Determinismo en física: la dimensión de lo posible

Determinism in physics: the dimension of possibility

OLIMPIA LOMBARDI

CONICET - Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales /
Facultad de Filosofía y Letras
CP 1430 Buenos Aires (Argentina)
olimpiafilo@arnet.com.ar

MARIANA CÓRDOBA

CONICET - Facultad de Filosofía y Letras,
Universidad de Buenos Aires
CP 1427 Buenos Aires (Argentina)
marianacordoba16@yahoo.com.ar

Abstract: In the present article we approach the issue of ontological determinism in physics. We propose a clarification of the concept of possibility that is useful for addressing this issue. By means of this clarification, the concept of probability can be given an interpretation that is meaningful for the practice of theoretical physics. Finally, these clarified concepts of possibility and probability are applied to the paradigmatic case of highly unstable systems, and it is argued that in this domain determinism and indeterminism can coexist in a single classical system.

Keywords: Ontological determinism, possibility, probability, high instability.

Resumen: En el presente artículo abordaremos la cuestión del determinismo ontológico en física. Proponemos una elucidación del concepto de posibilidad que resulte útil para tratar el problema del determinismo ontológico en física, y mediante la cual pueda interpretarse el concepto de probabilidad de un modo significativo para la práctica de la física teórica. Finalmente, los conceptos previamente elucidados se aplican a un caso paradigmático de la física, el de los sistemas altamente inestables, argumentando que en este ámbito determinismo e indeterminismo ontológicos pueden coexistir en un único sistema clásico.

Palabras clave: Determinismo ontológico, posibilidad, probabilidad, alta inestabilidad.

RECIBIDO: JUNIO DE 2012 / ACEPTADO: ENERO DE 2013

1. INTRODUCCIÓN

La gran revolución científica de la Modernidad instauró la imagen del universo-reloj: un universo que se comporta como un mecanismo de relojería en el cual todos los cambios se encuentran regidos por leyes deterministas. Es en tal universo que el demonio de Laplace puede reconstruir todo el pasado y prever todo el futuro sobre la base del estado presente, si bien nosotros, como sujetos finitos, debemos contentarnos con el conocimiento limitado que nos brinda el cálculo presentado en el *Essai Philosophique sur les Probabilités*.

La formulación del electromagnetismo, que alcanzó su versión definitiva a fines del siglo XIX con los trabajos de Maxwell, si bien puso en crisis la imagen mecanicista del universo, mantuvo inalterada la concepción determinista subyacente. La primera aparición de los métodos estadísticos en física adviene con la mecánica estadística clásica, también a fines del siglo XIX; sin embargo, las probabilidades utilizadas podían aún interpretarse a la manera Laplaciana, esto es, como medida de nuestra ignorancia y, por lo tanto, resultaban totalmente compatibles con el determinismo de las evoluciones clásicas subyacentes.

El problema del determinismo en la física sufre un viraje conceptual con la formulación de la mecánica cuántica en las primeras décadas del siglo XX. Algunos autores vieron en esta nueva teoría la muerte definitiva del determinismo; otros prefirieron eludir el problema adoptando una posición instrumentalista; finalmente, los menos optaron por asumir la incompletitud de la teoría, defendiendo la posibilidad de una nueva formulación que recuperase el determinismo. De todos modos, la irrupción de la mecánica cuántica pone la cuestión en primer plano, y permite pensar en un concepto ontológico de determinismo, no interpretable en términos de conocimiento o creencias subjetivas.

En el presente trabajo abordaremos la cuestión del *determinismo ontológico en física*. Este problema ha sido tematizado principalmente sobre la base del concepto de probabilidad, sin hacer intervenir la noción de posibilidad. Sin embargo, cuando se intenta caracterizar el concepto de determinismo, en particular el ontológico, la idea de

posibilidad suele aparecer de uno u otro modo. En el presente trabajo brindaremos una elucidación del concepto de posibilidad que resulte útil para tratar el problema del determinismo ontológico en física, y mediante el cual pueda interpretarse el concepto de probabilidad de un modo significativo para la práctica de la física teórica.

Con este fin, comenzaremos por distinguir diferentes sentidos del término ‘determinismo’, a fin de focalizar nuestro interés en el determinismo ontológico. En segundo lugar, distinguiremos distintas nociones de posibilidad, identificando aquella que resulta relevante para el problema del determinismo ontológico en física. A continuación, interpretaremos el concepto de probabilidad en términos de la noción de posibilidad recién formulada de modo que, a diferencia de la probabilidad subjetiva, resultará relevante para el problema de interés. Esta tarea nos permitirá analizar la discusión en torno del determinismo tal como se ha desarrollado tradicionalmente en el ámbito de la física. Finalmente, se aplicarán los conceptos previamente elucidados a un caso paradigmático de la física, el ámbito de los sistemas altamente inestables, donde se argumentará que determinismo e indeterminismo ontológicos pueden coexistir en un mismo sistema clásico.

2. ‘DETERMINISMO’ SE DICE DE MUCHAS MANERAS

El problema del determinismo es, sin duda, una de las cuestiones metafísicas tradicionales de la filosofía. ¿Las secuencias de acontecimientos según las cuales se organiza la realidad se encuentran totalmente determinadas?, ¿o, por el contrario, el futuro está abierto a diferentes posibilidades, cada una de ellas no unívocamente determinada por el pasado? El problema tiene una larga historia, tan larga como la de la filosofía misma, pues hace ya su aparición en el pensamiento de los atomistas griegos y continúa discutiéndose hasta la actualidad en el ámbito de la ciencia. A su vez, el concepto mismo de determinismo ha recibido múltiples caracterizaciones, desde aquellas que lo vinculan con la causalidad o la predictibilidad, hasta las que pretenden definirlo en términos exclusivamente científicos. En el presente trabajo no nos ocuparemos de tales caracterizaciones, sino que comenzaremos por elucidar los diversos sentidos con los

cuales suele utilizarse el término ‘determinista’ en las discusiones acerca del problema en física¹:

- 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, su solución fija unívocamente el valor de dichas variables en todo instante posterior. Si las soluciones se representan en un espacio de las fases, esto implica que las trayectorias no pueden cortarse, esto es, no existe ningún punto del espacio de las fases del cual emerja más de una trayectoria².
- En un segundo sentido, que denominaremos *gnoseológico*, el predicado ‘determinista’ se aplica a nuestro conocimiento: se dice que poseemos un conocimiento determinista acerca de un sistema real cuando el conocimiento de su estado en un dado instante permite conocer unívocamente su estado en todo instante posterior. Sin embargo, así expresado, el sentido gnoseológico resulta demasiado restrictivo: la práctica científica señala que 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 utilizado³; además, la teoría de propagación de errores permite calcular la evolución de las imprecisiones iniciales con el transcurso del tiempo. En consecuencia, a fin de evitar su vacuidad parece conveniente debilitar el sentido gnoseológico según la siguiente versión:

-
1. O. LOMBARDI, *La teoría del caos y el problema del determinismo*, “Diálogos” 33/72 (1998) 21-42.
 2. Matemáticamente, las ecuaciones deben cumplir las condiciones necesarias para asegurar la *existencia* y la *unicidad* de sus soluciones para cada conjunto de valores de las variables dependientes. En el caso de ecuaciones diferenciales ordinarias, las condiciones que aseguran existencia y unicidad son simples y están bien establecidas: ver, por ejemplo, N. PISKUNOV, *Cálculo Diferencial e Integral* (Limusa, México, 1994). En el caso de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, tales condiciones no pueden establecerse de un modo tan sencillo.
 3. R. BISHOP, *On separating predictability and determinism*, “Erkenntnis” 58/2 (2003) 169-188.

se dice que poseemos un conocimiento determinista acerca de un sistema cuando el conocimiento de su estado en un dado instante permite conocer unívocamente sus estados en los instantes posteriores dentro de un margen de error acotado por el interés particular que mueve la investigación.

- En un tercer sentido, que denominaremos *ontológico*, el predicado ‘determinista’ se aplica a los sistemas reales, en nuestro caso, físicos. Se dice que un sistema es determinista cuando, dado su estado en un cierto instante, su evolución para todo instante 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 (en tanto regularidades ontológicas⁴) hacen imposible que se encuentre en un estado diferente de e_2 en t_2 .

Con el auge de la filosofía analítica durante gran parte del siglo XX, muchos autores intentaron evitar las cuestiones ontológicas restringiéndose a la acepción semántica de ‘determinismo’. En un trabajo pionero en este tipo de enfoque, Richard Montague⁵ define el concepto de determinismo del siguiente modo: una *teoría T* es determinista si y sólo si, dados cualesquiera dos modelos de *T*, si coinciden para un instante t_0 , entonces coinciden para todo instante t . El retroceso de la filosofía analítica a fines del siglo XX permitió que algunos autores efectuaran un giro ontológico en el tratamiento del problema del determinismo. Este es el caso de John Earman quien abandona el enfoque lingüístico de sus trabajos anteriores⁶, afirmando:

“Dado que el determinismo es una doctrina acerca de la naturaleza del mundo, ningún problema se evita mediante este rodeo

-
4. La discusión detallada del concepto de ley natural excede por completo los límites del presente trabajo y haría imposible avanzar hacia el concepto de determinismo. No obstante, es conveniente insistir que aquí no consideramos las leyes naturales (entre las cuales se cuentan las leyes de la física) como ítems lingüísticos sino como “*patrones objetivos*”, utilizando los términos de M. BUNGE, *Treatise on Basic Philosophy, Vol. 3: Ontology I* (Reidel Publishing Company, Dordrecht-Boston, 1977) 173.
 5. R. MONTAGUE, *Deterministic theories*, en R. THOMASON (ed.), *Formal Philosophy* (Yale University Press, New Haven, 1974) 303-359.
 6. J. EARMAN, *Laplacian determinism, or is this any way to run a universe?*, “The Journal of Philosophy” 68/21 (1971) 729-744.

lingüístico. [...] Si los filósofos invirtieran menos tiempo intentando alcanzar para el determinismo la precisión ‘superficial’ permitida por la notación simbólica formal e invirtieran más tiempo en estudiar el contenido de las teorías físicas, se enfrentarían a los realmente fascinantes desafíos sustantivos que el determinismo debe afrontar en física clásica y relativista”⁷.

Desde esta perspectiva, Earman define el concepto de determinismo mediante el recurso a la noción de *mundo posible*, 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* si y sólo si, para cualquier $W' \in \Xi$, si W y W' coinciden en cierto instante, entonces coinciden para todo instante⁸. Aun antes, David Lewis también definía el concepto de determinismo en términos de mundos posibles:

“Por determinismo no entiendo una tesis de causación universal o una predictibilidad-en-principio universal, sino lo siguiente: las leyes de la naturaleza vigentes son tales que no existen dos mundos posibles que son exactamente idénticos hasta cierto tiempo, que difieren de allí en adelante, y en los cuales tales leyes nunca se violan”⁹.

Pero tal vez sea la formulación de William James la que, sin recurrir a la noción de mundo posible, mejor captura el núcleo central de la idea de determinismo ontológico:

7. J. EARMAN, *A Primer on Determinism* (Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1986) 20-21.

8. *Ibidem*, 13.

9. D. LEWIS, *Causation*, “Journal of Philosophy” 70/17 (1973) 556-567, 557.

“¿Qué sostiene el determinismo? Sostiene que aquellas partes del universo ya establecidas fijan y sentencian absolutamente lo que serán las demás partes. El futuro no tiene posibilidades ocultas en su seno: la parte que llamamos presente es compatible sólo con una totalidad. Cualquier otro complemento futuro que el fijado desde la eternidad es imposible”¹⁰.

Las caracterizaciones de determinismo ontológico aquí presentadas ponen de manifiesto que la noción modal de posibilidad siempre aparece bajo alguna forma. Por lo tanto, una comprensión más acabada del concepto de determinismo en su sentido ontológico requiere una previa elucidación de la noción de posibilidad, tarea que abordaremos en la próxima sección.

3. POSIBILIDAD: ACTUALISMO VERSUS POSIBILISMO

Muchas presentaciones del tema suelen comenzar introduciendo la distinción entre posibilidad lógica y posibilidad física. Sin embargo, esta estrategia no pone el suficiente énfasis en los diferentes ítems a los que puede aplicarse el predicado ‘posible’. Por este motivo, preferimos seguir a Mario Bunge, quien comienza diferenciando entre posibilidad *de dicto* y posibilidad *de re*¹¹. La *posibilidad de dicto* se predica de proposiciones o enunciados, y siempre es relativa a una teoría o, en general, a un cuerpo de conocimiento. En el caso particular de la posibilidad lógica, se dice que un enunciado p es lógicamente posible en relación a una teoría T si y sólo si de T no se deriva $\neg p$ ¹². Pero también pueden caracterizarse la posibilidad

10. W. JAMES, *The dilemma of determinism*, en *The Will to Believe* (Dover Publications, New York, 1897 [1956]) 150.

11. M. BUNGE, *op. cit.*, 165. En diversas partes del presente trabajo se tomará en cuenta lo que Bunge afirma en esta obra, puesto que se trata de uno de los pocos autores que se preocupa por elucidar detenidamente el concepto de posibilidad antes de abordar el concepto de probabilidad.

12. Nótese que esta tradicional caracterización de posibilidad lógica parece no tomar en cuenta el caso en que la teoría T es o se basa en una lógica paraconsistente, donde en algunos casos puede derivarse p y $\neg p$ sin que ello trivialice el sistema; véase N. DA COSTA, D. KRAUSE y O. BUENO, *Paraconsistent logics and paraconsistency*, en D. JACQUETTE (ed.), *Handbook of the Philosophy of Science. Philosophy of Logic*

matemática, la posibilidad epistémica y la posibilidad metodológica como otras formas particulares de la posibilidad *de dicto*¹³.

No obstante, si la cuestión de interés es la referida al determinismo ontológico, cobra relevancia la *posibilidad de re*, que se predica de ítems factuales, en particular, de hechos concebidos como estados de cosas, por ejemplo, la aplicación de una propiedad a un objeto o la relación entre dos o más objetos, o de eventos, entendidos como el acaecer de un hecho. En este segundo sentido, posibilidad es una categoría estrictamente ontológica. A este tipo de posibilidad nos referiremos en adelante.

Aún bajo la influencia de tesis de corte positivista-lógico, según las cuales los únicos conceptos científicos legítimos son aquellos pasibles de definición en términos empíricos, muchos físicos manifiestan profundas dificultades cuando intentan precisar su postura acerca del determinismo y su relación con la posibilidad. Algunos llegan incluso a negar la idea misma de indeterminismo sobre la base de que, en definitiva, en la realidad “*el sistema seguirá uno u otro camino y, en cualquier caso, algo ocurre realmente*”¹⁴. Estos autores suponen que lo real se reduce a lo actual y, por tanto, cancelan la idea misma de posibilidad del ámbito de la ciencia; tal posición *actualista* los ciega a la distinción posible-actual. En el ámbito de la filosofía, el actualismo se ha manifestado en los diversos intentos de construir lo posible en función de lo actual. Esta es la perspectiva adoptada, ya en la antigüedad, por Diodoro Crono; en palabras de Cicerón: “*Diodoro define lo posible como lo que es o será*”¹⁵. La misma idea expresa Bertrand Russell cuando afirma que ‘posible’ significa ‘a veces’, mientras que ‘necesario’ significa ‘siempre’¹⁶. El intento de definir lo posible en función de lo actual impide concebir posibles no actualizados.

Desde un enfoque opuesto al actualismo, el *posibilismo* concibe la posibilidad como una categoría ontológica irreductible. Uno de

(Elsevier, Amsterdam, 2007) 791-911.

13. M. BUNGE, *op.cit.*, 166.

14. P. LANDSBERG, *La búsqueda de la certeza en un universo probabilístico*, en J. WAGENSBERG (ed.), *Proceso al Azar* (Tusquets, Buenos Aires, 1992) 80.

15. W. KNEALE y M. KNEALE, *The Development of Logic* (Clarendon Press, Oxford, 1962 [1988]) 117.

16. M. BUNGE, *op.cit.*, 164.

los primeros intentos de caracterizar este tipo de posibilidad, que denominaremos *posibilidad ontológica*, es el del estoico Crisipo, quien definió lo posible como “*aquello a lo cual nada impide suceder, aun cuando no suceda*”¹⁷. Desde esta perspectiva, posibilidad es una categoría ontológica diferente de la de actualidad, si bien ambas se subsumen bajo la noción de realidad: de este modo, lo real se desdobra en lo real posible y lo real actual. No obstante, la definición de Crisipo es aún demasiado general: ¿qué es aquello capaz de impedir que algo, un hecho o un evento, suceda? Según el tipo de respuesta que se adopte, serán diferentes los conceptos de posibilidad ontológica resultantes: posible puede interpretarse como lo que los principios lógicos, entendidos ontológicamente, no impiden; o lo que Dios no impide; o lo que la naturaleza no impide¹⁸. No obstante, cuando el objetivo es investigar el problema del determinismo ontológico en el ámbito científico, el concepto de posibilidad ontológica que resulta pertinente es el que se refiere a las leyes naturales: posible es aquello que no impiden las leyes de la naturaleza, consideradas como regularidades inscriptas en el plano de lo real. A lo largo del trabajo sólo nos referiremos a este tipo de posibilidad, restringiéndonos al caso de las leyes de la física.

Muchos autores rechazan una ontología de *possibilia* no actuales sobre la base de que no existe un criterio de identidad no trivial para ítems no actuales¹⁹. A fin de enfrentar este desafío, los posibilistas han desarrollado diferentes estrategias destinadas a la identificación de *possibilia*: mundos posibles, subsistencia como diferente de existencia, etc. En estas discusiones se consideran ejemplos como el de la posibilidad de la existencia de Vulcano como un planeta

17. W. KNEALE y M. KNEALE, *op. cit.*, 123.

18. Nótese que aquí aparece otra noción que también podría denominarse ‘posibilidad lógica’: la que hace que sea posible el hecho de que un cuerpo sea esférico y rojo pero que sea imposible el hecho de que un cuerpo sea rojo y no rojo. Esta posibilidad lógica *de re*, se distingue de la posibilidad lógica *de dicto* definida más arriba en la medida en que ambas se predicán de ítems diferentes, lingüísticos y factuales respectivamente. La tradicional presentación en términos de la distinción entre probabilidad lógica y probabilidad física no permite recoger estas distinciones.

19. Ver, por ejemplo, W. V. O. QUINE, *On what there is*, en *From a Logical Point of View* (Harper, Nueva York, 1953) 1-19.

más cercano al Sol que Mercurio, o el de la posibilidad de que Julio César tuviera un sexto dedo en su mano derecha. Pero éstas no son situaciones que resulten relevantes en el tratamiento del problema del determinismo en física: aquí no se requiere una teoría omniabaricante de la posibilidad, que pudiera aplicarse a cualquier tipo de hecho posible —suponiendo que tal cosa fuera posible—. La noción de posibilidad ontológica que nos interesa aquí es la que se refiere a los hechos que describe la física: son las teorías físicas las que definen el espacio de la posibilidad ontológica. En lo que sigue nos referimos a este tipo de posibilidad, a la cual denominaremos *posibilidad física*: una posibilidad *de re*, ontológica (posibilista), definida por las leyes de la física.

Algunos autores, si bien admiten una relación entre legalidad y posibilidad, consideran que lo necesario se identifica con lo legal; éste es el caso de Montague, quien define lo físicamente necesario como lo deducible de un cierto conjunto de leyes físicas previamente especificadas²⁰. Sin embargo, con independencia del modo en que se conciban filosóficamente las leyes naturales, no es éste el modo en el que son entendidas las leyes respecto de lo posible en la práctica de la física: las leyes no fijan lo que ha de suceder, sino sólo lo que *puede suceder*. Lo que efectivamente sucede no depende exclusivamente de las leyes sino, además, de ciertas circunstancias particulares del fenómeno en cuestión. Por ejemplo, la ley general de los gases ideales, $PV/nT=R$, donde R es una constante universal, establece las combinaciones *posibles* entre los valores de presión P , volumen V , temperatura T y número de moles n en un gas en equilibrio; pero el valor que adquieren las cuatro magnitudes en un gas particular depende de su cantidad, del volumen del recipiente que lo contiene, de la rigidez o no de sus paredes, etc. El caso paradigmático es el de las leyes dinámicas: por ejemplo, la segunda ley de Newton en su forma diferencial, $d^2x/dt^2=F/m$, donde x representa la posición espacial, sólo establece las trayectorias que *puede* describir un cuerpo de masa m sometido a una fuerza F ; pero cuál de todas las trayec-

20. R. MONTAGUE, *op. cit.* Recuérdese que, como fue señalado más arriba, Montague se mueve en el ámbito semántico y, por tanto, entiende las leyes naturales como ítems lingüísticos y la posibilidad como posibilidad *de dicto*.

torias posibles se actualizará depende de la posición inicial y de la velocidad inicial del cuerpo considerado. En otras palabras, una ley física divide el ámbito de lo posible del ámbito de lo imposible; por ejemplo, la teoría especial de la relatividad fija como imposible que un cuerpo posea una velocidad superior a la de la luz. Dentro del ámbito de lo posible, las leyes físicas fijan algunos hechos necesarios como, por ejemplo, los referidos a ciertas propiedades elementales como la carga eléctrica del electrón o la masa de ciertas partículas subatómicas; pero ello no implica que legalidad deba identificarse con necesidad.

En resumen, contrariamente a lo que suponen algunos filósofos actualistas, la física utiliza un concepto de posibilidad ontológica irreductible al plano de lo actual; cuando el físico afirma la imposibilidad de señales superlumínicas no alude meramente a su inexistencia *de facto*: tales señales *no pueden* existir en una realidad regida por las leyes relativistas. A su vez, no todo lo físicamente posible se actualiza en algún momento: para que un hecho posible efectivamente ocurra deben darse ciertas circunstancias, sin las cuales el hecho permanece en el ámbito de la posibilidad. De acuerdo con la mecánica estadística, es posible que todas las moléculas de un gas confinado en un recipiente rectangular se agolpen espontáneamente en una de sus esquinas, aun cuando esto quizás nunca suceda en toda la historia del universo. El tránsito de lo posible a lo actual desde la perspectiva física tiene mucho más en común con las categorías aristotélicas de potencia y acto que lo que comparte con la epistemología positivista y su interpretación actualista de la posibilidad²¹.

21. Cabe señalar que la noción de posibilidad que aquí se presenta nada tiene que ver con la llamada 'teoría de la posibilidad' (*possibility theory*) desarrollada en el ámbito de la inteligencia artificial, donde el conjunto de proposiciones sobre las que se predica posibilidad son creencias de un agente inteligente, conjunto que suele denominarse 'base de creencias' (D. DUBOIS y H. PRADE, *Possibility Theory* (Plenum Press, New York, 1988). Como los propios autores de la teoría señalan, "*su mayor motivación es una tratamiento más fiel [faithful] del conocimiento incompleto*" (D. DUBOIS y H. PRADE, *Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics: A clarification*, "Annals of Mathematics and Artificial Intelligence" 32/1-4 (2001) 35-66, 35); tal noción no tiene utilidad para elucidar el concepto de posibilidad física que aquí se propone.

4. POSIBILIDAD CONDICIONAL

En la caracterización de determinismo ontológico formulada en la Sección 2 se dijo que un sistema es determinista cuando, si 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 . En esta formulación vemos que se predica imposibilidad de hechos que, sin embargo, resultan físicamente posibles, esto es, no se encuentran legalmente prohibidos. No obstante, esta doble predicación no resulta contradictoria pues, si bien en ambos casos se trata de posibilidad física, el concepto de posibilidad es utilizado en dos sentidos diferentes. En un caso se habla de posibilidad en un sentido absoluto: posibilidad como legalidad. En el caso de la caracterización de determinismo se utiliza una noción de posibilidad relativa a la ocurrencia de otro hecho, que podría denominarse *posibilidad física condicional*: un hecho b_2 es —físicamente— *condicionalmente posible* respecto de otro hecho b_1 [$P(b_2/b_1)$] si, dada la ocurrencia de b_1 , las leyes físicas no impiden la ocurrencia de b_2 ; un hecho b_2 es —físicamente— *condicionalmente necesario* respecto de otro hecho b_1 [$N(b_2/b_1)$] si, dada la ocurrencia de b_1 , las leyes físicas fijan unívocamente la ocurrencia de b_2 . En otras palabras, la ocurrencia de un hecho restringe el espectro de la posibilidad a un conjunto de hechos incluido en el conjunto total de los hechos físicamente posibles. Tal restricción puede ser de dos tipos:

- Dada la ocurrencia de b_1 , el conjunto de lo condicionalmente posible es un conjunto unitario cuyo único elemento es b_2 . En este caso, b_2 no sólo es *condicionalmente posible* respecto de b_1 sino también *condicionalmente necesario* respecto de b_1 [$P(b_2/b_1)$ y $N(b_2/b_1)$]. Aquí, dada la ocurrencia de b_1 , el hecho b_2 se actualiza como consecuencia de su necesidad condicional respecto de b_1 .
- Dada la ocurrencia de b_1 , el conjunto de lo condicionalmente posible es un conjunto no unitario al cual pertenece b_2 . En este caso, b_2 es *condicionalmente posible* respecto de b_1 pero *no condicionalmente necesario* respecto de b_1 [$P(b_2/b_1)$ y $\neg N(b_2/b_1)$]. Dada la ocurrencia de b_1 , se actualiza alguno de los hechos pertenecientes al conjunto de lo condicionalmente posible, entre

los cuales se encuentra h_2 ; pero aun si fuera h_2 el hecho que se actualiza, ello no modifica su carácter de no condicionalmente necesario respecto de h_1 .

Algunos autores, si bien adhieren a la interpretación de la posibilidad física como legalidad, niegan la relevancia del concepto de necesidad en el ámbito de la ciencia; éste es el caso de Bunge cuando afirma: “el concepto de necesidad difícilmente cumpla algún papel en ciencias fácticas excepto como sinónimo de actualidad. Todo lo que sucede debe ser y a la inversa. [...] El adverbio «necesariamente» es innecesario”²². Pero esta identificación entre lo actual y lo necesario impediría distinguir los dos tipos de restricción que introduce la ocurrencia de un hecho en lo físicamente posible: dada la actualización de h_2 , no se podría discriminar conceptualmente si la ocurrencia de ese hecho es consecuencia inevitable de la ocurrencia de h_1 o si sólo constituye la actualización de uno entre varios hechos condicionalmente posibles respecto de h_1 . Además debe señalarse que, si bien por motivos de simplicidad hasta aquí se ha omitido toda referencia a las circunstancias particulares que contribuyen a la caracterización completa de la situación, la posibilidad condicional depende de ellas: estrictamente, debe hablarse de la probabilidad condicional de un hecho h_2 , dada la ocurrencia de otro hecho h_1 y de ciertas *circunstancias particulares* C [$P(h_2/(h_1, C))$]. Tal vez donde mejor se manifiesta esta dependencia es en el caso de leyes físicas expresadas mediante ecuaciones dinámicas diferenciales en derivadas parciales, como por ejemplo la ley de Fourier de conducción térmica: la evolución resultante depende, no sólo de las *condiciones iniciales* —el estado del sistema en el instante inicial—, sino también de las circunstancias particulares dadas por las *condiciones de contorno o de frontera*.

Este concepto de posibilidad condicional aplicado a hechos en general puede fácilmente particularizarse para el caso de secuencias temporales de estados, de forma tal de resultar aplicable al problema del determinismo. Si un sistema es un tipo particular de objeto, un estado puede concebirse como una propiedad de dicho objeto; el hecho h consiste en que el sistema se encuentre en el estado e . En este

22. M. BUNGE, *op. cit.*, 176.

caso la posibilidad [la necesidad] condicional se expresa del siguiente modo: el hecho b_2 —el encontrarse el sistema en el estado e_2 — es *condicionalmente posible* [*necesario*] respecto del hecho b_1 —el encontrarse el sistema en el estado e_1 —, donde b_1 es temporalmente previo a b_2 . La precedencia temporal entre ambos hechos resulta relevante cuando se trata de establecer qué tipo de secuencia temporal de estados describirá el sistema. Nuevamente, si el sistema se encuentra efectivamente en el estado e_1 en el instante t_1 , pueden darse dos casos:

- Que el hecho de que el sistema se encuentre en el estado e_2 en el instante t_2 posterior a t_1 sea no sólo *condicionalmente posible* [$P(b_2/b_1)$], sino además *condicionalmente necesario* [$N(b_2/b_1)$].
- Que el hecho de que el sistema se encuentre en el estado e_2 en el instante t_2 posterior a t_1 sea *condicionalmente posible* [$P(b_2/b_1)$], pero *no condicionalmente necesario* [$\neg N(b_2/b_1)$].

No es difícil comprobar que esta elucidación del concepto de posibilidad física condicional resulta suficiente para caracterizar el concepto de determinismo ontológico que nos ocupa. Como fue señalado, cuando se predica determinismo ontológico de un sistema, se afirma que, dado su estado en un cierto instante, su evolución para todo instante posterior resulta físicamente necesaria. Queda claro ahora en qué sentido se comprende la necesidad en esta caracterización de determinismo: como una necesidad física condicional, en el marco de conceptos modales *de re*, ontológicos (posibilistas), definidos por las leyes de la física. No obstante, tradicionalmente la discusión acerca del determinismo en física se ha dado en términos de probabilidades; por ello, en las siguientes secciones abordaremos el concepto de probabilidad en relación con el de posibilidad física tal como ha sido recién elucidado.

5. POSIBILIDAD Y PROBABILIDAD

Desde un punto de vista totalmente formal, la probabilidad se representa mediante una función real Pr aplicada sobre una σ -álgebra F de subconjuntos de un conjunto S , $Pr: F \rightarrow [0,1]$, que cumple con ciertos axiomas, cuya presentación clásica es la de Kolmogo-

rov²³. Pero una teoría puramente formal de la probabilidad en nada se relaciona aún con el concepto de posibilidad; para establecer tal relación es necesario interpretar el formalismo, esto es, fijar la referencia de *S* y de *Pr*.

Como afirma Ian Hacking, desde el siglo XVII, la concepción de la probabilidad ha presentado una naturaleza dual: en su sentido epistémico, indica en qué medida la evidencia apoya una dada hipótesis; en su sentido ontológico, describe ciertas regularidades objetivas que exhibe la realidad²⁴. Durante el siglo XX, dos interpretaciones de la probabilidad en sentido epistémico han dominado la escena: la interpretación lógica, cuyos principales defensores fueron John Maynard Keynes y Rudolf Carnap, y la interpretación subjetiva, representada centralmente por Frank Ramsey y Bruno de Finetti. A su vez, la interpretación ontológica asimiló inicialmente las probabilidades a frecuencias relativas —posición de Ludwig von Mises y Hans Reichenbach, entre otros—; pero a partir de la década de 1950, la interpretación propensivista iniciada por Karl Popper rivalizó con la perspectiva frecuencialista hegemónica.

La primera pregunta que puede formularse es: ¿de qué se predica la probabilidad? La respuesta a esta pregunta permite distinguir entre *probabilidad de dicto*, que se aplica a proposiciones o enunciados, tal como es el caso de la probabilidad en sentido epistémico de la que nos habla Hacking, y *probabilidad de re*, que se aplica a hechos o eventos, tal como la probabilidad en sentido ontológico; esta distinción es análoga a la introducida respecto del concepto de posibilidad en la Sección 3. A su vez, en el plano ontológico, la interpretación frecuencialista de la probabilidad se basa en una concepción actualista de la posibilidad: si lo posible siempre acaba ocu-

23. A. N. KOLMOGOROV, *Foundations of the Theory of Probability* (Chelsea, New York, 1933). La teoría formal clásica de la probabilidad ha sido presentada bajo diferentes formulaciones equivalentes entre sí. Por otro lado, también se ha intentado formular teorías formales no clásicas, principalmente debido a los desafíos que introduce la mecánica cuántica, donde la Regla de Born define una probabilidad sobre ítems que no forman una σ -álgebra de estructura Booleana. De todos modos, independientemente del formalismo que se adopte, el aspecto relevante en la presente discusión es la interpretación de tal formalismo.

24. Cfr. I. HACKING, *The Emergence of Probability* (Cambridge University Press, Cambridge, 1975).

riendo, su probabilidad puede definirse en términos de la frecuencia de sus ocurrencias. La concepción posibilista de la posibilidad, en cambio, se corresponde con una interpretación propensivista de la probabilidad, según la cual la probabilidad mide la propensión de un hecho, esto es, su tendencia a actualizarse, aun cuando nunca se actualice²⁵. Es importante enfatizar que actualmente la adopción de una interpretación propensivista de la probabilidad no exige aceptar la posición de Popper en su conjunto: para este autor, las propensiones no son propiedades monádicas de los sistemas aislados, sino propiedades relacionales que vinculan el sistema con el arreglo experimental utilizado en el proceso de medición²⁶. Por el contrario, las propensiones pueden concebirse como propiedades de los sistemas individuales que, si bien se manifiestan a través de la medición, son independientes de ella. Como afirma Mauricio Suárez²⁷, un universo de un único electrón se encuentra en un cierto estado cuántico y, por tanto, posee todas las propensiones propias de dicho estado²⁸.

En definitiva, cuando se analiza el concepto de posibilidad como paso previo a ocuparse del concepto de probabilidad, se puede comenzar afirmando que la probabilidad propensivista mide la posibilidad física de los hechos posibles de los que nos habla la física. Si bien más adelante se precisará esta afirmación, conviene aquí mencionar la discusión acerca de si puede definirse una probabilidad propensivista como medida de la posibilidad física. En la biblio-

-
25. Es importante recordar que la interpretación frecuencionalista adjudica probabilidad a conjuntos de hechos: a diferencia de la interpretación propensivista, no permite predicar probabilidad de hechos individuales. Por otra parte, aun quienes adopten una interpretación propensivista, pueden utilizar el límite de las frecuencias observadas como un *critério* para adjudicar valores de probabilidad, si bien no como *definición* de probabilidad.
 26. K. POPPER, *The propensity interpretation of the calculus of probabilities and the quantum theory*, en S. KÖRNER (ed.), *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics* (Butterworth, Londres, 1957) 65-70. K. POPPER, *The propensity interpretation of probability*, "The British Journal of the Philosophy of Science" 10/37 (1959) 25-42.
 27. M. SUÁREZ, "Quantum selections, propensities and the problem of measurement", *The British Journal for the Philosophy of Science* 55/2 (2004) 219-255.
 28. Para una interpretación decididamente propensivista de la probabilidad en el ámbito cuántico, ver O. LOMBARDI y M. CASTAGNINO, *A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics*, "Studies in History and Philosophy of Modern Physics" 39/2 (2008) 380-443.

grafía la pregunta se formula en términos de si es posible interpretar las propensiones como probabilidades. Un conocido argumento que brinda una respuesta negativa a esta pregunta es el de Paul Humphreys²⁹, quien argumenta que las propensiones no satisfacen el teorema de Bayes analizando un ejemplo donde un fotón puede atravesar o reflejarse en un espejo semi-reflectante. La conclusión de Humphreys es objetada por David Miller³⁰: sobre la base de una reinterpretación del ejemplo esgrimido por Humphreys, Miller defiende la identificación entre propensiones y probabilidades. En un trabajo aún más reciente, Nuel Belnap³¹ evalúa la discusión y concluye que las propensiones pueden entenderse como probabilidades objetivas causales de caso único (*single-case probabilities*). Belnap brinda su demostración rigurosa sobre la base de la teoría formal de los espacio-tiempos ramificados (*branching space-times*), que a mi entender deben interpretarse físicamente en términos de historias posibles, en un sentido posibilista y no actualista de posibilidad. Más allá de los detalles técnicos de las argumentaciones, lo que esta discusión pone claramente de manifiesto es que la posibilidad (la propensión en la discusión de la bibliografía), en particular la posibilidad de transición entre estados físicos, no puede surgir de la teoría de la probabilidad sin más, sino que es necesario agregar algún elemento conceptual como, por ejemplo, la asimetría de la relación de causalidad. Esta conclusión apoya la perspectiva adoptada aquí, ya que se parte de la posibilidad (propensión), con todo su significado físico, y la probabilidad en este contexto aparece en un paso lógicamente posterior, puesto que mide tal posibilidad física.

Si bien no es un objetivo del presente trabajo desarrollar una teoría completa de la probabilidad propensivista³², sí señalaremos algunos aspectos relacionados con características que debe cumplir

29. P. HUMPHREYS, *Why propensities cannot be probabilities*, "The Philosophical Review" 94/4 (1985) 557-570.

30. D. MILLER, *Propensities may satisfy Bayes's theorem*, en R. SWINBURNE (ed.), *Bayes's Theorem, Proceedings of the British Academy, Vol. 113* (Oxford: Oxford University Press, 2002) 111-116.

31. N. BELNAP, *Propensities and probabilities*, "Studies in History and Philosophy of Modern Physics" 38/2 (2007) 593-625.

32. Para un intento en este sentido, ver R. N. GIERE, *A Laplacian formal semantics for single-case propensities*, "Journal of Philosophical Logic" 5/3 (1976) 321-353.

esta interpretación de la probabilidad para ajustarse al modo en que se utiliza la probabilidad en el ámbito de la física. En este sentido, vale la pena recordar la observación de Earman incluida en la Sección 2 acerca de la notación simbólica formal: si bien en la formulación de la teoría de la probabilidad en el lenguaje de la lógica de primer orden se adjudica probabilidad igual a 1 a una verdad lógica —que refiere a un hecho necesario— y probabilidad igual a 0 a una falsedad lógica —que refiere a un hecho imposible—, esto tiene muy poca relevancia a la hora de ocuparse cómo la probabilidad se aplica en la práctica de la física teórica y cómo se relaciona con las nociones de necesidad e imposibilidad.

En el ámbito de la física, como afirma Bunge, “*siempre que hay probabilidad, hay posibilidad*”, pero la conversa no es cierta: hay posibilidades respecto de las cuales no tiene sentido predicar probabilidad porque no forman parte de una teoría estocástica³³. En otras palabras, para que las asignaciones de probabilidad tengan sentido deben encontrarse fijadas legalmente.

Sobre esta base, en primer lugar debe recordarse que imposibilidad no equivale a probabilidad igual a cero. Una ley física distingue lo posible de lo imposible, pero no asigna probabilidad alguna en el ámbito de lo imposible. Por ejemplo, en un mundo regido por la teoría especial de la relatividad carece de sentido asignar probabilidad igual a cero al hecho imposible de que un cuerpo posea una velocidad superior a la de la luz; tal hecho sencillamente carece de una asignación de probabilidad. En cambio, en física se asigna un valor cero de probabilidad a hechos posibles. El caso típico es la probabilidad definida sobre el espacio de las fases de un sistema mecánico-estadístico clásico aislado como una medida de Lebesgue sobre la región del espacio accesible al sistema: en este caso, cualquier conjunto de estados que posea una dimensión inferior a tal región accesible tendrá medida nula y, por tanto, el hecho correspondiente tendrá valor cero de probabilidad, si bien es físicamente posible que el sistema se encuentre en cualquiera de tales estados. Por ejemplo, un gas confinado en un recipiente rectangular podría encontrarse en estados que conducen a una evolución tal que sus partículas se mueven para-

33. M. BUNGE, *op. cit.*, 204-205.

lamente entre sí y respecto de dos de las caras del recipiente: tales estados conforman una región que posee medida nula respecto de la región del espacio de las fases accesible al sistema y, por tanto, se le adjudica probabilidad cero, si bien el hecho de que el sistema se encuentre en cualquiera de ellos resulta totalmente posible de acuerdo con la mecánica estadística clásica³⁴.

En segundo lugar, necesidad tampoco equivale a probabilidad igual a uno. Una teoría física identifica ciertos hechos como necesarios, pero en general no asigna probabilidad alguna a tales hechos. Por ejemplo, en el ámbito del electromagnetismo carece de sentido asignar probabilidad igual a uno al hecho necesario de que un electrón tenga carga negativa. Por otra parte, en física se asigna valor 1 de probabilidad a hechos que no son necesarios en un sentido razonable de necesidad. Volviendo al ejemplo la probabilidad definida sobre la región del espacio de las fases accesible a un sistema mecánico-estadístico clásico aislado, la medida de la región es uno y, por lo tanto, el hecho de que el sistema se encuentre en alguno de los estados restringidos por los correspondientes vínculos tiene probabilidad uno, sin que tal hecho sea necesario en un sentido análogo al que lo es el hecho referido por una verdad lógica.

En definitiva, una probabilidad propensivista que pueda utilizarse adecuadamente en física es una medida de la posibilidad física de hechos posibles pero no necesarios. En otras palabras, dado un conjunto de hechos posibles pero no necesarios, la probabilidad propensivista queda representada por una función que adjudica un valor de probabilidad a los subconjuntos de tal conjunto, siendo cero y uno los valores límite de tal función, los cuales no deben asimilarse a imposibilidad y necesidad respectivamente. Esta idea puede aplicarse al caso de la posibilidad condicional en secuencias temporales de estados, que es el caso que nos interesa en relación al

34. Una situación de este tipo ha sido esgrimida para objetar la relevancia del Teorema de Birkhoff en mecánica estadística en la medida en que este teorema excluye los conjuntos de medida nula en el espacio de las fases. Véase, por ejemplo, el tradicional texto de R. TOLMAN, *The Principles of Statistical Mechanics* (Clarendon Press, Oxford, 1938) 68-69, y la discusión en J. EARMAN y M. RÉDEI, *Why ergodic theory does not explain the success of equilibrium statistical mechanics*, "The British Journal for the Philosophy of Science" 47/1 (1996) 63-78.

determinismo ontológico. En este caso, el hecho b_i consiste en que el sistema se encuentra en el estado e_i :

- Cuando b_2 en t_2 posterior a t_1 es no sólo condicionalmente posible sino también condicionalmente necesario respecto de b_1 en t_1 , no se asigna probabilidad alguna a b_2 . Este es el modo en que se tratan las evoluciones en mecánica clásica —no-estadística—, tradicionalmente considerada una teoría determinista³⁵: puesto que cada estado del sistema fija unívocamente en qué estado se encontrará el sistema en todo instante posterior, las probabilidades no intervienen en la descripción de la dinámica del sistema.
- Cuando b_2 en t_2 posterior a t_1 es condicionalmente posible pero no condicionalmente necesario respecto de b_1 en t_1 , sí suele definirse una probabilidad sobre el conjunto de todos los hechos condicionalmente posibles respecto de b_1 en t_1 . En este sentido resulta muy interesante el caso de la mecánica cuántica, donde las evoluciones estados cuánticos resultan totalmente deterministas en tanto regidas por la ecuación de Schrödinger. No obstante, si siguiendo a Bas van Fraassen³⁶ se define el “estado-valor” en el que se encuentra el sistema en un instante en términos de las propiedades que posee en dicho instante, se comprueba que la evolución de los estados-valor es indeterminista y puede calcularse la probabilidad de los estados-valor posibles en cada instante dado el estado-valor en un instante anterior³⁷.

35. El carácter determinista de la mecánica clásica, si bien tradicionalmente supuesto de un modo indubitable, ha sido desafiado durante las últimas décadas por diversos autores sobre la base de diferentes argumentos. Para una discusión del tema, ver O. LOMBARDI, *¿Es la mecánica clásica una teoría determinista?*, “Theoria” 17/43 (2002) 5-34.

36. B. C. VAN FRAASSEN, *A formal approach to the philosophy of science*, en R. COLODNY (ed.), *Paradigms and Paradoxes: The Philosophical Challenge of the Quantum Domain* (University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 1972) 303-366. B. C. VAN FRAASSEN, *The Einstein-Podolsky-Rosen paradox*, “Synthese” 29/1-4 (1974) 291-309.

37. Dos formulaciones en esta línea pueden hallarse en P. VERMAAS, *Unique transition probabilities in the modal interpretation*, “Studies in History and Philosophy of Modern Physics” 27/2 (1996) 133-159, y en G. CACCIAGALUPPO y M. DICKSON, *Dynamics for modal interpretations*, “Foundations of Physics” 29/8 (1999) 1165-1201.

6. PROBABILIDAD Y DETERMINISMO

En las discusiones acerca del determinismo en física suelen contraponerse dos tipos de probabilidad: objetiva y subjetiva. La probabilidad denominada *objetiva* puede comprenderse como una probabilidad ontológica, en muchos casos de naturaleza propensivista. Respecto a la probabilidad que en este contexto se denomina *subjetiva*, en cambio, no es tan claro que pueda asimilarse sin más a la probabilidad subjetiva a la que se refiere Hacking. En efecto, no siempre queda claro que sea una probabilidad *de dicto*, que se aplica a proposiciones o enunciados, tal como la probabilidad subjetiva de Ramsey y de Finetti. Lo relevante de la probabilidad subjetiva en el contexto del determinismo en física es que, sea aplicada a un hecho o a la proposición que describe un hecho, su valor depende del conocimiento que se posee acerca de las condiciones que dan lugar a tal hecho. Es en este sentido que suele hablarse de una probabilidad “*por ignorancia*”: su valor es función de la información con la cual se describe el hecho en cuestión, y es de esperar que, en general, dicho valor se modifique cuando se modifica la información disponible³⁸.

Es sobre la base de esta contraposición entre probabilidad objetiva y probabilidad subjetiva que Bernard d'Espagnat vincula “*el indeterminismo aparente, debido únicamente a la ignorancia de los detalles finos*” con “*las probabilidades subjetivas, relativas a nuestra ignorancia*”³⁹. La misma idea expresa Popper al afirmar:

“Hoy comprendo por qué tantos deterministas, e incluso ex-deterministas, que creen en el carácter determinista de la física clásica, creen seriamente en una interpretación subjetivista de

38. El término ‘subjetivo’ que se aplica a este tipo de probabilidad induce a múltiples confusiones, principalmente porque establece incorrectamente un nexo entre probabilidades y creencias de un sujeto particular. En la discusión acerca del determinismo en física, las probabilidades “por ignorancia” deberían ser denominadas ‘*probabilidades gnoseológicas*’, esto es, dependientes del conocimiento previo sobre el que se basa la caracterización del hecho en cuestión, sin que ello deba considerarse una cuestión subjetiva. No obstante, puesto que en el contexto de esta discusión la oposición que suele establecerse es ‘objetivo-subjetivo’, continuaremos con esta terminología en lo que sigue.

39. B. D’ESPAGNAT, *Une Incertaine Réalité* (Gauthier-Villars, Paris, 1985) 122-123.

la probabilidad: es de algún modo, *la única posibilidad razonable* que pueden aceptar; porque las probabilidades físicas objetivas son incompatibles con el determinismo”⁴⁰.

De este modo se instala la idea de la alternativa entre determinismo, que implica el carácter subjetivo de toda atribución de probabilidad, e indeterminismo, que involucra probabilidades objetivas. Esta idea continúa vigente; por ejemplo, Peter Kosso clasifica los tipos de probabilidad en dos grupos:

“La probabilidad objetiva es una propiedad de la naturaleza misma y se aplica a eventos que son genuinamente deterministas [...]. La probabilidad subjetiva es una propiedad de nuestro conocimiento de la naturaleza y se aplica a casos donde carecemos de información y, por tanto, poseemos incertidumbre”⁴¹

En un sentido análogo, Lawrence Sklar sostiene que la oposición tradicional en física es la que se establece entre “*el puro azar sin variables ocultas*”, propio de la mecánica cuántica donde existe un genuino fallo del determinismo, y la distribución sobre variables ocultas omnideterminantes, propia de la “*variante de ‘interpretación por ignorancia’ usual*” en mecánica estadística clásica⁴².

A pesar de la amplia adhesión a la alternativa dicotómica entre determinismo con probabilidades subjetivas e indeterminismo con probabilidades objetivas, dicha alternativa merece un nuevo análisis desde una perspectiva libre de los supuestos que han envuelto las discusiones tradicionales. Supóngase que la dinámica de un sistema adjudica ciertos valores de probabilidad a sus estados E_t en el instante t respecto de un estado inicial E_0 en el instante $t=0$. Si tal dinámica se considera “fundamental”, las opiniones tienden a coincidir: las probabilidades involucradas se interpretan como objetivas. Pero también es posible que esta dinámica probabilística sea

40. K. POPPER, *Teoría Cuántica y el Cisma en Física* (Tecnos, Madrid, 1982 [1988]) 125.

41. P. KOSSO, *Appearance and Reality* (Oxford University Press, Oxford MA, 1998) 114.

42. L. SKLAR, *Physics and Chance* (Cambridge University Press, Cambridge, 1993) 123.

el macro resultado de una dinámica determinista en términos de micro-estados e_i , mediante alguna técnica matemática como, en los casos típicos, una operación de grano grueso. De este modo, en el micro-nivel las probabilidades “desaparecen”. Es aquí donde la perspectiva tradicional, que instala la alternativa entre determinismo y probabilidades subjetivas o indeterminismo y probabilidades objetivas, interpreta las probabilidades así obtenidas como probabilidades cuya objetividad es sólo aparente: en realidad se trataría de probabilidades subjetivas, que dependen de nuestra ignorancia acerca de la evolución real y precisa del sistema en términos de sus micro-estados e_i ; por lo tanto, el macro-indeterminismo propio de la descripción probabilística no es más que una mera apariencia debida exclusivamente a nuestro conocimiento parcial del sistema. La pregunta es: ¿por qué las probabilidades del macro-nivel son subjetivas?

El sencillo ejemplo del tiro de un dado nos permitirá analizar esta cuestión desde una perspectiva diferente. En el micro-nivel mecánico, cada uno de los micro-estados e_i se define por la posición y la velocidad del dado en cada uno de sus puntos; aquí las micro-evoluciones son deterministas pues las leyes de la mecánica fijan, luego del intervalo $\Delta t = t_1 - t_0$, un único micro-estado e_1 posible respecto del micro-estado inicial e_0 . Pero en el macro-nivel, los estados del sistema son los macro-estados $E_0 = \text{Dado en el cubilete}$, $E_1 = \text{As hacia arriba}$, ..., $E_6 = \text{Seis hacia arriba}$. Aquí podría afirmarse que la probabilidad $1/6$ atribuida, digamos, a E_1 mide el grado de posibilidad de la ocurrencia del macro-estado E_1 dada la ocurrencia previa del macro-estado inicial E_0 . Sin embargo, desde la perspectiva tradicional las probabilidades del macro-nivel no son genuinamente objetivas. Según el argumento usual, si se conocieran las condiciones iniciales precisas del dado en el cubilete, la probabilidad de obtener un as pasaría de tener un valor $1/6$ a tener valor 0 o 1; por lo tanto, no puede tratarse de una probabilidad objetiva, puesto que su valor varía con la información de la que se dispone. Pero a este argumento podría replicarse que, cuando se dice que la probabilidad de obtener un as es $1/6$, en realidad se trata de una probabilidad que mide no una posibilidad absoluta sino una posibilidad condicional, esto es, la posibilidad de obtener un as en t_1 , dado que el sistema se encontraba en el macro-estado E_0 en t_0 anterior a t_1 . A su vez, cuando se

dice que la probabilidad de obtener un as ha adoptado un nuevo valor, por ejemplo 1, también se habla de una probabilidad que mide una posibilidad condicional, pero diferente de la anterior: la posibilidad de obtener un as en t_1 , dado que el sistema se encontraba en el micro-estado e_0 en t_0 . No se trataría, entonces, de la misma probabilidad que varía su valor frente a nueva información, sino de dos probabilidades distintas que, por tanto, pueden interpretarse sin inconvenientes como probabilidades objetivas que miden posibilidades físicas diferentes. Pero el argumento tradicional pasa por alto un detalle más: cuando se pasa al micro-nivel, no se obtiene un valor 1 de probabilidad, sino que la asignación misma de probabilidades desaparece, lo cual hace aún más conflictiva la idea de una misma probabilidad subjetiva aplicable tanto al macro-nivel como al micro-nivel, y cuyo valor varía con la información de la que se dispone.

Algunos autores han impugnado la posición tradicional, según la cual las macro-propiedades de un sistema microscópicamente determinista son necesariamente subjetivas: las macro-evoluciones son *generadas* por la dinámica objetiva del nivel mecánico subyacente, y no dependen en modo alguno de lo que conozca o no el sujeto. En otras palabras, nuestra ignorancia nada tiene que ver con la probabilidad del hecho de obtener un as en el tiro de un dado. Como afirma Peter Clark, existen probabilidades “*reales pero reductibles [...] que la probabilidad sea reductible no muestra en modo alguno que las medidas de probabilidad no son físicamente reales, esto es, que no están bien fundadas dinámicamente*”⁴³. Una opinión similar expresa Earman cuando sostiene:

“La inferencia ‘objetivo’ aplicado a las probabilidades implica que las probabilidades son irreductibles, lo cual a su vez implica que el determinismo es falso’ está equivocada desde el primer paso. $p=1/2$, digamos, para una moneda representa una tendencia objetiva de la moneda de caer con cara hacia arriba. Y la atribución de tal tendencia objetiva no queda socavada por el descubrimiento de que la salida de cada tirada está determinada

43. P. CLARK, *Determinism and probability in physics*, “Proceedings of the Aristotelian Society” 61 (1987) 185-210.

de un modo único por el microestado previo del sistema; incluso, si la mecánica estadística clásica es nuestra guía, el determinismo puede formar parte de la explicación de la tendencia a caer cara arriba $1/2$ de las veces⁴⁴.

En definitiva, los estados de un sistema y el carácter determinista o no de sus evoluciones son *relativos* a un cierto nivel ontológico, pero esto no implica que se trate de fenómenos subjetivos o meramente gnoseológicos. La física está colmada de conceptos relativos que, no por ello, carecen de objetividad: por ejemplo, en mecánica clásica la velocidad de un cuerpo sólo puede definirse por relación a un sistema de referencia, lo cual no conduce en modo alguno a suponer que tal velocidad es una propiedad que depende del sujeto y su conocimiento. Desde esta perspectiva, la estricta alternativa entre determinismo con probabilidades subjetivas e indeterminismo con probabilidades objetivas se torna insostenible: determinismo e indeterminismo objetivos pueden combinarse de un modo consistente en los distintos niveles de una misma realidad⁴⁵. La idea de que el indeterminismo del nivel de los macro-estados es una mera apariencia, debida exclusivamente a nuestro conocimiento parcial del sistema, no se desprende del carácter subjetivo de las probabilidades involucradas, sino que exige un supuesto adicional fuertemente reduccionista, según el cual existe un único modo objetivo de describir la realidad y, por consiguiente, toda descripción que no coincida con él será irremediabilmente subjetiva⁴⁶.

44. J. EARMAN, *op. cit.*, 151.

45. O. LOMBARDI, *Determinism, internalism and objectivity*, en H. ATMANSPACHER y R. BISHOP (eds.), *Between Chance and Choice: Interdisciplinary Perspectives on Determinism* (Imprint-Academic, Thorverton, 2002) 75-87.

46. Esta idea puede rechazarse desde una perspectiva filosófica ontológicamente pluralista como el realismo pluralista de raigambre kantiana desarrollado en diferentes trabajos tales como O. LOMBARDI y A. R. PÉREZ RANSANZ, *Los Múltiples Mundos de la Ciencia. Un Realismo Pluralista y su Aplicación a la Filosofía de la Física* (México, UNAM-Siglo XXI, 2012), y O. LOMBARDI y A. R. PÉREZ RANSANZ, *Lenguaje, ontología y relaciones interteóricas: en favor de un genuino pluralismo ontológico*, "Revista Arbor. Ciencia, Pensamiento y Cultura" 187/747 (2011) 43-52, y aplicado en diferentes ámbitos en trabajos como O. LOMBARDI y M. LABARCA, *The ontological autonomy of the chemical World*, "Foundations of Chemistry" 7/2 (2005) 125-148, O. LOMBARDI y M. LABARCA, *The ontological autonomy of the chemical*

7. POSIBILIDAD Y PROBABILIDAD EN SISTEMAS ALTAMENTE INESTABLES

En la sección anterior se ha argumentado desde una perspectiva general en favor de la posibilidad de la coexistencia de determinismo e indeterminismo objetivos en diferentes estratos de lo real. El propósito de la presente sección consiste en ilustrar esta tesis mediante un caso específico de la física: el de los sistemas llamados altamente inestables, cuyo comportamiento se estudia mediante dos enfoques teóricos, la *teoría del caos* y la *teoría ergódica*, los cuales parecen conducir a conclusiones contradictorias acerca del carácter determinista o indeterminista de los sistemas bajo estudio.

Si bien la definición precisa del concepto de caos continúa siendo objeto de debate⁴⁷, entre los especialistas existe un consenso prácticamente unánime acerca de ciertos aspectos. Los sistemas que pueden presentar comportamiento caótico quedan descriptos por sistemas de ecuaciones diferenciales de la forma

$$dx/dt = F(x, r)$$

donde $x=(x_1, x_2, \dots, x_d)$, $F=(F_1, F_2, \dots, F_d)$ y r es un parámetro. Tales ecuaciones son:

- *autónomas*: F no depende explícitamente de la variable tiempo
- *no lineales*: F es una función no lineal de las $\{x_i\}$

world: A response to Needham, “Foundations of Chemistry” 8/1 (2006) 81-92, O. LOMBARDI y M. LABARCA, *Irreversibilidad y pluralismo ontológico*, “Scientiae Studia. Revista Latinoamericana de Filosofía e História da Ciência”, 5/2 (2007) 139-167, M. LABARCA y O. LOMBARDI, *Why orbitals do not exist?*, “Foundations of Chemistry” 12/2 (2010) 149-157, y M. CÓRDOBA y O. LOMBARDI, *A Kantian perspective for the philosophy of chemistry*, en Jean-Pierre LLORED (ed.), *Chemistry, the Unknown Science* (Cambridge Scholars Publishing, Cambridge, 2013 en prensa).

47. Para una detallada discusión acerca de cierto tipo de definiciones del concepto de caos, ver R. BATTERMAN, *Defining Chaos*, “Philosophy of Science” 60/1 (1993) 43-66. Una pormenorizada búsqueda de una definición de caos desde un punto de vista matemático puede hallarse en P. SMITH, *Explaining Chaos* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998) Capítulo 10.

Por otra parte, todo sistema de comportamiento caótico es *sensible a las condiciones iniciales*. Esto significa que, en el espacio de las fases Γ correspondiente, las trayectorias divergen exponencialmente. Por ejemplo, supóngase un sistema descrito por una única ecuación diferencial $dx/dt=F(x)$ y sean dos puntos separados una distancia δ , la distancia entre las trayectorias que se inician en tales puntos debe aumentar exponencialmente con el tiempo según δe^{bt} , donde b se denomina *exponente de Lyapounov* y mide, precisamente, tal divergencia exponencial ($b>0$). Por lo tanto, la sensibilidad a las condiciones iniciales que exhiben los sistemas de comportamiento caótico implica su *inestabilidad*: la evolución temporal del sistema manifiesta grandes variaciones frente a pequeñas modificaciones de las condiciones iniciales⁴⁸.

Esta sensibilidad a las condiciones iniciales conduce a una importante consecuencia respecto de la predictibilidad de los estados futuros de los sistemas de comportamiento caótico. En la práctica, la precisión finita de nuestros instrumentos de medición impide conocer con precisión infinita el estado inicial de un sistema. Si se trata de un sistema de comportamiento regular y estable, la situación no es grave: pequeñas incertidumbres en la determinación empírica de las condiciones iniciales se convierten en incertidumbres grandes pero acotadas —aumentan linealmente con el tiempo— en el curso ulterior de la evolución. Pero si el sistema presenta un comportamiento caótico, las pequeñas incertidumbres iniciales se amplifican exponencialmente con el transcurso del tiempo de modo tal que, en la práctica, para tiempos muy superiores a $1/b$ —donde $\tau=1/b$ se denomina *tiempo de Lyapounov*— la predicción unívoca de los estados futuros del sistema se torna imposible. En otras palabras, a medida

48. Lo dicho puede generalizarse en dos sentidos. En primer lugar, debe considerarse el caso general de un sistema con d variables de estado, cuya evolución temporal se representa en un espacio de las fases Γ d -dimensional. En este caso existen d exponentes de Lyapounov b_i , uno por cada dirección x_i de Γ , cumpliéndose que los $b_j>0$ indican *divergencia exponencial* en las direcciones x_j , y los $b_k<0$ indican *contracción exponencial* en las direcciones x_k . En segundo lugar, hasta aquí se ha hablado de sistemas de ecuaciones diferenciales, pero también se da el caso de comportamiento caótico descrito por ecuaciones en diferencias finitas, $\mathbf{x}_{n+1}=\mathbf{F}(\mathbf{x}_n, r)$ con $\mathbf{x}_n=(x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{dn})$ y $\mathbf{F}=(F_1, F_2, \dots, F_d)$.

que transcurre el tiempo se produce una pérdida de información acerca del micro-estado preciso en el que se encuentra el sistema; intuitivamente, en $t=0$ la localización del punto representativo con una precisión δ brinda mayor información que su localización dentro de $\delta e^{b\Delta t}$ luego del intervalo Δt . En meteorología esta situación se ha hecho conocida como “efecto mariposa”: la perturbación generada por el batir de las alas de una mariposa podría amplificarse hasta el punto, por ejemplo, de provocar una tempestad en las antípodas unos días más tarde⁴⁹.

A pesar de la impredecibilidad resultante, como consecuencia de su autonomía las ecuaciones diferenciales que describen un comportamiento caótico cumplen las condiciones necesarias para asegurar la existencia y la unicidad de sus soluciones para cada conjunto de valores de las variables dependientes⁵⁰: esto significa que, en el espacio de las fases correspondiente, para cada punto representativo del micro-estado inicial, la trayectoria que en él se inicia existe y es única; además, dado que no hay restricciones para fijar el micro-estado inicial del sistema, las trayectorias no pueden cortarse en ningún punto, es decir, no existe ningún micro-estado a partir del cual el sistema evolucione temporalmente según dos o más trayectorias posibles. En otras palabras, las micro-evoluciones de un sistema caótico son completamente *deterministas*⁵¹.

La teoría ergódica, por su parte, estudia las propiedades estadísticas de los sistemas dinámicos considerados desde un punto de vista formal⁵². Para ello, no describe los sistemas en términos de puntos y trayectorias en el espacio de las fases —micro-estados y sus evoluciones—, sino que brinda una macro-descripción median-

49. El nombre ‘efecto mariposa’ también puede deberse a la forma del atractor que surge del sistema de ecuaciones planteado por el meteorólogo Edward Lorenz en la década de 1960. La gráfica del atractor de Lorenz puede hallarse en cualquier obra sobre teoría del caos; por ejemplo, H. G. SCHUSTER, *Deterministic Chaos* (VCH, Weinheim, 1984) 92, o P. SMITH, *op. cit.*, 10.

50. Véase Nota 1.

51. O. LOMBARDI, *La teoría del caos y el problema del determinismo*, “Diálogos” 33/72 (1998) 21-42. O. LOMBARDI, *La teoría del caos y sus problemas epistemológicos*, “Revista de Filosofía de la Universidad de Chile” 57(2001) 91-109.

52. J. L. LEBOWITZ y O. PENROSE, *Modern ergodic theory*, “Physics Today” 26/2 (1973) 23-29.

te una partición de grano grueso: el espacio de las fases Γ se divide en celdas de volumen no nulo, cada una de las cuales representa un macro-estado posible del sistema; cada posible macro-evolución queda así identificada como una posible sucesión de macro-estados. Sobre esta base se definen:

- Un *flujo dinámico* $\phi_t: \Sigma \rightarrow \Sigma$, donde Σ es el conjunto de los subconjuntos de la región accesible $\Gamma_\alpha \subset \Gamma$ del espacio de las fases Γ . Este flujo representa la evolución temporal del sistema⁵³.
- Una *medida normalizada* μ sobre la región accesible $\Gamma_\alpha \subset \Gamma$ del espacio de las fases, *invariante* bajo el flujo ϕ_t : para cualquier región $A \subseteq \Gamma_\alpha$, tal que $\mu(A) \neq 0$, se cumple $\mu(\phi_t(A)) = \mu(A)$. En general, la medida $\mu(A)$ se considera proporcional al volumen de la región A —medida de Lebesgue—; en este caso, la invariancia de μ bajo ϕ_t significa que cualquier región de Γ_α evoluciona según ϕ_t manteniendo su volumen constante a través de la evolución⁵⁴.

Mediante estos elementos teóricos, la teoría ergódica permite clasificar los sistemas dinámicos, de acuerdo con su grado creciente de inestabilidad, en sistemas ergódicos, sistemas mezcladores, sistemas K y sistemas Bernoulli. Tales clases no son independientes, sino que cada una de ellas incluye a la siguiente; por lo tanto, existe entre ellas una relación de implicación: si un sistema es mezclador, es ergódico, si es de tipo K, es mezclador y ergódico, y así sucesivamente, pero en ningún caso se da la implicación inversa.

En el macro-nivel descrito por la teoría ergódica, las evoluciones poseen propiedades estadísticas que fijan las probabilidades asociadas a las diferentes transiciones posibles entre macro-estados. En particular, en el caso de los sistemas K, los únicos macro-estados futuros que quedan unívocamente determinados son aquéllos que

53. Para una discusión acerca de la necesidad de restringir las definiciones a la región accesible del espacio de las fases, ver O. LOMBARDI, *El problema de la ergodicidad en mecánica estadística*, “Crítica. Revista Hispanoamericana de Filosofía” 35/103 (2003) 3-41.

54. En mecánica clásica, esta invariancia de la medida en el espacio de las fases se cumple como consecuencia de la validez del teorema de Liouville.

tienen probabilidad 0 o 1 independientemente de la macro-historia del sistema. En otras palabras, las macro-evoluciones son *indeterministas* puesto que la macro-evolución pasada no fija unívocamente la macro-evolución futura. La teoría ergódica suministra una magnitud que permite precisar las características de este tipo de comportamiento: la K-entropía o entropía de Kolmogorov es una medida de la cantidad de macro-estados condicionalmente posibles a partir de la ocurrencia de un macro-estado dado. Si se trata de un sistema K, el valor de la K-entropía es mayor que cero y es independiente de la particular partición considerada⁵⁵.

Los sistemas Bernoulli son un tipo particular de sistemas K en los cuales todos los macro-eventos son estadísticamente independientes: la descripción de la macro-historia completa del sistema no brinda información alguna acerca del próximo macro-estado. A fin de expresar esta idea en términos más precisos, supóngase que la macro-historia pasada del sistema queda representada por la sucesión de celdas $\dots, R_n, R_{n-1}, R_{n-2}, \dots, R_1$, de modo tal que en el instante $t-k$ el sistema se encuentra en el macro-estado representado por la celda R_k , y donde los instantes sucesivos se toman con un intervalo τ tal que $t_{i+1}-t_i=\tau$. Si el sistema es tipo Bernoulli, la probabilidad del macro-evento R_j en t_0 es independiente de los macro-eventos pasados; la probabilidad condicional de que el sistema se encuentre en R_j en t_0 , dado que se encontraba en R_1 en t_{-1} , en R_2 en t_{-2} , ... y en R_n en t_{-n} , es igual a la probabilidad absoluta de que se encuentre en R_j en t_0 :

$$\mu(R_j/\phi_\tau(R_1)\cap\phi_{2\tau}(R_2)\cap\dots\phi_{n\tau}(R_n)) = \mu(R_j)$$

donde $\mu(A/B)$ representa la medida condicional definida como $\mu(A\cap B)/\mu(B)$. En otras palabras, las celdas sucesivas se encuentran totalmente no correlacionadas, tal como los números que se obtienen en un juego de azar ideal: la macro-historia pasada resulta completamente irrelevante respecto de los macro-eventos futuros. En este caso podría hablarse, no sólo de un macro-indeterminismo, sino de una macro-aleatoriedad.

55. J. D. FARMER, *Dimension, fractal measure and chaotic dynamics*, en H. HAKEN (ed.), *Evolution of Order and Chaos* (Springer, Heidelberg, 1982).

El problema del determinismo surge cuando se relacionan las descripciones correspondientes a la teoría del caos y la teoría ergódica en el caso de alta inestabilidad. En efecto, el teorema de Pesin demuestra que, cuando un sistema es sensible a las condiciones iniciales —lo cual se manifiesta por la presencia de exponentes de Lyapounov positivos—, tiene K-entropía positiva y viceversa⁵⁶. Por lo tanto, ser un sistema K es condición necesaria y suficiente para el caos: un sistema dinámico es caótico en el micro-nivel si y sólo si en el macro-nivel resulta ser un sistema K, cuya K-entropía positiva resulta ser proporcional al exponente de Lyapounov (o a la suma de los exponentes de Lyapounov positivos). Esta equivalencia entre sistema caótico y sistema K expresada por el teorema de Pesin permite caracterizar la alta inestabilidad tanto desde la teoría del caos como desde la teoría ergódica. No obstante, tal equivalencia no cancela el hecho de que las respectivas propiedades definitorias, divergencia exponencial y K-entropía positiva, son conceptualmente diferentes pues se aplican sobre distintos estados y evoluciones, e incluso conducen a conclusiones opuestas respecto del determinismo.

En definitiva, en el micro-nivel los sistemas altamente inestables son totalmente deterministas: las evoluciones entre micro-estados son unívocas pero divergen exponencialmente con el tiempo, impidiendo así, luego de intervalos suficientemente largos, el conocimiento de los micro-estados futuros dentro de un margen acotado de error. Pero en el macro-nivel ya no entran en juego los micro-estados y los errores en su determinación empírica ni las micro-evoluciones exponencialmente divergentes: aquí se trata de macro-evoluciones y probabilidades asociadas a las posibles transiciones entre macro-estados. Pero, ¿cómo interpretar las propiedades estadísticas de las macro-evoluciones? Las opiniones comienzan a distanciarse cuando se trata de decidir acerca del carácter objetivo o subjetivo de las probabilidades en el macro-nivel.

Muchos autores adoptan una posición ortodoxa en la medida en que consideran que la descripción objetiva de los sistemas altamente inestables es la que brindan las ecuaciones diferenciales en el

56. R. MAÑÉ, *Ergodic Theory and Differentiable Dynamics* (Springer, Nueva York, 1987) 265.

micro-nivel: puesto que las macro-evoluciones son generadas por una evolución determinista subyacente, sus propiedades estadísticas son subjetivas, meras apariencias debidas exclusivamente a las limitaciones de nuestras capacidades de observación. Como afirma Paul Davies, las propiedades estadísticas de los sistemas altamente inestables se manifiestan “debido a que necesariamente ignoramos los detalles ultra-finos de incluso unos pocos grados de libertad”⁵⁷. En otras palabras, los sistemas altamente inestables son deterministas: si conociéramos el micro-estado preciso del sistema en un cierto instante, podríamos predecir completamente su micro-evolución futura y no necesitaríamos propiedades estadísticas para su descripción.

Unos pocos autores asumen una perspectiva no-ortodoxa, que consiste en defender el carácter objetivo del macro-nivel estadístico argumentando que el determinismo de la micro-dinámica subyacente es una mera aproximación, sólo aplicable en situaciones altamente idealizadas y, por tanto, irreales. Por ejemplo, Joseph Ford sostiene que, ante la presencia de caos, “el determinismo newtoniano sólo puede ser un inalcanzable sueño del teórico”⁵⁸. Por su parte, Ilya Prigogine anuncia “la muerte al fin sobrevenida del diablillo de Laplace”⁵⁹, e incluso considera que el azar ha ingresado definitivamente al ámbito de la mecánica clásica: “ciertos sistemas dinámicos inestables son aleatorios, como los juegos de azar tipo Bernoulli. Así pues [...] se puede hablar de azar; el azar se ha convertido en un elemento fundamental de la dinámica”⁶⁰. Precisamente a la luz de esta idea, Prigogine rechaza decididamente el vínculo de grano grueso entre la macro-descripción y la micro-descripción, reemplazándolo por un “cambio de representación dinámica” que mostraría que la micro-dinámica determinista surge como un límite puramente ideal de la macro-dinámica indeterminista fundamental⁶¹.

57. P. DAVIES, *Chaos frees the Universe*, “New Scientist” 128/1727 (1990) 48-51.

58. J. FORD, *How random is a coin toss?*, “Physics Today” 36/4 (1983) 40-47, 43.

59. I. PRIGOGINE e I. STENGERS, *La Nueva Alianza. Metamorfosis de la Ciencia* (Alianza Editorial, Madrid, 1990 [1979]) 108.

60. En J. WAGENSBERG (ed.), *Proceso al Azar* cit. 192.

61. B. MISRA, I. PRIGOGINE y M. COURBAGE, *From deterministic dynamics to probabilistic descriptions*, “Physica A” 98/1 (1979) 1-26. M. COURBAGE e I. PRIGOGINE, *Intrinsic randomness and intrinsic irreversibility in classical dynamical systems*, “Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 80/8 (1983)

Si bien estas dos posturas resultan opuestas en cuanto a la interpretación de las probabilidades del macro-nivel y, en consecuencia, respecto del carácter objetivo o subjetivo del macro-determinismo resultante, coinciden en la adopción de un supuesto tradicional: ambas consideran que debe identificarse *el* nivel objetivo, y toda descripción que no coincida con él será irremediamente subjetiva. O bien se supone que la dinámica objetiva es la que viene dada por las micro-evoluciones y, por tanto, el sistema es determinista con probabilidades subjetivas “por ignorancia”, o bien la dinámica objetiva es la del macro-nivel y, con ello, el sistema es indeterminista con probabilidades objetivas. De este modo, el caso de los sistemas altamente inestables pone de manifiesto una situación análoga a la del tiro del dado presentada en la sección anterior, pero aquí en un marco teórico preciso. En consecuencia, lo argumentado allí se aplica en este caso: una vez que se admite que los estados de un sistema y el carácter determinista o no de sus evoluciones son relativos a un cierto nivel ontológico, ya no es necesario decidir entre determinismo con probabilidades subjetivas e indeterminismo con probabilidades objetivas: determinismo e indeterminismo objetivos pueden combinarse de un modo consistente en los distintos niveles de una misma realidad.

En otras palabras, no tiene sentido preguntar por el carácter determinista o indeterminista de un sistema sin relativizar la pregunta al tipo de estados y evoluciones definidos por un cierto marco teórico. La teoría del caos “recorta” micro-estados representados por puntos en el espacio de las fases, y micro-evoluciones deterministas representadas por trayectorias que nunca se cortan. La teoría ergódica, por el contrario, “recorta” macro-estados representados por celdas de volumen no nulo en el espacio de las fases, y macro-evoluciones indeterministas caracterizadas por las probabilidades condicionales de transición entre macro-estados. Si se abandona la idea de *la* descripción privilegiada desde el punto de vista de su obje-

2412-2416. Para un análisis crítico de esta posición, ver O. LOMBARDI, *El fin de la omnisciencia: la respuesta de Prigogine al problema de la irreversibilidad*, “Theoria. Revista de Teoría, Historia y Fundamentos de la Ciencia” 14/36 (1999) 489-510, y O. LOMBARDI, *El problema de la irreversibilidad: Prigogine y la transformación del panadero*, “Revista Latinoamericana de Filosofía” 25/1 (1999) 69-86.

tividad, ambas descripciones pueden ser consideradas igualmente objetivas en la medida en que ambas teorías resultan empíricamente adecuadas e incluso igualmente exitosas en la explicación y producción de fenómenos en sus respectivos dominios de aplicación⁶². Por lo tanto, tanto el determinismo como el indeterminismo propios de los sistemas inestables son ontológicos, si bien relativos al tipo de evoluciones consideradas en cada caso.

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo hemos concentrado nuestra atención en el problema del determinismo ontológico, tal como se discute en el ámbito de la física. El objetivo final fue argumentar en favor de la posible coexistencia de determinismo e indeterminismo ontológicos en un mismo sistema. Para ello, comenzamos por elucidar el concepto de determinismo ontológico y precisar la noción de posibilidad necesaria para tal elucidación. Esta tarea nos permitió poner de manifiesto los distintos modos en que aparece la posibilidad en física, en particular, como posibilidad física condicional. Además, argumentamos que la posibilidad física no exige ser definida en un único dominio de la realidad, sino que aparece en distintos dominios en la medida en que se aplica a y se condiciona respecto de diferentes tipos de hechos. De este modo, la probabilidad, en su sentido ontológico propensivista, pudo ser caracterizada como una medida de la posibilidad física.

Con estos elementos teóricos, nos introdujimos de lleno en la discusión del problema del determinismo en el ámbito de la física, donde suele suponerse que el determinismo ontológico implica el carácter subjetivo —o gnoseológico— de toda atribución de probabilidad. Sobre la base de lo previamente discutido, en este ámbito pudimos admitir la coexistencia de determinismo e indeterminismo ontológicos y, por tanto, igualmente objetivos en un mismo sistema, en tanto conceptos relativos a la definición de los estados y evoluciones del sistema.

62. O. LOMBARDI, *Caos, ergodicidad e internalismo*, “Revista Latinoamericana de Filosofía” 28/1 (2002) 7-33.

Sin duda, el presente trabajo no pretende haber agotado la discusión sobre el determinismo en física, un ámbito todavía fértil en nuevas consideraciones. Por ejemplo, durante los últimos tiempos se han reavivado muchas polémicas que parecían saldadas, como la referida al carácter determinista de la mecánica clásica y de la teoría general de la relatividad. El propósito final ha sido el de incorporar a la discusión la olvidada categoría de posibilidad, lo cual enriquece las reflexiones sobre el determinismo y permite, a la vez, adoptar respecto del problema una perspectiva más flexible que la tradicional⁶³.

63. Las autoras agradecen las aportaciones de los árbitros anónimos que permitieron mejorar el trabajo, y también agradecen especialmente a los editores (de la revista y del presente número) por su activa participación en el proceso de evaluación. Este trabajo ha sido realizado con la aportación de subsidios del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y de la Universidad de Buenos Aires (UBA).