ESTUDIOS

[IRREVERSIBILIDAD Y FLECHA DEL TIEMPO EN AL FÍSICA]

Enrique Tirapegui
Profesor Titular
Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas
Departamento de Física

RESUMEN

Este artículo se ocupa de la irreversibilidad de los fenómenos macroscópicos. Partiendo de la afirmación de que las ecuaciones fundamentales de la física son reversibles, y de la descripción de la invariancia por inversión temporal en los sistemas mecánicos; contrasta esta reversibilidad teórica con las evidencias experimentales que la contradicen. Indica que el origen de la irreversibilidad depende crucialmente de la propiedad genérica de "sensibilidad extrema a las condiciones iniciales" que poseen todas las descripciones realistas de sistemas mécanicos.

Luego de examinar la visión que encuentra mayor concenso entre los físicos, para entender la irreversibilidad en el mundo físico, expone la visión de Ilya Prigogine, quien desde el comienzo de sus trabajos sobre termodinámica de procesos fuera de equilibrio se interesó en el problema de la irreversibilidad en la física y en el papel creador que ésta tiene en la naturaleza.

El autor concluye que el problema de la aparición de la irreversibilidad en la física no está aún completamente resuelto y que subsisten distintos puntos de vista en relación con él.

Hay muchos problemas abiertos en física y uno de los más antiguos y fundamentales es el de conciliar la reversibilidad temporal microscópica con la irreversibilidad temporal manifiesta que observamos en todos los fenómenos macroscópicos. No es este el único problema de los fundamentos de la física actual y otro interrogante es el que surge de la interpretación estadística estándar de la Mecánica Cuántica que conduce a conocidas paradojas que aún no han sido explicadas en forma completamente satisfactoria. Es probable que los dos problemas anteriores estén relacionados ya que es el llamado colapso de la función de onda en Mecánica Cuántica el que produce dificultades y este colapso proviene precisamente de la observación del sistema la que en general lo hace interactuar con un sistema macroscópico que solo puede ser descrito en el lenguaje de la Mecánica Estadística que es precisamente el que conduce a la paradoja de la irreversibilidad. Resulta sorprendente que a pesar de estos cuestionamientos en la base misma de la Mecánica Cuántica y de la Mecánica

Estadística esto no produce problemas en la aplicación de estas teorías a situaciones físicas concretas y aún más ellas son extraordinariamente exitosas en este aspecto. Lo notable en esta situación es que la paradoja aparece en los fundamentos mismos tanto de la Mecánica Estadística como de la Mecánica Cuántica y obviamente entonces en la termodinámica y la física de los sistemas macroscópicos cuya descripción se " deriva" en cierto sentido de la Mecánica Estadística. Menciono esto porque ya en Mecánica Clásica Newtoniana tenemos problemas de auto consistencia como por ejemplo el resultado demostrado por (1) Painlevé que establece que a) si las leyes fenomenológicas para cuantificar el roce enunciadas por Coulomb son válidas, b) si existen cuerpos rígidos tal como se definen en Mecánica (o sea un conjunto de puntos materiales sometidos a la ligazón holonómica de mantener sus distancias constantes cuando transcurre el tiempo), c) si las presiones normales entre cuerpos no pueden ser negativas, y d) todas las aceleraciones y tensiones son finitas, entonces en ciertos casos se producen contradicciones de las leyes fundamentales de la dinámica. Pero este problema no se refiere a las bases mismas de la dinámica newtoniana si no que tiene su origen en la modelización del roce, que no es ni más ni menos que la modelización de la disipación de energía que es precisamente la causa de la irreversibilidad en los sistemas macroscópicos y nos lleva en consecuencia a concluir que el problema estaría en este caso más bien en una buena modelización del roce la que en principio podría ser "deducida" de una descripción al nivel microscópico utilizando los métodos de la Mecánica Estadística. Este problema que parece simple y que aparece constantemente en las aplicaciones de la mecánica no tiene hasta ahora una solución satisfactoria y ha suscitado un especial interés estos últimos años que han visto aparecer una gran cantidad de publicaciones sobre modelos para entender los mecanismos del roce.

Volvamos ahora a lo que nos ocupará en este artículo, es decir, a la aparición de la irreversibilidad en los fenómenos macroscópicos. Para situar bien lo que nos interesa discutir pensemos en una experiencia corriente como es la caída de un objeto desde una cierta altura, y para precisar y estar de acuerdo con la leyenda de Newton y los orígenes de la mecánica digamos que el objeto es una manzana. Si la manzana cae a partir de un estado de reposo de una altura del orden de los 20 metros todos hemos visto que aumenta su velocidad constantemente (se trata de un movimiento uniformemente acelerado) y con una fórmula simple podemos calcular cual será su velocidad al chocar con el suelo. Imaginemos ahora que antes de que se produzca el choque invertimos la velocidad de la manzana manteniendo su valor numérico, la experiencia mostrará que esta subirá hasta el mismo punto del cual partió y habrá vuelto entonces a su estado inicial y esto después de un intervalo de tiempo igual al que tomó en la caída. Lo descrito es exactamente lo que llamamos la invariancia por inversión temporal en los sistemas mecánicos y lo que queremos decir con ello es que para cualquier movimiento que pueda realizar un sistema mecánico siempre existe un movimiento inverso que se obtiene cambiando el sentido en que corre el tiempo y que lo llevará de vuelta a su estado inicial. Ciertamente esta afirmación es sorprendente porque nuestra experiencia diaria nos enseña que la vuelta al pasado no existe (los organismos vivos nacen, envejecen y mueren, los ríos van siempre hacia el mar..........) y que el comportamiento que observamos pone en evidencia una "flecha del tiempo", o sea una manera objetiva de distinguir entre el pasado y el futuro. Pero hay excepciones y una de ellas es nuestra descripción de la caída libre de un cuerpo y aún más el problema es que las leyes fundamentales de la física tal como hoy las formulamos nos dan la predicción que el tipo de movimiento que deberíamos observar siempre es como el de la caída libre de un objeto, o sea un movimiento reversible en el tiempo como discutimos más arriba y que en consecuencia no es finalmente capaz de distinguir entre el pasado y el futuro.

Examinemos con detención esto último. La física describe la materia como formada de ciertos constituyentes fundamentales. Ya los griegos postularon una visión de este tipo y saltando a épocas más recientes podemos ver que la Mecánica Clásica (me referiré así a la Mecánica basada en la ecuación de Newton y en la idea de trayectoria del sistema a través del tiempo) postulaba el concepto de punto material como constituyente fundamental de la materia : así un cuerpo rígido estaba formado por puntos materiales sometidos a la ligazón de mantener sus distancias fijas y los fluidos se describían considerando pequeñas porciones de ellos para las cuales fuera razonable darles una velocidad y una posición que son precisamente las características que definen un punto material. La Mecánica Cuántica también considera como un concepto fundamental la partícula libre que corresponde a la idea de punto material y las visiones más actuales de la estructura de la materia consideran que existirían ciertas partículas fundamentales, los "quarks", que en cierto sentido serían los bloques con lo que toda la materia se construye. Cuando uno enfrenta una situación física macroscópica (o sea que el sistema contiene una gran cantidad de constituyentes elementales, típicamente del orden del llamado número de Avogadro que es 10 elevado a veinte y tres y que es el orden de magnitud de la cantidad de moléculas que contiene un centímetro cúbico de agua) lo primero es dar una descripción llamada "microscópica" del sistema y con esto uno quiere decir construir un modelo que establezca que es lo que uno va a considerar como los constituyentes elementales del sistema y como ellos interactúan. Por ejemplo si el sistema es un gas a temperaturas moderadas y tales que las N moléculas que lo forman no se desarman entonces un modelo microscópico consistirá en tomar a las moléculas como los constituyentes fundamentales y en darse una forma de interacción entre ellas (notemos que esta descripción microscópica ya es fenomenológica en el sentido que las moléculas no son constituyentes elementales ya que están formadas por átomos los que a su vez son también entes compuestos de otros y otros hasta llegar a los quarks). La interacción fenomelógica para tener un buen modelo es bien conocida en la forma de un potencial de interacción y si estamos en condiciones en que los efectos cuánticos no sean importantes podemos tratar el sistema con Mecánica Clásica lo que nos dará una colección de N ecuaciones diferenciales ordinarias (las ecuaciones de Newton para cada una de las moléculas) y como ya dijimos el número de estas será del orden del número de Avogadro lo que hace difícil de partida pensar en la posibilidad de exhibir una solución útil para entender la física. Pero la mayor dificultad es que esta descripción microscópica es reversible en el tiempo porque las ecuaciones de Newton admiten la simetría de inversión temporal y es un hecho experimental que el comportamiento del gas será irreversible, o sea, que si el sistema parte de un cierto estado no volverá a ese mismo estado durante su evolución. Pensemos que el gas está en un recipiente rectangular y que nos arreglamos en el instante inicial para construir un estado inicial que llamaremos I en el cual la parte del lado izquierdo esté a mas alta temperatura que la del lado derecho y supongamos además que las paredes del recipientes sean aislantes en el sentido de que no permitan ningún intercambio de energía con el exterior, si dejamos evolucionar el sistema veremos que después de un cierto tiempo característico T y llega a un estado final F en el cual todo el gas estará a la misma temperatura y allí se detienen los cambios observables. Si ahora nos recordamos que la descripción microscópica de nuestro se hace con las ecuaciones de ecuaciones de Newton y que estas son reversibles nosotros sabemos que a partir del estado final F de temperatura uniforme deberíamos poder dar una nueva condición inicial al sistema y que sería tal que este volvería después de un tiempo igual al que se demoró en llegar al estado de temperatura uniforme al estado inicial del cual partió, aún más, sabemos exactamente que la nueva condición inicial consistiría exactamente en mantener las mismas posiciones de las moléculas y en revertir las velocidades de todas ellas. El sistema retrocedería entonces pasando por todos los estados por los cuales había transitado y llegaría después de un tiempo T al estado inicial I del cual partió: se habría producido entonces un retorno al pasado. Aquí aparece la situación paradojal que este retorno al pasado no ocurre nunca y que además aparecemos como incapaces de provocarlo. Podemos sin embargo entender porque no ocurre este retorno hacia el pasado: la razón es que para preparar ese estado inicial en que las velocidades de todas las moléculas sean exactamente las opuestas de las que tienen en el estado F necesitamos una cantidad infinita de información. Expliquemos esto pensando en una experiencia numérica en la que simulamos el sistema en un computador : nos damos nuestro estado inicial dándonos las posiciones y las velocidades de las N moléculas del sistema (recordemos que N es del orden del número de Avogadro) y supongamos que el computador es capaz de integrar las 3n ecuaciones diferenciales de segundo orden en el tiempo (son 3N pues cada partícula tiene 3 coordenadas espaciales), después de un cierto tiempo T detenemos la simulación y apuntamos las posiciones y las velocidades, luego damos una nueva condición inicial para una segunda simulación en la que mantenemos las posiciones pero invertimos todas las velocidades y comenzamos de nuevo la integración numérica de las ecuaciones de Newton, como estas últimas poseen la invariancia por inversión temporal lo que esperamos es que exactamente después del tiempo T deberíamos tener todas las moléculas en las mismas posiciones que tenían en el estado I y esto es exactamente lo que no ocurre. La razón es que los sistemas mecánicos poseen una propiedad genérica (con esto queremos decir que la tienen casi siempre salvo casos excepcionales) que dice que si partimos de dos condiciones iniciales ligeramente distintas (en nuestro caso si cambiamos las posiciones o las velocidades de algunas moléculas) después de un cierto tiempo la evolución del sistema será completamente diferente (se llama a esta propiedad sensibilidad extrema con respecto a las condiciones iniciales), y que esto ocurrirá siempre aún cuando disminuyamos la diferencia entre las condiciones iniciales. En nuestra experiencia numérica estamos integrando ecuaciones diferenciales para funciones de variable real y darse condiciones iniciales es darse una serie de números reales que la simulación aproxima haciendo una troncatura y esto ya basta para que nunca podamos dar las condiciones iniciales exactamente qué es lo que se necesita ya que como dijimos cualquier error por pequeño que sea se amplificará en el tiempo. Vemos entonces cual es el origen de la irreversibilidad y vemos que ella depende crucialmente de la propiedad de sensibilidad a las condiciones iniciales que poseen todas las descripciones realistas de sistemas macroscópicos. Es cierto que hay sistemas mecánicos simples que no poseen esta propiedad y en ellos es perfectamente posible volver al estado inicial, pensemos por ejemplo en un péndulo que realiza pequeñas oscilaciones o en el ejemplo que dimos al comienzo de un objeto en caída libre desde una altura relativamente pequeña, pero el punto es que los sistemas macroscópicos no son nunca de ese tipo y presentan siempre un comportamiento irreversible que fue caracterizado ya en el siglo pasado y antes de que se tuviese evidencia de la estructura atómica de la materia por la segunda ley de la termodinámica que establece precisamente una flecha del tiempo : la dirección en que crece la entropía.

Volvamos ahora al ejemplo de un objeto en caída libre que discutimos al comienzo de este artículo y pensemos ahora que la caída no comienza a veinte metros de altura si no a 1000 metros. Al comienzo el movimiento será nuevamente uniformemente acelerado y la velocidad aumentará pero cuando esta velocidad crezca demasiado la fricción con el aire comenzará a frenar la caída y tenderá a disminuir la velocidad ya que es bien conocido que la fricción produce una fuerza contraria al movimiento y cuyo valor crece con la velocidad, vemos así que si ahora detenemos la experiencia después que este nuevo fenómeno haya comenzado a actuar y a continuación invertimos la velocidad el cuerpo no va a repetir en sentido inverso su trayectoria anterior. La explicación es simplemente que entró a actuar una nueva fuerza cuyo sentido es contrario al movimiento (o sea es opuesta a la dirección de la velocidad) y esta fuerza obviamente rompe la simetría de reversibilidad temporal como puede comprobarse directamente en la nueva ecuación de movimiento. Estamos aquí en un problema porque habíamos dicho que las ecuaciones fundamentales de la física eran reversibles y estamos en presencia de un fenómeno que requiere que introduzcamos para describirlo una ecuación temporalmente irreversible. La explicación de este hecho es que el sistema que estamos considerando es el de un cuerpo que cae en la atmósfera la que es un gas constituido por una gran cantidad N (del orden del número de Avogadro como ya hemos insistido varias veces) de moléculas y en consecuencia tenemos que considerar como nuestro sistema la atmósfera y el cuerpo en caída libre, si lo hacemos así tendremos un sistema formado de N+1 constituyentes fundamentales que interactúan entre ellos y cuando detenemos la experiencia para tratar de volver al estado inicial lo que tenemos que hacer es invertir las velocidades de todas las moléculas de la atmósfera además de la velocidad del cuerpo, en ese caso las leyes de la Mecánica nos dirían que el sistema volvería a su estado inicial. Si nos hemos extendido en este ejemplo es porque ilustra en forma simple varias propiedades fundamentales de los sistemas macroscópicos y la más central es que es posible siempre una descripción reducida y auto-contenida con un número mucho menor de variables que las microscópicas, y en el caso que nos ocupa esta descripción utilizaba solamente la posición y la velocidad del cuerpo que caía. El precio que hay que pagar por utilizar esta descripción reducida (que se llama en general un "coarse graining" en inglés y en lo que sigue utilizaré a veces esa terminología) es que las ecuaciones que uno escribe serán en general irreversibles como consecuencia de la eliminación de una gran cantidad de variables que pueden no considerarse pero cuya acción aparece quebrando la reversibilidad temporal de las ecuaciones microscópicas originales (en el caso que discutimos las variables eliminadas son todas las que se refieren a las moléculas de la atmósfera). El resultado general que hay que retener es que la posición mayoritaria de los físicos es que la irreversibilidad aparece en la descripción reducida (coarse graining) de los sistemas macroscópicos y que la posibilidad de esta descripción se debe a que las variables de la descripción microscópica evolucionan con tiempos característicos de órdenes de magnitud diferentes y que la descripción macroscópica solo debe retener aquellas variables que evolucionan en una escala temporal macroscópica. Esta posición es la que está implícita en casi todas las presentaciones usuales de la termodinámica de sistemas en equilibrio termodinámico o fuera del equilibrio termodinámico. Una presentación cuidadosa y consistente de esta manera de ver la física de los sistemas macroscópicos y que es en consecuencia una discusión de los fundamentos de la Mecánica Estadística es la de O. Penrose en su libro " Foundations of Statistical Mechanics" (2) en el cual los argumentos físicos son discutidos exhaustivamente (ver también Referencia (3)). Resulta notable que matemáticamente uno pueda demostrar que los sistemas dinámicos (en el lenguaje matemático un sistema dinámico es simplemente una regla de evolución temporal de un sistema) admiten siempre bajo condiciones muy generales que uno físicamente considera necesarias una infinidad de descripciones reducidas de tipo irreversible lo que es satisfactorio pero el problema es que la casi totalidad de ellas no pueden ser físicamente aceptables porque no pueden expresarse en términos de variables macroscópicas físicas las cuales deben satisfacer condiciones muy restrictivas para poder ser interpretadas (4).

Resumiendo podemos decir que un sistema macroscópico admite una descripción reducida (coarse graining) en términos de una pequeña (debemos entender aquí pequeña en comparación con el número típico de variables microscópicas que es el número de Avogadro) cantidad de variables macroscópicas. Esta descripción es en términos de una dinámica irreversible temporalmente y el origen de esta irreversibilidad es muy generalmente la disipación de energía de los grados de libertad retenidos (o sea las variables macroscópicas consideradas) a los grados de libertad eliminados. En el caso de nuestro ejemplo de la caída libre es claro que la disipación de energía se hace hacia las moléculas de la atmósfera como calor a través del mecanismo de fricción que es prototipo de un efecto disipativo. Lo que resulta realmente espectacular es que matemáticamente uno sabe que solo las ecuaciones irreversibles de tipo disipativo pueden explicar la formación de estructuras y vemos así el rol creador de la irreversibilidad ya que sin ella no habrían ni formas ni ritmos en la naturaleza. Fue Ilya Prigogine, Premio Nobel de Química 1977 y fundador del histórico grupo de Bruselas el que puso en evidencia el rol constructivo de las evoluciones irreversibles disipativas y quien bautizó a las estructuras que allí se forman estructuras disipativas (Referencias (5), (6), (7)) para enfatizar el rol de la disipación cuando el sistema que se considera está en un contacto con el exterior que le impide llegar al equilibrio termodinámico, situación que es la más rica en posibilidades ya que solo ella permite la coexistencia de estructuras posibles y la riqueza de comportamientos dinámicos que observamos. En efecto si el sistema está aislado o en contacto con un solo "termóstato" que le impone su ley necesariamente evoluciona a un solo estado estacionario que es posible en esa circunstancia y que es el estado de equilibrio termodinámico. Es muy necesario en este punto recordar el trabajo fundamental y precursor del matemático Alan Turing (8) quien en su célebre artículo sobre las bases químicas de la morfogénesis mostró el mecanismo de auto-organización espacial que crea las llamadas estructuras de Turing.

Lo que hemos expuesto hasta ahora es, como ya lo mencionamos, la visión que encuentra más consenso entre los físicos para entender la aparición de la irreversibilidad en un mundo físico regido por leyes reversibles en el tiempo al nivel de la interacción de los constituyentes elementales de la materia. Si bien es cierto que no existe en general una derivación rigurosa de una descripción reducida para sistemas físicos realistas lo que ocurre en la mayoría de los casos es que ciertas suposiciones dictadas por la física bastan para llegar a la meta deseada y ciertamente uno de los casos más ilustrativo de esta manera de proceder es la derivación original de Boltzmann de su descripción de gases diluídos (9) que lo condujo a escribir la celebra- da ecuación que lleva su nombre: en este caso la descripción reducida utiliza la función f (x, y, z, u, v, w, t) que representa el número de moléculas que en el instante t están en un elemento de volumen alrededor del punto de coordenadas (x, y, z) y cuya velocidad está en un elemento de volumen del espacio de velocidades alrededor del punto (u, v, w), y Boltzmann demostró usando una suposición llamada "stoszahl-Ansatz" que no es de carácter mecánico que esta función obedecía una ecuación auto-contenida que lleva su nombre y cuyas soluciones dan una excelente descripción de los gases diluídos. Como es bien sabido Boltzamann tambien mostró que podía construir un funcional de la solución de su ecuación que crecía monótonamente en el tiempo (teorema H de Boltzmann) y logró así dar una primera interpretación de la entropía termodinámica en términos de la estructura molecular de la materia. En este caso es posible identificar claramente que es a través del " stoszahl-Ansatz" de Boltzmann que se introduce la irreversibilidad en la evolución de la función f que se expresa matemáticamente en el Teorema H. Aunque esta manera de ver la aparición de la irreversibilidad en el comportamiento macroscópico de la materia ha sido exitosa en muchos aspectos no está exenta de críticas las cuales están esencialmente orientadas a encontrar poco satisfactorio desde un punto de vista fundamental el hecho de considerar la irreversibilidad como un atributo de una descripción reducida (el coarse graining) y por ende incompleta de un sistema físico. Ilya Prigogine y sus colaboradores del grupo de Bruselas son quienes han ido más lejos en proponer una visión alternativa del problema y son estas ideas las que expondremos ahora.

Desde el comienzo de sus trabajos sobre la termodinámica de procesos fuera del equilibrio Prigogine se interesó en el problema de la irreversibilidad por la conexión estrecha que esta tiene con los fenómenos disipativos los cuales son el mecanismo a través del cual los sistemas se auto-organizan cuando las condiciones externas son de no equilibrio. Si la irreversibilidad aparece como esencial entonces en todas las formas y ritmos en que se auto-organiza la materia a la escala macroscópica aparece como paradojal el hecho que esta propiedad surja como una consecuencia de una descripción reducida e incompleta de un sistema físico que en su descripción física completa a nivel microscópico presentaría reversibilidad temporal y no crearía en consecuencia una flecha del tiempo. Una primera discusión crítica de este problema fue presentada en un artículo sobre el "nivel macroscópico de la Mecánica Cuántica" escrito en colaboración con L.Rosenfeld, discípulo de N.Bohr quien fue quien creó la interpretación estadística de la Mecánica Cuántica comúnmente aceptada hoy por la mayoría de los físicos. Posteriormente el grupo de Bruselas centró sus estudios en la evolución de las correlaciones entre partículas en un sistema macroscópico y logró ligar la irreversibilidad a la creación de correlaciones que sería el proceso a través del cual se quebraría la simetría de reversibilidad temporal de las ecuaciones microscópicas. Estos trabajos dieron origen a la llamada teoría de las sub-dinámicas que fue precisamente el formalismo más adecuado para investigar la evolución de las correlaciones de cualquier orden (ver por ejemplo las Referencias (10), (11)). Han sido sin embargo resultados obtenidos durante las dos últimas décadas los que considero más iluminantes. El primero de ellos fue la construcción por Prigogine y colaboradores (12) de un proceso de Markov "equivalente" a un sistema dinámico reversible con fuertes propiedades ergódicas (tecnicamente debe ser un K-sistema que es una condición más fuerte que la de ser mezclador). El uso aquí de la palabra "equivalente" se refiere al hecho de que uno puede justificar que en el paso del sistema dinámico inicial al proceso de Markov no hay pérdida de "información" en un sentido que se puede precisar matemáticamente (13) y lo que hace esto posible es el carácter altamente singular que tiene el proceso de Markov construido. Pero es precisamente esta propiedad la más interesante de la construcción ya que lo que se logra es lo mismo que se obtiene con el coarse graining (en efecto el resultado de un coarse graining es siempre un proceso de Markov en las variables de la descripción reducida y el pasaje siempre conlleva pérdida de información debido a la eliminación de una gran cantidad de variables microscópicas) pero aquí sin pérdida de información en la descripción (14). Resulta además que la construcción admite una atrayente interpretación física que muestra que el rol esencial en la construcción lo juegan las variedades estables de los puntos del sistema y esto se entiende bien porque lo que hace el proceso de Markov es identificar todos los puntos que tienen un mismo futuro (15). El hecho de que esta construcción sea posible nos está indicando que es posible que existan varias representaciones "equivalentes" en un cierto sentido que se debe precisar de las leyes fundamentales de la física a nivel microscópico. Una exposición notable de estas ideas fue presentada por Prigogine en un coloquio internacional que reunió a científicos y filósofos alrededor del tema del azar en la ciencia en el Teatro-Museo Dalí en Figueres y que fue inaugurado precisamente por Dalí quien escribió un inspirado prólogo para el libro que reunió las conferencias y las discusiones (16).

Si la construcción que expusimos en el párrafo anterior nos mostró la posibilidad de distintas representaciones de la dinámica microscópica una pregunta razonable que surge es preguntarse si las ecuaciones de base (la ecuación de Newton para los sistemas clásicos y la de Schrodinger para los sistemas cuánticos) no admiten soluciones que vivan en espacios distintos de los que usualmente se usan. La respuesta es positiva y relevante para la problemática que nos ocupa. Pensemos en un sistema clásico (el modo de razonar será similar si los efectos cuánticos son importantes) y recordemos que hay dos maneras equivalentes en principio para ver el problema. Supongamos nuevamente para fijar las ideas que tenemos un gas de N partículas contenidas en un recipiente que las aisla del mundo exterior (se trata de un sistema aislado). Podemos describir microscópicamente el sistema diciendo que las N partículas describen trayectorias que se obtienen integrando las ecuaciones de Newton y que estas trayectorias quedan completamente determinadas cuando me doy en un instante inicial las posiciones y las velocidades de todas las partículas. Pero también podemos describir nuestro sistema dándonos una función densidad

$$F\ (r_1,r_2,\ldots\ldots\ldots r_N;\ p_1,\ p_2,\ldots\ldots\ldots p_N;\ t)$$

que tiene como argumentos las posiciones r_1, r_2,.........r_N, los momentums p_1, p_2,................p_N, de las N partículas, y el tiempo t, y cuya interpretación es que su valor nos da la probabilidad que el sistema esté en un elemento de volumen de 6_N dimensiones alrededor del punto (r_1, r_2,......r_N; p_1, p_2,......p_N) en el instante t (son 6_Ndimensiones porque cada partícula tiene tres coordenadas y su velocidad tres componentes). Es obvio que para la consistencia de esta interpretación la función F debe estar normalizada a uno en el sentido que su integral sobre todo el espacio de fases (se llama espacio de fases al conjunto de los puntos (r_1, r_2,.......r_N; p_1, p_2,........p_N) permitidos por las ligazones del sistema) debe ser uno. A partir de las ecuaciones de Newton para las N partículas es simple deducir como evoluciona en el tiempo la función F (r_1, r_2,.......r_N; p_1, p_2,.....p_N; t) que hemos introducido y se encuentra que ella obedece a una ecuación a derivadas parciales de primer orden que se conoce como ecuación de Liouville. En este lenguaje diríamos que la dinámica del sistema está dada por la evolución temporal de la función densidad F(r_1, r_2,........r_N; p_1, p_2......p_N; t) mientras que en el lenguaje de las trayectorias diríamos que son estas curvas soluciones de las ecuaciones de Newton las que describen la dinámica. Es bastante claro que la descripción en términos de una densidad de probabilidad es más general que la descripción con trayectorias ya que si tomamos como función de densidad F en el instante inicial una función que sea nula en todas partes salvo en un punto (R_1, R_2,......R_N; P_1, P_2,........P_N) veremos que la ecuación de Liouville la hace evolucionar de tal modo que en un instante t posterior la función F solo será no nula en un punto (R_1(t), R_2(t),..........R_N(t); P_1(t), P_2(t),........P_N(t)) del espacio de fases que será precisamente el punto al cual llegó en el instante t la trayectoria solución de las ecuaciones de Newton que partió de (R_1, R_2,.......R_N; P_1, P_2,......P_N) en el instante t=0. Vemos entonces que las trayectorias están contenidas en este nuevo lenguaje pero que podemos considerar situaciones más generales como la evolución simultánea de un conjunto de trayectorias (hagamos notar que la función densidad F que hemos introducido describe exactamente lo que corrientemente se llama en la literatura un ensemble de Gibbs). Podría concluirse de lo que hemos expuesto que las dos descripciones en términos de trayectorias o en términos de una función densidad F son completamente equivalentes: esto no es completamente correcto y la razón es que las soluciones de una ecuación dependen del espacio en que las buscamos (por ejemplo si buscamos un número cuyo cuadrado sea 2 no lo encontraremos si lo buscamos en el espacio de los números racionales y debemos ir al espacio de los números reales para encontrar una solución). La ecuación de Liouville para la evolución de la densidad F (r_1, r_2,......r_N; p_1, p_2,........p_N ; t) es una ecuación lineal de primer orden en el tiempo que dice que la derivada temporal de F es igual a un operador lineal L que llamaremos el Liouvilliano actuando sobre la dependencia de F en las variables (r_1, r_2,.....r_N; p_1,...p_N) y que escribimos L F(r_1,...r_N; p_1,....p_N; t). Existen para los operadores lineales tales que L ciertas funciones que son tales que cuando L actúa sobre ellas las transforma en un múltiplo de ellas mismas, estas funciones se llaman las funciones propias del operador L y el múltiplo el valor propio y muy generalmente cuando todas ellas son conocidas uno puede escribir explícitamente la solución del problema de la evolución temporal de la ecuación de Liouville. El punto importante aquí es que cuando uno considera funciones F que viven en los espacios más usuales (y que son tales que las funciones nulas en todas partes salvo en un punto, o sea las distribuciones que son las que representan las trayectorias como ya explicamos, pueden considerarse como formando parte de ellos en un límite apropiado) todos los valores propios del Louvilliano L (lo que se llama su espectro) son imaginarios puros y la evolución temporal de F es de carácter oscilatorio lo que hace que la función F no tiende en ningún sentido simple a una función constante que es lo que uno espera en un sistema aislado (ensemble microcanónico). Además el comportamiento oscilatorio en el tiempo no hace aparecer los tiempos característicos de decaimiento de los distintos grados de libertad que es precisamente lo que hace posible la descripción reducida tipo coarse graining como explicamos antes y ciertamente uno desea que cantidades observables como estas aparezcan en la teoría. La solución que Prigogine y colaboradores han propuesto es considerar la ecuación de Liouville en espacios más generales y han logrado mostrar en una variedad de modelos que el nuevo espectro del Liouvilliano (el espectro de un operador depende del espacio en que este actúa) tiene valores propios con partes reales no nulas y aún más que estas corresponden a las tasas de decaimientos características del sistema (una apasionada y lúcida descripción de sus puntos de vista puede encontrarse en el último libro de Ilya Prigogine cuyo título evocador "El fin de las certidumbres" corresponde muy bien a los temas que se discuten (17)). Resulta además que las funciones F sobre las cuales el Liouvilliano L puede actuar excluyen las distribuciones puntuales o sea las trayectorias en el espoacio de fases como hemos discutido y esto es razonable pues efectivamente la noción de trayectoria no aparece como una idealización justificable en sistemas con comportamiento termodinámico, o sea sistemas con sensibilidad extrema a las condiciones iniciales o altamente inestables o caóticos como también se les llama. Como uno podía esperar la construcción descrita que hace aparecer valores propios con partes reales para el Liouvilliano solo puede realizarse cuando el sistema es inestable y en los casos de sistemas con comportamientos regulares (no termodinámicos) uno solo recupera la formulación habitual y la noción de trayectoria que en estos casos es la buena idealización. Vemos entonces que en esta visión la irreversibilidad aparece al nivel microscópico fundamental en la forma de los valores propios con partes reales no nulas del Liouvilliano que implican una evolución irreversible. El precio que ha sido necesario pagar por esto es aceptar que la formulación de las leyes fundamentales de la Física tiene un carácter probabilístico ya que la ecuación de base pasa a ser ahora la ecuación de Liouville.

Digamos para concluir que el problema de la aparición de la irreversibilidad en la física no está aún completamente resuelto y hay distintos puntos de vista que subsisten y hacen de los fundamentos de la Mecánica Estadística un tema apasionante de investigación.

Referencias

(1) P.Painlevé, Comptes Rendus, CXL (1905), pp 635, 702, 847; ibid. CXLL (1905), pp.310, 401, 546; Zeitschrift fur M. u P. LVIII (1909), p.186.