

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS IX JORNADAS

VOLUMEN 5 (1999), Nº 5

Eduardo Sota

Luis Urtubey

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



## Mecánica clásica y determinismo: ¿caso cerrado?

*Olimpia Lombardi.\**

La concepción determinista, 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 acerca de la estabilidad del sistema solar, en los últimos años del siglo se comenzó a reflexionar acerca de la distinción conceptual entre determinismo y predictibilidad: 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 determinista del universo sufrió su primer gran desafío: hasta hoy, todos los intentos de reformular la mecánica cuántica sobre la base del determinismo clásico han fracasado tanto teórica como experimentalmente. Desde aquellos años, el siglo XX ha presenciado un paulatino resquebrajamiento de la tradicional cosmología determinista en favor de la idea de un universo abierto a nuevas posibilidades.

Frente a este poderoso avance del indeterminismo, la mecánica clásica parecía mantenerse como una plaza inexpugnable: con ella podía seguir operando el demonio de Laplace, capaz de reconstruir todo el presente y todo el pasado del universo a partir de su estado en un instante. Pero, en 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. Precisamente, el objetivo de este trabajo consiste en presentar los más importantes argumentos dirigidos a rechazar el carácter determinista de la mecánica clásica (en adelante, MC). Si bien el análisis pormenorizado de cada uno de ellos excede los alcances de esta presentación, se formularán algunas consideraciones críticas que pueden servir como de partida de ulteriores desarrollos.

\* \* \*

Dadas las diferentes acepciones del término "determinista", conviene señalar que aquí se adoptará únicamente su sentido ontológico: las consideraciones gnoseológicas aparecerán sólo cuando sea necesario distinguir entre determinismo y predictibilidad. Denominaremos "determinismo ontológico" a la doctrina metafísica según la cual todos los sistemas reales son deterministas y, por tanto, también lo será el universo como un todo. En este sentido, el predicado "determinista" se aplica a un sistema real cuando, dado su estado en un cierto instante, su evolución posterior resulta físicamente necesaria; en otras palabras, si el sistema se encuentra en el estado  $e_1$  en el instante  $t_1$ , las leyes físicas hacen imposible que se encuentre en un estado diferente de  $e_2$  en  $t_2$ . El predicado "determinista" se convierte así en un término metafísico pues, aún cuando se habla de necesidad física, el significado de los conceptos de necesidad y posibilidad depende del marco metafísico adoptado para su elucidación.

Una interesante caracterización del determinismo ontológico es la que brinda Earman (1986) sobre la base de la noción de mundo posible, entendiendo por "mundo" el conjunto

\* Universidad de Buenos Aires.

de todos los eventos inscriptos en una estructura espacio-temporal de cuatro dimensiones; el mundo actual contiene todos los eventos pasados, presentes y futuros, y un mundo posible contiene todos los posibles eventos que constituyen historias alternativas a la del mundo actual. Sea  $\mathcal{W}$  el conjunto de todos los mundos físicamente posibles, esto es, que satisfacen las leyes de la física del mundo actual, el mundo  $W \in \mathcal{W}$  es determinista si, para cualquier  $W' \in \mathcal{W}$ , si  $W$  y  $W'$  coinciden en cierto instante, entonces coinciden para todo instante. La caracterización modal de Earman constituye la versión ontológica de la definición semántica de Montague (1974): la teoría  $T$  es determinista en ciertas variables de estado si, dados dos modelos cualesquiera de la teoría, si ambos coinciden en cierto instante, entonces coinciden para todo instante.

En general, las teorías físicas describen el comportamiento de sistemas dinámicos mediante ecuaciones diferenciales, donde la variable  $t$  actúa como variable independiente. La solución de tales ecuaciones describe la evolución temporal del sistema dadas las condiciones iniciales, y puede representarse como una trayectoria en el espacio de las fases correspondiente. Por lo tanto, el problema del determinismo se relaciona con la cuestión de la existencia y unicidad de las soluciones de las ecuaciones diferenciales; la representación de la evolución temporal en el espacio de las fases permite expresar en lenguaje geométrico estas propiedades: para cada punto representativo del estado inicial de un sistema dinámico, la trayectoria que en él se inicia existe y es única; dado que no hay restricciones para fijar dicho estado inicial, las trayectorias no pueden cortarse, esto es, no existe ningún estado a partir del cual el sistema admita dos o más evoluciones posibles.-

Si bien el análisis del problema del determinismo en términos de las propiedades de ecuaciones diferenciales puede resultar insuficiente para algunas teorías físicas, en el caso de la MC 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 mecánicos. En consecuencia, el problema se abordará desde este marco conceptual; la pregunta es: ¿describe realmente la MC un mundo determinista, tal como tradicionalmente se ha considerado?.

\* \* \*

El argumento en favor del carácter indeterminista de la MC más frecuentemente esgrimido pero, a la vez, más cuestionable, es el que se basa en los resultados de la llamada "teoría ergódica": teoría matemática que estudia las propiedades estadísticas de los sistemas dinámicos, considerados desde un punto de vista abstracto, esto es, con independencia de la teoría física que los gobierna (cfr. Lebowitz & Penrose, 1973). Este estudio permite clasificar los sistemas de acuerdo a su grado creciente de aleatoriedad:

- *sistema ergódico*: el punto representativo evoluciona pasando por todos los puntos del espacio de las fases accesibles al sistema.
- *sistema mezclador*: sistema ergódico en el cual las trayectorias que se inician en dos puntos cualesquiera divergen con el tiempo. Como consecuencia, cualquier región finita del espacio de las fases evoluciona deformándose de modo que, para  $t \rightarrow \infty$ , se ramifica sobre toda la región del espacio de las fases accesible al sistema.
- *sistema K*: sistema mezclador en el cual las trayectorias divergen exponencialmente. Como consecuencia, si se aplica una partición de grano grueso al espacio de las fases y

se identifica la trayectoria con la secuencia de celdas ocupadas por el punto representativo, los únicos macroeventos (ocupación de una celda) que pueden predecirse son los que tienen probabilidad 0 o 1 independientemente de la macrohistoria del sistema.

- *sistema Bernoulli*: sistema K en el cual todos los macroeventos son estadísticamente independientes: la descripción de la macrohistoria completa del sistema no brinda información alguna acerca del próximo macroestado.

¿Cómo se relaciona esta clasificación totalmente abstracta con el comportamiento de los sistemas mecánicos? Los sistemas Hamiltonianos integrables no pueden manifestar siquiera un comportamiento mezclador (su trayectoria en el espacio de las fases se mantiene confinada en un toro n-dimensional). Pero existen sistemas Hamiltonianos no integrables que, debido a su fuerte inestabilidad, exhiben propiedades estadísticas de mayor orden; por ejemplo, en 1963 Sinai demostró que un sistema de dos esferas rígidas moviéndose según las leyes de la mecánica en una caja rectangular de paredes perfectamente reflectoras es un sistema Bernoulli. Esto implica una completa impredecibilidad: dado que la precisión finita de nuestras mediciones introduce una partición de grano grueso en el espacio de las fases, aún conociéndose la macrohistoria completa del sistema, resulta totalmente imposible predecir sus macroestados futuros.

Sobre esta base, autores como Ford (1989) y Prigogine (1990) consideran que la existencia de sistemas mecánicos inestables manifiesta el carácter indeterminista de la MC. Pero, ¿estas propiedades estadísticas atentan realmente contra el determinismo ontológico? En la medida en que resultan de una partición finita del espacio de las fases, no indican la emergencia de más de una trayectoria a partir de un mismo punto. En este sentido, resulta particularmente adecuada la distinción de Earman (1986) entre "micro" y "macro" aleatoriedad: los sistemas K exhiben una macro-aleatoriedad compatible con su micro-determinismo. La micro-aleatoriedad, si se probara irreductible, constituiría un grave escollo para el determinismo ontológico; pero la macro-aleatoriedad, en tanto propiedad gnoseológica, no permite aún extraer conclusiones ontológicas acerca del carácter determinista del sistema. La teoría ergódica muestra, incluso, que el carácter micro-determinista de un sistema no sólo es compatible sino puede originar una macro-aleatoriedad; por lo tanto, constituye un excelente argumento para el determinista ontológico, quien puede así señalar que muchos procesos aparentemente aleatorios en realidad responden a regularidades deterministas subyacentes.

\* \* \*

Desde una perspectiva totalmente diferente, Earman (1986) rechaza el carácter determinista de la MC prescindiendo de toda consideración gnoseológica. La estrategia consiste en producir contraejemplos: sistemas mecánicos que no responden a la caracterización de determinismo previamente formulada. En particular, Earman describe una serie de casos tomados de un ámbito paradigmáticamente newtoniano: el movimiento de partículas puntuales que interactúan gravitatoriamente. Por ejemplo, presenta un sistema de cuatro partículas puntuales que se mueven colinealmente de un modo particular, pudiendo probarse que existe un tiempo finito  $t^*$  tal que, para  $t \rightarrow t^*$ , las coordenadas de todas ellas tienden a infinito. Dado que las leyes newtonianas son invariantes bajo la inversión temporal, tal inversión conduce a una situación en la cual el universo permanece vacío hasta  $t^*$ , pero inmediatamente después aparecen cuatro partículas desde el infinito espacial. Considerando la

naturaleza de este caso, podría suponerse que el problema se origina en las colisiones; sin embargo, Earman presenta un nuevo ejemplo con 5 masas puntuales coplanares que nunca colisionan: también aquí existe un tiempo finito  $t^*$  tal que, para  $t \rightarrow t^*$ , las partículas desaparecen del universo. Al comentar estos ejemplos, Hutchison (1993) sostiene 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.

Pero, ¿constituyen estos casos una prueba definitiva del carácter indeterminista de la MC? El propio Earman señala las posibles estrategias que eliminarían estas “soluciones de escape” para, a continuación, considerarlas ilegítimas. Una primera posibilidad es la de imponer condiciones de contorno en el infinito, pero se trataría de una movida *ad hoc* con el único objeto de restaurar el determinismo. La segunda posibilidad consiste en introducir nuevas leyes como, en este caso, las de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Según Earman, el principio de conservación de la masa sostiene que (a) “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 ellas” y no que (b) “para todo  $t_1$  y  $t_2$ , la masa total en  $t_1$  es igual a la masa total en  $t_2$ ”: si bien (a) implica (b), no son equivalentes puesto que (b) impide las “soluciones de escape” al presuponer que el universo es cerrado.

La pregunta es: ¿por qué resulta legítimo considerar el universo abierto y no cerrado? La respuesta de Earman parece suponer que los principios de conservación sólo son válidos en la medida en que puedan deducirse de las leyes newtonianas. Por ejemplo, Earman afirma que adoptar el principio de conservación de la cantidad de movimiento para el universo completo implica suponer su carácter cerrado, puesto que sólo en los sistemas cerrados el principio puede probarse como teorema a partir de las leyes de Newton. Pero este argumento no es totalmente correcto. Independientemente del momento histórico de su formulación, los principios de conservación son considerados principios fundamentales de la física, de validez incluso interteórica. El mayor alcance de los principios se comprueba, por ejemplo, en el caso del estudio de colisiones elásticas mediante la conservación de la cantidad de movimiento, caso en el cual la segunda ley de Newton resulta inaplicable debido a la aceleración infinita de los cuerpos en el punto de contacto: no sería un procedimiento adecuado dejar que un “teorema” decidiera qué sucede en los casos en los que el “axioma” resulta inaplicable. En resumen, la validez universal de los principios de conservación —que implica la aceptación del carácter cerrado del universo— constituye el supuesto básico de la MC y no una mera estrategia *ad hoc* a la cual el empecinado determinista debe recurrir para salvar su doctrina de la refutación.

\*

\*

\*

Un nuevo argumento en contra del carácter determinista de la MC es el que brinda Hutchison (1993) pero, en este caso, no para afirmar su indeterminismo, sino para sostener la neutralidad de la mecánica clásica respecto del problema.

Hutchison sostiene que quienes argumentan en favor del carácter determinista de la MC, lo hacen a partir de las ecuaciones Lagrangianas de movimiento, para las cuales se cumplen las condiciones de existencia y unicidad de las soluciones. Pero la formulación Lagrangiana no resulta equivalente a las leyes de Newton, en la medida en que su derivación exige un supuesto adicional acerca de las fuerzas que actúan sobre el sistema: en particular, se asume que las fuerzas entre los cuerpos son conservativas, esto es, sólo dependen de la configura-

ción geométrica del sistema. En muchos casos tal supuesto se satisface (por ejemplo, cuando sólo intervienen interacciones gravitatorias), pero en otras situaciones no se cumple, en especial, 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 el ejemplo de una partícula que, partiendo del reposo, se mueve bajo la acción de una única fuerza que varía con la raíz cuadrada de la velocidad; la segunda ley de Newton permite formular la ecuación del movimiento; dadas las condiciones iniciales de reposo y velocidad nula, puede demostrarse que las soluciones pertenecen a una familia parametrizada de funciones de modo tal que, para cada valor del parámetro, se obtiene una posible evolución temporal del sistema.

Sobre la base de estas consideraciones, Hutchison concluye que la MC 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 las fuerzas: la MC es, en sí misma, totalmente neutral respecto del determinismo.

Este argumento permite reflexionar acerca de la importancia de identificar con precisión la teoría bajo estudio. En nuestro caso, ¿qué es la MC? Sin duda, ya no puede ser considerada la combinación entre las tres leyes de Newton y la ley de gravitación universal. Hutchison tiene razón cuando sostiene que la MC es una teoría que nada afirma acerca de la naturaleza de las fuerzas que actúan sobre un sistema: en ese sentido, se encuentra en un nivel de descripción diferente al de aquellas teorías que, como la gravitación o el electromagnetismo, describen los diferentes tipos de interacción presentes en la naturaleza. Sin embargo, el determinista podría replicar que las fuerzas a las que alude el autor, como las de rozamiento, no son fuerzas elementales sino puramente fenomenológicas, reductibles a interacciones que operan en la microestructura del sistema; pero las fuerzas básicas que pueden intervenir en las leyes de Newton son la gravitatoria y la electromagnética, y en ambos casos se trata de fuerzas conservativas. Si bien este argumento puede jugar en favor del determinismo en tanto posición metafísica, no invalida la conclusión de Hutchison acerca de la neutralidad de la MC: si mañana se descubriera una fuerza elemental no conservativa, sería absurdo suponer que, de pronto, la MC se ha vuelto indeterminista sin cambiar en absoluto su formulación original.

\*

\*

\*

En su crítica al trabajo de Earman, Wilson (1989) brinda un enfoque totalmente diferente del problema a partir de una crítica al análisis tradicional que pretende inferir la conclusión acerca del carácter determinista o indeterminista de una teoría como un resultado metateórico basado exclusivamente en su estructura sintáctica y semántica.

Wilson sostiene que la ruptura del determinismo debida al no cumplimiento de las condiciones de existencia o 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? La estrategia general consiste en suplementar o modificar la des-

cripción 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 la modelización de la situación física original. Así, por ejemplo, en los fenómenos de colisión, las tres leyes de Newton se suplementan mediante los necesarios principios de conservación; o en presencia de singularidades, se renormalizan las variables para obtener ecuaciones sin "rupturas"; o en el caso en que la energía potencial tienda a infinito debido al acercamiento indefinido entre partículas, se concluye que la existencia de sistemas de masas puntuales que interactúan sólo gravitacionalmente no es una genuina posibilidad física.

Una de las críticas que Wilson señala es la escasa atención que Earman brinda al problema de las condiciones de contorno. Dado que muchas situaciones mecánicas se describen mediante ecuaciones en derivadas parciales, el establecimiento de las condiciones de contorno adecuadas se convierte en un problema central y, en muchos casos, de gran dificultad matemática; el trabajo del físico consiste, precisamente, en encontrar condiciones de contorno que permitan la descripción unívoca de la evolución temporal del sistema bajo estudio. Según Wilson, las condiciones de contorno no juegan un papel pasivo como supone la perspectiva filosófica tradicional, que ubica el "contenido nomológico" de la teoría únicamente en las leyes expresadas como ecuaciones diferenciales.

Sobre la base de esta argumentación, Wilson rechaza una doctrina ampliamente aceptada en la filosofía de la ciencia contemporánea, según la cual la tesis del determinismo debe ser inferida a partir de la estructura de la teoría; por tanto, asumida como axioma, resulta o bien redundante o bien inconsistente con la propia teoría. Según Wilson, por el contrario, la MC incluye el determinismo como axioma: es precisamente su aceptación implícita lo que guía el trabajo del físico en su tarea de modelización de los sistemas mecánicos.

Nuevamente, aquí el eje de la discusión es la pregunta ¿qué es la MC? Wilson se distancia de la posición tradicional que considera la teoría, en tanto conjunto de leyes, como la unidad de análisis epistemológico. Por el contrario, su posición parece ajustarse a la noción kuhiana de paradigma (Kuhn, 1987): un paradigma incluye, no sólo las generalizaciones simbólicas, sino también los modelos con sus respectivos compromisos teóricos, y los ejemplares, en tanto soluciones de problemas concretos que sirven de guía para la resolución de nuevos problemas. Desde esta perspectiva, la MC no se limita a las leyes newtonianas (o ciertos principios de conservación); también abarca 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; y el determinismo representa uno de los compromisos metafísicos que, al guiar la resolución de los ejemplares, se convierte en un elemento constitutivo y esencial de la mecánica clásica concebida como paradigma.

\*

\*

\*

En el presente trabajo no se pretende haber agotado la discusión acerca del problema del determinismo de la MC: cada uno de los argumentos presentados merece un detenido análisis que excede esta presentación. Sin embargo, la revisión crítica aquí efectuada permite señalar ya un aspecto relevante de la discusión: la concepción epistemológica acerca de las unidades básicas que constituyen una disciplina científica 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 MC no puede considerarse en modo alguno un caso cerrado.

### **Bibliografía**

- Earman, J. (1986), *A Primer on Determinism*, Reidel, Dordrecht.
- Ford, J. (1989), "What is Chaos, That We Should Be Mindful of It?", en Paul Davies (ed.), *The New Physics*, Cambridge University Press, Cambridge Ma.
- Hutchison, K. (1993), "Is Classical Mechanics Really Time-reversible and Deterministic?", *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol.44, pp.307-323.
- Kuhn, T. S. (1987), "Algo más sobre los Paradigmas", en *La Tensión Esencial*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Lebowitz, J. L. & Penrose, O. (1973), "Modern Ergodic Theory", *Physics Today*, Vol.23, pp.23-29.
- Montague, R. C. (1974), "Deterministic Theories", en R. H. Thomason (ed.) *Formal Philosophy*, Yale University Press, New Haven Ct.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1990), *La Nueva Alianza*, Alianza Madrid.
- Wilson, M. (1989), "Critical Notice: John Earman's *A Primer on Determinism*", *Philosophy of Science*, Vol.56, pp.502-532.