

## QUANTA Y FILOSOFIA \*

MARIO BUNGE  
McGill University

La mecánica cuántica (en adelante MC) ilustra dramáticamente la tesis filosófica de que la ciencia no puede evitar estar empapada de filosofía. En efecto, las formulaciones standard de la MC<sup>1</sup> han sido construidas en el espíritu y la letra del positivismo temprano de moda entre las dos guerras mundiales,<sup>2</sup> filosofía ésta que casi ningún filósofo viviente sostiene ya.

Esta sumisión de las formulaciones corrientes de la MC a una filosofía comida por las polillas es en gran parte responsable de las incoherencias y oscuridades que se encuentran en dichas formulaciones. Muchas de estas confusiones son claramente advertidas por el principiante, al par que el iniciado las soporta con entereza. Este último se habitúa, en efecto, a manejar un aparato conceptual que no profesa comprender; y en ocasión llega a decir que la concupiscencia de la comprensión es un residuo pecaminoso de la física clásica. Admite que la MC está envuelta en niebla y a veces sostiene que así debe ser, que los hechos cuánticos son básicamente opacos a la razón<sup>3</sup> y que debemos

\* Investigación subvencionada por la Alexander von Humboldt-Stiftung. La versión al inglés de este artículo, cuyo original en español publicamos, fue presentada como ponencia en el VII Congreso Interamericano de Filosofía, celebrado en junio de este año, en Québec, Canadá.

<sup>1</sup> Cf. P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4a. ed., Oxford: Clarendon Press, 1958, y J. v. Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press, 1955.

<sup>2</sup> Cf. P. Frank, *Interpretations and Misinterpretations of Modern Physics*, Paris: Hermann & Cie., 1938, y *Foundations of Physics*, Chicago: University of Chicago Press, 1946.

<sup>3</sup> Cf. N. Bohr, *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Paris: Gauthier-Villars, 1932.

contentarnos con calcular predicciones confirmadas por los experimentos aun cuando no entendamos mucho.

Esta situación es intolerable para el filósofo y el historiador de la ciencia, quienes se dan cuenta de que la MC es un triunfo de la razón, que nada suele ser claro en los comienzos, y que las barreras a la razón tienen el curioso hábito de caer las unas tras las otras. El filósofo podrá sospechar que la niebla que envuelve a la MC es de naturaleza filosófica y que por consiguiente podrá ser penetrada con ayuda de instrumentos que no se encuentran en la caja de herramientas del físico, a saber, la lógica, la semántica, la gnoseología y la metodología. Más aún, el filósofo podrá sospechar que la niebla cuántica ha entorpecido el progreso de la física teórica básica durante los últimos treinta años, es decir, después que fuera construido el edificio principal de la MC. En efecto, las aplicaciones de la MC han sido tan numerosas y exitosas, que sólo unos pocos físicos piensan hoy día en la posibilidad de explorar sendas radicalmente nuevas. En este sentido los físicos teóricos se han vuelto aún más conservadores que los teólogos. El resultado de ello es que no ha habido avances revolucionarios en la microfísica básica ni los habrá mientras la teoría corriente continúe siendo considerada como perfecta o casi perfecta: la complacencia conduce al estancamiento y la decadencia. Sólo un Concilio Cuántico podrá sacarnos de ella.

Por consiguiente es aconsejable bosquejar la niebla filosófica que nos impide ver adelante, y libertar de ella a la MC. La ejecución de estas dos tareas, la crítica y la de reconstrucción, debieran ser no sólo de interés filosófico sino también de utilidad para el avance del conocimiento.

### 1. *Enfrentando la niebla*

Como cualquier otra teoría física, la MC es un formalismo matemático dotado de cierta interpretación. La interpretación usual de la MC se conoce con el nombre de *doctrina*

*de Copenhagen* y fue elaborada por algunos de los gigantes que construyeron la teoría: Bohr, Heisenberg, Born, Dirac, Pauli, y von Neumann. Esta doctrina es bien conocida por los físicos. Lo que pocos de ellos advierten es que la doctrina de Copenhagen es científica y filosóficamente insostenible, porque es incoherente y porque no es estrictamente física. Echemos un rápido vistazo a estos dos rasgos fatales de la doctrina ortodoxa.

Las incoherencias de esta doctrina son tanto formales como semánticas y pueden hallarse tanto en el cuerpo de la teoría usual como en la metateoría. Una típica incoherencia de tipo formal es ésta. Por una parte sostiene, con razón, que casi todas las propiedades microfísicas son característicamente cuánticas, o sea, no clásicas, lo que explica la novedad de la MC respecto de la física clásica. Pero por otra parte dice que estas propiedades no caracterizan a trozos de materia sino a manipulaciones humanas (operaciones de laboratorio). Ahora bien, estas últimas tienen lugar en el nivel macrofísico y por lo tanto son descriptibles clásicamente. En suma, la doctrina contiene el metaenunciado contradictorio “Los símbolos cuánticos se refieren a hechos no cuánticos (=clásicos).”

La fuente de esta contradicción es filosófica: se origina en el dogma de que la física teórica no se refiere a la realidad sino a la experiencia humana, cuando en verdad las teorías físicas *concernen* a la realidad (por hipótesis) aun cuando son *puestas a prueba* en la experiencia, contrastando algunas de sus consecuencias lógicas con hechos del mundo exterior. La doctrina de Copenhagen especifica de la siguiente manera ese constituyente de la filosofía empirista: “No hay hechos cuánticos autónomos; sólo hay items cuánticos que dependen del observador: las operaciones de observación (o de medición) generan las entidades en estados dados”. Pero esta afirmación contradice la práctica del físico cuántico: por cierto, casi todos los problemas que éste enfrenta conciernen a sistemas físicos o químicos que,

por hipótesis, no interactúan con aparatos. Más aún, la teoría cuántica de la medición es virtualmente inexistente, puesto que es incapaz de dar cuenta de los rasgos específicos de los instrumentos de medición, rasgos que hacen posible las mediciones. Por añadidura, el dogma en cuestión es incompatible con la suposición de que por lo menos el observador mismo es real y está compuesto de microsistemas. Si cada uno de los átomos de mi cuerpo existe sólo en la medida en que puedo observarlo, entonces yo —un sistema de átomos— no existo, puesto que tengo otras cosas que hacer que observar de continuo a mis constituyentes. En conclusión, la doctrina de Copenhagen es formalmente incoherente, y esta mancha deriva de su sujeción a una filosofía subjetivista.<sup>4</sup>

La doctrina en cuestión también es incoherente en otro sentido, a saber, semánticamente. Diremos que una teoría es *semánticamente incoherente* si, en algún punto, admite el ingreso en ella de predicados que no están emparentados con los predicados básicos (conceptos primitivos) de la teoría.<sup>5</sup> Esto siempre puede hacerse, en un contexto no axiomático, gracias a la ley lógica “Si  $p$ , entonces  $p$  ó  $q$ ”. En efecto, si se afirma  $p$ , entonces puede concluirse “ $p$  ó  $q$ ” aun cuando  $q$  contenga predicados totalmente ajenos a los contenidos en la premisa  $p$ . Por ejemplo, si se afirma la ecuación de Schrödinger se puede concluir “O bien la ecuación de Schrödinger es verdadera o es falso que el observador crea el mundo”, que equivale a “Si el observador crea el mundo, entonces la ecuación de Schrödinger es verdadera”. Desde luego que este es un fraude, ya que los predicados “observador”, “crear” y “mundo” no estaban in-

<sup>4</sup> Para otras incoherencias, cf. M. Bunge, *Metascientific Queries*, Springfield, Ill.: Charles C. Thomas, Publisher, 1959, y *Foundations of Physics*, Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1967, y A. Landé, *New Foundations of Quantum Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1965.

<sup>5</sup> M. Bunge, “Physics and Reality”, *Dialéctica*, 19 195 (1965) y *La investigación científica*, Barcelona: Ediciones Ariel (en prensa), I, Cap. 7.

cluidos en el conjunto básico de predicados del discurso primitivo y caen del cielo.

Es precisamente una maniobra de este tipo la que se ejecuta de continuo en la doctrina de Copenhagen. Ejemplo: Plantéese el problema de calcular los posibles niveles de energía de un átomo *aislado* de una especie dada, y conclúyase interpretando el resultado del cálculo como los valores que puede obtener un experimentador que perturba energícamente al átomo, aun cuando el átomo puede estar tan lejos que ningún experimentador pueda actuar sobre él. Esto es ir por átomos y volver con experimentadores. Hay muchas incoherencias semánticas como ésta, y todas ellas se originan en la misma filosofía subjetivista, en particular el operacionalismo. Hay una sola manera de evitar las incoherencias semánticas, y es fijar la base conceptual (conjunto de conceptos no definidos) y atenerse a ella; en otras palabras, axiomatizar la teoría. Si se incluye el concepto de observador en la base de la teoría, entonces no tiene por qué incurrirse en incoherencias semánticas del tipo señalado. Pero entonces aparecerán incoherencias sintácticas en cuanto se desee construir al observador a partir de microsistemas dependientes del observador. La manera de evitar incoherencias de los dos tipos es, obviamente, axiomatizar la teoría sin emplear predicados extrafísicos, o sea, *reformular la MC de manera ordenada y estrictamente física*. (Cf. la sección siguiente.)

Las incoherencias formales y semánticas que se encuentran en la formulación habitual de la MC no pueden evitarse con paños tibios, puesto que se originan en la obediencia ciega a una filosofía incompatible con la finalidad misma de la ciencia física: no se puede obtener una teoría plenamente física si ha de satisfacer requisitos no físicos tales como el postulado de que no hay entes autónomos, es decir, independientes del sujeto. El carácter *semifísico* de la formulación standard de la MC salta a la vista ya en su terminología: un símbolo que representa una propiedad física

se llama *observable*, y un sistema macrofísico que sirve como sistema de referencia o como instrumento de medición se llama *observador*. En lugar de hablar acerca de una propiedad de un sistema físico, el adherente a la doctrina de Copenhagen tratará de hablar de un observable a secas, o de un observable cuyos valores numéricos son determinados (¡y aun definidos!) por cierto conjunto de operaciones de laboratorio. Se cae así en un antropocentrismo.

Sin embargo, un análisis de los símbolos que figuran en la MC desmiente esta interpretación. Por ejemplo, el operador representativo de la posición del  $n$ -ésimo microsistema de un agregado dado se llamará  $X_n$ : el subíndice  $n$  nombra un individuo físico concreto que puede muy bien habitar un oscuro rincón del universo. Y el promedio cuántico de  $X_n$  será una función del tiempo, no una función del observador ni de los parámetros que describen las circunstancias de la observación. Con los restantes “observables” de la MC ocurre otro tanto. En una palabra, el observador es *supernumerario* en la MC, y se lo introduce sólo en beneficio de la filosofía adoptada. Lo que es aún peor, esta filosofía hace imposible a la física, al subordinarla a la psicofisiología del observador humano. No se trata meramente de que los enunciados de toda teoría física debieran ser empíricamente comprobables, lo cual es correcto: lo que sostiene la escuela de Copenhagen es que todos esos enunciados debieran referirse a situaciones experimentales, pues de lo contrario carecerían de sentido. (Algunos llegan a afirmar que también debiera incluirse la mente del observador.<sup>6</sup>) Lo que sucede es que la escuela de Copenhagen confunde la *comprobación* de una teoría con su *referente*: identifica un problema metodológico con un asunto semántico. Con ello arrastra uno de los líos que dieron origen al operacionalismo.<sup>7</sup>

Al incluir al observador en la MC, la escuela de Copen-

<sup>6</sup> E. Wigner, “Remarks on the Mind-Body Question”, en J. Good, Ed., *The Scientist Speculates*, London: Heinemann, 1962.

<sup>7</sup> M. Bunge, *La investigación científica*, Barcelona: Ediciones Ariel (en prensa), I, Cap. 3.

hagen la torna psicofísica antes que puramente física. Esto habría satisfecho a Mach y al Círculo de Viena, quienes proponían unificar a la ciencia sobre la base de la psicofisiología. Pero no nos satisface a nosotros, y ello por las siguientes razones. Primera: mientras la física clásica coexista con la cuántica, tendrían que coexistir dos gnoseologías mutuamente incompatibles: la realista asociada al macronivel, y la subjetivista asociada al micronivel. Segunda: si se admite al observador, con todo su equipo psíquico, como referente de las teorías físicas, entonces no sería posible comprobarlas sin ayuda de una ciencia psicológica muy avanzada. Pero la MC no contiene ninguna hipótesis concerniente a la constitución y al comportamiento del observador; ni siquiera la formulación corriente hace tales suposiciones. Sin embargo, puesto que la formulación habitual involucra observadores en cuanto referentes, no sólo como comprobadores de la teoría, a fin de que la palabra 'observador' adquiera sentido es preciso añadir a la física un buen trozo de psicofisiología. De hecho está ocurriendo el proceso inverso: la psicofisiología usa cada vez más física y química, en tanto que los físicos que dicen acatar la doctrina de Copenhagen, de hecho logran explicar y predecir hechos físicos sin usar la psicofisiología en sus cálculos. Esto muestra que el concepto de observador no es solamente extraño a la física, sino que debiera ser posible reformular la MC sin ayuda de este concepto psicofísico. Hagamos una exploración preliminar de esta posibilidad.

Los ejemplos que siguen sugieren que es perfectamente posible traducir los enunciados semifísicos que caracterizan a la doctrina de Copenhagen, a enunciados estrictamente físicos. La frase ' $x$  se le aparece al observador  $y$ ', purgada de sus ingredientes pragmáticos se reduce a ' $x$  ocurre en el sistema de referencia  $y$ '. Y la frase 'La incertidumbre concerniente a la afirmación de que ocurre  $x$  vale  $y$ ' se traduce por 'La probabilidad del hecho  $x$  es igual a  $1 - y$ '. Obsérvese que la traducibilidad no es idéntica a la equivalencia:

en la mayoría de los casos, los acontecimientos tratados por la teoría ocurren sin la presencia del sujeto, y un enunciado concerniente a la probabilidad objetiva de un acontecimiento difiere tanto conceptual como numéricamente de un metaenunciado referente a la probabilidad que algún sujeto asigne a una proposición objeto. En todo caso, la traducción es posible y es preciso efectuarla si deseamos conservar la distinción entre el sujeto y el objeto. Pasemos pues a una interpretación puramente física del formalismo matemático de la MC, aun a riesgo de que nos repriman aquellos que creen que el dudar de los principios básicos de la versión ortodoxa de la MC es vano.<sup>8</sup> Para el filósofo la vanidad reside en el dogma, no en la duda.

## 2. *Disipando la niebla*

El formalismo standard de la MC puede interpretarse de manera estrictamente física, en particular no psicológica. En otras palabras, se puede reinterpretar la MC en la misma forma en que se interpreta la física clásica, esto es, suponiendo que los entes a que se refiere la teoría —electrones, átomos, moléculas, etc.— existen de por sí. Esto no excluye, por cierto, la posibilidad de que un experimentador los modifique, por ejemplo eliminando algunos estados por filtración. Pero para lograr esta finalidad el experimentador tendrá que usar medios físicos: no le valdrá quedarse sentado calculando e invocando el espectro de Copenhagen. En otras palabras, si ha de intervenir eficazmente, el experimentador deberá hacerlo *qua* ente capaz de influir sobre los acontecimientos físicos por medios igualmente físicos, sea directamente con su cuerpo o indirectamente mediante instrumentos automáticos. La mente del físico calcula las predicciones y diseña e interpreta el experimento, pero no actúa directamente sobre el hecho físico y por este motivo no figura como referente de la teoría.

<sup>8</sup> L. Rosenfeld, "Foundations of Quantum Theory and Complementarity", *Nature* 190, 384, 1961.

La receta para construir versiones estrictamente físicas de la MC es ésta: “Tómese la formulación standard y púrguese de sus elementos subjetivistas, y finalmente organícese lógicamente lo que queda.” Los elementos subjetivistas son, desde luego, el concepto de observador y todas las nociones relacionadas con él, en particular las de observable y probabilidad subjetiva. En la formulación habitual de la MC, el concepto de observador aparece, p. ej., en el enunciado “Si el sistema está en un autoestado de su *observable A*, correspondiente al autovalor *a*, entonces al *medir A* el *observador* obtendrá con *certidumbre* el valor *a*”. Las palabras subrayadas están fuera de lugar en una teoría física puesto que designan al sujeto y algunos de sus actos y estados. Más aún, tal como está el enunciado es falso, porque las propiedades típicamente cuánticas no son directamente observables (en el sentido gnoseológico) y porque los valores que arrojan una medición son habitualmente tan sólo aproximaciones a valores computados teóricamente. En cuanto al concepto de certidumbre, también es extraño a una teoría física. Una teoría estrictamente física, si es estocástica, debe incluir una interpretación objetiva y en particular física del cálculo de probabilidades: debe interpretar la probabilidad como una propiedad física, no como una medida de la certidumbre.<sup>9</sup> Esto no excluye la posibilidad de construir modelos psicológicos del cálculo de probabilidades sino que, en interés de la coherencia, evita el mezclar los dos modelos. El postulado que acabamos de criticar podrá reformularse así o en forma parecida: “Si el sistema está en un estado representado por un autoestado del operador que simboliza su propiedad *A*, entonces el valor numérico de *A* es el valor propio correspondiente a ese autoestado”.

<sup>9</sup> H. Poincaré, *Calcul des probabilités*, 2a. ed., Paris: Gauthier-Villars, 1912, M. v. Smoluchowski, “Über den Begriff des Zufalls und den Ursprung der Wahrscheinlichkeitsgesetze in der Physik”, *Naturwissenschaften*, VI, 253, 1918, y K. R. Popper, “The Propensity Interpretation of Probability”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 10, 25, 1959.

Una vez que la teoría ha sido purgada de todos sus ingredientes extrafísicos, deberá ser reorganizada lógicamente, aunque sólo sea para evitar recaídas en el subjetivismo. No hay receta simple para ejecutar esta tarea, pues cualquier teoría puede axiomatizarse de diversas maneras. La fundamentación axiomática propuesta por el autor<sup>10</sup> emplea los siguientes conceptos primitivos que la teoría elucida pero, desde luego, no define: “microsistema” (o *cuantón*), “medio ambiente (microfísico o macrofísico) del microsistema”, “espacio ordinario (de configuración)”, “tiempo”, “espacio de los estados”, “propiedad de un microsistema”, “operador representativo de la propiedad de un microsistema” (el “observable” de la formulación ortodoxa), y otros diez conceptos básicos que son mucho más específicos, tales como los de masa, carga, y operador de la energía. Cada uno de estos conceptos está caracterizado mediante ciertos postulados que, como es habitual en ciencia, distan de ser evidentes; y todos ellos son hipótesis que habrá que justificar por el éxito de la teoría en dar cuenta de hechos experimentalmente controlables.

Los postulados de esta versión objetivista de la MC caracterizan tanto la naturaleza matemática de los primitivos como su significado físico: el sistema de axiomas es por consiguiente determinado tanto formal como semánticamente.<sup>11</sup> Por ejemplo, uno de ellos afirma que ciertos conjuntos son no vacíos y que sus elementos son microsistemas y medios ambientes de los mismos respectivamente. Desde el punto de vista físico ésta es una perogrullada; pero tiene su importancia filosófica, pues hace que la teoría no sea vacía y la compromete con el realismo gnoseológico. Otro axioma afirma que, si un operador representa una propiedad física de un microsistema, entonces los valores propios

<sup>10</sup> “A Ghost-Free Axiomatization of Quantum Mechanics”, en M. Bunge Ed., *Quantum Theory and Reality*, Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1967, y *Foundations of Physics*, idem.

<sup>11</sup> Para estas dos condiciones, cf. mi “The Structure and Content of a Physical Theory”, en M. Bunge Ed., *Delaware Seminar in the Foundations of Physics*, Berlin-Heidelberg-New York: 1967.

de dicho operador son los únicos valores de dicha propiedad. Nada se dice acerca de las observaciones. Las mediciones intervendrán, como es habitual, en la etapa de la comprobación. Por ejemplo, se tomará un agregado de microsistemas similares en un medio ambiente dado, se medirá cierta propiedad de los mismos, y se contrastará la distribución de frecuencias (histograma) hallada experimentalmente con la distribución de probabilidad calculada teóricamente para un único sistema. En lugar de postularse dogmáticamente que los valores experimentales son idénticos a los teóricos —como lo hace la doctrina de Copenhagen— se compararán los dos conjuntos de valores. En caso de discrepancia se criticará sea a la teoría, sea al experimento, o aún a ambos.

Se tendrá particular cuidado en no llamar *observables* a las propiedades de los microsistemas ni a sus representantes conceptuales (las variables dinámicas). Primeramente, porque no son perceptibles aun cuando son escrutables de manera indirecta, así como la impaciencia puede inferirse a partir de ciertos gestos y de cierta conducta verbal. Además, el llamar ‘observables’ a las propiedades microfísicas es dar por resuelto el importante problema del diseño de mediciones destinadas a captar sus valores. Finalmente, como ya se ha sugerido, el concepto de observable no es un predicado estrictamente físico, como lo muestra su análisis: “ $w$  es observable por  $x$  en las circunstancias  $y$  con los medios (empíricos y teóricos)  $z$ ”. Si hemos de evitar confundir la física teórica con la psicología y la gnoseología, entonces habrá que mantener al sujeto fuera de aquella. La función del sujeto es construir teorías y ponerlas a prueba, no posar como referente de las teorías físicas. Por estas razones las variables dinámicas que figuran en la MC no deben llamarse ‘observables’.

Las magnitudes típicas de la MC son variables aleatorias, en el sentido de que les están asociadas distribuciones de probabilidad. Esto vale en particular para la posición y el

impulso de un microsistema. El que la MC es básicamente probabilista, no se postula sino que se prueba en esta versión de la teoría: en efecto, se demuestra que la función que representa un estado cuántico satisface los axiomas del cálculo de probabilidades. De esta manera se ve que, en su formulación actual, la MC no contiene variables ocultas (no aleatorias). Este carácter básicamente aleatorio de la MC puede entenderse de varias maneras. Una es suponiendo que la MC básica no concierne a un ente individual sino a un conjunto estadístico de cuantones; de este modo no sorprende que los diversos componentes de un conjunto, todos los cuales están en el mismo estado cuántico, poseen valores diferentes de la posición y del impulso. Sin embargo, la MC básica vale para el microsistema individual, p. ej. para cada uno de los átomos de un haz muy débil que atraviesa un cristal y va a dar contra una pantalla fluorescente. Lo que ocurre es que la teoría se pone a prueba con referencia a conjuntos numerosos; p. ej., la distribución calculada se compara con la figura de “difracción” que va emergiendo sobre la pantalla a medida que aumenta el número de impactos individuales. En otras palabras: lo mismo que cualquier otra variable aleatoria, la función de estado se *refiere* a un cuantón individual (colocado en un medio ambiente dado) pero su forma precisa se *pone a prueba* mediante conjuntos estadísticos de cuantones. Y toda vez que se trate de conjuntos de microsistemas coexistentes —particularmente si interactúan— deben tratarse mediante una teoría más completa (una estadística cuántica) basada sobre la MC elemental.

(Otra posibilidad sería suponer que la MC no se refiere ni a un individuo arbitrario ni a un conjunto actual de cosas similares, sino que concierne a un conjunto conceptual de cuantones (un conjunto de Gibbs, no de Boltzmann). Pero esta alternativa no parece haber sido explorada sistemáticamente.<sup>12</sup> Una tercera posibilidad es considerar las

<sup>12</sup> La sugerencia proviene de P. G. Bergmann, “The Quantum State Vector and Physical Reality”, en el primero de los volúmenes citado en la nota 10.

propiedades cuánticas como potenciales o latentes en lugar de actuales, y suponer que se actualizan o manifiestan cuando el microsistema interactúa con un instrumento de medición.<sup>13</sup> Pero esto haría a todas las variables dinámicas dependientes del observador, puesto que se manifestarían a voluntad del mismo. Sin embargo, la concepción de las propiedades cuánticas como latentes puede libertarse de su matiz subjetivista de la siguiente manera. Por lo común, un cuantón carece tanto de posición puntiforme como de impulso preciso: sólo tiene distribuciones precisas de posición e impulso. Estas distribuciones cambian en el curso del tiempo bajo la acción del medio, sea que éste esté bajo control humano o no. En particular, un cuantón puede adquirir una estrecha localización espacial. Para esto basta que se hagan operaciones tendientes a la preparación de un estado localizado. Pero esto no es necesario: la propia naturaleza se encarga de ello de vez en cuando y este es el motivo por el cual nosotros, parte distinguida de la naturaleza, a veces logramos localizar átomos o producir haces electrónicos casi monocinéticos. En todos estos casos cierta distribución objetiva se estrecha, y en este sentido es que emerge una propiedad clásica, al par que su conjugada se torna clásicamente menos determinada. En cierto sentido, este caso límite es una propiedad potencial, puesto que el cuantón tiene la posibilidad de adquirirla. Pero no existe una dicotomía potencial/actual al estilo aristotélico, ya que las distribuciones (de la posición, de la energía, etc.) son propiedades actuales, o sea, propiedades poseídas por el cuantón en todo momento. Más aún, son objetivas o independientes del sujeto, aún cuando un observador pueda usar aparatos para estrechar o ensanchar ésta o aquella distribución. Todo lo que precede presupone, ciertamente, el abandono de las probabilidades subjetivas y la adopción de alguno de los mo-

<sup>13</sup> Cf. H. Margenau, *The Nature of Physical Reality*, New York: Mc Graw-Hill, 1950, y D. Bohm, *Quantum Theory*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1951.

delos físicos del cálculo de probabilidades.<sup>14</sup> En la axiomática propuesta por el autor se adopta la interpretación de Popper, o de la propensión, según la cual la probabilidad es una medida objetiva de la disposición objetiva de una cosa a comportarse de cierta manera. Si se desea evitar esta interpretación se deberá elaborar la MC como teoría concerniente a conjuntos de réplicas de un objeto, esto es, como una estadística de Gibbs. Pero esto aún no se ha hecho, y mientras no se haga podemos pensar que las variables dinámicas de la MC representan potencialidades objetivas.)

Estas someras indicaciones deberán bastar para bosquejar nuestra axiomática objetivista de la MC. Quien desee convencerse de que es una versión coherente y suficiente para calcular e interpretar todas las fórmulas habituales, deberá recurrir a las publicaciones técnicas del autor.<sup>10</sup>

### 3. *Viendo*

Una primera ventaja de esta sistematización realista de la MC es que distingue el aspecto formal del físico, la sintaxis de la semántica de la MC. El contenido físico es vertido mediante hipótesis de interpretación; éstas no son reglas de procedimiento sino suposiciones corregibles, y no son “definiciones operacionales” sino conjeturas independientes del observador. Como toda otra teoría científica, la MC contiene conceptos teóricos carentes de interpretación empírica, o sea, que no pueden introducirse mediante las mal llamadas definiciones operacionales. Más aún, ninguno de los símbolos básicos de la MC es empíricamente interpretable, por lo cual la MC carece de contenido empírico: no describe objeto empírico alguno. Esto no significa que la MC es improbable, sino que la teoría se refiere a hechos transempíricos, no a fenómenos propiamente dichos. En efecto, los microhechos a que se refiere la MC básica son imperceptibles. Los tests empíricos de la MC, al igual que los de

<sup>14</sup> Cf. Nota 9 y mi *Foundations of Physics* citado en la nota 4.

cualquier otra teoría, requieren la ayuda de otras teorías, de teorías que conectan microhechos con macrohechos, y de teorías que explican el comportamiento de los macrosistemas (p. ej. amplificadores) que intervienen en las mediciones. En suma, la MC, es *físicamente significativa* por referirse a entes y propiedades físicos, bien que imperceptibles; y es *empíricamente comprobable* cuando se la une a otras teorías físicas: de lo contrario es improbable. Esto no habría sido aceptado por quienes confundían significado con comprobabilidad.

Nuestra axiomática cuántica es formal y semánticamente determinada. Pero la interpretación del formalismo, a cargo de los postulados de interpretación de la teoría, no es completa sino bosquejada. Por ejemplo, cuando decimos que cada estado del microsistema está representado por un punto (o más bien un rayo) en cierto espacio (el espacio de Hilbert del sistema), los términos 'microsistema' y 'estado' no se definen ni se describen. Estas palabras se toman de la jerga física que domina la profesión. Estos y otros términos figuran no sólo en la MC sino también en otros campos de la física, y su significado es determinado juntamente por todos los campos de la investigación en que figuran. Esto no es privativo de la MC sino peculiar de toda la ciencia fáctica: en ésta no se tiene la posibilidad, característica de la matemática, de interpretar una teoría (p. ej., la teoría de los grupos) en otras teorías (p. ej., aritmética y geometrías métricas). Los axiomas semánticos o interpretativos de una teoría física establecen relaciones de referencia entre símbolos matemáticos e items físicos, sean entes, sean propiedades de éstos. Sería cómodo que las operaciones empíricas definiesen con precisión todos nuestros conceptos o al menos algunos de ellos, pero esto es tan imposible como esperar que las computadoras inventen conceptos matemáticos. Lo que pueden lograr las operaciones empíricas es obtener muestras de valores numéricos de funciones físicas (magnitudes) que nos permitan

poner a prueba las correspondientes teorías. En suma, no hay definiciones operacionales.<sup>15</sup> Y la idea habitual, de que una teoría física es un cálculo al que un conjunto de definiciones operacionales asigna sentido físico, es por ello errada. Los componentes semánticos de la MC son hipótesis en toda la regla, por concernir a inobservables y por ser corregibles.

En la reformulación de la MC propuesta por el autor, la interpretación se hace de manera literal y no metafórica: no se usan analogías clásicas ni se hace referencia a situaciones experimentales, sino que se establecen correspondencias entre signos y objetos físicos. En particular, no se hace uso de los conceptos de *onda* y de *partícula*: se considera que estos conceptos son clásicos y por ello se introduce un nuevo término, *cuantón*, para designar al ente peculiar a que se refiere la MC. Como es sabido, la mayoría de las fórmulas de la MC pueden leerse analógicamente o bien en términos de partículas o bien en términos de campos (o aún de fluidos); algunas pueden interpretarse en cualquiera de estas formas. Esto ha sugerido a los autores de la doctrina de Copenhagen que existen dos interpretaciones verdaderas que son a la vez mutuamente excluyentes y complementarias. En mi opinión, ello sugiere que ambas son interpretaciones *ad hoc*. Esta impresión se funda en las siguientes consideraciones: (a) no existe una axiomatización coherente de la MC, sea en términos exclusivamente corpusculares, sea en términos puramente ondulatorios; (b) en nuestra versión de la MC se pueden efectuar todos los razonamientos habituales sin emplear jamás los conceptos de corpúsculo y de onda. En particular, el vector de estado no se interpreta como una intensidad de campo sino como una fuente de propiedades físicas, en modo parecido a los potenciales y a los lagrangianos. Al abandonar las analogías clásicas, la MC sufre una transformación similar a la operada en la teoría electromagnética cuando la relatividad

<sup>15</sup> Véase la nota 7.

especial mostró que el éter no hacía falta como soporte del campo. Llegado a este punto, el especialista en teoría de los modelos deseará inquirir más profundamente en las diferencias entre interpretaciones naturales e interpretaciones *ad hoc*, y el filósofo sentirá la tentación de exclamar: “Ya lo decía yo: a nuevos niveles de la realidad, nuevas ideas”. Pero nosotros deberemos volver nuestra atención a otros problemas.

Al no hacer uso de los conceptos clásicos de partícula (corpúsculo bien localizado) ni de onda (perturbación en un campo), evitamos la dualidad onda-corpúsculo y el “principio” de *complementaridad*, piedra basilar de la doctrina de Copenhagen. En nuestra opinión, el cuantón no es ni una partícula clásica ni un campo clásico, sino un ente *sui generis* que en ciertas circunstancias extremas parece una partícula y en otras un campo. El que estas circunstancias extremas sean naturales o artificiales (controladas por un experimentador) no hace al caso. De todos modos, los conceptos de corpúsculo y de onda, aunque legítimos en referencia a sistemas macrofísicos (cuerpos y campos en gran escala), deben considerarse como metáforas al nivel cuántico y, como toda otra metáfora, deben manejarse como armas de doble filo: como auxiliares de utilidad heurística y al mismo tiempo engañosos. La eliminación de la dualidad onda-corpúsculo y del “principio” de complementaridad asociado a ella puede considerarse como una ventaja adicional de nuestra formulación de la MC, ya que en nombre de la complementaridad se han excusado demasiadas incoherencias y oscuridades.<sup>16</sup>

Otro fantasma que desaparece es el de la *incertidumbre*. Si la MC no se refiere a nuestros estados mentales sino a trozos de materia, entonces las dispersiones que figuran en las relaciones de Heisenberg no pueden interpretarse como incertidumbres subjetivas sino como latitudes obje-

<sup>16</sup> Cf. la nota 4.

tivas en la localización del cuantón.<sup>17</sup> Por cierto que nuestra reformulación de la MC no elimina la incertidumbre: no se conquista la infalibilidad con sólo axiomatizar una rama del conocimiento. Lo que ocurre es que el término 'incertidumbre' es relegado ahora a algunos de los metalenguajes de la MC; es decir, figura solamente en enunciados concernientes a nuestra habilidad en predecir hechos con ayuda de la teoría: no ocurre en el lenguaje objeto de la MC. Lo que es inherente a toda teoría física, no sólo a la MC. La palabra 'indeterminación', para designar las dispersiones en torno a la media, es levemente mejor pero tampoco es enteramente correcta. En efecto, no hay nada indeterminado en una distribución de posición, siempre que 'indeterminado' se iguale a 'ilegal y/o proveniente de la nada'<sup>18</sup>. La MC es estocástica, pero una teoría estocástica que contiene leyes perfectamente definidas y que conciernen a distribuciones de probabilidad no es una teoría indeterminista si no da lugar a lo ilegal y a lo creado a partir de la nada. En resumen, nuestra versión de la MC es tan determinista como la mecánica clásica, sólo que no confirma al determinismo laplaciano. Bien mirada, tampoco la versión ortodoxa es indeterminista ya que, si las probabilidades cuánticas son tan sólo grados de certeza, entonces nada puede inferirse acerca de las cosas mismas. El indeterminismo ontológico exige una interpretación física (objetiva) de la probabilidad, cosa que rechaza la doctrina de Copenhagen. En cuanto las probabilidades son objetivas y satisfacen leyes, el indeterminismo se evapora para hacer lugar el determinismo estadístico.

Con otros términos gnoseológicos, tales como 'observador', 'observable' y 'conocimiento', sucede algo similar: no figuran en el lenguaje de nuestra teoría aun cuando pueden aparecer en cualquier metalenguaje de la misma, como

<sup>17</sup> Véanse K. R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, 2a. ed., London: Hutchinson, 1959, y mi *Foundations of Physics*.

<sup>18</sup> M. Bunge, *Causalidad*, Buenos Aires: Eudeba, 1961, "Causality: A Rejoinder", *Philosophy of Science*, 29, 306, 1962, y "Cosmology and Magic", *The Monist*, 44, 116, 1962.

cuando uno dice que el conocimiento del estado de un microsistema le permite a uno calcular la distribución de su impulso y su posición media. De hecho ésta es la interpretación que emplea el físico salvo cuando se propone adecuar la MC a la filosofía oficial de la física. En efecto, cuando caracteriza el vector de estado dice que, para cada sistema y cada medio ambiente, dicho símbolo es una función del espacio y del tiempo, y aclara que la forma de la función puede variar cuando cambian el microsistema y/o su medio ambiente. (En otras palabras, tanto en la interpretación realista de la MC como en la práctica diaria del físico, cada punto  $\psi$  del espacio de Hilbert es una función compleja con dominio  $\Sigma \times \Sigma \times E^3 \times T$ , donde ' $\Sigma$ ' designa el conjunto de las cuantones, ' $\Sigma$ ' el conjunto de los medios ambientes, ' $E^3$ ' el espacio ordinario, y ' $T$ ' la duración.) Algo similar sucede con los operadores que transforman al espacio de los estados en sí mismo: en ningún caso aparece el observador como una nueva variable.

El sujeto aparece, hemos dicho, en algunos de los *meta-lenguajes* de la teoría. Sea, por ejemplo, una relación funcional  $F$  entre dos variables  $x$  e  $y$  cada una de las cuales representa un rasgo de un sistema físico. Llamando  $X$  al conjunto de las  $x$  e  $Y$  al conjunto de las  $y$ , se escribirá ' $F: X \rightarrow Y$ ' o bien ' $y = F(x)$ '. Si esta fórmula pertenece a una teoría física, podrá interpretársela así: El conjunto  $X$  de los valores de cierta propiedad de un sistema dado es representado por  $F$  en el conjunto  $Y$  de los valores de otra propiedad del mismo sistema. O, lo que es lo mismo, los valores individuales  $x$  e  $y$  de dos propiedades físicas están relacionados en la forma:  $y = F(x)$ . Esta es una interpretación estrictamente física de la relación funcional dada. Pero la misma fórmula puede reinterpretarse en algún metalenguaje de la teoría en la que figura. Por ejemplo, se la podrá reinterpretar de cualquiera de estas dos maneras: (1) Dada  $F$ , para toda  $x$  en  $X$  y toda  $y$  en  $Y$ , el *conocimiento* de  $x$  determina unívocamente a  $y$  [en el sentido

gnoseológico de 'determinación'] .(2) Para toda  $x$  en  $X$  y toda  $y$  en  $Y$ , el valor  $y$  se *halla* (o se calcula), a partir de una *medición* de  $x$ , usando la fórmula:  $y=F(x)$ .

Estas dos últimas interpretaciones pueden llamarse *gnoseológicas* o *pragmáticas*. La segunda es más restrictiva que la primera, pues ésta no especifica la clase de conocimiento requerido: el conocimiento puede ser empírico o aún puede tratarse del caso en que asignan valores hipotéticos a  $x$ . Pero cualquiera de las interpretacionesgnoseológicas de nuestra fórmula es más estrecha que la interpretación física dada más arriba, puesto que requiere la presencia de un sujeto, el que desgraciadamente no está siempre a disposición. La interpretación física es la más amplia y por añadidura es la base de las otras dos. En primer lugar, porque las interpretacionesgnoseológicas pertenecen a un metalenguaje del lenguaje en que aparece la fórmula ' $y = F(x)$ ', y no hay metalenguaje sin el correspondiente lenguaje objeto. Segundo porque, a menos que seamos solipsistas, debemos suponer que nuestro conocimiento físico es verdadero en la medida en que representa cosas, relaciones y acontecimientos del mundo exterior: si el conocimiento de  $x$  determina unívocamente el de  $y$  por medio de  $F$ , será porque  $X$  e  $Y$  están relacionados a través de  $F$ , o sea, porque  $Y$  es la imagen de  $X$  según  $F$ , aun cuando no lo sepamos.

El ideal de la *objetividad*, característico de la ciencia fáctica, es entonces compartido por la MC tanto como por la física clásica. El objeto no ha sido desaparecido ni se ha soldado con el sujeto. Lo que ha ocurrido es que nuestra imagen actual del micro-objeto es muy complicada. Y los que están soldados no son el objeto y el sujeto sino el sujeto y su reconstrucción conceptual del objeto, pero esto siempre ha sido así salvo para los platónicos. El sujeto no figura entre los predicados básicos de nuestra reformulación de la MC. Tampoco ocurre en la teoría de la medición, pues la física teórica no se ocupa de los sucesos psíquicos que tienen lugar dentro del cráneo del observador. Una teoría

física de la medición se ocupa solamente de la interacción física entre dos o más entes físicos, p. ej., un cuantón y un instrumento de medición.

(Es cierto que, según la formulación habitual de la MC, la intervención del observador produce una súbita contracción del estado cuántico, el que queda proyectado sobre uno de los ejes propios del “observable” que se mide. Este colapso sería ilegal y por consiguiente impredecible: no existiría ninguna relación legal entre el estado original y el estado final. Pero este postulado conduce a contradicciones,<sup>19</sup> por lo cual no figura en nuestra axiomática. Además, este postulado de proyección o del colapso de la “función de onda” implica el colapso del principio de legalidad, que es una presuposición ontológica fundamental de la investigación científica.<sup>20</sup>)

La teoría cuántica de la medición debe construirse como una aplicación de la MC básica al caso particular en que el medio ambiente está constituido por un instrumento inestable capaz de amplificar los microhechos que se quieren poner de manifiesto. Desgraciadamente, no existe tal teoría sino en forma embrionaria, y ello porque casi todos los físicos siguen al matemático von Neumann<sup>21</sup> en la creencia ingenua de que existen instrumentos universales, capaces de medir cualquier cosa, de modo que su acción puede representarse por medio de un único concepto (el operador proyección). Pero aparte de consideraciones técnicas, el filósofo podrá impugnar la tesis positivista de que la MC está basada en un análisis del proceso de medición, así como la tesis, más extrema aún, de que la MC íntegra versa sobre mediciones. Estas tesis son falsas por las siguientes razones: (a) no se pueden diseñar ni interpretar mediciones sin la ayuda de teorías; (b) las mediciones involucran macroprocesos, en tanto que la MC básica se

<sup>19</sup> H. Margenau y J. Park, “Objectivity in Quantum Mechanics”, en el volumen citado en la nota 11, y mi *Foundations of Physics*.

<sup>20</sup> Cf. la obra citada en la nota 7, I, Cap. 5.

<sup>21</sup> Obra citada en la n. 1.

refiere a microprocesos; (c) por estas razones, la teoría cuántica de las mediciones, en la medida en que existe, es una aplicación de la MC; (d) por consiguiente cualquier enunciado cuántico concerniente a mediciones debe figurar como teorema (enunciado derivado) y no como axioma de la MC.

Una yapa de nuestra versión de la MC es que torna obvia la futilidad de la llamada *lógica cuántica*.<sup>22</sup> El motivo para abogar por un cálculo lógico exótico parece ser éste. Si la MC es verdadera, entonces las proposiciones “El cuantón  $x$  está en el punto  $y$  en el instante  $t$ ” y “El cuantón  $x$  se mueve con velocidad  $v$  en el instante  $t$ ” son mutuamente incompatibles como lo muestran las relaciones de Heisenberg. Parecería entonces que la MC incluye un cálculo lógico que prohíbe la conjunción de ciertas proposiciones (las “inconmensurables”). Pero este argumento se funda en la consideración de los cuantones como partículas clásicas. La dificultad no aparece si se admite que, en general, los cuantones carecen tanto de posición puntiforme como de velocidad precisa. Esta consideración es suficiente para disipar la confusión de la lógica cuántica, pero no es necesaria: en cualquier campo aparecen proposiciones incompatibles, y la lógica ordinaria (el cálculo bivalente de predicados) basta para enfrentar estas situaciones. El hecho de que la conjunción de dos proposiciones dadas es falsa tan sólo nos muestra que no debemos afirmar tal conjunción. Más aún, al axiomatizar la MC se comienza por presuponer ciertas teorías matemáticas tales como el análisis, todas las cuales tienen la lógica ordinaria embutida. Por ello, el aceptar la lógica clásica al nivel de los fundamentos para rechazarla al nivel de los teoremas (p. ej., las relaciones de Heisenberg) es incurrir en contradicción.

Pero ya es tiempo de concluir.

<sup>22</sup> G. Birkhoff y J. V. Neumann. “The Logic of Quantum Mechanics”, *Annals of Mathematics*, 37, 823, 1936, y P. Destouches-Février, *La structure des théories physiques*, Paris: Presses Universitaires de France, 1951.

#### 4. *En conclusión*

La MC, una de las teorías más ricas y profundas, ha sido aneblada desde el comienzo por una gnoseología subjetivista que remonta a Berkeley y Mach. Este lastre filosófico se encuentra no sólo en montones de metaenunciados concernientes a la MC sino también en muchos de los enunciados objeto de la versión standard de la teoría. De resultas de esta sumisión a una filosofía subjetivista, los referentes de la MC en su versión ortodoxa terminaron por convertirse —parafraseando el veredicto que formulara Berkeley sobre los tambaleantes infinitesimales de Newton— en los fantasmas de entes físicos desaparecidos. La física, como ciencia del mundo exterior, parecía haber muerto.

Se ha afirmado a menudo, con convicción envidiable, que el casamiento de la MC con el subjetivismo y en particular el positivismo es insoluble. Esta creencia ha conducido a algunos a rechazar la MC, a otros a proponer reconstrucciones de la MC en un espíritu clásico, y a la mayoría a aceptar vivir en medio de la niebla, sea con resignación, sea con alegría. Mientras tanto los físicos han extendido, aplicado y comprobado la teoría básica, procediendo en su labor diaria sin fijarse en el lastre filosófico. Esto debiera haber bastado para sugerir que la unión de la MC con la gnoseología subjetivista era un *mariage de convenance* por el cual el positivismo aumentaba su prestigio al par que la nueva ciencia, recibida inicialmente con desconfianza debido a su alejamiento de las ideas clásicas, recibía el espaldarazo de una filosofía que aún estaba a la moda.

Este matrimonio es ahora una *mésalliance* y es preciso disolverlo. En efecto, (a) la gnoseología subjetivista adoptada por el neopositivismo ha muerto a consecuencia de la crítica externa y de la honesta autocrítica realizada por los propios pensadores positivistas; (b) el lastre subjetivista que entorpece el progreso de la física teórica puede y debe eliminarse, convirtiendo a la MC en una teoría estricta-

mente física, en particular libre de conceptos psicológicos. Con esto, la MC no ha quedado soltera sino que ha tomado un nuevo cónyuge filosófico: el realismo gnoseológico. No el realismo ingenuo, desde luego, sino un realismo que, si bien postula la existencia autónoma del mundo exterior, está dispuesto a corregir toda reconstrucción conceptual del mismo; un realismo que admite que, si bien las teorías físicas se proponen describir y explicar la realidad, lo hacen parcialmente, de modo imperfecto y simbólicamente.<sup>23</sup>

Este resultado, lejos de producir complacencia en el campo realista, debiera ponerlo en movimiento: si bien la MC ha dejado de ser la prueba viviente de que el realismo es insostenible, sugiere que las variedades existentes del realismo son subdesarrolladas porque no ofrecen una descripción y un análisis detallados de los modos complejos en que la investigación científica inventa y comprueba modelos conceptuales de trozos y aspectos del mundo exterior. El ontólogo debiera recoger un reto similar. Hasta hace poco le habían contado que la MC prueba que la materia se parece más al espíritu que a la materia, lo que le deleitaba o confundía, según el caso. Ahora debe darse cuenta de que la materia no ha sido desmaterializada por la MC,<sup>24</sup> sino que es mucho más complicada de lo que suponían la mecánica y las teorías clásicas de los campos: los cuantones son cosas proteicas difícilmente descriptibles en términos clásicos. Pero en todo caso están ahí, a la puerta de la ontología, exigiendo que se examine con mente fresca ciertas categorías ontológicas fundamentales, tales como las de sustancia, forma, movimiento, novedad, determinación, causalidad, azar, y ley. Ojalá la nueva física, librada de una filosofía anticuada, estimule nuevos desarrollos en la gnoseología y la ontología.

<sup>23</sup> Véanse el artículo citado en la n. 5, y J. J. C. Smart, *Philosophy and Scientific Realism*, London: Routledge and Kegan Paul, 1963.

<sup>24</sup> Cf. H. Feigl, "Matter Still Largely Material", *Philosophy of Science* 29, 39, 1962.