

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XXII JORNADAS

VOLUMEN 18 (2012)

Luis Salvatico  
Maximiliano Bozzoli  
Luciana Presenti

Editores



ÁREA LÓGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



## Sobre la importancia de las lógicas paraconsistentes en la interpretación de las superposiciones cuánticas

Newton da Costa<sup>\*</sup> y Christian de Ronde<sup>o</sup>

### 1. Introducción: las superposiciones en física

Las denominadas ‘superposiciones’ existen tanto en la física clásica como en la física cuántica. Sin embargo, el significado que se aplica al término en uno y otro caso dista en modo extremo tanto desde una perspectiva ontológica como epistemológica. Mientras que en el caso de la física clásica nos encontramos con superposiciones de ondas o de campos clásicos, en donde la suma de dos ondas (o campos) da como resultado una nueva onda (o campo) y no existe por ello una mayor dificultad que la del cálculo formal. En el caso de la mecánica cuántica, la suma de dos estados cuánticos no puede ser considerada como proveyendo un nuevo ‘estado singular’. La superposición cuántica determina la coexistencia de múltiples estados, en principio contradictorios, que no pueden resumirse en un conjunto de propiedades determinadas. Hoy, las superposiciones cuánticas ocupan un lugar central en los desarrollos tecnológicos dependientes de la física cuántica como lo son la teleportación, la criptografía o la computación cuántica (Leibfried, *et al.* 2005, Ourjoumtsev, *et al.* 2007). Como veremos, existen muchas interpretaciones que buscan responder la pregunta por el significado de las superposiciones cuánticas. En este trabajo argumentaremos a favor de la importancia de desarrollar una nueva interpretación de las superposiciones cuánticas en términos de las lógicas paraconsistentes.

Los orígenes de las lógicas paraconsistentes se remontan a los primeros intentos de sistematizar la posibilidad de evadir el *principio de no contradicción*; siendo elaboradas independientemente por Stanislaw Jaskowski en Polonia, y el primer autor de este trabajo en Brasil, a mediados del siglo pasado.<sup>1</sup> Las lógicas paraconsistentes son lógicas de teorías inconsistentes pero no triviales. Una teoría  $T$  fundada en la lógica  $L$ , que contiene un símbolo para la negación, es llamada inconsistente si tiene entre sus teoremas una sentencia  $A$  y su negación  $\neg A$ ; de otro modo, es llamada consistente.  $T$  es llamada trivial si cualquier sentencia de su lenguaje es también un teorema de  $T$ , de otro modo  $T$  es llamada no trivial. En lógica clásica y en las lógicas más usuales, una teoría es inconsistente si, y sólo si, es trivial.  $L$  es paraconsistente cuando puede ser la lógica subyacente de teorías inconsistentes pero no triviales. Claramente, ninguna lógica clásica es paraconsistente. La importancia de las lógicas paraconsistentes no se encuentra limitada al ámbito de la lógica pura sino que se ha extendido a muchos campos de aplicación tales como control robótico, control de tráfico aéreo, control de sistemas para máquinas autónomas, razonamientos deónticos, sistemas de información, y medicina (Akama & Ama, 2001; Nakmatsu *et al.* 2001, 2002a, 2002b). En lo que sigue, intentaremos llamar la atención respecto de la importancia de extender el campo de aplicación de las lógicas paraconsistentes para dar cuenta de las superposiciones cuánticas. En primer lugar discutiremos su significado. En la sección 3, nos interesa mencionar algunas de las distintas interpretaciones referidas a la superposición cuántica que encontramos en la literatura especializada. Finalmente, en la última sección, argumentaremos a favor de la

<sup>\*</sup> UFSC -Brasil.

<sup>o</sup> Departamento de Filosofía “Dr. A. Korn” – UBA– CONICET – BFU, cderonde@gmail.com

importancia de considerar la interpretación de las superposiciones cuánticas a partir de las lógicas paraconsistentes.

## 2. ¿Qué es una superposición cuántica?

En la física clásica, todo sistema puede ser descrito a través de sus *propiedades actuales*, tomando a la 'actualidad' como expresando el modo de ser *preexistente* de las propiedades independientemente de la observación —el prefijo 'pre' refiere en este caso a la existencia previa e independientemente de la medición. Todo sistema tiene un estado determinado caracterizado matemáticamente en términos de un punto en el espacio de fases. El cambio del sistema puede ser descrito a partir de sus propiedades actuales. En este caso, las propiedades *potenciales* o *posibles* son consideradas como puntos que el sistema puede alcanzar en un instante futuro de tiempo. Como señala Dieks:

En la física clásica la descripción de un sistema físico (un punto en el espacio de fases) refleja sólo lo actual, y nada que pueda ser considerado posible. Es verdad que en algunas ocasiones los estados que contienen probabilidades son considerados en la física clásica: pensemos por ejemplo en las distribuciones de probabilidad  $\rho$  de la mecánica estadística. Pero la ocurrencia de las posibilidades en tales casos refleja nuestra ignorancia respecto de lo que es actual. Los estados estadísticos no corresponden con las características del sistema actual (como lo es el caso de las superposiciones mecánico cuánticas), sino que cuantifican nuestro grado de ignorancia respecto de las características actuales. (Dieks, 2010, p. 125)

La mecánica clásica nos dice via la ecuación de movimiento, como es que el estado del sistema se mueve a lo largo de la curva determinada por las condiciones iniciales en el espacio de fases. El estado de un sistema físico se encuentra representado por un punto en el espacio de fases  $F$  mientras que las magnitudes físicas se encuentran expresadas a partir de funciones reales sobre  $F$ . Estas funciones conmutan entre ellas y pueden ser interpretadas como poseyendo valores definidos independientes de la observación física. Por su parte, en la formulación ortodoxa de la mecánica cuántica, un estado del sistema se encuentra dada por un rayo en el espacio de Hilbert  $H$ . Pero contrariamente al caso clásico, las magnitudes físicas representadas por operadores en  $H$  en general no son operadores que conmutan. Este hecho matemático tiene consecuencias interpretacionales en extremo problemáticas puesto que resulta difícil entonces sostener que las magnitudes cuánticas *preexisten* independientemente de la elección del conjunto de propiedades a ser observadas. Con el objetivo de restringir el discurso a subconjuntos de magnitudes mutuamente compatibles se eligen entonces diferentes Conjuntos Completos de Observables que Conmutan (CCOC). La elección de una representación matemática particular (dada por un CCOC) determina una base en la que los observables diagonalizan y en la cual el rayo puede ser expresado. De este modo, el vector puede ser escrito en términos de diferentes combinaciones lineales de estados.

$$\alpha_1 |\varphi_1^{B1}\rangle + \alpha_2 |\varphi_2^{B1}\rangle = |\varphi_1^{B2}\rangle = \beta_1 |\varphi_1^{B3}\rangle + \beta_2 |\varphi_2^{B3}\rangle + \beta_3 |\varphi_3^{B3}\rangle \quad (1)$$

Las combinaciones lineales de los estados son también llamados superposiciones cuánticas. Como señala Paul Dirac:

La naturaleza de las relaciones que el principio de superposición requiere que exista entre los estados de un sistema es de un tipo que no puede ser explicado en términos de conceptos físicos familiares. Uno no puede en ningún sentido concebir un sistema estando en dos estados y ver la equivalencia de esto como el sistema estando en otro estado completamente diferente. Hay una idea envuelta completamente nueva, a la cual debemos acostumbrarnos y a partir de la cual uno debe proceder a construir una teoría matemática exacta, sin tener una imagen clásica detallada. (Dirac, 1974, p. 12)

La diferencia formal de utilizar vectores en  $H$  en lugar de puntos en  $\Gamma$  tiene como consecuencia, en la mecánica cuántica, que aparte de la *posibilidad* que encontramos en la física clásica, debe considerarse un ámbito diferente, que da cuenta en cada instante de tiempo de propiedades mutuamente contradictorias. Para ver esto consideremos el siguiente ejemplo: dado un sistema con spin  $1/2$  en el estado  $|\uparrow_z\rangle$ , si lo dejamos interactuar con un campo magnético en la dirección  $z$ , todos los resultados que pueden devenir actuales en el futuro son propiedades posibles del sistema —de modo análogo a como son posibles las posiciones alcanzables en un péndulo en el caso clásico. Pero en cada instante particular, por ejemplo en el instante actual, si consideramos la dirección  $z$ , y el operador  $|\uparrow_z\rangle\langle\uparrow_z|$  como representando una propiedad preexistente actual, existen otras propiedades incompatibles que surgen de considerar operadores de proyección en otras direcciones. Por ejemplo, en la dirección  $x$ , los operadores  $|\uparrow_x\rangle\langle\uparrow_x|$  y  $|\downarrow_x\rangle\langle\downarrow_x|$  no conmutan con  $|\uparrow_z\rangle\langle\uparrow_z|$  y en consecuencia, no pueden ser considerados como poseyendo valores determinados simultáneamente. Desde la interpretación de Born de la función de onda, estas propiedades son usualmente consideradas como *posibles*. Sin embargo, esta posibilidad resulta esencialmente diferente de la idea de posibilidad discutida en la física. Si consideramos que el formalismo de la mecánica cuántica provee una descripción del mundo, una representación de *lo que hay* —y no meramente una referencia algorítmica a resultados experimentales—, en cada instante de tiempo, las propiedades  $|\uparrow_z\rangle\langle\uparrow_z|$ ,  $|\uparrow_x\rangle\langle\uparrow_x|$  y  $|\downarrow_x\rangle\langle\downarrow_x|$  deben ser tomadas en cuenta, puesto que todas ellas brindan información no trivial respecto del *estado de cosas*. En particular, las propiedades  $|\uparrow_x\rangle\langle\uparrow_x|$  y  $|\downarrow_x\rangle\langle\downarrow_x|$ , que constituyen la superposición y deben ser consideradas de manera simultánea son, en general, *propiedades contradictorias*.

En el enfoque ortodoxo de la lógica cuántica una de las propiedades, a saber, aquella en la que uno escribe el estado de cosas como un término singular, es considerada en tanto 'actual', mientras que el resto de las propiedades son consideradas como 'potenciales'. Las propiedades potenciales pueden devenir actuales en un tiempo futuro de acuerdo a la probabilidad dada por los números en modulo cuadrado que acompañan los estados. Estas propiedades, e.g.  $|\uparrow_x\rangle\langle\uparrow_x|$ ,  $|\downarrow_x\rangle\langle\downarrow_x|$ ,  $|\uparrow_y\rangle\langle\uparrow_y|$  y  $|\downarrow_y\rangle\langle\downarrow_y|$  en nuestro ejemplo, son siempre parte de superposiciones con más de un término y se encuentran constituidas por propiedades contradictorias. Sin embargo, desde una perspectiva matemática, independientemente del modo de existencia, ambas propiedades, tanto actuales y potenciales, se encuentran ubicadas en el mismo nivel: los proyectores de spin en todas las direcciones son átomos en el retículo y no existe prioridad de las propiedades actuales por sobre las propiedades potenciales. En el laboratorio, es precisamente este ámbito potencial contradictorio el que debe ser considerado por los experimentalistas en los desarrollos que se encuentran teniendo lugar hoy como la información cuántica, la computación o la

criptografía cuánticas. Esto parece indicar que estas propiedades no pueden ser consideradas meramente en términos de su 'devenir actuales en el futuro'. Teniendo en cuenta estos problemas existe un gran número de interpretaciones que intentan dar cuenta del significado de las superposiciones cuánticas. En la próxima sección discutiremos y analizaremos algunos de estos enfoques.

### 3. Las múltiples interpretaciones de la superposición cuántica

Como hemos visto, la descripción formal de la mecánica cuántica implica una diferenciación radical respecto de la noción clásica de posibilidad. Más allá de las posiciones empiristas (e. g. van Fraassen, 1991) e instrumentalistas (e. g. Fuchs & Peres 2000) que se contentan con el análisis referido a los resultados experimentales, existe un gran número de interpretaciones que intentan dar cuenta de la superposición cuántica. La pregunta desde una perspectiva realista en que se busca dar cuenta de modo coherente del significado del formalismo, debería permitir designar a la superposición cuántica con un concepto adecuado, de modo análogo a como un punto en el espacio de fases se interpreta en términos de un objeto en el espacio-tiempo.

Como señala Bacciagaluppi (1996, p. 74), el programa de variables ocultas intenta "restaurar una forma de pensar clásica respecto de *lo que hay*." Justamente, la propuesta de Bohm (1952a, 1952b) de discutir en términos de un estado de cosas actual se sostiene a partir de su reformulación de la mecánica cuántica y la interpretación de la función de onda  $\Psi$  en términos análogos a los de un campo clásico, en el que las partículas se mueven de acuerdo a la relación funcional:

$$dx/dt = \nabla S \quad \text{donde } S = \hbar \delta \quad (\text{donde } \delta \text{ es la fase de } \psi).$$

De este modo, al precio de transformar el formalismo, las partículas recuperan en el esquema bohmiano trayectorias y posiciones bien definidas, mientras que la evolución de las mismas tan sólo depende del nuevo campo cuántico. Se sigue de este esquema que ya no existen superposiciones de estados, las superposiciones se dan ahora tan sólo en relación al campo y permanecen tan misteriosas como las superposiciones de los campos clásicos. Los campos no tienen solamente un carácter dinámico sino que también determinan las probabilidades epistémicas de las configuraciones de partículas via la regla de Born.

En el caso de la interpretación de muchos mundos (IMM), si bien se mantiene el formalismo ortodoxo de la mecánica cuántica se presenta al mismo tiempo una interpretación por demás costosa desde el punto de vista metafísico. La IMM (De Witt & Graham, 1973) es considerada como una conclusión directa de la primera propuesta de Everett en términos de 'estados relativos' (Everett, 1957). La idea central de la IMM es que la superposición cuántica representa una 'colección de mundos', en cada uno de los cuales, un único valor del observable es actualizado. De este modo, la solución al problema de la medición aparece al asumir que cada uno de los términos en la superposición es actual en su propio mundo; el valor actual que vemos en *nuestro* mundo no es el único valor que se actualiza sino que, por el contrario, una multiplicidad de actualizaciones se desarrollan en cada uno de los mundos.

La llamada escuela de Ginebra de la lógica cuántica, enmarcada bajo los nombres de Josef Maria Jauch y Constantin Piron, también propone un enfoque en que los ámbitos actual y potencial se relacionan de modo análogo a como lo hacen en el esquema de la física clásica (Jauch, 1968; Piron, 1976) De acuerdo a este enfoque, tanto en la física clásica como

en la cuántica las mediciones provocan cambios de estado fundamentales en el estado del sistema. Según el arreglo experimental, el estado cuántico se caracteriza por *propiedades actuales*, que son aquellas para las que obtendremos con certeza la respuesta ‘sí’ en caso de ser medidas; y las *propiedades potenciales*, que son aquellas para las que no existe certeza sino una probabilidad no nula de ser observadas. Este esquema realista considera a las superposiciones en términos de posibles resultados actuales de medición.

#### 4. Lógicas paraconsistentes y superposiciones cuánticas

Si bien todas las interpretaciones que hemos discutido en la sección previa tanto desde el punto de vista formal como interpretativo contienen entre sí múltiples diferencias, todas ellas intentan, de una u otra manera, *evitar o disipar la contradicción de los términos que componen una superposición cuántica*. La contradicción ha sido siempre observada con recelo en el pensamiento occidental debido a las presuposiciones metafísicas impuestas por pensadores como Platón, Aristóteles, Leibniz o Kant. Más allá de la creación de las lógicas paraconsistentes y de su posterior desarrollo técnico en diferentes campos de aplicación, la famosa aserción de Popper referida a la idea que la aceptación de la contradicción “significaría la completa disolución de la ciencia” ha permanecido un prejuicio desafortunado en la filosofía de la ciencia hasta nuestros días.

Dejando a las posiciones instrumentalistas de lado, uno de nosotros ha argumentado (de Ronde, 2010) que es posible encontrar en la vasta literatura referida a la mecánica cuántica, dos estrategias básicas que intentan dar cuenta de qué habla la teoría. Mientras que la primera estrategia comienza por definir claramente un conjunto bien determinado de principios metafísicos y avanzar sobre el formalismo de modo tal que cumpla los requerimientos de la ontología presupuesta por los principios, la segunda estrategia intenta analizar el formalismo ortodoxo de la teoría y discutir las posibilidades interpretativas que se ajustan a dicha estructura formal, desarrollando a partir de aquí las posibilidades de una ontología que se encuentre con el formalismo de modo adecuado. Ejemplos de la primer estrategia son la teoría de variables ocultas de Bohm o la interpretación de colapso de Ghirardi Rimini Weber (1986); ejemplos de la segunda son las diferentes derivas de la lógica cuántica. Sin embargo, e independientemente de la elección de cualquier estrategia, parece claro que los desarrollos técnicos que han tomado lugar hoy respecto de la mecánica cuántica no se encuentran limitados por el esquema metafísico clásico. Como hemos argumentado a lo largo del presente trabajo tanto el formalismo de la teoría como las experiencias en el laboratorio parecen tener en cuenta ‘elementos contradictorios’. Es por ello que creemos que resultaría de sumo interés analizar las posibilidades de un formalismo que considere las ‘contradicciones’ en tanto elementos constitutivos del propio formalismo. Evidentemente, un tal formalismo, podría abrir posibilidades en el desarrollo de nuevos caminos no solo para estudiar y comprender sino también para avanzar sobre nuevos fenómenos implícitos –y tal vez hasta ahora ocultos– en las superposiciones cuánticas. En (da Costa & de Ronde, 2012) hemos presentado un primer esbozo que considera a las superposiciones desde la perspectiva de las lógicas paraconsistentes, esperamos continuar con este tratamiento en trabajos futuros.

## Notas

<sup>i</sup> Para un análisis pertinente ver por ejemplo (da Costa, Krause&Bueno, 2007).

## Bibliografía

- AKAMA, S., ABE, J. M., 2001, "The role of inconsistency in informationsystems", *Proceedings Of the 5th WorldMulticonferenceonSystemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2001)*, pp. 355-360, Orlando.
- BACCIAGALUPPI, G., 1996, *Topics in the Modal Interpretation of Quantum Mechanics*, tesis doctoral, University of Cambridge, Cambridge.
- BOHM, D., 1952A, "A suggestedinterpretations of the quantum theory in thernms of "hidden vari- ables": Part I", *PhysicalReview*, **85**, 166-179.
- BOHM, D., 1952B, "A suggestedinterpretations of the quantum theory in thernms of "hidden vari- ables": Part II", *PhysicalReview*, **85**, 180-193.
- DA COSTA, N. C. A., French, S., 2003, *PartialTruth: a unitaryapproachtomodels and scientifiCreasoning*, Oxford UniversityPress, Oxford.
- DA COSTA, N. C. A., KRAUSE, D., BUENO, O., 2007, "Paraconsistentlogics and paraconsistency", en *Handbook of thePhilosophy of Science (Phi- losophy of Logic)*, D Jacqueline editor, Elsevier, pp. 791-911.
- DA COSTA, N. C. A., DE RONDE, C., 2012, "Theparaconsistentlogic of quantum superpositions", preprint.
- DIRAC, P. A. M., 1974, *The Prinaples of Quantum Mechanics*, Oxford UniversityPress, London.
- DE WITT, B., GRAHAM, N., 1973, *TheMany-WorldsInterpretation of Quantum Mechanics*, Princeton UniversityPress, Princeton.
- DIEKS, D., 2010, "Quantum Mechanics, Chance and Modality", *Philosophica*, **82**, 117-137.
- EVERETT, H., 1957, "RelativeState'Formulation of Quantum Mechanics", *Reviews of Modern Physics*, **29**, 454-462.
- FUCHS, C., PERES, A.2000, "Quantum theoryneeds no 'interpretation' ", *PhysicsToday*, **53**, 70.
- GHIRARDI, G. C., RIMINI A., WEBER, T., 1986, "Unified Dynamics forMicroscopic and MacroscopicSystems", *PhysicalReview D*, **34**, 470- 491.
- JAUCH, J. M. 1968, *Foundations of quantum mechanics*, Addison-Wesley, MA.
- LEIBFRIED, D., KNILL, E., SEIDELIN, S., BRITTON, J., BLAKESTAD, R. B., CHIAVERINI, J., HUME, D. B, ITANO, W. M., JOST, J. D., LANGER, C., OZERI, R., REICHLER, R.,WINELAND, D. J., 2005, "Creation of a six-atom 'Schrödinger cat' state", *Nature*, **438**, 639-642.
- NAKAMATSU, K., ABE, J. M., SUZUKI, A., 2001, "Annotated semantics for defeasible deontic reasoning", en W. Ziarko and Y. Yao (eds.), RCCTC 2000, pp. 470-478, SpringerVerlag, Berlin.
- NAKAMATSU, K., ABE, J. M., SUZUKI, A., 2002a, "A railway inter- locking safety verificationsystemsbasedonabductiveparaconsistentlogicprogramming", *Soft Computing*



- 
- Systems: Design, Management and Applications*, Eds A. Abraham, J. Ruiz-del-Solar & M. Koppen, pp. 775-784, Amsterdam, Ohmsha, Tokyo.
- NAKAMATSU, K., ABE, J. M., SUZUKI, A., 2002B, 'Defeasible deontic robot control based on extended vector annotated logic programming', en *Computer Anticipatory Systems: SASYS 2001 - Fifth International Conference*, ed. D. M. Dubois, American Institute of Physics, 490-500
- OURJOUNTSEV, A., JEONG, H., TUALLE-BROURI, R. AND GRANGIER, P., 2007, "Generation of optical 'Schrödinger cats' from photon number states", *Nature*, **448**, 784-786.
- PIRON, C., 1976, *Foundations of Quantum Physics*, W A. Benjamin Inc., Massachusetts.
- DE RONDE, C., 2010, "For and Against Metaphysics in the Modal Interpretation of Quantum Mechanics", *Philosophica*, **83**, 85-117.
- DE RONDE, C., 2011, *The Contextual and Modal Character of Quantum Mechanics: A Formal and Philosophical Analysis in the Foundations of Physics*, PhD dissertation, Utrecht University, Utrecht.
- SCHRÖDINGER, E., 1935, "The Present Situation in Quantum Mechanics", *Naturwiss*, **23**, 807. Translated to english in *Quantum Theory and Measurement*, J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Eds), 1983, Princeton University Press, Princeton.
- VAN FRAASSEN, B. C., 1991, *Quantum Mechanics. An Empiricist View*, Clarendon, Oxford