La 'revolución francesa' en la física. Nacimiento matemático de la física clásica en el primer tercio del siglo XIX

Vladimir P. Vizguin

Resumen

Se estudia la primera fase de la formación de la física clásica a principios de los años 20 del siglo XIX, cuando se cimentan las bases de la óptica ondulatoria de Fresnel, de la electrodinámica de Ampère, de la teoría de conductibilidad de Fourier y de la termodinámica de Carnot. Se enfatizan los orígenes y premisas institucionales (la Escuela Politécnica de París) y conceptuales (el Programa de Laplace-Berthollet) de esta 'revolución francesa' en la física. Se revela el papel rector constructivo del análisis matemático en este proceso.

Abstract

This article examines the first stage of the formation of the classical physics in the beginning of the 20s of the XIX century connected with the origins of Fresnel's optics, Ampère's electrodynamics, Fourier's theory of thermal conductivity, and Carnot's thermodynamics. The institutional (The Paris Polytechnic School) and conceptual (The Laplace-Berthollet program) premises of this 'French Revolution' in physics are emphasized. The particular constructive importance of mathematical analysis in the process of creation of the fundamentals of classical physics is shown.

1. Introducción

Suele hablarse de la revolución newtoniana cuando se refiere uno a la física que sentó las bases de la ciencia clásica y de la revolución cuántica-relativista, origen de la física no clásica. La física clásica, por la que entendemos la óptica ondulatoria, la electrodinámica de

Maxwell, la termodinámica y la mecánica estadística, nació, paulatinamente, a lo largo del siglo XIX. Si echamos una mirada más atenta, vemos con nitidez dos etapas fundamentales: la linde de los siglos XVIII y XIX y los primeros años 1820, cuando se cimentan las bases de la física clásica (la electrodinámica de Ampère, la óptica de Fresnel, la teoría sobre el calor de Fourier y Carnot, etcétera), y el periodo de los 1850 y 1860, cuando concluye la formulación de la teoría del campo electromagnético (de Maxwell) y la termodinámica adquiere su forma definitiva (gracias al trabajo de Thomson y Clausius).

Como es fácil ver, la primera etapa guarda relación casi por completo con los nombres de sabios franceses (a los ya mencionados añadamos a Lagrange, Laplace, Biot, Poisson, Cauchy, Arago, Malus, Gay-Lussac, Navier, Dulong y Petit) cuyos logros más notables, obtenidos en los 1820, nos permiten hablar de la 'revolución francesa' en la física. Los creadores de la nueva física, a su vez, están íntimamente vinculados con la Escuela Politécnica de Paris, verdadera creatura de la gran revolución francesa.

En un principio el papel rector de la física francesa en este periodo corresponde a Laplace. Él, junto con el químico Berthollet y el físico Biot, formula el programa que sintetiza el experimento de precisión con el análisis matemático de los fenómenos físicos y las concepciones casi-newtonianas de la 'mecánica molecular'. Sustentándose en este programa primero y luego impugnándolo, a principios de los años 1820, un grupo de jóvenes investigadores opositores a Laplace destacan con sus trabajos que permiten hablar de una revolución en la física.

De manera sorprendente, el análisis matemático adquiere una importancia básica en estos trabajos, por lo que pasa a ser el instrumento principal para la teorización de la nueva física. Abordaremos el estudio del 'nacimiento matemático' de la física clásica considerando la base institucional de este proceso, la Escuela Politécnica de Paris, junto con el examen del programa de Laplace-Berthollet. Posteriormente discurriremos reiteradamente en el proceso del 'nacimiento matemático' de la nueva física con las obras de Fourier, Fresnel, Ampère y Carnot.

2. La Escuela Politécnica de Paris: premisas institucionales de la síntesis matemática de la física

Klein notó con claridad los cambios institucionales más importantes que ocurrieron en la ciencia debidos a la revolución francesa, ante todo en la matemática y en las ciencias naturales exactas.

> En la vida científica empezaron a influir los grandes cambios sociales originados por la revolución francesa y los acontecimientos históricos que le siguieron. La democratización de los pareceres llevó a la divulgación de la cultura y a una estricta especialización de determinadas orientaciones científicas. De conformidad con los imperativos del momento comenzó a cobrar gran importancia el quehacer docente. La posibilidad de dedicarse profesionalmente a la ciencia no restringida, más por las diferencias estamentales que clasistas, condujo a una afluencia sin precedentes de personas que se guiaban por una idea absolutamente nueva: convertirse en profesor era carrera que había cobrado gran importancia. Desde entonces empezó a desplazarse el centro de gravedad de la vida científica, cuyos portadores principales llegaron a ser los centros docentes superiores y no las academias. En Francia, en pos de los primeros intentos emprendidos en la Escuela Normal [...], este desarrollo lo inició Monge con la fundación de la Escuela Politécnica en 1794, en Alemania fue Jacobi [agreguemos también a Neumann] quien en 1827 fundó algo similar en Königsberg [Klein 1989, 14-15]

La Escuela Politécnica llegó a ser el núcleo y el modelo de la escuela superior francesa en materia de las ciencias exactas e ingenieriles. En ella trabajó un brillante cuerpo de profesores. Los primeros fueron Lagrange, Monge, Prony, Fourcroy, Berthollet y otros; un poco más tarde ingresaron también Ampère y Fourier, Laplace, quien se desempeñó como examinador, tuvo gran influencia.

Entre los egresados de la Escuela figuran Biot, Gay-Lussac, Malus, Poisson, Fresnel, Arago, Cauchy, Petit, Navier, Poinsot, Coriolis, Poncelet, Carnot y Lamé. La mayoría de ellos, más tarde, también enseñarían en la propia Escuela Politécnica. Fueron los politécnicos los que le garantizaron a Francia las posiciones más avanzadas en matemática, en mecánica y en física durante el primer tercio del siglo XIX.

Y es que en la Escuela Politécnica se le confería el papel rector a la matemática. El análisis matemático, su uso en la geometría, la geometría descriptiva y sus aplicaciones en la mecánica y en la física los impartieron Monge, Lagrange, Fourier, Poisson, Ampère, Cauchy y otros

> Por el propio carácter de la docencia era difícil separar la matemática pura de la aplicada. Se le prestaba mucha atención a la mecánica, por lo que la física matemática comenzó a liberarse por fin de las 'catóptricas' y 'dióptricas' de los sabios antiguos [Struik 1969, 198]

La Escuela Politécnica, de hecho, dio lugar a la literatura didáctica y a conferencias sobre matemática, mecánica y física matemática. Klein subrayó que

> la abrumadora mayoría de los principales manuales de matemática [álgebra, de mecánica y física matemática] en los inicios del siglo XIX proviene de los ciclos de conferencias que en su momento se impartieron en la Escuela Politécnica; en esta fuente, por así decirlo, tienen su origen todos nuestros manuales modernos [Klein 1989, 81].

A propósito, muchos resultados científicos de importancia se deben a los famosos cursos y manuales de Lagrange, Poisson, Cauchy y otros.

También otras instituciones y sociedades científicas y formativas hicieron su aporte al auge de las ciencias exactas en la Francia posrevolucionaria: la clase de ciencias físicas y matemáticas del Instituto Nacional (1795), de facto equivalente a la Academia de Ciencias de París, clausurada en 1793 (en 1816 se restituyó la antigua denominación según los marcos del instituto); la Escuela Normal para la preparación de profesores (aunque su funcionamiento estable data de 1808, cuando las universidades antes disueltas reanudaron sus actividades); el Buró de Longitudes y la Cámara de Medidas y Pesas; el Museo Nacional de Historia Natural; la célebre Sociedad de Arcueil (que trataremos más adelante) y otras.

En estas instituciones las posturas rectoras pertenecían a los mismos corifeos de las ciencias exactas: Laplace, Lagrange, Monge, Legendre y Proni; a los químicos Berthollet, Fourcroy y Chaptal; y a los biólogos Lamarck y Cuvier, entre otros. La mayoría de los autores de la nueva física salieron electos para el Instituto (o para la Academia de Ciencias): Biot (1803), Gay-Lussac (1806), Arago (1809), Poisson (1812), Malus (1812), Poinsot (1813), Ampère (1814), Cauchy (1816), Fourier (1817), Fresnel (1823) y Navier (1824), por mencionar algunos.

Tanto en la Escuela Politécnica como en la comunidad científica que unió a matemáticos con especialistas en mecánica, con físicos y, en parte, con ingenieros, se compaginaba armoniosamente la tendencia a la matematización apoyándose en el análisis matemático y haciendo hincapié en el experimento cuantitativo, cabal, y en las mediciones de precisión. Cuvier, al hacer un primer balance del desarrollo de la ciencia en el período posrevolucionario, escribió en 1808:

> Tan sólo los experimentos, siendo de precisión, efectuados por medios del pesaje, la medición y los cálculos, llevados a cabo vía confrontación con cada una de las sustancias y confirmados con todas ellas, hoy en día es el único camino lógico para las reflexiones y la argumentación [citado en Dorfman 1979, 5].

El experimento exacto de medición en el que hacía hincapié Cuvier (tipo Coulomb y los más tardíos de Biot, Arago, Gay-Lussac o Fresnel) hacía posible la 'matematización analítica' de la física

3. Programa de Laplace-Berthollet

Laplace, quien salió electo para la Academia de Ciencias en 1773, gozaba de gran prestigio científico mucho antes de la revolución. No obstante, desde la incorporación de la Academia de Ciencias al Instituto y la fundación del Buró de Longitudes, se convierte en una de las figuras centrales de la comunidad científica francesa. En 1796 ve la luz su obra más famosa, *Exposición del sistema del mundo* [Laplace 1982], en la que se proclama con gran nitidez su programa de 'mecánica molecular', variante moderna de la concepción newtoniana que reduce la diversidad de fenómenos físicos y químicos a la interacción de todo tipo de corpúsculos (moléculas), de manera análoga a la ley de la gravitación de Newton o a algunas de sus generalizaciones en el espíritu de Boscovic (a quien Laplace no da referencias, aunque debía conocer su concepción) [Vorontsov-Veliaminov 1985, 89].

He aquí algunas formulaciones tempranas del programa de Laplace:

> La atracción entre moléculas es la causa de que se unan moléculas homogéneas y de la dureza de los cuerpos; es fuente de afinidad de las moléculas heterogéneas. A semejanza de la gravitación, la atracción entre moléculas no para en la superficie de los cuerpos sino que penetra en ellos, actuando al margen de un contacto directo, a distancias imperceptibles. Esto confirma de manera palmaria los fenómenos de capilaridad. De donde se deduce la dependencia del influjo de las masas sobre las propiedades químicas [Laplace 1982, 253]

A renglón seguido, al señalar que la afinidad de moléculas ha de determinarse por la "forma de las moléculas que se unen y por su disposición mutua", Laplace observa: "La variedad de otras *formas* podría explicar todas las modificaciones de las fuerzas de atracción y, así, reducir a una ley esencial todos los fenómenos de física y astronomía" [Laplace 1982, 256], y se atuvo a este programa hasta el final de su actividad creadora.

En el quinto tomo de su *Mecánica celeste* que vio la luz en 1825, a pesar de las evidentes dificultades con las que se topó el programa de mecánica molecular, Laplace escribe:

> A base de estas hipótesis [*i. e.*, las tesis básicas de la mecánica molecular] los fenómenos de dilatación, de calor y de movimiento oscilatorio en los

> gases encuentran su explicación en términos de fuerzas de atracción y repulsión que actúan tan sólo a distancias imperceptibles. En la teoría de la acción capilar vinculo los efectos de capilaridad con esas fuerzas. Todos los fenómenos terrestres dependen de las fuerzas de ese género, al igual que los fenómenos celestes dependen de la gravitación universal. Me parece que el estudio de estas fuerzas ha de ser ahora la finalidad principal de la filosofía matemática [citado en Fox 1974, 89].

Una vez ubicado Napoleón en el poder, quien al poco tiempo pasó a ser miembro del Instituto de Francia, el prestigio de las ciencias exactas fue en aumento. Los sabios más renombrados, Laplace, Chaptal, Berthollet, Monge y otros, se colocaron a la cabeza no sólo de instituciones científicas y docentes, sino también estatales (incluso en algunos ministerios). En 1806 Laplace adquiere una quinta en Arcueil (a 6 km de París), cerca de la del químico Berthollet, donde surge una especie de filial de la clase físico-matemática del Instituto: la célebre Sociedad Científica de Arcueil, con Laplace y Berthollet a la cabeza. Ambos tenían criterios afines respecto a las tareas de la ciencia y a su solución. Al ocupar el lugar rector en la comunidad científica, Laplace y Berthollet tenían grandes posibilidades de distribuir cargos científicos y financiar proyectos de estudios, por lo que ejercían una influencia considerable en las elecciones para el Instituto (más tarde para la Academia de Ciencias).

Berthollet, en términos generales, compartía las ideas de la 'mecánica molecular' laplaciana. Junto con Laplace realzaba el papel fundamental del experimento exacto y de una estricta actitud matemática, siempre con el pie en el análisis matemático. El campo más conveniente para la materialización del programa de Laplace-Berthollet (o programa de Arcueil) lo constituyó, en su opinión, la física y la química. Los físicos, que en grado notable determinaron la primera fase de la 'revolución francesa' en la física, como Poisson, Gay-Lussac, Malus, Arago, Biot, Dulong y otros, se convirtieron en partidarios de ese programa (así como los químicos Chaptal, Thénard y el biólogo Cuvier).

La física era una esfera 'joven' que aún no se había formado institucionalmente, en comparación con la química y la mecánica. Debía aprovechar, por una parte, el experimento exacto propio de la química y, por la otra, los métodos matemáticos que se aplicaban con eficacia en la mecánica. Justamente en esta síntesis, que, entre otras cosas, se reflejaba en la concepción de la mecánica molecular, los miembros de la Sociedad de Arcueil veían la vía fundamental de la ciencia física. Durante los primeros dos decenios de seguir esta vía se cosecharon resultados notables que garantizaron el liderazgo de la física francesa y que prepararon el terreno abonado para sus realizaciones venideras:

la ley de Gay-Lussac (dependencia del cambio del volumen del gas respecto a la temperatura, 1802) y otras investigaciones en materia de gases, la teoría laplaciana de los fenómenos capilares (1806-1807), el descubrimiento por Malus de la polarización de la luz (1808) y las sucesivas investigaciones ópticas de Malus, Biot, Arago, así como la electrostática matemática de Poisson (1811).

En el programa de Laplace-Berthollet destacan dos fases. La primera se refiere al experimento de medición exacto (donde se confiere singular importancia a los aparatos e instrumentos de medida, por ejemplo a la balanza de torsión de Coulomb o al calorímetro de Lavoisier-Laplace) y a la búsqueda de leyes empíricas que se descubren por medio de mediciones y se expresan como relaciones algebraicas simples (del tipo de las leyes de Coulomb, Gay-Lussac, Dulong y Petit, por ejemplo). En este caso, precisamente la introducción del análisis matemático en la física, que permite describir los fenómenos con ayuda de relaciones cuantitativas exactas, era lo que servía de potente catalizador para el desarrollo del experimento de precisión y que a su vez ofrecía nuevas oportunidades para la consecutiva matematización de la física.

> Como quiera que estos fenómenos [los fenómenos de capilaridad] fueran reducidos a una sola teoría matemática, para su comparación cabal con la naturaleza era necesario contar con una serie de experimentos sumamente precisos. La necesidad de semejantes experimentos se deja sentir a medida que la física, perfeccionándose, entra en el campo del análisis [Laplace 1982, 250].

La segunda fase es la introducción de estas relaciones empíricas, descubiertas en experimentos, en el esquema conceptual de la 'mecánica molecular'. En este caso puede tratarse no sólo de las 'moléculas' de una sustancia y fuerzas casi-newtonianas proporcionales a

$$\frac{1}{r^2}\,,$$

sino también de las partículas de unos fluidos imponderables y de las fuerzas centrales intermoleculares de otra índole (por ejemplo, de acción corta).

Si en la *Exposición del sistema del mundo*, al propio Laplace le parecía muy problemático el programa de mecánica molecular,[1] en el período de Arcueil valora con más optimismo las perspectivas de éste:

1. "Pero la imposibilidad de conocer las figuras de las moléculas y sus distancias recíprocas convierten a todas estas explicaciones en nebulosas e inútiles para el desarrollo de la ciencia" [Laplace 1982, 256].

> En suma, todas las fuerzas de atracción y repulsión en la naturaleza pueden reducirse, en resumidas cuentas, a las análogas fuerzas de acción molecular [es decir, fuerzas intermoleculares de acción corta]. Así, en mi *Teoría de acción capilar* he demostrado que la atracción y repulsión entre pequeños cuerpos flotantes en un líquido y, en general, todos los fenómenos capilares dependen de la atracción intermolecular que es ínfima por lo que puede ser desatendida, a excepción de las distancias imperceptiblemente pequeñas. De manera similar se pretende reducir los fenómenos de electricidad y magnetismo a las acciones intermoleculares. El comportamiento de los cuerpos elásticos puede ser considerado de la misma manera [citado en Fox 1974, 100].

Un poco más adelante, hace notar Fox, Laplace habla de la inclusión de los fenómenos térmicos en este programa.

En esta parte el programa de Laplace también resulta sustancialmente ligado a la matematización de la física. Un ideal de la teoría física era la mecánica, sobre todo la celeste, en la que el análisis matemático patentizó su poder de manera muy convincente. Era natural considerar que las teorías físicas, es decir las teorías sobre los fenómenos térmicos, ópticos, eléctricos y magnéticos, se estructuraran según la mecánica. También aquí hubo cierto peligro de mecanización excesiva de la física, al aficionarse a modelos e hipótesis mecánicos especulativos.

De esta manera, el hincapié en la segunda parte del programa y el olvido o menosprecio de la primera podían conducir a los físicos por un camino falso. Los miembros de la Sociedad de Arcueil se dieron cuenta claramente de ello, razón por la que le otorgaron la misma importancia a la primera parte del programa. Biot se empeñó en elaborar este aspecto del programa (de manera convencional puede calificarse como subprograma de matematización de la física experimental [Frankel 1977]). Opinaba que únicamente a base de ella era posible avanzar para procurar, a la larga, realizar la idea de la mecánica molecular.

En 1806 Biot tradujo al francés la *Mecánica física* de Fischer. En su dedicatoria a Berthollet escribió:

> Cada uno de ustedes [*i. e.*, Berthollet y Laplace] se sorprendía de que los físicos tratasen de separar su ciencia de la matemática y la química, los dos pilares sin los cuales [la física] no habría podido dar un solo paso. Cabe suponer, pues tal suposición es de utilidad, que el lento proceso de la física en Francia obedece a que esta ciencia antes era más descriptiva que investigativa. Los físicos se contentaron con demostrar una serie de brillantes experimentos en vez de tratar de fijar cabalmente las leyes de los fenómenos y establecer relaciones entre ellas, que pueden obtenerse tan sólo a base de las reflexiones matemáticas [citado en Frankel 1977, 45].

Hacia finales del segundo decenio, precisamente la segunda parte del programa de Laplace, pese a los empeños de los laplacianos más consecuentes, ante todo Biot y Poisson (y desde luego el propio Laplace), se metía cada vez más en un callejón sin salida.

Los potentes métodos matemáticos tomados de la mecánica analítica y celeste no estaban en condiciones de salvar esa situación. La posición antilaplaciana, personificada en Fourier, Fresnel y Ampère, atraía a los ex-miembros de la Sociedad de Arcueil: Arago, Dulong y otros. Los antilaplacianos, al aceptar la primera parte del programa (subprograma de Biot), se negaban a acoger algunas de las tesis fundamentales de la segunda parte, así como la concepción corpuscular de la luz ligada a aquéllas: las nociones sobre la universalidad de las fuerzas centrales, la concepción de los fluidos imponderables, la modelación mecánico-molecular, etcétera.

De todos modos, en los marcos del programa de Laplace (o de Laplace-Heilbron) se perfilaron las principales formas de enlace recíproco entre la física y la matemática que pasaron a ser propias de la física clásica. En primer lugar, en la medida en que se logró reducir la física a la mecánica, aquélla se iba convirtiendo en una ciencia matematizada en la que regían las mismas estructuras y los mismos métodos matemáticos que en la mecánica analítica y celeste, o sea el análisis matemático, las ecuaciones diferenciales y el cálculo de variaciones.

En segundo lugar, ya la matematización primaria de la física experimental en el espíritu del subprograma de Biot abría nuevas posibilidades para la física, incluso si las relaciones fenomenológicas establecidas con pie en mediciones exactas no lograban reducirse a la concepción de la 'mecánica molecular'. Semejantes teorías matematizadas de tipo fenomenológico (por ejemplo, la teoría de la conductibilidad térmica de Fourier) poseían un considerable potencial explicativo y de pronóstico, uniendo en un todo multitud de fenómenos antes inconexos y permitiendo verificarlos por medio del experimento cuantitativo. El propio Laplace veía perfectamente estas ventajas de las teorías matemáticas de la física. En su *Exposición del sistema del mundo* escribió:

> Uno de los méritos más notables de las teorías matemáticas (y el mejor método de establecer su certeza) reside en que unen multitud de fenómenos al parecer heterogéneos y determinan sus relaciones mutuas por un cálculo preciso y no por reflexiones vagas y supositivas [Laplace 1982, 245].

4. Revolución: Fourier, Fresnel, Ampère, Carnot y otros

De cualquier manera, los avances más notables en la física de este periodo no se deben a Laplace ni a su programa, sino a los físicos, excepción hecha del 'laplaciano' Poisson, quienes impugnaban el programa de mecánica molecular. Fourier crea la teoría matemática de la conductibilidad térmica, Fresnel desarrolla la óptica ondulatoria, Ampère la electrodinámica y Carnot sienta las bases de la termodinámica. Todos estos trabajos notables, que en su conjunto formaron los cimientos de la física clásica, fueron creados en un lapso de varios años (por supuesto, con sustanciales estudios previos al respecto): 1819, *Memoria sobre la difracción de la luz*, de Fresnel, 1822, *Teoría analítica del calor*, de Fourier, 1823, *Sobre la teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos*, de Ampère (publicado en 1826), 1824, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, de Carnot, entre otros. A los autores de estas teorías les une la circunstancia de que rebasaron en grado notable los marcos del programa de Laplace e incluso se le opusieron. Al reconocer directa o indirectamente la primera parte del programa, es decir el subprograma de Biot, en su mayoría rechazaron la concepción de la mecánica molecular o algunos elementos del programa laplaciano tan importantes como la óptica corpuscular y la teoría sobre los fluidos imponderables.

Todos los 'antilaplacianos' principales estaban estrechamente relacionados con la Escuela Politécnica: Fourier fue profesor en ésta de 1795 a 1798, Fresnel egresó de ella en 1806, Ampère impartió cátedra de 1805 a 1824 y Carnot fue estudiante de la escuela hasta 1814. Durante ese tiempo todos ellos se mantuvieron alejados del círculo de científicos laplacianos y de su riguroso control, al que pertenecía, en las primeras décadas del siglo XIX, el total de la comunidad científica francesa.[2]

A la mayoría de los 'antilaplacianos'[3] les era propia la tendencia fenomenológica opositora tanto a la concepción de la mecánica molecular como a la de los fluidos imponderables. Esta tendencia adquiere

2. De 1802 a 1817 Fourier fue prefecto del departamento de Isère. Fresnel, después de concluir, en 1809, sus estudios en la Escuela de Puentes y Caminos, trabajó durante varios años en provincia como ingeniero hasta que en 1817 regresó a París como todo un investigador bien formado. Ampère comenzó a dedicarse a la física en 1820, pese a que en 1814 el Instituto ya lo había elegido como matemático. Carnot, recién egresado de la escuela, trabajó durante seis años como ingeniero militar en alguna provincia para, luego de su retorno a París en 1819, reanudar el servicio castrense.
3. Entre los que podemos incluir, además de los ya mencionados, a algunos de los antiguos laplacianos como *Arago*, Dulong y Petit, y a los discípulos de Fourier: Lamé, Duhamel, etcétera.

gran resonancia filosófica en los inicios de los años 1830, durante el positivismo de Comte; aunque no por ello se puede considerar a los adversarios del programa laplaciano como positivistas o precursores del positivismo, con todo y que Fourier hubiese tenido tanta influencia sobre Comte. Es más, el fenomenologismo de Fresnel y Ampère, digamos, se combinaba con las ideas etero-mecánicas del primero y las nociones molecular-atomísticas del segundo.

Por supuesto que la 'revolución francesa' que se produjo en la linde de los años 1820 no fue sino la primera fase de la creación de la física clásica, periodo en el que ésta aborda todas sus esferas primordiales: la teoría del calor, la óptica, la física de la electricidad y el magnetismo, aunque no alcanzó a formular sus respectivas teorías. La teoría de la electricidad, la del magnetismo y la de la luz adquirieron su forma clásica en la teoría del campo de Maxwell en la década de los 1860; mientras que la teoría del calor, en la termodinámica y en la mecánica estadística de Clausius, Thomson, Maxwell y Boltzmann, en los años 1850-1870. De todos modos, los fundamentos quedaron cimentados.

En esta etapa de la revolución, la contribución francesa fue a todas luces predominante, aunque no total, sobre todo en la esfera de la electricidad y del magnetismo; vale la pena mencionar los trabajos avanzados de Oersted, Faraday, Ohm, Green y Gauss, entre otros.

Recalquemos una vez más que a pesar de las posturas 'antilaplacianas' de los líderes de la revolución, todos ellos mantenían relación, de una u otra manera, con el programa de Laplace-Berthollet, pieza loral en los preparativos de la revolución durante los primeros dos decenios del siglo XIX.

5. Fourier: la física como teoría de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (teoría de la conductibilidad térmica)

Los fundamentos de la teoría matemática de la conductibilidad térmica, que se salen de los límites del programa de Laplace, fueron formulados por Fourier en un escrito que entregó al Instituto a finales de 1807. En 1808 y en 1811[4] se publicó una parte de ese trabajo. Una exposición exhaustiva de los resultados de Fourier se ofreció en su famoso tratado *Teoría analítica del calor* (1822). Fourier se atenía, en el fondo, al subprograma de Biot: la matematización de la física experimental.[5]

4. La memoria de 1811 fue presentada en un concurso anunciado por el Instituto. Fourier salió vencedor al crear la teoría de la conductibilidad térmica que se correspondía con la experiencia.

5. A propósito, en sus trabajos sobre la conductibilidad térmica, Fourier se apoyaba en

Durante varios años (de 1804 a 1806) Fourier hizo diversos experimentos hasta que se convenció de que la ley elemental de la propagación del calor en un cuerpo era.

$$\Delta Q = \frac{kS}{\Delta x} \cdot \Delta t \cdot \Delta T, \qquad (1)$$

donde ΔQ es la cantidad elemental de calor que pasa por la placa Δx en el tiempo Δt con diferencia de temperatura ΔT (k es el coeficiente de conductibilidad térmica). A continuación, luego de haber usado la condición de balance para la cantidad de calor, Fourier aplicó el lenguaje del análisis matemático y obtuvo la ecuación diferencial de propagación del calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \qquad (2)$$

(aquí a^2 es cierta combinación del coeficiente de conductibilidad térmica, de la conductibilidad térmica específica y de la densidad del cuerpo sólido).

Esta ecuación le permitió determinar la temperatura en cualquier punto del cuerpo y en cualquier instante a partir de la distribución de temperaturas en los límites del cuerpo de determinada forma y de la distribución de temperaturas dadas.

Fourier resolvió una serie de problemas de contorno para los casos de una barra infinita, de una esfera, de un cubo y de un anillo. Para ello elaboró un método de separación de variables (método de Fourier), aplicando sistemáticamente el desarrollo de las funciones en series trigonométricas

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \operatorname{sen} nx). \qquad (3)$$

También desarrolló otras funciones que más tarde se llamaron de Bessel; además de la representación de funciones por medio de una integral (integral de Fourier). Todos estos descubrimientos matemáticos de Fourier fueron una importantísima aportación para el desarrollo del análisis, la teoría de funciones y las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Paralelamente, la teoría de la conductibilidad térmica que él creó se convirtió en una de las primeras teorías físicas altamente matematizadas de tipo no mecánico.

los estudios termofísicos de Biot, concretamente en su *Memoria sobre la propagación del calor y un nuevo método de medir simple y exactamente altas temperaturas* (1804) [Frankel 1977, 64].

El programa de Fourier (formulación de teorías matemático-fenomenológicas de tipo no mecánico) puede considerarse como un desarrollo sucesivo del subprograma de Biot. Desde el primer momento, Fourier recalca que, sin plantearse la tarea de localizar la causa básica de los fenómenos térmicos, aunque sí sustentándose en la experiencia, podemos hallar leyes matemáticas que describan estos fenómenos. Cuando Klein cita esa frase, la comenta de esta manera:

> Esta frase caracteriza la actitud de Fourier hacia la consideración de la naturaleza como meramente fenomenológica. El instrumento que utiliza en el estudio de la materia, que designa como filosofía natural, es la matemática, y sobre todo, el análisis en aquella parte suya que fue sustancialmente desarrollada por el propio Fourier: me refiero a la teoría de ecuaciones diferenciales y a su integración [Klein 1989, 84]

Fourier renuncia con audacia a la mecánica y por consiguiente al programa de Laplace: "Pero por muy exhaustivas que sean las teorías mecánicas no son aplicables en absoluto a los fenómenos térmicos" [Fourier 1973, 151]. Más adelante habla de la necesidad de establecer, a base de mediciones exactas, de relaciones simples y elementales que unan a las magnitudes físicas determinantes de los fenómenos térmicos: "Antes que nada hace falta revelar y determinar con precisión las propiedades elementales que presiden los fenómenos térmicos" [Fourier 1973, 152]. La aplicación del análisis matemático permite a continuación reformular estas relaciones elementales en forma de ecuaciones diferenciales. En consecuencia, resulta que "todas las cuestiones físicas de esta índole están supeditadas al análisis matemático" [Fourier 1973, 152].[6]

Y más adelante argumenta: "Las ecuaciones diferenciales de propagación del calor expresan las condiciones más generales y reducen las cuestiones físicas al problema del análisis puro" [Fourier 1973, 155]. Desde este punto de vista, la teoría de la conductibilidad térmica es análoga a la mecánica analítica de Lagrange. No en vano Fourier llamó a su teoría, *Teoría analítica del calor*.

El programa de Laplace, desde el punto de vista matemático, reducía las ecuaciones de la física a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales ya habían sido utilizadas en el siglo XVIII por d'Alembert, Euler y otros en la mecánica de medios continuos. No obstante, se proponía que

6. En su manuscrito de 1907, Fourier escribió acerca de lo mismo: "El objetivo que se plantea aquí es determinar las leyes del movimiento del calor dentro de un cuerpo sólido. Reduciendo el problema físico a una expresión analítica damos el primer paso en este estudio" [citado en Friedman 1977, 83].

en principio se redujeran a ecuaciones diferenciales ordinarias. La comprensión de que ciertos fenómenos físicos no pudieran reducirse a la mecánica significaba que las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales tenían un carácter fundamental, prístino. Fourier se da cuenta de ello y plantea el estudio especial de esta 'esfera recientemente descubierta de la matemática, que eleva todo el análisis a un nuevo escalón de su desarrollo'.

Fourier era un partidario convencido de la concepción de 'la efectividad matemática' en las ciencias naturales. En su criterio, Natura encierra ricas estructuras matemáticas. Con la circunstancia de que las estructuras matemáticas descubiertas en alguna esfera de las ciencias naturales frecuentemente resultan adecuadas para la descripción de fenómenos en otro dominio:

> Vemos, por ejemplo, que una misma ecuación que se consideraba matemáticamente como expresión de propiedades abstractas y que en este sentido pertenece al análisis general es al mismo tiempo una ecuación del movimiento de la luz en la atmósfera, esta misma expresión describe las leyes de la difusión del calor en una sustancia sólida y ella misma entra en todos los problemas principales de la teoría de las probabilidades [Fourier 1973, 156].

Lo que, como es natural, le sugirió a Fourier la idea de que el verdadero lenguaje de las ciencias naturales y la física es, justamente, el análisis matemático, sobre todo las ecuaciones diferenciales: "No puede haber un lenguaje más universal que las ecuaciones analíticas, ni más sencillo ni exento de errores e imprecisiones, es decir, más digno para expresar las relaciones inmutables del mundo real" [Fourier 1973, 156].

Pero Fourier va más allá. El siguiente pronunciamiento testimonia que el análisis, a su juicio, es algo más que el lenguaje de la naturaleza, que no es sino una forma estructural especial ubicada más allá de la variedad de fenómenos físicos: "El análisis matemático es tan universal como la propia naturaleza; el análisis retrata la vinculación entre todos los fenómenos, ofrece una medida al tiempo, al espacio, a la fuerza, a la temperatura, etcétera" [Fourier 1973, 156]. De esta manera desarrolló Fourier consecutivamente el programa matemático-fenomenológico con formulación de teorías físicas, basado en el uso de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Su tratado, *Teoría analítica del calor*, sirvió de modelo para desarrollar la física matemática en Inglaterra y en Alemania; en particular ejerció una fuerte influencia en Thomson y Neumann, quienes durante los años 1830 a los 1850 tomaron 'el relevo francés'.

6. Fresnel: óptica ondulatoria y análisis matemático

Después de que Malus descubrió la polarización de la luz (1808) y Young reconoció como insuficiente la teoría de la interferencia, los adeptos laplacianos de la concepción emisivo-corpuscular de la luz cantaban victoria. Tanto más que ellos, según parecía, disponían de un enfoque teórico respecto a la explicación de toda una serie de efectos y fenómenos de polarización recién descubiertos y relacionados con la birrefringencia.

Fue así como "hacia 1815 la posición de la teoría ondulatoria devino desconsoladora" [Landsberg 1955, 21]. El propio Young consideraba que el desarrollo, evidentemente insuficiente e inusual, del aspecto matemático de la concepción ondulatoria en sus trabajos también dificultaba de manera sustancial la comprensión y la aceptación de esa misma concepción ondulatoria. "Mis demostraciones matemáticas, a falta de símbolos apropiados, no fueron comprendidas siquiera por matemáticos experimentados", escribió [citado en Whewell 1867, 601].[7]

En ese momento crítico Fresnel se dedica a la ciencia y desde 1815, y durante aproximadamente diez años, "la óptica fue transformada" [Landsberg 1955, 21] ante todo gracias a sus empeños. En los estudios ópticos de Fresnel se compaginaron con mucha armonía su intuición física, su extraordinaria inventiva técnica y su brillante capacidad matemática, sustentadas en la alta cultura matemática de los laplacianos y de la Escuela Politécnica. La dotación matemática de la teoría y el funcionamiento de la matemática en ella se inscribían naturalmente en la metodología física de Fresnel. "Su investigación de la luz fue una interacción dinámica entre la teoría y la observación, entre la matemática y el experimento" [Salliman 1974, 155].

Al encarar el problema de la elección de la teoría en el ejemplo de óptica, Fresnel rechazó las acusaciones esgrimidas contra la teoría ondulatoria, relativas a la complejidad de los procedimientos matemáticos que aplicó: la simplicidad de cálculos no puede tener peso alguno en el balance de probabilidades. "Para la naturaleza no existen dificultades del análisis" [Fresnel 1955, 141]. Sustentándose en el cálculo diferencial e integral, Fresnel combinó el principio de Huygens con el principio de la interferencia. Como resultado, acertó a reducir el

7. "El propio método de exposición de Young", señalaba Whewell, "no era capaz de infundir una preparación especial a sus criterios, ya que sus demostraciones matemáticas hacían que sus trabajos fueran inaccesibles para un lector común y corriente, mientras que la falta de simetría y de sistema en sus cálculos simbólicos les impedía ser atractivos para un matemático" [Whewell 1867a, 601].

cálculo de la amplitud de la onda resultante (suma de 'ondas elementales') a las denominadas integrales de Fresnel

$$\int_0^\infty dz \cos(az^2) \qquad y \qquad \int_0^\infty dz\, \mathrm{sen}(az^2) \qquad (4)$$

Al calcular estas integrales mediante el método de integración por partes y con la ayuda de series, aplicando profusamente construcciones geométricas (zonas de Fresnel),[8] Fresnel obtuvo una descripción matemática de la difracción y de la propagación rectilínea de la luz (además de una serie de otros fenómenos ópticos), lo que condujo al triunfo de la concepción ondulatoria.[9]

Los contemporáneos de Fresnel, Whewell y Arago, apreciaron altamente el aspecto matemático de su teoría. Whewell explicaba así la aceptación rápida y feliz de la teoría:

> La teoría matemática aplicada con tanto éxito en multitud de casos de distinta índole no pudo menos que llamar la atención especial de los matemáticos, por esta razón, desde este momento la teoría ondulatoria de la difracción de la luz fue universal y las dificultades matemáticas que en sí encerraba se explicaron asiduamente y fueron eliminadas [Whewell 1867, 565].

En su ensayo sobre Fresnel, Arago enfatizó la primacía de la ley matemáticamente formulada sobre el fenómeno físico: "La ley matemática es más importante que el propio fenómeno, pues redunda en fuente de todos los descubrimientos por venir" [Arago 1860, 77].

8 La abundancia de construcciones geométricas en los trabajos de Fresnel dio pie a Grattan-Guinness para llamar 'geométrico' a su modo de pensar, cercano al de Euler, en contraposición al modo algebraico (computador-formal) de Lagrange y Hamilton [Grattan-Guinness 1985, 107].

9 En los 1880, Rosenberg caracterizó el aspecto matemático de la teoría de la difracción de Fresnel como:

> La iluminación de cada punto de la pantalla es el resultado de una multitud infinita de iluminaciones que en parte se suman, en parte se sustraen y, por consiguiente, en unos lugares aumentan y en otros debilitan la iluminación. La determinación de la magnitud de esta iluminación, con pie en la hipótesis fundamental de la interferencia de un número infinito de ondas elementales, representaba en sí un problema meramente matemático pero sumamente difícil. Ante todo, Fresnel debía dar una expresión para el estado de movimiento de cada uno de los puntos oscilantes respecto al centro de formación de la onda. Después de eso obtuvo la posibilidad de determinar los movimientos que, partiendo de todos los puntos de la superficie luminosa, convergen en un punto de la pantalla. Pero aún quedaba la tarea más difícil: sumar todas estas expresiones para un número infinito de movimientos y hallar la integral de la intensidad luminosa resultante para un punto determinado de la pantalla [Rosenberg 1935, 176].

En esencia, aunque sea de forma indirecta, la óptica matemática de Fresnel tenía que ver con la ecuación de onda

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right). \qquad (5)$$

En el plano físico esto llevaba a la física a conceptos tan nuevos y fundamentales como el de 'éter elástico' y, conjuntamente con él, a un cuadro continuo-ondulatorio del mundo que, en cierto grado, se oponía a la concepción mecánico-atomística y newtoniano-laplaciana.

Fresnel, quien reflexionaba mucho sobre la estructura molecular del éter, al mismo tiempo separaba nítidamente la parte de la teoría que no dependía de las ideas sobre la estructura del éter de las propias representaciones hipotéticas. En esta parte avanzaba por el cauce de la misma actitud fenomenológica antilaplaciana que ya vinculamos con los nombres de Fourier, Ampère y el propio Fresnel. La teoría de Fresnel captó la naturaleza matemática de la luz y su carácter ondulatorio: la ecuación de onda o el principio de Huygens-Fresnel junto con el principio de la interferencia.

Este aspecto de la naturaleza de la luz también conservó su significado en la transición a la teoría electromagnética de la luz. Escribía Poincaré: "Las ecuaciones diferenciales son siempre verdaderas, se puede siempre integrarlas por los mismos procedimientos y los resultados de esa integración conservan siempre todo su valor" [Poincaré 1963, 149], independientemente de que se trate de las ondas en un éter elástico o de las ondas electromagnéticas de la teoría de Maxwell.

En tanto que el éter luminoso se consideraba como un medio casi-elástico, el desarrollo de la óptica ondulatoria resultó conjugado con el desarrollo de la teoría matemática de la elasticidad. En ese sentido Cauchy, sustentándose en el estudio de la ecuación de onda en un medio elástico, en 1828-1830, proporcionó una argumentación matemática más amplia acerca de la óptica de Fresnel, más tarde perfeccionada por Kirchoff, por Sommerfeld y por otros. En pos de las ecuaciones de Laplace de la conductibilidad térmica, Poisson incorporó en la física una ecuación diferencial más en derivadas parciales: precisamente la ecuación de onda.

7. Ampère: 'matematización analítica' de la electrodinámica

Un eminente logro más de la 'revolución francesa' en la física, en el que el análisis matemático desempeñó un papel primordial, fue la electrodinámica de Ampère. En 1820, éste descubrió el efecto de interacción de conductores con la corriente, con lo que, ligándolo a los experimentos de Oersted, se inició la electrodinámica como ciencia única sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos. En el momento de abordar su trabajo, concluyó que los fluidos magnéticos eran innecesarios e introdujo la concepción fundamental de la corriente eléctrica e identificó su dirección con la del movimiento de la electricidad positiva.

Luego, durante varios años, prosiguió en sus experimentos e investigaciones teóricas en esta área hasta llegar a la creación de su tratado generalizador: *Teoría de los fenómenos electrodinámicos deducida únicamente de la experiencia* (1826) [Ampère 1954]. Esta teoría, redactada apoyándose por completo en el espíritu de la física matemática francesa de Fourier, Poisson y Fresnel, engranaba con la orientación antilaplaciana.

El 'antilaplacianismo' de Ampère consistía, asimismo, en su distanciamiento con los planteamientos de la concepción de la 'mecánica molecular' y con su insistente proclamación, vinculada con aquélla, de la postura fenomenológica afín a los criterios de Fourier y de Fresnel, así como en conclusiones físicas concretas como la renuncia a los fluidos magnéticos, por ejemplo.

Matemáticamente formulada, la base de la teoría de Ampère pasó a ser la ley de la interacción entre los elementos infinitamente pequeños de la corriente, que a su vez pasó a la historia con su nombre. Basándose en esta ley, Ampère resolvió una serie de problemas de electrodinámica sobre la interación de dos conductores rectilíneos, de dos circuitos de distinta configuración, de dos solenoides, etc., además de que puso de manifiesto la equivalencia de solenoides (y conductores cerrados de otras formas) e imanes "en cuanto a la acción que sobre ellos ejercen los conductores con corriente u otros solenoides, o bien otros imanes" [Ampère 1954, 218].[10]

Desde el punto de vista matemático, la teoría de Ampère constaba, digamos, de dos partes: del establecimiento de la ley elemental o diferencial de la interacción de corrientes, y de su deducción de las fuerzas integrales de interacción en una serie de problemas concretos, en particular el de la integración de las correspondientes relaciones diferenciales. En este sentido la electrodinámica de Ampère era cercana a las teorías de Fourier y Fresnel antes examinadas.

10. A la resolución de estos problemas, o sea a la integración de la ecuación integral que expresa la ley de Ampère, para los casos concretos antes enumerados, se dedica la mayor parte de la *Teoría...* de Ampère; una serie de los problemas más importantes resueltos por Ampère se examina en los comentarios que Tricker hace a los trabajos de Ampère [Tricker 1974, 69-91].

De manera paralela, en la teoría de Ampère estaba ausente la ecuación diferencial fundamental en derivadas parciales. Las 'fuerzas de Ampère' estaban fuertemente ligadas a los elementos de corriente y el sabio no pudo llegar a un símil del campo, aunque fuese en sentido matemático. El desarrollo sucesivo de la electrodinámica patentizó que la representación de campo y su respectiva ecuación correcta en derivadas parciales que considerase cualesquiera interacciones electromagnéticas, debería sustentarse en toda una serie de leyes elementales (de Coulomb, de Ampère, de Biot-Savart, etc.), lo mismo que en las representaciones de Faraday sobre el campo y la inducción electromagnética.

Partiendo de ciertas analogías y consideraciones teóricas generales, Ampère buscaba la ley de la interacción de los elementos de la corriente *ids* e *i'd's* separados por la distancia *r* de la siguiente forma

$$d^2F = \frac{\rho \cdot i \cdot i' \cdot ds \cdot ds'}{r^n} \qquad (6)$$

donde ρ es la función desconocida de los ángulos θ, θ' y ε (esto es, entre *r* y *ds* y *ds'*, así como entre *ds* y *ds'*). Combinando virtuosamente las mediciones experimentales con los cálculos (como lo hacía Fresnel), llegó a la siguiente ley:

$$d^2F = \frac{1}{2}\,\frac{i \cdot i' \cdot ds \cdot ds'}{r^2}\,(2\cos\varepsilon - 3\cos\theta \cdot \cos\theta') \qquad (7).$$

Las funciones ρ y la constante *n* determinadas de acuerdo con la integración d^2F para varias situaciones concretas en las que se pudo determinar la fuerza por vía experimental.

El propio Ampère consideraba que en la construcción de la electrodinámica se sustentaba en la metodología fenomenológica de Newton. No en vano Maxwell, que sentía gran aprecio por la teoría de Ampère, le llamaba el 'Newton de la electricidad' [Maxwell 1977, 381-382]. Ampère vinculaba la metodología newtoniana con los recientes avances de la física matemática francesa, en particular con el enfoque de Fourier hacia la teoría del calor.

Es natural que en el nuevo programa de Fourier, de Fresnel y de Ampère se le diera especial atención a la matemática (*i.e.*, al análisis) que tomó la orientación matemática del programa de Laplace-Berthollet-Biot. He aquí lo que escribía Ampère al respecto:

> Comenzar con la observación de hechos, cambiar dentro de lo posible las condiciones que les acompañan, combinando esta labor inicial con mediciones exactas para deducir leyes generales basadas plenamente en la ex-

> periencia y, a su vez, obtener de esas leyes independientemente de cualesquiera suposiciones sobre la naturaleza de las fuerzas una expresión matemática de ellas, es decir, deducir la fórmula que las represente: he aquí la vía que siguió Newton. Este mismo camino siguieron en Francia los científicos a los que la física debe sus ingentes éxitos en los últimos tiempos. A este mismo derrotero me atenía yo en todas mis investigaciones de los fenómenos electrodinámicos [Ampère 1954, 10].

Ampère dedicó toda una página de la introducción de su trabajo de balance al enfoque de Fourier hacia la teoría del calor, al que consideraba afín a su propio enfoque [Ampère 1954, 12].

Además de Maxwell, Arago y Whewell también apreciaban grandemente la electrodinámica de Ampère [las citas correspondientes se dieron líneas antes]. Arago parangonaba la electrodinámica de Ampère con la mecánica celeste y con la mecánica analítica de Lagrange. "Cuando se conoce la fórmula general de acciones recíprocas de elementos infinitamente pequeños, la determinación de las acciones de toda la corriente de cualquier forma", escribía él, "es obra del análisis superior" [Arago 1860, 278].

Whewell recalcaba la fuerza pronosticable de la teoría de Ampère ("signo distintivo de toda teoría justa y sólida" [Arago 1861, 119]), condicionada por su forma matemática y la circunstancia siguiente: "si Ampère no fuera un excelente matemático no habría podido revelar las condiciones de las que dependía la destrucción de sus integrales" [Whewell 1867b, 122].[11]

Antes de 1820 Ampère, en efecto, se dedicó fundamentalmente a la matemática. Desde 1805 trabajó primero de 'repetidor' y luego de profesor en la Escuela Politécnica (hasta 1824); en 1814 resultó electo como académico de la sección de geometría. Hasta esos momentos había publicado una serie de importantes trabajos sobre el análisis, ante todo las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, el cálculo de variaciones y la mecánica analítica.

Desde 1820 se dedicó casi por completo al estudio de la electrodinámica. El enfrascamiento de Ampère en la problemática física no le permitía dedicarse al desarrollo de los resultados matemáticos que a veces obtenía al resolver problemas electrodinámicos. Así, al demostrar la equivalencia de la hoja magnética y la corriente que corre por el circuito que la limita, Ampère obtuvo una fórmula de transformación de la integral doble por la superficie en una integral curvilínea por el circuito, o sea, anticipó la fórmula de Stokes, uno

11 Se trata del cálculo de fuerzas integrales que en ciertos casos especiales se reducen a cero, lo que le permitía determinar la función r mencionada más arriba y el exponente

de los resultados más importantes del análisis vectorial [Appel 1922, véase también Belkand 1968].

En la clasificación de las ciencias elaborada por Ampère en los años 1830 (*Experiencia de la filosofía de las ciencias*, 1834), las ciencias físicas, a la par que las matemáticas, ocupaban uno de los lugares más importantes de las ciencias sobre el mundo material (o 'ciencias cosmológicas'). Con la particularidad de que la mecánica y la mecánica celeste quedaron incluidas en el apartado físico-matemático de las ciencias matemáticas, mientras que la física general comprendía la física elemental y matemáticas, a la vez que constituía el rubro fundamental de las ciencias físicas, en las que se incluía la tecnología.

La física matemática, según Ampère, incluye

> antes que nada las leyes generales que dimanan de la comparación ora de fenómenos que observamos en diferentes cuerpos, ora de mutaciones que experimentan estos fenómenos cuando las condiciones en las que se encuentran los cuerpos comienzan a variar; luego, a las causas a cuyo conocimiento podemos arribar explicando los fenómenos y deduciendo las consecuencias que dimanan de estas leyes [citado en Zotov 1971, 49]

De hecho, con esa comprensión de la física matemática se promueve en un primer plano el aspecto físico (esto es, se le considera como parte teórica de la física), a diferencia de su comprensión contemporánea, en la que la base de la física matemática son los métodos matemáticos y la estructura de las teorías físicas.

8. Carnot: los orígenes matemáticos de la termodinámica

Es incuestionable que el auténtico inicio de la termodinámica, que contenía su estructura conceptual, por así decirlo, de forma 'plegada', vino a ser la obra fundamental de Carnot *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, publicada en 1824 [Carnot 1987]. Es verdad que en sentido matemático se halla un tanto aparte. En ella no veremos tesis analíticas propias de los trabajos de Fourier, de Fresnel, de Poisson o de Ampère, en los que se aprovechan símbolos del análisis, ecuaciones diferenciales, integrales, etc., a excepción de una nota muy amplia, en la que, alegando las fórmulas matemáticas elementales de las leyes de Boyle-Mariotte y de Gay-Lussac, junto con la concepción del termógeno, Carnot demuestra que la "fuerza motriz es proporcional a la caída del termógeno" [Carnot 1987, 47]. Pero este es un nivel de matematización incomparable con el nivel de la física matemática francesa, además de que dista mucho de abarcar los cimientos de la teoría de Carnot.

A la par con él, hay una tradición que se remonta a Rosenberger, en la que se realza la 'matematicidad' intrínseca y potencial propia de la teoría de Carnot.

> Gracias a la última tesis [o sea, a la relación que estableció entre el trabajo mecánico, la cantidad de calor y la diferencia de temperaturas que no depende de otras circunstancias, de cualquier tipo], Carnot llegó a ser el 'padre' de una novísima teoría del calor en la medida en la que es una teoría matemática que considera únicamente las relaciones cuantitativas de los fenómenos [Rosenberg 1935, 217].

Rosenberg veía el carácter matemático de la teoría de Carnot en su método: "En esta esfera [termodinámica], hasta la fecha también permanece invariable su método: la novísima teoría del calor aprovecha la máquina de Carnot con sus procesos cíclicos, del mismo modo que el propio" [Rosenber 1935, 217]. Rosenberg observa respecto a esta frase: "Si bien la obra de Carnot es meramente matemática, por su espíritu, en aras de accesibilidad renuncia dentro de lo posible a fórmulas matemáticas" [Rosenberg 1935, 217; el último argumento no es lo suficientemente convincente: véase, por ejemplo, Vdovichenko 1985].

La tradición fenomenológica antilaplaciana de la física matemática francesa es igualmente propia de Carnot. Es él quien crea nuevas idealizaciones teóricas a partir de la tesis de la imposibilidad de crear un motor físico perpetuo, de la concepción del termógeno (en particular, del principio de su conservación) y del principio de la 'diferencia de temperaturas' que garantiza la fuerza motriz del calor.

> Para examinar el principio de la obtención de movimiento a partir del calor, a plenitud, hace falta estudiarlo independientemente de cualquier mecanismo [tesis fenomenológica de Carnot] o de cualquier agente determinado; es indispensable hacer reflexiones aplicables no sólo a las máquinas de vapor sino a todas las máquinas concebibles [enfoque teórico-universal de Carnot], sea cual fuere la sustancia puesta en servicio y sea cual fuere el método de influencia sobre ella [Carnot 1987, 19].

El concepto de la máquina térmica ideal y del proceso cíclico ideal, o del ciclo de Carnot, consistente en dos procesos adiabáticos y dos procesos isotérmicos, pasó a ser la idealización de partida que garantizaba el desarrollo de la termodinámica como esfera de la física matemática en los trabajos de Clapeyron, Clausius y Thomson.[12] Gelfer también subrayó en su trabajo esta faceta de la teoría de Carnot [Clau-

12. Aquí es oportuno citar a Engels, quien también vio en las idealizaciones de Carnot una

sius 1876-1891, 106-120] y cita a Tait, quien destacó como 'un gran mérito de Carnot'

> el modo de reflexión, absolutamente nuevo en la física matemática, el cual resultó en manos de Carnot y también de muchos continuadores suyos tan fecundo en nuevos descubrimientos como la propia idea de la conservación de la energía [citado en Guelfer 1981, 120].

La axiomática y el enfoque de Carnot eran tan ricos (así Lervich hacía ver una coincidencia estructural-axiomática de la termodinámica y de la teoría de Carnot [Vdovichenko 1985, 262]) que Clausius se vio obligado a defender su primacía en el descubrimiento de la ecuación fundamental del proceso cíclico libre

$$\int \frac{dQ}{T} = 0 ,$$

y que entre los años 1850-1860 algunos de sus contemporáneos insistían en atribuir a Carnot [Clausius 1876-1891, 142-143].

Del mismo modo, incluso en nuestra época, ciertos historiadores y especialistas en termodinámica ven en el texto de Carnot una anticipación del concepto de la entropía, concepto básico de la termodinámica cuya introducción permitió estructurar esta ciencia como rama de la física matemática (en el sentido de Fourier, de Fresnel, de Ampère y de otros) [Guelfer 1981, 109-110].

Clapeyron, con apenas tres años menos que Carnot, también había estudiado en la Escuela Politécnica y dominaba los métodos del análisis matemático; como también era ingeniero, entre otras cosas se dedicaba a máquinas térmicas. Fue el primero en apreciar el trabajo de Carnot y aplicó métodos geométricos y matemático-analíticos para representar la teoría de Carnot en una forma matemática consecuente. La representación gráfica del ciclo de Carnot y la sucesiva introducción de ciclos casi estáticos infinitamente pequeños le permitieron aprovechar el proceder del cálculo diferencial e integral [Guelfer 1981, 120-131].

construcción matemática por su espíritu: "Carnot diseñó una máquina de vapor ideal (o máquina de gases) que de verdad resulta tan infactible como infactible es, por ejemplo, una línea geométrica o un plano geométrico, pero con los mismos servicios que esas abstracciones matemáticas: presenta el proceso en cuestión en una forma pura, independiente, no deformada" [Engels 1965, 196-197].

9. Conclusión

Sin duda los logros más revolucionarios de la física clásica fueron los de los antilaplacianos franceses. Los trabajos de Fourier, Fresnel, Ampère y Carnot, que vieron la luz en un tiempo muy corto (aproximadamente cinco años) fueron los que cimentaron las bases de la física clásica. En su creación, como hemos visto, el análisis matemático tuvo una importancia teórico-formativa muy especial. Aunque ello no minimiza, ni mucho menos, el papel de Laplace, el programa de Laplace-Berthollet y el aporte de los demás laplacianos como Biot y, sobre todo, Poisson para la creación de la nueva física.

Por cierto, Poisson fue uno de los adeptos más 'ortodoxos' de Laplace y de su programa. En este período sus trabajos más importantes son las teorías matemáticas de electro y magnetostática y del proceso térmico adiabático (ecuación de Poisson $\Delta\phi = -4\pi\rho$ para el potencial eléctrico o magnético ϕ y la densidad de la carga eléctrica o magnética ρ, así como

$$K\,\frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0\,,$$

donde V y p son el volumen y la presión del gas, respectivamente). Tales teorías, al igual que las de Fourier, Fresnel y Ampère resultaron las primeras construcciones teóricas de la física clásica que se basaron en el uso del análisis matemático. A ellos les pertenecen también importantes trabajos sobre la teoría de la conductibilidad térmica, la óptica ondulatoria, la teoría de la elasticidad, la teoría de la capilaridad y otras (a la par con los trabajos clásicos de la mecánica analítica y la mecánica celeste además, desde luego, sobre diversos aspectos de la matemática).

En su ensayo dedicado a Poisson, su contemporáneo Arago destacó el triunfo del análisis matemático en la física: "Con la ayuda del cálculo diferencial [*i.e.*, del análisis] el matemático abarca toda la naturaleza, penetra en la esencia de las cuestiones físicas y en los profundos enigmas de los fenómenos naturales" [Arago 1861, 15]. De palabra Poisson sobrestimaba evidentemente las hipótesis físicas de partida que, como sabemos hoy, en su mayoría no han pasado la prueba del tiempo y, al parecer, subestimaba la fuerza constructiva del análisis matemático.

Por ejemplo, al acometer el proceso de matematización de la física de la conductibilidad térmica, Poisson subrayó que un importantísimo punto de partida de la teoría era cierta hipótesis general sobre la naturaleza del calor y el mecanismo de su propagación, que se promovía a base de la experiencia y de la analogía, por lo que los sucesivos 'cálculos estrictos' conducentes a las consecuencias que se verificaban en la experiencia, en principio, no daban nada nuevo. "Estas consecuencias son, de esta manera, la transformación de la hipótesis como tal, a la que los cálculos no añaden nada ni le restan nada" [1835, citado en Bellone 1980, 198]. "A la vez, en muchos trabajos de Poisson", escribía Arago,

> no estaba sujeto a discusión sólo el hecho de que en él hubiesen convergido la sagacidad, un profundo conocimiento del análisis y su aplicación ingeniosa. Aquí es dable parangonar al especialista en geometría con un general que ataca al enemigo, ora frontalmente, ora envuelve su posición inexpugnable, ora pone en el juego el arma recién inventada, pero siempre sale airoso [Bellone 1980, 26-27].

De suerte que los notables logros de Poisson no se deben a su apego a las representaciones físicas de tipo laplaciano sino, justamente, a aquel instrumento, el análisis, al que en ocasiones se refería con cierto menosprecio, a diferencia de Fourier.

El proceso de creación de la física clásica transcurre paralelamente, aunque con menos intensidad, fuera de los límites de Francia: primero en Alemania y luego en Inglaterra. Aquí son demostrativos dos tipos de figuras: unos (por ejemplo, Young y Gauss) no guardaban relación directa con la escuela científica francesa, otros, como Green y Ohm, se apoyaban directamente en la física matemática francesa (el primero en Laplace y en Poisson, y el segundo en Fourier).

En Rusia el nivel de la física matemática, orientada en la escuela francesa, se determinaba en la esfera de la docencia gracias a las conferencias de Lobachevsky (en la Universidad de Kazán), mientras que en el campo de los progresos científicos se apoyaban en los trabajos de Ostrogradsky, quien en los 1820 concluyó sus estudios en París en estrecho contacto con Fourier, Poisson y Cauchy, entre otros.

Las excepciones señaladas (una aportación importante del laplaciano Poisson y de los 'no franceses', sobre todo de Green y de Ohm) no hacen sino corroborar la regla. La democratización del sistema de instrucción, una acentuación notable del apoyo estatal a la docencia y a las investigaciones en las ciencias exactas e ingenieriles, junto con los procesos de institucionalización y profesionalización en este dominio, originados por la revolución francesa, condicionaron en gran medida el 'auge francés' de la física clásica. No es casual que los artífices de la nueva física fueran profesores o egresados (las más de las veces, lo uno y lo otro) de la Escuela Politécnica de París, donde era muy alto el prestigio de la matemática pues se comprendía el papel clave del análisis en el desarrollo de las ciencias naturales y técnicas.

En la primera etapa (al menos, hasta mediados de los primeros diez años) el papel rector de las ciencias naturales exactas correspondió al programa de Laplace-Berthollet, orientado hacia la 'mecánica molecular' y en la matematización intensa, con el subprograma de matematización de la física experimental de Biot. A principios y a mediados de los 1820 se forma un nuevo programa, en grado notable antilaplaciano, que no acepta muchas tesis del programa de Laplace, sobre todo la concepción de la 'mecánica molecular', por lo que le oponen una postura más fenomenológica.

Al mismo tiempo, los antilaplacianos (Fourier, Fresnel, Ampère y otros), quienes con sus descubrimientos sentaron las bases de la nueva física al igual que los partidarios del programa de Laplace, sustancialmente se sustentaban en sus estudios de la matemática, sobre todo en el análisis matemático. En sus manos el análisis devino un potente instrumento de teorización de la física que traspasaba los marcos de su mecanización, es decir, su reducción a la mecánica.

Las teorías matemáticas de la electricidad, magnetismo, calor y luz, creadas en los años 1810-1820, no sólo permitían calcular con precisión y pronosticar fenómenos físicos: las estructuras del análisis y las ecuaciones diferenciales resultaban una expresión exacta de las estructuras esenciales de la física cobijadas detrás del mundo de los fenómenos. Los propios conceptos físicos, como el potencial, la corriente eléctrica, la tensión, las ondas luminosas, el éter y, un poco más tarde, los campos eléctrico y magnético, surgieron con frecuencia en una envoltura sustancialmente matemática.

Es cierto que en el primer tercio del siglo XIX la creación de la física clásica aún distaba mucho de su conclusión. Las formas matemáticas de las teorías físicas o la falta de formulaciones matemáticas (como, por ejemplo, en el caso de la teoría de Carnot) sugerían la dirección de su desarrollo. Así, precisamente por la vía de la matematización de la teoría de Carnot, elaborada por Clapeyron en los trabajos de Clausius y Thomson (ya en los años 1850) se colocó en la cima a la creación de la termodinámica clásica. En la electrodinámica de Ampère la presencia de apenas una ley elemental de interacción de corrientes y la ausencia de la correspondiente ecuación diferencial sugería la dirección correcta del movimiento hacia una teoría consecuente y completa de la electricidad y del magnetismo. Es así como la 'revolución francesa' resulta apenas la primera fase del proceso de creación de la física clásica.

En este estadio y en el siguiente, vinculado con los nombres de Maxwell, Thomson, Helmholtz, Clausius y Kirchhoff, el análisis matemático desempeñaba el papel constructivo clave. Aquí surge el interrogante de por qué justamente el análisis y las ecuaciones diferenciales resultan la estructura matemática más conveniente para describir la realidad física.

En los principios del siglo XX, al hacer un balance del desarrollo de la física y la matemática en el siglo anterior, Poincaré responde el interrogante [Poincaré 1963, 99-102]. Ya a mediados del siglo XIX esa pregunta habría parecido muy trivial, sobre todo para los físicos. Esto porque ellos sabían perfectamente que el cálculo diferencial e integral surgieron en conexión con los problemas de la mecánica, al igual que las principales ecuaciones en derivadas parciales aparecieron en la mecánica de medios continuos y en la física.

Por eso, tan sólo a fines del siglo XIX y a principios del XX, cuando el análisis y la teoría de las ecuaciones diferenciales se desvincularon perceptiblemente de las ciencias naturales y adquirieron el estatus, digamos, de ciencias matemáticas independientes, fue cuando pudo surgir esa interrogante.

La respuesta de Poincaré es sencilla y lógica: la física, por su naturaleza, es local, y el aspecto continuo en ella prevalece evidentemente. Por esta razón "[e]l conocimiento del hecho elemental nos permite colocar el problema en ecuaciones [diferenciales]" [Poincaré 1963, 146]. Los fenómenos concluidos, integrales, están sujetos a experimento, a medición y aquí el análisis pone en manos del físico el potente aparato de integración. Más adelante, Poincaré aclara la esencia diferencial-analítica de la física:

> ... es porque el fenómeno observable es debido a la superposición de un gran número de fenómenos elementales muy parecidos entre sí, así se introducen del todo naturalmente las ecuaciones diferenciales
>
> [...]
>
> Es, pues, gracias a la homogeneidad aproximada de la materia estudiada por los físicos cómo la física matemática ha podido nacer [Poincaré 1963, 146-147].[13]

13 Para recalcar que estas condiciones de localidad, continuidad y homogeneidad están lejos de cumplirse siempre, incluso en las ciencias naturales, Poincaré agrega: "En las ciencias naturales no se encuentran ya esas condiciones: homogeneidad, independencia relativa de las partes alejadas, simplicidad del hecho elemental, y es por eso por lo que los naturalistas están obligados a recurrir a otras maneras de generalización" [Poincaré 1963, 147].

Ya en el primer tercio del siglo XIX, cuando predominaban evidentemente el análisis y, sobre todo, la teoría de las ecuaciones diferenciales como principal estructura matemática de la física, surgen otras esferas de la matemática, esferas importantes para la física. Algunas de ellas, que podrían incluirse en el análisis, son la teoría de funciones de variable compleja, la del cálculo de variaciones, los elementos del análisis vectorial y otras. Otras son ciertos aspectos de la geometría multidimensional, la diferencial y la proyectiva que se salían de los marcos del análisis. El material expuesto anteriormente patentiza que las investigaciones físicas y la física matemática en el primer tercio del siglo XIX dieron un potente impulso para el desarrollo del análisis y de otras ramas de la matemática. Pero este "problema recíproco" debe ser tema de un estudio especial.

Referencias

AMPÈRE, A.-M. (A.-M. Amper) 1954. *Elektrodinamika*. Moscú. (Versión original: *Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience*. Paris, 1827.)

APPELL, P. 1922. "Ampère mathématicien". *Rev. gén. de l'électricité*. Nov. Pp. 11-12.

ARAGO, F. 1860. *Biografii znamenitykh astronomov, fizikov y geometrov*. t. 2. San Petersburgo. (Versión original: D. F. J. Arago. *Biographies of distinguished scientific men*. Londres, 1857.)

__________ 1861. *Biografii znamenitykh astronomov, fizikov y geometrov*. t. 3. San Petersburgo. (Versión en inglés: D. F. J. Arago. *Biographies of distinguished scientific men*. Londres, 1857.)

BELKIND, L. D. 1968. *André-Marie Amper*. Moscú.

BELLONE, E. 1980. *A world on paper. Studies on the second scientific revolution*. Massachusetts: MIT Press.

CARNOT, S. 1987. *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. [Int., trad. y notas de J. Ordóñez]. Madrid. (La primera edición francesa en 1824; versión en ruso: *Vtoroe nachalo termodinamiki*. Moscú-Leningrado, 1934. Pp. 17-61.)

CLAUSIUS, R. 1876-1891. *Die mechanische Wärmetheorie*. 3e Aufgabe. Brunswick. Bd. 1-3. (Versión en ruso: véase Carnot 1987, 73-334.)

DORFMAN, Ya. G. 1979. *Vsemirnaya istoriya fiziki: s nachala XIX do serediny XX v.* Moscú.

ENGELS, F. 1965. *Dialektica prirody*. Moscú. (Versión en inglés: F. Engels. *Dialectic of nature*. Moscú, 1982.)

FOURIER, J. B. J. 1973. [illegible]. Moscú. (Versión original: *Théorie analytique de la chaleur*. Paris, 1822.)

FOX, R. 1974. "The rise and the fall of Laplacian physics". *Historical Studies in the Physical Sciences* 4: 89-176.

FRANKEL, E. 1977. "J. B. Biot and the mathematization of experimental physics in Napoleonic France". *Historical Studies in the Physical Sciences* 8: 33-72.

FRESNEL, A. 1823. "Mémoire sur la diffraction de la lumière". *Ann. Chim. Phys.* 11 (2): 246-296; 337-379. (Versión en ruso: véase Landsberg 1955.)

FRIEDMAN, R. M. 1977. "The creation of the new science. Joseph Fourier's Analytical Theory of Heat". *Historical Studies in the Physical Sciences* 8: 73-99.

GRATTAN-GUINNESS, I. 1985. "Mathematics and mathematical physics from Cambridge: a survey of the achievements and the French influence", en P. M. Harman (editor). *Wranglers and Physicists. Studies on Cambridge physics in XIXth century*. Manchester. Pp. 84-115. (Véase también la investigación fundamental de las matemáticas y física matemática en Francia en la primera mitad del siglo XIX: Grattan-Guinness 1990.)

———. 1990. *Convolutions in French mathematics 1800-1840. From the calculus and mechanics to mathematical analysis and mathematical physics*. Basel: Birkhäuser. 3 vols.

GUELFER, Ya. M. 1981. *Istoriya y metodologuiya termodinamici y statisticheskoi fiziki*. Moscú.

KLEIN, F. 1989. *Lectsii o razvitii matematiki v 19 stoletii*. T. 1. Moscú. (Versión original: *Vorlesungen über Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert*. Bd. 1. Berlin. 1926.)

LANDSBERG, G. S. 1955. "O. Fresnel. Ocherk zhizni y deyatelnosti". En: *O. Fresnel. Izbrannye trudy po optike*. Moscú. Pp. 5-70.

LAPLACE, P. S. (P. S. Laplas) 1982. *Izlozhenie sistemy mira*. Leningrad. (Versión original: *Exposition du système du monde*. Paris. 1796.)

MAXWELL, J. C. 1977. *Izbrannye sochineniya po teorii electromagnetnogo polya*. Moscú. (Versión original: J. C. Maxwell. *A treatise on electricity and magnetism*. Cambridge. 1873.)

POINCARÉ, H. 1963. *La ciencia y la hipótesis*. Madrid: Espasa-Calpe.

ROSENBERGER, F. 1935. *Istoriya fiziki*. Ch. 3. v. 1. Moscú-Leningrado. (Versión original: F. Rosenberger. *Die Geschichte der Physik*. Th. 3, Abt. 1. Braunschweig. 1887.)

SALLIMAN, R. 1974. "Fresnel and the emergence of physics as discipline". *Historical Studies in the Physical Sciences* 4: 137-162.

STRUIK, D. Ya. 1969. *Kratkii ocherk istorii matematiki*. Moscú. (Versión en alemán: D. J. Struik. *Abriss der Geschichte der Mathematik*. Berlin. 1963.)

TRICKER, R. 1974. *Frühe Electrodynamik. Das erste Stromgesetz*. Berlin.

VDOVICHENKO, N. V. 1985. "Rol mekhaniki v formirovanii termodinamiki", en *Issledovaniya po istorii fiziki y mekhaniki*. Pp. 254-280.

VORONTSOV-VELIAMINOV, B. A. 1985. *Laplas*. Moscú.

WHEWELL, W. (V. Uevel) 1867a. *Istoriya induktivnikh nauk*. T. 2. San Petersburgo. (Versión original: *The history of the inductive sciences*. V. 2. Londres. 1837.)

———. 1867b. *Istoriya induktivnikh nauk*. T. 3. San Petersburgo. (Versión original: *The history of the inductive sciences*. V. 3. Londres. 1837.)

ZOTOV, A. F. 1971. "Problema classificatsii nauk u Ampera", en *Uchenige o nauke y ee razvitii*. Moscú. Pp. 41-57.

Vladimir P. Vizguin, doctor en ciencias físico-matemáticas, nació en 1936 en Khabarovsk, Rusia. Es jefe de la Sección de Historia de la Física, Mecánica y Astronomía del Instituto de Historia de las Ciencias Naturales y Tecnología de S. I. Vavilov de la Academia de Ciencias de Rusia, donde trabaja desde 1965. Es especialista en la esfera de la historia y metodología de la física teórica y la historia social de la física en Rusia y la URSS. Es autor de más de 130 trabajos científicos, en particular de una serie de monografías sobre la historia de las teorías de relatividad, gravitación y teorías unitarias de campo (en ruso): *Desarrollo de la interconexión de los principios de la simetría y las leyes de conservación en la física clásica*, Moscú, 1972, *Programa de Erlangen y la física*, Moscú, 1975; *Teoría relativista de gravitación: orígenes y formación*, 1900-1915, Moscú, 1981 (existe la traducción húngara); *Teorías unitarias de campo en el primer tercio del siglo XX*, Moscú, 1985 (existe la traducción inglesa: V. P. Vizguin. *Unified field theories in the first third of the 20th century*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1994).

GRATTAN-GUINNESS, I. 1985. "Mathematics and mathematical physics from Cambridge: a survey of the achievements and the French influence", en P. M. Harman (editor). *Wranglers and Physicists. Studies on Cambridge physics in XIXth century.* Manchester. Pp. 84-111. (Véase también la investigación fundamental de las matemáticas y física matemática en Francia en la primera mitad del siglo XIX: Grattan-Guinness 1990.)

——— 1990. *Convolutions in French mathematics 1800-1840. From the calculus and mechanics to mathematical analysis and mathematical physics.* Basel: Birkhäuser. 3 vols.

GUELFER, Ya. M. 1981. *Istoriya y metodologuiya termodinamiki y statisticheskoi fiziki.* Moscú.

KLEIN, F. 1989. *Lectsii o razvitii matematiki v 19 stoletii.* T. 1. Moscú. (Versión original: *Vorlesungen über Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert.* Bd. 1. Berlín. 1926.)

LANDSBERG, G. S. 1955. "O. Fresnel. Ocherk zhizni y deyatelnosti". En: *O. Fresnel. Izbrannye trudy po optike.* Moscú. Pp. 5-70.

LAPLACE, P. S. (P. S. Laplas) 1982. *Izlozhenie sistemy mira.* Leningrad. (Versión original: *Exposition du systeme du monde.* Paris. 1796.)

MAXWELL, J. C. 1952. *Izbrannye sochineniya po teorii elektromagnitnogo polya.* Moscú. (Versión original: J. C. Maxwell. *A treatise on electricity and magnetism.* Cambridge. 1873.)

POINCARÉ, H. 1963. *La ciencia y la hipótesis.* Madrid. Espasa-Calpe.

ROSENBERGER, F. 1935. *Istoriya fiziki.* Ch. 3, v. 1. Moscú-Leningrado. (Versión original: F. Rosenberger. *Die Geschichte der Physik.* Th. 3. Abt. 1. Braunschweig. 1887.)

SILLIMAN, R. 1974. "Fresnel and the emergence of physics as discipline". *Historical Studies in the Physical Sciences* 4. 137-162.

STRUIK, D. Ya. 1969. *Kratkii ocherk istorii matematiki.* Moscú. (Versión en alemán: D. J. Struik. *Abriss der Geschichte der Mathematik.* Berlin. 1961.)

TRICKER, R. 1974. *Frühe Electrodynamik. Das erste Stromgesetz.* Berlin.

VDOVICHENKO, N. V. 1985. "Rol mekhaniki v formirovanii termodinamiki", en *Issledovaniya po istorii fiziki y mekhaniki.* Pp. 234-280.

VORONTSOV-VELLAMINOV, B. A. 1985. *Laplas.* Moscú.

WHEWELL, W. (V. Uevel) 1867a. *Istoriya induktivnykh nauk.* T. 2. San Petersburgo. (Versión original: *The history of the inductive sciences.* V. 2. Londres. 1837.)

——— 1867b. *Istoriya induktivnykh nauk.* T. 3. San Petersburgo. (Versión original: *The history of the inductive sciences.* V. 3. Londres. 1837.)

ZOTOV, A. F. 1971. "Problema classificatsii nauk u Ampera", en *Ucheniye o nauke y ee razvitii.* Moscú. Pp. 41-57.

Vladimir P. Vizguin, doctor en ciencias físico-matemáticas, nació en 1936 en Khabarovsk, Rusia. Es jefe de la Sección de Historia de la Física, Mecánica y Astronomía del Instituto de Historia de las Ciencias Naturales y Tecnología de S. I. Vavilov de la Academia de Ciencias de Rusia, donde trabaja desde 1965. Es especialista en la esfera de la historia y metodología de la física teórica y la historia social de la física en Rusia y la URSS. Es autor de más de 130 trabajos científicos, en particular de una serie de monografías sobre la historia de las teorías de relatividad, gravitación y teorías unitarias de campo (en ruso): *Desarrollo de la interconexión de los principios de la simetría y las leyes de conservación en la física clásica*, Moscú, 1972; *Programa de Erlangen y la física*, Moscú, 1975; *Teoría relativista de gravitación: orígenes y formación, 1900-1915*, Moscú, 1981 (existe la traducción húngara); *Teorías unitarias de campo en el primer tercio del siglo XX*, Moscú, 1985 (existe la traducción inglesa: V. P. Vizguin. *Unified field theories in the first third of the 20th century*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1994).