



Paradojas de la Microfísica

ATENEO de Badajoz

Octubre, 2020

El electrón: un objeto misterioso

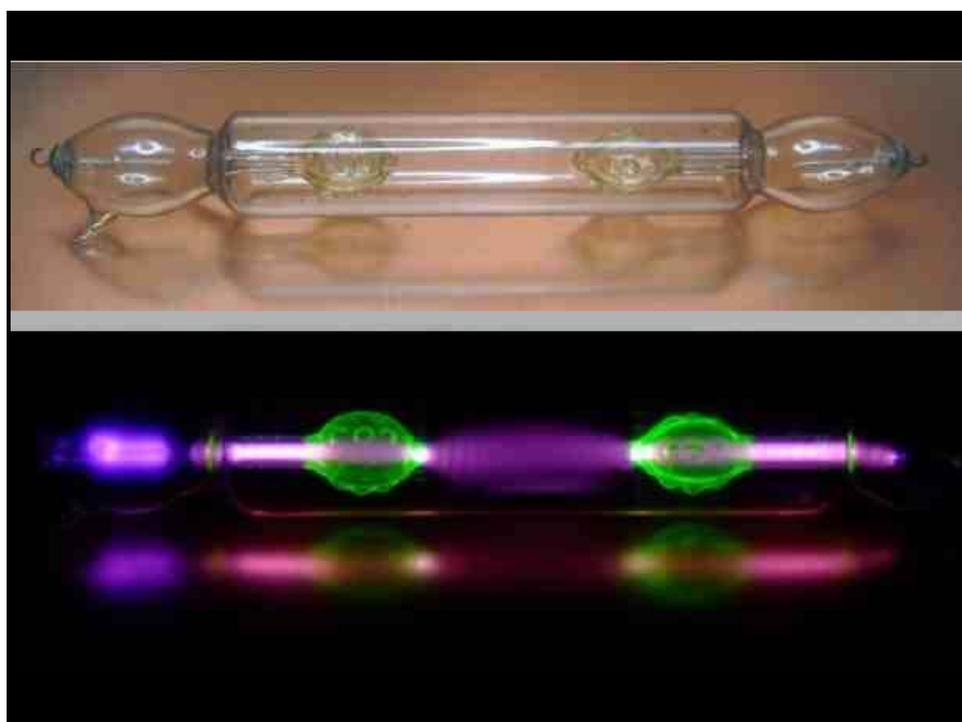
Acontecimientos de época

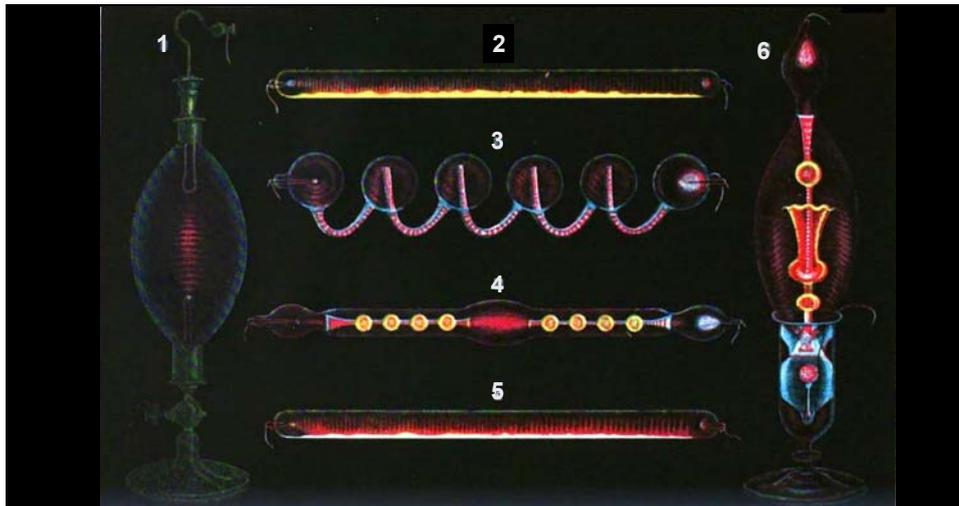


Tubos capaces de emitir luz de diferentes colores al aplicar una descarga eléctrica en su interior, en condiciones de baja presión y un ambiente de gases.

Estos tubos se utilizan aún para anuncios luminosos.

Un invento y creación del físico alemán **Heinrich Geissler**, datado de 1850

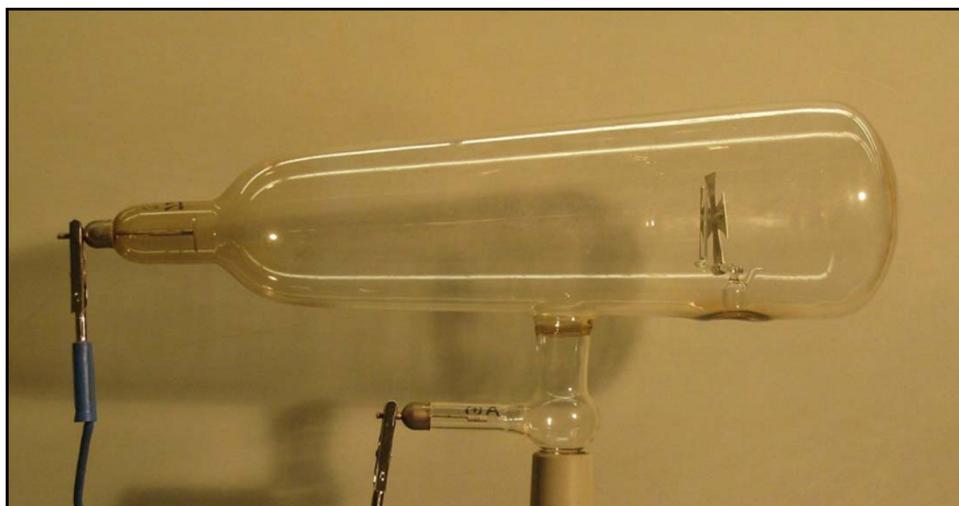




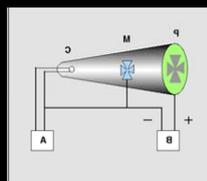
Dibujo a color de **tubos Geissler** iluminados por su propia luz, de un libro francés de filosofía natural de **1869**, que muestra algunas de las muchas formas y colores extravagantes. Estaban alimentados por **alto voltaje** de una bobina de inducción.

Inventado por el soplador de vidrio alemán **Heinrich Geissler** en **1857**, los tubos Geissler fueron los primeros tubos de descarga de gas y fueron fabricados para el entretenimiento. Alrededor de **1910** se convirtieron en las primeras **luzes de neón**.

Pie de foto: "Descarga eléctrica en gases enrarecidos: **1**.Descarga en **vapor de alcohol**. **2**.Muestra la Fluorescencia del **Sulfurato de Calcio**, **4**.Fluorescencia del Vidrio de **Uranio**, **5**.Muestra la Fluorescencia del **Sulfurato de Estroncio**, **6**.Fluorescencia del **Vidrio de Uranio y Sulfato de Quinina**".



Tubo de William Crookes



En **1870**, formó parte de la corriente que se conoce como "metapsíquica" (predecesora de la parapsicología) con sus investigaciones sobre el espiritismo y los fenómenos médiums

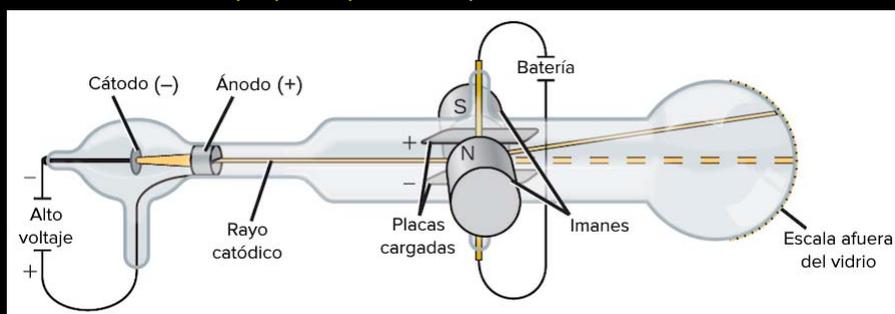




Modelos históricos para el electrón

Bergman, David L. - Models of the electron, Foundations of Science, 2 (1999)

Antes de finales del siglo XIX, **J.J. Thomson (1897)** fue capaz de demostrar la existencia de una **pequeña partícula** que se llama **electrón**.

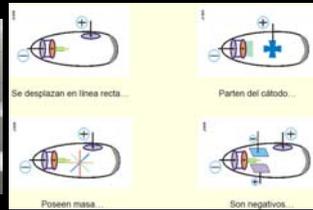
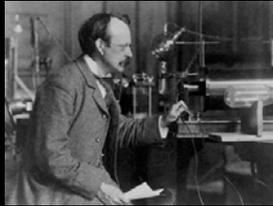


Tiene una **pequeña y definida cantidad de carga eléctrica** y **cantidad de masa inercial**.



| Partículas | Símbolo | Masa | | Carga | | Descubridor |
|------------|----------------|-----------------------|---------|----------------------------------|----------|-------------|
| | | En Gramos | En UMA | Absoluta | Relativa | |
| Electron | e- | $9,1 \times 10^{-28}$ | 0,00055 | $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ | -1 | Thomson |
| Proton | p+ | $1,6 \times 10^{-24}$ | 10,073 | $+1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ | +1 | Rutherford |
| Neutron | n ⁰ | $1,6 \times 10^{-24}$ | 10,087 | 0 | 0 | Chadwick |

- **Descubrimiento** del electrón en la década de **1890**, basado en varios experimentos independientes **se asignaron** al electrón **una carga negativa e** y **una masa m**,



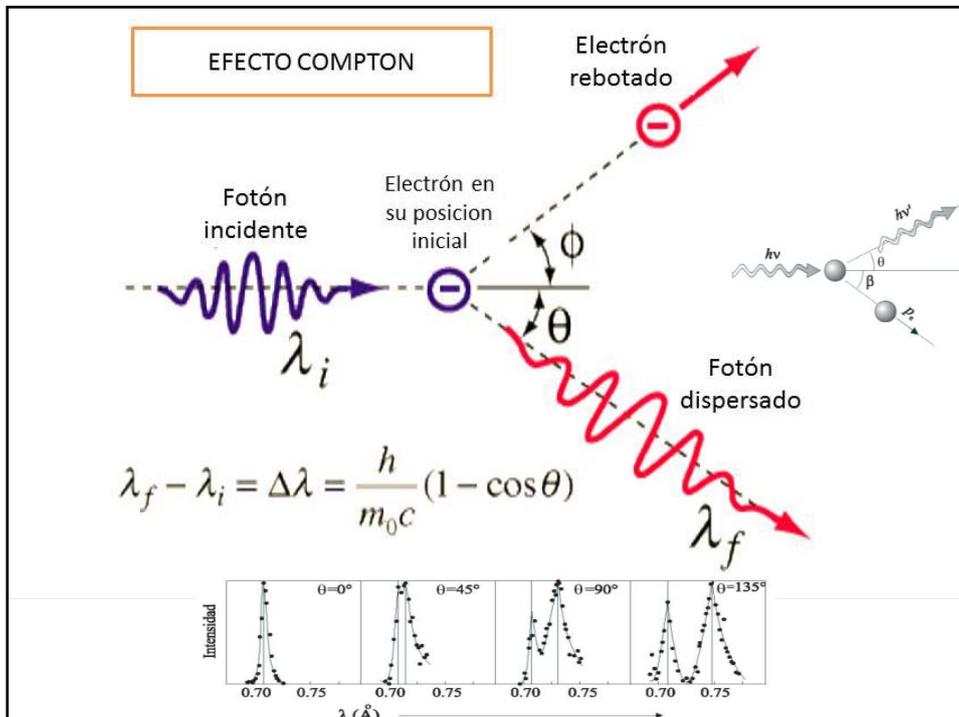
- Reconocimiento y verificación del **aumento de la masa efectiva con la velocidad** en **1905** y **1906**.
- Asignación de la **longitud de onda Compton** $\lambda_c = h/(mc)$ al **electrón** a partir de la **dispersión de los rayos X por electrones libres** en **1923**,

$$\frac{h}{m_e c} = \frac{hc}{m_e c^2} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{0,511 \text{ MeV}} = 0,00243 \text{ nm}$$

Longitud de onda Compton para el electrón.

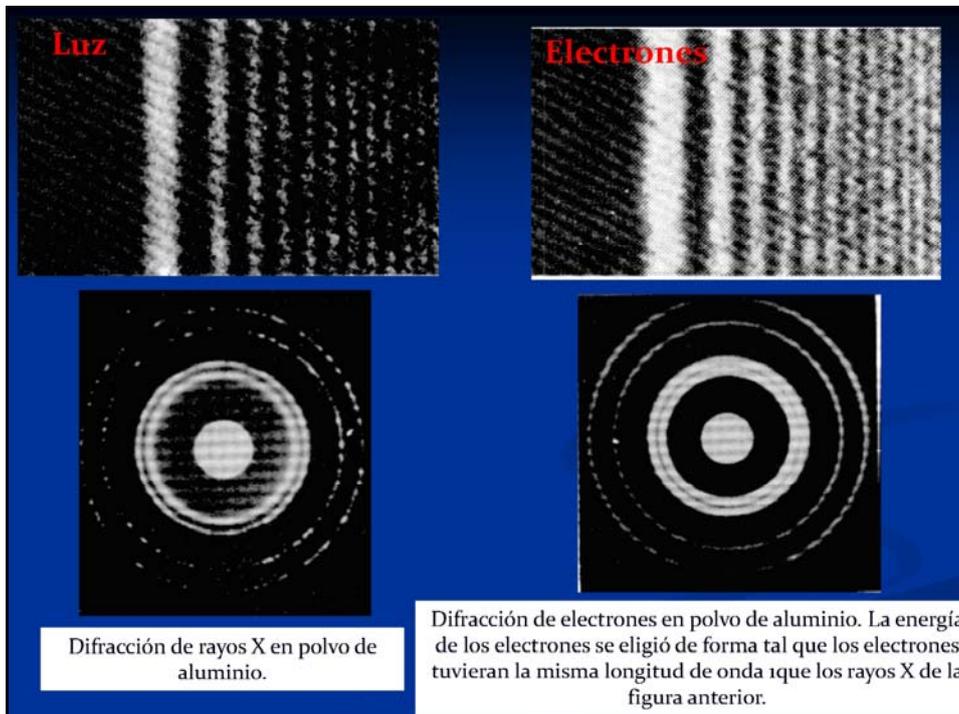
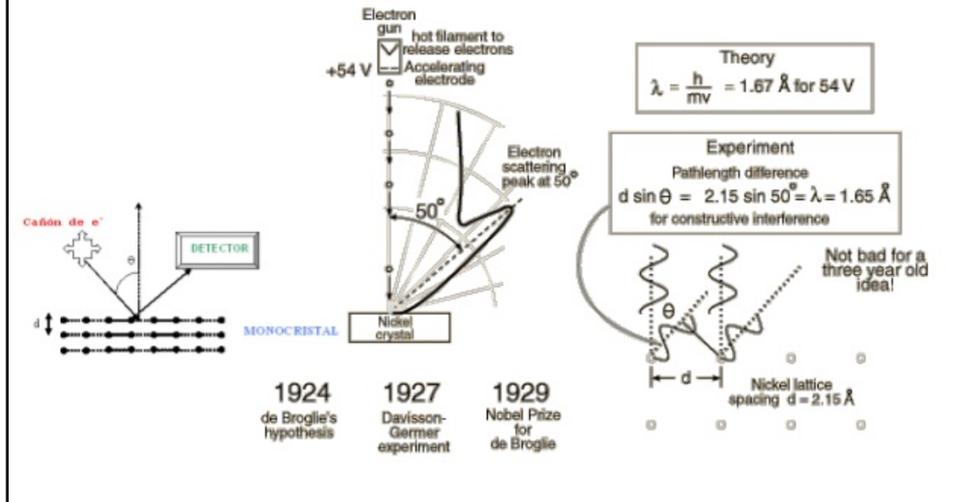
Es equivalente a la **longitud de onda de un fotón** cuya **energía coincide con la masa de la partícula**.

- Hipótesis de las **propiedades ondulatorias del electrón** por de Broglie en **1924**, $\lambda = h/(mv)$. Fue **verificada** por el experimento de **C.J. Davisson** y **L.H. Germer** de difracción de electrones por cristales en **1927**, e independientemente por **G.P. Thomson** en **1928**,



Experimento de Davisson-Germer (1927)

Comprobación experimental del postulado de De Broglie, con la determinación de la longitud de onda de los electrones mediante la difracción



Se dice a los estudiantes que *deben aceptar* el hecho de que la **Física Moderna** tiene muchas propiedades que, simplemente, el intelecto humano *no es capaz de comprender*.

La **Física Clásica** dio explicaciones comprensibles conceptualmente, pero ahora los estudiantes *deben asumir* que la **Física Moderna** no puede ser entendida de igual manera.

La **MC** es la teoría científica más exitosa jamás desarrollada, así que "*cállate y calcula*".

Por ejemplo, un electrón se describe como una *partícula puntual ideal* porque esta simplificación matemática es adecuada para obtener ecuaciones útiles.

Como dijo **Paul Dirac**, el objetivo es "*no tanto obtener el modelo de un electrón, sino más bien obtener un simple conjunto de ecuaciones que puedan utilizarse para calcular todos los resultados que pueden obtenerse mediante un experimento*"

MODELOS

Los principales científicos de la época (1890-1930) desarrollaron rápidamente **modelos para el electrón** y realizaron experimentos para validar sus ideas.

Punto ideal



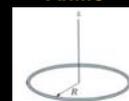
Punto ideal con masa



Esfera sin estructura
masa y carga



Anillo

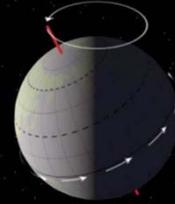


Concluyeron que la **partícula eléctrica** que habían descubierto era un **elemento fundamental de la materia** (o **partícula elemental**), y que los **electrones** formaban parte de los objetos ordinarios que observamos y manejamos todos los días.

Se desarrolló el concepto de que **la materia tiene una naturaleza electromagnética**, que explica lo que observamos en la naturaleza, así como que la **electricidad** y el **magnetismo** podían explicar numerosas propiedades físicas de la materia, como la **inercia**, el **color** de los objetos, la **fuerza gravitatoria** entre las masas y la **estructura cristalina** de ciertas moléculas.

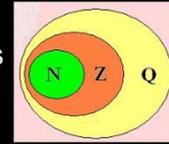
Por qué un electrón **NO** puede ser un punto ideal:

1. Tiene masa ($m_e = 9,1 \times 10^{-28} \text{ g}$) \rightarrow *resistencia al cambio estado movimiento*
2. Tiene carga ($q_e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) \rightarrow *comportamiento relacional*
3. Tiene momento angular propio ($\vec{S}_e = 0,5 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)
4. Tiene momento magnético ($\vec{\mu}_e = -9,3 \times 10^{-24} \text{ J/T}$)
5. Tiene movimiento de *cabeceo* o *precesión*



Y como consecuencia, precisa tener:

1. Tamaño ($r_e \approx 1,353 \times 10^{-57} \text{ m} \leftrightarrow 1,0 \times 10^{-24} \text{ m}$)
2. Forma (¿esfera? – ¿elipsoide? – ¿anillo? – ¿otras?)
3. Composición:
 1. **Elementos** o componentes
 2. **Número** de componentes
 3. **Ligaduras** entre componentes
 4. **La esencia distintiva** de los componentes

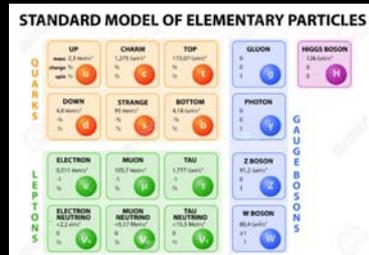


Por qué un electrón **NO** puede ser una *esfera* o *elipsoide*:

1. Las **fuerzas fuertes** de Coulomb de los elementos de carga concentrados en un área pequeña harían que el electrón explotara.
2. No se ha encontrado ninguna fuerza que equilibre las fuerzas de Coulomb en la superficie (o en la masa interna) de un electrón esférico.
3. Para producir el **momento magnético** observado del electrón, una esfera giratoria necesitaría una velocidad ($2,3 \times 10^{11} \text{ m/s}$) periférica **muy superior a la velocidad de la luz**: ($c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$),
4. La equivalencia masa-energía de la carga eléctrica en una esfera proporciona sólo el 75% de la masa efectiva del electrón: es decir, $E_0 = (3/4) m_0 c^2$.

Modelos históricos. Pronto se propusieron **varios modelos** para el electrón descubierto por J. J. Thomson en **1897**.

La carga eléctrica **comprimida** en forma de esfera o de anillo fue propuesta y evaluada sobre la base de la **electrodinámica clásica**. En los años siguientes, se desarrolló una nueva teoría cuántica que integró el electrón puntual y el electrón cuántico en el **Modelo Estándar de Partículas Elementales**.

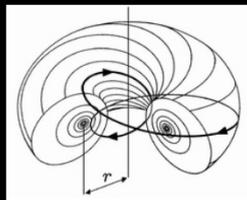


El primer modelo del **electrón** consistía en una "**carga distribuida sobre la superficie de una pequeña esfera**". A partir de la masa conocida, que se suponía de origen electromagnético, se calculó un "radio clásico del electrón" de **$2,82 \times 10^{-15}$ m**. Max **Abraham** abogaba por una **esfera perfectamente rígida**, mientras que H. A. **Lorentz** proponía una **esfera deformable** que se contrajera de acuerdo con su velocidad.

Ninguno era consciente aún del **espín** del electrón (momento angular) o del **momento magnético**, y por lo tanto sus esferas no era giratorias ni intentaban explicar estas características.

Otro modelo fue propuesto por **Parson** en **1915**. Su modelo consistía en una **carga distribuida sobre la superficie de un anillo giratorio**.

Mientras que la esfera tiene sólo un grado de libertad, el radio **R**, el anillo giratorio de Parson tiene **tres grados de libertad**, el radio **R**, la mitad del espesor **r**, y la velocidad de rotación **ω** , lo que proporciona más oportunidades para que las características del modelo de anillo se ajusten a los parámetros medidos del electrón.



En **1918**, H. S. **Allen**, presentó "**El caso de un electrón de anillo**", y discutió los argumentos a favor de un electrón en forma de circuito de corriente capaz de producir efectos magnéticos. El electrón, además de ejercer fuerzas electrostáticas, se comporta como **un pequeño imán**. La suposición del electrón de anillo eliminaba muchas dificultades pendientes...

Tal vez por esta razón, o por otras razones no declaradas, la mayoría de los científicos de hoy en día *adoptan el Modelo Estándar*, que considera al electrón como *un objeto cuántico con dualidad de onda-partícula*.

Como afirma P. A. M. Dirac, el objetivo es "no tanto obtener un modelo del electrón como *un simple esquema de ecuaciones que pueda utilizarse* para calcular todos los resultados que pueden obtenerse de un experimento".

El modelo de *punto ideal* es, en realidad, un modelo matemático y "no se basa en un modelo que se ajuste a las ideas físicas actuales". Como los modelos esféricos, el modelo de punto ideal es físicamente inestable.

Según las leyes de la electrodinámica, una partícula puntual con la carga conocida medida para un electrón *tendría que tener espín cero y cero momento magnético e inmediatamente se separaría debido a la fuerza de repulsión de Coulomb*.

En lugar de descartar el modelo puntual por sus predicciones erróneas, el modelo está dotado de las propiedades fundamentales empíricamente correctas por aclamación, dando crédito a una *visión cínica* en la que la ciencia moderna ha logrado más por consenso y por decreto que por lógica.

Bajo la vívida imaginación de los *líderes "científicos"* modernos, el modelo de puntos persiste en la literatura científica actual — incorporado a la teoría cuántica de los electrones— y se ha convertido en la teoría dominante sobre los electrones, en nuestros días.

El concepto moderno de un electrón cuántico que exhibe la dualidad onda-partícula ha sido expuesto por **Bohr, Dirac, Heisenberg, Schrödinger, DeBroglie, Born, Feynman** y otros.

Según este modelo, "una partícula libre no relativista, de energía $E=mv^2/2$ y momento angular $p=mvR$, se asocia con una onda de $v= E/h$ y $\lambda= h/p$ ".

Esta onda (o conjunto de ondas que forman un paquete de ondas), se describe matemáticamente por la función de onda de Schrödinger expresada por $\Psi(x,t)$.

Muchos científicos han llegado a la conclusión de que ninguno de los modelos históricos proporciona una explicación satisfactoria de las características observadas del electrón.

Asumiendo el modelo atómico de Bohr como **teoría límite** para explicar la estructura del átomo de hidrógeno y asumiendo el **comportamiento estacionario del electrón** en su primera órbita (de radio $a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2 = 0,529177 \times 10^{-10}$ m):

VELOCIDAD DEL ELECTRÓN EN EL ESTADO FUNDAMENTAL:

$$2.2 \times 10^3 \text{ km/s} = 2.2 \times 10^{16} \text{ A/s}$$

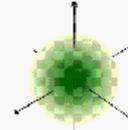
LONGITUD DE LA ÓRBITA:

$$L = 2\pi r = 2 \times \pi \times 0.529 = 3.324 \text{ A}$$

NÚMERO DE vibraciones 1 segundo:

$$6.62 \times 10^{15}$$

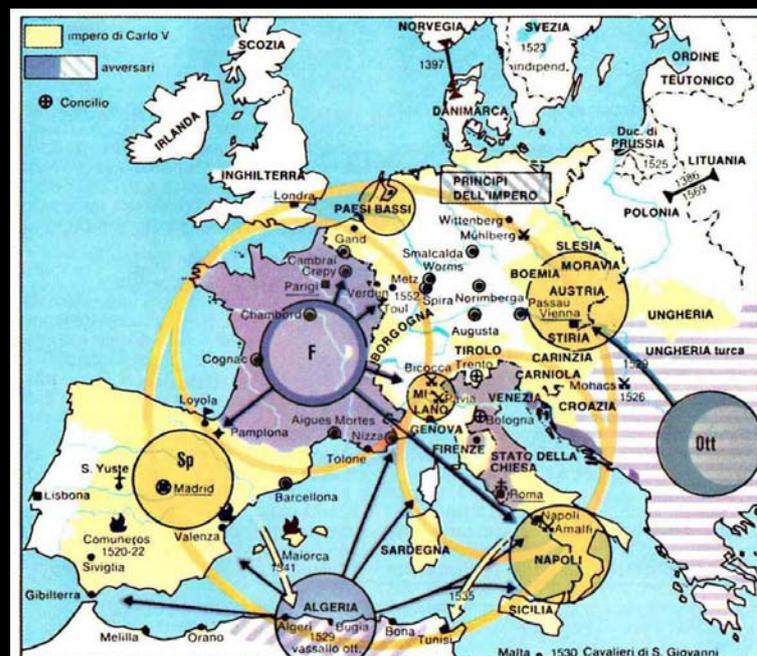
6620 Billones de ciclos vibracionales en 1 segundo



La **enorme velocidad** a la que evoluciona el electrón en ese minúsculo entorno, en las que **intervienen grandes distancias relativas frente al reducido tamaño de los objetos implicados**, hacen que la descripción dinámica de tales sistemas requiera un nuevo tratamiento, diferente al previsto en la Física clásica, más conforme con la talla del observador.

Se precisa una **nueva Física**, capaz de explicar el comportamiento de tales sistemas, en la que intervengan **enunciados de corte estadístico** y que permita trasladar su descripción a un lenguaje asimilable y comprensible para nuestra escala perceptiva de la naturaleza.

Periodo de conflictos religiosos. Carlos V (1519-1556)

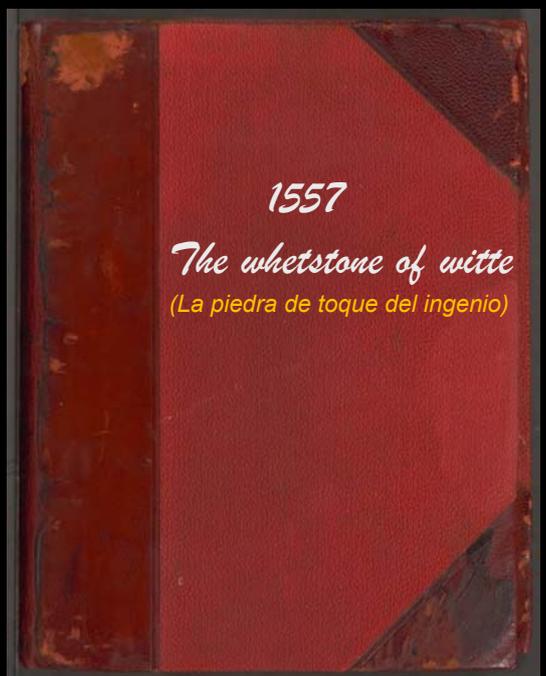


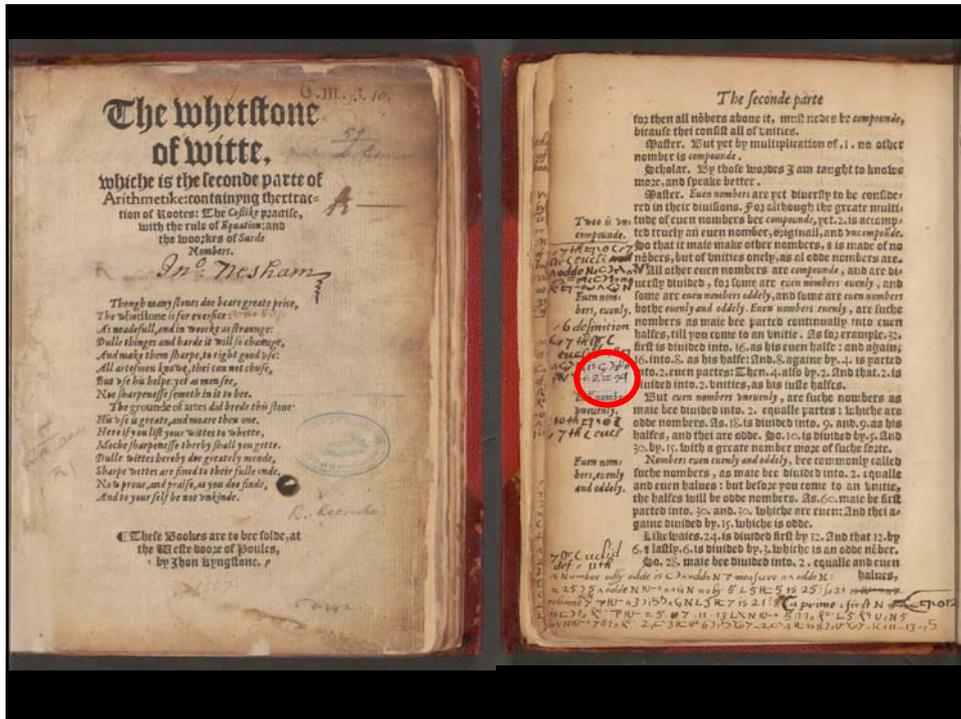
| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| <p>1515 Leonardo da Vinci estudia las leyes de la palanca</p> | <p>1522 Juan Sebastián Elcano vuelve a España, después de completar la primera vuelta al mundo</p> | <p>1543 Muere Nicolás Copérnico</p> |
|  |  |  |
| <p>1537 Tartaglia publica su "<i>Nova Scientia</i>"</p> | <p>1525 Jean Fernel calcula el perímetro de la tierra</p> | <p>1548 Nace en Nápoles Giordano Bruno</p> |

Recordre, Robert (1510?-1558)

Médico y matemático galés que utilizó por primera vez el signo igual (=) en el año **1557**.

Miembro de una respetable familia de Dinbych-y-Pysgod, Robert, entró en la universidad de **Oxford** cerca del **1525**, y obtuvo trabajo en el All Souls Colleeen **1531**.





=

The símbolo "**=**", también llamado **signo igual**, es un **símbolo** que establece la **identidad completa** (substancia y forma) entre dos objetos y/o fenómenos.

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
|  |  |  |



1643 - 1727

$$F - m \cdot a = 0$$

Fuerza
aplicada

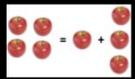


Resistencia al cambio
de movimiento o reposo

Aceleración o cambio
en la velocidad

Para que esta "ecuación" se cumpla, **es necesario** que:

1. El **valor numérico** de **F** sea **idéntico** al valor numérico de **m·a**
2. La **substancia** (contenido **unidades**) de **F** sea **idéntica** a la de **m·a**

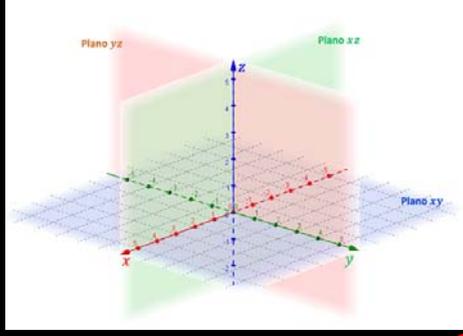


Ecuación de Newton (Dinámica de los cuerpos en movimiento):

$$F = m \cdot a$$



1643 - 1727



Ecuaciones de Newton

$$F_{x_i} = m_i \cdot a_{x_i}$$

$$F_{y_i} = m_i \cdot a_{y_i}$$

$$F_{z_i} = m_i \cdot a_{z_i}$$

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \dot{q}$$

$$\frac{\partial H}{\partial q} = -\dot{p}$$

Ecuaciones de Hamilton



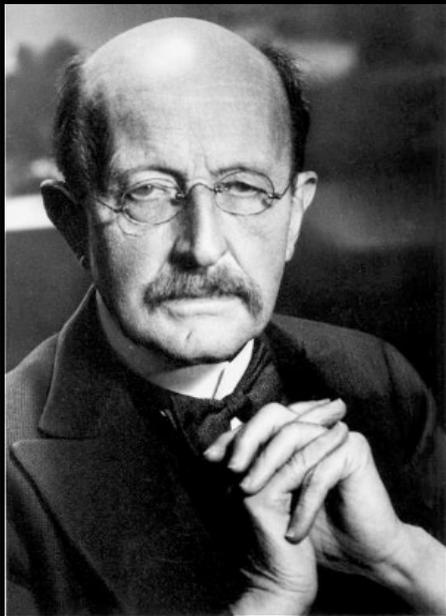
W.R. Hamilton
1805-1865



K.G.J. Jacobi
1804-1861

Ecuación de Hamilton - Jacobi:

$$H = \boxed{H} \left(\text{posición } q_1, q_2, \dots, q_{3N}, \text{ cantidad movimiento } \frac{\partial S}{\partial q_1}, \frac{\partial S}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_{3N}}, t \right) + \frac{\partial S}{\partial t} = \boxed{E}$$



M. Planck 1858 - 1947

h

$6,626070150(69) \times 10^{-27}$ erg-seg

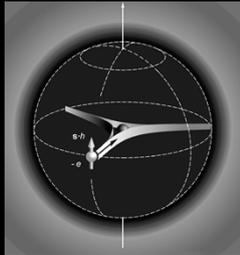
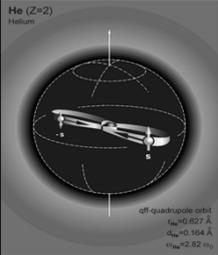
$h: 0.0000000000000000000000000066261$ erg-seg

corpúsculo

$h = mv \cdot \lambda$

onda

Microsistemas físicos



1887-1961

Ecuación de Schrödinger

Se introduce la constante de Planck en la Ecuación de Hamilton - Jacobi

ACCION → energía × tiempo

Determina la **curvatura** de Ψ en las tres direcciones espaciales: $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Constante de Planck → operador Laplaciano, describe cómo la función Ψ cambia su forma en el espacio

Unidad imaginaria: igual a la raíz cuadrada de -1

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Masa de la partícula descrita → Resistencia al movimiento

Describe la fuerza que actúa sobre la partícula → Determina las ligaduras de la partícula

Describe como Ψ cambia su forma en el tiempo → Pendiente temporal (tasa de cambio)

Ψ (espacio, tiempo)

STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES

Portadoras de materia (Left side of the chart)

Portadoras de fuerza (Right side of the chart)

| | | | | | | |
|--------|-------------------|---------------|--------------|-------|-------------|---------|
| QUARKS | UP | CHARM | TOP | GLUON | HIGGS BOSON | |
| | DOWN | STRANGE | BOTTOM | | | |
| | ELECTRON | MUON | TAU | | | Z BOSON |
| | ELECTRON NEUTRINO | MUON NEUTRINO | TAU NEUTRINO | | | W BOSON |
| | LEPTONS | | | | | |
| | | | | | | |

El **modelo estándar (ME)** de la física de partículas ha pasado muchas pruebas. Quedan aún muchos misterios.

El modelo convencional dice que las partículas fundamentales son:

1. **Partículas puntuales** o
2. **Cuerdas vibratorias** de la **longitud de Planck** ($1,6162 \times 10^{-35}$ m), que son virtualmente partículas puntuales.

Ninguno de estos modelos explica totalmente las numerosas propiedades de las partículas fundamentales.

Por ejemplo,

¿*Cómo es que las partículas fundamentales se mueven discontinuamente de un punto a otro sin pasar por el espacio intermedio?*

¿*Cómo poseen el momento angular de $\frac{1}{2}\hbar$ cuando son virtualmente puntos?*

¿*Cuánta de la energía de un electrón está almacenada en su campo electromagnético?*

¿*Cómo exhibe las propiedades tanto de las ondas como de las partículas?*

¿*Está una partícula fundamental hecha de algún bloque de construcción aún más fundamental?*

Cuando se supone que las partículas fundamentales están hechas de **espacio-tiempo**, entonces estas propiedades **contra-intuitivas** pueden **explicarse** mejor.

Así, se vuelven **conceptualmente comprensibles** y **matemáticamente cuantificables**. Además, tal modelo da **predicciones** correctas sobre la **gravedad** y los **campos eléctricos**.

Para la mayoría de los científicos, esta suposición inicial de que **el universo es sólo el espacio-tiempo** parecerá inicialmente imposible.

¿*Cómo pueden obtenerse la materia, la luz, las galaxias y las fuerzas de la naturaleza a partir de lo que parece ser el vacío del espacio-tiempo?*

El modelo de MC del espacio-tiempo propuesto hoy **está lejos de ser un vacío sin características**.

Además de tener propiedades bien conocidas como la **velocidad de la luz** y una **constante gravitatoria**, también tiene una **impedancia** y un **módulo de masa**.

Lo más importante es que la versión de la MC del espacio tiempo está llena de actividad. La **energía en el cero absoluto** (-273,15 K) implica que **el vacío tiene una gran densidad de energía (masa)**.

3. Posee una **acción intrínseca** o propia con dos posibles valores: $\pm \frac{1}{2} \hbar$

$$\frac{1}{2} \hbar = 0,527285909 \times 10^{-34} \rightarrow \text{Julios} \times \text{segundo}$$

4. Aparenta una **momento angular intrínseco** o propio

Paradójicamente, si asumimos que un modelo que supone que el electrón es una carga puntual girando, **¡la velocidad de giro debería ser mucho mayor que la velocidad de la luz!**, para que el momento angular propio tomara el valor que tiene.

5. Aparenta un **momento magnético: $-1.00115965218111 \mu_B$**

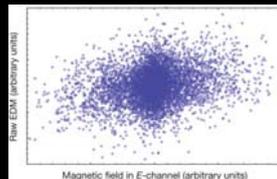
Actualmente se supone que **la masa** del electrón se origina a **partir de la energía del campo eléctrico** que manifiesta: **$m_e = 0,510998928(11) \text{ MeV}/c^2$**

Dentro del electrón parece que existe una distribución continua de carga eléctrica y carga magnética, con **simetría esférica**. Según esta distribución de carga y, en consonancia con las Leyes de Gauss para el campo eléctrico y magnético, se suele calcular **la distribución de los campos eléctrico y magnético dentro del electrón** y, posteriormente, la correspondiente energía del campo electromagnético y el momento angular del electrón.

6. Aparenta una **carga negativa**, uniforme y siempre constante

$$q_e = -1.602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19} \text{ C}$$

7. Su forma parece **aproximadamente esférica**

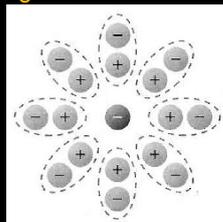


Improved measurement of the shape of the electron; J. J. Hudson, D. M. Kara, I. J. Smallman, B. E. Sauer, M. R. Tarbutt & E. A. Hinds; *Nature*, vol **473**, 493-496 (2011)

8. Posee una envoltura que podría calificarse como **dinámica**

Esta envoltura está formada por pares virtuales **electrón-positrón** en constante interacción (creación-aniquilación), siempre en el dominio del Principio de Indeterminación de Heisenberg para la **energía** y el **tiempo**.

El resultado, siempre la superficie externa de la "envoltura" **aparece como una carga eléctrica negativa**:



Dado el carácter dinámico de la "envoltura" de **apantallamiento** y el contexto de **indeterminación** en el que se desarrolla (**número** y **tipo** de pares) **¿puede decirse categóricamente que dos electrones son idénticos?**

La carga del electrón que observamos es la carga «desnuda» apantallada por una nube de pares virtuales electrón-positrón. Este fenómeno nos dice que la carga observada del electrón no es su carga «real», desnuda.

Recordemos que el electrón se mueve siempre rodeado de una nube de pares *electrón-positrón virtuales*. Debido al campo eléctrico del electrón estos pares los podemos imaginar organizándose de tal manera que los positrones virtuales se colocan más cerca de él y los electrones virtuales más lejos, luego nunca vamos a poder medir cuál es la verdadera carga del electrón —su carga desnuda— porque se encuentra parcialmente apantallada por una nube de positrones virtuales.

La carga efectiva del electrón va a ser su carga desnuda más la corrección QED:

$$e_{\text{eff}} = e_0 + \delta_e.$$

Como en el caso de la masa, se esperaba que δ_e fuera mucho menor que e_0 . Sin embargo, sucedía todo lo contrario. La razón de esta divergencia podemos achacársela al principio de Heisenberg, que permite a las partículas virtuales aparecer con cantidades casi ilimitadas de energía.

Así, en ese bullicioso mar de pares *electrón-positrón* la única regla a seguir es que su tiempo de existencia dependa de la energía con la que aparecen: *cuanta más energía, menos tiempo*.

Por tanto, no hay ningún impedimento para que esos pares de partículas virtuales surjan con energías cada vez mayores si acaban devolviéndola en el instante de tiempo apropiado, siguiendo el principio de Heisenberg.

En consecuencia:

1. Los electrones presentan una serie de *propiedades aparentes (carga, masa, espín, momento magnético)* que se mantienen, en general, idénticas para todos ellos (*en toda circunstancia dinámica*).
2. Sin embargo, hay evidencias, de que a niveles más profundos (envoltura de apantallamiento), tienen lugar *múltiples y desconocidos procesos de formación y aniquilación de partículas virtuales* (dinámica interna, $e^+e^- \leftrightarrow \gamma\gamma(\gamma)$), que son imposibles de dilucidar con los conocimientos y experiencias actualmente disponibles: *dos fermiones se transforman en un bosón, y viceversa*.
3. Esta última cuestión nos lleva a *dudar de la posible identidad individual* de estos cuantones que, se supone, *son los más elementales* de los que aparecen en la naturaleza.
4. Así, podría decirse que el término *electrón* sería más bien un *epónimo* que *el nombre de una partícula* concreta.
5. *¿Son totalmente indiscernibles entre sí? ¿El espín es propio del electrón desnudo o de la corona de apantallamiento? ¿Cómo influye el estado de reposo o movimiento en la corona de apantallamiento? ¿Cuál es la composición del “core” interno del electrón? ¿Qué significado tiene que se asimile a un agujero negro de Kerr, con radio de $1,353 \times 10^{-57} \text{m}$?*

