

LA MECÁNICA CUÁNTICA

y la estructura de la materia



LORENZO DÍAZ CRUZ

Aunque la Física es la más exacta de las ciencias naturales y ha alcanzado un desarrollo impresionante, a tal grado que se pueden describir y predecir muchos fenómenos con alta precisión, resulta curioso y sorprendente que para llegar a ese grado de conocimiento se haya procedido de una manera un tanto accidental, más que haber seguido un camino lógico y bien definido. Incluso podemos decir que en el progreso de la Física bien aplica el verso de Machado: "Caminante, no hay camino, se hace camino al andar".

Sin lugar a dudas ese es el caso de la mecánica cuántica, cuyos principios y métodos nos han servido para tener una comprensión profunda de la naturaleza. Los problemas fundamentales que se han resuelto gracias a la Cuántica, nos permiten tener con una descripción del universo que va desde las escalas subatómicas hasta el origen mismo del cosmos.

Por otra parte, las aplicaciones de la Cuántica han sido de tal amplitud, que bien podemos decir que buena parte de la economía del mundo involucra inventos basa-

dos en la cuántica, desde el láser, los semiconductores, LEDs, etcétera.

Cuando estábamos en los primeros años de la carrera de Física, nos enseñaron que los orígenes de la Física Cuántica surgieron por el interés de resolver algunos problemas asociados con la radiación. Uno de esos problemas era el del Cuerpo Negro, definido como un cuerpo que emite radiación en todas las frecuencias posibles, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

Para resolverlo Max Planck propuso que la energía estuviera cuantizada, esto es que exista una cantidad básica de energía, como una especie de paquetito cuya energía es proporcional a la frecuencia de la radiación, la famosa fórmula $E = h \nu$, donde h es la constante de Planck, un número muy pequeño de hecho, $h = 6.66 \times 10^{-34}$ J-s (J -s = Joules x segundo) y ν es la frecuencia de la onda electromagnética, o sea la luz.

El otro problema que dio origen a la cuántica fue el llamado efecto foto-eléctrico, que consiste en la propiedad de algunos materiales de producir una corriente eléctrica cuando reciben radiación con ciertas características, por ejemplo que la frecuencia sea mayor que un valor crítico asociado con cada material.

La solución propuesta por Einstein se basó también en proponer que la energía de la radiación está cuantizada, pero Einstein fue más allá y propuso que la misma radiación consistía de partículas que ahora llamamos fotones. Ahí hay una contradicción desde el punto de vista de la física clásica, que considera como entes separados a los fenómenos de ondas, como la radiación o el sonido, y las partículas, las cuales son descritas por la mecánica de Newton.

Para un principiante, como cualquiera de nosotros en esos primeros años de la carrera, resultaba difícil comprender la trascendencia de esas propuestas. Muchos nunca habíamos visto ni teníamos idea de lo que era un cuerpo negro en la realidad. Por otra parte, la solución de Einstein del efecto foto-eléctrico parecía tan sencilla como despejar una fórmula simple.

Los maestros fundadores tenían un dominio tal de la física clásica que podían comprender a fondo las contradicciones asociadas con esos fenómenos, algo que estaba muy lejos de unos estudiantes motivados, pero bisoños.

Afortunadamente, al menos para mí, hubo otro problema que también dio lugar al surgimiento de la mecánica cuántica, que me resultó más comprensible. Este fue el problema de la estructura de la materia.

Desde los griegos, con Demócrito en particular, se razonó que la materia no podía dividirse indefinidamente, que tendría que haber un límite, a ese límite que ya no se puede dividir se le llamó átomo. Tuvieron que pasar más de dos milenios, para que fuera posible explorar y comprobar las consecuencias de la hipótesis atómica. Pasamos primero por la alquimia, luego llegó el nacimiento de la química y del método científico propiamente, para que pudiera comprobarse la existencia de los átomos.

Aquí entra también Einstein y su famoso año maravilloso 1905, cuando presentó una explicación del movimiento Browniano, que es el movimiento que experimentan partículas de polvo que se colocan en la superficie de un líquido. Einstein logró explicar dicho movimiento como efecto de los átomos, o moléculas, que componen el líquido.



Desde los griegos, con Demócrito en particular, se razonó que la materia no podía dividirse indefinidamente, que tendría que haber un límite, ese límite que ya no se puede dividir se le llamó átomo. Tuvieron que pasar más de dos milenios, para que fuera posible explorar y comprobar las consecuencias de la hipótesis atómica. Pasamos primero por la alquimia, luego llegó el nacimiento de la química y del método científico propiamente, para que pudiera comprobarse la existencia de los átomos.

Un paso muy importante en esta dirección fue la detección de la unidad de carga eléctrica negativa, por JJ Thomson en 1897. Se comprobó que no había una carga menor que esa carga mínima, que ahora sabemos corresponde a la carga del electrón ($e=1.602 \times 10^{-19}$ Coulombs), siendo este una partícula elemental.

Pero si la materia que nos rodea, madera, rocas, hojas, plástico, todo es eléctricamente neutro, ¿cómo se logra esa neutralidad de la materia? Para explicarlo se propuso que la materia debía ser eléctricamente neutra, pero si estaba formada por átomos, estos debían ser neutros eléctricamente, y eso se debía a la existencia de una carga positiva, que equilibraría la carga negativa de los electrones del átomo.

Pero, ¿cómo se acomodan las cargas positivas y negativas dentro del átomo?

Para responder estas preguntas surgieron los primeros modelos del átomo. Thomson mismo propuso que el átomo era como un tamal con pasas (Fig. 1), la masa del tamal era la carga positiva y las pasas eran los electrones de carga negativa. Cada átomo está definido por el número de electrones que contiene.

Por otra parte, a principios del siglo XX, Ernest Rutherford, que fue alumno de Thomson, se propuso identificar la distribución de la carga eléctrica del átomo. Una parte tenía que ser positiva, para equilibrar la carga negativa de los electrones.

El experimento de Rutherford utilizó partículas alfa, esto es, núcleos del átomo de Helio que se hacían chocar sobre una placa de oro, muy delgada. Si el modelo de Thomson hubiera sido el correcto, se tendría que las partículas alfa pasarían por el material sin dispersarse mucho.

Sin embargo, el resultado que obtuvo Rutherford fue que las partículas alfa rebotaban en diferentes ángulos, incluso a 180 grados (Fig. 2), mismo que podía interpretarse como resultado de colisiones entre las partículas alfa del haz con un objeto que estaba concentrada en un radio muy pequeño, y que debía tener una masa mucho más grande que la del electrón.



FIGURA 1

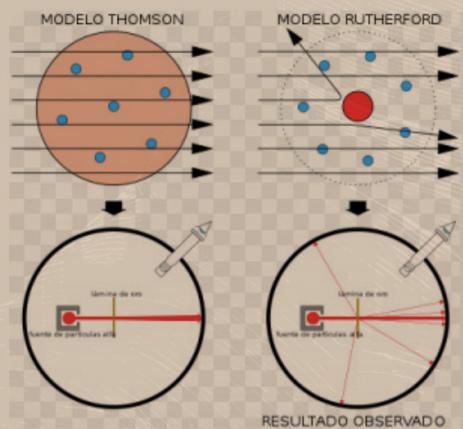


FIGURA 2

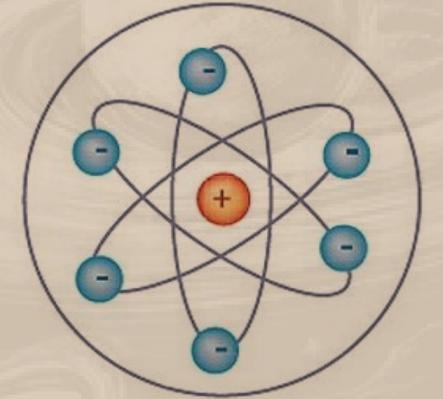


FIGURA 3

Dicho experimento daba lugar al nacimiento del núcleo atómico, como la carga positiva que equilibraba la carga negativa del electrón. Así pues, el modelo de Rutherford proponía que el átomo era como un sistema solar en miniatura (Fig. 3), aunque las trayectorias de los electrones serían más complicadas.

Sin embargo, cuando se intentó aplicar la física clásica para describir los fenómenos atómicos se encontró que eso no era posible. Por ejemplo, según la física clásica el electrón al estar girando en el átomo, siendo una carga eléctrica acelerada debía emitir radiación electromagnética, misma que le haría perder energía y eventualmente caer en el núcleo atómico, y ese caso no los átomos no serían estables y no podrían, según la física clásica.

La salida a este atolladero llegó con la formulación de la mecánica cuántica, cuyo desarrollo está lleno de intuiciones, adivinanzas, y propuestas aparentemente descabelladas. Un ejemplo de ese tipo de argumentos para explicar la estabilidad del átomo se debe a Niels Bohr, quien propuso que las órbitas podrían ser estables si existiera otra cantidad física que también estuviera cuantizada: ¡el momento angular! Pero ¿De dónde saco Bohr su idea? De ninguna parte, lo hizo así porque la idea funcionaba bien, ya luego vendrían otros físicos para dar una explicación más completa y estructurada.

Los pasos siguientes para establecer la mecánica cuántica se deben a otros gigantes de la física, incluyendo a Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Dirac, Born, principalmente.

Erwin Schrödinger propuso una ecuación que lleva su nombre, misma que describe la evolución espacial y temporal de un ente abstracto que contiene la información esencial del sistema, ese ente matemático se le llama "función de onda".

A partir de esta función es posible conocer la energía de los estados del átomo de hidrógeno. La diferencia de energía entre dichos estados coincide con la energía de la radiación que puede emitir dicho átomo, lo cual permite explicar los llamados espectros atómicos, y fue ampliamente reconocido como un paso fundamental para completar la teoría cuántica. Sin embargo, aunque la ecuación de Schrodinger explicaba muy bien los espectros atómicos, no se entendía que era realmente la función de onda. ¿Una especie de onda de materia? No era tan obvio que así fuera.

Un paso más para entender la mecánica cuántica llegó cuando Max Born presentó una interpretación de la función de onda, como una cantidad asociada con la probabilidad de observar un cierto fenómeno. Esos elementos aleatorios hicieron que fuera difícil aceptar la teoría cuántica, e incluso que fuera rechazada por algunos físicos, entre ellos el mismo Albert Einstein basado en la idea de que "Dios no juega a los dados".

Tal vez la razón para este rechazo tenía que ver con el hecho de que la física clásica se basa en la idea de que si se prepara un experimento de forma idéntica, se debe obtener el mismo resultado. Por ejemplo, si apuntamos con una pelota sobre una pared con dos rendijas, la pelotita pasa por una u otra rendija. Sin embargo, en la mecánica cuántica hay una probabilidad para cada una de las distintas posibilidades, así para un electrón que incide sobre las dos rendijas, no podemos saber por cuál pasa, hay una probabilidad de que pase por una, otra o ambas.

El punto culminante que nos mostró cuán diferente es la mecánica cuántica respecto de la clásica, vino con la formulación del principio de incertidumbre debido a Heisenberg. Dicho principio nos dice que no es posible conocer la ubicación y la velocidad de una partícula. Esto implica un hay un limitante para lo que podemos conocer de un sistema físico.

Un paso más para entender la mecánica cuántica llegó cuando Max Born presentó una interpretación de la función de onda, como una cantidad asociada con la probabilidad de observar un cierto fenómeno. Esos elementos aleatorios hicieron que fuera difícil aceptar la teoría cuántica, e incluso que fuera rechazada por algunos físicos, entre ellos el mismo Albert Einstein basado en la idea de que "Dios no juega a los dados".

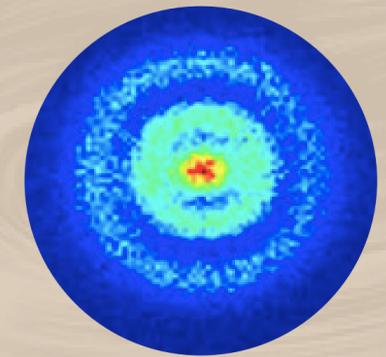
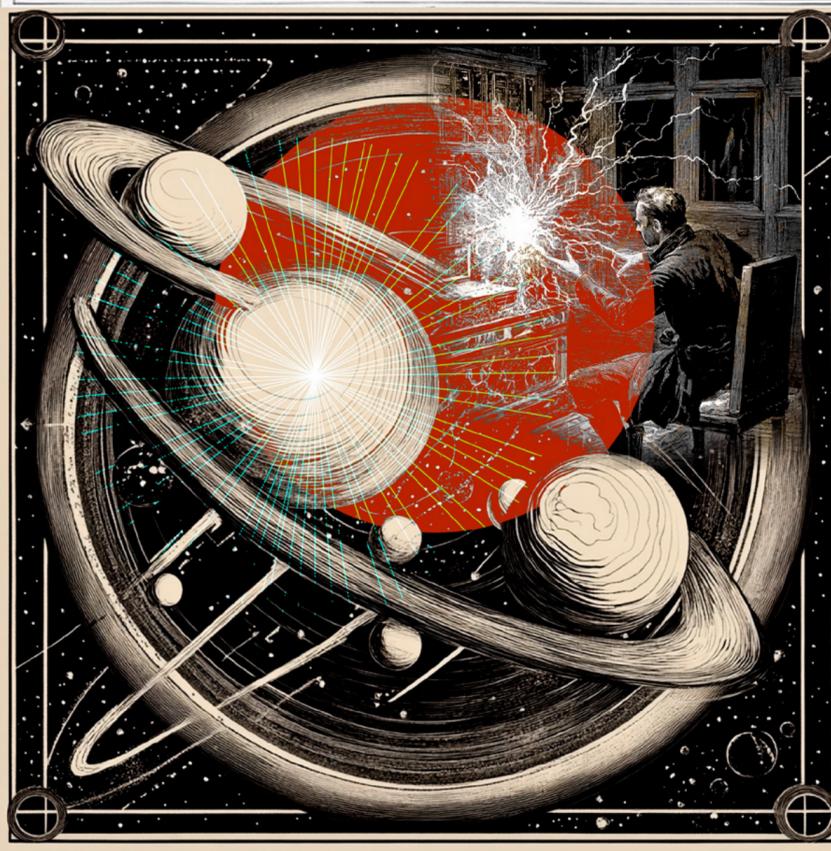
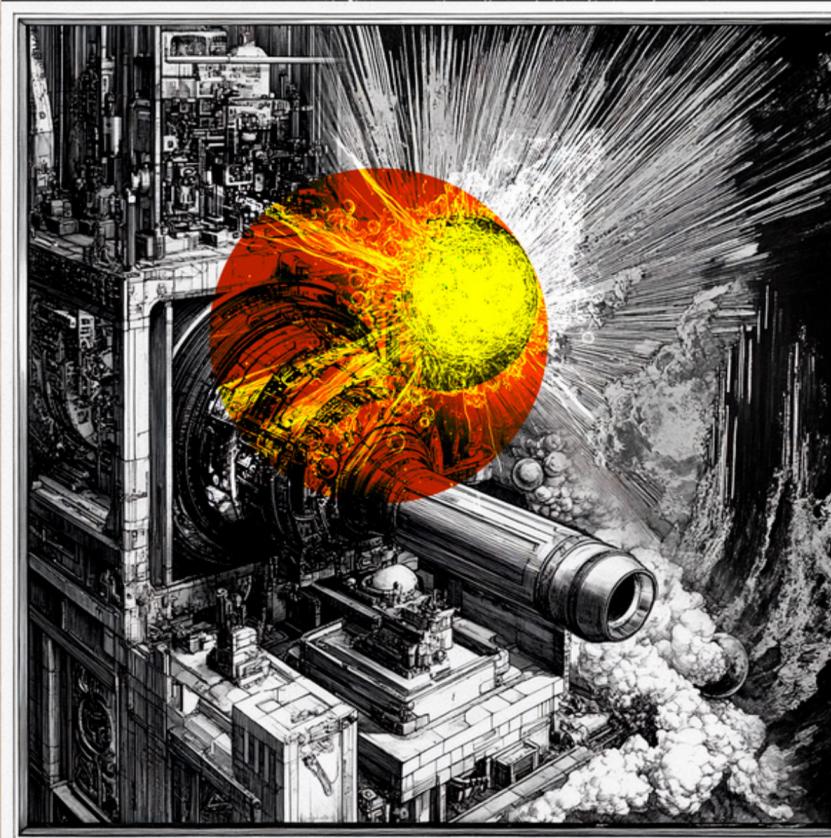
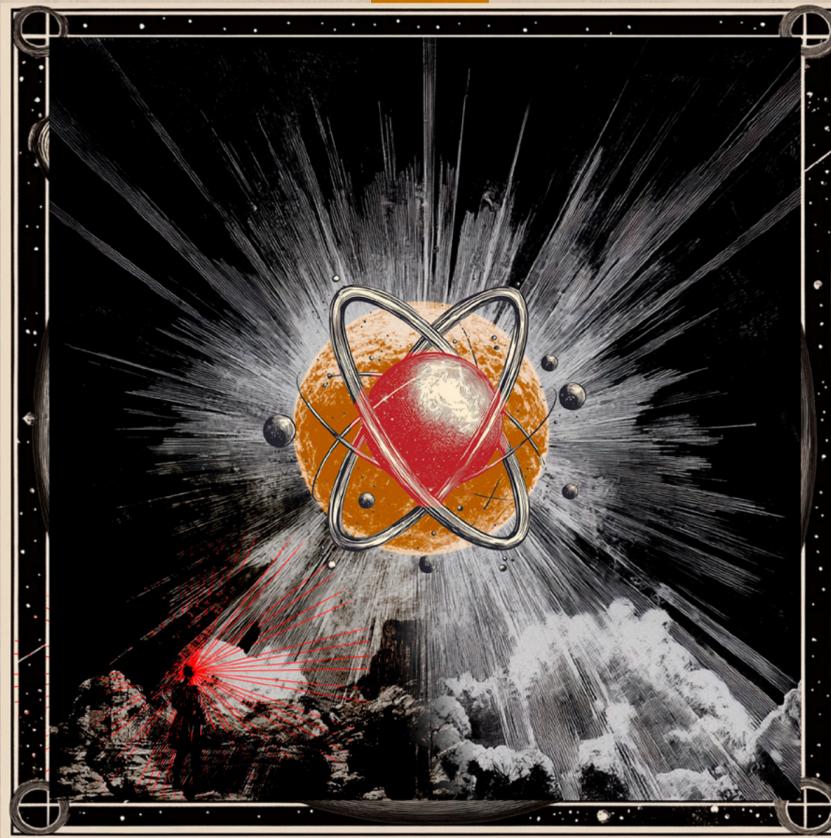


FIGURA 4

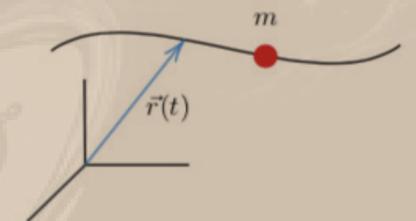


FIGURA 5

En otras palabras, en la física clásica podemos definir la trayectoria de una partícula, porque podemos conocer en todo momento su posición y su velocidad (Fig. 4). Sin embargo, en la mecánica cuántica no podemos hacerlo, y nos debemos conformar con tener una especie de nube de probabilidad. Nos dice que el electrón del átomo quizás esté en unas regiones sobre otras (Fig. 5).

Durante el siglo XX la mecánica cuántica consolidó su dominio como la teoría correcta de los fenómenos atómicos. De hecho se ha aplicado también para entender la estructura del núcleo, que consiste de protones y neutrones. Luego, para extender la mecánica cuántica a energías más altas, fue necesario formular un marco teórico que combinara la mecánica cuántica y la relatividad especial de Einstein, con lo cual fue posible explicar la estructura misma de los protones y neutrones, que ahora sabemos están formados de quarks. Pero ... esa es otra historia.



LORENZO DÍAZ CRUZ
Es doctor en Física por la Universidad de Michigan. Obtuvo el Premio Estatal Puebla de Ciencia y Tecnología en 2009. Fue merecedor de la Medalla de la DPyC-SMF (División de Partículas y Campos, Sociedad Mexicana de Física) en 2003 por su trayectoria en física de altas energías. Pertenece al SNI Nivel III. Realizó estudios en temas de educación en el Seminario CIDE-Yale de Alto Nivel en 2016. Es autor del libro El muchacho que soñó con el bosón de Higgs.