¿ES LA MECANICA CLASICA UNA TEORIA DETERMINISTA?
(*Is Classical Mechanics a Deterministic Theory?*)

Olimpia LOMBARDI*

Manuscrito recibido: 2000.7.31
Versión final: 2000.11.27.

* Crisólogo Larralde 3440, 6ºD, 1430 Buenos Aires, Argentina.
E-mail: olimpiafilo@arnet.com.ar

BIBLID [0495-4548 (2002) 17: 43; p. 5-34]

RESUMEN: El presente trabajo presenta una evaluación crítica de diferentes opiniones acerca del determinismo en Mecánica Clásica. El objetivo de este análisis consiste en poner de manifiesto que, aún en el ámbito supuestamente no controvertido de la Mecánica Clásica, la respuesta acerca del determinismo no queda unívocamente definida por argumentos científicos sino que depende, de un modo ineludible, de la perspectiva epistemológica desde la cual se formula el problema.

Descriptores: mecánica clásica, determinismo.

ABSTRACT: *This paper presents a critical evaluation of different opinions about determinism in Classical Mechanics. The goal of this analysis is to show that, even in the supposedly non controversial field of Classical Mechanics, the answer about determinism is not univocally fixed by scientific arguments, but inescapably depends on the epistemological perspective from which the problem is formulated.*

Keywords: *classical mechanics, determinism.*

SUMARIO

1. Introducción

La concepción determinista de la realidad, enraizada en la imagen del mundo-reloj, se originó durante el siglo XVIII como resultado de los asombrosos éxitos de la mecánica newtoniana y prevaleció casi sin cuestionamientos hasta fines del siglo XIX. A partir de los trabajos de Poincaré (1892) acerca de la estabilidad del sistema solar, en los últimos años del siglo el estudio del fenómeno de la inestabilidad permitió precisar las limitaciones intrínsecas en la predictibilidad de sistemas deterministas. Pero fue a principios del siglo XX, con el advenimiento de la Mecánica Cuántica, que la visión clásica del universo sufrió su primer gran desafío: aún las versiones deterministas de la Mecánica Cuántica suponen un profundo distanciamiento respecto de la tradicional imagen del mundo-reloj. Desde aquellos años, el siglo XX ha presenciado un paulatino resquebrajamiento de la cosmovisión determinista en favor de la idea de un universo abierto a nuevas e indeterminadas posibilidades. En la actualidad, la idea de un futuro fijado unívoca y necesariamente por el presente ha pasado a considerarse como un supuesto ontológico obsoleto prácticamente en todas las áreas del conocimiento.

Frente a este poderoso avance del indeterminismo en los ámbitos de pensamiento más diversos, la Mecánica Clásica parecía mantenerse como una plaza inexpugnable: con ella podía seguir operando el famoso genio de Laplace, capaz de reconstruir todo el presente y todo el pasado del universo a partir de su estado en un dado instante. Sin embargo, durante los últimos años incluso este paradigma del determinismo ha comenzado a sufrir ataques desde diversos frentes; algunos autores desafían la perspectiva tradicional, poniendo en duda el carácter determinista de la Mecánica Clásica sobre la base de variadas y no siempre compatibles argumentaciones. En el presente trabajo se desarrollará una evaluación crítica de las más difundidas perspectivas que aún consideran relevante la discusión acerca del carácter determinista de la Mecánica Clásica. El objetivo último consiste en señalar que, aún en el ámbito aparentemente no controvertido de la Mecánica Clásica, la respuesta acerca del determinismo no queda unívocamente definida por factores exclusivamente científicos sino que depende, de un modo ineludible, de la perspectiva epistemológica desde la cual se formula el problema.

2. *El concepto de determinismo*

En tanto cuestión metafísica por excelencia, el problema del determinismo hace su aparición desde los orígenes de la reflexión filosófica en la Grecia clásica: una de las primeras formulaciones de una tesis de tipo determinista se encuentra ya en los atomistas griegos. El atomismo fue retomado por el epicureísmo que, si bien adoptó la doctrina de Demócrito y

Leucipo, rechazó su estricto determinismo: en su caída vertical, los átomos experimentan una desviación espontánea e intrínseca -"*parenklisis*" o "*clinamen*"-, que permite la formación de los objetos físicos y hace posible la libertad humana. Casi contemporáneo al epicureísmo, el estoicismo se le enfrentó en múltiples aspectos y la cuestión del modo de determinación del futuro por el pasado no fue la excepción, al postular la estricta concatenación causal de todos los eventos del universo. Durante la Edad Media, el problema del determinismo se insertó en la discusión teológica, encarnándose en la doctrina de la *predestinatio*: desde San Agustín, el problema que desveló a los teólogos medievales fue el de compatibilizar la predestinación con la libertad humana. Con la Modernidad, el problema de reconciliar una metafísica determinista -consecuencia de los poderes absolutos de Dios- con la posibilidad del libre albedrío no desapare, si bien se traslada del plano teológico al filosófico. Pero es con Galileo y con la mecánica moderna que la cuestión del determinismo ingresa específicamente en la filosofía de la naturaleza, inaugurando la tendencia -que perdura hasta nuestros días- según la cual los filósofos adoptan la mejor teoría científica de su época como guía para creer en la verdad o falsedad del determinismo. Finalmente, con la imposición de la física newtoniana se instala de un modo definitivo la idea de una realidad determinista y mecanicista, la visión del universo como un enorme mecanismo de relojería cuyos estados se siguen inexorablemente a partir del estado inicial, en el instante de la creación.

Tradicionalmente, el determinismo fue considerado una tesis metafísica: científicos y filósofos no habrían tenido inconveniente alguno en admitir ingredientes puramente ontológicos en su pensamiento. Pero la situación se modificó durante el siglo XX, con la gran influencia del positivismo lógico y su declarado rechazo hacia la metafísica: el determinismo se convirtió, así, en una hipótesis científica que debía someterse al estricto tribunal de los criterios positivos de la ciencia[1]. Pero en la actualidad ya no somos prisioneros de las desmesuradamente rígidas pretensiones positivistas: durante los últimos años, muchos autores han vuelto a investigar el problema del determinismo en el plano ontológico y, de este modo, la discusión ha recobrado su cauce filosófico original. Dentro de esta nueva corriente, pueden distinguirse diferentes acepciones del término "determinista" (Lombardi, 1998):

- En un primer sentido, que denominaremos "*semántico*", el predicado "determinista" se aplica a ecuaciones dinámicas: se dice que una ecuación dinámica es determinista cuando, dado el valor de las variables dependientes en un cierto instante, fija unívocamente el valor de dichas variables en todo instante posterior.

- En un segundo sentido, que denominaremos "*gnoseológico*", el predicado "determinista" se aplica al conocimiento acerca de un sistema real: se dice que poseemos un conocimiento determinista acerca de un sistema cuando el conocimiento del estado de dicho sistema en un dado instante permite conocer unívocamente su estado en todo instante posterior dentro de un margen de error acotado[2].

- En un tercer sentido, que denominaremos "*ontológico*", el predicado "determinista" se aplica a los sistemas reales, sean físicos, biológicos, sociales, etc. Se dice que un sistema es determinista cuando, dado su estado en un cierto instante, su evolución para todo instante posterior resulta físicamente -no lógicamente- necesaria; en otras palabras, si el sistema se encuentra en el estado e_1 en el instante t_1, las leyes -interpretadas como regularidades ontológicas- hacen imposible que se encuentre en un estado diferente de e_2 en t_2; tales evoluciones también se consideran ontológicamente deterministas[3].

Tal vez la más conocida caracterización de determinismo en su sentido ontológico es la que brinda John Earman (1986) en términos de *mundos posibles*, entendiendo por *mundo* el conjunto de todos los eventos inscriptos en una estructura espacio-temporal de cuatro dimensiones; el mundo actual contiene todos los eventos que han ocurrido, que están ocurriendo y que ocurrirán, y un mundo posible es el conjunto de todos los posibles eventos que constituyen historias alternativas a la del mundo actual. Sea Ξ el conjunto de todos los mundos físicamente posibles, esto es, mundos posibles que satisfacen las leyes de la física correspondientes al mundo actual, el mundo $W \in \Xi$ es *determinista laplaciano* sii, para cualquier $W' \in \Xi$, si W y W' coinciden en cierto instante, entonces coinciden para todo instante (Earman 1986, p. 13)[4].

3. *Mecánica Clásica y determinismo*

Habiendo circunscripto el problema del determinismo al plano ontológico, puede ahora formularse la pregunta: ¿cómo sería el universo en cuanto al determinismo si la Mecánica Clásica fuese verdadera? Para abordar este problema es necesario comenzar recordando algunas cuestiones formales respecto de la Mecánica Clásica, así como ciertos aspectos matemáticos referidos a la representación de sus resultados. En sus presentaciones más sencillas, la Mecánica Clásica suele formularse en términos de las tres famosas Leyes de Newton: Ley de Inercia, Ley de Masa o Segunda Ley de Newton, y Principio de Acción y Reacción[5]. De estas tres leyes, la que cobra un papel central en la determinación del comportamiento dinámico de los cuerpos es la *Segunda Ley de Newton*, que expresa la proporcionalidad entre la fuerza neta F aplicada sobre un cuerpo y la aceleración a que éste adquiere: $F=ma$, donde m es la masa del cuerpo[6]. Dado que la aceleración se define en términos de la variación temporal de la velocidad, que a su vez es función de la variación temporal de la posición del cuerpo [$a=d^2x/dt^2$], la Segunda Ley de Newton puede expresarse como una ecuación diferencial de segundo orden:

$$d^2x/dt^2 = F/m$$

cuya solución $x(t)$ representa la evolución temporal del cuerpo, dadas las condiciones iniciales v_0 -velocidad inicial- y x_0 -posición inicial-[7].

Si bien esta presentación de la Mecánica Clásica, cercana a la formulación original de Newton, es conceptualmente clara y matemáticamente sencilla, para muchas aplicaciones resulta más conveniente la presentación hamiltoniana, formulada durante el siglo XIX y referida a sistemas de partículas puntuales. Sea un sistema de N partículas; para especificar el estado instantáneo de cada partícula son necesarias las tres componentes de su posición q y las tres componentes de su momento lineal p. Por lo tanto, el estado instantáneo del sistema de N partículas se define:

$$e = (q_1, q_2,..., q_n, p_1, p_2,..., p_n)$$

donde $n=3N$. El comportamiento dinámico del sistema satisface las *ecuaciones de Hamilton*:

$$dq_i/dt = \partial H/\partial p_i \qquad dp_i/dt = -\partial H/\partial q_i$$

donde el hamiltoniano $H(q_i, p_i)$ corresponde a la energía total del sistema. Las soluciones $q_i(t)$ y $p_i(t)$ representan la evolución temporal del sistema, dadas las condiciones iniciales q_{i0} y p_{i0}[8].

En definitiva, tanto en la formulación original de Newton como en la formulación hamiltoniana, el comportamiento dinámico de un sistema se describe mediante ecuaciones diferenciales donde la variable t, que representa la dimensión temporal, actúa como variable independiente. Dado un cierto conjunto de condiciones iniciales, cada conjunto de soluciones de tales ecuaciones diferenciales representa una evolución temporal posible del sistema. Por lo tanto, el problema del determinismo se relaciona estrechamente con la cuestión de la existencia y la unicidad de dichas soluciones.

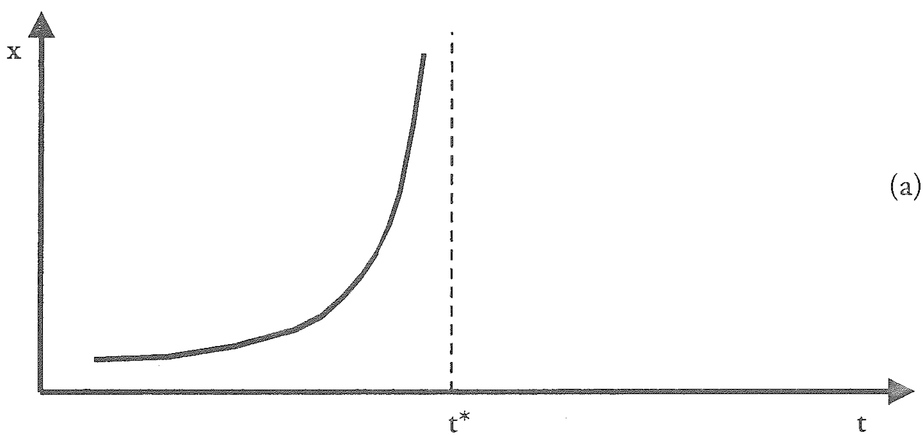
Un recurso ampliamente utilizado en física consiste en representar el comportamiento de un sistema dinámico en el llamado "*espacio de las fases*" correspondiente, esto es, un espacio euclídeo abstracto de tantas dimensiones como variables de estado posea el sistema; en tal espacio, cada punto representa un estado posible del sistema y, dado el punto correspondiente al estado inicial, la evolución temporal del sistema queda representada por una trayectoria que se inicia en dicho punto[9]. En el caso de un sistema aislado, cuya energía se mantiene constante, las trayectorias quedan confinadas en una hipersuperficie S_E de dimensión $2n-1$, donde $2n$ es la dimensión del espacio de las fases. Gracias a esta representación es posible expresar en lenguaje geométrico las propiedades de existencia y unicidad antes mencionadas: dado un sistema dinámico, para cada punto representativo de su estado inicial la trayectoria que en él se inicia existe y es única; además, dado que no hay restricciones para fijar el estado inicial del sistema, las trayectorias no pueden cortarse en ningún punto, es decir, no existe ningún estado a partir del cual el sistema evolucione temporalmente según dos o más trayectorias condicionalmente posibles.

Si bien el análisis del problema del determinismo sobre la base del estudio de las propiedades de ecuaciones diferenciales puede resultar insuficiente para algunas teorías físicas, en el caso de la Mecánica Clásica constituye un adecuado punto de partida, considerando la estructura formal de la teoría y el hecho de que la representación mediante espacios de las fases fue precisamente diseñada como recurso matemático para abordar tradicionales problemas en esta disciplina. En consecuencia, la cuestión del carácter determinista de la Mecánica Clásica se abordará desde este marco teórico-conceptual; la pregunta es, entonces: ¿describe realmente la Mecánica Clásica un mundo determinista, tal como tradicionalmente se ha considerado?

4. Singularidades: partículas que desaparecen del universo

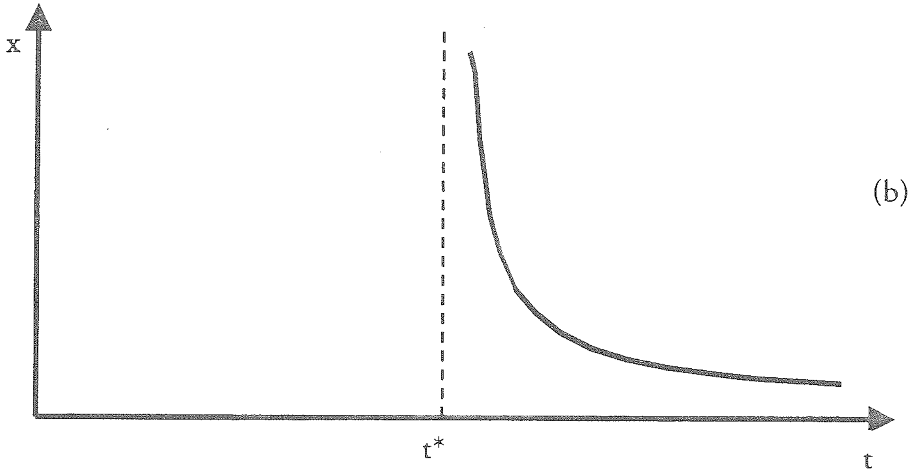
El argumento más conocido contra la tradicional tesis acerca del carácter determinista de la Mecánica Clásica es el que brinda John Earman (1986): su estrategia consiste en señalar *contraejemplos* al supuesto determinismo de la Mecánica Clásica.

Bien sabido es que, en el marco de la Mecánica Clásica, no existe un límite máximo de velocidad que las entidades físicas no puedan superar. La posibilidad de señales que se propagan a una velocidad arbitrariamente alta es, precisamente, lo que permite la simultaneidad absoluta: los relojes espacialmente separados pueden, en teoría, ser sincronizados en forma absoluta mediante una señal que se propaga a una velocidad arbitrariamente elevada; de este modo, puede lograrse una sincronización tan precisa como se desee. Por otra parte, la velocidad finita no es un invariante para todo sistema de referencia inercial: cualquiera sea el valor -finito- de la velocidad de una partícula en un sistema de referencia inercial, puede hallarse otro sistema de referencia inercial donde el valor de tal velocidad se haga tan alto como se quiera[10]. Esto indica que, en el marco de la Mecánica Clásica, una partícula puede adquirir un valor indefinidamente alto de velocidad. Tales peculiaridades de la Mecánica Clásica hacen posible una situación del siguiente tipo:



(a)

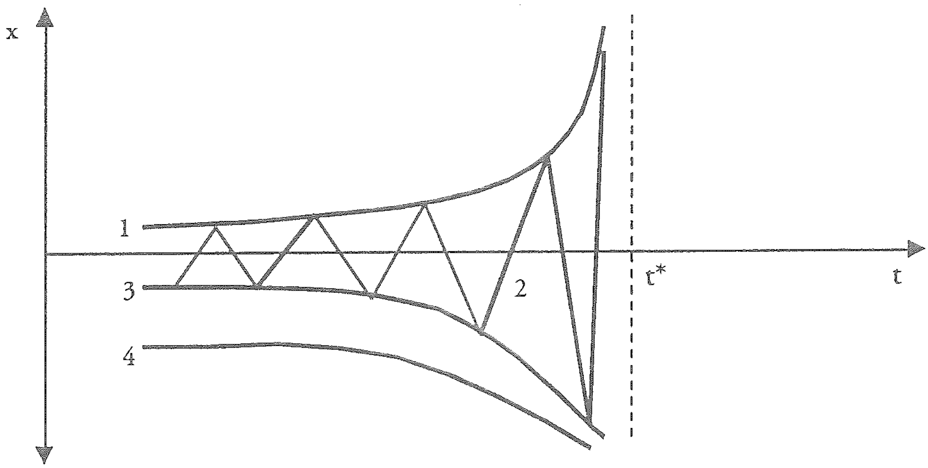
donde una partícula aumenta su velocidad indefinidamente[11], de modo tal que su coordenada espacial tiende a infinito a medida que el tiempo tiende a t^*; en términos formales, si bien para todo instante $t<t^*$ se cumple que $|v(t)|<\infty$, para $t \rightarrow t^*$ se cumple que $x(t) \rightarrow \infty$. Esta situación es la de un universo que contiene una única partícula, la cual "desaparece" en el infinito espacial en el instante t^*. Dado que las ecuaciones de la Mecánica Clásica son t-invariantes[12], la imagen temporalmente especular de la gráfica anterior también representa una evolución mecánicamente posible:



En estos casos, donde la función *x(t)* no está definida como una función continua desde $t \to -\infty$ hasta $t \to \infty$, se dice que *x(t)* es una función *singular*.

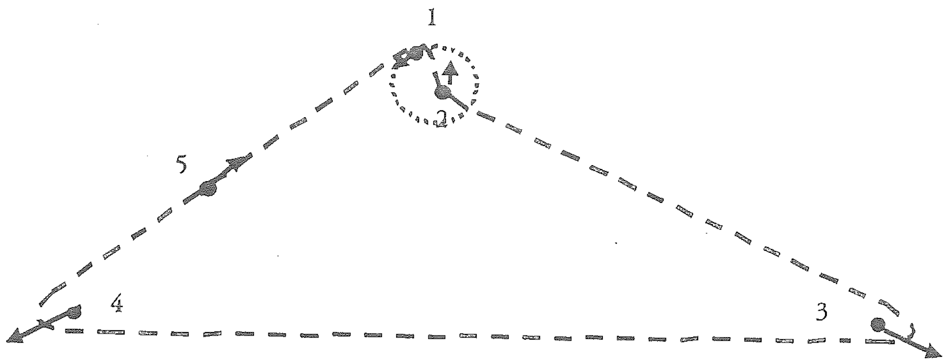
Una situación como la representada en la gráfica (b) constituye, en principio, un escollo para el determinismo ontológico. El determinismo es una doctrina que se refiere, no sólo al mundo actual, sino a todo mundo físicamente posible. El caso anterior nos muestra un universo posible que permanece vacío hasta $t=t^*$ donde, luego, aparece repentinamente una partícula desde el infinito espacial. Pero esto constituye una violación del determinismo ontológico; llamando e_0 al estado del universo en un instante $t_0<t^*$, para $t_1>t^*$ hay *dos estados condicionalmente posibles* respecto de e_0: e_1, correspondiente al universo que contiene la partícula proveniente del infinito espacial, y e'_1, correspondiente al universo que permanece vacío para todo instante posterior a t^*.

Este desafío al carácter ontológicamente determinista de la Mecánica Clásica adquiere una fuerza mayor si puede demostrarse que existen posibles configuraciones de entidades físicas e interacciones físicamente posibles capaces de generar un comportamiento del tipo del representado en la gráfica (b). Precisamente a ello apuntan ciertos resultados recientes en Mecánica Clásica teórica, obtenidos en un ámbito paradigmáticamente newtoniano: el movimiento de partículas puntuales que interactúan gravitatoriamente. En particular T. Mather y R. McGehee (1975) demostraron la existencia de singularidades en el caso de un sistema de cuatro partículas moviéndose colinealmente bajo el efecto de interacciones gravitatorias newtonianas. Las partículas 3 y 4 se aproximan entre sí disminuyendo su energía potencial en el proceso. Parte de tal energía potencial se convierte en energía cinética que acelera las partículas 3 y 4, y el resto se transfiere a la partícula 1 a través de la partícula 2 que rebota sucesivamente entre 1 y 3[13]:



Sobre la base de esta situación, Mather y McGehee demuestran la existencia de soluciones singulares: existe un tiempo finito t^* tal que, para $t \to t^*$, $x_1(t) \to +\infty$, $x_3(t)$ y $x_4(t) \to -\infty$, mientras $x_2(t)$ describe el infinito número de rebotes de la partícula 2 entre las partículas 1 y 3. Dada la t-invariancia de las ecuaciones newtonianas del movimiento, el ejemplo puede invertirse resultando así una situación en la cual el universo permanece vacío hasta t^*, pero inmediatamente después aparecen cuatro partículas desde el infinito espacial, de un modo conceptualmente similar al correspondiente a la gráfica (b)[14].

Dada la naturaleza de la situación descripta por Mather y McGehee, podría suponerse que la ruptura del determinismo depende esencialmente de la ocurrencia de colisiones. Pero esta hipótesis queda disconfirmada por nuevos resultados teóricos: en un artículo relativamente reciente, Joseph Gerver (1984) demuestra la existencia de singularidades en el caso de cinco masas puntuales coplanares que nunca colisionan[15]. La partícula mensajera 5 gira alrededor de un triángulo, tomando energía de la partícula 1 y transfiriéndola en parte a las partículas 2, 3 y 4, con el resultado de la expansión del triángulo con cada giro completo de la partícula mensajera:



Si bien en este artículo no brinda una demostración formal completa, Gerver considera plausible que la velocidad de la partícula mensajera y la velocidad de expansión del triángulo puedan ajustarse de un modo tal que, en un tiempo finito t^*, la partícula mensajera efectúe un número infinito de giros y el triángulo adquiera un tamaño infinito. Una vez más, la inversión temporal de esta situación conduce a un universo que permanece vacío hasta t^*, pero donde inmediatamente después aparecen cinco partículas desde el infinito espacial.

Sobre la base de estos resultados, Earman concluye que el espaciotiempo newtoniano, en la medida en que admite velocidades arbitrariamente altas, demuestra ser un escenario "poco amigable" para el determinismo ontológico (Earman 1986, p. 52). Los argumentos de Earman han tenido una repercusión tan amplia que muchos autores consideran definitivamente refutado el carácter determinista de la Mecánica Clásica. Por ejemplo, Jeremy Butterfield afirma sin rodeos que

> gran parte de la física newtoniana es indeterminista. Incluso, el indeterminismo acecha en el caso paradigmático discutido por Laplace: masas puntuales sólo influidas por la ley de gravitación de Newton (Butterfield 1998, p. 35).

Desde una perspectiva análoga, R.I. Hughes sostiene que

> las leyes de la física clásica no implican la tesis del determinismo. Como Earman (1986, cap. 3) ha señalado, la física clásica sólo puede ser considerada determinista mediante la adopción de supuestos aparentemente *ad hoc* (Hughes 1989, p. 76).

Al comentar las conclusiones de Earman, Keith Hutchison, al tiempo que expresa su acuerdo, agrega que la ruptura del determinismo se debe a la presencia de una singularidad en $t=t^*$, donde el Lagrangiano -diferencia entre energía potencial y energía cinética- adquiere un valor infinito; por lo tanto, no existe función lagrangiana alguna para la evolución completa del sistema (Hutchison 1993, p. 322). Pero estas conclusiones no sólo probarían el carácter indeterminista de la Mecánica Clásica, sino que atentarían seriamente contra nuestra tesis según la cual la respuesta acerca del determinismo de la Mecánica Clásica no queda unívocamente definida por factores exclusivamente científicos: aquí Earman parece mostrarnos resultados totalmente teóricos que refutan el tradicional supuesto determinista.

La pregunta es: ¿constituyen estos tipos de singularidad una prueba definitiva del carácter indeterminista de la Mecánica Clásica? El propio Earman evalúa las diferentes estrategias que eliminarían tales "soluciones de escape", considerándolas situaciones no genuinamente posibles desde un punto de vista físico. Una primera opción consiste en imponer condiciones de contorno en el infinito que impidan la aparición y desaparición de partículas en los confines del espacio; pero Earman sostiene, con razón, que se trataría de una movida *ad hoc* con el único objeto de restaurar el determinismo (p. 38). Una segunda alternativa es la de objetar la idealización en términos de masas puntuales; a ello Earman responde que, precisamente, tal tipo de idealización ha servido tradicionalmente de paradigma al determinismo laplaciano; pero agrega que, aún si se desecha la idealización y se trabaja con cuerpos de volumen finito, pueden reaparecer las soluciones de escape en el caso de colisiones elásticas (pp. 39-40).

La tercera estrategia es la que merece ser evaluada en detalle: ella consiste en introducir nuevas leyes como, en este caso, los Principios de Conservación de la Masa y del Momento Lineal; dado que las soluciones de escape violan claramente tales principios, quedarían excluidas de la posibilidad física. Frente a tal estrategia, Earman distingue entre dos versiones del Principio de Conservación de la Masa:

(1) "las líneas de mundo de las partículas no pueden tener puntos de comienzo o de finalización y la masa es constante a lo largo de tales líneas"

(2) "para todo t_1 y t_2, la masa total en t_1 es igual a la masa total en t_2"

Si bien (1) implica (2), ambas formulaciones no son equivalentes puesto que las soluciones de escape violan el principio en su versión (2) pero no en su versión (1): aún en estos casos de escape las partículas mantienen su masa constante a lo largo de líneas de mundo -trayectorias en la gráfica *x-t-* que carecen de inicio y de final. En términos de Earman, la versión (2) impide las soluciones de escape al presuponer que el universo es cerrado; "y la cuestión aquí es, precisamente, la de si el universo como un todo es un sistema abierto" (Earman 1986, p. 38)[16].

Pero, ¿es posible concebir el universo como un sistema abierto? Un sistema abierto es aquél que intercambia materia y/o energía con su entorno. Pero el universo es el sistema que lo contiene todo, para el cual no existe "exterior": para el universo como un todo no hay entorno con el cual intercambiar materia o energía. Por lo tanto, el universo es un sistema aislado *por definición*. No obstante, ello no implica que en él deban cumplirse los principios de conservación. El Principio de Conservación de la Masa, por ejemplo, afirma que en un sistema aislado la masa total permanece constante; pero tal constancia de la masa no es un hecho necesario: no es lógicamente contradictorio suponer que, en un sistema aislado, la masa pudiera aumentar o disminuir con el tiempo, del mismo modo en que lo hacen otras magnitudes físicas como, por ejemplo, la entropía. Lo que el principio implica es que la variación de la masa, si bien lógicamente posible, es físicamente imposible. En otras palabras, suponer que el Principio de Conservación de la Masa debe cumplirse en todo sistema aislado, por el mero hecho de encontrarse aislado, convierte al principio en una verdad analítica carente de contenido fáctico. Por lo tanto, la cuestión no reside, como supone Earman, en aceptar la versión (1) del principio y preguntarse acerca del carácter abierto o aislado del universo: el núcleo del problema consiste en determinar cuál de ambas versiones del Principio de Conservación de la Masa es la correcta, admitiendo su validez y el carácter aislado del universo.

La posición de Earman es clara: la versión correcta del principio es la versión (1). Pero, ¿cómo justifica esta elección?; precisamente debido a que la versión (2) bloquea las soluciones de escape que se derivan de la estricta aplicación de los principios newtonianos. En definitiva, la elección de Earman se funda en un supuesto implícito: los Principios de Conservación sólo son válidos en la medida en que *puedan deducirse de las leyes newtonianas*. Este supuesto se manifiesta cuando señala que el Principio de Conservación del Momento Lineal sólo puede probarse *como teorema* en un sistema aislado; por ello sería necesario aceptar el carácter abierto del universo a fin de bloquear su aplicabilidad.

Pero es precisamente en este punto donde es posible formular una alternativa a la posición de Earman, según la cual la validez de los principios de conservación en Mecánica Clásica no depende de su derivabilidad a partir de las leyes newtonianas. Según algunos autores, con independencia de cuestiones históricas acerca de su formulación, los principios de conservación cumplen el papel de principios fundamentales de la física, de validez interteórica, y en ello se basa la legitimidad de su aplicación en Mecánica Clásica. Quienes adoptan esta perspectiva sostienen que el Principio de Conservación del Momento Lineal, $dp/dt=0$, es una ley aplicable en todos los niveles de la física, incluso en el nivel microscópico; y si bien el principio suele introducirse en el estudio de la Mecánica Clásica aplicado al caso del choque por contacto entre cuerpos macroscópicos, su validez se extiende al caso de partículas subatómicas que interactúan a través de sus campos, e incluso al caso en que las partículas incidentes varían en tipo y/o número respecto de las partículas que emergen de la colisión. Otro motivo que suele invocarse para considerar el Principio de Conservación del Momento Lineal como más básico que las propias Leyes de Newton reside en el hecho de que tal principio corresponde a una propiedad de las interacciones físicas relacionada son su simetría ante la traslación espacial, simetría que también se supone de validez interteórica[17]. Por estas razones, algunos autores proponen, incluso desde un punto de vista didáctico, iniciar el estudio de la dinámica con el Principio de Conservación del Momento Lineal en lugar de comenzar por la noción de fuerza y la Segunda Ley de Newton (*cfr.* Alonso 1998); desde esta perspectiva, las interacciones físicas se conciben como fenómenos de intercambio de momento lineal. Sólo en un paso posterior se introduce la Segunda Ley de Newton, *deduciéndola* a partir del Principio de Conservación del Momento Lineal: el momento lineal total de un sistema aislado compuesto por la partícula *1* y las demás *i* partículas que interactúan con la primera es $p_{tot} = p_1 + \Sigma p_i = cte.$; por lo tanto:

$$dp_1/dt = -\Sigma dp_i/dt = F$$

De este modo, la fuerza F mide el intercambio de momento lineal por unidad de tiempo entre la partícula *1* y las restantes partículas del sistema[18].

Quienes defienden el mayor alcance de los principios de conservación respecto de las Leyes de Newton consideran que tal hecho también se comprueba en el estudio de fenómenos clásicos como es el caso de colisiones elásticas entre cuerpos macroscópicos: tal tipo de colisiones se describe mediante el Principio de Conservación del Momento Lineal, pues la Segunda Ley de Newton resulta inaplicable debido a la aceleración infinita de los cuerpos en el punto de contacto. A este caso se refiere Mark Wilson cuando señala que no sería un procedimiento adecuado dejar que un "teorema" decidiera qué sucede en los casos en los que el "axioma" resulta inaplicable:

> presumiblemente, salvo que el tratamiento de los fenómenos de colisión se altere, los axiomas de la "física de Newton" deben ser reformulados de modo tal que la conservación del momento lineal, en lugar de las leyes newtonianas originales, se elija como principio fundamental (Wilson 1989, p. 514).

En definitiva, nos enfrentamos aquí a dos formas diferentes de analizar la cuestión del determinismo en Mecánica Clásica. Para Earman, los principios fundamentales de la Mecánica Clásica son las Leyes de Newton; la validez de cualquier otra ley se funda en su derivabilidad a partir de tales principios. El problema del determinismo debe estudiarse, entonces, en el contexto formal de la teoría así definida. Por lo tanto, desde esta perspectiva las soluciones de escape son situaciones físicamente posibles puesto que se infieren de los principios fundamentales, y tales soluciones demuestran el derrumbe del tradicionalmente supuesto determinismo de la Mecánica Clásica. Sin embargo, desde una posición que ubica la Mecánica Clásica en el contexto general de la física, puede considerarse que los principios de conservación son más básicos y generales que las Leyes de Newton; su validez es un supuesto teóricamente previo a la aceptación de las leyes newtonianas y no, como supone Earman, una mera estrategia *ad hoc* a la cual el empecinado determinista debe recurrir para salvar su doctrina de la refutación. Desde esta perspectiva resulta totalmente legítimo excluir del ámbito de la posibilidad física las soluciones de escape que, si bien se derivan de las leyes newtonianas, contradicen los principios fundamentales de validez interteórica. De este modo se restaura el carácter ontológicamente determinista del universo regido por la Mecánica Clásica, puesto en crisis por los resultados de Mather, McGehee y Gerver. Esta divergencia entre ambas posiciones comienza ya a poner de manifiesto el modo en que ciertas concepciones metateóricas influyen decisivamente sobre la respuesta acerca del carácter determinista de una teoría científica.

5. Mecánica Clásica: ¿neutral respecto del determinismo?

Un nuevo argumento en contra del carácter determinista de la Mecánica Clásica es el que brinda Keith Hutchison (1993): a diferencia de Earman, su objetivo final no es señalar el carácter indeterminista de la Mecánica Clásica, sino sostener su neutralidad respecto del problema del determinismo[19].

Como ya fue señalado, Hutchison comienza por hacerse eco de los argumentos de Earman; incluso agrega un nuevo contraejemplo que, si bien no postula una interacción gravitatoria entre partículas según la Ley de Gravitación newtoniana, resulta mucho más sencillo desde un punto de vista matemático que los casos citados por Earman. Sean tres partículas colineales inicialmente en reposo y tales que, en $t=0$, $x_1(0)=-1$, $x_2(0)=0$ y $x_3(0)=1$. Se supone que las partículas *1* y *3* no interactúan entre sí, pero ambas son repelidas por la partícula central *2* central con una fuerza $F=3x^5-2x^3$. Dada la simetría de la configuración, el movimiento de cada una de las partículas externas es la imagen especular del movimiento de la otra: las partículas *1* y *3* son simplemente repelidas del origen de igual modo; por ello, se considera sólo la ecuación del movimiento de la partícula *3* que será -salvo constante-:

$$x_3''(t) = 3\, x_3^5 - 2\, x_3^3$$

Es muy fácil demostrar que la siguiente función es solución de la anterior ecuación diferencial[20]:

$$x_3(t) = (1 - t^2)^{-1/2}$$

Este resultado muestra que, para $t \to 1$, $x_3(t) \to \infty$ y lo mismo sucede para la partícula *1*: las partículas exteriores se aceleran de modo tal que, para $t \geq 1$, han desaparecido del universo. De este modo, Hutchison construye una solución de escape sin colisiones exenta de las complejidades matemáticas del sistema de Gerver. Sin embargo, ello sólo se logra a costa de postular interacciones diferentes de la interacción gravitatoria newtoniana: el problema aquí consiste en dotar de *sentido físico* a la fuerza postulada puesto que, a diferencia de cualquier fuerza macrocópica conocida, su magnitud aumenta con la distancia entre las partículas, tendiendo a infinito para $x \to \infty$. De todos modos, con independencia de este inconveniente particular, el ejemplo de Hutchison se inscribe en la misma línea argumentativa de Earman.

La posición de Hutchison se torna más interesante cuando sus argumentos viran hacia otra dirección. En referencia explícita al clásico texto de Richard Tolman (1938), Hutchison sostiene que quienes defienden el carácter determinista de la Mecánica Clásica, lo hacen a partir de las ecuaciones lagrangianas de movimiento:

$$d/dt(\partial L/\partial q'_i) = \partial L/\partial q_i$$

donde el lagrangiano L es la diferencia entre la energía potencial -sólo función de las coordenadas generalizadas q_i- y la energía cinética -sólo función de las velocidades generalizadas q'_i-. Pero la versión lagrangiana de las ecuaciones de movimiento no resulta equivalente a la que proporcionan las Leyes de Newton, puesto que su derivación exige un supuesto adicional acerca de las fuerzas que actúan en el sistema: en particular, se asume que las fuerzas entre los cuerpos son *conservativas*, esto es, sólo dependen de la configuración geométrica del sistema[21]. En muchos casos tal supuesto se satisface -por ejemplo, cuando sólo intervienen interacciones gravitatorias-, pero en otras situaciones no se cumple. En particular, la formulación lagrangiana resulta inaplicable cuando intervienen fuerzas *no conservativas* como, por ejemplo, las fuerzas de rozamiento dependientes de la velocidad. La adecuada descripción dinámica de un sistema mecánico mediante las ecuaciones de Lagrange asegura que su evolución será determinista pero, a la vez, implica que las fuerzas que actúan sobre el sistema son conservativas.

Pero, ¿qué tipo de evolución describe un sistema en el cual actúan fuerzas no conservativas? En este caso es posible que no se cumpla la condición de unicidad de las soluciones de las ecuaciones diferenciales de movimiento. Hutchison apoya su argumento mediante un ejemplo en el que interviene una fuerza dependiente de la velocidad: supóngase una partícula que, partiendo del reposo, se mueve bajo la acción de una única fuerza que varía con la raíz cuadrada de la velocidad; de acuerdo con la Segunda Ley de Newton, la ecuación del movimiento será:

$$m\, d^2x(t)/dt^2 = k \sqrt{|dx(t)/dt|}$$

Tomando como condiciones iniciales $x(0)=x'(0)=0$, puede demostrarse que cada una de las funciones de la siguiente familia parametrizada es solución del problema:

$$\begin{array}{ll} x_\alpha(t) = k^2/12m^2\,(t-\alpha)^3 & para\ t > \alpha \\ x_\alpha(t) = 0 & para\ t \leq \alpha \end{array}$$

Para cada valor de α se obtiene una posible evolución temporal del sistema, de acuerdo con la cual la partícula permanece en reposo durante α segundos y luego inicia su movimiento. Frente a ello, Hutchison agrega que:

> La mecánica newtoniana permite que la partícula permanezca estacionaria en un lugar durante un período arbitrario de tiempo, α segundos, ¡y luego comience espontáneamente a moverse! (1993, p. 320).

Pero, por más sorprendente que esta situación pueda parecer, no antentaría contra el determinismo si la solución fuese única, esto es, si existiera un único valor de α para la ecuación de movimiento; en otras palabras, el problema para el determinismo no reside en que la partícula comience a moverse "espontáneamente", sino en que no existe un único valor posible de $t=\alpha$ en el cual iniciará tal movimiento. De todos modos, el hecho es que este tipo de situación constituye un grave desafío para la concepción determinista de la Mecánica Clásica, desafío que nada tiene que ver con partículas que aparecen o desaparecen del universo. En efecto, dado el estado e_0 del sistema en $t=0$ [$x(0)=x'(0)=0$], la teoría no fija unívocamente su estado en todo tiempo posterior: por cada uno de los infinitos valores de α existe un estado $e_\alpha(t)$ en el instante $t>\alpha$ que resulta condicionalmente posible respecto de e_0.

La exhibición de este contraejemplo, junto con la explícita adhesión a los argumentos de Earman, permiten suponer que Hutchison acabará admitiendo el carácter indeterminista de la Mecánica Clásica. Sin embargo, su argumentación sigue otro camino: Hutchison concluye que la Mecánica Clásica es una suerte de *algoritmo* que permite obtener la evolución temporal de un sistema dadas las fuerzas actuantes, las condiciones iniciales y las condiciones de contorno. Pero si la evolución resulta o no ser determinista no depende del algoritmo, sino de la naturaleza de las fuerzas: la Mecánica Clásica es, en sí misma, totalmente *neutral* respecto del determinismo. Lo que Hutchison no señala es que un argumento análogo fue presentado por Richard Montague (1974) en su ya clásico trabajo sobre teorías deterministas: no es posible pronunciarse acerca del carácter deteminista o indeterminista de la Mecánica Clásica si no se especifican previamente las leyes que definen el tipo de fuerzas resultantes de las interacciones físicas. Sin embargo, Huchison avanza un paso más: no se trata de "completar" la Mecánica Clásica para decidir acerca de su determinismo, sino de comprobar que los predicados "determinista" e "indeterminista" *no le son aplicables*; en tanto mero algoritmo, la Mecánica Clásica no define el ámbito de las evoluciones físicamente posibles.

No obstante, frente al ejemplo de Hutchison en el que interviene una fuerza no conservativa -dependiente de la velocidad-, el defensor del carácter determinista de la Mecánica Clásica podría replicar que las fuerzas no conservativas a las que alude el autor -como, por ejemplo, las de rozamiento- no son fuerzas elementales sino puramente fenomenológicas, reductibles a interacciones que operan en la microestructura del sistema; pero las fuerzas elementales que pueden intervenir en la Mecánica Clásica son las que surgen de las interacciones gravitatoria y electromagnética, y en ambos casos se trata de fuerzas conservativas. Sin embargo, la concepción de Hutchison acerca de la naturaleza de la Mecánica Clásica lo inmuniza contra este tipo de críticas: la neutralidad de la Mecánica Clásica se funda en su carácter "formal" respecto de las evoluciones físicamente posibles. Argumentando por el absurdo, Hutchison podría responder que incluso si mañana se descubriera una fuerza elemental no conservativa, sería totalmente inaceptable suponer que, de pronto, la Mecánica Clásica se ha vuelto indeterminista aún sin cambiar en absoluto su formulación original (*cfr.* Hutchison 1993, p. 312).

En definitiva, ¿por qué Hutchison, aún aceptando la validez de los contraejemplos de Earman, no extrae su misma conclusión? La respuesta excede los límites propios de la discusión acerca del determinismo para ingresar a un terreno más amplio, que se refiere a la propia naturaleza de la Mecánica Clásica. Hutchison está en lo cierto cuando sostiene que la Mecánica Clásica nada afirma acerca del tipo de fuerzas que actúan sobre un sistema; en efecto, la fuerza que aparece en la Segunda Ley de Newton puede tener cualquier origen -gravitatorio, eléctrico, etc.-: la Mecánica Clásica se limita a establecer cómo tal fuerza, independientemente de su naturaleza, modifica el estado de movimiento del cuerpo sobre el cual actúa. Desde esta perspectiva, la Mecánica Clásica se encuentra en un nivel de descripción diferente y más general que el de aquellas teorías que, como la Gravitación o el Electromagnetismo, describen los diferentes tipos de interacción física presentes en la naturaleza. En otras palabras, la posición de Hutchison se basa en ubicar la Mecánica Clásica en el contexto de la física como disciplina, otorgándole un nivel de abstracción superior al de las teorías que describen interacciones físicas; pero considerada aisladamente, la Mecánica Clásica no es el tipo de unidad teórica que define el ámbito de las evoluciones físicamente posibles.

6. Los supuestos deterministas de la Mecánica Clásica

En explícita polémica con la posición de Earman, Mark Wilson (1989) brinda su enfoque del problema del determinismo a partir de una crítica de las posturas que pretenden inferir la conclusión acerca del carácter determinista o indeterminista de la Mecánica Clásica como un resultado metateórico basado exclusivamente en la estructura sintáctica y semántica de la teoría.

Wilson inicia su argumentación con el cuestionamiento de lo que denomina la concepción "de abajo hacia arriba" (*botton up*) de una teoría científica, según la cual una teoría *T*, para ser considerada "completa", debe definir *a priori* todas las posibles situaciones físicas relativas a *T*. Desde esta perspectiva, en el caso particular de la Mecánica Clásica, a las tres Leyes de Newton deben agregarse las leyes que rigen los tipos posibles de interacción entre los elementos de un sistema mecánico -por ejemplo, la Ley de Gravitación Universal o las leyes del Electromagnetismo-. Pero una vez que la teoría *T* ha sido completada de tal modo, la tesis acerca de su carácter determinista o indeterminista se infiere como un *metateorema* a partir de la estructura formal de la teoría: la teoría *T* será determinista sólo si puede demostrarse, como un hecho metamatemático acerca de sus leyes, que *T* no permite distintas evoluciones físicas posibles a partir de un mismo estado inicial. El objetivo de la investigación acerca del carácter determinista de *T* consiste, entonces, en establecer tal resultado metateórico: "la investigación acerca del determinismo del propio Earman procede generalmente de acuerdo con este plan «metateórico»" (Wilson 1989, p. 507). En consecuencia, desde esta perspectiva carece de sentido introducir en la teoría *T* la tesis del determinismo como un postulado adicional: asumida como "axioma", tal tesis resultará o bien redundante o bien inconsistente con la teoría *T*. Según Wilson, esta concepción acerca de las teorías científicas se encuentra fuertemente arraigada en el ámbito de la filosofía de la ciencia contemporánea. Su objetivo consiste en mostrar que tal concepción resulta incorrecta a la luz de la práctica efectiva de la física en el terreno teórico, y para ello presenta varios argumentos interrelacionados entre sí.

Wilson comienza por recordar que, para definir el movimiento mecánico de un sistema, es necesario agregar a las leyes ciertas condiciones particulares de la situación. Cuando la evolución dinámica del sistema queda descripta por ecuaciones diferenciales *ordinarias*, sólo se requieren *condiciones iniciales* que fijen el estado del sistema en el instante inicial. Pero muchas situaciones en Mecánica Clásica se describen mediante ecuaciones diferenciales *en derivadas parciales*; en estos casos, a las condiciones iniciales deben agregarse las *condiciones de contorno* que fijan el comportamiento de ciertos puntos del sistema a lo largo de toda la evolución. Por ejemplo, cuando se trata de establecer el movimiento de una cuerda sujeta por ambos extremos sobre la base de la llamada "ecuación de la onda", es necesario considerar como condición de contorno el hecho de que ambos extremos permanecen fijos durante toda la evolución; tal condición de contorno es indispensable: el comportamiento de la cuerda sería totalmente diferente si, por ejemplo, uno de sus extremos se mantuviera fijo pero el otro se moviera libremente[22]. Es precisamente respecto de este punto que Wilson objeta la perspectiva de Earman, quien deja de lado la consideración de las condiciones de contorno debido a que representan "un alejamiento del determinismo laplaciano en la medida en que requieren la especificación de datos futuros" (Earman 1986, p. 33). Pero, según Wilson, esta posición restringe de un modo inapropiado la discusión acerca del determinismo:

> no parece haber violación alguna del espíritu del determinismo en asumir que podemos tomar tales respuestas [las condiciones de contorno en los extremos de la cuerda] como dadas cuando investigamos el determinismo de la ecuación de la cuerda (Wilson 1989, p. 513).

Pero el establecimiento de las condiciones de contorno en una situación física concreta no siempre es una tarea sencilla como en el caso de la cuerda; en particular, se convierte en un problema conceptual cuando las condiciones de contorno varían con el tiempo. Si bien Wilson no es totalmente explícito respecto de este punto, tales situaciones pueden agruparse en dos tipos principales, que suelen denominarse "condiciones de contorno dependientes del tiempo" y "bordes móviles" respectivamente. En el primer tipo, las condiciones de contorno varían con el tiempo de un modo predeterminado desde el exterior del sistema e independiente de su evolución. Este es el caso, por ejemplo, de un problema de difusión de calor donde las fronteras del sistema son paredes cuya temperatura superficial varía en función de la hora del día. Si bien estas situaciones presentan una mayor complejidad que los casos de condiciones de contorno fijas, en general pueden ser resueltos cumpliendo las condiciones de existencia y unicidad de las soluciones. Por el contrario, los casos de bordes móviles suelen convertirse en serios problemas de gran dificultad matemática puesto que, en ellos, las condiciones de contorno varían como resultado de la propia evolución del sistema. El ejemplo que menciona Wilson es el del impacto de bolas cuyos contornos se modifican como consecuencia del propio impacto. Un ejemplo aún más sencillo es el que típicamente se presenta en ingeniería en el conformado de metales: si se toma un cilindro metálico de igual altura que diámetro y se lo comprime hasta la mitad de su altura, adquiere finalmente una forma similar a la de un barril. En ambos ejemplos, las condiciones de contorno se modifican fuertemente durante y *como consecuencia* de la evolución del sistema; por lo tanto, no pueden ser especificadas de antemano en la medida en que no se las conoce hasta que el problema no es resuelto: la solución depende de las condiciones de contorno las cuales, a su vez, dependen de la solución. Wilson señala que, en estos casos, los físicos adoptan una estrategia de aproximación a la solución por iteraciones sucesivas: se plantean tentativamente las ecuaciones de movimiento, luego se intenta establecer las condiciones de contorno adecuadas para obtener la existencia y unicidad de las soluciones, pero si este paso resulta problemático, se vuelve al inicio para modificar las propias ecuaciones de movimiento, y así sucesivamente. En definitiva, la parte más ardua del trabajo del físico consiste, precisamente, en encontrar condiciones de contorno que permitan la descripción *unívoca* de la evolución temporal del sistema bajo estudio; y esta tarea siempre se efectúa bajo

> la firme creencia de que un problema físico tiene "movimientos únicos" para todos los datos iniciales físicamente posibles, que los movimientos físicos existen si el sistema no es explosivo, y que hay cierto sentido en el cual los movimientos físicos dependen del tiempo de un modo continuo (Wilson 1989, p. 519).

Según Wilson, esta forma de resolver problemas en el ámbito de la Mecánica Clásica pone de manifiesto lo inadecuado del enfoque filosófico tradicional, según el cual el "contenido nomológico" de las teorías se localiza exclusivamente en las leyes -expresadas como ecuaciones diferenciales-, mientras que las condiciones iniciales y de contorno representan los "aspectos contingentes" de la situación física; pero en mecánica del continuo y en muchas otras ramas de la física que utilizan ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, las condiciones de contorno no juegan un papel tan pasivo como la imagen filosófica tradicional sugiere.

Continuando con su enfoque basado en la práctica efectiva de la física, Wilson subraya que el no cumplimiento de las condiciones de existencia y unicidad de las soluciones de las ecuaciones de movimiento es una situación cotidiana en ciencias, que la filosofía ha generalmente ignorado. ¿Cómo reacciona el físico ante estos casos? Sin duda, no renunciando al determinismo:

> un modelo matemático que sufre rupturas de la existencia o unicidad se muestra prácticamente inútil, salvo que las singularidades sean corregidas o controladas (Wilson 1989, p. 521).

La estrategia general del físico consiste en suplementar o modificar la descripción del sistema mecánico bajo estudio hasta lograr acotar el resultado a una solución única; sólo cuando este proceso de "ajuste" ha sido completado, se supone que se ha finalizado de modelar la situación física original. Así, en los fenómenos de colisión, donde el módulo de la aceleración tiende a infinito en el instante de encuentro entre los cuerpos, las tres Leyes de Newton se suplementan mediante los necesarios principios de conservación[23]. En los casos, como los que cita Earman, en los que la interacción gravitatoria entre partículas puntuales conduce a singularidades[24], la reacción más frecuente consiste en concluir que la existencia de sistemas de masas puntuales que interactúan sólo gravitacionalmente no es una genuina posibilidad física. En otros casos se procede a renormalizar ciertas variables para obtener ecuaciones sin singularidades:

> cuando un matemático que trabaja en mecánica celeste renormaliza la variable tiempo de un modo peculiar para que las nuevas ecuaciones gravitacionales queden libres de rupturas, su propósito es hacer posible un cálculo preciso de las órbitas cercanas a la colisión, y no salvar al determinismo por la gloria de la metafísica (Wilson 1989, p. 521).

Sobre la base de estos argumentos, Wilson concluye la legitimidad de considerar la tesis del determinismo como un postulado más de la Mecánica Clásica, no derivable de sus leyes pero tampoco contradictorio con ellas. Es precisamente la aceptación implícita del determinismo como *axioma fundamental* de la teoría lo que guía el trabajo del físico en su tarea de formular modelos de los sistemas mecánicos.

Frente a las recientes tendencias que niegan el carácter determinista de la Mecánica Clásica, Wilson vuelve al supuesto original pero desde una perspectiva novedosa. Su enfoque parte de una concepción acerca del significado mismo de la Mecánica Clásica totalmente diferente de la que suele adoptarse tradicionalmente: la Mecánica Clásica no es ya meramente la conjunción de las tres Leyes de Newton -y lo que de ellas se deriva-; tampoco es el conjunto que resulta de suplementar tales leyes mediante los necesarios principios de conservación. La Mecánica Clásica es una unidad mucho más amplia que, además de las leyes y principios, incluye de un modo esencial un conjunto de recursos matemáticos y estrategias de modelización que guían la aplicación de las leyes y los principios. Tales recursos y estrategias cobran una importancia tal que permiten, incluso, decidir qué leyes deben aplicarse en cada situación particular, aún a costa de pasar por alto otras leyes de similar jerarquía teórica. Es interesante señalar que, a lo largo de su trabajo, Wilson prácticamente no utiliza el término "Mecánica Clásica" -salvo en referencia a las tesis de Earman-; en general, alude a la mecánica de partículas puntuales, a la cinemática de máquinas, a la mecánica del cuerpo rígido o a la mecánica del continuo. Wilson no justifica explícitamente esta elección terminológica, pero no es difícil inferir su motivación: desde su perspectiva, si bien todas estas disciplinas se encuentran emparentadas a través de ciertas leyes de validez general, cada una de ellas posee su propia especificidad en la medida en que requiere sus propios recursos y estrategias particulares para la resolución de problemas. La tradicional concepción de la Mecánica Clásica como un conjunto claramente definido de enunciados estructurados deductivamente se disgrega, así, en múltiples disciplinas específicas sólo vinculadas a través de las leyes de más alto nivel teórico.

¿Qué papel cumple el determinismo en esta visión de la Mecánica Clásica? La tesis determinista se convierte aquí en una hipótesis totalmente general, que guía las estrategias particulares hacia la búsqueda de ecuaciones que cumplan las condiciones de existencia y unicidad de sus soluciones. En la visión de Wilson, el determinismo es un principio heurístico cuya validez reside en permitir, en la práctica, la obtención de resultados fructíferos para la descripción y la predicción del comportamiento de los sistemas mecánicos. Sin duda, aún desde esta perspectiva, la tesis determinista tiene profundas implicaciones ontológicas. Pero la razón principal de Wilson para aceptar el determinismo de la Mecánica Clásica se funda en su utilidad práctica y no en una posición metafísica adoptada *a priori*.

7. ¿Qué es la Mecánica Clásica?

En los apartados anteriores se han analizado diversas posiciones actuales respecto del problema del determinismo en Mecánica Clásica; si bien diferentes entre sí, todas ellas se apartan de la perspectiva tradicional, incluso aquélla que acepta el carácter determinista de la Mecánica Clásica. Pero el punto más importante que se desprende del análisis anterior consiste en que la divergencia entre las distintas posiciones no se debe a una diferente concepción de la noción de determinismo: si bien no siempre de un modo explícito, todos ellos comparten la idea según la cual un sistema es ontológicamente determinista si no existe más que una evolución condicionalmente posible a partir de cualquiera de sus estados. Tanto Earman como Hutchison y Wilson abordan el problema del determinismo en Mecánica Clásica en términos de la existencia y unicidad de las soluciones de las ecuaciones diferenciales del movimiento: la diferencia entre las conclusiones de los tres autores se funda en sus distintas concepciones acerca de la naturaleza y el contenido de la propia teoría bajo análisis.

De este modo, el eje de la discusión se desplaza hacia la pregunta, aparentemente trivial: ¿qué es la Mecánica Clásica? Históricamente, la Mecánica Clásica surge formando una unidad con la Teoría de la Gravitación: las interacciones gravitatorias constituyen los únicos nexos que vinculan los cuerpos físicos entre sí; las tres Leyes de Newton describen cómo tales interacciones modifican el estado de movimiento de los cuerpos. Esta es la imagen del universo que subyace a la famosa fórmula laplaciana de determinismo. Si bien recurriendo a resultados recientes, sobre esta concepción de la Mecánica Clásica se basa Earman al esgrimir las soluciones de escape como contraejemplos a la tesis determinista. Pero, con el transcurso del tiempo, el ámbito de la física fue ampliándose hacia la descripción de nuevos fenómenos y la formulación de nuevas teorías para dar cuenta de ellos. Y aún cuando no puede hablarse de una total unificación de la física, se alcanzaron ciertos estadios unificadores: los principios de conservación apuntan precisamente en esta dirección. Habiendo alcanzado este punto el desarrollo de la física, surge una nueva perspectiva según la cual la Mecánica Clásica ya no se identifica exclusivamente con las tres Leyes de Newton: los principios de conservación se convierten en principios fundamentales de la física; la Mecánica Clásica los incluye, no porque puedan inferirse de las Leyes de Newton, sino porque los "hereda" de un nivel teórico superior. Si los principios de conservación se incorporan al cuerpo de la teoría, las soluciones de escape quedan excluidas del ámbito de la posibilidad física. Pero esta reconceptualización de la Mecánica Clásica no constituye una estrategia *ad hoc* destinada exclusivamente a restaurar el determinismo, sino que depende de una peculiar concepción acerca del modo en que se organiza la física en su conjunto y del lugar que ocupa la Mecánica Clásica en esta estructura general.

Pero cuando la gravitación deja de ser el único "cemento" del universo y aparecen nuevas formas de interacción física, el concepto de fuerza amplía su referencia. No obstante, la Mecánica Clásica sigue describiendo el modo en que *cualquier* fuerza modifica el estado de movimiento de un cuerpo. La Mecánica Clásica, en tanto mecánica, abstrae del tipo particular de las fuerzas actuantes: de este modo se convierte en una teoría que apunta a un nivel de descripción superior al correspondiente a las teorías que describen las diferentes interacciones físicas. Pero si la Mecánica Clásica adquiere este carácter "formal", ya no es capaz siquiera de describir los mundos físicamente posibles y sus evoluciones si antes no se especifica el tipo de interacciones físicamente admisibles. Por lo tanto, la pregunta misma acerca del carácter determinista o indeterminista de la Mecánica Clásica pierde su sentido original.

Hasta aquí se han considerado tres formas de definir la Mecánica Clásica en tanto teoría física. No obstante, las tres alternativas comparten un supuesto epistemológico básico: considerar la teoría científica, en tanto conjunto de enunciados deductivamente relacionados, como unidad de análisis epistemológico. Wilson se enfrenta precisamente a esta concepción desde una perspectiva que concibe la ciencia más como actividad que como resultado; si bien no de un modo explícito, su enfoque parece ajustarse en gran medida a la noción kuhniana de *paradigma* (Kuhn 1962): un paradigma incluye no sólo las generalizaciones simbólicas -leyes, desde la perspectiva tradicional-, sino también los modelos con sus respectivos compromisos teóricos, y los ejemplos en tanto soluciones de problemas-tipo que sirven de guía para la resolución de nuevos problemas. Desde esta perspectiva, la Mecánica Clásica no se limita a las tres leyes newtonianas, siquiera con el agregado de los principios de conservación; tampoco es un algoritmo formal para calcular movimientos dadas las fuerzas actuantes. La Mecánica Clásica, además de incluir leyes y principios teóricos, abarca también los ejemplos en los cuales se aplican las estrategias de complementación teórica, renormalización, determinación de las condiciones de contorno, etc. dirigidas a asegurar la existencia y unicidad de las soluciones de las ecuaciones de movimiento. En este contexto, el determinismo representa uno de los supuestos básicos que guían la resolución de los ejemplares. La tesis determinista puede ser adoptada como una tesis metafísica postulada *a priori* o, a la manera de Wilson, como un principio heurístico cuya validez reside en su fecundidad práctica; pero en ambos casos el determinismo se convierte en un elemento constitutivo y esencial de la Mecánica Clásica concebida como paradigma.

8. Conclusiones

Cuando se piensa en el problema del determinismo en el ámbito de la física, suele considerarse que el caso de la Mecánica Clásica es el más sencillo: la respuesta al problema del determinismo parece ser trivial. La discusión desarrollada en el presente trabajo muestra qué tan desencaminado se encuentra este tradicional supuesto

Si se admite que pueden existir diferentes opiniones acerca del carácter determinista de una teoría tan ampliamente desarrollada y conocida como la Mecánica Clásica, la actitud más inmediata consistiría en responsabilizar del disenso a los desacuerdos respecto del concepto de determinismo, que se ha mostrado recurrentemente elusivo a través de la historia del pensamiento. Pero también en este caso se trata de una opinión equivocada: la divergencia entre las diversas conclusiones se basa en desacuerdos acerca de la naturaleza de la propia Mecánica Clásica y no acerca del concepto de determinismo. Tal vez el problema se deba, en parte, a la larga historia de la Mecánica Clásica y el modo en que se ha ramificado hacia múltiples y disímiles aplicaciones. Su amplísimo desarrollo hace difícil, en la actualidad, delimitar con precisión el ámbito de referencia del término "Mecánica Clásica".

Sin embargo, el argumento histórico no recoge toda la verdad de la situación: los desacuerdos acerca de cómo caracterizar la Mecánica Clásica dependen esencialmente de la posición epistemológica desde la cual se aborda el problema. El núcleo del disenso se encuentra en el modo en que cada autor concibe la unidad de análisis epistemológico que debe estudiarse para evaluar cuestiones no sólo epistemológicas, sino incluso metafísicas como es el caso del determinismo. La Mecánica Clásica puede ser concebida aisladamente, como una estructura de enunciados conectados deductivamente a partir de sus propias leyes específicas; también puede ser pensada como una estructura deductiva, pero con sus relaciones de dependencia respecto de la física en tanto disciplina global a la cual pertenece y que, por tanto, le impone restricciones teóricas desde un nivel superior; o puede ser interpretada como un mero algoritmo que opera sobre el material suministrado por teorías de nivel inferior; o puede ser concebida como un amplio paradigma, con sus propias estrategias de resolución de problemas y sus propios supuestos metafísicos. Según sea la decisión que se adopte, será diferente la posición respecto del carácter determinista o indeterminista de la Mecánica Clásica, aún sobre la base del acuerdo acerca del propio concepto de determinismo.

Este análisis del problema del determinismo en Mecánica Clásica brinda elementos en favor de nuestra tesis inicial: la respuesta acerca del determinismo de una dada teoría no queda unívocamente definida por factores exclusivamente científicos. En particular, la concepción epistemológica acerca de las unidades básicas que constituyen el objeto de análisis influye de un modo decisivo sobre la perspectiva de cada autor acerca de un tradicional problema metafísico como lo es el problema del determinismo. En definitiva, la cuestión del carácter determinista de la Mecánica Clásica no puede considerarse en modo alguno un caso cerrado.

Notas

1 En su conocida obra acerca del determinismo, Paulette Février es un claro exponente de esta perspectiva: "es importante por consiguiente llegar a establecer criterios positivos que permitan aislar una concepción del determinismo por la cual se haga este principio verificable en el nivel de la experiencia" (Février 1957, p. 19). Incluso el propio Karl Popper, a pesar de su explícito enfrentamiento con las tesis del Círculo de Viena, no logra escapar a su influencia cuando intenta sustituir la doctrina metafísica del determinismo por el concepto preciso y testable de *determinismo científico* basado en la noción de predictibilidad (Popper 1986, p. 25).

2 El matiz "dentro de un margen de error acotado" se debe a que, en la práctica científica, la determinación empírica del estado de un sistema en un cierto instante brinda, para cada variable de estado, no sólo un dado valor sino un inevitable error que depende de la precisión del instrumento de medición utilizado; además, la Teoría de Propagación de Errores permite calcular la evolución de las imprecisiones iniciales con el transcurso del tiempo. En consecuencia, sin este matiz el sentido gnoseológico del predicado "determinista" resultaría vacuo.

3 Se entiende aquí que lo físicamente posible es aquello que no impiden las leyes naturales, consideradas como regularidades inscriptas en el plano ontológico.

4 Según Earman, este concepto de determinismo se despliega en dos subconceptos: un mundo $W \in \Xi$ es *futurísticamente* (*históricamente*) *determinista laplaciano* sii, para cualquier $W' \in \Xi$, si W y W' coinciden en cierto instante, entonces coinciden para todo instante posterior (anterior) (Earman 1986, p. 13). Si bien la caracterización temporalmente simétrica de determinismo puede resultar inadecuada en algunos casos particulares, es aplicable al caso de la Mecánica Clásica dada la t-invariancia de la Segunda Ley de Newton.

5 La denominación del tercer principio newtoniano suele inducir a confusión en la medida en que sugiere la ocurrencia de *dos fenómenos*, la acción y la reacción; mucho mejor sería referirse a él como *Principio de Interacción*, nombre que indica la ocurrencia de un *único fenómeno*, la *interacción*, que se manifiesta con la aparición de *dos fuerzas*, una sobre cada cuerpo interactuante.

6 Aquí, como en todo el resto del trabajo, se adopta como convención escribir en negrita los símbolos que representan magnitudes vectoriales.

7 Cuando las magnitudes vectoriales se expresan en términos de sus tres componentes espaciales, la ecuación original se convierte en un sistema de tres ecuaciones diferenciales, una por cada componente.

8 Una presentación sencilla pero rigurosa de la versión hamiltoniana de la Mecánica Clásica puede hallarse en el primer capítulo del clásico texto de Tolman (1938). Es importante señalar que, estrictamente, las versiones hamiltoniana y newtoniana de la Mecánica Clásica no son equivalentes: la versión hamiltoniana sólo es aplicable a sistemas aislados conservativos. Como se verá más adelante, precisamente en ello se basan algunos autores para cuestionar el tradicional supuesto acerca del determinismo de la Mecánica Clásica.

9 El recurso matemático del espacio de las fases es de utilización general en física: las variables de estado pueden no pertenecer al ámbito de la mecánica. Aquí, donde se trata de un sistema de N partículas puntuales, las variables de estado son las q_i componentes de posición y las p_i componentes de momento lineal de las partículas, con $1 \leq i \leq n$ y $n=3N$. El espacio de las fases tendrá, entonces, dimensión $2n=6N$.

10 Estrictamente, en Mecánica Clásica la velocidad de una entidad física sólo queda completamente definida cuando se fija el sistema de referencia respecto del cual dicha velocidad se define. El pasaje de una sistema de referencia inercial a otro se efectúa mediante las conocidas Transformaciones de Galileo.

11 En esta gráfica, la velocidad instantánea de la partícula en cada instante queda representada por la pendiente de la curva en cada punto, donde la pendiente -que se calcula como la derivada primera de la función en cada punto- adquiere valor cero cuando la tangente de la curva es horizontal, y aumenta progresivamente hasta que su valor tiende a infinito cuando la curva tiende a convertirse en una línea vertical.

12 Una ecuación dinámica en su forma diferencial es *t-invariante* si permanece invariante ante la inversión de signo de la variable *tiempo*. Por lo tanto, el proceso descripto por tal inversión también resulta físicamente posible.

13 La demostración de Mather y McGehee se basa en un trabajo previo de D. Saari (1972-73), quien probó que, para que existan singularidades donde algunas partículas "escapan" al infinito, es necesario que al menos una de las partículas manifieste un comportamiento oscilatorio.

14 Podría argumentarse que estas situaciones son imposibles sobre la base de que el conjunto de condiciones iniciales que conduce a ellas tiene medida nula -probabilidad nula-. Pero, en física, $Pr(h)=1$ no implica que el hecho h sea necesario y $Pr(h)=0$ no implica que h sea imposible. Esta característica de la probabilidad es particularmente relevante en el caso de funciones continuas de probabilidad, que asignan valor cero a conjuntos de medida nula, pero ello es consistente con la ocurrencia posible -si bien excepcional- de los hechos que componen dichos conjuntos; éste es el caso de la probabilidad en Mecánica Estadística, que adjudica $Pr=0$ a conjuntos de medida nula, si bien el sistema puede adoptar los estados pertenecientes a tales conjuntos.

15 En este artículo, que es el que cita Earman, Gerver no brinda una solución analítica al problema, sino sólo una solución que denomina "heurística", esto es, una serie de argumentos matemáticos que brindan alta plausibilidad a su resultado, pero que no constituyen una demostración rigurosa. Más recientemente, Gerver (1991) ha presentado una solución completa al problema; agradezco al árbitro anónimo la información acerca de esta referencia actualizada.

16 Un argumento análogo puede formularse en términos del Principio de Conservación del Momento Lineal.

17 Las interacciones físicas, además, cumplen con la conservación de la energía, que se relaciona con la invariancia respecto del origen temporal, y con la conservación del momento angular, que se relaciona con la invariancia respecto de la rotación.

18 Esto se cumple bajo el supuesto de que el sistema es conservativo; la negación de este supuesto conduce a las cuestiones que se tratarán en el próximo apartado.

19 Si bien aquí nos detendremos en la cuestión del determinismo, Hutchison enfrenta de un modo análogo el problema de la reversibilidad de la Mecánica Clásica.

20 Este resultado puede comprobarse notando que $x_3(0)=1$ y, siendo $x_3'(t) = t\,(1 - t^2)^{-3/2}$, se cumple que $x_3'(0)=0$, tal como exigen las condiciones iniciales de la partícula *3*.

21 Fuerzas conservativas son aquéllas cuyo valor sólo depende de la posición relativa entre las partículas que interactúan. Las fuerzas no conservativas, en cambio, pueden depender de otras variables, incluso dinámicas, como el tiempo o la velocidad de las partículas.

22 La ecuación de la onda en una dimensión se expresa: $\partial^2 y/\partial x^2 = 1/c^2\ \partial^2 y/\partial t^2$. Su solución general es $y(x, t) = Y\,sen\,(2\pi\,x/\lambda)\,cos\,(2\pi ct/\lambda)$, donde λ es la longitud de onda. Siendo L la longitud de la cuerda: en el caso de la cuerda fija en ambos extremos, $L = n\lambda/2$; en el caso de la cuerda fija en un extremo y libre en el otro, $L = (2n-1)\lambda/4$, con $n \geq 1$.

23 Incluso, el caso de choque perfectamente elástico no se resuelve mediante las leyes newtonianas sino por aplicación directa del Principio de Conservación del Momento Lineal.

24 Un caso típico es el de partículas puntuales que se aproximan indefinidamente, de modo tal que las fuerzas resultantes de su interacción gravitatoria tienden a infinito.

BIBLIOGRAFIA

Alonso, M.: 1998, *¿Somos Muy Conservadores en la Enseñanza de la Física?*, Las Palmas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Butterfield, J.: 1998, 'Determinism and Indeterminism', in Edward Craig (ed.): *Routledge Encyclopedia of Philosophy, Vol. 3*, London-New York, Routledge, pp. 33-39.

Earman, J.: 1986, *A Primer on Determinism*, Dordrecht-Boston-Lancaster-Tokyo, Reidel Publishing Company.

Février, P.: 1957, *Determinismo e Indeterminismo*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección General de Publicaciones.

Gerver, J.L.: 1984, 'A Possible Model for a Singularity without Collisions in the Five Body Problem', *Journal of Differential Equations* 52, 76-90.

Gerver, J.L.: 1991, 'The Existence of Pseudocollisions in the Plane', *Journal of Differential Equations* 89, 1-68.

Hughes, R.I.G.: 1989, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge, Harvard University Press.

Hutchison, K: 1993, 'Is Classical Mechanics Really Time-Reversible and Deterministic?', *The British Journal for the Philosophy of Science* 44, 307-323.

Lombardi, O.: 1998, 'La Teoría del Caos y el Problema del Determinismo', *Diálogos* XXXIII, 21-42.

Mather, J.N., McGehee, R.: 1975, 'Solutions of the Collinear Four-Body Problem Which Become Unbounded in a Finite Time', in J. Moser (ed.): *Dynamical Systems. Theory and Applications*, New York, Springer Verlag.

Montague, R.: 1974, 'Deterministic Theories', in *Formal Philosophy*, New Haven, Yale University Press.

Poincaré, H.: 1892, *Méthodes Nouvelles de la Mecanique Celeste*, Paris, Gauthier Villars.

Popper, K.: 1986, *El Universo Abierto*, Madrid, Tecnos.

Saari, D.G.: 1972-73, 'Singularities and Collisions of Newtonian Gravitational Systems', *Archives of Rational Mechanics* 49, 311-320.

Tolman, R.C.: 1938, *The Principles of Statistical Mechanics*, Oxford, Clarendon Press.

Wilson, M.: 1989, 'John Earman's *A Primer on Determinism*', *Philosophy of Science* 56, 502-532.

Olimpia Lombardi es Ingeniera en Electrónica y Licenciada en Filosofía -Orientación Lógica y Epistemología- por la Universidad de Buenos Aires. Es Profesora Titular de Maestría en Educación e Informática, en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Es autora de un libro (Eudeba, en prensa) y de artículos sobre aspectos filosóficos de la obra de Prigogine y sobre teoría del caos. Es también autora de artículos sobre epistemología y educación en ciencias. Actualmente investiga el tema del determinismo y de la irreversibilidad en física.