

Física cuántica y orden racional

Miguel Ferrero¹, David Salgado y José L. Sánchez-Gómez²

¹ *Departamento de Física, Universidad de Oviedo, España*

² *Departamento de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid, España*

Introducción

El concepto de racionalidad es una de las ideas que más impregnan nuestras construcciones lingüísticas. Es además un problema recurrente, no solo en la historia de la filosofía, sino también en nuestra vida cotidiana. Hablamos, por ejemplo, de tomar “decisiones racionales”, de la “racionalidad o irracionalidad de cierta conducta”, de que algo es o no es “lógico”, en el sentido de racional, etcétera. Así que la pregunta es: Cuando usamos la palabra racionalidad, ¿qué es exactamente lo que se quiere decir? A modo de ejemplo: ¿Es un concepto claro y distinto? ¿Podemos remontarnos a sus orígenes? ¿Es algo que está espacialmente situado en algún lugar y si es así, dónde? ¿Es una cualidad intrínseca de los seres humanos y que por lo tanto está “en nuestro interior”, en nuestro cerebro, para ser más específicos? ¿Está, por el contrario, fuera de nosotros, digamos, en las “cosas mismas” que no pueden componerse de cualquier manera? ¿Debemos, más bien, situarlo en nuestra conducta, es decir, en las interacciones con otros seres humanos y cuerpos materiales? ¿O quizás debemos situarlo en la estructura social, en nuestras “instituciones”?

El concepto se muestra tan complejo que no parece que pueda ser comprendido si nos limitamos sólo a una de las posibilidades mencionadas. Una combinación de todas ellas dejará borrosa su definición, pero pensamos que esta opción es considerablemente mejor que seleccionar un único enfoque. Enfrentados a una tarea que sin duda nos desborda, nos limitaremos a un campo concreto para tratar así de entender dentro de este campo qué es lo que la racionalidad puede significar. Nuestros límites estarán delimitados por un discurso estrictamente científico: el de la física en general y el de la física cuántica en particular. Esta elección no es arbitraria. Como es bien sabido, la física cuántica se considera hoy día, junto con la teoría de la relatividad, la teoría básica del universo físico. Sin embargo, es la teoría que al mismo tiempo (y podríamos añadir que sorprendentemente) predice unos resultados experimentales que nos dejan por completo pasmados, desconcertados incluso, cuando los consideramos desde un punto de vista “racional”. Por lo tanto, nuestra elección se basa en la hipótesis de que la física cuántica podría proporcio-

arnos importantes indicios relativos a lo que el concepto de racionalidad pueda significar. Más adelante introduciremos un par de ejemplos tomados de la física cuántica que explicarán y aclararán mejor lo que acabamos de decir. En cualquier caso, pensamos que aunque los resultados que vamos a exponer se han alcanzado teniendo in mente la física cuántica y sus recientes desarrollos, son lo bastante amplios como para ser extendidos y aplicados a otros campos del conocimiento.

Primera aproximación al concepto de racionalidad

La primera idea de racionalidad que nosotros conocemos fue articulada por Aristóteles en la bien conocida sentencia: “el hombre es un animal racional”. No es nuestra intención hacer aquí una digresión erudita sobre lo que Aristóteles quiso decir con esa expresión. Está por completo fuera de nuestra competencia. No obstante, permítanos decir brevemente cuál es nuestra opinión acerca de ella. Para empezar, parece que esa frase no puede agotar en su contenido el concepto de racionalidad. Por un lado, parece indicar que hay animales racionales, los hombres, y hablando de Aristóteles no es aventurado suponer que ello se debe a que podemos construir silogismos. Por otro, sugiere que todos los demás animales son irracionales, porque no pueden hacer silogismos. Sin embargo, hay contraejemplos. Uno solo bastará. Parece que hoy día está bien documentado cómo se comporta un perro de caza que persigue a una liebre cuando llega a un cruce de senderos con tres posibles salidas alternativas. Hay casos en los que el perro husmea el primer sendero, después el segundo, e inmediatamente sale zumbando por el tercero. Su comportamiento es, en este caso, completamente racional en el sentido de que hace, presumiblemente con su cerebro, el mismo silogismo, la misma deducción que un hombre haría: la liebre no ha ido por este sendero, tampoco por este otro, por consiguiente ha tenido que ir por el que queda. Si el significado de la sentencia de Aristóteles es que los humanos son animales racionales porque pueden “razonar” y si, como hemos supuesto, esto implica que pueden hacer silogismos, entonces parece que ciertos animales que no son hombres son también seres racionales y, en consecuencia, la frase citada es equívoca o al menos incompleta.

Obsérvese que desde el punto de vista de Aristóteles, “la racionalidad” está espacialmente situada dentro del cuerpo humano, quizás en el corazón (como pensaba el propio Aristóteles), o en el alma (más tarde), o en la mente (después, en nuestra historia) o, ya más recientemente, en el cerebro. La localización es independiente de la definición aristotélica e igualmente válida para humanos y para animales que poseen un cerebro. Pero, ¿qué ocurre con aquellos seres que no tienen cerebro? ¿Pueden una ameba o un virus ser racionales? Si nos atenemos a lo que hemos dicho con anterioridad, la respuesta sería un simple no. Pero esto nos

deja también insatisfechos: ¿Qué significa decir que un virus es irracional?

Al contrario, hay seres humanos que, aún estando en posesión de un cerebro fisiológicamente sin dañar, proceden de una manera irracional. Por ejemplo, aquellos que atentan contra la supervivencia, amenazando su propia vida o la vida de los demás. Aquí ya no estamos hablando exclusivamente del cerebro y/o de sus conexiones sinápticas. Estamos hablando de algo relacionado con las normas, con reglas y leyes diseñadas para mantener la estabilidad social (y personal), con la conducta, para ser más específicos. Desde esta perspectiva, la racionalidad no está sólo “dentro”, sino también “fuera” y por consiguiente puede pensarse que un virus tiene un comportamiento racional, en términos de supervivencia y propagación [1]. Por el contrario, un ser humano dotado de un cerebro sano podría hacer cosas que, de acuerdo a las reglas sociales de comportamiento, den lugar a una inferencia, deducción o conducta irracional. Aún más, lo que podría ser racional de acuerdo a una determinada estructura social, digamos en una tribu del Amazonas, podría revelarse como irracional en el contexto de una sociedad diferente, y ello sin afectar en modo alguno ni tener consecuencia sobre las conexiones neuronales o el cerebro de esos individuos. La racionalidad en este caso se relaciona más con la conducta que adoptamos de acuerdo a normas sociales específicas.

Esta segunda idea de racionalidad tampoco agota el concepto y por esta razón es también incompleto. Además, la unión de las dos ideas de racionalidad expuestas es insuficiente o parcial, dado que no nos permite discernir los orígenes de este concepto. En el primer caso, procedería de la idea de Dios, mientras que, en el segundo, la definición de racionalidad depende por completo de las reglas sociales de una comunidad concreta. Además, si la racionalidad se relaciona sólo con el cerebro o con el comportamiento, ¿tiene sentido, por ejemplo, hablar de la racionalidad de las ciencias? Sin embargo, se acepta casi sin discusión que el discurso científico alcanza, precisamente, el punto más alto de la racionalidad. Que las ciencias son el paradigma de la racionalidad. Si limitamos nuestros argumentos al caso de la física, parece obvio que si la física es una ciencia racional, esa racionalidad no reside en el cerebro de Newton, ni en el de Einstein. Tampoco en su comportamiento. Esos físicos, como otros muchos que también contribuyeron a la construcción de esta ciencia, ya no están entre nosotros. La racionalidad de la física no puede estar en el cerebro de los físicos que hoy viven ni en su comportamiento. Y si no está localizada en el cerebro de los físicos que hoy viven, ni en su comportamiento (aunque debe relacionarse con esos dos aspectos, según hemos tratado de exponer), ¿dónde reside? La única respuesta “razonable” parece la que la sitúa en la estructura misma de la física, es decir, en la capacidad que sus teorías tienen para construir nuevos elementos de la realidad a partir de otros elementos ya dados, y en sus instituciones. Entendiendo por institucio-

nes los artículos, libros, laboratorios, bibliotecas, universidades, sociedades de física, etcétera, que forman parte de la física¹. Para entender lo que queremos decir con nuevos elementos de la realidad, una breve lista de ejemplos será suficiente: supernovas, ordenadores, aparatos de televisión, transistores, cuásares, agujeros negros, condensados de Bose-Einstein, esta hoja de papel, una rueda, teléfonos móviles, microondas, etcétera.

La Racionalidad en Física

Para ser más específicos respecto al concepto de racionalidad en física, necesitamos introducir una nueva hipótesis, implícita ya en lo que hemos dicho. La premisa es que hay una realidad material, de la cual somos parte. Esta realidad material compone el universo y es con ella y desde dentro, porque somos materia autoorganizada, con lo que hemos operado históricamente, primero con nuestras manos y después con nuestros instrumentos tecnológicos. No mantenemos que esa hipótesis pueda ser demostrada, porque bastaría decir que todo ocurre en la mente de Dios, según afirmó Berkeley hace ya bastante tiempo, o en la “realidad virtual de un superordenador”, como podría decirse hoy. Pero que no pueda ser demostrada no significa que no haya poderosas razones o argumentos para introducirla. El primero es que es el modo más sencillo de entender la experiencia humana, y en este sentido es “la hipótesis más verificada”, aunque nunca pueda ser definitivamente verificada. La segunda es que es algo más que un consenso lingüístico entre humanos. Como ya hemos explicado en el caso del perro de caza, los animales tienen alguna experiencia paralela a la nuestra en relación con la realidad material. La tercera es que la transformación que hacemos de ella es de facto una prueba de su existencia (véase algo más abajo qué significa esta transformación al construir nuevos elementos de realidad). Aceptémosla, pues, como una hipótesis preliminar. Es importante subrayar en este momento que esta hipótesis no implica en modo alguno que la realidad material pueda ser entendida como algo externo a nosotros y “terminada” en sus detalles más íntimos. Si ese fuese el caso, deberíamos limitarnos a “reflejarla” en nuestras teorías (inductivismo) [2], o a captarla y adecuarnos a ella cada vez mejor con nuestras conjeturas (falsacionismo) [3], etcétera. Este no es nuestro enfoque². Nótese que el énfasis de la observación anterior está puesto en la palabra “terminado”. Permítasenos explicar este punto con algo más de detalle. Hablamos de realidad material. Pero una cosa es la realidad material y otra, diferente, es la realidad física. Si las identificamos, corremos el riesgo de alcanzar, como hizo Einstein, lo que parece ser una conclusión errónea (considerada desde un punto de vista

¹ Utilizamos el término “institución” en sentido general y no técnico. Un tratamiento riguroso de este concepto sobrepasa los límites de este artículo y de nuestra propia competencia.

² El lector interesado puede consultar las referencias [4] a [7] citadas al final de este artículo.

experimental): existen elementos de realidad material. Este es otro de sus legados. Pero lo cierto es que no sabemos lo que es la realidad material. Si lo supiésemos, nuestra tarea como científicos habría terminado. El problema de la realidad física, del realismo, según anticipamos ya, viene después de la realidad material. La realidad física es una realidad material “temporalmente terminada”, una construcción social históricamente dependiente hecha (sobre todo, pero no sólo) por las ciencias. Esto es, susceptible de cambios con el tiempo. Es el resultado de nuestras decisiones, de la actividad humana sobre la realidad material, el resultado de su mutua interacción. Permítansenos aclarar brevemente este aspecto para ver cómo este enfoque permite arrojar cierta luz sobre el concepto de racionalidad. Si el mundo es materia, entonces es plausible pensar que la única cosa que los humanos pueden hacer es unir y separar “pedazos” de materia. Parece simple. Sin embargo, esto implica que para poder hacerlo tenemos que ser bípedos y tener libres las manos para manipularlos. Desde este punto de vista, el concepto de racionalidad toma una nueva perspectiva histórica, puesto que puede reintroducirse mirando a sus orígenes. La racionalidad debería haber estado precedida por un periodo “irracional”, una época en la que la racionalidad sólo cabe pensarla como relacionada con la supervivencia y la propagación de los genes [1], de las diferentes formas de vida. Sólo después, cuando nos pusimos de pie y liberamos nuestras manos, el concepto de racionalidad empezó a dar sus primeros pasos. Comenzamos a sostener trozos de materia, a manipularlos literalmente (huesos y piedras como armas, por ejemplo). Para resumir, empezamos a hacer operaciones materiales con la realidad material que nos envolvía. Fue esta manipulación de pedazos de materia dirigida a la supervivencia la que, en el devenir del tiempo, hace quizás cientos de miles de años, dio lugar a lo que ahora denominamos “objetos materiales”. Y fue también a través de esta manipulación de objetos materiales como establecimos ciertas relaciones recurrentes, que pasaron a ser “objetivas”. Y lo que ocurrió después fue que esas relaciones se utilizaron para construir nuevos objetos materiales y nuevas relaciones, y así sucesivamente. La transformación fue entonces: de animales apoyados en cuatro extremidades, pasamos a bípedos. Una realidad material indefinida, dio lugar a trozos de materia, después a objetos materiales y por último a relaciones entre objetos materiales. Este proceso que nos ha acompañado desde entonces introdujo lo que cabe definir como orden en la realidad material. Nuestra tesis aquí es que lo que denominamos racionalidad debe estar en el centro de este imperecedero proceso de ordenación. Esos son sus humildes orígenes.

Pongamos un ejemplo relativo a lo que el párrafo anterior sugiere, relacionado en este caso más con el campo de las matemáticas. Seguramente es cierto que desde los albores de la humanidad se construyeron triángulos “materiales”, en el modo apuntado aquí, en incontables ocasiones y en relación con nuestra supervivencia. Muchos y distintos triángulos materiales durante decenas de miles de años antes de que el

concepto geométrico de “triángulo” fuese introducido. Por ejemplo, en la construcción de refugios que nos protegiesen de ataques, peligros y calamidades; de lugares inaccesibles a un enemigo; de chozas; etcétera. Una y otra vez, de modo recurrente, se presentaría esa figura de tres lados. Previsiblemente, este proceso precedió a la geometría. De nuevo, un origen bien humilde. Pero una vez que los “triángulos” fueron generados por la actividad humana, pudimos trabajar con ellos, por ejemplo, clasificándolos y estudiando sus propiedades. Fue en este largo desarrollo, cuando por un lado teníamos ya los triángulos rectángulos y por otro los números naturales y racionales (y obsérvese que aquí racional procede de ratio, de cociente entre los naturales), cuando percibimos que era imposible hallar un cociente, un número racional, para expresar la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos lados tuviesen longitud unidad. La relación era “irracional” y se introdujeron los números reales, es decir, los construimos en ese proceso de ordenación. Nos referimos a los números racionales como aquellos que se ajustan a un orden material realizable. Irracional es, por otro lado, una construcción teórica “racional” que no se ajusta a ningún orden material realizable. Cuando la relación entre objetos materiales es racional, decimos que los objetos son conmensurables.

Pongamos ahora otro ejemplo, algo desagradable, pero perteneciente al ámbito de la física, de cómo este proceso de ordenación construye nuevos elementos de la realidad física. Pensemos en una bomba atómica. Para construirla una es necesario primero enriquecer el uranio. Con esto queremos decir que, a través de un complicado procedimiento que requiere mucha teoría y desarrollo tecnológico, separamos el uranio de otros elementos que están junto con él en la naturaleza. Cuando este trabajo ha terminado, hay que preparar dos piezas separadas de este uranio enriquecido, cada una de las cuales debe tener una masa previamente calculada, inferior al valor crítico. Después, hay que colocar cada pieza en un dispositivo contenedor, construido de modo similar, en el que se colocan también otros dispositivos cuya misión es juntar las dos masas en un preciso momento, etcétera. El resultado último de un gran número de operaciones materiales con objetos, que en resumidas cuentas se reducen a juntar y separa trozos de materia de una manera muy concreta, es una bomba atómica.

Podríamos hacer una descripción parecida de un aparato de televisión, un ordenador, un transistor, un circuito integrado, un carro, cualquier cosa. Todos ellos son el resultado final de un conjunto más o menos complejo de operaciones materiales a través de las cuales componemos la realidad material. Esto es, construimos nuevos objetos materiales a partir de otros y con ello introducimos orden en la realidad material.

Como ya hemos dicho, nuestra tesis es que la racionalidad está conectada con nosotros, con el proceso de ordenación y con la estructura que este orden ha producido. En cierto sentido, la racionalidad se relaciona con el hecho de que la realidad mate-

rial puede ser descompuesta en piezas y vuelta a componer de nuevo de modo diferente, desde dentro. Este es un proceso que produce objetos materiales y relaciones a la vez y de manera recurrente, introduciendo orden en la realidad material. Incluso si pudiésemos pensar en un universo distinto, con propiedades caóticas y arbitrarias vistas desde nuestro punto de vista actual, nosotros, como materia autoorganizada, lo percibiríamos como ordenado. Es decir, como racional, porque el caos de la materia sería también nuestro propio caos. Esta es la razón por la cual percibimos que los objetos materiales parecen tener su propia legalidad, que no todo es conmensurable con todo y que hay, realmente, distintos e independientes niveles de organización [8]. Algunas de las relaciones que pertenecen a un cierto nivel pueden ser clasificadas y compendiadas en un cierto algoritmo. Este algoritmo es capaz de reproducir todas las que pertenecen a esa clase, y esto es lo que denominamos “una ley”.

Si el proceso esbozado en lo que precede es concebible, la racionalidad sólo puede ser un concepto dinámico, en desarrollo, que nos trasciende, cruza todas nuestras actividades y alcanza su punto más álgido en las teorías científicas. Naturalmente, y a través de un bucle de retroalimentación, las teorías científicas nos dicen cómo son “realmente” las cosas materiales, es decir, qué es la realidad física.

Desde esta perspectiva, la racionalidad aparece relacionada con el nivel concreto de organización que el mundo material ha alcanzado en un momento determinado. Si se introducen nuevas relaciones, por ejemplo en la física, el concepto de racionalidad utilizado por esta ciencia debería ser convenientemente adaptado para incluirlas, modificado de acuerdo al nuevo orden establecido. Antes o después, sea el que sea el tiempo que transcurra, esta modificación se extenderá hasta cubrir todos los demás aspectos de nuestra existencia. Esta no es una tarea sencilla. Tenemos un ejemplo precioso de las dificultades que se han de superar en la construcción, durante el pasado siglo, de la Física Cuántica. Para mostrarlas, explicaremos dos aspectos nuevos de la realidad material que no estaban presentes en la física clásica y que por lo tanto parece imposible entender en el marco de la organización que la realidad material había alcanzado al final del siglo anterior, el XIX.

Dos nuevos y sorprendentes aspectos de la realidad material

Los dos aspectos que explicaremos brevemente son los de dualidad y entrelazamiento. El primero fue introducido a comienzos del siglo XX. El segundo, tal y como hoy se “entiende”, a finales del siglo pasado, es decir, hace sólo unos años. El primero se refiere a todas las entidades microscópicas, por ejemplo los fotones³. La en apariencia inocente palabra

³ Adoptamos aquí para desarrollar nuestro argumento lo que se denomina el enfoque ortodoxo. Hay otras alternativas como, por ejemplo, las “ondas vacías” (*empty waves*) o la interpretación de los muchos mundos [9]. Y lo

fotón implica lo siguiente. Hasta el siglo XX, la física utilizaba dos conceptos principales para describir la naturaleza, a saber: partículas y ondas. Una partícula estaba caracterizada por ciertos parámetros como masa y carga, por ejemplo, pero también por estar localizada en un punto concreto del espacio. Cuando una partícula, un electrón digamos, va de un punto a otro, se transporta masa, energía y momento. Por otro lado, una onda no tiene masa, ni carga. Es sólo una condición dinámica que se transmite de una región a otra. Energía y momento en movimiento, que no está situada en un punto preciso del espacio. O sea, que una onda está en distintos puntos del espacio en el mismo instante. Desde que a mediados del siglo XIX se estableciese el electromagnetismo, y después de que distintos experimentos sometiesen a verificación algunas de sus predicciones, se consideró que la luz estaba compuesta por ondas electromagnéticas. Era, entonces y ahora, un hecho experimental bien establecido. Pero de pronto, a comienzos del siglo XX, la imagen de la luz como ondas entró en una difícil crisis y la razón se denominó, más tarde, fotones. La idea de que la luz podía ser considerada como un flujo de partículas, los fotones, fue introducida por Einstein en 1905, en su conocido artículo sobre el efecto fotoeléctrico. Años más tarde, ese trabajo fue recompensado con un merecido Premio Nobel. El carácter corpuscular del fotón, jugó un papel muy significativo en la historia de la física cuántica, dado que fue el Efecto Compton (seguido por experimentos muy precisos realizados por Compton, Simon, Wilson, Bothe, Geiger and Blass) el que confirmó cuantitativamente la hipótesis corpuscular de Einstein. El *Efecto Compton* hizo más accesible el camino al nuevo formalismo mecánico cuántico de los años 1925-26. Así que el carácter corpuscular puede ser considerado también un hecho experimental bien establecido y hoy día tenemos una gran cantidad de dispositivos funcionando perfectamente por todo el mundo que se basan en el efecto fotoeléctrico. Al mismo tiempo, este hecho establece lo que se denominó “la naturaleza dual” de la radiación electromagnética, es decir, la idea de que esa radiación no es ni un fenómeno ondulatorio, ni un flujo de partículas, sino que se comporta como una onda bajo ciertas circunstancias y como una partícula en otras. Esta naturaleza dual fue extendida con éxito por Louis de Broglie, en 1923, a todas las entidades físicas y hoy es algo aceptado por la comunidad científica en general. A modo de ejemplo, la partícula que llamamos electrón tiene una masa de aproximadamente 9.1×10^{-31} kg. y una carga eléctrica aproximada de 1.6×10^{-19} culombios, pero puede ser también una onda, como demuestran cada uno de los microscopios electrónicos que hay en muchos hospitales por todo el mundo y que funcionan sobre la base de esta naturaleza dual de los electrones.

Esta naturaleza dual es, en sí misma, un asunto sorprendente, y aquí la palabra sorprendente debe entenderse desde la perspecti-

hacemos para no introducir entidades que, hoy por hoy, están más allá de las capacidades humanas.

va de una “racionalidad clásica”. Como hemos dicho, en física una partícula es, por definición, algo que tiene una localización concreta: tiene que estar en cierto instante en un punto definido del espacio. Pero una onda es, también por definición, algo que está situado a la vez en diferentes puntos del espacio. ¿Puede una pieza minúscula de materia, digamos un electrón, tener una posición concreta pero estar situada en posiciones diferentes? Los dos conceptos fueron introducidos para entender fenómenos distintos, irreducibles lógicamente el uno al otro. Pero ahora tenemos una y la misma “substancia”, digamos, un electrón, a la que debemos adscribir esas dos cualidades para ser cabalmente entendido. En la interpretación ortodoxa se dice que la radiación electromagnética tiene una naturaleza dual, significando que puede ser bien una onda, bien una partícula. ¿Cómo puede ser esto “racionalmente” posible?

El segundo aspecto es el entrelazamiento. El entrelazamiento, tal y como se entiende hoy fue introducido por Einstein, Podolsky y Rosen (EPR en la literatura) en 1935 [10] en un famosísimo artículo publicado en *Physical Review*. Después de un largo proceso de desarrollo que ahora no podemos exponer, “explotó” en los años 90 del pasado siglo como el recurso básico para el procesado de la información cuántica, es decir, como el concepto central en Teoría Cuántica de la Información. Este es un campo nuevo y emergente de la Física Cuántica que tiene un notable potencial para cambiar nuestras sociedades de la información en el próximo siglo (el XXII). El entrelazamiento es un concepto formal que se deriva de dos aspectos fundamentales del formalismo cuántico. A saber: el principio de superposición y la composición tensorial del espacio de estados conjunto de varios subsistemas. Intuitivamente, el entrelazamiento es la explicación de las correlaciones cuánticas. Adoptaremos aquí, como se desprende de todos los resultados obtenidos de los experimentos realizados en los últimos 30 años al respecto [11], la posición de que las correlaciones cuánticas simplemente ocurren. *Existen como un nuevo aspecto de la realidad material*. Una vez más, la realidad material se manifiesta mucho más *compleja* de lo que se había pensado, como ha sido siempre el caso.

Permítasenos explicar esto con un poco más de detalle. En el mundo hay correlaciones por todos los sitios. En la física clásica, en nuestras sociedades, en nuestras relaciones, por doquier. Precisamente, esa es una de las razones por las que puede introducirse orden. Así que, ¿qué tienen de particular las correlaciones cuánticas? ¿Es que, acaso, son diferentes de todas las demás? Y la respuesta a estas preguntas es: *sí, son diferentes*. Las correlaciones cuánticas son más fuertes que las clásicas y no pueden ser imitadas por ninguna correlación clásica. Esto es lo que dice el notabilísimo teorema de Bell. Situados en un plano filosófico, podríamos decir que las correlaciones clásicas pueden reducirse al nivel conceptual de causa y efecto. Esto es, pueden entenderse sobre la base de causas comunes (en el pasado) y/o comunicación oculta. Pongamos un ejemplo. Supongamos que dos amigos, Alicia en Madrid y

Benito en Milán tiran, cada uno de ellos, al aire cien veces una moneda cualquiera de un euro para ver si sale cara o cruz. Es un experimento muy sencillo. ¿Cuáles son los resultados previsibles? Pues que Alicia obtendrá cara en aproximadamente la mitad de las ocasiones (lo mismo le ocurrirá a Benito) y que en el 25% de los casos los dos obtendrán a la vez cara y en otro 25%, cruz. Y ¿qué pensaríamos si obtuviesen *siempre*, en éste y en otros muchos experimentos realizados de la misma manera, el mismo resultado (cara-cara o cruz-cruz)? Nadie se creería que esto puede ocurrir por una implausible coincidencia, por el mero azar. Por el contrario, pensaríamos seriamente, como explicación de las coincidencias persistentes, que tienen algún mecanismo que les permite obtener cara o cruz a voluntad y además en cualquiera de estas dos posibilidades:

- 1º. Han acordado previamente el orden en el cual iban a obtener cara o cruz (*causa común en el pasado*), o bien
- 2º. Tienen algún aparato, que nosotros no vemos, que le dice a uno de ellos el resultado que ha obtenido el otro (*comunicación oculta*).

Cualquier otra alternativa sería “racionalmente” rechazada, lo cual implica que esas correlaciones pueden ser reducidas a las categorías de causa y efecto.

Bien, y ¿qué ocurre con las correlaciones cuánticas? Para resumir, en el caso particular de un experimento similar que tratase de controlar las correlaciones cuánticas de pares máximamente entrelazados, obtendríamos siempre el equivalente a, digamos, cara-cara y cruz-cruz. Sin embargo,

- 1º. Puede resultar asombroso o incluso absurdo, pero el hecho real es que las “monedas cuánticas” utilizadas no tienen cara ni cruz hasta que son observadas, es decir, hasta que son detectadas o registradas. Y
- 2º. No existe comunicación oculta (esta posibilidad ha sido empíricamente excluida y hoy día puede ser considerado con confianza un hecho experimental bien establecido).

Consideradas a la vez, estas dos últimas características implican que para obtener esas correlaciones, lo que hace y obtiene Alicia en Madrid tiene consecuencias instantáneas en Milán: define la correspondiente cara o cruz que no estaba definida hasta ese preciso instante. Por otro lado, y como deja claro el teorema de Bell, no es posible causa alguna común: no existen teorías locales de variables ocultas capaces de reproducir las correlaciones cuánticas.

Para evitar enfrentarse a esta situación, muchas veces se dice que lo que hace Alicia en Madrid no tiene consecuencias instantáneas en Milán, porque Benito no puede saber si Alicia midió o no. Así que él obtiene el 50% de caras y el 50% de cruces y no puede saber, si ella no se lo dice (usando el teléfono, por ejemplo), si midió o no y, en consecuencia, tampoco el resultado [12]. Y es verdad: el formalismo cuántico garantiza que estas correlaciones no pueden utilizarse para enviar señales a velocidad superior a la de la luz. Pero es una verdad

a medias. Seamos claros. En eso hay acuerdo general. Pero la cuestión es que no es eso lo que se discute. Lo que se discute es que si más tarde se encuentran a medio camino, en Marsella, digamos, con sus respectivas anotaciones de cara, cara, cruz, etc., comprobarán que han obtenido siempre el mismo resultado. Y es esta coincidencia absoluta la que se quiere entender y lo que se discute. Que no puedan utilizarla para comunicarse a $v > c$ es ahora secundario. Lo que se desea saber es por qué, cómo es posible que obtengan siempre el mismo resultado cuando justo antes de finalizar “cada lanzamiento” ni siquiera estaban en un estado definido.

La realidad material manifiesta correlaciones cuánticas sin referentes, o para citar a David Mermin [13], sin correlata, sin nada previo que correlacionar (las caras y las cruces no están definidas) en una visión holista: el resultado que obtenemos aquí tiene inevitables consecuencias “instantáneas” allí. Esas correlaciones han sido comprobadas en muchos experimentos distintos y confluyentes⁴, tales como los experimentos de tipo de Bell, los de criptografía cuántica, teleportación, etcétera. Sin duda alguna, estos desarrollos afectarán a la tecnología en el futuro, al igual que la dualidad hizo ya. Pero desde el punto de vista de la racionalidad, plantea nuevas y complicadas dificultades. Es empíricamente adecuado (como demuestran los resultados experimentales); puede ser predicho, pero no puede ser explicado ni “comprendido”, si comprensión significa ser capaces de idear un “mecanismo”, una imagen que esté detrás de las correlaciones entre las propiedades no definidas, un mecanicismo, en fin, que tiene que excluir la causa común en el pasado y la comunicación oculta. El entrelazamiento parece ser así un concepto radicalmente nuevo, como lo es la dualidad, y requerirá nuevas palabras, una nueva forma “racional” de aproximarse a él y una nueva categoría conceptual.

Conclusión

Hemos tratado de demostrar que estos dos aspectos de la realidad material, dualidad y entrelazamiento (correlaciones cuánticas), parecen ser contradictorios o como a veces se dice, cuando se intentan comprender desde una perspectiva clásica, alucinantes o irracionales. Pero los resultados experimentales no pueden ser alucinantes ni irracionales. Si pareciera tal, entonces esto es una indicación de que algo está mal en nuestra aproximación, puede que incluso el concepto mismo de racionalidad.

Una conclusión posible podría ser que el concepto clásico de racionalidad ya no puede abarcar estos nuevos hechos empíricos, esos nuevos resultados experimentales. Si tratamos de mantener sin modificar este marco clásico, nos vemos obligados a decir, por ejemplo en un experimento de doble rendija, que el fotón “sabe siempre de antemano lo que vamos a hacer”

⁴ Para el significado preciso de este término, véanse las referencias [4], [5] y [7].

o, en un experimento de elección retardada [14], que el futuro tiene algún tipo de influencia en el pasado, o frases similares a esas en los otros experimentos ya realizados. Todas estas “paradojas” deberían ser inaceptables. Deberíamos intentar removerlas de la física. Y una posibilidad abierta es pensar que el concepto de racionalidad en la física debería ser concebida como un concepto dinámico que cambia con el orden que la estructura de la física ha introducido en la realidad material en un determinado momento.

Damos las gracias al prof. Emilio Santos (Univ. Cantabria) por su lectura crítica del manuscrito. Este trabajo se ha llevado a cabo con ayuda económica del Ministerio de Educación y Ciencia, proyecto No. FIS2004-01576.

Referencias

- [1] R. DAWKINS. *El gen egoísta*. Salvat Ciencia. Barcelona. (1989).
- [2] A. J. AYER, *The Foundations of Empirical Knowledge*, Macmillan. London (1955).
- [3] K. R. POPPER, *La Lógica del descubrimiento científico*. Tecnos. Madrid. (1962).
- [4] M. FERRERO, *What kind of realism*, in E. Bitsakis and N. Tambakis (eds.), *Determinism in Physics*, Gutenberg, Athens, (1985).
- [5] M. FERRERO, *Física Cuántica y Objetividad*, Arbor **CLXVII**, 659-660, 459-473 (2000).
- [6] M. FERRERO, D. SALGADO AND J. L. SÁNCHEZ-GÓMEZ, *Is the Epistemic View of Quantum Mechanics Incomplete?*, Found. Phys. **34**, 12, 1993-2003 (2004).
- [7] M. FERRERO, *About Science Fashion and Science Fact*, Physics Today **56**, 12. 13-14 (2003).
- [8] M. FERRERO. A propósito de Plantar Cara. *Revista Española de Física* (2003). Véase también, G. F. R. Ellis, Physics and the Real World, *Physics Today* **58**, 7. 49-54 (2005).
- [9] D. DEUTSCH. *La estructura de la realidad*. Anagrama. Barcelona (1999).
- [10] A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN. *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Phys. Rev. **47**, 777-780 (1935).
- [11] Una muestra representativa, podrían ser los siguientes:
J. FREEDMAN AND J. F. CLAUSER, *Phy. Rev. Lett.* **49**, 938-941 (1972); A. ASPECT, P. GRANGIER AND G. ROGER, *Phy. Rev. Lett.* **47**, 460-463 (1981); P. G. KWIAT, K. MATTLE, H. WEINFURTER, A. ZEILINGER, A. V. SERGIENKO AND Y. H. SHIH, *Phy. Rev. Lett.* **75**, 4337, (1995); G. WEIHS, M. RECK, H. WEINFURTER AND A. ZEILINGER, *Phy. Rev. Lett.* **81**, 5039 (1998); N. GISIN AND H. ZBINDEN, *Phy. Lett. A* **264**, 103-107 (1999); M. A. ROWE ET AL., *NATURE* **149**, 791-794 (2001).
- [12] G. BRASSARD AND A. A. METHOT. *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered incomplete? quant-ph/0701001*.
- [13] N. D. MERMIN. What is quantum mechanics trying to tell us? *American Journal of Physics* **66**, 753-767 (1998).
- [14] V. JACQUES, E. WU, F. GROSSHANS, F. TREUSSART, P. GRANGIER, A. ASPECT AND J. F. ROCH. *Experimental realization of Wheeler's delayed-choice Gedanken Experiment. quant-ph/0610241*.