

Introducción a Física de Partículas y Cosmología

Un mundo cuántico y relativista

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid
angel.uranga@uam.es

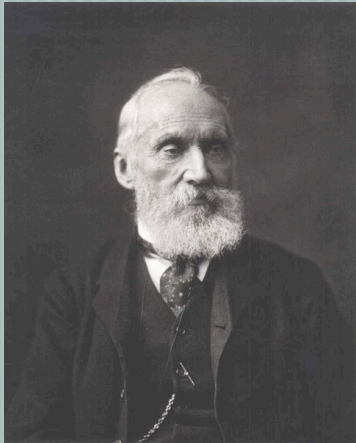
Un mundo relativista

Relatividad Especial y Teoría Cuántica de Campos

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid
angel.uranga@uam.es

Recordemos los albores del s. XX



**William Thomson
(Lord Kelvin)**



Las dos nubes en el horizonte que vislumbró Lord Kelvin desencadenaron dos enriquecedores **chaparrones** que hicieron florecer la Física del s. XX

- La radiación de cuerpo negro
⇒ **Mecánica Cuántica**

- El experimento de Michelson-Morley
⇒ **Teoría de la Relatividad**
Nueva visión del espacio y el tiempo

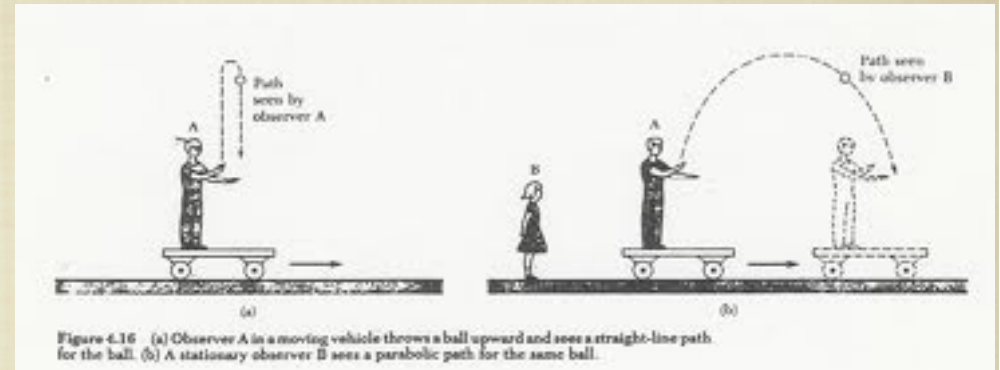
- Relatividad Especial
y las interacciones fundamentales

- Relatividad General
Descripción del Universo
Gravedad y Cosmología

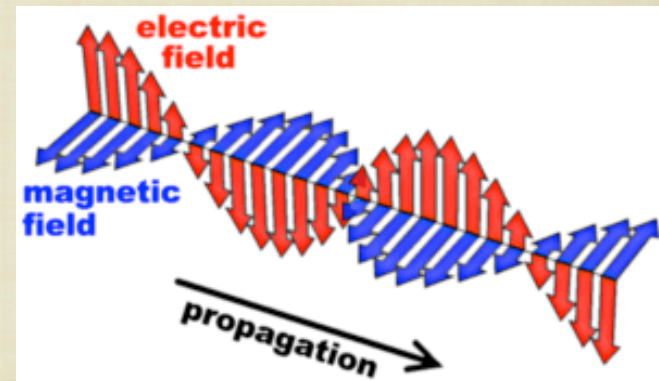
Mecánica Newtoniana y Electromagnetismo de Maxwell

Dos principios esencialmente contradictorios

* Principio de relatividad de Galileo:
Diferentes sistemas de referencia
inerciales son equivalentes
(mismas leyes de la Mecánica)



* Electromagnetismo de Maxwell:
la luz se propaga con una velocidad
determinada ($c = 300000 \text{ km/s}$)



¿Cómo es posible que la velocidad de la luz sea la misma para cualquier observador inercial?

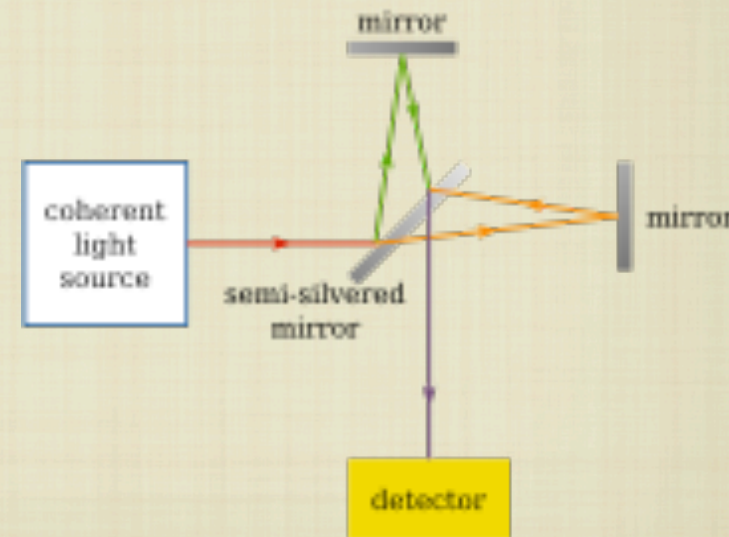
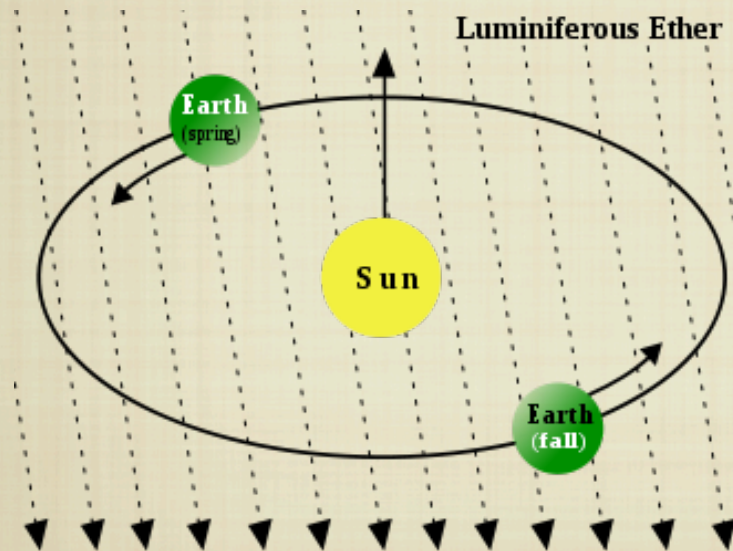
El consenso era la existencia de un sistema de referencia privilegiado, un éter en el que se propagaban las ondas electromagnéticas, entendidas como oscilaciones mecánicas de un medio/fluido

Y sin embargo ...

es cierto que la velocidad de la luz es independiente del observador

Experimento de Michelson-Morley

Medida de la velocidad de la luz respecto de la Tierra en distintas direcciones



El resultado es siempre idéntico, e igual a 300000km/s, de acuerdo con Maxwell

Einstein: Relatividad Especial



Fruto de la paradójica unión de los dos grandes principios

Sus postulados:

- 1) Velocidad de la luz = constante;
- 2) Equivalencia de **todas** las leyes físicas en todos los sistemas inerciales

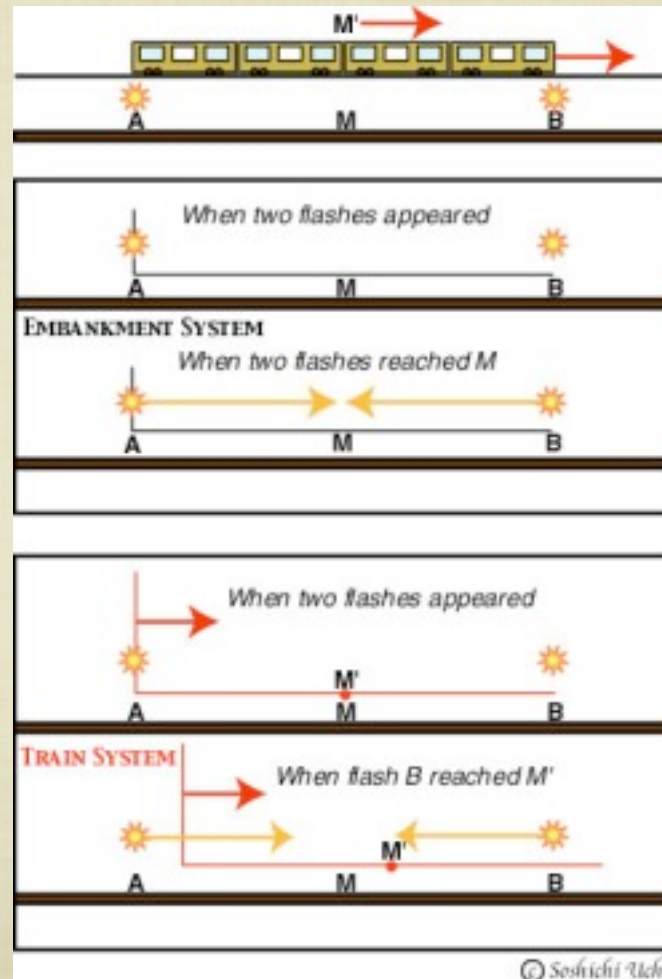
¿Cómo es posible que la velocidad de la luz sea la misma para cualquier observador inercial?

Sus conclusiones:

Dado que $c = \text{const}$, y $\text{velocidad} = (\text{espacio}/\text{tiempo}) \Rightarrow$
 \Rightarrow ¡El espacio y el tiempo no son absolutos!

Relatividad de la simultaneidad

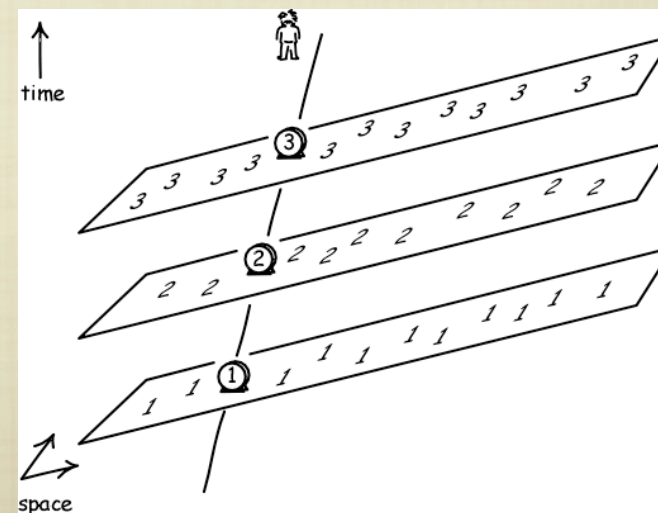
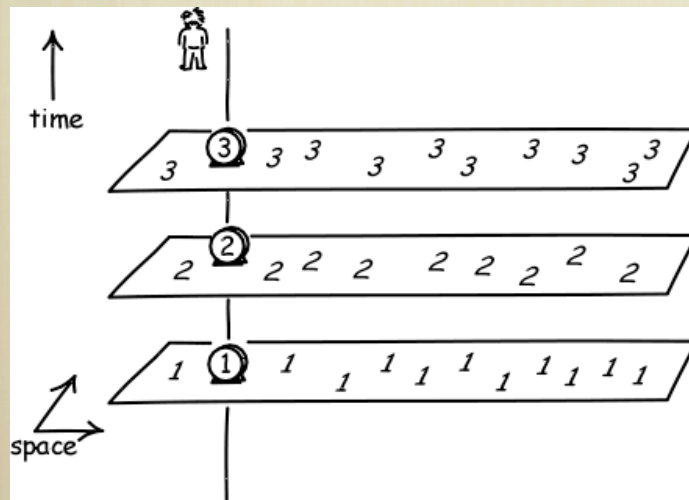
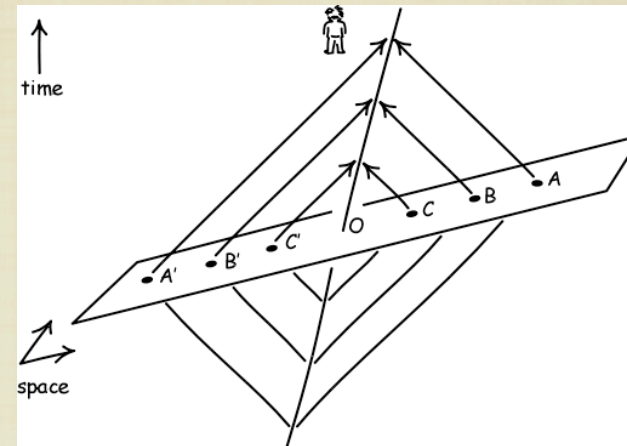
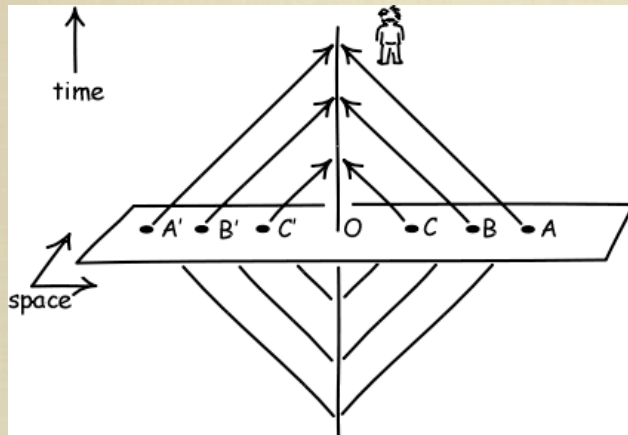
Diferentes observadores disienten en sus medida de qué eventos en el espacio y el tiempo son simultáneos



Espacio y tiempo

El espacio y tiempo Newtonianos son absolutos

En Relatividad Especial, dependen del observador



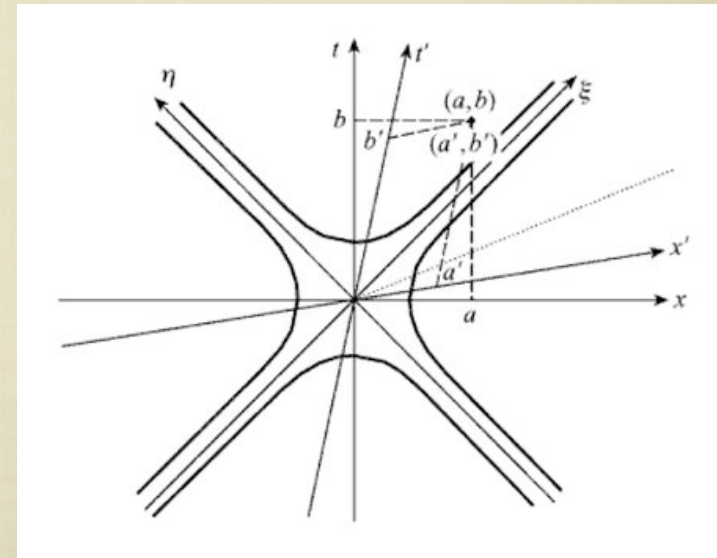
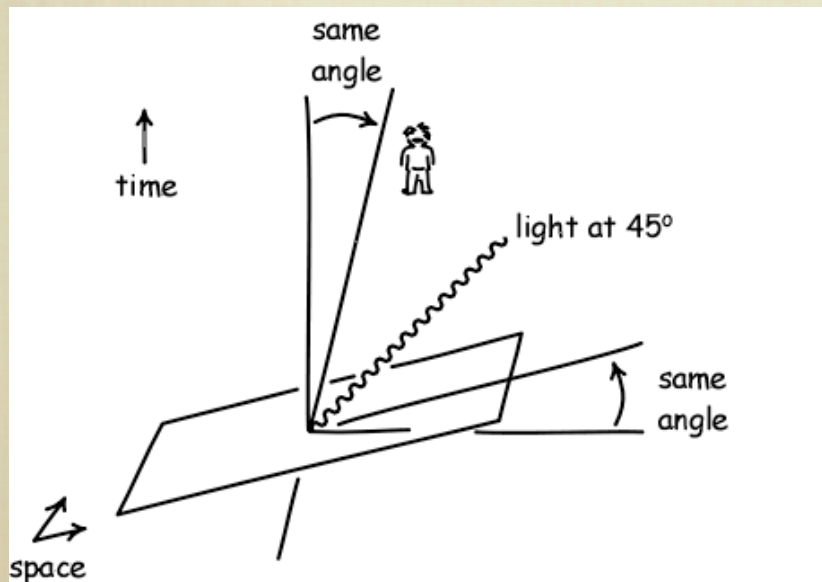
Espacio-Tiempo

El espacio en sí y el tiempo en sí están abocados a desaparecer, y sólo una unión de ambos se mantendrá como una realidad independiente.

Space by itself and time by itself, are doomed to fade away into mere shadows, and only a kind of union of the two will preserve an independent reality.

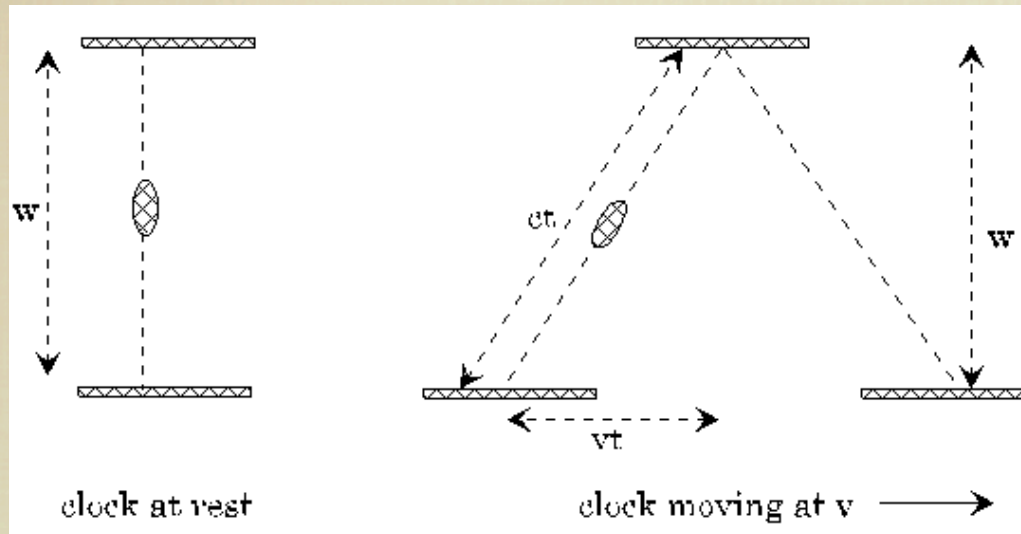


H. Minkowski



Cambio de sistema referencial como 'rotación en el espaciotiempo'

Regresando a Michelson-Morley...



$$c^2 t^2 = v^2 t^2 + w^2$$

$$t^2 (c^2 - v^2) = w^2$$

$$t = \frac{w/c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \tau$$

- Dilatación del tiempo, contracción del espacio
 - Modificación de las leyes de Newton, aumento relativista de la masa
- ⇒ ¡Velocidad de la luz como velocidad límite!
- ⇒ ¡La masa y la energía son conceptos intercambiables!

$$E=mc^2$$



P.A.M. Dirac

La ecuación de Dirac generaliza la de Schrödinger (p.ej. electrón) al régimen relativista
Unificación de relatividad y mecánica cuántica

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Compárese con la ecuación de Schrödinger (no-relativista)

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$
$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

Observación matemática: la generalización sólo existe si la partícula tiene cuatro grados de libertad

Interpretación física:

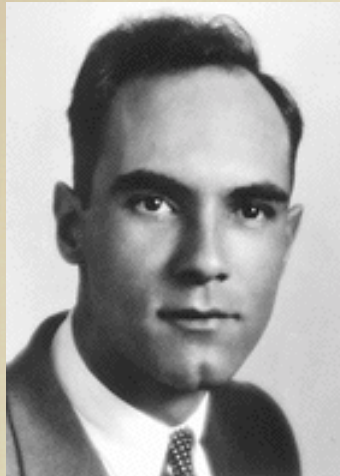
- Dos estados de spin
- Dos estados corresponden a una partícula con igual masa y carga opuesta: **antipartícula**



¡Predicción de la existencia de antipartículas!



e^+



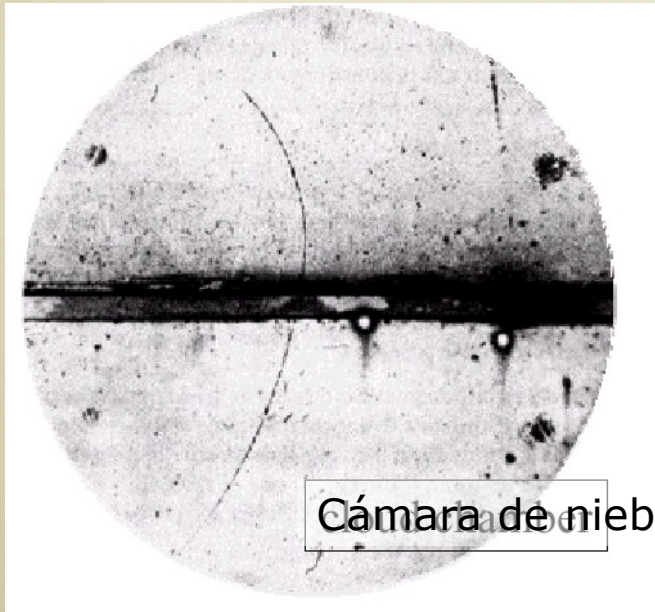
C. Anderson

Descubrimiento del positrón
(antipartícula del electrón)

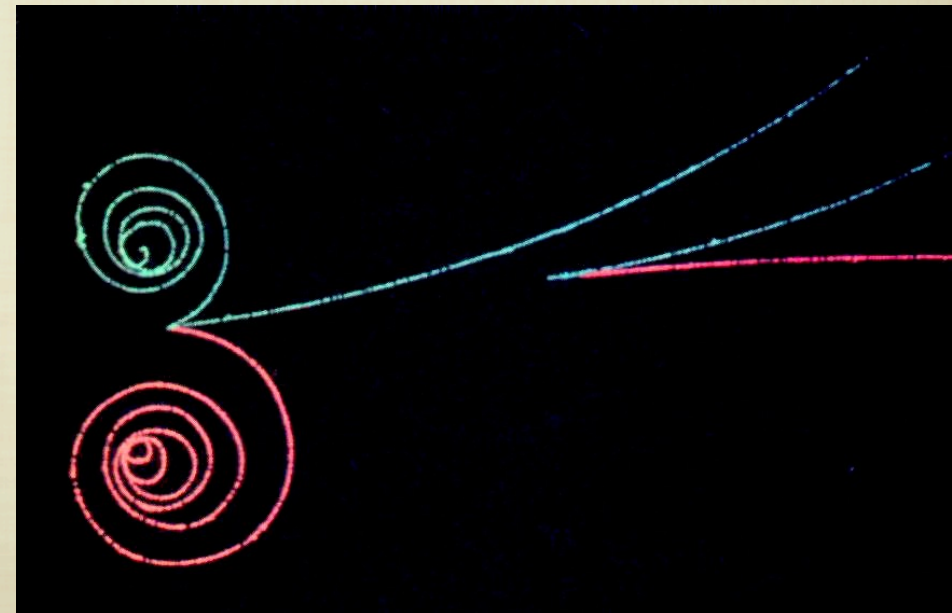
¡Dirac tenía razón!



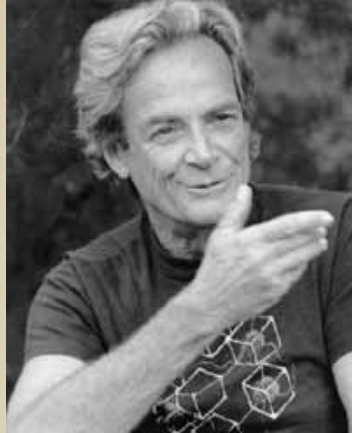
**Descubrimiento experimental
de la antimateria**



Cámara de niebla



☆☆ Electrodinámica Cuántica (QED)

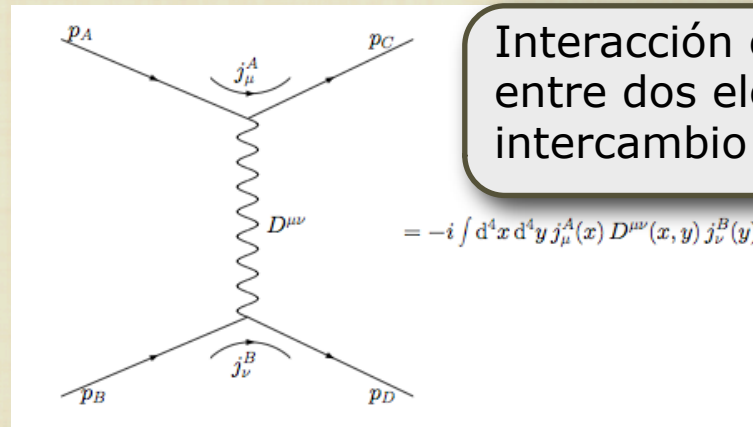


R. P. Feynman

Feynman, Tomonaga, Schwinger; Dyson
Describe interacciones electromagnéticas entre electrones, positrones y fotones, de forma cuántica y relativista

Diagramas de Feynman

Cálculo de amplitudes cuánticas mediante gráficos intuitivos



Interacción electromagnética entre dos electrones: intercambio de fotones (virtuales)



Banco Cuántico: ¡Oferta!
Tome prestado ΔE por un tiempo $\Delta t = \hbar / \Delta E$

Concepto de **partícula virtual**, que aparece y desaparece en el proceso.

Su energía puede ser arbitrariamente alta, compatible con el principio de incertidumbre (vive un tiempo muy corto)

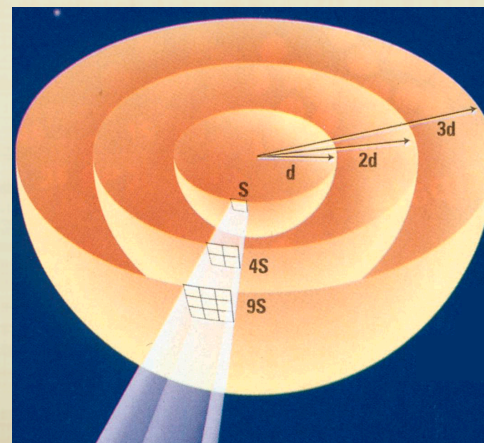
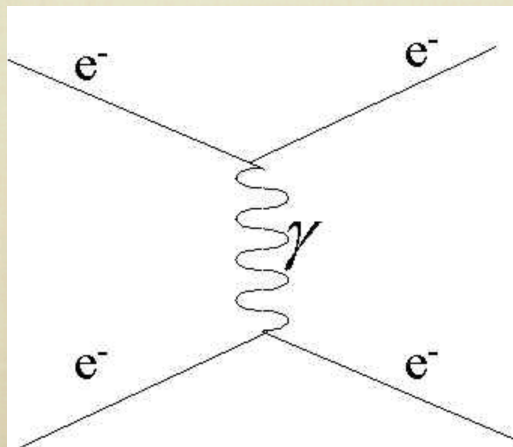
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Efectos reales de las partículas virtuales

La interacción electromagnética entre partículas cargadas se origina por intercambio de fotones (virtuales)

Las cargas eléctricas emiten y absorben continuamente fotones virtuales
(la nube de fotones virtuales es el campo electromagnético)

La dependencia $1/r^2$ en la ley de Coulomb describe la probabilidad de que uno de esos fotones sea absorbido por otra partícula cargada a una distancia r



ley $1/r^2$

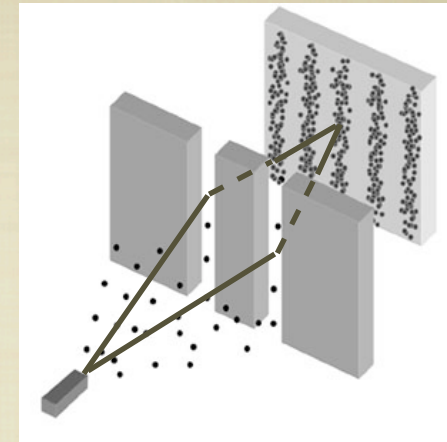
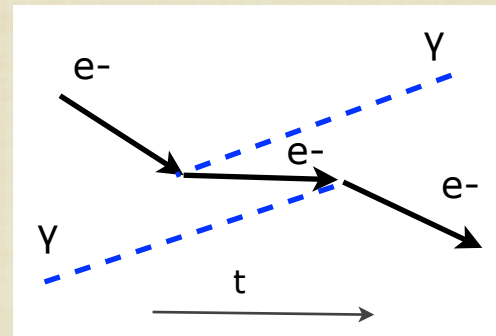
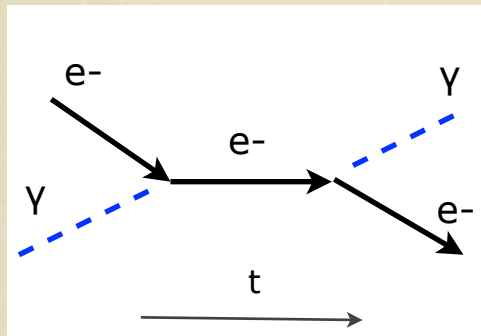
Teoría Cuántica de Campos

1934-48

Los diagramas codifican las propiedades cuánticas y relativistas

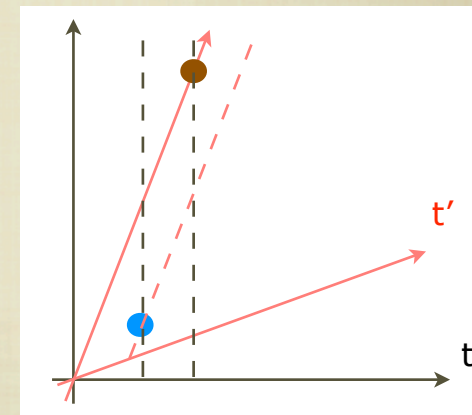
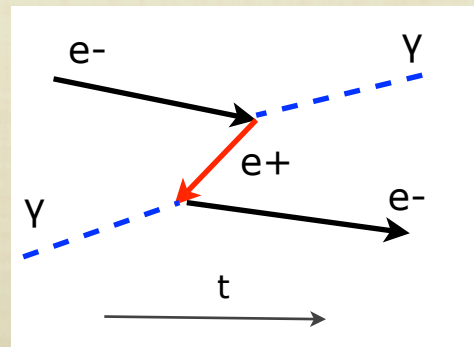
- **Cuánticas:** Amplitud de probabilidad de un proceso =
= suma sobre posibles maneras en que puede ocurrir
(generalización del experimento de doble rendija)

Ej: Efecto Compton



- **Relativistas:** Relatividad de la simultaneidad:
Orden temporal de eventos puede depender del observador.
Necesario sumar sobre diferentes ordenamientos temporales

Antipartículas =
ipartículas viajando
hacia atrás en el tiempo!

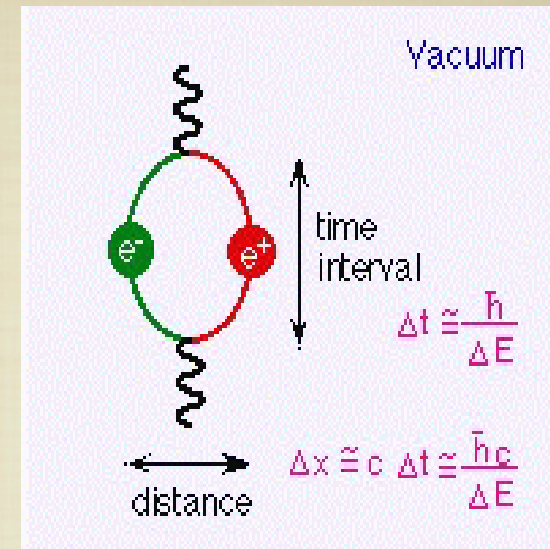


Antipartículas: consecuencia de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad

¡El vacío se convierte en un concepto complicado!

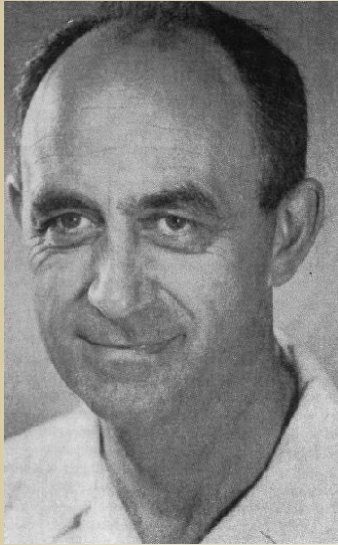
En la Física Cuántica los cuantos de los campos no pueden estar en reposo completo (principio de incertidumbre)

Por ejemplo, el estado de mínima energía del campo electromagnético (el vacío) puede producir pares virtuales electrón-positrón: **FLUCTUACIONES DEL VACÍO**



La electrodinámica cuántica reproduce los resultados conocidos y permite el cálculo de nuevos efectos (originados por las partículas virtuales) **¡en perfecto acuerdo con las medidas experimentales!**

La Teoría Cuántica de Campos y los diagramas de Feynman se convierten en el lenguaje natural para describir todas las interacciones.



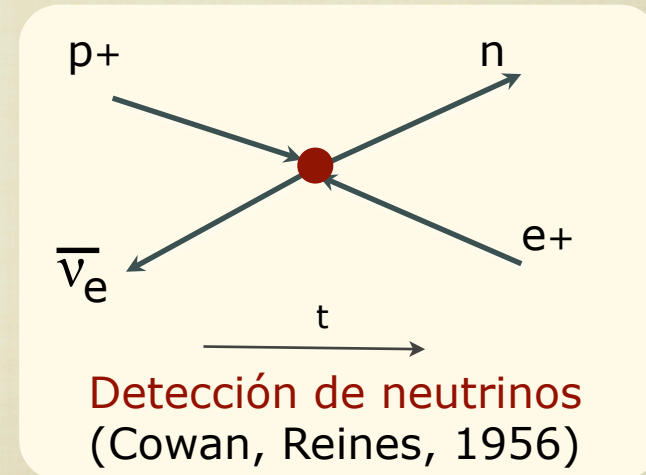
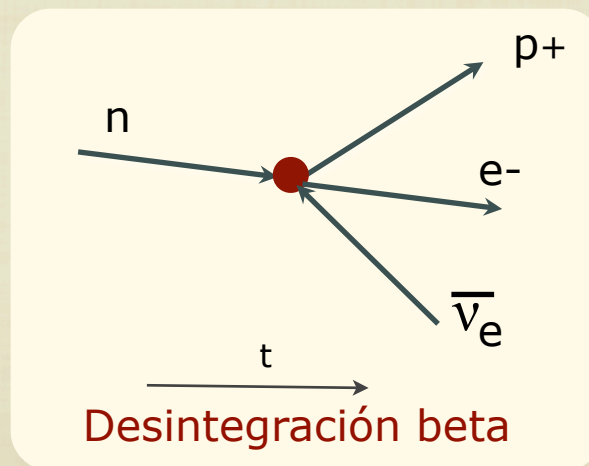
E. Fermi

Modelo de Fermi de interacciones débiles

Interacción con intensidad $G_F \sim 10^{-5}$ comparada con la electromagnética

La interacción débil cambia la naturaleza de las partículas. Es más apropiado denominarla "interacción" que "fuerza"

En el lenguaje de diagramas de Feynman



Patológica a altas energías ~ 100 GeV, Ok hasta ~ 1960

La analogía con electromagnetismo se hará mucho más concreta más adelante en la **teoría electrodébil** (partículas mediadoras Z/W)

Teoría Cuántica de Campos

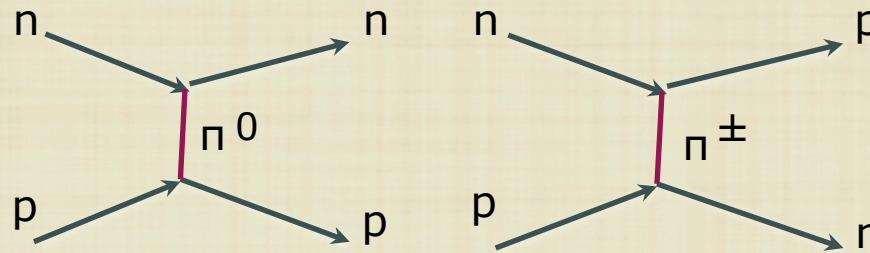
1934

Modelo de Yukawa de la interacción fuerte: mantiene unidos los protones y neutrones en el núcleo



H. Yukawa

analogía con electromagnetismo
Intercambio de partículas, denominadas **pión**



Interacción atractiva



Partículas masivas \Rightarrow

\Rightarrow **interacción de corto alcance**

Compatible con el principio de
incertidumbre: $1.4 \text{ fm} \sim 140 \text{ MeV}$

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Análogo de la ley de Coulomb

UNIVERSAL BANK OF QUANTA

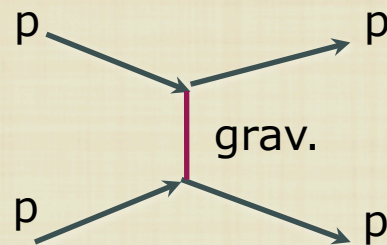


Banco Cuántico: ¡Oferta!
Tome prestados 140MeV
durante 10^{-23} s .

Interacción gravitatoria

Aunque crucial en nuestra vida cotidiana, a priori es esencialmente irrelevante a nivel de las partículas elementales. Aún así, interesante del punto de vista teórico

gravitón



Partículas sin masa \Rightarrow

\Rightarrow **interacción de largo alcance**

Similaridad entre la ley de Newton y la de Coulomb

La versión cuántica **no** es matemáticamente consistente
 La teoría clásica es la **Relatividad General de Einstein**

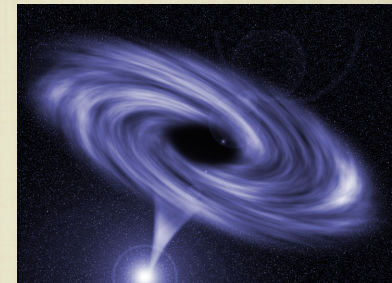
Gravedad:
 Sistemas muy masivos

Mecánica Cuántica:
 Sistemas muy pequeños

Gravedad Cuántica

Sistemas muy masivos pero muy pequeños

¡ Reto del s.XXI !



Agujeros negros



Origen del Big Bang