El mundo de Laplace: matemáticas, física y determinismo

AMY DAHAN DALMEDICO[1]
CNRS, CENTRE ALEXANDRE KOYRÉ

Me gustaría hablarles hoy aquí de un hombre que fue a la vez un gran científico –matemático y físico– un empresario de la ciencia, fundador de la famosa Societé d'Arcueil, un personaje comprometido en el curso de la Revolución y del Imperio, investido de múltiples responsabilidades, en estrechas relaciones con el poder político, un científico cuyo espacio social y profesional no tuvo límites fijos: Pierre Simon de Laplace. Una figura que imprimió durante muchas décadas su impronta sobre nuestra visión de la ciencia, sus ambiciones, y asimismo sobre cuál es el papel de las matemáticas en la comprensión del mundo y su devenir.

> «*Debemos contemplar el estado actual del universo como efecto de su estado anterior, y como causa del siguiente. Una inteligencia que en un instante dado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen, si fuera además suficientemente vasta como para someter a análisis sus datos, acogería en la misma fórmula el movimiento de los mayores cuerpos del universo y los del átomo más ligero: nada sería incierto para ella y tanto el porvenir como el pasado estarían presentes ante sus ojos*».

La Historia se ha habituado a retener esta cita de Laplace, sacada del *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, publicado en 1814, como la formulación crucial en la concepción del determinismo, que más tarde sería llamado determinismo científico. Más de cuarenta años antes, Laplace daba ya un enunciado muy semejante en el contexto del análisis del azar. ¿Cómo se vinculan, de manera premonitoria, dos conceptos aparentemente contradictorios, como determinismo y azar, en la obra fundamental del científico francés? Esta es una de las cuestiones que espero aclarar hoy. Por el camino abordaré muchos aspectos de la obra y los trabajos de Laplace, pero sin agotar en absoluto lo concerniente a su entorno social y profesional sin límites, lo que sería objeto suficiente para otra conferencia.

Laplace, el Newton de Francia

Pierre Simon Laplace nació en 1749 en Normandía y murió en París en 1827. Por dar una idea de sus contemporáneos: d'Alembert nació en 1717, Lagrange en 1736 y Monge en 1748. Su vida comenzó bajo Luis XV y acabó bajo Carlos X. Tuvo que adaptarse por tanto a la evolución caótica de la sociedad francesa –Revolución, Imperio, Restauración– y lo logró con acierto. Voy a intentar poner de relieve su proyecto científico global –pues sin duda lo tenía– y así estaré en mejor disposición para analizar la concepción del determinismo laplaciano. Después de una primera instrucción en el colegio de los Benedictinos y estudios de teología en Caen descubrió las matemáticas. Podemos distinguir tres períodos en su carrera:

[1] Directora de Investigación del CNRS, Centre Alexandre Koyré (EHESS-CNRS-MNHN)

1) Los veinte primeros años –de 1768 a 1789– constituyen una época de formación y ascenso del joven científico. Al llegar a París, provisto de una recomendación para d'Alembert, este constató inmediatamente sus dones matemáticos y le consiguió un puesto docente en la Escuela Militar. Publicó un gran número de memorias sobre cálculo integral, astronomía, cosmología y teoría de juegos. En análisis obtiene ya resultados importantes y forja las técnicas matemáticas que privilegiará toda su vida. Su estilo analítico, menos formalista que el de su colega Lagrange, se muestra inclinado hacia la utilidad de las fórmulas matemáticas y la precisión numérica. Laplace expresa lo que constituirá la base filosófica de su obra y elabora las grandes líneas de un programa de investigación en dos dominios que siempre serán de su predilección: las probabilidades y la mecánica celeste. Sin embargo, desde la década de los 80, se introduce en lo que será el tercer campo de interés en su madurez, la física, primero como colaborador de Lavoisier en la teoría del calor y luego como colaborador central de la comunidad científica que se halla al tanto de toda la producción de su época.

2) Su carrera alcanzó el cénit durante el período revolucionario, especialmente bajo el Directorio. A partir de 1789 se puso en marcha el proyecto de un nuevo sistema de pesos y medidas. Primero se quiso tomar como unidad de longitud la del péndulo que bate el segundo. Laplace contribuyó a la adopción de la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre y se hizo apóstol de la decimalización del sistema; se le debe buena parte de los nuevos nombres, entre ellos el de «metro». La Convención no lo juzga bastante entusiasta dado el cariz que toman los acontecimientos y lo excluye de sus trabajos. Durante el Terror considera preferible vivir retirado en Melun. Publica durante este período una extensa serie de memorias, y luego, en 1796, una obra de alta divulgación, *Exposición del sistema del mundo*, donde se encuentran los conocimientos astronómicos de su tiempo explicados sin fórmulas matemáticas al público cultivado. En la *Exposición* Laplace retoma y desarrolla la idea ya defendida por el filósofo Inmanuel Kant del nacimiento del sistema solar a partir de una «nebulosa». La atmósfera solar se habría extendido a gran distancia. Mediante enfriamiento y condensación se habrían formado anillos y luego planetas. Los satélites y demás cuerpos celestes se habrían engendrado de manera semejante. Esta teoría alcanzó una gran resonancia, aunque no haya accedido al estatus de verdad científica. Entre 1799 y 1805 aparecen los cuatro primeros tomos de su monumental *Tratado de la mecánica celeste*. Su fama es considerable, se lo denomina «el Newton de Francia». Es miembro del Instituto que reemplaza a la Real Academia de Ciencias, así como de la Oficina de Longitudes, creada en 1795 para ocuparse de las cuestiones de astronomía que tengan importancia práctica para la navegación. En ese marco ha tenido que supervisar la instalación del sistema métrico. La creación de la enseñanza científica superior demandaba asimismo la participación de los científicos en el esfuerzo republicano de formación de una nueva élite. Laplace imparte lecciones, con Monge y Lagrange, en la Escuela Normal, año III, en 1794. Es también uno de los principales inspiradores y animadores, junto con Monge, de la Escuela Politécnica, fundada ese mismo año y donde enseña hasta 1816. El Primer Cónsul lo nombra Ministro del Interior, donde no permanece mucho tiempo, pues un hombre de ciencia no resulta ser necesariamente un buen ministro. Es nombrado senador y en 1803 llega a ser vicepresidente del Senado.

3) En la última fase de su vida, entre 1805 y 1827, Laplace retorna a las probabilidades. Termina la *Teoría analítica de las probabilidades* y publica conjuntamente una obra de divulgación, el *Ensayo filosófico sobre las probabilidades,* que acompaña la obra técnica. Además, Laplace, nombrado conde del Imperio, se instala en Arcueil, en la vecindad de su amigo Berthollet, quien había montado en su casa dos laboratorios, uno de física y otro de química. A partir de esta escuela informal, la Sociedad de Arcueil, y de su colaboración con Berthollet, Laplace inicia el movimiento histórico de matematización de numerosas disciplinas que hasta entonces habían permanecido como especulaciones más bien cualitativas y metafísicas. Aborda los dominios de la capilaridad, de la óptica corpuscular, del calor, del sonido, etc. Estos trabajos aparecen agrupados, entre 1823 y 1825, en la última parte del tomo IV y en el tomo V de la *Mecánica celeste.* La principal orientación de la Sociedad de Arcueil fue el desarrollo de la física matemática. Se formulaban problemas y se animaba a los jóvenes discípulos a resolverlos, incluyendo los que concurren a los concursos con premios de la Academia. Llegaba a ocurrir que una memoria discutida debatida el domingo en Arcueil fuera leída el día siguiente en la reunión quincenal de la Primera Clase del Instituto. Entre los que se hicieron asiduos citemos a Gay-Lussac, Ampère, Malus, Biot y sobre todo Poisson. Esta escuela de física goza hoy de mala reputación; en efecto, Laplace y los laplacianos se opusieron a la perspectiva fenomenológica de Fourier en teoría del calor y a la teoría ondulatoria de la luz de Fresnel. Parecen haber ido a contracorriente de ciertas etapas que han marcado la evolución de la física, aunque resulta necesario matizar ese juicio demasiado sumario. No obstante, la física laplaciana ha tenido una influencia decisiva sobre la física matemática francesa del siglo XIX.

Quiero añadir en esta parte introductoria que las memorias matemáticas de Laplace se sitúan todas en la encrucijada –crucial para él y para la cuestión del determinismo ya mencionada– de la astronomía teórica y las probabilidades. Tienen que ver también con las ecuaciones en diferencias finitas parciales, de las que van a depender las probabilidades y que son un análogo discreto de las ecuaciones en derivadas parciales: series de un gran número de términos –que más tarde se llamarán asintóticas– y que juegan un importante papel en la teoría de las perturbaciones. La interpolación es lo que enlaza las ecuaciones en diferencias, el ajuste de las curvas y las observaciones astronómicas: los métodos de aproximaciones sucesivas están al servicio de la teoría de los movimientos elípticos o incluso de la teoría de las perturbaciones; finalmente, herramientas como la transformada de Laplace y las funciones generatrices forman toda la primera parte de la *Teoría analítica de las probabilidades* y se usan en la *Mecánica celeste.*

El postulado determinista

La convicción determinista de Laplace se impone de entrada y es bastante corriente en esa época, aunque no se usara ese término en el siglo XVIII. La astronomía había suministrado el paradigma por excelencia del determinismo, entendido como posibilidad de predicción mediante cálculo o ley matemática. La idea de que el mundo está escrito en lenguaje matemático, según la expresión de Galileo, se hallaba en su apogeo, especialmente después de que Clairaut hubiera calculado el regreso del cometa Halley. La ley de gravitación universal parecía el resultado más incontestable y admirable que se hubiera descubierto nunca y Laplace expresó a menudo la nostalgia de no haber podido ser él quien hubiera tenido la ocasión de encontrar esa ecuación única del mundo. Sin embargo, aún había muchas cuestiones no resueltas y la teoría se revelaba menos eficaz que la astronomía física y los métodos empíricos. Entre esas cuestiones estaban la de los movimientos exactos de los cuerpos celestes, la estabilidad del sistema solar, la figura de la Tierra, de los planetas y sus satélites, y la tan controvertida cuestión de si los planetas pertenecían o no al sistema solar. En fin, una interrrogación englobaba a todas las demás: ¿Sería suficiente la ley de Newton para explicar todas las lagunas o habría que añadir otras «causas extrañas»?

La formulación laplaciana del determinismo posee, según sabemos hoy, una contrapartida matemática: el teorema de existencia y unicidad de las soluciones de las ecuaciones diferenciales. Algunos historiadores contemporáneos han afirmado que Laplace la había extrapolado a partir de la simple constatación de que una ecuación diferencial lineal de segundo orden tiene una única curva como solución, que pasa por un punto dado, con una tangente dada: es decir, en términos mecánicos, un cuerpo en movimiento sometido a una fuerza que no depende sino de la posición inicial del cuerpo tiene una trayectoria completamente determinada desde que lo están su velocidad y su posición en un instante dado. Pero en esa época no se conocía ningún resultado matemático sobre el tema y el primer teorema preciso fue demostrado por Cauchy en 1830. Además, en mecánica celeste las cosas son todavía más complicadas, pues uno se ve confrontado, no a una ecuación diferencial, sino a un sistema diferencial que proviene del problema de *n* cuerpos y Laplace sabía mejor que nadie que no se podía resolver, sino como mucho, aproximar las soluciones.

En el marco de una metafísica materialista corriente Laplace cree en la posibilidad de la determinación de las leyes matemáticas del universo y afirma que una inteligencia superior completamente teórica, con posibilidades cognitivas infinitas, podría calcular todos los efectos de las leyes de la Naturaleza. Esta inteligencia no tiene por qué poseer cualidades sobrenaturales y en eso el determinismo laplaciano se opone al determinismo teológico anterior, en el que la inteligencia omnisciente era tenida por Dios. Sin embargo, designarlo con el término de determinismo científico sería fuente de confusión, pues no podría ser establecido científicamente. Quizá sería mejor hablar de determinismo ontológico global, basado en una íntima convicción metafísica: la Naturaleza es conocible y obedece a leyes matemáticas. Afirmación especulativa, por tanto, que tiene consecuencias sobre la heurística científica y que se podrá intentar confrontar con los datos científicos propiamente dichos, pero que no es un resultado de la ciencia. Y Laplace reconoce simultáneamente que el hombre permanecerá siempre lejos de esa inteligencia superior. Ese presupuesto de la finitud del entendimiento humano –lo sabemos tras la empresa crítica de Kant– es esencial para pensar toda la teoría del conocimiento y lo que atañe a la ciencia.

La ciencia de las probabilidades, una herramienta de la filosofía natural

La verdadera originalidad de Laplace es que propone, para remediar la imposibilidad práctica de una inteligencia tal, «la ciencia de los azares y las probabilidades» como guía de la investigación científica. Desde el comienzo de su carrera estaba persuadido de que «el sistema entero de los conocimientos humanos se liga a la ciencia de las probabilidades» y había resuelto consagrarle una gran parte de sus investigaciones. Anteriormente la «doctrina de las posibilidades» (“theory of chances” para los ingleses) había definido dos clases de objetivos: calcular la probabilidad de aparición de acontecimientos sobre los que existe incertidumbre, en primer lugar, sobre su ocurrencia (juego de dados), para luego calcular las esperanzas ligadas a esa eventualidad. Esta doctrina se ocupaba sobre todo de teoría de juegos y de cuestiones relativas a la vida civil (demografía, seguros, etc.). Sus fundamentos habían sido sometidos a «objeciones muy finas» (véanse las reticencias de d'Alembert sobre el análisis de los azares).

Laplace, al poner el acento sobre el término de probabilidades, sugiere la aparición de una rama nueva de las matemáticas que comprendería no sólo las matemáticas de los juegos y de las urnas hipotéticas, sino también la estimación de los errores científicos, la cuantificación de la credibilidad de las evidencias, la inferencia estadística e incluso la causalidad filosófica. En dos memorias[2] de 1774-76 Laplace expresa su filosofía y su metodología, y el matrimonio entre probabilidades y astronomía. Laplace comienza por

> *«fijar el sentido de estas palabras de azar y probabilidad. Vemos una cosa como efecto del azar cuando no ofrece a nuestra mirada nada de singular, o que anuncie un designio, e ignoramos además las causas que lo han producido. Por tanto, el azar no tiene realidad en sí mismo: no es más que un término específico para designar nuestra ignorancia sobre la manera en que las diferentes partes de un fenómeno se coordinan entre ellas y con el resto de la naturaleza. La noción de probabilidad tiene que ver con esta ignorancia...*»

Y prosigue: «la incertidumbre de los conocimientos humanos recae sobre los acontecimientos o las causas de los acontecimientos...»

- sea la causa conocida y el acontecimiento desconocido
- sea el acontecimiento conocido y la causa desconocida
- puede haber incertidumbre sobre ambos elementos

Es el primero (si exceptuamos la limitada memoria de Bayes de 1763, que con seguridad no había leído) en interesarse principalmente en el segundo problema, el de las probabilidades inversas. Va a tomar las probabilidades como instrumento y guía para paliar las lagunas del conocimiento humano y entregarse a la investigación de las causas. En la *Exposición del Sistema del Mundo* escribe:

> *«Nos hallamos tan lejos de conocer todos los agentes de la naturaleza y sus diversos modos de acción, que sería poco filosófico negar los fenómenos, únicamente porque son inexplicables en el estado actual de nuestros conocimientos. Simplemente debemos tratarlos con tanta mayor escrupulosidad cuanta mayor sea la dificultad que parezca haber en admitirlos; y es aquí donde el cálculo de probabilidades resulta indispensable, para determinar hasta qué punto hay que multiplicar las observaciones y las experiencias, a fin de obtener a favor de los agentes señalados una probabilidad superior a las razones que se pueda tener para no admitirlos.* »

Por tanto, no se trata de saber si las leyes de la Naturaleza son necesarias o contingentes (debate de la Academia de Berlín en 1748), si son deterministas o indeterministas, sino de calcular sus efectos con la mayor precisión posible y restringir la indeterminación a la porción congrua. El cálculo de probabilidades debe permitir ir

[2] Œuvres de Laplace, t.VII, pags. 27-65 y 69-275.

más lejos en la precisión numérica y en la previsión. Debe permitir también, en ciertas circunstancias, inducir las causas a partir de los efectos observados y repetidos, y esto tiene lugar sin que haya que pronunciarse sobre la naturaleza física explícita de la relación entre causas y efectos.

Laplace asimila una medida física o una observación a la realización de un acontecimiento aleatorio, sea en astronomía o en historia natural, donde Laplace asimila los nacimientos a extracciones de bolas de una urna. Enuncia el principio de probabilidad de las causas por los acontecimientos:

> *«Si un acontecimiento puede producirse por un número n de causas, las probabilidades de existencia de estas causas tomadas del acontecimiento se hallan entre ellas como las probabilidades del acontecimiento tomadas de estas causas, y la probabilidad de existencia de cada una de ellas es igual a la del acontecimiento tomado de esta causa dividida por la suma de todas las probabilidades del acontecimiento tomadas de cada una de estas causas.* »

Este principio es conocido actualmente con el nombre de «teorema de Bayes» y Laplace lo aplica, por ejemplo, a la distribución de los cometas. Al estudiar los cometas como *n* cuerpos lanzados en el espacio va a buscar la probabilidad de que la inclinación media de las órbitas en relación a un plano dado se encuentre entre los límites dados.

Investigación de las causas y teoría de los errores

Laplace se interesó por la «media» o valor medio relativo a toda una serie de observaciones. En la década de 1770 las dificultades lo detienen, puesto que ello le condujo, sólo para tres observaciones, a una ecuación de grado 15. Fue de modo paulatino –y la teoría de los cometas jugó un papel importante en el tema– como elaboró una teoría analítica de los errores al calcular la probabilidad de que la media de los errores de un gran número de observaciones esté comprendida entre valores dados. Este resultado de cáculo integral, publicado en 1810, que ahora se denomina teorema central límite, mejora mucho la ley de los grandes números enunciada por Bernouilli en 1713. Es significativo que desde el principio haya sido en astronomía donde se aplicó este cálculo, para minimizar las observaciones y los errores instrumentales, pero asimismo para la investigación de la causalidad filosófica.

Una vez adquirido ese resultado Laplace tenderá a relegar a un segundo plano el principio (llamado bayesiano-laplaciano) que le permite remontarse desde los acontecimientos a las causas y de las observaciones a los elementos. Más bien privilegia en la *Teoría analítica de las probabilidades*, la llamada teoría asintótica, en la cual las leyes de los errores de elementos determinados a partir de numerosas observaciones y los parámetros que intervienen en estas leyes pueden calcularse directamente, con muy buena aproximación y una muy buena probabilidad, a partir de las observaciones mismas, o sea, sin la investigación de las causas.

Laplace pone así las bases de la inferencia estadística. Sea por ejemplo una urna que contiene bolas rojas y blancas en proporción desconocida. Se han efectuado p+q tiradas que han dado como resultado p rojas y q blancas. El problema es determinar la probabilidad de que en las m+n tiradas siguientes salgan m rojas y n blancas. Laplace se pregunta sobre todo qué magnitud deben tener p y q y entre qué límites deben encontrarse m y n para que se pueda calcular la relación m/n sobre la base de la relación p/q. Los resultados matemáticos se suceden. Ciertamente Laplace, llevado por su ímpetu, no se resiste a aplicar su método a cuestiones bastante discutibles, como la probabilidad de que el sol salga mañana sabiendo que ha salido todas las mañanas desde hace 5000 años (en respuesta a un famoso texto de Hume) o bien la «probabilidad de que el sistema del mundo no se deba al azar sino a una causa primitiva que hubiera dirigido los movimientos planetarios», cuestión que le lleva a enunciar, con muchas precauciones, su «hipótesis cosmogónica» sobre la formación del sistema solar a partir de una nebulosa en rotación.

Causas y efectos en mecánica celeste

En la *Mecánica celeste* Laplace estudia las causas de numerosas irregularidades de los movimientos celestes. El método es sistemático: a partir de una regularidad observable en la Naturaleza postula que se debe a una causa constante. Para determinar con qué probabilidad se halla implicada esta causa primero imagina que no existe y que el fenómeno proviene de causas accidentales y errores de observación. Aplica entonces los métodos probabilísticos de la teoría de los errores. Llega incluso a discernir, mediante una larga serie de observaciones, el efecto muy pequeño de una causa constante, y eso incluso si los errores o las perturbaciones producidas por una causa constante pueden exceder el efecto mismo de esa causa constante. Puede decirse que las series estadísticas se comportan como los datos de errores acerca de una verdad fija y pueden informar respecto a la existencia de esa verdad y forjar a fin de cuentas una regularidad.

Añadamos, sin embargo, que en Laplace se plantean la cuestión de la verosimilitud de una hipótesis, la del grado de exactitud de una teoría y en consecuencia la cuestión de su legitimidad, pero nunca directamente la de su verdad. A propósito de sus trabajos y descubrimientos sobre la teoría de la Luna –las cuestiones seculares de los movimientos de los nodos y del perigeo de la órbita lunar– habla de «teoría llevada al más alto grado de evidencia»[3].

Señalemos que las causas –variación secular de la excentricidad, achatamiento del esferoide terrestre, etc.– son muy a menudo causas formales, o sea, elementos explicativos situados ya a nivel interno y matemático. Por ejemplo, para explicar la ley de los movimientos medios de los primeros satélites de Júpiter, Laplace avanza como causa su acción mutua gravitacional, con tal de que en su origen las relaciones de sus movimientos medios se hayan aproximado a esa ley dentro de ciertos límites que calcula. Aquí la causa de la ley –que juega el papel de efecto– se reduce al principio de gravitación de Newton y a los valores de las condiciones iniciales conformes con una cierta aproximación a la ley. Efectos y causas son, pues, matemáticamente homogéneos. Laplace continúa muy impregnado del ideal de la física newtoniana, que encarnaba para los físicos del siglo XVIII un tipo de metodología no causal, por contraste especialmente con la escuela mecanicista y cinética cartesiana, que apelaba a torbellinos y partículas que se empujan, es decir, a causas propiamente físicas que se sitúan en un nivel más profundo de la organización de la materia.

[3] *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*

Ideal de inteligibilidad racional del mundo

En la introducción a la *Teoría analítica de las probabilidades* Laplace escribe:

> *«Las causas regulares de los fenómenos son muy a menudo o desconocidas o demasiado complicadas para ser sometidas al cálculo; con frecuencia, además, su acción se halla perturbada por causas accidentales e irregulares; pero siempre queda impresa en los acontecimientos producidos por todas esas causas y aporta modificaciones que una larga serie de observaciones puede determinar. El análisis de probabilidades desarrolla esas modificaciones y les asigna su grado de verosimilitud.»*

Como anota Charles Gillispie, parece que una misma convicción anima a Laplace: por una parte, la regularidad del universo tomado en su totalidad anuncia la regla de una ley natural; por otra parte, allí donde aparecen factores perturbadores –piezas imperfectas, anomalías en los movimientos planetarios, indeterminación en la figura de la Tierra, amplia variación de la inclinación del plano de las órbitas de los cometas, etc.– tales datos pueden sugerir una causa accidental. Así tanto la aparente simetría como las excepciones manifiestan una cierta forma de causalidad, sea general o particular: el objetivo del análisis matemático es tratar de manera unitaria los dos casos, determinando sus grados de probabilidad y certidumbre. La convicción en la estructura causal de la Naturaleza no es contradictoria con el ideal newtoniano mencionado de una metodología no causal. Esta convicción se apoya sobre todo en motivos de inteligibilidad matemática: hay leyes de la Naturaleza y la tarea del científico es determinarlas, o al menos, aproximarse lo más posible.

Laplace determinista y Laplace teórico de las probabilidades son las dos caras de una misma moneda. Su convicción determinista juega un papel directo en la elaboración de la teoría analítica de las probabilidades, es uno de sus fundamentos. Para él aunque el azar se halle vinculado a nuestra ignorancia, la probabilidad es signo objetivo de un estado de cosas. Calcular una probabilidad, encuadrarla en límites precisos, significa mejorar nuestro conocimiento de las leyes de la Naturaleza, tener un instrumento para desembrollar las causas de los acontecimientos. Determinar las razones de la certidumbre y acotar la comprensión de lo probable es lo que constituye el corazón del proyecto científico laplaciano: observaciones y cálculos están al servicio del ideal de la inteligibilidad racional del mundo.

La física de Laplace

Vuelvo ahora a la física laplaciana desarrollada a partir de la Sociedad de Arcueil, sobre todo después de 1805, lo que nos permitirá completar el análisis del determinismo laplaciano. Desde la década de 1780 había estado atraído por la abundancia de nuevas ideas y los descubrimientos resultantes de la revolución química y efectúa tentativas para dar una formulación matemática a dominios todavía escasamente matematizados. Así, con Lavoisier, se interesa por el fenómeno del calor en 1783, fecha importante para la matematización de las ciencias experimentales, pues señala la aparición de una hipótesis física dual sobre el calor: el calor como fluido repartido por toda la Naturaleza y el calor como resultado del movimiento insensible de las partículas de materia; aunque de hecho la matematización siguió siendo muy rudimentaria y no prejuzgaba en nada la hipótesis física. Posteriormente la influencia de Laplace es clara en la química de Berthollet, con el que se asocia en la Sociedad de Arcueil, completando la obra de éste *Sobre la estática química* con una «Nota V sobre la naturaleza de los gases»[4]. Laplace da ahí, a partir de una interpretación molecular, una relación sobre los calores específicos de los gases (a volumen y presión constantes). Lanza especialmente la idea de que existen fuerzas repulsivas entre moléculas, inversamente proporcionales a una potencia de sus distancias.

Entre 1805 y 1810 publica una serie de textos sobre la capilaridad, y más tarde sobre otros fenómenos físicos, entre ellos la acción de la luz, donde intenta mostrar que la ley de Huygens relativa a la doble refracción en los cristales –ley que pertenece al marco de la teoría ondulatoria, pero que diversas experiencias de Malus habían corroborado– podía deducirse de una teoría corpuscular de la luz y de la hipótesis de las fuerzas atractivas y repulsivas. La materia está formada por corpúsculos ponderables que ejercen entre sí fuerzas atractivas instantáneas, a lo largo de la línea que los une y cuya intensidad está en función de la distancia que las separa. Las leyes de atracción universal, que regulan los cuerpos de la mecánica celeste, son también válidas a escala de los constituyentes de la materia. A estas fuerzas atractivas moleculares hay que añadir las fuerzas repulsivas que evitan en particular el desfondamiento de la materia sobre sí misma. Estos dos tipos de fuerza son «fuerzas *ad distans* insensibles a distancias sensibles».

Determinismo y reduccionismo mecanicista

En los últimos libros de la *Mecánica celeste* Laplace trata de la refracción astronómica, el movimiento de los fluidos elásticos, la velocidad del sonido, el movimiento de las mareas y la estabilidad de los mares, la atmósfera, etc. Esta ambición universal de explicación mediante las fuerzas atractivas y repulsivas es lo que numerosos historiadores de la ciencia han designado con el nombre de física laplaciana o programa mecánico-molecular laplaciano. Los discípulos de Laplace intentaron ponerlo en práctica en múltiples campos: la luz, con Malus; el calor, con Poisson; la electricidad y el magnetismo, con Ampère y Poisson, etc. La física laplaciana conduce a una visión del mundo coherente y armoniosa donde las leyes de la física establecidas a nuestra escala de percepción se transfieren a la escala microscópica y esa coherencia se halla reforzada por la semejanza matemática de los formalismos. Además, cualquiera que sea el campo considerado, se manifiesta una gran unidad metodológica; el método consiste siempre en hacer balance de las acciones en presencia de una sola molécula y luego eliminar, gracias a operaciones de integración, la expresión de la ley de acción a distancia, de la que sólo se sabe que se vuelve imperceptible cuando aumenta la distancia entre las moléculas.

La expresión de la física laplaciana va a dar lugar a una interpretación filosófica radical: todos los fenómenos observables son reductibles a la ontología subyacente de la materia, el movimiento y la fuerza; y se puede dar cuenta de todas las leyes de la Naturaleza a partir de los corpúsculos y las fuerzas a distancia entre ellos. Este reduccionismo mecanicista es indisociable de la formulación laplaciana del determinismo de 1812. Si en 1774 consideraba que la inteligencia omnisciente puede abarcar las afecciones de todos los seres ya no se hace cuestión de ello en el *Ensayo*,

[4] Œuvres de Laplace, t. XIV, pags. 329-332.

donde parece poder «abarcar en la misma fórmula los movimientos de los mayores cuerpos del universo y los del átomo más ligero».

En definitiva, tres elementos caracterizan el determinismo laplaciano:

- La convicción, de orden metafísico, del determinismo global de la Naturaleza y de su estructura causal, convicción ligada indisolublemente a su ideal de inteligibilidad del mundo.
- La afirmación correlativa de la posibilidad de predicción por las leyes matemáticas.
- El reduccionismo mecanicista.

En cuanto a la teoría de las probabilidades, a la que dedicó tantas investigaciones, es una herramienta indispensable y privilegiada en el conocimiento de las leyes de la Naturaleza, pero no se acompaña de la misma densidad ontológica.

Ciencia pura y ciencia aplicada: una dicotomía no pertinente en la época

A mediados del siglo XVIII, en particular Daniel Bernoulli (1700-1782) o Leonhard Euler (1707-1783), y durante la Revolución Francesa, los matemáticos continúan ocupándose a la vez de problemas prácticos de astronomía, geodesia, mecánica e ingeniería. Elaboran para ello diversos métodos variacionales y perturbativos (Euler, Lagrange, Laplace), instrumentos analíticos y probabilísticos (Euler, d'Alembert, Laplace, etc.), métodos de representación en el espacio (estereotomía, geometría descriptiva de Monge). A la vez legislan sobre el conjunto del corpus del análisis (Euler, Lagrange), proponen profundas reorganizaciones conceptuales y nuevos fundamentos, desarrollan importantes trabajos abstractos –sobre los que no ven a priori ninguna aplicación concreta– en teoría de números; por ejemplo, sobre las formas cuadráticas, y en teoría de ecuaciones.

Y todo ello se hace sin edificar ninguna jerarquía de valores entre el conjunto de esos trabajos: los de Lagrange sobre análisis, por ejemplo, no parecen a sus pares ni más ni menos profundos e importantes que los de teoría de números. Además, estos matemáticos asumen, en especial durante la época revolucionaria, diversas responsabilidades políticas e institucionales. Es el caso de Monge o Laplace, que aparecen progresivamente en la Escuela de Ingeniería de Mézières, en la Escuela Politécnica o en la Sociedad de Arcueil como verdaderos «patrones» científicos cuyos espacios sociales y profesionales no tienen límites.

Sin embargo, es significativo que en Francia la dicotomía relativa a la naturaleza de las matemáticas[5] surgiera por primera vez de manera conflictiva en la Escuela Politécnica, con ocasión del debate sobre el carácter de su enseñanza. Se oponen dos concepciones, que Bruno Belhoste, retomando la expresión de Théodore Olivier[6], ha

[5] Idéntico debate surgió en Inglaterra en el marco de la Revolución Industrial entre la concepción utilitarista y la filosófica de las matemáticas. Véase M.-J. Durand-Richard, 1996, «La Escuela Algebraica Inglesa: las condiciones conceptuales e institucionales de un cálculo simbólico como fundamento del concocimiento» en Goldstein, C., Gray, J., Ritter, J., (eds) *L'Europe Mathematique - Mythes, histoires, identité. Mathematical Europe - Myth, History, Identity,* Paris, Eds. M.S.H, 445-77.

[6] Véase Th.Olivier, *Mémoires de géométrie descriptive, théorique et appliquée*, París 1851.

sintetizado en la alternativa «Escuela de Monge o Escuela de Laplace». Gaspard Monge (1748-1818), heredero de la Enciclopedia, quiere utilizar la nueva Escuela para regenerar las artes mecánicas, y a ese respecto, dos disciplinas deben jugar un papel esencial: la geometría descriptiva y la química. Para Monge las consideraciones teóricas deben ir siempre a la par con sus aplicaciones. Pierre Simon de Laplace es fiel a la concepción tradicional de la formación de los ingenieros como élite científica y técnica, seleccionada mediante criterios escolares y sociales, cuya legitimidad reposa, ante todo, en el dominio de un saber teórico de carácter matemático y abstracto. Hay que concederle entonces el lugar preponderante en la enseñanza al análisis y a la mecánica, no a las disciplinas prácticas como la geometría descriptiva y la química.

De esos debates emerge una nueva concepción, ya defendida por Marie-Joseph Caritat de Condorcet (1743-1794) y representada durante el Imperio por múltiples matemáticos de la Academia: una ciencia puede aplicarse a otra ciencia, como el análisis a la geometría, a la mecánica o a la física, la teoría de probabilidades a la mecánica celeste (Laplace) o a las ciencias morales, pero igualmente puede aplicarse una ciencia a una técnica, como la geometría al dibujo o la astronomía a la navegación.

La alternativa –Escuela de Monge o Escuela de Laplace, es decir, escuela de ingeniería o escuela de ciencia superior– se discute al tiempo que el positivismo científico gana terreno. Augusto Comte (1798-1857), politécnico él mismo, profesor y examinador en la Escuela, diseña una jerarquía de disciplinas donde las matemáticas ocupan un lugar absolutamente privilegiado: confieren carácter de cientificidad a los otros campos del saber que las usan. En efecto, en la clasificación de las ciencias de Augusto Comte las matemáticas ocupan un lugar aparte, inaugurando la serie enciclopédica cuya base y primer término constituyen. Son «el instrumento más poderoso que el espíritu humano pueda emplear en la investigación de los fenómenos naturales»[7]. Por su «rigurosa universalidad», según Comte, ofrecen el mejor modelo de lo que debe ser una ciencia. Las otras ciencias fundamentales de la serie –astronomía, física, química, fisiología y sociología– se hallan clasificadas según el grado de abstracción de sus fenómenos y el grado de matematización de las leyes resultantes.

La imagen de las matemáticas que se desprende de la lectura de Comte refleja el espíritu de la disciplina que se impone en la Escuela Politécnica a lo largo de la primera mitad del siglo XIX y se extiende por Francia. En esta concepción de las matemáticas la noción de aplicación borra la barrera entre lo teórico y lo práctico, la enseñanza puede devenir absolutamente abstracta y teórica, con sólo un horizonte de aplicaciones. «Abstraer para mejor aplicar», tal es la divisa de la enseñanza y cuyo espíritu resume[8].

Lo que caracteriza la actividad matemática en Francia en la primera mitad del siglo XIX es, por tanto, una forma original de ligar el lado teórico y el lado aplicado, con privilegio declarado para lo teórico y concediendo a las propias aplicaciones la virtud de suscitar generalizaciones. Esta «matriz disciplinar», según la expresión de Kuhn, que encuentra su encarnación institucional en la Escuela Politécnica, fue la cantera de

[7] *Curso de Filosofía positiva*, 1ª lección.

[8] La mejor descripción de la situación de la enseñanza en la Escuela Politécnica es la que da B. Belhoste. Véase, en particular, *La Formation polytechnicienne, 1794-1994*, B.Belhoste, A. Dahan Dalmedico y A. Picon (eds), Dunod, París, 1992 , así como *La Formation d'une Technocratie, l'Ecole Polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire,* París, Belin, 2003.

matemáticos franceses durante más de 60 años. En ese contexto las matemáticas se convierten en Francia en el elemento determinante, excepcionalmente duradero, no sólo de la cultura de los ingenieros y de la formación de una «tecnocracia»[9], sino también de otras diciplinas.

En efecto, por la misma época, los matemáticos, convencidos de la universalidad y potencia de las matemáticas, parten a la conquista de múltiples territorios[10] que hasta entonces se les habían escapado, como la teoría del calor, la teoría de la luz, la electricidad, el magnetismo, diversas matematizaciones de clases de fenómenos nuevos, disciplinas que exploran las partes constituyentes de los cuerpos, etc. Se forja una extraña convicción, fortalecida a la vez por la cultura de los ingenieros y la firme creencia en el alcance universal de las matemáticas en el estudio de la Naturaleza, según la cual ellas estarían en la base de todo conocimiento y toda acción. Puede decirse que todavía hoy estamos ligados a ella.

Bibliografía

BRUNO BELHOSTE, *La Formation d'une Technocratie. L'Ecole Polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire.* Belin, París, 2003.

BERNARD BRU, Postfacio a la reedición del *Essai philosophique sur les probabilités*, Bourgois, París, 1986.

MAURICE P. CROSLAND, *The Society of Arcueil*, London, 1967.

MAURICE P. CROSLAND, *Science under control. The French Academy of Sciences, 1795-1914,* Cambridge University Press, 1992.

AMY DAHAN DALMEDICO, Le déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le déterminisme aujourd'hui, in *Chaos et Déterminisme*, A. Dahan, J-L.Chabert & K.Chemla (eds), Ed. du Seuil, col. Points, 1992.

AMY DAHAN DALMEDICO, *Mathématisations : A-L. Cauchy et l'Ecole française*, Librairie Blanchard, París, 1993.

ROBERT FOX, The rise and fall of Laplacian physics, Historical Studies in the Physical Sciences, 4, 89-136. 1974.

CHARLES GILLISPIE, Laplace, *Dictionary of Scientific Biography*, t. XV.

IVOR GRATTAN-GUINESS, *Convolutions in French Mathematics* (1800-1840), Birkhauser, 3 vols, 1990.

[9] Según la expresión de Belhoste.

[10] Laplace es el primero en querer desarrollar una física de ese modo tan matemático, en el tomo V de la *Mécanica celeste.* Sobre esos trabajos franceses de matematización (Fourier, Fresnel, Cauchy y muchos otros), su éxito y sus grandes debilidades, que llevarían a la pérdida de la supremacía científica francesa después de 1840, véase A. Dahan Dalmedico: *Mathématisations. Augustin-Louis Cauchy et l'Ecole Française,* Lib. Blanchard y Ed. du Choix, 1992, París. A finales del siglo XIX Henri Poincaré (1854-1912) será de nuevo la figura matemática central.