

ILYA PRIGOGINE

El redescubrimiento del tiempo

ILYA PRIGOGINE

Desde el origen, la física y la historia parecen oponerse como la ley y el acontecimiento. Sin embargo, igual que los historiadores, los físicos se enfrentan a un mundo en devenir, donde diferentes escalas de tiempo se encabalgan, donde unos acontecimientos crean diferencias irreducibles entre pasado y porvenir. Hoy, la física se hace capaz de comprender este mundo en su carácter temporal, y reconocer que las leyes físicas fundamentales que negaban la irreversibilidad del tiempo, y por ende, a fortiori, el devenir, eran de validez limitada, relativa a objetos excepcionales por su simplicidad. Quizá la renovación conceptual de la física, en la que se inventa una relación no contradictoria entre ley y acontecimiento, sea capaz de contribuir a una coherencia nueva entre los diferentes saberes, tanto científicos como prácticos.

Es para mí un placer y un honor haber sido invitado a dar hoy la conferencia Marc Bloch.

He releído recientemente algunos textos de este gran historiador y me ha sorprendido la convergencia entre la transformación del "oficio de historiador" que describe y la de la física que nosotros conocemos hoy. La historia, nos dice Marc Bloch, es "una ciencia en la infancia [...] O, para decirlo mejor, envejece bajo la forma embrionaria del relato, obstruida mucho tiempo por ficciones, aún más tiempo unida a los acontecimientos inmediatamente más aprehensibles, ella es, como empresa razonada de análisis, muy joven" [\(1\)](#).

Es probable que, hablando de la historia como de una ciencia "joven", Marc Bloch pensaba en la física como una ciencia "madura". No señala por otra parte en el mismo texto que la imagen de las ciencias físicas en el siglo XIX fascinó a ciertos historiadores hasta tal punto que éstos "creyeron posible instituir una ciencia de la evolución humana" que excluiría "muchas realidades muy humanas, pero que les parecían desesperadamente rebeldes a un saber racional. Este residuo era lo que llamaban, desdeñosamente, el acontecimiento" [\(2\)](#). El hecho de que el modelo de la física haya podido inspirar un desprecio del acontecimiento me parece traducir en cambio la "juventud" de esta ciencia. Se puede decir de la física que durante mucho tiempo también ha sido "obstaculizada por ficciones", ciertamente no unida a acontecimientos inmediatamente aprehensibles sino a un modelo de inteligibilidad en cuyo nombre ha creído, por el contrario, poder negar la realidad inmediatamente aprehensible, el carácter aleatorio de una tirada de dados o la naturaleza intrínsecamente irreversible de un proceso como la difusión del calor, por ejemplo.

En relación con la cita de Marc Bloc, querría remitirme al testimonio de un especialista de la más antigua de las ciencias físicas, la mecánica racional, Sir James Lighthill, presidente, en el momento en que hacía esta declaración, de la International Union of Theoretical and Applied Mechanics: "Aquí, debo pararme y hablar en nombre de la gran fraternidad de los que practican la mecánica. Somos muy conscientes hoy de que el entusiasmo que alimentaban nuestros predecesores por el éxito maravilloso de la mecánica newtoniana les ha llevado a generalizaciones en el dominio de la predicción [...] que ahora sabemos que son falsas. Queremos, colectivamente, presentar nuestras excusas por haber inducido a error al público cultivado recogiendo, a propósito del determinismo de los sistemas que satisfacen las leyes newtonianas del movimiento, ideas que se han revelado, desde 1960, como incorrectas" [\(3\)](#).

He aquí una declaración que bien se puede llamar rompedora. Los historiadores de las ciencias están acostumbrados a "revoluciones" en el curso de las cuales una teoría es vencida, abandonada, mientras otra triunfa. ¡Pero es raro que los especialistas de una teoría reconozcan que, durante tres siglos, se han equivocado en cuanto a la inclinación y a la significación de su teoría! Y ciertamente, la renovación que conoce desde algunas décadas la dinámica es un acontecimiento único en la historia de la ciencia. El determinismo, que

aparecía como la consecuencia ineluctable de la inteligibilidad dinámica, se encuentra hoy relegado a una propiedad válida sólo en casos particulares.

Es evidente que, desde el punto de vista del ideal del determinismo, la noción misma de historia está desprovista de sentido. Las trayectorias celestes no tienen historia, por ello podemos predecir indiferentemente un eclipse en el futuro y en el pasado. Pero la difusión del calor que ya he citado como ejemplo de proceso irreversible tampoco constituye una historia. Un proceso que nivela progresivamente una diferencia de temperatura no se narra, se prevé; sin tales procesos de uniformización, la vida sobre la tierra sería en verdad imposible, así como la mayor parte de nuestras técnicas. ¡Es suficiente imaginar lo que sería un mundo donde las diferencias de temperatura aumentarían espontáneamente! Pero la vida sobre la tierra comienza cuando el calor se ha implicado en otros procesos diferentes a éste. Cómo no pensar aquí en estas teorías recientes sobre el origen de la vida según las cuales es alrededor de las fuentes calientes submarinas que proliferan a lo largo de las dorsales activas donde la vida habría aparecido. ¡El agua, cargada de metales, brotando de esas fuentes con una presión de unas 275 atmósferas y una temperatura que puede alcanzar 350°C en contacto con el agua muy fría del océano! Ciertamente, el agua hirviendo se enfría, y esta uniformización forma parte del envejecimiento progresivo de la Tierra, pero quizá la actividad físico-química intensa que se desarrolló alrededor de chimeneas hidrotermales hoy fósiles, olvidadas en alguna parte al lo largo de una dorsal, ha producido los primeros actores de la historia de la vida.

La heterogeneidad, el contraste entre diferentes escalas de tiempo, la de la Tierra, la de la existencia de una boca hidrotermal, la de los primeros "vivos" que, quizá, proliferaron allí, ¿no recuerdan las tres "historias" a las que Fernand Braudel consagraba las tres partes de su gran obra?: "La primera propone una historia casi inmóvil, la del hombre en sus relaciones con el medio que le rodea; una historia lenta en fluir y en transformarse, hecha muy a menudo de retornos incesantes, de ciclos recomenzados sin fin... Por encima de esta historia inmóvil, una historia lentamente ritmada, diríamos gustosamente, si la expresión no hubiera sido desviada de su sentido pleno, una historia social, la de los grupos y de los individuos. Finalmente la tercera parte, la de la historia tradicional, si se quiere, de la historia a la dimensión no del hombre sino del individuo, la historia del acontecimiento de François Simiand..." (4).

Sin duda, las relaciones entre las "tres" historias braudelianas están más imbricadas de lo que acabo de evocar. Los seres vivos, incluso los hombres, son impotentes para parar los procesos radioactivos cuyo calor disipan las bocas hidrotermales, mientras que la actividad de los grupos sociales ha modificado profundamente la historia "inmóvil" de las relaciones del hombre con su medio, y la historia de las ciencias, historia hasta hace poco de un número bastante reducido de individuos, es sin duda el mejor ejemplo del modo como, en ciertas circunstancias, la historia "del acontecimiento" puede jugar un papel determinante en la "historia social". Sin embargo, esta diferencia es secundaria en relación al abismo que separa estos dos "relatos" del modo de inteligibilidad a que se ha identificado la física durante mucho tiempo. En la perspectiva de la física tradicional, *incluso el envejecimiento progresivo de la Tierra no es más que una apariencia*, ligada a nuestras aproximaciones prácticas. Es más allá de este mundo fenomenal donde debemos buscar una verdad esencialmente atemporal que niega tanto la irreversibilidad como el acontecimiento.

Lo he dicho al comienzo de esta exposición, la física se reencuentra hoy como una ciencia joven. Desde que Laplace, se dice, afirmó a Bonaparte que no habría un "segundo Newton", porque no había más que un solo mundo que descubrir, son numerosos los físicos que han pensado que su ciencia estaba en vías de finalizar. Un problema más a resolver, y todo se aclarará, al menos al nivel de los principios. Hoy, podemos afirmar por el contrario que el mundo de los procesos físicos y químicos, lejos de ser comprendido "en su principio", queda todavía por descubrir ampliamente. La irreversibilidad, el acontecimiento ya no son para los físicos la marca de la apariencia que las leyes de la física permiten rebasar. Caracterizan de manera intrínseca un mundo cuyas preguntas comenzamos a comprender solamente.

Esta transformación del juicio que una ciencia puede hacer sobre su propia historia es, creo, por su naturaleza de interés para los especialistas de las ciencias humanas en al menos tres planos: primero, en tanto que la física es una historia humana; después porque el modelo que constituía la física de ayer ha jugado, como Marc Bloch lo señalaba, un papel en el desarrollo mismo de las ciencias humanas; finalmente porque la física de hoy, en la medida en que se descubre ciencia del devenir físico-químico y no de las leyes intemporales que harían de ese

devenir una apariencia, reencuentra en su propio dominio algunos de los problemas que han llevado hasta ahora a dudar de la "cientificidad" de las ciencias humanas.

En *La nueva alianza*(5), hemos descrito la "crisis" de las dos culturas. ¿Cómo comprender la historia humana si la comprensión se identifica con la búsqueda de leyes que reducen toda la historia al encadenamiento indiferente de causas y de efectos? Es curioso por otra parte que la historia haya sido dos veces la víctima de este conflicto. Así, para hacer frente al modo de inteligibilidad físico, es más allá de la historia de los hombres como Kant buscó un fundamento a sus prácticas.

El hombre atemporalmente libre, respondiendo a un imperativo ético que trasciende la historia, dominando por el conocimiento una naturaleza sumisa a leyes que ignoran toda posibilidad de historia: cómo sorprenderse de que este cara a cara inestable haya puesto en cuestión sus dos términos, la libertad y el conocimiento. Cada conquista en la inteligibilidad del hombre, venga de la antropología, de la historia o de las ciencias biológicas, ha podido ser vista como una amenaza de "reducción" del hombre a un fenómeno como los otros. Y el conocimiento científico mismo ha sido, muy recientemente todavía, asociado a la "barbarie". "Por qué y cómo cierto tipo de saber, aparecido en la época de Galileo y considerado después como el único saber, produce, según las vías de una necesidad localizable y plenamente inteligible, la subversión de todos los demás valores, tanto de la cultura como de la humanidad del hombre, es perfectamente posible de comprender -a poco que se disponga de una teoría de la esencia de todo saber posible y de su fundamento", escribe Michel Henry (6).

No corresponde a un físico discutir con un filósofo de "la esencia y del fundamento de todo saber posible", ni sustituir a los historiadores para evaluar la "necesidad plenamente inteligible" que lleva a un saber a subvertir la humanidad del hombre. Sin embargo, en tanto que físico, me está permitido sospechar que se ha producido una amalgama demasiado rápida. La física de hoy es en efecto heredera de este saber "aparecido en la época de Galileo", pero no implica y sobre todo no justifica la subversión de la cultura. Permite correlativamente afirmar que la racionalidad puesta en cuestión por Michel Henry es no "la" racionalidad científica sino una imagen histórica, cargada de cultura, de esta racionalidad.

Del mismo modo, en un libro reciente, Allan Bloom (7) ha recordado la crítica que Swift dedicó a la racionalidad científica. Los habitantes de Laputa, perfectos cartesianos, tienen un ojo girado hacia el cielo, cuyas leyes matemáticas descifran, y el otro girado hacia el interior, hacia su subjetividad egoísta. Y la isla volante de Laputa domina la Tierra gracias al poder técnico fundado sobre el descubrimiento de principios físicos. La ciencia sería por tanto la aliada natural del poder, que domina lo que ella decide ignorar, los hombres que no son ni figuras geométricas ni pura subjetividad reflexiva.

El problema promovido por Swift es grave, y no es de esos que una simple transformación teórica puede resolver. Sin embargo, en la medida en que el modelo de la física ha servido históricamente de referencia y de garante a las lecturas de la racionalidad científica, podemos decir hoy que esta racionalidad ya no puede ser invocada para justificar que los científicos sigan el modelo de los habitantes de Laputa. El enfrentamiento entre el objeto sometido a leyes intemporales y el sujeto libre, dominando el mundo pero despojado de los lazos múltiples que éste teje con él, ya no puede en lo sucesivo decirse "racional" en el sentido de que sería racional oponer el mundo "verdadero", "legal", descifrado por la ciencia, al turbio mundo donde vive el científico.

El ideal clásico de la ciencia, el descubrimiento de un mundo inteligible pero sin memoria, sin historia, remite a la pesadilla anunciada por Kundera, Huxley y sobre todo Orwell: en 1984 la lengua misma ha sido aislada de su pasado, y por tanto también de su poder de invención de los futuros; contribuye a apresar a los hombres en un presente sin salida ni alternativa. Esta pesadilla es sin duda la del poder. Pero la supresión de la memoria, la eliminación de los relatos, la reducción de la imaginación ya no pueden prevalecer como el ideal de inteligibilidad que encarnaba la física para pretender ser el precio "racional" a pagar por la constitución de la sociedad en objeto "científico". Muy al contrario, el ejemplo de la física conduciría, como veremos, a definir los juicios a priori a propósito de lo que pueden los hombres, y a propósito de los modelos múltiples sobre los cuales el pasado y el futuro se penetran entre sí en sus presentes, así como en mutilaciones, destructoras de lo que se busca comprender.

Puede parecer extraño que el desarrollo de la física que, ayer, había llevado a Kant a concluir

que lo científico no debe "aprender" de la naturaleza sino dirigirse a ella como juez, sabiendo de antemano cómo debe responder, a qué principios está sometida, pueda hoy llevarnos a conclusiones opuestas, a la imposibilidad de juzgar a priori lo que es la descripción racional de una situación, a la necesidad de aprender de ella cómo podemos describirla. Ahí está pues la consecuencia no de un retroceso de la física, sino de su progreso. En la medida en que la física de hoy es susceptible de construir una descripción inteligible del devenir de la materia sin reducirlo a una apariencia, descubre un mundo abierto cuya diversidad no puede ser reducida por ningún esquema racional único. La física, hoy, ya no es la ciencia de un Universo infinito pero cerrado en cuanto a sus comportamientos y sus modos de conocimiento posibles. Es descubrimiento de un mundo marcado por la emergencia de lo nuevo.

Del mundo cerrado al Universo infinito: es así como Alexander Koyré había caracterizado la transformación cosmológica fundamental que implica y explicita la física moderna. Retrospectivamente, comprendemos mejor los límites de la explicitación por las leyes físicas de este infinito abierto por la destrucción de las certidumbres aristotélicas. Mientras que el descubrimiento de lo infinito, de la proliferación de los posibles, del carácter arbitrario de todo límite, iba a penetrar en todos los dominios de la cultura, la física reducía el infinito a la repetición infinita de lo mismo. Esto era así porque los objetos que privilegiaba guardaban por modelo común los movimientos periódicos de los planetas que constituyeron su primer campo de exploración.

Entramos aquí en la descripción del desarrollo teórico de la física contemporánea. El último enunciado tiene en efecto un sentido técnico preciso. Todo sistema dinámico "integrable", es decir, cuyas trayectorias se pueden calcular de manera exacta, puede efectivamente por definición ser representado en términos de movimientos periódicos independientes los unos de los otros. Toda trayectoria dinámica tiene por verdad fundamental la periodicidad de los movimientos planetarios.

Esta verdad la volvemos a encontrar en la definición misma de la trayectoria dinámica. Toda trayectoria dinámica es por definición determinista y reversible: define el futuro y el pasado como equivalentes e idénticamente deducibles del presente. De igual modo que las leyes de la dinámica no nos permitirían decir a priori en qué sentido gira la Luna alrededor de la Tierra, no establecen ninguna diferencia intrínseca entre una evolución que parte de un estado inicial hacia un estado situado en el futuro y la evolución que partiría de este estado futuro hacia el estado inicial. Si imagináramos la velocidad de la Luna instantáneamente invertida, veríamos a ésta "remontarse" hacia su pasado. Igualmente, si invirtiésemos instantáneamente todas las velocidades de un sistema de cuerpos en movimiento, este sistema recorrería en sentido inverso la sucesión de todos los estados que le han llevado al momento de la inversión.

La reversibilidad de las leyes dinámicas, así como de las leyes de las dos ciencias fundamentales creadas en el siglo XX, la mecánica cuántica y la relatividad, traducen una negación del tiempo tan radical como ninguna cultura, ningún saber colectivo jamás había imaginado. Muchas especulaciones han cuestionado la idea de novedad, han afirmado el inexorable encadenamiento de las causas y de los efectos. Muchos saberes místicos han negado la realidad de este mundo cambiante e incierto y han definido el ideal de una existencia que permite escapar al dolor de la vida. Conocemos por otra parte la importancia, en la Antigüedad, de la idea de un tiempo circular, que vuelve periódicamente a sus orígenes. Pero el mismo eterno retorno está marcado por la flecha del tiempo, como el ritmo de las estaciones o el de las generaciones humanas. Ninguna especulación, ningún saber afirmó nunca la equivalencia entre lo que se hace y lo que se deshace, entre una planta que crece, florece y muere y una planta que resucita, rejuvenece y vuelve a su grano primitivo, entre un hombre que madura y aprende y un hombre que, progresivamente, se vuelve niño, después embrión, después célula.

Y por ello, desde su origen, la dinámica era portadora de esta negación, la teoría física que se identifica con el triunfo mismo de la ciencia. Históricamente, es notable que los físicos no hayan tomado consciencia de esta consecuencia de las leyes dinámicas antes de ser constreñidos por ellas. Laplace había anunciado el determinismo de un mundo sometido a las leyes de la dinámica: su demonio, contemplando un instante del Universo, podría deducir de él indiferentemente el pasado y el porvenir en sus menores detalles. Pero es solamente al final del siglo XIX cuando aparece el "demonio de Maxwell", el cual, capaz de observar y de modificar el curso individual de las moléculas, podría luchar contra la irreversibilidad, y para quien no tiene sentido intrínseco la diferencia entre pasado y futuro que permite definir el

segundo principio de la termodinámica.

Sería por tanto un error de perspectiva ver en la negación de la flecha del tiempo por la física una "conquista conceptual", similar por ejemplo a la negación hecha por la relatividad de la simultaneidad absoluta de dos acontecimientos distantes. Por el contrario, la formulación por Clausius del famoso "segundo principio de la termodinámica", "la entropía del Universo crece hasta su máximo", marca la importancia que los físicos del siglo XIX atribuyeron al hecho de que la física, finalmente, al igual que otras ciencias de la época, podía describir un mundo "histórico".

Ciertamente, la historia termodinámica del mundo parecía deber resumirse en una evolución fatal hacia la "muerte térmica", hacia la nivelación definitiva de todas las diferencias que alimentan los procesos irreversibles. La producción de entropía que define la irreversibilidad de un proceso termodinámico define en efecto a éste por la destrucción progresiva que opera de sus propias condiciones. El flujo de calor tiene por condición una diferencia de temperatura y anula sin retorno esta diferencia. Sin embargo, para ciertos físicos tales como Planck y Boltzmann, lo esencial era que la naturaleza perdía, con el segundo principio, la *indiferencia* que parecía conferirle la dinámica. El segundo principio traducía, como dijo Planck, que la naturaleza no es indiferente, que tiene "propensiones", "preferencias" por ciertos estados. La física de los sistemas disipativos, productores de entropía, recogió esta concepción de Planck bautizando los regímenes finales de una evolución irreversible con el nombre de "atractor".

La física, a finales del siglo XIX, ha conocido una crisis profunda con el descubrimiento del carácter intrínsecamente irreconciliable de las leyes de la dinámica y de la irreversibilidad termodinámica. No puedo entretenerme aquí sobre el dramático fracaso de Boltzmann, que creyó poder dar una interpretación puramente dinámica al crecimiento de la entropía y se vio progresivamente forzado a negar el carácter intrínseco de la irreversibilidad, y a definirla como relativa al nivel macroscópico donde se sitúan nuestras observaciones. Se puede ver en la transformación de este fracaso en triunfo el verdadero nacimiento de la física de comienzos del siglo XX, esta física de la que Einstein ha constituido el mejor símbolo y que se atribuyó como vocación descubrir, más allá de los fenómenos cambiantes, una verdad intemporal. ¿Tuvo Dios la menor opción, en el momento de crear el Universo?: esta es, dijo un día Einstein, la única pregunta que debería interesar verdaderamente a un físico.

Hoy, la física ha reencontrado una nueva coherencia orientada no sobre la negación del tiempo, sino sobre el descubrimiento del tiempo en todos los niveles de la realidad física. Consagraré la segunda parte de mi exposición a las perspectivas que abre esta nueva coherencia.

Comencemos por esta física de los sistemas disipativos, de los sistemas caracterizados por "atractores" en la que Boltzmann y Planck habían visto el anuncio de una física del devenir. Sabemos hoy que su esperanza estaba justificada. La evolución irreversible de un sistema hacia su estado atractor no puede ser identificada con una evolución hacia la uniformidad más que en el caso de que el atractor sea el estado de equilibrio termodinámico. Lejos del equilibrio, la irreversibilidad, la producción de entropía pueden ser definidas como *fuentes de orden*.

Consideremos una situación experimental muy simple: la experiencia de termodifusión. Tenemos dos recintos unidos por un canal y llenos de una mezcla de dos gases, por ejemplo de hidrógeno y de nitrógeno. Partimos de una situación de equilibrio: los dos recintos están a la misma temperatura, a la misma presión, y contienen la misma mezcla homogénea de los dos gases. Establezcamos ahora una diferencia de temperatura entre los dos recintos. La desviación del equilibrio que constituye esta diferencia de temperatura no puede ser mantenida más que si es alimentada por un flujo de calor que compense los efectos de la difusión térmica. No estamos pues en un sistema "aislado", sino en un sistema "cerrado", donde uno de los recintos es calentado permanentemente mientras que el otro es enfriado. Así pues, la experiencia muestra que, unido al proceso de difusión de calor, se produce un proceso de *separación de los dos gases*. Cuando el sistema haya alcanzado su estado estacionario, tal que, para un flujo de calor dado, la diferencia de temperatura ya no varíe en el curso del tiempo, habrá más, digamos, hidrógeno en el recinto caliente, y más nitrógeno en

el frío, siendo la diferencia de concentración proporcional a la diferencia de temperatura.

Vemos que, en este caso, la actividad productora de entropía no puede ser asimilada a una simple nivelación de las diferencias. Ciertamente, la difusión térmica juega este papel, pero el proceso de separación de los gases mezclados que se produce por acoplamiento con la difusión es un proceso de creación de diferencia, un proceso de "anti-difusión" que mide una contribución *negativa* a la producción de entropía.

Este simple ejemplo muestra hasta qué punto es necesario que nos liberemos de la idea de que la actividad productora de entropía es sinónimo de degradación, de nivelación de las diferencias. Pues, si es cierto que debemos pagar un precio entrópico por mantener en su estado estacionario el proceso de termodifusión, también es cierto que este estado corresponde a una creación de orden. Una nueva mirada se vuelve ahora posible: podemos ver el "desorden" producido por el mantenimiento del estado estacionario como lo que nos permite crear un orden, una diferencia de composición química entre los dos recintos. El orden y el desorden se presentan aquí no como opuestos el uno al otro sino como indisolubles.

¿A qué llamamos orden? ¿A qué llamamos desorden? Cada uno sabe que las definiciones varían y traducen frecuentemente juicios sobre la belleza, la utilidad, los valores. Por tanto, estos juicios se enriquecen también de lo que aprendemos. Durante mucho tiempo, la turbulencia se nos ha impuesto como el ejemplo por excelencia de desorden. Por el contrario, el cristal ha aparecido como la figura del orden. En adelante estamos en condiciones de complicar este doble juicio. Sabemos hoy que debemos comprender el régimen turbulento como "ordenado": los movimientos de dos moléculas situadas a distancias macroscópicas, que se miden en centímetros, están correlacionados. Por el contrario, los átomos que forman un cristal vibran alrededor de su posición de equilibrio de forma incoherente: el cristal está desordenado desde el punto de vista de sus modos de excitación.

Pero el ejemplo de la termodifusión va más lejos de *articular* "orden" y "desorden", y plantea el problema del "precio" de la creación de orden. La separación química entre los dos gases, que no es una selección ejecutada de una vez por todas sino un proceso permanente, tiene por precio una creación de "desorden", la nivelación también permanente de la diferencia de temperatura que mantiene el flujo de calor. Encontramos una articulación parecida en el metabolismo viviente, donde la construcción de las moléculas biológicas compuestas se acompaña de la destrucción de otras moléculas, correspondiendo la suma de los procesos, por supuesto, a una producción de entropía positiva. Pero ¿podemos prolongar esta idea allí donde la termodinámica ya no puede guiarnos, allí donde se trata en particular de las relaciones de los hombres entre ellos y con la naturaleza? La intensificación de las relaciones sociales que favorece la vida urbana, por ejemplo, ¿no ha sido al mismo tiempo fuente de despilfarro, de polución, y de invenciones, prácticas, artísticas, intelectuales? La analogía es fecunda puesto que articula lo que demasiado a menudo estamos tentados a oponer, pero no funda, hay que decirlo, ningún juicio en cuanto a los valores respectivos de lo que es creado y destruido, y sobre todo no legitima nuestra historia como necesaria u óptima. El ejemplo de la física puede alumbrar el problema planteado a los hombres, no resolverlo.

Volvamos a la físico-química. El fenómeno de termodifusión es un fenómeno continuo: la separación de los dos gases es proporcional a la diferencia de temperatura. Pero, en otros casos, nos encontramos con fenómenos bruscos, espectaculares, con la aparición de nuevos regímenes de funcionamiento, cualitativamente diferentes, que se producen a una distancia determinada del equilibrio, es decir, a partir de un umbral de intensidad de los procesos irreversibles cuyo asiento es el sistema.

No nos entretendremos aquí en el descubrimiento de las "estructuras disipativas". Tomemos, para iluminar la sorpresa que han constituido, el ejemplo célebre de la "inestabilidad de Bénard". Una delgada capa líquida es sometida a una diferencia de temperatura entre la superficie inferior, calentada permanentemente, y la superficie superior, en contacto con el entorno exterior. Para un valor determinado de la diferencia de temperatura, el transporte de calor por conducción, donde el calor se transmite por colisión entre las moléculas, pasa a un transporte por convección, donde el calor se transmite por un movimiento colectivo de las moléculas. Se forman entonces torbellinos que distribuyen la capa líquida en "celdas" regulares. Miles de millones de moléculas que, antes, tenían un movimiento desordenado, participan ahora en un comportamiento colectivo. La formación de las celdas de Bénard

constituye verdaderamente la emergencia de un fenómeno macroscópico, caracterizado por dimensiones del orden de un centímetro, a partir de una actividad microscópica que no implicaba más que longitudes del orden del angstrom (10^{-8} cm). ¿Cómo hubiéramos podido creer posible la emergencia de este comportamiento colectivo si la experiencia no lo hubiera impuesto?

De igual modo, hizo falta que la experiencia nos permita observar "relojes químicos" para que nos pudiéramos creer que de millones de colisiones aleatorias que se producen en cada segundo entre las moléculas y en ocasión de las cuales se producen las reacciones químicas pueda nacer un ritmo macroscópico. Con una periodicidad del orden del minuto, el medio reaccional cambia, sin embargo, de color, como si un misterioso director de orquesta señalara los momentos en que las reacciones deben hacer variar la composición química del medio. Pero sabemos que no hay director de orquesta aquí, como tampoco hay, en los torbellinos de Bénard, un agente puesto al frente de la circulación de moléculas. Los procesos disipativos que conducen, lejos del equilibrio, a la formación de estructuras disipativas son los mismos que aquéllos que se compensan mutuamente en el equilibrio.

De hecho, es el mismo estado de equilibrio, no los regímenes de funcionamiento de la materia lejos del equilibrio, el que puede aperecer en adelante como singular en cuanto permite describir los procesos haciendo abstracción del tiempo. En cada instante, en el equilibrio, las consecuencias de un acontecimiento, por ejemplo una reacción química, son anuladas por otro acontecimiento. Por esto no existe ninguna diferencia entre diferentes sistemas químicos en equilibrio, ya sean los mecanismos de reacción lineales o no lineales (el producto de una reacción cataliza ésta reacción o otra, por ejemplo). Por el contrario, lejos del equilibrio, las consecuencias de una reacción no son inmediatamente anuladas sino que son susceptibles de propagarse y, si existen mecanismos no lineales, favorecer o inhibir otras reacciones, lo que en consecuencia... La lógica de la descripción de los procesos lejos del equilibrio no es ya una lógica de balance, sino una lógica narrativa (si..., entonces...). La actividad coherente de una estructura disipativa es en sí misma una *historia*, que tiene por materia el envite mutuo entre acontecimientos locales y la emergencia de una lógica coherente global que integra la multiplicidad de esas historias locales.

El descubrimiento de estos regímenes colectivos de actividad asocia lo que propondré definir como los tres elementos mínimos que exige toda historia: la irreversibilidad, las probabilidades, la posible emergencia de novedades coherentes. El movimiento (idealmente) reversible de la Luna alrededor de la Tierra no es una historia, pero la toma en consideración de los rozamientos que alejan imperceptiblemente la Luna de la Tierra cada año no basta tampoco para construir una historia. Para que ésta tome un sentido, hace falta que podamos imaginar que lo que ha tenido lugar hubiera podido no producirse, hace falta que unos acontecimientos sólo probables jueguen un papel irreductible. Pero una sucesión de tiradas de dados no es tampoco una historia. Falta aún que algunos de esos acontecimientos tengan una apuesta, que sean susceptibles de abrir a posibilidades que ellos condicionan sin -claro está- bastar para explicarlas.

Irreversibilidad y probabilidades caracterizan todo sistema químico, esté o no en equilibrio, pero es lejos del equilibrio donde algunos acontecimientos locales pueden dejar de ser insignificantes. donde una fluctuación local de concentración puede arrastrar a un nuevo tipo de régimen de funcionamiento. Un sistema cada vez más desviado del equilibrio puede, de bifurcación en bifurcación, conocer una sucesión de esos regímenes, pasar de la regularidad del reloj químico al "caos", donde su actividad puede definirse como lo inverso del desorden indiferente que reina en el equilibrio: ninguna estabilidad asegura ya la pertinencia de una descripción macroscópica, todas las posibilidades se actualizan, coexisten e interfieren, el sistema es "al mismo tiempo" todo lo que él puede ser.

¿Qué pasará si...? ¿Qué habría pasado si...? Son éstas preguntas no sólo de historiador, sino también de físico frente a un sistema que ya no puede representarse como manipulable y controlable. Estas preguntas no remiten a una ignorancia contingente y superable sino que definen la singularidad de los puntos de bifurcación, donde el comportamiento del sistema se vuelve inestable y puede evolucionar hacia varios regímenes de funcionamiento estables. En tales puntos, un "mejor conocimiento" no nos permitiría deducir lo que ocurrirá, sustituir la certidumbre a las probabilidades. Es pues el "diagrama de las bifurcaciones", el "mapa de los posibles" que explora un sistema cuando se ha apartado progresivamente del equilibrio por una modificación de sus relaciones con su medio, el que determina en cada caso lo que será

previsible, y lo que sólo seremos capaces de constatar y contar.

Igualmente lejos del equilibrio, un sistema puede volverse *sensible* a algunos aspectos de su propia realidad que eran insignificantes en equilibrio. Es el caso, como hemos visto, de la no-linealidad de los procesos que se producen en dicho sistema, pero es igualmente el caso para una fuerza tal como la fuerza de gravitación. Ésta no tiene efecto observable en un sistema en equilibrio, pero sin ella las celdas de Bénard no se formarían. Es pues la actividad disipativa misma quien determina lo que, en la descripción de un sistema físico-químico, es pertinente o puede ser despreciado.

¿A qué es sensible un ser? ¿Por qué puede ser afectado? ¿De qué le hacen capaz sus relaciones con su mundo? Tales cuestiones toman ya sentido para "seres" tan simples como los sistemas físico-químicos. ¿Por qué no se plantearían más urgentemente aún a los que estudian los seres vivos, dotados de memoria, capaces de aprender y de interpretar? ¿Cómo no encontrarían un sentido aún más crucial cuando se trata de hombres a los que el lenguaje hace sensibles a la indefinida multiplicidad de sus pasados, de los futuros que pueden temer o esperar, de las lecturas divergentes que estallan desde el presente? ¿No son las ciencias, ellas mismas, uno de los vectores de esta sensibilidad? Para los hombres de hoy, el "big bang" y la evolución del Universo forman parte del mundo, con el mismo derecho que, ayer, los mitos del origen. ¿Cómo juzgar a priori lo que "es" el hombre, cuáles son los conceptos pertinentes para definir su identidad si ya la identidad de un sistema físico-químico es relativa a su actividad? ¿Cómo un físico, después del descubrimiento del papel crucial de las relaciones lineales en física, podría ignorar la singularidad de la historia de los hombres donde tales relaciones son omnipresentes, enredando puntos de vista locales, visiones globales, representaciones divergentes del pasado, del presente y del porvenir?

Los instrumentos conceptuales producidos por la física de los sistemas disipativos ya no son los instrumentos de un juicio, destinado en principio a diferenciar entre las apariencias anecdóticas, circunstanciales, y una verdad general. Son instrumentos de exploración, susceptibles de engendrar nuevas cuestiones, de suscitar distinciones inesperadas. Así ocurre por ejemplo con el descubrimiento de la gran diversidad de los atractores. Ya he aludido a los atractores "puntuales", el estado de equilibrio principalmente, a los atractores periódicos, que traducen los "relojes químicos". Pero conocemos desde hace algunos años atractores caóticos que confieren a un sistema, descrito sin embargo por ecuaciones deterministas, un comportamiento errático. ¿Qué pertinencia tendrán tales instrumentos en la exploración de esta realidad múltiple, concreta, que es la de la naturaleza y la historia de los hombres? No puedo detenerme aquí para describir los temas donde ya intervienen, el de la meteorología o el del origen de la vida, principalmente. El punto esencial, me parece, es que el ejemplo de la física ya no puede arrastrar a otras ciencias a "fiscalizar" su objeto, sino que debe, por el contrario, abrirlas al problema que comparten con la física, el problema del devenir.

Llego ahora a la última parte de mi exposición, al problema de la coherencia de la física misma. La convicción de Boltzmann, para quien la irreversibilidad debía estar en el centro de la física, está hoy comprobada: la irreversibilidad abre la física al problema del devenir. Pero las leyes fundamentales de la física condenarían esta irreversibilidad como determinada por un modo de descripción aproximativo. Sería porque ignoramos el movimiento de cada molécula individual y porque caracterizamos un sistema en términos de variables macroscópicas por lo que observamos una evolución irreversible, la evolución hacia el estado macroscópico más probable, la que realiza la inmensa mayoría de las configuraciones microscópicas a priori posibles. Las probabilidades y la irreversibilidad no tendrían pues más que una significación negativa, traducirían la distancia entre el observador humano y aquel que podría observar un sistema de miles de millones de moléculas como nosotros observamos el sistema planetario.

En mecánica cuántica, la situación es más compleja. Todos saben que la mecánica cuántica no puede predecir más que probabilidades. Sin embargo la ecuación fundamental que está en el centro de la mecánica cuántica - la ecuación de Schroedinger - describe una evolución determinista y reversible. Es el acto de medida, irreversible, lo que introduce las probabilidades en mecánica cuántica. Esta estructura dual propia de la mecánica cuántica - la evolución de la función de onda inobservable en el espacio de Hilbert y su "reducción", que

permite determinar las probabilidades de los diferentes tamaños observable - ha hecho correr ríos de tinta. Es ella la que ha llevado a ciertos físicos a afirmar que, en el fondo, es la consciencia humana quien es responsable de la posibilidad de caracterizar el mundo cuántico en términos de probabilidad de observación.

Como ya señalamos en *La nueva alianza*, el formalismo actual de la mecánica cuántica traduce por su singularidad misma su solidaridad profunda con el modo de conceptualización clásico de la física, y hace aparecer de manera explícita los límites de éste. Toda descripción física se refiere a observaciones, a medidas, y no existe medida sin marca, sin producción irreversible de un rastro. Naturalmente, en astronomía por ejemplo, podemos olvidar que si se puede observar una estrella lejana es porque arde irreversiblemente y porque los fotones que emite impresionan la retina del astrónomo o su placa fotográfica. Pero cuando se trata de "observar" el mundo cuántico, nuestro único acceso experimental es el acontecimiento, colisión, emisión o absorción de fotones, desintegración, etc. Ahora bien, al igual que la mecánica clásica, la mecánica cuántica no puede dar sentido intrínseco al acontecimiento. Les remito aquí a la célebre parábola del "gato de Schroedinger". Una partícula radiactiva está encerrada en una caja con un gato. Si se desintegra provocará la rotura de un frasco de veneno que causará la muerte del gato. La mecánica cuántica nos prohíbe, frente a la caja cerrada, decir: ora la partícula está intacta, ora se ha desintegrado; ora el gato está vivo, ora está muerto. Sólo cada vez que abrimos la caja, cuando observamos el gato, podemos decir, eventualmente, "está muerto, luego la partícula se ha desintegrado". Es la observación lo que da sentido al acontecimiento, y no a la inversa.

Según algunas representaciones filosóficas de la historia de las ciencias, éstas progresarían por la negación. El progreso de la "razón" científica exigiría entonces que confiáramos al dominio de la opinión incompetente la idea de una distinción intrínseca entre pasado y futuro, como hemos abandonado la idea de causa final o de simultaneidad absoluta de acontecimientos distantes. Esta representación del progreso científico me parece peligrosa. Desprecia el hecho de que, en materia científica, negación y afirmación son indisolubles. El fracaso de Boltzmann, y la negación de la flecha del tiempo que de él se deriva, supone que queda demostrada la validez general de la noción de trayectoria dinámica. Recordemos aquí la declaración de Sir James Lighthill: el determinismo reversible en cuyo nombre la flecha del tiempo fue negada era una creencia que se revela hoy ilegítima. El descubrimiento de los límites de validez de la noción de trayectoria abre por tanto el espacio conceptual donde puede construirse un sentido dinámico intrínseco de la flecha del tiempo.

De hecho, desde 1892, estos límites estaban definidos. Poincaré demostró que la mayor parte de los sistemas dinámicos no pueden ser definidos en términos de "invariantes del movimiento", es decir, ser representados en términos de estos movimientos periódicos independientes a los que, como ya he dicho, la descripción de un sistema dinámico integrable puede ser referida. La razón de esta imposibilidad es el fenómeno de "resonancia", es decir, la transferencia de energía y de cantidad de movimiento entre dos movimientos periódicos.

Desde un punto de vista histórico, es interesante constatar que la "catástrofe de Poincaré" no tuvo consecuencias. El ideal de un mundo descrito en términos de trayectorias dinámicas -o de funciones exactas cuánticas- continuó dominando el pensamiento. Es sólo en el transcurso de estos últimos años cuando el desarrollo de la "dinámica cualitativa", al que se asocian los nombres del llorado Kolmogorov, de Arnold y de Moser, ha terminado definitivamente con la creencia según la cual, ya que responden a un mismo tipo de ecuaciones, los sistemas dinámicos pertenecen a una clase homogénea.

Los sistemas dinámicos estudiados por Poincaré se caracterizan por puntos de resonancia escasos, como son escasos los números racionales respecto a los números irracionales. Sin embargo, para los "grandes" sistemas (cuyo volumen tiende a infinito) sabemos que la situación se invierte. Las resonancias se acumulan por todas partes en el espacio de las fases, se producen a partir de ahora no ya en cualquier punto racional sino en cualquier punto real. A partir de entonces, los comportamientos no periódicos dominan. El sistema dinámico se caracteriza entonces por un comportamiento *caótico*.

El sistema caótico pone en cuestión la noción misma de causalidad. La idea de causa ha estado siempre, más o menos explícitamente, asociada a la noción de "mismo", necesaria para dar a la causa una capacidad operativa. "Una *misma* causa produce, en circunstancias *semejantes*, un *mismo* efecto". "Si preparamos dos sistemas semejantes de la misma manera,

obtendremos el mismo comportamiento". Incluso los historiadores, cuando invocan una relación de causalidad, se arriesgan a pensar que si las circunstancias hubieran sido ligeramente diferentes, si el viento hubiera soplado menos fuerte, si tal persona hubiera elegido llevar una ropa diferente, la situación que analizan, en lo esencial, no se habría modificado. Este riesgo es el de toda descripción, el de toda definición. Tanto las palabras como los números tienen una precisión finita. Toda descripción, verbal o numérica, define una situación no como idéntica a sí misma, sino como perteneciente a una clase de situaciones todas compatibles con la misma descripción. Así, si observamos un sistema caótico partiendo de dos estados iniciales tan semejantes como queramos, veremos evoluciones que divergen con el paso del tiempo de forma exponencial. El comportamiento de un sistema caótico, a pesar de ser descrito por ecuaciones deterministas, es esencialmente no reproducible.

Cada estado de un sistema dinámico integrable contiene, ya lo he señalado, su pasado y su futuro. El comportamiento caótico nos lleva a *situar* el presente, a caracterizar lo que el presente puede decirnos del futuro por su *horizonte temporal*. Sea cual sea la precisión de la definición de un estado, existe un tiempo de evolución después del cual esta definición habrá perdido toda pertinencia: más allá de este horizonte, la noción de trayectoria individual pierde su sentido. Como un verdadero horizonte, el horizonte temporal de los sistemas caóticos diferencia entre lo que podemos "ver" desde donde estamos y el más allá, la evolución que ya no podemos describir en términos de comportamiento individual sino sólo en términos de comportamiento errático, común a todos los sistemas caracterizados por el atractor caótico. Por supuesto, podemos intentar "ver más lejos", prolongar el tiempo durante el cual podemos prever una trayectoria, aumentando la precisión de su definición, restringiendo la clase de los sistemas que consideramos como "los mismos", pero el precio a pagar se vuelve rápidamente desmesurado: así, para multiplicar por diez el tiempo durante el cual la evolución se mantiene previsible a partir de sus condiciones iniciales, debemos aumentar la precisión de la definición de estas condiciones hasta un factor de e^{10} .

La descripción de los sistemas dinámicos caóticos impone una renovación del lenguaje mismo de la dinámica. Éste, en la medida en que supone un conocimiento infinitamente preciso del estado de un sistema dinámico, oculta de hecho la diferencia cualitativa entre sistemas dinámicos. Confiere al físico un punto de vista infinito a partir del cual es invisible el horizonte temporal que caracteriza los comportamientos caóticos, punto de vista que permite olvidar los límites de todo conocimiento concebible, es decir, finito. El ideal de conocimiento que implica el lenguaje de la dinámica clásica es pues ilegítimo, en el sentido de que, en el caso de los sistemas caóticos, no respeta el límite que define las condiciones de nuestro modo de conocimiento, históricamente contingentes, sino del conocimiento en general.

Desgraciadamente no me es posible describir aquí con detalle el nuevo lenguaje dinámico, que, hoy, nos permite integrar esta limitación, y dar incluso un sentido intrínseco, y no ya determinado por nuestra falta de conocimiento, a las probabilidades que había introducido Boltzmann para articular dinámica y termodinámica. Debemos precisar que este lenguaje sustituye el estado dinámico clásico, y a la ley de evolución reversible que parecía permitir deducir indiferentemente de este estado el pasado y el futuro, por un estado y una ley de evolución de simetría temporal rota. Esta doble ruptura de simetría expresa de manera positiva lo que la noción de horizonte temporal expresaba como un límite: la noción de un presente abierto sobre un futuro intrínsecamente aleatorio.

Esta transformación de la dinámica constituye, me parece, un ejemplo privilegiado del carácter abierto, inventivo, de la construcción de la inteligibilidad físico-matemática. El lenguaje de la dinámica clásica estaba marcado por una incoherencia implícita: ¿cómo aceptar que sea nuestra falta de conocimiento lo que da sentido a la irreversibilidad, sin la cual, por no hablar de nuestra vida misma, es inconcebible la actividad de medida que presupone toda teoría física? Ahora bien, no es abandonando la dinámica sino comprendiéndola, comprendiendo al mismo tiempo las razones y los límites de sus éxitos, como el problema ha podido ser resuelto. Por esta razón la significación que podemos dar hoy a la flecha del tiempo se dirige a la vez hacia el pasado y hacia el futuro de la dinámica. Hacia el pasado, ya que concebimos la irreversibilidad como la traducción de la progresiva pérdida de pertinencia de todo conocimiento, de todo poder de control, determinada por el carácter caótico del sistema, y expresamos así en su definición misma las razones del abandono del ideal clásico. Hacia el futuro, dado que la nueva descripción dinámica renueva nuestra mirada y nuestros instrumentos conceptuales. En particular, transforma la idea que nos hacemos de la irreversibilidad macroscópica.

Esta irreversibilidad ha sido siempre definida como relativa a las condiciones macroscópicas de no-equilibrio. El estado de equilibrio sería indiferente a la flecha del tiempo. Hoy, la relación entre microscópico y macroscópico se encuentra invertida: en un sistema susceptible de una evolución irreversible hacia el equilibrio, *la diferencia entre pasado y futuro persiste en el nivel microscópico incluso en un sistema en equilibrio*. No es el no-equilibrio lo que crea la flecha del tiempo, es el equilibrio lo que impide a la flecha del tiempo, siempre presente en el nivel microscópico, tener efectos macroscópicos. El no-equilibrio no crea la flecha del tiempo, pero le permite aparecer en el nivel macroscópico, manifestarse ahí no sólo por la evolución hacia el equilibrio sino también, como hemos visto, por la creación de comportamientos colectivos coherentes.

Sin embargo, la dinámica no es hoy la teoría de la realidad microscópica. Llegamos así al problema de la mecánica cuántica.

Aunque ha sido cuestionada por muchos de sus intérpretes, desearía subrayar que, para la mayoría de los físicos, la mecánica cuántica es la más potente de las teorías jamás construida por la física. En el ámbito experimental, sus predicciones han sido confirmadas con una precisión extraordinaria. Sin duda por eso la mayor parte de las críticas han intentado transformar la interpretación que damos a este formalismo sin modificarlo. Ahora bien, nuestra perspectiva implica una modificación de este formalismo.

Karl Popper escribía a propósito de la mecánica cuántica: "Mi propio punto de vista es que *el indeterminismo es compatible con el realismo*, y que la aceptación de este hecho permite adoptar una epistemología objetivista coherente, una interpretación objetivista del conjunto de la teoría cuántica, y una interpretación objetiva de la probabilidad" (8). Pero él sabía que este punto de vista revelaba un "sueño metafísico". En efecto, la mecánica cuántica actual no se limita, como la dinámica clásica, a someter la evolución de la función de onda a una ley reversible y determinista. Su formalismo ha tomado por modelo la descripción de los sistemas dinámicos *integrables*. Presupone la posibilidad de representar el comportamiento de un sistema en términos de movimientos periódicos independientes, posibilidad que, como demostró Poincaré, estaba restringida a una clase de sistemas dinámicos muy particular.

Aquí, una vez más, me es imposible entrar en detalles. El nuevo formalismo al que recientemente hemos llegado acentúa el carácter probabilista de la descripción cuántica, y confiere a las probabilidades una significación intrínseca, independiente de la medida. Siendo más precisos, este formalismo no toma por objeto privilegiado al átomo aislado, caracterizado en términos de estados estacionarios estables, sino al átomo en interacción con el campo que induce. Es por la resonancia entre el átomo y este campo por lo que, desde 1928, Dirac había explicado la inestabilidad de los estados estacionarios excitados, el hecho de que el átomo recupera espontáneamente su estado fundamental emitiendo uno (o varios) fotones. Sin embargo, el tiempo de vida de los estados excitados no pudo, en la mecánica cuántica usual, recibir una significación precisa, no pudo ser definido más que respecto a un tratamiento aproximado (regla de oro de Fermi). Ya lo he señalado, la mecánica cuántica actual, contrariamente a la primera teoría cuántica de Bohr, Sommerfeld y Einstein, no permite describir el acontecimiento que constituye la transición de un átomo hacia su estado fundamental con emisión de un fotón, y hace que las nociones de acontecimiento, de tiempo de vida y de probabilidad sean relativas al acto de observación.

Hemos mostrado que es de hecho imposible definir un átomo en interacción con su campo en términos de invariantes, es decir, describirlo por una función de onda sometida a la ecuación de Schroedinger. El teorema de imposibilidad de Poincaré puede así ser aplicado a la mecánica cuántica y permitir asimismo una clasificación cualitativa de los sistemas cuánticos. El nuevo formalismo que proponemos sustituye la evolución reversible de Schroedinger por una evolución de simetría temporal rota que confiere una significación exacta al tiempo de vida, al acontecimiento probabilista, y da sentido al hecho de que es en el futuro que compartimos con el átomo excitado donde éste recupera su estado fundamental. Este formalismo permite nuevas previsiones en relación con la mecánica cuántica. Conduce entre otras cosas a prever un desplazamiento de los niveles energéticos del átomo. En el caso de las experiencias usuales, este desplazamiento es demasiado ligero para ser observado, lo que es coherente con el éxito predictivo de la mecánica cuántica actual. Pero hemos comenzado a imaginar, en colaboración con los experimentadores, el tipo de situación experimental que permitiría refutar o confirmar nuestras previsiones, y, con ellas, la nueva

representación que proponemos de un átomo intrínsecamente marcado por la flecha del tiempo.

Llegamos así a una "síntesis" entre la primera teoría cuántica, que fue alimentada esencialmente por la termodinámica estadística, y la segunda, que buscó dar una interpretación puramente mecánica a los procesos resultantes del acoplamiento entre un átomo y un campo electromagnético. El átomo reversible de la mecánica cuántica es una idealización, la definición intrínseca del átomo es relativa al *proceso disipativo* que resulta del acoplamiento con su campo. Las leyes reversibles aparecen a partir de ahora referidas a lo sumo a casos límites. Pero esta síntesis no es más que un primer paso. Queda un terreno enorme por explorar. El mundo cuántico es un mundo de procesos, cuya descripción debería, como en el caso del acoplamiento entre el átomo y su campo, hacer explícita la flecha del tiempo. En todos los niveles, nuestras descripciones actuales hacen intervenir las nociones de resonancia y de colisión, y podemos así esperar encontrar fenómenos intrínsecamente irreversibles. La reacción química, de la que la teoría actual no da más que una representación fundamentalmente estática, deberá sin duda ser redefinida de forma radical, así como las interacciones fuertes estudiadas por la física de altas energías.

Como hemos subrayado, el carácter reversible de la ecuación de Schroedinger ha conducido a una pérdida del realismo físico. Conforme al "sueño metafísico" de Karl Popper, encontramos aquí una forma de realismo, centrado no alrededor de la noción de evolución determinista sino alrededor de la de *acontecimiento*. Son los acontecimientos los que permiten nuestro diálogo experimental con el mundo microscópico, es a ellos a quienes una teoría realista del mundo cuántico debe dar un sentido para escapar de las paradojas que han obsesionado a la mecánica cuántica desde su creación.

Para terminar esta muy rápida aproximación a la profunda transformación conceptual que conoce hoy la física, cómo evitar la cuestión que fascina tanto a los físicos como al público, la del origen del Universo.

Para muchos físicos continúa siendo inimaginable aún hoy que la física pueda tomar al Universo por objeto y aventurarse, con la cuestión del "Big Bang", en un ámbito hasta entonces reservado a las especulaciones religiosas y filosóficas: la "cosmogonía". Sin embargo, este desarrollo inesperado de la física parece irreversible. La alianza entre teoría y observación ha transformado ya de manera intrínseca el pensamiento cosmológico, imponiéndole mutaciones inesperadas.

Cuando, en 1917, Einstein propuso el primer modelo del Universo, se trataba de un Universo estático, eterno, expresión físico-matemática de la tautología parmenidiana "el ser es". Desde 1922, estaba claro para los matemáticos que las soluciones naturales a las ecuaciones de Einstein designaban un Universo no eternamente idéntico a sí mismo, sino ya en contracción, ya en expansión, y la observación de las galaxias lejanas concluyó: estas galaxias se alejan de nosotros a un ritmo tanto más rápido cuanto más alejadas están, es decir que las observamos tal y como fueron en un pasado más distante. Nuestro Universo está por tanto en expansión. Pero es el descubrimiento de la radiación fósil, en 1965, lo que, según palabras de Wheeler, confrontó a la física con la más grande de sus crisis, es decir, forzó a los físicos a tomarse en serio la consecuencia de un Universo en expansión: en el origen de esta expansión, hace quince mil millones de años, se piensa hoy, toda la materia y la energía que constituye nuestro Universo ha debido estar concentrada en un punto sin dimensión. Con la radiación "fósil", los ecos del "Big Bang", como lo había denominado con burla Fred Hoyle, llegaban hasta nosotros.

Los fotones de longitud de onda centimétrica que bañan la totalidad del Universo observable son para los astrofísicos el testimonio de que la materia, que es el objeto de las leyes físicas actuales, no es un "dato", sino el producto de una historia que ha acompañado a la expansión del Universo y cuyos fotones, productos residuales inertes, permiten medir el coste entrópico: en el seno de nuestro Universo hay alrededor de 10 o 10 fotones por un barión, una partícula material de estructura compleja como el protón o el neutrón.

Universo inmutable o Universo destinado a la muerte: si bien estas dos concepciones se inspiran en la ciencia, sus raíces se remontan mucho más lejos en la historia del pensamiento humano. En cambio, quién hubiera podido imaginar que podamos vernos abocados a situar la "muerte térmica" del Universo no en el final de su historia sino en su origen, a concluir que el

orden que caracteriza nuestro Universo actual no es un orden superviviente de la degradación progresiva, sino un orden producido durante una explosión entrópica original. Y esta "explosión" podría traducir el *nacimiento* mismo de nuestro Universo. En efecto, según un argumento reciente, la singularidad inicial del "Big Bang" podría sustituirse por la inestabilidad de un espacio-tiempo original "vacío" en el sentido de la mecánica cuántica. Es en términos de producción irreversible de la materia-energía de nuestro Universo, y no de su concentración infinita, como deberíamos pensar el origen del Universo.

Podemos constatar aquí también el cambio de sentido del segundo principio de la termodinámica. Esta "muerte térmica", esta producción masiva de entropía que situamos en los orígenes de nuestro Universo ya no es, con toda seguridad, una muerte. Marca por el contrario el paso de un Universo vacío a un Universo poblado de energía y de materia actuales, evalúa el precio del paso a la existencia de nuestro Universo.

En cada nivel de la física, encontramos el tiempo irreversible asociado al devenir de la materia allí donde ayer leyes atemporales reducían este devenir a la repetición de lo mismo. Se podría tratar de ir más lejos, plantear la pregunta: ¿de dónde viene la flecha del tiempo? ¿Surgió con la ruptura primordial de simetría del "vacío cuántico"? Nada de eso: esta ruptura de simetría eventual, así como las condiciones de no-equilibrio en el mundo que conocemos, revela la existencia de la flecha del tiempo, pero no la crea. En efecto, nos hace falta presuponer ya la existencia de esta flecha del tiempo para demostrar la inestabilidad del Universo vacío, la posibilidad de que ciertas fluctuaciones desencadenen el mecanismo cooperativo que habría creado simultáneamente la materia y la curvatura del espacio-tiempo.

De manera más general, creo que hay que resistir la tentación de "explicar" la flecha del tiempo. Podemos hablar del tiempo de nuestro nacimiento, del de la caída de Troya, del tiempo de la desaparición de los dinosaurios, e incluso del tiempo del nacimiento del Universo, pero la pregunta "cuándo, o por qué, ha comenzado el tiempo" escapa a la física, así como a las posibilidades de nuestro lenguaje y de nuestra imaginación. El tiempo irreversible, la diferencia entre el pasado y el futuro, precede y condiciona tanto la realidad física como las preguntas del físico.

Marc Bloch había opuesto las ciencias, que, dividiendo el tiempo en fragmentos artificialmente homogéneos, lo reducen a una medida, y la historia: "Realidad concreta y viva, entregada a la irreversibilidad de su impulso, el tiempo de la historia, por el contrario, es el plasma mismo donde se producen los fenómenos y el lugar de su inteligibilidad" [\(9\)](#).

Sin duda alguna, la distinción entre física e historia permanece, en el sentido de que la inteligibilidad física implica la identificación de objetos de comportamiento reproducible. Por supuesto, como ya he dicho, el comportamiento caótico no es reproducible individualmente, pero sabemos cómo producir un sistema de comportamiento caótico. Igualmente, podemos en lo sucesivo concebir una "receta" para crear un Universo y quizá en un futuro lejano, la expansión del Universo volverá a crear las condiciones de inestabilidad del vacío primordial. Por el contrario, una situación histórica no se prepara ni se reproduce. Sin embargo, esta distinción ya no es una oposición. Y ello porque la nueva coherencia que se perfila hoy en el interior del campo físico y, espero, entre los diferentes campos científicos, tiene por principio este tiempo irreversible del que hablaba Marc Bloch, productor de existencias nuevas caracterizadas por tiempos cualitativamente nuevos.

La física, como dije al comienzo de mi conferencia, se ve hoy como una ciencia joven, liberada de un modelo de inteligibilidad que, aunque ha podido fascinar a las otras ciencias, las enfrentaba con la física. Quizá por este cambio se encuentra por fin liberada de la relación estrecha que mantuvo desde su origen con el problema filosófico y teleológico de la Creación, de las "razones" últimas, intemporales, que darían su inteligibilidad al mundo. La transformación de la física que acabo de esbozar aquí traduce el carácter profundamente histórico de esta ciencia: al mismo tiempo solidaria con una tradición que seleccionó y privilegió una clase particular de objetos, y abierta, susceptible de construir a partir de los límites de esta tradición el sentido de lo que negaba. La física, incluso cuando ha sido llevada por su historia a plantear la pregunta del "origen del Universo", intenta, como las otras ciencias, construir el sentido de aquello de lo que no puede dar cuenta, ese tiempo irreversible que constituye a la vez la condición de sus objetos y de sus preguntas.

Notas

* Conferencia Marc Bloch pronunciada el 10 de junio de 1987 en el Gran Anfiteatro de la Sorbona. Agradezco a Isabelle Stengers la ayuda que me ha aportado en la redacción de esta exposición. Mi límite aquí a indicar el origen de las citas aparecidas en mi texto. En lo concerniente a las referencias científicas, el lector consultará *La Nouvelle alliance* (París, Gallimard, 1979) [hay traducción en castellano: *La nueva alianza*, Madrid, Alianza, 1990], *Physique, temps et devenir* (París, Masson, 1982), así como el nuevo libro, *Entre le temps et l'éternité* (París, Fayard, 1988) [en castellano, *Entre el tiempo y la eternidad*, Madrid, Alianza, 1990], escritos en colaboración con Isabelle Stengers.

1. M. Bloch, *Apologie de l'histoire ou Métier d'historien*, París, Armand Colin, 1949: XIV.
 2. *Ibid.*: XV.
 3. J. Lighthill, "The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics", en *Proceedings of the Royal Society*, Londres, A 407, 1986: 35-50.
 4. F. Graudel, *La Méditerranée et le monde méditerranéen à l'époque de Philippe II*, París, Armand Colin, 1949 (préface).
 5. La edición de bolsillo de *La nouvelle alliance*, aparecida en la colección "Filio-Essais" en 1986, fue aumentada con un prefacio y dos apéndices, el segundo de los cuales profundiza algunos aspectos de este problema.
 6. M. Henry, *La Barbarie*, París, Grasset, 1987: 10.
 7. A. Bloom, *L'ame désarmée*, París Julliard, 1987.
 8. K. Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Totowa, NJ, Rowman & Littlefield, 1982: 175.
 9. M. Bloch, *op. cit.*: 5.
-

L'Homme, 1988, nº 108: 5-26.