

# Estudio heurístico dialéctico del entrelazamiento cuántico

## Heuristic dialectic study of the quantum entanglement

José Ricardo Díaz Caballero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: joser@gest.cujae.edu.cu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional 

Recibido: 25 de enero de 2018    Aprobado: 3 de mayo de 2018

### Resumen

La teoría cuántica fue desarrollada, en su forma básica, a lo largo de la primera mitad del siglo XX por científicos como Schrödinger, Heisenberg, Einstein, Dirac, de Broglie, Bohr, Pauli y Von Neumann, entre otros. Aunque la estructura formal de la teoría está bien desarrollada, y es coherente con los resultados de los experimentos, no sucede lo mismo con su interpretación, que continúa siendo objeto de controversias. Uno de esos puntos candentes tiene que ver con el fenómeno del entrelazamiento cuántico. El presente apartado constituye una aproximación al estudio de este fenómeno y las posibilidades que abre la heurística dialéctica para su investigación y comprensión.

Palabras claves: heurística dialéctica, entrelazamiento cuántico

### Abstract

Quantic theory was developed in its basic way, during the first half of the twentieth century by some scientists among which are Schrödinger, Heisenberg, Einstein, Dirac, Bohr y Von Neumann. Although the formal structure of the theory has been appropriately developed and the theory has been consistent with the experiments results, its interpretation is still controversial. One of the most debated issues is the one concerned with the quantum entanglement. This paper is a heuristic dialectic approach to the study of quantum entanglement and the possibilities it brings for the research and comprehension of this phenomenon

Key words: dialectic heuristic, quantum entanglement

### INTRODUCCIÓN

Todo parece indicar que la física, en su versión o modalidad cuántica, se ha trasmutado en una ciencia acerca de la actividad del hombre en el micromundo; en una teoría y práctica dirigida a investigar el micromundo; en su interacción con el macromundo humanizado, la cual toma muy en serio la compleja relación que se establece entre lo subjetivo y lo objetivo en la investigación. La física cuántica es la ciencia que tiene por objeto el estudio y comportamiento de la estructura microscópica de la materia donde comienzan a notarse efectos como el *principio de indeterminación de Heisenberg* [1].

Un fundamento esencial de la teoría cuántica es que la energía no se intercambia de forma continua, sino que está cuantizada (hipótesis de Planck). En todo intercambio energético hay una cantidad mínima involucrada, que no se caracteriza por tener valores continuos sino discretos, como pequeñísimos “paquetes o escalones” llamados *cuantos*, cuyo tamaño es proporcional a la *constante de Planck* de  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s. La solución teórica de Max Planck al problema de la radiación del cuerpo negro, la explicación de Einstein al efecto fotoeléctrico mediante los *cuantos de luz* (más tarde, denominados fotones), los niveles de energía de los electrones en el átomo de Borh, la dualidad onda-corpúsculo, el *principio de indeterminación* de Heisenberg, el entrelazamiento cuántico, ... todo empieza en esta idea.

Las relaciones de indeterminación demuestran que existe un límite fijo para la precisión *conjunta* de las mediciones de la posición y momento lineal del electrón, de modo que si una es casi infinita, la otra es casi nula.

### Heurística del principio de indeterminación de heisenberg

Una tesis gnoseológica profunda subyace en el principio de indeterminación de Heisenberg: *solo tiene sentido hablar de lo que puedo medir* [2]. En sus propias palabras, refiriéndose a la trayectoria clásica de una partícula y su existencia, dice: “Creo que la existencia de la ‘trayectoria clásica’ puede formularse productivamente de la siguiente manera: la trayectoria existe desde el momento en que la observamos” [3]. Sin embargo, en los marcos de la física clásica se considera que el mundo existe con independencia de nosotros. Existe un Universo “ahí fuera”, y tal vez uno lo mire o no, pero su existencia es independiente de este hecho [2]. La tesis de Heisenberg pareciera contradecir el principio de la objetividad según el cual las cosas existen independientemente de nuestra conciencia y la actividad práctica asociada a ella, sean medidas o no. En otras palabras, que el mundo existe con independencia de nosotros.

Esto adiciona interesantes contradicciones heurísticas dialécticas: una primera contradicción asociada a la “existencia” y la “medición” y otra contradicción entre lo “predecible” y lo “impredecible” (figura 1).

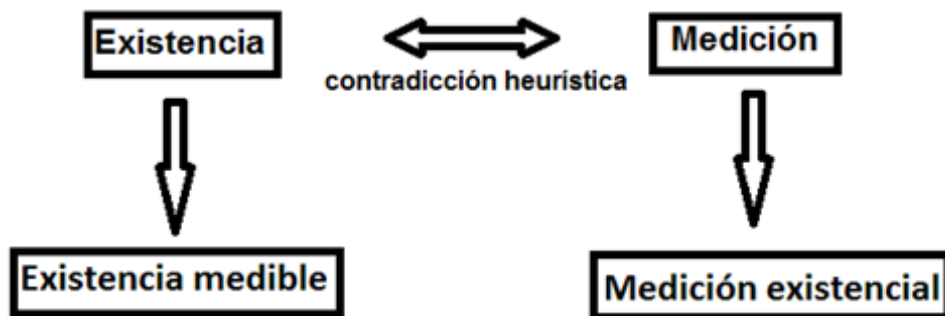


Fig. 1. Unidad dialéctica indiferenciada asociada al principio de la objetividad

Según Heisenberg, al menos para la ciencia física, la existencia en el micromundo presupone por necesidad la medición. De hecho, la existencia solo tiene sentido en tanto se puede medir. Por su parte, el proceso en sí de medición requiere también necesariamente la existencia de lo que es medido. Sin embargo, a la par con esa relación de presuposición mutua, entre la existencia cuántica y su medición se manifiesta también una relación de negación que es dialéctica por su esencia: la existencia objetiva de los fenómenos y objetos cuánticos niega ser reducida al proceso de su medición, por muy complejo y sofisticado que este sea, en tanto que la propia medición niega la pretensión de una existencia cuántica objetiva, independiente de la actividad práctica objetivo-subjetiva del investigador.

Esta contradicción revela dos conceptos con un elevado potencial heurístico que debe ser interpretado: la “existencia medible” y la “medición existencial”.

¿Qué entender por “existencia medible”? Entre otras posibles nociones, el término sugiere:

- La tesis de Heisenberg de que solo tiene sentido hablar de lo que puedo medir.
- Que, tarde o temprano, la existencia cuántica siempre es susceptible de ser medida y demostrada.
- La demostración de la existencia cuántica mediante determinadas propiedades medibles.

- Que la medición crea la existencia cuántica y la determina.
- Que la medición presupone la existencia cuántica.
- Que en el micromundo solo existe lo que puedo medir.
- La existencia subjetiva-objetiva y objetiva-subjetiva de la realidad cuántica.
- Que la existencia del micromundo es una creación de la actividad humana.
- Que la existencia cuántica depende del hombre y sus posibilidades técnicas de medición.
- Que la existencia cuántica es limitada.
- Que la conciencia acerca de las cosas determina la existencia cuántica de las cosas.
- El hecho de que la existencia cuántica es el contrario dialéctico de la medición, es decir, que al mismo tiempo la presupone y la niega.
- El reconocimiento de que el investigador es el demiurgo de la existencia físico-cuántica.
- Que sin el homo sapiens y su conciencia investigadora no hay existencia físico-cuántica.
- Que los fenómenos físico-cuánticos no son absolutamente objetivos; tienen en su esencia la marca, la huella de la subjetividad humana.
- La existencia de la medición como proceso objetivo.
- La existencia de la medición como proceso subjetivo.
- La validación de la existencia de los fenómenos y objetos cuánticos.
- La existencia también de una forma de existencia no medible.

Por su parte, del término "medición existencial" se infiere:

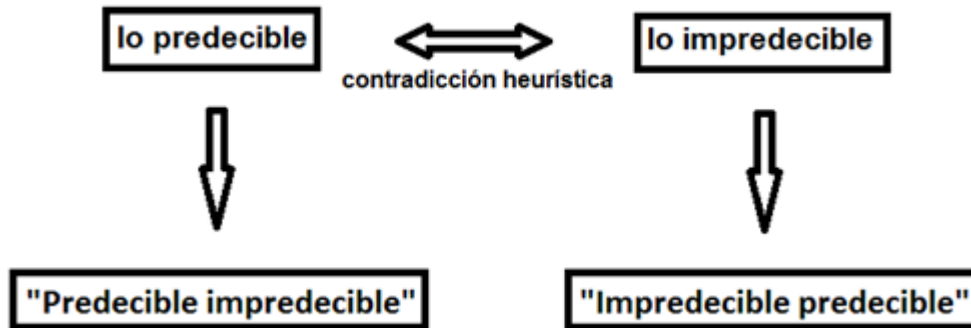
- Aquellas mediciones orientadas a establecer la existencia de determinado fenómeno, proceso u objeto cuántico.
- Las medidas de la existencia de un objeto cuántico.
- Que la medición solo tiene sentido si algo existe.
- La medición real y objetiva de las cosas.
- La medición que determina indirectamente la existencia de los fenómenos y objetos cuánticos.
- Que el investigador tiene una naturaleza existencial biofísico-cuántica.
- Que es inherente a los seres humanos crear nuevas realidades y estudiarlas como si fueran independientes de su actividad.
- La máxima filosófica de que el hombre es la medida de todas las cosas.
- Que la medición es el contrario dialéctico de la existencia cuántica, la presupone y la niega al unísono.
- La determinación existencial de la medición físico-cuántica como proceso fiable.
- Un criterio de existencia.
- Los criterios para la medición y validación de la propia medición existencial.
- La existencia de múltiples formas cuánticas y no cuánticas para la medición existencial cuántica.
- La existencia de múltiples formas cuánticas y no cuánticas de medición no existencial.
- La existencia y no-existencia de la medición de los fenómenos y objetos cuánticos.

La ciencia clásica aspiraba a poder predecir de forma conjunta y cada vez más precisa todas las magnitudes de los fenómenos y objetos de la realidad. Se podrían conocer con total exactitud las coordenadas espaciales y temporales, la masa y otras propiedades físicas de los objetos. Sin embargo, la clave de las relaciones de indeterminación establecidas por la física cuántica es que existe un límite fijo para la precisión conjunta de las mediciones de la posición y el momento lineal del electrón, de modo que, si una es casi infinita, la otra es casi nula. Del mismo modo ocurre con otras propiedades de los microobjetos, como la posición y el momento angulares de un objeto en rotación o la posición y la energía de una partícula en un potencial, por solo citar algunas [1].

Ello plantea una relación de presuposición y negación mutua en cuanto a la capacidad predictiva de la ciencia. La predicción científica en los marcos de la mecánica cuántica presupone considerar un amplio espectro de posibilidades insospechadas en el comportamiento probable de microobjetos como el electrón, que varían constantemente su estado como resultado de su interacción con el universo como un todo. Al mismo tiempo, el carácter probabilístico de ese comportamiento es predicho con asombrosa exactitud por la física cuántica. De manera similar, la naturaleza probabilística de la predicción cuántica niega el carácter absoluto y exacto de la

predicción clásica y, viceversa, la noción de predicción científica determinista y exacta niega el carácter probabilístico de la predicción cuántica.

Tales relaciones de contradictoriedad se concretan en una unidad indiferenciada dialéctica que sugiere dos interesantes conceptos heurísticos: lo “predecible-impredecible” y lo “impredecible-predecible” (figura 2).



**Fig. 2. Unidad dialéctica indiferenciada asociada a la capacidad predictiva de la ciencia**

El término “predecible impredecible” apunta a varias nociones heurísticas, entre ellas:

- Que la predicción científica debe ser capaz también de presuponer y asumir con dialéctica lo impredecible.
- Que lo predecible en la física cuántica es una forma trasmutada de lo impredecible.
- El carácter predictivo probabilístico de la física cuántica.
- Que, en ocasiones, lo predecible resulta ser, en la práctica, impredecible.
- Que lo predecible es una entre múltiples probabilidades.
- La predicción probabilística.
- Las anomalías en la ciencia.
- Resultados de experimentos que rebasan lo esperado por los investigadores.

Por su parte, el término “impredecible predecible” sugiere:

- Que lo impredecible también es determinable.
- Que lo impredecible está contenido en lo predecible.
- La naturaleza predecible de lo impredecible.
- El pronóstico probabilístico.
- La revolución científica como proceso dialéctico.

Si es imposible fijar a la vez la *posición* y el *momento* de una partícula, se renuncia entonces de alguna manera al concepto de *trayectoria*, esencial en la mecánica clásica. En vez de eso, el movimiento de una partícula queda regido por una función matemática que asigna, a cada punto del espacio y a cada instante, la probabilidad de que la partícula descrita se halle en una posición determinada en un instante determinado (al menos, en la interpretación de la mecánica cuántica más usual, la probabilística o interpretación de Copenhague). A partir de esa función, o función de ondas, se extraen teóricamente todas las magnitudes del movimiento necesarias.

La mecánica cuántica es asumida como fundamento teórico básico en varios dominios de la física y la química, entre ellos: la materia condensada, la termodinámica, la química cuántica y la física de partículas [4].

Algunos de los aspectos fundamentales de la teoría cuántica están siendo aún estudiados activamente, se destacan entre estos el polémico fenómeno del entrelazamiento cuántico.

### **Entrelazamiento cuántico**

El término “entrelazamiento cuántico” fue introducido en 1935 por Erwin Schrödinger [5]. El entrelazamiento cuántico es una propiedad sugerida en 1935 por Einstein, Podolsky y Rosen [6] como una paradoja denominada EPR en alusión a sus apellidos. La paradoja EPR fue más bien un argumento en contra de la mecánica cuántica,

en particular con vistas a probar su carácter incompleto puesto que se puede demostrar que las correlaciones predichas por la mecánica cuántica son inconsistentes con el principio del realismo local que dice que cada partícula debe tener un estado bien definido, sin que sea necesario hacer referencia a otros sistemas distantes.

El entrelazamiento es un fenómeno cuántico, sin equivalente clásico, en el cual los estados cuánticos de dos o más objetos se deben describir haciendo referencia a los estados cuánticos de todos los objetos del sistema, incluso si los objetos están separados espacialmente. Esto lleva a correlaciones entre las propiedades físicas observables. Por ejemplo, es posible enlazar dos partículas en un solo estado cuántico de forma que cuando se observa que una gira hacia arriba la otra siempre girará hacia abajo, pese a la imposibilidad de predecir, según los postulados de la mecánica cuántica, qué estado cuántico se observará.

El experimento planteado por Einstein, Podolsky y Rosen consiste en dos partículas que interactuaron en el pasado y que quedan en un estado entrelazado. Dos observadores reciben cada una de las partículas. Si un observador mide el momento de una de ellas, sabe cuál es el momento de la otra. Si mide la posición, gracias al entrelazamiento cuántico y al principio de incertidumbre, puede saber la posición de la otra partícula de forma instantánea, lo que contradice el sentido común: paradoja EPR.

La paradoja EPR está en contradicción con la teoría de la relatividad, ya que aparentemente se transmite información de forma instantánea entre las dos partículas. De acuerdo con la EPR, esta teoría predice un fenómeno (el de la acción a distancia instantánea) pero no permite hacer predicciones deterministas sobre él; de ello se deduce, por lo tanto, que la mecánica cuántica es una teoría incompleta.

Esta paradoja critica dos conceptos cruciales: la no localidad de la mecánica cuántica (es decir, la posibilidad de acción a distancia instantánea) y el problema de la medición. En la física clásica, medir un sistema es poner de manifiesto propiedades que se encontraban presentes en él; es decir, es una operación determinista. En mecánica cuántica, constituye un error asumir esto último. El sistema va a cambiar de forma incontrolable durante el proceso de medición y solo es posible calcular las probabilidades de obtener un resultado u otro.

Hasta 1964 este debate perteneció al dominio de la filosofía de la ciencia. Pero en ese mismo año el físico John Bell propuso una forma matemática para poder verificar la paradoja EPR. Bell logró deducir unas desigualdades asumiendo que el proceso de medición en mecánica cuántica obedece a leyes deterministas, y asumiendo también la localidad, es decir, teniendo en cuenta las críticas de la EPR. Si Einstein tenía razón, las desigualdades de Bell son ciertas y la teoría cuántica es incompleta. Si la teoría cuántica es completa, estas desigualdades serán violadas.

Desde 1976 se han llevado a cabo numerosos experimentos y todos han arrojado como resultado una violación de las desigualdades de Bell. Esto implica un triunfo para la teoría cuántica, que hasta ahora ha demostrado un grado altísimo de precisión en la descripción del micromundo, incluso a pesar de sus consabidas predicciones reñidas con el sentido común y la experiencia cotidiana.

La propiedad matemática que subyace a la propiedad física de entrelazamiento es la llamada no separabilidad. Además, los sistemas físicos que sufren entrelazamiento cuántico son típicamente sistemas microscópicos, pues en el ámbito macroscópico esta propiedad se pierde, en general, debido al fenómeno de la decoherencia.

### **Dialéctica del entrelazamiento cuántico**

El entrelazamiento cuántico ha sido objeto de análisis e interpretación no solo en el ámbito de las ciencias naturales y exactas, es también la base de tecnologías en fase de desarrollo, tales como la computación cuántica o la criptografía cuántica, y se ha utilizado en experimentos de teleportación cuántica. La filosofía de la ciencia tampoco ha estado al margen de estas cuestiones.

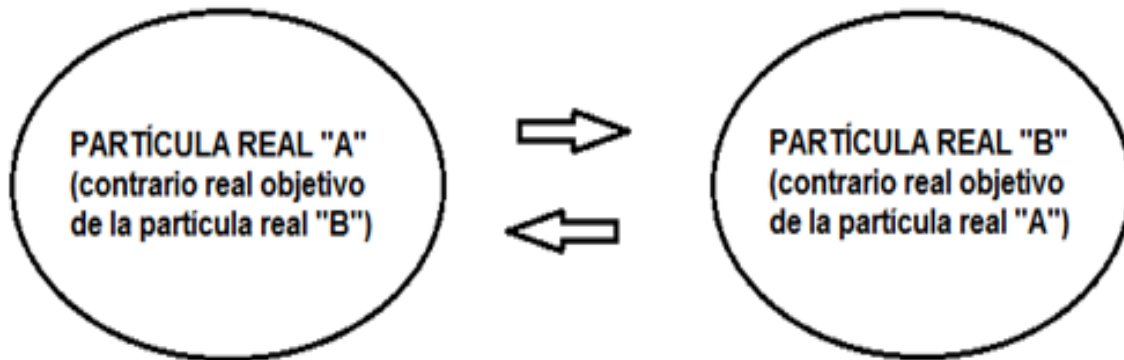
El enfoque filosófico dialéctico del entrelazamiento cuántico pudiera sugerir nuevos caminos y derroteros capaces de romper con la lógica habitual en la comprensión de este fenómeno.

La teoría dialéctica plantea que todo lo que existe es dialécticamente contradictorio y no hay fenómeno, proceso u objeto que se sustraiga a esta regularidad universal. En las cosas se manifiesta la dialéctica del ser y no ser, estar y no estar al mismo tiempo, que es el resultado directo del movimiento constante que experimentan en el tiempo; “todo fluye” decía Heráclito desde su cátedra de pensamiento dialéctico, todo objeto, proceso, fenómeno, sistema es el que es y, a la vez, su contrario. Ello significa que, si las partículas entrelazadas de la paradoja EPR existen, tienen también una naturaleza dialéctica contradictoria.

Desde esta perspectiva es posible considerar que el entrelazamiento cuántico es en sí mismo una contradicción dialéctica [7] en la que las partículas entrelazadas se presuponen, se niegan y se trasmutan de modo recíproco, a la manera de los contrarios dialécticos. \*

En el arsenal de principios, leyes y categorías de la dialéctica, destaca también otra forma de interrelación capaz de arrojar luz acerca del entrelazamiento cuántico —la contradicción “posibilidad-realidad” —. Según la teoría existen dos modalidades de la posibilidad en la naturaleza, la denominada “posibilidad abstracta” y la “posibilidad real”. La posibilidad abstracta es aquella que puede o no llegar a ser realidad, en cambio, la posibilidad real tiene más probabilidades de hacerse realidad.

Si se asume que cada una de las partículas del par entrelazado es el contrario dialéctico de la otra, manifestándose de forma objetiva como su contrario real, y que, al ser separadas, cada una de ellas porta en sí misma su propio contrario dialéctico como posibilidad potencial real (en lo adelante, partícula potencial real), según afirma la dialéctica para todo objeto, proceso o fenómeno de la realidad, se revela un cuadro heurístico del entrelazamiento cuántico que puede allanar el camino a la comprensión de este enigmático fenómeno físico (figura 3).



**Fig. 3. Se muestra el par entrelazado que existe de forma real objetiva**

En consonancia con la dialéctica, cuando el par de partículas entrelazadas se separa, el contrario potencial real de cada una de las partículas permanece unido a ellas. Esto significa que, aunque el par haya sido separado, permanece íntegro en cada uno de los contrarios como el par “partícula real A-partícula potencial real de A” y el par “partícula real B-partícula potencial real de B” (figura 4).

\* Los contrarios dialécticos tienen la propiedad de presuponerse y negarse mutuamente, es decir, la existencia de uno presupone por necesidad la existencia del otro contrario y, al mismo tiempo, la existencia de uno de los contrarios niega por necesidad la existencia del otro contrario. A la par con ello, cada uno de los contrarios se trasmuta de forma constante en el otro, adquiere las propiedades del otro y viceversa.

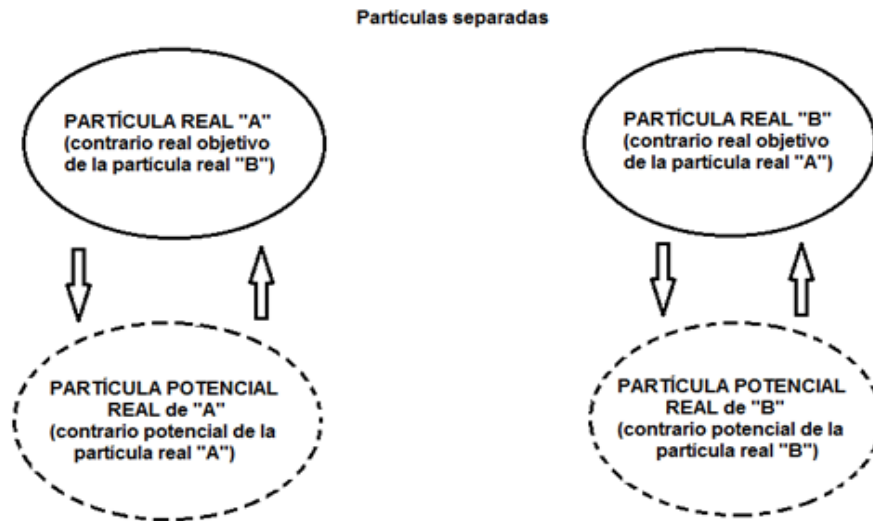


Fig. 4. Partículas reales del par entrelazado ya separadas y con sus correspondientes partículas potenciales asociadas

## CONCLUSIONES

El entrelazamiento cuántico no se entiende porque se piensa en un solo par de partículas cuando, desde la perspectiva dialéctica, cada uno de los contrarios en el par entrelazado porta en sí mismo su contrario dialéctico.

El único propósito de este análisis es mostrar que la teoría dialéctica, con sus principios, leyes y categorías, constituye un poderoso instrumento heurístico para allanar el camino y abrir nuevos derroteros en la comprensión y explicación de controversiales problemas existentes en la ciencia. Es casi seguro que no resuelva por sí misma los problemas y paradojas planteados, esa no es su misión, pero contribuirá a movilizar la reflexión de los investigadores para romper patrones y paradigmas que hoy día obstaculizan el salto hacia otras formas de pensarlos y asumirlos.

## REFERENCIAS

1. Feynman R. Mecánica Cuántica. Disponible en: <http://www.mecanicacuantica.com/introduction.htm> [consultado diciembre 2015].
2. Álvarez Nodarse R. Una introducción a la Mecánica Cuántica para "no iniciados". Departamento de Análisis Matemático, Facultad de Matemáticas, Universidad de Sevilla, 30 de junio de 2015.
3. Heisenberg W. La parte y el todo. Conversando en torno a la física atómica, Castellón de la Plana: Ellago Ediciones. Madrid. 2004, p. 150.
4. Gratton J. Introducción a la Mecánica Cuántica. 2013. Disponible en: <http://www.lfp.uba.ar/es/notas%20de%20cursos/notasmecanicacuantica/Cuantica.pdf> (consultado en octubre de 2016).
5. Bernstein J. Erwin Schrödinger. Encyclopedia Britanica. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Erwin-Schrodinger> [consultado el 30 de julio de 2017].
6. Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Physical Review 47. 1935, pp. 777-780.
7. Díaz Caballero JR. Más allá del paradigma. Filosofía y creatividad. Editorial de Ciencias Sociales. La Habana, 2012.