

CONCEBIDO tanto para que científicos e historiadores como para cualquiera que desee introducirse en uno de los aspectos más apasionantes de la historia de la cultura, este libro nos expone, sucesivamente, cómo se fueron gestando las grandes ideas que han ido transformando radicalmente el pensamiento científico humano y, por ende, el pensamiento en general.

Herbert Butterfield

Los orígenes de la ciencia moderna

EL METODO EXPERIMENTAL
EN EL SIGLO XVII

V

No siempre nos hemos dado cuenta de hasta qué punto las ciencias medievales procedían de lo que hoy día llamamos la transmisión literaria, y de cómo entraron en la historia europea como una herencia de la antigua Grecia y de la Roma imperial. Nadie es capaz de estudiar el estado real en que se encontraba la ciencia en el siglo X, pongamos, por ejemplo, sin darse cuenta de lo que se había perdido en sabiduría y en técnica —en civilización— de los días de la antigua Atenas y de la Alejandría de la antigüedad, o incluso desde los tiempos de San Agustín. Nadie que se dé cuenta de lo que era la Europa que surgió del oscurantismo medieval, o que se dé cuenta de lo que eran nuestros antepasados anglosajones uno o dos siglos antes de la conquista normanda, podrá imaginar que el mundo de entonces estuviera en condiciones de descubrir por sus propios medios la ciencia que Atenas y Alejandría habían alcanzado en sus épocas de mayor florecimiento. Era preciso restablecer el contacto con la ciencia de la antigüedad desenterrando textos y manuscritos, o consiguiendo traducciones y comentarios de pueblos como el árabe o los vasallos del Imperio Bizantino, que poseían ya el contacto, o quizá no lo habían perdido nunca. El proceso de recuperación llegó a su culminación y adquirió conciencia plena durante el período que hemos denominado Renacimiento. Hubieran sido precisos muchos más cientos de años si la Edad Media hubiera tenido, por decirlo así, que descubrir las mismas cosas por sus propios medios; es decir, si hubiera tenido que volver a encontrar las verdades científicas y filosóficas por medio de sus estudios y sus investigaciones propias, sin ayuda exterior.

taurus

Todo esto sirve para explicar por qué tantas cosas en la historia del pensamiento medieval se apoyan sobre unos cimientos de datos que, en realidad, pertenecen a la retransmisión literaria de la ciencia y la filosofía clásicas. Los historiadores opinan que es de importancia fundamental averiguar en qué fecha exacta se resucitó en la Europa occidental una obra determinada de Aristóteles, o cuándo se dispuso por primera vez de un tratado científico a través de una traducción árabe y —todavía mejor— cuándo consiguió Europa el texto auténtico en su idioma original. El proceso no sufrió retraso por ningún reparo que la Europa católica pudiera poner al hecho de aprender de los árabes infieles, de los bizantinos cismáticos o hasta de los griegos paganos. Ni tampoco se sabe que en la Edad Media se dejase pasar por alto ninguna oportunidad, ni que se despreciase ninguna fuente de información, porque estuviera manchada de paganismo o infidelidad. Debido a que las clases intelectuales medievales eran clericales y a que sus directivas eran religiosas, es comprensible que las ciencias naturales existentes ocupasen el lugar secundario que siempre habían tenido en el campo más extenso de la filosofía; se puede decir que no existía entonces lo que nosotros llamamos «naturalistas», o, cuando menos, que carecían de toda importancia. A causa de la importancia que tenía la transmisión puramente literaria, lo que nosotros llamamos ciencia, y que se debería llamar filosofía natural, era, ante todo, una serie de textos clásicos sobre los cuales se iban amontonando uno tras otro nuevos comentarios, obra generalmente de gentes que trabajaban en sus mesas, sin observar ni experimentar. Si, incluso durante el Renacimiento, se consideraba a la filosofía la reina de las ciencias, se debía al hecho de que quien dominaba las lenguas clásicas era el que ocupaba la posición clave. Todavía hoy podemos leer las cartas de los humanistas que maldecían su destino porque se veían obligados a estropear su estilo propio traduciendo del griego obras de física.

De esta forma, en el Medievo, los hombres se encontraron con un patrimonio que consistía en la explicación física del universo y de la manera de actuar de la Naturaleza; este patrimonio les había llovido del cielo y se le encontraron terminado y listo para ser empleado. Y fueron mucho más esclavos de aquel sistema intelectual que si lo hubiesen descubierto por sí mismos, sacándolo de sus propias investigaciones y estudios y de su propia lucha en pos de la verdad. Incluso parece que se adivina alguna que otra dificultad, algún que otro lapso allí donde aparecía una solución de continuidad

en la transmisión, donde quedaban por descubrir partes de la ciencia clásica. Ya hemos notado, por ejemplo, ciertas tendencias en el París del siglo XIV, que se crearon apenas comenzadas a causa de la deficiencia de las matemáticas, deficiencia que se rectificó en parte durante el Renacimiento al descubrirse nuevos textos clásicos. En estas condiciones, los principales puntos de ataque del pensamiento original —incluso las principales controversias del siglo XVI— se produjeron en aquellas cuestiones sobre las que los autores clásicos discrepaban unos de otros. Y aunque a fines de la Edad Media hubo algunos que comenzaban a experimentar y a ampliar los confines del pensamiento, en su mayor parte eran como los teóricos del *impetus*, que no hacían nada más que jugarle al borde de aquel sistema aristotélico que, en el año 1500, tiene que haberle parecido al pensador racional cuando menos tan válido como lo fue mil quinientos años antes. Aunque hubo quien, a fines de la Edad Media, comenzaba a observar la Naturaleza con meticulosidad y empeño, mejorando cada vez más sus métodos de observación, se propendía a compilar enciclopedias meramente descriptivas. Cuando se presentaba algo que requiriese una explicación, nunca la deducían de los hechos observados, sino que seguían aprovechándose del sistema de explicaciones que les había sido legado por la filosofía clásica. Sir Francis Bacon, a principios del siglo XVII, se quejaba de aquel divorcio entre la observación y la explicación, y parte de su propósito fue demostrar la manera en que la segunda guerra debía surgir de la primera.

Por lo que podemos apreciar, las matemáticas de la antigua Alejandría, descubiertas durante el Renacimiento, y la obra de Arquímedes, puesta a la disposición de todos en una traducción aparecida en 1543, forman el último filón de la ciencia clásica que fue descubierto con tiempo suficiente para constituir uno de los ingredientes o factores de nuestra ciencia moderna. Como ya hemos visto, se trataba de una serie de conocimientos que era necesario encontrar para que todos los componentes del movimiento científico pudieran ser ensamblados, y el esfuerzo autónomo de los hombres de ciencia —de un nuevo equipo de pioneros de la investigación— pudiera comenzar a avanzar. Y es notable lo rápidamente que comenzaron a moverse las cosas una vez que se hubieron reunido todos los ingredientes necesarios. A comienzos del siglo XVII, como ya sabemos, se estaba hundiendo la antigua explicación del universo —el esqueleto de la ciencia de aquel tiempo—. Comenzaba a surgir lo que los con-

temporáneos reconocían como una verdadera revolución científica y lo que, para nosotros, es la aurora de la ciencia moderna.

Ahora bien, si lo que tratamos de hacer es comprender el nacimiento de la ciencia moderna, no debemos imaginar que todo se puede explicar por el hecho de que comenzara a perfilarse el sistema de investigación experimental, ni que los experimentos eran una gran novedad. Todos admitían, incluso los enemigos del sistema aristotélico, que ningún sistema hubiera podido establecerse si no se basaba en experimentos y en observaciones —y quizá hubiera sido necesario recordárselo a aquellos catedráticos de los siglos XVI y XVII que se aferraban a la rutina de siempre y seguían comentando demasiado (en lo que podríamos denominar forma «literaria») las obras de los clásicos—. No obstante, quizá nos sorprendamos al descubrir que, en uno de los diálogos de Galileo, es Simplicius, el portavoz de los aristotélicos —el cabeza de turco de toda la obra—, quien defiende el método experimental de Aristóteles contra lo que se describe como el método matemático de Galileo. Y en otro pasaje, es el portavoz del propio Galileo quien dice que, aunque Aristóteles no da más que razones para demostrar que lo que tiene que pasar es esto o lo de más allá, aquello no es más que la forma en que Aristóteles trata de demostrar su tesis; el descubrimiento tiene que haber sido el resultado de un experimento. Ya hemos visto cómo el estudiante de Medicina y la Universidad médica de Padua iban en cabeza de casi todo el mundo en cuanto a experimentación, y el resultado más notable del método experimental que hemos encontrado hasta ahora en estas páginas es el tratado de William Harvey sobre la circulación de la sangre. Y, sin embargo, no era en las ciencias biológicas donde había de sufrir su más serio descalabro el modo aristotélico de enfrentarse con un problema. No fue allí donde encontró su centro, su eje de rotación, la revolución científica: por el contrario, más adelante tendremos que estudiar cómo afectó la revolución científica a la biología y a otras ciencias al reflejarse sobre ellas, como quien dice (y en segunda instancia). Lo que es todavía más notable, es el hecho de que la ciencia experimental por excelencia —la que estaba centrada en los laboratorios incluso antes del comienzo de los tiempos modernos— se mostró exageradamente lenta, si no fue la más lenta de todas, en alcanzar su forma moderna. La alquimia tardó mucho en transformarse en química, y la propia química pasó a ser cuantitativa y no cualitativa en sus métodos, en el más amplio sentido de la palabra, como las ciencias antiguas.

A este respecto, será interesante echar un vistazo al que es quizá el experimento más famoso de la revolución científica, y del que un historiador declaró en 1923 que lo consideraba «uno de los hechos más notables de la historia de la ciencia». Le conocemos a través de la narración imprecisa de un discípulo y biógrafo algo romántico de Galileo, que dice que su maestro había dejado caer dos cuerpos de peso distinto desde la torre de Pisa para demostrar que Aristóteles se equivocaba al decir que caerían a velocidades proporcionales a sus pesos. Historiadores posteriores suplieron más detalles y, en una obra publicada en 1918, aparecieron los hechos completos: leemos cómo aquel mártir de la ciencia subió a la torre inclinada llevando bajo un brazo una bala de cañón de cien libras y otra de una libra bajo el otro; y hasta el doctor Singer repite el relato en 1941 en su historia de la ciencia, donde lo denomina «el más famoso de los experimentos», y lo atribuye al año 1591. Nadie de entre la muchedumbre que lo presenciaba, según nos dicen, hizo referencia alguna al experimento —aunque, como vamos a ver, había razones particulares para que lo hicieran, si es que efectivamente lo presenciaron—, y los escritos del propio Galileo no confirman el hecho. Por el contrario, los escritos de Galileo demuestran que había ensayado el experimento repetidas veces en su juventud con el resultado opuesto: dice en una de sus obras juveniles que había ensayado aquello en varias ocasiones desde una torre alta y que, en todas ellas, un trozo de plomo adelantaba muy pronto a un trozo de madera. El experimento en cuestión había sido ya realizado por otro hombre de ciencia: Simon Stevin, de Brujas, y fue recogido en un libro publicado en 1605. Sin embargo, Stevin dejó caer bolas de plomo desde una altura de sólo treinta pies, y teniendo en cuenta lo poco que en aquellos tiempos se sabía acerca de la resistencia del aire, los aristotélicos no estuvieran quizá tan faltos de razón al decir que el resultado no era concluyente y que era preciso realizar el experimento desde gran altura.

Como Galileo se había ocupado en su juventud de especulaciones curiosas sobre el comportamiento de los graves al caer, debería haber estado en condiciones de apreciar aquellas razones, ya que en una de sus obras juveniles había incluso insistido en que era inútil arrojar los cuerpos desde lo alto de una torre; dijo que hubiera sido necesario duplicar la altura para poder juzgar correctamente. Para coronar la comedia, fue un aristotélico, Corelio, quien en 1612 declaró que los experimentos anteriores se habían efectuado desde demasiado

poca altura. En una obra publicada en aquel año, describió la forma en que había mejorado las condiciones del experimento en relación con todos los realizados anteriormente: no solamente había arrojado cuerpos desde una ventana alta, sino que lo había hecho desde el extremo de la torre de Pisa. El cuerpo mayor había caído más aprisa que el menor en aquella ocasión, y el experimento, decía, demostraba que Aristóteles había estado siempre en lo cierto. La obra de Corecio fue publicada en Florencia, y no parece que ni Galileo ni nadie negase la verdad de la aserción, aunque la fecha en que tuvo lugar es muy posterior al pretendido incidente de la vida de Galileo.

En realidad, los precursores de Galileo se habían ido aproximando a la solución del problema por caminos completamente diferentes ya desde hacía algún tiempo. Al principio se movían con timidez, opinando que pesos distintos de una misma sustancia caerían al mismo tiempo, aunque posiblemente se diesen velocidades diferentes para cuerpos de distinta composición. De hecho, Galileo emplea el argumento de sus predecesores: habían concluido que dos tejás, de una libra de peso cada una, dejadas caer simultáneamente, alcanzarían el suelo exactamente al mismo tiempo. Si se las fijaba una con otra, seguirían cayendo a la misma velocidad que lo hacían al ser soltadas por separado, y si se fijaba una encima de la otra seguiría sin ejercer mayor presión que antes, y, por tanto, no haría nada para obligar a su compañera inferior a caer con mayor velocidad que la primera vez. En otras palabras, los predecesores de Galileo habían buscado la solución del problema por medio de razonamientos, y ni ellos ni el propio Galileo demostraron interés alguno por alterar su conclusión en vista de que el experimento no había podido confirmar su hipótesis. En su juventud, Galileo sostuvo durante algún tiempo que los graves, al caer, no sufrirían aceleración; que cuando menos, solamente la sufrirían al principio de la caída, hasta que comenzaban a moverse con velocidad. Hasta en este punto se negó a dejarse vencer por simples observaciones. Se negó a cambiar de opinión en relación con esto por los resultados de un experimento efectuado desde lo alto de una torre, diciendo que sería necesario dejar caer los objetos desde una altura dos veces mayor antes de poder constatar que la prueba era decisiva. Como apéndice a toda la anécdota, puedo hacer observar que existía una controversia acerca de si el propio Aristóteles sostenía las teorías que hubieran hecho que aquel experimento decisivo le hubiera desacreditado. No obstante, la cuestión carece de importancia, puesto que los aristotélicos del siglo XVII

sí que eran partidarios de esta teoría y estaban dispuestos a aceptar el resultado, cualquiera que fuese.

En relación con éste y muchos otros fenómenos similares, nos aproximariamos bastante a la verdad si dijéramos que, durante unos cincuenta años, se han comentado mucho los que se denominaron «experimentos del pensamiento», de Galileo. En algunas de sus obras no se puede dejar de observar la manera en que afirma algunas veces: «Si hiciéramos tal cosa, sucedería tal otra», y en algunas ocasiones parece como si se hubiese equivocado en su deducción; en algunas ocasiones nadie se detiene a preocuparse de si uno de los dialogantes afirma concretamente que no se ha efectuado nunca el experimento. También es curioso observar con qué frecuencia emplea Galileo estos «experimentos del pensamiento» en relación con los problemas de mecánica que afectan a la cuestión de la rotación de la Tierra, y con cuánta frecuencia recurre a ellos cuando se tiene que enfrentar con los argumentos que eran el arma más poderosa de los aristotélicos. Discurre sobre lo que sucedería si se dejase caer una piedra desde lo alto del mástil de un barco si: a) el barco estaba en movimiento, o b) en estado de reposo. Mucho más adelante, en 1641, Gasendi causó profunda sensación al efectuar realmente ambos experimentos y publicar los resultados que obtuvo que, en este caso, confirmaban la tesis de Galileo. Había en Francia un joven, contemporáneo y admirador de Galileo, que se llamaba Mersenne; a pesar de que era discípulo en mecánica del gran italiano, no lograba sentirse convencido por los argumentos que habían sido presentados en favor de la tesis de la rotación de la Tierra. Se encontró con los «experimentos del pensamiento», de Galileo, sobre esta cuestión, y una y otra vez le oímos comentar, en forma muy significativa: «Sí, es cierto; pero el experimento real no se ha efectuado nunca.» Cuando, más adelante, comenzó a inclinarse cada vez más hacia el sistema de Copérnico, Mersenne reveló que, incluso entonces, la que le atraía era una forma de razonar diferente, un tipo de argumentación perteneciente a un período muy anterior a Galileo. Decía: «Si pudiera convencirme de que Dios siempre hace las cosas del modo más breve y más sencillo posible, entonces no tendría más remedio que creer que el mundo se mueve efectivamente.»

Donde más marcadamente se aprecia la revolución científica y donde mayores son los éxitos palpables que obtiene, es en el campo de la astronomía y de la mecánica. En el campo de la astronomía no podemos creer que el empleo de la experimentación en el sentido

vulgar de la palabra, hubiera tenido importancia fundamental alguna. Con respecto a la mecánica, podemos recordar lo que observamos cuando tratábamos del problema del movimiento: cómo parecía razonable decir que los enormes adelantos se debían a la transposición que se estaba efectuando en las mentes de los propios investigadores. Aquél era un problema que no podía ser atacado hasta no haber sufrido un proceso de «geometrización», de manera tal que se pudiera suponer que el movimiento tenía lugar en un espacio arquimédico vacío. Efectivamente, la ley moderna de la inercia —la imagen moderna de que los cuerpos continuaban su movimiento en línea recta hasta el infinito— no es cosa que la mente humana pueda llegar a determinar por medio del experimento, ni por ningún procedimiento que agudice hasta la perfección la capacidad de observación. Dependía del truco de imaginar un cuerpo puramente geométrico moviéndose en un espacio vacío y neutro —absolutamente indiferente a lo que estaba sucediendo— como una hoja de papel en blanco, igualmente impassible si trazamos sobre ella una línea horizontal o una vertical.

En el caso del sistema aristotélico, la situación había sido muy diferente; no había sido posible olvidar que ciertas partes del universo poseían cierto «poder de atracción». Existían ciertas direcciones que había que considerar privilegiadas; sin ello, el sistema perdería su base. Todas las líneas tendían a ser atraídas por el centro de la Tierra. En este sistema no era posible hacer la abstracción necesaria y, por ejemplo, trazar una línea recta que representase a un cuerpo que fuese despedido tangencialmente; es decir, desplazándose con determinación y rectitud hacia el espacio infinito. Era necesario que la línea se fuese curvando hacia la parte baja del papel, ya que el propio universo la obligaba a la dirección descendente, arrastrando al cuerpo con fuerza continua hacia el centro de la Tierra. En esta cuestión, ni siquiera Galileo alcanzó la perfección. No llegó al concepto del espacio euclidiano, absolutamente vacío y absolutamente exento de direcciones preferidas. Este es el motivo de que no lograse la formulación perfecta de las leyes modernas de la inercia, porque creía que la ley de la inercia servía solamente en el caso del movimiento según una trayectoria circular; y aquí se equivocaba, porque lo que nosotros denominamos «movimiento inercial» tiene que ser un movimiento a lo largo de una trayectoria recta. Cuando hablaba de una bola perfectamente esférica rodando hacia el infinito sobre un plano perfectamente horizontal y liso, demostraba sus limitacio-

nes, porque consideraba el plano horizontal como equidistante del centro de la Tierra, y lo imaginaba como un plano que, de hecho, envolvía a la Tierra; de esta manera podía considerar aquella clase de movimiento como una forma de movimiento circular. Y aunque, en último término, se daba cuenta de que un cuerpo podía salir lanzado según una tangente abandonando su trayectoria circular, en general era quizá un poco demasiado «copernicano» hasta en su mecánica, un poco excesivamente dispuesto a considerar el movimiento circular como la forma «natural» de movimiento, la cosa que no precisaba ser explicada. En realidad, en los términos en que se planteaba la nueva física, era precisamente el movimiento circular el que pasaba a ser un movimiento «violento» en el sentido aristotélico de la palabra. La piedra que se hace girar en una honda requiere una fuerza constante que la atraiga hacia el centro, y precisa que se ejerza una violencia para mantenerla en una trayectoria circular, y evitar que salga lanzada tangencialmente.

Los que sucedieron a Galileo procedieron en forma más consecuente en la geometrización de los problemas y trazaron sus diagramas en espacios más libres, más completamente vacíos y más perfectamente neutros. Algunas veces podemos ver la lucha que la nueva ciencia tuvo que sostener para superar las barreras mentales que se oponían a la consecución de sus propósitos, como cuando se suponía que los dos lados verticales de una balanza eran paralelos, y se objetó que tenían que encontrarse en el centro de la Tierra. Era sencillo responder: «Muy bien; olvidémosnos en este momento del centro de la Tierra, coloquemos la balanza muy arriba, en el cielo, más arriba que el propio Sol. Si es necesario, coloquemosla a una distancia infinita. Así podremos considerar sin temor que las dos líneas son paralelas.» Si se presentía la amenaza de que el diagrama quedase afectado por la acción de la gravedad, daban: «¡Olvidemos la gravedad! Imaginemos al cuerpo situado en el cielo, donde no hay ni arriba ni abajo; o sea, donde arriba y abajo son tan indiferentes como derecha a izquierda.» Era posible responder: «Seguramente Dios puede colocar un cuerpo en un espacio absolutamente vacío, y nosotros podemos observar sus movimientos en un lugar del universo donde no haya nada que lo atraiga ni lo repela ni que se interfiera con él en modo alguno.»

El sistema aristotélico no había podido llevar nunca a semejante método dialéctico, que era absolutamente necesario para la «geometrización» de los problemas, y que permitía que la ciencia misma

diese más cabida al punto de vista matemático. Ni siquiera había llevado a una cosa tan sencilla como es el «paralelogramo de fuerzas», aunque Simon Stevin no fuera quizá el primero en emplear este sencillo instrumento, cuando Galileo era todavía un muchacho. El sistema aristotélico había reprobado la idea de los movimientos compuestos, y no aprobaba de ningún modo que se tratase matemáticamente la trayectoria que seguiría un móvil cuando un movimiento quedaba superpuesto a otro. Hemos visto cómo, en el caso de los proyectiles, los peripatéticos se habían negado a pensar siquiera en una combinación de movimientos, prefiriendo pensar que el móvil continuaba su trayectoria en línea recta hasta que se agotaba su movimiento para, entonces, cambiar bruscamente de dirección y caer verticalmente a tierra. Fue la nueva escuela la que comenzó a curvar la trayectoria del móvil, y la que elaboró la teoría de que, en el mundo matemático (que, durante algún tiempo, llegaron a confundir con el mundo real), el proyectil describía una parábola. Y calcularon por procedimientos matemáticos el ángulo a que debía situarse el cañón para que el proyectil tuviese el alcance máximo, dejando que su conclusión fuese comprobada más adelante por medio de experimentos prácticos. Todo esto ayuda a explicar por qué Galileo podía estar en posición de defender lo que él llamaba el método matemático, incluso frente al método experimental de los más destacados peripatéticos. También ayuda a explicar por qué sir Francis Bacon, a pesar de su gran amor al experimento, en cierto modo no se adaptó a su tiempo y mostró haber dejado grietas en sus murallas, por las que le pudo atacar la crítica en el siglo xviii a causa de su deficiencia en matemáticas. Veía en cierto modo la importancia de las matemáticas —la necesidad de efectuar cálculos basados en los resultados experimentales de la física, por ejemplo— y en una ocasión se pronunció categóricamente a este respecto. Lo que le faltaba era la visión del géométra, la capacidad de ver cuáles de aquellas cosas eran susceptibles de medición, y el saber cómo se procedía para reducir un problema cualquiera a otro matemático.

Sin embargo, lo que había de ser de importancia fundamental era la extensión del método nuevo. Habiendo concebido el movimiento en su forma más simple —el movimiento que tenía lugar en un espacio absolutamente vacío y exento de direcciones predilectas, donde nada podía interferirse y donde no existiría medio alguno que pudiera oponerse—, la nueva escuela podía ahora volver sobre sus propios pasos y recoger de nuevo las cosas que había ido aban-

donando. O, más bien, tendríamos que decir que se podían permitir ir incluyendo cada vez más cosas de aquellas en el mundo que habían geometrizado, e ir las preparando para un tratamiento matemático de la misma clase. Cosas como la resistencia del aire, que habían dejado de lado en los primeros momentos de su razonamiento, ahora podían incluir las en el esquema, pero introduciéndolas de manera distinta; no ya como unas déspotas, sino como humildes servidoras. Todas estas cosas habían quedado absorbidas por el método matemático y podían ser transformadas en problemas geométricos; y se podía aplicar el mismo procedimiento al propio problema de la gravedad. El método que la nueva ciencia había adoptado era tal, que llevaba la mente a nuevos campos de interés y sugería nuevos tipos de experimentación práctica, atrayendo al estudiante hacia cosas que nunca hubieran captado la atención del investigador aristotélico. Y las nuevas avenidas que quedaban ahora abiertas a la ciencia, hasta para el experimento, habían de llevar a las ciencias naturales muy lejos del mundo de los fenómenos del sentido común y de las apariencias ordinarias en las que habían centrado la mayor parte de sus pensamientos, no solamente los peripatéticos, sino también los hombres de la teoría del *impetus*. En particular, la mente iba a ser dirigida constantemente en lo futuro hacia aquellas cosas —y se iba a ocupar de aquellos problemas— que pudieran reducirse a la medición y al cálculo. Por tanto, Galileo habló muy directamente cuando dijo que la forma, el tamaño, la cantidad y el movimiento eran las cualidades primordiales que el hombre de ciencia tenía que tratar de examinar cuando comenzaba a estudiar un cuerpo determinado. El sabor, el color, los sonidos y los olores eran cosas que le dejaban relativamente indiferente; afirmaba que no existirían si los seres humanos no tuvieran narices y oídos, lenguas y ojos. En otras palabras, la ciencia iba a limitar su interés a aquellas cosas que permitieran ser medidas y calculadas. El resto de los problemas —los que no pudieran ser reducidos a un tratamiento matemático por el momento—, quizá, en el curso del tiempo, pudieran ser reducidos también a dichos elementos fundamentales. Podrían ser traducidos o transpuestos a alguna otra cosa, de tal modo que, al continuar la evolución de la ciencia, llegarían a poder ser medidos y pesados.

De todos modos, lo esencial es que nuestro interés por el método experimental en cuanto tal, no haga que pasemos por alto una cuestión de la cual el propio siglo xviii tenía plena conciencia; a saber, la importancia que tenían las matemáticas en la evolución

que estaba teniendo lugar en aquel momento. Cuando está en duda la interpretación de toda la revolución científica, hay ciertos hechos que parecen estar relacionados con el problema y que, para el espectador, parecen poseer un carácter notablemente significativo. Ya hemos encontrado varias aspiraciones importantes y varios procesos evolutivos que pertenecen a los siglos xv y xvi, y que eran destellos de un tipo de mecánica más moderno; por ejemplo, los primeros albores de la geometría analítica, discusiones que parecen señalar adelante hacia lo que llamamos física matemática, y hasta alguna intuición respecto al valor intrínseco del método puramente cuantitativo aplicado a las ciencias naturales. No obstante, nos dicen que estas tendencias tan interesantes fueron detenidas, al parecer, porque el Medievo carecía de los conocimientos matemáticos necesarios, y el mundo tenía que esperar hasta que se hubiera descubierto nueva información matemática del mundo de la antigüedad durante el Renacimiento. Parece como si en la historia de la ciencia pudiera darse el caso de lo que podríamos denominar evolución truncada. Se puede cortar una línea evolutiva, incluso antes de que haya empezado a arraigar, si en aquel momento falta una de las condiciones que son requisito indispensable. De modo parecido, nos enteramos de que el descubrimiento de las leyes planetarias realizado por Kepler no fue posible más que gracias al hecho de que heredó, y desarrolló más todavía por su cuenta, el estudio de las secciones cónicas, en el que se hizo famoso en su día. Y no cabe duda de que las observaciones astronómicas de Tycho Brahe no se transformaron en un factor que revolucionase la historia más que cuando la mente matemática de Kepler se puso a elaborar la montaña de material compilado por el gran astrónomo. Más adelante vuelve a producirse el mismo fenómeno, y observamos que el problema de la gravedad no hubiera sido resuelto nunca—nunca hubiera llegado Newton a su síntesis—si no hubiera podido apoyarse, primero, en la geometría analítica de René Descartes y, segundo, en el cálculo infinitesimal del propio Newton y de Leibnitz. Así, pues, parece como si no sólo las ciencias matemáticas hubiesen realizado progresos notables en el siglo xvii, sino que también en la dinámica y la física las ciencias nos dan la impresión de que estuviesen ejerciendo una presión constante sobre los límites más lejanos de las matemáticas. Sin los adelantos efectuados por los matemáticos, no hubiera sido posible la revolución científica tal y como la conocemos.

En líneas generales, es cierto que allí donde se podían aplicar

sencilla y directamente métodos geométricos y matemáticos—como sucede en la óptica—se hicieron adelantos muy considerables en el siglo xvii. En el período a que hemos llegado—los tiempos de Galileo—la aritmética y el álgebra habían alcanzado algo similar al aspecto que, exteriormente, tienen también hoy: por ejemplo, el francés François Viète había establecido el empleo de letras que representaban números; el flamenco Simon Stevin estaba introduciendo el sistema decimal para sustituir a los quebrados; varios de los símbolos que son ahora familiares a todo estudiante comenzaban a ser empleados entre el siglo xv y los tiempos de Descartes. Al mismo tiempo comenzaban a crearse instrumentos auxiliares del cálculo—cosa de la mayor importancia para el estudio de los cuerpos celestes—, tales como los logaritmos que John Napier inventó y perfeccionó entre 1595 y 1614, y otros procedimientos para simplificar la multiplicación y la división: por ejemplo, el ábaco, que en el siglo xvii parece haber gozado de más fama incluso que los logaritmos. Se ha hecho la observación de que, al haber evolucionado por caminos separados el álgebra y la geometría—la primera entre los hindúes y la segunda entre los griegos—, la reunión de ambas, «la aplicación de métodos algebraicos al campo de la geometría», constituyó «el más importante de los adelantos hechos en el progreso de las ciencias exactas». Este suceso tuvo lugar en tiempos de Descartes. Descartes adelantó la idea de que las ciencias que trataban del orden y de la medición—tanto si la medición se refería a los números, formas, condiciones, sonidos u otros objetos—estaban relacionadas con las matemáticas. «Por tanto, debería existir una ciencia general: las matemáticas—dijo—, que debería explicar todo cuanto pueda averiguarse acerca del orden y la medida, considerado independientemente de cualquier aplicación que de ello se pudiera hacer sobre un tema determinado.» Afirmó que una ciencia así sobrepasaría en importancia y en utilidad a todas las ciencias que, en realidad, dependían de ella. Kepler decía que, igual que los oídos están hechos para el sonido y los ojos para el color, la mente humana está hecha para pensar en cantidades, y que está perdida en cuanto se aleja del campo cuantitativo del pensamiento. Galileo decía que el libro del universo había sido escrito en lenguaje matemático, y que su alfabeto consistía en triángulos, círculos y figuras geométricas. No cabe duda de que, tanto en Kepler como en Galileo, las influencias de Platón y de Pitágoras desempeñaron un papel de la mayor importancia.

Si tenemos bien presentes todas estas cosas, veremos por qué la experimentación práctica en las ciencias naturales comenzaban entonces a adquirir una dirección, cómo llegaba finalmente a cierta organización con una meta clara. Durante muchos siglos no había sido más que un caos sin orden ni concierto, casi exento de significado—algo, en muchos aspectos, ajeno al verdadero avance de la comprensión—, constituyendo algunas veces la parte más fantástica y absurda del programa científico. Había habido hombres en la Edad Media que decían que el experimento era lo que tenía verdadera importancia, o que se habían percatado de que, detrás de la filosofía natural de los clásicos, había habido una base de experimentación y observaciones minuciosas. Pero aquello no bastaba, y hasta en el siglo XVII, un hombre como sir Francis Bacon, que insistía en la necesidad de los experimentos, pero que era incapaz de relacionar aquella idea con la necesidad de proceder por el método matemático general que ya he descrito, demostró muy pronto que se había equivocado de miras. En el siglo XIII, un autor llamado Peregrine escribió una obra sobre el imán, y muchos de sus experimentos prepararon el camino para el notable libro que escribió sobre el mismo tema William Gilbert en el año 1600. No obstante, por lo que el libro de Gilbert ejerció mayor influencia en el futuro, fue por sus especulaciones de carácter cosmológico, basadas en la tesis de que la propia Tierra era un gigantesco imán, y sir Francis Bacon se apresuró a anotar el hecho de que se trataba de una hipótesis no demostrada por experimentos; la tesis no surgía de los experimentos mismos, como se reconocía generalmente que debía ser. Incluso Leonardo de Vinci mostró cierta tendencia al desorden científico; buscaba por todas partes, sin programa, como un escolar que se interesase por todo, y cuando preparaba un proyecto para una serie de experimentos—como el que ideó para sus estudios del problema del vuelo—, salta a la vista que nos encontramos ante una lista de experimentos, pero no relacionados entre sí como lo estarían en cualquier proyecto experimental moderno. Ni en la Edad Media ni en el Renacimiento se carecía de la habilidad técnica ni del ingenio que requiere la investigación moderna, como podemos comprobar si contemplamos los sorprendentes dispositivos que se construyeron, incluso cuando no había un fin urgente e inmediatamente utilitario que les indujera a ello. Y, sin embargo, hasta el siglo XVII no se doma ni se consigue ensillar, por decirlo así, a la experimentación, transformándola en una máquina poderosa y eficaz que comenzase a funcionar en aque-

llos momentos para arrastrar a la ciencia y la técnica en el largo camino que desde entonces ha recorrido.

Aunque uno se interese ante todo por la revolución científica en cuanto a la transformación de ideas que supuso, no podemos ignorar los cambios más profundos que produjo en el mundo y que afectaron al pensamiento humano o alteraron las condiciones en que estaba teniendo lugar aquel proceso mental. Estamos comenzando a darnos cuenta de que la historia de la tecnología tiene un papel más importante en la evolución del movimiento científico de lo que creíamos en un primer momento y, de hecho, la historia de la ciencia no podrá nunca ser completa si la limitamos demasiado estrictamente a la historia de las publicaciones científicas. Una parte de la influencia ejercida por la industria y la ingeniería sobre el pensamiento científico es, por ahora, difícil de localizar, y podría ser todavía más difícil demostrarla. Pero aparte de la transferencia de ideas y de técnicas de trabajo, tiene que haberse producido un efecto apreciable, de carácter sutil, en la manera en que se atacaban los problemas y en el modo de sentir el hombre las cosas, quizá hasta en sus ideas sobre la propia materia. Una serie de libros famosos del siglo XVI nos ofrecen un relato bastante completo de lo que se había conseguido por ejemplo, en la minería y en la metalurgia; y algunos de estos libros, sin duda alguna, preparan el camino para la química moderna, pues nos equivocáramos si creyésemos que surgió de la alquimia nada más. En este aspecto de la técnica, y especialmente en el campo de la mecánica y de la hidrostática, no cabe duda de la gran influencia de Arquímedes en el curso que siguió la revolución científica; casi podemos considerarle el santo patrón de los adictos a la mecánica y de los físicos experimentales modernos. Al principio existía un abismo profundo entre el investigador práctico y el pensador teórico. Los navegantes carecían de toda noción de matemáticas, mientras que los matemáticos carecían totalmente de experiencia náutica. Los que calcularon la trayectoria de un proyectil, el ángulo de fuego aproximado, estaban generalmente muy lejos de los artilleros, los cuales se enfrentaban de veras con el cañón en tiempos de guerra. Los cartógrafos, los topógrafos, los ingenieros, eran los que, ya desde mucho tiempo atrás, necesitaban las matemáticas; los navegantes portugueses habían necesitado de la ciencia como auxiliar cuando comenzaron a navegar al sur del Ecuador; William Gilbert tenía relaciones con navegantes, y Galileo habla de los problemas

que surgían en las construcciones navales de los astilleros de Venecia, o los que se presentaban a la artillería y en el bombo de agua en las minas. Efectivamente, no nos equivocaremos si pensamos en Galileo como un hombre que compartía su tiempo entre una especie de taller donde le ayudaban en el trabajo mecánicos expertos, construyendo constantemente aparatos—incluso objetos para la venta—, y la realización de experimentos, de forma que encontramos en él al mecánico o al artesano combinado con el filósofo, dando lugar a un tipo moderno del hombre de ciencia.

Se ha dicho que el número cada vez mayor de objetos mecánicos que iban apareciendo por todo el mundo, también había conducido a lo que podríamos llamar un interés especializado o una actitud mental moderna; un interés por el problema mismo de cómo funcionaban las cosas, y una disposición a mirar a la Naturaleza con la misma preocupación mental. Aparte de los casos famosos en los que un experimento estratégico pudiera aportar la solución de un problema particular, Galileo nos da la impresión de un hombre que estaba experimentando tan continuamente que adquirió una familiaridad con los movimientos y las estructuras: observó las maneras de comportarse un proyectil, el manejo de palancas y el comportamiento de cuerpos esféricos en planos inclinados, de tal manera que parece conocerlos de forma tan íntima como podríamos decir que algunos conocen a sus perros, intuitivamente. Y los relojes movidos por ruedas dentadas eran todavía algo sorprendentemente nuevo en el mundo cuando hizo su aparición en el siglo XIV la idea de que los cuerpos celestes podían ser algo parecido a un mecanismo de relojería. La propaganda primitiva en favor del movimiento científico insistía en forma notable en los resultados utilitarios que de él se esperaban; y aquél fue uno de los motivos en que se basaron los hombres de ciencia y las sociedades científicas al reclamar el apoyo de los reyes. Algunas veces parece existir una correspondencia muy curiosa entre las necesidades técnicas de la época y la preocupación principal de los investigadores científicos, incluso cuando se nos escapa la forma exacta en que estaban relacionadas entre sí, o se hace difícil localizarla, como sucede en el caso de la balística en el siglo XVI y, quizá, en el de la hidráulica del siglo XVII. Una gran parte de los problemas tratados por la Royal Society en sus primeros tiempos giraba en torno a temas de utilidad eminentemente práctica. Y durante un período notablemente largo, uno de los tópicos que se presentaban una y otra vez ante los técnicos y los hombres de ciencia era una

cuestión de necesidad inmediata: el problema de encontrar un método eficaz de medir una longitud. No sorprende el hecho de que una gran parte de la labor de los estudiosos de nuestro tiempo se haya dirigido hacia la historia de la tecnología.

En el siglo XVII hay una cosa que comienza a cobrar importancia destacada, y es la creación de nuevos instrumentos científicos, especialmente de instrumentos de medida; es difícil para nosotros darnos cuenta de lo dificultoso que debió de ser trabajar en los siglos anteriores, sin disponer de estos aparatos. El telescopio y el microscopio hacen su aparición ya a principios del siglo—y posiblemente fueron ideados algo antes—, y se hace difícil no considerarlos como una derivación de las industrias del vidrio y de la pulimentación de metales que existían en Holanda. No obstante, el microscopio no fue eficaz hasta bastante tiempo después, debido, al parecer, a un defecto, no de la técnica industrial en cuanto tal, sino de la ciencia de la óptica. Sin embargo, a mediados del siglo se construyó una lente más poderosa, que ayudó a una gran parte de los trabajos que se realizaron en los años que siguieron. Galileo representa un eslabón muy importante en la evolución del termómetro y del reloj de péndulo, y el barómetro aparece a mediados del siglo; pero durante mucho tiempo no fue posible registrar nada más que el cambio de la temperatura, porque no se disponía de una escala digna de confianza que permitiese medirla exactamente. Hasta el siglo XVIII no existió un termómetro verdaderamente exacto. A mediados del siglo XVI encontramos una vez más un invento henchido de posibilidades futuras: el de la bomba de aire; y a partir de entonces comenzamos a presenciar el empleo del soplete en el análisis químico. En la primera mitad del siglo, Van Helmont estudió los gases, inventó la palabra *gas* y encontró que existían gases de diversas clases—no solamente aire—; pero tropezó con la tremenda dificultad de que no disponía de medios de conservar y aislar ningún gas determinado que hubiera deseado estudiar, ni llegó tampoco a la concepción moderna de lo que es un «gas». Cuando consideramos la enorme variación y la naturaleza fantástica de los objetos que abarrotaban un laboratorio de alquimia incluso en el siglo XVI, es posible que tengamos la impresión de que no podría haber sido la falta de conocimientos técnicoindustriales lo que había retrasado la aparición de algunos de los instrumentos científicos modernos; aunque parece ser que, allí donde la pureza y la precisión eran factores decisivos, tanto en la industria vidriera como en la metalúrgica, los

adelantos técnicos conseguidos hasta el siglo XVII constituyen un factor que influyó notablemente en el caso. Podemos deducir, por las muchas veces que lo encontramos repetido en libros y en cartas, que el método experimental durante la primera mitad del siglo XVII constituía una seria carga económica para los investigadores. Al avanzar el siglo, cuando las reuniones de hombres de ciencia se fueron transformando en sociedades científicas: la Royal Society en Inglaterra, la Académie des Sciences en Francia, y sociedades similares en Italia en fecha todavía anterior, ayudaron a llevar la carga económica en los experimentos. Sus publicaciones y la fundación de revistas de aparición periódica hicieron todavía más rápida la comunicación entre los hombres de ciencia y la comparación de los resultados obtenidos. Parece que, hasta mediados del siglo, las publicaciones científicas no adoptaron la forma actual de comunicar los resultados obtenidos experimentalmente y describir el proceso seguido. Algunas veces, como en las obras de Galileo, se demostraba algo por razonamiento puro, aunque, posiblemente, se había descubierto en el curso de un proceso experimental.