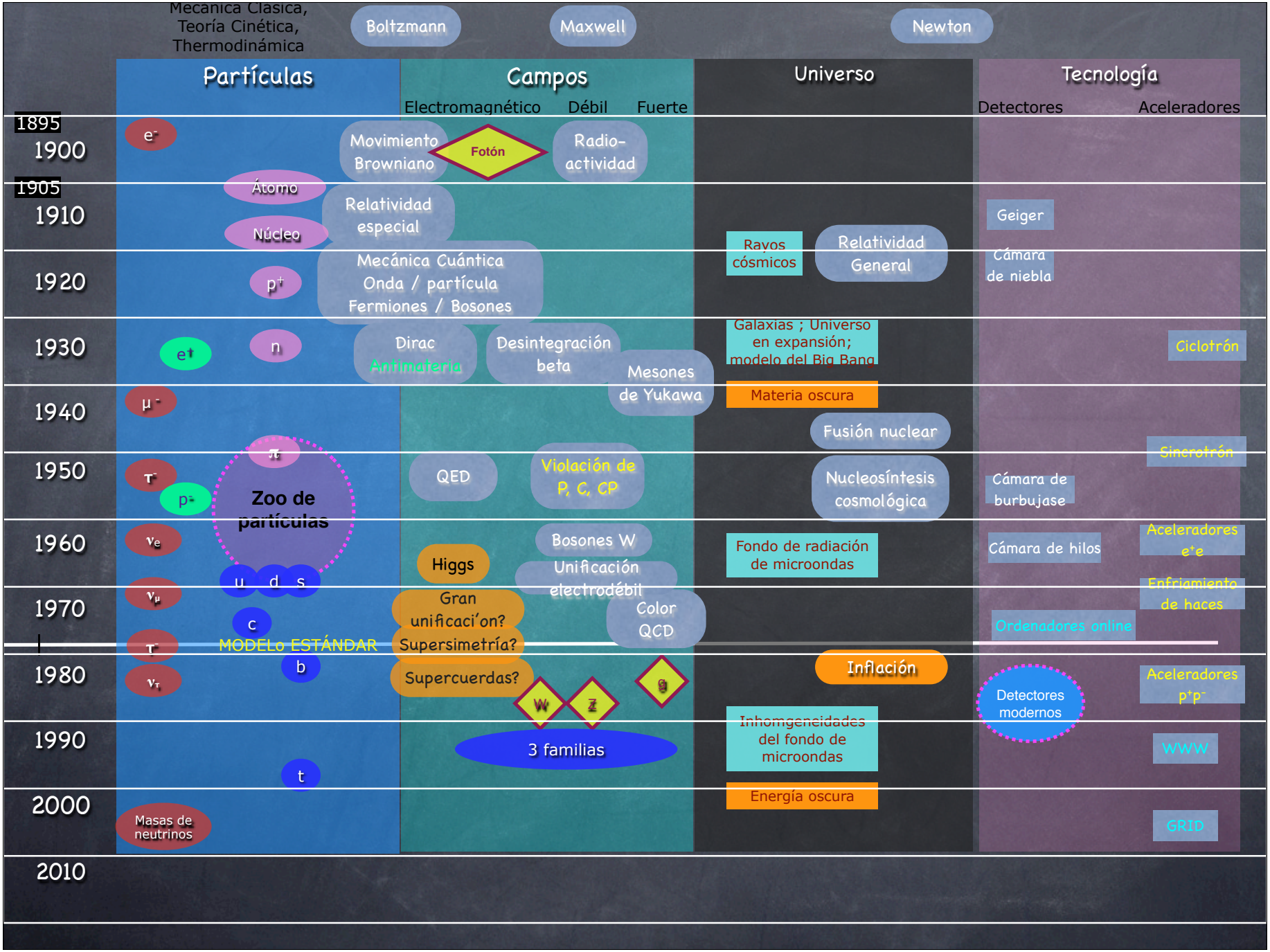
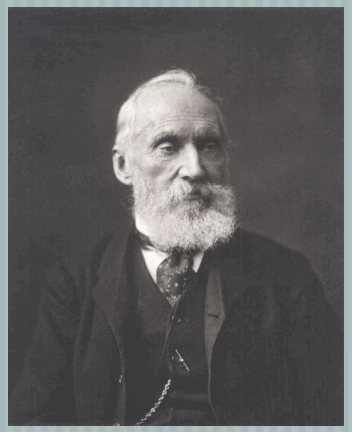
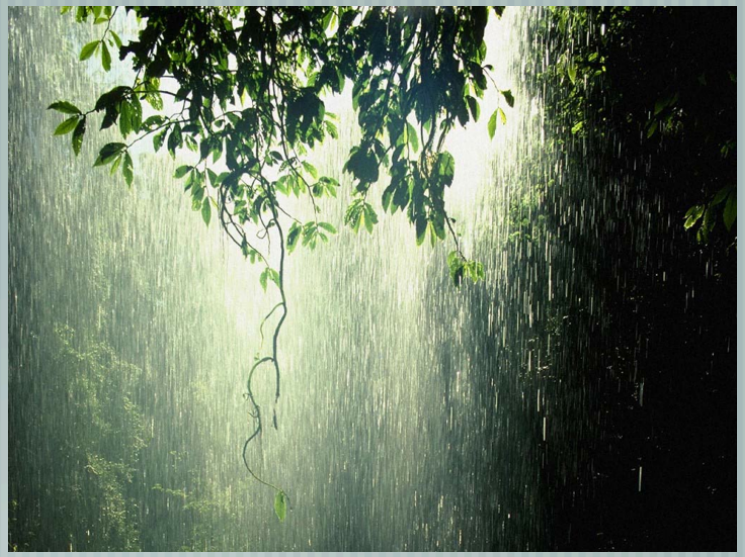

Mecánica Clásica, Teoría Cinética, Thermodinámica
Boltzmann
Maxwell
Newton
Partículas
Campos
Universo
Tecnología
Electromagnético
Débil
Fuerte
Detectores
Aceleradores
1895
1900
1905
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
e⁻
Movimiento Browniano
Fotón
Radio-actividad
Átomo
Relatividad especial
Núcleo
Geiger
Rayos cósmicos
Relatividad General
Cámara de niebla
p⁺
Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones
e⁺
n
Dirac
Antimateria
Desintegración beta
Mesones de Yukawa
Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang
Ciclotrón
μ⁻
Materia oscura
Fusión nuclear
π
Sincrotrón
τ⁻
p⁻
Zoo de partículas
QED
Violación de P, C, CP
Nucleosíntesis cosmológica
Cámara de burbujase
νe
Bosones W
Higgs
Unificación electrodébil
Fondo de radiación de microondas
Cámara de hilos
Aceleradores e⁺e⁻
νμ
u
d
s
Gran unificaci'on?
Color QCD
Enfriamiento de haces
c
Supersimetría?
Ordenadores online
MODELo ESTÁNDAR
τ⁻
b
Supercuerdas?
W
Z
g
Inflación
Detectores modernos
Aceleradores p⁺p⁻
ντ
3 familias
Inhomgeneidades del fondo de microondas
WWW
t
Energía oscura
Masas de neutrinos
GRID

Recordemos los albores del s. XX



William Thomson
(Lord Kelvin)



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

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

- El experimento de Michelson-Morley
  ⇒ **Teoría de la Relatividad**

Einstein: Relatividad Especial

Fruto de la paradójica unión de dos grandes principios

* Principio de relatividad de Galileo: Diferentes sistemas de refencia inerciales son equivalentes (mismas leyes de la Mecánica)
* Electromagnetismo de Maxwell: la luz se propaga con una velocidad determinada (c = 300000 km/s)

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

(experimento de Michelson-Morley)

Sus postulados:

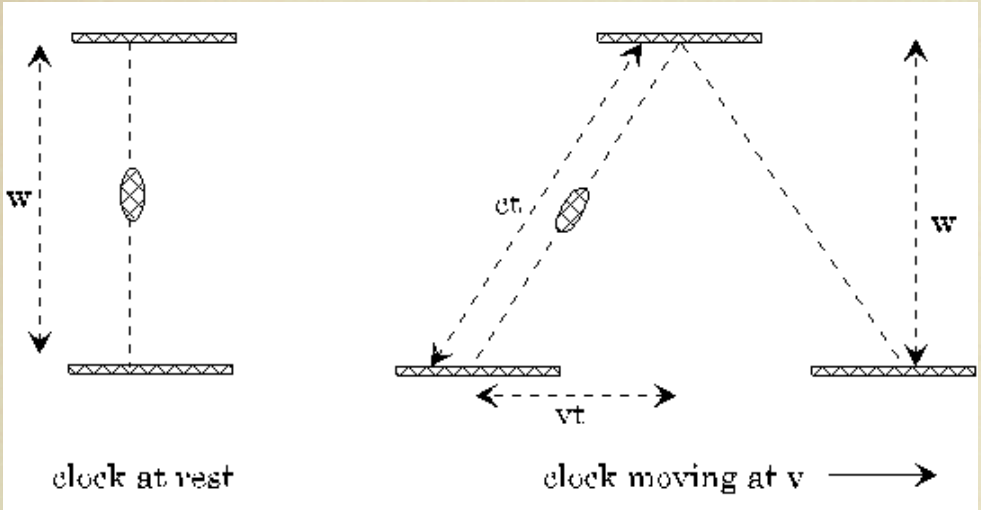
1) Velocidad de la luz = constante;
2) Equivalencia de **todas** las leyes físicas en todos los sistemas inerciales

Sus conclusiones:

Dado que c = const, y velocidad = (espacio/tiempo) ⇒

⇒ ¡El espacio y el tiempo no son absolutos!

PARTÍCULAS ELEMENTALES



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

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

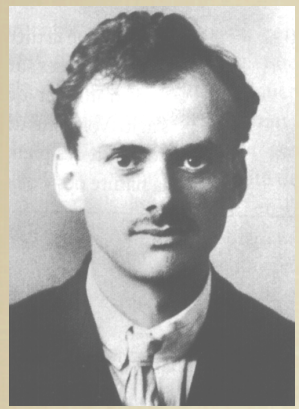
$$t = \frac{w/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \tau$$

1) Dilatación del tiempo, contracción del espacio

2) Modificación de las leyes de Newton, aumento relativista de la masa

¡La masa y la energía son conceptos intercambiables!

PARTÍCULAS ELEMENTALES



P.A.M. Dirac

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

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

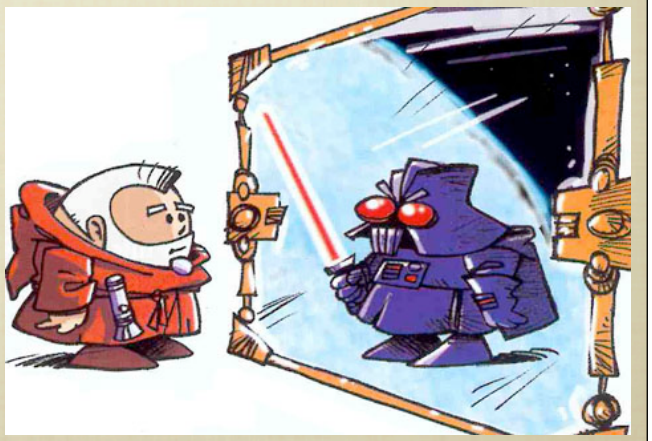
$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow$$
$$E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

Compárese con la ecuación de Schrödinger (no-relativista)

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

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**

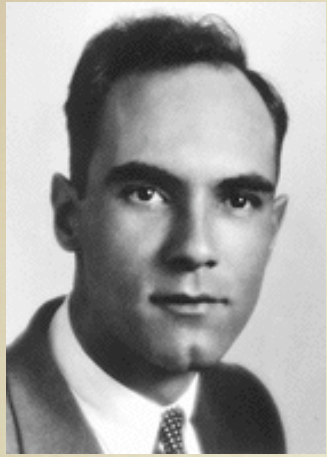


¡Predicción de la existencia de antipartículas!

PARTÍCULAS ELEMENTALES

1932

e^+

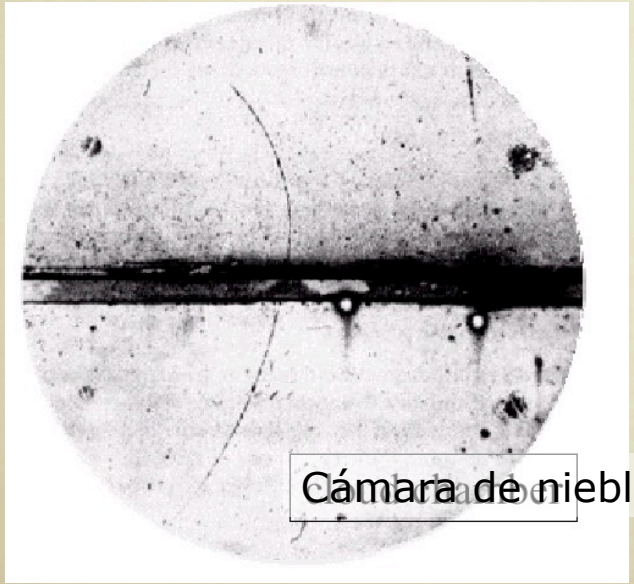


C. Anderson

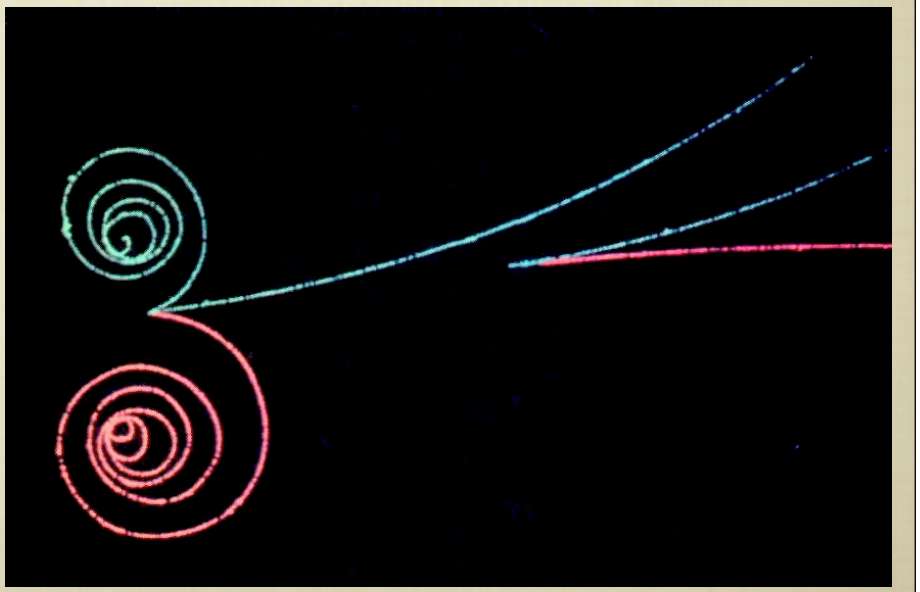
Descubrimiento del positrón
(antipartícula del electrón)

¡Dirac tenía razón!

Descubrimiento experimental de la antimateria

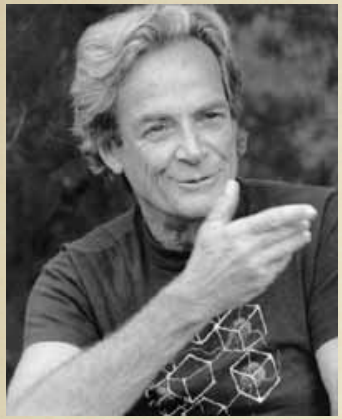


Cámara de niebla



PARTÍCULAS ELEMENTALES

Electrodinámica Cuántica (QED)

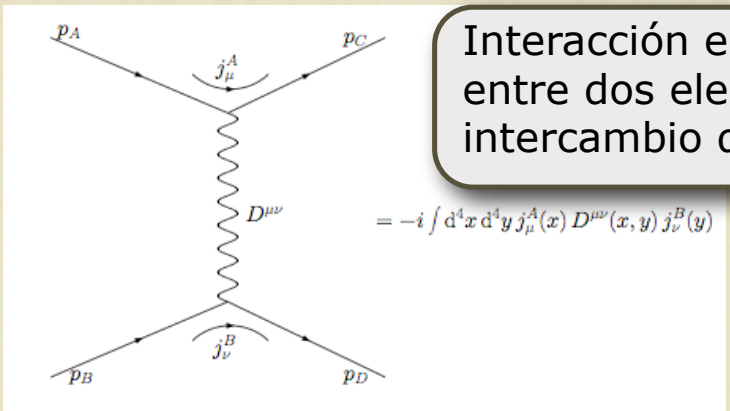


R. P. Feynman

Feynman, Tomonaga, Schwinger; Dyson
Describe las 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)

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)

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

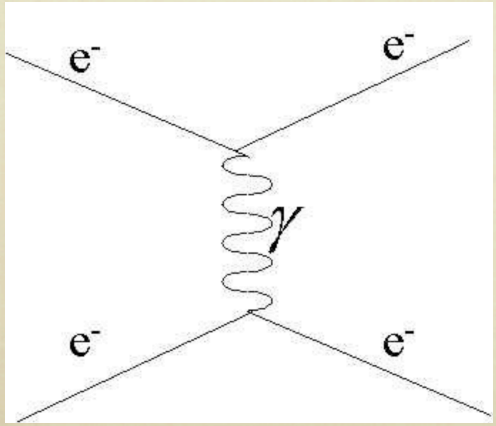
PARTÍCULAS ELEMENTALES

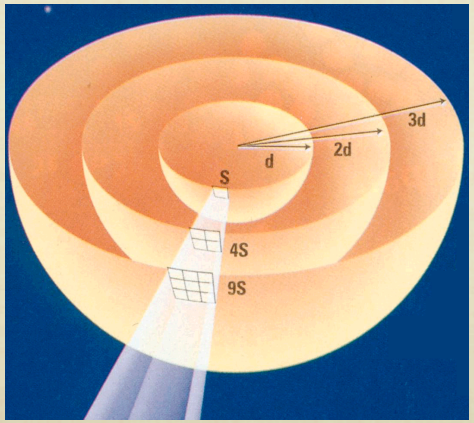
Efectos reales de las partículas virtuales

La interaccion 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**



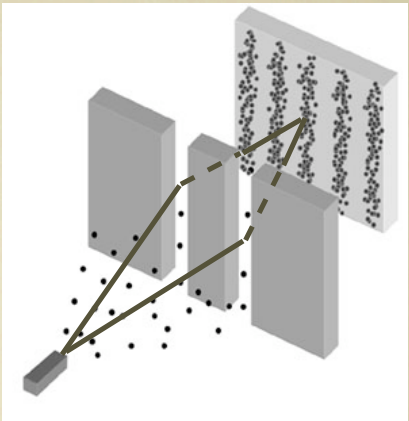


ley $1/r^2$

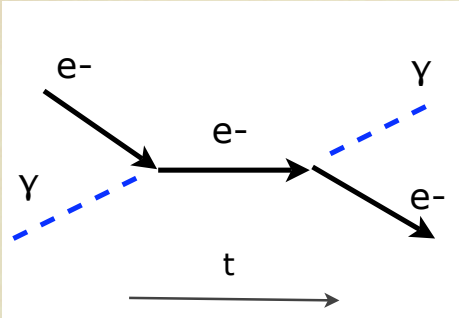
PARTÍCULAS ELEMENTALES

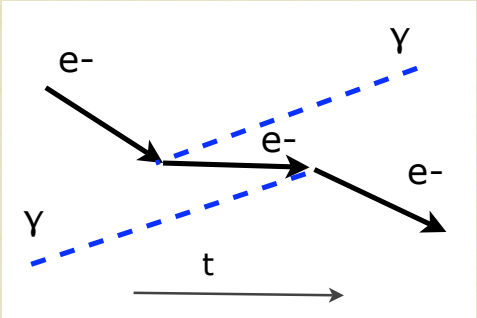
Los diagramas codifican las propiedades cuánticas y relativistas

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

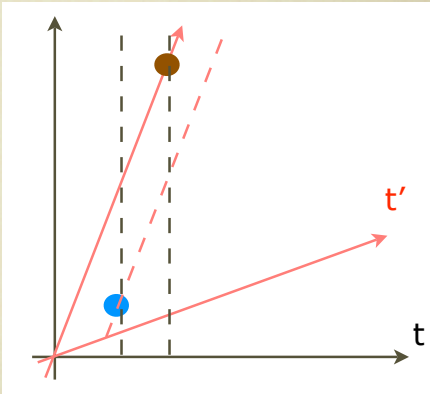


Ej: Efecto Compton

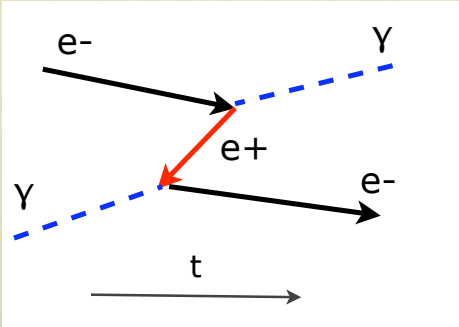




- Relativistas: Relatividad de la simultaneidad:
Orden temporal de eventos puede depender del observador.
Necesario sumar sobre diferentes ordenamientos temporales

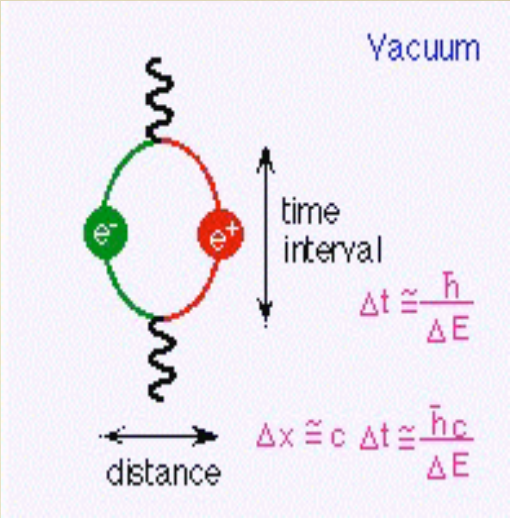


Antipartículas=
¡partículas viajando
hacia atrás en el tiempo!



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

PARTÍCULAS ELEMENTALES



¡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.

Volvamos a los albores del s. XX

A principios del s.XX, se habían descubierto una serie de fenómenos sin explicación conocida

1895: Wilhelm Röntgen descubrió los "rayos X"
(hoy, fotones de alta energía, similar rayos γ)

1896: Henri Becquerel detectó radiación de cristales de uranio
(radiación alfa, posteriormente entendida como núcleos de helio)

1898: Marie y Pierre Curie : radiación ionizante de uranio + polonio)
(radiación beta, posteriormente entendida como electrones/positrones)

Radioactividad

Más adelante se comprendió que están asociados a nuevas interacciones

La "interacción débil"	Desintegración beta
La "interacción fuerte"	Fuerzas entre protones y neutrones Desintegración alfa y rayos gamma

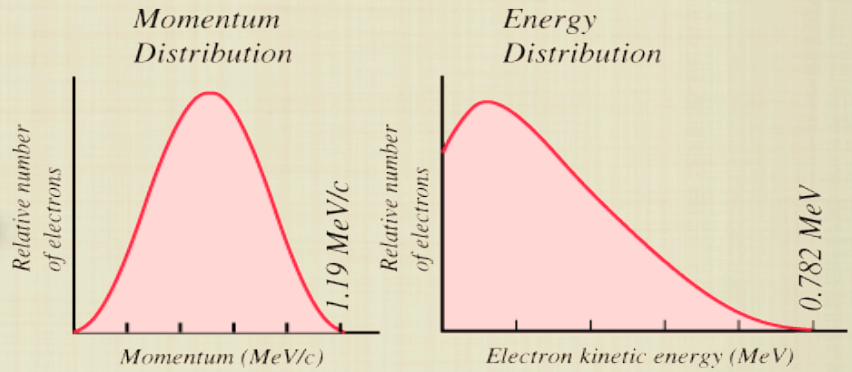
PARTÍCULAS ELEMENTALES

Desintegración beta de núcleos: emisión de electrones

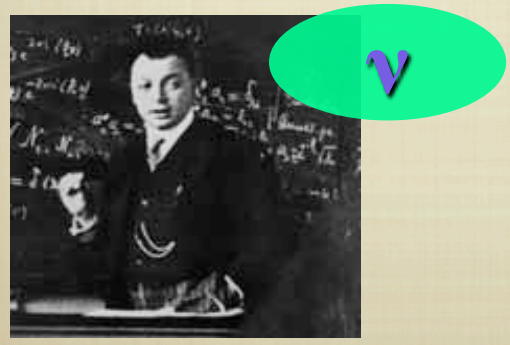
Nuevo tipo de interacción, n → p + e, denominado débil

En una desintegración de una partícula en dos, la conservación de energía y momento determinan la energía de las partículas resultantes. Sin embargo ¡los datos muestran que el espectro de energías de los electrones es continuo!

L. Meitner, O. Hahn



¿Violación de la conservación de la energía?



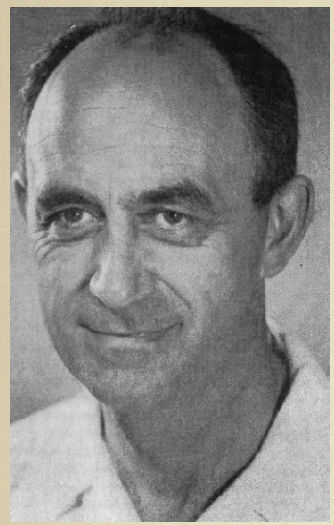
W. Pauli

¡NO! Una nueva partícula: **el neutrino**

En 1930 Wolfgang Pauli propuso la emisión simultánea de una partícula neutra extremadamente ligera (bautizada como **neutrino** por Fermi en 1931)

$$n \rightarrow p + e + \nu$$

PARTÍCULAS ELEMENTALES

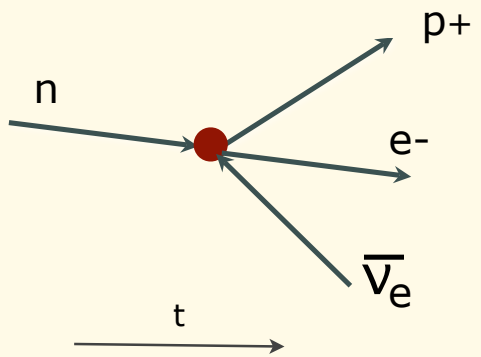


E. Fermi

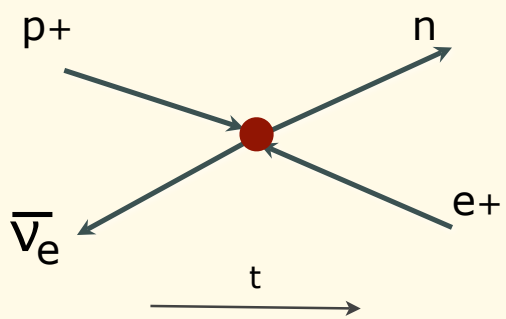
Propone un modelo de la interacción débil

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

En el lenguaje de diagramas de Feynman



Desintegración beta



Detección de neutrinos
(Cowan, Reines, 1956)

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

Interacción local entre "corrientes" (protón-neutrón / electrón-neutrino) sin intermediarios

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

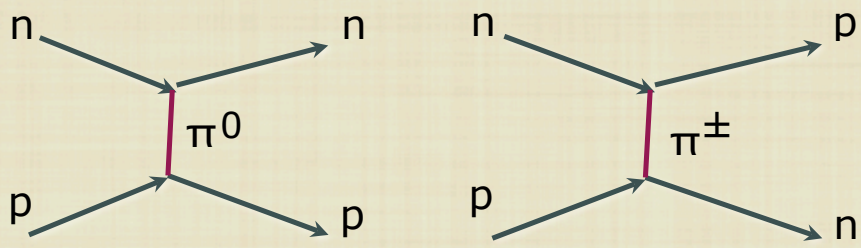
La analogía con electromagnetismo se hará mucho más concreta más adelante (partículas mediadoras Z/W)

PARTÍCULAS ELEMENTALES

Interacción fuerte: mantiene unidos los protones y neutrones en el núcleo

H.Yukawa

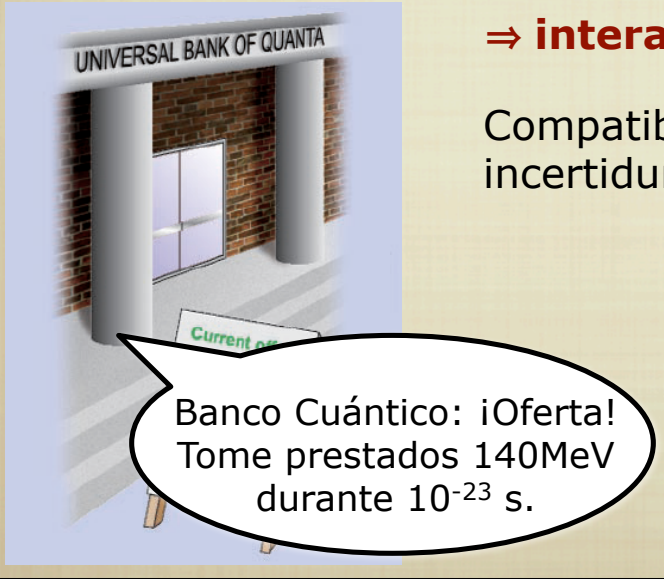
Modelo de Yukawa: analogía con electromagnetismo
Intercambio de partículas, denominadas **pión**



Partículas masivas ⇒

⇒ **interacción de corto alcance**

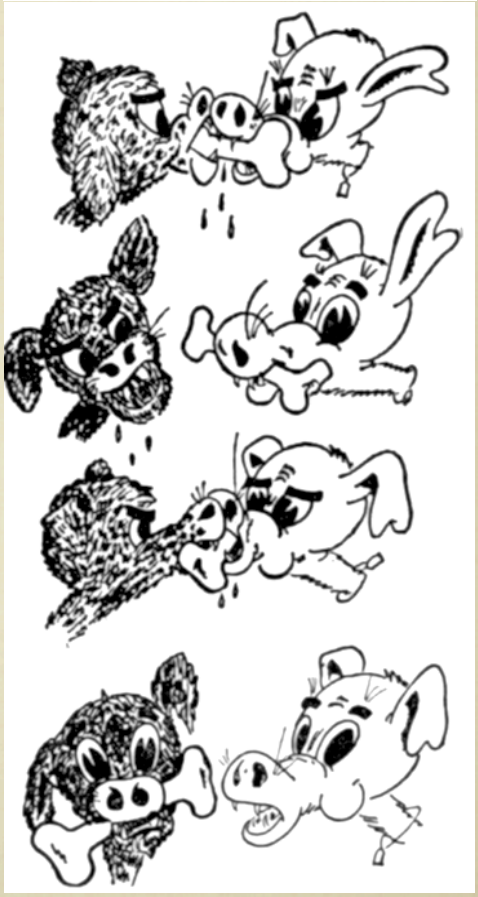
Compatible con el principio de incertidumbre: 1.4 fm ~ 140 MeV



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

Análogo de la ley de Coulomb

Interacción atractiva

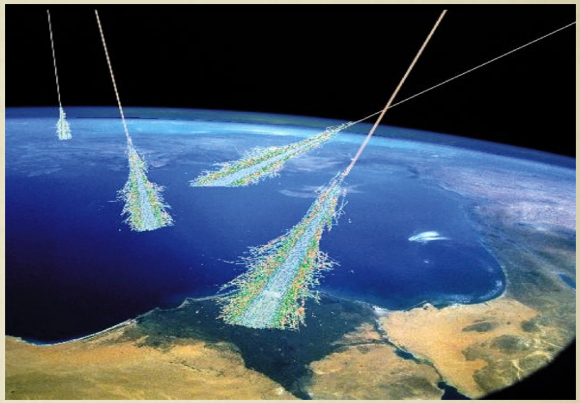


PARTÍCULAS ELEMENTALES

μ^-

1937

Tras la predicción de Yukawa del pión, comenzó una intensa búsqueda de esta partícula (100-200 MeV)



Aún no existían aceleradores con suficiente energía.
Se intentaró detectarlos en los rayos cósmicos (descubiertos en 1913)
Los físico subían a montañas o en globo a buscar trazas en emulsiones fotográficas

En 1937 C. Anderson descubrió una partícula en el rango de masas esperado

¡Pero era capaz de atravesar grandes espesores de material!
Es decir, no sentía las interacciones fuertes con los núcleos presentes en el material

¡No se trataba del pión de Yukawa!

Muón - "electrón pesado" (206 x m_e)

I. Rabi:
"¿Quién ha encargado eso?"
"Who ordered that?"

PARTÍCULAS ELEMENTALES

1947

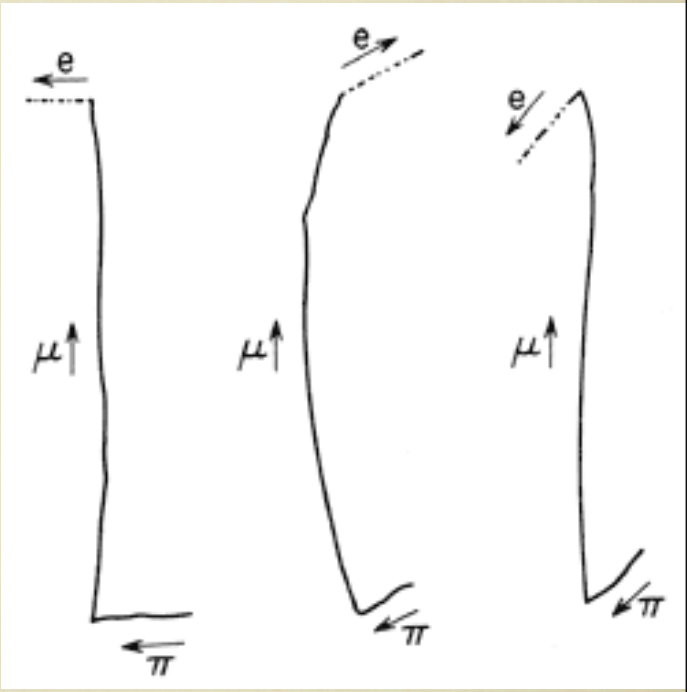
π

Descubrimiento del pión (cargado)

Confirma la explicación de Yukawa de la interacción entre protones/neutrones

Trazas en emulsiones fotográficas tomadas en el Pic de Midi, Pirineos

C. Powell



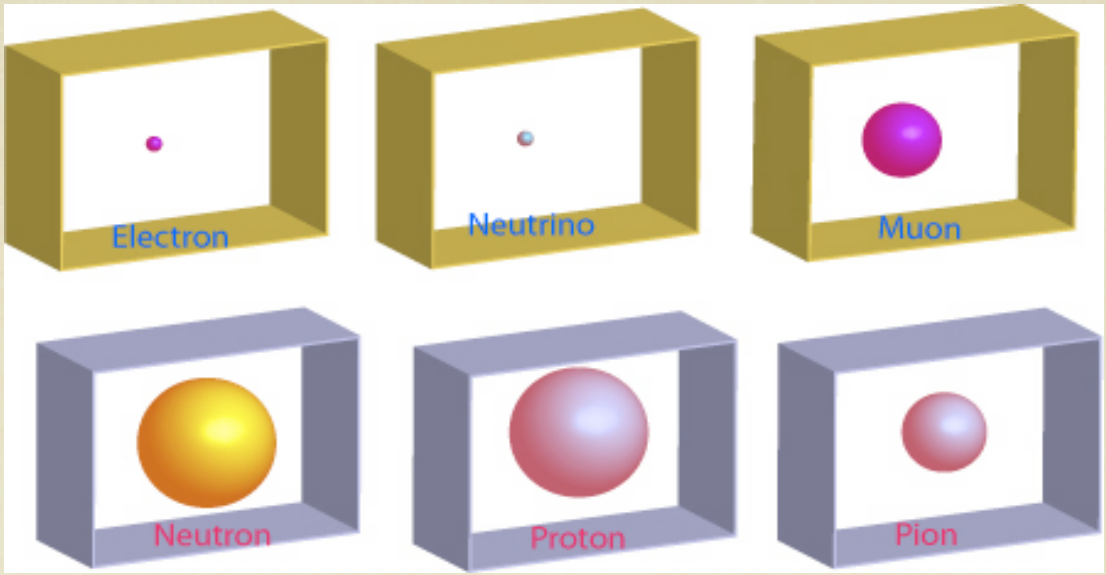
Un año más tarde, se producen piones en el ciclotrón de Berkeley, California

Comienzo de la era de los acelaradores.

PARTÍCULAS ELEMENTALES

1948

- **Lista de partículas elementales** (aprox. 1948)



- **Interacciones electromagnética (fotón), débil (teoría de Fermi), y fuerte (pión)**

- **Descripción cuántica y relativista de partículas e interacciones**

¿Y la interacción gravitacional?

No muy relevante en Física de Partículas, pero sí en la **estructura y evolución del Universo (Cosmología)**

Cosmología antes del s. XX

Antes s. XX: - Gravitación Newtoniana
- Universo infinito en el espacio y eterno en el tiempo

Sin embargo, esto último es incompatible con un hecho familiar:

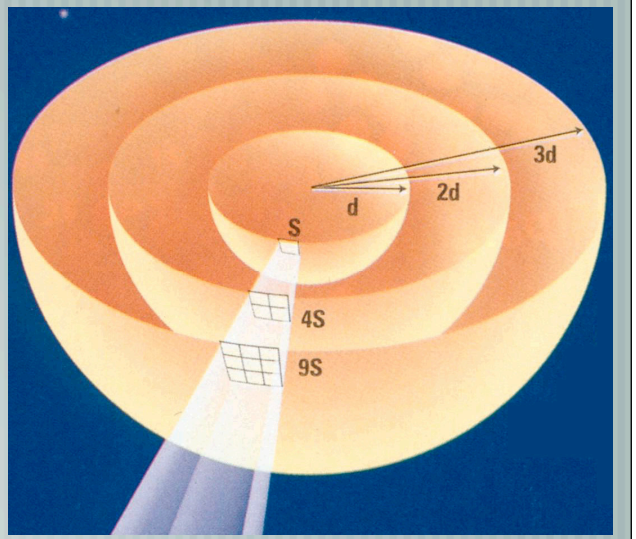
¡La noche es oscura!

La paradoja de Olbers (1823)

Supongamos el Universo infinito, eterno, y uniformemente poblado de estrellas. Entonces se obtiene un cielo infinitamente iluminado.

Demostración:

- Divídase el espacio en un número infinito de "capas de cebolla"
- Una estrella en la capa a distancia r tiene luminosidad $\sim 1/r^2$, pero el número de estrellas crece como $\sim r^2$
- Cada una de las infinitas capas contribuye con la misma cantidad



Resolución: Universo finito en el tiempo

Requirió cambio radical en la concepción del espacio-tiempo y la gravedad

Teoría de la Relatividad General

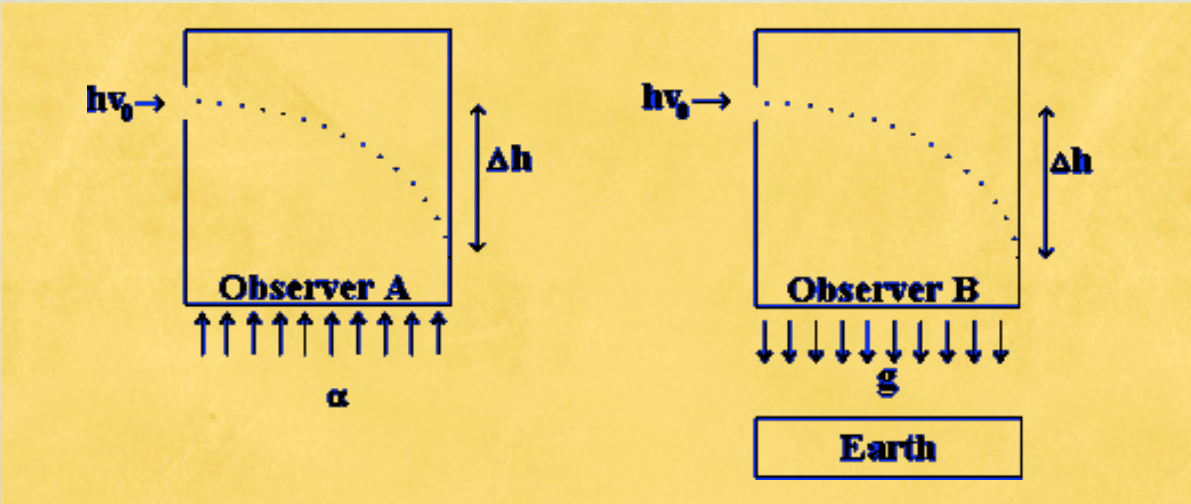
COSMOLOGÍA

La gravitación Newtoniana es una acción instantánea a distancia
Incompatible con la teoría de la relatividad

Relatividad General(Einstein): leyes físicas para observadores en sistemas de referencia no inerciales (acelerados)

⇒ Principio de equivalencia

Una aceleración es indistinguible de un campo gravitacional
(equivalencia de masa inercial y masa gravitatoria)



"El pensamiento más feliz de mi vida"

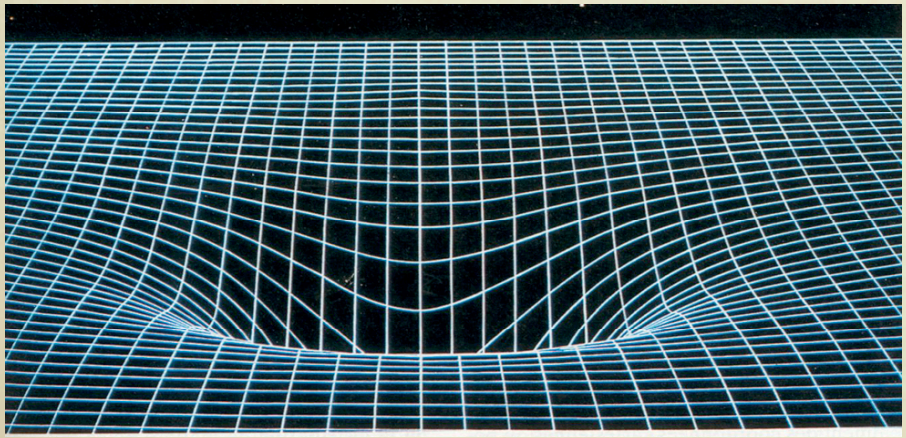
"The happiest thought of my life" (A. Einstein)

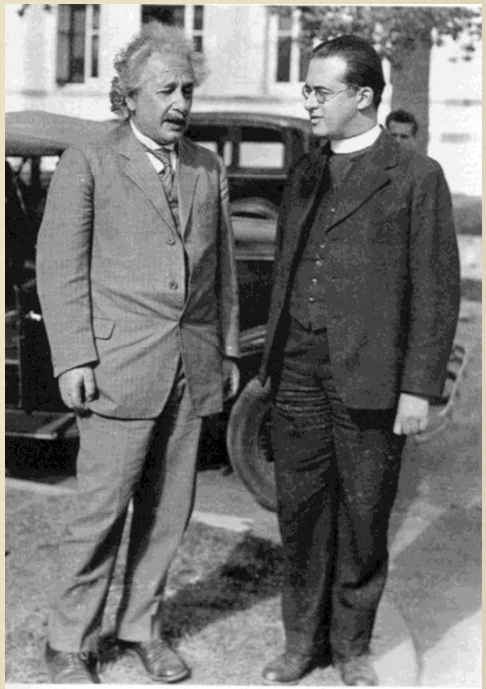
Relatividad General y Gravitación

Los rayos de luz definen el camino más corto en el espacio
- Ascensor acelerado: la luz sigue trayectorias parabólicas
- Campo gravitatorio: ¡los rayos de luz deben curvarse!

¡La gravedad se describe como la curvatura del espacio-tiempo!

Ecuaciones de Einstein:
- La Materia dicta al Espacio cómo curvarse
- El Espacio dicta a la Materia cómo moverse





A. Einstein y G.Lemaitre

Aplicación a Universo dinámico y en evolución

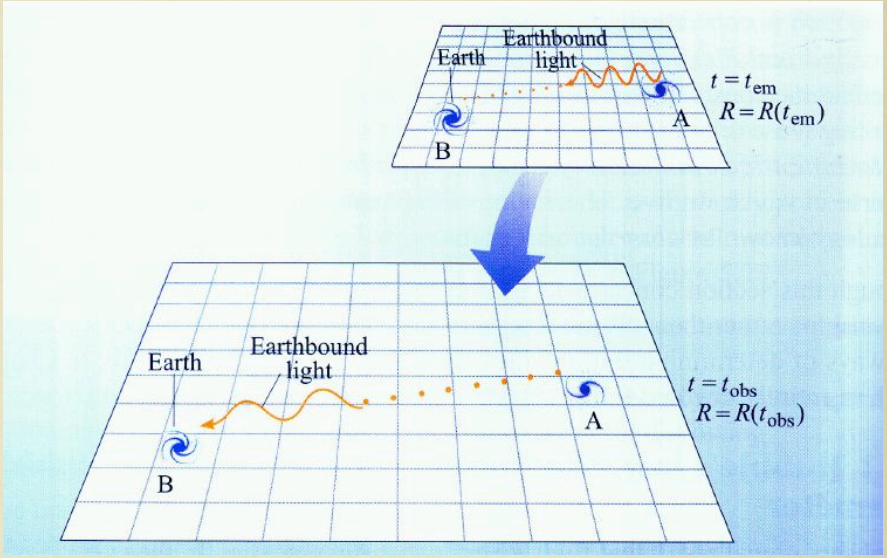
A. Friedmann (1922), G. Lemaitre (1927)

COSMOLOGÍA

Friedmann propuso una solución de las ecuaciones de Einstein para la evolución del Universo entero

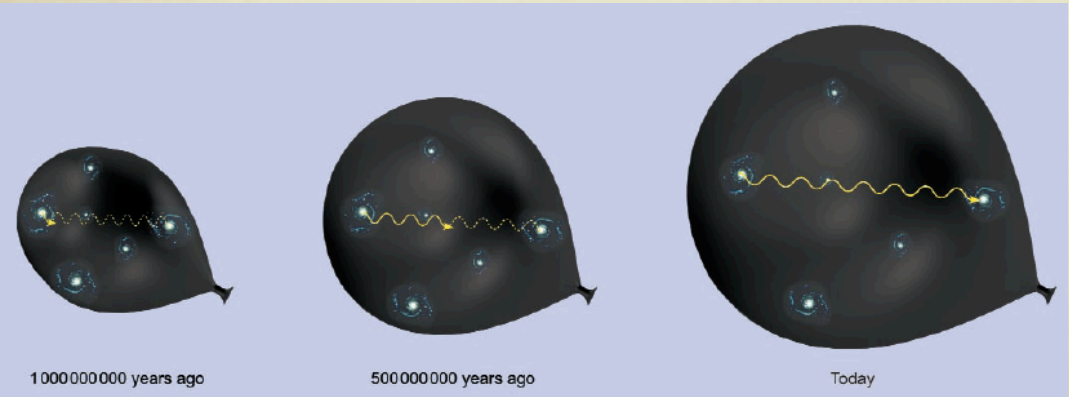
$$r_{AB}(t) = a(t)\, x_{AB}$$

Universo aproximadamente homogéneo.
Su evolución se describe mediante el **factor de escala a(t)**



Las ecuaciones de Friedmann relacionan la densidad promedio "ρ" y el factor de curvatura espacial "K" con el ritmo de expansión

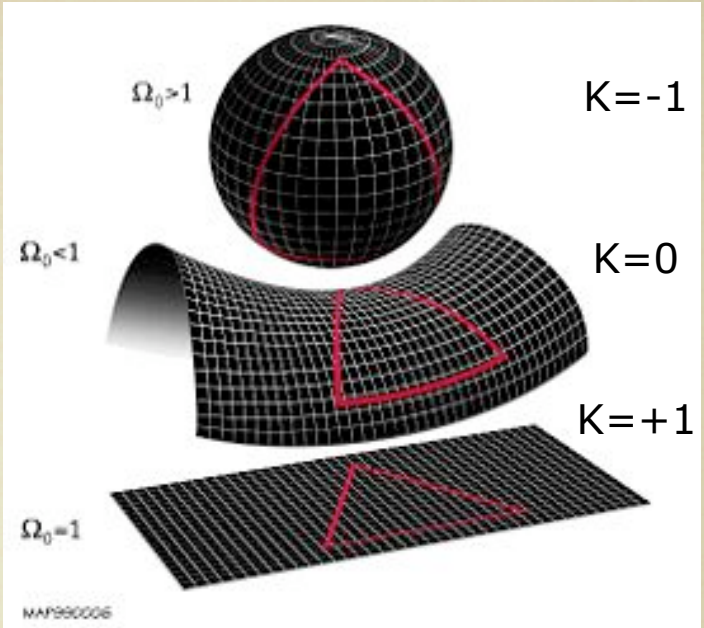
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2}$$



COSMOLOGÍA

Densidad crítica

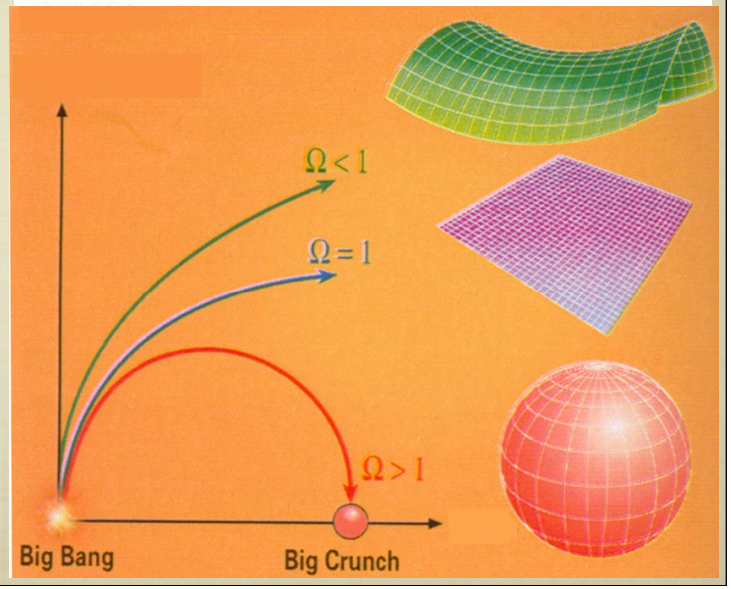
La densidad ρ determina la geometría del Universo
La densidad crítica corresponde al valor en el que la geometría del espacio es plana



Densidad crítica y evolución del Universo

En ausencia de lo que hoy se conoce como energía oscura:
- Densidad sub-crítica:
  Universo cerrado que colapsa
- Densidad super-crítica:
  Universo abierto en eterna expansión (decelerada)
- Densidad crítica:
  Universo plano en eterna expansión

(Advertencia: esta conclusión se modifica en presencia de energía oscura, ver charla 4)



COSMOLOGÍA

Einstein buscó soluciones que describieran un Universo estático y eterno

Pero sus propias ecuaciones no admitían soluciones estáticas

Propuso una modificación de las ecuaciones, añandiendo un término denominado

'constante cosmológica'

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - \frac{Kc^2}{a^2}$$

Interpretación:
- Densidad de energía del vacío
- Constante en el espacio y el tiempo
- Genera una repulsión que se opone a la atracción gravitacional

La determinación del modelo teórico correcto para la estructura del Universo se convirtió en una cuestión experimental

COSMOLOGÍA

1929-31

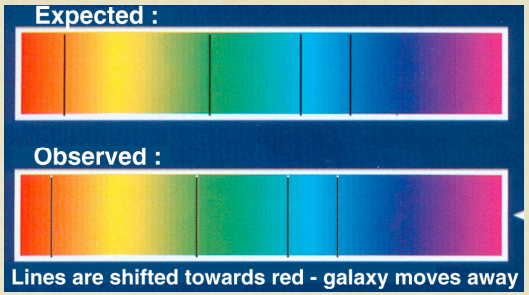
Expansión cosmológica

Hubble observó que la velocidad de las galaxias aumenta linealmente con la distancia

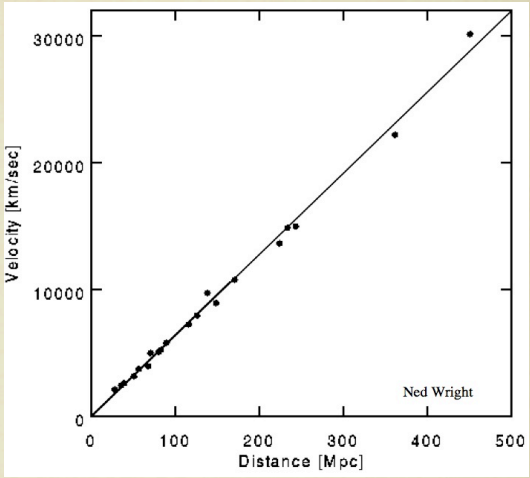
E, Hubble en el telescopio de Mt. Palomar

Explicable en el modelo de expansión de Friedmann

El Universo es como un globo que se infla, de modo que la velocidad de separación entre dos puntos cualesquiera aumenta con la distancia entre ellos



Corrimiento Doppler al rojo en el espectro de galaxias lejanas



La velocidad de recesión de las galaxias aumenta con la distancia

Einstein abandona la idea del Universo estático: **¡El Universo está en expansión!**

(hoy sabemos que la constante cosmológica podría explicar la energía oscura, de forma consistente con la expansión cosmológica, ver charla 4)

COSMOLOGÍA

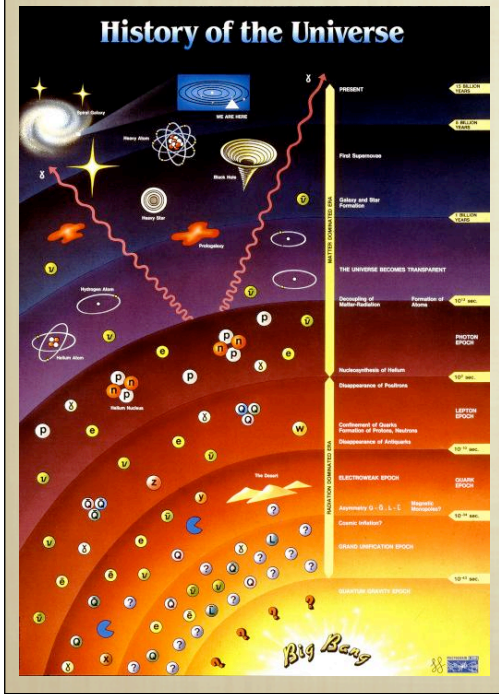
1948

Modelo del Big Bang:

G. Gamov

- El Universo comenzó comprimido y a altísima temperatura hace unos 13.000.000.000 de años ("huevo primigenio", Lemaitre 1930)
- A partir de ese estado, empezó a expandirse y enfriarse

En las primeras fases, era de la radiación (fotones). Posteriormente aparecen las partículas (protones, neutrones, electrones).
Con el progresivo enfriamiento se formaron núcleos, átomos, etc hasta finalmente estructuras astronómicas (estrellas, galaxias)



Predicciones claras y correctas:

- **Nucleosíntesis primordial**:
  - Formación de los núcleos ligeros en el rápido enfriamiento los primeros minutos (buen acuerdo con datos observ.)
- **Radiación de fondo de microondas**:
  - Radiación de cuerpo negro a T~5K, que llena el Universo

Remanente de la era de la radiación, corrida al rojo
- Detectada en 1965

¡Fascinante nueva visión del Universo!