

LA DOBLE SIGNIFICACION CIENTIFICA Y FILOSOFICA DE LA EVOLUCION DEL CONCEPTO DE FUERZA DE DESCARTES A EULER *

JUAN ARANA

En la caracterización del concepto mecánico de fuerza en los siglos XVII y XVIII, el examen de la concepción cartesiana constituye por necesidad el primer paso a dar, ya que en torno a ella se van a plantear todos los debates de los cien años siguientes. Las posteriores doctrinas al respecto no se enuncian nunca independientemente de ella sino a partir de ella o todo lo más frente a ella. HUYGENS, en efecto, desarrolla su propia teoría reflexionando sobre las reglas cartesianas del choque¹. En 1668 la Royal Society de Londres encarga a los más grandes mecánicos un estudio sobre la colisión elástica e inelástica, precisamente para encontrar una alternativa a la solución del pensador francés². NEWTON dedica toda la segunda parte de los *Principios matemáticos de la filosofía natural* a rebatir la doctrina cartesiana sobre la comunicación del movimiento y la interacción física³, y LEIBNIZ inicia la difusión

* Este trabajo ha sido realizado con la ayuda de una beca de investigación de la Fundación Alexander von Humboldt. He tratado con mayor detalle el tema que aquí se estudio en el comentario a los *Pensamientos sobre la verdadera estimación de las fuerzas vivas* de Immanuel Kant (Peter Lang Verlag, Berna).

1. Véase Ch. HUYGENS, Carta a van Gutschoven (17-1-1652), *Oeuvres complètes*, ed. Nijhoff, t. I, p. 167.

2. Véase R. DUGAS, *La mécanique au XVIIe siècle*, Neuchatel, Griffon 1954, pp. 287-293.

3. Véase Véase I. NEWTON, *Philosophiae naturalis principia mathematica, Opera*, ed. Horsley, vol. II, pp. 263 y ss.

de su teoría dinámica con un artículo titulado *Breve demostración del error memorable de Descartes* etc., abriendo con ello la polémica de las fuerzas vivas⁴, contienda entre cartesianos y leibnicianos que durará más de 50 años y de la que los newtonianos no quedaron al margen, sino que lucharon en unos casos a favor de DESCARTES (los ingleses) y en otros a favor de LEIBNIZ (los holandeses)⁵.

¿Qué extraño poder tuvo que tener el pensamiento de DESCARTES en este punto, para despertar tanta resonancia? Aquí hay encerrado un enigma, porque aparentemente nada más simple ni menos problemático. En un texto de los *Principios de filosofía*, se afirma que:

«Además de esto hay que señalar que la fuerza con que un cuerpo actúa contra otro o resiste a su acción, consiste solamente en que cada cosa persiste en tanto le es posible en el mismo estado en que se encuentra, esto es, en reposo o bien en movimiento rectilíneo y uniforme»⁶.

O sea, la fuerza no es más que una consecuencia del principio de inercia, cuya introducción es el mayor título de gloria de DESCARTES en la historia de la mecánica. Más que de consecuencia, habría que hablar de manifestación, ya que el único modo que tienen los cuerpos de mostrar su resistencia a cambiar de estado es precisamente el ejercicio de una fuerza, de una acción dinámica con respecto a los agentes que traten de modificar dicho estado. La fuerza, por tanto, tiene siempre una doble dimensión, como se afirma en el texto: por una parte es resistencia, en cuanto es requerida y consumida para alterar el movimiento o el reposo del cuerpo; pero por otro es acción, ya que contiene el poder efectivo para producir tal efecto. El principio de igualdad de acción y

4. Véase G. W. LEIBNIZ, *Mathematische Schriften*, ed. Gerhardt, vol. 6, pp. 117-119.

5. Véase M. ZWINGER, *Die lebendige Kraft und ihr Mass*, München, Lindauer, 1885, pp. 38-62; 148-151; 164-180.

6. R. DESCARTES, *Principes de philosophie, Oeuvres*, ed. A. T., vol. IX-2, p. 88.

reacción, que formulará NEWTON, ya está contenido de modo implícito en esta sumaria declaración cartesiana⁷.

Por consiguiente, el problema o los problemas de la idea de fuerza no radican en su principio mismo, que está íntimamente entrelazado con la comprensión mecánica de la naturaleza, sino en su explicitación cuantitativa, esto es, en su medida. La cuantificación de la fuerza es un asunto absolutamente esencial, no ya solamente por el hecho de que hay que hacerlo con todos los conceptos que aparecen en las ecuaciones de la física matemática, sino también porque sólo la cuantificación rigurosa puede llegar a despejar esta ambivalencia que acabamos de detectar en el concepto mismo: fuerza como acción y fuerza como reacción. Ciertamente es que ambos valores coinciden en la interacción dinámica, y en este sentido la fuerza de un choque es la misma considerada como acción y como reacción, pero no lo es menos que cuando hablamos de la fuerza de un cuerpo, no es lo mismo que pensemos en la medida de la resistencia de ese cuerpo a cambiar de estado cinemático, que será siempre la misma independientemente de cuál sea la velocidad, que considerar la medida de su capacidad para mover otros cuerpos, para ejercer acciones dinámicas venciendo resistencias opuestas, capacidad que varía radicalmente según sea mayor o menor la magnitud de su propio movimiento. Nadie puede dudar hoy de la urgencia de cuantificar adecuadamente los conceptos clave de la física, si lo que se pretende es hacer una física matemática. Sin embargo, por muy curioso y paradójico que pueda parecer de entrada, lo cierto es que DESCARTES, el campeón del matematicismo filosófico, no lo hizo con esta noción, como tampoco con otras nociones fundamentales que caracterizan su cosmología. En el texto que más cerca estuvo de hacerlo sólo dice que:

«Sin embargo, se debe juzgar la cantidad de esta fuerza por la magnitud del cuerpo en que está, y por la superficie que se separa este cuerpo de otro, y también por la veloci-

7. Si bien es cierto que el genio del inglés supo intuir la posibilidad de mantener aun en el caso de interacciones a distancia, eventualidad no contemplada por la mecánica cartesiana.

dad del movimiento..., y por las maneras contrarias en que se encuentran cuerpos diversos...»⁸.

Los discípulos, en las polémicas que sostuvieron con toda clase de advertencias, afirmaron siempre que la medida «cartesiana» de la fuerza es el producto de la masa por la velocidad⁹, pero en este texto comprobamos que además de la velocidad y la magnitud o volumen efectivo del cuerpo, que es el equivalente de la masa dentro de la física extensional, se mencionan otros factores, como la superficie de separación y las maneras del choque, que de ninguna manera son susceptibles de cuantificación. Esta indefinición revela la ambigüedad de la especificación numérica del concepto, y hay que advertir que no se trata de algo casual, sino que está conectado con problemas centrales de la filosofía de este autor. Las exigencias, en efecto, del criterio de claridad y distinción, aplicadas al campo de la física, imponen condiciones restrictivas muy fuertes, que DESCARTES satisface de un modo notablemente riguroso en lo relativo a las nociones de materia y movimiento¹⁰. Si distinguimos convenientemente entre la semántica y la sintaxis de la física cartesiana, habría que decir que el matematicismo es aceptable en lo que toca a la semántica, puesto que en los dos factores fundamentales de su sistema del mundo, la materia y el movimiento, no hay nada que empañe en principio la transparencia y diafanidad de estas nociones: tanto su claridad como su distinción son genuinas. Pero, en cambio, aparecen obstáculos insalvables para construir matemáticamente la sintaxis de esta teoría, es decir, para definir unívocamente la interrelación de las dos ideas mencionadas y generar a partir de ellas la realidad sensible que nos rodea si se ha de preservar la claridad y distinción, esto es, si no se puede introducir ningún elemento extra que contamine la simplicidad de tales elementos, y si en las relaciones entre ambos tampoco es posible enturbiar de ninguna forma la pureza de su contenido. Simplemente, sucede que resulta práctica-

8. *Principes...*, p. 88.

9. Véase, p. ej., A. CATELAN, *Courte remarque*, en Leibniz, *Philosophische Schriften*, ed. Gerhardt, vol. III, pp. 40-42.

10. Véase *Principes...*, pp. 65, 76.

mente imposible extraer de la mezcla de materia extensa y movimiento la diversidad y complejidad que revelan los sentidos. El proyecto entero se vuelve aporético, y en la práctica lo que ocurre es que DESCARTES sacrifica la claridad y distinción de la sintaxis de su física a la claridad y distinción de su semántica, y diseña un universo en que no hay nada más que extensión y movimiento, elementos que nada dejan oculto en su misma constitución, pero cuyas relaciones mutuas están en cambio cuajadas de obscuridades. Hay, en efecto, dos nociones que sintetizan y relacionan la extensión y el movimiento. La primera es la figura¹¹, en la cual las dificultades no son grandes, puesto que sólo sirve para establecer la identidad de las cosas a partir del reposo relativo de las partes. Tiene por misión definir los elementos de la naturaleza, esto es, los cuerpos, y por consiguiente está descargada de la responsabilidad de explicar nada más, es decir, no le compete dar razón ni de las relaciones de los cuerpos, ni tan siquiera del mantenimiento de las configuraciones mismas¹². Para explicar tanto una cosa como otra está la idea de fuerza, síntesis suprema de extensión y movimiento a la que se atribuye al menos tres funciones diferentes: primero, mantener la figura de los cuerpos, en cuanto fuerza de cohesión; segundo, conservar reposo o la uniformidad del movimiento de los cuerpos, en cuanto fuerza de inercia, tercero, determinar la comunicación del movimiento de unos cuerpos en otros, en la forma de fuerza de impulsión o choque. La dificultad estriba en resolver de una vez, mediante una concepción que sea ella misma clara y distinta, todas estas funciones. Si DESCARTES no consigue cuantificar unívocamente la idea de fuerza tiene, por tanto, buenos motivos para no hacerlo. No podía dar un valor numérico simple a partir del cual fuese posible deducir todas las cualidades que acompañan a los cuerpos físicos, y que abarcan desde la impenetrabilidad, la textura y el peso, hasta el color, olor y temperatura. La otra opción habría sido distinguir una serie de

11. Véase *Principes...*, p. 57.

12. Véase *Principes...*, pp. 126-127. Este concepto no es introducido explícitamente como mediación entre la extensión y el movimiento, pero tal es la función que desempeña, como se puede comprobar en la tercera parte de la obra (véanse, p. ej., pp. 144, 151, 154, etc.).

fuerzas primitivas irreductibles entre sí, con lo que hubiera arruinado la distinción de la idea.

Lo que de hecho hace el fundador del racionalismo es reafirmar la simplicidad de su concepción dinámica identificando la raíz última de la fuerza con la inercia, como hemos visto en el texto que cité antes, pero afirmando a la vez con una incoherencia harto comprensible una complejidad difícil de captar en el funcionamiento de esta propiedad supuestamente simple de lo extenso. Dicha complejidad se revela en la tercera ley de la naturaleza formulada en la segunda parte de los *Principios de filosofía*, que afirma que:

«si un cuerpo que se mueve encuentra otro más fuerte que él, no pierde nada de su movimiento, y si encuentra otro más débil que puede mover, pierde tanto como le da...»¹³.

A partir de aquí propone las siete famosas reglas con que resuelve todos los posibles casos de choque de dos cuerpos, teniendo en cuenta las diferencias de movimiento y magnitud que se pueden dar¹⁴. Los historiadores del pensamiento se han apresurado siempre a asegurar la extravagancia de estas reglas¹⁵, incompatibles en primer lugar con los fenómenos, como demostró MARIOTTE¹⁶, en segundo lugar con las matemáticas, como puso de manifiesto HUYGENS¹⁷, y en tercer lugar con la misma metafísica racionalista, tal como no dejó pasar por alto el propio MALEBRANCHE¹⁸. No obstante, se ha olvidado con frecuencia que tales reglas están contenidas potencialmente en la ley antes citada, y que es ahí precisamente donde está encerrada una secreta duplicidad de la idea cartesiana de fuerza. En un sentido la fuerza es igual al producto de la magnitud del cuerpo por la velocidad que posee, y se identifica con la

13. *Principes...*, p. 86.

14. Véase *Principes...*, pp. 89-93.

15. Véase, p. ej., I. SZABÓ, *Der philosophische Streit un «das wahre Kraftmass» im 17. und 18. Jahrhundert*, en *Humanismus und Technik*, 15 (1971).

16. Véase E. MARIOTTE, *Traité de la percussion*, Paris, Royale, 1676.

17. Véase Ch. HUYGENS, *De motu corporum ex percussione*, *Oeuvres complètes*, t. XVI, p. 39.

18. Véase A. ROBINET, *Malebranche de l'Académie des Sciences*, Paris, Vrin, 1970, pp. 114-194.

cantidad de movimiento. En este sentido sirve para evaluar las condiciones globales del movimiento y asegurar su mantenimiento y constancia; pero nada dice sobre su determinación, esto es, sobre el modo como se reparte y distribuye el movimiento entre los cuerpos presentes, canalizándose hacia unas direcciones antes que hacia otras. Esta segunda y decisiva dimensión de la idea de fuerza sale a la luz cuando DESCARTES alude a la «fortaleza» o «debilidad» de los cuerpos, expresiones que aparecen en la formulación de la tercera ley, están unidas indisolublemente a los cuerpos mismos y no dependen de su velocidad, sino única y exclusivamente de su magnitud.

En resumidas cuentas, en DESCARTES no hay uno, sino dos conceptos de fuerza: fortaleza intrínseca, que se puede asimilar a la magnitud del cuerpo, y que gobierna la determinación del movimiento, y fuerza cinemática, que equivale a la cantidad de movimiento, y establece el módulo de la acción dinámica, prescindiendo de la dirección y sentido en que se ejerce. Combinando ambas acepciones se deducen las siete reglas sin mayor trabajo, reglas que, con toda su estravagancia, poseen la virtualidad de explicar no sólo los fenómenos cinemáticos macroscópicos, como son las aceleraciones que unos cuerpos obtienen de otros, sino también de otros efectos dinámicos más primarios, como la impenetrabilidad y cohesión¹⁹, que no estaban presupuestos en la noción de cuerpo en juego, y que tampoco serán explicados por los críticos de DESCARTES, que se limitarán a postularlos sin más, razón por la que la mayor parte de sus objeciones descontextualizan la dinámica cartesiana, restringiendo su alcance de modo arbitrario.

En definitiva, bien puede decirse que la doctrina cartesiana de la fuerza no peca de contradicción o incoherencia, como se ha pretendido casi siempre, sino de ambigüedad y duplicidad. La inconsecuencia no es lógica, sino epistemológica, ya que no hay incompatibilidad entre las hipótesis, sino introducción subrepticia de conceptos confusos, o al menos de relaciones que atentan contra la claridad y distinción de la idea de sustancia extensa. Desde un punto de vista interno este defecto es esencial e irreparable, pero desde un punto de vista externo es muy disculpable teniendo en cuenta la

19. Véase *Principes...*, p. 94.

tremenda carga teórica soportada por la noción de la fuerza y la riqueza de matices que para su posterior desarrollo encierra.

* * *

HUYGENS, que nunca tuvo reparos en reconocer su filiación cartesiana, es el mejor contrapunto que se puede escoger para calibrar los límites de la concepción dinámica contenida en los *Principios de filosofía*. En este punto, la discrepancia entre ambos es total. En 1669, es decir, apenas una veintena de años después de la aparición de aquella obra, el físico holandés señalaba solapada, pero inequívocamente su discrepancia en la presentación de sus propias reglas del choque de los cuerpos:

«Solamente os diré que mi teoría concuerda perfectamente con la experiencia, y que la creo fundada en buena demostración»²⁰.

La importancia de este texto no reside en que HUYGENS reivindique en su favor el testimonio de los hechos, pues el propio DESCARTES se había adelantado a reconocer que su teoría no pretendía explicar lo que ocurre cuando dos cuerpos macroscópicos reales chocan entre sí, y por otra parte no era tampoco la primera vez que se hacía este tipo de objeción. La originalidad radica en la última parte de la frase, en la que HUYGENS, al subrayar que sus leyes están basadas en «buena demostración», señala indirectamente que las de DESCARTES no, es decir que las de éste han sido propuestas sin rigor, violando las reglas del modo geométrico de razonar. En el tratado *De motu*, demuestra HUYGENS que la alusión no ha sido en vano, porque allí evidencia que la cuarta regla cartesiana está en contradicción con la primera y la quinta²¹.

Antes de seguir comentando la contraposición entre DESCARTES y HUYGENS, es conveniente hacer un inciso para recordar la gran trascendencia de los trabajos del holandés con respecto a la cons-

20. Ch. HUYGENS, *Oeuvres complètes*, t. XVI, p. 179.

21. Véase *De motu...*, pp. 39-41.

titución de la teoría mecánica de los sólidos rígidos. En el *De motu* se encuentran codificados todos los principios de conservación de que se vale la física matemática clásica para resolver el problema de la comunicación del movimiento, por lo que desde el punto de vista de la historiografía de la ciencia la superioridad de su punto de vista es inapelable²². Retornando ya al punto en que nos encontrábamos, hay que preguntarse por las raíces filosóficas de esta superioridad. ¿Estriban acaso en una síntesis mucho más afortunada que la cartesiana para unir razón y experiencia? Creo que no se puede responder francamente que sí, sin añadir algunos matices. Desde cierto punto de vista es necesario confesar que el matematismo de HUYGENS apenas cede en nada al de su maestro. Lo que ocurre es que al traspasar a la física el modelo matemático de pensamiento, HUYGENS se fija más bien en el aspecto sintáctico que en el semántico. Con esto quiero decir que para HUYGENS lo esencial no es tanto operar con ideas que sean ellas mismas perfectamente claras y distintas, sino más bien establecer conexiones lógicas absolutamente claras y distintas entre conceptos que pueden encerrar un significado confuso, e incluso ignoto, aunque por supuesto no en la dimensión en que es estudiado por el físico. Sólo de esta manera cabe entender la forma en que introduce la segunda hipótesis del *De motu*:

«Cualquiera que esa la causa de que los cuerpos duros reboten de su contacto mutuo cuando son presionados recíprocamente uno contra otro, suponemos que dos cuerpos duros, iguales entre sí, con la misma velocidad, rebotan cuando se encuentran directamente con la misma velocidad con que habían venido»²³.

Es indudable que aquí no se está manejando una noción clara y distinta de cuerpo duro, puesto que se confiesa de entrada que se ignora la esencia y las fuentes de la dureza; pero en cambio queda fuera de dudas que los cuerpos duros se relacionan entre sí de un modo claro y distinto. Esta es la diferencia fundamental que separa a HUYGENS de DESCARTES y que hace que sus concepcio-

22. Véase DUGAS, *Le mécanique...*, pp. 315-320.

23. *De motu...*, p. 31.

nes dinámicas sean inconmensurables: mientras DESCARTES no puede aceptar ninguna propiedad que no haya sido previamente dilucidada por completo, el primero insiste en que es inadmisiblemente manejar a nuestro antojo el comportamiento de los cuerpos, por muy clara que sea su idea misma. Es preciso tener además en cuenta que aquí entran en pugna dos concepciones distintas de la racionalidad, y que la fuente última de la discrepancia no estriba en un supuesto apriorismo cartesiano al que se enfrentaría un presunto empirismo de HUYGENS. Si se quiere trasladar el debate a este terreno, DESCARTES tendría seguramente algo que decir en su favor, como por ejemplo el hecho de que su oponente restringe arbitrariamente el alcance de su explicación, con lo que deja sin justificar una gran cantidad de fenómenos, como los que se relacionan con la impenetrabilidad, dureza, elasticidad, deformación y fragilidad de los cuerpos, manifestaciones empíricas que quedaban perfectamente asumidas en la teoría del francés, y de las que HUYGENS, como en general toda la mecánica posterior, se desentienden diciendo que «cualquiera que sea la causa», el físico se limita a estatuir de qué modo pueden repercutir en la colisión de los cuerpos.

Si se me permite una comparación anacrónica, diría que el concepto de fuerza cartesiano tiene que ver con la hipotética interacción que uniría todos los tipos de fuerzas conocidos hasta ahora, esto es, las gravitatorias, electromagnéticas, nucleares y débiles, así como la hipercarga recientemente descubierta por los físicos. HUYGENS, en cambio, se limita a estudiar las consecuencias de la impenetrabilidad y la elasticidad de los cuerpos, que como es sabido son efectos particulares de ciertas fuerzas electromagnéticas. El reparo que cabe poner a DESCARTES no consiste por tanto en haber desatendido la experiencia, sino en pretender abarcarla con excesiva amplitud, proponiéndose una tarea que ni siquiera los físicos de finales del siglo XX son capaces de resolver hoy por hoy, ya que incluso las teorías más ambiciosas, denominadas de la «gran unificación» dejan aún sin considerar la gravedad. Frente a la desmesurada ambición científica de DESCARTES, HUYGENS es un ejemplo de prudente y sabia adecuación de los objetivos a las posibilidades efectivas de realización, aunque desde un punto de vista epistemológico dejase sin aclarar por qué no iba más lejos en sus

averiguaciones, dando así un matiz de desnuda facticidad a la definición de los límites de la física.

Precisamente esta indefinición de las fronteras exactas de las ciencias que se ocupan de la naturaleza, y en particular de la mecánica, es una constante en el pensamiento de los más grandes físicos matemáticos de finales del siglo XVII y de todo el siglo XVIII, de la que resultan gran número de malentendidos y errores, como veremos a continuación. El cuidado que se tomó KANT a fines del período para eliminar este foco de problemas estuvo, pues, perfectamente justificado, aunque resulta muy de lamentar que no supiera dar con la solución justa.

* * *

Con NEWTON, la evolución del concepto de fuerza entra en una fase decisiva. No obstante, el tratamiento del tema dentro de los escritos del inglés, y sobre todo en su obra principal, los *Principios matemáticos de la filosofía natural*, adolece de dos importantes restricciones, una temática y otra formal. NEWTON, en efecto, no toca todos los aspectos esenciales de la mecánica en los que la noción de fuerza desempeña un papel importante²⁴. La cuestión del choque y de las acciones por contacto, por ejemplo, se despa- chan dentro de los *Principia* en unas pocas páginas, donde poco más hace que remitirse a los trabajos de WREN, WALLIS y HUYGENS²⁵. Aparte de ello, en los momentos en que se agudizan las dificultades filosóficas, NEWTON advierte repetidas veces que el tipo de investigación practicado se inscribe con preferencia dentro de la matemática²⁶. El siguiente texto, que se refiere precisamente al tema de las fuerzas, no deja ningún margen de duda en este sentido:

«Utilizo sin embargo las palabras atracción, impulso o

24. Véase C. TRUESDELL, *Essays in the History of Mechanics*, Berlin, Springer, 1968, p. 141.

25. Véase *Principia...*, vol. II, pp. 21-29.

26. Véase, p. ej., *Principia...*, vol. III, p. 1.

propensión de cualquier tipo hacia un centro de modo indiferente e intercambiable, pues considero estas fuerzas no tanto física como matemáticamente»²⁷.

A pesar de todo ello, es innegable que NEWTON imprime un sesgo definitivo a la semántica de la voz «fuerza», que a partir del siglo XVIII se entiende generalmente de acuerdo con su conceptualización y no con el sentido que los físicos de la Antigüedad y la temprana edad moderna pretendieron darle. Yendo no obstante sin más dilación al punto central que nos ocupa, hay que decir que la idea newtoniana de fuerza encierra una notable complejidad, tal vez por un propósito más o menos deliberado de hacer compatible su propio sistema del mundo con otras concepciones cosmológicas. La fuerza sigue apareciendo como el sostén y el fundamento del movimiento en todas sus formas. Sin embargo, dado que de acuerdo con el principio de inercia el movimiento rectilíneo uniforme no necesita ser producido continuamente para mantenerse, tampoco precisa de una causa extrínseca para existir como afirmaba la física aristotélica, ya que esto sólo es menester para la perseverancia del movimiento no uniforme. En esta tesis, parece que lo más coherente habría sido romper de una vez por todas con el antiguo concepto de fuerza. Pero lo que hace en cambio NEWTON es introducir una distinción primordial, que desdobra la noción subsumiéndola bajo ideas tan alejadas entre sí como la potencia por una parte y la acción por otra. La distinción, en efecto, se establece entre la fuerza ínsita o de inercia, por una parte, y la fuerza impresa por otra. De la primera dice que:

«es la potencia para resistir de todos los cuerpos, en cuya virtud persevera cuando está en ellos por mantenerse en su estado actual, ya sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta»²⁸;

la segunda, en cambio, es caracterizada así:

«la fuerza impresa es una acción ejercida sobre un cuerpo pa-

27. *Principia...*, vol. II, p. 6.

28. *Principia...*, vol. II, p. 2.

ra cambiar su estado, bien sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta»²⁹.

Creo que merece la pena dedicar un momento de atención a analizar el contenido de estas enjundiosas definiciones. Lo que en primer lugar llama la atención es el hecho de que la fuerza no incide directamente sobre el movimiento, sino sobre el estado del cuerpo, bien entendido que sólo hay dos posibles estados para la materia: el reposo y el movimiento uniforme por un lado, y el movimiento no uniforme por otro. Así, es la existencia o inexistencia de aceleraciones lo que resulta de la fuerza, tal como prescribe la segunda ley del movimiento enunciada por Newton. Que el estado de un cuerpo sea de un signo u otro depende, claro está, del tipo de fuerza presente: la fuerza ínsita trata de conservar un estado carente de aceleración, la fuerza impresa determina a su vez el cambio de movimiento. Por tanto, ambos tipos pueden entenderse como acciones causales, pero con la salvedad de que la fuerza ínsita es intrínseca a los cuerpos, del mismo modo que la materia y la forma en la teoría causal aristotélica, mientras que la fuerza impresa es ejercida por una potencia extrínseca al móvil, guardando por ello estrecho parentesco con la causa eficiente aristotélica.

La oposición exterioridad/interioridad está acompañada por la dicotomía actividad/pasividad, puesto que NEWTON afirma explícitamente, por ejemplo en la *Optica*, que «la fuerza de inercia es un principio pasivo»³⁰, mientras que, como dije antes, la actividad es el rasgo que para este autor mejor define la fuerza impresa. De todos modos, la pasividad de la fuerza ínsita es muy particular: consiste en su manifestación como resistencia a cambiar de estado que presenta el cuerpo, es pues una pasividad que se refiere al propio cuerpo que la posee, en cuanto que no es capaz de modificar el estado en que se encuentra, sino solamente de exigir un esfuerzo al agente que trata de alterarlo. Ahora bien, con respecto a ese agente perturbador, la fuerza de inercia se convierte en algo activo, ya que dicho agente experimenta la reacción del paciente, puesto que

29. *Principia...*, vol. II, p. 2.

30. Véase *Optics, Opera*, vol. IV, p. 258.

en virtud del principio de igualdad de la acción y la reacción toda acción física se convierte en interacción recíproca. Por ello, la fuerza de inercia de un cuerpo es también fuerza impresa para los cuerpos que actúan sobre él.

El concepto newtoniano de fuerza contiene, como vemos, un análisis muy fino, complejo y original de las relaciones causales presentes en el tema de la comunicación del movimiento. Apunta claramente a la confección de un modelo ontológico de comprensión de los entes corpóreos que pueda servir para sustentar el edificio teórico de la mecánica racional. Para conseguir alcanzar esta meta, sólo era preciso cuantificar tanto la fuerza de inercia como la impresa en armonía con los principios esbozados, completando el círculo de los efectos posibles, con lo que se dispondría de un marco teórico para decidir qué tipos de sucesos son posibles en la naturaleza y cuáles no, al menos dentro del ámbito de consideración de la mecánica.

Sin embargo, lo cierto es que NEWTON fracasó en este intento. Su fracaso no consiste de todos modos en haber cometido errores definitivos, sino más bien en haber sido incapaz de culminar una tarea que había conseguido plantear en condiciones inmejorables. Su teoría no sólo es incompleta, sino que desemboca en la indefensión epistemológica, de modo que en su física se pueden introducir sin dificultad todo tipo de elementos extraños que escapan al control de la razón. En este sentido, las críticas formuladas por LEIBNIZ en su controversia con CLARKE se apoyan sobre bases muy firmes³¹. Pero vayamos directamente al asunto. El análisis newtoniano conduce a entender la fuerza sobre la base del esquema agente-acción-paciente, esquema que es reversible por la equivalencia de acción y reacción. Fuerza de inercia y fuerza impresa constituyen las dos caras de este modelo. La fuerza de inercia, centrada en el paciente, puede y debe ser cuantificada al igual que él, como de hecho hace el físico inglés al dar la cantidad de materia o masa como medida de la misma³². La fuerza impresa, a su vez, está polarizada en torno a la acción, y por tanto es a ella a la que co-

31. Véase *Correspondance Leibniz-Clarke*. Ed. A. Robinet, Paris, PUF, 1957, 2.º escrito de Leibniz, pp. 35-36.

32. Véase *Principia...*, vol. II, p. 2.

responde en principio aportar un conocimiento que abarque los tres términos a la vez. El argumento más fuerte en pro de esta interpretación es el hecho de que NEWTON propone no una, sino tres medidas diferentes para el tipo de fuerza impresa que más le importa, es decir, para la fuerza centrípeta, medidas que denomina respectivamente absoluta, aceleratriz y motriz. El dato más revelador es que la cantidad absoluta considera la acción desde el agente, puesto que depende de la distancia desde el lugar de la acción a la causa que la desencadena, esto es, al agente³³. La cantidad aceleratriz se puede decir que mira la acción desde la acción misma, puesto que la abstrae tanto de las condiciones que la originan como de las consecuencias que resultan de ella; por eso el módulo que se propone para medirla es la aceleración producida independientemente de la magnitud del cuerpo movido³⁴. Por último, la cantidad motriz evalúa la acción a partir del sujeto paciente, puesto que equivale a la cantidad de movimiento generado por unidad de tiempo, magnitud que tiene como factor la masa del móvil³⁵.

Teniendo esto presente, a la hora de la verdad la cantidad que resulta operativa es precisamente la tercera, puesto que sólo ella es generalizada para todas las fuerzas impresas en general (por otro lado, era la única susceptible de ello, dicho sea entre paréntesis)³⁶. A fin de cuentas, esto significa que toda la dinámica newtoniana se apoya en dos versiones de la fuerza que, o bien se reducen al aspecto pasivo de la acción dinámica, o bien restringen la consideración de la misma a los efectos producidos en el sujeto pasivo. De aquí resulta una teoría física que describe inmejorablemente los movimientos que se siguen de cualquier fuerza o conjunto de fuerzas que puedan aparecer en la naturaleza, pero que nada dice sobre las fuentes y circunstancias en que estas fuerzas aparecen. Sólo en el caso de la gravedad estatuye NEWTON una ley universal de atracción, declinando ampulosamente explicar sus causas³⁷. La crítica neoempirista ha celebrado este gesto como un

33. Véase *Principia...*, vol. II, p. 4.

34. Véase *Principia...*, vol. II, p. 4.

35. Véase *Principia...*, vol. II, p. 5.

36. Véase *Principia...*, vol. II, p. 14.

37. Véase *Principia...*, vol. II, pp. 173-174.

triumfo definitivo del espíritu positivo, siguiendo sin mucha originalidad unos argumentos acuñados por D'ALEMBERT en el tomo primero de la *Enciclopedia*³⁸. Pero esta crítica oculta que exactamente por las mismas razones por las que NEWTON calla sobre el origen de la gravedad, deja abierto el registro de tipos posibles de «fuerza impresa» y da cabida a todo tipo de «principios activos» dentro de la física, incluyendo algunos procedentes de las especulaciones de los alquimistas³⁹. Y todavía hay algo que es mucho más grave, teniendo en cuenta el punto al que entonces había llegado la evolución de la física matemática: su mecánica no puede descartar la pérdida progresiva de movimiento en el universo a través de los choques inelásticos y las interferencias gravitatorias, lo que condena a corto plazo al cosmos a la paralización y el colapso⁴⁰. Simultáneamente, esa misma mecánica no contiene ninguna objeción contra las intervenciones ocasionales del Creador u otros agentes espirituales para restablecer el equilibrio cósmico, haciendo buena la imagen del Dios mal relojero, eternamente ocupado en la tarea de insuflar nuevo impulso a su obra⁴¹.

Como conclusión, se puede afirmar que entre la mecánica de NEWTON y lo que nosotros llamamos «mecánica newtoniana» media un largo trecho, que tuvieron que recorrer los físicos y matemáticos del siglo XVIII, los cuales colmaron el hueco dejado por el incompleto concepto de fuerza del sabio inglés, y coronaron con éxito la tarea de completar los fundamentos de la mecánica racional⁴², gracias en gran parte a ideas introducidas por LEIBNIZ, como espero poder mostrar a continuación.

* * *

En el panorama descrito hasta el momento es casi imposible encontrar una perspectiva común que permita contemplar a la vez

38. Véase *Encyclopédie ou etc.*, vol. I. 1751. pp. 846-855.

39. Véase *Optics*, vol. IV, p. 260 y ss.

40. Véase *Correspondance Leibniz-Clarke*, 2.^a respuesta de Clarke, p. 49.

41. Véase *Correspondance...*, 3.^{er} escrito de Leibniz, p. 56.

42. Véase C. TRUESDELL, *Reactions of late baroque mechanics to succes, conjecture, error and failure in Newton's Principia*, en *Essays...* etc.

los planteamientos de DESCARTES, HUYGENS y NEWTON con respecto a la idea de fuerza. Todos ellos aportan puntos de vista valiosos y esclarecedores, pero para obtener progresos definitivos de cara a la consolidación de la mecánica, lo más indicado y urgente era tratar de refundir sus enseñanzas en una doctrina única. Históricamente, este papel fue asumido por LEIBNIZ, que adoptó una postura contrapuesta, pero en cierto modo homóloga a la de DESCARTES, y al mismo tiempo trató de recoger las fórmulas de HUYGENS, superando las deficiencias que creyó descubrir en las propuestas de NEWTON. Veamos todo esto por partes. En primer lugar, el antagonismo con DESCARTES no puede ser mayor. LEIBNIZ diagnostica contradicciones en las reglas cartesianas del choque, porque violan abiertamente el principio de continuidad, pero sobre todo no puede admitir la pretensión de que el producto de la masa por la velocidad determine la cantidad absoluta de fuerza poseída por el cuerpo, como afirmaban no tanto DESCARTES como sus partidarios en el último tercio del siglo XVII. Por ello tuvo la iniciativa de publicar en 1868 una *Breve demostración*, con la pretensión de desenmascarar los errores del partido cartesiano. Allí asume LEIBNIZ en el fondo la crítica de HUYGENS, demostrando que la versión cartesiana de la cantidad de movimiento es una magnitud que no suele conservarse en las colisiones, y que por lo tanto de ningún modo puede representar una constante fundamental de la naturaleza⁴³. Para LEIBNIZ, el gran defecto de la medida cartesiana es que es errónea, pero en cambio le reconoce el mérito de ser algo que encaja en el esquema de lo que debe ser la verdadera solución, lo que significa que la cuestión fue al menos bien planteada. La fuerza tiene, en efecto, que ser algo absoluto en opinión de LEIBNIZ, y debe conservarse a lo largo de los cambios⁴⁴. El carácter absoluto quiere decir en este contexto independencia con respecto a ejes, coordenadas y referencias, puesto que todas las magnitudes esencialmente unidas a sistemas de referencia pueden ser creadas o anuladas a voluntad efectuando el oportuno cambio de sistema de referencia. Esto significa que para LEIBNIZ la fuerza no puede ser una magnitud mediatizada por una dirección y un sen-

43. Véase LEIBNIZ, *Math. Schr.*, vol. 6, pp. 117-118.

44. Véase LEIBNIZ, *Essay de dynamique*, *Math. Schr.*, vol. 6, pp. 216-217.

tido, sino algo independiente de las determinaciones concretas de los movimientos que se derivan de ella. En términos modernos habría que decir que para LEIBNIZ la fuerza no es una magnitud vectorial, sino escalar. Por otro lado, la conservación de este absoluto es la garantía de que pueda ser abstraído de su distribución más o menos azarosa en los cuerpos, y de que es un parámetro que determina los límites y la índole de los procesos en que interviene.

La prueba más convincente de que LEIBNIZ entiende que en esto su interés es común con la física cartesiana, reside en el hecho de que le preocupara más la pérdida de tal perspectiva que el triunfo de sus adversarios, tal como expresa el siguiente texto:

«Pero se ha producido un inconveniente, que se ha caído excesivamente en el extremo opuesto y no se reconoce la conservación de nada absoluto que pueda ocupar el sitio de la cantidad de movimiento»⁴⁵.

Un poco más adelante⁴⁶, LEIBNIZ aclara que, por supuesto, esto tiene que ser la fuerza absoluta. Ahora bien, ¿cómo pretende determinar la fuerza como algo absoluto, independiente de sentidos, direcciones y referencias? ¿Acaso no está la fuerza abocada al movimiento, y no se encuentra éste indisolublemente unido a un rumbo, que va marcando una trayectoria, y dentro de ella un sentido ligado al transcurso irreversible del tiempo? Desde luego, en la medida que la fuerza se asimile al movimiento, o al cambio de movimiento, no habrá ninguna alternativa que no implique otorgar a la fuerza misma dirección y sentido. Precisamente por ello, la fuerza impresa newtoniana tiene este carácter vectorial: siempre está dirigida, bien del cuerpo hacia el centro que lo atrae, en el caso de la fuerza centrípeta, o bien en el sentido de la tangente a la trayectoria en el punto de encuentro, cuando dos cuerpos chocan. Pero no siempre tiene por qué ser así; la fuerza newtoniana de inercia no tiene una orientación definida, sino que se ejerce igualmente en cualquier dirección, ya que el cuerpo responde con indiferencia a todo tipo de sollicitaciones. En este sentido puede proclamarse que esta fuerza es tan absoluta como la noción de

45. Véase *Essay...*, p. 216.

46. Véase *Essay...*, p. 217.

EL CONCEPTO DE FUERZA DE DESCARTES A EULER

masa que sirve para cuantificarla. Sin embargo, no es ésta tampoco la fuerza absoluta que busca LEIBNIZ: el filósofo alemán está pensando en un principio activo, y no en una mera resistencia a abandonar el propio estado. El objetivo de su concepción dinámica es por consiguiente la contrapartida del de NEWTON: se fija en la fuerza no en cuanto que es aplicada en un sujeto paciente, sino en cuanto es ejercida por un sujeto agente, y por tanto ya no trata de determinar el efecto que produce en el móvil, que como enseña el físico inglés siempre será un cambio de movimiento. La cuestión ahora es averiguar qué consecuencias tiene la acción dinámica para el motor mismo, consecuencias que no pueden ser otras que el agotamiento de las fuerzas que posee. Es el consumo pues, y no la cantidad de movimiento imprimida al móvil lo que constituye la legítima medida de esta acepción de la palabra fuerza. La idea de consumo, por otra parte, se concreta de modo unívoco con la noción de efecto violento. LEIBNIZ resume todo esto en el siguiente texto:

«Denomino efecto violento a lo que consume la fuerza del agente, como por ejemplo dar una velocidad tal a un cuerpo dado, elevar un cuerpo tal a una tal altura, etc. Y se puede estimar cómodamente la fuerza de un cuerpo pesado por el producto de la masa o peso multiplicado por la altura a la que el cuerpo podría subir en virtud de su movimiento...»⁴⁷.

Es innegable la proximidad del efecto violento leibniciano con el moderno concepto de trabajo mecánico, así como el hecho de que su fuerza absoluta no es más que la capacidad de desarrollar una determinada cantidad de efecto violento, que es exactamente lo que los físicos llaman desde la segunda mitad del siglo XIX «energía»⁴⁸.

Se puede decir, por lo tanto, que aquí se da la otra cara de la moneda, y que las precisiones de LEIBNIZ aportan el complemento indispensable para completar la concepción dinámica de

47. *Essay...*, p. 216.

48. Véase Y. ELKANA, *La scoperta della conservazione dell'energia*, Milano, Feltrinelli, 1977, pp. 43-44.

NEWTON. Si la palabra fuerza denota el conjunto de relaciones que se establecen entre los cuerpos cuando tiene lugar la acción causal que genera y altera sus movimientos, la fuerza ínsita o inercia newtoniana sirve para caracterizar los términos de la relación, ya que si el agente es capaz de actuar como principio activo, alterando el estado cinemático de otros cuerpos y asumiendo sus reacciones, es precisamente en virtud de la inercia, propiedad indisolublemente unida a la masa. Este mismo atributo es el que da al paciente la capacidad de resistir a la acción dinámica. Inercia es pues principio activo en el motor y principio pasivo en el móvil; actividad extrínseca en el primer caso y pasividad intrínseca en el segundo.

Para cualificar la inercia como resistencia surge precisamente el concepto newtoniano de fuerza impresa, en el que se define el modo y grado en que la acción dinámica, aplicada a la resistencia suscitada por la fuerza ínsita del paciente, da lugar a una aceleración o cambio de velocidad que encuentra su expresión canónica en la segunda ley del movimiento, según la cual la fuerza impresa es igual al producto de la masa por la aceleración.

Lo único que falta ya es cualificar la inercia como principio activo, eliminando la indefinición y ambigüedad que en la dinámica newtoniana flotaba sobre este concepto. Para ello está la fuerza absoluta leibniziana, que enseña que los cuerpos en movimiento encierran un *quantum* absoluto de fuerza, es decir, una posibilidad predeterminada en su módulo, pero completamente abierta en su especificación, de vencer las resistencias de otros cuerpos a cambiar de estado. Mientras que la fuerza impresa de NEWTON viene del exterior hacia el cuerpo, la fuerza absoluta de LEIBNIZ va del cuerpo hacia el exterior. La definición del punto de llegada hace de la fuerza impresa algo relativo, dirigido, o como dicen los físicos, vectorial. La indefinición de ese mismo punto hace de la fuerza absoluta una realidad no relativa, absoluta o escalar. La motivación filosófica, metafísica incluso, que hay presente en LEIBNIZ no constituye, pues, un estorbo para la mejor comprensión de los fenómenos, sino que por el contrario potencia sin ninguna duda la adaptación de la teoría a la experiencia. Se puede, en efecto, comprobar que la fuerza contenida en el movimiento de un cuerpo se puede orientar del modo más diverso, puesto que puede ser fácilmente desviado sin perder nada de su impulso, descargando todo su vigor sobre el objetivo que se desee. A la hora de asimilar un empuje,

en cambio, la orientación de éste es determinante de la dirección del movimiento resultante. Todo depende de que se observe la fuerza desde el agente que la ejerce o desde el paciente que la recibe.

En resumidas cuentas, es preciso reconocer la originalidad y acierto del matiz aportado por LEIBNIZ al concepto de fuerza, sobre todo si tenemos en cuenta la parcialidad del enfoque newtoniano. Además de ello, el filósofo alemán trata de superar la parcialidad que se derivaría de reducir toda la teoría mecánica a la idea de fuerza absoluta. En consecuencia, introduce la distinción entre fuerza viva y fuerza muerta, que trata de recuperar todas las connotaciones del término propiciando un sistema omnicompreensivo. La distinción, sin embargo, está erizada de dificultades y fue caballo de batalla de las discusiones científicas durante dos generaciones de físicos. Oficialmente fue introducida en 1695, en el *Specimen dynamicum*, en un texto que respondía a la necesidad de dar una interpretación física a las expresiones matemáticas del cálculo infinitesimal⁴⁹. La fuerza viva, en efecto, puede concebirse como resultado de la integración de infinitos impulsos elementales, denominados por LEIBNIZ asimismo como sollicitaciones o fuerzas muertas, porque entendía que las mismas actúan cuando el cuerpo está en reposo como resultado del equilibrio de fuerzas contrapuestas, e igualmente cuando la ruptura sólo incipiente del equilibrio no ha permitido aún que la acción dinámica origine una velocidad asignable.

Lo cierto es que a fines del siglo XVII el cálculo infinitesimal se encontraba todavía en una fase inicial, y su aplicación a la física todavía conocía una situación embrionaria. Los titubeos tanto conceptuales como terminológicos en este campo estaban a la orden del día, y en este punto la audacia de LEIBNIZ superó probablemente los límites que la prudencia aconsejaba. Hay que esperar a JOHANN BERNOULLI y a LEONHARD EULER para encontrar una fundamentación verdaderamente rigurosa del tratamiento de la fuerza con los métodos del cálculo infinitesimal. Una lectura literal de los textos leibnicianos conlleva en este sentido ambigüedades inevitables, como la sugerencia de que la fuerza viva nace simplemente de la

49. Véase LEIBNIZ, *Specimen dynamicum*, *Math. Schr.*, vol. 6, p. 238.

acumulación sucesiva de las fuerzas muertas, escondiendo el hecho de que en cuanto sollicitación, la fuerza muerta es una fuerza impresa, y por tanto la fuerza viva no se origina en el mismo sujeto que detenta la fuerza muerta, sino en el que lo recibe, y que la fuerza viva misma no sale propiamente de la suma de infinitas fuerzas muertas, sino de los impulsos elementales producidos por éstas, es decir, de una suma de efectos de fuerzas muertas, y no de una suma de fuerzas muertas sin más.

* * *

Haciendo balance provisional de la situación a comienzos del siglo XVIII, resulta que la ciencia mecánica ha conocido un desarrollo prodigioso, pero adolece de una serie de carencias y disfunciones teóricas a nivel de fundamentos que giran en torno a la ausencia de una definición clara y completa de la noción de fuerza. Los materiales precisos para una solución definitiva de la dificultad están, sin embargo, presentes, ya que se encuentran dispersos en las teorías desarrolladas principalmente por los autores que hemos examinado hasta el momento. En cualquier caso, lo que falta todavía por hacer no es una nimiedad, pues se trata de llegar a conjugar todos esos elementos en un mismo cuerpo de doctrina, realizando la síntesis que NEWTON no quiso o no supo hacer y que LEIBNIZ no pudo tampoco completar. Desde un punto de vista histórico, una primera confirmación de la corrección de esta interpretación consiste en que todos los autores de cierta talla de la Ilustración siguen simultáneamente la inspiración de NEWTON y LEIBNIZ; el primero es el punto de partida indiscutible aceptado por todos; pero el segundo no deja de ser el inspirador reconocido o secreto para los que tratan de ir más allá de NEWTON mismo. A los partidarios de DESCARTES les cabe en cambio en esta historia el poco airoso pero necesario papel de ser el contrapunto crítico de los creadores y renovadores demasiado audaces.

* * *

WILLEM VAN 'SGRAVESANDE es un representante destacado de la física experimental, aunque no por ello descuidó otras vertientes

del estudio de la naturaleza⁵⁰. Su *Ensayo de una nueva teoría sobre el choque de los cuerpos* publicado en 1722 es una muestra interesante del tipo de teorías desarrolladas en el período central de las controversias entre leibnicianos y cartesianos sobre el concepto de fuerza y su medida. Aunque 'sGRAVESANDE es reconocido generalmente como newtoniano, atribuyéndosele el mérito de haber introducido la física del inglés en el continente⁵¹, la dinámica que defiende es claramente leibniciana. Su idea es urdir un entramado conceptual en que la fuerza viva complete y defina tanto filosófica como científicamente el esquema matemático de la mecánica newtoniana. Por ello propugna una nueva pareja de conceptos, que denomina «presión»⁵² y «esfuerzo»⁵³, y que quiere recoger por un lado la fuerza impresa de NEWTON y por otro la fuerza muerta de LEIBNIZ. De este modo quedarían enlazadas la inercia, entendida al modo de la *vis insita* del inglés y la fuerza, voz que 'sGRAVESANDE reserva a un concepto análogo en sentido y equivalente en medida a la fuerza viva del alemán⁵⁴. Así queda constituido un esquema cuatripartito que tiene el valor de no confundir la heterogeneidad de ambas concepciones y señalar una dirección de encuentro válida entre ellas, si bien es cierto que la propuesta deja todavía bastante que desear desde una perspectiva lógica y ontológica. Mucho más notable es la habilidad, ingenio y pulcritud con que plantea y realiza una serie de ensayos empíricos para discriminar el valor cuantitativo de la fuerza posesída por los cuerpos en movimiento, midiendo las huellas que dejan diversas esferas metálicas al caer sobre materias deformables⁵⁵. La capacidad interpretativa que caracterizan al buen físico experimental se revela claramente en la discusión de un caso en el que cuerpos que poseen fuerzas diferentes

50. Véase G. GORI, *La fondazione dell'esperienza in 'sGravesande*, Firenze, Nuova Italia, 1972.

51. Véase P. BRUNET, *L'introduction des théories de Newton en France au XVIIIe siècle*, Paris 1931, pp. 97-104.

52. Véase 'sGRAVESANDE, *Essai d'une nouvelle theorie sur le choc des corps*, en *Journal Litteraire*, 1722, pp. 9-11.

53. Véase *Essai...*, p. 5.

54. Véase *Essai...*, p. 4.

55. Véase 'sGRAVESANDE, *Physices elementa mathematica*, Leiden, Vander, 1725, pp. 109-120.

de acuerdo con la estimación leibniziana se detienen recíprocamente, pareciendo sugerir que están animados por su vigor idéntico⁵⁶.

Si 'sGRAVESANDE consigue ayudar a ir delimitando los perfiles de una solución definitiva del asunto por medio de sus esfuerzos conciliatorios y sus afortunadas experiencias, la inspiración leibniziana consigue frutos aún más prometedores en la obra de un físico de más amplios vuelos teóricos, como es Johann BERNOULLI. Johann es uno de los miembros más destacados de la estirpe de investigadores que comparten este nombre y que protagonizaron la vida científica europea en las primeras fases de la Ilustración. En 1727 compuso un *Discurso sobre las leyes de la comunicación del movimiento*, a través del cual trataba de convencer a los académicos franceses, que conservaban aún una adhesión mayoritaria a DESCARTES, de la superioridad de la solución de LEIBNIZ⁵⁷. Como en casi todos los autores de la época, la actividad investigadora de BERNOULLI está inspirada por el mecanicismo. Se trata no obstante de un mecanicismo pragmático, que contrasta fuertemente con el rígido mecanicismo ontológico de DESCARTES, que quiere captar la realidad tal cual es, o con el mecanicismo epistemológico de HUYGENS, que pretende definir a través de él un ideal de conocimiento. Al físico suizo le preocupa más bien el valor heurístico que poseen los modelos de comprensión mecánicos para resolver los numerosos enigmas que cierran el camino del conocimiento del mundo. En sus manos, el tema de los modelos se desvincula un tanto del problema de la verdad ontológica y se pone al servicio de la creación de teorías cada vez más ajustadas a los hechos y con mayores posibilidades de aplicaciones técnicas. En este sentido, la utilización de resortes para simular la elasticidad de la materia y reproducir idealmente el mecanismo de la comunicación del movimiento en el choque, es ejemplar, y de hecho será imitada numerosas veces en lo sucesivo. Las dos cualidades intrínsecas que debe cumplir en física un modelo son, de acuerdo con la praxis teórica de BERNOULLI, la posibilidad de ser representados imaginativamente y la aptitud para plasmarse en una formulación matemática exacta. La

56. Véase *Essai...*, pp. 37-38.

57. *Discours sur les lois de la communication du mouvement*, Paris 1727; *Opera omnia*, ed. 1821-1822, vol. III, p. 7-107.

superioridad del mecanicismo desde estos dos puntos de vista es innegable, y en ello reside el secreto del favor que gozará entre los hombres de ciencia durante más de 200 años.

Todo esto no debe llevar a ver en BERNOULLI algo así como un ingeniero distinguido. Por el contrario, su proximidad a los hechos no impide que sea uno de los primeros en haberse dado cuenta de que la tarea más urgente y necesaria que tiene planteada la mecánica es la sistematización de sus conceptos y la unificación de sus principios:

«poco satisfecho con extraer por una especie de inducción la regla general de los casos más sencillos, el autor se ha prescrito un método más simple y al mismo tiempo más general. Se remonta a su fuente, y abrazando toda la extensión de su objeto establece la regla general sobre los principios mismos de la mecánica, de la cual deduce a continuación, como otros tantos corolarios, las reglas particulares de cada caso»⁵⁸.

Y precisamente en conexión con este propósito sistematizador, su doctrina de las fuerzas trata de recoger por una parte las fuentes de la actividad natural, por otra los cauces por los que discurre y, por último, los lugares en donde se remansa y deposita. Todo ello se refleja en las definiciones que ofrece de los dos sentidos fundamentales de la fuerza:

«La fuerza viva es la que reside en un cuerpo cuando está en movimiento uniforme, y la fuerza muerta es la que recibe un cuerpo sin movimiento cuando es solicitado y presionado a moverse, o a moverse más o menos deprisa, cuando ya está en movimiento»⁵⁹.

Como vemos, en este texto se afirma sin titubeos que la fuerza viva reside en el cuerpo, constituye algo así como su patrimonio dinámico, el caudal de acciones que eventualmente puede ejercer. La fuerza muerta, por el contrario, es recibida por el cuerpo como principio modificador de su estado de movimiento; es pues una cifra de su pasividad, de su susceptibilidad para ser término de la

58. *Discours...*, pp. 3-4.

59. *Discours...*, p. 23.

actividad de los demás agentes dinámicos. Las fuerzas vivas y muertas encierran, por tanto, una consideración global y completa del origen y la plasmación del movimiento de la materia: fuerza como actividad y como pasividad, como términos inicial y final de un proceso que se despliega sin solución de continuidad, puesto que la capacidad representativa del cálculo infinitesimal nos muestra sin saltos en el vacío cómo surge la fuerza viva en el cuerpo que asimila progresivamente los impulsos de la fuerza muerta, y de qué modo a su vez esta fuerza viva puede consumirse paulatinamente generando otros tantos impulsos. La descripción cuantitativo-matemática encuentra por otra parte el justo complemento de una concepción ontológica bastante adecuada, pues según BERNOULLI:

«La fuerza viva es algo real y sustancial, que subsiste por sí mismo y, en cuanto está en sí, no depende de otro»⁶⁰.

Asimilar la fuerza a la forma sustancial de los cuerpos es la consecuencia metafísica más coherente de una comprensión de la naturaleza en que la fuerza ocupa una posición central. Mas no toda fuerza ha de ser subsumida bajo la categoría de sustancia, sino sólo la fuerza viva, que encierra toda la capacidad de acción del ente corpóreo, toda su potencia activa, como diría GRAVESANDE. Frente a ella, la fuerza muerta:

«no es otra cosa que la sollicitación por la que el cuerpo es urgido a la aceleración o deceleración del movimiento»⁶¹.

Así queda reducida, desde esta perspectiva metafísica, a un signo de la pasividad de las sustancias, de su dependencia del exterior a la hora de moverse y ser desplazadas.

* * *

En consecuencia, hay que reconocer que entre los miembros más aventajados de la escuela mecánica leibniana se supo asumir

60. J. BERNOULLI, *De vera notione virium vivarum* (1735) *Opera omnia*, vol. III, p. 240.

61. *De vera notione...*, p. 240.

las inmensas y fecundas enseñanzas de NEWTON para desembocar en una concepción completa y consistente tanto en el plano empírico, como en el matemático, en lo científico como en lo filosófico; síntesis que en cambio no supieron consumir con igual éxito los discípulos ingleses de NEWTON, que se encerraron en un estéril epigonismo sin perspectivas de futuro⁶². El panorama es aun más sombrío por lo que respecta a la escuela cartesiana, cuyos últimos representantes naufragaron en torpes maniobras para salvar lo esencial del punto de vista «extensional» preconizado por ellos, y produjeron numerosas memorias, vindicaciones y artículos en que las confusiones, peticiones de principio e incluso errores lamentables son moneda frecuente. Hay que reconocer en honor a la justicia que no fueron los únicos en actuar así, ya que algunos filósofos, especialmente de la escuela wolffiana, así como otros divulgadores y aficionados al tema les acompañaron e incluso les superaron en la comisión de despropósitos, enzarzándose unos y otros en un diálogo de sordos que históricamente se conoce como polémica de las fuerzas vivas. La importancia teórica de estos episodios es, como se puede suponer, secundaria, por lo que no voy a entrar en este momento en más detalles y pasaré sin más dilaciones a relatar el desenlace de esta historia a través de los dos mayores físicos matemáticos de la Ilustración, esto es, D'ALEMBERT y EULER.

Lo cierto es que desde el punto de vista de la historiografía se ha desconocido prácticamente hasta hoy la importancia tanto científica como filosófica y epistemológica de la evolución del concepto de fuerza, confundiendo en una misma rúbrica tanto las contribuciones que deben ser consideradas creaciones intelectuales de primera magnitud como los más desgraciados y nimios sucedidos de la polémica de las fuerzas vivas, que ningún historiador serio puede valorar positivamente. Seguramente, el principal culpable de que en este caso la historia se haya escrito sin guardar mucha fidelidad a lo que realmente sucedió es el juicio vertido a este respecto por D'ALEMBERT, quien aparte de ser un excelente físico y matemático, fue como todos saben un intelectual de gran

62. Véase *Historia general de las ciencias*, dir. R. Taton, vol. 2, Barcelona, Destino, 1972, pp. 517-518.

proyección, con mucha capacidad de convocatoria para difundir consignas y popularizar valoraciones de principio. El caso es que en el discurso preliminar del *Tratado de dinámica* publicado en 1743 escribió las siguientes palabras:

«de todos modos, como no tenemos una idea precisa y distinta de la palabra *fuerza* que restrinja este término a expresar un efecto, creo que se debe dejar a cada cual el poder decidir como quiera; y toda la cuestión no puede consistir más que en una cuestión metafísica muy difícil, o en una disputa de palabras, todavía más indigna de ocupar a los filósofos»⁶³.

A primera vista, en este texto se da a todo el mundo la razón, cosa que puede ocurrir cuando todo el mundo la tiene, aunque nadie se haya dado cuenta, o cuando lo que se discute es algo tan pueril, que no vale la pena desanimar a quien está obcecado en una sinrazón intrascendente. Está claro que en D'ALEMBERT hay algo de todo esto: no se sabe qué cosa pueda tener para él menos importancia: si las disputas terminológicas, las cuestiones metafísicas o, en último término, la misma idea de fuerza. Unas líneas más abajo del texto citado, agrega, en efecto, lo siguiente:

«la cuestión de la medida de las fuerzas es pues enteramente inútil a la mecánica, e incluso sin ningún objeto real»⁶⁴.

En consecuencia, D'ALEMBERT empieza ridiculizando la polémica de las fuerzas vivas, para finalizar poniendo en cuestión el sentido y la utilidad en mecánica de la noción misma de fuerza. Con ello inaugura una tendencia antidinamicista según la cual el concepto de fuerza no es más que la sustantivación de una determinada invariante matemática que aparece al combinar entre sí magnitudes que tienen correlaciones reales más claras e indiscutibles, por lo que es un término que poco puede añadir a la comprensión de la naturaleza, y sí en cambio puede atraer muchos

63. *Traité de dynamique*, Paris, David, 1758, p. XXII.

64. *Traité...*, p. XXIV.

problemas, por las incómodas connotaciones sensitivas e intelectuales que arrastra ⁶⁵.

La posición del científico francés es, pues, clara y tajante. Creo que es conveniente averiguar en nombre de qué instancia crítica la hace. ¿Se tratará acaso de un criterio epistemológico consciente y maduro, que le hace inclinarse hacia un nominalismo riguroso en las cuestiones semánticas, y hacia un empirismo radical con respecto a la fundamentación gnoseológica de la física? Esto es lo que parece sugerir la calificación de «seres oscuros y metafísicos» que reserva a conceptos tales como el de «Dios», las «causas motrices» y las «fuerzas vivas» ⁶⁶. D'ALEMBERT, a fin de cuentas, sería ya un precedente inmediato del científico positivista, tal como ha proclamado un reciente biógrafo ⁶⁷.

Si esto fuera así, resulta extraño que D'ALEMBERT considere la mecánica como una ciencia puramente racional, más simple aun que el álgebra ⁶⁸, y todavía es más sorprendente que afirme que las leyes mecánicas de la naturaleza son verdades necesarias y no contingentes ⁶⁹. La sorpresa llega al colmo cuando leemos en la justificación de esta tesis lo siguiente:

«la cuestión propuesta se reduce pues a saber si las leyes del equilibrio o del movimiento que se observan en la naturaleza son diferentes de las que habría seguido la materia abandonada a sí misma» ⁷⁰.

Es decir, D'ALEMBERT descarta las fuerzas vivas por ser seres oscuros y metafísicos, pero persigue alegremente a la materia abandonada a sí misma, para encontrar sus leyes y asegurar la certeza absoluta de la mecánica. Lo menos que se puede decir después de esto es que cualquier parecido de D'ALEMBERT con un científico positivista es mera coincidencia. D'ALEMBERT, como recono-

65. Véase M. JAMMER, *Storia del concetto di forza*, Milano, Feltrinelli, 1979, pp. 213 y ss.

66. Véase *Traité...*, p. XVII.

67. Véase *Dictionary of Scientific Biography*, New York, Scribner, 1970-1980, art. *D'Alembert*, vol. I, p. 112.

68. Véase *Traité...*, p. II.

69. Véase *Traité...*, pp. XXIV-XXV.

70. *Traité...*, p. XXV.

cen unánimemente los especialistas en la mecánica de la Ilustración⁷¹, es un teórico y un sistematizador de la física, como por lo demás afirma expresamente en su libro⁷². Si rechaza las fuerzas, es simplemente porque ha encontrado otra vía para unificar los principios de la mecánica postnewtoniana, vía que es más acorde con la tradición intelectual cartesiana, puesto que insiste ante todo en la claridad de los conceptos y en la consideración más simple y general del movimiento, apartando los ojos, por así decir, de las causas motrices, que siempre encierran algo de oscuridad y confusión. Así puede llegar a afirmar que:

«Si los principios de la fuerza de inercia, del movimiento compuesto y del equilibrio son esencialmente diferentes entre sí, como hay que convenir, y si por otra parte, estas tres cosas bastan a la mecánica, haber establecido sobre estos tres principios todas las leyes del movimiento de los cuerpos en cualquier circunstancia, como me he encargado de hacer en este tratado, es haber reducido esta ciencia al más pequeño número de principios posible»⁷³

En resumen: d'Alembert rechaza la fuerza, y en especial la fuerza leibniziana, porque no la necesita para sistematizar deductivamente la mecánica. ¿Pero qué mecánica? Precisamente la que en gran medida han construido mecánicos que no supieron pasarse de esta noción. Enseguida mostraré que a un sabio que sin duda sobrepuja aún las dimensiones de D'ALEMBERT, el concepto no sólo no estorba, sino que sigue siendo un instrumento altamente valioso. Bien es cierto que el heredero intelectual de D'ALEMBERT, LAGRANGE, enterrará la mecánica de la fuerza, haciendo de esta ciencia una rama de la teoría matemática de funciones⁷⁴. Pero la física del siglo XIX no seguirá esta senda, sino que reconstruirá una física basada en modelos intuitivos y matematizables, que ya no será una física de la fuerza, sino una física de la energía, o

71. Véase R. DUGAS, *Histoire de la mécanique*, Neuchatel, Griffon, 1950, p. 242.

72. Véase *Traité...*, p. XVI.

73. *Traité...*, p. XVI.

74. Véase J.-L. LAGRANGE, *Mécanique analytique*, Paris, Blanchard, 1965, especialmente: *Avertissement de la première édition* (1788), pp. I-II.

sea, una física de algo muy próximo al sentido que LEIBNIZ y los leibnicianos pretendieron dar a la palabra fuerza⁷⁵. Desde esta perspectiva se puede afirmar que si la noción ha dejado de tener el valor central que tuvo en los siglos XVII y XVIII, no es tanto porque los adversarios de la noción impusieron sus razones, sino más bien porque impusieron la interpretación que en el futuro se habría de dar al término, mientras que sus contrincantes resurgieron, como el ave fénix, de las cenizas de sus teorías, y se reincarnaron en las de HELMHOLTZ, MAYER o FARADAY.

* * *

Leonhard EULER constituye, sin ninguna duda, la figura culminante de la física matemática del siglo XVIII. En lo que se refiere a la mecánica, su modo de sistematizar los principios de esta ciencia no deja nada que desear, pero lo que más llama la atención de ello es el perfecto equilibrio que consigue entre lo filosófico, lo matemático y lo empírico. EULER encuentra las categorías filosóficas adecuadas para caracterizar las fuerzas, su acción y sus formas. En general las define como «las causas que pueden cambiar el estado de los cuerpos»⁷⁶. Como la relación de causalidad no puede concebirse como una relación autorreflexiva, rechaza la noción de fuerza de inercia, considerando más bien que la inercia es la condición de posibilidad desde un punto de vista ontológico para que los cuerpos puedan sufrir y ejercer la fuerza⁷⁷. La distinción entre fuerzas muertas y vivas es asumida con la que introduce entre presión y percusión⁷⁸. El vínculo entre la inercia y la fuerza en general se establece a través de la impenetrabilidad, que constituye el paradigma y el modelo de toda acción dinámica, aun-

15. Véase W. BERKSON, *Las teorías de los campos de fuerzas. Desde Faraday hasta Einstein*, Madrid, Alianza, 1981.

76. L. EULER, *De la force de percussion et de sa véritable mesure* (1746), *Opera omnia*, vol. II, 8, p. 29.

77. Véase L. EULER, *Recherches sur l'origine des forces*, (1750), *Opera omnia*, vol. II, 5, p. 112.

78. Véase *De la force*], p. 32.

que prudentemente deje EULER abierta la posibilidad de otros tipos de acción dinámica irreductibles a él, como la atracción a distancia⁷⁹. Todo este entramado conceptual no se articula meramente con abstractas conexiones lógicas, sino que se adapta con sorprendente facilidad a la más rigurosa y exacta matematización, incorporando la poderosa técnica del cálculo infinitesimal, de modo que los efectos más complicados de la experiencia se pueden reproducir teóricamente con todo detalle y prontitud. Puede decirse, en resumidas cuentas, que la física de la fuerza alcanza con EULER su definitiva mayoría de edad, y no sólo en su formulación nomológica (en este sentido, los escritos de EULER son los primeros que un físico actual puede leer sin extrañeza ni fatiga), sino, lo que es más importante, en su vertiente heurística, ya que los esfuerzos del físico suizo le permiten encontrar un modelo ontológico de la acción dinámica simple, coherente y extraordinariamente adaptable y capaz, al menos dentro de los módulos y límites de la física clásica.

En cuanto a la actitud de EULER con respecto a las discusiones anteriores sobre el concepto de fuerza, se ha señalado una coincidencia significativa con el juicio de D'ALEMBERT. EULER, en efecto, pronuncia sobre el particular el siguiente dictamen:

«Pues no habiendo convenido nunca entre ellos el efecto por cuya magnitud había que medir aquella fuerza, sus disputas han degenerado por lo regular en logomaquias, que se desvanecerán por sí mismas, pienso, cuando se haya encontrado la verdadera forma de estimar y medir las fuerzas...»⁸⁰.

A pesar de todo, la coincidencia es muy superficial, puesto que para D'ALEMBERT la polémica era viciosa desde su misma raíz, mientras que para EULER la polémica había sido mal planteada, y por otro lado estaba ya superada. Aquí está la raíz última de todo el asunto: para EULER, superar la polémica de las fuerzas y hacer que desaparezca no consiste más que en plantear bien el problema sustantivo que subyace, es decir, el problema de la me-

79. Véanse *De la force...*, p. 32; *Recherches...*, p. 151.

80. *De la force...*, p. 34.

dida de las fuerzas. Pero si éste es el caso, ello significa que la polémica misma no es una discusión científica, de detalle, sino la búsqueda de un planteamiento correcto, de un modelo ontológico adecuado. Se trata, en suma, de una discusión filosófica. Según D'ALEMBERT, el defecto era que se había derrochado demasiada metafísica para resolver un problema mecánico. Con mucha mayor corrección y propiedad, EULER detecta que el fallo es justamente el inverso: demasiada mecánica, demasiadas experiencias, demasiadas matemáticas, para tratar de resolver un problema de planteamiento, de concepción, de fijar los marcos globales de comprensión de la naturaleza, en definitiva, un problema de filosofía de la naturaleza. A doscientos años de distancia, lo verdaderamente lamentable es que esta implícita enseñanza de EULER, repleta de inteligencia y buen sentido, no prosperase, sino que unos y otros, es decir, científicos y filósofos, prefiriesen soluciones más cómodas para dar pábulo a sus respectivas ignorancias. Los mecánicos llegaron a pensar, aferrándose a la letra de la crítica de D'ALEMBERT, que no a su espíritu, que en el mundo de la mecánica sólo tienen cabida las experiencias y las ecuaciones matemáticas abstractas. Las consecuencias son las que comenta a propósito de las síntesis lagrangiana uno de los mejores historiadores de esta disciplina, TRUESDELL:

«La imagen que presenta de la mecánica es la de una disciplina cerrada: una rama de la teoría de ecuaciones diferenciales.

Al final del siglo XVIII existía la lamentable tendencia de huir de los problemas básicos del concepto, tanto en mecánica como en análisis matemático. La propensión formalística, tan contraria a la gran tradición iniciada por Jaime BERNOULLI y EULER, se extinguió rápidamente por la escuela francesa y, por supuesto, se refleja en la *Mecánica analítica*. La renuncia de historiadores y físicos a mirar más allá de la *Mecánica analítica* y a reconsiderar la gran obra de EULER y de los BERNOULLI es culpable de muchos juicios erróneos acerca de la producción científica del siglo XVIII. El tratado de LAGRANGE, como su título implica, no se ocupa de la mecánica racional; se debe considerar como una monografía sobre uno de los posibles métodos de deducir ecuaciones del movimien-

to, prácticamente restringida a la rama que hoy denominamos mecánica analítica»⁸¹.

Por su parte, muchos filósofos aceptaron aliviados la solución kantiana, que hacía de la mecánica una disciplina específicamente distinta de la metafísica, y se resignaron a no tener nada que decir sobre aquélla, con la ingenua esperanza de que entonces tampoco la mecánica podría decir nada sobre las importantes cuestiones que pensaban haberse reservado. La evolución posterior del pensamiento demostró, no obstante, que es imposible convertir la ciencia y la filosofía en dos conjuntos distintos. La filosofía de la naturaleza, que a partir del siglo XVIII y a raíz de su separación de las ciencias de la naturaleza atraviesa la mayor crisis de su historia, no debió haber perdido nunca el contacto vivificador con el saber positivo, y de hecho sólo empezó a salir de su postración cuando, a principios del siglo XX, las mismas necesidades de profundización teórica de los físicos impusieron una reconsideración filosófica de los fenómenos naturales y de los presupuestos de su investigación racional.

81. *Essays...*, trad. de J. L. Navascués y E. Tierno (Madrid, Tecnos, 1975, p. 131).