



## Teoría, experiencia y realidad en Albert Einstein

### Theory, experience and reality in Albert Einstein

### Teoria, experiência e realidade em Albert Einstein

DOI: 10.20873/rpv7n2-41

Ana Rioja Nieto

Orcid ID: 0000-0001-6223-2083

Email: riojan@ucm.es

#### Resumen

Es bien conocida la posición crítica que Albert Einstein mantuvo frente a la interpretación del nuevo formalismo cuántico que se gestó en torno al Instituto de Física Teórica de Copenhague, dirigido por Niels Bohr, desde la tercera década del siglo XX hasta el fin de sus días. Simplificando la cuestión, suele afirmarse que aquel defendió una concepción realista de la ciencia, a diferencia de físicos como el propio Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, también Max Born, y otros. Asimismo, frecuentemente se atribuye esa defensa del realismo científico a posiciones “conservadoras”, en la medida en que no supo adaptarse a las nuevas concepciones que exigía el mundo microfísico. En el presente artículo se pretende analizar el tipo de realismo preconizado por este eminente científico en el marco de sus convicciones epistemológicas, lo cual permitirá perfilar mejor cuál fue el fondo de su polémica con Bohr y, en general, su interpretación de la mecánica cuántica. Para ello se comienza analizando la relación entre teoría y experiencia, así como la noción einsteiniana de “realidad”, para pasar después a considerar su modo de concebir la noción de sistema cuántico individual, noción en la que convergen sus principales tesis acerca de la mencionada cuestión de la interpretación de la teoría cuántica.

#### Palabras clave

Einstein. Bohr. Realismo. Epistemología. Mecánica cuántica.

#### Abstract

Albert Einstein's critical stance regarding the interpretation offered by the new quantum formalism that took shape around the Copenhagen Institute of Theoretical Physics, led by Niels Bohr, is well known since the third decade of the 20th century. In a simplified way, it is usually said that Einstein supported a realistic view of science, as opposed to physicists such as Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, as well as Max Born and others. Likewise, this defense of scientific realism is also frequently assigned to 'conservative' stances, in so far as they have not been able to adapt to the new conceptions demanded by the microphysical world.

In this article we intend to analyze the kind of realism advocated by this eminent physicist within the framework of his epistemological presumptions, which will allow us to better define the substance of his controversy with Bohr and, in general, his interpretation of quantum mechanics.

### Keywords

Einstein. Bohr. Realism. Epistemology. Quantum mechanics.

## 1. Teoría y experiencia

En el punto de partida de su “credo epistemológico” hallamos la reiterada defensa, por parte de Einstein, de un mundo exterior real, independiente de todo sujeto, en tanto que alfa y omega de toda la ciencia natural. Ahora bien, la pregunta no trivial es la siguiente: ¿a qué denomina *mundo exterior real*? Para responder a este último interrogante, como él mismo sugiere, lo más indicado es partir del modo como se forma la noción de *objeto material*.

Creo que el primer paso para el establecimiento de un “mundo exterior real” es la formación del concepto de objetos materiales [bodily objects] y de objetos materiales de distintos tipos. De entre la multitud de experiencias sensibles elegimos mental y arbitrariamente ciertos conjuntos de impresiones sensibles que acontecen repetidamente (parcialmente en conjunción con impresiones sensibles que interpretamos como signos de experiencias sensibles de otros), y relacionamos con ellos un concepto: el concepto de objeto material. Considerado desde el punto de vista lógico, este concepto no es idéntico a la totalidad de las impresiones sensibles que a él se refieren sino que se trata de una libre creación de la mente humana. (...)

El segundo paso nos lleva a considerar que en nuestro pensamiento (que determina nuestras expectativas), atribuimos a ese concepto de objeto material una significación que en muy alto grado es independiente de las impresiones sensibles que originalmente lo han conformado. A esto hacemos referencia cuando atribuimos al objeto material una “existencia real”<sup>1</sup>.

El primer paso, por tanto, en la cuestión del establecimiento de un mundo exterior real exige pronunciarse sobre el origen de los conceptos y, en particular, sobre el de objeto material. A propósito de ello nos señala a su vez dos cuestiones de la mayor relevancia: primero,

---

<sup>1</sup> Einstein (1936), p. 291.

“elegimos” cierto conjunto reiterado de impresiones sensibles y, segundo, le aplicamos un concepto que “es libre creación de la mente humana”, de modo que no tiene un origen empírico.

Merece la pena detenerse en este punto relativo a la relación general entre lo racional y lo empírico, entre teoría y experiencia, dejando para el próximo epígrafe su aplicación en concreto al concepto de objeto material, así como la atribución de existencia real a dicho objeto.

Es característico del planteamiento epistemológico de Einstein considerar que, aun cuando “todo conocimiento de la realidad comienza en la experiencia y desemboca en ella”<sup>2</sup>, sin embargo no hay ningún tipo de camino lógico que conduzca de las impresiones sensibles a los conceptos. Nada deriva lógicamente de la experiencia, de manera que es tarea de la razón formar conceptos y proposiciones que no se abstraen o se infieren de lo dado en las sensaciones. Los conceptos son libre creación de la mente humana. Y esto se hace extensivo no sólo a los conceptos que Kant consideraba *a priori*, los conceptos puros del entendimiento, sino también a los que consideraba de origen empírico, con lo cual se diluye la distinción.

Kant, absolutamente persuadido de que ciertos conceptos son imprescindibles, los consideraba premisas necesarias de todo pensamiento, distinguiéndolos de los conceptos de origen empírico. Yo estoy convencido, sin embargo, de que esta distinción es errónea (...). Todos los conceptos, incluso los más próximos a la experiencia son, desde el punto de vista lógico, supuestos libres<sup>3</sup>.

Pero no sólo los conceptos, sino también las proposiciones generales o leyes son el resultado de la elaboración racional no derivada de la experiencia. En la construcción de una teoría científica el físico parte de las impresiones sensibles, puesto que ellas son las que precisan ser comprendidas y explicadas; segundo, formula una serie de hipótesis que constituyen el sistema de axiomas del que se deducirán consecuencias contrastables empíricamente; tercero, deduce dichas consecuencias y, finalmente, las contrasta con la experiencia, lo cual permite, no tanto “confirmar” como “invalidar” un conjunto de hipótesis. Pero lo fundamental es que los axiomas no se obtienen de manera inductiva a partir de la experiencia. La lógica de la ciencia es únicamente deductiva.

---

<sup>2</sup> Einstein (1933), p. 271.

<sup>3</sup> Einstein (1949a), p. 13.

Así, según expone en su correspondencia con Solovine, las experiencias inmediatas (E) nos son dadas. A partir de ellas se formulan axiomas (A) que no han sido inferidos inductivamente de dichas experiencias, pero de los cuales sí es posible inferir deductivamente ciertas proposiciones (S) [inicial del término alemán “Sätze”] que han de tener una formulación exacta y ser contrastables empíricamente. Dichas proposiciones S deducidas de A son puestas en relación con la experiencia E mediante verificación. Tenemos pues dos hiatos lógicos en el proceso de construcción de las teorías: el primero es el que conduce desde la variedad de E hasta la formulación de A, puesto que no se obtienen mediante inferencia inductiva; el segundo es el que trata de poner en conexión S con los datos empíricos E. En este último caso Einstein no deja de reconocer la enorme dificultad que conlleva “... la cuestión eternamente problemática de la conexión entre el mundo de las ideas y aquello que puede ser experimentado (experiencias inmediatas de los sentidos)”<sup>4</sup>.

En definitiva, el único momento lógico del proceso es el que permite inferir *deductivamente* de A las proposiciones S susceptibles de contrastación empírica, todo lo cual va a suponer la imposibilidad de afirmar la certeza del conocimiento. Como se observa, ello conduce a posiciones epistemológicas próximas al falibilismo popperiano en cuanto que propiamente puede hablarse más de invalidación de las teorías por la experiencia que de confirmación. En efecto, “no existe un método inductivo que nos conduzca a los conceptos fundamentales de la física. (...) El pensamiento lógico es necesariamente deductivo; se basa en conceptos hipotéticos y en axiomas”<sup>5</sup>.

La ciencia es pues una creación humana con sus conceptos y proposiciones libremente inventados, lo cual en modo alguno significa arbitrariamente inventados, “ya que el mundo de los fenómenos determina unívocamente el sistema teórico, pese a que no exista puente lógico entre los fenómenos y sus principios teóricos”<sup>6</sup>.

La experiencia sensible limita el abanico de posibilidades de elección de los conceptos y leyes susceptibles de aplicarse a la experiencia. Por ello afirma que la libertad de elección de un

---

<sup>4</sup> Einstein, carta a Solovine del 7-V-1952, en: Einstein (1956), p. 121. Ver también: G. Holton (1982).

<sup>5</sup> Einstein (1936), p. 307.

<sup>6</sup> Einstein (1918), p. 226.

científico “no se asemeja a la libertad de un escritor de ficción; más se parece a la de un hombre comprometido en la resolución de un crucigrama bien concebido”, en el que sólo *una* palabra le permite resolverlo con acierto<sup>7</sup>.

Y la justificación de tal modo de proceder, “en el que todo nuestro pensamiento es un juego libre de conceptos”, reside en último término en el “*grado de comprensión* que con su ayuda podemos adquirir sobre las experiencias de los sentidos”<sup>8</sup>. ¿A qué se denomina “comprender”? ¿Qué papel cabe atribuir a lo racional frente a lo empírico? La pregunta puede ser respondida a dos niveles. En primer lugar, Einstein atribuye a lo racional el papel de “elemento ordenador” de lo empírico.

Comprensibilidad [comprehensibility] (...) implica *creación de cierto orden en las impresiones sensibles*; un orden que se produce por la creación de conceptos generales, de relaciones entre dichos conceptos y de relaciones definidas de cierta clase entre los conceptos y la experiencia sensible. En ese sentido es comprensible el mundo de experiencias sensibles<sup>9</sup>.

Así, los conceptos son, en cierto sentido, principios ordenadores de la experiencia, pero no necesarios ni definitivos. Ahora bien, en un segundo nivel, esa ordenación racional de lo empírico debe hacerse atendiendo a un *principio lógico de economía*, es decir, “mediante el uso de un mínimo de conceptos primarios y de relaciones”, lo cual se conecta con la búsqueda de “unidad lógica en la imagen del mundo”, tan característica del pensamiento de Einstein<sup>10</sup>.

En cierto sentido podemos decir que se trata de una concepción piramidal de la ciencia, según la cual, partiendo de una amplia base de datos sensibles, se articula un reducido número de conceptos y de leyes lógicamente independientes entre sí, a partir de los cuales se accede de nuevo al mundo de la experiencia por vía de la inferencia deductiva. Pero, en la medida en que ningún puente lógico nos franquea el paso desde ese nivel empírico al conceptual, el conocimiento científico necesariamente ha de ser siempre provisional y sometido a permanente revisión.

---

<sup>7</sup> Einstein (1936), pp. 294-295.

<sup>8</sup> Einstein (1949a), p. 7.

<sup>9</sup> Einstein (1936), p. 292 La cursiva es nuestra.

<sup>10</sup> *Ibid*, pp. 293-294.

En resumen, lejos de toda forma de empirismo, en el texto citado al comienzo de este epígrafe Einstein defiende que el objeto material “no es idéntico a la totalidad de las impresiones sensoriales que a él se refieren”, es decir, no es un conjunto de elementos sensibles *dados* sino que se precisa de un elemento conceptual *puesto* por la mente a modo de principio ordenador que dota de unidad, permanencia y orden a dicho conjunto de elementos sensibles y, en esa medida, lo hace inteligible.

No me he criado en la tradición kantiana, pero he llegado a comprender el verdadero valor que se encuentra en su doctrina. (...) Está contenido en la sentencia: lo real no nos es dado sino puesto por nosotros (“aufgegeben”)<sup>11</sup>.

Ahora bien, tampoco se identifica con el apriorismo kantiano, puesto que dichos principios ordenadores supraempíricos no son necesarios ni definitivos sino contingentes y provisionales, lo que significa, primero, que pueden ser siempre modificados y, segundo, que Einstein mantiene, tal como se ha mencionado con anterioridad, un planteamiento falibilista con respecto al conocimiento científico.

## 2. Realidad e inteligibilidad

Retomemos a continuación el segundo paso en el proceso de establecimiento de un mundo exterior real. Tras haber analizado el concepto de objeto material en tanto que, como todo concepto, libre creación de la mente humana, en el texto anteriormente citado Einstein se refería a ese segundo paso en estos términos:

El segundo paso nos lleva a considerar que en nuestro pensamiento (que determina nuestras expectativas), atribuimos a ese concepto de objeto material una significación que en muy alto grado es independiente de las impresiones sensibles que originalmente lo han conformado. A esto hacemos referencia cuando atribuimos al objeto material una “existencia real”<sup>12</sup>.

¿En qué sentido atribuimos a ese concepto de objeto material una significación *independiente* de las impresiones sensoriales?

---

<sup>11</sup> Einstein (1949b), p. 680.

<sup>12</sup> Ver nota 1.

Digamos de entrada que la existencia externa no es en Einstein una idea que derive de las impresiones sensibles, sino que la atribución de existencia sólo puede recaer en dichas impresiones ordenadas bajo la forma de un concepto: el concepto de objeto. Ahora bien, esa atribución de existencia no inmediatamente percibida adquiere la forma de un postulado en cuanto condición de posibilidad de la inteligibilidad intersubjetiva del mundo, más allá de mera experiencia sensorial individual, si bien, como tal postulado, no puede ser demostrado. En contra de lo que Einstein aprendió de Mach, el conocimiento científico no se constituye sobre la base del mero enlace de sensaciones provisionales y cambiantes carentes de toda estabilidad y permanencia, porque la ciencia no estudia conjuntos de sensaciones sino objetos y estos no se reducen a aquellos, ni las leyes naturales son generalizaciones de significación meramente biológica. Como resultado de la labor constructiva de la mente orientada a explicar el material aportado por los sentidos, nos hallamos antes un orden de “realidad existente” que no se identifica con la “realidad experimentada”. El “ese est percipi” de Berkeley es insostenible. Así, en una carta a Moritz Schlick, el fundador del Círculo de Viena, afirma lo siguiente:

En general tu presentación no corresponde a mi estilo conceptual porque encuentro toda tu orientación demasiado positivista. (...) La física es el intento de construir conceptualmente un modelo del mundo real y de su estructura con arreglo a las leyes que lo rigen. (...) En resumen, me molesta la poco clara distinción entre *realidad experimentada* y *realidad existente*<sup>13</sup>.

Y la justificación de esa realidad existente, no reductible a la realidad experimentada, reside en que sólo la primera puede hacer inteligible la segunda. En consecuencia, sin ella no hay conocimiento científico, no hay ciencia.

‘Ser’ es siempre algo que es mentalmente construido por nosotros, esto es, algo que es puesto libremente (en sentido lógico). La justificación de tal constructo no reside en su derivación de lo que es dado por los sentidos. (...) *La justificación del constructo, que representa para nosotros la ‘realidad’, reside únicamente en su cualidad de hacer inteligible lo que es sensorialmente dado*<sup>14</sup>.

Resumiendo, estamos ante una forma de realismo crítico, en la que los objetos no están directamente representados mediante percepciones sensoriales. Lo real no es inmediatamente

---

<sup>13</sup> Einstein, carta a M. Schlick, 28-XI-1930. Citado por Holton (1982), p. 199.

<sup>14</sup> Einstein (1949b), p. 669. La cursiva no figura en el original.

percibido sino postulado como condición necesaria de toda posibilidad de comprensión de la experiencia sensible. Es en este sentido en el que atribuimos al concepto de objeto material una significación que es *independiente* de las impresiones sensoriales, del ser percibido.

La física es el esfuerzo por aprehender conceptualmente la realidad como algo que se considera independiente del ser percibido. En este sentido se habla de lo *físicamente real*<sup>15</sup>.

En efecto, la física describe las propiedades de los objetos materiales físicamente reales. La asunción de una *realidad física* independiente del sujeto es, por tanto, el primer requisito obligado de toda posibilidad de hacer ciencia. Pero el segundo requisito es la asunción de la *inteligibilidad* de dicha realidad, inteligibilidad que podemos representarnos como una balanza de pesos desiguales, en la que lo racional matemático pesa más que lo empírico, sin olvidar, no obstante, que el objetivo último es la comprensión de la experiencia puesto que todo conocimiento científico empieza y termina en ella.

Hasta el presente nuestra experiencia justifica la creencia en que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se pueda concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones puramente matemáticas, podemos descubrir los conceptos y leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para comprender los fenómenos naturales<sup>16</sup>.

A continuación, partiendo del tipo de realismo de Einstein expuesto hasta aquí, nos proponemos revisar los motivos de su desacuerdo con la interpretación de la mecánica cuántica que fue abriéndose paso desde 1927 y que posteriormente se denominó interpretación de Copenhague.

### **3. Einstein y la descripción cuántica de un sistema individual**

Líneas atrás nos hemos referido a una concepción piramidal de la ciencia consistente en una gran multiplicidad de datos sensibles en la base y en un reducido número de conceptos y principios en el vértice, de acuerdo con el principio de economía lógico. De hecho es una

---

<sup>15</sup> Einstein (1949a), p. 81.

<sup>16</sup> Einstein (1933), p. 274.

constante de la filosofía de la ciencia de Einstein la defensa de la simplicidad lógica como criterio de realidad.

Lo que es simple lógicamente –escribe a Lanczos- no tiene por qué ser físicamente verdadero, desde luego; pero lo que es físicamente verdadero es simple lógicamente, es decir, tiene una unidad de base<sup>17</sup>.

Cabe pues hablar de unidad del conocimiento, lo que supone cierta uniformidad en la ordenación conceptual de las impresiones sensoriales a diferentes escalas de magnitud. Ello implica que, si bien los conceptos en tanto que libre creación de la mente humana son modificables, hay ciertas condiciones fundamentales sin las cuales “algo dado” no llegaría a convertirse en “objeto” de ciencia. Lo que está en juego es el modo de objetivación de la experiencia y, en concreto, si la ordenación de lo percibido a nivel microfísico puede seguir teniendo lugar de la misma manera que a nivel macrofísico, esto es, si los objetos cuánticos lo son en el mismo sentido que los objetos clásicos. Pues en caso de respuesta negativa se produciría una quiebra lógica y ontológica en ese modo de objetivación de la experiencia que Einstein nunca estuvo dispuesto a asumir.

No obstante reconoció que el estado de cosas derivado de la teoría cuántica no propiciaba “la búsqueda de una base uniforme para la física” sino más bien todo lo contrario. Pero precisamente por ello afirma: “...a mi entender es una representación *incompleta* de la realidad. (...) Y su carácter incompleto necesariamente conduce a la naturaleza estadística (carácter incompleto) de las leyes”<sup>18</sup>. La justificación que ofrece de esta afirmación le conduce a la cuestión que, en su opinión, es la verdaderamente fundamental:

... hasta qué punto la función de onda  $\Psi$  describe el estado real de un sistema mecánico [individual]. Suponiendo que  $\Psi_r$  son las soluciones periódicas de la ecuación de Schrödinger, (...) hasta qué punto los  $\Psi_r$  individuales son descripciones *completas* de estados físicos<sup>19</sup>.

---

<sup>17</sup> Carta de Einstein a Lanczos, 24-II-1938. Citado por Holton (1982), p. 196.

<sup>18</sup> Einstein (1936), p. 316.

<sup>19</sup> Ibid.

Compartimos la opinión de Michel Paty quien sostiene que “la física se orienta a la descripción de *sistemas individuales* en la medida en que son pensables, y *toda la discusión sobre la interpretación de la mecánica cuántica, desde el punto de vista de Einstein, se centra en este problema*”<sup>20</sup>. En efecto, el núcleo de la cuestión reside en el tipo de descripción que la mecánica cuántica ofrece del estado de un sistema individual, es decir, de los objetos físicos individualmente considerados y de sus relaciones.

Hasta aquí hemos visto que, en efecto, un objeto material es un sistema con un principio de unidad y de continuidad que lo hace irreductible a lo que de él conocemos a través de los procesos de observación y medida. En la física clásica esa existencia continua de los sistemas físicos ha estado garantizada por lo que Schrödinger denominó “el postulado de continuidad de la descripción”<sup>21</sup>. Esto supone que, por principio, es posible su descripción en todo tiempo, y no sólo cuando son sometidos a procesos de observación y medida, lo que implica que la evolución del estado de los sistemas en el espacio y en el tiempo es independiente de la operación de medida. Pero a su vez ello exige algo fundamental: los observables de un sistema físico individual han de poseer *valor bien definido* en todo tiempo, de manera que el valor concreto que se obtiene tras la correspondiente operación de medida sea anterior e independiente de dicha operación, y no resultado de ella. Los sistemas físicos tienen propiedades observables con valor bien definido cuando son observados y cuando no lo son, y ello se aplica también y de modo especialmente relevante a las magnitudes conjugadas, como posición y momento o energía y tiempo, sometidas en la mecánica cuántica a las relaciones de incertidumbre de Heisenberg.

Ahora bien, si debido a la introducción del cuanto de acción de Planck la teoría no pudiera dar razón de todos y cada uno de los observables con valor bien definido de un sistema físico individual, entonces la teoría cuántica sería *correcta* pero no *completa*, que es exactamente lo que Einstein (junto con Podolsky y Rosen) defiende en su famoso artículo de 1935, al que Bohr replicaría ese mismo año con otro artículo de igual nombre. En efecto, el título del artículo en ambos casos fue el siguiente: “¿Puede ser considerada completa la descripción

---

<sup>20</sup> Paty (1993), p. 477. La cursiva es nuestra.

<sup>21</sup> Schrödinger (1952), p. 25.

mecánico-cuántica de la realidad física?”<sup>22</sup>. Ello nos lleva a plantearnos cuál es el criterio de completitud.

En una teoría completa –nos dice Einstein en el resumen inicial del artículo- hay un elemento correspondiente a cada elemento de realidad. Una condición suficiente para la realidad de una magnitud física es la posibilidad de predecir ésta con certeza, sin perturbar el sistema. En mecánica cuántica, en el caso de dos magnitudes físicas descritas mediante operadores no-conmutativos, el conocimiento de una impide el conocimiento de la otra.

Por tanto, o (1) la descripción de la realidad dada por la función de onda en mecánica cuántica no es completa [y las magnitudes conjugadas sí tienen simultáneamente realidad física, de los que la teoría no da razón], o (2) esas dos magnitudes no pueden tener realidad simultáneamente [puesto que los operadores asociados a esas dos magnitudes físicas no conmutan, en cuyo caso la mecánica cuántica sí es una teoría completa]<sup>23</sup>.

En definitiva, tal como especificará a lo largo del artículo, el criterio de completitud de una teoría exige que esta satisfaga el siguiente requisito: “*todo elemento de la realidad física debe tener su equivalente en la teoría física*”, lo cual conduce a la necesidad de definir *elemento de realidad*.

Los elementos de la realidad física no pueden ser determinados mediante consideraciones filosóficas a priori, sino que deben hallarse acudiendo a los resultados de los experimentos y de las medidas. No es necesario, sin embargo, para nuestros propósitos una definición comprehensiva de realidad. Nos basta con el siguiente criterio, que consideramos razonable. *Si, sin perturbar en modo alguno un sistema, podemos predecir con certeza (esto es, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa magnitud física*<sup>24</sup>.

El fondo del asunto reside en el modo como se interpreten las relaciones de incertidumbre. Sin negar en ningún momento que las desigualdades de Heisenberg sean correctas, lo que cuestiona es la interpretación de las mismas ofrecida por el propio Heisenberg, Bohr y otros según la cual, al no poder fijarse simultáneamente el valor bien definido de magnitudes conjugadas como posición y momento para el mismo estado del sistema, ello implica, no que pese a

---

<sup>22</sup> Einstein - Podolsky - Rosen (1935). [En lo que sigue mencionaremos únicamente el nombre de Einstein a propósito de este artículo y citaremos como E-P-R].

Bohr, N. (1935).

<sup>23</sup> E-P-R (1935), p. 777.

<sup>24</sup> Ibid.

todo tengan dicho valor bien definido aunque no pueda ser establecido por la teoría (como afirmará Einstein), sino que el propio sistema individual *no tiene* observables con valor bien definido y, en consecuencia, el valor que se halla tras la operación de medida no precede sino que es resultado de la propia medición. De Broglie, por su parte, coincide plenamente con el punto de vista de Einstein, según expone en el texto siguiente.

¿Qué significa propiamente la afirmación según la cual la posición de una partícula en una onda que ocupa una región extensa de espacio es *incierta*? ¿Significa esto que la partícula tiene en cada instante una posición en esta región del espacio, pero que ignoramos dicha posición o incluso que nos es imposible determinarla? ¿O bien significa que la posición de la partícula en toda la extensión de esta región está realmente indeterminada, de modo que está en ella en cierto modo “omnipresente”? (...)

Por mi parte pienso que una magnitud física tiene siempre en la realidad un valor bien determinado. El hecho de que el valor de una magnitud sea desconocido (o incluso que nos halleemos en la imposibilidad práctica de conocerlo) en absoluto implica que este valor esté indeterminado. Así, el hecho de que la posición o la cantidad de movimiento de un corpúsculo en su onda nos sea desconocido o escape a nuestras medidas no significa en modo alguno que esta magnitud no tenga en todo instante un valor determinado<sup>25</sup>.

No vamos a reproducir aquí el experimento mental mediante el cual Einstein trata de defender su tesis. Dicho muy brevemente, se basa en la posibilidad de predecir con probabilidad igual a la unidad el valor de cualquier variable dada perteneciente a la descripción de un sistema mecánico S2 a partir de medidas realizadas sobre otro sistema S1 con el cual previamente el sistema a investigar S2 ha interactuado, pero sin que sobre este último se haya realizado operación de medida alguna, con lo cual no quedaría sujeto a las limitaciones que establece el principio de indeterminación de Heisenberg.

El fundamental postulado en el que se basa toda la argumentación es el siguiente: “Puesto que durante la medida los dos sistemas ya no interactúan, ningún cambio real puede tener lugar en el segundo sistema como consecuencia de nada que se realice sobre el primer sistema”<sup>26</sup>. Es decir, operaciones de medida efectuadas sobre S1 no pueden afectar a S2 a distancia, de modo que uno y otro son independientes entre sí.

---

<sup>25</sup> Broglie, L. de (1965), pp. 151-152. Ver también: Broglie, L. de (1952).

<sup>26</sup> E-P-R (1935), p. 779. Como se sabe, dicho postulado no se cumple, puesto que los sistemas cuánticos han resultado ser no separables y no locales.

Lo que interesa destacar a propósito de todo ello es la importante cuestión que está en juego, a saber, cómo entender el valor de los observables de un sistema individual en tanto que propios *del sistema mismo*, o bien *de la interacción del sistema con el aparato de medida*, y ello pese a que dichos observables se asocien a operadores que no conmutan en vez de a variables numéricas. En el primer caso hay una continuidad en el modo de objetivación de la experiencia a distintos órdenes de magnitud; en el segundo caso crearíamos un hiato difícilmente salvable entre los llamados objetos clásicos y objetos cuánticos y con ello pondríamos en juego la unicidad de la descripción del mundo físico. Ahora bien, en la medida en que en la descripción del estado de un sistema mecánico el formalismo cuántico por principio no puede atribuir jamás valor determinado a las dos magnitudes conjugadas que lo definen, la teoría cuántica no cumple el criterio de completitud establecido y, en consecuencia, no será una teoría completa. Einstein, no obstante, deja abierta la posibilidad, sin mencionarlo explícitamente, de que la teoría cuántica llegue a ser completada mediante una teoría de variables ocultas.

Puesto que hemos mostrado que la función de onda no proporciona una descripción completa de la realidad física, dejamos abierta la cuestión de si tal descripción existe o no. Creemos, sin embargo, que una teoría tal es posible<sup>27</sup>.

#### **4. Bohr y la descripción cuántica de un sistema individual**

La respuesta de Bohr, en el número siguiente de la misma revista y en el mismo año, fue inmediata y contundente: la argumentación de los autores del artículo, por un lado “parece afectar seriamente a la solidez de la descripción mecánico-cuántica, que se basa en un formalismo matemático coherente capaz de abarcar automáticamente cualquier procedimiento de medida como el indicado”, pero además y fundamentalmente “el criterio de realidad propuesto contiene una esencial ambigüedad cuando se aplica a los problemas a los que actualmente estamos enfrentados”<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> E-P-R (1935), p.780.

<sup>28</sup> Bohr (1935), pp. 696-697.

¿En qué consiste esa *esencial ambigüedad*? Conforme al criterio de realidad establecido por Einstein, se trata de predecir con certeza o probabilidad igual a la unidad el valor de una magnitud física “*sin perturbar en modo alguno un sistema*”, esto es, sin que se vea alterado el estado del sistema por la operación de medida. Pero esto es justamente lo que cuestiona Bohr. Pese a que las medidas se lleven a cabo sobre S1 y no sobre S2, no puede cumplirse con el criterio establecido en la fijación del estado de S2, ya que, aun sin haberse producido lo que Bohr denomina “*perturbación mecánica*” (ninguna operación de medida se ha realizado sobre S2), sí hay “*una influencia de las condiciones que definen los posibles tipos de predicciones referentes al comportamiento futuro del sistema*”. Y añade algo fundamental: “*esas condiciones constituyen un elemento inherente a la descripción de todo fenómeno al que propiamente se refiere el término realidad física*”<sup>29</sup>.

¿Cuáles son esas *condiciones* que definen cualquier tipo de predicción sobre el estado futuro de un sistema y que se convierten en el *elemento inherente* de la descripción de la realidad física? Bohr se está refiriendo con ello al conjunto del *contexto experimental* que incluye, tanto el sistema 2, alejado espacialmente del sistema 1 y del propio aparato de medida. No es posible fijar y predecir el valor de las magnitudes conjugadas del sistema 2 al margen de toda operación de medida y, por tanto, de todo el dispositivo experimental gracias al cual los parámetros del sistema adquieren tal o cual valor. En ningún caso se puede pretender obtener información de propiedades independientes de los objetos y ello porque, en último término, los observables son propiedades relacionales, y no propiedades *del* sistema, como consecuencia de la ineludible “*interacción finita e incontrolable entre el objeto y el aparato de medida*”<sup>30</sup>. Es decir, se trata de propiedades fenoménicas que sólo adquieren sentido en la interacción observacional. Ello explica que para Bohr la noción de realidad física se refiera a los fenómenos<sup>31</sup>, entendiendo por tales el conjunto indivisible que forman objeto-aparato.

En realidad ha sido el descubrimiento del cuanto de acción el que nos ha enseñado que la física clásica tiene un rango de validez limitado, enfrentándonos a una situación sin precedente en la física al

---

<sup>29</sup> *Ibid.*, p. 700.

<sup>30</sup> Bohr (1935), p. 697.

<sup>31</sup> Ver nota 28.

plantear bajo una forma nueva el viejo problema filosófico de la existencia objetiva de los fenómenos con independencia de nuestras observaciones. (...) El límite que la naturaleza misma nos ha impuesto respecto a la posibilidad de hablar de los fenómenos como algo que existe objetivamente encuentra su expresión en la formulación de la mecánica cuántica<sup>32</sup>.

Por otro lado, esas situaciones experimentales, en las que los observables adquieren valor determinado, han de ser mutuamente excluyentes si se pretende agotar la información sobre el estado del sistema, esto es, si se aspira a definir inequívocamente la totalidad de esas magnitudes a las que Bohr denomina *complementarias*. Y, por tanto, por principio no pueden tener valor simultáneo ni corresponder a los “elementos de realidad” en el sentido de Einstein. De ahí, que en su artículo de réplica, Bohr apele a la noción de complementariedad para pedir la revisión de nuestra noción de realidad física.

En mecánica cuántica nos enfrentamos a una situación caracterizada por la noción de complementariedad. De hecho ese nuevo carácter de la filosofía natural supone una radical revisión de nuestra actitud con respecto a la realidad física, que puede considerarse paralelo a la modificación fundamental de todas las ideas referentes al carácter absoluto de los fenómenos físicos producida por la teoría general de la relatividad<sup>33</sup>.

En resumen, en opinión de Bohr, no hay en mecánica cuántica un significado inequívoco (no ambiguo) de la expresión “realidad física” en ausencia de toda especificación del contexto experimental.

## 5. Consideraciones finales

La idea de un mundo externo independiente del sujeto fue considerada por Einstein la base de toda la ciencia natural. Ahora bien, según se ha visto, la noción de “mundo exterior real” o “existencia real” en absoluto es *dada* de modo inmediato sino que, muy al contrario, es *construida*. En ese sentido ha afirmado que “realidad existente” y “realidad experimentada” no se identifican<sup>34</sup>, puesto que los objetos materiales que pueblan ese mundo externo suponen la

---

<sup>32</sup> Bohr (1934), p. 115.

<sup>33</sup> Bohr (1935), p. 702.

<sup>34</sup> Ver nota 13.

subsunción de un conjunto de impresiones sensoriales bajo la forma de un concepto libremente inventado y, por tanto, sujeto a revisión. En consecuencia, por un lado, las percepciones no representan objetos y, por otro, estos últimos adquieren una independencia de las impresiones sensibles que es en lo que consiste su existencia “real”. Tanto dicha existencia real independiente como el carácter inteligible de dicha existencia se convierten en dos postulados necesarios de la investigación científica, pero en tanto que tales no susceptibles de demostración.

Ahora bien, dada su inequívoca apuesta por la unidad del conocimiento, la objetivación de las impresiones sensibles supone una *uniformidad* de base, ya se trate de los puntos masa de Newton o de los campos continuos de Maxwell, por poner dos ejemplos. Pero es precisamente esta uniformidad la que se ha quebrado en mecánica cuántica, debido a que las magnitudes que figuran en las leyes de la teoría no describen “elementos de realidad” (a los han de corresponder magnitudes susceptibles de ser predichas con probabilidad igual a la unidad), sino puras probabilidades, lo cual afecta de lleno al modo de descripción del estado de un sistema físico individual, cuyos observables han de tener en todo tiempo valor definido. Y si la teoría cuántica no está en condiciones de satisfacer esa condición, sólo cabe concluir que, aun siendo una teoría correcta, no es completa.

Denomino incompleta la descripción dada por la mecánica cuántica (...) [debido] al hecho de que la descripción dada por la función  $\Psi$  no expresa las propiedades de un sistema individual de cuya “realidad” no dudamos (en el caso de tratarse de parámetros “macroscópicos”)<sup>35</sup>.

En mecánica cuántica, el estado de un sistema viene caracterizado por una función  $\Psi$  (...). La cuestión que a continuación se plantea es ésta: ¿en qué sentido describe la función  $\Psi$  el estado del sistema? Mi tesis es la siguiente: la función  $\Psi$  debe ser considerada, no como una descripción completa del sistema, sino sólo como una descripción incompleta. En otros términos, el sistema aislado posee propiedades cuya realidad nadie pone en duda, pero que no están contenidas en la descripción que la función  $\Psi$  da del sistema<sup>36</sup>.

Completar la teoría exige establecer un criterio uniforme de descripción de los sistemas físicos en cualquier orden de magnitud. De ahí, que Einstein manifestara en todo momento la convicción de hallarse ante un estadio provisional e incompleto de la teoría, convicción que no

---

<sup>35</sup> Einstein a Born, 15 de Septiembre de 1950, en: *Correspondence Einstein-Born* (1971), pp. 97-98.

<sup>36</sup> Einstein a Born, 12 de Enero de 1954, en: *Correspondence Einstein-Born* (1971), p. 227.

fue compartida por Bohr. Tras el desacuerdo entre ambos hallamos una diferente manera de entender la forma de categorizar el mundo empírico en función de la exigencia o no del mencionado requisito de uniformidad. Einstein reivindica la ausencia de hiato o ruptura entre la descripción de las propiedades de los sistemas individuales de los distintos formalismos, ya sean los propios de la física clásica o de la física cuántica. Lo cual tiene consecuencias ontológicas en la manera de concebir los sistemas físicos individuales y las propiedades observables de dichos sistemas.

En cambio, la noción de complementariedad de Bohr le permite convivir con esa ruptura, al precio de defender una tesis contextualista, según la cual los observables son concebidos como propiedades relacionales dependientes del contexto cuántico. Pero ello no significa, como en ocasiones se ha defendido, que el problema del corte cuántico-clásico sea entendido por Bohr de modo exclusivamente epistemológico y con carácter instrumental<sup>37</sup>.

Bohr habló no sólo de teorías (en el marco de una filosofía de la física antirrealista) sino del mundo, mientras que en el caso de Einstein incluso procede preguntarse si su concepción de la ciencia no está más próxima a una cierta forma de idealismo epistemológico que de realismo, dado el carácter construido de lo real. Así, su minuciosa elaboración de la relación entre teoría, experiencia y realidad pone de manifiesto el papel activo de la mente en la construcción de la noción de objeto material con “existencia real”. Ello le aproxima a la tradición kantiana, con la cual no se identifica, no obstante, debido al carácter contingente y provisional de los conceptos libremente inventados.

Lo cierto es que también Bohr dedicó no poca atención a la relación entre teoría y experiencia a propósito de la aplicabilidad de los conceptos clásicos a los objetos cuánticos, según hemos analizado en otro lugar<sup>38</sup>. En efecto, si por un lado defendió la imposibilidad de prescindir de dichos conceptos físicos clásicos para describir todo tipo de fenómenos, por otro estableció su limitación, por principio, cuando se trata de fenómenos regidos por el cuanto de acción

---

<sup>37</sup> A propósito de la interpretación de Bohr, recomendamos la obra siguiente: Faye, J. and Folse, H.J. (2017): *Niels Bohr and the Philosophy of Physics. Twenty-First-Century Perspectives*, en especial los capítulos de M. Bitbol, M. Bächtold y J. Faye citados en la bibliografía.

<sup>38</sup> Rioja (1992).

de Planck, limitación cuya expresión cuantitativa serían las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. En la medida en que la física no consiste en un mero lenguaje formal no interpretado, los conceptos clásicos (muy especialmente los relacionados con la descripción espacio-temporal y la explicación causal) cumplen con la fundamental tarea de establecer un obligado puente entre el esquema formal matemático y la experiencia, lo que ha dado lugar asimismo a reflexiones sobre el posible carácter trascendental kantiano del programa de Bohr<sup>39</sup>. El objetivo último no es sólo predecir sino describir, pero esa descripción no puede respetar el criterio de uniformidad exigido por Einstein cuando se aplica a observables asociados a operadores que no conmutan, esto es, a observables incompatibles considerados por Bohr complementarios. En efecto, en ese caso no se refieren a propiedades observables de objetos independientes de los procesos de observación y medida, si se quiere preservar su uso inequívoco. De ahí que, en opinión del físico danés, no sea posible de ninguna manera cumplir con el criterio de realidad establecido por Einstein en el artículo de 1935 y, por tanto, la teoría cuántica es una descripción completa de la realidad física.

Como consecuencia de todo lo dicho, es cuanto menos discutible interpretar la posición filosófica de Einstein al modo realista clásico, así como su disparidad de criterio con Bohr acerca de la interpretación de la mecánica cuántica en términos de una polémica sobre realismo-antirrealismo.

Digamos para finalizar y a modo de resumen que cuatro son los aspectos que caracterizan la filosofía de la física de Einstein. En primer lugar, su apuesta por la unidad lógica en la descripción del mundo, lo que implicará que el polo de lo racional adquiera un mayor protagonismo frente al polo de lo empírico. En segundo lugar, una posición marcadamente anti-inductivista que le llevará a defender, por expresarlo en términos de Popper, que la lógica de la investigación científica es exclusivamente deductiva. En tercer lugar, el modo de descripción de un sistema físico individual, que es lo que subyace a su definición de “elemento de realidad” y a la declaración de incompletitud de la mecánica cuántica en el artículo de 1935 (E-P-R). En

---

<sup>39</sup> Ver nota 37.

cuarto lugar, la exigencia de uniformidad de la descripción en cualquier orden de magnitud, algo que no contemplan los físicos de Copenhague<sup>40</sup>.

Ahora bien, a propósito de esta relación entre lo racional y lo empírico, entre teoría y experiencia, el mayor problema de lo que Einstein denominó su *credo epistemológico* probablemente sea el tipo de puente que es posible tender entre uno y otro polo, una vez que se ha roto toda conexión lógica entre ellos. Ni los conceptos son en ningún caso de origen empírico, ni las hipótesis se infieren de la experiencia. La cuestión entonces es qué garantiza que lo construido al margen de la experiencia pueda dar razón de ella. Einstein afirma que, pese a no existir puente lógico entre los fenómenos y los principios teóricos, sin embargo, el mundo fenoménico determina *unívocamente* el sistema teórico. Y añade a continuación: “Esto es lo que Leibniz, con una feliz expresión, ha denominado armonía preestablecida”<sup>41</sup>. Lo cierto es que no ofrece una justificación al respecto; más bien reconoce hallarse ante una cuestión límite. Hay que suponer, aun cuando no se pueda demostrar, que el mundo es inteligible si queremos hacer ciencia. También Leibniz adoptó como punto de partida que las proposiciones existenciales obedecen a un principio de razón suficiente, lo que dota de sentido a la pregunta acerca de *por qué*. De lo contrario, carecería de fundamento toda investigación empírica. El principio de razón no se puede demostrar, puesto que toda demostración lo supone. Asimismo, la investigación científica no puede demostrar que los fenómenos empíricos pueden ser conocidos y comprendidos porque es este el primer presupuesto de la propia investigación.

Todo ello nos pone en la frontera de las preguntas empíricas a las que la ciencia da respuesta, pero en las que se hallan implícitamente contenidas otras de carácter meta-empírico (epistemológicas o, en general, filosóficas), a las que no puede dar respuesta. Quizá esto es lo que Einstein quería decir con su famosa frase según la cual “la epistemología sin contacto con la ciencia se convierte en un esquema vacío; la ciencia sin epistemología es primitiva y

---

<sup>40</sup> Heisenberg, por ejemplo, da cuenta en su escrito “Encuentros y conversaciones con Einstein” acerca del desacuerdo de este último con el hecho de que el concepto de “trayectoria” dependa del tamaño del espacio en que se desarrollaran los movimientos del electrón (interior del átomo o cámara de niebla). El movimiento de un electrón debería ser descrito de igual manera tanto en espacios microfísicos como en aquellos directamente observables (Heisenberg (1989), pp. 92-93).

<sup>41</sup> Ver nota 6.

confusa”<sup>42</sup>. Es posible hacer ciencia sin filosofía, pero esta última aporta claridad y comprensión al alcance y también a los límites de la propia ciencia.

## Referencias bibliográficas

- Bächtold, M.: “On Bohr’s Epistemological Contribution to the Quantum-Classical Realism Cut Problems”, en: J. Faye and H.J. Folse (2017), pp. 235-252.
- Bitbol, M.: “On Bohr’s Transcendental Research Program”, en: J. Faye and H.J. Folse (2017), pp. 47-66.
- Bohr, N. (1934): *Theory and the Description of Nature*, Cambridge, at the University Press.
- (1935): “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” *Physical Review*, vol 48, pp. 696-702.
- Broglie, L. de (1952) : “La physique quantique restera-t-elle indéterministe?”, en: G. Lochak (ed.) (1987), pp.67-90.
- , (1965): “Les idées qui me guident dans mes recherches”, en: G. Lochak (ed.) (1987), pp. 149-167.
- Einstein, A. (1918): “Principles of Research”, *Address delivered at a celebration of Max Planck’s sixtieth birthday*, en: Einstein (1954), pp. 224-227.
- , (1933): “On the Method of Theoretical Physics”, *The Herbert Spencer Lecture, delivered at Oxford, june, 10*, en: Einstein (1954), pp. 270-276.
- , (1936): “Physics and Reality”, *The Journal of Franklin Institute*, vol. 221, Nº 3, pp. 313-347, en: Einstein (1954), pp. 290-323.
- , (1949a): “Autobiographical Notes”, en: P.A. Schilpp (ed.), vol. 1º, pp. 1-95.
- . (1949b): “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, in: P.A. Schilpp (ed.), vol. 2º, pp. 663-688.
- , (1954): *Ideas and Opinions*, translations by Sonja Bargmann, New York, Crown.
- , (1956): *Lettres à Maurice Solovine*, Paris, Gauthiers-Villars, 1956.
- Einstein, A.- Podolsky, B.- Rosen, N. (1935): “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”. *Physical Review*, vol. 47, 777-780.
- Correspondence Einstein-Born 1916-1955* (1972), trad. par Pierre Leccia, Introduction de B. Russell, Préface de W. Heisenberg, Paris, Éditions Seuil.
- Faye, J.: “Complementarity and Human Nature”, en: J. Faye and H.J. Folse (2017), pp. 115-132.
- Faye, J. and Folse, H.J. (2017): *Niels Bohr and the Philosophy of Physics. Twenty-First.Century Perspectives*. London, Bloomsbury.
- Heisenberg, W. (1989): *Encounters with Einstein and other Essays on People, Place and Particles*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Holton, G. (1982): *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Madrid, Alianza Editorial.
- Lochak, G. (ed.), (1987): *L. de Broglie, un itinéraire scientifique*, Paris, Éditions La Decouverte.

---

<sup>42</sup> Einstein (1949b), p. 684.

Paty, M. (1993): *Einstein philosophe*, Paris, P.U.F.

Rioja, A. (1992): "La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza", *Revista de Filosofía*, 3ª época, vol. V, Nº 8, pp. 257-282.

Schilpp, P. A. (ed.) (1949): *Albert Einstein Philosopher-Scientist*, Evaston, III: The Library of Living Philosophers, 2 vols.

Schrödinger, E. (1952): *Science and Humanism: Physics in Our Time*, New York, Cambridge University Press.

---, (1957): "What is a elementary particle", en: *Science Theory and Man*, London, George Allen & Unwin LTD, pp. 193-223.

Recibido em: 07/06/2022

Aprovado em: 08/11/2022

### **Ana Rioja Nieto**

Ana Rioja Nieto es Profesora Titular de la Facultad de Filosofía de la Universidad Complutense de Madrid. Desde el punto de vista docente, ha impartido diversas materias de Grado y Posgrado sobre cuestiones relacionadas con Filosofía de la Naturaleza, Historia y Filosofía de la Física. En cuanto a su actividad investigadora, ha publicado más de diez libros y decenas de artículos sobre temas tales como la evolución de las ideas cosmológicas, la constitución de la ciencia moderna, los debates sobre las interpretaciones de la mecánica cuántica o la crítica a la sociología del conocimiento científico. Entre dichas publicaciones cabe destacar las siguientes: *Teorías del Universo* junto con Javier Ordóñez, en tres volúmenes (Madrid, Síntesis, 1999 y 2006), la edición junto con este último de la obra de Pierre-Simon Laplace, *Exposición del Sistema del Mundo*, (Barcelona, Crítica, 2005), *Galileo en el infierno. Un diálogo con Paul Feyerabend*, con José Luis G. Recio (Madrid, Trotta, 2007), "Leibniz y la mecánica celeste" (en J. Arana (ed.): *Leibniz y las ciencias*, Madrid, Plaza y Valdés, 2013, pp. 111-152), "Niels Bohr and the Philosophy of Physics: Twenty-first-century Perspectives" (*International Studies in the Philosophy of Science*, (2109), 31:4, pp. 429-432), *El Mundo o el Tratado de la Luz de Descartes* (Madrid, Alianza Editorial, 2019), "La cosmovisión de Einstein" (en: *La cosmovisión de los grandes científicos del siglo XX*, Madrid, Tecnos, 2020, pp. 33-43). Ha publicado asimismo diversos trabajos sobre los creadores de la teoría cuántica: N.Bohr, L. De Broglie, M. Born, D. Bohm, A. Einstein, etc.