

**Aranda Anzaldo, A.** (1994) Los límites del reduccionismo molecular.  
*Ciencia y Desarrollo* Vol. XX 116:18-25.  
CONACYT. (LAT)



# Los límites del reduccionismo molecular

Armando Aranda Anzaldo

Laboratoire d'Immunobiologie, Faculté de Médecine, Université de Paris, Francia

**Existen inconsistencias fundamentales entre el paradigma de la biología molecular y el paradigma de la física contemporánea y, por lo tanto, el marco conceptual vigente en la biología molecular resulta insuficiente para abordar las cuestiones del origen y desarrollo de la forma y organización biológicas.**

A partir de la publicación en 1962 del libro *La estructura de las revoluciones científicas*, escrito por el historiador y filósofo Thomas Kuhn, el término *paradigma* se ha convertido en un componente básico de toda discusión sobre la naturaleza de la ciencia. Estrictamente, el término paradigma significa ejemplo o modelo, pero Kuhn ha utilizado este término dándole más de veinte acepciones diferentes. Sin embargo, es posible afirmar, sin temor a equivocarse, que en la actualidad la acepción más generalizada del concepto de paradigma científico consiste en el conjunto de conceptos y metodologías aceptados por una disciplina científica en un periodo histórico en particular. Según Thomas Kuhn, un paradigma permite el desarrollo continuo de una disciplina científica hasta que la acumulación de anomalías, o sea de observaciones y resultados experimentales que no pueden ser explicados en el marco del paradigma vigente, provoca una revolución conceptual que se manifiesta como un cambio de paradigma, lo que equivale a un cambio de *gestalt* o de visión del mundo.<sup>1</sup>

Muchas veces los paradigmas sucesivos son irreconciliables entre sí y, sin embargo, la dinámica de la ciencia parece estar basada en la sustitución periódica de sus paradigmas. El presente artículo propone que existen inconsistencias fundamentales entre el paradigma de la biología molecular y el paradigma de la física contemporánea y, por lo tanto, el marco conceptual vigente en la biología molecular resulta contradictorio e insuficiente para abordar las cuestiones del origen y desarrollo de la forma y organización biológicas.

## Origen del análisis reduccionista

La palabra análisis significa la división de un todo, ya sea material o abstracto, en sus partes constituyentes para examinar o determinar las relaciones de las partes entre sí. Por ejemplo, el análisis químico consiste en la descomposición de una sustancia química en sus diferentes elementos, radicales y otros componentes para determinar los tipos (análisis cualitativo) y las cantidades de cada componente presente en la

substancia (análisis cuantitativo). La síntesis, por el contrario, consiste en la combinación de elementos o sustancias separados para formar un todo coherente. Todo proceso de análisis, ya sea éste físico o intelectual, que no es seguido por un proceso de síntesis es necesariamente reduccionista, ya que todo aquello que es sujeto al proceso de análisis es reducido a sus partes por medio de la ruptura de conexiones internas y externas. El proceso de análisis está asociado por lo general con actividades científicas; sin embargo, la naturaleza reduccionista del análisis no se origina en la ciencia sino que parece tener sus raíces en las propiedades de la conciencia humana, a partir de la cual surgió la propia ciencia.

Según Eddington, las leyes fundamentales de la naturaleza y las constantes de la física pueden ser completamente derivadas a partir de consideraciones epistemológicas, o sea a partir de los requerimientos subjetivos de la naturaleza de la conciencia humana. Eddington afirma lo anterior a partir de las siguientes consideraciones: 1) el uso de la noción de probabilidad, como ocurre en la Mecánica Cuántica, enfatiza que son *conceptos* y no entidades con los que tratamos, ya que la probabilidad no es un atributo de los eventos sino de nuestro conocimiento; 2) la práctica de introducir nuevas cantidades y constantes físicas, consiste en definir tales cantidades en términos de las operaciones y cálculos de los cuales son el resultado. Esto implica una referencia esencial a nuestro sensorio y a nuestro aparato mental y, por lo tanto, los resultados dependen de la estructura del aparato mental con el cual organizamos nuestras sensaciones.<sup>2</sup>

Al parecer, la conciencia normal tiene características necesariamente reductivas o reduccionistas, ya que reduce la totalidad de la interacción orgánica a aquello que puede ser percibido, o resuelto por los sentidos y hecho consciente a través de un proceso de clasificación. Así, la conciencia no sólo plantea límites a aquello que podemos experimentar, sino que también determina la calidad de tales experiencias. La existencia de la conciencia presupone la permanencia del yo, también conocido como el ego; por lo tanto, toda experiencia implica una relación sujeto-objeto.

La palabra existencia se origina en el término latino *ex sistere* el cual significa "salir de" o "sobresalir de". Así, por medio del ego y la dualidad sujeto-objeto creamos la ilusión de estar como observadores por fuera de la naturaleza. Este dualismo de la conciencia se extiende hacia el propio sensorio que produce las propiedades a partir de las cuales tomamos conciencia de algún evento en particular, debido a que el funcionamiento del sistema nervioso depende de la existencia de condiciones de polaridad. Todas las propiedades atribuidas a la experiencia son derivadas de la naturaleza dualista de la conciencia basada en el ego, o sea todas las propiedades son conocidas solamente a través de relaciones de diferencia.

La ciencia se basa en la experiencia consciente. Sin embargo, el conocimiento científico trasciende la simple experiencia ya que está compuesto de clases de experiencias. Por medio del tratamiento analítico de estas clases, la conciencia establece una jerarquía basada en relaciones que trascienden aquellas contenidas en las experiencias sensoriales inmediatas. Así la conciencia, por medio de la clasificación de las diferencias, establece un sistema metafísico que representa el conocimiento de un orden que surge a partir de nuestra inferencia de relaciones entre clases de experiencias inmediatas. Esta función sintética de la ciencia es de gran importancia, ya que nos hace conscientes de la existencia de relaciones repetitivas—relaciones de orden— las cuales no pueden ser experimentadas en forma directa, pero pueden ser reconocidas como un tipo de orden que se basa en los grados de repetición o reproducibilidad dentro de la experiencia. Por lo tanto, el conocimiento de la realidad física depende de la experiencia sensorial, pero trasciende dicha experiencia a través de la organización de las experiencias en complejas clases metafísicas que utilizamos para describir el mundo revelado por nuestra conciencia.

La ciencia requiere del continuo apoyo de la experiencia sensible no sólo para obtener la información que es utilizada para elaborar inferencias sino, sobre todo, para llevar a cabo la verificación de tales inferencias. Un problema fundamental asociado con las inferencias científicas consiste en el error lógico que resulta de afirmar la verdad de lo antecedente a partir de lo conse-

cuente. Por ejemplo, en astronomía se presume con frecuencia que si una hipótesis P es verdadera, entonces debe conducir a la observación celeste Y. Si tal evento sucede (la observación Y), entonces se dice que la verdad de P ha sido confirmada cuando menos en parte. Sin embargo, podemos ver en forma intuitiva que este argumento es inválido ya que es posible imaginar múltiples hipótesis alternativas Q, R, S, etc., que pueden ser también consistentes con la observación celeste Y. Así, el astrónomo que pretende interpretar su sistema teórico en forma realista se ve confrontado con la crítica siguiente: si está equivocado puede llegar a saberlo, pero si está en lo correcto nunca llegará a saberlo. Como resultado de estas dificultades lógicas las teorías astronómicas fueron interpretadas en la Antigüedad y en la Edad Media como simples recursos para realizar cálculos y predicciones de las posiciones y movimientos celestes, pero sin pretender que tuvieran una verdad intrínseca.

### El reduccionismo mecanicista

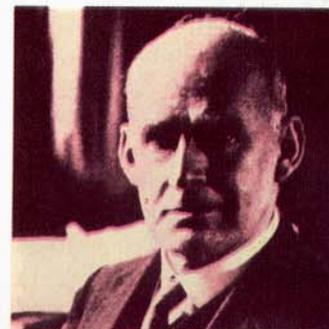
En la medida que evolucionaron los métodos reduccionistas para el examen de la experiencia, se pudo establecer que algunos aspectos de esta experiencia pueden ser descritos en términos de regularidades. Las propiedades repetitivas de algunas experiencias permiten que éstas sean descritas en términos de relaciones cuantitativas que son simbolizadas en forma de números y ecuaciones. Así, el lenguaje matemático fue introducido en la ciencia para describir una cierta clase de experiencias. El primer sistema natural que fue descrito en términos matemáticos, permitiendo así la predicción de eventos futuros, fue el movimiento de estrellas y planetas. Con el reconocimiento de la regularidad de los movimientos celestes surgió la correlación de esta regularidad con el comportamiento de máquinas basadas en la rueda. En la cultura occidental el movimiento celeste fue intelectualizado en forma de mecánica celeste y así dio origen al pensamiento maquinista en el cual toda la naturaleza es interpretada en función de la supuesta perfección de los movimientos celestes. Este punto de vista fue reforzado por el éxito en la construcción de instrumentos mecánicos, como el reloj, que de alguna manera imitan los movimientos celestes,

dando así origen a una filosofía conocida como mecanicismo.

El mecanicismo se basa en la suposición de que todos los sistemas físicos pueden ser reducidos a partes elementales que pueden ser localizadas con precisión en el espacio y el tiempo, y que pueden ser descritas por medio de sus propiedades intrínsecas, o sea sin necesidad de considerar las interacciones entre las partes. Las nociones mecanicistas fueron aplicadas a todos los sistemas naturales y en el área de las entidades más pequeñas permitieron el resurgimiento del atomismo, originalmente propuesto por Demócrito y Leucipo en el siglo V a.C., según el cual los componentes básicos de la realidad son concebidos como corpúsculos de materia sólidos, irreducibles, impenetrables, que se mueven a través del espacio vacío. El atomismo supone que estos corpúsculos elementales (átomos) pueden ser descritos en forma individual sin referencia a ninguna otra región del espacio-tiempo. Por lo tanto, la realidad se concibe como compuesta de entidades que carecen de estructura interna y cuyas propiedades son todas intrínsecas. A partir de estas suposiciones surgió el reduccionismo científico y la noción moderna de explicación que literalmente significa "nivelar" o sea, aplanar las irregularidades. Así, las irregularidades de la experiencia son niveladas al reducirlas a sus aspectos repetitivos que



T. Kuhn.



Eddington.

pueden ser descritos en términos de las propiedades de partículas de materia en movimiento propuestas por el atomismo. De esta manera, las cualidades reductivas de la conciencia fueron transformadas en la filosofía del reduccionismo mecanicista que fue acoplado con el método de análisis reductivo.

Las primeras explicaciones mecanicistas surgieron en un periodo cuando las expectativas culturales todavía estaban basadas en la religión. Por lo tanto, en las primeras formas de mecanicismo estuvieron presentes algunos resabios del antropomorfismo teleológico característico de la teología del siglo XVI. La teleología es el estudio del propósito o finalidad en la naturaleza. Existen fenómenos que parecen ser explicados con mayor facilidad no a partir de sus causas previas, sino en función de su finalidad o propósito aparente. Las explicaciones teleológicas son muy utilizadas con relación a los seres vivos. Así, el comportamiento de un animal puede ser descrito en función de su finalidad; por ejemplo, la busca de alimento. La actividad de un ajedrecista puede ser comprendida en términos de su propósito: ganar.

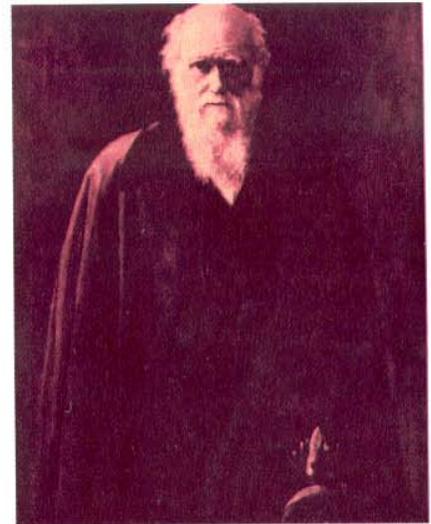
La capacidad humana de reducir la naturaleza a una ciencia mecánica fue tomada como evidencia de la existencia de un dios que diseñó la máquina de la naturaleza dotándola de un propósito específico. La aparente finalidad observada en muchos fenómenos naturales reforzó la analogía de éstos con las máquinas, ya que todas las máquinas son construidas en función de una finalidad o propósito específico. La ciencia de los siglos XVII y XVIII estuvo dominada por esta visión en la cual el universo es concebido como una máquina enorme compuesta de partes materiales, una máquina diseñada y mantenida por un creador antropomorfo que la dotó de un propósito. Esta idea fue central al deísmo filosófico especialmente difundido por Voltaire en el siglo XVIII. El método de análisis reduccionista se convirtió en la herramienta cognitiva del Siglo de las Luces. Sin embargo, la aplicación de este método reduccionista condujo eventualmente a modificar las suposiciones originales de la visión mecanicista. Los factores que precipitaron esta revisión fueron consecuencia de progresos históricos en la biología y en la física. La biología socavó la premisa teleológica del

mecanicismo y la física demolió el concepto de impenetrabilidad y, más tarde, la propia realidad material de los átomos.

### La selección natural y la teoría celular

Al principio del siglo XIX el pensamiento biológico estuvo dominado por la cuestión de la diversidad orgánica. Este interés culminó en la teoría de la selección natural —erróneamente conocida como teoría de la evolución—, propuesta en forma independiente por Darwin y Wallace en 1858. Esta teoría planteó un sólido argumento contra la idea de que existe una finalidad en la naturaleza. Por esta razón la teoría de la selección natural fue combatida con vehemencia por las instituciones religiosas. Sin embargo, la fuerza de sus argumentos y el apoyo de una creciente evidencia condujo a la aceptación casi general de esta teoría y a la modificación de las posiciones teleológicas tradicionales. La idea de la selección natural minó en forma casi irreparable el llamado argumento de intención o argumento teleológico, que es el más popular y persuasivo de los argumentos comúnmente utilizados para probar racionalmente la existencia de Dios. Este argumento ha sido propuesto y reformulado por múltiples autores a lo largo de la historia (Cicerón, San Agustín, Santo Tomás de Aquino, William Paley) y se basa en nuestra experiencia de la regularidad e integración observadas en el universo para luego concluir que tal armonía debe ser la obra de un Diseñador, Demiurgo, Gran Arquitecto o Dios. Pero el concepto de selección natural ocasionó una profunda revisión de la supuesta relación entre un dios creador y la naturaleza.

En la segunda mitad del siglo XIX las generalizaciones inductivas de Schleiden y Schwann fueron asociadas con las deducciones de Virchow para establecer a la célula como la máquina vital fundamental que debe ser considerada por cualquier estudio del orden biológico. A partir de 1900 surgieron en la biología dos líneas básicas de investigación. La primera se ocupa de la célula como elemento funcional de la herencia (relación genotipo-fenotipo) y la segunda se ocupa de la célula como elemento funcional de la ontogenia que es el proceso de desarrollo, a partir del óvulo fertilizado,



Darwin.

hasta el organismo adulto. Cuando los trabajos de Mendel fueron redescubiertos alrededor de 1900, inmediatamente fueron correlacionados con el conocimiento de la estructura celular a través de los trabajos de Sutton, Boveri, McClung y Bridges; así surgió el concepto de las bases cromosómicas de la herencia. La investigación subsecuente sobre la naturaleza y función de los cromosomas condujo a la descripción de los principios de la herencia en términos moleculares. El descubrimiento de las bases moleculares de las mutaciones y la asimilación de esta información dentro de la teoría de la selección natural produjo la llamada "nueva síntesis" del evolucionismo neodarwiniano que, al parecer, dio el tiro de gracia al argumento de intención. Así, la paradoja darwiniana, en la cual la supuesta finalidad de la naturaleza reside en máquinas celulares diseñadas y propulsadas por el ciego azar molecular, obligó al mecanicismo biológico a modificar su concepción de intención y a reconocer que la selección natural opera únicamente sobre variaciones producidas al azar por el proceso mutagénico. Las máquinas vivientes fueron concebidas como capaces de autoconstruirse a partir de mecanismos autónomos cuyas operaciones son constantemente modeladas por la selección natural. En otras palabras, la nueva biología pretendió haber demostrado que el Divino Relojero propuesto por William Paley está ciego y que los relojes (léase organismos) son construidos por mero accidente, o sea son resultados del azar.



Virchow.



Bernard.

La capacidad de describir a la célula en términos de los procesos moleculares de catálisis enzimática, replicación y transcripción del ADN, y traducción del ARN mensajero en proteínas, permitió establecer el enfoque de la biología molecular que predomina en la actualidad, ya que es considerado el más eficaz en cuanto a su capacidad de intervención en el curso de los fenómenos biológicos. De hecho existe la expectativa casi general de que todas las cuestiones biológicas podrán ser solucionadas por medio de este enfoque reduccionista. Ya desde principios de este siglo investigadores como Le Dantec sostenían que “la diferencia entre la vida y la muerte es del mismo orden de aquella que existe entre el fenol y el sulfato o entre un cuerpo electrificado y un cuerpo neutral... con el nuevo conocimiento adquirido por la ciencia, la mente ilustrada ya no requiere de pruebas, como la fabricación artificial del protoplasma, para estar convencida de que no existe diferencia esencial ni discontinuidad entre la materia viva y la materia inerte. En otras palabras, todos los fenómenos que estudiamos en los seres vivos pueden ser analizados objetivamente por los métodos de la física y la química”.<sup>3</sup> Pero ya en el siglo pasado el gran fisiólogo Claude Bernard sugería que “detrás de los mecanismos matemáticoquímico-físicos que nos gobiernan sentimos revolotear algo parecido a una idea rectora”;<sup>4</sup> mientras que Edmund Wilson, uno de los padres fundadores de la biología experimental en Estados Unidos, se preguntaba en 1925: “¿Acaso es la vida nada más que un delicado mecanismo explicable en términos de interacciones fisicoquímicas?; la respuesta en función de nuestro conocimiento actual parece ser negativa. La vida involucra una actividad que dota a la materia de nuevas propiedades como irritabilidad, crecimiento y propagación cuya naturaleza trasciende los atributos de la materia inorgánica e implica la presencia de algo más, algo que se llama “principio vital”.<sup>5</sup>

Es importante recalcar que la biología molecular y sus premisas actuales están basadas en el materialismo ingenuo característico de la física de los siglos XVII a XIX, ya que las moléculas descritas por la biología molecular son concebidas como compuestas por átomos materiales según las premisas de Galileo y Newton. La biología molecular presupone que los niveles superiores de estructura son nada más que manifestaciones de lo que ocurre a nivel molecular o sea, las propiedades moleculares son suficientes para explicar los fenómenos biológicos y por lo tanto la vida es reducible a los principios de la química y la física clásicas.

### La crisis del mecanicismo reduccionista

La época de oro del mecanicismo se extiende desde la publicación de los *Principia Mathematica* de Newton en 1687, hasta la aparición del *Traité de Mécanique Céleste* (1799-1825), de Pierre Simón de Laplace, el cual consideraba que sólo faltaba conocer algunos fenómenos en detalle para revelar la perfección mecánica de la totalidad del universo. Pero uno de los detalles consiste en el hecho de que una carga eléctrica en movimiento genera un campo magnético. A partir de esta observación, Faraday y Maxwell iniciaron una física del electromagnetismo que vino a terminar con el optimismo desmesurado de los mecanicistas. El desarrollo de la teoría electromagnética demostró que las partículas elementales no podían ser incluidas en el rígido marco del atomismo seguido por la física newtoniana y que ciertas propiedades elementales no están necesariamente asociadas con partículas materiales. Así, la descripción de la máquina natural tuvo que incluir nuevas entidades inmateriales denominadas *campos* que tienen la propiedad de afectar el comportamiento de la materia. Posteriormente fue demostrado que las partículas materiales se comportan como ondas electromagnéticas que no pueden ser localizadas con precisión en el espacio-tiempo y sólo pueden ser descritas a través de sus propiedades relacionales y probabilísticas. Los elementos de la máquina natural resultaron ser ni materiales ni particulados (corpúsculos), ya que surgen y desaparecen conti-

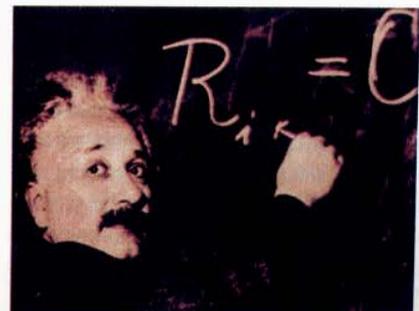
nuamente. De hecho, partículas, ondas, materia, energía, tiempo y espacio se convirtieron en conceptos relativistas que fueron incluidos dentro de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica.

### El extraño universo cuántico

La teoría cuántica, iniciada por un artículo de Einstein publicado en 1905 (sobre el efecto fotoeléctrico), es quizá el evento más revolucionario en la historia de la física y tal vez constituye la teoría más exitosa en la historia de la ciencia en cuanto a su capacidad para predecir y describir los fenómenos del universo físico. Entre los años de 1900 a 1920, los físicos concentraron su atención en fenómenos como la radiación térmica y el efecto fotoeléctrico, en los cuales la luz se comporta como un flujo de partículas y no como una onda. Ondas y partículas son cosas muy diferentes, como podemos constatarlo al comparar los rizados sobre la superficie de un lago. La cuestión crucial era si la luz está constituida por ondas o por partículas. Este dilema pronto multiplicó sus cuernos, ya que en 1927 se demostró que los electrones también son capaces de comportarse como ondas en lugar de partículas, y esta situación se repitió en el caso de los protones, neutrones y demás partículas fundamentales.

Los físicos teóricos han desarrollado métodos para describir ambos estados (onda-partícula). Decir que la luz se comporta como partícula significa que la energía de las ondas del campo electromagnético no puede ser subdividida en forma indefinida. Para todas las ondas con una frecuencia determinada existe una cantidad irreducible de energía que debe estar involucrada cada vez que la luz interacciona con cualquier otra cosa. Esta cantidad es el pro-

Einstein.





Heisenberg.



Schrödinger.

ducto de  $h\nu$ , donde  $\nu$  es la frecuencia y  $h$  es una constante llamada constante de Planck. Se denomina "cuanto" electromagnético o fotón a cada una de estas unidades de energía y se les considera como una de las partículas fundamentales o elementales. Hasta el momento se han descrito más de cien tipos de partículas elementales; esto pone en cuestión la verdadera "elementaridad" de tales partículas. ¿Acaso son todas igualmente elementales, o acaso varias son el resultado de combinaciones o estados excitados de otras partículas?

Actualmente se acepta que toda partícula elemental es una manifestación de las ondas propias de algún tipo de campo físico. Los físicos se refieren a ondas, partículas y campos en términos de las mismas ecuaciones; se considera impráctico preguntarse si los electrones o fotones son realmente ondas o partículas. Lo único que puede afirmarse es que son cosas cuyo comportamiento puede ser adecuadamente descrito y predicho por ciertas ecuaciones. Algunos visualizan partículas en ciertos fenómenos y ondas en otros fenómenos; ninguna concepción contiene toda la verdad. Sin embargo, por razones prácticas los físicos continúan refiriéndose a estas cosas en términos de "partículas elementales". Este punto de vista es característico de la mecánica cuántica que es una teoría fundamental de la energía, materia y movimiento. Es posible preguntarse cuál es la posición exacta de una partícula determinada o preguntarse cuál es la longitud de onda de una onda, pero la primera cuestión no puede ser preguntada con respecto a una onda ni la segunda con respecto a una partícula. Pero ya hemos visto que objetos como los electrones tienen algo en común con ondas y partículas, por lo cual las dos preguntas no pueden ser contestadas con precisión al mismo tiempo, o ambas preguntas pueden tener respuestas imprecisas. La longitud de onda del elec-

trón está íntimamente relacionada con su velocidad; por lo tanto, debemos aceptar un conocimiento exacto de la velocidad (longitud de onda) e ignorar la posición del electrón o viceversa, o si no, podemos conformarnos con un conocimiento impreciso de ambas cantidades (posición, velocidad). Éste es el famoso "Principio de Incertidumbre" formulado por Heisenberg. Así, la mecánica cuántica es un grupo de reglas matemáticas para calcular el comportamiento de las partículas elementales de acuerdo con el Principio de Incertidumbre. Este principio, a pesar de su nombre, ha conducido a un impresionante aumento en la precisión con la cual son descritos los fenómenos físicos.

La mecánica cuántica surgió en la misma época que la teoría de la relatividad desarrollada por Einstein. Sin embargo, hasta la fecha no ha sido posible reconciliar en un esquema común los principios fundamentales de ambas teorías. La relatividad se ocupa de todos los tipos de movimiento y de todas las leyes físicas, pero sus manifestaciones características sólo son observables cuando los objetos se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. La mecánica cuántica también incluye en principio a todos los fenómenos físicos, pero sus manifestaciones típicas sólo son observables cuando se exploran fenómenos microscópicos en la escala molecular. Por esta razón la mayoría de los fenómenos cotidianos pueden ser aproximados por medio de la mecánica clásica de Newton, la cual no es ni relativista ni cuántica.

La evidente discrepancia entre el mundo de la experiencia cotidiana y el mundo cuántico constituye una paradoja que ha inquietado a los físicos por más de cincuenta años, ya que la física cuántica parece incluir a la física clásica sólo como un caso límite. En el mundo de las partículas es posible concebir infinidad de situaciones en las cuales estas partículas se encuentran al

mismo tiempo en dos estados físicos que se excluyen mutuamente. Estas situaciones surgen siempre que se realizan mediciones para determinar el estado cuántico de tales objetos. Sin embargo, es también perfectamente lógico imaginar situaciones en las cuales los objetos macroscópicos pueden encontrarse en estados mutuamente exclusivos al mismo tiempo. En 1935 Schrödinger inventó una paradoja que muestra las situaciones absurdas provocadas por la aplicación de los principios de la mecánica cuántica a los fenómenos macroscópicos. Schrödinger imaginó un terrible experimento: un gato es colocado en una cámara metálica junto con un contador Geiger que contiene una diminuta cantidad de una sustancia radiactiva, tan diminuta que en el periodo de una hora sólo uno de los átomos de la sustancia puede decaer radiactivamente, pero es también igualmente probable que ningún átomo decaiga en ese periodo. Si hay una emisión radiactiva el contador Geiger activará un pequeño martillo que romperá un ánupula de cianuro provocando la muerte del gato. La cuestión es la siguiente: ¿cuál es el estado del sistema gato-mecanismo infernal al cabo de una hora en ausencia de un observador (ya sea éste un instrumento o un investigador)? ¿Está el gato vivo y el ánupula intacta o está el ánupula rota y el gato muerto? De acuerdo con la física cuántica el sistema completo se encuentra mitad en el estado "gato vivo, etc." y mitad en el estado "gato muerto, etc.". El estado físico del gato es análogo al de una molécula de benceno que en cualquier momento se encuentra de acuerdo con la teoría cuántica en dos estados sobrepuestos:



Sin embargo, cuando llevamos a cabo una observación directa o instrumental para describir cuál es el estado del gato al cabo de una hora, encontraremos que el gato está en uno de dos posibles estados: o vivo o muerto, todo depende del fortuito fenómeno del decaimiento radiactivo. Esto significa que el acto de medición u observación objetiva el estado físico del gato que previamente se encontraba en un absurdo y extraño estado sobrepuesto entre la vida y

la muerte. Esto implica que no existe una clara línea divisoria entre los aspectos objetivos y subjetivos de la investigación experimental, o sea que no existe diferencia absoluta entre el objeto estudiado y el sujeto que realiza el estudio, entre el sistema observado y el instrumento de medición u observación. Así, el observador participa activamente en la objetivación de la realidad física. Según el cosmólogo John A. Wheeler, para describir lo que ocurre en el mundo cuántico es necesario eliminar el término de observador y sustituirlo por el término de *participador*. En una forma insólita, el universo es un universo participativo.<sup>6</sup>

Así, vemos que en el mundo microscópico no puede ser mantenida la clara distinción cartesiana entre observador y observado, ya que el acto de observación modifica a aquello que es observado. Sin embargo, en la experiencia cotidiana no son observados los extraños efectos cuánticos; por lo tanto, esto conduce a preguntarse dónde termina el mundo cuántico y surge el mundo clásico; cuántos átomos son necesarios para constituir un sistema lo suficientemente grande para considerarlo sólo en términos de la física clásica. Las respuestas a estas preguntas son inciertas, pero es indiscutible que la química contemporánea ha realizado grandes progresos debido a que la mecánica cuántica ha permitido comprender fenómenos básicos como la valencia atómica y la naturaleza de los enlaces químicos, y la teoría cuántica del estado sólido, o teoría de la materia condensada, es la base sobre la cual descansa mucha tecnología contemporánea, desde el transistor hasta los superconductores.

Sin embargo, el colapso de las descripciones absolutas en el mundo microfísico, y el consecuente colapso de la concepción de los átomos como diminutas bolas de billar, significa el colapso de las concepciones de la realidad física basadas en el simple sentido común y la experiencia cotidiana. Los creadores de la teoría cuántica —hombres como Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Pauli y Dirac— con frecuencia se mostraron confundidos ante la absurda naturaleza del mundo descrito por la mecánica cuántica. Tanto así que Einstein decidió abandonar la teoría cuántica, como lo confirma la carta que envió a Max Born el 4 de diciembre de 1926, don-

de Einstein escribió: "La mecánica cuántica es sin duda imponente. Pero una voz interna me dice que no es todavía la verdadera. La teoría cuántica dice muchas cosas, pero realmente no nos acerca al secreto del *Viejo* (como Einstein se refería a Dios). Yo, por mi parte, estoy convencido de que *Él* no juega a los dados."<sup>7</sup> Sin embargo, hasta la fecha cada nuevo experimento diseñado para probar o refutar la validez de la teoría cuántica ha producido resultados que confirman la consistencia de la descripción cuántica de la naturaleza.

Así, en lugar de lograr la reducción de la naturaleza a partículas elementales, la física ha evolucionado hacia una visión de la realidad en la cual la materia no es considerada una causa sino el efecto de una clase especial de interacciones entre campos de energía. La materia y por consecuencia, los organismos, parecen surgir por un proceso epigenético a partir de niveles inferiores de organización que en el marco de la física actual no pueden ser considerados poseedores de una materialidad intrínseca. Es una ironía de la historia que el mecanicismo clásico basado en el atomismo ha sido demolido por el propio éxito del análisis reduccionista.

### El redescubrimiento de Aristóteles

A fines del siglo XIX surgió una nueva línea de investigación en biología, la cual habría de conducir al mecanicismo por un camino diferente; Wilhem Roux y Hans Driesch fundaron la embriología experimental. Driesch inició su carrera científica siendo un mecanicista convencido e influenciado por las ideas de Darwin, y suponía que los sistemas biológicos deben comportarse como verdaderas máquinas; por lo tanto, esperaba lograr el análisis causal del desarrollo embrionario, pero su trabajo experimental lo condujo al descubrimiento de las propiedades regulatorias del embrión.

En 1891 Driesch logró separar las dos primeras células (blastómeras) que resultan de la segmentación primaria del óvulo fecundado del erizo marino, y descubrió que cada blastómera era capaz de originar una larva íntegra aunque de tamaño reducido. En 1888 Roux había realizado un experimento similar, pero con un óvulo de rana fecundado, y obtuvo un resultado diferen-

te: cada una de las dos blastómeras dio origen a la mitad de un embrión. Roux concluyó que las partes del organismo son pre-determinadas en tal estadio bicelular, pero Driesch propuso que el destino de una célula es determinado por la posición de la célula en la totalidad del organismo. Driesch logró producir larvas gigantes por medio de la fusión de embriones de erizo marino y fue el primero en reconocer la profunda interacción funcional entre el núcleo y el citoplasma celulares, y también descubrió el fenómeno de la inducción embrionaria.

Los embriones animales en sus estadios tempranos están compuestos de tres tipos de tejidos: endodermo, mesodermo y ectodermo. El ectodermo da origen a la piel y el sistema nervioso. Sin embargo, cuando el ectodermo es removido y cultivado *in vitro* en aislamiento, no puede dar origen a ningún tejido diferenciado. Por el contrario, cuando el ectodermo es cultivado *in vitro* en presencia de un pequeño pedazo de mesodermo, entonces da origen a tejido nervioso, siendo capaz de formar el tubo neural. Esto demuestra que el mesodermo aporta un factor que induce al ectodermo a llevar a cabo su programa normal de diferenciación, o sea la interacción entre dos tejidos embrionarios resulta en un grado de diferenciación celular y tisular que no puede ocurrir en forma independiente. Por lo tanto, la inducción embrionaria fue definida como la producción de nuevas propiedades celulares en un tejido dependiente por medio de la interacción con otro tejido inductor, el cual no contiene las propiedades resultantes en el tejido dependiente ni tampoco altera sus propias características originales.

Los resultados anteriores motivaron a Driesch a abandonar la posición mecanicista, ya que es inconcebible que una verdadera máquina pueda ser dividida como el embrión del erizo marino y, sin embargo, dar origen a dos máquinas idénticas. Así, hacia fines de 1895 Driesch se convirtió al vitalismo filosófico y propuso que las características regulatorias del embrión se deben a la acción de la *entelequia*, una entidad originalmente propuesta por Aristóteles y que es la condición en la cual la esencia de una cosa se encuentra completamente realizada o sea, cuando la potencialidad de la cosa se transforma en acto. Pero Driesch

definió la entelequia como el principio vital que urge al organismo hacia la realización (actualización) de su potencialidad. La entelequia es identificada también con el ánimo, la cual, según Aristóteles, constituye la causa formal y final del organismo, de modo que siempre existe un propósito o intención consubstancial a la vida. La entelequia proporciona la fuerza vital que hace a la vida diferente de lo que no tiene vida. Driesch propuso que en los seres vivos existe una directiva interna o intención teleológica que los conduce a realizar con armonía el complejo proceso del desarrollo embrionario. Sin embargo, la entelequia es una entidad que no puede ser sujeto de estudio del método analítico reduccionista propio de la ciencia mecanicista.

Los avances subsecuentes de la embriología experimental mostraron que el análisis reduccionista no podía lograr una descripción en términos de elementos o partes mínimas que permitiera una explicación mecanicista del desarrollo embrionario. Pero este fracaso del método reduccionista fue interpretado como evidencia de que los niveles primarios de la estructura orgánica no habían sido descritos todavía en forma adecuada. El descubrimiento de la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN) por Watson y Crick en 1953, tuvo gran efecto sobre la biología ya que el ADN es el material que constituye los genes. En la actualidad existe una dicotomía con respecto a la cuestión del origen y naturaleza de la forma biológica. El enfoque reduccionista propone que la reducción de los sistemas embrionarios a sus elementos moleculares revelará finalmente los orígenes y causas de la forma biológica. Este enfoque se origina en la genética molecular y es de tendencia mecanicista. Su éxito actual se basa en la confirmación de la existencia de genes selectores originalmente propuestos por Antonio García Bellido. Estos genes se llaman así debido a que su actividad selecciona una ruta particular de desarrollo para la célula. Estos genes han sido identificados con los llamados genes homeóticos cuya función es regular la actividad de otros genes. En los insectos las mutaciones en los genes homeóticos provocan la conversión de una parte del cuerpo en otra; por ejemplo, la mutación del gene homeótico *aristopedia* ocasiona que brote una pierna en lugar de una

antena en la cabeza de la mosca de la fruta. En los insectos se ha demostrado que es el estado de actividad de un grupo de genes homeóticos lo que establece el camino de desarrollo tisular y orgánico seguido por una célula en particular. Homólogos de los genes homeóticos han sido descritos en otros animales, incluyendo el hombre, y en la actualidad se piensa que tales genes están involucrados en la especificación de los patrones espaciales de los embriones en desarrollo.<sup>8</sup>

El otro enfoque sobre el origen de la forma biológica deriva de la escuela clásica de la embriología experimental y sostiene que la cuestión de la ontogenia no puede ser explicada sólo en términos mecanicistas. Este enfoque acepta que es útil un cierto grado de reduccionismo como guía del método experimental, pero también propone que la cabal comprensión de los sistemas vivos requiere un enfoque a múltiples niveles que tome en cuenta la historia espacio-temporal del organismo, así como también las interacciones entre los diferentes niveles de organización estructural que están involucrados en fenómenos como la regulación embrionaria y la epigénesis, que es el desarrollo del organismo a partir de una sola célula indiferenciada por medio de la producción y organización gradual de sus diferentes constituyentes. Este enfoque es *holista* y al igual que el vitalismo representa una reacción contra el reduccionismo mecanicista. El holismo contemporáneo no es necesariamente vitalista aunque la mayoría de los mecanicistas lo acusan de serlo.

El holismo actual no requiere la participación de una fuerza extraña para explicar las propiedades de la organización biológica, pero busca explicar tales propiedades por medio de una comprensión de la epigénesis a múltiples niveles. La posición holista es con frecuencia reducida a la frase "el todo es más que la suma de sus partes", pero esto es un error de apreciación ya que la mayoría de los holistas saben que muchas veces las propiedades de un todo son consecuencia de la restricción de los grados de libertad presentes en las partes constituyentes. Por ejemplo, los estudios de Driesch mostraron que cada una de las dos blastómeras del embrión del erizo marino tienen menor potencial ontogénico cuando están combinadas en una sola estructura que

cuando están separadas. El holismo se ocupa de las complejas interacciones que existen entre los diferentes niveles de organización de un sistema, puesto que las propiedades de tal sistema no pueden ser establecidas simplemente con base en el examen de las partes constituyentes, ya que la naturaleza y función de las partes son consecuencia de sus relaciones dentro del sistema. De hecho, una característica de los organismos vivos es la presencia de propiedades emergentes, o sea propiedades que son consecuencia de la interacción entre las partes constituyentes pero que no están previamente presentes o preestablecidas en ninguna de esas partes en especial.

La doctrina de las propiedades emergentes propone que existen propiedades en los organismos que no son predecibles a partir del conocimiento de las propiedades de los elementos que constituyen a dichos organismos. Las propiedades observables a un cierto nivel de organización no son enteramente predecibles a partir de las propiedades observadas a un nivel inferior de organización. Un simple ejemplo: el olor del amoníaco no está presente en el hidrógeno o nitrógeno que lo constituyen, tampoco es predecible a partir de la leyes de la química. Dicho aroma resulta de la interacción de la molécula de amoníaco con nuestros receptores olfatorios y la subsecuente transformación de esta interacción química en un impulso eléctrico que estimula la corteza olfatoria de nuestro sistema nervioso central y es interpretado de acuerdo con un cierto marco de referencia.

### La insuficiencia del reduccionismo en biología

Considerando todo lo anterior, cabe preguntarse por qué la biología molecular continúa comprometida con un programa reduccionista que busca explicaciones mecanicistas a nivel de partículas materiales, aun cuando la física ya ha demostrado la incierta realidad de tales partículas. Una respuesta trivial consiste en que la biología molecular estudia fenómenos dentro de un rango de magnitud en el cual no son aparentes los contrasentidos con respecto a la mecánica newtoniana; en consecuencia, la intervención mecanicista parece ser todavía eficaz de acuerdo con las expectativas de la ma-



Watson y Crick.

oría de los biólogos. Tales expectativas dan por un hecho el funcionamiento jerárquico de los sistemas biológicos y, por lo tanto, se han concentrado en la descripción de ciertos eventos repetitivos que son consecuencia del funcionamiento de tal jerarquía. Sin embargo, fenómenos como la producción de mutaciones en el ADN por la acción de rayos X o de radiaciones ionizantes, el transporte de iones a través de canales en las membranas celulares, las interacciones entre los codones del ARN mensajero y los anticodones presentes en el ARN de transferencia (de lo cual depende la correcta traducción del mensaje genético para sintetizar las proteínas celulares), y la propia configuración del ADN en la famosa doble hélice que depende del estado de ionización de las bases que constituyen la secuencia del ADN, son todos fenómenos microscópicos cuya comprensión y descripción última requiere de las premisas de la mecánica cuántica. Así, sólo cuando se plantean cuestiones sobre la naturaleza y el origen de la organización jerárquica a partir de la cual surgen los eventos repetitivos, los biólogos son forzados a rebasar la postura mecanicista y reconocer los límites explicativos de la misma.

Otra posible respuesta a la pregunta ya mencionada, se basa en el hecho de que las expectativas de la cultura occidental contemporánea obstruyen el desarrollo de cualquier enfoque alternativo que no ofrezca resultados conducentes a obtener ventajas prácticas inmediatas. Nuestra cultura actual desprecia el conocimiento científico que no es susceptible de ser transformado en tecnología. La ciencia moderna ha cometido el error de ignorar toda ontología al con-

fundir el criterio de verdad con el simple éxito pragmático. Así, en contraposición a Einstein, la mayoría de los practicantes de la mecánica cuántica han abandonado la idea de que la misión de la física consiste en describir la verdadera "realidad" y han substituido esta misión por la simple predicción de los resultados de experimentos posibles. Por su parte, la biología molecular ha perdido la noción de organismo para reemplazarla por una colección de partes, genes, moléculas y otros componentes que supuestamente constituyen ojos, miembros o cualquier otra estructura en particular. Sin embargo, es un hecho que la composición del H<sub>2</sub>O no nos da la mínima idea de por qué el agua forma un vórtice cuando se va por la coladera. Así, mientras que la mayoría de los físicos cuánticos, perplejos ante las extrañas propiedades del mundo cuántico, evitan plantearse la cuestión de la "realidad física", la solidez de la biología molecular descansa sobre la fragmentación del organismo y la ignorancia del problema de la incertidumbre cuántica. Es una paradoja que la biología esté dominada por el mecanicismo reduccionista clásico, sobre todo si consideramos que el célebre físico Erwin Schrödinger inspiró el programa de investigación de la biología molecular a través de su libro *¿Qué es la vida?*, y que varios físicos discípulos de Niels Bohr, como Max Delbrück y Günter Stent, han jugado un papel importante en el desarrollo de esa disciplina. Incluso Francis Crick, codescubridor de la estructura del ADN, es físico de formación.

Es de esperarse que la superación de las limitaciones impuestas por el predominio del reduccionismo en biología ocurrirá en forma gradual y en presencia de gran oposición. De hecho, la física abandonó el mecanicismo reduccionista sólo después de haberse enfrentado a la porfiada irreducibilidad de los nuevos fenómenos observados. Por lo tanto, es lógico que la mayoría de los investigadores en biología molecular no estén dispuestos a abandonar suposiciones y premisas que han sido útiles en el pasado inmediato. Así, la extraña situación actual en la cual la física, que ha abandonado el mecanismo reduccionista como representación y explicación de la realidad, coexiste con una biología molecular que aspira a reducir a los organismos vivos en

términos de una simplicidad mecanicista, continuará existiendo hasta que la biología se vea forzada a examinar sus premisas en función de todo lo que se sabe acerca de los sistemas físicos en la actualidad.

En *El azar y la necesidad*, uno de los libros clave de la biología molecular, el distinguido biólogo Jacques Monod describe a la célula como "una máquina capaz de autorreproducirse".<sup>9</sup> Esta declaración confirma que existe una profunda falta de comunicación entre la física y la biología, puesto que la biología molecular pretende haber demostrado que la vida es reducible a la química y física clásicas, mientras que las premisas fundamentales de esas disciplinas han sido ya refutadas por la física contemporánea.

## Bibliografía

1. Aranda Anzaldo A., "La revolución kuhniana", *Ciencia y Desarrollo*, XIII 74: 97-104, 1987.
2. Eddington A. S., *The philosophy of physical science*, Cambridge University Press, 1939.
3. Le Dantec E., *The nature and origin of life*, Hodder & Soughton, Londres, 1921, p. 5.
4. Citado en Edmund Noble, *Purposive evolution*, Henry Holt Nueva York, 1924, p. XI.
5. Wilson E. B., *The cell in development and inheritance*, 3a. ed., Nueva York, 1925, p. 434.
6. Citado en J. Mehra (ed.), *The physicist conception of nature*, Reidel, Holanda, 1973, p. 244.
7. Bernstein J., *Quantum profiles*, Princeton University Press, Nueva Jersey, 1991, p.37.
8. Slack J. M., *From egg to embryo*, 2ed., Cambridge University Press, 1991, p. 228-281.
9. Monod J., *Le hasard et la nécessité; essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Le Seuil, París, 1970.

La siguiente es una lista de otras obras consultadas para la elaboración del presente artículo: Gilson E., *D'Aristote a Darwin et Retour*, Librairie Philosophique J. Vrin, París, 1971; Patte H., *Hierarchy theory*, George Braziller, Nueva York, 1973; Sheldrake R., *A new science of life*, Blond & Briggs, Londres, 1981; Lear J., *Aristotle: the desire to understand*, Cambridge University Press, 1988; Davenport R., *An outline of animal development*, Addison-Wesley, EUA, 1979; Thom R., *Semio-physic: a sketch*, Addison-Wesley, EUA, 1990; Lell J. S., *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press 1987.