

Thomas S. Kuhn

LA ESTRUCTURA DE LAS REVOLUCIONES CIENTÍFICAS

NUEVA EDICIÓN



BREVIARIOS

preguntas respecto de las cuales se han planteado. Esta circularidad no las invalida en absoluto, pero las convierte en partes de una teoría y, al hacerlo, las somete al mismo escrutinio que se aplica regularmente a las teorías en otros campos. Si han de tener como contenido algo más que una pura abstracción, entonces dicho contenido ha de descubrirse observando su aplicación a los datos que tratan de dilucidar. ¿Cómo podría dejar de ser la historia de la ciencia una fuente de fenómenos a los que se podría pedir legítimamente que se aplicaran las teorías acerca del conocimiento?

II. EL CAMINO HACIA LA CIENCIA NORMAL

EN ESTE ENSAYO *ciencia normal* significa la investigación basada firmemente en uno o más logros científicos pasados, logros que una comunidad científica particular reconoce durante algún tiempo como el fundamento de su práctica ulterior. Hoy en día tales logros se recogen en los libros de texto científicos, tanto elementales como avanzados, aunque rara vez en su forma original. Dichos libros de texto exponen el cuerpo de la teoría aceptada, ilustran muchas o todas sus aplicaciones afortunadas y confrontan tales aplicaciones con ejemplos de observaciones y experimentos. Antes de que tales libros se hicieran populares a comienzos del siglo XIX (incluso en fechas más recientes en las ciencias que han madurado después), muchos de los famosos clásicos de la ciencia desempeñaban una función semejante. La *Física* de Aristóteles, el *Almagesto* de Tolomeo, los *Principios* y la *Óptica* de Newton, la *Electricidad* de Franklin, la *Química* de Lavoisier y la *Geología* de Lyell, junto con muchas otras obras, sirvieron durante algún tiempo para definir los problemas y métodos legítimos de investigación para las sucesivas generaciones de científicos. Eran capaces de hacer tal cosa porque compartían dos características esenciales. Sus realizaciones carecían hasta tal punto de precedentes, que eran capaces de atraer a un grupo duradero de partidarios alejándolos de los modos rivales de actividad

científica, y a la vez eran lo bastante abiertas para dejarle al grupo de profesionales de la ciencia así definido todo tipo de problemas por resolver.

En adelante me referiré con el término *paradigmas* a los logros que comparten estas dos características, término que se conecta estrechamente con el de *ciencia normal*. Al elegir este término, es mi intención sugerir que algunos ejemplos aceptados de práctica científica efectiva, ejemplos que incluyen conjuntamente leyes, teorías, aplicación e instrumentación, suministran modelos de los que surgen tradiciones particulares y coherentes de investigación científica. Son las tradiciones que el historiador describe con rúbricas tales como “astronomía tolemaica” (o “copernicana”), “óptica corpuscular” (u “óptica ondulatoria”), etc. El estudio de los paradigmas, incluyendo entre ellos algunos mucho más especializados que los nombrados arriba a guisa de ejemplo, preparan fundamentalmente al estudiante para convertirse en miembro de la comunidad científica particular en la que habrá de trabajar más adelante. Puesto que en ella se encuentra con personas que aprendieron los fundamentos de su campo con los mismos modelos concretos, su práctica subsiguiente rara vez despertará discrepancias expresas sobre cuestiones fundamentales. Las personas cuya investigación se fundamenta en paradigmas compartidos se encuentran comprometidas con las mismas reglas y normas de práctica científica. Dicho compromiso y el aparente consenso que produce son prerrequisitos de la ciencia normal; esto es, del nacimiento y prosecución de una tradición investigadora particular.

Dado que en este ensayo el concepto de paradigma aparecerá a menudo en lugar de toda una serie de nociones familiares, habremos de explicarnos un tanto sobre las razones de su introducción. ¿Por qué el logro científico, en cuanto núcleo del compromiso profesional, es previo a los diferentes conceptos, leyes, teorías y puntos de vista que de él se puedan extraer? ¿En qué sentido constituye el paradigma compartido una unidad fundamental para el estudioso del desarrollo científico, unidad que no se puede traducir completamente a los componentes lógicamente atómicos que podrían funcionar en su lugar? Cuando encontremos en el capítulo v respuestas a estas cuestiones y otras similares, ellas resultarán fundamentales para comprender tanto la ciencia normal como el concepto asociado de paradigma. La discusión más abstracta, no obstante, se asentará sobre una exposición previa a ejemplos de ciencia normal o de paradigmas en acción. En concreto, ambos conceptos relacionados se clarificarán reparando en que puede haber un tipo de investigación científica sin paradigmas, o al menos sin alguno tan inequívoco y tan absorbente como los mencionados antes. La adquisición de un paradigma y del tipo de investigación más esotérico que éste permite es un signo de madurez en el desarrollo de un campo científico dado.

Si el historiador rastrea en el tiempo el conocimiento científico de un grupo seleccionado de fenómenos relacionados, lo más probable es que encuentre alguna variante menor de un patrón ilustrado aquí con la historia de la óptica física. Los libros de texto actuales le cuentan al estudiante que la luz está formada por fotones, esto

es, entidades mecánico-cuánticas que muestran algunas características de las ondas y algunas de las partículas. La investigación procede de acuerdo con ello, o más bien de acuerdo con la caracterización más elaborada y matemática de la que se deriva esta acostumbrada descripción verbal. No obstante, esa caracterización de la luz apenas tiene medio siglo. Antes de que la desarrollaran Plank, Einstein y otros a comienzo de este siglo [siglo xx], los textos de física enseñaban que la luz era un movimiento ondulatorio transversal, una concepción enraizada en un paradigma que en última instancia derivaba de los escritos ópticos de Young y de Fresnel a comienzos del siglo xix. Tampoco la teoría ondulatoria fue la primera que abrazaron casi todos los practicantes de la ciencia óptica. Durante el siglo xviii el paradigma de este campo lo suministraba la *Óptica* de Newton, que enseñaba que la luz estaba compuesta por corpúsculos materiales. En aquella época, los físicos buscaban pruebas, cosa que no hacían los primeros teóricos ondulatorios, en la presión ejercida por las partículas de luz al chocar con los cuerpos sólidos.¹

Estas transformaciones de los paradigmas de la óptica física constituyen revoluciones científicas y las sucesivas transiciones de un paradigma a otro mediante una revolución constituyen el patrón usual de desarrollo de la ciencia madura. Sin embargo, no es el patrón característico del periodo anterior a la obra de Newton, siendo ese contraste el que aquí nos interesa. No hay perio-

¹ Joseph Priestley, *The History and Present State of Discoveries Relating to Vision, Light, and Colours* (Londres, 1772), pp. 385-390.

do alguno entre la remota antigüedad y el final del siglo xvii que exhiba un punto de vista único, aceptado por todos, acerca de la naturaleza de la luz. En lugar de ello, nos encontramos un diferente número de escuelas y subescuelas rivales, la mayoría de las cuales abrazaba una variante u otra de las teorías epicureístas, aristotélicas o platónicas. Un grupo consideraba que la luz constaba de partículas que emanaban de los cuerpos materiales; para otro, era una modificación del medio interpuesto entre el cuerpo y el ojo; otro explicaba la luz en términos de una interacción entre el medio y una emanación del ojo, dándose además otras combinaciones y modificaciones de estas ideas. Cada una de las escuelas correspondientes se apoyaba en su relación con alguna metafísica concreta y todas ellas hacían hincapié en el conjunto particular de fenómenos ópticos que su propia teoría explicaba mejor, distinguiéndolos como observaciones paradigmáticas. Otras observaciones se abordaban con elaboraciones *ad hoc* o quedaban como problemas relevantes para investigaciones ulteriores.²

En diferentes momentos todas estas escuelas hicieron contribuciones significativas al cuerpo de conceptos, fenómenos y técnicas de los que Newton extrajo el primer paradigma de la óptica física aceptado de manera casi uniforme. Cualquier definición de científico que excluya al menos a los miembros más creativos de estas diversas escuelas, excluirá también a sus sucesores modernos. Esas personas eran científicos. Sin em-

² Vasco Ronchi, *Histoire de la Lumière*, trad. Juliette Taton (París, 1956), caps. i-iv.

bargo, quien examine una panorámica de la óptica física anterior a Newton podría concluir perfectamente que, por más que los practicantes de este campo fuesen científicos, el resultado neto de su actividad no llegaba a ser plenamente ciencia. Al ser incapaz de dar por supuesto un cuerpo común de creencias, cada autor de óptica física se veía obligado a construir de nuevo su campo desde sus fundamentos. Al hacerlo, la elección de las observaciones y experimentos que apoyaban su punto de vista era relativamente gratuito, pues no había un conjunto normal de métodos o de fenómenos que todo autor de óptica se viese obligado a emplear y explicar. En estas circunstancias, el diálogo de los libros resultantes se dirigía a menudo tanto a los miembros de otras escuelas como a la naturaleza. Este patrón no es desusado hoy en día en algunos campos creativos, y no es incompatible con descubrimientos e inventos de importancia. No es, sin embargo, el patrón de desarrollo adquirido por la óptica física después de Newton y que para otras ciencias es, hoy en día, familiar.

La historia de la investigación eléctrica en la primera mitad del siglo XVIII nos suministra un ejemplo más concreto y mejor conocido del modo en que se desarrolla una ciencia antes de adquirir su primer paradigma universalmente aceptado. Durante dicho periodo había casi tantos puntos de vista acerca de la naturaleza de la electricidad como experimentadores eléctricos importantes, personas como Hauksbee, Gray, Desaguliers, Du Fay, Nollet, Watson, Franklin y otros. Sus diversos conceptos de electricidad tenían algo en común: se derivaban en parte de una u otra versión

de la filosofía mecánico-corpúscular que guiaba a la sazón toda la investigación científica. Además, todos ellos formaban parte de teorías científicas reales, de teorías que se habían extraído en parte de experimentos y observaciones y que parcialmente determinaban la elección e interpretación de los problemas ulteriores sometidos a investigación. Con todo, por más que todos los experimentos fuesen eléctricos, y por más que la mayoría de los experimentadores leyese las obras de los demás, sus teorías sólo presentaban un parecido de familia.³

Siguiendo la práctica del siglo XVII, un grupo primitivo de teorías consideraba la atracción y la generación por fricción como los fenómenos eléctricos fundamentales. Este grupo tendía a tratar

³ Duane Roller y Duane H. D. Roller, *The Development of the Concept of Electric Charge: Electricity from the Greeks to Coulomb* (Harvard Case Histories in Experimental Science, Case 8; Cambridge, Massachusetts, 1954); y I. B. Cohen, *Franklin and Newton: An Enquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof* (Filadelfia, 1956), caps. VII-XII. Para algunos de los detalles analíticos del párrafo que sigue en el texto estoy en deuda con un artículo aún sin publicar de mi alumno John L. Heilbron. Se puede encontrar una explicación algo más extensa y precisa del surgimiento del paradigma de Franklin, aún pendiente de publicación, en T. S. Kuhn, "The Function of Dogma in Scientific Research", en A. C. Crombie (ed.), "Symposium on the History of Science, University of Oxford, July 9-15 1961", que publicará Heinemann Educational Books [Véase A. C. Crombie (ed.), *Historical Studies in the Intellectual, Social and Technological Conditions for Scientific Discovery and Technical Invention from Antiquity to the Present*, Heinemann Educational Books, 1963, pp. 347-369. El artículo de Kuhn se ha traducido al español como un folleto, *La función del dogma en la investigación científica*, Universidad de Valencia, Servicio de Publicaciones, 1980.]

la repulsión como un efecto secundario debido a algún tipo de rebote mecánico, posponiendo así lo más posible tanto la discusión como la investigación sistemática del nuevo efecto de la conducción eléctrica, recientemente descubierto por Gray. Otros *electricistas* (el término es suyo) consideraban que la atracción y la repulsión eran manifestaciones igualmente elementales de la electricidad, por lo que modificaron consiguientemente sus teorías y su investigación. (De hecho, este grupo es considerablemente pequeño, e incluso la teoría de Franklin no explicó nunca del todo la repulsión mutua de dos cuerpos cargados negativamente.) Sin embargo, encontraban las mismas dificultades que el primer grupo para explicar simultáneamente todo lo que no fueran los efectos de conducción más simples. Con todo, tales efectos suministraron el punto de partida de un tercer grupo, cuyos miembros tendían a hablar de la electricidad como de un “fluido” que podría discurrir por los conductores más bien que como un “efluvio” que emanase de los no conductores. Este grupo, a su vez, tenía dificultades a la hora de reconciliar su teoría con algunos efectos atractivos y repulsivos. Tan sólo gracias al trabajo de Franklin y sus seguidores inmediatos surgió una teoría capaz de explicar con facilidad aproximadamente igual casi todos estos efectos y por consiguiente pudo suministrar y suministró a la siguiente generación de “electricistas” un paradigma común para su investigación.

Excluyendo campos como el de las matemáticas y el de la astronomía, en los que los primeros paradigmas datan de la prehistoria, y excluyendo asimismo aquellos que, como la bioquímica, sur-

gieron por división y recombinación de especialidades ya maduras, las situaciones antes bosquejadas son históricamente típicas. Aunque entraña continuar utilizando la desafortunada simplificación que etiqueta un episodio prolongado en el tiempo con un nombre único y hasta cierto punto arbitrario (por ejemplo Newton o Franklin), sugiero que algunos desacuerdos fundamentales de carácter similar caracterizan, por ejemplo, el estudio del movimiento antes de Aristóteles y de la estática antes de Arquímedes, el estudio del calor antes de Black o de la química antes de Boyle y Boerhaave, y el de la geología histórica antes de Hutton. En algunas partes de la biología, por ejemplo en el estudio de la herencia, los primeros paradigmas universalmente aceptados son aún más recientes, siendo aún una cuestión abierta qué partes de la ciencia social habrían adquirido ya tales paradigmas. La historia sugiere que el camino hacia un firme consenso en la investigación es extraordinariamente arduo.

Sin embargo, la historia también sugiere algunas razones para las dificultades que se interponen en dicho camino. En ausencia de algún paradigma o de algún candidato a paradigma, es probable que parezcan igualmente relevantes todos los hechos que podrían corresponder al desarrollo de una ciencia dada. Como resultado de ello, la primitiva recogida de datos es una actividad mucho más aleatoria que la familiar en el desarrollo científico posterior. Además, en ausencia de una razón para buscar algún tipo particular de información más recóndita, la primitiva recolección de hechos se limita usualmente a la multitud de datos que está al alcance de la mano.

El conjunto resultante de hechos contiene los que son accesibles a la observación y experimentación casuales junto con algunos de los datos más esotéricos obtenibles de artes ya establecidas, como la medicina, el cómputo del calendario y la metalurgia. Dado que las artes son una fuente fácilmente accesible de hechos que no se podrían haber descubierto por casualidad, la tecnología ha desempeñado a menudo una función vital en el surgimiento de nuevas ciencias.

Pero si bien este tipo de recolección de hechos ha resultado esencial para la gestación de muchas ciencias importantes, quienquiera que examine, por ejemplo, los escritos enciclopédicos de Plinio o las historias naturales de Bacon, descubrirá que lo que producen es un cenagal. Hasta cierto punto, dudamos de calificar como científicas a las obras resultantes. Las "historias" baconianas del calor, el color, los vientos, la minería, etc., están llenas de informaciones, algunas de las cuales resultan arcanas. Sin embargo, yuxtaponen hechos que andando el tiempo resultarán reveladores (por ejemplo el calentamiento por mezcla) junto con otros (por ejemplo, el calor de las pilas de estiércol) que durante una buena época serán demasiado complejos para integrarse en alguna teoría.⁴ Además, puesto que cualquier descripción tiene que ser parcial, las historias naturales típicas tienden a omitir de sus listas enormemente circunstanciales precisamente aquellos

⁴ Véase el bosquejo de una historia natural del calor en el *Novum Organum*, vol. VIII de *The Works of Francis Bacon*, J. Spedding, R. L. Ellis y D. D. Heath (eds.) (Nueva York, 1869), pp. 169-203 [traducción española, *La gran restauración*, Madrid, Alianza, 1985, pp. 200-226].

detalles en los que los científicos del futuro hallarán fuentes especialmente reveladoras. Así por ejemplo, casi ninguna de las primitivas "historias" de la electricidad mencionan el hecho de que las partículas atraídas por una barra de vidrio frotado rebotan de nuevo. Tal efecto parecía ser mecánico y no eléctrico.⁵ Además, puesto que la recolección casual de hechos rara vez dispone del tiempo o de las herramientas para ser crítica, las historias naturales yuxtaponen a menudo descripciones como las de más arriba con otras que hoy somos totalmente incapaces de confirmar, como, por ejemplo, el calentamiento por antipe-ristasis (o por enfriamiento).⁶ Sólo muy de tarde en tarde, como ocurre en los casos de la estática, la dinámica o la óptica geométrica antiguas, los hechos recogidos con tan escasa guía de las teorías preestablecidas hablan con la suficiente claridad como para permitir que surja un primer paradigma.

⁵ Roller y Roller, *The Development*, pp. 14, 22, 28, 43. Sólo después de la obra recogida en la última de estas citas, los efectos repulsivos se reconocieron en general como de carácter inequívocamente eléctrico.

⁶ Bacon (*Novum Organum*, pp. 235, 337) dice, "el agua ligeramente templada se congela más fácilmente que la muy fría". [Traducción citada, p. 352.] Este hecho, mencionado desde Aristóteles (*Meteoros*, 248b31) hasta Descartes (*Meteoros*, fin del primer discurso), se conoce ahora como efecto Mpemba por el estudiante tanzano que llamó la atención sobre él en los años sesenta del siglo pasado, gracias al cual se ha observado en varios laboratorios de EUA. La explicación del efecto en términos de evaporación, convención, contenido gaseoso y otros factores dista de ser concluyente. (T.) Para una explicación parcial de la historia antigua de esta extraña observación, véase Marshall Clagett, *Giovanni Marliani and Late Medieval Physics* (Nueva York, 1941), cap. v.

Es ésta la situación que crean las escuelas típicas de los primeros estadios del desarrollo de una ciencia. Ninguna historia natural se puede interpretar en ausencia de al menos algún cuerpo implícito de creencias teóricas y metodológicas entrelazadas que hagan posible la selección, la evaluación y la crítica. Si este cuerpo de creencias no está ya implícito en la colección de hechos, en cuyo caso disponemos de algo más que de “meros hechos”, entonces ha de tomarse de fuera, quizá de una metafísica dominante, de otra ciencia o de circunstancias personales e históricas. No es de extrañar, por tanto, que en los primeros estadios de desarrollo de una ciencia, distintas personas describan e interpreten de modos diferentes el mismo rango de fenómenos, aunque usualmente no se trate exactamente de los mismos fenómenos concretos. Lo que es sorprendente y también quizá único en los campos que llamamos ciencia es que tal grado inicial de divergencia acabe desapareciendo hasta tal punto.

En efecto, desaparecen en muy considerable medida y, por lo que parece, de una vez por todas. Además, su desaparición está normalmente provocada por el triunfo de una de las escuelas preparadigmáticas que, debido a sus propias creencias y preconcepciones características, prestaba atención tan sólo a una parte restringida de aquella masa de información desmesurada e informe. Los electricistas que consideraban a la electricidad como un fluido y que, por tanto, hacían hincapié en la conducción, suministran un excelente ejemplo a este respecto. Inspirados por su creencia, que difícilmente podía enfrentarse a la conocida multiplicidad de efectos atractivos y repulsi-

vos, varios de ellos concibieron la idea de embotellar el fluido eléctrico. El fruto inmediato de sus esfuerzos fue la botella de Leyden, un artilugio que jamás hubiera podido ser descubierto por una persona que explorara la naturaleza de modo casual o aleatorio, y que fue de hecho desarrollada independientemente por al menos dos investigadores a comienzos de la década de 1740.⁷ Casi desde el comienzo de sus investigaciones eléctricas, Franklin se preocupó especialmente de explicar este aparato tan extraño y que resultaría ser particularmente revelador. Su éxito en esta tarea suministró el argumento más efectivo para convertir su teoría en un paradigma, por más que fuera aún incapaz de explicar todos los casos conocidos de repulsión eléctrica.⁸ Para ser aceptada como paradigma, una teoría debe parecer mejor que sus competidoras, pero no tiene por qué explicar todos los hechos a los que se enfrenta y de hecho nunca lo hace.

Lo que hizo la teoría de la electricidad como fluido para el subgrupo que la sostenía, lo hizo más tarde el paradigma de Franklin para todo el grupo de los electricistas. Sugería qué experimentos merecería la pena hacer y cuáles no porque se dirigían a manifestaciones de la electricidad secundarias o demasiado complejas. Pero el paradigma hizo la tarea de una manera mucho más efectiva en parte porque el fin del debate entre escuelas acabó con las constantes reiteraciones de los aspectos fundamentales y en parte por-

⁷ Roller y Roller, *The Development*, pp. 51-54.

⁸ El caso problemático era la repulsión mutua de los cuerpos cargados negativamente, sobre el cual véase Cohen, *Franklin and Newton*, pp. 491-494, 531-543.

que la confianza en que se hallaban en la vía correcta animó a los científicos a emprender tipos de trabajo más precisos, más esotéricos y más costosos.⁹ Libres de la preocupación por todos y cada uno de los fenómenos eléctricos, el grupo unido de los electricistas podría examinar con mucho más detalle ciertos fenómenos selectos, diseñando para la tarea un equipo experimental muy especializado y utilizándolo de una manera mucho más sistemática y obstinada de lo que los electricistas habían hecho antes. Tanto la recogida de hechos como la articulación teórica se convirtieron en actividades estrictamente dirigidas, por lo que la efectividad y la eficiencia de la investigación eléctrica aumentó consiguientemente, apoyando así una versión social de la aguda consigna metodológica de Francis Bacon según la cual “la verdad emerge más fácilmente del error que de la confusión”.¹⁰

En el siguiente capítulo examinaremos la naturaleza de esta investigación estrictamente dirigida

⁹ Habría que señalar que la aceptación de la teoría de Franklin no acabó totalmente con los debates. En 1759 Robert Symmer propuso una versión de dicha teoría que recurría a dos fluidos, y durante muchos años los electricistas se dividieron entre si la electricidad era un solo fluido o dos. Pero los debates sobre este tema no hacen más que confirmar lo que se ha dicho antes acerca del modo en que un logro reconocido universalmente une a la profesión. Aunque continuaron divididos sobre este punto, los electricistas concluyeron rápidamente que ninguna prueba experimental tenía la menor posibilidad de distinguir las dos versiones de la teoría las cuales, por lo tanto, eran equivalentes. Tras ello ambas escuelas podían explotar, y de hecho lo hicieron, todos los beneficios ofrecidos por la teoría de Franklin (*ibidem*, pp. 543-546, 548-554).

¹⁰ Bacon, *Novum Organum*, p. 210 [traducción española, p. 232].

o basada en paradigmas, pero antes de ello hemos de reparar brevemente en cómo el surgimiento de un paradigma afecta a la estructura de un grupo que trabaja en un campo. Cuando en el transcurso del desarrollo de la ciencia natural, una persona o un grupo produce por primera vez una síntesis capaz de atraer a la mayoría de los profesionales de la siguiente generación, las escuelas más antiguas desaparecen gradualmente. En parte su desaparición está provocada por la conversión de sus miembros al nuevo paradigma, pero siempre hay algunas personas que se aferran a uno u otro de los viejos puntos de vista y simplemente son eliminados de la profesión, que a partir de entonces ignora sus trabajos. El nuevo paradigma entraña una nueva y más rígida definición del campo. Los que no quieren o no pueden acomodar su trabajo a él han de proceder aisladamente o unirse a otro grupo.¹¹ Históricamente, lo normal es que se hayan limitado a permanecer en los departamentos de filosofía en los que se han gestado tantas de las ciencias especiales. Como muestran estas indicaciones, a veces basta con que reciba un paradigma para que un grupo que antes se interesaba solamente en el estudio de la naturaleza se transforme en una profesión o al menos en una disciplina. En las ciencias (aunque no en campos como la medicina, la tecnología o el derecho, cuya principal razón de

¹¹ La historia de la electricidad suministra un excelente ejemplo que se podría encontrar en las carreras de Priestley, Kelvin y otros. Franklin nos informa de que Nollet, quien a mitad de siglo era el electricista continental más influyente, “vivió lo bastante para verse convertido en el último de su secta, con la excepción del Sr. D.— su alumno y discípulo inmediato” (Max

ser se encuentra en una necesidad social externa), la formación de revistas especializadas, la fundación de sociedades de especialistas y la exigencia de un lugar especial en el currículum se asocian normalmente con la recepción inicial por parte del grupo de un paradigma único. Al menos así ocurrió entre el momento, hace siglo y medio, en que se desarrolló por vez primera el patrón institucional de especialización científica y el momento muy reciente en que la parafernalia de la especialización adquirió un prestigio propio.

La definición más rígida del grupo científico posee otras consecuencias. Cuando el científico individual puede dar por supuesto un paradigma, ya no necesita construir de nuevo su campo en sus obras principales, partiendo de los primeros principios y justificando el uso de cada uno de los conceptos introducidos. Eso puede quedar para el autor de libros de texto. Dado un libro de texto, no obstante, el científico creador puede iniciar su investigación donde ese termina, concentrándose exclusivamente en los aspectos más sutiles y más esotéricos de los fenómenos naturales de que se

Farrand [ed.], *Benjamin Franklin's Memoirs* [Berkeley, 1949], pp. 384-386). Con todo, resulta más interesante la resistencia de escuelas enteras en medio de un creciente aislamiento de la ciencia profesional. Considérese por ejemplo el caso de la astrología, que fue en tiempos parte integrante de la astronomía. O considérese la prosecución a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX de una tradición otrora respetada de química "romántica". Trátase de la tradición discutida por Charles Gillispie en "The *Encyclopédie* and the Jacobin Philosophy of Science: A Study in Ideas and Consequences", *Critical Problems in the History of Science*, Marshall Clagett (ed.) (Madison, 1959), pp. 255-289; y "The Formation on Lamarck's Evolutionary Theory", *Archives internationales d'histoire des sciences*, XXXVII (1956), 323-338.

ocupa su grupo. Y, en la medida en que lo hace, sus informes de investigación comenzarán a transformarse en modos cuya evolución ha sido muy poco estudiada, aunque su resultado moderno es obvio para todos y opresivo para muchos. No será frecuente que sus investigaciones se sigan incluyendo en libros dirigidos a cualquiera que pueda interesarse en el tema del campo, como el libro de Franklin *Experiments... on Electricity* o el de Darwin, *Origin of Species*. Por el contrario aparecerán normalmente en forma de artículos breves dirigidos exclusivamente a los colegas profesionales, las personas de las que se puede suponer que tienen conocimiento de un paradigma compartido y que resultan ser las únicas capaces de leer los artículos a ellas dirigidas.

Actualmente, en el terreno de las ciencias, normalmente los libros o bien son textos o bien son reflexiones retrospectivas sobre un aspecto u otro de la vida científica. Lo más probable es que el científico que lo escriba encuentre que su reputación profesional disminuye en lugar de aumentar. Sólo en los antiguos estadios preparadigmáticos del desarrollo de las diversas ciencias ordinariamente los libros poseían la misma relación con los logros profesionales que aún tienen en otros campos creativos. Y solamente en aquellos campos que aún utilizan libros, con o sin artículos, como vehículo de comunicación de la investigación, las líneas de la profesionalización se hallan aún tan débilmente trazadas que las personas ordinarias pueden aspirar a seguir el progreso leyendo los informes originales de los profesionales. Tanto en matemáticas como en astronomía, los informes de investigación cesaron ya en la anti-

güedad de resultar inteligibles al público educado general. La investigación en dinámica se volvió asimismo esotérica al final de la Edad Media para recuperar la comprensibilidad general tan sólo brevemente al comienzo del siglo xviii, momento en que un nuevo paradigma sustituyó al que había guiado la investigación medieval. La investigación eléctrica comenzó a necesitar una traducción para las personas comunes antes del final del siglo xviii y la mayoría de los campos de la física dejaron de ser generalmente accesibles en el siglo xix. En esos dos mismos siglos se pueden detectar transiciones similares en diferentes partes de las ciencias biológicas, y en algunas áreas de las ciencias sociales pueden estar teniendo lugar perfectamente hoy en día. Aunque se ha convertido en un lugar común, sin duda aceptable, deplorar la creciente brecha que separa al científico profesional de sus colegas de otros campos, se ha prestado muy escasa atención a la relación esencial que media entre dicha brecha y los mecanismos intrínsecos al avance de la ciencia.

Desde la antigüedad prehistórica, un campo de estudio tras otro ha ido cruzando la línea divisoria que media entre lo que el historiador llamaría su prehistoria como ciencia y su historia propiamente dicha. Estas transiciones a la madurez pocas veces han sido tan repentinas o tan inequívocas como podría haber dado a entender mi explicación necesariamente esquemática. Pero tampoco han sido históricamente graduales, es decir coextensivas con todo el desarrollo de los campos en los que se han dado. Los autores sobre temas de electricidad a lo largo de las primeras cuatro dé-

cadadas del siglo xviii poseían mucha más información sobre los fenómenos eléctricos de la que tenían sus predecesores del siglo xvi. Durante el medio siglo posterior a 1740 no se añadieron muchos tipos nuevos de fenómenos eléctricos a sus listas. No obstante, en aspectos importantes, los escritos eléctricos de Cavendish, Coulomb y Volta en el último tercio del siglo xviii parecen mucho más lejanos de los de Gray, Dufay e incluso Franklin de lo que los escritos de estos descubridores eléctricos de comienzos del siglo xviii lo están de los del siglo xvi.¹² En algún momento entre 1740 y 1780 los electricistas fueron capaces por vez primera de dar por supuestos los fundamentos de su campo. A partir de ese momento, procedieron a abordar problemas más concretos y recónditos y cada vez en mayor medida expusieron sus resultados en artículos dirigidos a otros electricistas, más bien que en libros escritos para el mundo culto en general. Adquirieron como grupo lo que habían logrado los astrónomos en la antigüedad y los estudiosos del movimiento en la Edad Media, los de la óptica física a finales del siglo xvii y los de la geología histórica a comienzos del xix. Esto es, lograron establecer un paradigma que

¹² Los desarrollos posteriores a Franklin incluyen un enorme aumento en la sensibilidad de los detectores de carga, las primeras técnicas confiables y ampliamente difundidas para medir la carga, la evolución del concepto de capacidad y su relación con una noción recientemente refinada de tensión eléctrica y la cuantificación de la fuerza electrostática. Sobre todos ellos véase Roller and Roller, *The Development*, pp. 66-81; W. C. Walker, "The Detection and Estimation of Electric Charges in the Eighteenth Century", *Annals of Science*, 1 (1936), pp. 66-100; y Edmund Hoppe, *Geschichte der Elektrizität* (Leipzig, 1884), Parte I, caps. iii-iv.

demostró ser capaz de guiar la investigación de todo el grupo. Exceptuando la perspectiva que da ver las cosas retrospectivamente, es difícil hallar otro criterio que declare con tanta claridad que un campo dado constituye una ciencia.

III. LA NATURALEZA DE LA CIENCIA NORMAL

¿CUÁL ES entonces la naturaleza de la investigación más profesional y esotérica a que da lugar la recepción de un paradigma único por parte de un grupo? Si el paradigma representa el trabajo que ha sido realizado de una vez por todas, ¿qué otros problemas deja para que los resuelva el grupo cohesionado? Tales cuestiones parecerán tanto más urgentes si reparamos ahora en un aspecto en el que los términos empleados hasta el momento pueden llamar a error. Según su uso establecido, un paradigma es un modelo o patrón aceptado y este aspecto de su significado me ha permitido apropiarme aquí del término *paradigma* a falta de otro mejor. Pero como pronto quedará claro, el sentido de 'modelo' y 'patrón' que permite dicha apropiación no es exactamente el mismo que se usa al definir *paradigma*. En gramática, por ejemplo, *amo*, *amas*, *amat* es un paradigma porque muestra el patrón que se ha de usar al conjugar un gran número de otros verbos latinos para producir por ejemplo *laudo*, *laudas*, *laudat*. Según esta aplicación normal, el paradigma funciona permitiendo la repetición de ejemplos cada uno de los cuales podría servir en principio para sustituirlo. Por otro lado, en la ciencia un paradigma rara vez es un objeto que se pueda replicar. Por el contrario, es un objeto que debe articularse y especificarse ulteriormente en condiciones nuevas o más rigurosas, al modo

de una decisión judicial aceptada que sienta precedente.

Para mostrar cómo puede ser así hemos de reconocer hasta qué punto el paradigma puede ser notablemente limitado tanto en amplitud como en precisión en el momento en que surge. Los paradigmas alcanzan su posición porque tienen más éxito que sus competidores a la hora de resolver unos cuantos problemas que el grupo de científicos practicantes considera urgentes. Tener más éxito, con todo, no es lo mismo que ser completamente afortunado en la resolución de un único problema ni notablemente afortunado con un gran número de problemas. El éxito de un paradigma en sus momentos iniciales consiste en gran medida en una promesa de éxitos detectable en ejemplos seleccionados y aún incompletos, como es el caso con el análisis del movimiento de Aristóteles, el cómputo de las posiciones planetarias de Ptolomeo, la aplicación de la balanza de Lavoisier o la matematización del campo electromagnético de Maxwell. La ciencia normal consiste en la actualización de dicha promesa, actualización que se logra extendiendo el conocimiento de aquellos hechos que el paradigma exhibe como especialmente reveladores, aumentando la medida en que esos hechos encajan con las predicciones del paradigma, así como articulando más aún el paradigma mismo.

Pocas personas que no sean de hecho científicos practicantes de una ciencia madura se darán cuenta de hasta qué punto un paradigma deja sin hacer una gran cantidad de trabajo de retoque de este tipo, o lo fascinante que puede ser la ejecución de dicho trabajo. Hay que comprender estos

aspectos. Las operaciones de retoque ocupan a la mayoría de los científicos a lo largo de sus carreras. Constituyen lo que llamo aquí ciencia normal. Si se examina detenidamente, sea históricamente o en el laboratorio contemporáneo, dicha empresa parece ser un intento de meter a la fuerza a la naturaleza en los compartimentos prefabricados y relativamente inflexibles suministrados por el paradigma. Entre los objetivos de la ciencia normal no hay ninguno que exija nuevos tipos de fenómenos, y en realidad los que no encajan en esos compartimentos frecuentemente ni siquiera se ven. Tampoco entra normalmente entre los objetivos de los científicos inventar teorías nuevas, y a menudo son intolerantes con las inventadas por otros.¹ Por el contrario, la investigación en la ciencia normal se orienta a la articulación de los fenómenos y teorías ya suministrados por el paradigma.

Quizá sean defectos. Las áreas investigadas por la ciencia normal son minúsculas, por supuesto, pues la empresa que ahora se discute posee una visión drásticamente reducida. Sin embargo, tales restricciones surgidas de la confianza en un paradigma resultan ser esenciales para el desarrollo de la ciencia. Al centrar la atención en un rango pequeño de problemas relativamente esotéricos, el paradigma obliga a los científicos a investigar algunas partes de la naturaleza con un detalle y una profundidad que de otro modo sería inimaginable. Además la ciencia normal incorpora un mecanismo que asegura el relajamiento de

¹ Bernard Barber, "Resistance by Scientists to Scientific Discovery", *Science*, CXXXVI (1961), pp. 596-602.

las restricciones que atan a la investigación cuando el paradigma del que derivan deja de funcionar de manera efectiva. En este punto los científicos comienzan a comportarse de modo distinto y cambia la naturaleza de los problemas que investigan. Sin embargo, entre tanto, en el periodo en el que el paradigma tiene éxito, la profesión habrá resuelto problemas cuyos miembros difícilmente se habrían imaginado y que nunca se hubieran planteado sin el compromiso con el paradigma. Y al final una parte de los logros resulta siempre ser permanente.

A fin de mostrar con mayor claridad qué se entiende por investigación normal o basada en paradigmas, permítaseme ahora tratar de clasificar y ejemplificar los problemas de que consta principalmente la ciencia normal. Por motivos de conveniencia pospondré la actividad teórica y comenzaré con la recogida de hechos, esto es, con los experimentos y observaciones descritos en las revistas técnicas con las que los científicos informan a los colegas de su profesión acerca de los resultados de su investigación corriente. ¿Sobre qué aspectos de la naturaleza informan normalmente los científicos? ¿Qué determina su elección? Y dado que la mayor parte de la observación científica consume mucho tiempo, equipo y dinero, ¿qué motiva a los científicos para proseguir con su elección hasta alcanzar una conclusión?

Creo que hay sólo tres núcleos normales de investigación científica fáctica que no son distintos siempre ni de manera permanente. En primer lugar, está la clase de hechos que, según ha mostrado el paradigma, son especialmente reveladores de la naturaleza de las cosas. Al utilizarlos en

la resolución de problemas, el paradigma ha hecho que merezca la pena determinarlos no sólo con mayor precisión, sino también en una mayor variedad de situaciones. En una época u otra, estas determinaciones fácticas significativas han incluido, en astronomía, la posición y magnitud estelar, los periodos de eclipses de las binarias y de los planetas; en física, los pesos específicos y la compresibilidad de los materiales, las longitudes de onda y las intensidades espectrales, las conductividades eléctricas y los potenciales de contacto; y en química, la composición y los pesos de combinación, los puntos de ebullición y la acidez de las soluciones, las fórmulas estructurales y la actividad óptica. Los intentos de aumentar la precisión y amplitud con que se conocen los hechos de este jaez ocupa una fracción significativa de la bibliografía de la ciencia experimental y observacional. Una y otra vez se han diseñado para tales propósitos aparatos especiales complejos, y la invención, construcción y despliegue de tales aparatos han exigido talentos de primera línea, abundante tiempo y considerable apoyo financiero. Los sincrotrones y los radiotelescopios no son sino los más recientes ejemplos de hasta qué extremo son capaces de ir los que trabajan en la investigación si hay un paradigma que les asegure que los hechos que buscan son importantes. De Tycho Brahe a E. O. Lawrence, algunos científicos han alcanzado gran reputación no por la novedad de sus descubrimientos, sino por la precisión, confiabilidad y amplitud de los métodos que han desarrollado para determinar de nuevo un tipo de hecho previamente conocido.

Una segunda clase, aunque mucho menor, de determinaciones fácticas se orienta a aquellos hechos que, aunque a menudo carezcan en sí mismo de mucho interés, con todo se pueden comparar directamente con predicciones extraídas de la teoría paradigmática. Como veremos en seguida, cuando pase de los problemas experimentales a los teóricos de la ciencia normal, no suele haber muchas áreas en las que una teoría científica pueda compararse directamente con la naturaleza, especialmente si está formulada de manera predominantemente matemática. Sólo tres áreas de este tipo son aún accesibles a la teoría general de la relatividad de Einstein.² Además, incluso en esas áreas en que es posible la aplicación, ésta exige a menudo aproximaciones teóricas y experimentales que limitan gravemente el acuerdo esperable. La mejora de dicho acuerdo o el hallazgo de áreas nuevas en que se pueda demostrar el acuerdo representan un reto constante a la habilidad y la imaginación del experimentador y del observador. Los telescopios especiales para

² El único punto de contacto tradicional que aún se acepta de manera general es la precesión del perihelio de Mercurio. El desplazamiento hacia el rojo en el espectro luminoso de las estrellas distantes se puede derivar de consideraciones más elementales que la relatividad general, y lo mismo puede decirse de la curvatura de la luz en torno al Sol, una cuestión hoy en día un tanto debatida. En cualquier caso las mediciones de este último fenómeno siguen siendo equívocas. Muy recientemente puede haberse añadido un punto de contacto adicional: el desplazamiento gravitatorio de la radiación de Mossbauer. Tal vez haya pronto otros en este campo ahora activo tras un largo periodo de letargo. Para una exposición del problema puesta al día aunque breve, véase L. I. Schiff, "A Report on the NASA Conference on Experimental Tests of Theories of Relativity", *Physics Today*, XIV (1961), 42-48.

demostrar la predicción copernicana de la paralaje anual; la máquina de Atwood inventada inicialmente casi un siglo después de los *Principios* para ofrecer la primera demostración inequívoca de la segunda ley de Newton; el aparato de Foucault para demostrar que la velocidad de la luz es mayor en el aire que en el agua, o el gigantesco contador de centelleo designado para demostrar la existencia del neutrino, todos estos equipos experimentales especiales y muchos otros similares ponen de manifiesto el enorme esfuerzo e ingenio que ha exigido la producción de un acuerdo cada vez más estrecho entre la naturaleza y la teoría.³ Este intento de demostrar el acuerdo representa un segundo tipo de trabajo experimental normal y depende de un paradigma de manera más obvia que el primer tipo. La existencia del paradigma plantea el problema a resolver, y a menudo la teoría del paradigma está directamente implicada en el diseño del aparato capaz de resolver el problema. Sin los *Principios*, por ejemplo, las mediciones hechas con la máquina de Atwood no habrían significado nada en absoluto.

³ Para dos de los telescopios paralácticos véase Abraham Wolf, *A History of Science, Technology, and Philosophy in the Eighteenth Century* (2ª ed., Londres, 1952), pp. 103-105. Para la máquina de Atwood véase N. R. Hanson, *Patterns of Discovery* (Cambridge, 1958), pp. 100-102, 207-208 [traducción española, *Patrones de descubrimiento*, Madrid, Alianza, 1977, pp. 205-208]. Para los dos últimos equipos experimentales especiales, véase M. L. Foucault, "Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau...", *Comptes rendus... de l'Académie des sciences*, XXX (1850), pp. 551-560; y C. L. Cowan Jr. et al., "Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", *Science*, CXXIV (1956), pp. 103-104.

Creo que un tercer tipo de experimentos y observaciones agotan las actividades de acopio de hechos de la ciencia normal. Consta del trabajo empírico emprendido para articular la teoría paradigmática, resolviendo algunas de sus ambigüedades residuales y permitiendo la resolución de problemas sobre los que anteriormente se había limitado a llamar la atención. Esta clase resulta ser la más importante de todas, y su descripción exige que la subdividamos. En las ciencias más matemáticas, algunos de los experimentos orientados a la articulación se dirigen a determinar constantes físicas. La obra de Newton, por ejemplo, indicaba que la fuerza entre dos masas unidad a la distancia unidad habría de ser la misma para todos los tipos de materia en todas las posiciones del universo. Pero los problemas que él se planteaba se podían resolver sin estimar siquiera la magnitud de esta atracción, la constante de la gravitación universal; y durante el siglo posterior a la aparición de los *Principios*, nadie ideó ningún aparato que fuera capaz de determinarla. La famosa determinación de Cavendish en la década de 1790 tampoco fue la última. Debido a su posición central en la teoría física, gran cantidad de experimentalistas sobresalientes se han planteado como objetivo mejorar los valores de la constante gravitatoria con redoblados esfuerzos.⁴ Otros ejemplos del mismo tipo de trabajo continuado incluirían las determinaciones de la unidad astronómica, del número de Avogadro, del coefi-

⁴ J. H. P[oynting] revisa unas dos docenas de mediciones de la constante gravitatoria entre 1741 y 1901 en "Gravitation Constant and Mean Density of the Earth", *Encyclopaedia Britannica* (11ª ed., Cambridge, 1910-1911), XII, pp. 385-389.

ciente de Joule, de la carga del electrón, etc. Pocos de estos esfuerzos complejos se habrían concebido, y ninguno de ellos se habría llevado a cabo sin una teoría paradigmática que definiera el problema y garantizara la existencia de una solución estable.

Sin embargo, los esfuerzos destinados a articular un paradigma no se restringen a la determinación de constantes universales, sino que, por ejemplo, se pueden orientar a la obtención de leyes cuantitativas. Se encuentran en esta categoría la ley de Boyle, que relaciona la presión con el volumen de un gas; la ley de Coulomb de la atracción eléctrica, y la fórmula de Joule que relaciona el calor generado con la resistencia eléctrica y la corriente. Quizá no sea obvio que se precise un paradigma para descubrir leyes de este tipo. A menudo oímos que se descubrieron al examinar las mediciones tomadas por ellas mismas, sin ningún compromiso teórico; pero la historia no ofrece apoyo alguno a un método tan excesivamente baconiano. Los experimentos de Boyle no eran concebibles (y de ser concebidos hubieran recibido otra interpretación, de recibir alguna) hasta que se interpretó el aire como un fluido elástico al que se podrían aplicar todos los conceptos elaborados en la hidrostática.⁵ El éxito de Coulomb

⁵ Para el pleno trasplante a la neumática de los conceptos de la hidrostática, véanse *The Physical Treatises of Pascal*, traducción I. H. B. Spiers y A. G. H. Spiers con introducción y notas de F. Barry (Nueva York, 1937). [Véase la traducción española de los tratados sobre el vacío en B. Pascal, *Obras*, Madrid, Alfaguara, 1961, pp. 722-787, y en B. Pascal, *Tratados de neumática*, Madrid, Alianza, 1984.] La introducción original de Toricelli del simil "vivimos sumergidos en el fondo de un

dependió de la construcción de aparatos especiales para medir la fuerza entre cargas puntuales. (Quienes habían medido anteriormente las fuerzas eléctricas utilizando balanzas de platillos ordinarias, etc., no habían hallado en absoluto ninguna regularidad consistente o simple.) Mas ese diseño dependía a su vez del reconocimiento previo de que cada partícula del fluido eléctrico actúa a distancia sobre todas las demás. Coulomb estaba buscando la fuerza entre tales partículas, la única fuerza que se podría suponer con seguridad que era una función simple de la distancia.⁶ Los experimentos de Joule podrían utilizarse también para ilustrar cómo surgen las leyes cuantitativas a través de la articulación de los paradigmas. De hecho, la relación entre un paradigma cualitativo y la ley cuantitativa es tan estrecha y general que, desde Galileo, tales leyes se han conjeturado a menudo de modo correcto con la ayuda de un paradigma años antes de que se pudiera diseñar un aparato para su determinación experimental.⁷

Finalmente, hay un tercer tipo de experimentos que se orienta a articular el paradigma. Se parece más que los otros a la exploración y domina en especial en aquellos periodos y ciencias que se

océano de aire elemental” se da en la página 164. Su rápido desarrollo se muestra en los dos tratados principales.

⁶ Roller y Roller, *The Development*, pp. 66-80.

⁷ Para ejemplos, véase T. S. Khun “The Function of Measurement in Modern Physical Science”, *Isis*, LII (1961), pp. 161-193 [puede verse ahora como capítulo 8, pp. 178-224 de T. S. Khun, *The Essential Tension*, The University of Chicago Press, 1977; hay traducción española, *La tensión esencial*, México, FCE, 1981, y reediciones posteriores].

ocupan más de los aspectos cualitativos de la regularidad de la naturaleza que de los cuantitativos. Es frecuente que un paradigma desarrollado para un conjunto de fenómenos resulte ambiguo cuando se aplica a otros estrechamente relacionados con ellos. Se precisan entonces experimentos para elegir una de las maneras alternativas de emplear el paradigma en la nueva área de interés. Por ejemplo, las aplicaciones paradigmáticas de la teoría calórica versaban sobre el calentamiento y el enfriamiento por mezclas y por cambio de estado. Sin embargo el calor se podía ceder o absorber de muchas otras maneras, como por ejemplo por combinación química, por fricción y por compresión o absorción de un gas, y a cada uno de estos otros fenómenos la teoría podía aplicarse de diversos modos. Si el vacío tenía una capacidad de calor, por ejemplo, el calentamiento por compresión podría explicarse como el resultado de mezclar gas con vacío. O tal vez podría deberse a un cambio en el calor específico de los gases con el cambio de presión, y había además otras diversas explicaciones. Se emprendieron muchos experimentos para elaborar estas diversas posibilidades y distinguir las unas de otras. Todos estos experimentos surgieron de la teoría calórica como paradigma y todos la explotaron para el diseño experimental y la interpretación de resultados.⁸ Una vez que se hubo establecido el fenómeno del calentamiento por compresión, todos los experimentos ulteriores en el área dependieron así del paradigma. Dado el fenómeno, ¿de qué otra ma-

⁸ T. S. Khun “The Caloric Theory of Adiabatic Compression”, *Isis*, XLIX (1958), pp. 132-140.

nera podría haberse elegido un experimento para elucidarlo?

Pasemos ahora a los problemas teóricos de la ciencia normal que caen casi en las mismas clases que los experimentales y los observacionales. Por pequeña que sea, una parte del trabajo teórico normal consiste sencillamente en utilizar la teoría existente para predecir información fáctica de valor intrínseco. La composición de efemérides astronómicas, el cómputo de las características de las lentes y la producción de curvas de propagación de radio constituyen ejemplos de problemas de esta clase. Con todo, en general los científicos los consideran como un trabajo deslucido que se ha de relegar a los ingenieros o a los técnicos. La mayor parte de ellos nunca aparecen en revistas científicas importantes. Sin embargo, estas revistas contienen muchísimas discusiones teóricas de problemas que al no científico han de parecerle casi idénticas. Se trata de las manipulaciones de la teoría que se emprenden no porque las predicciones a que dan lugar sean intrínsecamente valiosas, sino porque se pueden confrontar directamente con los experimentos. Su finalidad es mostrar una nueva aplicación del paradigma o aumentar la precisión de una aplicación que ya ha sido hecha.

La necesidad de este tipo de trabajo surge de las inmensas dificultades que a menudo se encuentran al establecer puntos de contacto entre una teoría y la naturaleza. Dichas dificultades se pueden ejemplificar brevemente mediante un examen de la historia de la dinámica después de Newton. A comienzos del siglo XVIII, aquellos científicos que hallaron un paradigma en los *Princi-*

pios dieron por supuesta la generalidad de sus conclusiones, pues tenían todas las razones para hacerlo. No hay otra obra conocida en toda la historia de la ciencia que haya permitido simultáneamente un aumento tan considerable en la amplitud y la precisión de la investigación. En el caso de los cielos, Newton había derivado las leyes de Kepler del movimiento planetario, a la vez que había explicado algunos aspectos observados en los que la Luna dejaba de obedecerlas. Por lo que respecta a la Tierra, había derivado los resultados de algunas observaciones dispersas sobre péndulos y sobre mareas. Con la ayuda de suposiciones adicionales aunque *ad hoc*, también fue capaz de derivar la ley de Boyle y una fórmula importante para la velocidad del sonido en el aire. Dado el estado de la ciencia en aquel momento, el éxito de estas demostraciones fue tremendamente impresionante. Sin embargo, dada la presunta generalidad de las leyes de Newton, el número de estas aplicaciones no era grande y Newton prácticamente no desarrolló otras nuevas. Además, comparado con lo que cualquier licenciado en física puede conseguir hoy en día con esas mismas leyes, las pocas aplicaciones de Newton ni siquiera se desarrollaron con precisión. Finalmente, los *Principios* se idearon principalmente para su aplicación a problemas de mecánica celeste, sin que fuese en absoluto claro cómo podrían adaptarse a aplicaciones terrestres, especialmente a las que incluían movimientos bajo resistencia. En cualquier caso, los problemas terrestres ya habían sido abordados con gran éxito por todo un conjunto de técnicas distintas desarrolladas originalmente por Galileo y

Huygens y expandidas en el continente durante el siglo XVIII con los Bernoulli, D'Alembert y muchos otros. Presumiblemente se podría mostrar que sus técnicas y las de los *Principios* eran casos particulares de una formulación más general, aunque durante algún tiempo nadie vio muy bien cuál podría ser.⁹

Restringjamos la atención por un momento al problema de la precisión. Ya hemos ejemplificado su aspecto empírico. Se necesitaba un equipo especial, como el aparato de Cavendish, la máquina de Atwood o los telescopios mejorados, a fin de suministrar los datos especiales exigidos por las aplicaciones concretas del paradigma newtoniano. Por el lado de la teoría existían dificultades similares para obtener un acuerdo. Por ejemplo, al aplicar sus leyes a los péndulos, Newton se vio obligado a tratar la lenteja del péndulo como una masa puntual a fin de obtener una definición única de la longitud del péndulo. La mayoría de sus teoremas ignoraban también el efecto de la resistencia del aire, y las únicas excepciones eran

⁹ C. Truesdell, "A Program toward Rediscovering the Rational Mechanics of the Age of Reason", *Archive for History of the Exact Sciences*, I (1960), pp. 3-36, y "Reactions of Late Baroque Mechanics to Success, Conjecture, Error, and Failure in Newton's *Principia*", *Texas Quarterly*, X (1967), pp. 281-297 [véanse los capítulos II y III de C. Truesdell, *Essays in the History of Mechanics*, Nueva York, Springer, 1968, traducido al español como *Ensayos de historia de la mecánica*, Madrid, Tecnos, 1975: "Programa para el redescubrimiento de la mecánica racional de la Ilustración", pp. 89-132, y "Reacciones de la mecánica del barroco a los éxitos, conjeturas, errores y fracasos contenidos en el (*sic*) *Principia*", pp. 134-174]. T. L. Hankins, "The Reception of Newton's Second Law of Motion in the Eighteenth Century", *Archives internationales d'histoire des Sciences*, XX (1967), pp. 42-65.

hipotéticas y preliminares. Se trataba de aproximaciones físicas razonables, aunque en cuanto aproximaciones restringían el acuerdo esperable entre las predicciones newtonianas y los experimentos reales. Las mismas dificultades aparecen con mayor claridad aún en la aplicación de la teoría de Newton a los cielos. Algunas observaciones telescópicas simples y cuantitativas indican que los planetas no obedecen del todo las leyes de Kepler, y la teoría newtoniana indica que no deberían hacerlo. Para derivar dichas leyes, Newton se había visto obligado a desprestigiar toda atracción gravitatoria excepto la que se da entre cada planeta individual y el Sol. Puesto que los planetas también se atraen mutuamente, sólo es de esperarse un acuerdo aproximado entre la teoría aplicada y la observación telescópica.¹⁰

El acuerdo conseguido resultó obviamente más que satisfactorio para quienes lo lograron. Exceptuando algunos problemas terrestres, ninguna otra teoría lo había hecho ni de lejos tan bien. Ninguno de quienes cuestionaban la validez de la obra de Newton lo hacía por su escaso acuerdo con los experimentos y las observaciones. Con todo, estas limitaciones en el acuerdo legaron muchos problemas teóricamente fascinantes a los sucesores de Newton. Se necesitaban por ejemplo técnicas teóricas para abordar el problema de los movimientos de más de dos cuerpos atrayéndose a la vez, así como para estudiar la estabilidad de las órbitas perturbadas. Los problemas de este jaez ocuparon a muchos de los mejores ma-

¹⁰ Wolf, *A History of Science*, pp. 75-81, 96-101; y William Whewell, *History of the Inductive Sciences* (ed. rev., Londres, 1847), II, pp. 213-271.

temáticos europeos durante el siglo xviii y comienzos del xix. Euler, Lagrange, Laplace y Gauss, todos ellos realizaron sus trabajos más brillantes en problemas orientados a mejorar el acuerdo entre el paradigma newtoniano y la observación de los cielos. Muchas de estas figuras trabajaban a la vez en el desarrollo de las matemáticas precisas para aplicaciones que ni Newton ni la escuela continental contemporánea de mecánica habían nunca ensayado. Produjeron, por ejemplo, una inmensa bibliografía y algunas técnicas matemáticas poderosísimas para la hidrodinámica y para el problema de las cuerdas vibrantes. Estos problemas de aplicación dan cuenta de lo que probablemente sea el trabajo más brillante y agotador del siglo xviii. Podrían encontrarse otros ejemplos examinando el periodo posparadigmático del desarrollo de la termodinámica, de la teoría ondulatoria de la luz, de la teoría electromagnética o de cualquier otra rama de la ciencia cuyas leyes fundamentales sean plenamente cuantitativas. Al menos en las ciencias más matemáticas, la mayor parte del trabajo teórico es de este tipo.

Pero no todo tiene este mismo carácter. Incluso en las ciencias matemáticas hay también problemas teóricos de articulación paradigmática; y estos problemas dominan en los periodos en que el desarrollo científico es principalmente cuantitativo. Algunos de los problemas, tanto de las ciencias más cuantitativas como de las más cualitativas, se orientan simplemente a la clarificación por reformulación. Por ejemplo, los *Principios* no siempre fueron una obra fácil de aplicar, en parte porque hasta cierto punto mantenían cierto desaliño inevitable en una primera aproximación, y en

parte porque en gran medida su significado sólo estaba implícito en sus aplicaciones. En cualquier caso, para las aplicaciones terrestres había un conjunto aparentemente independiente de técnicas continentales que se antojaban mucho más poderosas. Por tanto, desde Euler y Lagrange en el siglo xviii a Hamilton, Jacobi y Hertz en el siglo xix, muchos de los más brillantes físicos matemáticos europeos trataron repetidamente de reformular la teoría mecánica de una forma equivalente aunque lógica y estéticamente más satisfactoria. Esto es, querían mostrar las lecciones explícitas e implícitas de los *Principios* y de la mecánica continental en una versión lógicamente más coherente que resultara a la vez más uniforme y menos equívoca en su aplicación a los problemas recientemente planteados de la mecánica.¹¹

En todas las ciencias han tenido lugar repetidamente reformulaciones semejantes de un paradigma, pero en su mayoría han producido en el paradigma cambios más sustanciales que las reformulaciones de los *Principios* antes citadas. Tales cambios derivan del trabajo empírico que antes describíamos como orientado a la articulación del paradigma. Ciertamente, clasificar este tipo de trabajo como empírico era algo arbitrario. En mayor medida que cualquier otro tipo de investigación normal, los problemas de la articulación del paradigma son a la vez teóricos y empíricos; los ejemplos ya puestos se aplicarían aquí perfectamente. Antes de que Coulomb pudiera construir su equipo y hacer con él mediciones,

¹¹ René Dugas, *Histoire de la mécanique* (Neuchâtel, 1950), Libros IV-V.

tenía que emplear la teoría eléctrica para determinar cómo construirlo. La consecuencia de sus mediciones fue un refinamiento de dicha teoría. O, una vez más, quienes diseñaron los experimentos que habían de distinguir las diversas teorías del calentamiento por compresión, eran generalmente las mismas personas que habían inventado las versiones que había que comparar. Trabajaban a la vez con los hechos y con la teoría, y su trabajo producía no sólo nueva información sino un paradigma más preciso, obtenido por la eliminación de las ambigüedades que aún conservaba la forma original con la que comenzaron a trabajar. En muchas ciencias, la mayoría del trabajo normal es de este tipo.

Creo que estas tres clases de problemas: la determinación de los hechos significativos, el encaje de los hechos con la teoría y la articulación de la teoría, agotan la producción bibliográfica de la ciencia normal, tanto empírica como teórica, pero no agotan completamente, como es obvio, toda la bibliografía científica. Hay también problemas extraordinarios, y bien pudiera ser que su resolución hiciera que la empresa científica en su conjunto fuese especialmente valiosa. Pero los problemas extraordinarios no aparecen cuando uno quiere, pues sólo surgen en ocasiones especiales dispuestas por el progreso de la investigación normal. Por consiguiente, y de manera inevitable, la inmensa mayoría de los problemas abordados incluso por los mejores científicos, cae usualmente en una de las tres categorías bosquejadas más arriba. No se puede llevar a cabo de otra manera el trabajo siguiendo un paradigma, y abandonar el paradigma es dejar de practicar la ciencia que de-

fine. Enseguida descubriremos que tales deserciones se producen, siendo los goznes sobre los que giran las revoluciones científicas. Pero antes de comenzar el estudio de tales revoluciones, precisamos una visión más panorámica de las preocupaciones de la ciencia normal que les preparan el camino.