

## **Dos ontologías alternativas para la mecánica cuántica**

*FERNANDA SAMANIEGO BAÑUELOS*

### **Resumen**

La presencia de interpretaciones realistas por un lado, e interpretaciones llamadas «ortodoxas» con tendencia positivista y antirrealista, por el otro, es una especie de esquizofrenia que ha acompañado a la teoría cuántica desde sus orígenes. En este trabajo veremos que esto sigue vigente analizando dos interpretaciones actuales de la mecánica cuántica cuyos compromisos ontológicos son radicalmente distintos. Primero expondré algunos argumentos a favor de una ontología de propiedades, compatible con el formalismo cuántico, y posteriormente ofreceré una respuesta que podría elaborarse desde la Electrodinámica Estocástica Lineal, una teoría física que intenta rescatar el realismo y la causalidad en la mecánica cuántica. Desde mi punto de vista, si bien ambas propuestas tienen virtudes, comparten una dificultad pues son incompatibles con los sistemas cuánticos que tienen elementos no diagonales en su matriz de densidad.

### **1. Introducción**

Lombardi, basada en las ideas de Neri Castañeda, propone abandonar las categorías clásicas de objetos individuales definidos con propiedades determinadas y propone adoptar una ontología de propiedades. Por el contrario A. M. Cetto y Luis de la Peña, autores de la EDEL, prefieren conservar las categorías clásicas y dar un valor ontológico al campo estocástico de fondo con el cual interactúan las partículas, pues consideran que de esa manera obtenemos explicaciones causales de los problemas cuánticos. Ellos proponen a la Electrodinámica Estocástica Lineal como una teoría fundamental a partir de la cual puede derivarse la teoría cuántica.

Hacia el final del trabajo haré un balance de las dos propuestas y explicaré por qué desde mi punto de vista ambas dejan sin resolver un aspecto: son incompatibles con los sistemas cuánticos cuyas matrices de densidad tienen elementos no diagonales.

### **2. Contexto**

El siguiente abanico sirve para ubicar a la EDEL y a Lombardi entre otros autores que defienden distintas interpretaciones de la mecánica cuántica.

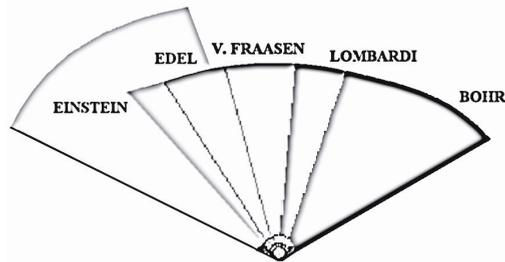


Figura 1. Abanico con algunas interpretaciones de la mecánica cuántica.

A la izquierda tenemos las interpretaciones que buscan un rescate de la causalidad más completo, donde los fenómenos tengan explicaciones compatibles con las demás áreas de la física. El abanico es más amplio en esa zona, porque esas interpretaciones hacen uso de otras teorías físicas para explicar o derivar la mecánica cuántica. Un poco más a la derecha tenemos la interpretación de Bas Van Fraassen que es realista respecto a las entidades observables, pero no se compromete ni con la existencia de las entidades teóricas, ni con la verdad de las teorías. Finalmente, en el extremo derecho, está la interpretación de Bohr que no busca más el regreso al determinismo y la causalidad en el sentido clásico. Es interesante notar que en este abanico los compromisos realistas van «disminuyendo» conforme avanzamos de izquierda a derecha.

## 2.1. El principio de complementariedad de Bohr

En el Congreso de Física de 1927 que se llevó a cabo en Italia, Bohr presentó una ponencia frente a varios de los físicos más destacados de la época: Max Born, A. H. Compton, Enrico Fermi, Paul Dirac, Heisenberg, H. A. Lorentz, Robert Millikan, Wolfgang Pauli, Max Plank, Arnold Sommerferld, Otto Stern y el gran ausente fue Albert Einstein. Allí Bohr habló por primera vez públicamente del principio de complementariedad y lo presentó como «un punto de vista general... útil para armonizar los enfoques aparentemente conflictivos mantenidos por distintos científicos» (Bohr citado por Holton, 1973, p. 119)

El principio de complementariedad dice que la naturaleza muestra facetas que se excluyen mutuamente, pero que nos brindan información esencial acerca de los fenómenos estudiados y que por tanto se complementan y son igualmente necesarias. «Lo contrario [decía Bohr] no es una contradicción, sino complemento del ser».<sup>1</sup>

Para Bohr, la complementariedad era una estructura conceptual a través de la cual se podían resolver las paradojas de la mecánica cuántica, tales como la naturaleza ondulatoria-corpúscular de la luz, la incompatibilidad entre la física clásica y la moderna o la imposibilidad de separar a los 'objetos' atómicos del 'sujeto' (o del arreglo experimental) que los mide.

## 2.2. Interpretación realista

Einstein, quien puede considerarse el exponente paradigmático de una postura realista ante la mecánica cuántica, nunca aceptó el principio de complementariedad de Bohr: «Me parece una equi-

1 Nota que escribió Bohr en un pizarrón de la Universidad Estatal de Moscú.

vocación permitir que las descripciones teóricas dependan directamente de aserciones empíricas, tal como parece intentarse, por ejemplo, en el principio de complementariedad de Bohr» (Einstein citado por Holton, 1973, p. 125)

La complementariedad estaba relacionada con cierto abandono del sentido común y de la lógica clásica que Einstein no compartía ni estaba dispuesto a tolerar. Para Einstein la ciencia debía ser un refinamiento del pensamiento cotidiano y las teorías científicas debían ser de preferencia monistas, esto es, sostener la existencia de un solo tipo de objetos; por eso no aceptaba la dualidad de objetos con características de onda y partícula<sup>2</sup>.

### 2.2.1. Argumento realista EPR

En 1935 se publicó el famoso trabajo con la idea original de Einstein, pero que escribió básicamente Boris Podolsky y salió a la luz bajo la autoría ellos dos y de un asistente de Podolsky llamado Nathan Rosen. Allí los autores argumentaban que «si se adopta un punto de vista objetivo y realista claramente definido [por ellos], entonces la mecánica cuántica es una teoría incompleta.» (Fine, 1986).

El criterio de realismo mínimo que propusieron los autores del artículo EPR fue el siguiente: diremos que una magnitud física es real, si el sistema tiene ya un valor definido para esa magnitud física antes de que se realice la medición, si podemos predecir con certeza el valor de una magnitud física sin perturbar el sistema. Así, la magnitud es independiente de la observación y lo único que sucede al medir es que nosotros nos damos cuenta de cuál era su valor pre-existente.

Basándose en un ejemplo físico Einstein, Podolsky y Rosen hicieron una demostración impecable: partieron del supuesto de que las variables del sistema eran mínimamente reales (en el sentido que ellos definieron) y, dado que la mecánica cuántica no podía establecer todos los valores específicos anteriores a la medición de las variables, llegaron a la conclusión de que la teoría era incompleta. Concluyeron que había «elementos de realidad» que la mecánica cuántica estaba ignorando y que eran necesarios para que la teoría fuera capaz de proveer la información faltante.

### 2.2.2. Interpretación de ensamble

Einstein atribuía la falta de certeza en la cuántica a nuestra ignorancia y a que la teoría era incompleta. Él seguía «creyendo en la posibilidad de construir un modelo de la realidad, es decir, de una teoría que represente las cosas en sí mismas y no sólo la probabilidad de su ocurrencia.» (Einstein, citado por de la Peña, 1987, p. 75).

Einstein suponía que había valores iniciales en los sistemas, aunque no los conociéramos, y criticaba al grupo de Copenhague por dar una interpretación incorrecta a la  $\psi$  función de onda. En una de sus críticas afirma que la «función  $\psi$  no describe de ninguna forma una condición de un sistema individual; habla más bien de varios sistemas, de un ‘ensamble de sistemas’ en el sentido de la mecánica estadística» (Einstein citado por Home y Whitaker, p. 266, negritas mías).

«La razón de que [Einstein] encontrara el aspecto estadístico de la mecánica cuántica insatisfactorio, era primordialmente que creía que esa característica era consecuencia del fracaso en

2 Einstein consideraba problemático adscribir realidad física al aspecto ondulatorio y al aspecto corpuscular simultáneamente: si la partícula localizable cargaba toda la energía y el momento, entonces la onda asociada a ella estaba vacía, era una especie de **onda fantasma** a la que difícilmente podríamos asignarle un valor real.

proveer una descripción completa de los fenómenos microfísicos individuales. [Así, Para Einstein los ensambles eran] un parámetro retóricamente apto para llamar la atención a la incompletitud de la teoría cuántica». (Home, 1997, p. 372). En breve, desde el punto de vista einsteniano, la naturaleza estadística de  $\psi$  demostraba que la teoría cuántica era una teoría incompleta que debía ser completada «desde afuera», por construcción de una teoría más general, que abarcara la relatividad general y que incluyera los resultados de la teoría cuántica como una aproximación. El camino correcto para completar la mecánica cuántica era construir toda una nueva teoría unificadora a partir de la cual pudiera derivarse la mecánica cuántica.

Desde la iniciativa realista de Einstein, pionera en el ámbito de la física cuántica, muchos otros autores han intentado adoptar interpretaciones realistas de la teoría: la interpretación determinista de Bohm, la interpretación por ensambles de Ballentine, etc. Tales interpretaciones, si bien muy diferentes entre sí en cuanto a su postura respecto a la causalidad, conciben la mecánica cuántica como una descripción objetiva de lo real, en la cual la conciencia de los observadores no juega ningún papel y los aparatos de medición son también sistemas cuánticos que interactúan con el sistema microscópico a medir respetando las leyes de la teoría. Precisamente a esta familia de interpretaciones realistas pertenece la EDEL.

### 3. Lombardi: Racionalidad y Ontología en Mecánica Cuántica

#### 3.1. Rompimiento de los lazos entre lenguaje, pensamiento y realidad

En su artículo *Mecánica Cuántica: ontología, lenguaje y racionalidad*, Lombardi tiene como objetivo «poner de manifiesto el modo en que la mecánica cuántica obliga a reflexionar acerca de la racionalidad teórica<sup>3</sup>, en la medida en que pone en crisis ciertas categorías lógico-ontológicas básicas de la historia de la lógica y la metafísica.» (Lombardi, p. 2)

Lombardi explica cómo para Aristóteles la palabra ‘logos’ tenía un significado múltiple que entrelazaba al lenguaje, el pensamiento y la realidad. En ese entonces era claro que podíamos expresar mediante nuestro lenguaje el conocimiento de la realidad. Pero estos lazos aristotélicos, desde el punto de vista de Lombardi, parecen romperse con la mecánica cuántica porque no podemos describir con nuestro lenguaje natural la referencia de la teoría y, por tanto, no alcanzamos a comprender la realidad de la que nos habla (para más detalles ver Lombardi, p. 1-2).

#### 3.2. Principio de incertidumbre de Heisenberg

El principio de incertidumbre de Heisenberg mostró que la teoría cuántica no permite determinar simultáneamente el valor preciso del momento y la posición de un sistema cuántico.

#### 3.3. Teorema Kochen-Specker

En 1967 Simon Kochen y Ernst Specker demostraron con su teorema que en un sistema cuántico sólo es posible asignar simultáneamente valores a un subconjunto propio de las variables, formado

3 La división entre racionalidad teórica por un lado y la racionalidad práctica por el otro, es cuestionada frecuentemente. Claramente, Lombardi acepta la distinción entre racionalidad teórica y práctica y aclara desde un principio que se referirá sólo a la teórica.

por las que son mutuamente compatibles. Esto es, que el formalismo cuántico impedía la asignación de todas las propiedades del sistema en un momento dado.

Lombardi señala que si bien el principio de Heisenberg mostraba la imposibilidad de determinar los valores de dos observables incompatibles de manera simultánea, no mostraba que tal asignación fuera imposible en principio. Por eso podía defenderse aún el argumento EPR de que la mecánica cuántica no daba cuenta de los valores de las observables del sistema cuántico por ser una teoría incompleta; y tenía sentido también hacer propuestas para completar la teoría, como lo hacían las teorías de variables ocultas.

El teorema de Kochen y Specker (1967) fue más lejos que el principio de Heisenberg al demostrar que el formalismo cuántico impedía la asignación de todas las propiedades del sistema en un momento dado. Para Lombardi, el resultado Kochen-Specker frustra todo intento de formular las teorías de variables ocultas al dejar claro que «no existe ningún camino para ‘completar’ la teoría de modo tal que sea posible predicar simultáneamente todas las propiedades del sistema.» (Lombardi, p. 5). Podemos agregar todas las variables que queramos al formalismo cuántico y a lo sumo podremos conocer las propiedades de uno de los subconjuntos de observables compatibles entre sí, subconjuntos que son conocidos como ‘contextos’. Entonces, lo que mostraron Kochen y Speaker fue que la asignación de las propiedades de un sistema cuántico es necesariamente contextual.

### 3.4. Contextos en la matriz de densidad

A partir de la ecuación de Schrödinger se obtienen los estados posibles de un sistema cuántico ( $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \dots$ ), pero hay un principio de superposición en la mecánica cuántica que nos dice que además de éstas soluciones, hay combinaciones lineales<sup>4</sup> de ellas que son soluciones válidas también.

Una solución superpuesta puede ser de dos tipos:

- 1) Cuando describe un estado puro basta un cambio de base para que el estado del sistema cuántico quede representado mediante un solo vector de estado  $\Psi_n$
- 2) Pero cuando la superposición corresponde a un estado mezclado, por más cambios de base que hagamos, no encontraremos ninguna que nos permita describir al estado mediante una sola función de onda  $\Psi_n$ . De hecho, en este caso, el sistema está constituido por varios subsistemas independientes, cada uno caracterizado por una función de onda distinta  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \dots$  y su estado sólo puede describirse de forma estadística.

Para hacer esta descripción estadística de los estados mezclados la función de onda ya no es suficiente, es necesaria una herramienta matemática conocida como la matriz de densidad  $\rho$ , que está dada por la expresión  $\rho = \sum w_i |\Psi_i\rangle \langle \Psi_i|$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$  donde los coeficientes  $w_i$  nos dicen en qué proporción se encuentran los componentes del sistema correspondientes a cada  $\Psi_i$ . La matriz de densidad nos sirve para expresar tanto los estados mezclados como los puros<sup>5</sup>.

4 Las combinaciones lineales de  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \dots$  son todas aquellas sumas del tipo  $\Psi = a \Psi_1 + b \Psi_2 + c \Psi_3 + d \Psi_4 + \dots$ , donde los coeficientes  $a, b, c, d, \dots$  son números arbitrarios.

5 Los estados puros son casos particulares en los que la matriz cumple con ciertas características ( $\rho^2 = \rho$ ).

### 3.4.1. Ejemplo del espín

El espín es una propiedad asociada al momento angular del electrón, esto es, nos da información sobre la dirección en la que el electrón está «rotando». Dadas las orientaciones permitidas para el vector del momento angular, sabemos que el espín sólo puede tener dos valores (o bien  $\frac{1}{2}$  ó bien  $-\frac{1}{2}$ ) y por eso los estados base del espín (en la dirección del eje vertical) suelen definirse como:

$|\Psi_1\rangle = |\uparrow\rangle$  (arriba o positivo) y  $|\Psi_2\rangle = |\downarrow\rangle$  (abajo o negativo).

Representemos a  $|\uparrow\rangle$  por la matriz  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  y a  $|\downarrow\rangle$  con la matriz  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Entonces las siguientes matrices de densidad representan **estados puros**:

$$\rho_1 = |\uparrow\rangle\langle\uparrow| = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \rho_2 = |\downarrow\rangle\langle\downarrow| = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

En la primera matriz todos los componentes del sistema están en el estado  $|\uparrow\rangle$  (por lo que  $w_1 = 1$  y  $w_2 = 0$ ) y en la segunda todos están en el estado  $|\downarrow\rangle$  (por lo que  $w_1 = 0$  y  $w_2 = 1$ ).

Las matrices de densidad para estados mezclados serían como sigue:

Si la mitad de los componentes del sistema están en el estado  $|\uparrow\rangle$  y la otra mitad en el estado  $|\downarrow\rangle$  la matriz de densidad es:

$$\rho_3 = \frac{1}{2} \rho_1 + \frac{1}{2} \rho_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \text{ y aquí notamos que } \rho^2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} \neq \rho$$

Otro estado mezclado estaría representado por la matriz

$$\rho_4 = \left(\frac{3}{5}\right)^2 \rho_1 + \left(\frac{4}{5}\right)^2 \rho_2 = \frac{9}{25} \rho_1 + \frac{16}{25} \rho_2$$

Haciendo una caricatura, lo que nos dice  $\rho_4$  es que de cada 25 mediciones, 9 veces encontraremos al sistema en el estado  $|\uparrow\rangle$  y 16 veces en  $|\downarrow\rangle$ .

Gráficamente los cuatro estados ejemplificados podrían verse así:

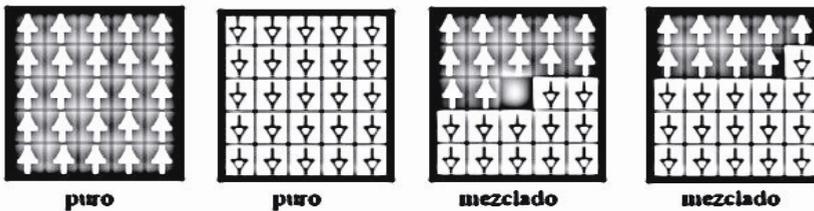


Figura 2. Estados puros y estados mezclados.

Los cuatro ejemplos de matrices de densidad que mencionamos fueron escogidos de la manera más simple posible, pero los términos no-diagonales, (que corresponden a términos del tipo  $w_i|\downarrow\rangle\langle\uparrow|$  donde se combinan los estados base) pueden ser distintos de cero, generando imágenes como la de la figura 3.

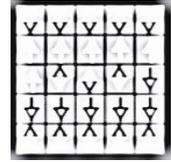


Figura 3

### 3.4.2. Regresando a los contextos...

Lombardi apunta que el carácter contextual en la mecánica cuántica es diferente a cualquiera que pudiéramos encontrar en la física clásica. La autora explica que la matriz de densidad tiene la propiedad de que los elementos de su diagonal principal nos dan información sobre las propiedades asociadas a un contexto y los elementos fuera de la diagonal se refieren a contextos diferentes.

«Esta característica de la matriz de densidad pone de manifiesto que la descripción completa de un sistema cuántico exige contar con información referida a propiedades asociadas, al menos, a dos contextos diferentes. Pero, a la vez, la contextualidad de la mecánica cuántica expresada por el teorema Kochen-Specker impide adjudicar simultáneamente de un modo consistente valores a todas las observables del sistema. Por lo tanto, si bien el estado cuántico brinda una caracterización del sistema que es completa en el sentido de no ser completable, no permite asignar todas sus propiedades en un instante dado» (Lombardi, p. 7, negritas más)

Más adelante volveremos al punto de que la matriz de densidad contiene información sobre más de un contexto. Pero hay un punto que vale la pena recalcar en este momento y que creo que Lombardi aceptaría sin problemas: lo que demuestra el teorema Kochen-Specker es que la mecánica cuántica nunca podrá completarse, por lo tanto, frustra los intentos de variables ocultas, pero no derriba la idea de que la mecánica cuántica sea incompleta en el sentido de que pueda subsumirse en un formalismo más general, o «complementarse» de alguna otra forma. Uno puede optar por quedarse con el formalismo no-completable, o buscar teorías más generales como la EDEL que lo complementen (aunque ya no intenten completarlo formalmente).

## 3.5. Problema ontológico

### 3.5.1. Principios de identidad

El principio leibniciano de identidad de los indiscernibles afirma que si dos individuos poseen exactamente las mismas propiedades, entonces se trata de un mismo individuo (o de dos versiones del mismo individuo). Pero este principio, como expone Lombardi, no puede aplicarse a los objetos cuánticos tras el resultado de Kochen-Specker porque sus propiedades no pueden ser simultáneamente determinadas. El principio de Leibniz presupone el principio de determinación omnimoda, según el cual, para cualquier individuo, todas las propiedades se encuentran objetivamente determinadas. Pero el teorema Kochen-Specker pone en crisis éste último principio, provocando que el

principio leibniciano para discernir entre individuos no pueda siquiera ser expresado en su forma original.

Como se muestra en la figura 4, podemos encontrarnos en mecánica cuántica, con dos objetos cuyas propiedades conocidas sean iguales pero que no sean «idénticos».

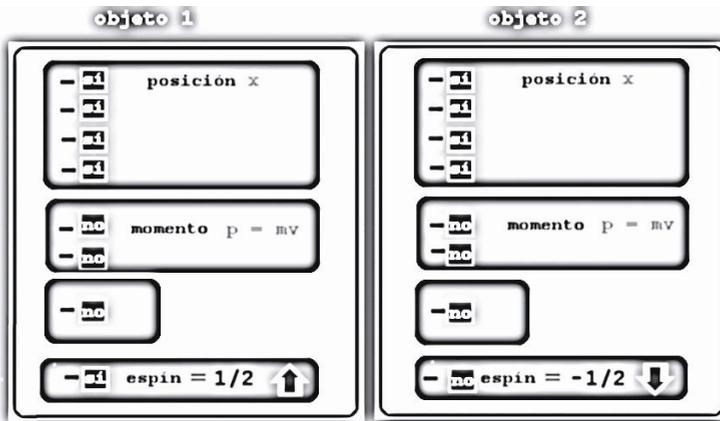


Figura 4. *Objetos cuánticos indistinguibles pero no idénticos.*

En la figura 4 cada rectángulo representa un contexto. El teorema Kochen-Specker nos dice que sólo podemos conocer simultáneamente las propiedades correspondientes a uno de ellos. Las marcas «sí» nos muestran que aquí conocemos, tanto en el objeto 1 como en el objeto 2, las propiedades del primer contexto. Tomando en cuenta la información que tenemos, no podemos discernir entre los dos objetos. Sin embargo en otro contexto los objetos pueden tener propiedades distintas y por tanto no ser idénticos.

Como la figura 4 es muy sencilla, mencionaremos un aspecto que se dejó de lado para poder dibujarla y esto nos dará una mejor idea de la fuerza del teorema Kochen-Specker: En la figura se está suponiendo que podemos hacer una lista de las propiedades del objeto cuántico y dividir las en subconjuntos, pero esto es imposible según el teorema Kochen-Specker. Como Lombardi explica, el teorema es tan fuerte que nos dice, incluso, que si hay una propiedad  $P$  que pertenece a dos contextos, puede suceder que al asignar el valor  $p_1$  a  $P$  desde un contexto y el valor  $p_2$  a  $P$  desde otro contexto, puede resultar que  $p_1 \neq p_2$ . Esto significa que el valor de  $P$  no está determinado independientemente del contexto y por tanto no puede aplicarse la teoría de conjuntos a la «lista de propiedades» del objeto. Esa lista, simplemente, no puede formularse.

Por otro lado, en física clásica, la posición ayuda a distinguir entidades individuales: como dos objetos no pueden ocupar la misma región del espacio al mismo tiempo, la posición es lo que ayuda a diferenciarlos cuando son idénticos en el resto de sus propiedades. Pero en mecánica cuántica el principio de Heisenberg nos enseña que sólo podemos conocer la posición pagando el precio de ignorar todas las propiedades que pertenezcan a otros contextos. Y el teorema de Kochen-Specker profundiza el problema: un objeto no posee una posición determinada puesto que la posición sólo adquiere un valor determinado desde un contexto y debe necesariamente quedar indeterminada desde otros contextos. Es así como explica Lombardi que el teorema Kochen-Specker pone en crisis los principios de identidad clásicos basados en la posibilidad de diferenciar a las entidades por sus propiedades.

### 3.5.2. Preguntas Ontológicas

Ante las características de la mecánica cuántica y, en particular, ante las consecuencias del resultado Kochen-Specker, Lombardi plantea las siguientes preguntas ontológicas: ¿Cómo comprender estos objetos cuánticos que no poseen todas sus propiedades determinadas y, en consecuencia, no cumplen con el principio de identidad? ¿Cómo podemos hablar de que «un electrón ha dejado la traza de su trayectoria en la cámara de niebla» si recordamos que sólo es posible adjudicar simultáneamente propiedades a un sistema cuántico desde un contexto?

La autora se pregunta en qué sentido podemos referirnos con nuestro lenguaje a una entidad individual portadora de propiedades definidas, como un electrón o un fotón, si cada conjunto de propiedades parece corresponder a un objeto, pero no es posible pensar en una entidad individual que subyace a las propiedades en la medida en que no es admisible predicar todas sus propiedades simultáneamente. (Para más detalles ver Lombardi, p. 11)

Desde el punto de vista de Lombardi, en el momento que no podemos hablar de entidades individuales, ni distinguir las de otros individuos, nuestro lenguaje natural y lógico, con sujetos y predicados, no nos sirve para referirnos a las entidades cuánticas, lo cual plantea un serio desafío a las categorías ontológicas tradicionales.

### 3.6. Propuesta: Ontología de propiedades

Lombardi se pregunta entonces, si la salida al problema ontológico puede hallarse en una nueva concepción de la estructura categorial de la ontología cuántica. «En particular, si el objeto cuántico se esconde cada vez que intentamos asirlo, tal vez la mejor estrategia sea abandonarlo» La autora propone así, «prescindir del objeto cuántico como entidad fundamental y, con ello, ... adoptar una ontología de propiedades... en la que el objeto cuántico sólo se constituye contextualmente como un haz de propiedades» (p. 12)

Entonces, dos ontologías alternativas serían: 1) ontología tradicional con entidades definidas de las que pueden predicarse propiedades. 2) ontología de haces de propiedades.

Para Lombardi, la elección entre las dos ontologías en el caso de la física clásica es una cuestión de preferencias metafísicas, pero en el caso de la mecánica cuántica es la misma teoría la que impone las limitaciones que la llevan a inclinarse por la ontología de haces de propiedades, en la que parece apropiado identificar cada haz con un contexto.

La autora sostiene que una vez que se acepta una ontología de haces de propiedades, nuestro lenguaje natural y lógico con sujetos y predicados resulta inadecuado: «los nombres ya no tienen que nombrar pues no existen siquiera los haces de propiedades que juegan el papel de individuos [como en el caso clásico]... En definitiva, la mecánica cuántica parece referir a una ontología de la cual no podemos hablar con nuestros lenguajes, sean éstos naturales o artificiales.» (p. 13-14).

Todo esto la lleva a cuestionarse, regresando a los lazos aristotélicos, si la mecánica cuántica nos impide comprender una teoría cuya ontología no podemos describir con nuestros lenguajes. Para Lombardi la mecánica cuántica nos invita a adoptar un criterio más amplio de racionalidad que supere las limitaciones de nuestro lenguaje y permita concebir nuevas estructuras de lo real.

#### 4. Respuesta a partir de la EDEL

La Electrodinámica estocástica lineal (EDEL) es una teoría que surgió a partir de algunas modificaciones y correcciones que Luis de la Peña y Ana María Cetto hicieron a la Electrodinámica estocástica (EDE) propuesta por los mismos autores y por varios otros años atrás. Ambas teorías coinciden en su intención de rescatar un análisis causal y realista de los fenómenos cuánticos.

La hipótesis central de la EDEL es que existe un campo de fondo presente en todo el espacio que interactúa con las partículas subatómicas causando los fenómenos cuánticos. La idea del campo de fondo y de utilizarlo para entender el problema de la estabilidad atómica fue propuesta originalmente por el físico Walter Nernst, quien consideró el campo de fondo como un campo electromagnético de origen desconocido, que estaba presente en todo el espacio y que podía ayudar a explicar la estabilidad atómica.

Esto implica un cambio profundo y radical en el objeto de estudio, pues ya no se estudia un átomo como sistema aislado, sino que se analizan sistemas abiertos en los que la interacción entre los átomos y el campo de fondo que los rodea es primordial.

Creo que la EDEL respondería al interesante planteamiento de Lombardi, diciendo que, en efecto, el principio de incertidumbre de Heisenberg y el teorema de Kochen-Specker nos hablan de la imposibilidad de adjudicar valores determinados a observables incompatibles de manera simultánea, pero que aún así podemos ver estos resultados como consecuencias del formalismo cuántico que no tienen por qué llevarnos a abandonar la ontología tradicional. Como la misma Lombardi menciona en su artículo, el principio de Heisenberg no es un resultado de deficiencias experimentales o limitaciones empíricas, sino una demostración formal que surge de la propia teoría, dentro de un esquema conceptual definido, pero no inevitable.

Ante la imposibilidad de adjudicar todas las propiedades a entidades individuales, antes que adoptar una ontología de propiedades, la EDEL optaría por una ontología de conjuntos de individuos (ensambles). Con esta ontología diríamos que el formalismo cuántico nos permite conocer los pesos probabilísticos de obtener ciertas propiedades en los miembros del ensamble, pero no podemos conocer las propiedades de todos los miembros. Esto nos permite seguir expresando la realidad que queremos describir con nombres y adjetivos, con sujetos que se refieren al ensamble y predicados que nos hablan de sus propiedades, rescatando así el uso de nuestros lenguajes lógicos y naturales.

Lombardi señala que hay al menos dos dificultades formales en ofrecer una salida vía la interpretación de ensambles: en primer lugar, la mecánica estadística clásica (con la que se describen y analizan los ensambles) tiene una estructura llamada Booleana, que es compatible con la lógica proposicional clásica y con la teoría de conjuntos. Pero, como vimos, el teorema Kochen-Specker mostró que la mecánica cuántica no tiene una estructura booleana, sino una estructura más general que impide hablar de ensambles con las conectivas lógicas. La segunda dificultad formal, relacionada con la anterior, se refiere a la probabilidad. La función clásica de probabilidad cumple con axiomas que también están basados en una estructura booleana, por lo tanto, dice Lombardi, las probabilidades cuánticas (si es que pueden llamarse probabilidades) no son las probabilidades de la mecánica estadística clásica.

Creo que los autores de la EDEL responderían a las dificultades planteadas por Lombardi, diciendo que su interpretación de ensamble no se ve afectada por el teorema Kochen-Specker en la medida en que la EDEL no pretende completar el formalismo de la mecánica cuántica desde el interior de la teoría, cosa que imposibilita el teorema, sino que propone una teoría más general,

a partir de la cual podemos entender lo que parece tan confuso desde el interior de la mecánica cuántica.

Kochen-Specker dirían: por más variables que se agreguen al formalismo cuántico, la teoría jamás podrá completarse, jamás podremos saber todas las propiedades del sistema... y la EDEL respondería: totalmente de acuerdo, el formalismo cuántico nos habla de ensambles de partículas y no puede definir simultáneamente todas sus propiedades. Pero esto no nos obliga a abandonar nuestros lenguajes naturales o a cambiar de ontología. Entonces, dejemos el formalismo cuántico como está y tratemos de entender los resultados que obtenemos de él y los fenómenos del microdominio con una nueva teoría más amplia que nos permita analizar la mecánica cuántica desde un punto de vista externo.

Hay todavía un detalle que atender en la respuesta de la EDEL: si es una teoría más amplia que contiene a la mecánica cuántica, entonces tiene que aceptar que está incluyendo una estructura no booleana. Los autores de la EDEL responderían en este caso que, más que incluir a la mecánica cuántica, la EDEL lleva a la mecánica cuántica mediante aproximaciones. En éstas aproximaciones hacia la cuántica, se tienen que adoptar ciertas herramientas formales, que ciertamente pueden tener una estructura no-booleana, pero esto no afecta ya a la EDEL. Luis de la Peña y Ana María Cetto nos dirían que las características (muchas veces indeseables para ellos) que se dan en el estado cuántico, no afectan a la EDEL y por tanto no tienen consecuencias en su ontología.

Con esto podemos ver que hay un desacuerdo racional en el que, la EDEL por un lado y Lombardi por otro, ofrecen puntos de vista sólidos, a partir de los cuales podemos sostener ontologías diferentes para la mecánica cuántica. En el caso de Lombardi, una ontología de propiedades que va más acorde con las propiedades que podemos adjudicar al sistema cuántico de manera simultánea. Y en el caso de la EDEL, una ontología tradicional, que es compatible con nuestro sentido común y que nos permite seguir expresándonos acerca de la realidad mediante nuestros lenguajes formales y naturales, manteniendo los lazos aristotélicos.

Tanto De la Peña y Cetto, por un lado, como Lombardi por el otro, encuentran en su postura la mejor manera de satisfacer los valores epistémicos y los objetivos científicos que consideran más importantes: para los primeros es primordial mantener una postura realista en la que la existencia del campo de fondo es fundamental para ofrecer explicaciones causales de los fenómenos cuánticos y para Lombardi esto no es primordial.

## **5. Comentario sobre la matriz de densidad**

Más allá de la postura de la EDEL, quisiera hacer un comentario al artículo de Lombardi respecto a la necesidad de contar con información de más de un contexto a la hora de describir los sistemas cuánticos mediante la matriz de densidad.

Supongamos por un momento que aceptamos junto con Lombardi la ontología de haces de propiedades y abandonamos al «escurridizo objeto cuántico». Ahora pongamos nuestra atención en un estado que requiere para ser descrito una matriz de densidad con elementos no nulos fuera de la diagonal, esto es, que requiere elementos de dos contextos o dos haces distintos para ser descrito.

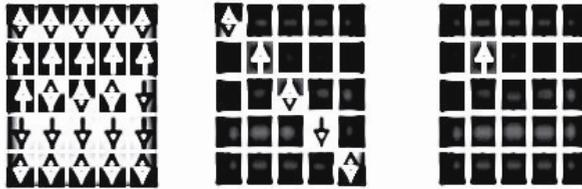


Figura 5

Entonces ¿qué ventaja tiene adoptar la ontología de haces de propiedades, si de cualquier forma no nos sirve un solo haz para describir al sistema cuántico? ¿Qué ventaja tiene si los sistemas cuánticos se nos escapan con nuestra nueva ontología tanto como con la ontología tradicional?

Lombardi podría responder que la ventaja es que los haces de propiedades coinciden con los conjuntos de observables que pueden adquirir valores determinados simultáneamente, esto es, que la ontología que propone es muy apegada al formalismo cuántico. Pero no sé si esto es tan valioso como para romper con el lenguaje natural y con la lógica estándar donde las proposiciones expresan la adjudicación de propiedades a entidades definidas. Con esto no quiero decir que me inclino por la ontología tradicional (1) sobre la ontología de haces de propiedades (2) propuesta por Lombardi, sólo me parece que ambas tienen dificultades similares cuando tratamos con sistemas cuánticos cuyas matrices de densidad contienen información acerca de varios contextos.

## 6. Conclusiones

La mecánica cuántica es una teoría subdeterminada en el sentido Duhem-Quine. Muestra de ello es que, como mostramos en este trabajo, pueden sostenerse posturas en conflicto respecto a su ontología: por un lado la «ontología de propiedades» que propone Lombardi y por el otro lado la «ontología de ensambles de partículas» que proponen los autores de la EDEL –Luis de la Peña y Ana María Cetto– en defensa de una postura realista.

Cada uno de ellos considera que su visión es más consistente con el resto de las teorías científicas que conocen y aceptan y que va más acorde con los objetivos que buscan en su investigación científica. Cada uno encuentra mejores explicaciones con su visión y siente que responde mejor a los valores que consideran epistémicamente relevantes. Estamos entonces ante un claro ejemplo de desacuerdo racional.

La ontología de propiedades tiene la virtud de ser más compatible con el formalismo cuántico y es una propuesta innovadora en el sentido de que nos invita a romper con las viejas concepciones de la racionalidad y del «individuo cuántico». La ontología de la EDEL, por su parte, tiene la ventaja de ofrecer explicaciones causales, respondiendo a una pregunta que muy pocas veces encuentra respuesta en las interpretaciones de la mecánica cuántica: ¿por qué se dan los fenómenos cuánticos? Además, es compatible con el sentido común, con la lógica clásica y con nuestro lenguaje.

Sin poner en duda todas estas grandes virtudes, en este trabajo he defendido que ambas ontologías comparten la dificultad de ser incompatibles con aquellos sistemas cuánticos cuyas matrices de densidad contienen información acerca de varios contextos.

## Bibliografía

- Arana, Juan. *Causalidad y objetividad. Schrödinger y el trasfondo filosófico de la física cuántica*. En la antología de Mataix, Carmen y Andrés Rivadulla, eds. *Física Cuántica y Realidad*, Universidad Complutense, 2002. p. 73-97.
- Chimal, Carlos. *Luz interior: Conversaciones de Ciencia y Literatura*, Tusquets editores. Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. México, 2001.
- De la Peña, Luis y Ana María Cetto. *Stochastic Theory for Classical and Quantum mechanical Systems*. Foundations of Physics, Vol.5, 1975.
- De la Peña, Luis y Ana María Cetto *Does Quantum Mechanics accept a Stochastic Support?* Foundations of Physics, Vol.12, No.10., October, 1982
- De la Peña, Luis y Ana María Cetto, *The Quantum Dice*, Kluwer Academic Publishers, EUA, 1996.
- De la Peña, Luis. *Albert Einstein, navegante solitario*, Fondo de cultura económica, México, 1987. capítulo 4, p. 75-94.
- De la Peña, Luis. *En busca de los fundamentos físicos de la Mecánica Cuántica*. Instituto de Física, UNAM, 2005.
- De la Peña, Luis y Ana María Cetto. *Contribution from stochastic electrodynamics to de understanding of Quantum Mechanics*. 2005
- De la Torre, Alberto Clemente, *Física Cuántica para filo-sofos*, Ed. Fondo de cultura económica, México, 1992.
- Einstein, Albert. «*Física y Realidad*», Journal of the Franklin Institute, marzo de 1936.
- Einstein, Podolsky y Rosen. 1935
- Einstein, Albert. *Correspondencia Born-Einstein, 1916-1955*, Ed. Siglo XXI, México, 1973.
- Hacyan, Shahen. *Física y metafísica del espacio y el tiempo*, Ed. Fondo de Cultura Económica, Méxcio, 2004.
- Holton, Gerald. 1973, *Ensayos Sobre el Pensamiento Científico en la Época de Einstein*. Traducción: José Otero, Alianza Editorial, Madrid. 1982. Cap.3
- Home, Dipankar. *Conceptual Foundations of Quantum Physics*. Plenum Press, NY, 1997.
- Jammer, Max. *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley and sons, 1994. P. 288-92.
- Laloë. *Do We Understand Quantum Mechanics? Strange correlations, paradoxes, and theorems*. Laboratoire de Physique de lens. Paris, Francia, escrito en noviembre de 1998, publicado en enero del 2001.
- Lobardi, Olimpia. «*Mecánica cuántica y no-localidad: ¿con cuántos dados juega Dios?*» Por publicarse en «Fuerzas y Dinámica» editado por Laura Benítez y José Antonio Robles, Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM, México.
- Lobardi, Olimpia. *El Problema del Determinismo en la Física*, Tesis Doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, 2000. pp. 1-49.
- Olivé, León. *Conocimiento, Sociedad y Realidad*, Fondo de cultura económica, México, 1988. capítulo 9: *Sobre el realismo científico*. p. 211-262.
- Olivé, León, *Realismo y antirrealismo en la concepción semántica de las teorías*, Revista CRÍTICA / Vol. XVII / N°. 51, p. 34.
- Penrose, Roger y John Stachel. *Einstein 1905: un año milagroso*, Editorial Crítica, España, 2001.
- Whitaker and Home. *Ensemble Interpretations of quantum Mechanics*. Department of Pure and Applied Physics, Queen's University of Belfast, Northern Ireland, Agosto de 1991.

Wick, David. *The Infamous Boundary*, Copernicus Press, Boston, 1995. Cap. 12.

Zinkernagel, Henrik. *Bohr's relevance to philosophy and contemporary physics*. En la antología de Maiax, Carmen y Andrés Rivadulla, eds. *Física Cuántica y Realidad*, Universidad Complutense, 2002. p. 155-171.

Artículos que se publicarán próximamente en la antología sobre Racionalidad editada por Ana Rosa Pérez Ransanz y Ambrosio Velasco. Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM, México, D.F.

Álvarez, Sebastián. «*Racionalidad y diversidad en la ciencia*»

Lombardi, Olimpia. «*Mecánica Cuántica: ontología, lenguaje y racionalidad*»

Nudler, Oscar. «*¿Racionalidad o racionalidades? Hacia un pluralismo no relativista*»

### Otras fuentes

<http://www.lapresentacion.com/linares/vitaniet.htm>

<http://www.elcultural.es/HTML/20040909/Ciencia/CIENCIA10206.asp>

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/sternGerlach/sternGerlach.htm>

<http://www.fisica.unam.mx/teo/proyectos17.htm>

<http://focus.aps.org/story/v2/st28>