



Ignis Mutat Res

El calórico y la estructura de la materia en los orígenes de la Química Moderna

Antonio D. Casares Serrano

Universidad de Alicante

1. Un panorama de los orígenes del “experimentalismo”

La historia de la física moderna presenta, en general, un doble proceso constitutivo: por una parte, la astronomía, la óptica matemática y la teoría del movimiento llegaron al siglo XVII con una importante acumulación de observaciones como punto de partida de diversas teorías matemáticas en el seno de una importante tradición que se había gestado a lo largo de la Edad Media; por otro lado, la hidrostática, el calor, la óptica física, la pneumática, la electricidad o el magnetismo, compartían *cajón de sastre* entre los fenómenos oscuros de la alquimia y la historia natural. Las primeras habían llegado a clarificar en gran medida un importante número de fenómenos básicos sin necesidad de una cuantificación sistemática, gracias a su combinación fructífera con la geometría. En estas ramas de la física, la experimentación sistemática iba a suponer un importante medio de selección entre los diversos modelos geométricos tradicionales y una nueva relación de la observación y la teoría. En las segundas, sin embargo, la tarea en gran parte estaba todavía por hacer. Pocos fenómenos tenían un estatus de claridad mínima para facilitar sus posibilidades de matematización y en muchos de los casos ni siquiera se podía hablar de la identificación de observaciones básicas. En el seno de la historia y la filosofía natural se desarrollaron una gran diversidad de revalorizaciones de la filosofía clásica durante el Renacimiento, lo que favoreció el planteamiento de un variado número de teorías del mundo natural con una clara pretensión unificadora de los fenómenos orgánicos e inorgánicos que no podían escapar a la especulación y a la observación inmediata.

El siglo XVII se abre con el importante impulso de una nueva orientación de las ciencias hacia la investigación y el dominio de los procesos naturales a partir de la propuesta metodológica de Francis Bacon. En su *Novum organum* (1620), las denominadas ciencias baconianas aspiraron a seleccionar inductivamente los fenómenos básicos dispersos en los amplios y enmarañados sistemas naturales con la pretensión de establecer conceptos manejables desde el punto de vista experimental y cuantitativo.¹ En las ciencias geométricas la experimentación en muchos casos estaba

¹ Entre las múltiples perlas que la dispar obra de Francis Bacon nos proporciona, podemos seleccionar los párrafos 1, 19 o 74 del Libro I del *Novum Organum* (1620), directamente relacionados con los problemas de la química del siglo XVII: “There are and can exist but two ways of investigating and discovering truth. The one hurries on rapidly from the senses and particulars to the most general axioms, and from them, as principles and their supposed indisputable truth, derives and discovers the intermediate axioms. This is the way now in use. The other constructs its axioms from the senses and particulars, by ascending continually and gradually, till it finally arrives at the most general axioms, which is the true but unattempted way”, recoge el párrafo 19 del Libro I del *Novum Organum*, en BACON, *Advancement of Learning, Novum Organum and New Atlantis*, en edición de M. J. Adler, Great Books of the Western World nº 28, Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993, p. 108.

idealizada por la regularidad de las apariencias y en pocas ocasiones se realizaban verdaderos experimentos diseñados físicamente al margen de la reestructuración geométrica de las observaciones. La radical diferenciación de estatus entre las ciencias físico-matemáticas tradicionales y las nuevas ciencias experimentales descansaba en la necesidad técnica de estas últimas, en donde los fenómenos básicos para el desarrollo del estudio sistemático y la cuantificación precisaban del desarrollo de instrumentos y máquinas que hicieran posible no sólo la experimentación sino incluso la observación repetida de los fenómenos. En este sentido, las ciencias baconianas seguían presentando el Talón de Aquiles de la teoría: sin leyes y teorías operativas no se alcanzaban a establecer los primeros conceptos métricos básicos para la experimentación sistemática². El marco filosófico general en muy pocas ocasiones permitía esperar resultados definidos, resultando una experimentación errática y dispersa que sólo aspiraba a controlar y reproducir determinados fenómenos útiles o a ser el punto de partida de nuevas diversiones en los salones de la nobleza y la Corte.

A las dificultades del programa de las ciencias baconianas se enfrentó la segunda gran propuesta metodológica para una nueva ciencia encabezada por René Descartes. En su *Discours de la méthode* (1637) señalaba la importancia de establecer unas nuevas reglas para el razonamiento que guiaran la investigación científica por el camino de una nueva matemática, vinculada con la física a través de un mecanismo subyacente capaz de reflejar explicativamente las leyes matemáticas del mundo.³ Este sueño mecanicista contaría pronto con los recursos matemáticos necesarios desarrollados paralelamente por Newton y Leibniz, que a su vez desarrollarían dicho programa en direcciones divergentes. La nueva física experimental aparecía, pues, implicada en un renovado y crítico proyecto de filosofía del conocimiento y de filosofía en general.

Los nuevos métodos se enfrentaban a una espesa filosofía hermética, surgida sobre las bases del nuevo impulso del neoplatonismo renacentista, que dominaba la alquimia y la magia natural, y que a pesar de todo orientó cada vez más una actitud activa hacia la exploración de los efectos y las causas naturales de los fenómenos a la sombra de estrechas relaciones simpáticas que actuaban a distancia. En este ámbito confuso desde una lectura actual se encuentra gran parte de la obra precursora del estudio experimental del magnetismo publicada por W. Gilbert en 1600. En el *De magnete*, Gilbert exponía los conocimientos acumulados durante la Edad Media acerca de los efectos magnéticos y los enriquecía con pequeñas experiencias realizadas por él mismo en el seno de un marco complejo de cálculos precisos e influencias astrológicas.⁴ A pesar de todo, la obra de Gilbert constituyó un importante punto de partida para las primeras explicaciones mecánicas y las experiencias

² No está de más recordar que la lectura tradicional de Bacon adolece de una clara parcialidad e imprecisión como nos ha puesto de manifiesto tan claramente Paolo Rossi en sus diversos estudios dedicados a la filosofía empirista inglesa. En ellos se nos revela una filosofía baconiana *constructiva*, alejada del coleccionismo de datos empíricos, que sólo en los últimos años ha sido reconsiderada al margen de tópicos y posiciones doctrinales. Véase ROSSI, Paolo (1986), *Las arañas y las hormigas. Una apología de la historia de la ciencia*, Barcelona, Crítica, 1990, pp. 89-110, y más extensamente ROSSI, Paolo (1974), *Francis Bacon: De la magia a la ciencia*, Madrid, Alianza, 1990.

³ Cfr. DESCARTES, Rene (1620), *Discurso del método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*, Madrid, Alfaguara, 1987, *Segunda Parte*: pp. 15-16.

⁴ Las diversas investigaciones de Gilbert se basaban en la analogía de los imanes esféricos que empleaba en sus experiencias, con la forma de la Tierra, como prototipo del Gran Imán. De ahí que su deducción de un principio de magnetismo universal le llevara a un consecuente animismo: en el fondo, su empirismo está al servicio de una nueva fisiología. Cfr. GILBERT, William (1600), *On the Magnet*, Dover, New York, 1958.

instrumentales que realizaron los primeros científicos experimentales de mediados del siglo XVII, que desencadenarían la manufactura de nuevos instrumentos y máquinas capaces de hacer posible una mayor continuidad y sistematicidad de la observación de los fenómenos magnéticos.

En este sentido, el principal punto de partida de la nueva física experimental fue la manufactura de nuevos instrumentos y máquinas que generalizaban la aproximación a fenómenos dispersos y erráticos en la naturaleza. La pneumática, la electricidad y el magnetismo, radicalmente al margen de las *matemáticas mixtas* en la universidad tradicional, experimentaron un extraordinario resurgimiento a partir de los desarrollos de la bomba de vacío, los generadores y acumuladores eléctricos, y las agujas imantadas. Con estos nuevos prototipos de máquinas se desencadenó la oleada de la "experimentación" de salón orientada al control y manifestación de fenómenos espectaculares como los realizados por el abate Jean-Antoine Nollet en Francia a lo largo de la primera mitad del siglo XVIII.⁵ Campos como el de la pneumática ya habían apuntado, en la segunda mitad del siglo XVII, una importante posibilidad de matematización a partir de los trabajos de Pascal, Torricelli, Boyle y Hooke, en donde la física experimental se intentaba abrir paso entre la herencia de la física galileana y las innovaciones de una nueva mecánica que enfrentaba a cartesianos y newtonianos a las puertas del nuevo siglo.

La física experimental pronto inició su caracterización propia a principios del siglo XVIII abarcando los campos del calor, hidrostática e hidrodinámica, la luz, la pneumática, la electricidad, el magnetismo y la acústica, y estableciendo claramente las fronteras respecto de la historia natural y la química, con la que no obstante mantenía alguna necesaria vinculación a través de la teoría de la materia, del calor y de la luz. Su desarrollo se llevó a cabo inicialmente en gabinetes, al margen de la enseñanza académica, y haciendo uso de la comunicación epistolar, aunque pronto fueron promovidas durante las primeras décadas del siglo ilustrado las publicaciones reivindicadoras de este nuevo estatus y de una renovación académica de las ciencias. Es el caso de los *Physices elementa mathematica experimentis confirmata* (1720-1) de W.J. 'sGravesande y el *Course of Experimental Philosophy* (1734-44) de J.T. Desaguliers, que mostraban su apoyo al nuevo modelo de ciencia física newtoniana caracterizado por una estrecha vinculación de la experimentación con las matemáticas, como la promovida por J. D' Alembert en Francia.⁶ Este será el punto de partida para la unificación, bajo la nueva caracterización experimental, de la totalidad de las ciencias físicas.

1. 1. Instrumentos e instituciones

El surgimiento y desarrollo de la mentalidad experimental es absolutamente inabordable sin tener presente el gran número de nuevos instrumentos y máquinas que se inventaron y perfeccionaron a lo largo de los siglos XVII y XVIII. La bomba de vacío, los generadores y acumuladores eléctricos, los electrómetros, higrómetros, los

⁵ Sobre la relación entre la naciente ciencia moderna y el teatro y el espectáculo como medios de difusión de los nuevos fenómenos físico-químicos, pueden consultarse los recientes trabajos de: SELLES, Manuel A. (2001), "El vapor en el laboratorio: una memoria sobre la ebullición del abate Nollet", *Asclepio*, Vol. LIII, 2, pp. 165-189, y SOLIS, Carlos (2005), "Erudición, magia y espectáculo: el juicio de la República de las Letras sobre Athanasius Kircher", *Endoxa: Series filosóficas*, 19, UNED, Madrid, pp. 243-313.

⁶ Sobre el papel de D'Alembert en la *Encyclopédie* y en la renovación de la física experimental, puede verse: D'ALEMBERT, Jean (1751), *Discurso preliminar de la Enciclopedia*, Madrid, Sarpe, 1984, y HANKINS, Thomas L. (1970), *Jean D'Alembert: Science and Enlightenment*, Oxford.

termómetros y barómetros, las máquinas imantadoras y las máquinas de vapor, fueron dispositivos técnicos y mecánicos que se generalizaron en sus diferentes prototipos clamando a su vez por un fundamento teórico para la explicación de los fenómenos que a través de ellos se tornaban habituales y cotidianos. Todos ellos vieron la luz en laboratorios y talleres de artesanos, muchos de los cuales hicieron sus contribuciones a las primeras investigaciones de la física experimental, y todos, en general, terminaron dando lugar a una industria naciente de instrumentos encabezada en muchos casos por los propios investigadores. Es representativo, en este sentido, la aparición de nuevas industrias de instrumentos ópticos e instrumentos de medida entre 1720 y 1780 en Inglaterra, Escocia y Holanda, así como el hecho de que investigadores franceses e italianos, como A. Lavoisier y A. Volta, acudieran a las Islas Británicas y a los Países Bajos en busca de instrumental de precisión para acondicionar sus gabinetes de investigación.

Las botellas de Leiden, los electrómetros, los generadores eléctricos y las bombas de vacío, eran elementos indispensables para abordar los nuevos fenómenos ajenos a una naturaleza que sólo los manejaba indirecta y caprichosamente, y en muchos casos a gran escala. Sólo a través de los termómetros y los barómetros podía intentarse la elaboración de una teoría cualitativa de los efectos del calor y el vacío, todavía implicados con una física aristotélica de los cuatro elementos. Sin estos instrumentos difícilmente podía establecerse alguna relación cuantitativa entre cualidades primarias de los fenómenos –como el peso, la densidad, o la intensidad– y sus posibles causas materiales, que permitiera definir conceptos físicos con capacidad explicativa y predictiva. Y lo que era más fundamental, muchos de los fenómenos estudiados por la nueva física experimental eran totalmente desconocidos si no se conseguía de alguna manera provocarlos.

La mediación instrumental fue tan directa en el desarrollo de la física experimental que sus primeros usos estuvieron caracterizados por la total toma de contacto y revelación de los fenómenos, tan sólo "enriquecida" por un mar de simpatías cósmicas. Pero ya a mediados del siglo XVIII, la gran diversidad de instrumentos diseñados para permitir la observación de nuevos fenómenos empezó a mostrar los suficientes matices en la maquinaria como para permitir clasificar dichos instrumentos en tres grandes grupos: un primer grupo caracterizado por aquellos aparatos cuyo único objeto era la demostración y popularización de los nuevos objetivos de la ciencia –que pronto formaron parte del mobiliario de las escuelas, academias y universidades promoviéndose incluso ayudas económicas para la adquisición de los mismos por parte de los profesores–; un segundo grupo mucho más perfeccionado y específicamente destinado a mejoras sucesivas con el objeto de constituirse en instrumentos de medida y cuantificación de los nuevos fenómenos ya controlados de una forma cualitativa; y finalmente, podríamos diferenciar aquellos instrumentos fundamentales capaces de promover diseños experimentales de medida y demostración de los fenómenos. Las bombas de vacío, los generadores eléctricos y "las máquinas de cebar agujas" se convirtieron pronto en elementos fundamentales de todo centro de investigación experimental, y termómetros, barómetros y electrómetros empezaron a aportar resultados en favor de métodos de medida cada vez más vinculados con teorías de la materia contrastadas cada vez más con una observación experimental planificada.

Las bombas de vacío, por ejemplo, incrementaron su potencia de 1/40 a 1/600 atmósferas entre los años 1750 y 1770, y los generadores eléctricos pasaron de generar 10.000 voltios en la década de los 40 a producir voltajes de más de 100.000 voltios en la década de los 80. Este desarrollo técnico, vinculado estrechamente con una naciente industria que aprovechaba al tiempo que promovía la investigación experimental instrumentalizada, fue el que hizo posible la generalización de numerosos efectos desconocidos hasta entonces en relación con la electricidad, el

magnetismo, la neumática y el calor, que permitieron estudiar los efectos de la corriente eléctrica en los seres vivos –la electricidad dinámica–, la electrólisis del agua, la fusión de los metales o los efectos químicos de la electricidad.

No ha de resultar extraño, por tanto, que fuera un hábil artesano y empresario del instrumental eléctrico, Francis Hauksbee, convencido de las posibilidades de la nueva física newtoniana, el primero que impartiera lecciones públicas de física experimental en Londres, labor que continuaría el también newtoniano Jean-Théophile Desarguliers tras su muerte en 1713. Esta actividad orientada hacia la demostración popular de sorprendentes efectos experimentales tenía ya antecedentes en la florentina *Accademia del Cimento*, a mediados del siglo XVII, y en las jornadas de exhibición experimental que Robert Hooke, ayudante, en aquellos años, del baconiano Robert Boyle, iniciara en 1662 promovidas por la *Royal Society*. La influyente institución científica de Londres había concedido un lugar preeminente para la física experimental, sobre todo en aquellos campos en los podían preverse beneficios económicos: navegación, minería, ingeniería naval, balística e hidrostática, etc.⁷

En el campo académico, el Wadham College de la Universidad de Oxford, durante el rectorado de John Wilkins, es la primera institución inglesa en introducir formalmente la física experimental en las aulas en 1700, y Cambridge se une a la docencia de la nueva metodología experimental en 1707, mientras en Francia Jacques Rohault y Pierre Polinière iniciaban sus "experiencias físicas" en la Universidad de París. Es este un inicio académico de la física experimental que va a estar mucho más definido por la inesperada fiebre experimental que va a recorrer los salones públicos de París, asociada a la persona del abate Jean-Antoine de Nollet para el cual se instituirá una cátedra en el *Collège de Navarre*, de la Universidad parisina el año 1752. A lo largo de la segunda mitad del siglo XVIII numerosas ciudades francesas promueven la fundación de cátedras experimentales en sus colegios: Pont-a-Mousson (1759), Caen (1762), y Draguignan (1765), entre otras. La física experimental alcanzaría en Francia con posterioridad una diversidad institucional incomparable de la mano de la *Académie des sciences*, los *Cabinets de physique*, y la proliferación de escuelas militares y profesionales: *Ecole royale militaire*, *Ecole royale des ponts et chaussées*, *Ecole des mines*... En Alemania, por otra parte, el impulso experimental promovido por las experiencias de Otto von Guericke con el vacío, se vio en gran medida relegado por el debate metodológico de Leibniz con cartesianos y newtonianos, que terminaría dando lugar a una nueva corriente especulativo-experimental durante el siglo XVIII encabezada por Christian Wolff. La propuesta racionalista y sistemática de Wolff se extendería durante la segunda mitad del siglo XVIII en Francia de la mano de la Marquesa de Chatelet y en los artículos de física experimental de la *Encyclopédie*, en estrecho contacto con la defensa de la libertad de pensamiento. Pero el principal foco de la física experimental en el continente se situaba, sin embargo, en Holanda. Las universidades de Utrech y Leiden fueron focos experimentalistas paralelos y estrechamente vinculados con la *Royal Society* y el método newtoniano. Con Senguerius, 'sGravesande, Boerhaave y Musschenbroeck – este último también un emprendedor empresario–, la Universidad de Leiden se convirtió en el centro experimentalista más reputado del continente, de donde salieron los tratados que establecerán la conformación actual de las ciencias físicas frente a la

⁷ Sobre la Royal Society se puede acudir a los estudios de M. PURVER (1967), *The Royal Society: Concept and Creation*, Routledge and Keagan Paul, London, y M. HUNTER (1982), *The Royal Society and Its Fellows, 1660-1700: The Morphology of an Early Scientific Institution*, The British Society for the History of Science, Chalfont St. Giles. Para la *Accademia*, es ya un clásico el trabajo de W.E.K. MIDDLETON (1971), *The Experimenters: A Study of the Accademia del Cimento*, Johns Hopkins Press, Baltimore.

historia natural, y las orientaciones teóricas y experimentales que trazarán los debates metodológicos con el mecanicismo cartesiano durante la primera mitad del siglo XVIII.⁸

En pleno Siglo Ilustrado, la física experimental se abría paso en su variante populista y de salón, mientras en las nuevas cátedras se sentaban las bases del verdadero problema acerca de la naturaleza de las magnitudes experimentales y las teorías de la materia que cada vez eran más necesarias para que la nueva física experimental alcanzara el estatus del conocimiento físico-matemático que siglos atrás había alcanzado la mecánica.

1. 2. Método y materia

El siglo XVII había tenido que resolver los conflictos que la nueva física planteaba a la filosofía natural de Aristóteles y a los prolíficos desarrollos de la filosofía hermética. Frente a la restrictiva física de la combinación de los cuatro elementos clásicos y a las simpatías y otras causas ocultas de la magia natural, la metodología del siglo XVII optó por una variopinta diversidad de desarrollos corpuscularistas que permitieran separar los órdenes de lo animado y lo inanimado en la filosofía natural. En cierto modo considerada como una variante lógica extrema de la filosofía natural aristotélica, la filosofía corpuscular permitía seguir manejando conceptualmente los elementos clásicos desvinculados de la teoría de las causas y del hilemorfismo aristotélico, a cambio de propugnar un mecanismo subyacente autónomo e independiente de leyes matemáticas similares a las obtenidas por la mecánica. El éxito de este último campo de la física durante el siglo XVII lo convertía en un verdadero modelo del estatuto científico, y la física experimental, segregada de la historia natural, pugnaba por encontrar modelos explicativos que constituyeran mecanismos ocultos pero racionalizables desde un punto de vista geométrico.

La gran crítica de la filosofía aristotélica llevada a cabo por René Descartes acercó a la física hacia un mundo corpóreo regido uniformemente por leyes al modo de una gran máquina. En sus *Principia philosophiae* de 1644, Descartes sentaba las nuevas reglas del movimiento que podían regular esta nueva visión mecánica del mundo sobre la base de un continuo material en movimiento, donde el vacío no era posible porque la extensión era una propiedad inherente de la materia. Un auténtico *plenum* material salpicado de vórtices hacía posible el flujo constante de la materia que permitía establecer explicaciones de un orden inferior al observacional para fenómenos como el magnetismo. El universo cartesiano permitía igualmente asimilar el sistema copernicano al tiempo que hacía posible pensar en un número ilimitado de mundos rompiendo con la limitación teológica de la Creación.⁹

⁸ Sobre los orígenes e intereses de las sociedades científicas europeas se pueden consultar las siguientes obras: J.E. McCLELLAN III (1985), *Science Organized: Scientific Societies in the Eighteenth Century*, Columbia University Press, New York, y G. MEYNELL (2002), *The French Academy of Sciences, 1666-91*, Haven House, Dover. Un clásico acercamiento al proyecto enciclopédico de Diderot y D'Alembert sigue siendo el de F. VENTURI (1963), *Los orígenes de la Enciclopedia*, Barcelona, Crítica, 1980.

⁹ Cfr. la *Segunda Parte*: "Sobre los Principios de las Cosas Materiales" de los *Principia* cartesianos en DESCARTES, R. & LEIBNIZ, G.W., *Sobre los Principios de la Filosofía*, Madrid, Gredos, 1989, pp. 73-121. En la *Dióptrica* y en los *Meteoros* se desarrollan las "explicaciones" cartesianas acerca de la concepción de la naturaleza que se deriva de la aplicación de las reglas del método. En la filosofía cartesiana está implícita una concepción de la naturaleza que repudia los principios activos y se sostiene exclusivamente sobre el principio de inercia. Cfr. DESCARTES, Rene (1620), *Discurso del método, Dióptrica, Meteoros...*, pp. 59-67 (Sobre la luz), pp. 179-184 (Sobre la naturaleza de los cuerpos terrestres) y pp. 184-191 (Sobre los vapores y las exhalaciones).

La filosofía cartesiana promovió un enconado debate en todos los órdenes del conocimiento humano, pero su sustentación sobre la duda metódica permitió que con posterioridad fuera aceptada y reformulada por los jesuitas a través de una física de lo posible, no esencialista, que salvaguardaba los fundamentos teológicos de la Creación. La física mecanicista así establecida promovía una matematización de los fenómenos en virtud de los efectos observados y estudiados pero no permitía decidir nada firme acerca de la verdadera naturaleza de los fenómenos. El sistema cartesiano se tornaba en una pálida sombra de lo que había pretendido ser como apuesta de conocimiento plenamente humano, y se abanderaba como la manifestación de las limitaciones de la naturaleza humana ante la Obra Divina. Durante las últimas décadas del siglo XVII los físicos cartesianos manejaban la reformulación de Malebranche como una epistemología sin repercusiones ontológicas, y asumían que no era posible esperar una comprensión física verdadera de la realidad. Las múltiples posibilidades de los modelos mecánicos habían sumido a la física experimental en un mar de conjeturas.

Paralelamente a la física mecanicista de Descartes, en Inglaterra y Holanda se defendía la nueva física newtoniana planteada como el estudio matemático de la naturaleza. Newton perseguía la *geometria universalis*, una física que nace allí donde la matemática logra discernir el funcionamiento específico y verdadero del mundo. El proyecto newtoniano plenamente inmerso en la mecánica tradicional como disciplina matemática, aboga sin embargo por la exactitud en el arte de medir. Todo el proyecto latente de la física de Newton está apuntado en el Prefacio de los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de 1687: todos los fenómenos naturales parecen depender de ciertas fuerzas capaces de organizar las partículas que conforman los cuerpos materiales. Allá donde la matemática y la experimentación converjan descansará el modelo verdadero de la realidad física del mundo. Nuevamente el corpuscularismo es la extrema posibilidad que quiebra la filosofía natural de Aristóteles, pero en esta ocasión con la complicidad del concepto de fuerza.¹⁰

El prototipo de la fuerza newtoniana era la gravedad. El propio Newton se mostraba reticente a la posibilidad de aceptar una fuerza caracterizada como una acción a distancia que a finales del siglo XVII tiene todo el aspecto de una simpatía o causa oculta de la magia natural. Así, y en aparente contradicción con la introducción que redactara Roger Cotes para la segunda edición de los *Principia*, en el Escolio General que cierra la obra se señalan algunas conjeturas acerca de ese famoso "espíritu sutilísimo" que penetra todos los cuerpos y permite la interacción de las partículas que los constituyen. El proyecto de física newtoniana sufrió, además, nuevas tensiones a raíz de su segunda gran obra, *Opticks* (1704), donde se exponen directrices y conjeturas diversas para la investigación experimental en forma de "cuestiones", que fueron aumentando en número y temática en sucesivas ediciones de la obra.¹¹

¹⁰ En el Prefacio de los *Principia* señala Newton: "En este sentido, la mecánica racional será la ciencia de los movimientos resultantes de cualesquiera fuerzas, y de las fuerzas requeridas para producir cualesquiera movimientos, propuestas y demostradas con exactitud", en NEWTON, Isaac (1687), *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, Madrid, Técnos, 1987, p. 6.

¹¹ "Podríamos ahora añadir algo sobre cierto espíritu sutilísimo que penetra y yace latente en todos los cuerpos grandes, por cuya fuerza y acción las partículas de los cuerpos se atraen unas a otras cuando se encuentran a escasa distancia y se ligan en caso de estar contiguas; y los cuerpos eléctricos operan a distancias mayores, repeliendo tanto como atrayendo a los corpúsculos vecinos; y la luz es emitida, reflejada, refractada, curvada y calienta los cuerpos; y toda sensación es excitada... Por otra parte, tampoco disponemos de una cantidad suficiente de experimentos para determinar con precisión y demostrar mediante qué leyes opera este espíritu eléctrico y elástico", NEWTON, I. (1687), *Principios Matemáticos...*, op. cit., p. 621.

El siglo XVIII se inició con los primeros debates entre los proyectos de física cartesiano y newtoniano en Inglaterra, Holanda y Francia. La teoría de la materia que se consideraba esencial para sustentar los diseños experimentales de la nueva física necesitaba explicar la naturaleza y la cohesión de los materiales, y las fuerzas de atracción y repulsión tenían grandes posibilidades teóricas en este sentido. Los problemas descansaban, sin embargo, en su marco de actuación. La definición de las fuerzas de atracción que caracterizaban la cohesión de las partículas materiales planteó el debate acerca de la existencia de un medio etéreo de interacción que hiciera posible seguir manteniendo el principio de interacción por contacto continuo. Desde sus trabajos y cartas a Boyle y Bentley entre los años 1679 y 1692, que trataban cuestiones acerca del aire y el éter, Newton había expuesto el problema con la suficiente ambigüedad teórica como para permitir que sus discípulos y seguidores tuvieran, durante el siglo XVIII, que plantearse el problema desde nuevas perspectivas experimentales. Para s'Gravesande y Desaguliers la gravedad no necesitaba definirse como una causa oculta, sino como un efecto manifiesto. Los newtonianos del siglo XVIII optaron por una definición cinética de la atracción –como momentum o inercia del movimiento–, mientras los cartesianos insistieron en que si no se daba una causa explícita de la acción atractiva entre dos cuerpos ésta se constituía en una causa o cualidad oculta al más puro estilo hermético.¹²

Durante la segunda mitad del siglo XVIII, los matemáticos franceses como D'Alembert, consideraron la atracción newtoniana más como un propuesta de investigación que como una causa o explicación de la cohesión y el movimiento, estableciendo su acción como interacción natural y uniforme en todas las partes del mundo y la materia, pero sin renunciar a alcanzar algún día su definición en términos de impulso y colisiones entre las partes impenetrables de la materia. No obstante, su reacción contra la definición de acciones a distancia les llevó a mantener la incognoscibilidad de los primeros principios físicos desarrollando una física experimental de carácter instrumentalista sustentada en la interacción a través de fluidos sutiles. La física en general se orientaba en torno a 1750 hacia la búsqueda de unas leyes de colisión y movimiento derivadas de la necesaria impenetrabilidad cartesiana de la materia, de forma que la mayoría de las cuestiones que fueron incrementando las últimas ediciones de la *Opticks* de Newton apuntaban hacia complejidades ajenas, en gran medida, al espíritu del mecanicismo cartesiano.

En el debate entre cartesianos y newtonianos jugó un relevante papel la investigación cuantitativa de Stephen Hales, *Vegetable Statics*, publicada en 1727, acerca de la combinación del aire y la materia. Hales descompuso diferentes sustancia por medio de calor recogiendo grandes volúmenes de "aire" –en realidad diferentes gases que, en ausencia de una teoría química de los elementos, eran asimilados a un aire prototípico o fundamental muy emparentado con el elemento clásico de la filosofía natural aristotélica–. La posterior compresión de estos aires obtenidos planteaba el problema de explicar cómo tales cantidades de aire podían estar contenidas físicamente en el espacio reducido del sólido. En ausencia de análisis químico, del estudio de Hales parecía derivarse la existencia de dos estados del aire: una variedad

Todo un proyecto de investigación que se desarrollará posteriormente en numerosas *Quaestions* de la *Optica* (sobre todo en la *Quaestio* 31, en lo que se refiere a la química), y que tendremos oportunidad de abordar más adelante.

¹² Las citadas cartas de Newton pueden consultarse en la reciente edición de Andrew Janiak, NEWTON, Isaac (2004), *Philosophical Writings*, Cambridge University Press, Cambridge: pp. 1-11 (Carta a Robert Boyle, 28 de febrero de 1678/9), pp. 94-105 (Cartas a Richard Bentley, 10 de diciembre de 1692, 17 de enero de 1692/93, 11 de febrero de 1692/93, y 25 de febrero de 1692/3). Existe también una reciente traducción castellana de estas cartas a cargo de José Luis González Recio, NEWTON, Isaac (2001), *Cuatro cartas al Dr. Bentley: carta al honorable Sr. Boyle sobre la causa de la gravitación*, Madrid, Universidad Complutense.

"elástica" –aquella que Newton definía como partículas que se repelen mutuamente– y otra "fijada" en la materia constitutiva de los cuerpos; variedades que eran intercambiables mediante la combustión o fermentación de los sólidos. Las diferentes experiencias de Hales con el aire le llevaron a interpretar, en términos newtonianos, que podía definirse tanto un estado en donde predominaban las fuerzas de repulsión como un estado definido por las fuerzas de atracción, pero no un estado conjunto donde se manifestaran ambas fuerzas simultáneamente.¹³

A partir de una reformulación de las experiencias de Hales, la posterior formulación matemática de Roger Boscovich en 1763, permitió una comprensión conjunta, a partir de la simetría esférica, de las atracciones y las repulsiones entre las partículas materiales al mismo nivel, desarrollándose a partir de ese momento el análisis de la interrelación y combinación de las fuerzas aplicado a fenómenos como las colisiones entre partículas, el calor o la electricidad.¹⁴ La acumulación de fuerzas y la complejidad de sus interrelaciones impulsó, a partir de mediados del siglo XVIII, la introducción de una creciente multiplicidad de fluidos asociados a la acción de cada una de las fuerzas implicadas. La aceptación de una teoría material del calor y la creciente popularidad de los fenómenos eléctricos impulsó sin duda la aceptación de una generalización de la acción de las fuerzas a partir de sucesivos medios transportadores específicos. Asimismo, la publicación en aquellas fechas de la correspondencia entre Newton y Boyle acerca de las características físicas del aire y el éter, acabó decantando a la mayoría de los newtonianos a favor de la acción gravitatoria a través de un éter sutil y relegando a un segundo término la interpretación apuntada inicialmente por Cotes.

El marco físico general proporcionado por los fluidos sutiles durante la segunda mitad del siglo XVIII estableció las directrices fundamentales de los inicios de la física experimental cuantitativa. Los fluidos imponderables eran definidos como sustancias con propiedades físicas especiales que no interactuaban con los procesos físicos a los que está sometida la materia ordinaria. En general, proporcionaban el marco de continuidad necesario para establecer los procesos físicos en un marco temporal, aportando el elemento o componente neutral que hacía posible definir los procesos físicos como flujos de propiedades específicas entre las partículas constitutivas de los cuerpos en calorimetría, combustión, electricidad y magnetismo. El marco teórico pronto generó una amplia diversidad de conceptos propuestos con un claro interés cuantitativo: carga, capacidad calórica, tensión eléctrica, temperatura, etc. El hecho evidente de que los procesos eléctricos y magnéticos, al igual que los calóricos, manifestaban en muchas ocasiones la conservación de alguna característica todavía desconocida, impulsó claramente la introducción de intermediarios neutros que permitían definir los procesos físicos en términos de conservación e intensidad cuantificables en alguna medida. La importancia de la interacción entre las fuerzas repulsivas y las atractivas en el sistema newtoniano, unido al relevante papel del calor en la fijación del aire en la materia, planteó de un modo coherente la extensión de la naturaleza fluida del fuego, como elemento de la filosofía natural aristotélica, a los

¹³ El estudio principal acerca de los "aires fijados" durante el siglo XVIII sigue siendo el de GUERLAC, Henry (1957), "Joseph Black and Fixed Air. A Bicentenary Retrospective, with Some New or Little Known Material", *Isis*, Vol. 48, No. 2. (Jun.), pp. 124-151, y GUERLAC, Henry (1957), "Joseph Black and Fixed Air: Parte II", *Isis*, Vol. 48, No. 4. (Dec.), pp. 433-456.

¹⁴ La obra cumbre de Boscovich es su *Philosophiae Naturalis Theoria Redacta ad Unicam Legem Virium in Natura Existentium*, (Viena, 1758) en donde expone su teoría matemática de la materia sin extensión introduciendo el concepto de "punto de fuerza". Sobre Boscovich pueden consultarse los estudios de COLUBI, Mariano (1999), *Boskovic y la visión mecánica de la naturaleza (1740-1785)*, Madrid, Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid, y J.F. FUERTES y J. LÓPEZ GARCÍA (1992), "Roger Boscovich: ¿precursor de la teoría de campos?". *Theoria* 7, pp. 687-701.

fenómenos eléctricos y magnéticos que presentaban ciertas concordancias con el calor y manifestaban, con mucha mayor fuerza, los mismos fenómenos de atracción y repulsión generalizados como principios fundamentales en la física newtoniana.¹⁵

Sin embargo, el problema fundamental de los fluidos imponderables fue siempre la total imposibilidad de determinar su peso o alguna otra característica específica de un modo concluyente. Los fluidos sutiles poseían propiedades físicas pero no eran materiales, peculiaridad esta que los situaba en muchos sentidos al mismo nivel que las simpatías y principios herméticos de los alquimistas. Mientras la cuantificación seguía su curso, los fluidos sutiles empezaron a generalizarse de tal forma que el siglo XVIII terminó envuelto en una enmarañada tela de fluidos imponderables fundamentales asociados a cada principio motor responsable de cada nuevo fenómeno físico. La existencia y generalización de estos transportadores inmatrimales reforzó todavía más el creciente instrumentalismo de la física experimental e hizo cada vez más difícil establecer un compromiso ontológico con los resultados experimentales. Las fuerzas tendían entonces a ser consideradas como abstracciones matemáticas ajenas al mundo real, que permitían el cálculo y la predicción pero que nada tenían que decir de la comprensión verdadera de los fenómenos del mundo.

Paralelamente, a partir de 1750 la física experimental vuelve a posar su mirada renovada en la mecánica, en la firmeza de sus leyes y la precisión de sus cálculos. En 1782 F. K. Achard, miembro de la Academia de Ciencias de Berlín, pone de manifiesto la necesidad de calibrar los instrumentos de medida en orden a la importancia de la precisión y de la observación exacta de los fenómenos.¹⁶ Ejemplos paradigmáticos son el conjunto de observaciones de la variación magnética publicadas por van Swiden en 1767 y realizadas sistemáticamente a lo largo de diez años, y las tablas de pesos específicos publicadas por M.J. Brisson en 1787. La fiabilidad de los instrumentos y la precaución en la realización de las medidas se tornaban elementos fundamentales en la actividad de los nuevos físicos experimentalistas del último cuarto de siglo, inclinando cada vez más la balanza hacia la cuantificación instrumental, en detrimento de la función explicativa de los mecanismos sustentados en los fluidos imponderables.

1. 3. Experimentación y experimentalistas

A lo largo de la segunda mitad del siglo XVII y la mayor parte del siglo XVIII, se pueden distinguir cuatro grandes grupos humanos que desarrollaron la física experimental desde tratamientos y expectativas suficientemente diferenciadas: jesuitas y otras agrupaciones religiosas, académicos, profesores e investigadores independientes. Es sin duda de gran importancia definir la estructura característica de

¹⁵ En general, en la historiografía de la física experimental, la aparición de los fluidos sutiles o imponderables se hace coincidir con la interpretación de la mecánica newtoniana desde la teoría del éter, surgida ante las numerosas cuestiones que planteaba la inicial concepción newtoniana de la naturaleza a partir de la acción de fuerzas a distancia. En este sentido se puede interpretar la introducción de Roger Cotes a la segunda edición de los *Principia* en defensa de una teoría de la acción de las fuerzas a distancia. Cfr. Robert E. SCHOFIELD (1970), *Mechanism and Materialism: British Natural Philosophy in an Age of Reason*, Princeton. En realidad no existió en ningún momento una teoría definida de los fluidos imponderables, sino más bien una serie de recursos explicativos de diversa procedencia (luz, calor, electricidad, magnetismo, etc.), que acabaron disolviéndose en la teoría newtoniana del éter durante el siglo XIX. Véase HANKINS, Thomas L. (1985), *Ciencia e Ilustración*, Madrid, Siglo XXI, 1988, pp. 54-72.

¹⁶ Véase HEILBRON, J.L. (1982), *Elements of Early Modern Physics*, Berkeley, Univ. California Press, pp. 65-88.

cada uno de estos grupos para exponer de una forma global las diferentes vías de desarrollo de las ciencias, y más concretamente de la física experimental a lo largo del siglo XVIII.¹⁷

En el primero de estos grupos, los jesuitas, fueron mayoritariamente durante el siglo XVII los encargados de la formación de las élites ilustradas y académicas del Continente, y desarrollaron un buen número de observaciones sobre electricidad. La formación jesuita partía de la filosofía natural de Aristóteles, pero hacía un importante énfasis en la enseñanza de las matemáticas y el uso de maquinaria e instrumental técnico propio de la ingeniería militar y de la astronomía de posición. El impulso fundamental de las matemáticas en la formación de las órdenes religiosas estaba estrechamente vinculado con la tradición de la astronomía matemática cuya principal misión era la de "salvar las apariencias" celestes. Entre las restantes formaciones religiosas fue sobresaliente el papel desempeñado por la Orden de Monjes Mínimos, entre cuyos miembros destacaron M. Mersenne y E. Maignan. Pero por encima de todos los miembros de agrupaciones religiosas sobresalió la actividad del abate Jean-Antoine Nollet en el campo de la electricidad.

El grupo de los académicos se organizaba en dos tipos de sociedades claramente diferenciadas en sus estatutos fundacionales. Por un lado las Academias de las Ciencias de París, Berlín, o Bolonia, fueron los prototipos históricos de sociedades cerradas, fundadas y sostenidas por los respectivos monarcas, con un número fijo de miembros, y encargadas de desarrollar determinados programas de investigación de interés nacional, generalmente de gran envergadura y costosos presupuestos. Por otro lado, la *Royal Society* de Londres fue el paradigma de una sociedad científica abierta, conformada por un número variable de socios, y sostenida por sus propios miembros según sus respectivas posibilidades económicas. Tanto unas como otras recurrían a la creación de publicaciones periódicas donde se promovía el debate y confrontación de los resultados de las investigaciones realizadas por los miembros de cada una de ellas. Parece que, en los inicios de la física experimental, las sociedades abiertas tenían mayor libertad de planteamientos y sus contribuciones fueron las que desencadenaron los principales cursos experimentales que siguió la nueva física de la electricidad y el magnetismo.

El propósito principal de las academias fue el avance de las ciencias y de la tecnología. El peso creciente de este último componente técnico se debió sin duda a que un importante número de miembros de estas agrupaciones –sobre todo de las conformadas libremente– eran a su vez empresarios inquietos y promotores de nuevas industrias manufactureras o artesanales. Muchas de ellas incluían explícitamente en sus estatutos su oposición a la especulación escolástica, orientando sus objetivos hacia el conocimiento natural del mundo del que se podía derivar un evidente interés práctico. Las academias y las agrupaciones científicas promovieron igualmente la competición constante entre sus miembros a través de debates públicos y la concesión de premios, y sus miembros más potentados favorecieron las investigaciones a través de la subvención de los salarios y la adquisición del instrumental. Sin embargo, la inestable composición de muchas de estas sociedades, y su precario sustento

¹⁷ En esta parte de nuestra presentación de las diferentes vías de investigación que caracterizan la ciencia del siglo XVIII, seguiremos de cerca el análisis que hace Heilbron en el capítulo 2 de su estudio sobre los orígenes de la física experimental moderna: HEILBRON, J.L. (1982), *Elements of Early Modern...* op. cit, pp. 90-158. Con ello pretendemos aproximarnos brevemente a la amplísima confrontación de procedimientos experimentales, instrumentos e instituciones que abordan los diversos fenómenos físicos y químicos sobre los que se construirá la naciente química moderna, como ciencia plenamente diferenciada de la física teórica y experimental del siglo XVII. En el seno de esta panorámica sociológica de la ciencia del siglo XVIII se entrecruzan los diversos contextos de descubrimiento que posteriormente delimitarán los trabajos experimentales de Lavoisier sobre el calor y la estructura de la materia.

económico, fue promoviendo la progresiva sustitución de los premios por la concesión de honores académicos. Muestra de la importancia de las academias y sociedades científicas en el desarrollo de la física experimental del siglo XVIII es el nombre de algunos de los galardonados: Desaguliers, Canton, Franklin, Priestley, Volta, entre otros.

El tercer grupo de promotores de la experimentación fue el constituido por los profesores de universidades, colegios e instituciones asociadas, y escuelas profesionales. Las universidades de Oxford, Cambridge, Leiden, Göttingen, Bolonia y Pavia fueron las pioneras en la institucionalización académica de los nuevos métodos experimentales, pero los profesores no vinculados con academias y agrupaciones libres, en general, no practicaron una verdadera investigación en física experimental más allá de la demostración de experiencias como recurso didáctico durante la docencia. A lo largo de la segunda mitad del siglo XVIII, la progresiva institucionalización de los cursos de física experimental estuvo vinculada con las sucesivas reformas de las instituciones de enseñanza de los jesuitas por parte de los diferentes monarcas, tras las sucesivas guerras de religión que diezmaron Europa, potenciándose el mantenimiento de colecciones instrumentales en las diferentes universidades e instituciones docentes. Fue sin duda esta progresiva acumulación de instrumental cada vez más perfeccionado en las universidades y la continuidad presupuestaria, entre otras causas, la que contribuyó al traslado progresivo de la investigación experimental desde las sociedades de investigación hasta las universidades y academias nacionales a lo largo del siglo XIX.

Finalmente, hay que resaltar la labor de numerosos investigadores experimentales que desarrollaron su actividad al margen de las agrupaciones anteriormente mencionadas, aunque muchos de ellos acabaron colaborando con sociedades libres como *la Royal Society* de Londres. Son los casos representativos de Francis Hauksbee y Benjamin Franklin sin los cuales no podría reconstruirse el curso y los avances de la investigación de la electricidad.

Las diferentes teorías que resultaron de la actividad de estos grupos de experimentalistas se desarrollaron principalmente en los campos del calor, la electricidad y el magnetismo. El calor, el más común e inmediato de los fenómenos mencionados, fue el prototipo básico para la elaboración de las teorías de los fluidos sutiles. Parte integrante de la experiencia cotidiana, en la filosofía natural de Aristóteles su tratamiento era el de una cualidad, más o menos intensa, que escapaba a la cuantificación. Sin embargo, desde la construcción del termómetro por parte de Galileo en 1592, se iniciaron los debates acerca de la naturaleza y entidad que se correspondía con la expansión del mercurio en dicho instrumento. Las experiencias de Joseph Black pusieron de manifiesto que el termómetro no medía una entidad física llamada calor, sino una propiedad, la temperatura, que pronto empezó a asociarse con la densidad de un fluido calórico que pasaba de forma natural de los cuerpos más calientes a los más fríos, a partir de los trabajos de Lazare y Sadi Carnot sobre el rendimiento térmico. Las teorías acerca de la naturaleza del calórico durante el siglo XVII, siguiendo la crítica corpuscularista a la filosofía natural de Aristóteles, habían definido un conjunto de "partículas ígneas" o de fuego que únicamente expresaban el intercambio de una propiedad desconocida reflejada por la temperatura. Se trataba, por lo tanto, de partículas de una naturaleza especial que no alteraban las restantes cualidades físicas de los cuerpos que las emitían o las recibían.¹⁸

¹⁸ Sobre Black se puede acudir a los ensayos ya mencionados de Guerlac (véase nota 13). La obra de Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, publicada en 1824, a pesar de pasar bastante desapercibida en su momento, será la base sobre la cual se edificará la Termodinámica. Puede consultarse igualmente la traducción de la obra de CARNOT, Sadi (1824), *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, Madrid, Alianza, 1987. Para nuestro

Será a partir de los *Elementa chemiae* (1732) de Boerhaave cuando se establezca la teoría de que el termómetro mide la densidad de fluido calórico, afirmando una proporcionalidad cuantitativa entre la cantidad de calor presente en un cuerpo y su temperatura y volumen. Las posteriores experiencias de D. G. Fahrenheit y J. Black establecieron importantes correcciones cuantitativas al poner de manifiesto que la cantidad de calor "contenida" en un cuerpo no era proporcional ni a su volumen ni a su masa. Surgía de este modo el problema de la capacidad calórica de los cuerpos y del calor latente de las diferentes sustancias, que sólo pudo ser resuelto por J. C. Wilcke, W. Irvine, G. Fordyce y B. Thompson, apelando a un conjunto de experimentos cuantitativos que debilitaron considerablemente, en la última década del siglo XVIII, los presupuestos de una teoría del calórico basada en el intercambio de un fluido imponderable.¹⁹

En el campo de la electricidad, la física experimental encontró los fenómenos más asombrosos. Durante la primera mitad del siglo XVIII se pudo comprobar que numerosos materiales podían ser electrificados por fricción manifestando atracciones y repulsiones mutuas que aproximaban los fenómenos eléctricos a la teoría newtoniana de la gravitación. Pero fue, sin duda, a partir de 1746 cuando el descubrimiento de la botella de Leiden permitió acumular grandes cargas eléctricas que hicieron posible controlar la atracción eléctrica a diferentes escalas de una forma que no admitía la atracción gravitatoria. Las cometas eléctricas y los pararrayos acercaron los fenómenos naturales a gran escala a la investigación de laboratorio hasta el momento dedicada a proporcionar efectos espectaculares con los que entretener al público.²⁰

Desde las investigaciones de R. Boyle con la electricidad en el vacío –la incandescencia en el vacío o luz barométrica– se había abierto el debate acerca del medio de transmisión de los fenómenos eléctricos. Las experiencias de Francis Hauksbee con un globo giratorio de vidrio y diferentes materiales le permitieron plantear –con un claro paralelismo en la teoría del calórico– que un efluio eléctrico transportado por el globo giratorio transmitía la electricidad a otros materiales que se acercaban a él. En 1729 Stephen Gray descubría que la electricidad podía ser comunicada por contacto continuo a largas distancia, lo que pareció probar la existencia de un fluido eléctrico que se transportaba a lo largo de los cuerpos en contacto con la fuente. Estos nuevos descubrimientos iniciaron un conjunto de diversas experiencias orientadas a estudiar la capacidad conductora de los diferentes materiales y al descubrimiento de la electrificación por inducción de los metales expuesta por Ch.-F.C. Dufay en 1733. Fue el mismo Dufay el que definió dos tipos de electricidad: una "resinosa" –obtenida por la frotación de sustancias como el ámbar– y otra "vítrea" –obtenida de la frotación del vidrio–, que se atraían mutuamente pero repelían a las de su misma naturaleza. Posteriormente el abate Nollet interpretó estos dos tipos de electricidad como resultado del movimiento de dos fluidos eléctricos que

caso, resultan de gran interés los ensayos de BARNETT, Martin K. (1956), "The Development of Thermometry and the Temperature Concept", *Osiris*, Vol. 12, pp. 269-341, y FENBY, David V. (1987), "Heat: Its measurement from Galileo to Lavoisier", *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 59, No. 1, pp. 91–100.

¹⁹ Los trabajos de Boerhaave sobre el calor fijado en los cuerpos serán fundamentales para la apertura de nuevas vías de investigación acerca de la naturaleza cuantitativa del calor. Cfr. KERKER, Milton (1955), "Herman Boerhaave and the Development of Pneumatic Chemistry", *Isis*, Vol. 46, No. 1. (Mar.), pp. 36-49.

²⁰ La botella de Leiden, ideada por Ewald Georg von Kleist y descrita posteriormente por Pieter van Musschenbroek en Leiden (Holanda) a comienzos de la década de 1740, es uno de esos ejemplos a través de los cuales se pone de manifiesto cómo un nuevo dispositivo sin demasiado interés –sus primeros usos fueron las demostraciones y los entretenimientos de salón, de los que ya hemos hablado (cfr. nota 5)–, permite el acercamiento a un nuevo campo de fenómenos que hasta el momento permanecían ajenos al conocimiento científico.

se desplazaban en sentidos contrarios desde las fuentes o cuerpos electrificados. Alternativamente, Benjamin Franklin, centrado en los fenómenos eléctricos naturales e influenciado por el éter espacial de Newton, planteó una teoría eléctrica basada en el movimiento de un único fluido que constituía una atmósfera eléctrica estática alrededor de la Tierra. La segunda mitad del siglo XVIII presenta los espectaculares experimentos atmosférico-eléctricos de Franklin que contribuyeron a caracterizar y precisar su teoría del fluido eléctrico único: las dos electricidades descubiertas por Dufay y teorizadas por Nollet se transformaban en el exceso o la deficiencia del fluido único definido por Franklin.²¹

En las últimas décadas del siglo XVIII, se pone de manifiesto un giro operacional en las investigaciones eléctricas desarrolladas por F. U. Th. Aepinus, A. Volta, Ch. A. Coulomb y H. Cavendish, que terminaron desarrollando una incipiente teoría cuantitativa de la corriente eléctrica y toda una instrumentación de medida que permitiría el establecimiento de las primeras leyes cuantitativas de la electricidad. La naturaleza del fluido sutil fue cambiando progresivamente hasta prescindir de las atmósferas eléctricas de Franklin y los efluvios de Nollet. La medición de la resistividad, la capacitancia, la tensión eléctrica y la fuerza de atracción entre las cargas que se empezaba a plantear como fundamento de los nuevos experimentos eléctricos era reflejo de la nueva orientación de los estudios experimentales de la electricidad a comienzos del siglo XIX.²²

Diferentes fenómenos físicos que hoy sabemos asociados con la estructura de la materia, diversas técnicas instrumentales alrededor del uso del fuego controlado en el laboratorio, y un vasto abanico de investigadores individuales y colectivos, nos permiten examinar, a continuación, el caso concreto de los experimentos sobre el calor de Lavoisier y D'Alembert de la década de 1770. En nuestro análisis gnoseológico de dichas investigaciones intentaremos poner de manifiesto los elementos fundamentales que caracterizan lo que conocemos como conocimiento científico tendiendo un puente entre los clásicos contextos de descubrimiento y de justificación desde el seno de la propia investigación científica del siglo XVIII. Con ello esperamos poner de manifiesto la relevancia de una *teoría morfológica de las ciencias* elaborada a partir de los "contextos de modelización", resultantes de la propia investigación científica como actividad llevada a cabo por sujetos gnoseológicos que operan con diferentes materiales, siguiendo cursos operatorios algunos de los cuales llegan a fructificar, contextualizadamente, en aquellos teoremas que constituyen el armazón de cualquier ciencia.²³ Veamos cómo se elaboran las primeras morfologías (entramados de

²¹ Las nuevas perspectivas que se abren en el campo de los fluidos elásticos desde el ámbito de los fenómenos eléctricos son turbadoras. Puede seguirse una parte de estas investigaciones en los experimentos de Benjamín Franklin: FRANKLIN, Benjamín (1988), *Experimentos y observaciones sobre electricidad*, Madrid, Alianza Editorial.

²² Cfr. HEILBRON, J. L. (1979), *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, Berkeley/Los Angeles/London, University of California Press.

²³ La idea de un contexto de modelización no es nueva. Ha sido sugerida por David Calvo como una corrección de la epistemología neopositivista en la que se establecía la dicotomía entre "contexto de descubrimiento" y "contexto de justificación", tomando como referencia el papel de los modelos en las ciencias físicas. Véase CALVO, David (2004), "Los tres contextos de la investigación científica: descubrimiento, modelización, justificación", en RIVADULLA, Andrés (Ed.) (2004), *Hipótesis y verdad en ciencia. Ensayos sobre la filosofía de Karl R. Popper*, Editorial Complutense, Madrid, pp. 179-191. Desde la perspectiva gnoseológica que venimos proponiendo los "contextos de modelización" –en plural– hacen de puente en el abismo positivista como resultado de la propia actividad experimental de los científicos: no constituyen el ámbito o parcela de una epistemología que aspira a definir la naturaleza de los enunciados científicos en vías de constitución que esperan ser justificados finalmente, sino las

operaciones, relaciones, principios, identidades, proposiciones y teoremas) de la naciente química moderna.

2. Conocimiento experimental y matemáticas

Hemos visto cómo el siglo XVII había hecho florecer a numerosos experimentalistas como Edmé Mariotte, Robert Boyle, o el mismo Isaac Newton, pero el primer gran impulso en favor de un método experimental cuantitativo fue desarrollado posteriormente durante la Ilustración. Será durante el gran proyecto ilustrado de la *Encyclopédie* cuando se defiendan las opciones que el conocimiento matemático podía aportar en el examen de los cuerpos terrestres. D'Alembert señalaba en su "Discurso preliminar" a la *Encyclopédie*:

Ya de lleno en el mundo corporal, advertimos en seguida el uso que podemos hacer de la Geometría y de la Mecánica para adquirir sobre las propiedades de los cuerpos los conocimientos más variados y profundos... No es menor el uso de los conocimientos matemáticos en el examen de los cuerpos terrestres que nos rodean. Todas las propiedades que observamos en estos cuerpos tienen entre ellos relaciones más o menos sensibles para nosotros: el conocimiento o el descubrimiento de estas relaciones es casi siempre el único fin que nos es dado conseguir, y el único, por consiguiente, que debiéramos proponernos... Tal es el plan que tenemos que seguir en esa extensa parte de la física llamada Física general y experimental.²⁴

El papel de las matemáticas en la física fue el centro de un gran debate en Europa durante el siglo XVIII: Diderot, Buffon o Franklin abogaron por un uso limitado de las matemáticas que no apartara al físico de la Naturaleza distrayéndolo con formulaciones abstractas; D'Alembert, Condorcet o Voltaire, señalaron una y otra vez que toda experimentación sin matemáticas se reducía en último término a juegos de salón. Por "ciencias físico-matemáticas" se entendían aquellas que "mediante la aplicación de los cálculos matemáticos a la experiencia, deducen a veces de una sola y única observación un gran número de consecuencias estrechamente ligadas por su exactitud a las verdades geométricas".²⁵ La física experimental en la práctica, no podía contar en ningún caso con los fundamentos teóricos necesarios para una deducción tan estrechamente ligada a "las verdades geométricas". En su conjunto, las ciencias definidas en el siglo XVIII por dicho término se encontraban todavía decidiendo cómo denominar a los fenómenos que consideraban como sus objetos propios de estudio.

La mayoría de los experimentalistas rechazaban las matemáticas por cuestiones de muy diversa índole: desde metodológicas hasta metafísicas. Para los más perspicaces, estaba claro que el ideal de las ciencias estaba representado por la astronomía matemática o la mecánica. Sin embargo, era necesario percatarse de las diferentes etapas que habían transcurrido en el desarrollo y configuración de las ciencias físicas tradicionales, e iniciar el camino que debía seguir la nueva física experimental. Entre 1715 y 1740 se llevó a cabo una importante labor educativa entre los físicos experimentales, sobre todo de la mano de los físicos holandeses –Hermann

armaduras o entramados materiales y de operaciones desde los que se aborda la investigación científica en sí misma.

²⁴ D'ALEMBERT, Jean (1751), *Discurso preliminar...*, op. cit., pp. 52-54. El conjunto de los matemáticos del siglo XVIII asumía que la física debía aceptar los principios que ya estableciera Descartes en 1644: "No admito en física principios distintos a los de las matemáticas, porque todos los fenómenos de la naturaleza pueden explicarse y demostrarse a partir de ellos", DESCARTES, René & LEIBNIZ, G.W. (1989), *Sobre los principios de la filosofía...*, p. 121.

²⁵ D'ALEMBERT, Jean (1751), *Discurso preliminar...*, op. cit., p. 54.

Boerhaave, Willem 'sGravesande, Pieter van Musschenbroek, entre otros—, que incidieron abiertamente en la necesidad del rigor y la precisión informativa en relación con la experimentación realizada en campos como el calor, la electricidad y el magnetismo. Los trabajos de Willem 'sGravesande señalan en aquellas décadas la importancia de las matemáticas en las ciencias experimentales pero centran su principal propósito en la descripción precisa de los experimentos y del instrumental empleado —es el caso de su obra más conocida y pronto traducida a otras lenguas: *Physices elementa mathematica experimentis confirmata sive, introductio ad philosophiam Newtonianam* (1720)—. Primero era necesario homologar los fenómenos; luego llegará el momento de proponer teorías sobre la naturaleza de los mismos. Como señala repetidamente J. L. Heilbron, disponer de buenos instrumentos de medida era necesario para establecer relaciones cuantitativas, pero para que las relaciones sean significativas es necesario el respaldo de una teoría, aunque solo sea una teoría instrumentalista.²⁶

3. El calor y los fluidos sutiles

En la década de 1740 se desencadenó una polémica relectura de la obra newtoniana y surgieron discrepancias entre los físicos acerca de la valoración de las diferentes teorías de Newton contenidas en los *Principia* (1687) y en la *Opticks* (1704). La aceptación hasta ese momento de las circunstancias que rodeaban la actuación a distancia de las fuerzas newtonianas dispersas por el universo sufrió un importante giro cuando se publicaron en 1744 unas famosas cartas en las que Newton exponía a Boyle (1679) y a Bentley (1692) su teoría del éter como sustento físico de la acción a distancia de la fuerza de gravedad. La progresiva caracterización de los fenómenos eléctricos y magnéticos encontró una vía de explicación cualitativa en las propiedades de este éter newtoniano y contó desde aquel momento con una importante conexión teórica con los desarrollos de la física newtoniana a lo largo del siglo XVIII. Los fenómenos eléctricos y magnéticos favorecieron por su parte la aceptación progresiva de la nueva revisión de la naturaleza de las fuerzas newtonianas, y la física de Newton, con su propuesta de un éter imponderable y perfecto, permitió el desarrollo de teorías cualitativas acerca de la naturaleza de los inciertos fenómenos de la física experimental que abrían las puertas a una nueva orientación metodológica.

Los fluidos sutiles pronto empezaron a dominar el espectro explicativo de las teorías físicas durante la segunda mitad del siglo XVIII. La gravitación, la luz, el calor, la electricidad, el magnetismo, la combustión, etc., eran susceptibles de desarrollarse como fenómenos físicos dependientes del movimiento de un fluido sutil que servía de soporte a unos efectos físicos que podían experimentarse en el laboratorio. Como sustancias físicas que eran poseían propiedades físicas, como el movimiento, pero al no estar constituidos de materia ordinaria, no transmitían ninguna masa a lo largo del proceso de experimentación. Su principal papel era permitir y favorecer la transmisión de los efectos descritos en las experiencias calóricas y eléctricas sin afectar de forma directa a las propiedades primarias conocidas de los componentes implicados en la experiencia. Pronto se aplicaron los desarrollos matemáticos fundamentales de la hidrodinámica y se estableció la posibilidad de realizar estimaciones de “concentraciones”, como la “carga” y la “capacidad”, en función de que la densidad del

²⁶ “The availability of good measuring instruments helped supply pressure for the establishment of quantitative relations between physical parameters. Numerical tables, some worked out to crowds of illusory decimals, were duly filled up by experimentalists. To obtain significant relations, however, a theory was required, and often an instrumentalist one.”: HEILBRON, J.L. (1982), *Elements of Early Modern...*, op. cit., p. 75.

fluido era proporcional a la intensidad del efecto. Al ser los fluidos sutiles considerados como sustancias físicas, cuantificaciones primarias como la temperatura empezaron a ser comprensibles al considerarse como una medida de la concentración del fluido calórico en cada objeto.²⁷

Sin embargo, considerados como propuestas teóricas satisfactorias, los fluidos sutiles siempre recordaron a los principios alquímicos y a las simpatías y antipatías herméticas. Como constituyentes ambiguos del mundo físico tampoco soportaron los triunfos de la cuantificación, y a medida que se fueron desarrollando los primeros resultados cuantitativos de los nuevos fenómenos y se fueron sentando las primeras relaciones matemáticas simples entre ellos, las nuevas propiedades físicas fueron relegando el papel de estas primeras explicaciones cualitativas conforme la cuantificación fue dando paso a la medición sistemática de nuevas propiedades mucho menos primarias y evidentes. En la etapa final de esta dinámica por desarrollar los fundamentos cualitativos que permitieran la cuantificación primaria de los nuevos fenómenos, se pueden situar los trabajos fisico-químicos de Lavoisier realizados durante las últimas décadas del siglo. Para Lavoisier no se trataba, como veremos, de matematizar la física experimental sino de establecer y generalizar un marco de control sistemático de la experimentación.

4. La experimentación y la medida

Antes de pasar al análisis de los importantes experimentos cuantitativos de Lavoisier –podríamos hablar de un proyecto de cuantificación sistemática–, convendría hacer algunas consideraciones acerca del trasfondo conceptual que va a guiar nuestra investigación. En primer lugar, experimentar es observar, y preguntarse cualquier cuestión acerca de la lógica del descubrimiento científico supone tener presente una teoría sobre la observación científica. Desde la perspectiva gnoseológica que vamos a desarrollar no podemos, por tanto, sustraernos a la necesidad de que, como indicara N. R. Hanson en un relevante y ya clásico ensayo:

La visión es una acción que lleva una ‘carga teórica’. La observación de x está moldeada por un conocimiento previo de x. El lenguaje o las notaciones usados para expresar lo que conocemos, y sin los cuales habría muy poco que pudiera reconocerse como conocimiento, ejercen también influencias sobre las observaciones.²⁸

Dicho esto, no cabe contemplar investigación alguna como independiente de las posibilidades teóricas posibles que se desplegaron en el momento de su configuración histórica. La investigación científica se ve insertada necesariamente en el seno de un proceso histórico, aun cuando el investigador individual no se considere dependiente o condicionado por teoría alguna al diseñar e interpretar sus propuestas experimentales. No obstante, observar no es necesariamente interpretar. Sólo en este caso, y desde una crítica a la epistemología positivista, se podría aceptar plenamente la afirmación de Hanson. La historia de las ciencias nos muestra infinidad de fenómenos sorprendentes o sin sentido que carecen de marco teórico y no por ello dejan de ser fruto de una observación planificada (en ocasiones, técnicamente compleja). La observación, por tanto, no siempre permite discernir entre teorías

²⁷ La proliferación de teorías que vinculaban estrechamente el concepto de fuerza y los fluidos elásticos es un elemento señalado por J. L. Heilbron como de vital importancia en el desarrollo de la cuantificación en física experimental durante el siglo XVIII: HEILBRON (1982), *Elements of Early Modern Physics*, op. cit., pp. 55-88.

²⁸ HANSON, N. R. (1958/1971), *Patrones de descubrimiento. Observación y explicación*, Madrid, Alianza Editorial, 1977, p. 99.

alternativas.²⁹ En el caso de Lavoisier, sin embargo, el químico francés expresó claramente en numerosas ocasiones que los resultados de sus experimentos no permitían decidir entre teorías alternativas. ¿Qué teoría establecía pues los límites de su labor experimental?

La labor experimental de Lavoisier puede considerarse localizada en el periodo final de un proceso generalizado de cuantificación progresiva en la física experimental. Sus experiencias de laboratorio supusieron además un renovado impulso en la configuración de la nueva ciencia química. En este sentido, creemos conveniente revisar la clásica diferenciación que en su momento estableciera T. S. Kuhn entre los términos “experimento” y “medición”:

Al insistir en que es una condición indispensable un cuerpo de teoría muy desarrollado para realizar mediciones fructíferas en la física, parece que quiero decir que en esta ciencia la teoría debe conducir siempre al experimento y que el papel de éste es, definitivamente, secundario. Pero tal implicación depende de identificar ‘experimento’ con ‘medición’, identificación que ya reprobé explícitamente. Sólo porque la comparación cuantitativa de teorías con la naturaleza llega en una etapa tan tardía del desarrollo de una ciencia es que la teoría parece ser una guía decisiva.³⁰

Aunque no compartimos en su totalidad la posición de Kuhn, desde el planteamiento gnoseológico que vamos a desarrollar, podemos considerar que experimento es todo aquel proceso de investigación dirigida que extrae de la naturaleza una información particular y discreta, localizada por un entorno característico que permite su repetibilidad. Fuera de estas condiciones el experimento se diluye en una observación natural, periódica, en el mejor de los casos, o extraordinaria y dispersa en su generalidad. El experimento puede incluir pautas de observación cualitativas y cuantitativas, pero sólo alcanza el nivel de la medición cuando las pautas cuantitativas alcanzan el grado más alto de definición e implicación con los contenidos conceptuales de la teoría.

Vamos a considerar pues que existen una serie de “experimentos” que no alcanzan a ser procesos de “medición”, pero que sin embargo desarrollan pautas cuantitativas indirectas o sostenidas por teorías cualitativas: podríamos considerarlos como procedimientos de *creación de fenómenos*.³¹ De este modo, las disciplinas experimentales supondrían, en su conjunto, todas aquellas experiencias diseñadas de antemano bajo soporte teórico de diversa índole, algunas de las cuales contarían con pautas de cuantificación indirecta –estableciendo procesos de cuantificación de cualidades ambiguas que todavía no alcanzan el status de propiedades físicas teóricamente coherentes–, y otras con pautas de medición de propiedades físicas definidas expresamente por la teoría. “Experimento” y “medición” solamente coincidirían en el caso de la última clase de diseños experimentales señalados, normalmente asociados con la labor realizada por la ciencia en periodos “normales” según el esquema de las revoluciones científicas de Kuhn. Los experimentos realizados durante los períodos “de crisis” serían experiencias reveladoras de fenómenos nuevos y experiencias de cuantificación indirecta de los mismos –estos

²⁹ Sobre este importante debate de la actual epistemología de la ciencia puede consultarse el ensayo de HACKING, Ian (1983), *Representar e intervenir*, México, Paidós, 1996, pp. 177-214. El dilema entre teoría y observación, fruto del horror metafísico de los positivistas, se analiza en el ensayo de MAXWELL, Grover (1962), “El estatus ontológico de las entidades teóricas”, en OLIVÉ, L. & PÉREZ RANSANZ, A. R. (Comp.) (1989), *Filosofía de la ciencia: Teoría y observación*, Madrid, Siglo XXI, pp. 116-144.

³⁰ KUHN, T. S. (1961), “La función de la medición en la física moderna”, en KUHN, T. S. (1993), *La tensión esencial*, México, F.C.E., p. 225.

³¹ Cfr. HACKING, Ian (1983), *Representar e intervenir*, op. cit., pp. 261-274.

últimos coincidirían aproximadamente con los que Kuhn denomina procedimientos de “medición extraordinaria”-.³²

El matiz introducido entre experimentación y medición creemos ayudará a evaluar con mayor precisión las condiciones en las que se llevaron a cabo los experimentos de Lavoisier sobre el calor y el análisis del aire atmosférico. En cualquier caso se puede considerar que la medición refleja, en última instancia, un papel predominante en la construcción de las ciencias por otros motivos de carácter metacientífico y filosófico. En particular, y citando las pertinentes reflexiones de G. Bueno:

Si se encarece la importancia de la medida en la ciencia física ello no es debido a que la medida sea, por sí misma, una operación científica; sino porque la medida supone unidades, y las unidades son conformaciones privilegiadas del material. Medir es reconstruir, a partir de términos, relaciones internas, dispuestas en clases; en este sentido medir es clasificar, conformar. Los conglomerados que así se forman (planetas en un sistema, células en un organismo, &c.) son los que van vinculados a la ciencia, ante todo, porque la ciencia se ha vinculado a ellos. No habría ningún motivo para afirmar que ello se debe a que la realidad, ‘en su fondo’, es así. Más exacto será decir que los ‘conglomerados categoriales’ son aquellos aspectos de la realidad del mundo que resultan de la manipulación de nuestras operaciones (sobre todo, aritméticas y geométricas). Miramos a la realidad a la luz del farol aritmético o geométrico, no porque con estas luces penetremos ‘en el fondo’ de la materia (como si ella ‘estuviera escrita en caracteres matemáticos’), sino porque sólo con estas luces percibimos contornos de ‘conglomerados cerrados’ coordinables con su ‘longitud de onda’. Las ciencias, en cuanto que establecen verdades, se refieren, desde luego, a la realidad, pero más que porque ‘penetran en ella’, porque son ciertas partes de la realidad misma las que quedan incorporadas a las cadenas constitutivas del cuerpo científico.³³

La medición tiene la capacidad de fijar en cifras las relaciones entre las propiedades físicas que se encuentran en el fondo de la planificación experimental. Este desenvolvimiento numérico final, que tuvo su origen en planteamientos cualitativos y especulativos diversos, tiene la virtud de expresar del modo más directo la significatividad de la experimentación científica y de establecer la línea de continuidad básica y acumulativa de las investigaciones futuras. Es a través de la medición donde la teoría entra en contacto realmente con el mundo físico: porque medir es relacionar, comparar, clasificar, operaciones que aíslan unas partes del mundo de otras permitiendo su tratamiento y manipulación, la reconstrucción de la realidad en un contexto significativo.

El planteamiento gnoseológico que vamos a ensayar se interesa por la construcción operatoria de las ciencias más que por su justificación pragmática o por su génesis histórica. Se trata de una propuesta de teoría morfológica de las ciencias

³² Ibidem. pp. 225-237. En cualquier caso, asentimos al principio general propuesto por Kuhn de que: “El camino de la ley científica a la medición científica rara vez puede recorrerse en sentido inverso”, p. 243. Una refrescante revisión/relectura de la obra kuhniana se encuentra en el ensayo de BELTRÁN MARÍ, Antonio (1998), “T.S. Kuhn. De historia, de filosofía y de pájaros”, en SOLÍS, Carlos (Ed.) (1998), *Alta tensión. Filosofía, sociología e historia de la ciencia*, Barcelona, Paidós, pp. 111-143.

³³ BUENO, Gustavo (1993), *Teoría del cierre categorial*, vol. 3., Oviedo, Pentalfa, p. 134. Hay que reconocer el esfuerzo realizado en los últimos años por parte de Gustavo Bueno en la renovación del análisis gnoseológico de las ciencias a través de diferentes trabajos de su primera época: *Ensayos materialistas* (1972), “El cierre categorial aplicado a las ciencias físico-químicas” (1982) o *Teoría del cierre categorial* (1992-1993), de un alcance muy superior a los desarrollos posteriores de su filosofía.

que desarrolla el morfologismo filosófico de tradición aristotélica cuyo canon ontológico, gnoseológico y ético es la escala del cuerpo humano frente a cualquier reduccionismo fisicoquímico o genético. Esta propuesta se puede considerar heredera de la tradición filosófica que, partiendo de Aristóteles, recorre la obra de filósofos como Spinoza, Leibniz, Goethe, Poincaré, Thom,..., incluye una lógica de los todos y las partes, y está inserta en el reciente "giro morfológico" que ha experimentado la filosofía a partir de la incorporación de la singularidad topológica en el sentido de René Thom. El morfologismo actual es una ontología *postcrítica* que plantea el análisis de los principios generales de la estructura de la realidad y donde la posición trascendental kantiana ha sido llevada más allá de cualquier proyecto idealista. Como señala Pérez Herranz:

El morfologismo es un materialismo porque considera lo humano como un ser más dado en el mundo, sin ningún privilegio respecto del conocimiento, ni de la práctica, ni de la estética, ni de la evolución. Pero en el materialismo (como en el idealismo) sin adjetivar cabe cualquier cosa. Por eso diremos que es un materialismo argumentado mediante el método trascendental: se ocupa y preocupa por clarificar las estructuras de nuestro conocer, por las estructuras que hacen posible que los conceptos involucrados en los juicios se refieran a objetos o hechos del mundo objetivo... Trascendental equivale a establecer las determinaciones del sujeto que se suponen constitutivas del objeto, de las condiciones de posibilidad de ese objeto.³⁴

En el morfologismo filosófico, si algo alcanza el grado de trascendentalidad no es por una inalcanzable condición metafísica sino porque ha manifestado su naturaleza límite³⁵: el *sujeto trascendental* como *sujeto corpóreo operatorio* y su *lenguaje* como condiciones inmanentes de la racionalidad humana plantean el problema desde nuevos horizontes. Son así las condiciones de los sistemas dinámicos, las morfologías implícitas en las producciones de la racionalidad humana, las que exigen un esfuerzo filosófico alejado del reduccionismo científico.³⁶

Según estos rápidos trazos, el morfologismo filosófico nos permite elaborar una propuesta de teoría morfológica de las ciencias desde los propios componentes operatorios de las ciencias: *fenómenos*, *signos materiales*, *operaciones* manuales e instrumentales, *instituciones*, *relaciones* a través de procesos, *relaciones de identidad*, o *estructuras sistemáticas*, conducirán nuestro análisis filosófico a través de las

³⁴ PÉREZ HERRANZ, Fernando (2006), "El 'giro morfológico': la forma, condición del sentido", *Quaderns de filosofia i ciència*, 36, p. 70. Sobre la Idea de "forma", véase PÉREZ HERRANZ, Fernando (1998), *Árthra he péphyken: las articulaciones naturales de la filosofía*, Alicante, Universidad de Alicante, pp. 182-194.

³⁵ Kant señala en la Introducción a la *Crítica de la Razón Pura* [B 25]: "Llamo *trascendental* todo conocimiento que se ocupa no tanto de los objetos, cuanto de nuestro modo de conocerlos, en cuanto que tal modo ha de ser posible *a priori*", KANT, Immanuel (1781), *Crítica de la Razón Pura*, Alfaguara, Madrid, 2000, p. 58 (las cursivas son de Kant). Sobre la trascendentalidad kantiana véase la "relectura" que hace Martínez Marzoa en MARTINEZ MARZOA, Felipe (1989), *Releer a Kant*, Anthropos, Barcelona, pp. 25-41.

³⁶ Apunta René Thom acerca del papel de la experiencia y la experimentación en la construcción de las ciencias: "La concepción positivista contiene, en mi opinión, un grave error: puede llegar a la insignificancia. Si nos limitamos a describir la realidad, no se plantea ningún obstáculo. Pero el problema no es describir la realidad, sino aislar en ella lo que tiene sentido para nosotros, lo que es sorprendente en el conjunto de los hechos. Si los hechos no nos sorprenden, no aportarán ningún elemento nuevo a la comprensión del universo. Lo mismo da ignorarlos", en THOM, René (1980), *Parábolas y catástrofes. Entrevista sobre matemática, ciencia y filosofía*, Barcelona, Tusquets, 2000, p. 136.

ciencias construidas como campos cerrados, sometidos a categorías, donde diferentes esquemas morfológicos de la racionalidad a escala del sujeto operatorio se despliegan en el tiempo como “filtros gnoseológicos” internos a cada ciencia, permitiendo la construcción de los teoremas científicos sobre las relaciones de identidad que resultan de la investigación científica a lo largo del tiempo. Cada marco de investigación –cada hipótesis regulativa–, cada descubrimiento –cada relación de identidad–, a lo largo del tiempo constituye un momento de configuración morfológica del campo científico. Se disuelve en cierto modo, a través del análisis gnoseológico, el dilema fundamental entre la dimensión sincrónica y diacrónica de las teorías científicas en la última filosofía de la ciencia del siglo XX.³⁷ Pasemos a analizar la capacidad de los químicos del siglo XVIII para desarrollar *totalidades sistemáticas*.

5. El “método experimental” de Lavoisier

A finales del siglo XVII, las siguientes palabras de Fontenelle nos permiten poner de manifiesto la dificultad que existía –y existirá durante todo el siglo siguiente– a la hora de establecer con precisión las fronteras entre la física y la química en el seno de las nuevas disciplinas que se están empezando a desarrollar aceleradamente bajo el nombre de “física experimental”:

La Química, a través de operaciones visibles, descompone los cuerpos en unos principios genéricos y palpables, sales, azufres, etc., pero la Física, a través de delicadas especulaciones, actúa sobre los principios igual que la Química lo hace sobre los cuerpos; los descompone a su vez en unos principios todavía más sencillos, en pequeños cuerpos dotados de formas y movimientos infinitos... La esencia de la Química es más confusa, más intrincada; se asemeja más a las mezclas, en las cuales los principios están más entrelazados unos con otros; la esencia de la Física es más sencilla, más clara y se remonta a los primeros orígenes del mundo, mientras que la otra se queda a medio camino.³⁸

Como acertadamente comenta Isabelle Stengers, resulta imposible distinguir de un modo absoluto entre física y química, en el contexto cartesiano en el que podemos situar expresiones como “pequeños cuerpos dotados de formas y movimientos infinitos”. La química adquiere la apariencia de un híbrido definido menos por su dependencia de la teoría que por su utilidad y experimentación práctica.

No sólo Fontenelle era consciente de las dificultades implícitas en el establecimiento de las fronteras entre la física y la química. En el artículo “Química” publicado en el tercer volumen de la *Encyclopédie*, en 1753, Gabriel-François Venel, químico y médico amigo de Diderot, apuntaba expresamente a los campos del calor y los estados de agregación de la materia como las fronteras más polémicas entre la física y la química durante el siglo XVIII.³⁹ La elección de estos dos temas de investigación nos indica sin embargo, no tanto la orientación física de Lavoisier como

³⁷ Puede verse un completo análisis y clasificación de las diferentes filosofías de la ciencia del pasado siglo, desde una perspectiva gnoseológica, en los ensayos de HIDALGO, Alberto (1990), “Estrategias metacientíficas” I & II, *El Basilisco* 2ª Epoca, 5 & 6, Oviedo, pp. 19-40 y 26-48, respectivamente. Un reciente análisis del tránsito entre teorías científicas, desde la epistemología de los modelos de dinámica científica, que trata el abandono de la teoría del flogisto es el estudio realizado por Anna Estany: ESTANY, Anna (1990), *Modelos de cambio científico*, Barcelona, Crítica.

³⁸ Citado en STENGERS, Isabelle (1989), “La afinidad ambigua: el sueño newtoniano de la química del siglo XVIII”, en SERRES, Michel (Ed.) (1989), *Historia de las ciencias*, Madrid, Cátedra, 1998, p. 338.

³⁹ BENSUAUDE-VINCENT, Bernadette (1989), “Lavoisier: una revolución científica”, en SERRES, Michel (Ed.), *Historia de las ciencias*, op. cit., p. 414.

las bases de su formación. Su estrecha y continuada colaboración con diferentes físicos de la *Académie Royale des Sciences*, desde 1768, y su consideración personal como *physicien*, aparecen, a la luz de su *Traité élémentaire de chimie* (1789), como un elemento más de este significativo momento histórico de configuración de la química en el seno de la física experimental.⁴⁰

El tratamiento que Lavoisier aplicará al estudio del calor y a los agregados de la materia no es independiente ni separable de su metodología experimental. La mayor parte de los experimentos que realizó no eran ni siquiera nuevas experiencias, sino que formaban parte de una sistemática reformulación de los problemas alrededor de los cuales se discutía sobre las fronteras entre la física y la química como ciencias experimentales. Lavoisier siguió un método experimental único definido por la utilización generalizada y sistemática de la balanza. Su primer objetivo no era la medición como proceso de obtención de valores precisos de una propiedad física característica, sino el control de la experimentación, la generalización del instrumental y los dispositivos experimentales, así como la elaboración de un marco teórico de control de las cifras de los resultados indirectos que se obtenían a través de la experimentación en aquel momento, a través de la propuesta de un sistema de medición internacional y de un modelo de evaluación del error de las medidas experimentales. Lavoisier sabía que, para decidir entre las diversas especulaciones teóricas que aspiraban a guiar la investigación experimental, no bastaba con el aumento de precisión en las descripciones de los diseños y resultados, sino que se hacía necesario un paso más que permitiera establecer algunas relaciones primarias entre los nuevos fenómenos de la física y las entidades cuantificables primarias –como el peso y el volumen–: la caracterización cuantitativa de los experimentos, aun en ausencia de una clara noción de lo que se pretendía medir. Para Lavoisier todo debía ser resuelto en el laboratorio a través de diseños experimentales que tuvieran en cuenta todas las variables cuantificables, fueran o no pertinentes en la evaluación y determinación del fenómeno en cuestión. La realización de pesadas de todos los elementos y componentes del experimento pronto empieza a definir la vía seguida por el método experimental de Lavoisier, y apunta a la necesaria colaboración de éste con sus colegas físicos más versados en la aplicación de técnicas matemáticas para organizar, estructurar y corregir significativamente los resultados obtenidos. Las operaciones llevadas a cabo en los laboratorios del siglo XVIII seguían los esquemas instrumentales heredados de la alquimia y la filosofía natural de los últimos tres siglos: escaso control sobre el entorno experimental, asistematismo en la cuantificación significativa de cualidades primarias, atención preferente a las manifestaciones visuales directas en los procedimientos de transformación (cualidades secundarias como el color, olor, efervescencia, etc.), y un uso abusivo de explicaciones *ad hoc* en el seno de un corpuscularismo especulativo, hacían difícil la comparación de los resultados de las investigaciones, la eliminación de hipótesis y la elaboración de teorías más sólidas acerca de la estructura de la materia. Esta situación podía ser superada con la introducción de un nuevo contexto de trabajo experimental: el esquema de proporcionalidad introducido por la balanza.

Vamos a considerar el papel de las investigaciones de Lavoisier acerca del calor y su repercusión en la caracterización de la estructura de la materia, a través de su posterior análisis del aire atmosférico. En concreto la *Mémoire sur la chaleur* presentada conjuntamente con Laplace en 1780 como memoria de la *Académie Royale des Sciences*, de sumo interés por ser el trabajo compartido de un químico experimentalista y un matemático. Nuestro análisis gnoseológico pondrá de manifiesto

⁴⁰ Las colaboraciones de Lavoisier con los físicos de la *Académie* se encuentran recogidas en el clásico ensayo de GUERLAC, Henry (1976), "Chemistry as a Branch of Physics: Laplace's Collaboration with Lavoisier", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7, pp. 193-276.

el nuevo estatus de la balanza como instrumento fundamental del método experimental de Lavoisier que no constituye un simple tránsito en favor de una mayor precisión en las medidas, sino el punto de partida sistemático para las primeras estimaciones indirectas de cifras en torno a los nuevos fenómenos desatados por la física experimental durante el Siglo Ilustrado.⁴¹

El método experimental de Lavoisier muestra además, de un modo mucho más directo, el estado primario de la cuantificación en la física experimental al sustentarse casi íntegramente en el principio de conservación de la masa: ello indica claramente las limitaciones de la cuantificación de procesos físicos tan complejos como el calor que sólo cuentan con el apoyo teórico de la teoría de los fluidos imponderables. En este sentido, una gran cantidad de los resultados cuantitativos de los experimentos de Lavoisier están teóricamente desasistidos, rodeados de hipótesis *ad hoc* la mayoría de las veces insolubles, que tan sólo le permiten esclarecer los cursos experimentales para favorecer la repetibilidad posterior de los mismos en igualdad de condiciones y proponer relaciones primarias entre la mediación de los fenómenos desconocidos y las cantidades y volúmenes de gases obtenidos.⁴² No cabe duda de que se trata de experimentación, experimentación cuantitativa y sistemática, generalizada dentro de un programa científico, pero no se puede hablar, sin embargo, de la medición directa de propiedades establecidas por una teoría física: como veremos, Lavoisier emplea la balanza como “contexto regulador”.

6. El calor y los cuatro elementos

El programa experimental de Lavoisier no habría podido llevarse a cabo, no sólo sin la importante contribución de sus colegas físico-matemáticos de la *Académie*, sino sin los desarrollos instrumentales llevados a cabo desde las primeras décadas del siglo, y sin el progresivo compromiso e implicación de los metalúrgicos y artesanos parisienses en la fabricación y perfeccionamiento de los nuevos instrumentos de laboratorio. En 1727 se publicaba el importante trabajo de Stephen Hales, *Vegetable staticks*, que puso de manifiesto la posibilidad de liberar cantidades significativas de “aire” por destilación destructiva de sólidos y líquidos, y que introdujo uno de los dispositivos experimentales más importantes para las investigaciones posteriores de Lavoisier: la caja neumática. Surgía así la idea de la existencia de aire “fijado” e inelástico en la materia sólida que abría las puertas a una crítica decisiva de los

⁴¹ Desde nuestra perspectiva resulta claro un juicio tan generalizado en las historias de las ciencias como el expuesto por Bensaude-Vincent: “La balanza de Lavoisier no aporta únicamente una mayor precisión a las mediciones experimentales, sino que se convierte en el juez supremo de los debates teóricos y adquiere su máxima importancia en el marco de un programa metódico de investigación. Para cada tema tratado, Lavoisier realiza un inventario sistemático de las publicaciones, francesas y extranjeras. Revisa las dudas, las contradicciones o las controversias relativas a la cuestión y concibe una serie de experimentos que desembocarán en una decisión final. Todos los litigios se dirimen en el laboratorio y la tradición se juzga mediante la balanza”, BENSAUDE-VINCENT, Bernadette (1989), “Lavoisier: una revolución científica”, op. cit. p. 416.

⁴² Lavoisier señala insistentemente la importancia de corregir y calibrar los resultados experimentales en relación con unas condiciones básicas que anticipan el standard actual de experimentación física: “Repetiré por última vez que en todos los experimentos de este tipo, nunca se debe olvidar de reducir mediante el cálculo el volumen de aire, tanto al principio como al final de la experiencia, al que tendría a 10 grados de temperatura y una presión de 28 pulgadas”: LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, Barcelona, Crítica, 2007, pp. 95-96.

elementos aristotélicos y al planteamiento de nuevas experiencias sobre la calcinación y la combustión que revelaran la verdadera naturaleza del aire atmosférico.

Por otra parte, el concepto de “aire fijado” permitía un nuevo tratamiento de las cuestiones abiertas en torno a la “materia del fuego”, el elemento aristotélico sin duda más enigmático y esquivo al control de la experimentación. En 1757, Joseph Black definía el concepto de “calor latente” como “fuego fijado” en la materia, al comprobar que hirviendo grandes cantidades de agua, el fuego se “fijaba” en el aire sin producir cambio alguno en la lectura del termómetro. Todavía era difícil establecer qué propiedad era la directamente definida por el desplazamiento del mercurio, pero se estimaba que el fuego debía ser una “sustancia material fluida” para poder desplazar a un líquido en el interior de un tubo de vidrio –el termómetro medía en todo caso la intensidad o densidad de “fuego fijado” en el cuerpo, no la cantidad total–. Black había interpretando sus resultados experimentales en el seno de la teoría del fluido calórico propuesta en 1732 por Boerhaave en sus *Elementa chemiae*, en donde se establecía que la cantidad de calor en cualquier cuerpo era proporcional a su temperatura y a su volumen –el cuerpo era considerado como un mero recipiente de calor, lo que permitía la posibilidad de establecer experimentalmente su capacidad calorífica (en 1781, Johann Carl Wilcke definiría independientemente la capacidad calorífica mediante la expresión “calor específico”)–. Posteriores experimentos de Black y Wilcke sobre la capacidad calorífica de los cuerpos definirían la existencia de un “calor latente” que no aparecía registrado por los termómetros, y que según la teoría del fluido calórico de Boerhaave, permanecía oculto en las combinaciones de átomos que constituían los cuerpos.

La “materia del fuego” planteó nuevos problemas en combinación con el estado de “aire fijado” en sólidos y líquidos, como el dilema de la evaporación planteado por William Cullen en 1756. Cullen había comprobado cómo la evaporación estaba emparejada con un descenso de la temperatura, pero si, como se pensaba, los líquidos se evaporaban disolviéndose en el aire, no se alcanzaba a comprender la mayor evaporación en el vacío. Este último problema permitió considerar que la evaporación no dependía de la disolución en el aire, sino de la combinación del líquido con el fuego generando el estado de vapor. El estado “aeriforme” pasaba así a depender de su combinación con la “materia del fuego”, y en este punto se iniciaron las investigaciones fundamentales sobre el calor llevadas a cabo por Lavoisier.⁴³

Antoine-Laurent Lavoisier y Pierre-Simon de Laplace reinician a mediados de la década de 1770 un conjunto de experimentos cuantitativos sobre la expansión del mercurio que acabarán reflejados en la memoria presentada en la *Académie* bajo el título de *Mémoire sur la chaleur* (1780). Este trabajo, dividido en cuatro artículos, recoge los resultados de un nuevo método para la medición del calor junto a una serie de experimentos sobre la combustión y la respiración. Laplace es el encargado de las aplicaciones matemáticas desarrolladas a lo largo del proceso de cuantificación, así como del análisis de las consecuencias experimentales, mientras que Lavoisier se ocupa de la propuesta y desarrollo de la labor experimental.⁴⁴ La *Mémoire* de 1780 es un ejemplo representativo del método experimental de Lavoisier y nos permite

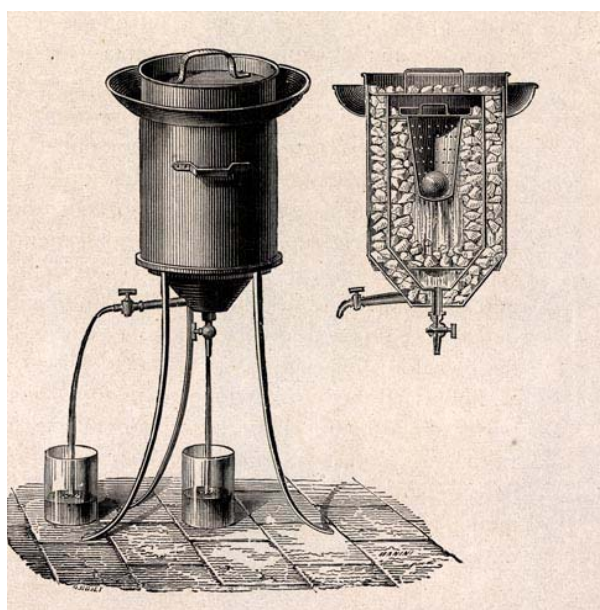
⁴³ Se puede hacer un rápido repaso de la problemática de los “aires fijados” durante el siglo XVIII en la obra de BERTOMEU SÁNCHEZ, José R. & GARCÍA BELMAR, Antonio (2006): *La Revolución Química: Historia y Memoria*, Valencia, Universitat de València, pp. 47-61.

⁴⁴ Un detenido análisis de los experimentos sobre el calor realizados por Lavoisier y Laplace se encuentra en el reciente ensayo de SARAIVA, L. M. R. (1997), “Laplace, Lavoisier and the Quantification of Heat”, *Physis. Rivista Internazionale di Storia della Scienza* (Florenca: Leo S. Olschki Editore), vol. 34, Fasc. 1-2, pp. 112-134.

comprobar con claridad la base fundamental y el alcance de los planteamientos cuantitativos desplegados por ambos investigadores:

Dans l'ignorance où nous sommes sur la nature de la chaleur, il ne nous reste qu'à bien observer ses effets... Parmi ces effets, il faut en choisir un, facile à mesurer, et qui soit proportionnel à sa cause; cet effet représentera la chaleur.⁴⁵

El nivel de la cuantificación desplegado en los experimentos sobre el calor solamente alcanza a tratar el fenómeno del calor de forma indirecta, y resulta totalmente insuficiente para establecer diferencias teóricas en favor de una de las dos teorías vigentes acerca de la naturaleza física del calor: la teoría de los fluidos elásticos y la teoría del movimiento microscópico de las partículas que constituyen la materia. Esta característica indeterminación o ambigüedad teórica es fundamental y constitutiva de los experimentos de Lavoisier y será puesta de manifiesto con relativa frecuencia en las memorias y recensiones públicas de sus trabajos. Únicamente desaparecerá de una forma manifiesta en el *Tratado* de 1789.⁴⁶



En el primer artículo de la memoria, probablemente elaborado por Laplace, se describe el nuevo método para la medición del calor y el dispositivo experimental utilizado: el calorímetro. Para superar los errores experimentales derivados del tradicional método de la mezcla, Lavoisier y Laplace proponen el siguiente dispositivo experimental para el cálculo de los calores específicos de los cuerpos: consideraron un cilindro hueco que contenía hielo en su interior, con el espesor suficiente para evitar que la temperatura del interior del cilindro se viera afectada por la temperatura del exterior. Cualquier

proceso que en el interior de ese recipiente libere calor, actuará sobre el hielo del interior del mismo fundiendo una cierta masa m de hielo, de manera que la masa de hielo fundido será proporcional al calor liberado en el interior del cilindro. El dispositivo real empleado, constaba de tres calorímetros cada uno encerrado dentro del otro y conectados a sendos desagües cónicos que permitían eliminar el agua residual procedente del hielo fundido. El cilindro más interno era una jaula de mallado metálico donde se colocaban las sustancias con las que se iba a experimentar. Un cilindro intermedio rodeaba completamente al anterior y contenía el hielo a su temperatura de fusión, de manera que cuando el calor procedente del cilindro interior fundía parte de este hielo, la masa de agua recogida por su desagüe inferior es una medida relativa del calor liberado. Finalmente, el recipiente exterior estaba a su vez lleno de hielo a la

⁴⁵ LAVOISIER & LAPLACE (1780), *Mémoire sur la chaleur*, en Dumas, J.-B., Grimaux, E., et Fouqué, F.-A. (Eds.), *Oeuvres de Lavoisier*, 6 vols., Impr. Imperiale, Paris, 1862-1893; II, p. 288.

⁴⁶ "Nous ne déciderons point entre les deux hypothèses précédentes; plusieurs phénomènes semblent favorables à la dernière... mais il en est d'autres qui s'expliquent plus simplement dans la première; peut-être ont elles lieu toutes deux à la fois", LAVOISIER & LAPLACE (1780), *Mémoire sur la chaleur*, en *Oeuvres* II, pp. 286-287.

misma temperatura de fusión para evitar que el calor del exterior modificase las condiciones del hielo interior.⁴⁷

En el segundo artículo se exponen los resultados obtenidos en las diferentes experiencias realizadas para el cálculo de los calores específicos de distintas sustancias (tomando el calor específico del agua como la unidad), así como el calor liberado en procesos de combustión y respiración animal.⁴⁸ Pero es en el tercer artículo de la memoria donde se presentan algunas interesantes reflexiones sobre la estructura de la materia, seguramente a cargo de Laplace, mientras Lavoisier se encarga de la redacción del cuarto y último artículo donde se aborda el problema de la combustión y la respiración animal. Llegados a este punto, veamos algunos aspectos de la investigación sobre el calor llevada a cabo en las últimas décadas del siglo XVIII. En primer lugar, la investigación del calor (y, en general, toda investigación científica), parte de una serie de *fenómenos* observados que no permiten establecer de forma inmediata la naturaleza del calor: los cuerpos se dilatan con el calor, el calor de los cuerpos está relacionado con su temperatura, los cambios de estado en los cuerpos van asociados a una variación de calor, las combinaciones entre sustancias, la combustión, la descomposición y la respiración son procesos que tienen relación con el calor, etc. Todos estos resultados se derivan de la observación atenta de las diferentes sustancias que hay sobre la tierra y constituyen *fenómenos* problemáticos de partida para la investigación experimental. Los fenómenos constituyen el punto de partida igualmente para el análisis gnoseológico de las ciencias que vamos a desarrollar en tres niveles: fenoménico, referencial, y sistemático. Estos tres niveles son necesarios si no queremos reducir el conocimiento científico, y el saber humano en general, a simples construcciones sociales, o a manifestaciones psicológicas o culturales del Espíritu. En su conjunto, estos tres niveles se enmarcan en el seno del método filosófico de conocimiento desarrollado desde Platón, y constituyen lo que más recientemente ha denominado C. M. Turbayne, “arco del conocimiento”:

Se supone que hay un movimiento ‘ascendente’ desde la información referente a ‘particulares’ recibida por los sentidos a conceptos generales y principios fundamentales (de las matemáticas, o quizá de alguna otra ciencia). Existe también un ‘camino’ deductivo ‘descendente’, que supuestamente conduce al ámbito de las ideas de Platón, pero no necesariamente en la opinión de algunos escritores recientes, quienes, sin embargo, aceptaron el mismo modelo general para la ‘estructura’ del conocimiento y su metodología de adquisición y desarrollo.⁴⁹

En el primer nivel, el fenoménico, los fenómenos son el punto de partida, pero son, sin embargo, las *referencias physicalistas* vinculadas con estos fenómenos las que

⁴⁷ El método de la mezcla permitía la estimación de los calores específicos de dos sustancias a través del principio de homogeneización según un cálculo simple: para dos sustancias A y B de masas y temperaturas m_A, T_A y m_B, T_B , respectivamente, que se ponen en contacto homogéneo, la relación entre sus calores

específicos es:
$$\frac{q_A}{q_B} = \frac{m_B(T_M - T_B)}{m_A(T_A - T_M)}$$
, donde T_M es la temperatura final de la mezcla

homogénea.

La experimentación puso pronto de manifiesto que este método estaba sujeto a evidentes errores, por ejemplo, cuando se intentaba homogeneizar sustancias en diferentes estados, cuando los pesos específicos eran muy diferentes, o cuando las sustancias reaccionaban entre sí. Puede seguirse la reflexión que, al respecto, realiza Laplace en LAVOISIER & LAPLACE (1780), *Mémoire sur la chaleur*, en *Oeuvres* II, pp. 290-300.

⁴⁸ Ibidem. pp. 301-307.

⁴⁹ OLDROYD, David (1986), *El arco del conocimiento*, Crítica, Barcelona, 1993, p. 25.

se someten a *operaciones* (como los procesos que se observan y miden en el interior del calorímetro) por parte de los *sujetos corpóreos* agrupados en *instituciones* científicas que desarrollan los diferentes *campos* del saber científico. En nuestro caso, los fenómenos señalados sobre el calor de los cuerpos hacen referencia a la estructura de la materia que subyace a los fenómenos mismos. En ausencia de un conocimiento siquiera mínimo de la interacción entre el calor y la materia a niveles estructurales, Lavoisier y Laplace no pueden más que establecer *referencias fisicalistas* aparentes como el volumen o la temperatura, a partir de las cuales diseñar procedimientos experimentales que les permitan trascender el primer nivel de observaciones y fenómenos de la investigación. Procedimientos que, a falta de una directriz teórica suficiente (los autores señalan de inicio la imposibilidad de sustentar sus experimentos en ninguna teoría conocida a cerca de la naturaleza del calor), se desarrollan en un *trasfondo regulador* de control que garantice al menos la repetibilidad de los resultados obtenidos. Uno de los contextos o esquemas de fondo sobre los que se desarrolla la investigación del calor es el *esquema morfológico* de la balanza. Los *esquemas morfológicos* van a establecer, dentro del análisis gnoseológico de las ciencias, los marcos de contacto entre los dos primeros niveles de la investigación: el nivel fenoménico y el nivel referencial. A través de los *esquemas morfológicos*, como morfologías o elementos dinámicos de las ciencias, los *fenómenos*, las *referencias fisicalistas*, y las *operaciones* van a poder fructificar en *proposiciones-r* (referenciales) y *relaciones entre proposiciones* relevantes que permitirán la constitución de *relaciones de identidad* y *teoremas* del tercer nivel, el sistemático, como base de los modelos y teorías propias de cada campo científico. De entre los diferentes *esquemas morfológicos* presentes en el desarrollo de la investigación científica surgirán aquellos que contribuyan a la resolución de *relaciones de identidad*. Estos *esquemas morfológicos* se coordinarán en un *contexto de modelización* en el seno del cual se diseñarán las teorías científicas. En nuestro caso, la balanza empieza a constituirse en el contexto experimental básico de la dinámica científica del siglo XVIII, a través de la introducción de la proporcionalidad matemática en el ámbito de la materia, de lo físico.⁵⁰

Los experimentos sobre el calor de Lavoisier y Laplace ponen de manifiesto los avances en la precisión de la descripción experimental e instrumental ya iniciada en las primeras décadas del siglo por los experimentalistas holandeses –introducen, además de numerosas mejoras, un nuevo instrumento, el calorímetro–, y sobre todo señalan la importancia de tres puntos de partida en la experimentación sobre la naturaleza del calor:

- No todo el calor contenido en un cuerpo puede ser medido por las variaciones de mercurio en un termómetro. El calor puede ser absorbido por un cuerpo sin un cambio en su temperatura.
- Existen diferencias entre temperatura y calor, de tal forma que dos cuerpos de igual volumen y a la misma temperatura pueden contener diferentes cantidades de calor.
- Es necesario establecer la relación entre el calor absoluto o total presente en un cuerpo y los cambios que manifiesta su temperatura.

Estos resultados pueden considerarse *hipótesis regulativas* que surgen de las relaciones experimentales establecidas entre las *proposiciones-r* planteadas a partir de

⁵⁰ Véase sobre la balanza como “contexto determinante” mecánico-geométrico, PÉREZ HERRANZ (2007), “Entre Samos y el Museo: la travesía por el número y la forma geométrica”, en GONZÁLEZ RECIO, José Luis (Ed.), *Átomos, almas y estrellas. Estudios sobre la ciencia griega*, Plaza y Valdés, Madrid, pp. 353-398.

los *fenómenos* y *términos* problemáticos que constituían el punto de partida de la investigación. En el seno de estas *hipótesis* se podrán diseñar posteriores operaciones y experimentos cuantitativos sobre la naturaleza del calor y su relación con la estructura de la materia. Es desde este nuevo horizonte experimental desde el que Laplace se aventura a señalar, al final de este artículo, la importancia de conocer el calor absoluto de los cuerpos para poder elaborar una teoría de la materia de naturaleza molecular. De esta forma, el análisis del calor desde planteamientos empíricos básicos sugiere algo de suma importancia para la investigación posterior:

Tous les corps sur la terre, et cette planète elle-même, sont pénétrés d'une grande quantité de chaleur, dont il nous est impossible de les priver entièrement, à quelque degré que nous abaissions leur température. Le zéro du thermomètre indique conséquemment une chaleur considérable, et il est intéressant de connaître, en degrés du thermomètre, cette chaleur commune au système entier des corps terrestres.⁵¹

Sin embargo, la tentativa de cálculo del calor absoluto del agua no da los resultados deseados y ambos autores confían en que la experimentación futura consiga afinar los experimentos que permitan un conocimiento más preciso del calor encerrado en los cuerpos. No obstante, Laplace se aventura al final de este artículo III a proponer un método para la estimación de las afinidades moleculares entre diferentes sustancias como medida indirecta de la cohesión molecular en los cuerpos, a partir de reacciones de diferentes sustancias con ácidos:

L'équilibre entre la chaleur, qui tend à écarter les molécules des corps, et leurs affinités réciproques, qui tendent à les réunir, peut fournir un moyen très-précis de comparer entre elles ces affinités; si l'on mêle, par exemple, à une température quelconque audessous de zéro, un acide avec de la glace: il la fondra, jusque à ce qu'il soit assez affaibli pour que sa force attractive sur les molécules de la glace soit égale à la force que fait adhérer ces molécules les unes aux autres, et que est d'autant plus grande que le froid est plus considérable: ainsi le degré de concentration auquel l'acide cessera de fondre la glace sera d'autant plus fort que la température du mélange sera plus abaissée au dessous de zéro, et l'on pourra rapporter aux degrés du thermomètre les affinités de l'acide avec l'eau, suivant ses divers degrés de concentration.⁵²

Mediante experiencias como la descrita entre distintos ácidos se podía llegar a estimar una medida de las respectivas *afinidades* de diferentes sustancias respecto del agua, y con ello se podría tener una medida indirecta de la cohesión molecular de cada sustancia. La estimación de la *afinidad* o atracción preferente entre los principios o componentes de las sustancias era un proyecto de investigación que podría remontarse desde diversos textos alquímicos, pasando por el famoso pasaje de la *Optiks* de Newton (la extensa cuestión 31), hasta el estudio de las sales a comienzos del siglo XVIII.⁵³ Sin embargo, el carácter clasificatorio predominantemente pragmático

⁵¹ LAVOISIER & LAPLACE (1780), *Mémoire sur la chaleur*, en *Oeuvres* II, p. 308.

⁵² *Ibidem.*, pp. 317-318.

⁵³ En la cuestión 31 se puede leer: "En efecto, es bien sabido que los cuerpos actúan unos sobre otros por la acción de la gravedad, magnetismo y electricidad. Estos ejemplos muestran el talante y curso de la naturaleza, haciendo que no sea improbable la existencia de otras potencias atractivas además de éstas, pues la naturaleza es muy consonante y conforme consigo misma. No examino aquí cómo se puedan realizar estas atracciones. Lo que denomino atracción puede realizarse mediante un impulso o cualesquiera otros medios que me resulten desconocidos... Las atracciones de la gravedad, del magnetismo y de la electricidad alcanzan distancias claramente perceptibles, por lo que han sido observadas por ojos vulgares; sin

que adquiere el estudio y determinación de las afinidades químicas durante este siglo, por parte de la química de las sustancias vegetales desarrollada en Francia, redefine la noción desde una perspectiva nueva: el análisis y la transformación química de las sustancias. En este sentido, fueron las investigaciones sobre las sales y sus disoluciones las que culminaron en la primera de las tablas de afinidad publicada por Étienne-François Geoffroy en 1718. Sólo posteriormente, la difusión de la filosofía newtoniana en Francia permitió que se establecieran vínculos entre la clasificación de laboratorio y las fuerzas de atracción de Newton. Para los químicos del siglo XVIII el estudio de la sustitución de sustancias, mediante lo que hoy denominamos reacciones de desplazamiento, constituyó un proyecto de suma importancia porque permitía la primera ordenación y clasificación de datos empíricos obtenidos en el laboratorio, al tiempo que hacía posible establecer jerarquías predictivas de transformación de unas sustancias en otras en condiciones definidas. Por otra parte, los químicos del norte de Europa desarrollaron sus investigaciones sobre la base del aislamiento de sustancias de origen mineral, lo que permitió a Torbern O. Bergman elaborar una tabla de afinidades, en 1788, con más de 50 columnas, donde se recogían 25 tipos de ácidos, 16 sales metálicas y 15 tierras. Entraba de este modo en la química del siglo XVIII una nueva perspectiva para la definición de la composición química y un contexto experimental determinante para la caracterización de la reacción química: el análisis químico mediante la destilación a través de la acción del calor. Será en el seno de este nuevo proyecto heterogéneo del análisis químico y la clasificación de las transformaciones químicas donde se llevará a cabo la consolidación de una nueva terminología química que refleje la estructura química de la materia.⁵⁴

En este marco heterogéneo de investigación química, centrado en la destilación por la acción del calor, encuentran su desarrollo los trabajos de Lavoisier y Laplace. De la *Mémoire sur la chaleur* parece deducirse que Laplace está más inclinado por una explicación del calor a partir del movimiento de los componentes internos de la materia, mientras que Lavoisier sigue considerando la opción de los fluidos elásticos. La investigación cuantitativa de Lavoisier y Laplace no alcanza a establecer *relaciones de identidad* relevantes que permitan dilucidar la naturaleza del calor, y por ello no logran desarrollar un conocimiento químico analizable desde el tercer nivel gnoseológico propuesto (aquel que constituye el soporte lógico-material de las ciencias: relaciones de identidad, modelos, teoremas y teorías). Los cursos operatorios se mantienen en el ámbito de las relaciones básicas de identidad y de la heurística marcada por las *hipótesis regulativas*. La investigación experimental presenta estos

embargo, puede haber otras que alcancen distancias lo suficientemente pequeñas como para haber escapado hasta ahora a la observación”, NEWTON, Isaac (1704), *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*, Madrid, Alfaguara, 1977, p. 325. El trabajo clásico al respecto es el de THACKRAY, Arnold (1970), *Atoms and powers: an essay on Newtonian matter-theory and the development of chemistry*, Cambridge, Harvard University Press.

⁵⁴ Las tablas de afinidades inspiraron gran número de investigaciones de laboratorio durante el siglo XVIII, llegando a establecerse valores de cuantificación relativos, de modo que podía predecirse el curso de la doble descomposición de dos sales con bastante éxito. La popularidad del concepto de afinidad llegó al ámbito literario, para servir de inspiración a literatos como Goethe, pero no alcanzó a desplazar a las diversas teorías de los principios o elementos de la materia que continuaron conviviendo con el nuevo análisis químico por su parcial capacidad interpretativa, al permitir diferenciar a la química de las artes industriales o prácticas. El resultado es la típica confusión y falta de coherencia que se experimenta en la actualidad al releer los tratados de química del siglo XVIII –como el popular *Cours de chymie* de Nicolás Lemery, original de 1687, pero ampliamente reeditado durante la siguiente centuria, donde se suceden al mismo nivel procedimientos experimentales de gran precisión con expresiones y razonamientos que hoy nos cuesta asociar con la química.

inconvenientes: aunque disponga de la base de una (o varias, como en el caso que nos ocupa) hipótesis de trabajo, nunca cuenta con la garantía de resolver las cuestiones planteadas inicialmente, tan sólo garantiza que surgirán cuestiones nuevas. No obstante, los experimentos sobre el calor de Lavoisier y Laplace presentan a la comunidad científica un método más preciso de determinación del calor específico de las sustancias, aportan un nuevo instrumental más efectivo para abordar la medida del calor en los cuerpos y generan varias *hipótesis regulativas* que sugieren el trasfondo heurístico para posteriores experimentos de determinación de los calores absolutos de los cuerpos, punto de partida de la investigación directa de la estructura de la materia durante el siglo XIX.

La determinación del calor absoluto era el punto central de los experimentos realizados –aquí es donde Laplace desarrolla toda su capacidad matemática para la corrección de los resultados⁵⁵–, pero como nos demuestra el último de los artículos de la *Memoria*, Lavoisier estaba más interesado en el calor implicado en los procesos de la combustión y la respiración. Paralelamente a la teoría del calórico como fluido imponderable, estaba la teoría del flogisto como fluido de similar naturaleza que se desprendía de los cuerpos durante la combustión según la teoría propuesta por Johann Becher y Georg Stahl. Para Lavoisier, el descubrimiento de los principios de la combustión suponía el esclarecimiento de la relación principal entre la “materia aeriforme” y la “materia del fuego”. Y esperaba que los estudios físicos del calor le permitieran sustentar una nueva teoría química cuantitativa de la combustión y la respiración animal –no olvidemos que si el calórico era cuantificable también podía serlo el flogisto, punto este decisivo para decidir acerca de la validez de la teoría de Stahl–. Fueron estos experimentos sobre la combustión y la naturaleza del calor, los que llevaron posteriormente a Lavoisier a considerar el *calórico* como “una sustancia real y material”, tal y como aparece reflejado en la tabla de sustancias simples que incluye en la Segunda Parte del *Tratado elemental de química* de 1789:

Es difícil concebir estos fenómenos [los de la dilatación de los cuerpos por el calor] si no se admite que son el efecto de una sustancia real y material, de un fluido muy sutil que se introduce a través de las moléculas de todos los cuerpos separándolas; y aun suponiendo que la existencia de este fluido es una hipótesis, con ella se explican de una forma muy satisfactoria los fenómenos de la naturaleza.⁵⁶

Veamos a qué resultados lleva esta definición del calor como *sustancia simple* en la nueva química de los elementos de Lavoisier, a partir del análisis del aire atmosférico y la combustión química en el nuevo contexto experimental de la química cuantitativa.

7. El análisis del aire atmosférico

Lavoisier entregó el 1 de noviembre de 1772 a la *Académie* un sobre lacrado en el que recogía sus primeros resultados experimentales acerca del papel del aire atmosférico en la calcinación. El sobre sería abierto el 5 de mayo del año siguiente, y contenía las siguientes reflexiones:

⁵⁵ Véase SARAIVA (1997), “Laplace, Lavoisier and...”, op. cit., pp. 122-126. Sobre la influencia de P. S. Laplace en el conjunto de la obra de Lavoisier puede verse: GUERLAC (1976), “Chemistry as a Branch of Physics...”, op. cit. pp.: 266-276.

⁵⁶ LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, op. cit., pp. 72-73.

Hace unos ocho días descubrí que al quemar azufre, el peso de éste, en lugar de disminuir, aumentaba; es decir que de una libra de azufre podíamos obtener más de una libra de ácido vitriólico, sin tener en cuenta la humedad del aire; lo mismo ocurre con el fósforo: este aumento de peso proviene de la cantidad prodigiosa de aire que se fija durante la combustión y que se combina con los vapores. Este descubrimiento, resultado de una serie de experimentos que considero decisivos, me indujo a pensar que lo que se observaba en la combustión del azufre y del fósforo podía tener lugar, igualmente, con todos los cuerpos que ganan peso tras la combustión o la calcinación; y me convencí incluso de que el aumento de peso de las sales metálicas respondía a la misma causa. El experimento ha confirmado completamente mis conjeturas; he procedido a reducir litargirio en recipientes cerrados, con el aparato de Hales, y he observado que, en el momento en que la cal se convierte en metal, se desprende una cantidad considerable de aire, y que este aire forma un volumen mil veces superior al de la cantidad de litargirio utilizada.⁵⁷

Estas primeras experiencias sobre la combustión y la calcinación en presencia de aire no llegaban a proponer todavía resultados teóricos acerca de la naturaleza de la relación entre el “aire fijado” y “la materia del fuego”. Durante la segunda mitad de la década de 1770, Lavoisier realizará numerosos experimentos sobre combustión y respiración animal, al tiempo que irá madurando la posibilidad de proponer una alternativa sobre la naturaleza de la combustión más satisfactoria que la teoría del flogisto de Georg Ernst Stahl. Posteriormente, en la mencionada *Mémoire sur la chaleur* (1780) que incluye, en su Artículo IV, experimentos de cuantificación del “aire fijado” liberado en la combustión de carbón y de fósforo, los resultados teóricos ya aparecen sugeridos por el propio Lavoisier, sobre la base de los desarrollos matemáticos de Laplace.⁵⁸ De esta experimentación sistemática Lavoisier establece los siguientes resultados:

- Toda combinación química produce una liberación de calórico
- Las sustancias en estado aéreo o vaporoso deben su estado a la gran cantidad de calor que se encuentra en ellas
- El *aire puro* es la sustancia más rica en calórico
- La combustión sólo se produce en presencia de *aire puro*

Desde el punto de vista gnoseológico, estos resultados presentan una relevante novedad interna: son *principios de relaciones*, constituidos por la generalización de relaciones primarias observadas entre términos a través de la experimentación. En la investigación científica, una vez elaboradas diferentes *proposiciones-r* y operando con ellas en el seno de *hipótesis regulativas*, el conocimiento encerrado en cualquier campo científico requiere alcanzar un nivel más refinado y preciso que facilite la elaboración de los *modelos* y *teoremas* fundamentales de cada ciencia. En este nivel sistemático, del entramado de relaciones establecidas se van segregando, a partir de la *neutralización* del sujeto operador, diversas relaciones de identidad que apuntan al soporte lógico-material de los modelos y teorías. Estos esquemas, independientes de

⁵⁷ LAVOISIER (1772), “Experimentos sobre calcinación”, cit. en BESAUDE-VINCENT (1989), “Lavoisier: una revolución...”, op. cit., p. 418.

⁵⁸ “Le charbon et toutes les matières charbonneuses ont la même action sur la base de l’air: elles se l’approprient et forment avec elles, par la combustion, un acide sui generis, connu sous le non d’air fixe ou d’acide crayeux. Le dissolvant de la base de l’air, la matière du feu, est encore dégagé dans cette opération, mais en moindre quantité que dans la combustion du soufre et du phosphore, parce qu’une portion se combine avec l’acide méphitique, pour le constituer dans l’état de vapeur et d’élasticité dans lequel nous l’obtenons”: LAVOISIER & LAPLACE (1777), *Mémoire sur la combustion en général*, en *Oeuvres* II, p. 230.

la actividad operatoria del sujeto y de los dispositivos sociales e institucionales, son los que sustentan, a través de teorías –como *totalidades sistemáticas*–, la definición de una *verdad* científica, y conforman el cierre del campo de una ciencia, a partir de sus términos, operaciones, principios y relaciones. En nuestro caso, estos cuatro resultados son *principios* elaborados a partir de las diferentes experiencias en el laboratorio derivadas del análisis de relaciones y operaciones con el calor y sus manifestaciones en diferentes sustancias. Son genéricos y en la mayoría de los casos permiten delimitar la significatividad de la investigación cuantitativa, tanto positiva como negativamente. A partir del establecimiento de *principios de relaciones* la investigación delimita su curso y segrega aquellas experiencias que se someten al marco sistemático de la neutralización operatoria. Una nueva teoría de la combustión está cada vez más cerca, pero, como veremos, nada garantiza en la investigación científica, que se llegue a ella.

No será hasta 1789, cuando Lavoisier recogerá y generalizará definitivamente los resultados de sus experimentos sobre combustión y calcinación en el capítulo 3 de la Primera Parte de su *Tratado elemental de química* dedicado al análisis del aire atmosférico. El mencionado capítulo comienza con un experimento cuantificador de la combustión atmosférica de mercurio en un recipiente cerrado a la temperatura de evaporación del mismo sostenida mediante un horno. El diseño experimental es mostrado con todo tipo de detalles y dibujos indicando en cada momento la secuencia de operaciones y las estimaciones previas efectuadas de las condiciones iniciales del experimento.⁵⁹ Lavoisier mantuvo el dispositivo funcionando durante doce días hasta que no detectó cambios en la calcinación del mercurio. Inicialmente el contenido de aire en el interior del dispositivo era de 50 pulgadas cúbicas (a 28 pulgadas de presión y 10 grados de temperatura). Al final del periodo de operación el aire recogido en las mismas condiciones iniciales era de 42-43 pulgadas cúbicas. El experimento fue repetido varias veces prestando mucha atención en la conservación del aire interior y a la hermeticidad de las vasijas que contenían el mercurio y el aire atmosférico, y los resultados siempre señalaban una disminución del volumen del aire de alrededor de una sexta parte. Los resultados del experimento eran por tanto una reducción del volumen de aire y cantidades considerables de cal de mercurio en forma de gránulos de color rojizo.⁶⁰

Lavoisier pasó inmediatamente a caracterizar experimentalmente las propiedades del aire recogido al final del proceso de combustión del mercurio. Resultaba no ser apropiado para la respiración animal, ni para el sostenimiento de la llama de una vela. Por otra parte, la cal obtenida calentada en un horno en un

⁵⁹ LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, op. cit., pp. 88 ss. El *Tratado* tenía muchos propósitos como obra innovadora que representaba los primeros pasos de una nueva metodología experimental. Al papel sistemático de la cuantificación en los experimentos se añadía la necesidad de desvincular la obra de las teorías del pasado, ya que como señala el propio Lavoisier en el “Discurso preliminar” será comprendido mucho mejor por aquellos que no hayan estudiado nada de las anteriores propuestas de las ciencias experimentales. Esto es algo que, como veremos, Lavoisier no llegó a conseguir. No obstante, la continuidad con las teorías anteriores de la física experimental se presenta siempre de forma fragmentaria, sólo en la medida en que la experimentación necesita de una conceptualización inicial para ponerse en marcha.

⁶⁰ El proceso global puede ser descrito como un proceso reversible en los siguientes términos:
$$\text{Hg} + \text{aire (O}_2\text{)} \leftrightarrow \text{cal (HgO)} + \text{calor/luz}$$

Esta reversibilidad en la fijación y liberación del componente “respirable” del aire atmosférico, y la concordancia del proceso de cuantificación, es la que llevó posiblemente a Lavoisier a desestimar como errónea la teoría del flogisto de Stahl.

recipiente cerrado, liberó “de 7 a 8 pulgadas cúbicas de un fluido elástico mucho más apropiado que el aire atmosférico para mantener la combustión y la respiración de los animales”.⁶¹ Lavoisier pasa a indicar las sorprendentes cualidades opuestas de este nuevo “aire fijado” en la cal de mercurio y lo identifica finalmente con el obtenido por Priestley, Scheele y él mismo en experimentos realizados con anterioridad. Pasemos, seguidamente, a las reflexiones que el propio Lavoisier realiza sobre las circunstancias de este experimento:

1. El aire atmosférico no es una sustancia simple.

...el aire atmosférico está compuesto por dos fluidos elásticos de naturaleza diferente o, por decirlo así, opuesta.

Una prueba de esta importante verdad es que si se vuelven a combinar los dos fluidos elásticos obtenidos separadamente, es decir, las 42 pulgadas cúbicas de mofeta o aire no respirable y las ocho pulgadas cúbicas de aire respirable, se forma de nuevo un aire totalmente parecido al atmosférico y que, poco más o menos, es tan apropiado como éste para la combustión, la calcinación de los metales y la respiración de los animales.⁶²

2. El calor y la luz están asociados con el aire atmosférico.

Puesto que existe una descomposición del aire en la calcinación del mercurio y una fijación y combinación de la base de la parte respirable con éste, resulta... que se debía haber desprendido calor y luz, y no se debe dudar de que este desprendimiento no se haya producido; pero en la experiencia que acabo de indicar concurren dos causas para que pase desapercibido. La primera es que al durar la calcinación varios días, el desprendimiento de calor y luz repartido en tan largo intervalo de tiempo, es infinitamente débil en cada instante particular. La segunda es que al operarse con un horno y con la ayuda de fuego, el calor producido por la calcinación se confunde con el del horno. Podría añadir que al combinarse la parte respirable del aire o, mejor, su base, con el mercurio, no abandona la totalidad del calorífico con el que estaba unida, quedando una parte ligada en la nueva combinación.⁶³

3. Las interacciones de los diferentes fluidos elásticos que intervienen en la constitución del aire atmosférico se establecen según el concepto de *afinidad*, como ya vimos en las reflexiones de Laplace expuestas en la *Mémoire sur la chaleur* de 1780.

Aunque esta experiencia nos suministra un procedimiento extremadamente sencillo para obtener separadamente los dos principales fluidos elásticos que componen nuestra atmósfera, no nos da ideas exactas sobre la proporción que guardan entre sí estos dos fluidos. La afinidad del mercurio por la parte respirable del aire, o mejor dicho, por su base, no es lo suficientemente grande para poder vencer por completo los obstáculos que se oponen a esta combinación. Estos obstáculos son

⁶¹ LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, op. cit., p. 90.

⁶² Ibidem. p. 91.

⁶³ Ibidem. p. 92. En un experimento descrito a continuación, en el que se sustituye el lecho de mercurio por un trozo de alambre fino de hierro, Lavoisier señala la aparición de calor y luz en el proceso de calcinación del metal: ibidem. pp. 92-93.

la adherencia de los dos fluidos que constituyen el aire atmosférico y la fuerza de afinidad que une la base del aire vital al calórico.⁶⁴

En las anteriores conclusiones de Lavoisier podemos comprobar cómo la caracterización de la composición del aire atmosférico a través de la combustión del mercurio mantiene numerosos elementos dispersos de la física experimental del siglo XVIII, así como reformulaciones de algunos conceptos antiguos que encuentran un nuevo lugar y sentido en las teorías de los fluidos sutiles y en la nueva comprensión de los estados de la materia derivados del nuevo sistema de los elementos. Para Lavoisier, la atmósfera, y por extensión, el mundo en su totalidad, puede concebirse como un entramado ordenado de fluidos elásticos, algunos ponderables directamente –como los componentes fundamentales del aire atmosférico– y otros imponderables, que sólo se pueden estudiar por sus efectos –como es el caso de la luz y del calor (fenómenos equivalentes si nos atenemos a las experiencias de calcinación del antimonio llevadas a cabo por Nicaise Le Febvre en 1669)–⁶⁵. Los primeros presentan además la posibilidad de distribuirse en diferentes estados de agregación (sólido, líquido y aeriforme) en función de su estrecha relación con el calórico, elemento fundamental y fluido elástico imponderable. La naturaleza de esta relación no está nada clara, pero la inclusión del calórico como elemento o sustancia simple en el *Tratado* parece indicar que Lavoisier confiaba en una interacción material entre los fluidos imponderables y la materia ordinaria.⁶⁶

La naturaleza de la combustión, tal y como es definida por Lavoisier, mantiene una importante deuda con las investigaciones de Louis-Bernard Guyton de Morveau sobre la generalizada ganancia de peso de los metales al ser calcinados. Estas mismas experiencias serían tomadas en consideración en 1771 por Jacques Turgot, quién, en una carta a Condorcet, exponía la primera sistematización del calor con los estados de agregación de la materia:

El aire es una sustancia ponderable que constantemente pasa al estado de vapor o fluido expansivo de acuerdo con el grado de calor que contenga, pero que es también capaz de unirse a todos los demás principios de los cuerpos y, en ese estado, intervenir en la constitución de los diferentes compuestos... este aire se combina o se separa en las diferentes reacciones químicas debido a una mayor o menor afinidad hacia los principios a los que estaba ligado o hacia aquellos a los que se le expone.⁶⁷

⁶⁴ Ibidem., p. 91.

⁶⁵ En su *Traité de la Chymie*, Le Febvre expone su método de calcinación del antimonio a través del calor generado por una lente óptica (espejo ustorio) que concentra los rayos del sol sobre la muestra. En relación con la convivencia de diferentes tradiciones en la obra de Lavoisier, no deja de ser curioso el apoyo que concede, a través de esta teoría de los fluidos elásticos como imagen general del mundo, a la caracterización tradicionalmente defendida de los cometas como fenómenos atmosféricos y, por lo tanto, sublunares: “Los fenómenos que acompañan a los meteoros ígneos me hacen creer que existe así en lo alto de la atmósfera una capa de fluido inflamable y que en el punto de contacto de estas dos capas de aire es donde se producen los fenómenos de la aurora boreal y otros meteoros ígneos”, ibidem., p. 87.

⁶⁶ No obstante, el uso particular del concepto de “afinidad” que hace un experimentalista como Lavoisier, poco sospechoso de simpatizar con el proyecto de química newtoniano desarrollado durante la primera mitad del siglo XVIII, nos puede sugerir que el francés compartiera ciertas ideas con algunos de sus contemporáneos como Claude-Louis Berthollet. Véase sobre el proyecto newtoniano de química durante el siglo XVIII: STENGERS (1989), “La afinidad ambigua...”, op. cit., pp. 337-361.

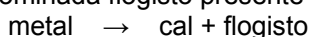
⁶⁷ Citado en BROCK, William H. (1992), *Historia de la química*, Madrid, Alianza Editorial, 1998, p. 103.

La influencia de Turgot en los posteriores trabajos de Lavoisier y, sobre todo, en el trasfondo teórico del *Tratado* de 1789 es bastante clara. Esta caracterización de la combustión, por otra parte, es abiertamente opuesta a la tradicionalmente defendida por la teoría del flogisto. Aunque ampliamente implicada en un nuevo proyecto cuantitativo de la química de los elementos, no puede evitar guardar evidentes rastros con una química de los principios –sobre todo en la caracterización de la acción del calor–. Para el francés la combustión es una combinación del calórico con el aire, y no una liberación de flogisto –la fuente de calor contenida en el combustible–. Los efectos físicos del calor igualmente se invierten: mientras que para Stahl, el calor se fija provocando una combinación o una condensación, para Lavoisier, el calor se libera provocando una expansión y una desagregación en los constituyentes de la materia. De los diferentes trabajos de Lavoisier sobre la combustión se concluye que:

- Durante la combustión se produce un incremento del peso del cuerpo calcinado en una cantidad igual a la parte de aire descompuesto durante el proceso
- En la combustión el cuerpo calcinado se transforma en un óxido por adición de aquella sustancia del aire que le hace aumentar su peso
- El proceso se puede invertir cambiando las condiciones de transformación y permitiendo recuperar las cantidades iniciales de las diferentes sustancias de partida

Desde el análisis gnoseológico que venimos realizando, estos resultados aportan una información mucho más precisa y determinante: más allá de las *proposiciones-r* hasta ahora estudiadas, establecen sin lugar a dudas una proporcionalidad entre las partes de un proceso químico y permiten la cuantificación y definición de la naturaleza de los elementos que intervienen en la transformación química. Proceso que se manifiesta a la luz de la *reversibilidad* como nuevo *esquema morfológico*, ya que la combinación de las sustancias en la combustión y la calcinación química según el *esquema morfológico* cuantitativo definido por la balanza, permitía predecir el camino inverso de la transformación en los mismos términos. De la combinación de estos dos *esquemas morfológicos* surge, por tanto, la *relación de identidad* fundamental de la crítica a la teoría del flogisto (los procesos reversibles y cuantificables de oxidación química se reducen a: *Metal + Oxígeno* ↔ *Cal del metal [+ Calor]*, donde el calor es todavía considerado un “elemento simple” dentro de la teoría química de Lavoisier) que sienta la base de una nueva química del análisis y las transformaciones químicas que se desarrollará durante el siglo XIX, cuando se consolide una teoría coherente de la estructura atómica de la materia y la naturaleza del calor.⁶⁸

⁶⁸ Lavoisier había iniciado con anterioridad un importante ataque a la teoría del flogisto a partir del momento en que tuvo conocimiento de los experimentos de Guyton de Morveau. Véase GUERLAC (1976), "Chemistry as a Branch of Physics...", op. cit., pp. 216-223. Hemos de hacer un importante esfuerzo si queremos valorar correctamente el importante peso que podía llegar a alcanzar una teoría cualitativa coherente como la teoría de Stahl. Se trataba de mucho más que una simple caracterización del proceso de la combustión: constituía una explicación coherente de la acidez, el color, el olor, la reactividad y la composición de las sustancias, dentro de la teoría general aristotélica de los cuatro elementos corregida, en diferentes versiones, por los tres principios de Paracelso. La combustión era definida a partir del intercambio de una *sustancia ideal* denominada flogisto presente en el combustible:



Durante la combustión, el metal perdía el flogisto y mostraba su elemento constituyente: la cal o tierra básica. Para recuperar el metal se combinaba la cal con carbón vegetal (sustancia rica en flogisto, como lo demuestra su fácil combustión) restableciendo la mezcla inicial de partida.

8. Conclusiones: La nueva química de los elementos

Hemos podido analizar desde un punto de vista gnoseológico diferentes aspectos de la experimentación realizada por Lavoisier en relación con los estudios fronterizos entre la física y la química del siglo XVIII: la relación entre la naturaleza del calor, la combustión y los estados de agregación de la materia. En primer lugar, la cuantificación introducida por Lavoisier en los experimentos de combustión y análisis del aire atmosférico no permite que la podamos considerar como un proceso de medida de propiedades físicas sujetas a las estrechas condiciones establecidas por una teoría. El soporte que Lavoisier busca en las teorías cualitativas entre las que se mueve la física experimental del siglo XVIII es más el punto de partida de los fenómenos conocidos que un apoyo para la explicación física de sus resultados experimentales. Su confianza última descansa en que las cifras ayudan a definir claramente los diseños experimentales, favoreciendo su repetibilidad y la homogeneidad de las condiciones de experimentación, a pesar de que no trazan puentes entre la diversidad de fenómenos y efectos estudiados de un modo directo y los conceptos físicos explicativos organizados por las diferentes teorías disponibles. En otras palabras, aunque esto no debe llevarnos a pensar en una absoluta desvinculación de los resultados experimentales del francés con las teorías cualitativas de la época, sí se hace evidente que no necesita de ninguna de ellas para trazar y planificar la investigación que lleva a cabo en el laboratorio: la balanza como *esquema morfológico* de la nueva química permite abordar los fenómenos al margen de sus posibles explicaciones teóricas. El resultado es una experimentación que trasciende las limitaciones de las explicaciones *ad hoc* vigentes en la física experimental del siglo XVIII, abriéndose paso entre los fenómenos y los términos físicos ambiguos, en el seno de un contexto experimental que delimita nuevas variables y posibilidades de comprensión de los viejos fenómenos a través de la generación de *hipótesis regulativas* capaces de fructificar en la elaboración de resolutivos *relaciones de identidad*. Es a partir del surgimiento de estos últimos cuando podemos hablar de la *neutralización operativa* que hará posible la naciente química moderna como ciencia, como campo de términos entramados en teorías y encerrados por relaciones necesarias que incorporan una parte de la realidad al conocimiento humano.

En segundo lugar, para Lavoisier el calor es una sustancia pura y material, concebida como un fluido elástico inalterable –al modo en que son definidos fenómenos como la luz, la electricidad o el magnetismo–, y profundamente implicado en la organización y estructura de la materia. La materia se organiza en tres estados de agregación caracterizados por la cantidad de calor (calórico, como elemento fundamental) que se halla presente en la composición. De tal forma que el estado sólido se corresponde con el compuesto con mínimo contenido de calórico y el estado

Los problemas evidentes que resultaban de la ganancia de peso de las cales no constituyeron elementos suficientes para la desestimación de una teoría coherente –sobre todo teniendo en cuenta que el cambio de peso era considerado un fenómeno físico, no químico (recordemos la confusa definición de Fontenelle)–. Aquí es donde podemos apreciar la importancia definitiva para la química del nuevo método experimental cuantitativo de Lavoisier. Sería, no obstante, el descubrimiento de que al calentar la cal de mercurio se podía recuperar el metal sin la intervención del carbón vegetal (que era el que cedía el flogisto), uno de los puntos más importantes que acabaron por desorganizar la teoría del flogisto como explicación cualitativa coherente –una incoherencia cualitativa podía resultar más decisiva que una continuada acumulación de cifras y cuantificaciones–. Cfr. BERTOMEU SÁNCHEZ, José R. & GARCÍA BELMAR, Antonio (2006), *La Revolución Química*, op. cit., pp. 63-88.

“aeriforme” o gaseoso con el de máxima saturación de calórico.⁶⁹ Esta persistente definición material del calor continuará hasta la generalización de los estudios termodinámicos de Sadi Carnot y la consolidación de la teoría atómica de Dalton durante las primeras décadas del siglo XIX en el seno del *esquema morfológico* cuantitativo y de un nuevo *contexto de reversibilidad* como *esquema morfológico* complementario que permiten conjuntamente la reconstrucción del tradicional doble proceso racional del análisis y la síntesis en las ciencias físico-químicas. De la combinación de los diferentes *esquemas morfológicos* que confluyen en la obtención de *relaciones de identidad* a partir de la experimentación, se constituye el *contexto de modelización* primario de la química moderna como puente entre los contextos clásicos de descubrimiento y justificación.⁷⁰

De este modo, la reversibilidad es la nueva cara de la cuantificación, entendida como control de los procedimientos experimentales más allá de los límites establecidos por la corporeidad de los materiales. Como señalan Prigogine y Stengers:

Las transformaciones reversibles pertenecen a la física clásica en el sentido en que definen la posibilidad de actuar sobre un sistema, de controlarlo. El objeto dinámico es controlable por medio de sus condiciones iniciales: una adecuada preparación del sistema conlleva la deseada evolución hacia tal o cual estado predeterminado. El objeto termodinámico, cuando está definido en función de sus transformaciones reversibles, es controlable a través de sus condiciones de contorno.⁷¹

La química se convierte con Lavoisier en la ciencia del doble procedimiento: composición y descomposición, análisis y síntesis. Ambos procedimientos constituyen el círculo demostrativo de la química como ciencia experimental y cuantitativa, cuyo objeto de estudio radica de un modo absoluto en la construcción experimental de la materia llevada a cabo en el laboratorio. Ningún proceso o transformación será comprensible mientras ambos procedimientos no cierren un círculo demostrativo

⁶⁹ “Por tanto, la palabra gas es para nosotros un nombre genérico que designa el último grado de saturación de cualquier sustancia por el calórico, es decir, la expresión de uno de los estados en que se pueden presentar los cuerpos”, LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, op. cit., p. 100.

⁷⁰ La distinción entre *contexto de descubrimiento* y *contexto de justificación* fue introducida por Hans Reichenbach en 1938, en su ensayo *Experience and Prediction*, Chicago, University of Chicago Press, pp. 6-7. Su objetivo era la exclusión del contexto de descubrimiento de la filosofía de la ciencia neopositivista, reduciendo ésta al estudio formal de las teorías científicas ya constituidas en su estado final. La imposibilidad de elaborar una lógica del descubrimiento científico era un problema que se remontaba a los debates entre Whewell y John Stuart Mill de mediados del siglo XIX. Más allá de la puerta abierta por los trabajos del *segundo* Wittgenstein durante la década de 1940, que influyó en la crítica al neopositivismo de autores como Hanson y Toulmin, desde el punto de vista gnoseológico, el *contexto de modelización* como configuración dinámica puente creemos que permite establecer relaciones fructíferas entre los componentes sintácticos, semánticos y pragmáticos de las teorías científicas y los elementos materiales e instrumentales en el seno de los cuales se despliega la investigación experimental, ya que, desde una perspectiva gnoseológica, carece de sentido un descubrimiento previo a su justificación. Con ello pretendemos elaborar una teoría morfológica de las ciencias que no asuma las teorías científicas como entidades formales estáticas en el seno de una deriva de paradigmas inconmensurables, sino como resultados cuasi-estables derivados de esquemas morfológicos en competencia a partir de los resultados de la investigación experimental. Véase, PIAGET, Jean & GARCÍA, Rolando (1982), *Psicogénesis e historia de la ciencia*, Madrid, Siglo XXI, pp. 28-31.

⁷¹ PRIGOGINE, Ilya & STENGERS, Isabelle (1979), *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Madrid, Alianza, 1997, p. 159.

sometido a una estricta y exacta definición mediante la experimentación. En esta nueva química, la *fijación* se convierte en la combinación básica que define las relaciones entre los fluidos elásticos y la materia, y la *afinidad* (redefinida cualitativamente en el seno del sistema de elementos o sustancias simples) establece el nivel de profundidad explicativa que la nueva química permite desarrollar.⁷²

Como complemento al despliegue de los nuevos *esquemas morfológicos*, y bajo la influencia directa de Condillac, Lavoisier propone una nueva filosofía de las sensaciones que alcanza su máxima en el papel de la nomenclatura en las ciencias. Nombrar es conocer, porque el nombre es referencia directa del proceso constructivo de la Naturaleza, un proceso que la química recrea a partir de la reconstrucción experimental de la realidad a través de las posibilidades de combinación de los elementos-principios. Sin embargo, el alcance de la nomenclatura está definido por los instrumentos y el nivel de análisis desplegado en la experimentación –con la ayuda correctora de la matemática como núcleo metodológico–. De este modo, la nueva química muestra cómo se han de abordar los nuevos fenómenos desde esta renovada premisa instrumental, en el seno de un nuevo *contexto de modelización*, que desencadena la secuencia cuantitativa de las investigaciones futuras de la química moderna.⁷³

Alicante, enero de 2009

Referencias Bibliográficas

- BACON, *Advancement of Learning, Novum Organum and New Atlantis*, en edición de M. J. Adler, Great Books of the Western World nº 28, Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993.
- BARNETT, Martin K. (1956), "The Development of Thermometry and the Temperature Concept", *Osiris*, Vol. 12, pp. 269-341.
- BELTRÁN MARÍ, Antonio (1998), "T.S. Kuhn. De historia, de filosofía y de pájaros", en SOLÍS, Carlos (Ed.) (1998), *Alta tensión. Filosofía, sociología e historia de la ciencia*, Barcelona, Paidós, pp. 111-143.
- BENSUAUDE-VINCENT, Bernadette (1989), "Lavoisier: una revolución científica", en SERRES, Michel (Ed.): *Historia de las ciencias*, Madrid, Cátedra, 1998: pp. 411-435.
- BERTOMEU SÁNCHEZ, José R. & GARCÍA BELMAR, Antonio (2006), *La Revolución Química: Historia y Memoria*, Valencia, Universitat de València.
- BROCK, William H (1992), *Historia de la química*, Madrid, Alianza Editorial, 1998.
- BUENO, Gustavo (1972), *Ensayos materialistas*, Madrid, Taurus.

⁷² El peso desorbitado que Lavoisier concede a los procesos de fijación, al amparo de su teoría del calórico como elemento químico, nos muestra la clara dependencia que su nueva caracterización de la química presenta respecto de la neumática, y su desconocimiento de la variedad química de aires fijados que se habían encontrado ya a finales del siglo XVIII. Véase BROCK (1992), *Historia de la química*, op. cit., pp. 98-110. Por otra parte, la química de los elementos de Lavoisier sufrirá una renovadora transformación cuando la teoría atómica de Dalton se consolide como *totalidad sistemática* fundamental de la química moderna.

⁷³ Este carácter constructivo de la nueva química lo resume el propio Lavoisier: "El mérito de la nomenclatura que hemos adoptado consiste principalmente en que una vez nombrada la sustancia simple, los nombres de todos sus compuestos se deducen necesariamente de esta primera palabra", LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, op. cit., p. 102.

- BUENO, Gustavo (1982), "El cierre categorial aplicado a las ciencias físico-químicas", en HIDALGO, Alberto & BUENO SÁNCHEZ, Gustavo (Eds.), *Actas del I Congreso de Teoría y Metodología de las Ciencias*, Oviedo, Pentalfa: pp. 101-164.
- BUENO, Gustavo (1992-1993), *Teoría del cierre categorial*, 5 vols., Oviedo, Pentalfa.
- CALVO, David (2004), "Los tres contextos de la investigación científica: descubrimiento, modelización, justificación", en RIVADULLA, Andrés (Ed.) (2004), *Hipótesis y verdad en ciencia. Ensayos sobre la filosofía de Kart R. Popper*, Editorial Complutense, Madrid, pp. 179-191.
- CARNOT, Sadi (1824), *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, Madrid, Alianza, 1987.
- COLUBI, Mariano (1999), *Boskovic y la visión mecánica de la naturaleza (1740-1785)*, Madrid, Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid.
- D'ALEMBERT, Jean (1751), *Discurso preliminar de la Enciclopedia*, Madrid, Sarpe, 1984.
- DESCARTES, Rene (1620), *Discurso del método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*, Madrid, Alfaguara, 1987.
- DESCARTES, René & LEIBNIZ, G.W. (1989), *Sobre los principios de la filosofía*, Madrid, Gredos.
- ESTANY, Anna (1990), *Modelos de cambio científico*, Barcelona, Crítica.
- FENBY, David V. (1987), "Heat: Its measurement from Galileo to Lavoisier", *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 59, No. 1, pp. 91-100.
- FRANKLIN, Benjamín (1988), *Experimentos y observaciones sobre electricidad*, Madrid, Alianza Editorial.
- FUERTES, J.F., y LÓPEZ GARCÍA, J. (1992), "Roger Boscovich: ¿precursor de la teoría de campos?". *Theoria* 7, pp. 687-701.
- GILBERT, William (1600), *On the Magnet*, Dover, New York, 1958.
- GONZÁLEZ RECIO, José Luis (Ed.) (2007), *Átomos, almas y estrellas. Estudios sobre la ciencia griega*, Plaza y Valdés, Madrid.
- MAXWELL, Grover (1962), "El estatus ontológico de las entidades teóricas", en OLIVÉ, L. & PÉREZ RANSANZ, A. R. (Comp.) (1989), *Filosofía de la ciencia: Teoría y observación*, Madrid, Siglo XXI, pp. 116-144.
- GUERLAC, Henry (1957), "Joseph Black and Fixed Air. A Bicentenary Retrospective, with Some New or Little Known Material", *Isis*, Vol. 48, No. 2. (Jun.), pp. 124-151.
- GUERLAC, Henry (1957), "Joseph Black and Fixed Air: Parte II", *Isis*, Vol. 48, No. 4. (Dec.), pp. 433-456.
- GUERLAC, Henry (1976), "Chemistry as a Branch of Physics: Laplace's Collaboration with Lavoisier", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7: pp. 193-276.
- HACKING, Ian (1983), *Representar e intervenir*, México, Paidós, 1996.
- HANKINS, Thomas L. (1970), *Jean D'Alembert: Science and Enlightenment*, Oxford.
- HANKINS, Thomas L. (1985), *Ciencia e Ilustración*, Madrid, Siglo XXI, 1988.
- HANSON, N. R. (1958/1971), *Patrones de descubrimiento. Observación y explicación*, Madrid, Alianza Editorial, 1977.
- HEILBRON, J. L. (1979), *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, Berkeley/Los Angeles/London, University of California Press.
- HEILBRON, J.L. (1982), *Elements of Early Modern Physics*, Berkeley, Univ. California Press.
- HIDALGO, Alberto (1990), "Estrategias metacientíficas I", *El Basilisco* 2ª Epoca, 5, Oviedo, pp. 19-40.

- HIDALGO, Alberto (1990), "Estrategias metacientíficas II", *El Basilisco* 2ª Epoca, 6, Oviedo, pp. 26-48
- HIDALGO, Alberto & BUENO SÁNCHEZ, Gustavo (Eds.) (1982), *Actas del I Congreso de Teoría y Metodología de las Ciencias*, Oviedo, Pentalfa.
- HUNTER, M. (1982), *The Royal Society and Its Fellows, 1660-1700: The Morphology of an Early Scientific Institution*, The British Society for the History of Science, Chalfont St. Giles.
- KANT, Immanuel (1781), *Crítica de la Razón Pura*, Alfaguara, Madrid, 2000.
- KERKER, Milton (1955), "Herman Boerhaave and the Development of Pneumatic Chemistry", *Isis*, Vol. 46, No. 1. (Mar.), pp. 36-49.
- KUHN, T. S. (1961), "La función de la medición en la física moderna", en KUHN, T. S. (1993), *La tensión esencial*, México, F.C.E.: pp. 202-247.
- KUHN, T. S. (1993), *La tensión esencial*, México, F.C.E.
- LAVOISIER, A. L., *Oeuvres de Lavoisier*, 6 vols., Impr. Imperiale, Paris, Dumas, J.-B., Grimoux, E., et Fouqué, F.-A. (Eds.), 1862-1893.
- LAVOISIER, A. L. (1789), *Tratado elemental de química*, Barcelona, Crítica, 2007.
- MARTINEZ MARZOA, Felipe (1989), *Releer a Kant*, Anthropos, Barcelona.
- McCLELLAN III, J.E. (1985), *Science Organized: Scientific Societies in the Eighteenth Century*, Columbia University Press, New York.
- MEYNELL, G. (2002), *The French Academy of Sciences, 1666-91*, Haven House, Dover.
- MIDDLETON, W.E.K. (1971), *The Experimenters: A Study of the Accademia del Cimento*, Johns Hopkins Press, Baltimore.
- OLDROYD, David (1986), *El arco del conocimiento*, Crítica, Barcelona, 1993.
- OLIVÉ, L. & PÉREZ RANSANZ, A. R. (Comp.) (1989), *Filosofía de la ciencia: Teoría y observación*, Madrid, Siglo XXI.
- NEWTON, Isaac (1687), *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, Madrid, Técnos, 1987.
- NEWTON, Isaac (1704), *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*, Madrid, Alfaguara, 1977.
- NEWTON, Isaac (2004), *Philosophical Writings*, Cambridge University Press, Cambridge.
- NEWTON, Isaac (2001), *Cuatro cartas al Dr. Bentley: carta al honorable Sr. Boyle sobre la causa de la gravitación*, Madrid, Universidad Complutense.
- PÉREZ HERRANZ, Fernando (1998), *Árthra he péphyken: las articulaciones naturales de la filosofía*, Alicante, Universidad de Alicante.
- PÉREZ HERRANZ, Fernando (2006), "El 'giro morfológico': la forma, condición del sentido", *Quaderns de filosofia i ciència*, 36, pp. 61-72.
- PÉREZ HERRANZ (2007), "Entre Samos y el Museo: la travesía por el número y la forma geométrica", en GONZÁLEZ RECIO, José Luis (Ed.), *Átomos, almas y estrellas. Estudios sobre la ciencia griega*, Plaza y Valdés, Madrid, pp. 353-398.
- PIAGET, Jean & GARCÍA, Rolando (1982), *Psicogénesis e historia de la ciencia*, Madrid, Siglo XXI.
- PRIGOGINE, Ilya & STENGERS, Isabelle (1979), *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Madrid, Alianza, 1997 (Ed. Corregida y aumentada: 1986).
- PURVER, M. (1967), *The Royal Society: Concept and Creation*, Routledge and Keagan Paul, London.
- REICHENBACH, Hans (1938), *Experience and Prediction*, Chicago, University of Chicago Press.
- RIVADULLA, Andrés (Ed.) (2004), *Hipótesis y verdad en ciencia. Ensayos sobre la filosofía de Kart R. Popper*, Editorial Complutense, Madrid.
- ROSSI, Paolo (1974), *Francis Bacon: De la magia a la ciencia*, Madrid, Alianza, 1990.

- ROSSI, Paolo (1986), *Las arañas y las hormigas. Una apología de la historia de la ciencia*, Barcelona, Crítica, 1990.
- SARAIVA, L. M. R. (1997), "Laplace, Lavoisier and the Quantification of Heat", *Physis. Rivista Internazionale di Storia della Scienza* (Florenca: Leo S. Olschki Editore), vol. 34, Fasc. 1-2: pp. 112-134.
- SCHOFIELD, Robert E. (1970), *Mechanism and Materialism: British Natural Philosophy in an Age of Reason*, Princenton.
- SELLES, Manuel A. (2001), "El vapor en el laboratorio: una memoria sobre la ebullición del abate Nollet", *Asclepio*, Vol. LIII, 2, pp. 165-189.
- SERRES, Michel (Ed.) (1989), *Historia de las ciencias*, Madrid, Cátedra, 1998.
- SOLÍS, Carlos (Ed.) (1998), *Alta tensión. Filosofía, sociología e historia de la ciencia*, Barcelona, Paidós.
- SOLIS, Carlos (2005), "Erudición, magia y espectáculo: el juicio de la República de las Letras sobre Athanasius Kircher", *Endoxa: Series filosóficas*, 19, UNED, Madrid, pp. 243-313.
- STENGERS, Isabelle (1989), "La afinidad ambigua: el sueño newtoniano de la química del siglo XVIII", en SERRES, Michel (Ed.), *Historia de las ciencias*, Madrid, Cátedra, 1998: pp. 337-361.
- THACKRAY, Arnold (1970), *Atoms and powers: an essay on Newtonian matter-theory and the development of chemistry*, Cambridge, Harvard University Press.
- THOM, René (1980), *Parábolas y catástrofes. Entrevista sobre matemática, ciencia y filosofía*, Barcelona, Tusquets, 2000.
- VENTURI, Franco (1963), *Los orígenes de la Enciclopedia*, Barcelona, Crítica, 1980.