



La Física del Vacío



Bert Janssen

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos - UGR

Plan de la Conferencia

1. Vacío en física clásica

- Horror vacui
- Vacíos artificiales
- Ondas electromagnéticas & aeter luminífero

Plan de la Conferencia

1. Vacío en física clásica

- Horror vacui
- Vacíos artificiales
- Ondas electromagnéticas & aeter luminífero

2. Mecánica Cuántica y Teoría Cúantica de Campos

- Energía del punto cero
- Fluctuaciones cuánticas & vacío cuántico
- Efectos del vacío: polarización del vacío, efecto Schwinger, efecto Casimir

Plan de la Conferencia

1. Vacío en física clásica

- Horror vacui
- Vacíos artificiales
- Ondas electromagnéticas & aeter luminífero

2. Mecánica Cuántica y Teoría Cuántica de Campos

- Energía del punto cero
- Fluctuaciones cuánticas & vacío cuántico
- Efectos del vacío: polarización del vacío, efecto Schwinger, efecto Casimir

3. Relatividad General y Teoría Cuántica de Campos en espacios curvos

- Soluciones del vacío: agujeros negros & ondas gravitacionales
- Radiación de Hawking y efecto Unruh
- Constante cosmológica

Plan de la Conferencia

1. Vacío en física clásica

- Horror vacui
- Vacíos artificiales
- Ondas electromagnéticas & aeter luminífero

2. Mecánica Cuántica y Teoría Cuántica de Campos

- Energía del punto cero
- Fluctuaciones cuánticas & vacío cuántico
- Efectos del vacío: polarización del vacío, efecto Schwinger, efecto Casimir

3. Relatividad General y Teoría Cuántica de Campos en espacios curvos

- Soluciones del vacío: agujeros negros & ondas gravitacionales
- Radiación de Hawking y efecto Unruh
- Constante cosmológica

4. Defectos topológicos y rotura espontánea de simetría

Interrumpidme cuando queráis

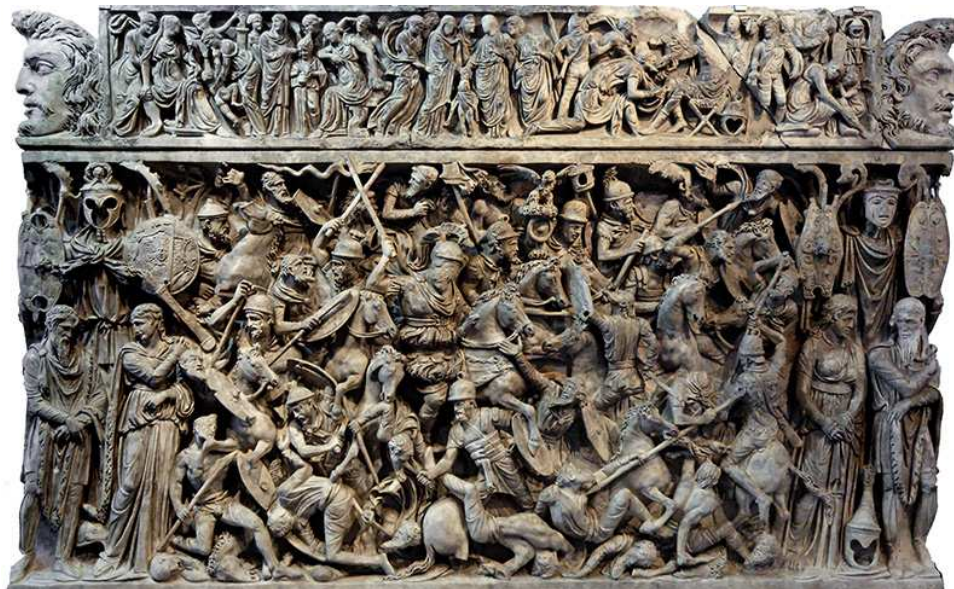
Las preguntas tontas no existen.
Sólo existen las respuestas tontas.



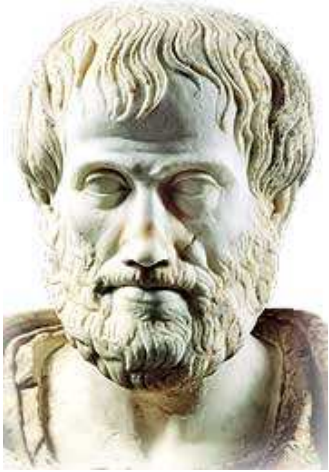
1. Vacío en física clásica



1.1 Horror Vacui



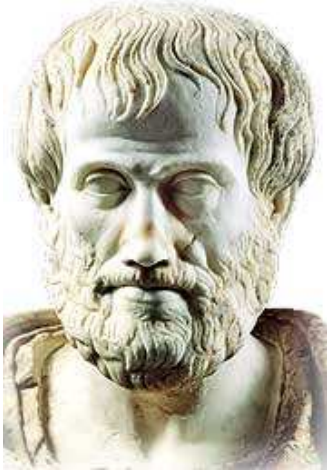
Aristóteles: “Natura abhorret vacuum.”



El vacío no existe porque

- la nada no existe
- el vacío no tiene características
- material adyacente llenaría el vacío
- no hay movimiento en el vacío
- colocando un objeto en vacío, ¿dónde iría ese vacío?

Aristóteles: “Natura abhorret vacuum.”



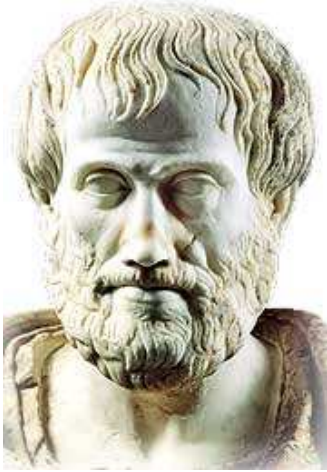
El vacío no existe porque

- la nada no existe
- el vacío no tiene características
- material adyacente llenaría el vacío
- no hay movimiento en el vacío
- colocando un objeto en vacío, ¿dónde iría ese vacío?



Galilei: No se puede bombear agua más de 10 metros de altura

Aristóteles: “Natura abhorret vacuum.”



El vacío no existe porque

- la nada no existe
- el vacío no tiene características
- material adyacente llenaría el vacío
- no hay movimiento en el vacío
- colocando un objeto en vacío, ¿dónde iría ese vacío?



Galilei: No se puede bombear agua más de 10 metros de altura

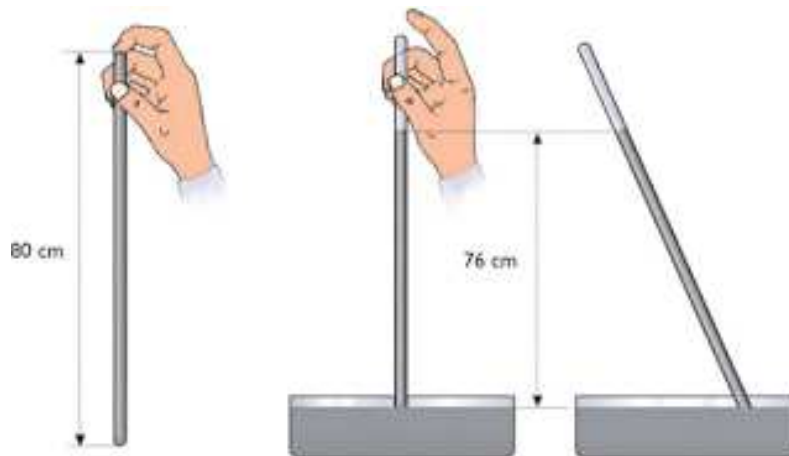


Descartes: Plenismo atómico

- bomba limita altura de columna de agua, no vacío
- volumen ocupado por cuerpo = volumen de cuerpo
→ no existe espacio sin materia

1.2 Creadores del vacío

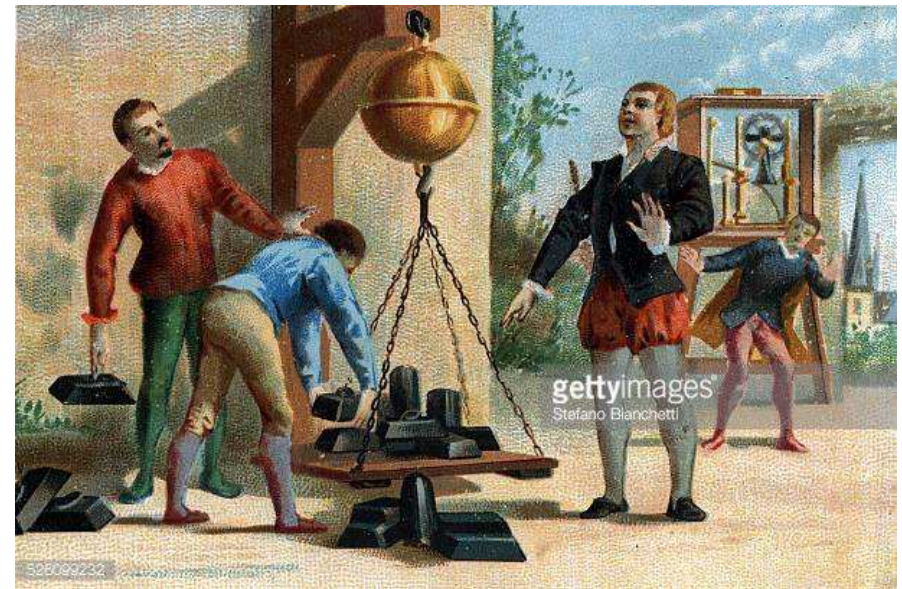
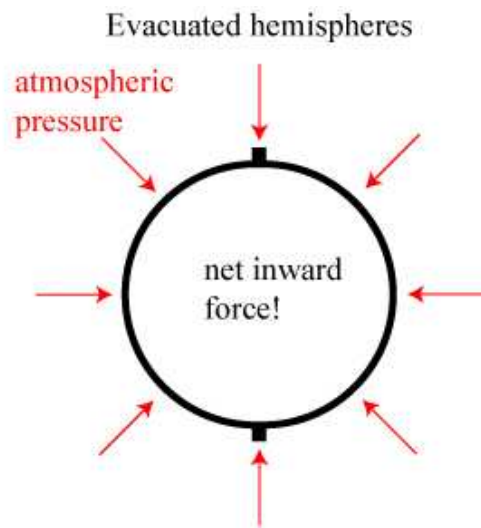
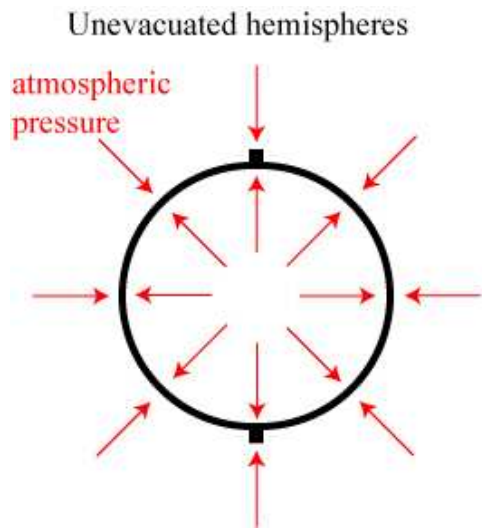
Torricelli: primer identificador del vacío(1643)



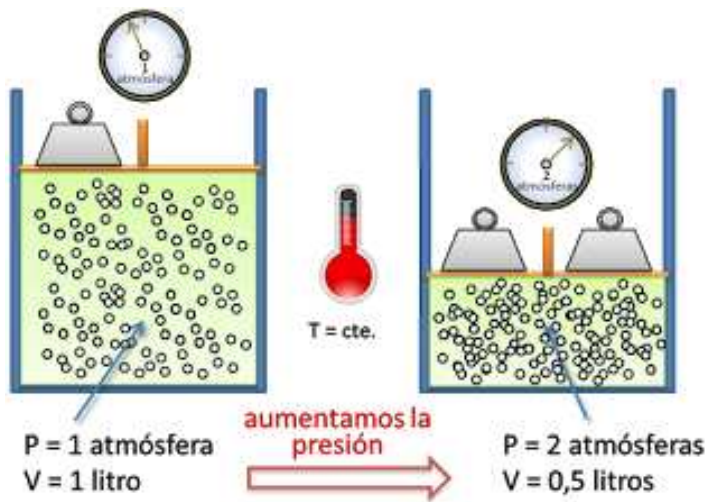
Pascal demuestra que es debido a presión atmosférica (Puy de Dôme, 1648)

—> demostración de **existencia de vacío!**

von Guericke: bomba de vacío & hemisferios de Magdeburgo (1656)



Boyle: bomba de vacío mejorada & leyes de gases (1659)

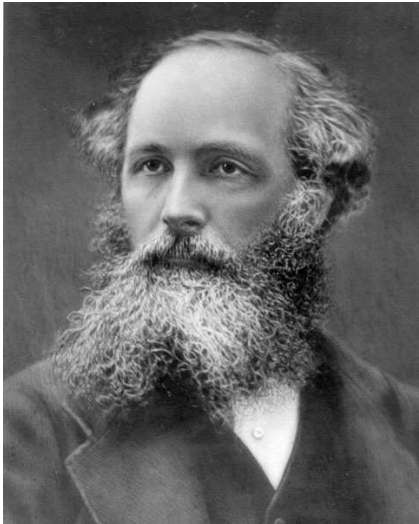


- Experimentos sistemáticos
 - Ley de Boyle(-Mariotte): $P_1 V_1 = P_2 V_2$
 - Fundador de la Royal Society
- > desarrollo del método científico
- > primer ladrillo en modelo del átomo



Experimento con un pájaro en una bomba de aire (J.Wright, 1768)

1.3 Las ondas electromagnéticas y el aether



Maxwell (1865):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

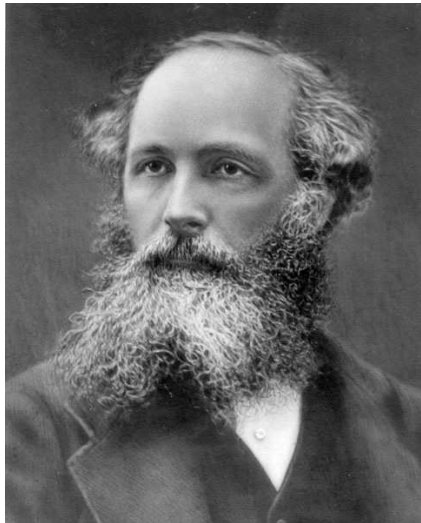
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}$$

donde $c = 300\,000 \text{ km/s} = \text{velocidad de la luz}$

1.3 Las ondas electromagnéticas y el aether



Maxwell (1865):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

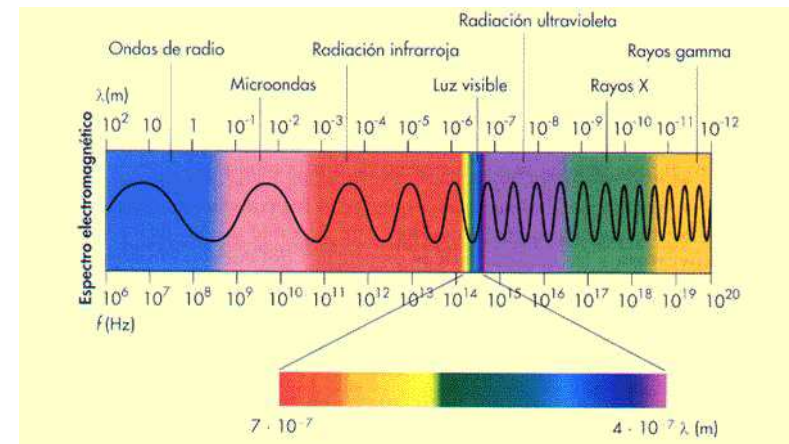
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}$$

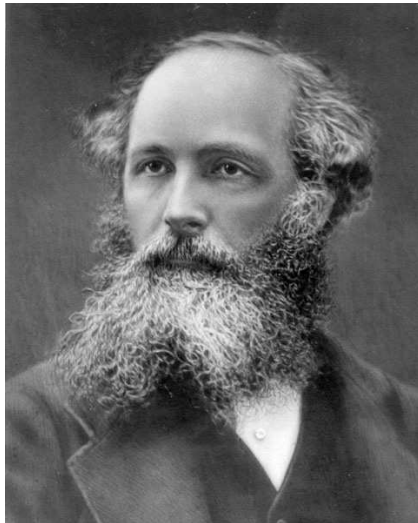
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}$$

donde $c = 300\,000 \text{ km/s} = \text{velocidad de la luz}$

Luz = ondas electromagnéticas
= paquetes de campo electromagnético
que se mueven por el espacio
a $300\,000 \text{ km/s}$



1.3 Las ondas electromagnéticas y el aether



Maxwell (1865):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

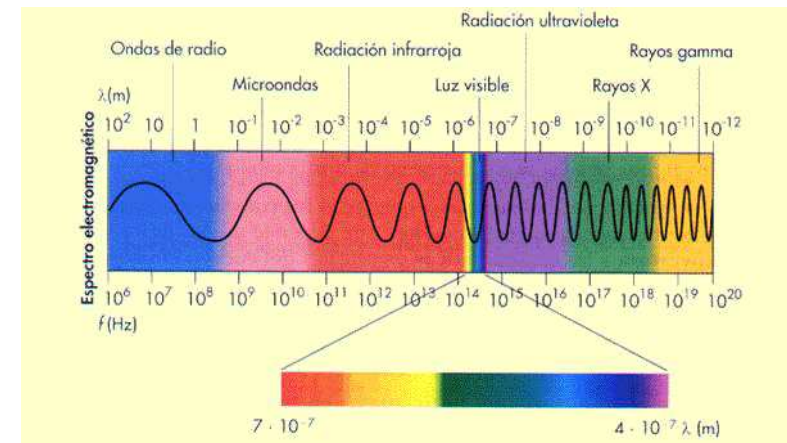
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}$$

donde $c = 300\,000 \text{ km/s} = \text{velocidad de la luz}$

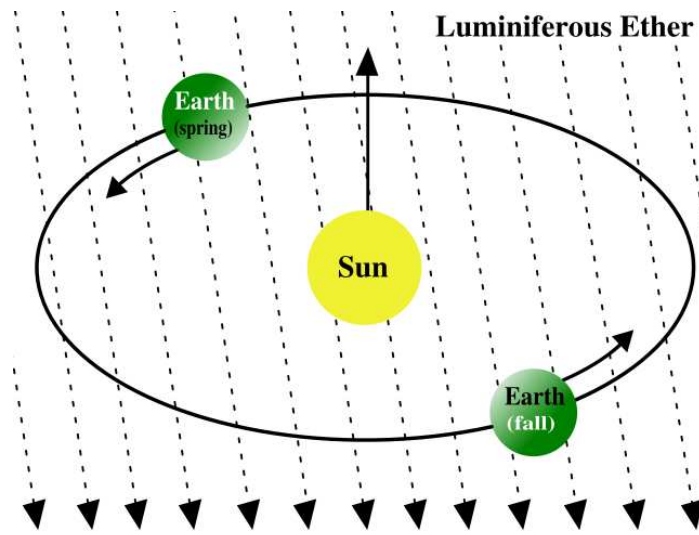
Luz = ondas electromagnéticas
= paquetes de campo electromagnético
que se mueven por el espacio
a $300\,000 \text{ km/s}$



→ ¿Cuál es el medio en que se propagan las ondas?

Respuesta del Siglo XIX: “en el éter luminífero...”

Éter = medio material en que se propagan las ondas electromagnéticas

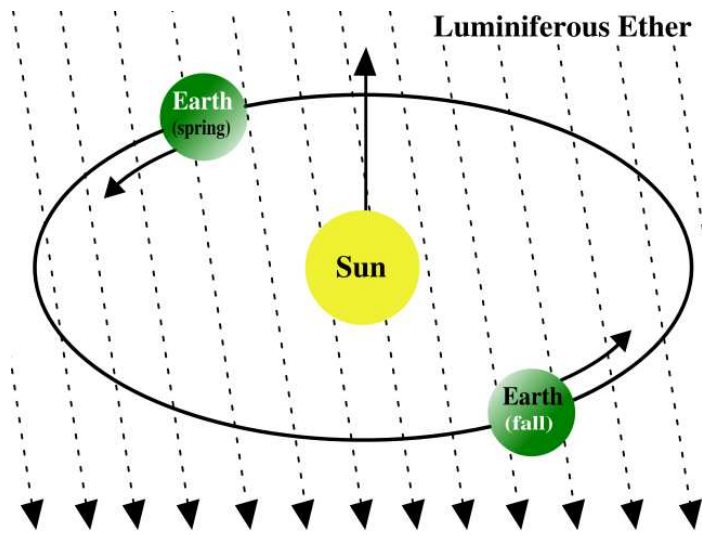


Universo lleno de éter? Fin del vacío?

- omnipresente y uniformemente distribuido
- muy ligero: no hay rozamiento con objetos materiales
- muy denso y muy rígido: suportar velocidades y frecuencias muy altas

Respuesta del Siglo XIX: “en el éter luminífero...”

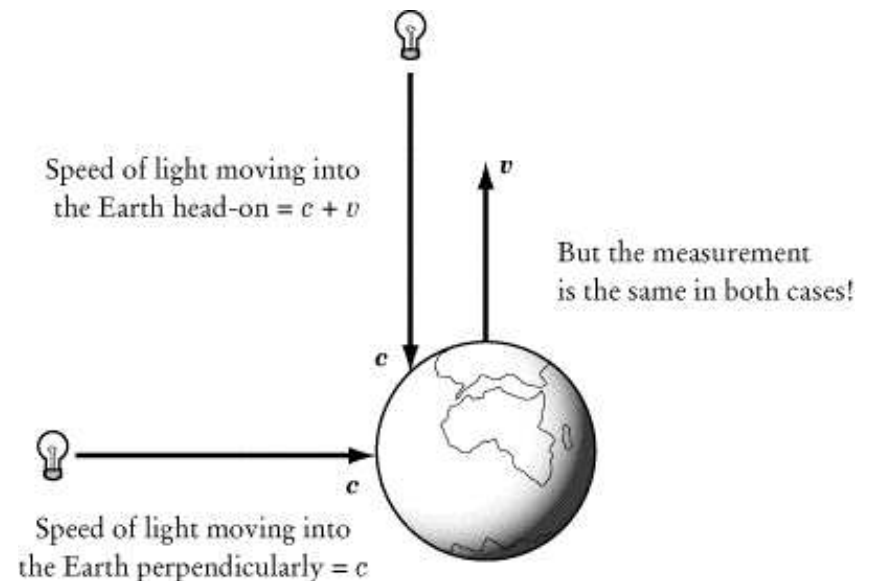
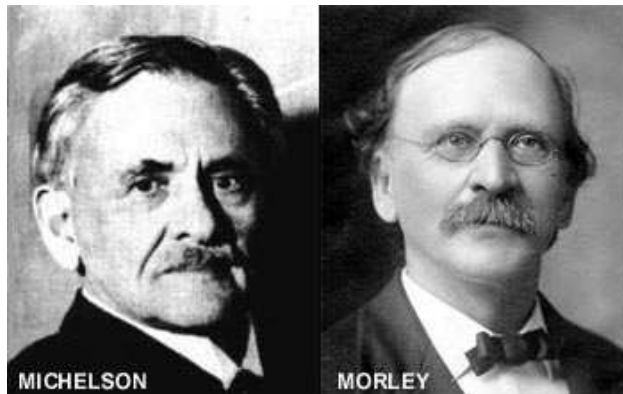
Éter = medio material en que se propagan las ondas electromagnéticas



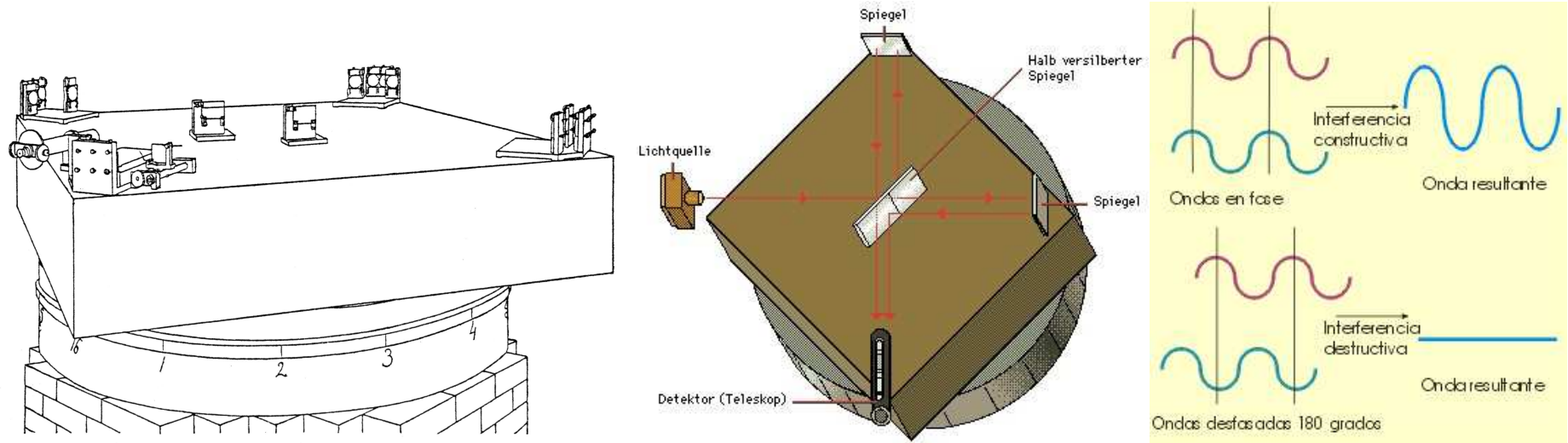
Universo lleno de éter? Fin del vacío?

- omnipresente y uniformemente distribuido
- muy ligero: no hay rozamiento con objetos materiales
- muy denso y muy rígido: suportar velocidades y frecuencias muy altas

Detectar movimiento con respecto al éter?
Experimento de Michelson-Morley (1887):

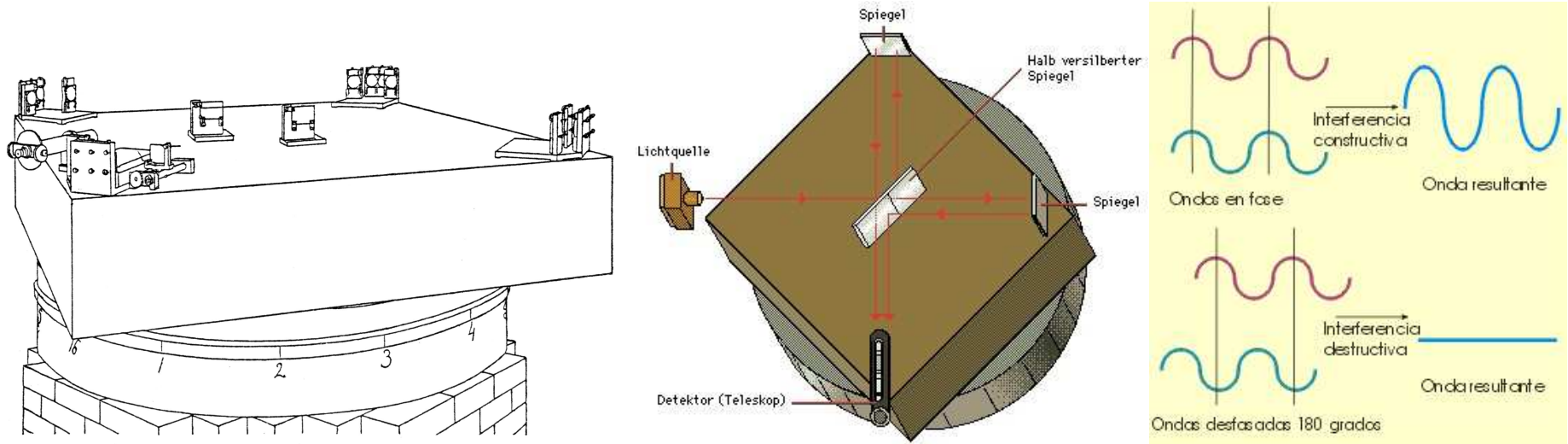


El experimento de Michelson & Morley fracasado:



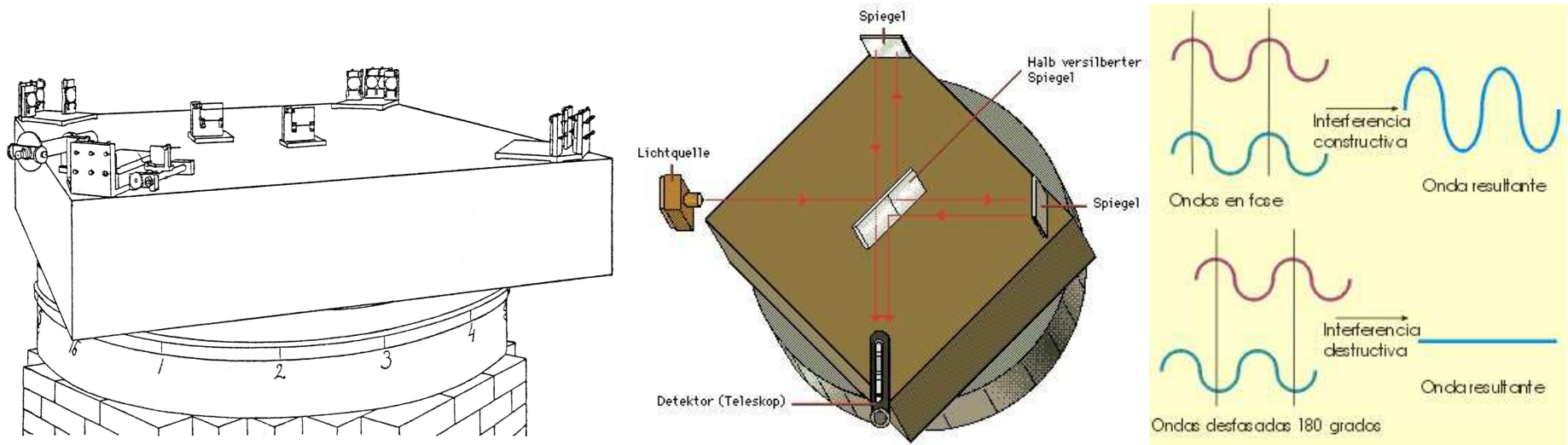
- Interferómetro con luz visible: patrón de interferencias

El experimento de Michelson & Morley fracasado:



- Interferómetro con luz visible: patrón de interferencias
- No se obtuvo **ningún resultado!** $\rightarrow c + v = c?$
- Michelson recibió el Premio Nobel en 1907 por el interferómetro

El experimento de Michelson & Morley fracasado:



- Interferómetro con luz visible: patrón de interferencias
- No se obtuvo **ningún resultado!** $\rightarrow c + v = c?$
- Michelson recibió el **Premio Nobel** en 1907 por el interferómetro
- Relatividad Especial resuelve problema: **éter no existe!**
- Ondas electromagnéticas = paquete de campo electromagnético
 \rightarrow **No necesitan medio** para propagarse

2. Mecánica Cuántica y Teoría cuántica de Campos



2.1 Oscilador armónico en Mecánica Cuántica

Mecánica newtoniana = movimiento de masas macroscópicas

- piedras, coches, planetas, ...
- intuitiva, calculable, entendible, ...

2.1 Oscilador armónico en Mecánica Cuántica

Mecánica newtoniana = movimiento de masas macroscópicas

- piedras, coches, planetas, ...
- intuitiva, calculable, entendible, ...

Mecánica cuántica = comportamiento de partículas microscópicas

- moléculas, átomos, electrones, ...
- cuantización de medidas, relaciones de incertidumbre, efecto túnel, superposición de estados, interpretación probabilística, ...

2.1 Oscilador armónico en Mecánica Cuántica

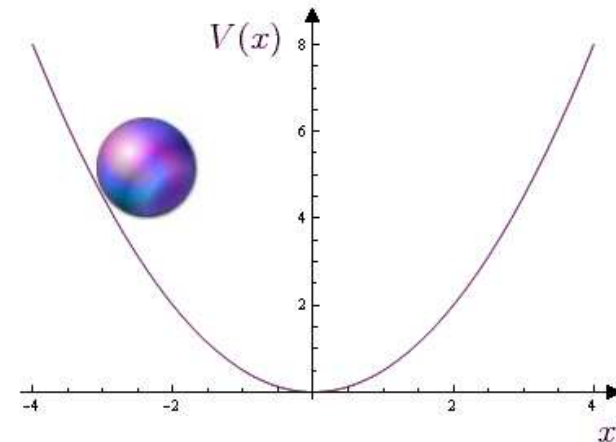
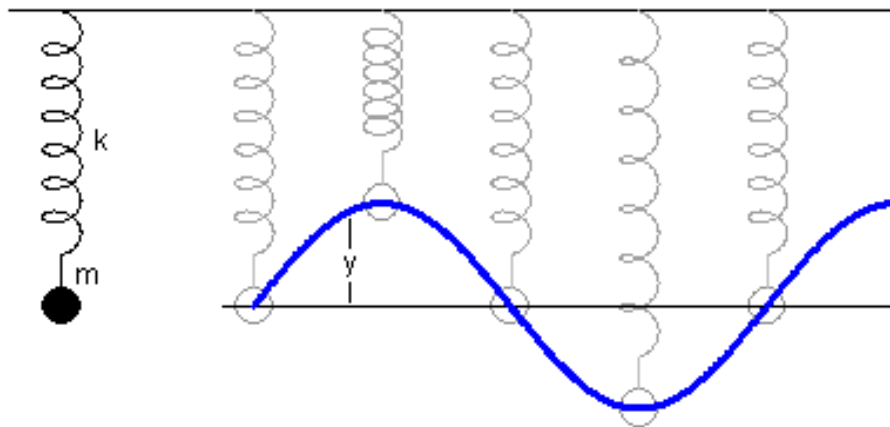
Mecánica newtoniana = movimiento de masas macroscópicas

- piedras, coches, planetas, ...
- intuitiva, calculable, entendible, ...

Mecánica cuántica = comportamiento de partículas microscópicas

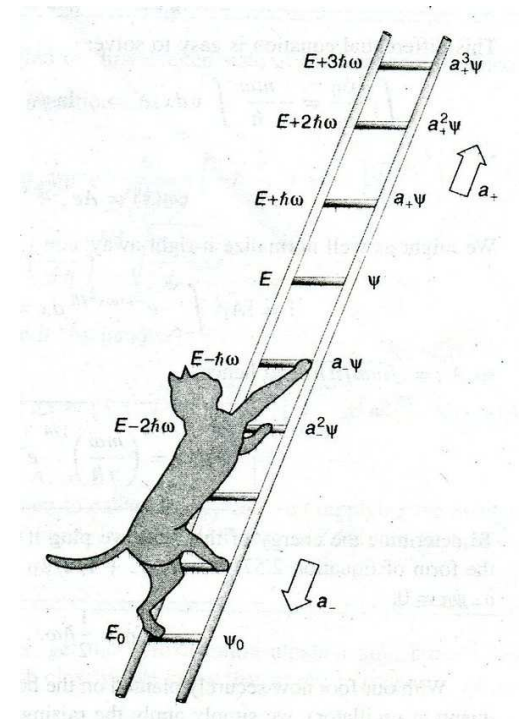
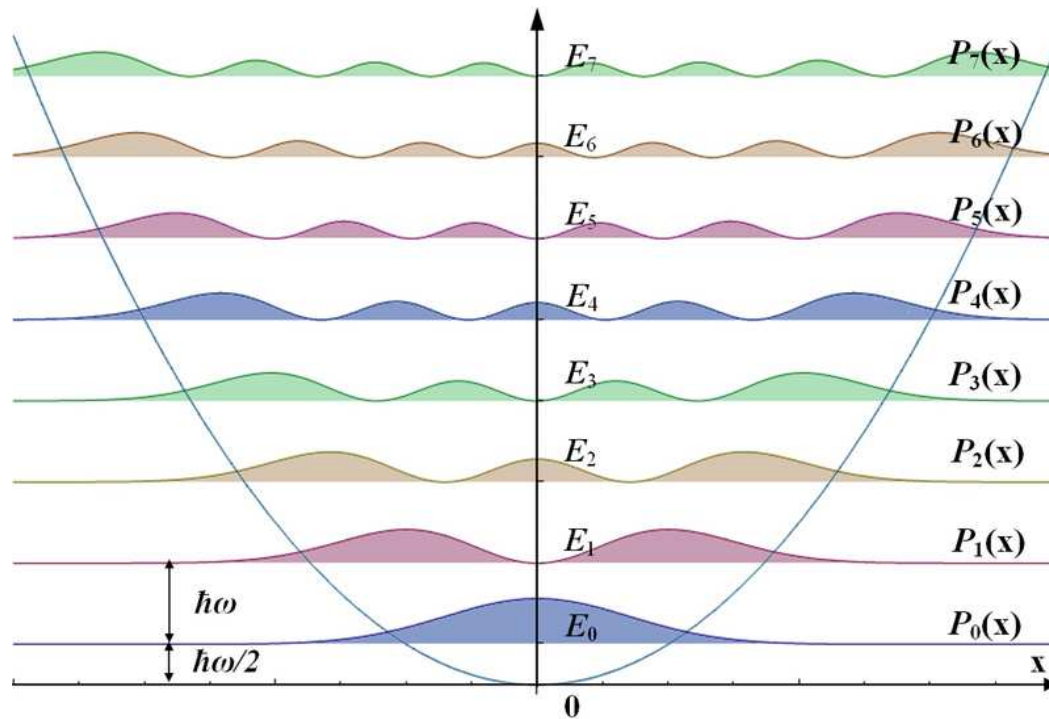
- moléculas, átomos, electrones, ...
- cuantización de medidas, relaciones de incertidumbre, efecto túnel, superposición de estados, interpretación probabilística, ...

Oscilador armónico clásico: $V(x) = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$



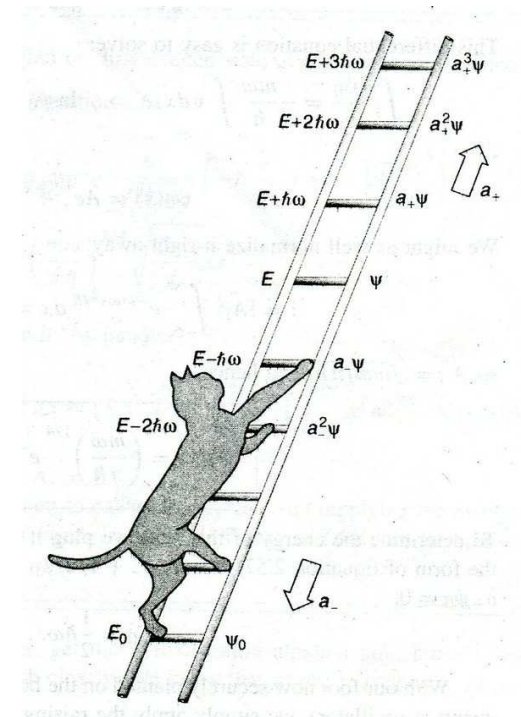
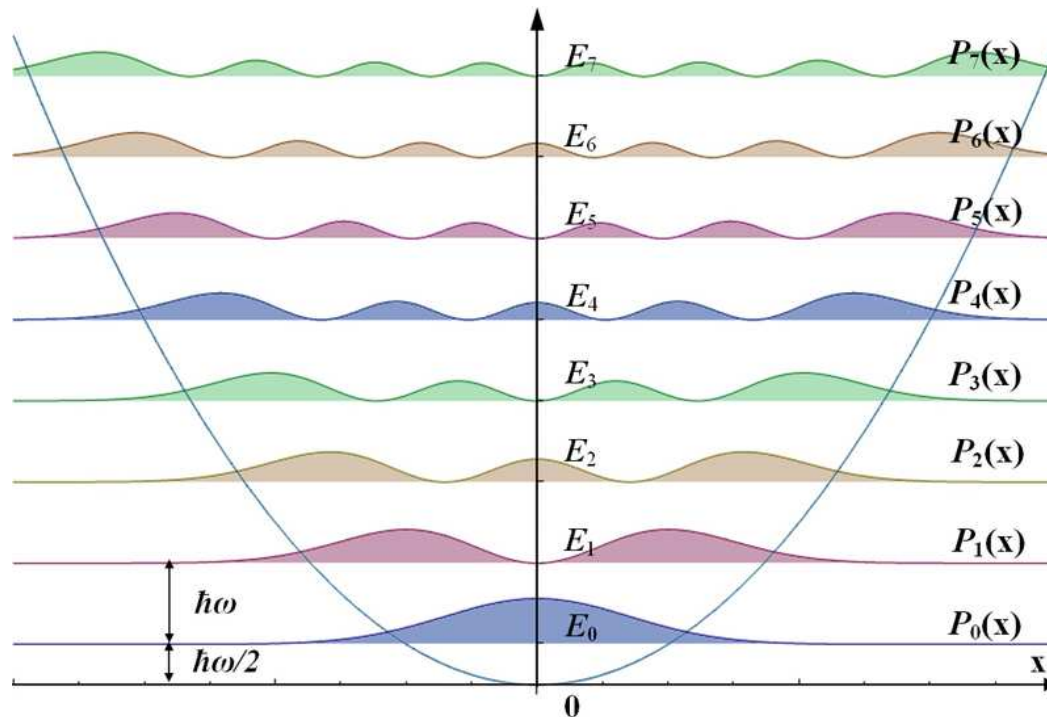
$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad E = \frac{1}{2} m v^2 + V(x) = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

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



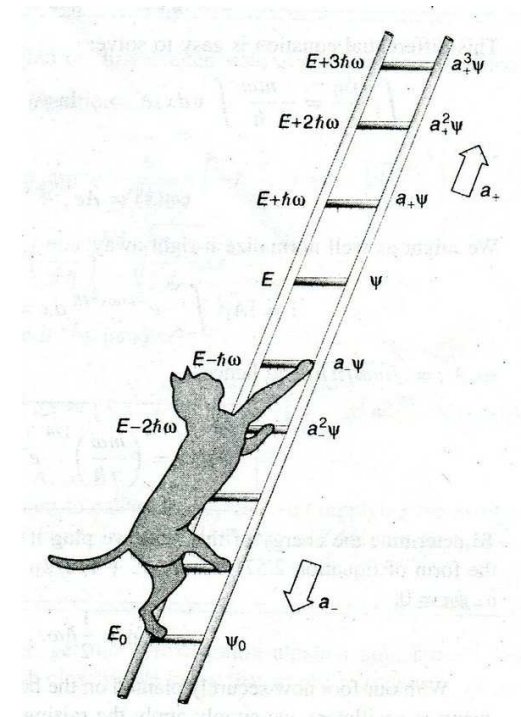
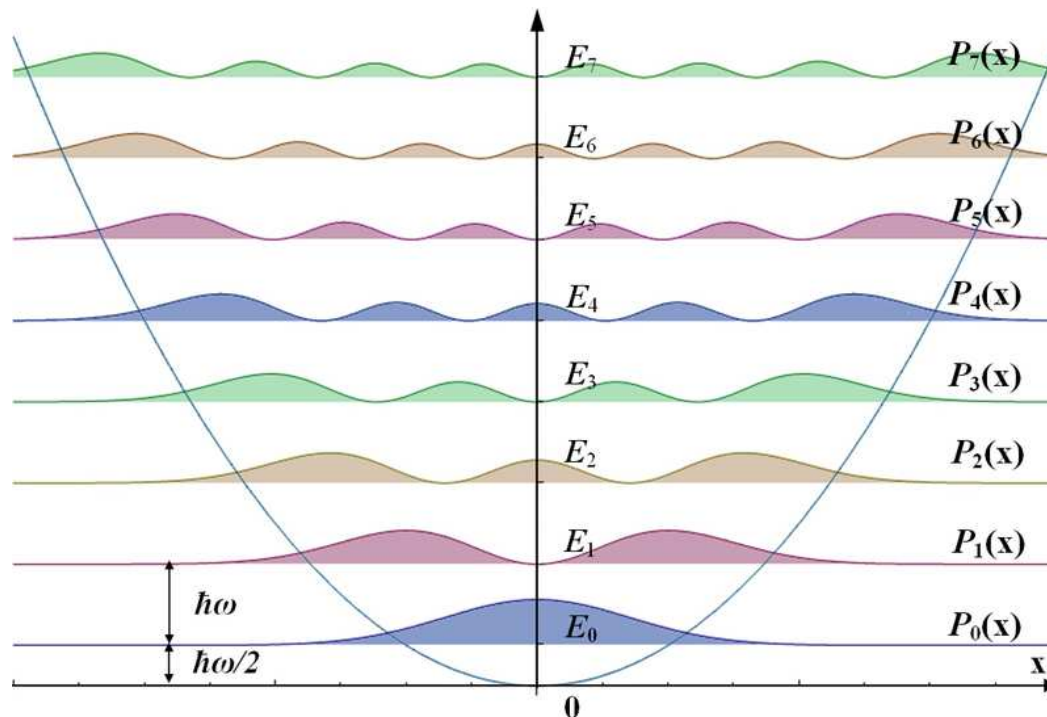
- Niveles de energía cuantizados: $E_n = \hbar \omega (n + \frac{1}{2})$

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



- Niveles de energía cuantizados: $E_n = \hbar\omega (n + \frac{1}{2})$
- Auto-estados de energía son estáticos: $H|n\rangle = E_n|n\rangle$
Estados coherentes oscilantes $\langle x(t) \rangle = A \cos(\omega t - \phi_0)$

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

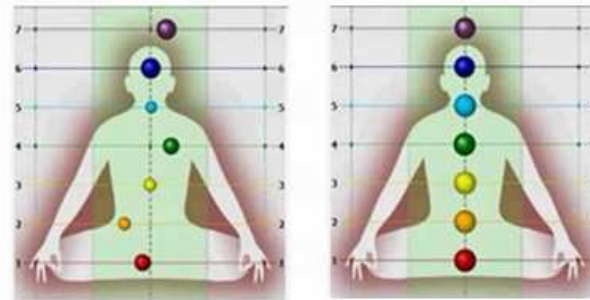


- Niveles de energía cuantizados: $E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2}\right)$
- Auto-estados de energía son estáticos: $H|n\rangle = E_n|n\rangle$
Estados coherentes oscilantes $\langle x(t) \rangle = A \cos(\omega t - \phi_0)$
- **Energía del punto cero:** estado más bajo tiene energía $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$
→ Energía del vacío!

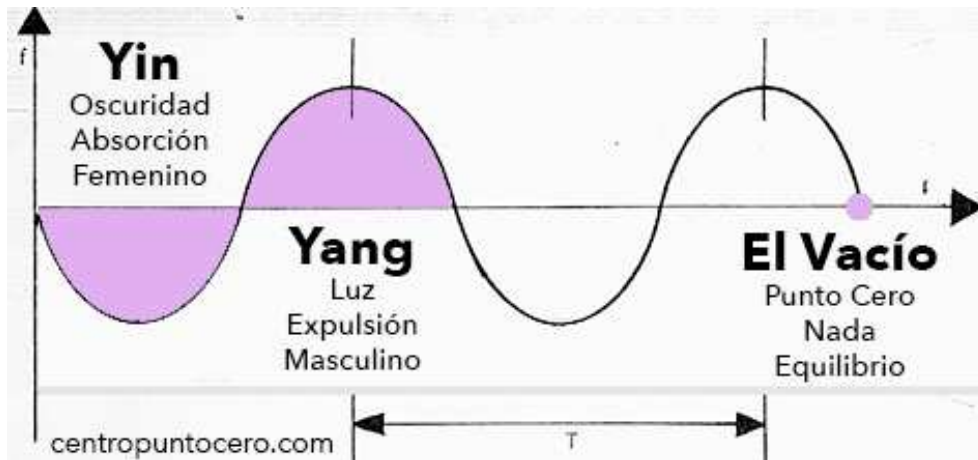
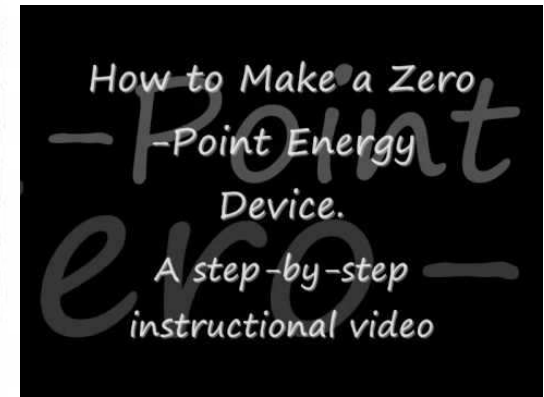
Cuidado con lo que encuentras en Internet sobre la energía del punto cero!



Before ZeroPoint Products After ZeroPoint Products



Energy Centers



Chip de Energia Punto Cero
protector de Smog Electromagnetico para celulares

Electrosmog Protective Chip
 Quantum Intelligence

Solesky Melchizedek lo usa en su iphone

Iyashi Wand

Material: Stainless Steel Exterior
 Iyashi Ceramics
 Magnet

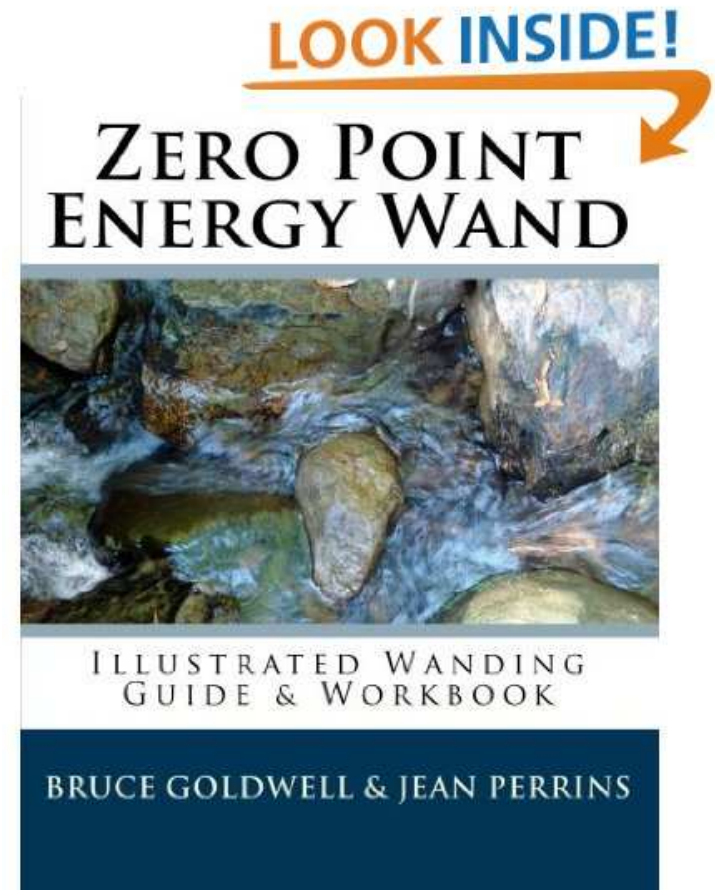
Energy Technologies: BFIT
 Negative Ions
 Magnet Therapy
 Infrared Therapy
 Scalar Energy
 Zero Point Energy

Infusion: Full Spectrum
 18000+ Frequencies

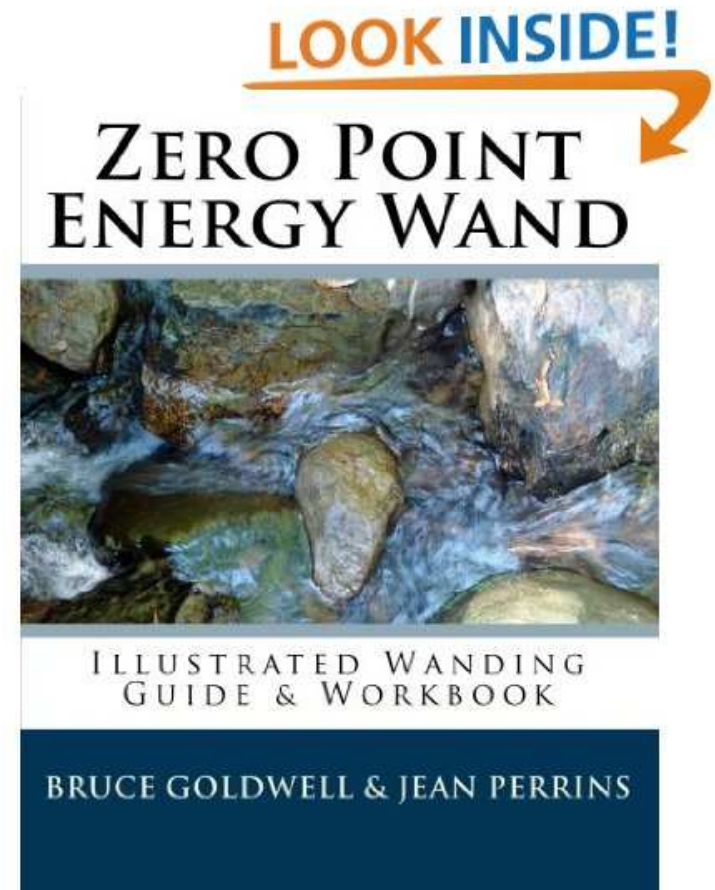
Zero Point Pendants

TOP SELLER

And many people who drink this Zero Point-energized water claim they become sharper thinkers, better problem solvers...



And many people who drink this Zero Point-energized water claim they become sharper thinkers, better problem solvers...

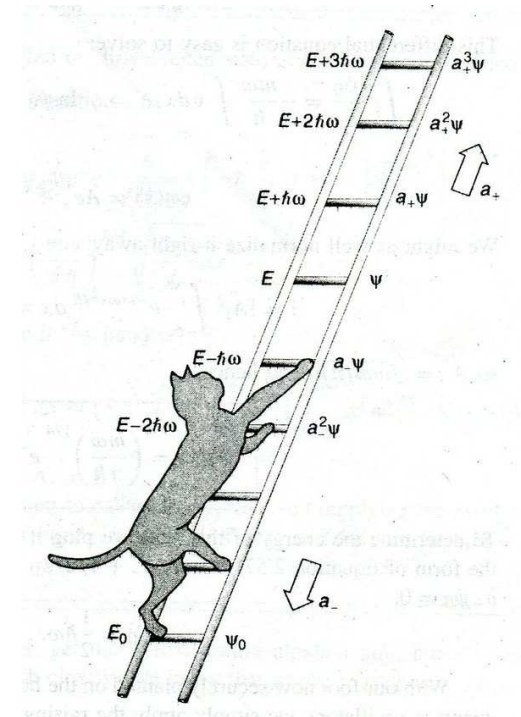
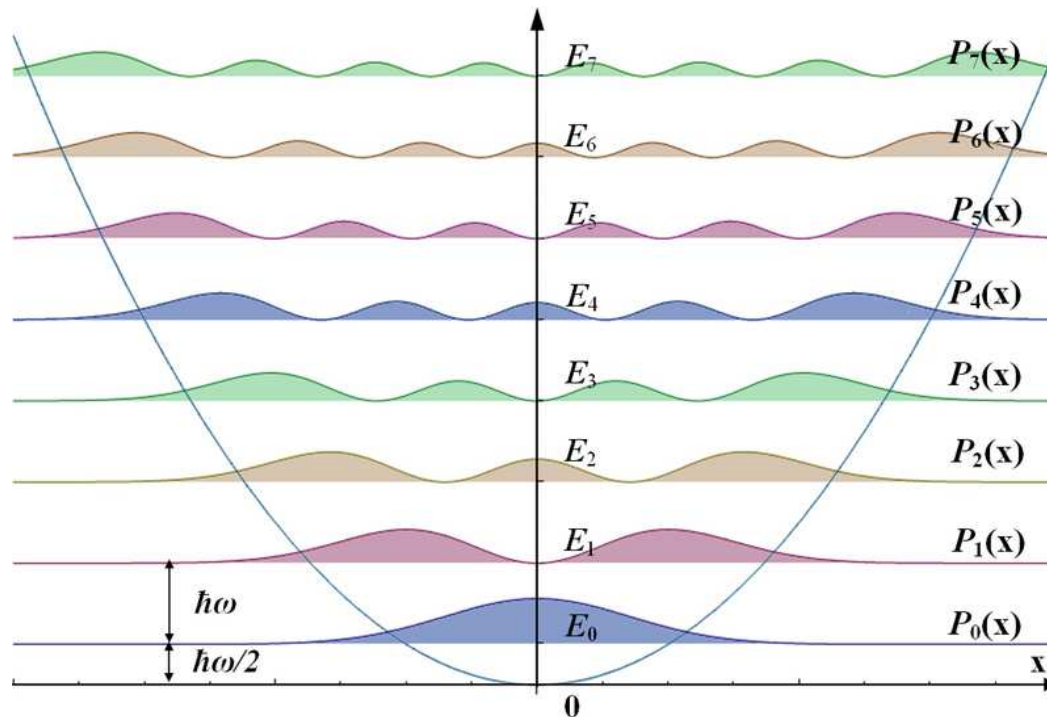


Energía de punto cero **no tiene que ver con esoterismo!** Es física!

Energía del punto cero = energía más baja posible de sistema físico

→ **Por definición inextraíble!**

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

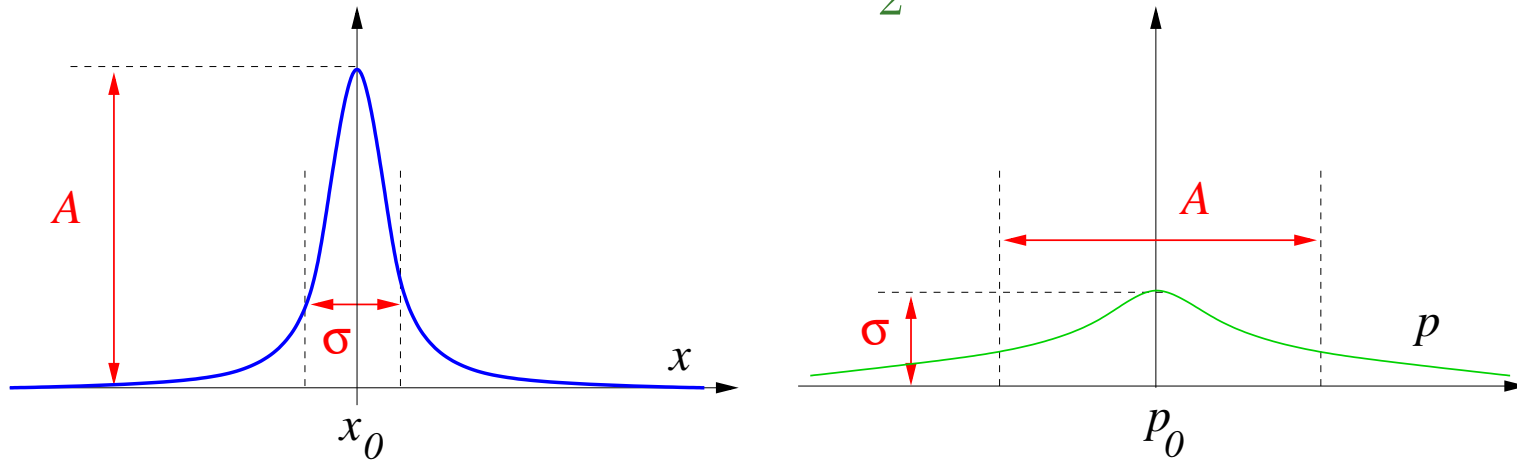


- Niveles de energía cuantizadas: $E_n = \hbar \omega (n + \frac{1}{2})$
- Auto-estados de energía son estáticos: $H|n\rangle = E_n|n\rangle$
Estados coherentes oscilantes $\langle x(t) \rangle = A \cos(\omega t - \phi_0)$
- **Energía del punto cero:** estado más bajo tiene energía $E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega$
 → Energía del vacío
 → Principio de Incertidumbre

2.2 Fluctuaciones Cuánticas

Principio de Incertidumbre (Heisenberg, 1927): Imposible conocer simultáneamente posición y momento con mucha precisión

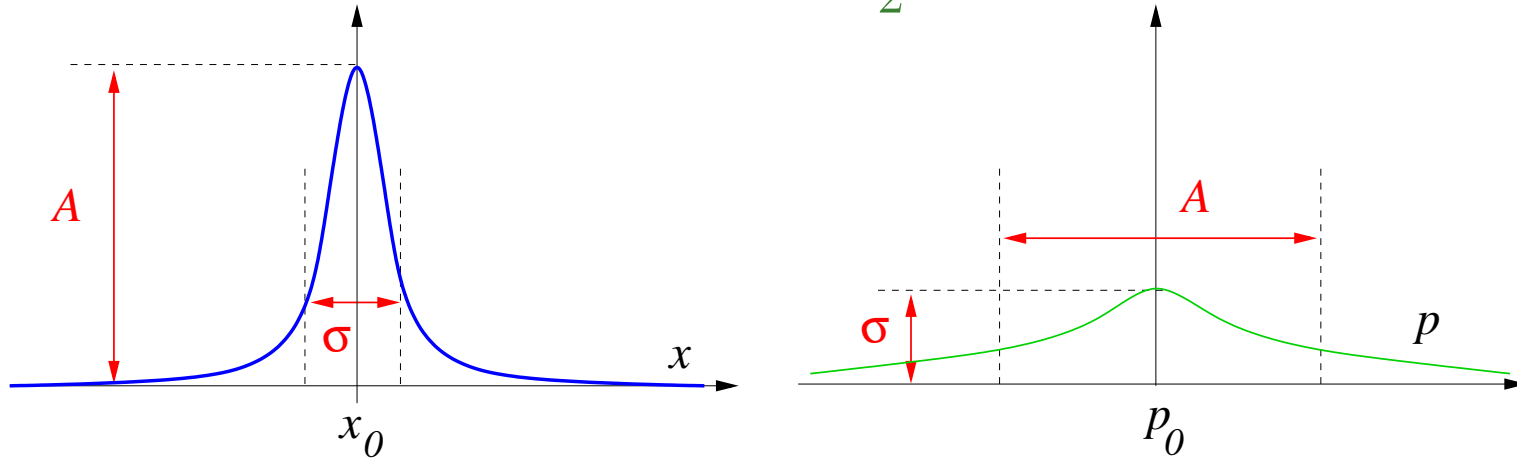
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$



2.2 Fluctuaciones Cuánticas

Principio de Incertidumbre (Heisenberg, 1927): Imposible conocer simultáneamente posición y momento con mucha precisión

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$



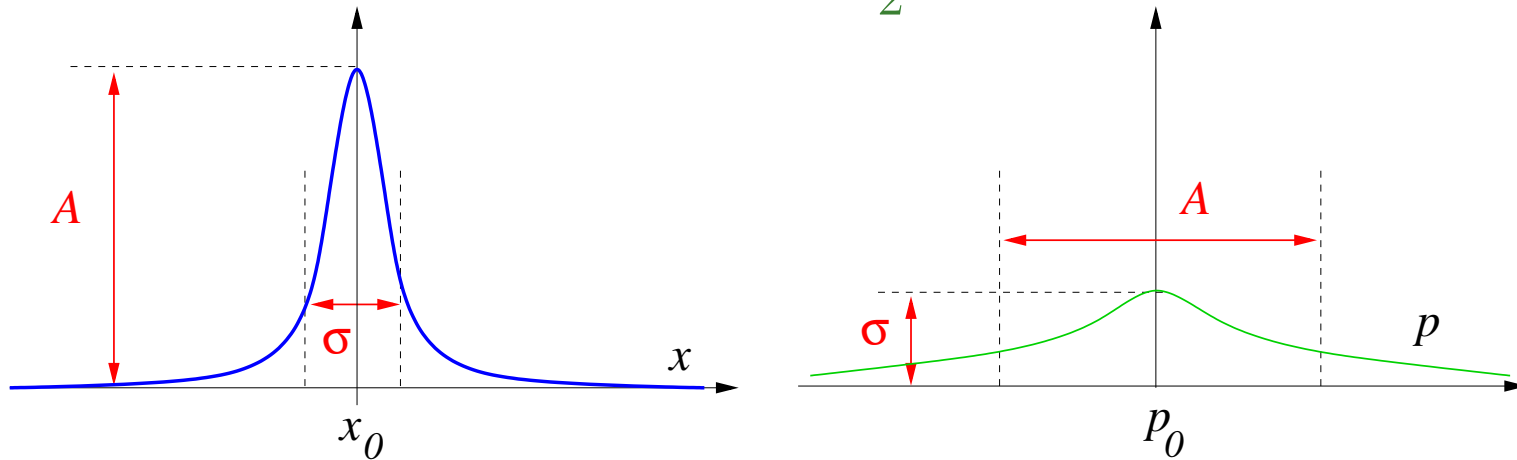
Otros ejemplos:

- Energía y tiempo: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- Espín en direcciones ortogonales: $\Delta\sigma_x \cdot \Delta\sigma_y \geq \frac{\hbar}{2} \langle\sigma_z\rangle$

2.2 Fluctuaciones Cuánticas

Principio de Incertidumbre (Heisenberg, 1927): Imposible conocer simultáneamente posición y momento con mucha precisión

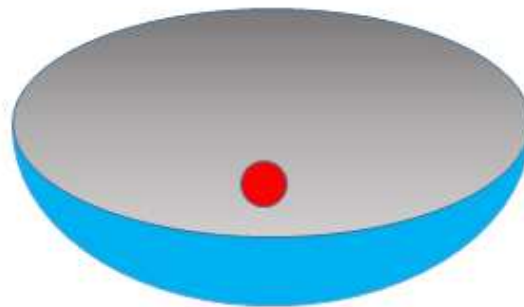
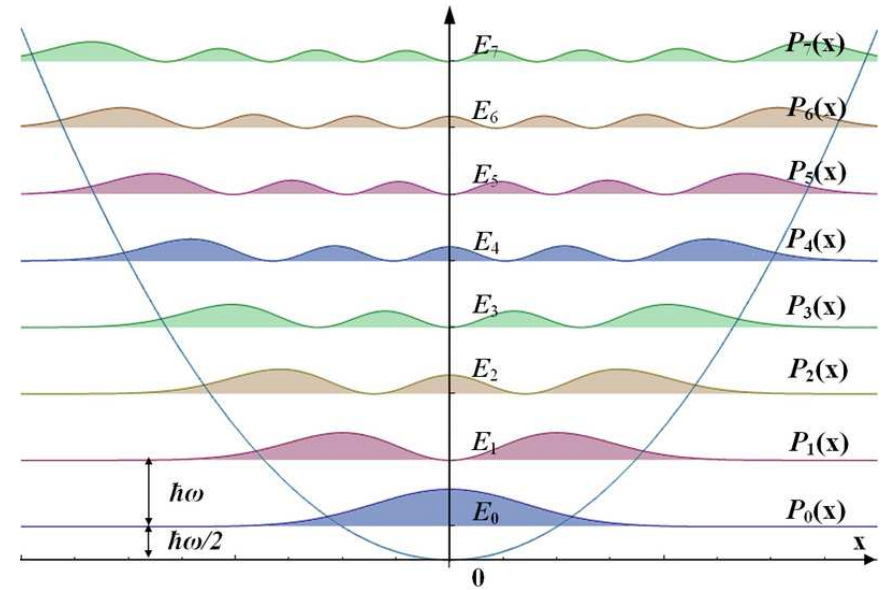
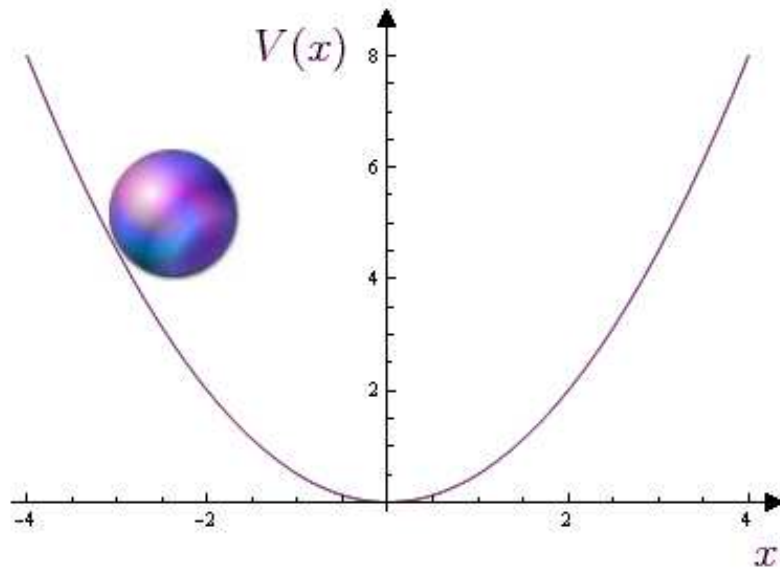
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$



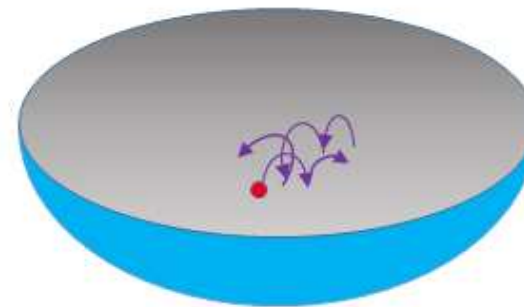
Otros ejemplos:

- Energía y tiempo: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- Espín en direcciones ortogonales: $\Delta \sigma_x \cdot \Delta \sigma_y \geq \frac{\hbar}{2} \langle \sigma_z \rangle$
- En general: $[A, B] \neq 0 \implies (\Delta A)^2 \cdot (\Delta B)^2 \geq \left| \frac{1}{2} [A, B] \right|^2$

Oscilador armónico en estado fundamental:



Naïve Expectation
(ordinary experience)



Quantum Fluctuation
(imperfect representation)

M. Strassler 2013

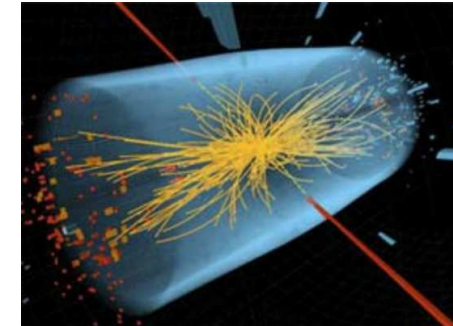
→ Principio de Incertidumbre induce fluctuaciones cuánticas

Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

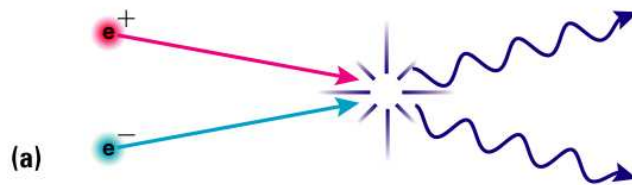
Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

- Einstein: Equivalencia de energía y materia

$$E = mc^2$$

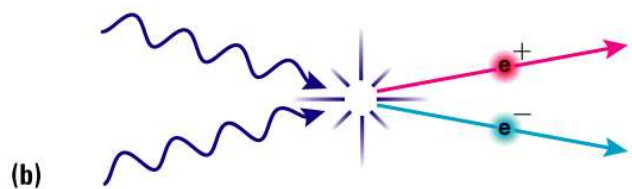


→ creación de partículas y anti-partículas



Aniquilación de electrón y positrón:

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



Creación de electrón y positrón:

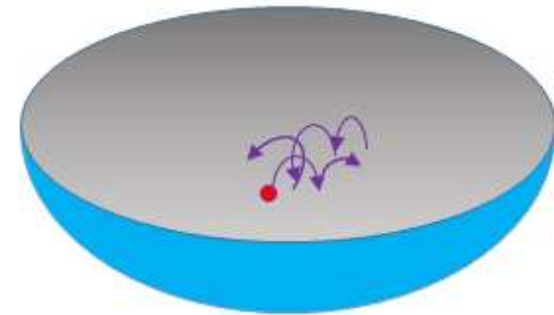
$$2\gamma \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{cuando } E_\gamma \geq m_e$$

Copyright © Addison Wesley

Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

- Heisenberg: Principio de Incertidumbre

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

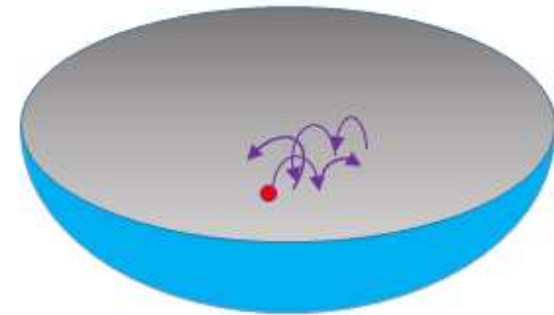


- > posible tomar prestado energía ΔE durante un instante Δt
- > creación y aniquilación de **partículas virtuales**

Teoría Cuántica de Campos = Mecánica Cuántica & Relatividad Especial

- Heisenberg: Principio de Incertidumbre

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

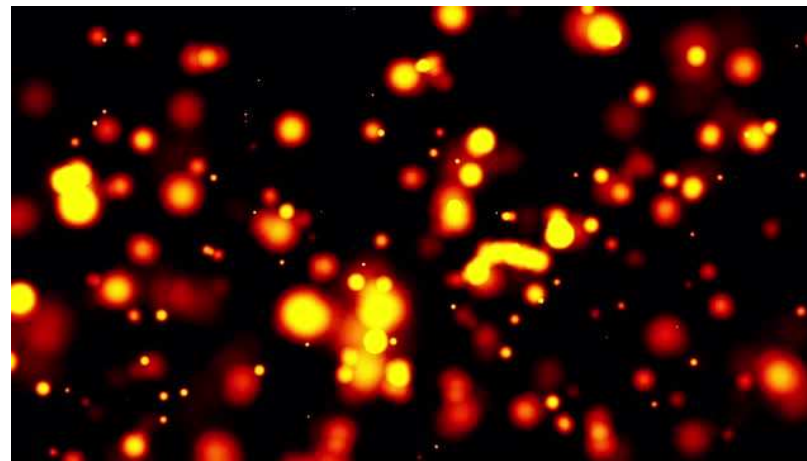
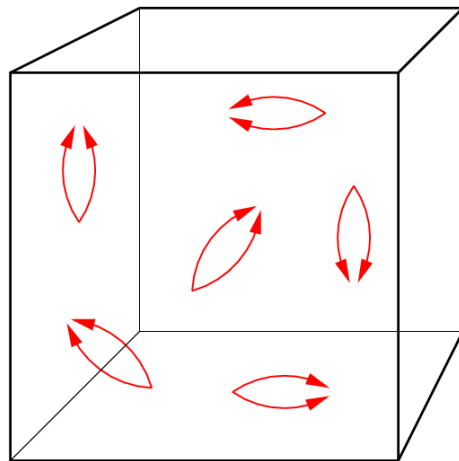


—> posible tomar prestado energía ΔE durante un instante Δt

—> creación y aniquilación de **partículas virtuales**

Vacío cuántico **no es espacio vacío**, tras quitar moléculas, átomos y fotones

Vacío cuántico es **sopa de partículas virtuales**, apareciendo y desapareciendo

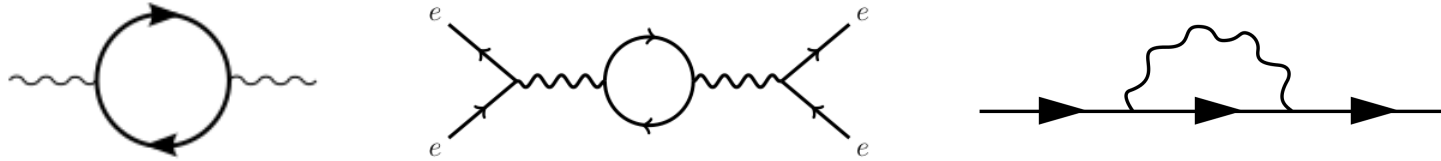


2.3 Efectos del vacío

A. Polarización del vacío

Fluctuaciones cuánticas hacen que vacío se comporta como **medio dieléctrico**

Partículas sienten **interacciones con partículas virtuales y fotones**

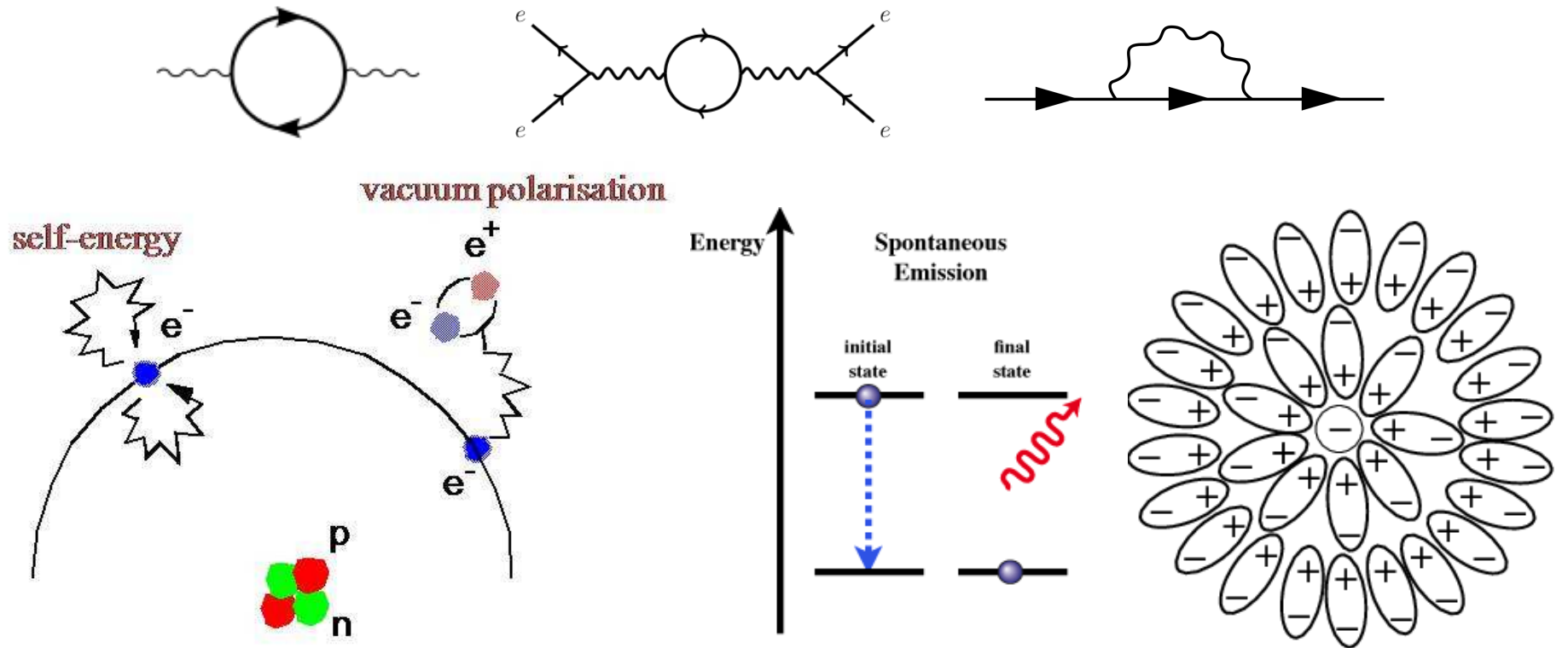


2.3 Efectos del vacío

A. Polarización del vacío

Fluctuaciones cuánticas hacen que vacío se comporta como **medio dieléctrico**

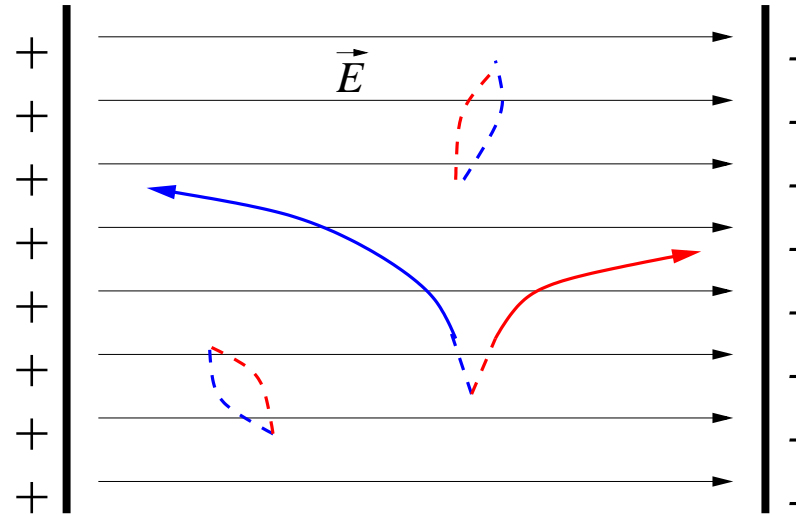
Partículas sienten **interacciones con partículas virtuales y fotones**



- **Lamb shift:** Correcciones a energía de electrones
- **Emisión espontánea:** interacción con campo electromagnético cuantizado
- **Apantallamiento** de cargas desnudas

B. El efecto Schwinger

Producción de partículas por campo eléctrico extremadamente fuerte

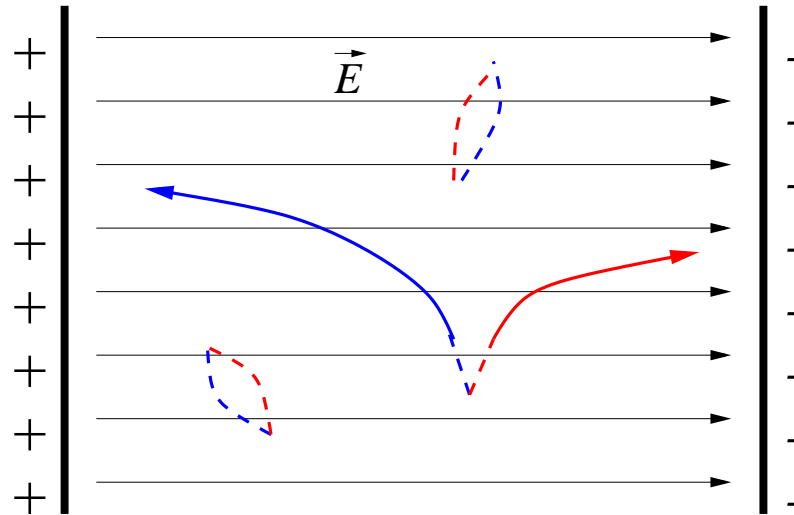


\vec{E} capaz de convertir fluctuaciones cuánticas en partículas reales
→ Creación de partículas reales del vacío

$$|\vec{E}| \geq \frac{m^2 c^3}{q_e \hbar} \simeq 1,3 \cdot 10^{18} \text{ V/m}$$

B. El efecto Schwinger

Producción de partículas por campo eléctrico extremadamente fuerte



\vec{E} capaz de convertir fluctuaciones cuánticas en partículas reales
→ Creación de partículas reales del vacío

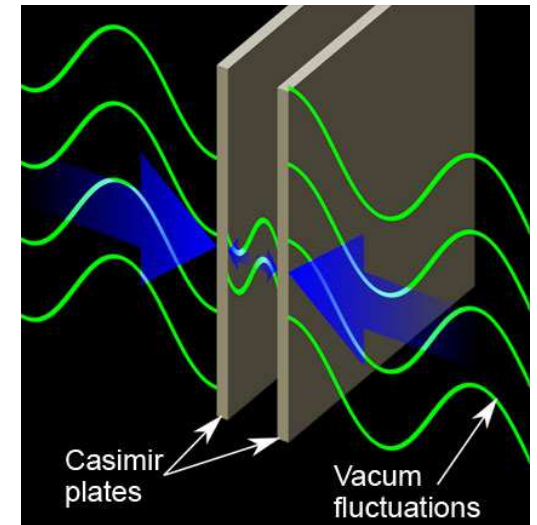
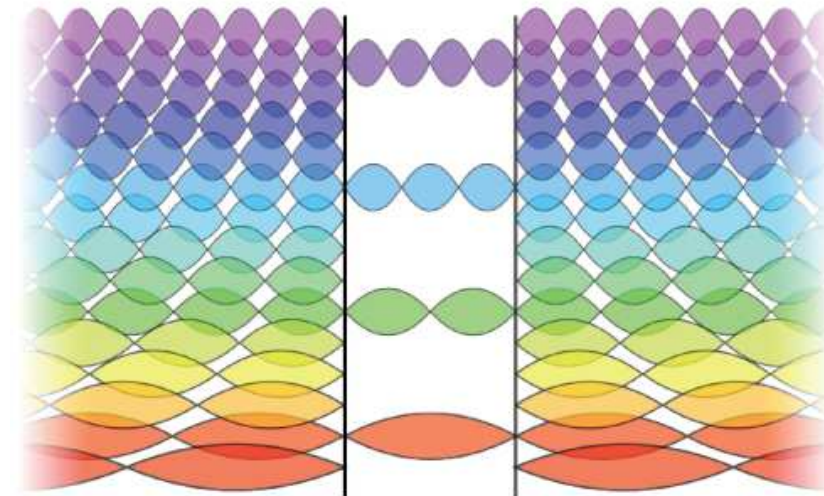
$$|\vec{E}| \geq \frac{m^2 c^3}{q_e \hbar} \simeq 1,3 \cdot 10^{18} \text{ V/m}$$

- Predicho por Heisenberg & Euler en 1936
- Derivado en lenguaje de QED por Schwinger en 1951
- Aún no hay verificación experimental

C. El efecto Casimir

Casimir & Polder, 1947:

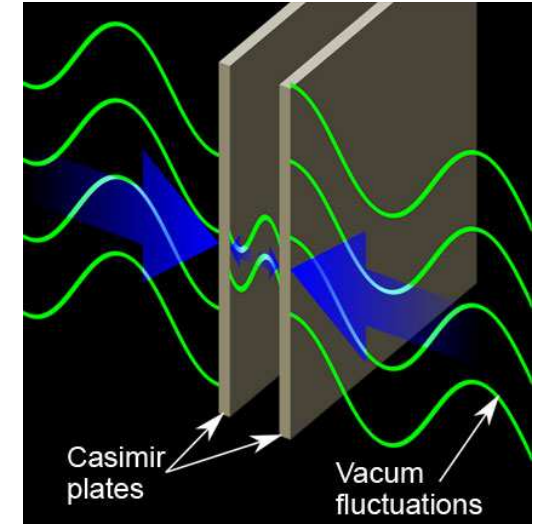
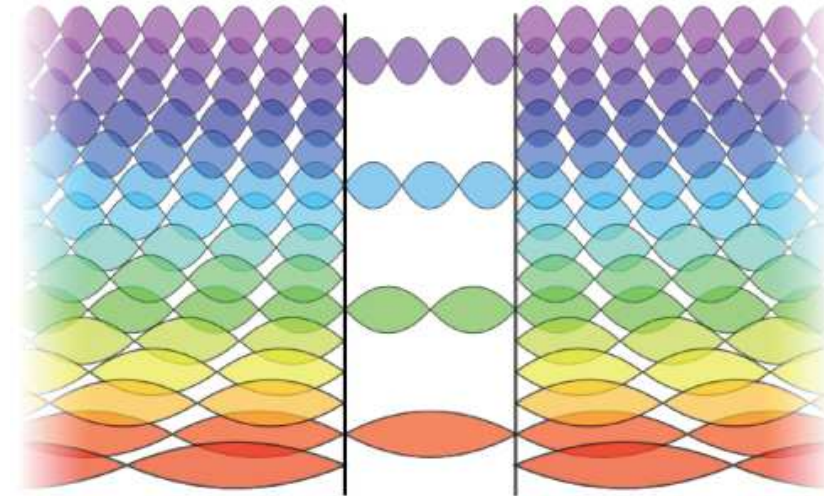
Fuerza atractiva entre espejos paralelos, debido a energía del vacío



C. El efecto Casimir

Casimir & Polder, 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**

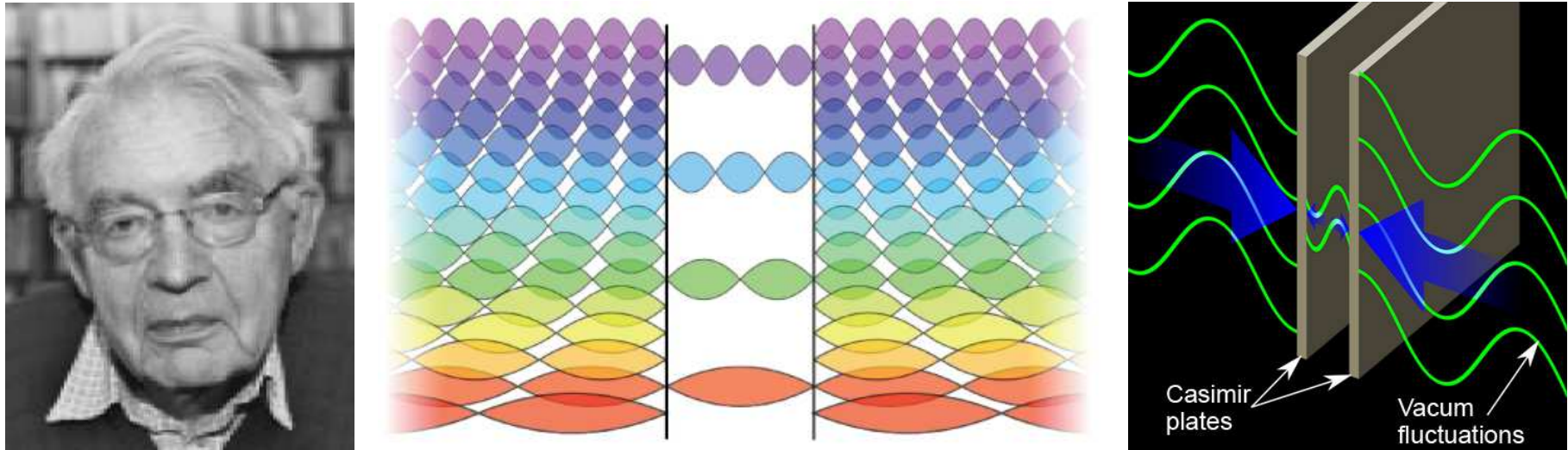
$$d = 1 \mu m, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad F \sim 10^{-7} N$$

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

C. El efecto Casimir

Casimir & Polder, 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**

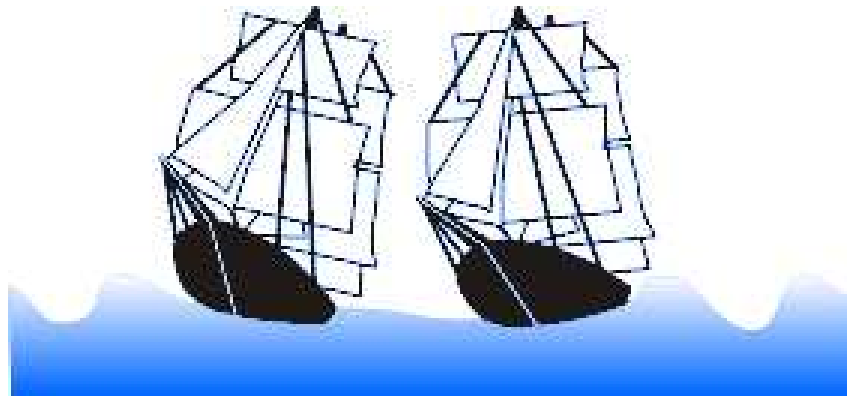
$$d = 1 \mu m, \quad A = 1 cm^2 \quad \Rightarrow \quad F \sim 10^{-7} N$$

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

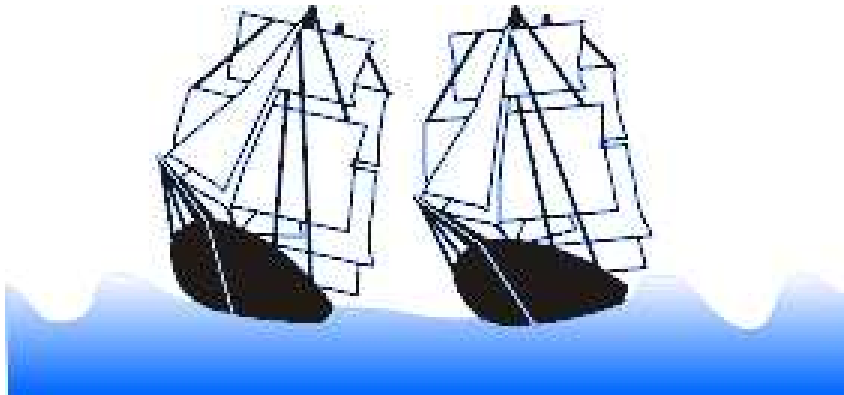
Lamoreaux (1997): **Comprobación experimental** con error relativo de 15%

→ verificación experimental extremadamente complicada

Análogo clásico: fuerza misteriosa entre barcos?



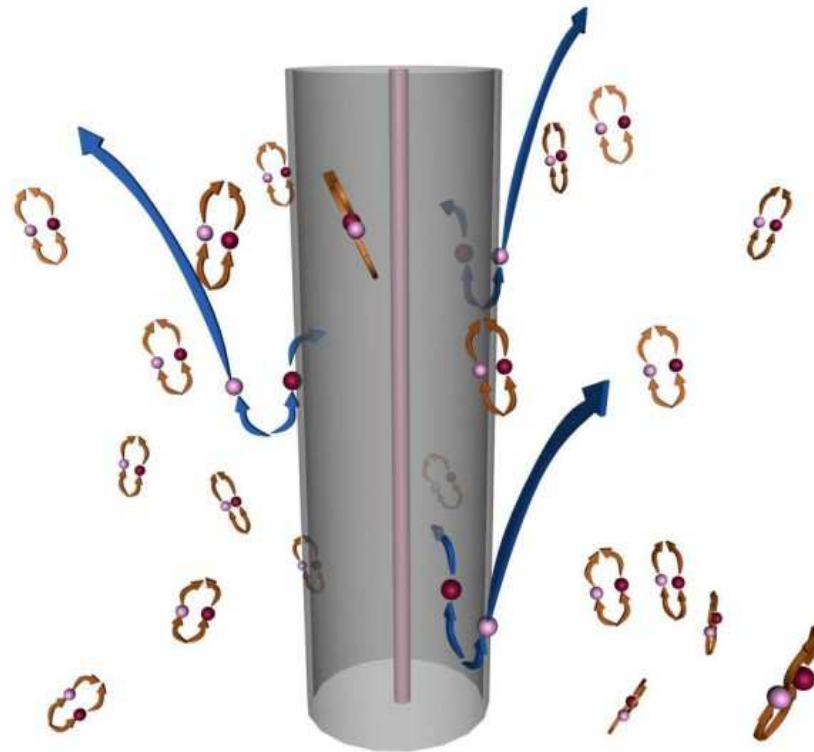
Análogo clásico: fuerza misteriosa entre barcos?



—> Real o mito?

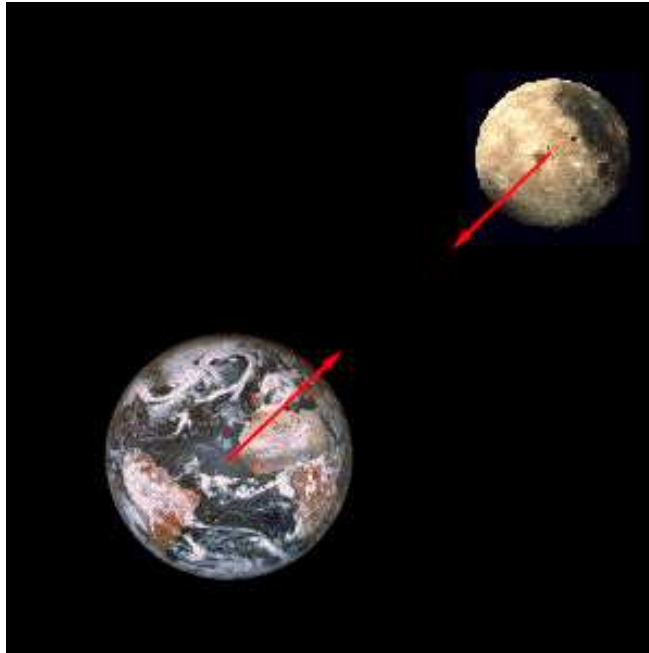
—> Efecto de ondas o de tensión superficial del agua?

3. Relatividad General y TCC en espacios curvos



3.1 Soluciones de vacío en Relatividad General

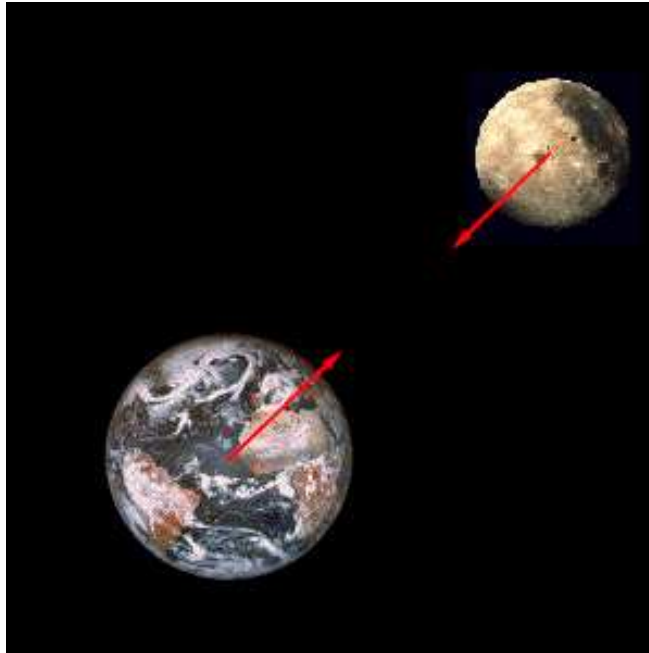
Gravedad Newtoniana postula **fuerza atractiva** entre cualesquiera dos masas



$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

3.1 Soluciones de vacío en Relatividad General

Gravedad Newtoniana postula **fuerza atractiva** entre cualesquiera dos masas

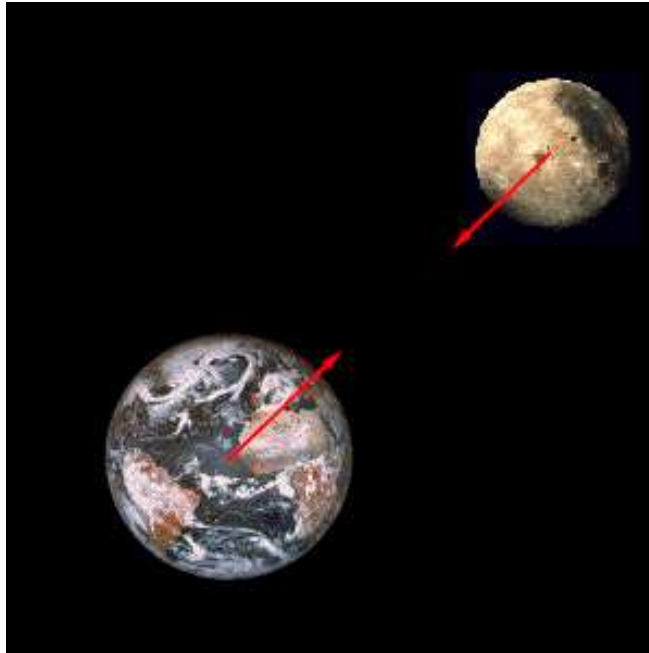


$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

- **Éxito fenomenológico & matemático:**
—→ efemérides planetarias, poder predictivo, elegante, ...

3.1 Soluciones de vacío en Relatividad General

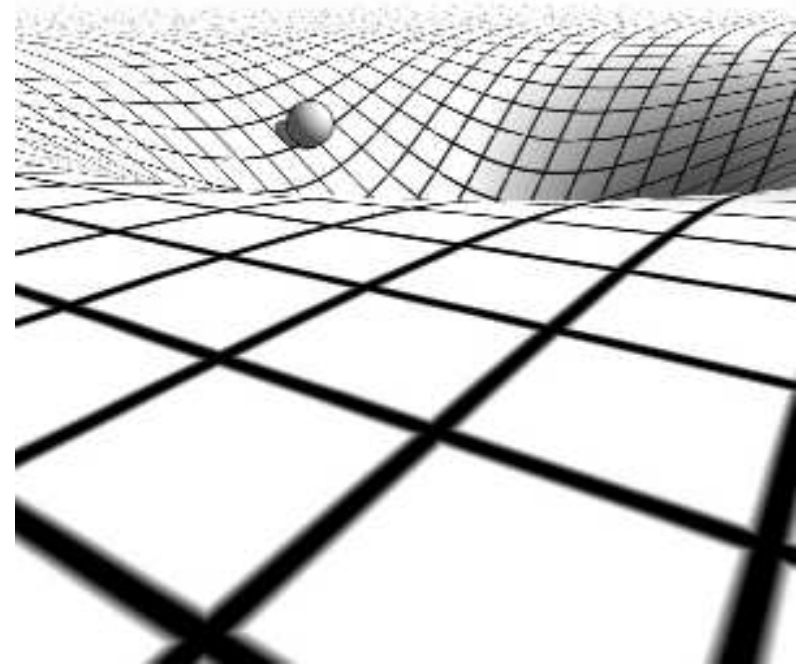
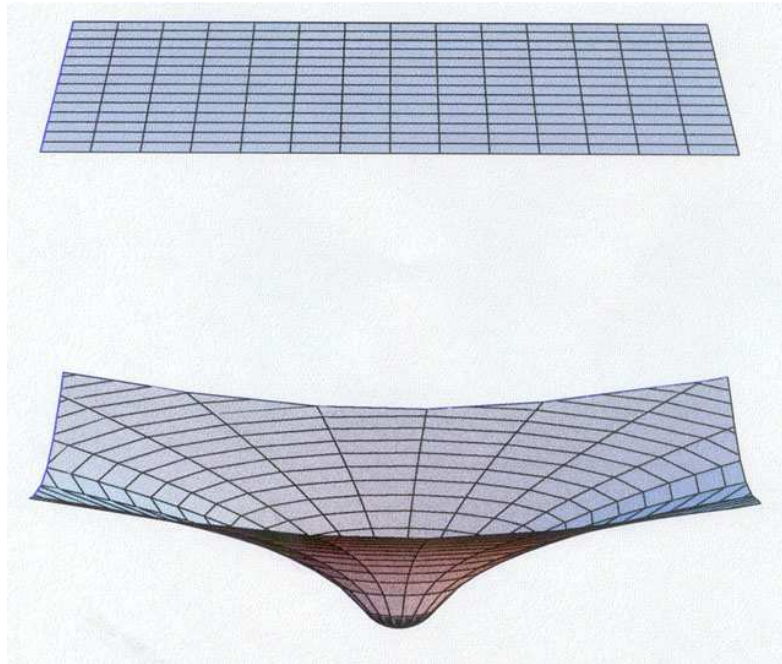
Gravedad Newtoniana postula **fuerza atractiva** entre cualesquiera dos masas



$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

- **Éxito fenomenológico & matemático:**
 - > efemérides planetarias, poder predictivo, elegante, ...
- **Problemas conceptuales & fundamentales:**
 - > ¿Cómo se propaga la gravedad?
 - > ¿A que velocidad se propaga la gravedad?

Relatividad General: Gravedad es manifestación de espacio curvo

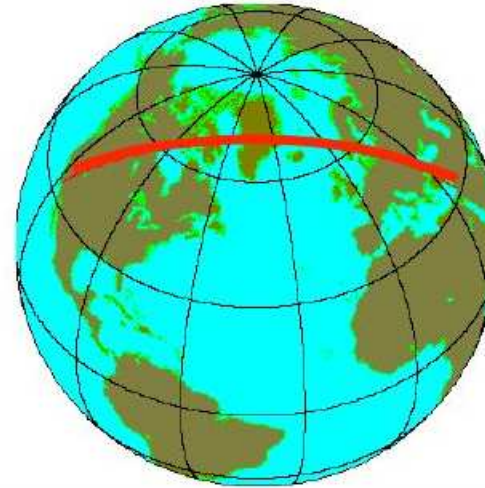
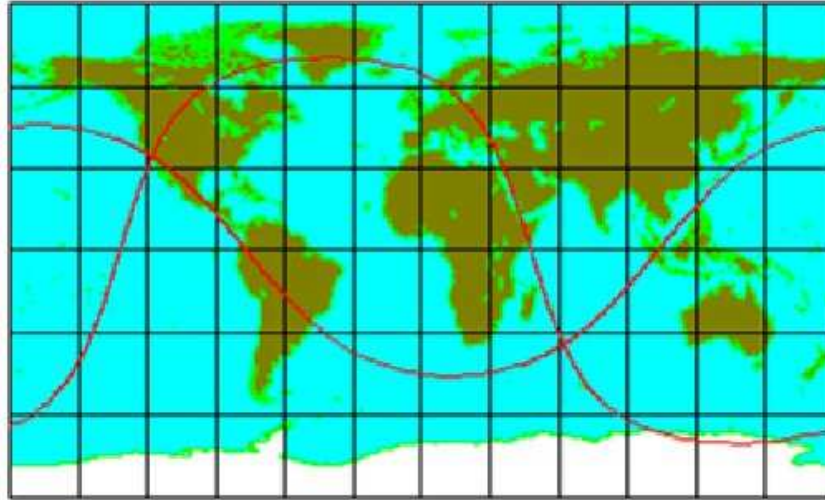


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

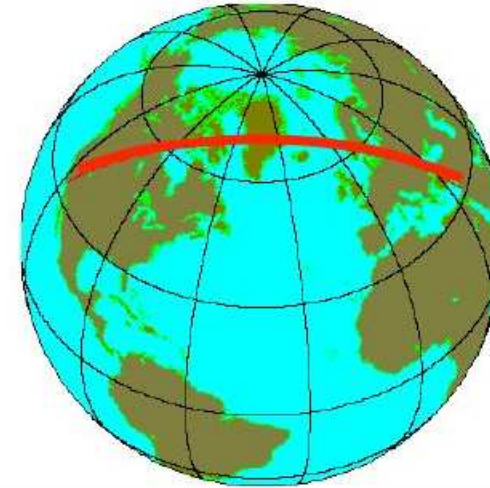
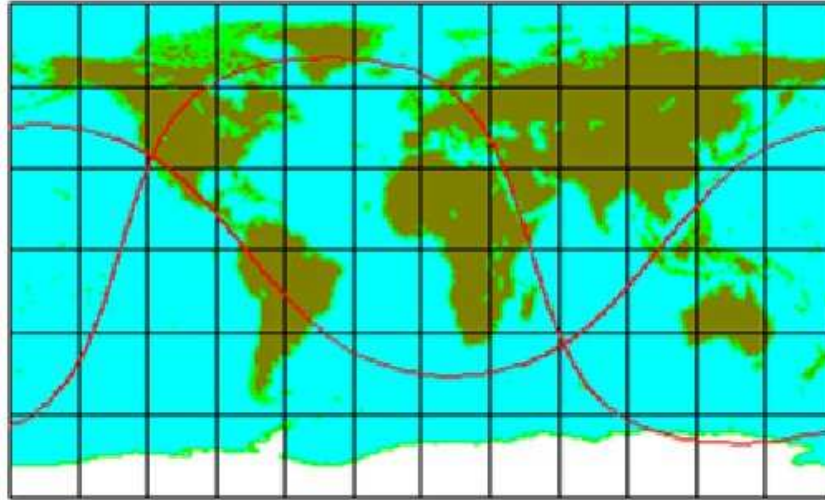
La materia indica cómo se curva el espacio

El espacio indica cómo se mueve la materia

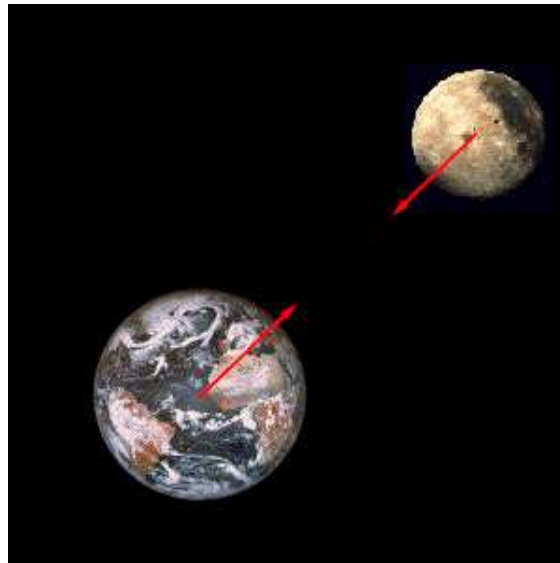
La materia sigue la trayectoria más recta posible



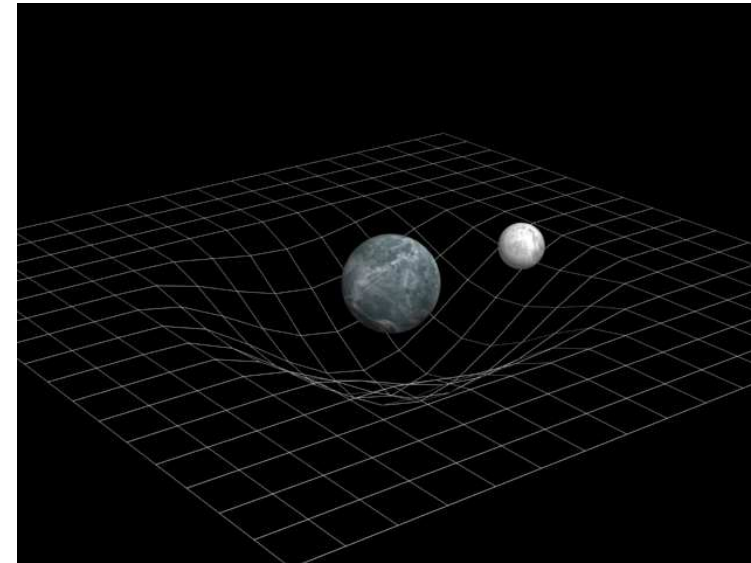
La materia sigue la trayectoria más recta posible



No hay fuerza gravitatoria à la Newton, sino trayectorias en espacio curvo.



NO



SÍ

Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

A. Ondas gravitacionales

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física



NO



más como...

Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

A. Ondas gravitacionales

El espaciotiempo no es un escenario estático

Es una **parte dinámica** de la física

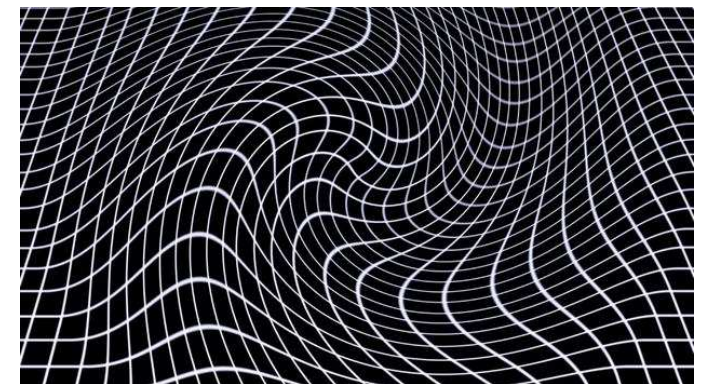


NO



más como...

- Interacciona con el contenido de energía y materia
- Tiene dinámica propia: puede cambiar de forma y tamaño



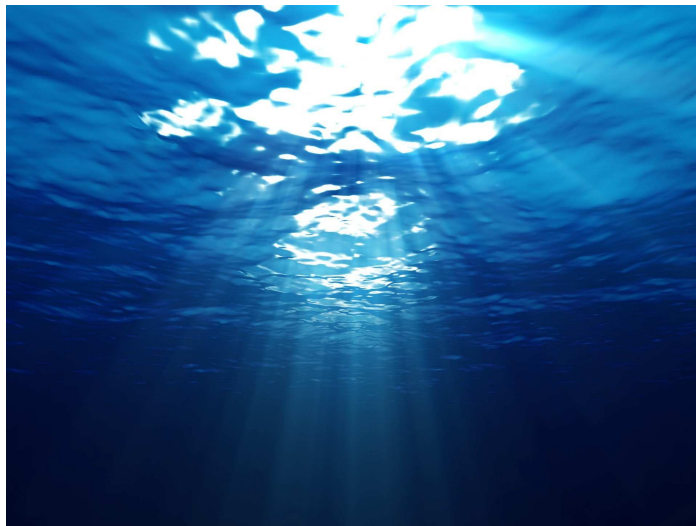
Ondas gravitacionales =
perturbaciones en el espaciotiempo que se
propagan solos



Ondas gravitacionales =
perturbaciones en el espaciotiempo que se
propagan solos



¡OJO! No son ondas *de algo* propagando por el espaciotiempo
Son oscilaciones del espaciotiempo mismo...

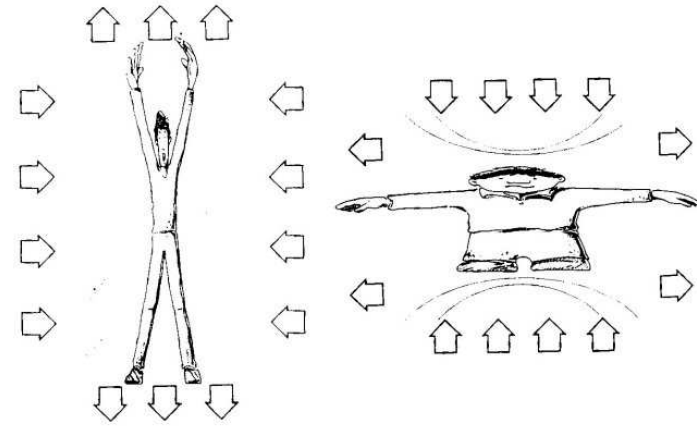
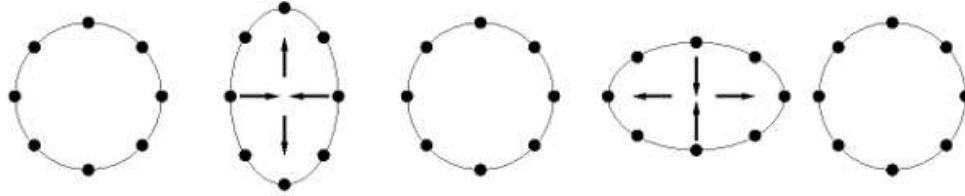


NO

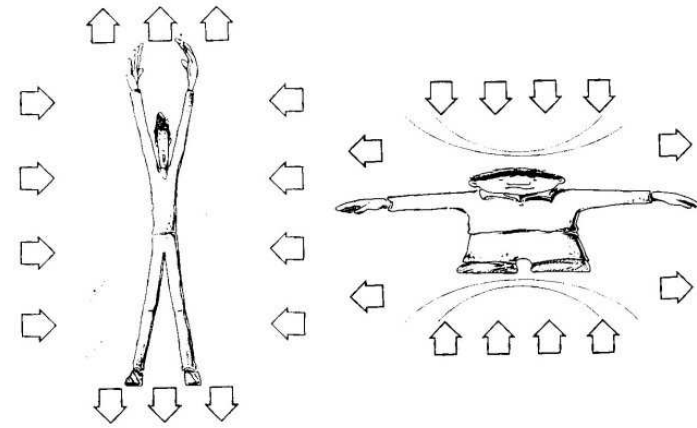
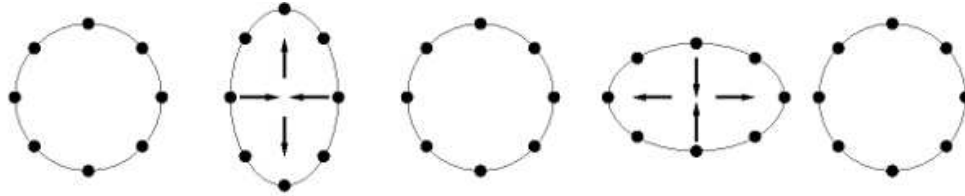


SÍ

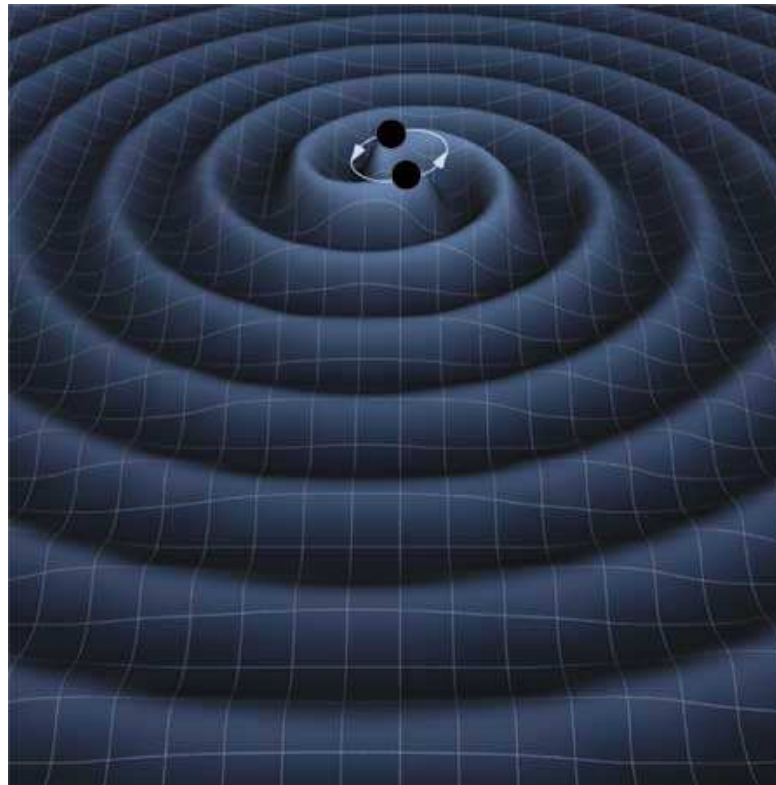
● Efecto al pasar:



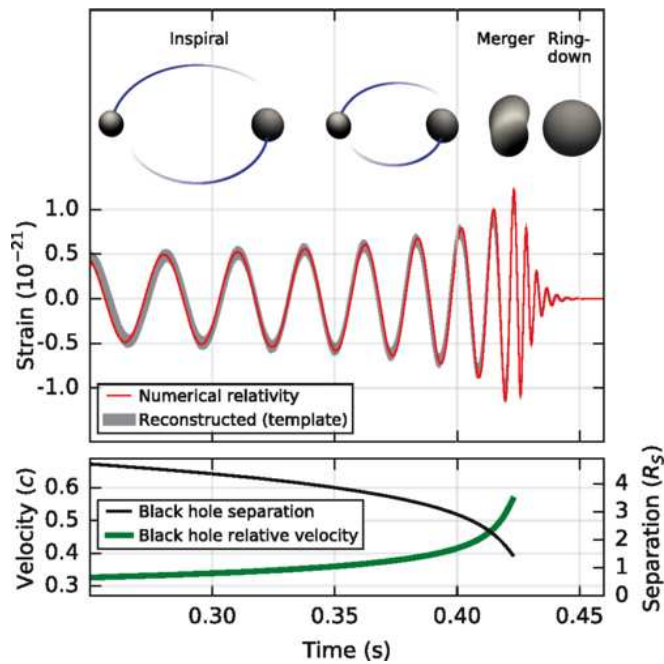
- Efecto al pasar:



- Generadas por cambio en momento cuadrupolar de la materia
→ Ejemplo más común: sistema binario

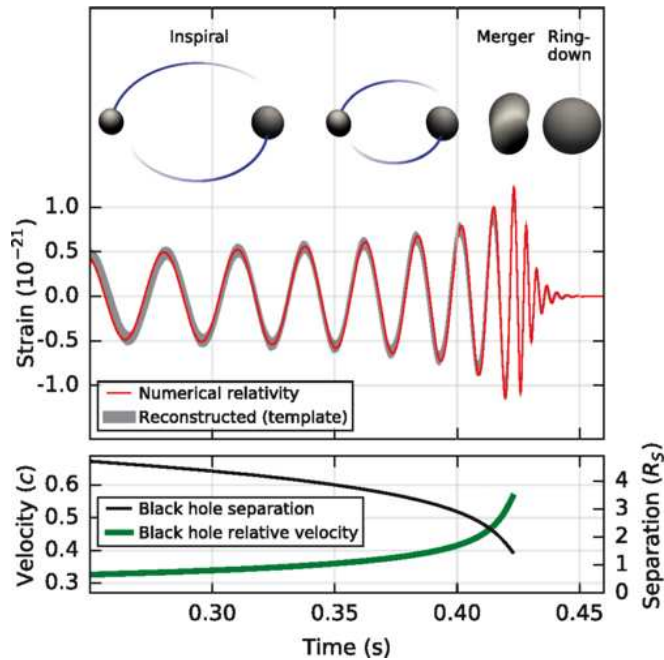


- Ondas gravitacionales se llevan energía de sistema binario



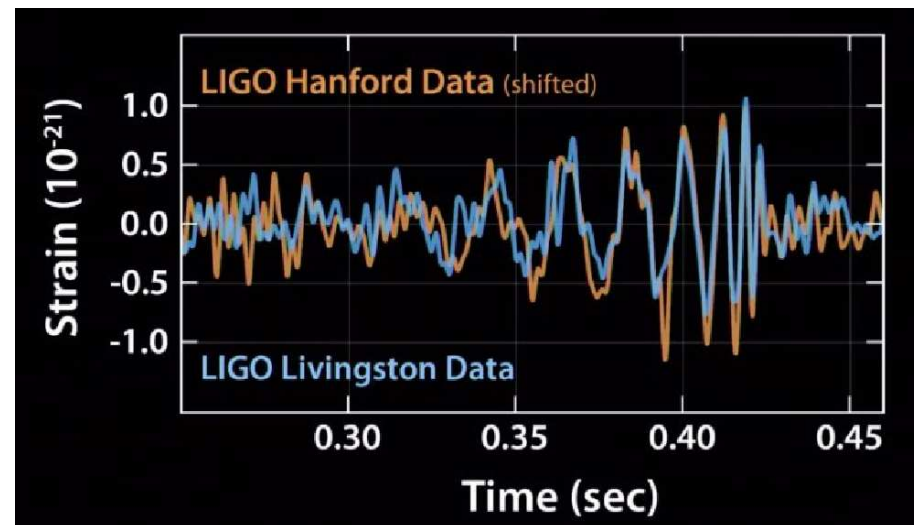
- masas se acercan
- masas giran más rápido
- masas emiten más radiación
- masas se acercan más aún
- ...
- sistema colapsa en $\sim 10^8$ años
- señal muy típica

- Ondas gravitacionales se llevan energía de sistema binario



- masas se acercan
- masas giran más rápido
- masas emiten más radiación
- masas se acercan más aún
- ...
- sistema colapsa en $\sim 10^8$ años
- señal muy típica

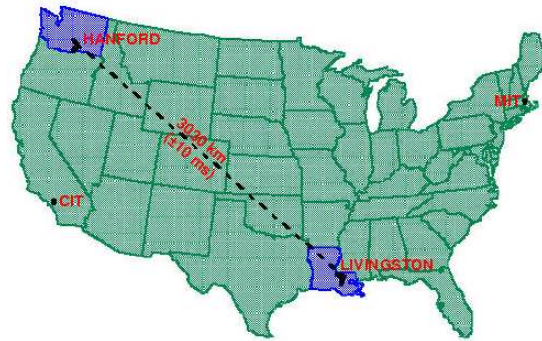
- Y eso es lo que han detectado en LIGO:



Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Hanford (WA)

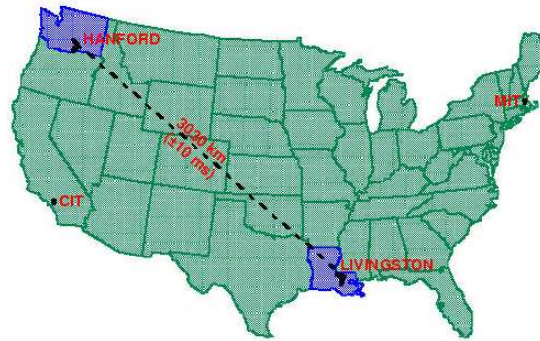


Livingston (LA)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

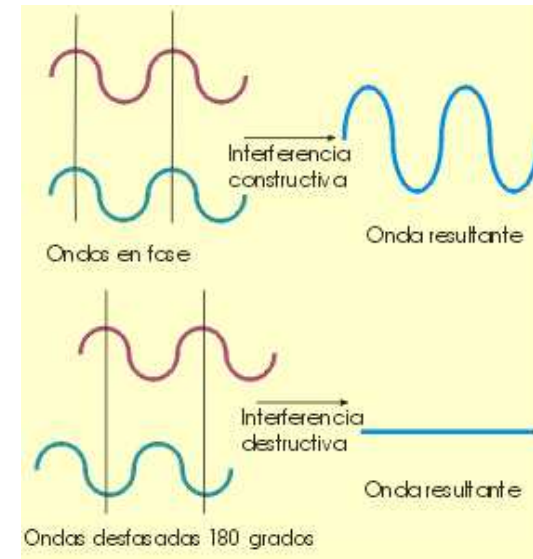
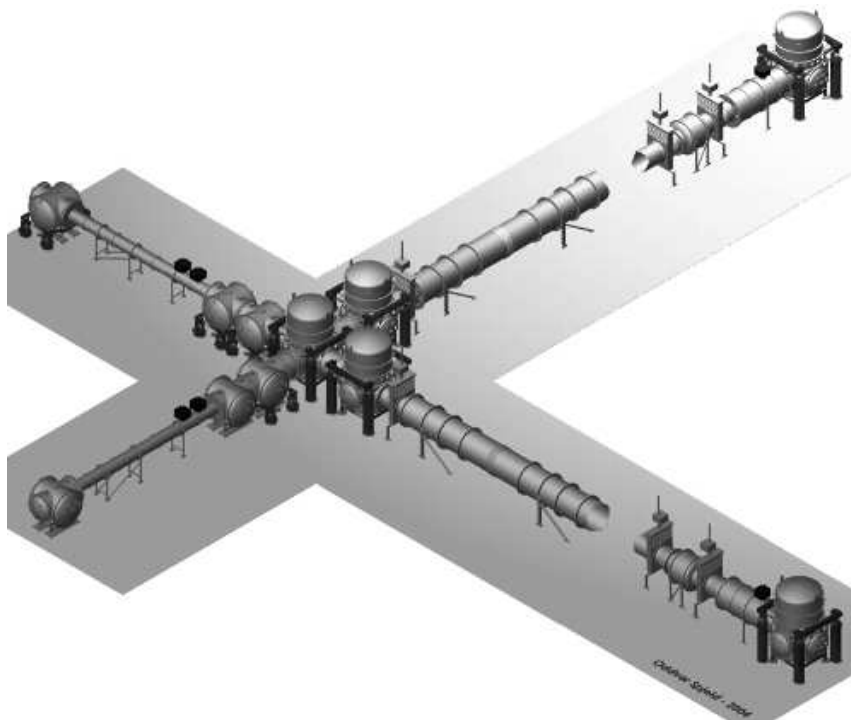


Hanford (WA)

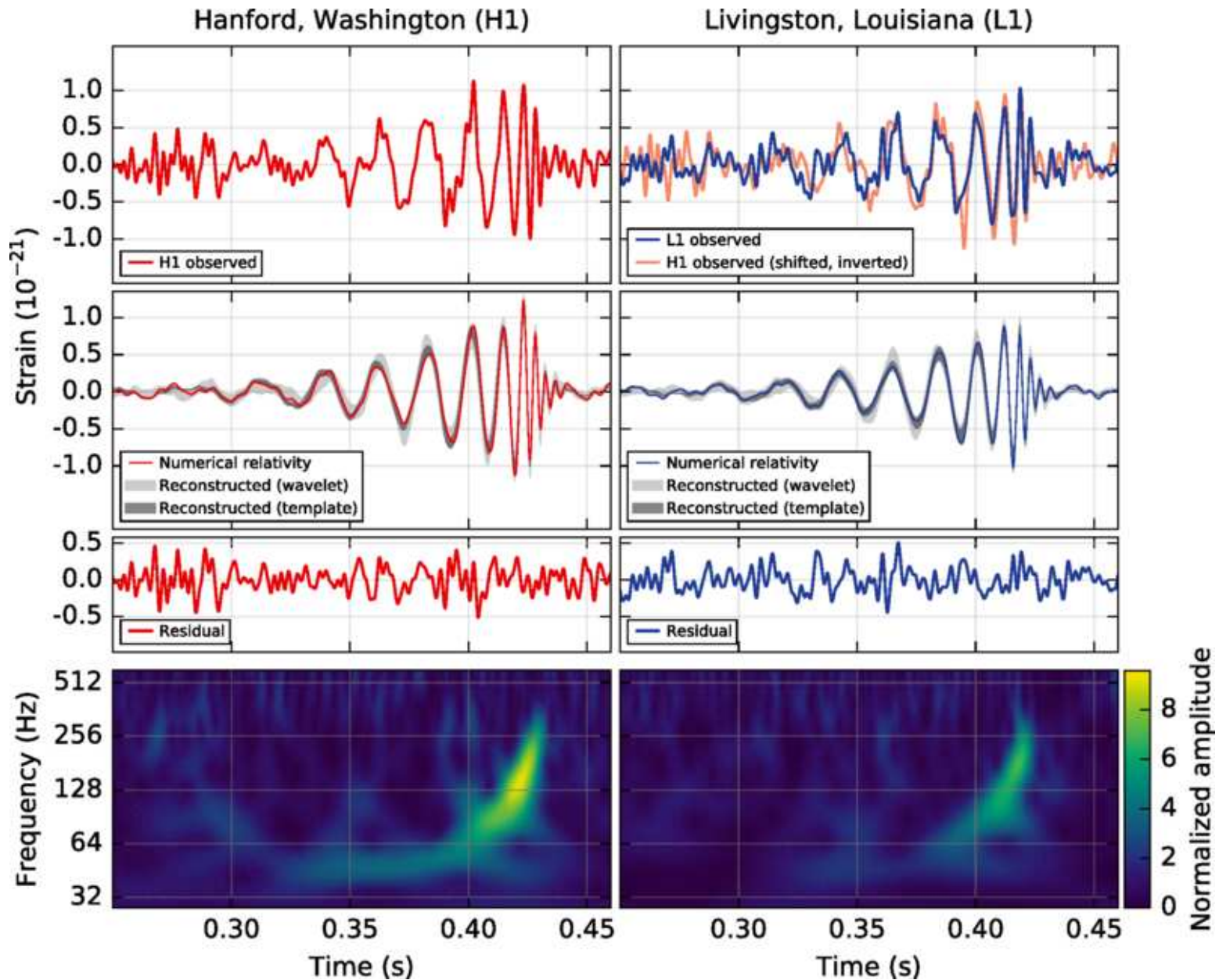


Livingston (LA)

2 interferómetros de 4 km a 3200 km distancia



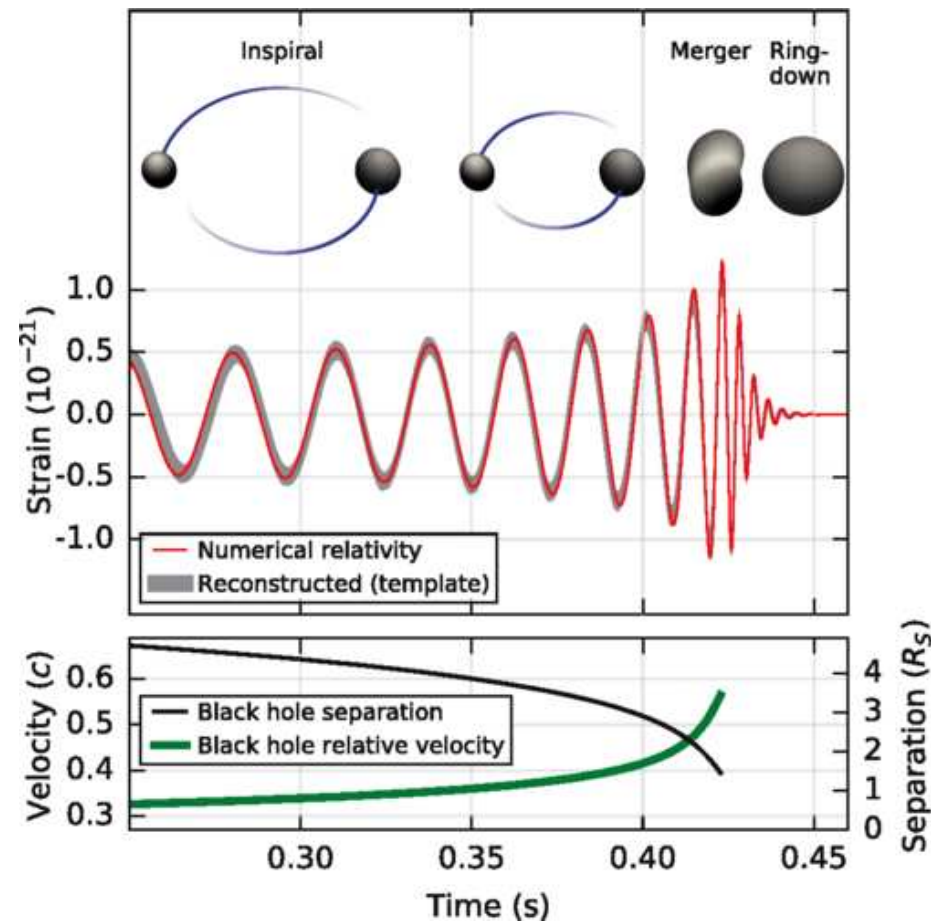
El 14 de septiembre 2015 a las 9:50 UTC: GW150914



Probabilidad de falsa alarma $< 2 \cdot 10^{-7} \Leftrightarrow 5,1\sigma$

Señal típica de colisión de dos objetos masivos:

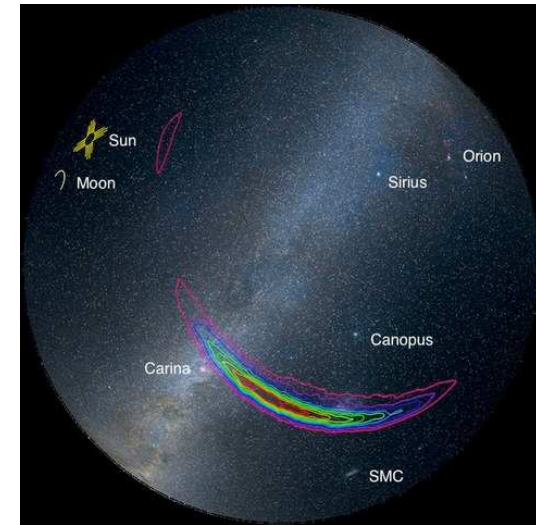
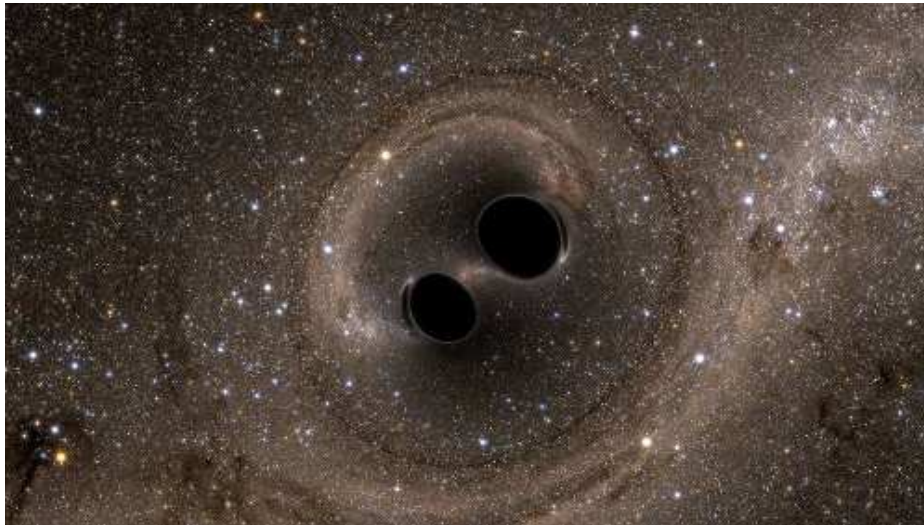
- 6,9 ms de retraso entre las dos señales
- Aumento de frecuencia y amplitud de 35 Hz a 150 Hz en 0,2 s
- Oscilaciones amortiguadas después de máximo



Datos indican (90% confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$ dos objetos de $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$ y $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

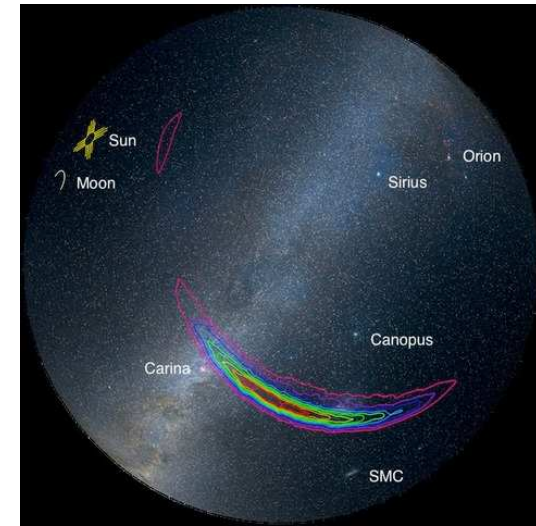
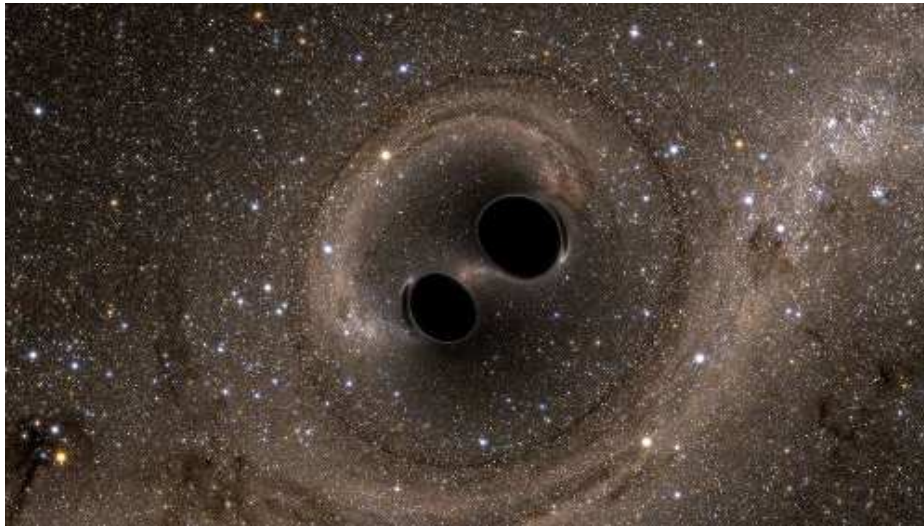
Fusión de dos agujeros negros!



Datos indican (90% confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$ dos objetos de $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$ y $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

Fusión de dos agujeros negros!

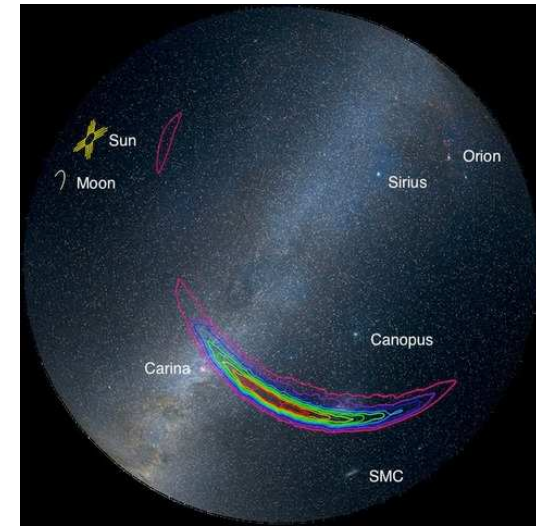
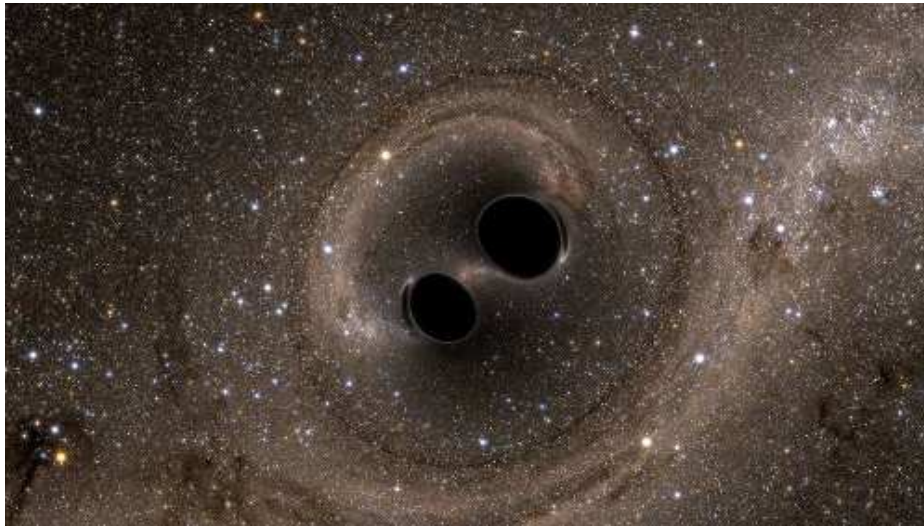


- Agujero negro resultante con $m_f \approx 62M_{\odot}$ y $a = 0,67$
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales: $E_{\text{rad}} \approx 3 M_{\odot} c^2$
(comparación: $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$; $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$)

Datos indican (90% confidence level):

- $\mathcal{M} \approx 30M_{\odot} \implies$ dos objetos de $m_1 = (36 \pm 5)M_{\odot}$ y $m_2 = (29 \pm 4)M_{\odot}$
- $f = 75 \text{ Hz} \implies$ separación de $\sim 350 \text{ km}$

Fusión de dos agujeros negros!



- Agujero negro resultante con $m_f \approx 62M_{\odot}$ y $a = 0,67$
Energía emitida en forma de ondas gravitacionales: $E_{\text{rad}} \approx 3 M_{\odot} c^2$
(comparación: $E_{\text{Nagasaki}}/c^2 \approx 1 \text{ g}$; $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$)
Potencia emitida en máximo: $\sim 200 M_{\odot} c^2/s \sim 50 \times \sum_{\star} P_{\star}$
- A distancia de $1,3 \cdot 10^9$ años-luz ($z \approx 0,09$)

Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

B. Agujeros negros

Agujero negro: = campo gravitatorio tal fuerte que confina la luz
= trozo de espacio con singularidad, rodeado por horizonte

Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

B. Agujeros negros

Agujero negro: = campo gravitatorio tal fuerte que confina la luz
= trozo de espacio con singularidad, rodeado por horizonte

Horizonte = punto de no retorno
= punto perfectamente regular

Singularidad = punto de curvatura infinita
= final del espaciotiempo
= final de la física conocida



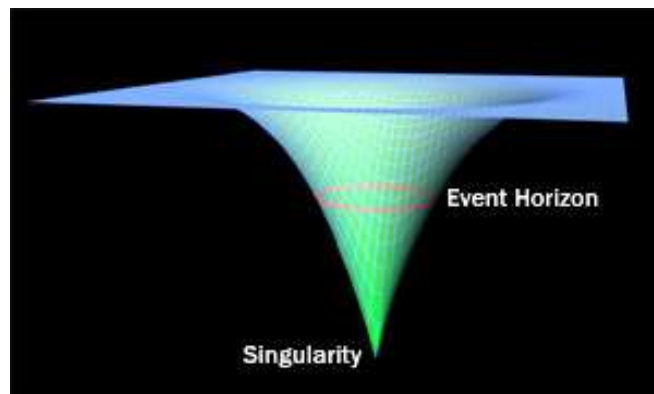
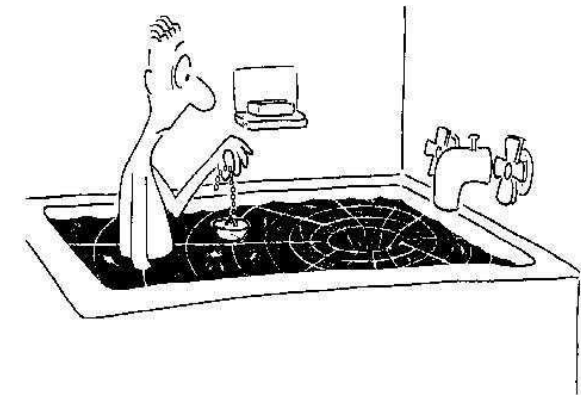
Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

B. Agujeros negros

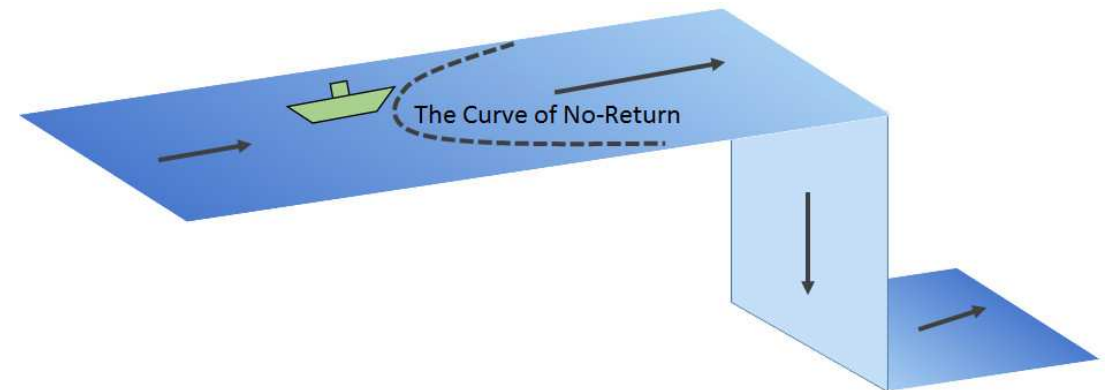
Agujero negro: = campo gravitatorio tal fuerte que confina la luz
= trozo de espacio con singularidad, rodeado por horizonte

Horizonte = punto de no retorno
= punto perfectamente regular

Singularidad = punto de curvatura infinita
= final del espaciotiempo
= final de la física conocida



NO



mejor

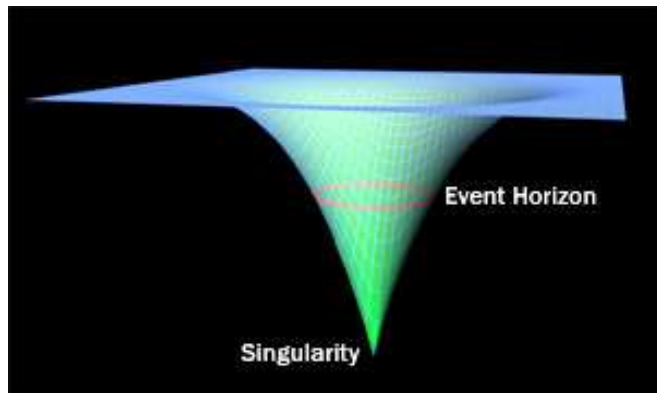
Soluciones del vacío: espacio curvo en ausencia de materia

B. Agujeros negros

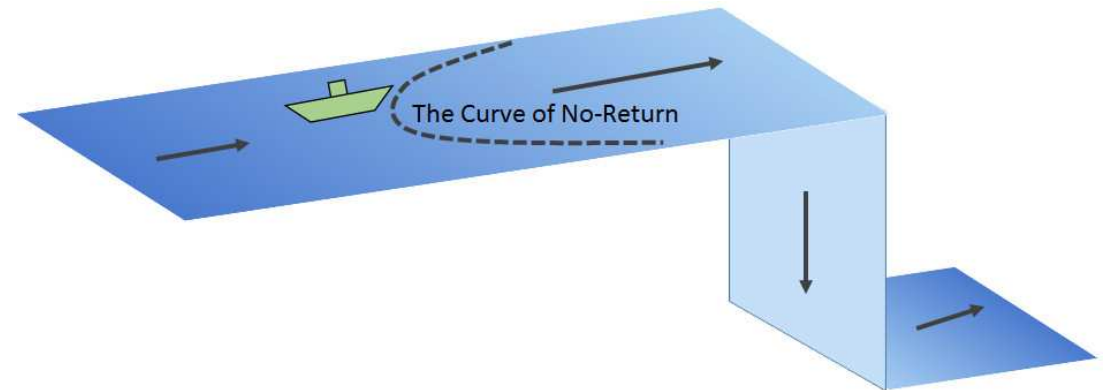
Agujero negro: = campo gravitatorio tal fuerte que confina la luz
= trozo de espacio con singularidad, rodeado por horizonte

Horizonte = punto de no retorno
= punto perfectamente regular

Singularidad = punto de curvatura infinita
= final del espaciotiempo
= final de la física conocida



NO



mejor

- No se puede quedar en reposo dentro del horizonte
- Agujero negro está totalmente vacío!!!

3.2 TCC en espacio curvo: Radiación de Hawking

Teoría Cuántica de Campos: fluctuaciones cuánticas

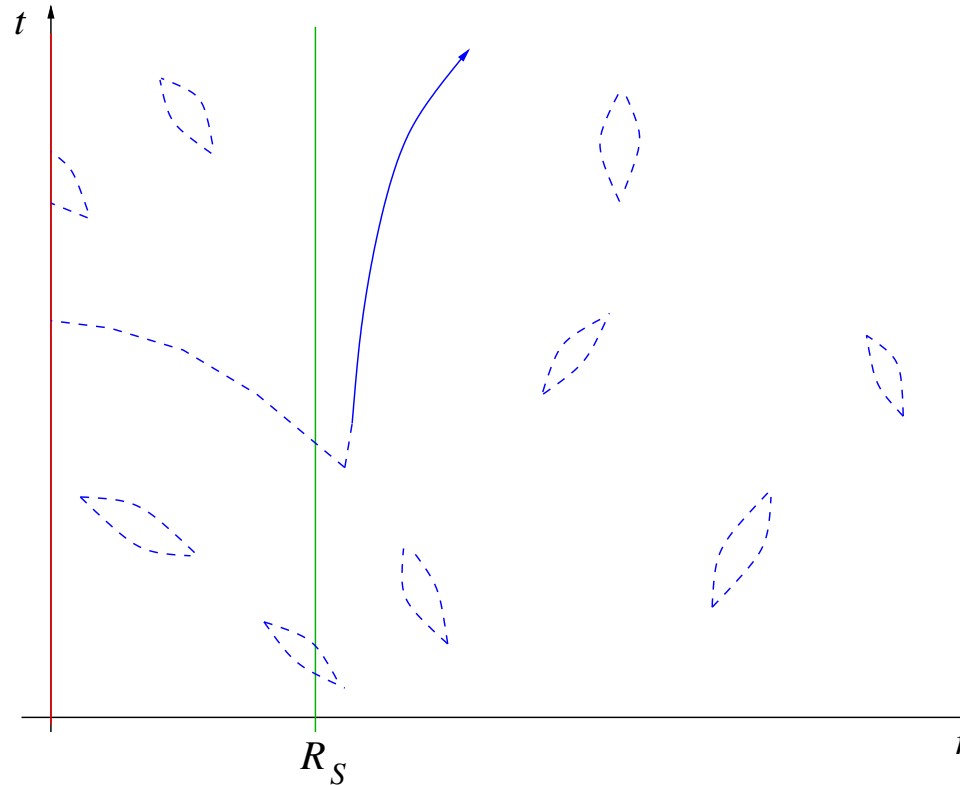
Relatividad General: espaciotiempo curvo

3.2 TCC en espacio curvo: Radiación de Hawking

Teoría Cuántica de Campos: fluctuaciones cuánticas

Relatividad General: espaciotiempo curvo

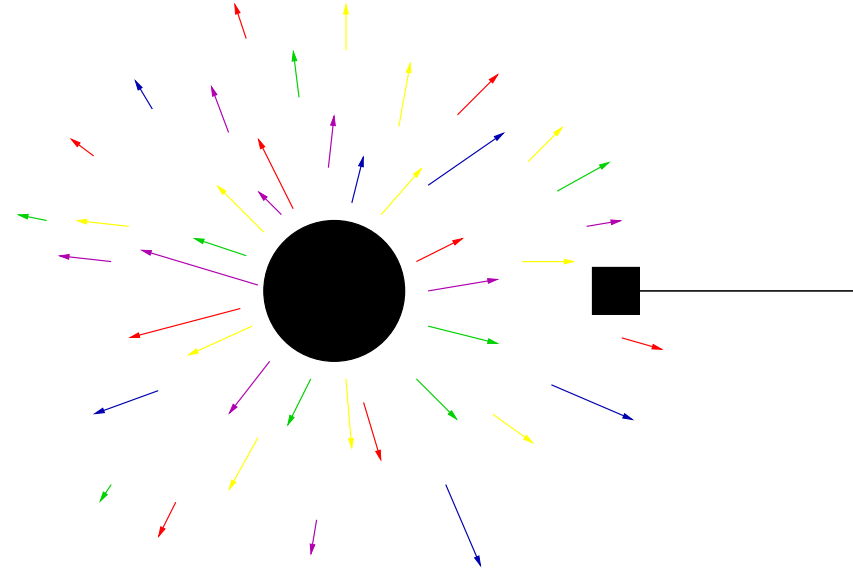
Hawking (1974): Creación de partículas cerca del horizonte



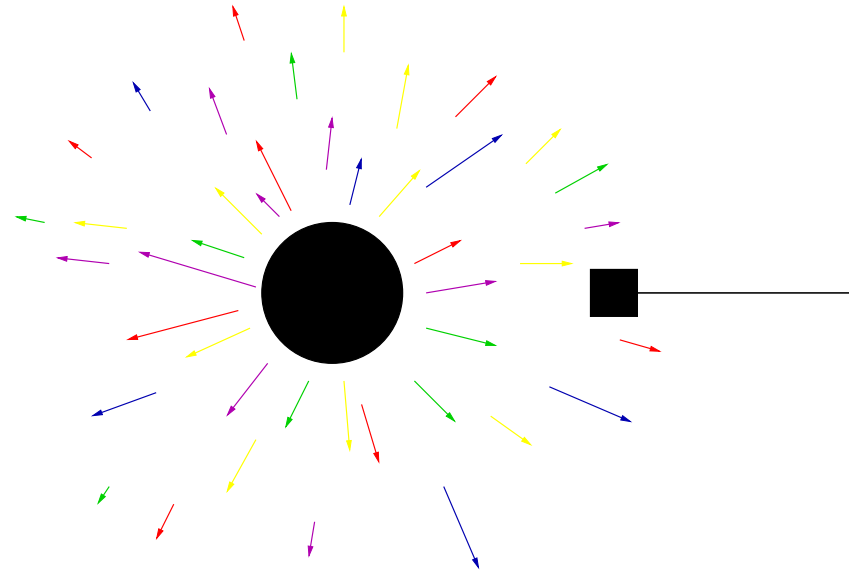
→ Análogo gravitacional del Efecto Schwinger

→ radiación térmica con $T = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi k_B}$

→ Agujero negro pierde energía por radiación térmica:



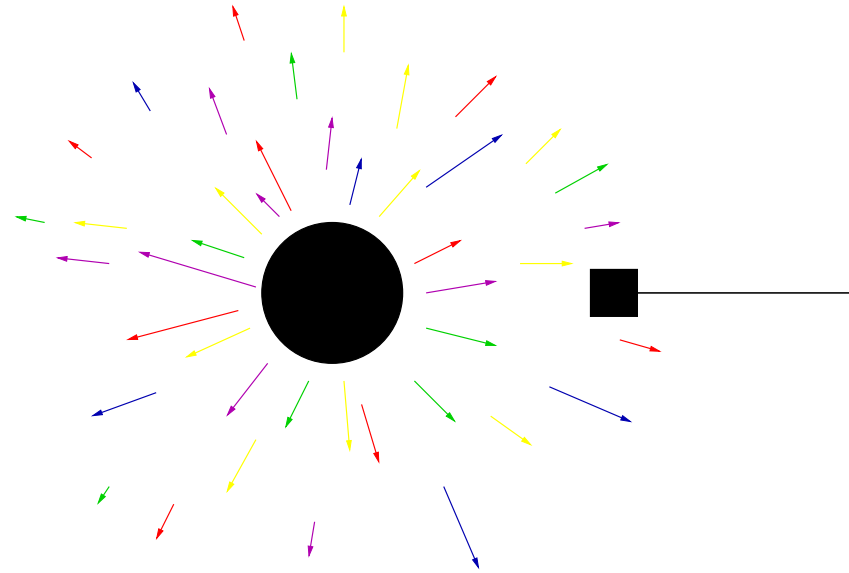
→ Agujero negro pierde energía por radiación térmica:



Preguntas abiertas

- ¿Los agujeros negros se evaporan completamente?
- ¿Qué pasa con la singularidad?
- ¿Qué pasa con la información?
- ...

→ Agujero negro pierde energía por radiación térmica:

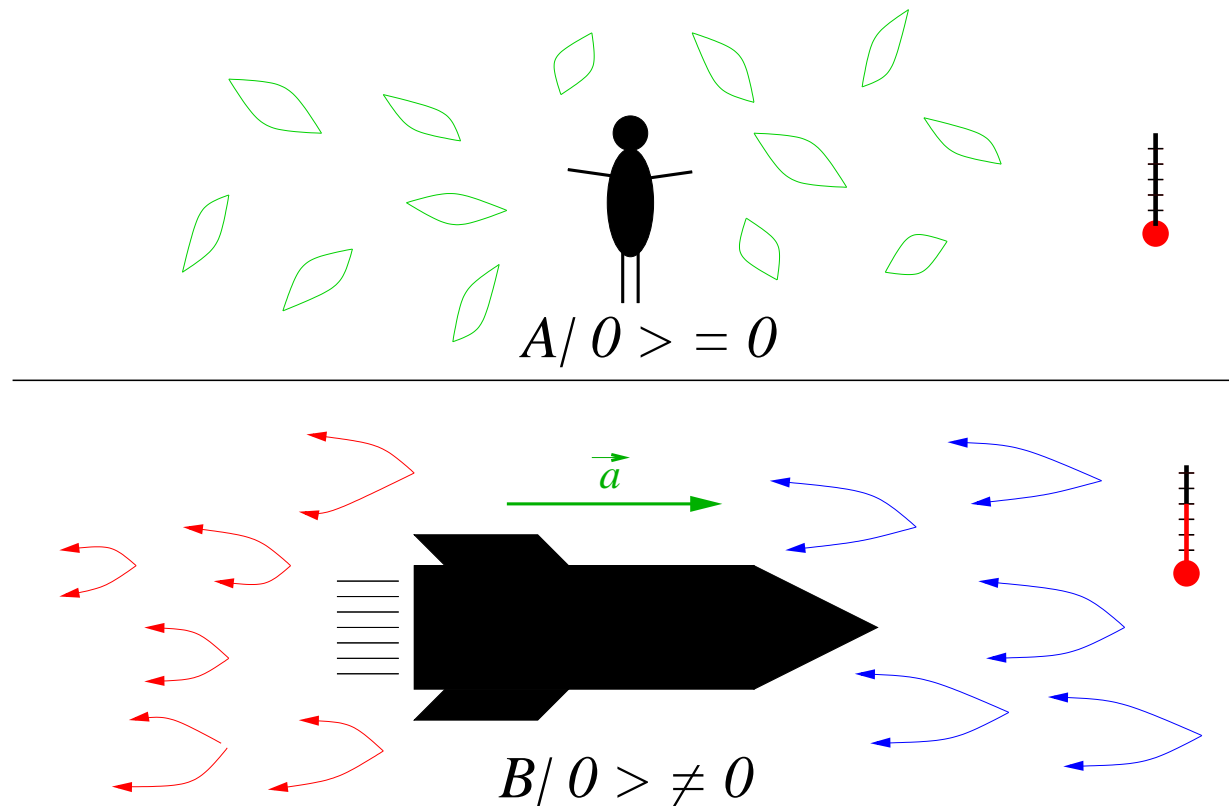


Preguntas abiertas

- ¿Los agujeros negros se evaporan completamente?
- ¿Qué pasa con la singularidad?
- ¿Qué pasa con la información?
- ...

→ **Gravedad cuántica debería dar estas respuestas**

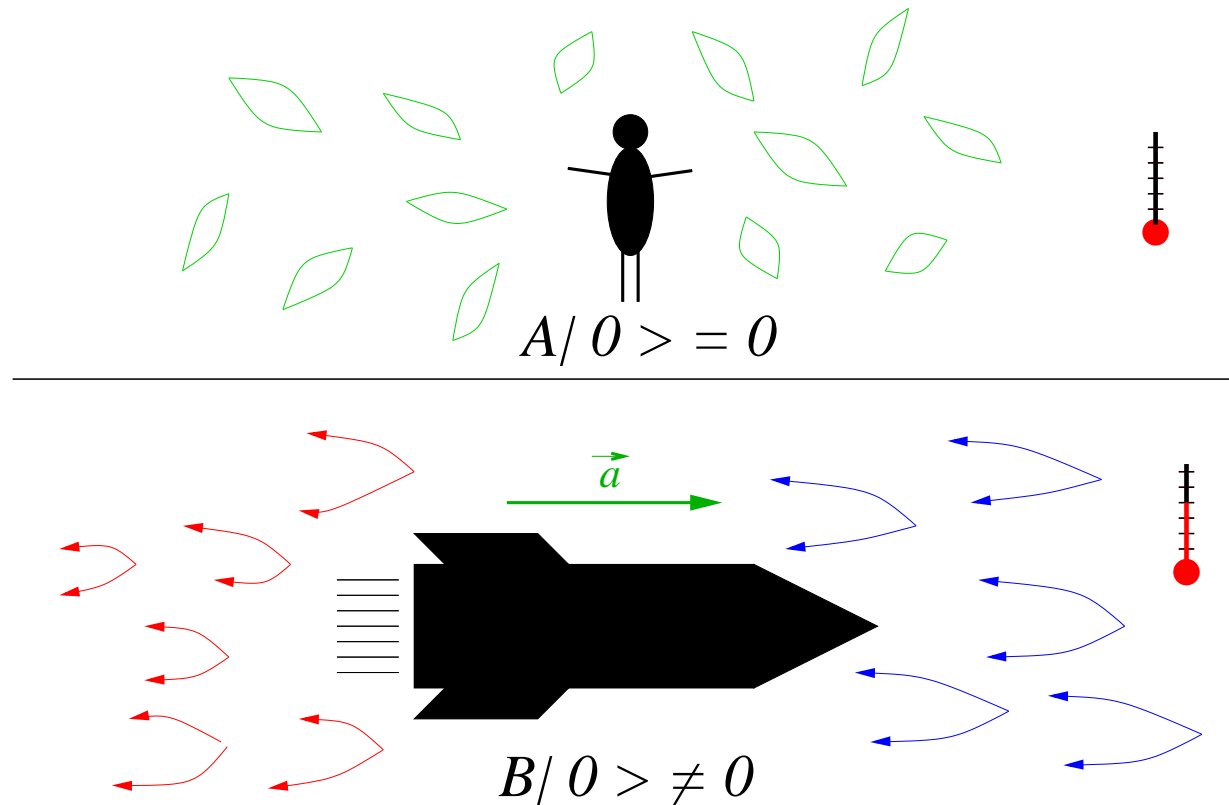
Efecto Unruh: Espacio plano visto por observador acelerado



Unruh (1974): entender radiación de Hawking para caso sencillo

Observador acelerado observa radiación térmica: $T = \frac{\hbar a}{2\pi k_B}$

Efecto Unruh: Espacio plano visto por observador acelerado



Unruh (1974): entender radiación de Hawking para caso sencillo

Observador acelerado observa **radiación térmica**: $T = \frac{\hbar a}{2\pi k_B}$

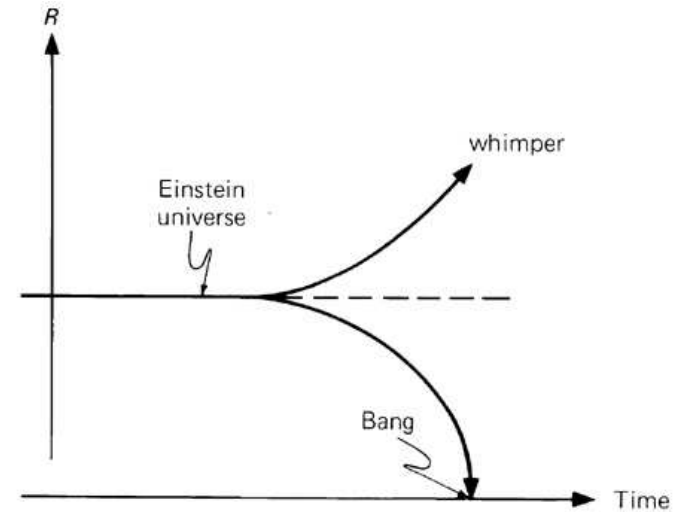
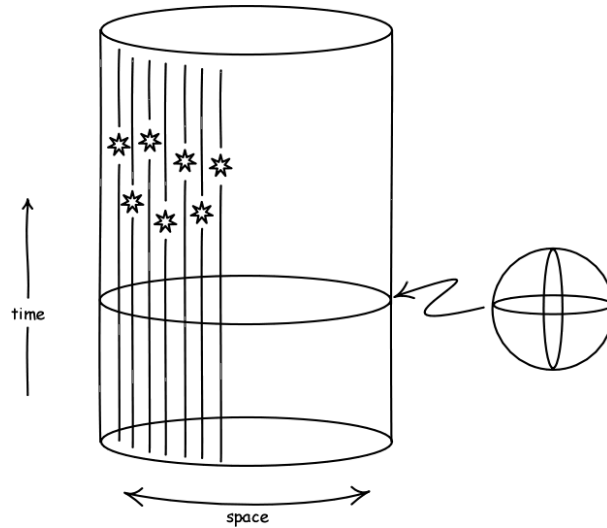
→ Vacío en Teoría cuántica de Campos invariante bajo transf Lorentz

→ **Vacío no invariante** bajo cambio generales de coordenadas

$$A|0\rangle = 0, \quad B|0\rangle = (\alpha A + \beta A^\dagger)|0\rangle \neq 0$$

3.3 Energía del vacío y constante cosmológica

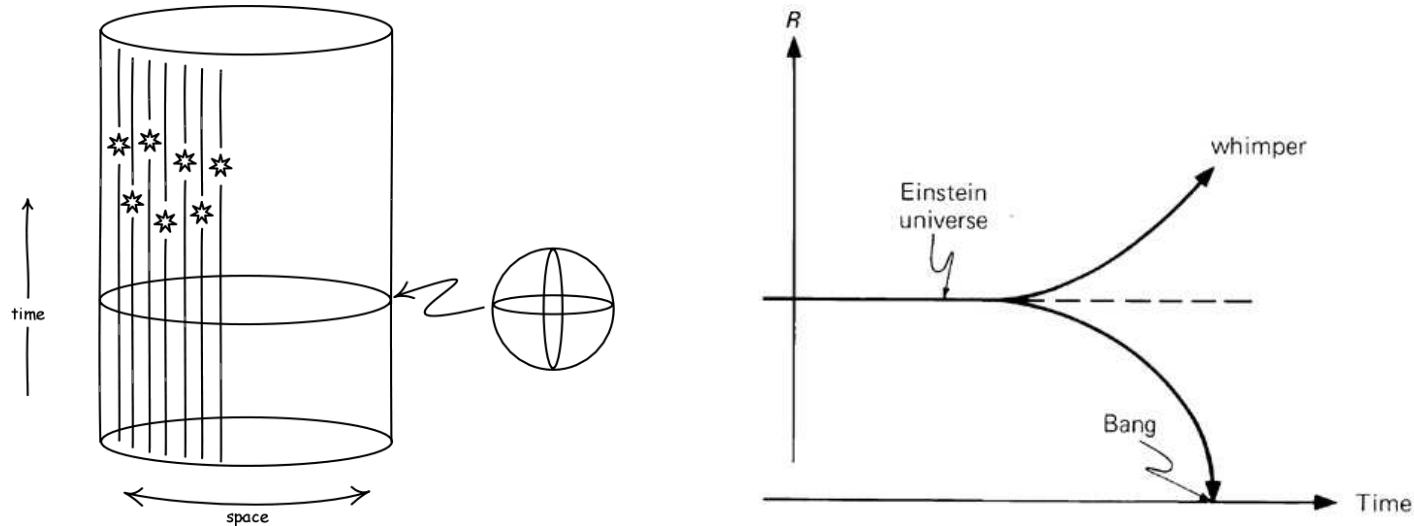
Introducida por Einstein en 1917 para conseguir un universo estático



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

3.3 Energía del vacío y constante cosmológica

Introducida por Einstein en 1917 para conseguir un universo estático



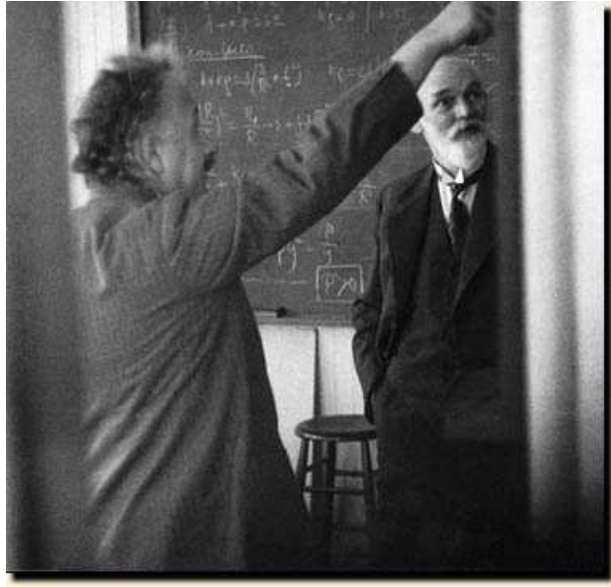
“...que las ecuaciones de gravedad que he defendido hasta ahora necesitan una pequeña modificación.”

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

→ término de **repulsión gravitatoria universal**

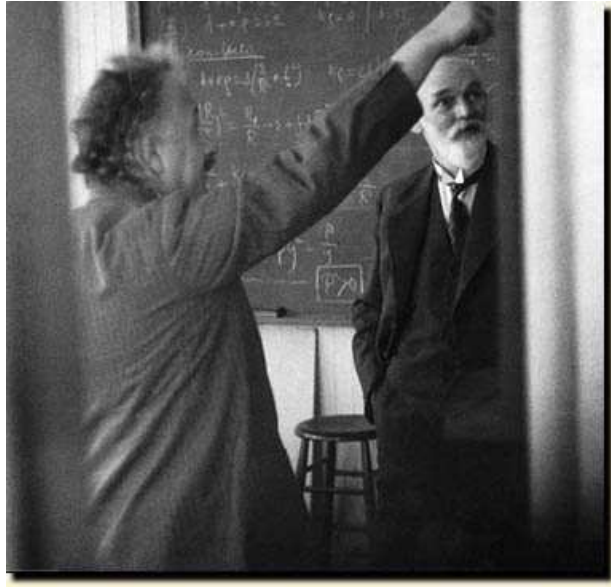
→ Eddington: equilibrio inestable

De Sitter y Eddington (y Hubble) convencen a Einstein de universos dinámicos



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

De Sitter y Eddington (y Hubble) convencen a Einstein de universos dinámicos



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

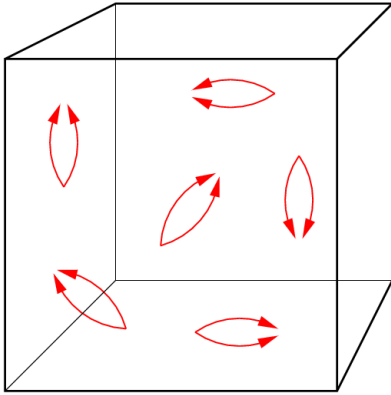
- ¿Por qué de todos los valores posibles, $\Lambda = 0$ en nuestro universo?

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

→ Sí $\Lambda \neq 0$ está permitido, ¿por qué $\Lambda = 0$?

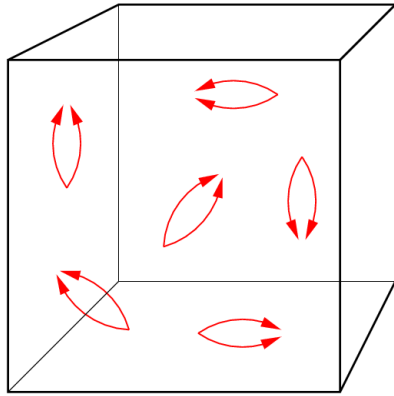
→ ¿Hay una simetría que lo protege?

- ¿Por qué las **fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen** a la energía total del universo?



- TCC predice una energía del vacío no-trivial
- Gravedad se acopla a todas las formas de energía
- TCC & Rel Gen predicen una constante cosmológica efectiva

- ¿Por qué las **fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen** a la energía total del universo?

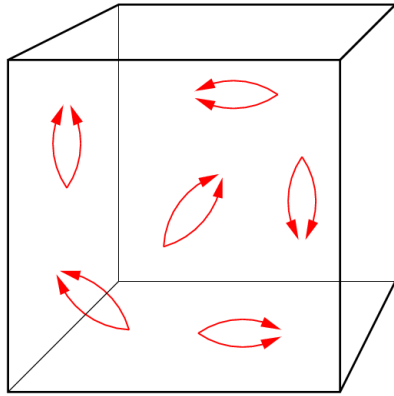


- TCC predice una energía del vacío no-trivial
- Gravedad se acopla a todas las formas de energía
- TCC & Rel Gen predicen una constante cosmológica efectiva

$$\rho_{\text{vac}} \gtrsim \frac{m_P}{\ell_P} \sim 10^{120} \text{ GeV}/m^3, \quad \rho_\Lambda \sim 1 \text{ GeV}/m^3 \quad \implies \quad \Lambda_\star \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

- Peor predicción teórica de la historia de la Ciencia...

- ¿Por qué las **fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen** a la energía total del universo?



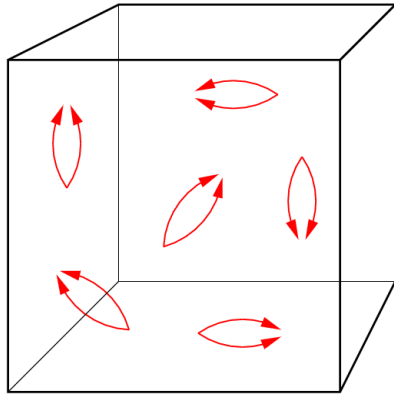
- TCC predice una energía del vacío no-trivial
- Gravedad se acopla a todas las formas de energía
- TCC & Rel Gen predicen una constante cosmológica efectiva

$$\rho_{\text{vac}} \gtrsim \frac{m_P}{\ell_P} \sim 10^{120} \text{ GeV}/m^3, \quad \rho_\Lambda \sim 1 \text{ GeV}/m^3 \quad \implies \quad \Lambda_\star \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

→ Peor predicción teórica de la historia de la Ciencia...

- **Energía oscura** acelera la expansión del universo!
¿Tiene la constante cosmológica **algo que ver con energía oscura**?

- ¿Por qué las **fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen** a la energía total del universo?



- TCC predice una energía del vacío no-trivial
- Gravedad se acopla a todas las formas de energía
- TCC & Rel Gen predicen una constante cosmológica efectiva

$$\rho_{\text{vac}} \gtrsim \frac{m_P}{\ell_P} \sim 10^{120} \text{ GeV}/m^3, \quad \rho_\Lambda \sim 1 \text{ GeV}/m^3 \quad \implies \quad \Lambda_\star \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

→ Peor predicción teórica de la historia de la Ciencia...

- **Energía oscura** acelera la expansión del universo!

¿Tiene la constante cosmológica **algo que ver con energía oscura**?

→ No por su tamaño: $\Lambda_\star \sim 10^{-120} \Lambda_0$

→ Sí por su manera de diluirse: $w_{\Lambda_\star} = -1,13 \pm 0,25$ (NB: $w_{\Lambda_0} = -1$)

Problema vieja de la constante cosmológica (pre-1998):

¿Por qué las fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen a una constante cosmológica efectiva observable, que influye en la expansión del universo?

Problema vieja de la constante cosmológica (pre-1998):

¿Por qué las fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen a una constante cosmológica efectiva observable, que influye en la expansión del universo?

Problema nueva de la constante cosmológica (post-1998):

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

Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja en comparación con Λ_0 ?

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

Problema vieja de la constante cosmológica (pre-1998):

¿Por qué las fluctuaciones cuánticas del vacío no contribuyen a una constante cosmológica efectiva observable, que influye en la expansión del universo?

Problema nueva de la constante cosmológica (post-1998):

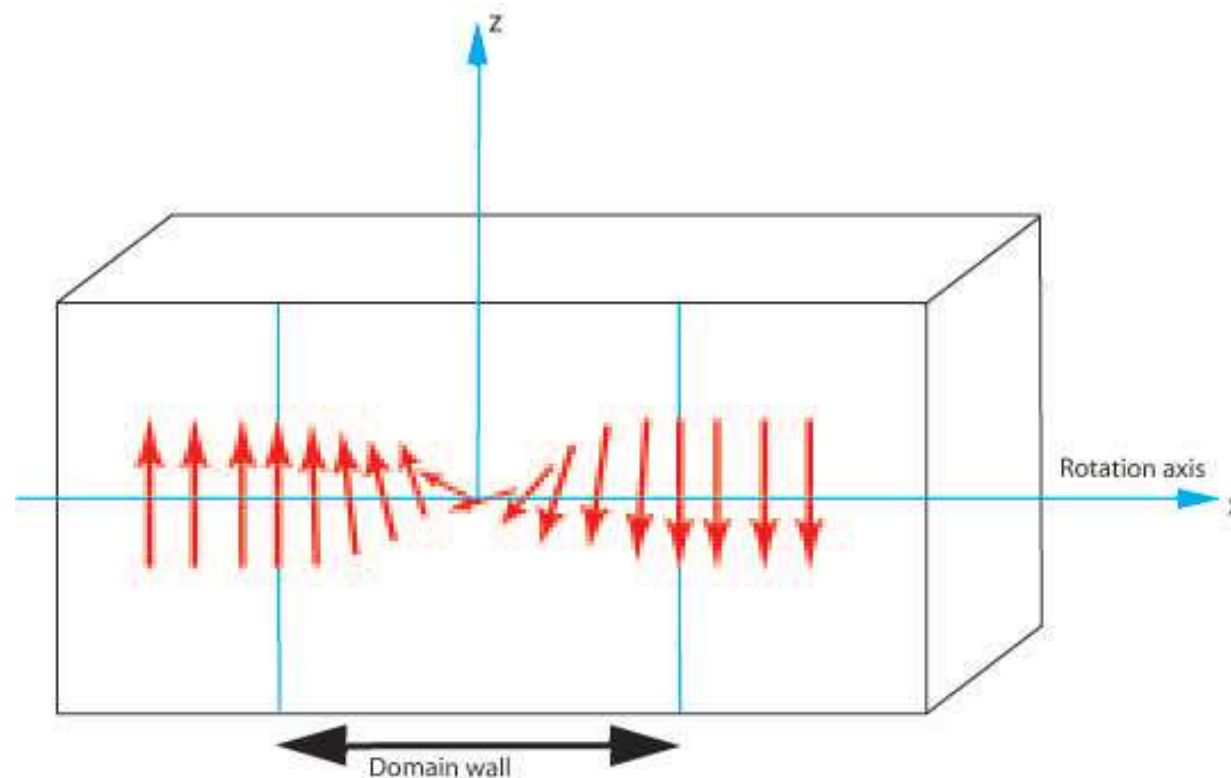
¿Son las fluctuaciones cuánticas del vacío la causa de la aceleración del universo?

Si lo son, ¿por qué su contribución es tan baja en comparación con Λ_0 ?

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

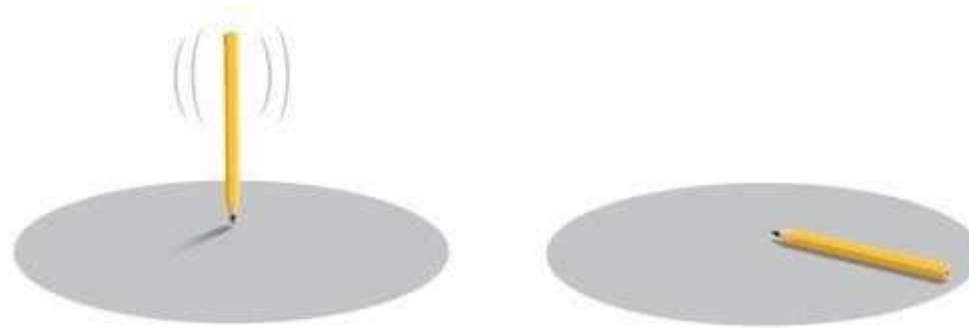
—→ No entendemos bien los grados de libertad cuánticos de la gravedad!!

4. Ruptura espontánea de simetría y defectos topológicos



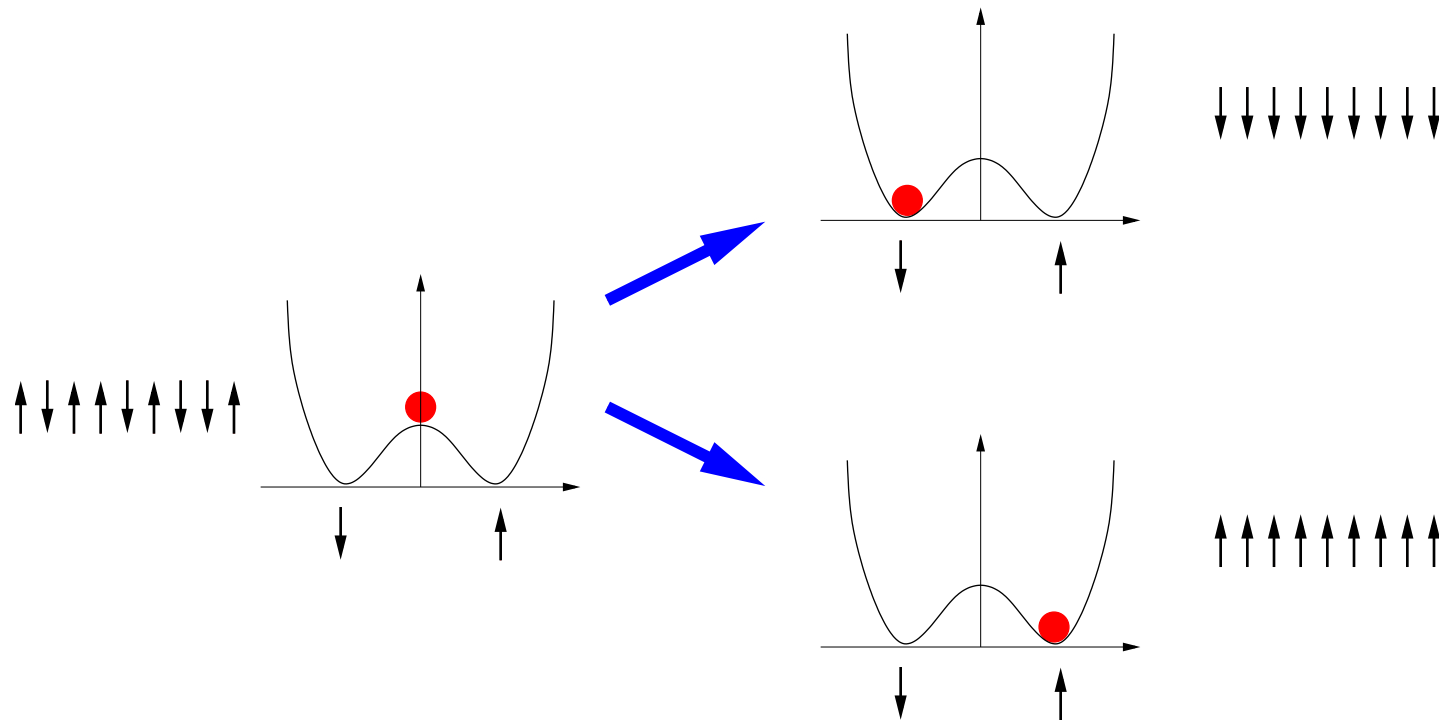
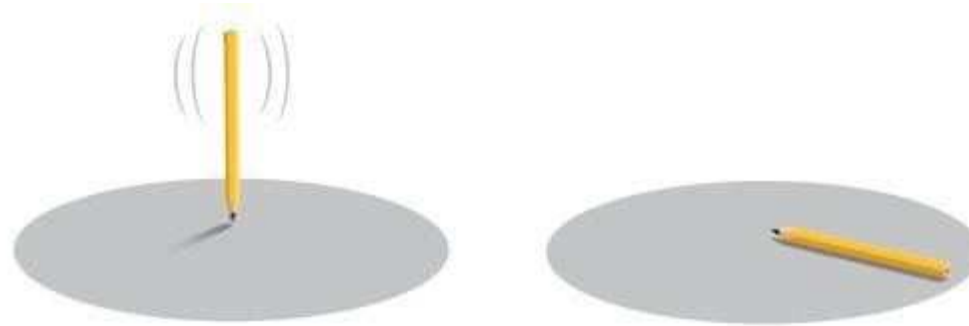
Ruptura espontánea de simetría

Estado simétrico inestable decae en estado estable no-simétrico

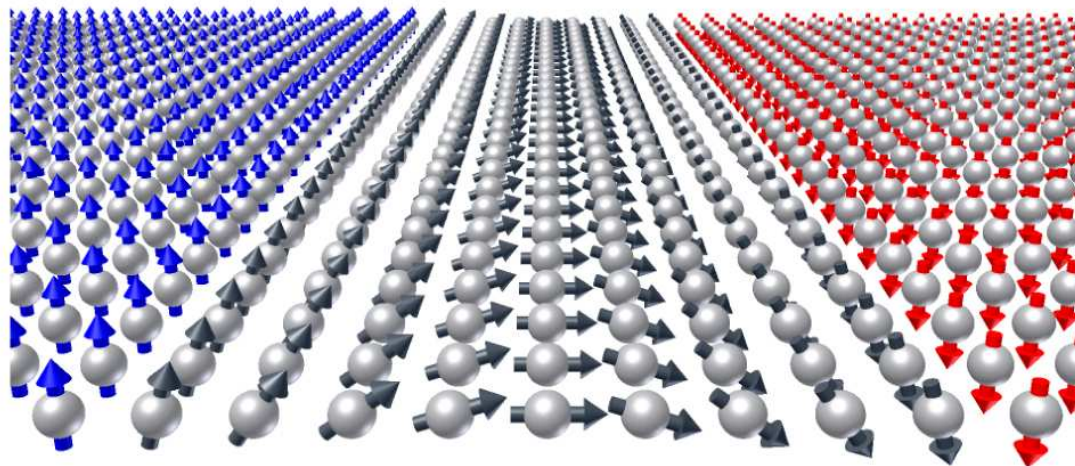
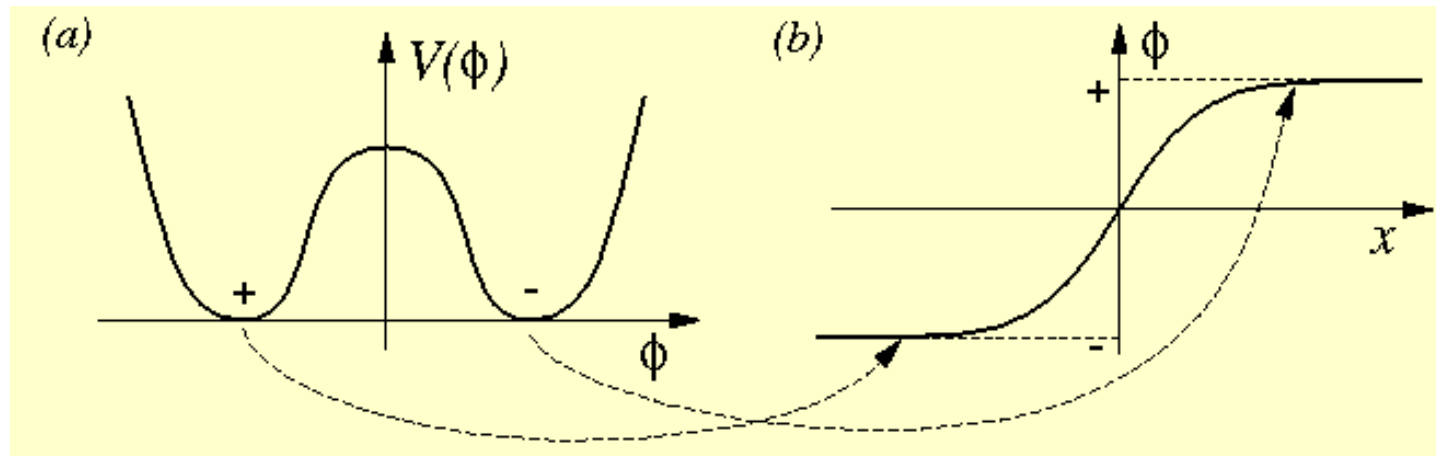


Ruptura espontánea de simetría

Estado simétrico inestable decae en estado estable no-simétrico



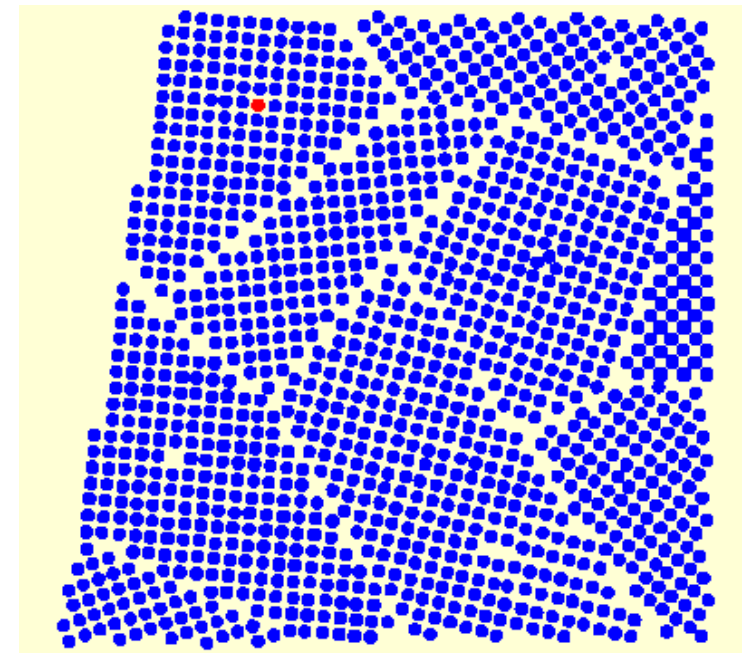
Pared de dominio: interpolación entre dos vacíos
→ energía centrada en zona de transición



Domain 1

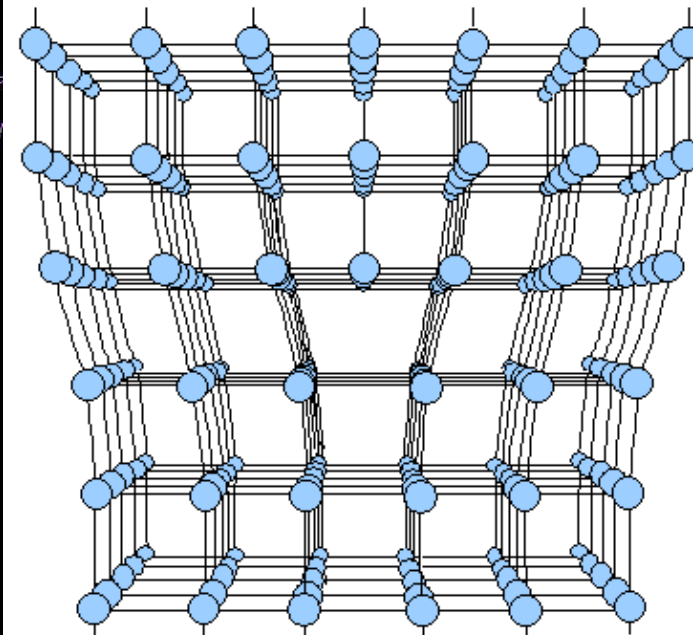
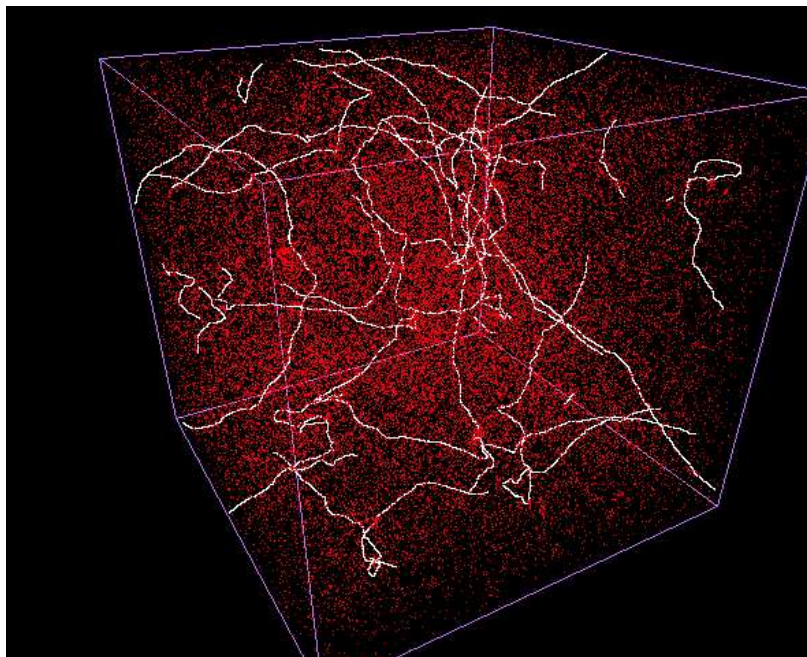
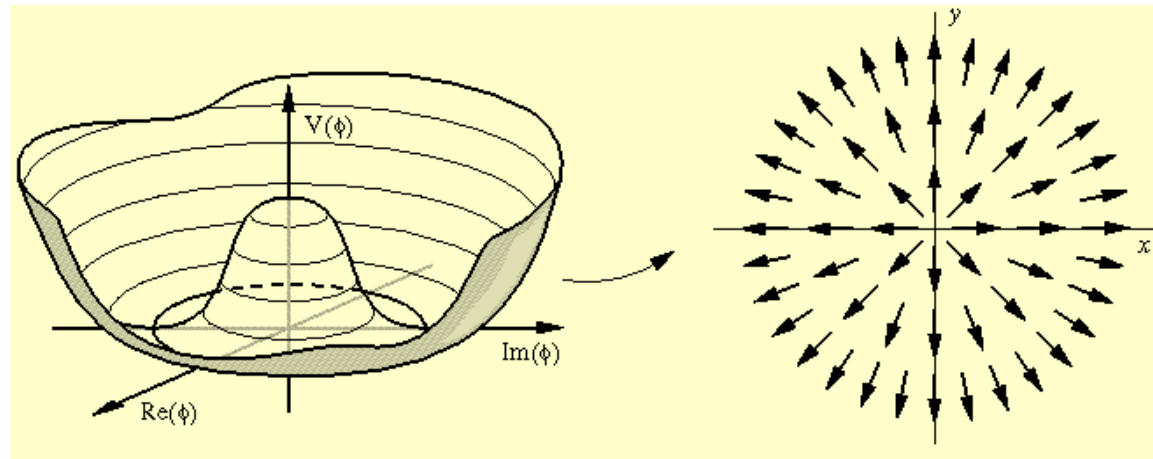
Domain wall

Domain 2

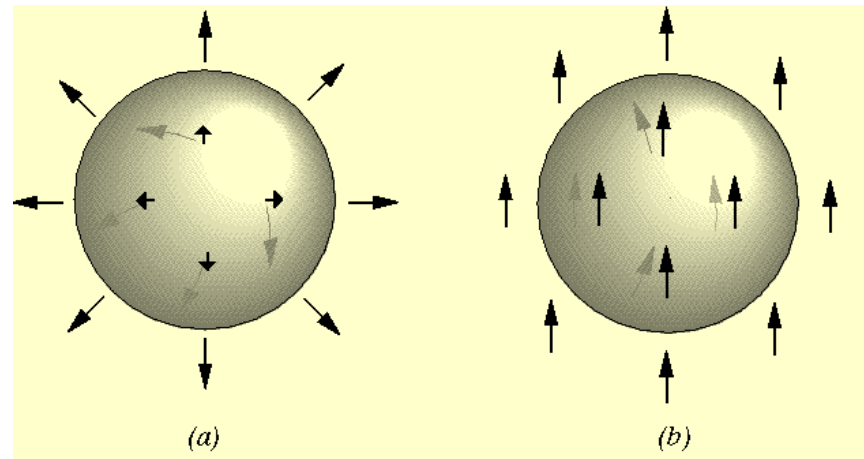


Vórtice: vacío degenerado en in círculo

→ energía centrada a lo largo de una dimensión



Monopolo magnético: vacío degenerado en in esfera



proton **electron**

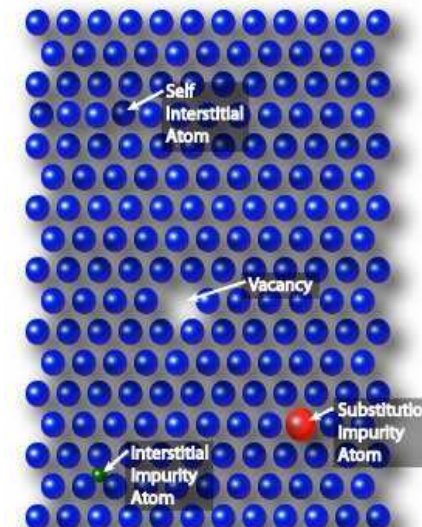


electric charges

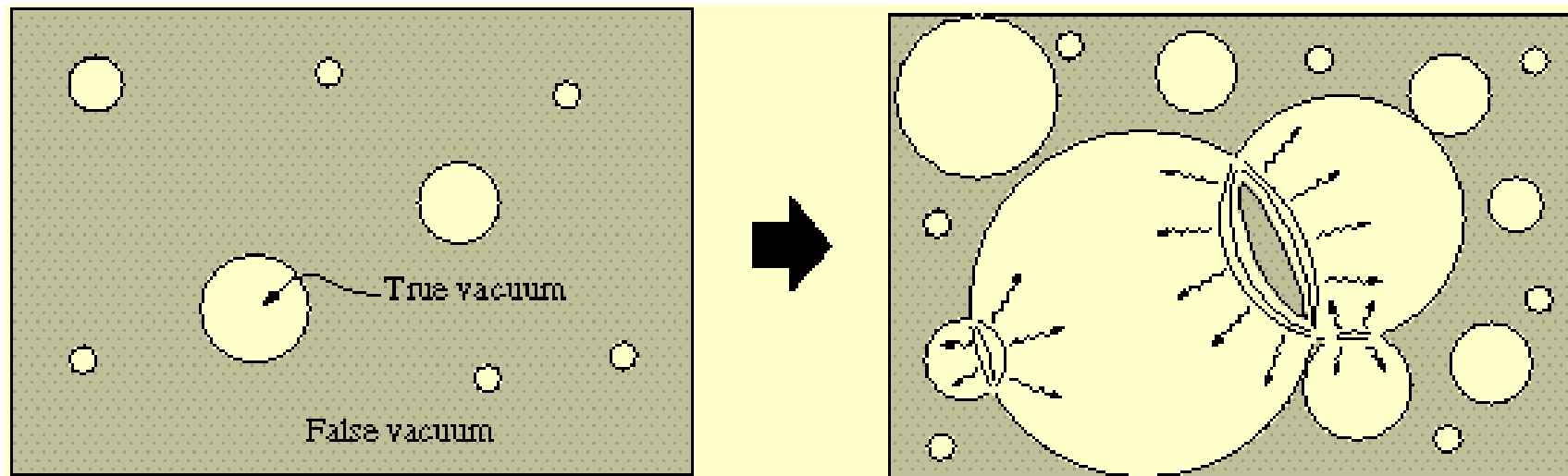
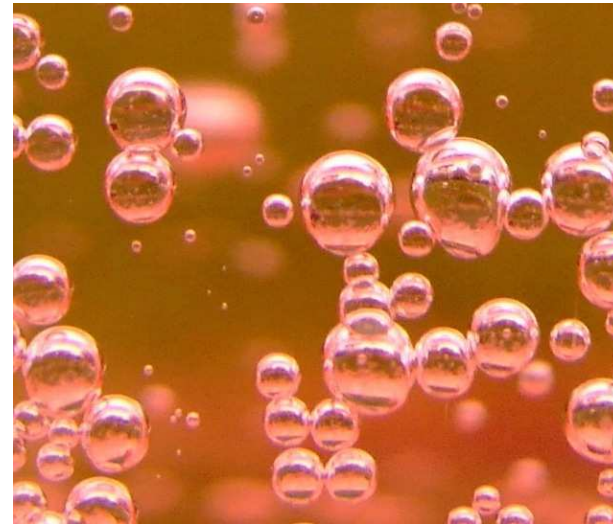
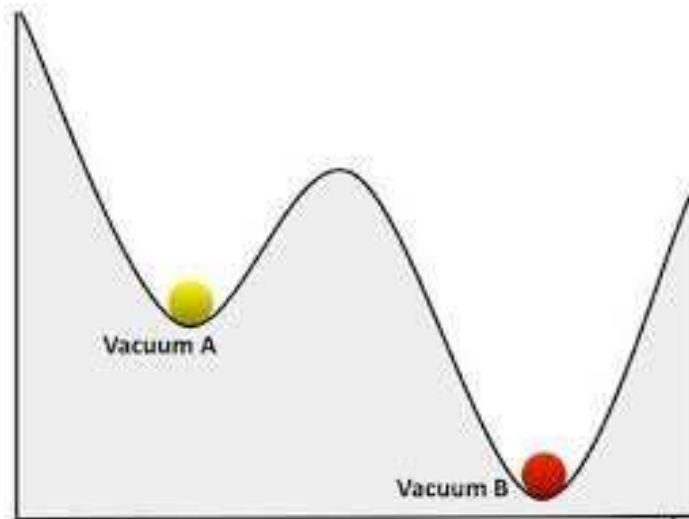


magnetic dipole

magnetic monopoles?



Universo como burbuja?



Big Bang como nucleación de burbujas?

Resumen

- Vacío \neq ausencia de materia y luz
Vacío = estado de energía más baja

Resumen

- Vacío \neq ausencia de materia y luz
Vacío = estado de energía más baja

- Vacío cuántico tiene estructura complicado

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar \quad \& \quad E = mc^2 \quad \implies \text{fluctuaciones cuánticas}$$

Resumen

- Vacío \neq ausencia de materia y luz
Vacío = estado de energía más baja
- Vacío cuántico tiene estructura complicado
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar \quad \& \quad E = mc^2 \quad \implies \text{fluctuaciones cuánticas}$$
- Efectos de vacío en Teoría cuántica de Campos
 - Polarización del vacío, efecto Lamb, emisión espontánea, ...
 - Efecto Schwinger
 - Efecto Casimir

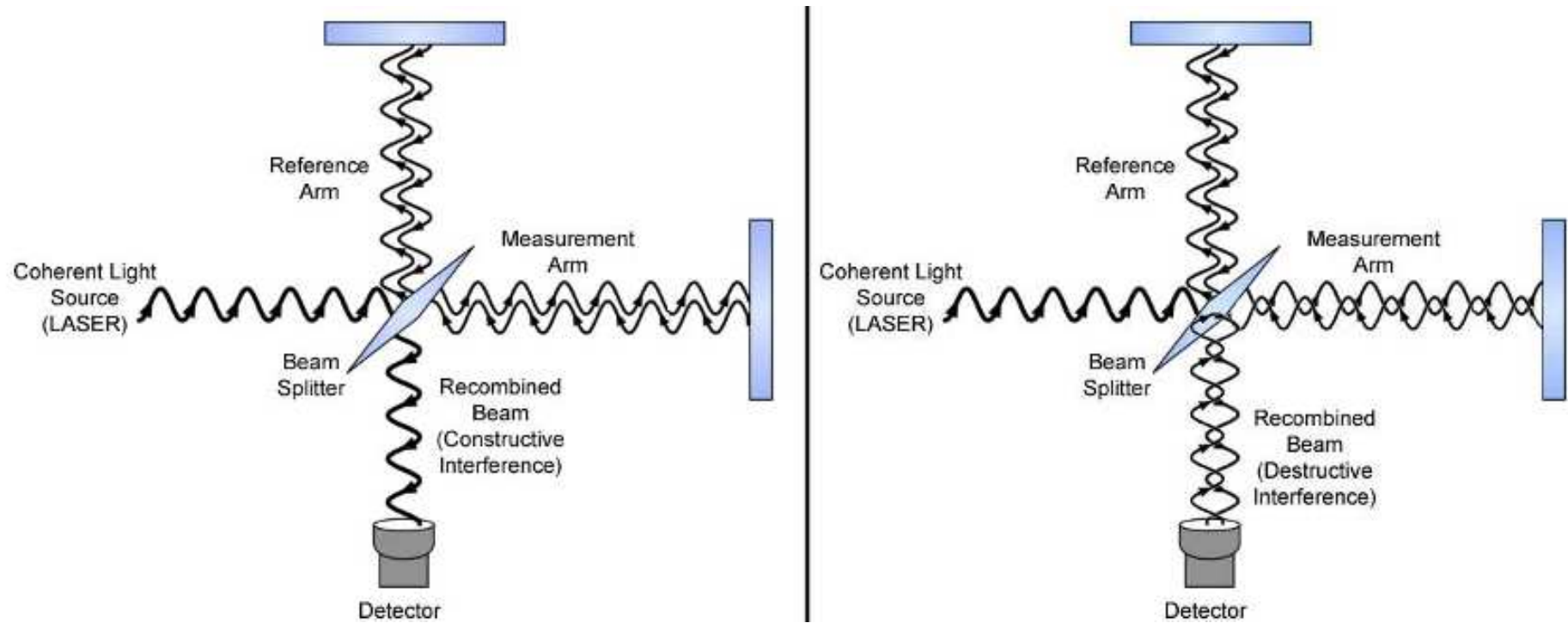
Resumen

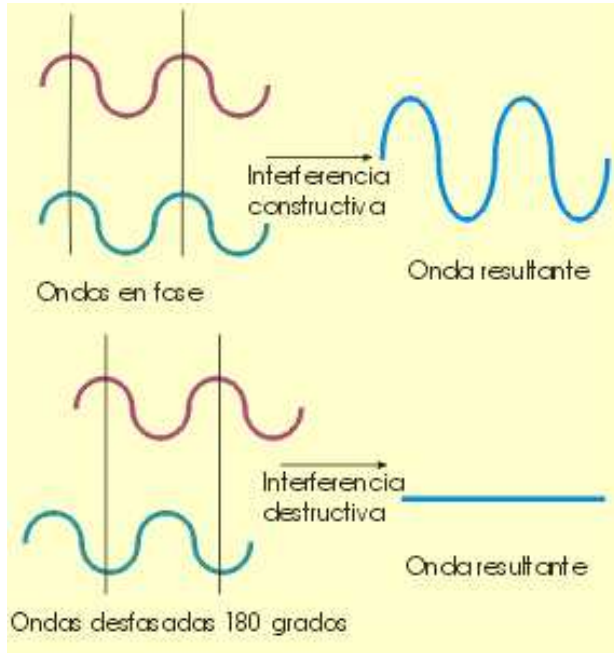
- Vacío \neq ausencia de materia y luz
Vacío = estado de energía más baja
- Vacío cuántico tiene estructura complicado
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar \quad \& \quad E = mc^2 \quad \implies \text{fluctuaciones cuánticas}$$
- Efectos de vacío en Teoría cuántica de Campos
 - Polarización del vacío, efecto Lamb, emisión espontánea, ...
 - Efecto Schwinger
 - Efecto Casimir
- Efectos de vacío en TCC en espacio curvos
 - Radiación de Unruh, radiación de Hawking
 - Constante cosmológica y energía del vacío?

Resumen

- Vacío \neq ausencia de materia y luz
Vacío = estado de energía más baja
- Vacío cuántico tiene estructura complicado
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar \quad \& \quad E = mc^2 \quad \implies \text{fluctuaciones cuánticas}$$
- Efectos de vacío en Teoría cuántica de Campos
 - Polarización del vacío, efecto Lamb, emisión espontánea, ...
 - Efecto Schwinger
 - Efecto Casimir
- Efectos de vacío en TCC en espacio curvos
 - Radiación de Unruh, radiación de Hawking
 - Constante cosmológica y energía del vacío?
- Defectos topológicos cuando vacío degenerado
→ Paredes de dominio, vórtices, monopolos magnéticos

¡Gracias!





Láser recorre brazos ~ 75 veces

Onda gravitacional cambia longitud de brazos

\Rightarrow cambia número de longitud de ondas en brazo

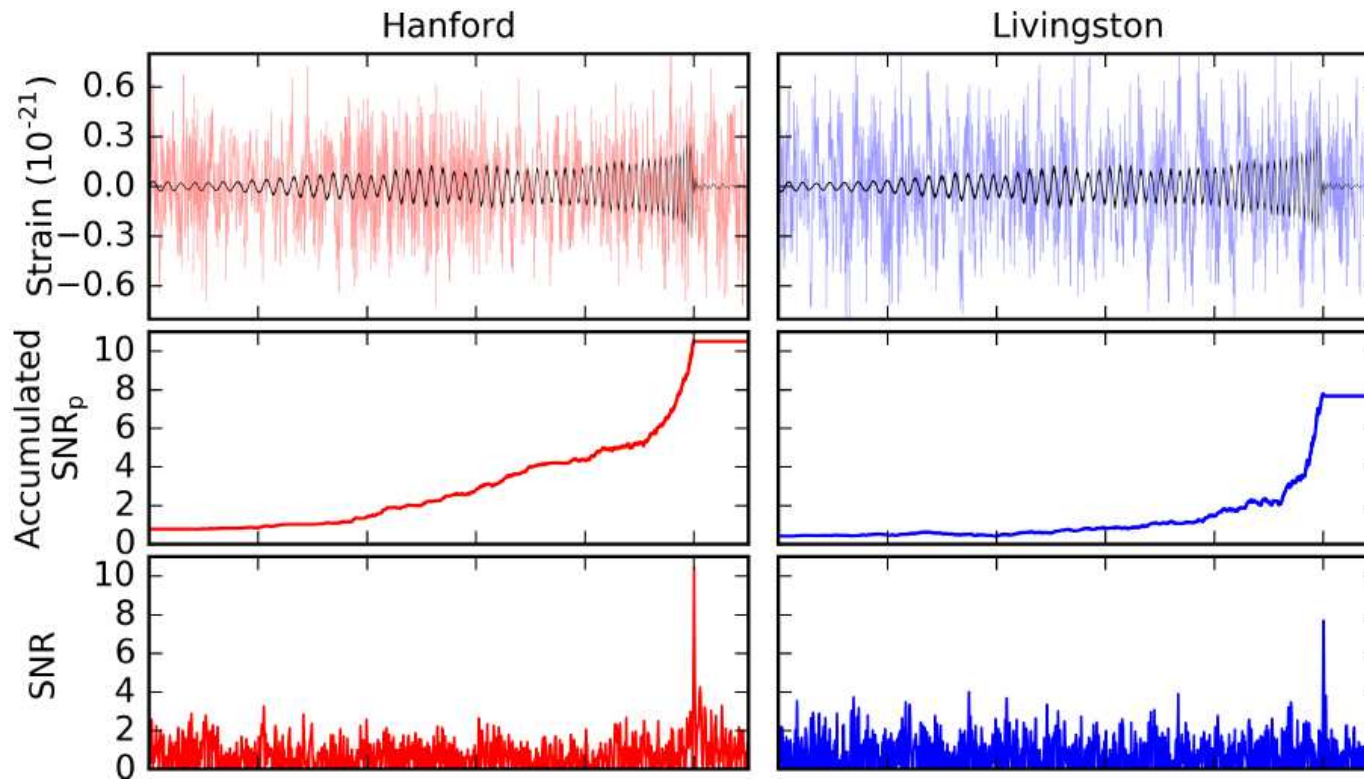
\Rightarrow cambia la intensidad de la señal medida

Sensibilidad: $\Delta L/L = 10^{-21}$

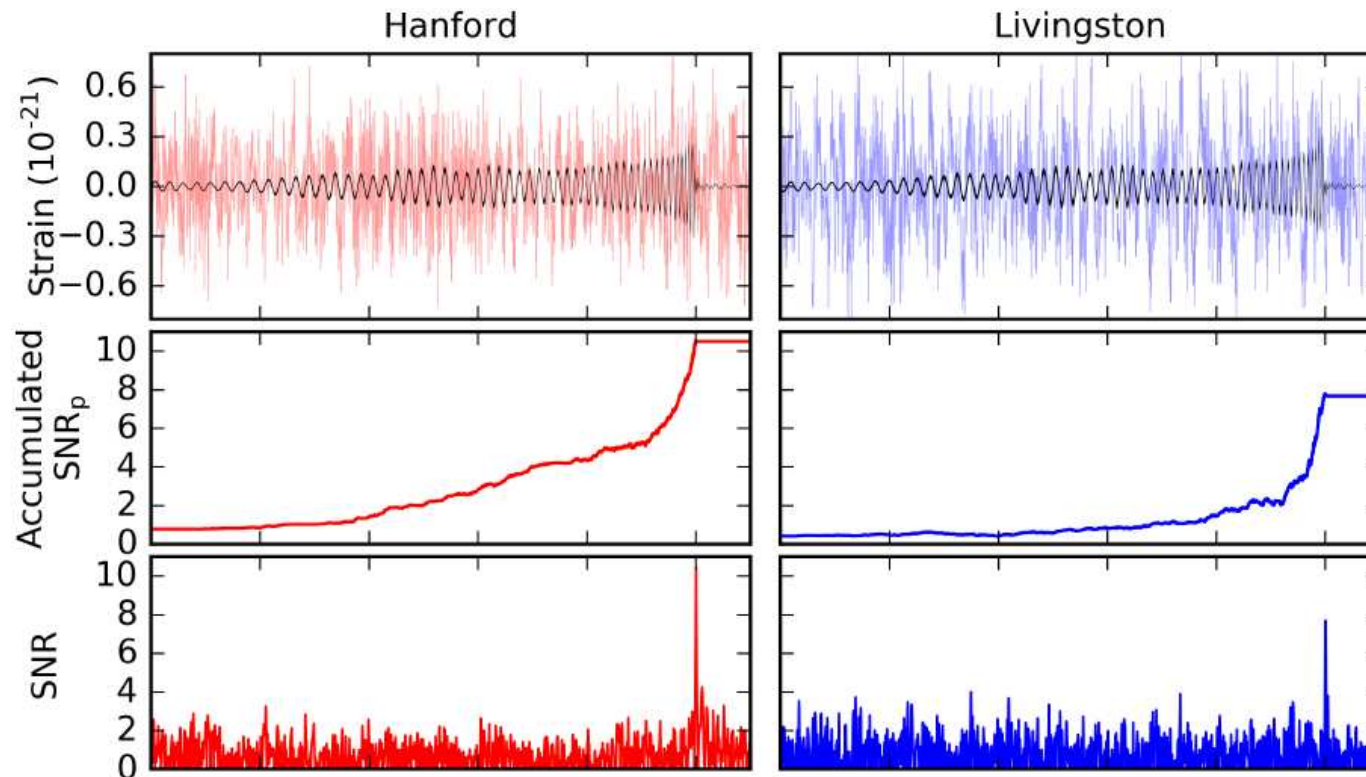
$$\Delta L \sim 10^{-18} m$$

NB: radio de carga del protón $R_p = 0,8 \cdot 10^{-15} m$

Segundo evento: 26 de diciembre 2015 a las 3:38 UTC: **GW151226**



Segundo evento: 26 de diciembre 2015 a las 3:38 UTC: **GW151226**



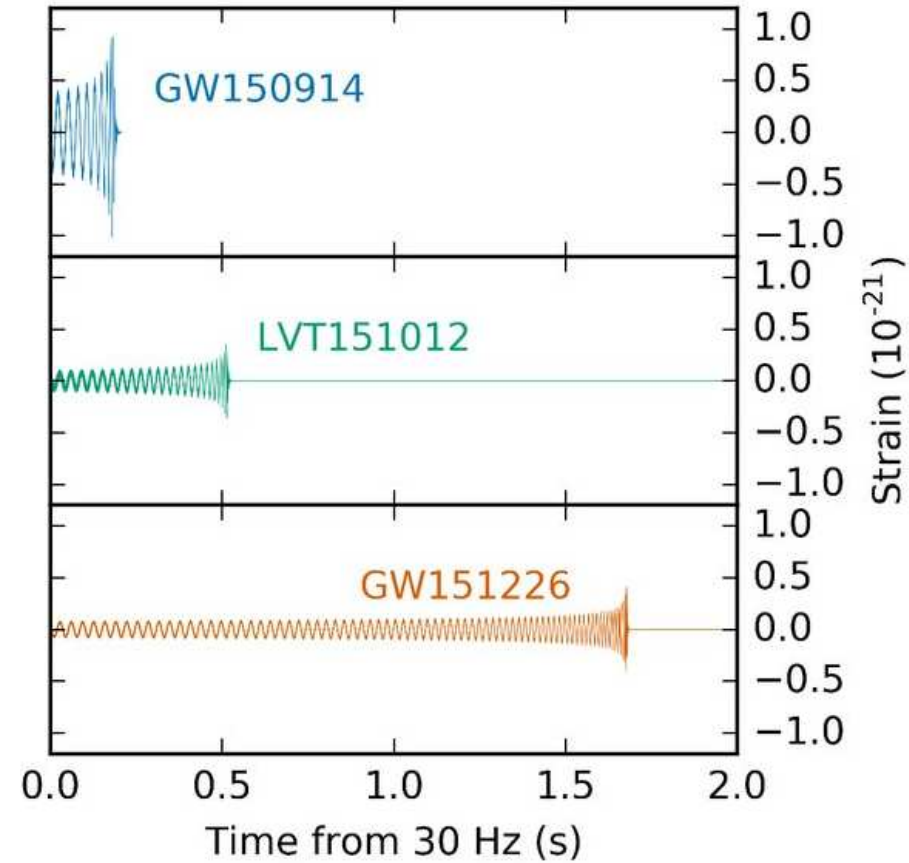
Señal: 35 a 450 Hz en 0, 2s

Fusión de agujeros negros con $M_1 \approx 14M_\odot$ y $M_2 \approx 7M_\odot$

Agujero negro resultante con $M_3 \approx 21M_\odot \implies E/c^2 \approx 1M_\odot$

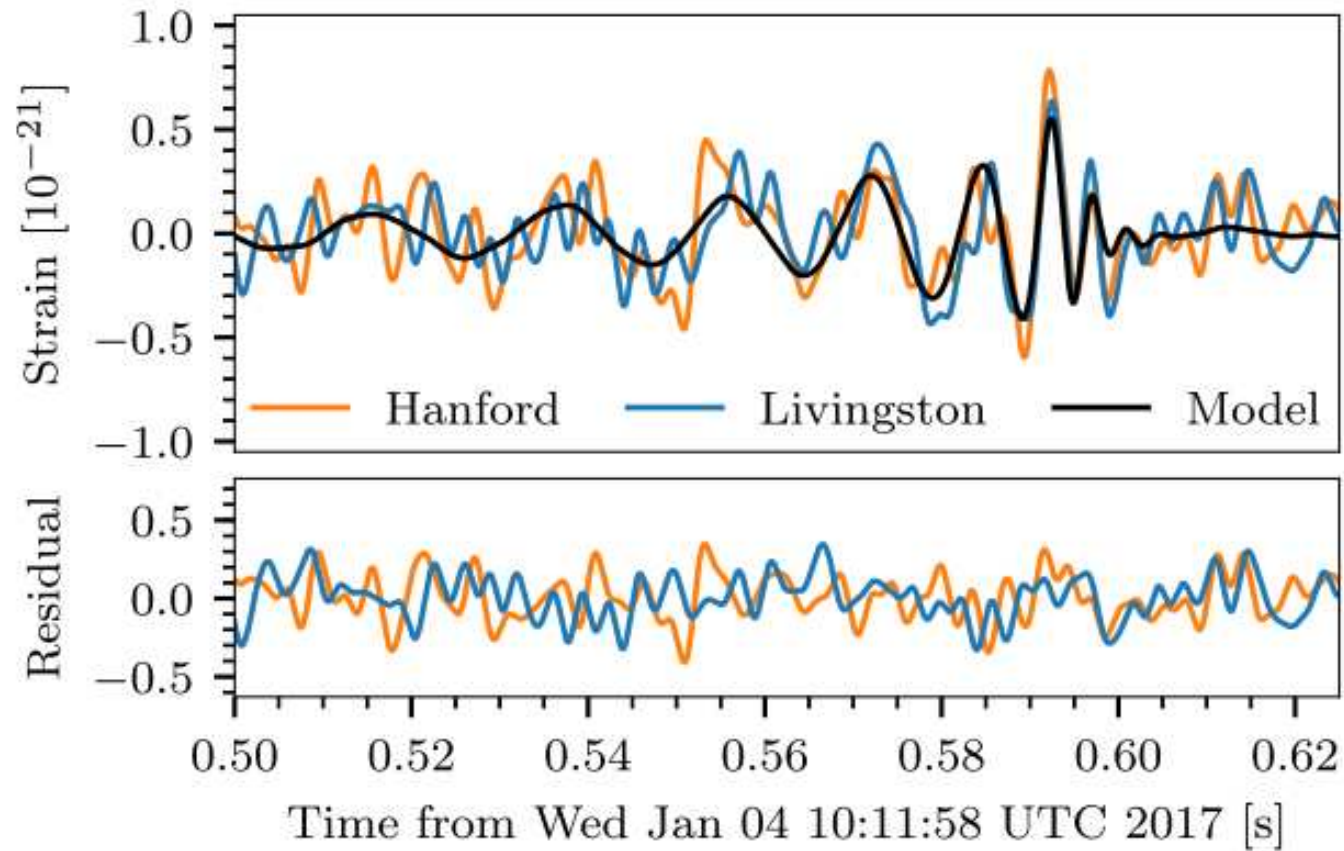
Distancia: $1,4 \cdot 10^9$ años-luz

Candidato: 12 de octubre 2015 a las 9h54 UTC: **LVT151012**



Data estadísticamente no suficientemente significativa ($\sim 2\sigma$)...

Tercer evento: 4 de enero 2017 a las 10:11:58.6 UTC: **GW170104**

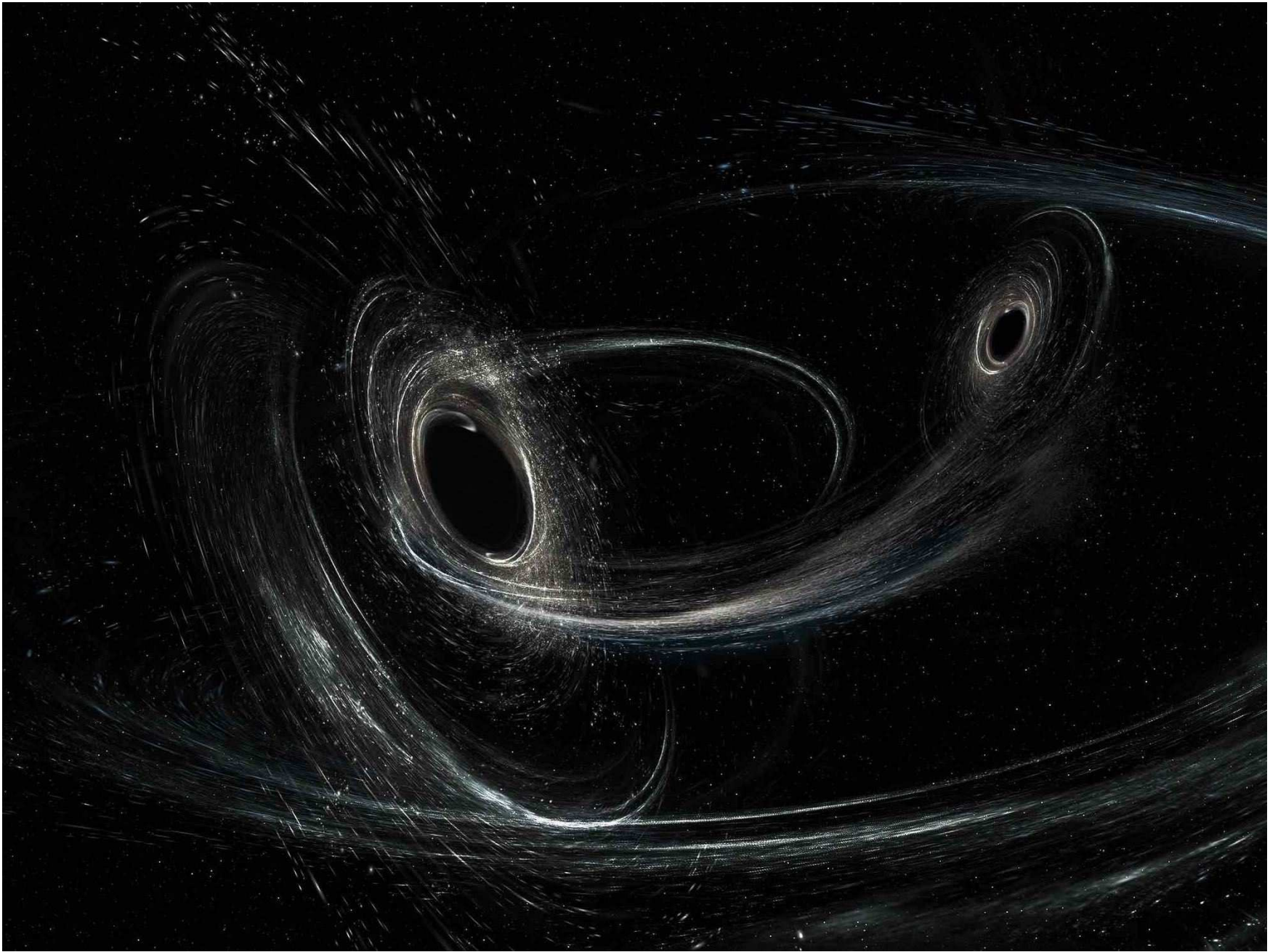


Señal: 160 a 199 Hz en 0,4s

Fusión de agujeros negros con $M_1 \approx 32M_\odot$ y $M_2 \approx 19M_\odot$

Agujero negro resultante con $M_3 \approx 49M_\odot \implies E/c^2 \approx 2M_\odot$

Distancia: 1,4 – 4,3 · 10⁹ años-luz



Black Holes of Known Mass

