

Capítulo II

LA IDENTIFICACION DE LO REAL

1. *Las leyes de Newton*

Vamos ahora a penetrar en esta ciencia clásica para comprender sus puntos fuertes, aquello que, de la naturaleza, ha conseguido esclarecer de una vez por todas, y para comprender también sus debilidades, todo aquello que ha debido negar y que ahora se revuelve contra ella.

Un problema central, desde Galileo, podríamos casi afirmar que el problema central de la física, es el problema de la aceleración de los cuerpos; es pidiendo a la naturaleza cuentas de los cambios sufridos por el estado de movimiento y de reposo de los cuerpos como hemos conseguido obtener de ella respuestas matemáticas. Galileo ha descubierto que no debemos pedir a la naturaleza la *causa* de su estado de movimiento si éste es uniforme, ni tampoco pedirle la causa de su estado de reposo: el movimiento y el reposo se mantienen por sí mismos, eternamente, si nada viene a perturbarlos. Por el contrario, se le pedirán explicaciones por todo paso del reposo al movimiento, del movimiento al reposo, por todo cambio de velocidad. Sin embargo, no le preguntaremos por qué el cuerpo acelera; pregunta-

remos cómo se efectúa esta transformación para poder describirla, para poder enunciar su ley matemática.

La formulación de las leyes newtonianas del movimiento realiza la síntesis de dos desarrollos convergentes, el de la física —la descripción del movimiento, con las leyes de Kepler y las de la caída de los cuerpos formuladas por Galileo— y el de las matemáticas que culminan en el cálculo «infinitesimal».

¿Cómo describir una velocidad que varía de manera continua? ¿Cómo describir la evolución, instante a instante, de las diversas magnitudes, posición, velocidad, aceleración, que caracterizan el estado instantáneo de un móvil? Los matemáticos han introducido el concepto de cantidad infinitesimal para responder a estas preguntas. Una cantidad infinitesimal resulta de un *paso al límite*, es la variación de una magnitud entre dos instantes sucesivos cuando el intervalo entre estos dos instantes tiende a cero. La descripción infinitesimal puede así descomponer el cambio en una serie infinita de cambios infinitamente pequeños, mientras que, anteriormente, no se podía describirlo más que como el resultado de un número finito de transiciones de magnitud finita yuxtapuestas como las perlas de un collar.

En cada instante la descripción del estado de un móvil comprenderá no solamente su posición, que llamaremos r , sino también su «tendencia instantánea» a cambiar de posición, es decir, su velocidad V en este instante, y su tendencia a modificar esta velocidad, es decir, su aceleración a . Velocidad y aceleración instantáneas son «conceptos límites» que miden una variación instantánea como el cociente entre dos cantidades infinitesimales: entre la variación de la magnitud posición o velocidad, durante un intervalo de tiempo Δt que tiende hacia cero y el mismo intervalo Δt . Se denomina a tales magnitudes «derivadas con respecto al tiempo». Se escribe, desde Leibniz, $v = dr/dt$. En cuanto a la aceleración, $a = dv/dt = d^2r/dt^2$ derivada de una derivada, es una *derivada* «segunda».

El problema sobre el cual se concentra la física newtoniana es el cálculo de la derivada segunda, de la aceleración sufrida en cada instante por los diferentes puntos de un sistema material. El movimiento de cada uno de estos puntos durante un intervalo de tiempo finito será entonces calculable por *integración*, es decir, sumación de las variaciones infinitesimales de velocidad sufridas durante este intervalo. El caso más simple es aquel en el que a es una constante (así, por ejemplo, para la caída de un cuerpo, a es la constante gravitacional g). Generalmente, la misma aceleración varía a lo largo del tiempo y el tra-

bajo del físico es precisamente el determinar la naturaleza de esta variación.

En lenguaje newtoniano, estudiar la aceleración es determinar las diferentes «fuerzas» que actúan sobre los puntos del sistema estudiado. Lo que llamamos tradicionalmente la segunda ley de Newton, $F=ma$, expresa la proporcionalidad en cada instante entre fuerza aplicada en un punto y la aceleración que ésta genera. Esta equivalencia entre fuerza y aceleración da la versión matemática de la estructura causal que le es propia al mundo de la dinámica: mundo en el cual nada se produce, en donde ningún movimiento empieza, varía o termina si no es como efecto de una fuerza, y esto en cada instante.

En el caso de un sistema de puntos materiales, el problema se complica por el hecho de que en cada instante los valores de las fuerzas aplicadas varían en función de las aceleraciones que estas fuerzas determinaron en el instante precedente. Las fuerzas estudiadas por la física newtoniana son, en efecto, función de la configuración espacial de sistemas de cuerpos entre los cuales ellas actúan y, por tanto, varían cuando las distancias entre estos cuerpos varían.

Un problema dinámico se define bajo la forma de un sistema de ecuaciones diferenciales; el estado instantáneo de cada uno de los puntos del sistema queda descrito por su velocidad y su aceleración, es decir, por derivadas primeras y segundas. Este sistema de ecuaciones describe la siguiente situación: en cada instante, un conjunto de fuerzas, función de la distancia entre los puntos del sistema (y en consecuencia función de r) genera una aceleración particular dv/dt para cada uno de estos puntos; el conjunto de estas aceleraciones determina a su vez la modificación de las distancias entre los puntos y, consecuentemente, las resultantes del conjunto de las fuerzas que actúan en el instante siguiente.

Mientras que el conjunto de estas ecuaciones diferenciales define el problema dinámico, su «integración» constituye la *solución*. La integración de las ecuaciones del movimiento lleva al cálculo del conjunto de trayectorias $r(t)$ de los puntos del sistema. Las trayectorias espacio-temporales de un conjunto de puntos en interacción contienen la totalidad de la información que la dinámica reconoce como pertinente; constituyen la descripción completa del sistema dinámico.

Toda descripción dinámica implica, por tanto, dos tipos de datos empíricos: por una parte, la descripción de las posiciones y de las velocidades de cada uno de los puntos de un sistema en un instante dado, a menudo llamado instante inicial, ya que la integración de las

ecuaciones dinámicas desplegará a partir del «estado inicial» así descrito la sucesión de los estados, es decir, el conjunto de las trayectorias puntuales; por otra parte, *la naturaleza de las fuerzas dinámicas*, es decir, la manera en la cual las aceleraciones instantáneas que generan pueden ser deducidas del estado instantáneo del sistema

En lo que concierne al segundo punto, sabemos que el triunfo de la ciencia newtoniana es el descubrimiento de que una sola fuerza, la fuerza de gravitación, determina el movimiento de los planetas, de los cometas y de los cuerpos que caen sobre la tierra. Cualquiera que sea el par de cuerpos materiales, su distancia y sus respectivas masas, el sistema newtoniano implica que una fuerza de atracción los une, que se ven atraídos el uno hacia el otro por esta fuerza, proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

La dinámica newtoniana se presenta entonces como doblemente universal. La definición de la ley de gravitación que describe cómo las masas tienden a acercarse las unas con respecto a las otras no contiene ninguna referencia a la escala de los fenómenos. Se aplica igualmente al movimiento de los átomos, al de los planetas y al de las estrellas de una galaxia: todo cuerpo, cualquiera que sea su dimensión, tiene una masa, es decir, se ve sometido a las fuerzas de interacción newtonianas. Por otra parte, si definimos un sistema dinámico por el hecho de que el movimiento de cada uno de sus puntos queda determinado en cada instante por la posición y la velocidad del conjunto de puntos materiales que lo constituyen, el único sistema dinámico, hablando rigurosamente, es el universo en su conjunto. Ya que los cuerpos interaccionan en el universo, cualquiera que sea la distancia que los separa, los sistemas dinámicos locales, tales como el sistema planetario, no pueden definirse más que por aproximación, despreciando el conjunto de fuerzas pequeñas con respecto a aquellas de las cuales calculamos el efecto.

Insistamos en este punto: cualquiera que sea el sistema dinámico, la forma de las leyes del movimiento, $F = ma$, permanece válida. Otros tipos de fuerzas diferentes de la fuerza de gravitación podrían ser descubiertos —y efectivamente han sido descubiertos: las fuerzas de atracción y de repulsión eléctricas, por no citar más que éstas—, y vendrían entonces a modificar el contenido empírico de las leyes del movimiento; no modificarían *la forma*, que define lo que, fundamentalmente, es el mundo de la dinámica, lo que significa la reducción del cambio a un conjunto de trayectorias. Este significado que-

da contenido en los tres atributos de la trayectoria mecánica: *la legalidad, el determinismo, la reversibilidad*.

La ley dinámica que rige la trayectoria deduce el conjunto de las aceleraciones instantáneas de las fuerzas de interacción entre los puntos del sistema. Por tanto supone, determinada la naturaleza de las fuerzas, la manera en la cual éstas varían con la distancia entre estos puntos. Sin embargo, la ley dinámica no basta para describir tal o cual evolución dinámica particular, sino solamente para definir todas las evoluciones posibles. Para calcular una trayectoria es necesario adjuntar al conocimiento de la ley del movimiento el conocimiento empírico de un estado instantáneo cualquiera del sistema. La ley general deduce el sistema, tal como un razonamiento lógico deduce la conclusión a partir de las premisas. Es destacable que, siendo conocida la ley, cualquier estado particular basta para definir enteramente el sistema y no solamente su evolución futura, sino también aquella, perteneciente al pasado, que ha finalizado en ese estado. En consecuencia, en cada instante todo viene dado. La dinámica define todos los estados como equivalentes, ya que cada uno permite determinar todos los demás, predecir la totalidad de las trayectorias que constituyen la evolución del sistema.

«Todo viene dado», esta expresión a menudo meditada por Bergson resume la dinámica y la realidad que ésta describe; todo viene dado por el dato inicial; la ley general de evolución dinámica no permite ninguna predicción particular en tanto que uno de los estados del sistema no esté definido; en cuanto lo está, la ley determina completamente el sistema, permite deducir su evolución y calcular su estado en cualquier instante anterior o posterior.

Todo viene dado, pero también todo es posible. El ser que tuviera el poder de manipular el sistema dinámico tiene la libertad de imaginar para este sistema cualquier estado; desde el momento que este estado es compatible con la definición dinámica del sistema, es posible calcular un estado inicial tal que el sistema llegue «espontáneamente» al estado escogido en el momento escogido. A la generalidad de las leyes dinámicas responde la arbitrariedad de las condiciones iniciales y, consecuentemente, la arbitrariedad de las evoluciones particulares.

La *reversibilidad* de la trayectoria dinámica fue, en lo que a ella se refiere, implícitamente afirmada por todos los fundadores de la dinámica, y entre otros por Galileo y Huyghens: cada vez que querían poner en evidencia la relación de equivalencia entre causa y efecto so-

bre la cual deseaban fundar su descripción matemática del movimiento, evocaban una operación imaginaria que podemos ilustrar con una pelota perfectamente elástica que rebota sobre el suelo; imaginaban la inversión instantánea de la velocidad del móvil estudiado y describían su retorno hacia la posición inicial con restauración simultánea de lo que había producido el movimiento acelerado entre el instante inicial y el instante de inversión. La pelota, por ejemplo, remonta a su altura inicial.

La dinámica hace de la reversibilidad la propiedad de toda evolución dinámica. El antiguo experimento imaginario era de hecho la escenificación de una propiedad matemática general de las ecuaciones dinámicas: la estructura de estas ecuaciones implica que si las velocidades de todos los puntos de un sistema son instantáneamente invertidas, todo ocurre como si el sistema «recorriera el tiempo en sentido inverso». Recorre de hecho en sentido inverso todos los estados por los cuales su evolución anterior lo ha hecho pasar. La dinámica define como *matemáticamente equivalentes* las transformaciones de $t \rightarrow -t$, es decir, la inversión del sentido de recorrido del tiempo, y $v \rightarrow -v$, la inversión de las velocidades. Lo que una evolución dinámica ha realizado, otra evolución, definida por la inversión de las velocidades, puede deshacerlo y restaurar una situación idéntica a la situación inicial.

Esta última propiedad de reversibilidad de la dinámica conduce a una dificultad cuyo carácter fundamental no se impondrá más que con la mecánica cuántica. Toda intervención, manipulación, medida es, en esencia, irreversible. En consecuencia, la ciencia *activa* se encuentra, por definición, extraña al mundo reversible que ella describe, cualquiera que sea, por otra parte, el grado de plausibilidad intrínseca de tal descripción. Sin embargo, igualmente desde este último punto de vista, la reversibilidad puede ser tomada como símbolo de la extrañeza del mundo descrito por la dinámica. Cualquiera conoce la impresión de absurdo que provocan las películas proyectadas al revés, el espectáculo de una cerilla que reconstituye su llama, aquellos tinteros rotos que se vuelven a formar y retornan sobre la mesa después de que la tinta se ha vuelto a concentrar, aquellos ramos que rejuvenecen hasta transformarse otra vez en capullos. El mundo dinámico define tales evoluciones como posibles, en pie de igualdad con sus inversas, que nosotros conocemos.

2. *Movimiento y futuro*

Sabemos que Aristóteles había hecho del tiempo la medida del cambio. Pero también había reconocido la multiplicidad cualitativa de los cambios de la naturaleza. Para la dinámica, igualmente, el tiempo es la medida del cambio: es el parámetro en función del cual la ley despliega sus efectos, despliega la sucesión infinita de estados dinámicos. Pero el tiempo —medida de la dinámica— no es un tiempo general, común al conjunto de las evoluciones cualitativamente distintas, cada una poseyendo su propia razón, su propio ritmo; el tiempo dinámico constituye no solamente una medida del futuro, sino el mismo futuro dinámico, al cual postulamos, se reduce en principio el conjunto de los procesos naturales. La diversidad cualitativa de los cambios se ve reducida al correr homogéneo y eterno de un tiempo único, *medida* pero también *razón* de todo proceso. ¿Cómo comprender esta nueva concepción del porvenir natural?

Es interesante introducir este problema comparando el futuro dinámico con la concepción atomista del cambio, muy potente en el momento en que Newton formulaba sus leyes. De hecho, parece ser que no solamente Descartes, Gassendi y d'Alembert, sino el mismo Newton, pensaban que las colisiones entre átomos duros constituían una fuente última, incluso la única, del cambio de movimiento ¹. Sin embargo, la descripción dinámica que aquellos que hemos citado han contribuido a fundar, se opone casi punto por punto a la que deriva de la hipótesis atomista.

Al carácter continuo de la aceleración descrita por las ecuaciones dinámicas se opone el choque discontinuo, colisión instantánea entre partículas duras, en el cual Newton había ya notado el hecho que, en contradicción con la dinámica, conlleva una pérdida de movimiento irreversible. La única colisión reversible, es decir, la única que está de acuerdo con las leyes de la dinámica, es la colisión elástica. Pero

¹ Sobre este punto, véase T. Hankins, «The Reception of Newton's Second Law of Motion in the Eighteenth Century», en *Archives internationales d'Histoire des Sciences*, vol. XX, 1967, pp. 42-65; B. I. Cohen, «Newton's second Law and the Concept of Force in the Principia», en *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton, Tricentennial Celebration, The Texas Quarterly*, vol. X, núm. 3, pp. 125-127. Los cuatro párrafos que siguen se inspiran, en lo que concierne al problema del atomismo y de la conservación, en W. L. Scott, *The Conflict between Atomism and Conservation Theory*, Londres, MacDonald, 1970.

¿cómo atribuir la compleja propiedad de elasticidad a los átomos de los cuales pretendemos hacer los primeros elementos de la naturaleza?

Por otra parte, y en un plano menos técnico, a la ley general del movimiento dinámico se opone el carácter aleatorio generalmente atribuido a las colisiones entre átomos. Los filósofos de la Antigüedad ya habían subrayado el hecho de que cada proceso natural, interpretado en términos del movimiento y de las colisiones de los átomos en el vacío, puede ser objeto de múltiples explicaciones, todas plausibles, todas diferentes. Lo que poco importa al filósofo atomista al ser su meta, ante todo, el demostrar la suficiencia de este tipo de explicación, la inutilidad de recurrir a lo sobrenatural, es el describir un mundo sin Dios ni normas, un mundo en donde el hombre es libre y no tiene por qué esperar castigo o recompensa de ningún tipo, divino o natural. Pero ¿qué relación hay entre este mundo mortal, este mundo inestable en donde, sin pausa alguna, los átomos se unen y se deshacen, los seres nacen y mueren y el mundo inmutable de la dinámica, regido por una fórmula matemática única, verdad eterna desplegándose en un mundo futuro tautológico? La ciencia moderna, ciencia de ingenieros y astrónomos, es una ciencia de intervención y de previsión, a la que el convencimiento general de que todo es explicable por los átomos no puede bastarle. La ley matemática constituye la posibilidad concreta de prever y de manipular. La naturaleza será legal, sometida y previsible, y no caótica, irregular, estocástica.

Volveremos a encontrar en el siglo XX el contraste entre el determinismo legal y el acontecimiento aleatorio que, tal como lo ha mostrado Koyré, había atormentado a Descartes². En efecto, desde el final del siglo XIX, con la teoría cinética de los gases, el caos de los átomos ha vuelto a la física: se ha visto que el comportamiento caótico de una población numerosa, tal como la de las moléculas de un gas, es el comportamiento previsible por excelencia. Desde entonces, el problema de la relación entre la ley dinámica y la descripción estadística se transforma en uno de los problemas centrales de la física y constituye la clave de la renovación actual de la dinámica (véase *infra*, libro III).

Sin embargo, en el siglo XVIII el enfrentamiento parecía no tener salida, lo que, dicho sea de paso, contribuye a explicar el escepticismo de la mayoría de los físicos de esta época en lo que se refiere al

² A. Koyré, *Etudes galiléennes*, pp. 127-136.

alcance efectivo de la descripción dinámica. En efecto, estos físicos sabían que la descripción dinámica infinitesimal dejaba en la sombra el proceso de colisión, para ellos la única fuente inteligible del cambio de movimiento. Sabían también que en la naturaleza, en cuanto hay un choque, rozamiento, contacto brusco entre cuerpos de diferentes velocidades, algo de movimiento se pierde, por lo que concluían que, en estos casos no ideales, la energía no se conserva (véase también capítulo IV, 3). Les era imposible, tanto a los atomistas como a los ingenieros preocupados con el rendimiento, ver en la dinámica algo más que una idealización, un modelo parcial expresado en un lenguaje coherente. Así pues, los físicos del continente se han resistido durante mucho tiempo a las seducciones del newtonianismo. Notemos que la victoria de esta doctrina en Francia coincide, y no es un azar, con la separación profesional entre físicos e ingenieros, que favorecieron las instituciones académicas post revolucionarias.

Pero ¿dónde encontrar las raíces de la síntesis newtoniana y de su concepción del cambio? Síntesis³ entre la ciencia de las máquinas ideales, en donde el movimiento se transmite entre piezas ya en contacto, sin choques ni rozamientos, y la ciencia de los astros que interaccionan a distancia, esta evolución se ha formado en contra del atomismo, la ciencia del azar y de las colisiones. ¿Debemos por ello dar la razón a aquellos que creen que la dinámica newtoniana, con el hecho de atribuir a las interacciones a distancia la responsabilidad exclusiva de todos los procesos naturales, representa una novedad real, una ruptura radical en la historia del pensamiento? Es lo que la historia positivista ha querido siempre hacernos creer cuando nos cuenta cómo Newton tuvo la valentía de inducir, del estudio matemático del movimiento planetario y de las leyes de la caída de los cuerpos la acción de una «fuerza» que permitía dar una formulación común a fenómenos que en principio no tenían ninguna relación entre sí. La verdad histórica parece, sin embargo, menos conforme con las normas positivas. Fue casi totalmente ignorada por los contemporáneos de Newton, a los que habría escandalizado.

¿Qué habrían dicho los que, en el continente, acogían no sólo con sospechas, sino con indignación esta «fuerza» extrañamente similar a

³ En su obra sobre la historia de la mecánica (*Die Mechanik in Ihrer Entwicklung*), Mach ha insistido sobre la doble filiación de la dinámica moderna: ciencia de las trayectorias y ciencia de los balances.

las cualidades ocultas, a las preferencias y a las atracciones de la antigua física? ¿Qué habrían dicho los defensores de la racionalidad y del rigor mecanicista si hubieran conocido la extraña historia de la fuerza newtoniana? Ya que, detrás de las prudentes declaraciones de Newton (no habrá ninguna hipótesis en lo que se refiere a la naturaleza de las fuerzas), se disimulará la pasión de un alquimista ⁴. Paralelamente a sus estudios matemáticos, Newton había estudiado durante treinta años los antiguos escritos alquimistas y explorado en estudios minuciosos y enconados de laboratorio la posibilidad de realizar la gran obra, la síntesis del oro.

La síntesis newtoniana, la unificación del cielo y la tierra fue la obra no de un astrónomo, sino de un químico. Lo que inspiró la fuerza newtoniana que anima a la materia inerte y que constituye en su sentido más fuerte la actividad de la naturaleza, parecen ser las fuerzas que el químico Newton observó entre los cuerpos, fuerzas de atracción, de repulsión que regulan la «vida social» de la materia, fuerzan a todo cuerpo a formar pares estables con otros, a provocar por repulsión la disolución de los compuestos, a servir de mediadores ⁵ que permiten el acercamiento y el acoplamiento de otros cuerpos.

Cierto es que el estudio de las trayectorias celestes jugó un papel decisivo. Al principio, hacia 1679, Newton parece haber tenido como solo objetivo encontrar en este estudio la acción de nuevas fuerzas atractivas, *análogas* a las fuerzas químicas, más simples de estudiar matemáticamente. Aproximadamente seis años más tarde este estu-

⁴ Es lo que han concluido los historiadores contemporáneos que han comenzado el estudio de la impresionante masa de «notas alquimistas» de Newton, ignoradas y despreciadas como «no científicas» hasta ahora. Lord Keynes, quien ha jugado un papel decisivo en su recolección, resume el choque que supuso su descubrimiento: «Newton no fue el primero de la Era de la Razón. Fue el último de los magos, el último babilonio o sumerio, el último gran espíritu que haya contemplado el mundo visible y el mundo intelectual con los mismos ojos que aquellos que comenzaron a construir nuestra herencia intelectual hace poco menos de diez mil años»; citado por B. J. Dobbs, *The Foundations of Newton's Alchemy*, Cambridge, University Press, 1975, p. 13; R. S. Westfall, «Newton and the Hermitic tradition», en *Science, Medicine and Society*, ed., A. G. Debus, Londres, Heinemann, 1972, y R. S. Westfall, «The Role of Alchemy in Newton's Career», en *Reason, Experiment and Mysticism*, ed. M. L. Righini Bonelli y W. R. Shea, Londres, MacMillan, 1975.

⁵ Dobbs (*op. cit.*, pp. 204-210) estudia el papel del «mediador», este «tercer cuerpo» que hace sociables a los otros dos cuerpos. A este propósito, recordaremos la importancia del personaje del mediador en *Las afinidades electivas* de Goethe, no tan alejado de Newton en lo que a la química respecta.

dio matemático había llegado a una conclusión inesperada: no solamente hay similitud entre las fuerzas que unen los planetas y aquellas que aceleran la caída de los cuerpos, hay identidad; la atracción no es específica de cada planeta, es la misma, ya se trate de la Luna alrededor de la Tierra, de los planetas, o incluso de los cometas que atraviesan el sistema solar. Newton buscaba en el cielo fuerzas análogas a las fuerzas químicas, a las afinidades que constituyen propiedades específicas, diferentes para cada compuesto químico, confiriendo a cada uno una actividad cualitativamente diferenciada. Sin embargo, descubrió una ley universal cuya validez confirmó para todos los fenómenos químicos, mecánicos, celestes.

La síntesis newtoniana no es, pues, una ruptura, es una *sorpresas*. Es un descubrimiento inesperado, trastornador, que la cultura conmemora haciendo de Newton el símbolo mismo de la ciencia moderna. Esta ciencia suponía un orden universal, suponía que un método laborioso de medida de experimentación podría descubrir la verdad del mundo. Y he aquí que de hecho la naturaleza se deja explicar, que responde más allá de las esperanzas de aquél que la interrogaba.

Durante mucho tiempo esta prolijidad repentina de la naturaleza, este triunfo del «Moisés» inglés constituyó una especie de escándalo intelectual para los racionalistas del continente. La obra de Newton fue aceptada como un descubrimiento puramente empírico, cuya refutación empírica no sorprendería demasiado a nadie. Así es como en 1747 Euler, Clairaut y d'Alembert, sin duda los más grandes hombres de ciencia de la época, llegan a la misma conclusión: Newton se ha equivocado, para describir el movimiento de la Luna es necesaria una fórmula matemática de la fuerza de atracción más compleja, hacer la suma de dos términos. Desde ese momento y durante dos años, todos creen que al fin la naturaleza ha desmentido a Newton y esta creencia es fuente de excitación, pero no de desesperación. Muy lejos de identificarla con la ciencia física misma, los físicos consideran sin demasiados remordimientos el renunciar al descubrimiento newtoniano. D'Alembert llega hasta mostrar escrúpulos en la búsqueda de otras pruebas en contra de Newton, a «darle la patada del asno»⁶.

Uno solo había tenido la audacia de elevarse en contra del veredicto de los físicos, de protestar contra la ligereza con la que los físicos proponían abandonar la universalidad de la fuerza de gravita-

⁶ La historia del «error» de Newton viene contada por Hankins (*Jean d'Alembert, Science and Enlightenment*, pp. 29-35).

ción; este newtoniano convencido era Buffon, que escribía en 1748: «Una ley en física no es ley más que porque su medida es simple y la escala que la representa no es solamente siempre la misma, sino que además es única... El señor Clairiaut ha propuesto una dificultad en contra del sistema de Newton, pero no es más que una dificultad que no debe ni puede convertirse en un principio, es necesario buscar cómo resolverla y no hacer de ella una teoría cuyas consecuencias no se apoyan más que sobre un cálculo; ya que, como he mencionado, se puede representar todo con un cálculo y no llegar a nada; y si permitimos añadir uno o varios términos a una ley física, como lo es la de la atracción, no añadimos más que arbitrariedad en lugar de representar la realidad ⁷.»

Más tarde, Buffon proclamaría lo que llegaría a ser bien pronto, pero por poco tiempo, el programa de investigación de la química: «Las leyes de afinidad por las cuales las partes constituyentes de las diferentes sustancias se separan de las otras para recombinarse entre ellas y formar materias homogéneas son las mismas que la ley general por la cual todos los cuerpos celestes actúan los unos sobre los otros: se ejercen de la misma forma y en las mismas relaciones de masas y distancias; un globo de agua, de arena o de metal actúa sobre otro globo como el globo de la tierra actúa sobre el de la Luna; y si hasta hoy hemos mirado las leyes de la afinidad como diferentes de las de la gravitación, es por no haberlas concebido bien, no haberlas entendido bien, es por no haber arropado este objeto en toda su extensión. La figura que, en los cuerpos celestes, no contribuye nada o casi nada a la ley de la acción de los cuerpos los unos sobre los otros, porque la distancia es muy grande, hace al contrario casi todo cuando la distancia es muy pequeña o nula... Nuestros sobrinos podrán, con la ayuda del cálculo, abrirse camino en este nuevo campo de conocimientos» ⁸, es decir, deducir de la figura de los cuerpos elementales su ley de interacción.

La historia dio la razón al naturalista, para quien la fuerza no era un mero artífice matemático, sino el fundamento de una nueva cien-

⁷ G. L. Buffon, *Réflexions sur la loi d'attraction*, apéndice a *Introduction à l'Histoire des Minéraux*, publicada en 1774, tomo IX de las *Oeuvres complètes*, París, Garnier Frères, pp. 75 y 77.

⁸ G. L. Buffon, *Histoire Naturelle. De la Nature, Seconde Vue*, 1765, citado por H. Metzger, *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique*, París, Blanchard, 1974, pp. 57-58.

cia de la naturaleza: los físicos tuvieron que reconocer el error cometido. Cincuenta años más tarde, Laplace pudo escribir el *Sistema del Mundo*, la ley de la gravitación universal había resistido victoriosamente, los numerosos casos en los cuales parecía refutada se habían transformado en demostración brillante de su vitalidad y de su fecundidad. Paralelamente, y en particular bajo la influencia de Buffon, los químicos franceses volvían a descubrir la extraña analogía entre la atracción física y las afinidades químicas⁹; a pesar de los sarcasmos de d'Alembert, Condillac, Condorcet, cuyo racionalismo riguroso se acomodaba mal a esas «analogías» oscuras y estériles, rehacían en sentido contrario el recorrido de Newton, de los astros a la materia.

A principios del siglo XIX, el programa newtoniano, la reducción del conjunto de los fenómenos físico-químicos a la acción de las fuerzas —algunos han añadido a la atracción de la gravedad la fuerza repulsiva del calor que dilata los cuerpos y facilita la disolución, así como las fuerzas eléctricas y magnéticas—, llegó a ser el programa oficial del grupo científico más potente y prestigioso: la escuela de Laplace que domina el mundo científico en el momento en que el Imperio domina Europa¹⁰.

A principios del siglo XIX se crean las grandes escuelas francesas y la Universidad se reorganiza. Es el momento en el cual los hombres de ciencia llegan a ser profesores e investigadores profesionales y a quienes es sistemáticamente confiada la formación de sus sucesores.

⁹ A. Thackray describe esta conversión en buffonianos de una parte de los químicos franceses en *Atoms and Power, An Essay on Newtonian Matter and the Development of Chemistry*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1970, pp. 199-223. La *Statique chimique* de Berthollet constituye la clausura y coronación del programa buffoniano en química; los alumnos de Berthollet abandonaron el conjunto de conceptos por los cuales este último había hecho de un proceso de reacción química una transformación compatible con las exigencias de la ciencia de las fuerzas y de las trayectorias y, en especial, la idea de que la asociación química en proporciones definidas constituye un caso particular y no la regla. ¿Cómo habrían podido las fuerzas newtonianas explicar que dos átomos se asocien, sin que un tercero, también atraído, tome parte en esta asociación?

¹⁰ No se trata aquí de explicar ni el triunfo del newtonianismo en Francia, ni su caída, sino de subrayar algunos puntos, y en primer lugar la correlación al menos cronológica, entre estos acontecimientos y diversas etapas de profesionalización de la ciencia en Francia. Véase M. Crosland, *The Society of Arcueil, a View of French Science at the Time of Napoleon*, Londres, Heinemann, 1960, así como su biografía de Gay-Lussac, en Cambridge University Press, 1978.

res¹¹. El saber intenta sintetizarse, unificarse en manuales y en trabajos de divulgación. La ciencia no se discute ya en los salones, se enseña o se difunde; ya no es objeto de críticas, ni está sometida a los intereses mundanos¹², es objeto de consenso; y este consenso, como hemos visto en el capítulo anterior, fue primeramente newtoniano. Podríamos decir que Buffon ha triunfado sobre el Siglo de las Luces.

Un siglo después de la apoteosis de Newton en Inglaterra, el énfasis de los versos del hijo de Ampère hace eco al del epitafio de Pope¹³:

*Du Christ de la science annonçant la venue,
Kepler, du tabernacle avait ouvert la nue;
Alors, du dieu voyant adoré par Platon,
La verbe se fit homme, il s'appela Newton.
Il vint, il révéla le principe suprême,
Constant, universel, un comme Dieu lui même.
Les mondes se taisaient, il dit: ATTRACTION.
Ce mot, c'était le mot de la création.*

Por breve tiempo, pero que marcará a los científicos de una nostalgia duradera, la ciencia triunfó, reconocida y honrada por un estado poderoso, poseedora de una concepción global y coherente del

¹¹ Sabemos que Thomas Kuhn ha hecho de esta función de las instituciones científicas modernas de encargarse de la formación de futuros investigadores, es decir, de asegurar su propia reproducción, una característica fundamental de la actividad científica tal como la conocemos desde el siglo XIX en adelante. Estos problemas ya empiezan a ser estudiados por los historiadores de la ciencia, véanse los estudios de M. Crosland, R. Hahn y W. Farrar en *The Emergence of Science in Western Europe*, ed. M. Crosland, Londres, MacMillan, 1975.

¹² Gaston Bachelard concede una gran importancia a este aislamiento del «cuerpo científico», del cual hace un progreso decisivo; podríamos incluso adelantar que en este sentido toda su obra tiene por eje esta puesta a punto institucional y sus consecuencias en el orden de los conocimientos, desde la ciencia mundana (*La Formation de l'esprit scientifique*) hasta la «ciudad científica» (*Le Rationalisme appliqué*). Más allá de las dimensiones fácilmente ridiculizables de las discusiones de salón, la apertura de la ciencia del siglo XVIII, la multiplicación de los círculos académicos, la práctica no profesional de una tarea de investigación curiosa y crítica, podría servirnos de fuente de inspiración bien necesaria en los tiempos actuales.

¹³ Citado en Schlanger, J., *Les Métaphores de l'organisme*, París, Vrin, 1971, p. 108.

mundo. Newton, venerado por Laplace, llegó a ser el símbolo, la expresión misma de la verdad de esta ciencia de la edad de oro, del feliz momento en que los científicos fueron identificados y se reconocieron a sí mismos como los participantes de una empresa colectiva, mantenida y alentada por la sociedad y fundada sobre una fecunda unanimidad teórica.

El programa de Laplace murió con el Imperio, desbordado por el descubrimiento de numerosos fenómenos que fue incapaz de asimilar. ¿Podemos decir por tanto que el mecanismo está muerto, que el mundo newtoniano está abandonado? Es verdad que un cierto mecanicismo elemental ha muerto —estaba ya muerto con el reemplazo de los conceptos geométricos, por los conceptos infinitesimales y con la introducción de fuerzas actuando a distancia. En este sentido, el mecanicismo no ha parado de morir a cada trastorno de las ciencias físicas; lo que significa que nos ha sobrevivido a todos, espectro renaciente sin cesar, exorcizado de nuevo sin cesar.

¿Qué significan hoy, después de la teoría de los campos, la relatividad, la mecánica cuántica, la síntesis newtoniana? Es un problema complejo sobre el que tendremos que volver. Sabemos hoy que la naturaleza no es siempre conforme a ella misma. En el dominio de lo microscópico, las leyes de la mecánica cuántica reemplazan a las de la mecánica clásica. Lo mismo que a escala del Universo, la física relativista toma el relevo de la física newtoniana. Sin embargo, ésta queda como punto de referencia por excelencia, siempre válida a nuestra escala. Podemos incluso decir que en el sentido en que la hemos definido, descripción de trayectorias deterministas, reversibles, estáticas, la dinámica newtoniana permanece en el corazón de la física. Además, ha constituido el terreno de predilección de los más grandes matemáticos y físicos (entre ellos Hamilton, Poincaré). Así es como ha llegado a ser un lenguaje formal, coherente y abstracto y en tanto que tal es como vamos ahora a descubrirla y hacer explícita la concepción del cambio que presupone.

3. *El lenguaje de la dinámica*

La formalización de la dinámica responde en primer lugar a esta exigencia: descubrir el «buen» conjunto de variables que define el sistema de manera tal que la descripción tenga la máxima sencillez y economía, tal que los principios de la dinámica y en particular el *prin-*

cipio de conservación de la energía, puedan aparecer con toda claridad.

El principio de conservación de la energía, de conservación de la suma de las energías potencial y cinética, constituye la traducción, bajo la forma de regla sintáctica del lenguaje dinámico, de lo que había sido evidente en la base de la ciencia moderna de las máquinas simples (véase capítulo I, 4): en el mundo idealizado, sin choque ni rozamiento, el rendimiento de las máquinas es igual a uno, el dispositivo realizado por una máquina se limita a transmitir íntegramente el movimiento que recibe. La máquina a la cual se confiere una cierta cantidad de energía potencial (resorte tenso, peso elevado, aire comprimido, etc.) produce un movimiento correspondiente a una cantidad igual de energía cinética. Esta es a su vez exactamente suficiente para restituir a la máquina la energía potencial utilizada en la producción del movimiento.

El caso más simple es aquel en donde la única fuerza a tomar en consideración es la fuerza de gravitación, siendo el caso de las máquinas simples (poleas, palancas, tornos, etc.). En ese caso, una relación global de equivalencia entre causa y efecto es fácil de establecer; sólo la altura descendida por el cuerpo en un instante dado determina la velocidad adquirida durante esta bajada. Ya la caída del cuerpo de masa m sea vertical, ya siga un plano inclinado o un recorrido en montaña rusa, de cualquier forma la velocidad (v) que adquiere y la energía cinética ($mv^2 / 2$), no dependen más que del desnivel, h , recorrido ($v = \sqrt{2gh}$) y hacen al cuerpo capaz de volver a subir a su altura inicial (cualquiera que sea, una vez más, el camino seguido); el trabajo contra la fuerza de gravitación que una subida tal implica, restituye al sistema la energía potencial, mgh , que su caída le había hecho perder. Pensemos igualmente en el movimiento pendular, en el curso del cual las energías cinética y potencial se agotan alternativamente y alcanzan, alternativamente también, valores máximos.

Naturalmente, cuando se trata no ya de un cuerpo gravitatorio y de la Tierra, sino de un sistema de cuerpos en interacción, la equivalencia reversible entre causa productora y efecto producido es menos fácil de visualizar; en cada instante, la distancia entre las masas del sistema y, en consecuencia, las fuerzas de interacción entre esas masas y, en consecuencia, la aceleración de cada punto del sistema, varían. La aceleración en cada punto, al igual que la variación de energía potencial provocada por esta aceleración, es función, en cada instante, *del estado global del sistema*. La trayectoria seguida por cada uno de los puntos refleja y expresa, desde un punto de vista local, la

evolución global del sistema. Es, consecuentemente, a nivel global como puede establecerse la equivalencia reversible entre causa y efecto. En cada instante, la variación global de energía cinética, balance de las aceleraciones sufridas en cada punto del sistema, compensa exactamente la variación de la energía potencial, determinada por el conjunto de las variaciones de las distancias entre los puntos del sistema. De aquí ese principio dinámico fundamental: la evolución dinámica del sistema aislado conserva la energía de ese sistema.

La energía potencial (o «potencial», tradicionalmente simbolizado por V), que depende de las posiciones relativas de los puntos materiales, constituye una generalización de la magnitud que permitía a los mecánicos medir el movimiento que una máquina podía ser capaz de producir después de una transformación impuesta a su configuración espacial (por ejemplo, un cambio de altura de una masa m perteneciente a la máquina confiere a esta máquina una energía mgh). Pero la energía potencial no solamente permite a los ingenieros el hacer balances. Permite también describir el conjunto de las fuerzas aplicadas en cada instante en los diferentes puntos del sistema: en cada uno de los puntos la derivada del potencial respecto a una coordenada espacial q mide la fuerza aplicada en ese punto en la dirección de esta coordenada. Desde este momento, las leyes newtonianas del movimiento pueden formularse adoptando no ya la fuerza, sino la función potencial como magnitud central: la variación en cada instante de la velocidad de una masa puntual (o del momento, p , producto de la masa por la velocidad) se mide por la derivada del potencial por la coordenada q de esta masa.

El siglo XIX iba a generalizar la descripción dinámica introduciendo en particular una nueva función, la función hamiltoniana H , que es simplemente suma de las energías potencial y cinética del sistema, pero expresada en términos de lo que se llama «variables canónicas». Las ecuaciones dinámicas que definen un problema en el espacio «intuitivo» en función de las posiciones y de las derivadas con respecto al tiempo de las posiciones tienen la misma diversidad que esos problemas; las ecuaciones *canónicas*, en lo que a ellas atañe, permiten rebasar esta particularidad y formular todos los problemas dinámicos bajo una forma idéntica. La descripción canónica del problema dinámico es muy abstracta: ya no implica desde un primer momento involucrar las posiciones y las velocidades derivadas de las posiciones. Las variables canónicas q y p (llamadas por analogía con la posición q y el momento $p = m \, dq/dt$, coordenadas de posición y de

momento) se definen como magnitudes *independientes la una de la otra*. El momento canónico ya no puede ser calculado a partir de la posición, pero la evolución en el tiempo de la posición y del momento —y, por tanto, la trayectoria de los puntos materiales en el espacio medido por estas variables— son deducibles de la función hamiltoniana, que contiene así, bajo su forma canónica, la verdad dinámica del sistema. Ciertamente es que, en los casos simples (péndulo, resorte, obús de cañón) las variables canónicas son las variables usuales, pero esto no es más que una cuestión de oportunidad, no una obligación.

El Hamiltoniano $H(p, q)$ constituye entonces la magnitud fundamental de la que pueden ser deducidas la descripción del sistema y su evolución. Definir un problema dinámico en el marco del formalismo hamiltoniano es, de entrada, escoger la mejor representación canónica del sistema, escoger variables canónicas p, q , tales que el Hamiltoniano expresado en función de estas variables tenga la estructura más apropiada para la resolución del problema, para la integración de las ecuaciones. Existe un número infinito de representaciones de un sistema dinámico dado, de las que cada una puede constituir bastante más que una simple transformación geométrica de la representación «intuitiva» del sistema: las variables canónicas pueden ser funciones muy complejas de las posiciones y de las velocidades «intuitivas». Pero lo esencial es que todas las representaciones canónicas son equivalentes; cada uno de los puntos de vista canónicos sobre el sistema contiene la verdad completa sobre este sistema. En cuanto conocemos el Hamiltoniano expresado en función de las variables escogidas, podemos calcular, para cada uno de los puntos, la derivada de esta función con respecto a la variable de posición y a la variable de momento, $\partial H(p, q)/\partial q$ y $\partial H(p, q)/\partial p$ ¹⁴. Estas derivadas tienen un sentido físico. La primera da la variación a lo largo del tiempo de p , dp/dt , y la segunda, la variación a lo largo del tiempo de q , dq/dt . El Hamiltoniano constituye entonces la ley del movimiento del sistema estudiado; cualquiera que sea la representación escogida, la evolución en el tiempo de las variables canónicas correspondientes pueden deducirse del Hamiltoniano a través de las *mismas* ecuaciones canónicas.

Las ecuaciones canónicas constituyen, sin lugar a duda, una de las más destacables realizaciones de la historia de las ciencias. Su alcance no se ha limitado, de hecho, a la dinámica. Juegan un papel fun-

¹⁴ El ∂ indica que se trata de derivadas *parciales*. H es simultáneamente función de p y q , pero se deriva únicamente con respecto a una de las dos variables.

damental y notable en mecánica «estadística», aplicable a sistemas constituidos por un gran número de partículas en interacción, en mecánica cuántica, aplicable a las moléculas y a los átomos. Es verdad que el significado de las ecuaciones de Hamilton se ve por ello generalizado, abstraído. En mecánica cuántica, tal como veremos, el Hamiltoniano función de las coordenadas y de los momentos se debe reemplazar por un ente de nuevo tipo, un *operador*. Sin embargo, las ecuaciones hamiltonianas subsisten; constituyen lo que podríamos llamar el lenguaje eterno de la dinámica y forman parte, de modo definitivo, de nuestra ciencia.

El Hamiltoniano es, ya lo hemos dicho, la suma de las energías cinéticas y potencial expresadas en función de las variables canónicas escogidas para describir el sistema.

En tanto que la definición del Hamiltoniano da su contenido físico particular a cada problema, la estructura de las ecuaciones canónicas contiene las propiedades *a priori* de toda evolución dinámica. Las ecuaciones canónicas son *reversibles*: la inversión del tiempo es matemáticamente equivalente a una inversión de las velocidades. Son *conservativas*: el Hamiltoniano, que expresa la energía del sistema con un par de variables canónicas escogidas, se conserva a lo largo de la evolución en el tiempo que determina; en cada instante de esa evolución, la variación de la energía potencial compensa exactamente la de la energía cinética. La energía del sistema genera una evolución que la mantiene invariante.

El lenguaje abstracto de la dinámica hamiltoniana, digámoslo así, devuelve la concepción dinámica del movimiento a su verdad. De hecho, trata la sucesión de estados que aparecen a lo largo del tiempo como una sucesión de puntos de vista, equivalentes los unos a los otros, sobre la verdad invariante del sistema que representa el hamiltoniano. Es de destacar, desde el punto de vista Hamiltoniano, que sea indiferente el considerar que la evolución dinámica describe, desde un punto de vista dado, la transformación de un sistema o que describe la modificación aportada a la descripción de un sistema invariante cuando el punto de vista y, consecuentemente, la definición de las variables canónicas, cambia de manera continua.

Hemos dicho que todas las representaciones de un mismo sistema son equivalentes; están engranadas entre sí por las transformaciones canónicas (transformaciones unitarias en mecánica cuántica) que conservan la forma hamiltoniana de las ecuaciones del movimiento. Nos plantearemos más tarde el problema del carácter suficiente de es-

tas transformaciones y veremos que la naturaleza no se agota en los puntos de vista que engendra (véase capítulo IX, 5). Preguntémonos ahora cómo escoger el par de las variables canónicas, es decir, el punto de vista sobre el sistema a seguir con el cual la evolución será descrita de una manera óptima.

En los ejemplos tipo de la dinámica clásica difícilmente se escapa a la selección de variables dinámicas de posición y de velocidad que expresan eficazmente la descripción más simple. En los problemas más complejos, la selección puede exigir más sutileza. Se trata de llegar al sistema de ecuaciones diferenciales más fácilmente integrable. Lo que cuenta es la estructura del Hamiltoniano, el cual, por derivación, da las variaciones de p y de q . Ahora bien, podemos imaginar una estructura particular que permitiría hacer la integración del todo fácil. Bastaría encontrar variables canónicas tales que el Hamiltoniano se encuentre reducido al término de energía cinética, que no depende más que de los momentos, es decir, tales que en términos de energía potencial, que no depende más que de las coordenadas de posición, se anule. En efecto, en ese caso los momentos cuya evolución viene dada por la derivada del Hamiltoniano respecto a las coordenadas de posición, no serían más que *invariantes* del movimiento [$\partial H(p)/\partial q \equiv 0$]. En cuanto a las posiciones, la integración de su ecuación de evolución no ofrecería ninguna dificultad: tendríamos una especie de movimiento pseudoinercial, en donde cada punto del sistema evoluciona independientemente de todos los demás (figura 1):

Ahora bien, esta representación singular que suprime formalmente toda interacción entre las unidades del sistema *define para noso-*

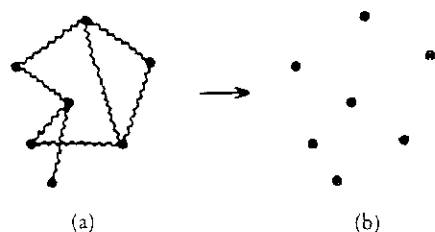


Figura 1. Transición de la representación de un sistema dinámico, como un conjunto de puntos interaccionantes, a la representación privilegiada, en donde cada punto se comporta independientemente de los otros (eliminación formal de la energía potencial).

tros el concepto de integrabilidad. Todo sistema descrito en función de ecuaciones diferenciales integrables puede ser representado como un conjunto de unidades cada una de las cuales evoluciona aisladamente, con independencia de todas las demás, en ese movimiento eterno y siempre igual a sí mismo que Aristóteles habría atribuido a los cuerpos divinos solamente. Como lo había hecho notar Maxwell¹⁵, recogiendo una palabra a su vez recogida por Hegel a los «antiguos»¹⁶, no solamente son los planetas, sino todas las partículas las que, como los dioses felices, van a donde quieren, cada una desplegando por su propia cuenta la ley singular de su capricho.

La particularidad de tal definición es que hace aparecer desde el nivel de las ecuaciones diferenciales no solamente la energía, sino el conjunto de los diferentes invariantes del movimiento dinámico, es decir, de las magnitudes físicas que guardan un valor constante a la largo de toda la evolución y bastan para determinarla enteramente. El que todo sistema dinámico integrable pueda ser asimilado a este tipo de definición, pone de manifiesto con evidencia el carácter estático y determinista de toda descripción a través de trayectorias dinámicas: «todo viene dado» significa aquí que, desde el primer instante, el valor de los diferentes invariantes del movimiento viene dado, nada puede ya «suceder» u «ocurrir», ninguna interacción puede alterar el movimiento pseuso-inercial; no solamente el sistema, sino cada unidad constitutiva de ese sistema no para de repetir, bajo formas equivalentes, un estado inicial del cual no puede olvidar el mínimo detalle.

Durante mucho tiempo se ha pensado que los sistemas integrables debían ser tomados como modelos de sistema dinámico. La dinámica se proponía aplicar el mismo método a todo problema; encontraría el «buen» cambio de variables que eliminaría las interacciones y la evolución dinámica se encontraría explícitamente reducida a la repetición de sí misma. Un ejemplo particularmente estudiado fue el célebre problema de tres cuerpos, quizá el problema más impor-

¹⁵ J. C. Maxwell, *Report on Tait's Lecture on Force*, en L. Campbell y W. Garnett, *The life of James Clerk Maxwell*, Londres, MacMillan, 1882, p. 648.

¹⁶ En *De Orbitis Planetarum* (Jena, 1801), Hegel escribe: «Corpora autem coelestia glebae non adscripta et centrum gravitatis perfectius in se gerentia, Deorum more per levem aera incedant», recuperando la misma idea en el párrafo 269 de la *Filosofía de la Naturaleza*; hemos consultado la traducción inglesa de la *Filosofía de la Naturaleza*, traducida, introducida y anotada por M. J. Petry, 3 vols., Londres, Allen and Unwin, 1970 (vol. 1, pp. 261 y 347).

tante de la historia de la física. El movimiento de la Luna, influido al mismo tiempo por la Tierra y el Sol, anuncia ya este problema. Fueron numerosas las tentativas de ponerlo bajo su forma integrable hasta que, a finales del siglo XIX, Bruns y Poincaré demostraron que era imposible. Fue una sorpresa y esa sorpresa anunciaba el fin de las extrapolaciones desde la física de los movimientos simples, el fin de la convicción de que el movimiento dinámico es homogéneo.

Otras indicaciones en el mismo sentido hicieron su aparición en esta época. Así, ciertos investigadores notaron que una trayectoria puede volverse intrínsecamente indeterminada en ciertos puntos singulares. Un péndulo rígido puede tener dos tipos de comportamientos cualitativamente diferentes: bien puede oscilar o bien dar vueltas alrededor de su punto de suspensión. Si su empuje inicial es exactamente el suficiente para hacerle llevar con una velocidad nula a su posición vertical, la dirección hacia la cual volverá a caer y, así, la naturaleza de su movimiento es indeterminada: una perturbación infinitesimal basta para arrastrar el sistema bien hacia una rotación, bien hacia una oscilación. Es el problema de la inestabilidad del movimiento sobre la cual volveremos a hablar largamente (capítulo IX, 1).

Es interesante constatar que Maxwell ya había subrayado la importancia de tales puntos singulares: «En todos los casos de este género (Maxwell acaba de describir la explosión del algodón fulminante), existe una circunstancia común; el sistema posee una cantidad de energía potencial que puede ser transformada en movimiento, pero que no puede comenzar a serlo más que cuando el sistema haya alcanzado una cierta configuración, lo que necesita un gasto de trabajo que puede ser infinitesimal y es en general despreciable frente a la energía que permite liberar. Así la roca, desprendida por la helada, en equilibrio sobre un punto singular del flanco de la montaña, la pequeña chispa que enciende el inmenso bosque, la pequeña palabra que mueve al mundo a la guerra, el pequeño escrúpulo que impide al hombre hacer lo que quiere, la pequeña espora que estropea todas las patatas, el pequeño germen que hace de nosotros filósofos o idiotas. Pero la existencia a partir de un cierto nivel tiene sus puntos singulares: cuanto más elevado es el nivel más numerosos son los puntos. En estos puntos, ciertas influencias, cuya talla física es demasiado pequeña para ser tomada en consideración por un ser finito, pueden producir resultados de la mayor importancia. Todos los grandes resultados producidos por las empresas humanas dependen de la manera en la que nos aprovechamos de estos estados singulares cuando

se presentan»¹⁷. Esta concepción quedó sin respuesta a falta de técnicas matemáticas necesarias para identificar los sistemas que poseen tales puntos singulares y, a falta de los conocimientos en química y en biología que nos permiten hoy, lo mostraremos más tarde, comprender de manera más precisa el papel efectivamente esencial de estos puntos singulares.

De cualquier manera, desde las mónadas de Leibniz (véase conclusión, 4) hasta nuestros días, por ejemplo, los estados estacionarios del electrón en el modelo de Bohr (véase capítulo VIII), el sistema integrable ha permanecido, de hecho, el modelo por excelencia de sistema dinámico y los físicos han buscado extrapolar al conjunto de los procesos naturales las propiedades de lo que no constituye, de hecho, más que una clase de Hamiltonianos muy particulares. Lo que por otra parte es muy comprensible: cuando pensamos en «sistema dinámico», es evidentemente en esta clase de sistemas dinámicos en la que pensamos, ya que son los que han podido ser explorados de la manera más completa hasta estos últimos años. También debemos contar con la fascinación que suscita siempre un sistema cerrado, capaz de plantear todos los problemas desde el momento en que no los define como desprovistos de sentido. La dinámica es un tal lenguaje, sin exterior, coextensivo por definición al mundo que describe. Para ella, todos los problemas, simples o complejos, se parecen, ya que puede siempre plantearlos bajo la misma forma general. De ahí la tentación de extraer la conclusión de que, idealmente, desde el punto de vista de su solución, todos los problemas se parecen y de que nada nuevo puede aparecer debido a la mayor o menor complejidad del procedimiento de interacción. Sabemos ahora que esta homogeneidad postulada es falsa. Volveremos a tratar este problema más adelante. Pero nosotros, que sabemos hoy qué diferencias cualitativas aparecen entre los sistemas dinámicos, podemos mejor medir las consecuencias culturales y epistemológicas de la fascinación ejercida por el modelo de sistema integrable. Desde Leibniz hasta nosotros, encontramos esta convicción. El universo, si es un sistema dinámico, debe ser concebido con las propiedades de un sistema dinámico integrable.

¹⁷ J. C. Maxwell, *Science and Free will*, en L. Campbell y W. Garnett, *op. cit.*, p. 443.

4. *La dinámica y el diablillo de Laplace*

La descripción dinámica, concebida según el modelo de sistema integrable, posee un símbolo: el diablillo imaginado por Laplace, capaz de observar en un instante dado la posición y velocidad de cada una de las masas constitutivas del universo y de deducir a partir de ahí la evolución universal, tanto hacia el pasado como hacia el futuro.

Claro está que nadie ha pensado jamás el que un físico podría un día beneficiarse del saber del diablillo de Laplace. El mismo Laplace había recurrido a esta ficción para poner de manifiesto la extensión de nuestra ignorancia práctica y la necesidad de una descripción estadística de ciertos procesos. El problema del diablillo de Laplace no es sólo el de la posibilidad efectiva de una previsión determinista del curso de las cosas, es más bien el problema de su posibilidad de principio, y esta posibilidad de principio de una preciencia total está implicada por la dualidad de la ley dinámica y de la descripción de las condiciones iniciales.

En efecto, el hecho de que podamos describir un sistema dinámico como sometido a una *ley* determinista, incluso si la ignorancia práctica del estado inicial excluye toda *previsión* determinista, permite distinguir entre la «verdad objetiva» del sistema, tal como lo contempla el diablillo de Laplace, y el hecho de nuestra ignorancia. En estas condiciones, la idea de que la definición instantánea de un sistema no basta para determinar su evolución, de que el determinismo físico tiene elementos que no son los límites de nuestras capacidades de observación y de cálculo, parecía que debía ser afirmada no solamente en contra del diablillo de Laplace, sino en contra de la dinámica. En el marco de la dinámica clásica, la descripción determinista puede ser inaccesible en la práctica, no por ello deja de perfilarse como un *límite* que define la serie de las descripciones de precisión creciente.

Es precisamente la dualidad leyes-condiciones iniciales la que, como veremos, se encuentra hoy en tela de juicio: la idea de que el concepto de estado inicial de un sistema es siempre válido, cualquiera que sea la ley dinámica de este sistema, la idea de que la determinación de las condiciones iniciales es una operación teóricamente concebible para todo sistema dinámico, está hoy abandonada. Pero volveremos más tarde (capítulo IX) sobre esta brecha al fin descubierta en el edificio de la dinámica clásica y sobre la muerte al fin sobrevinida del diablillo de Laplace. La ciencia clásica, en lo que a ella ata-

ñe, desde el momento en que aceptaba la verdad de la descripción dinámica, *debía* concluir en el determinismo universal, en el carácter ilusorio de los procesos que constituyen el mundo que habitamos y que nos han producido a los seres vivos y parlantes.

La ciencia moderna ha nacido de la ruptura de una alianza animista con la naturaleza: en el seno del mundo aristotélico, el hombre parecía encontrar su sitio, a la vez como ser viviente y como ser conocedor, el mundo estaba hecho a su medida, el conocimiento intelectual alcanzaba el principio mismo de las cosas, la causa y la razón final de su devenir, la finalidad que los habita y los organiza. El primer diálogo experimental recibió, en lo que a él concierne, parte de su justificación social y filosófica de otra alianza, esta vez con el Dios creador y racional de los cristianos. En la medida en que la dinámica se ha convertido y ha permanecido como ciencia modelo, ciertas implicaciones de esta «alianza», rápidamente rota, sin embargo, han subsistido y, en primer lugar, el desconocimiento de la alianza experimental, la cual, de hecho, se había ligado con la naturaleza.

La ciencia, convertida en laica, ha permanecido como el anuncio profético de un mundo descrito tal como se ve contemplado desde un punto de vista divino o demoníaco: la ciencia de Newton, este nuevo Moisés ante quien se descubrió la verdad del mundo, es una ciencia *revelada*, definitiva, extraña al contexto social e histórico que la identifica como actividad de una comunidad humana. Este tipo de discurso profético, inspirado, lo volvemos a encontrar a lo largo de la historia de la física, acompañó a cada una de las innovaciones conceptuales, cada vez que la física parecía unificarse y cada vez que este triunfo llevaba a los físicos a abandonar la máscara prudente del positivismo. Cada vez han repetido, en el lenguaje de la época, lo que escribía el hijo de Ampère: esta palabra —atracción, energía, teoría de campos, partículas subatómicas— es la palabra de la creación. Cada vez que los físicos anuncian, como en la época de Laplace o finales del siglo XIX, que la física es un tema cerrado —o próximo a serlo, ya que se puede designar el último punto en el cual la naturaleza resiste todavía, aquel punto de resistencia que, una vez vencido, la librerá completamente y sin defensa al conocimiento— repiten sin saberlo los gestos de la antigua fe, esperan un nuevo Moisés, la repetición del triunfo newtoniano.

Qué importa, se dirá, esta pretensión profética injustificable, qué importa este entusiasmo ingenuo. ¿No se ha proseguido el diálogo con la naturaleza, la investigación de nuevos lenguajes teóricos, de

nuevas preguntas, de nuevas posibilidades de respuesta? Ciertamente, pero la interpretación global no deja de tener influencia sobre las investigaciones locales. La interpretación global se apoya sobre el trabajo efectivo de los científicos, pero también inversamente, lo orienta, es ella la que privilegia ciertas direcciones de investigación, fija las relaciones entre las diferentes regiones del saber y el frente avanzado de la interrogación. Es ella la que define la estrategia y, sobre todo, la define como estrategia: cercar a la naturaleza, obligarla a confesar la ley a la cual está sometida, el lenguaje que habla ¹⁸.

Cualquiera que sea el lenguaje que hasta ahora la física ha prestado a la naturaleza, este lenguaje ha definido siempre un mundo natural del cual el hombre está excluido, lo que, por supuesto, se explica fácilmente. El diálogo experimental, en sus principios, no podía más que plantear problemas elementales; los objetos de referencia cuya descripción la física ha conseguido matematizar y que guían su exploración, tales como el movimiento de los astros y el funcionamiento de las máquinas simples idealizadas, son de una simplicidad muy particular y son ellos los que están en la base del mundo newtoniano anunciado por Laplace. El hombre, sea lo que sea, es el producto de procesos físico-químicos extremadamente complejos y también, indisociablemente, el producto de una historia, la de su propio desarrollo, pero también el de su especie, de sus sociedades entre las otras sociedades, naturales, animales y vegetales. Complejidad e historia, estas dos dimensiones están realmente ausentes del mundo que contempla el diablillo de Laplace. La naturaleza que supone la dinámica clásica es una naturaleza a la vez amnésica, desprovista de historia y enteramente determinada por su pasado, es una naturaleza indiferente, para la cual todo estado es equivalente, y una naturaleza sin relieve, llana y homogénea, la pesadilla de una insignificancia universal. El tiempo de esta física es el tiempo del despliegue progresivo de una ley eterna, dada de una vez por todas y totalmente expresada por cualquier estado del mundo.

La forma sistemática que se ha dado la física clásica, su pretensión de constituir una descripción del mundo cerrada, coherente, completa, expulsa al hombre del mundo que describe en tanto que

¹⁸ Este problema constituye uno de los temas de la obra de Michel Serres; véase, en particular, el capítulo «Conditions» de la *Naissance de la physique dans le texte de Lucrèce*, París, Minuit, 1977.

habitante, pero también, como lo hemos mencionado, en tanto que lo describe.

Es Einstein, una vez más, el que destaca el enigma sobre el que desemboca el mito de la ciencia moderna; lo ha escrito y repetido: el milagro, la única cosa verdaderamente asombrosa, es que hay una ciencia, que hay una convergencia entre la naturaleza y el espíritu humano tal que una estructura matemática libremente inventada pueda alcanzar la estructura misma del mundo. Resuena en este estupor algo parecido al eco de otra declaración, célebre en su tiempo. Cuando, al final del siglo XIX, el físico alemán Du Bois-Reymond hizo del diablillo de Laplace la encarnación de la lógica de la ciencia moderna, añadió: «*Ignorabimus*», ignoraremos siempre y totalmente la relación entre este mundo, que nuestra ciencia hace transparente, y el espíritu que conoce, percibe, crea esta ciencia¹⁹.

El mundo de Laplace, tal como aquel al que aspiraba Einstein, es un mundo simple e insípido, sin sombra, sin espesor, que se entrega como totalmente independiente de la actividad experimental, de la elección de puntos de vista, de la selección de las propiedades pertinentes; el hombre, en tanto que habitante participante en un devenir natural, es inconcebible en él; en tanto que experimentador activo, que elige, manipula, pone en escena, comunica, discute y critica sus resultados, ha desaparecido igualmente, se ha contraído hasta no ser más que un punto: la conciencia cognoscitiva que contempla un mundo entregado y sin misterio. Pero este punto no es sino un residuo de una opacidad total. Está en la oscuridad impenetrable que constituye la correlación lógica a un mundo totalmente iluminado por falta de relieve, un punto fuera del mundo, una fuente inconocible de luz.

La naturaleza tiene mil voces y solamente hemos empezado a escucharla; sin embargo, desde hace aproximadamente dos siglos, el diablillo de Laplace obsesiona nuestra imaginación, resurge sin cesar y, con él, la pesadilla de la insignificancia de todas las cosas, la soledad alucinada del que, durante tanto tiempo, se había creído al alcance de un mundo a su medida. Si realmente el mundo es tal que un diablillo —es decir, a pesar de todo, un ser similar a nosotros, poseyendo la misma ciencia pero con sentidos más agudizados y una potencia mayor de cálculo— pudiera calcular el porvenir y el pasado a partir de la observación de un estado instantáneo, si realmente la ver-

¹⁹ Véase a propósito del diablillo de Laplace, E. Cassirer, *Determinism and Indeterminism in Modern Physics*, New Haven, Yale University Press, 1956, pp. 3-25.

dad de la naturaleza está contenida en la dinámica y si nada distingue cualitativamente los sistemas simples, que podemos describir, de aquéllos, más complejos, para los cuales haría falta un diablillo, entonces el mundo no es más que una inmensa tautología, eterna y arbitraria, tan necesaria y absurda en cada uno de sus detalles como en su totalidad. Tal es el desafío de esta ciencia moderna que nos ha legado el siglo XIX y que nos es necesario exorcizar hoy.