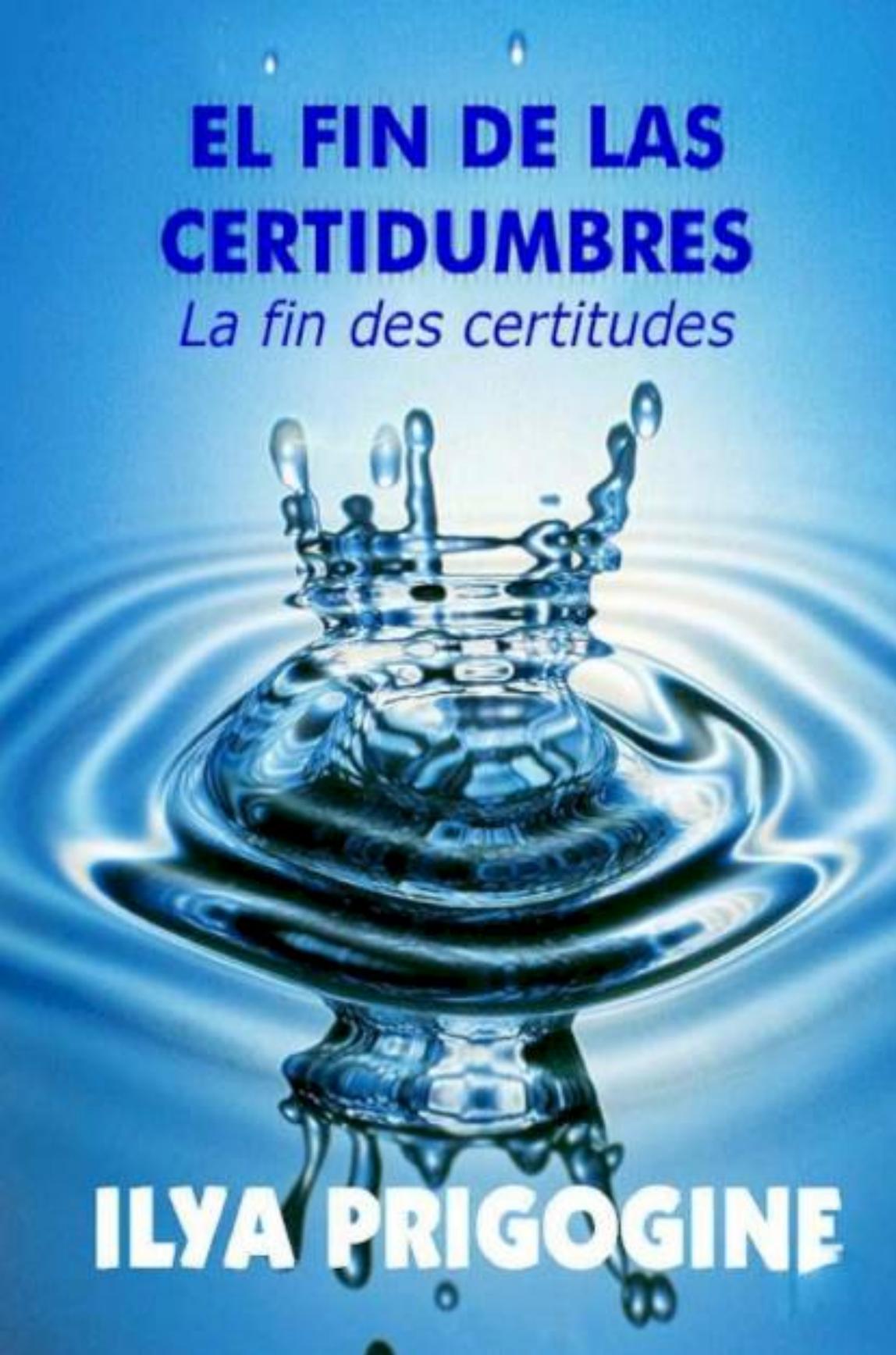


EL FIN DE LAS CERTIDUMBRES

La fin des certitudes



ILYA PRIGOGINE

El Premio Nobel de Química, Ilya Prigogine, enfrenta el determinismo científico preguntándose si el futuro está dado o se encuentra en construcción permanente. Este dilema lleva a considerar el tiempo como variable fundamental de la realidad. Los intentos de aplicar el evolucionismo darwiniano al universo de la física introduce la noción del tiempo, pero entra en contradicción con la física newtoniana, que establece equivalencia entre pasado y futuro; de esta manera la flecha del tiempo se ha reducido a la fenomenología. Para Einstein, el tiempo era una ilusión. Sin embargo, el desarrollo de la física del no-equilibrio y la dinámica de los sistemas inestables nos lleva a la idea del caos y obliga a reafirmar la teoría del tiempo de Galileo y lo relaciona con la irreversibilidad.

Esta obra se refiere al rompimiento entre pasado y futuro que afirma la física tradicional, mecánica y cuántica y la teoría de la relatividad. Cuando se incorpora la inestabilidad surgen las posibilidades. El fin de este libro es presentar los cambios habidos en la física y su efecto en la teoría general de la ciencia y la epistemología.

Prólogo

¿UNA NUEVA RACIONALIDAD?

Según Karl Popper el sentido común tiende a afirmar que «todo acontecimiento es causado por un acontecimiento, de suerte que todo acontecimiento podría ser predicho o explicado... Por otra parte, el sentido común atribuye a las personas sanas y adultas la capacidad de elegir libremente entre varios caminos distintos de acción...»^[P.1]. En el pensamiento occidental esa tensión al interior del sentido común se traduce en un problema mayor, que William James denominó «Dilema del determinismo»^[P.2]. Dilema en que se juega nuestra relación con el mundo, y particularmente con el tiempo. ¿El futuro está dado o en perpetua construcción? ¿Acaso la creencia en nuestra libertad es una ilusión? ¿Es una verdad que nos separa del mundo? ¿Es nuestra manera de participar en la verdad del mundo? La cuestión del tiempo se sitúa en la encrucijada del problema de la existencia y el conocimiento. El tiempo es la dimensión fundamental de nuestra existencia, pero también se inserta en el centro de la física, ya que la incorporación del tiempo en el esquema conceptual de la física galileana fue el punto de partida de la ciencia occidental.

Desde luego ese punto de partida es un triunfo del pensamiento humano, pero además se sitúa en el origen del problema que trata este libro. Es sabido que Einstein aseveró a menudo que «el tiempo es una ilusión».

Y en efecto, el tiempo —tal como fuera incorporado en las leyes fundamentales de la física desde la dinámica newtoniana clásica hasta la relatividad y la física cuántica— no autoriza ninguna distinción entre pasado y futuro. Todavía hoy y para numerosos físicos la siguiente es una verdadera

profesión de fe: en el nivel de la descripción fundamental de la Naturaleza no hay *flecha del tiempo*.

Sin embargo en todas partes —en química, geología, cosmología, biología o ciencias humanas— pasado y futuro desempeñan papeles diferentes. ¿Cómo podría la flecha del tiempo surgir de un mundo al que la física atribuye una simetría temporal? Tal es la *paradoja del tiempo*, que traslada a la física el «Dilema del determinismo». La paradoja del tiempo está en el centro de este libro.

La paradoja del tiempo sólo fue identificada tardíamente, en la segunda mitad del siglo XIX, gracias a los trabajos del físico vienés Ludwig Boltzmann. Este creyó posible seguir el ejemplo de Charles Darwin en biología y dar una descripción evolucionista de los fenómenos físicos. Su intento tuvo por efecto el poner en evidencia la contradicción entre las leyes de la física newtoniana —basadas en la equivalencia entre pasado y futuro— y toda tentativa de formulación evolucionista que afirmara una distinción esencial entre futuro y pasado. En esa época las leyes de la física newtoniana eran aceptadas como la expresión de un conocimiento ideal, objetivo y completo. Puesto que dichas leyes afirmaban la equivalencia entre pasado y futuro, cualquier tentativa de atribuir una significación fundamental a la flecha del tiempo parecía una amenaza a ese ideal.

La situación no ha cambiado hoy. Numerosos físicos consideran la mecánica cuántica (en el ámbito de la microfísica) como la formulación definitiva de la física, tal como en la época de Boltzmann los físicos consideraban definitivas las leyes de la física newtoniana. Perdura por lo tanto el interrogante: ¿cómo incorporar la flecha del tiempo sin destruir esas grandiosas construcciones del intelecto humano?

Así entonces, desde la época de Boltzmann la flecha del tiempo ha sido relegada al dominio de la fenomenología. Nosotros, observadores humanos limitados, seríamos responsables de la diferencia entre pasado y futuro. Esta tesis, que reduce la flecha del tiempo al carácter aproximativo de

nuestra descripción de la Naturaleza, es aún sustentada en la mayoría de los libros recientes. Otros autores renuncian a pedir a la ciencia la clave del misterio insoluble que constituiría el surgimiento de la flecha del tiempo. Pero desde Boltzmann la situación ha cambiado profundamente. El desarrollo espectacular de la *física de no-equilibrio* y de la dinámica de los *sistemas dinámicos inestables*, asociados a la idea de caos, nos obliga a revisar la noción de tiempo tal como se formula desde Galileo.

En efecto, en el curso de los últimos decenios nació una nueva ciencia: la física de los procesos de no-equilibrio. Esta ciencia condujo a conceptos nuevos como la *auto-organización* y las *estructuras disipativas*, hoy ampliamente utilizados en ámbitos que van de la cosmología a la ecología y las ciencias sociales, pasando por la química y la biología. La física de no-equilibrio estudia los procesos disipativos caracterizados por un tiempo unidireccional y, al hacerlo, otorga una nueva significación a la irreversibilidad. Antes, la flecha del tiempo se asociaba a procesos muy simples, como la difusión, el frotamiento, la viscosidad. Se podía concluir que esos procesos eran inteligibles con la sola ayuda de las leyes de la dinámica.

No sucede lo mismo hoy. La irreversibilidad ya no sólo aparece en fenómenos tan simples. Está en la base de una multitud de fenómenos nuevos, como la formación de torbellinos, las oscilaciones químicas o la radiación laser. Estos fenómenos ilustran el papel constructivo fundamental de la flecha del tiempo. La irreversibilidad ya no se puede identificar con una simple apariencia que desaparecería si accediéramos a un conocimiento perfecto. Es condición esencial de comportamientos coherentes en el seno de poblaciones de miles y miles de millones de moléculas. Conforme a una fórmula que me gusta repetir, la materia es ciega al equilibrio allí donde no se manifiesta la flecha del tiempo, pero cuando ésta se manifiesta lejos del equilibrio, ¡la materia comienza a ver! Sin la coherencia de los procesos

irreversibles de no-equilibrio sería inconcebible la aparición de la vida en la Tierra. La tesis según la cual la flecha del tiempo sólo sería fenomenológica se vuelve absurda. Nosotros no engendramos la flecha del tiempo. Por el contrario, somos sus vástagos.

El segundo desarrollo relativo a la revisión del concepto de tiempo en física fue el de los sistemas dinámicos inestables. La ciencia clásica privilegiaba el orden y la estabilidad, mientras que en todos los niveles de observación reconocemos hoy el papel primordial de las fluctuaciones y la inestabilidad. Junto a estas nociones aparecen también las opciones múltiples y los horizontes de previsibilidad limitada. Nociones como el caos se han popularizado e invaden todos los ámbitos de la ciencia, de la cosmología a la economía. Pero, como mostraremos en este libro, los sistemas dinámicos inestables conducen igualmente a una ampliación de la dinámica clásica y de la física cuántica, y a partir de allí a una formulación nueva de las leyes fundamentales de la física. Esta formulación rompe la simetría entre pasado y futuro que afirma la física tradicional, mecánica cuántica y relatividad inclusive. La física tradicional vinculaba conocimiento completo y certidumbre, que en ciertas condiciones iniciales apropiadas garantizaban la previsibilidad del futuro y la posibilidad de retrodecir el pasado. Apenas se incorpora la inestabilidad, la significación de las leyes de la Naturaleza cobra un nuevo sentido. En adelante expresan posibilidades.

La ambición de este libro es presentar esta transformación de las leyes de la física y, por ende, de toda nuestra descripción de la Naturaleza. Otras cuestiones se vinculan directamente al problema del tiempo. Una de ellas es el extraño papel que la física cuántica otorga al observador. La paradoja del tiempo hace que nosotros seamos responsables de la rotura de simetría temporal observada en la Naturaleza. Es más, el observador sería responsable de un aspecto fundamental de la teoría cuántica, denominado *re-*

ducción de la función de onda. Veremos que ese papel atribuido al observador otorgó a la mecánica cuántica su aspecto aparentemente subjetivista y suscitó interminables controversias.

En la interpretación habitual, la medición —que en la teoría cuántica impone una referencia al observador— corresponde a una rotura de simetría temporal. En cambio, la introducción de la inestabilidad en la teoría cuántica conduce a una rotura de la simetría del tiempo. ¡A partir de allí el observador cuántico pierde su estatus singular! La solución de la paradoja del tiempo aporta igualmente una solución a la *paradoja cuántica* y lleva a una formulación realista de la teoría. Aclaremos que ello no nos hace retornar a la ortodoxia clásica y determinista. Por el contrario, nos conduce a afirmar aún más el carácter estadístico de la mecánica cuántica.

Como ya hemos destacado, tanto en dinámica clásica como en física cuántica las leyes fundamentales ahora expresan posibilidades, no certidumbres. No sólo poseemos leyes sino acontecimientos que no son deducibles de las leyes pero actualizan sus posibilidades. En esa perspectiva, estamos obligados a plantear el problema de la significación del acontecimiento primordial que la física bautizó «Big Bang». ¿Qué significa el Big Bang? ¿Nos libera de las raíces del tiempo? ¿El tiempo debutó con el Big Bang? ¿O el tiempo preexistía a nuestro Universo?

Llegamos así a la frontera de nuestros conocimientos en un ámbito donde razonamiento físico y especulación se delimitan con dificultad. Por cierto es prematuro hablar de demostración o de prueba, pero es interesante analizar las posibilidades conceptuales. Como veremos, podemos concebir hoy el Big Bang como un acontecimiento asociado con una inestabilidad, lo que implica que es el punto de partida de nuestro Universo, mas no del tiempo. Si bien nuestro Universo tiene una edad, el medio cuya inestabilidad pro-

dujo ese Universo no la tendría. En esta concepción, el tiempo no tiene principio, y probablemente no tiene fin...

Es satisfactorio que incluso en sus fronteras la física pueda afirmar el carácter primordial de la flecha del tiempo. Pero lo esencial de nuestra tarea sigue siendo la formulación de las leyes de la Naturaleza en el ámbito en que se sitúa principalmente nuestro diálogo experimental, el ámbito de las energías débiles (*basses*), de la física macroscópica, de la química y la biología. También allí se anudan los lazos que unen la existencia humana con la Naturaleza.

La cuestión del tiempo y el determinismo no se limita a las ciencias: está en el centro del pensamiento occidental desde el origen de lo que denominamos racionalidad y que situamos en la época presocrática. ¿Cómo concebir la creatividad humana o cómo pensar la ética en un mundo determinista? La interrogante traduce una tensión profunda en el seno de nuestra tradición, la que a la vez pretende promover un saber objetivo y afirmar el ideal humanista de responsabilidad y libertad. Democracia y ciencia moderna son ambas herederas de la misma historia, pero esa historia llevaría a una contradicción si las ciencias hicieran triunfar una concepción determinista de la Naturaleza cuando la democracia encarna el ideal de sociedad libre. Considerarnos extraños a la Naturaleza involucra un dualismo ajeno a la aventura de las ciencias y a la pasión de inteligibilidad propia del mundo occidental. Según Richard Tarnas, esa pasión es «reencontrar la unidad con las raíces del propio ser»^[P.3]. Hoy creemos estar en un punto crucial de esa aventura, en el punto de partida de una nueva racionalidad que ya no identifica ciencia y certidumbre, probabilidad e ignorancia.

En este fin de siglo se plantea frecuentemente la cuestión del porvenir de la ciencia. Para algunos, como Stephen Hawking en su *Breve historia del tiempo* estaríamos cerca del fin, del momento en que podríamos descifrar «el pensa-

miento de Dios»^[P.4]. Por el contrario, creo que la aventura recién empieza. Asistimos al surgimiento de una ciencia que ya no se limita a situaciones simplificadas, idealizadas, mas nos instala frente a la complejidad del mundo real, una ciencia que permite que la creatividad humana se vivencie como la expresión singular de un rasgo fundamental común en todos los niveles de la Naturaleza.

He intentado presentar esta transformación conceptual (que implica la apertura de un nuevo capítulo en la historia fecunda de las relaciones entre física y matemáticas) de una manera legible y accesible para cualquier lector interesado en la evolución de nuestras ideas sobre la Naturaleza. Con todo, era inevitable que algunos capítulos, en especial el capítulo V y el VI, recurrieran a desarrollos algo técnicos. Pero los resultados son recuperados de manera más general en los capítulos ulteriores. Toda innovación conceptual exige una justificación precisa y debe delimitar las situaciones donde permite nuevas predicciones. Observemos que dichas predicciones ya fueron verificadas mediante simulaciones en el computador.

Aunque este libro sea fruto de decenios de trabajo, sólo estamos en el umbral de este nuevo capítulo de la historia de nuestro diálogo con la Naturaleza. Pero el tiempo de vida de cada uno de nosotros es limitado y he querido presentar los resultados tal como existen hoy. No invito al lector a visitar un museo arqueológico, sino a excursionar en una ciencia en devenir.

Capítulo I

EL DILEMA DE EPICURO

1

Las cuestiones estudiadas en este libro —¿el Universo se rige por leyes deterministas? ¿Cuál es el papel del tiempo?— fueron formuladas por los presocráticos en los albores del pensamiento occidental. Nos han acompañado durante más de dos mil quinientos años. Hoy, los desarrollos de la física y las matemáticas del caos y la inestabilidad abren un nuevo capítulo en esa larga historia. Percibimos esos problemas desde un ángulo renovado. En adelante, podremos evitar las contradicciones del pasado.

Epicuro fue el primero que planteó los términos del dilema al que la física moderna otorgó el peso de su autoridad. Sucesor de Demócrito, imaginaba el mundo constituido por átomos moviéndose en el vacío. Pensaba que caían todos con igual velocidad, siguiendo trayectorias paralelas. ¿Cómo podían entonces entrar en colisión? ¿Cómo la novedad —nueva combinación de átomos— podía aparecer? Para Epicuro, el problema de la ciencia, de la inteligibilidad de la Naturaleza, era inseparable del destino de los hombres. ¿Qué podía significar la libertad humana en el mundo determinista de los átomos? Escribía a Meneceo:

«En cuanto al destino, que algunos ven como el amo de todo, el sabio se mofa. En efecto, más vale aceptar el mito de los dioses que someterse al destino de los fí-

sicos. Porque el mito nos deja la esperanza de reconciliarnos con los dioses mediante los honores que les tributamos, en tanto que el destino posee un carácter de necesidad inexorable»^[1.1].

A pesar de que los físicos de que habla Epicuro sean los filósofos estoicos, la cita posee una resonancia asombrosamente moderna... Una y otra vez los pensadores de la tradición occidental, como Kant, Whitehead o Heidegger, defendieron la existencia humana contra una representación objetiva del mundo, que amenazaba su sentido. Pero ninguno logró proponer una concepción que satisficiera las pasiones contrarias, que reconciliara nuestros ideales de inteligibilidad y libertad. Así, la solución propuesta por el propio Epicuro, el *clinamen* que en momentos imprevisibles trastorna imperceptiblemente la caída paralela de los átomos, permaneció en la historia del pensamiento como el paradigma mismo de la hipótesis arbitraria, que salva un sistema mediante la introducción de un *ad hoc*^[1.2].

¿Necesitamos acaso un pensamiento de la novedad? ¿No es toda novedad una ilusión? También aquí la cuestión se remonta a los orígenes. Para Heráclito, tal como lo entendió Popper, «la verdad es haber captado lo esencial de la Naturaleza, haberla concebido como implícitamente infinita, como el proceso mismo»^[1.3]. Por contraste, el célebre *Poema* de Parménides afirma la realidad única del ser que no muere, nace, ni deviene. Y, como se sabe por el *Sofista*, Platón postula la imprescindibilidad del ser y el devenir, ya que si la verdad está vinculada al ser, a una realidad estable, no podemos concebir la vida o el pensamiento apartando el devenir.

Desde sus orígenes la dualidad del ser y el devenir ha obsesionado el pensamiento occidental, a tal extremo que Jean Wahl pudo caracterizar la historia de la filosofía como una historia desdichada que oscila continuamente entre un

mundo autómatas y un Universo gobernado por la voluntad divina^[1.4].

La formulación de las «Leyes de la Naturaleza» aportó un elemento fundamental a este antiguo debate. En efecto, las leyes enunciadas por la física no tienen por objeto negar el devenir en nombre de la verdad del ser. Por el contrario: pretenden describir el cambio, los movimientos caracterizados por una velocidad que varía con el curso del tiempo. Y, sin embargo, su enunciado constituye un triunfo del ser sobre el devenir. El ejemplo por excelencia de ello es la ley de Newton, que vincula fuerza y aceleración: es determinista y a la vez reversible en el tiempo. Si conocemos las condiciones iniciales de un sistema sometido a esta ley, es decir su estado en un instante cualquiera, podemos calcular todos los estados siguientes así como todos los estados anteriores. Es más, pasado y futuro desempeñan el mismo papel, puesto que la ley es invariante con respecto a la inversión de los tiempos ($t \leftrightarrow -t$). La ley de Newton justifica perfectamente al célebre demonio de Laplace, capaz de observar el estado presente del Universo y deducir toda evolución futura.

Es sabido que la física newtoniana fue destronada en el siglo XX por la mecánica cuántica y la relatividad. Pero los rasgos fundamentales de la ley de Newton —su determinismo y simetría temporal— sobrevivieron. Por supuesto que la mecánica cuántica ya no describe trayectorias sino funciones de onda (ver sección 4 de este capítulo y el capítulo VI), pero su ecuación de base, la ecuación de Schrödinger, también es determinista y de tiempo reversible.

Las leyes de la Naturaleza enunciadas por la física representan por lo tanto un conocimiento ideal que alcanza la certidumbre. Una vez establecidas las condiciones iniciales, todo está terminado. La Naturaleza es un autómatas que podemos controlar, por lo menos en principio. La novedad, la

elección, la actividad espontánea son sólo apariencias relativas al punto de vista humano.

En esa formulación de las leyes de la Naturaleza, numerosos historiadores subrayan el papel esencial desempeñado por la figura del Dios cristiano, concebido en el siglo XVII como un legislador todopoderoso. En esa época teología y ciencia convergían, y Leibniz escribió: «... en la más mínima sustancia, ojos tan penetrantes como los de Dios podrían leer la serie completa de cosas del Universo. *Quae sint, quae fuerint, quae mox futura trahantur* (que son, que fueron, que se producirán en el porvenir)»^[1.5]. La sumisión de la Naturaleza a leyes deterministas acercaba así el conocimiento humano al punto de vista divino atemporal.

La concepción de una Naturaleza pasiva sometida a leyes deterministas es una especificidad de Occidente. En China, o en Japón, «Naturaleza» significa «lo que existe por sí mismo». Joseph Needham nos recordó la ironía con que los letrados chinos recibieron la exposición de los triunfos de la ciencia moderna^[1.6]. Quizá el gran poeta hindú Tagore también sonrió al enterarse del mensaje de Einstein:

«Si la Luna, mientras cumple su carrera eterna alrededor de la Tierra, estuviera dotada de conciencia de sí misma, estaría profundamente convencida de que se mueve *motu proprio* en función de una decisión tomada de una vez por todas. También sonreiría un ser dotado de una percepción superior y de una inteligencia más perfecta al mirar al hombre, sus obras y su ilusión de actuar por libre voluntad. Esa es mi convicción, aunque sé que no es plenamente demostrable. Pocos seres humanos —si pensaran hasta sus últimas consecuencias lo que saben y lo que entienden— serían insensibles a esta idea, mientras el amor propio no los irguiera contra ella. El hombre se defiende de la noción de ser un objeto impotente en el curso del Universo. ¿Acaso el carác-

ter legal de los acontecimientos (que se manifiesta de manera más o menos clara en la Naturaleza inorgánica) debería cesar de verificarse ante las actividades de nuestro cerebro?»^[1.7].

Einstein consideraba que esta posición era la única compatible con las enseñanzas de la ciencia. Pero dicha concepción nos resulta tan difícil de aceptar como lo era para Epicuro. Y tanto más cuanto que desde el siglo XX el pensamiento filosófico se ha interrogado más y más sobre la dimensión temporal de nuestra existencia, como testimonian Hegel, Husserl, William James, Bergson, Whitehead o Heidegger. Si para los físicos que seguían a Einstein el problema del tiempo estaba resuelto, para los filósofos seguía siendo la interrogante por excelencia, en la que se jugaba el significado de la existencia humana.

En uno de sus últimos libros, *L'univers irrésolu (El Universo indeciso)*, Karl Popper escribe: «Considero que el determinismo laplaciano —confirmado como parece estarlo por el determinismo de las teorías físicas y su éxito brillante— es el obstáculo más sólido y más serio en el camino de una explicación y una apología de la libertad, creatividad y responsabilidad humanas»^[1.8]. Sin embargo, para Popper el determinismo no sólo pone en cuestión la libertad humana. Torna imposible el encuentro de la realidad, vocación misma de nuestro conocimiento. Popper escribe más adelante que la realidad del tiempo y del cambio han sido siempre para él «el fundamento esencial del realismo»^[1.9].

En *Le possible et le réel*, Henri Bergson pregunta: «¿Para qué sirve el tiempo?... El tiempo es lo que impide que todo sea dado de una vez. Aplaza, o, más bien, es aplazamiento. Por lo tanto debe ser elaboración. ¿No será entonces el vehículo de creación y elección? ¿Acaso la existencia del tiempo no probaría que hay indeterminación en las cosas?»^[1.10]. Para Bergson, igual que para Popper, realismo e