

Mecánica Cuántica y Computación Cuántica

J. F. G. H.¹

¹Space-time Foundation, Eccentric Multiverse of Madness
Quantum TimeLord Virtual Academy

2023

Hacia la Mecánica Cuántica

- La fórmula de Bohr para el átomo de hidrógeno no captura otros efectos cuánticos, como el efecto Stark, el efecto Zeeman, el efecto Zeeman anómalo, ni explica el espín del electrón ni otras partículas subatómicas.
- Se intentó una corrección relativista del modelo de Bohr, incluyendo órbitas elípticas, mediante la introducción de números cuánticos adicionales, mediante las llamadas variables acción-ángulo de la Mecánica Clásica, corrección llamada de Bohr-Sommerfeld.

Así, se tenían:

$$\oint p_r dr = n\hbar \quad \oint p_\varphi d\varphi = n_\varphi\hbar \quad \oint p_\theta d\theta = n_\theta\hbar \quad (1)$$

Pero esto tampoco daba cuenta del espín del electrón de forma obvia o natural, aunque sí tuvo éxitos parciales rederivando correcciones relativistas del átomo de hidrógeno.

Hacia la Mecánica Cuántica(II)

Louis de Broglie introdujo la dualidad onda-partícula. Toda partícula tiene una longitud de onda asociada, no es solamente que las ondas se pueden comportar como partículas, las propias partículas son también ondas bajo ciertas condiciones. Esta dualidad, derivada por de Broglie en forma relativista, adquiere la forma simple:

$$p = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{Mv} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2)$$

Posteriormente, Heisenberg introdujo la llamada mecánica matricial, y su principio de indeterminación, que indica que no puede conocerse simultáneamente y con precisión los valores de dos observables conjugados:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2} \quad (4)$$

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} \langle | [A, B] | \rangle \quad (5)$$

Hacia la Mecánica Cuántica(III)

Finalmente, Schrödinger y Dirac, introdujeron sus ecuaciones cuánticas para los átomos:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x, y, z, t) \right) \Psi = i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = E\Psi \quad (6)$$

$$(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu + i\hbar e\gamma^\mu A_\mu + mc)\Psi = (i\hbar\boldsymbol{\gamma} \cdot \boldsymbol{D} + mc)\Psi = 0 \quad (7)$$

- De estas ecuaciones, resueltas numéricamente, se obtienen actualmente las estructuras espectrales de átomos, moléculas y partículas subatómicas.
- El objeto fundamental de la Física Cuántica es una función de onda o vector de estado Ψ que es en general un número complejo $\Psi \in \mathbb{C}$, $\Psi = a + bi$, con lo que la interpretación real de la función de onda debe ser entendida de otra forma.

Hacia la Mecánica Cuántica(IV)

- Max Born, introdujo la idea de que la función de onda es una amplitud de probabilidad, y no es medible, pero el cuadrado de la función de onda, o más precisamente el módulo al cuadrado, da la probabilidad de encontrar a la partícula en el espacio-tiempo.
- La Física Cuántica, extendida a sistemas relativistas, convierte la función de onda en una superposición de ondas sobre la que actúan operadores cuánticos de creación y destrucción de partículas.
- Es la llamada Teoría Cuántica Relativista Especial o Teoría Cuántica de Campos invariantes, en su versión más refinada conocida hoy día como Modelo Estándar de la Física de partícula subatómica o Física de Altas Energía.

Fenómenos cuánticos que no tienen explicación clásica:

- Espín del electrón y otros números cuánticos de partículas subatómicas.
- En la Física Atómica: los efectos Zeeman normal, Zeeman anómalo, el efecto Stark, la interacción espín-órbita, el desplazamiento Lamb,...
- La superposición cuántica de estados “indefinidos”.
- El entrelazamiento cuántico.
- Estados cuánticos exóticos de la materia: condensados de Bose-Einstein, condensados fermiónicos, aislantes y superconductores topológicos, aniones (partículas con espín arbitrario), superconductividad, superfluidez, cristales de tiempo, puntos cuánticos,...
- El efecto Zenón cuántico y el efecto anti-Zenón cuántico.
- La decoherencia cuántica.

Mecánica Cuántica y más allá(II)

- La creación de pares de partículas-antipartículas (y la predicción de la antimateria).
- La creación de pares en campos fuertes.
- El efecto Hall cuántico y Hall cuántico fraccional.
- El colapso de la función de onda o reducción del vector de estado (interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica).
- Las oscilaciones de neutrinos y quarks.
- La desintegración radioactiva.
- Procesos de decaimiento y penetración de partículas en barreras impenetrables clásicamente (efecto túnel cuántico).

Mecánica Cuántica y más allá(III)

- El mass-gap de las teorías Yang-Mills y la masa cuántica de las partículas en QCD.
- La ruptura espontánea de simetría.
- La explicación de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos.
- La estructura y brillo de las estrellas.
- La fisión y fusión nuclear.
- Interconversión de materia y energía en partículas.
- El plasma de quark-gluones y otros tipos de plasma.
- El Modelo Estándar de partículas elementales.
- La termodinámica cuántica y evaporación de los agujeros negros.
- Las teorías de supercuerdas/teoría M, F, S,...

Mecánica Cuántica y más allá(IV)

Cosas que la Mecánica Cuántica no puede explicar aún:

- Por qué hay algo en vez de nada en el Universo.
- Por qué las masas y acoplos de las partículas son los que son.
- La gravedad (no hay aún gravedad cuántica, circa 2023).
- La naturaleza de las singularidades espacio-tiempo.
- El problema de la información de los agujeros negros.
- Si es posible viajar en el tiempo (existencia de CTCs).
- Si es posible crear una TARDIS.
- Si hay un Multiverso (no se sabe aún...).
- Si hay agujeros de gusano estables en el Universo.
- Si hay universos paralelos y otras dimensiones.
- El origen y final del Universo que vemos.
- Si podemos superar tramposamente la velocidad de la luz en el vacío.

Principio de superposición

- El principio de superposición en Física Clásica existe para partículas, ondas (no lineales) y campos:

$$\vec{r}(t) = \sum_i a_i \vec{e}_i$$

$$y_t(x, t) = \sum_i y_i$$

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

$$\vec{g} = \sum_i \vec{g}_i$$

- El principio de superposición de la Mecánica Cuántica es similar pero NO idéntico:

$$\Psi = \sum_i c_i \phi_i$$

Principio de superposición(II)

Las diferencias son:

- 1 Los coeficientes son números complejos, que se interpretan como amplitudes de probabilidad.
- 2 Los coeficientes, mientras NO se miden, son indefinidos.
- 3 Cuando son medidos, proyectamos la función de onda (o la colapsamos en el lenguaje de la interpretación de Copenhague) sobre una dirección o una base del observador.

Origen histórico de la Mecánica Cuántica:

- Teoría cuántica original y fundamentos: 1925-1935. Mecánica matricial (Born, Heisenberg, Jordan, 1925). Mecánica ondulatoria (Schrödinger 1926). Interpretación probabilística (Max Born 1926).
- Principio de indeterminación o incertidumbre (Heisenberg 1927).
- Complementariedad: Bohr 1927.
- Entrelazamiento (entanglement en inglés): Schrödinger 1935.
- Completitud, realismo no local (Einstein-Podolski-Rosen), 1935-1945. No separabilidad de sistemas multipartículas.

Teoría cuántica para un qubit o quantum bit

Vocabulario cuántico:

- 1 Observables.
- 2 Medidas.
- 3 Medidas proyectivas.
- 4 Medidas generalizadas.
- 5 Dinámica de qubits y más generalmente qudits.
- 6 Puertas cuánticas (quantum gates).
- 7 Puertas universales.
- 8 Entrelazamiento de sistemas multipartícula.
- 9 No localidad y no separabilidad cuántica.
- 10 Contextualidad cuántica y conjuntos completos de observables “que conmutan” (localmente).

Qubits, qubits y qudits

Qubits y qudits

Para un sistema de 2 niveles o más generalmente de d -niveles:

$$|\Psi\rangle = \sum_{i=0}^{d-1} c_i |i\rangle = c^0 |0\rangle + \dots + c^{d-1} |d-1\rangle \quad (\text{qdit, d-level q-state})$$

Qubits

$$|\Psi\rangle = \sum_{i=0}^{\infty} c^i |i\rangle = c^0 |0\rangle + \dots + c^d |d\rangle + \dots \quad (\text{q}\infty\text{it, quantum field})$$

Observación: un observador puede medir y seleccionar o “preparar” un estado cuántico seleccionando de las infinitas posibilidades de un vector cuántica una particular. Y luego determinar su evolución temporal de forma DETERMINISTA.

Observables en Física Clásica

- En Mecánica Clásica: predecimos las propiedades de sistemas físicos y podemos predecir propiedades (incluso en sistemas no lineales).
- Excepción singular: fenómenos no lineales clásicos y ondas no lineales (solitones), caos determinista.
- Ejemplos de sistemas clásicos predecibles: eclipses, líneas espectrales de los átomos, órbitas planetarias, . . .
- Los observables clásicos corresponden a FUNCIONES definidas sobre un espacio abstracto de configuración (Mecánica de Newton o más generalmente la Mecánica Lagrangiana), o bien el llamado espacio de fases (Mecánica Hamiltoniana).
- Los observables clásicos son “puntos” de un espacio de configuración o de un espacio de fases. Ejemplo: $x(t), v(t), p(t), \dots$
- Evolución temporal: resolución de ecuaciones de Newton (generalmente integración), ecuaciones de Lagrange o las ecuaciones de Hamilton.

$$\frac{dA}{dt} = \{A, H\}$$

Observables en Física Cuántica

- 1 En teoría cuántica, los observables corresponden a “operadores hermíticos” en un espacio de Hilbert \mathcal{H} .
- 2 Generalmente, los observables tienen o bien una representación matricial (Dirac, Heisenberg, . . .) o bien una representación como un operador diferencial o integral
- 3 Estados: evolucionan con la ecuación de Schrödinger. Operadores “constantes”.
- 4 Observables y operadores: pueden también evolucionar (imagen o representación de Heisenberg) y se mantiene constante la función de onda.
- 5 Ejemplos de operadores cuánticos: operador posición $X = \hat{x}$, $P = -i\hbar\partial_j$, $E = i\hbar\partial_t$, matrices de espín (espín 1/2, matrices de Pauli).
- 6 Los observables son los denominados autovalores de los operadores, estén o no en formulación matricial.

Algoritmos cuánticos(I)

- Hay dos tipos de algoritmos cuánticos: deterministas y probabilísticos.
- La computación cuántica está aún en sus primeros pasos.

Algoritmos deterministas cuánticos:

- ➊ Deutsch: distinguir funciones constantes y “balanceadas” de dos variables binarias en una consulta.
- ➋ Deutsch-Josza: distinguir funciones constantes y “balanceadas” de N -variables binarias en una consulta.
- ➌ Bernstein-Vazirani: determinar una función de $2N$ funciones lineales en una búsqueda o consulta.

Algoritmos probabilísticos:

- ➊ Simon: encontrar el periodo de una función de N variables binarias tras un número de consultas polinómico de orden N o mayor.
- ➋ Grover: encontrar N ítems mediante \sqrt{N} subítems o consultas (el mejor procedimiento clásico solo puede ser de orden N).
- ➌ Shor: factorizar números enteros en un número de pasos polinómicos (el mejor método clásico es exponencialmente largo en tiempo).

Tipos de ordenadores cuánticos

- Gate-based ion trap processors (procesadores de trampas de iones).
- Gate-based superconducting processors (procesadores de puertas basados en superconductores).
- Photonic processors. Procesadores fotónicos (computación cuántica y fotónica híbrida). A quantum photonic processor is a device that manipulates light for computations.
- Procesadores de átomos neutros (neutral atom processors).
- Rydberg atom processors (procesadores de átomos de Rydberg).
- Quantum annealers (recocidos cuánticos).
- Topological quantum computers (ordenadores cuánticos topológicos).
- ...

Lenguajes de programación cuánticos

Top 5 Quantum Programming Languages:

- Python (Actual Quantum Programming Language) ...
- Qiskit (Open-source Programming Tool) ...
- Ocean, TM, licenciado y privativo (Quantum Computing Programming Suite) ...
- Q# (Quantum Computing Programming Algorithm) ...
- Cirq (Google AI Programming Language).
- Quantum++ is a modern general-purpose multi-threaded quantum computing library.
- QCL (Quantum Computer Language) is the most advanced implemented quantum programming language. Its syntax resembles syntax of the C programming.
- Haskell and OCaml Haskell and OCaml are both functional languages.

Ciencia de la información cuántica

- Quantum Information Science. Ciencia de la Información Cuántica.
- Quantum sensing. Improving sensitivity and spatial resolution. Sensores cuánticos. Mejora espacial y de sensibilidad a la clásica.
- Quantum cryptography. Criptografía cuántica. Quantum teleport. Teleportación cuántica.
- Privacy founded on fundamental laws of quantum physics. Leyes fundamentales de la química basadas en la privacidad.
- Quantum networking. Distributing quantumness around the world. Redes e internet cuánticas.
- Quantum simulation. Simulación cuántica.
- Probes of exotic quantum many-body phenomena. Fenómenos cuánticos macroscópicos.
- Quantum computing. Speeding up solutions to hard problems. Computación cuántica. Aceleración de soluciones a problemas difíciles.
- Quantum information concepts. Conceptos de información cuánticos. Entrelazamiento, corrección de errores, complejidad, . . . Entanglement, error correction, complexity, . . .

Doctor Strange in the Multiverse of Madness!

