

El Oscilador Armónico

Kurt Bernardo Wolf
Instituto de Ciencias Físicas,
UNAM Campus Morelos
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

Guillermo Krötzsch
Instituto de Ciencias Físicas,
UNAM Campus Morelos

El propósito de este artículo es describir el prototipo más sencillo y perfecto de un sistema cuántico: el **oscilador armónico**, y revisar algunas consecuencias que este modelo ha tenido en la filosofía de la ciencia contemporánea.

Para ello, debemos primero referirnos al oscilador armónico **clásico**: es un modelo que abstrae varios sistemas mecánicos y ópticos que vemos en la vida diaria. Imaginen una pequeña masa unida a un punto fijo mediante una liga perfectamente elástica, es decir, cuya elongación es directamente proporcional a la fuerza que usamos para estirla. Si desplazamos la masa y la soltamos, la masa oscilará de un lado a otro del punto de equilibrio con un movimiento llamado armónico, como ilustramos en la **Figura 1**. La segunda ley de Newton nos remite inmediatamente a resolver la trayecto-

ria y velocidad de la partícula: son curvas descritas por las funciones trigonométricas de seno o coseno, las cuales son favoritas de la naturaleza. Si graficamos la elongación contra la velocidad de la masa y dejamos correr el tiempo, vemos que su trayectoria recorre un círculo; podemos así interpretar la evolución del oscilador como una rotación del plano elongación-velocidad. A éste se ha llamado **plano-fase**, el cual rota rígidamente alrededor del origen de coordenadas; el oscilador armónico es el único sistema con esta propiedad.

La mecánica cuántica difiere de

la clásica en que su descripción es probabilística, es decir, reconoce que las coordenadas de una partícula en el plano-fase no determinan un punto, sino la pequeña área donde es mayor la probabilidad de encontrarla. Esta **función de probabilidad** es el objeto primario que maneja la mecánica cuántica obedeciendo la **relación de incertidumbre** de Heisenberg: las posiciones de las partículas sub-microscópicas como los electrones, no pueden ser sujetas a una determinación exacta sin que el mismo acto de medición perturbe su posición y velocidad. Son dos las funciones de probabilidad

del oscilador armónico cuántico que presentan el mayor interés: aquéllas que más se acercan a la descripción clásica, los llamados **estados coherentes** ilustrados en la **Figura 2**, y aquéllas que tienen una energía definida, llamados **estados propios**, que mostramos en la **Figura 3**. Ambos pueden compararse con el movimiento del oscilador en la primera figura.

Los estados coherentes del oscilador son usados para tratar la luz que se desprende de un láser e interacciona con materia; su estudio y producción experimental durante los años 60s valieron el

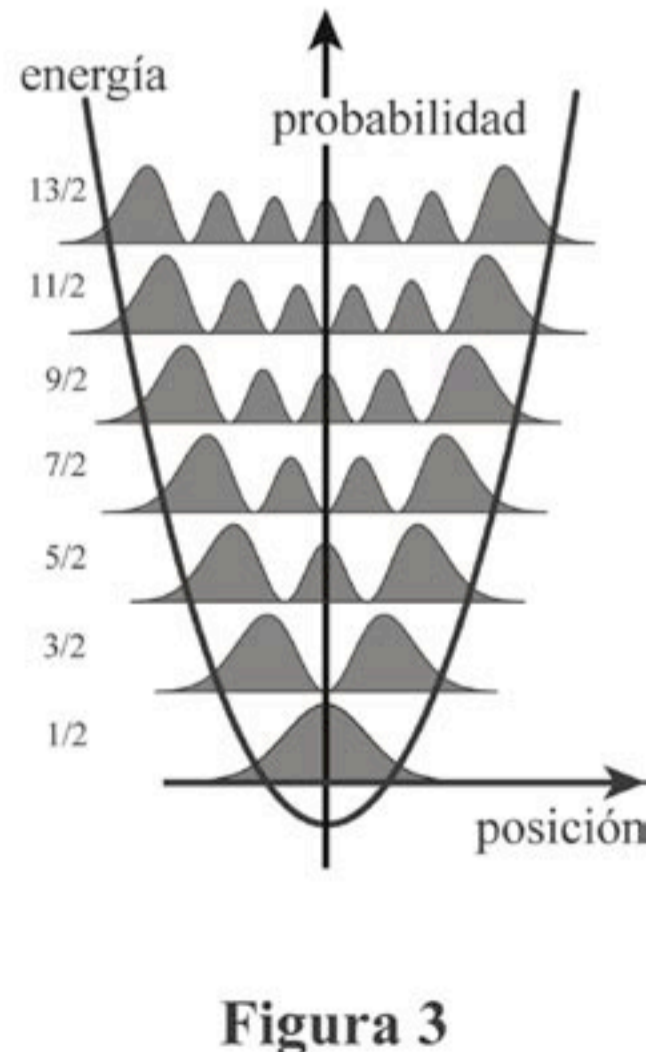
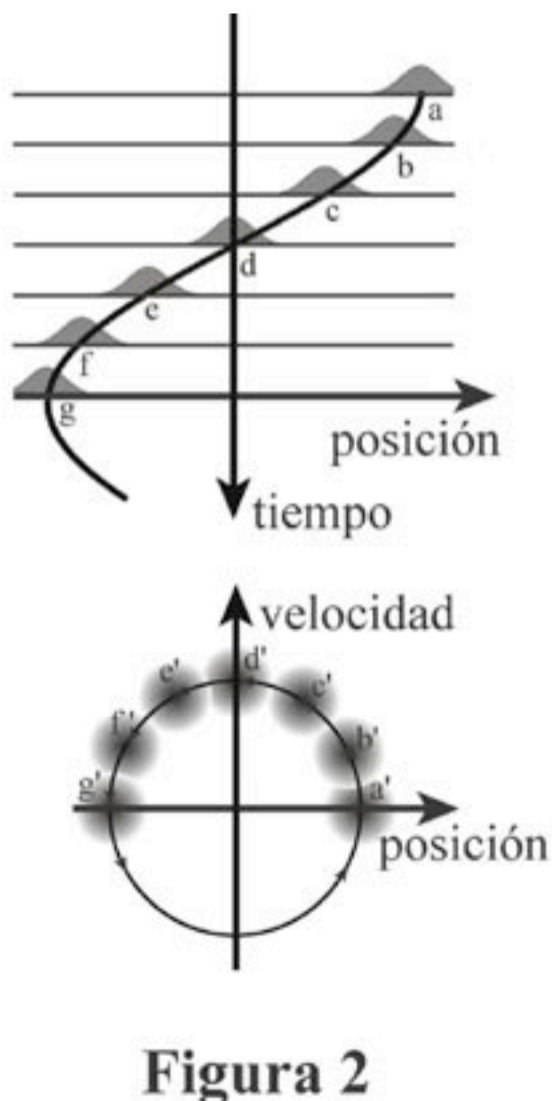
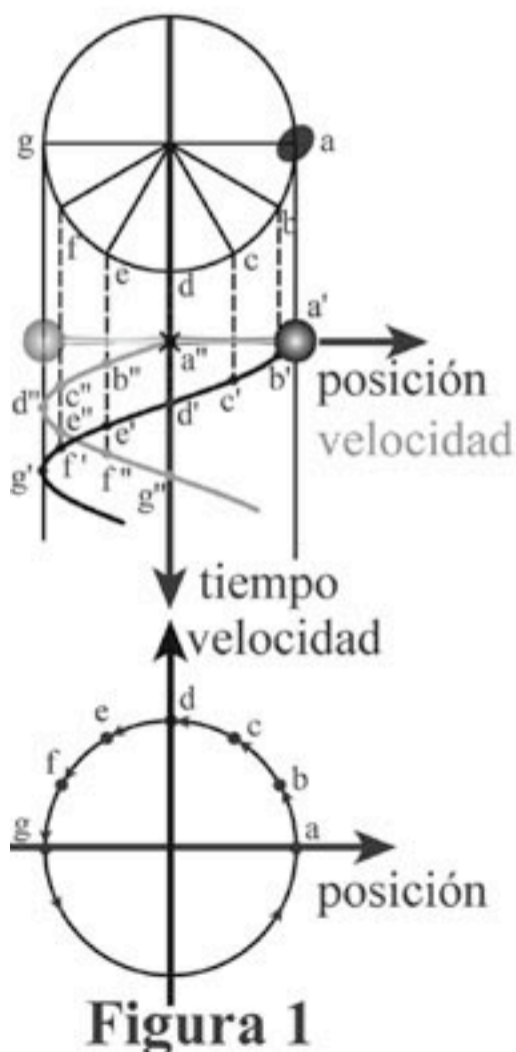


Figura 1: La manivela fija a una rueda que gira (arriba, a–g) proyecta una sombra, la cual se mueve igual que una masa unida por una liga a su punto de equilibrio X: con un movimiento armónico (a'–g'); su velocidad también varía armónicamente (a''–g''). En el plano posición-velocidad (abajo, el plano fase) su trayectoria en el tiempo equivale a una rotación rígida de éste.

Figura 2: Oscilador armónico cuántico, donde la probabilidad está dada por el área bajo las curvas. Los estados coherentes se mueven de la misma manera que el modelo clásico de la figura anterior y tienen una función de probabilidad con incertidumbre mínima.

Figura 3: Estados propios tienen distribuciones de probabilidad más anchas mientras más alta es la energía. ¿En dónde se encuentra la partícula? En todas partes.

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.



premio Nobel en física otorgado a Roy Glauber en 2006 [ver nota 1, al final del texto]. Por otra parte, los estados propios fueron los primeros en ser estudiados y se usaron desde los años 30s para el cómputo de los niveles de energía en modelos del núcleo atómico, también produciendo varios premios Nobel. El movimiento armónico es ubicuo en la naturaleza; lo podemos ver en la sombra de la manivela de una rueda que gira, lo podemos escuchar en una frecuencia pura, tocar en la cuerda de una guitarra, y mirar en el abanico de colores del arco iris.

Entre los detractores de la teoría cuántica basada en distribuciones de probabilidad estuvo Albert Einstein, quien argüía un tanto metafísicamente que Dios no juega con dados. Chocaba con su intuición que la posición de una partícula no pudiera ser localizable en un punto, sino que estuviera distribuida probabilísticamente en todo el espacio, como en la *Figura 3*. ¿En cuál de los máximos se en-

contrará la masa? ¿en todos? La mecánica cuántica predice además que las partículas pueden encontrarse en una *superposición de estados*; es decir, que pueden “estar” en dos o más regiones distantes del espacio al mismo tiempo. Su colega y oponente Niels Bohr, mantenía la opinión que sólo los resultados del cálculo tienen sentido y que toda pregunta fuera del contexto matemático es como buscar el color del número tres. Este punto de vista, si bien no satisfacía la intuición clásica, sí predecía correctamente todos los resultados experimentables.

En 1935, Einstein y sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen publicaron un artículo sutil pero devastador sobre la superposición de estados en sistemas cuánticos, que llegó a ser conocido como la paradoja EPR, y concluyendo que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. Argumentos en pro y en contra de esta tesis campearon durante las siguientes tres décadas, hasta que en 1964 John Bell

diseñó el problema demostrando que ninguna otra teoría (con “variables ocultas”) podría reproducir los resultados de la mecánica cuántica, que para entonces ampliaba sus predicciones a una gama cada vez mayor de sistemas físicos, como el estado sólido, la criogenia, la superconductividad, el efecto láser, además de la fisión y fusión nucleares. Pero tuvieron que pasar otras tres décadas para que durante los 80s las técnicas de la física experimental pudieran poner a prueba los aspectos más álgidos de la paradoja EPR, y otras tres décadas más para que hoy en día se entiendan y utilicen estos conceptos en áreas como la información y la criptografía cuánticas, ya comprobados mediante experimentos de creciente sofisticación con el manejo individual de átomos y de fotones en estados de superposición.

Cuando estudiábamos física en los años 60s nos preguntábamos si las matemáticas de la mecánica cuántica eran más confiables que

la intuición que pregonaban los filósofos humanistas, cuyas herramientas mentales eran las mismas de Platón, Tomás de Aquino, Kant o Gramsci. Asistí (dice esto KBW) varias veces al Seminario de Filosofía de la Ciencia que se reunía en la Facultad de Filosofía de la UNAM, donde recuerdo con pena ajena los vericuetos argumentativos que presentaba el eminente doctor Eli de Gortari para tratar de justificar ante sus colegas y estudiantes los fundamentos de la mecánica cuántica sin apoyarse en precisión matemática alguna; con solo movimiento de manos. Sospecho que justificar la mecánica cuántica sólo a partir de principios filosóficos es imposible, porque nuestra intuición proviene de nuestros cinco sentidos ancestrales y primigenios. La razón es otra cosa.

Pero no piense el lector que ahora todo está entendido, como nunca lo está en la ciencia. Porque si aceptamos que la mecánica cuántica describe la realidad objetiva

de lo infinitesimal, caemos en desavenencias con el segundo pilar de la física moderna: la teoría de la relatividad. La paradoja EPR vuelve a levantar su horrible cabeza cuando ciertas predicciones implican la transmisión instantánea de influencia causal (transporte de materia, de luz o, en este caso, de información), que aún el sentido común científicamente educado juzga imposible. Habrá que esperar que nuevos y más ingeniosos experimentos diluciden las aparentes contradicciones que aún percibimos en las bases de nuestro entendimiento de la naturaleza. El árbol de la ciencia crece, sus ramas se multiplican y florecen sus aplicaciones; mientras, los que exploramos sus fundamentos somos sus raíces, intentando llegar hasta el centro de la tierra.

[1] El Prof. Roy Glauber participó en el Taller Internacional “Osciladores armónicos II” que organizamos con el hoy Centro Internacional de Ciencias AC en Cocoyoc, durante marzo de 1994.

Para actividades recientes de la Academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx



Diplomado Pensamiento científico en el aula



ACADEMIA DE CIENCIAS
DE MORELOS, A.C.

Este Programa tiene como objetivo la **actualización y capacitación en Ciencias para los profesores de Secundaria y Preparatoria/Bachillerato del Estado de Morelos. Las sesiones son impartidas por científicos de primer nivel en los Institutos y Centros de Investigación de la UNAM Campus Morelos (Cuernavaca).**

Acreditación por parte de la Academia de Ciencias de Morelos y la Secretaría de Educación del Estado de Morelos, con valor escalafonario. Certificado por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (Nº ACM- 930330-RW2-0013).

Inicio del Diplomado: Septiembre de 2009

Más información: almadcaro@yahoo.com.mx

Tel: 3 11 08 88 y Cel: 777 15 57 221

Módulos

Se imparten en forma intercalada:

Biología, Física, Matemáticas, Química e Historia de las Ideas Científicas.

Plan de trabajo

- Semiescolarizado y sabatino.
- Horario de 9:00 a 13:00 horas - Secundaria.
10:00 a 14:00 horas - Preparatoria/Bachillerato.
- Se realizarán conferencias especializadas para docentes y conferencias de divulgación para todo público.
- Se llevarán a cabo proyectos de investigación por los profesores con participación de sus alumnos.

Las instalaciones están ubicadas dentro del Campus de la UAEM.

Secundaria-Auditorio del Instituto de Biotecnología, UNAM. De 9-13hrs.

Preparatoria/Bachillerato- Auditorio del Centro de Ciencias Genómicas, UNAM. De 10-14 hrs.