

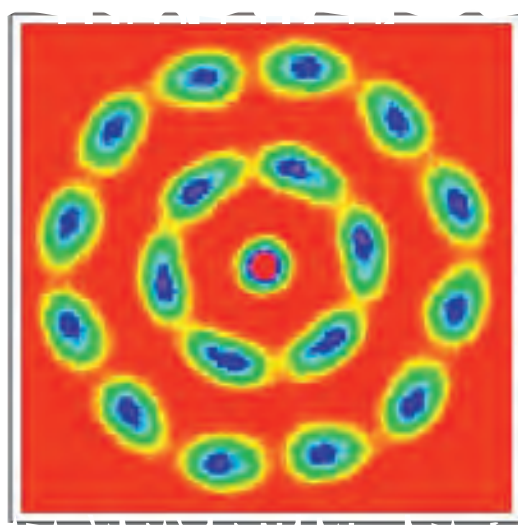
# Algunos aspectos de fundamentación de la mecánica cuántica un siglo después

José L. Sánchez Gómez

*Se presentan algunas reflexiones sobre los postulados de la Mecánica Cuántica, en particular se analiza la cuestión del colapso de la función de onda a la luz de recientes avances tecnológicos y sobre la relación entre la evolución lineal cuántica y la posibilidad de transmitir información a velocidad superior a la de la luz en el vacío.*

## 1. Introducción

En el número especial de esta Revista en conmemoración del centenario de la hipótesis de los cuantos de Planck [1] aparecen sendos trabajos de Guillermo García Alcaine y del presente autor (que de ahora en adelante citaré como I) que tratan diversos aspectos básicos y de actualidad en la cuestión de la fundamentación de la mecánica cuántica. Por razones de espacio, y con el fin de no repetir lo ya expresado en dichos trabajos y en algún otro publicado en esta misma Revista, voy a limitarme aquí a discutir ciertos aspectos apenas tratados en ellos y, al mismo tiempo, presentar algunos resultados teóricos y experimentales recientes relacionados con estos temas. Discutiré principalmente la naturaleza del pretendido (por algunos) colapso de la función de ondas y, en relación con esto, la cuestión de cuáles son los postulados que han de introducirse a fin de estructurar la mecánica cuántica desde un punto de vista minimalista, es decir, incluyendo el mínimo número de ellos lógicamente independientes entre sí. Comentaré asimismo brevemente en el Apéndice la evolución de la investigación en fundamentación de la teoría cuántica en España y el estado actual y perspectivas inmediatas de la misma. (Nota: El “siglo después” del título se refiere, claro está, al transcurrido desde la fundación de la R.S.E.F.)



Representación de la densidad de probabilidad de un retículo de 19 electrones a baja temperatura

## 2. ¿Representa la función de ondas algo objetivo? (o el colapso ataca de nuevo)

Esa es la pregunta básica que ya intentó responder Schrödinger, afirmativamente, siendo rebatido por Pauli, Born y otros (ver I). De hecho, el trabajo de Max Born donde se introduce la hipótesis probabilística, hoy mayoritariamente admitida, lleva por título *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge* (“Sobre la mecánica cuántica de las colisio-

nes”) y en el resumen aparecen claramente sus objetivos:

*A partir de un estudio de las colisiones, se desarrolla el siguiente punto de vista: la mecánica cuántica de Schrödinger es capaz de describir no sólo los estados estacionarios sino también los saltos cuánticos.*

La expresión “saltos cuánticos” contiene lo principal del enigma de la naturaleza de la función de ondas. Como es sabido, la interpretación probabilística re-suelve esta cuestión siempre que se adopte el punto de vista pragmático de que la función de ondas, o en general el estado cuántico, representa una colectividad –idealmente infinita– de sistemas;

esto es, nos ciñamos a la llamada “Interpretación Estadística”, absteniéndonos, en general, de formularnos preguntas acerca de sucesos individuales. Como se comenta en I, la descripción de procesos individuales dentro de la interpretación ortodoxa (de Copenhague) de la mecánica cuántica involucra la existencia del famoso “colapso de la función de ondas” (conocido también como reducción del paquete de ondas o proyección del estado cuántico) tras la medida u observación de dicho estado individual. En I se discute asimismo con cierto detalle posibles soluciones al problema que no comportan ningún tipo de colapso, concluyéndose que ninguna de ellas es enteramente satisfactoria (recuérdese que no estamos tratando aspectos pragmáticos –muy respetables e interesantes, desde luego– sino fundamentales, en el sentido de que tienen que ver con la *fundamentación de la teoría* y no con las aplicaciones de la misma). Ahora, la cuestión que nos planteamos no se refiere a la existencia del colapso, sino, admitiendo éste, a su posible naturaleza y propiedades.

El postulado del colapso (o reducción) del paquete de ondas fue introducido por John von Neumann en su famosa obra *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*

(1932), editada en versión española de Ramón Ortiz Fornaguera por el CSIC en 1949 y reeditada también por el CSIC en 1991 [2]. En 1951 Lüders generalizó este postulado a fin de incluir la medida de observables con espectro degenerado. En un lenguaje más moderno, ambas versiones del postulado pueden expresarse de la manera siguiente: consideremos un sistema cuántico  $Q$  descrito por un operador densidad  $\rho_Q$ . Supóngase que el observable  $F$ , con espectro discreto  $\{f_n\}$  y autovectores  $|f_n\rangle$  se mide en dicho sistema. El postulado de Von Neumann afirma que el valor  $f_k$  se obtendrá con probabilidad  $\pi_k \equiv \text{tr}[P_k \rho_Q]$ , donde  $P_k = |f_k\rangle\langle f_k|$ , y el estado del sistema tras una medida con resultado  $f_k$  vendrá dado por

$$\bar{\rho}_Q = \frac{P_k \rho_Q P_k}{\text{tr}[P_k \rho_Q P_k]}. \quad (1)$$

En la versión de Lüders las probabilidades vienen dadas también por la expresión de arriba, pero el estado del sistema tras la medida con resultado  $f_k$  viene ahora dado por (suponemos que el estado antes de la medida es puro, es decir,  $\rho_Q = |\psi_Q\rangle\langle\psi_Q|$ )

$$|\bar{\psi}_Q\rangle = \pi_k^{-1/2} P_k |\psi_Q\rangle. \quad (2)$$

Si el autovalor en cuestión es degenerado, el proyector  $P_k = \sum_{j=1}^p |f_{kj}\rangle\langle f_{kj}|$ , siendo  $p$  la dimensión del subespacio correspondiente y  $\{|f_{kj}\rangle\}$  una base ortonormal en dicho subespacio.

La diferencia principal entre ambas formulaciones del postulado de reducción surge al medir un observable con espectro degenerado. Si como resultado de la medida se obtiene un valor propio degenerado del observable, la versión de Von Neumann afirma que lo más que puede decirse es que el estado tras la medida pertenece al subespacio asociado a dicho valor degenerado. Por el contrario, Lüders afirma que el estado final queda definido y viene dado por la expresión anterior. Para la discusión que sigue esta diferencia es irrelevante; en cualquier caso, adoptaremos la versión de Lüders.

La primera pregunta que podemos formularnos es la siguiente: suponiendo que el colapso fuera un proceso físico (seguramente bastante extraño) que tuviera lugar en el espacio-tiempo, ¿sería instantáneo o se produciría con una velocidad máxima determinada? Resulta que esta pregunta, que tan sólo hace diez años habría sido considerada como puramente retórica o, si se quiere, cuyo análisis se habría realizado esgrimiendo sólo argumentos de consistencia teórica (invariancia bajo transformaciones de Lorentz, por ejemplo), hoy puede responderse en parte desde un punto de vista estrictamente experimental gracias a los recientes progresos en diversas técnicas relacionadas con la óptica cuántica. En este contexto cabe distinguir dos tipos de colapso (o facetas del mismo): el que tendría lugar en sistemas individuales y el que aparecería en sistemas entrelazados de dos o más partículas, como es el caso en los llamados estados EPR (véase I). Ambos son, desde luego, conceptualmente iguales, pero el segundo es más espectacular porque al medir una partícula “colapsa” el estado de la otra a distancia. (Para un análisis de los procesos EPR sin colapso, véase, p.e., [3], [4]).

Las situaciones aparentemente paradójicas a las que conduce ya la existencia del colapso del primer tipo tienen una larga y venerable historia. El mismo Einstein, en el famoso congreso Solvay de 1927, señaló que la hipótesis del colapso lleva a conclusiones que parecen contradecir las leyes básicas de la física, pues involucra la existencia de “acciones a distancia” que parecen ir en contra de la teoría de la relatividad. El argumento de Einstein es bien sencillo: supóngase que una partícula incide sobre un diafragma de manera tal que su función de ondas,  $\Psi$ , se “difracta” y dicha partícula se detecta después en una pantalla. En ese caso, Einstein argüía que si se interpreta  $|\Psi|^2$  en el sentido de distribución de probabilidad, entonces, antes de que se lleve a cabo el proceso de localización, la partícula debe considerarse como potencialmente presente –con probabilidad casi constante– en toda la pantalla; sin embargo, en el instante que se localiza dicha partícula debe tener lugar una peculiar acción a distancia que impide que la onda distribuida continuamente en el espacio produzca efectos simultáneos en distintos lugares de la pantalla. Es digno de resaltarse que este experimento ideal ha sido recientemente llevado a cabo – con modificaciones técnicas no demasiado importantes desde el punto de vista conceptual– por el grupo de Nicolás García, en el CSIC (Madrid) [5]. La conclusión *experimental* de estos autores es que el colapso, si se considera como un proceso físico real, debe ocurrir a una velocidad mayor que  $4c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

***Suponiendo que el colapso fuera un proceso físico, ¿sería instantáneo o se produciría con una velocidad máxima determinada?***

Como ya se ha dicho, la situación es incluso más rara en el caso de un sistema de dos partículas en un estado entrelazado, como el estado singlete de dos partículas de espín  $1/2$  tratado en I:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha(1)\beta(2) - \beta(1)\alpha(2)], \quad (3)$$

donde  $\alpha, \beta$  representan estados con proyecciones de espín sobre un determinado eje (convencionalmente, eje  $z$ )  $+, -1/2$ , respectivamente. Como se describe en I, el estado inicial –estado metaestable de las dos partículas de momento total nulo– decae, saliendo ambas en direcciones opuestas. Supongamos que en el sistema donde el estado total se representa por  $\Psi$  dada más arriba (llamémoslo LAB) la partícula 1 (su proyección de espín) se mide antes que la 2, digamos en el instante  $t_1$ . Si consideramos que la medida produce el colapso, nos vemos forzados a admitir que al medir la partícula 1 hemos colapsado no sólo la “parte” de la función de ondas correspondiente a esta partícula sino también la de la partícula 2, y ésta a distancia. En efecto si, por ejemplo, el resultado obtenido para la partícula 1 es  $+1/2$  el correspondiente para la partícula 2 sería  $-1/2$ , y la descripción que el observador que ha medido la partícula 1 daría del estado global en un instante  $t > t_1$  sería en términos del estado “colapsado”

$$\Psi_{col} = \alpha(1)\beta(2), \quad (4)$$

Recalquemos una vez más que este proceso puede “entenderse” sin necesidad de colapso, pero el precio a pagar es el de admitir que la mecánica cuántica es una teoría de correlaciones entre propiedades inexistentes (*correlations without correlata*, en palabras de Mermin, propulsor de este tipo de ‘interpretación; véase [4] para más detalles). Ahora bien, si, como en el caso anterior de una partícula, admitimos que existe un colapso de algún tipo, resulta lícito el hacernos algunas preguntas sobre ciertas características del mismo, por ejemplo sobre su velocidad. Esta pregunta es la que se formularon Nicolas Gisin y colaboradores, quienes *experimentalmente* llegaron a que, de tener lugar el colapso, su velocidad en el sistema LAB habría de ser superior a  $10^7$  (!)c [6]. Vemos, pues, que en ambos casos las velocidades involucradas son superiores a la de la luz en el vacío y en el segundo caso todo parece indicar que el colapso sería instantáneo, lo cual parece descartarlo como un proceso realmente físico. No obstante, el mismo Gisin hace notar que antes de la determinación experimental de la velocidad de la luz se creía que ésta era infinita, ya que se sabía que era mucho mayor que la del sonido en el aire, que era la mayor de las velocidades físicas conocidas entonces. Curiosamente la razón de ambas velocidades –luz y sonido– es del orden de la cota de Gisin, de modo que, si se es suficientemente osado (¿irreflexivo?), puede argüirse que en realidad lo que todo esto nos indica es la existencia de nueva física asociada al proceso de observación; algo desde luego muy improbable, pues mientras que no había razón alguna para suponer que la velocidad del sonido en el aire es la mayor de las velocidades físicas posibles, la hay –y fuerte– para suponer que la de la luz en el vacío sí lo es. En I ya se discutieron diferentes propuestas para evitar el “infame” (en terminología de John Bell) colapso. Aquí sólo se tratará brevemente una que prácticamente no se discutió entonces, la interpretación de la función de ondas como puro elemento de información, en el espíritu de la teoría de la información cuántica. En realidad la idea no es nueva y de hecho en sus aspectos puramente pragmáticos coincide con la interpretación de Copenhague (su diferencia con ésta es que en la teoría de la información cuántica no se plantean en absoluto cuestiones acerca de la naturaleza de la realidad y cosas por el estilo, que preocupaban a Bohr y, sobre todo, a Heisenberg). La idea central es que la función de ondas o, en general, el estado cuántico no es algo objetivo (como, p.e., el campo electromagnético) sino que es meramente un elemento de información. Conociendo el estado cuántico de un sistema en un determinado instante (suponemos que es un estado puro, es decir, un vector del correspondiente espacio de Hilbert), poseemos la máxima información posible, esto es, experimentalmente accesible, sobre dicho sistema en ese instante. Tras una medida, el conocimiento del sistema que posee el correspondiente observador generalmente varía y el “colapso” o reducción no sería más que una especie de regla nemotécnica para describir el cambio de información sobre el sistema, el cual implica una “reinicialización” del estado para adaptarlo a esa nueva información. Así, pues, no hay aquí nada objetivo; al parecer las paradojas eran elementos fantasmales introducidos al querer objetivar lo que no es objetivable, el estado cuántico. Debe admitirse que esta idea resuelve el problema desde un punto de vista pragmático y, por ello, es la que subyace en general en las aplicaciones de

la mecánica cuántica, muy particularmente en todo lo relacionado con la información cuántica, como criptografía y computación cuánticas, por ejemplo. No obstante, quedan algunas cuestiones pendientes de solución. La primera tiene que ver con los sistemas cerrados, que por definición no admiten una clara distinción entre el observador y lo observado. Ciertamente, esto sólo daría lugar a problemas serios en el marco de una (posible) cosmología cuántica, porque en este contexto, cuando se considera el estado cuántico del universo en su totalidad, no tiene evidentemente sentido el postular un observador externo al sistema. Como ya se comentó en I, la salida por parte de los “pragmáticos” es asegurar que la cosmología cuántica, entendida como el análisis del estado cuántico global del universo, no tiene sentido, porque la teoría cuántica no puede aplicarse desde el punto de vista de su verificación experimental (que al final es lo que cuenta) a un único sistema como es, en este contexto, el universo, ya que sus predicciones son siempre estadísticas.

***El “colapso” o reducción no sería más que una especie de regla nemotécnica para describir el cambio de información sobre el sistema.***

De todos modos, investigadores tan notables como Penrose, Hawking, Hartle y, de alguna manera, Gell-Mann creen que sí tiene sentido formularse esas cuestiones cosmológicas. El futuro lo dirá, de modo que aquí lo dejaremos en suspenso. La segunda cuestión parece de más relevancia en relación con el problema que nos ocupa. Podemos a su vez dividirla en dos: ¿información de qué? (*what knowledge?*, preguntaba John Bell; aquí se tomarán “conocimiento” e “información” como conceptos equivalentes) y ¿conocimiento de quién? (*whose knowledge?*). El análisis de la primera de ellas nos llevaría una vez más al borde entre la física y la metafísica, lo que quieren evitar a toda costa los defensores de la interpretación del estado cuántico como mero elemento de información, así que no se discutirá más aquí. Sin embargo la segunda sí es relevante desde un punto de vista estrictamente empírico. Esta cuestión fue abordada por Rudolf Peierls [7] (quien a la sazón tenía alrededor de ochenta años, lo que aumenta, si ello es posible, la estimación que de él se tenía y se tiene como científico) y puede plantearse del modo siguiente: supongamos un sistema  $S$  y su correspondiente espacio de Hilbert  $H_S$  de dimensión  $D$ , junto a los consabidos observadores,  $A$  (Alice = Alicia) y  $B$  (Bob, a quien llamaremos, más castizamente, Benito), quienes, basándose en su correspondiente información sobre el sistema, lo describen mediante los estados (en general, operadores o matrices densidad) respectivos  $\rho_A$  y  $\rho_B$ . Puesto que la información de Alicia es en general distinta de la de Benito,  $\rho_A \neq \rho_B$ . La pregunta es entonces si hay alguna restricción sobre los posibles estados  $\rho_A, \rho_B$  (se da por supuesto que la información de ambos es siempre fidedigna y que no ha habido perturbaciones del sistema desconocidas para cualquiera de ellos). Pues bien, bajo estas premisas, Peierls estableció dos criterios para que las correspondientes descripciones del sistema dadas por Alicia y Benito sean compatibles:

$$I: [\rho_A, \rho_B] = 0$$

$$II: \rho_A \rho_B \neq 0$$



La condición II parece completamente natural, pues viene a decir que las descripciones de A y B no pueden contradecirse entre sí. Por otra parte, la I es también una condición lógica a simple vista, pues parece venir impuesta por la restricción de que dos observables pueden medirse simultáneamente sólo si conmutan; de hecho, es fácil darse cuenta de que se cumple si  $\rho_A$  y  $\rho_B$  representan estados puros (son proyectores), ya que en tal caso ambos operadores densidad han de ser idénticos, puesto que evidentemente lo son los correspondientes vectores estado,  $|\psi_A\rangle = |\psi_B\rangle$ . Sin embargo, una reflexión más profunda conduce a que esa condición no es necesaria para asegurar la compatibilidad de las descripciones del sistema dadas por ambos observadores en el caso general. De esto se dio cuenta C. Fuchs (citado en [8]), quien construyó un simple contrajemplo, expuesto con mínimos cambios en ese trabajo, que muestra que tal condición no se satisface en un caso particular de descripciones dadas por A y B que cumplen todos los requisitos. La cuestión sigue en cierto sentido abierta, aunque un notable progreso en su solución ha sido realizado recientemente por Brun et al. [9], que han reemplazado I por la condición necesaria y suficiente, válida incluso para más de dos observadores, siguiente (se da siempre por supuesto que el espacio de Hilbert asociado al sistema físico en cuestión es de dimensión finita): si cada una de las matrices densidad correspondientes a los diferentes observadores A, B, C,... tiene un (no necesariamente único) desarrollo en estados (no necesariamente ortogonales) de la forma

$$\rho = \sum_i \rho_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|, \quad (\rho_i > 0) \quad (5)$$

y hay al menos un estado común en cada uno de dichos desarrollos, entonces estas matrices pueden representar el conocimiento diferente que tales observadores tienen del sistema en cuestión. Como se señala en el segundo de los trabajos citados en [9], aunque este resultado supone un importante paso adelante en la comprensión de la compatibilidad de la información poseída por distintos observadores, y por lo tanto en la solución del problema de la objetivación de dicha información, aún quedan importantes cuestiones al respecto por resolver. Por no hacer demasiado largo este artículo no me extenderé en detalles, para los cuales remito a los trabajos mencionados [9].

### 3. Sobre los postulados de la mecánica cuántica

Los postulados “tradicionales” de la mecánica cuántica, formulados en el marco de la llamada interpretación ortodoxa (o de Copenhague) se encuentran en cualquier texto de mecánica cuántica (véase, p.e., [10], u [11] para una introducción sencilla). Aunque desde el punto de vista didáctico las formulaciones tradicionales son bastante convenientes, la verdad es que no todos los postulados que se enumeran son lógicos y matemáticamente independientes entre sí. Una cuestión relevante en la fundamentación e interpretación de la mecánica cuántica es la de cuáles son los postulados estrictamente requeridos para construir dicha teoría. Algo a primera vista sorprendente es que a pesar de que en la formulación tradicional no se hace ningún tipo de mención a la teoría de la relatividad (lógicamente, pues se trata de la mecánica cuántica no-relativista), la teoría cuántica prohíbe la trans-

misión de señales superlumínicas, lo que en principio no tendría por qué ser así (en la mecánica newtoniana, asimismo no-relativista, hay acciones dinámicas instantáneas). Para entender esto, es conveniente distinguir entre “influencia” y “transmisión de información”. Por influencia se entiende algo no muy precisamente definido relacionado con la no-localidad del estado cuántico; por ejemplo, lo que ocurre al estado de una partícula al medir la otra en un estado entrelazado de dos partículas, desde el punto de vista del observador que realiza dicha medida. Puede hablarse de una cierta influencia no-local sobre ese estado, pero en ningún caso esto puede servir para establecer una comunicación superlumínica entre ambos observadores (A y B, más arriba).

***La linealidad de la evolución temporal en Mecánica Cuántica está muy relacionada con la imposibilidad de comunicación superlumínica.***

Desde hace algún tiempo, se sabe que la linealidad de la evolución temporal en mecánica cuántica está muy relacionada con la causalidad, es decir con la imposibilidad de comunicación superlumínica. Sin embargo, sólo recientemente esta relación se ha formulado clara y explícitamente; véase [12]. Es conveniente distinguir –algo artificialmente– entre “estática” y “dinámica” cuánticas. La primera se refiere a las características de un sistema cuántico en un determinado instante (se discuten más abajo), mientras que la segunda tiene que ver con la evolución temporal de los estados (o de los operadores, si se está en la imagen de Heisenberg). Pues bien, un resultado interesante es el siguiente: si se especifica la estática del sistema de cierta forma (ver más abajo) y si se prohíbe toda posibilidad de comunicación superlumínica, la dinámica del mismo ha de describirse mediante mapas *lineales completamente positivos* (LCP) sobre sus estados (operadores densidad). Ahora bien, según un teorema de Kraus [13] todo mapa LCP puede realizarse mediante una evolución lineal y unitaria en un espacio de Hilbert, es decir, por un proceso cuántico, donde el hecho de que el operador de evolución sea función del hamiltoniano (su exponencial, esencialmente) es intrínseco a las simetrías del sistema (ver, p.e. [14]), en este caso a la invariancia bajo traslaciones temporales propia de un sistema cerrado. Este punto tiene su importancia porque durante bastante tiempo se ha venido especulando sobre la posibilidad de una teoría equivalente empíricamente a la mecánica cuántica, que coincidiera en la “estática” con ésta, pero cuya evolución temporal sea no-lineal, es decir, no se cumpla *exactamente* la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Así, en un contexto algo distinto, Weinberg construyó una teoría no-lineal [15], que en principio parecía estar de acuerdo en el aspecto empírico con la mecánica cuántica, pero pronto se vio que dicha teoría admite comunicación superlumínica, por lo que no es una alternativa razonable a la mecánica cuántica. No sé si se ha demostrado bajo las codiciones más generales posibles, pero en cualquier caso el resultado mencionado más arriba proporciona buenas razones para afirmar que, admitiendo la estática cuántica en todo instante, la dinámica ha de ser necesariamente lineal si se quiere eliminar la posibilidad de transmisión superlumínica de señales (la recíproca sí es cierta en

general); resultados recientes relacionados con esta cuestión pueden verse en [16] y trabajos allí citados.

Pasemos ahora a la “estática” para preguntarnos cuáles serían los postulados imprescindibles para construir la mecánica cuántica. En [17] se aborda esta cuestión y se muestra que, además del postulado de imposibilidad de comunicación o transmisión de información superlumínica (postulado que llamaremos P3) hay que introducir los dos siguientes postulados “estáticos”:

**P1. Postulado probabilístico:** *Los resultados que predice la teoría cuántica son esencialmente probabilísticos, es decir, un observador únicamente puede conocer (en general) las probabilidades de los diversos resultados de las medidas realizadas en un sistema físico.*

**P2. Postulado del espacio de Hilbert:** *A todo sistema físico (simple o compuesto) se le asocia un espacio de Hilbert complejo y separable. Los estados físicos vienen representados en general por operadores densidad (con sus conocidas propiedades matemáticas); los estados puros corresponden a operadores de proyección sobre subespacios monodimensionales o, equivalentemente, a vectores (más apropiadamente a rayos). Las magnitudes físicas se representan mediante operadores hermiticos (“observables”) sobre dicho espacio de Hilbert.*

Por supuesto, un análisis apropiado requiere el aparato matemático adecuado. Por ejemplo, la conocida “regla probabilística”,  $\pi_k = \text{Tr}[P_k \rho_Q]$  –ya introducida en la sección anterior– que da la probabilidad de obtener un valor determinado de una cierta magnitud física correspondiente a un autovalor dado del observable asociado (suponemos espectro discreto, por simplicidad), y que suele tratarse como un postulado independiente, no lo es, ya que puede deducirse del teorema de Gleason (ver [17] y referencias allí a los trabajos originales para más detalles). Por otra parte, la existencia de reglas de superselección, que restringen las posibles superposiciones de estados del espacio de Hilbert, obliga a elaborar más cuidadosamente P2, que aquí se ha presentado de manera excesivamente general. Asimismo, es necesario introducir el llamado postulado de simetrización a fin de poder tratar partículas idénticas. Por razones de espacio, se dejará aquí esta cuestión, que aunque pueda parecer puramente académica sigue despertando interés. (Para una visión reciente distinta, pero igualmente interesante, de este tema, véase [18]). Sobre todo, y para concluir, hay que recalcar que la conexión entre evolución lineal (unitaria) e imposibilidad de comunicación superlumínica explica que, aun

siendo formalmente una teoría no-relativista, la mecánica cuántica respete en lo esencial el principio de relatividad, de modo que ambas teorías, Relatividad Especial (la General es harina de otro costal) y Mecánica Cuántica, parecen mantener una relación cooperativa más allá de la tradicional “coexistencia pacífica”, aunque, eso sí, no sea posible la construcción rigurosa de una mecánica cuántica relativista, llegándose necesariamente a la teoría cuántica de campos relativistas. Pero eso es otra historia.

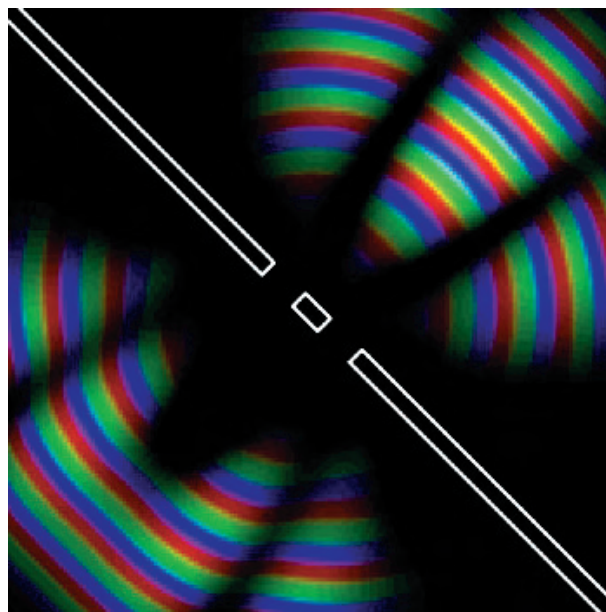
## Apéndice: Algunos aspectos de la investigación sobre los fundamentos de la teoría cuántica en España

Este Apéndice se dedica a unos breves comentarios acerca de los aspectos más destacados –desde mi punto de vista– del desarrollo de la investigación sobre fundamentos de la teoría cuántica en España, así como de las perspectivas inmediatas de la misma. Por supuesto, esta modesta exposición no pretende tener rigor histórico ni ser exhaustiva, así que pido disculpas de antemano si he omitido alguna –probablemente valiosa– contribución de autores españoles a este tema.

Parece claro que la investigación en aspectos de fundamentación de la teoría cuántica es minoritaria en todas partes; y así, desde luego, ha de ser, dado el enfoque y las características de la misma. De hecho, como algo sistemático de cierta consistencia, este tipo de investigación empezó prácticamente en los primeros años setenta del siglo pasado, como consecuencia principalmente de la posibilidad de verificación experimental de las desigualdades de Bell. Desde esas fechas hasta el comienzo de la década de los noventa aparecieron varios grupos, principalmente en Europa, EE.UU., Canadá y Japón. Las implicaciones experimentales, junto con el desarrollo de la óptica cuántica y el “boom” de la información cuántica, han hecho que gran parte de los investigadores e investigadoras de esos grupos se hayan pasado a estas disciplinas, en particular a la computación cuántica. Algo así es lo que ha ocurrido en España, con la peculiaridad de que aquí hasta mediados de los ochenta no puede hablarse

apropiadamente de ningún grupo de investigación en esta materia, sino sólo alguna que otra persona más o menos aislada o colaborando generalmente con gente de fuera del país.

Ese era el caso, por ejemplo, de Emilio Santos, desde hace bastantes años catedrático de Física Teórica de la universidad de Cantabria, a quien ha de considerarse como un pionero en esta línea de investigación en nuestro país, ya que empezó a trabajar en estos temas –o en otros muy relacionados– a principios de la década de los setenta. (Los avatares de la investigación desarrollada por E. Santos, contados por él mismo, pueden verse en [19]).



Representación de la probabilidad de densidad de un paquete de ondas atravesando una rendija doble.

A finales de los ochenta ya había algunos pequeños grupos trabajando en estos temas en diversas universidades españolas; se empezaron a realizar tesis doctorales y se organizaron algunos cursos sobre fundamentos cuánticos. Para ser más precisos, ha de decirse que ya antes habían tenido lugar algunas reuniones científicas dedicadas a temas relacionados de algún modo con la fundamentación cuántica; por ejemplo, el “Sixth International GIFT Seminar”, que tuvo lugar en Jaca en 1975 y en el cual participó John Bell, así como un seminario en Salamanca a principios de los ochenta –no recuerdo la fecha exacta– organizado por Luis J. Boya (y tal vez algún otro que no me conste o no recuerde). En cualquier caso, un buen paso adelante se dio con la organización del “International Symposium on Fundamental Problems in Quantum Physics”, que tuvo lugar en Oviedo, en 1993, y en el cual participaron reconocidos investigadores en esta área, y que tuvo su continuación en un segundo simposio, también en Oviedo, en 1996 (las principales contribuciones a dichos simposios se encuentran en [20] y [21], respectivamente). Siguiendo el signo de los tiempos, el tercer –y por ahora último– simposio de la serie cambió significativamente su contenido, habiéndosele dedicado mucha más atención a la información cuántica. Este simposio tuvo lugar en Oviedo el pasado mes de julio y una reseña sobre el mismo puede verse en el número 4 del volumen 16 de esta Revista.

En cuanto a las publicaciones en revistas españolas (esencialmente Anales de Física y REF), o bien de libros publicados en España (no me refiero, claro está, a monografías generales ni a libros de texto de mecánica cuántica), aunque no son demasiadas, no ha lugar citarlas todas. Me limitaré a recordar –aunque sólo sea porque fui coautor– el que creo fue el primer “review” sobre aspectos de fundamentación cuántica publicado en España [22], así como el número especial de la REF citado al principio de este artículo, en el que además de los artículos ya mencionados, habría que destaca (en este contexto, por supuesto, pues todos los artículos de ese número son de gran calidad) los de información cuántica de A. Galindo, computación cuántica de J.I. Cirac y gravitación cuántica de E. Álvarez. Asimismo creo debe mencionarse el libro que reúne las lecciones de un curso sobre problemas de fundamentación cuántica que tuvo lugar en el verano de 1995, en el marco de los cursos de El Escorial [23]. Otros cursos del mismo tipo, dirigidos por A.F. Rañada y quien esto escribe, se desarrollaron en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo de Santander en 1999, 2000 y 2001, pero sus contenidos no han sido publicados. Como ya se ha comentado, la información cuántica es un tema de investigación en claro desarrollo en la actualidad. En España existen unos cuantos –en general, pequeños– grupos dedicados a diversos aspectos de este tema, sobre todo a los relacionados con la computación cuántica. Uno de los atractivos del trabajo en información cuántica consiste en su faceta pluridisciplinar, pues en el se dan cita, además de –por supuesto– la mecánica cuántica, la óptica cuántica, la teoría de números y las ciencias de la computación. Aprovechando el mencionado congreso de Oviedo del pasado mes de julio, la mayoría de los participantes españoles al mismo –una parte significativa de quienes se dedican en España a estos menesteres– decidió crear un grupo a nivel nacional (estatal, si se quiere). Tras una primera reunión en el Instituto de óptica del CSIC (Madrid), celebrada el pasado mes de octubre, dicho grupo ha empezado a ponerse en marcha. Dispone de

una página web –aún en pruebas cuando escribo– <http://www.squin.net> y próximamente se solicitará su constitución como grupo especializado de Información Cuántica de la R.S.E.F. Se tiene, desde luego, la intención de que este grupo lleve a cabo, dentro de sus posibilidades, diversas actividades, como cursos de doctorado interuniversitarios, reuniones periódicas a nivel nacional, etc. Esperemos que todo ello represente un acicate para el desarrollo de la investigación en información cuántica en España.

## Agradecimientos

He de agradecer las conversaciones mantenidas con diversas personas sobre los temas tratados en este artículo; como son bastantes y no querría olvidar a nadie, prefiero hacerlo de manera genérica. Este trabajo se ha beneficiado de una ayuda del MCyT, proyecto BFM2002-01414.

## Referencias

- [1] *Rev. Esp. Fis.* **14** (2000). Número especial: *Cien Años de Quanta*.
- [2] J. VON NEUMANN, *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* (CSIC, Madrid, 1991).
- [3] G. GARCÍA ALCAINE Y G. ÁLVAREZ GALINDO, “Adversus collapsum”, *Rev. Esp. Fis.* **15**, 29 (2001).
- [4] N. DAVID MERMIN, “What is quantum mechanics trying to tell us?”, *Am. J. Phys.* **66**, 753 (1998).
- [5] N. GARCÍA ET AL., “Time-resolved diffraction and interference: Young’s interference with photons of different energy as revealed by time resolution”, *Phil. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* **360**, 1039 (2001).
- [6] N. Gisin et al., “Optical tests of quantum non-locality : from EPR-Bell tests toward experiments with moving observers”, quant-ph/0009055; N. Gisin, “Sundays in a Quantum Engineer’s Life”, en *Quantum [Un]speakables. From Bell to Quantum Information*, R.A. Bertlmann, A. Zeilinger, eds. (Springer, Berlin, 2002).
- [7] R. PEIERLS, *More Surprises in Theoretical Physics* (Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, 1991).
- [8] N. DAVID MERMIN, “Whose knowledge?”, en *Quantum ...*, ref. [6].
- [9] T.A. BRUN, J. FINKELSTEIN Y N.D. MERMIN, “How much state assignments can differ”, quant-ph/0109041; T.A. Brun, quant-ph/0208088.
- [10] A. GALINDO Y P. PASCUAL *Mecánica cuántica* (Eudema Universidad, Madrid, 1989).
- [11] C. SÁNCHEZ DEL RÍO, *El significado de la física* (Edit. Complutense, Madrid, 2002).
- [12] C. SIMON, V. BUZEK Y N. GISIN, “No-signaling condition and quantum dynamics”, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 170405 (2001).
- [13] K. KRAUS, *States, effects and operations: Fundamental notions of quantum theory* (Springer, Berlin, 1983); J. Preskill, *Lecture Notes on Quantum Computation*, <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229>.
- [14] L.E. BALLENTINE, *Quantum Mechanics: a modern development* (World Scientific, 1998).
- [15] S. WEINBERG, “Testing Quantum Mechanics”, *Ann. Phys. (N.Y.)* **194**, 336 (1989).
- [16] B. MIELNIK, “Comments on Weinberg’s Nonlinear Quantum Mechanics and the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox”, quant-ph/0012041.
- [17] D. SALGADO Y J.L. SÁNCHEZ-GÓMEZ, “Some Comments on Three Suggested Postulates for Quantum Theory”, *Found. Phys. Lett.* **15**, 229 (2002).
- [18] L. HARDY, “Quantum Theory From Five Reasonable Axioms”, quant-ph/0101012.
- [20] E. SANTOS, “A personal view on the foundations of quantum mechanics”, en *Foundations of Quantum Physics*, editado por R. Blanco et al., Anales de Física, Monografías (RSEF, 2002).
- [21] *Fundamental Problems in Quantum Physics*, editado por M. FERRERO Y A. VAN DER MERWE (Kluwer, Dordrecht, 1994).
- [22] *New Developments on Fundamental Problems in Quantum Physics*, editado por M. FERRERO Y A. VAN DER MERWE (Kluwer, 1997).
- [23] J. L. SÁNCHEZ-GÓMEZ Y J.M. SÁNCHEZ-RON, “Quantum mechanics and macroscopic separability: a critical review”, *Anal. Fis.* **79**, 85 (1983).
- [24] *Fundamentos de Física Cuántica*, editado por A.F. RAÑADA et al. (Editorial Complutense, Madrid, 1996).

José L. Sánchez Gómez

está en el Dpto. de Física Teórica. Univ. Autónoma de Madrid