

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVIII JORNADAS

VOLUMEN 14 (2008)

Horacio Faas  
Hernán Severgnini

Editores



ÁREA LOGICO-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



# Modalidad y no-individualidad en la teoría cuántica

Graciela Domenech\*, Federico Holik\* y Christian De Ronde†

## 1 Introducción

La revolución en los fundamentos de la física de comienzos del siglo XX se enmarca en la crisis que sacudió las bases del pensamiento clásico. Por una parte, la teoría de la relatividad dio lugar a un concepto de espacio diferente al presupuesto por la mecánica newtoniana mientras que por otra, la teoría atómica cuestionó la visión clásica del mundo en términos de objetos entrando en conflicto con los principios de la lógica aristotélica. En particular, el principio de identidad encuentra severas limitaciones en relación a las llamadas “partículas idénticas”, dicho en un lenguaje más preciso “partículas indistinguibles”. E. Schrödinger [1998] llegó a sostener que: “[...] hemos sido [...] forzados a rechazar la idea de que [...] una partícula es una entidad individual que retiene su identidad por siempre. Todo lo contrario, ahora estamos obligados a afirmar que los constituyentes últimos de la materia no tienen individualidad para nada.” Aún hoy la discusión respecto del significado de la teoría cuántica continúa vigente. Por ejemplo D. Dieks y M. Versteegh señalan:

No existe ninguna señal en la mecánica cuántica estándar de que los fermiones idénticos sean cosas, la irreflexividad de las relaciones no nos ayuda aquí. Las relaciones cuánticas no tienen una interpretación en términos de lo que es actual, sino más bien *via* aquello que podría suceder en caso de que se realice una medición, y no pueden ser usadas en un procedimiento de asignación de nombres luego de la introducción de un marco de referencia externo. Es por ello que no existe evidencia de que las relaciones cuánticas entre fermiones conecten algún objeto físico actual. D. Dieks y M. Versteegh (2007, nuestra traducción).

Pero si bien ambas afirmaciones se refieren a las partículas indistinguibles –el ámbito en el que surgió la discusión sobre la individualidad– lo que aquí queremos señalar es que el problema resulta aún más profundo. La estructura formal en su conjunto se halla en conflicto con la noción de individuo, y no sólo con la noción de *individuo actual* sino también con la de *individuo posible*.

En este trabajo, avanzamos en la discusión del problema de la no-individualidad en la mecánica cuántica presentando dos argumentos referidos al teorema de Kochen-Specker y al principio de superposición. Asimismo, nos preguntamos, en el contexto de las interpretaciones modales, si uno puede sostener formalmente la noción de ‘individuo posible’.

## 2 No-individualidad en la mecánica cuántica

El problema de la identidad en la mecánica cuántica aparece ya en el desarrollo llevado a cabo por M. Planck de la expresión que describe a la radiación de cuerpo negro. Planck necesitó, en este caso, considerar a los cuantos de radiación como indistinguibles. Sin embargo, el cuestionamiento no se refiere sólo a la *indistinguibilidad* sino también a la *identidad* misma de las partículas. En palabras de Schrodinger:

\* Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE) - CONICET.

† Center Leo Apostel (CLEA)- Foundations of the Exact Sciences (FUND), Brussels Free University

Este ensayo trata de la partícula elemental. Más particularmente con una cierta faceta que este concepto ha adquirido –o más bien perdido– en la mecánica cuántica. Quiero decir lo siguiente. que la partícula elemental no es un individuo; no puede ser identificada, carece de identidad. Este hecho es conocido por todo físico. [...] En el lenguaje técnico se cubre diciendo que la partícula obedece una nueva estadística, ya sea la estadística de Bose-Einstein o la de Fermi-Dirac. La implicación, lejos de ser obvia, es que el epíteto insospechado ‘esto’ no es aplicable a, por ejemplo, un electrón, excepto con cuidado, en un sentido restringido y a veces no es aplicable para nada. E. Schrödinger (1998, nuestra traducción).

La estructura no booleana de las propiedades relacionadas con distintos contextos experimentales es tal que la verdad o falsedad no puede ser predicada respecto de ellas. Esto impide considerar en forma ingenua que todas las propiedades son propiedades de un sistema. Más aún, el teorema de Kochen-Specker (KS) [1967] nos muestra formalmente que no existe una familia compatible de valuaciones booleanas de conjuntos no disjuntos de propiedades compatibles. Es la noción misma de partícula la que aparece fuertemente cuestionada. La función de onda independiente del contexto en que se encuentra representada no puede ser pensada en estos términos: la indeterminación funda la imposibilidad de unificar constitutivamente las diferentes representaciones en ‘un todo’ *singular y único*, en algo que pueda ser considerado ‘un individuo’ [de Ronde, 2007].

Por otro lado, el *principio de superposición* también conmueve la noción clásica de individuo, habilitando estados “tipo gato de Schrödinger” que combinan propiedades con sus negaciones. Como señala P. Dirac:

La naturaleza de las relaciones que requiere el principio de superposición para existir entre los estados de cualquier sistema es de un tipo que no puede ser explicado en términos de conceptos físicos familiares. Uno no puede en ningún sentido clásico imaginar a un sistema estando en dos estados y verlo equivalentemente como estando en algún otro estado. Existe aquí una idea completamente nueva, a la cual uno debe acostumbrarse y a partir de la cual uno debe proceder a construir una teoría matemática exacta, sin tener ninguna imagen clásica. P. Dirac (1947, nuestra traducción)

La idea de superposición no puede ser pensada en términos de individualidad, puesto que ella viola aquel principio que Aristóteles llamó el más cierto de todos. El *principio de no contradicción* asegura que todo aquello que ‘es’ debe ser mientras aquello que ‘no es’ nunca puede llegar a serlo. En la superposición, por el contrario, una propiedad y su negación existen en un modo del ser que pensados desde la actualidad lleva a inconsistencias evidentes, si es que se trata de pensar a estos elementos como *propiedades de un individuo*. Algo no puede ser ‘blanco’ y ‘negro’ a la vez, o estar ‘arriba’ y ‘abajo’ o a ‘izquierda’ y ‘derecha’. La idea de pensar en términos gnoseológicos a los elementos de la superposición, esto es, como *posibles existentes* también encuentra un límite certero debido a la imposibilidad de realizar una ‘interpretación por ignorancia’ de las probabilidades que predice la teoría.

La función de onda -que es la representación matemática del estado de aquello que consideramos una “partícula elemental”- no nos permite referirnos a esa ‘partícula’ como un individuo. El problema reside en que, más allá del lenguaje casi coloquial con que nos referimos

a las representaciones matemáticas, la noción de objeto clásico no es compatible con la estructura formal de la teoría.

### 3 Individualidad en las interpretaciones modales de la mecánica cuántica

Las interpretaciones modales de la mecánica cuántica pueden ser pensadas como aquellas interpretaciones que, asumiendo como correcto el formalismo cuántico estándar, buscan preguntarse respecto de la consistencia del discurso clásico aplicado a dicho formalismo. Podemos caracterizar a las interpretaciones modales de la siguiente manera:

1. Una de las características más importantes de las interpretaciones modales es que mantienen invariante la formulación estándar de la mecánica cuántica. Siguiendo la recomendación de van Fraassen, uno necesita aprender de la estructura formal de la teoría para desarrollar una interpretación. Esto es diferente de muchos intentos que presuponen una ontología particular, avanzando en este caso en la reformulación de la teoría.
2. Las interpretaciones modales son interpretaciones de no-colapso. La evolución siempre se encuentra delimitada por la función de onda cuántica y 'el colapso' no es más que el pasaje de lo posible a lo actual, no es considerado como un proceso físico.
3. Las interpretaciones modales adscriben propiedades a los sistemas cuánticos. La adscripción de propiedades depende de los estados de los sistemas y se aplica independientemente de las mediciones hechas. Existe una distinción entre el nivel de lo posible y el de lo actual, los cuales se relacionan a través de una regla interpretacional.
4. La modalidad no se interpreta en términos de ignorancia. No hay una interpretación de ignorancia respecto de la distribución de probabilidad asignada a las propiedades físicas. El estado del sistema determina todo aquello que existe. Para las interpretaciones modales no hay tal cosa como 'variables ocultas' a partir de las cuales uno podría obtener mayor información.

Estas interpretaciones buscan además predicar propiedades de los sistemas cuánticos, refiriéndose de este modo a la realidad física yendo más allá de los meros resultados experimentales. Sin embargo, los límites impuestos a la predicación de propiedades han sido explicitados por varios teoremas *no-go* [Bacciagaluppi 1995, Vermaas 1997]. Una de las restricciones más importantes que las interpretaciones modales deben tener en cuenta se encuentra relacionada con las posibles inconsistencias derivadas de los teoremas de tipo KS. Tal vez la más radical de las consecuencias ha surgido con la versión modal del teorema KS (teorema MKS) [Domenech *et al.* 2006, 2007], el cual no sólo afecta la consistencia de las proposiciones que se refieren a las *propiedades actuales*, sino también a la consistencia de las *propiedades posibles*. El teorema MKS impide pensar la 'posibilidad' sin tener en cuenta la estructura contextual de la teoría. La posibilidad, al igual que la actualidad en el teorema de KS, aparece limitada en su existencia a partir del contexto. De este modo la idea de referirse en forma 'clásica' a la posibilidad debe ser dejada de lado.

En este sentido parecería interesante analizar la posibilidad de pensar la individualidad desde el conjunto de las interpretaciones modales para poder volver a hablar, si no de individuos actuales, de individuos posibles. Sin embargo, nos encontramos una vez más frente al formalismo, que restringe y localiza los términos con que es menester referirse a la realidad física según la teoría cuántica. Si bien los teoremas *no-go* no permiten referirse a los sistemas cuánticos como "mismidades", es decir como entidades actuales que tienen la propiedad de poseer

individualidad, las interpretaciones modales de la mecánica cuántica tampoco escapan a esta imposibilidad, ya que el teorema MKS limita de forma certera la intención de recuperar al individuo, manteniéndolo alejado también en el ámbito de la posibilidad. Según este teorema, la función de onda en el ámbito de la posibilidad, restringida a los contextos experimentales particulares, tampoco admite valuaciones booleanas.

Entonces, podría decirse que en la mecánica cuántica el mundo de la posibilidad encuentra contradicciones análogas a las del mundo de las propiedades actuales, lo que se hace visible en el paso hacia la actualidad. Lo posible no es aquello meramente actualizable puesto que su relación con lo actual también engendra contradicciones. La *posibilidad* no puede ser ordenada en términos clásicos. Las interpretaciones modales entendidas como el intento de encontrar los límites del lenguaje clásico al formalismo cuántico hacen aún más explícito el problema que nos interesa, y esto se aplica, como vimos, también al caso particular del problema de la individualidad.

#### 4 Conclusiones

Nos vemos interpelados en este caso por la mecánica cuántica, que nos invita a preguntarnos por la necesidad de la idea de individuo. La pregunta que nos interesa proponer a manera de conclusión del trabajo es la siguiente: *¿es necesaria la idea de individualidad en la física cuántica?* Si bien algunos autores señalan que es posible retener la tesis de que los sistemas cuánticos pueden ser considerados individuos (ver [French, S. y Krause 2006] para un análisis más detallado) haciendo hipótesis difíciles de mantener [Readhead y Teller 1992], en este trabajo presentamos argumentos distintos a los que se recurre habitualmente en la literatura para analizar el problema de la individualidad de los sistemas cuánticos. En vez de concentrarnos en las propiedades estadísticas de colecciones de partículas como se hace usualmente, nosotros usamos a los teoremas de KS y MKS como argumento central para rechazar la individualidad. Este enfoque permite rechazar también la noción de individualidad en las interpretaciones modales.

Forzar nuestras ideas clásicas del mundo puede resultar por lo menos contraproducente a la hora de avanzar en una interpretación de la mecánica cuántica. Si la idea de individuo resulta una categoría que no puede ser aplicada a esa teoría deberemos entonces desarrollar una estructura conceptual que se aproxime en forma más directa a aquello de lo cual la cuántica nos habla.

#### Referencias

- Bacciagaluppi, G., 1995, "A Kochen Specker theorem in the Modal Interpretation of Quantum Mechanics" *Internal Journal of Theoretical Physics*, 34, 1205-1216
- Dieks, D y Versteegh, M., 2007, "Identical Quantum Particles and Weak Discernibility", preprint, *Archivo electrónico de Los Alamos*: quant-ph/0703021
- Dirac, P., 1947, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford
- Domenech, G., Freytes, H y de Ronde, C., 2006, "Scopes and limits of Modality in Quantum Mechanics" *Annalen der Physik*, 15, 853-860 *Archivo electrónico de Los Alamos*: quant-ph/0612226.
- Domenech, G., Freytes, H y de Ronde, C., 2007, "The Contextual Character of Modal Interpretations of Quantum Mechanics" preprint, *Archivo electrónico de Los Alamos*: quant-ph/07051660
- French, S y Krause, D., 2006, *Identity in Physics. A Historical, Philosophical, and Formal Analysis*. Oxford Univ Press.
- Kochen, S and Specker, E., 1967, "On the problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics" *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, 59-87
- Redhead, M. and Teller, P., 1992, "Particle Labels and the Theory of Indistinguishable Particles in Quantum Mechanics" *The British Journal for the Philosophy of Science* Vol 43, No. 2, 201-218.

- de Ronde, C., 2007, "Understanding Quantum Mechanics Through the Complementary Descriptions", preprint. *Archivo electrónico de Los Alamos*: quant-ph/0705.3850
- Schrodinger, E., 1998, "What Is an Elementary Particle?" En *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*. E. Catellani (Eds.), Princeton University Press.
- Vermaas, P.E., 1997, "A No-Go Theorem for Joint Property Ascriptions in Modal Interpretation" *Physics Review Letters*, 78, 2033-2037