

Arbor

A

NO 478 . TOMO CXXII . OCTUBRE . 1985

Mecánica cuántica: La lógica como una de las ciencias experimentales

F. J. Ynduráin

Se discuten los fundamentos de la mecánica cuántica y, en especial, dos de sus propiedades más chocantes: el llamado «problema de la medida», y la interpretación probabilística de la realidad. Se dan argumentos que indican que la verificación experimental de dichos principios implica que la lógica intrínseca del Universo no coincide con la lógica habitual de la mente humana sino de una forma aproximada, cuando pueden despreciarse las fluctuaciones cuánticas. La situación nos parece similar a la de la geometría: durante mucho tiempo se creyó que la euclídea encerraba una verdad absoluta; hoy tenemos que reconocer que la experiencia demuestra que la geometría del espacio no coincide con la euclídea sino de forma aproximada cuando se está lejos de fuertes campos gravitatorios.

The philosophy appropriate to quantum mechanics, however, has not yet been adequately developed. I suspect it will demand even more radical departures from the traditional doctrine (...) than those demanded by the theory of relativity.

(B. RUSSELL, *History of Western Philosophy*, Unwin, Londres, first edition, 1946.)

1. Introducción

Podríamos comenzar este artículo con la famosa frase de Einstein, «Lo más misterioso del cosmos es que podemos com-

prenderlo» (la cita no es textual): como veremos más adelante, las «paradojas» de la mecánica cuántica (muchas veces utilizaré la abreviación «MC» para ésta) lo son, o dejan de serlo, según la actitud que tomemos respecto a la afirmación arriba hecha. Cuando se menciona la palabra «actitud» se está, en cierto modo, involucrando la psicología; y es que, en mi opinión, la cuestión no es realmente científica, sino psicológica. En efecto, muy pocos científicos (incluso entre los que se sienten insatisfechos con la formulación ortodoxa de la M. C.) dudan que las pruebas *experimentales*, único criterio científico de validación, conforman, y seguirán confirmando, la M.C. La insatisfacción con esta teoría se da, cuando se da, a otro nivel: llamémosle filosófico o psicológico.

Antes de entrar en materia quiero hacer una distinción importante. Ante cualquier afirmación científica revolucionaria y (sobre todo) que parezca contradecir nuestra experiencia cotidiana hay siempre personas que se rebelan. Al ir pasando el tiempo, estos grupos se quedan en general reducidos a gentes simples, ignorantes o incompetentes. Por ejemplo, aún hoy existe en Estados Unidos la «Flat Earth Society» que escribe cartas a revistas profesionales (p. ej., *Physics Today*) cuando se lanzan satélites artificiales con explicaciones de cómo esto no invalida su idea de que la Tierra es plana y ellos pueden explicarlo perfectamente. En España hemos sufrido (por el poder personal que acaparó) a uno de estos «crackpots» que se negaron a aceptar la teoría de la relatividad.

Este tipo de personajes no son los que interesan aquí. A diferencia de la oposición a la teoría copernicana, la relatividad, etc., la oposición a la M. C. cuenta aún hoy con personalidades prestigiosas que confiesan que, aun aceptándola, no la entienden y (en mayor o menor grado) les resulta insatisfactoria: John Bell, Feynman y Hoyle son tres de los más famosos ejemplos actualmente activos; Schrödinger, De Broglie y el propio Einstein (curiosamente tres de los creadores de la teoría) en el pasado. Unas objeciones defendidas por personas tan competentes merecen ser discutidas.

2. La mecánica cuántica

Para centrar la discusión es conveniente presentar una formulación de la mecánica cuántica, lo que paso a hacer dando una versión esquematizada de la utilizada por Feynman para los alumnos de físicas que empiezan a estudiar esta disciplina. Consideremos un dispositivo experimental como el de la figura 1. En ella, F es una fuente de electrones; P, una pared con dos rendijas, 1 y 2; D, un detector. Suponemos que todo el dispositivo está encerrado en una caja, de forma que lo único que detectamos es lo que llega a D. *Si los electrones fueran ondas*, entonces se producirían interferencias (Fig. 2), como es sabido por física elemental; y estas interferencias producirían unas señales bien específicas en el detector D. Estas señales son totalmente distintas de las que se producen para partículas en el sentido clásico del término, debido a que una partícula o pasa por la rendija 1 o por la 2, mientras que una onda pasa por ambas. Si hacemos la experiencia con unos electrones reales se producen interferencias y parece que estaríamos tentados de considerar que los electrones son ondas, no partículas. Una onda, como es sabido, viene descrita por la amplitud de la oscilación, $\varphi(x, t)$ en el punto x en el instante de tiempo t . (Vamos a suponer para simplificar que φ es un número real; en general es complejo.) Sin embargo, la hipótesis de que el electrón es una onda es incompatible con la experiencia: cada electrón individual se comporta como una partícula. La M. C. resuelve el problema postulando que el electrón es un «ente» caracterizado por una función $\varphi(x, t)$ (como si fuese una onda), e interpretando la cantidad $[\varphi(x, t)]^2$ como la probabilidad de encontrar el electrón en el punto x en el instante de tiempo t . Por supuesto, igual que el movimiento de una partícula clásica está gobernado por unas ecuaciones (en el caso no-relativista, de Newton) la función φ , llamada función de onda, obedece a ciertas ecuaciones (la ecuación de Schrödinger, por ejemplo). Puede demostrarse que las ecuaciones de la M. C. son autoconsistentes y, por tanto, aparentemente, no hay lugar a pensar en paradojas.

La situación es, sin embargo, bastante complicada: y las complicaciones aparecen en cuanto comenzamos a hurgar en el significado de la frase «probabilidad de encontrar el electrón». Las dificultades son de dos tipos; cuál de los dos es

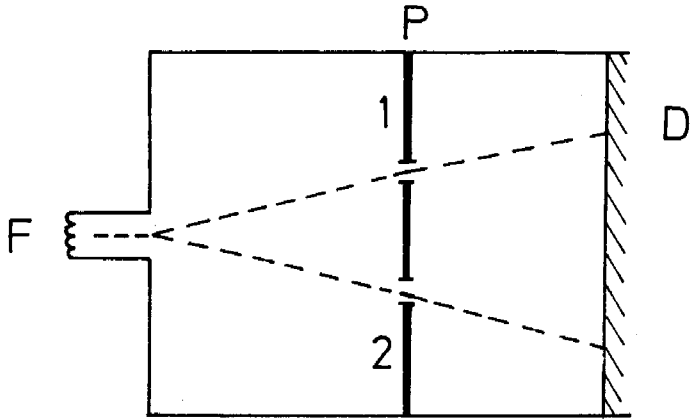


Fig. 1

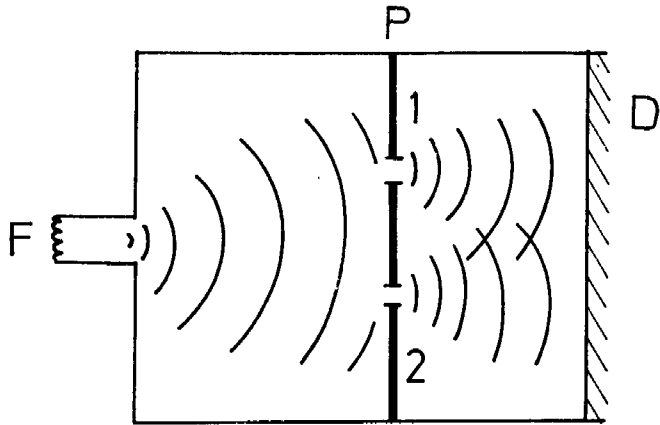


Fig. 2

más grave es, en mi opinión, una cuestión de disposición filosófica personal.

La primera dificultad es que la M. C. contiene intrínsecamente el azar. Según la M. C. si preparamos un electrón de una cierta manera, por ejemplo, con la fuente de electrones F, y al cabo de cierto tiempo t miramos donde está, lo podemos encontrar en un cierto punto x_1 . Si volvemos a preparar un electrón, exactamente igual que antes, volvemos a esperar el mismo tiempo t , y volvemos a medir su posición, vamos en general a encontrar que está en otro sitio, x_2 , distinto de x_1 . Aparentemente no podemos saber dónde va a estar cada electrón individual; sólo podemos decir que lo encontramos más veces en aquellos puntos en los que la probabilidad de encontrarlo, φ^2 , sea mayor. Esta arbitrariedad es la que molestaba profundamente a Einstein y la que motivó su famosa frase «Dios no puede estar jugando a los dados» (incidentalmente, esta frase identifica bastante claramente el carácter metafísico (*) de las objeciones de Einstein).

El segundo problema está relacionado con el primero, y se conoce como «el problema de la medida en la mecánica cuántica». Para muchos es la desventaja más seria de las dos, un punto de vista que sin embargo no comparto. El meollo de la cuestión está de nuevo en la frase $\varphi(x, t)$ es «la probabilidad de encontrar el electrón en el punto x en el instante de tiempo t ». Una vez hemos hecho la medida, hemos encontrado el electrón en un punto determinado, digamos x_1 como en el ejemplo anterior. Aparentemente esto indica que, si bien el electrón obedece las leyes cuánticas, el aparato de medida, no: o encuentra el electrón en x_1 o no lo encuentra. Para ser consistentes deberíamos de abandonar el determinismo también para el aparato de medida y decir que éste, a su vez, tiene una función de onda ψ y que ψ representa la probabilidad de que *hagamos una medida*. La cadena se puede seguir *ad infinitum*, y parece que fuese imposible hacer ningún tipo de afirmación.

Un análisis más detallado de ambas paradojas lo haré después; para terminar esta sección presentaré las respuestas ortodoxas a ambas. Dichas respuestas son las formuladas por la llamada «escuela de Copenhague» debido a que se elaboró en buena medida alrededor de Niels Bohr, en aquella ciudad.

(*) La palabra «metafísico» no se utiliza aquí en sentido peyorativo sino que simplemente indica algo que está más allá de la física.

La respuesta a la primera cuestión puede resumirse en la de Bohr a Einstein. A la *boutade* de éste («Dios no puede estar jugando a los dados»), Bohr opuso otra: «Deja de decirle a Dios lo que tiene que hacer». De otra manera: la naturaleza no tiene necesariamente que comportarse como le gustaría a Einstein. La respuesta a la segunda cuestión, en su forma extrema, es la dada también por Bohr. Los aparatos de medida son macroscópicos; constan por tanto de infinidad de partículas (del orden de 10^{23}). Por tanto, las fluctuaciones probabilísticas se cancelan casi exactamente en ellas y podemos, con una gran aproximación, olvidarnos de dichas fluctuaciones y tratarlos como objetos plenamente deterministas con un error despreciable (en la vigesimoséptima decimal, típicamente). Cuando las fluctuaciones no se cancelan se le aplica el formalismo cuántico y se *busca* un aparato de medida en el que sí se cancelen.

Incluso los más violentos detractores de la M. C. admiten que ambas respuestas resuelven el problema a nivel pragmático: utilizándolas se puede predecir el comportamiento de la materia a escala microscópica con gran precisión (en algunos casos hasta con nueve decimales) en acuerdo aplastante con la experiencia. La cuestión no es de «éxito», sino de principios. Antes de pasar a analizarla, sin embargo, es conveniente centrar el problema en relación a otros similares.

3. Las fronteras del conocimiento

Newton comparó la tarea del científico a la de un niño que recogiese conchas a la orilla del mar, queriendo así poner de manifiesto la pequeñez de los conocimientos que la nascente ciencia iba adquiriendo en comparación con el aparentemente ilimitado mundo que quedaba por explorar. A pesar de su indudable modestia, este punto de vista tiene algo de presuntuoso: tanto Newton como toda la ciencia posterior hasta el siglo actual ignoraba la posibilidad de que existieran barreras naturales a la acumulación de saber. Por otra parte, tanto Galileo o Newton como sus seguidores partían de un principio francamente optimista, a saber, la compatibilidad de la mente humana con el universo exterior. Unos ejemplos aclararán quizá lo dicho.

La geometría, como estudio de las propiedades del espacio real, se basaba, desde Euclides hasta Riemann, en unos postulados que se consideraban evidentes por sí mismos. La expresión más clara de esta actitud viene dada por la filosofía de Kant que considera los conceptos de espacio y tiempo como dados apriorísticamente. Es curioso que Kant, que pretendía haber entendido a Hume, no se percatara de lo sorprendente que era el que algo dado *a priori* a la mente humana coincidiera con unas propiedades medibles del espacio objetivo. Por ejemplo, según Kant (¡y Euclides!) es evidente que dos paralelas, definidas como dos rectas que forman un ángulo de 90° con una tercera no se cortan. Experimentalmente, parece (parecía) que esto, efectivamente, era así. Hoy, por supuesto, sabemos que ambas hipótesis son falsas: los postulados de Euclides no son algo apriorístico, sino que son meras abstracciones de las experiencias que el ser humano acumula de sus manipulaciones de distancias y movimientos desde su infancia. Y no sólo estos postulados, en especial el de las paralelas no son apriorísticos, sino que tampoco son ciertos experimentalmente sino de una forma aproximada. Desde la relatividad general sabemos que dos paralelas a veces se cortan, y a veces no. Unos seres que vivieran en las cercanías de una estrella de gran masa, más aún en un agujero negro, hubieran comenzado por considerar «evidentes por sí mismas» unas geometrías cuyo parecido con la de Euclides sería inexistente: y la idea Kantiana del tiempo tampoco saldría mejor parada.

Sin embargo, parece que aún podemos salvar la situación: es posible desarrollar un instrumento matemático para tratar el espacio curvo, y el tiempo no-absoluto, que la experiencia nos indica ser las que corresponden al universo real: todavía podemos repetir la frase de Einstein citada al principio y maravillarnos de que el cosmos sea comprensible. Aparentemente, ya que no la geometría, al menos nuestra lógica sí que podría tener un carácter «evidente» por sí mismo», «apriorístico», y, además, ser la misma que la del universo.

Desgraciada, o afortunadamente, esto no es así. Hay una evidencia aplastante de que la lógica no es más apriorística que los postulados de Euclides, y que tampoco nuestra lógica coincide exactamente con la de la naturaleza. En este apartado voy a explicar brevemente una de las razones por las que esto es así; en el próximo veremos la que se relaciona más directamente con nuestro tema.

En primer lugar, se han desarrollado en el siglo actual lógicas no convencionales; por ejemplo, lógicas polivalentes que no respetan la ley del *tertio excluso*; y se ha demostrado que son tan coherentes como la lógica ordinaria. Esto, por supuesto, implica que si la mente humana ha escogido la lógica «convencional» se debe simplemente a que es la más apropiada para tratar con el mundo objetivo: no a que sea la única posible. Al igual que un habitante de un agujero negro hubiese aceptado como geometría intuitiva una no-Euclidea, es posible imaginar un universo en el que lo natural fuese una lógica no-Aristotélica. Sabemos que en nuestro universo (como ya se comentó) la geometría es no-Euclidea: en el próximo apartado veremos que tampoco la lógica es Aristotélica.

4. La lógica de la mecánica cuántica

Dije antes que aquí iba a examinar el más poderoso motivo por el que es necesario abandonar la noción de que la lógica es algo absoluto y la razón por la que tenemos que admitir que la que intuitivamente nos parece correcta coincide con la del universo sólo de forma aproximada. El motivo es, por supuesto, que los objetos microscópicos obedecen la lógica de la mecánica cuántica; lógica que es radicalmente distinta e irreducible a la nuestra. Vaya por delante mi opinión de que tal es la razón de las aparentes paradojas que algunos físicos han creído (y siguen creyendo) encontrar en la M. C., y el desasosiego que ésta les produce. Como dice Elton, cuando los niños intentamos introducir nuestros macroscópicos dedos en nuestras macroscópicas bocas, el dedo entra o no entra; no tenemos ninguna experiencia intuitiva de lo que sería una situación cuántica de interferencia entre «dedo entra» y «dedo no entra».

A la luz de esta discusión, y de la del apartado precedente, podemos reexaminar los dos primeros de la M. C. descritos en el apartado segundo; comenzando por el último, ya que, como hemos expresado antes, es en mi opinión el más sencillo de «resolver».

El famoso «problema de la medida», que ya he citado, se plantea ahora de forma más simplificada. Nuestra «lógica»

no coincide con la del universo, a escala macroscópica. Para poder, sin embargo, aplicar nuestros esquemas mentales, nos es necesario utilizar aparatos de medida macroscópicos para los que las fluctuaciones cuánticas sean suficientemente pequeñas como para poderlas despreciar. Así, decimos «hemos encontrado el electrón en el punto x_1 », lo que contradice la regla básica de la M. C., que dice que sólo hay probabilidades. En puridad, deberíamos describir el resultado del experimento diciendo que «la función de onda de nuestro aparato de medida es φ_M ». Tal descripción sería, por lo menos en principio, posible; pero en la práctica es: A) Inutilizable, ya que las funciones de onda de un sistema macroscópico son extraordinariamente complejas, y B) Superfluo, puesto que —como repetidas veces se ha mencionado— el error cometido al utilizar un lenguaje clásico para objetos macroscópicos es mucho menor que la precisión de cualquier aparato de medida existente o imaginable hoy en día.

Más serio, en mi opinión, es el problema de la interpretación probabilística de la *realidad* cuántica. Aquí no tratamos de si es o no cómodo utilizar conceptos clásicos, digamos la lógica Aristotélica, para entes que sólo la obedecen aproximadamente; el problema aparece en su crudeza cuando nos planteamos seriamente qué quiere decir la frase «el suceso A tiene una probabilidad de ocurrir de (pongamos por caso) un 50 por 100». El cálculo de probabilidades se entiende bien referido a sucesos que se encuentran en el futuro, y como medida de nuestra ignorancia. Si yo compro 50 billetes de lotería para el sorteo del próximo jueves, y hay 100 números distintos, tengo una probabilidad del 50 por 100 de que el jueves me toque. Lo que es más difícil de comprender es que, el viernes, y el sábado, y todo el tiempo mientras no lea la lista de los premios, siga teniendo la misma probabilidad. Aún peor, si una vez jugué y me tocó, y repito *exactamente* todo —mismo número, mismo bombo, misma ordenación de las bolas en el bombo, etc.—, si las bolas fueran cuánticas no podría decir que me iba a volver a tocar: de nuevo tendría simplemente un 50 por 100 de probabilidades. Pero esto no acaba aquí. Si un suceso tiene el 50 por 100 de probabilidades de ocurrir, esto quiere decir que jugando muchas veces a la lotería (por seguir con el ejemplo anterior) me tocará, más o menos, la mitad de las veces. Pero nada en la teoría de probabilidades se opone a que exista una racha de suerte, y me toque todas las veces

que juegue. Experimentalmente, si uno repite, digamos, 10.000 veces el experimento, no se encuentran casos en los que «el suceso A» se produzca más de un 60 por 100, ni menos de un 40 por 100, y si se repite un millón de veces, estas cifras se convierten en 51 y 49 por 100. *Pero es imposible hacer una predicción cuantitativa* de cuántas veces hay que repetir un experimento para una desviación dada del resultado ideal del 50 por 100.

Se comprende que esta situación cause profundo malestar a muchos físicos; la frase de Einstein «un Dios jugando a los dados es demasiado ateísmo» adquiere su verdadero y profundo significado, y no sorprende que se intente ir, más allá de la M. C., a un esquema menos aleatorio.

Una posible solución fue propuesta por el propio Einstein; supuso que las partículas elementales (p. ej., los electrones) tienen en realidad una estructura muy compleja que ignoramos; es debido a esta ignorancia que sólo hablamos de probabilidades, y, si conociéramos en detalle tal estructura, podríamos calcular exactamente si el electrón lo vamos a encontrar en el punto x_1 o en el x_2 (así es como funciona la teoría de probabilidades en la mecánica clásica, y es por esto que no produce particular malestar). Esto es lo que se llama una teoría de «variables ocultas»; desgraciadamente (o afortunadamente, según el punto de vista) todas las teorías de variables ocultas construidas hasta la fecha se han demostrado incompatibles con la experiencia y es bastante posible que no pueda existir una tal teoría.

Hay otras soluciones más fantásticas. Por ejemplo, se ha propuesto la existencia de una infinitud de universos que no interaccionan entre sí; todos los estados posibles son reales en alguno de estos universos de manera que el concepto de probabilidad desaparece. Esta explicación es compatible con la evidencia experimental; lo malo de ella es que no explica nada. Tiene exactamente las mismas predicciones que la M. C. ortodoxa, y el postulado de los infinitos universos es inverificable, ya que, puesto que son inconexos, ninguna señal puede pasar del uno al otro. En mi opinión, la navaja de Occam es suficiente para relegar tales esquemas a la categoría de *divertimenti*.

Aún más fantástica es la propuesta de Hoyle. Supongamos que escribimos un mensaje (por ejemplo, el contenido de este artículo) en lenguaje Morse. Obtendremos una sucesión de

puntos y rayas que, para quien no conozca Morse, aparecerán ordenadas al azar. La hipótesis de Hoyle es que, justamente, el aparente azar de los sucesos cuánticos encubre un mensaje enviado desde el futuro (¡) por una superinteligencia. Teniendo en cuenta que Hoyle, además de un gran físico es un divertido autor de ciencia ficción, quizá sea más apropiado clasificar su propuesta como parte de su última actividad.

Finalmente, tenemos la «explicación» que yo creo tiene más posibilidades de ser correcta: el concepto de probabilidad cuántica es irreducible a nuestra lógica humana. Así como es imposible de describir totalmente un espacio curvo (como el que sabemos que existe en la naturaleza) en términos del espacio euclídeo en el que se mueve nuestra intuición, pueden existir conceptos de la lógica del universo no reducibles a la nuestra. Podemos inventar una «lógica» especialmente para ellos: y el formulismo matemático de la M. C. no es otra cosa. Pero los conceptos en sí son distintos de los nuestros y un intento de precisarlos en exceso está, muy probablemente, condenado al fracaso.

5. Conclusión

Una gran clarificación de las estructuras de la lógica llegó en el siglo actual estudiando las paradojas lógicas, esto es, proposiciones incompatibles con ellas mismas (el más famoso ejemplo es el del barbero de Königsberg, «el hombre que afeita a todos aquellos que no se afeitan a sí mismos»). Las paradojas de la mecánica cuántica son de un tipo muy distinto; no hay nada en la M. C. contradictorio consigo misma. La propia teoría afirma que hay cosas del universo microscópico que, intrínsecamente, no se pueden conocer; lo más que podemos es asignar probabilidades. Hay otras propiedades que sí pueden calcularse (y medirse) con tanta exactitud como deseamos. El acuerdo entre la teoría y la experiencia es impresionante. En algunos casos, como el del momento magnético del electrón (un fenómeno puramente cuántico), este acuerdo llega a nueve cifras decimales exactas. ¿Podemos ahora concluir que no hay razones para la insatisfacción que algunos físicos experimentan frente a esta teoría? Es un hecho que,

como ya se ha dicho, hay personas (científicos muy competentes) que no se contentan con admitir que hemos llegado a los límites de la comprensión humana, donde (parafraseando a Einstein) «el universo deja de ser comprensible» o, como he explicado, su lógica deja de coincidir con la nuestra, y que creen que acabará por encontrarse una nueva teoría, más fundamental que la M. C., y libre de sus «paradojas». En mi opinión, esto es una cuestión de actitud psicológica; porque hay otros muchos físicos que creemos que lo divertido de la ciencia es que permite descubrir cosas nuevas e insospechadas. Y nos parece no insatisfactorio, sino emocionante, el que se haya encontrado que el universo obedece a una lógica distinta y no reducible a la nuestra.