Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

EL LIMITADO ESTATUS ONTOLÓGICO DE LA LÓGICA CUÁNTICA

The limited ontological status of quantum logic

Rafael Mora Ramirez
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
rafael.f.mora@hotmail.com

Resumen

Esta investigación busca explicar el significado de la lógica cuántica. Se inicia considerando las razones que justifican el surgimiento de las lógicas cuánticas. Luego, se prosigue exponiendo la lógica cuántica de Birkhoff y von Neumann. Finalmente, se termina tratando sobre las interpretaciones que ha tenido la lógica cuántica, en especial, por parte de Putnam. Básicamente, concluimos que la lógica cuántica no constituye una nueva lógica que pueda reemplazar a la lógica clásica como lógica del mundo.

Palabras clave: lógica formal, lógica cuántica, mecánica cuántica, ley de distributividad, interpretación de la lógica cuántica.

Abstract

This research seeks to explain the meaning of the quantum logic. I start considering the reasons that justify the *raison d'être* of the quantum logical. Then, I continue exposing the quantum logic of Birkhoff and von Neumann. Finally, we ended talking about the interpretations that has taken the quantum logic, in particular, by Putnam. Basically, we conclude that the quantum logic does not constitute a new logic that can replace the classical logic as logic of the world.

Keywords: formal logic, quantum logic, quantum mechanics, distributive law, interpretation of quantum logic.

Fecha de Recepción: 19/02/2020 – Fecha de Aceptación: 23/12/2020

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

1. ¿Lógicas cuánticas?

La lógica formal estudia la validez de los argumentos. Principalmente, como la matemática se puede sostener que la lógica no trata sobre el mundo sino que más bien es una forma de hablar sobre el mundo o, mejor aún, una forma de limitar las maneras de hablar sobre el mundo (Bunge 1997). En ese sentido, la lógica teórica se puede considerar como como una ciencia normativa pues establece las leyes, los principios y todos los criterios que nos podrían revelar los modos en los que una argumentación posee validez.

Ahora bien, en tanto aplicación, la lógica proposicional ordinaria (como un vaso vacío) puede ser llenado con contenidos físicos apropiados. Esta sería la lógica de aquel mundo concebido por la ciencia. A esto se le llama lógica práctica.

> (…) la lógica práctica (resultante de la aplicación de la lógica formal a las teorías físicas) pretende dictar las reglas básicas que rigen las relaciones vinculantes que presentan entre sí nuestras proposiciones sobre el mundo real. Pero, ¿podría una revisión de esta lógica ayudarnos a comprender el sentido de los fenómenos cuánticos? Nosotros solemos considerar a la lógica como si de algo inmutable e independiente de nuestro conocimiento experimental del mundo se tratase. Sin embargo, eso mismo pensábamos de la geometría hace dos siglos. Y sucedió que la geometría del mundo podía cambiar, si variábamos las relaciones que se establecen entre los objetos estudiados por ella. Quizá, la lógica sea una cuestión empírica en la misma medida que ahora consideramos que la química y la geometría lo son (Sklar 285).

¿Puede la lógica depender de la estructura del mundo? ¿Es la lógica algo *a posteriori* más bien que *a priori*? ¿Qué sucedería en el muy especial caso de la lógica de los procesos que acontecen en el mundo cuántico? La lógica cuántica se podría definir como el conjunto de reglas algebraicas (formales y estructurales) que rigen las operaciones para combinar los elementos del vocabulario lógico vinculándolos a acontecimientos físicos que se observan a escalas atómicas en el micromundo cuántico. Según Maldonado:

> El trabajo de la lógica cuántica consiste en el desarrollo de un lenguaje que permita traducir al lenguaje de los fenómenos y comportamientos macroscópicos las especificidades del mundo cuántico que tienen un lenguaje radicalmente diferente del que usamos en la escala macro. Por ende, el objetivo de la lógica cuántica es el de estudiar si la semántica cuántica se corresponde o no con la semántica proposicional clásica. Y si no se corresponde, entonces trabaja en la construcción de un puente (167).

¿Qué relación habrá entre la lógica cuántica y la proposicional? ¿Es la primera una derivación de la segunda? ¿O es, más bien, la cuántica una modificación profunda de la segunda? En pocas palabras, como lo afirma Piscoya (1995), el debate sobre la verdadera comprensión de la mecánica cuántica se debe a un intento forzado de

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

utilizar un lenguaje clásico para describir procesos que deben ser vistos a una luz totalmente nueva, con un nuevo aparato conceptual. Este debe ser, entendemos el papel de la lógica cuántica.

Existen distintos intentos de modificar la lógica clásica para resolver algunas dificultades de la mecánica cuántica que resultaron en las denominadas "lógicas cuánticas". Varios de estos intentos consisten en acudir a lógicas polivalentes para poder asignar a cualquier proposición otras posibilidades además de verdadera (V) o falsa (F). Hans Reichenbach pensó que dando cabida a proposiciones que no fueran ni ciertas ni falsas, algunas de las características de los sistemas cuánticos podrían representarse adecuadamente.

> Una afirmación sobre la proposición de una partícula era verdadera o falsa después de que se hubiese realizado una medición de la posición. Pero, para una partícula en un estado cuántico entre mediciones, en el que la posición tuviera un valor definido con probabilidad uno, ¿sería posible decir que las afirmaciones sobre la posición tenían un valor de verdad "indeterminado", no siendo ni verdaderas ni falsas? (Sklar 285).

Reichenbach, así, introduce el valor indeterminado (I) como alternativa adicional. Por ende, se fundamenta en una lógica trivalente. Así, su sistema posee, además, tres tipos de negación en vez de uno.

Pongamos un ejemplo. Consideremos una propiedad de un sistema cuántico, por ejemplo X=5m. Si el estado de sistema es tal que dicha propiedad es una propiedad objetiva poseída, entonces la proposición "el sistema tiene X=5m" es V; si la misma es una propiedad objetiva no poseída, será F; y si la propiedad es una propensidad (es decir, una tendencia o inclinación), la proposición será I.

Aparte de Reichenbach, otras propuestas de lógicas polivalentes son las siguientes. Según Fevrier, es necesario incorporar a V y F el valor absolutamente falso (A). Von Weizäsker propone no tres, sino infinitos valores de verdad distribuidos continuamente entre V y F. Otras modificaciones propuestas a la lógica clásica (por Birchoff y Von Neumann) mantienen valores bivalentes de verdad, pero variando las leyes distributivas de la lógica clásica (Clemente de la Torre 110-111).

2. La lógica cuántica de Birkhoff y von Neumann

Detengámonos en la sugerencia de Garett Birkhoff y John von Neumann. Ellos tenían la intención de discernir en la teoría cuántica las características más básicas que condujeron a los desconcertantes fenómenos cuánticos. Así, se centraron en las relaciones entre estados de sistemas, relaciones que podrían ser consideradas como un tipo de "lógica" de proposiciones sobre el sistema.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

Supongamos que una partícula pasa efectivamente, es decir, con probabilidad igual a 1, a través de un filtro que sólo permite el paso de partículas spin-arriba. Entonces, podemos decir que "spin-arriba" es verdadero para la partícula. Si la partícula pasa definidamente a través de un filtro que deja pasar tanto partículas spin-arriba como partículas spin-abajo, diremos que en este caso "spin-arriba q_o spin-abajo" es verdadero. Si una partícula pasa efectivamente a través del filtro p y a través del filtro s diremos que en este caso "p q_y s" es verdadero[1].

Enseguida, describiremos formalmente a la lógica cuántica. La mecánica cuántica asocia a cada sistema físico F un espacio de Hilbert[2] H_F. La idea de una lógica cuántica explota una analogía entre la estructura del conjunto de los subespacios de un espacio de Hilbert H y el conjunto las partes del espacio de las fases[3] E de un sistema mecánico clásico: ambos son retículos[4] ordenados

---

[1] Hay que advertir que tanto q_o como q_y son las versiones cuánticas de la disyunción y la conjunción de la lógica clásica.

[2] Un espacio de Hilbert es un espacio vectorial provisto de un producto interno y que tiene la estructura de un espacio de Banach. Los espacios de Banach son espacios vectoriales a los que se puede extender de un modo natural el cálculo diferencial originalmente inventado para las funciones con argumentos y valores en R. $\mathcal{V}$ es un espacio vectorial sobre $\mathbb{K}$ si se ha definido una función $\varphi : K \times V \rightarrow V$, que se combina con la operación + en $\mathcal{V}$ y con la multiplicación $\otimes$ en $\mathbb{K}$ según ciertas reglas. En tal caso los elementos de V se llaman *vectores*; los elementos de K, *escalares*; operación +, *adición vectorial*, y la función φ, *multiplicación por escalares*. Sean, pues, a y b cualesquiera escalares; v y w, cualesquiera vectores. Escribimos av por φ (a,v). Estas son las reglas anunciadas.

V1 $a(v+w) = av + aw$

V2 $(a \oplus b)v = av + bv$

V3 $a(bv) = (a \otimes b)v$

V4 $1v = v$ (donde 1 denota el elemento neutro de la multiplicación en $\mathbb{K}$)

Un producto interno en $\mathcal{V}$ es una función que asigna a cada par ordenado $< \mathrm{u}, \mathrm{v} > \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ un escalar $< \mathrm{u}|\mathrm{v} >$ sujeto a condiciones enunciadas a continuación.

PI1 $< \mathrm{v}|\mathrm{w} > = < \mathrm{w}|\mathrm{v} >^*$;

PI2 $< \mathrm{v}|a\mathrm{w} + b\mathrm{u} > = a < \mathrm{v}|\mathrm{w} > + b < \mathrm{v}|\mathrm{u} >$;

PI3 $< \mathrm{v}|\mathrm{v} > = 0$ si y solo si v = 0; de otro modo, $< \mathrm{v}|\mathrm{v} > > 0$ (Mosterín y Torreti 212, 213, 495).

[3] El espacio de fases se puede entender de este modo. Sean $q_1, \ldots, q_n$ las coordenadas generalizadas de posición de un sistema mecánico clásico en un instante dado y $\dot{q}_1, \ldots, \dot{q}_n$ las respectivas componentes de velocidad en ese instante. Si L es el *lagrangiano* del sistema, se definen coordenadas generalizadas de momento $p_1, \ldots, p_n$ por las ecuaciones:

$$p_k = \frac{\partial L}{\partial q_k} \qquad (1 \leq k \leq n)$$

El estado mecánico del sistema en dicho instante queda entonces completamente especificado por las 2n coordenadas de posición y momento $q_1, \ldots, q_n, p_1, \ldots, p_n$ y puede representarse adecuadamente mediante un punto en una variedad diferenciable de 2n dimensiones. Este es el espacio de fases del sistema (Mosterín y Torreti 213-214).

[4] Un retículo es un orden parcial reflexivo, en el cual cada par de elementos posee un ínfimo y un supremo. Es decir, $<A, \preccurlyeq>$ es un retículo si y solo si:

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

parcialmente por la relación de inclusión. Consideremos ahora el retículo de los subespacios del espacio de Hilbert H_F. Si sus elementos son designados con letras mayúsculas, tenemos que $U \sqcap B = U \cap B$, pero $U \sqcup B = U \oplus B$, el subespacio generado por U y B; por otra parte, para cada subespacio U, el conjunto de todos los vectores ortogonales a U, es un subespacio U′ tal que $U \sqcup U' = H_F$ y $U \sqcap U' = \{0 \in H_F\}$, de modo que U′ es el complemento relativo de U en el retículo de los subespacios de H_F.

Esta lógica cuántica en cuestión se constituye definiendo la biyección g: $B \mapsto b$ del retículo de los subespacios del espacio de Hilbert H_F en el conjunto de las proposiciones referentes al estado del sistema cuántico F y confiriendo a este conjunto la estructura de retículo que hace de esa biyección un isomorfismo[5]. Suponiendo que conocemos los símbolos básicos de la lógica clásica, entonces

$g(U) \wedge g(B) = g(U \sqcap B) = g(U \cap B)$, pero
$g(U) \vee g(B) = g(U \sqcup B) = g(U \oplus B)$, y
$\sim g(U) = g(U')$,

la proposición que dice que el sistema está en el subespacio ortogonal a U.

El álgebra proposicional cuántica es una estructura (reticular) cerrada bajo la operación de intersección en H, pero no es cerrada ni bajo la unión de conjuntos, ni bajo la operación de complemento relativo (que corresponde a la negación exclusiva)[6]; además, al no ser cerrada bajo la unión tampoco lo será con respecto a la disyunción exclusiva. No obstante, la lógica cuántica tiene definiciones alternativas de operaciones algebraicas cerradas que pueden pensarse como las operaciones lógicas correspondientes a la negación y disyunción cuántica. Estas

---

(1) $\langle A, \preccurlyeq \rangle$es un orden parcial, es decir, un orden de precedencia que ordena a los elementos que interrelaciona colocándolos unos detrás de otros.

(2) cualquier par x, y de elementos de A posee un ínfimo y un supremo, es decir, hay en A elementos u y w tales que u = inf (x,y) y w = sup (x,y). Formalmente, inf (x,y) es también simbolizado como $x \sqcap y$, y sup (x,y) es también simbolizado como $x \sqcup y$ (Mosterín y Torreti 526).

[5] Dos sistemas (o estructuras concretas) $\mathcal{A}$ y $\mathcal{B}$ con universos posiblemente distintos A y B pueden parecerse estructuralmente en ciertos aspectos, pero no en otros. En el caso extremo de que sean estructuralmente idénticos decimos que se trata de sistemas isomorfos entre sí. Son distinguibles por su "materia", por su universo, pero no por su forma: su forma es la misma, son isomorfos (Mosterín y Torreti 325).

[6] Una sentencia A en un lenguaje L es una negación exclusiva de la sentencia B precisamente cuando h(A) = H – h(B), donde H es el conjunto de estados posibles del sistema en cuestión y la función h es una función de satisfacción que asigna a cada sentencia elemental A en E (que es un conjunto de sentencias elementales) el conjunto h(A) de estados que satisfacen A. Existe otro tipo de negación, la negación selectiva o de alcance restringido. Esta negación se caracteriza porque una sentencia A y su negación selectiva A^* pueden ser ambas no verdaderas simultáneamente.

operaciones son la ortocomplementación y la operación de junta (el resultado del cual es el "supremo" de un par de elementos) en el retículo de los subespacios de H.

Así, el conjunto de los subespacios de un espacio de Hilbert, H, con las operaciones de intersección de conjuntos, $\cap$, y la operación de suma lineal, $\oplus$, forma un retículo cuántico, esto es, un retículo que puede interpretarse como una lógica cuántica. Nótese que en este retículo $<H,\cap,\oplus>$ podemos definir siempre un orden parcial como sigue: $A \leq B$, si $A \oplus B = B$. Este orden parcial corresponde a la relación de inclusión de conjuntos. Es fácil ver con un ejemplo que este retículo no es distributivo. Consideremos una línea D que no coincide con ninguna de las líneas (direcciones) A, B, C. Es claro que $D \wedge A = 0$, $D \wedge B = 0$, $D \wedge C = 0$, y por lo tanto: $(D \wedge A) \vee (D \wedge B) \vee (D \wedge C) = 0$. Sin embargo, $(A \vee B \vee C) \wedge D = D \neq 0$ (Martínez, 2005, p. 231)[7]. Por ello, se puede afirmar que el retículo $<H,\cap,\oplus>$ no es un álgebra de Boole[8], ya que no obedece a la ley distributiva.

Con un ejemplo más simple explicaremos por qué no se cumple la mencionada ley de la lógica tradicional, conocida como la de distributividad:

$$[p \wedge (r \vee s)] = [(p \wedge r) \vee (p \wedge s)]$$

Por mencionar un caso, si un hombre es alto y tiene los ojos azules o marrones, entonces el hombre es alto con ojos azules, o alto con ojos marrones. Lo particular en la lógica cuántica es que "q_y" no es distributiva sobre "q_o" como sí lo es "y" sobre "o". Por ejemplo, consideremos una partícula que se desplaza sobre una recta. Sean p, q y r las proposiciones siguientes.

p = la partícula tiene una determinada velocidad *v*

---

[7] Este ejemplo muestra que un retículo proposicional cuántico no satisface la ley distributiva. Sin embargo, puede mostrarse que un retículo cuántico satisface la condición de ortomodularidad: $A<B \rightarrow B=A \vee (B \wedge A^{\perp})$. $A^{\perp}$ es el orto-complemento de A, correspondiente a la negación selectiva de A. El desarrollo del programa de lógica cuántica posterior al de Birkhoff y von Neumann puede verse como un intento por interpretar esta ley de orto-modularidad, y de entender el sentido en que, supuestamente, esta ley ortomodular podría jugar un papel similar al que juega la distributividad en los cálculos clásicos (Martinez Muñoz 232).

[8] Un álgebra de Boole es un sistema $\mathcal{B} = <B, \sqcup, \sqcap, \complement, 0, 1>$ - donde $B \neq \emptyset$, $\sqcup$ y $\sqcap$ son operaciones binarias en B, $\complement$ es una expresión unaria en B, $0 \in B$ y $1 \in B$- que satisface los siguientes axiomas:

$x \sqcup y = y \sqcup x$	$x \sqcap y = y \sqcap x$
$x \sqcup (y \sqcup z) = (x \sqcup y) \sqcup x$	$x \sqcap (y \sqcap z) = (x \sqcap y) \sqcap x$
$x \sqcap (y \sqcup z) = (x \sqcap y) \sqcup (x \sqcap z)$	$x \sqcup (y \sqcap z) = (x \sqcup y) \sqcap (x \sqcup z)$
$x \sqcup \complement x = 1$	$x \sqcap \complement x = 0$
$x \sqcup 0 = x$	$x \sqcap 1 = x$

Otra noción equivalente, basada en nociones de orden, es que un álgebra de Boole es un retículo distributivo y complementado (Mosterín y Torreti 29-30).

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

q = la partícula se encuentra en el intervalo [-1,1]
r = la partícula está fuera del intervalo [-1,1]

Notamos que la proposición "q q_o r" es verdadera, pues es del tipo "$p \vee \sim p$". Por lo tanto,

p q_y (q q_o r) = p…………………(α)

Pero, por otro lado, las proposiciones

p q_y q
p q_y r

resultan ser falsas pues cada una postula valores simultáneos de posición y momento lineal (o velocidad) con una no permitida exactitud ya planteada por la relación de indeterminación o incertidumbre de Heisenberg[9]. Por ende

(p q_y q) q_o (p q_y r) = F…………..(β)

Por comparación entre (α) y (β) tenemos que

p q_y (q q_o r) $\neq$ (p q_y q) q_o (p q_y r)

Por consiguiente, "q_y" no es distributiva sobre "q_o" en la forma que "y" es distributiva sobre "o".

Para terminar esta parte señalaremos que

> Uno puede formular una lógica de proposiciones del tipo ordinario utilizando el "no" ordinario y el "o" ordinario. Dicha lógica tiene la propiedad distributiva indicada más arriba y se le conoce como álgebra booleana. Pero, también uno puede formular una estructura formal del tipo apropiado a "q_y" y "q_o" (junto con una negación cuántica apropiada). Esta nueva lógica tiene un uso interesante. Uno puede captar los elementos esenciales de la estructura de superposición[10], tan característica de

[9] Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, un observador puede determinar o bien la posición exacta de una partícula en el espacio o bien su momento (el producto de la velocidad por la masa) exacto, pero nunca ambas cosas simultáneamente. Cualquier intento de medir ambos resultados conlleva imprecisiones.

[10] La superposición cuántica ocurre cuando un objeto "posee simultáneamente" dos o más valores de una cantidad observable. Esto sucede en la paradoja del gato de Schrödinger, según el cual un gato está encerrado en una caja que contiene, además del animal, un átomo radiactivo, un contador Geiger y una ampolla de cianuro cuyo contenido cae en un cubo con ácido cada vez que el

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

los sistemas cuánticos, representando la estructura de las proposiciones acerca de los sistemas cuánticos (Sklar 287).

De este modo, se puede sostener que una lógica cuántica es modelable o construible a partir de considerar las limitaciones de la lógica proposicional. Sin embargo, ¿es la lógica cuántica una lógica proposicional modificada?, ¿la lógica cuántica vinculada al micromundo es una lógica que depende de la lógica que rige los procesos del macromundo?, ¿es posible ver la lógica proposicional clásica como una derivación de la lógica cuántica? Estas cuestiones serán abordadas a continuación.

3. Interpretaciones de la lógica cuántica

Escribe Maldonado:

> La lógica cuántica encuentra en el problema de la condicionalidad de los eventos el más idóneo de los terrenos epistemológicos. Por este motivo, hunde sus raíces, férreamente, en el dominio de la lógica. Por ende, se pregunta: ¿qué clase de implicaciones tienen o admiten los eventos cuánticos? En otras palabras, el tema que surge aquí es el de la posibilidad de considerar las implicaciones y proposiciones de la mecánica cuántica sin ambigüedades ni contradicciones (Maldonado 168).

¿Cuál es el modo correcto de pasar de premisas a conclusiones en lógica cuántica?, ¿cómo se sabe que un razonamiento en el contexto del mundo cuántico es adecuado?, ¿qué se puede deducir a partir de tal o cual hecho asociado al micromundo? Piscoya afirma que podría hablarse de la necesidad de la creación de un tipo de lógica no-clásica denominada lógica cuántica que sería distinta de la ordinaria básicamente en sus reglas de formación, pero no en las de deducción (Piscoya 17). Esto se contrapone al proyecto actual que busca un tipo específico de implicación para los eventos cuánticos. Pero, de acuerdo con Mosterín y Torreti, y

contador Geiger detecta la emisión de partículas radiactivas. Si se emite la partícula, el detector romperá la ampolla y el gato morirá. Si no se emite, la ampolla seguirá intacta y el gato vivirá. La probabilidad de que el gato permanezca con vida es del 50%. Solo abriendo la caja averiguaríamos qué le ha ocurrido al gato, pero mientras tanto este estaría "vivo y muerto a la vez". Otro experimento en el que interviene la superposición es el de la doble rendija. Por medio de este experimento se comprobó que la luz tiene naturaleza ondulatoria ya que se formaba un patrón de interferencia en una placa fotosensible colocada al final de las dos placas. Sin embargo, algo extraño ocurre cuando utilizamos electrones. Si se repite el experimento ahora disparando muchos electrones (partículas de materia), vemos que se genera un patrón de interferencia. Pero, cuando se observa a las partículas justo antes de pasar por las dos rendijas, el patrón de interferencia desaparece y en su lugar se forman dos líneas solamente, es decir, el electrón se comporta como materia esta vez. De esta manera quedó demostrada la naturaleza dual onda-partícula de las partículas subatómicas.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

en apoyo a la postura de Piscoya, el "condicional" de la lógica cuántica tendrá que ser la relación → entre proposiciones que corresponde, en virtud del isomorfismo g, a la relación que ordena parcialmente el retículo de los subespacios. Ciertamente, la mecánica cuántica no razona mediante un nuevo *modus ponens*; pero los defensores de la lógica cuántica siguen usando el *modus ponens* clásico para deducir teoremas matemáticos e incluso en sus razonamientos filosóficos[11]. Por todo ello, cuesta darle sentido al concepto de "lógica cuántica" (Mosterín y Torreti 346-347).

El asunto se torna más controvertido cuando se hace la propuesta de que la "lógica" cuántica debería ser interpretada como "lógica" *per se* en el pleno sentido de la palabra. El hecho de que la mecánica cuántica al analizar la misma realidad a escala micro-fundamental es supuestamente la teoría más confiable y general que tenemos a disposición, sugiere que la lógica cuántica es la lógica real, la lógica del mundo empírico, la lógica que dibuja la misma realidad. Sobre esta base, Putnam (1968) ha sugerido la analogía con el abandono de la geometría euclidiana debido al desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.

> Putnam argumenta que existe la posibilidad real de que nuestros descubrimientos sobre física cuántica muestren que la lógica clásica no es empíricamente correcta; considera que hay una analogía perfecta entre lo que ocurrió en geometría a finales del siglo XIX y lo que puede ocurrir en el caso de la lógica con los fenómenos cuánticos. Rechaza Putnam que todo cambio de lógica no sea más un cambio en el significado que asignamos a las expresiones lógicas (Martinez Vidal 95).

La lógica clásica (que normalmente manejamos en la vida cotidiana) pertenece al mundo de lo macro. Pero, ahora que nos hemos topado con una realidad cuántica a escala micro donde parece que las leyes de la lógica no se cumplen del todo, esto nos plantea una curiosa pregunta ¿debemos replantear desde la raíz toda nuestra lógica? Escribe Sklar:

> La idea ahora es que, así como la relatividad nos mostró que la geometría euclidiana, en su día considerada como válida para el mundo, era en realidad falsa y debía ser reemplazada por razones empíricas por la geometría no-euclidiana del espacio-tiempo, así la mecánica cuántica nos dice que la lógica booleana estándar a la que estábamos tan acostumbrados es incorrecta como lógica del mundo. Los hechos empíricos nos llevan a ver que la verdadera lógica del mundo es una caracterizada por la lógica no distributiva de la mecánica cuántica y no por la lógica distributiva que, creíamos, describía correctamente las relaciones entre proposiciones sobre el mundo. Desde este punto de vista, "q_y" es en realidad "y" y "q_o" es "o". Sucede únicamente que algunas cosas que considerábamos verdaderas sobre "y" y "o" son falsas, ocupando otras cosas verdaderas su lugar (Sklar 287-288).

[11] Es preciso anotar que cuando cuestionamos la ley distributiva, esto hace que ya no sigamos ante una lógica clásica, pues el rechazo (aun cuando sea sólo parcial) de una expresión tautológica ya nos coloca en el plano de otra lógica.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

¿Se justifica cuestionar la lógica estándar sobre la base de consideraciones cuánticas?, ¿es legítima la analogía en relación con la geometría no euclidiana estudiada por Einstein?

Es evidente que la lógica cuántica suscitó toda una serie de expectativas sobre futuros desarrollos basados en ella. En resumen, Putnam propuso tres tesis:

(1) La lógica clásica es una ciencia empírica; algunas de las "verdades necesarias" de la lógica clásica podrían volverse falsas por razones empíricas.
(2) De la misma manera que la teoría general de la relatividad nos lleva a adoptar una geometría no-euclidiana, nuestra mejor interpretación de la mecánica cuántica nos debe llevar a adoptar una lógica no-clásica[12].
(3) Adoptando una lógica no-clásica podemos retener buena parte de las propiedades de un sistema (Cabello 504).

Asimismo, Putnam desarrolló su versión del realismo lógico cuántico ofreciendo una radical disolución[13] del problema de la medida[14]. Según Putnam, el

[12] Esto es correcto, pero no debe ser llevado al extremo. Porque aún sigue habiendo lógica paraconsistente, lógica no monotónica que tienen gran uso en el razonamiento regular como técnico. Además, como están las cosas hoy, ¿qué es la lógica cuántica sino una etiqueta que se aplica a distintos sistemas lógicos incluso divergentes entre sí?

[13] Hay que distinguir entre resolver y disolver un problema. Para nosotros, una ***solución*** (o resolución) consiste en una argumentación sobre qué es aquello que genera al problema, junto con una propuesta para evitar dicho problema; mientras que una disolución consiste simplemente en notar que el enfoque dado a un asunto no es del todo adecuado. Por ejemplo, en un campo en pleno verano nos preguntamos ¿por qué no crece la plantación? Luego, nos podemos dar cuenta que la tierra no es fértil y que necesita ser enriquecida. Esta es una solución. Pero una disolución sería percatarnos que si estamos en pleno invierno, no es factible esperar que una planta crezca de modo ordinario. La pregunta ¿por qué no crece esta planta en invierno? está mal planteada pues en invierno no suele crecer mucha vegetación. Este problema debe disolverse. En realidad, se trata de un hecho real que ha sido enfocado como si se tratase de un problema. La diferencia entre resolver y disolver un problema es un asunto de óptica. Bajo cierto punto de vista es un problema, bajo otro solo tiene la apariencia de un problema pero en esencia no lo es.

[14] De acuerdo con Okon: "El formalismo estándar de la mecánica cuántica contiene dos leyes de evolución radicalmente distintas. Por un lado tenemos la evolución de Schrödinger que es continua, determinista y lineal y por otro la dictada por el postulado del colapso que es, en cambio, discontinua, indeterminista y no-lineal. ¿Cómo acomoda la teoría a este par de evoluciones temporales tan diferentes?, ¿no dan lugar a inconsistencias? De entrada parece que no, pues el formalismo estándar especifica en qué situaciones se debe utilizar una u otra de las leyes dinámicas. En detalle, se propone lo siguiente:
i) Cuando no está sucediendo una medición, todos los estados evolucionan de acuerdo con la ecuación de Schrodinger.
ii) Cuando alguna medición sucede, los estados cambian de acuerdo con el postulado del colapso.
A primera vista, esta receta puede parecer razonable pues implica que en cada momento solo una de las leyes dinámicas debe ser utilizada, evitando así inconsistencias. Sin embargo, al mirarla con

problema de la medida (y de hecho todas las demás "paradojas" de la mecánica cuántica) surge a través de una aplicación incorrecta de la ley distributiva, y por lo tanto *desaparece* una vez que se reconoce esto. Específicamente, Putnam pone restricciones a la aplicación de la ley de la distributividad.

Por esta restricción, Resnik considera que, ante los fenómenos observados por los físicos cuánticos, lo que debemos hacer es restringir las aplicaciones de la regla de distribución de la conjunción sobre la disyunción (regla a la que no se ajustan los fenómenos de la cuántica) de manera que establezcamos que esa regla no es aplicable en ese ámbito.

De este modo, evitaríamos el peligro de caer durante algún tiempo, en la incoherencia total. Tampoco necesitamos abandonar las normas que rodean a la deducción. Sin embargo podemos cambiar, por ejemplo, lo que cuenta como una implicación o como un contrario sin abandonar las normas que nos comprometen con lo que nuestras teorías implican o que nos prohíben afirmar simultáneamente dos contrarios (Martinez Vidal 103).

¿Este problema se trata solo de modificar cuidadosamente ciertas reglas? ¿No es muy complicado (si no es que imposible) alterar el significado de la implicación y, a la vez, tratar de mantener todos los otros conceptos? Parecería entonces que una modificación de la lógica estándar arreglaría esta situación. No obstante, A. Clemente de la Torre sugiere que el cambio de lógica resulta ser un procedimiento desesperado además de incorrecto:

El valor de las lógicas cuánticas radica en que, a través del mismo, se logra un profundo análisis de la estructura de mecánica cuántica, antes que en la posibilidad concreta de reemplazar la lógica clásica. Todos los sistemas lógicos propuestos han sido criticados por alguna u otra falla técnica, cosa no tan grave, porque, en principio, dichas fallas son subsanables con modificaciones en la estructura de la propuesta. Destaquemos, además, que, en cada caso, la mecánica cuántica juega un papel importante, por ejemplo, en la determinación de valores de verdad para las proposiciones, de modo que la lógica queda subordinada a la mecánica cuántica, contrariamente a la creencia de que la lógica está por encima de todas las ciencias. Por más importantes que seamos los físicos cuánticos, no lo somos tanto como para exigir que todo el mundo aprenda a razonar de otra manera porque así se solucionan ciertas dificultades de la teoría. La solución a los problemas debería pasar por una revisión de los conceptos físicos y no defenestrando a la lógica. Mucho más grave, y posiblemente irremediable es el hecho de que las lógicas cuánticas no son alternativas posibles a la lógica clásica, porque la misma presentación y aprendizaje de sus estructuras, la selección de sus axiomas, las opciones entre alternativas, etc., se hacen utilizando la lógica clásica que se pretende

---

más detalle, revela ser sumamente insatisfactoria. El problema es que la receta, esencial para poder utilizar el formalismo cuántico, depende crucialmente del concepto de medición, pero esta noción no tiene un significado preciso dentro del mismo formalismo. El resultado es entonces, en el mejor de los casos, un formalismo vago, con dos leyes de evolución incompatibles y sin un criterio preciso para decidir cuál de las dos debe ser utilizada en cada momento. Este es, en pocas palabras, el problema de la medición en mecánica cuántica" (Okon 133-134).

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

> abolir. Todo sistema axiomático está basado en postular la verdad incuestionable de sus axiomas, lo que implica la falsedad de la negación de los mismos. Pero si además, existe otro valor de verdad indeterminado, negar un axioma no necesariamente sería falso. Estos argumentos sugieren considerar las lógicas cuánticas como interesantes cálculos [proposicionales] con los cuales se pone en evidencia la estructura de la mecánica cuántica, pero no como sistemas alternativos a la lógica clásica. Consideramos entonces esta primera opción, la de negar la lógica clásica, como interesante pero imposible (Clemente de la Torre 111-112).

¿Cómo es posible alterar la lógica que usamos para cuestionar esa misma lógica?, ¿es posible criticar la lógica desde ninguna lógica o toda crítica a la lógica presupone una lógica previa y anterior? Si hay enunciados fundamentales que nos sirven como principios desde los cuales partir para las investigaciones de las teorías científicas ¿cómo así podemos esperar cuestionar cosas como las reglas que gobiernan el valor de verdad de los enunciados de tal forma que no deje sin efecto esos mismos enunciados fundamentales de los cuales partimos?

Si con la lógica se busca explicitar las relaciones formales que rigen los razonamientos válidos, no queda claro cómo deberíamos cambiar de lógica para ahora razonar mejor acerca de los procesos micro-físicos. La recomendación de Clemente de la Torre parece ser la más saludable: revisar cuidadosamente los conceptos físicos de la realidad cuántica. Entonces, cabe preguntar

> (…) ¿nos muestra realmente la mecánica cuántica que deberíamos sustituir nuestra lógica clásica por una nueva lógica? Y ¿eliminamos con ello realmente los aspectos paradójicos del mundo cuántico? Una objeción es que aunque "q_y" y "q_o" jueguen un papel útil, sería totalmente erróneo pensar en ellos como sustitutos de "y" y "o". Un problema es que "y" y "o" todavía juegan, en su significado tradicional, un papel en la descripción cuántica del mundo. (…) Es, pues, erróneo pensar que en la imagen cuántica del mundo "q_y" y "q_o" reemplazan, antes que complementan, a "y" y "o". (…) (Sklar 288-289).

Esto lo ilustra el teorema de Kochen y Specker[15] quienes en 1967 demostraron que, si el espacio de Hilbert H_F tiene más de dos dimensiones, los conectores de la

---

[15] El teorema de Kochen y Specker afirma que es imposible que exista una teoría alternativa a la mecánica cuántica (como la de variables ocultas), que reúna las siguientes características:
(1) Los resultados de todas las magnitudes medibles ("observables") existen antes de ser observados.
(2) Los resultados preexistentes mencionados en (1) son independientes de cuales sean los otros observables que se midan conjuntamente sobre el mismo sistema individual. (condición de no-contextualidad).
(3) Las predicciones de una teoría de variables ocultas sobre los resultados de cualquier experimento realizado en un sistema individual coinciden con las predicciones de la mecánica cuántica (Cabello 67).
Las teorías de variables ocultas son formulaciones alternativas que suponen la existencia de ciertos parámetros desconocidos que serían los responsables de las características estadísticas de

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

lógica cuántica tal y como han sido definidos no pueden ser funciones veritativas y, por ende, no pueden ser fundamentales o análogos a los de la lógica ordinaria. Su significado y su alcance ontológico no pueden, por eso, ser los mismos de los conectores homólogos de la lógica ordinaria (o clásica). Esto significa que el estatus ontológico de la lógica cuántica tiene limitaciones frente a la lógica estándar u ordinaria. Además, este teorema asegura que los experimentos sobre un sistema cuántico no tienen resultados predefinidos. Con ello, la predicción y el uso de la implicación quedan restringidos.

La objeción más sensata a la tesis de la sustitución de la lógica es que la argumentación utilizada en la propia discusión (es decir, el ámbito metateórico) supone las reglas de la lógica estándar. Es decir, no podemos establecer un debate sobre la prioridad ontológica de la lógica cuántica y, a la vez, usar reglas de la lógica ordinaria para entender nuestra discusión. Esto último puede comprenderse a la luz de la siguiente cita:

> Saúl Kripke ha observado que si lo que ocurre es que los lógicos cuánticos utilizan la lógica clásica para derivar una contradicción y luego utilizan un meta-lenguaje clásico para definir la lógica cuántica, entonces la propuesta no es la de que abandonemos la lógica clásica. Si por el contrario, lo que pretenden es que sustituyamos la lógica clásica por lógica cuántica también en el metalenguaje, entonces sencillamente no entenderemos lo que hacen (Martinez Vidal 96).

¿Cómo podemos usar como fundamento de nuestro razonamiento la lógica cuántica sin abandonar totalmente la lógica ordinaria?, ¿será posible elabora una mixtura entre lógica ordinaria y cuántica?, ¿esto menoscabaría sus pretensiones ontológicas? La situación dentro de la mecánica cuántica parece inducirnos verdaderamente, o bien a modificar la lógica, o bien a modificar el cálculo de probabilidades que se emplean en la misma. Contra la modificación de la lógica se levantan, por lo menos, dos razones "prácticas" de gran peso. En primer lugar, está el hecho de que las matemáticas que se usan en la construcción de tal teoría están edificadas mediante una lógica "clásica", por lo cual, si la teoría –como se requeriría para una axiomatización totalmente rigurosa– fuera expuesta junto con una formalización explícita de sus matemáticas, contendría dos lógicas que son incompatibles entre sí. En segundo lugar, la verificación de la teoría de los cuantos se produce en el terreno de la física clásica —o sea, empleando aparatos clásicos y teorías clásicas para interpretar sus respuestas— y la misma está construida mediante la lógica bivalente; por lo tanto, aunque fuera posible construir de este

la mecánica cuántica. Dichas formulaciones pretenden restablecer el determinismo eliminado por la interpretación de la escuela de Copenhague, que es la interpretación estándar en mecánica cuántica.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

modo una teoría cuántica, la misma no sería verificable de un modo coherente (Agazzi 451). Asimismo, Bunge sostiene lo siguiente:

> (…) una teoría revolucionaria, si es científica, no se rebelará contra todo sino que será compatible con la lógica, con la mayoría, si no la totalidad, de las matemáticas, y con diversas teorías factuales consideradas verdaderas en una primera aproximación. (El rumor originado por von Neumann y propagado por unos pocos matemáticos y filósofos, según los cuales la mecánica cuántica implica una revolución en la lógica, carece de base; cuando se axiomatiza esta teoría se advierte que presupone ciertas teorías matemáticas que llevan embutidas la lógica ordinaria. Además, si la mecánica cuántica obedeciera a una lógica propia, no podría unirse a teorías clásicas, v. g., la [de] Maxwell, para derivar enunciados contrastables.) (Bunge 244).

Una teoría verdaderamente revolucionaria sería aquella que contuviera consecuencias opuestas a las normalmente aceptadas (pero jugando con las mismas reglas lógicas aceptadas) por las teorías rivales. Pero, además el concepto mismo de teoría científica se funda en el empleo de una lógica bivalente. Es sabido que una teoría *debe* ser modificada si de sus hipótesis se deduce una contradicción con los datos experimentales, y ello solo tiene sentido a causa de que una tal contradicción formal significa que hipótesis y datos experimentales no pueden ser simultáneamente verdaderos, es decir, que por ser las proposiciones que expresan datos experimentales *verdaderas*, alguna de las hipótesis debe resultar *falsa*. Hasta aquí, por tanto, resulta que en la teoría *admitimos* todo lo que puede ser supuesto verdadero y excluimos todo lo que pueda suponerse falso. ¿Cuál debería ser entonces nuestra postura, si se admitiera la existencia de un estado intermedio entre verdadero y falso? En estas circunstancias el hecho de que de ciertas hipótesis se obtenga una conclusión falsa, no tendría quizás por qué obligarnos a modificar la teoría, con tal de que pudiera demostrarse que ello era compatible con el hecho de que ciertas hipótesis fueran consideradas en dicho estadio, más que como verdaderas, como “admitidas”. Popper (1962) alzaría su voz de protesta si la ciencia no pudiese legitimar el desechar algún enunciado cuyas consecuencias resultasen no ser previsibles.

En realidad, la única situación en la cual estaríamos obligados a modificar la lógica sería aquella en que partiendo de datos experimentales y operando con la lógica llegáramos a resultados que fueran contradictorios con otros datos de hecho. Sin embargo, puede demostrarse que ello no es posible en la lógica clásica (Agazzi 451). Por estos motivos, de hecho, Putnam ha retrocedido en su propuesta. Su idea de que la verdadera lógica del mundo es la cuántica fue ampliamente considerada como errónea (Wilce 2017). Por ello, consideramos que el estatus ontológico de la lógica cuántica está limitado solo a tener validez dentro de los límites de la física cuántica.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

4. Excurso: actualidad de la lógica cuántica

No quisiéramos acabar este trabajo con malas noticias. Nosotros creemos conveniente tomar en cuenta las últimas noticias sobre la lógica cuántica que está en plena investigación, aunque lo que se está viendo es el uso de esta lógica cuántica como cálculo (con aplicaciones prácticas) y no tanto desde el punto de vista filosófico. El 23 de agosto del 2010, Serge Haroche, dijo que han demostrado que pueden utilizar la extraña lógica de la física cuántica, por ejemplo, ante el hecho de que una puerta puede estar abierta y cerrada al mismo tiempo y que una vez que uno lo ha observado, el sistema tiene que colapsar en una de las posibilidades. La meta última sería llegar a la computación cuántica[16]. Sostuvo, además, que los algoritmos que uno puede basar en la lógica cuántica son mucho más rápidos que los que podemos desarrollar con las computadoras clásicas. El problema matemático y práctico es que hasta ahora hay muy pocos algoritmos útiles basados en la lógica cuántica. La meta está muy lejos y hay una cantidad de dificultades por delante que se deben enfrentar. Por ejemplo, el hecho de que el sistema se comporta de manera cuántica sólo cuando está aislado de toda perturbación del entorno. Las perturbaciones del entorno dan nacimiento a lo que conocemos como "decoherencia cuántica"[17], la pérdida de las propiedades cuánticas (Dora Bär, *La Nación*).

En octubre del 2011, los diarios informaban que la lógica cuántica es todo un campo nuevo y absolutamente fascinante de la física y podría conducir a la fabricación de un ordenador cuántico (*Universitam*).

El 9 de octubre del 2012, el francés Serge Haroche y el estadounidense David Wineland fueron honrados con el Premio Nobel de Física del 2012, por ser autores de revolucionarios métodos experimentales para la medición y manipulación de sistemas cuánticos individuales. Específicamente, Haroche experimentó con los átomos de Rydberg. Al acoplar estos átomos en las cavidades de un superconductor con pocos fotones, alcanzó poner a prueba las leyes de la "decoherencia cuántica" y demostrar que es posible llevar a cabo operaciones de lógica cuántica prometedoras para el tratamiento de información. (RT, Actualidad, Ciencia)

[16] La computación cuántica es un paradigma de computación distinto al de la computación clásica. Se basa en el uso de *qubits* en lugar de bits, y da lugar a nuevas puertas lógicas que hacen posibles nuevos algoritmos.
[17] Este término es usado para explicar cómo un sistema físico, bajo ciertas condiciones específicas, deja de exhibir efectos cuánticos y pasa a exhibir un comportamiento típicamente clásico, sin los efectos contraintuitivos típicos de la mecánica cuántica.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

El 17 de marzo del 2014, el nobel Haroche consideró que en 50 años habrá aplicaciones de la lógica cuántica, pero seguramente no serán las que pensamos ahora.

El 16 de marzo del 2017, se dio a conocer que ya se habían diseñado una puerta lógica cuántica muy potente. Esta investigación teórica explora lo que podría lograrse más allá de las limitaciones tecnológicas actuales para guiar el trabajo experimental posterior. Las puertas lógicas son, junto con los *qubits* (la versión cuántica del bit 0/1), las piezas elementales con las que construir, como en un juego de bloques, un ordenador cuántico. Es importante que sean rápidas no solo para acelerar los cálculos, sino también para minimizar las interacciones perjudiciales debidas al ruido ambiental (UPV/EHU).

Bibliografía

Agazzi, Evandro. *Filosofía de la física.* Barcelona: Herder, 1978.

Bär, Nora. "El premio Nobel de Física y su paso por Buenos Aires". *La Nación*. 9 oct. 2012.

Birkhoff, Garrett y Von Neumann, John. "The Logic of Quantum Mechanics", *The Annals of Mathematics* 37/4 (1936): 823-843.

Bunge, Mario. *Filosofía de la física*. Barcelona: Ariel, 1978.

Bunge, Mario. *La ciencia, su método y su filosofía*. Buenos Aires: Sudamericana, 1997.

Cabello, Adán "Introducción a la lógica cuántica", *Arbor* 167/ 659-660 (2000): 489-507.

Cabello, Adán. "Física cuántica: Los experimentos no realizados no tienen resultados", *Temas, Investigación y* Ciencia 10 (1997): 65-67.

Clemente de la Torre, Alberto. *Física cuántica para filósofos.* México: FCE, 2000.

Maldonado, Carlos. "Lógicas no-clásicas: la lógica cuántica", *Zero* 19 (2007): 164-168.

Martinez Muñoz, Sergio. "Lógica cuántica". *Lógica*. ed. Carlos Alchourrón, Madrid: Trotta, 2005. 227-236.

Martinez Vidal, Concepción "El *status* epistemológico de la lógica: verdad y necesidad". *Filosofía de la lógica*. coord. María Jose Frápolli Sanz, Madrid: Tecnos, 2007. 83-118.

Mosterín, Jesús y Torreti, Roberto. *Diccionario de Lógica y Filosofía de la Ciencia*. Madrid: Alianza Editorial, 2010.

Okon, Elias. "El problema de la medición en lógica cuántica", *Revista mexicana de Física* 60 (2014): 130-140.

Piscoya, Luis. "Lógica y mecánica cuántica", *Magistri et Doctores* 11 (1995): 16-17.

Popper, Karl. *La lógica de la investigación científica*. Madrid: Tecnos, 1962.

Resonancias. Revista de Filosofía 9 (2020): 37-53
DOI 10.5354/0719-790X.2020.60604

Priest, Graham. *Una brevísima introducción a la lógica*. México: Océano, 2006.

Putnam, Hilary (1968). "Is Logical Empirical?". *Boston Studies in the Philosophy of Science,* eds. Robert S. Cohen y Marx W. Wartofsky. Dordrecht: D. Reidel, 1968. 216-241.

Rt. "Nobel de Física de 2012 por intentar controlar la luz". *RT*, *Actualidad, Ciencia,* 9 oct. 2012.

Sinc. "El gato de Schrödinger actúa en la película de un premio Nobel". *Sinc*. 17 mar. 2014.

Sklar, Lawrence. *Filosofía de la física*. Madrid: Alianza Editorial, 1994.

Universitam. "Utilizan nueva técnica de lógica cuántica para verificar si la constante de estructura fina realmente es variable". *Universitam. Ciencia, investigación, tecnología y desarrollo*. 2 oct. 2011.

Upv/Ehu. "Diseñan una puerta lógica cuántica robusta y ultrarrápida que funciona en un microsegundo". *Noticias de la UPV/EHU.* 16 mar. 2017.

Wilce, Alexander "Quantum Logic and Probability Theory", *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2017): s/p.