

# ATREVERSE CON LA MECÁNICA CUÁNTICA

AMÍLCAR J. FUNES

*“Quien no se sienta abrumado  
por la mecánica cuántica  
es porque no la ha entendido.”*

Niels Bohr (1885-1962)

*El capitán de fragata (R) Amílcar J. Funes completó, durante su carrera en la Armada, los estudios en Física (licenciatura y doctorado) contribuyendo a la creación del Servicio Naval de Investigación y Desarrollo (SE-*NID*) y del Laboratorio Naval de Ensayos Acústicos (LANEA). Instauró el Programa de Investigación y Desarrollo de la ex SEGBA y actuó más de tres lustros en la Comisión Nacional de Energía Atómica, donde ayudó a establecer el programa de agua pesada, entre otras actividades. Ha publicado un par de libros técnicos (Residuos Radiactivos y Termodinámica Técnica), poesías y cuentos “Pandora enCaja”, que obra en la Biblioteca del Centro Naval y numerosos artículos científicos y de interés general.*

**Se puede vivir la vida como un simple molusco adherido al casco de un navío, aunque la empresa resulta indudablemente más atractiva si se logra conservar durante su transcurso el condimento excitante que derrochan los niños: la curiosidad.**

Puesto a pensar sobre las construcciones mentales empleadas para explicar el mundo físico circundante, el hombre común, el hombre práctico, podría preguntarse si vale la pena hacer el esfuerzo intelectual para comprender una de las más interesantes, que parece reservada sólo para los especialistas: la mecánica cuántica. Si la respuesta fuera afirmativa hasta se animaría, tal vez, a realizar una breve incursión cognitiva para saber de qué trata “la cuántica”. En tal caso, este artículo quizá le sirva de introducción.

La mecánica cuántica, con el auxilio de la conversión de la masa en energía enunciada por la teoría de la relatividad, fue introducida explosivamente en el siglo XX en Hiroshima y Nagasaki. Otras realizaciones también discutidas son los reactores nucleares, mediante los cuales Francia obtiene más del 60 % de su energía eléctrica y la Argentina, no menos del 15 %. En muchas publicaciones se ha discutido sobre la conveniencia del empleo de los reactores, aun frente a los efectos del calentamiento del planeta y de la contaminación, debidos a la generación convencional con plantas térmicas. La lista de ventajas e inconvenientes circula entre despachos oficiales, reuniones de académicos, de empresarios y de ecologistas. De todos modos, la ignorancia no vence al peligro.

Hay otras aplicaciones que se disfrutan sin ambages, cuando no con placer y agradecimiento, como los láseres que graban los discos compactos y los leen, los ubicuos chips empleados en electrónica, la comprensión de la biología molecular y del DNA, los desarrollos de nuevos materiales (e. g. superconductores, superfluidos, fullerenos), la micros-



BOLETÍN DEL CENTRO NAVAL

**Número 809**

Septiembre/diciembre de 2004

Recibido: 28.10.2002

(1)  
Magnetic Resonance Imaging.

copía electrónica, las técnicas de imágenes médicas por resonancia magnética (MRI) (1), por emisión de positrones (PET) (2), y varias otras aplicaciones todavía en desarrollo.

(2)  
Positron Emission Tomography.

Esta mecánica trata de la interpretación de fenómenos básicos que pueden ser observados experimentalmente, como por ejemplo la aparición de la llama amarilla que muestra la sal de cocina expuesta a la llama de un mechero, las características de la luz de las estrellas, la producción de la imagen en un tubo de televisión, la fisión y fusión nucleares, la superconductividad, el magnetismo, etc.

Para explicar estos fenómenos fue necesario comprender las relaciones entre las partículas y sus energías respectivas, dentro del dominio atómico, donde las dimensiones son las del diámetro del átomo ( $10^{-10}$  m = 1 Angström), las del núcleo ( $10^{-14}$  m) o aun menores.

El adjetivo *cuántica* se adhirió a la mecánica a partir del descubrimiento de los gránulos o *cuantos* de energía que constituyen la radiación electromagnética (como la luz). Según se verá luego, las partículas elementales (e. g. los electrones) también tienen la energía cuantificada cuando su movimiento está confinado dentro del dominio atómico.

Por otra parte, el adjetivo *ondulatoria* también le ha sido asignado a esta mecánica submicroscópica porque, por una parte, se comprobó que las partículas muestran propiedades que sólo habían sido observadas en las ondas (fenómenos de interferencia cuando interactúan entre sí). Y por otra parte —quizá la principal— porque al vincular a esas partículas con un tipo de onda que se introducirá luego, se pudieron hacer desarrollos teóricos utilizando una ecuación —la *ecuación de onda de Schrödinger*—, similar a la empleada para tratar los fenómenos ondulatorios en general, como los acústicos, los electromagnéticos, etc. Todo este conocimiento, con la formulación matemática correspondiente, permite efectuar cálculos y predicciones para diseñar y construir dispositivos como los mencionados precedentemente. Es muy importante notar que si se aplica la mecánica cuántica para tratar a las partículas del mundo visible, los resultados coinciden con los obtenidos por medio de la mecánica de Newton.

Desde el punto de vista de lo que sería —por ahora— sólo la comprensión del universo, la mecánica cuántica se ha empleado para explicar las reacciones termonucleares que mantienen caliente al sol (y a las estrellas en general), y los científicos hasta se atreven a formular con su auxilio teorías audaces sobre el origen de todo a partir del Big Bang, la gran explosión primigenia.

Hay filósofos que se han interesado en algunos aspectos de la mecánica cuántica, atraídos por una aparente violación del determinismo, vale decir de la relación sólida entre causa y efecto; y hasta han llegado a reconsiderar el concepto de *realidad* como algo que existe independientemente del observador.

El panorama de las consecuencias del desarrollo de la mecánica cuántica plantea entonces un desafío interesante para intentar una primera aproximación a sus misterios revelados y a aquellos que todavía no han hallado explicación satisfactoria.

### **El señor Planck y el Cuanto de Energía**

Cuando el siglo XX pugnaba por dejar atrás al XIX, uno de los problemas que ocupaban la mente de los físicos era la forma de la curva *intensidad versus frecuencia* correspondiente a la radiación del cuerpo negro. Un cuerpo negro puede ser una cápsula cerrada de porcelana, por ejemplo, con un orificio de comunicación al exterior. Calentada hasta una temperatura que permita medir la radiación que sale por el orificio (p. ej. 500°C o 600°C) se puede obtener la curva mencionada, mediante un instrumento que mida la intensidad de la radiación emitida y su frecuencia (i.e. ciclos por segundo).

Después de algunos intentos fallidos para llegar a una fórmula del tipo

**Intensidad = función de la frecuencia** (para cada temperatura), cuya representación gráfica coincidiera con la curva experimental, el Dr. Planck adaptó creativamente fórmulas propuestas anteriormente y logró llegar a la expresión matemática correcta, aunque se resistía a aceptarla. Algo en ella indicaba que la energía no era emitida (ni absorbida) en forma de radiación continua sino en forma discreta, como si se tratara de pequeños paquetes expresados por

$$E = h \cdot \nu$$

a los que denominó *cuantos* de energía. (“E” es energía, “h” es una constante —constante de Planck, cuyo valor es  $6,63 \cdot 10^{-34}$  Joule.seg—, y la letra griega  $\nu$  (nu) representa la frecuencia.)

Por otra parte, se habían hecho experimentos de iluminación de un metal (por ejemplo zinc) con luz monocromática (de una única longitud de onda p. ej. azul, no como la luz blanca, que es una superposición de varias longitudes de onda distintas), y se había observado el desprendimiento de electrones del metal iluminado, el cual quedaba cargado positivamente.

Einstein, por entonces un inquieto (y doctorado) empleado de la oficina de patentes de Berna (Suiza), vinculó el efecto con los cuantos de energía y propuso como explicación individual del fenómeno (llamado *efecto fotoeléctrico*) el choque de un cuanto (un *fotón*) de radiación con un electrón; de modo que la energía del primero era transferida al segundo, logrando así arrancarlo de su matriz metálica.

Conviene recordar que tanto la radiación térmica del cuerpo negro como la luminosa empleada para lograr el efecto fotoeléctrico son parte del amplio espectro de la radiación electromagnética. Y que el término *espectro* se aplica a una gama de valores de cualquier magnitud variable de la física: radiación, sonido, temperatura, etc. Aunque ahora, generosamente, se habla también de espectros de sensaciones, político, laboral, religioso, etc.

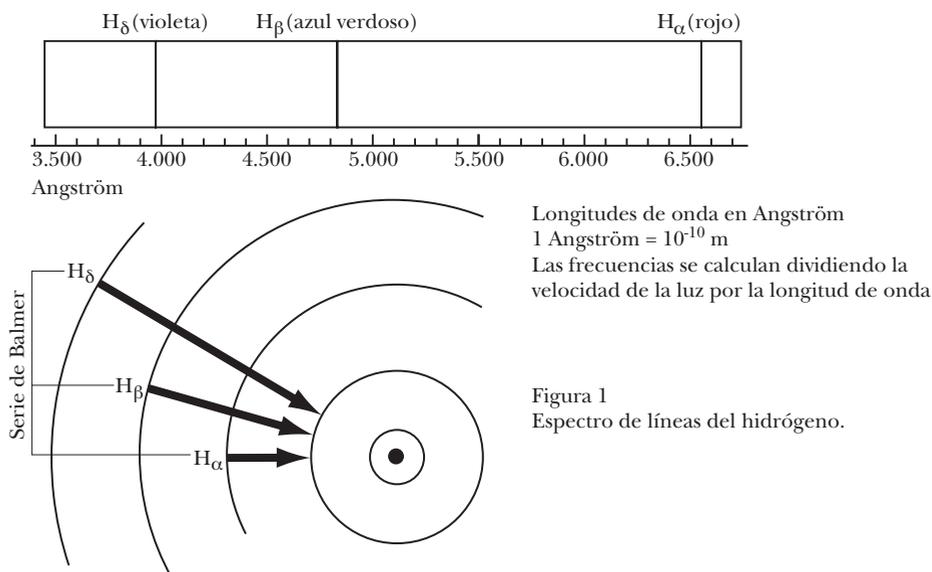
## La Danza de los Espectros

Cualquier persona puede recrear la magia de proyectar los colores del arco iris sobre una pared empleando una palangana con agua, un espejo de mano dentro del recipiente (con el borde superior del espejo apoyado en la pared lateral de la palangana y el borde inferior apoyado en el fondo), y un rayo de sol. Sólo se requiere un poco de habilidad para hacer incidir el sol sobre el espejo a través del agua y dirigir el haz reflejado sobre la pared. La combinación de las superficies del agua y del espejo, con el líquido interpuesto, constituye un prisma donde la luz blanca, además de refractarse (i.e. doblarse), se dispersa (i.e. los colores se separan; el rojo es el menos desviado y el violeta es el más desviado). El arco iris resultante se denomina *espectro solar*. Es un espectro de bandas, una al lado de la otra, sin discontinuidades.

Los científicos se habían sorprendido mucho con un experimento parecido. Utilizaron la luz generada por una corriente eléctrica que provocaba incandescencia al pasar por un tubo con hidrógeno a baja presión. Al atravesar un prisma, esa luz no mostraba un espectro de bandas como el espectro solar del experimento casero, sino un espectro de rayas separadas, denominado *espectro de líneas*, mostrado en la figura 1.

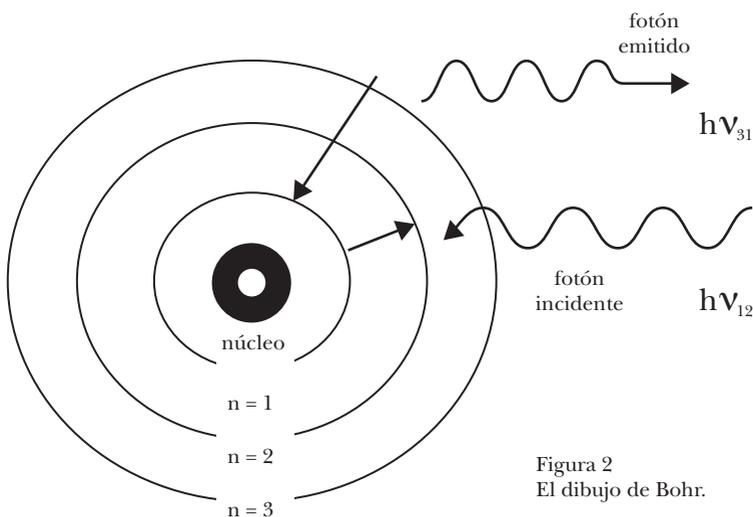
Cada línea aparecía a una frecuencia bien diferenciada (o sea con un color diferente, como se muestra en la figura 1) <sup>(3)</sup>. El Sr. Balmer, un maestro de escuela aficionado a la numerología, propuso una fórmula matemática mediante la cual, haciendo variar en ella

(3)  
Para calcular la frecuencia de una línea, se divide la velocidad de la luz por la longitud de onda de esa línea.



un par de números enteros  $m$  y  $n$  de uno en uno, se podían reproducir las relaciones entre las frecuencias de cada par de líneas del espectro.

Las famosas líneas del espectro de emisión del hidrógeno desvelaban al joven físico Niels Bohr hasta que, para explicarlas, propuso un dibujo del átomo con varios círculos concéntricos alrededor del núcleo. En la figura 2 está reproducido en limpio, aunque fue incluido previamente en la figura 1.



Como ya existía una hipótesis del átomo constituido por un núcleo rodeado de electrones que se movían alrededor de él —en forma análoga a los planetas alrededor del sol— se pensó que la emisión de energía correspondiente a cada línea podría ser debida a la aceleración del movimiento de una carga como la del electrón. Éste es un efecto incluido en la teoría del electromagnetismo de Maxwell. El problema es que el átomo de hidrógeno tiene un solo electrón que puede acelerarse y emitir al hacerlo. Girando alrededor del núcleo, el electrón debería experimentar aceleración hacia el centro del átomo (centrípeta), porque de otro modo saldría disparado como la piedra de una honda de revoleo; y al radiar la energía correspondiente a esa aceleración debería ir perdiendo la energía propia, con el resultado de

que luego de haber dado unas cuantas vueltas en espiral caería en el núcleo hasta alcanzar su energía mínima. Esto sucedería en todos los átomos que emitían la luz de la descarga luminosa del hidrógeno excitado por la corriente eléctrica del tubo.

De ser así, el diámetro del átomo se reduciría de aproximadamente  $10^{-10}$  m, al valor del diámetro de su núcleo, establecido aproximadamente en  $10^{-14}$  m. Además, como esa caída debería suceder en una fracción de segundo, la luz proveniente del tubo gaseoso excitado por la corriente eléctrica nunca podría pasar de ser un efímero destello.

“Estos círculos —dijo Bohr— representan órbitas posibles para el electrón; o mejor, estados posibles de energía. La órbita más interna corresponde al estado de menor energía. La energía del electrón será tanto mayor cuanto más externa sea la órbita en que

se mueva. Mientras se halla en una órbita, el electrón no emite; se halla en un estado estacionario.” Cabe suponer que los físicos de su auditorio fruncieron las cejas. Luego continuó: “Cada vez que el electrón pasa desde una órbita más externa a otra más interna, emite la diferencia de energía entre ambas en forma de un cuanto de luz, un fotón. Es un salto cuántico”. Tal vez algún miembro del auditorio haya dicho: “¡Oh... no!”. Pero Bohr agregó: “El efecto inverso también es posible; un fotón de radiación externa puede golpear al electrón y causarle un salto cuántico desde una órbita (o estado) de menor energía a otra de energía mayor”. (¿Habría habido algún desmayado en el auditorio?) “Y si la energía del fotón es suficiente, puede hacer saltar al electrón fuera del átomo, como se observa en el efecto fotoeléctrico.” (Alguien se levantó y salió.)

## La audacia de De Broglie

Después de la tesis de De Broglie, muchos doctores en física deben haber desesperado del modesto alcance de la tesis propia. Ésta fue su idea en 1924: “Puesto que la luz se comporta como una onda que integra el espectro electromagnético, pero TAMBIÉN se comporta como esa partícula –el fotón–, que es capaz de golpear a los electrones hasta arrancarlos de sus átomos, ¿no sería posible que sucediera lo contrario..., que las partículas se comportaran TAMBIÉN como ondas?”.

Luis de Broglie propuso cuál debería ser el “traje de onda” que usaría la partícula, caracterizándolo por la longitud de onda correspondiente  $\lambda$  (en metros), que cumple la relación:

$$\lambda = h/p$$

donde **h** es la constante de Planck y **p** es el impulso de la partícula, que se obtiene multiplicando su masa por la velocidad que la anima. No hay ninguna consideración agregada, de modo que la expresión vale tanto para un electrón, como para una pelota de fútbol. Si la pelota de fútbol tiene 0,330 kg de masa y se mueve a la velocidad de 10 m/s, la longitud de onda que le corresponde es del orden de  $10^{-34}$  m. Para un electrón a la misma velocidad, la longitud de onda  $\lambda$  es del orden de  $10^{-4}$  metro.

A nadie se le ocurriría hacer una experiencia para estudiar cómo se propagan las ondas de pelotas de fútbol. En cambio, se puede emplear un haz de electrones para proyectarlo como si fuese la luz de una linterna y ver si se comporta como las ondas luminosas.

## Resultados insólitos

Una figura vale por mil palabras. La figura 3 muestra los resultados de dos experimentos cuyas conclusiones siguen a continuación.

La prueba más contundente de que la radiación electromagnética (que incluye la luz visible) es una onda, está dada por la difracción, que permite obtener figuras de interferencia como la fotografiada en la figura 3 (izquierda). Si los electrones también pueden producir esa figura de difracción, como en la figura 3 (derecha), es porque se están comportando como ondas. El señor De Broglie había tenido una intuición genial.

A Bohr le pareció inmediato vincular sus órbitas estacionarias con ondas estacionarias. Solamente era necesario especificar que en cada órbita entrara una cantidad entera de longitudes de onda, para poder empalmar la cola de una onda con su cabeza. En la órbita de radio mayor deberían entrar más longitudes de onda (siempre

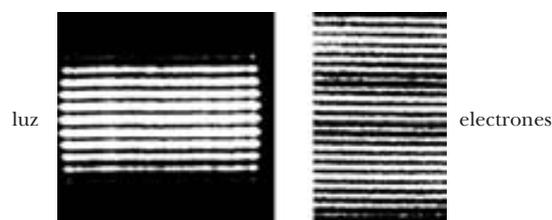


Figura 3  
Difracción por dos ranuras.

En la figura debida a la luz (izq.) cada grano del negativo fue producido por un solo fotón. Imagen obtenida por el Physical Science Study Committee.

En la difracción debida a los electrones (der.) cada grano del negativo fue producido por un solo electrón. Imagen obtenida por el profesor G. Mollenstedt en la Universidad de Turingia (Alemania).

en número exacto). Y esos números deberían coincidir con los “ $n$ ” de su modelo (figura 2), de modo que el nuevo dibujo podría ser el mostrado en la figura 5.

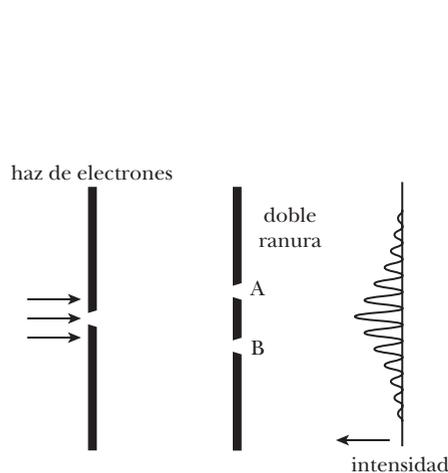


Figura 4  
Dispositivo experimental para obtener las fotografías de la figura 3.

La curva de intensidad representa el perfil del registro: las crestas son las bandas brillantes y los valles, las oscuras.

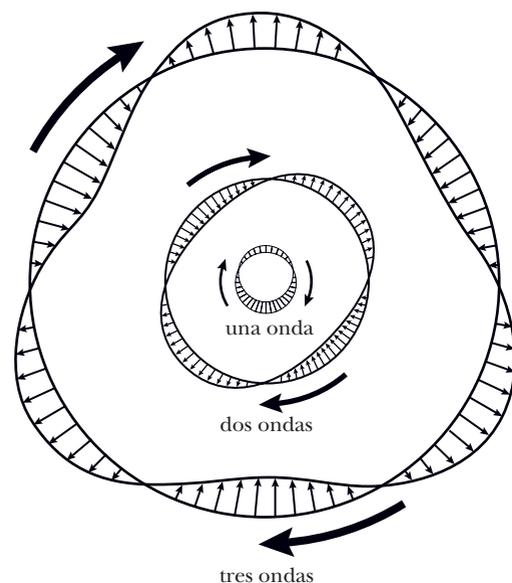


Figura 5  
Ondas de Bohr / De Broglie.

### Complicaciones

Las cuestiones atómicas que no se entendían (e. g. efecto fotoeléctrico, espectros de emisión de líneas de átomos simples, como el hidrógeno) parecían aclaradas con ayuda de los conceptos de cuantificación de la energía y dualidad onda-partícula. Sin embargo, los espectroscopistas (los que estudiaban los espectros de emisión) continuaron descubriendo nuevas líneas en sus placas fotográficas, además de otras peculiaridades, especialmente cuando los átomos emisores se hallaban sometidos a un campo magnético aplicado. Entonces fueron propuestos otros números cuánticos, además del “ $n$ ”, que dieron cuenta del impulso angular del electrón en su órbita (número cuántico “ $l$ ”), de la inclinación del plano de la órbita (número cuántico “ $m$ ”) y, finalmente, hasta se propuso un número cuántico denominado *spin*, relacionado con una supuesta rotación del electrón sobre sí mismo (número cuántico  $s$ ). Con estos cuatro números cuánticos ( $n$ ,  $l$ ,  $m$  y  $s$ ) se pudo dar cuenta de las energías correspondientes a las transiciones que podía efectuar un electrón en órbita alrededor del núcleo de un átomo. En otras palabras, esa cuantificación permitió calcular los niveles de energía posibles de un electrón vinculado a un núcleo. Además, se logró entender la armadura teórica de la tabla periódica de los elementos tal como se la estudia actualmente, con la caracterización de los electrones que van completando las capas alrededor de los núcleos a medida que éstos van incorporando más nucleones: desde el hidrógeno (1 protón) hasta elementos más pesados como el uranio (92 protones). Un complemento teórico indispensable fue el principio de exclusión (propuesto por Pauli), según el cual los electrones se van ubicando alrededor del núcleo atómico en orden creciente de energía, desde la capa con  $n = 1$  en adelante, con la restricción de que en cada capa no pueden coexistir dos electrones con el mismo conjunto de números cuánticos  $n$ ,  $l$ ,  $m$  y  $s$ . Estas reglas pueden ser halladas en cualquier texto secundario de física o de química.

Sin embargo, no se había logrado entender cabalmente el significado de esa onda en que parecía transformarse el electrón cuando se lo invitaba a pasar por ranuras dispuestas adecuadamente (figura 4). De Broglie hablaba de una “onda piloto” que guiaba a la partícula, pero los físicos no se ponían de acuerdo.

Los desarrollos teóricos posteriores estuvieron a cargo de grandes físicos y matemáticos, por cuyas contribuciones a la mecánica cuántica merecieron el Premio Nobel. Ellos fueron Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrödinger y Paul Dirac. Sólo cabe aquí mencionar algunos de sus hallazgos.

Heisenberg no estaba de acuerdo con la consideración de un átomo invisible, con electrones que tampoco se pueden ver dentro de él, ya fueran partículas u ondas. Si el electrón efectuaba una transición desde un estado de energía a otro, sólo se podía tener información sobre los estados inicial y final por la frecuencia del fotón de la radiación absorbida o emitida. Por ejemplo, una transición del nivel de energía 2 al 1, se caracterizaba por la frecuencia que llamó  $n_{21}$ . De este modo, concibió tablas con arreglos numéricos en filas y columnas de números  $n_{ij}$ , donde  $i = 1, 2, 3, \dots$  indicaba la fila y  $j = 1, 2, 3, \dots$  indicaba la columna (los elementos con  $i = j$ , como  $n_{22}, n_{33}$ , etc. se hallaban en la diagonal del arreglo). Otros arreglos similares podían hacerse con magnitudes como la posición  $q_{ij}$  o el impulso  $p_{ij}$ . Born se dio cuenta de que esos arreglos constituían entes matemáticos conocidos, denominados *matrices*, los cuales tienen una propiedad muy interesante: su producto no es conmutativo. Es decir que si **A** y **B** son matrices, su producto **A . B** es *distinto* de **B . A** y por lo tanto **A . B - B . A  $\neq$  0**.

Born y su alumno Jordan hallaron que algunos pares de variables empleadas (que denominaron conjugadas) daban un resultado muy particular:

$$p \cdot q - q \cdot p = h/(2\pi i), \text{ donde } i \text{ es la raíz cuadrada de } (-1). \quad (4)$$

Aquí  $p$  y  $q$  representan, respectivamente, matrices de variables cuánticas equivalentes al impulso y a la posición en el mundo cuántico.

### **“Ay... cómo es cruel la incertidumbre...” Pero la Incertidumbre es un Principio**

Estacado entre las matrices, Heisenberg llegó a otra conclusión que todavía mantiene en vilo a físicos, matemáticos y filósofos. Las variables conjugadas, además de cumplir con la regla de conmutación que se acaba de ver, exhiben una propiedad muy singular: ante incrementos “ $\Delta$ ” de sus valores, el producto de dichos incrementos resulta acotado por la expresión:

$$\Delta p \cdot \Delta q > h$$

Para aclarar el significado de  $\Delta$ , podemos aplicarlo a la fluctuación del valor del dólar diciendo que la divisa experimenta una variación  $\Delta$  (positiva o negativa) casi diaria. Otro tanto sucede con el valor de las acciones en la Bolsa.

Esta característica de las variables conjugadas ha sido denominada “principio de incertidumbre” y establece que esas dos propiedades de una partícula no pueden conocerse simultáneamente con exactitud. Cuando se conoce exactamente el impulso de una partícula (o sea el producto de su masa por su velocidad), su ubicación resulta ser completamente incierta. Y a su vez, cuando se conoce exactamente la ubicación, el impulso no puede ser determinado. La limitación se explica por el análisis de qué significa la medición de esas propiedades.

Supóngase un electrón en movimiento. Para ubicarlo (conocimiento de la posición  $q$ ) es necesario iluminarlo para verlo. Para eso, la luz incidente debe tener una longitud de onda igual o menor que el supuesto tamaño del electrón, digamos del orden de  $10^{-10}$  m (1 Angström), que es más o menos el diámetro atómico típico. Esa longitud de onda está dentro de la gama de los Rayos-X del espectro electromagnético; los fotones correspondientes tienen energía suficiente como para apartar de su camino al electrón que golpean. Y en el instante que sigue ya no se puede saber dónde se halla ese electrón.

(4)  
 $h$  = constante de Planck; el  $2\pi$  aparece por estar vinculado con órbitas circulares, y el “ $i$ ” aparece por la expresión de una onda en forma de exponencial compleja.

“Medir es perturbar”, repetía en sus clases el Dr. Balseiro. Y con el párrafo siguiente daba un paso hacia la filosofía: “El sistema no está constituido solamente por los entes cuánticos, sino que lo integran las partículas, los instrumentos y hasta el mismo observador”.

Con una pelota de fútbol la situación es completamente distinta porque los fotones de luz que deben alcanzarla para hacerla visible no tienen energía para moverla. La perturbación existe, pero es despreciable. Como todos sabemos muy bien, desde el punto de vista práctico se pueden conocer exactamente tanto el impulso cuanto la ubicación de la pelota.

Conviene remarcar que el principio de incertidumbre no tiende a encubrir posibles errores o desprolijidades de la medición en el dominio de la mecánica cuántica (i.e. dimensiones atómicas). Es una limitación impuesta por la naturaleza de la combinación entre el objeto a medir, el instrumento de medición y el observador. Esta situación se pondrá en evidencia nuevamente, al considerar la difracción por dos ranuras.

### **Navegando en las Ondas $\Psi$**

El Dr. Schrödinger leyó un comentario de Einstein sobre la idea de las ondas de De Broglie, en el cual decía: “Creo que representa más que una mera analogía”. Einstein era tan influyente entonces (1925), que eso fue suficiente para que Schrödinger se decidiera a investigar qué significaba tomar literalmente la idea de De Broglie sobre la dualidad partícula-onda.

Al salto cuántico de un electrón orbital de un nivel de energía a otro menor, por ejemplo de  $n = 2$  a  $n = 1$ , le corresponde la emisión de radiación electromagnética caracterizada por la frecuencia  $\nu_{21}$ , según se ha visto. Eso debía corresponder —pensó Schrödinger— a una vibración del electrón dentro del átomo, una vibración que debía ser más complicada que la supuesta por De Broglie (figura 5). Pensó en las ondas sonoras como las producidas por aros vibrantes (¿las órbitas?) o en aquellas más complicadas de una placa; o, todavía, en las vibraciones tridimensionales de las ondas sonoras en el aire que llena una esfera metálica rígida.

En el caso de una cuerda vibrante hay nodos en esos puntos donde la cuerda está anclada; en el caso de la esfera hay nodos sobre las paredes internas, donde el aire no puede vibrar. Y además, según los tonos excitados, hay otros nodos en distintas partes de la cuerda (caso unidimensional) o del interior de la esfera (caso tridimensional). La existencia de esos nodos caracteriza los denominados “modos de vibración”, que Schrödinger vinculó con los números cuánticos. En resumen, él desdibujó el modelo de Bohr y reemplazó al electrón orbital por una onda electrónica cuyo límite era el átomo; su tratamiento matemático siguió líneas que había trazado Helmholtz para la esfera rígida con aire vibrando adentro. Schrödinger caracterizó a la onda electrónica que figuraba como incógnita en su ecuación de movimiento (ecuación de Schrödinger desde entonces) con el símbolo  $\Psi$ .

### **La leyenda de “Tridente”**

En el Instituto Balseiro, a fines de la década de 1950, solía aparecer semanalmente en la cartelera de estudiantes una página con pensamientos breves, ya jocosos, ya serios —siempre inteligentes—, firmados con el símbolo  $\Psi$ , que fue inmediatamente caracterizada como “La Página de  $\Psi$ ”. Profesores y estudiantes aguardaban ansiosos la novedad editorial, siempre intrigados por el autor y la oportunidad en que él pinchaba el papelito en la cartelera. Nunca se llegó a sorprenderlo, aunque se tuvo una fundada sospecha que no pudo ser confirmada. Quienes no habían cursado todavía la materia Mecánica

Cuántica llamaron “Tridente” al fantasma, por la similitud entre la letra griega empleada y el cetro de Neptuno. Entre los sobrevivientes de aquel cenáculo todavía se piensa que Tridente era una mujer.

Volviendo a la física, resulta sorprendente que la cómoda ecuación de onda diera los mismos resultados que la ecuación matricial de Heisenberg, pero se pudo probar que ambos métodos de cálculo conducen a los mismos niveles de energía permitidos para el electrón, ya sea cuando está retenido por la atracción del núcleo o encerrado en cualquier tipo de “caja” de tamaño atómico (el electrón libre no tiene niveles cuánticos de energía).

Es importante notar que cualquier partícula subatómica (e. g. el protón) se puede tratar de la misma manera que el electrón, pero se ha hecho referencia sólo a éste por razones didácticas.

Así como los académicos de Bariloche no lograban desenmascarar a Tridente, también la comunidad mundial de los físicos ha tenido dificultades para hallar el sentido de la función de onda  $\Psi$ . ¿Qué era lo que vibraba dentro del átomo?

“En la física nuclear fracasa la idea de las trayectorias como líneas matemáticas —dice George Gamow—; se hace necesario otro procedimiento para describir el movimiento de las partículas materiales, y es aquí cuando las funciones  $\Psi$  vienen en nuestra ayuda”. Y en otro párrafo de su obra (*Treinta años que conmovieron la Física*) explica: “Ellas no poseen ninguna realidad física, no poseen masa. Tal como se las entiende en la mecánica cuántica, ellas guían el movimiento de las partículas en el mismo sentido como se considera en la mecánica clásica que las líneas de trayectoria guían ese movimiento”. Gamow hace la comparación con el movimiento de los planetas, en el cual las órbitas no son rieles por donde circulan la Tierra, Venus o Marte. Aunque continuas, las funciones de onda no constituyen ningún campo ni sistema de fuerzas con influencia sobre la marcha de los electrones. Max Born fue quien enunció el sentido de la función de onda, expresando que el cuadrado de su valor absoluto representa “la probabilidad de que la partícula se encuentre en uno u otro lugar del espacio y de que se mueva con esta velocidad o con tal otra”.

Considerando solamente lo que sucede en una dimensión, se tiene:

$[\Psi(x)]^2 = \text{probabilidad de hallar la partícula en el punto de coordenada } x.$

Para interpretar el experimento de difracción e interferencia de electrones a través de dos ranuras empleando la función de onda del electrón, es conveniente reexaminar el experimento ilustrado en la figura 4 y hacer la comparación entre los resultados de la mecánica clásica (figura 6) y los de la mecánica ondulatoria (figura 7).

En los esquemas 6 y 7 anteriores se ha colocado a la izquierda un diafragma con dos ranuras horizontales, A

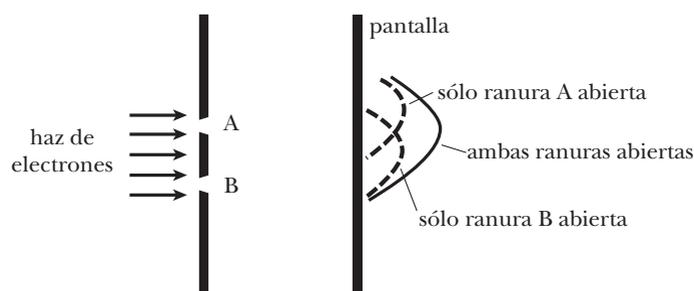


Figura 6  
Distribución de intensidades según la física clásica.

Si los electrones fuesen como proyectiles disparados por una ametralladora floja sobre su base, las distribuciones de impactos serían las mostradas, según que estuviesen abiertas solamente la ranura A, o solamente la B, o ambas a la vez.

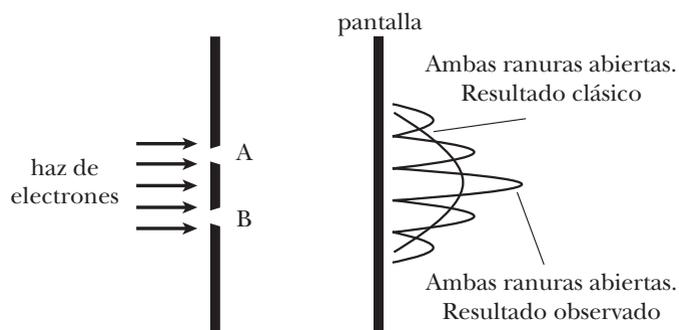


Figura 7  
Difracción por dos ranuras.  
Casos clásico y cuántico comparados.

Con ambas ranuras abiertas se observan las franjas de interferencia. En este caso las crestas de la curva representan intensidades de las bandas brillantes; los valles representan las zonas oscuras interpuestas entre las bandas brillantes. Las ranuras son horizontales. Las bandas también.

y B (de las cuales se ha representado el corte). A la derecha, se reproduce también en corte un elemento de registro, que puede ser una película fotográfica o una pantalla fosforescente. Las curvas que acompañan a esos cortes representan en cada caso la impresión del negativo o la intensidad de luz registrada sobre la pantalla fosforescente. Al igual que las ranuras, son horizontales las bandas que aparecen en las pantallas. Las curvas describen entonces la intensidad de dichas bandas según una línea imaginaria que las cruza verticalmente.

Como se dijo antes, en el caso de las ondas luminosas aparece el fenómeno de difracción con interferencia, que resultó muy sorprendente cuando también se lo obtuvo con un haz de electrones.

Una vez que Schrödinger contribuyó con la mecánica ondulatoria para explicar la dualidad onda-corpúsculo propuesta por De Broglie, llegó el momento de hallarle explicación a la difracción en términos de la famosa  $\Psi$ , que tan bien había respondido para explicar la cuantificación de los niveles de energía del electrón orbital del átomo.

La idea central es la siguiente: las funciones de onda  $\Psi$  de todos los electrones del haz son iguales (todos ellos tienen la misma velocidad). Con la ranura B cerrada, cada electrón que pase por la ranura A incidirá sobre la pantalla para contribuir a formar la banda mostrada en la figura 6 para “sólo ranura A abierta”.

No importa que los primeros cinco electrones caigan lejos del centro de la curva. Es seguro que cuando miles y miles de ellos hayan impresionado la pantalla, la curva de intensidad mostrará que la mayoría fue a parar al centro de la banda, mientras que cada vez menos incidieron en los bordes. Vistos como ondas, a cada electrón le corresponde una  $\Psi_A$  que da lugar a una probabilidad  $P_A$ . La curva correspondiente a “sólo A abierta” representa, aproximadamente, esa probabilidad. En otras palabras, es más probable la incidencia de electrones en el centro de la banda, donde la pantalla muestra la mayor intensidad. Conviene repetir que se trata de un resultado estadístico. Nadie puede predecir dónde incidirán los primeros electrones empleados en el experimento, ni tampoco los últimos. Sólo se puede asegurar que cuando un número suficiente de partículas haya pasado por la ranura A, su distribución sobre la pantalla tendrá el perfil de intensidad mostrado por la curva correspondiente, que es una curva probabilística.

Cuando solamente esté abierta la ranura B, el resultado será el mismo, con el adecuado cambio de B en el lugar de A.

Pero cuando las dos ranuras se hallan abiertas, aunque pasen primero cinco electrones por A, luego uno por B, luego otros tres por B, luego uno por A, etc., la combinación de las probabilidades  $P_A$  y  $P_B$  no es esa suma directa mostrada para “ambas ranuras abiertas” en la figura 6 y en “resultado clásico”, figura 7. En efecto, ahora aparece, además, un término de interacción entre ambas funciones de onda y se obtienen sobre la pantalla varias bandas brillantes cuyas intensidades fotográficas se ven en la figura 3 (derecha) y se hallan graficadas en la figura 4 y en la figura 7, en esta última como “resultado observado”.

A cualquiera pueden ocurrírsele preguntas comprometedoras como las siguientes: ¿qué pasa cuando ambas ranuras están abiertas y los electrones del haz vienen de uno en uno? ¿Por dónde pasará el primero? ¿Y el segundo? Si el primero pasó por A, ¿qué hará el segundo? ¿Irá por B?

Con ambas ranuras abiertas todo sucede como si una vez franqueado el diafragma, las ondas  $\Psi$  (que para todos los electrones de ese experimento son funciones iguales) se combinaran para dar una función de probabilidad  $P_{AB}$  representada gráficamente por la curva del “resultado observado” de la figura 7. La misma curva sirve para interpretar la existencia de las bandas de la figura 3, derecha.

Cada electrón que se acerca al sistema de ranuras parece saber si está abierta solamente la A (en cuyo caso contribuirá a la curva “sólo A” de la figura 6), o la solamente la ranura B (en cuyo caso contribuirá a la curva “sólo B”); o si están abiertas ambas ranuras (en cuyo caso contribuirá a la curva de interferencia del “resultado observado” de la figura 7). ¡Hasta se podría pensar que el electrón, cuando están abiertas ambas ranuras, pasa un poco por cada una!

### Y ahora... ¡el gato!

El mismo Schrödinger se resistía a darle algún sentido a esa probabilidad calculada a partir de la función de onda  $\Psi$ , concepto que había sido elaborado por Max Born. Es procedente aclarar que debido al caluroso apoyo dado por Niels Bohr a esta idea, se llegó a pensar que era debida a él, hasta el punto de haberse difundido como “la interpretación de Copenhague”, ciudad del Instituto de Bohr.

El caso es que para probar que esa interpretación podía llevar a conclusiones sin sentido, Schrödinger propuso la famosa paradoja del gato, ilustrada en la figura 8.

En una caja con mirilla está encerrado un gato. Hay también una muestra radiactiva que efectúa por lo menos una desintegración cada hora, con emisión de una partícula, digamos un electrón. Hay también un contador Geiger asociado. Cuando el contador registre esa desintegración, accionará un mecanismo que romperá un frasco con cianuro y el gato morirá envenenado. La desintegración nuclear es de naturaleza aleatoria y su probabilidad de ocurrencia es la misma en cada instante. De modo que la emisión del electrón puede acontecer en el primer minuto de la hora establecida para el experimento, o a los 25 minutos y medio, o en la última décima de segundo de esa misma hora.

Dentro del lapso de la prueba, por ejemplo a los 30 minutos, ¿el gato estará vivo o muerto? De acuerdo con las condiciones establecidas precedentemente, puede estar vivo o puede estar muerto. Esto lo verificará un observador cuando destape la mirilla y vea qué ha sucedido.

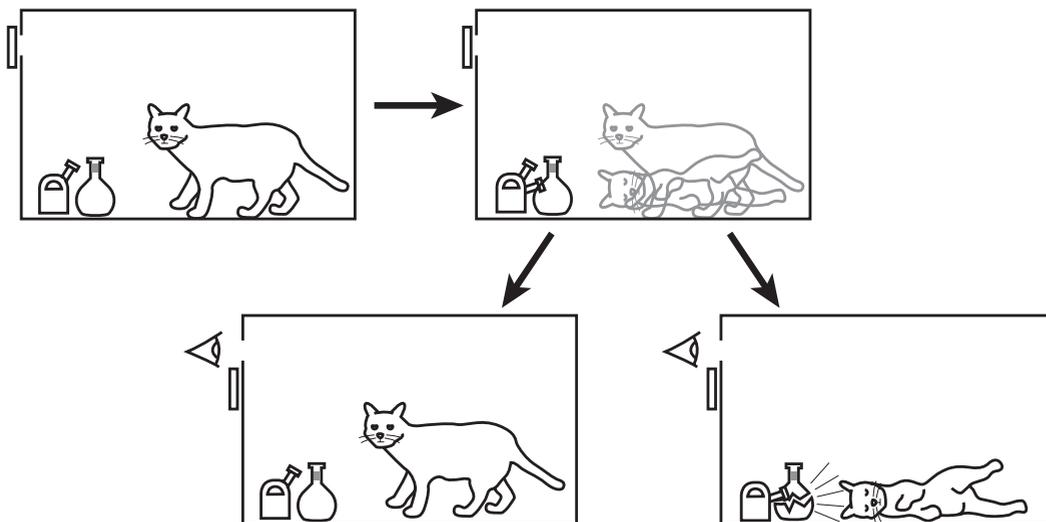


Figura 8  
El gato de Schrödinger... no se sabe si está vivo o muerto.

Según John Gribbin (*En busca del Gato de Schrödinger*), se puede decir que no hay forma de conocer el resultado hasta que se observe por la mirilla. Ya se dijo que la desintegra-

ción radiactiva es un fenómeno aleatorio y es impredecible, excepto en sentido estadístico; vale decir que la probabilidad del suceso surge de los resultados obtenidos en numerosos experimentos análogos. De acuerdo con la interpretación de Copenhague, en el experimento de las dos ranuras existe la misma probabilidad de que el electrón pase por A o por B, y ambas probabilidades solapadas dan el valor  $P_{AB}$ , que representa una superposición de estados, cada uno con su respectiva probabilidad  $P_A$  o  $P_B$ . En el experimento del gato se tienen las dos funciones de onda, que permiten calcular las respectivas probabilidades: una para la no desintegración y otra para la desintegración. La superposición de estados posibles (del electrón en el átomo no desintegrado y del electrón en el átomo desintegrado) es real hasta el momento de la observación; y ella estaría descrita por una superposición de las funciones de onda correspondientes (tales como “no” y “sí”, que podría ser llamada “ni”).

Solamente cuando se observa, la función de onda compuesta colapsa en la correspondiente a uno de los dos estados.

Mientras no se observe por la mirilla, “habrá una muestra radiactiva que se ha desintegrado y no se ha desintegrado, un vaso con veneno que no está ni roto ni entero, y **un gato que está muerto y vivo, y ni vivo ni muerto**”.

En esta paradoja del gato, la superposición de estados es real hasta que se observa. En el experimento de la doble rendija, que un electrón haya pasado por una ranura o por la otra, que no esté ni aquí ni allá, que esté un poco en cada lugar, son lucubraciones que se pueden poner bajo el paraguas de lo probable, mientras se saborea una taza de té contemplando una fotografía tan concluyente como la de la figura 3. Pero imaginar al gato en esta forma de muerte indefinida es tan inadmisibles que todavía la discusión no ha cesado. Puede ser que el problema radique en que dentro de la hora, para cierto instante no observado... el gato no esté ni vivo ni muerto, sino... ¡50% vivo y 50% muerto! De modo que es difícil reconciliar un suceso cuántico como una desintegración, que puede ser detectada por un instrumento (contador Geiger), con la interpretación probabilística de Copenhague.

### **Salto al vacío (el gato siempre cae parado...)**

En la década de los años 1950, Hugh Everett desarrolló una tesis muy original donde propuso que las funciones de onda  $\Psi$  no se colapsan en el momento de la observación como lo había anticipado la “interpretación de Copenhague”. Según él, al observar qué pasa con el electrón cuando se aproxima a las dos ranuras, uno de sus estados posibles –descritos respectivamente por  $\Psi_A$  y  $\Psi_B$ – colapsa y sólo se registra el pasaje por la ranura A (descrito por  $\Psi_A$ ) o por la ranura B (estado descrito por  $\Psi_B$ ). Everett sostiene que ambas posibilidades son reales y que en lugar de colapsar en una sola, se separan en el momento de la observación.

Por ejemplo, si se observa el pasaje por la ranura A, la función de onda  $\Psi_B$  no se esfuma sino que describe el suceso del pasaje por B en otro mundo, en otro universo posible.

En el caso del gato, si el observador lo viera muerto al abrir la mirilla, el “otro gato” (correspondiente al otro estado) pasaría a estar vivo en otro universo. Esto no significa que en ese otro mundo posible el gato pueda ser extravagante y tener cinco patas o desarrollar alas. No es que todo lo imaginable pueda ocurrir. Según Everett, sólo aquello que es posible ocurre en alguna versión de la realidad, en algún lugar del superespacio que se identifica con otro universo ¡Hasta dónde puede conducir la difracción de un haz de electrones por dos ranuras, un experimento reproducible en cualquier laboratorio de física modesto!

Aunque según Richard Feynmann “el experimento de la doble ranura contiene el único misterio”, todavía no es posible permitir que el lector retorne a su cordura habitual.

La otra pieza de resistencia de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre, fue formulado unas página atrás para la coordenada espacial “x”, pero la extensión a las otras dos (y, z) es inmediata.

Dado que Einstein había propuesto en su teoría de la relatividad que el tiempo funciona como una cuarta coordenada (que en realidad es el producto c.t, donde c es la velocidad de la luz), fue posible plantear una cuarta relación de incertidumbre:

$$\Delta E \cdot \Delta t > h$$

En el Congreso Solvay de Física de 1930, Einstein debatió con Bohr porque no aceptaba la validez de esa relación; sus argumentos no se impusieron y el prestigioso Herr Albert se fue de este mundo refunfuñando por aquel incidente.

La incertidumbre entre la energía y el tiempo da para lucubraciones teóricas que quitan el sueño. Aun en el espacio vacío se puede “pedir prestada” a la nada una cantidad de energía  $\Delta E$ , siempre que sea por un tiempo  $\Delta t$  tal que el producto de ambos incrementos se mantenga por debajo de los  $6,6 \cdot 10^{-34}$  [Joule.seg], valor de la constante h de Planck. Debido a que  $E = m \cdot c^2$ , la energía y la masa son interconvertibles y entonces resulta factible que alrededor de cada quien bailoteen por tiempos brevísimos infinidad de partículas de masa “m”, plasmadas desde esos  $\Delta E$  de energía, las cuales aparecen y desaparecen fugazmente como los guiños de las luciérnagas nocturnas...

Es una verdadera injusticia no haber mencionado la contribución de Paul Dirac a la mecánica cuántica (o mecánica ondulatoria según otros textos). Pero tratándose de trabajos teóricos relacionados con el álgebra cuántica, la electrodinámica cuántica y otras cuestiones no menos abstractas, una mezcla de piedad y buen juicio aconseja detenerse en este punto.

#### **Para aprobar el examen. Resumen S.D. (sin demostraciones)**

La Mecánica Cuántica nació con ese nombre a partir de los trabajos de Planck; después de los trabajos de Bohr, de De Broglie y de Schrödinger, se publicaron muchos textos con el título de Mecánica Ondulatoria. Actualmente, los títulos de los libros más destacados han vuelto a la denominación Mecánica Cuántica (M.C.).

Este artículo ha sido enfocado sobre los siguientes conceptos:

- La M.C. es aplicable a cualquier partícula de tamaño comparable con el diámetro atómico, que es del orden de 1 Angström ( $10^{-10}$  m). En el texto se ha hecho referencia solamente al electrón por un motivo didáctico.
- Toda vez que el electrón esté confinado en un espacio de dimensión atómica, solamente dispone de niveles discretos de energía para ubicarse. Cualquier cambio de energía acontece por un salto cuántico, ya sea desde un nivel más alto a otro menor (con emisión de un cuanto de radiación de valor  $E = h \cdot \nu$ ), o desde un nivel inferior de energía a otro superior (con absorción de un cuanto de radiación).
- A cualquier partícula, atómica o macroscópica, animada de un impulso  $p = m \cdot v$ , se le puede asociar una longitud de onda  $\lambda = h/p$ . Las partículas atómicas (como los electrones) se mueven con velocidades que son fracciones de la de la luz; a un tercio de esa velocidad la longitud de onda del electrón llega a ser del orden de  $10^{-1}$  Angström. Una longitud de onda típica de la luz visible es de 5.000 Angström.

- Los electrones, a su paso por orificios o ranuras de dimensión comparable con su longitud de onda, se comportan como ondas o como partículas, según el instrumental empleado para efectuar la observación. El comportamiento ondulatorio produce fenómenos de interferencia como los de la radiación electromagnética (e. g. luz). En el efecto fotoeléctrico, los electrones emitidos se comportan esencialmente como partículas.
- A cada partícula se le puede asociar una función de onda  $\Psi$  cuya característica principal es que el cuadrado de su módulo representa la probabilidad de hallar a la partícula en un espacio dado. Mediante una ecuación característica (ecuación de Schrödinger), las funciones de onda pueden ser calculadas “como por receta” y los resultados permiten hallar los niveles de energía permitidos de las partículas confinadas. Las partículas libres no tienen niveles discretos de energía.
- Hay variables cuánticas que, tomadas de a pares (e. g. coordenada e impulso o energía y tiempo) cumplen con una relación de incertidumbre descubierta por Heisenberg. Esa relación implica que no pueden conocerse exactamente, al mismo tiempo, los valores de ambas variables. El aumento de la precisión en la medición de una de ellas, “borronea” el valor de la otra, sin que esto esté relacionado de ningún modo con algún error en la medición. La medición altera el estado del sistema observado. Medir es perturbar.

NOTA: Cualquier contribución sobre la paradoja del gato de Schrödinger o sobre los universos múltiples de Everitt será agradecida por el autor del artículo, en el hiperespacio [amilcar29@ciudad.com.ar](mailto:amilcar29@ciudad.com.ar) ■

#### Bibliografía

- *Para contribuir al conocimiento del lector no especializado, se citan sólo algunas obras que poseen capítulos enteros con explicaciones adicionales y escaso contenido de fórmulas. El listado ha sido hecho en el orden estimado de complejidad creciente.*
- *J. P. McEvoy y Oscar Zárate: Teoría Cuántica para Principiantes, Ed. Era Naciente (1996). Obra recomendada especialmente.*
- *John Gribbin: En busca del Gato de Schrödinger, Bibl. Científica Salvat (1986).*
- *George Gamow: Treinta años que conmovieron la Física, Ed. Eudeba, 2ª Ed. (1974)*
- *Paul Davies: Otros Mundos, Bibl. Científica Salvat (1986)*
- *Paul Davies: Dios y la Nueva Física, id. ant.*
- *George Gamow: Physics. Foundations and Frontiers, Prentice-Hall. (1969) Se recomiendan los Caps. 21 y 22.*
- *Max Born: Atomic Physics, Blackie & Sons, 7th Ed. (1960) Se recomienda el Cap. IV (pocas fórmulas).*
- *David Bohm: Quantum Theory, Prentice-Hall (1959) Se recomienda el Cap. 8 (lectura laboriosa).*
- *W. Heitler: Elementos de Mecánica Ondulatoria, Ed. Alhambra (1953). Se recomienda el Capítulo Primero (algunas fórmulas).*
- *A. J. Funes: Tocando Fondo: Hacia el Límite de la Pequeñez, Boletín del Centro Naval, Vol 112, No. 774 (abril - junio 1994). Enuncia problemas cuánticos en microdispositivos. Nota: en la página 296, 5º párrafo, las 3 últimas líneas deben decir: "...efecto cuántico denominado efecto túnel, que se describe como el pasaje de una partícula a través de una barrera de energía más alta que la que posee dicha partícula".*