

**100 años de Mecánica Cuántica: desde sus
formulaciones originales hasta nuestros días.**

Revisión histórico conceptual.

Dr. Silvano J. Sferco

IFIS Lioral – SemIFIS 2025 – miércoles 8 de octubre de 2025

|...Nobel Prize in Physics 2025

Summary



Ill. Niklas Elmehed © Nobel
Prize Outreach

John Clarke

Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel
Prize Outreach

Michel H. Devoret

Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel
Prize Outreach

John M. Martinis

Prize share: 1/3



The Nobel Prize in Physics 2025 was awarded jointly to John Clarke, Michel H. Devoret and John M. Martinis "for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit"...

2025: Año Internacional de la Ciencia y Tecnología Cuántica



1900 -1925: cuántos, vieja Teoría Cuántica

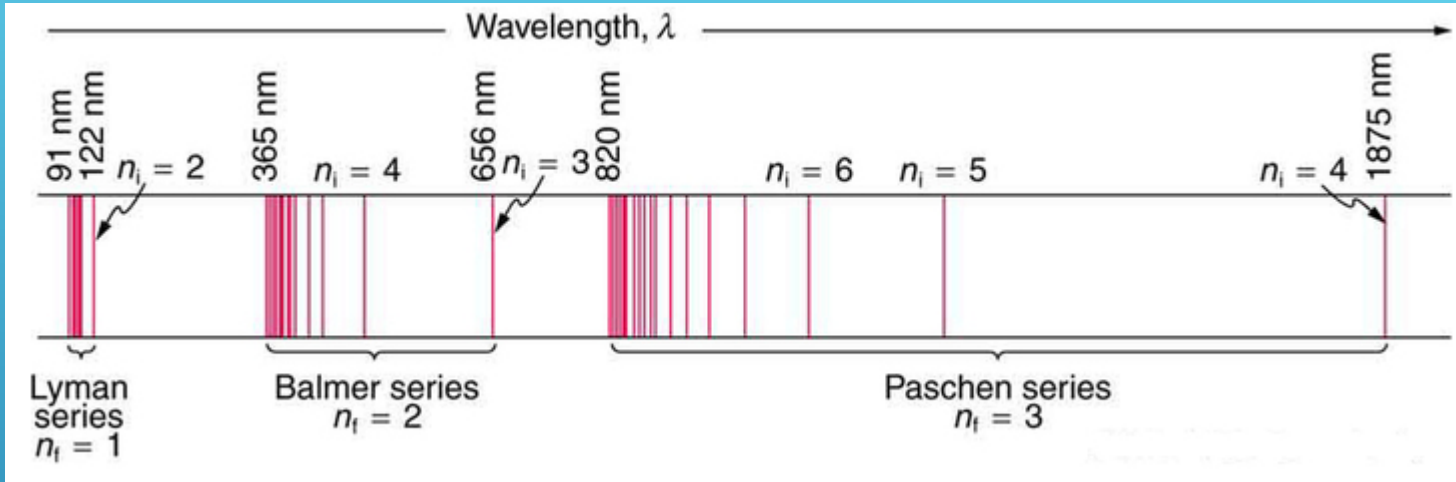
1925 - actualidad: Mecánica Cuántica

Período 1900-1925:



- * 1900 Planck: Radiación del cuerpo negro - cuantos
(osciladores armónicos - intercambiaban energía en forma de múltiplos enteros de un "paquete de energía" elemental $E = h \nu$ con $h = 6,62607 J.s$)
- * 1905 Einstein: Efecto fotoeléctrico - fotones
(radiación EM intercambia energía con la materia, en forma de "cuantos de energía, $E = h \nu$)
- * 1913 Bohr: Espectros de emisión/absorción del átomo de H
(Modelo "planetario" - electrón en órbita circular - impulso angular cuantificado)

Espectro de líneas del H y esquema de niveles.

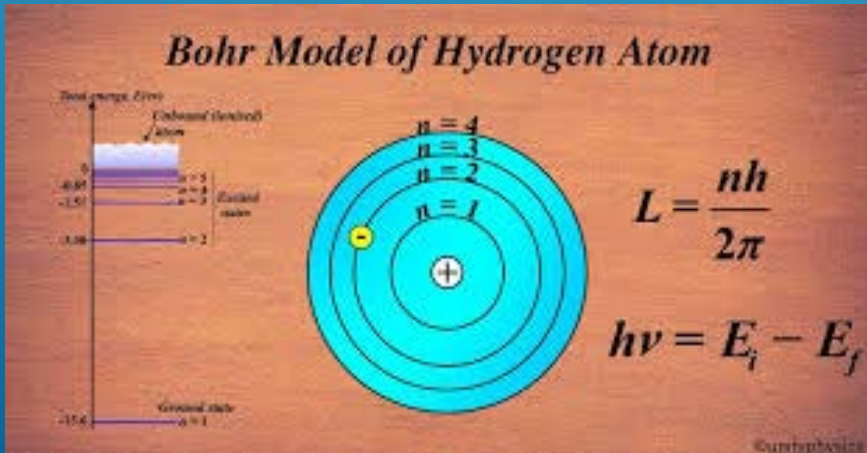


$$\frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (\text{Rydberg})$$

Donde

λ_{vac} es la **longitud de onda** de la luz emitida en el **vacío**,
 R_H es la **constante de Rydberg** para el **hidrógeno**,
 n_1 y n_2 son enteros tal que $n_1 < n_2$,

Modelo de Bohr para H



Período 1900-1925:



- * 1916-1919 Sommerfeld - Extiende el modelo de Bohr - explica estructura fina.
- * 1916 Einstein: Coeficientes de Absorción y Emisión
(introduce la "emisión estimulada", base del laser)
- * 1922 Stern-Gerlach: Experimento para verificar la cuantificación del impulso angular (spin del electrón).
- * 1922 Compton: Fotón no sólo con energía sino con momento p
- * 1924 de Broglie: Dualidad onda-partícula $\lambda = h/p$
- * 1925 Pauli: Principio de Exclusión (usa Bohr-Sommerfeld)
- * 1925 Uhlenbeck-Goudsmit ("spin" del electrón)



Sin embargo, la “vieja” teoría cuántica de Bohr-Sommerfeld, no explicaba:

- * los desdoblamientos espectrales del átomo de H.
- * los espectros de los átomos multielectrónicos,
- * los espectros moleculares.
- * el spin del electrón

*** 1924 Max Born: Se debería reformular la Mecánica, generando una nueva “Mecánica Cuántica”**

Período 1900-1925:



...y, mientras tanto, en ése período, también pasaban otras cosas:

*** 1905 Einstein: Relatividad Especial (o Restringida)**

*** 1915 Einstein: Relatividad General**

La Mecánica Clásica tenía 4 versiones equivalentes:

- (a) La formulación de Newton
- (b) La formulación de Lagrange
- (c) La formulación de **Hamilton**
- (d) La formulación de **Hamilton-Jacobi**

Y se desarrollaron versiones relativistas para cada una de ellas.

Período 1925-1927

Mecánica Cuántica Matricial: Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan, Wolfgang Pauli



- 1) W. Heisenberg (Julio 1925): "Sobre la reinterpretación teórico-cuántica de las relaciones cinemáticas y mecánicas"

Zeitschrift für Physik, Vol. 33, 879-893 (Diciembre 1925)

(Artículo fundacional. Propone solo trabajar con magnitudes observables).

- 2) M. Born y P. Jordan (Septiembre 1925): "Sobre la mecánica cuántica"

- 3) M. Born, W. Heisenberg y P. Jordan (Noviembre 1925) "Sobre la mecánica cuántica II"

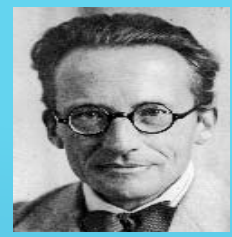
- * Relacionan frecuencias e intensidades con elementos de matriz de frecuencias y de matriz de amplitudes.
- * Usan las ecuaciones clásicas de Hamilton donde, en lugar de x y p consideran una matriz de frecuencias y una matriz de amplitudes.
- * Las ecuaciones de Hamilton son ecuaciones matriciales. (Todo en 1D)

- 4) W. Pauli (Enero 1926): "Sobre el espectro del hidrógeno desde la (publica marzo 1926) perspectiva de la nueva mecánica cuántica"
(Resuelve el átomo de hidrógeno (3D) dentro de la mecánica matricial)



Período 1925-1927

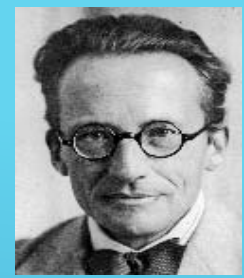
Mecánica Cuántica Ondulatoria: Erwin Schrödinger



1. E. Schrödinger (Enero 1926) "La cuantificación como un problema de autovalores. Parte I"

Annalen der Physik, Vol. 79, págs. 361-376 (Marzo 1926)

- * Analogía variacional con el Principio de Fermat (eikonal)
- * Usa la ecuación de Hamilton-Jacobi.
- * Ecuación de onda independiente del tiempo $H\Psi = E\Psi$.
- * Introduce $p \rightarrow -i \left(\frac{h}{2\pi} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)$. Cuantización como problema de autovalores.
- * Resuelve los niveles de energía del átomo de H.



Mecánica Cuántica Ondulatoria: Erwin Schrödinger

2. E. Schrödinger (Febrero 1926) "La cuantificación como un problema de autovalores. Parte II"

Annalen der Physik, Vol. 79, págs. 489-527 (Marzo 1926)

- * Resuelve las autofunciones del átomo de H (coordenadas esféricas)
- * Discute "degeneración de niveles" y "normalización" de la función de onda (no habla de probabilidades - lo hará Max Born en poco tiempo)

Mecánica Cuántica Ondulatoria: Erwin Schrödinger



3. E. Schrödinger "Sobre la relación entre la mecánica cuántica de Heisenberg-Born-Jordan y la mía propia"

Annalen der Physik, Vol. 79, págs. 734-756 (1926)

* A pesar de ser "formulaciones totalmente diferentes" conducen a resultados iguales.

* Se unificaron las dos teorías !

La Mecánica Matricial era de difícil implementación.

La Mecánica Ondulatoria resultó mucho más manejable.



Mecánica Cuántica Ondulatoria: Erwin Schrödinger

4. E. Schrödinger "La cuantificación como un problema de autovalores Parte III"

Annalen der Physik, Vol. 80, págs. 437-490 (1926)

- * Propone la Teoría de perturbaciones y la aplica al Efecto Stark.
- * Permite identificación de fenómenos espectroscópicos en términos cuánticos.
- * Enfatiza la equivalencia con la Mecánica Matricial



Mecánica Cuántica Ondulatoria: Erwin Schrödinger

5. E. Schrödinger "La cuantificación como un problema de autovalores. Parte IV"

Annalen der Physik, Vol. 81, págs. 109-139 (1926)

- * Introduce su ecuación dependiente del tiempo:
$$H\Psi = i \left(\frac{h}{2\pi} \right) \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$
- * Interpreta $|\Psi|^2$ como una distribución de carga eléctrica distribuida continuamente en el espacio.
- * Principio de Superposición lineal
- * Demuestra que si $h \rightarrow 0$ su ecuación tiende a la ecuación de Hamilton-Jacobi.

Período 1925-1927

Mecánica Cuántica Ondulatoria: Max Born



M. Born: "Sobre la mecánica cuántica de los procesos de colisión"
Zeitschrift für Physik, 37, 863-867 (junio 1926).

- * Formula la interpretación probabilística de la función de onda.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV < \infty$$

(Schrödinger)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV = 1$$

(Born)

- * Interpreta $|\Psi(\mathbf{x})|^2 dV$ como probabilidad de encontrar a la partícula en un volumen dV centrado en el punto $\mathbf{x}$.

Período 1925-1927

Mecánica Cuántica de Dirac: Paul A.M. Dirac



Publica 5 papers entre diciembre 1925 y enero 1927 donde:

- Reescribe (con otro lenguaje) la Mecánica Cuántica Matricial.
- Relaciona el corchete de Poisson clásico con el conmutador cuántico
- Deduce su ecuación cuántica a partir de la M. Clásica usando la equivalencia anterior ("representación de Heisenberg")
- Resuelve los niveles de energía del átomo de H (marzo 1926)
- Muestra que tanto la ecuación de Schrödinger y la de Heisenberg, son diferentes "representaciones" de su teoría (que es más abstracta). Publicado: **enero 1927**

Período 1925-1927

Mecánica Cuántica de Dirac: Paul A.M. Dirac



Publica otro paper en marzo 1927, donde introduce operadores de creación y destrucción (1er trabajo con “campos cuánticos” y primer paso de una “Electrodinámica Cuántica”).

- Lo aplica al campo electromagnético y considerando el acoplamiento entre el átomo y la radiación y **explica** la “Emisión estimulada” introducida por Einstein (1916)



Otros Trabajos relevantes del período :

Pauli (junio 1926) - Reformula su Principio de Exclusión incluyendo el spin. Usando Schrödinger muestra que el "acoplamiento spin-órbita", explica los dobletes espectrales del átomo de H (estructura fina).



Pauli (enero 1927) - Teoría Cuántica del spin (Ecuación de Pauli usando "espinores" de dos componentes. Matrices de spin de Pauli. Explica el experimento de Stern-Gerlach).

Heisenberg (mayo 1927) - Principio de Incertidumbre

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$



"No es que no sepamos la posición y el momento; es que no existen simultáneamente con precisión definida."

5ta Conferencia Solvay: "Electrones y Fotones", Bruselas, 24 al 27 octubre 1927



5ta Conferencia Solvay: "Electrones y Fotones", Bruselas, 24 al 27 octubre 1927



- * La mecánica cuántica estaba formalmente establecida: los 3 formalismos son equivalentes entre sí.
- * M. Born había dado la interpretación probabilística de la función de onda (1926).
- * W.Heisenberg había formulado el principio de incertidumbre (marzo de 1927).

Problemas conceptuales que se discutieron:

- + Dualidad onda-partícula: ¿por qué a veces onda y a veces partícula?
- + Interpretación probabilística de la función de onda: ¿No será que la M.Cuántica está incompleta y por ello los resultados son probabilísticos?
- + Medición y “conocimiento de la realidad física” ¿Qué significa “medir”?

5ta Conferencia Solvay: "Electrones y Fotones", Bruselas, 24 al 27 octubre 1927



1□. Principio de complementariedad (N. Bohr)

La dualidad onda-partícula de la materia y la luz se entiende como **complementaria**:

Las **propiedades ondulatorias** y **propiedades corpusculares** son mutuamente excluyentes en una medición única, pero **ambas necesarias** para una descripción completa.

- **Interpretación:** No tiene sentido hablar de "trayectoria exacta" y "patrón de interferencia" al mismo tiempo. La física cuántica describe lo **que podemos medir**, no una realidad objetiva independiente.



2. Interpretación probabilística (M. Born)

La **función de onda ψ** describe la **probabilidad de resultados de mediciones**, no una propiedad física continua de la partícula.

La conferencia reafirmó la **interpretación probabilística de Born**:



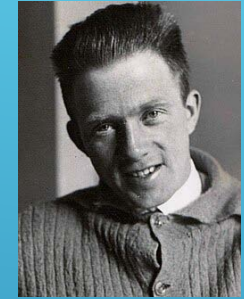
5ta Conferencia Solvay: "Electrones y Fotones", Bruselas, 24 al 27 octubre 1927



3. Principio de incertidumbre (W. Heisenberg)

No es un límite de precisión tecnológica, sino un límite fundamental de la naturaleza.

Se incluye una nueva relación de incerteza: $\Delta E \Delta t \geq \hbar$



4□ Realidad y Acto de medición

Toda observación implica **interacción con un aparato**, lo que determina qué propiedades pueden ser conocidas simultáneamente.

El acto de medición no revela una propiedad preexistente, sino que define el resultado observado.

La mecánica cuántica no describe la "realidad en sí", sino **los resultados posibles de un experimento.**

No existe una realidad cuántica independiente del acto de medir.

Debates durante, y posteriores a la 5ta Conferencia Solvay



Interpretación de Copenhague (Bohr, Heisenberg, Pauli, Born)

1. La función de onda describe nuestro conocimiento, no una realidad objetiva.
(Puede estar en una "superposición de estados" al mismo tiempo)
2. Las mediciones definen los fenómenos observables.
(la función de onda "colapsa" al autovector del autovalor medido)
3. Los resultados son probabilísticos, no deterministas.
4. Los conceptos clásicos son indispensables para describir resultados experimentales.
5. La complementariedad sustituye a la causalidad clásica.

Einstein, Schrödinger, de Broglie están en desacuerdo. Piensan que debe existir una "realidad" independiente del observador. Reconocen el valor predictivo de la Mecánica Cuántica, pero la consideran incompleta (y por eso es probabilística). Seguirán buscando una teoría más "realista".



El gato de Schrödinger (Schrödinger-1935)

En 1935, publica el experimento mental del gato encerrado (que no se sabe si está vivo o muerto). Sólo la medición (es decir, la apertura de la caja), permite saber el "estado" del gato.

Si aceptamos la superposición cuántica como descripción completa de la realidad, debemos aceptar un mundo donde los gatos están "vivos y muertos" simultáneamente.

El absurdo indica que la teoría cuántica o su interpretación están incompletas:

debe haber algo más que determine qué sucede antes o independientemente de la observación





Paradoja EPR (correlaciones de partículas separadas) (Einstein, Podolsky, Rosen-1935)

Experimento mental, concluyendo que: "La descripción cuántica no puede considerarse completa; debe haber variables adicionales ('variables ocultas') que determinen los resultados físicos reales."

Schrödinger-1935, denomina "entrelazamiento" a esa correlación, y reconoce que es una consecuencia esencial y no eliminable de la Mecánica Cuántica.

Entrelazamiento cuántico (continuación)



Teorema de Bell (John S. Bell-1964) permite distinguir entre teorías con **variables ocultas locales** (como deseaba Einstein) y la **Mecánica Cuántica**. Demostró que ciertas correlaciones entre partículas entrelazadas, violan la “**desigualdad de Bell**”



□ Así, el *entrelazamiento* se vuelve comprobable experimentalmente !

Detecciones experimentales de la existencia del entrelazamiento cuántico:

*Clauser et al. (1972) - Aspect et al. (1981-1982) - Zeilinger et al. (1998) -
- Hensen et al. (2015) - Giustina et al. (2015) - Shalm et al. (2015)*

* Se considera experimentalmente probada la **existencia del entrelazamiento cuántico** □ **Premio Nobel de Física 2022**

Aplicaciones: Criptografía cuántica
Computación cuántica.



Problema: la Mecánica Cuántica no era compatible con la Relatividad Especial



Paul Dirac (dos papers 1928) - Ecuación relativista del electrón y su extensión a teoría de campos.

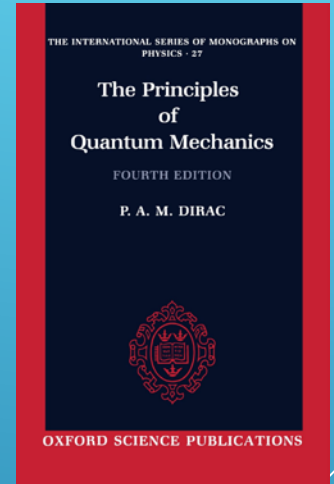
Ecuación de Dirac:

- * Une la Mecánica Cuántica con la Relatividad Especial (para satisfacer las transformaciones de Lorentz, necesita incorporar espinores de 4 componentes).
- * Aparición natural del spin $1/2$ del electrón.
- Estados de energía negativa (en 1930 interpreta como la antipartícula del electrón) (el positrón fue detectado experimentalmente en 1932)
- * Explica naturalmente la estructura fina del átomo de H.
- * Conserva la interpretación probabilística.

Paul Dirac (1930) - "The Principles of Quantum Mechanics" Oxford University Press

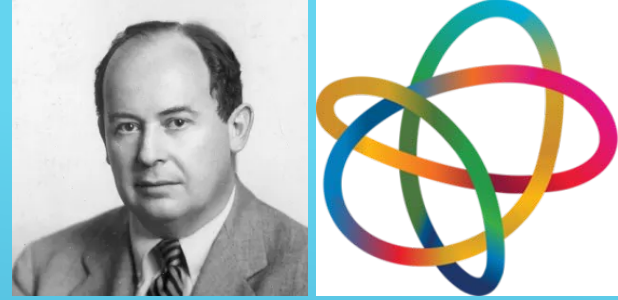


- * Primer libro sobre Mecánica Cuántica (primera exposición sistemática del formalismo cuántico moderno)
- * Introduce el formalismo de bra y kets: $\langle \psi |$ y $|\psi \rangle$
- * Introduce el producto interno y la notación de Dirac
- * Introduce la δ de Dirac (para tratar con estados continuos)
- * Desarrolla su versión de la cuántica en términos de estados "abstractos" $|\psi \rangle$, tal que pueden escribirse en términos de la Representación de Schrödinger o de Heisenberg.



John von Neumann (1932) -

"Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik"
(Fundamentos Matemáticos de la Mecánica Cuántica),
Springer verlag, 1932.



- * **Formulación matemática rigurosa de la MC en lenguaje de vectores (funciones) y operadores de un espacio vectorial de Hilbert.**
- * **Demuestra que la Mecánica Cuántica no Relativista (y sin spin), se puede obtener a partir de 5 Postulados.**
- * **Junto con los aportes de Dirac (en su libro), define el lenguaje matemático que se usará, de aquí en adelante, para la Mecánica Cuántica.**

Postulados de la Mecánica Cuántica no Relativista



1) Estado físico de un sistema descrito por una "función de onda" ψ que pertenece al espacio vectorial de Hilbert de las funciones de cuadrado integrable. Contienen toda la información que es posible extraer del sistema.

2) A cada "observable" físico A , le corresponde un "operador hermítico" $\hat{A}$ en el espacio de Hilbert. Los autovalores de $\hat{A}$, que llamaremos a_n , son los valores físicos posibles que la magnitud A puede tomar.

3) La evolución temporal del sistema está descrita por la ecuación de Schrödinger

$$\hat{H} \psi = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{siendo } \hat{H} \text{ el operador Hamiltoniano del sistema.}$$

4) Si el sistema está en un estado correspondiente a la función de onda ψ , el valor medio de una serie de mediciones de una magnitud física F en dicho estado será:

$$\langle \mathbf{F} \rangle = \frac{(\psi, \hat{F} \psi)}{(\psi, \psi)}$$

5) Los operadores que representan a las coordenadas y los momentos en el espacio de Hilbert satisfacen las reglas canónicas de conmutación:

$$[\hat{x}_i, \hat{p}_j] = i \hbar \delta_{ij} \hat{I}$$

Segunda Cuantificación - Teoría Cuántica de Campos



Primera cuantificación (lo que vimos hasta ahora):

- * $\psi(x)$ es una "onda de probabilidad" para $N=\text{fijo}$.
- * No puede tratar casos de $N=\text{variable}$.

Dirac (1927): (electrón no relativista)+(cuantificación de los modos del campo EM): operadores de creación y destrucción de fotones. Trata procesos de Absorción y Emisión.

Dirac (1930): (electrón relativista)+(cuantificación del campo de Dirac): operadores de creación y destrucción de electrones y positrones ($\hat{\psi}^\dagger(x)$, $\hat{\psi}(x)$). Trata procesos de Creación y Aniquilación de fermiones. Problemas $N= \text{variable}$.

Esto es la 2da cuantificación: $\psi(x)$ ya no es más una onda de probabilidad, sino operadores que crean o destruyen fermiones (de spin $1/2$). Operadores que obedecen a la ecuación de Dirac: por eso 2da cuantificación.

Teoría Cuántica de Campos



Visualización intuitiva del **Campo de Dirac**:

Campo de Dirac como un "medio cuántico" extendido en todo el espacio, lleno de excitaciones posibles (modos).

- Cuando el campo **se excita en un punto del espacio**, aparece un **electrón**.
- Cuando el campo **no tiene excitaciones**, estamos en el **vacío**.
- Cuando se excita de otra forma (la "parte de energía negativa" del campo), aparece un **positrón**.

Así, las partículas y antipartículas son excitaciones locales diferentes de un mismo campo.

El campo de Dirac está "en todas partes", y los electrones o positrones son solo **ondas cuánticas localizadas** que viajan en él.

Excitaciones del campo EM: **fotones**

Excitaciones del campo de Dirac: **electrones y positrones**

Teorías Cuánticas de Campos (actuales)



****Electrodinámica Cuántica (QED, 1946-1950):** S.I. Tomonaga,

J. Schwinger, R. Feynman, F.J. Dyson

* Incluye Renormalización. * Corrimiento Lamb. * Momento magnético anómalo del electrón

****Teoría Electrodébil (1961-1968):** S. Glashow S. Weinberg, A. Salam

* Incluye Renormalización. * Decaimiento beta. * Unifica la interacción débil con la EM

****Cromodinámica Cuántica (1964-1975):** Gell-Mann, Fritzsche,

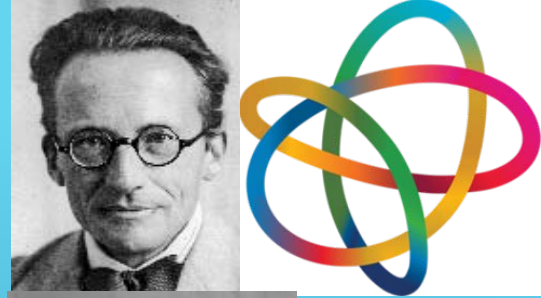
Gross, Wilczek, Politzer, 't Hooft

* Incluye Renormalización. * Interacciones fuertes entre quarks

****Modelo Estándar (1960-1975):** por los dos anteriores.

* Explica todas las interacciones conocidas (excepto la gravedad)

La ecuación de Schrödinger (MC no relativista), será la más utilizada para átomos, moléculas y sólidos.



Será utilizada para N electrones interactuantes, utilizando La aproximación de Hartree-Fock, y una variedad de aproximaciones que la simplifican o la extienden.



R. Feynmann (1942), en su Tesis de doctorado, desarrolla una nueva formulación de la MC: la versión de "Path integrals"



- Versión a partir de la variación de una "Acción"
- Versión equivalente a la de Schrödinger.

W. Kohn (1964) Teoría de la Funcional Densidad (DFT)
1965: las ecuaciones de Kohn-Sham
Premio Nobel de Química en 1998.

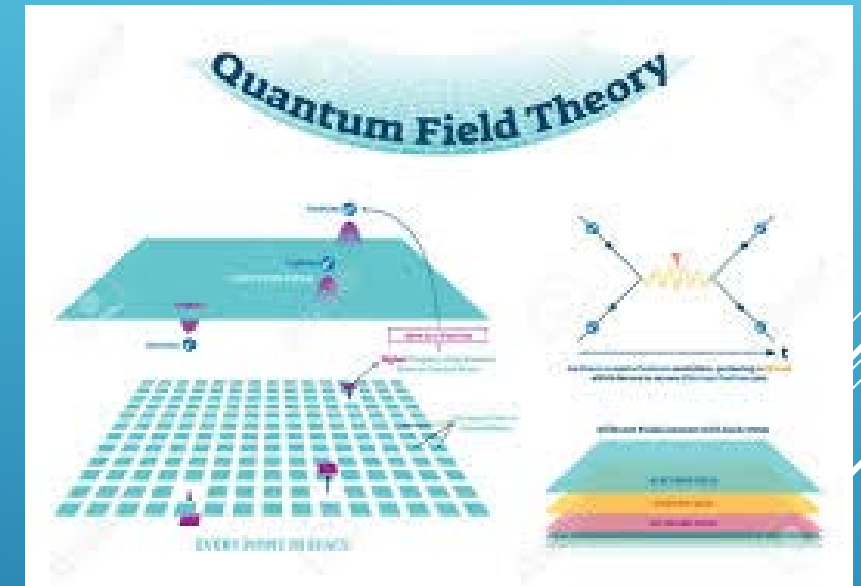
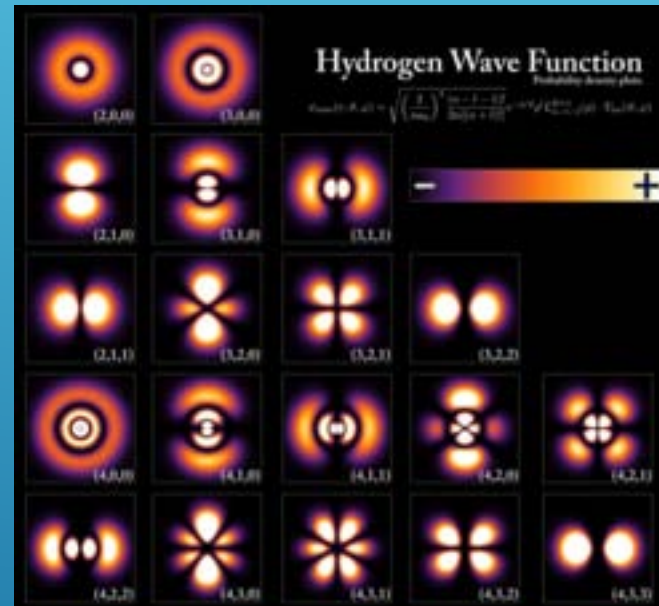
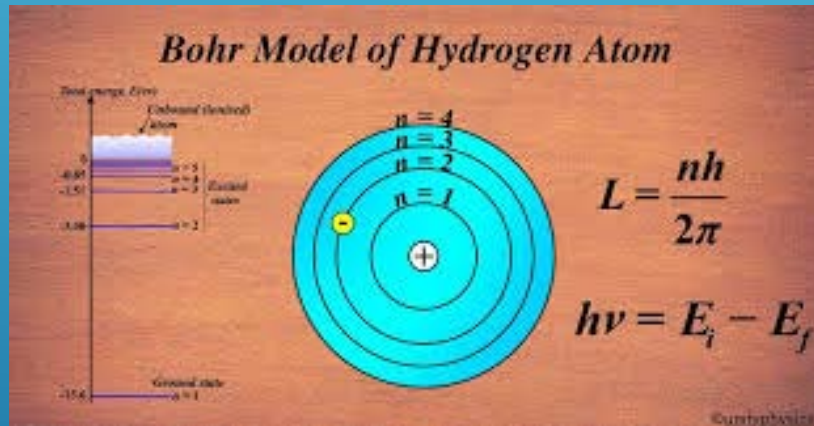


Reflexiones finales:



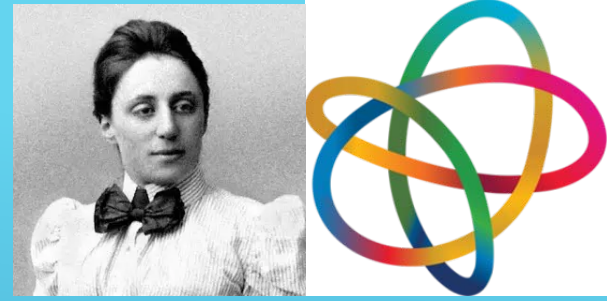
¿Realidad? o ¿sólo “modelos” convenientes de la realidad?

¿diferentes modelos para cada escala de tamaño?



Ver en youtube: La Teoría cuántica de Campos, ilustrada por ScienceClic español. (15')
<https://www.youtube.com/watch?v=HNmQJI3RI8E&t=459s>

Teorema de Noether (Emmy Noether-1918)



A toda simetría continua diferenciable de la Acción de un sistema físico le corresponde una ley de conservación.

En otras palabras:
cada simetría $\rightarrow$ una cantidad conservada.

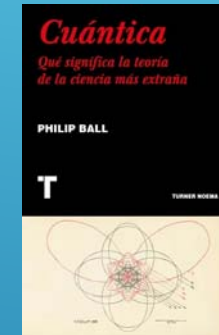
Simetría	Cantidad conservada (ley de conservación)
Invarianza temporal	Energía
Invarianza espacial (traslaciones)	Momento lineal
Invarianza de rotación	Momento angular
Invarianza de fase (en QED)	Carga eléctrica

Bibliografía:

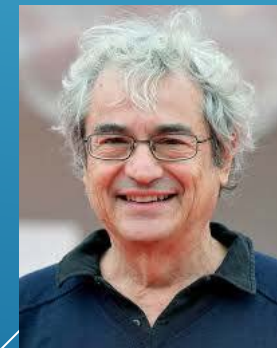
1) "Historia de la Física Cuántica", 3 volúmenes
José Manuel Sanchez Ron, Planeta, 2025.



2) "Cuántica. Qué significa la teoría de la ciencia más extraña". Philip Ball, Turner, 2018.



3) "Helgoland". Carlo Rovelli, Anagrama, 2020.



4) Papers originales y libros de cuántica

5) Chat Gpt (con cuidado, verificar información!)



Muchas Gracias !

