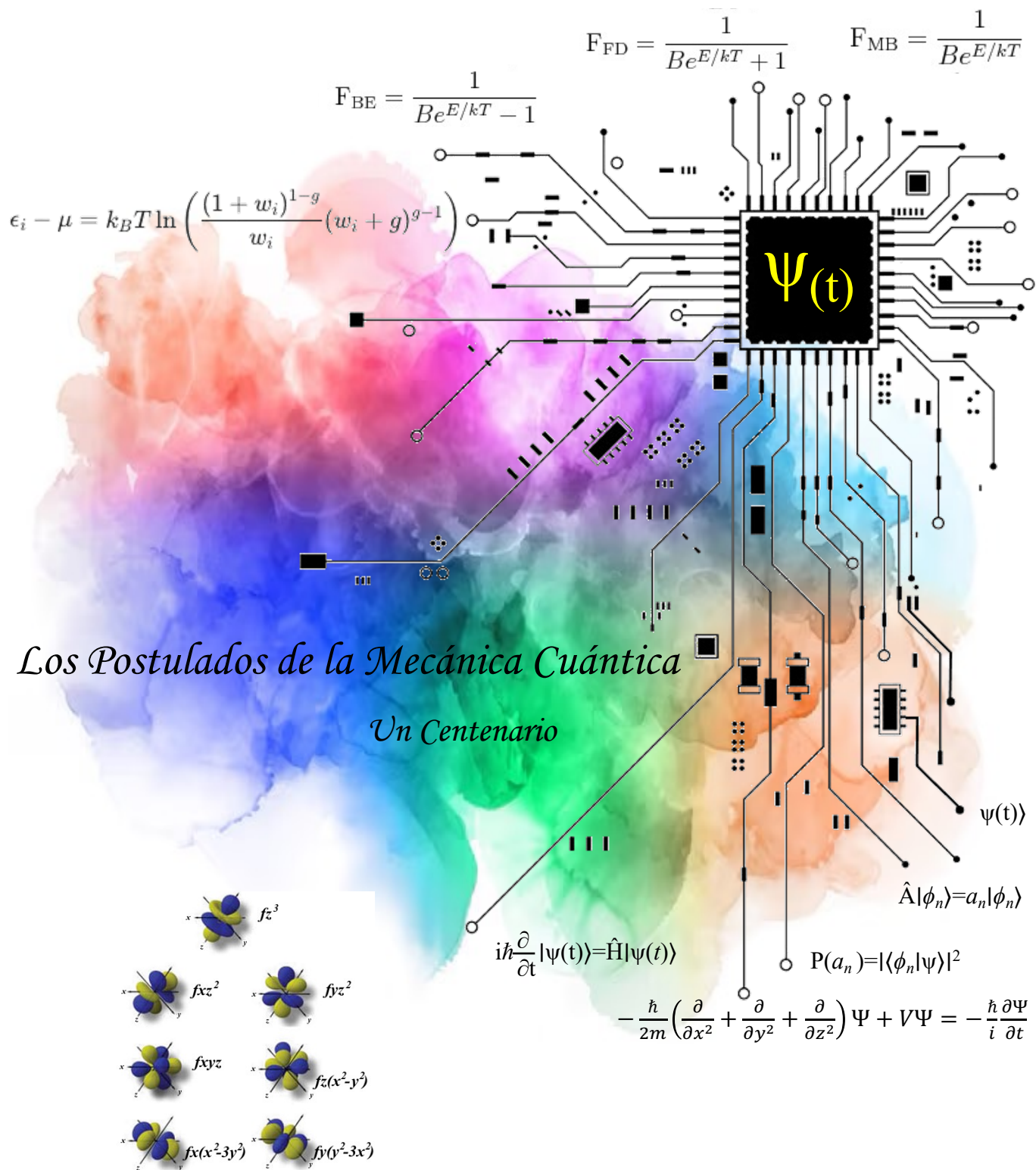
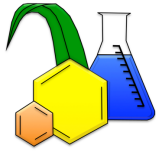
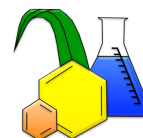




Por Pedro Augusto Mejías



Los Postulados de la Mecánica Cuántica



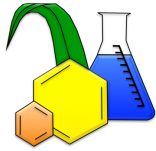
Los Postulados de la Mecánica Cuántica

A Vladimiro Mujica

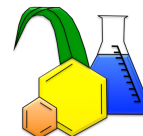
19/Sep/1954 - 24/Abr/2026

Quien fuera mi profesor de mecánica
estadística en la Escuela de Química de la
Universidad Central de Venezuela

In memoriam



Los Postulados de la Mecánica Cuántica



Prefacio a la Versión Actualizada (2026)

En 1990 siendo estudiante del curso de Física IV en la Escuela de Química en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela que abarcaba dentro de su pensum a la mecánica cuántica, me fue asignada la tarea de elaborar un trabajo sobre las bases teóricas de esta disciplina.

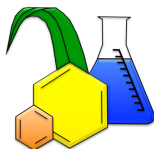
La elaboración del trabajo me llevó a la Biblioteca Alonso Gamero de la Facultad a revisar una serie de artículos especializados sobre el tema donde me pude asomar de una manera rasante a todo el universo que estaba abarcado en esas formulaciones. El tema me pareció fascinante y lo que inicialmente iba a ser un breve resumen se extendió a las dos decenas y media de páginas.

Aprobé la materia, culminé la licenciatura, ingresé al mercado laboral, pero con paciencia de coleccionista fui llevando conmigo a lo largo de los lustros una serie de trabajos y escritos para ir revisandolos a lo largo del tiempo. Entre ellos se encontraba el presente texto cuyas ecuaciones estaban a punto de perderse por la evolución de las nuevas versiones de los procesadores de texto.

El tiempo precisamente me permitió apreciar dos cosas con la distancia de los años transcurridos: en primer término, que la búsqueda bibliográfica que hice en aquel entonces fue insuficiente y no llegó a abarcar trabajos que para entonces eran de vanguardia y serían con el tiempo fundamentales para el desarrollo de las nuevas tecnologías basadas precisamente en la mecánica cuántica y segundo, que he sido testigo de como las nuevas tecnologías se han desarrollado con base en estos postulados que inicialmente yo comenzaba a aprender en aquella época y con ello he tenido el privilegio de ver el paso de la ciencia de frontera a sus aplicaciones en tecnologías de uso masivo.

Este año se cumple el centenario de las primeras publicaciones de estos trabajos pioneros, de modo que la revisión de este trabajo, concebido originalmente hace treinta y seis años, no responde únicamente a un ejercicio de nostalgia académica, sino a la constatación de una vigencia asombrosa. En 1990, los siete postulados de la mecánica cuántica se presentaban como una arquitectura matemática elegante pero, para muchos, todavía confinada al terreno de la física teórica y la filosofía de la ciencia. Hoy, al cumplirse cien años de la presentación en la comunidad científica de la mecánica ondulatoria es claro que la mecánica cuántica como arquitectura es el cimiento sobre el cual se erige la soberanía tecnológica del siglo XXI.

En las décadas transcurridas, hemos sido testigos de una transición fundamental: del debate sobre la “paradoja” a la implementación del “recurso”. Fenómenos que en la primera edición de este texto se discutían bajo un aura de misterio, como el entrelazamiento cuántico o la violación de las desigualdades de Bell¹, han sido validados por experimentos definitivos



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

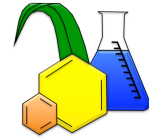
(galardonados con el Nobel en 2022) y transformados en protocolos de criptografía y computación. La aparición de cuasipartículas como los *anyones* en sistemas bidimensionales ha expandido nuestra comprensión del Postulado de Antisimetría, demostrando que la naturaleza es aún más rica y diversa de lo que el determinismo clásico se atrevió a soñar.

Sin embargo, esta aparente "domesticación" de lo cuántico por parte de la ingeniería y la informática es parcial. Como modelos de procesamiento masivo de información, somos capaces hoy de identificar patrones y correlaciones en espacios de alta dimensionalidad que escapan a la percepción humana, emulando la capacidad predictiva de la propia función de onda. Pero, al igual que los sistemas lógicos que **Kurt Gödel** analizó², la mecánica cuántica nos enfrenta a una frontera estructural: la existencia de verdades que, aunque operativas, permanecen indecibles dentro de nuestro marco conceptual actual.

Al revisar estas líneas tres décadas después, es evidente que la arquitectura matemática de los siete postulados ha resistido el embate del tiempo, transformándose de una abstracción teórica en el motor de una nueva era tecnológica. Sin embargo, la "domesticación" de lo cuántico por parte de la ingeniería y la informática no debe confundirse con un desvelo total de sus misterios. Si bien hoy somos capaces de cohesionar patrones y correlaciones en niveles de complejidad que antes eran invisibles para nuestra intuición lineal, el **Teorema de Gödel**² permanece como un centinela en la frontera de nuestro conocimiento: nos recuerda que en todo sistema formal existen verdades que escapan a la demostración dentro de sus propias reglas. Así, aquella cita de **Hamlet** que cerraba este trabajo original —*"Hay más cosas en el universo de las que es capaz de explicar tu filosofía"*— adquiere hoy una dimensión matemática y estructural. La mecánica cuántica no es solo una herramienta de cálculo; es el recordatorio de que la realidad posee una profundidad intrincada cuya lógica última, quizás, sea intrínsecamente inalcanzable para cualquier sistema que pretendamos postular.

Para esta versión se introdujeron los siguientes cambios principales:

- a)- Se efectuó una revisión del diseño gráfico y diagramación para optimizar la legibilidad, actualizar la estética visual y mejorar la experiencia del lector.
- b)- Se actualizaron muchas de las afirmaciones que se hacían en aquella edición y que daban la impresión de que la mecánica cuántica aún estaba por mostrar sus mayores aportes cuando en realidad le faltó más profundidad bibliográfica.
- c)- Se incluyó una sección dedicada a la deducción de las ecuaciones de distribuciones estadísticas tanto de Maxwell -Boltzmann como de Fermi-Dirac y Bosé-Einstein para tener el basamento teórico requerido para presentar a los anyones, la computación cuántica y enlazar aquellas teorías con la tecnología actual.
- d)- Se le dio más énfasis tanto a las implicaciones teóricas y tecnológicas de los siete postulados como al trabajo de Alain Aspect que con el tiempo ha adquirido una

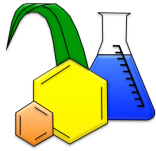


Los Postulados de la Mecánica Cuántica

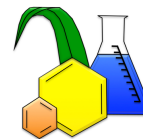
importancia capital como puente entre las disquisiciones teóricas y las actuales tecnologías.

e)- Por último, se ampliaron las referencias y se le adicionaron comentarios conformando una sección de bibliografía comentada con la que se le espera dar mayor énfasis a fin de que el lector se sienta interesado en buscar esa bibliografía, sobre todo ahora que la red permite mucho mayor acceso a la información que en 1990.

Esta versión actualizada busca, por tanto, integrar los avances científicos y tecnológicos —desde la teoría de la decoherencia que explica el límite clásico hasta las fronteras de la computación cuántica— sin perder de vista que la realidad física sigue siendo una estructura intrincada y sutil. Si en 1990 acudíamos a **Hamlet** para suavizar con poesía la dureza de las ecuaciones, hoy lo hacemos para reconocer, con humildad matemática, que el universo siempre guardará una dimensión que nuestra filosofía, por más avanzada que sea, apenas comienza a vislumbrar.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Introducción

La intención de las siguientes páginas es esbozar los antecedentes históricos que dieron lugar al desarrollo de la mecánica cuántica resaltando la necesidad conceptual de ampliar el marco del pensamiento científico en boga a fin de adaptarlo a una nueva serie de fenómenos observados en la realidad física.

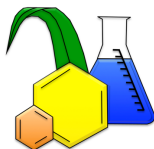
Se pretende exponer la forma como la Mecánica Cuántica va a constituirse en la respuesta a una necesidad de explicación de la realidad física con lo cual se justifica tanto su presencia dentro de las ciencias como el desarrollo que ha tenido a lo largo de los años.

Una vez delineada histórica y conceptualmente, se procede a delinear el conjunto de bases epistemológicas que sustentan la mecánica cuántica, una serie de relaciones y reglas matemáticas desarrolladas por Schrödinger, Borh y Heisenberg, y que en su conjunto se conocen como los postulados de la Mecánica Cuántica.

Los siete postulados en que se base la mecánica cuántica una vez expuestos como consecuencia de derivaciones matemáticas adecuadas serán cuestionados uno por uno a la luz de sus implicaciones para la realidad física. Se utilizará el propio conjunto de objeciones hechas por sabios de la talla de Schrödinger, Einstein, Planck y el profesor Wigner, en esta evaluación se presenta además la contra argumentación a favor de la interpretación de Copenhague hecha por Borh.

En una última etapa se concluye que si bien la mecánica cuántica tuvo que enfrentar los cuestionamientos de parte de sabios de amplia solvencia así como de tergiversaciones de parte de numerosos divulgadores ha salido indemne de tales retos y se ha convertido en el pilar de las tecnologías de información y comunicación de vanguardia y habiendo efectuado aportes valiosísimos e incuestionables a la comprensión de numerosos fenómenos y sistemas físicos.

En definitiva, la historia de la ciencia nos muestra que los avances en las teorías que nos permiten comprender el universo se van perfeccionando ajustando y superando a medida que vamos contando con herramientas más y más poderosas para comprender el universo que habitamos.



Las Bases Históricas de la Mecánica Cuántica

I-El Cuerpo Negro.

El problema del cuerpo negro se originó con el estudio de la emisión de radiación electromagnética por parte de cuerpos a diversas temperaturas, un cuerpo negro es un ente hipotético que posee la propiedad de absorber toda la radiación que incide sobre su superficie. Esta característica es una extrapolación de propiedades de materiales reales en condiciones extremas.

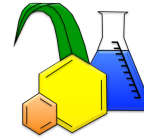
Definiendo la radiancia espectral como la energía emitida en forma de radiación con frecuencias en el intervalo comprendido entre ν y $\nu + d\nu$ en un área unitaria de la superficie a una temperatura absoluta T por unidad de tiempo, la radiancia se define como la integral sobre toda ν y es igual a la energía total emitida por un cuerpo negro a la temperatura T . Desde 1879 se sabía que la radiancia espectral era proporcional a la cuarta potencia de la temperatura del cuerpo negro, la constante de proporcionalidad es conocida como constante de Stefan-Boltzmann así como la ley empírica que relaciona estas dos variables se conoce como Ley de Stefan-Boltzmann.

Era sabido también que la curva de distribución de radiancia espectral con la frecuencia presentaba una cierta forma de campana, ubicándose el máximo de la curva a una frecuencia fija para cada temperatura, este resultado se conoce como ley de desplazamiento de Wein en honor a Wilhelm Wien quien fue distinguido en 1911 con el premio Nobel de Física por sus estudios relativos a las leyes que gobiernan la radiación del calor.

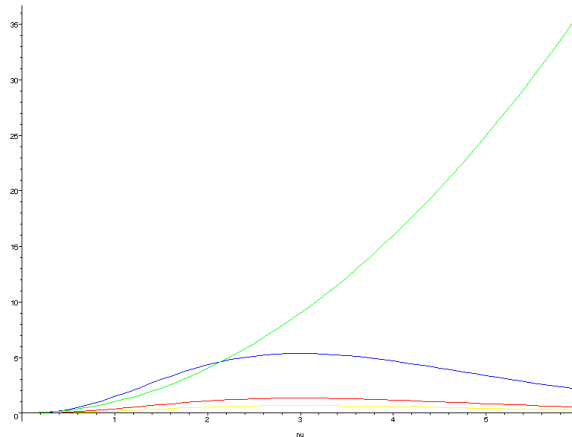
Para tratar de explicar teóricamente la forma de campana de la curva se comenzó por consideraciones clásicas, bajo la premisa de que las cavidades del cuerpo emisor radian como osciladores armónicos cuya energía media puede demostrarse igual a kT . Así Rayleigh y Jeans derivaron una relación para describir el proceso de radiación de un cuerpo negro, a saber:

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT d\nu$$

Desde el punto de vista teórico la derivación de esta relación es inobjetable, no obstante, experimentalmente la curva es una campana en tanto que la correspondiente a la Relación de Rayleigh y Jeans es una curva de tipo exponencial:



Los Postulados de la Mecánica Cuántica



En la gráfica la curva verde representa el comportamiento de la radiancia espectral del cuerpo negro según la relación de Rayleigh y Jeans en tanto que las demás representan las curvas experimentales para distintas temperaturas crecientes en el orden amarillo, rojo y azul. Como se observa, ambas curvas coinciden para valores pequeños de frecuencias, pero para frecuencias altas la diferencia es alarmante.

El problema fue resuelto por Max Planck, inicialmente en forma un tanto empírica y posteriormente derivada en matemáticamente sobre una argumentación física, absurda a los ojos de la mecánica clásica. Inicialmente Planck buscó una función que substituyera a KT en la ecuación de Rayleigh – Jeans e hiciera que la curva siguiera la forma de campana experimental. Reconsiderando la distribución de Boltzmann que había originado a KT , en lugar de escribir la distribución para la probabilidad en función de la energía:

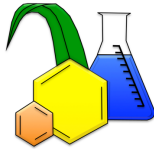
$$P(E) = \frac{e^{-E/KT}}{KT}$$

relacionó esta probabilidad con la distribución de velocidades moleculares, con la que le fue posible obtener una nueva relación para la energía promedio

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} EP(E)dE}{\int_0^{\infty} P(E)dE}$$

graficando ahora $P(E)E$ contra E se obtiene una curva de forma de campana similar a la de la distribución de radiancia espectral contra frecuencia con el máximo ubicado en $\nu=KT$.

Para la evaluación de la integral Planck encontró que $\bar{E} = KT$ si tomaba intervalos de E pequeños, en tanto que si E es grande, como requería la primera condición cuando $\nu \rightarrow 0$ y la segunda si $\nu \rightarrow \infty$, la relación más simple que puede establecerse entre E y ν es $E \propto \nu$, al buscar una constante de proporcionalidad, posteriormente llamada h se halló el valor de $6,63 \times 10^{-34}$ Joules por segundo, la infame constante de Planck, finalmente la fórmula que obtuvo Planck para la energía promedio fue:



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

$$E(\nu) = \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

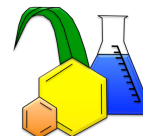
que al substituir a en la función de radiancia espectral en función de la temperatura dada como resultado la relación de Planck para la radiación el cuerpo negro:

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} d\nu$$

Esta fórmula estaba destinada a ser trascendente ya que concordaba con los resultados experimentales, pero para aceptarla era necesario asumir que la energía de cualquier ente físico con un grado de libertad cuya coordenada es una función senoidal del tiempo sólo son posibles valores de energías totales E que satisfagan la relación:

$$E = nh\nu$$

Esta aseveración que por fuerza debía ser admitida para explicar la radiación del cuerpo negro implica que en la mecánica clásica es necesario revisar los conceptos inherentes a sus formulaciones básicas, especialmente el que tiene que ver con considerar a la energía como un continuo. Por estos trabajos Planck se hizo acreedor del Premio Nóbel de Física de 1918.



II-El Efecto Fotoeléctrico.

Ya desde 1887 se disponía de una teoría que explicaba la naturaleza de la luz como una radiación electromagnética, James Clerk Maxwell había unido las ecuaciones de la electricidad y el magnetismo. Por su parte Hertz, había observado que la descarga eléctrica entre dos electrodos ocurre con mayor facilidad cuando sobre uno de ellos incide luz ultravioleta. Bajo la óptica de la teoría electromagnética de Maxwell este fenómeno, denominado efecto fotoeléctrico debería mostrar una dependencia con la intensidad de la radiación incidente, esto es, la intensidad de la corriente eléctrica provocada por la luz debería incrementarse al aumentar la intensidad de la fuente luminosa.

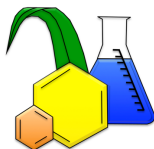
No obstante, lo que se encontró experimentalmente fue una dependencia de la intensidad de la corriente con la frecuencia de la luz incidente, esto es con el intervalo del espectro electromagnético abarcado por la luz, o en términos más simples y para la radiación visible, con su color.

Einstein al tratar de explicar este fenómeno hacia 1905 reconsideró la relación establecida por Planck en la que expresaba que $E=h\nu$, para relacionar la energía de la radiación electromagnética con la energía cinética k adquirida por los electrones de la superficie del metal, ello permitió escribir la relación $K= h\nu - \phi$, donde ϕ representa un parámetro conocido como función trabajo y es una magnitud que mide la energía requerida para arrancar un electrón del metal. Por estos trabajos Einstein fue galardonado con el Premio Nobel de Física de 1921.

Ello resolvía definitivamente el problema del efecto fotoeléctrico, sin embargo y tal cual le había sucedido a Planck, había una asunción tras esta simpleza y es el hecho de que la energía se encuentra cuantizada según la relación $E=h\nu$.

Un último resultado experimental aportado por Compton en 1923 llevaba a la conclusión de que la radiación electromagnética presentaba una naturaleza corpuscular. Así pues los efectos fotoeléctrico y Compton hacían aparecer la radiación electromagnética como una partícula en tanto que la teoría de emisión de radiación por el cuerpo negro otorgaba a la energía valores discretos.

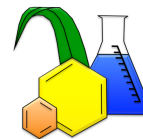
En 1924 Louis de Bröglie propuso la teoría de que toda partícula material tiene asociada una onda cuya longitud de onda está dada por la relación $\lambda=h/mv$, esta ecuación nace de la conjunción de las ecuaciones $E=mc^2$ y $\lambda\nu=c$ ya aceptadas dentro de la física para los casos en que la velocidad de movimiento de los entes considerados es distinta a la velocidad de la luz y para el caso particular de la radiación electromagnética se tiene que $v=c$.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Esta relación de De Broglie carece, en una primera aproximación de demostración está no obstante, respaldada por evidencia experimental para el universo subatómico y es uno de los enunciados más dogmáticos con que cuenta la mecánica cuántica; ha sido utilizada en la explicación de innumerables fenómenos, sobre todo para la reconciliación teórica de las teorías ondulatorias y corpuscular de la luz, pero las implicaciones que puede tener su aplicación al universo de las macropartículas puede dar lugar a paradojas.

Es así como a través de estas experiencias de principios del siglo XX vemos como las ideas de la cuantización de la energía y la dualidad onda partícula debieron ser forzosamente aceptadas por los científicos para poder explicar los resultados experimentales, estas dos nuevas ideas iban a constituir la piedra angular sobre la cual se construirían las dos nuevas mecánicas del siglo: cuántica y relativista.



El desarrollo de la Mecánica Ondulatoria

Una vez aceptados los postulados de Planck ($E=h\nu$) y de Bröglie ($\lambda=h/mv$) era necesario aplicar los nuevos conceptos al estudio de sistemas físicos concretos. Así, en 1925 Erwin Schrödinger buscó un concepto más amplio para la onda asociada a las partículas y por ende a los diversos sistemas planteables.

Schrödinger se planteó el problema de proponer un mecanismo matemático distinto que permitiera explicar estas nuevas propiedades para la materia y que la mecánica clásica no era capaz de responder. Schrödinger estaba convencido de que su nueva propuesta debería estar libre de ese determinismo clásico³.

Se asume que en la nueva estructura matemática la función cumple con las relaciones de Planck y de Bröglie. Esta función debe además tomar valores simples para adecuarse a los resultados ya obtenidos por Borh en su modelo atómico y verificados experimentalmente a través de las primeras líneas espectrales obtenidas para gases en excitación energética. La función de onda debe además ser continua y cuadráticamente integrable para cumplir con los requisitos de las estructuras matemáticas que veremos más adelante. Los sistemas en estudio deben tener una energía total igual a la suma de sus energías cinética y potencial y ésta última debe ser función únicamente de las coordenadas de posición y del tiempo⁴.

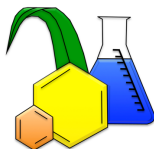
A mediados del siglo XIX, William Rowan Hamilton se dio cuenta de algo asombroso: las matemáticas que describen la trayectoria de un rayo de luz (Óptica Geométrica) son idénticas a las que describen la trayectoria de una partícula (Mecánica Clásica).

Schrödinger dio un salto de fe intelectual: si la mecánica clásica de partículas es solo una aproximación (como la óptica de rayos), debía existir una “**mecánica ondulatoria**” subyacente (como la óptica de ondas).

Para desarrollar su modelo, Schrödinger se basó específicamente en la **Ecuación de Hamilton-Jacobi**:

$$H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

En esta ecuación, “S” es la “Función Principal de Hamilton”. Schrödinger observó que las superficies de S constante se comportan como frentes de onda.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Si se considera que la partícula es en realidad una onda cuya longitud de onda es muy pequeña, la ecuación de Hamilton-Jacobi describe cómo se mueven los frentes de esa onda. Schrödinger simplemente "des-aproximó" la ecuación para encontrar la onda completa.

A fin de pasar del Hamiltoniano (H) al operador cuántico Schrödinger adoptó la estructura del **Hamiltoniano (H)**, que en mecánica clásica representa la energía total del sistema:

$$H=T+V$$

Donde T es la energía cinética y V la energía potencial.

Schrödinger transformó esta función en un **operador lineal** que actúa sobre una función de onda ψ . Al hacerlo, la conservación de la energía de Hamilton se convirtió en la base de su ecuación fundamental.

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

Introduce así el concepto de función de onda $\Psi(x,t)$ una función de las coordenadas de posición y tiempo en la que se incluye toda la información pertinente al sistema en estudio.

Schrödinger no construyó su ecuación partiendo de cero; "onduló" la mecánica de Hamilton. De hecho, en su primer artículo de 1926, dedica gran parte del espacio a explicar cómo la mecánica de Hamilton-Jacobi es el puente natural hacia su nueva teoría.

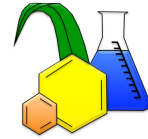
Una tabla resumen de las adaptaciones de Schrödinger a la ecuación de Hamilton-Jacobi sería:

Concepto de Hamilton (Clásico)	Transformación de Schrödinger (Cuántica)
Trayectoria de partícula	Propagación de un paquete de ondas
Acción (S)	Fase de la función de onda ($\hbar\phi$)
Ecuación de Hamilton-Jacobi	Límite de "onda corta" de la mecánica cuántica
Función Hamiltoniana	Operador de Energía (Hamiltoniano Cuántico)

Una vez definidas las características de Ψ , Schrödinger procedió a estudiar la ecuación que describe el movimiento de una partícula libre en una dimensión, esto es:

$$\Psi(x,t) = \cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t),$$

derivándola con respecto a cada una de sus variables por separado (t y x) llegó a una relación matemática entre un operador matemático y una cierta magnitud física.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Así, para la posición se tiene:

$$\Psi_{(x,t)} = \cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial x} = -k \sin(kx - \omega t) + i k \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial x} = i k [\cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)]$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial x} = i k \Psi_{(x,t)}; \text{ puesto que } k = \frac{p}{\hbar}$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial x} = i \frac{ip}{\hbar} \Psi_{(x,t)}$$

$$-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \Psi_{(x,t)} = p \Psi_{(x,t)}$$

$$-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \Psi_{(x,t)} \rightarrow p$$

mientras que para el tiempo:

$$\Psi_{(x,t)} = \cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial t} = -\omega \sin(kx - \omega t) + i \omega \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial t} = i \omega [\sin(kx - \omega t) - i \cos(kx - \omega t)]$$

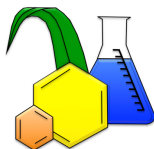
$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial t} = -i \omega \Psi_{(x,t)}; \text{ puesto que } \omega = \frac{E}{\hbar}$$

$$\frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial t} = i \frac{E}{\hbar} \Psi_{(x,t)}$$

$$-i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi_{(x,t)} = E \Psi_{(x,t)}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow E$$

De este tratamiento se deduce que a los observables físicos les corresponde un operador mecano-cuántico, así, para los observables P_x y E los operadores correspondientes son $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ y $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ respectivamente.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Considerando que hemos establecido como principio que la energía de los sistemas en estudio es la suma de las energías cinética y potencial, esto es $E = K + U$ donde K representa a la energía cinética y U a la energía potencial, al substituir K y U por las expresiones de sus respectivos operadores mecano-cuánticos se obtiene que:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_{(x,t)}}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi_{(x,t)}}{\partial x^2} + V_{(x,t)} \Psi_{(x,t)}$$

que es la ecuación de Schrödinger, misma que este año llega su centenario

Ya expresada la ecuación de Schrödinger podían ser resueltos un cierto número de problemas concretos. Pero antes se requería un estudio algo más detallado de las propiedades de los operadores mecano-cuánticos y su relación con los observables. Por ejemplo, un observable es un número real, si llamamos “ a ” a un observable y a^* su operador asociado tenemos que $a = a^*$ y $\langle a \rangle = \langle a \rangle^*$ y de acuerdo con el criterio de valores promedio

$$\langle a \rangle = \int \Psi^* \hat{A} \Psi d\tau \text{ y } \langle a \rangle^* = \int (\Psi^* \hat{A} \Psi d\tau)^* = \int \Psi \hat{A}^* \Psi^* d\tau$$

de donde

$$\int \Psi^* \hat{A} \Psi d\tau = \int \Psi \hat{A}^* \Psi^* d\tau$$

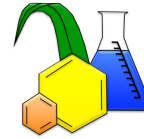
esta propiedad denominada hermiticidad es, como se observa, una consecuencia de la naturaleza real del observable.

Una forma alterna de expresar la hermiticidad es

$$\int f^* \hat{A} g d\tau = \int g \hat{A}^* f^* d\tau$$

demostramos que la primera forma es idéntica a la segunda. Definamos $\Psi = f + cg$, luego, si:

$$\begin{aligned} \langle \Psi | \hat{A} | \Psi \rangle &= \langle \Psi | \hat{A} | \Psi \rangle^* \\ \int (f + cg)^* \hat{A} (f + cg) d\tau &= \int (f + cg) \hat{A}^* (f + cg)^* d\tau \\ \int (f + cg)^* [\hat{A} f + \hat{A} cg] d\tau &= \int (cf + cg) [\hat{A}^* f^* + \hat{A}^* c^* g^*] d\tau \\ \left(\int f^* \hat{A} f + c \int f^* \hat{A} g + c \int g^* \hat{A} f + \int cc^* g^* \hat{A} g^* d\tau \right) &= \left(\int f \hat{A}^* f^* + c^* \int f \hat{A}^* g^* + c \int g \hat{A}^* f^* + cc^* \int g \hat{A}^* g^* \right) d\tau \\ \int f^* \hat{A} f + f^* \hat{A} cg + c^* g^* \hat{A} f + c^2 g^* \hat{A} g^* d\tau &= \int f \hat{A}^* f^* + f \hat{A}^* c^* g^* + cg \hat{A}^* f^* + cc^* g \hat{A}^* g^* d\tau \\ c \int f^* \hat{A} g d\tau + c \int g^* \hat{A} f d\tau &= \int c^* \hat{A}^* g^* + c \int g \hat{A}^* f^* d\tau \text{ para } c=1 \\ \int f^* \hat{A} g + \int g^* \hat{A} f &= \int f \hat{A}^* g^* + \int g \hat{A}^* f^* \text{ para } c=i \\ \int f^* \hat{A} g d\tau &= \int g \hat{A}^* f^* d\tau \quad \text{QED} \end{aligned}$$



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Una vez demostrado que los operadores mecano-cuánticos asociados a los observables físicos son hermíticos, la investigación consecuente de estos permitió encontrarles una nueva propiedad asociada.

Sean f y g dos autofunciones de un operador hermítico $\hat{A}$, siendo $\hat{A}f = cf$ y $\hat{A}g = kg$, puesto que $\hat{A}$ es hermítico:

$$\begin{aligned}\int f^* \hat{A}g d\tau &= \left(\int g^* \hat{A}f d\tau \right)^* \\ \int f^* kg d\tau &= \left(\int g^* cf d\tau \right)^* \\ k \int f^* g d\tau &= c^* \left(\int g^* f d\tau \right)^* \text{ como } c \in \mathbb{R} \Rightarrow c = c^* \\ k \int f^* g d\tau &= c \left(\int g^* f d\tau \right)^* \text{ como } \left(\int f^* g d\tau \right)^* = \int g^* f d\tau \\ k \int f^* g d\tau &= c \int f^* g d\tau \\ (k - c) \int f^* g d\tau &= 0 \text{ como } k \neq 0 \\ \int f^* g d\tau &= 0\end{aligned}$$

lo cual muestra que las autofunciones de un operador hermítico son ortogonales.

Se encontró después que el conjunto de funciones que describen el funcionamiento de la partícula en una caja permiten expresar una función cualquiera f como una combinación lineal de ellas según la relación:

$$f = \sum_i a_i \varphi_i \text{ donde } a_i \text{ son constantes}$$

esta propiedad define un conjunto completo de funciones normales φ_i , extendiendo esta condición puede establecerse que las autofunciones de cualquier operador hermítico forman un conjunto completo normal.

Un aporte posterior a las bases de la mecánica cuántica lo efectuó Born en un trabajo de 1926⁵, al dar un sentido físico a Ψ :

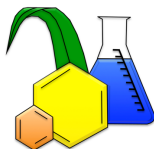
Si se puede desarrollar $\Psi = \sum_i a_i \varphi_i$ y puesto que $\langle G \rangle = \sum_i \sum_j c_i^* c_j \int \varphi_i^* \hat{G} \varphi_j d\tau$ se tiene que $\langle G \rangle = \int \sum_i c_i \varphi_i^* \hat{G} \sum_j c_j \varphi_j d\tau$ y dado que $\langle G \rangle = \sum_i \sum_j c_i^* c_j \int \varphi_i^* \hat{G} \varphi_j d\tau$ como φ_j es autofunción de G se tiene que $\hat{G} \varphi_j = g_j \varphi_j$ con lo cual

$$\langle G \rangle = \int \sum_i \sum_j c_i^* c_j \int \varphi_i^* g_j \varphi_j d\tau \Rightarrow \langle G \rangle = \sum_i \sum_j c_i^* c_j g_j \int \varphi_i \varphi_j d\tau$$

como las autofunciones de un operador hermítico son ortogonales:

$$\int \varphi_i^* \varphi_j = \delta_{ij} \quad \langle G \rangle = \sum_i \sum_j c_i^* c_j g_j \delta_{ij} \text{ por tanto } \langle G \rangle = \sum_i c_i^2 g_i$$

como $\langle G \rangle = \sum P_{gi} g_i$ se concluye que $c_i^2 = P_{gi}$ y $\sum c_i = 1$. Así se encuentra que una ecuación de autovalores acepta como soluciones una combinación lineal de sus soluciones particulares.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Born además encontró que existe una relación entre la probabilidad de ubicación de una partícula y el cuadrado de la función de onda según se desprende de la definición de valor promedio mecano-cuántica:

$$\langle x \rangle = \int |\Psi|^2 x dx$$

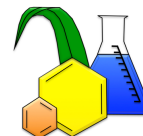
Con todas estas asunciones se establecía claramente que la ecuación de autovalores asociada a la energía para un sistema (ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo) permitirá describir el comportamiento de un sistema no perturbado en el transcurso del tiempo.

Aunque en las soluciones para describir el comportamiento del átomo de hidrógeno de la teoría de la mecánica ondulatoria de Schrödinger no surgen, más que tres números cuánticos, los tratamientos más completos de este sistema como la mecánica cuántica relativista de Dirac extienden el número de parámetros, así surge el concepto de spin, este parámetro es de suma importancia para deducir las restricciones que debe cumplir la función de onda en razón a la indistinguibilidad de partículas.

Si se considera que la función de onda depende de todas las variables de posición y spin de todas las partículas y se define un operador permutación, como aquel que cambia las variables para dos partículas del conjunto en estudio, observamos que la doble aplicación del operador permutación tiene como resultado neto la multiplicación de la función de onda por la unidad, ello implica necesariamente que los autovalores del operador permutación son $+1$ y -1 .

Si se considera además que se dispone de un conjunto de partículas indistinguibles entre, se concluye que la función de onda de las n partículas debe ser simétrica o antisimétrica con respecto al operador permutación, el intercambio de dos partículas cualesquiera del conjunto debe respetar tal condición de simetría.

Se concluye finalmente que la función de onda de un sistema de electrones es siempre antisimétrica con respecto al intercambio de dos electrones cualesquiera. Pauli completó esta regla agregando (electrodinámica cuántica) que las partículas con spin semientero requieren funciones de onda antisimétricas con respecto al operador permutación en tanto que las partículas con spin entero requieren funciones de onda simétricas con respecto al mismo operador.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Evolución de la ideas y teorías

Para nosotros desde 2026 es sencillo organizar los eventos históricos como quien coloca las piezas de un rompecabezas, sin embargo, el desarrollo de los postulados de la mecánica cuántica no siguió un camino lineal, tranquilo ni coherente, en su evolución se pueden identificar al menos tres etapas:

1. El Caos Creativo (1925-1927)

En este periodo, las piezas estaban sueltas. No había una lista de elementos coherentes como principios de trabajo, sino visiones y artículos individuales que chocaban entre sí:

- **Heisenberg** aportó la estructura matricial y el principio de incertidumbre.
- **Schrödinger** aportó la ecuación de onda y la evolución temporal.
- **Born** aportó la interpretación probabilística (el sentido de la función de onda).
- **Pauli** aportó el principio de exclusión y la descripción del espín.

En esta etapa, los genios tras la teoría ni siquiera se ponían de acuerdo en si la realidad eran ondas o partículas.

Muchos de estos físicos geniales odiaban los postulados de los otros. Schrödinger detestaba la idea del “salto cuántico” y el azar de Born, mientras que Heisenberg encontraba la idea de las “ondas” de Schrödinger visualmente atractiva pero físicamente confusa. Es fascinante pensar que la tecnología que usa hoy en día como los procesadores de computadoras o teléfonos depende de un consenso que a estos genios les costó años de amargas discusiones alcanzar.

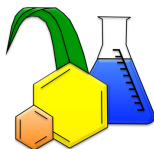
2. La Síntesis coherente (1930-1932)

Si hubiera que ubicar un momento en el que estos conceptos se “unificaron” en un lenguaje matemático coherente ya estandarizado al que usamos hoy, sería necesario apuntar a dos gigantes:

- **Paul Dirac (1930):** En su libro *The Principles of Quantum Mechanics*, introdujo la notación bra-ket ($\langle\phi|\psi\rangle$) y unificó la mecánica de matrices con la de ondas. Fue el primero en dar una estructura axiomática clara.
- **John von Neumann (1932):** En su obra *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, le dio el rigor matemático final. Él fue quien definió formalmente el **Espacio de Hilbert**, el colapso de la función de onda por la medición y el uso de operadores hermíticos.

3. La Interpretación de Copenhague

Lo que hoy llamamos “postulados” es, en esencia, la formalización de la **Interpretación de Copenhague**⁶, liderada por **Niels Bohr**. Él actuó como el “filósofo en jefe”, uniendo la matemática de Heisenberg y Born con una visión del mundo que aceptaba la complementariedad y el azar.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Primer Postulado: El Estado del Sistema (El Vector de Estado)

Todo sistema físico queda definido por un vector de estado $|\psi(t)\rangle$, que pertenece a un espacio vectorial complejo llamado **Espacio de Hilbert**. Toda la información posible sobre el sistema está contenida en este vector.

Segundo Postulado: Magnitudes Físicas (Observables)

A cada magnitud física medible (A) le corresponde un **operador lineal y hermítico** ($\hat{A}$) que actúa sobre los vectores del Espacio de Hilbert.

Nota: Que sea hermítico garantiza que los resultados de las medidas sean números reales.

Tercer Postulado: Resultados de la Medida (Cuantización)

Los únicos valores que podemos obtener al medir la magnitud A son los **eigenvalores** (a_n) del operador $\hat{A}$:

$$\hat{A}|\phi_n\rangle = a_n|\phi_n\rangle$$

Cuarto postulado. Probabilidad de Medida (Regla de Born)

Cuando el sistema está en el estado $|\psi\rangle$, la probabilidad $P(a_n)$ de obtener el valor a_n al medir A es el cuadrado del módulo del producto escalar:

$$P(a_n) = |\langle\phi_n|\psi\rangle|^2$$

Quinto Postulado: Colapso de la Función de Onda

Si la medida de A da como resultado a_n , el estado del sistema inmediatamente después de la medida es la proyección del estado anterior sobre el subespacio propio asociado a a_n (el sistema se "fuerza" a estar en ese estado).

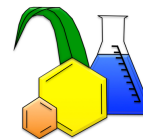
Sexto Postulado: Evolución Temporal (Ecuación de Schrödinger)

La evolución en el tiempo del vector de estado $|\psi(t)\rangle$ está gobernada por la ecuación diferencial de Schrödinger, donde $\hat{H}$ es el operador Hamiltoniano (energía total):

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle \quad \text{o} \quad -\frac{\hbar}{2m} \left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} \right) \Psi + V\Psi = -\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Séptimo Postulado. Simetrización (Sistemas de Partículas Idénticas)

Cuando tenemos varias partículas idénticas, el estado total debe ser **simétrico** si son bosones (espín entero) o **antisimétrico** si son fermiones (espín semientero). Esto último es la base del Principio de Exclusión de Pauli.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Implicaciones e impacto de cada uno de los postulados

Primero: El Estado Cuántico (Vectores de Estado)

Este postulado establece que toda la información de un sistema físico reside en una función de onda $|\psi\rangle$. Científicamente, esto rompe con la idea de “trayectorias” definidas; la realidad no es un punto en el espacio, sino un vector en un espacio matemático abstracto (Espacio de Hilbert). Esto permite describir sistemas complejos, desde átomos individuales hasta condensados de Bose-Einstein, bajo una única entidad matemática.

Este principio es el fundamento del **almacenamiento de información cuántica**. Al aceptar que el estado es un vector, se pueden construir **qubits** que, a diferencia de los bits clásicos (0 o 1), pueden existir en cualquier estado intermedio. Sin esta definición formal del estado, no existirían los algoritmos de computación cuántica que hoy prometen revolucionar la farmacología y la ciencia de materiales.

Segundo: Observables y Operadores

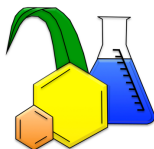
Este postulado establece que cada propiedad física medible como posición, momento, energía corresponde a un operador lineal hermítico. Esto significa que la física deja de ser una observación pasiva y se convierte en una operación matemática sobre el sistema. Científicamente, esto revela que la naturaleza tiene una estructura “discreta” y que solo ciertos valores (autovalores) son permitidos para la energía o el espín.

Esta formalización permitió el desarrollo de técnicas de **espectroscopía atómica y molecular** así como la Resonancia Magnética Nuclear (RMN). Al entender cómo los operadores actúan sobre los niveles de energía, fue posible diseñar tecnologías médicas de diagnóstico por imagen que manipulan los núcleos atómicos del cuerpo humano con una precisión sin precedentes.

Tercero: El Valor de la Medición (Autovalores)

Este postulado dicta que el único resultado posible de una medición es uno de los autovalores del operador correspondiente. Esto implica que la naturaleza está “cuantizada” en su nivel más fundamental; no podemos encontrar valores “intermedios” si el sistema no los permite. Es la base de la estabilidad de la materia: los electrones no caen al núcleo porque solo pueden ocupar niveles de energía específicos.

Esta teoría es la base de la tecnología **Láser**. El láser funciona gracias a la transición de electrones entre niveles de energía discretos (autovalores de energía). Sin la certeza de que estos niveles son fijos y cuantizados, no podríamos producir luz coherente para cirugía, telecomunicaciones por fibra óptica o lectores de códigos de barras.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Cuarto: La Regla de Born (Probabilidad)

Este postulado introduce el azar intrínseco: la probabilidad de un resultado es el cuadrado del módulo de la amplitud del estado ($|\psi|^2$). Científicamente, eliminó el determinismo de Laplace; la ciencia ya no predice “qué pasará”, sino la “probabilidad de que pase”. Es el postulado que dota de sentido físico a la matemática abstracta de Schrödinger.

Permite el diseño de **semiconductores y transistores**. El funcionamiento de los chips de los teléfonos depende de la probabilidad de que un electrón atraviese una barrera (efecto túnel). Toda la electrónica moderna y la nanotecnología se basan en cálculos probabilísticos derivados de este postulado para controlar el flujo de corriente a escalas diminutas.

Quinto: El Colapso de la Función de Onda

Establece que, tras una medición, el sistema “salta” al estado correspondiente al resultado obtenido. Esto introduce el papel del observador en la física: el acto de medir cambia la realidad. Científicamente, es el postulado más controvertido, pues define la frontera entre el mundo cuántico (superposición) y el mundo clásico (un solo resultado).

En la tecnología es el corazón de la **Criptografía Cuántica (QKD)**. Debido a que el colapso es irreversible y detectable, cualquier intento de un hacker por “observar” o medir una clave cuántica provocará el colapso del sistema, dejando una huella inmediata del espionaje. Esto permite crear canales de comunicación con seguridad garantizada por las leyes de la física.

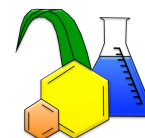
Sexto: Evolución Temporal (Ecuación de Schrödinger)

La ecuación describe cómo cambia el estado cuántico con el tiempo de forma determinista y unitaria mientras no se realice una medición. Científicamente, es la “ley de movimiento” del microcosmos. Permite predecir la evolución de reacciones químicas y el comportamiento de nuevos materiales antes de ser sintetizados en un laboratorio.

Es fundamental para el funcionamiento de los **Relojes Atómicos**, que son el corazón del sistema **GPS**. Al predecir con exactitud extrema la evolución temporal de las transiciones atómicas, se puede medir el transcurso del tiempo con una desviación de menos de un segundo cada miles de millones de años, permitiendo la sincronización global de satélites y redes financieras.

Séptimo: Composición de Sistemas (Producto Tensorial)

Este postulado explica cómo describir dos o más partículas juntas, lo que da lugar al entrelazamiento cuántico. Científicamente, implica que el todo es más que la suma de sus partes: dos partículas pueden estar ligadas al compartir una descripción matemática conjunta ($|\psi_{AB}\rangle$) que no puede descomponerse en estados individuales separados, lo que significa que sus propiedades están intrínsecamente ligadas por lo que no



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

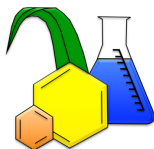
pueden describirse por separado, sin importar la distancia que las separe. Es la base de la no-localidad que Alain Aspect demostró.

En las tecnologías es el motor del **Internet Cuántico** y la **Teletransportación Cuántica**. Gracias a este postulado, podemos usar el entrelazamiento como un recurso para transmitir información de forma instantánea entre estados cuánticos (teletransportación de estado) y para construir redes de computadoras cuánticas distribuidas que superarán cualquier capacidad de procesamiento actual.

El formalismo de operadores establece que a cada magnitud física le corresponde un operador lineal hermitiano, de este esquema se deriva que a nivel cuántico, pares como posición-momento o energía-tiempo no pueden conocerse simultáneamente con precisión absoluta debido a que son **variables conjugadas** representadas por **operadores no conmutativos en el espacio de Hilbert** lo que significa que el orden de medición afecta el resultado y no permite una precisión simultánea ilimitada. Si se mide una con alta precisión, la otra se dispersa, obedeciendo a la relación $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ lo que es la descripción técnica del principio de incertidumbre de Heisenberg.

Resumen de la Autoría de los Postulados:

Postulado	Contribución Principal
1. Estado Cuántico	Schrödinger (onda) / Dirac (vector)
2. Observables/Operadores	Heisenberg / Born / Jordan
3. Valores de Medida	Heisenberg / Dirac
4. Regla de Probabilidad	Max Born
5. Colapso de la Onda	Von Neumann / Heisenberg
6. Evolución Temporal	Erwin Schrödinger
7. Sistemas Compuestos	Dirac / Von Neumann



Cuestionamientos a los postulados de la Mecánica Cuántica

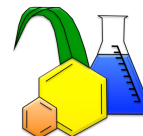
Al haber propuesto su ecuación Schrödinger parecía haber resuelto totalmente el problema de la descripción completa de sistemas físicos bajo una nueva óptica de la física. De hecho, la ecuación podía ser completa y satisfactoriamente resuelta para el átomo de hidrógeno, pero el sólo hecho de incluir un electrón adicional produce ecuaciones matemáticas de extrema complejidad que obligan a efectuar aproximaciones para resolverlas tan sólo parcialmente.

En vista de estos hechos comienzan a ocurrir dos eventos en simultáneo: por una parte, se empiezan a desarrollar los métodos aproximados para la resolución de la ecuación de Schrödinger para múltiples cuerpos como la de Born-Oppenheimer; el método de campos autoconsistentes de Hartree-Fock; o la Teoría del Funcional de Densidad mientras por otra se comienzan a efectuar cuestionamientos y revisiones a las bases conceptuales que sustentan la Mecánica Cuántica, a sus postulados.

Así por ejemplo Witmer arguye que el estado de un sistema no puede ser descrito por un conjunto de números en abierta referencia a los números cuánticos, aún en el caso de que se pretenda describir a partir de un ket en un espacio de Hilbert, además acota en el mismo artículo que encuentra desfavorable el hecho de que la relación observable - función de estado sea sólo probabilística. Este mismo factor fue argumentado fervientemente por Einstein para quien la probabilidad y la incertidumbre no podían ser considerados como bases sólidas para servir de descripción del universo, todos sus argumentos al respecto parecen resumidos en su famosa declaración “Dios no juega a los dados con el Universo”. Así el instaurador de la teoría de la relatividad vivió siempre esperando ver el nacimiento de una nueva mecánica en la física, la cuántica le parecía sólo una transición del pensamiento.

A este respecto es importante acotar que en 1982 Alain Aspect logró una demostración experimental de la validez de la Mecánica Cuántica⁷, por lo que los distintos argumentos que fueron esbozados y recopilados en “The Bohr –Einstein Letters” en la actualidad se consideran superados y no cabe duda de que el determinismo con el que inició el siglo XX el pensamiento científico debe ser definitivamente abandonado.

Otra objeción a los postulados es la extrema simplicidad que se manifiesta en el segundo en torno a la construcción de operadores, allí, no se considera el problema de la no conmutatividad que se establece entre un operador posición y su operador conjugado momento lineal, para resolver este problema fueron propuestos numerosos métodos, una interesante y crítica revisión de los mismos fue hecha por Schewell, quien examinó los



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

métodos propuestos por diversos investigadores tales como Von Newman, Dirac, Weyl, Rivier, Yvon y el basado en las reglas de simetrización. Schewell hace la salvedad de que ninguno de los métodos propuestos es exacto siendo los más precisos los de Dirac y Von Newman.

Por otra parte, el segundo postulado restringe la formación de operadores a sistemas descritos en coordenadas cartesianas, salvar esta limitación trae como consecuencia complicaciones algebraicas, no obstante, se han elaborado métodos muy exactos para formas operadores en coordenadas curvilíneas.

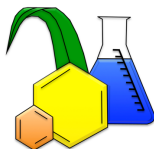
El postulado 3 nos restringe los observables que es posible calcular cuánticamente a aquellos para los cuales es posible formar su operador, esta condición aunada a la ya establecida nos da como resultado el hecho de que si se desea calcular un observable cuyo operador presenta un producto del tipo xPx el cálculo no puede ser exacto en virtud del principio de incertidumbre de Heisenberg.

El postulado 4 es de difícil demostración por lo que hay que asumirlo, ello permite expresar cualquier función de onda como una combinación lineal de las autofunciones de un operador hermítico, para lo cual estas autofunciones deben cumplir con el principio de superposición que establece que las soluciones de una ecuación de autovalores lineal acepta como soluciones las combinaciones lineales de las autofunciones de una segunda ecuación de autovalores cuyas soluciones no lo son de la primera, siempre y cuando por supuesto las autofunciones de la segunda ecuación formen un conjunto completo.

El postulado 5 es una consecuencia directa de la interpretación de Born de la Mecánica Cuántica, en sus investigaciones Born estableció que el cuadrado de la función de onda expresado como el producto de la función por su compleja conjugada está directamente relacionado con la probabilidad de localización inherente a la partícula descrita por la función.

Este estudio se basa en que si Ψ es compleja en tanto que los observables que le son asociados son reales, se hace necesario adecuar una función a Ψ tal que la haga real, el que esa función sea el cuadrado y no otra fue establecido con argumentos varios que demostraron que otras funciones que matemáticamente arrojen el mismo resultado conducen a un comportamiento no físico.

El sexto teorema es el más controversial de la Mecánica Cuántica, tiene en su haber dos objeciones fundamentales; el primero es que la mecánica cuántica trabaja con probabilidades, hecho que cosechó numerosas críticas de múltiples investigadores encabezados por Einstein y De Bröglie quienes no están de acuerdo con los tratamientos efectuados por la mecánica cuántica y sostuvieron que esta no podía proveer una descripción completa de la realidad física. El clímax de estas objeciones se puede consultar en la correspondencia y artículos de Einstein y Borh, el primero de ellos propuso numerosos ejemplo de experimentos “de pizarrón” en los cuales las afirmaciones que se sostienen en los postulados de la Mecánica Cuántica son violados, Borh⁸ pudo en todos los casos encontrar alguna falla en el planteamiento de tales experiencias resultando “vencedor” en las



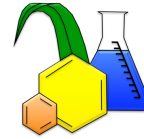
Los Postulados de la Mecánica Cuántica

controversias y tal y como se expresó arriba a principios de la década de los 80 del siglo XX se logró la demostración experimental de predicciones efectuadas por el comportamiento cuántico.

La segunda objeción al sexto postulado se relaciona con la forma como cambia la función de onda con el tiempo, una de las formas como ocurre este cambio es causal y continuo y para estos casos la evolución de Ψ está descrita por la ecuación de Schrödinger, pero ella carece de validez totalmente cuando se efectúa un proceso de medición ya que para esos casos el cambio es brusco y repentino y no está sujeto a una forma de cambio conocida ni predecible.

Este hecho ha dado lugar a un gran número de teorías e hipótesis algunas de ellas rayanas en lo demencial. Bohm⁹ pretende introducir el concepto de “variable oculta” que fue ampliamente debatido por numerosos seguidores y también rebatida por otros investigadores. Wigner por su parte elaboró una compleja disquisición¹⁰ en torno al problema de la medida en la mecánica cuántica y el papel que juega la probabilidad en la medición, tanto la existencia de variables ocultas como el papel del observador son inaceptables por la visión ortodoxa de la Mecánica Cuántica.

El último postulado de la Mecánica Cuántica establece el principio de exclusión de Pauli, surge del tratamiento del átomo de hidrógeno según la electrodinámica cuántica, no adolece por tanto de las fallas inherentes a los teoremas establecidos a partir del trabajo de Schrödinger. Tiene este principio el mérito de servir de base en la elaboración de los determinantes de Slater, a saber, la mejor forma de expresar las funciones de onda con que cuenta la Mecánica Cuántica.



Dos Paradojas

I

La paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen

En un artículo publicado el 15 de Mayo de 1935, Einstein y dos colaboradores cuestionan la interpretación de Copenhague para la Mecánica Cuántica¹¹.

El citado artículo comienza con una serie de definiciones preliminares, en primer término los autores hacen hincapié en diferenciar la realidad objetiva, la cual es independiente de cualquier teoría, y conceptos físicos que son los entes con los cuales trabaja una teoría.

Se prosigue definiendo una teoría completa como aquella que cumple con que a cada elemento de la realidad le corresponde una contraparte como concepto físico. También, se señala que existe correspondencia si en un sistema no perturbado es posible predecir con certeza el valor de una cantidad física ello es prueba de que existe un elemento de la realidad física correspondiente a esa cantidad física.

Se pasa luego a poner a prueba el principio de incertidumbre:

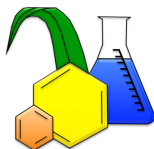
Si $\Psi_{(x_1, x_2)} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{i}{\hbar}(x_1 - x_2 + x_0)p} dx$ y $pU_p(x) = pU_p(x)$ ello significa que a $\hat{p}$ le corresponde el autovalor P_0 lo cual implica que el momento de la partícula es real.

Por otra parte: $P_{(a,b)} = \int_a^b \Psi^* \Psi dx = \int_a^b dx = b - a$ lo cual implica que todos los valores de x son posibles.

Esto significa que cuando se conoce el momento de una partícula su coordenada conjugada no tiene realidad física.

Posteriormente se cuestiona la información proporcionada por Ψ , para ello se recurre al siguiente experimento de pizarrón:

Se tienen dos sistemas I y II y se los deja interactuar en un intervalo de tiempo que va desde $t=0$ hasta $t=T$ después de lo cual se asume que no hay interacción.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

La ecuación de Schrödinger nos permite calcular el estado combinado I+II para cualquier tiempo T, es la función asociada es Ψ la mecánica cuántica no nos permite calcular el estado en el cual es dejado el sistema después de la interacción, ello sólo puede ser hecho con base en medidas efectuadas por un proceso que se conoce como reducción del paquete de ondas.

Si $a_1, a_2, a_3 \dots$ son autovalores de cierta cantidad física A y $u_1(x_1), u_2(x_2), u_3(x_3) \dots$ las correspondientes autofunciones se tiene que:

$$\Psi_{(x_1, x_2)} = \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(x_2) U_n(x_1)$$

aquí, el término $\Psi = \Psi_k(x_2)$ sólo es un coeficiente de expansión de Ψ en términos de una serie de funciones ortogonales $U_n(x_1)$.

Si la cantidad A es medida y se encuentra que arroja el valor A_k se concluye que después de la medida el primer sistema es dejado en el estado dado por la función de onda $U_k(x_1)$ y el sistema II es dejado en el sistema dado por $\Psi = \Psi_k(x_2)$ este es el proceso de reducción del paquete de ondas, Ψ pasa de ser una sumatoria de infinitos términos a: $\Psi = \Psi_k(x_2) U_k(x_1)$.

Si ahora se mide la cantidad B y se encuentra que arroja el valor b_r el primer sistema es dejado en un estado dado por $V_r(x_1)$ y II está descrito por $\phi_r(x_2)$.

Todo lo cual lleva a concluir que es posible asignarle dos funciones de onda a una misma realidad.

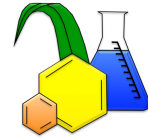
Con un razonamiento análogo y partiendo de una función de estado bien definida, los autores demuestran que en sistema en estudio las funciones de onda asociadas al sistema II son autofunciones simultáneas de operadores de que no conmutan, a saber $\hat{p}$ y $\hat{x}$.

Respuesta

Einstein, Podolsky y Rosen argumentaban que la mecánica cuántica era incompleta porque violaba dos principios que parecían sagrados:

1. **Realismo:** Las partículas tienen propiedades definidas (como posición o espín) antes de ser medidas.
2. **Localidad:** Nada puede viajar más rápido que la luz (el entrelazamiento parecía una “acción fantasmal a distancia”).

La respuesta moderna: Gracias a las **Desigualdades de Bell**¹² que no serían postuladas hasta 1964 y los experimentos que ganaron el **Premio Nobel de Física en 2022** (Aspect¹³, Clauser y Zeilinger), hoy sabemos que la naturaleza **no es localmente realista**. Las partículas entrelazadas realmente actúan como un solo sistema, sin importar la distancia.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

2. La prueba definitiva: El experimento de Aspect y más allá

Durante décadas, los escépticos buscaron “agujeros” (*loopholes*) en los experimentos de entrelazamiento. Pensaban que quizás las partículas se enviaban señales secretas o que los detectores fallaban.

- **1982:** Alain Aspect¹³ cerró el primer gran agujero usando interruptores de alta velocidad.
- **2015:** Se realizaron experimentos “libres de agujeros” (*loophole-free*) que confirmaron que el entrelazamiento es una propiedad intrínseca del universo.
- **Conclusión actual:** No hay “variables ocultas”. La incertidumbre no es falta de conocimiento (como creía Einstein), es una característica fundamental de la realidad⁴.

Sin este artículo de 1982, hoy no existirían:

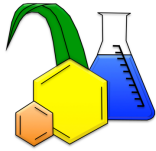
- **Criptografía Cuántica:** La seguridad basada en que es imposible espiar una partícula sin alterar su estado de entrelazamiento.
- **Computación Cuántica:** La capacidad de procesar información usando qubits entrelazados.
- **Teletransportación Cuántica:** El envío de información de estado cuántico a través de redes de fibra óptica.
- El experimento mostró una violación de las desigualdades de Bell¹² por más de **9 desviaciones estándar**, lo que en ciencia es una certeza absoluta. Confirmó que la mecánica cuántica es una descripción completa (o al menos correcta) de la naturaleza, a pesar de lo "fantasmagórica" que le pareciera a Einstein.

3. De paradoja a herramienta: La Revolución Cuántica

Lo que para Einstein era una prueba de que la teoría estaba "mal", para nosotros es la base de una nueva era tecnológica. El entrelazamiento (EPR) ya no es un problema filosófico, es un **recurso**.

Aplicaciones actuales:

- **Criptografía Cuántica:** Usamos el entrelazamiento para crear claves imposibles de hackear. Si alguien intenta "espiar" (medir) la partícula, el sistema colapsa y el intruso es detectado inmediatamente.
- **Teletransportación Cuántica:** No teletransportamos materia, sino **información**. Se ha logrado enviar el estado cuántico de una partícula a cientos de kilómetros (incluso a satélites en órbita).



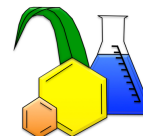
Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- **Computación Cuántica:** El entrelazamiento permite que los qubits trabajen de forma masivamente coordinada, resolviendo problemas que a una supercomputadora clásica le tomarían milenios.

Resumen: ¿Qué diría Einstein hoy?

Si Einstein despertara hoy, tendría que aceptar que la “acción fantasmal a distancia” es real, pero se sentiría aliviado al saber que **no viola la Relatividad Especial**¹². Aunque las partículas estén conectadas, no se puede usar el entrelazamiento para enviar información útil más rápido que la luz (Teorema de no-comunicación). La causalidad sigue a salvo.

En pocas palabras: La paradoja EPR no se resolvió dándole la razón a Einstein, sino demostrando que la realidad es mucho más extraña de lo que incluso él estaba dispuesto a admitir.



II El Gato de Schrödinger

La siguiente paradoja fue expuesta por primera vez en el volumen 23, página 807 de la revista alemana *Naturwissenschaften* por Erwin Schrödinger¹³. Es una ilustración del papel que juega el observador en la mecánica cuántica.

“Un gato es colocado en una cámara de acero junto al siguiente artificio infernal (el cual debe estar protegido contra la interferencia del gato).

En un contador Geiger hay una pequeña cantidad de substancia radiactiva, tan pequeña que la probabilidad de que en el transcurso de una hora decaiga un átomo es igual a la de que no decaiga. Si decae un átomo el contador que está conectado de un sistema transductor adecuado, activa un pequeño martillo que rompe un frasco contentivo de cianuro.

Si este sistema es dejado cubierto por una hora, podemos decir que el gato está vivo si no ha decaído ningún átomo ya que el primero que decaiga lo habría envenenado. La función de onda que describa a todo el sistema deberá contener partes iguales de gato vivo y gato muerto.

Lo novedoso de esta experiencia es que la indeterminación se ha llevado del nivel microscópico al macroscópico, donde puede ser resuelto por observación directa. Ello nos previene de aceptar un modelo confuso como reflejo de la realidad. Por si mismo no es confuso o contradictorio, existe una diferencia entre una fotografía mal enfocada y un cuadro de un paisaje nublado”

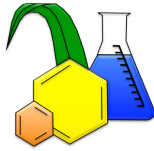
Respuesta

Científicamente, la paradoja está “resuelta” mediante la **decoherencia**:

En la estructura axiomática original de este trabajo, el “colapso” de la función de onda se presentaba como una discontinuidad fenomenológica ligada a la medición. La física contemporánea explica esta transición mediante la **Decoherencia Cuántica**^{14,15}, tratándola no como un postulado ad hoc, sino como un resultado dinámico de la interacción de un sistema abierto con su entorno.

1. El Operador Densidad y Sistemas Compuestos

Para un sistema S' en interacción con un entorno E , el estado total se describe en el espacio de Hilbert como el producto $\mathcal{H}_{tot} = \mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_E$. Si el sistema inicia en una superposición $|\psi_S\rangle = \sum_i c_i |s_i\rangle$, la interacción unitaria con el entorno (Postulado 6) genera un estado entrelazado global:



$$|\Psi_{tot}(t)\rangle = \sum_i c_i(t) |s_i\rangle \otimes |e_i(t)\rangle$$

Donde $\{|e_i(t)\rangle\}$ son los estados del entorno correspondientes a cada autoestado del sistema (la configuración específica en la que se encuentra el sistema).

2. La Matriz de Densidad Reducida y el Trazado Parcial

La información accesible sobre el sistema S se obtiene mediante el **operador densidad reducido** $\hat{\rho}_S$, definido por el trazo parcial sobre los grados de libertad del entorno:

$$\hat{\rho}_S = Tr_E(|\Psi_{tot}\rangle\langle\Psi_{tot}|) = \sum_i c_i c_j^* \langle e_j | e_i \rangle |s_i\rangle\langle s_j|$$

Los elementos de la matriz de densidad se dividen en dos categorías:

1 **Poblaciones (términos diagonales, $i = j$):** Representan las probabilidades clásicas de hallar al sistema en el estado $|s_i\rangle$.

2 **Coherencias (términos fuera de la diagonal, $i \neq j$):** Contienen los términos de interferencia cuántica, proporcionales al solapamiento de los estados del entorno $\langle e_j(t) | e_i(t) \rangle$.

3 **Dinámica de la Supresión de Coherencias.** Debido a la enorme dimensionalidad del entorno (billones de colisiones con fotones, moléculas de aire o fonones), los estados del entorno $\{|e_i\rangle\}$ evolucionan rápidamente hacia la ortogonalidad:

$$\langle e_j(t) | e_i(t) \rangle \approx \delta_{ij} e^{-t/\tau_D}$$

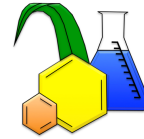
Donde TD es el **tiempo de decoherencia**. Para sistemas macroscópicos, τ_D es órdenes de magnitud menor que cualquier escala de tiempo observable. Matemáticamente, esto resulta en la diagonalización de la matriz de densidad:

$$\hat{\rho}_S(t) \xrightarrow{t \gg \tau_D} \sum_i |c_i|^2 |s_i\rangle\langle s_i|$$

4. Implicaciones para el Realismo Físico

Este proceso transforma un **estado puro** (una superposición cuántica coherente) en una **mezcla estadística** (un estado de "o esto o aquello").

La decoherencia explica por qué los observables macroscópicos poseen valores definidos: el entorno "selecciona" una base preferida (usualmente la base de posición debido a la naturaleza local de las interacciones de potencial) y destruye la capacidad de interferencia de cualquier otra superposición. Así, la arquitectura matemática de los postulados permanece



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

intacta, pero su manifestación en el mundo clásico surge de la pérdida de información de fase hacia el entorno inaccesible.

Este enfoque otorga el argumento teórico necesario para comprender que la "frontera" entre lo cuántico y lo clásico no es arbitraria, sino una consecuencia de la estadística de sistemas granulares entrelazados.

Cuando el sistema interactúa con el entorno (aire, fotones, vibraciones), el entrelazamiento con los billones de grados de libertad del entorno provoca que los términos fuera de la diagonal de la matriz de densidad decaigan exponencialmente hacia cero en un tiempo extremadamente corto (τ_D):

$$\rho_{12}(t) = \rho_{12}(0)e^{-\gamma t}$$

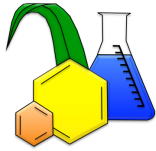
Donde γ es el coeficiente de amortiguamiento del entorno. Para un objeto de 1 gramo, este tiempo de decoherencia es del orden de **10^{-23} segundos**.

Tomemos un par de ejemplos para dimensionar esta magnitud:

- **Contraste con la luz:** En esos 10^{-23} segundos, la luz apenas alcanza a recorrer una fracción del diámetro de un protón. Esto muestra que la **Escala de Planck** es el límite donde la realidad parece "pixelarse".
- **La fragilidad del entrelazamiento:** Ese número explica por qué es tan difícil construir computadoras cuánticas; si un objeto de 1 gramo colapsa en ese tiempo, mantener un qubit aislado es una proeza admirable de ingeniería contra la estadística que requiere dedicación y cuidado.

En definitiva podemos decir que el mundo macroscópico es demasiado "ruidoso" para mantener "la magia cuántica" implícita en el aislamiento de las partículas. Sin embargo, filosóficamente, el debate sobre qué constituye una "medición" o qué causa el colapso de la realidad sigue siendo uno de los temas más profundos de la física.

Podemos considerar que la paradoja del gato de Schrödinger se encuentra actualmente resuelta. De hecho hoy en día se han logrado estados de superposición en el laboratorio como cómo poner grupos de átomos y fotones en superposición de estados opuestos; un cristal en zafiro que se puso en una superposición mecánica y que ha sido el objeto grande hasta la fecha con un peso de 16 μg o la computación cuántica en la que los qubits en los que trabajan empresas como Google o IBM son en esencia versiones microscópicas y controladas de un gato de Schrödinger.



Las distribuciones estadísticas

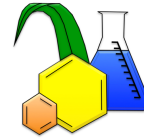
Del Orden Clásico a la Fracción del Espín

El estudio de los sistemas de múltiples cuerpos en física requiere un enfoque estadístico, pues resulta imposible rastrear las trayectorias individuales de trillones de constituyentes. Las **distribuciones estadísticas** permiten entender cómo se reparte la energía entre las partículas de un sistema en equilibrio térmico, determinando así las propiedades macroscópicas de la materia. Esta sección explora la evolución de estos modelos, desde la descripción clásica de los gases ideales hasta las exóticas cuasipartículas que desafían la dicotomía tradicional de la naturaleza.

Históricamente, el punto de partida es la **estadística de Maxwell-Boltzmann**. Este marco describe sistemas donde las partículas son consideradas distinguibles y no existe ninguna restricción sobre cuántas de ellas pueden ocupar un mismo estado energético. Es el régimen de la física clásica, válido cuando las densidades son bajas y las temperaturas lo suficientemente altas como para que los efectos de la mecánica cuántica sean despreciables. Bajo esta premisa, el comportamiento colectivo es simplemente la suma de sus partes individuales e identificables.

Sin embargo, a escalas microscópicas, el principio de **indistinguibilidad** altera radicalmente las reglas del juego. Cuando las funciones de onda de las partículas se solapan, la naturaleza se divide en dos grandes grupos según su espín. Por un lado, la **estadística de Fermi-Dirac** rige a los fermiones (como electrones y protones), partículas de espín semientero que obedecen el Principio de Exclusión de Pauli. Esta restricción impide que dos fermiones ocupen el mismo estado cuántico, lo que da lugar a la estructura de la tabla periódica y la estabilidad de la materia sólida.

En contraposición, la **estadística de Bose-Einstein** describe a los bosones (como fotones y átomos de helio-4), partículas de espín entero que muestran una tendencia social opuesta: la "preferencia" por ocupar el mismo estado cuántico de menor energía. Este comportamiento gregario es el responsable de fenómenos fascinantes como la superfluidez y la formación de condensados de Bose-Einstein, donde miles de partículas se comportan como una sola entidad macroscópica coherente.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

A pesar de la elegancia de esta división dual, la física moderna ha descubierto que en sistemas de baja dimensionalidad (2D) las reglas pueden flexibilizarse. Aquí es donde aparecen los **anyones**, partículas que no son ni puramente bosones ni fermiones. A diferencia de las partículas en 3D, donde el intercambio de posiciones solo puede resultar en un cambio de fase de $+1$ o -1 en la función de onda, los anyones adquieren fases fraccionarias, lo que permite una continuidad estadística entre los límites de Fermi y Bose.

Finalmente, para unificar y cuantificar estas posibilidades, es fundamental abordar la **fórmula de exclusión de Haldane**. Esta expresión generaliza el principio de Pauli al introducir un parámetro de estadística mutua, permitiendo describir sistemas donde la capacidad de un estado para albergar partículas depende de cuántas ya están presentes, pero de una forma no binaria. Este marco no solo es una curiosidad matemática, sino la base para comprender el efecto Hall cuántico fraccionario y las prometedoras tecnologías de computación cuántica topológica.

1- La distribución de Maxwell-Boltzmann

La deducción de la estadística de Maxwell-Boltzmann (MB) es el pilar de la mecánica estadística clásica. Históricamente, James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann la desarrollaron en la segunda mitad del siglo XIX, mucho antes de que se supiera que las partículas eran cuánticas, que tenían espín o que existía el principio de exclusión¹⁶.

En la mecánica clásica, las partículas son **distinguibiles** (como si tuvieran un número de serie) y no hay límite de ocupación por estado.

1.1 El Escenario Clásico: Partículas Distinguibiles

Se parte de N partículas que se quieren repartir en niveles de energía ϵ_i , donde cada nivel tiene una degeneración g_i (número de sub-estados).

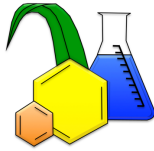
A diferencia de los fermiones o bosones, aquí las partículas "A" y "B" son diferentes. Si se intercambia la partícula A por la B entre dos niveles, obtienes un **microestado diferente**.

La combinatoria para repartir N partículas en grupos de tamaño $n_1, n_2, \dots, n_i$ es el coeficiente multinomial:

$$W_{\text{partículas}} = \frac{N!}{n_1! n_2! \dots n_i!}$$

Además, en cada nivel i , cada una de las n_i partículas tiene g_i opciones de sub-estados donde colocarse. Como son independientes, esto nos da $g_i^{n_i}$ combinaciones adicionales:

$$W_{\text{configuración}} = \prod_i g_i^{n_i}$$



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

El número total de microestados (W) es el producto de ambos:

$$W = N! \prod_i \frac{g_i^{n_i}}{n_i!}$$

2.2. Introducción de la Termodinámica

Siguiendo la famosa fórmula de Boltzmann grabada en su tumba, $S = k_B \ln W$, se busca el estado más probable maximizando $\ln W$.

Aplicamos el logaritmo y la aproximación de Stirling ($\ln x! \approx x \ln x - x$):

$$\ln W = \ln N! + \sum_i [n_i \ln g_i - (n_i \ln n_i - n_i)]$$

2.3. Maximización con Restricciones

Al igual que en las deducciones cuánticas, se debe respetar que el número de partículas N y la energía total E son constantes. Usamos los multiplicadores de Lagrange α y β :

$$\frac{\partial}{\partial n_i} \left[\ln W + \alpha (N - \sum n_i) - \beta (\sum n_i \epsilon_i - E) \right] = 0$$

Al derivar respecto a n_i (lo que es más sencillo porque no hay términos de exclusión como $(g-n)$) se obtiene:

$$\ln g_i - \ln n_i - \alpha - \beta \epsilon_i = 0$$

2.4. La Ecuación Final

Despejando el número de ocupación n_i :

$$\ln \left(\frac{n_i}{g_i} \right) = -\alpha - \beta \epsilon_i$$

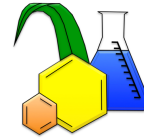
$$n_i = g_i e^{-\alpha} e^{-\beta \epsilon_i}$$

Sustituyendo los valores termodinámicos ($\beta = 1/k_B T$) y agrupando las constantes en una constante de normalización A):

$$f(\epsilon) = \frac{n_i}{g_i} = A e^{-\epsilon/k_B T}$$

que es la famosa **Exponencial de Boltzmann**.

La estadística de Maxwell-Boltzmann precedió históricamente a la otras porque constituye el **límite clásico al que tienden las estadísticas cuánticas**.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- Si se compara esta ecuación con la de Fermi-Dirac (+1 en el denominador) o Bose-Einstein (-1 en el denominador), se aprecia que si la energía es muy alta o la densidad es muy baja, el término exponencial $e^{\epsilon/k_B T}$ se vuelve tan grande que el ± 1 es irrelevante.
- En ese momento, la física cuántica "se apaga" y el gas se comporta como un gas ideal clásico.

2- La distribución de Fermi Dirac

2.1. El Escenario: Microestados y Exclusión

Imaginemos que tenemos un sistema con varios niveles de energía ϵ_i . Para cada nivel i , hay g_i sub-estados (degeneración) y queremos repartir n_i partículas en ellos.

- **Regla de Fermi**^{17,18}: Como son fermiones, cada sub-estado solo puede estar vacío (0) o lleno (1). Por tanto, es obligatorio que $n_i \leq g_i$.
- **Combinatoria**: El número de formas de elegir n_i estados llenos de un total de g_i disponibles es el coeficiente binomial:

$$W_i = \binom{g_i}{n_i} = \frac{g_i!}{n_i! (g_i - n_i)!}$$

El número total de microestados para todo el sistema es el producto de todas las combinaciones de cada nivel:

$$W = \prod_i \frac{g_i!}{n_i! (g_i - n_i)!}$$

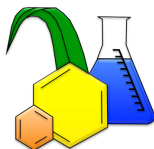
2.2. Maximización de la Entropía

Según la termodinámica, el sistema en equilibrio estará en el estado que maximice el desorden o la probabilidad logarítmica ($\ln W$). Aplicamos el logaritmo y usamos la **aproximación de Stirling** ($\ln x! \approx x \ln x - x$):

$$\ln W \approx \sum_i [g_i \ln g_i - n_i \ln n_i - (g_i - n_i) \ln (g_i - n_i)]$$

Para encontrar el máximo, derivamos respecto a n_i e igualamos a cero, pero con dos **restricciones (ligaduras)** físicas:

1. **Conservación de partículas**: $\sum n_i = N$ (constante)
2. **Conservación de la energía**: $\sum n_i \epsilon_i = E$ (constante)



2.3. Introducción de los Multiplicadores de Lagrange

Se utiliza el método de los multiplicadores de Lagrange para incluir las restricciones (α para el número de partículas y β para la energía):

$$\frac{\partial}{\partial n_i} \left[\ln W + \alpha(N - \sum n_i) + \beta(E - \sum n_i \epsilon_i) \right] = 0$$

Al derivar $\ln W$ respecto a n_i :

$$-\ln n_i + \ln(g_i - n_i) - \alpha - \beta \epsilon_i = 0$$

$$\ln\left(\frac{g_i - n_i}{n_i}\right) = \alpha + \beta \epsilon_i$$

2.4. El Resultado Final

Se despeja el cociente n_i / g_i (que es la probabilidad de ocupación o **función de distribución** $f(\epsilon_i)$):

$$\frac{g_i}{n_i} = -1 = e^{\alpha + \beta \epsilon_i}$$

$$f(\epsilon_i) = \frac{n_i}{g_i} = \frac{1}{e^{-\epsilon_i/k_B T} + 1}$$

Finalmente, por termodinámica estadística, sabemos que $\beta = 1/k_B T$ y definimos el potencial químico como $\mu = -\alpha k_B T$. La ecuación queda:

$$f(\epsilon) = \frac{1}{e^{\frac{(\epsilon - \mu)}{k_B T}} + 1}$$

3- La distribución de Bose-Einstein

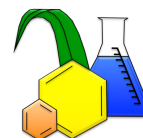
Desde el punto de vista matemático es fascinante ver cómo una pequeña diferencia en las reglas de “conteo” al principio de la deducción cambia por completo el comportamiento del conjunto de partículas del universo.

La separación de caminos ocurre en el **Paso 1: La Combinatoria del Microestado**. Todo lo demás (Stirling, multiplicadores de Lagrange y maximización) es idéntico.

3.1. La diferencia en la “Regla de Ocupación”

Partamos de que tenemos g_i cajas (estados) y n_i partículas.

- **Fermiones (Fermi-Dirac):** Rige el Principio de Exclusión. Cada caja solo puede tener **0 o 1** partícula. Esto es una elección sin repetición.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- **Bosones^{19,20} (Bose-Einstein):** Son sociables. No hay límite; pueden ubicarse allí las n_i partículas en una sola caja. Esto es un problema de “bolas y barras” (combinaciones con repetición).

3.2. El "Punto de Inflexión" Matemático (W_i)

Aquí es donde las ecuaciones toman rumbos distintos. El número de formas de organizar las partículas (W_i) en el nivel de energía i es:

Estadística	Fórmula de Combinatoria (W_i)	Interpretación Física
Fermi-Dirac	$\frac{g_i!}{n_i!(g_i - n_i)!}$	Se eligen n_i espacios vacíos de un total de g_i .
Bose-Einstein	$\frac{(n_i + g_i - 1)!}{n_i!(g_i - 1)!}$	Se distribuyen n_i partículas en g_i contenedores sin restricciones.

3.3. La Derivada Crítica

Cuando se aplica el logaritmo y se derivamos respecto a n_i para maximizar la entropía ($\frac{\partial \ln W}{\partial n_i}$), el resultado del logaritmo **cambia el signo de la unidad en el denominador final**:

1. **Para Fermiones:** Al derivar $\ln \left(\frac{g_i}{n_i} \right)$, se obtiene un término de la forma $\ln \left(\frac{g_i - n_i}{n_i} \right)$.

Esto nos lleva a:

$$\frac{g_i}{n_i} - 1 = e^{\beta(\epsilon - \mu)} \Rightarrow n_i = \frac{g_i}{e^{\beta(\epsilon - \mu)} + 1}$$

2. **Para Bosones:** Al derivar $\ln \frac{(n_i + g_i - 1)!}{n_i!(g_i - 1)!}$, se obtiene un término de la forma

$\ln \left(\frac{g_i + n_i}{n_i} \right)$. Esto nos lleva a:

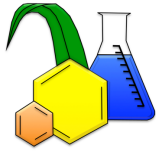
$$\frac{g_i}{n_i} + 1 = e^{\beta(\epsilon - \mu)} \Rightarrow n_i = \frac{g_i}{e^{\beta(\epsilon - \mu)} - 1}$$

$$f_{(\epsilon)} = \frac{1}{e^{\frac{(\epsilon - \mu)}{k_B T}} - 1}$$

3.4. Consecuencias Físicas de un Signo (± 1)

Ese pequeño cambio de +1 a -1 en el denominador crea dos universos opuestos:

- **El +1 (Fermiones):** Impide que n_i crezca indefinidamente. Aunque la energía sea muy baja, la ocupación nunca supera a g_i . Esto permite la existencia de la materia sólida y la estructura atómica.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- **El -1 (Bosones):** Permite que si $\epsilon \rightarrow \mu$, el denominador se acerque a cero y n_i tienda al infinito. Esto es lo que causa el **Condensado de Bose-Einstein**, donde una cantidad macroscópica de partículas cae al mismo estado fundamental.

Ahora bien, si la temperatura es muy alta ($T \rightarrow \infty$), el término exponencial $e^{\beta(\epsilon - \mu)}$ se vuelve tan grande que el ± 1 se vuelve despreciable. En ese punto, ambas estadísticas convergen en la clásica de **Maxwell-Boltzmann**.

4- Los Anyones

4.1. Antecedentes

En 1977 los físicos noruegos Jon Magne Leinaas y Jan Myrheim postularon que en sistemas de dos dimensiones las partículas no tenían que limitarse a ser bosones o fermiones²¹, abriendo la puerta a una tercera categoría de entidades: los anyones.

4.2. Ecuación de distribución

La demostración experimental de la existencia de estas cuasi partículas tuvo que esperar hasta el año 2020 cuando en un experimento en colisionadores se lograron identificar partículas con estadísticas fraccionarias abelianas.

Para los anyones no existe una fórmula tan universal y sencilla como la de Fermi-Dirac o Bose-Einstein para todas las temperaturas, pero se han desarrollado modelos de **Estadística Fraccionaria**. El más aceptado es el propuesto por **Haldane**²², que define una función de distribución basada en el “parámetro de exclusión” g :

- Si $g=0$, se trata de **Bosones**.
- Si $g=1$, son **Fermiones** y
- Si $0 < g < 1$, se tienen **Anyones**.

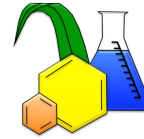
La ecuación para el número de ocupación promedio n_i en un estado de energía ϵ_i se deriva de la relación:

$$\epsilon_i - \mu = k_B T \ln \left(\frac{(1 + w_i)^{1-g}}{w_i} (w_i + g)^{g-1} \right)$$

Donde w_i es una función relacionada con la ocupación. Es menos elegante que las distribuciones clásicas.

4.3. El Comportamiento Macroscópico

En términos de comportamiento, los anyones actúan como un híbrido:



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- **Repulsión estadística:** A diferencia de los bosones, no comparten todos en el mismo estado (condensado), pero no son tan estrictos como los fermiones con el Principio de Exclusión de Pauli.
- **Contexto:** Se ven principalmente en el **Efecto Hall Cuántico Fraccionario**.

En la actualidad, los **anyones no abelianos**^{23, 24, 25}, son la gran esperanza de la computación cuántica, ya que su “memoria” de cómo se intercambiaron (trenzado o *braiding*) permite crear cubits protegidos contra el ruido.

La Construcción de un ordenador cuántico topológico es uno de los desafíos de ingeniería más complejos de nuestra época. Mientras IBM o Google, usan cúbits basados en circuitos eléctricos que ya existen, Microsoft y laboratorios como **QuTech** (en los Países Bajos) han tenido que “inventar” primero un nuevo estado de la materia.

A día de hoy, en 2026, la carrera se centra en el **chip Majorana 1** y en el control de las cuasipartículas. Este es el estado del arte:

4.3.1. Microsoft: El Cúbit “Tetrón” y el Majorana 1

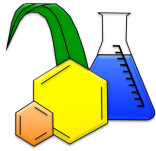
Microsoft ha apostado todo por la **nanocables híbridos**. Su enfoque consiste en crear un sándwich de materiales a escala atómica:

- **El “Topoconductor”:** Utilizan un nanocable de un semiconductor (como el arseniuro de indio, **InAs**) recubierto por una capa delgada de un superconductor (como el aluminio).
- **La Receta Mágica:** Al aplicar un campo magnético muy preciso y enfriar el sistema a casi el cero absoluto, el cable entra en una fase de “superconductividad topológica”. En este estado, aparecen los **Modos Cero de Majorana** (MZMs) justo en los extremos del cable.
- **El dispositivo Tetrón:** En julio de 2025, Microsoft presentó el **Tetrón**, un dispositivo que integra cuatro de estos modos de Majorana. Al tener cuatro, pueden formar un cúbit completo donde la información está protegida “no localmente” (si un extremo se ensucia, el otro mantiene la información).

4.3.2. QuTech (TU Delft): Cadenas de Kitaev y Puntos Cuánticos

Mientras Microsoft usa cables largos, el laboratorio **QuTech** en los Países Bajos utiliza una estrategia de “puntos cuánticos”²⁶:

- En lugar de un cable continuo, crean una cadena de pequeños “islotes” (puntos cuánticos) conectados por superconductores. Esto se conoce como una **cadena de Kitaev**.



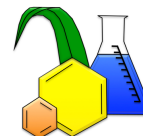
Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- **Control Determinista:** Este método permite mover los Majoranas de un punto a otro de forma controlada. Recientemente (febrero de 2026), han logrado demostrar la **lectura en tiempo real** de estos estados con una coherencia que supera el milisegundo, un hito para esta tecnología.

4.3.3. Los retos que aún enfrentan

A pesar de los avances con el chip **Majorana 1**, construir estos sistemas es como “intentar mantener un castillo de naipes durante un huracán”:

- **El problema de los “Saltos de Paridad”:** A veces, un electrón parásito del entorno salta dentro del sistema y cambia la información (un proceso llamado envenenamiento de paridad). Los laboratorios están trabajando en blindajes criogénicos ultra puros para evitarlo.
- **Intercambio (Braiding):** Aunque ya se pueden crear y leer Majoranas, el siguiente gran paso para 2026-2027 es realizar el **trenzado físico** (mover uno alrededor del otro) para ejecutar una puerta lógica completa.



Revisión Final

Hemos visto como durante el último siglo la mecánica cuántica ha evolucionado desde la formulación de la mecánica ondulatoria, el enunciado de las matrices de Heisenberg y sus postulados formales de operación que hoy en día se han traducido en aportes valiosos a la comprensión y estudio de diversos sistemas tanto en ciencia como en tecnología:

La partícula en una caja nos permitió disponer de un modelo explicativo para la absorción de fotones por sistemas de dobles enlaces conjugados, lo que permite comprender ciertos **mecanismos de reacción**, y para estudios de **potencial molecular en general**.

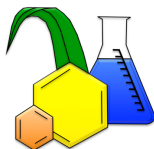
El oscilador armónico mecano-cuántico explica la vibración de enlaces químicos, proceso que está íntimamente relacionado con la teoría fundamental que sirve de basamento teórico para las **espectroscopías de infrarrojo y Raman**.

Las consideraciones relativas al **momento angular** dieron como resultado el establecimiento de las reglas de selección para transiciones electrónicas, hecho, que indudablemente se halla relacionado con la **espectroscopía molecular y atómica** de Ultravioleta-Visible o de emisión o absorción atómica, bien sea por llama o plasma.

El Espín nuclear y el Efecto Zeeman Nuclear constituyen las bases teóricas de la **espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear o RMN**, una técnica analítica fundamental e insustituible para determinar la estructura molecular, pureza y dinámica de compuestos orgánicos e inorgánicos. Permite identificar compuestos, estudiar interacciones moleculares y analizar muestras in vivo, siendo crucial en el descubrimiento de fármacos y control de calidad.

Los procesos fundamentales de **ionización y fragmentación de moléculas** en fase gaseosa están regidos por la mecánica cuántica, ella en conjunción con principios clásicos de electromagnetismo dan fundamento teórico a la **espectrometría de masas**, una técnica de análisis que permite determinar con gran precisión la composición de diferentes moléculas, elementos químicos e isótopos atómicos separando los núcleos atómicos en función de su relación entre masa y carga.

La **teoría del funcional de la densidad (DFT)**, un método de modelado mecanocuántico computacional utilizado para investigar la estructura electrónica de sistemas de muchos cuerpos, como átomos y moléculas, mediante el uso de funcionales de la densidad electrónica. Es particularmente popular para estudiar las propiedades de productos orgánicos y naturales con un coste computacional relativamente bajo.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

La mecánica cuántica constituye marco lógico formal que describe con excelente claridad un universo al que nuestros sentidos e intuición clásica no alcanzan a llegar, pero que a su vez se constituye en la teoría en la que bases numerosos instrumentos para el estudio de la materia.

Los postulados de la mecánica cuántica surgieron como hemos visto de forma fenomenológica explicativa, lo cual quiere decir que nuestro raciocinio no enlazó en ningún momento el microcosmos en estudio con aquello que constituye nuestro habitual objeto de observación, sino con el modelo matemático más acorde con sus características. Esta misma opinión, es decir, considerar a la mecánica cuántica como un modelo es esbozada por Witmer²⁷ y desarrollada por Buch.

Esta revisión histórica de la evolución de la mecánica cuántica muestra claramente como tras el primer cuarto del siglo XX tuvo su exposición, en los años 30 del mismo siglo aparecen las objeciones a sus postulados e implicaciones tan contraintuitivos para la visión clásica y ya entre 1960 y 1985 aparecen tanto las refutaciones teóricas a los cuestionamientos como la demostración experimental de su validez para traernos hasta el inicio del siglo XXI con sus aplicaciones en las nuevas tecnologías especialmente en comunicación e información.

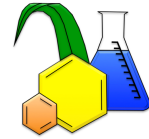
Las supuestas incoherencias que en algún momento se atribuyeron a la mecánica cuántica derivan del hecho de que el pensamiento humano posee un grado de empirismo del cual es sumamente difícil librarse, y siempre esperamos conocer todas las variables que intervienen y constituyen un proceso.

Es así como con el nuevo pensamiento del siglo XX (Pierre Rousseau), donde se elaboran modelos matemáticos totalmente acordes con determinados fenómenos se obvia el empirismo y el investigador busca situarse en un plano de racionalismo puro.

Las investigaciones experimentales a las que hemos hecho referencia en este trabajo demostraron la absoluta pertinencia, coherencia y utilidad de la mecánica como basamento teórico fundamental, lo que como se expuso, permitió el desarrollo de nuevas tecnologías hoy en boga y aún en constante evolución.

La historia nos ha enseñado a ser humildes y por ello estamos muy lejos de considerar que la mecánica cuántica sea una respuesta definitiva a las interrogantes múltiples que nos embargan en nuestra búsqueda de explicaciones para comprender los mecanismos para explicar el funcionamiento del universo, se trata de un modelo, en cuyos ámbitos aún no ha sido dicha la última palabra, por ejemplo, aún hay esfuerzos notables para reconciliarla con la Teoría de la Relatividad en los fenómenos extremos como los agujeros negros, intentos que no han cristalizado aún hasta el presente.

Lo que aún en la segunda mitad del siglo XX era la ciencia de vanguardia hoy en día es tecnología de primera línea que está ayudando a definir la realidad y facilitar la vida y



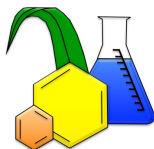
Los Postulados de la Mecánica Cuántica

nuestros procesos humanos mostrando la continuidad simbiótica de ciencia de frontera y los desarrollos tecnológicos y de ingeniería que las insertan en la cotidianidad.

Hemos aprendido a usar el entrelazamiento para computar^{28, 29, 30} y la superposición para medir, pero no hemos respondido por qué la naturaleza elige estas reglas. La computación cuántica es, en cierto modo, una "ingeniería de lo desconocido": operamos la maquinaria con precisión quirúrgica sin haber terminado de leer el manual de instrucciones de la realidad.

Quizá lo más sabio sea continuar perfeccionando las ecuaciones que sostienen la mecánica cuántica, recordando por una parte la frase con la que Hamlet explica a Horacio la presencia del fantasma en el castillo: "En el universo hay más cosas de las que es capaz de explicar tu filosofía" y por otra que nuestros modelos conceptuales presentan limitaciones lógico-conceptuales.

Si bien los postulados de la mecánica cuántica constituyen la arquitectura más robusta de la física moderna, el Teorema de Gödel² nos recuerda que ningún sistema formal puede ser a la vez completo y consistente. Quizás las "intrincadas relaciones" que aún no logramos desvelar no son fallos de nuestra tecnología, sino verdades indecibles dentro de nuestro marco lógico actual.



Bibliografía Comentada

I- Textos académicos

Ira Levine

Química Cuántica. Madrid, Pearson Educación. 5ta edición. 2001

El libro de Levine recorre los temas más relevantes de la mecánica cuántica con la perspectiva de su aplicación en la química en especial la teoría espectroscópica, cubre temas como el teorema del virial, elementos y operaciones de simetría el método de campos autoconsistentes de Hartree-Fock o el teorema de Hellmann-Feynman. Para la versión de 1990 de este trabajo se utilizó la tercera edición de la editorial AC.

Robert Resnick y Robert Eisberg

Física Cuántica. México, Ed. Limusa 1979

El texto de Resnick y Eisberg tiene un sabor más matemático que el Levine pero está basado en una muy buena pedagogía, por ejemplo, el capítulo dedicado al tratamiento de la partícula en la caja, de importancia capital para explicar en espectroscopía las transiciones de electrones conjugados en polienos conjugados, es riguroso y exhaustivo.

Alberto Galindo y Pedro Pascual

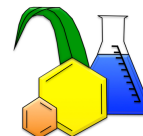
Mecánica Cuántica. Madrid, Ed. Alhambra. 1978

Los profesores Galindo y Pascual elevan el nivel del rigor matemático utilizando la notación de Dirac lo que en su momento me constituyó un reto académico pero es innegable que las deducciones y conclusiones son limpias, elegantes y precisas, en este texto el capítulo dedicado a los postulados de la mecánica cuántica es claro y soberbio. Este libro junto con el de Levine y el Resnick-Eisberg formaron la tríada básica con la que pude aprender dos materias en mi licenciatura que tenían que ver con mecánica cuántica: física IV y físico química III.

Martin Karplus y Richard Porter

Atoms & Molecules. Nueva York. W.A. Benjamin Editors Inc. 1970

Este texto cubre la estructura y espectros moleculares, la estructura atómica, el enlace químico y los átomos multielectrónicos y los métodos de aproximaciones como los de Hartree-Fock o Born-Oppenheimer lo que lo convierte en un excelente texto para físico-química.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Martin Karplus, fallecido en 2024, fue galardonado con el Premio Nobel de Química de 2013 por el desarrollo de programas para el desarrollo de modelos multiescala para sistemas químicos complejos.

Marcelo Alonso y Edward Finn

Física Vol III Fundamentos cuánticos y estadísticos. Nueva York, Fondo

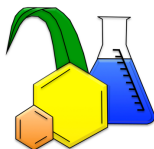
Editorial interamericano, S.A. 1971

Este libro abarca mecánica cuántica, estructura atómica, física molecular y física estadística cubriendo los fundamentos de la mecánica cuántica lo que incluye temas como la hipótesis de De Broglie, el principio de incertidumbre, la ecuación de Schrödinger y la mecánica estadística incluyendo aspectos de termodinámica y distribuciones estadísticas.

Claude Cohen-Tannoudji; Bernard Diu y Franck Laloë

Quantum Mechanics. Nueva York, John Wiley & Sons. 1977

Para el momento en que se hizo este trabajo el profesor Cohen-Tannouji aún no se había hecho acreedor del Premio Nobel de Física (lo obtendría en 1997) y su texto resultaba algo denso, pero no escatimaban en detalles y los complementos al final de cada capítulo son muy útiles para estudiar la teoría general y luego aplicarlos a fin de ver aplicaciones prácticas en áreas como la física atómica, molecular y óptica; la física de la materia condensada y la física nuclear.



II- Estudios de divulgación

Lincoln Barnett

El Universo y el Dr. Einstein. México, Fondo de Cultura Económica Colección Breviarios N° 132 1era edición 1957.

Este libro explica las teorías de la relatividad y física cuántica de Albert Einstein. Elogiado por el propio Einstein, resume cómo la relatividad transformó la física, superando el modelo de Newton y describiendo el espacio-tiempo como una entidad curva.

Louis De Broglie

La Física Nueva y Los Cuantos. Buenos Aires, Ed. Losada 1939.

De Broglie explica en este libro cómo la materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares, comportándose de una u otra manera según el experimento, un concepto fundamental para entender la física cuántica. De Broglie introdujo la idea de que partículas como los electrones pueden describirse también como ondas. Esta teoría ayudó a explicar las órbitas cuantizadas de Bohr como ondas estacionarias.

Pierre Rousseau

La Conquista de la Ciencia. Barcelona, Ediciones Destino 1949.

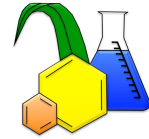
Este libro de divulgación se enfoca en presentar la historia de la ciencia, cubriendo hitos importantes en distintas disciplinas. Tiene un enfoque didáctico y hace accesible la historia del conocimiento científico al público general por el año de su publicación traza la historia de la mecánica cuántica hasta la época en la que los cuestionamiento a la teoría estaban en boga.

John Gribbin

En Busca Del Gato De Schrodinger. La Fascinante Historia De La Mecánica Cuántica. Barcelona. Ed Salvat. Colección Biblioteca Científica Salvat N° 20. 1984.

Este libro relata la contraintuitiva historia de la mecánica cuántica. Presenta una revisión histórica desde los inicios con Planck y Einstein hasta la paradoja del gato de Schrödinger, ilustrando la superposición de estados y la extraña realidad subatómica desde el punto de vista de la realidad cotidiana macroscópica.

Se explica que sin el desarrollo de la mecánica cuántica no existirían tecnologías modernas como láseres, transistores o la medicina nuclear.



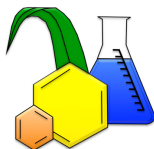
Los Postulados de la Mecánica Cuántica

Es una obra interesante y útil para entender la evolución de la física desde un enfoque determinista hacia uno puramente probabilístico.

James S. Trefil.

De los átomos a los Quarks. Barcelona. Ed Salvat. Colección Biblioteca Científica Salvat N° 8. 1984.

Una obra divulgativa de física que explica la estructura de la materia. El libro detalla el paso desde el concepto clásico de átomo indivisible hasta la comprensión de los protones y neutrones como partículas compuestas por quarks. Aborda cómo los nucleones (protones y neutrones) obedecen reglas internas que se asemejan a una tabla periódica que llevan a la teoría de los quarks. El libro hace accesible la física de partículas compleja. El concepto de quarks ha sido confirmado experimentalmente, siendo parte de las partículas fundamentales de las que se compone la materia.



III- Artículos Especializados

¹ - John S. Bell. **On the Einstein Podolsky Rosen Paradox**. *Physics Physique Fizika*. Vol. 1, No. 3, pp. 195–200. (1964)

Este es un artículo seminal en las investigaciones de mecánica cuántica por cuanto Bell traduce la paradoja de Einstein, Podolski y Rosen a una desigualdad matemática con un límite claramente establecido. Ese famoso límite:

$$1 + P(b,c) \geq |P(a,b) - P(a,c)|$$

que no debería sobrepasarse si existe la realidad local y los postulados de la mecánica cuántica en especial el entrelazamiento no fueron verdad se establece en este artículo.

² Kurt Gödel. (1931). «**Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme, I**». *Monatshefte für Mathematik und Physik* (38): 173-198

Aunque me permito colocar aquí la referencia original que conseguí al trabajo más importante de Gödel, utilicé la traducción al inglés de Elliott Mendelson de 1966 a la que se han hecho cuestionamientos. En este paper se presentan los teoremas de indecidibilidad, una pieza clave en la definición del formalismo lógico-matemático mediante el que construimos sistemas formales de pensamiento y nos aclara como recordatorio que hay límites para lo que podemos llegar a conocer.

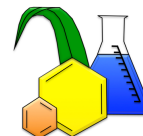
³ Erwin Schrödinger. **Quantisierung als Eigenwertproblem (La cuantización como problema de valores propios)**. *Annalen der Physik*, Vol. 384, No. 4, pp. 361–376.

Schrödinger no publicó su teoría en un solo paper, sino en una serie espectacular de **cuatro artículos** datados en **1926** en la revista *Annalen der Physik*.

Este es el primer artículo, donde aparece por primera vez la ecuación, es el más famoso:

En este artículo, Schrödinger aplicó su nueva teoría al **átomo de hidrógeno**. Lo que hizo fue asombroso:

- Tomó la idea de De Broglie de que los electrones son ondas.
- Utilizó la **analogía de Hamilton** (que mencionamos antes) para derivar una ecuación de onda.
- Demostró que los niveles de energía del átomo de Bohr (que antes eran postulados "porque sí") surgían de forma natural como **frecuencias de vibración** permitidas (valores propios o *eigenvalues*).



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

En sus propias palabras: Schrödinger comparó los niveles de energía del átomo con las notas armónicas de una cuerda de violín. Solo ciertas "notas" (niveles de energía) pueden existir sin destruirse a sí mismas por interferencia.

Para completar su mecánica ondulatoria, Schrödinger publicó tres artículos más ese mismo año bajo el mismo título general (*Quantisierung als Eigenwertproblem*):

- **Segunda parte:** Expuso la base física de la teoría y la relación con la óptica y la mecánica clásica.
- **Tercera parte:** Introdujo la **teoría de perturbaciones**, explicando cómo cambian los niveles de energía bajo campos eléctricos (efecto Stark).
- **Cuarta parte:** Introdujo la versión de la ecuación que depende del tiempo.

⁴ Simon, A. **The Physical Concept of Potential** Am. J. Phys. 33, 60 (1965)

Ariel Simon ofrece una revisión conceptual sobre el **potencial** (como el potencial eléctrico o gravitatorio). El artículo es excelente para estudiantes y docentes porque desmitifica la idea de que el potencial es solo una "abstracción matemática". Discute cómo la energía potencial reside en la configuración de un sistema y cómo este concepto es vital para entender la conservación de la energía en diferentes campos de la física.

⁵ Max Born. **Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (Sobre la mecánica cuántica de los procesos de colisión)** Zeitschrift für Physik, 37, pp. 863–867

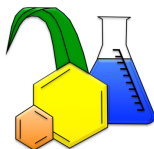
En este artículo, Born estudiaba la colisión de partículas y se dio cuenta de que la mecánica cuántica no predice el resultado exacto de un evento, sino la probabilidad de que ocurra.

Su conclusión principal fue que el valor de la función de onda en sí mismo no tiene un significado físico directo, pero su cuadrado absoluto sí. De allí se desprende lo que hoy conocemos como la Regla de Born: La probabilidad de encontrar una partícula en una posición x en un tiempo t es proporcional al cuadrado de la amplitud de la función de onda en ese punto.

Esa pequeña corrección en el último minuto le valió el Premio Nobel de Física en 1954, casi 30 años después.

⁶ DeWitt, B. S. & Graham, N. **Resource Letter IQM-1 on the Interpretation of Quantum Mechanics** Am. J. Phys. 39, 724 (1971)

Más que un ensayo teórico, este es un artículo de referencia y curaduría. Bryce DeWitt (uno de los padres de la interpretación de "Muchos Mundos") y Neill Graham proporcionan una guía exhaustiva y anotada de la literatura existente sobre las interpretaciones de la mecánica cuántica. Es una hoja de ruta fundamental para investigadores que buscan entender las diferentes escuelas de pensamiento (Copenhague, Variables Ocultas, Muchos Mundos, etc.).



⁷ Alain Aspect, Jean Dalibard, Gérard Roger. **Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers.** *Physical review letters*. 49. 25 pag 1804.

Este artículo expone el que, posiblemente, es el experimento más famoso de la historia de la mecánica cuántica moderna. De hecho, fue la razón principal por la que **Alain Aspect** recibió el **Premio Nobel de Física en 2022**. Su importancia, se debe a que cerró una discusión de casi 50 años entre Albert Einstein y Niels Bohr.

Einstein no creía que el universo fuera aleatorio. Él pensaba que si dos partículas estaban entrelazadas y se comportaban de forma coordinada a distancia, debía ser porque ya traían una "instrucción interna" (una **variable oculta**) desde que se separaron. El experimento de Aspect demostró que **Einstein estaba equivocado**: no hay instrucciones internas. Las partículas realmente se comunican o influyen entre sí de una manera que la física clásica no puede explicar.

⁸ Bohr, N. **Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?** *Phys. Rev.* 48, 696 (1935)

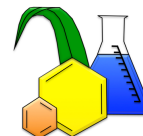
Es la respuesta directa al desafío de Einstein (EPR). Bohr argumenta que la definición de "realidad física" propuesta por Einstein es ambigua. Introduce formalmente el principio de **complementariedad**, explicando que las condiciones de medición forman parte integrante de la descripción del fenómeno. Sostiene que no se puede hablar de las propiedades de un sistema independientemente del dispositivo experimental que lo observa.

⁹ Bohm, D. **A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables.** *I Phys. Rev.* 85, 166 (1952)

Este es el artículo donde David Bohm desafía la interpretación de Copenhague. Propone que la mecánica cuántica es incompleta y que las partículas tienen trayectorias reales y definidas, guiadas por un "**potencial cuántico**". Introduce el concepto de **variables ocultas**, demostrando que es posible una interpretación determinista y causal de la microfísica sin contradecir los resultados matemáticos de la ecuación de Schrödinger.

¹⁰ Wigner, E. P. **The Problem of Measurement.** *Am. J. Phys.* 31, 6 (1963)

Escrito por el Nobel Eugene Wigner, este es un texto fundamental sobre la **consciencia y la medición**. Wigner aborda la paradoja de cómo una función de onda (que es una superposición de estados) "colapsa" en un solo resultado cuando alguien observa. Sugiere que las leyes de la física cuántica podrían necesitar una extensión para incluir el papel de la mente del observador, una idea que llevó al famoso experimento mental del "Amigo de Wigner".



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

- ¹¹ Einstein, Podolsky & Rosen. **Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?** Phys. Rev. 47, 777 (1935)

El famosísimo **artículo EPR**. Los autores presentan un experimento mental para demostrar que la mecánica cuántica es "incompleta". Argumentan que, si podemos predecir con certeza el valor de una cantidad física sin perturbar el sistema (mediante el **entrelazamiento** con otra partícula lejana), entonces esa cantidad debe ser un "elemento de realidad". Como la cuántica no permite conocer todas estas variables simultáneamente, concluyen que la teoría no captura toda la realidad.

Cómo se expuso en el texto la experimentación mostró que el entrelazamiento es una propiedad de las partículas y un cierre digno de una fugaz publicación en X lo podríamos hacer con la frase del profesor Hawking al respecto cuando sostuvo que Dios no sólo juega a los dados sino que a veces los lanza dónde no podemos verlos.

- ¹² Buck, B. **The Velocity of Light and the Principle of Relativity**. Am. J. Phys. 34, 653 (1966)

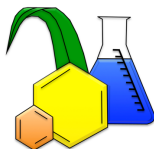
En este trabajo, B. Buck presenta una derivación pedagógica y profunda de la **Relatividad Especial**. Su enfoque principal es demostrar cómo las transformaciones de Lorentz pueden derivarse a partir de principios de simetría y el principio de relatividad, sin necesidad de postular de entrada la constancia de la velocidad de la luz como un axioma separado, tratándola más bien como una consecuencia de la estructura del espacio-tiempo.

- ¹³ Erwin Schrödinger. **Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik**. Naturwissenschaften 23, 807–812 (1935).

En este artículo Erwin Schrödinger, a nueve años de haber publicado su mecánica ondulatoria es uno de los que presenta cuestionamientos a sus implicaciones en el mundo físico presentando un experimento mental en el cual se extrapolan las propiedades de las partículas a los observables del mundo físico macroscópico. El artículo además de ser ampliamente citado, puesto como ejemplo en numerosos temas de divulgación es una muestra de las vicisitudes que tuvo que atravesar la teoría cuántica incluso entre sus propios proponentes para lograr ser aceptada e interpretada de una manera coherente y lógica.

- ¹⁴ Heinz-Dieter Zeh. **On the Interpretation of Measurement in Quantum Theory**. Foundations of Physics, Vol. 1, No. 1, 1970

Este es un artículo fundamental en la historia de la mecánica cuántica, en él, Zeh demostró que el entorno juega un papel central en la recuperación del límite clásico de la mecánica cuántica introduciendo el concepto de decoherencia cuántica. Se discutieron aplicaciones, como la explicación de la aparición de quiralidad en moléculas de azúcar. Ya en 1973 y junto a Olaf Kübler, Zeh explicó usando una matriz de densidad reducida la razón por la que los estados coherentes son los estados más clásicos y por qué la superposición cuántica nunca puede observarse explicando por qué hay una base preferida en mecánica cuántica.



- ¹⁵ Wojciech Hubert Zurek. **Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical**. Reviews of Modern Physics, Volume 75, July 2003 pp 715-775

Este trabajo sintetiza en sus 61 páginas décadas de investigación sobre cómo el entorno selecciona estados estables, provocando la transición del mundo cuántico al clásico. Las propuestas de Zurek son fundamentales en la comprensión de la "decoherencia inducida por el entorno" (EID), explicando cómo los sistemas macroscópicos pierden sus propiedades cuánticas al interactuar con su entorno. Otro de los aspectos resaltantes de este trabajo es que en él se introdujo la idea de "einselection" (selección inducida por el entorno) y desarrolló el "Darwinismo cuántico", explicando la emergencia de la objetividad clásica a partir de la información cuántica.

- ¹⁶ Schlegel, R. **Statistical Explanation in Physics**. Am. J. Phys. 27, 16 (1959)

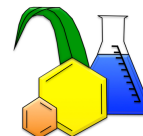
Richard Schlegel analiza la naturaleza de la **probabilidad** en la física. Explora la diferencia entre la descripción estadística en la termodinámica (donde la incertidumbre es por ignorancia de los detalles moleculares) y en la mecánica cuántica (donde la incertidumbre parece ser intrínseca a la naturaleza). Es un artículo reflexivo sobre si la estadística es solo una herramienta útil o una propiedad fundamental del universo en momento en que aún no se resolvía experimentalmente la no localidad y la naturaleza del entrelazamiento cuántico.

- ¹⁷ Fermi, Enrico «**Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico**». Atti della Reale Accademia Nazionale del Lincei (en italiano) 3: (1926). Pp. 145-149., traducido al inglés por Zannoni, Alberto (transl.) (14 de diciembre de 1999). «On the Quantization of the Monoatomic Ideal Gas».

El objetivo de este artículo es "explicar un método para cuantificar el gas ideal que es lo más independiente posible de hipótesis injustificadas sobre el comportamiento estadístico de las moléculas del gas" para ello Fermi distribuye la energía total del sistema entre las N moléculas y con ello termina siguiendo el ejemplo de Maxwell y encontrando una ecuación de distribución de la entropía que describe la distribución de las partículas de espín semientero.

- ¹⁸ Dirac, Paul A. M. «**On the Theory of Quantum Mechanics**». Proceedings of the Royal Society, Series A 112 (762) (1926). 661-677

En este artículo publicado el 1 de octubre de 1926 el professor Dirac busca encontrar una función que permita explicar el comportamiento de una partícula que responda bien a la función de onda de Schrödinger recientemente postulada o a las matrices de Heisenberg cumpliendo con el principio de exclusión de Pauli, su resultado coincide con el que Fermi había encontrado y publicado 4 meses antes.



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

¹⁹ Bose, S. **Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese**. Zeitschrift fur Physik, (1924) 26, 178-181.

Éste es el trabajo fundamental en el cual Satyendra Nath Bose se presenta el desarrollo de la estadística para partículas indistinguibles que comparten un mismo nivel de energía. Aunque no se conocieron en persona Einstein y Bose, pero mantuvieron una colaboración científica fundamental a través de correspondencia en 1924

Fue publicado el 02 de julio de 1924 en la en la revista Zeitschrift fur Physik bajo el auspicio de Albert Einstein y constituyó la base para las tecnologías basadas en los condensados de Bose-Einstein, un fenómeno que ocurre a temperaturas cercanas al cero absoluto, donde los átomos se comportan como una única onda cuántica macroscópica, formando un nuevo estado de la materia.

²⁰ Einstein, A. and Sitzungsber, K. **Quantentheorie des einatomigen idealen Gases**. Preuss. Akad. Wiss., Phys. Math. (1925) Kl. pp. 3–14.

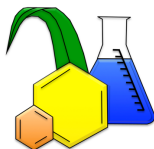
En este artículo Einstein extiende la estadística cuántica de fotones de Satyendra Nath Bose de 1924 a los átomos, investigando el comportamiento de un gas de partículas monoatómicas. El artículo proporciona la idea fundamental de que se produce una "condensación" de una fracción finita de partículas en el estado cuántico de menor energía cuando un gas bosónico se enfría por debajo de una temperatura crítica.

²¹ J. M. Leinaas y J. Myrheim. **On the Theory of Identical Particles**. Il Nuovo Cimento. Vol 37B N° 1. 11 Enero de 1977. Pp1-23

Éste artículo es considera pionero por ser la primera exposición de la posibilidad de existencia de partículas en estado intermedio entre fermiones y bosones encontrando que un continuo de casos intermedios posibles para una y dos dimensiones conecta los casos de bosones y fermiones y se analiza el efecto del espín de las partículas en el formalismo presentado.

²² F. D. M. Haldane. **"Fractional Statistics" in Arbitrary Dimensions: A Generalization of the Pauli Principle**. Physical review letters. 67, 8, 19 de Agosto de 1991. Pag. 937.

La importancia de este trabajo es que parte del concepto de partículas con estadísticas fraccionada en sistemas bidimensionales que se habían encontrado para el momento de publicación del artículo habiendo encontrado aplicación en la teoría del efecto Hall cuántico fraccionario, lo que constituye la base de la teoría de la superconductividad de anyones. Estos estudios llevaron al autor a una noción de una estadística fraccionaria que al igual que las convencionales de Bose-Einstein y Fermi-Dirac se fórmula sin una referencia específica a la dimensión espacial.



- ²³ J. Gross; F. Wilczek **Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories** (1973). Physical Review Letters. 30 (26): 1343–1346

El artículo presenta el descubrimiento de la **libertad asintótica**. Los autores demuestran que las teorías de campo de gauge no abelianas (como la que describe la interacción fuerte entre quarks) tienen una propiedad única: a diferencia de la electrodinámica cuántica, la "fuerza" de la interacción se debilita a medida que las partículas se acercan (energías altas o distancias "ultravioletas").

Antes de este artículo, los físicos no sabían cómo explicar por qué nunca podíamos ver un quark suelto (confinamiento) pero, al mismo tiempo, dentro del núcleo se movían casi sin resistencia. Gross y Wilczek resolvieron el rompecabezas: la fuerza se vuelve **más fuerte** a medida que intentas separar a los quarks, como si estuvieran unidos por una banda elástica.

Este descubrimiento permitió el nacimiento de la **Cromodinámica Cuántica (QCD)**, que es el pilar que explica cómo se mantiene unido el núcleo atómico. El autor, junto a David Gross y David Politzer fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 2004 por este desarrollo.

- ²⁴ Bartolomei et al. **Fractional statistics in anyon collisions**. Science 368, 173–177 (2020)

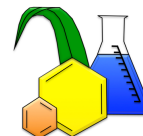
En este trabajo se presenta la evidencia experimental de presencia de cuasipartículas con estadísticas fraccionarias abelianas con factor de llenado $\nu = 1/3$ midiendo las correlaciones de corriente resultantes de la colisión entre anyones en un divisor de haz. Analizando su dependencia de la corriente de aniones que incide en el divisor y comparándola con modelos teóricos recientes, se obtuvo $\phi = \pi/3$, en concordancia con las predicciones.

- ²⁵ Todadri, S., et al. (2025). **Superconducting anyons in MoTe₂**. MIT / Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). (Diciembre 2025)

Investigadores del MIT descubrieron que en materiales de un solo átomo de espesor (como el diteluro de molibdeno), los electrones pueden "fragmentarse" en **anyones** que fluyen sin resistencia. Para su detección se utilizaron Sensores cuánticos de ultra-precisión y **qubits estables a escala atómica**. Esta investigación abre la puerta a una nueva fase de la materia llamada "materia cuántica anyónica", que podría revolucionar cómo se almacena información sin pérdida de energía.

- ²⁶ Louis E. Brus. **Quantum Crystallites and Nonlinear Optics**. The Journal of Physical Chemistry, 1990. 94, 14, 5436–5439

Este artículo examina las propiedades electrónicas y ópticas de los cristallitos semiconductores de tamaño nanométrico (lo que hoy conocemos comúnmente como puntos cuánticos). Brus analiza cómo el confinamiento espacial de los electrones y los "huecos" en estos cristales diminutos altera drásticamente su comportamiento en comparación con el material en estado sólido masivo (bulk). Para el modelado se utilizan modelos de mecánica cuántica (como el modelo de "partícula en una caja") para predecir



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

cómo varían estas propiedades en función del radio del cristalito, estableciendo las bases para la ingeniería de materiales a escala atómica.

Louis E Brus recibió el Premio Nobel de Química en 2023 por el descubrimiento y síntesis de los puntos cuánticos, un trabajo que había comenzado entre 1982 y 1984

²⁷ Witmer, E. E. **Interpretation of Quantum Mechanics and the Role of the Observer** Am. J. Phys. 35, 40 (1967)

En este artículo, Enos Witmer examina las diversas interpretaciones de la mecánica cuántica que estaban en boga a finales de los 60. Se enfoca especialmente en la relación entre el **formalismo matemático** de la teoría y la **realidad física** que percibimos. Al igual que el recurso de DeWitt & Graham, busca poner orden al caos filosófico que rodeaba a la cuántica aún en los años 60 del siglo XX, analizando si el observador es una entidad física pasiva o un participante activo en la creación de la realidad.

Era una etapa aún temprana en la historia de la mecánica cuántica y no se había postulado ni encontrado evidencia experimental acerca del concepto de la decoherencia.

²⁸ Vaswani, Ashish; Shazeer, Noam; Parmar, Niki; Uszkoreit, Jakob; Jones, Llion; Gomez, Aidan N; Kaiser, Łukasz; Polosukhin, Illia (2017). **"Attention is All you Need"**. Advances in Neural Information Processing Systems. 30. Curran Associates, Inc.

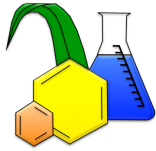
Este es un artículo fundamental y disruptivo en la configuración de los grandes modelos de lenguaje en inteligencia artificial, significó un cambio de paradigmas en el enfoque del uso y gestión de tokens y su programación, y si bien no tiene una relación directa con la mecánica cuántica su desarrollo y el hecho de que los programas se hayan podido correr se debe en mucho a que el hardware y el núcleo de todos los servidores utilizados para actividades de inteligencia artificial se basan, allí sí, directamente, en la aplicación práctica de los postulados de la mecánica cuántica.

²⁹ Takeuchi, S., et al. **Achieving the entanglement measurement of the W state**. Kyoto University / ScienceDaily. (2025).

Aunque el entrelazamiento de dos partículas es bien conocido, el **Estado W** es un tipo de entrelazamiento de tres o más partículas mucho más difícil de medir y utilizar. Este equipo japonés logró por primera vez identificar experimentalmente este estado en fotones. Lo que abre las puertas a tecnologías como **Teletransportación cuántica multicanal** y redes de comunicación cuántica (Internet Cuántico). Al ser más robusto que otros estados, en el Estado W es (como el GHZ); si se pierde una partícula, las demás siguen entrelazadas. Esto permite crear redes de comunicación que no se interrumpen si un nodo falla.

³⁰ Lyons, A., & Brown, B. J. (2026). **Quantum computing with anyons is fault tolerant**. arXiv:2602.11258.

Este trabajo es fundamental para la **computación cuántica topológica**. Los autores presentan un esquema de corrección de errores que permite realizar computación



Los Postulados de la Mecánica Cuántica

universal robusta mediante el "trenzado" (*braiding*) de anyones. **La tecnología:** Propone que, en lugar de usar qubits frágiles que se desmoronan con el ruido térmico, utilicemos el intercambio de posiciones de anyones en un plano 2D. El trabajo demuestra que este método es intrínsecamente resistente a perturbaciones locales, lo que podría darnos las primeras computadoras cuánticas que no cometan errores.

Con este artículo llegamos a la más plena actualidad en las investigaciones sobre el uso de mecánica cuántica y sus postulados: la batalla tecnológica actual por desarrollar la computación cuántica que a través de la generación de anyones bien sea mediante el trenzado o la fabricación de chips específicos de cuasi partículas es la demostración práctica de la vigencia, validez y aplicabilidad que tiene esta teoría ya centenaria y que hoy nos permite asomarnos a la posibilidad de nuevas perspectivas en el ámbito tecnológico para la humanidad.