

# 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

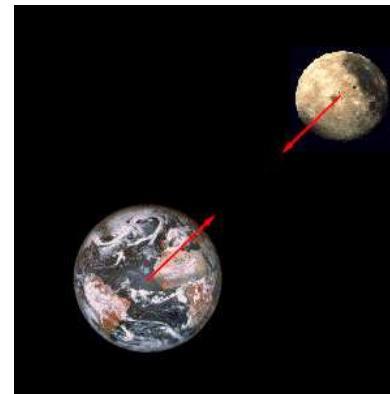
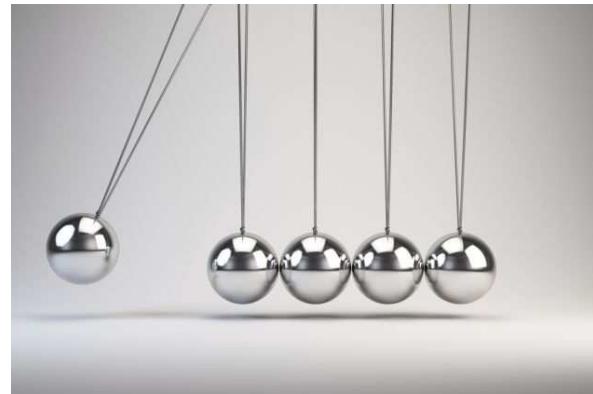
# Índice

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

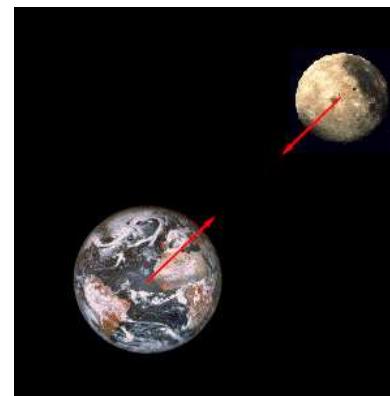
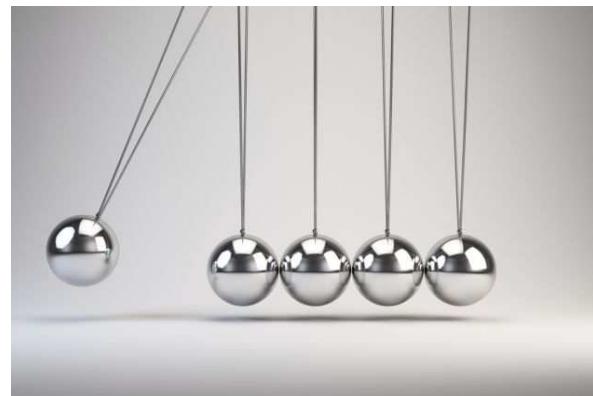


→ interacción a través de fuerzas

# 1. Por qué gravedad cuántica?

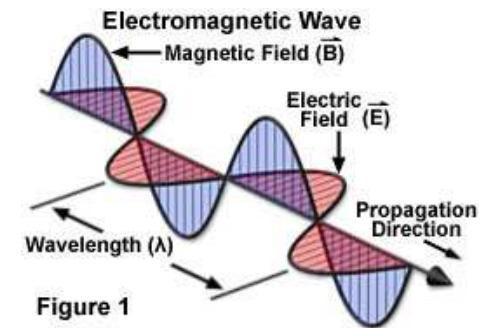
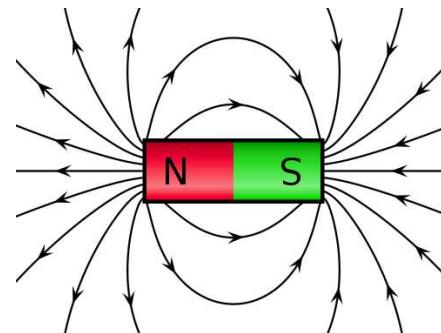
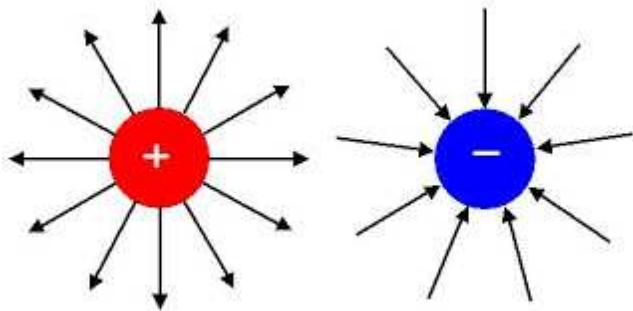
## Física clásica pre-1900

- Mecánica newtoniana: dinámica de partículas & interacción gravitatoria



→ interacción a través de fuerzas

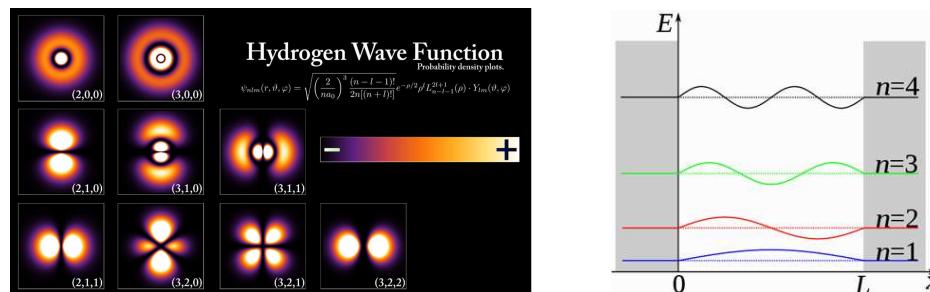
- Teoría de Maxwell: teoría de campos dinámicos



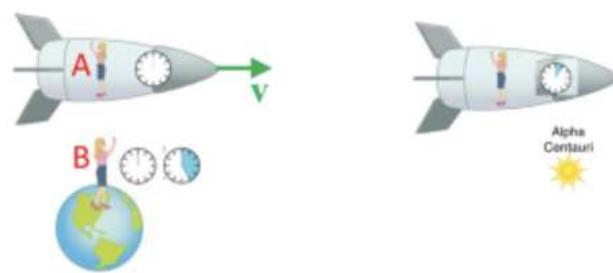
→ interacción a través de campos

## Revoluciones físicas de 1900 - 1930:

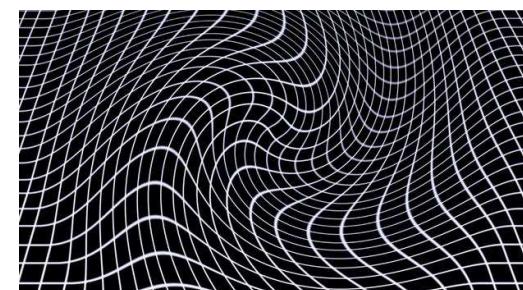
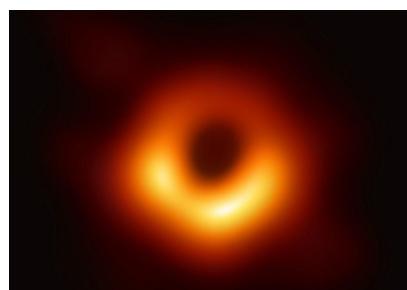
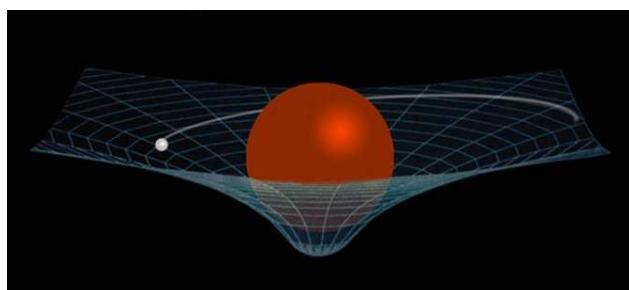
- Mecánica cuántica: descripción del mundo (sub)atómico



- 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

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

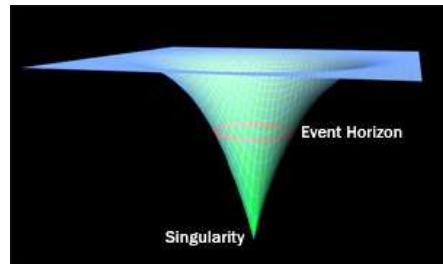
$$m_P = \sqrt{\frac{c \hbar}{G_N}} = 2,17651(13) \cdot 10^{-8} kg$$

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

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

## Unificando teorías

- Relatividad General = Relatividad Especial & gravedad



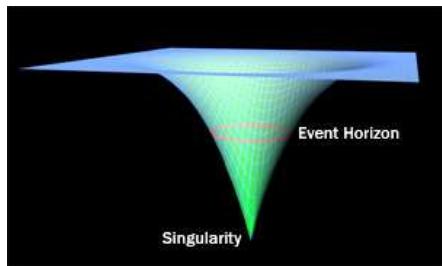
Teoría puramente clásica

Predice su propio rango de validez

→ teoría incompleta!

## Unificando teorías

- Relatividad General = Relatividad Especial & gravedad

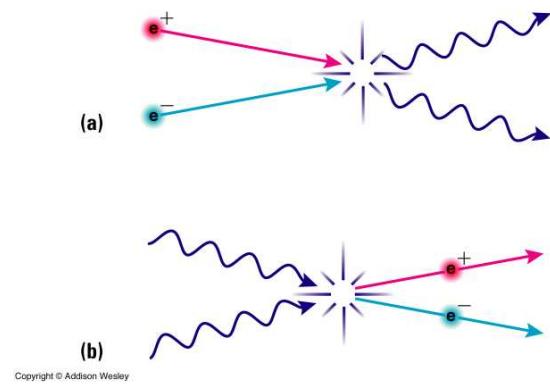


Teoría puramente clásica

Predice su propio rango de validez

→ teoría incompleta!

- Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial



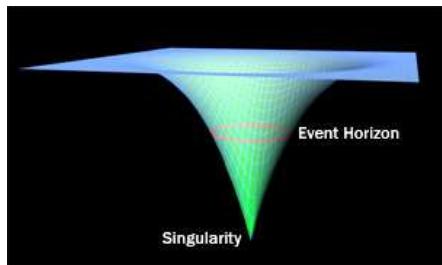
Creación y aniquilación de partículas

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

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

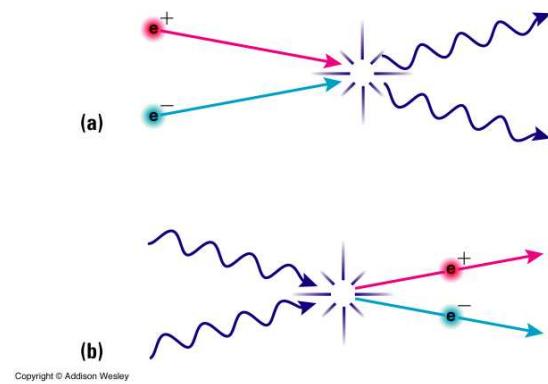
## Unificando teorías

- 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

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

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

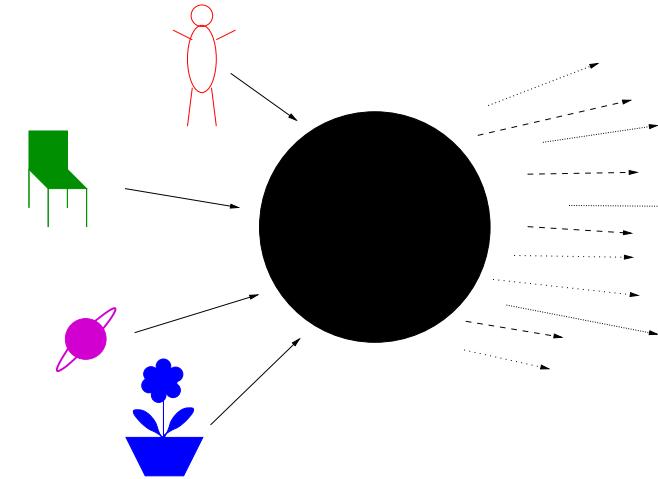
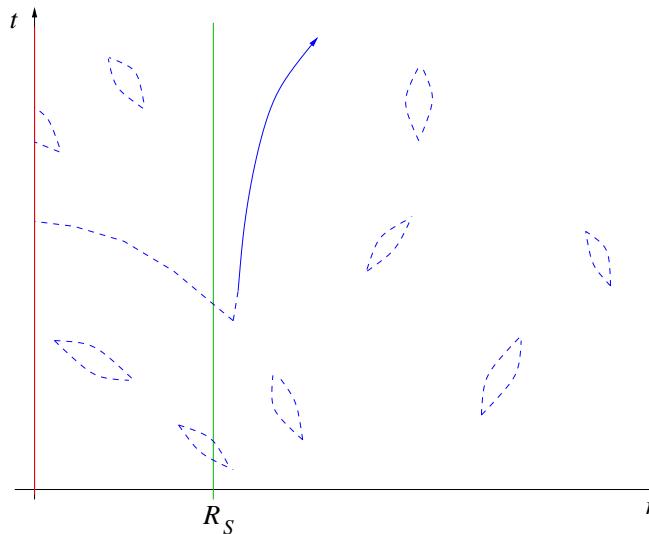
→ Partículas son excitaciones (cuántos) de campos:

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

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

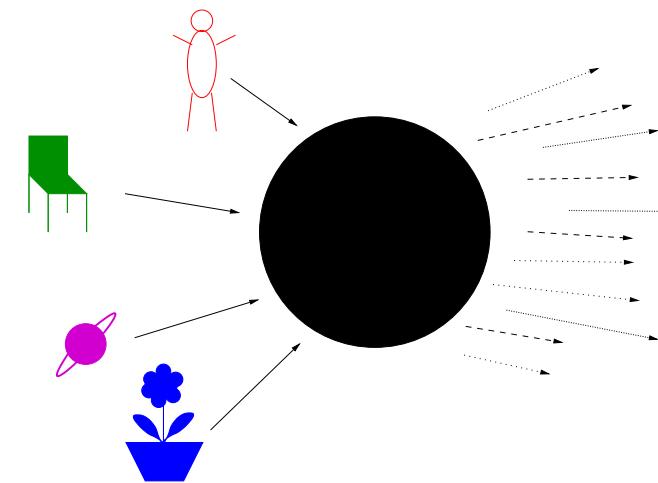
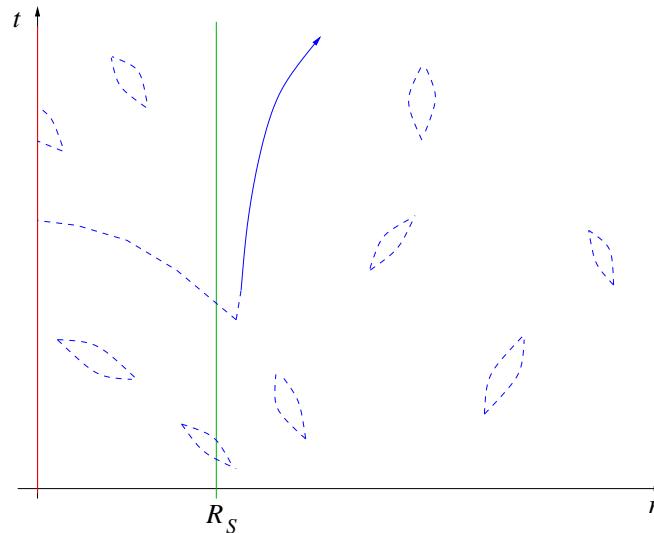
→ describe 3 de las 4 interacciones fundamentales

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



→ Gravedad clásica!

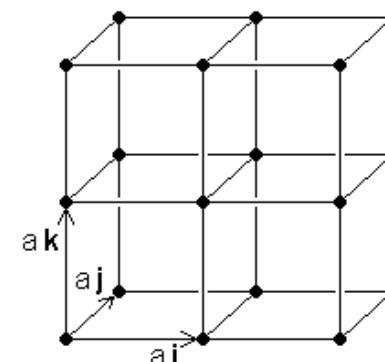
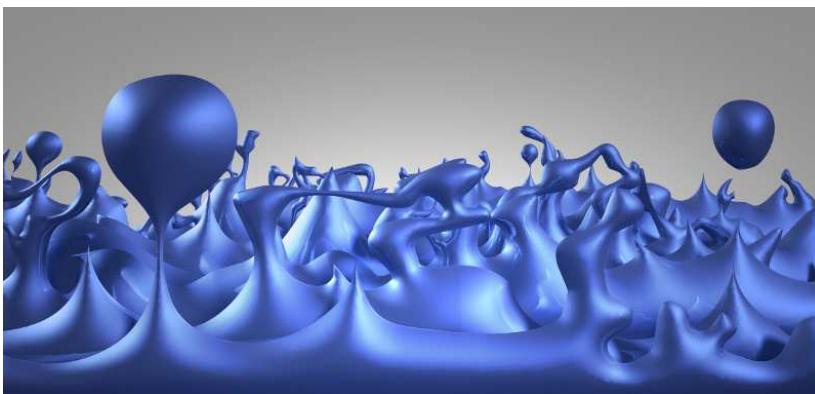
# Teoría cuántica de campos en espacios curvos = Relat General & TCC



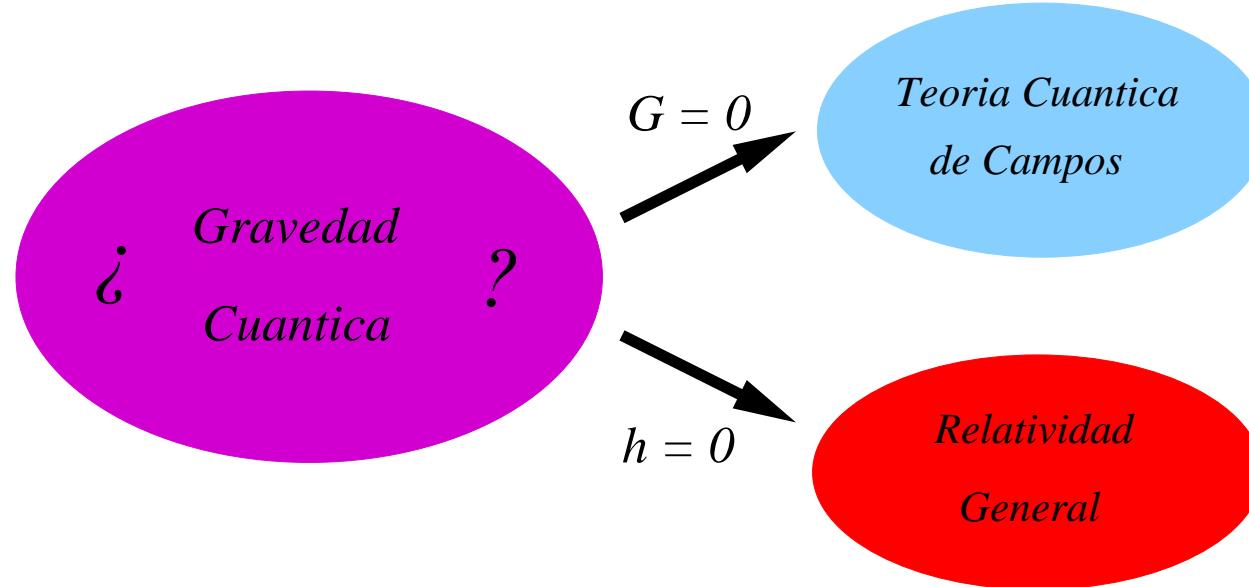
→ Gravedad clásica!

Gravedad cuántica = teoría cuántica del espaciotiempo mismo

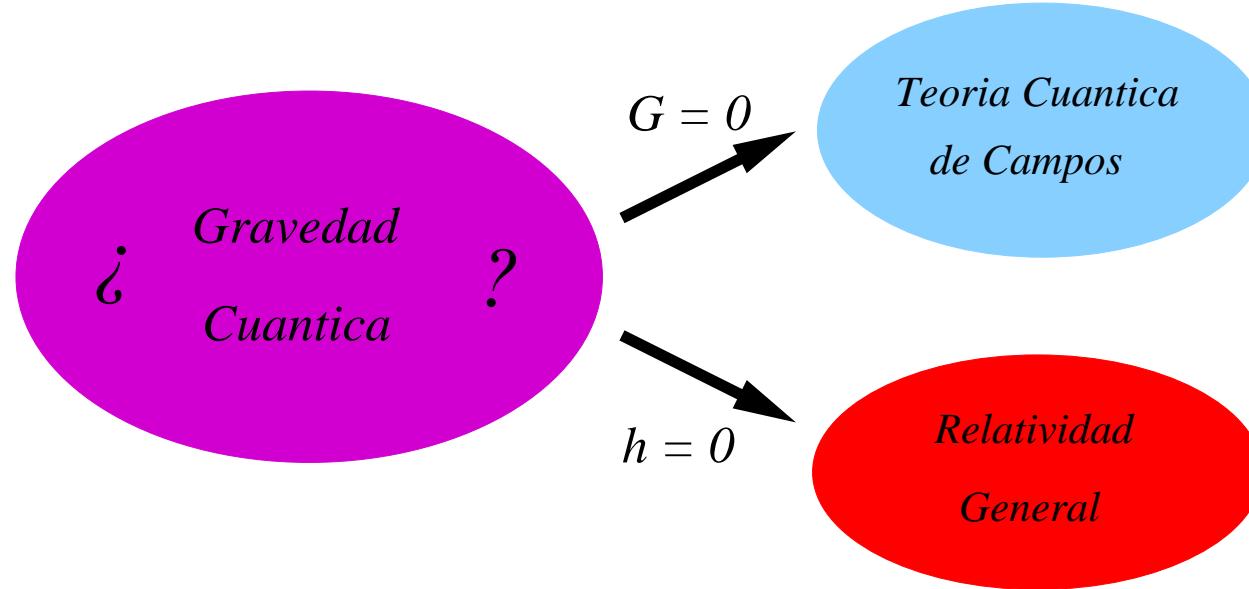
→ Concepto clásico de espaciotiempo deja de ser válido



Queremos teoría que recupere tanto Relatividad General, como TCC



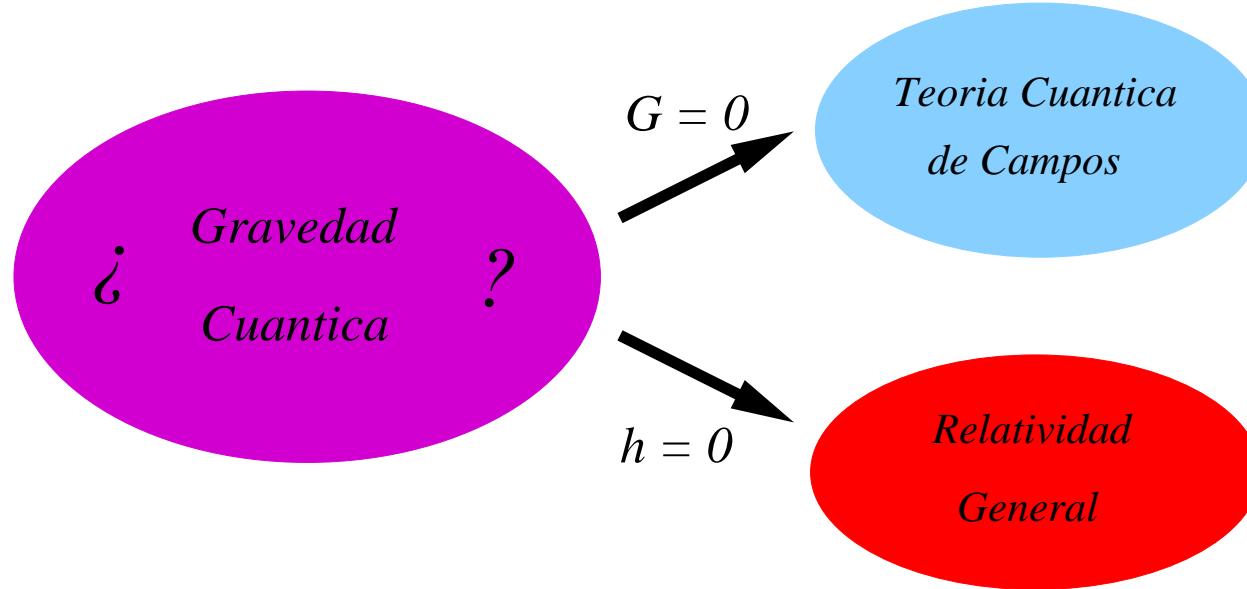
Queremos teoría que recupere tanto Relatividad General, como TCC



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  $R_s = \frac{2G_N m}{c^2}$

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

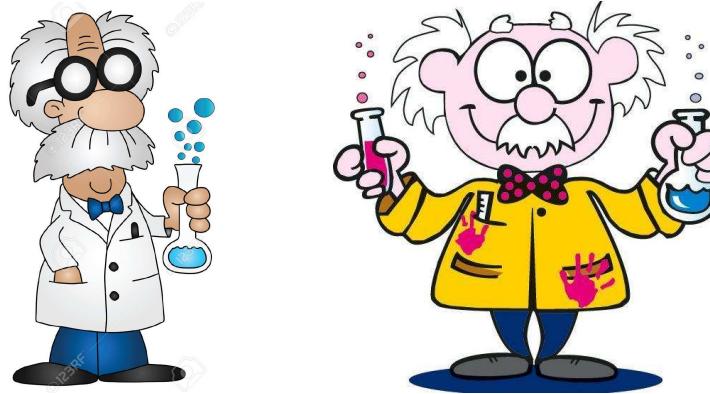
$$\iff L \sim \ell_P = \sqrt{\frac{G_N \hbar}{c^3}} \sim 10^{-35} \text{ m} \sim 10^{-19} R_{p+}$$

→ Completamente fuera del alcance experimental!

**Entonces, ¿por qué preocuparse?**

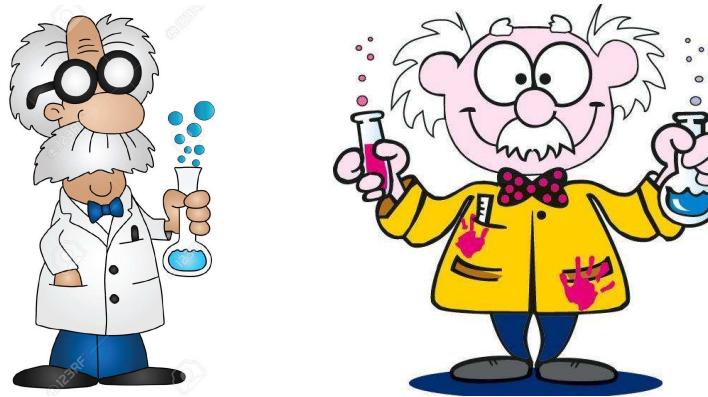
## Entonces, ¿por qué preocuparse?

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

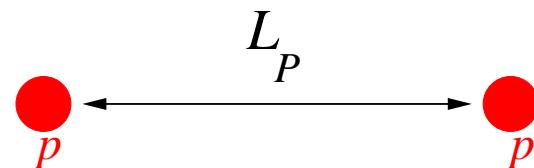


## Entonces, ¿por qué preocuparse?

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



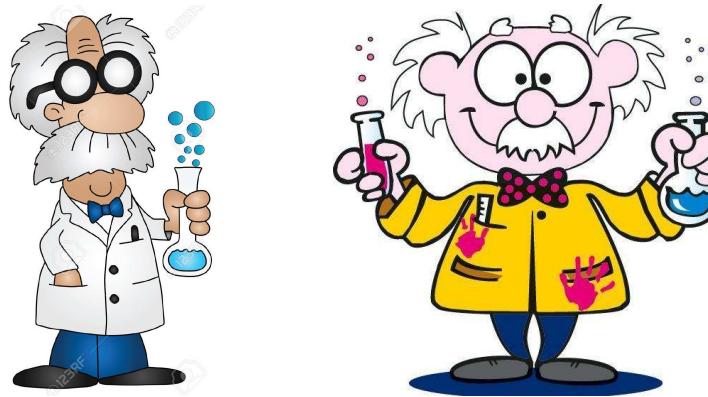
- Porque es una pregunta válida sin respuesta!



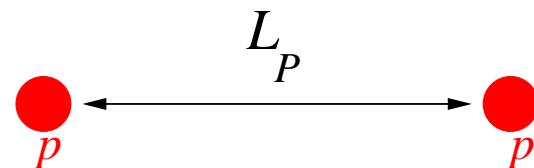
→ ¿Qué pasa si pongo dos protones a una distancia  $L = \ell_P$ ?

## 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.”*

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

## 2. La constante cosmológica

Introducida por Einstein en 1917 para conseguir un universo estático:

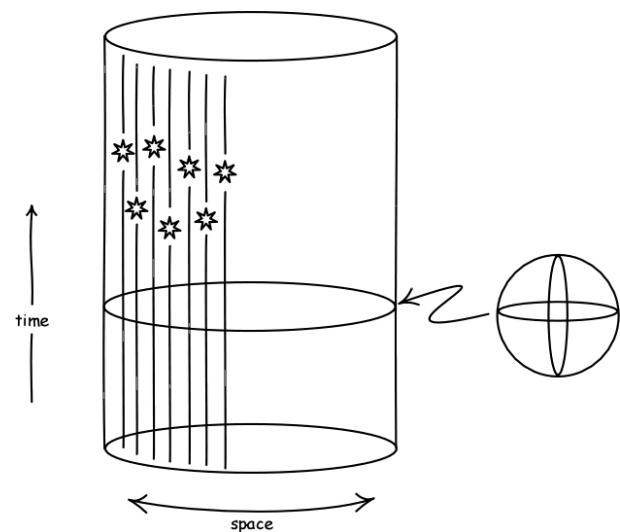
*“...que las ecuaciones de gravedad que he defendido hasta ahora necesitan una pequeña modificación.”*

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

acceleration      gravity      cosmological constant

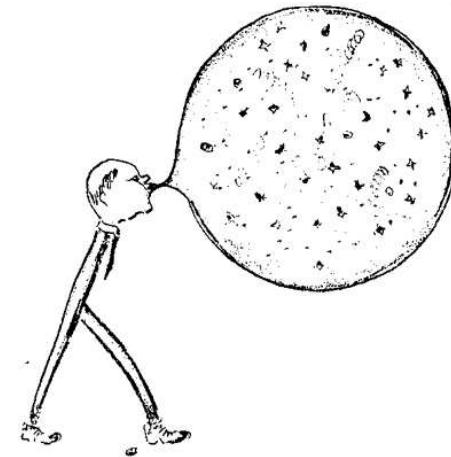
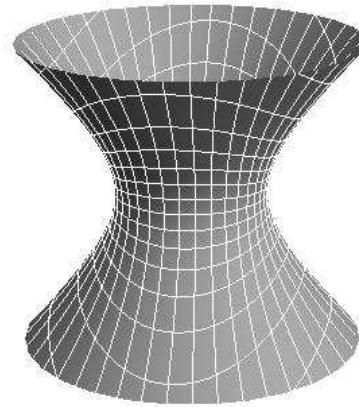
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

slows down expansion      speeds up expansion

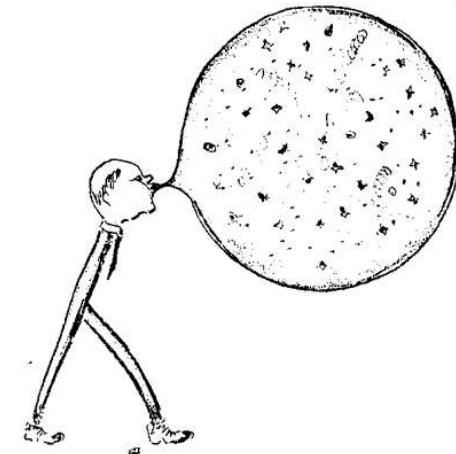
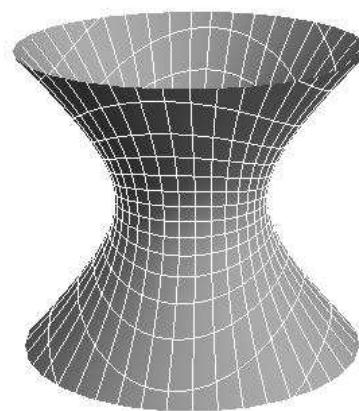


- Término introducido ad hoc
- Genera repulsión gravitatoria universal

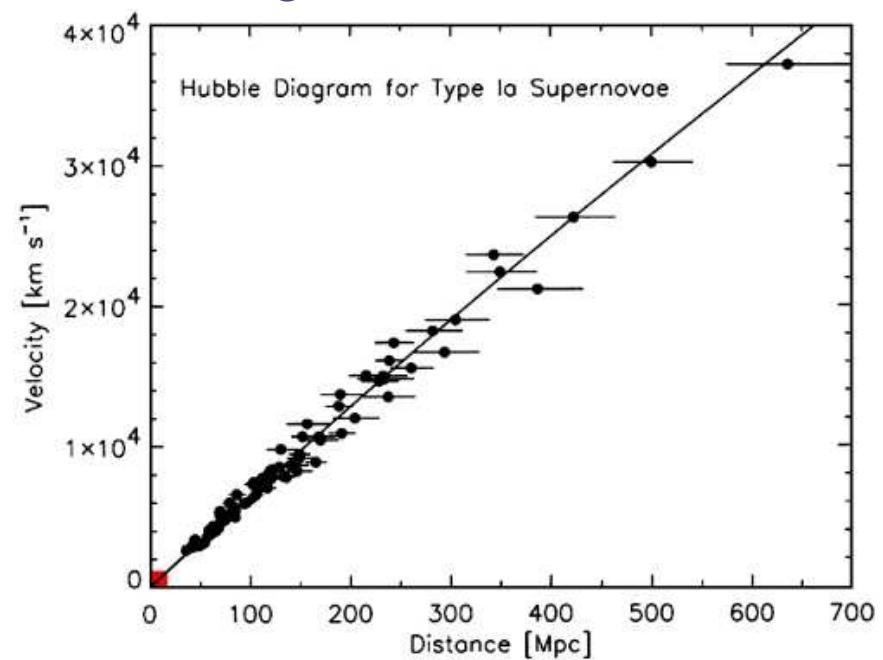
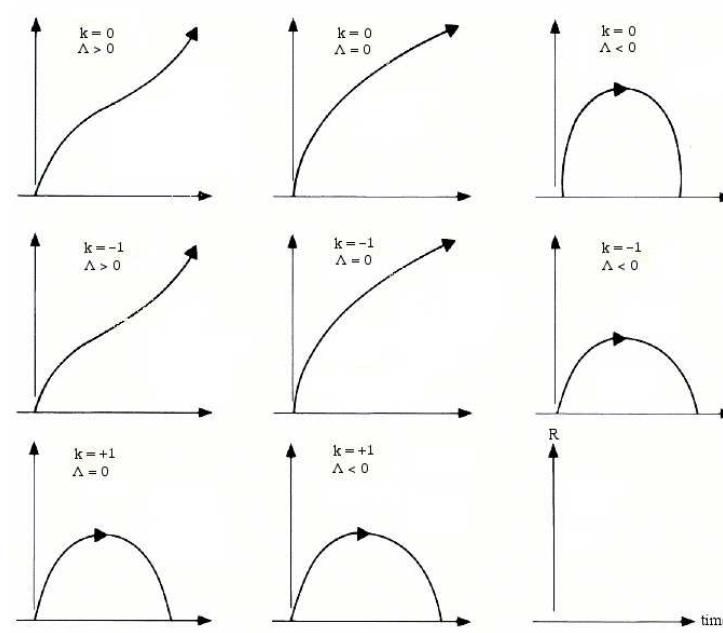
## De Sitter: universo vacío en expansión exponencial gracias a $\Lambda$



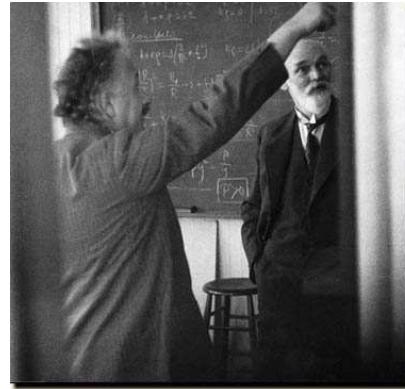
## De Sitter: universo vacío en expansión exponencial gracias a $\Lambda$



Friedmann & Lemaître: soluciones exactas de universos dinámicos  
Hubble: diagrama observacional de redshift de galaxias

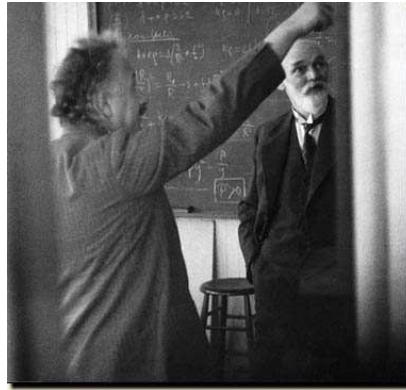


## De Sitter y Eddington convencen a Einstein de universos dinámicos



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

## De Sitter y Eddington convencen a Einstein de universos dinámicos

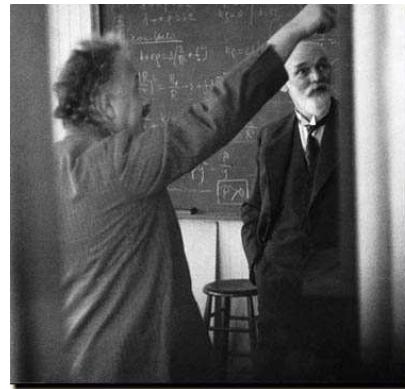


Einstein retira constante cosmológica como “el error más grande de su vida”

¿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

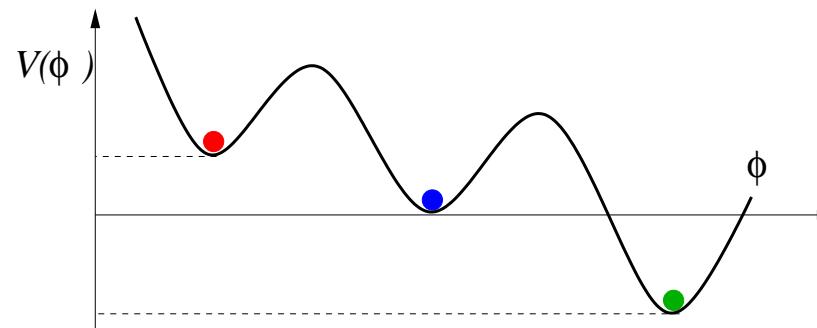


Einstein retira constante cosmológica como “el error más grande de su vida”

¿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  $\mathcal{T}_{\mu\nu}$



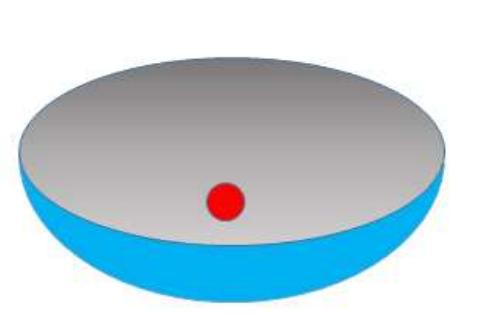
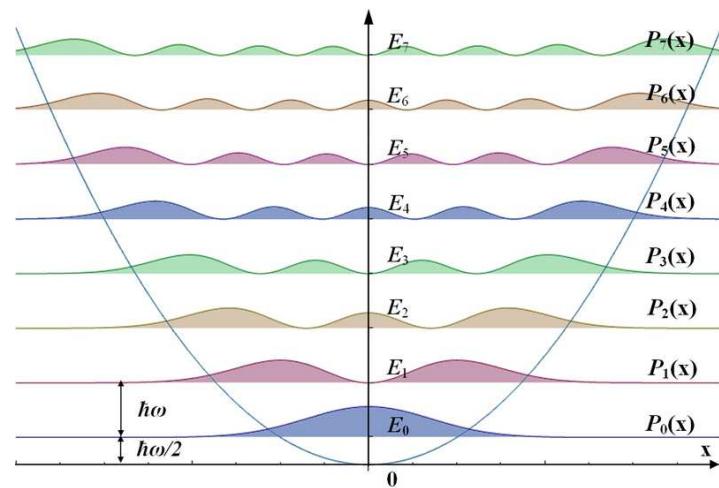
Energía potencial constante  $V_0 \neq 0$  induce una cte cosm efectiva  $\Lambda_{\text{eff}} = V_0$

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

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

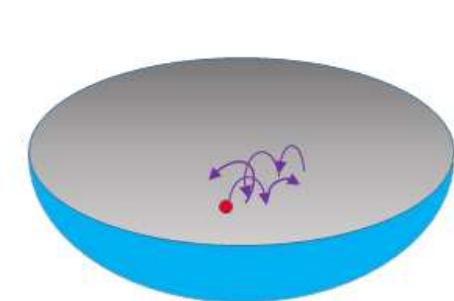
→ ¿Por qué la energía del vacío es exactamente cero?

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



Naïve Expectation  
(ordinary experience)

M. Strassler 2013



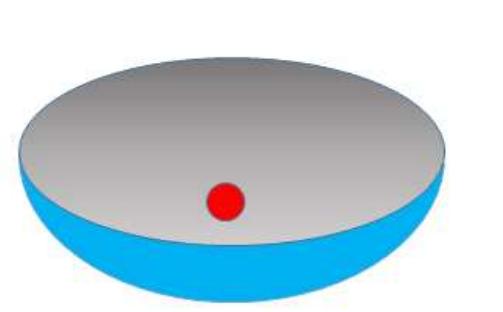
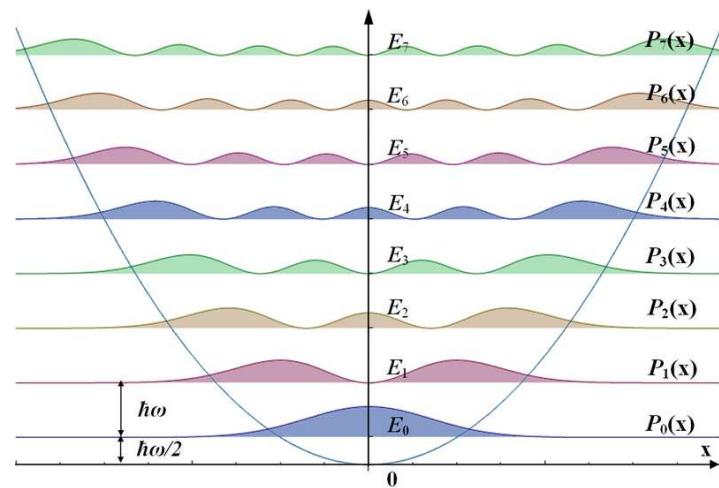
Quantum Fluctuation  
(imperfect representation)

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

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

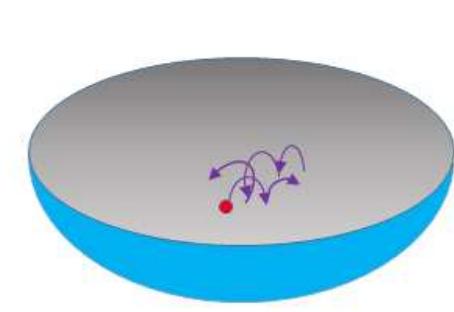
→ ¿Por qué la energía del vacío es exactamente cero?

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



Naïve Expectation  
(ordinary experience)

M. Strassler 2013

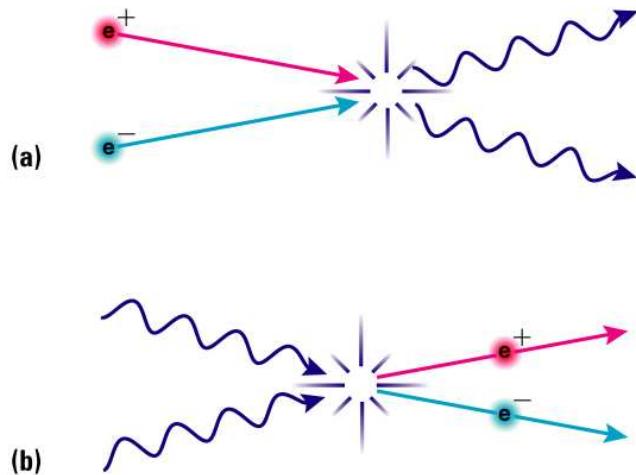


Quantum Fluctuation  
(imperfect representation)

- 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:  $E = mc^2$



Copyright © Addison Wesley

Aniquilación de electrón y positrón:

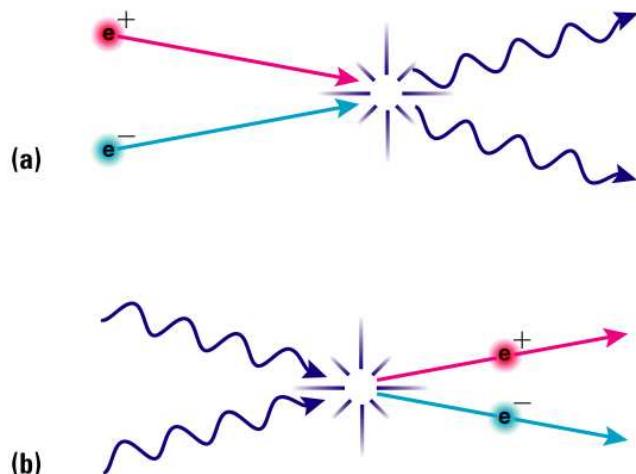
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \text{con } E_\gamma \geq m_e$$

Creación de electrón y positrón:

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

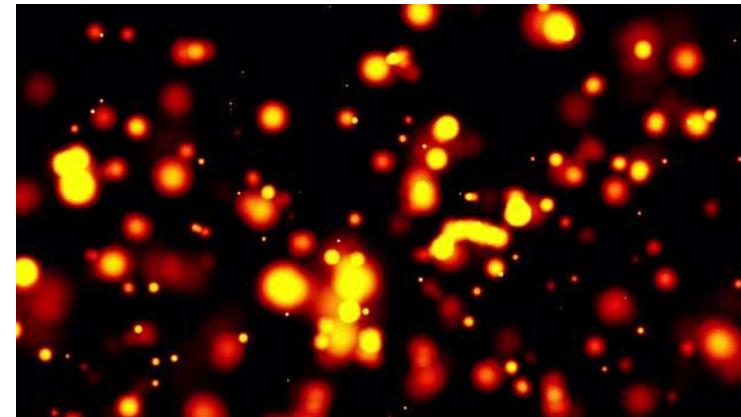
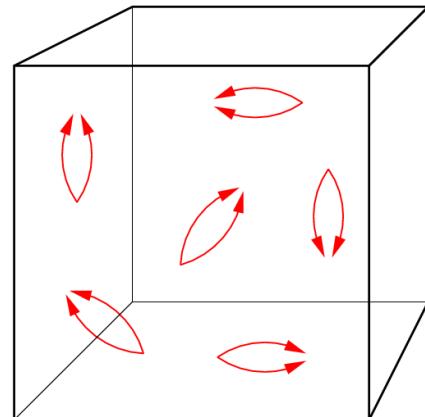
# Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

Einstein:  $E = mc^2$



Copyright © Addison Wesley

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



Aniquilación de electrón y positrón:

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

Creación de electrón y positrón:

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

→ Vacío cuántico es sopa de partículas virtuales: Efecto Casimir

1967: Zel'dovich: contribución de fluctuaciones cuánticas a  $\Lambda$



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

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  $\Lambda$



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

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  $\Lambda$



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

Cut-off a la escala de Planck:

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

No concuerda con observaciones cosmológicas:

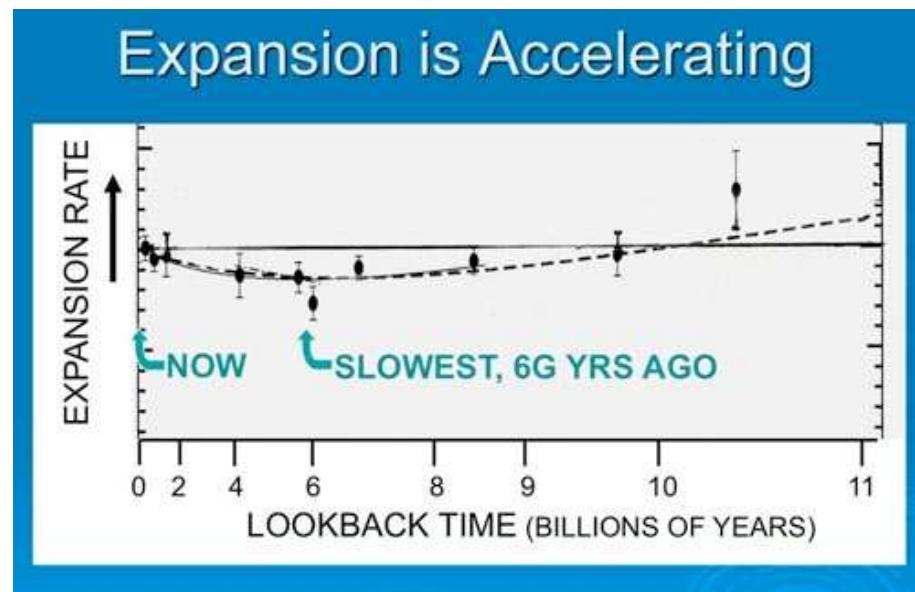
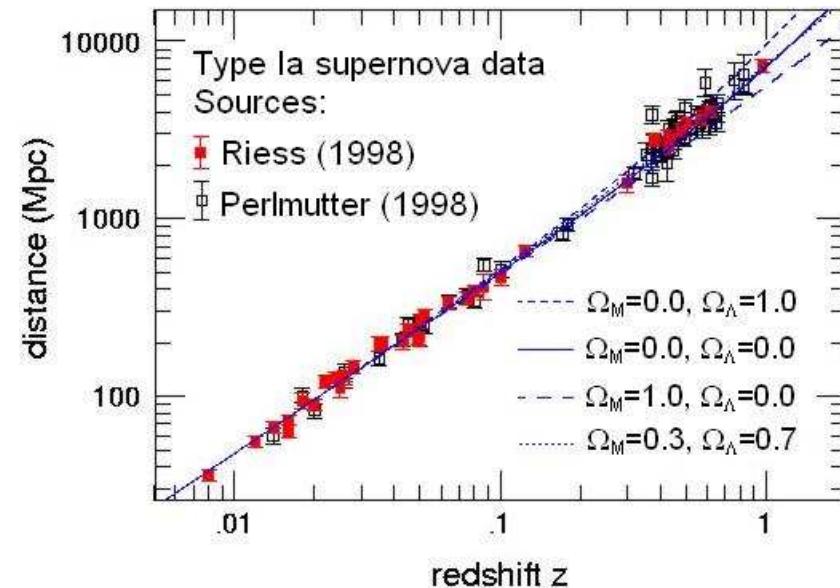
$$|\rho_{\text{obs}}| \lesssim 1 \text{ GeV}/m^3$$

→ Peor predicción teórica de la historia!!!

Problema (viejo) de la constante cosmológica:

¿Por qué 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:

$$P = w \rho \implies \begin{cases} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{cases}$$

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

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado  $w$  caracteriza el tipo de materia:

$$P = w \rho \implies \begin{cases} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{cases}$$

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

Cálculo teórico versus observaciones cosmológicas:

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

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

Expansión acelerada del universo: fluido con presión negativa

Parámetro de estado  $w$  caracteriza el tipo de materia:

$$P = w \rho \implies \begin{cases} w = 0 & \text{materia fría} \\ w = 1/3 & \text{radiación} \\ w = -1 & \text{constante cosmológica} \\ w = -1,13^{+0,23}_{-0,25} & \text{energía oscura observada} \end{cases}$$

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

Cálculo teórico versus observaciones cosmológicas:

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

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

→ Peor predicción teórica de la historia!

## Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

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

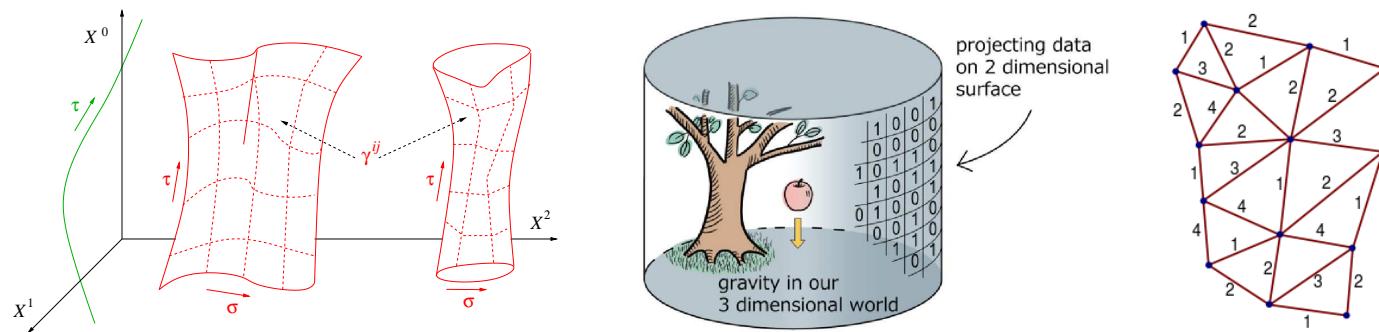
- Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja?
- Si no, ¿cuál es la causa de la aceleración?

## Problema (nuevo) de la constante cosmológica:

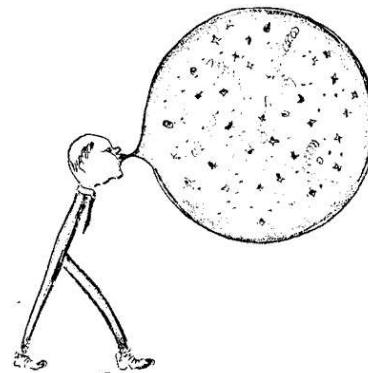
¿Son las fluctuaciones cuánticas la causa de la aceleración del universo?

- 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 cuánticos** de gravedad

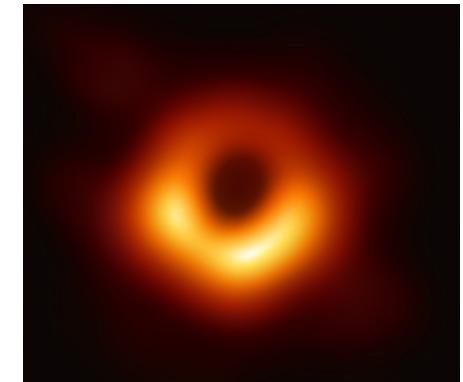
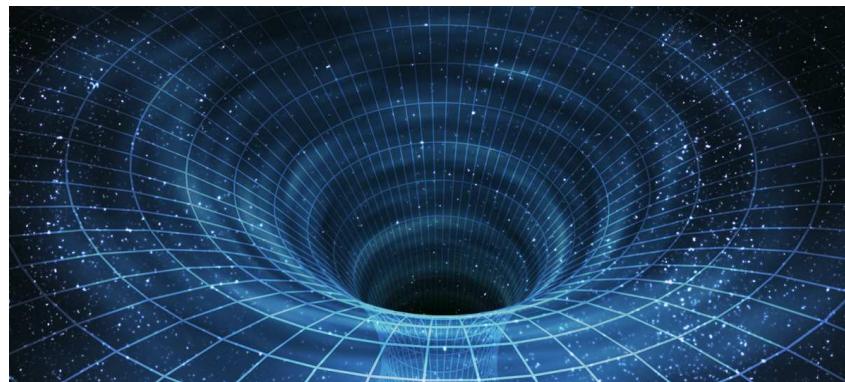
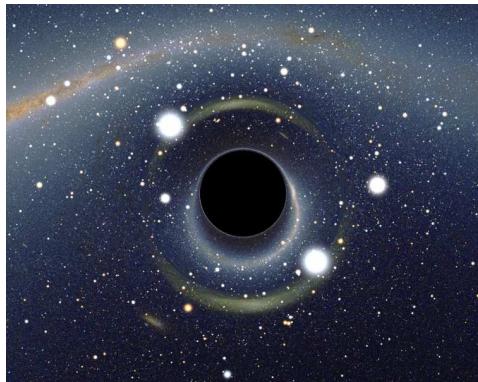


¿Resolverá la gravedad cuántica el problema de la constante cosmológica?



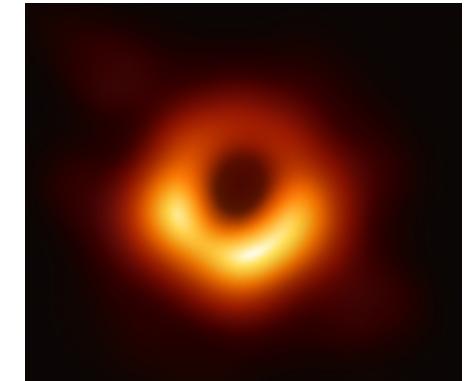
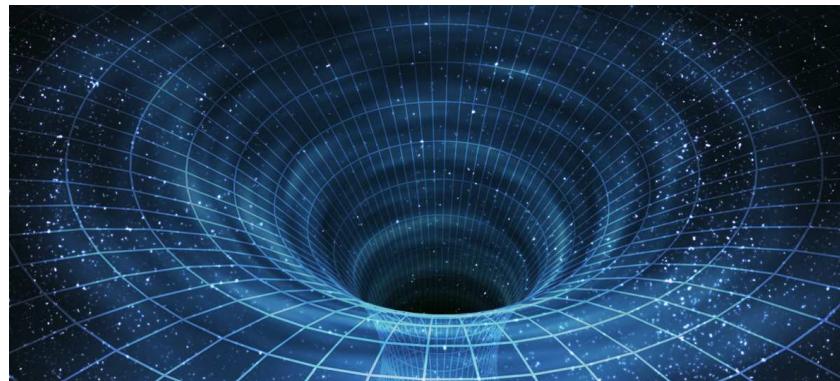
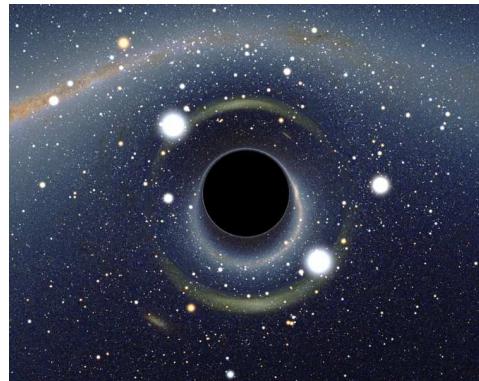
### 3. Evaporación de agujeros negros

Agujeros negros son objetos emblemáticos de Relatividad General

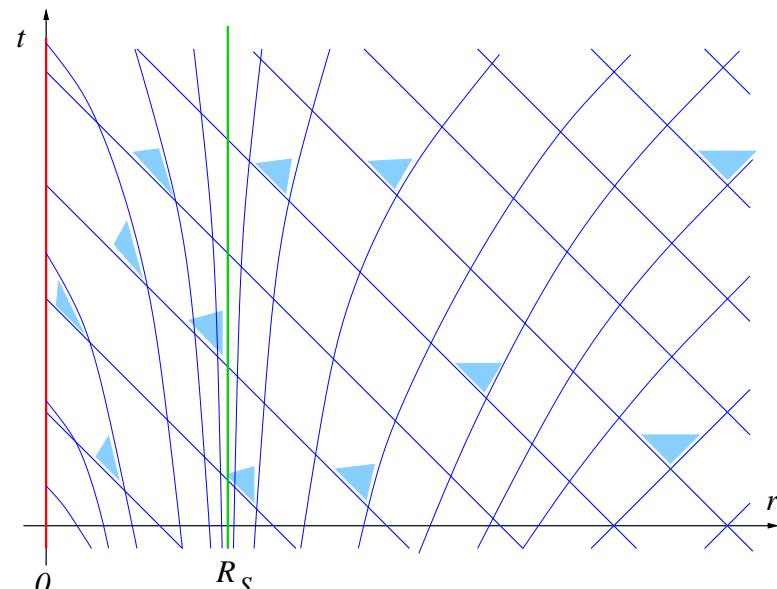


### 3. Evaporación de agujeros negros

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  $\kappa_H$  es constante en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie  $\kappa_H$  = 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  $\kappa_H$  es constante en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie  $\kappa_H$  = 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  $\kappa_H$  es constante en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie  $\kappa_H$  = 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  $\kappa_H$  es constante en todo el horizonte.

NB: Gravedad de superficie  $\kappa_H$  = 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  $\kappa_H$  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  $N$  varian 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  $N$  varian 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

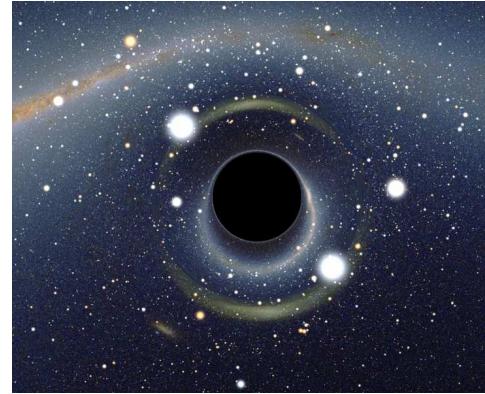
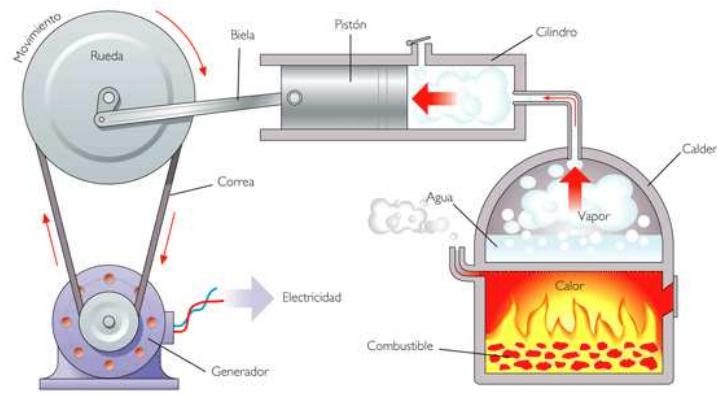
$$M \sim E \quad \text{masa y energía relativista}$$

$$A \sim S \quad \Leftrightarrow \text{teorema de no-pelo: } S = 0$$

$$\kappa_H \sim T \quad \Leftrightarrow \text{agujero negro no emite nada: } T = 0$$

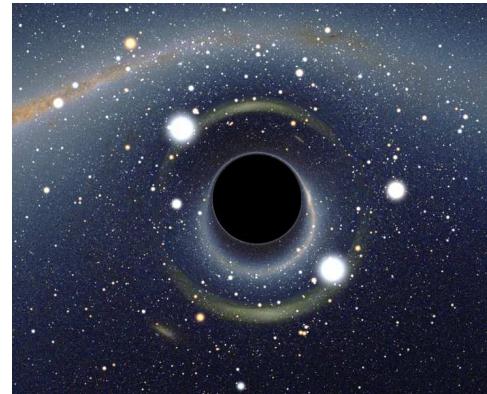
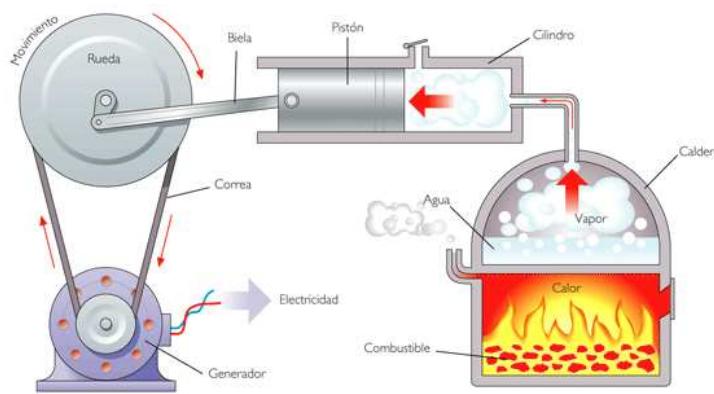
## → ¿Cuál es la relación con agujeros negros?

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

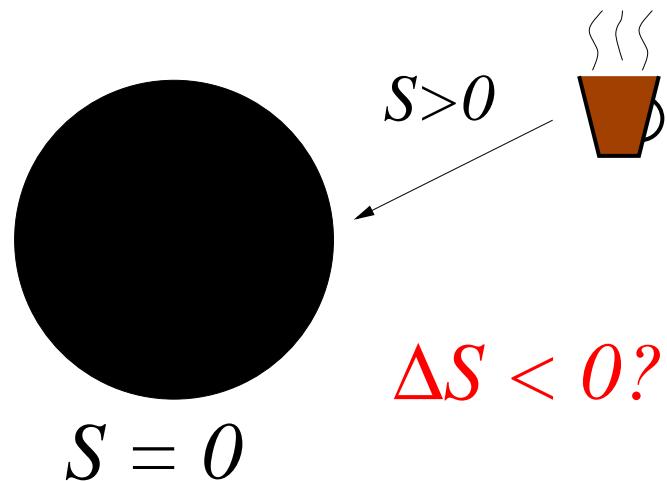


→ ¿Cuál es la relación con agujeros negros?

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



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

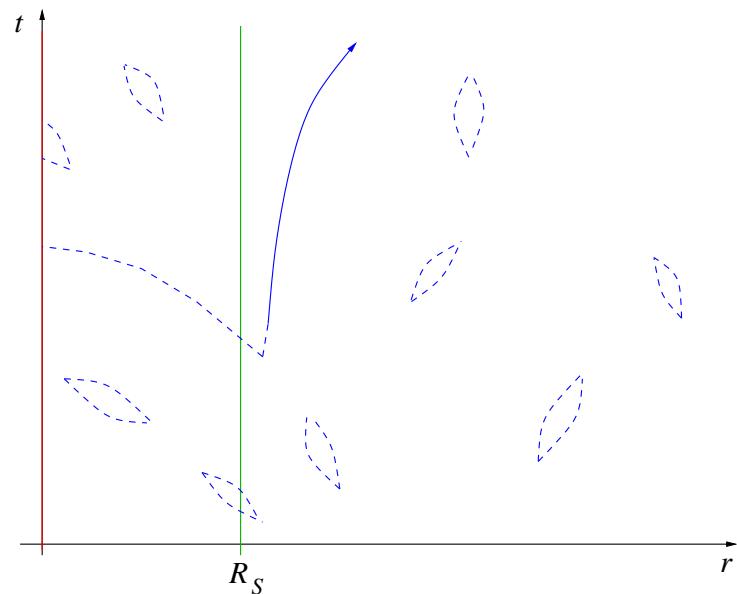


Agujeros negros tienen **entropía no-trivial**, para no violar la Segunda Ley de la termodinámica...

→ 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

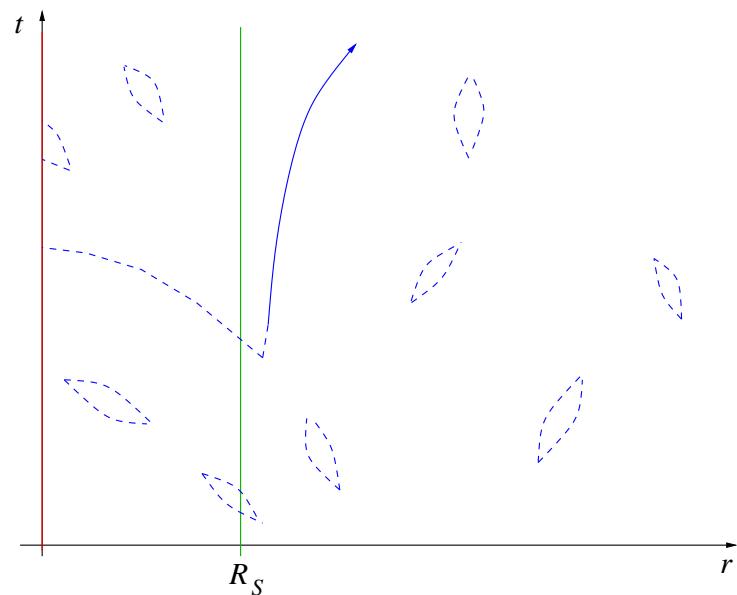
$$T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B} = \frac{\hbar}{8\pi k_B G_N m}$$

⇒ 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

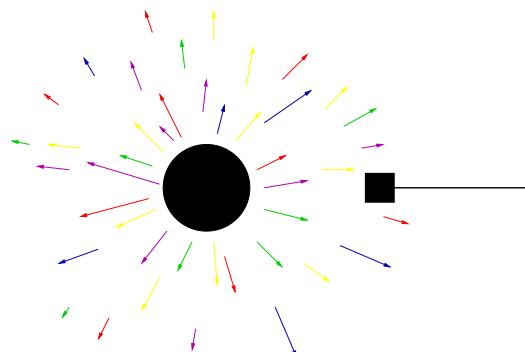
$$T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B} = \frac{\hbar}{8\pi k_B G_N m}$$

⇒ 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  $m = m_\odot$ :

$$T \sim 10^{-8} K, \quad t_{ev} \sim 10^{67} \text{ años}$$

$$\text{NB: } T_* \sim 2,7 K, \quad t_* \sim 1,3 \cdot 10^{10} \text{ años}$$

Un agujero negro es un sistema termodinámico

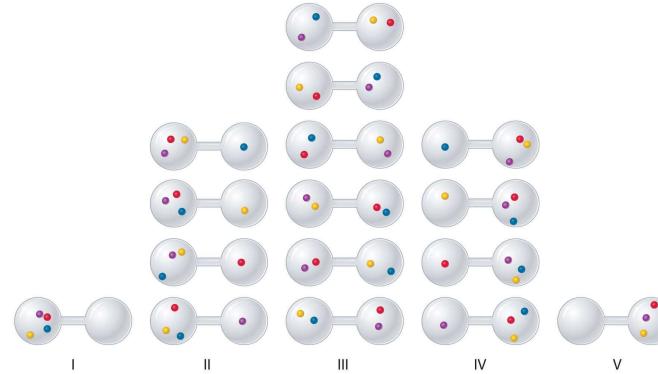
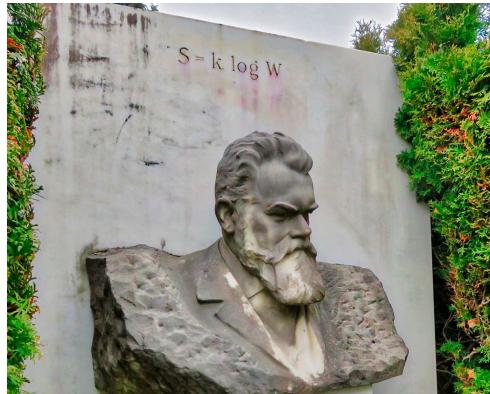
→ Dos problemas gordos aún sin resolver:

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

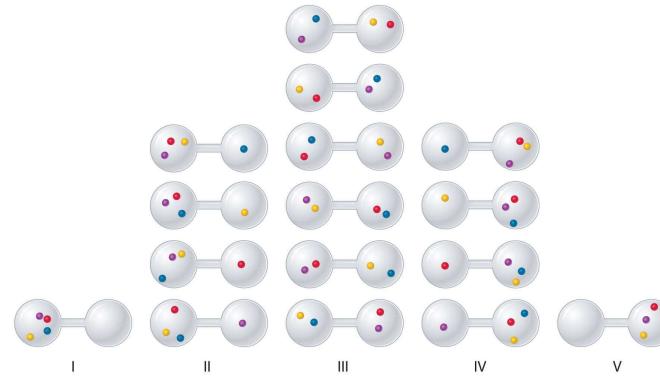
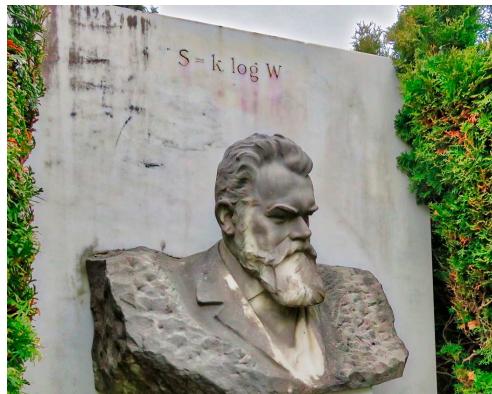


Un agujero negro es un sistema termodinámico

→ Dos problemas gordos aún sin resolver:

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

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



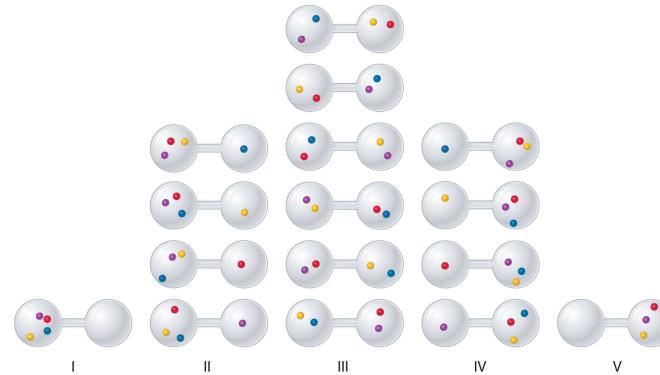
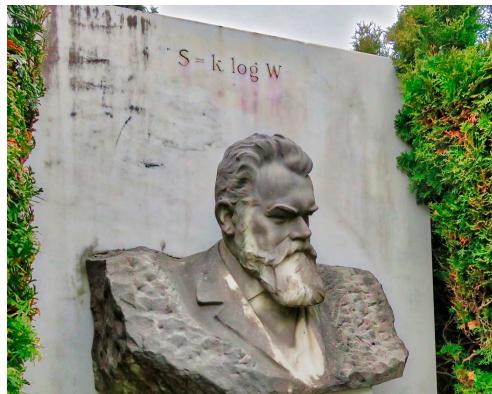
Para  $m = m_\odot \implies S \sim 10^{77} k_B \implies N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$

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



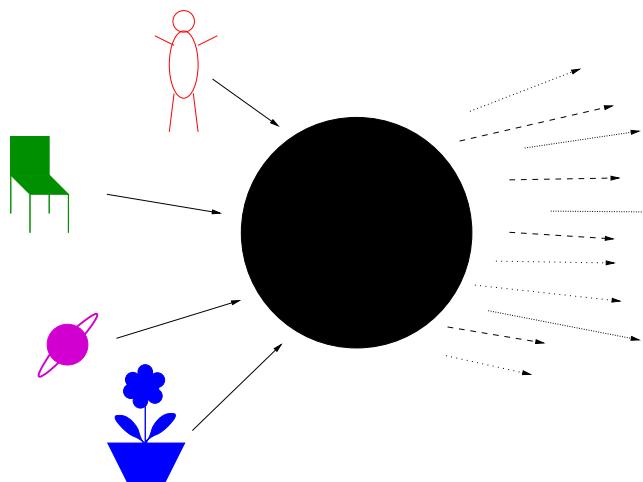
Para  $m = m_\odot \implies S \sim 10^{77} k_B \implies N \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}}$

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!

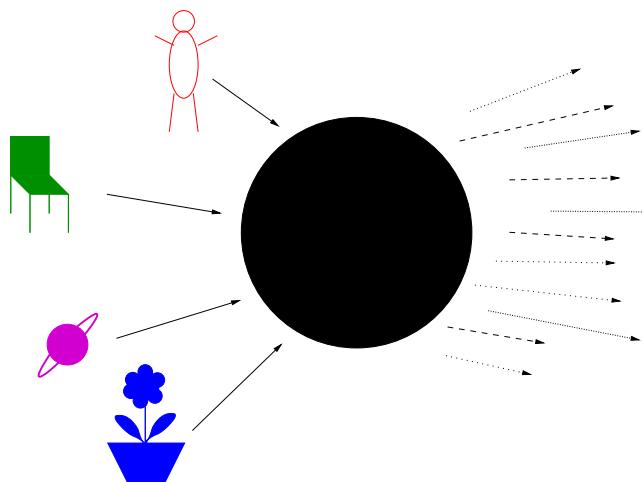
¿Cuáles son los microestados?

- Paradoja de la información: ¿Es evolución unitaria?



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

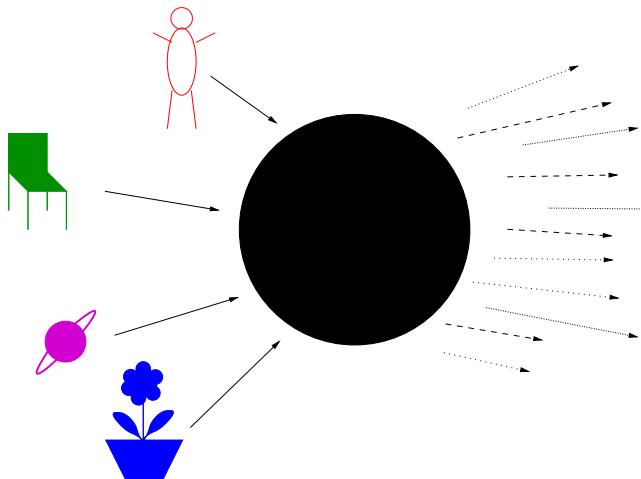
- Paradoja de la información: ¿Es evolución unitaria?



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

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

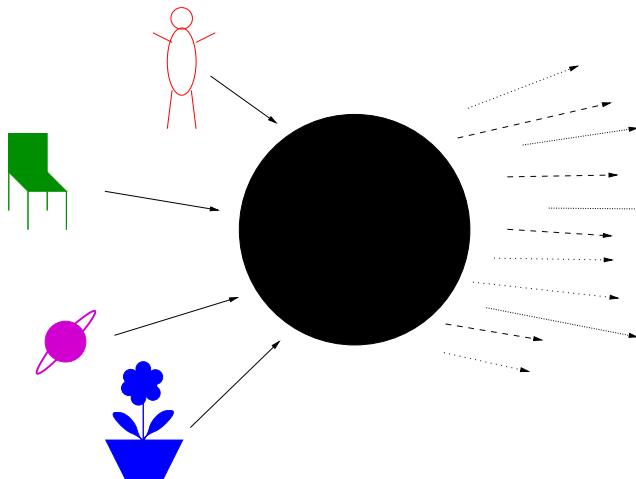
- Paradoja de la información: ¿Es evolución unitaria?



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

- Clásicamente: dentro del agujero negro, inaccesible...
- Cuánticamente: evaporación de agujeros negros → dispersión  
In-state = (suma de) estados puros;      Out-state = estado térmico  
→ **Viola unitaridad de la Mecánica Cuántica!**

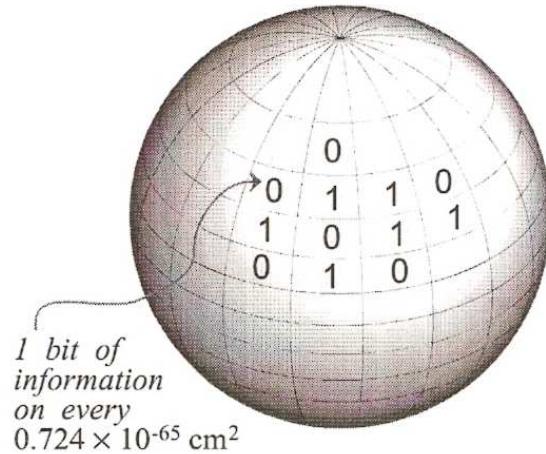
- Paradoja de la información: ¿Es evolución unitaria?



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

- Clásicamente: dentro del agujero negro, inaccesible...
- Cuánticamente: evaporación de agujeros negros → dispersión  
 $\text{In-state} = \text{(suma de) estados puros;}$        $\text{Out-state} = \text{estado térmico}$   
 $\longrightarrow$  **Viola unitaridad de la Mecánica Cuántica!**
- ¿Cuál es producto final de evaporación?  
 $\longrightarrow$  ¿Singularidad desnuda? ¿Tiene singularidad?  
 $\longrightarrow$  ¿Remnante? ¿Violaría la cota de entropía?

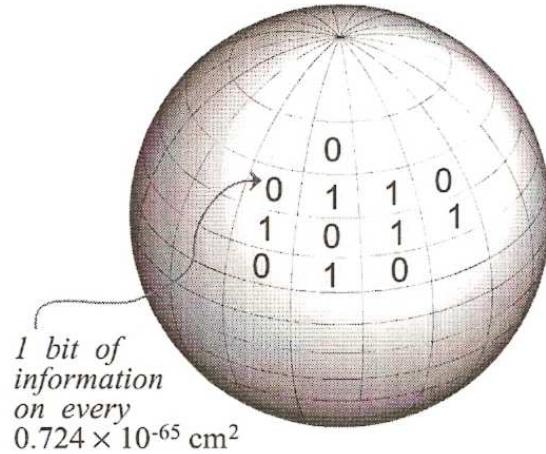
Entropía del agujero negro crece con área del horizonte, no como volumen



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

→ Información del interior almacenada en superficie del agujero negro

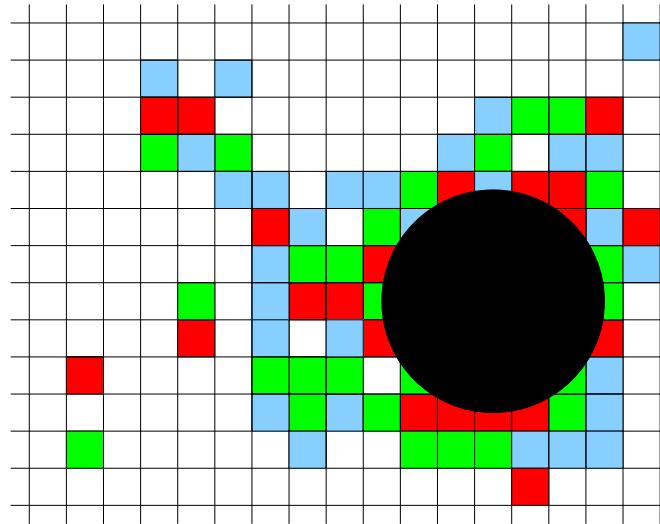
Entropía del agujero negro crece con área del horizonte, no como volumen



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

→ Información del interior almacenada en superficie del agujero negro

Grados de libertad gravitacionales locales no son independientes



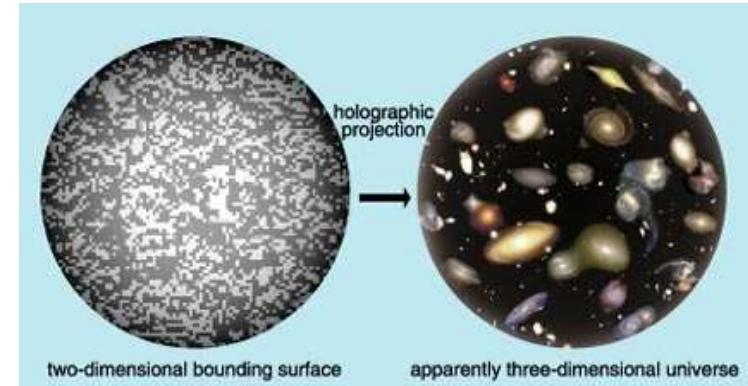
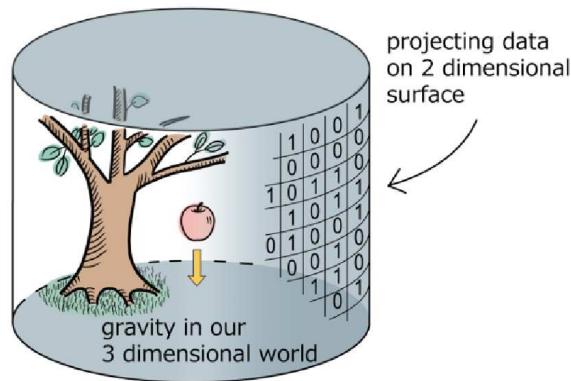
→ número de grados de libertad no crece con  $V$ , sino con  $A$

## 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, ...

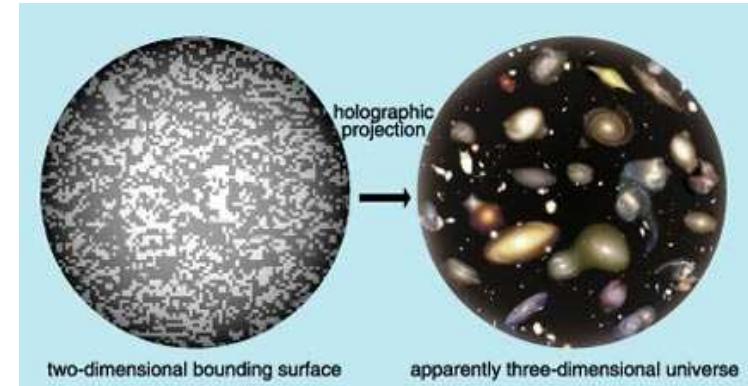
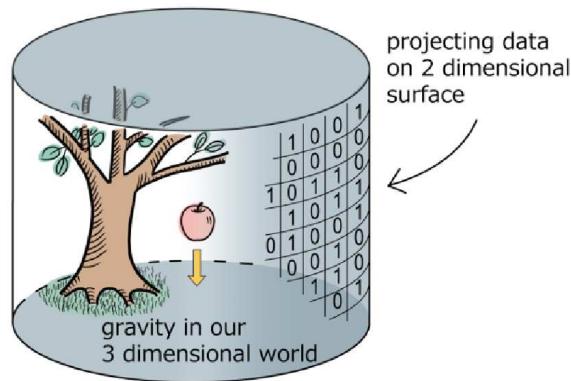


## Principio Holográfico:

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?

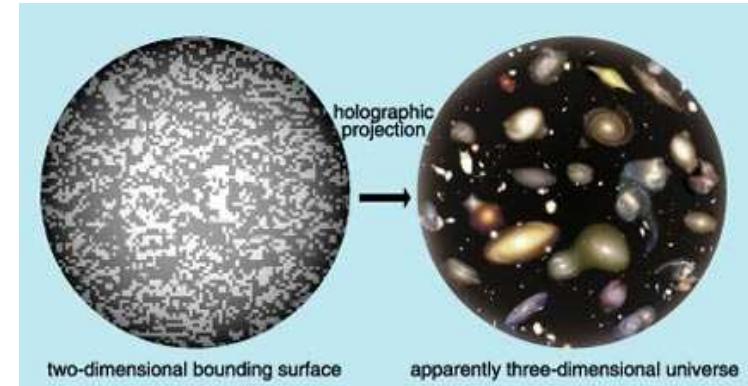
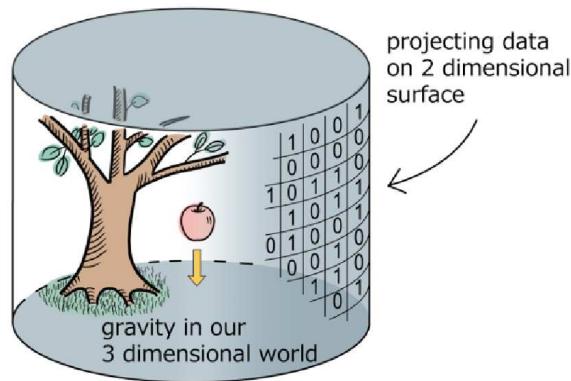
→ Es espaciotiempo 4-dim un fenómeno emergente?

## Principio Holográfico:

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

→ No solo horizonte de eventos

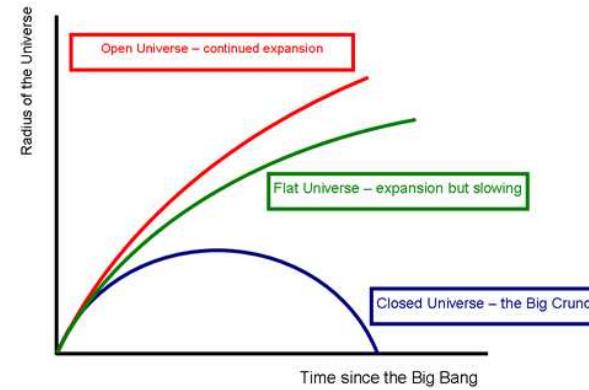
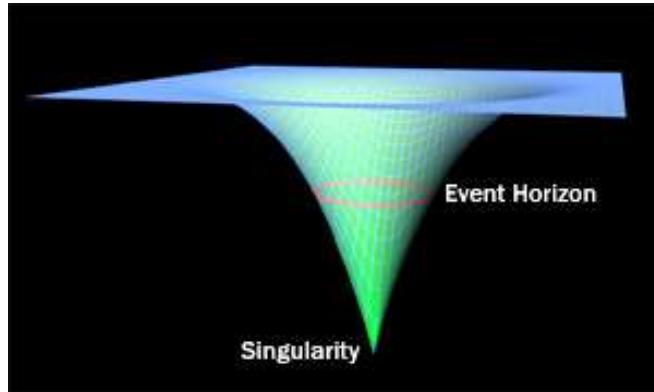
También pasa con horizontes cosmológicos, Rindler, ...



- 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

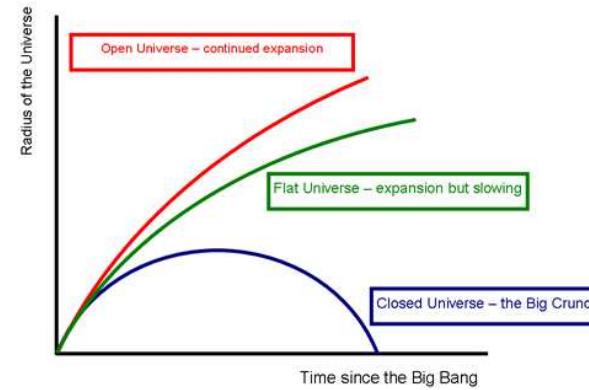
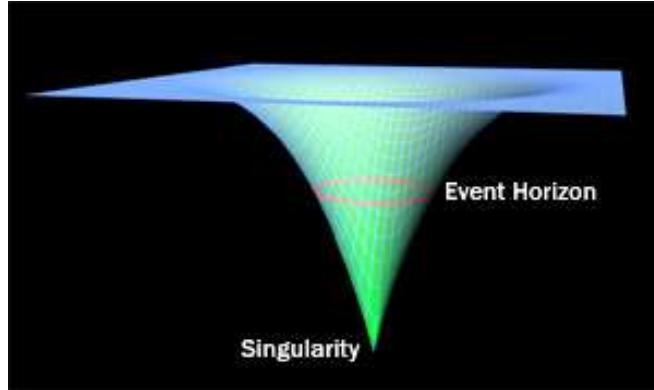
- Relatividad General está plagada de singularidades de curvatura



→ Nueva física (cuántica) debería resolver singularidades

## 4. Más indicaciones

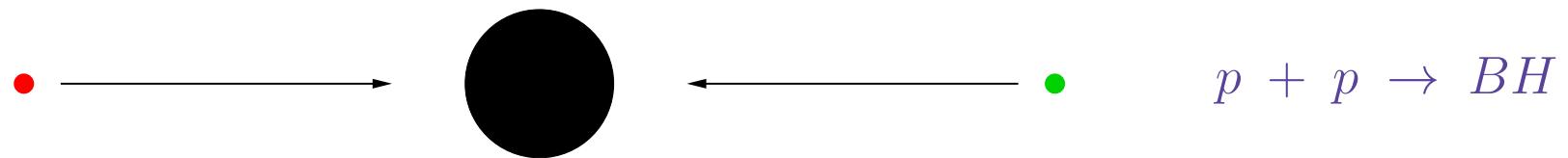
- Relatividad General está plagada de singularidades de curvatura



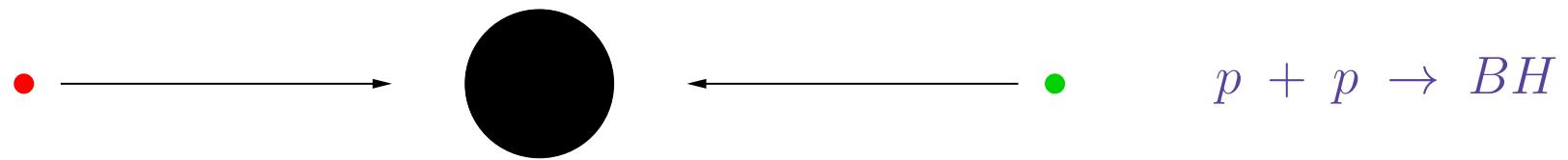
→ Nueva física (cuántica) debería resolver singularidades

- 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



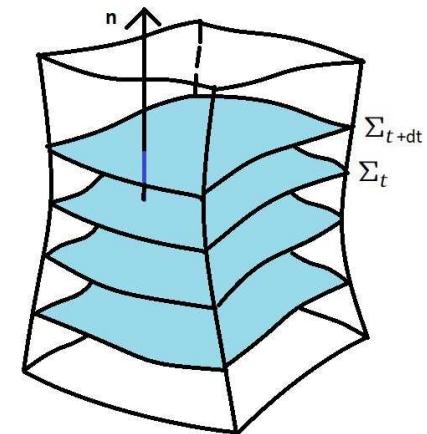
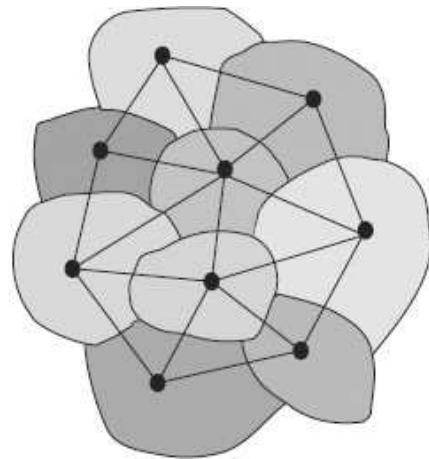
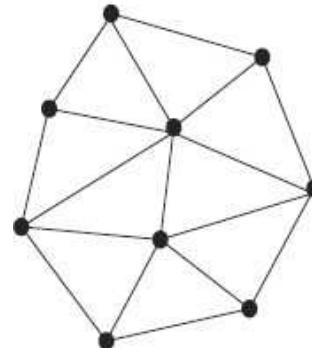
Teoría no comprobada!

# 5. Gravedad cuántica de lazos



Teoría no comprobada!

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



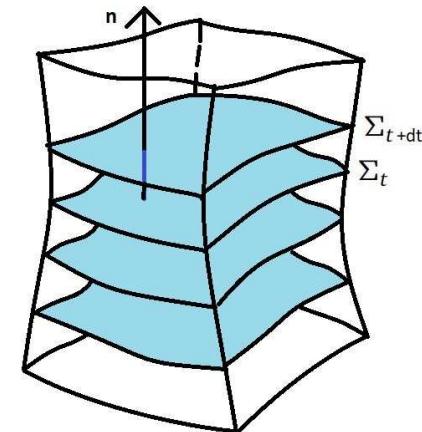
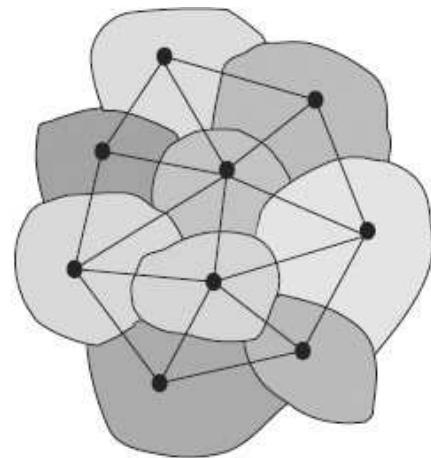
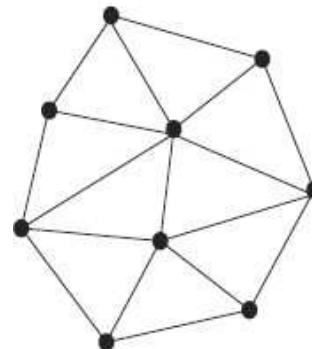
→ cuantización de Dirac sobre Relatividad General en formalismo ADM

# 5. Gravedad cuántica de lazos



## Teoría no comprobada!

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

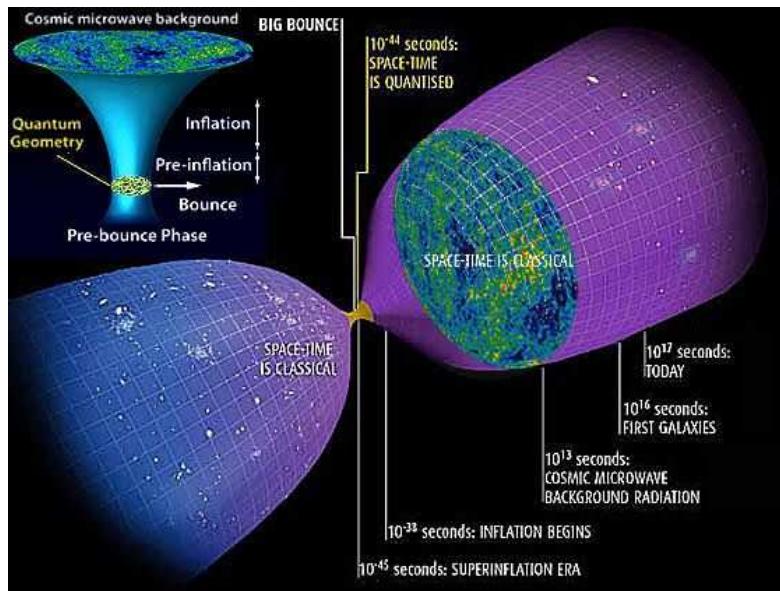


- cuantización de Dirac sobre Relatividad General en formalismo ADM
- ecuaciones dinámicas & ligaduras: resolver con **variables de Ashtekar**
- ligadura escalar sin resolver: **teoría aún incompleta**

# Loop Quantum Cosmology

Aplicación de LQG a casos con mucha simetría

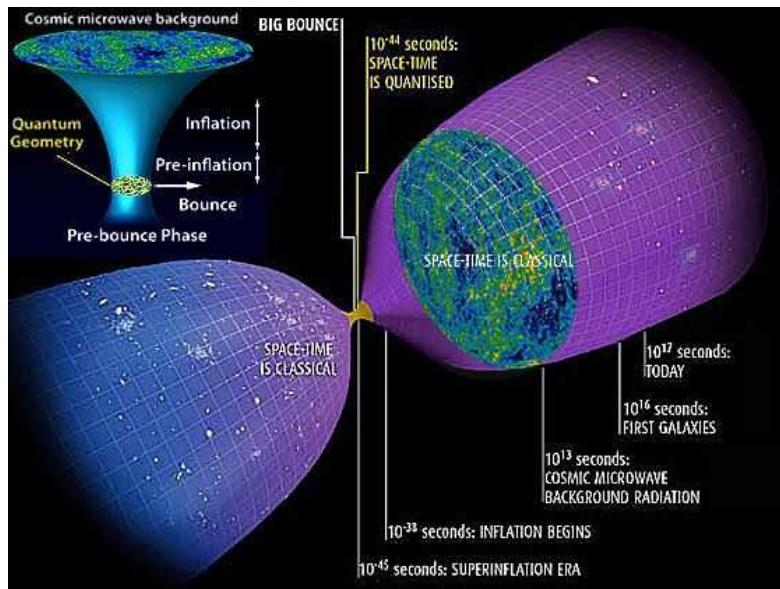
- modelos cosmológicos: homogeneidad & isotropía
- agujeros negros: simetría esférica & estaticidad



# 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



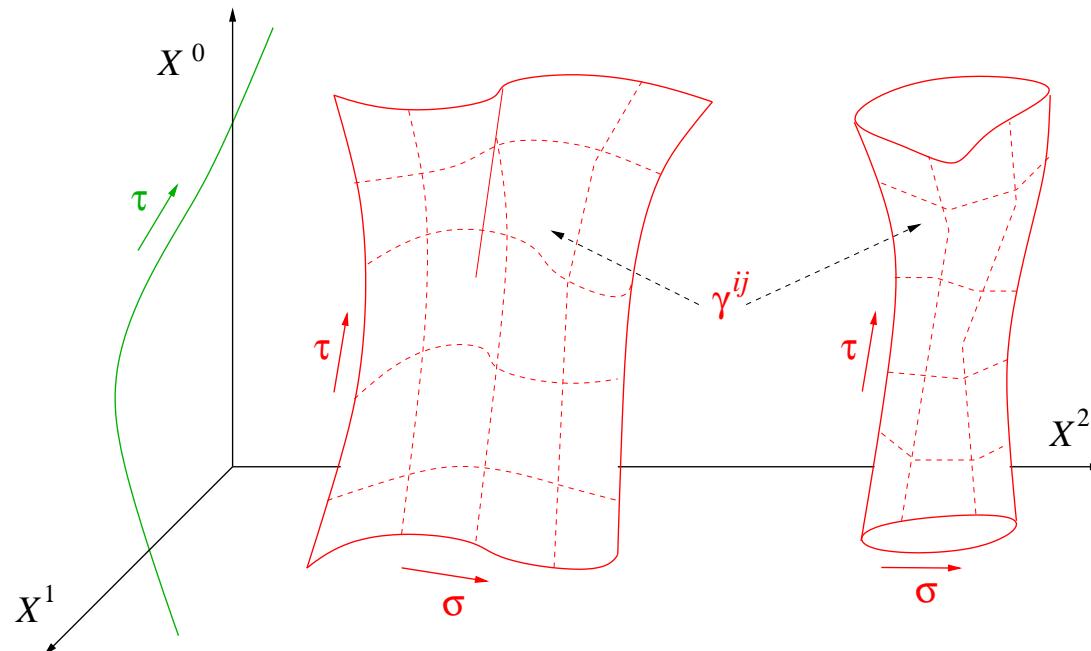
Teoría no comprobada!

# 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

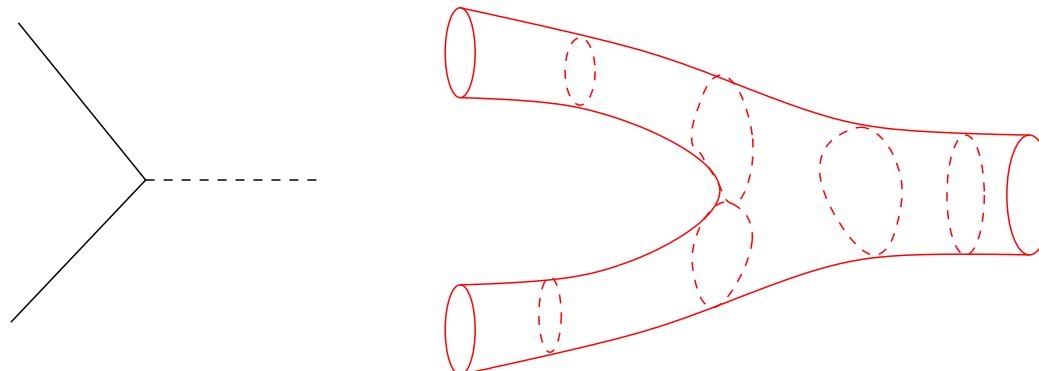
- Cuerda cerrada: partícula de espín 2 sin masa: gravitón  
→ Teoría de gravedad!!! (sin haberlo pedido)

## Comentarios generales

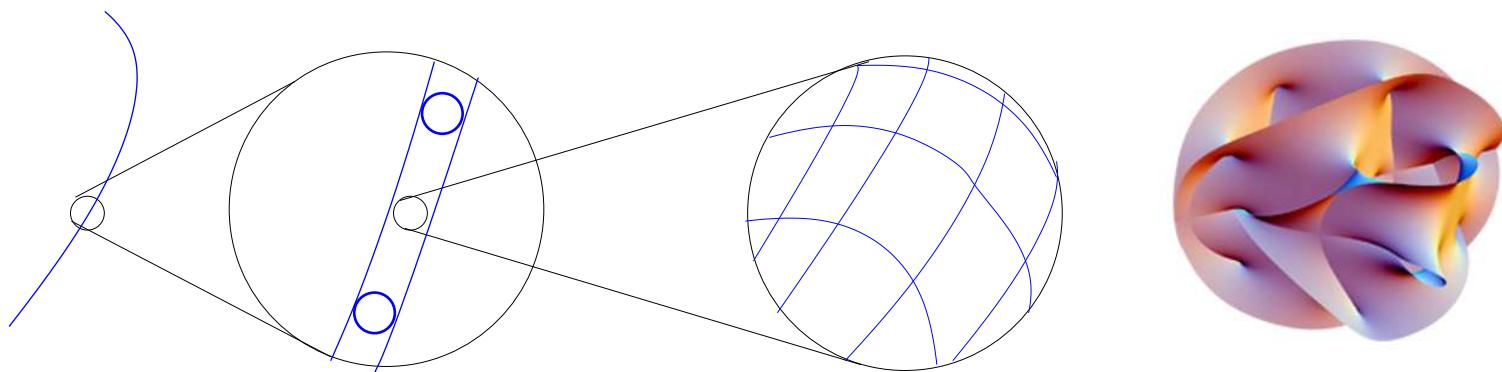
- Cuerda cerrada: partícula de espín 2 sin masa: gravitón
  - Teoría de gravedad!!! (sin haberlo pedido)
- gravitón  $\iff \ell_s = 10^{-35}m \sim \ell_P \sim 10^{-19}R_p +$ 
  - escala de cuerdas  $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV \sim 10^{15} E_{LHC}$
  - fuera de alcance de verificación experimental: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

## Comentarios generales

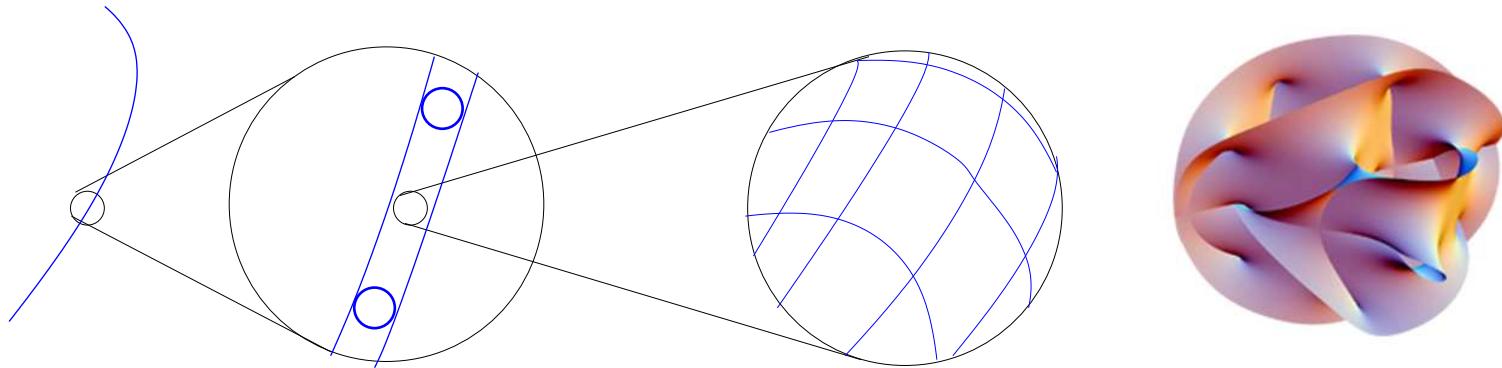
- Cuerda cerrada: partícula de espín 2 sin masa: gravitón  
→ Teoría de gravedad!!! (sin haberlo pedido)
- gravitón  $\iff \ell_s = 10^{-35}m \sim \ell_P \sim 10^{-19}R_p$   
→ escala de cuerdas  $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV \sim 10^{15} E_{LHC}$   
→ fuera de alcance de verificación experimental: Problema!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



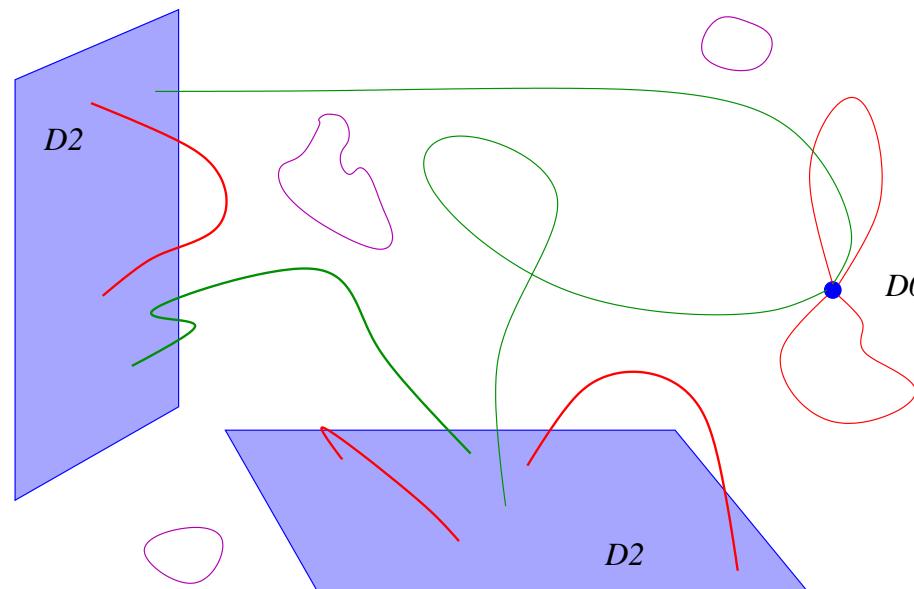
- Consistencia: espacio es 10-dimensional (9+1)
  - reducción dimensional (Kaluza-Klein)
  - geometría muy especial



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



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



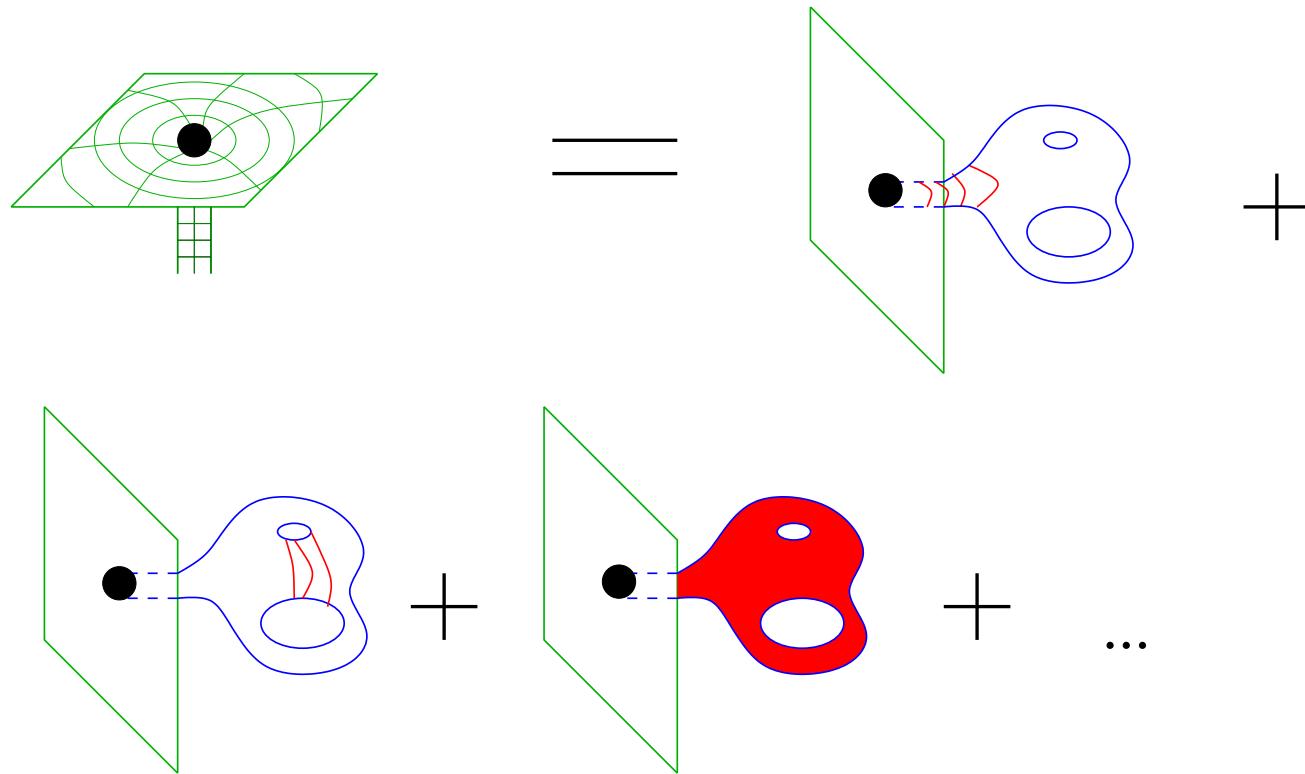
- Entropía de agujeros negros (extremos): Recuento de los microestados

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

- 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

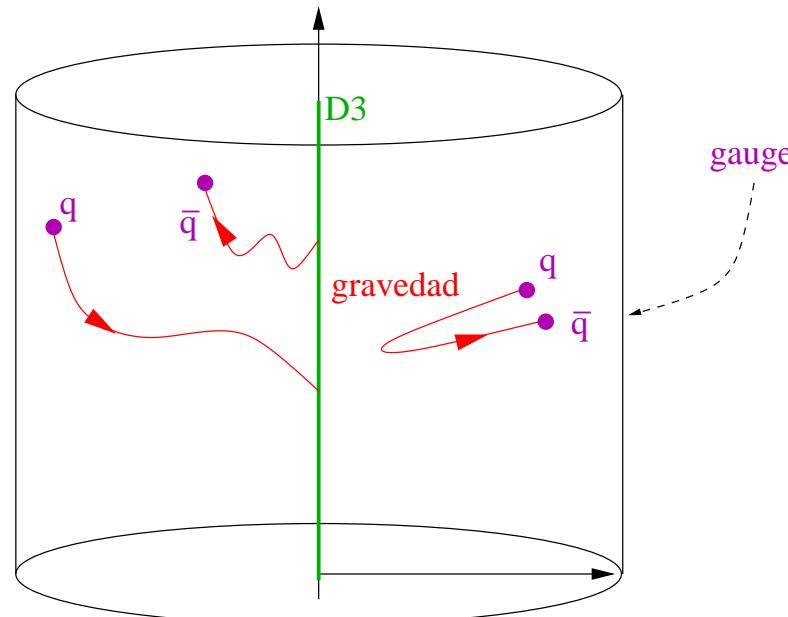


→ nunca se ha conseguido resultados similares para casos más realistas...

- 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  $SU(N)$

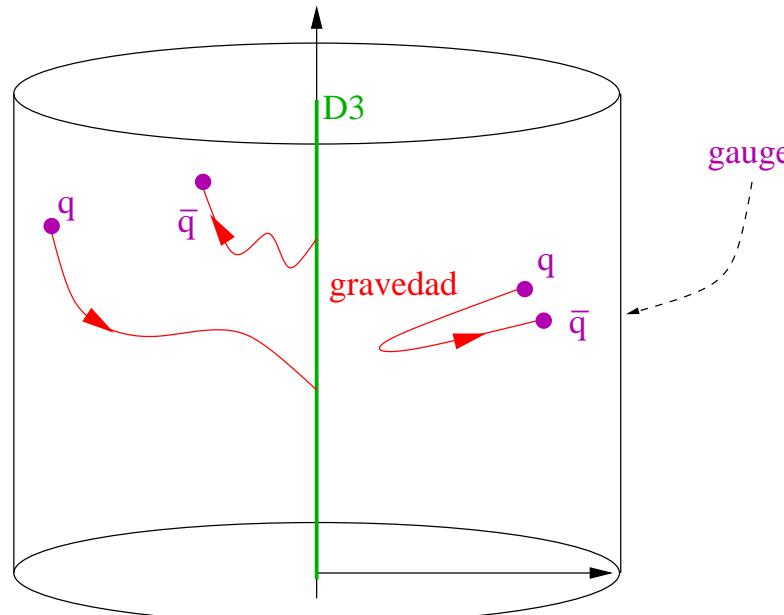
→ teoría de partículas 4-dim capta holográficamente gravedad 10-dim



- 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



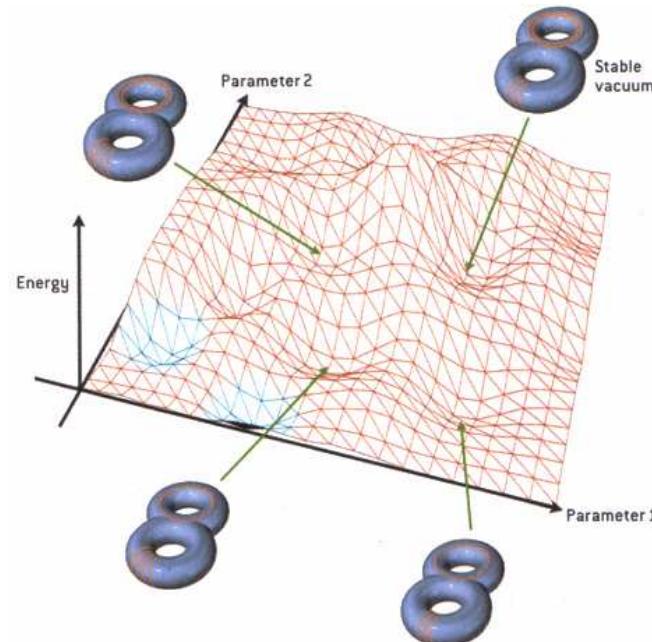
→ Diccionario concreto entre teoría gauge 4-dim y gravedad 10-dim

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?

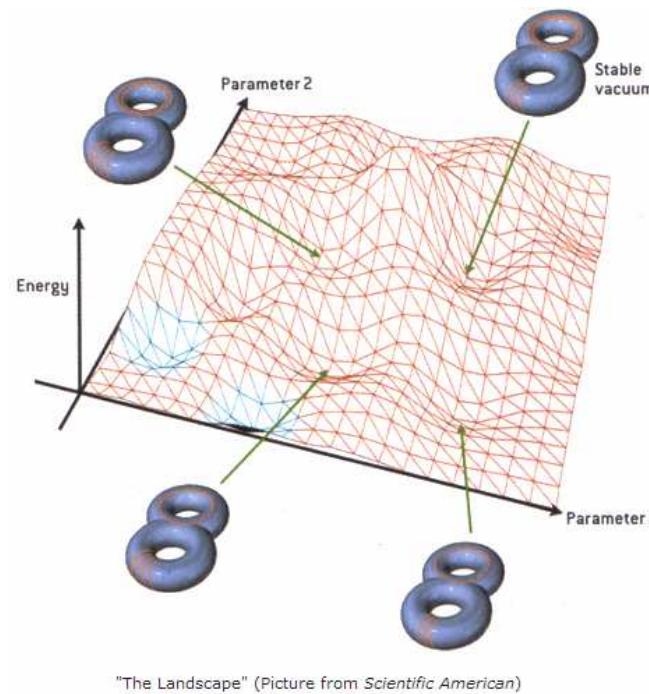
- Compactificaciones:  $Mink_4 \times T^6$ ?     $Mink_4 \times CY_3$ ?     $Mink_4 \times CY'_3$ ?
- Branas enroscadas:



"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 enroscadas:



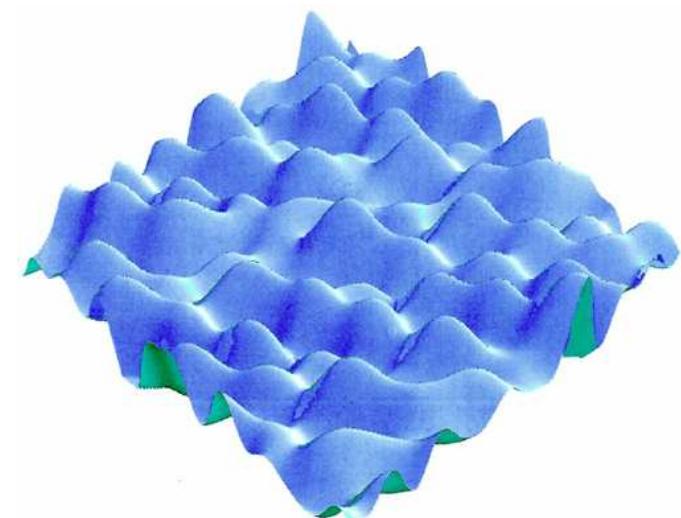
→  $\sim 10^{500}$  vacíos: **Landscape!**

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...



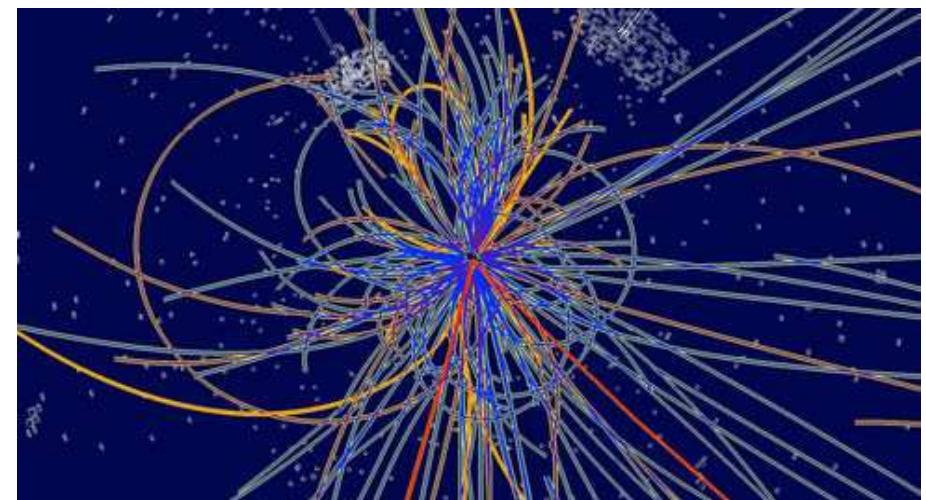
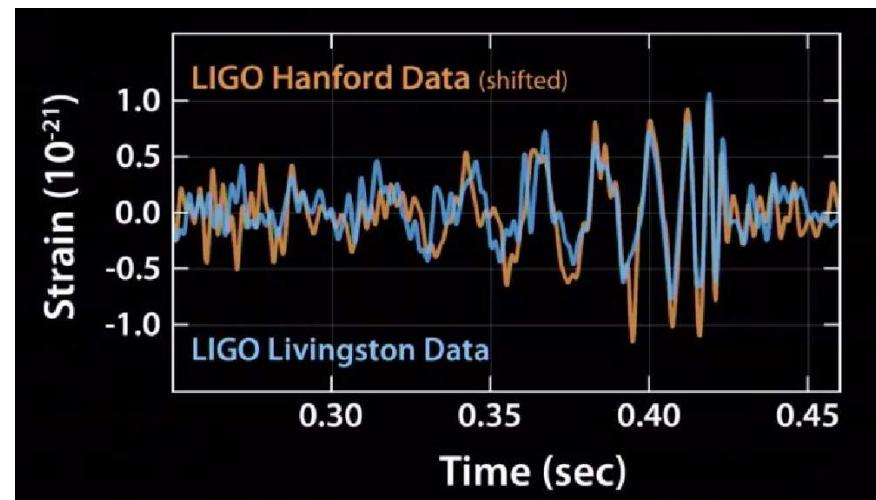
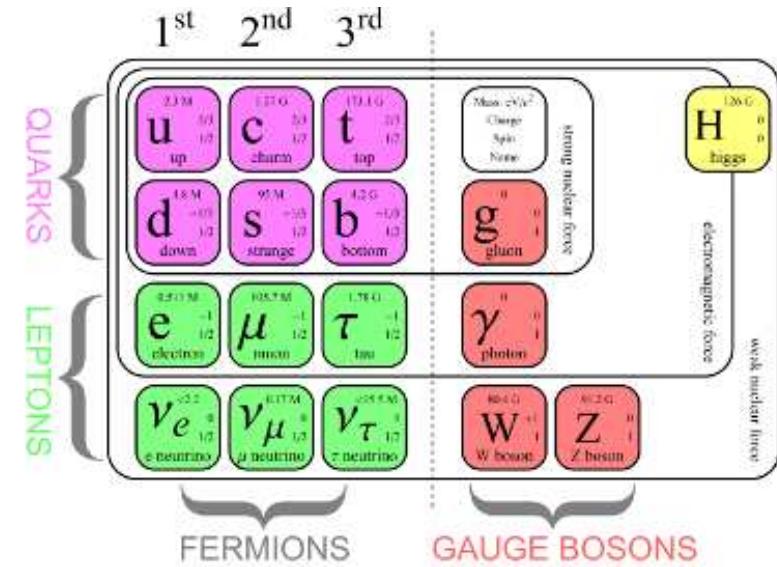
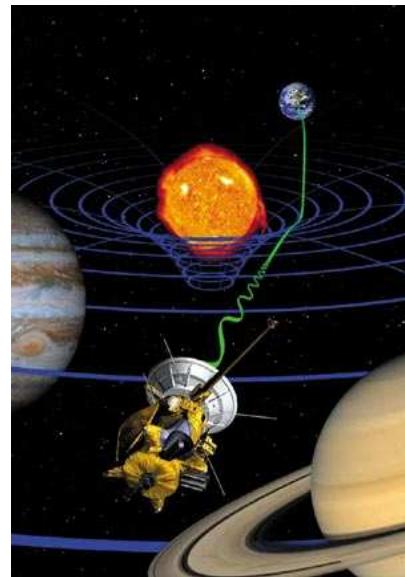
Opinión personal: Mixed feelings

Matemáticas impresionantes!       $\longleftrightarrow$       Realidad física?

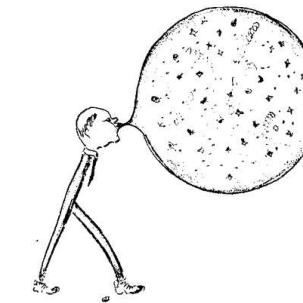
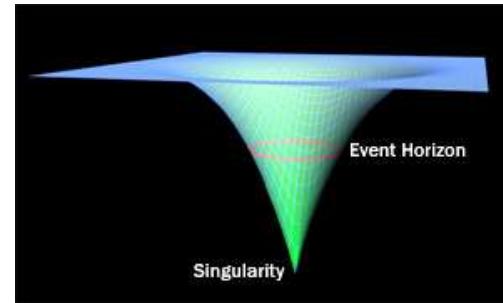
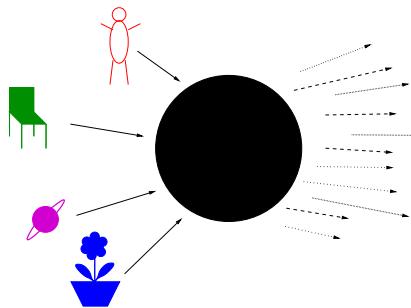
→ ¿inherente a gravedad cuántica?

# Resumen:

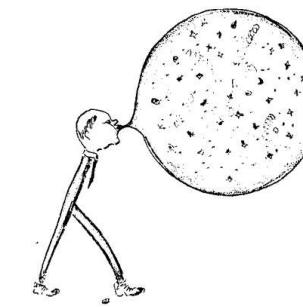
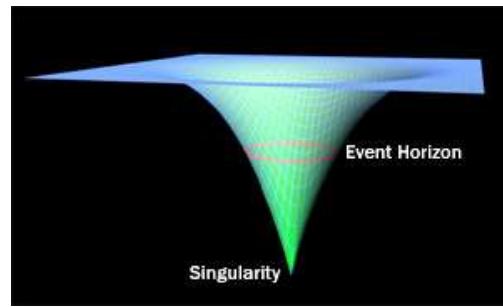
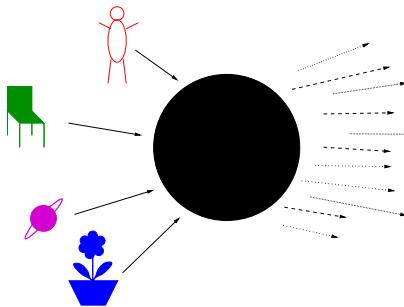
- Relatividad General & Modelo Estándar: éxitos impresionantes



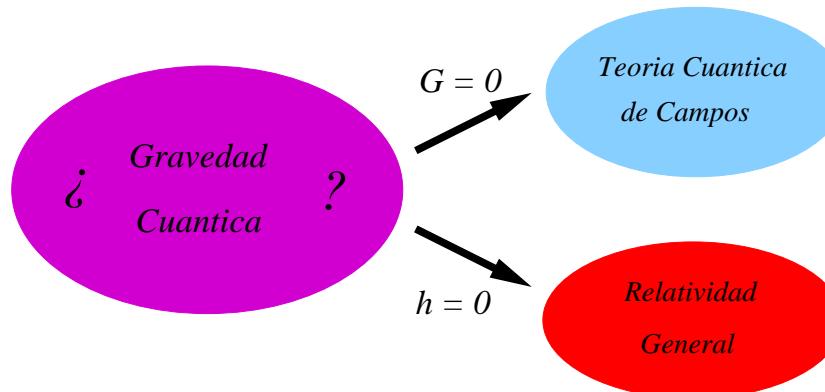
- Varios problemas que **transceden** el régimen de física conocida



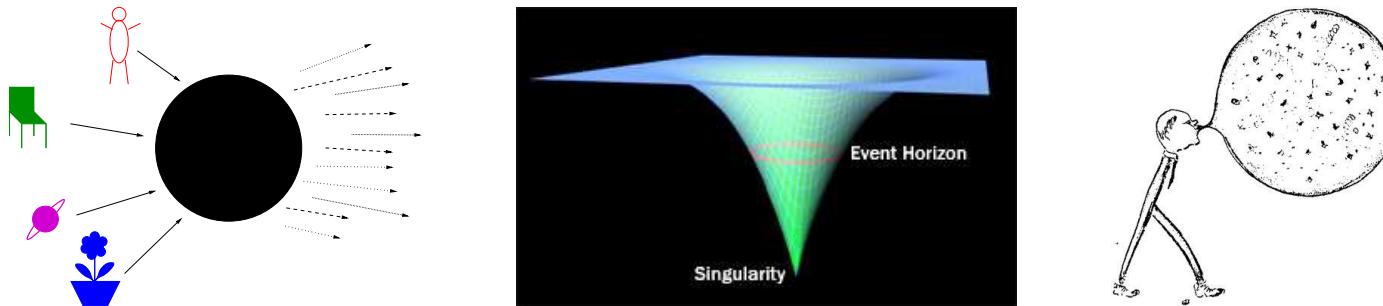
- Varios problemas que transceden el régimen de física conocida



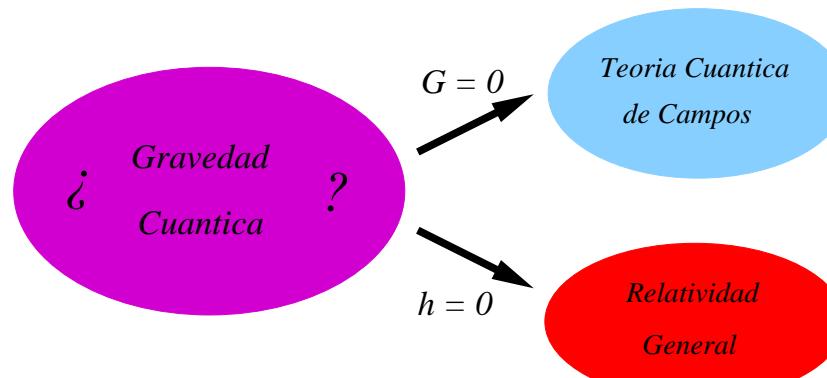
- Debe haber un régimen de gravedad cuántica



- Varios problemas que transceden el régimen de fisica conocida



- Debe haber un régimen de gravedad cuántica



- Cae fuera de alcance 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

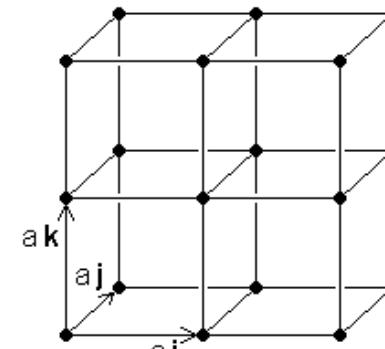
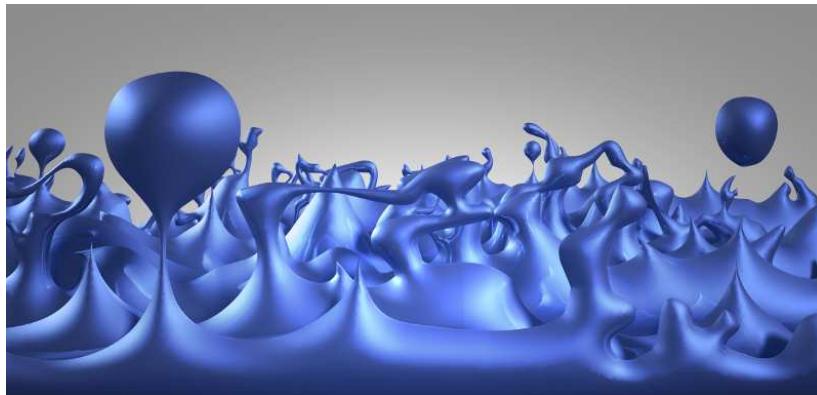
- Relatividad General es descripción granulada, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...



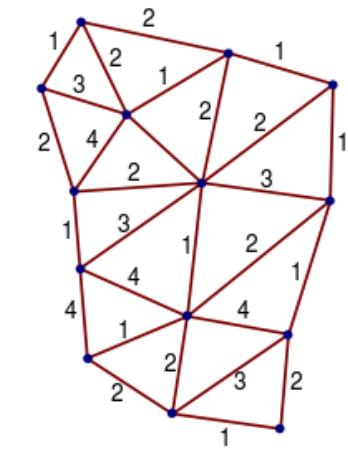
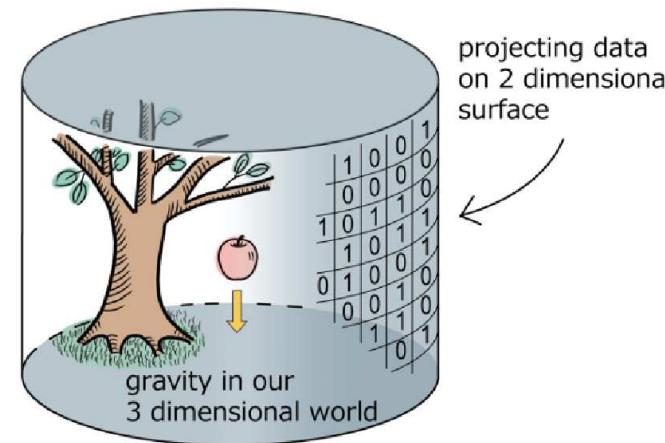
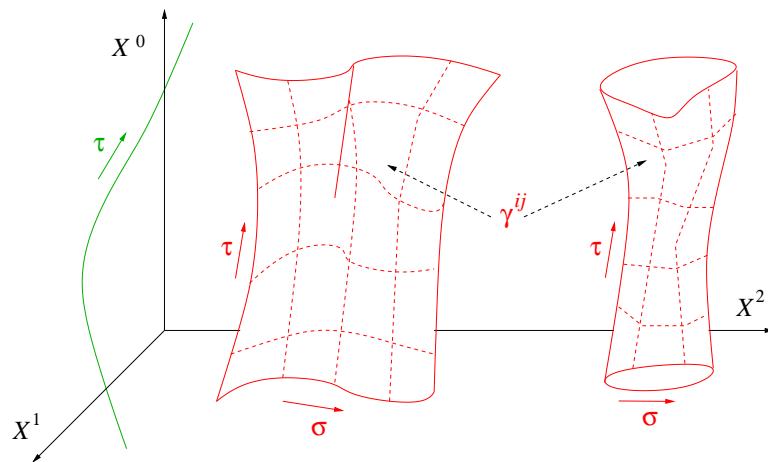
- Relatividad General es descripción granulada, (semi-)clásica de un sistema cuántico subyacente...



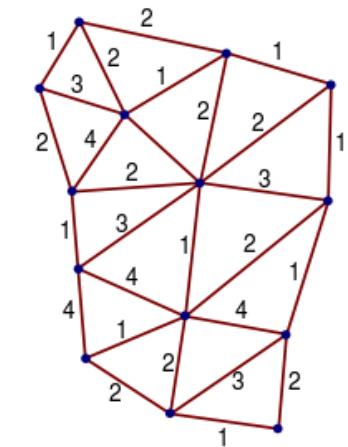
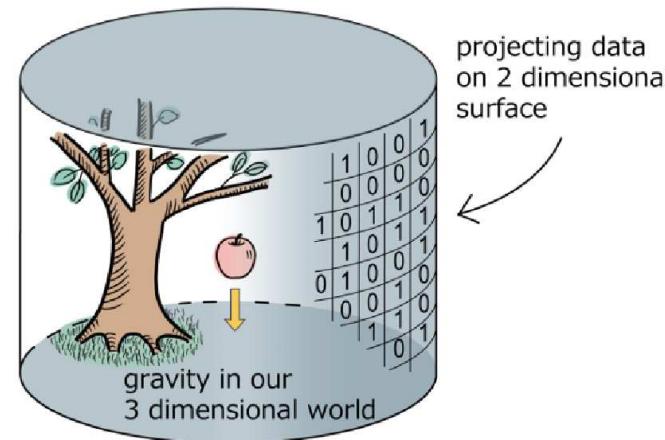
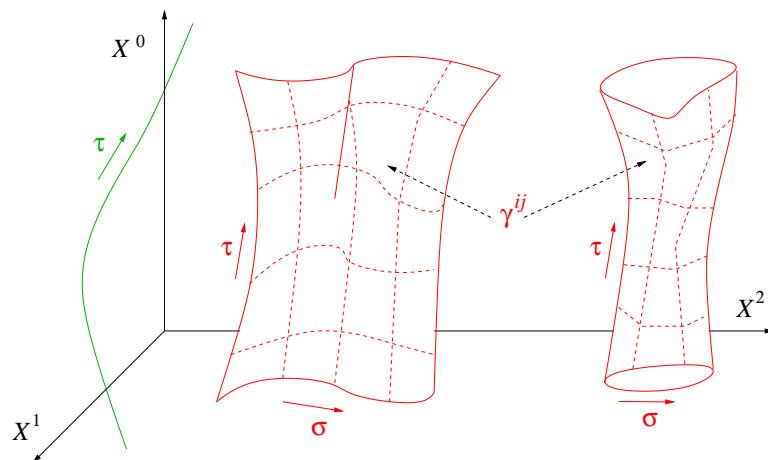
- Gravedad cuántica debe dar descripción cuántica del espaciotiempo



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



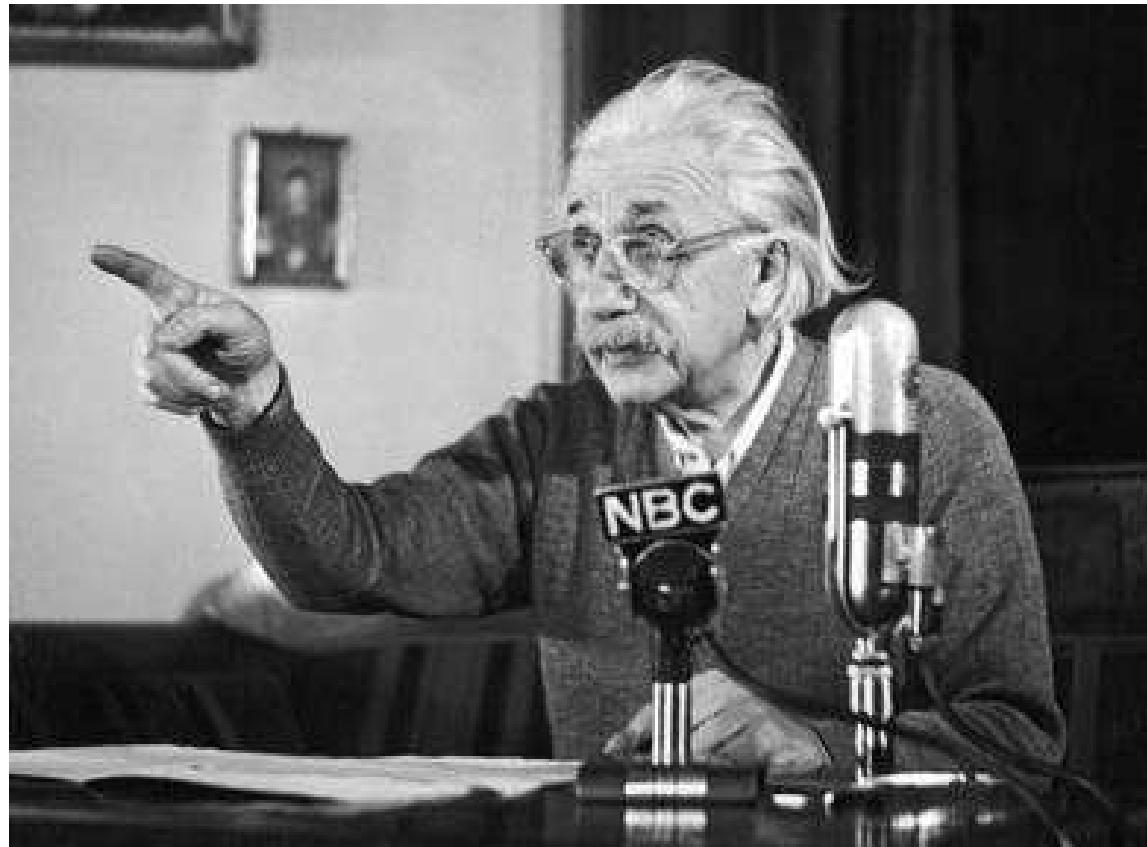
- Aún no tenemos una teoría clara de gravedad cuántica  
→ No entendemos los grados de libertad cuánticos de gravedad



- Pero queda mucho por descubrir...



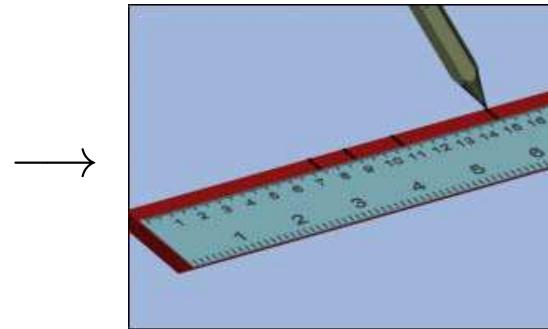
# Muchas gracias!



## ¿Preguntas?

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

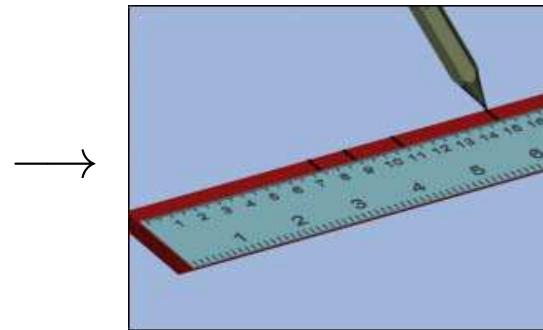
→ problema del extraterrestre y la Wikipedia



“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



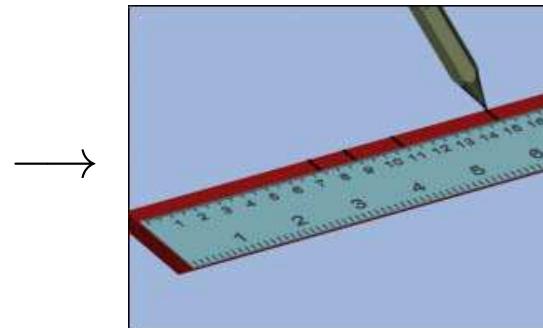
“Sí” →  $S \sim 20$ ;  $I \sim 09$  → 2009 → 0,2009 m

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 m

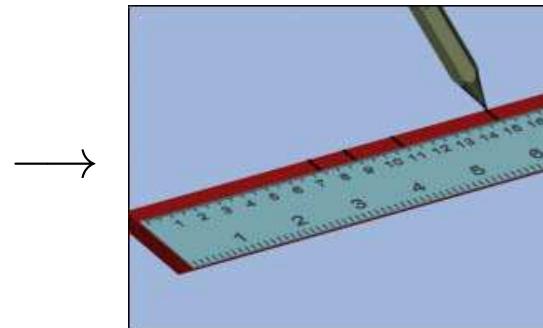
En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

“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

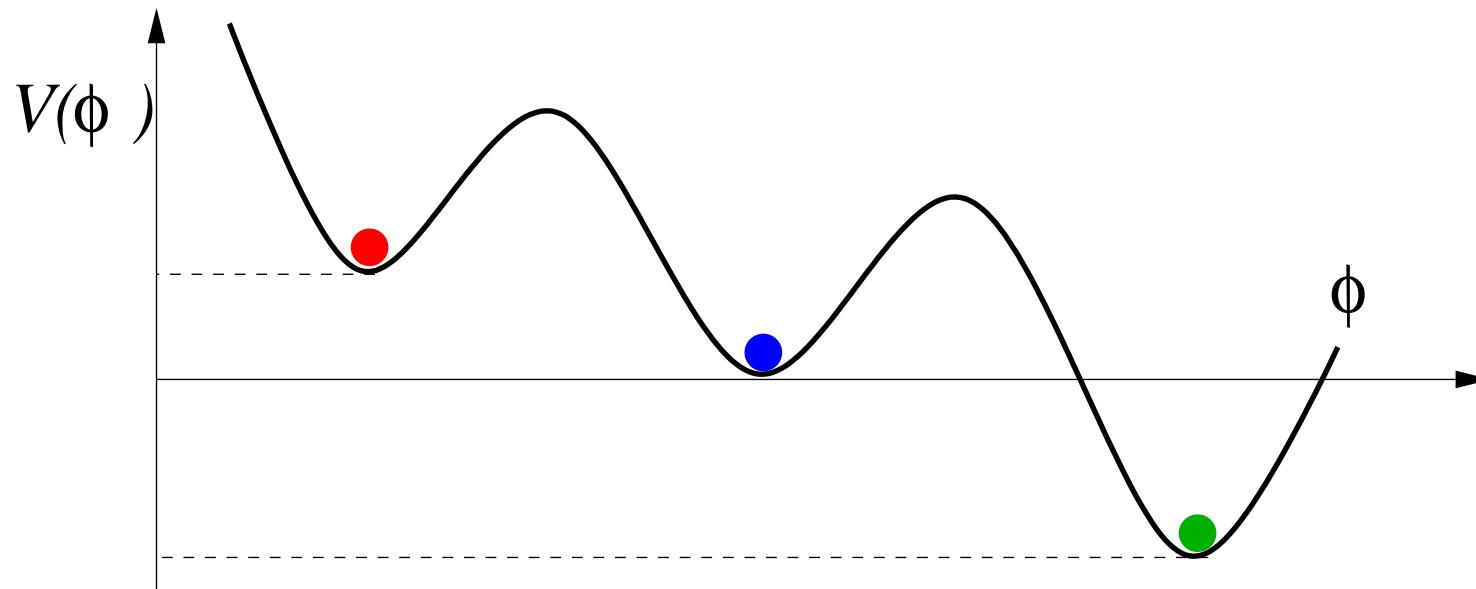
En seguida te topas con el carácter cuántico de la Naturaleza:

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

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

“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...

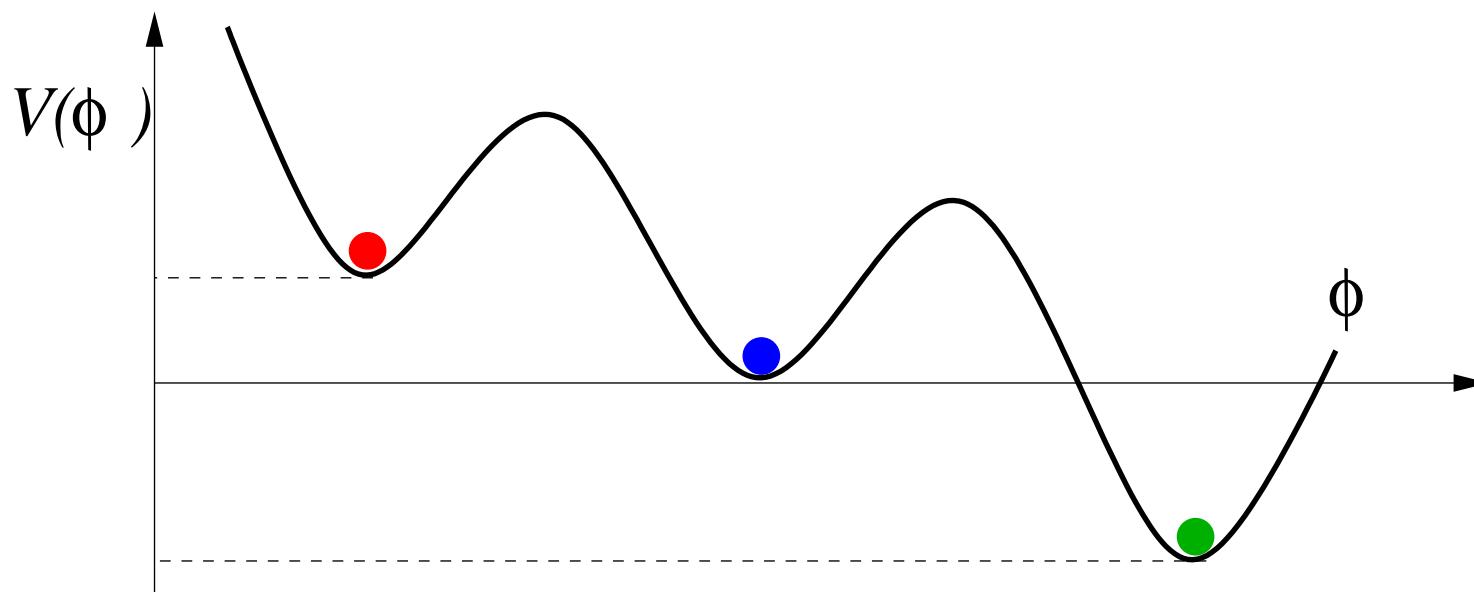


Ejemplo: Gravedad & escalar mínimamente acoplado

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

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

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



Ejemplo: Gravedad & escalar mínimamente acoplado

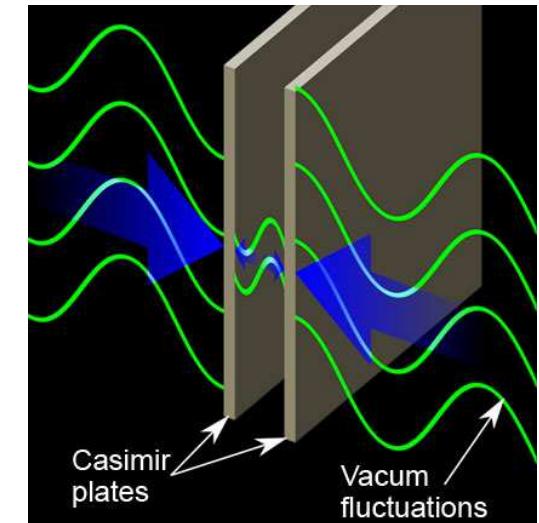
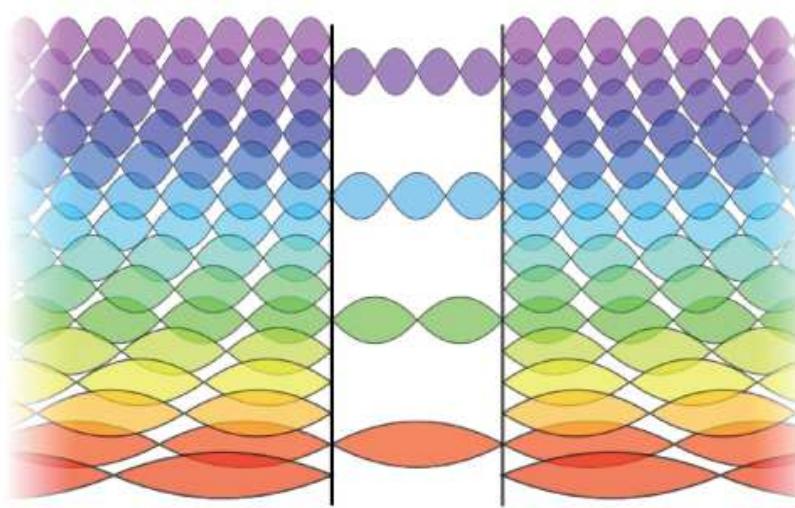
$$S = \int d^4x \sqrt{|g|} \left[ \frac{1}{2\kappa} R + \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - V(\phi) \right]$$

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

Solución particular: escalar congelado comporta como constante cosmológica

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

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

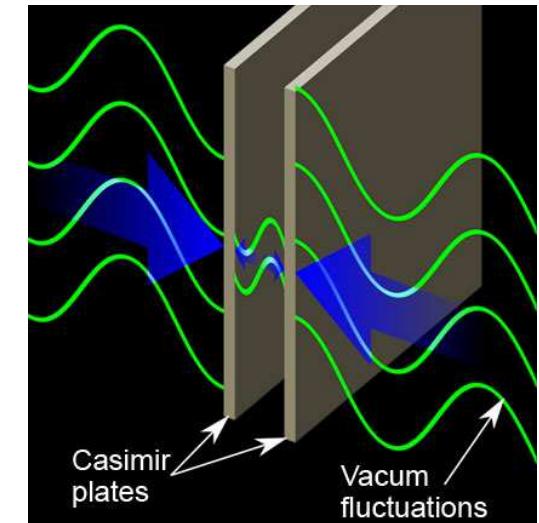
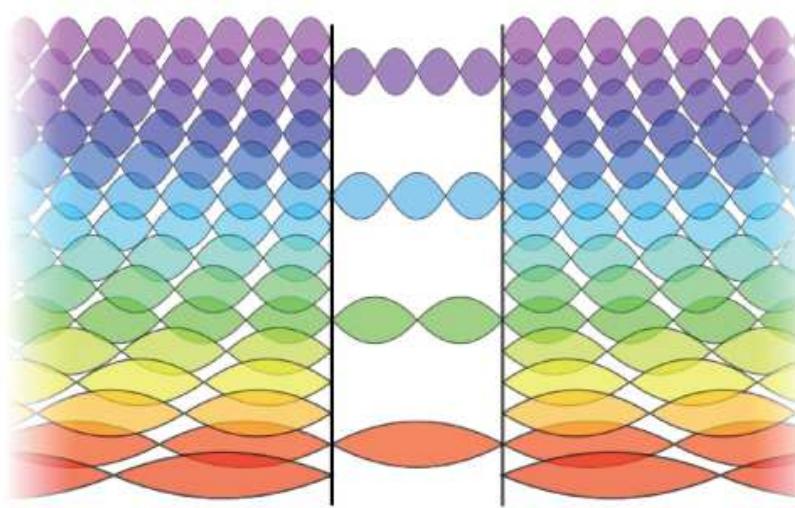


- Hay menos modos cuánticos entre las placas que fuera de las placas
- Presión del vacío neta hacia dentro: **Fuerza de Casimir**

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

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

## 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 hacia dentro: **Fuerza de Casimir**

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

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

Lamoreaux (1997): **Comprobación experimental** con error relativo de 15 %  
→ verificación experimental extremadamente complicada

## Extraordinaria acuerdo entre datos independientes: $\Lambda$ CDM

$$\Omega_{\text{bar}} \approx 0,048$$

$$\Omega_{\text{DM}} \approx 0,264,$$

$$\Omega_{\Lambda} \approx 0,685$$

