



# Origen del tiempo: relatividad y emergencia



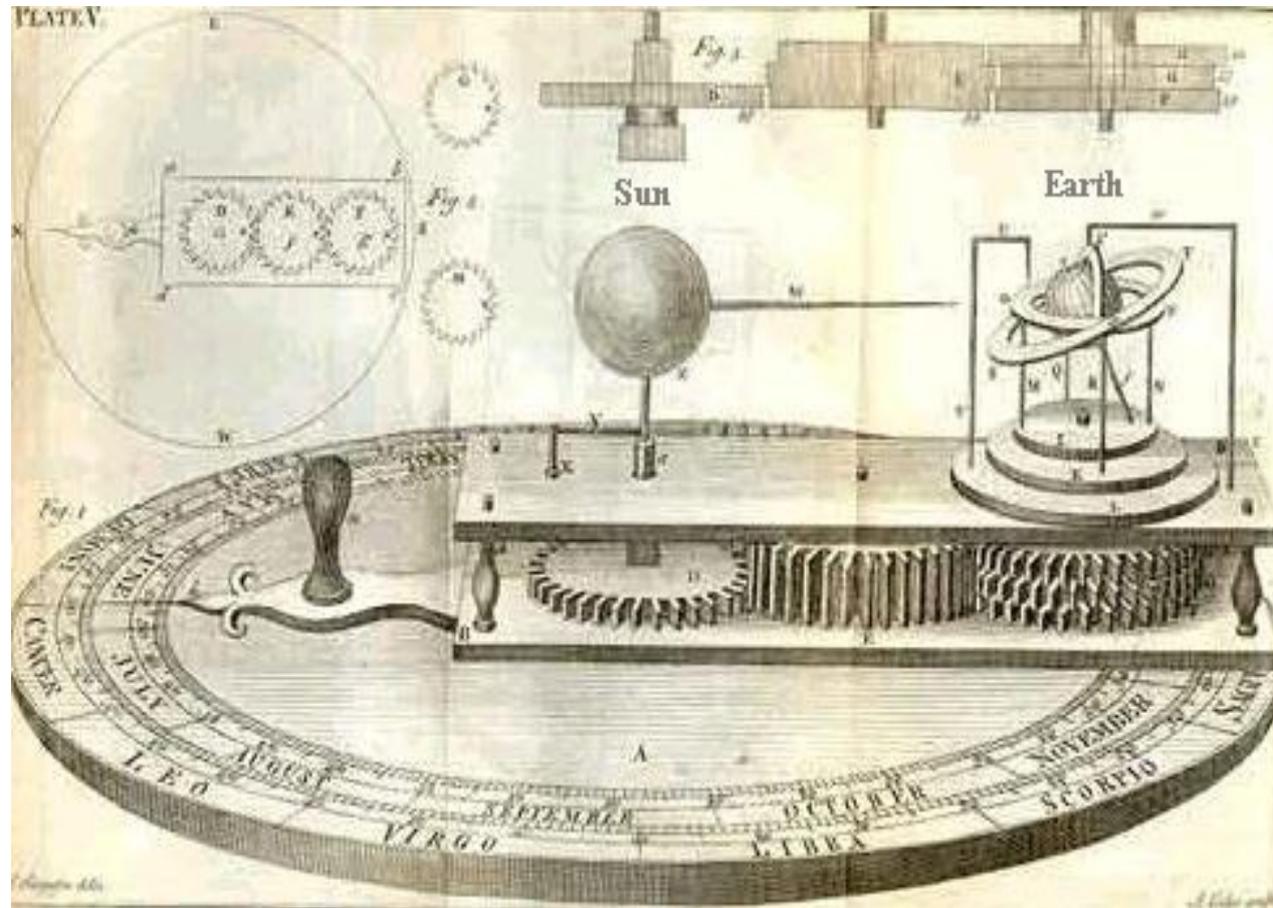
Gil  
Jannes



Universidad  
Europea

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

# El tiempo Newtoniano



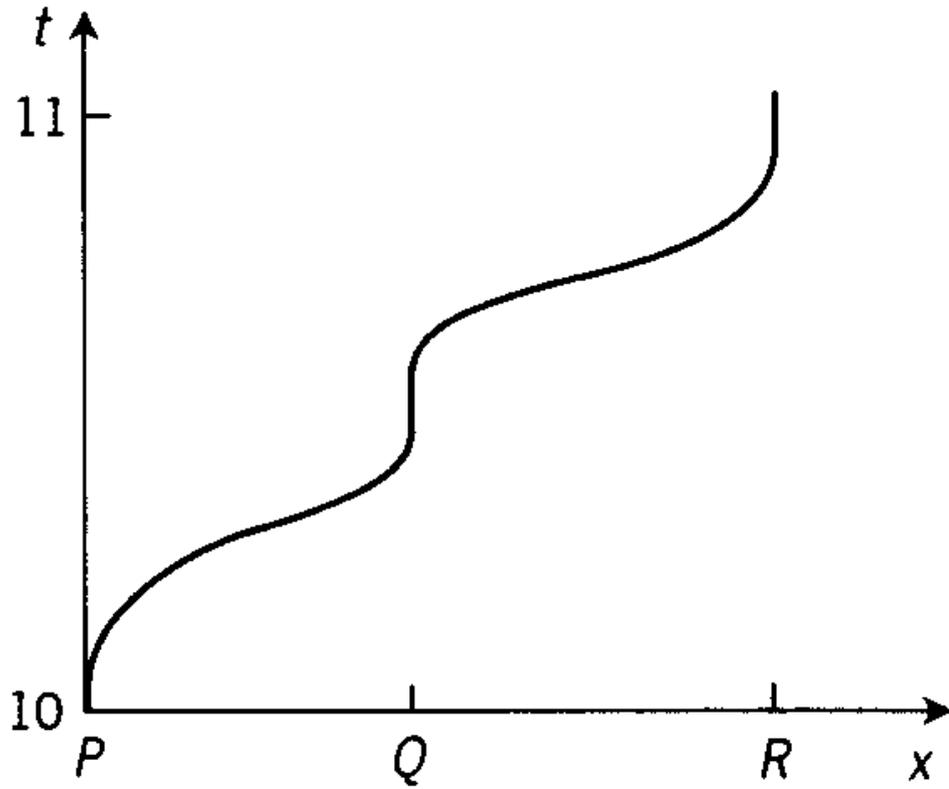
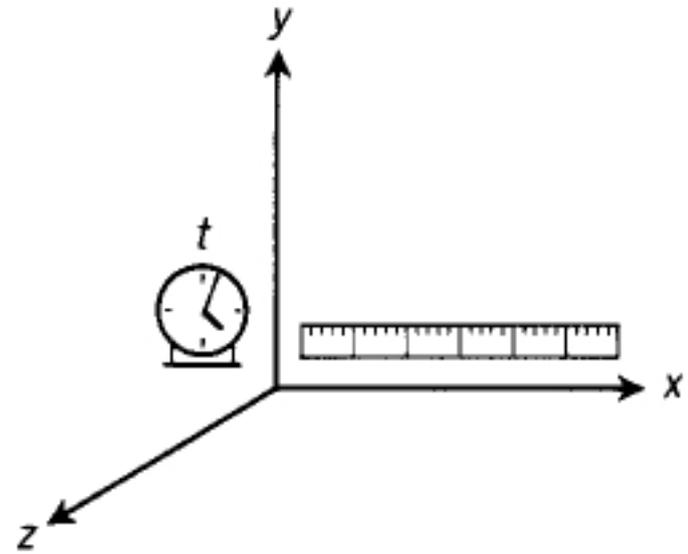
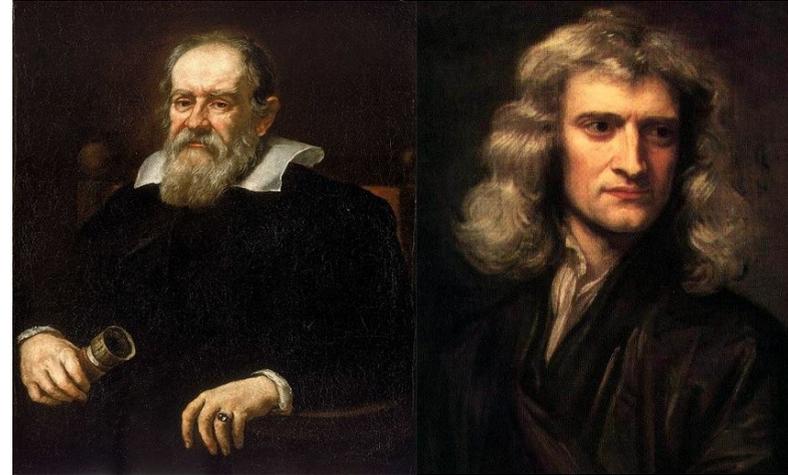


diagrama espacio-temporal



referencial (observador)

# Newton (Galileo)



## 1ª ley de Newton (ley de inercia):

“Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare”

(Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él)

Observador inercial = no-acelerado

Estado de reposo o movimiento... *respecto a qué?*

# Espacio absoluto

# Tiempo absoluto



“Absolute, true and mathematical time, of itself, and from its own nature flows equably without regard to anything external, and by another name is called duration.

Relative, apparent and common time, is some sensible and external (whether accurate or unequable) measure of duration by the means of motion, which is commonly used instead of true time ...”

# Newton (Galileo)



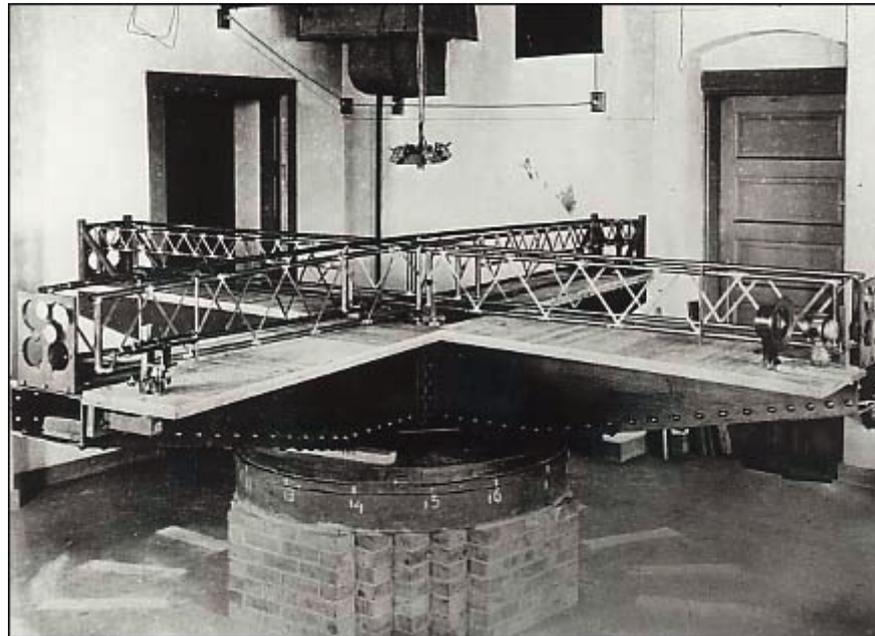
- Observadores privilegiados (inerciales respecto al espacio absoluto)
- Los observadores inerciales (no-acelerados) son equivalentes (observan las mismas leyes físicas)  
= Principio de relatividad especial (Galileo)
- TODOS los observadores están de acuerdo sobre el tiempo (sincronización)
- Barras rígidas, relojes absolutos
- Transformaciones entre referenciales inerciales: **Galileo**  
 $x' = x - vt$   
 $t' = t$

# Relatividad especial



# Postulados

- Principio de relatividad (= de Galileo):  
“Todos los observadores inerciales son equivalentes”
- Constancia de la velocidad de la luz (“ $c=1$ ”)  
(en referenciales inerciales)

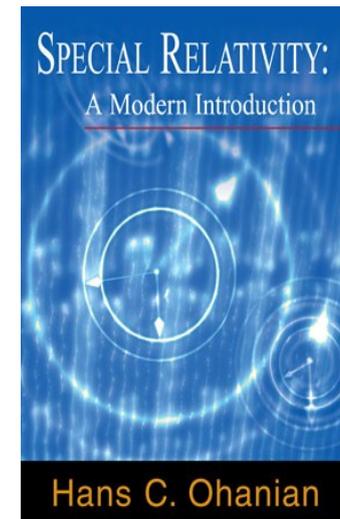
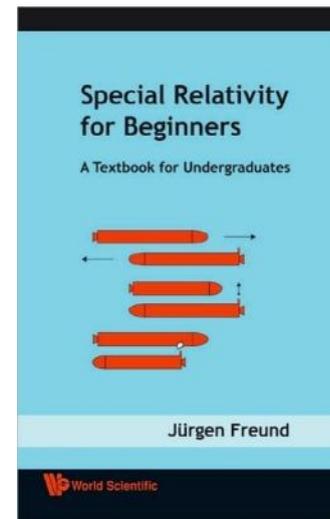
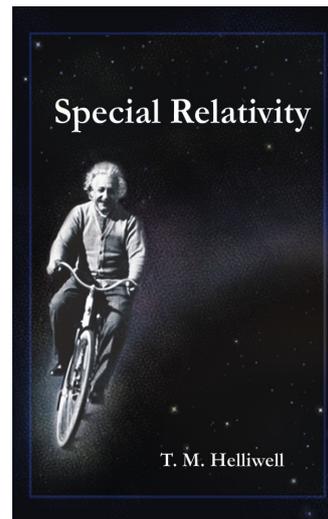
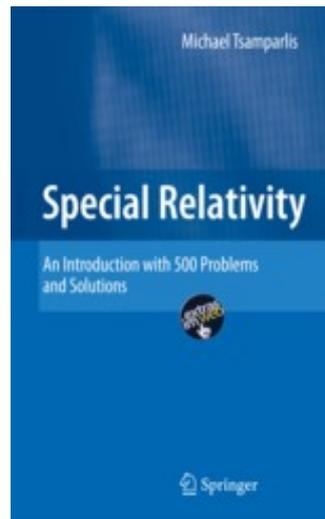
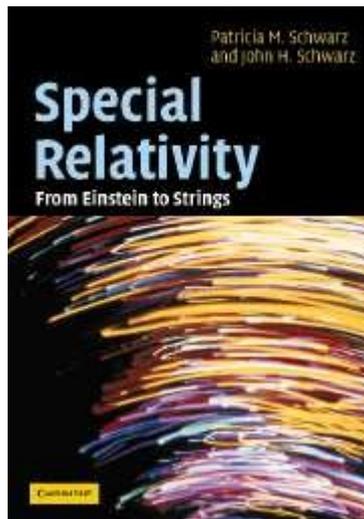


Espacio + tiempo → ESPACIOTIEMPO

Ya no hay espacio absoluto ni tiempo absoluto → sincronización???

# El camino “tradicional”

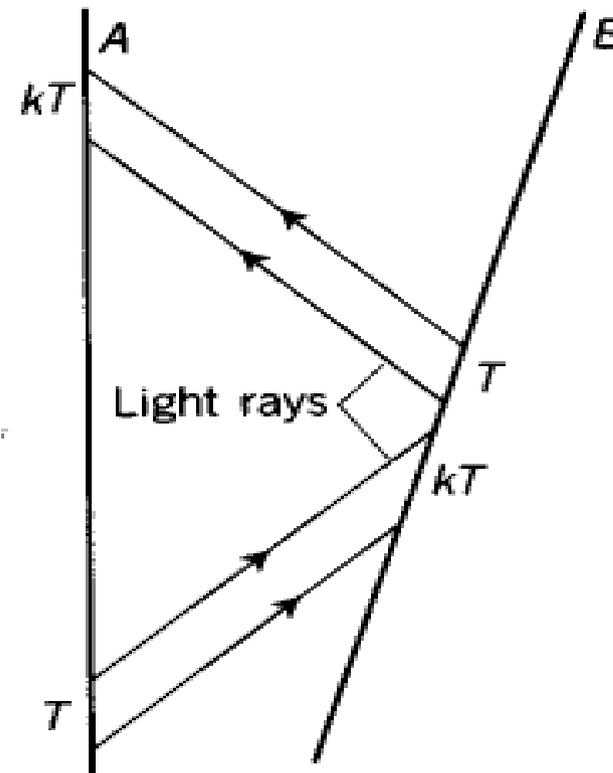
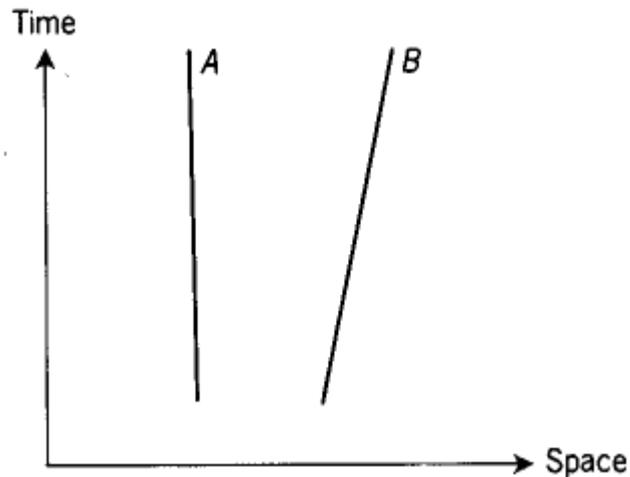
- Transformaciones de Lorentz
- Espaciotiempo de Minkowski
- Efecto Doppler relativista
- ...



# Bondi k-calculus

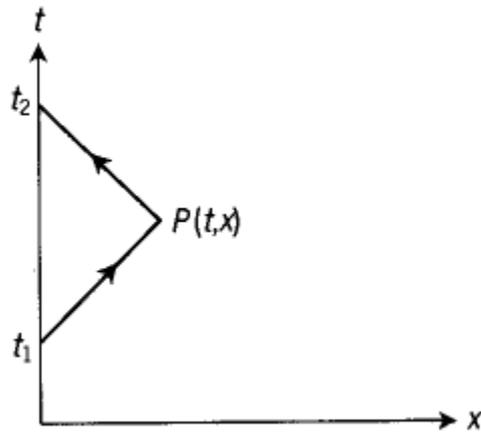


- Sincronización usando rayos de luz



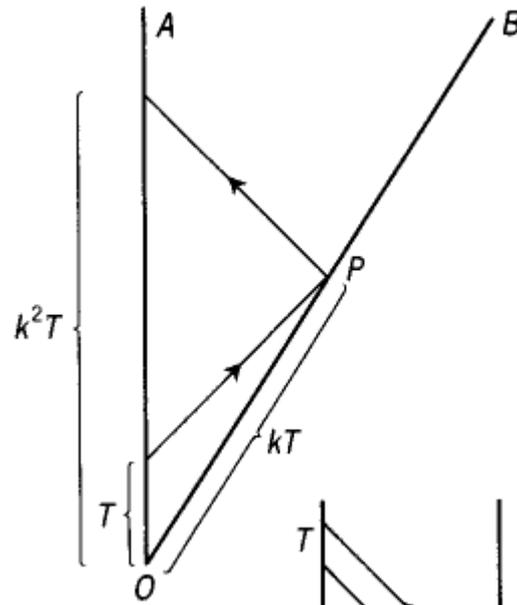
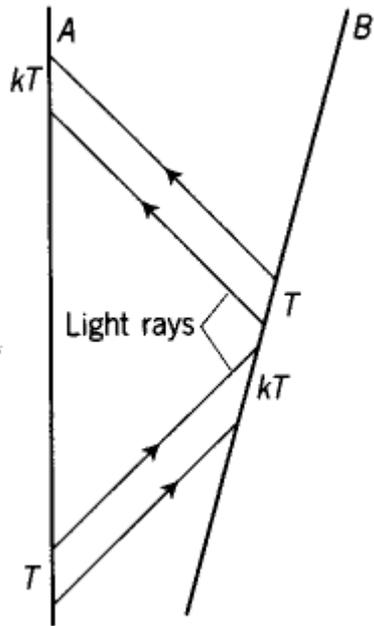
$k = k$  : reciprocidad

- equivalencia de observadores inerciales
- (solo se mide la velocidad *relativa* entre A y B)



$$(t, x) = \left( \frac{1}{2}(t_1 + t_2), \frac{1}{2}(t_2 - t_1) \right),$$

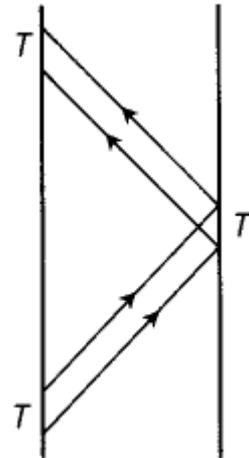
$$(c=1)$$



$$(t, x) = \left( \frac{1}{2}(k^2 + 1)T, \frac{1}{2}(k^2 - 1)T \right).$$

$$v = \frac{x}{t} = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}$$

$$k = \left( \frac{1+v}{1-v} \right)^{1/2}$$

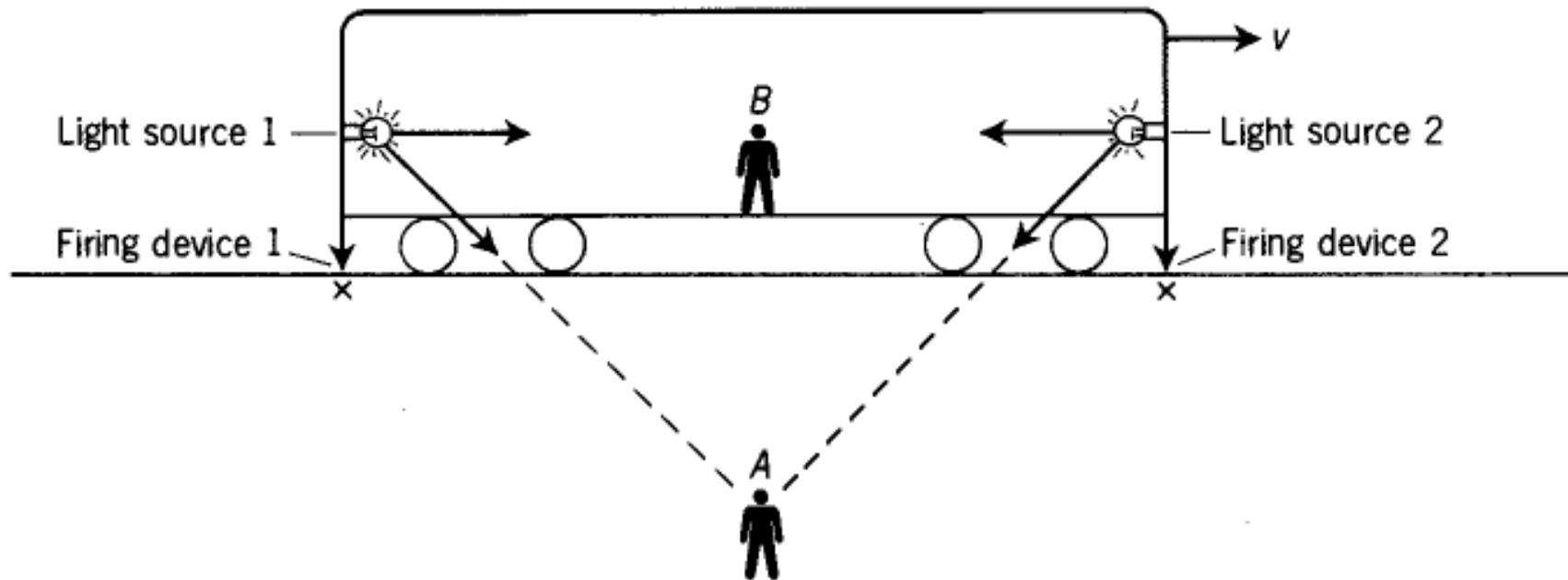


$k=1$  (observadores en reposo relativo)

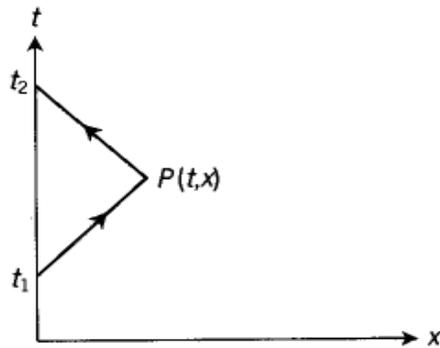
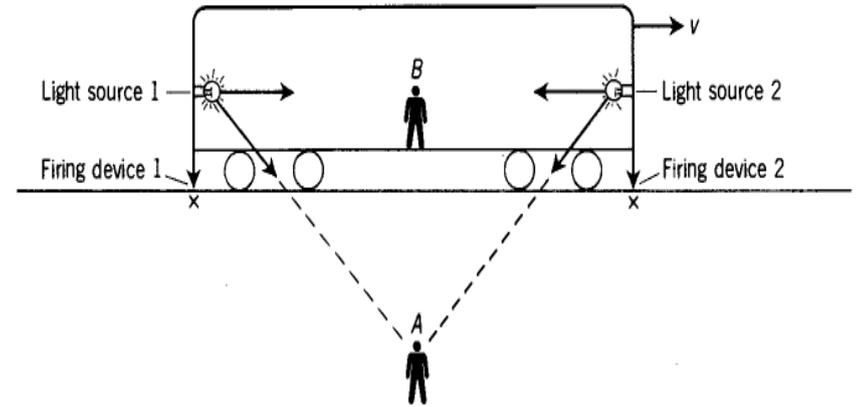
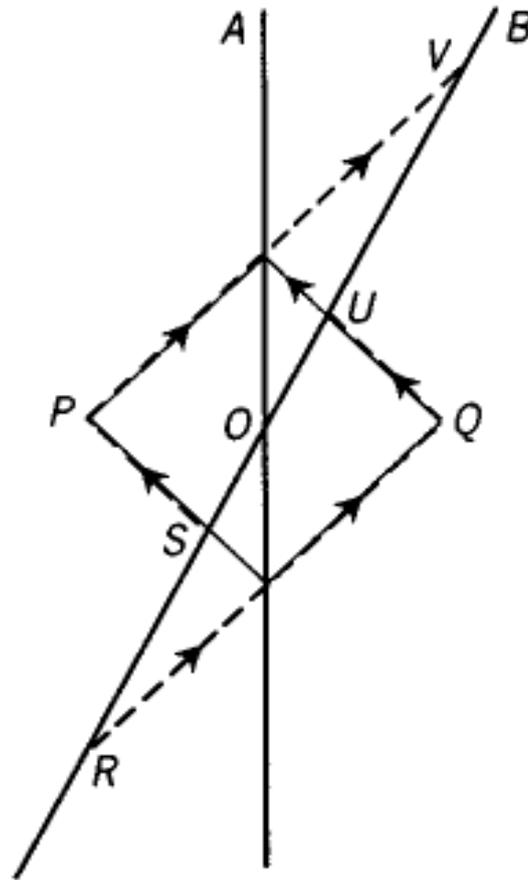
# Relatividad de la simultaneidad (el tren de Einstein)



# Relatividad de la simultaneidad (el tren de Einstein)

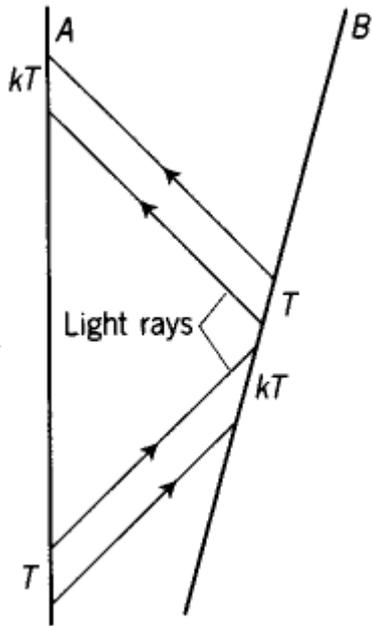


# Relatividad de la simultaneidad



- P y Q son equidistantes tanto para A como para B
- P y Q son simultáneos para A
- no son simultáneos para B (Q-O-P)

# Dilación temporal



Si A emite rayos con intervalo T, B los recibe con intervalo  $kT$

$$k = \left( \frac{1+v}{1-v} \right)^{1/2}$$

$$v > 0 \implies k > 1$$

B dirá que el reloj de A va lento

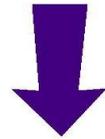
Vice versa: si B emite rayos con intervalo T...

RECIPROCIDAD DE LA DILACIÓN TEMPORAL

Además: cuando  $v \rightarrow 1$  (es decir  $v \rightarrow c$ ):  $k \rightarrow \infty$  !!!

# Relatividad Especial:

Espacio absoluto – tiempo absoluto (Newton)



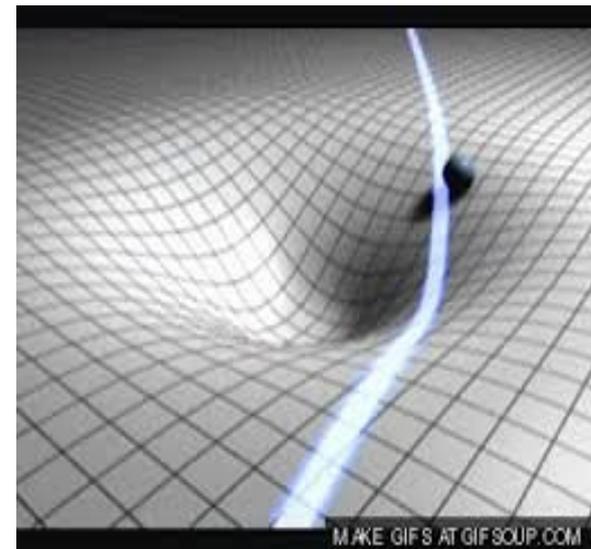
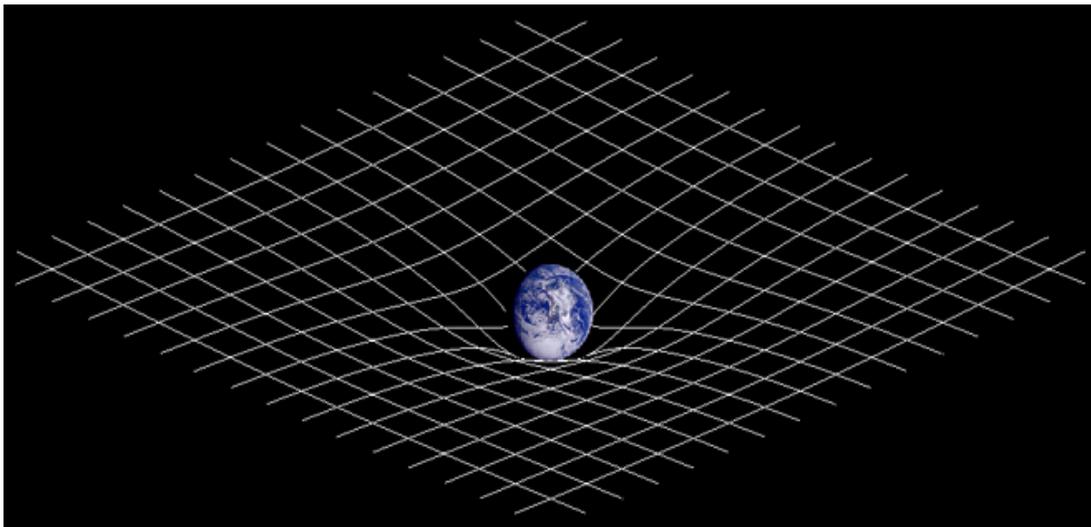
Espaciotiempo (plano)

# Relatividad general



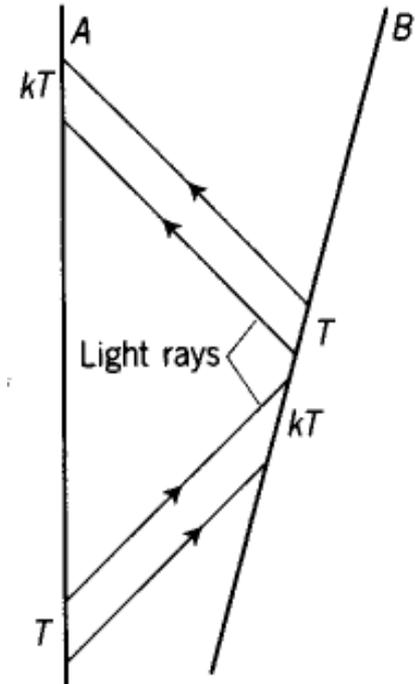
# Relatividad General

- Curvatura del espaciotiempo
- Espaciotiempo dinámico:  
"Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve" (J.A. Wheeler)



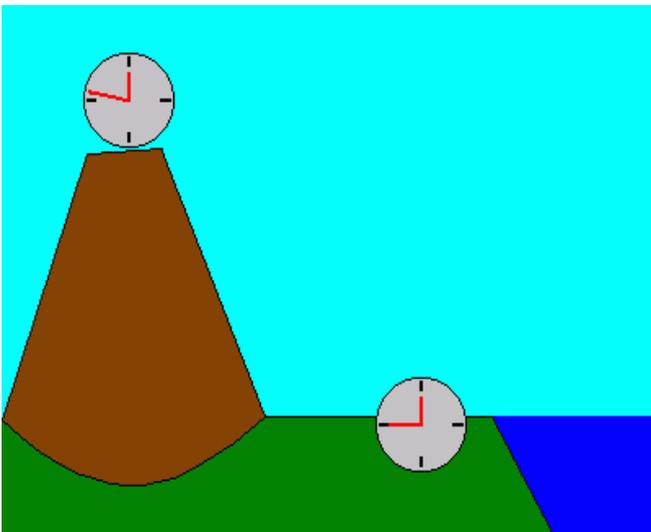
# El tiempo en relatividad general

- Nota: un campo gravitatorio es (localmente) equivalente a una aceleración

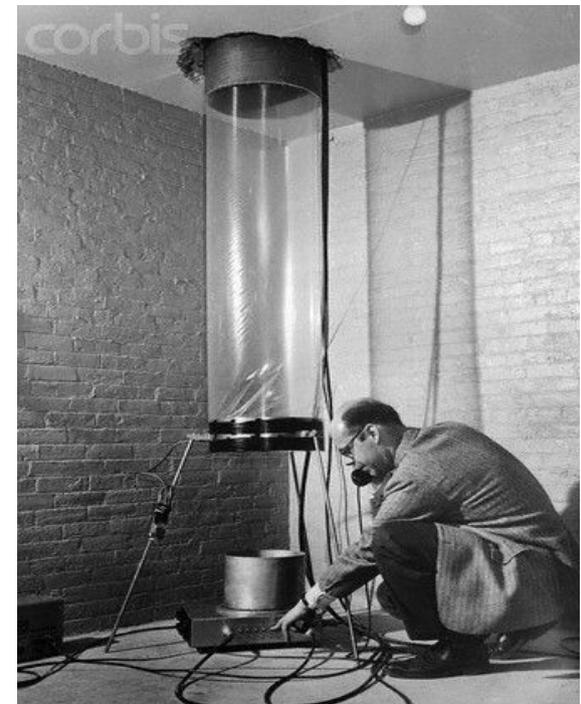


# El tiempo en relatividad general

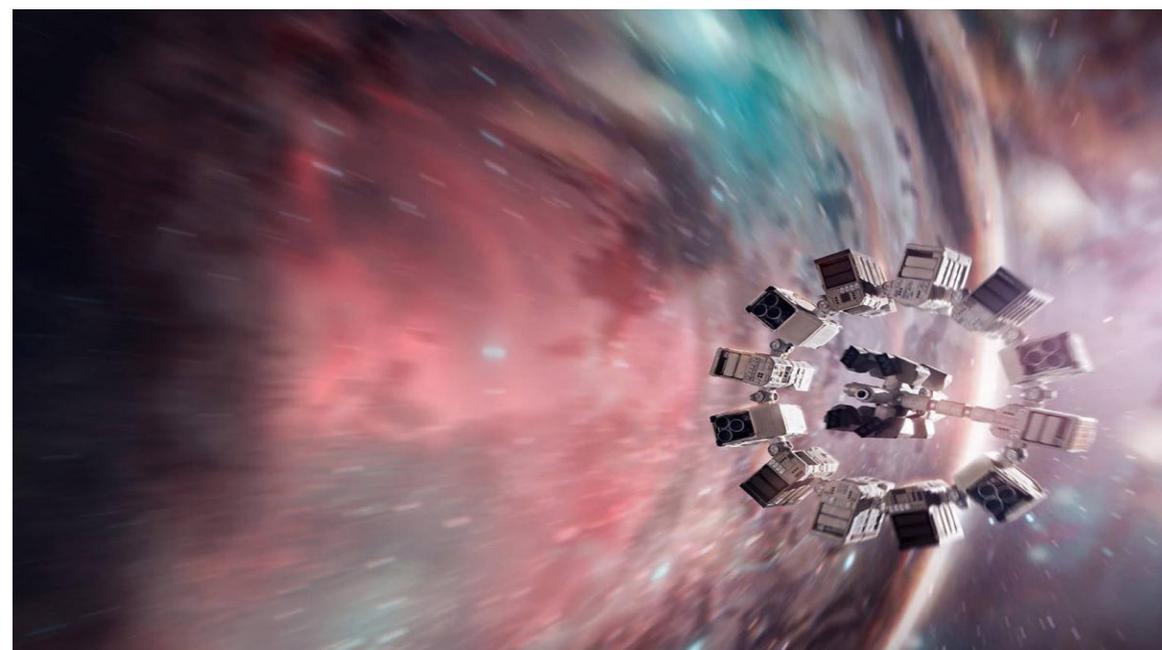
- Nota: un campo gravitatorio es (localmente) equivalente a una aceleración
- La dilación temporal gravitacional (acelerada) es absoluta (y experimentalmente verificada)

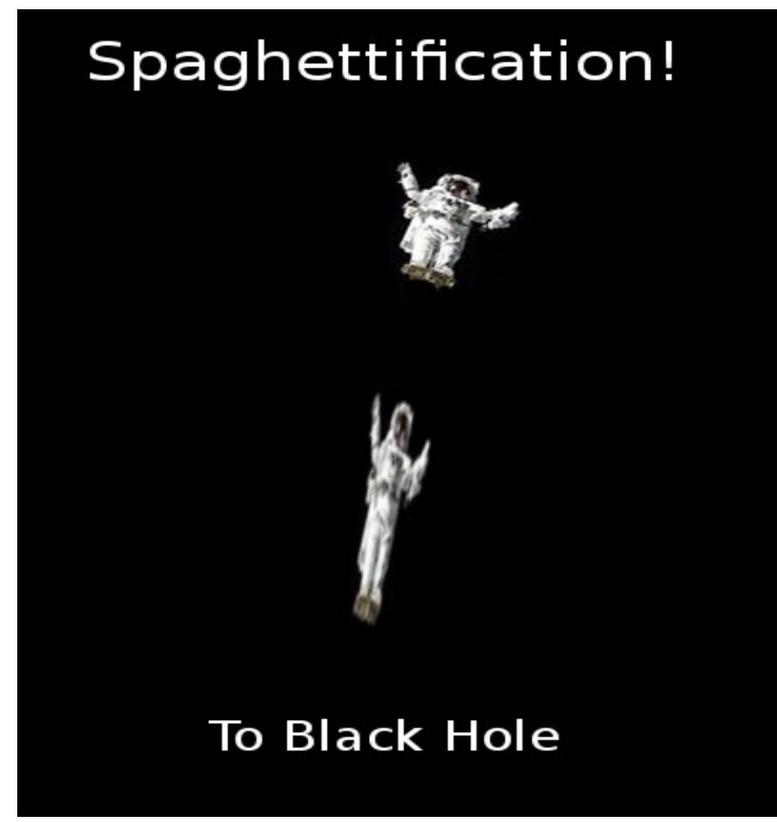
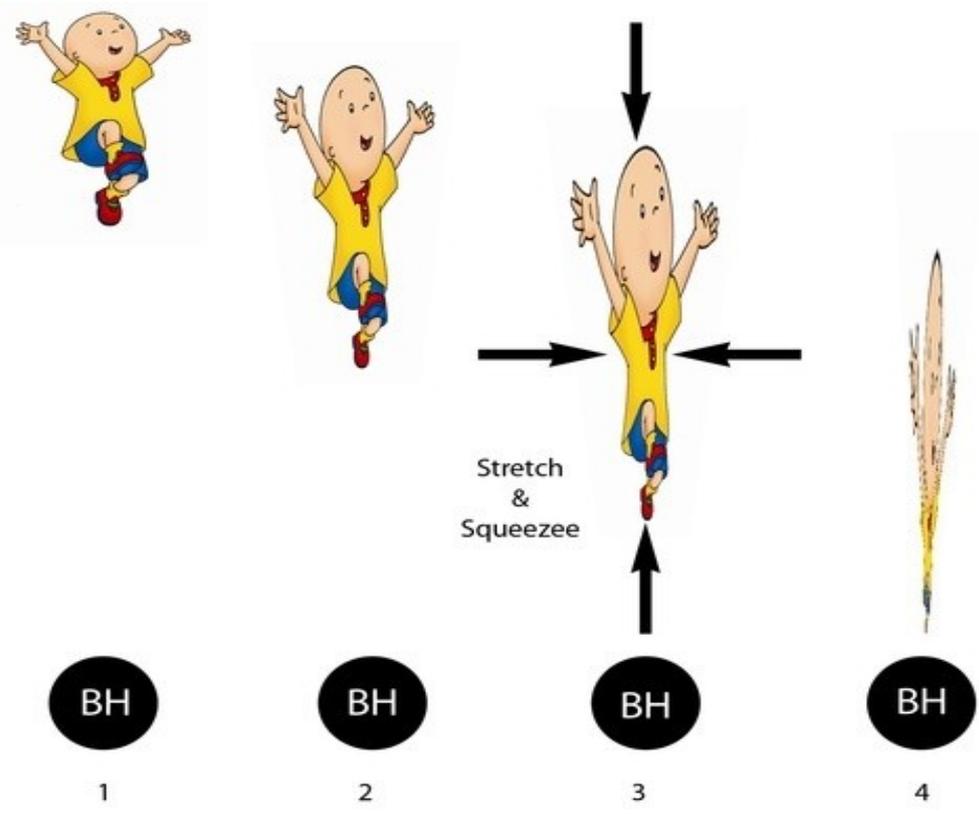
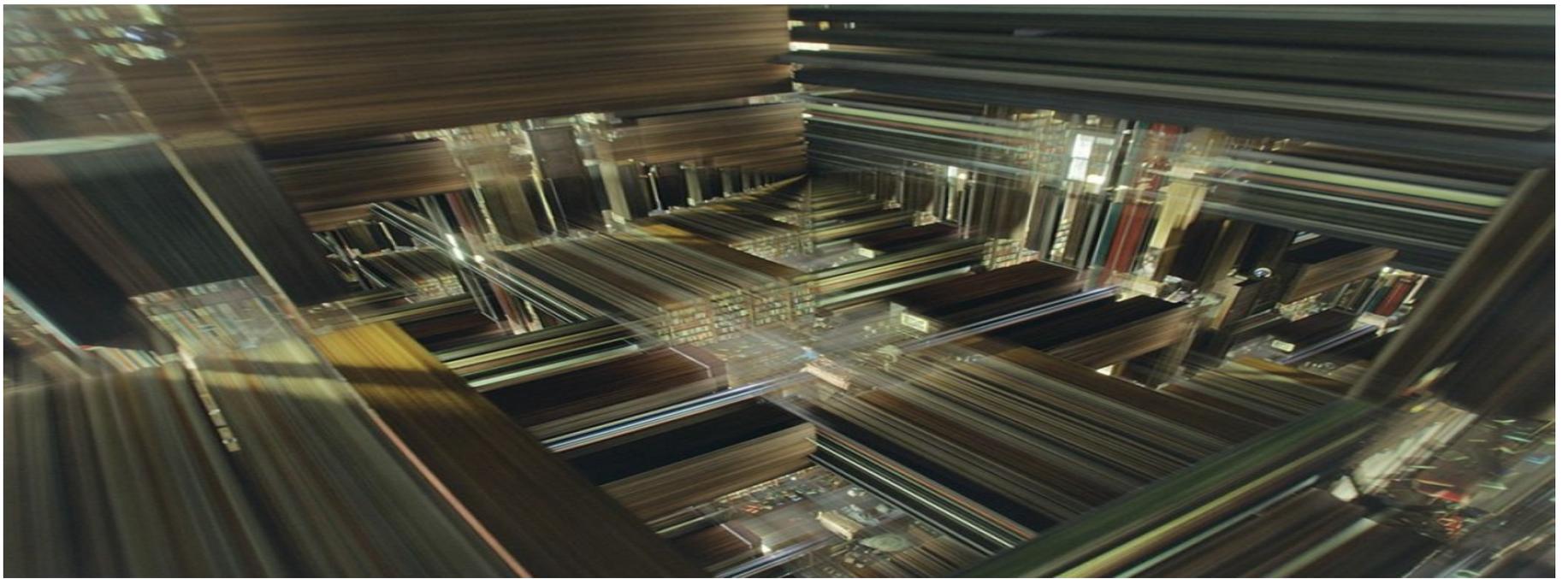


Hafele-Keating (1971)

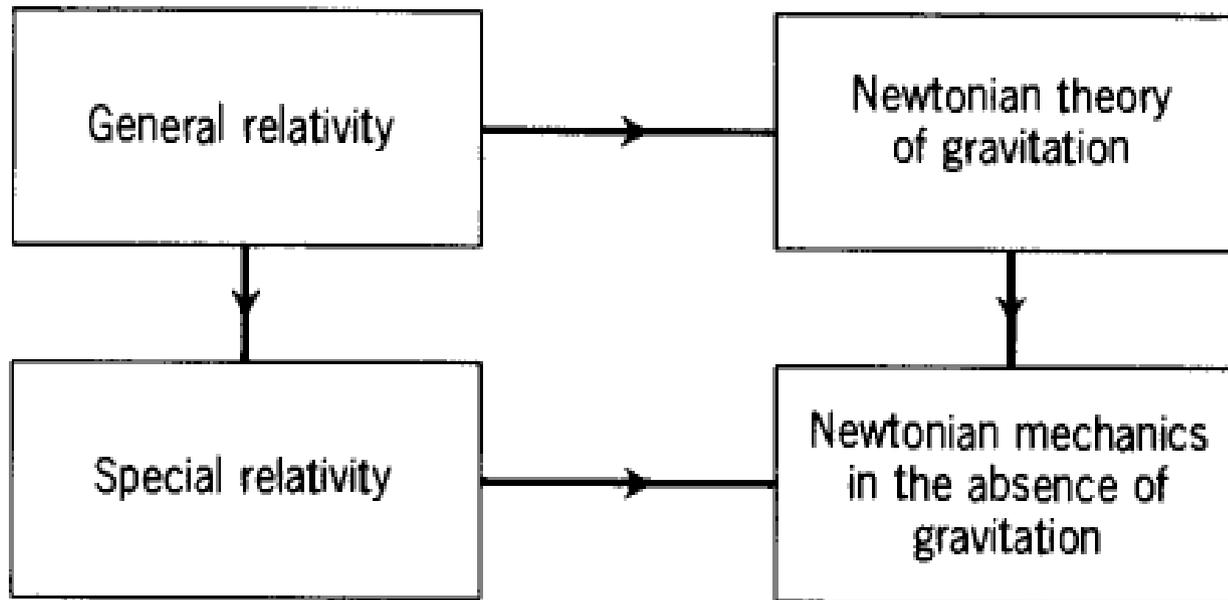


Pound-Rebka (1959)





# Principio de correspondencia



- Poca masa: RG  $\rightarrow$  RE
- Velocidades bajas: RG  $\rightarrow$  Newton
- Poca masa y v baja  $\rightarrow$  Newton sin gravedad

# Jerarquía

?



Relatividad General



Relatividad Especial

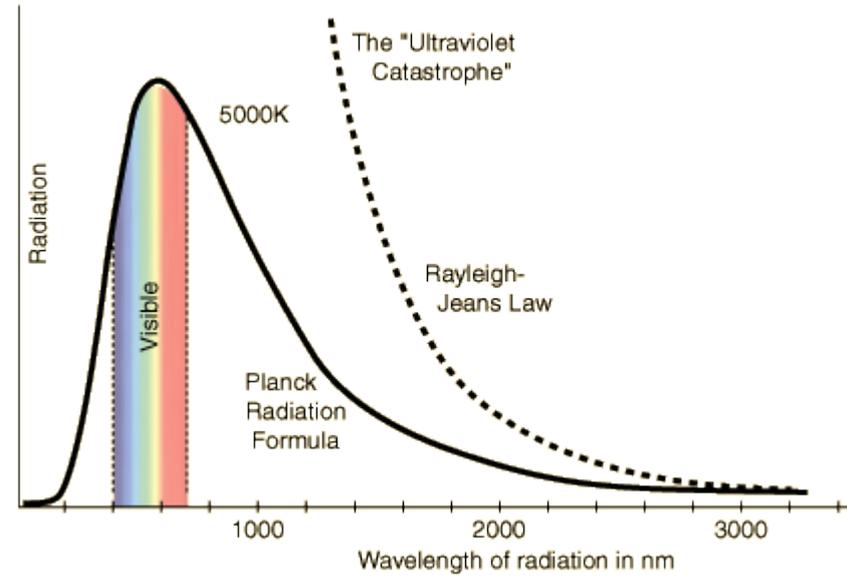


Física Newtoniana

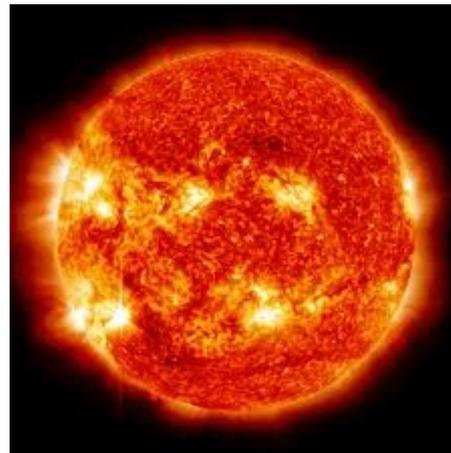
# El mundo cuántico



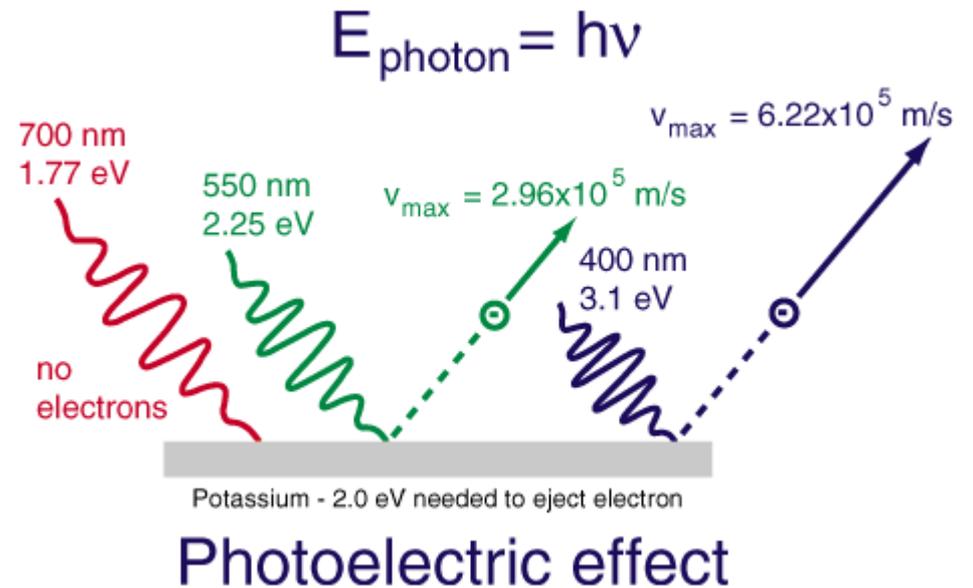
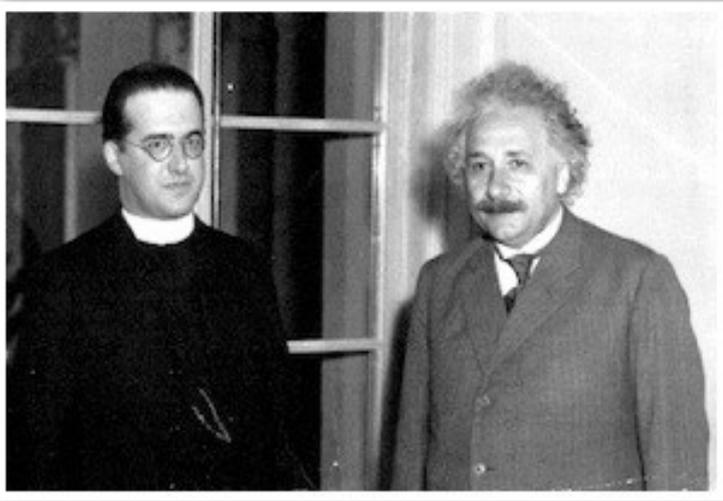
# Planck - radiación cuerpo negro



Carácter cuántico de la energía  
 $E=h\nu$

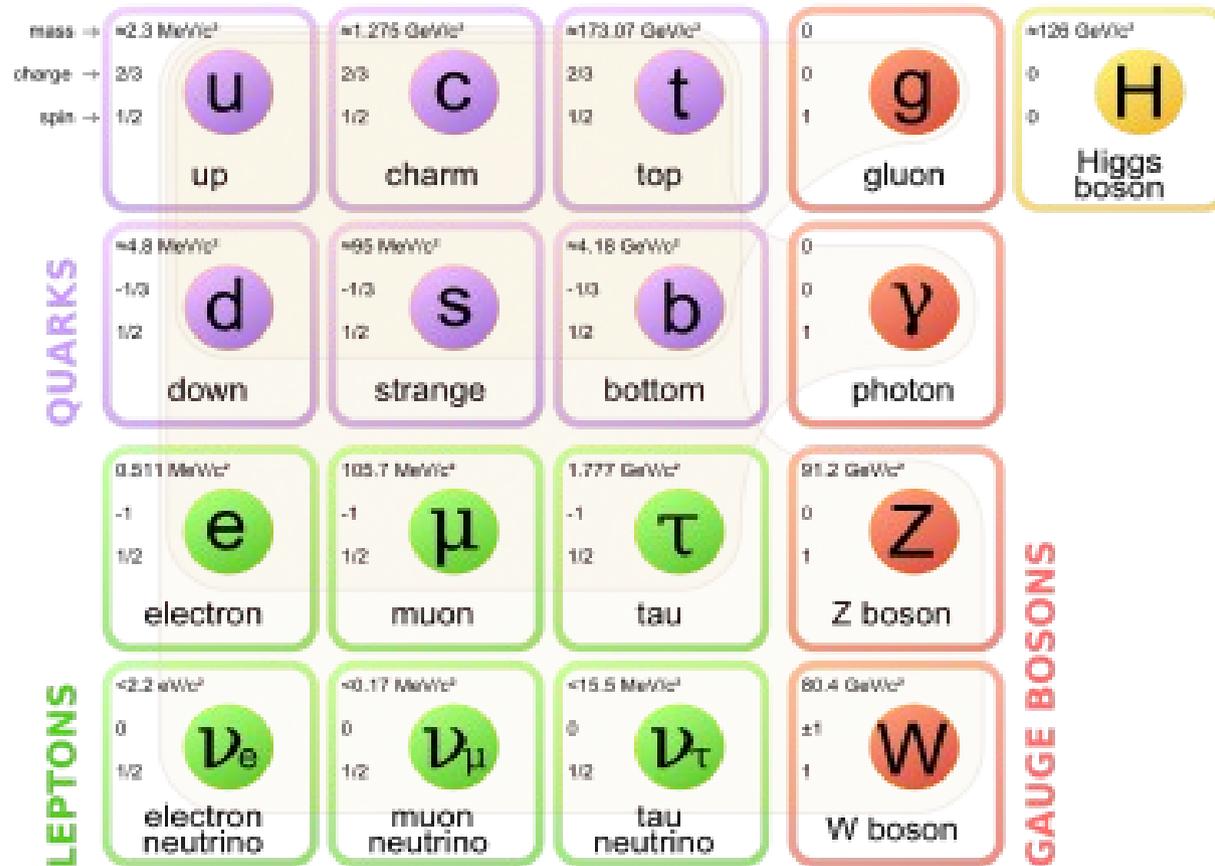


# Einstein – efecto fotoeléctrico



Carácter cuántico de la radiación  
electromagnética (luz=fotones)

# La materia y la energía tienen carácter cuántico (discreto)



Quizá el espacio-tiempo también?

# Jerarquía

“Gravedad cuántica”



Relatividad General

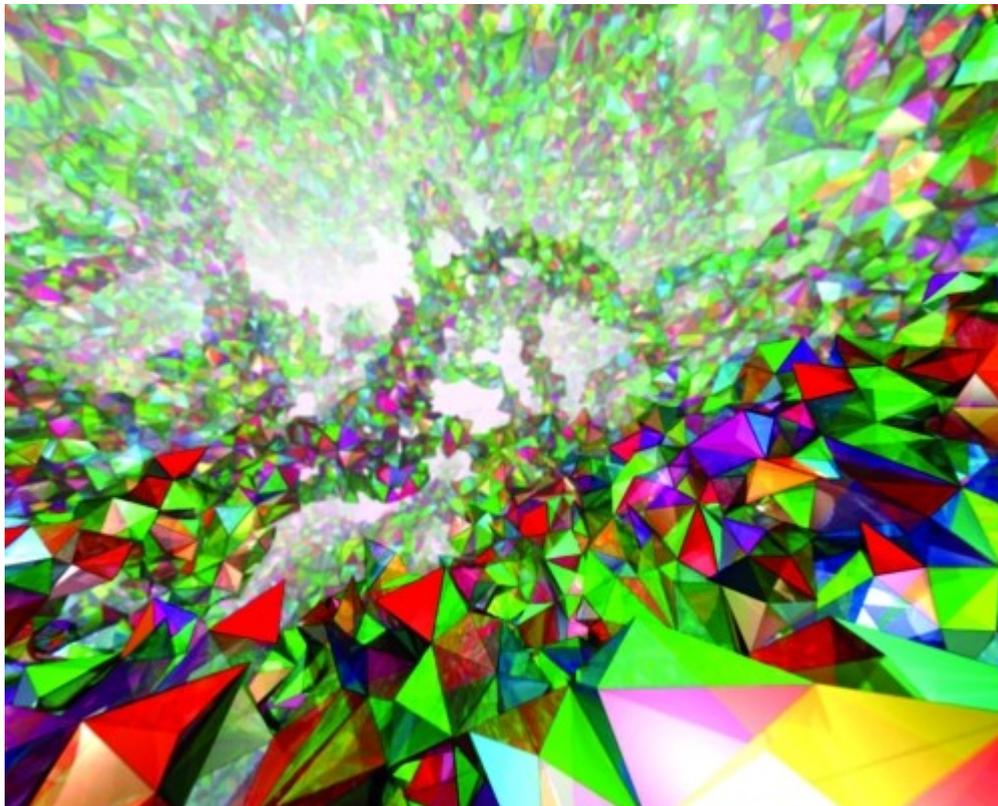


Relatividad Especial

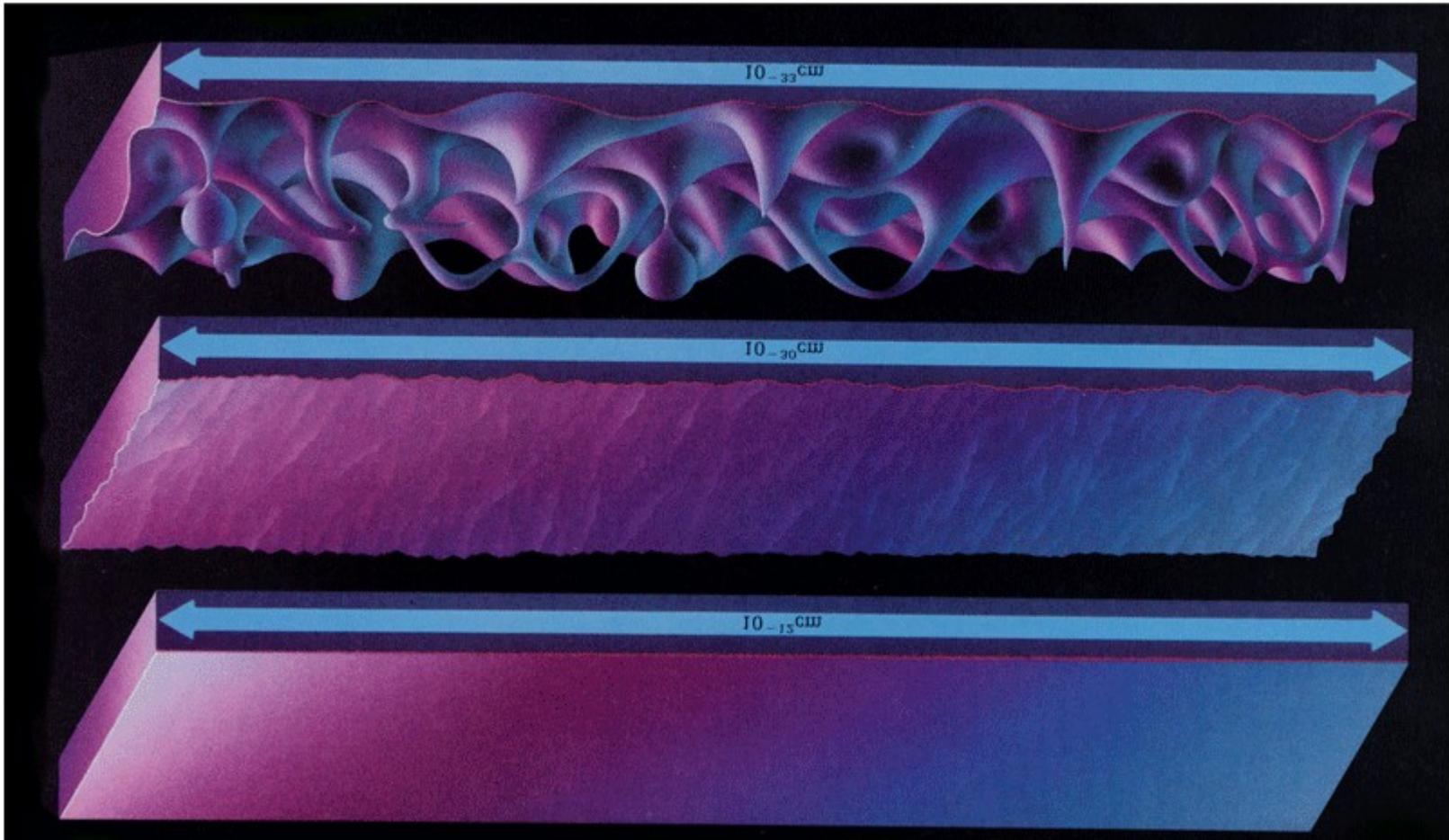


Física Newtoniana

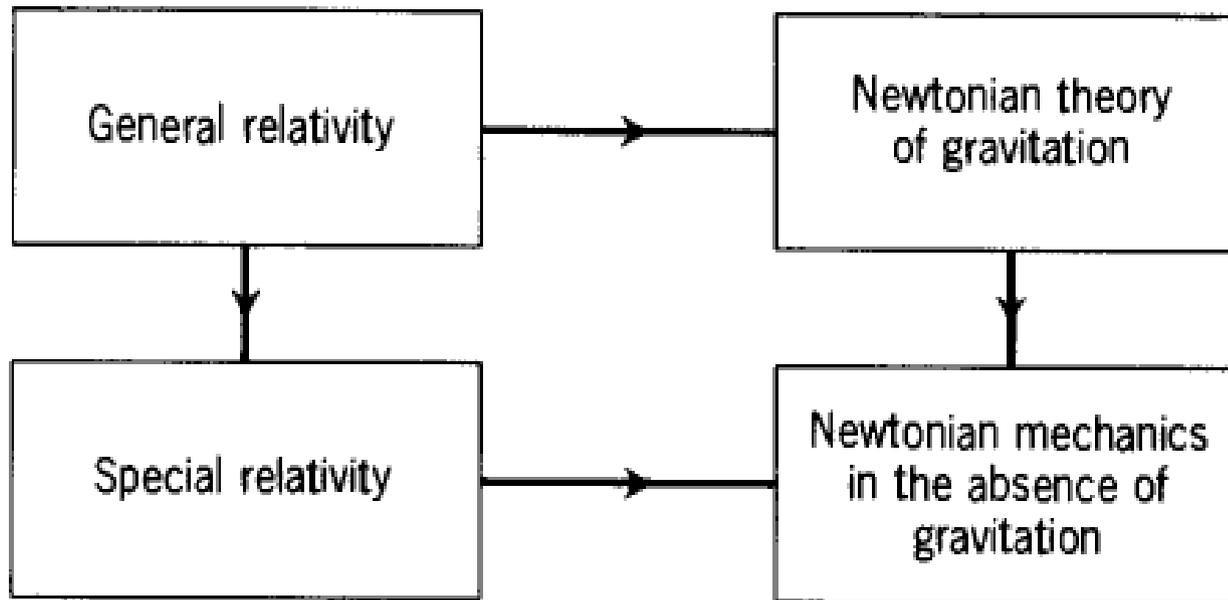
# Gravedad Cuántica



# Espuma espaciotemporal



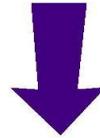
# Principio de correspondencia



- Poca masa: RG  $\rightarrow$  RE
- Velocidades bajas: RG  $\rightarrow$  Newton
- Poca masa y v baja  $\rightarrow$  Newton sin gravedad

# Jerarquía

Espaciotiempo discreto (GC)



Espaciotiempo continuo curvo (RG)



Espaciotiempo plano (RE)

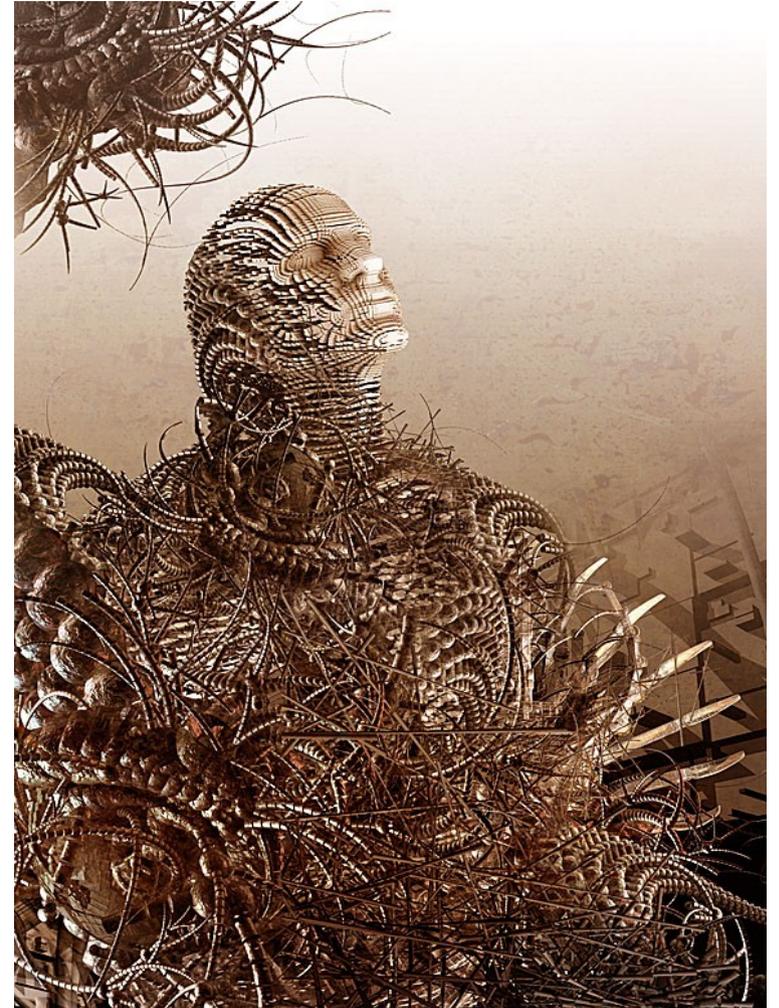
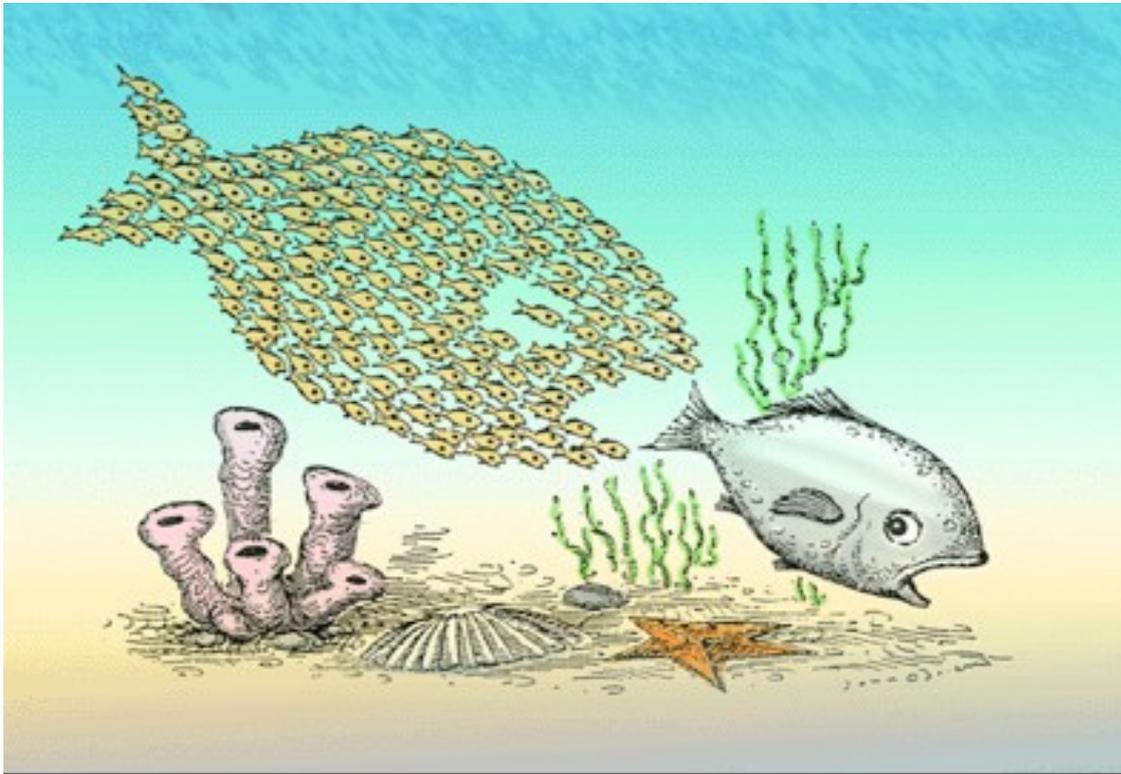


Tiempo

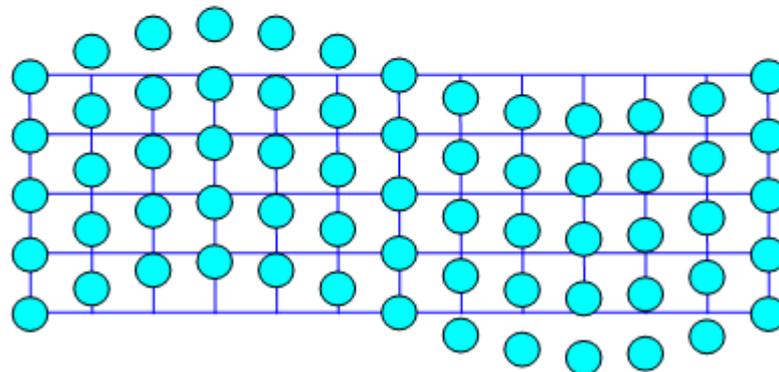
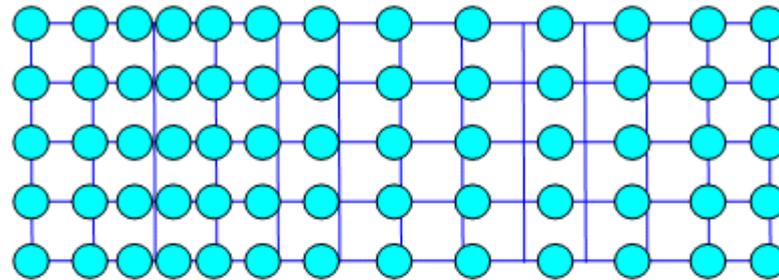
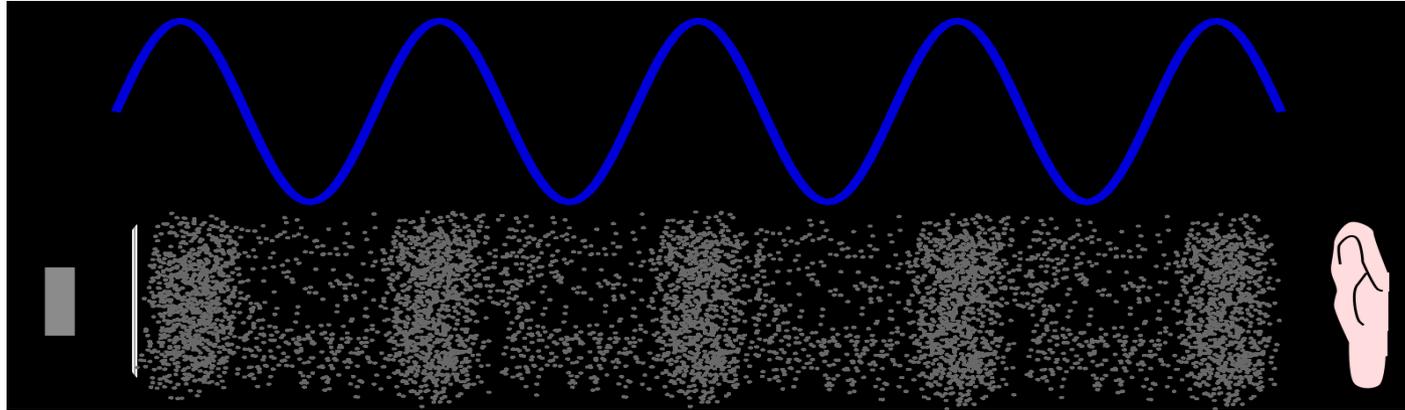


Tiempo absoluto (Newton)

# Emergencia

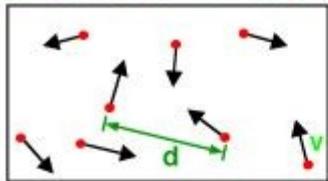


# Fenómenos colectivos

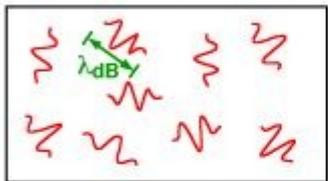


# Condensados de Bose-Einstein

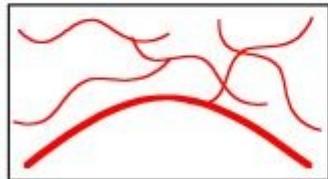
What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



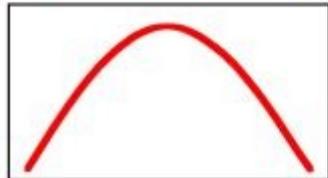
High Temperature  $T$ :  
thermal velocity  $v$   
density  $d^{-3}$   
"Billiard balls"



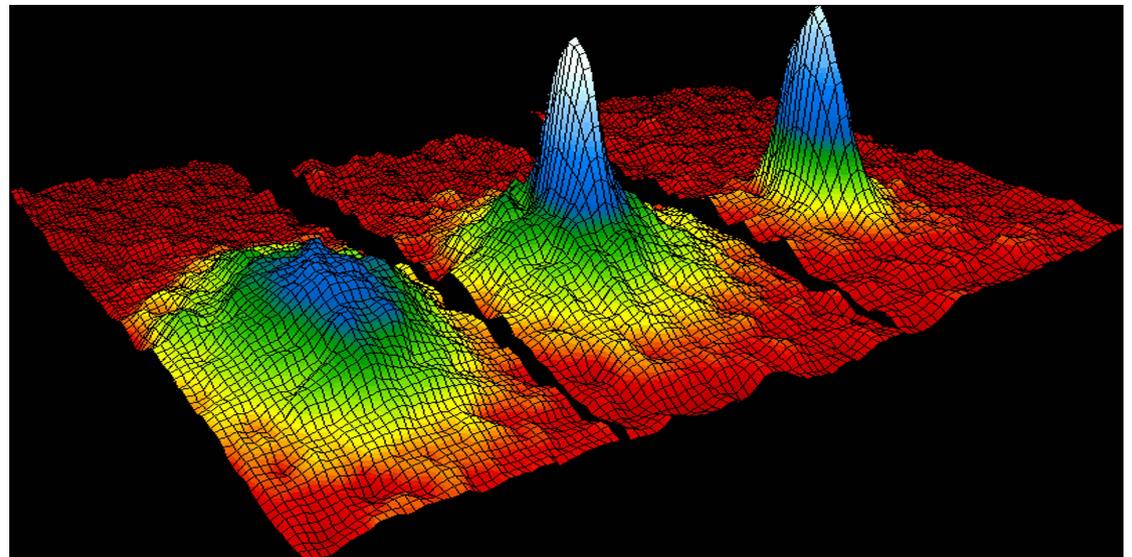
Low Temperature  $T$ :  
De Broglie wavelength  
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$   
"Wave packets"



$T = T_{crit}$ :  
Bose-Einstein  
Condensation  
 $\lambda_{dB} = d$   
"Matter wave overlap"



$T = 0$ :  
Pure Bose  
condensate  
"Giant matter wave"



# Tiempo de...

Es tiempo de investigación,  
es tiempo de vida,  
.... es tiempo CSIC



# CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

# Tiempo de... ecuaciones

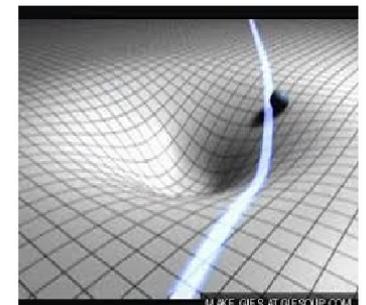
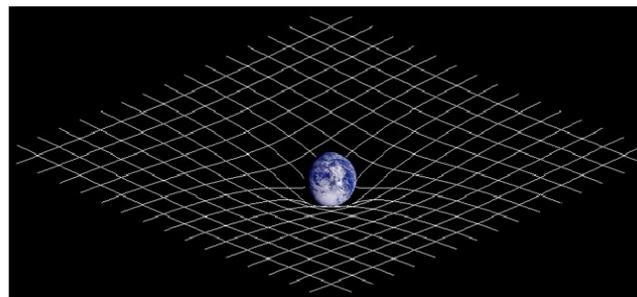
$$\square\phi \equiv \frac{1}{\sqrt{-g}}\partial_{\mu}\sqrt{-g}g^{\mu\nu}\partial_{\nu}\phi = 0$$

- Ecuación de movimiento del sonido (los fonones) en un CBE
- Ecuación de movimiento en un espaciotiempo curvo (relatividad general)

$$(-\partial_t^2 + c^2\partial_x^2 + c^2\partial_y^2 + c^2\partial_z^2)\phi = 0$$

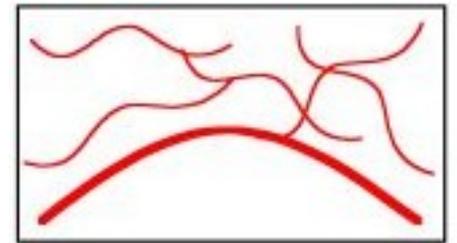
## Relatividad General

- Curvatura del espaciotiempo
- Espaciotiempo dinámico:  
"Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve" (J.A. Wheeler)

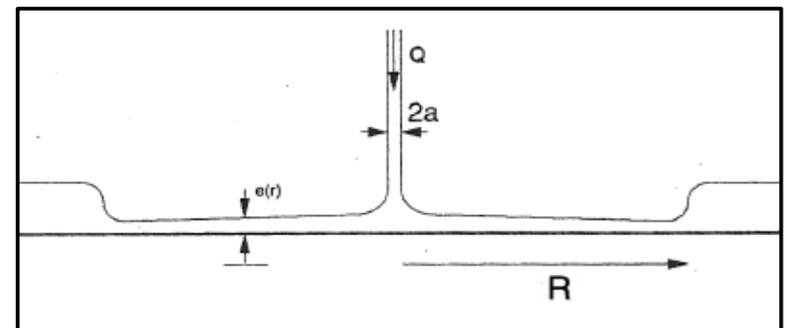
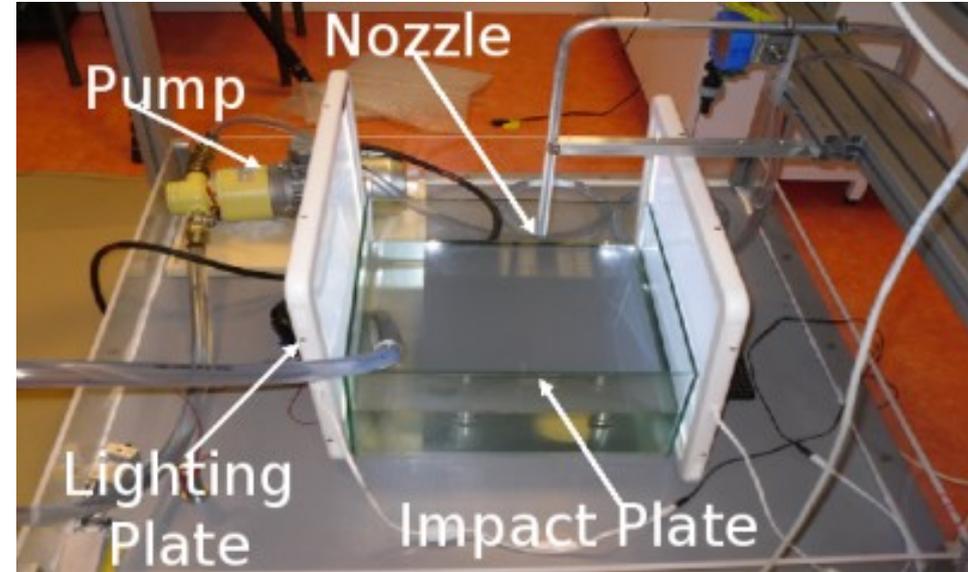


# Espaciotiempos efectivos

- La parte “cinética” de la RG se reproduce en sistemas de materia condensada
- Espaciotiempos curvos efectivos
- Espaciotiempo  $\leftarrow$  efecto colectivo de los átomos constituyentes
- Curvatura  $\leftarrow$  densidad de átomos (distribución – a mano)  
agujeros negros efectivos (“análogos”)

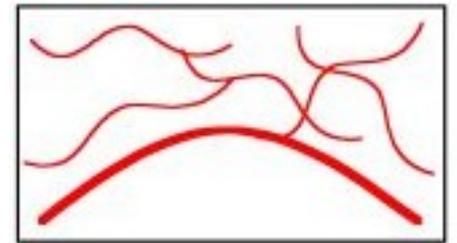


# Experimental Setup for the Circular Jump



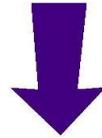
# Espaciotiempos efectivos

- La parte “cinética” de la RG se reproduce en sistemas de materia condensada
- Espaciotiempos curvos efectivos
- Espaciotiempo  $\leftarrow$  efecto colectivo de los átomos constituyentes
- Curvatura  $\leftarrow$  densidad de átomos (distribución – a mano)
- Quizá algo parecido a la parte “dinámica” también... (“matter tells spacetime how to curve”)
- $\rightarrow$  Gravedad emergente ?



# Jerarquía

Tiempo “absoluto” (laboratorio)



Espaciotiempo efectivo curvo



# Dinámica

Modelos de dinámica efectiva sugieren 2 escalas de gravedad emergente

## Jerarquía

Tiempo absoluto (laboratorio)



Espaciotiempo efectivo plano



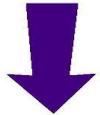
Espaciotiempo efectivo curvo

# Jerarquía

Tiempo absoluto (laboratorio)



Espaciotiempo efectivo plano



- Espaciotiempo efectivo curvo



Espaciotiempo plano



Tiempo



Tiempo : (Newton)

- Hasta ahora: emergencia del carácter relativista del (espacio)tiempo
- Estructura espaciotemporal fundamental
  - discreta (gravedad cuántica)
  - absoluta (gravedad emergente)

# Podría el tiempo emerger de una estructura a-temporal?

- A nivel físico: parece complicado...  
(de momento)

- A nivel matemático:

recordad: 
$$(-\partial_t^2 + c^2\partial_x^2 + c^2\partial_y^2 + c^2\partial_z^2)\phi = 0$$

- Minkowski: ecuación “hiperbólica”  
(t : -      x, y z: +)

- $$a(\partial_t^4 + c^4 \partial_x^4 + c^4 \partial_y^4 + c^4 \partial_z^4)\phi + (-\partial_t^2 + c^2 \partial_x^2 + c^2 \partial_y^2 + c^2 \partial_z^2)\phi = 0$$
- ecuación “elíptica” (t : + x, y, z : +)
- a: parámetro  $a \propto E/E_{\text{Planck}}$
- para  $E \ll E_{\text{Planck}}$  (a<<1) : tiempo “relativista”
- para  $E \sim E_{\text{Planck}}$  (a~1) : no hay tiempo!!!

# Conclusión

- Tenemos descripciones muy buenas del tiempo (físico): relatividad
- Sabemos muy poco sobre su origen

