D'ALEMBERT

Obra

MIEMBRO DE LAS ACADEMIAS DE PARÍS, BERLÍN Y LONDRES, Jean Le Rond d'Alembert había escrito una importante obra en los ámbitos de las matemáticas y la física antes de ser editor con Diderot de la Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. *El primer volumen, publicado como indica esta portada en 1751, incluía un* Discurso preliminar, *manifiesto ideológico de la Ilustración escrito por D'Alembert. Biblioteca Nacional, Madrid.* ◊

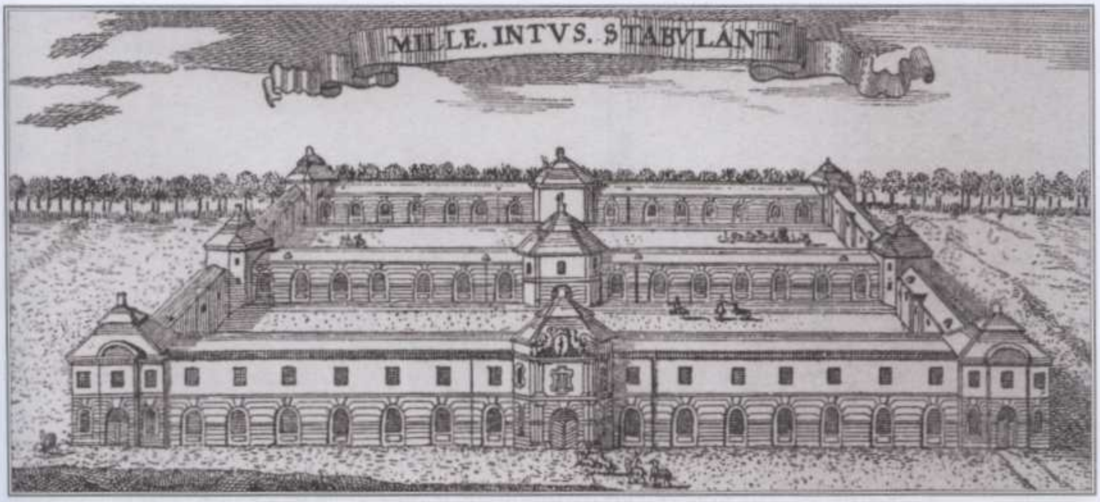
Obra

Gonçal Mayos

Opúsculos matemáticos

D'Alembert fue uno de los primeros matemáticos que decidió publicar conjuntamente todos sus ensayos, y en una edición que intentaba superar la muy reducida circulación de los escritos matemáticos. El resultado fueron los ocho volúmenes de los *Opuscules mathématiques* que publicó entre 1761 y 1780, aunque los primeros volúmenes recogieron obras publicadas o elaboradas con anterioridad. El motivo principal que le movió a editar por su cuenta los *Opúsculos* fueron las dificultades que encontró para publicar sus obras en la década de 1760 por el bloqueo conjunto de Clairaut en la Academia de Ciencias de París y de Euler en la Academia de Ciencias de Berlín.

Autor de celebridad. Debemos añadir, no obstante, que D'Alembert, a diferencia de otros matemáticos de su tiempo, con la *Enciclopedia* se había percatado de la fuerza del creciente «capitalismo de imprenta» para llegar al público lector donde fuera y como fuera. Además D'Alembert, también gracias a su tarea de publicista en las batallas de la *Enciclopedia*, había adquirido gran relevancia social y era conocido mucho más allá de los estrechos círculos matemáticos y científicos (aunque como veremos, su concepción de la ciencia es muy matematicista).



A PARTIR DE 1746, AÑO EN QUE SU ENSAYO SOBRE LA CAUSA DE LOS VIENTOS FUE PREMIADO por la Academia de Berlín y hasta 1755, cuando se inicia la disputa con Euler, D'Alembert publicó sus Opúsculos *en la Academia de las Ciencias y las Artes de Berlín, emplazada, como se aprecia en este grabado de 1700, en los antiguos edificios que ocupaban las caballerizas del rey de Prusia.* ◊

Los *Opúsculos* son un extenso cajón de sastre con muy diversos tipos de escritos matemáticos y físico-matemáticos, que además tenían distinto valor y relevancia. Recordemos, por ejemplo, que en 1747 D'Alembert aplicó el cálculo diferencial al análisis del problema físico de la cuerda vibrante, lo cual le condujo a la resolución de una ecuación diferencial. D'Alembert fue el primero en 1754 en utilizar el desarrollo de Taylor con resto explícito en forma de integral. Propuso un método para resolver los sistemas de ecuaciones diferenciales y desarrolló un primer ejemplo de ecuación con derivadas parciales. En 1768 utilizó en un caso particular el criterio de convergencia de series que lleva su nombre. Evidentemente también había otras aportaciones menores, pues como ya se ha dicho en los *Opúsculos matemáticos* se recoge la totalidad de los frutos de su dilatada y compleja trayectoria matemática y físico-matemática que ahora recordamos brevemente.

Trayectoria como matemático. D'Alembert se inició en las matemáticas en el Colegio de las Cuatro Naciones porque sus profesores jansenistas y malebranchianos vieron en él una mente brillante e intentaron convertirlo en un gran teólogo como Pascal. Creyeron que –como a éste– las matemáticas no lo alejarían de la teología, sino todo lo contrario. Se equivocaron, pues D'Alembert quedó fascinado con los introductores del cálculo infinitesimal de Leibniz y de Newton, los hermanos Bernoulli. Ya no se interesó por la teología y, a pesar que tuvo que licenciarse en Derecho (1738) e iniciar

Medicina como dignas y rentables profesiones adecuadas a su condición de hijo natural de marquesa y general, al poco abandonó dichas ocupaciones, que aparentemente no dejaron ningún rastro en sus preferencias y opciones intelectuales.

Así D'Alembert apostó por ganarse la vida con las matemáticas (cosa bastante difícil en aquella época), y lo consiguió en poco tiempo y con relativa facilidad. Ya en 1739 envió a la Academia de Ciencias una *Mémoire sur le calcul intégral*, en la que detectaba errores en la obra del padre Charles Reyneau *El análisis demostrado*. También envió, y se publicaron poco después en las *Memorias* de la Academia de Ciencias de París, dos trabajos posteriores: *Investigaciones sobre la integración de las funciones racionales* y *Sobre la integración de ecuaciones diferenciales*, donde proponía nuevos métodos y nuevas posibilidades. En conjunto estas aportaciones le valdrán a D'Alembert ingresar en 1741 en la Academia de Ciencias de París como «adjunto de astronomía», cuando tan sólo contaba con veinticuatro años y con el también matemático Alexis Clairaut como su mentor. Más tarde, en 1746, D'Alembert se convirtió en «asociado de geometría» en la misma Academia de Ciencias.

Profundización en el cálculo diferencial. La formación en matemáticas de D'Alembert, que era básicamente autodidacta, no le impidió penetrar en lo que era el descubrimiento estrella de los últimos tiempos: el cálculo infinitesimal. Aunque Fermat ya había estudiado cómo calcular el máximo y el mínimo de algunas curvas, serán Leibniz y Newton quienes –cada uno por su cuenta– pero al mismo tiempo descubrieron las dos grandes versiones del cálculo infinitesimal. Leibniz desarrolló el cálculo diferencial e integral, mientras que Newton introdujo el término y método de «fluxiones» (lo que ahora llamamos derivadas). Se produjo entonces un gran debate que escindió momentáneamente la evolución de las matemáticas en el continente y en las Islas Británicas. En éstas, Newton y sus discípulos imponían totalmente su ley, y será Voltaire quien hará un importante esfuerzo para transmitir estas aportaciones por el continente.

Mientras tanto, en Europa la tradición matemática leibniziana era más potente, pues además su notación era más elegante, con lo que se impuso universalmente hasta hoy.

DISCÍPULOS DE LEIBNIZ, *los hermanos Jean (1654-1705) y Jacques Bernoulli (1667-1748) desarrollaron un papel importante en la clarificación y la difusión del cálculo diferencial e integral que Euler y D'Alembert estudiaron. En el grabado, los hermanos se ocupan de la ecuación que describe la trayectoria de una partícula que pasa de un punto a otro en el menor tiempo posible, afectada sólo por la gravedad.* ◊

Así, entre 1739 y 1744 se reeditó anotada y con añadidos a pie de página una edición latina en 4 volúmenes de los *Principia*; pues bien, en esa edición ya se transcribía la terminología newtoniana de las fluxiones a la notación y simbolismo leibnizianos. D'Alembert estudió las aportaciones de los hermanos Jacques y Jean Bernoulli, discípulos directos de Leibniz; del marqués de L'Hôpital (que escribió en 1696 el *Análisis de los infinitamente pequeños para la inteligibilidad de las líneas curvas*); de Fontenelle (*Elementos de la geometría del infinito*, de 1727); del grupo malebranchista (conectado con los primeros maestros matemáticos de D'Alembert en el Colegio de las Cuatro Naciones) y de Clairaut –que fue clave para la aceptación de D'Alembert en la Academia de Ciencias–. También discípulo de los Bernoulli, Euler había ido desarrollando sus importantes aportaciones más al este, en San Petersburgo y, finalmente, en Berlín. D'Alembert lo conoció más tarde, cuando su escrito sobre los vientos fue premiado por la Academia berlinesa y dio comienzo su gran amistad con Federico II.

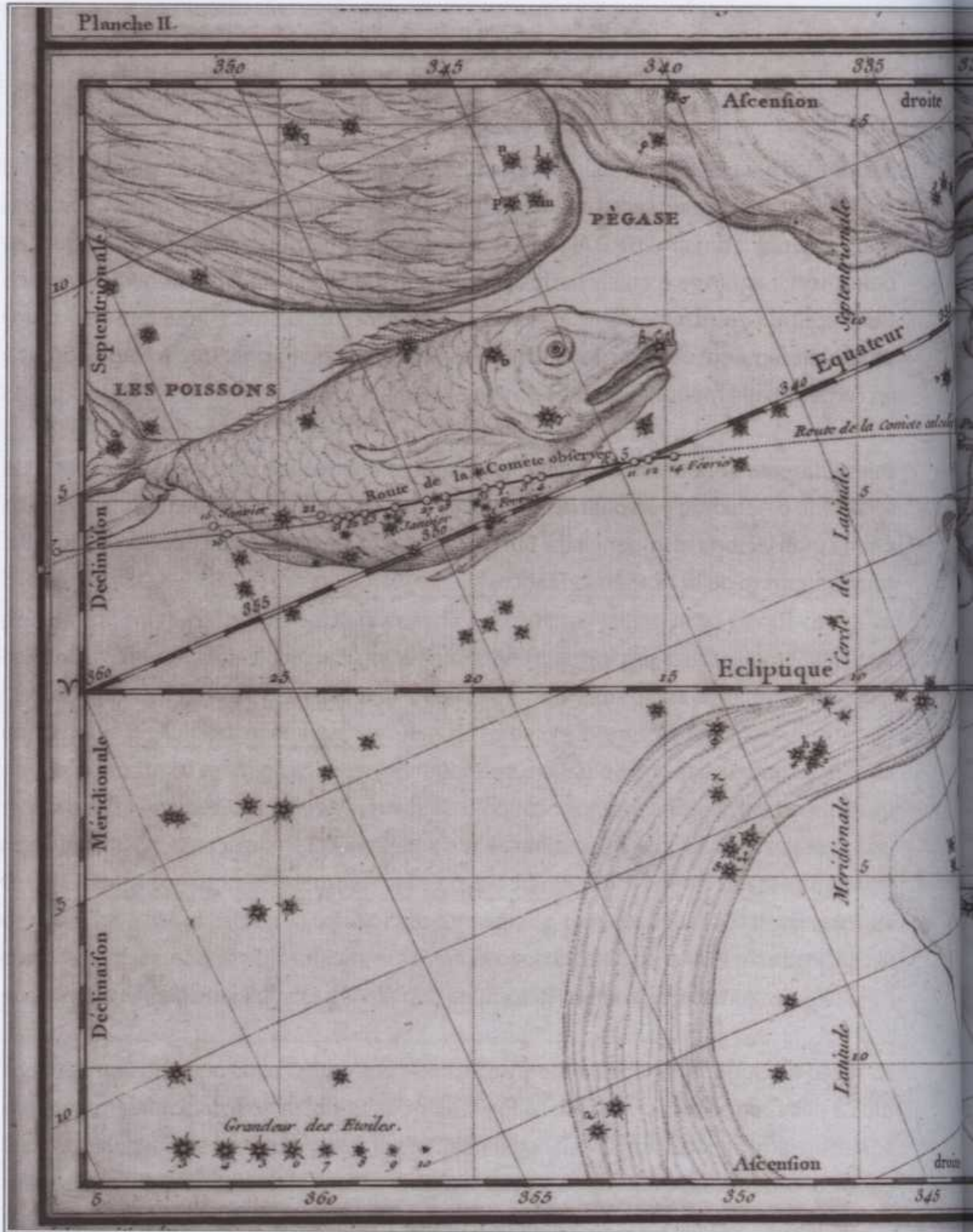
El álgebra. En álgebra, D'Alembert demostró que el conjunto de los números complejos es suficiente para contener y expresar todo el cálculo analítico. También se enfrentó con el problema a la vez ontológico y matemático del estatuto otorgable a las soluciones negativas de las ecuaciones algebraicas. Es decir, por el significado que pudieran tener las raíces negativas, en especial las raíces imaginarias, como pueda ser la raíz cuadrada de −1. Tradicionalmente se había podido trabajar sin demasiado problema con los números negativos gracias a que eran interpretados geométricamente como puntos en coordenadas negativas. De esta manera se les podía dar un cierto sentido real: serían como los números complejos en las coordenadas positivas pero, en ese caso, en las negativas. Éstas y otras sutiles estrategias de cálculo evitaban gran parte de los problemas. D'Alembert, en interrelación con Euler, colaboró para que finalmente Argand estableciera la notación que unificaría bajo una misma forma general de un número complejo todas las raíces negativas.

Superación del bloqueo académico de Clairaut y Euler. En 1759, Clairaut predijo con un mes de antelación la llegada del cometa Halley. Dicho científico era un brillante matemático, incluso más precoz que D'Alembert, al que había promocionado a la Academia de Ciencias, pero con el que en los últimos años había competido denodadamente, pues coincidían en muchas áreas de trabajo e interés. Al iniciarse su enfrentamiento, Clairaut, al ser mayor, tener más renombre y gozar de un aliado como Euler (presidente de la Academia de Berlín) consiguió bloquear durante años, de hecho hasta su muerte en 1765, el ascenso de D'Alembert en la Academia de Ciencias. Sólo tras la muerte de Clairaut consiguió D'Alembert ser nombrado miembro «pensionista» de la Academia; a los 47 años estaba ya totalmente consagrado, tenía publicada casi toda su obra científica, matemática y filosófica, y era miembro reconocido de la aún más prestigiosa socialmente Academia Francesa (de la que en unos años sería secretario).

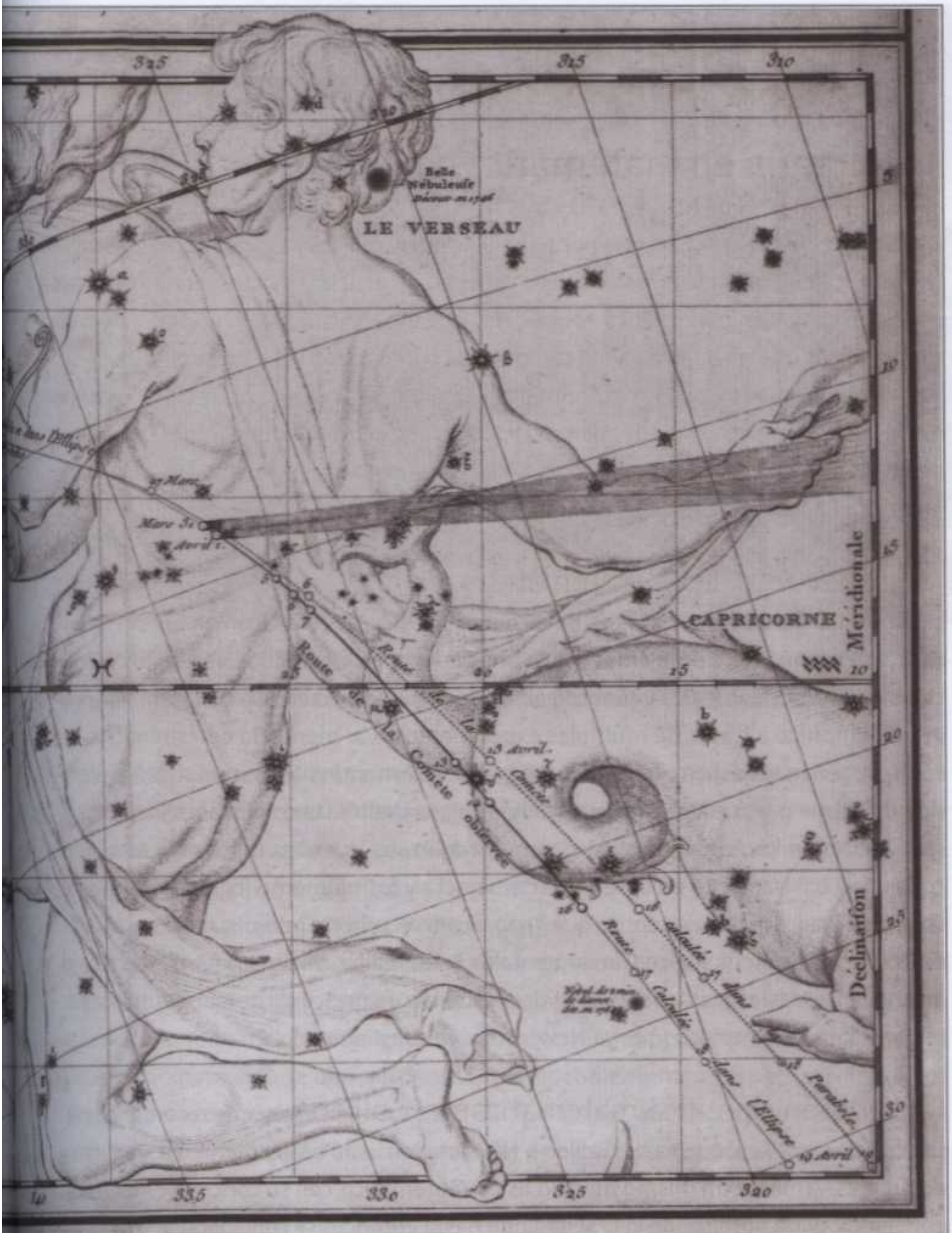
Todavía más difícil lo tuvo D'Alembert en su competencia con Euler pues, a pesar de que, según parece, ambos se apropiaban desarrollos del contrario y se negaban a confesarlo, Euler se caracterizaba por una enorme elegancia y simplicidad formal que daba un acabado lógico-deductivo mucho más perfecto a sus obras y que eclipsó la sobria claridad y las intuiciones que caracterizaban a D'Alembert.

Finalmente, D'Alembert consiguió superar los bloqueos de Clairaut y Euler y ascendió velozmente en el panorama de las academias europeas (renunció en 1763 a la oferta de Federico para presidir la Academia de Berlín –precisamente en sustitución de Euler–, pero en 1772 fue elegido secretario perpetuo de la Academia Francesa). Además, se declararon discípulos directos de D'Alembert los nuevos y brillantes valores en matemáticas Condorcet, Lagrange (con su perfectamente acabada *Mecánica analítica*) y Laplace (su *Exposición del sistema del mundo* y su *Mecánica celeste* definen un sistema del mundo completamente autónomo, determinado y estable que, como dirá a Napoleón, «ya no contempla la hipótesis de Dios»).

Especialmente Condorcet actuará como el amigo más íntimo e incluso una especie de secretario o heredero personal de D'Alembert, quien, un año antes de morir, obtuvo su última gran victoria al imponerse a Buffon y conseguir la elección de Condorcet, en 1782, como miembro de la Academia Francesa.



Discípulo del marqués de l'Hôpital y de Jean Bernoulli, *Alexis-Claude Clairaut (1713-1765) aplicó los resultados de su* Teoría de la Luna *(1752) al cálculo de la órbita del cometa Halley, lo que le permitió prever el 15 de abril de 1759 como la fecha del tránsito del cometa por su perihelio, con un mes de retraso sobre la fecha real del tránsito. A partir de 1752, la rivalidad entre Clairaut y D'Alembert dio paso a una disputa abierta sobre el papel que debían tener la observación y la teoría en ciencia.*



Encumbrado por sus contemporáneos como un nuevo Tales, Clairaut continuó con sus trabajos y, en 1762, perfeccionó el cálculo de la trayectoria del cometa, tomando en consideración las perturbaciones que introducían Júpiter y Saturno. Su trabajo fue premiado por la Academia de San Petersburgo. En la imagen, mapa del cielo realizado por el astrónomo Charles Messier (1730-1817) en el que se describe la trayectoria del cometa Halley por las constelaciones de Piscis y Acuario en 1759.

Trayectoria en matemáticas mixtas

D'Alembert destacó tanto o más por su aplicación de nuevos desarrollos matemáticos (como el cálculo infinitesimal) a la física, mecánica, acústica y astronomía física que por sus trabajos en matemática «pura». Hay que especificar que en el siglo XVIII estas matemáticas mixtas, aún teniendo como objeto cuestiones físicas, no implicaban prácticamente ningún desarrollo experimental. Eran «mixtas», pero procedían de forma axiomático-demostrativa, sin apenas aportaciones experimentales, pues se trataba de definir las posibilidades y condiciones de la matematización de los diversos campos de la realidad por el análisis y cálculo infinitesimal.

Modelo teórico de las matemáticas mixtas. Como hemos apuntado, en el siglo XVIII las matemáticas mixtas, o físico-matemática, se centraban en aplicar la formalidad matemática a problemas físicos previamente racionalizados, abstraídos y reducidos a condiciones ideales y cuantificables. En lugar de llevar a cabo un complejo programa empírico a través de múltiples experimentos o, al menos, la determinación de cómo deberían ser éstos, ello significaba –para la corriente más matematizante y teórica, de la que participaba D'Alembert– limitarse a definir las condiciones ideales que racionalizarían los fenómenos físicos y unificarían sus leyes. Las matemáticas mixtas consistían básicamente en determinar abstracta y formalmente (como en las matemáticas puras) un modelo teórico que –pensaba D'Alembert– minimizara los principios ontológicos y epistemológicos fundamentales. Éstos habían de ser autoevidentes (como afirmaba Descartes y, aun antes, Euclides) y habían de prescindir totalmente de hipótesis de carácter empírico (que ya Newton había cuestionado).

La tradición científica matematizante: Galileo. Hay que recordar que la revolución científica, que va de Galileo a Newton, consistió básicamente en ir aplicando progresivamente un mismo modelo físico-matemático, con su concreta ontología y epistemología, a ámbitos de la realidad que hasta entonces se consideraban esencialmente divergentes (es decir con leyes y principios inconmensurables entre sí). Galileo fue clave a la hora de demostrar que los mismos principios que se aplicaban a la astronomía (que entonces se llamaba el mundo supralunar y se consideraba no sometido

Este óleo de Luigi Sabatelli (1772-1850) recrea la presentación que Galileo Galilei (1564-1642) hizo ante los patricios de Venecia y el Dux de la Serenísima República de las posibilidades que abría para los marinos venecianos el uso del nuevo instrumento, el «tubo óptico», que el pisano había perfeccionado en 1609. Tribuna de Galileo, Palacio Torrigiani, Florencia, Italia. ◊

al cambio ni a la corrupción) también eran aplicables a las «cualidades primarias» que sí eran cuantificables (extensión, volumen, movimiento, peso...) de la física terrestre (lo que se llamaba mundo sublunar, el ámbito de la corrupción y del cambio continuo).

Es sabido que el propio Galileo tuvo el valor (y fue criticado por ello) de usar un artilugio del menospreciado mundo de los artesanos no letrados y sin formación teórica matemática: el telescopio. Pero en general, esta línea en el desarrollo de la «nueva ciencia» físico-matemática prescinde de los avances empíricos, pragmáticos y tecnológicos –que en gran medida se dan autónoma e independientemente– para privilegiar los grandes avances teóricos logrados en el campo formal, abstracto y puro de las matemáticas (bajo la hégida del ideal axiomático y de estricta deducción de la geometría de Euclides).

El sueño newtoniano. Aún en Newton, la tradición más teórico-matematizante y la más empírico-experimental se dan todavía separadas y bajo una cierta discontinuidad, como se ejemplifica si se comparan sus dos obras magnas. Por una parte está la aportación matemática y estrictamente teórica física-matemática de los *Principia mathematica* y, por otra, la obra y programa más experimental de la *Óptica*. Claramente D'Alembert se inscribe en el desarrollo del estricto programa teórico y físico-matemático de los *Principia* de Newton, mientras que no consta que jamás hiciera efectivamente ningún experimento.

En la línea de trabajo adoptada por D'Alembert (centrada en los grandes desarrollos matemáticos que unen Galileo, Descartes, Newton y Leibniz), no había pues dos regiones ontológicas totalmente diversas y opuestas, que requerieran, por tanto, ciencias y principios totalmente distintos. Se consideraba que había un único y mismo modelo físico-matemático aplicado a dos ciencias hermanas –la astronomía y la física– que sólo se distinguían por aspectos parciales (por ejemplo, por las masas implicadas en los diversos fenómenos o la presencia o no de rozamiento por la atmósfera, etc.). Newton culminó la aplicación del mismo paradigma físico-matemático a las nuevas ciencias: química, fisiología, biología, termodinámica, electricidad... Eso es lo que algunos estudiosos han llamado «el sueño newtoniano» sobre el desarrollo de las nuevas ciencias, en el que participa claramente D'Alembert.

Así, poco a poco, se fueron abandonando las hipótesis específicas heredadas de las viejas ontologías, ya fuera la aristotélico-escolástica o la mágico-naturalista de muchos renacentistas. El mismo modelo ontológico y epistemológico que permitió racionalizar, matematizar, cuantificar, prever e, incluso, dominar los movimientos astronómicos y físico-terrestres, se utilizó en adelante para explicar las reacciones químicas, los mecanismos fisiológicos o los movimientos anatómicos, los fenómenos eléctricos, de transmisión del calor y la conservación de la energía en los distintos sistemas (termodinámica), etc.

Las matemáticas, la lengua perfecta. Dentro de esta tendencia, D'Alembert fue clave en la matematización y racionalización de ámbitos de la física como la mecánica y dinámica de fluidos o de complejos sistemas de tres o más cuerpos en afectación mutua. Para todo ello D'Alembert desarrolló aplicaciones matemáticas del cálculo diferencial que fueron clave para que su discípulo Laplace obtuviera la formulación

RETRATO DEL MATEMÁTICO Y ASTRÓNOMO PIERRE-SIMON DE LAPLACE (1749-1827), *condecorado con la Legión de Honor y realizado tras la Restauración, cuando fue nombrado par de Francia. Laplace fue una de las figuras más versátiles de la segunda mitad del siglo* XVIII *y definió las claves de una nueva ciencia determinista en obras tan decisivas como la* Exposición del sistema del mundo *(1796), el* Tratado de mecánica celeste *(1799-1815) y la* Teoría analítica de la probabilidad *(1812).* ◊

plenamente matemática de un coherente y determinista sistema del mundo. Especialmente aportó novedades decisivas en el tratamiento teórico de la física de los medios continuos o fluidos (sólidos elásticos o líquidos) y en el desarrollo (que culmina posteriormente) de la teoría de campos.

Pero, además, en tanto que filósofo, metodólogo y teórico del conocimiento, interpretó la matematización de lo real presente en las nuevas ciencias físico-matemáticas como la plena racionalización del saber humano. Siguiendo la evolución que de Galileo lleva a Leibniz, D'Alembert pensaba que sólo las matemáticas podían explicar el mundo racionalmente; pues las matemáticas, si no eran el mismo alfabeto ontológico de la realidad, al menos constituían la lengua perfecta que permitía expresarlo y conocerlo racionalmente.

Por eso, la unidad, universalidad, simplicidad, coherencia y efectividad de las matemáticas eran para D'Alembert la prueba de su veracidad, su certeza y su proximidad a la razón misma. En última instancia, pensaba D'Alembert, la humanidad, a largo plazo y a través del trabajoso progreso de las ciencias, estaba llamada a obtener la plena unificación filosófica de todas las ciencias y del sistema completo del mundo. Así en el artículo «Método» de la *Enciclopedia*, D'Alembert afirma que «El método matemático es el de todas las ciencias, lo que es natural al espíritu humano, lo que permite descubrir las verdades de todo género».

Debate entre cartesianismo y newtonianismo. Si de resultas del debate sobre la prioridad del cálculo infinitesimal entre Leibniz y Newton se produjo una cierta escisión en la evolución de las matemáticas entre el continente y en las Islas Británicas, aún fue mayor la escisión por lo que respecta a la física. Aquí el enfrentamiento era entre el newtonianismo y la tradición cartesiana, que rechazaba la noción de vacío, tendía a identificar la materia con la extensión geométrica y se negaba radicalmente a aceptar conceptos que recordasen las «entelequias» cualitativas y finalistas escolástico-aristotélicas (entre ellas la fuerza gravitacional introducida por Newton).

Sin duda en esta polémica y en todos los bandos, intervino un cierto orgullo patrio. En el caso francés, aun reconociendo lo mucho que se había avanzado desde Descartes, había una importante resistencia a aceptar que el sistema ontológico, físico y epistemológico cartesiano contenido en los *Principios de filosofía*, tenía que ser totalmente sustituido por el newtoniano, contenido en los *Principios matemáticos de la filosofía natural* (1687) y en la *Óptica* (1704). Había, de hecho, una importante insistencia en mantener, al menos, los principios ontológicos básicos del cartesianismo.

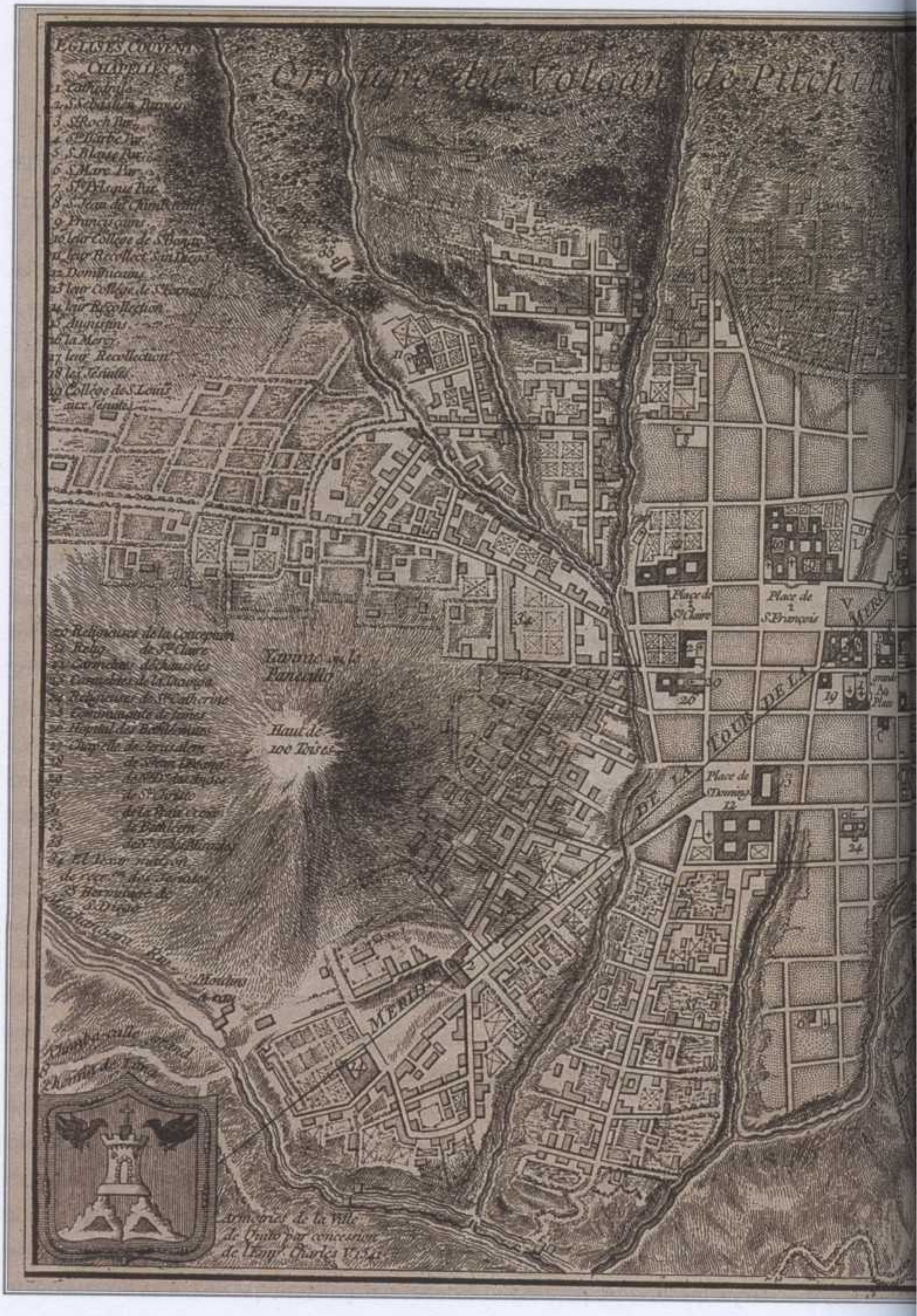
El experimento crucial. Ciertamente, Maupertuis, Voltaire o Clairaut introdujeron y defendieron en Francia el newtonianismo; pero, por ejemplo, el director del Observatorio Astronómico de París –Cassini– se oponía a éste en favor del cartesianismo. La necesidad de concluir esta larga polémica llevó incluso a la Academia de Ciencias de París a plantear y llevar a cabo lo que se consideró un experimento crucial que dirimiría sin ninguna duda la superioridad del newtonianismo o bien del cartesianismo. La noción de «experimento crucial» proviene de Francis Bacon (aunque no consta que hiciera ninguno), que lo denominó un tanto peligrosamente «experimento luciferino». Bacon usaba ese término, no para de remitirse al demoníaco Lucifer, sino a aquel experimento que daba luz y distinguiría inequívocamente la bondad o veracidad de las teorías en disputa.

El experimento crucial que diseñó la Academia a tal efecto comportaba medir la forma exacta de la Tierra. Según la teoría gravitacional newtoniana, la Tierra no era perfectamente esférica, sino que, al contrario, debía tener un ligero, pero significativo y medible, achatamiento por los polos. Según el estudioso Javier Moscoso, el cartesianismo de los vórtices predecía también un achatamiento de la Tierra, pero en el ecuador.

El reto estaba servido: sólo hacía falta medir con precisión el arco terrestre en el ecuador y en el polo, para poder compararlos rigurosamente y constatar en dónde se produce efectivamente el predicho achatamiento. Según fuera el resultado de ese experimento crucial quedaría, sino totalmente refutado, al menos muy tocado el sistema del mundo cartesiano o el newtoniano; e inversamente el otro podría considerarse confirmado frente a la prueba de los hechos.

Perú y Laponia. Para llevar a cabo este decisivo experimento, que despertó una gran pasión internacional, se planificaron dos expediciones. El famoso navegante, naturalista y geógrafo Charles de La Condamine (miembro de la Academia de Ciencias de París desde 1730), junto con el matemático y astrónomo Pierre Bourguer y otros científicos, viajarían a Perú para medir el arco ecuatorial de meridiano. Por otra parte, el famoso científico Maupertuis y el matemático Clairaut (también de la Academia de Ciencias de París) viajarían a Laponia para medir por su cuenta el arco de meridiano justo en el polo Norte. Una vez de vuelta en París y comparadas las distintas medidas, la conclusión del experimento sería clara y evidente.

Ambas expediciones partieron en 1736, pero como era lógico primero regresó la del polo Norte, pues La Condamine y los suyos se encontraron con tantas dificultades (incluso dos muertes del equipo científico) que tardaron casi una década en volver. Hay que decir que la expedición de La Condamine, en compensación, aportó tal enorme cantidad de información y especímenes para estudio de los naturalistas, que se convirtió en una de


EGLISES COUVENTS
CHAPELLES
3 St. Roch Par.
6 S. Marc Par.
9 Franciscains
16 la Merci
17 leur Recollection
19 Collège de S. Louis aux Jésuites
Haut de 100 Toises
Place de 3 St. Claire
Place de 1 S. François
Place de S. Domingo 12
DE LA TOUR DE LA
MERID
Moulins
Armoiries de la Ville de Quito par concession de l'Empr. Charles V 1541

LA EXPEDICIÓN GEODÉSICA A PERÚ *fue organizada por la Academia de Ciencias de París y dirigida por La Condamine (1735-1744). Con el apoyo de la corona española, la expedición incorporó a dos jóvenes matemáticos del cuerpo de guardamarines, Jorge Juan (1713-1773) y Antonio de Ulloa (1716-1795), y tenía por misión probar si la figura de la Tierra era achatada o no en los polos. Para ello los «caballeros del punto fijo», como se les conoció popularmente, realizaron mediciones del arco del meridiano terrestre en Quito, ciudad de la que La Condamine levantó este plano, grabado en 1741. Sin embargo, Jorge Juan y Antonio de Ulloa, pese a su azaroso regreso, consiguieron avanzarse a los franceses al publicar los resultados en las* Observaciones astronómicas y físicas *(1746), alcanzado lo que suponían la superación del último escollo para el triunfo de las ideas newtonianas.* ◊

las más famosas e importantes del siglo XVIII. Como suele suceder con los grandes experimentos cruciales, los resultados fueron en un principio no del todo concluyentes (pues faltaba la medición ecuatorial). Pero pronto se impuso la conclusión (hoy efectivamente irrefutable) del achatamiento terrestre en los polos, con lo cual el newtonianismo recibió un fuerte impulso y continuó su expansión triunfal también en el continente. De hecho Newton es –quizá incluso más que Bacon o Locke– uno de los grandes emblemas en los que coinciden en reivindicar casi todos los ilustrados.

Tratado de dinámica (1743)

Dinámica y estática. La obra científica más famosa y seguramente la más importante de D'Alembert es su *Traité de dynamique (Tratado de dinámica)*, publicado en 1743. En él D'Alembert expuso la mecánica de los cuerpos rígidos estableciendo la existencia de un equilibrio entre las acciones y las reacciones internas de un sistema completamente rígido. Hay que avisar al amable lector de una posible causa de confusión en la comprensión del alcance de esta obra pues, a pesar de referirse en el título a la dinámica, D'Alembert demuestra en ella que la dinámica puede derivarse de la estática. Por tanto, D'Alembert lo que hace en el tratado es relacionar la dinámica (desarrollada por Newton) con la estática (desarrolladas, más bien, por Descartes y Galileo).

Todavía muy cartesiano, D'Alembert se inclinaba a reducir todas las situaciones mecánicas a choques e impactos directos entre los cuerpos, sin recurrir a conceptos que ve «metafísicos» como las fuerzas continuas. D'Alembert insiste en que el movimiento sólo se puede transmitir por contacto directo y, en su definición de masa, estaba implícita la ley de conservación del movimiento. A pesar de su decidida militancia en el bando del newtonianismo, D'Alembert se esfuerzaba por defender la interpretación de la gravitación como mera ley formulada en términos matemáticos. Como mucho pudo pensarla como una mera propiedad física de los cuerpos, pero en todo momento rechazó identificarla con un impulso vitalista o como signo de la potencia misma de la materia (cosa que ya había formulado Giordano Bruno o, en explícita polémica con Newton, John Toland).

El misterio de la elasticidad de los átomos. En su *Tratado de dinámica*, D'Alembert intenta dilucidar la naturaleza de la materia aceptando el corpuscularismo (átomos perfectamente rígidos e impenetrables), pero sin poder explicar ni la elasticidad de éstos ni otros muchos fenómenos químicos o físicos que la presuponen.

A pesar de que para superar dichos problemas pensó que los átomos estaban conectados con sus vecinos por una especie de muelles, D'Alembert era consciente de que esa teoría era muy difícilmente asumible como real, más allá de un mero modelo teórico. Una vez más, el *Tratado de dinámica* era sobre todo una obra de alta teoría y con muy poca preocupación por la experimentación. D'Alembert pensaba la mecánica bajo el modelo de la geometría de Euclides, partiendo de axiomas evidentes, a partir de los cuales se demostraban matemáticamente el resto de proposiciones o teoremas.

En ese proyecto de axiomatización y fundamentación, D'Alembert rechazaba todo concepto metafísico, esencialista, oscuro o vago, a la vez que insistía en que todo pudiera reducirse a nociones empíricamente determinables (que es, como hemos visto, algo diferente de hacer experimentos), como lo son el movimiento a través de un espacio determinable en un lapso determinado de tiempo. Es decir, se debía presentar y argumentar físico-matemáticamente la mecánica, sólo a partir de los cuerpos y su fácilmente determinable movimiento, pues sólo eso resulta perceptible sin presuposiciones metafísicas.

Experimento mental. Como vemos, el *Tratado de dinámica* era una especie de magno «experimento mental o ideal» (a los que eran muy dados Galileo y otros grandes científicos), que no comportaba llevar a cabo ni real ni efectivamente los complejos experimentos que habrían sido necesarios para demostrar empíricamente las teorías propuestas. A diferencia de la lentitud, dificultad y, probablemente en aquella época, la práctica imposibilidad de llevar a cabo los experimentos necesarios; la aplicación del modelo matemático a fenómenos previamente idealizados, racionalizados y abstraídos permitía proceder de forma mucho más rápida, sólida y efectiva.

GIORDANO BRUNO (1548-1600), autor de obras como Del infinito, De monade *y* De imagium compositione, *defendió una interpretación de la teoría de Copérnico basada en la unidad e infinitud de la naturaleza. Condenado por el Santo Oficio, fue quemado vivo en el Campo dei Fiori, donde en 1889 fue alzada una estatua en su memoria decorada con bajorrelieves que, como éste, ilustran pasajes de su vida.* ◊

Las tres leyes del movimiento. Dentro de esta concepción de la ciencia y de su proceder más correcto, en la primera parte del *Tratado*, D'Alembert desarrolló sus tres leyes del movimiento, que vienen a ser los axiomas de una mecánica totalmente matematizada y abstracta.

La primera es equivalente a la ley de inercia de Newton, y D'Alembert intentó demostrarla *a priori* a partir de un razonamiento puramente geométrico y de las meras nociones de tiempo y espacio. La segunda ley era para D'Alembert la regla del paralelogramo aplicada al movimiento. Y la tercera trataba del equilibrio y era equivalente al principio de conservación del momento lineal en colisiones.

El principio de D'Alembert. El *Tratado* también contenía el llamado principio de D'Alembert, que aplica a un sistema en equilibrio, sin rozamiento ni pérdida de la cantidad de movimiento. En tal caso, afirmaba D'Alembert, todo estado instantáneo del sistema estará globalmente equilibrado (es decir, la suma de todas sus fuerzas –tanto de acción como de reacción– será cero o nula).

Reflexiones sobre la causa general de los vientos (1746-1747)

Teoría sobre los vientos y las mareas. Buscando los distintos ámbitos de aplicación tanto de su *Tratado de dinámica* como de su *Tratado del equilibrio y movimiento de los fluidos*, D'Alembert se planteó la convergencia de la dinámica de fluidos (ya fueran gaseosos o líquidos) y la astronomía con una nueva teoría sobre los vientos (y en cierta manera sobre las mareas). Lo hizo en las dos versiones de sus *Reflexiones sobre la causa general de los vientos*. La versión latina le valió a D'Alembert ganar un importante concurso de la Academia de Ciencias de Berlín en 1746, superando ni más ni menos que a Daniel Bernoulli. Al año siguiente, D'Alembert publicó una versión ampliada y mejorada en francés, buscando por tanto un impacto más amplio que la estricta Academia.

Ahora bien, científicamente esta importante obra tiene que ser valorada con mucho cuidado desde la actualidad ya sea desde el punto de vista de la teoría propuesta, ya sea desde el valor instrumental del procedimiento matemático puesto en marcha para desarrollarla. Así, esa obra hoy en día ha sido totalmente refutada en muchas de sus tesis si nos centramos en el aspecto, en principio central, que es la teoría sobre los vientos que se defiende. Pero en cambio es una obra muy relevante dentro de la historia de las ciencias, si nos atenemos a que abre líneas muy útiles y básicamente correctas para el cálculo y cuantificación de fluidos (especialmente con cierta masa, como el agua oceánica).

La atracción lunar y solar. Expliquémoslo sintéticamente. D'Alembert daba la máxima importancia en la causación de los vientos a la atracción lunar y solar; de hecho los pensaba en un planteamiento muy teórico como «mareas atmosféricas». En una época donde ni siquiera se intuían los principios o incluso balbuceos de la futura teoría termodinámica, D'Alembert minimiza los efectos del calor en la atmósfera e intenta pensar los vientos desde lo que científicamente dispone: la física y teoría gravitacional newtoniana y el nuevo cálculo infinitesimal. Es por ello que piensa los vientos como «mareas de aire» provocadas sólo por efectos gravitatorios y por el movimiento de rotación de la Tierra.

Ciertamente, aquí el error de D'Alembert nace de que, por su muy débil densidad, las masas de aire sufren muy poco (aunque sí en cierta medida) la influencia de la gravedad sobre ellas. Ello provoca que, aunque en contrapartida D'Alembert acierta en el papel que la rotación terrestre tiene sobre los vientos (lo que más tarde se llamará «fuerza de Coriolis»), en conjunto resulte errónea la vía abierta por él hacia una teoría general de los vientos. Ahora bien, más tarde su discípulo Laplace (en su magna y completa *Mecánica celeste*) reconoce no sólo que la rotación terrestre es clave para la formación de los vientos alisios, sino que además el planteamiento y propuesta de cálculo de D'Alembert resultaban muy adecuadas para las mareas (es decir los movimientos del agua oceánica, que sí tiene suficiente densidad y, por tanto, es susceptible a los efectos gravitacionales solares y lunares, además de la rotación terrestre).

Ecuaciones con derivadas parciales. Ahora bien, sólo esto no habría salvado para la ciencia la obra de D'Alembert. Eso lo harán –según los expertos– sobre todo las aportaciones matemáticas desarrolladas en las *Reflexiones sobre la causa general de los vientos*. En esa obra encontramos una decisiva aportación a la matemática en la medida en que inauguró un nuevo desarrollo del cálculo infinitesimal (las ecuaciones con derivadas parciales) y, además, una eficaz aplicación de todo ello (de prolongado éxito y trayectoria) a la problemática «mixta» o físico-matemática de la mecánica de fluidos (ya sean vientos –que, como ya se ha dicho, D'Alembert imaginaba como «mareas atmosféricas»– o las mareas, que en el fondo son los «vientos» del agua oceánica).

Consecuencias para la carrera académica de D'Alembert. Además de por estos motivos, las científicamente obsoletas *Reflexiones sobre la causa general de los vientos* son de gran importancia para contextualizar las teorías científicas del francés en los aspectos sociales, políticos y culturales de la vida y los grandes debates filosóficos de la época. Lo son por dos motivos, que como veremos se retroalimentan más de lo que parece.

Por una parte esa obra fue clave D'Alembert comenzara a lograr una gran influencia en la Academia de Berlín (que premió la obra) y en la política académica internacional. Así, en esta última, D'Alembert consiguió ir superando los bloqueos y enemistades de Clai-

En sus *Meditationes de generali ventorum causa*, *D'Alembert formula la importancia que la gravedad y la rotación terrestre tienen en la formación de los vientos. En esta imagen de un sistema de bajas presiones situado en el hemisferio Norte, tomada por un satélite en septiembre de 2003, se aprecia con claridad el movimiento antihorario de la espiral que forma la fuerza de Coriolis.* ◊

raut, Euler y otros, para ir imponiéndose como el principal referente científico y de alta política académica en el marco internacional y, en consecuencia, poder posicionar sus grandes discípulos (Condorcet, Lagrange, Laplace...) en los mejores puestos y con las mejores condiciones dentro de ese marco.

Por otra parte, las *Reflexiones* fueron también claves para que D'Alembert profundizara en su relación amistosa con el influyente «rey filósofo» Federico II de Prusia. Y no podemos olvidar, dado el objetivo primordial de este libro, la importancia que tiene que D'Alembert ponga al servicio de las ideas ilustradas, tanto su alianza con el ilustrado rey de la potencia militar más importante del momento (que además estaba creciendo espectacularmente en lo político, lo cultural y lo económico), como su creciente influencia en la política académica internacional. Más allá de defender la dignidad del intelectual y los ideales ilustrados públicamente y por escrito en la «república de las

TRAS EL ÉXITO LOGRADO CON LAS MEDITACIONES DE 1746 EN LA ACADEMIA DE BERLÍN, *D'Alembert trabó amistad con Federico II de Prusia, que supo admirar el espíritu y apreciar la ciencia del brillante matemático y filósofo. Castillo de Charlottenburg, Berlín.*

letras», D'Alembert será clave además para el reconocimiento en las cortes, las altas academias y la cultura oficial de los enciclopedistas y del grupo de los filósofos franceses, que lideraba con Voltaire. En muchos casos ese reconocimiento intelectual comportó también aspectos más sólidos y pecuniarios (que también resultan importantes) de promoción social.

D'Alembert incluso puso en peligro su prestigio y reconocimiento internacional para defender ese espectacular y sorprendente ejemplo de «capitalismo de imprenta» o de libre república de las letras que es la *Enciclopedia* que dirigió con Diderot y que –hoy lo sabemos con pelos y señales– también necesitaba y en grado notable esa legitimidad y apoyos que D'Alembert había ido recabando a lo largo de su compleja carrera de matemático y científico, de académico y de personalidad con peso internacional, de filósofo renovador y de comprometido propagandista (en parte, como veremos, incluso en contra de su carácter y tendencia personal).

Investigaciones sobre los equinoccios (1749)

Las ecuaciones diferenciales de la hidrodinámica. Entre las posteriores obras físico-matemáticas de D'Alembert debemos destacar el *Ensayo sobre una nueva teoría sobre la resistencia de los fluidos*, de 1752, en la que por primera vez expuso en términos de «campo» las ecuaciones diferenciales de la hidrodinámica. Como esta obra no obtuvo el premio a un concurso de la Academia de Berlín, D'Alembert culpó a Euler, la relación con el cual se había deteriorado desde que, a finales de la década de 1740, D'Alembert, Clairaut y Euler coincidieron en intentar la resolución del complejísimo problema de los tres cuerpos (aplicado sobre todo a las influencias gravitacionales del Sol, la Tierra y la Luna).

El problema de los tres cuerpos. Entre 1754 y 1756 D'Alembert publicó en tres volúmenes las *Recherches sur différens points importants du système du monde*, donde investigaba el movimiento de la Luna afectado por la gravitación solar y terrestre. También como una aplicación a ese problema de los tres cuerpos en la mecánica celeste, D'Alembert publicó *Investigaciones sobre la precesión de los equinoccios y sobre la rotación de la Tierra*. Se llama *precesión* al movimiento de rotación del eje de la Tierra y *nutación* a la ligera oscilación de ese eje de rotación terrestre a lo largo de su dirección media. Ambos fenómenos eran y habían sido determinados con facilidad por astrónomos como resultado de la observación de los movimientos aparentes de las llamadas estrellas fijas. En su obra, D'Alembert superaba la teoría anterior de Clairaut sobre la precesión de los equinoccios, al integrar más componentes en la ecuación del movimiento y, por tanto, obteniendo resultados más acordes con los fenómenos observados.

De los éxitos de D'Alembert, pero también de las incomprensiones y las miserias de las relaciones de poder, nace su enfrentamiento con Clairaut y con Euler. Como hemos dicho, D'Alembert acusará a Euler de haber influido en el tribunal que declaró desierto el premio de la Academia de Berlín al que se había presentado; a su vez, parece que Euler estaba resentido por la amistad e influencia filosófica de D'Alembert en el emperador Federico, quien precisamente se resistía a otorgarle la presidencia efectiva de la Academia de Berlín en sustitución de Maupertuis y eso que venía ejerciéndola interinamente. Parece que Federico reservaba esta presidencia para D'Alembert, quien nunca la aceptó, y por ello Maupertuis figuró como su presidente hasta su muerte en 1759, pese a que Euler –que nunca lo fue plenamente– actuó los últimos años como el presidente interino. Finalmente, a la muerte de Euler, D'Alembert resultó clave para que su discípulo Lagrange fuera escogido por Federico presidente de la Academia berlinesa.

Ya hemos comentado que por estos conflictos con Euler, D'Alembert tuvo problemas para publicar sus trabajos en las *Memorias de la Academia de Berlín*, los cuales se añadieron a los que ya tenía en la Academia de Ciencias de París frente a Clairaut. Estas dificultades fueron decisivas para que D'Alembert decidiera publicar por su cuenta sus *Opúsculos matemáticos*. En 1761 aparecieron los dos primeros volúmenes de los *Opúsculos* de D'Alembert y en 1764 apareció el tercero. Los restantes, hasta 8, se sucedieron con nuevos trabajos, pero progresivamente manifestaron un menor valor en sus aportaciones. Ello fue debido tanto a que D'Alembert desviaba gran parte de su esfuerzo a la divulgación más filosófica o a la *Enciclopedia*, como a que se produjo un importante empeoramiento de su salud.