

3. Galileo y la ciencia de la mecánica

La ciencia de la astronomía estuvo asociada con el sacerdocio y la tradición culta desde la Antigüedad remota hasta la época moderna. En astronomía no hubo tradición artesanal de alguna importancia hasta los grandes descubrimientos geográficos, momento en que la astronomía entró en contacto con la navegación con vistas a la determinación de la longitud y latitud en alta mar. De acuerdo con ello, hallamos que los astrónomos modernos empleaban los métodos matemáticos de la vieja tradición culta, siendo originales en las teorías producidas y conservadores en la metodología. Copérnico y Kepler, en sus comienzos, no consideraban a las matemáticas como una mera herramienta intelectual, como un método de desarrollar una teoría científica con independencia del contenido de dicha teoría. Sus matemáticas eran de carácter metafísico, incorporando las preconcepciones de Pitágoras y Platón. Los cuerpos celestes eran necesariamente esféricos por lo que respecta a la forma, mientras que sus movimientos eran necesariamente circulares. La observación habría de acomodarse a estos presupuestos, ya que las formas matemáticas, las armonías, determinaban la estructura del universo, siendo una realidad previa a la

percepción de los órganos de los sentidos. Descartes escribió en 1628:

Cuando recapacitaba cómo era que los primeros filósofos de épocas pretéritas se negaban a admitir al estudio de la sabiduría a quien no supiese matemáticas [...], vi confirmadas mis sospechas de que tenían conocimiento de un tipo de matemáticas muy distinto del que es usual en nuestro tiempo.

En el siglo XVII las matemáticas habían pasado a formar parte de la lógica del método científico, siendo una herramienta neutral de investigación más bien que un determinante a priori de la naturaleza de las cosas, constatando Descartes el profundo cambio que había tenido lugar en la condición de las matemáticas. El cambio no tuvo lugar principalmente en la astronomía, sino en la ciencia de la mecánica. En esta área se había dado una larga tradición tanto de práctica artesanal como de discusión culta, siendo en la mecánica donde surgió el método científico experimental-matemático. La ciencia de la mecánica y el método matemático experimental se desarrollaron durante el siglo XVI en el norte de Italia, que era entonces quizá la región más avanzada técnicamente de toda Europa, especialmente por sus arquitectos e ingenieros. Frente a ello, Inglaterra, que se hallaba menos desarrollada técnicamente, produjo la ciencia del magnetismo y el método inductivo cualitativo, mientras que los alemanes, empleando viejos métodos, desarrollaron la ciencia de la astronomía.

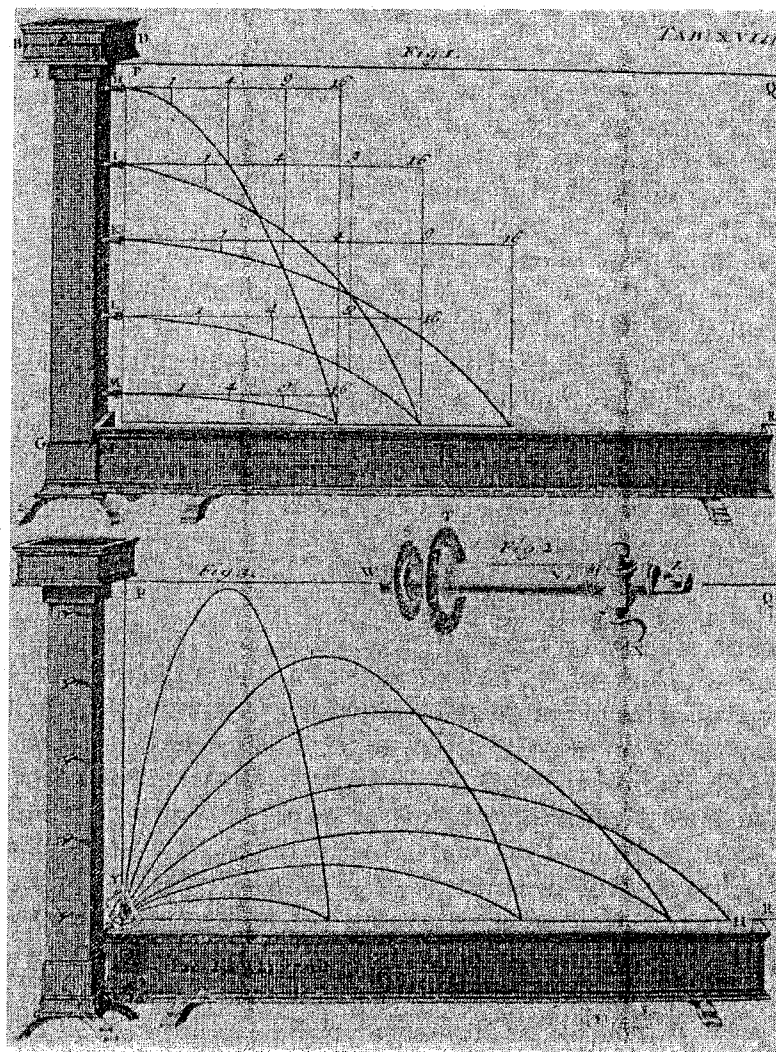
Tras el estancamiento de la escuela del *impetus* en las universidades, la mecánica se desarrolló en el siglo XVI gracias sobre todo a los ingenieros, si bien los eruditos continuaron con las discusiones acerca del *impetus*, adoptando finalmente el tema una forma moderna con el profesor de universidad Galileo. Los ingenieros se pusieron rápidamente a la cabeza de los teóricos del *impetus* por lo que atañe al método, practicando experimentos en lugar de limitarse a discutir.

Además sus experimentos eran cuantitativos. Medían y correlacionaban las variables estudiadas a fin de obtener leyes físicas empíricas. El artista e ingeniero Leonardo da Vinci, 1452-1519, estudió diversos problemas de construcción de manera experimental. Utilizando modelos a escala, investigaba de qué manera el peso vertical que podían soportar pilares verticales y vigas horizontales variaba con el grosor y la altura o longitud. Sus experimentos lo llevaron a los resultados de que el poder de sustentación de un pilar de un material y altura dados variaba como el cubo de su diámetro, y que la capacidad de sustentación de una viga era directamente proporcional a su grosor e inversamente proporcional a su longitud.

Tales experimentos indican que Leonardo apreciaba la importancia de la experimentación cuantitativa en el método científico, siendo a la vez consciente del valor de las matemáticas. «No hay certeza en la ciencia si no se puede aplicar una de las ciencias matemáticas», escribía. Pensaba que la mecánica era la más noble de las ciencias, «puesto que vemos que por medio de ella realizan sus acciones todos los cuerpos animados que poseen movimiento». En sus opiniones teóricas, Leonardo no avanzó más allá de los teóricos del *impetus*, si bien amplió el alcance de la mecánica más allá de las cuestiones físicas, hasta la naturaleza animada. Consideraba que los huesos y articulaciones de los animales eran sistemas de palancas operados mediante la fuerza de los músculos.

Un problema mecánico que cobró importancia con el desarrollo de las armas de fuego era el de la naturaleza del movimiento de los proyectiles. Los griegos sólo habían sido capaces de habérselas con combinaciones de fuerzas o movimientos que se hallasen en la misma línea recta o en líneas paralelas, como en las palancas. Los movimientos de los proyectiles siempre fueron más bien un problema, puesto que se debían a una fuerza de proyección y a la fuerza de grave-

dad, que rara vez se hallaban en la misma línea o eran paralelas. Los aristotélicos de la Edad Media eran de la opinión de que un proyectil se movía inicialmente hacia arriba a lo largo de una recta inclinada hasta que se agotaba la fuerza de proyección, cayendo entonces verticalmente hacia abajo por la



Trayectorias parabólicas de proyectiles.

fuerza de la gravedad. De este modo, no combinaban la fuerza de proyección con la fuerza de la gravedad, sino que las consideraban consecutivamente. Los partidarios de la teoría del *impetus* estimaban que la gravedad podría comenzar a actuar un poco antes de que el *impetus* del proyectil se agotase, de manera que el punto superior de su trayectoria no sería un ángulo agudo, sino de forma redondeada. Leonardo abrazó esta opinión. En la trayectoria de un proyectil había tres partes: en primer lugar, un movimiento rectilíneo bajo la acción del *impetus*; en segundo lugar, una porción curva en la que se mezclaba la gravedad y el *impetus*, y en tercer lugar, una caída vertical bajo la fuerza de la gravedad.

Los trabajos de Leonardo fueron seguidos de los de Tartaglia, 1500-1557, un ingeniero autodidacto, agrimensor y contable que escribió sobre matemáticas y mecánica. En 1546 publicó un libro sobre táctica militar, municiones y balística en el que estableció que el *impetus* de proyección y la fuerza de la gravedad actúan conjuntamente sobre un proyectil a lo largo de toda su trayectoria. Así, la trayectoria de un proyectil es curva en todo su recorrido, pues «siempre hay alguna parte de la gravedad apartando el proyectil de su línea de movimiento». Tartaglia halló también una regla empírica que conectaba el alcance de un cañón con su ángulo de inclinación. El alcance es máximo, decía, cuando el cañón se halla inclinado un ángulo de 45°, y a medida que el ángulo aumenta o disminuye, el alcance disminuye, al principio lentamente y luego más aprisa. Tartaglia estaba muy preocupado por la promoción de las matemáticas y de la mecánica. Hizo la primera traducción italiana de la geometría de Euclides y publicó la primera edición de la mecánica de Arquímedes en 1543. Para él las matemáticas se ocupaban exclusivamente del método de la ciencia, sin que representasen verdades metafísicas a las que hubiesen de ajustarse las teorías científicas.

El objetivo del estudioso de la geometría –escribió Tartaglia– es siempre hacer con la mayor habilidad las cosas que puede construir en materiales.

Así las matemáticas eran útiles en la ciencia tan sólo en la medida en que eran aplicables a cuestiones físicas concretas.

Girolamo Cardano, 1501-1576, un rico estudioso que daba clases en la escuela platónica de Milán, era contemporáneo de Tartaglia. Frente a Tartaglia, Cardano sostenía que las formas geométricas y las armonías aritméticas determinaban el carácter de las cosas naturales, confirmando al hombre el estudio de las matemáticas poderes ocultos sobre la naturaleza. En el campo de la mecánica no era un experimentalista, o al menos no contrastaba sus generalizaciones experimentalmente, puesto que sostenía que la fuerza necesaria para mantener a un cuerpo en reposo en un plano inclinado era proporcional al ángulo del plano, enunciado que los experimentos refutarían para ángulos de magnitud apreciable.

Algo más tarde, Benedetti, 1530-1590, de la Universidad de Padua, continuó la discusión de la teoría del *impetus*. Su libro *De la mecánica* (1585) era básicamente una crítica de la teoría aristotélica. Benedetti rechazaba la idea aristotélica de que la velocidad de un cuerpo aumentaba a medida que se hallaba más próximo al centro del universo, sosteniendo que la velocidad de tal cuerpo en caída libre aumentaba a medida que se alejaba del punto de partida. Benedetti pensaba que una piedra tirada a un pozo que atravesase la Tierra no se detendría en el centro, como había supuesto Aristóteles, porque el *impetus* que adquiriera la haría avanzar, de manera que habría de oscilar aquí y allá en torno al centro hasta que su *impetus* se agotase. No obstante, Benedetti creía que los cuerpos de igual forma y tamaño caerían con velocidades proporcionales a sus densidades, cayendo más rápidamente el cuerpo más pesado.

Simón Stevin, 1548-1620, de Brujas, era un notable estudioso de la mecánica en esta misma época fuera de Italia. Como Tartaglia, comenzó su carrera como tenedor de libros e ingeniero militar, si bien Stevin tuvo más éxito, haciéndose consejero técnico del príncipe Mauricio de Nassau, acabando sus días como capitán general de Holanda. Stevin era al principio un autodidacto, pero adquirió mayor educación que Tartaglia, acudiendo a la Universidad de Lovaina cuando tenía treinta y cinco años. En 1586 Stevin publicó una obra de mecánica que contenía varios resultados importantes. Realizó un experimento refutando la opinión aristotélica de que los cuerpos pesados caen más aprisa que los ligeros, experimento que se ha atribuido incorrectamente a Galileo.

El experimento contra Aristóteles es el siguiente —escribía Stevin—: Tomemos [...] dos balas de plomo, una de ellas diez veces mayor en peso que la otra, que dejaremos caer juntas de la altura de treinta pies sobre una plancha u otra cosa que suene con claridad, y se verá que la más ligera no emplea diez veces más tiempo para caer que la más pesada, sino que caen con tanta igualdad sobre la plancha que ambos ruidos parecen una única sensación de sonido.

Stevin obtuvo también una comprensión intuitiva del paralelogramo de fuerzas, un método para hallar la acción resultante de una combinación de dos fuerzas que no se hallan en la misma recta ni en líneas paralelas. El método fue formulado explícitamente por primera vez por Newton y Varignon en 1687, consistiendo en la representación de las dos fuerzas, en magnitud y dirección, mediante dos líneas rectas que se originan en un punto común, viniendo dada la resultante por la diagonal del paralelogramo formado al trazar otras dos líneas paralelas a las dos primeras. Las matemáticas antiguas, como se recordará, nunca habían conseguido abordar la combinación de fuerzas que no fuesen ni lineales ni paralelas.

En relación con la construcción naval, Stevin hizo progresar la ciencia de la hidrostática, añadiendo al principio de flotación de Arquímedes la proposición de que cualquier cuerpo flotante adopta una posición tal que su centro de gravedad se halle en la misma línea vertical que el centro de gravedad del fluido desplazado. Era también un agudo exponente del sistema decimal, defendiendo su uso en la representación de fracciones para pesos, mediciones y monedas. En lo que atañe al método, era un consumado experimentalista y un científico aplicado. Los experimentos, señalaba, «son la sólida base sobre la que han de edificarse las artes». Además defendía la cooperación de varias personas en un proyecto científico común, pues afirmaba que «el error o negligencia de uno se compensa con la precisión del otro».

En mecánica, como en magnetismo, hallamos que los artesanos e ingenieros podrían desarrollar el método científico y nuevos experimentos, pero no nuevos cuerpos teóricos. Tanto en magnetismo como en mecánica fue el estudioso interesado en la tradición artesanal que se oponía a la vieja tradición culta el que originó nuevas teorías. La vieja mecánica fue rechazada, y la nueva, fundada por un hombre así: Galileo Galilei, 1564-1642, de las universidades de Padua y Pisa. Galileo nació en Pisa, donde estudió y enseñó un corto período de tiempo en la universidad. En 1592 se mudó a la más liberal e ilustrada Universidad de Padua, donde permaneció dieciocho años, desarrollando sus más importantes investigaciones sobre mecánica. En 1610 se cambió a Florencia como «filósofo y primer matemático del gran duque de Toscana», donde llevó a cabo sus investigaciones en astronomía con el telescopio. Finalmente estudió mecánica de nuevo cuando su obra astronómica se vio condenada.

Las dos grandes obras de Galileo son el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, el ptolemaico y el copernicano*, publicada en 1632, y sus *Dos nuevas ciencias*, publica-

da en 1638. Ambas obras estaban escritas en forma de diálogo entre dos de sus amigos y defensores, Sagredo y Salviati, y un partidario del punto de vista aristotélico, Simplicio. De este modo, Galileo trató de dar a sus obras un gran auditorio, desacreditando efectivamente la mecánica y cosmología aristotélicas. La obra de Galileo en mecánica, como la de Leonardo, Tartaglia y Stevin, se vio estimulada por los problemas experimentados en la ingeniería. En una carta escrita en 1632 a Marsili, Galileo señalaba que había sido específicamente el problema de los proyectiles el que lo había llevado a estudiar la caída gravitatoria de los cuerpos. Además, su libro de mecánica, las *Dos nuevas ciencias*, se abre con una escena situada en el Arsenal veneciano, donde Salviati señala:

Pienso que la constante actividad en vuestro famoso arsenal, señores venecianos, ofrece un gran campo para filosofar a los intelectos que especulan, especialmente en aquella parte que se denomina mecánica, donde se construyen continuamente todo tipo de instrumentos y de máquinas por medio de gran número de artesanos, entre los que ha de haber algunos que, en parte por experiencia heredada y en parte por observaciones propias, se han tornado muy expertos en las explicaciones.

Mas aunque esos artesanos supiesen muchísimo, decía Galileo, no eran realmente científicos, al no hallarse familiarizados con las matemáticas, por lo que no podían desarrollar sus resultados teóricamente. Galileo estaba muy preocupado por la función de las matemáticas en el método científico, y especialmente por el problema del grado en que los objetos físicos corresponden a figuras geométricas. En el diálogo astronómico, el aristotélico Simplicio señala que las esferas geométricas tocan a un plano en un punto, mientras que las esferas físicas tocan al plano en varios puntos, de hecho en toda un área, de modo y manera que parecería darse una falta de correspondencia entre las matemáticas y la naturaleza. Salviati responde que si bien es así, con todo cabe

la posibilidad de imaginar una esfera geométrica imperfecta que tocase al plano en diversos puntos. De este modo, las matemáticas se podrían ajustar a los objetos físicos, pudiendo utilizarse para interpretar la naturaleza, estimándose la correspondencia entre ambas mediante «experimentos bien elegidos». Cualquier discrepancia sería culpa del científico: «El error no reside ni en lo abstracto ni en la geometría ni en la física, sino en el calculador que no sabe cómo ajustar sus cuentas».

El primer conjunto de problemas mecánicos abordado por Galileo constaba de aquellos que entrañan efectos de escala; el problema de por qué las máquinas grandes se derrumban frecuentemente, destrozándose, siendo así que se habían construido con exactamente las mismas proporciones geométricas que otras máquinas menores, duraderas y eficaces en el desempeño de su propósito. Las propiedades de las figuras geométricas no dependen de sus tamaños, poseyendo π el mismo valor para todos los círculos. Sin embargo, los grandes navíos pueden colapsar en el dique, mientras que los menores construidos con las mismas proporciones podrían botarse con seguridad. Aquí parece darse de nuevo una falta de correspondencia entre las matemáticas y la naturaleza, si bien el problema podría resolverse, afirmaba Galileo, si la cantidad de materia contenida en un cuerpo se tratase como una magnitud matemática, si la materia se considerase «como si perteneciese a las simples y puras matemáticas». Así, si las dimensiones de una máquina se doblasen, su peso aumentaría ocho veces, mientras que la resistencia de sus partes individuales aumenta en menor proporción, de modo que no pueden soportar el mayor peso. Como Leonardo, Galileo mostró que el peso que una viga horizontal puede soportar disminuye de hecho en proporción a su longitud, de modo que habría de ser mucho más gruesa a fin de aguantar incluso el mismo peso. De manera semejante, un gran edificio exige pilares para aguantar

el peso del tejado proporcionalmente mucho más gruesos que los de una estructura menor. Una vez más, al igual que Leonardo, Galileo transportó su mecánica al dominio del mundo animado, señalando que las patas de los elefantes han de ser proporcionalmente mucho más gruesas que las de los insectos a fin de transportar su peso. Halló que los cilindros huecos eran más fuertes que los cilindros sólidos que contienen la misma cantidad de materia, sugiriendo que ello explicaba el hecho de que los huesos de los animales fuesen huecos y aproximadamente cilíndricos, puesto que dicha forma daba la máxima resistencia para el mínimo de peso.

Galileo era de la opinión de que se podían aplicar demostraciones matemáticas convenientemente elegidas a la investigación de cualquier problema que entrañase cantidades medibles, aparte de las mediciones espaciales de longitudes, áreas y volúmenes, que habían sido el objeto tradicional de la geometría. Al investigar el efecto de la escala, estudió las cantidades de materia, más adelante denominadas «masas», según estas líneas. A continuación investigó problemas dinámicos que entrañaban las medidas del tiempo y la velocidad de una manera similar. Aquí el problema central para Galileo era el de la caída de los cuerpos bajo la fuerza de la gravedad. En primer lugar refutó la opinión aristotélica de que los objetos pesados caen más aprisa que los ligeros. Qué ocurriría, se preguntaba, si un cuerpo pesado y otro ligero se atasen y se dejaran caer desde cierta altura. Desde el punto de vista aristotélico podría sostenerse que el tiempo empleado por su caída sería o la media de los tiempos de ambos cuerpos si se tomasen separadamente o el tiempo de un cuerpo que tuviese que caer desde la misma altura con un peso que fuese la combinación de ambos. «La incompatibilidad de los resultados —escribió Galileo— mostró que Aristóteles se equivocaba.» Para hallar qué ocurría de hecho en la caída gravitatoria de los cuerpos, Galileo realizó el experimento consistente en medir el tiempo emplea-

do por esferas metálicas pulidas que rodaban por longitudes dadas de un plano inclinado graduado. La caída libre de un objeto bajo la acción de la gravedad era demasiado rápida como para observarse directamente, por lo que Galileo «diluyó la gravedad», empleando el recurso del plano inclinado, a fin de que sus esferas metálicas se moviesen hacia abajo por la gravedad con velocidades medibles. De este modo halló que todos los cuerpos, independientemente de sus pesos, caían por las mismas distancias en el mismo tiempo, siendo la distancia proporcional al cuadrado del tiempo de caída o, lo que venía a ser lo mismo, que las velocidades de los cuerpos graves aumentaban uniformemente con el tiempo.

De acuerdo con la física aristotélica, la acción constante de una fuerza hacía que un cuerpo se moviese con velocidad uniforme. Los resultados de Galileo mostraban, no obstante, que los cuerpos no se mueven con velocidad uniforme bajo la influencia constante de la fuerza de la gravedad; antes bien, en cada intervalo temporal recibían un incremento extra de velocidad. La velocidad que tiene un cuerpo en un punto se mantiene, viéndose incrementada por la fuerza gravitatoria. Si la fuerza de la gravedad se pudiese desconectar, el cuerpo habría de continuar moviéndose con la velocidad que tenía en dicho punto. Tal fenómeno se observaba cuando las esferas metálicas de Galileo alcanzaban el final del plano inclinado, continuando con su movimiento a lo largo de una mesa horizontal bien pulimentada con una velocidad uniforme. De estas consideraciones seguía el principio de inercia, que establece que un cuerpo permanece en el mismo estado de reposo o movimiento uniforme en tanto en cuanto no actúe sobre él ninguna fuerza.

De ahí pasó Galileo a mostrar el valor de la demostración matemática en la ciencia desarrollando la teoría de la trayectoria trazada por un proyectil. Consideró el movimiento de una esfera que rueda a lo largo de una mesa con velocidad

uniforme hasta alcanzar el borde, momento en que traza una trayectoria curva hasta llegar al suelo. En un punto cualquiera de esta trayectoria, la esfera tendría dos velocidades: una horizontal que permanece constante debido al principio de inercia y otra vertical que aumenta con el tiempo debido a la gravedad. En la dirección horizontal la esfera recorrería distancias iguales en tiempos iguales, si bien en la vertical las distancias cubiertas serían proporcionales al cuadrado del tiempo. Tales relaciones determinan la forma de la trayectoria descrita. La trayectoria de un proyectil disparado por un cañón sería pues una parábola completa, dando un alcance máximo cuando el cañón se hallaba a una elevación de 45° . Así pues, lo que Tartaglia había observado de hecho Galileo lo dedujo teóricamente de los resultados de sus experimentos con planos inclinados. A este respecto, escribía Galileo:

El conocimiento de un solo hecho adquirido mediante el descubrimiento de sus causas prepara la mente para entender y conocer otros hechos, sin necesidad de recurrir a experimentos, precisamente como en este caso, en el que por argumentación sólo el autor prueba con certeza que el alcance máximo se da cuando la elevación es de 45° .

Tal desarrollo resultaba de la máxima importancia para la ciencia. Hasta ahora los nuevos fenómenos se habían hallado sólo por azar o accidente, y las hipótesis rivales, como la mecánica aristotélica o la del *impetus*, podían convivir durante muchas generaciones debido a la falta de criterios para decidir entre ellas que no fuesen exclusivamente lógicos. Ahora Galileo mostraba cómo era posible demostrar «lo que tal vez no se haya observado nunca» a partir de fenómenos ya conocidos, suministrando la demostración una explicación de esos fenómenos y verificando dicha explicación el descubrimiento experimental de los hechos predichos. Para Tartaglia una elevación del cañón de 45° que daba el

alcance máximo constituía un hecho bruto. Para Galileo era la resultante de las propiedades de las dos velocidades poseídas por el proyectil, siendo verificada su explicación por la realización física del hecho predicho. De manera semejante, Galileo sabía que como cuestión de hecho las oscilaciones de un péndulo empleaban el mismo tiempo, sin que importase la amplitud de la oscilación, y más adelante Christiaan Huygens de Holanda demostró matemáticamente que ello era una consecuencia necesaria de la uniformidad de la fuerza de la gravedad.

Con Galileo alcanzó la madurez el método científico matemático-experimental. Extrajo la geometría de su concentración en longitudes, áreas y volúmenes para aplicarla a otras propiedades medibles, concretamente el tiempo, el movimiento y la cantidad de materia, a fin de descubrir las conexiones existentes entre ellas y deducir las consecuencias de dichas conexiones. A fin de aplicar las matemáticas a los fenómenos físicos de esta manera, el campo de investigación habría de restringirse a la observación de cualidades que fuesen medibles. Las matemáticas no podrían aplicarse a cualidades no medibles, por lo que habrían de ignorarse. Galileo tenía que desestimar también algunos de los fenómenos medibles menos pertinentes, de manera que pudiese simplificar su estudio y centrarse en lo fundamental de su problema. Sabía de sobra que la resistencia del aire, que era medible en principio, modificaba la caída gravitatoria de los cuerpos, mas ignoró el asunto. Galileo hizo sus condiciones experimentales lo más perfectas y «matemáticas» posible, utilizando un plano inclinado pulimentado y una esfera metálica lisa. Sólo de ese modo podía obtener información que trascendiese las condiciones del experimento particular, información que describiese el comportamiento fundamental de todos los cuerpos que sufren una caída gravitatoria. De ahí que la demostración matemática pudiese aplicarse, dando una estructura de teoría abstracta y consecuencias

predichas que pudieran contrastarse mediante ulteriores experimentos.

Había un límite que no podía traspasar el método matemático-experimental. No podía abordar fenómenos no medibles, tales como las propiedades cualitativas que distinguen una criatura viva de otra. Aquí encajaba el método baconiano cualitativo e inductivo, aunque ello llevaría algún tiempo. Durante el siglo XVII el método matemático-deductivo recibió la más amplia aplicación; de hecho se convirtió en una filosofía. Las propiedades no medibles de la materia que ignoraban los científicos matemáticos llegaron a considerarse irreales. Llegó a trazarse una distinción entre las cualidades primarias y medibles de la naturaleza y las cualidades secundarias que no eran medibles. Las cualidades primarias medibles, masa, movimiento y magnitud, se consideraban como propiedades reales, objetivas, de la materia, mientras que las propiedades secundarias no medibles, colores, olores, sabores, se tenían por productos subjetivos de los órganos de los sentidos que no poseían realidad en cuanto tales en el mundo exterior.

Otro desarrollo que acompañó al surgimiento del método matemático experimental fue la elaboración de instrumentos de medida, de modo que las matemáticas pudiesen apoyarse en los fenómenos. Galileo usaba ampliamente aquellos instrumentos de medición tradicionales del tipo de la regla, la balanza, el reloj de agua, desarrollando otros. Construyó el primer termómetro para medir la temperatura y utilizó el péndulo para medir el tiempo, primero en medicina para estimar el ritmo del pulso y luego, más en general, en el plan que dejó tras de sí del primer reloj de péndulo. Galileo desarrolló también el telescopio y lo empleó masivamente para realizar observaciones astronómicas, aunque curiosamente la mayoría de sus observaciones de los cielos eran de carácter cualitativo.

En 1609 Galileo oyó que se habían construido «lentes de perspectiva» capaces de aumentar los objetos distantes. Habían sido hechos por los constructores de lentes de Magdeburgo, especialmente Hans Lipperhey, quien presentó su invento en 1608. Galileo investigó las propiedades ópticas de combinaciones de lentes y construyó para sí mismo diversos telescopios mejorados. Con tales telescopios examinó los cielos y descubrió una muchedumbre de nuevos hechos. Descubrió que los cuerpos celestes no eran en absoluto tan perfectos y superiores a la Tierra como sugería la tradición aristotélica. Había manchas en la faz del Sol y la Luna parecía ser en gran medida como la Tierra, poseyendo inmensas montañas cuya altura estimó a partir de la sombra que arrojaban. Descubrió que la Vía Láctea constaba de muchísimas estrellas fijas y, con otros, observó la nebulosidad en la constelación de Andrómeda. Galileo halló además que el planeta Venus tenía fases como la Luna, cambiando de una fina forma creciente a la órbita llena, así como que el planeta Júpiter poseía cuatro lunas, presentando según creía una imagen en miniatura del sistema solar de acuerdo con el esquema copernicano.

Galileo había sido desde hacía tiempo un partidario del sistema copernicano del mundo. Escribiendo a su amigo Johannes Kepler en 1597, decía haber sido «ya desde hace muchos años un seguidor de la teoría de Copérnico», dado que explica «las razones de muchos fenómenos que resultan completamente incomprensibles según las opiniones comúnmente aceptadas». El sistema copernicano no se había aceptado ampliamente durante el siglo XVI, ya que daba predicciones de posiciones planetarias que no resultaban más precisas que las producidas por el esquema ptolemaico, incorporando suposiciones que parecían insostenibles desde el punto de vista de la mecánica tradicional. Además, era tan sólo un alejamiento de especialistas respecto de la filosofía de la naturaleza integrada de Aristóteles, no forman-

do aún parte de una visión coherente del mundo en su conjunto.

No obstante, los desarrollos en astronomía tendían a favorecer la teoría copernicana, y los descubrimientos de Galileo dieron un considerable impulso a esta tendencia. En 1572 había aparecido una nueva estrella brillante, probablemente una supernova, que duró todo el año siguiente, desapareciendo en 1574. Además en 1577 se puso a la vista un cometa, cuya trayectoria fue observada y medida por Tycho Brahe, Michael Maestlin y otros que mostraron que se movía en torno al Sol, a través del sistema solar. Aristóteles había sostenido que la aparición de cometas era un fenómeno terrestre que tenía lugar bajo la órbita de la Luna y que los cielos eran perfectos e inmutables, no hallándose sujetos ni a la generación ni a la corrupción. Ambas pretensiones se vieron destruidas por los fenómenos astronómicos observados en la década de 1570, a lo que Galileo añadió las pruebas derivadas de las manchas del Sol y las montañas de la Luna a fin de ilustrar la imperfección de los cielos. Además, se había señalado muy pronto que si la teoría copernicana fuese verdadera, entonces Venus debería presentar fases como la Luna. A simple vista, Venus aparecía siempre como un círculo, mas Galileo mostró por medio del telescopio que las fases esperadas se daban. Asimismo, se había argüido que sólo podía haber en el universo un centro de rotación, y, puesto que la Luna giraba en torno a la Tierra, los demás cuerpos celestes debían moverse del mismo modo. Galileo mostró entonces que sea cual sea la opinión que se adopte relativa a la disposición del sistema solar, había ciertamente más de un centro de rotación en el mundo, dado que había cuatro lunas girando en torno a Júpiter.

Galileo publicó la mayor parte de sus descubrimientos astronómicos en la segunda década del siglo XVII, resultando sumamente efectivos para apoyar la teoría copernicana. Ahora que se producían nuevos elementos de juicio en favor

de la nueva astronomía, la oposición a la misma se endureció, dado que ya no se podía considerar como una opinión minoritaria sin importancia. Algunos eclesiásticos próximos denunciaron como heréticas las opiniones de Galileo, a la vez que los filósofos escolásticos de Pisa declaraban que sus opiniones eran falsas y contrarias a la autoridad de Aristóteles. Sugerían que las manchas solares no eran sino nubes que se movían en torno al Sol, o bien que se debían a imperfecciones en el telescopio, no pudiendo haber lunas en torno a Júpiter, dado que no se hacía mención de ellas en las obras de los antiguos. En 1615 Galileo fue convocado ante la Inquisición en Roma obligándole a abjurar de la teoría copernicana. Las proposiciones de que la Tierra rotaba sobre su eje y de que se movía en torno al Sol se declararon oficialmente falsas y heréticas, y en 1616 la obra de Copérnico fue incluida en el Índice de libros prohibidos, de donde no salió hasta 1835.

Galileo no sufrió cambio alguno de opinión, ya que dieciséis años más tarde publicó, con permiso de los inquisidores florentinos, su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, el ptolemaico y el copernicano*. Este libro se abrió directamente con un ataque a la doctrina aristotélica de que los cuerpos celestes eran muy diversos y distintos de la Tierra en composición y propiedades. La aparición de nuevas estrellas, cometas, manchas solares y las montañas de la Luna se citaban todos ellos como prueba en contra de esa opinión aristotélica. Además Galileo rechazó la idea corriente desde la Antigüedad según la cual la inmutabilidad y ausencia de cambio era algo noble, un signo de perfección. Propuso la idea, más adelante importante, de que el movimiento no era una transmutación que llevase a la generación o corrupción, sino que se limitaba a ser, como él decía, «una simple transposición de partes sin corromper ni engendrar nada de nuevo». Tal concepción se tornó más tarde parte de la filosofía mecánica, que sos-

tenía que el universo y cuanto contenía había permanecido y habría de permanecer en gran medida tal y como es, sin que aparezcan o desaparezcan entidades nuevas, consistiendo simplemente los procesos naturales en los movimientos mecánicos de los cuerpos y en el intercambio de sus momentos.

En sus argumentos en favor del sistema copernicano, Galileo se centró en contrarrestar las objeciones mecánicas de sentido común que lo asediaban. Repitió las respuestas que Copérnico había dado a tales objeciones, aunque esas respuestas eran ahora más convincentes al basarse en la nueva mecánica de Galileo. Según el principio de inercia, la atmósfera rotaría naturalmente con la Tierra sin precisar de una fuerza propulsora constante, tal y como sugería la mecánica de Aristóteles. Los objetos arrojados desde una altura no caerían hacia el oeste, porque compartirían el movimiento de la Tierra. Galileo sugería de manera similar que una piedra arrojada desde el mástil de un barco en movimiento caería a la base del mástil y no tras él, ya que la piedra compartiría el movimiento general del barco y su contenido. Dicho experimento fue realizado por un francés, Gassendi, en la década de 1640, hallando que se obtenía el resultado que Galileo esperaba.

Así pues, Galileo atacaba no sólo a la astronomía, sino también a la mecánica de la vieja cosmología. Presentó un nuevo modo de considerar las cosas que resultaba coherente y que se oponía a la visión aristotélica que componía también un todo integrado. En la Jornada III de su *Diálogo* admitía que los argumentos en favor de ambas visiones del mundo eran aproximadamente igual de decisivas, si bien creía poseer una prueba concluyente del sistema copernicano en su teoría de las mareas que discutía en la Jornada IV. Ambos movimientos de la Tierra, su rotación diaria y su movimiento anual en torno al Sol, daban lugar a sacudidas, según creía, que hacían que las aguas del océano se movie-

ran de un lado a otro como el agua de una jofaina. Rechazó la idea de que el Sol y la Luna provocaban las mareas, pues ello entrañaba que los cuerpos celestes eran superiores a la Tierra e influían sobre los acontecimientos terrestres, doctrina a la que era muy contrario. Con todo, su teoría exigía que debería de haber una marea diaria y no dos, como se observa. Además, contradecía el principio de inercia según el cual los cuerpos de la Tierra deberían compartir sus movimientos.

Así, en última instancia, Galileo no acabó estableciendo la teoría copernicana, si bien contribuyó a apoyarla sustancialmente. Su obra se dirigía a un auditorio más amplio que el de los matemáticos y astrónomos profesionales. Estaba escrita en primer lugar en italiano vernáculo, en la forma dialogada de la conversación ordinaria, y se hallaba simplificada para que la argumentación llegara al profano. Discutía tan sólo dos sistemas del mundo, el ptolemaico y el copernicano, dejando de lado sus variantes, como los sistemas de Tycho Brahe y de William Gilbert, que era el mismo que el tychónico excepto en que la Tierra rotaba diariamente sobre su eje. Además, ignoraba el sistema de su amigo Kepler, que había mejorado considerablemente la teoría copernicana, suministrando una abrumadora prueba de la hipótesis heliocéntrica para matemáticos y astrónomos profesionales, aunque tal vez no para el profano.

La gran obra de Galileo sobre los sistemas del mundo se publicó en 1632, unos trece años después de que Kepler hubiera dado a conocer la última de sus tres leyes del movimiento planetario. Mas Galileo ignoraba la obra de su amigo y mantuvo hasta el final que las órbitas de los planetas eran círculos y no elipses, como Kepler había demostrado en 1609. Según el principio de inercia de Galileo, si la superficie de la Tierra fuera perfectamente uniforme, una esfera puesta en movimiento sobre dicha superficie continuaría rodando en torno a la Tierra indefinidamente. De ahí que pensase

que la velocidad uniforme por un círculo fuese el movimiento natural de todos los cuerpos sobre los que no actuaba una fuerza. Esos movimientos naturales los disfrutaban los cuerpos celestes, no menos que los terrestres, y dado que, en su opinión, las órbitas de los planetas eran circulares, no surgían problemas relativos a los movimientos de los cuerpos celestes; eran, como había pensado Copérnico, enteramente naturales.

Así, Galileo no poseía la concepción moderna del movimiento inercial como velocidad uniforme en línea recta. Si la hubiera poseído, podría haber mostrado que la fuerza gravitatoria del Sol doblaba el movimiento rectilíneo natural de los planetas para formar una elipse, pues había mostrado que la gravedad de la Tierra doblaba el movimiento inercial del proyectil en una órbita parabólica. Ambos problemas, el de la trayectoria de la bala de cañón y el de la órbita del planeta, eran similares, y más adelante Newton los trató como tales. Mas Galileo falló en este caso, pues se hallaba constreñido por una vieja idea que nunca llegó a superar, a saber, la idea de que los movimientos de los cuerpos celestes eran circulares y uniformes. Sus ideas astronómicas se hallaban también limitadas por la poca atención prestada a la obra de Kepler, y quizá también por su adopción de un método cualitativo y no matemático en astronomía, un método hacia el que había sentido aversión en las ciencias terrestres, ya que había criticado a Gilbert y su obra sobre el magnetismo por su falta de matemáticas.

Galileo y Kepler forman un chocante contraste. Kepler también oyó hablar de los nuevos telescopios de los fabricantes de lentes holandeses e investigó la teoría óptica de su construcción. Diseñó un nuevo tipo de telescopio que era diferente en principio del desarrollado por Galileo, aunque él no empleó el instrumento para fines astronómicos; ciertamente ni siquiera lo construyó. Kepler estaba ocupado con la ordenación de las observaciones cuantitativas realizadas

por Tycho Brahe y no con los hechos de la observación telescópica cualitativa, siendo cierto de Galileo justamente lo contrario. Kepler se ocupaba principalmente de hacer que la astronomía fuese más precisa y exacta técnicamente, mientras que Galileo se interesaba primariamente por propagar la revolución inaugurada por Copérnico. Kepler se hallaba también interesado en promover la teoría heliocéntrica, y ciertamente halló las pruebas más permanentes a su favor, y, a su vez, Galileo realizó algunas observaciones cuantitativas en astronomía de naturaleza técnica. Preparó tablas de los eclipses de las lunas de Júpiter con el fin de determinar la longitud en el mar. Sin embargo, lo principal para Galileo era promover la revolución copernicana. Como hemos visto, Galileo abre su obra sobre astronomía con un ataque a los aristotélicos y no con un comentario sobre los interesantes problemas que se encuentran en la navegación, mientras que su trabajo en mecánica se abre con una discusión de los problemas derivados del estudio de las máquinas en el arsenal veneciano.

La naturaleza de los intereses galileanos contribuye a explicar por qué abandonó en gran medida el método matemático en astronomía, concentrándose en realizar observaciones telescópicas cualitativas. Cualquiera podría ver con el telescopio las lunas de Júpiter, las fases de Venus y las montañas de la Luna, mas sólo un matemático hábil podría sentirse convencido por los hallazgos de Kepler de que la teoría heliocéntrica era esencialmente correcta. Así Galileo fue más efectivo históricamente en la difusión del sistema copernicano entre las personas de su tiempo de lo que lo fue Kepler, pues aportó pruebas más sencillas a un público más amplio. Este extremo fue de sobra captado por la oposición, ya que en 1633 Galileo fue llamado de nuevo a Roma para enfrentarse a la Inquisición, por más que su obra hubiese sido aprobada por los inquisidores locales de Florencia. Una vez más se le obligó a abjurar de la hipótesis copernicana, y

en esta ocasión fue condenado por herejía y fue detenido los restantes nueve años de su vida en una villa cercana a Florencia. Allí escribió sus estudios de mecánica, que fueron pasados de contrabando al otro lado de la frontera y publicados en Amsterdam en 1638, a la vez que sus obras se prohibían en Italia.