La Mecánica Cuántica, su Origen y Significado

JAIME RÖSSLER B.
Departamento de Física
Facultad de Ciencias, Universidad de Chile
Casilla 653, Santiago, Chile

IIda Parte

Contrariamente a la física conocida previamente, la mecánica cuántica es áltamente no intuible, y su formalismo no ofrece imágenes de los procesos microscópicos, limitándose sólo a prever los resultados experimentales. Esta nueva situación obligó a revisar las bases epistemológicas de la física

En lo que sigue, queremos poner de relieve el carácter no intuitivo de los fenómenos cuánticos y la imposibilidad de aislarlos del proceso experimental de observación. También mostraremos que, en gran medida, los fenómenos fisico-químicos y biológicos del mundo macroscópico tienen su base en procesos elementales de naturaleza cuántica.

4.3 *El Principio de Incertidumbre de Heisenberg*

El físico Werner Heisenberg descubrió cotas muy precisas para el grado de predictibilidad que tolera la Mecánica Cuántica. Su resultado se conoce como *"el principio de incertidumbre de Heisenberg"*; según él, si logramos conocer la posición de una partícula con un error ΔX, entonces no podemos conocer simultáneamente su velocidad sin cometer un error ΔV, que es siempre mayor o igual que la cota,

$$\Delta V \geq \frac{h}{4\,\pi\, m\, \Delta X.}$$

(por simplicidad, suponemos ausencia de campos magnéticos). Según esta expresión, si queremos disminuir el error en la determinación de la posición, p.ej. a la mitad, entonces el mínimo error en la velocidad sube al doble; si queremos medir sin error la posición, el error en la velocidad es infinito. Dado que la constante de Planck h es pequeña a escala macroscópica, podemos conocer p.ej. la posición y velocidad de una pelota de foot-ball con una exactitud casi absoluta. En cambio este efecto es dramático para un electrón; p.ej. si determinamos su posición con un margen de error comparable al tamaño atómico, el error en su velocidad es $\Delta V \sim 1000$ (km/Seg). Este hecho nos lleva a abandonar completamente la ilusión de poder definir una trayectoria nítida para un electrón orbitando un átomo.

Heisenberg mostró además que su principio de incerteza no podía ser violado experimentalmente (lo cual le da una "cobertura" a la Mecánica Cuántica). En efecto, si pretendemos observar un electrón iluminándolo, los fotones que lo impactan le ceden

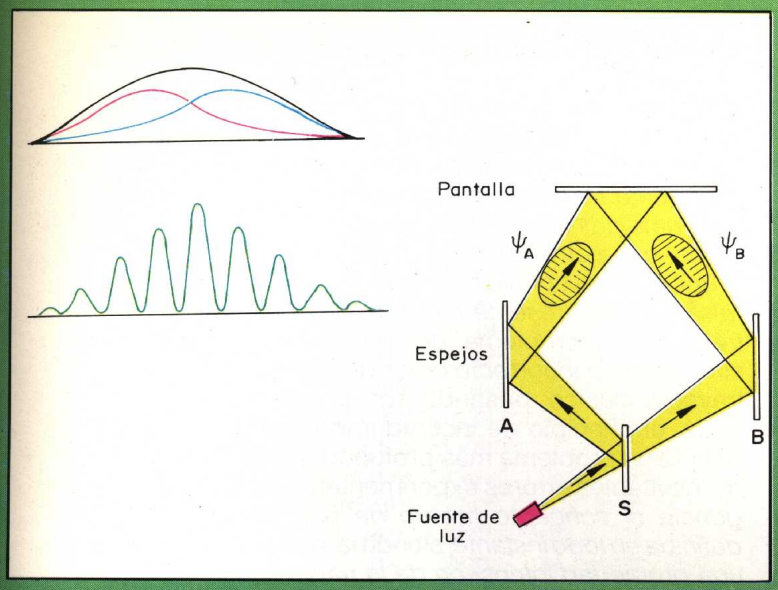

Figura11 Experimentando con fotones. Acá los espejos A y B son perfectamente reflectantes, mientras que S es semi-transparente.

cierta cantidad de movimiento al rebotar en él, lo que hace incierta su velocidad; si queremos mejorar la determinación de posición, debemos bajar la longitud de onda de los fotones incidentes, lo que aumenta la cantidad de movimiento intercambiada entre los fotones y el electrón, aumentando el error en la velocidad de este último.

¿Es nuestra incapacidad experimental la que nos impide *conocer* la trayectoria de una partícula elemental, o son *los conceptos mismos de posición y velocidad los que carecen de sentido al requerirlos en forma conjunta*?". La pregunta es más de índole ontológica que física, pues no es decidible con experimentos directos. No obstante, como luego veremos, basta el mero uso de la imagen clásica de partícula con posición y velocidad bien definidas en todo momento, para inducirnos a conclusiones erróneas.

4.4 *Experimentando con Fotones*

Para ilustrar el último punto consideremos un tradicional experimento de interferencia con fotones (pudiéndose plantear experimentos similares con electrones). Enviamos un haz de luz (compuesto por un gran número de fotones) sobre un espejo semitransparente S, el cual deja pasar un 50 % del flujo luminoso, reflejando el resto (ver fig. 11). Los dos haces así obtenidos se pueden separar tanto como se quiera en el espacio, hasta llegar a los espejos A y B, que los hacen converger sobre una pantalla. Llamemos $\Psi_A(\vec{r},\vec{t})$ a la función de onda de *cada fotón* cuando se reemplaza el espejo S por uno perfectamente reflectante (y por tanto todos los fotones pasan por el espejo A), y $\Psi_B(\vec{r},\vec{t})$ al caso en que eliminamos S, pasando los fotones por el espejo B. De acuerdo al principio de superposición (ver sec.2.2), al colocar el espejo semitransparente S, la función de onda de cada fotón toma la forma

$$\Psi(\vec{r},\vec{t}\,);=;\ \Psi_A(\vec{r},\vec{t}\,)+;\ \Psi_B(\vec{r},\vec{t}\,)\ (6)$$

(Se omite un factor $1/\sqrt{2}$ por simplicidad). Según el postulado de M. Born, el perfil de intensidad luminosa sobre la pantalla está dado por

$$|\Psi(\vec{r},\vec{t}\,)|^2 = |\Psi_A|+|\Psi_B|^2\,,$$

donde $\vec{r}$ es un punto de la pantalla y t el instante del impacto del fotón. Tal perfil aparece indicado en la fig. 11 mediante la linea verde; allí se pueden apreciar las típicas oscilaciones de un diagrama de interferencia (ver figura 4 del artículo anterior). En realidad el diagrama de intensidades se ha formado por el impacto de un enorme número de fotones, que podemos colectar poniendo una placa fotográfica sobre la pantalla. Cada fotón sólo ennegrece un pequeño gránulo de la emulsión, de modo que en el momento del impactoactúa como si fuese casi puntual.

Si ahora tapamos el espejo B, de modo de asegurarnos que cada fotón llegue a la pantalla através del espejo A, entonces su función de onda será Ψ_A. En tal caso observamos un diagrama de intensidad luminosa como el indicado en la línea roja en la figura 11, el cual viene dado por $|\Psi_A|^2$. A la inversa, al tapar el espejo A observamos el diagrama de intensidad luminosa dado por $|\Psi_B|^2$, e indicado en la línea azul en fig. 11.

Hacemos notar que la suma de estos dos diagramas *no coincide* con el perfil indicado en la línea verde. Sólo este último diagrama muestra las oscilaciones típicas de la interferencia, asociadas al hecho de que el montaje experimental *no permite saber* por cuál espejo, A o B, llega un fotón llegó a la pantalla.

Los resultados recién descritos persisten válidos aun para intensidades tan bajas de luz que nos aseguren que nunca se encuentra más de *un solo fotón* entre la fuente luminosa y la pantalla. La figura 12, extraída de un experimento real, satisface este último requisito.

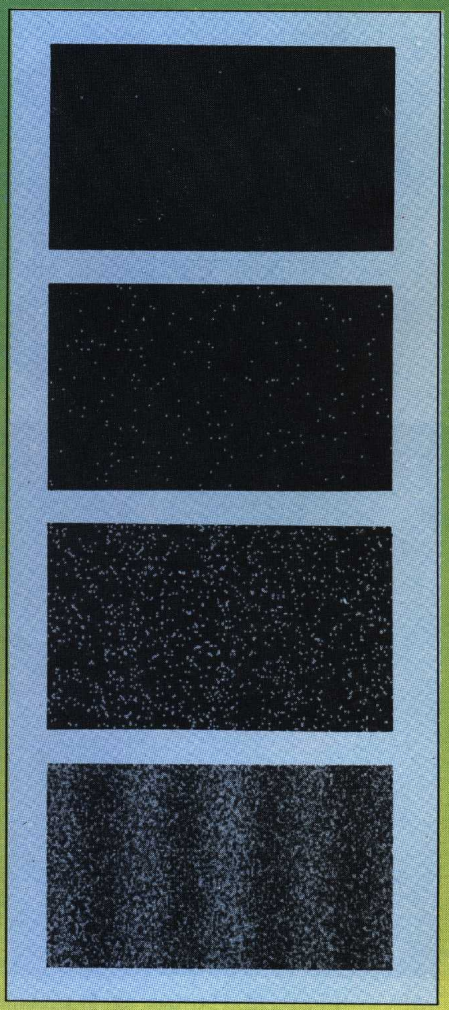

Figura12- Un diagrama de interferencia se hace aparente sólo después de un alto número de impactos. Cada partícula (electrón) interfiere con sí misma, pues nunca hay más de un electrón entre la fuente y la pantalla.

Así pues, el diagrama de interferencia no procede de la interacción entre muchos fotones, sino que describe lo que ocurre con *fotones individuales*, aunque necesitamos acumular muchos eventos para poder observar las líneas de interferencia (fig.12).

Usando los últimos antecedentes, dilucidemos el significado de la función de onda Ψ dada en la rel.(6), la cual describe cada fotón en el caso de ambos espejos destapados. Formulemos la disyuntiva:

(i) ¿La función de onda $\Psi = \Psi_A, +, \Psi_B$ describe *nuestra incapacidad* de decidir experimentalmente por qué camino llegó a la pantalla un determinado fotón, aunque él siguió *un trayecto bien definido* pasando ya sea a través del espejo A o del espejo B (opciones mutuamente excluyentes)?

(ii) La proposición **(i)** es falsa, y en cierto sentido cada fotón tiene *realidad física simultánea sobre los dos trayectos*.

Aceptemos **(i)** como hipótesis de trabajo; dado que sólo hay un fotón a la vez en el montaje experimental, si éste pasa por el espejo A, el resultado obtenido debe ser independiente de si el espejo B está tapado o destapado (dado que la distancia entre los dos espejos puede ser tan grande como se quiera, resultaría absurdo aceptar que el fotón logre enterarse de que el espejo B está destapado o tapado). Así, el conjunto total de los fotones que pasaron por el espejo A deben producir sobre la pantalla el perfil indicado en linea roja. Del mismo modo, los fotones que pasan por el espejo B deben producir el diagrama obtenido al tapar el espejo A, pues rechazamos la existencia de una "interacción a distancia" que lleve la información sobre el estado del espejo A. Como el diagrama total sobre la pantalla se obtiene sumando todos los puntos de impactos fotónicos (ver fig. 12), *al postular que (i) es correcto* concluimos que tal diagrama es la suma de los perfiles rojo y azul, y que corresponde a la curva negra en figura 11; notar como tal curva carece de las oscilaciones típicas de la interferencia.

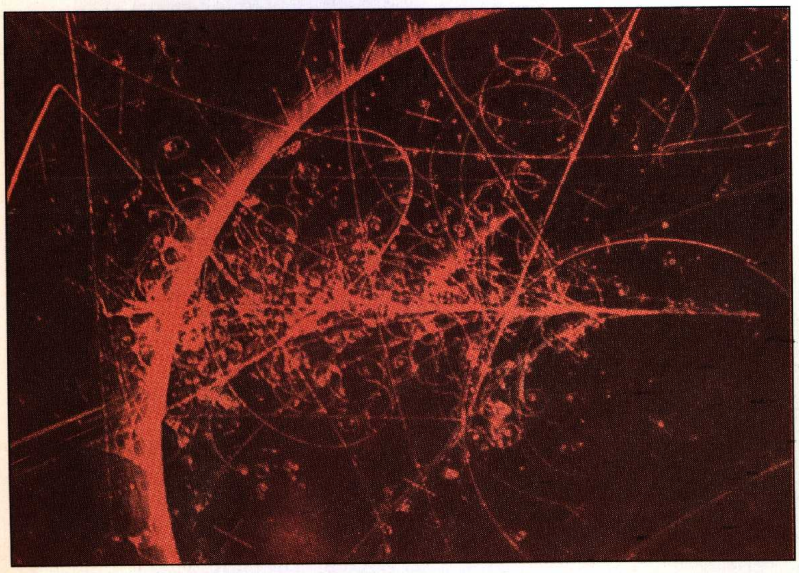

Figura13- Cámara de Burbujas. Las trazas espirales son generadas por partículas sub-atómicas cargadas sometidas a un campo magnético, las que pierden energía al interactuar con el hidrógeno líquido del recipiente.

Matemáticamente, esto corresponde a $|\Psi_A|^2 + |\Psi_B|^2$; *¡pero este resultado no coincide con lo observado experimentalmente!*, que corresponde a la curva verde, o matemáticamente, a $|\Psi_A, +, \Psi_B|^2$.

Por lo tanto concluimos que *la proposición **(i)** es falsa para el presente montaje experimental*. No se trata de un problema de ignorancia nuestra, es simplemente incorrecto creer que el fotón siguió un trayecto clásico, pasando por un solo espejo. Así pues, el principio de incertidumbre de Heisenberg denota un problema más profundo que la existencia de inevitables errores experimentales; *ha perdido vigencia el concepto mismo de una posición bien definida en todo instante*, siendo la incerteza cuántica una *propiedad intrínseca de la naturaleza*.

También es posible tener ambos espejos destapados, y determinar mediante detectores "no destructivos" cual espejo reflejó a un determinado fotón, prosiguiendo éste su viaje una vez observado. La situación parece a primera vista equivalente al caso en que, con ambos espejos descubiertos, no hay mediciones intermedias. No obstante, el resultado es distinto, teniéndose que los fotones detectados sobre el trayecto A llegan a la pantalla conformando el mismo perfil de intensidades obtenido al tapar el espejo B; algo análogo pasa con los fotones detectados sobre el trayecto B, teniéndose finalmente un perfil total como el dado por la curva negra de fig.11.

De este modo, al efectuar una observación intermedia *alteramos radicalmente* el curso de un proceso cuántico. Lo último es extraño para la física clásica, donde un planeta no altera su trayecto por el hecho de ser observado. Sin embargo, nuestras conclusiones son concordantes con el principio de Heisenberg, según el cual una medición de posición altera de un modo incontrolado la velocidad de la partícula (ver sec.4.3). No obstante, el aceptar el efecto perturbador de la medición *no es suficiente* para interpretar los procesos cuánticos, necesitándose una renuncia radical a nuestra intuición clásica.

Podemos ir más lejos aun. Al hacer un análisis cuidadoso del caso en que ambos espejos están destapados, concluimos que las posiciones de las lineas de interferencia están regidas por el valor de $\Theta_A - \Theta_B$; acá Θ_A describe ciertas características existentes a lo largo de la trayectoria que pasa por el espejo A, mientras que Θ_B corresponde al trayecto B. Así pues, el diagrama de interferencia depende de una *comparación* entre las características físicas de ambos trayectos. Lo anterir sugiere que *cada fotón* en el estado $\Psi_A, +, \Psi_B$ posee algún tipo de realidad física *simultánea* por ambos trayectos, enfatizando el hecho de que en Mecánica Cuántica no existen trayectorias nítidamente definidas.

Sin embargo, ninguna imagen intuitiva simplista es adecuada para describir cómo se informa un deter-

minado fotón sobre los valores de Θ_A y Θ_B. Por ejemplo, pensemos que cada fotón se subdivide al llegar al espejo semitransparente S, una fracción de él sigue el trayecto A y la otra el trayecto B, refundiéndose ambas sobre la pantalla (imagen ondulatoria clásica). No obstante, si interceptamos uno de los trayectos con un fotodetector, sólo observamos fotones de energía hv (o ausencia de señal si el fotón sigue el otro trayecto). Si fuese correcta la hipótesis de la subdivisión de cada fotón en el espejo S, entonces sólo una fracción del mismo llegaría al fotodetector, y por tanto se observarían pulsos de una fracción de hv. ¡Pero el experimento muestra lo contrario!. Tampoco es plausible esperar que cada fotón viaje subdividido por ambos trayectos, pero que al ser detectado sufra una "recombinación instantánea"; de hecho, la separación entre ambos espejos se puede elegir arbitrariamente grande, de modo que tal recombinación contradiría la teoría de la relatividad (*).

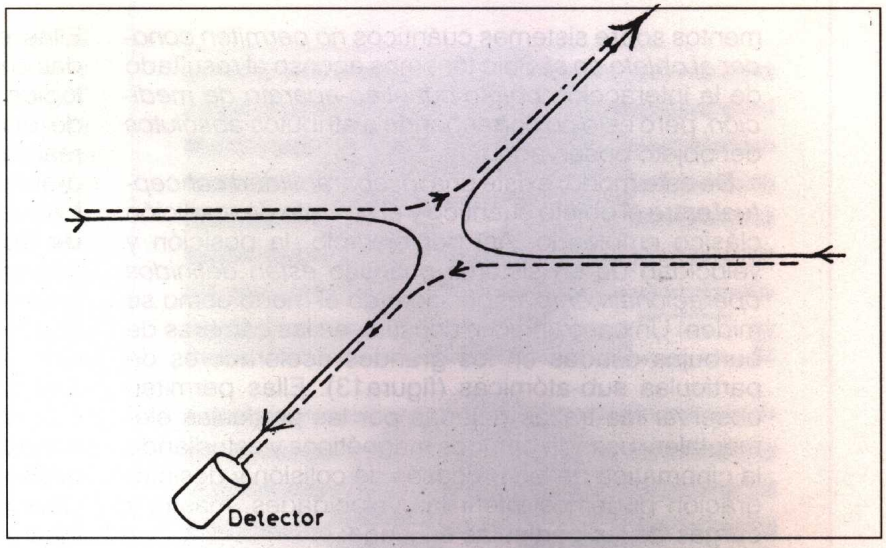

Figura14- Colisión entre partículas idénticas. La interferencia entre las trayectorias continua y a trazos provoca un cambio drástico en el número de partículas colectadas en el detector.

Parece menos aceptable aun el postular que el fotón ya posee la información del montaje experimental en el momento de enfrentar el espejo S, para así tomar la "decisión adecuada" respecto a subdividirse o no subdividirse; recuérdese que en principio podemos separar tanto como se quiera (digamos, varios años-luz) las distintas componentes del montaje experimental; esto evitaría cualquier transporte de información. Más aun, podemos tapar el espejo B con la fotocelda (o destaparlo) *después* de que el fotón ya cruzó por S. Según nuestra intuición, ahora el fotón necesitaría *información sobre el futuro* para tomar la correcta decisión al llegar a S; ¡nadie se atrevería a postular capacidad de precognición a nuestro fotón!

Consideramos que la argumentación última ya es concluyente; *no caben imágenes intuitivas para los fenómenos cuánticos*. Podemos formarnos cierta imagen intuitiva que puede parecer apropiada para entender cierta parte del proceso; pero tal imagen falla al aplicarla a otra parte del mismo proceso, o bien, al cambiar el montaje experimental.

El análisis ya es concluyente; no *caben imágenes intuitivas para los fenómenos cuánticos*; tampoco es legítimo *aislar un proceso cuántico de un montaje específico de medición* (**). Una imagen intuitiva puede parecer apropiada para entender cierta parte de un proceso, pero falla al aplicarla a otra parte del mismo, o bien al cambiar el montaje experimental.

Esta situación exige precisar las metas de la teoría cuántica. Ella debe aplicarse para describir un objeto microscópico sólo *en cuanto es observado*, usando una prescripción matemática distinta al cambiar el dispositivo experimental de observación.

Si bien la Mecánica Cuántica es no intuitiva, ella no encierra ningún tipo de comportamiento no causal, ni "acción a distancia" ni influencia del futuro sobre el pasado. Las aparentes paradojas surgen al especular sobre los procesos cuánticos *previos a una observación*, y para ello combinamos mentalmente los atributos del objeto cuántico obtenidos en *distintos* experimentos, *mutuamente incompatibles*.. Esto constituye un grave error lógico.

Las dificultades serían genuinas si *pudiéramos observar* fotones por el trayecto A de fig.11, pero al llegar a la pantalla formarán un diagrama de interferencia que dependiese de lo que ocurre en el trayecto B; en tal caso sería legítimo hablar de "influencia instantánea a distancia"; pero n*o es ésta* la situación observada.

4.5 *El Significado del Formalismo Cuántico*

La última sección nos mostró que la fenomenología microscópica es completamente ajena a nuestro nivel de experiencias, y la intuición no resulta una guía confiable para incursionar en tal ámbito. Es necesaria una modificación radical de las concepciones clásicas.

En gran medida debemos a la profundidad del pensamiento de Niels Bohr la gestación de la nueva perspectiva; sus ideas han quedado plasmadas en la llamada "interpretación de Copenhagen de la Mecánica Cuántica". Bohr hizo notar que los experi-

(*) La Teoría de la Relatividad prohíbe enviar señales a mayor velocidad que la luz. ¡La mecánica cuántica es plenamente consistente con la Relatividad!, y ningún efecto cuántico permite "comunicación instantánea" o "acción a distancia". Los notables experimentos de A. Aspect (ref.8) no son una *excepción* en tal sentido.

(**) En este sentido Wheeler (10) dice categóricamente *"no hay fenómeno físico mientras no haya medición"*.

mentos sobre sistemas cuánticos *no permiten conocer al objeto en sí*. Sólo tenemos acceso al resultado de la interacción *objeto cuántico-aparato de medición*, pero esto no corresponde a atributos *absolutos* del objeto observado.

De este modo, existe una *inseparabilidad conceptual* entre el objeto cuántico y el aparato de medición clásico empleado. Así por ejemplo, la posición y velocidad de un sistema cuántico *están definidos operacionalmente*, especificando el modo como se miden. Un caso típico lo constituyen las cámaras de burbujas usadas en los grandes aceleradores de partículas sub-atómicas (figura13). Ellas permiten observar las trazas dejadas por las partículas elementales; usando campos magnéticos y estudiando la cinemática de los procesos de colisión y desintegración podemos inferir las velocidades, masas y cargas de las partículas en juego.

Un ejemplo más simple es una placa fotográfica con un gránulo ennegrecido por un impacto fotónico; dicho gránulo establece l*a definición misma* de la posición terminal del fotón en el particular experimento considerado. Sin embargo, no es legítimo usar este resultado para hacer inferencias retrospectivas sobre el fotón, como p. ej. pretender establecer su tamaño a partir del porte del gránulo; lo último restauraría las trayectorias clásicas, lo que está en flagrante contradicción con el análisis de la sección anterior. En contraposición, en el caso clásico, la posición y velocidad de una partícula son propiedades *objetivas*, siendo irrelevante el hecho de que sean o no medidas.

Naturalmente, si cambiamos el montaje experimental, también debe cambiar la forma como el objeto cuántico en estudio afecta al nuevo montaje experimental. De acuerdo a N. Bohr, los distintos experimentos nos aportan facetas *complementarias* sobre el sistema cuántico en estudio (p.ej. las propiedades *corpuscular* y *ondulatoria* de los fotones). Ellas parecen contradictorias cuando son requeridas en forma *simultánea*. No obstante, es una falacia lógica combinar mentalmente imágenes extraídas de distintas observaciones, si ellas *no se pueden* realizar en forma conjunta (p.ej. observar el diagrama de interferencia y el camino seguido por el fotón en fig.11). Lo anterior constituye el "**Principio de Complementariedad**". Bohr consideraba que tal principio también era útil en otras areas del conocimiento, como la Biología, donde los aspectos físico—químicos y vitalistas son ambos esenciales, pero aparecen como contradictorios al aplicarlos simultáneamente.

Indudablemente, al comparar distintos experimentos sobre un haz de fotones (ver sec.4.4) los resultados nos parecen extraños. Pero no podemos ignorar que nuestra "forma natural de pensar" está supeditada a la estructura de nuestro cerebro, el cual está diseñado para manejar situaciones del nivel macroscópico. Así pues, no es extraño que nuestra mente sea incapaz de tener una concepción directa del mundo microscópico. Desde esta perspectiva, los resultados de distintos experimentos sobre el nivel microscópico nos aportan "proyecciones parciales" de la realidad existente a tal nivel, pero no tenemos base para esperar que esas distintas proyecciones formen un cuadro directamente compatible con nuestras estructuras mentales.

El premio Nobel de física, Richard Feynman avalaba el carácter anti-intuitivo de la Mecánica Cuántica, señalando (11) "Tiempo atrás los periódicos decían que sólo 20 físicos entendían la Teoría de la Relatividad; dudo que esto haya sido cierto. Lo que sí es seguro es que nadie intuye la Mecánica Cuántica ... No traten de preguntarse "pero cómo pueden ocurrir cosas así?", pues están entrando a un callejón sin salida, del cual nadie ha logrado escapar".

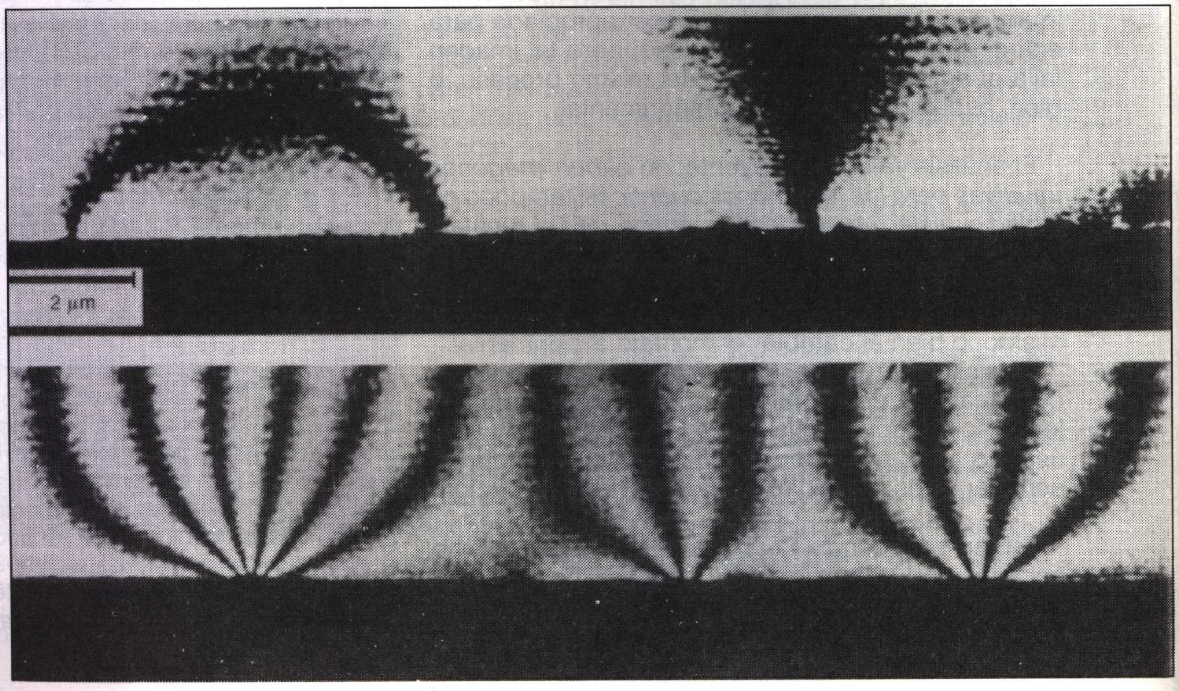

Figura15- Lámina de Plomo superconductor sobre la que se ha aplicado un campo magnético perpendicular. El superconductor es "perforado" por lineas de campo cuantizadas (fluxones). La foto superior muestra fluxones aislados (uno de ellos reentrante). La foto inferior muestra varios fluxones emergiendo de una misma perforación.

Dado que sólo tenemos acceso a observar la interacción entre un objeto cuántico y los aparatos clásicos de medición, y no a los atributos "absolutos" del objeto, Bohr concluye que existe una *ineludible* dependencia de la Mecánica Cuántica respecto del nivel clásico. De hecho, los resultados de una medición se interpretan usando imágenes clásicas (recuerdese los casos de la cámara de burbujas y la placa fotográfica). Este punto de vista, central en la "*Interpretación de Copenhagen*", prohíbe p. ej. asignar una función de onda cuántica al aparato de medición.

Tal punto de vista ha resultado incómodo para algunos físicos, que quisieran poder "parar sobre sus propios pies" a la teoría cuántica. Pero al abandonar la interpretación de Copenhagen surgen severas dificultades, que arrastran a postular cambios radicales en la concepción de la realidad. Las hipótesis (ref.14) van desde asignar un rol activo a la *conciencia* del experimentador a la tesis de "Los Universos Múltiples".

Entre las interpretaciones recientes de la Mecánica Cuántica, cabe mencionar el trabajo de Cramer (ref.14), que describe los procesos cuánticos mediante un intercambio de ondas "retardadas" (que viajan del pasado al futuro) y "avanzadas" (que viajan del futuro al pasado). Tal mecanismo permite explorar todos los detalles del espacio-tiempo relevantes para la evolución de la partícula cuántica.

Cabe destacar que todas las interpretaciones de la Mecánica Cuántica llevan básicamente a las mismas consecuencias experimentales. Actualmente las discusiones de tipo interpretativo sólo abarcan una pequeña fracción de los artículos publicados en la literatura especializada.

4.6 *Fenomenología Cuántica*

La Mecánica Cuántica describe una vasta gama de fenómenos físicos; acá sólo haremos una muy breve reseña de aquellos que nos parecen más relevantes:

(a) La Estabilidad de la Materia

Como vimos en el análisis histórico, el modelo atómico de Rutherford no era estable, pues cada electrón debía irradiar hasta caer al núcleo. A medida que el electrón se acercaba al núcleo, se incrementaba la interacción atractiva mutua, bajando con ello la *energía electrostática* del átomo; esta baja era compensada con la energía luminosa irradiada, manteniéndose así constante la energía total del universo. A nivel cuántico, la caída del electrón al núcleo se describe como el estrechamiento paulatino del "radio medio" de la función de onda. Sin embargo, de acuerdo al principio de incerteza cuántico (5), a medida que se restringe el radio medio ΔX, sube la velocidad media del electrón; esto implica un aumento de la *energía cinética*. Es fácil ver que, a partir de cierto radio crítico (1) la energía neta del átomo (partes electrostática y cinética) empieza a aumentar; a partir de ese momento no se puede irradiar más energía en forma de luz, pues ya no hay de dónde extraerla. Este aspecto del problema era totalmente incomprensible a comienzos del siglo; por esto el postulado de Bohr (2) pareció una audacia insolente; se necesitó alrededor de una década para entender que detrás de las ideas de Bohr había un fondo de verdad.

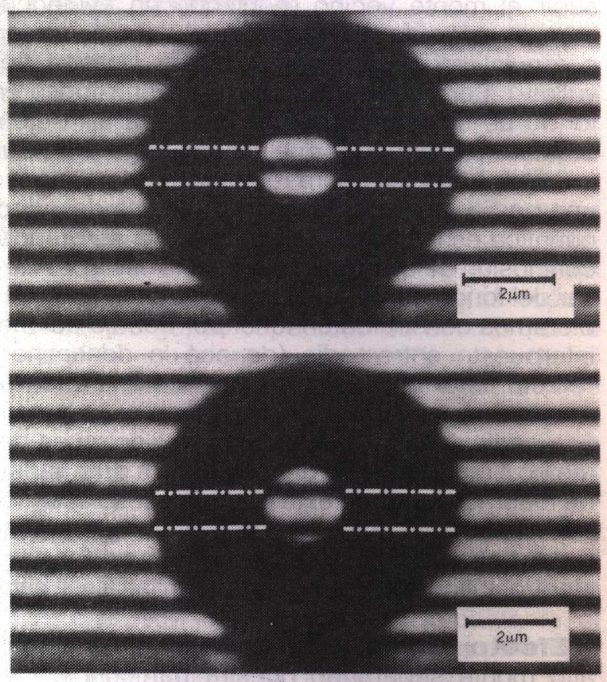

Figura16- Efecto Aharanov-Bohm. Las lineas horizontales constituyen el diagrama de interferencia electrónico. La foto superior corresponde a un número par de fluxones encerrados en el superconductor anular.
El superconductor contiene un magneto, también anular, en su interior.

De paso mencionemos que el mismo principio de incerteza permite explicar el enlace químico covalente, dado que al compartirse un electrón entre dos átomos debe incrementarse el tamaño medio de su función de onda ΔX, con la consiguiente baja en energía cinética; esto lleva a una disminución de la energía neta del par de átomos enlazados (o molécula) en comparación al caso en que se encontraban disociados. Tal disminución se denomina *energía de enlace molecular*, pues, para disociar la molécula en los dos átomos primitivos, es necesario entregarle esta energía de enlace; esto no es posible en ausencia de radiación y a bajas temperaturas, lo que determina la estabilidad del enlace.

(b) Efecto Túnel

Pensemos en una montaña rusa en un parque de diversiones, con sus "montes" y "valles"; si nuestro carro parte de la cumbre de un alto monte, aun sin un impulso inicial él podrá bajar a los valles y remontar otras cumbres de menor altura; cuando pasa por los valles crece la velocidad, para luego disminuir al

subir el monte vecino (poniendo en evidencia la conservación de la energía, que pasa de su forma potencial -en la cumbres- a su forma cinética -en los valles-). Pero si nuestro carro está en reposo en el fondo de un profundo valle, quedará allí detenido eternamente a menos que se le entrege un impulso.

Sin embargo, si ahora reemplazamos el carro por una partícula elemental (para la cual la descripción cuántica es ineludible), llegamos a la sorprendente conclusión de que nuestra partícula es capaz de pasar del fondo de un valle al valle vecino, como si hubiéramos construido un túnel por debajo del monte interpuesto entremedio (de acá la denominación "efecto túnel"). Este efecto permite entender fenómenos tales como ciertos decaimientos radioactivos (vía partículas α), la migración de electrones de un átomo a otro dentro de un metal, y otra gran variedad de fenómenos. Claro está que en el caso cuántico la "montaña rusa" corresponde a la energía potencial de las partículas en estudio, originada por las fuerzas electrostáticas u de otro tipo que se dan a esa escala.

Efecto túnel resonante.- Si se tiene un muy alto monte separando nuestra partícula del valle vecino, entonces el efecto túnel se torna en general muy improbable; exceptúese el caso en que el pozo vecino tiene un nivel cuántico coincidente con la energía de nuestra partícula. Razonando clásicamente, este efecto *resonante* resulta muy extraño, pues el monte bloquea la información sobre las características del valle vecino, las que son necesarias para determinar la presencia o ausencia de resonancia. Sin embargo el formalismo cuántico permite hacer las predicciones correctas sin necesidad de responder estas preguntas.

(c) Partículas idénticas y el principio de Pauli

A nivel de Mecánica Cuántica, la identidad de las partículas adquiere un significado profundo, sin ninguna analogía clásica. Podemos imaginar dos bolas de billar idénticas que chocan y después se alejan; pero su calidad de *idénticas* no juega ningún rol peculiar; por ejemplo, podemos filmar la colisión, y evitar así confundir una partícula con la otra. No obstante, a nivel de partículas elementales tratadas cuánticamente la situación ya no es así, pues la pérdida de trayectorias clásicas hace imposible discernir entre una determinada situación y otra donde las partículas se han intercambiado (ver fig. 14). El formalismo cuántico asigna una misma función de onda a ambas situaciones (salvo un factor ± 1) . Un análisis cuidadoso lleva a concluir que esta condición trae diversas consecuencias, dando lugar a fenómenos tan exóticos como la superfluidez (*).

Una implicancia de gran importancia es el llamado *"principio de Pauli"*, que rige sistemas de muchos electrones, y también se aplica a otras partículas elementales, que reciben el nombre genérico de *fermiones*, como los protones y neutrones del núcleo atómico. Según este principio, dos fermiones de un mismo tipo (p.ej. electrones) no pueden estar en el mismo estado cuántico. Ello implica que cada átomo sólo tolera un cierto número de electrones en cada nivel de energía (denominado comúnmente como "capa" o "sub-capa atómica"). Lo último da lugar a la diversidad de elementos de la tabla periódica, existiendo algunos que ceden fácilmente electrones (típicamente los buenos metales); otros con tendencia a formar enlaces covalentes, como el carbón (piedra angular de la química de la vida); otros ávidos de electrones (como el oxígeno); etc... Sólo gracias a esta diversidad es posible la variedad de substancias que constituyen el mundo macroscópico, incluyendo los seres vivos. De no existir el principio de Pauli, la química sería muy distinta, perdiéndose la diversidad y riqueza de estructuras y organizaciones que vemos en nuestro universo.

El principio de Pauli, en combinación con el principio de incerteza, también permite entender la estructura de los núcleos atómicos, el comportamiento de los metales y aisladores, el enlace químico, y fenómenos exóticos como la superconductividad, las estrellas enanas blancas y las explosiones de supenova.

(d) Superconductividad

Este fenómeno, al igual que la superfluidez, es un ejemplo de efecto cuántico a escala macroscópica. Consiste en un estado especial de la materia, observado en diversos metales y compuestos. Se observa por debajo de cierta temperatura crítica, en general cercana al cero absoluto (-273 C°), aunque las famosas cerámicas $Y\,Ba_2\,Cu_3\,O_{7-x}$ son superconductoras sobre la temperatura del aire líquido. La superconductividad conlleva una serie de fenómenos, en particular *corrientes persistentes* sin disipación de calor. Estas corrientes se caracterizan porque un circuito cerrado contiene en su interior un *número entero* de lineas de flujo magnético (cada línea corresponde a *unfluxón* $\equiv h/(2\,e) \sim 2 \bullet 10^{-15}$ *Weber* , donde h es la constante de Planck y e la carga del electrón). La cuantización del flujo magnético es reminiscente de lo ocurre con los orbitales atómicos (ver fig. 10); claro que acá estamos trabajando con un *circuito de corriente macroscópico*. Citamos este ejemplo para dejar en claro que, aunque la fenomenología cuántica opera básicamente a escala submicroscópica, ella explica muchos efectos macroscópicos. En algunos fenómenos (como la superconductividad y superfluidez) las características genuinamente cuánticas se transparentan perfectamente a escala macroscópica. La figura15 muestra una espectacular fotografía de fluxones emergiendo de un superconductor; ella se obtuvo usando la ultramoderna tecnología de "holografía electrónica (15)".

(e) Efecto Aharanov-Bohm

Se pueden efectuar experimentos similares al de sec. 4.4, pero reemplazando fotones por electrones. En tal caso se usa un campo electrico (en vez de un espejo semitransparente) para separar la trayectoria

(*) Estado particular en que se encuentra el Helio líquido a bajas temperaturas, permitiendole trepar por las paredes de un recipiente, atravesar capilares muy finos sin resistencia, etc....

de cada electrón en dos caminos; esto pues los campos eléctricos ejercen fuerzas sobre los electrones. Posteriormente, ambos caminos son refundidos sobre una pantalla, donde se observa un típico diagrama de interferencia (como el de fig.12, obtenido usando electrones). Este diagrama depende ahora del campo magnético encerrado entre ambos caminos. Si variamos tal campo, las líneas de interferencia sobre la pantalla se corren; lo sorprendente es que, aun asegurándonos de que no *hay campo magnético sobre ninguno de los dos caminos*, igual observamos el efecto del campo encerrado sobre el diagrama de interferencia. Es como si cada electrón tuviera modo de enterarse de lo que hay encerrado entremedio de sus dos "caminos virtuales" (estos dos caminos virtuales juegan el mismo rol que las trayectorias A y B del experimento con fotones).

Un detalle técnico:el corrimiento de las líneas de interferencia está gobernado por el factor $l = 2e\Phi / h$, donde Φes el *flujo magnétic* encerrado por el superconductor. Si $l = 0, 2, 4, \ldots$, no hay corrimiento de las líneas de interferencia respecto al caso sin campo magnético; en cambio, si $l = 1, 3, 5, \ldots$, las franjas negras toman la posición de las franjas iluminadas y vice versa. También se pueden dar los casos intermedios si l no es entero. No obstante, si el flujo magnético Φ procede de una corriente superconductora, éste consta de un número entero de fluxones $\Phi = l\,h/(2e)$, con $l = 0, 1, 2, 3 \ldots$, y por tanto las líneas de interferencia sólo se pueden desplazar de los dos modos recién descritos. En la figura15 mostramos un espectacular experimento real (ref.15) que verifica el efecto Aharanov-Bohm; allí se ha blindado un magneto anular mediante Niobio superconductor (esto último para impedir que las lineas de flujo magnético emerjan fuera del anillo). Posteriormente se ha enviado un haz de electrones sobre el arreglo; cada electrón sigue una *superposición* de caminos, algunos cruzan por dentro y otros por el exterior del anillo. Dicho experimento pone en evidencia al menos tres efectos cuánticos: *(i)* carácter ondulatorio de los electrones, *(ii)* el efecto Aharanov-Bohm, y *(iii)* la cuantización del flujo magnético en un superconductor. Lo último queda en evidencia al verse solamente las dos opciones antes descritas para el diagrama de interferencia: la fig. inferior muestra un anillo superconductor que encierra en su interior un número par de fluxones; en la figura superior el número de fluxones encerrados es impar.

No podemos impedir que nuestra intuición nos pregunte: ¿ cómo se entera el electrón de la existencia o ausencia de un campo magnético, si él nunca tiene contacto con tal campo? La respuesta es un tanto especializada (**). No obstante, creemos que estos argumentos técnicos no amortiguan el fuerte contraste entre nuestra experiencia cotidiana de la realidad y algunos efectos cuánticos como los acá mostrados.

(**) Se puede describir el efecto Aharanov-Bohm mediante el valor del "potencial magnético" a lo largo de las dos posibles trayectorias del electrón; tal "potencial vectorial magnético" es un artificio matemático del electromagnetismo clásico.

5 Conclusiones

Después de revisar brevemente la creación y significado de la Mecánica Cuántica, causa asombro la capacidad de **conocer** del ser humano; cómo él ha sido capaz de horadar el mundo ultramicroscópico de los procesos elementales, de naturaleza completamente distinta a lo que muestra el mundo macroscópico, y su intuición se ve fuertemente golpeada si pretende formarse un cuadro coherente de las distintas fenomenologías cuánticas. Sin embargo, su capacidad de abstracción le permite elaborar un lenguaje matemático que da fiel cuenta de este mundo submicroscópico, mundo que es la raíz de todos los procesos que regulan nuestra vida. La estabilidad misma de la materia, la ligazón química, y los complejos procesos biológicos necesitan la Mecánica Cuántica, de un modo central, para su entendimiento.

Tal teoría nos ha permitido, por la vía de la inferencia, hacer previsiones sobre situaciones todavía no puestas a prueba en el laboratorio. No obstante, el progreso de la ciencia y la tecnología ha permitido confirmar una a una estas predicciones.

Así, cuando en febrero de 1987 (ref.16) el detector de Kamiokande (Japón) observó neutrinos provenientes de la explosión de una estrella situada a enorme distancia, no hizo sino confirmar ciertas predicciones de la Mecánica Cuántica realizadas por Landau y Chandrasekar hacia 1932, cuando recién nacía dicha rama de la física, sin tenerse entonces más que un conjunto muy limitado de experiencias de laboratorio que la validaban. Las condiciones imperantes en el corazón de estrellas como ésta son tan extremas en cuanto a presión y densidad, que jamás nuestros laboratorios las podrán reproducir. ¡Sin embargo el intelecto humano ha sido capaz de prever los procesos que allí ocurren! ●

REFERENCIAS

[ref.~8] Franck Laloë, "Les Surprenantes Prédictions de laMécanique Quantique" *La Recherche* Vol 17, Num. 182,pag. 1358 (Nov. 1986)

[ref.~9] Niels Bohr *Dialectica*, V 2, 312 (1948); ver también "Quantum Physics and Philosophy; Causality andComplementarity", en sl Essays 1958-1962 on *Atomic Physics and Human Knowledge* (London, 1963)

[ref.~10] J.A. Wheeler, *in sl The Mathematical Foundation of Quantum Mechanics*, edited by A.R. Marlow (Academic,New York) (1978)

[ref.~11] Richard Feynman, *The Character of PhysicalLaw* (MIT, Cambridge, MA), pag. 129. (1967)

[ref.~12] E. Wigner, en *The Scientific Speculates*,edited by I.J. Good (Heinemann, London, 1962)

[ref.~13] H. Everett *Reviews of Modern Physics*,Vol. 29, pag. 454 (1957)

[ref.~14] John Cramer, "The Transactional Interpretationof Quantum Mechanics". *Reviews of Modern Physics*, Vol. 58 Num. 3, pag. 647 (Julio 1986)

[ref.~15] Akira Tonomura *Physics Today*, Vol. 43,Num. 4, pag. 22 (abril 1990).

[ref.~16] Rodrigo Ferrer P. "En Busca de Nuevos Modelos", *Revista Creces* 89, Vol. 10 Num 10, págs.14-22 (Octubre 1989)