

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

PLAN

Estas series de charlas sobre Física de Partículas y Cosmología cubren aproximadamente 100 años de ideas, teorías y experimentos

- 4 Feb: "Un mundo cuántico y relativista", A. Uranga
- 6 Feb: "Lo infinitamente pequeño", C. Pena
- 11 Feb: "El Universo en expansión", D. G. Cerdeño
- 13 Feb: "En el interior de protones y neutrones", C. Pena
- 18 Feb: "Materia y energía oscura", D. G. Cerdeño
- 20 Feb: "El Modelo Estándar", A. Casas
- 25 Feb: "El LHC, la partícula de Higgs y más allá", A. Casas

Más de 50 premios Nobel en Física de Partículas

Resulta imposible ser exhaustivo o riguroso

Nos restringimos a una visión general de los principales descubrimientos e ideas

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 relativista-II

Relatividad General y Gravitación

Un mundo cuántico

Estructura de la materia y Mecánica Cuántica

Angel M. Uranga

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

En los albores del s. XX

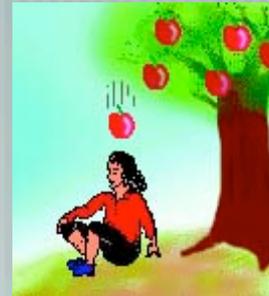
c. 1900

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:

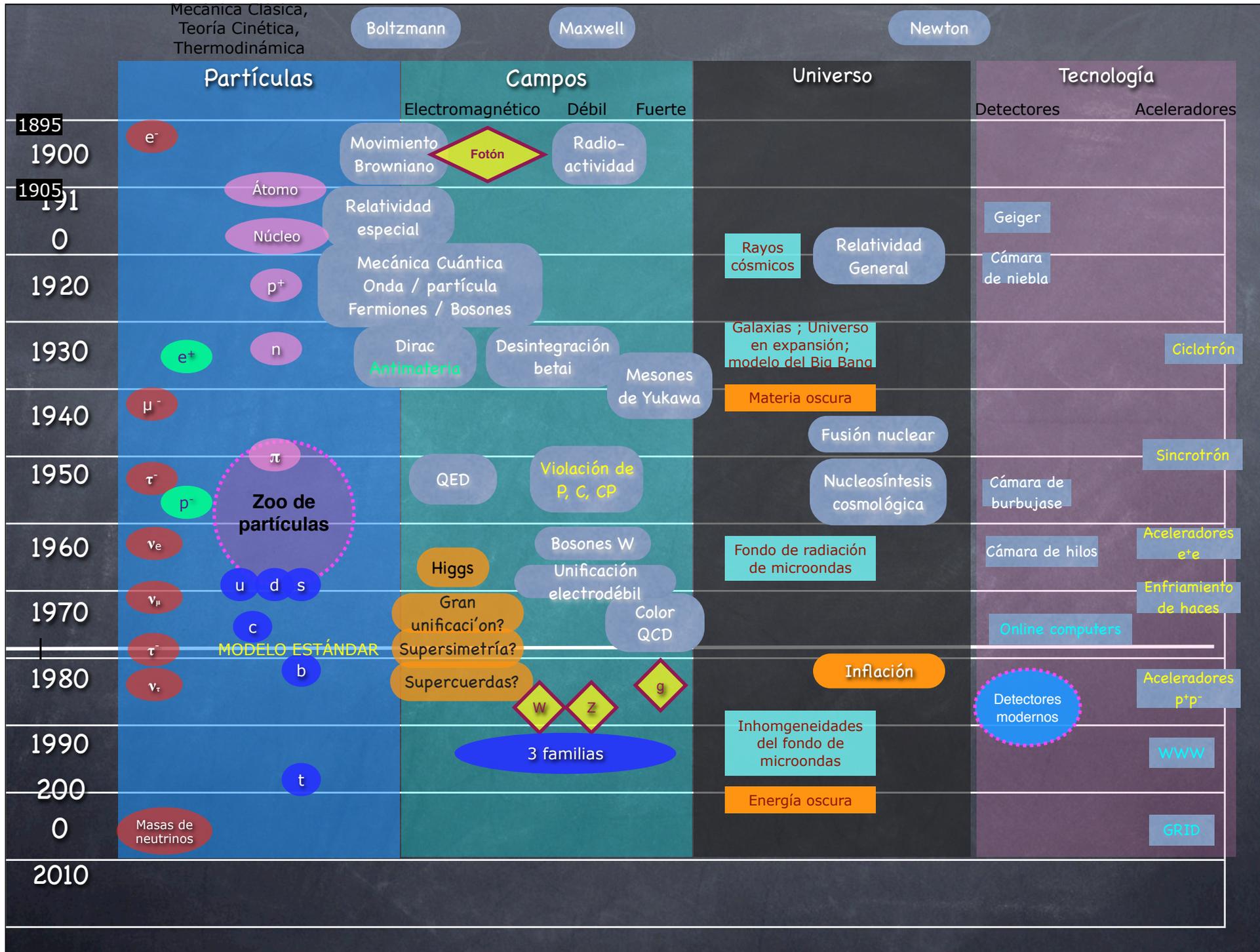
- Gravedad (Newton)
- Electromagnetismo (Maxwell)



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**

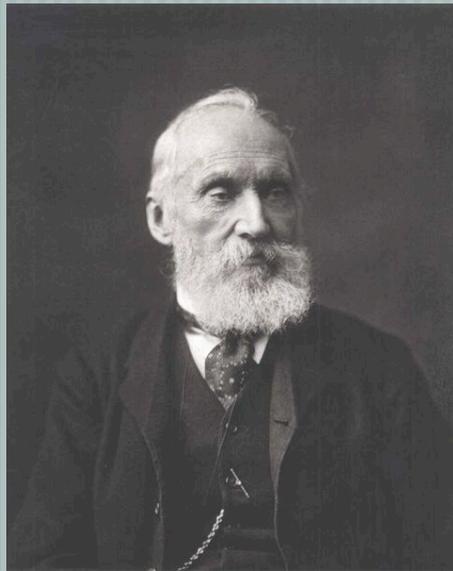


En los albores del s. XX

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

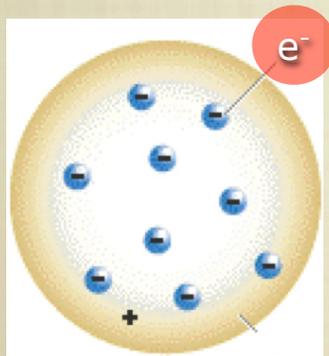
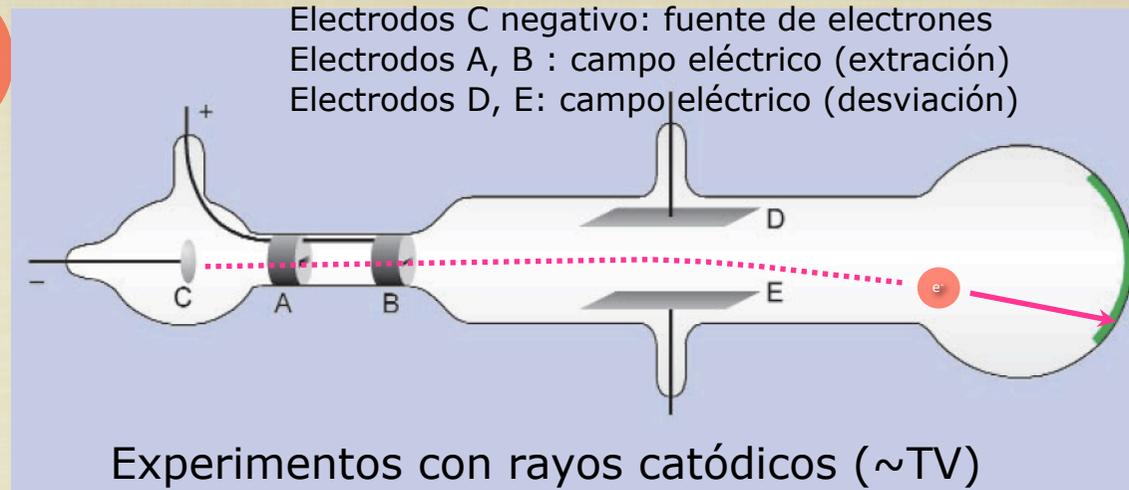
Partículas Elementales

1897



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)**



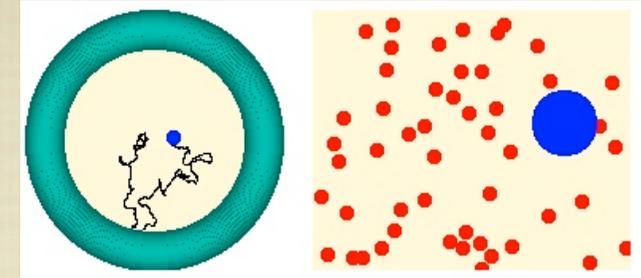
**Los electrones son partículas sub-atómicas!
(El átomo NO es indivisible!)**

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



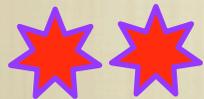
Albert Einstein

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

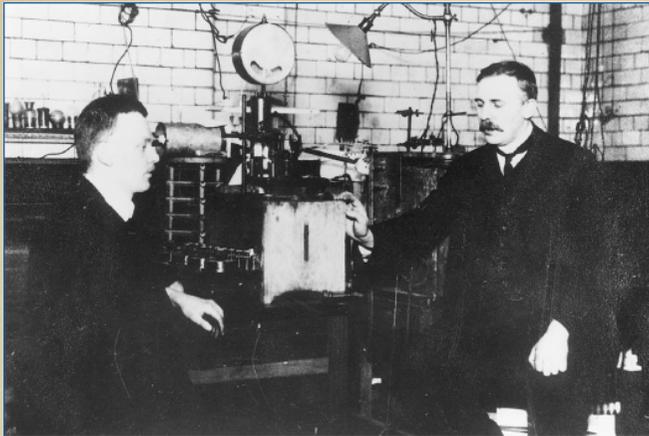


$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

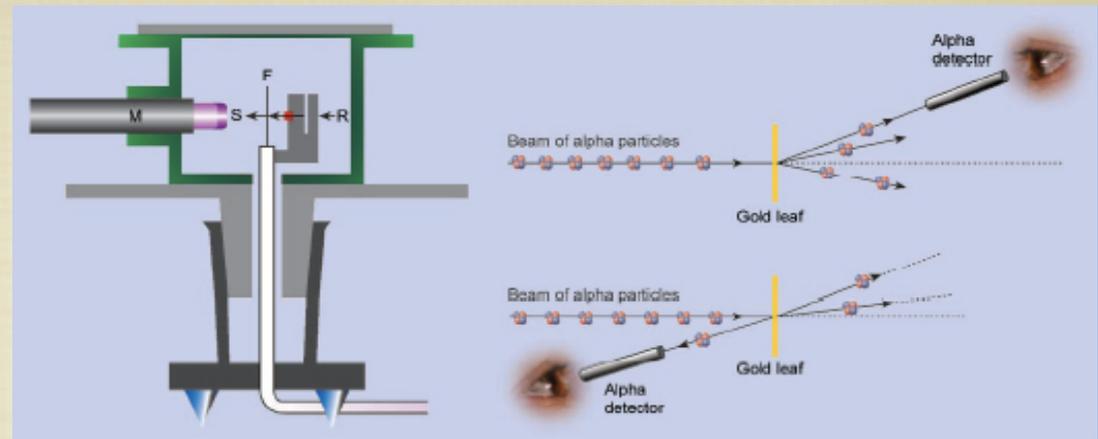
Francois Perrin (1907) utiliza la fórmula de Einstein para confirmar la teoría y calcular el número de Avogadro.



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)

(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

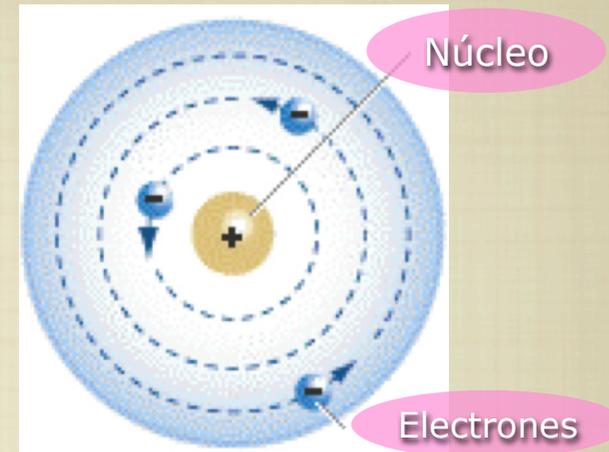
E. Goldstein (1886): rayos anódicos

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, saltamos momentáneamente hasta entonces



Modelo de Rutherford del átomo "vacío"

¿Hay otras partículas en el núcleo?

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

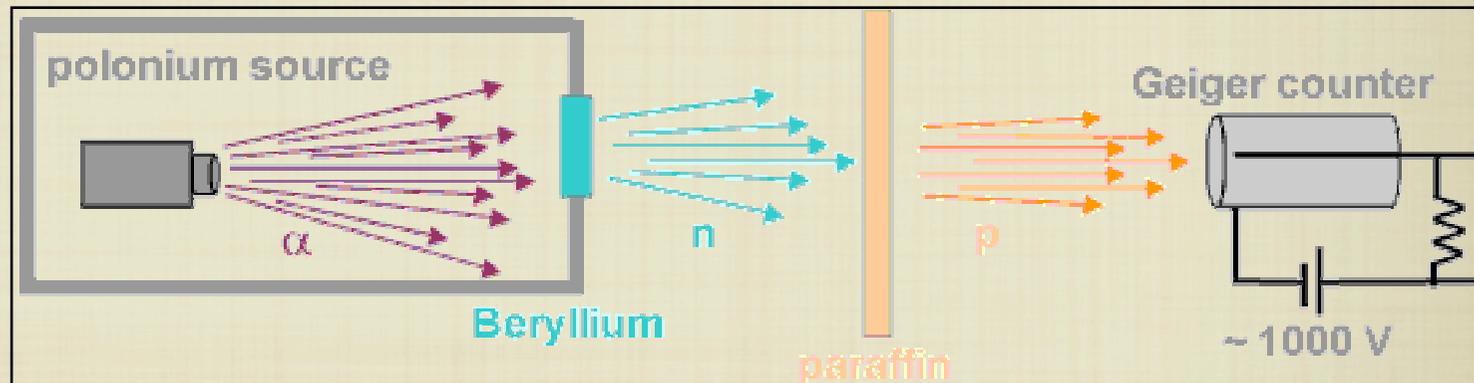
¿A qué corresponden las dos unidades de masa con carga cero?

★ ★ Neutrón:

Descubierto por J. Chadwick en 1932



James Chadwick

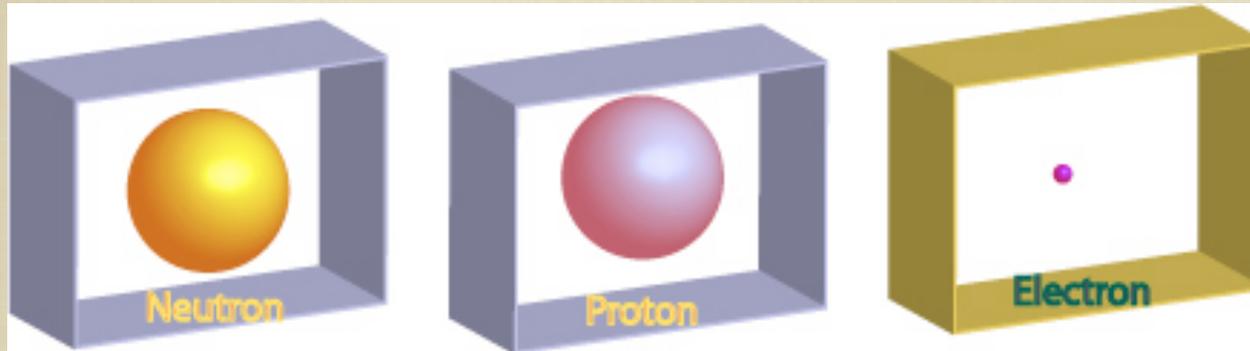


Análisis cinemático: Masa del neutrón \sim masa del protón

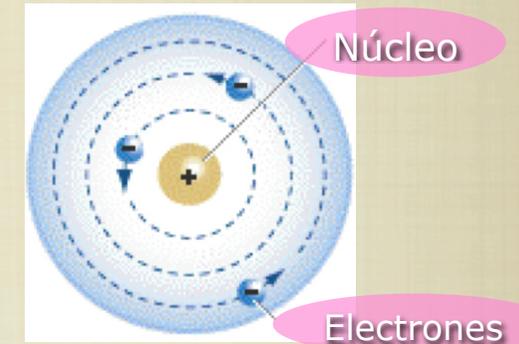
Partículas Elementales

Modelo sencillo, fácil de recordar

- Lista de partículas elementales (aprox. 1932)



- Forman átomos estables mediante interacciones electromagnéticas



Pero que no consigue explicar varias cosas

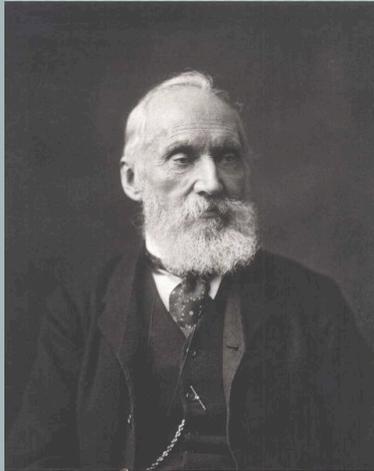
¿Por qué los electrones no radian energía al girar en su órbita?

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)**

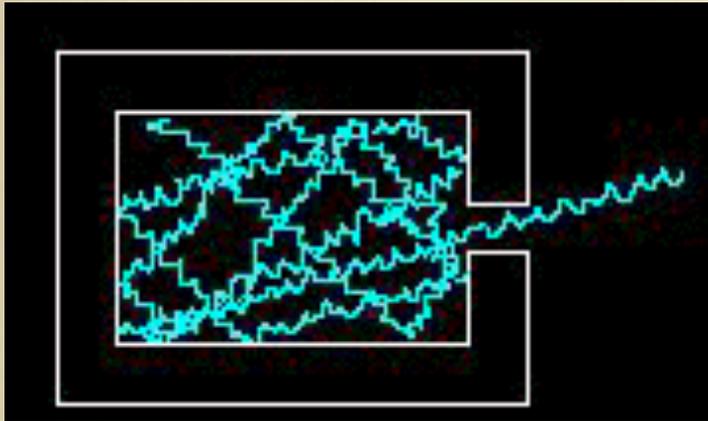


Las dos nubes en el horizonte que vislumbró Lord Kelvin desencadenaron sendos enriquecedores *chaparrones* que hicieron florecer la Física del s. XX

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

Fotón

Radiación de cuerpo negro



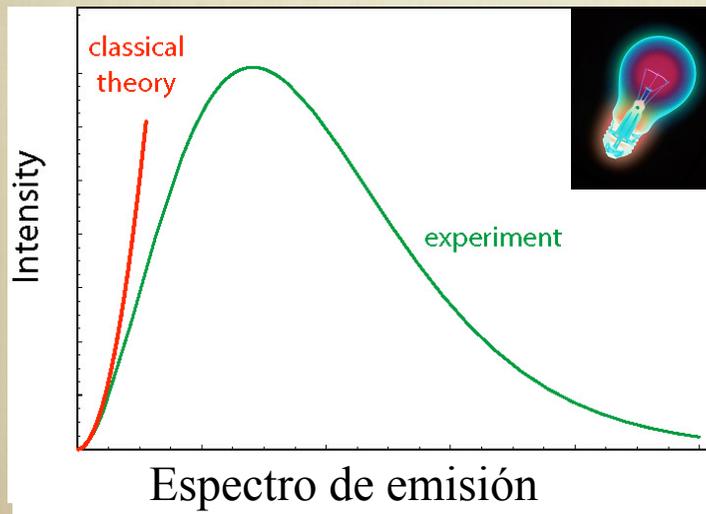
“Cuerpo negro”: Cavidad que absorbe luz incidente y emite radiación en equilibrio térmico

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

Teoría clásica (Raleigh-Jeans)

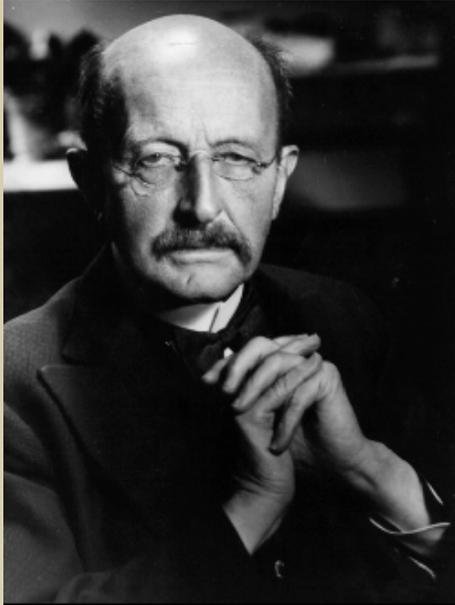
$$I(\nu) \simeq \nu^2 \langle E \rangle$$

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



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

Fotón



Max Planck

Un "Acto de desesperación"

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

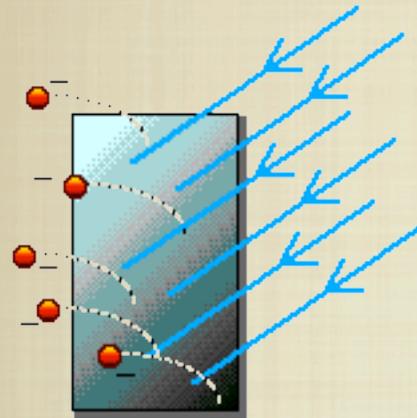


h = una nueva constante fundamental de la Naturaleza

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

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

Fotón



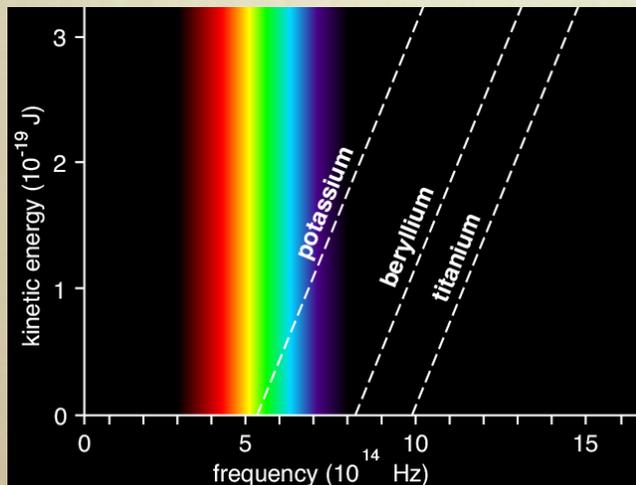
Efecto fotoeléctrico

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



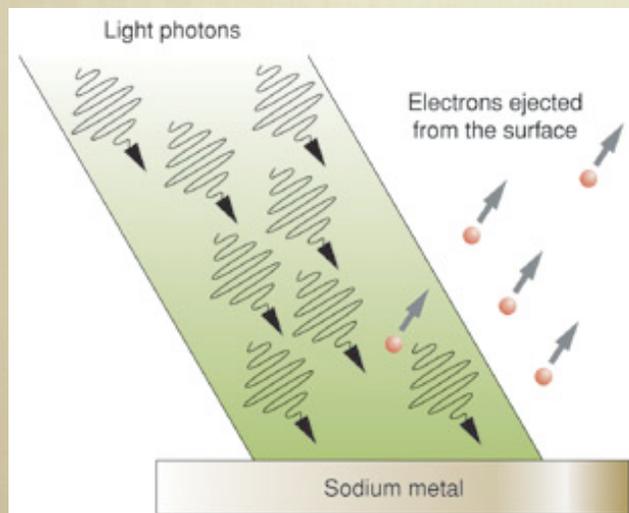
Albert Einstein

“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 Compton, 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

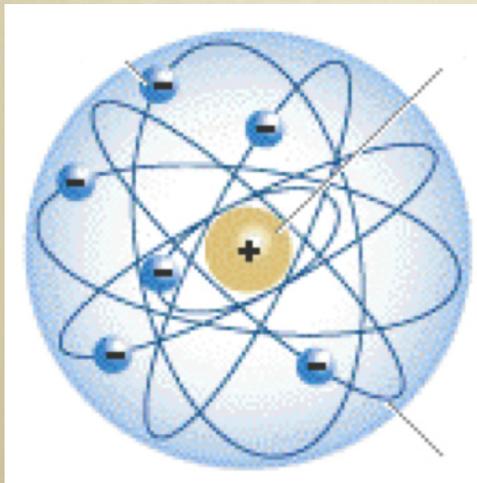
$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi} \quad E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (\text{hidrógeno})$$

- 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

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



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



Louis de Broglie

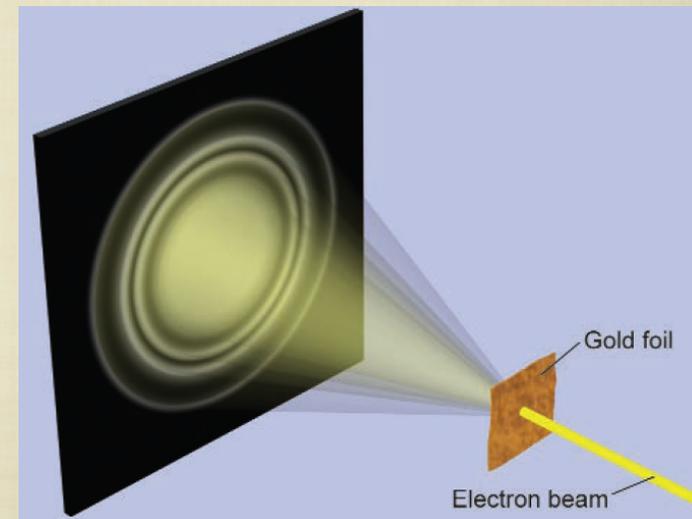
Así como la radiación electromagnética (ondas) se comporta como particular (fotones), ...



Las partículas se comportan como ondas

Dualidad onda-partícula

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

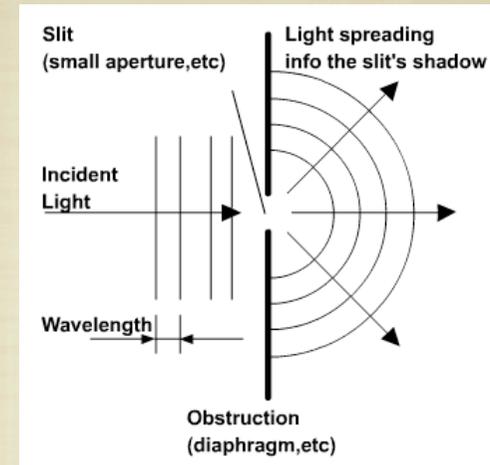
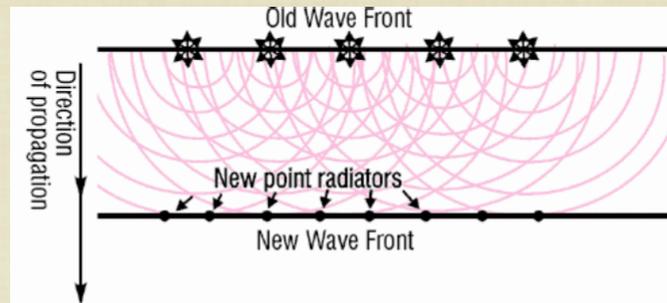


*Confirmado experimentalmente en 1927
En la difracción de electrones (Davisson/Germer)

Principio de Huygens

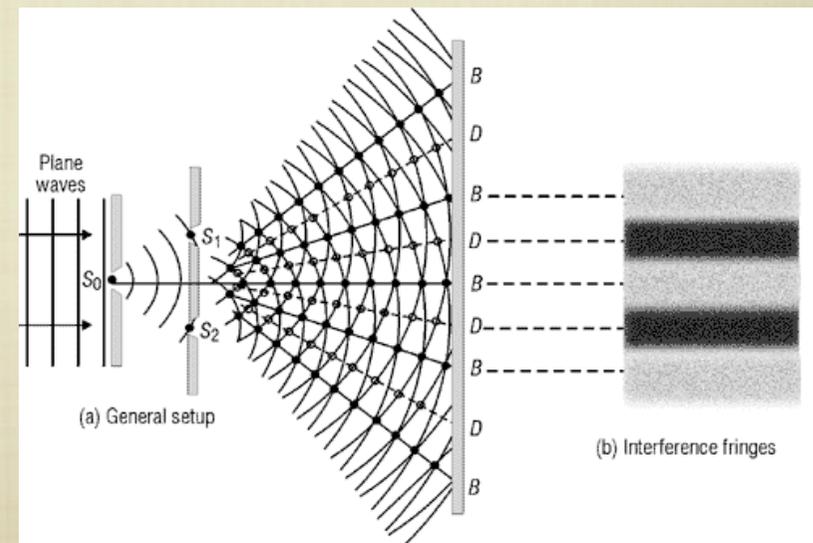
- Cada punto del frente de ondas se constituye en un foco secundario

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



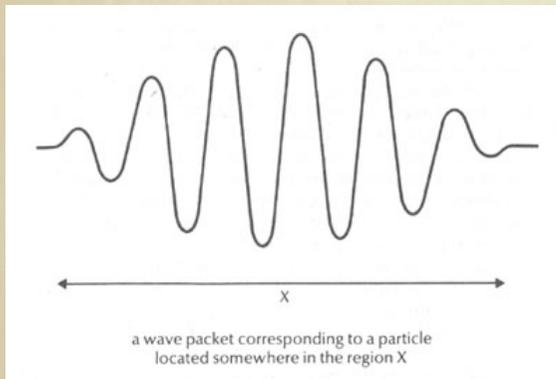
El principio de incertidumbre

Posición y momento

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

Tiempo y energía

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

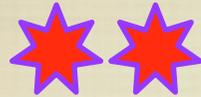


En la medida de la posición hay una incertidumbre de orden la longitud de onda $\Delta x \sim \lambda = h/\Delta p$

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



E. Schrödinger

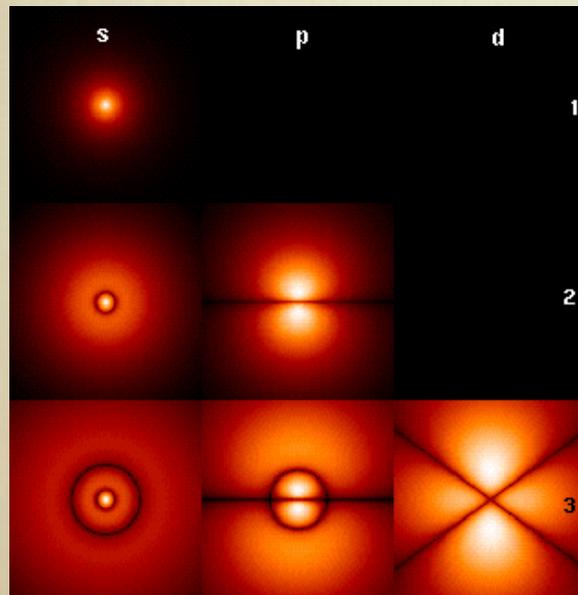


Función de onda de probabilidad

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 $v \ll c$



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

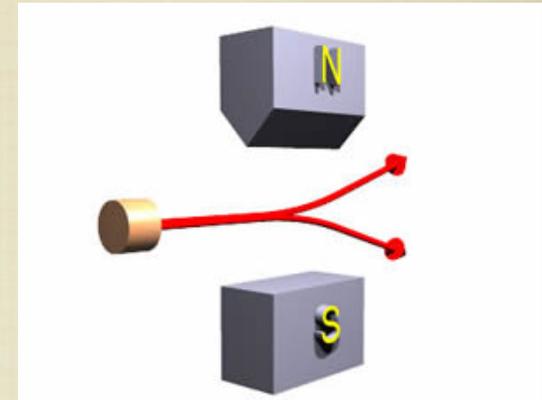
Principio de exclusión de Pauli (1924): en cada orbital, sólo dos electrones, que se distinguen por un misterioso número cuántico bi-valuado

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)

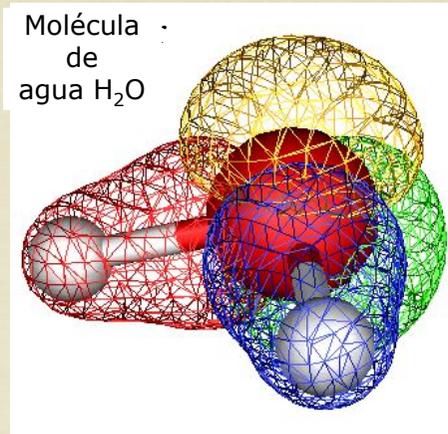
La Física Cuántica explicó la existencia de estructura en la materia



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")**