

Introducción a Física de Partículas Elementales y Teoría de Cuerdas

Angel M. Uranga

David G. Cerdeño

Luis E. Ibáñez

Fernando Marchesano

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid

PLAN

- 3 Feb: "Un mundo cuántico y relativista", D. G. Cerdeño
- 5 Feb: "Física de Partículas Elementales", D. G. Cerdeño
- 10 Feb: "Gravedad", A. Uranga
- 12 Feb: "Más allá del modelo Estándar", L.E. Ibáñez
- 17 Feb: "Teoría de Cuerdas", F. Marchesano
- 19 Feb: "Teoría de Cuerdas y Física de Partículas", F. Marchesano
- 24 Feb: "Teoría de Cuerdas y Gravedad", A. Uranga

PLAN de hoy

Un mundo cuántico

Estructura de la materia y Mecánica Cuántica

Un mundo relativista-I

Relatividad Especial y Teoría Cuántica de Campos

Un mundo cuántico

Estructura de la materia y Mecánica Cuántica

David G. Cerdeño

based on the slides prepared by

Angel M. Uranga

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, Madrid

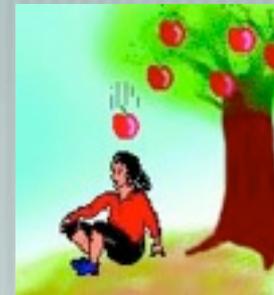
angel.uranga@uam.es

Universo: Sistema Solar y estrellas de nuestra galaxia
(infinito, eterno, prácticamente estático e inamovible)

Estructura de la materia: Átomos (Dalton, Mendeleev)
(indivisibles, sin estructura interna)

Dos fuerzas fundamentales:

- Gravedad (Newton)
- Electromagnetismo (Maxwell)



Marco general de la Física:

- Mecánica clásica (Galileo, Newton)
- Termodinámica y Mecánica estadística (Kelvin, Boltzmann)

**Nadie sospechaba el increíble progreso de la Física
en los 100 años siguientes**

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

e^-

Átomo

Núcleo

p^+

n

e^+

μ^-

τ^-

p^+

ν_e

ν_μ

τ^-

ν_τ

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Higgs

Gran unificación?

Supersimetría?

Supercuerdas?

3 familias

W

Z

g

Color QCD

Bosones W
Unificación electrodébil

Violación de P, C, CP

Zoo de partículas

u d s

c

b

t

Fotón

Radio-actividad

Rayos cósmicos

Relatividad General

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Materia oscura

Fusión nuclear

Nucleosíntesis cosmológica

Fondo de radiación de microondas

Inflación

Inhomogeneidades del fondo de microondas

Energía oscura

Geiger

Cámara de niebla

Ciclotrón

Sincrotrón

Cámara de burbujase

Cámara de hilos

Aceleradores e^+e^-

Enfriamiento de haces

Online computers

Detectores modernos

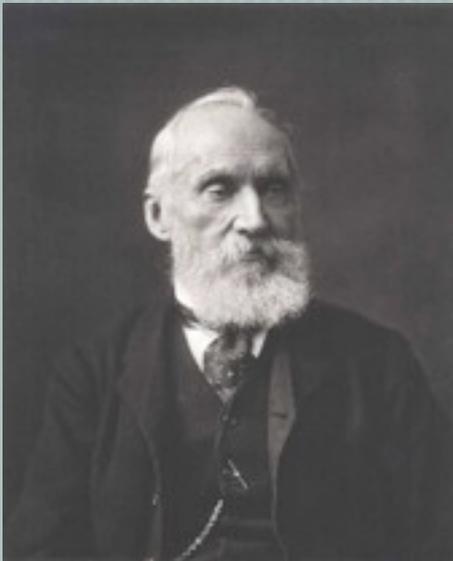
Aceleradores p^+p^-

WWW

GRID

En los albores del s. XX

“En Física, sólo queda completar la sexta cifra decimal”
(All that remains to do in physics is to fill in the sixth decimal place)



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

“Ya no queda nada por descubrir en Física.
Sólo queda aumentar más y más la precisión
de las medidas experimentales”

*There is nothing new to be discovered in
physics now, All that remains is more
and more precise measurement.*

Pero ya Lord Kelvin mencionó dos inquietantes
nubes en el horizonte de la Física:

- La radiación de cuerpo negro
- El experimento de Michelson-Morley

En los albores del s. XX

Albert Michelson, 1894

“En Física, sólo queda completar la sexta cifra decimal”

(All that remains to do in physics is to fill in the sixth decimal place)



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

“Ya no queda nada por descubrir en Física.
Sólo queda aumentar más y más la precisión
de las medidas experimentales”

*There is nothing new to be discovered in
physics now, All that remains is more
and more precise measurement.*

Pero ya Lord Kelvin mencionó dos inquietantes
nubes en el horizonte de la Física:

- La radiación de cuerpo negro
- El experimento de Michelson-Morley

En los albores del s. XX

Albert Michelson, 1894

“En Física, sólo queda completar la sexta cifra decimal”

(All that remains to do in physics is to fill in the sixth decimal place)

Lord Kelvin, 1900, en su discurso a la Asociación Británica para el Desarrollo Científico:



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

“Ya no queda nada por descubrir en Física.
Sólo queda aumentar más y más la precisión
de las medidas experimentales”

*There is nothing new to be discovered in
physics now, All that remains is more
and more precise measurement.*

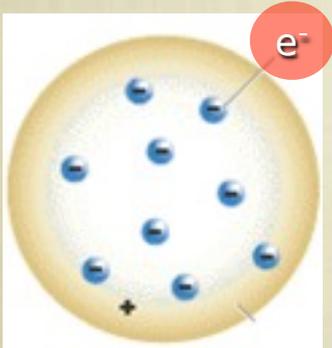
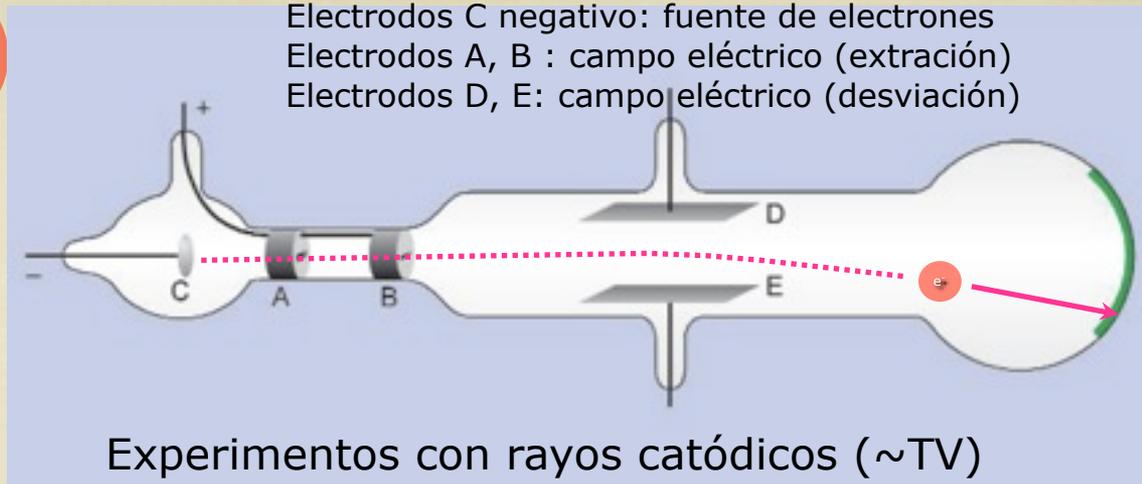
Pero ya Lord Kelvin mencionó dos inquietantes
nubes en el horizonte de la Física:

- La radiación de cuerpo negro
- El experimento de Michelson-Morley



J.J. Thomson

e^-



Su modelo del átomo como 'pudding de pasas' (1904)



Los 'rayos' son corpúsculos cargados (conocidos como electrones desde entonces) con un cociente carga/masa fijo (propiedades intrínsecas de los electrones)

$$(q/m)_e \approx 1840 (q/m)_{H^+}$$



Los electrones son partículas sub-atómicas! (El átomo NO es indivisible!)



R.A. Millikan

En 1906 R. Millikan consigue medir el valor de la carga del electrón en su experimento de la gota de aceite

Observó que las gotas de aceite estaban cargadas en unidades enteras de una carga fundamental

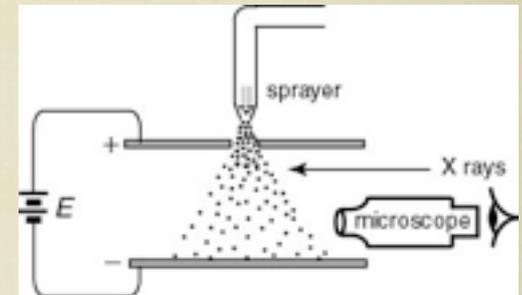
$$q_E = 1.592 \times 10^{-19} \text{ Coulombs}$$

Las medidas actuales de la carga del electrón indican que

$$q_E = 1.602\,176\,53\,(14) \times 10^{-19} \text{ Coulombs}$$

Además de la medida de q/m podemos obtener que

$$m_E = 9.109\,382\,91\,(40) \times 10^{-31} \text{ kg}$$

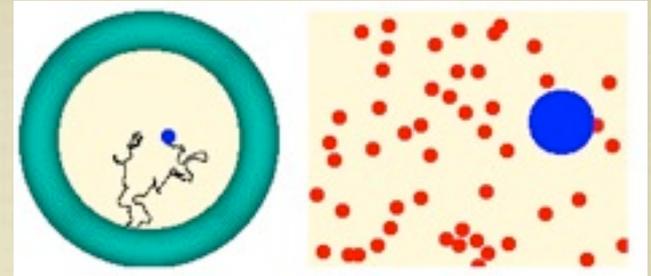


Átomo

Partículas Elementales

1905

Robert Brown (1827) observa el movimiento aleatorio (*random walk*) de partículas suspendidas en un fluido (movimiento browniano)

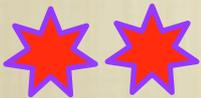


Albert Einstein(1905) explica mediante la teoría cinética que el movimiento se debe a colisiones con las moléculas del medio

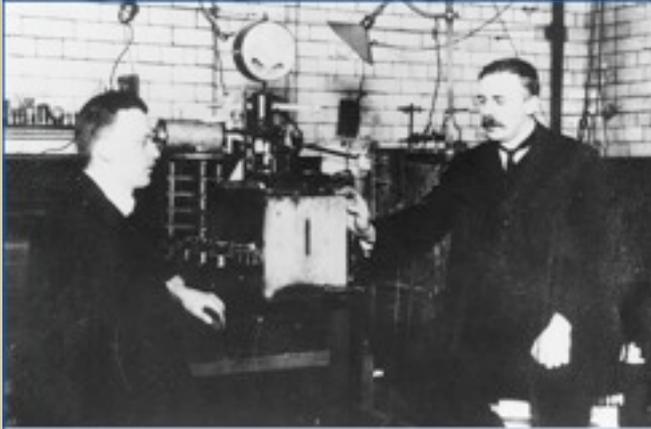
Albert Einstein

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

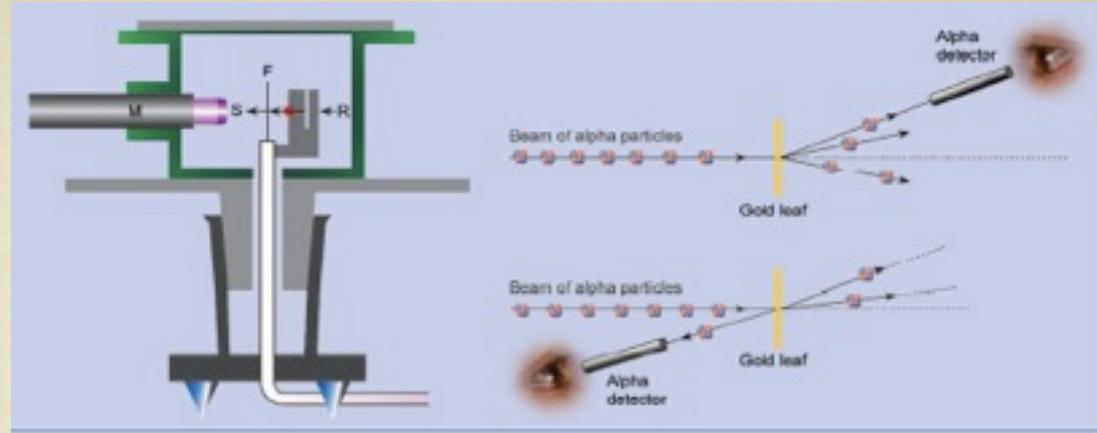
Francois Perrin (1907) utiliza la fórmula de Einstein para confirmar la teoría y calcular el número de Avogadro.



Queda demostrada la discontinuidad de la materia
(existencia de moléculas y átomos)



**Ernest Rutherford (dcha) y
Hans Geiger (izda) en Manchester**



Geiger y Marsden lanzan partículas alfa (núcleos de He) contra planchas de oro. Pequeñas desviaciones de trayectoria, pero en 1 de cada 8000 casos, rebote violento. Incompatible con el modelo del átomo 'pudding de pasas' de Thomson.

Ernest Rutherford: concepto de núcleo

La masa del átomo se encuentra concentrada en una pequeñísima región, el núcleo, con carga positiva, con los electrones orbitando alrededor.

Estima su tamaño en $\sim 27 \times 10^{-15}$ m (valor real: 7.3×10^{-15} m)

(distancia mínima de la partícula alfa, tal que energía potencial de Coulomb = energía cinética)



Descubrimiento del núcleo

El átomo está esencialmente **vacío**

Analogía con el sistema solar:
Si el núcleo tuviera el tamaño del Sol,
los electrones orbitarían a una distancia
1000 veces mayor que la distancia Tierra-Sol

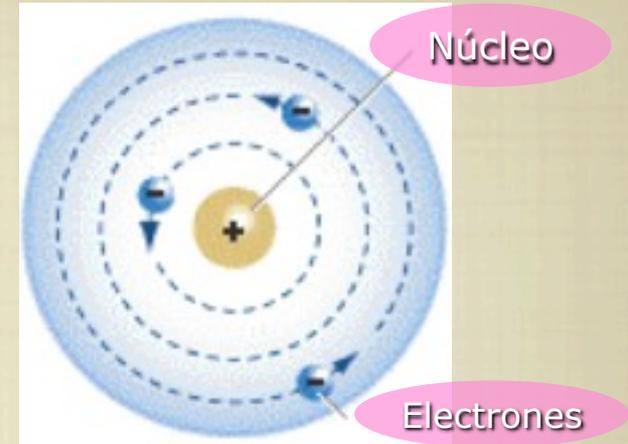
¿De qué está hecho el núcleo ?

★ ★ Protón:

- W. Prout (1815): los pesos atómicos son múltiplos del peso atómico del hidrógeno
- E. Goldstein (1886): rayos anódicos
- W. Wien (1898): mide q/m para diferentes núcleos, incluido H
- E. Rutherford (1918): propone que los núcleos contienen núcleos de hidrógeno (protones)

★ ★ Neutrón:

Descubierto por J. Chadwick en 1932, saltemos momentáneamente hasta entonces



Modelo de Rutherford del átomo "vacío"

¿Hay otras partículas en el núcleo?

Por ejemplo: He-4 tiene $Z=2$ pero $A=4$

¿A qué corresponden las dos unidades de masa con carga cero?

En 1930 Bethe y Becker descubren una nueva forma de radiación, neutra, muy penetrante, pero no ionizante (¿podrían ser rayos gamma?)

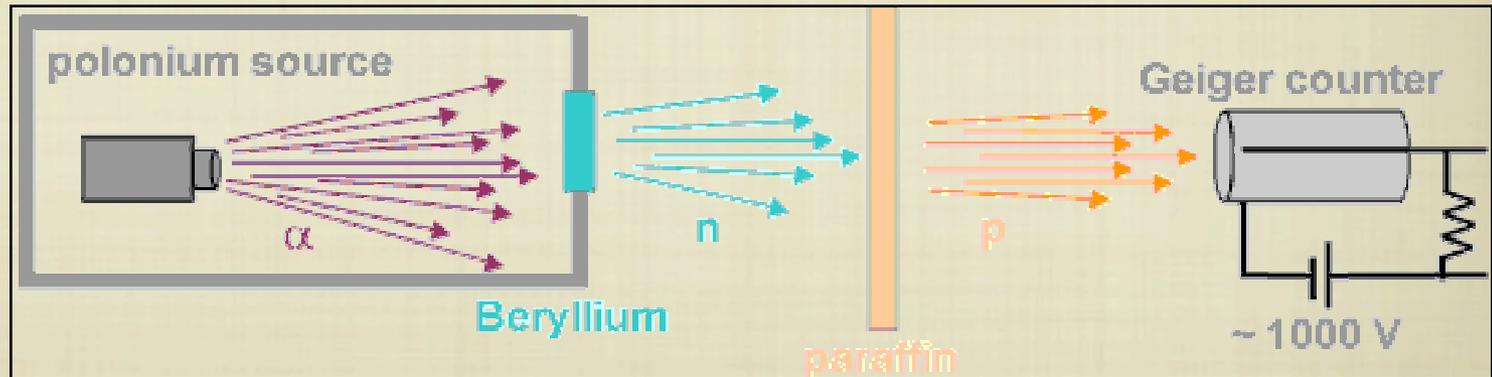
★ ★ Neutrón:

Descubierto por J. Chadwick en 1932

Joliet-Curie descubren que al incidir sobre parafina, se emiten protones de $\sim 5.3\text{MeV}$



James Chadwick

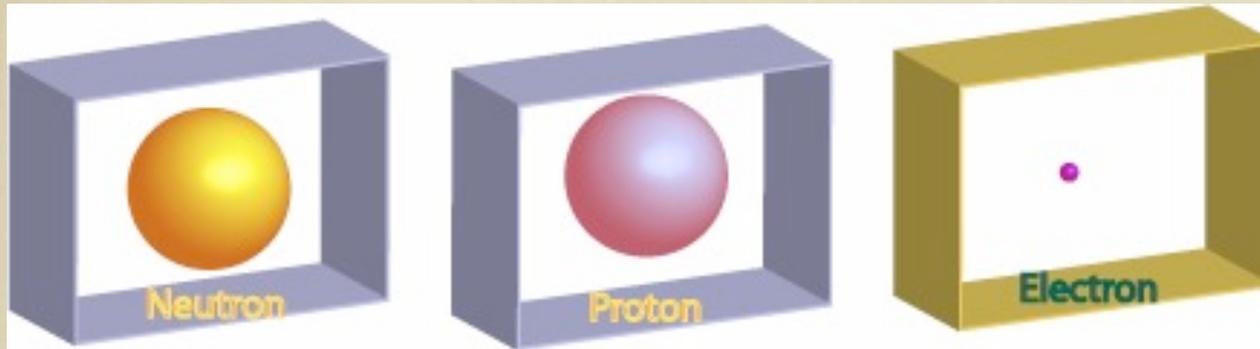


Análisis cinemático: Masa del neutrón \sim masa del protón

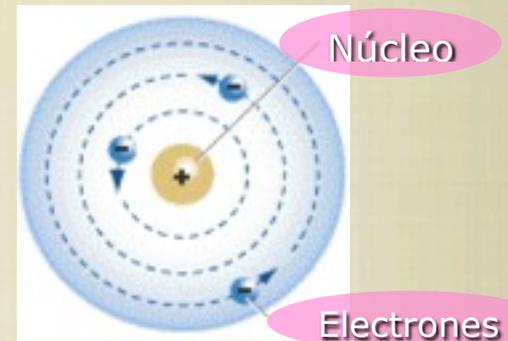
Partículas Elementales

Modelo sencillo, fácil de recordar

- Lista de partículas elementales (aprox. 1932)



- Forman átomos estables mediante interacciones electromagnéticas



Pero que no consigue explicar varias cosas

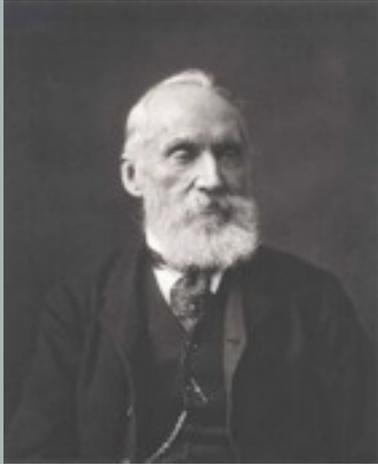
¿Por qué los electrones no radian energía al girar en su órbita?

Contradicción con la teoría del electromagnetismo **clásica** de Maxwell

¿Qué es lo que mantiene unidos los protones y neutrones en el núcleo?

Requieren comprender que la Naturaleza está descrita por la Mecánica Cuántica

Recordemos los albores del s. XX



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

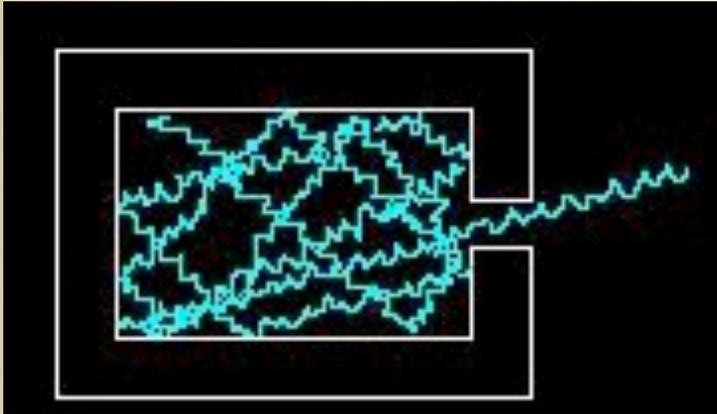


Las dos nubes en el horizonte que vislumbró Lord Kelvin desencadenaron sendos enriquecedores ***chaparrones*** que hicieron florecer la Física del s. XX

- La radiación de cuerpo negro
⇒ **Mecánica Cuántica**
- El experimento de Michelson-Morley
⇒ **Teoría de la Relatividad**

Fotón

Radiación de cuerpo negro



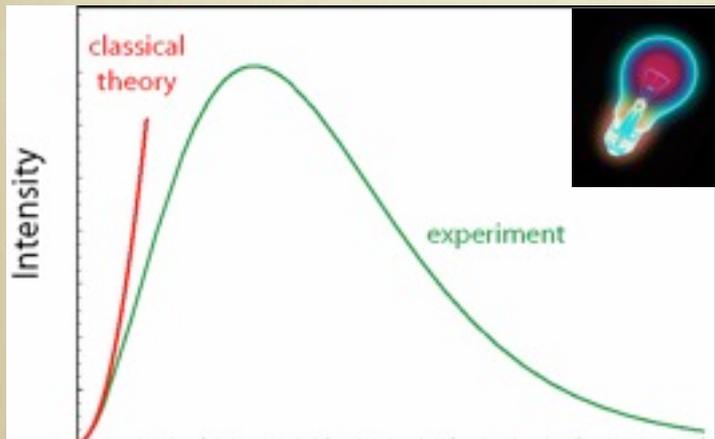
“Cuerpo negro”: Cavidad que absorbe luz incidente y emite radiación en equilibrio térmico

El espectro de la radiación emitida (intensidad para cada frecuencia) depende sólo de la temperatura (Kirchoff, 1860)

Teoría clásica (Raleigh-Jeans)

$$I(\nu) \simeq \nu^2 \langle E \rangle$$

Energía promedio de los osciladores en las paredes de la cavidad (proporcional a la temperatura)



Espectro de emisión

Predice una intensidad infinita en el régimen de frecuencias altas(!)

Fotón

Un "Acto de desesperación"

Los osciladores en las paredes de la cavidad emiten y absorben energía en "unidades mínimas" ("cuantos") $E = h \nu$



h = una nueva constante fundamental de la Naturaleza

Frecuencias altas implican cuantos de mayor energía, más costosos y termodinámicamente menos probables. Supresión del régimen $E \gg kT$



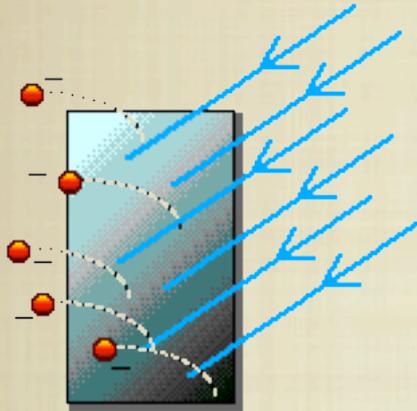
Max Planck

$$I(\nu) \simeq \nu^2 \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Fotón

Efecto fotoeléctrico

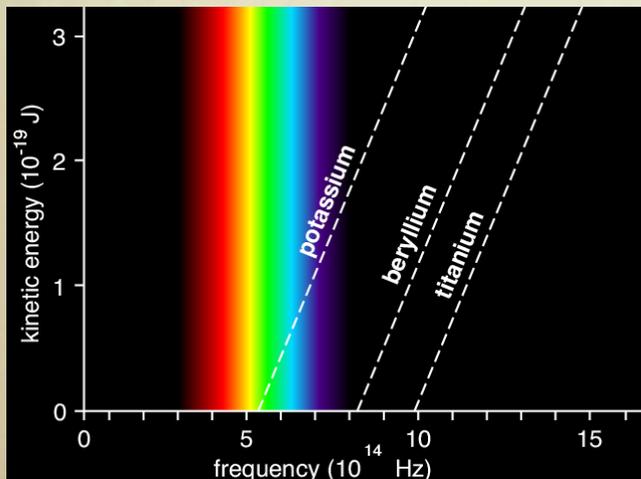
Producción de rayos catódicos (extracción de electrones) cuando se ilumina una superficie metálica con luz (radiación electromagnética)



Teoría **clásica**:

Energía de los electrones proporcional a la energía de la luz (cuadrado de la amplitud del campo e.m.)

Total desacuerdo con resultado experimental(!)



La energía del electrón es independiente de la intensidad de la luz

Pero es proporcional a la frecuencia de la luz, con pendiente = "h"

Existe un umbral de frecuencia, por debajo del cual no hay emisión

Fotón

Efecto fotoeléctrico



Albert Einstein

“Mi única contribución revolucionaria”

La luz es emitida y absorbida en cuantos de energía $E = h \nu$

Un cuanto de luz entrega toda su energía a un único electrón

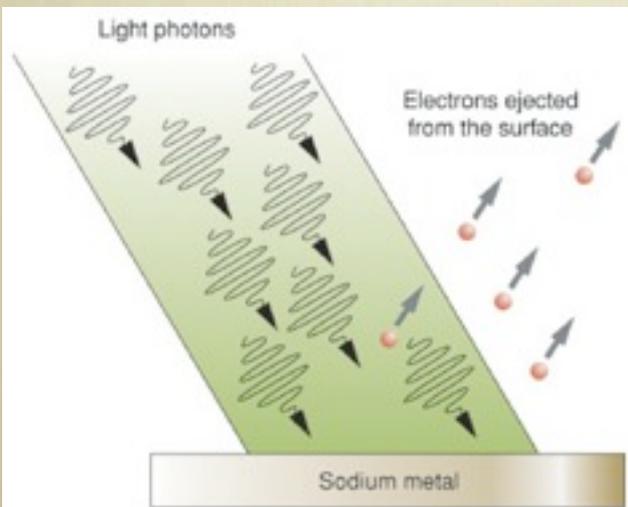
(demostrado experimentalmente por Millikan, 1923)

$$E_{\max} = h\nu - W$$



Fotón: El cuanto de luz se comporta como una partícula

Estas ideas marcan el comienzo de la Mecánica Cuántica



¿Por qué los electrones no radian energía al girar en su órbita?

Contradicción con la teoría del electromagnetismo **clásica** de Maxwell



N. Bohr



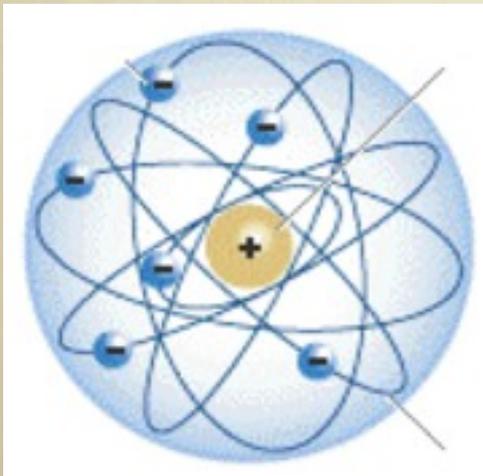
N. Bohr propone una descripción **cuántica** de los electrones en el átomo

- Cuantization del momento angular \Rightarrow niveles de energía

$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

$$E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (\text{hidrógeno})$$

- Emisión de radiación implica una transición de nivel
- Energía del fotón emitido = diferencia de niveles de energía



Reproduce la fórmula empírica de J. J. Balmer (1885) para el espectro de emisión del hidrógeno

$$\lambda = \frac{hm^2}{(m^2 - n^2)}$$

Fotón

Efecto Compton



Arthur Compton

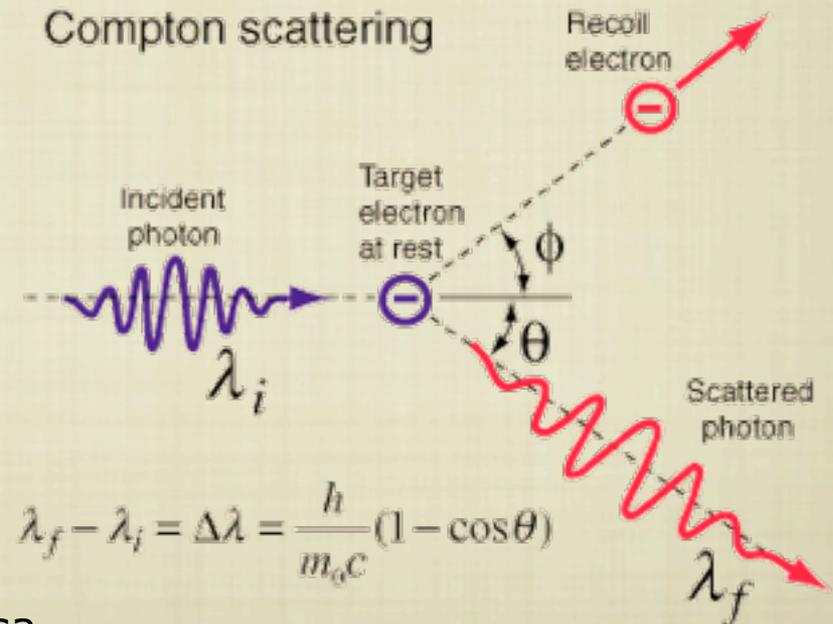
La longitud de onda de los fotones que inciden sobre un material (y son dispersados por sus electrones) depende únicamente de la dirección de dispersión

El fotón incidente cede parte de su energía y como consecuencia de la relación

$$E = h \nu$$

sale dispersado con menor frecuencia (mayor longitud de onda)

El cambio en frecuencia depende de la masa de la partícula con la que choca el fotón



La comprensión de las extrañas leyes que gobiernan el mundo cuántico, la Mecánica Cuántica, tardó unos 10 años

Así como la radiación electromagnética (ondas) se comporta como particular (fotones), ...

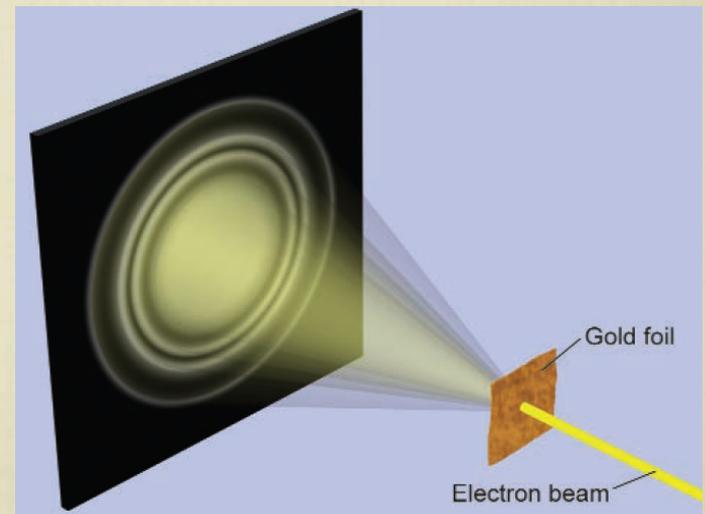


Las partículas se comportan como ondas
Dualidad onda-partícula

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Louis de Broglie

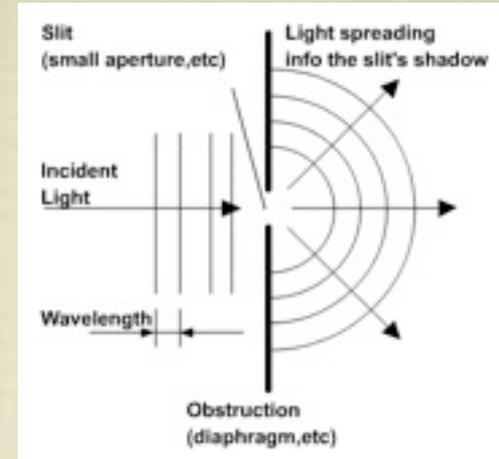
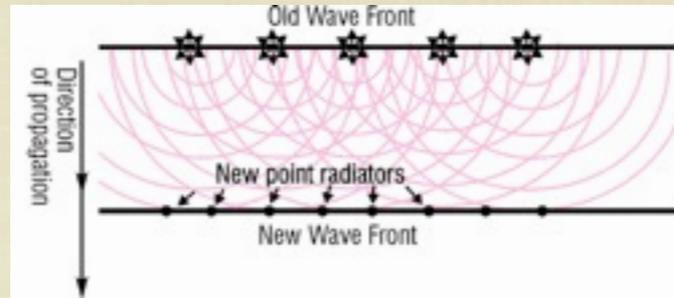


*Confirmado experimentalmente en 1927
En la difracción de electrones (Davisson/Germer)

Principio de Huygens

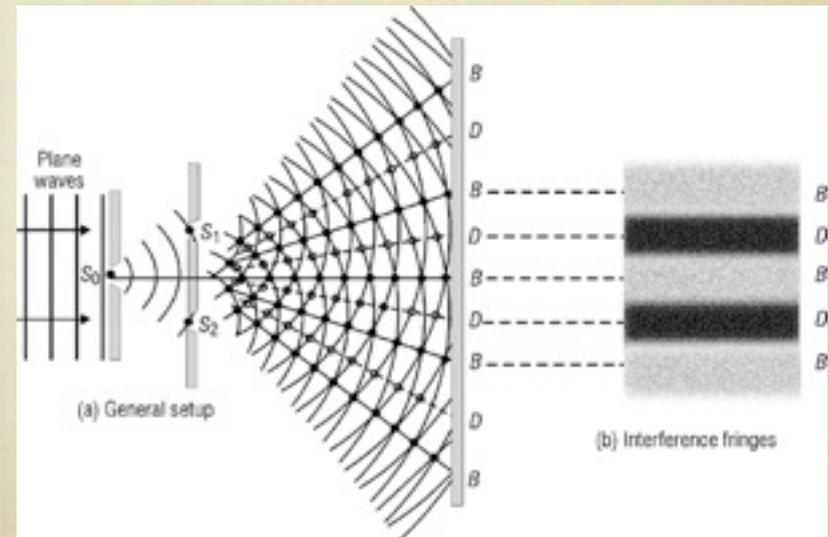
- Cada punto del frente de ondas se constituye en un foco secundario

Ondas planas



Experimento de la doble rendija

Amplitud en un punto del detector es la superposición de las amplitudes por los dos caminos posibles





W. Heisenberg

Las partículas/ondas son objetos deslocalizados

Existe un límite en la precisión de la medida simultánea de ciertas propiedades de una partícula



El principio de incertidumbre

Posición y momento

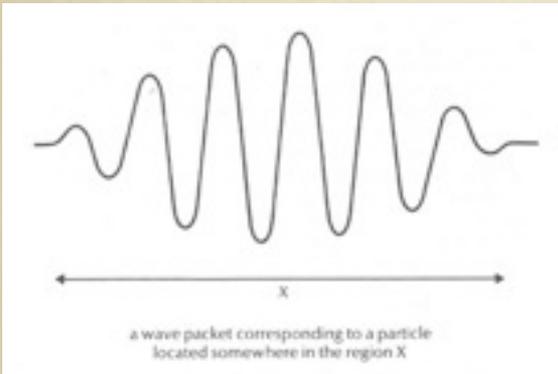
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

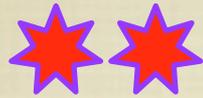
Tiempo y energía

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

En la medida de la posición hay una incertidumbre de orden la longitud de onda $\Delta x \sim \lambda = h/\Delta p$

En la medida de la frecuencia ($\sim \nu = E/h$) de una onda hay una incertidumbre de orden del tiempo Δt empleado en la medida





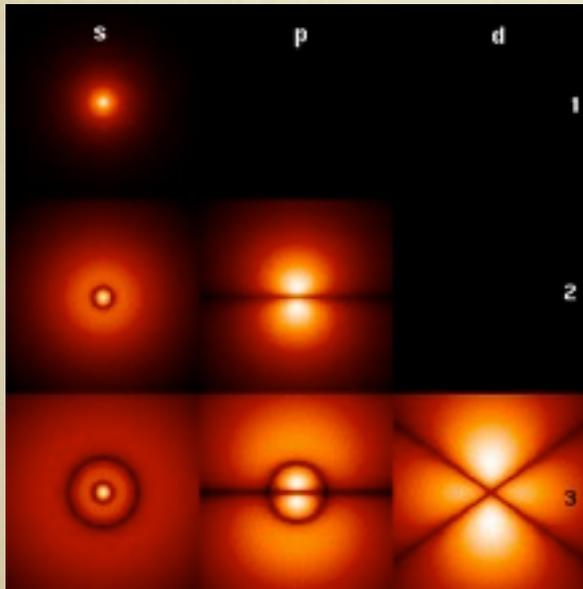
Función de onda de probabilidad

Las partículas son ondas
⇒ descripción mediante una ecuación de ondas

$$H\psi(\mathbf{r}, t) = (T + V)\psi(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t)$$

Descripción válida en teoría
no relativista $v \ll c$

E. Schrödinger



Interferencia: ψ = función compleja

Interpretación (Born, 1927):

ψ = "amplitud de probabilidad"

$|\psi(x)|^2$ = probabilidad de encontrar la
partícula en la posición x

Funciones de onda de electrón en el átomo de
hidrógeno ('ondas estacionarias en 3 dimensiones)

☆☆ Spin

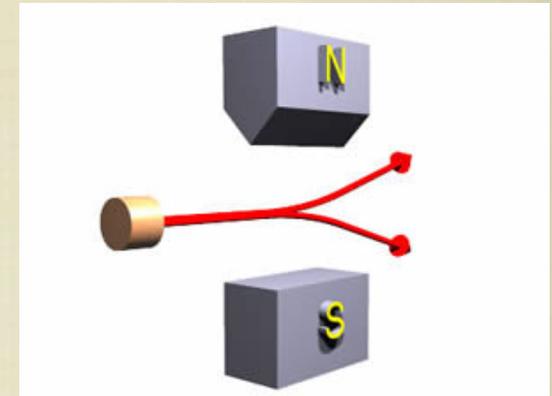
Principio de exclusión de Pauli (1924): en cada orbital, sólo dos electrones, que se distinguen por un misterioso número cuántico bi-valuado

Kronig; Uhlenbeck, Goudsmit (1925): "spin" $+1/2$, $-1/2$

Estados de rotación intrínsecos de la partícula, polarización levógira o dextrógira de la onda Ψ

- Experimento de Stern-Gerlach (1922)

Un campo magnético inhomogéneo desvía los electrones según su momento magnético (relacionado con el spin)



Fermiones y bosones

-**Bosones**: Partículas con spin entero (fotón, etc)

No se aplica el principio de exclusión de Pauli.

Sistemas de bosones en el mismo estado cuántico (p.ej. láser)

-**Fermiones**: Partículas con spin semi-entero (electrón, protón, etc)

Principio de exclusión de Pauli:

No pueden existir dos fermiones en el mismo estado cuántico

⇒ Impenetrabilidad de la materia

(El átomo cuántico está todo lo "lleno" que puede estar de forma compatible con el principio de exclusión de Pauli)

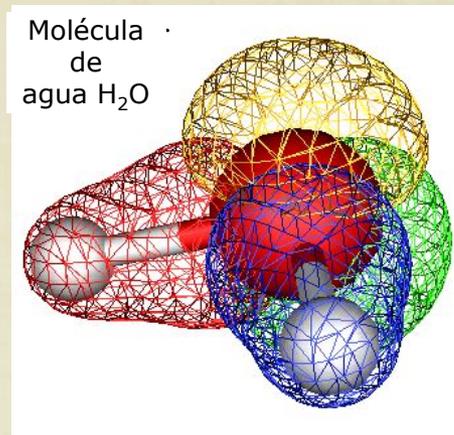
La Física Cuántica explicó la existencia de estructura en la materia



Linus Pauling (1928)



Explicación del enlace químico



Comprensión del origen de la estructura
en átomos (enlace químico)
y moléculas (fuerzas de van der Waals)

**Nueva visión del mundo y multitud de aplicaciones prácticas
(originado por preguntas fundamentales: "curiosidad pura")**

Un mundo relativista

Relatividad Especial y Teoría Cuántica de Campos

David G. Cerdeño

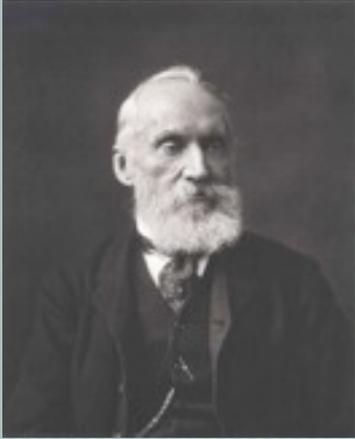
based on the slides prepared by

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

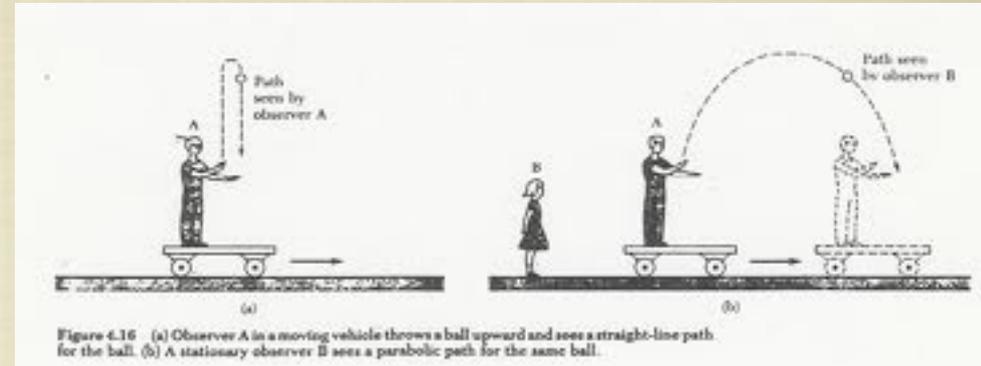
- Relatividad Especial
**y las interacciones
fundamentales**

- Relatividad General
Descripción del Universo
Gravedad y Cosmología

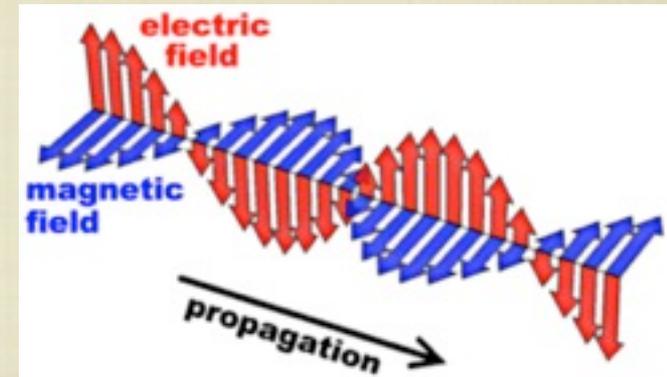
Mecánica Newtoniana y Electromagnetismo de Maxwell

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?

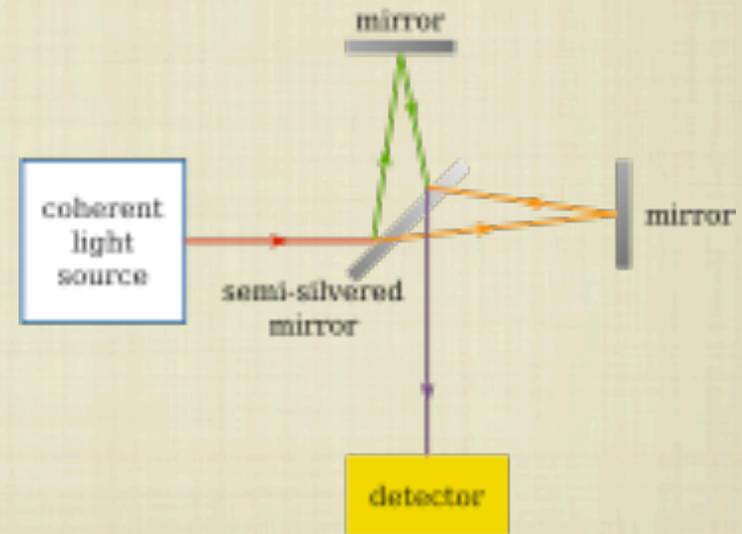
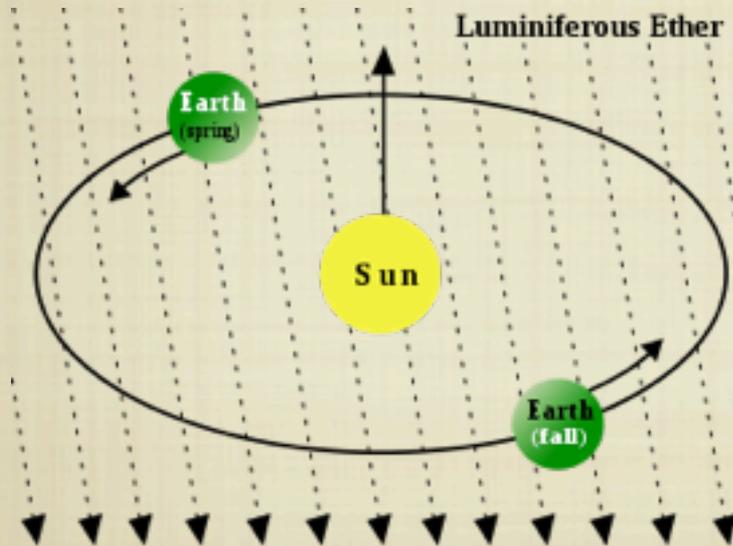
El consenso era la existencia de un sistema de referencia privilegiado, un éter en el que se propagaban las ondas electromagnéticas, entendidas como oscilaciones mecánicas de un medio/fluido

Y sin embargo ...

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

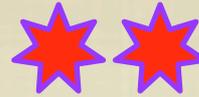
Experimento de Michelson-Morley

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?

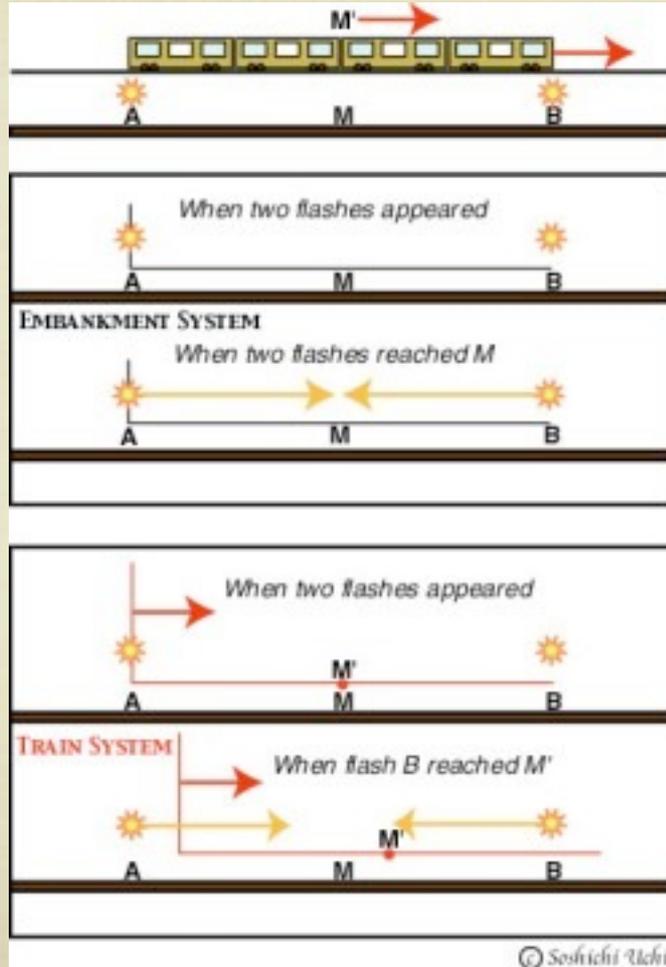
Sus conclusiones:

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

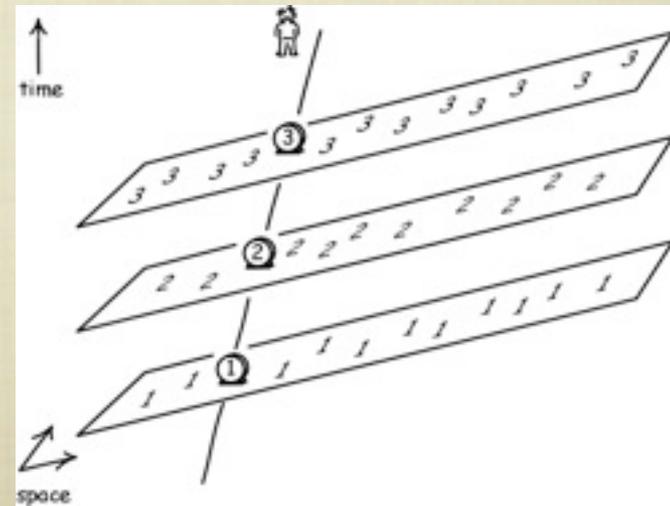
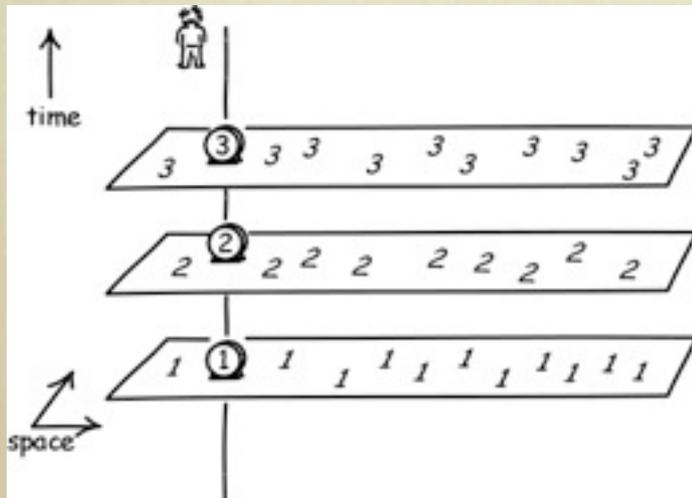
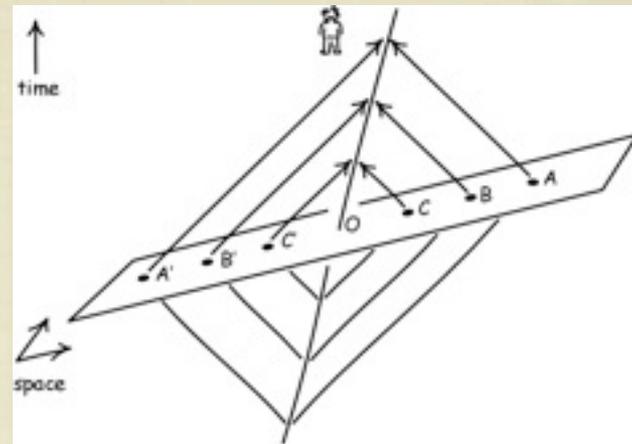
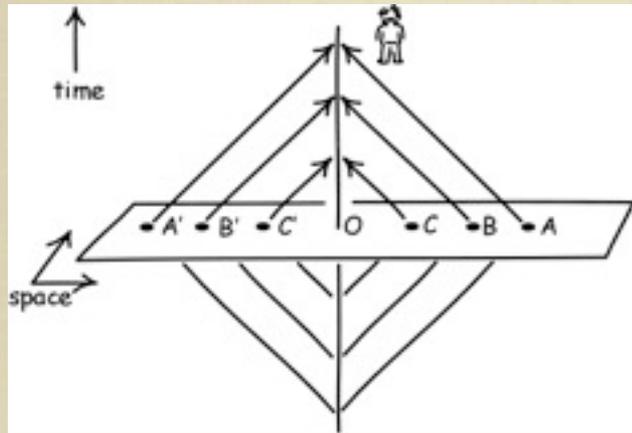
Diferentes observadores disienten en sus medida de qué eventos en el espacio y el tiempo son simultáneos



Espacio y tiempo

El espacio y tiempo Newtonianos son absolutos

En Relatividad Especial, dependen del observador



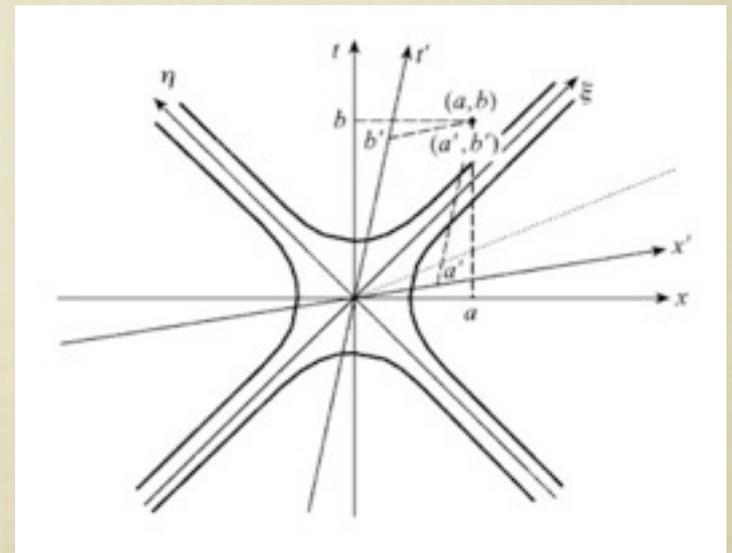
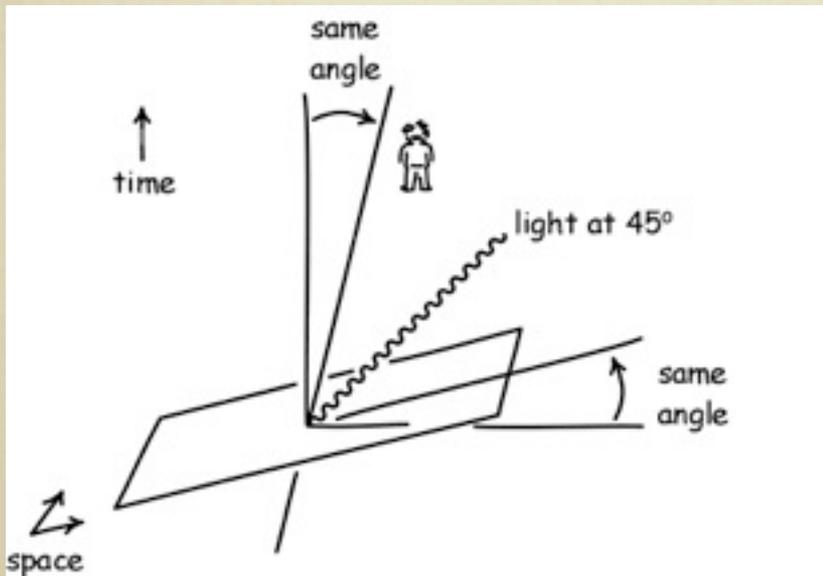
Espacio-Tiempo

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.

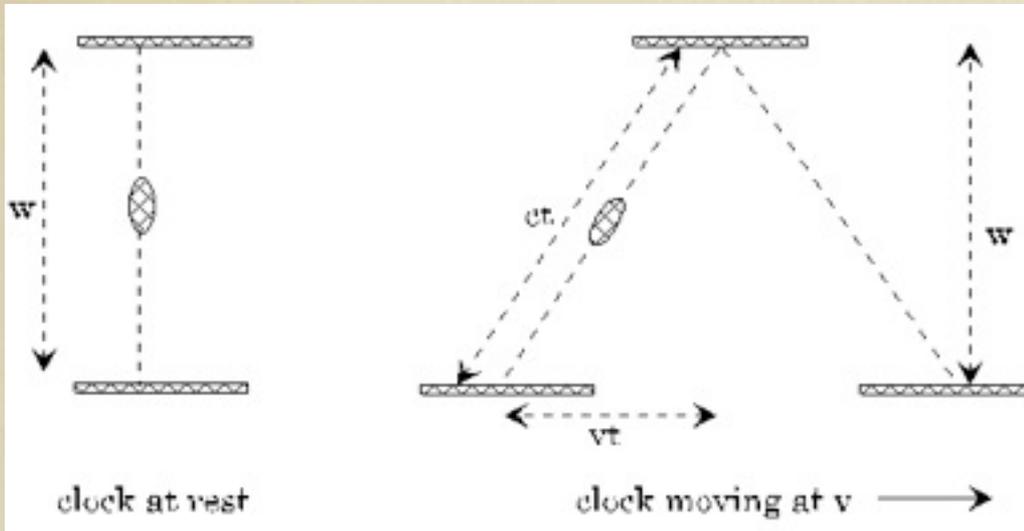


H. Minkowski



Cambio de sistema referencial como 'rotación en el espaciotiempo'

Regresando a Michelson-Morley...



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

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

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

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- Dilatación del tiempo, contracción del espacio

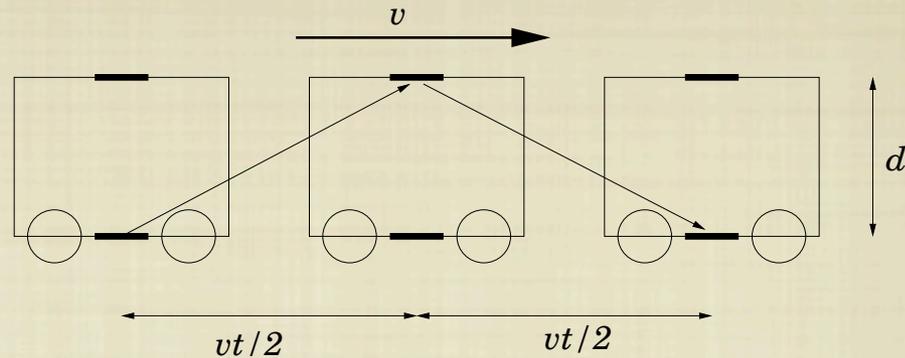
- Modificación de las leyes de Newton, aumento relativista de la masa

⇒ ¡Velocidad de la luz como velocidad límite!

⇒ ¡La masa y la energía son conceptos intercambiables!

Relatividad Especial

- Dilatación del tiempo



Imaginemos la reflexión de un rayo de luz en el interior de un tren en movimiento. Según el cálculo anterior, observamos que el tiempo transcurrido para el mismo suceso (emisión de un rayo de luz, reflexión y detección del mismo rayo) depende de nuestro sistema de referencia.

Si nos encontramos en el sistema de referencia del andén, **el tiempo transcurrido es mayor**

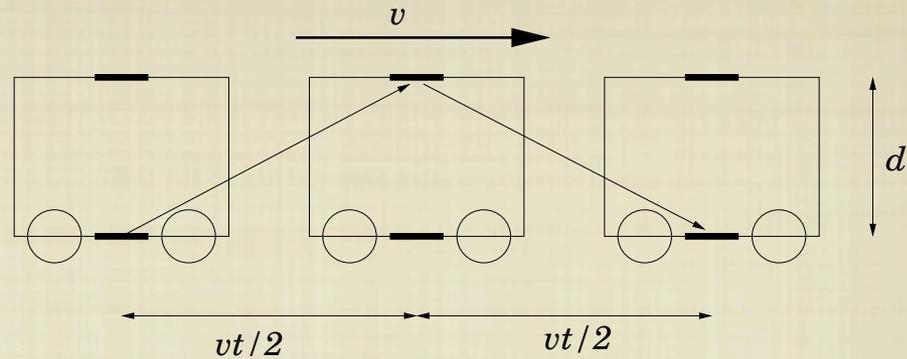
$$t = \frac{2d/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{Lo que implica } t > t'$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{Es una función creciente de } v, \text{ siempre mayor que } 1$$

Para velocidades bajas, $v \ll c$, $\gamma \approx 1$ los efectos relativistas no son apreciables.

Relatividad Especial

- Contracción del espacio



Si el andén tiene longitud L (medida en el sistema de referencia del andén), entonces el tren necesita un intervalo de tiempo t para recorrerlo con velocidad v . Es decir, $L = vt$

En el sistema de referencia del tren, el intervalo de tiempo vendrá dado por t' y la longitud del andén que se medirá será por lo tanto $L' = vt'$

Para el pasajero del tren **la longitud del andén es menor.**

$$L' = vt' = vt\sqrt{1 - v^2/c^2} = L\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Observese que la situación es simétrica. por ejemplo, la longitud del tren en el sistema de referencia del tren es mayor que la medida desde el andén.

Relatividad Especial

Ejemplo: Vida media (y observación) de muones

Los muones tienen vida media de $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Se forman en la atmósfera (a unos 15 km de altura) en colisiones de rayos cósmicos a velocidades muy cercanas a la de la luz

$$v \sim 0.99 c \quad \gamma \approx 9$$

Un cálculo ingenuo de la distancia que estos muones podrían recorrer resulta

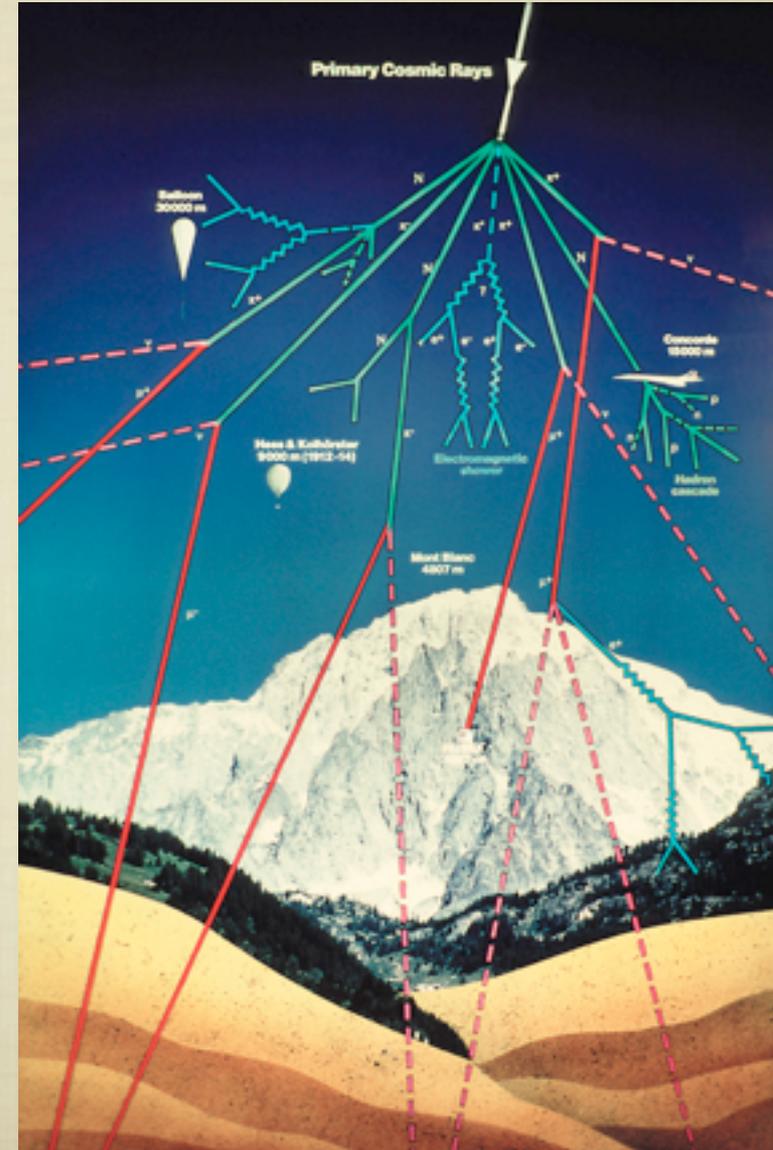
$$l = v \tau \sim 660 \text{ m}$$

El cálculo correcto (teniendo en cuenta la dilatación del tiempo) explica por qué se observan a nivel del mar

$$l = v \gamma \tau = v \gamma \tau \sim 5600 \text{ m}$$

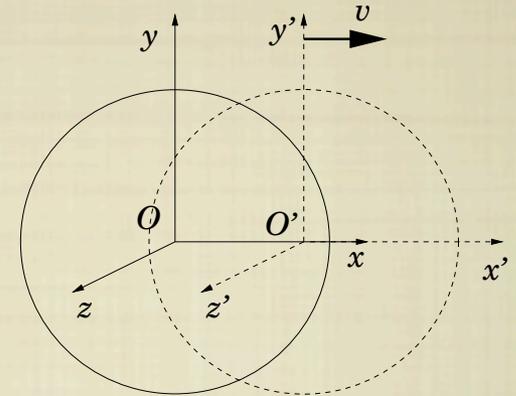
Desde el punto de vista del muón la Tierra se mueve a $v=0.99c$ hacia ellos! Por efecto de la contracción de distancias, la atmósfera tiene un espesor de sólo

$$L = l/\gamma \sim 1666 \text{ km}$$



Relatividad Especial

Todo esto se puede entender como un cambio de coordenadas entre sistemas inerciales, que "corrige" las transformaciones de Galilei para incorporar los efectos relativistas



- Transformaciones de Galilei

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

- Transformaciones de Lorentz

(satisfacen los principios relativistas)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

Observe que las transformaciones de **t** y **x** están íntimamente ligadas



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^+



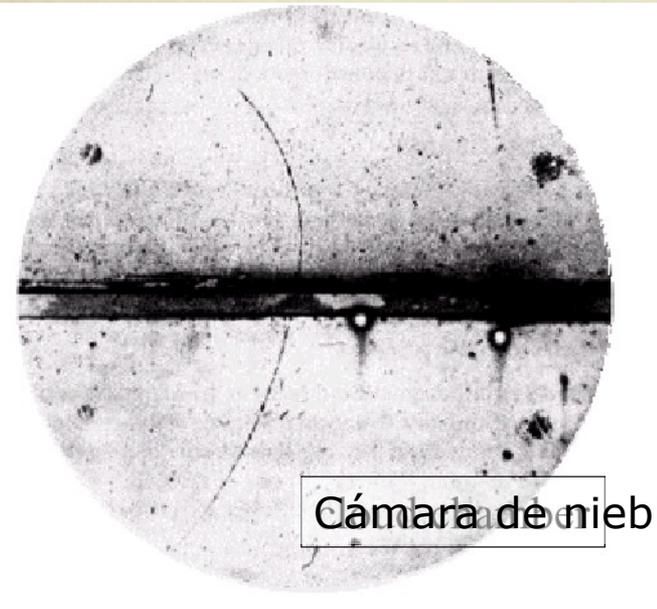
C. Anderson

Descubrimiento del positrón
(antipartícula del electrón)

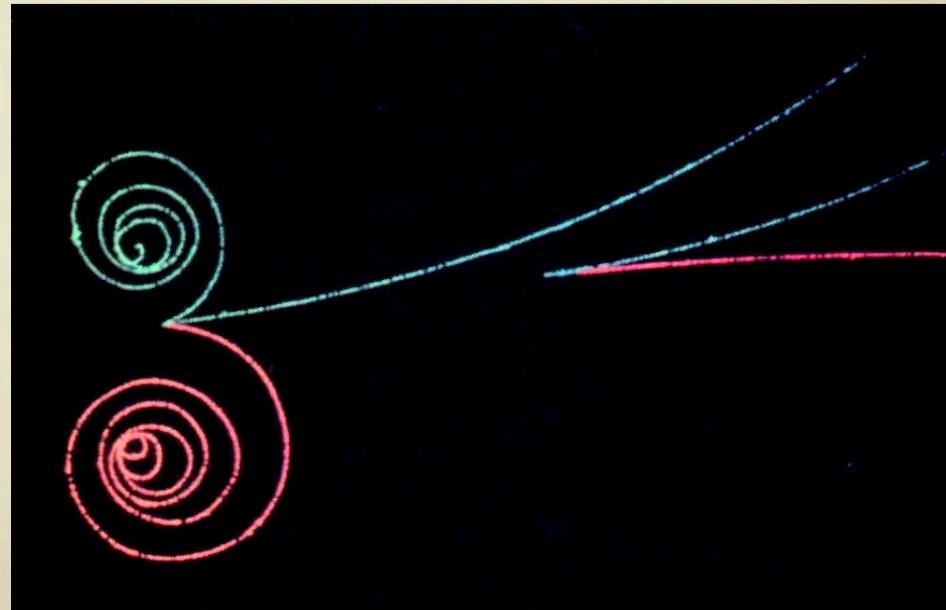
¡Dirac tenía razón!



**Descubrimiento experimental
de la antimateria**

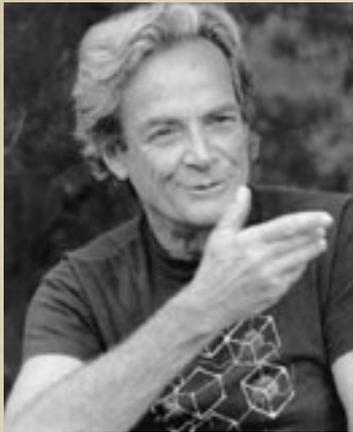


Cámara de niebla





Electrodinámica Cuántica (QED)

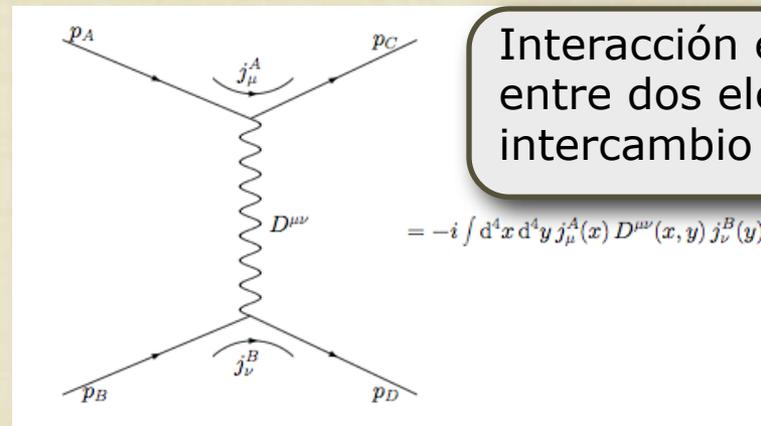


R. P. Feynman

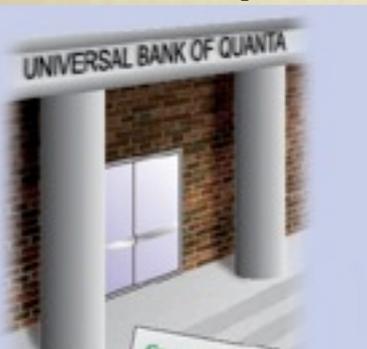
Feynman, Tomonaga, Schwinger; Dyson
Describe interacciones electromagnéticas entre electrones, positrones y fotones, de forma cuántica y relativista

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)

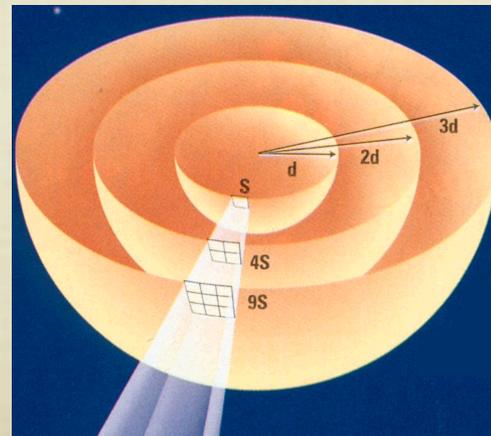
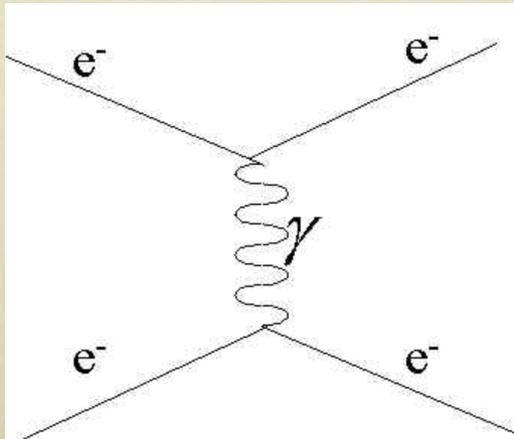
$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

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 $1/r^2$

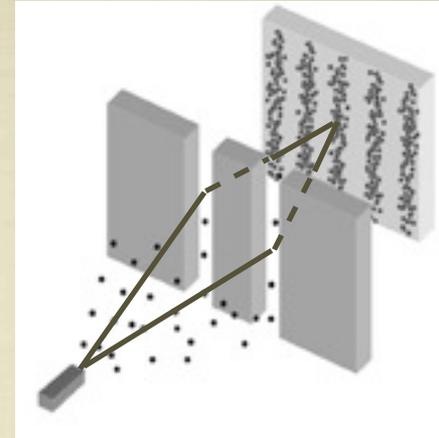
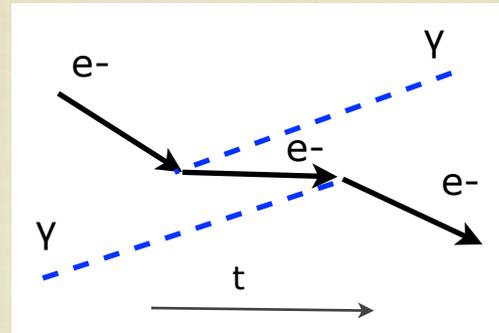
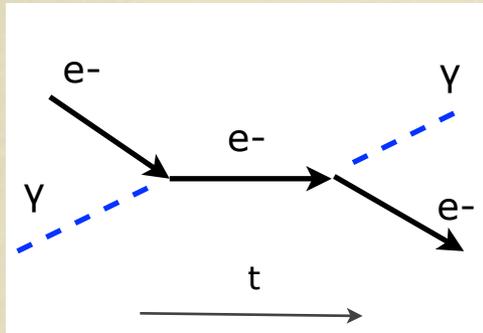
Teoría Cuántica de Campos

1934-48

Los diagramas codifican las propiedades cuánticas y relativistas

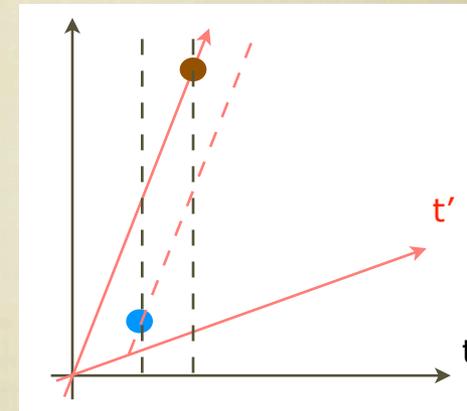
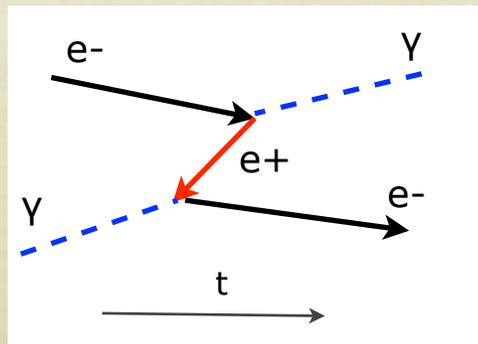
- **Cuánticas:** Amplitud de probabilidad de un proceso = suma sobre posibles maneras en que puede ocurrir (generalización del experimento de doble rendija)

Ej: Efecto Compton



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

Antipartículas = partículas viajando hacia atrás en el tiempo!

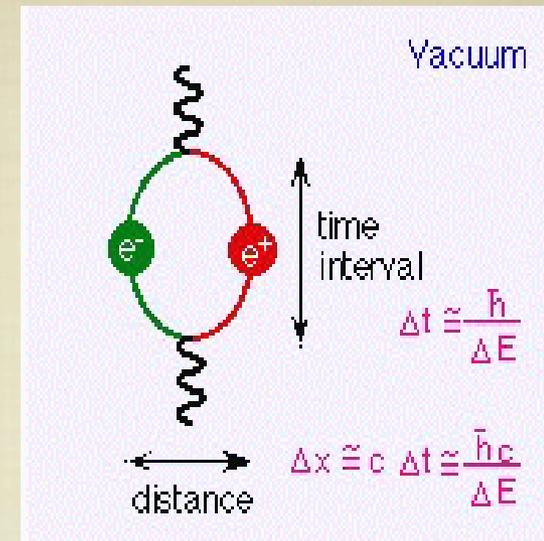


Antipartículas: consecuencia de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad

¡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.

Modelo de Fermi de interacciones débiles

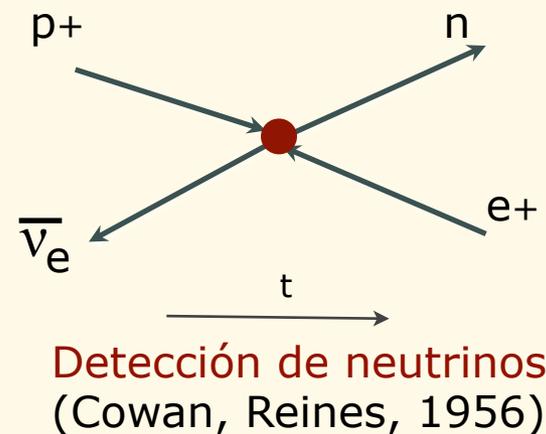
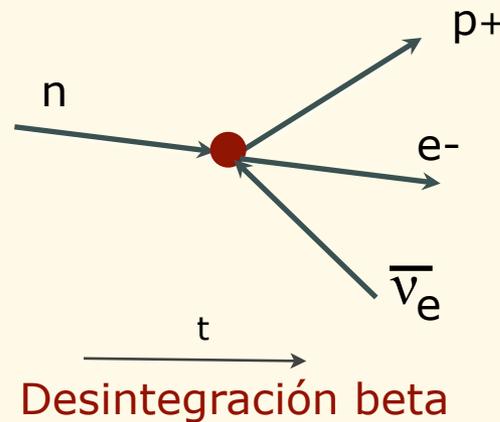
Interacción con intensidad $G_F \sim 10^{-5}$ comparada con la electromagnética

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

En el lenguaje de diagramas de Feynman



E. Fermi

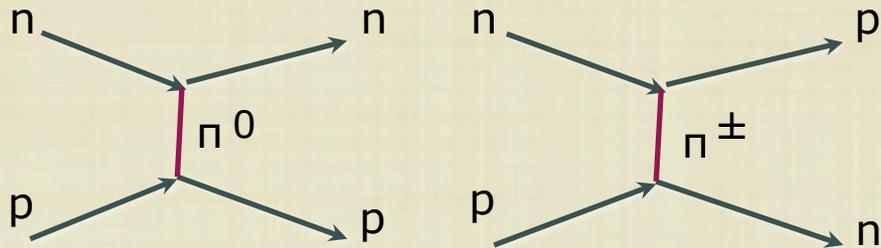


Patológica a altas energías ~ 100 GeV, Ok hasta ~ 1960

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

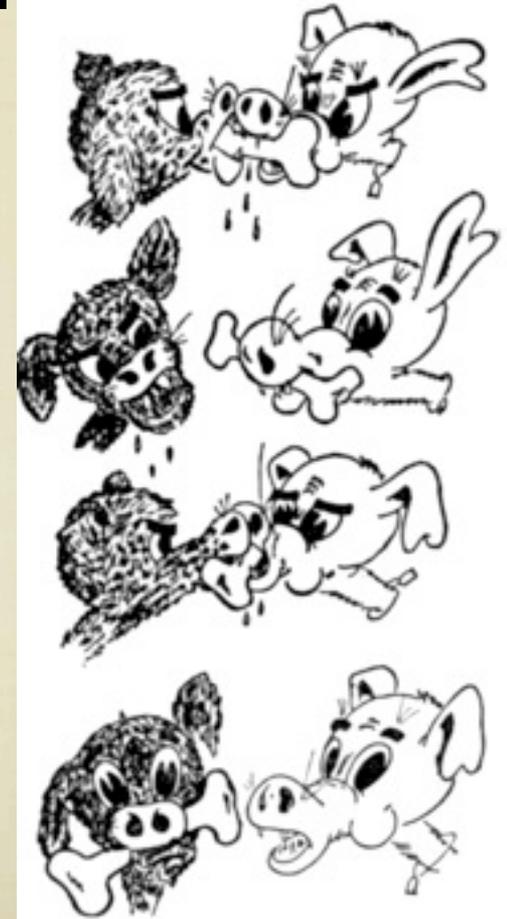
Modelo de Yukawa de la interacción fuerte: mantiene unidos los protones y neutrones en el núcleo

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



H. Yukawa

Interacción atractiva



Partículas masivas \Rightarrow

\Rightarrow **interacción de corto alcance**

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

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

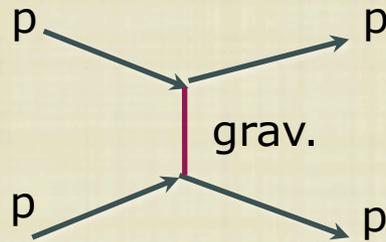
Análogo de la ley de Coulomb

Banco Cuántico: ¡Oferta!
Tome prestados 140 MeV
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**



Agujeros negros



Origen del Big Bang

Gravedad:
Sistemas muy masivos

Mecánica Cuántica:
Sistemas muy pequeños

Gravedad Cuántica
Sistemas muy masivos pero muy pequeños
¡ Reto del s.XXI !

