

ENSAYO

Determinismo, indeterminismo y la flecha del tiempo en la ciencia contemporánea

Daniel A. Morales

1 Introducción

La ciencia ha sido muy efectiva en su afán de entender el universo y la posición del hombre en éste. Lo increíble es que podamos lograr esto sin movernos prácticamente de nuestro propio planeta. Nuestro principal instrumento para lograr esta proeza es la mente humana. El entender cómo la mente es capaz de establecer ese vínculo entre el comportamiento del mundo exterior y nuestros conceptos es uno de los grandes retos futuros de la ciencia. Desde el punto de vista filosófico este problema está relacionado con las ideas de realismo e idealismo que discutiremos más adelante. Estas ideas filosóficas también se hacen evidentes en las teorías actuales de la ciencia.

Comenzaremos discutiendo algunas nociones fundamentales para el resto del ensayo. En primer lugar, ¿qué significan las ideas de complejidad y de simplicidad? Estas son nociones fundamentales en la ciencia. Podemos preguntarnos ¿qué es más complejo, un insecto o un ser humano?, o ¿qué es más complejo, un ser humano o el universo como un todo? Los logros antiguos y recientes de la ciencia demuestran que mientras que podemos entender el universo como un todo, se nos dificulta entender los aspectos más básicos del comportamiento humano. De manera que lo más importante para considerar un sistema como simple o complejo no puede ser solamente el número de partículas que lo componen. Esta diferencia ha sido expuesta elocuentemente por uno de los pensadores actuales más importantes como Murray Gell-Mann en su libro *el Quark y el Jaguar* [15]: ¿qué es más simple un quark, la partícula última constituyente de la materia, o un jaguar? ¿Podemos cuantificar las nociones de simplicidad y de complejidad, de tal manera que podamos afirmar inequívocamente que un jaguar es más complejo que un quark, o a la inversa?

La física hasta ahora ha tratado esencialmente con sistemas simples, la razón es que los sistemas simples pueden ser estudiados más fácilmente usando la matemática. C.N. Yang, uno de los físicos teóricos más famosos del siglo XX apunta que [38]:

Mientras más simple es el problema, es más seguro que el análisis esté más cercano a alguna estructura matemática básica.

Además, a la física le interesa los aspectos esenciales del universo y no los detalles. Esta manera de atacar los problemas ha sido muy fructífera y la física actual puede mostrar muy orgullosamente un conjunto de leyes de la naturaleza. En última instancia estas leyes se representan matemáticamente y no verbalmente. Aunque, al final cuando comunicamos estas leyes a los miembros de “la otra cultura” (las humanidades) como la llamó C.P. Snow (1905-1980) [29], debemos hacerlo verbalmente o por escrito.

Muchos aceptan que una ciencia es más fundamental en la medida en que sea más matematizable, afirmación ésta que podríamos designar como el sueño pitagórico o la “falacia jonia” como lo llama Isaiah Berlin (1909-1997), asociando esta idea con los filósofos presocráticos y la afirmación de que el mundo es ordenado y que puede ser explicado por leyes matemáticas que rigen el comportamiento de simples entidades [19]. De todas las ciencias naturales es la física la que más se acerca a esta premisa. El lenguaje matemático es el instrumento más poderoso de que dispone el hombre para entender el universo en el que vive. Albert Einstein (1879-1955) en su libro *Mi Visión del Mundo* escribe [13]:

Según nuestra experiencia estamos autorizados a pensar que la Naturaleza es la realización de lo matemáticamente más simple. Creo que a través de una construcción matemática pura es posible hallar los conceptos y las relaciones que iluminen una comprensión de la Naturaleza. Los conceptos usables matemáticamente pueden estar próximos a la experiencia, pero en ningún caso pueden deducirse de ella. Está claro que la experiencia es el único criterio que tiene la Física para determinar la utilidad de una construcción matemática. Pero el principio creativo se encuentra en realidad en la matemática. De algún modo creo que es cierto que a través del pensamiento puede comprenderse la realidad, tal como lo soñaron los antiguos.

El éxito que ha tenido la física en entender el universo usando la matemática es una evidencia de lo que Eugene Wigner (1902-1995) designó como la irracional efectividad de la matemática en las ciencias naturales [36]:

El milagro de lo apropiado del lenguaje matemático para la formulación de las leyes de la física es un regalo maravilloso que no entendemos ni merecemos.

La complejidad de la existencia y del conocimiento humano ha traído como consecuencia la creación de parcelas del conocimiento. Esta parcelación ha provocado el aislamiento entre las diferentes ramas del saber. Por esta separación y jerarquización del conocimiento ya no es posible para una sola persona poseer y estar al tanto de todo lo que ocurre en las diversas ramas del conocimiento. Pero puede ser que esta jerarquización sea simplemente ilusoria: a la naturaleza no le importa como el hombre ha clasificado el conocimiento.

Para tratar de entender la jerarquía del conocimiento han surgido dos corrientes filosóficas: el reduccionismo y la emergencia. ¿Puede la sociología o la psicología ser reducida a las ciencias físicas? En general, ¿puede una rama del conocimiento considerada como poco matematizada ser reducida a las leyes de otra más matematizada?, o, por el contrario, existen leyes emergentes, es decir leyes presentes en la rama inferior de la jerarquía que nunca van a ser obtenidas como consecuencia de las leyes presentes en las ramas superiores de la jerarquía? ¿Son estas leyes emergentes consecuencia de la complejidad de los sistemas con los que trabaja la rama inferior?

Otro aspecto relacionado con la discusión anterior lo constituye la noción de evolución. El pasaje de un organismo simple a uno complejo es una transformación en el tiempo que es irreversible, es decir, no observamos el caso contrario. Por otra parte, nuestra vida transcurre del nacimiento a la muerte de manera irremediable y nunca observamos una reversión de este hecho. Si tiramos un vaso de vidrio al piso éste se romperá en muchos pedazos y nunca observamos que el vaso de manera espontánea se reconstruya a sí mismo. Si nosotros miramos una película proyectada al revés observamos claramente que el transcurrir de las secuencias no es natural. En otras palabras, los fenómenos macroscópicos que observamos revelan claramente una flecha del tiempo, dirigida del pasado hacia el futuro [27,28]. Sin embargo, las leyes de la física son reversibles en el tiempo. Las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes físicas no cambian cuando el parámetro tiempo t presente en estas ecuaciones es sustituido por el parámetro menos tiempo $-t$. Esto significa que las ecuaciones fundamentales de la física no distinguen entre el pasado y el futuro. Nos encontramos entonces ante una paradoja. Si consideramos a las leyes físicas como una síntesis del comportamiento del universo, entonces porqué estas leyes son indiferentes al sentido del tiempo, mientras que nuestra apreciación de los fenómenos naturales diariamente nos dice que existe claramente una flecha del tiempo. Los fenómenos observados en nuestro universo, sea en química, geología, biología, psicología o sociología muestran una dirección preferencial en su dinámica, una flecha del tiempo.

Ahora, ¿cómo puede surgir una flecha del tiempo de ecuaciones completamente simétricas? Este problema es conocido como la *paradoja temporal*. Fue identificado en el siglo XIX por el físico vienés Ludwig Boltzmann (1844-1906) al tratar de formular para la física una teoría de la evolución de la misma manera como Charles Darwin (1809-1882) lo había hecho para la biología. Sin embargo los intentos de Boltzmann tuvieron que luchar contra las leyes de Newton, el paradigma de determinismo y objetividad en la física. Posteriormente, la flecha del tiempo fue relegada al terreno de la fenomenología: se acepta que la flecha del tiempo es consecuencia de la incapacidad de la mente humana para percibir la totalidad de una sola vez, de manera que la flecha del tiempo aparece como consecuencia de las aproximaciones que nuestra mente introduce en la descripción

de la naturaleza. Sin embargo, hay varios intentos recientes para formular leyes del movimiento que describan la dinámica de procesos irreversibles en el tiempo [26].

Conectado al problema de la existencia o no de una flecha del tiempo real está la pregunta de si nuestro futuro está determinado por nuestro momento presente o, si por el contrario, no hay forma de predecir el futuro a partir del presente. El sentido común nos indica que hay algo de verdad en esta premisa: si cometemos un acto antisocial ahora, es bastante probable que en el futuro paremos en la cárcel. Pero, si esto fuera así en general, ¿podríamos predecir el resultado al girar una ruleta, simplemente mirando como el crupier tira la pelotita?

A comienzos del siglo XX el gran filósofo de la ciencia Karl Popper (1902-1994) escribió [25]:

El sentido común nos inclina, por una parte, a asegurar que cada evento es causado por algunos eventos precedentes, de manera que cada evento puede ser explicado o predicho. . . . Por otra parte. . . el sentido común atribuye a las personas maduras y sanas. . . la habilidad para escoger libremente entre posibilidades alternativas de actuación.

Los aspectos delineados anteriormente son sólo algunos de los problemas fundamentales a los que se enfrenta la ciencia actual. He querido englobar todos los problemas anteriores bajo el tema del determinismo e indeterminismo y la flecha del tiempo en la ciencia contemporánea. Estos aspectos han estado muy interrelacionados en las culturas humanas: ¿poseo libre albedrío para seleccionar mi futuro o por el contrario cualquier cosa que haga no será capaz de cambiar mi futuro que ya ha sido preestablecido desde mi nacimiento? Esta discusión también está conectada con la llamada ciencia del caos, muy de moda en la actualidad. Queremos ahora discutir estos aspectos con mayor profundidad.

2 Los griegos y el tiempo

Los problemas discutidos anteriormente no son nuevos, en el sentido de que preguntas similares ya se la hacían filósofos de la antigüedad. En particular quiero empezar discutiendo estas nociones en los griegos. El gran problema de la filosofía griega era el problema del ser y el devenir: de qué estaban formadas las diversas cosas que observamos a nuestro alrededor y si nuestra noción del pasaje del tiempo era real o tan sólo una ilusión o, en otras palabras, el problema fundamental era la naturaleza de la materia y del tiempo. Diversas teorías exponían que las cosas estaban formadas por uno o todos de cuatro elementos: agua, aire, fuego o tierra, y que fue la unión de estos cuatro elementos en diferentes proporciones y en diferentes organizaciones lo que dio origen a nuestro

universo. Asociado a la composición de las cosas estaba la noción de devenir, el decaimiento y muerte de las cosas. Filósofos como Heráclito (540-475 a.C) [18] sostenían que lo real era lo que se percibía por medio de los sentidos y estos nos indicaban que las cosas cambiaban, se transformaban:

A los que se bañan en los mismos ríos, aguas distintas cada vez fluyen, y las almas son exhaladas de la humedad.

Mientras que filósofos como Parménides (515-450 a.C) [18] sostenían que nuestros sentidos nos engañan y nos dan una idea ilusoria del devenir. Lo que es real es lo que es permanente, inmanente y que no cambia; el cambio es ilusorio:

Y del camino ya sólo queda un solo relato: que es. Y para éste hay muchísimas señales de que lo que es no engendrado e imperecedero. Pues es integro, inmóvil e infinito ni fue ni será, pues es ahora todo al mismo tiempo, uno solo, continuo.

Albert Einstein sostenía que el paso del tiempo era tan sólo una ilusión, razón por la cual Popper solía llamarlo “Parménides”. Entre los documentos más importantes que tenemos sobre las ideas filosóficas sobre el tiempo y la irreversibilidad son las cartas que Einstein intercambió con su amigo de toda la vida Michele Besso. Besso siempre insistía en interrogar a Einstein sobre el problema del tiempo, la irreversibilidad y su conexión con las leyes de la física. Einstein le respondía una y otra vez que la irreversibilidad era una ilusión, una impresión suscitada por unas condiciones iniciales improbables. No hay irreversibilidad en las leyes fundamentales de la física. Debes aceptar la idea de que el tiempo es subjetivo, con su insistencia sobre el “ahora” no debe tener ninguna significación objetiva. Cuando Besso muere, Einstein le escribe a la hermana e hijos de éste [12]:

Michele se me ha anticipado en dejar este mundo extraño. Esto nada significa. Para nosotros, físicos creyentes, la distinción entre pasado, presente y futuro es solo una ilusión, por persistente que ésta sea.

En esta búsqueda por la composición fundamental de la materia, la idea más ingeniosa y que parcialmente encuentra un asidero experimental en nuestra ciencia actual, es aquella expuesta por Demócrito (460-371 a.C) y Leucipo (430 a.C), de que todo lo existente (el alma incluida) puede concebirse como formada por entidades microscópicas, indivisibles, llamadas átomos y el vacío. Estas ideas son expuestas posteriormente de manera elocuente e ilustrativa en el gran poema de la antigüedad “De rerum natura” (De la naturaleza de las cosas) del gran poeta latino Tito Lucrecio Caro (95-55 a.C) [37]. Otro filósofo de la escuela atomística cuyas ideas quiero discutir en relación con la flecha del

tiempo es Epicuro (341-270 a.C). Éste, como representante de la escuela atomista, aceptaba la existencia de los átomos y el vacío. Pero esta escuela también asumía que los átomos se movían en trayectorias rectas y paralelas, a lo cual Epicuro se oponía. ¿Cómo se podía explicar la existencia de la diversidad en nuestro mundo si no se producían choques entre los átomos? ¿Cómo se puede explicar el libre albedrío de los seres humanos en un mundo completamente determinístico y sin azar? Para resolver este dilema Epicuro introduce la idea del *clinamen* (declinación): las trayectorias de los átomos no son siempre paralelas sino que algunas veces se desvían de estas trayectorias y chocan produciendo la gran diversidad de cosas que observamos en nuestro mundo. Como lo expone Lucrecio en su *De rerum natura* [37]:

En momentos inciertos y en lugares inciertos, ellos (los átomos) se desvían ligeramente de sus cursos, justamente lo suficiente como para que consideremos que han cambiado su dirección.

Sin embargo, Epicuro no proporciona ningún mecanismo por medio del cual el *clinamen* actúa.

Así, arribamos a los dos más grandes pensadores de la antigüedad, Platón (427-347 a.C) [23] y Aristóteles (384-322 a.C) [1] cuyas visiones filosóficas sobre el universo siguen vigentes y son punto de discusión en las teorías más actuales de la física. Platón sostenía que el mundo que observamos no representa sino una imagen imperfecta de un mundo más perfecto que es el mundo de las ideas inmanentes. En ese mundo se encuentran presentes en estado latente todas las realidades posibles que se pueden presentar en el universo, los arquetipos de las cosas visibles. Aristóteles, por el contrario, sostenía que la realidad es el mundo que observamos, lo que es real es el devenir, la transformación de las cosas, todo lo que observamos con nuestros sentidos. No podemos pensar como real otra cosa que no sea lo que observamos a nuestro alrededor. Un concepto importante en Aristóteles es el de potencia y acto. Potencia es la posibilidad latente que tiene un cuerpo para transformarse en otro, en acto, en realidad.

Estas ideas filosóficas de Platón y Aristóteles han sido asociadas a los puntos de vista del pájaro y la rana. El pájaro por su capacidad de volar tiene una visión más amplia de la realidad y puede tener acceso a realidades que la rana no tiene. La rana, por el contrario, al estar condicionada a moverse y tener acceso a una realidad más limitada que el pájaro no admite como real nada a lo que no pueda tener acceso. En la actualidad ambos puntos de vista han sido asociados con las visiones de muchos teóricos la de los experimentales .

Los puntos de vista de Platón y Aristóteles nos han acompañado aún en la ciencia actual como veremos más adelante.

3 El tiempo y el determinismo

Se considera que la ciencia contemporánea, basada en el llamado método científico, comienza con las ideas de Galileo (1564-1642), Kepler (1571-1630) y Newton (1642-1727). Con Newton se origina la verdadera revolución científica. Newton establece los principios físico-matemáticos que nos permiten entender el movimiento de los cuerpos: sus tres leyes de la mecánica. Estas leyes constituyen el núcleo central de lo que se conoce como mecánica clásica, el cuerpo de teorías desarrolladas por los físicos desde mediados del siglo XVII hasta finales del siglo XIX. La premisa fundamental de la mecánica clásica es que la materia consiste de un conjunto de partículas con masa y carga y que las posiciones instantáneas y velocidades de esas partículas se pueden determinar experimentalmente con precisión arbitraria. En este sentido, uno asocia con los sistemas físicos un conjunto de variables dinámicas que poseen en cada instante valores bien definidos que determinan el estado del sistema. La evolución futura del sistema queda completamente definida dando los valores de estas variables en el estado presente. La evolución en el tiempo de las variables que caracterizan al estado del sistema se determina entonces resolviendo un conjunto de ecuaciones de movimiento.

La discusión anterior nos permite formular una característica fundamental de la mecánica clásica: dada la función de fuerza para un sistema físico, el estado mecánico del sistema en cualquier otro instante estará completa y unívocamente especificado o determinado por el estado mecánico a algún instante inicial arbitrario. Es esta característica de las ecuaciones de movimiento la que define a la mecánica clásica como una teoría determinista. Esta característica aparece reflejada en un pasaje de Pierre Simon Laplace (1749-1827) muy citado [20]:

Debemos considerar el estado presente del universo como una consecuencia de su estado previo y como la causa del estado que seguirá. Una inteligencia que conozca todas las fuerzas que actúan en la naturaleza en un instante dado así como también las posiciones momentáneas de todas las cosas en el universo, sería capaz de comprender en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes como también los de los átomos más ligeros en el mundo, con tal de que su intelecto fuera lo suficientemente poderoso para someter todos los datos al análisis; para ella nada sería incierto, tanto el futuro como el pasado estarían presentes simultáneamente ante sus ojos. La perfección que la mente humana ha sido capaz de darle a la astronomía proporciona una indicación de tal inteligencia. Descubrimientos en mecánica y geometría, acoplados con aquellos en gravitación universal, han traído a la mente dentro del alcance de comprender en la misma fórmula analítica el estado pasado y futuro del sistema del mundo. Todos los esfuerzos de la mente en la

búsqueda de la verdad tienden a aproximarnos a la inteligencia que hemos imaginado, aunque ella (la mente) permanecerá infinitamente remota de tal inteligencia.

La opinión anterior está muy ligada al concepto de tiempo. ¿Está el futuro escrito o en continua construcción?, ¿están nuestros actos determinados desde el principio o poseemos libre albedrío para escoger nuestro futuro?

4 Indeterminismo, probabilidad y mecánica cuántica

Durante el siglo XX aparecen dos grandes teorías de la física: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. La teoría de la relatividad trata con fenómenos que se dan a altas velocidades mientras que la mecánica cuántica trata con el comportamiento de los entes microscópicos que constituyen la materia. Aquí nos concentraremos en las ideas fundamentales de la mecánica cuántica.

Experimentos que se hicieron al final del siglo XIX y en el primer cuarto del siglo XX indicaban que la mecánica clásica no era aplicable a los átomos. El comportamiento del mundo microscópico era tal que ameritaba la deducción de nuevas leyes a ese nivel. El desarrollo fundamental lo realizaron, entre otros, N. Bohr (1885-1962), W. Heisenberg (1901-1976), L. de Broglie (1892-1987) y E. Schrödinger (1887-1961). Heisenberg desarrolló su mecánica de matrices dentro del marco filosófico del pensamiento positivista de E. Mach (1838-1916) que establecía que cualquier teoría explicativa de la naturaleza debía contener solamente elementos que tuvieran una correspondencia con la realidad, es decir cualquier elemento teórico que no fuera observable no podía incluirse en la formulación de la teoría. Estas son extensiones de las ideas idealistas de Berkeley (1685-1753) [2]. Otra manera alternativa fue desarrollada por Schrödinger, basado en una idea de L. de Broglie. Este último decía que así como la luz poseía un comportamiento dual de onda y partícula (fotón) así también las partículas microscópicas, como los electrones, poseían un comportamiento dual, de partícula y onda: allí donde van las ondas van las partículas.

De Broglie entonces postuló que, debido al comportamiento ondulatorio de los entes microscópicos, le podíamos asociar una longitud de onda que era inversamente proporcional a la masa de la partícula. Así, los electrones que tienen una masa muy pequeña poseen una longitud de onda apreciable, y, por el contrario, partículas macroscópicas, tales como una pelota de béisbol, que poseen masas grandes no tienen comportamiento ondulatorio sino de partícula. Schrödinger toma esta idea de De Broglie y la combina con la ecuación clásica de las ondas para encontrar una ecuación diferencial para las ondas de materia, $H\psi = E\psi$, donde H es un operador hermítico y E son sus autovalores. Esto último introduce en la teoría física un elemento no observable: la función de

onda Y , que básicamente representa la amplitud de la onda de materia, en general un número complejo. Note las diferencias filosóficas de las dos teorías. La de Heisenberg, idealista: la teoría sólo contiene los elementos que podemos observar, todo lo demás no tiene existencia real, y la de Schrödinger: la teoría contiene elementos que no podemos medir pero que son necesarios para explicar eventos que sí son medibles.

Ahora, ¿cuál era el significado de esta “función de onda”? Esta pregunta todavía en la actualidad constituye uno de los acertijos fundamentales de la mecánica cuántica.

M. Born (1882-1970) estableció que ya que las partículas tienen comportamiento de ondas no es posible determinar con certeza sus posiciones. Lo único que podemos calcular es el cuadrado de la función de onda, lo cual representa la probabilidad de encontrar la partícula en una cierta posición del espacio. Esta interpretación introduce un aspecto de aleatoriedad en la mecánica cuántica y sugiere que aspectos de indeterminismo están presentes en las leyes de la naturaleza. Esta situación no le gustaba nada a Einstein, un convencido determinista, quién entonces expresa que “no creía que Dios jugara a los dados con el universo”. Para entender esto debemos recordar que Einstein creía en el Dios de Spinoza (1632-1677), un dios identificado con la naturaleza, donde el azar no es posible, lo que nos parece contingente es solo una ilusión; solo nos parece contingente porque no conocemos su causa ni su mecanismo.

A pesar de ello, de acuerdo a la teoría cuántica, y recordando las palabras de P. Dirac (1902-1984), toda la química y gran parte de la física podía ser calculada a partir de primeros principios sin necesidad de hacer más experimentos. La estructura y propiedades de cualquier sustancia desconocida podían ser predichas con gran precisión, y la velocidad, mecanismo y productos de cualquier proceso físico o químico desconocidos podían ser determinados. Lo único que se requería era resolver las ecuaciones de la mecánica cuántica.

Las aplicaciones de la mecánica cuántica han transformado nuestras vidas. Se estima que el 30% del producto territorial bruto de los E.E.U.U. se basa en invenciones desarrolladas gracias a la mecánica cuántica, desde semiconductores en los chips de las computadoras hasta los rayos láser utilizados en los lectores de discos compactos y DVDs, aparatos de resonancia magnética nuclear en los hospitales y celulares, entre otros.

Ahora quiero discutir el aspecto de indeterminismo y probabilidad en la mecánica cuántica. Uno de los principios fundamentales de esta teoría lo constituye el principio de indeterminación de Heisenberg que éste formuló en 1927. De acuerdo con este principio las ecuaciones de la mecánica cuántica restringen la precisión con la cual un observador puede medir simultáneamente ciertas cantidades, por ejemplo la posición y la velocidad de un electrón. Heisenberg estableció que aunque las leyes de la mecánica cuántica contenían elementos estadísticos en su formulación, estos elementos no eran propiedad de la misma

naturaleza sino que aparecían como consecuencia de la perturbación causada cuando el observador quería observar la naturaleza. Por ejemplo, la determinación de la posición de un electrón de manera precisa requiere la utilización de radiación electromagnética de alta frecuencia, lo que implica alta energía. En el proceso de colisión de un fotón de esta radiación con un electrón producirá un cambio brusco en el momento del electrón. Este cambio será mayor en la medida en que la frecuencia de la luz se haga cada vez mayor. Por otra parte, la determinación de la posición del electrón con poca precisión requerirá luz de baja frecuencia, esto es, baja energía. En este último caso la colisión de un fotón con un electrón no provocará un cambio muy importante en el momento de este último, de manera que éste puede ser medido con gran precisión. Este ejemplo ilustra el hecho de que existe una relación dual o complementaria entre la posición con que se mide el momento de un electrón y la precisión con que se determina su posición. Si x es la precisión con que se mide la posición de una partícula de características microscópicas y p es la precisión en la medida de su momento, entonces el principio de indeterminación establece que el producto de estas dos cantidades no puede ser menor que $h/2p$, esto es $\Delta x \Delta p \geq h/2p$, donde h es la constante de Planck. El principio de indeterminación tiene importantes y profundas consecuencias sobre el principio de causalidad. Este principio, uno de los más queridos y protegidos por los físicos del siglo XIX, establece que los efectos siempre preceden a sus causas. Este principio está entonces en la base del determinismo de Newton y Laplace.

El principio de indeterminación niega el principio de causalidad. Como dice Heisenberg [6]:

En la formulación estricta de la ley causal -si conocemos el presente, podemos calcular el futuro- no es la conclusión la que está errada sino la premisa.

Los valores iniciales de la posición y de la velocidad no pueden ser medidos simultáneamente con absoluta precisión, de manera que uno no puede calcular un futuro único para la partícula sino un conjunto de posibles futuros. Sólo la medición determinará que futuro se observará en la realidad. De esta manera la conexión causal entre presente y futuro se pierde y es sustituida sólo por probabilidades de los eventos posibles.

Estas ideas también se pueden discutir desde el punto de vista de la ecuación de Schrödinger, que es una ecuación simétrica en el tiempo y además determinista con respecto a su elemento principal, la función de onda. La función de onda contiene en potencia, en el sentido de Aristóteles, todas las posibilidades futuras del sistema bajo estudio. Aunque la evolución en el tiempo de la función de onda es perfectamente determinista: dada la función de onda en un instante dado se puede calcular exactamente la evolución en el tiempo de la función de onda, la ecuación de Schrödinger no nos puede decir con certeza cuál de

todas las posibilidades se convertirá en acto, en el sentido de Aristóteles, en el futuro. De esta manera, la irreversibilidad temporal en la mecánica cuántica entra como consecuencia del observador. Es la persona que realiza la medición la que determina cuál de entre todas las posibilidades se convertirá en acto.

Sin embargo, a pesar de que la mecánica cuántica nos ha permitido entender muchos de los aspectos del mundo microscópico, todavía existen aspectos que no entendemos. Uno de los problemas de la mecánica cuántica es que es una teoría que posee una ecuación determinista, la ecuación de Schrödinger, y un conjunto de reglas ad hoc que nos dicen como calcular las probabilidades de las diferentes posibilidades asociadas con un determinado evento. Sin embargo, a pesar de todo el tiempo transcurrido desde la creación de la mecánica cuántica hasta la actualidad, todavía nadie ha deducido una ecuación que nos diga con certeza cuál de las diferentes posibilidades se dará en la realidad.

Ya que de acuerdo a la mecánica cuántica, los electrones se comportan como ondas, ellos presentan las características que asociamos con las ondas. En particular, las funciones de onda describen combinaciones de diferentes estados, las llamadas superposiciones. Un electrón, por ejemplo, podría estar en una superposición de estados correspondientes a diferentes posiciones. Schrödinger afirmaba que este principio de superposición debía aplicarse también a los objetos macroscópicos ya que estos estaban formados por átomos. Un experimento mental muy conocido que ilustra este hecho es el experimento del gato encerrado en una caja. Supongamos que colocamos un gato en una caja herméticamente cerrada, con oxígeno para que el gato pueda respirar, y una muestra de un elemento radiactivo cuya emisión desencadena que un gas venenoso encerrado en un recipiente se libere y mate al gato. Como la emisión o el decaimiento del elemento radiactivo es aleatorio, la función de onda del átomo radiactivo es una superposición del estado que decae y el estado que no decae, y por lo tanto, produce un gato que está al mismo tiempo vivo y muerto. Sólo cuando una persona abre la caja la superposición se borra quedando un solo estado: el gato muerto o el gato vivo.

5 El reduccionismo matemático

Otro aspecto importante está relacionado con la aplicación de la mecánica cuántica a energías y distancias muy pequeñas. En física se trabaja en construir una teoría general de donde todo surja como consecuencia de los principios establecidos por esta teoría. Esta gran teoría, llamada teoría de unificación y en la cual el mismo Einstein estuvo trabajando gran parte de su vida sin lograr obtenerla, representa la gran ambición en el siglo XXI. Para lograr esto debemos construir una gran teoría que combine la teoría de la relatividad general de Einstein con la mecánica cuántica. A partir de esta teoría general se debería poder

construir todo el árbol jerárquico del conocimiento humano. En cada rama de ese árbol aparecen conceptos necesarios para entender aspectos relacionados con esa rama particular, tales como protones, electrones, átomos, moléculas, células, organismos, sociedades, culturas. La última gran teoría de la física no debe contener conceptos, ya que ello implicaría que deberíamos construir otra teoría más fundamental para derivar esos conceptos. La última teoría debería ser matemática, sin palabras ni conceptos y sin el parámetro tiempo, es decir matemática y atemporal a partir de la cual cualquier científico pueda derivar toda la existencia del universo [32,33].

Muchos no creen que lo anterior sea posible. Estos creen que en cada rama de la jerarquía del conocimiento aparecen leyes y propiedades que dependen de la complejidad de los sistemas estudiados en esa rama y que no son derivables de los conceptos de la rama inmediatamente sobre esta. Por ejemplo, un zoólogo tan eminente como Ernst Mayr arguye en su libro *Thisis Biology*[21] que las ciencias físicas no pueden explicar muchos aspectos relacionados con la vida y que muchos aspectos estudiados por los físicos no son relevantes para el mundo viviente, o para cualquier otra ciencia fuera de la física. Los organismos vivos deben ser entendidos a cada nivel de organización; no pueden ser reducidos a las leyes de la física y la química. Más adelante escribe [21]:

La unidad de la ciencia no podrá alcanzarse hasta que se acepte que la ciencia contiene un conjunto de provincias separadas, una de las cuales es la física, otra de las cuales es la biología. Sería fútil tratar de “reducir” la biología, una ciencia provincial, a la física, otra ciencia provincial, o viceversa.

Al comentar sobre las ideas de C.P. Snow expuestas en su libro *The Two Cultures* sobre la separación entre los científicos y los humanistas apunta que [29]:

La brecha entre la física y las humanidades, como él (Snow) correctamente apunta, es en verdad virtualmente infranqueable. Simplemente no existe un camino de la física a la ética, la cultura, la mente, el libre albedrío y otras preocupaciones humanísticas. La ausencia en la física de estos importantes tópicos contribuyó a la alienación de los científicos y los humanistas que Snow reclama. Pero, todas estas preocupaciones tienen relaciones substanciales con las ciencias de la vida.

Otro opositor a la teoría reduccionista es Roald Hoffmann, ganador del Premio Nobel de Química. En este sentido él comenta [11]:

... Un gran defecto de los físicos teóricos es su tendencia al reduccionismo: creen que todo en la naturaleza puede reducirse a unos

cuantos principios y partículas simples. “Ni la naturaleza ni la vida funcionan de ese modo en la realidad”. “La complejidad, y no la simplicidad, es la esencia de la vida”.

Vemos, de las dos posiciones anteriores, que el problema de la reducción y la emergencia en la ciencia no está resuelto. Estas posiciones apuntan al hecho de que cuando los sistemas adquieren cierta complejidad otras leyes aparecen. Y es precisamente en este terreno que otro tipo de indeterminación, ahora al nivel clásico, emerge: el caos.

6 El caos

De acuerdo al diccionario Larousse la palabra caos viene del griego khaos que significa abismo. En filosofía expresa la confusión general de los elementos y de la materia, antes de la creación del mundo. Este estado de confusión original ha sido plasmado en diversas obras de la antigüedad. A continuación transcribo un párrafo muy hermoso de Las Metamorfosis de Ovidio (43 a.C-17 d.C) [22], obra que indudablemente presenta elementos en su composición que reflejan las teorías que sobre el universo tenían los antiguos griegos:

Antes de existir el mar, la tierra y el cielo, continentes de todo, existía el Caos. El Sol no alumbraba aún el mundo. La Luna todavía no estaba sujeta a sus vicisitudes. La Tierra no se hallaba todavía suspensa en el vacío, o tal vez quieta por su propio peso. No se conocían las márgenes de los mares. El aire y el agua se confundían con la tierra, que todavía no se había solidificado. Toda era informe. Al frío se oponía el calor. Lo seco a lo húmedo. El cuerpo duro se hundía en el blando. Lo pesado era ligero a la vez. Dios, o la Naturaleza, puso fin a estos despropósitos, y separó al cielo de la tierra, a ésta de las aguas y al aire pesado del cielo purísimo. Y así, el Caos dejó de ser. Dios puso a cada cuerpo en el lugar que le correspondía y estableció las leyes que habían de regirlos. El fuego, que es el más ligero de los elementos, se ubicó en la región más elevada. Más abajo, el aire. La Tierra, encontrada en su equilibrio, la más profunda . . .

Algunas de las ideas sobre el determinismo y el caos ya habían sido anticipadas en 1903 por el gran matemático francés Henri Poincaré en su libro *The value of Science* [24]:

Si conociéramos con precisión infinita las leyes de la naturaleza y la situación inicial del universo, podríamos predecir exactamente la

situación de este mismo universo en un momento posterior. Pero incluso aunque las leyes naturales no tuvieran ningún secreto para nosotros, sólo podríamos conocer la situación inicial de modo aproximado. Todo lo que necesitamos para poder decir que un fenómeno ha sido predicho y que está regido por leyes es poder predecir la situación posterior con la misma aproximación que la inicial. Pero esto no siempre es posible; puede ocurrir que las pequeñas diferencias en las condiciones iniciales se hagan muy grandes en el resultado final. Un pequeño error al principio producirá un error enorme al final. La predicción se hace imposible y tenemos un fenómeno fortuito.

Murray Gell-Mann apunta [15]:

Dado que nada puede medirse con la precisión absoluta, el caos da origen a una indeterminación efectiva en el nivel clásico que se superpone a la indeterminación cuántica. La interacción entre estas dos clases de impredecibilidad es un aspecto fascinante y todavía poco estudiado de la física contemporánea.

Robert May, uno de los padres de la teoría del caos, define así esta ciencia [14]:

En la ciencia, el caos se refiere a la idea de que el comportamiento de algo puede ser a pesar de todos los intentos y propósitos impredecible aún cuando sea descrito por una “ecuación determinista” muy simple; por determinista queremos decir que las ecuaciones, y todos los parámetros en ella son completamente conocidos, sin elementos estadísticos o inciertos. Tal ecuación parece predecir con certeza el futuro de algo, dado su estado a algún momento inicial.

Un aspecto esencial del sistema caótico es que las ecuaciones que rigen su comportamiento son no lineales, de manera que un pequeño cambio en las condiciones iniciales de un experimento, o una situación en el mundo real, puede provocar un gran cambio en el comportamiento futuro del sistema [30]. Esto significa que si conducimos el experimento dos veces a partir de condiciones iniciales ligeramente diferentes, a medida que el tiempo transcurre las diferencias entre el comportamiento del sistema en las dos situaciones se vuelve tan diferente que es imposible hacer ninguna predicción. Esta situación es conocida como “el efecto mariposa”; el aleteo de una mariposa en Brasil podría provocar al cabo de unos meses un tornado en Texas [16]. La única manera entonces de hacer predicciones es conociendo las condiciones iniciales del sistema con absoluta certeza, algo imposible. En el caso de sistemas lineales, dos sistemas que

partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes no difieren mucho en su comportamiento a medida que el tiempo transcurre.

Los efectos no lineales que aparecen en sistemas caóticos son típicos de sistemas complejos: por ejemplo el comportamiento de un cardumen en el tiempo, el comportamiento de poblaciones y culturas mundiales, el comportamiento de la economía mundial, la actividad eléctrica en nuestros cerebros y corazón, el congestionamiento en las autopistas, todos estos son ejemplos de sistemas reales cuyo comportamiento temporal puede ser estudiado con la teoría del caos.

A diferencia de los físicos fundamentales que quieren descubrir las leyes fundamentales de la naturaleza y sus restricciones, los científicos que trabajan en el campo de la teoría del caos y la complejidad utilizan ecuaciones que son sólo modelos aproximados de la realidad. El caotista quiere capturar los aspectos esenciales de su sistema bajo estudio, no quiere describir todos los aspectos del sistema. Para ello utiliza ecuaciones muy simples, que muestran universalidad, en el sentido de que la misma ecuación puede describir variados sistemas aparentemente diferentes: una población de pájaros y el comportamiento de la bolsa de Nueva York, por ejemplo [16].

La ecuación más sencilla que muestra caos y que ha sido utilizada ampliamente para describir muchos sistemas es la ecuación logística: $y = ax(1 - x)$, donde a es una constante.

Describiré la ecuación logística con un párrafo de la obra *Arcadia, Acto 1, Escena 4* [31]:

Lo que ella hace, cada vez que obtiene un valor para y , es usar ese como su próximo valor para x . Y así sucesivamente. Como una retroalimentación. Ella reintroduce la solución en la ecuación, y entonces la resuelve de nuevo. Iteración, tú sabes.

Lo que resulta del procedimiento anterior es que para ciertos valores del parámetro de la ecuación, el futuro no puede predecirse a partir del estado presente. La distribución final de valores de x luce aleatorio, destruyendo cualquier predicción, aún cuando la ecuación de donde partimos es completamente determinista. Este resultado representa caos, indeterminismo al nivel clásico. En otras palabras, caos a partir del orden: Lo impredecitivo y lo predeterminado se solapan de tal manera para hacer todo de la manera que es. Es como la naturaleza se crea a sí misma, en cada escala, el cristal de nieve y la tormenta.[31].

La moderna teoría del caos comenzó en el año 1966, cuando Edward Lorenz, estudiando un modelo matemático del comportamiento atmosférico, descubrió que sus ecuaciones mostraban caos. La resolución de esas ecuaciones con condiciones iniciales muy parecidas mostraba que al cabo de unos pocos segundos las soluciones se diferenciaban mucho unas de las otras. Con este resultado, Lorenz explicó porqué no se puede hacer predicciones del clima con más de unos pocos días de anticipación. Cualquier error en la medición de las condi-

ciones atmosféricas en un momento determinado se amplificará exponencialmente al cabo de poco tiempo invalidando cualquier predicción del clima. A este efecto Lorenz lo llamó “efecto mariposa”, recordando el cuento *El Sonido de un Trueno* del año 1952 del gran escritor de ciencia ficción Ray Bradbury [5]. En ese cuento la muerte de una mariposa prehistórica y su consecuente incapacidad para reproducirse, desencadena un final diferente en una elección presidencial.

Hasta ahora hemos discutido sólo la teoría del caos en la ciencia clásica. Pero la teoría del caos también hace su aparición en la mecánica cuántica. La ecuación de Schrödinger es una ecuación lineal de manera que el caos, en el mismo sentido que aparece en las leyes clásicas, no puede hacer su aparición en la mecánica cuántica. Sin embargo, el caos cuántico está ligado no a la aleatoriedad de los niveles energéticos o de la función de onda, sino a la aleatoriedad en la distribución del espaciado entre los niveles de energía. En síntesis, el caos cuántico se refiere a la aleatoriedad del espaciado de los niveles de energía a nivel cuántico de sistemas que presentan caos a nivel clásico [3, 7, 8, 17, 34]. El espaciado de los niveles energéticos de sistemas cuánticos no caóticos sigue una distribución de Poisson y la contraparte clásica de estos sistemas presenta una dinámica regular o completamente integrable, mientras que aquel de sistemas cuánticos caóticos sigue distribuciones correspondientes a ciertos tipos de matrices llamadas aleatorias y su contraparte clásica presenta una dinámica irregular, sin constantes de movimiento. Lo increíble es que este problema físico presente conexiones con uno de los problemas no resuelto más importante de la matemática actual, como lo es la hipótesis de Riemann. La hipótesis de Riemann establece que los ceros complejos de la función zeta de Riemann, $\zeta(z)$, tienen todos parte real igual a $1/2$, de manera que las cantidades $\{\Gamma_j\}$ definidas por $\zeta(\frac{1}{2} - i\Gamma_j) = 0$ son todas reales. Esta conjetura está, además, relacionada con la distribución de los números primos. La conexión se puede apreciar en la relación

$$\zeta(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^z} = \prod_{p=\text{primo}} \left(1 - \frac{1}{p^z}\right)^{-1}$$

con $Re(z) > 1$.

La conexión entre el caos cuántico y la hipótesis de Riemann tiene una historia muy interesante. En los años 50s, Eugene Wigner hizo la importante observación que la estadística de las matrices que describían el comportamiento de núcleos pesados no era muy diferente de la estadística correspondiente a matrices hermiticas aleatorias. Esta observación fue clave en la interpretación de los espectros de energía de núcleos pesados, ya que los elementos matriciales correspondientes a estos sistemas no eran conocidos. La observación de Wigner predice entonces que la distribución (la distribución, no los valores individuales) de los niveles de energía de un núcleo pesado sigue la misma ley que

la de matrices hermíticas aleatorias. Estas ideas fueron elaboradas posteriormente por Freeman Dyson, entre otros, y la proposición teórica fue confirmada hace 30 años en la distribución de los niveles nucleares del elemento erbio-166. La función de correlación de dos puntos de la distribución de los ceros de la función zeta de Riemann $1 - \left(\frac{\sin \pi x}{\pi x}\right)^2$ es la misma que la función de correlación de dos puntos de matrices hermíticas aleatorias. Esto sugiere que los ceros de la función zeta realmente poseen características espectrales. Si esto es así, los ceros de la función zeta deberían estar asociados a los autovalores de algún operador hermítico desconocido. Esta idea fue originalmente propuesta, de manera independiente, por David Hilbert y George Pólya. Si este operador existe, él determinará tanto la posición exacta de cada cero de la función zeta como la distribución exacta de los números primos. Por otra parte, debido a la conexión con el problema físico del caos cuántico, los físicos están también buscando un operador hamiltoniano correspondiente a un sistema físico y cuyos autovalores sean las cantidades reales $\{\Gamma_j\}$ correspondientes a la parte imaginaria de los ceros de la función zeta de Riemann. De acuerdo a Michael Berry, en el futuro estaremos leyendo los ceros de la función zeta de Riemann directamente de un espectro de un sistema físico, tomado en el laboratorio.

7 Conclusión

Hemos discutido el determinismo e indeterminismo en la ciencia natural, donde la matemática es un ingrediente fundamental en estos estudios. Sin embargo, existe también el problema de determinismo e indeterminismo en la matemática misma, problema éste relacionado con la lógica. Estas ideas son discutidas bajo el nombre de teoría de la información algorítmica [9,10]. Lo increíble es que estas ideas puramente matemáticas, sin relación aparente con el mundo natural, también están al final relacionadas con el mismo problema en las ciencias naturales. Para los platónicos, esto era de esperar: al final todo el universo y sus leyes no son más que representaciones de arquetipos que existen en el mundo perfecto de las ideas, el mundo de las matemáticas.

Concluiremos este artículo transcribiendo la parte final del ensayo de Jorge Luis Borges (*Nueva Refutación del Tiempo*). Después de describir sus ideas que presentan el tiempo como una ilusión, Borges comenta [4]:

And yet, and yet. . . Negar la sucesión temporal, negar el yo, negar el universo astronómico, son desesperaciones aparentes y consuelos secretos. Nuestro destino (a diferencia del infierno de Swedenborg y del infierno de la mitología tibetana) no es espantoso por irreal; es espantoso porque es irreversible y de hierro. El tiempo es la sustancia de que estoy hecho. El tiempo es un río que me arrebató, pero yo soy el río; es un tigre que me destroza, pero yo soy el tigre; es un fuego

que me consume, pero yo soy el fuego. El mundo, desgraciadamente, es real; yo, desgraciadamente, soy Borges.

Referencias

- [1] Aristotle, *Physics*, Oxford University Press, Oxford, 1999.
- [2] G. Berkeley, *Principles of Human Knowledge and Three Dialogues*, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- [3] M. V. Berry y J. P. Keating, "The Riemann zeros and eigenvalue asymptotics", *SIAM Review*, 41 (1999), 236-266.
- [4] J. L. Borges, *Otras Inquisiciones*, Alianza Editorial, Madrid, 1997.
- [5] R. Bradbury, *El Sonido de un Trueno en Las Doradas Manzanas del Sol*, Minotauro, Barcelona, 2002.
- [6] D. C. Cassidy, "Heisenberg, uncertainty and the quantum revolution", *Sci. Amer.* May, (1992) 110-111.
- [7] B. Cipra, *What's Happening in the Mathematical Sciences 1998-1999*, vol 4, AMS, Providence, RI, 1999.
- [8] J. B. Conrey, "The Riemann hypothesis", *Notices of the American Mathematical Society*, 50 (2003), 341-353.
- [9] G. Chaitin, "Computers, Paradoxes and the Foundations of Mathematics", *American Scientist*, March-April (2002), 164-171.
- [10] G. Chaitin, "Información y Azar", *Boletín de la Asociación Matemática Venezolana*, IX (1) (2002), 55-81.
- [11] L. Chang, *The New York Times Grandes Logros de los Genios de Hoy*, McGraw-Hill, México, 2000.
- [12] A. Einstein, *Correspondencia con Michele Besso (1903-1955)*, Edición, prólogo y notas de P. Speziali, Traducción de M. Puigcerver, Tusquets Editores, Barcelona, 1994.
- [13] A. Einstein, *Mi visión del mundo*, Fábula Tusquets Editores, Barcelona, 1997.
- [14] G. Farmelo (editor), *It Must be Beautiful: Great Equations of Modern Science*, Granta Books, London, 2002.

- [15] M. Gell-Mann, *El Quark y el Jaguar*, Tusquets Editores, S.A., Barcelona, 1995.
- [16] J. Gleick, *Chaos*, Heinemann, 1988.
- [17] B. Hayes, "The spectrum of Riemannium", *American Scientist* 91 (2003), 296-300.
- [18] *Heráclito, Parménides y Empédocles, Textos Presocráticos*, traducción de M. Del Pino, Edicomunicación, Barcelona, 1995.
- [19] G. Holton, *Einstein, historia y otras pasiones*, Taurus, Madrid, 1998.
- [20] P. S. Laplace, *Philosophical Essays on Probabilities*, traducido por F. W. Truscott y F. L. Emory, Dover, New York, 1951.
- [21] E. Mayr, *This is Biology*, The Belknap Press, Cambridge, Mass., 1997.
- [22] Ovidio, *La Metamorfosis*, Edicomunicación, S.A., España, 1995.
- [23] Platón, *Diálogos*, Editorial Porrúa, México, 1996.
- [24] H. Poincaré, *The Value of Science*, The Modern Library, New York, 2001.
- [25] K. Popper, *El universo abierto*, Tecnos, Madrid, 1984.
- [26] H. Price, *Time's Arrow and Archimedes Point*, Oxford University Press, New York, 1996.
- [27] I. Prigogine, *The End of Certainty*, The Free Press, New York, 1997.
- [28] *Scientific American*, September, 2002. Número especial sobre el tiempo.
- [29] C.P. Snow, *The Two Cultures*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [30] I. Stewart, *Does God Play Dice? The Mathematics of Chaos*, Basil Blackwell, New York, 1989.
- [31] T. Stoppard, *Arcadia*, Faber and Faber Limited, London, 1993.
- [32] M. Tegmark, "Parallel Universes", *Scientific American*, May 2003, 30-41.
- [33] M. Tegmark y J.A. Wheeler, "100 Years of Quantum Mysteries", *Scientific American*, February (2001), 54-61.
- [34] A. Terras, "Finite quantum chaos", *Amer. Math. Month.* 109 (2002), 121-139.

- [35] Tito Lucrecio Caro, *De la Naturaleza de las Cosas*, traducción de L. Alvarado, Equinoccio Editorial de la Universidad Simón Bolívar, Baruta, 1982.
- [36] E. Wigner, “The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences”, *Commun. Pure Appl. Math*, 13 (1960), 1-14.
- [37] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.
- [38] D. Z. Zhang, “C. N. Yang and Contemporary Mathematics”, *Math. Intelligencer* 15 (1993), 13-21.

DANIEL A. MORALES
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
VENEZUELA