

LA COMPLEMENTARIEDAD: UNA FILOSOFÍA PARA EL SIGLO XXI

Borrador pre-publicación del libro publicado por Programa Editorial, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Colección Ciencias Físicas, Exactas y Naturales (Febrero 2014) ISBN 958-670-282-0

Jairo Roldán Ch.

Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Yoav Ben-Dov

Cohn Institute for the History and Philosophy of Science and Ideas, Tel-Aviv University
Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Germán Guerrero P.

Departamento de Filosofía, Facultad de Humanidades
Universidad del Valle, Cali, Colombia

INTRODUCCIÓN

De manera general se admite que vivimos en un período de profundos cambios conceptuales en muchos dominios. Sea que uno califique este momento como una “crisis dentro de la modernidad” o que prefiera llamarlo sin ambages una “situación postmoderna”, es claro que muchas suposiciones sobre la ciencia, el pilar central del edificio de las ideas de la sociedad moderna, que han prevalecido desde la revolución científica del siglo XVII, están siendo cuestionadas seriamente hoy en día. En particular, tales cuestionamientos se refieren a menudo al estatuto del conocimiento científico y su relación con la realidad.

Un dominio donde surgen de manera muy aguda estas cuestiones es la física cuántica. Se sabe muy bien que la teoría cuántica ha dado lugar a algo que luce como una crisis conceptual persistente. Fuera de la relativamente pequeña comunidad científica que de modo explícito estudia este dominio, muchos sienten que la crisis conceptual en mecánica cuántica de alguna manera está relacionada con problemas más generales de la visión filosófica de nuestra sociedad. Si esta intuición está justificada, es de esperarse entonces que respuestas dadas originalmente a preguntas dentro de este dominio particular puedan tener relevancia en áreas más amplias de la indagación y acción humanas.

Queremos explorar esta posibilidad siguiendo una respuesta particular que ha sido dada a los problemas conceptuales en mecánica cuántica, con la intención expresa de su autor de extenderla a campos mucho más amplios: se trata del enfoque de Niels Bohr, una de las figuras cimeras en el desarrollo de la teoría cuántica. El concepto central de este enfoque fue llamado por él la complementariedad y conlleva una nueva visión de la relación entre el conocimiento humano (codificado en una descripción lingüística) y la realidad. En pocas palabras, la complementariedad es una relación que existe entre descripciones mutuamente excluyentes de la realidad, que son sin embargo todas “verdaderas”. Si esto se acepta, la idea de una única descripción de la realidad, que puede formularse en el lenguaje humano, parece entonces condenada al fracaso. Esto podría tener profundas implicaciones en constructos conceptuales en muchas áreas del pensamiento occidental, que fueron elaborados sobre el supuesto de que tal descripción no solo es posible, sino también quizás accesible. Sin embargo, a diferencia de los deconstructivistas postmodernos que intentan también socavar tales constructos, la complementariedad justifica el uso de un lenguaje rígido en un contexto bien definido.

Lo que se rompe con la propuesta de la complementariedad es una visión del mundo: el mecanicismo, que puede considerarse como una interpretación de la física clásica. La física clásica comprende la dinámica newtoniana y sus formulaciones más generales y abstractas: la mecánica lagrangiana y la hamiltoniana. Incluye también la electrodinámica clásica y la gravitación de Einstein o teoría de la Relatividad General. Para lograr el propósito de presentar las ideas fundamentales de la visión mecanicista y su base científica hemos considerado que basta con una discusión de la mecánica newtoniana en su formulación original. Por ello no se hace una discusión ni de las dinámicas lagrangiana ni hamiltoniana, ni de la electrodinámica ni de la gravitación einsteiniana. No es nuestra pretensión mostrar un desarrollo histórico riguroso desde los presocráticos hasta la física cuántica y los estudios de lo complejo. Si discutimos al comienzo del libro las ideas de Aristóteles ello se

debe a que consideramos que presentar el mecanicismo sin hacer referencia a la cosmovisión aristotélica que con su surgimiento se rompió, dejaría al mecanicismo privado de su contexto en el marco de la evolución de las ideas. En cuanto a la termodinámica y la mecánica estadística, tal como lo discutimos brevemente en el capítulo 8 a propósito de la sugerencia de Bohr sobre una relación de complementariedad entre la dinámica y la termodinámica, tales teorías no puede enmarcarse en el mecanicismo, pues no puede afirmarse que la entropía se reduzca a las interacciones dinámicas de las partes que componen el sistema. Además el uso de la estadística en la mecánica estadística como expresión de nuestra ignorancia presenta problemas para una interpretación en términos de una realidad en sí. La relación entre la mecánica estadística y la complejidad se trata brevemente en el capítulo 9 al presentar el fenómeno de las celdas de Bénard. Profundizar en los aspectos no mecanicistas de la termodinámica y la mecánica estadística excedería sin embargo los límites que hemos impuesto a nuestro libro.

En el libro se quieren presentar las propuestas de extensión de la complementariedad a dominios no sólo diferentes a la mecánica cuántica sino también a la física misma. La ampliación y profundización de tales propuestas son objeto de un programa de investigación cuyos resultados más detallados se irán publicando a medida que se tengan desarrollados con la deseada profundidad y coherencia. Igual reflexión vale para la relación entre complementariedad y complejidad esbozada en el libro.

La primera parte del texto presenta la cosmovisión aristotélica, el surgimiento de la física clásica y la cosmovisión mecanicista.

La segunda parte incluye los fenómenos cuánticos, la teorización cuántica y el carácter de la teoría cuántica.

Es en la tercera y en la cuarta parte del libro donde se analizan el enfoque de Bohr y la complementariedad. Comenzamos con el papel original de ese concepto en el contexto de la mecánica cuántica. Siguiendo las extensiones sugeridas por Bohr, procedemos entonces a su aplicación en áreas no sólo distintas a la física cuántica, como la termodinámica, sino también en campos diferentes a la física, como la biología, la psicología y la moral. Avanzamos luego a dominios no previstos por Bohr donde pensamos que el concepto de complementariedad puede tener relevancia, tales como el reciente campo de investigaciones multidisciplinarias llamadas de modo no muy preciso “estudios de lo complejo” (o, en uno de sus aspectos, estudio del “caos”).

Finalmente, planteamos la cuestión acerca de hasta que punto puede considerarse la complementariedad como una de las herramientas que puede ser útil en la formación de la conciencia conceptual de la sociedad humana en el futuro cercano, explorando lo que puede aportar en la búsqueda de una relación armónica entre diversas áreas de la experiencia humana.

El libro está dirigido a personas de un amplio rango de intereses, sin que se exija un bagaje técnico previo específico.

PRIMERA PARTE: DE ARISTÓTELES AL MECANICISMO

CAPÍTULO 1: DE ARISTÓTELES AL MECANICISMO

Como dijimos en la introducción, debemos comenzar nuestro estudio con la teoría aristotélica, doctrina considerada como referencia para todos los desarrollos que condujeron a la mecánica clásica. Esta última es la base del mecanicismo, cosmovisión que llegó a penetrar todo el pensamiento occidental y que se rompe con la descripción cuántica y la complementariedad. No nos proponemos establecer en sí mismo el pensamiento aristotélico, sino analizar el universo conceptual a partir del cual, y también contra el cual, se ha construido la mecánica newtoniana.

La genialidad de Aristóteles se manifiesta en la coherencia general que guarda su sistema teórico, aspecto que contribuyó entre otros a que su doctrina prevaleciera durante tanto tiempo. Determinar, entonces, las especificidades de los conceptos físicos en Aristóteles nos lleva necesariamente a revisar mucho de su sistema, el cual está fuertemente fundamentado en sus ideas acerca del cambio.

La cosmovisión aristotélica

Antes de comenzar esta parte de nuestro estudio debemos aclarar que no pretendemos analizar todo el cuerpo doctrinal inmenso de Aristóteles sino sólo aquello que tiene relevancia para la física aristotélica.

Lógica

Con la lógica, Aristóteles quiere ofrecer un instrumento adecuado para la correcta conducción del pensar científico, de la demostración y de la refutación. Se trata de una ciencia formal del saber, de un análisis del pensamiento y el lenguaje del ser humano. De ese análisis surgen tres elementos fundamentales que son: el concepto, el juicio y el raciocinio. Estudiemos brevemente esos elementos.

El concepto

Es el último elemento que descubre el análisis de la mente. Aristóteles clasifica los conceptos en categorías o grupos típicos de conceptos. Según él hay diez clases de cosas que pueden decirse o predicarse de algo (las categorías son pues formas de predicación), ellas son: la esencia o substancia y los accidentes.

La esencia

Dice lo que la cosa es, lo permanente y necesario, lo esencial, lo quiditativo (del latín quid: qué o qué cosa. La quididad es aquello que hace a algo ser lo que es). Esta categoría

expresa la substancia o la esencia, el ente que existe en sí mismo, independiente y suficiente. La definición es la elaboración de tal concepto, fija la esencia de algo de modo que su quiddidad quede patente, clara, separada de la de cualquier otro ser. Se lleva a cabo especificando el género y la especie. Consideremos un ejemplo: la definición del 2. El género es "el número", la especie es "el primer par", o sea que su definición es "el primer número par".

Las nueve categorías restantes son los accidentes o atributos que se añaden a la esencia para determinarla más.

Los accidentes

Expresan aspectos de la esencia. Ellos son: Cuánto (aspecto de cantidad). Qué tipo de cosa (aspecto de cualidad). Con qué está relacionada (aspecto de relación). Dónde (aspecto de lugar). Cuándo (aspecto de tiempo). En qué actitud (aspecto de postura, posición). En qué estado o condición (aspecto de condición, estado). Qué hace (aspecto de acción). Qué padece, qué sufre (aspecto de pasión, afección).

Para Aristóteles las categorías no son simples elementos lógicos sino también ontológicos (del griego *ôn*, *ontos*: ser. La ontología es el estudio del ser en general, del ser en cuanto ser). Y ello a pesar de que su análisis es un análisis del juicio, en el fondo un análisis lingüístico, y no del ser. Esto se debe a que Aristóteles acepta la correspondencia entre el pensar y el ser.

El juicio

Consiste en la unión de dos conceptos para obtener un enunciado sobre la realidad, afirmando o negando algo. Es el asiento propio de lo verdadero y de lo falso.

El raciocinio

El raciocinio en su forma ideal es el silogismo, al que Aristóteles considera la base de todas las ciencias. Es una deducción: de dos premisas se sigue por necesidad lógica una conclusión.

La ciencia

Para Aristóteles los enunciados de la ciencia expresan nexos reales, estrictos, necesarios, que no pueden ser de otra manera. Ellos se dan con la esencia, con el en sí de las cosas. La base de la ciencia es entonces el conocimiento de la esencia. Su conocimiento supera el conocimiento del simple hecho. Se trata de conocer el por qué dado con la esencia. La ciencia para Aristóteles es análisis del ser.

La metafísica

Para Aristóteles, metafísica es ontología: estudio del ser en cuanto ser. Es la ciencia de las primeras cosas y de las causas. Los principios o causas del ser son:

La substancia y la forma: constituyen esencialmente lo que conocemos como causa formal. Como veremos, las nociones de substancia y de forma están íntimamente ligadas.

La materia (hyle): es lo que conocemos como causa material. Veremos que hay dos: la materia primera o prima que es algo metafísico, lo indeterminado totalmente, el correlato conceptual de la forma, y la materia segunda, que es básicamente la materia sensible.

La causa y principio del movimiento: es lo que conocemos como causa eficiente.

El fin: es lo que conocemos como causa final.

Estudiemos cada una de las causas o principios del ser.

La sustancia y la forma

La substancia primera

Para Aristóteles el concepto de ser no es unívoco. Tienen ser la idea de mujer, las mujeres concretas, su cuerpo, su alma, sus cualidades, las cantidades, lo que sucede y también lo posible, el pasado y el futuro. Pero el concepto de ser no es equívoco. Así como no es equívoco el concepto de sano que se aplica a un estado del cuerpo, al color del rostro, a la medicina que recobra la salud, al alimento que la conserva, siendo su sentido no igual en todos los casos. Sin embargo en todos los casos se usa en un sentido análogo, que es el sentido originario y propio al que todos los otros sentidos menos propios se refieren, y que es el que entendemos cuando pensamos en la salud del cuerpo. ¿Cuál es entonces el sentido primario del ser al que se refieren todos los demás sentidos? Para Aristóteles es la substancia primera, el ser individual y concreto. Sólo la substancia primera es la substancia en sentido propio, primario y principal, aquello que nunca puede ser de hecho predicado de otro, sino que es el sujeto último de todas las predicaciones; por ejemplo este hombre, este caballo. Es el último sujeto de predicación y el fundamento del ser de los accidentes.

En Aristóteles la substancia es un "objeto" lingüístico y ontológico. Hay, en efecto, un aspecto lingüístico en el concepto de substancia en Aristóteles. En su pensar y en su hablar, más precisamente en sus juicios, la mente presupone un substrato, sujeto u objeto, del cual se predica en último término todo lo predicado, y el cual no es predicado de nada. Esta peculiar manera de operar y de funcionar del espíritu tiene que reflejarse, según Aristóteles

en el ser. El ser auténtico es entonces la substancia, que por lo tanto es algo también ontológico.

La substancia segunda

Aristóteles se pregunta qué es lo que hace que la substancia primera sea lo que es. Sócrates es substancia primera, es el último sujeto de todos los predicados acerca de él. ¿Qué es propiamente esta substancia Sócrates? Respuesta: Sócrates es hombre. O sea que lo que es Sócrates se viene a entender desde lo general, desde el universal, que es la substancia segunda. La substancia segunda es entonces lo común a muchos individuos, es el universal, por ejemplo hombre. Puede ser predicada de otro, ser substancia y también predicado.

La forma

La substancia segunda es el concepto, la idea, el universal. Se conoce como forma entendida no en el sentido visual que utilizamos cuando decimos que algo tiene forma redonda, sino forma entendida como aquello que especifica un determinado ser en su peculiaridad ontológica, lo determinante, lo configurador, lo dador de ser.

Se debe aclarar que el concepto de forma aristotélico tiene varios aspectos. Uno de ellos es la forma como universal. Sin embargo la forma como lo determinante también incluye a veces los accidentes, y este constituye otro de los aspectos del concepto. Esto se verá más claro en la concepción aristotélica del movimiento.

La materia

Hemos dicho que la forma es lo configurador, lo dador de ser. Pero aquello que configura presupone y necesita algo a lo cual configurar, algo informe a lo cual darle forma. Ese algo es lo que Aristóteles llama materia, el receptáculo de la forma. La forma configura a un substrato informe, la materia, para tener un ser determinado. La forma implica entonces a la materia. La materia es lo que sirve de soporte a la forma. Aristóteles distingue dos sentidos para el concepto de materia. La materia primera o prima que es la absoluta indeterminación, lo indiferenciado, lo carente de toda forma, pero capaz de toda información. Esa materia primera es entonces una exigencia lógica del concepto de forma: sin la materia así entendida no tendría sentido la forma. Es la acepción más general del concepto de materia. La materia segunda, por otra parte, es esencialmente la materia como la entendemos hoy en día, tiene ya forma pero puede recibir otra forma.

La forma, entendida como arquetipo, y la materia prima constituyen el ser en su peculiaridad ontológica, la substancia segunda.

La forma, entendida como incluyendo los accidentes, y la materia, como materia segunda, constituyen las cosas que vemos, lo individual y concreto, la substancia primera. La teoría de la forma y la materia se llama el hilemorfismo.

Aristóteles llega a la forma y a la materia también a través del lenguaje y el pensamiento. Cuando hablamos del cambio nos referimos muchas veces a una cosa que se transforma en otra, o a una cosa que surge de otra: el árbol surge de la semilla, el bloque de mármol se transforma en la estatua. Son casos en que una substancia se transforma en otra substancia. O sea hay un cambio de forma, algo cambia de forma. Es claro que hay involucrados dos conceptos, la forma y aquello que cambia de forma: lo que pierde una forma y adquiere otro, que es la materia. El análisis del pensamiento y del lenguaje nos lleva a distinguir esos dos conceptos y dada la posición ontológica de Aristóteles esos conceptos corresponderán a principios del ser.

El acto y la potencia

Relacionada con la dupla materia y forma está la formada por el acto y la potencia. Para Aristóteles lo posible tiene tanto ser como lo que existe de hecho, con lo que ya es actual. La estatua que es sólo una potencialidad en el mármol no trabajado tiene para Aristóteles tanto ser como la estatua ya terminada, sólo que en una modalidad diferente. La estatua ya terminada tiene ser en acto, y la que es sólo una posibilidad tiene ser en potencia. En la semilla el árbol tiene ser o existe en potencia. El árbol adulto tiene ser o existe en acto. En aquel que sabe construir existe en potencia aquel que construye y el que duerme existe en potencia en aquel que vela.

El ser en acto tiene precedencia lógica sobre el ser en potencia pues se dice de algo que es potencial sólo cuando se tiene en la mente ese ser en acto. Desde el punto de vista cronológico es tanto anterior como posterior puesto que, por una parte, lo actual viene de un posible pero, por otra parte, ello sólo se debe a que lo potencial proviene de un ser en acto que lo precede en el tiempo: el escultor precede en el tiempo a la estatua, la semilla viene de un árbol en acto, el constructor en potencia de uno en acto.

Hemos dicho que la materia primera es lo totalmente informe e indeterminado, lo que tiene todas las posibilidades pues puede recibir cualquier determinación, cualquier forma. La materia primera es entonces la pura potencia, donde existen todos los seres en potencia. Una vez recibe forma, el ser en potencia que existía en la materia se hace actual. El ser en acto es materia y forma. La forma es, entonces, lo que lo actualiza. Como la forma solamente existe unida a la materia, finalmente la forma es el ser en acto. Por ello también se llama a la forma la entelequia que significa "lo que ha alcanzado su fin". En cuanto a la materia segunda, que ya tiene una forma, se trata de una potencia mixta: ya ha recibido algún tipo de actuación pero aún es capaz de recibir una actuación ulterior.

La causa eficiente y el movimiento

La causa eficiente es el principio del movimiento. Aristóteles distingue dos grandes clases de movimientos o cambios:

Movimientos en que cambian los accidentes de una misma substancia. Se dividen en: movimientos cuantitativos, que son un aumento o una disminución, un crecer o un decrecer, movimientos cualitativos, que son una alteración, y movimientos locales, que son un cambio de lugar. Este último es la forma primitiva de movimiento y es eterno. Por ello el devenir es eterno. En todos estos movimientos hay un cambio de forma, entendida como incluyendo los accidentes.

Movimientos en que cambia la substancia. Aquí cambia la forma entendida no sólo como incluyendo los accidentes, pues hay en general cambios de accidentes, sino también como substancia segunda. Se denominan generación y corrupción.

Ahora bien, ¿qué es entonces para Aristóteles el movimiento? Aristóteles sostiene que el movimiento es el paso de la potencia al acto. Se parte de materia con una forma A que pasa a otra forma B. Cuando la materia tiene la forma A, la forma B existe en potencia pues esa materia tiene la potencialidad de adquirir la forma B. El movimiento es la actualización de ese ser en potencia, o sea se tiene cuando la materia pasa de la forma A a la forma B. El movimiento se lleva a cabo entonces entre dos términos precisos: un término en acto y otro en potencia. La forma A es el término en acto y la forma B es el término en potencia.

Examinemos en esos términos los movimientos mencionados arriba:

Movimientos cuantitativos. La materia es materia segunda. Se trata de cambio de forma, incluyendo esta los accidentes. El accidente que cambia es el de cantidad. En general cambiarán también otros accidentes.

Movimientos cualitativos. Se trata de cambio de forma, incluyendo esta los accidentes. El accidente que cambia es el de cualidad. En general cambiarán también otros accidentes.

Movimientos locales. Se trata de cambio de forma, incluyendo esta los accidentes. El accidente que cambia es el de lugar. En general cambiarán también otros accidentes.

Generación y corrupción. Básicamente cambia la forma entendida como substancia segunda, pero pueden cambiar accidentes, con lo cual la forma incluye en general accidentes.

Sobre la causa del movimiento Aristóteles sostiene que todo lo que se mueve, necesariamente se mueve por otro. O sea que todo movimiento requiere un motor. Este principio lo considera Aristóteles como evidente. El agente motor lleva siempre, según él, una substancia particular, o cualidad o cantidad, que viene a ser el principio o causa del movimiento.

La causa final

Para Aristóteles no es posible entender las formas y los procesos del ser sin pensar en el fin, por lo cual este último constituye un verdadero principio, una verdadera causa del ser. Aristóteles sostiene que el fin no se encuentra sólo en las actividades humanas, en el arte, la

técnica, sino también en la naturaleza. Más aún, para él, la noción de fin en el arte surge de la misma naturaleza. El ejemplo más evidente de finalidad lo haya Aristóteles en las plantas y los animales. Su tesis es que la naturaleza nada hace sin sentido y sin fin.

Aristóteles se pregunta si las cosas en la naturaleza suceden realmente orientadas hacia un fin, o si suceden por casualidad y dan sólo la apariencia de finalidad. En efecto: en la naturaleza muchas cosas suceden y tienen como consecuencia necesaria otras cosas, sin que ello indique un sentido finalista. Así, por ejemplo, cae la lluvia debido al proceso de condensación y enfriamiento de las masas de aire, y crece el trigo, sin que se pueda afirmar que la lluvia cae con el fin de que el trigo crezca. Aristóteles arguye que la casualidad puede quizás dar cuenta de uno que otro hecho de la naturaleza, pero que lo que se da siempre y en todas partes, no puede ocurrir por azar, sino que implica un principio, el fin. En la naturaleza todo está siempre y en todas partes regulado con uniformidad, por lo tanto las causas finales están por todas partes en la naturaleza. Pueden existir excepciones ocasionales, desviaciones, como ocurre en el arte, donde el artista puede cometer desviaciones y aun errores, sin que nadie niegue que va guiado por una idea que obra como fin hacia el cual se orienta su actividad.

Pasemos ahora a estudiar los elementos de la física de Aristóteles.

El movimiento local

Para entender el movimiento local en Aristóteles es necesario considerar su cosmología, que contiene todo aquello relacionado con la estructura de orden cosmológico, los movimientos naturales simples, los conceptos de liviandad y gravedad, y la teoría de los elementos.

Orden cosmológico

La cosmología aristotélica se inicia con la idea del orden cosmológico, la cual se origina en la cultura helénica, y que consiste en la suposición de que el mundo es un todo ordenado, en la certidumbre de que no existe nada desordenado en la naturaleza.

A este principio de orden en Aristóteles se le unen otros dos: la esfericidad y la simetría del mundo respecto a su centro, y la existencia de seis direcciones, postuladas a priori, que son: arriba-abajo, derecha-izquierda, adelante-atrás. Esta estructura de orden la obtiene Aristóteles de forma lógica pero es compatible con la experiencia sensible. Es importante anotar que la tridimensionalidad se presenta en términos absolutos, puesto que las seis direcciones a priori lo son, es decir, el arriba es diferente y contrario en todo momento y en cualquier circunstancia al abajo, ya que están definidos a partir de un único punto, el centro del universo.

Movimientos naturales

Una vez definida la estructura de orden Aristóteles agrega los movimientos naturales simples, movimientos que son de dos tipos: rectilíneos y circulares. Esto lo fundamenta en la observación y en el hecho de que las dos únicas figuras simples son la línea recta y la línea circular.

Los movimientos naturales simples son entonces: alrededor del centro, que es una traducción del movimiento circular; a partir del centro, una forma del movimiento rectilíneo simple y hacia el centro, segunda forma del movimiento rectilíneo simple.

Finitud del universo

La finitud del universo, una de sus grandes tesis, la apoya Aristóteles en una implicación lógica de la idea de cambio, pues el hecho de que el movimiento sea un simple proceso de actualización hace que el movimiento sea limitado. Como dijimos antes, para que exista movimiento se deben tener dos términos: uno actual y otro potencial. En el caso del movimiento local se precisa de un lugar que existe en acto y de un lugar que existe en potencia, el movimiento local es la actualización del lugar potencial. En suma, es necesaria la existencia de lugares permitidos entre los cuales pueda llevarse a cabo el movimiento. En un mundo infinito habría movimientos para los que no existiría término final, y el cuerpo persistiría entonces indefinidamente en el mismo estado de movimiento, lo cual es ininteligible dentro del marco conceptual aristotélico.

Lo liviano y lo pesado. Los elementos

A partir de los movimientos naturales simples, desarrolla la idea de que los cuerpos poseen la cualidad de lo liviano o de lo pesado, cualidad irreductible para crear los movimientos hacia arriba y hacia abajo. Un cuerpo es liviano porque es transportado por su naturaleza hacia lo alto, y un cuerpo es pesado porque es transportado por su naturaleza hacia abajo. Lo pesado y lo liviano son principios naturales y absolutos del movimiento.

Hablemos primero de su carácter absoluto. Si se entienden lo liviano y lo pesado en un sentido relativo, no se puede fundamentar el movimiento natural hacia arriba y hacia abajo. Los cuerpos por principio tienden hacia lo alto o hacia lo bajo acorde a su naturaleza, sean cuales fueren las transformaciones del medio. Es así como lo pesado y lo liviano, en términos absolutos, están íntimamente relacionados con las direcciones absolutas arriba y abajo. Además, si algunos cuerpos se mueven algunas veces hacia lo alto y otras hacia abajo, es simplemente porque contienen una mezcla de liviandad y gravedad en proporciones variadas.

Para entender mejor el carácter de lo liviano y lo pesado como causas del movimiento, como motores o potencias actualizadoras, hay que hablar de la teoría de los elementos en

Aristóteles. Hay una relación indisoluble entre los elementos, los movimientos naturales, y las cualidades, las potencias de lo pesado, o gravedad, y de lo liviano, o liviandad.

Bajo el principio de que los elementos y los movimientos simples naturales se corresponden uno a uno aparecen los elementos sublunares y el elemento del cielo. Como el movimiento rectilíneo en el mundo sublunar se presenta de dos maneras, deberá haber entonces dos elementos que se desplazan naturalmente en línea recta: a partir del centro y hacia el centro. Estos elementos son la Tierra y el Fuego que poseen absolutamente la cualidad de lo pesado y lo liviano respectivamente.

Puesto que existen cuerpos que no son del todo pesados ni del todo livianos, es necesario agregar dos elementos más en la región sublunar para explicar estos hechos. El Agua y el Aire son estos elementos, que son de naturaleza mixta o sea tanto livianos como pesados, con lo cual el Fuego será el único elemento totalmente liviano y la Tierra el único totalmente pesado.

Vale la pena mostrar cómo las ideas de forma y materia se aplican a los cuatro elementos. Aristóteles considera que hay cuatro cualidades elementales de las cosas sensibles: lo caliente, lo frío, lo húmedo y lo seco, y dos parejas de contrarios: caliente-frío y húmedo-seco. Entre las cuatro cualidades hay seis posibles combinaciones, de las cuales hay que eliminar las combinaciones entre contrarios, quedando entonces sólo cuatro combinaciones posibles, las cuales dan lugar a los cuatro elementos así: el Fuego es caliente y seco, el Aire es caliente y húmedo, el Agua es fría y húmeda y la Tierra es fría y seca. O sea que si a la materia se le da como determinación formal las cualidades de lo caliente y lo seco se obtiene el elemento Fuego y así mismo se obtienen los demás elementos. El proceso de transformación entre estos elementos, y por tanto el proceso de transformación de las cosas sensibles, se da mediante el intercambio de estas cuatro cualidades.

En cuanto al movimiento circular, que es el movimiento natural alrededor de un centro, se le ha de asociar un quinto elemento, una quinta esencia, el Éter, el elemento de las esferas celestes, que ha de poseer cualidades especiales y totalmente diferentes a los elementos sublunares; esta "sustancia corporal más divina que aquellas y anterior a todas" no será ni pesada ni liviana, y esto por las propiedades específicas del movimiento circular que lo hacen bien diferente del movimiento rectilíneo o movimiento natural en el mundo sublunar.

La teoría aristotélica de los elementos lleva a instituir una separación y heterogeneidad absolutas entre el cielo y la tierra. Idea que ha de jugar un papel determinante en la evolución de las teorías físicas.

Como se ha mostrado, lo pesado y lo liviano en tanto que potencias o motores dependen originalmente de los movimientos rectilíneos naturales hacia arriba y hacia abajo. De esta manera aparecen lógicamente anteriores a los elementos primarios: tierra y fuego. Sin embargo, la manera como estos elementos son introducidos hace que aparezcan relacionados con lo pesado y lo liviano, es decir, con los motores, los cuales originan los movimientos naturales hacia arriba y hacia abajo en el mundo sublunar.

Aristóteles fue llevado inevitablemente a construir un nexo directo entre el movimiento de un cuerpo y su constitución física, la composición material intervendrá en todos los casos como un factor decisivo en la explicación del movimiento del cuerpo. Los elementos son la expresión concreta de los motores naturales.

Resumiendo tenemos entonces que lo pesado y lo liviano, la gravedad y la liviandad, son principios, causas del movimiento natural. Las cosas sensibles llevan entonces dentro de sí un principio del movimiento, están animadas por ese principio, no son inertes. También llevan dentro de sí un principio de reposo. El elemento Tierra es el único que es absolutamente grave o pesado, pues el peso es una manifestación de la gravedad. El Fuego es el único elemento absolutamente ligero, y el Agua y el Aire son de naturaleza mixta.

Estas ideas se entienden un poco más mediante un análisis descriptivo del movimiento local. Veamos antes las ideas de Aristóteles respecto a los conceptos de lugar, espacio, vacío y tiempo.

El lugar y el espacio

Aristóteles realiza un estudio detallado y completo sobre el concepto de lugar, mas no desarrolla una teoría del espacio. Para Aristóteles el espacio pertenece a la categoría de cantidad, siendo una cantidad continua, y su relación con el lugar es que la suma total de todos los lugares configura el espacio.

Para Aristóteles el lugar es un accidente que tiene existencia real y se encuentra caracterizado en la forma siguiente: El lugar de un cuerpo no es una parte ni la totalidad del cuerpo, sino lo que rodea al cuerpo. El lugar en el cual se encuentra un cuerpo no es ni mayor ni menor que el cuerpo mismo. El lugar es esencialmente separable de las cosas, el lugar donde se encuentra una cosa puede ser dejado.

Es claro que el espacio no puede ser una substancia (primera) pues entonces tendría que estar en el espacio, pues todas las cosas están rodeadas del espacio, ni tampoco es una forma (substancia segunda) pues entonces sería inseparable de una substancia (primera).

A partir de sus supuestos acerca del lugar, Aristóteles llega por lógica a la definición del lugar de un cuerpo como la frontera adyacente del cuerpo que lo contiene o cuerpo continente. El lugar de un cuerpo es entonces el límite que lo envuelve o rodea.

Como veremos un poco más adelante, para Aristóteles no existe el vacío. El universo para él es una plenitud. Todo cuerpo está entonces contenido en otro. La frontera del cuerpo que lo contiene, adyacente al cuerpo contenido es el lugar de este último. O sea que es la frontera interna del receptáculo continente. Es una superficie. Si el cuerpo contenido se evacua del continente, otro llena esa vacuidad. El que se evacua pase a ser contenido por otro cuerpo continente y la frontera adyacente de este pasa a ser su nuevo lugar. Su antiguo lugar pasa a ser el lugar del nuevo cuerpo que llena el vacío que él dejó. Ese cambio de lugar es el movimiento. Como el nuevo lugar es un lugar potencial mientras el cuerpo esté en el antiguo lugar y esa potencialidad se actualiza cuando el cuerpo pasa a ocupar el nuevo

lugar, la idea de movimiento local se inscribe en la concepción general de movimiento de Aristóteles de movimiento como paso de lo potencial a lo actual.

El hecho de que se puede cambiar el contenido, de que se puede cambiar de lugar, revela que el lugar es algo diferente del cuerpo, demuestra la realidad del lugar y del espacio.

De la definición de lugar de Aristóteles y de su noción de plenitud se sigue que el cuerpo continente tiene que estar en todas partes en contacto con su contenido. Por lo tanto el continente tiene que estar en reposo con respecto al contenido. Esto implica que también el contenido, o sea el cuerpo del cual la superficie interior del continente es el lugar, debe también estar en reposo. Este punto, como lo veremos en el próximo capítulo, constituye una de las críticas de Filopón al concepto de lugar de Aristóteles.

Los lugares naturales

Ahora bien, los cuerpos ligeros o pesados por su naturaleza poseen un movimiento natural, ya sea hacia arriba o hacia abajo, dirigiéndose a lugares bien definidos dada la finitud del movimiento; de tal forma que existen lugares naturales o sitios bien específicos a los cuales tienden los cuerpos de acuerdo a su naturaleza.

La existencia de lugares naturales y de las direcciones absolutas significa que hay diferencias cualitativas en el espacio, que no todos los lugares son iguales. Max Jammer expresa esto diciendo que el espacio es "portador de diferencias cualitativas". Como la noción de lugares naturales proporciona los fundamentos del movimiento natural, es finalmente el espacio el que proporciona esos fundamentos. Aristóteles mismo habla en la Física acerca de que las tendencias de los cuerpos a ir hacia sus lugares naturales no sólo muestran que el lugar y el espacio son una realidad, sino también que ejercen una influencia activa.

Por otra parte, la existencia de lugares bien definidos se encuentra originada en un principio de orden, pero un orden estático; el principio de orden dinámico se encuentra en la existencia de los movimientos naturales simples, que son los encargados de llevar el equilibrio en el cosmos. Más aún, la dinámica del movimiento natural depende únicamente de condiciones espaciales; las tendencias direccionales de los cuerpos únicamente son posibles debido a las diferencias entre los lugares hacia los cuales se mueven.

En síntesis, el espacio que se propone es un espacio finito, continuo, de simetría esférica, con tridimensionalidad absoluta, portador de diferencias cualitativas, donde hay primacía de trayectorias rectilíneas y circulares.

Inexistencia del vacío

Dentro de la misma concepción del movimiento se llega de inmediato a la negación del vacío. Según Aristóteles el vacío no existe ni puede existir. En efecto, puesto que en el

vacío no habría diferencias no se tendrían lugares especiales, los lugares naturales, a los cuales irían los cuerpos en su movimiento natural. Tampoco habría causa para el movimiento ni término final para este: una vez puesto en movimiento el cuerpo no se detendría, lo cual es imposible dentro del marco aristotélico. Aristóteles presenta además el siguiente argumento, bastante interesante, en contra del vacío: comienza observando que el medio en que se mueve un cuerpo presenta una resistencia a su movimiento que es menor cuanto menos denso es el medio: O sea que cuanto menos denso el medio, mayor es la rapidez con que se mueve el cuerpo. Concluye lógicamente que, siendo el vacío un medio sin densidad, la rapidez excedería en él cualquier valor.

El concepto de tiempo

Entremos a analizar la categoría del tiempo aristotélico y veamos cómo se enmarca y a la vez se sustenta dentro de la teoría del cambio. Estudiar el tiempo aristotélico separado del movimiento no es posible, es mediante el movimiento y con este como el tiempo adquiere su significación. Esta es la premisa con la cual Aristóteles inicia el estudio del tiempo para luego ir a determinar la relación existente entre tiempo y movimiento, en otras palabras, para dar respuesta a: ¿qué elemento del movimiento es el tiempo?

La noción de tiempo que presenta Aristóteles en sus escritos es muy cercana a nuestra noción intuitiva, pues en efecto asociamos el tiempo con el cambio y tenemos la tendencia a considerar que si nada cambiase no podríamos concebir la idea de tiempo. El concepto de tiempo absoluto de Newton, del cual hablaremos más tarde en el próximo capítulo, es mucho menos intuitivo. Es algo muy abstracto. Se trata de una idea según la cual el tiempo es absoluto, o sea independiente de los cuerpos, de la existencia de los cuerpos. El tiempo absoluto de Newton se concibe como existiendo aun si no existiesen cuerpos, aun si no existiese nada que cambiase.

Aristóteles introduce la definición de "antes de" y "después de" como dos términos irreductibles, que no ofrecen ningún problema, por otra parte tienen la propiedad de ordenar las partes del movimiento.

Como el tiempo se caracteriza por ser continuo el movimiento debe poseer una magnitud o número. Esta medida es lo que para Aristóteles va a ser el tiempo, al que considera no como movimiento sino como aspecto numerable del movimiento. Arguye que así como el número nos permite distinguir entre el más y el menos, así el tiempo nos permite determinar el más o el menos del movimiento. El término medida tiene aquí el sentido de magnitud, cantidad o aspecto numerable, se trata de la duración, la medida de la relación temporal de antes y después.

Vale la pena explicar un poco más la relación entre el tiempo y el movimiento en Aristóteles. Para nosotros hoy en día, el movimiento físico es cambio de posición y sucede en un cierto intervalo de tiempo. La razón entre la distancia recorrida y el intervalo de tiempo invertido en recorrerla es la rapidez. Si añadimos la dirección del movimiento tenemos la velocidad. En Aristóteles, los lugares entre los cuales va a suceder el movimiento están fijos. Son los términos entre los que sucede el cambio: se pasa de un

lugar actual a uno potencial. Dado que el punto en que comienza el movimiento y aquel donde termina ya están fijos, ¿qué nos resta para diferenciar los posibles movimientos entre uno y otro lugar? Sólo la rapidez o el tiempo para ir de un lugar al otro. Ese tiempo va entonces a caracterizar el movimiento. Y es un número. Por ello Aristóteles dice que el tiempo es el aspecto numerable del movimiento.

Hay en Aristóteles una estrecha relación entre el tiempo y el movimiento, entre el tiempo y los cuerpos; ya que no es posible pensar el movimiento en forma independiente de los cuerpos de una manera física. El tiempo no es una cantidad independiente, existe en el movimiento.

La causa del movimiento: el motor

Anteriormente se dijo que el espacio aristotélico se encuentra constituido por regiones bien diferenciadas llamadas "lugares naturales", lugares que no tienen independencia real con relación a los cuerpos. Además, se discutió el hecho de que los movimientos naturales tienen como fin una posición bien específica, un lugar natural, que está en estricta concordancia con la naturaleza del cuerpo.

Dentro de este contexto ¿qué significado tiene el reposo natural? La permanencia de un cuerpo en su lugar natural es lo que ha de entenderse por reposo natural, que se hará manifiesto en el momento de realizar un esfuerzo para desplazarlo, puesto que el cuerpo en estas condiciones se opondrá, ofrecerá una resistencia activa a ser sacado de su lugar natural; esta resistencia manifiesta tiene como origen el vínculo estrecho entre el cuerpo y el lugar natural. En otras palabras, la resistencia manifiesta en el cuerpo no se debe únicamente a este, ni al lugar natural, sino a ambos, dada la fuerte relación entre estos.

Con esto, aparecen el reposo y el movimiento como dos circunstancias diferentes para un cuerpo y en alguna medida como opuestas, puesto que un movimiento natural lleva al cuerpo a su lugar natural, mientras que un cuerpo en su lugar natural no se pone en movimiento por sí mismo sino que es necesario que un agente externo lo saque de este. La existencia de un cuerpo en reposo no necesita causa, mientras que ponerlo en movimiento y mantenerlo en él requiere de una causa.

Dentro de la caracterización del reposo y del movimiento, y especialmente del movimiento, el motor o principio activo juega un papel determinante. Es así como el movimiento desde un punto de vista ontológico es el paso del ser en potencia al ser en acto y desde el punto de vista mecánico es la acción conjunta de un motor y un móvil. Todo cambio tiene necesidad de una causa que lo explique, al igual que todo movimiento precisa de un motor como su causa. También la permanencia de un movimiento implica un motor; "suprimid esa causa, y el movimiento cesará, separad el motor del móvil y el movimiento cesará igualmente". Toda generación de movimiento implica un contacto entre el motor y el móvil.

Los únicos movimientos posibles son aquellos que conlleven a su lugar, movimientos naturales, o aquellos que en contra de su naturaleza los aleja del mismo, movimientos

violentos. Como se puede ver, un movimiento violento siempre será contrario a un movimiento natural.

Estudiemos ahora dos movimientos: el movimiento natural de caída y el movimiento de un proyectil.

Movimiento natural de caída

Para el caso del movimiento general de caída, es menester preguntarnos tanto por la causa (motor) en general que lo origina, como por la causa del aumento de velocidad que lo caracteriza, y finalmente por la diversidad de velocidades. El movimiento natural de caída es, según Aristóteles, originado por la gravedad de los cuerpos graves, siendo esta intrínseca a los mismos, y que además es manifiesta por el peso. El aumento de velocidad para un cuerpo pesado se atribuye al hecho de que su gravedad lleva al cuerpo a su lugar natural de la manera más corta y más rápida: en línea recta y tan rápido como el medio ambiente se lo permita. Se considera natural en Aristóteles que el cuerpo, al acercarse a su lugar natural, a su meta, lo haga cada vez más rápido. Por último, la diferencia de velocidades en la caída de los cuerpos graves se debe a la diferencia de sus pesos, siendo mayor la del más pesado.

Sobre el párrafo anterior es necesario aclarar que su redacción no corresponde al lenguaje de Aristóteles, en especial lo relacionado con la velocidad. En Aristóteles, no sólo no está constituido el concepto de velocidad en los términos actuales sino que ni siquiera utiliza este término. Considera que un movimiento de un móvil A es más rápido que el de otro móvil B en dos sentidos: si en un mismo tiempo de recorrido la distancia recorrida por A es mayor, o si una misma distancia es recorrida en menor tiempo por A.

Movimiento de un proyectil

Sea el proyectil una piedra lanzada en el aire. La explicación de este movimiento es mucho más compleja. Como movimiento violento que es, requiere de un motor externo y en contacto con la piedra mientras que dure el movimiento; sin embargo, la piedra se mueve aún sin estar en contacto con la mano, después de haber sido lanzada por esta. Ahora bien, sucede que cuando la mano mueve la piedra, mueve también el aire delante de ella y lo desplaza. Al soltarse la piedra de la mano queda detrás de esta un vacío y como la naturaleza aborrece el vacío, el aire desplazado pasa a llenar el vacío. El asunto se complica porque Aristóteles, en coherencia con su idea de que la permanencia de un movimiento implica un motor, de que separado el motor del móvil el movimiento cesa, arguye que una vez cesa el contacto con la mano el aire deja de ser móvil, pues cesa de obrar el motor. La única manera de que el movimiento no se pare es entonces que la mano le transmita al aire poder motriz, con lo cual el aire comienza a obrar entonces como motor. Pero, dice Aristóteles, en ningún momento el aire es motor y móvil a la vez, sino que cuando deja de ser móvil, se transforma en motor. Al volverse motor, mueve tanto a la piedra como el aire delante de ella, el cual se vuelve móvil y pasa a ocupar el vacío que se tiende a formar

detrás de la piedra. Ese aire deja de ser móvil ya que pierde contacto con el aire que lo movió, pero se vuelve motor pues el aire que lo movió le comunicó poder o fuerza motora. Y así sucesivamente hasta que se agota el poder motor que se va perdiendo paulatinamente en cada etapa. Esto implica que hay un instante, cuando el aire deja de ser móvil y se vuelve motor, en que cesa el movimiento, el cual no sería entonces continuo. Además todo esto pareciera querer decir que el aire ya no se estuviera moviendo cuando mueve la piedra. Estos puntos son para nosotros hoy en día difíciles de captar. Lo que es claro es que en la teoría del motor aristotélico no es posible asimilar la acción del motor a la acción de empujar.

En los movimientos analizados, y en general en todo movimiento, se presentan, dentro del marco aristotélico, resistencias al movimiento. Estas, que podemos llamar fuerzas de resistencia actúan bajo dos formas: bajo la forma de resistencias exteriores, como el medio en los movimientos naturales, y bajo la forma de resistencias interiores a los cuerpos, innatas en ellos, que se manifiestan ya sea por una tendencia a alcanzar el lugar natural o por un rechazo activo a abandonarlo.

El movimiento natural de caída, rectilíneo, y el movimiento violento de proyección fueron analizados teniendo en cuenta la fuerza motriz que los produce y los mantiene, dejando de lado las fuerzas de resistencia que están presentes en estos movimientos, hecho que no hace incompleto lo planteado por el fenómeno, puesto que lo determinante en el cambio es el motor y la fuerza resistiva se limita a disminuir el movimiento. Es así como la fuerza motriz y la fuerza de resistencia no son equiparables en su función dentro del movimiento. En Aristóteles, la causa motriz es determinante para el movimiento, mientras que la fuerza de resistencia no.

El modelo astronómico de Aristóteles

El universo entero está contenido en una gran esfera: la esfera de las estrellas. En todos los puntos del interior hay materia, se tiene una plenitud. Fuera de la gran esfera no hay nada: ni materia, ni espacio, ni vacío. Como la esfera de las estrellas no está contenida en nada no tiene entonces lugar.

La mayor parte del universo está hecha de éter que se estructura en una serie de capas concéntricas que forman una esfera hueca cuya superficie exterior limita con la esfera de las estrellas y cuya superficie interior está limitada por la esfera de la luna, que es el planeta más bajo. El movimiento de las capas concéntricas, o sea su rotación, explica los movimientos celestes. Los planetas, las estrellas y las capas concéntricas, que en últimas son esferas huecas, están hechos de éter.

Aristóteles sostiene que hay 55 capas concéntricas. Muchas de las capas tienen como función proporcionar los enlaces mecánicos necesarios para mantener todo el conjunto en rotación. Como el universo es una plenitud, todas las capas están en contacto y mediante ese contacto se transmiten el movimiento. Cada capa arrastra a su vecina más próxima. El modelo de Aristóteles acerca de la forma y la realidad de las esferas celestes que mueven los cielos es sumamente explícito y detallado.

Aristóteles y el mecanicismo

Para hacer una comparación entre las tesis de Aristóteles y las ideas mecanicistas en la antigüedad nos es preciso hacer referencia breve a las ideas de Demócrito quien vivió alrededor de 460-370 a.C.

Los átomos y el vacío. Para Demócrito el ser está dividido en partículas que no se pueden descomponer en otras: los átomos, que significa indivisibles. Cada átomo es eterno, uno, inmóvil con respecto a sí mismo. Los átomos tienen dos propiedades: magnitud y forma. Tienen extensión pero son indivisibles. El átomo es impenetrable, indestructible, eterno, ocupa una porción determinada del espacio. Junto con la noción de átomo se introduce la de espacio vacío: los átomos están sometidos en el vacío a un movimiento perpetuo, que no se debe a una fuerza exterior al universo, sino que es un movimiento espontáneo.

Hay un número infinito de átomos, no tienen cualidades de ninguna clase fuera de la extensión y la forma, todos son de la misma naturaleza, sólo varían en su forma externa: forma de hoz, de gancho, redondos,..., y en su magnitud. También pueden tener diferente orden y posición, y movimiento local. Se trata de diferencias puramente cuantitativas. Los átomos tienen diversas figuras y magnitudes y cambian constantemente su posición en el espacio y así dan origen a cambios en las cosas que se componen de ellos.

Las cualidades de las cosas en el mundo sensible. ¿Cómo explicar tales cualidades, como lo dulce, lo amargo, lo caliente, los colores, que percibimos a través de los sentidos? Para Demócrito son subjetivas, no objetivas. Se deben a que los órganos de los sentidos interpretan la realidad dando tales impresiones. Los sentidos sólo interpretan correctamente la naturaleza de las cosas cuando dan información sobre variaciones en la cantidad: extensión, figura, dureza, etc. Se prefigura aquí la división moderna entre cualidades primarias y cualidades secundarias. Esta división, ligada con los nombres de Descartes y de Locke, sostiene que se deben distinguir las cualidades primarias, como la posición y la forma, que son poseídas por los objetos, que son cualidades en sí de ellos, y las cualidades secundarias como el olor y el gusto, que sólo son respuestas humanas a la interacción con los objetos.

El mundo como autómatas. Los átomos se mueven en el espacio vacío. Ese movimiento es eterno, ocurre violentamente mediante presión e impulso, y es connatural. Parece que con esa última palabra se quiere decir automático, autónomo, por sí mismo. El mundo según Demócrito sería un autómatas, una máquina.

Concepción mecanicista. La materia no está hecha de dioses. No tiene vida. No hay categoría antropomórfica ninguna. No hay en ella propósito, ni fines. Todo se explica por el movimiento de cuerpos inertes sin diferencias cualitativas.

Causalidad. Todo está causalmente y del modo más férreo determinado por los átomos y las leyes propias y connaturales de la naturaleza. Toda la naturaleza es un único e inmenso

nexo causal. ¿Se trata ya del determinismo, doctrina que a grandes rasgos sostiene que todo evento o fenómeno está totalmente determinado por eventos o fenómenos anteriores?

Materialismo. Demócrito cree poder explicarlo todo con sus átomos. Según él, el alma también es un agregado de átomos, y también el pensamiento y todos los sentimientos no son más que movimientos de átomos.

Cuando estudiemos en el capítulo tercero la cosmovisión mecanicista ligada con la mecánica newtoniana, encontraremos muchos de los aspectos ya intuitivos por Demócrito. La gran diferencia es que el mecanicismo moderno se fundamenta en una teoría física cuantitativa, lo que le da un poder de convicción del cual adolecen las ideas cualitativas y puramente filosóficas de Demócrito.

Aristóteles comparte con el mecanicismo la posición realista. Para precisar qué se quiere decir con la última frase hay que mencionar un poco las ideas de Parménides quien vivió alrededor de 540-470 a.C. Para Parménides la esencia de todo es el ser, el cual concibe como estático, estable, fijo, permanente, quieto, en reposo. Para Parménides el ser es lo idéntico consigo mismo, por ello quedan excluidos de él la evolución y el tiempo en general. Sólo el ser existe, la nada, el no-ser, no existe. Para Parménides hay identidad entre el ser y el pensamiento del ser, nuestro pensar es un reflejo del mundo del ser, refleja al ser como la copia al modelo. Pensar y ser están coordinados entre sí, el ser no se escapa del concepto. Se trata de una teoría del conocimiento objetivista o realista. Ese tipo de posición sostiene la existencia de una realidad en sí, independiente de lo humano, y la posibilidad para el ser humano de acceder al conocimiento de ella. Tanto Aristóteles como Demócrito se inscriben dentro de la posición objetivista.

Con respecto a la noción de estado del mecanicismo moderno, que estudiaremos más adelante, a nuestro juicio no se puede hacer ninguna comparación pues es una noción fundada en el algoritmo clásico y Aristóteles no tiene una teoría cuantitativa sino cualitativa.

El mecanicismo moderno rechaza las causas finales. Tampoco se tiene este concepto en el mecanicismo de Demócrito.

Aristóteles no reduce todo a lo sensible pues acepta el nous, el intelecto activo, como algo independiente de lo sensible.

En Aristóteles los cuerpos materiales no son inertes, están animados por un principio de movimiento y de reposo. En su movimiento natural se mueven a causa de ese principio interno de movimiento. Es también un principio interno lo que les hace detenerse al llegar a su lugar de reposo y lo que se opone al movimiento que un agente externo quiera darles para sacarlos de su lugar de reposo. Algunos hablan de que esto implica que para Aristóteles en todo hay un alma.

Otro aspecto en que las ideas de Aristóteles se diferencian del mecanicismo es en la manera de concebir la relación entre el todo y la parte. Vale la pena tratar este tópico en una sección aparte.

El todo y la parte en Aristóteles

En Aristóteles juega un papel preponderante la idea, la forma. Sostiene que la idea está en el mundo, formando un todo con la materia y que el entendimiento activo la separa conceptualmente de la materia; y es con estas ideas separadas conceptualmente que se hace la ciencia. Ahora bien, la idea es un todo. En el mundo sensible la idea no es sólo lo que usualmente llamamos forma, sino toda la organización de la cosa concreta, la manera como se organizan sus partes. O sea que si lo primero es la idea ello significa que lo primero es el todo, y las partes están supeditadas al todo. La materia es lo informe, lo que no tiene estructura, y sólo la adquiere mediante la idea, mediante la idea del todo. La idea es idea del todo. El todo no surge de la organización de las partes sino al revés: la organización de las partes surge por el todo. Esta visión es opuesta a la del mecanicismo de los atomistas, y en general se opone a cualquier mecanicismo, una de cuyas características es la relación entre el todo y la parte según la cual todas las propiedades del todo se explican a partir de las propiedades de sus partes, con lo que el todo está subordinado conceptualmente a la parte. Ese tipo de relación entre el todo y la parte se llama mecánica, por oposición a la relación en Aristóteles que se denomina orgánica. Esa visión aristotélica es también una visión holística.

La palabra holístico viene del griego holos, que significa todo. El holismo pone el énfasis en el todo más que en las partes; sostiene, en esencia, que el todo tiene propiedades que no se explican a partir del mero análisis de sus partes. Cuando una división, conceptual o con el pensamiento, de un todo en sus partes, y el análisis de las propiedades de esas partes no permiten entender todas las propiedades de ese todo, se puede afirmar que se tiene un todo indivisible. Un pensamiento que considere las cosas como todos o totalidades indivisibles se considera un pensamiento holístico. En algunas ocasiones, las consideraciones anteriores se resumen, de un modo un poco simplista, diciendo que el holismo sostiene que el todo es más que la suma de sus partes.

Usualmente se presenta la visión orgánica de Aristóteles en el contexto de su teoría de la organización del mundo físico, con los cinco elementos y los lugares naturales, comparando el universo físico de Aristóteles con un organismo vivo donde cada cosa ocupa su lugar natural según la estructura del todo.

Otro aspecto de totalidad o holismo en Aristóteles es que las cosas, el espacio, el movimiento y el motor forman un todo indivisible. En Aristóteles todos estos términos se mezclan y se funden en un espacio que está cargado de finalidad. Esto es ilustrado de una manera clara en lo que es un objeto o cuerpo material en el marco aristotélico: es un elemento conceptual con muchos atributos que no es pensable en forma independiente de regiones específicas del universo, es decir, de los lugares naturales. El lugar natural de un cuerpo es parte de la definición del cuerpo. Por otra parte, como el movimiento es finalmente una expresión de la naturaleza única del cuerpo, un cuerpo sólo puede estar sometido a un único movimiento simple a la vez.

Vale la pena profundizar un poco sobre la relación entre el espacio y la materia en Aristóteles. Él mismo plantea la dificultad de que dado que el centro del universo y el centro de la tierra son el mismo punto, al cual son llevadas las cosas graves, se podría preguntar si lo hacen porque es el centro de la tierra o porque es el centro del universo. Aristóteles afirma que se mueven hacia el centro de la tierra solo incidentalmente, ya que esta tiene su centro en el centro del universo. O sea que realmente se mueven hacia el centro del mundo. Por lo tanto no es la estructura de la tierra el factor determinante sino la estructura del espacio. El espacio tiene un papel dinámico. La diferencia entre los lugares dicta el movimiento natural de los cuerpos. Es la estructura del espacio lo que determina el movimiento natural. O sea que el espacio es independiente de la materia en el sentido de que es la estructura del espacio lo que determina el movimiento natural de los cuerpos pero esa estructura no depende en nada de la materia.

Existe un sentido, sin embargo, en que hay una indivisibilidad entre el espacio y la materia. En primer lugar no se puede concebir espacio sin materia pues el espacio es la suma de lugares y la noción de lugar implica la existencia de materia. Por otra parte los lugares naturales lo son para los elementos de la materia. No tienen sentido sin materia. Además toda la noción de movimiento necesita de causas finales y efectivas, y el lugar constituye esas causas para la materia. Entonces el entramado lógico implica que no puede concebirse ni materia sin lugar ni lugar sin materia.

CAPÍTULO 2: EL SURGIMIENTO DE LA FÍSICA CLÁSICA

Como se ha visto en el capítulo anterior, la propuesta aristotélica constituye un sistema conceptual lógicamente coherente, sustentado en los principios de causa y orden, dentro del cual es posible enmarcar de manera unificada todo cuanto acontece.

Pero la teoría aristotélica tiene problemas en la búsqueda de explicaciones sobre fenómenos específicos. El intento de resolver estos aspectos problemáticos llevó definitivamente al cambio del sistema conceptual, que requirió de un camino bastante largo y lento.

Es así como en la teoría del movimiento local, que se basa en alguna medida en la observación directa y es confirmada por muchos fenómenos cotidianos, se van a presentar tres fenómenos que manifiestan dificultades para su entendimiento desde el marco aristotélico y que serán tenidos muy en cuenta para futuros análisis del movimiento. Primero, la fuerza por debajo de cierto valor no produce efecto sobre el cuerpo. Segundo, ¿cuál es la fuente del incremento de la fuerza motriz exigido para producir la aceleración de los cuerpos en la caída libre? Tercero, ¿cuál es la fuerza motriz que mantiene en movimiento el proyectil cuando este ha abandonado el agente de la proyección?.

Solucionar estos problemas implica necesariamente transformar el concepto aristotélico de causa del movimiento por la idea más amplia y unificada de fuerza como acción externa al cuerpo y ontológicamente independiente de este.

El sistema aristotélico (físico) va a ser sustituido por la teoría newtoniana, pero para ello es necesaria la intervención de diferentes pensadores, tales como Filopón, Buridán, Copérnico, Kepler, Galileo y Descartes.

Como ya muchos historiadores de la ciencia lo han planteado, llegar al sistema newtoniano requiere en primera instancia la sustitución del concepto del cosmos, caracterizado por su finitud y estructura de orden, por un concepto de universo infinito regido por leyes; y en segunda instancia la creación de un espacio geométrico, independiente y autónomo. Que en términos más específicos sería la sustitución de una explicación basada en substancias y cualidades por una basada en elementos matemáticos; de lugares naturales y direcciones privilegiadas por un espacio homogéneo; de un geocentrismo por un heliocentrismo; de la gravedad como propiedad relacional entre el cuerpo y el espacio por una gravedad que es propiedad de la materia, manifiesta entre pares de cuerpos, y que afecta a lo externo; de un cuerpo con muchos atributos por un cuerpo masivo, cuantificable.

Teoría del ímpetus

Juan Filopón

Floreció alrededor del 530 d.C. La primera gran contribución para aclarar el concepto de espacio fue hecha por Filopón. Filopón inició la independización ontológica, sin lograrlo cabalmente, entre el cuerpo y el espacio; también es el precursor de la llamada “teoría del ímpetus” en la mecánica. La revisión realizada por Filopón del concepto aristotélico de espacio está intrínsecamente relacionada con la teoría del ímpetus.

Filopón comienza por señalar una inconsistencia interna en el concepto aristotélico de espacio. El lugar ha sido definido como el límite adyacente a los cuerpos, con la condición fundamental de que los cuerpos no se encuentren en movimiento. Con esta definición no sólo es imposible determinar el lugar del mundo sublunar, sino también los lugares de los cuerpos celestes, ya que las esferas celestes ciertamente se encuentran en movimiento. Filopón muestra cómo una parte fija de la esfera en rotación ocupa diferentes lugares en el curso del tiempo, de lo que concluye la inconsistencia de la definición aristotélica del lugar, la cual debe ser rechazada.

Esta inconsistencia lleva a Filopón a plantear su concepto de espacio. Según él, la naturaleza del espacio ha de buscarse en el volumen incorpóreo, tridimensional, que se extiende a lo largo, a lo ancho y en profundidad, y que es igualmente diferente del cuerpo material inmerso en él.

Pero esta identificación del espacio con el vacío no supone la existencia de un vacío como tal, en acto. El vacío, aunque es una necesidad lógica, coexiste siempre con la materia, el vacío y el cuerpo están correlacionados de una manera inseparable, ya que cada uno de ellos requiere la existencia del otro. Tan pronto como un cuerpo deja determinado lugar del espacio, otro cuerpo lo reemplaza. Una determinada región del espacio puede recibir sucesivamente a diferentes cuerpos, sin tomar parte en el movimiento del cuerpo.

Resulta claro que esta noción de espacio, más bien abstracta, es incompatible con la dinámica aristotélica, donde el espacio está íntimamente ligado con diferencias cualitativas de los cuerpos; el espacio en Filopón es concebido como la dimensionalidad pura. Esta manera de representarse el espacio va en directa contradicción con direcciones preestablecidas como el arriba y el abajo, que pasan ahora a ser características relativas del espacio que dependen de la disposición geométrica.

Aunque Filopón discute ciertos conceptos aristotélicos, acepta otros lógicamente, como el principio fundamental de la finitud del universo; ya que, existiendo un estrecho vínculo entre el espacio y la materia, puesto que la materia es finita, el espacio también lo será.

Rehusar un espacio cualitativo diferenciado y reemplazarlo por un espacio con dimensiones puras, el cual no se ha podido independizar del todo del cuerpo, implica necesariamente una forma diferente de ver la teoría aristotélica, el movimiento local y los movimientos violentos en especial.

Parece que Filopón fue el primero en demostrar que el medio no puede ser la causa del movimiento del proyectil, según como pensaba Aristóteles. Entre los interrogantes que se planteaba estaba: ¿Por qué una piedra pesada puede ser lanzada más lejos que una ligera?.

La explicación de los movimientos forzados de los proyectiles va a ser una innovación importante, la cual será utilizada por diferentes autores antes de que aparezca como la teoría del ímpetus en el siglo XIV. Esta explicación con base en la teoría del ímpetus se propone bajo la premisa de que el aire no produce el movimiento sino que opone resistencia a él.

Si el aire no tiene la propiedad motriz de mover al móvil, el poder motor, que consiste en una cierta fuerza motriz incorpórea, debe ser adquirido por el móvil a través del acto de lanzar. Esta fuerza motriz es solamente “prestada” y decrece según la tendencia natural del cuerpo y la resistencia del medio, de manera que el movimiento no natural del proyectil cesa.

Dentro del marco aristotélico, la fuerza motora es posible entenderla como una fuerza-cualidad, al igual que el calor y el frío; cualidades sustanciales que pueden separarse de su fuente y ser transferidas a otro cuerpo y que por lo tanto deben ser pasajeras.

Filopón sostenía que la velocidad de los cuerpos que caen y de los proyectiles es proporcional solamente a la fuerza motriz, y que la resistencia del medio solamente reduce la velocidad en un valor definido.

Juan Buridán

Murió hacia el 1366 d.C. La teoría del ímpetus surge como una alternativa aristotélica a la explicación de los movimientos de caída y de proyectiles, en los cuales es difícil precisar el motor. Alternativa que pretende mantener el principio aristotélico de que el movimiento es producido por una causa y que el efecto debe ser proporcional a la causa, siendo el efecto la velocidad. Buridán da varias razones contra la teoría aristotélica de los proyectiles; razones todas ellas basadas en la experiencia y que llegan a contradecir aquel poder especial del aire de mover, comunicado por el agente propulsor:

Una rueda de molino que continúa girando un tiempo después de haber sido impulsada. Aquí no puede hablarse evidentemente del aire desplazado que vuelve a impulsar por detrás.

Una lanza a la cual se le ha dado una forma puntiaguda en su parte posterior, no es desplazada más lentamente, cuando es arrojada, que una lanza que no este aguzada, como sería el caso si la teoría fuese correcta.

Un barco que se desplaza en un río contra la corriente continúa moviéndose por un tiempo, aún después de que los remos se han detenido. Y sin embargo, un marinero sobre el puente no siente el aire que empuja el barco, sino el aire que viene de frente y resiste su movimiento.

Supongamos que el barco llevara una carga de granos o de madera y que un hombre se situara detrás de la carga. Si el aire tuviera tal poder que pudiera empujar al barco fuertemente, el hombre sería apretado violentamente entre la carga y el aire que lo empuja por detrás.

Un atleta que va a dar un salto corre cierta distancia para tomar impulso, pero una vez que está en el aire no siente que el aire lo empuja sino que el aire enfrente de él le ofrece resistencia.

Todo lleva a Buridán a concluir que el motor imprime una cierta “fuerza motiva”, un cierto ímpetus en el proyectil, que actúa en la dirección en la cual el motor movía al cuerpo en movimiento; manteniéndose el cuerpo en movimiento hasta que es afectado por la acción de las fuerzas independientes.

Las propiedades que se le han de asignar a la “fuerza motiva” o ímpetus deben ser:

Cuanto más velozmente mueva el motor al cuerpo, mayor será el ímpetus que imprima al cuerpo en movimiento.

Cuanta más materia tenga el cuerpo que es movido, más intenso es el ímpetus que recibe. Esta propiedad, junto con la anterior, expresa que la medida del ímpetus de un cuerpo es su cantidad de materia multiplicada por su velocidad.

El ímpetus es algo que tiene una naturaleza permanente y sólo es corrompido por la resistencia que ofrece el medio, es decir, debe ser entendido como un principio violento y no natural, impreso en el cuerpo. El ímpetus como propiedad motriz no es equiparable a la gravedad, como propiedad natural del cuerpo.

En ausencia de fuerzas sobre un cuerpo que se encuentra en movimiento, bajo la existencia de un ímpetus en él, éste continuará en círculo como es el caso de los cuerpos celestes, o en línea recta en los cuerpos terrestres. En realidad, esta característica es más una implicación del trabajo realizado por Buridán que una afirmación enfática; pues él la aplica única y exclusivamente para los cuerpos celestes cuyo movimiento continuo era naturalmente circular. En el mundo terrestre no puede cumplirse la condición de ausencia de fuerzas, ya que en este existen afecciones como las tendencias naturales y la resistencia, este no es un mundo vacío. En esto, Buridán está muy cerca de la teoría de Aristóteles.

Dentro de este esquema, la concepción sobre la caída de los cuerpos que propone Buridán está basada en los siguientes aspectos: Primero, un cuerpo es igualmente pesado, antes del movimiento, después del movimiento y durante el movimiento; segundo, la resistencia que ejerce el medio sobre el cuerpo puede considerarse constante durante todo el movimiento; y tercero, si las condiciones del motor y la resistencia no cambian en el movimiento de un cuerpo, este mantendrá la misma velocidad.

Ahora bien, con estos tres presupuestos ¿cómo explica el aumento continuo de la velocidad de caída de un cuerpo? La única posibilidad, y de la cual ahora hace uso Buridán basado en el supuesto de que la fuerza produce una velocidad, es que un aumento de velocidad está originado en un incremento del ímpetus. Y el aumento del ímpetus al hecho de que el movimiento se hace más rápido. Entra, entonces, en un círculo vicioso y ambiguo, puesto que el aumento de movimiento se va a explicar a partir del aumento del ímpetus, y este último aumento a partir del aumento del movimiento.

Todo lo anterior muestra como la teoría del ímpetus, dentro de un contexto aristotélico, coloca el ímpetus como un intermediario entre la fuerza motriz externa y el movimiento que se origina por ésta. Reemplazándose de esta manera la causa externa aristotélica, como lo es el aire, por una causa interna del movimiento, el ímpetus.

La teoría del ímpetus representa avances en los conceptos empleados para abordar la naturaleza, con relación a los aristotélicos. En la teoría del ímpetus, el principio mediante el cual se relacionan los diferentes cuerpos que intervienen en la producción del movimiento es el principio de la transferencia del movimiento, el cual se presenta siempre y cuando los cuerpos estén en contacto. Con esto, se ha dejado atrás el principio aristotélico basado en las causas finales.

La teoría del ímpetus reemplaza la explicación aristotélica basada en las causas finales por una explicación sustentada en la causa eficiente lo que conlleva, en lo relacionado con el motor, a que todo cuerpo, sin importar su naturaleza, está en la posibilidad de ser motor, y lo es cuando se encuentra en movimiento.

Finalmente, algo que se continúa manteniendo, con diferentes matices pero que en el fondo implican lo mismo, es la necesidad de superar la resistencia del cuerpo para ponerlo en movimiento. El cuerpo se opone positivamente a ser sacado del reposo, por esto, para ponerlo en movimiento hay que realizar una fuerza mayor que esta resistencia. En una primera interpretación del ímpetus, la tendencia al reposo del cuerpo hace que el ímpetus se debilite en el movimiento; mientras que en una segunda interpretación, una vez se logre ponerlo en movimiento, el ímpetus permanece en el cuerpo cuando no existe resistencia por parte del medio.

Nicolás Copérnico

El geocentrismo

Debemos comenzar aclarando que lo que vamos a llamar astronomía ptolemaica o geocentrismo, no es propiamente la teoría astronómica desarrollada por Ptolomeo en el *Almagesto*. Este término lo emplearemos para designar la interpretación que la escolástica hizo de los textos de la antigüedad que fusiona en forma ejemplar la cosmología y física aristotélica con la explicación celeste o astronómica que alcanzó su máximo grado de precisión con Ptolomeo.

El pensamiento cosmológico y físico griego se encuentra sistematizado en la obra de Aristóteles y tiene peculiaridades que lo distinguen del pensamiento astronómico alejandrino consumado en la obra de Ptolomeo; estas diferencias se mostrarán en lo que viene a continuación.

Los principios que sustentan el geocentrismo esquemáticamente pueden ser: el principio de circularidad y uniformidad, y el principio de diferencia entre mundo terrestre y celeste. La tesis es, entonces, que romper con estos dos principios conlleva la caída del geocentrismo y la instauración del heliocentrismo en donde el mundo se hace infinito, no hay una distinción entre mundo terrestre y celeste, y no se privilegia el movimiento circular uniforme.

La forma del mundo para el griego no se aleja mucho del sentido común o de la impresión que se lleva una persona al observar la noche estrellada por un tiempo prolongado. El firmamento se nos presenta como una gran bóveda, o semiesfera, en la que se encuentran enclavadas las estrellas y planetas. Al transcurrir los minutos detectamos que el conjunto de estrellas se mueve al unísono manteniendo la configuración existente entre ellas describiendo semicircunferencias que tienen como centro nuestro punto de observación, la tierra. Esta corta observación nos permite comprender porque los antiguos para orientarse en este mar de estrellas convinieron en agruparlas en constelaciones y darles nombres de acuerdo a formas muy familiares. Los antiguos hicieron un mapa de los cielos definiendo las constelaciones y dando su ubicación relativa.

Si continuamos nuestras observaciones nocturnas durante varios días llega un momento en que nuestra mirada se hace más aguda y podremos detectar que no todo en el cielo se mueve de la misma forma. Hay puntos luminosos que a simple vista no se distinguen de las estrellas y que si bien se mueven no se mueven con todo el conjunto de estrellas. Esta diferencia de movimientos permite distinguirlos de las estrellas. En ocasiones estos puntos luminosos se retrasan y adelantan con relación a la constelación en donde se encuentran, describiendo una especie de bucle para continuar su travesía a lo largo de un grupo de constelaciones especiales, las constelaciones del zodiaco. A este número reducido de

puntos luminosos, que no pasan de cinco observables a simple vista, se les dio el nombre de vagabundos o errantes, lo que actualmente se traduce como planetas. Se les llamaba así pues no mantenían el orden presente en las estrellas, en las estrellas fijas. Como las estrellas no se mueven entre sí, sino todas en conjunto, queda claro porque se les llaman estrellas fijas.

Aunque los planetas no tienen el movimiento regular observado en las estrellas poseen una regularidad en su movimiento a través de las constelaciones del zodiaco: tardan un tiempo determinado, fijo, para ubicarse de nuevo en la constelación de partida. De todas las observaciones precedentes no es difícil concluir que los cielos tienen la forma de una gran esfera que gira uniformemente, y que el grupo de estrellas que desaparecen en el horizonte durante la noche completa el círculo de su recorrido viajando con un movimiento igualmente uniforme sobre la otra cara que no se observa de la tierra y que a la noche siguiente podremos encontrar a este mismo grupo de estrellas en el firmamento.

La justificación anterior del principio de circularidad y uniformidad que dominó a la astronomía ptolemaica recurre a la observación directa. Pero se encuentran otros tipos de justificaciones que no pueden considerarse de menor importancia y que son de interés. Una de ellas involucra aspectos cosmológicos sobre la creación del mundo mezclados con elementos estéticos o matemáticos. Una bella descripción de la defensa de la circularidad y uniformidad se halla en el Timeo de Platón en donde plantea que el mundo debió ser creado por un dios sin ojos, sin miembros, sin oídos porque se autocontiene y es todo. No requiere de estos órganos porque más allá de él no hay nada. Esta forma de concebir el mundo a la manera de un organismo es bastante característica de la física y la cosmología griegas.

Además, se pregunta Platón, ¿cuál es la figura que es capaz de contener más en sí misma? No cabe duda que es la circunferencia. La circunferencia, además de ser la figura cuyos puntos son equidistantes de un mismo punto, tiene la siguiente propiedad matemática que para la época de Platón era bien conocida y demostrada: dado un perímetro determinado se pueden construir diversas figuras con áreas muy variables, pero entre todas estas figuras la que contiene la máxima área es la circunferencia. Ahora ¿cuál es la figura que puede mantener de manera indefinida el movimiento que se le proporcione? Se responde que es la esfera, que mantiene por mayor tiempo su movimiento sobre una superficie pulida en comparación con cuerpos de otras formas; además este movimiento de rotación de la esfera sobre su propio eje tiene la peculiaridad de asemejarse al reposo ya que la esfera girando sobre sí misma no se traslada de un punto a otro. El creador del mundo recurriendo a su perfección le dio la forma de esfera que es la más perfecta de todas y le proporcionó un movimiento que se conserva por siempre.

Los griegos expusieron un buen número de razones para mostrar la naturaleza diversa de los cielos y la tierra. Esta línea de pensamiento está claramente expuesta por Aristóteles, y entre las razones que alega unas tocan con la observación directa mientras que otras caen en el campo teológico y cultural. En primer lugar, mientras la tierra es el mundo de lo corruptible y cambiante, el cielo es el mundo de lo perfecto, de lo siempre constante. Pruebas del cambio y transformación del mundo terrestre se encuentran en el nacimiento, crecimiento y muerte de los seres humanos, los animales y las plantas, como también en los cambios climáticos y atmosféricos. Este tipo de convulsiones, o algo semejante o alejado de

ellas, no se presenta en los cielos; en ellos el número de elementos permanece igual e inmodificable y siempre en las mismas circunstancias. En segundo lugar, este modo de detectar el mundo es consonante con la creencia de que la presencia del ser humano no es digna de ser igualada con la de los demás seres que poblan el mundo. El lugar asignado al ser humano por los dioses debe estar de acuerdo con la jerarquía de éste y en tal posición que esté protegido por ellos, y como el mundo es esférico tal lugar ha de ser el centro de la esfera, el mundo terrestre, y los dioses ocuparan aquellos lugares que se corresponden con su naturaleza divina, los lugares perfectos, la región celeste.

El mundo terrestre, que Aristóteles llama región sublunar, se extiende hasta los límites de la órbita lunar. De allí en adelante hasta las estrellas fijas se halla el mundo celeste, o región supralunar. Como vimos en el capítulo anterior, la teoría aristotélica de los elementos se construye a partir de este principio: el fuego, el aire, el agua y la tierra son los elementos de la región sublunar y el éter, un elemento sutilísimo y divino, compone los cuerpos celestes como las estrellas y planetas. Los cuerpos celestes, de acuerdo con Aristóteles, están enclavados en esferas cristalinas que son su soporte físico para permanecer en sus órbitas y no caer a la tierra. Las esferas cristalinas gozan de una transparencia absoluta ya que están compuestas de éter. Bajo este esquema de pensamiento es interesante ver que los cometas no provienen del mundo incorruptible sino que se originan en el límite de la región supralunar y sublunar.

Los progresos al interior de la astronomía alejandrina se gestaron por una forma de pensar que hizo caso omiso de las especulaciones cosmológicas griegas y asumió como preocupación de primer orden dar una descripción matemática del movimiento de los astros de manera hipotética. Esta inquietud ya había sido formulada anteriormente por Platón quien se preguntaba “¿Cuáles son los movimientos uniformes y ordenados que pueden ser tomados como hipótesis para explicar los movimientos aparentes de los planetas?”. La respuesta al interrogante platónico es dada en forma acabada en el *Almagesto* de Ptolomeo en donde se recurre, en la medida en que sean necesarias, a construcciones geométricas que superponen círculos sobre círculos, que funcionan como variantes del principio de circularidad y uniformidad. En este sentido, el interés de los alejandrinos no es explicar cómo están constituidos los cielos, y por ello no recurren por ejemplo a las esferas celestes, sino proponer los movimientos circulares que es necesario considerar matemáticamente para describir los movimientos de los planetas, sin que ello quiera decir que tales movimientos son a los que realmente están sometidos.

En el caso del movimiento retrógrado de los planetas se recurre a una circunferencia, llamada deferente, que tiene como centro la tierra y a un epiciclo, que es otra circunferencia de radio menor cuyo centro se ubica sobre el deferente. Los periodos de rotación del deferente y del epiciclo se ajustan de acuerdo al movimiento del planeta que se quiere explicar de tal manera que producen los bucles correspondientes al movimiento retrógrado.

Antes de ver el paso de una concepción geocéntrica del mundo a una heliocéntrica, vale la pena preguntarnos qué aspectos impedían la consolidación de una estructura heliocéntrica del universo en la época antigua. El pensamiento antiguo no fue ajeno a la posibilidad de pensar un mundo cuyo centro no fuera la tierra y que incluso fuera infinito, todo este tipo

de consideraciones cabían dentro de un pensamiento altamente especulativo como el griego.

La escuela pitagórica fue la primera en proponer un universo no centrado en la tierra. Su ideal de que todas las cosas están gobernadas por los números y la armonía los llevó a postular como centro del mundo a una gran bola de fuego que desde allí irradiaba luz en todos los sentidos, como también a proponer la presencia de la antitierra en una posición opuesta a la tierra, ajustando así el número de objetos celestes a diez que para los pitagóricos era el número perfecto. Dentro de la escuela alejandrina, y acorde con su propuesta de hacer una descripción matemática de los cielos, Aristarco de Samos propuso un mundo centrado en el sol, conclusión que obtuvo no a la manera especulativa de los pitagóricos sino derivada del cálculo de las distancias relativas entre el sol y la tierra, y la luna y la tierra, al igual que del cálculo de los tamaños del sol y la luna en relación con el de la tierra, encontrando que el primero es mucho mayor que la tierra. Si el sol es más grande que la tierra no es posible, arguyó Aristarco, que lo mayor gire en torno a lo más pequeño sino que debe darse lo contrario. Aparece entonces la pregunta de ¿por qué no se arraigó el heliocentrismo en la antigüedad?

El argumento de Aristarco es bastante atractivo y soportado en mediciones astronómicas pero se puede decir que las razones en contra del heliocentrismo fueron más convincentes para la época. El pensamiento antiguo no estaba preparado para aceptar una idea de este tipo y presentaba argumentos poderosos como los que siguen. Primero, en una tierra en movimiento los cuerpos sobre su superficie no presentarían la quietud que manifiestan sino que saldrían expelidos por los aires; además, las nubes y pájaros en su vuelo se verían retrasados o adelantados desde la tierra ya que no comparten el movimiento de esta; y, por último, al lanzar un cuerpo verticalmente era de esperar que este no retornara de nuevo al lugar desde donde se lanzó. En segundo lugar, aparte de las anteriores objeciones físicas, se encuentra una objeción astronómica como la del paralaje: ¿cómo es que desde la tierra girando en torno al sol no se observa ningún cambio en el brillo y tamaño de las estrellas?, pues en cierto tiempo la tierra estaría más cerca a una grupo de estrellas y tiempo después, por ejemplo al cabo de seis meses, estaría en una posición más distante. Y en tercer lugar, la observación directa, el sólo hecho de ver que el sol y las estrellas son las que se mueven es razón suficiente para inferir que realmente deben estar en movimiento. Aparte de estas objeciones se pueden extraer otras de tipo cultural que de una u otra forma ya han sido mencionadas, ya hemos visto cómo el geocentrismo no sólo se fundamenta en ideas cosmológica y físicas sino que trasciende al ámbito cultural y teológico.

La tradición escolástica hereda los trabajos de Aristóteles y Ptolomeo interpretándolos de acuerdo a sus propios intereses religiosos. Desarrolla, entonces, una simbiosis entre la concepción aristotélica y la ptolemaica sin aparentes contradicciones para el momento pero que se harán evidentes posteriormente. En particular se mantienen las esferas cristalinas y el mecanismo de relojería dado por los epiciclos como entidades realmente existentes en el cielo.

Copérnico y el heliocentrismo

Nicolás Copérnico, como bien lo plantea Kuhn, es el último antiguo y el primer moderno en cuestiones astronómicas. Copérnico fue llevado a plantear su modelo heliocéntrico porque para ese entonces los desfases en el calendario eran bastante notorios y se hacía necesario la elaboración de uno nuevo, tarea que emprendió y culminó con la realización del calendario gregoriano. Pero él era consciente de que las fallas presentes en el calendario no eran de carácter puramente técnico sino que su origen se encontraba en la concepción astronómica ptolemaica que lo soportaba. Otro aspecto, ya no práctico como el anterior, era el de la búsqueda de una armonía geométrica que se traduciría en una simplicidad en los cielos que debía patentizarse en el nuevo modelo de explicación.

Un aspecto importante que preocupaba a Copérnico del modelo ptolemaico era la forma compleja de cómo a partir de un buen número de epiciclos se explicaba el movimiento retrógrado de los planetas. Impulsado por su espíritu platónico de un mundo geométrico, ordenado y simple, Copérnico encuentra que la retrogradación de los planetas se vuelve una conclusión natural si la tierra se mueve en torno al sol y ya no hay necesidad alguna para recurrir a los epiciclos. Se presenta, por ejemplo, el movimiento retrógrado de un planeta superior, como Júpiter, cuando la tierra se va aproximando a él y lo traspasa porque se mueve con mayor velocidad. En el caso de los planetas inferiores, Venus y mercurio, sucede lo contrario, son estos los que se mueven más rápido que la tierra y se detecta su retrogradación desde la tierra cuando se están acercando a ella.

El heliocentrismo copernicano no rompe aún con el principio de circularidad y uniformidad, pero el sólo hecho de desplazar la tierra del centro del mundo invita a pensar que la tierra no es de naturaleza diferente a la de los demás planetas y cuerpos celestes, tema sobre el que Copérnico no se manifiesta explícitamente. Copérnico, al mantener la circularidad, es heredero de las esferas cristalinas y, como debe ser natural, la tierra se halla unida a una de ellas. De forma tal que se ve forzado a involucrar un tercer movimiento en la tierra, el de precesión, además del movimiento de rotación sobre su propio eje y el de translación entorno al sol. El movimiento de precesión de la tierra es, en otras palabras, el movimiento cónico del eje terrestre que hace que el eje siempre esté apuntando hacia un mismo punto del firmamento muy aproximadamente hacia la estrella polar. Dicho movimiento permite de esta manera explicar el cambio en las estaciones. Si este movimiento estuviera ausente en la tierra no habría cambio de estación, porque al encontrarse firmemente agarrada a la esfera cristalina la superficie terrestre queda expuesta a los rayos solares siempre de la misma forma.

Los planteamientos copernicanos estuvieron también sometidos a una dura crítica, muy semejante a la que soportó Aristarco, por parte de los defensores de una tierra estática. Pero a diferencia de este último, las ideas de Copérnico estaban dominadas por un ideal de armonía geométrica y de simplicidad cualitativa que van ser muy tenidas en cuenta por algunos de sus predecesores, como Kepler y Galileo, que cultivaban igualmente ese ideal matemático platónico. Pero antes de continuar con estos dos grandes pensadores debemos detenernos en Tycho Brahe.

Tycho Brahe

La contribución de Brahe en la consolidación del heliocentrismo no tiene el carácter teórico, matemático y reflexivo de Copérnico, Kepler y Galileo, sino que está fundada en la observación meticulosa y detallada de los cielos. La actitud de Brahe es comparable a la de los Fenicios y Babilonios, quienes fueron los primeros en organizar el mapa de los cielos sobre los cuales se basaron prácticamente los trabajos astronómicos hasta la época de Tycho. Este tuvo la posibilidad de construir y dirigir un gran observatorio astronómico sin igual en el momento, lo que le permitió reelaborar y completar el mapa de los cielos como también construir tablas astronómicas bastante precisas sobre la ubicación de los planetas en diferentes momentos del año. Todo esto sin el empleo del telescopio que sería usado por primera vez por Galileo para escrutar el cielo.

Entre las observaciones de Brahe vale la pena destacar dos de ellas con el objeto de detectar las rupturas que produjeron en los dos principios del geocentrismo. La primera tiene que ver con el lugar desde donde proceden los cometas. Fue claro para Brahe, a raíz de sus observaciones, que los cometas no provenían de la superficie última de la región sublunar sino que se aproximaban a la tierra desde regiones bastante alejadas de los planetas pertenecientes a la región celeste. Una consecuencia de este hecho es que no pueden existir esferas cristalinas, pues al ser atravesadas por los cometas se producirían graves efectos que de ninguna manera son constatados.

La segunda se refiere a que Brahe fue uno de los primeros astrónomos que se deleitó presenciando un cambio abrupto en los cielos, pues en sus memorias está consignada la aparición de una nueva estrella. Este fenómeno ya había sido observado por los chinos desde tiempos muy remotos, pero esto no hace parte de la memoria occidental.

Tanto la procedencia de los cometas como la aparición de una nueva estrella dejan sin piso aquel presupuesto griego de un cielo incorruptible y siempre perfecto en contraposición a una región terrestre convulsionada.

Johannes Kepler

Las investigaciones astronómicas de Brahe fueron muy bien conocidas por Johannes Kepler quien fue uno de sus colaboradores. Kepler nació en 1571 y murió en 1630. Su trabajo consistió, aunque no en su totalidad, en ampliar y continuar la revolución copernicana. Haciendo una interpretación de los datos estelares obtenidos por Tycho Brahe, Copérnico había “quitado” la tierra del centro del universo y con ello, el orden cosmológico aristotélico desaparecía por completo; la tierra era la que giraba alrededor del sol y no al contrario como se venía pensando. Hasta Copérnico la preocupación fundamental de la astronomía era “salvar las apariencias” y a esto se reducía el trabajo. El propósito de Copérnico es más profundo, pretende determinar la composición del mundo planetario. Y finalmente, con Kepler, el interrogante será el por qué de dicha composición.

Con Kepler asistimos a dos avances de interés dentro del heliocentrismo: rompe definitivamente con el principio de circularidad y uniformidad, y es el primero en enunciar leyes matemáticas que gobiernan el movimiento de los planetas. El ideal platónico de Kepler lo empuja a buscar regularidades matemáticas en los cielos que son muestra de la grandiosidad de Dios. La creación del mundo obedece a un proyecto claramente establecido con reglas enteramente precisas expresadas en el lenguaje matemático.

En un primer momento, Kepler busca estas regularidades asociando cada una de las órbitas de los planetas con un sólido regular, pero este camino es infructuoso. En un segundo momento, las busca a partir de las órbitas circulares de los planetas pero se encuentra con que las posiciones de mercurio derivadas de los cálculos matemáticos no coinciden en forma significativa con los valores consignados en las tablas de Brahe. Dada su gran confianza en estas tablas, Kepler deja de lado las órbitas circulares y explora la posibilidad de que las órbitas sean elípticas, aprovechándose de los desarrollos que en este momento se venían dando en el tratamiento matemático de la elipse en el que él mismo había hecho grandes contribuciones. Al considerar la órbita de Marte elíptica, cosa que hizo también para los demás planetas, encontró que las discrepancias con las tablas de Brahe se reducían notoriamente. Por esto elevo a primera ley el enunciado que dice que las trayectorias de los planetas son elipses con el sol en uno de sus focos.

La primera ley de Kepler viola la primera parte del principio de circularidad-uniformidad, viola la circularidad. Su segunda ley viola la segunda parte, la uniformidad: los planetas en su camino elíptico no se mueven uniformemente sino que lo hace más rápido en las cercanías del sol y se mueven más lentamente en las posiciones más alejadas. En cuanto a la tercera ley de Kepler, que también se enmarca dentro de las inquietudes de este, va mucho más allá de la simple ruptura con la tradición griega; en ella logra expresar no una regularidad general tan simple como la primera, ni una regularidad a la manera como se hace en la segunda ley con las velocidades de cada planeta, sino que permite relacionar de manera general los periodos de revolución de los diferentes planetas con su distancia promedio al sol, encontrando que esta relación es la misma, es constante, para todos.

Dar respuesta al interrogante acerca del por qué de la composición del mundo planetario lleva entonces a Kepler a proponer una teoría de la gravitación en la que se ha de sustentar la dinámica planetaria, que la constituyen las mencionadas tres leyes. La realización de este propósito de sustentar la dinámica planetaria está fuertemente relacionada con la metafísica de Kepler, la cual se caracteriza por el uso y aplicación de métodos matemáticos o geométricos en las formas explicativas, aspecto que ha de unirse a una corroboración permanente con la experiencia.

La concepción metafísica kepleriana sostiene la existencia desde siempre en la mente del creador de ideas arquetípicas, que eran producidas, por una parte, en el universo visible, y por otra, en la mente humana. Es así como la geometría es el arquetipo de la creación física y se encuentra en la mente humana.

Esta imagen metafísica del mundo, en Kepler, contiene una nueva concepción sobre la causalidad. Las armonías matemáticas que se detectan al analizar los hechos son las causas

de estos; o en otros términos, la razón por la cual se manifiestan de esa manera. La causalidad ha de interpretarse en términos de armonía y sencillez matemática. Bajo estos principios, Kepler se aventura a realizar tratamientos matemáticos exactos de los problemas, siendo el primero en establecer leyes naturales en el sentido conocido en la ciencia actual.

Se ha visto cómo dentro de la teoría aristotélica existe un vínculo estrecho entre el concepto de fuerza y el concepto de cuerpo, sin que sea posible establecer una línea divisoria entre ellos, esto es bien manifiesto en la utilización de términos como fuerzas externas y fuerzas internas, las cuales pueden ser en unos casos motrices y en otros resistivas. Este dualismo no es superado por la teoría del ímpetus. Kepler, en gran parte, logra superar este dualismo unificando las fuerzas bajo el aspecto de exterioridad e introduciendo el aspecto pasivo del cuerpo, el término inercia, como una necesidad lógica. La inercia del cuerpo la concibe Kepler como una propiedad de oposición, o sea, como una resistencia activa, positiva.

Kepler no alcanza a librarse del axioma aristotélico de que el movimiento y su permanencia requieren de una fuerza. Pero en lo que sí avanza es en que esta fuerza productora de movimiento no hay que buscarla dentro del cuerpo, sino fuera de él, ya que el cuerpo es “impotente”, “inerte”, lo cual se manifiesta por su permanente tendencia al reposo, o sea, su resistencia al movimiento.

La inercia es algo propio de todos los cuerpos, es lo que los hace inmóviles y que tengan como destino el reposo. Un cuerpo por sí mismo no se pone en movimiento, y para ponerlo en movimiento se requiere de una fuerza, haciéndose manifiesta la inercia mediante una fuerza de oposición al movimiento; más aún, en el momento en que deje de existir la fuerza sobre el cuerpo, este se detiene por sí mismo. La inercia es algo activo, es una fuerza de resistencia, que también se hace presente en los cuerpos celestes.

Veamos cómo este concepto de inercia se encuadra dentro de la teoría de la gravedad kepleriana, que tiene como propósito la destrucción de la concepción animista del universo. Lo ligero y lo pesado es explicado por Aristóteles como una “pugna real de fuerzas” del arriba y del abajo, siendo estas dos direcciones mera contraposición lógica. Para Kepler, la gravedad pasa a ser de naturaleza relativa, como lo es la distancia, debida a la atracción existente entre los cuerpos. La gravedad es la tendencia de cuerpos semejantes a unirse, siendo esta la causa motriz del movimiento de los astros y de los cuerpos terrestres, y no ninguna causa teleológica. Para Kepler, se debe concebir la estructura del universo no como la de un ser vivo, sino más bien como la de un mecanismo divino de relojería.

El espacio aristotélico, ligado a diferencias cualitativas en los cuerpos, queda desvanecido con la revolución copernicana, configurándose un espacio homogéneo, donde todos los lugares se convierten en lugares naturales para cada cuerpo. Por otra parte, al desaparecer los lugares naturales, el espacio ya no puede ser generador de fuerzas o actividades sobre los cuerpos. No es el encargado de producir movimiento, reposo o determinar la relación entre los cuerpos. Todas estas propiedades que se le habían atribuido al espacio son trasladadas al cuerpo de manera novedosa. El espacio ha sido despojado de su actividad.

La explicación de la gravedad por Kepler aparece históricamente ligada a la teoría del magnetismo de Gilbert, la cual utilizó para explicar la física del universo. Le atribuye a la tierra, a los planetas y a la materia en general, una propiedad magnética muy semejante a la que poseen los imanes. Esta fuerza magnética se puede visualizar mediante líneas, o cadenas, o nervios elásticos que emanan de los astros, convergiendo hacia sus satélites respectivos. En el caso de una piedra suspendida en el aire, esta se encuentra unida a la tierra por infinidad de nervios elásticos de configuración cónica en cuya cúspide se encuentra la piedra, de tal manera que la piedra es atraída a la tierra por todos lados.

Kepler explicó la rotación diaria de la tierra sobre su eje por medio del ímpetus que el creador le había dado desde el comienzo. El movimiento de los planetas tenía su origen en las líneas procedentes del sol. Los satélites son mantenidos en sus órbitas por dos fuerzas: una, la atracción mutua con el cuerpo central, y la otra, la fuerza magnética surgida del sol que lo impulsa tangencialmente. En lo anterior, no hay que descontar la fuerza de resistencia debida a la inercia del astro, la cual lo libera en parte del impulso al cual se encuentra sometido. Para el caso de un proyectil que sea lanzado lo suficientemente lejos de la tierra verticalmente hacia arriba, aunque este comparte con la tierra su movimiento de rotación no caerá en el sitio desde el cual fue lanzado debido a la fuerza de resistencia, su inercia, que lo libera en alguna medida del impulso de la tierra.

En todas estas explicaciones es notoria la búsqueda de fuerzas tangenciales o laterales para la descripción de las órbitas planetarias, que no pueden originarse en las fuerzas magnéticas centrales exclusivamente.

Por otra parte, con Kepler se avanza en el concepto de masa y en la relación que guarda esta con la fuerza, haciéndose de esta manera cuantificable. Esto es manifiesto cuando plantea la situación de colocar una piedra de tamaño comparable con la tierra en las cercanías de esta, y concluye que, en ausencia de otras influencias, tanto la tierra como la piedra son recíprocamente atraídas una sobre la otra, sobre la línea que las une, recorriendo distancias inversamente proporcionales a las masas respectivas.

Es así como al hacerse el concepto de fuerza matematizable, esto origina que el concepto correlativo de masa también lo sea. De igual forma, el término de resistencia va definiéndose como principio matemático y físico, el cual permite distinguir unos cuerpos de otros debido al modo diferente cómo reaccionan a la misma causa motriz.

Con Kepler asistimos a un gran progreso en la manera de ver las fuerzas. Se comienza el proceso de externalización de las fuerzas y la reciprocidad en las acciones de los cuerpos que están presentes; la fuerza es vista como una interacción.

Además, Kepler acentúa más la disociación conceptual entre cuerpo y fuerza. La fuerza siempre será externa al cuerpo y el cuerpo se ha de caracterizar por lo inerte; aunque esta inercia es una oposición positiva, que es muy viable pensarla como una fuerza interna al cuerpo, con la propiedad de afectar al mismo cuerpo.

Galileo Galilei

La tradición histórica ha visto en Galileo, quien nació en 1564 y murió en 1642, al padre de la ciencia clásica. Es en su obra, al igual que en la de Kepler, donde por primera vez en la historia del pensamiento humano se realiza la idea de la física-matemática.

Sus aportes astronómicos

Las contribuciones más importantes de Copérnico y Kepler pertenecen al campo de la astronomía, este no es el caso de Galileo ya que hizo grandes aportes tanto en la física terrestre como en la celeste. En esta sección nos interesa principalmente los que produjo en el segundo aspecto. Es bien conocido que Galileo se inscribe dentro de la tradición platónica, aunque este aspecto no se haga notorio en sus aportes astronómicos.

Galileo, aunque no fue propiamente quien descubrió el telescopio, sí fue el primero en dirigir el telescopio hacia el cielo para hacer un estudio detallado de este, y para ello dedicó tiempo al pulimento de lentes y a mejorar la potencia del telescopio. Escudriñó todos los rincones del firmamento: la luna, Venus, Júpiter, Saturno, el sol y las estrellas.

Al dirigir su telescopio a la luna observó regiones oscuras y claras las cuales interpretó, a las primeras como cráteres o valles y a las segundas como montañas. Las montañas, al ser más altas que los valles, son susceptibles de ser iluminadas por el sol impidiendo que la luz llega a ellos. Galileo concluye entonces que la luna es tan accidentada, con valles y montañas, como la tierra, luego es de esperar que su constitución sea semejante y no esté compuesta por una materia divina y etérea como se suponía. Accidentes, no de esta naturaleza sino manchas encontró también al observar el sol a través del telescopio lo que indica que el sol no es del todo perfecto.

Este aumento de poder de la vista a través del telescopio le permitió a Galileo observar también fases en Venus semejantes a las que se producen en la luna, que no pueden ser explicadas sino suponiendo que este planeta gira en torno al sol y no a la tierra. En Júpiter se halló con un microsistema solar, pequeñas lunas girando en torno suyo que hacía las veces de sol. Al observar Saturno, el poder de resolución del telescopio le impidió ver claramente sus anillos, observando dos protuberancias opuestas al planeta que interpretó como lunas de Saturno. Y por último, al orientar el instrumento hacia las estrellas se halló con un universo infinito. Puntos que a simple vista aparecían como una estrella, al ser observados a través del telescopio se presentaban como un número inmenso de ellas, pudiéndose distinguir claramente que unas estaban más alejadas de otras; regiones donde no se observa nada a simple vista se poblaban al ser observadas por el telescopio.

En síntesis, las interpretaciones que hizo Galileo de sus observaciones reafirman y les dan mayor peso a las ideas heliocéntricas anteriores. La tierra es un planeta más, gira en torno al sol, y en el sistema solar hay pequeños sistemas análogos a los que tienen como centro a los planetas y lunas girando alrededor de estos. El mundo se hace infinito y es posible que existan otros sistemas semejantes al nuestro que tengan como centro las estrellas que

observamos. No hay tal privilegio de una tierra en el centro ni tal privilegio de cielos perfectos; no se conoce con absoluta certeza la constitución de los planetas, el sol y las estrellas; es muy probable que los planetas se compongan de algo semejante a la tierra y que las estrellas sean otros soles muy distantes, pero en todo caso su naturaleza no puede ser considerada divina.

Matematización de la naturaleza

Galileo se dedicará al estudio de los cuerpos en movimiento y más concretamente de aquellos que caen, de ahí que la física galileana se podría llamar, como dice Koyré, la física de la caída. El problema de la caída de los cuerpos siempre será abordado desde una perspectiva matemática, con la preocupación por la consecución de leyes que rijan el movimiento.

Con Galileo se asiste a una época donde la manera de enfrentar la naturaleza y de producir explicaciones de ella sufre cambios profundos. Con Aristóteles, el análisis del movimiento colocaba especial atención al por qué se produce, y el estudio se llevaba en términos de cualidades y sustancias. Para Galileo, el análisis busca el cómo se producen los movimientos; el estudio se realiza en términos matemáticos, recogiendo la tradición platónica y arquimediana.

La polémica entre Aristóteles y Platón se fundamentaba en el rol que juega la matemática en las explicaciones físicas. Es decir, en el aspecto de si la matemática conlleva a la verdad sobre las cosas, o si por el contrario resulta perjudicial y peligrosa. Platón planteaba que las matemáticas eran de gran utilidad para las explicaciones físicas, mientras que para Aristóteles matematizar la naturaleza no llevaba a nada; en el mundo real lo que existen son las cualidades y las formas, las cuales no pueden ser matematizadas ni geometrizadas, es decir, el hecho de ser la realidad física cualitativa e imprecisa choca completamente con la rigidez de las matemáticas.

Para Galileo, es imposible elaborar una explicación física sin el uso de las matemáticas y por esto la única forma de llegar a ella es interrogándola en términos matemáticos. Además, las leyes matemáticas tienen un valor real y dominan completamente la física, puesto que existe una homogeneidad entre la geometría y los entes de la naturaleza. La creación de una ciencia matemática que reemplace la física aristotélica es la tarea asumida por Galileo. Para ello, fue necesaria la elaboración de una nueva terminología y darle sentido matemático a términos como: resistencia, movimiento, velocidad, aceleración, etc.

El método cualitativo aristotélico daba muy poca importancia a conceptos como espacio y tiempo, puesto que examinar los hechos en estos términos significaba dar importancia a aspectos que se consideraban meramente accidentales. Desde Galileo, los conceptos de espacio y tiempo, tratados matemáticamente, se convierten en categorías fundamentales

Movimiento de caída. Gravedad

Como ya se dijo, Galileo construye una teoría matemática sobre la caída de los cuerpos en la tierra que ha de estar fuertemente relacionada con una explicación del movimiento de los astros. Para Galileo, el movimiento de caída es el único movimiento natural puesto que se produce por sí mismo, no necesita de una acción externa al cuerpo; y es en éste sentido que se debe entender el término natural en Galileo. En Galileo, el movimiento no expresa ni se relaciona con la naturaleza física del cuerpo; el movimiento no afecta la naturaleza del móvil y un cuerpo posee movimiento siempre con relación a otro. El movimiento y el reposo adquieren el carácter de relativos y, con ello, son puros accidentes del cuerpo.

El movimiento hacia arriba no es para Galileo un movimiento natural pues, como dijimos, el único movimiento natural es el de caída. Esta inferencia tiene su principio en la gravedad de los cuerpos como propiedad constitutiva e inseparable del cuerpo. Todos los cuerpos son graves y tienden hacia un centro específico, que es el lugar que corresponde de acuerdo a su naturaleza grave. Es así como la pesantez de los cuerpos es algo relativo que depende del medio en el cual se encuentran inmersos los cuerpos; por ejemplo, el fuego es leve no por cualidad sino porque es empujado hacia arriba por otros más pesados que él. Si bien los cuerpos en la tierra caen hacia el centro de ella, esta tendencia del cuerpo a un centro específico no puede interpretarse como una causa final, es decir, como la tendencia a un lugar donde el cuerpo se perfecciona y se realiza.

La única propiedad dinámica que Galileo le deja a los cuerpos es la gravedad, todas las demás que se le atribuyen son enteramente geométricas, y esto porque una ausencia de gravedad en los cuerpos implicaría un mundo completamente estático, donde no existe producción de movimiento, es decir, es un mundo falto de causa.

Explicemos esto un poco mejor: La gravedad en la física galileana es la única fuente de movimiento, el único principio activo; los choques no hacen sino transmitir el movimiento de un cuerpo a otro, un movimiento que ya existe. El que la única fuente generadora de movimiento sea la gravedad se manifiesta cuando un cuerpo cae y va adquiriendo velocidad; al igual que por el hecho de que cuando un cuerpo sube por una pendiente pierde velocidad. Por tanto la gravedad tiene un papel dinámico; pero de resto, el mundo galileano es un mundo que adolece de fuerzas, es enteramente frío, estático.

Lo anterior es bien notorio en su afirmación de que la velocidad adquirida por un móvil en planos de diferente inclinación es igual cuando lo es la altura de los planos. Allí no nombra en ningún momento causa alguna, fuerza o fuente que origine aumento de velocidad; Galileo admite como evidente que un cuerpo al descender por un plano aumente la velocidad. Para él no es posible pensar la gravedad de un cuerpo como una fuerza que actúa sobre el cuerpo. La gravedad y la masa se confunden en Galileo. La gravedad es algo que pertenece al propio cuerpo; y por esto un cuerpo en cualquier lugar siempre ha de pesar lo mismo y caer de la misma manera.

El mundo que imagina Galileo es un mundo estático que adquiere un carácter dinámico a expensas de la gravedad. De ahí, que no es menester pensar en causas adicionales a la gravedad, en fuerzas y en ímpetus (en términos de Buridán).

Inercia circular

Al principio de que los cuerpos son graves se va a unir un segundo principio, el de un orden cosmológico donde prima el orden circular y la finitud del espacio. La física galileana sienta sus explicaciones sobre estos dos principios, y sobre ellos se alzarán el principio de inercia galileano.

Galileo muestra que existe un tipo de movimiento: el circular, que no es ni natural ni violento. En un movimiento circular nada cambia. Por esta razón, según Galileo, un cuerpo en la tierra que no encuentre ninguna resistencia puede moverse indefinidamente describiendo trayectorias circulares, puesto que ni se aleja ni se acerca del centro de la tierra. No es posible que el cuerpo se mueva de modo indefinido en línea recta puesto que, en primer lugar, al ser el espacio finito, el cuerpo tendría que finalmente llegar a un punto final en su movimiento, y en segundo lugar, al ser grave, tiende hacia el centro de la tierra. No hay que olvidar que si no existiese la gravedad, el mundo, según Galileo, sería estático. La finitud del espacio y la gravedad condicionan completamente la permanencia o constancia del movimiento circular, sin necesidad de recurrir a agentes externos. Y esto no es válido para el movimiento rectilíneo horizontal, que no existe porque los cuerpos son graves y si dejaran de serlo no podrían moverse.

La física galileana muestra por primera vez un movimiento que se mantiene por sí mismo, sin recurrir a ningún agente externo o alma motriz. El movimiento circular se conserva porque es acorde con la naturaleza o propiedades intrínsecas del cuerpo, se podría decir con la gravedad. Dar la posibilidad de la existencia de tales movimientos, con esas características, ha de representar un gran avance dentro de las teorías físicas.

Newton introduciría luego su principio de inercia, según el cual todo cuerpo sobre el que no obra ninguna fuerza tiende a permanecer en reposo o en movimiento rectilíneo. Los movimientos uniformes rectilíneos son llamados, en la física newtoniana, movimientos inerciales, pues son los que siguen los cuerpos por su propia inercia. El movimiento circular en la física de Newton requiere siempre la acción de una fuerza. En la física de Galileo, en cambio, la ausencia de fuerza da lugar al movimiento circular. Los movimientos circulares son los movimientos inerciales en la física galileana.

Composición de movimientos

Según vimos en el capítulo anterior, en Aristóteles no cabe la idea de que un cuerpo esté sometido a más de un movimiento; los diferentes movimientos, según sean compatibles o no con la naturaleza del móvil, resultan igualmente compatibles o no entre sí. El movimiento es una expresión de la naturaleza del cuerpo, que es única.

Para Galileo el movimiento no afecta la naturaleza del cuerpo, los movimientos entonces son compatibles, es decir, pueden coexistir en un cuerpo, ningún movimiento puede estorbar a otro.

Explicación de la trayectoria de un proyectil

Teniendo en cuenta los principios mencionados, es muy sencillo para Galileo dar cuenta del movimiento de proyectiles. Su explicación es que, puesto que los movimientos horizontal y vertical, a los cuales está sometido el cuerpo, no se estorban, y dado que la gravedad actúa siempre, la trayectoria de un proyectil se curva desde el principio configurándose una parábola.

El movimiento vertical, el que se presenta en la caída libre, es por principio uniformemente acelerado puesto que tiene origen en la gravedad del cuerpo. En cuanto al movimiento horizontal, que en la realidad corresponde a un arco de circunferencia, se ha de mantener puesto que es un movimiento inercial.

El espacio

El espacio galileano es un espacio que no es totalmente vacío, puesto que contiene una serie de puntos con respecto a los cuales giran o hacia los cuales caen los cuerpos graves que han de colocarse en este espacio. Esto hace que el espacio galileano no sea totalmente homogéneo, los cuerpos no pueden ocupar cualquier región del espacio; ni que sea isotrópico, existen direcciones privilegiadas, como las radiales hacia un punto, o las circulares respecto a un punto en el caso de los movimientos inerciales circulares. De todas formas nos encontramos muy cerca del espacio vacío euclidiano, que será el que conformará la mecánica newtoniana.

El tiempo

En cuanto al tiempo propuesto por Galileo, será un tiempo mucho más cercano al tiempo “absoluto, verdadero y matemático” de Newton que su espacio mismo. Galileo llega a un tiempo matemático constituido por instantes y también homogéneo; pero en cierta forma es un tiempo falto de dinamismo, no es concebido como un fluir, sino simplemente como la seriación o unión de instantes. Se podría decir que la física estática galileana involucra necesariamente un tiempo estático.

Pero lo que sí hay que resaltar y dejar bien en claro es que Galileo independizó el tiempo del movimiento e hizo que tiempo y movimiento cobraran identidad propia, determinando la manera matemática como se relacionan. Este aspecto de disociar el tiempo, el espacio y el movimiento es de suma importancia en la evolución de las ciencias físicas.

Con relación a Aristóteles se han presentado grandes cambios en la forma de interpretar el tiempo. Recordemos que el tiempo, en Aristóteles, es la medida del movimiento, y como tal no puede ser pensado independiente de este. Así como el movimiento no puede ser abstraído del cuerpo, el tiempo tampoco podrá serlo. El tiempo hace parte de la existencia de los cuerpos. Ahora, puesto que el ser humano hace parte del mundo, el tiempo de Aristóteles es en cierta forma el tiempo “vivido” por nosotros.

En Galileo aparece el tiempo como un continuo mensurable, se ha desterrado el tiempo como algo vivido, el hombre ya no hace parte del mundo físico en sentido estricto. El estudio de la velocidad y la aceleración obligó a Galileo a generar una representación geométrica del tiempo sobre una línea recta. Con Galileo, el mundo empieza a concebirse como una máquina donde es posible determinar sus estados futuros a partir de las condiciones presentes, y todo esto es posible porque ha sido eliminado el hombre del mundo real.

René Descartes

René Descartes se incluye dentro de la lista de hombres que contribuyeron a plantear una perspectiva diferente a la aristotélica, completamente renovadora de las ciencias. Su ingenio e imaginación se encuentran plasmados en las diferentes contribuciones que realizó como pensador, interviniendo en variados campos del saber como: la matemática, las ciencias de la naturaleza y la filosofía.

Descartes se acoge a la tradición platónica, y como tal, ha de buscar leyes matemáticas que no necesariamente se identifican con la naturaleza pero que sí son las que rigen a la naturaleza, ya que son las leyes que impuso Dios a esta. Es decir, Descartes no se preocupa por entender cómo funcionan las cosas, sino cómo deben funcionar. Descartes se abstrae completamente de los fenómenos, concibiendo el mundo como constituido por muy pocas cosas y regido enteramente por la matemática, logrando llegar a resultados sumamente interesantes y valiosos para la fundamentación de la mecánica newtoniana.

Extensión y movimiento

Para lograr su objetivo de construir una explicación basada absolutamente en las matemáticas, Descartes reduce todo lo material a extensión y movimiento. Los cuerpos son extensos dado que la materia por la cual están constituidos es homogénea y uniforme; además, estos cuerpos se encuentran en reposo o en movimiento. Este último se determina cuantitativamente por lo que se llama cantidad de movimiento, que es equivalente a la cantidad de materia (extensión) por la velocidad que posea.

Los cuerpos cartesianos son cuerpos que no poseen peso, poseen extensión única y exclusivamente, no poseen ninguna otra cualidad. Descartes reduce el cuerpo a extensión y el mundo a geometría. La única manera como los diferentes cuerpos pueden darse a

conocer a otros cuerpos es mediante el contacto, por medio de choques. No existe otra forma en que pueden interrelacionarse los cuerpos cartesianos.

Esta forma muy particular de ver el mundo se fundamenta en una idea de autogobierno por parte de la naturaleza, la cual requirió de Dios solamente para que se generara una primera cantidad de movimiento, dejando al mismo tiempo cierta cantidad de reposo. Es así como esta primera cantidad de movimiento y reposo no ha de aumentar ni disminuir, sólo se distribuye de maneras diferentes entre las cosas; puesto que la extensión, el otro elemento constitutivo del mundo cartesiano, no tiene porqué afectar el movimiento, ya que las cosas, la extensión misma, se originan gracias al movimiento.

En el mundo cartesiano no existen generadores ni fuentes de movimiento (en cierto sentido, fuerzas), al igual que no existen sifones por donde sea viable la desaparición del movimiento. Por ejemplo, no existe algo activo como la gravedad, productora de movimiento.

La forma de interrelacionarse los diferentes cuerpos en el mundo cartesiano es, entonces, mediante choques donde el movimiento, a la manera de una sustancia, pasa de un cuerpo a otro sin que en su totalidad se pierda. Es decir, la dinámica de este mundo consiste simplemente en una transferencia de movimiento a semejanza con un fluido. De ahí que dentro del esquema cartesiano la transferencia y la conservación del movimiento sea un principio que implicará todo lo demás.

Lo mismo que conduce a Descartes a aceptar la conservación del movimiento, o sea, el hecho de que este es transferido de un cuerpo a otro mediante choques, lo ha de llevar a determinar la permanencia del movimiento. El movimiento para mantenerse se explica de igual manera como se explicaba anteriormente el reposo; no es necesaria ninguna causa para su existencia. El movimiento y el reposo son para Descartes estados.

En perfecta coherencia con su visión de la transmisión del movimiento, Descartes entra a explicar el reposo de un cuerpo. Hecho novedoso dentro de la evolución de las ciencias, ya que nadie había afrontado este problema, excepto Kepler al estudiar la inercia de los cuerpos. Dentro del espíritu lógico que anima a Descartes, tanto como es necesaria la explicación del movimiento como estado, así lo es la explicación del reposo. La concepción cartesiana del reposo no es entendida a la manera kepleriana, como una resistencia al movimiento, sino como una absorción de movimiento: el cuerpo en reposo toma movimiento del cuerpo que lo está empujando. Idea totalmente compatible con una concepción sustancial del movimiento.

Dentro de este esquema, es posible pensar en una cantidad de reposo en un cuerpo inmóvil, y es debido a esta que unos cuerpos oponen mayor o menor resistencia a su puesta en movimiento. Por esto, arguye Descartes, un cuerpo pequeño, al golpear a uno de mucho mayor tamaño, nunca podrá ponerlo en movimiento por más velocidad que lleve.

Esta concepción de reposo es la que ha de utilizar Descartes para dar explicación a los fenómenos de cohesión y dureza. En la física cartesiana, el principio de separación es el movimiento y el reposo será el principio de unión y cohesión. Al entender el reposo como

una fuerza positiva, el reposo relativo de las partes constitutivas de un cuerpo es lo que forma la unión y dureza de este.

Ahora bien, ¿cómo es posible utilizar ese gran principio de transferencia de movimiento para dar cuenta del movimiento de los planetas y la gravitación terrestre, en un mundo ausente de principios activos (fuerzas) y donde lo único que existe es la extensión y el movimiento? Lo que va a hacer Descartes es proponer un medio infinito o materia sutil, que se llama éter o “materia primera”, sobre la cual flotan todos los cuerpos. A esa materia Dios le ha dado cierta cantidad de movimiento y forma una serie de vórtices o torbellinos, en los cuales los planetas y los cuerpos terrestres sufren movimientos giratorios o son impulsados hacia ciertos puntos centrales. Todo ello debido a las leyes del movimiento vortiginoso.

Al introducir esta materia primera con sus propiedades bien especiales, Descartes en cierto sentido elude el problema. Con su propósito de geometrizar el mundo, atribuye a este medio características que se expresan, por ejemplo, en la gravedad. Pero esto no lo salva de dejar cosas sin explicar, como es el hecho muy general de que dos cuerpos de igual forma, en idénticas circunstancias, son susceptibles de efectos diferentes. Todo esto sucede en Descartes por pretender reducir toda la actividad del mundo a transferencias de movimiento, y los cuerpos a sus correspondientes dimensiones, despojándolos de toda propiedad dinámica. Es así como la teoría altamente especulativa del torbellino oculta las causas dinámicas de lo real en este medio invisible, y preserva con ello el carácter puramente geométrico de los cuerpos.

La aplicación de la teoría del torbellino para el caso de la gravedad se presenta en los siguientes términos: la gravedad es el resultado de una serie de empujes realizados por una multitud de partículas sobre el cuerpo que es llevado hacia la tierra. Estas partículas son materia sutil que gira alrededor de la tierra. Lo cual conlleva a desechar la gravedad o pesantez como una propiedad del cuerpo o como la atracción del cuerpo por parte de la tierra.

De todas maneras, la teoría del torbellino desarrollada por Descartes es de suma importancia, ya que se presenta como una alternativa a explicaciones de corte tradicional como la aristotélica, reemplazando una concepción espiritual y teleológica del mundo por una concepción material y mecánica.

El espacio y el tiempo

Veamos, por último, qué nos dice Descartes sobre el espacio y el tiempo. En cuanto al espacio cartesiano, es claro que ya es completamente matemático y en este sentido homogéneo e isótropo. Lo que le falta es ser vacío para llegar a convertirse en el espacio newtoniano. El espacio cartesiano es un espacio donde no es posible que existan regiones vacías, es todo lleno; la presencia de espacios vacíos en el mundo cartesiano imposibilita completamente cualquier transferencia del movimiento. Es espacio en Descartes no se encuentra desvinculado conceptualmente de los cuerpos, por esto es lleno.

Un mundo mecánico como el cartesiano, donde todo cambio ha de explicarse a partir de choques e intercambios de cantidad de movimiento, no requiere ser analizado en el tiempo, sino en el espacio. Toda pérdida o ganancia de cantidad de movimiento en una región del mundo se compensa como una ganancia o pérdida en otra u otras regiones del espacio. El mundo se ha de imaginar como un conjunto de cuerpos, uno a continuación del otro, donde los diferentes cuerpos cambian el valor de su velocidad de una manera regular y acorde con la velocidad de los demás cuerpos. El mundo cartesiano no es dinámico en su aspecto general; la cantidad de movimiento total se debe conservar y eso lo hace estático y al margen del cuerpo. El mundo cartesiano es atemporal.

El movimiento concebido por Descartes no tiene sino una relación indirecta con el cuerpo, el movimiento cartesiano es ante todo una distancia, la trayectoria. Es análogo al movimiento que debe tener un punto para generar una línea, o el que debe tener una línea para generar un plano; es un movimiento atemporal. Como dice Koyré, es el movimiento de los geómetras.

En síntesis, la física cartesiana está sentada en el principio de transferencia del movimiento, por medio de la cual se relacionan los diferentes cuerpos; transferencia que se presenta únicamente por el contacto de los cuerpos. Se podría pensar que en este aspecto Descartes no se aleja de lo planteado en la teoría del ímpetus. Esto es correcto si se piensa en un aspecto específico, por ejemplo, en la explicación de fenómenos muy concretos. Pero esta preocupación de explicaciones específicas es válida para el caso de la teoría del ímpetus. Descartes lleva más lejos el hecho de la sustancialidad del movimiento, tan lejos que, a partir de esta, y junto con su preocupación de matematización, pretende dar cuenta de todo cuanto existe; hazaña que no es nada comparable con el propósito de la teoría del ímpetus. Más aún, la propuesta cartesiana es que lo real es explicable sin necesidad de recurrir a causas finales. Solo se precisa de unos cuantos principios matemáticos elementales.

Isaac Newton

Nació en 1642 y murió en 1727.

Las leyes de la dinámica

La mecánica de Newton se formula mediante tres leyes. Vamos a enunciarlas como aparecen en su libro: “Principios matemáticos de la filosofía natural y su sistema del mundo”, más conocido como Principia por el comienzo de su título en Latín. Newton comienza con una serie de definiciones, antes de formular sus leyes. Presentaremos las dos primeras y luego su primera ley. La primera definición es la de masa. Dice así:

“La cantidad de materia es la medida de la misma, surgida de su densidad y magnitud conjuntamente”

Newton amplía a continuación la definición en término de densidad y volumen y afirma “Es esa cantidad la que en lo sucesivo menciono bajo el nombre de masa o cuerpo”

Para Newton entonces la masa es la cantidad de materia. Hoy en día se concibe la masa como medida de la inercia de la materia o sea como medida de su resistencia al cambio de estado. Esto se aclarará cuando presentemos un poco más adelante la primera ley de Newton.

La segunda definición es la de cantidad de movimiento:

“La cantidad de movimiento es la medida del mismo, surgida de la velocidad y la cantidad de materia conjuntamente”

La cantidad de movimiento es entonces el producto de la masa por la velocidad.

Newton formula su primera ley en la forma siguiente:

“Todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas”

La primera ley se conoce como el principio de inercia. Sobre la tendencia de la materia a permanecer en estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, Newton dice en su tercera definición, presentada como las dos primeras antes de enunciar sus leyes, que:

“La fuerza ínsita de la materia es un poder de resistencia de todos los cuerpos, en cuya virtud perseveran (...) por mantenerse en su estado actual, ya sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta”

Hoy en día se concibe la masa como medida de la inercia de la materia o, en términos newtonianos, como medida de esa fuerza ínsita a la que Newton hace referencia. Por ello se habla de masa inercial.

En cuanto a la fuerza impresa, ha dicho en su definición cuarta:

“La fuerza impresa es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, bien sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta”

En la actualidad no se habla de fuerza ínsita y la fuerza impresa es lo que se conoce como fuerza neta aplicada a un cuerpo.

El efecto cuantitativo de la fuerza aplicada a un cuerpo es enunciado en la segunda ley:

“El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y se hace en la dirección de la línea recta en la que se imprime esa fuerza”

En lenguaje moderno la ley dice que el cambio de la cantidad de movimiento es igual a la fuerza neta total sobre el cuerpo.

La tercera ley conocida como la ley de la acción y de la reacción dice:

“Para toda acción hay siempre una reacción opuesta e igual. Las acciones recíprocas de dos cuerpos entre sí son siempre iguales y dirigidas hacia partes contrarias”

Las ecuaciones que relacionan las fuerzas con los cambios de la cantidad de movimiento pertenecen a la clase de ecuaciones llamadas diferenciales. Las ecuaciones diferenciales representan relaciones entre ratas de cambio de ciertas cantidades, en un punto del espacio y en un instante del tiempo, y otras cantidades, en el mismo punto y en el mismo instante. Como las relaciones se tienen en un mismo punto y en un mismo instante se denominan también relaciones locales e instantáneas. En el caso de las ecuaciones de Newton, las relaciones son entre las ratas de cambio de la cantidad de movimiento y las fuerzas en el mismo punto y en el mismo instante.

Las ecuaciones diferenciales permiten calcular, a partir de los valores en un punto y en un instante de las cantidades que cambian, los valores de esas cantidades en cualquier otro punto y en cualquier otro instante. En las ecuaciones de Newton, las cantidades que cambian son las velocidades y las posiciones. Por lo tanto, si se conoce el valor de las posiciones y las velocidades en un punto y en un instante, las ecuaciones permiten conocer los valores de las posiciones y las velocidades en cualquier otro punto y en cualquier otro instante. Los valores de esas cantidades representan el estado dinámico del sistema. Esto significa que si se conoce con certeza el estado dinámico en un instante dado, las ecuaciones permiten conocer con certeza cuál será el estado dinámico en cualquier otro instante. Ahora bien, si se conoce con certeza el estado inicial las ecuaciones no sólo permiten conocer cuál será el estado en cualquier instante futuro, sino que también permiten conocer cuál fue el estado en cualquier instante pasado. Se concluye entonces que las ecuaciones determinan totalmente la evolución del sistema. Por ello se llaman también ecuaciones deterministas.

Hay que recalcar que no basta tener ecuaciones deterministas para hacer predicciones deterministas, es necesario también el conocimiento preciso del estado del sistema.

Acerca del carácter determinista de las leyes de Newton y la visión determinista del mundo es necesario ampliar la discusión en este punto. Newton en sus Principia no sólo enunció sus tres leyes sino que también llevó a cabo un desarrollo matemático sistemático para explorar las consecuencias de esas leyes. Haciendo uso tanto de sus tres leyes del movimiento como de su ley de la gravitación universal, de la cual hablaremos un poco más adelante, derivó las tres leyes de Kepler y explicó, entre otros fenómenos, el movimiento de la Luna, las mareas terrestres y el comportamiento de los cuerpos bajo el efecto de la atracción de la Tierra.

El éxito y el poder de las leyes de Newton para predecir el comportamiento de los objetos mecánicos dieron lugar al aspecto determinista de la visión mecanicista del mundo. Es necesario ampliar este asunto un poco más. El poder que proporcionaron las leyes de Newton se refería a nuestra capacidad de predecir. Por hacer referencia a nuestras capacidades, el poder de predecir es algo epistemológico: se remite a lo que podemos o no

llevar a cabo, a lo que podemos o no conocer. La palabra epistemología viene del griego *epistēmē*: conocimiento, que a su vez se deriva del verbo *epistēnai*: conocer, saber. Se relaciona con ontología que, como vimos, es el estudio del ser en cuanto ser, de la realidad en sí, independiente de lo humano, en particular del conocimiento accesible a los humanos. El éxito epistemológico de la mecánica clásica condujo a su interpretación en términos ontológicos: no se trataría solamente de predictibilidad, cuyo carácter es epistemológico, sino de determinismo, que es algo ontológico: la realidad misma sería determinista lo cual explicaría nuestro poder de predicción al aumentar nuestro conocimiento de ella. La imagen determinista del mundo está expresada de manera clara en la famosa cita de Laplace en su libro *Essai philosophique sur les probabilités* :

“Debemos entonces considerar el estado presente del Universo como el efecto de un estado anterior y como la causa de aquel estado que ha de seguir. Supongamos por un instante una inteligencia que pudiera conocer todas las fuerzas por las cuales la naturaleza está animada y la situación respectiva de las entidades que la componen (...) tal inteligencia incluiría en la misma fórmula el movimiento de los grandes cuerpos del universo y de los más ligeros átomos; para tal inteligencia nada sería incierto y el futuro, al igual que el pasado estaría presente ante sus ojos”.

Ahora bien, el gran poder de predicción que condujo al elemento determinista en la visión del mundo se debió al tipo de sistemas a los cuales se aplicaron con éxito las leyes de Newton. Para tales sistemas, llamados técnicamente integrables, es posible llevar a cabo predicciones de su comportamiento a largo plazo: para mejorar la precisión de nuestras predicciones en un cierto porcentaje, basta mejorar el conocimiento del estado inicial en el mismo porcentaje. Hoy en día, sin embargo, se conoce que pocos sistemas son integrables. Existen los sistemas llamados caóticos, o sensibles a condiciones iniciales, para los cuales, no importando cuán preciso sea nuestro conocimiento de las condiciones iniciales, mientras exista un grado de imprecisión tan pequeño como se quiera, la imprecisión en nuestra predicción del estado futuro del sistema crecerá exponencialmente con el tiempo. Como en la práctica siempre existe una imprecisión en nuestro conocimiento del estado inicial, resulta entonces que el sistema es a largo plazo impredecible.

¿Implica tal impredecibilidad que la realidad descrita por la mecánica clásica es indeterminista? La respuesta es no, pues es posible seguir invocando la inteligencia suprema de Laplace la cual puede conocer con precisión infinita el estado inicial del sistema y por tanto conocer tanto el estado futuro como el estado pasado del sistema. En el sentido de que, a pesar de la existencia de sistemas caóticos, todavía puede mantenerse que la visión del mundo derivada de la mecánica clásica es determinista, afirmaremos que para los sistemas regidos por la mecánica clásica el pasado y el futuro están contenidos en el presente.

Una pregunta, sin embargo, surge a nuestros ojos de manera natural, y es la siguiente: dada la existencia de sistemas regidos por la mecánica clásica pero en la práctica impredecibles, ¿es todavía razonable invocar una inteligencia como la que menciona Laplace? En otras palabras, dada la existencia de una impredecibilidad en la práctica irreducible, ¿es razonable mantener la idea de una predictibilidad en principio? La pregunta será abordada más adelante en el capítulo donde hablaremos sobre complejidad.

La ley de la gravitación universal

Para aplicar la segunda ley de Newton es necesario conocer las fuerzas. Newton encontró la expresión para la fuerza gravitacional entre dos cuerpos. Esa fuerza es directamente proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. O sea que cuanto mayores las masas, mayor es la fuerza gravitacional entre ellas, y cuanto mayor la distancia, menor es la fuerza. La ley de la gravitación universal, junto con la segunda ley de la dinámica, le permitió a Newton, entre otras cosas, explicar cuantitativamente la caída de los cuerpos en la tierra y deducir las leyes de Kepler, unificando así en un mismo esquema conceptual el movimiento de los cuerpos celestes y de los cuerpos en la tierra. En otras palabras unificó los dominios sublunares y supralunares.

El espacio

Para Newton el espacio es absoluto: existe en sí, independiente de los cuerpos que lo ocupan. Para él tiene sentido la idea de un espacio vacío, desprovisto de cuerpos. El espacio no es el conjunto de relaciones espaciales entre los cuerpos, con lo cual en ausencia de cuerpos no habría espacio. Ese era el punto de vista de Leibniz, no el de Newton. Ese último fragmenta totalmente espacio y cuerpos.

Relacionada íntimamente con sus ideas acerca del espacio absoluto está la distinción explícita que introdujo Newton entre dos tipos de movimiento: el absoluto y el relativo. El movimiento absoluto corresponde a un cambio real de lugar, al paso de un cuerpo físico de un punto a otro del espacio absoluto. Implica una relación entre el cuerpo y el espacio. El movimiento relativo es un cambio de posición respecto a otro cuerpo. Implica una relación entre dos cuerpos. La noción de espacio absoluto estaba ligada en Newton con sus ideas acerca Dios.

El tiempo

Igual que el espacio, el tiempo para Newton era absoluto y existía independiente de los fenómenos que en él se desarrollaban.

En cuanto al carácter del tiempo en las ecuaciones, es importante mencionar que si se cambia en ellas el valor de la variable temporal t por el valor $-t$, las ecuaciones no cambian. Ello significa que los fenómenos descritos por la dinámica de Newton son reversibles.

Una manera sencilla de entender la reversibilidad es la siguiente: imaginemos que se filma un fenómeno y se proyecta la película al revés. Si lo que se ve en la pantalla es también un fenómeno que sucede en la realidad, diremos que el fenómeno filmado es reversible. Para un fenómeno tal no nos es posible decidir si la película está proyectada en la dirección correcta o al revés. Un ejemplo es el siguiente: filmamos el choque entre dos bolas de

billar. Si proyectamos la película al revés, veremos otro choque entre las bolas. No tendremos manera de decidir cuál fue el choque filmado y cuál es el que se obtiene debido a la proyección de la película al revés. Ahora bien, si filmamos por ejemplo la caída y el posterior rompimiento contra el suelo de un jarrón de vidrio, y luego proyectamos la película al revés, inmediatamente sabremos que la película está al revés, pues el fenómeno en que pedazos de vidrio en el suelo se juntan espontáneamente para formar un jarrón de vidrio y luego se elevan hasta una cierta altura, no sucede en la realidad. Tales fenómenos son irreversibles.

Si las ecuaciones de Newton implican que los fenómenos descritos por ellas son reversibles, tendremos que concluir que hay problemas para describir mediante ellas los fenómenos irreversibles, tales como la caída y el rompimiento del jarrón. Volveremos a este punto más adelante.

Ideas de Newton sobre Dios

Se suele ver la obra de Newton descontaminada de cualquier elemento no científico y en especial teológico. En muchos casos se coloca como ejemplo del divorcio alcanzado entre la ciencia y la religión en el siglo XVII, y en otros como el triunfo de la ciencia sobre la religión. Estas afirmaciones pueden encontrar su razón de ser cuando se extrapola la relación actual entre ciencia y religión a los períodos del surgimiento de la ciencia moderna, sin tener presente el contexto social propio del momento y los escritos newtonianos en que no habla directamente de asuntos físicos.

Al tener en cuenta estos dos últimos aspectos, se descubre en el trabajo de Newton cómo su proyecto de filosofía natural tiene en últimas una preocupación teológica, sin que estas dos inquietudes, las físicas y las teológicas, rivalicen entre sí sino que, por el contrario, armonicen.

En cuanto al contexto social debemos hacer referencia, en primer lugar, al clima intelectual de Inglaterra en el siglo XVII. Esta época estaba dominada por el empirismo, preconizado por Bacon, y por la ética puritana. El puritanismo promovía el cultivo de la ciencia como medio para glorificar a Dios y como búsqueda del bienestar humano. En el puritanismo se mezclan de manera especial la dimensión espiritual y material, identificándose esta última con un carácter utilitario. La realización de trabajos sistemáticos y metódicos que tengan como objeto cubrir las necesidades humanas son muestra de la gracia divina y llevan a la salvación del hombre. Es en este ambiente en el que surgen los aportes de Newton a la ciencia.

El puritanismo se inscribe dentro del ideario de la Iglesia anglicana de poner en concordancia las reflexiones sobre la naturaleza con las reflexiones teológicas, es decir que el orden presente en el mundo no puede estar en contradicción con las consideraciones en torno a su creador. En este sentido podemos decir que no sólo Newton es heredero consciente de esta forma de pensar, sino que su obra será interpretada y difundida de acuerdo con este ideal.

En cuanto a la manera cómo Newton liga el trabajo sobre la naturaleza con preocupaciones religiosas hay que mirar los escritos que tocan, y no propiamente tratan, el asunto teológico. Tanto los Principia (1687) como la Optica (1704) son obras dedicadas casi de manera exclusiva a asuntos físicos tratados matemáticamente y de acuerdo con el método experimental, pero en cada uno de estos tratados existe una pequeña rendija por donde ingresan las concepciones teológicas. Por lo tanto, teniendo en consideración estos dos trabajos, no nos es posible afirmar que en Newton se encuentre un sistema teológico claramente expuesto aunque, como veremos, es posible aproximarnos a una reconstrucción coherente de sus presupuestos teológicos, así como del papel que desempeñaron en su creatividad científica.

Tanto en el Escolio General, añadido en la segunda edición de 1713, que aparece al final de los Principia, como en las cuestiones o preguntas presentes al finalizar la Óptica, algunas de ellas adicionadas y otras modificadas para la segunda edición de 1717, Newton no sólo clarifica aun más su punto de vista sobre la gravedad, la naturaleza y propiedades de la luz, abordando asuntos más generales como la constitución de la materia, la estructura del mundo y las características de las fuerzas que lo gobiernan, sino que también el desarrollo de estas ideas le permite presentar su oposición al mecanicismo y al éter cartesianos, defendiendo la existencia de principios activos, que tienen la propiedad de ser inmateriales, no mecánicos y externos a la materia, como medio a través del cual Dios actúa y se manifiesta en el universo.

Para Newton las inquietudes teológicas ocupan un primer lugar en relación con las científicas, a tal punto que la ciencia está subordinada a ella. Esto es en el orden de reflexión, pero en el orden de indagación se ha de proceder científicamente para comprender a Dios, de tal manera que Dios no puede ser usado como principio demostrativo; esto sería convertirlo en una hipótesis y las hipótesis, según Newton, no deben hacer parte del sistema explicativo. En otras palabras, tanto en los Principia como en la Óptica, Dios no aparece, ni de manera explícita ni de manera implícita, como un presupuesto a partir del cual se derivan las leyes de la naturaleza y con ellas la comprensión de la naturaleza; la función predominante de Dios en la construcción de los sistemas teóricos, se encuentra presente, por ejemplo, en Descartes.

Como para Newton la tarea principal del hombre de ciencia es lograr, así sea de manera aproximativa, una clara comprensión de Dios y de su función en el mundo, Dios no se constituye en el punto de partida sino en la finalidad última de la investigación. El llegar a Dios no se logra por el camino de la introspección, ni por la adoración de imágenes y cumplimiento de penitencias; se llega a través de la experiencia, mediante el conocimiento de la naturaleza. Lo interesante, entonces, es poder comprender cómo se mezclan o relacionan estos dos aspectos, el físico y el teológico, para dar origen a un modelo explicativo de la naturaleza altamente prometedor, cuya certeza no reposa en premisas teológicas sino en la experiencia que debe ser tratada matemáticamente.

El proyecto teológico, dada su pretensión y complejidad, debe ser tratado metódicamente, por etapas, y de manera segura. Un primer paso en esta tarea ingente de comprender el papel de Dios en el mundo es tener un conocimiento de la naturaleza que ya, de alguna

manera, nos acerca a él; por esto se debe comenzar por la filosofía natural cuya forma de indagación no debe distinguirse por su método de la teología natural.

Newton expone dos tipos de justificaciones sobre la realidad de una Providencia Divina, una, de carácter teleológico, en la que destaca la perfección y complejidad del mundo, y otra, de carácter contingente, donde exhibe la no conservación del movimiento y la necesidad de la permanente intervención divina.

Para Newton, toda la armonía del mundo no puede provenir sino de un ser inteligente superior a todas las cosas mismas que asigna a cada una de ellas su función y es su constructor siempre presente.

El argumento de la contingencia de la naturaleza es aun más rico puesto que está ligado a la no conservación del movimiento, y a la causa de la gravedad, la electricidad, el magnetismo y las fuerzas vitales. Newton piensa que el mero principio de inercia es insuficiente para comprender la multiplicidad de fenómenos que se presentan en la naturaleza; es necesario, además, la presencia de otro tipo de principios. La inercia, la persistencia de los cuerpos a permanecer en su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme mientras no sean forzados a cambiar ese estado en virtud de fuerzas externas, debe ser entendida como un principio pasivo en la medida en que no puede ser fuente de movimiento. Si el mundo únicamente estuviese dotado del principio de inercia su destino sería el caos o el completo reposo. A lo sumo, en presencia exclusiva de ella y bajo condiciones muy especiales, el movimiento se mantendría; pero, como se presentan choques y rozamiento entre los cuerpos que desgastan el movimiento de la naturaleza, en estas condiciones la naturaleza estaría expuesta a una degradación permanente de movimiento. Bajo las solas propiedades de la materia no es posible explicar el orden presente en el mundo. El descubrimiento de principios pasivos es importante, pero ellos solos no explican todo, se requiere, según Newton, de un principio que ponga los cuerpos en movimiento y, una vez en movimiento, otro principio es necesario para conservar el movimiento.

Los principios que causan la gravedad, la fermentación, la cohesión de los cuerpos, la electricidad, el magnetismo y las fuerzas vitales, son principios que restauran el movimiento que se pierde durante las colisiones y por el rozamiento. Estos principios no pueden concebirse mecánicamente, pueden ser inmateriales y son externos a la materia. En los Principia Newton engloba bajo el término de espíritu eléctrico y elástico la causa de estos principios. Dicho espíritu se encontraría esparcido por todo el universo atravesando todas las cosas y cuerpos vivientes, y sería el medio a través del cual Dios actúa en el mundo. Dado el carácter de actividad de estas fuerzas, Newton los llama principios activos. Para Newton, los principios activos son tan empíricos, sin ser mecánicos, como los pasivos, y la investigación de ellos debe ser igualmente rigurosa y supeditada a los fenómenos.

Veamos cómo se aplica lo anterior para el caso de la gravedad. Newton considera que la gravedad es un poder que debe ser admitido sin duda alguna, puesto que es una fuerza que se infiere de los fenómenos, aunque la causa que la produce sea desconocida. Esta causa no puede ser mecánica como la piensan los cartesianos. Además, la gravedad no puede ser entendida como una propiedad intrínseca, inherente, y esencial a la materia; la causa de la

gravedad es un principio exterior a la materia que no es mecánico y que no puede actuar a distancia sino por contacto.

En la búsqueda de una solución a la causa de la gravedad, Newton intenta en un primer momento explicarla mediante causas materiales y la identifica con la acción que produce una materia sutil, muy poco densa, el éter, que penetra todos los espacios y que bien podría asociarse con un intermediario entre Dios y el mundo. Pero esta salida, observa Newton, no puede sostenerse a partir de los principios de la mecánica. De tal forma que termina abrazando la idea de que el espacio, “como si fuera el sensorio de Dios”, es el medio a través del cual Dios actúa en el mundo, siendo la gravedad una manifestación de dicha acción.

En síntesis, el mundo requiere de la permanente intervención de un espíritu divino, inteligente y siempre presente en todo lugar para poner orden y uniformidad, porque la materia por sí misma no está dotada de este poder.

En cuanto a la afirmación de que el espacio es como si fuera el sensorio de Dios, se necesita analizar cómo concibe Newton el proceso de percepción del ser humano. Según Newton, hay un lugar bien definido del cuerpo donde se localizan las imágenes de los objetos externos, ese lugar es el sensorio. Las imágenes que se producen en el sensorio llegan a través de los nervios y el cerebro, por medio de unos espíritus que reciben a través de los órganos de los sentidos los impulsos producidos por los objetos externos. Es decir que el sensorio es el lugar de las imágenes, que son percibidas por el alma de forma inmediata y sin mediación alguna.

Veamos ahora el sentido que toma la afirmación de Newton según la cual el espacio es como si fuera el sensorio de Dios. Dios está presente ante todas las cosas, todo lo ve, todo lo siente, pudiendo actuar sobre ellas según su voluntad, a la manera como la voluntad del hombre gobierna sobre su cuerpo. Puesto que los cuerpos se hallan en el espacio, podemos entonces explicitar en detalle la analogía de la siguiente manera: así como el alma del hombre percibe las imágenes en su sensorio, el alma de Dios percibe en el espacio los cuerpos externos. Como el alma del hombre no es el alma de las imágenes que se producen en él, de igual forma Dios no es el alma de los cuerpos o del mundo. Newton no cae en el panteísmo; el mundo no es el cuerpo de Dios así como las imágenes no son el cuerpo del hombre. Esta conclusión final es la que Newton destaca, en el Escolio General, cuando al referirse a Dios dice: “Este rige todas las cosas, no como alma del mundo, sino como dueño de los universos”.

CAPÍTULO 3: LA COSMOVISIÓN MECANICISTA

La cosmovisión mecanicista

Hasta ahora hemos hablado del reemplazo de la teoría aristotélica por una nueva teoría: la mecánica clásica, reemplazo que tuvo lugar en el siglo XVII. Lo que sucedió en ese siglo, sin embargo, es mucho más importante que la sustitución de una teoría por otra, de una fórmula por otra, de una explicación por otra. Lo más relevante fue la inclusión de estas nuevas ideas acerca del movimiento y del objeto físico en todo el marco conceptual y cultural de la época. En el siglo XVII se tuvo lo que se denomina una revolución científica, que se puede llamar: la revolución científica de la modernidad. Cuando ello ocurre, lo que sucede dentro de la ciencia cambia todo nuestro marco conceptual y redefine nuestra visión de las cosas, nuestra visión del mundo.

Cuando se mira un libro de exposición popular de la ciencia, uno se percata de que se comienza con los antiguos, con las preguntas que se hacían ellos acerca de la composición y movimiento de los cuerpos celestes. Esto puede dar lugar a la idea de que tales preguntas jugaban un papel esencial en la visión del mundo. Sin embargo, es importante darse cuenta de que la descripción de la física en el contexto de la visión general del mundo estaba centrada en un lugar muy restringido. Los pensadores se hacían en efecto muchas preguntas, pero las que se referían al movimiento de los cuerpos celestes no eran preguntas centrales.

Como ejemplo podemos citar el hecho de que al final de la antigüedad, en el imperio romano, había dos grandes escuelas filosóficas: la estoica y la epicúrea, que diferían en su concepción de la física. Los epicúreos creían en los átomos y los estoicos en un continuo que permeaba todo el universo: el neuma. Si se estudian estas dos grandes escuelas y su visión filosófica, se encuentra que la parte que corresponde a la física es muy pequeña, puede ser importante pero no demasiado en el contexto de todos los debates que ellos tenían. Las grandes diferencias en la visión filosófica giraban más bien en torno de la moral, de lo que es bueno en la relación entre los seres humanos, de la manera correcta de vivir una vida.

En la baja edad media, la física aristotélica, que fue descrita en el capítulo primero, ocupaba un lugar importante solamente en la medida en que era relevante a las cuestiones mayores de tipo teológico acerca de cuál es, de nuevo, la posición del hombre frente al universo, de cuál es el papel de la moral, de la naturaleza y posición de Dios. Las preguntas de la física eran importantes en este contexto, pero no eran demasiado importantes en sí.

En el siglo XVII esto cambió, las preguntas acerca del movimiento de los planetas y, en general, acerca del movimiento de los cuerpos materiales, se volvieron centrales a la cosmovisión de la sociedad. Sin embargo, bien pudiera no haber sido así. Sabemos que había astronomía en Babilonia, que había astronomía entre los romanos y también entre los chinos. No hay ninguna razón de tipo lógico para pensar, por ejemplo, que si los chinos hubiesen descubierto las leyes del movimiento de la mecánica clásica y las hubiesen aplicado a sus cálculos astronómicos, ello necesariamente hubiese afectado su visión

general del mundo. Ello sí sucedió, sin embargo, en la Europa del siglo XVII. Podemos mencionar dos ejemplos de ello.

En el siglo XVIII, cuando tuvo lugar un cambio social que dio lugar a la Revolución Francesa, los pensadores miraban a Newton como una fuente de su pensamiento sociológico, de su nueva visión revolucionaria. Uno de ellos fue Voltaire, un pensador social muy relevante, que vio necesario y consideró como algo supremamente importante para los propósitos de lograr ese cambio de visión social que, junto con otros preconizaba, el popularizar las ideas de Newton, trayéndolas de Inglaterra a Francia.

Otro ejemplo es el de Napoleón, quien cuando hizo su campaña en Egipto se llevó 200 hombres de ciencia. Esto es muy significativo, porque antes en la historia, cuando los reyes iban en campaña llevaban sacerdotes. Esta vez Napoleón llevo científicos en un número considerable; esto indicaba que de alguna manera la ciencia había reemplazado a la religión y que estaba muy cerca de la misma esencia del tejido social.

Los historiadores aún se preguntan por qué sucedió esto, pues no es nada obvio, desde el punto de vista histórico, el hecho de que se cree una nueva teoría física, en este caso una nueva teoría del movimiento, y que esto afecte la cosmovisión total de la sociedad hasta cambiarla por una nueva. Esto no es nada claro pero se debe aceptar como un hecho.

En este texto no vamos a profundizar en el por qué de ese hecho histórico de que una teoría científica sea, de cierta manera, la causa de una nueva visión acerca del universo que incluye al ser humano y a la sociedad, sino que más bien pensaremos un poco en su significado.

La visión que se va a analizar es llamada el mecanicismo, que no es lo mismo que la mecánica, porque esta última es una teoría física y el primero es una cosmovisión. Hoy en día tenemos una situación paradójica, y es que los físicos saben muy bien que la teoría de la mecánica ha sido superada, más sin embargo, muchos continúan teniendo una visión del mundo que está muy cercana a la visión mecanicista. Uno de los propósitos de este libro es examinar entonces una visión que esté de acuerdo con la física moderna y que nos muestre lo inadecuado de la visión mecanicista.

Se habla a veces de la mecánica cuántica, de la filosofía de la mecánica cuántica. Esas son cosas que sucedieron a principios del siglo XX. Ya estamos a comienzos del siglo XXI y las cosas están cambiando fuertemente. En la sociedad como un todo están sucediendo cambios que apuntan hacia una nueva visión que quizá va a ser la visión del siglo XXI. Es muy importante entonces que los investigadores en física pura, los especialistas, tomen conciencia de estos cambios de la sociedad como un todo para que también encuentren su lugar en la sociedad del siglo XXI.

Vamos entonces ahora a hablar del mecanicismo, que está usualmente relacionado con el filósofo francés René Descartes. Como lo vimos en el capítulo segundo, Descartes vino antes que Newton y creó una teoría física del movimiento que ya no es considerada como una teoría válida; las ideas de Descartes, sin embargo, son muy importantes para interpretar la teoría mecánica de Newton.

Laplace fue la persona que integró la visión cartesiana y las ecuaciones de la mecánica clásica. Las ecuaciones no son tan importantes, pueden ser las ecuaciones originales de Newton o cualquier otra formulación equivalente de la mecánica. Lo que cuenta es el papel que juega la formulación en nuestra visión del movimiento. El mecanicismo tiene muchos aspectos. Mencionaremos cinco que son los más importantes para nuestros propósitos.

El objetivismo

El primero es el que llamaremos el objetivismo. Se trata de una noción de objetividad que hace referencia a una realidad en sí, independiente de la existencia de los humanos, una realidad real por así decirlo.

Volvamos un poco atrás a Laplace, Laplace era un ateo, no creía en Dios. Preguntémosnos entonces cuál es esa inteligencia suprema a la que se refiere en su famosa cita, en su libro *Essai philosophique sur les probabilités*, que presentaremos aquí de nuevo

“Debemos entonces considerar el estado presente del Universo como el efecto de un estado anterior y como la causa de aquel estado que ha de seguir. Supongamos por un instante una inteligencia que pudiera conocer todas las fuerzas por las cuales la naturaleza está animada y la situación respectiva de las entidades que la componen (...) tal inteligencia incluiría en la misma fórmula el movimiento de los grandes cuerpos del universo y de los más ligeros átomos; para tal inteligencia nada sería incierto y el futuro, al igual que el pasado estaría presente ante sus ojos”.

Esa inteligencia suprema es un ser que está por fuera del mundo y tiene una visión simultánea y total de todas las partículas del universo y de todas sus interacciones. Esta inteligencia también calcula mediante fórmulas, que son las de Newton. Podemos entonces concluir que si yo sé las fórmulas de Newton también sé cuál es la inteligencia de ese dios o demonio que invoca Laplace. Este continúa después de esta cita diciendo que el conocimiento de los científicos se asemeja al conocimiento de esa inteligencia superior. Algo similar fue dicho antes por Galileo, quien afirmó que cuando una cosa cae, Dios sabe la fórmula de la caída. Como yo también conozco la misma fórmula, entonces mi conocimiento iguala al de Dios en ese contexto. Esta imagen que tiene el mecanicismo del científico como dios o demonio, indica que también el científico, también nosotros, podemos imaginar el mundo como sería visto por una inteligencia que esté fuera de este mundo, o sea que podemos mirarlo desde el exterior. Yo miro esta mesa, la veo con sus propiedades. Si la dejo de mirar, Dios la ve como la veo yo. Entonces puedo concebir que sus propiedades son independientes de mi observación, son propiedades en sí de esta mesa y definen la materialidad de la mesa. Esta es una premisa supremamente importante de la ciencia moderna.

Para precisar esta idea, Galileo y más adelante John Locke, distinguieron entre cualidades primarias y cualidades secundarias, que fueron mencionadas en el capítulo primero. Las cualidades primarias existen en el objeto tal cuál es, son cualidades en sí del objeto. La forma geométrica, la masa, el movimiento, son cualidades primarias. Si yo miro la mesa y digo que su color es bonito, eso no está en la mesa, está en mí, es una cualidad secundaria;

quizá para mí esta mesa es bella, pero para algún otro no lo será. Por tanto, se puede afirmar que la belleza no será algo que le pertenece en sí, o sea que, de cierta manera, es una ilusión comparada con la cosa en sí, no es una realidad que existe en el mundo, existe sólo en mi visión. Aquella inteligencia superior que ve la realidad tal como es, no mira las cualidades secundarias, mira las cualidades primarias que son las cualidades en sí de los objetos, ve la materia.

Esta situación de que habla allí Laplace tiene que ver con las masas, las fuerzas, no tiene que ver con los valores morales, sino con un mundo objetivo que no depende de nosotros, cuyas cualidades serían las mismas aún si no existiésemos nosotros. Su existencia y sus cualidades son independientes de nosotros, de nuestro conocimiento y de nuestra existencia. Y aún más, también nosotros, los seres humanos, tenemos este tipo de objetividad, vale decir, estamos hechos de átomos newtonianos, o sea de cualidades primarias. Esta es la visión de Laplace.

El reduccionismo

Esto nos lleva al segundo aspecto que trataremos en el mecanicismo, nos lleva al reduccionismo mecanicista. Reducir una teoría a otra es básicamente tomar la primera y basarla enteramente en la segunda. Un ejemplo de intento reduccionista es el de explicar la termodinámica en términos del movimiento de los átomos, o sea en términos de la dinámica de estos. Hay problemas con este intento de reducción, no vamos a entrar ahora en eso, pero la idea fundamental de tratar de reducir la teoría de la termodinámica a la mecánica es una ilustración de un programa de reducir una teoría a otra.

Existe un esquema general de reducción, que fue planteado en el siglo XIX por el filósofo francés positivista Augusto Comte, que se basa en la mecánica clásica. Así, se considera todavía a las partículas, que son en esencia los átomos de Laplace, como el nivel básico de la realidad. Hoy en día un físico diría quizá que no son los mismos átomos de Laplace, que los corpúsculos básicos son los quarks y los leptones. Lo relevante para nuestros propósitos es, sin embargo, que existen aún unas entidades fundamentales que hacen el mismo papel que les atribuye Laplace en su cita, y que la idea es que en la mecánica de esas partículas se basa absolutamente toda la física.

La idea reduccionista continúa al considerar los otros fenómenos como basados en la física, como reducibles a ella. Así, hoy en día no está considerada la química como una ciencia básica, y aunque hay químicos que no lo aceptarían, la mayoría de ellos admite que la base de las ciencias, la ciencia básica, es la física, y la química es una ciencia derivada, basada en la física. En un esquema que coloque la ciencia fundamental en la parte de abajo, como los cimientos de un edificio, la química iría encima de la física.

Por encima de la química estaría la biología, pues dentro de la visión reduccionista la biología se reduce a la dinámica de las moléculas orgánicas. Esta visión de la biología recibió un gran impulso en la década de los años cincuenta del siglo XX con el descubrimiento de la doble hélice y la estructura del ADN.

Encima de la biología está la sicología, pues, dentro de esta visión, la respuesta a la pregunta acerca de cuál es la base de la sicología es que tal base es el cerebro, y como este último está hecho de neuronas y estas de moléculas biológicas, entonces la sicología se reduce finalmente a la biología.

Por último está la sociología, que se reduciría al comportamiento de grandes masas de individuos, y por tanto se reduciría a la sicología de esas masas. Tal como sucede, dentro del esquema reduccionista, con las propiedades de los cuerpos macroscópicos que se reducen a la interacción de las grandes masas de partículas que los constituyen.

En síntesis, dentro de la visión reduccionista, la sociología se reduce a la sicología, esta a la biología, la cual se reduce a la química, que se reduce a la física, y esta finalmente a la física de las partículas fundamentales. Tenemos entonces el gran esquema reduccionista en donde toda la realidad son los átomos modernos, las partículas fundamentales. Hoy en día existen teóricos del área de partículas elementales, o de la física de altas energías, que buscan entonces una teoría del todo, que explique todo dentro del anterior esquema reduccionista. El edificio de la ciencia luciría en ese grandioso esquema como se muestra en la siguiente figura.

Sociologia
Sicología
Biología
Química
Resto de la fisica
Fisica de particulas

Figura 3.1

Ahora bien, el esquema anterior implica también una jerarquía social de la ciencia que se obtiene volteando la figura anterior:

Fisica de partículas
Resto de la fisica
Química
Biología
Sicología
Sociologia

Figura 3.2

Allí, en esta jerarquía, los físicos de altas energías serían los más importantes porque están estudiando lo más fundamental; otras áreas de la física tienen menor importancia. A medida que se va bajando en el esquema jerárquico, se supone que no sólo la importancia va disminuyendo sino también la cientificidad. La química se considera como parte plena de la ciencia, la biología aún es buena ciencia, la cientificidad de la psicología ya es dudosa, en cuanto a la sociología, dentro de esta visión difícilmente se considera como ciencia verdadera.

La visión descrita, si bien puede parecer exagerada y caricaturesca, es todavía muy fuerte entre muchos científicos y no científicos, que incluso consideran que una pregunta que no pueda encontrar una respuesta dentro del esquema anterior es una pregunta que no tiene sentido. Los reduccionistas mecanicistas convencidos y coherentes con su esquema, al considerar la pregunta: ¿Existe Dios? - haciendo referencia a Aquel del que hablan las grandes religiones monoteístas y no al pequeño dios o demonio de Laplace - tratarán de hallar la respuesta finalmente en las propiedades e interacciones de los átomos contemporáneos. O sea, intentarán reducir a Dios y Sus atributos a las interacciones de las partículas fundamentales. Como obviamente no lo logran, concluirán en consecuencia que se trata de una pregunta sin sentido, o sea que quien la hace piensa que ha dicho algo, pero lo único que realmente ha hecho es ruido, movimiento del aparato fonador y del aire, sin ningún correlato con nada real.

La visión reduccionista tiene entonces sus raíces en Laplace y es una visión muy fuerte especialmente en muchos científicos y no científicos que siguen el mismo juego que plantea el programa reduccionista actual desde la física de partículas.

Hoy en día hay sociólogos que ponen las cosas al revés. El grupo de Edimburgo de los nuevos analistas de la ciencia dice que no vemos los átomos, que lo único que vemos es gente hablando de los átomos, gente escribiendo libros acerca de los átomos. Concluyen que en realidad no hay átomos, que lo que hay es un grupo social de físicos que hablan acerca de los átomos. O sea que así como para muchos físicos todo está hecho de átomos, para los sociólogos de la ciencia en cuestión todo es social; para los primeros la gente está hecha de átomos, para los segundos los átomos son un constructo social, o sea que puede decirse que están hechos de gente. Para unos lo social se reduce a lo físico, para los otros lo físico se reduce a lo social.

Se trata de dos extremos cuya estructura conceptual es la misma, a saber: que todo se reduce a unas leyes más fundamentales. O sea que hay una única visión del mundo, visión que para los unos es física y para los otros es social. Es la visión de aquel dios o demonio imaginario invocado por Laplace que podría ver el mundo desde afuera. Su visión de los fenómenos, que es una sola, es la visión correcta del mundo.

En general, la gente hace mucha referencia a las revoluciones científicas en contra de las supersticiones de la edad media. Lo que vemos aquí sin embargo es algo muy típico dentro de la cultura occidental desde la edad media, que es la idea siguiente: Hay una sola visión del mundo que es verdadera y las demás son falsas. Por ejemplo, no hay salvación fuera de la Iglesia, o no hay nada bueno fuera de la física. Es una manera de pensar igual en ambos

casos. Es una visión reduccionista que podríamos llamar monismo conceptual o filosófico: hay un sólo marco conceptual para enmarcar todos los fenómenos. Ahora bien, como en el mecanicismo se considera que lo que describe nuestro marco conceptual es la realidad en sí, se trata también de un monismo metafísico.

Eliminación de causas finales. El determinismo mecanicista

El tercer aspecto del mecanicismo es muy importante, concierne al asunto de las causas. Como ya vimos en el capítulo primero, en la visión aristotélica hay cuatro tipos de causa que deben explicarlo todo. Recordemos un poco lo que vimos antes. La primera de las causas es la causa material y la segunda la causa formal. Por ejemplo, la materia de que está hecha una estatua, el mármol, es la causa material y la forma de ella, que inicialmente está en la mente del escultor y que guía su trabajo, es la causa formal. Estas dos causas no son esenciales para nuestra discusión y podemos dejarlas de lado. Mucho más relevantes son las otras dos causas, la efectiva y la final.

Así, consideremos las pequeñas plantas y preguntémonos: ¿Por qué están aquí? ¿Por qué tienen esa forma? La respuesta aristotélica es que alguien sembró la semilla y cuidó su crecimiento. Ese alguien es la causa efectiva. Esa causa viene antes del efecto, impulsa el proceso hacia el futuro, del pasado hacia el futuro. La causa final es hacia donde el proceso va: la planta está creciendo para ser un árbol, o sea desarrolla todas sus hojas, toma la forma que tiene, a fin de llegar a ser un árbol. Entonces el árbol es una de las causas finales.

En la filosofía aristotélica medioeval, la causa final era la más importante, el argumento más central. Ello tiene que ver con que Aristóteles era un biólogo. Si miro al ojo y me pregunto por qué tiene el diseño que tiene, la respuesta para un aristotélico es clara, el ojo tiene la forma que tiene a fin de que los animales puedan ver, su diseño responde a su propósito que es permitir la visión. O sea tiene esta estructura, este cristalino, esta retina, con el fin de poder ver, la causa final es llegar a ver y ella explica la forma y las características del ojo.

La respuesta en términos de causas eficientes se dará en términos de embriología, de lo que sucede en el embrión. O en términos evolutivos. Ahora, se trata de procesos que sucedieron en el pasado y que son muy complicados. No conocemos realmente esos procesos, creemos que existe es tipo de explicación pero no la tenemos completamente desarrollada. Por ello cuando miramos el mundo de la vida lo que aparece más inmediata y claramente son las causas finales.

En la vida mental las consideraciones finales son las más inmediatas: yo deseo, yo quiero, hago las cosas con la visión del futuro. No vemos claramente las causas eficientes. Quizá el psicoanálisis diría en términos de causas eficientes por qué estamos haciendo tal cosa, invocando una causa en el inconsciente. Pero como no sentimos esto de modo inmediato, nuestra experiencia de la vida interna es finalista: hago cosas hacia el futuro, de manera teleológica. La palabra teleología viene del griego: tele, telos, que significa propósito, fin e indica el estudio de los fenómenos por medio de causas finales. Otro de sus sentidos es el

estudio de las evidencias de diseño en la naturaleza, ya que un diseño indica un propósito, un fin.

Ahora, una de las ideas básicas de la ciencia moderna del siglo XVII era que la ciencia no debí hablar de causas finales. Este asunto fue expresado más claramente por un contemporáneo de Descartes, el inglés Francis Bacon, quien dijo que las causas finales no deben ser parte de las explicaciones científicas. O sea que en la ciencia deberían rechazarse las explicaciones teleológicas. La idea fundamental es que si se mira, por ejemplo, el proceso de caída de un objeto, se debe preguntar qué lo empuja y no hacia dónde va. Pero Aristóteles, como biólogo, era finalista. Respondía que el objeto cae porque quiere llegar a su lugar natural, porque existe una causa final que lo lleva hacia allá. Al igual que yo cuando tengo hambre voy hacia el restaurante a fin de saciarla. La causa final, el satisfacer mi hambre, me conduce entonces al restaurante.

En el mecanicismo, que es un punto de vista científico moderno, el objeto no sabe hacia dónde va, ni ello es relevante. Lo que importa es la situación inicial incluidas las causas eficientes, las interacciones, a partir de la cual se siguen las situaciones futuras, o sea que, en ese sentido, las condiciones iniciales son las causas de lo que comienza a suceder. Es decir, ahora es el pasado la causa del futuro y no al revés, solamente el pasado es una causa. Esto es supremamente importante en el mecanicismo y constituyó un corte muy importante en el pensamiento occidental cuando, en el siglo XVII, Bacon dijo que la ciencia no debía hablar de causas finales, pero que en religión sí podemos hablar de causas finales. Ciencia y religión coexistieron a través del siglo XVII, el mismo Newton no fue un mecanicista en el sentido que hemos expuesto. Newton escribió su libro de física como parte de un programa mucho mayor que incluía la teología, la alquimia, la astrología, y quería integrar todo esto en un nuevo tipo de visión que era profundamente religiosa. Para Newton su teoría fue la prueba por excelencia de la existencia de Dios. Cien años después, sin embargo, Laplace dijo como científico que no necesitaba la hipótesis de Dios.

Tenemos entonces dos etapas. En una se dice que en la ciencia no debemos hablar de causas finales, pero que se puede tener otro campo, que puede explicar nuestra vida mental, en el cual es posible utilizar causas finales. Un siglo después se tiene una segunda etapa, en que surge el monismo conceptual y metafísico mecanicista de que hablamos antes, donde se sostiene que no hay sitio para nada distinto a esa visión, o sea que no hay causas finales en la realidad. Esta posición la encontramos todavía hoy en algunos biólogos. Para Richard Dawkins, por ejemplo, aquellos que todavía creen en causas finales, aún si constituyen la mayoría de la humanidad, son científicamente ignorantes. Dawkins, quien es también un reduccionista, sostiene que todo se reduce a los genes, para él no hay más realidad que el gene. Monod, otro biólogo contemporáneo muy relevante, afirma que lo que caracteriza a la ciencia es la exclusión de causas finales.

Esta idea de la inexistencia de causas finales persiste hoy en día. Ella implica que no hay un propósito en la vida, no hay ningún sentido moral para ninguna acción, no hay libre albedrío, no hay escogencias morales, todo ello es sólo una ilusión, pues todo se reduce al ciego movimiento de los átomos.

Hay que aclarar que la anterior no es la única visión que existió en el siglo XIX, pues a través de ese siglo hubo visiones diferentes, como la visión romántica en la literatura, en el arte, en la filosofía, que iban en contra del mecanicismo. Sin embargo, tales visiones no estaban en el centro del movimiento social, se trataba de algo periférico, sin la seriedad, se consideraba, de la ciencia y su visión del mundo.

La manera como se expresa en el mecanicismo la causalidad eficiente es el determinismo estricto. Dijimos que, según el mecanicismo, el mundo tiene ciertas propiedades en sí, independientes de la observación y del conocimiento del observador. Este conjunto de propiedades define un estado presente del mundo. El determinismo sostiene que ese estado presente del mundo determina totalmente su futuro. Ya vimos en el capítulo segundo la relación entre las ecuaciones y el determinismo. Es debido a este último que la inteligencia suprema de Laplace, una mente con capacidades infinitas que pudiese conocer el estado presente del mundo, podría predecir con certeza, sin ninguna duda, el estado futuro del mundo. Es decir el futuro estaría totalmente contenido en el presente, o determinado por este. De igual manera, el estado presente del mundo ha estado contenido en el estado pasado del mundo, de donde basta saber el estado presente para conocer con certeza tanto el pasado como el futuro. Todo entonces estaría determinado al principio del universo. En ese momento quizás se invocaría la noción de Dios a fin de crear el estado inicial del mundo. De allí en adelante el mundo continuaría totalmente determinado y la hipótesis de Dios no sería más necesaria. Se entiende entonces por qué Laplace respondió a Napoleón, cuando este le preguntó acerca del papel de Dios en el esquema mecanicista, con la arrogante frase de: "Señor, yo no necesité esa hipótesis".

Carácter no antrópico del mecanicismo

Hemos hablado de tres aspectos del mecanicismo: el objetivismo, el reduccionismo y la eliminación de las causas finales. Hay otro aspecto relacionado con estos tres y es el que podemos llamar carácter no antrópico del mecanicismo. El estudio de este aspecto aclara mejor la oposición del mecanicismo con el libre albedrío. Consiste en que dentro del mecanicismo, en donde existe esa división estricta entre el observador y lo observado, en donde las cualidades del observador, las que le permiten observar, no son más que un resultado de la interacción de la materia, el ser humano se reduce en últimas a una mera contingencia, a algo que puede o no puede existir, a algo que no es esencial para el entendimiento del mundo, porque lo fundamental para ello son las propiedades de los átomos y sus interacciones. Es un hecho que el ser humano existe, pero podría bien no haber existido y es posible entonces entender el mundo sin tener en cuenta esa contingencia.

Si juntamos el determinismo y el reduccionismo, encontramos otra área de conflicto entre el mecanicismo y las visiones religiosas. En efecto, el determinismo significa que todo el futuro del mundo material está absolutamente determinado al comienzo por su estado inicial, y el reduccionismo sostiene que todas las cualidades típicamente humanas se reducen por completo a las interacciones de la materia. Por lo tanto todas las acciones de los seres humanos estarían también totalmente determinadas por el estado inicial del mundo. Ello significa que no existe el libre albedrío, o sea que la ética se queda sin una

base seria, o sin base alguna, puesto que ¿cuál podría ser tal base si no existe la responsabilidad en el ser humano?

La metáfora de la máquina. Relación mecánica entre el todo y la parte

El siglo XVII fue un siglo de cambio en la sociedad europea. El cambio más significativo fue la nueva relación entre la economía y el poder político. En ese siglo, y aquí se habla de una manera muy amplia por qué en realidad el cambio sucedió desde antes del siglo XVII y se extendió hasta después de él, emerge un nuevo grupo social que llega al poder. Se trata de un nuevo sector social emergente: la burguesía, compuesta inicialmente por los artesanos y comerciantes, y luego por gran parte de la inteligencia. Este grupo social tenía un papel muy marginal en la sociedad medioeval, pero se fue haciendo cada vez más importante en los siglos XVI, XVII y XVIII hasta que finalmente se toma el poder en la Revolución Francesa. Su impacto de todos modos ya se podía sentir en las centurias anteriores; dos siglos antes de la Revolución Francesa ya se podía vislumbrar el resultado.

Un nuevo grupo social como este tiene nuevos valores, nuevos ideales, nueva cosmovisión. La visión mecanicista correspondía con los intereses de este grupo de personas, hacía énfasis en la importancia de la materia, insistía en que las cosas se pueden contar, matematizar, en suma se trataba de una visión materialista tanto en el sentido metafísico como económico. Se hizo un corte en la historia, la visión de la sociedad como una máquina resultaba estar de acuerdo con las leyes de la ciencia, con las leyes de la razón. He aquí un aspecto sumamente importante y relevante de la relación entre la ciencia, la técnica y la sociedad.

Hemos dicho que Descartes propuso una visión mecanicista. ¿De dónde viene la palabra mecanicismo? Viene de máquina. Descartes consideraba el mundo como una gran máquina, su metáfora era el reloj. Conviene recordar que en esa época había en Europa grandes relojes sumamente elaborados, supremamente precisos, por todas partes. Regulaban toda la vida social. Había también gran fascinación con los autómatas, especies de robots mecánicos en forma de muñecos que estaban animados por un movimiento mecánico y simulaban los movimientos humanos. La idea era que muy pronto se podrían explicar todos los movimientos del universo, incluidos los movimientos orgánicos, en términos de máquinas. Si se podía tener una máquina que se moviera como un ser humano, se podía esperar entonces que muy pronto se podría desarrollar una que reprodujera exactamente todo. Para Descartes era muy importante tener esta metáfora, esta imagen frente a sus ojos, y poder señalar y decir: “Miren esta máquina, así es el mundo”

Ahora bien, ¿cómo son esas máquinas del siglo XVII? ¿Cuál es la relación entre el todo constituido por ellas y las partes, las piezas de que están compuestas? Imaginemos que tenemos uno de esos relojes y nos proponemos entender su funcionamiento. ¿Qué haríamos? Lo desbaratamos ¿verdad? Miramos cada parte, entendemos qué hace cada una de ellas, cómo es la relación entre ellas; volvemos y lo armamos asegurando no haber olvidado nada ni haber dañado ninguna pieza, y de nuevo tenemos el reloj. El todo, que es el reloj, se entiende por completo a partir de las propiedades y relaciones de sus partes. La manera como analizamos el reloj se volvió la meta de la indagación científica. Había que

analizar todo en sus partes más pequeñas, se precisaba mirar las partes para entender el todo. Esto dio lugar al reduccionismo. Hay además otro aspecto en la máquina y es que ella no tiene propósitos ni intenciones, ella obra únicamente de acuerdo a causas eficientes. Cada movimiento local de cada pieza determina el movimiento final de la máquina. De aquí se concluye entonces que si el mundo es una gran máquina, el mundo no tiene propósitos, ni ningún sentido.

La máquina no tiene tampoco ninguna historia asociada con ella; si en el reloj una parte no está funcionando, lo mejor es reemplazarla por una pieza nueva, que no tiene ninguna historia, y el reloj va a funcionar de idéntica manera. También puedo reemplazarla por una pieza vieja, con otra historia, y el reloj igual funcionará correctamente. Nótese que esto no sucede con los organismos. Si yo quiero, por ejemplo, entender un gato y lo divido en partes, quizás voy a aprender mucha anatomía gatuna, pero la cosa más esencial del gato, que es la vida, se habrá perdido. No puedo entender la manera como un gato vivo está funcionando si lo desbarato, lo corto en pedazos y luego estudio cada parte. Los biólogos moleculares reduccionistas sostienen que esto en principio puede llegar a ser posible y que las limitaciones actuales son técnicas. Esto por supuesto no es más que un deseo o como máximo un eventual programa de investigación fundamentado en una extensión de la visión mecanicista.

Tampoco es posible tener piezas de repuesto nuevas para el gato. Cualquier posible pieza mayor tendría que venir de otro gato, con otra historia, y el funcionamiento global del gato se verá afectado por esa historia que trae su pieza.

En el siglo XVII la gente tomó esa metáfora de la máquina y la aplicó en todo, especialmente en el cuerpo social. En los tiempos medievales se consideraba la sociedad como un organismo. Ahora, un organismo tiene una historia que no es posible olvidar. Cada parte del organismo tiene un lugar que le es propio, un lugar por así decir natural. También hay jerarquías. Yo no puedo poner en el mismo estatus a la cabeza y a un dedo. Si pierdo el dedo, mi cuerpo y yo mismo nos veremos fuertemente afectados. Pero si pierdo la cabeza perderé sin remedio la vida. No puedo entonces intercambiar la cabeza con el dedo.

En el siglo XVII la gente empezó a concebir la sociedad en términos mecanicistas que se reflejan en el siguiente mito de la creación de la sociedad, que en algunos países se enseña desde la escuela primaria y que, a grandes rasgos, dice que en el principio, en el comienzo, había individuos que eran autónomos, los cuales se juntaron luego y, para poder vivir juntos, hicieron un contrato social, el cual dio lugar a la sociedad. Esta idea sumamente importante comenzó con Rousseau. Sin embargo no es más que un mito, pues nunca ha existido, ni existirá, una persona totalmente autónoma, sin sociedad. Este mito es consistente con la visión mecanicista. Primero, se tienen las partes autónomas, en este caso los individuos. Luego se ponen en interacción esas partes mediante un arreglo como el de un reloj, arreglo que en el caso de la sociedad se haría de acuerdo con el contrato social, y entonces se tiene el todo, la sociedad, como la mera suma de sus partes. Podemos imaginar distintos arreglos, y llegar a un contrato social totalmente racional.

Ahora bien, hay que reconocer que la idea de individuos autónomos tiene la ventaja de asignarle libertad al individuo e igualdad de derechos. Sin embargo, la manera como en el

modelo mecanicista se relaciona ese individuo, con libertad y derechos inalienables, con el todo que es la sociedad, tiene la desventaja de que implica también que la sociedad está finalmente fragmentada, atomizada. Y como cualquier átomo material, o cualquier pieza de una máquina, cada átomo humano sería intercambiable, sin nada que lo haga único, sin historia relevante, una mera pieza de una gran máquina. Otra idea implícita en el mito es que podemos comenzar de cero para construir una nueva sociedad mediante la razón y bajo las leyes de la ciencia.

Un pensador social que seguía una línea de razonamiento mecanicista en la Revolución Francesa es Condorcet quien afirmaba que quizá llegaríamos a tener una teoría matemática de la sociedad, con tres o cuatro leyes, no importa cuántas sean, con el mismo carácter de las leyes de Newton. Entonces, así como conociendo las leyes de Newton podemos aspirar a construir una máquina perfecta, cuando conozcamos las leyes de la sociedad podremos esperar la construcción de una sociedad perfecta.

Cien años después Marx tenía una visión similar, pues hablaba de la existencia de leyes científicas de la sociedad y sostenía que, del mismo modo que en la mecánica se puede predecir todo a partir de las leyes de Newton, mediante las leyes sociales se podría hacer predicciones y obtener la sociedad perfecta.

Tenemos entonces en la visión mecanicista un corte en la historia. La Revolución Francesa comenzó los años contando desde cero, con un nuevo calendario. Todo era nuevo allí, el año de la Revolución fue el año uno. Cosas similares sucedieron con la revolución Marxista, con la Internacional, con la destrucción completa del viejo mundo para comenzar desde cero. La visión subyacente es la misma: miramos la máquina social, la desbaratamos, vemos qué está mal, hacemos un nuevo diseño, rearreglamos las piezas y obtenemos la nueva máquina.

La de la máquina fue una metáfora técnica que tuvo significado social, económico, y que se volvió la metáfora central para entendernos a nosotros mismos y a nuestra relación con la sociedad.

Comentarios finales

Tenemos cinco aspectos que están relacionados: objetividad, reduccionismo, abolición de causas finales y determinismo, carácter no antrópico, y relación mecánica entre el todo y la parte, los cuales constituyen una visión que está basada en la mecánica clásica, que supone la física clásica en el centro del mundo, y que todavía se tiene en muchos círculos científicos, a pesar de que la base científica de ella, que es la mecánica clásica, ya no sea considerada como universalmente válida y haya sido reemplazada por la mecánica cuántica. Surge entonces la pregunta: si tenemos una nueva teoría, una nueva base científica, ¿con qué reemplazamos la cosmovisión? Quizá no deba estar basada exclusivamente en la física, pero de todas maneras sí debemos mirar la física para ver qué lecciones podemos aprender de ella para entender y mostrar que esta visión mecanicista no es válida ya más, y para llegar quizás a algunas intuiciones acerca de con qué debemos reemplazarla.

Para terminar hay que anotar que al comienzo del siglo XXI tenemos un nuevo tipo de técnica, la de la información, que origina una tecnología que ya no es sólo una tecnología de la materia. Hay signos de que con nuevas metáforas inspiradas en tales tecnologías se puedan formar nuevas visiones acerca de nuestro lugar en la sociedad. A medida que estas tecnologías se hagan más y más centrales, se espera que las nuevas ideas, los nuevos conceptos, se hagan más relevantes, más dominantes. Todo es muy nuevo. Hace unos diez o doce años, por ejemplo, toda la tecnología de computadoras no estaba demasiado presente en la vida diaria. Hoy no podemos ignorar su presencia. Más tarde en el capítulo de complejidad hablaremos un poco más de todo esto y trataremos de unirlo al hilo conductor del texto.

SEGUNDA PARTE: LOS FENÓMENOS Y LA TEORÍA CUÁNTICOS

CAPÍTULO 4: LOS FENÓMENOS CUÁNTICOS

En el presente capítulo se describe el comportamiento típico cuántico y se muestra cómo entra en conflicto con aspectos fundamentales de la cosmovisión mecanicista.

Las entidades físicas en el siglo XIX

La física del siglo XIX consideraba que la materia existía en forma de dos tipos de entidades fundamentales: la llamada habitualmente “materia”, formada por partículas, y la radiación, constituida por ondas. Ambas entidades tienen propiedades mutuamente excluyentes. En cada instante de tiempo las partículas están localizadas en una región del espacio y dos de ellas no pueden ocupar una misma región del espacio en un mismo instante de tiempo. Si se hacen chocar dos trozos de materia, por ejemplo dos canicas de cristal, rebotan o, si van a una velocidad muy grande, quizás se rompan, pero cada pedazo conserva su identidad. Una onda tiene un comportamiento muy diferente. Estudiemos brevemente las propiedades de las ondas para confrontarlas con las de las partículas.

Supongamos que dos personas mantienen en tensión una cuerda larga sosteniéndola por cada extremo. Una de las personas sacude la cuerda por el extremo por donde la sostiene. La cuerda se deforma entonces un poco al sacudirla y la deformación comienza a propagarse a través de ella hasta llegar al otro extremo. Esa deformación se llama una pulsación o un pulso. También se produce un pulso cuando se lanza una piedra a un estanque tranquilo. Si se observa la pulsación que se produce, se encuentra que el agua no avanza con ella. En efecto: si se coloca un pedazo pequeño de madera en el agua de tal modo que flote en ella, se verá que, al pasar el pulso, el trozo de madera se mueve hacia arriba y hacia abajo para volver luego a quedar en reposo. Una pulsación en el agua puede viajar distancias largas. Cuando pasa por un punto, sin embargo, el agua de ese punto sólo se mueve hacia arriba y hacia abajo, y finalmente vuelve a quedar en reposo. Igual sucede con la pulsación que se propaga en la cuerda. Cada punto de la cuerda se mueve hacia arriba y hacia abajo cuando llega la pulsación, pero al final vuelve a quedar en reposo. El medio a través del cual se desplazan los pulsos no se desplaza entonces con ellos.

Antes de continuar con nuestro estudio de pulsos en el agua necesitamos introducir la noción física de energía y en particular de energía cinética. Julius Robert Mayer, uno de los investigadores pioneros en el estudio de los fenómenos ligados con el calor, postuló la existencia en el universo de una entidad física fundamental que se manifestaba en distintas formas, entidad que se conoce como energía que viene de la palabra griega *energeia* que puede traducirse como actividad. El primero en expresar de manera clara el principio de la conservación de la energía fue Hermann von Helmholtz. De acuerdo con este principio, no existe creación ni destrucción de energía, sino su conversión de una forma a otra. Cada una de estas manifestaciones se asocia a un componente del abanico de fenómenos físicos. Así un cuerpo que se mueve tiene una forma de energía llamada energía cinética, la cual depende de la masa del cuerpo y del cuadrado de la velocidad.

Consideremos de nuevo el trozo de madera en el estanque. Cuando la pulsación en el agua llega el punto donde se encuentra, lo mueve y, por lo tanto, le comunica energía cinética y cantidad de movimiento. Con la pulsación se desplazan entonces energía cinética y

cantidad de movimiento. Un pulso puede considerarse como un transporte de energía y cantidad de movimiento de un punto del espacio a otro sin transporte neto de partículas.

Este fenómeno de transporte de energía y cantidad de movimiento por medio de pulsaciones es muy diferente al movimiento de las partículas. Supongamos otra vez que dos personas mantienen en tensión una cuerda y que cada una produce un pulso desde el extremo por donde sostiene la cuerda. Se forman entonces dos pulsos que se mueven uno hacia el otro. Antes de encontrarse, los pulsos viajarán uno de izquierda a derecha y el otro de derecha a izquierda, y lo harán como si cada uno actuara separadamente sobre la cuerda. Cuando los dos pulsos se encuentran, se combinan y la cuerda toma una forma complicada. Sin embargo, los pulsos continúan viajando después como si nada hubiera sucedido. El que va hacia la izquierda continúa su viaje con su forma original y lo mismo sucede con el que va hacia la derecha.

El fenómeno de dos pulsaciones que pasan una a través de la otra sin alterarse es una propiedad característica de ellas. No existe ninguna situación análoga en la dinámica de las partículas. Si se lanzan dos bolas en direcciones opuestas y chocan, su movimiento cambia, es posible que de modo violento dependiendo de su velocidad, pero nunca se superponen de la manera como lo hacen los pulsos. El cruce de dos pulsos es totalmente diferente del cruce de dos partículas de materia. La forma de la pulsación que resulta de la superposición o combinación de otras dos se encuentra mediante la siguiente regla denominada el Principio de Superposición: “Para encontrar la pulsación resultante en cualquier instante de tiempo, se suman en cada punto los desplazamientos correspondientes a cada una de las pulsaciones que viajan en el medio. Esta suma nos da el desplazamiento del medio en cada instante”.

Un pulso es una forma de onda. Las ondas en general son perturbaciones del estado de un medio que se propagan en ese medio. Puede decirse también que en general una onda es un transporte de energía y de cantidad de movimiento en un medio sin que se tenga un transporte neto de partículas. Si en una cuerda en tensión, en lugar de formar un sólo pulso, se generan pulsos de manera periódica, esa serie periódica de pulsos es también una onda.

Un tipo especial de ondas lo constituyen las ondas armónicas. Una propiedad importante de estas ondas es que no cambian su forma cuando se propagan. En la realidad las ondas varían su forma al propagarse pues van perdiendo energía y cantidad de movimiento. Hay muchos casos en la naturaleza, sin embargo, en los cuales una onda armónica es una buena aproximación a la forma de la onda. Si se produjese una onda armónica en una cuerda y se tomase una fotografía de la cuerda en un instante dado se obtendría una gráfica como la que sigue. En línea cortada se muestra la cuerda cuando no pasa a través de ella ninguna onda. Es lo que se llama la posición de equilibrio. En la gráfica están indicadas dos cantidades importantes asociadas con la onda: su amplitud y su longitud de onda.

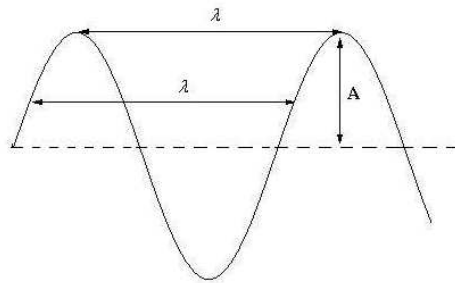


Figura 4.1

La distancia máxima que alcanza cualquier partícula de la cuerda a partir de su posición de equilibrio se denomina la amplitud A . La distancia entre dos máximos o entre dos mínimos se llama la longitud de onda λ . El inverso del período del movimiento que genera los pulsos se conoce como la frecuencia ν de la onda.

Las ondas obedecen el Principio de Superposición. Cuando dos ondas se propagan en un medio, el resultado es otra onda que en un sentido muy definido es la suma de las dos ondas. Esto quiere decir que el desplazamiento total de cada partícula del medio en cualquier momento es la suma algebraica de los desplazamientos producidos en ese instante por cada una de las ondas. Se describe este hecho a menudo diciendo que las ondas pueden interferir. En aquellos puntos donde las ondas se refuerzan, se dice que hay interferencia constructiva. Cuando sucede lo contrario, se dice que hay interferencia destructiva. Hay situaciones en las cuales la interferencia destructiva y la interferencia constructiva se alternan de modo que la energía de las ondas no se distribuye uniformemente en el medio, sino que es máxima en ciertos puntos y mínima en otros. Esa distribución de energía se denomina un patrón o figura de interferencia.

Otro de los fenómenos típicos de las ondas es el de la difracción que resulta del encuentro de una onda con un obstáculo: la onda se dispersa alrededor de este último llegando incluso a sitios detrás de él. Si el obstáculo es una pantalla en la cual se tiene una pequeña ranura, la onda rodea los bordes y se dispersa en abanico formando una figura bastante compleja, característica de la interferencia de partes de la onda que vienen de diferentes puntos de la ranura. Un fenómeno tal no se observa jamás con partículas: según el principio de inercia, partículas que no estén sometidas a una fuerza se mueven en línea recta y no pueden jamás rodear un obstáculo. Aun suponiendo que los bordes del obstáculo ejerzan fuerzas que desvíen las partículas de su trayectoria rectilínea, es difícil encontrar una expresión matemática para tales fuerzas que dé cuenta de la estructura característica de la difracción.

Los fenómenos de interferencia y de difracción convencieron a los físicos del siglo XIX de que la luz era una onda. Haremos una descripción simplificada del tipo de experimentos que condujeron a la aceptación de la imagen ondulatoria de la luz.

Estudiemos primero un experimento para estudiar la difracción. Se tiene luz que incide sobre un diafragma opaco D con una rendija muy estrecha. A una distancia grande del diafragma hay una pantalla P .

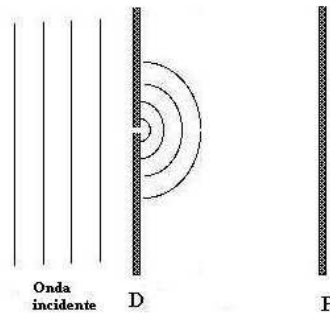


Figura 4.2

En la pantalla se forma un diagrama de difracción que consta de una franja ancha iluminada cuyo centro está coincidiendo con el centro de la rendija. A cada lado de esa franja hay dos franjas más estrechas oscuras. Al lado de ellas se tienen a su vez dos franjas iluminadas y así sucesivamente, o sea que las franjas oscuras e iluminadas se van alternando. La intensidad de las franjas iluminadas va disminuyendo a medida que nos alejamos del centro. La franja central iluminada y las demás franjas iluminadas corresponden a interferencia constructiva y las franjas oscuras a interferencia destructiva. Si se hace una gráfica de la intensidad de la luz en la pantalla, escogida como eje X, contra la distancia vertical sobre ella, que se escoge como eje Y, se obtiene la figura 4.3

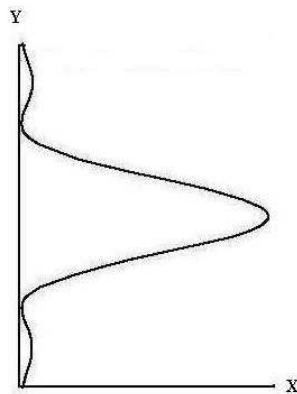


Figura 4.3

Para estudiar la interferencia se puede usar el dispositivo esquematizado en la figura 4.4, cuya descripción es como sigue.

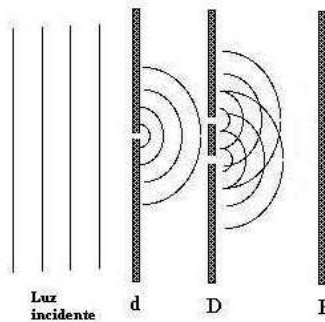


Figura 4.4

Se tiene luz que incide sobre un diafragma opaco d con una rendija muy estrecha. La luz que emerge del diafragma d incide sobre un segundo diafragma D con dos rendijas muy estrechas. A una cierta distancia del diafragma D hay una pantalla P . Al pasar la luz por ellas, cada una de las rendijas se comporta como una fuente puntual de luz. Si la luz es una onda, las ondas lumínicas que emergen de las dos fuentes puntuales deben superponerse y formar una figura en la pantalla. Ahora bien, sucede que con el dispositivo descrito en la práctica además del fenómeno de interferencia se tiene también difracción y la figura que se forma en la pantalla es el resultado de ambos fenómenos. Describamos primero lo que se obtendría si se tuviese interferencia solamente.

El patrón de interferencia formado por la luz que emerge de las dos rendijas en el diafragma D consta de porciones iluminadas, que representan los puntos donde las ondas se superponen constructivamente, y porciones oscuras, que representan los puntos donde las ondas se superponen destructivamente. La superposición destructiva o negativa en un punto de la placa depende de la diferencia de camino desde las rendijas hasta el punto en cuestión. Si la diferencia de caminos es tal que la onda que emerge de una rendija llega al punto en un máximo, mientras que la onda que viene de la otra rendija llega en un mínimo, tendremos interferencia destructiva. Si las dos ondas llegan en un máximo, se tendrá por el contrario interferencia constructiva. En el caso más general la diferencia de caminos es tal que la superposición es intermedia entre totalmente destructiva, en cuyo caso se tiene un mínimo de intensidad en la placa, y completamente constructiva, situación en la que se tiene un máximo de intensidad en ella. Además los máximos y mínimos se van alternando. Si se hace una gráfica de la intensidad de la luz en la pantalla, escogida como eje X , contra la distancia vertical sobre ella, que se escoge como eje Y , se obtiene la figura 4.5. El fenómeno de interferencia no se observa jamás con las partículas tal como las concibe la física clásica, dos flujos de partículas siempre se refuerzan. En otras palabras, el flujo resultante nunca se anula, el número de partículas que lo componen es siempre la suma de las partículas en cada flujo individual.

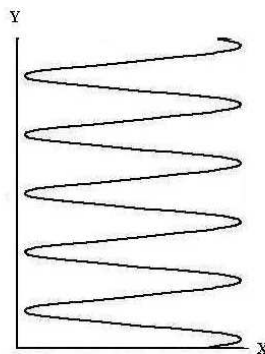


Figura 4.5

Dijimos sin embargo que en la práctica con el dispositivo descrito además de interferencia de la luz que sale de las dos rendijas se tiene difracción. La figura que se obtiene está formada por una combinación del patrón de interferencia mostrado en la figura 4.5, y el de difracción, mostrado en la figura 4.3. Ese patrón es mostrado en la figura 4.6.

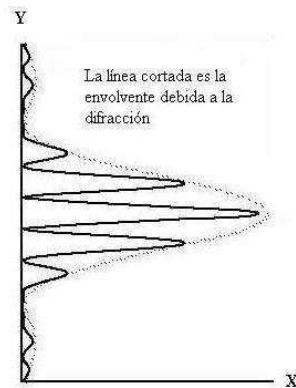


Figura 4.6

Otra diferencia entre las ondas y las partículas consiste en que las ondas tienden a ocupar todo el medio en que se mueven. Es verdad que a su paso por el medio su energía se va disipando. Sin embargo, si se les proporciona la energía necesaria, finalmente llegan a ocupar todo el medio. Cuando ello sucede, en cada instante de tiempo la onda ocupará todo el medio. En cambio una partícula, por más energía que tenga, siempre va a estar concentrada en una región precisa del espacio en cada instante de tiempo.

Además de los experimentos que mostraron un comportamiento ondulatorio para la luz, en el siglo XIX se creó también la teoría electromagnética de Maxwell según la cual la luz sería una onda electromagnética o sea una configuración ondulatoria de campos eléctricos y magnéticos.

La teoría electromagnética de Maxwell tiene el mismo carácter de la teoría del movimiento de Newton: puede interpretarse en términos objetivistas, no antrópicos, es determinista y, en el siglo XIX, trataba de reducirse a un modelo mecanicista. Junto con la teoría newtoniana forma parte de las denominadas teorías clásicas, a diferencia de la teoría cuántica cuyo carácter, como veremos, es fundamentalmente diferente del de ellas.

Se tiene entonces que en la física del siglo XIX las entidades físicas eran o partículas u ondas y que ambos conceptos, el de onda y el de partícula, se excluyen mutuamente, en el sentido de que algo no puede ser a la vez una onda y una partícula, puesto que algo no puede, a la vez, superponerse y no superponerse, o, también a la vez, estar disperso en todo el espacio y estar concentrado en una región finita del espacio.

Para finalizar este resumen sobre el carácter de las entidades físicas en el siglo XIX es importante, antes de entrar a considerar el comportamiento cuántico, añadir un resultado que, si bien es fruto del siglo XX, forma parte de la física clásica. El resultado en cuestión viene de la teoría especial de la relatividad y dice que ninguna interacción física puede viajar a mayor velocidad que la velocidad de la luz en el vacío. En otras palabras: la velocidad máxima de todo proceso físico es la velocidad de la luz en el vacío. Este hecho no ha sido falseado por ningún fenómeno físico hasta el momento y es considerado como uno de los principios fundamentales de la física.

El comportamiento cuántico

Hemos hablado ya de lo que es una onda y de los fenómenos típicamente ondulatorios como la interferencia y la difracción. Describimos también las experiencias que mostraron el carácter ondulatorio de la luz.

Imaginemos ahora un experimento similar al de las dos rendijas pero con trozos de materia. Consideremos un cañón pequeño C que dispara balas al azar sobre un diafragma d donde hay dos rendijas 1 y 2. Las balas que pasan por las rendijas inciden luego sobre otro diafragma D.

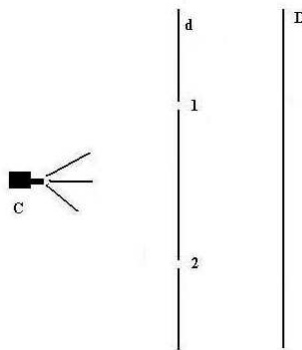


Figura 4.7

Supongamos que, tapando la rendija 2, se cuentan ahora los impactos de balas en el segundo diafragma y que se hace una curva del número de impactos, que se marcan en el eje X, contra la distancia vertical sobre el diafragma, tomada como eje Y. La curva lucirá como en la figura 4.8.

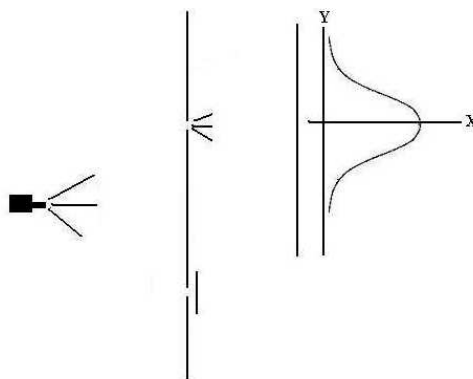


Figura 4.8

Si se hace la experiencia tapando la rendija 1, la gráfica será la de la figura 4.9.

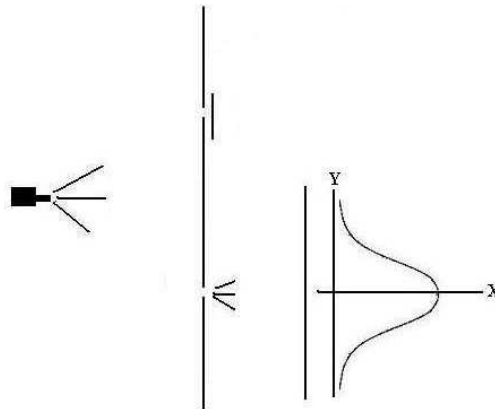


Figura 4.9

Si hacemos la experiencia con las dos rendijas abiertas la curva que se obtiene es naturalmente la suma de las que se muestran en las figuras 4.8 y 4.9, ya que la suma total de las balas que llegan al segundo diafragma con las dos rendijas abiertas es igual al número de balas que pasan por la rendija 1 más el número de las que pasan por la rendija 2.

Es posible diseñar un experimento con electrones similar al que acabamos de describir. Es necesario precisar que se trata de lo que se denomina un experimento de pensamiento. El experimento tal como lo describiremos tiene grandes dificultades técnicas para poder ser llevado a cabo. Sin embargo podemos afirmar que si se resolviesen tales dificultades el resultado sería como el que presentaremos, pues existe un gran número de experimentos que han sido llevados a cabo, cuyos resultados nos permiten hacer la anterior afirmación. El experimento de pensamiento es el que sigue.

Se tiene un cañón de electrones que es un dispositivo que emite electrones y los acelera hacia un blanco dado. Los electrones se envían a través de dos rendijas en un diafragma para que incidan luego sobre una pantalla P, en frente de la cual hay un detector Geiger móvil. Un detector Geiger es un aparato que registra la llegada de partículas. La llegada de una partícula al detector es indicada por un cierto sonido que emite el aparato. El montaje total se ilustra en la figura 4.10.

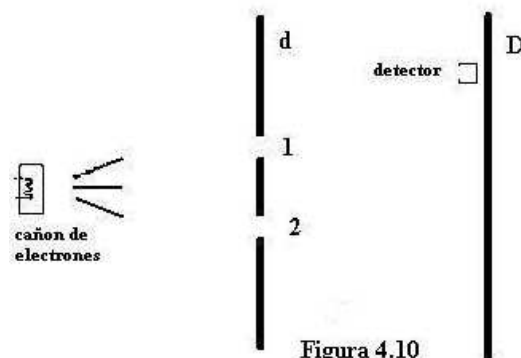


Figura 4.10

Dijimos que un detector Geiger suena cuando una partícula es detectada. En nuestro experimento oiremos una serie de sonidos que interpretaremos como la llegada de un

electrón. Si se mueve el detector a diferentes posiciones el número de sonidos en un mismo intervalo de tiempo variará, unas veces se oirán más sonidos, otras veces menos.

Si se reemplaza la pantalla D por una fluorescente, se verá una serie de destellos correspondientes cada uno a la llegada de un electrón a la pantalla. Podemos entonces afirmar que los electrones son partículas y que su comportamiento debe ser similar al de las balas en nuestro experimento anterior. Se puede entonces, lo mismo que en el caso de las balas, contar el número de impactos y hacer una gráfica de ese número contra la distancia vertical sobre la placa y esperar que esa gráfica sea similar a la que se tiene sumando las curvas en las figuras 4.8 y 4.9. Para nuestra sorpresa la gráfica que se obtiene es la que corresponde a la interferencia de ondas (figura 4.6)

Encontramos entonces una dificultad fundamental cuando tratamos de describir el comportamiento del electrón considerándolo como una partícula clásica. La figura de interferencia nos lleva a concluir que el electrón es una onda y como tal debe pasar por ambas rendijas. Sin embargo, si ello es así, ¿cómo entender que en la pantalla fluorescente se observen destellos discretos y en la placa una serie de puntos discretos también, lo que indica que cada electrón, al igual que las balas, es una entidad discreta y localizada que sólo puede pasar por una de las rendijas? Nos enfrentamos a una dualidad, pues sabemos que algo no puede ser a la vez una onda y una partícula. Se trata de la famosa dualidad onda partícula que se extiende también a la luz. En efecto: si en el experimento con luz de las dos rendijas disminuimos la intensidad luminosa, comenzaremos a observar en la placa fotográfica impactos discretos, como si a ella estuvieran llegando estructuras discretas y localizadas como son las partículas. La misma pregunta que nos hacíamos acerca de la naturaleza del electrón surge ahora con respecto a la naturaleza de la luz: ¿se trata de una onda o de una partícula?

Volvamos ahora a nuestra experiencia con el cañón de electrones. Tenemos datos que nos llevan a concluir que los electrones son partículas. Sin embargo su distribución en la placa fotográfica es la de una onda. ¿Será que el hecho de estar enviando un número muy grande de electrones casi uno después del otro podrá ayudarnos a explicar su distribución, invocando un tipo de interacción especial entre ellos? Para explorar esta posibilidad, podemos enviar un haz de electrones con poca intensidad, asegurándonos así de que los electrones van tan distanciados unos de otros que en la práctica podemos afirmar que van llegando bien separados a la placa, de modo que ninguno perturbe al otro en su camino. Si hacemos este experimento y luego examinamos la distribución de ellos en la placa, de nuevo observaremos la típica distribución de interferencia de una onda. O sea que todo el asunto tiene que ver con cada electrón individualmente. Esto nos aboca a la siguiente dificultad adicional cuando tratamos de explicar el comportamiento del electrón considerándolo como una onda: cuando esta onda llega a la pantalla fluorescente, el destello sólo se produce en un punto. Como se trata de un sólo electrón cada vez y este se detecta en el punto donde está el destello, tendremos que concluir que la onda colapsa a ese único punto o sea desaparece en todos los demás puntos. Y ese colapso tiene lugar de modo instantáneo puesto que podemos imaginar la distancia entre las rendijas y la pantalla, y el tamaño de esta última, tan grandes como se quiera. Sin embargo, la velocidad máxima de todo proceso físico es la velocidad de la luz en el vacío. Por lo tanto la onda debería tomar

un cierto tiempo para colapsar o para desaparecer de todos los otros puntos diferentes a aquel donde se observa el destello.

Podemos ensayar otro tipo de razonamiento: si los electrones son partículas deben pasar por una de las dos rendijas, ¿será que hacen algún tipo de movimiento complicado a su paso por las rendijas, movimiento que de alguna manera puede dar cuenta de su distribución en la placa? Antes de intentar hacer una teoría siguiendo esa línea de ideas, hagamos el siguiente experimento: cerremos una de las rendijas, por ejemplo la rendija 2. Si lo hacemos, encontraremos que la distribución es la que se muestra en la figura 4.8. Si ahora cerramos la rendija 1, hallaremos la distribución mostrada en la figura 4.9. Razonando que al abrir las dos rendijas cada electrón pasa por una de ellas, esperaríamos que la distribución de los electrones con las dos rendijas abiertas fuese la suma de la distribución obtenida cuando se cierra una rendija más la correspondiente cuando se cierra la otra. Pero hemos visto que no es así, que al abrir las dos rendijas se obtiene una distribución como la de la figura 4.6. Este resultado es sumamente inquietante, en efecto: con las dos rendijas abiertas se obtiene una distribución de máximos y mínimos, se tienen ciertos puntos a donde no llega ningún electrón. Si se cierra una de las rendijas se encuentra, sin embargo, que en algunos de tales puntos llegan ahora electrones. Es como si el hecho de abrir por ejemplo la rendija de abajo, cuando la de arriba ya está abierta, impidiese a un electrón llegar a un cierto punto a donde sí llega cuando sólo está abierta la rendija de arriba. O como si cada electrón supiese donde llegar según estén abiertas las dos rendijas o no. Y esa supuesta información acerca de si una rendija está abierta o no le llegaría al electrón de modo instantáneo violando así uno de los principios básicos de la física. En efecto: si consideramos - dado que hemos comprobado que al tapar de modo alterno cada rendija el electrón pasa o por una o por la otra - que el electrón tiene una trayectoria, entonces podemos imaginar un electrón que está a punto de pasar digamos por la rendija 1. Decidimos tapar la rendija 2 pero posponemos el acto de taparla hasta el momento mismo en que el electrón comienza a entrar a la rendija 1. Si no tapásemos la rendija 2, sabemos que el electrón incidirá en la pantalla de modo que colabore a formar un patrón de interferencia. En cambio si la tapamos el electrón colaborará a formar un patrón como el de la suma de las curvas en las figuras 4.8 y 4.9. Si consideramos que de alguna manera el electrón recibe información acerca del estado de la rendija 2, esa información le debe llegar entonces de modo instantáneo puesto que podemos considerar la distancia entre las dos rendijas tan grande como se quiera.

Nótese que el problema de una información instantánea se tiene también si ensayamos a considerar el electrón como una onda en el experimento anterior. Podemos imaginar que la onda está a punto de llegar al diafragma. El hecho de cerrar o no la rendija 2 cambiará radicalmente el comportamiento de la onda: si no se cierra la rendija, se obtendrá la interferencia típica de una onda. Si, por el contrario, se cierra la rendija, se obtendrá la distribución correspondiente a partículas. O sea que si se cierra la rendija, de inmediato la onda se convierte en una partícula o sea desaparece inmediatamente de todo el espacio para concentrarse en un punto en las inmediaciones de la rendija 1. Si el cambio radical de comportamiento se atribuye a una perturbación de la onda causada por el hecho de cerrar la rendija 2, tal perturbación se transportará de modo inmediato.

Podemos intentar otra cosa: en lugar de cerrar una de las rendijas, dejemos las dos rendijas abiertas y observemos por donde pasa cada electrón. Podemos para ello colocar frente a una de las rendijas un dispositivo que nos permita saber cuáles electrones pasan por esa rendija. El dispositivo puede ser una fuente de luz. Después de pasar por la rendija en cuestión, el electrón dispersará la luz de la fuente y veremos un destello que nos indicará su presencia. En esa forma sabremos por cuál de las rendijas pasa cada electrón. Si hacemos la experiencia encontraremos que la mitad de los electrones pasa por una de las rendijas y la otra mitad por la otra rendija. La distribución que encontramos ahora no es la distribución de interferencia sino la distribución de trozos de materia que pasan por una u otra rendija como en el caso de las balas. Es posible argumentar en este caso que los electrones cambian su comportamiento debido a que la luz los perturba. El problema con esa línea de pensamiento es que, al igual que con el caso de la rendija que puede cerrarse o no, nos conduce a una violación del principio de la velocidad máxima de las interacciones físicas. En efecto: podemos imaginar un electrón que esté a punto de pasar por la rendija detrás de la cual no hay ninguna fuente de luz. El comportamiento de tal electrón dependerá de si prendemos o no la fuente de luz en ese instante. Si argumentamos que el electrón es informado del estado de la fuente de luz o es perturbado si ella está prendida, debemos concluir que tal información o tal perturbación llegan de modo instantáneo al electrón pues podemos imaginar la distancia entre las rendijas tan grande como queramos.

Nótese de nuevo que si en el experimento anterior consideramos el electrón como una onda nos enfrentamos a los mismos problemas con la velocidad a que viajan las supuestas perturbaciones. Podemos imaginar la onda a punto de llegar al diafragma. El hecho de prender o no la fuente de luz, cambiará radicalmente el comportamiento de la onda. Si atribuimos tal cambio, cuando se prende la luz, a una perturbación causada por la fuente lumínica, tal perturbación llegará de modo inmediato.

Es sumamente inquietante entonces que dos experimentos - el que consiste en tapar una de las dos rendijas y el que consiste en observar con una fuente de luz por donde pasa cada electrón - que sólo tienen en común el hecho de que ambos nos permiten conocer por donde pasa cada electrón, produzcan el mismo resultado.

El hecho es que podemos ensayar cualquier otra manera de observar el paso de los electrones y la conclusión a que llegaremos será la misma: si se intenta observar su camino, los electrones se comportan como partículas; si no se les observa en su recorrido, se comportan como ondas, y hasta el momento no se ha encontrado una manera de entender el comportamiento de los electrones, y también de la luz, utilizando sólo uno de los dos conceptos: el de onda o el de partícula, que son mutuamente excluyentes desde el punto de vista lógico.

El problema no es similar al de encontrarnos con un animal extraño con características nunca vistas, que en ciertos aspectos se asemeja a un animal conocido y en otros se asemeja a otro animal distinto pero también conocido. Nuestro problema, siguiendo la metáfora del animal desconocido, sería el de hallar un animal con características que no sólo dependen de la manera como lo observamos, sino que además son excluyentes desde el punto de vista lógico.

Muchas preguntas como las siguientes surgen en la mente: ¿Son los electrones pequeños corpúsculos similares a las perlas del mar o son más bien como las olas del mar? Si se comportan como las perlas o como las olas según sea el arreglo experimental que tengamos ¿de qué manera podemos emplear con respecto a ellos el verbo ser? Recordemos que en la visión mecanicista se sostiene que las cosas tienen características que no dependen de que las observemos o no.

Para mostrar aún con mayor dramatismo el comportamiento extraño de los electrones vamos a describir otro experimento: el experimento de elección retardada (delayed-choice experiment).

El experimento de elección retardada

Hemos dicho que, ó bien decidimos observar por cuál rendija pasa cada electrón, con lo cual desaparece la figura de interferencia y los electrones se comportan como partículas, ó bien dejamos de observar el camino seguido por los electrones, con lo que aparece la figura de interferencia y los electrones presentan un comportamiento ondulatorio.

El experimento de elección retardada pospone la decisión de observar o no el camino que siguen los electrones hasta un momento en el cual estos últimos ya han atravesado el aparato. En este tipo de experiencias todo sucede como si la decisión que hace el observador ahora tuviese influencia en lo que ha hecho el electrón en el pasado.

Un arreglo ideal para llevar a cabo un experimento de elección retardada es el que se muestra en la figura 4.11.

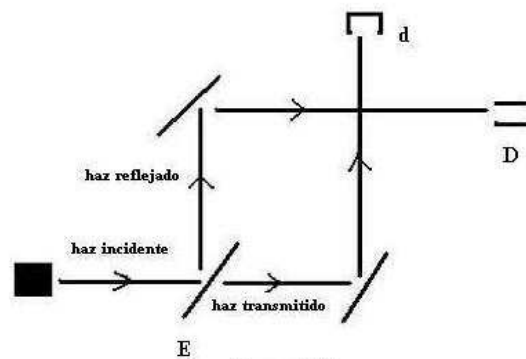


Figura 4.11

Se tiene un haz de fotones. Coloquemos en su camino un espejo semitransparente E que parta el haz en dos mitades. Una de ellas será reflejada y formará un haz dirigido hacia arriba y la otra será transmitida formando un haz que seguirá en la misma dirección que el haz inicial. Tanto el haz reflejado como el transmitido encuentran después un espejo que

los refleja noventa grados. Los haces se cruzan y entran cada uno a un detector que marcamos como D y d. Si suponemos que el haz inicial es de tan baja intensidad que en la práctica los fotones entran uno por uno al aparato, se encuentra que sólo uno de los detectores se activa cada vez.

Se puede entonces razonar así: cada fotón que llega al primer espejo, el semitransparente, ó se refleja ó se transmite. En el primer caso, sigue el camino que lleva al detector D; en el segundo caso, sigue el camino que lleva al detector d. La experiencia equivale a observar el camino que siguen los electrones en el experimento de las dos rendijas: si el que pasa por la rendija de arriba o el que pasa por la de abajo. El fotón muestra entonces un comportamiento corpuscular.

Veamos ahora una variante del experimento (figura 4.12)

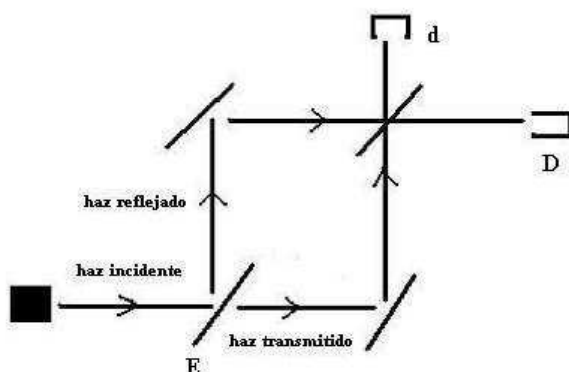


Figura 4.12

Lo que se ha hecho es insertar un segundo espejo semitransparente en el punto donde se cruzan los dos haces. Este espejo recombina los dos haces. En efecto: parte del haz que va hacia el detector D sigue ahora la ruta que lleva al detector d y parte del haz que va hacia el detector d sigue ahora por la que lleva al detector D. Se producen ahora efectos de interferencia entre los dos haces que dependen de las diferencias de camino entre el segundo espejo semitransparente y uno y otro detector. Es posible arreglar las cosas de modo que la intensidad del haz resultante que va hacia el detector D, después de pasar el segundo espejo semitransparente, sea igual a cero, o sea que se tenga interferencia destructiva para ese haz. Se concluye entonces que la intensidad del haz resultante que va hacia el otro detector es del 100% del haz incidente. Igualmente se puede lograr que la intensidad del haz que va hacia el detector d, después de pasar el segundo espejo semitransparente, sea también igual a cero. Ninguno de estos hechos puede entenderse a menos que se atribuya al haz de fotones un comportamiento ondulatorio. Y como el experimento se puede hacer con un haz inicial de tan baja intensidad que en la práctica cada fotón entra uno por uno al aparato, debemos concluir que cada fotón se comporta como una onda. Con la presencia del segundo espejo, la experiencia es equivalente a la de las dos rendijas cuando ambas permanecen abiertas.

En conclusión: es la presencia del segundo espejo semitransparente lo que decide qué comportamiento va a exhibir el fotón, si el corpuscular o el ondulatorio. Sin el segundo espejo, se manifiesta el comportamiento corpuscular, lo que significa que el fotón sigue sólo uno de los dos posibles caminos. Con el segundo espejo presente, lo que se manifiesta es el comportamiento ondulatorio, lo que implica que una parte del fotón sigue por uno de los caminos y otra parte sigue por el otro camino. De nuevo nos enfrentamos con la dualidad onda-partícula; con el hecho de que, dependiendo del contexto experimental, el fotón va a manifestar una u otra de dos propiedades mutuamente excluyentes.

En este experimento, sin embargo, se manifiesta algo aún más sorprendente. Y es que podemos calcular cuánto tiempo toma un fotón para llegar a la región donde puede colocarse eventualmente el segundo espejo y diferir hasta el último momento la colocación o no de ese espejo. Ese hecho de esperar hasta cuando el fotón esté ya en las inmediaciones del sitio donde puede o no colocarse el segundo espejo, para decidir si se coloca o no ese segundo espejo, es lo que da el nombre de “elección retardada” a la experiencia. Todo indica que el hecho de colocar o no un espejo en un momento dado define si el fotón muestra uno u otro de sus dos posibles comportamientos.

Si el que se manifiesta es el comportamiento corpuscular, se debe considerar entonces que el fotón ha seguido por uno u otro de los dos caminos posibles; si lo que se muestra en cambio es el comportamiento ondulatorio, la consideración debe ser que parte del fotón ha seguido por un camino y parte por el otro. Parece evidente que cuando el fotón llega al sitio donde puede o no colocarse el segundo espejo semitransparente ya ha recorrido su camino, o bien por una sola ruta o bien por ambas rutas. Por lo tanto, el colocar o no ese espejo no podría cambiar la manera como ha hecho el fotón su recorrido. Sin embargo, dependiendo de si se coloca o no, el espejo se encuentra que el fotón va por las dos rutas o va por una sola.

La conclusión sorprendente es que todo indica que lo que se hace en un momento dado parece influir en el comportamiento del fotón en el pasado, violándose así una de las intuiciones más fundamentales del mecanicismo acerca de las relaciones causales que sostiene que la causa no puede ser posterior en el tiempo a su efecto.

El indeterminismo

Consideremos de nuevo el experimento anterior sin el segundo espejo semitransparente. Se encuentra que 50 % de los electrones llegan a D y 50% llegan a d. ¿Es posible determinar cuáles van por una ruta y cuáles por la otra? Como vimos en capítulos anteriores, para aplicar el determinismo es necesario poder asignar un estado en sí al objeto investigado. El comportamiento del electrón no parece permitir una asignación de tal estado pues el comportamiento depende del contexto experimental: en ciertos contextos el electrón se comporta como un corpúsculo y en otros como una onda. Ese hecho dificulta entonces la asignación de un estado en sí, que por definición debe ser independiente del contexto observacional.

Nótese que lo que sí se puede asignar es la probabilidad para cada ruta, la cual es igual al número de electrones que siguen la ruta en cuestión dividido por el número total de ellos que salen de la fuente. En el caso que estamos considerando existe entonces una probabilidad del 50% para cada ruta posible.

Preguntas similares acerca del determinismo se pueden hacer respecto al experimento de las dos rendijas. Consideremos que ambas están abiertas y la intensidad es muy baja de modo podemos detectar la llegada de cada electrón uno a uno. ¿Es posible determinar a qué punto exacto de la pantalla llega cada electrón? Las mismas consideraciones que presentamos antes acerca de la dificultad que las propiedades contextuales del electrón presentan para la aplicación del determinismo son válidas aquí. Sin embargo, es posible contar cuantos electrones llegan a cada punto y asignar una probabilidad de llegada de cada electrón a cada punto de la pantalla. Esa probabilidad será igual al número de electrones que llegan al punto en cuestión dividido por el número total que sale de la fuente. Cuando un gran número de electrones ha llegado, la distribución de la probabilidad es como el patrón de una onda. Si hacemos el mismo proceso de contar cuantos electrones llegan a cada punto en el caso en que se tapa una de las rendijas, podemos asignar las probabilidades para este caso. Encontramos la distribución de probabilidades para una partícula cuyo estado inicial no se conoce con precisión. El abrir o cerrar una rendija cambia entonces la distribución de probabilidades.

Antes de terminar debemos añadir que los experimentos descritos para mostrar por qué el mundo cuántico es extraño son experimentos ideales, llamados “de pensamiento”; son experimentos donde se han obviado todas las complicaciones técnicas pero que pueden traducirse en experimentos reales. La diferencia hoy en día no parece ser relevante porque los resultados en el experimento real son iguales a los resultados obtenidos en el experimento ideal.

También hemos hablado de los fenómenos cuánticos y no de la teoría cuántica. Estos son resultados experimentales. Quizá resulte después que la teoría cuántica no es una buena teoría, pero cualquier teoría que pretenda ser básica, correcta, debe explicar estos experimentos.

Resumen de la situación

Desde la visión mecanicista se presentan las siguientes dificultades para entender el comportamiento de la luz y de los electrones:

A) Dificultades para afirmar que el electrón es una partícula.

Las siguientes experiencias indican un carácter corpuscular:

Experimento 1: El de las dos rendijas con una de ellas cerrada.

Experimento 2: El mismo experimento con ambas rendijas abiertas pero con una fuente de luz encendida detrás de una de ellas.

El resultado de ambos experimentos permite afirmar que el electrón pasa por una u otra rendija. Además a la pantalla llegan entidades discretas una a una.

Experimento 3: El experimento de elección retardada sin el segundo espejo semitransparente.

El resultado permite afirmar que el electrón va por una u otra ruta. También a cada detector llegan entidades discretas una a una.

Se presentan, sin embargo, los siguientes problemas:

Problema 1: Si en el experimento 1 se abren las dos rendijas o en el segundo se apaga la luz o en el tercero se coloca el segundo espejo semitransparente, se debe atribuir un comportamiento ondulatorio al electrón. Dependiendo del contexto experimental, el electrón presenta comportamientos que son mutuamente excluyentes. Este hecho dificulta la asignación de un estado en sí para el electrón y por lo tanto hace difícil aplicar la tesis del determinismo. Todo indica una especie de indivisibilidad entre todo el contexto experimental y el electrón.

Problema 2: Si se considera que el hecho de abrir la rendija en el experimento 1 o de apagar una luz en el segundo perturba al electrón y lo hace pasar a un comportamiento ondulatorio, se violaría el principio de la velocidad máxima de las interacciones, pues las distancias entre las dos rendijas puede ser tan grande como se quiera.

Problema 3: La decisión de colocar o no el segundo espejo semitransparente en el experimento 3 se puede posponer hasta cuando el electrón esté en las inmediaciones del sitio donde puede colocarse o no ese espejo. Todo sucede como si lo que hacemos en un momento dado pudiese influir en el comportamiento del electrón en el pasado, violándose así una de las más caras intuiciones del mecanicismo sobre la causalidad, que es la consideración de que la causa no puede ser posterior en el tiempo al efecto.

Problema 4: Si queremos evitar en el experimento 3 la violación de la idea intuitiva de causalidad del mecanicismo, podríamos intentar razonar como sigue: la colocación del segundo espejo semitransparente en el momento mismo en que el electrón llega al sitio donde colocamos el espejo, perturba al primero. El problema consiste en que para ciertas distancias entre el espejo y los detectores, el electrón llega siempre a uno de los detectores, y para otras distancias llega siempre al otro detector. En conclusión: el electrón, al encontrar el espejo, recibiría información instantánea sobre las distancias entre el espejo y los detectores, la cual lo guiaría por uno u otra de las rutas que del espejo lleva a los detectores. De nuevo se tendría violación del principio de la velocidad máxima de las interacciones.

B) Dificultades para afirmar que el electrón es una onda.

Las siguientes experiencias indican un carácter ondulatorio:

Experimento 1: El de las dos rendijas con ambas abiertas.

Experimento 2: El experimento de elección retardada con el segundo espejo semitransparente.

Problema 1: Si la intensidad se disminuye, se detecta en la pantalla del experimento 1 un destello cada vez. De la misma forma se detecta en los detectores del experimento 2 la llegada de entidades discretas. Todo sucede como si la onda colapsara de modo instantáneo a un sólo punto violando el principio de la velocidad máxima de las interacciones.

Problema 2: Si se intenta seguir el recorrido de la supuesta onda, los resultados son los de una partícula. Dependiendo del contexto experimental, el electrón presenta comportamientos que son mutuamente excluyentes. De nuevo se tiene la dificultad para asignar un estado en sí al electrón y para aplicar el determinismo. También aparece la indivisibilidad entre todo el contexto experimental y el electrón.

Problema 3: La decisión de quitar o no el segundo espejo semitransparente en el experimento 3 se puede posponer hasta cuando la supuesta onda esté en las inmediaciones del sitio donde puede colocarse o no ese espejo. De nuevo, todo sucede como si lo que hacemos en un momento dado pudiese influir en el comportamiento del electrón en el pasado, violándose así la intuición mecanicista acerca de que la causa no puede ser posterior en el tiempo al efecto.

Problema 4: Para evitar la violación de la idea intuitiva de causalidad del mecanicismo podemos intentar el razonamiento siguiente: El acto de remover el espejo semitransparente en el momento mismo en que la onda llega al sitio donde está colocado, la perturba. El problema radica en que la onda colapsaría inmediatamente se quita el espejo, pues una vez removido este, el electrón se comporta como un corpúsculo. Otra vez se tendría violación del principio de la velocidad máxima de las interacciones, con la complicación adicional de que lo que haría colapsar de modo inmediato a la onda no sería la presencia de algo sino la ausencia de algo.

Problema 5: Si se considera que el hecho de cerrar la rendija en el experimento 1 o de prender una luz en el experimento 2 perturba la onda y la hace pasar a un comportamiento corpuscular, se violaría el principio de la velocidad máxima de las interacciones, pues la distancia entre las dos rendijas puede hacerse tan grande como se quiera.

¿Se resuelve la situación afirmando simplemente que el electrón o la luz son lo que son, que no son ni partículas ni ondas sino algo que podemos llamar, por ejemplo, quantones y que el comportamiento de tales entidades es como lo hemos descrito?

Tal propuesta no resuelve nada. Simplemente pone un nombre a un ente con comportamiento extraño y problemático. Decir que se trata de algo nuevo, un quantón, no resuelve la paradoja que presenta el hecho de que ese quantón tiene propiedades que se excluyen mutuamente desde el punto de vista lógico. Si se quiere construir una visión de la luz o de los electrones como algo que tiene propiedades en sí, tal visión debe explicar cómo al interactuar con los instrumentos se generan comportamientos mutuamente excluyentes.

Debe darse respuesta además a la violación, en tal interacción, del principio de la velocidad máxima de las interacciones.

Un mero "bautizo" no logra nada de lo anterior ni da tranquilidad a la mente mecanicista.

El comportamiento cuántico y el mecanicismo

Para finalizar este capítulo vamos a precisar qué aspectos del mecanicismo parecen ser violados por el comportamiento de los electrones y los fotones. Recordemos algunos de los aspectos del mecanicismo.

El objetivismo, que es la idea de que los cuerpos están hechos de partes que tienen una existencia y unas propiedades independientes totalmente de la existencia de los observadores. Los electrones y fotones parecen tener propiedades que dependen del contexto experimental dentro del cual son observados.

El determinismo, según el cual el estado futuro del universo físico, al igual que sus estados pasados, están totalmente contenidos en el estado presente. Una vez fijados el estado del universo y las interacciones entre sus partes, su evolución futura queda determinada completamente. El comportamiento de electrones y fotones parece que sólo se puede predecir de manera estadística.

El reduccionismo en su aspecto lógico que consiste en la idea de que es posible invocar una sola imagen para comprender la realidad. Para explicar el comportamiento de electrones y fotones parece que es necesario invocar dos modelos mutuamente excluyentes desde el punto de vista lógico.

No sólo hay conflictos con los anteriores aspectos del mecanicismo sino con las ideas más intuitivas de tal cosmovisión sobre las relaciones causales, ya que el experimento de escogencia retardada sugiere que el comportamiento de los electrones en un momento dado parece depender del contexto experimental en el futuro.

Nuestros intentos por evitar tal violación de las ideas sobre la causalidad mecanicista mediante la suposición de una perturbación del electrón, nos ponen en conflicto con el principio físico de la velocidad máxima de las interacciones, que en otras palabras dice que las relaciones causa a efecto en la física se llevan a cabo con una velocidad máxima y no de manera instantánea. El conflicto con ese principio fundamental físico se presenta con cualquier intento de explicación del comportamiento contraintuitivo de electrones y fotones en la línea de perturbaciones que se producen sobre ellos.

Para terminar recordemos que hemos presentado los fenómenos cuánticos típicos sin hacer ninguna referencia a la teoría cuántica.

¿Será que la teoría permite resolver los interrogantes y restablecer una visión mecanicista?
La respuesta a esta pregunta es el tema de los próximos capítulos.

CAPÍTULO 5 LA TEORIZACIÓN CUÁNTICA

Hitos históricos en la mecánica cuántica

Planck y la cuantización

La historia de la mecánica cuántica comienza en 1900. Max Planck estaba dedicado a estudiar la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro. En física se entiende por cuerpo negro un cuerpo que absorbe todas las radiaciones que recibe. Ello no significa que el cuerpo no emita ninguna radiación, en efecto, como la energía que absorbe no se puede acumular indefinidamente, el cuerpo debe de alguna manera desembarazarse de una parte. Lo que sucede es que las radiaciones absorbidas elevan la temperatura del cuerpo, el cual emite entonces radiación electromagnética que crece en función de la temperatura. Planck intentaba encontrar una relación que le reprodujese los valores experimentales de la distribución de la radiación del cuerpo negro en función de la frecuencia de las ondas emitidas. Para ello representó su cuerpo negro por una cavidad cerrada en cuyo interior se movían las ondas electromagnéticas. El problema consistía en determinar el estado de equilibrio térmico entre la materia que constituía las paredes calientes de la cavidad y el campo electromagnético contenido dentro de ellas. Ese problema presentaba una dificultad fundamental pues, según las teorías de la época, las frecuencias de la radiación dentro de la cavidad formaban un continuo o sea podían tomar un número infinito de valores. A cada una de las posibles vibraciones, infinitas en número, correspondía una cantidad fija de energía para una temperatura dada. A la radiación total correspondía entonces una cantidad infinita de energía, la cual debería ser emitida por las paredes de la cavidad, por lo cual estas últimas se enfriarían inmediatamente al cero absoluto. Las teorías clásicas no daban cuenta entonces del equilibrio térmico existente entre las partículas materiales de las paredes de la cavidad y la radiación electromagnética continua contenida en ellas.

Planck resolvió el problema mediante una hipótesis que no parecía ser más que un mero artificio de cálculo sin justificación física: para determinar la distribución de energía entre las diversas vibraciones del campo electromagnético, dividió esa energía en pequeñas unidades aisladas. Tal discretización de una magnitud continua no es físicamente legítima a menos que uno pueda, al final del cálculo, hacer tender a cero la magnitud de los elementos discretos para obtener el resultado del caso continuo. Los paquetes de energía de Planck, sin embargo, no respondían a esa condición y Planck tuvo que suponer que cada paquete tenía un valor finito, igual a la frecuencia ν de la vibración multiplicada por una nueva constante hasta el momento desconocida, que ahora se denomina constante de Planck y se escribe como h . Cada paquete de energía se conoce hoy en día como un quantum, palabra latina que significa cantidad.

Einstein y el fotón

Planck mismo no era totalmente consciente de todas las implicaciones verdaderamente revolucionarias de su trabajo. Fue Einstein quien, en 1906, concluyó que había involucrada una paradoja fundamental: por una parte se utilizaban las ecuaciones de Maxwell que describían un campo continuo y, por otra parte, la energía de las vibraciones

electromagnéticas y las variaciones de esa energía eran múltiplos enteros de paquetes de energía de Planck. O sea que el campo electromagnético del cuerpo negro se comportaba como si fuera discreto y no continuo.

Einstein mostró cómo el fenómeno de la emisión de electrones por metales sometidos a radiación lumínica, llamado el efecto fotoeléctrico, sólo podía interpretarse admitiendo que el metal absorbe la energía por cantidades discretas que no son otras que los paquetes de energía de Planck. Como en el caso del cuerpo negro, este resultado indicaba que, en su contacto con la materia, la luz se comportaba no como un flujo continuo sino como un conjunto de cantidades discretas. El concepto del quantum de luz suscitó una viva oposición de parte de muchos de los físicos de la época, incluidos entre ellos el mismo Planck; sin embargo Einstein perseveró en sus convicciones y llegó a afirmar en 1909 que la teoría correcta de la luz debería asociar los aspectos corpuscular y ondulatorio.

El modelo atómico de Bohr

Los quanta hicieron luego su aparición en otro dominio de la física. En 1911 Rutherford sugirió que el átomo se componía de un pequeño núcleo alrededor del cual gravitaban los electrones tal como los planetas alrededor del sol. El modelo tenía, sin embargo, un inconveniente. Según las ecuaciones de Maxwell, una partícula cargada animada de un movimiento circular emite ondas electromagnéticas y pierde así su energía. Los electrones de todos los átomos del Universo deberían entonces caer a sus núcleos en un tiempo extremadamente breve. Ahora bien, ello no sucede puesto que los átomos son estables. ¿Cómo explicar entonces este resultado?

En 1913, Niels Bohr propuso un modelo atómico, más precisamente un modelo del átomo de hidrógeno. El hidrógeno es el más simple de los átomos: se compone de un protón, su núcleo, alrededor del cual orbita un electrón. Bohr supuso que este electrón sólo puede encontrarse en una familia discreta de órbitas, a saber: aquellas sobre las cuales la cantidad de movimiento del electrón (que es el producto de su masa por su velocidad) multiplicada por la circunferencia de su órbita es un múltiplo entero de la constante de Planck. En cada una de estas órbitas permitidas, el electrón posee una cierta energía y, por una razón desconocida, no emite radiación electromagnética. El electrón se encuentra de ordinario sobre la órbita de energía mínima, la más cercana al núcleo. Si llega a absorber un fotón, “salta” a otra órbita permitida cuya energía sea igual a la de la órbita de partida más la energía del fotón absorbido. Después de un cierto tiempo, el electrón vuelve a su órbita inicial emitiendo un fotón de igual energía que la del fotón incidente. Como la energía de un fotón determina, según la fórmula de Planck, la frecuencia de la onda que le está asociada, Bohr calculó las frecuencias de las ondas luminosas absorbidas o emitidas por el átomo de hidrógeno y encontró los valores experimentales conocidos en su época.

Ello constituyó un éxito impresionante pero parcial. Bohr no pudo en particular determinar, de entre todas las transiciones posibles del electrón, aquellas que se producían efectivamente, ni calcular sus probabilidades. Además, los fundamentos conceptuales de su modelo eran muy oscuros: Bohr no explicaba por qué sólo ciertas órbitas estaban permitidas, ni como se efectuaban las transiciones entre las órbitas. Tales transiciones

parecían corresponder a “saltos” instantáneos que no podían explicarse por medio de ningún movimiento continuo.

Las probabilidades de Einstein

En 1917, Einstein analizó de nuevo el fenómeno del cuerpo negro con base en la interacción entre radiación y materia. Usó la idea de estados u órbitas discretas y mediante la hipótesis de que la emisión de un fotón y el retroceso correspondiente del átomo que lo emitía constituían un proceso aleatorio el cual poseía una probabilidad bien definida, obtuvo la ley de Planck. No era posible, sin embargo, predecir el momento exacto en que sucedía la emisión.

De su trabajo se concluye también que los quanta de luz, o fotones como se les conoce ahora, poseían no sólo energía sino también cantidad de movimiento, o sea se comportaban como una partícula.

Es importante añadir que en 1923 Arthur Compton mostró que, en su interacción con los electrones, un haz luminoso se comportaba como un conjunto de partículas individuales desviadas por sus colisiones con los electrones. Este fenómeno, llamado el efecto Compton, acabó en la práctica con toda la oposición que había surgido de manera muy viva entre muchos físicos hacia la idea de propiedades corpusculares de la luz.

de Broglie y las ondas de materia

En 1924, Louis de Broglie explicó la existencia de las órbitas discretas de Bohr postulando, por simetría con el comportamiento corpuscular de las ondas luminosas, que las partículas materiales poseen un comportamiento ondulatorio y que se debe asociar una onda al movimiento de cada partícula. de Broglie estableció luego una fórmula que ligaba la cantidad de movimiento del electrón con la longitud de onda que le estaba asociada, y supuso después que el movimiento del electrón en el átomo era análogo al de una onda que rodeara circularmente el núcleo. Para existir, tal onda debía cerrarse exactamente sobre ella misma. Esta restricción, una vez introducida en la fórmula de de Broglie, daba las órbitas permitidas del modelo de Bohr. En 1925, el postulado de de Broglie recibió confirmación experimental directa luego de que Clinton Davisson demostrara que un haz de electrones que atravesaba un cristal metálico daba lugar a una figura de difracción característica de las ondas, con lo cual se verificó la fórmula de de Broglie.

Por su estructura, tal fórmula se parecía a la de Planck: en ambas aparecía el quantum de acción h y ambas planteaban el mismo problema conceptual de presentar, de un lado del signo igual, cantidades ligadas al movimiento de una partícula como la energía y la cantidad de movimiento y, del otro lado, cantidades características de una onda como la frecuencia y la longitud de onda. ¿Cuál era entonces la naturaleza del objeto físico al que se referían esas fórmulas? ¿Una onda o una partícula?

A principios de la década de 1920, los físicos se encontraban en una situación embarazosa: por una parte los nuevos modelos “cuánticos”, en los que aparecía la constante de Planck, daban resultados correctos e imposibles de obtener en el marco de las teorías clásicas, por otra parte ninguno de tales modelos podía decir con exactitud en qué conceptos se fundamentaban. Los físicos, que desde finales del siglo XIX vivían en la convicción de que la materia estaba compuesta de corpúsculos y la luz compuesta de ondas, descubrían ahora que las ondas mostraban un comportamiento corpuscular y los corpúsculos un comportamiento ondulatorio. La física de los cuanta introducía también elementos nuevos y extraños, como el carácter aleatorio de la emisión o de la absorción de radiación en la interacción radiación-materia, lo que implicaba la imposibilidad de describir con precisión las transiciones electrónicas en el modelo de Bohr. En el fondo, los nuevos modelos cuánticos no eran sino un conjunto de reglas prácticas que indicaban en qué circunstancias se debería abandonar el marco clásico y suponer un comportamiento cuántico. Esas reglas, conocidas hoy en día como la “vieja teoría cuántica”, no se basaban en ninguna teoría fundamental.

Heisenberg y la mecánica matricial

Durante los años 1925-1926 se propusieron dos versiones de una teoría fundamental llamada después “nueva teoría cuántica”. La primera versión se debe a Werner Heisenberg y sobre ella tuvo mucha influencia el enfoque de Bohr. Hemos dicho que el modelo de Bohr fracasaba en la explicación de ciertas propiedades del átomo como la probabilidad de emisión por este último de una radiación lumínica de frecuencia dada. Esta probabilidad constituía sin embargo una cantidad medible: uno podía preparar un gran número de átomos en un estado similar y contar luego la cantidad de fotones emitidos en cada frecuencia, en otras palabras, era posible medir la intensidad luminosa para cada frecuencia. Heisenberg consideró entonces que, a pesar de sus limitaciones, el punto fuerte del modelo de Bohr radicaba justamente en no interrogarse sobre el comportamiento “real” del electrón sobre su órbita o en el momento de su transición entre dos órbitas, sino en fijarse solamente en la previsión de las frecuencias lumínicas emitidas por el átomo, únicas cantidades medibles experimentalmente. Había que renunciar entonces a la descripción completa del movimiento del electrón en el átomo, puesto que no era medible de manera directa, y contentarse con la predicción exacta de las intensidades medibles. Heisenberg logró así desarrollar técnicas matemáticas que le permitieron calcular estas intensidades y otras características de la radiación emitida. Esta primera versión de la nueva mecánica cuántica, al formularse en el lenguaje matemático de las matrices, tablas cuadradas de números, recibió el nombre de “mecánica matricial”.

La mecánica matricial de Heisenberg posee una extraña propiedad: al contrario de la mecánica clásica de Newton, no proporciona una descripción espacio-temporal de las cantidades ligadas al movimiento. Por ejemplo, no da ninguna indicación precisa ni sobre la posición ni sobre la velocidad de un electrón que esté en órbita alrededor de su núcleo. Heisenberg pensaba, sin embargo, que ese hecho no tenía ninguna importancia: ni la posición ni la velocidad, según él, eran cantidades directamente medibles; bastaba entonces que la teoría física no hiciese referencia a tales cantidades. Heisenberg justificaba su punto de vista invocando el ejemplo de la relatividad especial, en la cual las medidas concretas

con reglas y relojes se sustituían a los conceptos abstractos de espacio y de tiempo. Lo mismo sucedía en la teoría cuántica. Su papel, afirmaba Heisenberg, consistía sólo en la predicción del comportamiento de cantidades medibles. Esta concepción, sin embargo, estaba lejos de ser fiel al pensamiento de Einstein acerca de la realidad física. Como veremos, Einstein adoptó en los años siguientes una posición sobre la mecánica cuántica diametralmente opuesta a la de Heisenberg y Bohr.

La ecuación de Schrödinger

La segunda versión de la nueva teoría cuántica se debe a Erwin Schrödinger. Partiendo del concepto de de Broglie de onda asociada a cada partícula material, Schrödinger estableció la ecuación que lleva su nombre y que describe el comportamiento de esas ondas. Demostró también que su propia mecánica ondulatoria y la mecánica matricial de Heisenberg eran matemáticamente equivalentes y expresaban, por medio de dos lenguajes matemáticos distintos, una misma estructura teórica. La versión de Schrödinger es sin embargo más fácil de visualizar: el comportamiento del electrón, o de cualquier otra partícula cuántica, se describe, en su teoría, por medio de una entidad matemática llamada la “función de onda”, que es solución de la ecuación de Schrödinger y toma valores diferentes en diferentes puntos del espacio. Por ejemplo, el estado del electrón sobre su órbita se describe por una función de onda que rodea el núcleo. Esta función no atribuye una posición definida al electrón, sin embargo, cuando se calcula la energía del electrón en la órbita, se encuentran los valores experimentales.

Schrödinger pensaba en un comienzo que el electrón consistía en una función de onda, que no era una partícula sino una onda. Tal interpretación no era sin embargo satisfactoria puesto que no daba cuenta de la estructura discreta de las partículas materiales y de los cuantos de luz. Max Born sugirió entonces interpretar la función de onda como una representación de la probabilidad de presencia del electrón en un punto dado, siendo esta probabilidad igual al cuadrado de la amplitud de la función de onda en el punto considerado.

Las relaciones de Heisenberg

Analizando sus ecuaciones de la mecánica matricial, Heisenberg encontró en 1927 un resultado sorprendente: la indeterminación ligada tanto a la posición como a la velocidad del electrón en el seno del átomo era una propiedad general. Si en ciertas condiciones se consigue localizar el electrón con una gran precisión, los valores de su velocidad y de su momento serán altamente imprecisos, y viceversa. En otras palabras, cuanto menor resulte la indeterminación de la posición, mayor resultará la indeterminación del momento. De manera inversa, si se llega a determinar con gran precisión el momento, la posición resultará altamente imprecisa. En ambas situaciones el producto de las dos indeterminaciones, la de la posición y la del momento, es siempre superior a la constante de Planck. La mecánica ondulatoria, al ser equivalente a la mecánica matricial, conducía también al mismo resultado. En ocasiones se emplea la palabra “incertidumbre” en lugar de

“indeterminación”. La primera terminología supone que el electrón posee una posición y una velocidad independientes totalmente del observador y del proceso de observación, sólo que de alguna manera el proceso de observación de una de las cantidades altera nuestro conocimiento de la otra, o sea que lo que está implicado es únicamente nuestro conocimiento de propiedades en sí del electrón. La segunda terminología indica que cantidades como la posición y el momento no están determinadas de una manera independiente del contexto experimental. Veremos más adelante que el uso de una u otra de las palabras mencionadas depende de la interpretación que se dé a la teoría cuántica. Por el momento quizá lo mejor es evitar ambas palabras y hacer referencia simplemente a las relaciones de Heisenberg o al Principio de Heisenberg.

La 5ta Conferencia Solvay. Bohr vs Einstein

En 1927, los más grandes físicos de la época se reunieron en Bruselas, con ocasión del quinto congreso Solvay, para discutir el status de la nueva teoría cuántica. Si bien todo el mundo reconocía que las versiones de Heisenberg y de Schrödinger reproducían los valores determinados experimentalmente, los fundamentos conceptuales de la nueva teoría seguían siendo muy oscuros. Las preguntas que estaban en las mentes eran como las siguientes: ¿Cómo una misma entidad, o la luz o la materia, podía comportarse unas veces como una onda y otras veces como una partícula? Esta “dualidad onda-partícula”, presente ya en la hipótesis emitida por Einstein en 1909, parecía incomprensible. ¿Cuál era el significado de las relaciones de Heisenberg? ¿Cómo interpretar la limitación de la teoría a las predicciones estadísticas? La gran cuestión a la que se enfrentaban los participantes en el congreso, y de hecho toda la comunidad científica, era el saber si, a pesar de la falta de claridad en sus fundamentos conceptuales, era posible aceptar una teoría científica que daba predicciones correctas, o si era necesario buscar una teoría mejor.

La posición de Bohr, que finalmente sería aceptada por la mayoría de los físicos, era la de aceptar la teoría tal como era. No hablaremos ahora de las ideas de Bohr puesta que serán objeto de un análisis detallado en capítulos posteriores. Sólo añadiremos que la importancia histórica del quinto congreso Solvay es enorme pues, a partir de él, la mayoría de los físicos comenzó a adoptar la posición de Bohr y a sentirse cada vez más libre para trabajar sobre los aspectos experimentales y aplicados de la teoría sin preocuparse demasiado de sus fundamentos conceptuales. Ese enfoque pragmático produjo resultados impresionantes: en la década de 1930, la teoría cuántica permitió estudiar no sólo el átomo sino también la estructura del núcleo; más adelante, en la década de 1950, el descubrimiento de partículas aun más fundamentales permitió aumentar de modo significativo nuestro conocimiento de la estructura de la materia. Aquí como en tantos otros dominios - como el de la estructura de la materia condensada o la física de las bajas energías - las predicciones de la teoría cuántica se mostraron de una precisión enorme. De manera paralela, esta teoría condujo a la aparición de tecnologías importantes tales como la energía nuclear, las componentes microelectrónicas y los láser. Después de la Segunda Guerra Mundial, los enormes presupuestos destinados a la investigación transformaron muchas disciplinas físicas en gigantescas empresas científicas, en las que la mayoría de los actores consideraban una pura pérdida de tiempo el análisis de los fundamentos conceptuales de la teoría que utilizaban.

Una pequeña minoría rehusó sin embargo aceptar la posición de Bohr y persistió en la creencia en la posibilidad de una descripción, a su juicio más clara, de la teoría cuántica. La persona más eminente que se opuso a la teoría cuántica tal como fuera formulada a mediados de la década de 1930 fue Einstein, quien había sin embargo contribuido de manera enorme a su desarrollo inicial. No discutiremos tampoco en este punto las ideas de quienes se oponen a la interpretación de Bohr pues de ello hablaremos en detalle en capítulos posteriores.

Estados cuánticos. Funciones de onda

En la mecánica cuántica, lo mismo que en otras teorías, tenemos sistemas y estados de estos sistemas. En el caso de la mecánica clásica, el estado de un sistema está determinado por las posiciones y las velocidades de las componentes del sistema. Sabemos que los fenómenos cuánticos indican que las partículas de alguna manera están asociadas con una onda cuyo comportamiento está regido por la ecuación de Schrödinger. En la descripción cuántica se considera que el estado del sistema se representa por su función de onda. Dejaremos de lado en este momento la pregunta sobre si esa función de onda o función de estado representa una realidad en sí de la partícula o no. Digamos por ahora que todo lo que conocemos en un momento dado sobre una partícula estará representado por su función de estado. Ahora bien, sabemos que las ondas obedecen el principio de superposición. ¿Qué significará este principio en relación con el estado de un sistema cuántico?

La superposición de dos ondas da como resultado otra onda. Si el estado de un sistema cuántico se representa por una función de onda, la superposición de dos estados cuánticos resultará, entonces, en otro estado cuántico.

Consideremos una partícula, por ejemplo un electrón. Supongamos que puede ocupar dos regiones distintas del espacio, como el interior de una de dos cajas pequeñas alejadas una de la otra. Lo que se quiere decir es que, a partir de la información que poseemos, podemos concluir únicamente que, si abrimos las cajas, encontraremos el electrón en una de ellas y no en ninguna otra región del espacio.

Si razonamos de acuerdo con la mecánica clásica, diremos que el electrón tiene siempre una posición bien definida y que, por lo tanto, está necesariamente o en la primera caja o en la segunda. La teoría cuántica dice por su parte que existe un estado para el cual la función de onda del electrón está completamente concentrada en la primera caja - de tal modo que tenemos la certeza de encontrar allí al electrón -, que existe otro estado para el cual la función de onda está totalmente concentrada en la segunda caja - de modo que tenemos la certeza de encontrar allí al electrón - y que, en violación del razonamiento clásico, existen también muchos otros estados que corresponden a superposiciones de los dos estados que acabamos de mencionar, o sea a combinaciones del primero con el segundo. Para tales estados, la función de onda toma valores no nulos en cada una de las dos cajas, de modo que no podemos decir que el electrón se encuentra en una caja y no en la otra. Lo único que sabemos es que, si abrimos las cajas, encontraremos el electrón en una sola de las cajas. La teoría cuántica nos dice que la probabilidad de encontrarlo en una caja dada está

determinado por el valor de la función de onda en esa caja. ¿Cuál es entonces el significado de una superposición de estados cuánticos? ¿Significa que, en tanto no las abramos, el electrón se encuentra simultáneamente en las dos cajas? ¿O debemos considerar que el electrón se encuentra realmente en una sola de las cajas y que la superposición de los estados cuánticos traduce simplemente nuestra ignorancia sobre su posición real? ¿Cuál es la relación entre la partícula y su función de onda?

Relación entre la función de onda y la partícula

En el ejemplo hipotético del electrón y las dos cajas dijimos que la probabilidad de encontrar el electrón en una caja está determinado, según la teoría cuántica, por el valor de la función de onda en la caja. Hablando de una manera más precisa debemos afirmar que tal probabilidad es igual al cuadrado de la función de onda. Consideremos de nuevo el experimento de las dos rendijas. Supongamos que se cubre la rendija de abajo. Tenemos entonces un estado cuántico que corresponde al caso de electrones que pasan por la rendija de arriba. A tal estado le corresponde una función de onda Ψ_1 . Si se cubre la rendija de arriba se tendrá el caso de electrones que pasan por la rendija de abajo. A tal estado se le asigna una función de onda Ψ_2 . Si se abren las dos rendijas el estado cuántico corresponderá a una combinación o superposición de los estados Ψ_1 y Ψ_2 .

Ahora bien, podemos imaginar esa superposición de estados como una onda que se propaga a partir de cada una de las rendijas. Cuando se llega a la pantalla tenemos sin embargo que preguntarnos cuál es la probabilidad de encontrar el electrón en un punto dado de ella. Las reglas de la mecánica cuántica nos dicen cómo encontrar esa probabilidad. Debemos tomar el valor de la superposición en ese punto y elevarla al cuadrado. El valor obtenido es la probabilidad buscada. En esta situación tenemos interferencias, pues en algunos puntos de la pantalla el valor de las ondas Ψ_1 y Ψ_2 es igual y opuesto o sea se anula: se tiene interferencia destructiva. En ese caso el valor de la superposición es cero e igual sucede con la probabilidad de encontrar allí el electrón. En otros puntos puede suceder que se tenga interferencia constructiva, lo que significa que el valor de la superposición es grande y, por lo tanto, también lo es la probabilidad de encontrar allí a la partícula.

Supongamos ahora que, de alguna manera, observamos el paso de cada electrón por las rendijas. Si se observa que el electrón pasa por la rendija de arriba, ello significa lógicamente que la probabilidad de observarlo cerca de la rendija de abajo se hace cero en ese instante. O sea que Ψ_2 se hace cero. Al llegar a la pantalla, la probabilidad de encontrar el electrón en un punto dado de ella se obtendrá únicamente a partir de Ψ_1 pues, como dijimos, Ψ_2 se hizo cero. De modo similar, si se observa que el electrón pasa por la rendija de abajo, ello significa que Ψ_1 se hace cero y el cálculo de las probabilidades de llegada del electrón a un punto de la pantalla se obtiene a partir de Ψ_2 solamente. En esta situación no se tendrá interferencia, pues sólo está en juego cada vez una de las dos ondas y nunca una superposición de ellas.

Nuestro formalismo, con sus reglas de uso: con su algoritmo, describe entonces de manera perfecta lo que sucede con el experimento de las dos rendijas, tal como lo describimos en el capítulo anterior.

El colapso de la función de onda o el problema de la medición

Analicemos ahora con más cuidado este asunto de que la observación del paso de los electrones por cada rendija afecta la función de onda de estos: tal observación, en efecto, cambia la función de onda de una superposición de Ψ_1 y Ψ_2 a un valor igual a Ψ_1 o a Ψ_2 solamente y lo hace de modo instantáneo.

Para recalcar la lógica aquí involucrada volvamos al caso del electrón que puede estar en una de dos cajas y precisemos un poco más la situación. Imaginemos dos cajas con dos pestañas que les permite acoplarse con tornillos como en la figura 5.1.

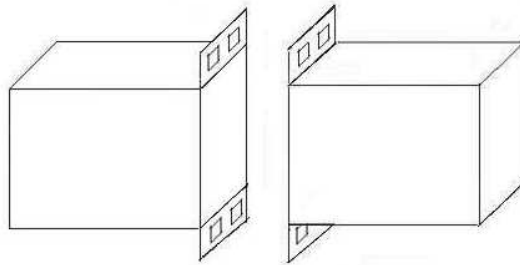


Figura 5.1

Las cajas tienen también una puerta, aquella que tiene el mecanismo de acople, que puede abatirse hacia adentro, de modo que una vez acopladas las dos cajas formen una sola como en la figura 5.2.

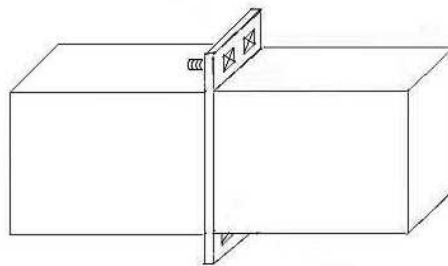


Figura 5.2

Supongamos que en la puerta de una de las cajas, opuesta a la que se abate, hay una ranura por donde puede penetrar un electrón de un haz incidente. Detrás de la rendija hay un dispositivo d que detecta el paso del electrón y, cuando esto sucede, cierra la rendija. La figura 5.3. muestra la situación

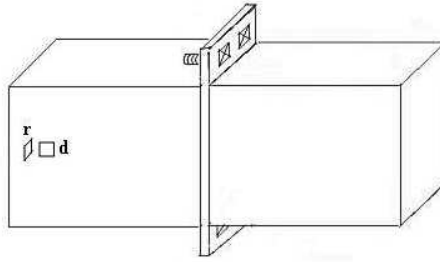


Figura 5.3

Una vez cerrada la rendija, sabemos que se tiene un electrón dentro de la gran caja. Asociado con el electrón hay una función de onda cuyo valor al cuadrado en cada punto dentro de la caja nos da la probabilidad de encontrar el electrón en ese punto. Como no hay ninguna posibilidad de encontrar el electrón fuera de la gran caja, el valor de la función de onda en cualquier punto del espacio fuera de ella es cero.

Supongamos ahora que se cierran las dos puertas abatibles y se desacoplan las dos cajas. Una parte de la función de onda del electrón queda ahora en una de las cajas y la otra parte queda en la otra caja. Llamemos ahora Ψ_1 la parte de la función de onda que queda en una de las cajas, que llamaremos caja 1, y Ψ_2 la que queda en la otra caja, que denominaremos caja 2. La función de onda del electrón es ahora igual a la suma de Ψ_1 y Ψ_2 .

Supongamos ahora que abrimos la caja 1 y encontramos allí al electrón. Si alguien abre simultáneamente la caja 2 no podrá encontrar allí al electrón pues sólo hay uno. De esto se sigue lógicamente que el valor de Ψ_2 se hace cero en el momento mismo en que se detecta al electrón en la caja 1. De modo similar Ψ_1 se hace cero inmediatamente alguien detecta el electrón en la caja 2. Y ello sucede no importa cuán separadas en el espacio estén las dos cajas.

Este proceso, en que una parte de la función de onda desaparece cuando se hace una medición, recibe el nombre de colapso de la función de onda. Las propiedades del colapso son sumamente extrañas desde el punto de vista del mecanicismo. En primer lugar el proceso no es determinístico. En el caso que estamos considerando: el de las dos cajas, lo único que podemos saber antes de abrir alguna de las cajas es que hay una probabilidad - llamémosla P_1 - de encontrar el electrón en la caja 1 y una probabilidad - que llamaremos P_2 - de encontrarlo en la caja 2. O sea: hay una probabilidad igual a P_1 de que, al determinar dónde se encuentra el electrón, el término Ψ_2 se haga cero, en otras palabras de que la función de onda colapse a Ψ_1 . De modo similar hay una probabilidad igual a P_2 de que la onda colapse a Ψ_2 . Preguntas como las siguientes surgen casi de inmediato dentro del marco del mecanicismo: ¿qué es lo que decide que el electrón pase a ser descrito por uno de los dos términos de la superposición? ¿es la interacción con el aparato de medida?

El problema de la medición

¿En qué consiste el proceso de medición? El proceso puede resumirse en tres etapas:

- a) Preparación del sistema: se colocan los aparatos, se determina la situación, la condición inicial. Se asigna un estado al sistema.
- b) Evolución del proceso: se deja que el sistema evolucione sin interferir con él.
- c) Medición propiamente dicha

Veamos algunos ejemplos:

- i) Medición de resistencia eléctrica o determinación de la curva V vs I .

Preparación del sistema: Se colocan los aparatos, se determina el estado inicial o sea los valores iniciales del voltaje y la intensidad.

Evolución del proceso: luego se varía V y se deja que el proceso de la corriente eléctrica siga su curso.

Medición propiamente dicha: se mira el valor de I o sea se determina la situación final, que es la medida propiamente dicha.

- ii) Medición de la trayectoria de un móvil.

Preparación del sistema: Se determina la condición inicial: posición y velocidad iniciales del móvil o sea su estado inicial, y las fuerzas que obran sobre él.

Evolución del proceso: se deja que las fuerzas obren.

Medición propiamente dicha: en determinados instantes se toman fotografías estroboscópicas del móvil.

- iii) Interferencia de electrones.

Preparación del sistema: se colocan el cañón de electrones, el diafragma y la pantalla, se fijan los parámetros del cañón y se "prende" el sistema. Se asigna una función de onda al haz de electrones.

Evolución del proceso: se deja que el haz pase por las rendijas y siga su camino hacia la pantalla.

Medición propiamente dicha: Se determina a qué punto de la pantalla llega cada electrón.

En el caso de los dos primeros ejemplos, tanto el proceso de preparación como la medida son interacciones con el objeto que se mide, las cuales se supone que tienen el mismo carácter. Ninguna de los dos tipos de interacciones, las involucradas en la preparación y las que tienen lugar en la medida, tienen nada de especial que permita hacer una distinción fundamental entre ellas. Ambas no son más que interacciones físicas. Se esperaría que lo mismo sucediera en el tercer ejemplo que es cuántico, o sea que se considere la medición como una interacción física más sin nada de especial con respecto a las otras interacciones físicas. En su ya clásico libro sobre mecánica cuántica, el físico húngaro John von Neumann analiza el proceso de medida en cuántica y sostiene que lo anterior no es así.

Lo que afirmó von Neumann en esencia es que se podían obtener todos los resultados prácticos si se aceptaban dos posibles procesos de evolución temporal para la función de estado.

El primero, dado por la ecuación de Schrödinger, respeta la superposición de los estados: si se tiene inicialmente una superposición, la ecuación de Schrödinger dará posteriormente también una superposición. La evolución es completamente determinista, no contiene en sí misma ningún elemento probabilístico. La ecuación es como una ecuación clásica de onda. El sistema sigue esa evolución durante la segunda etapa del proceso de medida, cuando no interferimos con él, cuando no hacemos ninguna medición sobre él sino que lo dejamos que evolucione bajo la influencia de las interacciones físicas en juego. Llamaremos a este proceso el proceso d recalando con ello que es determinista.

En la tercera etapa, que es la medida propiamente dicha, el sistema sigue un segundo proceso que es indeterminista y que por ello llamaremos proceso i. Durante ese proceso en que el sistema interactúa con el aparato de medida, la función de onda colapsa a uno solo de los posibles estados que puede dar la medida, todas las demás posibilidades desaparecen. Esto sucede de una manera no determinista, no podemos determinar qué estado se tendrá después de la medida, pero podemos calcular las probabilidades.

Como ejemplo consideremos el caso del experimento de la doble rendija. Empezamos con una superposición que son las dos ondas que salen de cada rendija. Durante el viaje de las ondas a la pantalla, el sistema sigue el proceso d, o sea que al llegar a la pantalla y antes de interactuar con ella - interacción que va a constituir nuestra medida porque cuando sucede podremos saber a qué punto llega el electrón - se tiene una superposición, es decir todavía hay interferencia. Al interactuar con la pantalla se lleva a cabo el proceso i, la superposición colapsa, ya no se tiene interferencia. En conclusión, si usamos los dos procesos de von Neumann tenemos buenos resultados.

Si estamos interesados sólo en los aspectos prácticos, los procesos de von Neumann son suficientes pues no tendremos ambigüedad en ninguna situación. Si estamos interesados en la estructura conceptual de la teoría el asunto es sin embargo muy extraño, puesto que una medida es una interacción más. Lo único que la distingue de otras interacciones es que estamos utilizando esa interacción para obtener cierta información. O sea que lo que convierte una interacción en una medida es el uso que le damos. Pero la interacción en sí es física y no vemos qué tiene que ver con el uso que queremos darle. ¿Cómo puede el electrón saber que tal interacción física es una medida y en consecuencia seguir el proceso

i? Parece razonable suponer que el electrón debería seguir siempre el proceso d. Sin embargo, si sabemos que la interacción es una medida, y somos nosotros quienes diseñamos nuestra medida y decidimos que una interacción lo es, tenemos que emplear el proceso i. Von Neumann mostró de manera sencilla que el proceso i no podía explicarse por medio del proceso d, que las interacciones físicas jamás podrían dar el proceso del colapso. En esto consiste en esencia el problema de la medición o medida en mecánica cuántica.

La paradoja del gato

El problema que presenta el colapso de la función de onda no concierne únicamente a las partículas como el electrón, sino que plantea una cuestión fundamental acerca de la naturaleza de diversos niveles de la realidad física. Para ilustrar esta afirmación Schrödinger imaginó en 1935 el ejemplo siguiente.

Supongamos un laboratorio donde colocamos un gato vivo, un átomo radiactivo, un contador Geiger que detecta la radiación emitida por el átomo cuando se desintegra y un mecanismo automático unido al contador. Cuando la radiación llega al contador, el mecanismo rompe un recipiente de cristal lleno de un gas letal. Cerramos entonces de modo hermético el laboratorio y prendemos el contador. Supongamos que en el momento que lo cerramos la probabilidad de que el átomo se desintegre es del 50%. Obviamente la probabilidad de que no se desintegre es también del 50%. Si el átomo se desintegra, emite una radiación que es detectada por el contador Geiger. El mecanismo automático rompe entonces el recipiente con el gas letal el cual se dispersa en el laboratorio y provoca la muerte del gato. O sea: si el átomo se desintegra, el gato muere. Si no se desintegra, no hay radiación, no se rompe el recipiente, no se difunde el gas y el gato continúa vivo. Como la probabilidad de que el átomo se desintegre es del 50%, hay entonces una probabilidad del 50% de encontrar el gato muerto al abrir el laboratorio. La probabilidad de encontrarlo vivo es también del 50%, pues esa es la probabilidad de que el átomo no se desintegre. Si lleváramos a cabo muchos de estos experimentos con muchos laboratorios y muchos gatos, la mitad de las veces encontraríamos gatos vivos y la mitad gatos muertos.

Podemos considerar todo el proceso como una medición. La preparación del sistema consiste en la colocación del gato, el átomo, el contador y el mecanismo con el recipiente que contiene el gas letal, y el acto de cerrar herméticamente el laboratorio y prender el contador. La evolución del proceso es lo que sucede en el laboratorio después de que lo cerramos y prendemos el contador. La medida consistirá en abrir el laboratorio y ver si el gato está vivo o muerto. El estado del gato jugará el papel de la aguja de un detector cuya posición nos indica el resultado de una medición. En nuestro caso, si el gato está vivo, sabremos que el átomo se desintegró. Si está muerto, concluiremos que el átomo no se ha desintegrado.

Ahora bien, ¿cómo describirá la mecánica cuántica la situación que hemos descrito? Consideremos el átomo. Como sabemos que tiene una probabilidad del 50% de desintegrarse y una del 50% de no desintegrarse, tendremos que describir el átomo, de acuerdo con la mecánica cuántica, por una superposición de dos funciones de onda, una que

describe el átomo sin desintegrarse y la otra que lo describe desintegrado. Como todo lo que está dentro del laboratorio son sistemas físicos hechos de átomos y electrones los cuales se describen por la cuántica, también todo lo que está dentro del laboratorio puede describirse por una función de onda. Habrá una función que describe el átomo sin desintegrar y todo el resto del laboratorio en la situación en que el átomo no se ha desintegrado, o sea: el contador Geiger sin dispararse, el tubo sin romperse, el gas letal contenido en el tubo y el gato vivo. Similarmente habrá una función de onda que describe el átomo desintegrado y el resto del laboratorio en la situación que se tiene cuando se desintegra el átomo, o sea: el detector disparado, el tubo roto, el gas letal dispersado en el laboratorio y el gato muerto. En el momento en que lo cerramos y prendemos el contador, todo lo que está en el laboratorio se describirá cuánticamente entonces por una superposición de esas dos funciones de onda.

Pero sucede que mientras el laboratorio está cerrado, no interferimos con lo que hay adentro por medio de ninguna medición. Por ello tenemos que considerar que todo lo que está en el laboratorio sigue el proceso ψ o sea obedece a la ecuación de Schrödinger. El proceso ψ respeta la superposición, razón por la cual tenemos que concluir que después de que cerremos el laboratorio y hasta cuando lo volvamos a abrir, todo lo que se encuentra dentro de él va a estar en un estado de superposición. Se trata de la superposición de un estado cuántico que describe el gato vivo y otro estado que describe el gato muerto.

La medida, dijimos, consistirá en abrir el laboratorio y ver si el gato está vivo o muerto. Si está vivo, sabremos que el átomo no se desintegró. Si está muerto, concluiremos que el átomo se ha desintegrado. Como se trata de una medida, en el momento en que se abre el laboratorio la superposición colapsa. Se tiene el proceso ψ . Uno de los estados de la superposición desaparece. Si el gato está vivo, desaparece el estado que describía el gato muerto. Si está muerto, lo que desaparece es el estado que describía el gato vivo.

Si sólo nos interesan los resultados prácticos para describir experimentos no tendremos de qué preocuparnos. Pero, ¿qué sucede si nos preguntamos acerca de lo que sucede en el laboratorio antes de que miremos dentro? Esta pregunta es muy natural para quien está enseñado a pensar en términos de una realidad objetiva que tiene un estado independiente de la observación. La respuesta coherente con la descripción cuántica que hemos hecho es que después de cerrar el laboratorio y prender el contador, si nadie lo ha reabierto, el gato estará en un estado indefinido, en el cual estará simultáneamente "vivo" y "muerto". O como "flotando" entre "estar vivo" y "estar muerto".

La descripción anterior parece a primera vista totalmente absurda. Sabemos bien que si abrimos el laboratorio encontraremos el gato o completamente vivo o completamente muerto, y de seguro no "suspendido" entre esas dos posibilidades. Es claro que no tenemos ninguna manera de saber cuál es el estado del laboratorio a menos que lo abramos para observarlo. ¿Tenemos entonces que concluir que el gato permanece durante el tiempo que el laboratorio está cerrado en un estado indefinido, y que la mera apertura del laboratorio, que podemos considerar como un proceso de medida, obliga al sistema a "decidir" acerca de la realización de una de las dos posibilidades?

Una de las cosas más importantes del ejemplo de Schrödinger es que se refiere a algo que, como un gato, está al acceso de nuestra percepción directa. Al fin de cuentas un electrón es algo que no percibimos directamente y quizá por ello estemos dispuestos a aceptar que sucede con él toda una serie de cosas extrañas. Un gato en cambio es algo que conocemos muy bien, sabemos que o está vivo o está muerto, y no podemos imaginar cómo sería un gato que estuviera como suspendido entre estar vivo y estar muerto, en una superposición de ambas posibilidades. Y más extraño, más bizarro aún, es el pensamiento de que lo que va a decidir si el gato está vivo o muerto es nuestra mirada, de tal modo que, si se nos olvida mirar dentro del laboratorio, el gato permanecerá entonces flotando entre los dos estados.

Podemos mostrar de una manera aún más dramática el problema de la medida mediante la que se llama la paradoja del amigo de Wigner, en honor del gran físico cuántico que la inventó. La versión que vamos a presentar sigue la línea de ideas de Wigner. Imaginemos que el laboratorio tiene una pared de vidrio y que en un momento determinado un amigo nuestro va a observar a través de ella lo que sucede y viene luego a informarnos sobre lo que ha pasado con el gato. Vamos a suponer que antes de nuestro amigo, y después de que preparamos el sistema, nadie más ha visto a través de la pared. Nuestra medición consistirá entonces en escuchar de nuestro amigo lo que ha observado sobre el estado del gato. Antes de que él lo haga, desde nuestro punto de vista podemos considerarlo como un sistema cuántico en una superposición de dos estados: la observación del gato vivo y la observación del gato muerto. ¡O sea que hasta que mi amigo no me cuente lo que ha observado acerca del gato, permanecerá para mí en una superposición cuántica y sólo colapsará a un estado único y definido al decirme cuál fue su observación!

No-localidad del colapso

Todo lo anterior va en contra de nuestras más caras intuiciones acerca de los cuerpos que están al acceso de nuestra percepción directa, o sea los cuerpos macroscópicos. Podemos continuar el razonamiento acerca del gato, algo que no hizo Schrödinger en su artículo original, en la línea de pensamiento que sigue. Hemos supuesto que en un instante dado abrimos el laboratorio y observamos lo que sucede. En ese momento tiene lugar el colapso. Imaginemos ahora que hemos colocado en una esquina del laboratorio una cámara de video, la cual podemos encender desde afuera, y que puede filmar lo que sucede dentro y enviar fuera una señal de video que muestra lo que sucede en el laboratorio. Supongamos que en lugar de abrir el laboratorio prendemos la cámara en un momento dado pero la señal emitida no la vemos nosotros sino que la enviamos a otra persona con un televisor a miles de kilómetros de distancia. En el momento mismo en que esa persona observa lo que sucede en el laboratorio, sucederá la medición y por tanto el colapso. O sea que lo que produce el colapso puede estar tan lejos como queramos del laboratorio donde sucede el colapso y de todos modos este tiene lugar de modo inmediato. El proceso del colapso viola entonces la ley de la velocidad máxima de las interacciones físicas. En términos técnicos, este tipo de conexiones instantáneas constituyen lo que se llama la no-localidad.

Esta no-localidad del colapso se puede apreciar también con el ejemplo de las dos cajas. El valor de Ψ_2 se hace cero inmediatamente que se detecta el electrón en la caja 1 y viceversa. Y ello aunque las dos cajas estén alejadas una de otra tanto como queramos.

Problemas con la relación mecánica entre el todo y la parte

Supongamos que tenemos un sistema compuesto por dos electrones. Indicaremos por Ψ_i las posibles funciones de estado de uno de los electrones y por Ψ_j las posibles funciones de estado del otro electrón.

La teoría cuántica dice que las funciones de estado del sistema total compuesto por los dos electrones son productos de los dos tipos de funciones Ψ_i y Ψ_j . O sea que una función del tipo $\Psi = \Psi_i \Psi_j$ es una posible función de estado del sistema compuesto.

Cuando esa es la función de estado del sistema compuesto es claro que podemos decir que Ψ_i representa el estado de una de las partes del sistema total, o sea uno de los electrones, y que Ψ_j representa el estado de la otra parte del sistema total, es decir el otro electrón. Cada parte del sistema tiene su estado y a partir del estado de esas partes se encuentra el estado del sistema total. Nos basta conocer el estado de cada parte para conocer el estado del sistema total. En otras palabras el estado del todo se obtiene a partir del estado de cada una de las partes. Tenemos la ya mencionada la relación mecánica entre el todo y la parte.

Sin embargo, la teoría afirma que superposiciones de estados del tipo $\Psi_i \Psi_j$ serán también funciones de estado del sistema compuesto, o sea que en general el estado del todo será una suma de términos $C_{ij} \Psi_i \Psi_j$ donde los C_{ij} son números complejos.

En esa superposición están involucrados todos las posibles funciones de estados de cada una de las partes del sistema. No se puede entonces asignar una función de estado a las partes que componen el sistema compuesto, sólo se puede asignar una función de estado al sistema total. O sea que las partes no tienen características propias, sólo las tiene el todo del cual ellas forman parte. En cierta manera las partes sólo tienen propiedades comunes. Esto es lo que se entiende por entanglement que se puede traducir como enmarañamiento.

El resultado anterior es general: sólo se puede asignar un estado al todo y no a las partes. En ese sentido la relación mecánica entre el todo y la parte es problemática. Estrictamente no se pueden considerar las partes como separadas sino como formando un todo indivisible.

Pérdida de la objetividad

Una posición objetivista acepta la existencia de una realidad objetiva. Tal realidad estaría "más allá", "detrás" o "subyaciendo" los fenómenos, sería independiente de nuestro conocimiento y de lo que medimos o decidimos medir, pero influiría, sin embargo, sobre los resultados de nuestras medidas. Por su propia concepción general, la realidad objetiva es una noción que no es definible operacionalmente. Los conceptos operacionales se

definen por medio de un procedimiento operativo experimental, con determinados aparatos y métodos concebidos y contruidos por el hombre. Lo definible operacionalmente lo es a través o por medio de fenómenos, dicho de otro modo, son los fenómenos los que permiten definir operacionalmente los conceptos. La realidad en sí, al concebirse como más allá de lo fenomenal, no es por tanto un concepto operacionalmente definible. Ni tampoco un término teórico puesto que no es necesario para ningún cálculo ni liga entre sí conceptos definidos operacionalmente. En suma, se puede afirmar que el concepto de realidad independiente no es un concepto científico sino filosófico o metafísico.

Todo el andamiaje de la mecánica clásica es compatible con esa idea de propiedades independientes o en sí de los cuerpos. La idea, como vimos, es uno de los pilares del mecanicismo, y este ha permeado de tal modo el pensamiento occidental, que el concepto de realidad en sí es la idea "natural" que, con respecto a la naturaleza, se forma en la mente de todo estudiante de ciencia y en general de todo científico "filosóficamente desprevenido": la posición de un objeto en cualquier sitio se considera de manera natural como una propiedad del objeto independiente de si se le observa o no. En la concepción occidental ordinaria del mundo, se acepta como plena de sentido la afirmación acerca de la existencia de un árbol en un bosque jamás visto por hombre alguno.

La expresión precisa de la idea de realidad independiente o de propiedades en sí de los objetos físicos es que están hechos de cualidades primarias que no dependen de nosotros. Ahora, tenemos un electrón el cual es descrito por una función de onda, esta última debe entonces representar una cualidad primaria. Pero en la esencia misma de la mecánica cuántica está la idea de que la función de onda se comporta de modo diferente según la estamos observando o no. Entonces toda la distinción entre cualidades primarias y secundarias se cae, lo cual es muy inquietante si se quiere sostener el mecanicismo. Es claro por lo tanto que el paso de la mecánica clásica a la cuántica no consiste simplemente en un cambio en las ecuaciones, sino que los conceptos básicos de las cualidades primarias y de la realidad independiente se ponen en cuestión.

CAPÍTULO 6. EL CARÁCTER DE LA TEORÍA CUÁNTICA

En el presente capítulo vamos a preguntarnos acerca de la teoría que tenemos, acerca de su carácter: ¿se trata de una buena teoría física? Esta fue la pregunta que estuvo fundamentalmente presente en 1927 en la Quinta Conferencia Solvay. Hay tres tipos de respuestas: las pragmáticas, las objetivistas y las no objetivistas.

Posición pragmática

Una primera respuesta de la inmensa mayoría de los físicos de hoy en día es que se tienen ecuaciones que funcionan, con las cuales se pueden hacer cosas muy útiles como los transistores y el láser, y otras bastante cuestionadas como las bombas atómicas. Pero cuestionadas o no todas esas se han podido desarrollar, lo que indica que las ecuaciones son muy poderosas. No hay dudas sobre los resultados que se extraen a partir de las ecuaciones. En consecuencia no se tiene desde el punto de vista científico ningún tipo de problemas. No hay de que preocuparse. Richard Feynman, uno de los más grandes físicos del siglo XX, con su legendaria franqueza y lucidez, en su libro QED The Strange Theory of Light and Matter en la página 124, expresa este punto así:

"(...) sobre este marco de las amplitudes [la mecánica cuántica] no existe ninguna duda experimental: usted puede tener todas las preocupaciones filosóficas que quiera acerca del significado de las amplitudes (si, en efecto, ellas significan algo finalmente), pero dado que la física es una ciencia experimental y el marco está de acuerdo con los experimentos, eso es suficientemente bueno para nosotros".

(La traducción es nuestra y el subrayado es del mismo Feynman). El nosotros significa obviamente "nosotros físicos pragmáticos".

Si se abre un texto estándar de Mecánica Cuántica, si mucho se encontrarán dos o tres páginas dedicadas a los asuntos relacionados con el carácter de la teoría, con su interpretación, con la visión del mundo consistente con ella, asuntos no muy significativos dentro del contexto del libro. En esas pocas páginas, si es que se tienen, se hacen referencias oscuras a Niels Bohr, de quien hablaremos más tarde, se habla de la interpretación de Copenhague, de la escuela de Copenhague, y rápidamente se finaliza con estos tópicos y el texto se dedica a mostrar cómo hacer cálculos, dejando la idea implícita, y en algunos casos explícita, de que el resto de preocupaciones diferentes a las relacionadas con los cálculos, son o para filósofos o para físicos con inclinaciones filosóficas, que son gente poco seria.

Relacionado con el asunto de la posición pragmática, vale la pena sin embargo mencionar que a pesar de que la parte científica en que se basa la filosofía mecanicista reduccionista ya se ha demostrado que no es universalmente válida, muchos de los científicos cuánticos, y de los científicos en general, continúan pensando en términos mecanicistas. Contrasta esto con la posición de algunos de los fundadores de la mecánica cuántica como Einstein, de Broglie y Schrödinger, quienes vieron con claridad la situación conceptual y finalmente no estuvieron de acuerdo con la teoría que ellos mismos habían contribuido a crear.

Einstein, quien aportó las primeras ideas fundamentales a la mecánica cuántica, una vez se tuvo construido totalmente el algoritmo cuántico comenzó a atacar la misma teoría que había contribuido a crear, llegando inclusive a detestarla. Lo que Einstein no podía soportar era que la mecánica cuántica se presentaba como una teoría que no podía interpretarse en términos de una realidad totalmente independiente de lo humano.

La posición de Einstein, de de Broglie, de Schrödinger y de Bohm es coherente. Lo incoherente es aceptar el algoritmo cuántico y continuar teniendo una concepción filosófica idéntica en muchos de sus fundamentos a la del mecanicismo. Si no se quiere pecar de incoherente dentro de una posición pragmática, no se debe adoptar entonces ninguna posición y limitarse a hacer cálculos, como parece ser el caso de Feynman. Si despojarse de cualquier interpretación resulta difícil, pues el ser humano no es esencialmente una máquina de calcular sino un ser que puede y debe encontrar el sentido del mundo, se debe evitar entonces la incoherencia. Y si, a diferencia de alguien como Bohm, no se quiere intentar la creación de una nueva teoría, vale la pena mirar cuál podría ser una nueva posición filosófica acorde con la teoría cuántica.

En este libro no diremos más acerca de este enfoque pragmático limitándonos a los comentarios anteriores. La razón es que no estamos aquí interesados en la parte pragmática de la teoría cuántica, no estamos interesados en dispositivos electrónicos ni en bombas atómicas. Nos interesa la coherencia y la parte conceptual, nos concierne el asunto de una visión del mundo consistente con los hallazgos de la ciencia, que por el contexto de todo lo que hasta ahora hemos dicho y lo que diremos después, consideramos un asunto bastante serio.

Propuestas de interpretación realista u objetivista

El carácter de no-localidad subyacente a los fenómenos cuánticos es algo ineludible. Toda teoría que pretenda interpretar la mecánica cuántica en términos objetivistas, o sea que trate de darle una interpretación objetivista a la función de onda, se enfrenta a esta no localidad que la pone en problemas con la relatividad especial. Otro problema que enfrentan tales teorías es el problema de la medida.

Einstein

Un ejemplo de posición realista es la de Einstein. Él acepta la existencia de una realidad independiente de cualquier teoría. Esa realidad debe entonces distinguirse de los conceptos con que operan las teorías, los cuales se construyen con el fin de que correspondan con la realidad objetiva y por medio de ella podamos representárnosla. Einstein sostiene que una teoría exitosa debe ser correcta, lo cual se juzga por el grado de acuerdo entre sus conclusiones y la experiencia humana, y completa, cuando cada elemento de realidad tiene su contraparte en la teoría. Einstein sostiene que el problema con la teoría cuántica es que no es completa o sea que existen elementos de realidad que no están descritos en la teoría.

Los argumentos de Einstein acerca de la incompletez de la mecánica cuántica. Argumento EPR

Einstein publicó, junto con dos colaboradores suyos, Podolsky y Rosen, una objeción a la cuántica que se conoce como el argumento o paradoja EPR. Podemos sintetizarla como sigue:

1. Einstein propone un criterio de realidad que reza así: "Si, sin perturbar en modo alguno un sistema, podemos predecir con certeza, o sea con probabilidad igual a uno, el valor de una cantidad física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física".

Acerca del criterio de Einstein se pueden hacer algunos comentarios: No es un criterio necesario, pues pueden concebirse elementos de la realidad que tengan un carácter intrínseco de azar, que no pueden entonces, bajo ninguna circunstancia, predecirse con certeza. O sea: la existencia de un azar objetivo, verdadero, es una posibilidad lógica.

El criterio, sin embargo, es suficiente y razonable. Supongamos por ejemplo que se considera que la posición de una bolita de ruleta es una propiedad en sí de ella que no depende de su observación. Imaginemos entonces la siguiente situación: Sea un cuarto totalmente aislado de toda perturbación exterior, excepto la producida por un interruptor que se puede conectar desde afuera y abre una ventanilla en una pared del cuarto y enciende una luz allí adentro. En el cuarto se tiene una ruleta con su correspondiente bolita. Supongamos que en un instante t cualquiera un observador conecta el interruptor y observa la posición de la bolita en la ruleta y la ve en el número 5. El observador apaga luego la luz y se aleja del cuarto. Aceptamos como razonable que en un instante posterior cualquiera y a una distancia tan grande como se quiera del cuarto, el observador puede predecir con certeza que la posición de la bola en la ruleta será el número 5. Y esa predicción la hará, en el momento y en el lugar en que la hace, sin perturbar en modo alguno la bolita. ¿Por qué aceptamos como razonable lo anterior? Simplemente porque consideramos que la posición de la bolita es una propiedad en sí de ella, que no depende de su observación, o sea porque aceptamos que esa posición es un elemento de realidad.

2. Supongamos ahora que se tienen dos partículas que interactúan durante un cierto tiempo, y que se conoce la suma de sus momentos (producto de la masa por la velocidad) y la diferencia de sus posiciones. El conocimiento simultáneo de esas cantidades no está prohibido por la mecánica cuántica. Las partículas se separan luego sin que se altere el valor de las variables mencionadas.

Consideremos ahora dos observadores en dos sitios diferentes del espacio que van a observar sea la posición o sea el momento de las partículas.

Si uno de ellos observa la posición de una partícula, de inmediato sabrá la posición de la otra pues conoce la diferencia de sus posiciones. En principio, es posible hacer la medida de la posición de una de las partículas tan rápido que, durante la medición, un rayo de luz no alcance a recorrer la distancia que separa las partículas. Se puede asegurar entonces que la medida de la posición de una partícula no afecta para nada a la otra partícula. Según el

criterio de realidad de Einstein, la posición de una partícula será entonces un elemento de realidad.

Un análisis similar es válido para el momento. Si uno de los observadores determina el momento de una partícula, de inmediato sabrá el momento de la otra pues conoce la suma de los momentos. Al igual que con la medida de la posición, es posible en principio efectuar la medida del momento de una de las partículas tan rápido que, durante la medición, un rayo de luz no alcance a recorrer la distancia que separa las partículas, asegurando así que la medida del momento de una partícula no afecta para nada a la otra partícula. Según el criterio de realidad de Einstein, también el momento de una partícula será un elemento de realidad.

3. La cuántica dice que el conocimiento de la posición de una partícula hace indeterminado su momento y viceversa. Lo dicho en el punto 2 nos fuerza a la conclusión de que la cuántica es incompleta pues no permite conocer simultáneamente todos los elementos de realidad.

La conclusión de Einstein es que la mecánica cuántica no es una buena teoría. El mismo trató de encontrar una nueva. Lo que buscaba lo llamó la Teoría del Campo Unificado, y en ella trabajó hasta cuando murió en el año 1955, sin tener éxito en su intento. Einstein no quería saber nada de la mecánica cuántica, que el mismo había contribuido a crear, y quería comenzar con otra cosa desde el principio.

Algunos aceptan hoy en día una posición que es cercana a la de Einstein y consideran que la mecánica cuántica así como está no es buena, pero que sí es un buen punto de partida. Quizás se deba entonces corregirla para que se convierta en una teoría aceptable. Desde el año 1952 ha habido intentos por hacer nuevas teorías. Se habla usualmente de nuevas interpretaciones de la mecánica cuántica, sin embargo ello no es correcto pues se trata de cambios en la teoría, o sea estrictamente de nuevas teorías. Consideraremos algunas de esas nuevas teorías.

Bohr, al contrario de Einstein, sostiene que la teoría cuántica no satisface los criterios clásicos de lo que debe ser una teoría. Esto lo que significa en últimas es que no se puede enmarcar dentro del mecanicismo. Sin embargo es una buena teoría y no necesitamos buscar otra, lo que necesitamos cambiar es nuestra concepción de lo que es una teoría física aceptable.

En el próximo capítulo mostraremos la respuesta de Bohr a la objeción de Einstein y las consecuencias que se siguen de esa respuesta. Vamos ahora a analizar las ideas de algunos de los que siguen a Einstein en su intento por mantener la epistemología clásica y cambiar la teoría para que esté de acuerdo con esa epistemología. Sólo hablaremos de las más importantes teorías, mal llamadas interpretaciones, como lo observamos más arriba.

de Broglie-Bohm

El primer intento por mantener la epistemología clásica y cambiar la teoría cuántica para que correspondiera con esa epistemología fue hecho por de Broglie en el año de 1927. de Broglie dejó de lado su línea de pensamiento y la teoría fue reinventada en el año 1952 por David Bohm. La teoría a veces se llama Teoría de la onda piloto, nombre original de de Broglie, otras veces se le conoce como Teoría de Bohm o del potencial cuántico. Es un ejemplo de una clase más grande de teorías llamadas de variables ocultas.

¿Cuál es la idea fundamental en ese tipo de teorías? Es una idea que se planteó en la década del 20 del siglo XX. Recordemos el ejemplo del electrón y las dos cajas, y la onda total que era una superposición de la función de onda en una caja más la función de onda en la otra. De acuerdo con la teoría cuántica, sólo se puede conocer la probabilidad de encontrar el electrón en cada caja, que es proporcional al cuadrado de la función de onda en la caja. Según la idea básica de las variables ocultas, la función de onda no es la descripción completa del sistema, hay otras variables que no aparecen como variables cuánticas, que por lo tanto están ocultas, y que determinan donde está el electrón, si en una caja o en la otra. O sea el electrón tiene un estado definido, sólo que no lo conocemos pues algunas variables están ocultas; por ello tenemos que acudir a las probabilidades como fruto de nuestra ignorancia de tales variables.

Una de las versiones más simples de variables ocultas es la teoría de David Bohm según la cual la variable oculta es la localización del electrón. En esta teoría hay dos entidades matemáticas fundamentales asociadas al electrón y que representan propiedades en sí: la función de onda y la localización. Antes nos preguntábamos si el electrón era una onda o una partícula. En la teoría de Bohm se tiene una onda y una partícula. La onda es una función del espacio y del tiempo, se extiende sobre el espacio y cambia con el tiempo. La posición, la variable oculta, también cambia con el tiempo y ese cambio depende de la onda.

En la teoría de Bohm, la función de onda no es entonces únicamente un símbolo matemático sino que representa un campo físico real que está sometido a la ecuación de Schrödinger. La partícula, algo real también, obedece a una cierta ecuación de movimiento. Dentro de la teoría ella está sometida no solamente a un potencial clásico sino también a un "potencial cuántico" adicional.

Una manera de imaginarse un mecanismo es pensando en un trozo de madera que flota cerca de la orilla del mar. Las olas lo van llevando de aquí a allá a través de la superficie. El cambio de la posición del trozo de madera depende de las olas que son ondas. Sólo que en el caso del electrón su posición nos está oculta al igual que la manera como lo "guía" la onda. La metáfora del trozo de madera y las olas nos puede ayudar a mirar el experimento de las dos rendijas según la teoría de las variables ocultas de Bohm.

Cuando se hace el experimento con las dos rendijas abiertas, la onda pasa por ambas rendijas, pero la partícula, con su posición que es la variable oculta, pasa solamente por una. Sin embargo es influenciada por las dos ondas, la que sale por una rendija y la que sale

por la otra, que son las ondas que la guían. Si se tapa una rendija, el electrón es afectado sólo por una onda y se comporta de una cierta manera. Si ahora se abre la rendija, el electrón es afectado por las dos ondas y su comportamiento es entonces diferente. Si miramos la estructura matemática, la teoría de Bohm da exactamente las mismas predicciones de la teoría cuántica usual, en el dominio en que las velocidades de las partículas son despreciables en comparación con la velocidad de la luz, dominio que se conoce como no relativístico. El dominio donde las velocidades de las partículas son comparables con la velocidad de la luz se llama el dominio relativístico. No podemos entonces, en el dominio no relativístico, distinguir experimentalmente ambas teorías. La de Bohm tiene el carácter objetivista de las teorías clásicas.

Algunos, como John Bell, aceptan la teoría de Bohm y la comparan a la electrodinámica clásica, diciendo que allí se tiene un campo electromagnético y el electrón, que es una partícula que se mueve de acuerdo con el campo, y que aquí se tiene una partícula que se mueve de acuerdo con el potencial cuántico. Esta analogía no es muy exacta realmente pues en el electromagnetismo es posible separar el campo de la partícula en el sentido de que se pueden tener configuraciones puras de campo. El electrón y el campo son entidades diferentes y separables. En la teoría de Bohm, tanto el electrón como la onda que lo guía son inseparables.

A Einstein en particular no le gustó la teoría de Bohm, a la que consideró una teoría barata, demasiado artificiosa y poco elegante. En cuanto a la elegancia es interesante recordar que, en el dominio no relativístico, la teoría cuántica y la teoría de Bohm son experimentalmente indistinguibles. Sin embargo la teoría de Bohm introduce entidades físicas adicionales a las que considera la mecánica cuántica usual. Y en la ciencia es habitual considerar que si existen dos explicaciones para los mismos fenómenos, se debe escoger aquella que introduce menos entidades, la cual será considerada una explicación más elegante.

En realidad hay problemas físicos serios con la teoría de Bohm, independientes de las consideraciones de elegancia, y es que contiene explícitamente acciones instantáneas a distancia, lo que en el capítulo anterior llamamos no-localidad. Si se consideran dos partículas que interactúan y luego se separan, la teoría dice que cada partícula está influenciada inmediatamente por la otra, no importa cuál sea la distancia que las separe. Hablando de manera más precisa, uno de los aspectos cualitativamente nuevos del potencial cuántico, y que explican, señala Bohm, las diferencias que existen entre las teorías clásicas y cuánticas, es que el potencial cuántico depende solamente de la forma de la función de onda y no de su amplitud. Ahora, en general toda interacción física disminuye con la distancia. Para una onda ello significa que su amplitud disminuye con la distancia. Sin embargo no necesariamente su forma se altera con la distancia. Si el potencial cuántico depende solamente de la forma de la función de onda, la consecuencia es que sus efectos no disminuyen necesariamente con la distancia y el sistema no está necesariamente separado de aspectos del ambiente que están muy alejados. Si se considera un sistema de muchas partículas, el potencial cuántico es una función de las coordenadas de las partículas y del tiempo. Bohm señala que el comportamiento de cada partícula puede depender de manera no-local del comportamiento de las otras partículas sin que importe la distancia entre ellas.

En el caso de la mecánica cuántica usual, la no-localidad está ligada al colapso de la función de onda. Pero tal colapso es precisamente uno de los puntos que hacen de la teoría cuántica una teoría problemática desde el punto de vista de la epistemología y ontología clásicas. Se supone que una teoría como la de Bohm restablecería esa epistemología y esa ontología. En tal teoría, sin embargo, la posición de una partícula depende de manera no-local y explícita de la posición de la otra a través de la fórmula de la onda que la guía. O sea tenemos una teoría que de modo explícito contradice el principio de la velocidad máxima de las interacciones.

Hasta estos días no se ha encontrado la manera de reformular la teoría de Bohm de modo que esté de acuerdo con la teoría de la relatividad y por esto la gran mayoría de los físicos sospechan de la teoría. Bohm argumenta que la no-localidad de su teoría no permite sin embargo la transmisión de señales a mayor velocidad que la de la luz, conservándose, según él, la esencia de la relatividad. El problema es que la palabra señal se debe interpretar aquí significando una entidad que permite a los humanos transmitir información. En otras palabras, lo que se dice es que ninguna señal utilizable puede propagarse a mayor velocidad que la de la luz. Esto significa que se interpreta el principio relativista de manera pragmática, que no es el modo como lo entendía Einstein, para quien señal significaba cualquier influencia física, sin restricción alguna acerca de la posibilidad o no de ser utilizable por los seres humanos.

Hay algunos físicos, especialmente discípulos de Bohm, que tratan de desarrollar su teoría de manera que se vuelva relativística. Sin embargo, han pasado casi cincuenta años y no se ha avanzado significativamente en esa dirección. La teoría de Bohm no luce muy bien tanto desde el punto de vista estético como desde el punto de vista físico. El precio para volver a algo supuestamente simple y sólido como la física clásica parece muy alto. Todo luce muy artificial y muy ad hoc. De todos modos es justo reconocer que la teoría de Bohm puede ser muy útil como manera pedagógica de presentar la mecánica cuántica: hay simulaciones de computador que muestran las trayectorias de las partículas según la teoría de Bohm, que pueden ayudar mucho a visualizar la situación de la mecánica cuántica. O sea puede ser una manera muy interesante de pensar sobre la mecánica cuántica. No obstante esto no es lo que quería Einstein, él deseaba saber como Dios había hecho el mundo. No podía creer que fuese como lo dice la mecánica cuántica pero no podía creer tampoco que fuese como lo explicaba Bohm.

Otro aspecto fundamental que señala Bohm acerca de su teoría es que no se tiene una relación mecánica entre el todo y las partes. El potencial cuántico de un sistema de partículas depende del estado cuántico del sistema total de una manera que no se puede reducir a las interacciones entre las partículas. Para ello, esas interacciones deberían tener precedencia sobre el todo, no depender del todo, el cual sí dependería de ellas. Aquí, por el contrario, ellas dependen de la función de onda total, que a su vez depende del estado del todo y además evoluciona con el tiempo.

Veamos por último la manera cómo se trata la paradoja del gato dentro de la teoría de Bohm. Para Bohm no existe ningún colapso. Lo que percibimos es solamente la partícula. Es verdad que la función de onda del gato está en una superposición, pero las partículas con las que está formado el gato están solamente donde está el gato, vivo o muerto. Yo no

sé dónde están esas partículas antes de mirar el laboratorio, pero hay un estado verdadero, objetivo del mundo. Las partículas están aquí o acá. Cuando yo mire el laboratorio voy a ver las partículas que están formando al gato vivo o al gato muerto. Se tiene entonces un estado definido, mi conciencia no tiene que ver nada con esto.

Lo anterior parece una solución al problema. Sin embargo hay ciertas cosas que pueden perturbarnos un poco. Supongamos que el gato está vivo. Vemos entonces las partículas formando la configuración de gato vivo, y la parte de la función de onda que usaremos en nuestros cálculos es la correspondiente al gato vivo. Sin embargo existe todavía la función de onda correspondiente al gato muerto. O sea que tenemos un mundo que percibimos en el cual el gato está vivo, con su cuerpo hecho de partículas, y un mundo como fantasma donde sólo existe la función de onda del gato muerto, donde no hay partículas. Bohm dice al respecto que esto es como tener una serie de notas musicales que nadie toca. No es claro el significado de esta especie de mundo fantasma en donde hay algo que tiene la posibilidad de existir en el mundo que percibimos pero que no está realizado en él.

Es necesario aquí profundizar un poco en el significado que asigna Bohm a la función de onda. Recordemos que el potencial cuántico depende solamente de la forma de la función de onda y no de su amplitud. Dado que lo que cuenta es la forma de la función de onda y no su amplitud, la "fuerza" producida por el potencial cuántico no es de naturaleza mecánica sino que se trata, dice Bohm, de un "contenido de información". Bohm explica el sentido de la expresión precedente mediante la analogía de un barco que esta controlado por el piloto automático. La nave es guiada por ondas de radar las cuales no la empujan de manera mecánica sino que dirigen su comportamiento. Podemos considerar el barco, afirma Bohm, como un sistema autoactivo cuya actividad esta dirigida por las ondas de radar que contienen información acerca del ambiente total, de un modo que depende únicamente de la forma de la onda y no de su intensidad.

Bohm sostiene que, en ese contexto, la información contenida en las ondas de radio tiene una significación objetiva, puesto que, por medio del piloto automático, ella juega un papel activo en guiar el barco. Él sugiere considerar que la partícula responde al potencial cuántico de una manera objetivamente autoactiva y que el potencial cuántico contiene, de modo implícito al menos, información sobre el ambiente total.

Bohm afirma que las partículas constituyen la realidad directamente manifiesta y que la función de onda, por el contrario, no puede ser percibida sino a través de su manifestación en el movimiento de las partículas. Bohm presenta como justificación de esta suposición el hecho, que demuestra en su teoría, de que en el límite clásico, que es el nivel en que nos llegan los datos sensoriales, el potencial cuántico puede despreciarse. Ello quiere decir, afirma Bohm, que todo lo que conocemos del mundo a través de los sentidos, debe pasar por un nivel donde la función de onda no juega un papel esencial.

La naturaleza de la función de onda es entonces, según Bohm, la de un contenido de información. Este contenido de información está organizado en un espacio multidimensional. El significado de la información es el movimiento de la partícula la cual está en el espacio-tiempo. Esta ultima constituye lo que Bohm llama el "orden explícito" de

la realidad. El contenido de información en cambio esta fuera del espacio-tiempo, en lo que Bohm llama el "orden implicado" de la realidad.

Según la teoría de Bohm, la realidad en sí tiene dos niveles: un nivel no manifiesto que es el orden implicado y que está fuera del espacio-tiempo, y un nivel manifiesto que es el orden explícito y que está en el espacio-tiempo.

Volvamos a la paradoja del gato. Si el gato está vivo, la parte de la función de onda correspondiente al estado "gato muerto" correspondería a un contenido de información no activado. Esa parte de la función de onda existe pero está inactiva o "físicamente inefectiva". Bohm dice que otra manera de entender el asunto es considerando que las dos partes de la función de onda total, la que corresponde al gato muerto y la que corresponde al gato vivo, forman dos especies de canales en los que las partículas del gato pueden entrar, o sea dos especies de caminos que las partículas pueden seguir. Es como si existiese una encrucijada con dos caminos, una bifurcación de caminos, y las partículas se van por alguno de ellos. El otro camino, el otro canal, se queda vacío de partículas, pero continúa existiendo. Como lo que percibimos, el orden explícito, contiene las partículas, una vez estas entran en un canal, todo sucede para nosotros como si el otro canal no existiese. Para nosotros todo sucede como si hubiese habido un colapso de la función de onda, como si la encrucijada, la bifurcación, se hubiese convertido en un solo camino, desapareciendo el otro. Pero en realidad el otro camino sigue existiendo.

Ahora bien, la parte de la función de onda vacía de partículas corresponde no sólo al gato muerto sino también a nosotros observando al gato muerto. ¿Cuál es finalmente el significado de esta fantasmagórica función de onda que existe en un fantasmagórico mundo multidimensional y que no se manifiesta en el mundo que percibimos? Ya dijimos que para Bohm la función de onda representa un contenido de información objetiva, real, al cual responde la partícula de manera autónoma a partir de su propia energía. Profundizando más sobre el tema, Bohm dice que el punto principal en relación con el contenido de información es que se trata de "una forma que entra en una energía como una actividad que surge del interior del sistema mismo. En otras palabras, la actividad del sistema es 'informada' por la forma en la información". Bohm añade luego "(...) la actividad básica de la información objetiva es la imprimir forma en una energía que está inicialmente informe. Tal actividad puede entonces considerarse como una especie de sentido de esta información". O sea que el receptáculo de la forma es la energía que antes de recibir la forma está informe, y la forma se actualiza, adquiere sentido, al informar a la energía.

Siguiendo el pensamiento de Bohm aplicado a la paradoja del gato, diremos que en el caso en que el gato está vivo, la función de onda correspondiente al estado "gato vivo", que nos incluye a nosotros observando al gato vivo, constituye una forma que está actualmente activa, mientras que la función de onda que corresponde al estado "gato muerto", incluidos nosotros mirando al gato muerto, constituye una forma que está sólo potencialmente activa. Antes de que las partículas entren en algunos de los dos caminos: gato vivo o gato muerto, las dos partes de la función de onda total están potencialmente activas. Una vez las partículas entran en al camino de la función de onda "gato vivo", esta función se actualiza, mientras que la otra función, la función "gato muerto", queda permanentemente en estado potencial, no se actualiza.

Dentro de la ontología de Bohm la realidad está constituida entonces por formas actualizadas, que constituyen el orden explícito, el de nuestra percepción, y por un mundo lleno de formas en estado potencial, no actualizadas. Claramente estamos lejos del mundo mecanicista newtoniano y más cerca de Aristóteles y aún de Platón, pues en Bohm existen formas puras, no actualizadas. Justo es decir, sin embargo, que Bohm no pretende volver al mecanicismo, su intención es obtener una teoría ontológica, interpretable en términos de una realidad en sí.

Con respecto a esto último, Bohm insiste en que en todo el proceso de medida, tal como lo describe su teoría, nuestra conciencia no esté involucrada en absoluto. Examinemos con más profundidad este punto.

Bohm asume que las partículas son lo que el observador percibe. O sea que todavía hay una referencia al observador. Si se quiere ser consistente, se debe definir el observador en términos del lenguaje de la teoría. Ello se logra considerando el observador mismo como un sistema físico, constituido por partículas y una función de onda total, la cual tiene una parte que corresponde al estado de observar al gato vivo y otra parte correspondiente al estado de observar al gato muerto. Si el gato está vivo, entonces las partículas del observador están en el camino de la parte de la función de onda que corresponde al estado "observar el gato vivo". La otra parte de la función, que corresponde al estado "observar el gato muerto", esta inactiva.

Hasta aquí todo parece ir muy bien. Hay que percatarse, sin embargo, de que la conciencia del observador está ligada con la forma activada, y no con la forma no activada, que sin embargo existe. O también: la conciencia está ligada con las partículas. Y aquí se hace relevante una ambigüedad que existe en la teoría de Bohm, que consiste en que la palabra partícula se usa en dos sentidos. En un sentido, se considera la partícula como la porción más minúscula de materia, en otro sentido, cuando se habla de partícula versus onda, se habla de partícula como punto geométrico que se mueve en el espacio. Como en el análisis del proceso de medida se confronta la partícula con la función de onda, parece natural asumir que lo que el observador percibe es la partícula en el sentido de punto geométrico. Esos puntos geométricos son las posiciones, las coordenadas de las partículas consideradas como porciones más pequeñas de la materia. Resulta entonces que la conciencia está ligada con las coordenadas de las partículas. Es como si el observador tuviese dos cuerpos, un cuerpo de partículas y un cuerpo de función de onda, y su experiencia y su conciencia estuviesen conectada con el cuerpo de las partículas, y más precisamente con las coordenadas de las partículas.

Esta misteriosa relación entre conciencia y coordenada de las partículas, necesaria para la coherencia de la teoría, es otro aspecto que la aleja de la mecánica clásica donde no es menester asumir nada en cuanto a la relación entre la mente y la materia.

Everett

La segunda teoría de que vamos a hablar en la línea objetivista es una que fue propuesta en 1957 por Hugh Everett, que se denomina la teoría de los mundos múltiples o del estado relativo.

Sabemos que el gran problema es el colapso de la función de onda. Everett niega simplemente la existencia de tal colapso y afirma que el proceso de medida hace entrar el observador en un estado de superposición. Así, el gato de Schrödinger está realmente en una superposición de los estados "vivo" y "muerto"; cuando el observador abre el laboratorio y mira el gato, entra él también en una superposición de dos estados físicos, a saber: "observación del gato vivo" y "observación del gato muerto". O sea que las dos posibilidades corresponden a realidades objetivas.

Ahora bien, si ambas posibilidades existen, ¿cómo es que sólo percibimos una de ellas? Si tanto la situación en que nosotros observamos el gato muerto, como aquella en que observamos el gato vivo, constituyen situaciones reales, que están existiendo, ¿por qué sólo experimentamos una sola de ellas y no las dos?

La respuesta es que la realidad "subjetiva" de cada uno de nosotros corresponde a una sola de esas posibilidades, tenemos la impresión de ver el gato en un estado definido. La realidad "objetiva" incluye sin embargo las dos posibilidades. Igual sucede en cualquier medición: las diversas componentes de la función de onda, cada una de las cuales representa una posibilidad de medida, existen realmente en la teoría de Everett. El observador es consciente únicamente de una posibilidad e ignora totalmente la existencia de las otras componentes. Desde un punto de vista objetivo, sin embargo, todas las posibilidades descritas por esas diversas componentes existen efectivamente.

De una manera muy simple se pueden considerar esas diversas posibilidades como "mundos paralelos" que existen todos simultáneamente y en cada uno de los cuales se realiza un estado cuántico particular. Dentro de esta visión de la teoría de Everett, si por ejemplo hemos visto el gato vivo, existe otra componente del universo donde seres iguales a nosotros han visto el gato muerto, y no son conscientes de nosotros que miramos el gato vivo. Algo similar a lo que describe Borges en su cuento "El jardín de los senderos que se bifurcan".

Se comprende fácilmente el malestar que produce esta multiplicidad de mundos de los cuales uno sólo nos es individualmente accesible. La tendencia natural es considerar que si esa teoría es el remedio para el problema del colapso, resulta el remedio peor que la enfermedad. Además existen problemas en ella de los cuales no hablaremos aquí. Uno de los problemas serios de la teoría de Everett es la dificultad para comprobarla. ¿Cómo se puede distinguir un mundo donde las cosas están definidas de un mundo donde existe superposición?

Einstein ya había muerto cuando Everett propuso su teoría y sólo podemos especular acerca de su posible reacción a ella. Quizás hubiese considerado la teoría como la consideran

muchos de los físicos, como una extravagancia. Sin embargo, la teoría de Everett es, de todas las propuestas avanzadas para interpretar la teoría cuántica, quizás la más "limpia" desde el punto de vista matemático.

A pesar de su extravagancia, hay ciertas áreas de la física donde la teoría de Everett se puede utilizar en forma provechosa. El grupo que favorece este tipo de interpretación es gente que trabaja en cosmología, ya que es muy difícil hacer una teoría cosmológica dentro de la visión usual de la mecánica cuántica, donde hay una distinción entre el observador y su aparato, y el sistema observado, en el sentido de que el observador está por fuera del sistema observado. Pero si el sistema es todo el cosmos ¿dónde colocamos el observador de modo que se pueda distinguir del sistema, si por definición, el sistema, que es el cosmos, contiene todo, incluido el observador? No hay un "afuera" donde colocar el observador. Para resolver este problema, mucha gente que trabaja en cosmología prefiere hacerlo dentro de la teoría de Everett, donde finalmente no se necesita un observador puesto que no hay colapso.

Volviendo a Einstein, podemos afirmar que su deseo no era tener una teoría cuyo mérito fuese facilitar el trabajo y posibilitar las publicaciones de quienes están en un determinado campo de especialización, sino tener una visión del mundo razonable y en términos de una realidad independiente.

Ghirardi, Rimini y Weber

Everett eliminaba el colapso con su teoría. Hay otros intentos en los que no se elimina el colapso sino que se intenta ver en él un proceso que no depende de una conciencia humana, de un observador, proceso que tiene lugar únicamente cuando la ecuación de Schrödinger conduce un cuerpo de grandes dimensiones, como un gato, a una superposición de estados diferentes. Es necesario, entonces, corregir la ecuación de Schrödinger y añadirle nuevos términos cuya influencia para una sola partícula sea muy débil. Si se hace una experiencia con un solo electrón o con un pequeño número de ellos, la influencia de los elementos añadidos es despreciable y la versión estándar de la ecuación de Schrödinger da una descripción correcta de los resultados. Sin embargo, si el proceso físico lleva a un cuerpo de grandes dimensiones a un estado de superposición, la influencia acumulativa de los elementos suplementarios de la ecuación sobre las numerosas partículas que componen el cuerpo se hace significativa y causa la reducción de la función de onda.

Una teoría en ese sentido fue formulada en 1982 por tres físicos italianos, Ghirardi, Rimini y Weber, la cual se conoce por las iniciales de ellos como teoría GRW. Según su enfoque, cuando una partícula se encuentra en una superposición de estados correspondientes a posiciones diferentes, ella posee una pequeña probabilidad de "saltar" espontáneamente de un estado a otro. Para una sola partícula la probabilidad del "salto" es tan pequeña que se debe esperar al menos algunos millones de años para que se produzca. Para un cuerpo de grandes dimensiones, sin embargo, existe una probabilidad razonable para que una de sus partículas efectúe el "salto" en un tiempo muy corto, y la teoría está construida de modo que esta partícula arrastra consigo todo el cuerpo entero. Así, partículas aisladas pueden

quedar mucho tiempo en un estado de superposición, en tanto que la superposición de cuerpos de grandes dimensiones se reduce inmediatamente.

La teoría luce interesante, pero la idea de que una sola partícula arrastre todo un cuerpo macroscópico hiere el buen sentido físico. Lo peor es que se puede demostrar que esto va a suceder de una manera no local: el arrastre puede incluir objetos tan distantes y realizarse en un tiempo tan corto, que se viola el principio de la velocidad máxima de las interacciones físicas. La teoría no es compatible entonces con la relatividad. Por otra parte, las correcciones que la teoría GRW introduce implican una violación de ciertas predicciones cuánticas estándar que no han sido experimentalmente constatadas, en tanto que las predicciones de la teoría estándar han sido verificadas con un grado muy alto de precisión.

Tenemos entonces una teoría que le añade algo ad hoc a la ecuación de Schrödinger, que no es muy intuitiva, que no es local, cuyo formalismo es muy complicado y cuyas predicciones difieren de las ya verificadas predicciones de la teoría estándar.

Posiciones no objetivistas

La más importante de este tipo de posición, la de Bohr, será tratada en el próximo capítulo donde hablaremos también de la posición de Heisenberg, cercana pero no idéntica a la de Bohr.

von Neumann

En el capítulo anterior vimos que von Neumann sostiene la existencia de dos posibles procesos de evolución para la función de onda: uno que conserva la superposición, y otro, el proceso de medida propiamente, cuando el sistema interactúa con el aparato de medida y la onda colapsa a uno solo de los posibles resultados de la medida.

Ahora bien, dice von Neumann, el aparato de medida no está exento de la descripción cuántica, sólo que usualmente no analizamos cuánticamente el aparato. Sin embargo, podemos profundizar el análisis y considerar nuestro ojo como instrumento de observación. En tal caso, el aparato anterior se considerará en una superposición y el colapso tendrá lugar cuando nuestro ojo interactúe con él. Pero podemos continuar moviendo la frontera entre el sistema observado y el instrumento de observación, considerar el proceso óptico del observador como parte del sistema y decir que es el cerebro el que hace una medida sobre el ojo. Ahora el sistema óptico estará en una superposición y el cerebro, que es el que mide, hará el colapso. Finalmente, concluye von Neumann, se puede considerar el cerebro mismo como parte del sistema y entonces es el ego abstracto del observador el que hace el colapso.

Lo que quiere decir von Neumann con el ego abstracto del observador no es muy claro. Lo que sí es claro es que resulta muy extraño que en un libro en el que se trata de los

fundamentos matemáticos de la teoría cuántica se termine hablando del yo del observador, el cual parece tener una influencia física.

Wigner

Muchas veces se piensa que en últimas lo que dijo von Neumann es que la conciencia es la que determina el colapso. Esto no es estrictamente correcto. Para von Neumann, como matemático, le bastaba tener una estructura matemática, no una imagen del mundo. Fuera de la frase mencionada acerca del ego abstracto, en su libro él no profundiza en el asunto. Quien afirmó explícitamente, a comienzos de la década del 60 del siglo XX, que es la conciencia la que causa el colapso, fue el físico cuántico Wigner, que como físico quería conocer la realidad física descrita por la estructura matemática. Sus ideas dieron lugar a un experimento en el que gente en una habitación se concentraba y trataba de hacer un colapso cuántico en un sistema en otra habitación. Una revista científica incluso publicó el experimento, cuyos resultados fueron negativos.

Wheeler

Según Wheeler, el universo, su existencia y su origen no tienen una realidad en sí. El referente último para Wheeler es el sentido o la significación, y acepta la definición de Follesdal que dice que "El sentido es la intersección de todos los datos de que disponen las personas que comunican". Wheeler propone que el fundamento de todo, incluida la misma teoría cuántica, es el establecimiento del sentido.

Para construir su teoría, Wheeler sostiene que se debe hacer una diferencia entre un fenómeno cuántico registrado por una conciencia y uno no registrado por una conciencia, pues sólo el primero puede utilizarse para construir el sentido al constituir un dato para las personas que comunican.

En esencia, la tesis de Wheeler es que el universo es necesario para construir el sentido y, a su turno, el universo debe su definición y su existencia a la búsqueda del sentido hecha por aquellos que comunican. Para Wheeler: "la existencia es el circuito cerrado del sentido". Una mitad del circuito va de la física al sentido y es la parte más evidente; la segunda parte va del sentido a la física y constituye, según Wheeler, la parte más extraña.

De la física al sentido: Construimos el sentido a partir de la evidencia, de los datos que compartimos. Esos datos los constituyen todo lo que oímos, escuchamos, sentimos,..., y todo ello, dice Wheeler, se puede reducir a fenómenos cuánticos elementales.

Del sentido a la física: Para encontrar la evidencia, los datos que vamos a compartir y que constituyen el sentido, es necesario tener, según Wheeler, la libertad de hacer preguntas y la posibilidad de identificar las respuestas. Mediante un análisis de un tipo de problema estadístico y la aceptación del carácter de los fenómenos cuánticos, Wheeler llega a la

conclusión de que la "posibilidad de distinguir" y la "libertad de hacer preguntas" implican la utilización de funciones de onda.

Una vez obtenidas las funciones de onda, Wheeler se apoya en resultados de las teorías de campos de gauge para obtener los campos y las partículas a partir de las fases de las funciones de onda.

En la teoría de Wheeler, que no es una teoría objetivista, no se presenta el problema de la medida. Se tienen, sin embargo, problemas profundos con el concepto de tiempo, al reducir la naturaleza a nosotros, pues su definición y su existencia se deben a la búsqueda del sentido que nosotros hacemos.

Wheeler considera que se debe modificar radicalmente el concepto de tiempo y que tal labor debe ser hecha durante la que él llama "física de la tercera época". Sugiere considerar que en la parte del circuito cerrado de la existencia, que va de la física al sentido, el orden natural del tiempo es válido, pero que en la parte que va del sentido a la física no hay razones para que ese orden normal, e incluso el mismo concepto de tiempo, sean válidos.

La teoría de Wheeler se basa en una interpretación radical de las ideas de Bohr. Veremos en el próximo capítulo que la noción de que sólo se tiene un fenómeno cuando es registrado por una conciencia no es bohriana.

La posición de d'Espagnat

Bernard d'Espagnat sostiene la existencia de una realidad en sí, pero acepta como completa la teoría cuántica, concluyendo que no es posible una interpretación objetivista de ella. No clasificamos sus tesis entre las propuestas de interpretación objetivista debido a su posición acerca del carácter no objetivista de la teoría cuántica, ni tampoco entre las posiciones no objetivistas, pues el pilar fundamental de su pensamiento es la existencia de una realidad independiente.

d'Espagnat sostiene que la noción de una realidad en sí es necesaria para la coherencia interna del pensamiento. Sólo mencionaremos el siguiente argumento que es uno de los varios que presenta. Cuando pensamos, lo hacemos sobre algo y tenemos la certeza en tal momento de que al menos algo existe, algo es: nuestro pensamiento. No podemos afirmar entonces que la noción de existencia, de ser, está desprovista de sentido. Si decimos que una realidad independiente, independiente de lo humano se entiende, no existe o que tal noción no tiene sentido, esto significa entonces que sólo el hombre pensante existe, o al menos que la afirmación de la existencia no se puede plantear sino de modo secundario al ser humano. d'Espagnat encuentra tan gratuita esta subordinación del ser a los hombres como la afirmación solipsista, según la cual yo mismo sería lo único existente, y añade que los argumentos mantienen su fuerza aún si esa realidad independiente no es conocible en detalle por el ser humano. La realidad independiente sería la explicación de los fenómenos, no como causa de ellos sino como su razón de ser.

A posteriori, después de analizar la física cuántica, d'Espagnat llega a la conclusión de que la realidad independiente no es una realidad física, lo que significa que no es conocible por medio de la física. Un análisis, muy completo y detallado, del problema de la medida y de todos los intentos por resolverlo en términos objetivistas, y de la no-separabilidad, de la cual hablaremos en el próximo capítulo, lo convencen de que las nociones de espacio, tiempo, espacio-tiempo, evento y aún la de posición de las cosas, no son más que herramientas para la descripción de los fenómenos, que son las experiencias humanas controlables y comunicables, obtenidas en condiciones bien especificadas. d'Espagnat propone diferenciar la realidad empírica, que es el conjunto de los fenómenos, de la realidad en sí o realidad independiente. Para d'Espagnat, la única realidad que puede ser conocida por el espíritu humano, en el sentido que a la palabra conocer se le da en la investigación científica, es la realidad empírica.

Ahora bien, para d'Espagnat la realidad en sí no es conocible, pues el sentido de esa palabra es el de un conocimiento exhaustivo de algo tal como es. Sin embargo, tampoco es totalmente inconocible, pues las nociones como espacio-tiempo y curvatura, ni son familiares, ni son modos a priori de nuestra sensibilidad. Por tanto vienen de algo externo a nosotros. Es natural pensar, concluye d'Espagnat, que reflejan algo de la realidad independiente. En conclusión: la realidad en sí está velada, adjetivo entre conocible e inconocible, que significa que podemos conocer al menos las estructuras generales de lo real en sí.

TERCERA PARTE: LA COMPLEMENTARIEDAD

CAPÍTULO 7. LA CONCEPCIÓN DE BOHR

Hemos mencionado que la mayoría de los textos de mecánica cuántica hacen referencia a la escuela de Copenhague, pero están dedicados a mostrar las ecuaciones y a trabajarlas. Sucede, sin embargo, que Bohr pensó ciertas cosas oscuras, de tal modo que si lo entendiesen, lo más probable es que muchos de los físicos no aceptarían sus tesis porque van en contra de varias de las creencias básicas que, aún hoy en día, son parte de su pensamiento, creencias que hemos mencionado en la primera parte del libro. Por suerte para ellos, los físicos en general no leen las fuentes primarias, estudian las leyes de Newton pero muy pocos leen el libro original de Newton. Finalmente casi nadie lee a Bohr.

Otro aspecto del pensamiento de Bohr es que insistía en la utilización de un lenguaje claro y no ambiguo, y él mismo es notorio por no hablar de una manera clara y ambigua, por lo cual su pensamiento se presta siempre a la interpretación. Si sólo nos interesa el manejo del aparato matemático de la cuántica y sus aplicaciones, no necesitamos preocuparnos por el debate entre Einstein y Bohr, ni por la escuela de Copenhague. Si, por el contrario, nuestro interés se centra en la parte conceptual y la visión del mundo, debemos entonces estudiar a Bohr.

Bohr tiene una posición opuesta a la de Einstein. Considera que la teoría cuántica no satisface las teorías clásicas, pero que es una buena teoría y por lo tanto no necesitamos buscar una nueva, lo que necesitamos es cambiar nuestra concepción de lo que es una teoría física. La mayoría de los físicos dice que acepta a Bohr. Eso sin embargo no es suficiente.

En efecto: Si se está de parte de Einstein, se debe decir que la mecánica cuántica no es buena y que por tanto es necesario buscar una nueva teoría. Las dificultades no importan puesto que al final se espera que alguien resulte con una teoría mejor. Si se está de parte de Bohr, no se ve la necesidad de una teoría mejor. Sin embargo, hay algo que hacer, ya que, como se dijo antes, el mecanicismo se convirtió en la visión global para la cultura occidental. Y si la mecánica cuántica no está de acuerdo con las teorías clásicas, entonces quizás debemos dejar de lado la visión mecanicista, que fue una construcción epistemológica elaborada con base en la teoría precisa de la mecánica clásica. Si aceptamos a Bohr, tenemos entonces que cambiar nuestra visión global del mundo y esto es más radical que lo que pretende Einstein con su propuesta de un cambio de teoría física. Al aceptar a Bohr no tenemos que cambiarle mucho a la física pero sí a nuestra visión del mundo.

Entonces, ¿cuáles son las consecuencias de aceptar la posición de Bohr? ¿Son ellas aceptables? Si vamos en la dirección de Bohr, ¿perderemos quizás la racionalidad científica? ¿Será el fin de la cultura moderna? ¿Perderemos los logros filosóficos de esa cultura? ¿Llegaremos a conclusiones muy radicales acerca de la ciencia, la racionalidad y el estatuto de la cosmovisión moderna? Estas son las preguntas que es menester hacerse. Pero, por otra parte, cabe la posibilidad de que la aceptación de Bohr pueda ayudarnos a resolver problemas que surgieron a causa de la cosmovisión mecánica. Quizás esto suscitará más problemas, es necesario investigarlo. Por el momento pasemos al estudio de Bohr y sus tesis.

La interpretación de Bohr

Para Bohr, al contrario que para Einstein y los seguidores del mecanicismo, la ciencia trata solamente de una realidad meramente empírica. La base de la ciencia es entonces la intersubjetividad y no la objetividad en términos de una realidad independiente. Si se hace una reconstrucción del pensamiento de Bohr se puede ver que su conclusión sobre el carácter no objetivista de la mecánica cuántica no es algo a priori. Si bien hay suposiciones de tipo lingüístico en Bohr, la conclusión según la cual la mecánica cuántica no puede interpretarse en términos de una realidad totalmente independiente del observador es a posteriori.

Reconstrucción del pensamiento de Bohr

Su noción de ciencia

Se puede comenzar con su noción acerca de la meta de la ciencia, a la que considera como el aumento y el ordenamiento de la experiencia comunicable sin ambigüedad. En otras palabras, la ciencia se ocupa de los enunciados exentos de ambigüedad. Esa noción de ciencia no compromete a nadie ni con el realismo ni con una posición no realista. Se puede aceptar que la ciencia trata de los enunciados intersubjetivos pero solamente como algo metodológico: aquellos enunciados que sean intersubjetivos son los candidatos a describir la realidad independiente. La intersubjetividad sería un criterio para encontrar candidatos a la objetividad. Uno puede pensar que el mismo Einstein hubiera aceptado esto. Bohr no da el paso hacia una realidad objetiva como meta de la ciencia, pero su línea de reflexión no se basa en puros argumentos filosóficos, como es el caso por ejemplo con los positivistas lógicos.

Objetivo equivalente a no ambiguo

Bohr llama la atención sobre el aspecto lingüístico que hay detrás de la noción mencionada de ciencia. Es razonable equiparar objetivo con no ambiguo. Analicemos este asunto. Estrictamente no se puede hacer una equivalencia entre objetivo y no ambiguo puesto que no todo lo que es no ambiguo es objetivo. La base de la diferencia es la observación. Veamos esto más en detalle. Un enunciado objetivo debe ser algo independiente de cada sujeto particular, algo que trasciende cada sujeto particular; por tanto debe aparecer con un sentido igual para todos los sujetos en su buen uso de razón y de sus sentidos. Por ello un enunciado objetivo no puede ser ambiguo puesto que enunciado ambiguo es aquel que tiene más de un significado, dependiendo del sujeto particular que lo enuncia o del que lo escucha o de ambos. Resulta entonces que todo lo objetivo debe ser no ambiguo. Hay que anotar que la no ambigüedad, y por tanto la objetividad, son dependientes de un contexto: la expresión "la fuerza ejercida sobre ese cuerpo es igual a 20 newtons" aparece como no ambigua sólo para quien conoce el contexto de los conceptos de la mecánica clásica. Sólo para este tipo de personas el enunciado tendrá un único sentido y podrá confrontarse con la experiencia para decidir sobre su objetividad. Ahora, si bien todo lo objetivo es no ambiguo, no todo lo no ambiguo es objetivo. Se puede tener un modelo matemático exento

de ambigüedad para quienes conocen el contexto en que se enmarca, pero que no resulta objetivo al no estar de acuerdo con la experiencia. Los enunciados no ambiguos resultan ser entonces los buenos candidatos para la objetividad y es la confrontación con el mundo fenomenal lo que permite decidir si un enunciado no ambiguo es o no objetivo. La diferencia entre objetivo y no ambiguo la da por tanto la experiencia.

El asunto sin embargo se complica cuando tomamos conciencia de que toda observación está impregnada de teoría y que por tanto la observación misma implica la condición de no ambigüedad.

En efecto: toda observación depende de un contexto conceptual, está íntimamente ligada con un marco conceptual. Toda percepción sensorial está teñida de teoría. Un ejemplo dramático de ello se encuentra en el ensayo de Oliver Sacks “Ver o no ver” incluido en su libro “Un antropólogo en Marte”. Sacks reporta el caso de una persona que por causa de unas cataratas y otros problemas pierde la visión a una edad muy tierna y que en la práctica ha sido entonces ciega toda su vida. A los cincuenta años se somete a una operación que le permite adquirir el sentido de la vista. En contra de lo que pudiera pensarse, el uso de sus ojos para ver no es algo que le llega de inmediato y fácilmente, después de una breve adaptación. Por el contrario, exige un esfuerzo inmenso y en ocasiones dramático y doloroso de construcción de los conceptos necesarios para la visión, entre ellos el concepto mismo de espacio. Si nos parece que para ver no es necesario todo un marco conceptual ello se debe a que hemos construido ese marco en los primeros años de nuestra vida. Edificarlo en la edad adulta, como es el caso con la persona del ensayo de Sacks, constituye un desafío que, en ocasiones, parece imposible de enfrentar. El ciego que entra al mundo de los videntes tiene que crear los conceptos necesarios para ver. El uso de los sentidos se logra mediante conceptos, modelos, teorías, experiencias e instrumentos.

En suma: toda observación será tan precisa y falible como el marco conceptual que la sustenta. Como el marco conceptual que sustenta toda experiencia científica tiene que estar exento de ambigüedad, existe un sentido fundamental en que la observación implica la no ambigüedad. La búsqueda de la objetividad se confunde entonces con la búsqueda de la no ambigüedad. No es fácil, y quizás no sea posible, determinar donde está la frontera entre la no ambigüedad y la objetividad. Podemos entonces decir finalmente que hay un sentido en el cual se pueden equiparar en el terreno científico objetividad y no ambigüedad.

Hasta el momento nada nos compromete ni con el realismo ni con una posición no realista. Es la siguiente tesis lingüística de Bohr, junto con la existencia de los fenómenos cuánticos, lo que lo lleva a su posición no realista.

La unicidad del lenguaje común

¿Cuál es el lenguaje que nos permite llegar a la no ambigüedad? Bohr sostiene que sólo poseemos un lenguaje que podemos desnudar de ambigüedad y ese no es otro que el lenguaje común y ordinario, el lenguaje humano, el único que tenemos y el único que tendremos siempre. Bohr acepta que ese lenguaje en su uso ordinario está repleto de ambigüedades, sin embargo puede ser refinado y desnudarse de ambigüedades. Entre los

elementos fundamentales de ese lenguaje están los conceptos de espacio, de tiempo y de causalidad. Esta última consideración luce muy razonable; para convencerse de ello basta hacer el ejercicio de tratar de imaginar como aparecería a nosotros el mundo si no poseyéramos tales conceptos. Podemos incluso afirmar que sin ellos no podríamos reconstruir conceptualmente el mundo.

Para Bohr, la física clásica es sólo un refinamiento de ese lenguaje común. Las ideas de espacio y tiempo se refinan dando lugar a la teoría de la relatividad especial. Igual sucede con la idea de causalidad que se refina hasta tener el determinismo: conocido el estado del sistema y las interacciones a que está sometido, lo cual se supone en principio posible, se puede determinar el estado futuro (y pasado) del sistema. Por otra parte no puede haber relación causal entre eventos separados por un intervalo que la luz no pueda recorrer durante el tiempo que separa los dos eventos.

El punto fuerte de Bohr es su consideración de que, en la física, es el lenguaje de la física clásica el que permite y permitirá siempre definir contextos de no ambigüedad o sea contextos científicos.

Su argumento es que, sin importar cuán abstracta sea una teoría, para confrontarla con la experiencia son necesarios los conceptos clásicos, ya que sólo mediante ellos podemos comunicar sin ambigüedad tanto las descripciones de los aparatos como los resultados de medida.

Para entender mejor este punto volvamos de nuevo a la objetividad y a la no ambigüedad. Una teoría, llamémosla A, que debe ser no ambigua, requiere un marco conceptual o teoría, que podemos llamar B, también no ambigua, que sustente las experiencias que deciden su objetividad o sea su científicidad.

Supongamos, por ejemplo, que la teoría A hace ciertas predicciones que se verifican por medio de aparatos regidos por otra teoría B que no necesariamente tiene que ser igual a A. Si los resultados están de acuerdo con lo predicho quiere decir que esos fenómenos se enmarcan dentro del contexto o marco conceptual de la teoría A. Ese marco forma una red de conceptos, una estructura.

La teoría A puede también explicar cierto conjunto de fenómenos, los cuales se muestran por medio de aparatos regidos por una teoría B. Cuando se afirma que la teoría A los explica se quiere decir que ellos se pueden enmarcar dentro del contexto de la teoría. Lo que equivale a decir también que se reducen al marco conceptual de la teoría A.

Es evidente la necesidad de un contexto teórico en que se enmarquen los fenómenos estudiados para poder tener una explicación. Si sólo se incluye la descripción de los aparatos y de los resultados de medida lo único que se tendrá es una lista. Y una lista no constituye una explicación. Una lista requiere por el contrario una explicación, que se considera como dada cuando la lista se enmarca dentro de un contexto o red de conceptos coherentes.

Vale la pena anotar que si una teoría A no resulta objetiva los partidarios de ella pueden impugnar la teoría B que sirve de sustento a los aparatos mediante los cuales aparecen los fenómenos.

Veamos un ejemplo que sirva de ilustración. Supongamos una teoría sobre el movimiento de algún planeta, basada en la mecánica clásica, la teoría newtoniana de la gravitación y ciertas suposiciones iniciales, referentes por ejemplo al número de planetas involucrados, a su posición relativa y a sus masas. Ella será nuestra teoría A. Si queremos definir su objetividad, acudimos a la experiencia mediante observaciones telescópicas. Para definir ese tipo de observaciones sin ambigüedad se necesita una teoría: la de la óptica para aplicarla a los aparatos. La óptica es la teoría B que sustenta las observaciones.

Consideremos ahora los fenómenos cuánticos. Ellos se obtienen mediante aparatos cuya sustentación es la física clásica. Los resultados: marcas en pantallas, posiciones de agujas, etc., se expresan en el marco de la física clásica. Hemos visto que esos fenómenos no se pueden enmarcar dentro del contexto de la física clásica. Ahora bien, cuando Bohr sostiene que el lenguaje de los físicos es el de la física clásica no sólo está afirmado que los aparatos y los resultados de medida se expresan mediante la física clásica. De hecho si no hubiese sido así no se habrían descubierto. Si ese fuese todo el sentido de la tesis bohriana se trataría en cierto modo de algo trivial. El aspecto de su tesis que no es en absoluto banal es la implicación de que todos los fenómenos se deben enmarcar de algún modo en el marco de la física clásica, pues es el único lenguaje que permite un contexto de objetividad.

Es legítimo argumentar que no existe ninguna razón lógica para que ello sea así, y que el hecho mismo de que los fenómenos cuánticos no se puedan incluir dentro del contexto clásico es una indicación de que se debe buscar un lenguaje diferente al clásico que permita explicarlos. Una pregunta que puede surgir es si no constituye la misma teoría cuántica el contexto donde enmarcar los fenómenos cuánticos.

El problema es que lo que percibimos, lo que aparece, el fenómeno, aparece en el marco de la teoría clásica, donde las cosas tienen trayectoria, donde conceptos mutuamente excluyentes como onda y partícula no pueden aplicarse a un mismo objeto.

Si intentamos dejar que nos guíe la teoría cuántica para construir una nueva teoría para los aparatos y los resultados fenoménicos que permita incluirlos en el contexto de esa teoría, esta última debería aceptar las cosas fenoménicas que ya conocemos como regidas por la física clásica y proponer la existencia de nuevas entidades. El nuevo contexto se expresaría en términos de las nuevas entidades y las ya conocidas. Podrían aceptarse, por ejemplo, los electrones como partículas con trayectoria y decir que el vector de estado cuántico representa otras entidades que existen realmente. Es indudable que se trata de una posibilidad lógica. El problema es que esas nuevas entidades tienen que ser no locales lo cual implica que la labor de construcción del nuevo contexto teórico es sumamente ardua. De hecho es el programa de David Bohm y su escuela.

Tenemos que aceptar que no es muy clara la necesidad de que todas las entidades fenoménicas físicas tengan que describirse necesariamente en el marco de la física clásica. Si Bohr insiste en no salir del marco de esa física está obligado entonces a encontrar algún

modo de utilizar la red de conceptos que lo forman de modo que sea posible organizar los fenómenos cuánticos sin salir de ese marco. Si su programa es exitoso y logra responder a todas las paradojas cuánticas, puede decirse que su tesis acerca de la unicidad del lenguaje clásico es una intuición exitosa y que, al no necesitar introducir entidades nuevas, es más económica que cualquier teoría que, como la de Bohm requiere la introducción de nuevas entidades. Ya se adivina que algún precio hay que pagar y que si no queremos pagarlo tenemos entonces que buscar otra alternativa.

Si se pretende que la realidad es la teoría abstracta, no hay que olvidar que esa teoría está en el mundo de la realidad matemática ideal. Toda teoría matemática debe confrontarse con los fenómenos, que están en el mundo de nuestra percepción, para ser considerada como científica. Haciendo uso de la distinción de Platón entre el mundo de las ideas o mundo inteligible y el mundo visible o mundo sensible, podemos decir que la teoría abstracta está en el mundo inteligible y nuestra percepción está en el mundo sensible. Y el marco conceptual del mundo sensible ciertamente no es el de la teoría abstracta. Quizás una posible manera de reformular la tesis de Bohr de la unicidad del lenguaje clásico sea diciendo que es el mundo sensible el que permite decidir si una teoría abstracta, que vive en el mundo inteligible, es una teoría científica, y que ese mundo sensible se enmarca dentro de la teoría clásica.

Con el fin de entender el resto del pensamiento de Bohr aceptemos su tesis de la unicidad del lenguaje de la física clásica para la explicación de los fenómenos físicos y examinemos las consecuencias lógicas de esa aceptación.

Para terminar esta parte debemos añadir que Bohr observa también que el lenguaje clásico se basa en la estabilidad de la materia: sin esa estabilidad no podríamos tener cuerpos materiales, ni podríamos tener eventos, ni relaciones causales, ni tendría sentido la idea de espacio ni de la de tiempo. Vale la pena decir igualmente que Bohr no se pregunta por el origen o naturaleza de ese lenguaje. Parece que para él lo importante es que ha sido desarrollado para orientarnos en el espacio y en el tiempo y para encontrar relaciones causales entre unas cosas y las otras.

Irracionalidad del quantum de acción

Hemos decidido aceptar entonces la tesis de Bohr sobre la unicidad del lenguaje. Sucede, sin embargo, que los fenómenos cuánticos no parecen poder enmarcarse en el contexto del lenguaje clásico, refinamiento del único lenguaje que permite una comunicación sin ambigüedad.

Como argumentos pueden esgrimirse todas las dificultades que analizamos en los capítulos 4 y 5. En los escritos de Bohr se encuentran sin embargo esbozados argumentos muy poderosos; uno de ellos es el siguiente.

Se pueden deducir las leyes del movimiento clásico a partir de una cantidad que tiene unidades de momento por distancia o de energía por tiempo. Esa cantidad se llama la acción. Las ecuaciones de un sistema clásico se obtienen exigiendo que esa cantidad sea un mínimo. Sabemos que para obtener mínimos necesitamos poder variar continuamente la

cantidad en cuestión para luego imponer la condición de que esa variación sea igual a cero. Es necesario entonces que la acción sea una cantidad continua. Los fenómenos cuánticos indican en cambio una cuantización de la acción. La acción viene en cantidades discretas y la cantidad mínima de acción tiene un valor que es el de la mencionada constante de Planck, que se simboliza con la letra h . Esa cantidad h se llama también el quantum de acción. Si en un fenómeno clásico se puede considerar la acción como continua es porque las acciones típicas involucradas son tan grandes comparadas con h que podemos hacer la aproximación del continuo, de modo similar a como consideramos en nuestra experiencia ordinaria una hoja de papel como continua a pesar de que en realidad no lo es pues posee poros. Es por ello que los fenómenos cuánticos, basados en una discretización o cuantización de la acción, no pueden insertarse en la red conceptual del lenguaje clásico, basado en una continuidad de la acción.

Otra manera de llegar a la conclusión que expresamos en la última frase es sugerida por Bohr al anotar que es el quantum de acción el que permite la estabilidad de la materia. En efecto, si consideramos que, dado que está compuesto de un núcleo positivo y de electrones negativos periféricos a ese núcleo, podemos describir el átomo por medio de la electrodinámica clásica, tendremos una inestabilidad de la materia, pues los electrones, al ser acelerados por la fuerza electromagnética del núcleo positivo y girar entonces alrededor de éste, comenzarán a radiar, a perder energía y finalmente colapsarán en el núcleo. Sólo la introducción de h permite la estabilidad en el átomo de Bohr al considerar órbitas estables en las cuales el electrón no radia. Entonces, dado que la base misma del lenguaje clásico depende de la existencia del quantum de acción, no nos es lícito pretender entender ese h mediante el uso del lenguaje clásico: no podemos pretender entender aquello que nos permite entender. Se debe por tanto aceptar h como algo que no se explica ni requiere explicación. En ese sentido habla Bohr de la irracionalidad de h .

Indivisibilidad de los fenómenos cuánticos

Al considerar h como algo que no se explica ni requiere explicación, se deben aceptar las consecuencias de esa consideración; la principal es la indivisibilidad del fenómeno cuántico: h confiere a los fenómenos cuánticos un carácter de totalidad o indivisibilidad que se manifiesta en el hecho de que cualquier intento de dividir un fenómeno cuántico exige un cambio en los arreglos experimentales que produce nuevos efectos y que es en general incompatible con la definición del fenómeno que se investiga. Recordemos por ejemplo el fenómeno de interferencia de un haz de electrones a través de dos rendijas. Si se quiere dividir el fenómeno y saber por cual rendija pasa cada electrón y se hacen los arreglos experimentales adecuados para ello, se destruye paulatinamente la interferencia.

No se puede entonces mantener la estricta separación clásica entre observador y observado, no se puede definir una interacción entre ellos que pueda compensarse; estrictamente no puede hablarse de interacción sino de totalidad indivisible que incluye el aparato de medida. Los átomos o indivisibles serían en realidad los fenómenos cuánticos.

La paradoja cuántica fundamental

Siguiendo las ideas de Bohr tenemos que decir que la paradoja cuántica fundamental no es el hecho de que un electrón parezca comportarse algunas veces como onda y otras veces como partícula. La paradoja fundamental se expresa por medio de la siguiente pregunta ¿si el único lenguaje que puede permitir experiencias científicas no puede dar cuenta de los fenómenos cuánticos cómo podemos afirmar que tales fenómenos sean científicos?

Solución de la paradoja cuántica: el modo complementario de descripción

La indivisibilidad abre la puerta a la solución de la paradoja cuántica y permite el desarrollo de un nuevo modo de descripción, un nuevo uso del lenguaje clásico: el modo complementario de descripción. La indivisibilidad implica que el uso de todo concepto exige un contexto experimental preciso. No es seguro entonces que si se cambia el contexto experimental el concepto se pueda seguir utilizando. Si bien es verdad que los conceptos se definen dentro de una estructura teórica y en ese sentido puede afirmarse que en cierta manera son definidos por la teoría, la indivisibilidad restringe ahora su uso, y es la experiencia, o mejor, el tipo de experiencia, la que define si podemos usarlo o no para describirla.

Así, por ejemplo, la experiencia en la cual un haz de electrones pasa por un par de rendijas sin que tengamos ningún dispositivo que permita decidir por cuál rendija pasa cada electrón, es una experiencia que nos autoriza a usar el concepto de onda. Si añadimos un dispositivo que nos permita conocer por dónde pasa cada electrón, tendremos una experiencia que nos permite usar el concepto de partícula. Igual sucede con los conceptos de posición y de velocidad precisas. Una experiencia que nos permita usar el concepto de posición precisa no nos autoriza para usar el de velocidad precisa y viceversa.

La indivisibilidad abre entonces la posibilidad de experiencias y conceptos mutuamente excluyentes: dos conceptos serán mutuamente excluyentes si no es posible definir un contexto experimental que permita utilizarlos a la vez. O sea que son conceptos mutuamente excluyentes en el siguiente sentido: que no es posible utilizarlos a la vez en ninguna experiencia cuántica. Si se intenta utilizarlos ambos en un mismo fenómeno cuántico, se llega a conclusiones que no están de acuerdo con la experiencia, o sea a conclusiones no objetivas. Esto sucede con los conceptos de posición y velocidad precisas. Igual sucede con los conceptos de onda y partícula.

Dos conceptos mutuamente excluyentes no pueden entonces combinarse en la mente para tener una sola imagen conceptual. Así, por ejemplo, como los conceptos de velocidad y de posición son mutuamente excluyentes, no nos está permitido combinarlos en la idea de trayectoria, a pesar de que desde un punto de vista lógico no se excluyan, como sí se excluyen los conceptos de onda y partícula. Sólo se podrían combinar en una única imagen conceptual si pudiéramos diseñar un tipo de dispositivo que permitiese utilizarlos a la vez. Como no es posible diseñar ese tipo de dispositivo, y ello debido a la indivisibilidad, no es

posible entonces utilizarlos a la vez en nuestro razonamiento. En cuanto a los conceptos de onda y partícula, como no se pueden utilizar ambos en una misma experiencia, se elimina entonces la paradoja de la existencia de algo que a la vez sería onda y partícula.

Tales conceptos, como los de onda y partícula, y posición y momento precisos, son, sin embargo, necesarios para agotar toda la información posible acerca de un mismo objeto cuántico como un electrón. Conceptos mutuamente excluyentes pero necesarios para agotar toda la información posible acerca de un mismo objeto cuántico se denominan conceptos complementarios. Nótese que una vez fijado el contexto experimental, el uso de los conceptos queda fijo para esa experiencia. Bohr propone la complementariedad como una nueva relación lógica entre los conceptos del lenguaje clásico, la cual permite dar cuenta de experiencias que no se pueden explicar en el modo normal de uso de ese lenguaje.

El papel del instrumento

Hemos dicho que un fenómeno cuántico es una totalidad indivisible que incluye el aparato de observación. En esa totalidad, sin embargo, se debe hacer una distinción fundamental entre el instrumento y el resto de fenómeno. En efecto: si queremos tener una experiencia, la unicidad del lenguaje clásico exige que la descripción del arreglo experimental y de los datos se haga en términos clásicos, y ello para que sea posible una comunicación sin ambigüedad del experimento. Una parte de la totalidad constituida por el fenómeno debe describirse entonces por medio del uso ordinario del lenguaje clásico. En otras palabras: el instrumento es aquel aspecto del fenómeno cuántico que se describe por la física clásica.

Un aspecto importante del fenómeno cuántico es que al ir de una experiencia A a una experiencia B complementaria de A, aquello que se considera instrumento cambia. Ilustremos este punto con un ejemplo.

Consideremos una experiencia que nos permite observar la interferencia de electrones. Tenemos entonces una fuente f de electrones que inciden sobre un diafragma D donde se tiene una ranura. Frente a ese diafragma se tiene un segundo diafragma d con dos ranuras. Frente a éste y a una cierta distancia se tiene una placa fotográfica P .

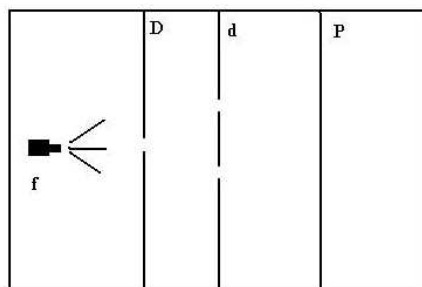


Figura 7.1

¿Cuál es el instrumento? El instrumento está formado por la fuente, los dos diafragmas y la placa.

La experiencia anterior no nos permite conocer por cuál de las ranuras practicadas en el segundo diafragma pasa cada electrón. Para encontrar una manera de saberlo podemos razonar así: Cada electrón va a producir un movimiento en el primer diafragma cuando pasa por la ranura practicada en él. Un conocimiento del movimiento producido en ese diafragma nos permitiría decidir por cuál ranura del segundo diafragma pasa luego cada electrón. En efecto: Si después de pasar por el diafragma D, el electrón pasa por la ranura de arriba del diafragma d, podemos esperar que el movimiento que produce en el diafragma D será diferente al que produciría si pasase después por la ranura de abajo del diafragma d. No podemos, sin embargo, conocer el movimiento producido por el electrón en el diafragma D pues este último está rígidamente fijo. Para determinar tal movimiento diseñamos otra experiencia en la cual el primer diafragma no está fijo sino que está colgado de un resorte r frente al cual hay un aparato A que detecta el movimiento.

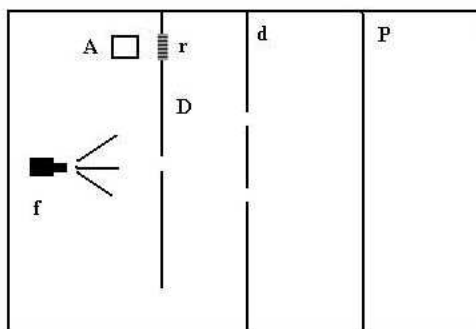


Figura 7.2

Sucede sin embargo que, si bien podemos ahora decidir por dónde pasan los electrones y considerarlos como partículas, la interferencia desaparece. Ello se muestra claramente mediante el análisis matemático, del cual se concluye que para poder conocer con la precisión necesaria el movimiento del diafragma, es necesario tratarlo ahora cuánticamente. Llegamos entonces a la siguiente conclusión: en esta experiencia, complementaria de la anterior, el primer diafragma ya no es parte del instrumento.

Es posible presentar otros ejemplos de este tipo en que un cuerpo hace parte del instrumento en una experiencia y deja de serlo en la experiencia complementaria. Se puede por ello afirmar que la frontera entre el instrumento y el interior cambia, que se trata de una frontera móvil. Pero no se trata de una frontera en el sentido clásico, pues para ello se necesitaría que uno pudiera separar el instrumento del resto del fenómeno, lo cual no es posible dada la indivisibilidad inherente a todo fenómeno cuántico. No hay ninguna restricción lógica para la distinción de aspectos diferentes en un todo indivisible. Lo que hace indivisible al todo no es la imposibilidad de distinguir aspectos diferentes, sino la imposibilidad de separar esos aspectos, pues de hacerlo el todo dejaría de ser lo que es.

La clausura del fenómeno cuántico

Para Bohr, un fenómeno cuántico no está completo hasta tanto no se produzca una marca irreversible en el instrumento de observación. En el experimento de las dos rendijas, el fenómeno sólo se completa, o como dice Bohr en su terminología particular: se cierra o clausura, cuando se produce la marca irreversible en la placa fotográfica. Mientras no se complete el fenómeno, no nos es lícito hacernos preguntas acerca del objeto, tampoco podemos ni decidir qué conceptos utilizar con respecto a su comportamiento, ni hacer inferencias válidas sobre él.

Es por ello que, dentro de la interpretación de Bohr, las preguntas que, en el experimento de elección retardada, se plantean sobre lo que ha pasado con el fotón antes de que llegue al punto donde podemos colocar o no el segundo espejo semitransparente no son válidas, pues no puede decirse nada acerca del fotón hasta que no se cierre el fenómeno con su detección mediante un efecto irreversible en el aparato.

Analicemos este punto en más detalle. En ese experimento, se espera hasta que se cierre el fenómeno para decidir si el comportamiento del fotón es corpuscular: el fotón siguió por uno de los dos caminos, u ondulatorio: parte del fotón se fue por un camino, parte por el otro. Pero cuando el fenómeno se cierra ya el segundo espejo semitransparente o ha sido colocado o no. O sea que las inferencias legítimas son las que se hacen cuando ya el espejo en cuestión o está o no está colocado. Las inferencias que nos dan resultados paradójicos, por el contrario, se hacen acerca de lo que ha pasado con el fotón antes de que se tome la decisión sobre la colocación o no del segundo espejo. O sea, se supone que pueden hacerse preguntas y dar respuestas sobre el comportamiento del fotón antes de que se clausure el fenómeno. Ello es válido si suponemos que el fotón tiene propiedades en sí. Pero eso es precisamente lo que se pone en cuestión con los fenómenos cuánticos. Para Bohr, todas las inferencias sobre el fotón son contextuales, se necesita tener todo el contexto experimental completo para hacer preguntas e inferencias válidas, y en el caso del experimento de elección retardada, el contexto experimental sólo se tiene completo cuando el fotón es registrado en el aparato por un efecto irreversible. En conclusión: las inferencias paradójicas del experimento de elección retardada no son válidas.

Otro aspecto importante con la noción de clausura del fenómeno es que no se exige la presencia de una conciencia para tener completo el fenómeno, sólo se requiere el efecto irreversible en el aparato. Para Bohr, un fenómeno lo es cuando está "clausurado" por un efecto irreversible en el instrumento. En esto se diferencia Bohr de Wheeler para quien, como vimos, un fenómeno sólo lo es cuando está registrado por una conciencia. En un fenómeno cuántico, como lo concibe Bohr, el observador es necesario para definir el aspecto complementario que se va a manifestar, y ese observador no tiene derecho a afirmar de qué aspecto se trata en tanto no haya hecho los arreglos del caso; pero una vez que el dispositivo experimental está definido, la presencia del observador ya no es necesaria para tener el fenómeno.

Imposibilidad de una ontología en los fenómenos cuánticos

Aunque Bohr no expresó ni en detalle, ni con suficiente claridad, su pensamiento respecto a cuestiones de tipo ontológico, pues parece que en general rehusó hablar de esos tópicos, es posible sin embargo construir argumentos consistentes con su pensamiento general, que van en la línea de ideas siguiente. Ya que no es posible hacer una distinción absoluta entre observador y observado, ya que no se puede tener una división tajante y absoluta entre aquello que es el observador y aquello que es lo observado, no tienen sentido aquí preguntas ontológicas, que son preguntas acerca de un objeto de observación definido de manera absoluta, son preguntas acerca de un objeto que se considera independiente del contexto experimental, del contexto observacional. La ciencia entonces no se va a referir a una realidad independiente de lo humano, del contexto observacional humano, de la existencia humana, sino que sólo va a hacer referencia a la experiencia comunicable sin ambigüedad.

Tenemos entonces todo el argumento bohriano para una posición no objetivista, que podemos resumir como sigue:

- a) La ciencia trata de la experiencia comunicable sin ambigüedad. Enunciados científicos deben ser intersubjetivos. Objetivo es equivalente a no ambiguo. Este punto es aceptable aún para un objetivista, el cual lo puede considerar sólo como metodológico.
- b) El único lenguaje que permite la no ambigüedad, y por tanto la ciencia, es el lenguaje común cuyos elementos esenciales son espacio, tiempo y causalidad. La física clásica es sólo un refinamiento del lenguaje común. En física el lenguaje que permite la construcción de contextos de no ambigüedad es la física clásica. Suposición lingüística de Bohr no justificada plenamente por él.
- c) Se aceptan los fenómenos cuánticos y con ellos la existencia de h . Esto lo da la observación. No es un punto filosófico, sino un hecho científico.
- d) El punto lingüístico b) unido a los datos científicos c) conducen a la paradoja cuántica.
- e) La necesidad de h para la estabilidad de la materia, punto científico, y el hecho de que esa estabilidad sea necesaria para el lenguaje clásico, junto con la suposición lingüística b), conducen a la inexplicabilidad de h y a su consecuencia principal la indivisibilidad.
- f) La indivisibilidad abre la puerta a la solución de la paradoja cuántica y permite el desarrollo de un nuevo modo de descripción, un nuevo uso del lenguaje clásico: el modo complementario de descripción.
- g) La indivisibilidad no permite preguntas ontológicas. En conclusión: se debe adoptar una posición no objetivista.

Conclusión

La única suposición extracientífica es la lingüística. Y la conclusión no objetivista es a posteriori, viene como conclusión de lo lingüístico y lo científico.

Comentarios sobre el rechazo a una ontología

Las ideas implícitas de Bohr acerca de la naturaleza solamente empírica de la realidad física se fundamentan en la tesis lingüística sobre la unicidad del lenguaje. Si se rechaza esa tesis, se puede aceptar una realidad física independiente y tratar de encontrar un nuevo lenguaje para describirla y explicarla. Es el intento que hace Bohm, por ejemplo. El rechazo ontológico de Bohr no tiene entonces el carácter de una necesidad lógica.

Por otra parte, aún aceptando que la realidad física sólo es una realidad empírica, todavía es posible aceptar la existencia de una realidad independiente no física, como es el caso con d'Espagnat.

En conclusión: la aceptación de la epistemología de Bohr y del carácter empírico de la realidad física, no nos compromete entonces necesariamente con un rechazo total de la noción de realidad independiente.

Bohr y el problema de la medida

El problema de la medida o la paradoja del gato se basan en los siguientes presupuestos:

- a) Se considera a la cuántica como una teoría completa.
- b) Se interpreta de modo objetivista la función de onda.
- c) Se acepta como natural y obvio el comportamiento intuitivo de los cuerpos macroscópico, que es el que describe la física clásica.

Bohr acepta el primero de los presupuestos, pero rechaza el segundo pues, para él, la función de onda no tiene sentido físico y no es más que un elemento auxiliar para los cálculos.

En cuanto al tercer presupuesto, que es la suposición de que los cuerpos macroscópicos tienen las propiedades que nos dan la percepción y la intuición ordinaria y directa, hay que recordar lo siguiente: dentro de la interpretación bohriana, si un cuerpo macroscópico se debe describir mediante el lenguaje clásico o mediante el algoritmo cuántico es algo que se decide según el contexto experimental. Ya vimos más atrás el caso de un diafragma macroscópico, que en un contexto experimental se trataba como objeto clásico, y en otro contexto experimental, complementario del primero, se describía cuánticamente. El punto clave para Bohr es que si un cuerpo macroscópico se describe en un contexto experimental en el cual él juega el papel de instrumento, debe entonces describirse clásicamente. Si el contexto es tal que las acciones físicas respecto a él son del orden del quantum de acción, el cuerpo debe describirse mediante el algoritmo cuántico. En el caso de la paradoja del gato,

este último se utiliza como instrumento, por lo tanto debe estar descrito en el lenguaje clásico, en el cual superposiciones de un estado "gato muerto" y un estado "gato vivo" no tienen el menor sentido.

En conclusión: al no aceptar dos de las premisas en que se formula el problema de la medida, este último se disuelve para Bohr.

Respuesta de Bohr al EPR y análisis de su concepción

El criterio de realidad propuesto por Einstein es ambiguo. Hay que tener en cuenta todo el aparataje. Si se mide la posición de una partícula se puede saber la de la otra. Sin embargo, la interacción con el aparato de medida y su intercambio impredecible de momento hace, que en una medición posterior de su momento, no se pueda ya afirmar que se conoce la suma de los momentos, por lo cual no se podrá entonces determinar el momento de la otra.

Igual sucede con mediciones iniciales de momento: si se mide el de una partícula se podrá conocer el de la otra. Pero la interacción con el aparato de medida hará imprecisa la posición. Ya no se podrá afirmar entonces que se conoce la diferencia de posiciones, y no se podrá utilizar esa condición para determinar la posición de la segunda partícula a partir de una medida de la posición de la primera.

La conclusión de Bohr es que cuando hacemos una medida de la posición o del momento de la primera partícula, se tiene, aún si no existe ninguna interacción directa con la segunda partícula, una influencia sobre las condiciones que definen los tipos posibles de predicciones relativas al comportamiento futuro de esa partícula. Decir entonces que las mediciones sobre la primera partícula se hacen "sin perturbar en modo alguno la segunda partícula" es, según Bohr, una manera ambigua de hablar. Para Bohr, las condiciones que definen los tipos posibles de predicciones que pueden hacerse acerca del comportamiento futuro de un sistema, son un elemento inherente de todo fenómeno al que pueda asignarse a justo título el término de realidad física.

De nuevo vemos que Bohr no se pregunta por la realidad en sí de los sistemas sino por las condiciones en que puede usarse sin ambigüedad el término realidad física.

Durante cerca de tres décadas, el debate entre Einstein y Bohr se consideró puramente filosófico. Los avances teórico-experimentales iniciados por Bell lo sacaron, sin embargo, de ese contexto filosófico. Bell mostró, en efecto, que la concepción einsteiniana de la realidad física da lugar a ciertas desigualdades entre cantidades físicas medibles y que la mecánica cuántica predice, en ciertos casos, una violación de tales desigualdades. De resultar ciertas las predicciones de la cuántica, los electrones se comportarían como si se enviaran señales a mayor velocidad que la luz. Se presenta entonces una posibilidad de decidir experimentalmente entre las posiciones de Bohr y Einstein. El veredicto experimental no favorece a Einstein.

En la siguiente sección analizaremos la noción de no-separabilidad y su relación con la indivisibilidad de Bohr.

Indivisibilidad y no-separabilidad

En esta sección vamos a mostrar que si se concibe una realidad física con el carácter de en sí o independiente, los fenómenos cuánticos indican que esa realidad estaría fuera del espacio y el tiempo.

La idea general de separabilidad

La idea general de separabilidad está implícita en la noción familiar de objeto físico: un objeto físico es algo que está delimitado, cerca o lejos, en suma separado de otros objetos y de nosotros mismos. En la noción más refinada de sistema físico, este último se concibe como algo suficientemente aislado de sus alrededores y se considera que lo que sucede en un sistema físico no depende, o sólo depende muy débilmente, de lo que sucede en otros sistemas físicos suficientemente alejados en el espacio y o en el tiempo del sistema en cuestión. Los objetos físicos aparecen separados: los fenómenos se muestran inscritos en el espacio y en el tiempo.

Parece natural concebir entonces que también la realidad en sí o independiente está inscrita en el espacio y el tiempo. La concepción, según la cual la realidad está compuesta de entidades que son localizables en regiones distintas y que no ejercen entre sí sino influencias que decrecen con la distancia, es entonces muy natural.

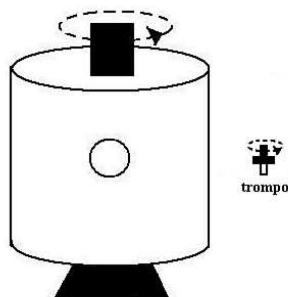
Precisando la idea de separabilidad

Para precisar la idea de separabilidad consideremos la siguiente situación:

Imaginemos un dispositivo que consiste en un cilindro atravesado por un eje central. El cilindro tiene dos huecos diametralmente opuestos y dentro de él un mecanismo que lo hace girar.

El mecanismo además lanza periódicamente un par de trompos que giran, uno por cada hueco. Cada trompo tiene una mitad de su eje de giro pintado de un color diferente al resto de él.

La situación se ilustra en las figuras 7.3 y 7.4.



lanzador giratorio de trompos

Figura 7.3

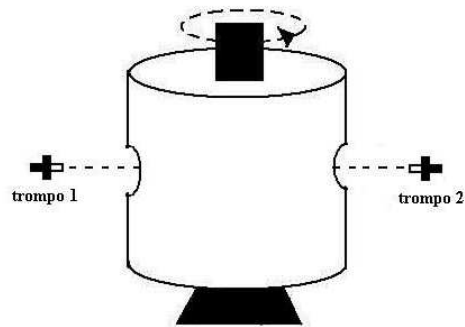


Figura 7.4

Supongamos ahora que el dispositivo lanzador de trompos está en el centro de un gran recinto circular.

Consideremos además que en la periferia de este recinto hay dos cabinas colocadas diametralmente opuestas.

La figura 7.5 ilustra la situación descrita. Las dos cabinas se marcan con un número para distinguirlas.



Figura 7.5

En cada cabina hay un observador que mira una pantalla donde hay un cuadrante.



Figura 7.6

De cuando en vez, la dirección en que son lanzados los pares de trompos coincide con el eje imaginario que conecta las cabinas y cada trompo del par entra a una de las cabinas, donde el observador, por medio del cuadrante, determina en qué dirección está orientado el eje de giro del trompo. Recordemos que cada trompo tiene una mitad de su eje de giro pintada de un color diferente al resto de él. Ello permite asignar una dirección al eje de giro.

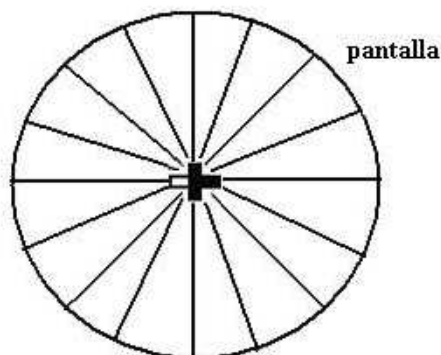


Figura 7.7

Los observadores encuentran la siguiente correlación: si el trompo que entra a una cabina está orientado en una dirección, el otro, que entra a la otra cabina, está orientado en la dirección contraria. Por ejemplo: si el eje de un trompo apunta en la dirección norte, el eje del otro apunta en la dirección sur y así para cada dirección.

Los observadores atribuyen la correlación al dispositivo que los emite, cuyo mecanismo está construido de modo que los trompos de cada par emitido tengan su eje apuntando en direcciones opuestas. En otras palabras, ellos consideran que los trompos vienen ya correlacionados desde la salida del dispositivo.

Imaginemos ahora que cada trompo sale de su cabina respectiva y entra a una segunda cabina vecina, donde es de nuevo observado. El observador que está en esa segunda cabina encuentra que, en general, el trompo apunta ahora en una dirección diferente. Atribuye este hecho a la interacción que el trompo ha tenido en la primera cabina, por medio de la cual la orientación de su eje pudo ser determinada. Cuando los segundos observadores, es decir los que se encuentran en las cabinas vecinas, comparan sus observaciones encuentran que de nuevo las orientaciones de los ejes están correlacionadas: Si el eje de uno de los trompos apunta en una dirección, el eje del otro apunta en la dirección exactamente contraria. Esa correlación sólo puede explicarse ahora si una señal va de un trompo al otro, señal que coordina las orientaciones de los ejes. Ahora, como ninguna señal puede viajar a mayor velocidad que la velocidad de la luz, la segunda correlación sólo podrá tener lugar si la distancia entre las dos segundas cabinas es tal que, durante el tiempo en que se observan en ella los trompos, una señal de luz puede salir del uno y llegar al otro. De lo contrario no puede existir tal correlación.

Ahora bien, si los observadores en las segundas cabinas encuentran siempre correlacionadas las direcciones de giro de los trompos, aún si el recinto es tan grande como

se quiera, habría que concluir que la correlación sería instantánea y que los trompos se envían señales que pueden viajar a mayor velocidad que la de la luz, violando así el principio de la velocidad máxima de las interacciones.

La no-separabilidad

Sucede que hay experiencias que muestran que los electrones se comportan como si se enviasen señales a mayor velocidad que la luz. Puede decirse que, en cierta manera, los electrones son como trompos minúsculos, pues tienen una propiedad análoga al giro sobre uno de los ejes que tienen estos últimos. Hay que advertir que la propiedad en cuestión que tienen los electrones no es exactamente igual al giro de un trompo sino solamente análoga. Experimentos, análogos al que se describió más arriba en relación con los trompos, se han llevado a cabo con pares de electrones producidos en una fuente común, y se han encontrado correlaciones que parecen poder explicarse únicamente por la existencia de señales que viajarían a mayor velocidad que la de la luz. La existencia de tales correlaciones es lo que se denomina la no-separabilidad.

¿Cómo explicar tales correlaciones? ¿Cómo entender la no-separabilidad? Hay que recordar que toda la idea de separabilidad está basada en la concepción según la cual la realidad está inmersa en el espacio y el tiempo. Según tal concepción, que podemos llamar concepción separable, el espacio y el tiempo hacen parte de la realidad en sí, es decir que existen independientemente de lo humano, de lo que conocen y deciden medir los humanos, de la existencia de los humanos. Como la realidad se inscribe, entonces, en el espacio y el tiempo, también la distancia entre dos elementos de la realidad tiene una existencia en sí, lo mismo que las relaciones causales entre los eventos que forman la realidad.

Enfrentados a la no-separabilidad hay dos posibles conclusiones a las que se puede llegar:

a) Se continúa aceptando que la realidad está inmersa en el espacio y el tiempo. La no-separabilidad implica entonces que existen influencias supraluminosas o sea que viajan a mayor velocidad que la luz. Uno de los problemas más graves para entender este tipo de influencias, por ejemplo entre un electrón y otro, es el siguiente: la idea de causalidad en la relatividad implica que aquello que es la causa debe preceder en el tiempo a aquello que es el efecto. Ahora bien, sucede que si se acepta una relación causal supralumínica entre dos eventos de la realidad, considerada como inmersa en el espacio y en el tiempo y por tanto obedeciendo las ecuaciones de la relatividad especial, esas mismas ecuaciones afirman que uno de los eventos puede ser el primero para un observador, el segundo para otro observador e incluso puede haber otro observador para el cual ambos eventos sean simultáneos. ¿Cómo lograr una extensión razonable de la idea de causa en el caso de las influencias supraluminosas, si un evento puede a la vez ser causa y efecto de otro y ello según el observador que se tenga?

Este grave problema hace que la segunda conclusión, que se describirá a continuación, luzca más atractiva.

b) La no-separabilidad indica que la realidad en sí no está inmersa en el espacio y el tiempo y que estos últimos, al igual que la causalidad ordinaria, no es más que parte de nuestro marco conceptual adaptado a la descripción de nuestra experiencia.

Es muy importante aclarar en este punto que, al igual que sucede con el potencial cuántico de Bohm y su no-localidad, la no-separabilidad no permite la transmisión de señales - entendidas como señales utilizables - a mayor velocidad que la de la luz. Se puede hablar de influencias o conexiones supraluminosas, pero no de señales de ese tipo.

La no-separabilidad y la indivisibilidad de Bohr apuntan en la misma dirección

Antes que nada hay que recalcar que las dos nociones parten de concepciones filosóficas muy diferentes. La no-separabilidad sólo tiene sentido en el contexto de una concepción objetivista. En cambio las tesis de Bohr son puramente epistemológicas, pues, como vimos, en su concepción de la mecánica cuántica las consideraciones ontológicas no tienen lugar. Como pudimos ver en el análisis de la respuesta de Bohr a Einstein, la indivisibilidad no significa solamente que no podemos dividir conceptualmente los sistemas y los instrumentos de medida, sino también que tampoco podemos hacer tal división para los sistemas entre sí.

En resumen: la no-separabilidad y la indivisibilidad afirman que en un fenómeno cuántico los resultados de una medida efectuados sobre un sistema no están en general determinados únicamente por variables locales. Entran en juego otras variables en regiones que están arbitrariamente alejadas.

La epistemología de Bohr

La propuesta de Bohr es para él mucho más fundamental que la mecánica cuántica, esta última sólo es el mejor ejemplo que puede invocar para ilustrar su epistemología general. Bohr propone una nueva manera de relacionar los conceptos, un nuevo modo de descripción adaptado a experiencias que, como las cuánticas, no pueden ser explicadas por el lenguaje clásico en su modo normal de descripción. Bohr propone que apliquemos la complementariedad en toda situación epistemológica donde nos enfrentemos a situaciones donde nuestro lenguaje ordinario no nos permite explicar y donde, por tanto, confrontemos paradojas.

Ligada a la epistemología bohriana hay una nueva visión del mundo según la cual no se debe pensar en términos de una realidad independiente que el ser humano trataría de abordar con una sola descripción, sino que hay que concentrarse en una realidad intersubjetiva para la cual no hay una descripción única, sino descripciones adaptadas a contextos que son mutuamente excluyentes pero todos necesarios para agotar esa realidad.

Para finalizar, tenemos que hablar de las ideas de Heisenberg, cercanas a las de Bohr pero con diferencias fundamentales. Ambos, sin embargo, son considerados generalmente como los fundadores de la llamada interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, conocida también como interpretación de Copenhague.

Heisenberg

Heisenberg comparte el punto de vista de Bohr según el cual sólo el lenguaje común, refinado por la física clásica, permite una comunicación científica. Las limitaciones del uso del lenguaje clásico en la física cuántica se muestran, para él, por las relaciones que llevan su nombre.

Para Heisenberg, es por medio de las matemáticas que podemos despojar de ambigüedad al lenguaje. En este punto encontramos una diferencia con Bohr, para el cual, como lo vimos, la unicidad del lenguaje común y la imposibilidad de este último para dar cuenta de los fenómenos cuánticos constituyen la paradoja fundamental de la mecánica cuántica. Bohr concluye entonces que se debe aceptar sin posible explicación la existencia del quantum de acción y la indivisibilidad de los fenómenos cuánticos, y propone la complementariedad como el modo de escapar a la paradoja cuántica. La indivisibilidad no juega en cambio ningún papel en el pensamiento de Heisenberg. En cuanto a la complementariedad, para él no es más que un medio útil de hablar, pero que sin embargo es ambiguo.

Otra gran diferencia con Bohr consiste en que Heisenberg no descarta la posibilidad de encontrar una ontología que pueda adaptarse a los fenómenos cuánticos. Para él, la función de onda contiene elementos objetivos, en sí, independientes del observador, que serían las posibilidades o tendencias probables. El mismo hace referencia a la potencia de Aristóteles en este punto. También, según él, la función de onda contiene elementos que conciernen a nuestro conocimiento del sistema y que son subjetivos, pues pueden diferir de un observador a otro.

En cuanto al proceso de medida, lo que dice en esencia Heisenberg es que la evolución del sistema - entre la preparación del sistema y la medida propiamente dicha - no puede describirse por medio de los conceptos clásicos, y que la medida propiamente dicha consiste en el paso de lo posible a lo real, entendiendo por real lo que se desenvuelve en el espacio-tiempo.

Los detalles de su teoría de la medida son muy vagos. Lo más grave sin embargo es que hay una ambigüedad en su descripción del paso de lo potencial a lo real. En efecto: Heisenberg distingue el acto de observar, que es la interacción del sistema con el instrumento de observación, y el acto de registrar, que es simplemente el acto psicológico de percibir. El problema es que en algunos pasajes Heisenberg dice que la reducción de la función de onda tiene lugar durante el acto de registrar, y en otros dice que sucede durante el acto de observar.

CAPÍTULO 8. LA COMPLEMENTARIEDAD COMO PRINCIPIO EPISTEMOLÓGICO

Extensión de la complementariedad a otros dominios

Para Bohr, la complementariedad era un principio epistemológico que encontraba su más clara aplicación en la mecánica cuántica. La motivación para extender la complementariedad a otros dominios surgía de considerarla como un nuevo modo lógico de mirar el mundo en situaciones donde nuestro lenguaje parece no servirnos para explicar. La idea es encontrar otras situaciones con la misma estructura lógica que los fenómenos cuánticos para aplicar la herramienta recién creada. Vale la pena reflexionar un poco más acerca de este aspecto de la complementariedad.

En mecánica cuántica, donde Bohr descubre la complementariedad, hay conceptos complementarios que se excluyen mutuamente desde el punto de vista lógico, como son los conceptos de onda y partícula, y conceptos que en cuanto a la lógica no se excluyen uno a otro, como los de posición y momentos precisos. Esto significa que el aspecto de exclusión mutua, clave en la identificación de dos conceptos como complementarios, no lo determina la lógica. Lo que lo determina es la exclusión mutua de los contextos experimentales que definen su uso.

Por otra parte, cuando se dice que dos conceptos son complementarios, y que por tanto se excluyen mutuamente, ello significa que no pueden utilizarse ambos en un mismo razonamiento. O sea que análisis, preguntas, inferencias, que involucren a uno de ellos se excluyen con análisis, preguntas, inferencias, que involucren al otro. Por ello, respecto a un electrón, no puede hablarse de trayectoria, que implica la combinación mental de los conceptos de posición y momento precisos. Y por ello también se resuelve la dualidad onda- partícula, puesto que los contextos experimentales que definen el uso de los conceptos de onda y partícula se excluyen mutuamente, lo que nos prohíbe la utilización de ambos conceptos en un mismo contexto experimental. No estamos enfrentados entonces a una situación que nos obligue a utilizar los dos conceptos en un mismo contexto, lo cual sería paradójico debido a la exclusión mutua lógica de los dos conceptos.

Surge entonces una pregunta: ¿cómo pensar en extender la complementariedad fuera del ámbito de la física en la cual se tienen claramente definidos los contextos experimentales? Más aún, ¿cómo esperar extenderla a campos donde no se hacen observaciones científicas? Es aquí donde se vuelve importante retomar el punto que tratamos en el capítulo anterior acerca de la relación indisoluble entre experiencia y teoría, que hace que toda experiencia este impregnada de teoría, que toda experiencia sea tan precisa y falible como el marco teórico que la sustenta. En últimas, una experiencia es una red de conceptos. Por ello, el que dos experiencias sean mutuamente excluyentes significa que las redes de conceptos ligados con ellas son mutuamente excluyentes.

El punto anterior es el que permite esperar que la complementariedad pueda extenderse a campos diferentes a la física. Si dos redes de conceptos son mutuamente excluyentes, lo son también todos los razonamientos basados en esas redes de conceptos. Pero como son

complementarias, ambas redes de conceptos se precisan para agotar todo lo que puede conocerse acerca de un mismo objeto. Por tanto no podemos esperar agotar toda la descripción del objeto con una sola red de conceptos. Y tampoco podemos esperar una descripción en términos de propiedades en sí del objeto, pues todas sus propiedades nos aparecen como contextuales, relativas a una red de conceptos que no es la única posible acerca de su comportamiento.

Ahora bien, ¿de dónde surge la posibilidad de contextos mutuamente excluyentes? En mecánica cuántica es la indivisibilidad del fenómeno, el cual incluye el instrumento de observación, lo que produce la contextualidad de las redes de conceptos y abre esa posibilidad. O sea que contextualidad implica aquí indivisibilidad o totalidad, indica que se tiene un todo indivisible. Es de esperarse entonces que ligado con cualquier eventual uso de la complementariedad siempre haya un tipo de indivisibilidad o totalidad.

Complementariedad en termodinámica

Es conocido el problema fundamental que consiste en la dificultad de conciliar los fenómenos irreversibles observados en el dominio macroscópico con las leyes dinámicas reversibles de la mecánica clásica. Recordemos lo que se dijo al respecto en el capítulo segundo, cuando se habló del carácter reversible de las ecuaciones de Newton. Antes de seguir adelante hay que aclarar que el problema de la irreversibilidad se presenta también con la mecánica cuántica, pues también las ecuaciones de esa teoría son reversibles. Para facilitar la exposición, sin embargo, seguiremos el análisis dentro del contexto de la mecánica clásica.

La irreversibilidad se expresa en termodinámica por medio de una función llamada la entropía, mediante la cual se expresa la llamada segunda ley de la termodinámica que dice que para un sistema totalmente aislado, la entropía o permanece constante o aumenta con el tiempo. La entropía aumenta con cada proceso irreversible que sucede dentro del sistema; cuando esos procesos se terminan, la entropía se hace constante. Si se quiere reducir la termodinámica a la dinámica habría que expresar la entropía, que es una variable macroscópica, en términos de las variables de estado de los átomos que componen el cuerpo macroscópico. Poincaré demostró mediante un teorema matemático que ello no es posible. Se hace necesario entonces emplear, además de los conceptos mecánicos, otros conceptos a fin de encontrar una explicación a la irreversibilidad termodinámica. La irreversibilidad es entonces irreducible a la dinámica. O sea que la segunda ley de la termodinámica es irreducible a la dinámica.

En general se considera que tal reducción se logra mediante una disciplina llamada mecánica estadística. El teorema de Poincaré nos hace esperar, sin embargo, que se debe acudir a conceptos adicionales a los de la dinámica para lograr tal reducción. La mecánica estadística recurre en efecto a los conceptos de probabilidad. Se tiene entonces que la mecánica estadística es resultado de la dinámica y el azar. En la formulación usual se introduce la idea de un agregado o colectivo estadístico ya que en la práctica se considera imposible conocer el estado dinámico exacto de un sistema macroscópico. El azar entra entonces como fruto de la ignorancia del observador. Parecería que la irreversibilidad fuese

fruto de nuestra ignorancia, algo totalmente subjetivo. Ahora, como lo remarca Prigogine, una consideración de las leyes de la termodinámica como subjetivas llevaría a la conclusión de que la combustión que tiene lugar en un horno, que es un proceso altamente irreversible, sería consecuencia del aumento de nuestra ignorancia.

El formalismo de la mecánica estadística da lugar entonces a una controversia entre las interpretaciones objetivistas y subjetivistas de la irreversibilidad, que tienen que ver con la manera como debe, en general, interpretarse la noción de probabilidad.

Bohr ha sugerido una interpretación puramente epistemológica de la irreversibilidad al proponer una complementariedad entre los conceptos dinámicos y los conceptos termodinámicos. La idea de Bohr se puede interpretar en el sentido de una exclusión mutua entre los contextos experimentales que permiten definir los conceptos dinámicos y aquellos que permiten la definición de los conceptos termodinámicos. Sin embargo, ambos tipos de conceptos son necesarios para agotar toda la información posible acerca de un cuerpo macroscópico. Parece entonces que Bohr indica que un cuerpo macroscópico tiene una especie de totalidad o indivisibilidad. Volveremos a este punto cuando hablemos de la complejidad.

Vale la pena darse cuenta que, si bien el problema entre reversibilidad e irreversibilidad se presenta, como se dijo, también con la mecánica cuántica, la solución que propone Bohr, que es válida tanto para el caso clásico como para el cuántico, se da en términos de la complementariedad, que es algo que surge con el análisis de los fenómenos cuánticos.

Complementariedad en biología

A lo largo de la historia ha existido y todavía existe una pugna entre los reduccionistas mecanicistas, que sustentan la tesis de que un organismo vivo no es más que un grande y complejo conjunto de átomos y que de las interacciones entre ellos surgen las leyes de la vida, o sea que sostienen la reducibilidad de la biología a la física, y en particular a las leyes de la mecánica con su eliminación de causas finales y su aceptación únicamente de causas eficientes, y los vitalistas, que no aceptan tal reducción y que llaman la atención sobre el hecho de que para entender el funcionamiento de un órgano primero debe conocerse su posición y su función en el organismo, y para quienes el concepto de finalidad es fundamental. Para los vitalistas, la biología tiene leyes especiales que no se reducen a las de la física.

Hay que aclarar que el surgimiento de la mecánica cuántica no cambia mucho la situación, pues los reduccionistas simplemente cambian la reducción de la biología a la mecánica clásica por la reducción a la mecánica cuántica. Y esto en parte porque tampoco en la mecánica cuántica aparecen causas finales, sino únicamente causas eficientes. Por eso escribimos en el párrafo de arriba la palabra mecánica sin calificarla ni de clásica ni de cuántica.

Bohr propone una solución original en términos de complementariedad e indivisibilidad que se puede formular de la forma que sigue. Un organismo es un todo indivisible.

Preguntas acerca de si un organismo está compuesto de átomos y si su comportamiento se reduce a las leyes entre esos átomos, o si tiene leyes propias irreducibles a las de la física, son preguntas que sólo se pueden formular especificando un contexto experimental. En circunstancias experimentales adecuadas para el análisis de los átomos de un organismo vivo con los mismos métodos y la misma precisión con que se analizan los átomos de un cuerpo inerte, la respuesta será que tales átomos obedecen las leyes físicas a que están sometidos todos los átomos; sin embargo, en tales circunstancias se privará al organismo de su vida. En circunstancias experimentales en que se renuncia a analizar los átomos del organismo vivo con los mismos métodos y la misma precisión con que se analizan los átomos de un cuerpo inerte, se manifestarán sus propiedades vitales. Ambas circunstancias experimentales son mutuamente excluyentes: el estado del animal muerto es mutuamente excluyente con el estado del animal vivo. Pero los conceptos definidos en ambos tipos de contextos experimentales son necesarios para agotar toda la información acerca de un organismo vivo. Bohr propone además considerar la vida como algo que al igual que el quantum de acción ni se explica ni requiere explicación.

Es importante añadir que en su último ensayo, que incluso dejó inconcluso y que trataba de la relación entre la biología y la física cuántica, Bohr menciona los argumentos arriba presentados y su conclusión acerca del carácter irreducible de la vida que la haría similar al quantum de acción. Habla de la reconsideración de tales conjeturas a la luz de la biología molecular y el descubrimiento del DNA, y llega finalmente a la conclusión de que, en la biología, términos teleológicos deben considerarse como complementarios a los conceptos de la biología molecular.

Podemos reformular sus últimas ideas sobre la biología diciendo que su propuesta consiste en considerar como complementarias redes de conceptos que no emplean sino causas eficientes, que son los de la física, y redes de conceptos que emplean causas finales, que serían necesarias en la biología. Cuando hablemos de complejidad, volveremos a referirnos a este tema de la complementariedad en biología.

Complementariedad en psicología

En experiencias psicológicas de introspección es necesario definir un ego: un sujeto que analiza, y un contenido de conciencia: el objeto analizado. Sin embargo, la frontera entre el sujeto y el objeto la fija el contexto de la descripción, y ello porque tanto sujeto como objeto hacen parte de una misma psiquis, que es un todo indivisible. Se concluye, según Bohr, que no solamente el sentido de cada concepto y de cada palabra es relativo y depende de la escogencia arbitraria de nuestro punto de vista, sino que también debemos aceptar el hecho de que una elucidación completa de un mismo objeto puede requerir diversos puntos de vista irreducibles a una descripción única.

Veamos dos ejemplos de ese corrimiento de frontera en psicología, de esa frontera móvil psicológica, base de las aplicaciones de la complementariedad en psicología propuestas por Bohr. Ambos ejemplos son extraídos de la literatura. Uno, el presentado por Bohr mismo, de la literatura danesa; otro, presentado por nosotros, de la literatura colombiana.

Frontera móvil en sicología

El ejemplo que presenta Bohr es el siguiente. En la novela "Las aventuras de un estudiante danés" del poeta y filósofo danés Poul Martin Møller, hay dos personajes, dos primos que en la escena relevante al caso están conversando. Uno de ellos es muy eficiente en asuntos prácticos, el otro, conocido como el licenciado, es adicto a meditaciones filosóficas recónditas en detrimento de su vida social. El primo práctico reprocha al licenciado el no aprovechar las oportunidades que le ofrece la amabilidad de sus amigos para encontrar un trabajo práctico. El licenciado explica sus dificultades en las siguientes palabras, que traduciremos libremente de uno de los ensayos de Bohr publicados en inglés, en donde se presenta la cita del libro de Møller:

"Mis interminables disquisiciones no me permiten lograr nada. Mas aún, llego a pensar sobre mis propios pensamientos acerca de la situación en que me hallo. Pienso incluso en que estoy pensando en ello, y me divido en una infinita secuencia retrógrada de "yoes" que se toman en consideración unos a otros. No sé en cual "yo" parar como el real, y en el momento en que paro en uno, hay en verdad de nuevo un "yo" que se detiene. Me confundo y siento un vértigo como si estuviese mirando a un abismo sin fondo, y mis reflexiones resultan finalmente en un terrible dolor de cabeza"

El primo le responde:

"De ninguna manera puedo ayudarte a escoger entre tus muchos "yoes". Eso está totalmente fuera de mi esfera de acción, y estaría tan loco como tú si me dejara llevar por tus sobrehumanas fantasías. Mi línea es aferrarme a las cosas palpables y caminar por el ancho sendero del sentido común; por lo tanto mis "yoes" nunca se entremezclan"

Nuestro ejemplo de la literatura colombiana es el siguiente. Al final de la novela "La nieve del Almirante", el poeta y novelista colombiano Alvaro Mutis escribe algunas pequeñas crónicas acerca de su personaje Maqroll el Gaviero. Una de ellas narra sus días de permanencia en el Cañón de Aracuriare, días durante los cuales quiso hacer un examen de su vida. Dejemos ahora que sea la pluma magistral del mismo Mutis quien nos hable de ese corrimiento de la frontera psicológica experimentado por Maqroll en su ejercicio de introspección:

"Pasados los días, el Gaviero inició, sin propósito deliberado, un examen de su vida, un catálogo de sus miserias y errores, de sus precarias dichas y de sus ofuscadas pasiones. Se propuso ahondar en esta tarea y lo logró en forma tan completa y desoladora que llegó a despojarse por entero de ese ser que lo había acompañado toda su vida y al que le ocurrieron todas estas lacerías y trabajos. Avanzó en el empeño de encontrar sus propias fronteras, sus verdaderos límites, y cuando vio alejarse y perderse al protagonista de lo que tenía hasta entonces como su propia vida, quedó sólo aquel que realizaba el escrutinio simplificador. Al proseguir en su intento de conocer mejor al nuevo personaje que nacía de su más recóndita esencia, una mezcla de asombro y gozo le invadió de repente: un tercer espectador le esperaba impasible y se iba delineando y cobraba forma en el centro mismo de su ser. Tuvo la certeza de que ese, que nunca había tomado parte en ninguno de los

episodios de su vida, era el que de cierto conocía toda la verdad, todos los senderos, todos los motivos que tejían su destino ahora presente con una desnuda evidencia que, por lo demás, en ese mismo instante supo por entero inútil y digna de ser desechada de inmediato. Pero al enfrentarse a ese absoluto testigo de sí mismo, le vino también la serena y lenificante aceptación que hacía tantos años buscaba por los estériles signos de la aventura".

Son muy interesantes los diversos corrimientos de frontera psicológica que le ocurren al Gaviero. En un primer corrimiento, el "yo" usual se convierte en objeto de observación de un segundo "yo" que surge. En un segundo corrimiento, es ese segundo "yo" el que se vuelve objeto de observación de un tercer "yo". Es en el contexto de ese tercer "yo" donde tienen respuesta las preguntas existenciales que no tenían sentido en el contexto definido por el "yo" usual.

A diferencia del desventurado licenciado de Møller, el Gaviero tiene la lucidez de fijar su frontera en el tercer "yo", que trae la clave de la solución de sus angustias existenciales, evitando caer en el abismo sin fondo de la regresión infinita de "yoes".

La conclusión es que la indivisibilidad entre el "yo" que observa y el contenido de conciencia observado, implica una frontera móvil entre ellos, que se traduce en la necesidad de definir contextos diferentes y excluyentes para agotar toda la riqueza de la vida interna. La exclusión se muestra en casos como el del Gaviero de Mutis, donde preguntas, respuestas, análisis que no tienen sentido en un contexto, lo tienen en otro contexto. Los diferentes contextos tendrían entonces una relación de complementariedad.

Complementariedad entre instinto y razón

Cuando se emplea la palabra "razón", se hace referencia a una situación donde están implicados pensamientos humanos. Ahora, sostiene Bohr, ningún pensamiento es imaginable sin un marco de conceptos construido sobre un lenguaje que cada generación debe aprender de nuevo; el uso de los conceptos suprime en gran parte la vida instintiva.

Cuando se emplea la palabra "instinto", se piensa en una situación que se caracteriza por la renuncia a todo recurso al pensamiento conceptual. Bohr presenta como ejemplo la extraordinaria facultad de los pueblos llamados primitivos para orientarse en la selva y en los desiertos, facultad que en apariencia se pierde en las sociedades más civilizadas, pero que puede reaparecer en ocasiones. Tales logros no son posibles, sostiene Bohr, sino por una renuncia al pensamiento conceptual.

Habría entonces una exclusión mutua entre las situaciones descritas por las palabras razón e instinto. Sin embargo, ambas palabras son necesarias para distinguir las diversas situaciones donde pueden encontrarse los seres humanos.

Complementariedad entre pensamiento y sentimiento

Bohr habla de complementariedad entre experiencias síquicas cuya descripción exige palabras como pensamientos y sentimientos, y presenta observaciones al respecto que parece considerar como evidentes. Dice que si intentamos analizar nuestras propias emociones, apenas las sentimos. Sostiene que la situación es similar a la del mundo atómico donde se tienen experiencias obtenidas mediante montajes diferentes y descritas por analogías extraídas de nuestras representaciones habituales.

Quizás podamos entender las ideas de Bohr al respecto mediante el siguiente análisis:

- Supongamos que experimentamos un sentimiento de volición. Con esa última palabra, o con palabras relacionadas con ella como las contenidas en la frase: "yo quiero esto", describimos la situación psicológica en que nos encontramos, nuestro contenido de conciencia. En esa situación no podemos decir "yo pienso por qué quiero esto".
- Supongamos que decidimos analizar nuestro sentimiento de volición. Al menos mientras dura el análisis la emoción apenas se siente. Podemos describir la situación diciendo: "reflexiono sobre por qué quiero esto". No la describiríamos realmente si dijésemos "yo quiero esto".

Bohr ha propuesto algunas otras aplicaciones de la complementariedad aunque con menos fuerza de convicción. Preferimos dejar de lado la crítica a esas propuestas y explorar extensiones de la complementariedad diferentes a las sugeridas por él.

Complementariedad en moral

Aún suponiendo que en la biología no se precisan de consideraciones finalistas - usando causas finales - pues expresiones como el "ojo está hecho para ver" pueden ser consideradas sólo como formas abreviadas para una descripción mecanística - que utiliza únicamente causas eficientes - en términos de embriología y selección natural, todavía es posible hablar de una complementariedad con respecto al ser humano.

En efecto: como ser vivo, puede estudiarse con los instrumentos científicos de la física, la química y la biología, sin referencia a causas finales. Por otra parte, todo ser humano percibe su mente, y su contenido aparece finalista. El mismo objeto, el ser humano, debe describirse entonces por medio de dos redes de conceptos que se excluyen mutuamente: la red asociada con una descripción puramente en términos de causas eficientes, donde no hay lugar para consideraciones finalistas, y la red asociada con causas finales, con propósitos, con decisiones morales.

Hay que aclarar aquí que en mecánica clásica el determinismo, como vimos, es incompatible con el libre albedrío esencial a toda descripción moral. Ahora bien, el hecho de que en mecánica cuántica no se tenga determinismo no significa que quepa en la descripción cuántica ninguna concepción finalista. Las probabilidades en mecánica cuántica

están perfectamente determinadas por la dinámica. Allí no hay nada similar al libre albedrío.

¿Cambia la situación si se considera que finalmente en biología son necesarios conceptos teleológicos? La respuesta es negativa pues el tipo de teleología que estamos aquí considerando respecto al ser humano es la relacionada con el libre albedrío, con aquello que le da sentido a la responsabilidad moral. Un animal, aún si se llega científicamente a la conclusión de que como ser vivo obedece a la teleología, no es responsable moralmente de sus acciones. La posible teleología asociada con él se relaciona con la manera de entenderlo como organismo, y como organismo que evoluciona, y no con un libre albedrío del cual carece.

Tendríamos entonces que la antinomia entre una descripción científica del ser humano, donde no tienen cabida consideraciones morales, y su descripción como un ser moral, se resolvería en el marco de la complementariedad. La red de conceptos asociada con la descripción científica sería mutuamente excluyente con la red de conceptos asociada con la descripción moral. Ambas redes son sin embargo necesarias para agotar toda la complejidad del ser humano, complejidad asociada con la relación de indivisibilidad entre la mente y el cuerpo en este plano material.

Complementariedad entre las culturas humanística y científica

Podemos tratar de aplicar el concepto de complementariedad a un debate que recorre el mundo académico y que consiste en la prioridad relativa de las disciplinas científicas y humanísticas. No es necesario insistir en que tal debate existe y se expresa a veces en términos virulentos. Se puede seguir el concepto de C.P. Snow de las "dos culturas" hasta su manifestación en los ataques de algunos científicos a las disciplinas humanísticas calificadas como "alta superstición". Sin embargo, hoy en día es claro que las hostilidades a lo largo de la línea divisoria entre las disciplinas pueden ser peligrosas y dañinas, en una situación donde los problemas centrales que enfrenta la humanidad implican aspectos tanto científicos como humanos.

En tanto se siga insistiendo en la supuesta existencia de un solo conjunto de métodos y principios que regulen todo conocimiento válido, es imposible una coexistencia pacífica y productiva entre las disciplinas humanísticas y científicas. La razón es que los dos dominios se basan en suposiciones básicas radicalmente diferentes. Uno de los puntos centrales de la diferencia es, de nuevo, el uso de consideraciones teleológicas. En ciencias naturales se rechaza explícitamente la teleología. En las disciplinas humanísticas, por el contrario, la teleología es indispensable: no se puede llegar a ningún entendimiento de los asuntos humanos sin recurrir a conceptos como volición y propósito. Y, en particular, como lo dijimos en la sección anterior, no es posible formular ningún precepto moral aceptable sin el uso de términos finalistas.

Complementariedad y la relación mente y cuerpo

A partir de la separación que hizo Descartes entre la cosa extensa y la cosa pensante, la filosofía occidental ha estado envuelta en un intento desesperado por determinar, de una vez y para siempre, cuál de los dos, el cuerpo o la mente, existen realmente, o, si ambos existen, cuál es la relación exacta entre ellos. En términos de la complementariedad, el cuerpo, incluido el cerebro, se puede estudiar por medio de las ciencias naturales, que no envuelven términos finalistas. Por otra parte, los más importantes aspectos de la experiencia subjetiva de la mente aparecen como finalistas: yo quiero, yo escojo, yo espero. Pero la distinción entre la mente y el cuerpo no es entre dos sustancias que existen separadamente en el mundo: en el ser humano vivo aparecen siempre juntas. Así, podemos considerar el lenguaje del cuerpo, la red de conceptos asociada con él, y el lenguaje de la mente, la red de conceptos asociada con ella, como dos diferentes descripciones de la misma entidad, que se aplican en contextos mutuamente excluyentes. Las suposiciones básicas de cada una de esas redes de conceptos son contradictorias, no se pueden aplicar a la vez, pero cada una de ellas es aplicable en distintos contextos.

Para terminar, vale la pena recordar lo que dijimos más arriba en relación con la complementariedad en moral. Las dos últimas extensiones de la complementariedad que hemos propuesto se basan en las descripciones mecanísticas y teleológicas con respecto al ser humano. Hemos expresado nuestras consideraciones en una forma que se basa en el supuesto de que no es válida una descripción finalista en biología. Sin embargo, nuestras propuestas se formulan de igual modo aún si resulta que en biología son necesarias tales consideraciones, pues la teleología que está en juego en nuestros análisis es la asociada exclusivamente con el ser humano, aquella que tiene que ver con el libre albedrío.

CAPÍTULO 9. COMPLEMENTARIEDAD Y COMPLEJIDAD

Introducción

Un aspecto del reduccionismo mecanicista es la supuesta reducción de lo complejo a lo simple, que equivale a decir que lo complejo no es más que una mera apariencia. Expliquemos esto con un poco más de detalle.

En el lenguaje ordinario se considera simple aquello que no está compuesto, lo elemental, o lo formado por un pequeño número de elementos o partes. También lo que es fácil de entender. Lo complejo, en cambio, es lo que está compuesto por muchos elementos diversos. Indica igualmente lo complicado. La complejidad de un todo hecho de muchas partes relacionadas entre sí significa que no se conocen perfectamente ni la naturaleza ni el grado de la relación entre las partes.

Es claro que para que algo sea complejo debe estar compuesto de muchas partes en interacción. Sin embargo un gas diluido está compuesto de un número enorme de elementos y comparado con un copo de nieve o con un ser vivo nos parece muy simple. Debe existir entonces un tipo de comportamiento que puede calificarse de complejo. Y mejor que hablar de sistemas complejos será referirnos a comportamientos complejos.

En la física, las leyes consideradas como fundamentales, las de la mecánica clásica, las de la mecánica cuántica, son simples en el sentido de ser pocas e involucrar pocos entes matemáticos. El hecho de que el lenguaje en que se expresan sea abstracto y requiera varios años de estudio para su dominio no significa que las leyes en sí sean complejas. Los ejemplos mediante los cuales se ilustran tales leyes a los estudiantes también son simples: pocos elementos y pocas interacciones. Se entiende que los fenómenos reales son mucho más complejos que esos ejemplos pero que finalmente se reducen a las leyes fundamentales que son simples. Entre las ideas implícitas que se transmiten por medio de la educación y que luego se convierten en intuitivas, están entonces: la idea de que las leyes fundamentales son simples, y la idea de que lo complejo se reduce a lo simple.

La segunda idea significa en el fondo que la complejidad de los fenómenos reales se debe a que las relaciones entre las partes son mal conocidas, pero que una vez lo sean, y en principio pueden serlo, se recobrará la simplicidad, se reducirá lo complejo a lo simple. Esto nos lleva a una tercera idea que se vuelve también intuitiva, según la cual la realidad es simple. La complejidad es una apariencia.

La supuesta reducción de las formas de la naturaleza a formas regulares está ligada con la idea de que lo complejo se reduce a lo simple, de que la complejidad es sólo aparente: la complejidad de las nubes, de la turbulencia,...., es sólo apariencia, para el físico entrenado todo aparece fundamentalmente simple.

Veremos en este capítulo que sistemas físicos con muchas componentes, y aun sistemas simples, pueden mostrar, en determinados contextos o circunstancias experimentales, un cierto comportamiento, el comportamiento complejo, el cual difícilmente se puede

enmarcar en el mecanicismo. Queremos precisar en este capítulo cuáles son las características de ese comportamiento y su choque con el mecanicismo. Exploraremos también la relación entre complejidad y complementariedad.

Sistemas caóticos. El efecto mariposa

En el área conocida como la complejidad se pueden identificar tres líneas de desarrollo principales: el caos, los fractales y los estudios propiamente de lo complejo. Comenzaremos con el estudio de la primera línea: el caos o estudio de los sistemas con comportamiento caótico.

Dijimos en el capítulo tercero que uno de los aspectos del mecanicismo era el determinismo estricto, que se puede expresar diciendo que existe un estado objetivo del mundo y que su estado presente determina totalmente su estado futuro. Las ecuaciones de la mecánica clásica muestran este aspecto determinista pues ellas, junto con un conocimiento preciso del estado del sistema en un momento inicial, permiten conocer con certeza el estado del sistema en cualquier instante posterior e igualmente en cualquier instante anterior. El estado inicial se conoce también como las condiciones iniciales. Se tiene entonces que las ecuaciones, junto con el conocimiento de las condiciones iniciales, dan como resultado el determinismo total. Para los sistemas regidos por la mecánica clásica el pasado y el futuro están contenidos en el presente.

Analicemos de nuevo este asunto del determinismo total. Sabemos que el determinismo está ligado con el objetivismo o realismo, pues la aceptación en principio de la posibilidad de conocer con precisión infinita el estado inicial del sistema implica que se acepta la noción de un estado objetivo, en sí, independiente de la existencia y del conocimiento del observador. Sin la noción de estado objetivo, aún con la existencia de ecuaciones diferenciales continuas, no se tendrá determinismo. Decir que se tiene determinismo debido a que las ecuaciones son deterministas, en el sentido de que a partir de unas condiciones iniciales dadas se pueden determinar con certezas las condiciones posteriores, es fuente de malentendidos, pues es necesario también que tales condiciones sean posibles de conocer al menos en principio, lo que en el caso de la física significa la aceptación de la noción de estado objetivo. En la mecánica cuántica, en su interpretación ortodoxa, no se sostiene la noción de estado objetivo y por lo tanto no se tiene determinismo a pesar de que las ecuaciones son "deterministas" o "causales".

Profundicemos más este asunto: ¿Qué significa aceptar que en principio se puede obtener una información infinitamente precisa del estado del sistema? En la práctica esto jamás se obtiene. Como lo vimos en el capítulo tercero, Laplace imagina una "Inteligencia suprema" que sí lo puede. Recordemos sus propias palabras:

"(...) tal inteligencia incluiría en la misma fórmula el movimiento de los grandes cuerpos del universo y el de los más ligeros átomos; para tal inteligencia nada sería incierto y el futuro, al igual que el pasado, estaría presente ante sus ojos".

O sea, esta Inteligencia puede observar el estado en sí, puede observar "desde afuera" el sistema, puede separarse totalmente de él. ¿De dónde viene ese convencimiento de que existe un estado objetivo posible de conocer, si no en la práctica sí en principio?

Para los sistemas clásicos estables, que se pensaba constituían la regla, el hecho de que en la práctica siempre haya una imprecisión en el conocimiento de las condiciones iniciales no tiene consecuencias, en el sentido de que las predicciones van a tener la misma imprecisión. La diferencia entre dos estados iniciales cercanos lleva a predicciones de estados finales igualmente cercanos. Por ello se considera que no hay necesidad de llegar a una precisión infinita para hacer predicciones con una precisión por debajo de lo que detectan nuestros aparatos. Siempre podemos mejorar nuestras predicciones sin necesidad de llegar al límite de precisión infinita en las condiciones iniciales. Para conocer, por ejemplo, la posición final de un cohete con una precisión veinte veces mejor, basta conocer las condiciones iniciales con una precisión veinte veces mayor. Los límites a la precisión de los estados finales los coloca solamente la tecnología del momento.

Sin embargo, Poincaré descubrió a principios de siglo lo que hoy se conoce como sistemas con inestabilidad dinámica o sistemas caóticos. Para tales sistemas, dos conjuntos de condiciones iniciales tan cercanos que en la práctica sean indistinguibles darán como resultado estados futuros enormemente diferentes. No importa en la práctica cuán preciso se haga el conocimiento de las condiciones iniciales, en tanto exista una imprecisión tan pequeña como se quiera, la imprecisión del estado futura crecerá exponencialmente con el tiempo. Esta sensibilidad a las condiciones iniciales significa que la única manera en que se pueden hacer predicciones a largo plazo con algún grado de precisión es conociendo con precisión absolutamente infinita las condiciones iniciales.

¿Es posible para tales sistemas caóticos seguir sosteniendo las ideas de estado objetivo y de determinismo? ¿Es posible seguir imaginando la Inteligencia suprema de Laplace? Estrictamente sí, pues, como se dijo en el capítulo 2, se puede suponer que tal Inteligencia puede llegar a la precisión infinita, lo que significa que puede pasar al límite matemático de conocer un punto sin dimensiones en el espacio de fase. Es claro que esta nueva Inteligencia es mucho menos humana que la original, que sólo precisaba tener sentidos mucho más potentes que los de un ser humano y podía ser simplemente un potente computador, para hablar en términos de la tecnología contemporánea.

De hecho, John von Neumann, uno de los fundadores de la cibernética, parece que construyó su primer computador con el fin de lograr un control sobre el clima, bajo el supuesto determinista de que conociendo y procesando suficientes datos sobre la atmósfera se lograrían predicciones del clima cada vez mejores, logrando liberar a la humanidad del sometimiento a las turbulencias climáticas. Vale la pena anotar que uno de los desarrollos que impulsaron los estudios de lo complejo fue el descubrimiento hecho por el meteorólogo Edward Lorenz, quien escribió un modelo sencillo de computador relacionando las variables relevantes en el estudio del clima y se encontró con el carácter caótico de la atmósfera. El hecho de que la atmósfera sea un sistema sensible a las condiciones iniciales significa que, aún si fuese posible llenar toda la atmósfera de la tierra con un enorme arreglo de instrumentos de medida, no sería posible hacer predicciones a largo plazo, puesto que siempre habría alguna imprecisión en las medidas de los instrumentos, y la

naturaleza caótica de la atmósfera haría que estas imprecisiones se ampliaran exponencialmente con el tiempo.

Lo anterior ha dado origen a la metáfora conocida como el efecto mariposa: el que una mariposa bata o no sus alas en algún lugar del mundo (pequeña perturbación) puede definir si sucede o no una tormenta en algún otro lugar del mundo.

Volviendo a la nueva Inteligencia suprema, como dijimos ésta tiene que poder conocer un punto sin dimensiones, que para un ser humano no constituye más que una abstracción. Para sistemas caóticos, el determinismo estricto no tiene entonces la misma fuerza de convicción que para sistemas estables y ello a pesar de que las ecuaciones son deterministas.

Nótese que cuando Poincaré hizo su descubrimiento, el mecanicismo hacía aproximadamente un siglo que había quedado firmemente establecido. Los sistemas con inestabilidad dinámica pasaron a ser considerados en física como una rareza matemática, a pesar de que Poincaré mostró que bastaba considerar tres o más cuerpos astronómicos en interacción para tener la posibilidad de un sistema caótico. El hecho de que por esa época se descubrieron los fenómenos cuánticos que, como vimos, en un sentido devastaban el edificio de la física clásica, quizás contribuyó a que, en general, la atención de los físicos sólo viniese a enfocarse hacia los sistemas con inestabilidad dinámica a partir de la década del 60 del siglo XX.

Cuando se habla de esto - el efecto mariposa - con la gente que no estudia ciencias, no se muestran sorprendidos, pues dicen que así es la vida: pequeñas diferencias al principio pueden producir al final grandes diferencias; de ese tipo de cosas estamos enseñados a ver en la vida. Quienes estarán más sorprendidos son aquellos que ya han empezado a estudiar física. Pues ellos sí sentirán que se está yendo en contra de su intuición física.

Vale la pena hacer aquí una anotación acerca de la intuición cotidiana. En muchos libros de mecánica cuántica se da a entender que la mecánica clásica es de sentido común. Que los objetos de la vida diaria se comportan así como los describe la mecánica clásica, y que la mecánica cuántica es contraintuitiva. Esta afirmación es muy sorprendente. En primer lugar, si la mecánica clásica es tan intuitiva que podemos verla funcionando en la vida diaria, ¿por qué hubo que esperar hasta el siglo XVII para desarrollarla?. ¿Es por qué la gente de la antigüedad y de la edad media estaba loca o era estúpida? Pero hemos visto qué grandes pensadores se tuvo en la antigua Grecia, y en la edad media hubo también gente muy brillante, gente que hizo grandes construcciones tanto materiales como mentales. Si cuando tales personas miraban el mundo y no veían allí las leyes de Newton, ello se debe a que no son intuitivas.

Para darse cuenta de lo bien fundado de nuestra afirmación sobre el carácter no intuitivo de la mecánica clásica, basta enseñar física en el ámbito de secundaria, o trabajar en la escritura de un manual de mecánica clásica para ese nivel. Si fuera tan intuitiva, no se explicarían las enormes dificultades de los estudiantes para entenderla y aprenderla.

Si en muchos de los textos se deja entender de modo implícito o explícito que la mecánica clásica es intuitiva, ello se debe a que son escritos por físicos, que desde la secundaria han comenzado a estudiarla y a entrenarse para ver el mundo a través de los conceptos clásicos, hasta que desarrollan una intuición, que finalmente es una conaintuición comparada con lo que ve la mayoría de la gente. Esta idea de que la mecánica clásica es intuitiva es compartida por un pequeño grupo de seres humanos que son precisamente los que escriben la mayoría de los textos de física. Se debe entonces ser muy cuidadosos cuando se habla de intuición cotidiana, de sentido común, pues aún dentro de una misma cultura no todos comparten lo mismo. El sentido común y la intuición natural son constructos sociales y culturales.

Fractales

La segunda línea de investigación es la de los fractales. Comencemos su estudio con algunas ideas muy sencillas.

Continuidad y derivabilidad en física clásica

El concepto de curva continua y derivable es fundamental en física clásica. Lo presuponen las ideas de velocidad y de aceleración. Se supone que las curvas en la naturaleza se pueden aproximar o describir por curvas regulares y lo mismo se aplica para áreas y volúmenes. Se considera que en la naturaleza todo se mueve de manera continua. Así, funciones en todas partes continuas pero no derivables se han considerado sólo entes matemáticos que no se dan en la realidad física. Tratemos, sin embargo, de responder la pregunta que encabeza la siguiente sección.

¿Cuál es la longitud de una costa marítima?

Desde un cierto punto de vista la longitud es infinita; desde otro punto de vista depende de la regla con que se mide. Supongamos que la regla mide un metro. El número de metros que se obtendrá será una aproximación a la longitud real, pues entre un extremo y otro de la regla habrá una serie de codos y recodos menores que un metro. Si ahora se toma una regla de medio metro, la longitud medida será mayor, abarcará más detalles, pero todavía se tratará de una aproximación. Y así podemos continuar disminuyendo la longitud de la regla, con lo que se encontrará cada vez una longitud mayor para la costa. Si la forma de esta última fuese una curva regular, obtendríamos en el límite en que la longitud de la regla tiende a cero su longitud. Mandelbrot descubrió, sin embargo, que cada vez que la escala de medida disminuía, la longitud de la costa marítima crecía sin límites, pues cada recodo contenía nuevos recodos cada vez más pequeños. O sea que a medida que analizamos la costa en una escala menor, aparece una estructura similar a la que se observa en la escala mayor. Es decir que la figura aparece similar en cada escala. Por ello su longitud aumenta sin límites.

Si pretendemos cubrir una costa marítima con una línea unidimensional no lo lograremos entonces. Existe sin embargo una clase de objetos geométricos, descubierta por Mandelbrot, que en cierto modo puede hacer el trabajo: un fractal (del latín fractus: quebrado, irregular). Un fractal es una figura autosemejante en el sentido de que si se le observa en una escala cada vez más fina, parece doblarse y retorcerse tanto como cuando se la mira en la escala original de baja resolución. Si se cubre una superficie con una curva fractal, se obtendrá una curva de longitud infinita que cubre un área finita.

Hay otra característica de un fractal y es que su dimensión no es un número entero. ¿Cómo podemos entender esto? Nuestra idea más intuitiva de la dimensión de un objeto es que es el número de datos que tenemos que dar para ubicar un punto en el objeto. Consideremos una línea, escogemos un origen y con relación a ese origen podemos ubicar cualquier punto de la línea. ¿Cuántos datos necesitamos para ello? ¿Cuántos números hay que dar? Uno, ¿verdad? Decimos entonces que la dimensión de la línea es uno. Si consideramos un plano, es preciso dar dos números para ubicar cualquier de sus puntos relativos a un origen. Decimos que su dimensión dos. Entonces, ¿qué sentido puede tener una dimensión que no es un número entero? Es preciso dar una definición más general de dimensión que se reduzca a la noción intuitiva en el caso de las figuras que conocemos y que no sea un entero en el caso de un fractal. Veamos cómo obtener esa generalización de la noción de dimensión.

Consideremos una figura como las que conocemos en geometría, un cuadrado de un metro cuadrado de área, por ejemplo. Tratemos de darle una estructura fractal, o sea tratemos de darle una estructura autosemejante, que se repita a cualquier escala. Lo podemos hacer mediante un procedimiento sencillo: se toma el cuadrado y se construyen dentro de él 4 cuadrados iguales de área igual a $1/4$ de su área. Se repite la operación para cada pequeño cuadrado y así sucesivamente. Obtenemos entonces una figura invariante a escala, pues cada vez que se mira a una escala menor, o sea se amplifica la figura, vemos la misma estructura.

Podemos considerar que el procedimiento descrito arriba tiene lugar por etapas. En la etapa cero tenemos el cuadrado original, en la etapa 1 está dividido en cuatro cuadrados iguales, en la etapa 2 está dividido en 16 cuadrados iguales y así sucesivamente.

Imaginemos que vamos a medir el área con instrumentos de medida de diferente tamaño. Comenzamos con un instrumento que es un cuadrado de un metro cuadrado de área. Obviamente sólo necesitamos colocarlo una vez y obtenemos el área de un metro cuadrado.

Supongamos ahora que disminuimos la escala de nuestro instrumento de medida en $1/2$, o sea tomamos un cuadrado de $1/2$ metro de lado, o sea de área igual a $1/4$ del área del primer instrumento. Necesitamos colocarlo cuatro veces. Obviamente obtenemos la misma área. Si llamamos e a la escala y n el número de veces que tenemos que colocar el instrumento, obtenemos en el caso del segundo instrumento que $e = 1/2$ y $n = 4$.

Supongamos ahora que de nuevo disminuimos la escala relativa al primer instrumento y tomamos un cuadrado de $1/4$ de metro de lado. O sea, tomamos $e = 1/4$. Necesitamos colocar el instrumento 16 veces, o sea que $n = 16$.

Nótese que se obtiene una relación entre e y n . En efecto: para el caso $e = 1/2$ y $n = 4$ se tiene que 4 es igual a 1 dividido por $1/2$ y todo elevado al cuadrado. O sea que:

$$n = (1/e)^2$$

Igual relación se obtiene para el caso $e = 1/4$ y $n = 16$. Y si continuamos el procedimiento de ir disminuyendo la escala del instrumento de medida obtendremos lo mismo. Obviamente en cada caso el área obtenida es la misma. ¿Cuál es la relevancia de este aparente juego? La relevancia viene del hecho de que el exponente que aparece en la ecuación es la dimensión del cuadrado. Si llamamos d a la dimensión la ecuación queda en la forma:

$$n = (1/e)^d$$

Es posible hacer el ejercicio para cualquier figura de la geometría que conocemos y obtenemos la misma relación entre n , e , y d . Podemos en efecto tomar un cubo de 1 metro de lado y dividirlo primero en 8 cubos iguales. Luego hacemos lo mismo con cada uno de los 8 cubos y obtenemos en total 64 cubos iguales y así sucesivamente. La figura tiene autosemejanza. Comenzamos entonces nuestro proceso de medida del volumen con un cubo de 1 metro de lado. Disminuimos la escala por $1/2$ y entonces necesitamos colocarlo 8 veces. O sea que se tiene $e = 1/2$ y $n = 8$. Si disminuimos ahora la escala por $1/4$ respecto al primer instrumento, debemos colocar el nuevo instrumento 64 veces. Es fácil comprobar que entre n , e , y d se tiene de nuevo la ecuación:

$$n = (1/e)^d$$

donde d vale ahora 3.

Para tales figuras el d es un número entero, lo que se espera obviamente. Como la dimensión es entera, las figuras, a pesar de que tienen autosemejanza, no cumplen la segunda condición para ser fractales.

Apliquemos ahora el procedimiento anterior a un fractal. Para ello necesitamos presentar un fractal. Veamos la llamada curva de Koch. Se obtiene en la forma que se describe a continuación.

Se toma un segmento de línea de longitud uno. Se divide en tres intervalos iguales. Se retira el de la mitad y se reemplaza por dos segmentos de longitud $1/3$. Se obtiene:



Figura 9.1

Supongamos ahora que se continúa el mismo procedimiento con cada una de las cuatro líneas. Es fácil ver que se van obteniendo las figuras que se muestran a continuación:

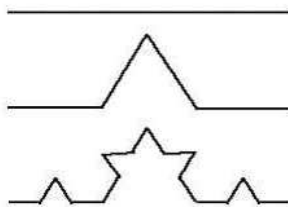


Figura 9.2

La línea es la etapa 0.

En etapas posteriores la figura aparece como:



Figura 9.3

Si cerramos la línea obtenemos el "copo de nieve" de Kock:

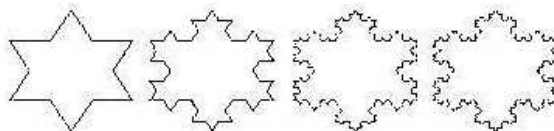


Figura 9.4

No es difícil ver que la longitud de la curva de Koch aumenta sin límites. O sea tiene longitud infinita. Sin embargo, como lo muestra el "copo de nieve", esa curva infinita puede encerrar un área finita. Vemos entonces por qué una curva fractal es un buen modelo para una costa marítima.

Efectuemos ahora en la curva de Koch el proceso de medida que describimos más arriba. Consideremos la etapa dos en la construcción de ese fractal:



Figura 9.5

Queremos medir su longitud. Comenzamos con una regla de una longitud igual a uno. Obviamente sólo podemos colocar la regla una vez y obtenemos una longitud de uno.

Supongamos que disminuimos la escala y tomamos una regla de $1/3$ de la longitud de la regla original. Podemos colocarla 4 veces. O sea que tenemos $e = 1/3$ y $n = 4$. La longitud que obtenemos es $4/3$, que es mayor que uno. La longitud medida aumenta con nuestra nueva regla.

Disminuyamos de nuevo la escala de la regla de medida y tomemos una de longitud igual a $1/9$ de la longitud de la primera regla. Podemos colocarla 16 veces. O sea que tenemos que $e = 1/9$ y $n = 16$. La longitud que obtenemos es ahora igual a $16/9$ que es mayor que $4/3$. Es fácil ver que a medida que disminuimos el largo de la regla la longitud de la curva crece sin límites.

Tenemos ahora que averiguar qué valor se obtiene para d si aplicamos a los dos pares de valores de e y de n obtenidos la ecuación:

$$n = (1/e)^d$$

Un cálculo sencillo da como resultado que $d = 1,2619$ que es un valor entre 1 y 2.

El procedimiento descrito funciona para fractales que al verlos amplificados aparecen exactamente iguales, como es el caso de la curva de Koch. Sin embargo, la autosemejanza de los fractales significa únicamente que al verlos ampliados aparecen con una estructura similar. Un caso particular se da cuando aparecen exactamente iguales. Para fractales que no aparecen, al ampliarlos, exactamente iguales, es posible generalizar un poco más la noción de dimensión.

Mandelbrot encontró ese nuevo tipo de geometría, la geometría fractal, en muchas áreas. Hoy en día encontramos los fractales en diversos dominios: en las estructuras de las nubes, en los cráteres de la luna, en los árboles, en las colonias de microbios, en el cuerpo humano, en la turbulencia, en el humo de los cigarrillos. En imágenes artísticas encontramos fractales. Al igual que sucede con los sistemas caóticos nos encontramos los fractales por todas partes. Excepto en los textos de física estándar, que están escritos bajo el supuesto de que, como dijimos antes, en la naturaleza todo se mueve de manera continua y derivable. Sin embargo, si observamos el mundo, veremos que es sólo en nuestra imaginación, con nuestras simplificaciones, donde las cosas aparecen suaves y derivables. En la naturaleza casi todo es fractal y caótico. Se requiere entonces un cambio radical de perspectiva. La naturaleza no ha cambiado, lo que está cambiando es nuestra visión de la naturaleza. Hoy

en día si vemos una nube vemos un fractal. Pero las personas, salvo quienes han visto el mundo con los ojos del mecanicismo, siempre han mirado la naturaleza y han visto la estructura fractal y la han expresado en el arte. Como sucede con el efecto mariposa, con el caos, cuando se habla de fractales con personas que no están en el área de la ciencia, no se sorprenden mucho, porque dicen que así es la vida, uno ve algo y se acerca más y ve más y más detalles, ve similitud en lo grande y lo pequeño. De nuevo el mecanicismo se muestra como contraintuitivo.

Fractales y caos

Hay una relación entre los fractales y los sistemas caóticos. Para entenderla de manera fácil, debemos ampliar un poco la noción de estado del sistema. El estado de un sistema en mecánica clásica se especifica mediante las posiciones y las velocidades de las partículas que componen el sistema. O sea que el estado se representa por una serie de números. Imaginemos el sistema más sencillo, una partícula. En general necesitamos tres números para especificar su posición en un sistema de coordenadas dado, e igualmente se precisan tres números para la velocidad. En total son 6 números. Si el sistema tiene N partículas, el estado de cada una requiere 6 números. Para especificar el estado de todo el sistema se precisan entonces $6N$ números.

Los números que especifican el estado se pueden representar en un espacio abstracto que se llama el espacio de fase del sistema. Consideremos de nuevo una partícula y supongamos que se mueve en línea recta. ¿Cuántos números se requieren para indicar su posición? Si escogemos un sistema de coordenadas de modo que el eje x coincida con la línea recta en que se mueve la partícula, sólo necesitamos un número pues la partícula únicamente tendrá coordenada x . Lo mismo se aplica para la velocidad. Se precisan entonces dos números para indicar el estado de la partícula. El espacio de fase será entonces un plano y cada punto en el plano representará un estado del sistema. La figura 9.6 muestra el espacio de fase. Hemos indicado el eje horizontal con la letra q . Allí se representan los valores de la posición de la partícula. En el eje vertical, indicado por p , se representan los valores de la velocidad.

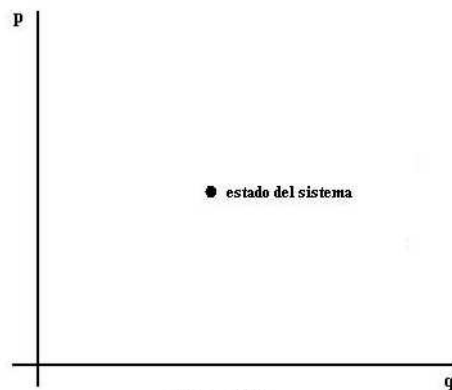


Figura 9.6

Ahora bien, sabemos que en general se necesitan $6N$ números para indicar el estado de un sistema de N partículas. O sea que el espacio de fase tendrá $6N$ dimensiones. Obviamente no nos es posible representar en una gráfica un espacio de fase de mas de tres dimensiones. Sin embargo podemos simbólicamente representar un espacio de cualquier dimensión por medio de un plano como el de la figura 9.6, tomando la variable q como un símbolo de las coordenadas del sistema, y la variable p como un símbolo de las velocidades. El plano p - q representará entonces el espacio de fase. Podemos utilizar nuestro plano simbólico para ilustrar gráficamente el determinismo, los sistemas estables y los sistemas caóticos.

El determinismo, como sabemos, significa que si conozco las ecuaciones con todas las fuerzas en acción y el estado inicial, o sea el estado a un tiempo t que tomamos como cero, me es posible en principio conocer con precisión el estado en cualquier tiempo posterior, o sea a un tiempo $t > 0$. Esto significa que puedo conocer la trayectoria del sistema entre el tiempo inicial y el tiempo final, pues la trayectoria no es más que el conjunto de todos los estados que el sistema va ocupando entre el tiempo inicial y el final. Como cada punto de la trayectoria está totalmente determinado por los puntos anteriores, la trayectoria será única. La figura 9.7 ilustra la idea.

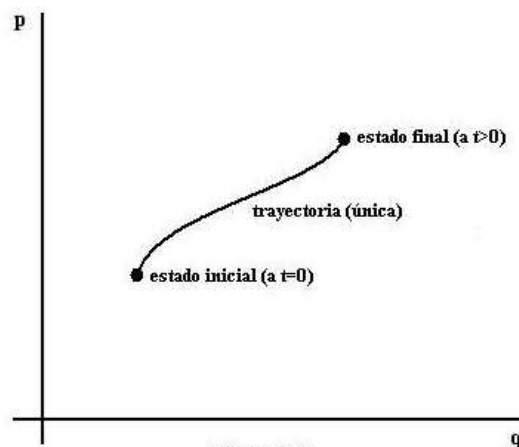


Figura 9.7

Sabemos también que en la práctica no nos es posible conocer con precisión el estado del sistema, o sea no podemos determinar exactamente cuál es el punto en el espacio de fase correspondiente a su estado.

Con la información que tenemos en la práctica sobre el sistema, sólo podemos determinar una región en el espacio de fase, que contiene puntos representando estados del sistema compatibles con nuestra información. Cuánta más información tengamos, menor será la región en el espacio de fase. Si pudiésemos tener toda la información sobre el estado del sistema, la región se reduciría a un punto, aquel que representa el estado del sistema.

En los sistemas estables, el hecho de no conocer con certeza el estado inicial del sistema tiene como única consecuencia el que las predicciones acerca del estado final tampoco son precisas. O sea que tampoco podemos asignar un punto para el tiempo final sino sólo una región.

Sin embargo, las dos regiones, la que conocemos inicialmente y la que predecimos, son del mismo orden, o sea que tenemos el mismo grado de precisión para las predicciones que la que tenemos para el estado inicial, razón por la cual, si queremos mejorar nuestras predicciones nos basta mejorar el conocimiento del estado inicial. Todo se debe a que estados iniciales cercanos evolucionan a estados finales igualmente cercanos.

La figura 9.8 nos ilustra este punto. Los círculos representan las regiones inicial y final de que hablamos.

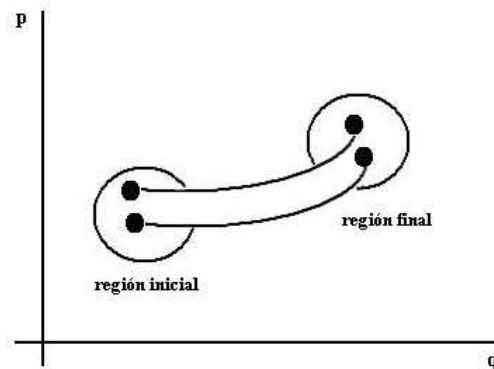


Figura 9.8

Es claro entonces que para hacer buenas predicciones no necesitamos conocer exactamente el punto en el espacio de fase ocupado por el sistema.

¿Qué sucede con los sistemas caóticos? Con los sistemas caóticos sucede que puntos inicialmente cercanos se van alejando exponencialmente con el paso del tiempo como se ilustra en la figura 9.9.

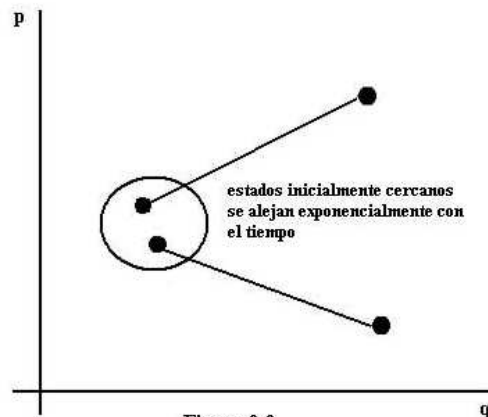


Figura 9.9

En el caso de sistemas caóticos sólo se pueden hacer buenas predicciones a corto plazo, cuando los estados todavía no se han alejado demasiado. La situación no mejora en esencia si hacemos más pequeña la región inicial. Lo único que cambia es que podemos entonces hacer buenas predicciones en un tiempo mayor. Por lo tanto, la única manera de hacer buenas predicciones para cualquier tiempo futuro es conociendo con exactitud el estado inicial.

Para ver la relación entre sistemas caóticos y los fractales imaginemos la siguiente situación. Supongamos que en la región inicial que conocemos del espacio de fase hay dos tipos de estados, que en la figura 9.10 indicamos por equis y por puntos respectivamente. Los estados equis evolucionan a estados finales que se alejan exponencialmente con el tiempo de los estados finales a que evolucionan los estados punto. Estados equis cercanos evolucionan sin embargo a estados finales cercanos y lo mismo sucede con los estados punto cercanos. La situación se ilustra en la figura 9.10.

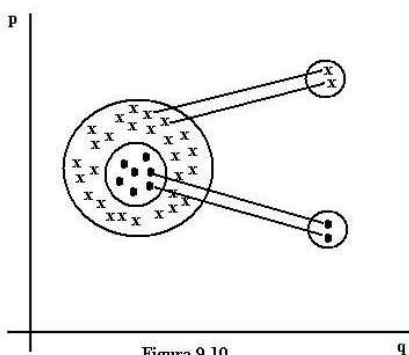


Figura 9.10

Es claro que si el grado de precisión con que conocemos la situación inicial corresponde a la región dada por el círculo mayor de la figura 9.10, nuestras predicciones a largo plazo no serán muy buenas. En efecto: sólo conocemos que el estado es uno de los que están dentro del círculo mayor. Pero sucede que allí hay dos tipos de estados cuya evolución se aleja con el tiempo. Entonces ¿cómo podemos dilucidar si el estado final va a estar dentro de las regiones que rodean los estados finales de los estados punto o dentro de las que rodean los estados finales de los estados equis? La situación sin embargo no es desesperada; nos basta mejorar nuestro conocimiento inicial, ya que si tomamos regiones lo suficientemente pequeñas, finalmente tendremos regiones donde únicamente se tendrán estados de un solo tipo. Si nuestra región, por ejemplo, corresponde al círculo pequeño interior, sólo tendremos estados punto.

Supongamos ahora que los estados equis y los estados punto están íntimamente entremezclados como se ilustra en la figura 9.11.

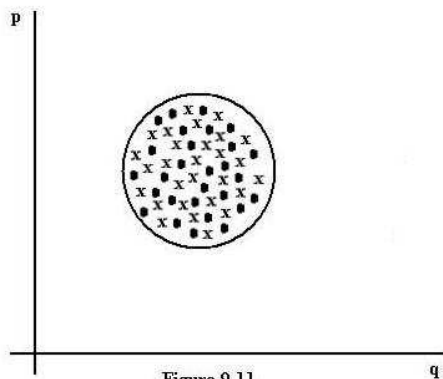


Figura 9.11

La situación es más complicada que la ilustrada en la figura 9.10. Sin embargo podemos afirmar que en principio nada cambia. Basta tomar regiones cada vez más pequeñas para

separar los estados equis de los estados punto. Ahora bien, supongamos que la región de la figura 9.11 tiene una estructura fractal. Ello significa que si tomamos una parte de ella más pequeña veremos la misma situación de estados equis y estados punto íntimamente mezclados. O sea que no es posible, mejorando la precisión inicial, encontrar regiones donde únicamente se tengan estados de un solo tipo. En conclusión: tal estructura fractal del espacio de fases implica que el sistema es caótico.

Fenómenos o comportamientos complejos

La tercera línea de investigación, que se denomina estudios de lo complejo, es bastante nueva, comenzó a fines de 1980. Las investigaciones más recientes se han llevado a cabo en el Instituto de Santa Fe en Nuevo México, Estados Unidos. Lo que se está tratando de entender son sistemas en que hay muchos participantes, sistemas que muestran un comportamiento que es completamente inesperado, que es precisamente lo común en todos ellos.

En los estudios de la complejidad lo que se encuentra es un orden que emerge de un sistema supremamente complejo en el sentido de estar compuesto por muchas partes en interacción. Ese orden que emerge es un tipo de autoordenamiento. O sea que es un orden que no se encuentra al principio sino que va emergiendo como resultado al final. Veamos un par de ejemplos para ilustrar la noción de complejidad.

La simulación de las redes neurales

Una red neural es una estructura virtual en la cual se tienen celdas que pueden tener en el caso más sencillo dos estados posibles, que llamaremos 1 y 0. Se puede hacer la simulación con decenas, o a lo más con centenares de estas celdas y se asigna a cada una de ellas de manera aleatoria los estados 1 o 0. La simulación se lleva a cabo por etapas en cada una de las cuales se prescribe que el estado de cada celda dependa de las celdas vecinas por medio de un algoritmo que está fijo; por ejemplo un algoritmo que especifique que al número de estado de cada celda le añada el número del estado correspondiente a las celdas vecinas multiplicado por un factor llamado la fuerza de sinapsis.

Se supone que una red neural es similar a la estructura del cerebro que tiene células interconectadas por sinapsis. Hay que tener en cuenta sin embargo que lo que se tiene hasta ahora son estructuras muy sencillas. En el cerebro tenemos 100.000 billones de neuronas y cada una de ellas puede tener varios millones de sinapsis, y cada neurona tiene una estructura muy compleja. Pero aún con esta simulación tan sencilla podemos encontrar varios tipos de comportamientos interesantes que emergen.

Se deja entonces que la simulación corra bastante tiempo y se permite que la fuerza de sinapsis también cambie. Sabemos que en el cerebro la sinapsis cambia según lo que suceda en el resto del cerebro. En la red neural se puede dejar que la fuerza de sinapsis cambie

según el estado de las celdas. Lo que se encuentra son regiones enteras de la red en las cuales surge un orden particular. Por ejemplo: una región entera va fluctuando entre 0 y 1, o sea que fluctúan todas las celdas de la región, mientras que en otra región se va a encontrar un comportamiento caótico aleatorio.

Ahora bien, si se pone una señal de entrada en algunas de las celdas y esas señales son aleatorias, podemos encontrar que una región que antes era caótica, ahora se comporta de una manera ordenada. Esto es contraintuitivo por que se deja entrar una señal caótica y esto genera estructuras ordenadas.

Este tipo de estructuras se supone que simulan el cerebro y a pesar de que se trata de modelos muy sencillos parece que estamos aprendiendo algo relevante, pues hoy en día los sistemas de inteligencia artificial operan según estos modelos, por ejemplo para reconocer patrones.

Las redes son un programa de computador que alguien ha escrito. Pero nadie ha fijado desde el principio el comportamiento de ese sistema, el programador solamente define la estructura de la celda, la estructura de la sinapsis. Tenemos en esta simulación de computador una situación en la que conocemos absolutamente todo lo que hemos puesto, pero no sabemos lo que va a salir.

Todo el que ha trabajado en programas de computador sabe que la situación es similar a lo que sucede en las redes neurales. Se tiene el programa pero no se sabe si va a funcionar, si van a comenzar a aparecer errores, comportamientos no esperados ni programados. Esto no se puede eliminar.

Se tiene entonces una situación radicalmente nueva. Consideremos una máquina como los relojes del siglo XVII. Se hace un diseño cuidadoso de cada parte de ese sistema para que funcione siempre en la misma forma. No se esperan sorpresas sino que el reloj funcione exactamente como se ha planeado. No se supone que aparezcan errores sistemáticos, a menos que con el paso del tiempo el reloj se dañe. Cuando se escribe un programa de computador, por el contrario, los errores sistemáticos son la regla. O sea que tenemos un tipo de impredecibilidad que está incorporada en el uso de la tecnología actual.

Las celdas de Bénard

Analicemos ahora un fenómeno físico de tipo complejo: las celdas de Bénard, descubiertas en 1900.

Sea una capa de fluido, por ejemplo agua, entre dos placas horizontales paralelas cuyas dimensiones son mucho mayores que el ancho entre las placas. Inicialmente ambas placas están a la misma temperatura y se tiene entonces una situación de equilibrio. Se crea luego una diferencia de temperatura comunicando energía calórica a la placa de abajo, de modo que si la temperatura de la placa de abajo es T_2 y la de la placa de arriba es T_1 entonces $\Delta T = T_2 - T_1 > 0$.

La energía calórica comunicada es una condición que lleva al sistema fuera del equilibrio y se conoce como ligadura de no-equilibrio.

Cuando la diferencia de temperatura es pequeña, el sistema adopta un estado único y sencillo en el que se transporta calor de la placa inferior a la superior. Este fenómeno es la conocida conducción térmica.

Si nos alejamos cada vez más del equilibrio llegaremos a una diferencia de temperatura crítica cuando el fluido comienza a moverse masivamente. Se trata de la convección térmica. Este movimiento no es aleatorio ni desordenado: el fluido se estructura en una serie de pequeñas celdas de convección. En cada celda el fluido está rotando: en unas en el sentido del giro de las manecillas del reloj, en otras en el sentido contrario. Mas precisamente: la dirección de rotación se alterna de una celda a la otra a lo largo del eje horizontal.

Los aspectos relevantes del fenómeno son los siguientes:

La dimensión espacial característica de una celda de Bénard en condiciones usuales de laboratorio es del orden de milímetros (10^{-1} cm) mientras que la escala espacial característica de las fuerzas intermoleculares es del orden de los angstroms (10^{-8} cm): las fuerzas intermoleculares operan en distancias iguales aproximadamente al tamaño de una molécula, mientras que una sola celda de Bénard involucra aproximadamente 10^{20} moléculas. Se tiene entonces un número enorme de partículas que se comportan de modo coherente a pesar del movimiento térmico aleatorio de cada una de ellas. Se tiene emergencia de un comportamiento global que no puede reducirse a las interacciones locales de las partes. De la interacción entre el movimiento térmico de las partes y la ligadura de no-equilibrio (fuente calórica que calienta la placa de abajo) emerge una complejidad organizada.

El experimento es perfectamente reproducible. En tanto las condiciones experimentales: fluido, placas, dimensiones, fuente externa, sean iguales, las celdas surgirán a la misma temperatura crítica y aparecerán estructuradas de modo que a una celda que gira en la dirección de las manecillas del reloj, le sigue otra que lo hace en la dirección contraria. Una vez que se establece una dirección de giro en una celda, tal dirección no cambia.

Sin embargo, no importando cuan sofisticado sea el control del arreglo experimental, hay dos situaciones cualitativamente diferentes que pueden tener lugar justo después de la diferencia de temperatura crítica. Si numeramos las celdas, una situación posible es que las impares giren en el sentido de las manecillas del reloj y las pares en la dirección contraria. La otra situación posible es que sean las pares las que giren en la dirección de las manecillas del reloj y las impares las que giren en la dirección contraria.

O sea: en cuanto se supere la diferencia de temperatura crítica sabemos que aparecerán las celdas. Este fenómeno está sujeto a un determinismo estricto. Por contraste, la dirección de la rotación de las celdas es impredecible e incontrolable. Sólo el azar, en la forma de una

perturbación particular, que puede haber prevalecido en el momento del experimento, decidirá si una celda gira en una dirección o en la otra.

Tenemos entonces una cooperación entre azar y determinismo.

Las celdas de Bénard ilustran un comportamiento típico lejos del equilibrio, que es la aparición de varias soluciones posibles para un mismo valor de parámetros. En nuestro ejemplo hay un solo parámetro: la diferencia de temperatura entre las placas, y dos soluciones posibles. Sólo el azar decide cual de estas soluciones se realiza. El hecho de que sólo una entre varias posibilidades ocurra, le da al sistema una dimensión histórica: un tipo de memoria de un evento pasado que tuvo lugar en un momento crítico y que afecta la evolución futura del sistema. El punto crítico a partir del cual puede producirse un nuevo estado macroscópico, una nueva estructura macroscópica, se llama una bifurcación.

Si analizamos las relaciones que describen sistemas como el que nos lleva a las celdas de Bénard, encontraremos que son relaciones no lineales entre variables termodinámicas, macroscópicas. Veamos brevemente cuál es la diferencia entre relaciones lineales y relaciones no lineales.

Supongamos que un pan cuesta p pesos. Dos panes costarán obviamente $2p$ pesos. La relación entre el precio total P y el número n de panes será simplemente $P = np$. Si hacemos una gráfica de P contra n , encontraremos una línea recta. Decimos que tenemos una relación lineal. En el caso en que no tengamos una línea recta decimos que tenemos una ecuación no lineal. Así por ejemplo la relación entre el área A de un cuadrado y el lado l es $A = l^2$. La gráfica de A contra l no es una línea recta. Se trata de una relación no lineal.

Volviendo a nuestro sistema, dijimos que se rige por ecuaciones no lineales que relacionan entre sí variables macroscópicas. Tales variables describen la actividad del sistema como un todo. La naturaleza de tales ecuaciones determina la posibilidad de que la acción de las componentes microscópicas, las partes, de cómo resultado la ampliación de las fluctuaciones y la formación de nuevas estructuras: El todo determina las potencialidades que tienen las partes. Pero es la actividad de las partes, en forma de fluctuaciones, lo que determina qué nueva estructura macroscópica del sistema como un todo se tendrá: Las partes determinan la estructura del todo. La parte y el todo se determinan mutuamente.

Relación entre caos, fractales y comportamiento complejo

Podemos entender la relación entre estas tres líneas de investigación en el contexto del fenómeno que produce las celdas de Bénard. El parámetro relevante es la diferencia de temperatura ΔT que vamos ahora a llamar λ . La diferencia de temperatura crítica en la cual comienza la convección térmica la indicaremos por λ_c . Comenzando con una diferencia de temperatura igual a cero, o sea con $\lambda = 0$ y aumentando poco a poco el valor de λ , encontraremos tres regiones diferentes de comportamiento:

a) Entre $\lambda = 0$ y $\lambda = \lambda_c$ el sistema adopta un estado único y sencillo. No se forman estructuras. Puede decirse que es la región del orden y la simplicidad.

b) A partir de $\lambda = \lambda_c$ comienza el comportamiento complejo. Se tiene:

Emergencia de estructuras.

Bifurcaciones, que son aquellos puntos donde hay varias estructuras posibles, en nuestro ejemplo las estructuras de las celdas girando en sentidos contrarios. Esos puntos donde suceden las bifurcaciones son puntos inestables.

Combinación de azar y determinismo.

Autoorganización. El todo y la parte se autodeterminan: el todo define las potencialidades de las partes y las partes definen la estructura del todo, surge una dimensión histórica.

c) Si se aumenta mucho el valor de λ se llega a otro valor crítico λ_c' donde comienza un comportamiento caótico donde todos los puntos se hacen inestables.

Dado que la región b) donde sucede el comportamiento complejo está entre las regiones a) y c), se dice que la complejidad está entre el orden y el caos, o que la complejidad está en el borde del caos.

Complejidad y mecanicismo

Los fractales rompen con el reduccionismo mecanicista: la complejidad de un fractal no se puede reducir a la simplicidad de una figura geométrica regular (no fractal). Cuando el espacio de fase es fractal se tiene un comportamiento caótico.

Respecto a este último tipo de comportamiento, algunos autores como Prigogine sostienen que seguir imaginando una Inteligencia Suprema que puede llegar a la precisión infinita, o sea que es capaz de pasar al límite matemático de conocer un punto sin dimensiones, no es una suposición razonable. Sostiene que la física es el estudio de lo que aparece a los humanos y no de lo que aparecería a una Inteligencia Suprema no humana como la invocada. Por lo tanto, dada la ubicuidad de los sistemas caóticos, propone considerar su comportamiento como general, siendo el comportamiento de los sistemas estables sólo un caso particular sencillo e ideal.

La descripción del estado del sistema por un punto en el espacio de fase sería entonces únicamente una aproximación. Lo general sería una descripción en términos de una región en el espacio de fase. La evolución general de los sistemas físicos se daría no en términos de estados precisos sino en términos de probabilidades. Aunque el mismo Prigogine no es totalmente claro a veces en las implicaciones últimas de su propuesta, como lo ha

clarificado d'Espagnat se estaría proponiendo una descripción del mundo físico en términos no objetivistas y no deterministas.

Las características de los fenómenos de comportamiento complejo no se enmarcan tampoco dentro de la cosmovisión mecanicista.

Comencemos con el fenómeno de Bénard resumiendo sus características. Se presenta en él una relación no mecánica entre el todo y las partes y una emergencia de cualidades globales que no se reducen a las interacciones locales. El todo y la parte se determinan mutuamente. También existe una combinación entre azar y determinismo.

Las características anteriores van en contra del pensamiento reduccionista mecanicista dentro del cual todo el comportamiento de un organismo complejo va a estar contenido en las propiedades de sus partes. Es decir se tienen las partes, se hacen interaccionar por medio de las leyes locales y como fruto de esa interacción surge de modo totalmente determinado el comportamiento del organismo. El presente contiene por lo tanto el futuro, y también el pasado. El todo se entiende totalmente a partir de sus partes y sus propiedades.

El fenómeno de Bénard presenta también una irreversibilidad esencial, hay en él evolución y tiene una dimensión histórica. Todo ello va igualmente en contra de las ideas del mecanicismo acerca del tiempo.

Tampoco el caso de las redes neurales en un computador se puede enmarcar dentro del mecanicismo. Recordemos ese ejemplo. Se coloca en ciertas celdas una neurona de estado 1 o 0, se definen interacciones entre esas neuronas, sinapsis, y se pone a andar el sistema. Comienzan entonces a suceder cosas que no se pueden prever de antemano, que no se pueden predecir; surge una estructura caótica y lo interesante es que si se pone una señal de entrada aleatoria, algunas regiones que estaban desordenadas ahora aparecen ordenadas. El todo empieza a mostrar propiedades que no se reducen a las partes y sus interacciones.

Complementariedad y complejidad

La pregunta acerca de qué es más fundamental, si las propiedades del todo o las propiedades de las partes, deja ahora de tener sentido puesto que muchas de las propiedades del todo sí dependen de las propiedades de sus partes pero, a su vez, las propiedades del todo forman un contexto que va a influir en las propiedades de sus partes. Se tiene el sistema complejo como un todo indivisible y se puede invocar un uso de la complementariedad para tales sistemas.

Consideremos, por ejemplo, el caso de un sistema macroscópico. En ciertos contextos, de los cuales hablamos en la sección de complementariedad en termodinámica, se pueden usar los conceptos dinámicos que se refieren a interacciones locales entre las partes que componen el sistema. En otros contextos, se pueden usar los conceptos termodinámicos irreducibles a la dinámica. Los contextos son mutuamente excluyentes, pero tanto los conceptos termodinámicos como los dinámicos son necesarios para agotar todo lo que se

puede saber acerca del sistema. Es la complejidad del sistema lo que produce la que podríamos llamar indivisibilidad termodinámica.

O sea que en ciertos contextos se debe afirmar que el sistema complejo esta hecho de sus partes y en otros hay que decir que las partes están hechas por el todo. Los contextos se excluyen mutuamente en el sentido de que preguntas que tienen sentido en un contexto dejan de tenerlo en el otro.

Otro posible ejemplo de sistema complejo donde se aplicaría la complementariedad, y que daría lugar a una relación complementaria entre sociología y psicología, es la sociedad. Examinemos esta idea.

Como lo mencionamos en el capítulo tercero, en la sociología la visión reduccionista diría que la sociedad se compone de individuos autónomos, que inicialmente no hay interacción entre ellos, que luego ellos se reúnen y hacen un contrato social y de allí surge entonces la sociedad. Tal visión es sin embargo un mito pues de igual modo que no puede existir una sociedad sin seres humanos tampoco se puede tener ningún ser humano autónomo, sin sociedad.

En la nueva visión de lo complejo se tendrían seres humanos con una gran complejidad de interacciones; de estas interacciones surge algo que son los fenómenos sociales. Existe un sentido en el cual puede decirse que la sociedad es fruto de los seres humanos. Sin embargo todo ser que nace lo hace en un contexto social que le es externo, puede decirse que le es impuesto, sobre lo cual no tiene escogencia. Existe entonces un sentido en el cual puede afirmarse que el ser humano es fruto de la sociedad.

La pregunta acerca de qué es lo fundamental, si la sociedad o el individuo, no tiene sentido a menos que se especifique el contexto en que se hace la pregunta. Hay que considerar la sociedad como un todo indivisible donde no se puede definir de modo tajante y absoluto dónde está la frontera entre el individuo y lo social, ni decir de modo absoluto cuál de ellos es lo fundamental. En ciertos contextos se debe afirmar que el individuo es lo fundamental, que lo fundamental son los fenómenos psicológicos. En otros contextos hay que decir que lo social es lo fundamental, que lo fundamental son los fenómenos sociológicos. Contextos en que lo individual es fundamental son mutuamente excluyentes con aquellos en que lo fundamental es lo social, pero ambos tipos de conceptos, los sociológicos y los psicológicos, son necesarios para agotar todo lo que puede saberse de ese sistema altamente complejo que es la sociedad.

En ambos ejemplos la complejidad de los sistemas da lugar a nuevas propiedades. Hay emergencia de nuevas propiedades, y los conceptos asociados con esas nuevas propiedades del nuevo nivel resultan complementarios con los conceptos asociados con las propiedades del nivel supuestamente fundamental en la visión reduccionista.

El uso de la complementariedad para un sistema donde se tiene un comportamiento complejo implica ya una contextualidad de las propiedades de tal sistema, y por lo tanto una pérdida del objetivismo mecanicista. Si además se aceptan sugerencias como la de

Prigogine, se tendría que la complejidad, al igual que la complementariedad, rompe tanto con el objetivismo como con el determinismo.

Nótese que el cuestionamiento de la visión reduccionista, y en general de la visión mecanicista, no viene sólo de la mecánica cuántica, de un dominio que pudiera calificarse de exotérico para el hombre común pues los electrones no están al acceso directo de los sentidos, sino también de la emergente ciencia de lo complejo, que trata de fenómenos que pueden llamarse de la vida diaria. Además parece existir una relación fundamental entre complementariedad y complejidad.

CAPÍTULO 10. A GUISA DE CONCLUSIÓN: LA COMPLEMENTARIEDAD, ¿UNA FILOSOFÍA PARA EL SIGLO XXI?

Este último capítulo recoge las conclusiones a que hemos llegado en nuestra indagación sobre la complementariedad. Esas conclusiones, fruto de la investigación, forman a su vez un programa de investigación que tiene como gran objetivo precisar cada vez más las aplicaciones de la complementariedad sugeridas. Se espera también que a partir de esas conclusiones se generen investigaciones ulteriores sobre el tópico de la relación entre el conocimiento científico y la visión de lo real consistente con ese conocimiento.

El fin del mecanicismo

Una primera conclusión es que asistimos al fin de la cosmovisión que comenzó con la modernidad y también al fin de los conflictos que suscitó tal cosmovisión.

Resumamos los puntos en que la complementariedad se opone a la visión mecanicista.

Contra el objetivismo mecanicista

El objetivismo sostiene: a) Que existe una realidad en sí, y b) Que esa realidad es descriptible por nuestros conceptos.

En últimas sostiene que la realidad fenoménica y la realidad en sí coinciden. Einstein con su criterio de realidad quería decidir cuando un concepto correspondería a un elemento de realidad.

Ahora bien, toda experiencia se describe por redes de conceptos. La complementariedad sostiene que el mundo fenoménico se presenta compuesto por experiencias mutuamente excluyentes pero necesarias para agotar toda la información posible acerca de un objeto. Las redes de conceptos correspondientes son por lo tanto mutuamente excluyentes pero necesarias para agotar el conocimiento del objeto. Las propiedades del objeto no son en sí sino contextuales, relativas a una red de conceptos que no es la única posible.

Detrás de cada uso de la complementariedad parece haber un tipo de totalidad o indivisibilidad. Este es un punto que es necesario investigar en cada uso de la complementariedad. En la física cuántica se trata de la indivisibilidad del fenómeno cuántico que constituye una totalidad que incluye el instrumento de observación. En termodinámica parece tenerse también una indivisibilidad que estaría detrás de la complementariedad entre la dinámica y la termodinámica. En biología se trataría de la totalidad del organismo. En psicología habría la indivisibilidad del ego que observa y el contenido de conciencia observado. En el ser humano su indivisibilidad como mente y cuerpo. En general se tendría la experiencia humana como una totalidad que incluye al mismo ser humano sujeto de la experiencia.

En conclusión: La realidad descrita por nuestros conceptos tiene tan sólo un carácter fenoménico.

Contra el reduccionismo mecanicista

La complementariedad se opone al monismo conceptual o filosófico, pues sostiene que no existe una única red conceptual para enmarcar todos los fenómenos. El mundo se presenta como multicontextual, en una variedad de contextos necesarios pero mutuamente excluyentes. Ahora, si bien la complementariedad sostiene que cada experiencia es relativa a un contexto, se debe recordar que una vez encontrado el contexto, el uso del lenguaje queda de una vez fijado. Así, por ejemplo, en el contexto en que el lenguaje es el de la dinámica y no el de la termodinámica, ningún acuerdo socio-lingüístico ulterior puede cambiar el lenguaje.

Las descripciones que se enmarcan en contextos mutuamente excluyentes son a su vez descripciones mutuamente excluyentes de la realidad. Cada una es sin embargo correcta, verdadera, relativa a su contexto. Pero ese contexto se define en una interacción entre el sujeto que conoce y una realidad que no por ser empírica deja de ser externa a la mente del sujeto. El contexto, y por tanto la verdad de cada descripción, no es algo que se defina por un mero acuerdo socio-lingüístico. Lejos de invocar un relativismo cultural o social, la complementariedad reconoce más bien el hecho de que la experiencia es mucho más rica que el lenguaje que no puede abarcarla con una sola red contextual. La complementariedad implica que la idea de una única descripción de la realidad, que puede formularse en el lenguaje humano, parece condenada al fracaso.

Como lo que describe nuestro marco conceptual no es la realidad en sí, sino sólo la realidad fenoménica, no se tiene entonces un monismo metafísico.

Contra la eliminación de causas finales y el determinismo mecanicista

Las descripciones deterministas y las que incluyen causas finales no son ahora antagónicas sino complementarias. Es lo que se tiene en la propuesta complementariedad en biología y sobre todo en el caso de la descripción de la experiencia total humana.

Contra el carácter no antrópico del mecanicismo

Ya no es posible borrar conceptualmente el observador. La realidad fenoménica se presenta estructurada en experiencias mutuamente excluyentes y es el observador el que define el tipo de experiencia. Pero una vez elegida los conceptos quedan fijos. Si bien la realidad fenoménica es externa al sujeto no es independiente de él. La vieja metáfora del mundo como un libro puede ilustrar la idea de una realidad externa al sujeto mas sin embargo inconcebible sin la existencia del sujeto, e incluso con una existencia anterior al

sujeto. Imaginemos que alguien escribe un libro para sus descendientes futuros. El libro existe antes que sus futuros lectores pero no puede concebirse independiente de la existencia de ellos pues está estructurado para que ellos lo lean. El futuro lector está implícito entonces en el libro. El libro tiene una existencia externa y anterior en el tiempo a la existencia de su lector pero esa existencia no es independiente de la existencia de ese lector.

Contra la relación mecánica entre el todo y la parte

El todo y las partes tienen una relación de complementariedad. Hay contextos en los cuales puede considerarse que todas las propiedades del todo se entienden a partir de las propiedades de las partes. En ese contexto se puede afirmar plenamente que el todo está compuesto de partes y no tiene propiedades emergentes. A su vez hay contextos en que existen propiedades del todo que son emergentes, que no se reducen a las meras interacciones entre las partes. Ambos tipos de contextos se excluyen mutuamente pero son necesarios para agotar toda la información acerca del todo.

La necesidad de coherencia

Otra conclusión es la necesidad de coherencia que tienen muchos de los expertos en física. Si se declaran pragmáticos, puesto que las ecuaciones son muy poderosas y no existen dudas sobre los resultados que se extraen a partir ellas, por lo cual se puede considerar que desde el punto de vista científico no existe ningún tipo de problemas, lo deben ser con coherencia. Deben aceptar limitarse a calcular y considerar la física sólo como una serie de recetas que funcionan. Si no se es totalmente pragmático también hay que buscar la coherencia, no se puede continuar siendo mecanicista sin que al mismo tiempo se tenga la obligación de cambiar la cuántica. Si no se quiere cambiar la cuántica y no se quiere ser totalmente pragmático, se debe ver cuál puede ser una posible visión del mundo consistente con esa teoría.

Convendría entonces que si los especialistas en física no quieren dejar a otras disciplinas la exploración de una cosmovisión del mundo acorde con los hallazgos fundamentales de su propia disciplina, tengan en claro que:

Aceptar el algoritmo cuántico y continuar teniendo una concepción filosófica idéntica en muchos de sus fundamentos a la del mecanicismo es incoherente.

No adoptar ninguna posición y limitarse a hacer cálculos y experimentos es coherente.

Si no se quiere dejar de lado una interpretación lo primero que hay que evitar es la incoherencia. En particular, si el aspecto no ontológico no se encuentra aceptable, se debe entender que es entonces necesario intentar la creación de una nueva teoría. Si lo que se encuentra inaceptable es la creación de una nueva teoría, vale entonces la pena mirar cuál podría ser una nueva posición filosófica acorde con la teoría cuántica.

La complementariedad: ¿Una filosofía para el siglo XXI?

Una nueva epistemología

La complementariedad abre la posibilidad de un marco para resolver diferentes conflictos. Lo que permite esperar que la complementariedad pueda extenderse a campos diferentes a la física es que, como una experiencia es una red de conceptos, la existencia de dos tipos de experiencias mutuamente excluyentes significa que las redes de conceptos ligados con ellas son mutuamente excluyentes y que lo son también todos los razonamientos basados en esas redes de conceptos. Ahora bien, la complementariedad dice que a pesar de ser mutuamente excluyentes las dos redes de conceptos se precisan ambas para agotar todo lo que puede conocerse acerca de un mismo objeto.

Como ya lo hemos enfatizado, ello significa que no podemos esperar agotar toda la descripción del objeto con una sola red de conceptos, la descripción no puede darse en términos de propiedades en sí del objeto, pues todas sus propiedades nos aparecen como contextuales, relativas a una red de conceptos que no es la única posible acerca de su comportamiento.

Veamos ahora los posibles usos de la complementariedad que se deducen de nuestro estudio.

Complementariedad en la relación entre el todo y las partes

Hay varios posibles usos de la complementariedad que se enmarcan en el contexto de la relación entre el todo y las partes. La idea es que el todo y las partes están en una relación de complementariedad. La pregunta acerca de si todas las propiedades de un todo se reducen a las propiedades de sus partes deja entonces de tener sentido si no se especifica antes el contexto.

En un contexto, el entendimiento del todo se logra identificando sus partes y las interacciones entre ellas. Todas las propiedades del todo que tienen sentido en este contexto se explican a partir de las propiedades de sus partes. Ninguna de esas propiedades son emergentes. En este contexto basta el análisis del todo para entender sus propiedades. El todo está aquí subordinado conceptualmente a las partes. El énfasis está en la parte.

En otro contexto, mutuamente excluyente con el anterior el todo muestra propiedades puramente globales, emergentes, que no se pueden entender mediante el puro análisis en sus partes. El énfasis está aquí en el todo, que puede considerarse como indivisible. Dado que el estudio del todo en ese contexto no se lleva a cabo por medio del análisis en sus partes, es necesario llamarlo de otro modo. Puede decirse que es un estudio sintético y no analítico, aunque la palabra sintético da la idea de una síntesis que se haría a partir de las

partes identificadas por medio del análisis. Quizás sea mejor emplear la palabra global, u holístico, para el estudio del todo en este contexto. Se tendría entonces una complementariedad entre el enfoque analítico y el enfoque global u holístico.

En el contexto del enfoque analítico todas las preguntas se resuelven en términos de las interacciones de las partes. Allí tiene pleno sentido afirmar que el todo no es más que el conjunto de sus partes, pues ninguna propiedad es emergente.

En el contexto del enfoque global u holístico hay propiedades que no se entienden a partir de las partes y de sus interacciones.

Ambos contextos son necesarios para entender todas las propiedades del todo, algunas de las cuales se explican de modo reduccionista y otras deben considerarse como emergentes.

En resumen tenemos:

Complementariedad entre el todo y las partes. O mejor: entre el lenguaje del todo y el lenguaje de las partes. Entendiendo aquí por lenguaje la red de conceptos en que se enmarcan las preguntas que tienen sentido en el contexto dado.

Complementariedad entre el enfoque analítico, reduccionista, y el enfoque global, holístico. O entre el lenguaje analítico, reduccionista, y el lenguaje global, holístico.

Los siguientes son algunos casos concretos en que se aplicaría esta complementariedad entre el todo y las partes.

Complementariedad entre la Dinámica y la Termodinámica

La dificultad fundamental para conciliar los fenómenos irreversibles observados en el dominio macroscópico con las leyes dinámicas reversibles de la dinámica tendría solución en el marco de la complementariedad.

El contexto en que se puede aplicar la dinámica, con su enfoque local, analítico, reduccionista, reversible, sería complementario con el contexto en que vale el enfoque termodinámico, global, con propiedades emergentes, e irreversible.

Otro aspecto de este uso de la complementariedad sería que la reversibilidad y irreversibilidad tendrían una relación complementaria.

Complementariedad entre sociología y psicología

La psicología sería el lenguaje de las partes: los individuos. Formaría el contexto en que puede considerarse que las partes fundamentales de la sociedad, los individuos, tienen una gran complejidad de interacciones, de las que surge algo que son los fenómenos sociales.

En ese contexto se considera la sociedad como el fruto de los seres humanos. Allí el individuo y los fenómenos psicológicos son lo fundamental. Se tendrían entonces elementos sociales reducibles a las interacciones entre los individuos.

La sociología sería el lenguaje del todo: la sociedad. Constituiría el contexto en que puede considerarse que todo ser humano que nace lo hace en un entorno social que le es externo, que le es impuesto; hecho sobre el cual no tiene opción. En ese contexto puede afirmarse que el ser humano es fruto de la sociedad. Allí lo social, los fenómenos sociológicos, son lo fundamental. Existirían entonces elementos sociales emergentes.

Ambos contextos, aquel donde lo individual es fundamental y aquel donde lo fundamental es lo social serían mutuamente excluyentes, pero ambos necesarios para agotar todo lo que puede conocerse de ese sistema altamente complejo que es la sociedad.

No tendría sentido entonces preguntarse qué es lo fundamental, si la sociedad o el individuo, a menos que se especifique el contexto en que se hace la pregunta.

Relación entre la complementariedad y la complejidad

La complejidad permite entender mejor la relación de complementariedad entre el todo y las partes. Los estudios de lo complejo indican que muchas de las propiedades del todo dependen en efecto de las propiedades de sus partes pero, a su vez, las propiedades del todo forman un contexto que va a influir en las propiedades de sus partes. El sistema complejo aparece como un todo indivisible, donde deja de tener sentido la pregunta acerca de qué es más fundamental, si las propiedades del todo o las propiedades de las partes, a menos que se especifique con claridad el contexto. En ciertos contextos se debe afirmar que el sistema complejo esta hecho de sus partes y en otros hay que decir que las partes están hechas por el todo. Los contextos se excluyen mutuamente en el sentido de que preguntas que tienen sentido en un contexto dejan de tenerlo en el otro.

Veamos otros usos de la complementariedad que no se enmarcan en el contexto del todo y las partes.

Complementariedad en psicología

Se trata de un uso en psicología introspectiva. Al ser la psiquis un todo indivisible, entre el yo y el contenido de conciencia hay una frontera que es "móvil", que cambia con el contexto. En un contexto, se tiene un yo; en otro, ese yo, o un aspecto de él, pasa a ser parte del contenido de conciencia. Por ello tanto el yo como el contenido, la vida interior, son contextuales. Hay contextos complementarios, o sea mutuamente excluyentes pero necesarios para agotar toda la descripción del mundo interior. Cada contexto está formado por una red de conceptos en donde tienen sentido ciertas preguntas acerca del contenido. La riqueza de la vida interior no se agota entonces en una sola red contextual.

Complementariedad entre el enfoque teleológico y el enfoque en términos de causa eficientes

La confrontación entre el enfoque que sólo admite de causas eficientes y la teleología, se presenta tanto en biología, en la forma del debate entre el reduccionismo y el vitalismo, como también y principalmente en el estudio del ser humano, donde las consideraciones que involucran propósitos, intenciones, y sobre todo el libre albedrío y la responsabilidad moral, chocan con la idea del rechazo total a las causas finales. La complementariedad puede ayudar a resolver ese tipo de enfrentamientos. Examinemos algunos aspectos donde el enfoque complementarista sería de vital importancia.

Complementariedad en biología

La propuesta de una complementariedad en biología se presta a varias críticas fuertes. El argumento según el cual un análisis del organismo en sus átomos privaría a este de la vida, razón por la cual las circunstancias en que la vida aparece se excluirían con aquellas en que se hace un análisis del organismo en sus partes, argumento que indicaría una relación de complementariedad entre el enfoque reduccionista, que considera que todas las propiedades biológicas se reducen a las interacciones entre los átomos, y el enfoque vitalista, según el cual habrían propiedades emergentes puramente biológicas, se puede criticar recalcando que la biología molecular ha mostrado que se logra avanzar mucho en el análisis sin matar al organismo. Es obvio que si se divide el organismo en sus átomos se lo priva de la vida; sin embargo no hay que olvidar que la división de un todo en sus partes es conceptual, y dado que se conocen las propiedades de los átomos, es legítimo proponer un programa en que, a partir de esas propiedades y considerando sistemas cada vez más complejos, se pueda finalmente llegar a entender todas las propiedades del ser vivo. No obstante, el hecho de que existan propiedades macroscópicas de un sistema que no tiene vida, que no se reducen a las propiedades de las partes, indica que el programa de tratar de reducir las propiedades de un sistema vivo, algo mucho más complejo que uno inerte, a las meras interacciones entre los átomos, no se muestra tan promisorio.

En cuanto a la propuesta de complementariedad entre el enfoque teleológico y el enfoque en términos de causas eficientes, se puede argumentar que todos los aspectos que aparecen como indicando un propósito, un diseño, se pueden entender en términos de embriología y de evolución, sin necesidad de emplear causas finales. Ese último programa enfrenta sus propias dificultades, el estudio de las cuales escapa a los propósitos de este libro. Aquí nos basta decir que el programa que podemos llamar complementarista de Bohr es también válido, y que se necesita mucha investigación para dilucidar cuál es el enfoque que a la larga será el más fructífero.

Complementariedad en Moral

En asuntos morales la teleología se expresa en términos de libre albedrío. Si en la biología se puede argüir que la teleología, en el sentido de un diseño, se puede rechazar en aras de

un programa que invoca la embriología y la evolución, en los asuntos de la responsabilidad moral parece imposible desterrar las ideas teleológicas. Si se considera que, suponiendo que incluso los fenómenos biológicos se reducen a la descripción en términos solamente de causas eficientes, el ser humano se agota como cuerpo con ese tipo de descripción, con esa red de conceptos, como mente, el ser humano precisa de otra red conceptual, de otro contexto eminentemente teleológico. Preguntas que no tienen sentido en un contexto las tendrán en el otro. Pero se necesita considerar ambas redes de conceptos para responder a todas las preguntas que surgen en el fenómeno humano.

Analicemos un poco más la propuesta de complementariedad en Moral para definir mejor qué se está diciendo y qué no se está afirmando. Se sostiene que hay dos contextos complementarios: un contexto teleológico en donde tienen sentido preguntas acerca de propósitos, fines, y en general de responsabilidad moral, preguntas sobre el ser humano como mente, como espíritu, y otro contexto no teleológico en términos de causas eficientes en el cual tienen sentido preguntas sobre el ser humano como cuerpo. Podemos considerar al primer contexto como aquel en que se hacen preguntas referentes al aspecto espiritual del ser humano, mientras que el segundo contexto es aquel en el cual las preguntas hacen referencia al aspecto puramente material o animal del ser humano. Sólo en la red de conceptos del aspecto espiritual tienen sentido las preguntas morales.

La última frase del párrafo anterior no debe interpretarse como una afirmación en el sentido de que hay un dominio para la moral y otro para la ciencia, pues en el contexto que hemos llamado teleológico deben enmarcarse también muchas de las experiencias en la psicología y la sociología, que son ciencias donde muchas de las preguntas se refieren a aspectos relacionados con la responsabilidad moral.

Complementariedad entre el enfoque humanístico y el enfoque científico

Este uso de la complementariedad está íntimamente relacionado con el que acabamos de considerar. La cultura o el enfoque humanístico, con su énfasis en lo propiamente humano, que incluye la mente, la moral, los fines y propósitos, choca profundamente con la cultura o enfoque puramente científico donde se invoca la eliminación de cualquier asomo de teleología. La complementariedad entre el contexto donde tienen sentido sólo las preguntas científicas y el contexto en que se enmarcan las preguntas humanísticas acerca del ser humano, resolvería el conflicto y tendería un puente entre el denominado abismo entre las dos culturas, que quizás ahora dejaría de serlo.

Complementariedad mente cuerpo

Profundamente relacionado con los dos usos anteriores de la complementariedad estaría la complementariedad entre el lenguaje del cuerpo y el lenguaje de la mente. O sea entre la red de conceptos en que tienen sentido las preguntas acerca de la mente y la red en que se enmarcan las preguntas sobre el cuerpo. Se superaría así la polémica acerca de la primacía

de uno u otro aspecto del ser humano que ha dado origen a todas las formas de materialismo enfrentadas a todas las formas de idealismo.

La complementariedad como antídoto contra el dogmatismo

Preguntas acerca de la libertad y la responsabilidad moral, que implican decisiones, propósitos, metas, no tienen sentido en un contexto, en una red de conceptos en la cual descripciones teleológicas no tienen cabida. Si se considera que todas las preguntas sobre el ser humano tienen que poderse responder en esa red de conceptos, la conclusión obvia es que tales preguntas no tienen sentido, son aparentes, pues el ser humano no tendría una libertad real ni tampoco una responsabilidad moral real. Se podría de nuevo invocar la ciencia diciendo que la psicología o la sociología deben finalmente explicar esa tendencia del ser humano a la moral, o ese afán de respuesta a las preguntas de tipo moral. Es claro que si el único contexto aceptado es aquel donde se rechaza cualquier referencia a causas finales, la explicación de tales ciencias debe darse dentro de ese contexto. O sea que lo que se trataría de explicar, sin recurrir a causas finales, sería el por qué de esa necesidad humana de creer en apariencias, o por qué es quizá necesario para la cohesión social o aún para la posibilidad de la existencia de una sociedad el que los individuos estén convencidos y tengan fe en algo que de hecho no es más que una quimera. Dejando de lado lo poco convincente que tal tipo de explicación pueda ser para un ser humano enfrentado a decisiones morales importantes, es de esperarse que dentro de esa posición conceptualmente monista, cualquier respuesta que se dé dentro de un contexto donde se acepten causas finales será rechazada y aun recibida con hostilidad. Si esa hostilidad se acrecienta con una alta dosis emocional, no es extraño encontrar como resultado un dogmatismo ponzoñoso y perseguidor.

Por otra parte, si se considera que el único contexto válido para responder todas las preguntas acerca del ser humano es un contexto donde la teleología juega un papel importante, es claro que preguntas que exijan una red de conceptos donde no se aceptan las explicaciones en términos de causas finales, serán consideradas preguntas sin sentido. No será extraño entonces que el rechazo a la red de conceptos que no incluyen la teleología se traduzca en un dogmatismo acerbo, venenoso e intransigente.

Toda pretensión de reducir la experiencia humana a una sólo red de conceptos conduce entonces a posiciones dogmáticas que dejan sin respuesta un gran número de inquietudes válidas con respecto al ser humano. La complementariedad sostiene que la experiencia humana es demasiado rica y compleja para pretender agotarla con una sola red de conceptos, que se debe admitir la existencia de contextos mutuamente excluyentes pero que sin embargo deben aceptarse para poder dar explicación a toda la vastedad de la experiencia humana.

La complementariedad no se identifica con el relativismo

Ahora bien, como lo hemos mencionado más arriba, el reconocimiento de la existencia de redes de contextos mutuamente excluyentes y de la verdad relativa a esos contextos de las respuestas a los interrogantes humanos, no significa que se esté invocando ningún tipo de relativismo cultural, social o lingüístico. Examinemos este punto considerando algunos ejemplos de complementariedad.

En la mecánica cuántica, son los experimentos y la red de conceptos asociados con ellos los que definen los contextos. Igual sucede con la propuesta de complementariedad entre la dinámica y la termodinámica.

En el caso de la complementariedad que existiría entre la psicología y la sociología, se sostiene la existencia de dos contextos mutuamente excluyentes, uno en que lo fundamental son los individuos, y lo derivado o supeditado lógicamente son los fenómenos sociales, y otro donde lo fundamental es lo social, y lo supeditado lógicamente son los individuos. Los elementos que componen cada contexto no se supone que sean arbitrarios, ni definidos a priori, sino que deben ser objeto de la investigación científica, deben ser revelados por la investigación científica. Entre esos elementos estarán los procesos, y la red conceptual asociada con ellos, que ocurren en cada contexto, o que se enmarcan en cada contexto. Se espera que la investigación permita definir aquellos aspectos de lo social que son un mero fruto de las interacciones entre los individuos, y aquellos aspectos del individuo que son un fruto de lo social. Estos últimos aspectos serán considerados como emergentes al no poderse reducir a las meras interacciones entre las partes de lo social que básicamente son los individuos. En la complementariedad propuesta en modo alguno hay implicada un tipo de acuerdo socio-lingüístico que defina los contextos.

Se supone además que la existencia de los contextos complementarios es independiente de la forma de la cultura. El contenido de los contextos dependerá de la cultura pero no la estructura complementaria de lo socio-psicológico.

También en la propuesta de complementariedad en psicología se supone que la estructura complementarista es general a todo ser humano y a toda cultura. La "frontera" entre el "yo" y el contenido de conciencia dependerá de lo individual y lo social. Una gran introspección corre mucho la frontera hacia el yo dejando poco yo y mucha vida interior. Poca introspección deja mucho yo y poca vida interior. El grado de introspección dependerá del individuo y de su cultura. Al igual que sucede con los individuos hay culturas con mayor introspección que otras. Lo que supone la complementariedad propuesta es que la estructura complementarista es independiente del individuo y la cultura.

La complementariedad acepta una realidad empírica que es externa al sujeto, el cual no define arbitrariamente los contextos en que tienen sentido sus preguntas. Existe el sujeto y existe la realidad empírica, y el hecho de que esta última no sea independiente de la

existencia del sujeto no significa que sea una invención de este último, como el hecho de que el ser humano no sea independiente de la existencia de la sociedad en que vive no significa que no exista. Más bien la complementariedad reconoce que el sujeto y la realidad empírica forman un todo indivisible en que ambos aspectos, el sujeto y la realidad, tienen existencia. Un asunto diferente es si además de esa realidad empírica existe finalmente una realidad en sí, que pueda dar explicación a las preguntas naturales que surgen acerca de la relación profunda entre la realidad empírica y el sujeto para el que aparece esa realidad. Hablaremos brevemente de este tópico en la sección que sigue.

Complementariedad y la idea de una Realidad en sí

La complementariedad no nos compromete necesariamente con el no-realismo. Aceptarla como principio epistemológico no implica aceptar una posición no ontológica. d'Espagnat, por ejemplo, tiene una posición realista pero acepta la cuántica como una teoría completa y habla de complementariedad entre mente y materia. La complementariedad permite entonces un terreno de diálogo entre objetivistas y no objetivistas. Una de sus grandes virtudes es que es útil tanto para agnósticos acerca de lo Real, como parece que lo fue el mismo Bohr, como para realistas convencidos como d'Espagnat.

Las ideas implícitas de Bohr acerca de la naturaleza solamente empírica de la realidad física se fundamentan en la tesis lingüística sobre la unicidad del lenguaje. Si se rechaza esa tesis, se puede aceptar una realidad física independiente y tratar de encontrar un nuevo lenguaje para describirla y explicarla. Es el intento que hace Bohm, por ejemplo. El rechazo ontológico de Bohr no tiene entonces el carácter de una necesidad lógica.

Por otra parte, aun aceptando que la realidad física sólo es una realidad empírica, todavía es posible aceptar la existencia de una realidad independiente no física, como es el caso con d'Espagnat.

En conclusión: la aceptación de la epistemología de Bohr y del carácter empírico de la realidad física, no nos compromete entonces necesariamente con un rechazo total de la noción de realidad independiente.

GLOSARIO

Substancia o esencia

En la filosofía de Aristóteles el último elemento que descubre el análisis de la mente es el concepto. Aristóteles clasifica los conceptos en categorías o grupos típicos de conceptos. La substancia o esencia es una categoría que dice lo que la cosa es, lo permanente y necesario, lo esencial. Expresa el ente que existe en sí mismo, independiente y suficiente.

Los accidentes

Expresan en la filosofía aristotélica aspectos de la esencia. Ellos son: de cantidad, de cualidad, de relación, de lugar, de tiempo, de postura o posición, de condición o estado, de acción y de pasión o afección.

La substancia primera

Para Aristóteles la substancia primera es el ser individual y concreto. Sólo la substancia primera es la substancia en sentido propio, primario y principal, aquello que nunca puede ser de hecho predicado de otro, sino que es el sujeto último de todas las predicaciones; por ejemplo este hombre, este caballo.

La substancia segunda

Es para Aristóteles lo común a muchos individuos, es el universal, por ejemplo hombre. Puede ser predicada de otro, ser substancia y también predicado. La substancia segunda es el concepto, la idea, el universal. Se conoce como forma entendida no en el sentido visual que utilizamos cuando decimos que algo tiene forma redonda, sino forma entendida como aquello que especifica un determinado ser en su peculiaridad ontológica, lo determinante, lo configurador, lo dador de ser.

La materia

En el pensamiento aristotélico la forma es lo configurador, lo dador de ser. La materia es el receptáculo de la forma. Es un substrato informe que la forma configura para tener un ser determinado. La materia es lo que sirve de soporte a la forma.

La materia primera o prima

Es para Aristóteles la absoluta indeterminación, lo indiferenciado, lo carente de toda forma, pero capaz de toda información. Es una exigencia lógica del concepto de forma: sin la materia así entendida no tendría sentido la forma. Es la acepción más general del concepto de materia.

La materia segunda

En el pensamiento aristotélico es esencialmente la materia como la entendemos hoy en día, tiene ya forma pero puede recibir otra forma.

Hilemorfismo

Es la teoría aristotélica de la forma y la materia.

El acto y la potencia

Para Aristóteles lo posible tiene tanto ser como lo que existe de hecho, con lo que ya es actual. La estatua que es sólo una potencialidad en el mármol no trabajado tiene para Aristóteles tanto ser como la estatua ya terminada, sólo que en una modalidad diferente. La estatua ya terminada tiene ser en acto, y la que es sólo una posibilidad tiene ser en potencia. En la semilla el árbol tiene ser o existe en potencia. El árbol adulto tiene ser o existe en acto. En aquel que sabe construir existe en potencia aquel que construye y el que duerme existe en potencia en aquel que vela.

La entelequia

En Aristóteles la materia primera es la pura potencia, donde existen todos los seres en potencia. Una vez recibe forma, el ser en potencia que existía en la materia se hace actual. El ser en acto es materia y forma. La forma es lo que lo actualiza. Como la forma solamente existe unida a la materia, finalmente la forma es el ser en acto. Por ello también se llama a la forma la entelequia que significa "lo que ha alcanzado su fin".

El movimiento

Para Aristóteles el movimiento es el paso de la potencia al acto. Se parte de materia con una forma A que pasa a otra forma B. Cuando la materia tiene la forma A, la forma B existe en potencia pues esa materia tiene la potencialidad de adquirir la forma B. El movimiento es la actualización de ese ser en potencia, o sea se tiene cuando la materia pasa de la forma A a la forma B. El movimiento se lleva a cabo entonces entre dos términos precisos: un término en acto y otro en potencia. La forma A es el término en acto y la forma B es el término en potencia.

La causa eficiente

Es el principio del movimiento. Aristóteles sostiene que todo lo que se mueve, necesariamente se mueve por otro. O sea que todo movimiento requiere un motor. Este principio lo considera Aristóteles como evidente. El agente motor lleva siempre, según él,

una substancia particular, o cualidad o cantidad, que viene a ser el principio o causa del movimiento.

La causa final

Para Aristóteles no es posible entender las formas y los procesos del ser sin pensar en el fin, por lo cual este último constituye un verdadero principio, una verdadera causa del ser. Aristóteles sostiene que el fin no se encuentra sólo en las actividades humanas, en el arte, la técnica, sino también en la naturaleza. Para él, la noción de fin en el arte surge de la misma naturaleza. El ejemplo más evidente de finalidad lo haya Aristóteles en las plantas y los animales. Su tesis es que la naturaleza nada hace sin sentido y sin fin.

El holismo

Pone el énfasis en el todo más que en las partes; sostiene, en esencia, que el todo tiene propiedades que no se explican a partir del mero análisis de sus partes. Cuando una división, conceptual o con el pensamiento, de un todo en sus partes, y el análisis de las propiedades de esas partes no permiten entender todas las propiedades de ese todo, se puede afirmar que se tiene un todo indivisible. Un pensamiento que considere las cosas como todos o totalidades indivisibles se considera un pensamiento holístico.

Realidad en Sí

Realidad independiente de la existencia de los humanos, totalmente objetiva. Tal realidad estaría "más allá", "detrás" o "subyaciendo" los fenómenos, sería independiente de nuestro conocimiento y de lo que medimos o decidimos medir, de nuestra propia existencia, pero influiría, sin embargo, sobre los resultados de nuestras medidas.

Realidad empírica

Conjunto de los fenómenos (del griego *phainómenon*: representación). El fenómeno designa lo que se nos da en la experiencia y conocemos a través de los sentidos.

Energía

Entidad física fundamental que se manifiesta en distintas formas. Su nombre viene de la palabra griega *energeia* que puede traducirse como actividad. El principio de la conservación de la energía dice que no existe creación ni destrucción de energía, sino su conversión de una forma a otra. Cada una de estas manifestaciones se asocia a un componente del abanico de fenómenos físicos. Así un cuerpo que se mueve tiene una forma de energía llamada energía cinética, la cual depende de la masa del cuerpo y del cuadrado de la velocidad.

Ondas

Las ondas en general son perturbaciones del estado de un medio que se propagan en ese medio. Puede decirse también que en general una onda es un transporte de energía y de cantidad de movimiento en un medio sin que se tenga un transporte neto de partículas.

Dualidad onda partícula

En ciertos experimentos el comportamiento de un electrón es tal que nos lleva a concluir que se trata de una onda. En otros experimentos, sin embargo, su comportamiento nos conduce a la conclusión de que es una partícula. Esto nos enfrenta a una dualidad, pues sabemos que algo no puede ser a la vez una onda y una partícula. Se trata de la denominada dualidad onda partícula que se extiende también a la luz.

Función de onda

El comportamiento del electrón, o de cualquier otra partícula cuántica, se describe en mecánica cuántica por medio de una entidad matemática llamada la “función de onda”. En general se habla de que se representa el estado del electrón por una función de estado.

Principio de Heisenberg

Afirma que si en ciertas condiciones se consigue localizar el electrón con una gran precisión, los valores de su velocidad y de su momento serán altamente imprecisos, y viceversa. En otras palabras, cuanto menor resulte la indeterminación de la posición, mayor resultará la indeterminación del momento. De manera inversa, si se llega a determinar con gran precisión el momento, la posición resultará altamente imprecisa .

Colapso de la función de onda

Proceso, en que una parte de la función de onda desaparece cuando se hace una medición. Así en el caso del experimento de la doble rendija se empieza con una superposición que son las dos ondas que salen de cada rendija. Durante el viaje de las ondas a la pantalla, el sistema sigue un proceso determinista, o sea que al llegar a la pantalla y antes de interactuar con ella - interacción que va a constituir nuestra medida porque cuando sucede podremos saber a qué punto llega el electrón - se tiene una superposición, es decir todavía hay interferencia. Al interactuar con la pantalla se lleva a cabo el proceso indeterminista, la superposición colapsa, ya no se tiene interferencia.

No-localidad

Lo que produce el colapso de la función de onda puede estar tan lejos como queramos del laboratorio donde sucede el colapso y de todos modos este tiene lugar de modo inmediato.

Si se pretenda interpretar la mecánica cuántica en términos objetivistas, o sea se trata de darle una interpretación objetivista a la función de onda, el proceso del colapso viola entonces la ley de la velocidad máxima de las interacciones físicas. En término técnicos, este tipo de conexiones instantáneas constituyen lo que se llama la no-localidad.

Enmarañamiento cuántico

Cuando se tiene un sistema cuántico compuesto el estado más general se representa por una superposición en la cual están involucrados todos las posibles funciones de estados de cada una de las partes del sistema. No se puede entonces asignar una función de estado a las partes que componen el sistema compuesto, sólo se puede asignar una función de estado al sistema total. O sea que las partes no tienen características propias, sólo las tiene el todo del cual ellas forman parte. En cierta manera las partes sólo tienen propiedades comunes. Esto es lo que se entiende por entanglement que se puede traducir como enmarañamiento.

Indivisibilidad

Dentro del pensamiento de Bohr los fenómenos cuánticos tienen un carácter de totalidad o indivisibilidad que se manifiesta en el hecho de que cualquier intento de dividir un fenómeno cuántico exige un cambio en los arreglos experimentales que produce nuevos efectos y que es en general incompatible con la definición del fenómeno que se investiga. Un ejemplo es el fenómeno de interferencia de un haz de electrones a través de dos rendijas. Si se quiere dividir el fenómeno y saber por cual rendija pasa cada electrón y se hacen los arreglos experimentales adecuados para ello, se destruye paulatinamente la interferencia.

Separabilidad

La idea general de separabilidad está implícita en la noción familiar de objeto físico: un objeto físico es algo que está delimitado, cerca o lejos, en suma separado de otros objetos y de nosotros mismos. En la noción más refinada de sistema físico, este último se concibe como algo suficientemente aislado de sus alrededores y se considera que lo que sucede en un sistema físico no depende, o sólo depende muy débilmente, de lo que sucede en otros sistemas físicos suficientemente alejados en el espacio y o en el tiempo del sistema en cuestión. La idea de separabilidad está basada en la concepción según la cual la realidad independiente está inmersa en el espacio y el tiempo. Según tal concepción el espacio y el tiempo hacen parte de la realidad en sí, es decir que existen independientemente de lo humano, de lo que conocen y deciden medir los humanos, de la existencia de los humanos. Como la realidad se inscribe, entonces, en el espacio y el tiempo, también la distancia entre dos elementos de la realidad tiene una existencia en sí, lo mismo que las relaciones causales entre los eventos que forman la realidad.

No-separabilidad

Existen experimentos que se han llevado a cabo con pares de electrones producidos en una fuente común, y se han encontrado correlaciones que parecen poder explicarse únicamente por la existencia de señales que viajarían a mayor velocidad que la de la luz. La existencia de tales correlaciones es lo que se denomina la no-separabilidad. La no-separabilidad es una noción que tiene sentido dentro de una concepción objetivista del espacio-tiempo.

Sistemas caóticos

Para tales sistemas, dos conjuntos de condiciones iniciales tan cercanos que en la práctica sean indistinguibles darán como resultado estados futuros enormemente diferentes. No importa en la práctica cuán preciso se haga el conocimiento de las condiciones iniciales, en tanto exista una imprecisión tan pequeña como se quiera, la imprecisión del estado futura crecerá exponencialmente con el tiempo. Esta sensibilidad a las condiciones iniciales significa que la única manera en que se pueden hacer predicciones a largo plazo con algún grado de precisión es conociendo con precisión absolutamente infinita las condiciones iniciales.

Efecto mariposa

Metáfora basada en el carácter caótico de la atmósfera. Dice que el hecho de que una mariposa bata o no sus alas en algún lugar del mundo (pequeña perturbación) puede definir si sucede o no una tormenta en algún otro lugar del mundo.

Fractal

Un fractal es una figura autosemejante en el sentido de que si se le observa en una escala cada vez más fina, parece doblarse y retorcerse tanto como cuando se la mira en la escala original de baja resolución. Si se cubre una superficie con una curva fractal, se obtendrá una curva de longitud infinita que cubre un área finita.

BIBLIOGRAFÍA

ARISTÓTELES. OBRAS. Aguilar, Madrid, 1977.

ARTHUR, W. P. "On the evolution of complexity", Working paper 93-11-070, Santa Fe Institute, Santa Fe, N.M., 1993.

ATLAN, Henry. Á TORT ET Á RAISON. Le Seuil, Paris, 1986.

BELL, John. SPEAKABLE AND UNSPEAKABLE IN QUANTUM MECHANICS. Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

BEN-DOV, Yoav. "Everett's Theory and the Many-Worlds' Interpretation". American Journal of Physics (58). 1990, pp. 829-832.

— "Hidden variables as Configuration Points". Il Nuovo Cimento (108B). 1993, pp. 931-939.

— "Science and the Human: Complementarity as Reconciliation", en D. Aerts, (ed.), Einstein Meets Magritte, the Yellow Book: Worldviews,, Kluwer Academic, 1996.

— INVITACIÓN A LA FÍSICA. Editorial Andres Bello, Santiago de Chile,. 1999.

BOHM, David. "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables. Part I". Phys. Rev. (85), 1952, pp.166-179.

— "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables. Part II". Phys. Rev. (85), 1952, pp.180-193.

— WHOLENESS AND THE IMPLICATE ORDER. Routledge and Kegan Paul, London, 1980.

BOHM, D. y HILEY, J.B. THE UNDIVIDED UNIVERSE: AN ONTOLOGICAL INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS. Routledge and Kegan Paul, London 1993

BOHR, Niels. ATOMIC THEORY AND THE DESCRIPTION OF NATURE. Cambridge University Press, Cambridge, 1934.

— "Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?". Physical Review (48). 1935, pp. 696-702.

— "Quantum mechanics and physical reality". Nature (136). 1935, pp. 65.

— "Analysis and synthesis in science". Intern. Encyclopedia of Unified Science Vol 1 (No.1). 1938.

— "On the notions of Causality and Complementarity". Dialectica (2). 1948, pp. 312 – 319.

— "On the Notions of Causality and Complementarity". Science. Vol.111. 1950.

— "Mechanical research and natural philosophy". Acta Medica Scand. (142) Suppl. 266. 1952 pp.967

— "Physical Science and the Study of Religions" en Einer Munksgaard, Studia Orientalia Ionni Pedersen Septuagenario.1953.

— "Physical science and man's positions". Philosophy Today (65). 1957.

—"Physical models and living organisms" en W.D. McElroy and Glass, (ed.), *Light and Life*, The John Hopkins Press, 1961.

—ESSAYS 1958-1962 ON ATOMIC PHYSICS AND HUMAN KNOWLEDGE. Interscience Publishers, New York, 1963.

—PHYSIQUE ATOMIQUE ET CONNAISSANCE HUMAINE. Gauthier Villars, Paris, 1972.

BURNET, John. *EARLY GREEK PHILOSOPHY*. London, 1920.

BUTTERFIELD, Herbert. *LOS ORÍGENES DE LA CIENCIA MODERNA*. Taurus Ediciones, Madrid, 1982.

CAMBEL, A.B. *APPLIED CHAOS THEORY: A PARADIGM FOR COMPLEXITY*. Academic Press, San Diego, Cal., 1993.

CARATINI, Roger. *LA PHILOSOPHIE*, 1, HISTOIRE. Éditions Seghers, Paris, 1983.

DAWKINS, Richard. *THE BLIND WATCHMAKER*. W.W. Norton and Company, New York, 1996.

DE BROGLIE, Louis, "Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférence et la diffraction dans la théorie des quantas de lumière". *Comptes Rendus* (183). 1926, pp. 447-448.

—"La structure de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire". *Comptes Rendus* (184). 1927, pp. 273-274.

—"La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement" *Journal de Physique et du radium* (8). 1927, pp. 225 -244.

D'ESPAGNAT, Bernard. *CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS*. Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1976.

—EN BUSCA DE LO REAL. Alianza Editorial, Madrid, 1983.

—"Non-separability and the Tentative Description of Reality". *Phys. Rep.* Vol. 110 (No. 4). 1984, pp. 203 - 264.

—UNE INCERTAINE RÉALITÉ. Gauthier-Villars, Paris, 1985.

—"Empirical Reality, Empirical Causality and the Measurement Problem". *Found. Phys.* (17). 1987, pp. 507.

—VEILED REALITY. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1995.

EINSTEIN, Albert, PODOLSKY, Boris, y ROSEN, Natan. "Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?". *Physical Review* (47). 1935 pp. 777-80.

EINSTEIN, Albert. "Autobiographical Notes" en P.A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein, Philosopher Scientist*, Vol.I. Open court, La Salle, Illinois, 1970.

—"Remarks to the Essays appearing in this Collective Volume" en P.A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein, Philosopher Scientist*, Vol.II. Open court., La Salle, Illinois, 1970.

—IDEAS AND OPINIONS. Laurel Edition, Dell Publishing Co, Inc., New York, 1973.

EVERETT, Hugh. "Relative state formulation of quantum mechanics". *Reviews of Modern Physics* (29). 1957, pp. 454-62.

FEYNMAN, Richard P. Q.E.D. THE STRANGE THEORY OF THE LIGHT AND MATTER. Princeton University Press, Princeton, 1985

FLECK, L. GENESIS AND DEVELOPMENT OF A SCIENTIFIC FACT. University of Chicago Press, Chicago, 1979.

FOLSE, Henry. THE PHILOSOPHY OF NIELS BOHR. North Holland, Amsterdam, Oxford, 1985.

GALILEO. CONSIDERACIONES Y DEMOSTRACIONES MATEMÁTICAS SOBRE DOS NUEVAS CIENCIAS. Editora Nacional, Madrid, 1981.

—LE MESSENGER DES ÉTOILES. Éditions du Seuil, Paris, 1992.

—DIALOGOS SOBRE LOS DOS MÁXIMOS SISTEMAS DEL MUNDO PTOLEMAICO Y COPERNICANO. Alianza Editorial, Madrid, 1994.

GELLMANN, Murray. THE QUARK AND THE JAGUAR. ADVENTURES IN THE SIMPLE AND THE COMPLEX. W. H. Freeman, New York, 1994.

GHIRARDI, G.C., RIMINI, A., y WEBER T. "Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems", *Phys. Rev. D*, Vol. 34, (No. 3). 1986, pp. 470-491.

GRANÉS, José. NEWTON Y EL EMPIRISMO. Empresa Editorial Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1988.

GUERRERO, Germán. "El lugar de Dios en la filosofía natural de Newton". *Praxis Filosófica*, Nueva serie (No. 6). 1997, pp. 99-112.

HEISENBERG, Werner. PHYSIQUE ET PHILOSOPHIE. Albin Michel, Paris, 1970. LA PARTIE ET LE TOUT. Albin Michel, Paris, 1972.

HIRSCHBERGER, Johannes. HISTORIA DE LA FILOSOFÍA, TOMO 1. Editorial Herder, Barcelona, 1982.

HOFFMAN, Banesh, y PATY, Michel. L'ÉTRANGE HISTOIRE DES QUANTA. Éditions du Seuil, Paris, 1981.

HORGAN, J. "From Complexity to Perplexity". *Scientific American*, June, 1995, pp. 104-109.

JAMMER, Max. THE PHILOSOPHY OF QUANTUM MECHANICS. John Wiley & Sons, New York, London, 1947.

—CONCEPTOS DE ESPACIO. Colección Diana, Editorial Grijalbo, S.A., México, 1970.
—THE CONCEPTUAL DEVELOPMENT OF QUANTUM MECHANICS. Mc Graw Hill, New York, 1974.

KELLER, S.H. IN THE WAKE OF CHAOS: UNPREDICTABLE ORDER IN DYNAMICAL SYSTEMS. University of Chicago Press, Chicago, 1993.

KOUZNETSOV, Boris. GALILEO GALILEI. Colección Vulcano, Editorial Científico-Técnica, Ciudad de la Habana, 1981.

KOYRÉ, Alexandre. ÉTUDES D'HISTOIRE DE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE. Gallimard, Paris, 1973.

—ESTUDIOS GALILEANOS. Siglo XXI editores. México, 1981.

—DU MONDE CLOS À L'UNIVERS INFINI. Gallimard, Paris, 1988.

KUHN, Thomas. LA REVOLUCIÓN COPERNICANA. Ariel, Barcelona, 1981.

—THE STRUCTURE OF SCIENTIFIC REVOLUTIONS. University of Chicago Press, Chicago, 1962.

LAPLACE, Pierre Simon de. A PHILOSOPHICAL ESSAY ON PROBABILITIES. Dover, New York, 1951.

LAUWERIER, H. FRACTALS, IMAGES AND CHAOS. Penguin Books, London, 1991.

LEWIN, R. COMPLEXITY: LIFE AT THE EDGE OF CHAOS. J.M. Dent, London, 1993.

LONDON, Fritz, y BAUER, Edmond. LA THÉORIE DE LA OBSERVATION EN MÉCANIQUE QUANTIQUE. Hermann, Paris, 1939.

MANDELBROT, Benoit. THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. W.H. Freeman, New York, 1977.

MATURANA, Humberto, y VARELA Francisco. AUTOPOIESIS AND COGNITION. THE REALIZATION OF THE LIVING. D. Reidel Publishing Company, Boston, Mass., 1980.

—EL ÁRBOL DEL CONOCIMIENTO. LAS BASES BIOLÓGICAS DEL CONOCIMIENTO HUMANO. Editorial Debate. Madrid, 1996.

MONOD, Jacques. LE HASARD ET LA NÉCESSITÉ. Éditions du Seuil, Paris, 1970.

MORIN, Edgar. INTRODUCTION À LA PENSÉE COMPLEXE. ESF Éditeur, Paris, 1990.

MUTIS, Alvaro. SIETE NOVELAS. EMPRESAS Y TRIBULACIONES DE MAQROLL EL GAVIERO. Alfaguara, Bogotá, 1995.

- NEWTON, Isaac. OPTICKS. Dover, New York, 1952.
- PRINCIPIOS MATEMÁTICOS DE LA FILOSOFÍA NATURAL Y SU SISTEMA DEL MUNDO. Editora Nacional, Madrid, 1982.
- PATY, Michel. "Sur le réalisme d'Albert Einstein". La Pensée, No. 204, 1979. pp. 18-37.
- LA MATIÈRE DÉROBÉE. Éditions des archives contemporaines, Paris, 1988.
- EINSTEIN PHILOSOPHE. Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
- PESSIS-PASTERNAK, G. (ed.). FAUT-IL BRULER DESCARTES? DU CHAOS À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE. Édition la découverte, Paris, 1991.
- PETERSEN, A. "The Philosophy of Niels Bohr". Bulletin of the Atomic Scientist, (19). 1963. pp. 8-14.
- QUANTUM PHYSICS AND THE PHILOSOPHICAL TRADITION. M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1968.
- PRIGOGINE, Ilya, y STENGERS, Isabelle. LA NOUVELLE ALLIANCE. Gallimard, Paris, 1979.
- ENTRE LE TEMPS ET L'ÉTERNITÉ. Fayard, Paris, 1988.
- PRIGOGINE, Ilya. FROM BEING TO BECOMING. TIME AND COMPLEXITY IN THE PHYSICAL SCIENCE. Freeman, San Francisco, Cal., 1980.
- TAN SÓLO UNA ILUSIÓN. Tusquets Editores, Barcelona, 1988.
- EL TIEMPO Y EL DEVENIR, Coloquio de Cerisy. Gedisa editorial, Barcelona, 1996.
- LA LEYES DEL CAOS. Drakontos, Barcelona, 1997.
- ROLDÁN, Jairo. "La realidad física para Bohr" en Memorias del Seminario en conmemoración del centenario de Erwin Schrödinger. Academia colombiana de ciencias exactas y naturales, Colección Enrique Péres Arbeláez, No.1. Bogotá, 1987.
- "El modo complementario de descripción". Revista de Ciencias, 1, 1989, pp. 51-71.
- "La no-separabilidad. ¿Está la realidad física en el espacio-tiempo?". Revista de Ciencias, 4, 1991, pp. 61-84.
- LANGAGE, MÉCANIQUE QUANTIQUE ET RÉALITÉ: UN ESSAI SUR LA PENSÉE DE NIELS BOHR, Thèse de Doctorat, Université de Paris, Panthéon-Sorbonne, Paris, 1991.
- "El mundo cuántico y nuestra visión de lo real" en: Panorama de la Física contemporánea., Centro de Publicaciones, Facultad de Ciencias, Universidad del Valle. Cali 1995.
- "Complementariedad entre Ciencia y Religión", en Arsenio Arbeláez, (compilador) Principios para una educación del siglo XXI. Correlaciones, Fundaec. Cali, 2000.
- "Los estudios de lo complejo y las ciencias de la vida". Medicina, Vol. 22, No.1 (52), Abril, 2000, pp. 2-7.
- RUELLE, David. ACASO E CAOS. Editora UNESP, São Paulo, 1993.

SCHRÖDINGER, Erwin. "The present situation in quantum mechanics" (Traducción del artículo de la paradoja del gato de Schrödinger de 1935) en Wheeler, J.A., y Zurek, W.H. (eds). Quantum Theory and Measurement. Princeton University Press, Princeton, 1983.

SHIMONNY, Abner. "The role of the observer in Quantum Theory". American Journal of Physics Vol.31, (No. 10). 1963.

—"Refléxions sur la philosophie de Bohr, Heisenberg et Schrodinger" Journal de Physique Colloque 62, supplément au No.3, Tome 42, 1981, c2-91-c2-95.

STEWART, I. DOES GOD PLAYS DICE? THE MATHEMATICS OF CHAOS. Brackwell, Cambridge, Mass., 1989.

VON NEUMANN, John. MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS. Princeton University Press, Princeton, 1955.

WAGENSBER, Jorge. IDEAS SOBRE LA COMPLEJIDAD DEL MUNDO. Tusquets Editores, Barcelona, 1994.

WALDROP, M. M. THE EMERGING SCIENCE AT THE EDGE OF ORDER AND CHAOS. Simon and Shuster, New York, 1992.

WHEELER, J.A., y ZUREK, W.H. (eds). QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. Princeton University Press, Princeton, 1983.

WHEELER, John Archivald. "Bits, Quanta, Meaning", en A. Giovannini, F. Mancini, y M. Martinaro. (eds). Problems in Theoretical Physics. University of Salerno Press. Salerno 1994.

WIGNER, Eugene. "Remarks on the mind-body question" en Symmetries and Reflections. Indiana University Press, Bloomington, 1967.

—"The problem of the Measurement" Am. J. of Phys. (31). 1.963, pp. 6-15.