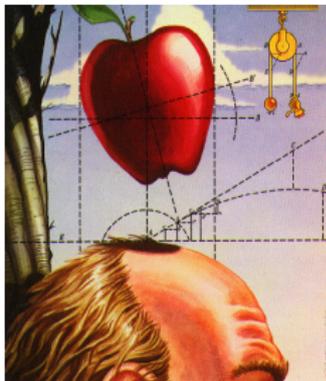


Perspectivas de gravedad cuántica



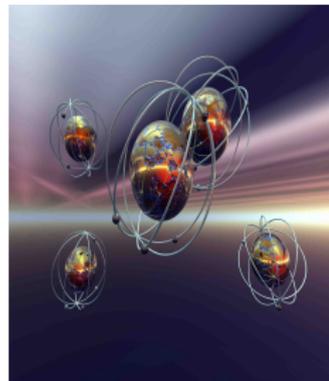
IEM

Instituto de Estructura de la Materia



CSIC

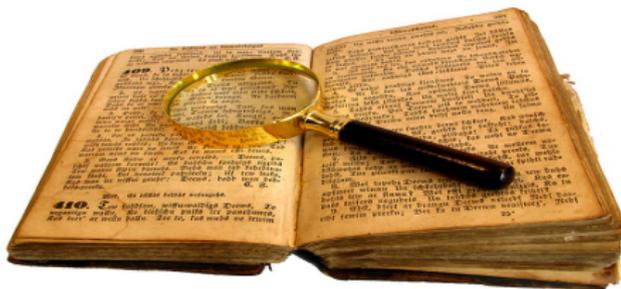
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



Gil Jannes



Introducción



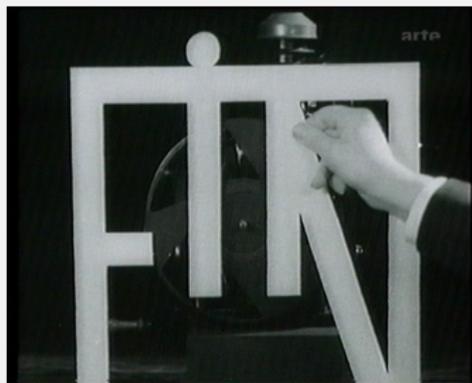
¿Qué es la gravedad cuántica?

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



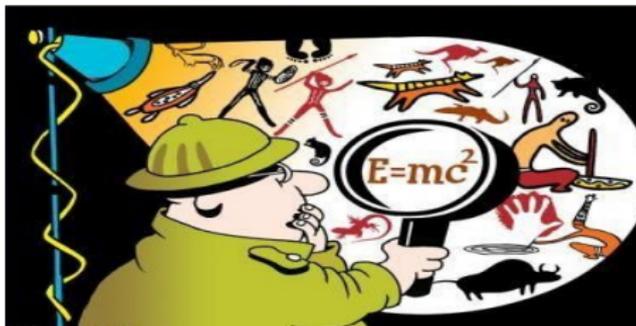
Ingredientes

- 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:

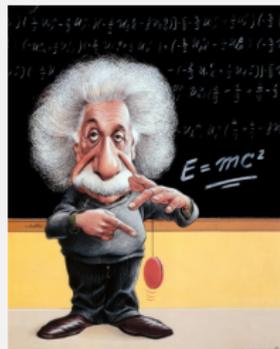
- Relatividad de la simultaneidad
- Dilación temporal
- Contracción de Lorentz-FitzGerald
- Paradoja de los gemelos
- ...

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:

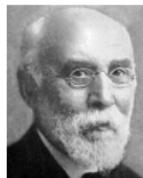
- Relatividad de la simultaneidad
- Dilación temporal
- Contracción de Lorentz-FitzGerald
- Paradoja de los gemelos
- ...
- Equivalencia masa-energía: $E = mc^2$



- Transformación de Lorentz:

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt)$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \quad \text{factor de Lorentz}$$



- Transformación de Lorentz:

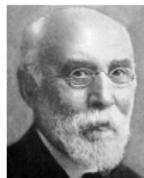
$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt)$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \quad \text{factor de Lorentz}$$

- Elemento de línea invariante:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \equiv \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\eta_{\mu\nu} = [-c^2, 1, 1, 1] \quad \text{métrica de Minkowski}$$



- Transformación de Lorentz:

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt)$$

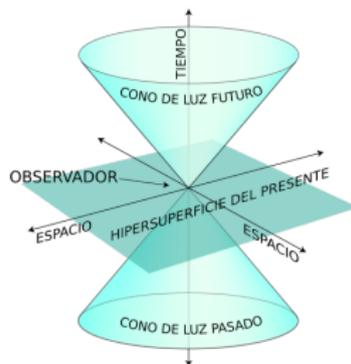
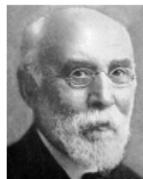
$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} \quad \text{factor de Lorentz}$$

- Elemento de línea invariante:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \equiv \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

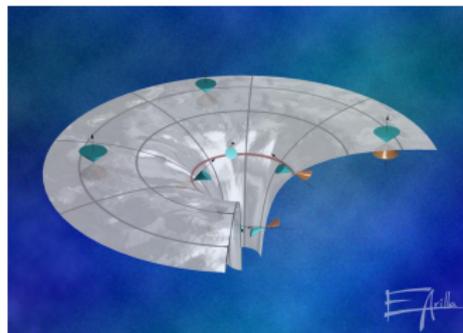
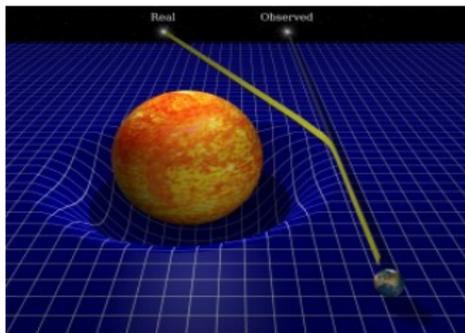
$$\eta_{\mu\nu} = [-c^2, 1, 1, 1] \quad \text{métrica de Minkowski}$$

ESPACIO y TIEMPO: relativos \rightarrow ESPACIO-TIEMPO: absoluto



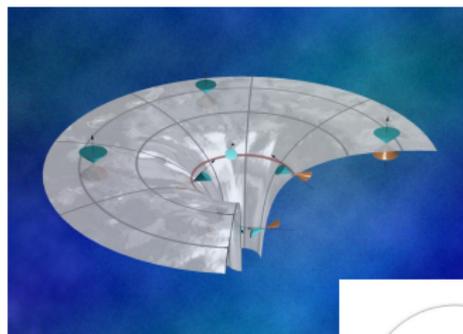
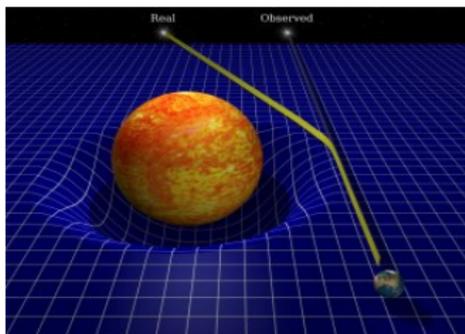
- Relatividad especial: **espaciotiempo plano**
- RELATIVIDAD GENERAL: **ESPACIOTIEMPO CURVO**

“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

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

métrica $g_{\mu\nu}$

- define cómo medir distancias espaciotemporales
- $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
- p.ej. espaciotiempo plano:
 - $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} \equiv [-c^2, 1, 1, 1]$
 - $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$

RELATIVIDAD GENERAL = TEORÍA GEOMÉTRICA DINÁMICA DE LA GRAVEDAD

$$E = \hbar\omega$$

(\hbar =constante de Planck, ω =frecuencia)

ENERGÍA (MATERIA) VIENE EN PAQUETES DISCRETOS (CUÁNTICOS)

$$E = \hbar\omega$$

(\hbar =constante de Planck, ω =frecuencia)

ENERGÍA (MATERIA) VIENE EN PAQUETES DISCRETOS (CUÁNTICOS)

Consecuencias:

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

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

$$E = \hbar\omega$$

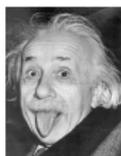
(\hbar =constante de Planck, ω =frecuencia)

ENERGÍA (MATERIA) VIENE EN PAQUETES DISCRETOS (CUÁNTICOS)

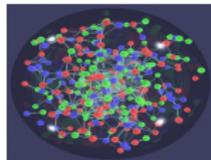
Consecuencias:

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

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



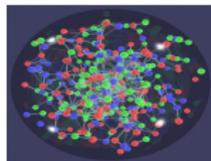
Materia consiste de partículas



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*

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*

Brookhaven

Cern

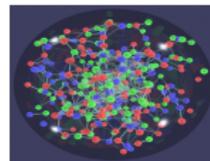
Desy

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**

Brookhaven



Cern



Desy



Fermilab



Kek



Slac



Three Generations of Matter (Fermions)

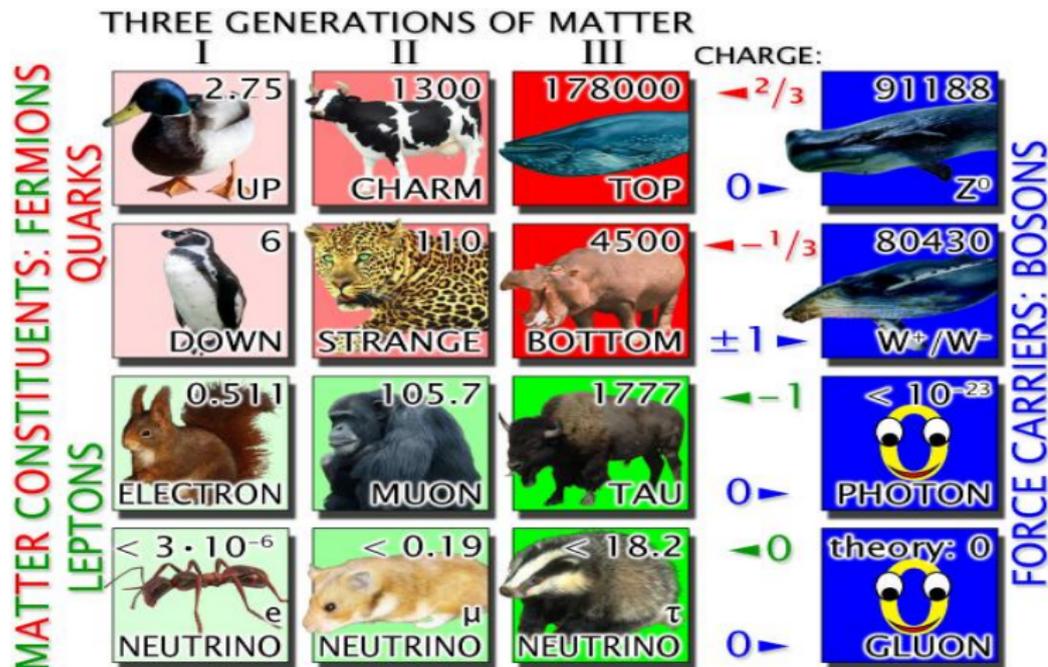
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z⁰ weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W[±] 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 →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z⁰ weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W[±] weak force
Leptons				Bosons (Forces)

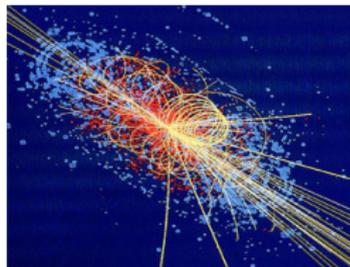
• ¿ Bosón de Higgs ? (LHC)

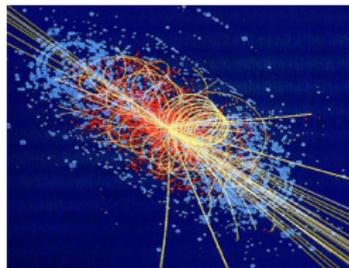
• ¿ ¿ ¿ Gravitón ? ? ?



ALL MASSES IN MEV;
ANIMAL MASSES
SCALE WITH
PARTICLE MASSES

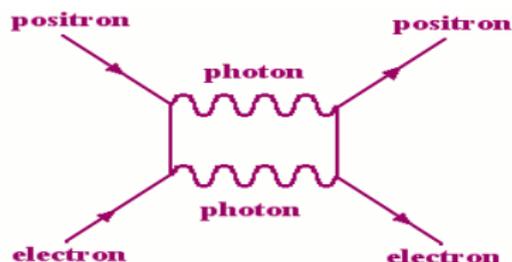
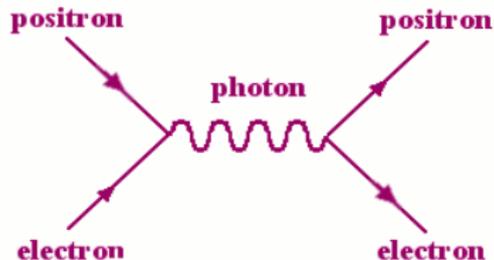
The Standard Model
fundamental particle zoo





DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Método perturbativo



RENORMALIZACIÓN

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

2009: ¿ ¿ ¿ GRAVEDAD CUÁNTICA ? ? ?

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

2009: ¿ ¿ ¿ 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

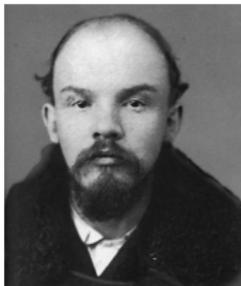
(LHC: 10^{12} eV, protón: 10^{-15} m)

- 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^{12} eV, protón: 10^{-15} 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

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



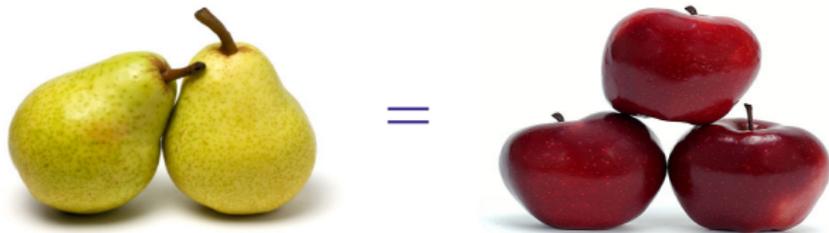
=



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

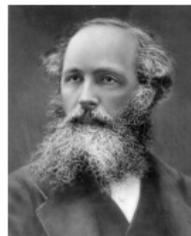


5 Motivación “estética”

4 Motivación histórica: unificación como motor de progreso

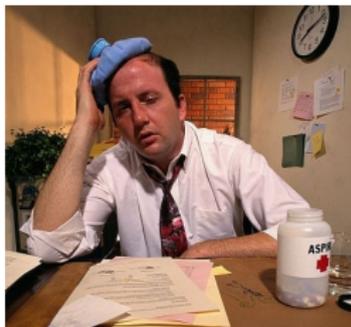
P.ej. Electricidad + magnetismo

⇒ Electromagnetismo

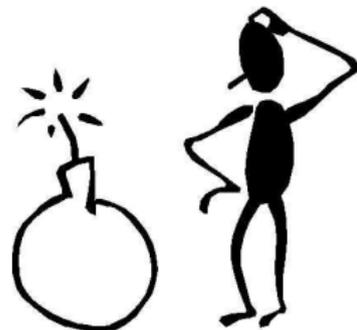


5 Motivación "estética"



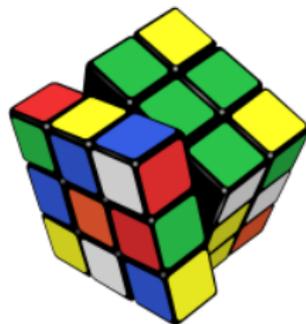


Problemas



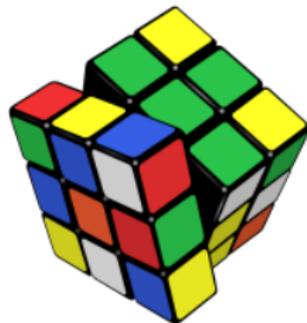
TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

- 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”)

- Escala de gravedad cuántica (“de Planck”): 10^{29} eV
- LHC: 10^{12} eV

- Escala de gravedad cuántica (“de Planck”): 10^{29} eV
- LHC: 10^{12} eV



- Se necesitaría un acelerador del tamaño del sistema solar

- Escala de gravedad cuántica (“de Planck”): 10^{29} eV
- LHC: 10^{12} eV



- Se necesitaría un acelerador del tamaño del sistema solar

OBSERVACIONES COSMOLÓGICAS

- indirectas
- 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

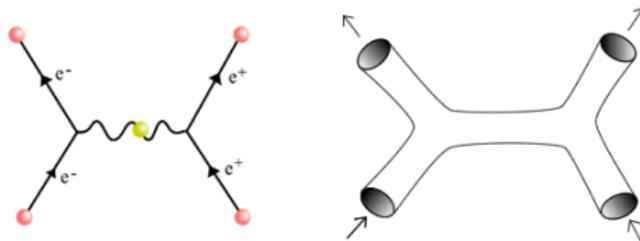
$$G = T$$



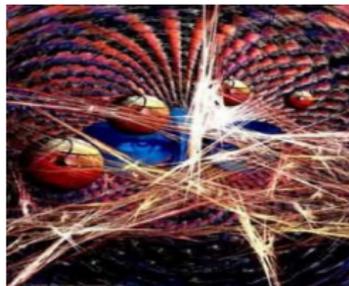
Enfoques



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



- Partículas \longleftarrow modos de vibración de cuerdas

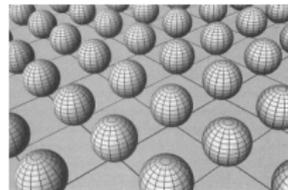
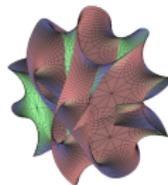
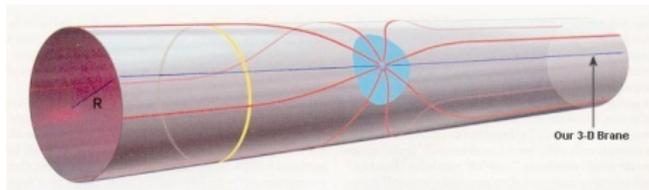


Logros

- 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
⇒ ¿ Teoría-M ?
- Entropía de agujeros negros extremales

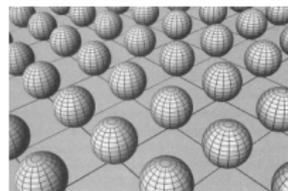
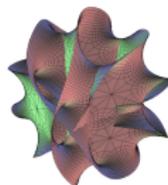
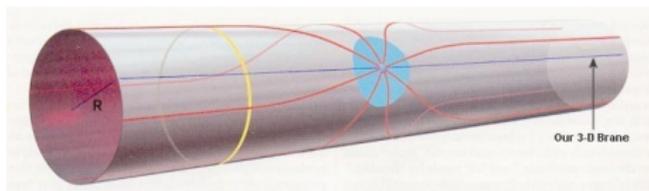
Problemas

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

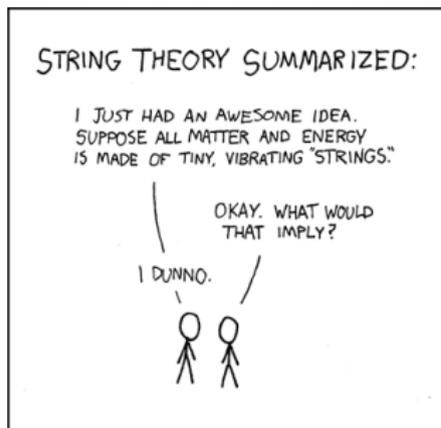


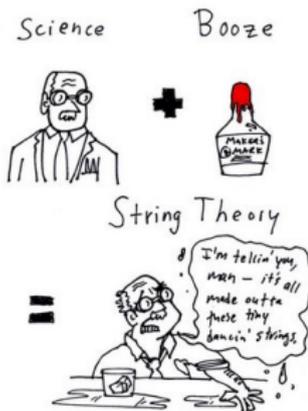
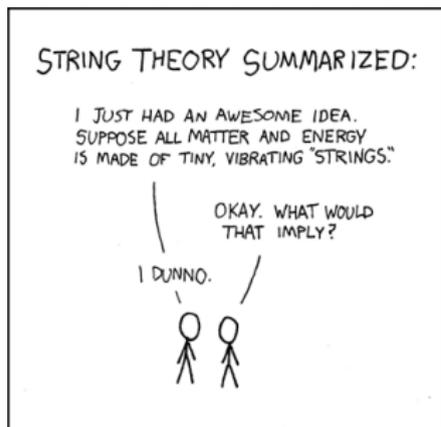
Problemas

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









CUANTIZACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

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

$$G = T$$

CUANTIZACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

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

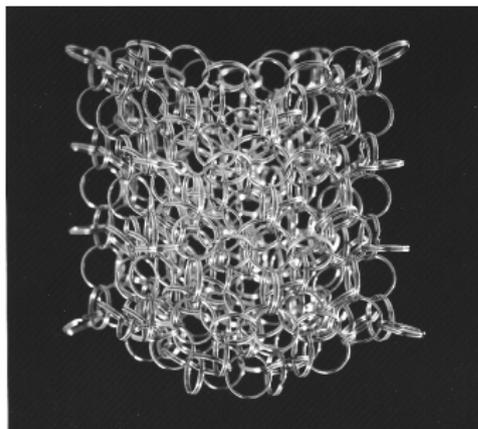
$$G = U$$

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)

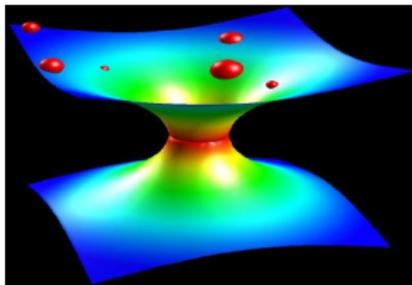


Logros

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

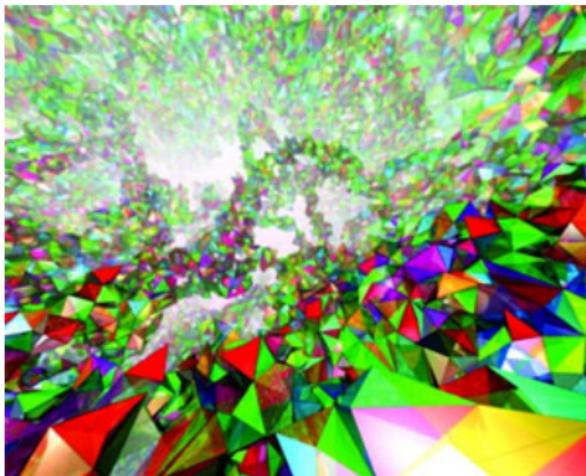
Logros

- **Geometría cuantizada** (operadores de área y volumen)
- Cuantización exacta (no-perturbativa)
- No hay espaciotiempo pre-definido ("invariante bajo difeomorfismos")
- **Resolución de singularidades cosmológicas**
- Entropía de agujeros negros (módulo parámetro)



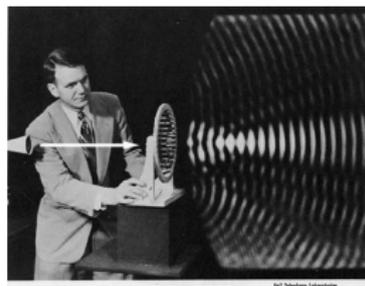
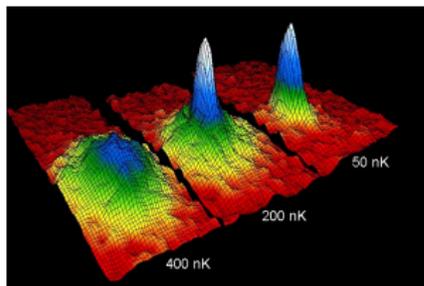
Problemas

- ¿Cómo acoplar materia?
- ¿Evolución/dinámica?
- ¿Límite semiclásico?
- ¿Predicción?



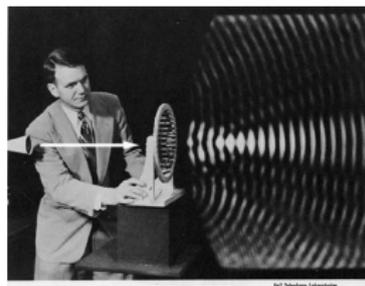
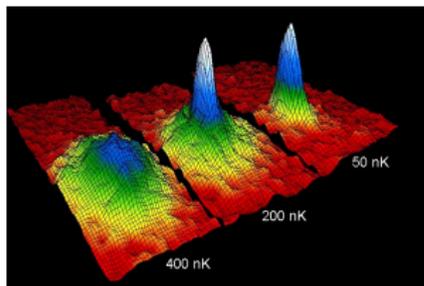
Efectos colectivos a T baja en sistemas de MATERIA CONDENSADA

⇒ ESPACIOTIEMPOS CURVOS EFECTIVOS



Efectos colectivos a T baja en sistemas de MATERIA CONDENSADA

⇒ ESPACIOTIEMPOS CURVOS EFECTIVOS

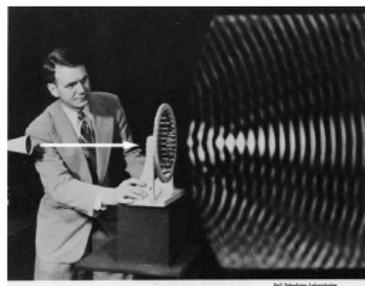
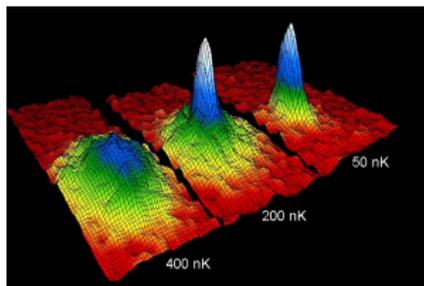
FONONES: geometría \Leftarrow velocidad del sonido

- Transformaciones de Lorentz [$c_{\text{luz}} \Rightarrow c_{\text{sonido}}$]



Efectos colectivos a T baja en sistemas de MATERIA CONDENSADA

⇒ ESPACIOTIEMPOS CURVOS EFECTIVOS

FONONES: geometría \Leftarrow velocidad del sonido

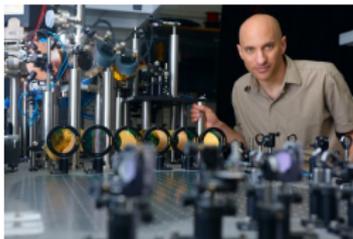
- Transformaciones de Lorentz [$c_{\text{luz}} \Rightarrow c_{\text{sonido}}$]

- CURVATURA depende del comportamiento colectivo del sistema



Direcciones:

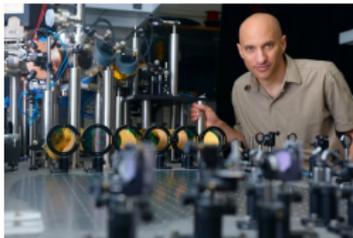
- Analogía útil (y punto)



- $T_{99\%(\text{universo})} \ll \text{escala de Planck}$
 ¿ GRAVEDAD como fenómeno EMERGENTE a baja energía ?

Direcciones:

- Analogía útil (y punto)



- $T_{99\%(\text{universo})} \ll$ escala de Planck
¿ GRAVEDAD como fenómeno EMERGENTE a baja energía ?

Logros/ventajas

- Posibilidad de hacer EXPERIMENTOS de laboratorio (a.n. sónico)
- Se basa en física conocida y comprobada
- Hace PREDICCIÓN: c_{luz} variable a energía alta

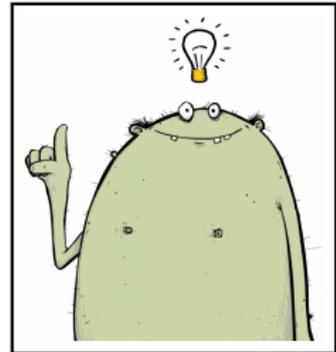
Problemas

- “ c_{luz} variable”: pero ¿a qué energía? ($\gg E_{\text{Planck}}$)
- Analogía \Rightarrow predicciones concretas
- ¿Ecuaciones de Einstein ?
- Campo inmaduro
- Espaciotiempo de fondo pre-definido [teorías del **éter**]





Conclusiones



“QUANTUM GRAVITY IS A STRANGE LAND WHOSE FEATURES HAVE ONLY STARTED TO BE GLIMPSED” (R. WOODARD)

“QUANTUM GRAVITY IS A STRANGE LAND WHOSE FEATURES HAVE ONLY STARTED TO BE GLIMPSED” (R. WOODARD)



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