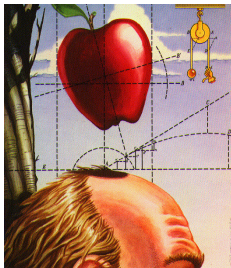
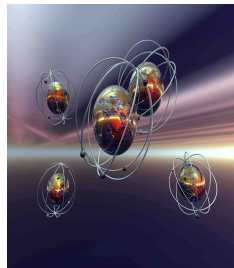




# Perspectivas de gravedad cuántica

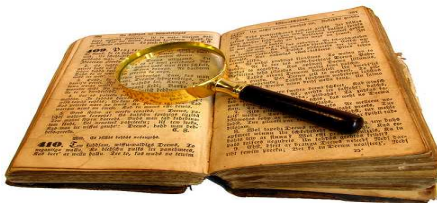
**Gil Jannes**

Universidad Europea de Madrid





# Introducción



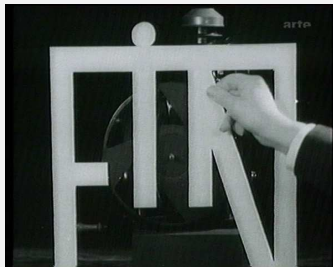
## ¿Qué es la gravedad cuántica?

Respuesta breve:

## ¿Qué es la gravedad cuántica?

Respuesta breve:

NO SABEMOS



## ¿Qué es la gravedad cuántica?

- “El campo de la física teórica que procura **unificar** la **teoría cuántica de campos**, que describe tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, con la **relatividad general**, la teoría de la cuarta fuerza fundamental: la **gravedad**.” (WIKIPEDIA)

## ¿Qué es la gravedad cuántica?

- “El campo de la física teórica que procura **unificar** la **teoría cuántica de campos**, que describe tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, con la **relatividad general**, la teoría de la cuarta fuerza fundamental: la **gravedad**.” (WIKIPEDIA)
- “Una descripción de la **interacción gravitatoria** de la materia y energía en la cual estas vienen descritas por la **teoría cuántica**. En general, pero no siempre, esto implica una cuantización de la gravedad.” (STANFORD ENCYCLOPEDIA OF PHILOSOPHY)

## ¿Qué es la gravedad cuántica?

- “El campo de la física teórica que procura **unificar** la **teoría cuántica de campos**, que describe tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, con la **relatividad general**, la teoría de la cuarta fuerza fundamental: la **gravedad**.” (WIKIPEDIA)
  - “Una descripción de la **interacción gravitatoria** de la materia y energía en la cual estas vienen descritas por la **teoría cuántica**. En general, pero no siempre, esto implica una cuantización de la gravedad.” (STANFORD ENCYCLOPEDIA OF PHILOSOPHY)
- 
- Gravedad cuántica NO es una teoría
  - Es un campo de investigación (principalmente teórica)
  - Existen varios enfoques

## Ingredientes

- RELATIVIDAD GENERAL
- TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS





## Ingredientes

- Relatividad especial
- RELATIVIDAD GENERAL
- Física cuántica
- TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS



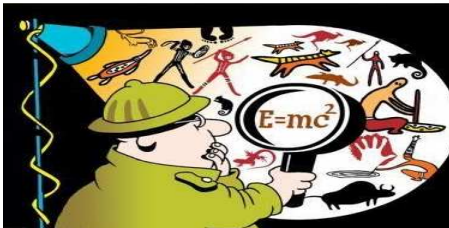
## Ingredientes

- Relatividad especial
- RELATIVIDAD GENERAL
- Física cuántica
- TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS





# Repaso histórico



## Postulados

- 1 Las leyes de la física son las mismas para todos los observadores inerciales.
- 2 La velocidad de la luz en el vacío [ $c$ ] es una constante independiente del estado de movimiento de la fuente

## Postulados

- 1 Las leyes de la física son las mismas para todos los observadores inerciales.
- 2 La velocidad de la luz en el vacío [ $c$ ] es una constante independiente del estado de movimiento de la fuente

## Consecuencias:

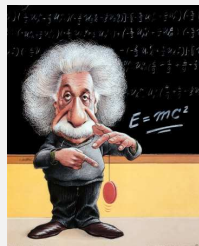
- Relatividad de la simultaneidad
- Paradoja de los gemelos
- Dilación temporal
- Contracción de Lorentz-FitzGerald
- ...

## Postulados

- ① Las leyes de la física son las mismas para todos los observadores inerciales.
- ② La velocidad de la luz en el vacío [ $c$ ] es una constante independiente del estado de movimiento de la fuente

## Consecuencias:

- Relatividad de la simultaneidad
- Paradoja de los gemelos
- Dilación temporal
- Contracción de Lorentz-FitzGerald
- ...
- Equivalencia masa-energía:  $E = mc^2$



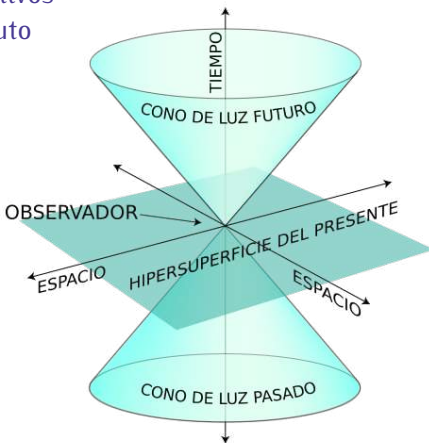
- Dilación temporal  $\Rightarrow$  Relatividad del tiempo
- Contracción de Lorentz-FitzGerald  $\Rightarrow$  Relatividad del espacio

ESPACIO y TIEMPO: relativos

- Dilación temporal  $\Rightarrow$  Relatividad del tiempo
- Contracción de Lorentz-FitzGerald  $\Rightarrow$  Relatividad del espacio

ESPACIO y TIEMPO: relativos

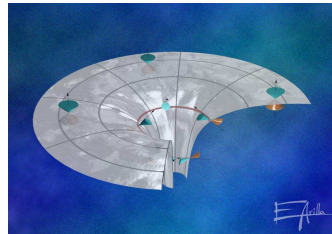
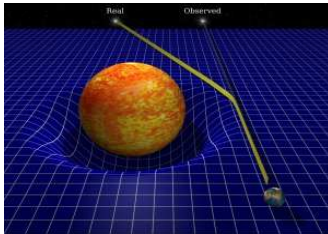
ESPACIO-TIEMPO: absoluto





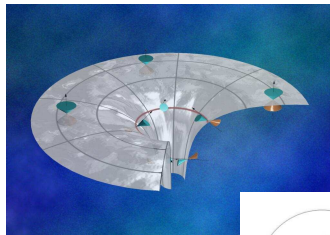
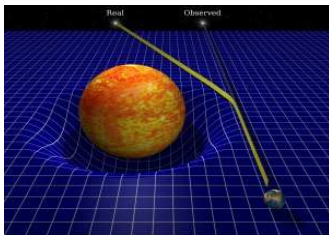
- Relatividad especial: **espaciotiempo plano**
- RELATIVIDAD GENERAL: **ESPACIOTIEMPO CURVO**

“El espaciotiempo determina el movimiento de la materia.  
La materia determina la curvatura del espaciotiempo.”



- Relatividad especial: **espaciotiempo plano**
- RELATIVIDAD GENERAL: **ESPACIOTIEMPO CURVO**

“El espaciotiempo determina el movimiento de la materia.  
La materia determina la curvatura del espaciotiempo.”



ECUACIONES DE EINSTEIN:

$$G = T$$

ECUACIONES DE EINSTEIN:

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

ECUACIONES DE EINSTEIN:

$$G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

$T_{\mu\nu}$ : tensor de energía-impulso  $\leftarrow$  energía (masa)

$G_{\mu\nu}$ : tensor de Einstein =  $f(g_{\mu\nu}) \leftarrow$  geometría

tensor:  $4 \times 4$  índices (0: tiempo, 1–3: espacio)

métrica  $g_{\mu\nu}$

- define cómo medir distancias espaciotemporales
- Espaciotiempo plano:  $g_{\mu\nu} \equiv [-c^2, 1, 1, 1]$
- Cerca de un agujero negro: dilación temporal, contracción espacial;  $g_{\mu\nu}$  complicado

RELATIVIDAD GENERAL = TEORÍA GEOMÉTRICA DINÁMICA DE LA GRAVEDAD

$$E = \hbar\omega$$

( $\hbar$ =constante de Planck,  $\omega$ =frecuencia)

ENERGÍA (MATERIA) VIENE EN PAQUETES DISCRETOS (CUANTOS)

$$E = \hbar\omega$$

( $\hbar$ =constante de Planck,  $\omega$ =frecuencia)

ENERGÍA (MATERIA) VIENE EN PAQUETES DISCRETOS (CUANTOS)

### Consecuencias:

- relaciones de incertidumbre de Heisenberg
- dualidad onda-partícula
- superposición de estados cuánticos
- ...

teoría clásica (continua –  $x, p$ )  $\Leftrightarrow$  teoría cuántica (discreta –  $\hat{x}, \hat{p}$ )

No-comutatividad de  $\hat{x}, \hat{p}$

$$E = \hbar\omega$$

( $\hbar$ =constante de Planck,  $\omega$ =frecuencia)

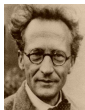
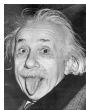
ENERGÍA (MATERIA) VIENE EN PAQUETES DISCRETOS (CUANTOS)

Consecuencias:

- relaciones de incertidumbre de Heisenberg
- dualidad onda-partícula
- superposición de estados cuánticos
- ...

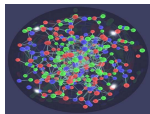
teoría clásica (continua –  $x, p$ )  $\Leftrightarrow$  teoría cuántica (discreta –  $\hat{x}, \hat{p}$ )

No-comutatividad de  $\hat{x}, \hat{p}$



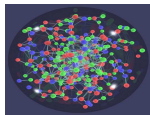


Materia consiste de partículas



MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**

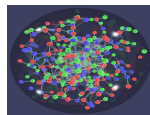
Materia consiste de partículas



MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**



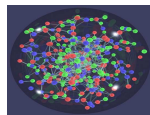
Materia consiste de partículas



MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**



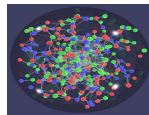
Materia consiste de partículas



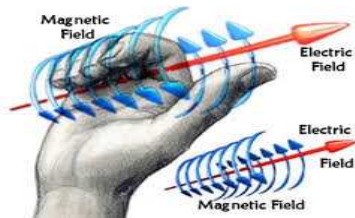
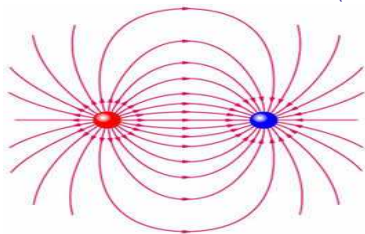
MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**



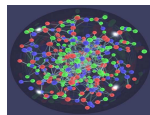
Materia consiste de partículas



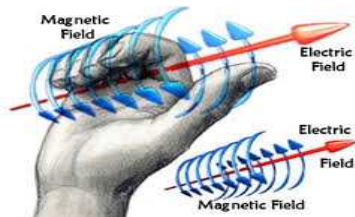
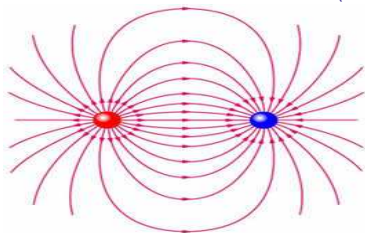
MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**



Materia consiste de partículas



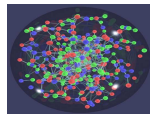
MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**



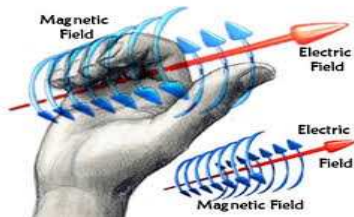
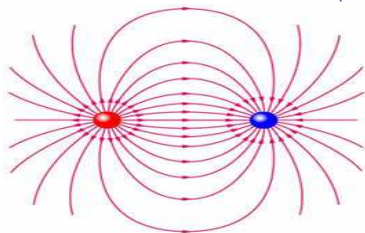
- Está en todas partes.
- En cada punto
  - Valor (intensidad)
  - Dirección

tiene:

Materia consiste de partículas

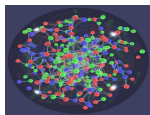


MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE PARTÍCULAS:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE CAMPOS



- Está en todas partes.
- En cada punto del espacio-tiempo tiene:
  - Valor (intensidad)
  - Dirección

Materia consiste de partículas

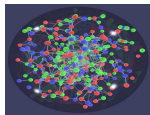


MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**

- **Partículas** son estados excitados (“cuantos”) de **campos**  
p.ej. fotón = excitación del campo electromagnético
- **relativista** en sentido de la relatividad **especial (CURVATURA)**



Materia consiste de partículas



MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**

- **Partículas** son estados excitados (“cuantos”) de **campos**  
p.ej. fotón = excitación del campo electromagnético
- **relativista** en sentido de la relatividad **especial (CURVATURA)**

Brookhaven

Cern

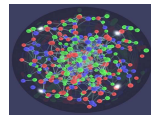
Desy

Fermilab

Kek

Slac

Materia consiste de partículas



MODELO ESTÁNDAR DE FÍSICA DE **PARTÍCULAS**:  
TEORÍA CUÁNTICA (RELATIVISTA) DE **CAMPOS**

- **Partículas** son estados excitados (“cuantos”) de **campos**  
p.ej. fotón = excitación del campo electromagnético
- **relativista** en sentido de la relatividad **especial** (**CURVATURA**)

Brookhaven



Cern



Desy



Fermilab



Kek



Slac



**Three Generations  
of Matter (Fermions)**

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W<sup>±</sup></b> weak force
Leptons				Bosons (Forces)

**Three Generations of Matter (Fermions)**

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W<sup>±</sup></b> weak force
Leptons				Bosons (Forces)

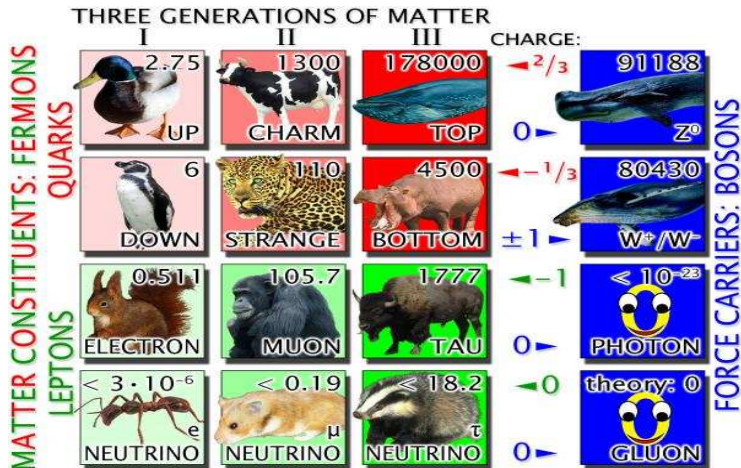
- Bosón de Higgs (LHC)
- $???$  Gravitón ???

**Three Generations of Matter (Fermions)**

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W<sup>±</sup></b> weak force
Leptons				Bosons (Forces)

- Bosón de Brout–Englert–Higgs (LHC)

- *¿¿¿* Gravitón ???



ALL MASSES IN MEV;  
ANIMAL MASSES  
SCALE WITH  
PARTICLE MASSES

The Standard Model  
fundamental particle zoo

- Relatividad especial: 1905
- Relatividad general: 1915
- Física cuántica: 1900-1905 / 1924-1927
- Teoría cuántica de campos  
1940s (QED), 1960s (QCD), 1975 (SM)

2016: ¿ ¿ ¿ GRAVEDAD CUÁNTICA ? ? ?

- Relatividad especial: 1905
- Relatividad general: 1915
- Física cuántica: 1900-1905 / 1924-1927
- Teoría cuántica de campos  
1940s (QED), 1960s (QCD), 1975 (SM)

2016: ¿ ¿ ¿ GRAVEDAD CUÁNTICA ? ? ?







# Objetivo



- Relatividad general: energías altas
- Física cuántica: distancias pequeñas
- ① Gravedad cuántica: **ENERGÍAS ALTAS EN DISTANCIAS PEQUEÑAS**

Escala de gravedad cuántica (“de Planck”):  $10^{29}$ eV /  $10^{-35}$ m

LHC: 10 TeV  $\sim 10^{13}$ eV

protón, electrón:  $10^{-15}$ m – quark:  $< 10^{-18}$ m

- Relatividad general: energías altas
- Física cuántica: distancias pequeñas
- ① Gravedad cuántica: **ENERGÍAS ALTAS EN DISTANCIAS PEQUEÑAS**

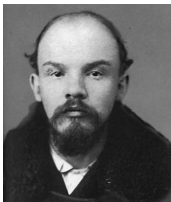
Escala de gravedad cuántica (“de Planck”):  $10^{29}$  eV /  $10^{-35}$  m

LHC: 10 TeV  $\sim 10^{13}$  eV

protón, electrón:  $10^{-15}$  m – quark:  $< 10^{-18}$  m

### RESOLUCIÓN DE SINGULARIDADES

Agujeros negros



Origen del universo



2 Inconsistencia lógica: geometría clásica vs materia cuántica

$$G_{\mu\nu} = \hat{T}_{\mu\nu}$$

## 2 Inconsistencia lógica: geometría clásica vs materia cuántica

$$G_{\mu\nu} = \hat{T}_{\mu\nu}$$



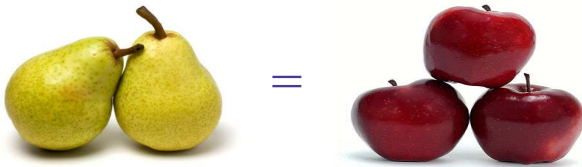
=



## 3 Energía oscura

## 2 Inconsistencia lógica: geometría clásica vs materia cuántica

$$G_{\mu\nu} = \hat{T}_{\mu\nu}$$



## 3 Energía oscura



#### 4 Motivación histórica: unificación como motor de progreso

P.ej. Electricidad + magnetismo

⇒ Electromagnetismo



#### 5 Motivación “estética”

#### 4 Motivación histórica: unificación como motor de progreso

P.ej. Electricidad + magnetismo

⇒ Electromagnetismo



#### 5 Motivación “estética”





## 5 Motivación observacional/experimental?

## 5 Motivación observacional/experimental?

NO

No existe, a día de hoy, ningún experimento ni observación que requiera una teoría de gravedad cuántica para su explicación.



## 5 Motivación observacional/experimental?

NO

No existe, a día de hoy, ningún experimento ni observación que requiera una teoría de gravedad cuántica para su explicación.

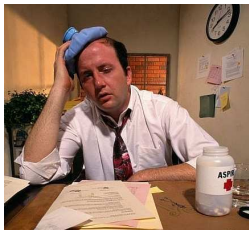


Recordad:

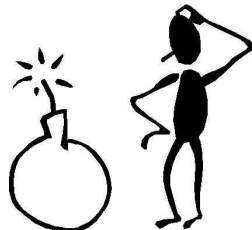
Escala de Planck:  $10^{29}$  eV /  $10^{-35}$  m

vs

LHC:  $10^{13}$  eV /  $10^{-18}$  m



# Problemas



## TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

- lineal
  - $f(x + y) = f(x) + f(y)$
  - $f(\alpha x) = \alpha f(x)$
- renormalización
- grupos finitos



## TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

- lineal
  - $f(x + y) = f(x) + f(y)$
  - $f(\alpha x) = \alpha f(x)$
- renormalización
- grupos finitos



## RELATIVIDAD GENERAL

- no es lineal
- no es renormalizable
- se caracteriza por un grupo infinito (“difeomorfismos”)

## EXPERIMENTOS

- Escala de gravedad cuántica (“de Planck”):  
 $10^{29}$  eV –  $10^{-35}$  m
- LHC:  $10^{13}$  eV –  $10^{-18}$  m



## EXPERIMENTOS

- Escala de gravedad cuántica (“de Planck”):  
 $10^{29}$  eV –  $10^{-35}$  m
- LHC:  $10^{13}$  eV –  $10^{-18}$  m



Acelerador de partículas del tamaño del sistema solar ??



## EXPERIMENTOS

- Escala de gravedad cuántica (“de Planck”):  
 $10^{29}$  eV –  $10^{-35}$  m
- LHC:  $10^{13}$  eV –  $10^{-18}$  m



Acelerador de partículas del tamaño del sistema solar ??

OBSERVACIONES COSMOLÓGICAS :  $10^{20}$  eV

- indirectas, no manipulables

## EXPERIMENTOS

- Escala de gravedad cuántica ("de Planck"):  
 $10^{29}$  eV –  $10^{-35}$  m
- LHC:  $10^{13}$  eV –  $10^{-18}$  m



Acelerador de partículas del tamaño del sistema solar ??

OBSERVACIONES COSMOLÓGICAS :  $10^{20}$  eV

- indirectas, no manipulables
- extrapolar ??



TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS SUPONE  
ESPACIOTIEMPO DE FONDO FIJO

## TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS SUPONE ESPACIOTIEMPO DE FONDO FIJO

- Modelo estándar de partículas: espaciotiempo **plano**
- Teoría cuántica de campos en espaciotiempos **curvos**

radiación de Hawking



## TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS SUPONE ESPACIOTIEMPO DE FONDO FIJO

- Modelo estándar de partículas: espaciotiempo **plano**
- Teoría cuántica de campos en espaciotiempos **curvos**

radiación de Hawking



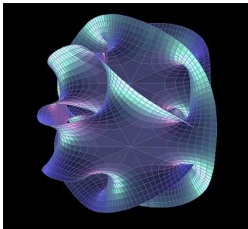
RELATIVIDAD GENERAL = TEORÍA DINÁMICA DEL ESPACIOTIEMPO

$$G = T$$

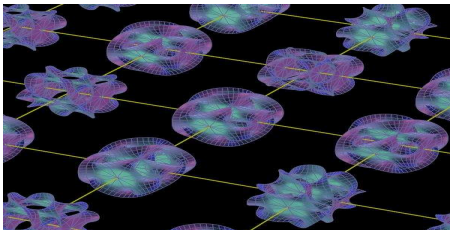
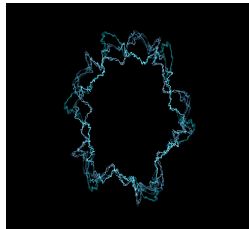


# Enfoques

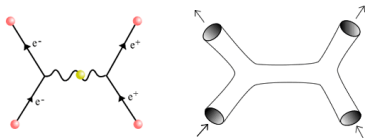




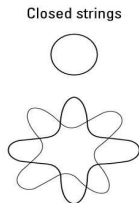
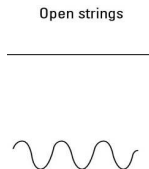
# Teoría de Cuerdas



- Partículas puntuales  $\implies$  CUERDAS  
(objetos 1-dimensionales – abiertas/cerradas)



- Partículas puntuales:  $F \sim 1/r^n \rightarrow \infty$  si  $r \rightarrow 0$ ; cuerda no
- Partículas  $\iff$  modos de vibración de cuerdas



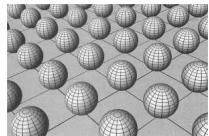
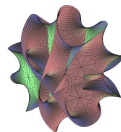
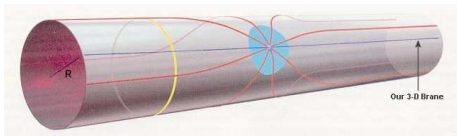


## Logros

- “Contiene” modelo estándar de partículas
- Predice de forma natural **gravitón**
- Evita problemas de **infinitos** en Teoría Cuántica de Campos
- Abierto campos de investigación matemática
- **Simetría/dualidades** entre teorías
  - 1995 – relaciones entre 5 versiones: I, II-A, II-B, HO, HE  
 $\implies$  ¿ Teoría-M ?

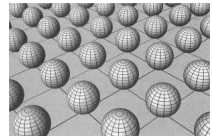
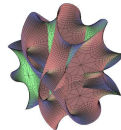
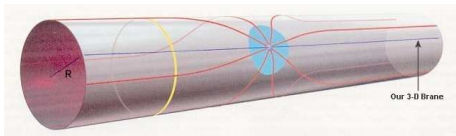
## Problemas

- **Supersimetría** (fotón-fotino, fermión-sfermión, quark-squark...)
- **Dimensiones extras** (11?)
- **5 versiones**



## Problemas

- **Supersimetría** (fotón-fotino, fermión-sfermión, quark-squark...)
- **Dimensiones extras** (11?)
- **$10^{500}$  versiones** ("landscape")
  - $\rightarrow$  ¿ predictibilidad ?
  - ¿Multiverso? ¿Nuestro universo?
- Muchos resultados no parecen aplicables a nuestro universo



## LOGROS IMPORTANTES ÚLTIMOS 10 AÑOS:

## LOGROS IMPORTANTES ÚLTIMOS 10 AÑOS:

## ESTADO ACTUAL?

Crisis – pero las ha habido antes

- Pro: “muy improbable” que una teoría tan elegante y tan consistente esté mal
- Con: ni una sola predicción que se podría verificar/refutar (ni siquiera en principio)

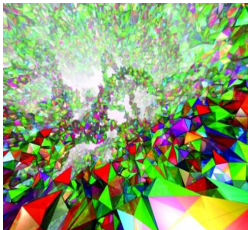
## ESTADO ACTUAL?

Crisis – pero las ha habido antes

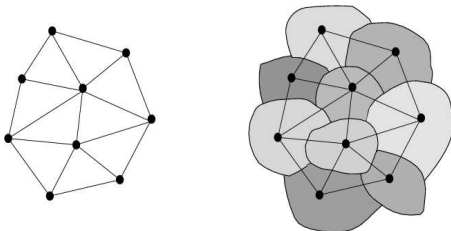
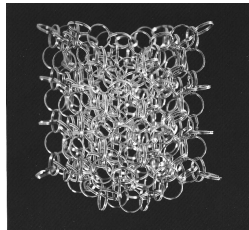
- Pro: “muy improbable” que una teoría tan elegante y tan consistente esté mal
- Con: ni una sola predicción que se podría verificar/refutar (ni siquiera en principio)

### Perspectiva

- ¿Construir una teoría en base a argumentos de elegancia y consistencia matemática? (Dirac: positrón – antimateria)
- Contacto con realidad? (Cosmología de cuerdas)



# Gravedad Cuántica de Lazos





## CUANTIZACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

- Geometrodinámica: cuantizar métrica  $g_{\mu\nu} \Rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$
- LQG: reformular ecuaciones de Einstein:

$$G = T$$

- y luego cuantizarlas

## CUANTIZACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

- Geometrodinámica: cuantizar métrica  $g_{\mu\nu} \Rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$
- LQG: reformular ecuaciones de Einstein:

$$G = U$$

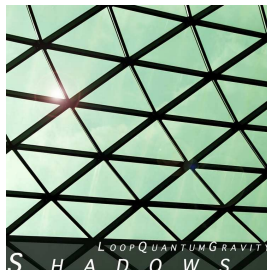
- y luego cuantizarlas

## CUANTIZACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

- Geometrodinámica: cuantizar métrica  $g_{\mu\nu} \Rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$
- LQG: reformular ecuaciones de Einstein:

$$G = T$$

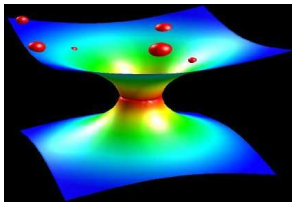
(variables de Ashtekar-Barbero)



- y luego cuantizarlas

## Logros

- Geometría cuantizada (operadores de área y volumen)
- Cuantización exacta (no-perturbativa)
- No hay espaciotiempo pre-definido (“invariante bajo difeomorfismos”)
- Resolución de singularidades cosmológicas

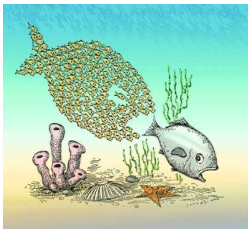


## Problemas

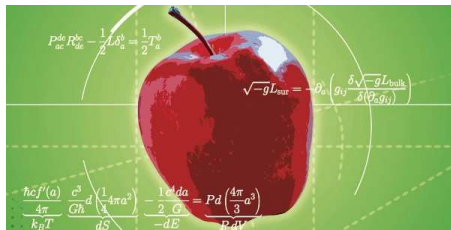
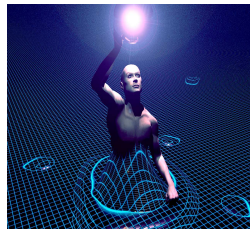
- ¿Cómo acoplar materia?
- ¿Evolución/dinámica?
- ¿Límite semiclásico?
- ¿Predicción? (Cosmología Cuántica de Lazos)

## Perspectiva

- Cuantizar la RG de forma consistente es una tarea altamente no-trivial
- Consistencia no puede ser la única guía
- Importancia de contacto con mundo observacional



# Gravedad emergente



- Teoría cuántica aplicada a objetos **individuales**  
→ física de partículas
- Teoría cuántica aplicada a objetos **colectivos**  
→ materia condensada

Efectos colectivos a T baja (superconductividad, superfluidéz)

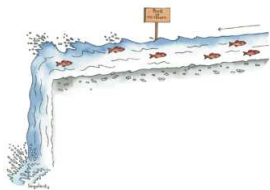
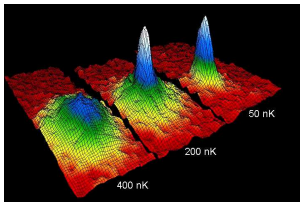
⇒ **ESPACIOTIEMPOS CURVOS EFECTIVOS**

- Teoría cuántica aplicada a objetos **individuales**  
→ física de partículas
- Teoría cuántica aplicada a objetos **colectivos**  
→ materia condensada

Efectos colectivos a T baja (superconductividad, superfluidez)

⇒ **ESPACIOTIEMPOS CURVOS EFECTIVOS**

- Excitaciones (fonones, elementos no condensados) se mueven como si vieran una geometría curva
- **CURVATURA** determinada por parte condensada





Gravedad = fenómeno emergente de baja temperatura?

Gravedad = fenómeno emergente de baja temperatura?

### Logros/ventajas

- Posibilidad de hacer **EXPERIMENTOS** de laboratorio  
→ radiación de Hawking “análoga” en CBE
- Se basa en física conocida y comprobada

Gravedad = fenómeno emergente de baja temperatura?

## Logros/ventajas

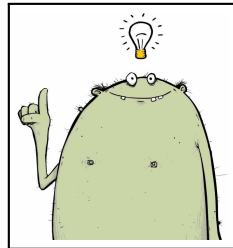
- Posibilidad de hacer **EXPERIMENTOS** de laboratorio  
→ radiación de Hawking “análoga” en CBE
- Se basa en física conocida y comprobada

## Problemas

- No es una teoría, más bien una idea
- Analogía  $\Rightarrow$  **predicciones concretas**
- Dinámica de la gravedad: ¿Ecuaciones de Einstein ?



# Conclusiones



- Datos directos que permitan verificar / descartar una teoría u otra? (muy) poco probable
- Datos indirectos que nos proporcionen pistas? No tan descabellado

### Observaciones futuras

- Ondas gravitatorias de agujeros negros
- Fondo cósmico de microondas (universo primitivo)
- Violaciones de la simetría Lorentz (variaciones de  $c$ )?

- Datos directos que permitan verificar / descartar una teoría u otra? (muy) poco probable
- Datos indirectos que nos proporcionen pistas? No tan descabellado

### Observaciones futuras

- Ondas gravitatorias de agujeros negros
- Fondo cósmico de microondas (universo primitivo)
- Violaciones de la simetría Lorentz (variaciones de  $c$ )?



LA NATURALEZA SIEMPRE TIENE LA PALABRA FINAL

“LA GRAVEDAD CUÁNTICA ES UN MUNDO EXTRAÑO CUYAS  
CARACTERÍSTICAS SOLO EMPEZAMOS A ENTREVER” (R. WOODARD)

“LA GRAVEDAD CUÁNTICA ES UN MUNDO EXTRAÑO CUYAS CARACTERÍSTICAS SOLO EMPEZAMOS A ENTREVER” (R. WOODARD)



“Después de un estudio profundo de la gravedad cuántica, he llegado a la conclusión



“LA GRAVEDAD CUÁNTICA ES UN MUNDO EXTRAÑO CUYAS CARACTERÍSTICAS SOLO EMPEZAMOS A ENTREVER” (R. WOODARD)



“Después de un estudio profundo de la gravedad cuántica, he llegado a la conclusión que vivimos en un cuenco de agua”