

Introducción a Física de Partículas y Cosmología

del siglo XX

Parte 1/4

Fernando Marchesano
CERN

(agradecimientos a Rolf Landua
y Ángel Uranga por material original)

Advertencia

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

Más de 50 premios Nobel en Física de Partículas

Resulta imposible ser exhaustivo o riguroso

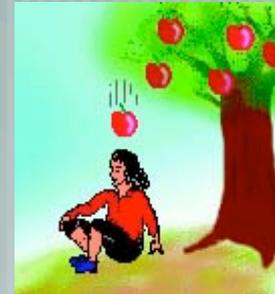
Nos restringimos a una visión general de los principales descubrimientos e ideas

Marco general de la Física:

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

Dos fuerzas fundamentales:

- Gravedad (Newton)
- Electromagnetismo (Maxwell)



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)

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

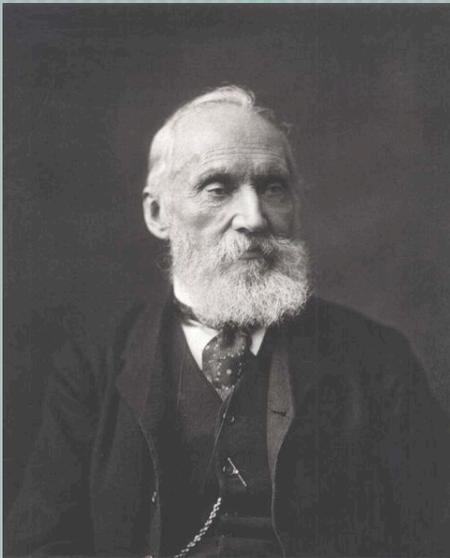
En los albores del s. XX

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

Universo: Sistema Solar y estrellas de nuestra galaxia

- ¿Por qué brilla el Sol?
- Paradoja de Olbers (¿por qué la noche es oscura?)

Estructura de la materia: Átomos (Dalton, Mendeleev)

- ¿Cómo encaja el electrón? (rayos catódicos, J.J.Thomson, 1897)

Dos fuerzas fundamentales:

- Gravedad (Newton)
- Electromagnetismo (Maxwell)
- ¿Y la radioactividad? (Becquerel, 1896)

Marco general de la Física:

- Mecánica clásica
- Termodinámica y Mecánica estadística
- La radiación de cuerpo negro
- El experimento de Michelson-Morley

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^+

e^+

n

μ^-

Zoo de partículas

τ^-

p^+

ν_e

u

d

s

ν_μ

c

τ^-

MODELO ESTÁNDAR

ν_s

b

ν_s

t

Masas de neutrinos

Movimiento Browniano

Fotón

Radio-actividad

Relatividad especial

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

QED

Violación de P, C, CP

Higgs

Bosones W
Unificación electrodébil

Gran unificación?
Supersimetría?

Supercuerdas?

W

Z

g

3 familias

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

Mecánica Clásica,
Teoría Cinética,
Termodinámica

Boltzmann

Maxwell

Newton

Partículas

Campos

Universo

Tecnología

Electromagnético Débil Fuerte

Detectores Aceleradores

1895

e^-

Fotón

Radio-actividad

1900

Movimiento Browniano

1905

Átomo

Relatividad especial

1910

Núcleo

Mecánica Cuántica
Onda / partícula
Fermiones / Bosones

1920

p^+

Rayos cósmicos

Relatividad General

Geiger
Cámara de niebla

1930

e^+

n

Dirac
Antimateria

Desintegración beta

Mesones de Yukawa

Galaxias ; Universo en expansión; modelo del Big Bang

Ciclotrón

1940

μ^-

Materia oscura

Fusión nuclear

1950

τ^-

p^+

Zoo de partículas

QED

Violación de P, C, CP

Nucleosíntesis cosmológica

Cámara de burbujase

Sincrotrón

1960

ν_e

Higgs

Bosones W
Unificación electrodébil

Fondo de radiación de microondas

Cámara de hilos

Aceleradores e^+e^-

1970

ν_μ

u d s

Gran unificación?
Supersimetría?

Color
QCD

Online computers

Enfriamiento de haces

1980

τ^-

ν_τ

c

b

Supercuerdas?

W Z g

Inflación

Detectores modernos

Aceleradores p^+p^-

1990

t

3 familias

Inhomogeneidades del fondo de microondas

WWW

2000

Masas de neutrinos

Energía oscura

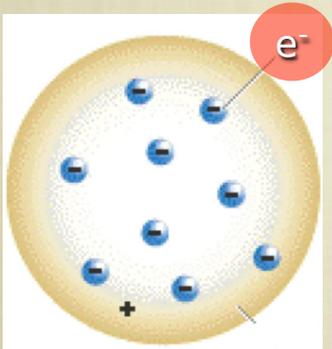
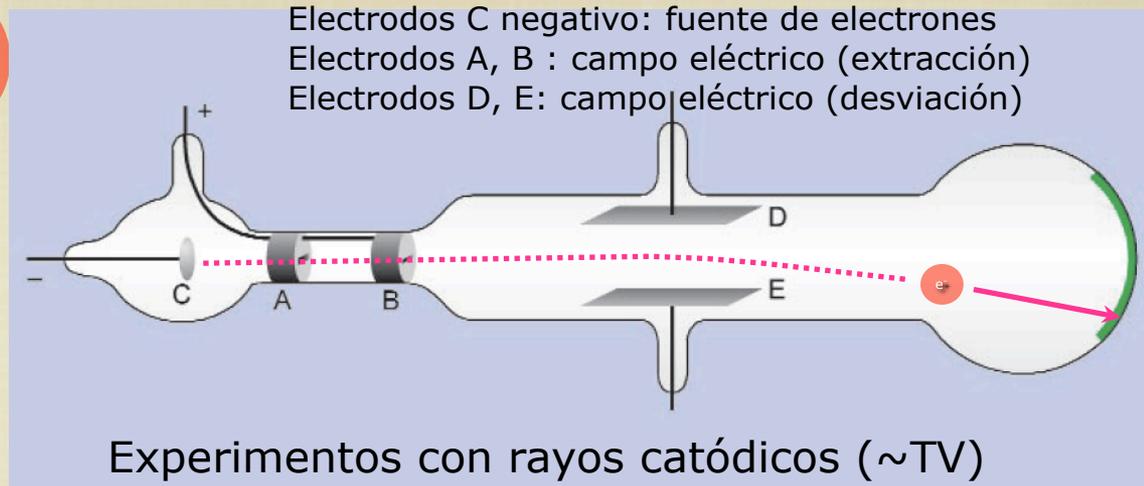
GRID

2010



J.J. Thomson

e^-



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

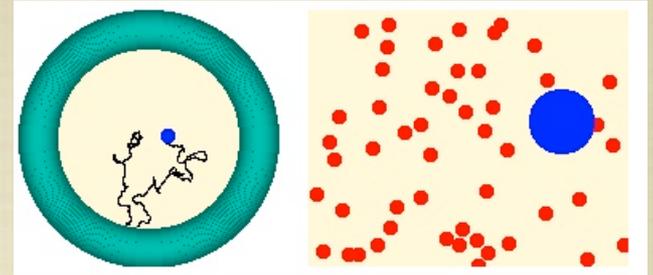


Los 'rayos' son corpúsculos cargados (conocidos como electrones desde entonces) con un cociente carga/masa fijo (propiedades intrínsecas de los electrones)



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)

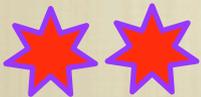


Albert Einstein (1905) explica mediante la teoría cinética que el movimiento se debe a colisiones con las moléculas del medio

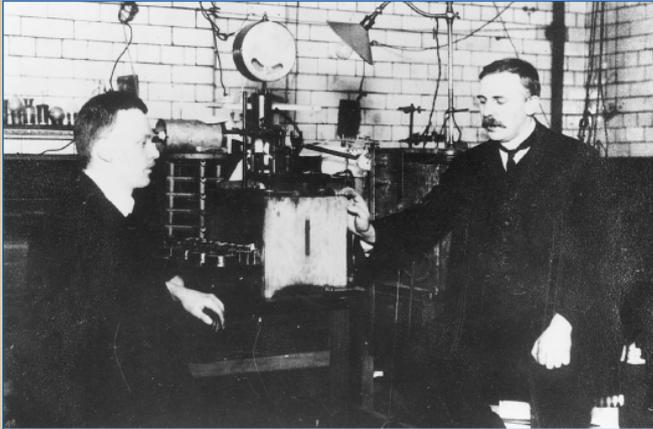
Albert Einstein

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

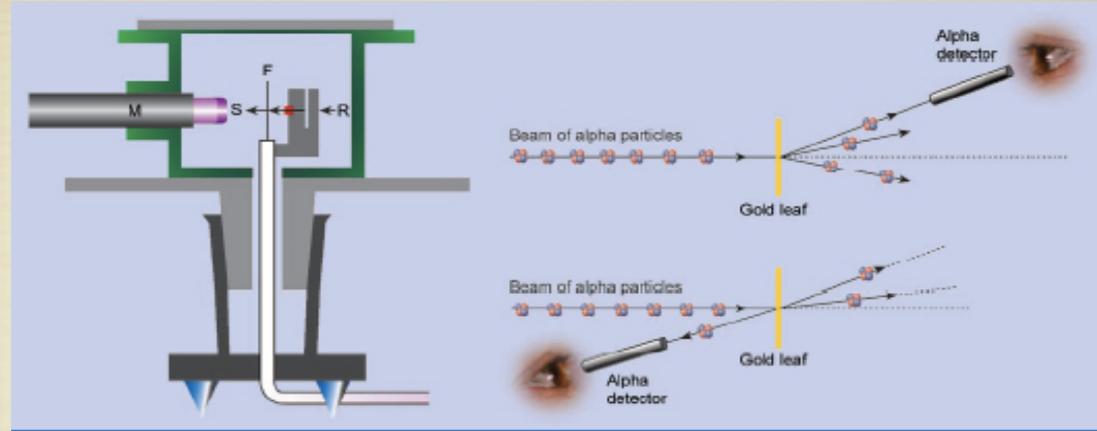
François Perrin (1907) utiliza la fórmula de Einstein para confirmar la teoría y calcular el número de Avogadro.



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



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



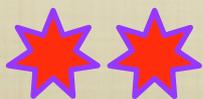
Geiger y Marsden lanzan partículas alfa (núcleos de He) contra planchas de oro. Pequeñas desviaciones de trayectoria, pero en 1 de cada 8000 casos, rebote violento. Incompatible con el modelo del átomo 'pudding de pasas' de Thomson.

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

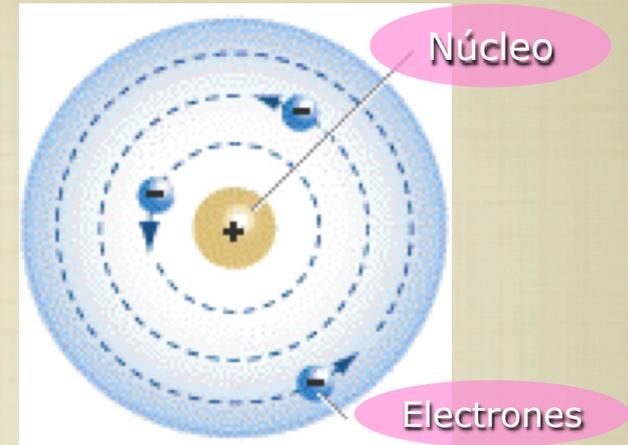
E. Goldstein (1886): rayos anódicos

W. Wien (1898): mide q/m para diferentes núcleos, incluido H

E. Rutherford (1918): propone que los núcleos contienen núcleos de hidrógeno (protones)

★ ★ Neutrón:

Propuesto por E. Rutherford en 1920. Descubierto por J. Chadwick en 1932.
Saltemos momentáneamente hasta entonces...



Modelo de Rutherford del átomo "vacío"

n

¿Hay otras partículas en el núcleo?

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

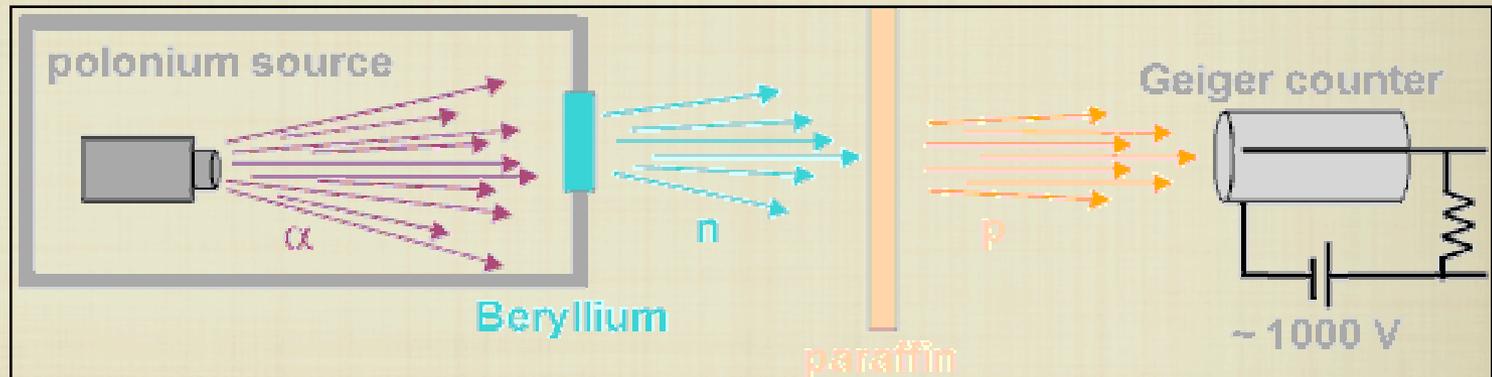
¿A qué corresponden las dos unidades de masa con carga cero?

★ ★ Neutrón:

Descubierto por J. Chadwick en 1932



James Chadwick

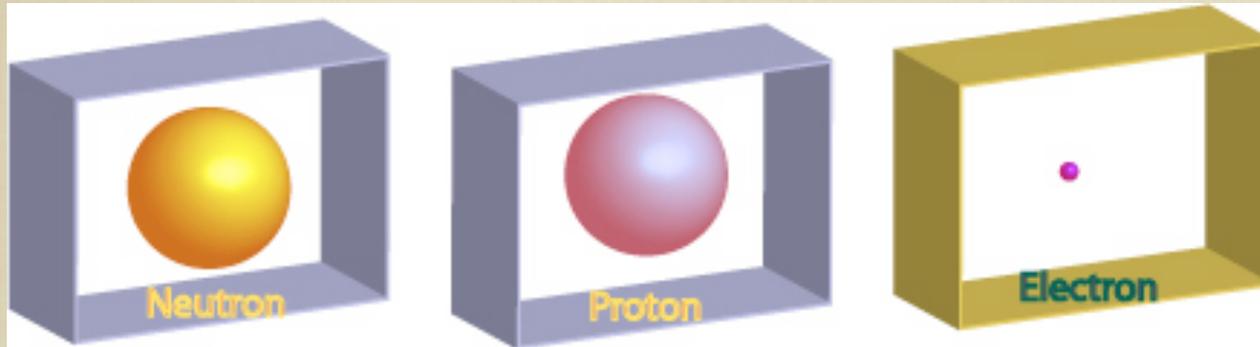


Análisis cinemático: Masa del neutrón \sim masa del protón

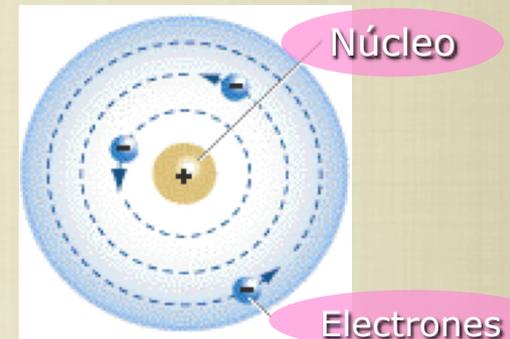
PARTÍCULAS ELEMENTALES

Modelo sencillo, fácil de recordar

- **Lista de partículas elementales** (aprox. 1932)



- **Forman átomos estables mediante interacciones electromagnéticas**



Pero que no consigue explicar varias cosas

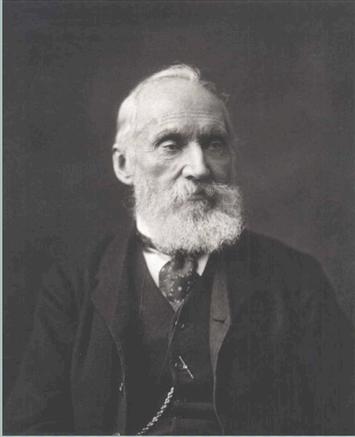
¿Por qué los electrones no radian energía al girar en su órbita?

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)**

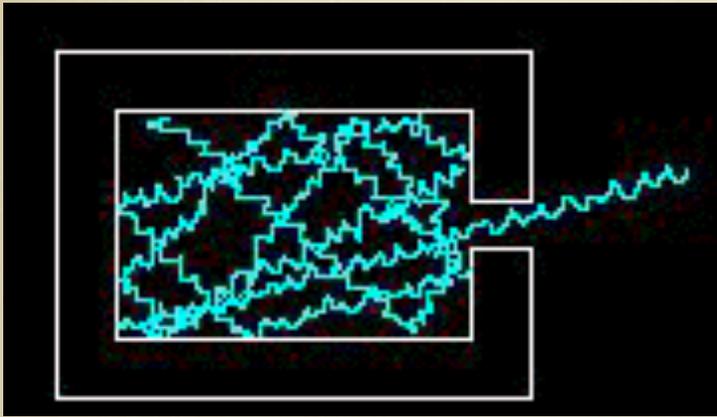


Las dos nubes en el horizonte que vislumbró Lord Kelvin desencadenaron dos enriquecedores ***chaparrones*** que hicieron florecer la Física del s. XX

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

Fotón

Radiación de cuerpo negro



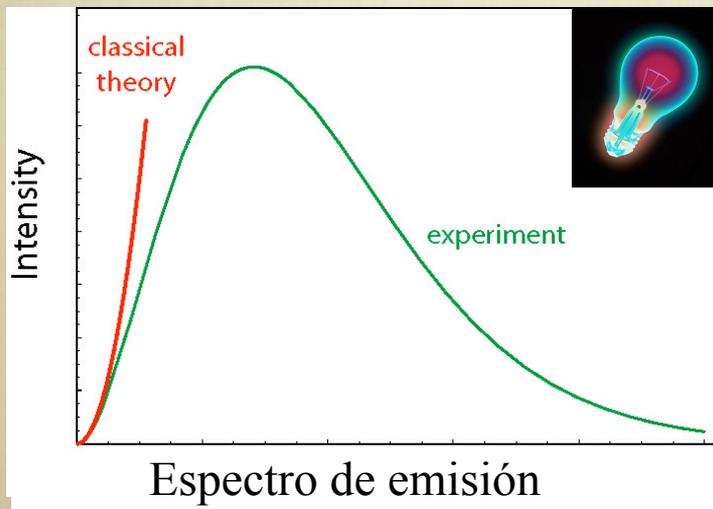
“Cuerpo negro”: Cavidad que absorbe luz incidente y emite radiación en equilibrio térmico

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

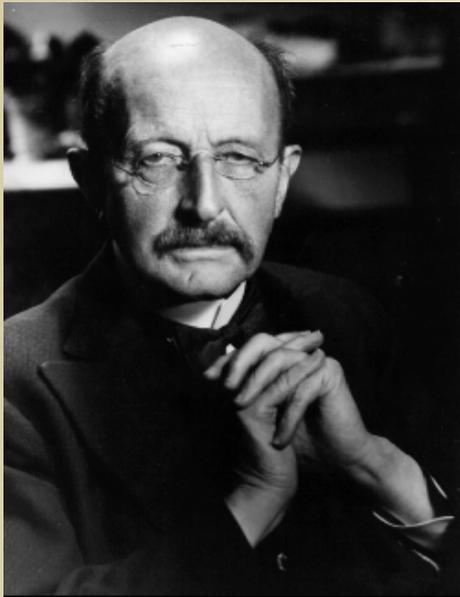
Un "Acto de desesperación"

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 $h\nu \gg kT$



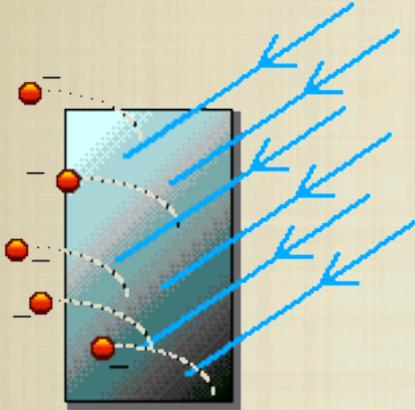
Max Planck

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

Fotón

Efecto fotoeléctrico

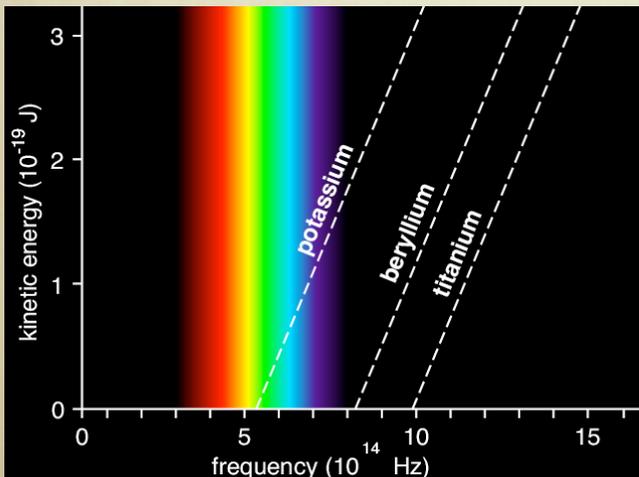
Producción de rayos catódicos (extracción de electrones) cuando se ilumina una superficie metálica con luz (radiación electromagnética) (P. v. Lenard)



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

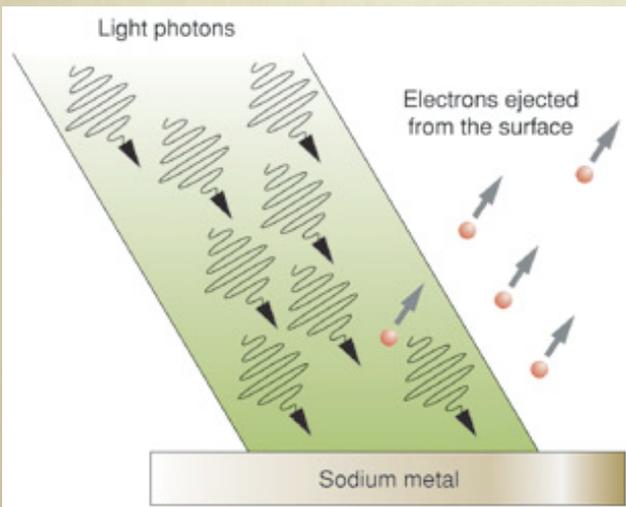
“Mi única contribución revolucionaria”

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, 1915)

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



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



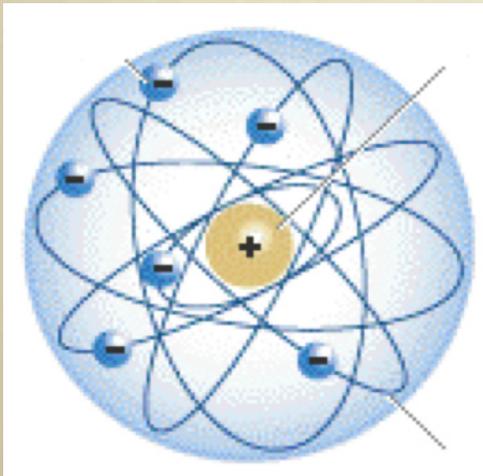
N. Bohr propone una descripción **cuántica** de los electrones en el átomo

- Cuantización 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



656.210 nm 486.074 nm 434.010 nm 410.12 nm



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

$$\lambda = \frac{91.18 \text{ nm}}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)}$$

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



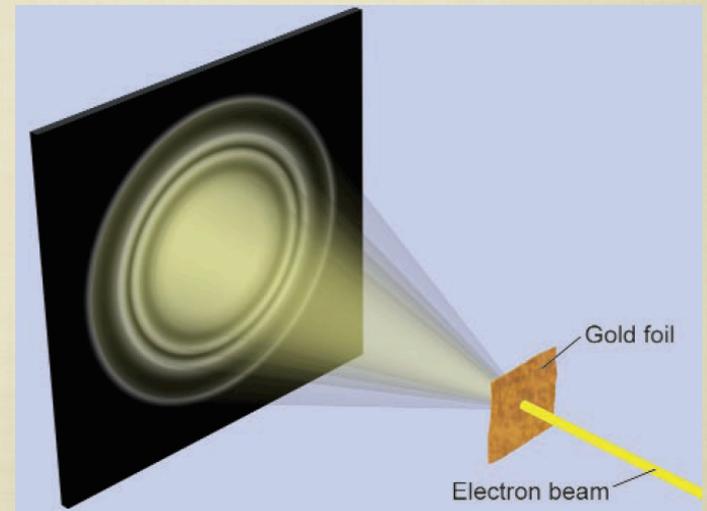
Louis de Broglie

Así como la radiación electromagnética (ondas) se comporta como partículas (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)



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

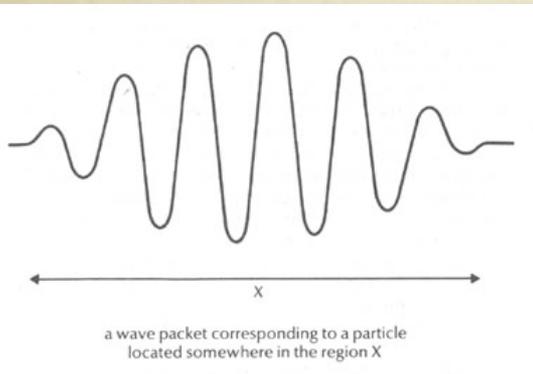
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

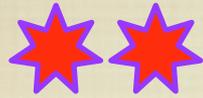
Tiempo y energía

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

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





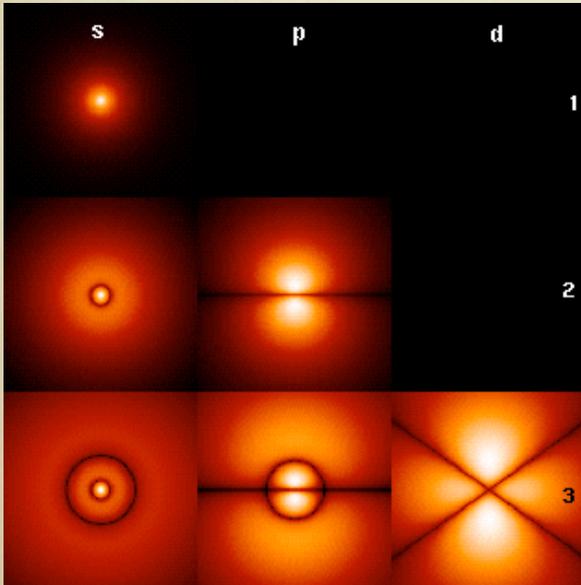
Función de onda de probabilidad

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

- Experimento de Stern-Gerlach (1922)

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

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

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

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)

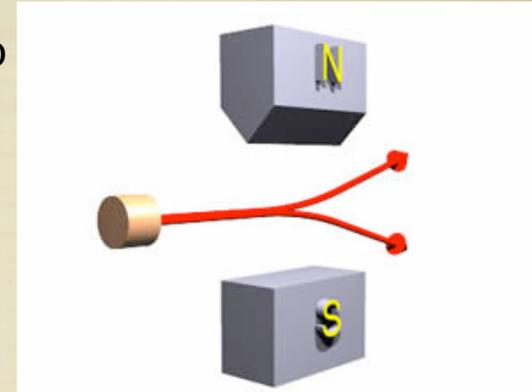
-**Fermiones**: Partículas con spin semi-entero (electrón, protón, etc)

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)



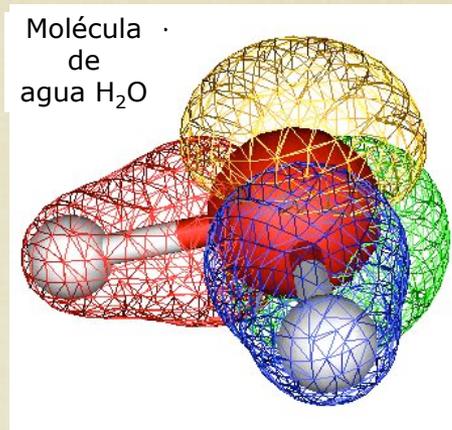
La Física Cuántica explicó la existencia de estructura en la materia



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")**