



QUÉ ES LO QUE NO SABEMOS
(y otros textos)

Ilya Prigogine

Biblioteca Omegalfa
2019
Ω

Qué es lo que no sabemos, y otros textos

Ilya Prigogine

Este volúmen reúne cuatro conferencias
impartidas por Ilya Prigogine:

- | | |
|---------------------------------|----|
| 1. ¿Qué es lo que no sabemos? | 3 |
| 2. El nacimiento del Tiempo | 12 |
| 3. El papel creativo del Tiempo | 18 |
| 4. El Universo y el Tiempo | 25 |

Recopilación, corrección y maquetación:
Mayo de 2019
Demófilo



Biblioteca Libre
OMEGALFA
2019
Ω

¿QUÉ ES LO QUE NO SABEMOS?*

*Conferencia pronunciada en el Fórum
Filosófico de la UNESCO en 1995*

Traducción: Rosa María Cascón

¿Qué es lo que no sé? Esta pregunta me hace pensar en otra pregunta, que se puede considerar complementaria: “¿qué es lo que sé?”. Mi respuesta a esta pregunta está clara: muy poco. No digo esto por modestia excesiva, sino por una convicción profunda: nos encontramos al final de esa era de la historia de la ciencia que se abrió con Galileo y Copérnico. Un período glorioso en verdad, pero que nos ha dejado una visión del mundo demasiado simplista. La ciencia clásica enfatizaba los factores de equilibrio, orden, estabilidad. Hoy vemos fluctuación e inestabilidad por todas partes. Estamos empezando a ser conscientes de la complejidad inherente del universo. Esta toma de conciencia, estoy seguro, es el primer paso hacia una nueva racionalidad. Pero sólo el primer paso.

Para los padres fundadores de la ciencia occidental, como Leibniz y Descartes, el objetivo a conseguir era la certeza. Y todavía es la ambición de los grandes físi-

* Fuente: *A Parte Rei. Revista de Filosofía*
<http://serbal.pntic.mec.es/AparteRei/>

cos contemporáneos, Einstein o Hawking, alcanzar la certeza mediante una teoría unificada, una descripción geométrica del Universo. Una vez conseguido este objetivo, seremos capaces de deducir a partir de nuestro modelo todos los distintos aspectos de la naturaleza.

Sin embargo, cuanto más exploramos el universo, más nos topamos con el elemento narrativo, presente a todos los niveles. Es inevitable pensar en Sheherezade, que sólo interrumpía una historia para empezar otra más hermosa si cabe. También la naturaleza nos presenta una serie de narraciones inscritas unas dentro de las otras: la historia cosmológica, la historia a nivel molecular y la historia de la vida y del género humano hasta llegar a nuestra propia historia personal. En cada nivel asistimos al surgimiento de lo nuevo, de lo inesperado.

Por otro lado, desde Newton a Schrödinger y Einstein, la ciencia se ha basado en leyes deterministas en las que el pasado y el futuro juegan papeles simétricos. Entonces, ¿cómo podemos encajar el elemento narrativo que acabo de describir dentro de un contexto gobernado por tales leyes? Muchos investigadores han tratado de evitar este problema invocando a las aproximaciones que se introducen en las leyes de la naturaleza siempre que se aplican a sistemas complejos. Pero esta solución siempre me ha parecido extraña. Porque, si las cosas fueran así, seríamos el “padre” del tiempo, en vez de su “hijo”.

Es cierto que la herencia científica del siglo veinte tiene dos aspectos diferentes. Por un lado, las leyes de la naturaleza, y por otro, la descripción termodinámica de

fenómenos asociados con el aumento de la entropía. Ciertamente, esta es una concepción del mundo en evolución. Pero entonces, ¿cómo encaja en la descripción fundamentalmente atemporal que dan “las leyes de la naturaleza”? Además, existe otro problema, ya que el aumento de entropía está normalmente asociado a un desorden creciente. ¿Cómo podría, entonces, un proceso de esas características producir estructuras complejas como la vida, en particular la vida humana?

Estas son las preguntas cuyas respuestas no hemos hecho más que empezar a imaginar. Aquí entran en juego dos campos científicos de desarrollo reciente: la física del desequilibrio, y la teoría del “caos”, asociados a sistemas dinámicos inestables.

Consideremos en primer lugar la física del desequilibrio. Aquí lo sorprendente es lo que sucede si se obliga a un sistema a alejarse mucho de su equilibrio (y las condiciones de nuestro propio sistema planetario e incluso de nuestra situación cosmológica son tales que prácticamente todos los sistemas que nos rodean están muy lejos de encontrarse en equilibrio; un buen ejemplo es la ecosfera): aparecen nuevas estructuras en los puntos de “bifurcación”. Así hablamos de una auto-organización que conduce a la formación de estructuras “disipativas”.

Tomemos como ejemplo la química. En este campo podemos ver la auto-organización en acción en el surgimiento de estructuras espacio-temporales relacionadas con rupturas de simetría. Un ejemplo que ha sido bien estudiado es el de las reacciones oscilantes. Las condiciones para que surjan estas estructuras inestables

vienen dadas por el carácter no lineal de las ecuaciones que gobiernan los procesos químicos. Como es bien sabido, las ecuaciones no lineales tienen más de una solución. La solución que corresponde a estas “estructuras disipativas” se da en un estado que dista mucho de la posición de equilibrio. Además, estos procesos son necesariamente auto-catalizadores. Es la vieja historia del huevo y la gallina. La gallina pone huevos, que, a su vez, se convierten en gallinas. La auto-catalización es típica de aquellos fenómenos biológicos en los que los ácidos nucleicos codifican el proceso de síntesis de proteínas, que, a su vez, cataliza la replicación de ácidos nucleicos. La aparición de tales estructuras demuestra el papel constructivo que juega la irreversibilidad temporal. Lejos de una posición de equilibrio, la materia adquiere nuevas propiedades que permanecen ocultas a nuestros ojos mientras nuestra atención se ciña a los estados estables.

En un reciente informe, C.K. Biebricher, G. Nicolis y P. Schuster escriben: “El mantenimiento de la organización de la naturaleza no se consigue –ni se puede conseguir– con una dirección central; el orden sólo se puede mantener mediante la auto-organización. Los sistemas auto-organizativos permiten adaptarse a (...) las condiciones externas. Hay que destacar la superioridad de los sistemas auto-organizativos sobre la tecnología humana convencional (...). Un ejemplo que ilustra esta superioridad son los sistemas biológicos en los que se pueden formar productos complejos con el máximo de precisión, eficacia y rapidez.

Pero todavía queda mucho por hacer, tanto en matemáticas no lineales como en investigación experimental,

antes de que podamos describir la evolución de sistemas complejos fuera de ciertas situaciones sencillas. Los retos aquí son considerables. En particular, es necesario superar el actual desfase en nuestra comprensión entre las estructuras físico-químicas complejas y los organismos vivos por simples que estos sean.

Por mucho que se avance en esta dirección, una conclusión ya está clara: la dirección del tiempo, el elemento “narrativo” ha de jugar un papel esencial en la descripción de la naturaleza. Sentada esa premisa, el tiempo narrativo debe entonces incluirse en nuestra formulación de las leyes de la naturaleza. Estas leyes, tal y como Newton las formuló, pretendían expresar certezas. Ahora debemos hacer que expresen “posibilidades” que pueden o no llegar a realizarse en el futuro. En este punto es donde tenemos que acudir a la teoría del caos, asociada con las estructuras dinámicas inestables.

Un ejemplo típico es el caso del “caos determinista”. En tales sistemas, dos trayectorias tan cercanas entre sí como uno pueda imaginar, con el tiempo divergen exponencialmente: esto se llama “sensibilidad a las condiciones iniciales”. Como nunca poseemos sino un conocimiento limitado de las condiciones iniciales, la previsibilidad que definía la mecánica clásica es insostenible.

Existen formas de inestabilidad más pronunciada incluso, relacionadas con la aparición de las “resonancias” (fenómeno descubierto por Henri Poincaré). Todo el mundo tiene una idea intuitiva de lo que es resonancia. Cuando tocamos una nota en un piano, oímos los ar-

mónicos, como el octavo o el quinto. En las mecánicas clásica y cuántica, las resonancias hacen posible el acoplamiento entre fenómenos dinámicos. Este es un tema muy técnico, pero podemos resumir sus resultados principales. Tradicionalmente hay dos formulaciones de las leyes de la naturaleza: una en términos de trayectorias (mecánica clásica) o funciones de onda (mecánica cuántica), y la otra en términos de teoría de conjuntos. Esta segunda formulación es de naturaleza estadística. Para sistemas estables, estas dos formulaciones son equivalentes. Para sistemas inestables, que son la mayoría de los que observamos, éste ya no es el caso. La inestabilidad sólo puede incorporarse a nivel estadístico. Así pues, es este modelo el que puede permitirnos expresar las leyes de la naturaleza de manera que incluyan a la flecha del tiempo, y que describan posibilidades más que certezas.

A primera vista, esta conclusión puede parecer revolucionaria, pero en realidad responde a una necesidad histórica. Cuando grandes científicos como Gibbs y Einstein introdujeron por primera vez la teoría de conjuntos en la física, fue para poder formular leyes termodinámicas a nivel dinámico microscópico, tanto para casos de equilibrio como de desequilibrio. Para ellos, este recurso a la teoría establecida era simplemente el signo de una falta de información sobre las condiciones iniciales. Pero ¿no había una razón más profunda para actuar de este modo? Si así fuera, entonces los fenómenos descritos por la termodinámica tales como la transición de fases, se deberían, en última instancia, sólo a nuestra falta de información, a nuestras aproximaciones. Una vez más, esta es una visión an-

tropomórfica difícil de aceptar. Porque, si es así, ¿por qué conjuntos y no trayectorias o funciones de onda? Esta es la pregunta que empieza a responder la dinámica de sistemas inestables.

Es imposible, en un artículo tan breve, describir la reformulación que necesitan las leyes de la naturaleza cuando se amplían para cubrir sistemas dinámicos inestables. Sólo señalaré, por ejemplo, su aplicación en casos como el de un líquido o gas en el que se producen interacciones continuamente. Si pudiéramos observar a los átomos o a las moléculas implicados, veríamos un movimiento perpetuo que no responde a un orden concreto. Es este movimiento “caótico” lo que confiere a dichos sistemas tanto su naturaleza escasamente predecible como su capacidad de auto-organización.

Para la concepción clásica del mundo, la ciencia iba de la mano de la certeza. La gloria suprema de la mente humana parecía depender de la posibilidad de alcanzar la certeza. Sin embargo, yo creo que, por el contrario, la idea de certeza lleva a contradicciones, a una división irreconciliable en nuestra visión del mundo. Comparto la opinión de Karl Popper, que escribió en su libro “El Universo Abierto –un Argumento para el Indeterminismo”:

“Considero tal determinismo Laplaciano –por mucho que parezca confirmado por las teorías a primera vista deterministas de la física, y por su maravilloso éxito– como el obstáculo más sólido y grave para la explicación y la defensa de la libertad, la creatividad y la responsabilidad humanas”.

Desde los primeros tiempos, el pensamiento de los

griegos contenía dos aspectos principales: la comprensión de la naturaleza, y la construcción de una democracia basada precisamente en las ideas de libertad y responsabilidad. Durante mucho tiempo se sostuvo que estos dos proyectos sólo podían coexistir en una concepción dualista de la naturaleza, ya fuera el dualismo Cartesiano, los mundos nouménico y fenoménico de Kant, o, más recientemente, la introducción del “principio antrópico” en la cosmología.

Los elementos de progreso que he resumido aquí nos permiten ir más allá de esta dualidad y de las contradicciones que contiene.

Collingwood tenía razón cuando escribió en su trabajo “El Concepto de Naturaleza”:

“(El nuevo) concepto de naturaleza, que comienza a encontrar su expresión hacia el final del siglo dieciocho y que, desde entonces hasta nuestros días no ha parado de tomar fuerza para establecerse con más seguridad, se basa en la analogía entre los procesos del mundo natural tal y como los estudian los científicos, y las vicisitudes de los asuntos humanos tal y como las estudian los historiadores”.

Desde este punto de vista, actualmente estamos entrando en una nueva fase de nuestra descripción del concepto de naturaleza, una fase que transformará los mismos cimientos de nuestro proyecto científico. A mi amigo Leon Rosenfeld, el más estrecho colaborador de Nils Bohr, siempre le gustaba decir que uno entendía una teoría física si asía sus límites. Se ha tardado casi tres siglos en alcanzar los límites de los conceptos clásicos mediante el descubrimiento de la inestabilidad.

Como subrayé al comienzo de este artículo, no hemos hecho más que empezar a explorar el complejo mundo que hemos descubierto. Pero podemos tener ya la certeza de que el carácter temporal y evolutivo de este mundo ocupará de ahora en adelante un lugar central en su descripción física, como así ha sucedido en las ciencias biológicas desde los tiempos de Darwin. Estamos redescubriendo el tiempo, pero es un tiempo que, en lugar de enfrentar al hombre con la naturaleza, puede explicar el lugar que el hombre ocupa en un universo inventivo y creativo.

<http://www.unesco.org/phiweb/uk/1rpu/nobel/presnobel.html>

- II -

EL NACIMIENTO DEL TIEMPO

Conferencia desarrollada en Roma

12/02/87).

¿Cuáles son las exigencias que la Física ha de satisfacer frente a un universo evolutivo? Son tres: irreversibilidad, probabilidad y coherencia, que constituyen las condiciones para la existencia de nuevas estructuras que ha descubierto la Física de los procesos alejados del equilibrio.

a) La irreversibilidad macroscópica.

Dado un sistema, es decir, una porción arbitraria del espacio, el segundo principio de la termodinámica afirma que existe una función, la entropía, que podemos descomponer en dos partes: un flujo entrópico proveniente del mundo externo, y una producción de entropía propia del sistema considerado. Es esta producción de entropía interna la que siempre es positiva o nula, y que corresponde a los fenómenos irreversibles. Todas las reacciones químicas y los fenómenos biológicos son irreversibles.

Para muchos hombres de ciencia la irreversibilidad corresponde a la disipación, al desorden. Se trata de comprender que así como hay creación de desorden, hay creación de orden y estos principios están ligados. En

un ejemplo: en dos cajas comunicantes, ponemos una mezcla de hidrógeno y nitrógeno. Si la temperatura interna del sistema es homogénea, también lo será la distribución de los componentes. Pero si sometemos los extremos del sistema a temperaturas diferentes, creamos una distribución contrastada. El hidrógeno abundará más en un extremo y el nitrógeno en otro. Así es que se crea una disipación, un aumento de entropía, pero también un aumento de ordenación. Es el conocido fenómeno de la antidifusión.

Este fenómeno requiere un cambio de paradigma porque clásicamente, se asociaba orden a equilibrio (caso de los cristales) y desorden a no-equilibrio (caso de la turbulencia). Hoy sabemos que es inexacto: la turbulencia es un fenómeno altamente estructurado en el cual millones de partículas se insertan en un movimiento extremadamente coherente. Resultando que el universo del no-equilibrio muestra un universo coherente.

El ejemplo clásico es el de la inestabilidad de Bénard. Si calentamos por debajo un estrato de líquido, podemos observar la formación de vórtices, fenómenos coherentes que transmiten el calor de manera más eficaz que la sola conducción térmica. Es un fenómeno de bifurcación que conduce a la formación de estructuras del no-equilibrio, que hoy se ha convenido en llamar “estructuras disipativas”, que siempre responden a un mecanismo de amplificación de las fluctuaciones. En las reacciones químicas se producen continuamente fluctuaciones: siempre hay más acá o más allá concentraciones que se diferencian de la media. Para un estado próximo al equilibrio este hecho es irrelevante porque las fluctuaciones mueren y el ambiente vuelve a un

estado homogéneo. Pero en situaciones alejadas del equilibrio, se puede producir lo contrario: en vez de retornar al estado inicial, se amplifican las fluctuaciones y esto lleva a situaciones nuevas, que da lugar a posibilidades variadas.

La biósfera es un sistema alejado del equilibrio. Un sistema en equilibrio no tiene historia, no tiene más que persistir en su estado en el que las fluctuaciones son nulas.

Si pensamos en el péndulo, no aparecen la irreversibilidad o las probabilidades. Cómo conciliar probabilidad y determinismo en el caso del juego de las monedas (cara o cruz)? Se sale del paso diciendo que esto ocurre por mi ignorancia de todas las condiciones en que se realiza la experiencia. Pero no, existen sistemas dinámicos que ningún conocimiento finito de las condiciones iniciales permite prever el resultado del juego.

En la concepción clásica el determinismo era fundamental, y la probabilidad era una aproximación a la descripción determinista, debido a nuestra información imperfecta. Hoy la situación es la inversa: las estructuras de la naturaleza nos constriñen a introducir la probabilidad independientemente de la información que poseamos. La descripción determinista no se aplica de hecho más que a situaciones sencillas, idealizadas, que no son representativas de la realidad física que nos rodea.

Actualmente, la irreversibilidad limita el alcance de la noción de trayectoria clásica en razón de la inestabilidad de los sistemas dinámicos. Si el universo estuviera sometido a un conjunto de leyes a la Kepler, no encon-

traríamos más que evoluciones del tipo de las que nos muestran las trayectorias planetarias y no habría ninguna dirección privilegiada del tiempo. Pero el mundo no es un conjunto de péndulos, no está hecho de movimientos periódicos simples.

b) La irreversibilidad en cosmología.

La irreversibilidad es común al universo entero, no es relativa a una parte del universo. Se presenta el problema: cómo concebir el inicio del tiempo, la creación del tiempo y la creación del universo?

La muerte térmica está en los inicios del universo. Todos los otros fenómenos entrópicos son despreciables en comparación con la producción de entropía que tuvo lugar en el inicio del universo. Para formular esto hay que apelar a dos tipos de constituyentes: los fotones y los bariones. El universo es sobre todo de fotones ya que hay 10⁹ de estos por cada barión. Los fotones son productos de “deshecho”, se van enfriando con la expansión del universo. En cambio, los bariones son objetos de no-equilibrio, son los supervivientes de los primeros momentos del universo. Se puede asociar fotones y bariones a la producción de desorden y de orden en el universo. El universo es el resultado de una transformación irreversible y proviene de “otro” estado físico.

La transformación del espacio - tiempo en materia, en el momento de la inestabilidad del vacío corresponde a una explosión de entropía, a un fenómeno irreversible. La materia, corresponde en realidad, a una “contami-

nación” del espacio - tiempo. Pero la contaminación, la disipación, son productores a la vez de orden y desorden.

El estado fundamental (el vacío), puede disminuir su energía emitiendo agujeros negros, de la misma manera en que un átomo puede pasar de un estado excitado a su estado fundamental emitiendo fotones. Este fenómeno es irreversible.

Gracias al segundo principio de la termodinámica es como se ha construido el universo y como la materia lleva consigo el signo de la flecha del tiempo.

c) El nacimiento del tiempo.

El Big Bang es una singularidad que cae fuera de la ciencia que estudia fenómenos repetibles. Del mismo modo, creer que la vida es una singularidad no permite hacer ciencia. Así es que más adecuado es pensar que la vida se forma cada vez que los fenómenos planetarios sean favorables. Por otra parte, se formará un universo cada vez que las condiciones astrofísicas sean favorables.

El nacimiento del tiempo, no es el nacimiento de nuestro tiempo. Ya en el vacío fluctuante, preexistía el tiempo en estado potencial. El tiempo no es la eternidad ni el eterno retorno... Y no es solamente irreversibilidad y evolución.

La Física clásica, cuyo texto canónico es *Le système du monde* de Laplace, nos invitaba a reconstruir una imagen del mundo superponiendo movimientos simples. A

cada movimiento correspondía una no-homogeneidad del espacio-tiempo. En cambio, en la cosmología ahora expuesta, la totalidad desempeña el papel determinante. El hecho singular, individual, sólo se vuelve posible cuando está implicado en semejante totalidad. Llegamos así a un tiempo potencial, un tiempo que está “ya siempre aquí”, en estado latente, que solo requiere un fenómeno de fluctuación para actualizarse. En este sentido, el tiempo no ha nacido con nuestro universo: el tiempo precede a la existencia, y podrá hacer que nazcan otros universos. ■

-III-

EL PAPEL CREATIVO DEL TIEMPO

Conferencia. Milán

(24/10/84).

El pensamiento mecánico, dinámico, es el intento de aislar un sistema, de considerarlo independientemente del resto del universo.

Los sistemas dinámicos no son nunca estables. P.ej. cuando un cuerpo pasa cerca de nuestro planeta su trayectoria queda desplazada y ya no vuelve a la situación precedente. Opuestamente, cuando corremos el corazón se acelera pero luego se recupera en el ritmo normal. En este caso hay un comportamiento estable y en el de la dinámica hay una forma de inestabilidad.

Cómo es, en cambio, la descripción termodinámica? Es de tipo global: coloca a un sistema en su ambiente. Introduce, además, la idea de estabilidad. Por el segundo principio de la termodinámica, los fenómenos irreversibles conducen a una producción positiva de entropía.

Si se perturba a un sistema aislado en equilibrio, vuelve después al equilibrio. En los fenómenos disipativos se pueden despreciar las perturbaciones, en el mundo de la dinámica, no.

De este modo, identificamos el nexo entre disipación y orden. Si no hubiese estabilidad, el mundo cambiaría de continuo por lo que no podría existir ninguna organización estable de las estructuras, por ejemplo las de las estructuras biológicas. Por tanto, la irreversibilidad

es un fenómeno muy relevante.

Aristóteles había analizado el problema del tiempo; había advertido que el tiempo era la medida del movimiento en la perspectiva del antes y el después. Y esto es lo que todavía se hace hoy: se mide el tiempo con relojes que tienen un movimiento periódico. Pero en cuanto al antes y el después, Aristóteles pensaba que sería el alma la que daba esa perspectiva y por tanto, seríamos nosotros mismos los responsables de la irreversibilidad en el mundo, como piensan hoy muchos físicos. Pero ahora comprobamos que los fenómenos irreversibles conducen a nuevas estructuras y desde que estas aparecen ya no podemos pensar que somos los responsables de la perspectiva del antes y el después. Ya no podemos pensar, con Einstein, que el tiempo irreversible es una ilusión.

El no equilibrio crea la coherencia, permitiendo a las partículas actuar a larga distancia. La materia en proximidad al equilibrio es “ciega”, porque cada partícula “ve” solamente las moléculas que la rodean; mientras que en situación alejada del equilibrio se producen correlaciones de largo alcance que permiten la construcción de los estados coherentes que hoy se encuentran en numerosos campos de la Física y la Química.

La mecánica cuántica ha introducido el azar en la Física. Sin embargo, el azar solo entraba en juego a nivel microscópico y de esto algunos concluyeron que a nivel macroscópico el azar resultaría eliminado por la ley de los grandes números. Pero ahora sabemos que esto no es así.

Cerca del equilibrio siempre es posible linealizar, pero

lejos de él tenemos no linealidad del comportamiento de la materia. La existencia de estos estados que pueden convertirse unos en otros introduce el elemento histórico en la descripción. Esto parecía reservado a la Biología o a las ciencias humanas cuando ahora puede observarse en sistemas extremadamente sencillos.

También en estos casos, la estructura, la forma del espacio, son distintas en el interior y en el exterior del sistema. Podemos decir que la irreversibilidad crea una diferenciación; el interior del sistema resulta distinto del exterior, exactamente como en el interior de un sistema viviente tiene una estructura y una composición química, completamente distinta a la del mundo exterior.

El sistema adopta ritmos distintos según sean las condiciones. La reversibilidad conduce a la autonomía; cambios pequeños en el medio llevan a comportamientos internos distintos abriendo la posibilidad de que el sistema se adecúe al mundo externo. Esto lleva a comprender que la vida no se nutre solamente de química sino que ha incorporado la gravitación, el campo electromagnético, etc.

Cuando juego a la ruleta, aunque lo haga mil veces, no queda nada del pasado, mientras que en un sistema dinámico incluso el carácter casual es resultado del propio sistema dinámico. Lo impresionante es que en la naturaleza se encuentra variedad donde se espera estabilidad y a la inversa. Por qué el mundo está hecho preferentemente de partículas de materia y no de antimateria? Por qué hay tantas moléculas de quiralidad levógira y tan pocas dextrógiras?

Se puede aplicar a la neurofisiología el mismo método usado para el clima, es decir, estudiar el potencial eléctrico sucesivo en función del potencial eléctrico precedente. En estado de vigilia el carácter casual es enorme: a un valor dado puede corresponderle otro cualquiera. En el sueño profundo, en cambio, la situación es menos casual. Podemos analizar la diferencia entre vigilia y sueño desde el punto de vista de los atractores extraños.

El sistema neurofisiológico es tan altamente inestable que sigue funcionando durante el sueño como un sistema dinámico muy complejo. Cuando se pasa del sueño a la vigilia emergen claramente dos hechos: la dimensionalidad aumenta y el sistema se hace más complejo. En segundo lugar no se trata ya de un sistema dinámico cerrado. En vigilia el sistema ya no es completo, cerrado sobre sí mismo, sino que contiene elementos venidos del mundo externo.

¿Cuál es el papel del tiempo? Tenemos el astronómico, el tiempo de la dinámica, y también un tiempo químico en nosotros mismos, pero este es un tiempo pobre que solamente existe mientras se alimenta la reacción. Con la vida la situación cambia radicalmente; con la inscripcón del código genético tenemos un tiempo interno biológico que prosigue a lo largo de miles de millones de años de la vida misma, y este tiempo autónomo de la vida no solo se trasmite de una generación a otra, sino que su mismo concepto se modifica: se produce un perfeccionamiento evolutivo. Es la irreversibilidad en acción, en la autonomía de los seres que

tienden a hacerse cada vez más independientes del mundo externo.

Se puede decir que las biomoléculas son moléculas orgánicas cuya simetría ha sido rota por la irreversibilidad (de hecho hay que leer las biomoléculas en cierto orden, de izquierda a derecha, tal como se lee este texto). Esta ruptura de la simetría espacial es la expresión de la ruptura de simetría entre pasado y futuro. En todos los fenómenos que observamos vemos el papel creativo de los fenómenos irreversibles, el papel creativo del tiempo.

En la concepción clásica, la irreversibilidad estaba ligada a la entropía, y esta a su vez, a una probabilidad. Cómo se entendía a la probabilidad? Para Boltzmann que había tenido la idea de expresar la irreversibilidad a través de la probabilidad, la respuesta era: la probabilidad nacía de nuestra ignorancia de las trayectorias exactas. De manera que la irreversibilidad era la expresión de nuestra ignorancia. Hoy ante el papel creativo de los fenómenos irreversibles, esta concepción no puede sostenerse.

Ahora debemos ir más allá, entender que la estructura del espacio-tiempo está ligada a la irreversibilidad, o que la irreversibilidad expresa también una estructura del espacio-tiempo. El mensaje del segundo principio de la termodinámica no es un mensaje de ignorancia sino que expresa la estructura del universo. Los sistemas dinámicos que están en la base de la química, de la biología, son sistemas inestables que se dirigen hacia un futuro que no puede ser determinado a priori porque tenderán a cubrir tantas posibilidades, tanto espacio,

como tengan a su disposición.

Tenemos que examinar el sentido del segundo principio: en vez de un principio negativo, de destrucción, vemos emerger otra concepción del tiempo.

La Física clásica había producido solamente dos nociones de tiempo: el “tiempo-ilusión” de Einstein y el “tiempo-degradación” de la entropía. Pero estos dos tiempos no se aplican a la situación actual.

En sus primeros instantes, el universo, todavía muy pequeño y muy caliente, era un universo de equilibrio. Ahora se ha transformado en cambio en un universo de no-equilibrio. La misma existencia de materia y no de antimateria es prueba de una ruptura de simetría. La mecánica que trata de puntos materiales, se ocupa en realidad de una de las manifestaciones de la irreversibilidad. No habría puntos materiales, no habría objetos, en un universo en equilibrio.

La evolución del universo no ha sido en la dirección de la degradación sino en la del aumento de la complejidad, con estructuras que aparecen progresivamente a cada nivel, de las estrellas y las galaxias a los sistemas biológicos.

Hay quienes creen que el porvenir del universo sólo podrá ser una repetición suya, según la idea de que el tiempo no es más que una ilusión; o bien consistirá en una inevitable decadencia, debida al agotamiento de los recursos, como prevé la termodinámica clásica. La realidad es más compleja: a tiempos largos y a nivel cosmológico están implicadas tanto la gravitación como la entropía y el juego de ambas está muy lejos de ser aclarado.

No podemos prever el porvenir de la vida, o de nuestra sociedad, o del universo. La lección del segundo principio es que este porvenir permanece abierto, ligado como está a procesos siempre nuevos de transformación y de aumento de la complejidad. Los desarrollos recientes de la termodinámica nos muestran un universo en el que el tiempo no es ni ilusión, ni disipación, sino creación. ■

-IV-

EL UNIVERSO Y EL TIEMPO *

*Conferencia en el Museo de La Plata
(24 de octubre de 1991)*

Lamento muchísimo no poder hablar en español, y siento gran pena por ello. Voy a hablar en el inglés "quebrado" que los científicos usan y espero que así será mejor comprendido.

Déjenme decirles, en primer lugar, que tanto yo como mi esposa guardaremos en la memoria el recuerdo de esta visita a La Plata por mucho tiempo. No sólo hemos visto objetos extraordinarios, hermosos y de muchísimo significado, sino también hemos sido recibidos con cordialidad y afecto, lo que recordaremos por muchos años.

Esta es una visita especial en mi vida, porque combina dos de mis intereses: el interés por la universidad, el contacto con ella y con la ciencia; y el interés por objetos extraordinariamente preciosos, es decir, el interés por la arqueología.

Desde mi punto de vista, no hay contradicción alguna entre el hecho de que yo, como físico, esté también interesado por la historia de la humanidad.

* Ciencia, filosofía y creatividad, en la óptica de un Premio Nobel (Crónica publicada por el diario el Día en La Plata el 25 del 10 de 1992)

En esencia, para mí, la ciencia es un diálogo con la naturaleza y este dialogo es continuado.

La ciencia busca comprender los principios en los que se basa el complejo mecanismo de la naturaleza. Por lo tanto, es interesante preguntar cómo los hombres empezaron a observar el mundo a su alrededor miles de años atrás. Siempre me ha fascinado el neolítico, particularmente porque el neolítico es el período en que se observa una mayor producción de obras de arte, y es en este período donde podemos ver la diferencia entre varios puntos de vista; y ya se aprecia la riqueza de la visión humana de la naturaleza. Se puede comparar, por ejemplo, el neolítico chino con el europeo y el precolombino. Por supuesto sabemos muy poco pues no hay documentos escritos, pero parece haber una diferencia. La diferencia está, tal vez, en el concepto de la estabilidad del universo y el significado del tiempo.

¡Para los griegos, el universo era eterno. Las civilizaciones precolombinas no confiaban en el universo: el universo podía existir pero también podía desaparecer, oponiéndose a la idea de la estabilidad del universo. Esta concepción está relacionada con la idea de movimiento y del tiempo. Para los griegos, el movimiento era automático; ésta fue también la visión de la mecánica clásica, para la cual el movimiento de la Tierra alrededor del sol era un movimiento de equilibrio dinámico entre gravitación y fuerza centrífuga.

Por otro lado, se puede observar una idea diferente del tiempo y del movimiento. Si pensamos en seres vivientes y biológicos, entonces el tiempo no es estático. Para tener funciones, para existir, debemos recibir energía.

El tiempo en esta concepción podría referirse a una forma de tiempo biológico. En el último siglo se ven ambas teorías en la civilización occidental: la idea de un universo atemporal, eterno; y la idea de una evolución del universo, no necesariamente estable.

Los problemas a los que se enfrentaba el hombre del neolítico son en cierta medida los problemas que enfrentan los científicos modernos. Por supuesto, nuestra perspectiva ha cambiado; la perspectiva de la ciencia respecto de la naturaleza ha cambiado enormemente en las últimas décadas.

Cincuenta años atrás, la mayoría de la gente estaba convencida de saber las leyes fundamentales de la naturaleza; que éstas estaban todas comprendidas. Recuerdo a Faber Se lee en un texto de un conocido sociólogo y antropólogo francés, Levy Bruhl: "Ya no nos sorprende nada pues sabemos las leyes básicas de la naturaleza y cuando vemos algo que no entendemos, no dudamos de que con un poco de inteligencia lo podemos reducir a las leyes que conocemos".

Y un gran filósofo ha dicho que la naturaleza es descolorida y sin sentido. Hoy no creo que haya mucha gente que piense así. Nos sorprende la complejidad de la naturaleza y la relación entre esa búsqueda de la complejidad de la naturaleza y el problema cósmico. Estamos sorprendidos por la simplicidad y la complejidad simultáneas de la estructura intermedia, la estructura biológica.

Por lo tanto, podemos entender mejor y compartir el asombro que el hombre del neolítico expresó en las hermosas obras de arte que nos ha legado. No quiero

cansarlos con un discurso complejo ni con fórmulas matemáticas. Déjenme explicarles cuál es la dirección de mis investigaciones y los problemas en los que he estado trabajando en mi vida científica durante dos décadas.

Siempre he estado fascinado por el problema del tiempo y con los años he comprendido mejor la naturaleza del concepto de tiempo. Creo que hay tres períodos en las civilizaciones occidentales, que se pueden distinguir cuando hablamos del tiempo.

1) El reconocimiento de la existencia de un problema; el reconocimiento de lo que llamo la paradoja del tiempo. Hay un consenso que el tiempo es una forma de conciencia humana, que el tiempo no está en la naturaleza. Esto es precisamente lo que llamo la paradoja del tiempo. El tiempo está en nosotros, es una dimensión interna. ¿Cómo es posible que existamos sin tiempo? Sin embargo, la extraña conclusión a la que se llegó a principios de siglo es que el tiempo es una ilusión humana. Esta extraña conclusión fue unánimemente aceptada y es aún aceptada por la mayoría de los científicos contemporáneos.

Stephen Hawking ha dicho en su libro *Breve historia del tiempo*: "Estamos cerca del momento en el que llegaremos a la mente de Dios." Esto significa llegar al estadio donde no hay diferencias entre pasado y futuro; una forma de geometría atemporal; una forma de eternidad.

2) El redescubrimiento del problema en la última década. El descubrimiento de que el tiempo es una flecha irreversible, y que tiene un rol creativo y constructivo,

en la física del mundo microscópico, en química, en hidrodinámica, en biología.

3) Entender la relación entre el rol constructivo del tiempo en nuestro entorno y la formulación de las leyes básicas de la naturaleza (las leyes de Newton, de Einstein, la relatividad) que son deterministas. Creo que habrá una nueva revolución científica cuando se hayan adaptado esas leyes a la dirección de la flecha del tiempo, a este rol constructivo de la irreversibilidad del tiempo que vemos a nuestro alrededor.

Déjenme decirles algunas palabras sobre cada una de estas tres etapas:

Hagamos referencia a las leyes del movimiento de Newton. Una característica de las leyes básicas de movimiento es que se puede cambiar la flecha, no se reconoce dirección preferencial del tiempo. Pasado y futuro juegan el mismo papel, como en un péndulo, donde no se puede decir qué viene antes y qué viene después. En el movimiento más simple no hay dirección preferencial del tiempo. En esencia, el problema del movimiento del péndulo, del movimiento de la tierra alrededor del eje, son ejemplos de leyes básicas de la naturaleza, modelos que contienen tiempo.

Y por siglos la gente decía que no habla dirección del tiempo; que el movimiento de la tierra no reconocía dirección del tiempo. Por lo cual el mundo no conoce dirección del tiempo, el tiempo es una ilusión. Pero no es así, Esto surge de la idea de que el movimiento del péndulo o de la tierra son movimientos demasiado simples. El tiempo emerge al discutir problemas con una complejidad mínima que los mencionados no po-

seen. En el siglo XIX surgieron ideas sobre evolución con Darwin y sobre la entropía y reversibilidad. Entre otros grandes físicos, Boltzmann trató de introducir la irreversibilidad en la física básica. Pero fue derrotado. La gente le demostró que estaba equivocado. Pero él sabía que aunque la situación básica de Newton era temporalmente reversible, había de todos modos una evolución del universo. Este era un momento en que todos estaban convencidos que el tiempo era una ilusión. Lo dijo Einstein, los filósofos, los científicos. Y así fue por 50 años.

Una de las cosas para aprender cuando observamos la historia de la ciencia es que la historia de la ciencia es impredecible. Parece andar como una máquina en una dirección, pero no es así. Nadie pudo predecir la obra de Miguel-Angel, ni la de Mozart, ni la de Einstein. Einstein empujó la ciencia en una dirección definida pero se dio cuenta que esta dirección tenía límites. Este es un aspecto interesante de la ciencia. La ciencia es un diálogo. Se pueden inventar teorías pero la naturaleza puede decir sí o no. En esencia, la grandeza de Einstein fue la dirección en que trato de empujar a la ciencia (hacia la naturaleza) y el reconocer que había límites al ideal que él seguía.

En cuanto al segundo período de la paradoja del tiempo, se llega al descubrimiento del rol creativo y constructivo del tiempo a través de la termodinámica del no equilibrio y de sorprendentes avances en la mecánica clásica. La termodinámica del no equilibrio es el estudio de los sistemas que no presentan un equilibrio donde nada pasa, sino sistemas que están sometidos a leyes de flujo de energía donde pasa algo muy diferente. To-

dos están familiarizados con las estructuras de equilibrio como las de los cristales, que tienen una organización hermosa, pero los cristales están muertos, no necesitan ningún flujo de energía para existir. Pero hay otras estructuras que existen sólo si se les da energía. Por ejemplo, una ciudad existe si se le da energía o material; hay un intercambio entre la ciudad y el trabajo a su alrededor.

Si se aísla la ciudad, ésta desaparece, como si aislamos a un ser viviente, éste muere. En física, en química, hay muchas de estas estructuras de no equilibrio que se han estudiado desde hace treinta años, no más, pues hasta entonces la gente estaba convencida que las únicas estructuras eran las de equilibrio.

El no equilibrio lleva al desorden, al caos, a la turbulencia. La gente piensa que la turbulencia es desorden. Pero no es así, la turbulencia es un estado altamente organizado, donde millones de moléculas se siguen unas a otras en un espectro complejo. Es en el no equilibrio donde tenemos el trabajo autoorganizativo de las estructuras.

El campo del no equilibrio es usado por la naturaleza para crear complejidad. Experimentalmente se descubren más y más tipos de situaciones de no equilibrio; por ejemplo los cristales del no equilibrio, en los que un componente tiene máxima concentración de componentes regulares y el otro componente tiene un máximo de concentración de componentes irregulares. Las situaciones de no equilibrio son el resultado de reacciones químicas, de actividad química. Recientemente se han observado en laboratorios este tipo de

cristales de no equilibrio. La diferencia es que en los cristales de equilibrio la distancia entre dos grupos iónicos es de pocos angstroms. Pero en los cristales de no equilibrio la distancia puede ser de milímetros o fracciones de centímetros. Es una organización bastante diferente.

En cuanto a la regularidad e irregularidad, en el no equilibrio dos partículas próximas divergen en tiempo introduciendo una forma de inestabilidad o inconstancia.

Todo esto introduce una nueva visión en muchos campos alrededor nuestro. Una nueva visión se ve en el campo de la biología: en biología hay muchas situaciones regulares, que deben ser regulares para no ser alteradas, como las regulaciones metabólicas, que deben ser confiables ya que se necesita cierto control; y esos mecanismos de control son generalmente mecanismos de retroalimentación, que pueden ser parte de un equilibrio que controla reacciones químicas.

Por otra parte hay estructuras irregulares de no equilibrio, como por ejemplo el cerebro, que pareciera trabajar sólo si las señales son altamente irregulares, y son caóticas cuando el cerebro está trabajando. Lo mismo sucede con el ecosistema.

La biosfera es un sistema altamente irregular e inestable. Como saben, los períodos geológicos han sido distribuidos en forma irregular.

En cuanto al tercer período, cómo entender la aparición del tiempo, la existencia de su flecha. Hay sistemas, como el movimiento de la Tierra alrededor del sol, que son regulares. Pero hay otras estructuras dinámicas que

son inestables. Y estos tipos de sistemas rompen la simetría entre las dos direcciones del tiempo entre el futuro y el pasado.

Todos han escuchado que hay materia y antimateria, electrones negativos y positivos, protones y antiprotones. Desde el punto de vista de la teoría básica, la materia y la antimateria son equivalentes. Nuestro universo no es simétrico en materia y antimateria. Contiene más materia. Esto es un ejemplo de ruptura de simetría.

La irreversibilidad del tiempo es una ruptura de situaciones simétricas donde las dos direcciones del tiempo jugarían el mismo rol. Esto se aplica también a la cosmología. Dije que Einstein observó la compleja idea de la naturaleza y quiso describir el Universo en términos geométricos, en términos en los que el tiempo como flecha fuera eliminado.

Su idea era relacionar la materia y las estructura de espacio-tiempo. Aplicó estas ideas a la cosmología y el modelo de Universo que introdujo fue un universo estático.

Entonces, sucedieron muchas cosas inesperadas: surgió la convicción de que el universo no era estático sino que estaba expandiéndose y que las soluciones estáticas de Einstein eran inestables, eran las soluciones de expansión las estables.

Surgió un nuevo aspecto, el de que todas las soluciones de expansión tenían una singularidad en su origen: el Big Bang. La gente especulaba si el Big Bang era imaginario o verdadero. Cuando se descubrió la radiación residual que apareció en los primeros momentos luego del Big Bang, se demostró que el universo era

evolución. Es como dijo Darwin, que fue el padre de la teoría de la evolución del universo.

Tenemos dos posiciones *a priori*. O que el mundo es un sistema geométrico, reversible; o que el mundo es un sistema desordenado y en evolución, muy similar en cierto sentido a la evolución biológica.

Entonces, ¿cuál es el significado del Big Bang? Yo no lo considero como una singularidad, sino como pura inestabilidad, como una transición de un estado previo del universo al universo como lo vemos hoy. En este cuadro incluimos luego la creación de la materia, como ya dije antes, Einstein habla de la materia en relación con el tiempo espacial. Si incluimos la creación de la materia en este cuadro, volvemos al problema de la inestabilidad y el problema que se mencionó antes, el rol creativo de la irreversibilidad, que creó al principio tanto desorden (la radiación cósmica) como orden (las partículas elementales). Las partículas elementales son partículas fósiles, que nos conducen a la materia y a la vida.

Einstein dijo que el tiempo debía ser real, y me sorprendió encontrar una reacción similar en un texto del grandioso escritor argentino Jorge Luis Borges: "El tiempo es una sustancia de la que estoy hecho; el tiempo es un río que me lleva, pero yo soy el río; es un tigre que me destruye, pero yo soy el tigre; es un fuego que me consume, pero yo soy el fuego".

Respuestas a preguntas del público presente:

1) Pregunta:

¿Evolucionan las leyes físicas?

Respuesta:

Una posibilidad es que las leyes físicas evolucionan porque el universo evoluciona constantemente. Un aspecto más importante y tal vez más profundo es saber qué son las leyes de física. Si se considera una ley de física como teoría básica de la que se puede deducir todo, es difícil imaginar que esta ley evolucione. Sin embargo, creo que tenemos que cambiar nuestra idea de ley de física. Debemos entender que las leyes básicas de física tan sólo están descubriendo posibilidades, no lo que pasa, sino lo que pasaría. Las leyes básicas son sólo un lienzo, donde luego aparecen otras cosas. En esencia, llegamos al concepto de leyes básicas que es similar a las situaciones axiomáticas en el campo de las matemáticas. Lo que es axiomático, no es nunca completo. Y en este sentido yo creería que la evolución de leyes es más la evolución de la realización de las potencialidades de las leyes más básicas.

2) Pregunta:

¿Tienen aplicaciones económicas las nuevas concepciones físicas?

Respuesta:

La economía clásica estaba más influida por las leyes newtonianas y muy interesada por la idea de equilibrio. Hoy por supuesto, la mayor parte de la economía está influida por la Interacción no lineal, las fluctuaciones. La economía recibe influencias de los aspectos sociales, políticos. No podemos hablar de economía en el mismo sentido que la economía clásica. Vemos también el rol del tiempo en la economía. Por ejemplo, el problema de las fluctuaciones. Las fluctuaciones del mercado son más complejas hoy en día.

3) Pregunta:

¿Hay también aspectos sociológicos en esta nueva visión de la Física?

Respuesta:

Hay muchos nuevos aspectos. Uno de los elementos principales es lo que me gustaría llamar retroalimentación cognitiva. Los seres humanos no se comportan como moléculas. Las acciones de los hombres en un determinado tiempo dependen de la visión humana del universo y de las posibilidades que existen en el futuro. Cuando las gentes de Massachussets emigraron a Texas, no lo hacían por lo que el mercado de empleo presentaba en ese momento, sino por las posibilidades de este mercado unos años después.

En esencia, las acciones humanas son como la intersección de la realidad posibilidad. Me gustaría destacar el rol de las utopías. Las utopías son Ideas genera-

les de nuevas posibilidades. Son importantes para el futuro de la humanidad.

4) Pregunta:

¿Puede hacer alguna aplicación a la Psicofonía de estas ideas?

Respuesta:

La ciencia moderna nos ha liberado de la idea de que somos máquinas, autómatas. Y nos ha liberado de la Idea de que el universo es autómatas. Ha acercado aún más la relación entre hombre y naturaleza. Me gustaría creer que la ciencia tiene un rol futuro importante, que esta nueva cara de la ciencia va a impedir la fragmentación, permitiendo así cercano de todas las ciencias.

---o0o---

Nota:

El texto es una traducción libre basada en la grabación realizada durante la conferencia. Se publica sin que haya sido revisada por el Prof. Prigogine, aunque con su consentimiento.

