PANORAMA GENERAL
DE
HISTORIA DE LA CIENCIA

LA CIENCIA DEL RENACIMIENTO
LAS CIENCIAS EXACTAS EN EL SIGLO XVII

POR

DESIDERIO PAPP y JOSE BABINI

ESPASA-CALPE ARGENTINA, S. A.
BUENOS AIRES

(1954)

tratado sobre las cónicas, lamentando seis años después no haber conocido antes el trabajo de DESARGUES que le hubiera ahorrado escribir el propio, tan simples y generales eran los métodos arguesianos.

Pero esos métodos, que tan brillantemente iniciara DESARGUES sobre las propiedades proyectivas de las figuras, deberán esperar más de un siglo antes de ser retomados y constituir entonces una rama autónoma de la matemática.

CAPÍTULO IV

GALILEO GALILEI

1. — GALILEO GALILEI es una de las figuras cumbres del pensamiento moderno. Nace en Pisa el 15 de febrero de 1564, descendiente de una familia de origen florentino que contó entre sus miembros un homónimo profesor de medicina en la Universidad de Florencia durante la primera mitad del siglo XV. Su padre: VINCENZIO GALILEI (1520-1591) fué un florentino dotado de amplia cultura humanista y matemática: además fué un músico renombrado, como ejecutante y como teórico.

En 1574, la familia de GALILEO se traslada de Pisa a Florencia, y el año siguiente el niño ingresa en el monasterio de Vallombrosa para estudiar humanidades, pero en 1578 abandona esos estudios para continuarlos en la casa paterna en un ambiente artístico, especialmente musical. VIVIANI, en su *Racconto istórico della vita del Sig. Galileo Galilei*, escrita en 1654 (doce años después de la muerte de Galileo) pero publicada en 1717, cuenta que en esta época, GALILEO, de poder elegir libremente carrera, hubiera sido pintor.

Pero el destino, o, mejor dicho, su padre, quería otra cosa. Pensando quizá en su homónimo antepasado, y con la esperanza de una vida más holgada que la propia, el padre de GALILEO había decidido que su hijo fuera médico, y en 1581 el futuro sabio se inscribe en la Escuela de Artes de la Universidad de Pisa. En esa escuela GALILEO toma el primer contacto con la filosofía aristotélica, que constituía entonces la propedéutica de la enseñanza de GALENO, fundamento ésta de los estudios médicos de la época. Un escrito (que en *Le Opere di Galileo Galilei*[1] aparece con el título *Juvenilia*), encontrado entre los papeles de GALILEO y que resumiría las lecciones que entonces recibiera, muestra el cabal conocimiento que GALILEO tuvo de esa filosofía.

Es durante esta época de estudiante de medicina, que GALILEO habría realizado la observación de los movimientos pendulares que más tarde lo llevarían a descubrir sus leyes. Es probable que la narración de VIVIANI, a este respecto, reúna en una sola las circunstancias que rodearon a las observaciones juveniles y a las deducciones realizadas por el sabio experimentado.

Más tarde, en 1584, se produce un acontecimiento importante en la vida del joven GALILEO, aún estudiante de medicina: se inicia en el estudio de la matemática. Probablemente el padre, que conocía matemática, le habría señalado como la geometría servía de fundamento a la pintura, a la perspectiva, a la música, y este hecho lo habría inducido a conocer fundamentos tan útiles. Toma entonces lecciones de matemática, y esta ciencia conquista su espíritu de tal modo, que deja todo otro estudio para dedicarse a EUCLIDES y sobre todo a ARQUÍMEDES.

Es así que en 1585 abandona la Universidad de Pisa, sin título académico, y regresa a Florencia donde continúa sus estudios matemáticos y escribe sus primeros trabajos; al mismo tiempo que se ocupa de enseñanza privada en esa ciudad y en Pisa y trata de conseguir una cátedra. Después de varios fracasos, y gracias al apoyo de GUIDUBALDO DEL MONTE, en 1589 logra finalmente la cátedra de matemática en la misma universidad en la que cuatro años antes era aún estudiante de medicina. Tres años después pasa a la Universidad de Padova, iniciando su período veneciano rico en descubrimientos científicos.

Respecto del período pisano recordemos únicamente que fué entonces cuando el buen conocedor de ARISTÓTELES empieza a lanzar dardos en contra del estagirita, como lo demuestra el escrito juvenil *De motu* (no aparecido en vida

[1] Edición oficial en veintiún volúmenes, (Firenze, 1890-1909), dirigida por ANTONIO FAVARO.

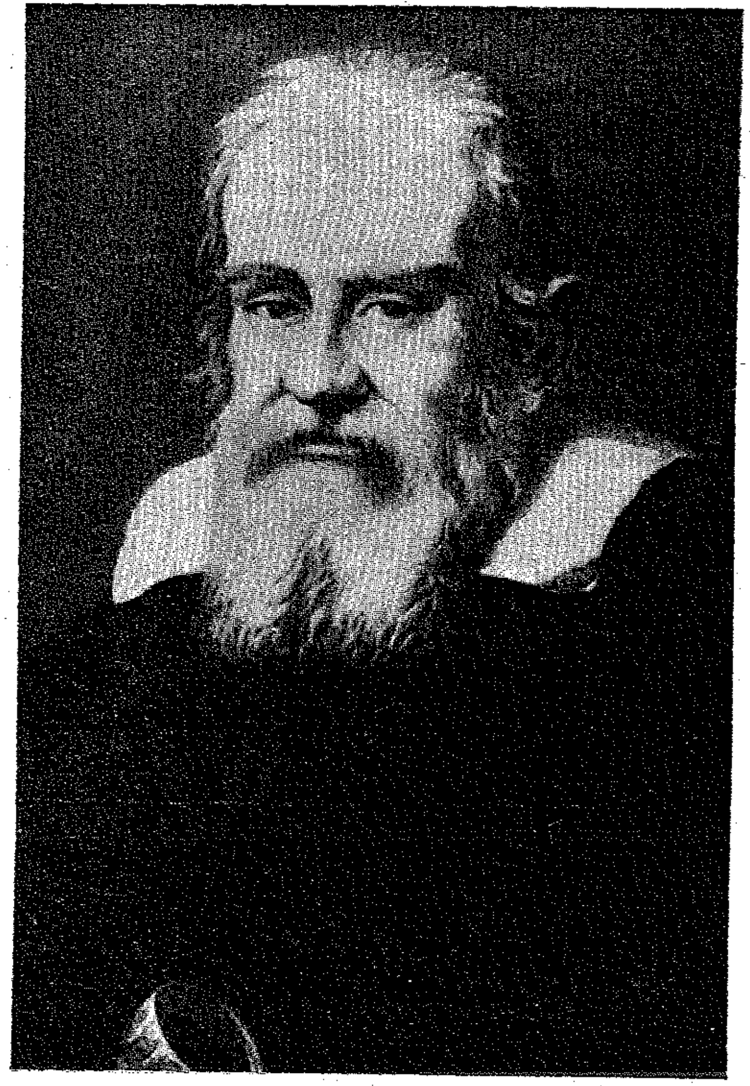


FIG. 12. — GALILEO GALILEI, según un retrato pintado hacia 1640 que se conserva en la Galería Pitti, de Florencia.

de GALILEO), donde ya están en germen las ideas de los *Discorsi* de su vejez.

Ya cubierto de honores por sus hazañas científicas, GALILEO regresa a Toscana en 1610 como primer matemático del gran duque COSIMO II, y es durante esta estada en Florencia que se desarrollará su doloroso conflicto con la Iglesia.

Sus descubrimientos astronómicos habían llevado a GALILEO a la convicción de la exactitud de la doctrina copernicana, lo que le valió que a sus enemigos aristótelicos se sumaran ahora los teólogos; y en 1615 se presenta una acusación concreta, en contra de GALILEO, ante la Inquisición. GALILEO se apresta a la lucha; en una célebre carta de 1615 dirigida a CRISTINA DE LORENA defiende los principios de la libertad del pensamiento científico, sosteniendo que los teólogos no han de inmiscuirse en las cuestiones científicas que ignoran, pues de hacerlo sería como "si un príncipe absoluto, sabiendo que puede mandar libremente y hacerse obedecer, quisiera, sin ser médico ni arquitecto, que se recetara o se construyera según su opinión con grave riesgo de la vida de los mismos enfermos y manifiesta ruina de los edificios"; y se dirige a Roma a defender sus ideas en el centro mismo de la lucha.

La decisión de la Iglesia, sin embargo, es contraria a COPÉRNICO: se declara que la doctrina heliocéntrica es contraria a las Sagradas Escrituras y que por tanto "no puede tenerse ni defenderse".

GALILEO regresa a Florencia, eximido personalmente de toda pena, y aunque amargado ante la inutilidad de su defensa y la derrota de sus convicciones, no piensa abandonar la lucha, confiando volver a la misma en el momento oportuno. Éste parece presentarse en 1623, cuando sube al trono pontificio, con el nombre de URBANO VIII, el cardenal BARBERINI que había demostrado siempre gran afecto hacia GALILEO. Inicia entonces la redacción de su *Diálogo*, que termina en 1629 y que después de lograr, no sin esfuerzos, la aprobación de la censura, aparece en 1632.

Pero la acogida oficial del libro fué muy distinta de la esperada. Varias versiones se han difundido para explicar

el cambio de actitud de URBANO VIII. Es probable que no fueran ajenos a él las intrigas de los enemigos de GALILEO: ya había circulado la maligna versión de atribuir a GALILEO un horóscopo de URBANO VIII que no le favorecía; así como, al aparecer el libro, se quiso personificar en el papa la figura poco simpática de Simplicio; pero la verdad es que la actitud de la Iglesia obedeció sobre todo a la cabal naturaleza del libro que GALILEO acababa de publicar no advertida a tiempo para prohibir su impresión. Y esta vez

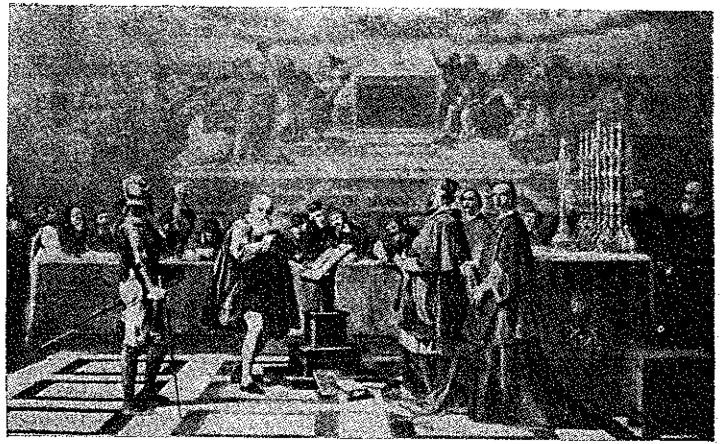


FIG. 13. — Cuadro bastante conocido que representa el momento en el que GALILEO habría pronunciado la frase: "Eppur si muove".

el proceso que se le inicia, no es para el viejo GALILEO de resultados tan benignos como el anterior. Ahora la acusación es directa: se le obliga a comparecer ante la Inquisición, y en Roma se le interroga y, finalmente, se le condena (abril de 1633) "a formal prisión... por un período determinable" a satisfacción del Santo Oficio; se le impone además penitencia saludable, y se prohibe el libro acusado.

Esta condena, relativamente moderada, estaba condicionada por la retractación que tuvo que pronunciar GALILEO respecto de las ideas de su libro, y en la que afirmaba "...abjuro, maldigo y detesto dichos errores y herejías... y juro que nunca más en el futuro diré o afirmaré algo, verbalmente o por escrito, que pueda dar nacimiento a una semejante sospecha en mí; y si conozco algún hereje o que sea sospechoso de herejía, lo denunciaré a este Santo Oficio...".

Galileo no fué torturado ni estuvo jamás en las cárceles de la Inquisición. También es falsa la difundida leyenda del "Eppur si muove", que empezó a circular, por razones fáciles de comprender, en el ambiente de los enciclopedistas franceses. (Se menciona, quizá por primera vez, en las *Querelles littéraires*, París, 1761, del eclesiástico Agustin-Simòn Irailh (1717-1794)).

Después de su condena, Galileo estuvo en Roma y en Siena en casa de amigos, hasta que obtuvo el permiso de residir en su "villa" de Arcetri, cerca de Florencia, aunque al principio con la obligación de no recibir visitas, ni discutir sus ideas, ni hacer reuniones, ni salir. En Arcetri pasó los últimos años de su vida, que empleó en redactar sus antiguos apuntes de dinámica, completándolos con los progresos que él mismo le había introducido durante su larga vida de investigador. Da fin así al manuscrito de sus *Discorsi e dimostrazioni* que aparecen en Leiden en 1638 y cuyos ejemplares pudo tener en sus manos, sin verlos, pues ya estaba ciego, a mediados de 1639.

Al final de su vida se le permitió que vivieran con él dos de sus discípulos: Viviani desde 1639 y Torricelli desde 1641. Pocos meses más tarde, el 8 de enero de 1642, el gran sabio muere en brazos de estos dos discípulos.

2. — Los primeros escritos de Galileo corresponden a su época juvenil, a la época de su encuentro con la matemática y con Arquímedes. Inspirado evidentemente en los escritos del gran siracusano, compone hacia 1586 *La Bilancetta*, en italiano, donde describe la pesada hidrostática. Este escrito muy breve circuló manuscrito y no se publicó en vida de su autor. También circuló manuscrito

en esa época otro escrito de Galileo inspirado en Arquímedes: *Theoremata circa centrum gravitatis solidorum*, que apareció como Apéndice de la "Quarta Giornata" de los *Discorsi* de 1638, con la siguiente presentación: "Estas son algunas proposiciones referentes al centro de gravedad de los sólidos, que durante su juventud fué estudiando nuestro académico, por estimar que lo que había escrito al respecto Federigo Commandino, no carecía de cierta imperfección...".

Mientras es lector en Pisa escribe, como trabajo relacionado con su cátedra, unos comentarios al *Almagesto* que jamás se encontraron y, como primer fruto de sus reflexiones dinámicas, el escrito *De motu* ya citado (hay que recordar que Galileo es lector de matemática y que la mecánica se estudiaba en la cátedra de filosofía). Con esas reflexiones se vinculan las experiencias acerca de la caída de los graves realizadas desde "una alta torre". Así escribe Galileo en *De Motu*, Viviani aclarará informando que esas experiencias se realizaron desde el Campanile de Pisa.

Pero será durante su estada en Padova cuando se cimentará la fama científica de Galileo. En 1597 idea y construye un compás de proporciones que más adelante perfecciona, agregándole un cuadrante, y que hace conocer en *Le operazioni del compasso geometrico e militare*, Padova, 1606. Respecto de este instrumento se suscitó una cuestión de prioridad, pues en 1507 Baldassare Capra (m. 1626) se atribuyó su invención en el escrito *De usu et fabrica Circuli cujusdam proportionis*. Ante ese escrito Galileo acusa a Capra de plagio, expediéndose el tribunal académico a su favor y dando lugar esta cuestión a la publicación de *Difesa di Galileo Galilei contro alle calunnie et imposture di Baldassar Capra...*", Venezia, 1607.

A esta época pertenece también el "termómetro" de Galileo. En efecto, al referirse a estos años escribe Viviani: "En estos tiempos encontró los termómetros, es decir aquellos instrumentos de vidrio con agua y aire para distinguir a través de los cambios de calor y de frío, la variación de la temperatura del lugar." En verdad, el instrumento

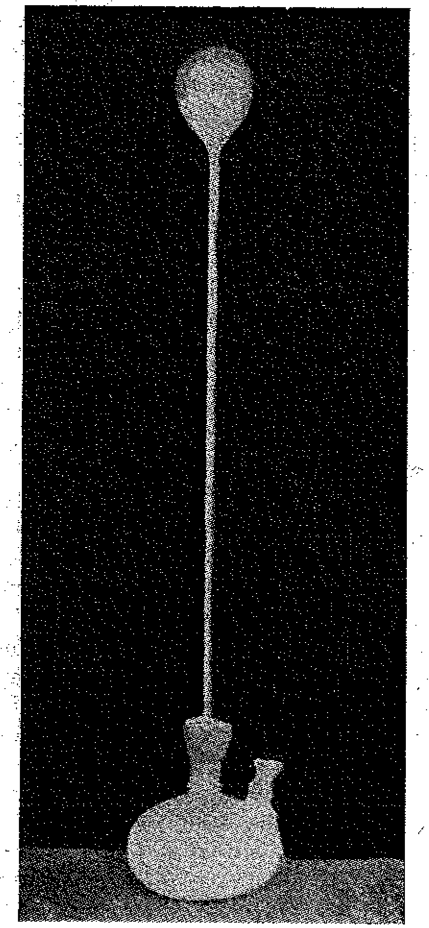


FIG. 14. — El termoscopio de GALILEO, según el modelo que se conserva en el Museo de Historia de la Ciencia, en Florencia.

ideado por GALILEO, fundado en propiedades pneumáticas conocidas desde la antigüedad (FILÓN de Bizancio y HERÓN de Alejandría), es un termoscopio que consiste en un tubo abierto en su extremidad inferior, con un bulbo como ex-

tremidad superior y colocado con la abertura en un recipiente con agua. Según la temperatura del ambiente, el agua bajaba o subía por el tubo. Más tarde GALILEO utilizó el instrumento como termómetro, agregando una escala graduada al tubo.

Como veremos oportunamente, la primera descripción de un termómetro clínico se debe a SANTORIO y aparece en un escrito de 1612 (primero sin graduación midiendo las distancias con compás, luego con graduación) y es semejante al termoscopio de GALILEO; el aparato de SANTORIO tiene un tubo sinuoso y el paciente toma el bulbo en la boca.

El instrumento fué perfeccionado por varios autores: hacia mediados de siglo (1654) aparece el "termómetro florentino", que era el utilizado por los académicos del Cimento y cuyos distintos tipos hemos mencionado al referirnos a esa academia (Cap. II, § 2); en 1665 HUYGENS aconseja que los extremos de la escala correspondan a las temperaturas de fusión y de ebullición del agua. Es difícil establecer quién fué el primero en construir un termómetro con mercurio; quizás el primer termómetro a mercurio digno de este nombre fué el de GABRIEL DANIEL FAHRENHEIT (1686-1736), construído en 1714 con su conocida escala, en la que los extremos aconsejados por HUYGENS corresponden a los 32 y 212 grados, respectivamente.

La primera aparición impresa de la palabra "termómetro" se encuentra en un libro de 1624 aplicada al termoscopio de GALILEO. Aunque no es fácil establecer la prioridad en la invención de este instrumento, agreguemos que GALILEO siempre reivindicó para sí el hallazgo de utilizar la expansión del aire para apreciar la variación de la temperatura.

3. — Mientras GALILEO prosigue en sus investigaciones mecánicas, se producen los acontecimientos que han de llevarlo a la defensa del sistema copernicano que, por otra parte, le darán ocasión de nuevos descubrimientos científicos. Ya en 1604, con motivo de la aparición de una nueva estrella, GALILEO expuso en sus clases ideas que se oponían a las antiguas concepciones aristotélicas, pero será la construcción de su primer anteojo (ver este *Panorama*,

vol. VI, Cap. VI, § 9) en 1609, el punto de partida de una sucesión extraordinaria de descubrimientos astronómicos.

En efecto, a principios del año siguiente dirige su anteojo hacia el cielo, y observa con él las estrellas, los planetas, y ese cielo que la concepción corriente consideraba incorruptible, impedido de "generación" y asiento de los astros, en un número eternamente fijo.

Los resultados de sus primeras observaciones telescópicas, se conocen a través de su correspondencia y del célebre "mensajero celeste": *Sidereus Nuncius, magna longeque admirabilia spectacula pandens, suspiciendaque proponens unicuique praesertim vero philosophis atque astronomis... Perspicilli nuper a se reperti beneficio...* que aparece a comienzos de marzo de 1610. A fines de enero de ese año escribía: "...que la luna es un cuerpo semejante a la tierra... he observado también una cantidad de estrellas fijas que jamás habían sido vistas... Y ahora también sé qué es la Via Láctea", que en su época se suponía una masa informe de vapor, y que GALILEO reconoce que es un conjunto de estrellas.

Pero el descubrimiento máximo es el de los satélites de Júpiter (que GALILEO llama planetas), que observa en la primera quincena de enero; bautizando a esos cuatro astros que giran alrededor del viejo planeta, en honor de los Médicis, con el nombre de *Medicea sidera* (estrellas mediceas).

Este descubrimiento significaba por lo demás un señalado aporte en favor de la doctrina copernicana; por una parte eliminaba la crítica fácil al sistema copernicano de ser en él la luna un caso de excepción (pues no giraba alrededor del sol, sino de la tierra), excepción que no figuraba en el sistema, aparentemente más armónico, de PTOLOMEO; y por la otra introducía, además de la tierra, otro centro de rotación, y si lo era Júpiter ¿no podía serlo el sol?

Después de la primera edición del *Sidereus Nuncius*, siguen las observaciones. En julio, siempre de 1610, da cuenta, en forma de anagrama, que "el planeta más alejado (Saturno) tiene forma triple". GALILEO había observado que Saturno era una estrella formada por tres cuerpos: uno

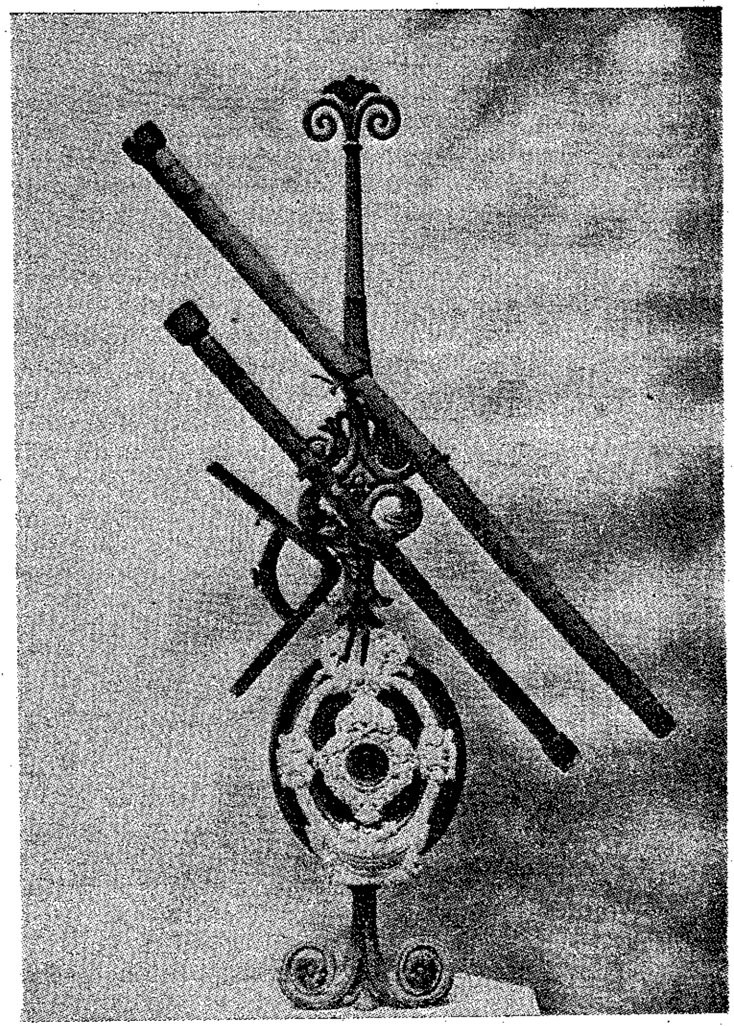


FIG. 15. — Dos anteojos y un objetivo de GALILEO, que se conservan en el Museo de Florencia.

central y dos laterales tres veces menores. Más tarde (1616) modificó esa descripción aproximándose a la verdadera (los anillos fueron descubiertos por HUYGENS en 1659).

Otro descubrimiento que anunció en forma de anagrama fué el de las fases de Venus. Ese anagrama, que nadie pudo descifrar, era un conjunto de letras que ordenadas convenientemente, formaban la frase: "Cynthiae figuras aemulatur mater amorum", que traduciríamos "las formas de la diosa del amor (Venus) rivalizan con las de Diana (la Luna)", y que metafóricamente expresaba que Venus también tenía fases.

También el descubrimiento de las fases de Venus fué un argumento favorable a la doctrina copernicana. Lo fué también la observación de las manchas del sol que inicia en octubre de 1610 y que hace conocer, junto con observaciones anteriores, en la nueva edición del *Sidereus Nuncius* que KEPLER hace editar en Praga.

Cuando GALILEO abandona Padova para regresar a Toscana está en el máximo de su gloria. Ingresa en la Accademia dei Lincei y sigue trabajando. En 1612 aparece el *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua e che in quella si muovono,* libro de inspiración arquimediana con el cual combate las concepciones entonces vigentes de origen aristotélico. Tanto esta cuestión como la observación de las manchas solares provocó vivas polémicas. En la cuestión sobre las manchas solares, en la que GALILEO intervino con su escrito de 1613: *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti,* publicado por cuenta de la Accademia dei Lincei, disputaban a GALILEO la prioridad de esa observación DAVID FABRICIUS (1564-1617) y CHRISTOPHER SCHEINER (1573-1650). (Recordemos que el matemático THOMAS HARRIOT fué también uno de los primeros en observar las manchas del sol. Ver *Panorama,* vol. V, Cap. IV, § 1.) Tanto FABRICIUS como SCHNEIDER hicieron conocer sus observaciones en 1611, el primero en su escrito *De maculis in sole observatis,* el segundo en cartas con pseudónimo. Mientras el primero ubicaba correctamente las manchas en la superficie solar, el padre SCHEINER las atribuyó a sombras de satélites del sol, aunque más tarde en su *Rosa Ursina, sive Sol* de 1630 admitió la interpretación de GALILEO.

En realidad, es indiscutible la prioridad de GALILEO en lo que se refiere a las manchas solares, no sólo en cuanto a la fecha de la primera observación, sino también por la correcta interpretación del fenómeno que le permitió además calcular con bastante aproximación el período de rotación solar. Está demás decir que también este fenómeno contribuyó a fortificar su convicción en la doctrina de COPÉRNICO, y que la polémica suscitada al respecto le sirvió para dirigir ataques a los peripatéticos por su obstinación en defender principios ya insostenibles. En una de las cartas que motivara la polémica acerca de las manchas solares escribe: "... paréceme acción no enteramente de verdadero filósofo, querer persistir, séame lícito decirlo, casi obstinadamente en sostener conclusiones peripatéticas descubiertas como manifiestamente falsas, convenciéndome que si ARISTÓTELES viviera en nuestra época no haría lo mismo, pues no es mayor signo de perfecto juicio o más noble efecto de doctrina profunda defender lo falso, que sentirse convencido por la verdad."

Vinculadas con sus observaciones astronómicas, mencionemos sus descripciones del fenómeno de la luz cenicienta y de la superficie lunar, cuyo aspecto rugoso contradice la afirmación aristotélica de la forma perfectamente esférica y de la naturaleza cristalina de los planetas, con la apreciación bastante aproximada que hizo de la altura de las montañas de la luna, a partir de la longitud de su sombra, señalando que, en proporción, esas montañas eran más altas que las más elevadas montañas terrestres. A la luna, en realidad, dedicó GALILEO sus últimas observaciones telescópicas: en 1637, antes de volverse ciego, estudió los movimientos diarios y mensuales de libración del satélite terrestre. También se ocupó GALILEO de un método para la determinación de las longitudes, utilizando los eclipses de los satélites de Júpiter, mucho más frecuentes que los eclipses de luna, pero las tablas que él y más tarde uno de sus discípulos calcularon para ese método, desaparecieron.

Por último, recordemos que otro fenómeno astronómico fué el causante de uno de los escritos más interesantes de GALILEO: *Il Saggiatore.*

La aparición de varios cometas, en 1618, provocó una serie de observaciones y discusiones acerca de la naturaleza de esos astros. El jesuíta ORAZIO GRASSI (1582-1654), publicó el año siguiente un escrito sobre el tema siguiendo la interpretación aristotélica, al que respondió, contradiciéndolo, un discípulo de GALILEO. Entonces GRASSI replica, ahora con pseudónimo, atacando directamente a GALILEO. Es para responder a ese ataque que GALILEO publica en 1623, editado por la Accademia dei Lincei, *Il Saggiatore,* escrito polémico cuyo mérito no reside tanto en las consideraciones astronómicas (tanto a GALILEO como a los demás escapó por entonces la verdadera naturaleza y movimiento de los cometas), sino en su valor literario y en las consideraciones de orden general que en él se expresan respecto de la filosofía natural. Es en este libro donde aparece la frase tan citada de GALILEO acerca del papel de la matemática en la elaboración de la ciencia natural: "... además me parece advertir que Sarsi (el pseudónimo de GRASSI) cree firmemente que para filosofar es necesario apoyarse en la opinión de algún autor célebre, como si nuestra mente se mantuviera totalmente estéril e infecunda si no encuadra en un razonamiento ajeno; y quizás estime que la filosofía es un libro y una fantasía de un autor como lo es la *Ilíada* o el *Orlando Furioso,* libros en los que lo menos importante es si lo que está escrito en ellos es verdadero. La filosofía está escrita en este grandísimo libro constantemente abierto ante nuestros ojos (me refiero al universo), pero no se le puede comprender si antes no se comprende su idioma y se conocen los caracteres con que está escrito. Está escrito en idioma matemático, y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin cuyo recurso no es posible a los humanos entender cosa alguna; sin ellos no es sino un vano deambular a través de un oscuro laberinto."

Si las observaciones astronómicas de GALILEO no constituyen su contribución científica más original, es indudable que son las que más profundamente impresionaron el ambiente científico de la época. La aparición del *Sidereus Nuncius* provocó reacciones de toda índole, algunas para nosotros simplemente absurdas. Hay quien sostiene que los astros nuevos observados por GALILEO no son sino ilusiones ópticas provocadas por el nuevo instrumento óptico; hay quien sostiene que el número de planetas no puede ser sino siete, número dotado de propiedades místicas y de ahí que los planetas observados por GALILEO son inexistentes; y hay simplemente quien se niega a mirar por el telescopio. Tenía razón GALILEO cuando escribía, con humorismo aunque no sin amargura, que para convencer a los obstinados no sería suficiente "ni el testimonio de la misma estrella si bajase a la tierra y hablase por sí misma".

Por lo demás, contribuyó a la difusión internacional del *Sidereus Nuncius* el idioma en que apareció. Las obras de GALILEO en italiano se difundieron menos, y si el nombre de GALILEO tenía fama internacional fué debido a la traducción de sus obras a idiomas más difundidos en el mundo científico, contribuyendo a esa labor el padre MERSENNE, que ya en 1634 publicó en francés el curso de mecánica dictado en Padova, que circulaba manuscrito entre sus discípulos.

4. — De la correspondencia de GALILEO se desprende que ya desde fines del siglo XVI proyectaba escribir una obra sobre "el sistema y composición del universo... Concepto inmenso y lleno de filosofía, de astronomía y de geometría..." Como interpretaba erróneamente el fenómeno de las mareas, suponiéndolo una consecuencia del movimiento de la tierra y por tanto una nueva prueba de la concepción copernicana, pensó más tarde, hacia 1624, publicar esa obra en forma dialogada y con el título *Del flusso e reflusso,* aludiendo a ese fenómeno de las mareas. Las gestiones para lograr la aprobación eclasiástica fueron largas y laboriosas. Entre las exigencias de la autoridad religiosa figuró el cambio de título y la inserción de un prefacio "Al Discreto lector", cuyo contenido se le había sugerido totalmente, "con libertad del autor para cambiarlo y adornarlo en cuanto a las palabras".

La obra, aparecida en 1632, y dedicada al gran duque

FERDINANDO II de Toscana, llevaba como nuevo título *Dialogo dove nei congressi di quattro giornate si discorre sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano, proponendo indeterminatamente le ragioni filosofiche tanto per l'una quanto per l'altra parte* (Firenze), y en ella se finge una acción que se desarrolla en Venecia en el palacio de Sagredo, que es uno de los tres interlocutores. Los otros dos eran Salviati y Simplicio. SAGREDO y SALVIATI fueron personajes reales vinculados con GALILEO. GIOVANFRANCESCO DI NICCOLÒ SAGREDO (1571-1620) fué un notable veneciano, discípulo y amigo de GALILEO en Padova, que en el *Dialogo* representa la persona culta, de mente clara, que en cierto modo actúa de juez entre los dos opositores: Salviati y Simplicio. FILIPPO D'AVERARDO SALVIATI (1528-1614), que en el *Dialogo* personifica en cambio el pensamiento del autor, fué probablemente discípulo de GALILEO: de noble familia florentina había hospedado frecuentemente a GALILEO. El tercer personaje del *Diálogo*: Simplicio, que con toda intención lleva el nombre del conocido comentarista de ARISTÓTELES, no es sino portavoz de los argumentos peripatéticos escolásticos o meramente empíricos. Es, por tanto, el contradictor de Salviati en el diálogo, en el cual tercia Sagredo mostrando en general sus contradicciones.

El *Dialogo* es obra más de exposición que de investigación; las contribuciones originales de GALILEO ya figuraban o figurarán en otros escritos de aspecto más científico; pero por este mismo hecho, por la hermosa factura literaria que la forma dialogada acentúa, y por estar en italiano, su difusión fué inmediata y mayor entre los ambientes no estrictamente científicos.

Comprende cuatro partes o "giornate" (jornadas): la primera tiene por objeto "discurrir de la manera más clara y detallada acerca de las razones naturales, y su eficacia, que hasta ahora han sido dadas, por una parte y por la otra, por los sostenedores de las posiciones aristotélicas y ptolemaica y por los secuaces del sistema copernicano".

La discusión que sigue pone de manifiesto las falacias contenidas en las creencias de la época, ya estuvieran fundadas en las autoridades de ARISTÓTELES o de PTOLOMEO,

FIG. 16. — Portada de la primera edición (1632) del *Diálogo* de GALILEO. De acuerdo a los nombres escritos en los bordes de sus túnicas, los tres personajes, de izquierda a derecha, representarían respectivamente Aristóteles, Ptolomeo y Copérnico.

ya sobre un empirismo superficial. Así se refuta la distinción entre materia celeste y sublunar; la distinción, puramente metafísica, de los movimientos en simples (rectilíneo y circular) y compuestos (de los simples); la consideración, también metafísica, de ser el movimiento circular un movimiento perfecto siendo imperfecto el rectilíneo; y la posición de la tierra inmóvil en el centro del universo. Se traen a colación, no sólo los nuevos descubrimientos astronómicos (manchas solares, aspecto de la luna) y las observaciones vinculadas con la aparición de nuevas estrellas y de cometas, sino también la ceguera demostrada frente a ellos por los peripatéticos, en la que seguramente no habría caído Aristóteles mismo, pues, dice Salviati, "no dudo un solo instante que si Aristóteles viviera en nuestra época cambiaría de opinión... pues si es cierto que admite que los cielos son inalterables, etc., porque ninguna cosa nueva se ha visto en él engendrarse o disolverse partiendo de las antiguas, nos deja entrever implícitamente que si hubiera visto algunos de esos accidentes, habría estimado lo contrario y habría antepuesto, como corresponde, la experiencia sensible al razonamiento natural...", criticando así el método a priori aristotélico, que es el método —agrega Salviati— "con el cual escribió su doctrina, mas no creo que sea el método con el cual la investigó; pues estoy firmemente convencido de que él trató, ante todo, de asegurarse, ya por los sentidos, por la experiencia o por las observaciones, lo más posible de las conclusiones, para luego buscar los medios para demostrarla; pues así se procede en general en las ciencias demostrativas: y esto es así porque si la conclusión es verdadera, por el método resolutivo se encuentra fácilmente alguna proposición ya demostrada o se llega a algún principio evidente por sí mismo; pero si la conclusión es falsa, se puede proseguir hasta el infinito sin encontrar verdad alguna, si no se ha encontrado ya algún imposible o algún evidente absurdo"; terminando esta primera "giornata" con algunas consideraciones acerca de las posibilidades y limitaciones del conocimiento humano.

La segunda "jornada" continúa con el argumento: se sostiene que es más razonable hacer girar la tierra y no el

universo, para explicar el movimiento diurno; lo contrario sería tan poco racional —señala Sagredo— "como si alguien ascendido a lo alto de una cúpula para contemplar la ciudad y el condado, exigiese que se hiciera girar toda la región alrededor suyo para no tomarse el trabajo de girar la cabeza".

Al discutirse los argumentos que se oponían ordinariamente al movimiento terrestre, se exponen dos principios de la nueva mecánica: la ley de inercia y el principio de relatividad.

Sometido a un interrogatorio a la manera socrática, el buen Simplicio reconoce aquella ley y su efecto en la conocida experiencia de la piedra que cae desde el árbol de una nave que se mueve con velocidad uniforme, mientras Salviati expone el principio, hoy llamado de relatividad de Galileo, tomando como ejemplo (estamos en Venecia) móviles en el interior de la cámara de una nave con movimiento uniforme.

En esta segunda jornada es donde Galileo, por boca de Sagredo, explica cómo llegó a sus oídos la teoría copernicana: narra que siendo aún joven, un profesor de Rostock expuso unas clases sobre aquella doctrina; clases a las que él, Sagredo, no había asistido por creer que tal doctrina era una "solemne locura", pero que luego se había arrepentido, pues un amigo muy inteligente y discreto le había manifestado que esa doctrina "no era en absoluto ridícula". Y Sagredo agrega, no sin malicia, que desde entonces se había ocupado en interrogar a los partidarios de una y otra doctrina, y que había encontrado muchos que habían pasado de la doctrina de Ptolomeo a la de Copérnico, "por la fuerza convincente de sus razones", mientras que no sólo muchos ptolemaicos no conocían o no habían entendido a Copérnico, sino que ninguno había pasado de la doctrina de Copérnico a la de Ptolomeo.

Termina la segunda jornada con la observación de que si la fuerza centrífuga engendrada por el movimiento de la tierra no tiene influencia sobre los movimientos en ésta, se debe a que la gravedad, es decir el peso de las cosas o la tendencia a dirigirse hacia el centro de la tierra, supera en mucho a aquella fuerza centrífuga.

Así como la segunda jornada trata del movimiento diurno, la tercera se ocupa del movimiento anual. Aquí también Salviati hace que Simplicio por sí mismo y de acuerdo con los datos astronómicos, vaya dibujando los movimientos relativos de los distintos planetas y resulta... la figura del sistema heliocéntrico.

Se mencionan nuevamente las manchas solares, el movimiento de rotación del sol y de los satélites de Júpiter, la mayor simplicidad del sistema de Copérnico frente al de Ptolomeo, y el argumento de que la gran distancia de las estrellas fijas es la que explica que no pueda advertirse una paralaje sensible de las mismas; terminando esta tercera jornada con frases de aprecio por la "filosofía magnética" de Gilbert (ver *Panorama,* Vol. VI, Cap. VI).

La cuarta y última "giornata" está dedicada a la explicación de las mareas. Puede parecer extraño que Galileo estuviera tan descaminado en la explicación de las mareas, cuando ya desde la antigüedad (en especial con Poseidonio del siglo II) se había vinculado ese fenómeno con los movimientos de la luna. Pero ha de advertirse que antes del estudio newtoniano de la gravedad, esa vinculación se fundaba en causas ocultas o fuerzas especiales: el mismo Kepler imagina tales fuerzas para explicar cómo la luna y la tierra se mantienen en sus órbitas. Es comprensible, en cambio, que Galileo, enemigo como lo era de toda explicación fundada sobre causas ocultas, reaccione ante aquellas explicaciones y admita otra teoría que resultó errónea. Además no oculta su extrañeza ante la actitud de Kepler. "Más me maravilla en Kepler que en los otros —dice—, pues es un ingenio agudo y libre, que no obstante tener en su mano los movimientos atribuídos a la tierra, ha prestado oídos y admitido el predominio de la luna sobre las aguas, propiedades ocultas y otras niñerías."

La explicación de las mareas fundada sobre el doble movimiento de la tierra sólo lograba explicar un solo flujo y reflujo diario; para explicar el segundo recurre a una teoría de los movimientos oscilatorios que le permite aludir al isocronismo de los movimientos pendulares.

El final de la cuarta jornada y del *Dialogo* encierra una promesa. En efecto, Sagredo, al clausurar las jornadas, expresa el deseo de reanudarlas y sobre todo manifiesta su impaciencia por conocer "los elementos de la nueva ciencia de nuestro académico, respecto de los movimientos local, natural y violento".

5. — Esa promesa será cumplida por Galileo con la publicación de sus *Discorsi* de 1638, a los cuales dedicaremos especialmente el próximo capítulo.

A modo de conclusión, agreguemos que el *Dialogo* de Galileo, con el *De Revolutionibis* de Copérnico, algunos escritos de Kepler y los *Principia* de Newton, forman el conjunto de las máximas obras de la astronomía moderna. Es la más fácil de leer de todas ellas, de ahí su gran influencia en favor del sistema copernicano, la resonancia que tuvo y el proceso que siguió a su aparición. Hay que reconocer que no obstante el título y los propósitos declarados del libro, no obstante la forma dialogada que pretende ocultar la verdadera opinión del autor, el *Dialogo* es manifiestamente favorable a la doctrina copernicana, cuya adhesión por parte de Galileo no era por lo demás desconocida; de ahí que la iglesia entendiera que con este libro Galileo había ido más allá de lo permitido por la resolución de 1616.

Por otra parte, en el *Diálogo* están en germen o desarrolladas muchas contribuciones científicas de Galileo, y sobre todo ese libro es un claro índice del cambio de actitud científica que caracterizará a los tiempos modernos: la sustitución, en la explicación de los fenómenos naturales, de las formas sustanciales de Aristóteles o las místicas de Platón, por los conceptos matemáticos: mecánicos o geométricos. Se proseguía así la senda abierta, casi dos mil años antes por Arquímedes, y se preparaba el camino para la explicación mecánica y matemática de la realidad natural.

CAPÍTULO V

GALILEO Y LOS FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA

1. — Si la fama de GALILEO, según el juicio de sus contemporáneos, finca en sus descubrimientos astronómicos, éstos, por notables que fueran, no constituyen su primordial legado a la posteridad. Coinventor del telescopio, que supo reconstruir y mejorar sin haber visto el modelo de sus precursores, GALILEO efectuó la primera exploración telescópica del sistema solar; con su genial interpretación de los fenómenos observados en el firmamento y con su épica lucha en favor de la doctrina copernicana íntimamente ligada a las mayores vicisitudes de su vida, logró dar al sistema heliocéntrico un fundamento firme para las futuras exploraciones del Universo.

Sin embargo, su decisiva intervención en el desarrollo de la astronomía, que esbozamos en el capítulo anterior, sólo constituye una parte, y no la más importante, de su actividad científica. El mérito de haber sentado las bases de la mecánica y de haber formulado la primera ley dinámica matemáticamente expresada, el hecho de haber enseñado con el ejemplo vivo de sus propias investigaciones —verdadero *praeceptor mundi*— el método experimental; esto es lo que aparece en la perspectiva histórica como la obra esencial del gran pisano. Con razón afirmó el gran analista LAGRANGE: "Les découvertes des satellites de Jupiter, des phases de Venus, des taches du Soleil, etc., ne demandent que de telescopes et de l'assiduité; mais il fallait un génie extraordinaire, pour démêler les lois de la nature dans des phenomènes que l'on avait toujours eu sous yeux, mais

dont l'explication avait néanmoins toujours échappè aux recherches des philosophes."

Pertenece por entero a GALILEO el privilegio de haber sido el primero en comprender el fenómeno del movimiento, ese fenómeno al que se reducen, en último análisis, todos los acontecimientos que se desarrollan en la naturaleza, como afirma el aforismo *Ignoto motu, ignota natura*, transcripción de la vieja frase aristotélica: "Quien no comprende el movimiento, nada entiende de la naturaleza."

Cuando aparece GALILEO, en el vasto dominio de la mecánica sólo hay, entre un cúmulo de estériles especulaciones, algunos hallazgos intuitivos, aislados, desvinculados entre sí. El fenómeno de la caída y del movimiento de un proyectil —transiciones mal interpretadas entre dos estados de equilibrio— continuaban siendo enigmáticos aun para los más sagaces pensadores pregalileanos. LEONARDO, a pesar de su poderosa intuición, no logró concebir matemáticamente ningún principio de la dinámica; COPÉRNICO, aunque describió el movimiento de los planetas alrededor del sol, fué incapaz de describir el de una manzana que cae; las investigaciones de STEVIN no salieron en lo esencial del campo de la estática; y las búsquedas de CARDANO, TARTAGLIA y BENEDETTI, si bien contribuyeron a revelar las inconsistencias de las doctrinas del estagirita, sólo se aproximaron en pocos problemas particulares a la nueva cinemática.

Mas todo esto cambia gracias a la labor de GALILEO: lo vislumbrado por algunos precursores se reúne en la grandiosa síntesis de la mecánica galileana que, completada por HUYGENS y extraordinariamente ampliada por NEWTON, será el fundamento de la mecánica clásica.

2. — Las investigaciones mecánicas acompañan a GALILEO desde sus años de estudiante hasta su vejez. Como la mayoría de los resultados de esas investigaciones sólo cobraron forma definitiva en su obra cumbre —*Discorsi e dimostrazioni*—, escrita hacia el final de su vida en el cautiverio de Arcetri, sus concepciones pasaron por varias etapas. La reconstrucción del desarrollo de sus ideas, que se debe en primer lugar a la investigación histórica de ANTONIO FA-

VARO, RAFAELLO CAVERNI, EMIL WOHLWILL, ALEXANDRE KOYRÉ, no fué tarea fácil, y debió apoyarse sobre la copiosa correspondencia que GALILEO sostuvo con sus amigos y enemigos.

La educación científica que GALILEO recibió en Pisa y en Florencia llevaba por completo el sello de las convicciones peripatéticas de la época, aun cuando la asidua lectura de los escritos de ARQUÍMEDES, que lo llevaron a redactar los ensayos que mencionamos en el capítulo anterior, lo orientaron muy pronto hacia el enfoque matemático de los fenómenos naturales.

Durante su profesorado en Pisa (1589-1592), enseñó oficialmente la ciencia aristotélica, pero no por eso dejó de manifestar sus dudas acerca del valor de esa ciencia, corroborado en su orientación antiperipatética también por GIOVAN BATTISTA BENEDETTI, que acababa de publicar su *Diversarum speculationum*... (ver *Panorama*, Vol. VI, Cap. V, § 2). La influencia de esta obra es sensible sobre el escrito de GALILEO, que pertenece a este período: *Sermones de motu gravium*, redactado en parte en forma dialogada como lo serán más adelante sus dos obras principales.

Como ya dijimos, *De motu* contiene el esquema rudimentario de algunas ideas de la futura mecánica galileana; en oposición a la cinemática del endiosado estagirita, aparece en ese escrito la afirmación de ser la velocidad de caída independiente del peso de los cuerpos: "Tanta enim velocitate descendit plumbi frustum cujus gravitas sit 10 libras, quam plumbi frustum cujus gravitas sit 100 libras."

La igualdad de los tiempos de caída la demuestra GALILEO con un razonamiento totalmente peripatético, batiendo al adversario con sus propias armas. Si ARISTÓTELES estuviera en lo cierto, razona GALILEO, un cuerpo compuesto por la reunión de un cuerpo liviano y de un cuerpo pesado debería caer con *mayor velocidad* que cada una de sus partes, pues es más pesado que cada una de ellas; pero al mismo tiempo, en el cuerpo compuesto, la parte liviana y lenta obstaculiza la pesada y rápida, y por lo tanto el cuerpo debería caer con *menor velocidad* que la parte pesada; de ahí que la tesis aristotélica conduce a una flagrante contradicción. Por lo demás si se consideran dos cuerpos de igual peso; éstos, según ARISTÓTELES, caen con igual velocidad, y en nada debería influir el hecho de reunir esos dos cuerpos en uno solo, formando un cuerpo cuyo peso es ahora mayor, pero que sin embargo cae con velocidad igual a la de cada una de sus partes que es más liviana que el todo.

También sus consideraciones acerca del movimiento sobre un plano inclinado y sus estudios sobre la oscilación pendular, que remontan ambos al período pisano, lo convencen de que los tiempos de caída son independientes del peso de los cuerpos. GALILEO concibe el arco descrito por el péndulo como formado por una infinidad de minúsculos segmentos rectilíneos, que representan planos inclinados pequeñísimos que permiten asimilar el movimiento pendular al de caída. Como el peso del péndulo no influye sobre el período de oscilación, deduce que la duración de caída no depende del peso de los cuerpos. Es esta conclusión la que GALILEO trató de verificar mediante experimentos de caída libre realizados desde la cima de "una alta torre", muy verosímilmente la famosa Torre inclinada, según ha trasmitido una tradición que atribuyó a esas experiencias, necesariamente rudimentarias por la perturbación provocada por la resistencia del aire, una importancia mayor de la que realmente poseían para las investigaciones del joven físico.

Si bien en los años de Pisa GALILEO no logró librarse totalmente de las limitaciones de la mecánica aristotélica, ha llegado en cambio a reconocer claramente la caducidad de todo dogmatismo frente al testimonio de la experiencia. "Quod hoc multorum opinionum adversetur —escribe en *De Motu*— nil mea refert dummodo rationi et experientiae congrua." Durante la feliz época de su profesorado en Padova (1592-1610), el criterio experimental se afirma, ahondando el abismo que lo separa de los peripatéticos de su tiempo. Fué durante el período paduano, cuando las búsquedas de GALILEO se alejaron de las investigaciones de las causas de los fenómenos, para dirigirse, con claridad creciente, hacia la descripción matemática de su desarrollo. Gracias a esta fecunda orientación, en la que el "porqué" de los fenómenos se sustituye al "cómo" de los mismos, GALILEO realiza en Padova la labor más revolucionaria en sus investigaciones mecánicas.

En el comienzo de este período descubre la forma parabólica de la trayectoria de los cuerpos lanzados y resuelve varios problemas relativos al movimiento pendular y al plano inclinado. Reconoce luego —aun cuando sólo para casos particulares— el principio de inercia, verdadera llave de los fenómenos mecánicos, con el cual puede desarrollar la teoría del movimiento de los proyectiles. Finalmente logra formular —hazaña máxima— la ley de la caída libre. De ahí que los hechos fundamentales de su foronomia y dinámica fueron encontrados durante los fecundos años de su período veneciano.

Los escritos, relativos a la mecánica, de este período son: 1) *Le Mecaniche,* apuntes de sus clases, que tradujera MERSENNE, y que sólo aparecieron impresos en su idioma original en 1649. Este ensayo, que trata de las máquinas simples, se mantiene dentro de los límites de la estática; 2) Un fragmento de pocas páginas: *De motu accelerato*; y 3) Un ensayo sobre el movimiento enviado a LUCA VALERIO, matemático de la Sapienza de Roma. Algunas alusiones a estos trabajos, se encuentran en la correspondencia de GALILEO. La falta de publicación de tales escritos de esta época, como de cualquier otro referente a las investigaciones mecánicas, impide asignar fechas a aquellos hechos fundamentales. En este sentido la correspondencia ayuda: así, por ejemplo, revela que en 1604 GALILEO, según lo prueba una célebre carta dirigida a Fra PAOLO SARPI, creía que las velocidades del cuerpo que cae son proporcionales a los espacios recorridos, pero que en 1609 ya conoce la relación exacta y la correcta deducción de la ley de caída, como se reconoce por una carta de VALERIO a GALILEO. De manera que es entre aquellas dos fechas cuando GALILEO realizó el descubrimiento que representa uno de sus títulos de gloria más duraderos.

Cuando regresa a Toscana, en 1610, GALILEO se dedica en primer lugar a problemas astronómicos y a las tareas que le impone su cargo de primer matemático de la corte. No obstante, mantiene un vivo interés por los problemas de la mecánica como lo atestigua su *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o che in quella si muovono* de 1612, en el que trata, con espíritu arquimediano, cuestiones básicas de hidromecánica. GALILEO rechaza las doctrinas aristotélicas, según las cuales la forma de un cuerpo es la determinante de su estado de flotación o de hundimiento en el agua. Aclara que la propiedad de un cuerpo de sumergirse o no en un líquido, depende de los pesos específicos (GALILEO utiliza otra denominación) del cuerpo y del líquido. Si los dos pesos específicos son iguales, el cuerpo se mantiene en equilibrio en el líquido cualquiera sea su forma y posición; si, en cambio, el peso específico del cuerpo es superior al del líquido, caerá al fondo y flotará en la superficie del líquido si ese peso específico es inferior. Para refutar a sus adversarios peripatéticos, realiza una célebre experiencia que esboza en los *Discorsi e dimostrazioni.* Sumerge en un recipiente lleno de agua una bola de cera, y luego agrega sal al agua aumentando su densidad hasta lograr que la bola suba a la superficie. Deseoso de referir la mecánica de los líquidos a los principios generales de la mecánica de los sólidos, GALILEO aplica el principio de las velocidades virtuales a los problemas hidrostáticos, proporcionando a este campo de investigaciones un nuevo instrumento de demostración.

Como señaláramos (Cap. IV, § 3) el escrito de 1612 provocó una polémica larga y apasionada. En realidad, GALILEO no logró contestar a la pregunta que servía de punto de partida a la teoría de sus adversarios: ¿por qué flotan sobre la superficie del agua, agujas o láminas delgadas de metal? De acuerdo al principio de ARQUÍMEDES deberían hundirse. La explicación de este fenómeno sólo fué lograda durante el siglo XVIII con el descubrimiento de la tensión superficial de los líquidos.

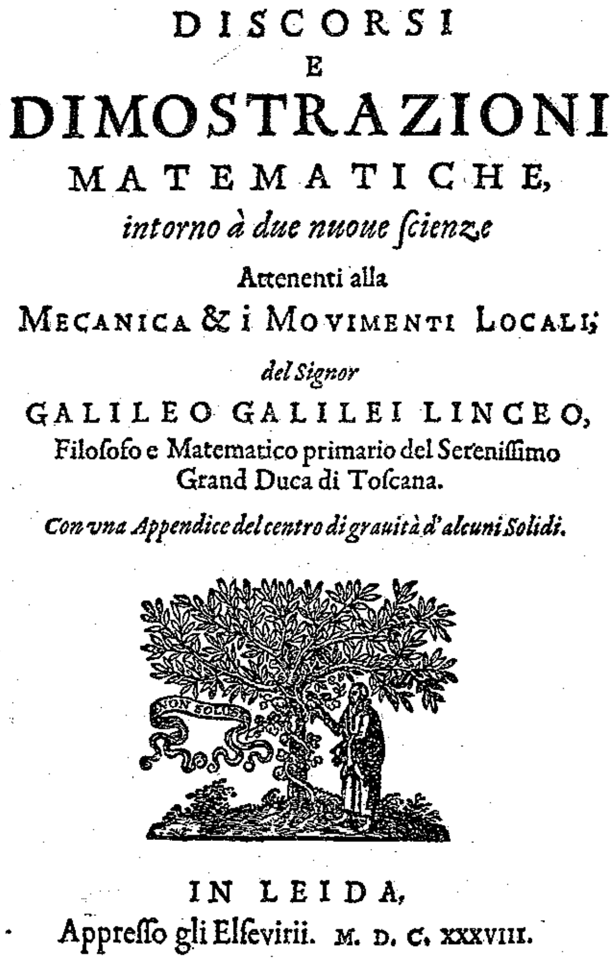
3. — Ya aludimos (Cap. IV, § 5) a la promesa que encerraba la frase final del *Dialogo* de GALILEO, y cómo esa

promesa se cumple cuando en julio de 1638 aparece, lejos de Italia, en la libre Holanda, y editada por la famosa casa Elzevir la obra máxima de GALILEO: *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenenti alla mecanica e i movimenti locali.* Los tres personajes del *Dialogo*: Salviati, Sagredo y Simplicio, vuelven a reunirse para discurrir con sagacidad galileana, esta vez acerca de cuestiones matemáticas y físicas. Sus conversaciones, a las que sirve de marco el famoso Arsenal de Venecia, se distribuyen en cuatro jornadas, a las que GALILEO agregó un "Apéndice sobre el centro de gravedad de algunos sólidos" (ver Cap. IV, § 2). Póstumamente se agregaron los fragmentos de dos jornadas más.

Si es posible fijar la fecha de nacimiento de una ciencia, el año 1638, en el que aparecen los monumentales *Discorsi*, es el año en que nacen la mecánica y la física modernas.

Las dos primeras jornadas están dedicadas, sobre todo, a los problemas que plantean la cohesión de los sólidos y la resistencia que éstos ofrecen a la ruptura, problemas cuyo conjunto constituye una de las dos nuevas ciencias aludidas en el título de la obra. El poder y la resistencia de los andamios y de los soportes necesarios para construir un barco pequeño y un gran navío, no están entre sí en una razón proporcional a las dimensiones de esas construcciones; esta observación (que ponen en boca de un viejo capataz) brinda a los tres interlocutores el tema de su primera discusión, llevándolos a la conclusión que estructuras geométricas semejantes en todos sus detalles, presentan sin embargo sorprendentes diferencias en su resistencia a la ruptura. Esta particularidad de la resistencia de los materiales, que *no* crece proporcionalmente con las dimensiones, determina además para las máquinas u otras construcciones un tamaño máximo que no pueden superar. De esta manera quedan limitadas, no sólo las dimensiones de los artefactos construídos con materia inerte, sino también el tamaño de plantas y de animales, excluyendo de la naturaleza viva los gigantes.

Estas consideraciones preliminares, algunas de las cuales reaparecen en la segunda jornada, conducen a un detenido



DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuoue scienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI;
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo
Grand Duca di Toscana.
Con vna Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.

IN LEIDA,
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. XXXVIII.

FIG. 17. — Portada de la edición original de los *Discorsi* de 1638.

análisis de las causas de la cohesión y de la resistencia de los materiales. La repugnancia que la naturaleza siente por el vacío —así lo admite GALILEO— es la causa principal de la cohesión de los sólidos, cuyas partículas se mantienen unidas por el "horror vacui". Como la separación entre las partículas está acompañada por la formación de espacios vacíos, ese "horror al vacío" se manifiesta como resistencia a la ruptura. GALILEO acepta pues el concepto aristotélico del "horror vacui", pero trata de conferirle un contenido empírico, proponiendo experiencias para medir la cohesión en los líquidos.

Un interés particular revisten sus consideraciones acerca del hecho de que en los tubos de aspiración de las bombas, cualquiera fuera el mecanismo de éstas, el agua no se elevaba más allá de 18 codos (unos 10 metros). ¿Es que el horror al vacío tendría en estos tubos un límite de 18 codos? Lo que ocurre —explica GALILEO— es que alcanzada esa altura, la columna de agua se quiebra bajo su propio peso como lo haría, cuando alcanza su alargamiento crítico, un bastón de madera o una barra de hierro. Dejó así GALILEO a su discípulo TORRICELLI la gloria de descubrir en la presión atmosférica la fuerza que equilibraba dicha columna líquida, y con eso la explicación correcta del fenómeno. En verdad, resulta extraño que el genial toscano no se haya anticipado a su discípulo, ya que no sólo sabía que el aire es pesado sino que había indicado un par de procedimientos para medir ese peso.

A esta altura del diálogo, el concepto de los "indivisibili", vale decir, de las partículas infinitamente pequeñas que constituyen los cuerpos macroscópicos, permite a GALILEO dar muestras de su notable sagacidad en el campo de la matemática pura. A la objeción de que los elementos inextensos no pueden constituir una magnitud extensa, GALILEO contesta que si bien una magnitud extensa no puede estar formada por un número finito de indivisibles, puede en cambio estar formada por un número infinito de tales elementos. Los conceptos de mayor, menor, igual, afirma GALILEO, no pueden aplicarse a conjuntos infinitos en la misma forma en que se aplican a los conjuntos finitos, ilustrando su afirmación con el ejemplo de que en un conjunto finito hay más números que cuadrados (y en proporción más aun cuanto mayor es el conjunto finito), mientras que en el conjunto infinito hay tantos números

como cuadrados. Además, demuestra que un segmento mayor que otro *no* contiene más puntos que éste, aun en el caso en que el segundo segmento sea parte del primero. Estas consideraciones y algunas otras sobre el continuo y el infinito potencial y el infinito actual, se vinculan con la "geometría de los indivisibles", cuyo primer tratado su discípulo CAVALIERI había hecho conocer tres años antes, y anticipan algunas consideraciones de la teoría de los conjuntos que creara a fines del siglo XIX GEORG CANTOR.

Volviendo al concepto físico de los indivisibles, los tres amigos discuten la hipótesis de las partículas indivisibles de la luz. Éstas se insinuarían, como las experiencias con espejos ustorios lo pondría de manifiesto, entre los átomos de los sólidos provocando su fusión. Tales consideraciones conducen a plantear la cuestión de la velocidad de la luz, que la mayoría de los pensadores antiguos, con excepción de HERÓN, suponía que se propagaba instantáneamente. GALILEO, sin embargo, rechaza esta opinión sostenida por Simplicio, y propone la siguiente experiencia para determinar la velocidad de la luz: dos observadores situados a cierta distancia entre sí, están provistos de linternas iluminadas, cuya luz puede interceptarse con una pantalla. El primer observador quita rápidamente la pantalla de su linterna mientras que el segundo hace lo propio en cuanto ve la luz de la primera linterna. El lapso medido por el primer observador entre los instantes en que levantó su pantalla y en que ve la luz de la segunda linterna, representa el tiempo requerido por la luz para recorrer el doble de la distancia que separa ambos observadores. La experiencia efectiva, que más tarde realizaron los académicos florentinos, con una distancia entre los dos observadores de dos leguas no dió resultado; es que tanto GALILEO como sus discípulos no previeron la enorme velocidad de la luz (aunque GALILEO la califica siempre de "velocísima"), y creyeron que podía medirse en un recorrido tan reducido. Con todo, la idea de GALILEO es genial y cuando, a mediados del siglo XIX, FIZEAU se propuso medir la velocidad de la luz no hizo sino modernizar esa idea, sustituyendo el segundo observador por un espejo y midiendo el tiempo empleado por la luz para recorrer la doble distancia mediante el conocido artificio de la rueda dentada. No fué necesario, sin embargo, llegar hasta el experimento de FIZEAU para reconocer que la luz no se propagaba instantáneamente, pues en el mismo siglo XVII el danés OLAF RÖMER lograba determinar el orden de magnitud de su velocidad (ver Cap. VI, § 5) utilizando precisamente los satélites de Júpiter descubiertos por GALILEO.

Dejando de lado algunas consideraciones de interés meramente matemático, señalemos que en la continuación del diálogo GALILEO entra en la discusión de problemas cinemáticos y mecánicos que preparan el tema principal de las dos últimas jornadas. Refuta —como lo hiciera en sus años de Pisa— la creencia aristotélica en la proporcionalidad entre los pesos de los cuerpos y sus velocidades, y examina detenidamente, para rechazarla, la ley aristotélica según la cual la velocidad de caída de un mismo cuerpo en medios distintos es inversamente proporcional a la densidad de esos medios. Para poder estudiar con más exactitud el fenómeno de la caída, retarda el movimiento introduciendo, para observarlo, planos inclinados con escasa pendiente; y para impedir el rozamiento perturbador entre el móvil y la materia del plano, considera el movimiento pendular, como ascenso y descenso, respectivamente, del móvil por planos inclinados infinitamente pequeños.

Es indudable que estas investigaciones sobre las oscilaciones del péndulo constituyen la parte de mayor valor del final de la primera jornada: en ellas se da la ley del isocronismo del péndulo, reconociendo la proporcionalidad entre el período de oscilación y la raíz cuadrada de la longitud del péndulo. GALILEO, además, admite que cualquiera que sea el punto de partida de un móvil que desciende a lo largo de un arco de círculo, el tiempo que emplea para descender hasta el punto más bajo de su trayectoria es rigurosamente constante. Si eso fuera así, el círculo sería una tautócrona, y el isocronismo del péndulo circular valdría para cualquier amplitud de oscilación: sin embargo no es así, la proporcionalidad establecida por GALILEO sólo es válida para pequeñas amplitudes; y la

curva tautócrona —como lo demostrará más tarde HUYGENS — no es el círculo, sino la cicloide.

Los problemas que acabamos de reseñar sugieren a GALILEO reveladoras comparaciones entre las oscilaciones del péndulo y las de las cuerdas de los instrumentos musicales, permitiéndole pasar así de la dinámica a la acústica. Investiga el fenómeno de la resonancia y encuentra que una cuerda hace vibrar a otras: la que está al unísono, así como la octava y la quinta; comparando este fenómeno con la trasmisión del movimiento de un péndulo oscilante a otro en reposo ("pendoli simpatici"). Señala, y esta es su mayor contribución a la acústica, que la altura de los sonidos depende de la frecuencia de las vibraciones, rectificando aquí también a ARISTÓTELES, que creía que la diferencia entre los sonidos agudos y graves corresponde a la diferente velocidad de propagación. GALILEO estudia también la influencia de las propiedades físicas de las cuerdas sobre las características acústicas de los sonidos que emiten, llegando a la conclusión de que "la razón próxima e inmediata de la esencia de los intervalos musicales, no es la longitud de las cuerdas, ni la tensión, ni el espesor, sino la proporción de los números de vibraciones y sacudidas de las ondas del aire que vienen a herir el tímpano de nuestros oídos obligándolo a vibrar también con la misma frecuencia".

Con algunas otras consideraciones, que siguen de esa conclusión, acerca de los fenómenos de consonancia y disonancia, termina la primera jornada que abarca, como acabamos de ver, una extraordinaria variedad de cuestiones.

4. — La segunda jornada de los *Discorsi* retoma el tema inicial de la jornada anterior: el problema de la resistencia que ofrecen los sólidos a la tracción y a la ruptura. La búsqueda más o menos infecunda de las causas de esa resistencia, que motivara en la jornada anterior amplias digresiones entre los tres interlocutores, cede ahora al estudio, más fecundo, de las características observables y medibles de los fenómenos revelados por esa resistencia. De ahí que la segunda jornada esté dedicada a investigar

las soluciones científicas de un conjunto de problemas planteados a los arquitectos y constructores en sus tareas prácticas, desde los comienzos de la civilización, y de los cuales no existían hasta entonces sino soluciones empíricas sugeridas por la larga experiencia de los siglos. Agreguemos que algunos de los resultados que logra GALILEO en este campo —como lo han puesto de relieve las investigaciones de MARCOLONGO— fueron anticipados por LEONARDO DA

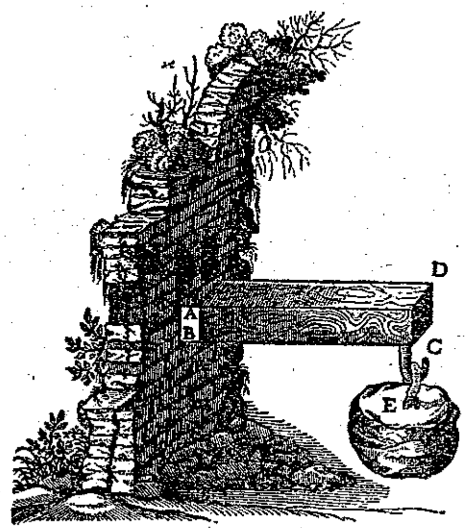


FIG. 18. — Figura de la Jornada segunda de los *Discorsi*, que ilustra el teorema que muestra la influencia de la forma de la sección de una viga sobre la carga de ruptura.

VINCI, pero las vicisitudes sufridas por los manuscritos de LEONARDO (ver el tomo especial dedicado a LEONARDO DA VINCI en este *Panorama*), explican que GALILEO no haya conocido los trabajos de su genial precursor.

A partir del principio de la palanca, GALILEO demuestra que la resistencia a la ruptura de prismas o cilindros de distinta longitud y espesor, es directamente proporcional al

cubo del espesor e inversamente proporcional a la longitud, y estudia una serie de problemas y cuestiones deducidas de esa propiedad: variaciones de las dimensiones de un sólido que ofrezca una resistencia dada, sólido de igual resistencia, ventajas que ofrece el cilindro hueco frente al macizo, subrayando que de esta ventaja "se sirve en mil operaciones el arte, y más todavía la naturaleza, en las cuales sin aumentar el peso, aumenta grandemente la robustez, como se ve en el hueso de los pájaros y en muchísimos tallos de plantas..."

Sin entrar en detalles, señalemos que la excepcional importancia y variedad de los resultados y problemas que GALILEO trata en las dos primeras jornadas de sus *Discorsi*, autorizan a considerarlo como el verdadero iniciador de los estudios científicos de la resistencia y elasticidad de los materiales.

5. — Pero, por indiscutible que sea la importancia de tales estudios, el hecho que confiere jerarquía de obra cumbre a los *Discorsi* no reside en el contenido de las dos primeras jornadas, sino en el de las dos últimas. Es esta segunda parte del magno libro la que sienta los fundamentos de toda futura descripción del mundo físico, al estructurar la nueva ciencia del movimiento. Como para subrayar lo decisivo del momento, en muchas páginas el italiano vulgar cede al académico latín, que acentúa la solemnidad de la exposición, "De subjecto vetustissimo novissiman promovemus scientiam", declara GALILEO al comenzar la tercera jornada, subrayando la escasa proporción entre los numerosos y extensos volúmenes escritos por los filósofos al respecto, y el reducido número y escaso valor de las propiedades halladas. "Se ha fijado la atención en algunas que son de poca importancia, como por ejemplo, que el movimiento natural de los graves en descenso se acelera continuamente; sin embargo, no se ha hallado hasta ahora en qué proporción se lleva a cabo esta aceleración; pues nadie, que yo sepa, ha demostrado que los espacios que un móvil en caída y a partir del reposo recorre en tiempos iguales, están entre sí en la misma razón que está la sucesión de

los números impares a partir de la unidad. Se ha observado que las armas arrojadizas o los proyectiles describen una línea en cierto modo curva; sin embargo, nadie notó que esa curva era una parábola. Yo demostraré que esto es así, y también otras cosas muy dignas de saberse y, lo que es de mayor importancia —termina con ejemplar modestia— dejaré abierto el camino y el acceso a una vastísima ciencia, de la cual estas investigaciones son el fundamento y en la cual ingenios más agudos que el mío podrán alcanzar mayores profundidades."

Para llevar a buen término la labor citada en el párrafo anterior, GALILEO tuvo que introducir una serie de conceptos cinemáticos y dinámicos a los que confirió el sentido que hoy mantienen en la mecánica. Las primeras de esas nociones innovadas por GALILEO son las de velocidad y de aceleración. El concepto tradicional de velocidad, como cociente del espacio recorrido por el tiempo empleado en recorrerlo, válido para el movimiento uniforme, ya no lo es para el movimiento variado. Para generalizar el concepto de velocidad, GALILEO utiliza, con lenguaje de los escolásticos, el riguroso método arquimediano (descomponiendo el tiempo en la misma forma en que el siracusano descomponía las figuras) y llega a un concepto de velocidad que en definitiva es el actual, es decir: utiliza en forma encubierta los conceptos infinitesimales que hoy sirven para definir la velocidad. En cuanto al movimiento uniformemente acelerado (que es el movimiento variado que en verdad estudia), lo define como aquel movimiento "que, a partir del reposo, va adquiriendo incrementos iguales de velocidad en intervalos iguales de tiempo".

También aparece, por primera vez, en los razonamientos y cálculos de GALILEO el concepto de fuerza en el sentido moderno. Libre de los errores del pasado, el gran florentino reconoce que la fuerza no determina la posición, ni la velocidad de un cuerpo, sino su aceleración. Tal noción se presenta en los *Discorsi* exenta de todo antropomorfismo, sin estar oscurecida, como en el pensamiento de algunos de sus sucesores, por la falsa analogía con la sensación muscular, ni por la introducción de nebulosos agentes metafísicos, sino concibiéndola puramente como una abstracción matemática.

Pero, entre las innovaciones conceptuales que los *Discorsi* introducen, ninguna posee un alcance tan grande como el principio de inercia, principio con el cual puede decirse que inicia la mecánica moderna. En efecto, si los griegos fracasaron en su intento de estructurar la dinámica, si el lúcido espíritu de ARQUÍMEDES no fué más allá de la estática, fué porque les faltó la noción fundamental de la inercia. Ninguno de los pensadores griegos se atrevió a admitir que el axioma más común de la mecánica aristotélica: el motor reside siempre en lo movido, podría no cumplirse en la naturaleza. Fué menester la intuición de GALILEO para reconocer claramente y en toda su amplitud que una determinada clase de movimientos: el rectilíneo uniforme, podía perpetuarse sin una causa perpetua, paradoja extraordinaria, tanto más si se piensa que la ciencia pitagórica admitía que el movimiento que poseía este privilegio era el movimiento circular, personificado en el girar incesante de los astros sobre sus órbitas circulares.

No cabe duda de que algunos precursores de GALILEO habían vislumbrado el principio, guiados en especial por las dudas que en su espíritu despertaba la tesis aristotélica. A principios del siglo VI, IONNES PHILOPONOS, comentarista del estagirita, enseñó que los cuerpos lanzados reciben una impulsión que permanece en ellos, aun cuando el cuerpo que les imprimió el movimiento deja de tener contacto con ellos. Es la teoría del "ímpetus", difundida en el siglo XIV por los doctores parisienses —en especial JEAN BURIDAN y ALBERT DE SAXE— y por la escuela de Oxford —THOMAS BRADWARDINE y WILLIAM OF HEYTISBURY. Desde luego, tal axioma está lejos del principio de inercia, ya que no admite la uniformidad del movimiento y supone que el ímpetus deja de actuar, consumiéndose al cabo de cierto tiempo. En el siglo XV, NICOLÁS DE CUSA da un paso adelante al admitir, sobre el fundamento griego de que el movimiento externo de los astros está vinculado con su forma perfectamente esférica, que una esfera podría rodar eternamente sobre un plano, sin rozamiento, describiendo una recta. Sin embargo, esta ley del CUSANUS proclama la persistencia de la rotación y no de la traslación, como lo exige la ley de GALILEO. Por último, recordemos aún entre los precursores a LEONARDO y a KEPLER, que vislumbraron confusamente la ley, y GIOVAN BATTISTA BENEDETTI, que entrevé que los móviles poseen una "naturalem appetentiam" (una propensión natural) al movimiento rectilíneo.

Pero es GALILEO quien da el principio con admirable clarividencia. Si bien enuncia la ley sólo para movimientos sobre planos horizontales, reconoce que en ellos la velocidad está dada de "modo inmutable". ¿Cómo procede GALILEO para demostrar la ley? Evidentemente ningún experimento real puede poner al alcance de la observación un movimiento rectilíneo y uniforme no expuesto a la acción de fuerza alguna, ya que no puede sustraerse ningún cuerpo a la acción de la resistencia de las masas vecinas, ni alejarse a distancia infinita de las masas gravitantes. Por eso GALILEO acude a un experimento ideal, realizable con rigor sólo en la esfera del pensamiento. Consideremos una bola que desciende sin rozamiento por un plano inclinado, para ascender luego por otro plano inclinado que corta al anterior según una arista horizontal. Cualquiera sea la pendiente del segundo plano, la altura vertical que en sí alcanza la bola, es igual a la altura de la cual partió en el primer plano. De aquí se deduce que cuanto menor es la inclinación de ese segundo plano, mayor será el camino recorrido en él por la bola. Si la inclinación del segundo plano es entonces nula, es decir, si el segundo plano es horizontal, el recorrido de la bola proseguirá indefinidamente y el móvil sobre el cual no actúa fuerza alguna, mantendrá su velocidad uniforme eternamente. "Motum in horizontali esse aeternum", declara solemnemente GALILEO.

Hasta qué grado GALILEO reconoce la trascendental importancia de su descubrimiento y hasta qué límites concibe su generalidad, puede juzgarse, no sólo por la aplicación que supo darle (ver § 7), sino también por las palabras contenidas en el Escolio de la Proposición XXIII de la tercera jornada de los *Discorsi,* donde aparece también la demostración anterior: "Velocitatis gradus, quicunque in

movili reperiatur, est un illo suapte natura indelebiliter impressus, dum externae causae accelerationis aut retardationis tollantur, quod in solo horizontali plano contingit." (Cualquiera sea el grado de velocidad que se dé a un móvil, está por su propia naturaleza indeleblemente impreso en él, con tal que se eliminen todas las causas externas de aceleración o retardo, lo que sólo ocurre en el plano horizontal.)

6. — La descripción matemática de la caída libre, buscada infructuosamente durante siglos, es el mayor timbre de gloria de GALILEO. Este problema fundamental, que lo ocupó durante una gran parte de su vida (como lo prueban sus experiencias de Pisa), constituye el contenido esencial de la tercera "Giornata" de los *Discorsi.* Antes de esbozar el camino heurístico que recorren con sus razonamientos los interlocutores del diálogo, recordemos los elementos del problema ya logrados por los precursores de GALILEO.

ORESME, uno de los más sagaces pensadores del s. XIV, llegó a formular una reveladora relación entre el movimiento uniforme y el uniformemente acelerado, admitiendo que el camino recorrido en un tiempo dado es igual siempre que la velocidad del móvil animado de movimiento uniforme sea la mitad de la velocidad final del móvil acelerado. Los razonamientos de ORESME contenían implícitamente la idea de aceleración constante y de velocidad proporcional al tiempo, idea que asomará en LEONARDO, al decir que en la caída libre, el cuerpo "en cada grado de tiempo adquiere un grado de movimiento y un grado de velocidad". (Ver *Panorama,* Vol. IV, Cap. XV). Por otra parte BENEDETTI, a mediados del siglo XVI (Ver *Panorama,* Vol. VI, cap. V, § 2), afirmaba, en contra de los escolásticos, que no sólo la velocidad de caída es independiente del peso, sino que el aire en lugar de acelerar la caída la retardaba. Por último, STEVIN, alrededor de 1600, trató de demostrar experimentalmente la constancia de la velocidad de caída. Pero todos estos resultados, envueltos a veces en especulaciones metafísicas, se mantuvieron aislados e inconexos y sólo representan modestos atisbos de la solución galileana del problema.

¿Cuál es la relación —se pregunta GALILEO— que liga la velocidad de un cuerpo que cae con los restantes elementos que intervienen en el movimiento? Sostenido por la clásica convicción de que la naturaleza obra por leyes simples, formula dos hipótesis. La primera de ellas es que

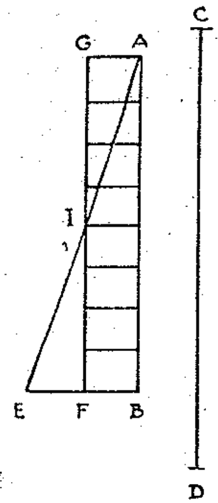


FIG. 19. — Figura de GALILEO para demostrar la ley de la caída libre.

la velocidad adquirida es proporcional al espacio recorrido. Con los recursos del cálculo infinitesimal, que a la sazón se estaba gestando, GALILEO hubiera advertido que esa hipótesis, dadas las condiciones iniciales del problema, en rigor sólo era compatible con el reposo; pero sin los recursos del cálculo y guiado más por la intuición que por el raciocinio, la rechaza por cuanto esa hipótesis implicaría un movimiento instantáneo.

Admite entonces otra hipótesis, tan simple como la anterior: la proporcionalidad entre la velocidad de caída y

la duración de la caída. Con esta hipótesis y con un teorema geométrico que recuerda los razonamientos de ORESME, llega a su importante resultado: "El tiempo en que un móvil recorre un espacio con movimiento uniformemente acelerado a partir del reposo, es igual al tiempo en que el mismo móvil recorrería ese mismo espacio con un movimiento uniforme cuya velocidad fuera la mitad de la velocidad final del movimiento uniformemente acelerado." El esquema de su razonamiento es el siguiente: Considera el triángulo ABE cuya altura AB representa el tiempo contado a partir del reposo, representado por A, y cuya base EB representa le velocidad final del movimiento uniformemente acelerado. Toma luego el paralelogramo equivalente, de igual altura AB y de base FB igual a la mitad de AB. Como "el conjunto de todas las paralelas contenidas en el cuadrilátero es igual al conjunto de las comprendidas en el triángulo" y como esas paralelas son los "grados de velocidad", creciente en el triángulo y constante en el paralelogramo, llega a la conclusión de que los dos movimientos han recorrido en el mismo tiempo el mismo espacio, representado en la figura por AB, aunque en verdad, sin mencionarlo GALILEO, lo es por la medida común de las dos figuras equivalentes. Logrado ese resultado (con símbolos modernos: $v = g\ t$; $s = \frac{1}{2}\ v\ t$), GALILEO da en la proposición siguiente la ley fundamental de la caída libre: "Si un móvil con movimiento uniformemente acelerado desciende desde el reposo, los espacios recorridos por él en tiempos cualesquiera, están entre sí como los cuadrados de esos tiempos." En símbolos: $s = \frac{1}{2}\ g\ t^2$, que es la conocida ley de la caída libre.

En posesión de la ley buscada, el gran florentino la somete al control experimental. Sus rudimentarios medios no le permitían, sin embargo, una verificación directa, recurriendo entonces al plano inclinado con el objeto de retardar el movimiento demasiado rápido de la caída. Hizo rodar una bola de bronce "durísima, bien redonda y pulida" por una ranura revestida de pergamino pulido y lustrado de unos doce codos de longitud, comprobando espléndidamente la ley. " ...por medio de experiencias repetidas —escribe GALILEO— nos encontrábamos siempre con que los espacios recorridos estaban entre sí como los cuadrados de los tiempos, y esto en todas las inclinaciones del plano...'' Nada muestra mejor las dificultades que debió vencer GALILEO en estas experiencias, que señalar el modo de medir los intervalos de tiempo pequeños que las mismas exigían. A falta de un adecuado reloj mecánico (el regulador pendular todavía no había sido introducido) GALILEO empleó clepsidras, tal como las habían empleado los griegos un par de milenios antes. ''Para la medida del tiempo —escribe— disponíamos de un gran cubo de agua puesto en alto, que por una finísima espita que tenía soldada en el fondo derramaba un hilillo de agua, que íbamos recogiendo en un vasito durante todo el tiempo que la bola descendía por la ranura o por algunas de sus partes. Las pequeñas cantidades de agua recogidas de este modo, eran pesadas de tiempo en tiempo con una sensibilísima balanza, de modo que las diferencias y las proporciones de sus pesos nos daban las diferencias y las proporciones de los tiempos...''

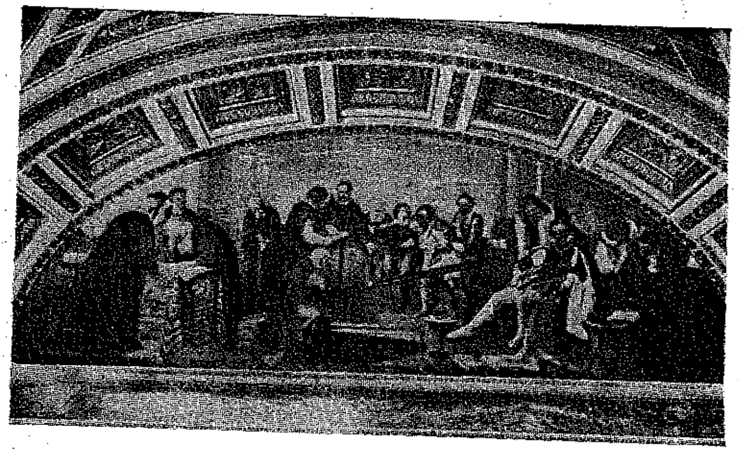


FIG. 20. — Cuadro de GIUSEPPE BEZZUOLI, expuesto en el Museo de Florencia, que muestra GALILEO demostrando experimentalmente la ley de la caída de los graves

A continuación de la deducción de la ley de la caída, GALILEO estudia detenidamente el movimiento sobre el plano inclinado, demostrando numerosas proposiciones: las velocidades adquiridas sobre planos diversamente inclinados son iguales si las alturas de esos planos son iguales; la aceleración que sufre un móvil en la caída vertical y en la inclinada están entre sí como la longitud y la altura del plano inclinado, etcétera.

7. — GALILEO no sólo tuvo el mérito de haber aclarado el concepto de inercia y descubierto la ley de la caída, puntos de arranque de toda la dinámica, sino también el de haber dado el más hermoso ejemplo de aplicación de ambos principios al análisis del movimiento de los proyectiles, tema que constituye el contenido esencial de la cuarta jornada de los *Discorsi*.

Antes de GALILEO era creencia general la imposibilidad de la coexistencia de dos movimientos en un mismo móvil, sin perturbarse recíprocamente. Tal creencia era tan firme que fué esgrimida por TYCHO BRAHE en contra de la doctrina de COPÉRNICO. Pero precisamente esos movimientos copernicanos de la tierra, cuya realidad era indiscutible para GALILEO, le sugirieron que varios movimientos simultáneos, lejos de destruírse, podían superponerse perfectamente. Fué quizás de este modo que el gran florentino llegó a la fecunda idea de la composición de los movimientos, que le permitió dar con la solución del problema de los proyectiles, del cual sus precursores: LEONARDO, CARDANO, TARTAGLIA y BENEDETTI sólo habían entrevisto más o menos confusamente algunos aspectos.

Con admirable claridad, GALILEO reconoce que la trayectoria del proyectil, no perturbada por el medio, es una parábola, resultante del movimiento inerte —rectilíneo y uniforme— y del movimiento acelerado según la ley de la caída libre. ''Me imagino un móvil lanzado sobre un plano horizontal, libre de todo impedimento. Sabemos... que su movimiento ha de ser uniforme y perpetuo sobre el mismo plano, si el plano se extiende infinitamente; pero si lo suponemos limitado y en el aire, el móvil, que supongo dotado de gravedad, al continuar su marcha y llegar al borde del plano añadirá a su primer movimiento uniforme e indestructible, aquella propensión hacia abajo que tiene por su propia gravedad, y de ahí seguirá un movimiento compuesto del uniforme horizontal y del naturalmente acelerado hacia abajo ...''

Con esta premisa GALILEO demuestra en forma geométrica que la trayectoria resultante es una parábola. ''Supongamos —dice— una línea horizontal o un plano *ab* puesto en alto, sobre el que marche un móvil con movi-

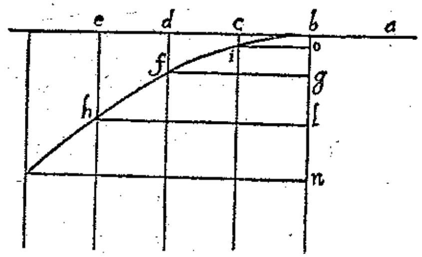


FIG. 21. — Figura de GALILEO para demostrar la trayectoria de los proyectiles.

miento uniforme desde *a* hasta *b*; y al faltar el punto de apoyo en *b*, sobrevenga al móvil, por su propia gravedad, un movimiento naturalmente hacia abajo según la vertical *bn*. Supóngase además la línea *be* continuación en línea recta del plano *ab*, como trascurso o medida del tiempo, y sobre ella váyanse tomando a voluntad partes iguales cualesquiera de tiempo *bc*, *cd*, *de* y desde los puntos *b*, *c*, *d*, *e* supongamos trazadas líneas paralelas a la vertical *bn*. En la primera tómese una parte cualquiera *ci*; en la segunda tómese *df* cuádruplo de aquélla, en la tercera tómese el nónuplo de aquélla y así sucesivamente ... Y si suponemos un descenso vertical según la cantidad *ci*, sobreañadido al móvil que marcha con movimiento uniforme más allá de *b*

hasta *c*, nos encontraremos con que se ha colocado en el punto *i* durante el tiempo *bc*, y continuando el movimiento durante el tiempo *db*, doble del *bc*, el espacio del descenso hacia abajo será cuádruplo del primer espacio *ci* ... de modo que con toda claridad se deduce que los espacios *eh*, *df*, *ci* están entre sí como los cuadrados de las líneas *eb*, *db*, *cb* ...''

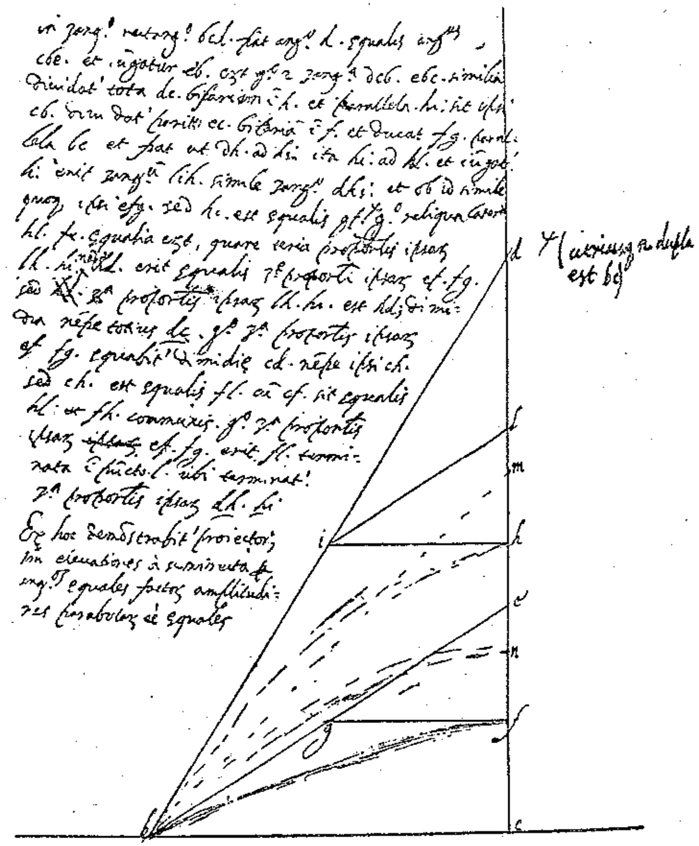


FIG. 22. — Facsímil de una página manuscrita de los *Discorsi*, en la que se demuestra una propiedad de las trayectorias de los proyectiles.

Comprobado que ésa es la propiedad de la parábola queda resuelto el problema, que en teoremas sucesivos GALILEO generaliza, estudiando el tiro oblicuo y considerando su trayectoria en distintas condiciones. Muestra —como lo había hecho ya TARTAGLIA (ver *Panorama*, Vol. VI, Cap. V, § 1)— que el alcance del tiro en un plano horizontal es máximo cuando el ángulo de elevación es de 45°; demuestra que dos cuerpos, uno de los cuales cae libremente y el otro es lanzado horizontalmente desde la misma altura, tocan simultáneamente el mismo plano horizontal: la demostración de otras proposiciones similares completan la jornada.

8. — Tal es el contenido de las cuatro jornadas que constituyen el núcleo esencial de los *Discorsi e dimostrazioni* de 1638. Ya dijimos que en la primera edición GALILEO agregó, como apéndice, un estudio de su juventud sobre el centro de gravedad de los sólidos, y que en una edición póstuma se publicaron fragmentos de dos "jornadas" más, que en verdad nada esencial agregan a lo tratado en la edición original.

Diferenciándose de sus contemporáneos FRANCIS BACON y RENÉ DESCARTES, GALILEO no dedicó ningún tratado especial al método científico. En cambio, mientras que las celebradas tablas del Lord Canciller no guiaron la marcha real de investigador alguno, y la historia no conoce ningún caso en el que las reglas solemnemente proclamadas por el pensador francés hubieran prestado utilidad en el estudio de la naturaleza, GALILEO dió, en su *Discorsi*, imperecederos ejemplos prácticos del proceso intelectual que se convirtió en el indispensable instrumento de exploración científica del mundo físico.

Sin embargo, agreguemos de inmediato que llamar "experimental" al método galileano es, por lo menos, unilateral y parcial; es ver sólo un aspecto de aquel proceso intelectual, puesto que la experiencia con su inducción generalizadora no es sino una de sus etapas.

Nada es más instructivo a este respecto que considerar el camino heurístico recorrido por GALILEO en su búsqueda

de la ley de la caída. Parte, como vimos, de una hipótesis intuitiva, deduce sus consecuencias lógico-matemáticas, y luego somete éstas al veredicto de la observación experimental. Por decisivo que sea el experimento, no es sino una fase de la marcha del pensamiento; no inicia sino completa ese proceso cognoscitivo en el que se entrelazan armónicamente elementos racionales y empíricos: hipótesis, deducción, experimento, inducción. Si es cierto que en la práctica el método galileano no presenta siempre las etapas sucesivas en ese orden jerárquico, no es menos innegable que las grandes leyes naturales (gravitación, energía, herencia, etcétera) no fueron fruto de procesos empíricos, sino que surgieron de hipótesis intuitivas a priori, cuyas consecuencias lógicas fueron verificadas a posteriori, experimentalmente.

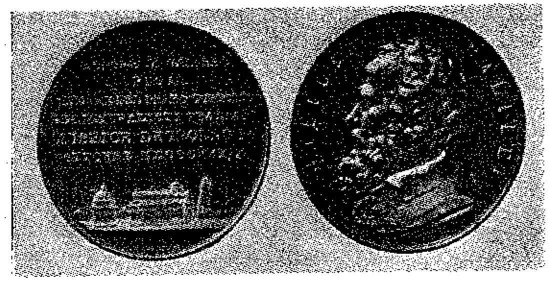


FIG. 23. — Medalla acuñada en honor de GALILEO con motivo del primer Congreso italiano de naturalistas (1839).

Desde luego que GALILEO no descubrió el triple hontanar: filosófico-especulativo, matemático-racional, y empírico-experimental, de donde fluye todo conocimiento científico natural. De la fuente filosófica ya habían espigado, y a veces con exceso, la ciencia de ARISTÓTELES y los escolásticos; de la fuente matemática se nutría la estática de ARQUÍMEDES; y en cuanto al valor de la observación y del experimento, ya habían dado prueba de ello los alquimistas árabes y cristianos, así como los precursores ingleses e ita-

CAPÍTULO IX

NEWTON Y LA LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

1. — El genio de Kepler había brindado a la ciencia las primeras leyes matemáticas que regían los movimientos de los planetas y de los satélites, pero esas leyes cinemáticas de Kepler sólo eran válidas en el espacio celeste y no se aplicaban a los movimientos terrestres. Por su parte, Galileo con sus leyes de la caída libre y de la trayectoria de los proyectiles no controlaba fenómenos celestes, sino terrestres.

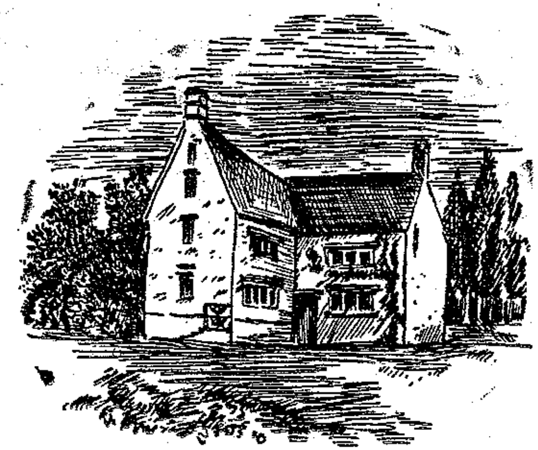


Fig. 57. — La casa natal de Newton en Woolsthorpe.

Por considerables que fueran los progresos logrados a través de esas hazañas científicas, dejaron subsistentes la doctrina dos veces milenaria de la dualidad de las leyes: unas para el mundo celeste, otras para el mundo sublunar, y mantuvieron la carencia de *una* mecánica del mundo.

Crear un fundamento sólido de la mecánica del cielo y reunirlo en indisoluble unidad con la mecánica de la tierra, fué la obra gigantesca de Newton. Sus *Principia,* publicados en 1687, aportan el máximo progreso que nuestros conocimientos del mundo físico deben a los esfuerzos de un solo hombre. "Obra cumbre de la mente humana", según Lagrange, los *Principia* son probablemente el mayor monumento de la historia de la ciencia.

Hijo de un granjero, Isaac Newton nació un año después de la muerte de Galileo y un siglo después de la desaparición de Copérnico, el día de Navidad de 1642 [1] en Woolsthorpe, Condado de Lincoln. Su madre, que enviudara antes de nacer el niño, se volvió a casar muy pronto confiando el pequeño Isaac al cuidado de la abuela. En oposición a Huygens, Leibniz y Gauss el futuro coloso no fué un niño prodigio. Es verdad que en sus primeros años se destacó por su habilidad mecánica en construir relojes solares y molinos de viento, pero ni en la escuela de la aldea, ni en la Grammar-School de Grantham, a la que asistió como alumno externo, reveló su genio. En 1661 ingresa al Trinity College de Cambridge y en él descubre su vocación. Estudia con espíritu crítico la geometría de Euclides y de Descartes y se compenetra de la aritmética de los infinitos de Wallis; es durante esos años estudiantiles (1665) que logra demostrar su célebre "teorema del binomio", que es uno de sus primeros aportes a la matemática. Tuvo la suerte de encontrar en su profesor de matemática, Isaac Barrow, al maestro que supo formar a su inigualado alumno y que, apreciando las dotes excepcionales del joven Newton y no obstante haber éste en el otoño de 1667 logrado sólo el undécimo lugar entre los candidatos

[1] Todas las fechas de este capítulo están dadas según el calendario juliano, vigente aún en Inglaterra durante la vida de Newton.

al grado de "Fellow", lo asocia a sus investigaciones. De BARROW aprendió NEWTON el hermoso rigor de la exposición *more geometrico,* que constituirá una de las características del estilo de su obra maestra: los *Principia;* por lo

FIG. 58. — Estatua que representa a NEWTON joven, existente en el vestíbulo del Trinity College de Cambridge.

demás ya hablamos (Cap. VIII, § 2) de la influencia de BARROW en la labor matemática de NEWTON. Además, BARROW unía a sus condiciones de científico (fué matemático, filósofo, teólogo), preciosas condiciones humanas: inclinándose ante la superioridad de su discípulo, se resignó a ser la estrella matutina que se esfuma ante el sol naciente, y aun muy joven, en 1669 renuncia a su cargo para cederlo a NEWTON que ocupará la cátedra durante un cuarto de siglo (un decreto especial de CARLOS II le autorizó a enseñar en el Trinity College a pesar de no ser sacerdote).

Unos años antes, la epidemia de peste bubónica que azotó Ingaterra en el bienio 1665-1667 y que obligó a la Universidad a cerrar sus puertas, llevó a NEWTON a refugiarse en la casa paterna de Woolsthorpe; fué en ese tranquilo retiro de esos años donde NEWTON encontró las ideas directoras de tres descubrimientos científicos, cada uno de los cuales le habría asegurado fama duradera: las fluxiones, la gravitación universal y la dispersión de la luz. Estos excepcionales descubrimientos, cuya ampliación y definitiva elaboración le insumirán gran parte de su vida, los realizó antes de cumplir los veinticinco años.

De regreso a Cambridge, NEWTON se dedicó a investigaciones ópticas sobre las que versan las clases del joven profesor y en las que obtiene sus primeros éxitos. Perfecciona notablemente el telescopio ideado por su compatriota JAMES GREGORY en 1663, construyendo en 1668 su telescopio de espejo (reflector), para ofrecer a la astronomía un instrumento libre de la aberración cromática, que NEWTON estimaba inevitablemente unida a los telescopios refractores. El telescopio de NEWTON despertó un enorme interés: el rey expresó deseos de verlo y la Royal Society, que conserva hoy como inestimable reliquia el segundo modelo de ese telescopio, lo elige miembro de la misma en 1672, año en que presenta a la institución su primera memoria: *A new theory about light and colours,* que más tarde aparece en los Philosophical Transactions.

Consciente del excepcional valor de su descubrimiento de la naturaleza de los colores (en una carta dirigida al secretario de la Royal Society OLDENBURG la califica "the oddest, if not most considerable detection, which last hitherto been made in the operations of nature"), NEWTON experimentó una enorme sorpresa, más tarde convertida en amargura, al verse envuelto en una violenta e interminable polémica con HOOKE, HUYGENS, IGNACE GASTON PARDIES (1636-1673), y otros que atacaban su hipótesis corpuscular, aunque ésta fuera expuesta con expresas reservas. Temperamento retraído e introspectivo, que sufría cuando se veía expuesto a discusiones públicas, NEWTON, con el fin de evitar ulteriores controversias, decidió entonces suspender la publicación de la síntesis de sus investigaciones ópticas; en efecto, su *Opticks* no aparece hasta 1704.

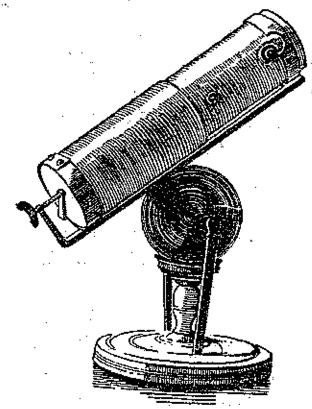


FIG. 59. — El anteojo reflector construído por NEWTON que se conserva actualmente en la biblioteca de la Royal Society.

Mientras tanto NEWTON había logrado notables progresos en la elaboración de su cálculo de las fluxiones, proporcionándole un poderoso instrumento para retornar al problema de la gravitación universal, al cual comenzó a dedicarse con empeño hacia 1680, estimulado por el interés que hacia ese tema mostraban los miembros de la Royal Society. Sin embargo, fué menester la insistencia del gran astrónomo EDMUND HALLEY para decidir al genio temeroso a reunir sus investigaciones y entregar el manuscrito de la *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (ver más adelante § 3) a la Royal Society, cuya aparición en el verano de

1687 convirtió a este año en una fecha memorable en la historia del pensamiento científico.

"Nunca hubo —escribe TANNERY— una obra de ciencia que haya tenido igual importancia, y es difícil concebir que alguna vez pueda haber otra que, en la misma extensión, contenga tantas verdades nuevas y de semejante valor." Para demostrar con todo rigor geométrico estas nuevas verdades que —según palabras de BERTRAND— "parecen atraerse como los abismos de que habla la Escritura", NEWTON se sometió en los dos o tres años que precedieron a la aparición de los *Principia*, a un régimen de trabajo muy severo que le produjo frecuentes insomnios. Vivía sólo para pensar y para calcular, y los extraordinarios esfuerzos cerebrales y las privaciones que se impuso repercutieron gravemente sobre su salud. Sufrió, como pretenden algunos de sus biógrafos, un colapso mental al que habría contribuído un incendio que destruyó una parte de sus manuscritos. La escasez de documentos contemporáneos no permiten determinar la naturaleza de su enfermedad; lo que puede afirmarse es que cayó en un estado de profunda depresión nerviosa. Lentamente recuperó la salud hacia 1693, y desde entonces puede decirse que las preocupaciones científicas de NEWTON se alejaron de la ciencia exacta y natural. En 1700 se inicia la ya mencionada lamentable polémica acerca de la prioridad de la invención de los métodos infinitesimales, en la que en 1712 interviene la Royal Society para defender los derechos de NEWTON, polémica que, según dijimos, sobrevivió a los dos grandes protagonistas NEWTON y LEIBNIZ, y continuó entre sus partidarios: los matemáticos ingleses y los continentales durante todo el siglo XVIII.

En 1687, año de la publicación de los *Principia*, NEWTON integró una delegación encargada de defender los privilegios de la Universidad de Cambridge ante el alto tribunal eclesiástico (High Court of Ecclesiastical Commissioners). Su éxito en esta misión, unido a su creciente fama como sabio, contribuyeron en el año siguiente a su elección como representante de la Universidad en el Parlamento, cargo que mantuvo hasta 1705 y en el que se desempeñó discretamente: carente de don retórico, intervino poco en las deliberaciones y debates parlamentarios.

Durante este período se produjo un acontecimiento que debía fijar otro rumbo a la vida pública de NEWTON. CHARLES MONTAGU, más tarde Lord HALIFAX (1661-1715), discípulo y amigo de NEWTON, acababa de ser nombrado Canciller del Tesoro. Con la esperanza de encontrar en el gran científico un destacado colaborador para su proyectada reforma de la moneda inglesa, lo hizo nombrar en 1695 Inspector (Warden), y pocos años después Director general, (Master of Mint) de la Casa de la Moneda. El genial investigador se dedicó con excepcional celo y éxito a sus nuevas tareas; en unión con MONTAGU contribuyó a salvar la moneda depreciada y a restaurar el crédito de la nación. Coincidían esos tiempos con los de la construcción de una poderosa flota y con el nacimiento del imperio mercantil inglés, de ahí que para muchos compatriotas ochocentistas de NEWTON —aunque este juicio no coincida con el de la posteridad— sus hazañas en la Casa de la Moneda equivalen o quizás superen a sus méritos científicos. Cabe señalar, además, la extraña coincidencia de que los dos investigadores a los que la astronomía debe sus máximas reformas: COPÉRNICO y NEWTON, hayan demostrado gran interés por un problema tan poco celestial como es la reforma de la moneda.

En Cambridge, NEWTON había conquistado fama universal e imperecedera; en Londres, donde se traslada en 1695, agregará al prestigio la riqueza. Como profesor debía conformarse con una pobre remuneración de cien libras anuales, la Moneda le aportó primero sesicientas, luego dos mil. Como era célibe, su sobrina CATHERINE BARTON [2] cuidaba de su lujosa residencia, disponiendo de coche y de una servidumbre de seis personas. Los contemporáneos lo colman de honores: La Academia de París lo incorpora a su seno en 1699, la Royal Society lo elige presidente en 1703, cargo que mantuvo hasta el fin de su vida, la reina le otorga en 1705 el título de "Sir", la princesa de Gales lo distingue con su amistad...

Mas la gloriosa época de los grandes descubrimientos había pasado definitivamente; sus últimas investigaciones se reducen a estudios químicos, búsquedas cronológicas y especulaciones teológicas.

NEWTON mostró, ya en los años de su profesorado en Cambridge, un activo interés por la química, como lo prueba su trabajo *De natura acidorum,* aparecido en 1710, pero escrito un par de décadas antes. En ese ensayo, el gran físico trata de explicar la afinidad química mediante una atracción de las partículas que, de acuerdo con su hipótesis, seguiría una ley distinta a la de la gravedad. Empero, el problema químico que atrajo particularmente el interés de NEWTON fué el de la transmutación de los metales, como lo evidencian su correspondencia con ROBERT BOYLE y las experiencias realizadas en el laboratorio que NEWTON tenía cerca de sus habitaciones en Cambridge. No es improbable que la inmensa autoridad de que gozaba desde la publicación de los *Principia,* hiciera nacer en Inglaterra la esperanza de que las experiencias alquimísticas de NEWTON lograran su objetivo, y no es de descartar tampoco que tal esperanza contribuyera a su designación como Director de la Moneda.

Muy interesado en los estudios bíblicos, NEWTON en sus trabajos de cronología trató de poner en evidencia que la Creación se produjo en torno al año 4000 a. C., así como trató de calcular la fecha del Diluvio y de otros acontecimientos; sin embargo sus especulaciones de cronología bí-

[2] VOLTAIRE atribuye en sus *Lettres philosophiques* (1765) la designación de NEWTON como inspector y luego director de la Casa de la Moneda, a las relaciones que la sobrina de NEWTON habría mantenido con MONTAGU. "En mi juventud —escribe VOLTAIRE— creí que NEWTON había hecho su fortuna por sus extraordinarios méritos... Nada de eso. ISAAC NEWTON tenía una sobrina sumamente amable, llamada señora CONDUITT; ella agradaba mucho al Gran Tesorero HALIFAX. El cálculo infinitesimal y la gravitación de nada le hubieran servido sin la encantadora sobrina." Para reducir esta versión a la categoría de una calumnia, baste pensar que el gran físico fué designado Inspector de la Moneda cuando CATHERINE tenía quince años y residía, como alumna, en una escuela eclesiástica lejos de NEWTON.

blica sólo reflejan una faceta de su espíritu profundamente religioso. Los problemas teológicos lo atraían desde su juventud, y esta atracción no hizo más que acentuarse en el curso de los años, como lo muestra su extensa correspondencia teológica con el filósofo LOCKE, y se tornó dominante en los últimos años de su vida. Fruto de esta postrera época, son sus cartas dirigidas al predicador RICHARD BENTLEY sobre las verdades de las Escrituras, sus comentarios a las profecías de David, su exégesis del Apocalipsis de San Juan, donde entre otras afirmaciones anuncia el fin del poder temporal de los papas para el año 2060. Tales lucubraciones de su senectud, ponen en evidencia su erudición, su sagacidad y su celo de protestante, pero no la genialidad que los siglos futuros admirarán en el autor de los *Principia*.

La vejez de NEWTON fué larga y feliz; fuera de su controversia con LEIBNIZ nada perturbó sus últimos veinte años. En 1722 el octogenario comenzó a padecer de litiasis, soportó la enfermedad y sus complicaciones ulteriores con paciencia y con serenidad. Pocas semanas antes de su muerte presidió aún una reunión de la Royal Society. Falleció en la noche del 20 de marzo de 1727 a la edad patriarcal de ochenta y cinco años. Sus restos fueron inhumados en el Panteón londinense de la Abadía de Westminster, junto a los reyes de Inglaterra. Su lápida invita con un patético epígrafe a la posteridad: Sibi gratulentur mortales, tale tantumque existisse humani generi decus. (Congratulaos mortales, de que el género humano ostente un ornamento tal).

NEWTON era de talla mediana; una larga cabellera canosa le confería, desde sus cuarenta años, un aspecto venerable, aun sin la tradicional peluca. Era de temperamento colérico. Agreguemos que su mentalidad estrictamente científica, si bien fué compatible con los problemas teológicos, excluía toda comprensión del arte y de la literatura. Fuera del inglés, no poseía ninguna lengua viva; en cambio escribía y hablaba con fluidez en latín, que en el siglo de NEWTON conservaba su jerarquía de idioma científico internacional.

Después de la muerte de NEWTON, su sucesor en la dirección de la Casa de Moneda: JOHN CONDUITT (1688-1737), que después de su casamiento (1717) con CATHERINE BARTON vivió en la casa del gran físico, se propuso elevarle un monumento biográfico, pero su prematura muerte impidió la ejecución del proyecto, y su manuscrito y los documentos que había reunido permanecieron inéditos. Aunque parezca extraño, y no obstante la veneración que rodeara a NEWTON, hay que esperar un siglo después de su muerte para encontrar en el físico DAVID BREWSTER (1781-1868) un biógrafo, dispuesto a investigar testimonios contemporáneos de la vida de NEWTON. La segunda edición de la obra de BREWSTER: *Memories of the Life, Writings and Discoveries of Sir Isaac Newton* (Dos volúmenes, Edinburg, 1855), utiliza entre otras fuentes los documentos reunidos por CONDUITT, y continúa siendo todavía hoy, a pesar de las numerosas monografías publicadas desde entonces, el hontanar indispensable para el conocimiento de la vida del descubridor de la ley de la gravitación universal.

2. — En otros capítulos de este volumen nos ocupamos de las investigaciones ópticas (Cap. VII) y matemáticas (Cap. VIII) de NEWTON, en éste expondremos las investigaciones mecánicas y, en particular, la historia de la ley que lleva su nombre, referente a la gravitación universal.

Una leyenda difundida por VOLTAIRE y por el médico HENRY PEMBERTON, amigo de NEWTON, atribuye el origen de la ley de la gravitación universal a la caída de una manzana. "Un día del año 1666 —escribe VOLTAIRE en sus *Eléments de la philosophie de Newton* (1738)— retirado NEWTON en la campaña y viendo caer frutos de un árbol, se dejó llevar, según me contó su sobrina, a una profunda meditación sobre la causa que atrae así a todos los cuerpos, obligándolos a seguir una línea recta que pasaría, si fuese prolongada, muy próxima del centro de la Tierra." Por otra parte, el arqueólogo WILLIAM STUKELEY (1687-1765) confirma en una memoria *Memoirs of Sir Isaac Newton Life*, fechada en 1752 pero inédita hasta 1936, la misma versión. El propio NEWTON le habría asegurado que la caída de una manzana le sugirió la primera idea de su futura ley. A pesar de este testimonio, resulta difícil ver en el relato volteriano o pembertiano algo más que una leyenda, considerada como tal por POGGENDORF, por GAUSS, por SCHOPENHAUER, por MACH y por otros, aunque algunos historiadores, entre los cuales ALDO MIELI, se inclinan a concederle autenticidad. Con todo, el valor de la manzana newtoniana como símbolo es indiscutible. "In hac philosophia —escribe el autor de los *Principia*, refiriéndose al método de su Filosofía Natural— propositiones deducuntur ex phaenomenis et redduntur generales per inductionem." El fenómeno concreto que utiliza la deducción como punto de partida para buscar la ley de la gravitación, y que ésta generaliza mediante la inducción, encuentra en efecto un símbolo insuperable en la caída de la manzana en Woolsthorpe.

En realidad, no era necesario que la caída de una manzana recordara al joven NEWTON el problema central de la mecánica celeste, puesto que éste preocupaba a los investigadores desde los comienzos del siglo. KEPLER admitía la realidad de la atracción gravífica: "Gravitas est —escribió en su *Astronomía nova*— afectio corporea mutus inter cognata corpora", o sea que la gravitación actúa entre masas de la misma naturaleza (corpora cognata). La Tierra atrae la piedra y atrae a la Luna, porque todos estos cuerpos son "cognata", es decir del mismo origen o de estructura idéntica, pero no existe gravitación entre el Sol y los planetas, por no ser estos cuerpos semejantes. Sin duda —agrega KEPLER— el Sol emana una fuerza motriz (virtus movens) que impulsa a los planetas, pero esta fuerza es magnética, no gravitacional (ver *Panorama*, Vol. VI, Cap. X). A medida que la distancia aumenta, la fuerza magnética solar decrece, lo que explica la menor velocidad de los planetas más alejados. Pero ¿cómo decrece esa fuerza magnética del Sol? ¿Lineal o cuadráticamente con la distancia? KEPLER recuerda que la intensidad de la luz solar disminuye de acuerdo con la ley del cuadrado de la distancia, y en su *Epitome* (1621) se pregunta si la fuerza del Sol no disminuirá en la misma proporción. Después

de haber llegado así, por lo menos en su aspecto matemático, hasta el umbral de la solución newtoniana, KEPLER se desvía y admite que la fuerza motriz del Sol no se distribuye a la manera de la luz por todo el espacio, sino sólo en el plano de la eclíptica. ¿A qué perderse en el vacío donde no hay cuerpos para mover? Apoyado en esta hi-

FIG. 60. — Retrato de ISMAEL BOUILLAUD.

pótesis, y guiado por su concepto erróneo de fuerza, que consideraba como determinante de la velocidad, KEPLER termina por rechazar la proporcionalidad inversa al cuadrado, que será el eje de la ley de NEWTON, admitiendo que la fuerza propulsora que emana del astro central decrece proporcionalmente con la distancia.

El sabio francés ISMAEL BOULLIAUD (1605-1695) (=BULLIALDUS) critica en su *Astronomia Philolaica* (1645) la conclusión de KEPLER: para él la intensidad de la luz y la de la fuerza motriz que emana del Sol deben seguir una y la misma ley de variación en el espacio: en razón inversa al **cuadrado** de la distancia. Mas BOULLIAUD es incapaz de demostrar la verdad de su feliz pero casual hallazgo, que queda estéril en su extensa obra que incluye, además de la obra citada, treinta y nueve volúmenes in folio con la correspondencia del autor con los sabios de la época.

BOULLIAUD influyó sobre las ideas astronómicas del físico y biólogo italiano GIAN ALFONSO BORELLI (1608-1679), quien al estudiar el sistema formado por Júpiter y sus satélites: los "planetas mediceos", llega a concebir en su *Theoria mediceorum planetarum* (1666) la trayectoria de los mismos como resultante de dos fuerzas antagónicas en equilibrio: una centrífuga, otra centrípeta. Reconoce además que el astro central atrae sus satélites, como la gravedad de la Tierra lo hace con los cuerpos terrestres. Simultáneamente con NEWTON, concibe pues BORELLI la fundamental identidad de la fuerza que actúa en el movimiento de los planetas y en la caída de los graves. Si bien el italiano no disponía del indispensable aparato matemático para verificar su teoría, sus razonamientos, fundados en el concepto de inercia, lo acercan mucho a la ley de la gravitación universal. Con razón NEWTON lo citará entre sus precursores.

Llegamos finalmente al agresivo contrincante de NEWTON, ROBERT HOOKE, que en 1666 —otra vez el año newtoniano— propone controlar mediante relojes de péndulo la variación que sufre la gravedad con la altura; el atraso de los relojes indicaría la sospechada disminución de la atracción, y en 1674 presenta en su ensayo *An attempt to prove the motion of earth* las tres premisas de su sistema del mundo: a) todos los cuerpos celestes poseen una atracción dirigida hacia sus centros, que no sólo mantiene unidas sus partes, sino que les permite atraer a todos los cuerpos celestes que se encuentran dentro de su "esfera de actividad"; b) puestos en movimiento rectilíneo y uniforme, todos los cuerpos persisten en la trayectoria rectilínea hasta que una fuerza central no les hace describir una trayectoria curva; y c) las fuerzas atractivas son tanto más poderosas cuanto más próximos a sus centros están los cuerpos sobre los que actúan. Como lo muestra esta última premisa, en 1674 HOOKE no poseía aún la ley del cuadrado de la distancia, pero cinco años más tarde, sin que se sepa por qué camino, logró formularla como lo evidencia una carta que dirige en enero de 1680 a NEWTON. Análogas ideas y conjeturas pertenecen al arquitecto y matemático CHRISTOPHER WREN y al astrónomo EDMUND HALLEY.

Por interesantes que sean las contribuciones de todos estos precursores, ninguno fué más allá del presentimiento de la verdad buscada. Ninguno de ellos logró formular exactamente la ley, y mucho menos demostrarla; ninguno sospechó su extraordinaria fecundidad; todos estaban igualmente lejos de intuir que la ley de la gravitación podría convertirse en la clave misma de la dinámica celeste y terrestre. Toda esta inmensa labor aguardaba aún su realización; haberla llevado a cabo en forma tan notable que dos siglos nada pudieron agregarle, es el inigualable mérito de NEWTON.

A ninguno de sus predecesores debe NEWTON tanto como a KEPLER. Las hipótesis propuestas por este soñador matemático acerca de la gravitación fueron poco felices, sin embargo, sus tres leyes implicaban la futura ley única de NEWTON y señalan al gran inglés el rumbo a seguir. En efecto, el principio de inercia revela en el movimiento de los planetas una aceleración continua desviadora y las leyes empíricas de KEPLER se explican inmediatamente por las características de la fuerza determinante de esta aceleración. Así la segunda ley, la de las áreas, sugiere en el movimiento planetario la acción de una fuerza central; si ésta es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, la trayectoria será una cónica, por ejemplo una elipse, y la fuerza en este caso estará dirigida hacia un foco, como exige la primera ley kepleriana. Por otra parte, la tercera ley permite concluir que la fuerza atractiva entre el Sol y los planetas es proporcional a la masa de estos últimos, siendo la constante de proporcionalidad la misma para todos los planetas. Si, por último, se admite que la atracción es también proporcional a la masa del Sol, todas las conclusiones anteriores se sintetizan en la célebre fórmula de NEWTON para la fuerza atractiva F:

$$F = g \frac{m_1 \quad m_2}{r^2}$$

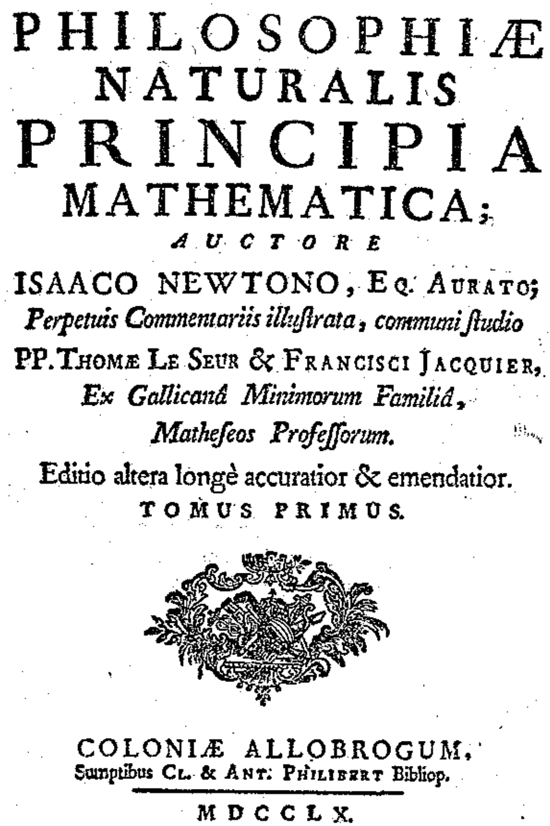
donde g es una constante numérica que depende de las unidades empleadas para medir las masas y la distancia. De este modo, las leyes de KEPLER ofrecen el instrumento para demostrar la ley de la atracción universal "more geometrico", como lo hizo NEWTON al desarrollar extensamente su ley en los *Principia.* Sin embargo, el camino que conduce a la demostración no es necesariamente idéntico al que lo ha llevado al descubrimiento. En efecto, cuando NEWTON ideó su clásica exposición que figura en los *Principia,* hacía mucho tiempo que estaba en posesión de su ley y tenía además la certeza de que la causa de la aceleración conferida a los satélites por el astro central era la misma que la gravedad comunicaba a los cuerpos terrestres. ¿Cómo llegó a este descubrimiento?

3. — En los *Principia,* NEWTON nos ha dejado en la ignorancia respecto de la génesis y de las etapas intermediarias que lo condujeron a su descubrimiento máximo. Nada indica en su magna obra las dudas de su espíritu en la búsqueda, sobre toda su lucha se cierne el glacial y olímpico silencio de los dioses. Sin embargo, un manuscrito de NEWTON de 1715 que integra la colección de documentos newtonianos de LORD PORTSMOUTH, incluye algunas indicaciones acerca del punto de partida de su camino heurístico.

Según este importante testimonio, NEWTON considera las trayectorias planetarias como engendradas por dos fuerzas contrarias —centrífuga y centrípeta— que se contrabalancean. Trata de determinar la primera estudiando la presión que ejerce una bola (giratoria) colocada dentro de una esfera vacía, al rodar sobre la superficie de ésta. Calcula

luego la fuerza centrípeta deduciéndola de la tercera ley de KEPLER y llega a la conclusión de que "las fuerzas que mantienen los planetas en sus órbitas deben ser inversas a los cuadrados de sus distancias al centro en torno del cual se desplazan". Para verificar la relación obtenida, compara la fuerza que rige el movimiento de la Luna con la fuerza que la gravedad terrestre ejerce sobre los cuerpos en caída libre, encontrando una correspondencia satisfactoria (found then answer pret y nearly). Echando finalmente una mirada retrospectiva a los lejanos años de Woolsthorpe, ya septuagenario, agrega: "Todo esto lo logré en los años de la peste en 1665 y 1666. En aquellos tiempos estaba yo en la flor de mi edad en lo que respecta a la invención y más apto a dedicarme a la matemática y a la filosofía que nunca."

El documento no revela detalles de cálculos efectuados en aquellos años de Woolsthorpe. Mas teniendo en cuenta lo que expone dos decenios más tarde en el Capítulo I del III libro de los *Principia,* se puede reconstruir la comprobación verificadora —sencilla y genial— realizada por NEWTON entre el movimiento lunar y la caída galileana de los graves. Sea T el centro de la Tierra, L el centro de la Luna desplazándose sobre una órbita que suponemos circular y cuya radio designamos con R; sea LQ el arco descrito por la Luna en un minuto. Si la atracción hipotética de la Tierra sobre la Luna dejara de actuar en el instante en que la Luna pasa por L, ésta continuaría en línea recta siguiendo la tangente de la órbita en L, un minuto después se encontraría en P. La atracción de la Tierra la hace pues caer de P a Q. Esta caída PQ de la Luna en un minuto es igual, de acuerdo a la geometría de EUCLIDES, a $\overline{LQ}^2$:2R, donde 2R es un valor conocido, pues desde la antigüedad se sabía que R es cerca de sesenta veces el radio r de la Tierra y éste, en la época de NEWTON, era conocido con bastante aproximación. En cuanto a la cuerda LQ, ésta no difiere, puesto que el tiempo considerado es pequeño, mayormente de su arco y puede ser reemplazado por éste. Por otra parte, el valor de este arco se deduce inmediatamente del radio R y de la duración, bien conocida, de la revolución de la Luna. De esta manera calcula NEWTON que PQ es sensiblemente igual a 15 pies, es decir que la Luna se desvía de su trayectoria rectilínea o cae hacia la Tierra 15 pies por minuto. Ahora bien, en la superficie de la Tierra, es decir a la distancia r del centro, un grave en caída libre recorre 15 pies en el primer segundo; puesto que los es-



PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA;
AUCTORE
ISAACO NEWTONO, EQ. AURATO;
Perpetuis Commentariis illustrata, communi studio
PP. THOMÆ LE SEUR & FRANCISCI JACQUIER,
Ex Gallicanâ Minimorum Familiâ, Mathefeos Profefforum.
Editio altera longè accuratior & emendatior.
TOMUS PRIMUS.
COLONIÆ ALLOBROGUM,
Sumptibus CL. & ANT. PHILIBERT Bibliop.
MDCCLX.

FIG. 61. — Portada de una edición de los *Principia* de NEWTON del siglo XVIII, cuidada por los mínimos franceses THOMAS LE SEUR y FRANÇOIS JACQUIER.

pacios recorridos crecen, según GALILEO, como los cuadrados de los tiempos, en un minuto el grave habrá caído 15×60^2 pies. Pero si es verdad que la gravedad disminuye con el cuadrado de las distancias crecientes, entonces la Luna caerá un espacio $R^2 = 60^2$ veces menor que el espacio recorrido en el mismo tiempo por los graves sobre la superficie terrestre, es decir $\frac{15 \times 60^2}{60^2}$ pies (es decir 15 pies) valor precisamente encontrado para PQ, caída de la Luna en un minuto. Concordancia reveladora que a la vez que sugiere que la ley de los cuadrados —eje de la nueva ley— es cierta, muestra que la ley galileiana no es más que un caso especial de la ley newtoniana. El ideal antiguo de construir dos mecánicas: una sublunar y otra cósmica según patrones diferentes, cede ante una nueva idea: sólo hay una mecánica, a la vez celeste y terrestre.

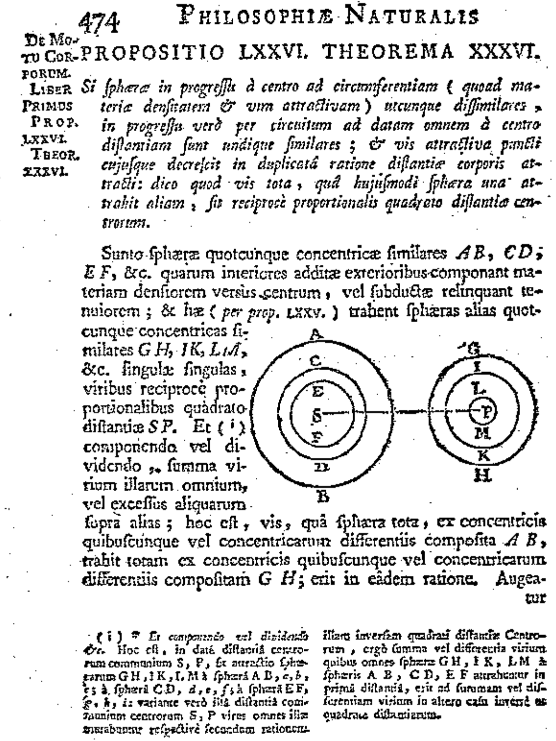
Es de admirar lo osado del pensamiento de NEWTON y su intuición profunda, que una vez adquirida esta prueba remonta a una amplia generalización: a la hipótesis de que la fuerza atractiva descrita por su ley actúa entre dos masas puntuales cualesquiera, donde quieran se encuentren en el espacio cósmico. Por primera vez en la historia ocurre que una ley cuantitativa se revela valedera tanto para fenómenos terrestres como para fenómenos celestes, superándose definitivamente de esta manera el abismo que la dualidad aristotélica de las leyes naturales había abierto veinte siglos antes entre la morada del hombre y el resto del universo.

4. — Entre el descubrimiento de la ley de la gravitación universal y su publicación transcurren más de dos décadas. ¿Por qué NEWTON dejó pasar veintiún años antes de proclamar el más importante de sus descubrimientos? No faltan suposiciones para explicar tan extraordinario retardo. Un error inicial, cometido en el cálculo debido al valor inexacto del radio terrestre, habría llevado a NEWTON a abandonar el estudio del problema durante varios años. Las mediciones geodésicas del abate PICARD que llegaron

a conocimiento de NEWTON en una reunión de la Royal Society, le habrían permitido en 1682 corregir sus cálculos y verificar su hipótesis y volver por tanto al problema de la gravitación. Aunque esta versión está muy difundida, probablemente no merece crédito puesto que varias determinaciones bastante exactas del radio terrestre —como las de SNEL y de GUNTER— estaban en 1666 ya a disposición de NEWTON. Otra versión pretende que los ataques del insoportable HOOKE, que había impugnado algunas conclusiones teóricas de la óptica de NEWTON y que sin duda reclamaría la paternidad de la ley de la gravitación, habrían descorazonado al ultrasensible y tímido león. Aunque la profunda adversión de NEWTON a verse envuelto en controversias públicas, explica el atraso de la aparición de muchos de sus escritos, la tardía publicación de su obra maestra tuvo motivos mucho más naturales. Fueron dificultades para solucionar determinados problemas de cálculo integral, indispensables para la formulación definitiva de la ley, las que lo detuvieron. Para dar cuenta del movimiento de una piedra, en caída libre, o de la Luna en su trayectoria, es necesario valorar la atracción total de una esfera homogénea sobre una partícula material situada fuera de ella; cada una de las partículas de la esfera atraerá a la masa de la partícula con una fuerza que variará de una partícula a otra según las distancias y las masas presentes. ¿Cómo sumar esas infinitas acciones para lograr la acción total? NEWTON logró dominar la dificultad en 1685 demostrando que la esfera actúa sobre la partícula exterior como si toda su masa estuviera concentrada en su centro. La posesión de este teorema, más sencillo y hermoso de lo que el descubridor esperara, le permitió extender su ley, establecida para masas puntuales e irreales, a masas con volúmenes determinados, es decir a los cuerpos reales.

A pesar de este gran progreso, la publicación de los *Principia* hubiera sufrido quizá nuevos atrasos, a no mediar la eficaz intervención de HALLEY. Vivamente interesados en el problema de la gravitación, HALLEY, HOOKE y WREN se reunieron en enero de 1684 discutiendo la hipó-

tesis del inverso del cuadrado. ¿Cómo demostrarla? Admitida como cierta ¿cómo explicar con ella la elipticidad de las trayectorias planetarias? Estas preguntas quedaban sin respuesta, a pesar de que HOOKE y HALLEY ya habían


474 PHILOSOPHIÆ NATURALIS

DE MOTU CORPORUM. LIBER PRIMUS PROP. LXXVI. THEOR. XXXVI.

PROPOSITIO LXXVI. THEOREMA XXXVI.

Si ſphæræ in progreſſu à centro ad circumferentiam (quoad materiæ denſitatem & vim attractivam) utcunque diſſimilares, in progreſſu verò per circuitum ad datam omnem à centro diſtantiam ſunt undique ſimilares; & vis attractiva puncti cujuſque decreſcit in duplicatâ ratione diſtantiæ corporis attracti: dico quod vis tota, quâ hujuſmodi ſphæra una attrahit aliam, ſit reciprocè proportionalis quadrato diſtantiæ centrorum.

Sunto ſphæræ quotcunque concentricæ ſimilares *AB*, *CD*, *EF*, &c. quarum interiores additæ exterioribus componant materiam denſiorem versùs centrum, vel ſubductæ relinquant tenuiorem; & hæ (*per prop.* LXXV.) trahent ſphæras alias quotcunque concentricas ſimilares *GH*, *IK*, *LM*, &c. ſingulæ ſingulas, viribus reciprocè proportionalibus quadrato diſtantiæ *SP*. Et (i) componendo vel dividendo, ſumma virium illarum omnium, vel exceſſus aliquarum ſupra alias; hoc eſt, vis, quâ ſphæra tota, ex concentricis quibuſcunque vel concentricarum differentiis compoſita *AB*, trahit totam ex concentricis quibuſcunque vel concentricarum differentiis compoſitam *GH*; erit in eâdem ratione. Augeatur

(i) * *Et componendo vel dividendo &c.* Hoc eſt, in datâ diſtantiâ centrorum communium S, P, ſit attractio ſphærarum GH, IK, LM à ſphærâ AB, a, b, c; à ſphærâ CD, d, e, f; à ſphærâ EF, g, h, i: variante verò illâ diſtantiâ communium centrorum S, P vires omnes illæ mutabuntur reſpectivè ſecundum rationem illam inverſam quadrati diſtantiæ Centrorum, ergò ſumma vel differentia virium quibus omnes ſphæræ GH, IK, LM à ſphæris AB, CD, EF attrahentur in primâ diſtantiâ, erit ad ſummam vel differentiam virium in altero caſu inversè ut quadrata diſtantiarum.

FIG. 62. — Reproducción facsimilar de la página de los *Principia* donde se demuestra uno de los teoremas importantes que conducen a la ley de la atracción universal.

cambiado al respecto varias cartas con NEWTON. Así, en agosto de ese año, HALLEY decide visitar a NEWTON en Cambridge. Llegado a la casa del gran físico, HALLEY —se cuenta— habría preguntado inmediatamente: "¿Cuál sería la órbita descrita por un planeta admitiendo que la gravitación disminuye con el cuadrado de la distancias?" "Una elipse", fué la categórica respuesta. "¿Cómo lo sabe usted?", insistió HALLEY; "Lo he calculado", declaró NEWTON, prometiendo a HALLEY que enviaría a la Royal Society una exposición de su descubrimiento.

Conforme a esta promesa, en febrero de 1685 NEWTON presentó un conciso ensayo titulado *De Motu*, que más tarde amplió reuniendo sus investigaciones mecánicas en un cuerpo de doctrina, del que entregó a la docta asociación los dos primeros libros en abril de 1686. El entusiasmo con que la Royal Society acogió al manuscrito fué perturbado por el litigioso HOOKE, que proclamó su prioridad en el descubrimiento de la ley del inverso del cuadrado. Indignado, NEWTON rechazó las infundadas pretensiones de su rival y amenazó con suprimir la parte final —el libro tercero— de su manuscrito. Felizmente el conflicto se resuelve, conformándose HOOKE con ser mencionado en un escolio agregado al primer libro, y NEWTON autoriza entonces la impresión de la obra completa. Sin embargo, aparece una última dificultad: La Royal Society, carente de fondos, no puede sufragar los gastos de la impresión; el desinteresado HALLEY se ofrece para hacerlo y finalmente, después de tantas peripecias, en el verano de 1687 sale de las prensas la inmortal obra *Philosophiae naturalis principia mathematica*, que señala un jalón no sólo en la historia de la ciencia, sino también en la de las concepciones filosóficas del mundo [3].

5. — Expondremos brevemente las ideas y los resultados esenciales de la gran obra de NEWTON. Con su *Principia*, la física se aparta por primera vez desde los pitagóricos, si se exceptúa a ARQUÍMEDES, de la íntima sustancia de las cosas para dirigirse hacia su orden geométrico, su estruc-

[3] A la primera edición de los *Principia*, de tirada muy reducida, siguió en 1713 la segunda edición preparada por ROGER COTES, discípulo predilecto de NEWTON. La última edición, revisada por el autor, aparecida en 1726, el año anterior a su muerte, fué cuidada por el médico y matemático HENRY PEMBERTON.

tura funcional y sus vinculaciones cuantitativas. La mecánica se deduce de un conjunto de definiciones y de axiomas, y la presentación de sus proposiciones y de sus teoremas sigue estrictamente el modelo de la geometría euclidiana. Este método geométrico no permite penetrar en el proceso creador de NEWTON y no nos revela el sendero recorrido antes de haber descubierto las verdades que nos presenta acabadas, cual si hubieran surgido ya armadas, como Minerva de la cabeza de Júpiter. Por otra parte, ha sido precisamente esa presentación sintéticogeométrica la que confirió a los *Principia* esa precisión y ese rigor que causaron la admiración de los contemporáneos del sabio y de la posteridad.

Las leyes de la física no son sino relaciones cuantitativas entre los conceptos creados por nuestras definiciones, de ahí que los *Principia* se abren con las definiciones de los conceptos fundamentales. De éstos, los conceptos de masa y de fuerza —entes centrales de la mecánica— poseen singular importancia. "La masa —afirma NEWTON— es la cantidad de materia medida por el producto de la densidad por el volumen." Es indudable que esta definición no es feliz, ya que implica un evidente círculo vicioso, puesto que la densidad no es otra cosa que la masa de la unidad de volumen. Sin embargo, la crítica de la posteridad, que no dejó de reprochar este error a NEWTON, olvidó un poco que en el siglo XVII las tres unidades fundamentales eran la densidad (tomada como sinónimo de peso específico), la longitud y el tiempo, reemplazándolo más tarde, gracias a la mecánica newtoniana, por las unidades actuales: masa, longitud y tiempo. Era pues lógicamente admisible concebir, como hiciera NEWTON, la masa en términos de densidad. Sea como fuere, lo importante es la distinción capital introducida por el gran innovador entre masa y peso, pues para NEWTON peso y masa no son conceptos idénticos, sino proporcionales. "He encontrado —escribe— que los pesos son proporcionales a su masa." Es uno de los más imperecederos méritos de NEWTON el haber reconocido que detrás del peso, es decir detrás de la magnitud de la gravedad terrestre que actúa sobre el cuerpo y que varía según la posición del cuerpo en el espacio, existe latente una característica invariable, una magnitud constante del cuerpo: su masa. Los conceptos masa y peso, cuya diferencia sólo fué vagamente entrevista por GALILEO, BALIANI y HUYGENS, se separan por primera vez, con toda claridad y generalidad, en la mecánica.

Las nociones de masa y fuerza son inseparables. El concepto de fuerza es un concepto central de la mecánica, es el que convierte la mecánica en algo distinto a una mera geometría explicada. Si es indiscutible que GALILEO y HUYGENS reconocieron en la caída libre y en otros fenómenos, que la fuerza es la determinante de la aceleración, sólo NEWTON es quien lo hace con completa generalidad. Concibe como fuerza toda causa capaz de modificar la velocidad de un móvil.

NEWTON distingue varias clases de fuerza, entre ellas hasta una "fuerza absoluta". Empero, para escapar a las sospechas de haber admitido en el sistema de su mecánica un ente metafísico, subraya cuidadosamente que su noción de fuerza no es explicativa, sino descriptiva, un concepto "puramente matemático". En efecto, la causa que NEWTON llama fuerza, corresponde cuantitativamente a su efecto, siendo proporcional a la aceleración que imprime a un cuerpo, y el coeficiente de proporcionalidad es precisamente la masa del cuerpo.

En una nota —"Scholium" en la terminología de los *Principia*— con la que concluye el Capítulo I, NEWTON indica también el sentido que desea dar a los conceptos de espacio y de tiempo. "El espacio absoluto —escribe— permanece siempre igual e inmóvil y sin relación con ningún objeto exterior." Estos conceptos de espacio y tiempo absolutos, que debían provocar severas críticas a partir de la segunda mitad del siglo XIX, fueron impuestos a NEWTON por las exigencias de su magna tarea, la de codificar la mecánica. Sus leyes del movimiento, encabezadas por la ley de inercia, postulaban el marco inmutable de un sistema de referencia universal, el marco del espacio y del tiempo absolutos, sin el cual carecerían de sentido. NEWTON comprendía muy bien que el mundo físico no ofrece ningún

sistema de coordenadas, con relación al cual un movimiento podría ser, por ejemplo, rectilíneo y uniforme como el descrito por el principio de inercia. Tanto es así que si se introdujera también un cuerpo en reposo absoluto, inexistente en el universo, la masa de este cuerpo crearía un campo gravitacional y por consiguiente no podría servir de centro de referencia para la descripción del movimiento inerte. Para orillar tamaña dificultad, que acabamos de ilustrar sólo con un ejemplo, NEWTON pensaba que si se admitían, como lo hizo la astronomía del siglo XVII, las estrellas como fijas, también podría admitirse un sistema fijo y absoluto de coordenadas.

No hay dudas que al introducir las nociones metafísicas del espacio y del tiempo absolutos, NEWTON fué también alentado por sus reflexiones teológicas, como lo evidencia el célebre escolio final de su obra en el que expresa que Dios, merced a su omnipotencia y eternidad "constituye el espacio y la duración". "Dios —afirma— está presente en todo y no sólo *virtualmente* sino *sustancialmente*, pues no puede subsistir virtud sin sustancia." Identificado con la presencia sustancial del Creador, el espacio o "sensorium Dei" debe ser absoluto, como, por su parte, su eternidad sustancial confiere carácter absoluto al tiempo. De esta manera, la conciencia divina proporciona el centro primario de un sistema de referencia fijo y universal. Tal es el sentido metafísico o hiperfísico que el piadoso autor de los *Principia* da a su espacio y a su tiempo absolutos, como lo comprueba también el instructivo *Diario* del matemático y físico DAVID GREGORY (1661-1708), que tuvo oportunidad de conversar con el propio NEWTON sobre estos problemas.

Sin embargo, aun en medio de sus especulaciones esotéricas, el gran físico no olvidaba la férrea regla que se había impuesto: deducir de hechos observables las proposiciones de su filosofía natural. Para ello, busca un criterio objetivo que permita separar el movimiento verdadero (absoluto) del movimiento aparente (relativo) y encuentra que el movimiento de rotación confiere al móvil un rasgo: la fuerza centrífuga, que revela sin referencia alguna a un sistema de coordenadas, un estado de movimiento. La rotación absoluta, cree NEWTON, puede entonces reconocerse mediante las fuerzas centrífugas que se manifiestan en el cuerpo que gira. Esta opinión, así como el célebre experimento que describe en los *Principia* para ilustrarla, fué sometida a una crítica constructiva sólo a fines del siglo XIX: crítica fecunda que en los comienzos de nuestro siglo conduciría a la teoría de la relatividad de EINSTEIN.

A las definiciones que acabamos de reseñar, siguen en la obra de NEWTON los tres "axiomas" o leyes del movimiento, llamados hoy principios fundamentales de la dinámica. Dos de estas leyes ya estaban implícitas en las definiciones, de las que los axiomas no constituyen sino su desarrollo. En efecto, si la fuerza determina una aceleración (cambio de velocidad o cambio de dirección), se deduce que un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza exterior está en reposo o se mueve con movimiento uniforme y rectilíneo: tal como lo exige el primer axioma. Por otra parte, el concepto de masa y la definición de fuerza se traducen en el segundo axioma: El cambio de movimiento (Mutatio motus) es proporcional a la fuerza motriz y se produce según la dirección de la recta en la que actúa la fuerza. Este axioma, que constituye la actual ecuación fundamental de la dinámica, equivale a postular la igualdad de la fuerza con el producto de la masa por la aceleración. A estas dos premisas, de las cuales en realidad la primera es un caso especial de la segunda, NEWTON agrega una tercera: "A cada acción se opone siempre una reacción igual y dirigida en sentido contrario", profundo principio que en su forma más general exige que cada vez que una fuerza provoca una acción, debe encontrarse en alguna parte del universo otra fuerza que provoca una acción de igual magnitud y de sentido opuesto a la primera. NEWTON destaca la "extensísima validez" de su tercer axioma, y para apoyarlo expone, entre algunos experimentos reales —como lo hiciera tantas veces GALILEO— una experiencia imaginaria. Supone la Tierra, en la que cada partícula gravita hacia las demás, cortada en dos partes por un plano. Si la presión que ejerce una de esas partes sobre la otra no fuera igual y de sentido contrario a la contrapresión, la

Tierra se movería en el sentido de la acción mayor. Sin embargo, y a pesar de acudirse a pruebas experimentales, las tres leyes newtonianas son efectivamente axiomas o postulados inaccesibles a una verificación directa y sólo comprobables a través de la exactitud, siempre experimentada, de las consecuencias que de ellas se deducen.

Sólo el tercer axioma pertenece por completo a NEWTON; el primero es el principio de inercia descubierto por GALILEO y enunciado por DESCARTES (ver Cap. I, §7); en cuanto al segundo aparece contenido en las investigaciones de GALILEO y empleado con éxito por HUYGENS. Mas si estos dos primeros axiomas no fueron descubiertos por el físico inglés, fué él el primero en formularlos rigurosamente y fijarlos como cimientos de la mecánica. Ni GALILEO ni HUYGENS discernieron los conceptos y postulados primordiales que permitirían construir la mecánica; al establecer con su poderoso sentido científico los conceptos básicos y las leyes indispensables para estructurar la mecánica, NEWTON superó a sus precursores. Es el primero que sabe —cosa que ni GALILEO ni HUYGENS sospecharon— que las tres leyes fundamentales son válidas para toda materia, aun para la que se encuentra en los espacios celestes. Nada había hecho prever el extraordinario alcance de las leyes formuladas para describir los movimientos terrestres; la generalidad de esas leyes, comprobada a través de la mecánica celeste de NEWTON, es de por sí un título a la inmortalidad, aun sin el hallazgo capital de la ley de la atracción, tan universal como los tres axiomas básicos. En definitiva, si el autor de los *Principia* utiliza ladrillos ajenos, es él quien levanta el edificio.

Formuladas las definiciones y enunciadas las leyes básicas, NEWTON aborda el fondo de su tema, desarrollando la dinámica de la masa puntual. Señalemos los resultados esenciales de las investigaciones del primer libro. En los movimientos curvilíneos de los cuerpos —demuestra NEWTON— las áreas descritas alrededor de un centro inmóvil son proporcionales a los tiempos empleados para describirlas. Esta es la ley kepleriana de las áreas (ver *Panorama*, Vol. VI, Cap. III, § 4) que deja de ser una ley empírica para convertirse en un riguroso teorema mecánico; agregando NEWTON que en todos los movimientos en los que se aplica esa ley la fuerza está dirigida hacia el centro, en torno del cual gira el móvil. Si la trayectoria de éste es una elipse y uno de sus focos es el punto hacia el cual se dirige la fuerza aceleradora, ¿cuál será la ley de esta fuerza? Gracias a un simple cálculo, NEWTON reconoce que la intensidad de la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el móvil y el foco de la elipse. Invierte luego NEWTON el teorema y busca la trayectoria de un móvil atraído por un punto fijo por una fuerza que varía según la ley del recíproco del cuadrado de la distancia, y encuentra que esa trayectoria es una elipse, una hipérbola o una parábola, es decir, una cónica. Al considerar una serie de casos, todos los cuales confirman los resultados ya obtenidos, ensancha gradualmente la base de estos teoremas demostrando que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia (Proposición 60) y directamente proporcional a sus masas (Proposición 69). Cada una de estas proposiciones es un jalón hacia el objetivo final; sin embargo, en el encadenamiento de los resultados le falta un indispensable eslabón: en virtud de las proposiciones que acaba de establecer, las partículas de un cuerpo, por ejemplo de una esfera homogénea, ejercen su fuerza atractiva de acuerdo a las distancias variables de sus partículas a la masa atraída. Como ya dijimos, NEWTON resuelve el problema, uno de los más arduos que se le cruzaba en el camino de los *Principia*, demostrando que la atracción total actúa como si la fuerza que la provoca tuviera su asiento en el centro de la esfera, y en el caso general en el centro de gravedad del cuerpo.

Los movimientos estudiados en el primer libro se efectúan en el vacío. Investigar la influencia de un medio resistente es uno de los temas principales del libro segundo que desmonta el campo, hasta entonces poco cultivado, de la aero - e hidrodinámica. El rozamiento entraña una pérdida de velocidad que puede ser proporcional a la velocidad o a su cuadrado [4]. En otros problemas, NEWTON estudia el roce interno (viscosidad) de los líquidos y determina la resistencia por los acortamientos que sufren las amplitudes de la oscilación pendular. Examina la caída de un cuerpo, la producción de ondas y su propagación en un líquido. Su interés por la mecánica de las vibraciones en un medio elástico lo lleva al dominio de la acústica. Reconoce que las vibraciones sonoras son longitudinales y plantea la primera fórmula para la velocidad del sonido, que encuentra proporcional a la raíz cuadrada del cociente de la elasticidad (presión) por la densidad del aire. Esta fué la primera aproximación teórica que se dió para la velocidad real del sonido (que en condiciones normales de temperatura fija esa velocidad en 300 m por segundo), la segunda aproximación no apareció hasta comienzos del siglo XIX.

El primer libro de los *Principia* no es sino un preludio, el segundo un intermezzo, sólo el tercero encierra la sinfonía. NEWTON corona su obra aplicando al sistema del mundo las conclusiones que tan sagazmente supo deducir *more geometrico* en el libro preliminar de su magistral tratado. Los teoremas del libro primero cobran cuerpo en el tercero para reunir, gracias a una sublime ley, en indivisible unidad la mecánica terrestre con la mecánica celeste, cuyos pilares fundamentales surgen unos tras otros de las ideas y demostraciones desarrolladas en el "Sistema del mundo matemáticamente tratado", título promisor que ostenta el libro final de los *Principia.*

En los cuarenta y dos proposiciones, problemas, corolarios y escolios de este libro, NEWTON establece los principios y los alcances de su ley de la gravitación universal. La célebre demostración —que hemos anticipado en el § 3— de la identidad entre la fuerza que actúa en la caída libre y en el movimiento lunar, se encuentra en la Proposición IV, Teorema IV del libro. Sentada la ley sobre bases fir-

[4] La ley empírica que rige la resistencia de los flúidos en función de velocidad del móvil no fué establecida sino hasta mediados del siglo XIX por el físico inglés STOKES. Para pequeñas velocidades (hasta 50 metros por segundo), la resistencia es proporcional a la primera potencia, para velocidades mayores a potencias superiores.

mes, NEWTON demuestra mediante numerosos ejemplos su admirable fecundidad: la comparación de la atracción que el Sol ejerce sobre la Tierra con la de ésta sobre la Luna, le permite deducir la masa del Sol en unidades de la masa terrestre; de igual modo calcula las masas de Júpiter y de Saturno a partir de la atracción de esos astros sobre sus satélites. Una vez establecidas las masas de esos cuerpos celestes y conocidos sus diámetros puede determinar los pesos específicos de las sustancias que componen el Sol y esos planetas, adoptando el peso específico de la Tierra como unidad. Con una seguridad rayana a la clarividencia valora correctamente la densidad de la Tierra atribuyéndole un valor entre 5 y 6; y calcula la magnitud de la gravedad sobre la superficie del Sol, de Júpiter y de la Luna, hazaña en la que ni siquiera pensaron sus predecesores. El enigma de las mareas se encuentra resuelto de golpe, gracias a la aceleración impresa por el satélite y el Sol a las masas móviles de los mares terrestres; siendo conocida la masa del Sol, NEWTON puede también calcular la altura de las mareas solares.

Otro enigma casi dos veces milenario: la precesión de los equinoccios, recibe por fin explicación por la atracción lunisolar sobre el ensanchamiento del globo en la zona ecuatorial. Como la Luna no es sólo atraída por la Tierra, sino también por el Sol, NEWTON demuestra que su ley da perfecta cuenta de las irregularidades de la órbita lunar, ya de la evección (desigualdad de las cuadraturas) descubierta por HIPARCO, de la variación observada por TYCHO BRAHE y de la desigualdad del apogeo y de los nodos, desconocida antes del gran inglés. Como ilustración del enorme poder explicativo de su ley, NEWTON indica también que los cometas —hasta entonces cuerpos por completo misteriosos— obedecen al igual que los planetas a la ley de la gravitación universal, ley que aclara también las perturbaciones que sufren las trayectorias de los planetas por la atracción mutua de sus masas. En suma, NEWTON aporta la prueba de que los intrincados movimientos de todo el sistema solar pueden ser deducidos de su ley, que abarca en su simple fórmula fenómenos tan dispares como la retrogradación de los nodos de la Luna, y la desviación de una plomada de su vertical en las proximidades de una montaña.

Desde la cima escalada, el escolio final de la obra —el famoso "Scholium generale"—, NEWTON echa una mirada retrospectiva sobre las conclusiones alcanzadas. Rotas yacen las tablas de la ley cartesiana del universo, desaparecidos los torbellinos del sistema del mundo, y resuelto el problema del movimiento de los cuerpos celestes sometidos a la única ley de la gravitación universal. En el escolio aparece la conocidísima afirmación: "Hypotheses non fingo" como respuesta a la cuestión planteada por la causa de la gravitación. "Hasta ahora —escribe— no logré deducir las causas de las propiedades de la gravitación y no arriesgo la formulación de hipótesis." Sin embargo, si NEWTON se hubiera atenido rigurosamente a la abjuración de toda hipótesis no hubiera logrado crear el cuerpo de doctrina de la mecánica terrestre, y menos aún el de la mecánica celeste. En verdad, también él —como más tarde los extirpadores de hipótesis del siglo XIX, desde KIRCHHOFF hasta OSTWALD— acudió con frecuencia a este imprescindible instrumento de investigación. Tanto es así que el prefacio —escrito con la aprobación de NEWTON por ROGER COTES— de la segunda edición de los *Principia*, expresa que también la física newtoniana admite hipótesis con carácter de preguntas, siempre expuestas a la condición de ser susceptibles de verificación.

En cuanto a la gravitación universal, NEWTON se abstuvo de asignarle una causa hipotética, considerando su ley como la interpretación matemática de un hecho experimental. Sin embargo, sus discípulos ochocentistas —LAPLACE y sus contemporáneos— newtonianos más ortodoxos que el propio maestro, terminaron por considerar la atracción —causa matemática en las deducciones de NEWTON— como la causa física del movimiento introduciendo así la noción, tan cómoda como discutible, de la acción a distancia de las fuerzas.

6. — En Inglaterra el éxito de los *Principia* fué casi inmediato. "Nec fas est propius mortali attingere Divos" (No está dado a ningún mortal aproximarse más a los dioses),

elogia HALLEY a NEWTON en el prefacio que escribiera para los *Principia*. No es éste simplemente el homenaje de un amigo sino, en mayor o menor medida, la apreciación de

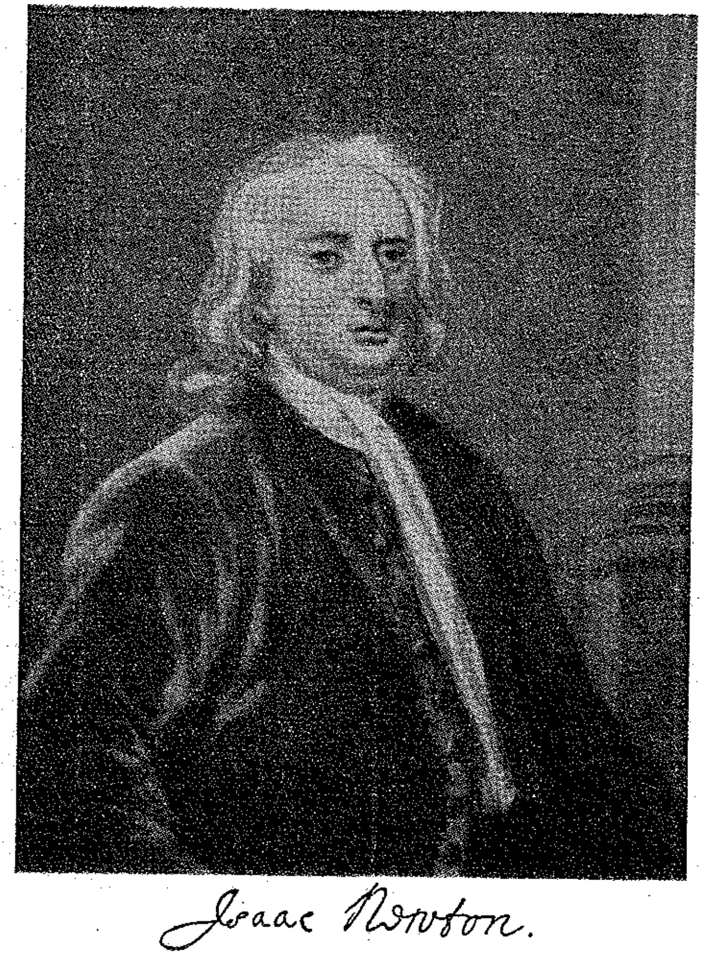


FIG. 63. — Uno de los retratos más conocidos de NEWTON, de un cuadro del año 1725. Debajo, la firma autógrafa de NEWTON.

la Royal Society, aunque ésta contara entre sus miembros influyentes a HOOKE, el irreducible enemigo personal de su compatriota genial. El más eficaz propagador de las ideas newtonianas fué el ya mencionado DAVID GREGORY con su obra *Astronomiae Physicae et Geometricae Elementa* (1702), primera exposición de la astronomía de acuerdo con los principios de la nueva mecánica. Este libro, muy apreciado por el propio NEWTON, sirvió durante algún tiempo como introducción a la ciencia newtoniana, puesto que en los decenios que inmediatamente siguieron a la publicación de los *Principia*, esta obra contó con muy pocos lectores capaces de comprenderla. En la Universidad de Cambridge, SAMUEL CLARKE (1675-1729), traductor de la *Óptica* de NEWTON y newtoniano de la primera hora, introduce el estudio de los *Principia* y WILLIAM WHISTON (1667-1747), sucesor de NEWTON en su cátedra, expone en sus cursos las ideas básicas de la nueva mecánica. Casi simultáneamente encuentra acceso la nueva doctrina en la Universidad de Oxford, a la que pronto sigue la de Edinburgo.

Mas si en Inglaterra los hombres de ciencia adhirieron prontamente y con entusiasmo, que casi podría calificarse de patriótico, a la nueva doctrina, no ocurrió lo mismo en el continente donde las ideas de NEWTON chocaron con una marcada resistencia apoyada por espíritus eminentes. LEIBNIZ y HUYGENS la combatieron; "El principio de la atracción me parece absurdo", escribe este último al criticar la explicación dada por NEWTON al fenómeno de las mareas. Todavía largo tiempo después, en 1730, JOHANN BERNOULLI (1667-1748) rechaza la ley de la gravitación universal reprochando a su descubridor haber introducido, una vez más, causas ocultas en la física. A pesar de la autoridad de HUYGENS, su patria, Holanda fué el primer país del continente donde la mecánica newtoniana encontró prestigiosos y entusiastas propagadores. WILHEMUS JACOBUS 'sGRAVESANDE (1688-1742), secretario de embajada en Londres, había estado en contacto con NEWTON, y cuando es nombrado profesor en la famosa Universidad de Leiden —donde la obra del innovador de la clínica médica HERMAN BOERHAAVE (1668-1738) ya había preparado el terreno para los principios del método experimental— 'sGRAVESANDE convierte su cátedra en un centro de investigaciones y de estudios dirigidos según el espíritu de la ciencia newtoniana. Su libro de texto de física, que lleva el significativo título *Introductio ad philosophiam newtonianam* (1720-1721), tuvo amplia difusión y pronto fué traducido al francés. Siguiendo el ejemplo de 'sGRAVESANDE, también el conocido electrólogo PETRUS VAN MUSSCHENBROEK (1692 - 1761) se convirtió en portavoz de la física newtoniana, a la que dediicó un importante tratado: *Epitome elementorum physyco-mathematicae* (1726).

Los adversarios de la nueva doctrina mantenían su posición con particular perseverancia en Francia, donde medio siglo después de publicados los *Principia* aun prevalecía ampliamente la teoría cartesiana de los torbellinos. Filósofo y geómetra, PIERRE LOUIS MOREAU DE MAUPERTUIS (1698-1759), célebre por la expedición geodésica al círculo polar, fué el primer académico de Francia que adhirió a la doctrina newtoniana y que la propaló en un ensayo: *Sur les lois d'attraction,* desafiando así la cohorte de los cartesianos, a la que pertenecía el Secretario de la Academia LE BOUVIER FONTENELLE (1657-1757), el astrónomo del Observatorio de París JACQUES CASSINI (1677-1756), el geómetra JOSEPH SAURIN (1659-1737), el naturalista RENÉ ANTOINE FERCHAULT DE RÉAUMUR (1683-1757), el entonces joven físico JEAN ANTOINE NOLLET (1700-1770) y muchos otros. En medio de tal conflicto de ideas, en el que todo parecía favorecer a los sostenedores de la doctrina tradicional, fué gran mérito del escritor FRANÇOIS MARIE AROUET DE VOLTAIRE (1694-1778) haber contribuído más que nadie a la difusión de las nuevas teorías con sus *Eléments de la philosophie de Newton* (1738-1742); por lo demás, VOLTAIRE estimuló la labor de la docta EMILIE DE BRETEUIL MME DU CHATELET (1706-1749) que brindó, con ayuda de CLAIRAUT, una versión francesa de los *Principia.* Sin embargo, la autoridad de que gozaba DESCARTES en Francia era tan aplastante que sus torbellinos continuaron enseñándose en los colegios hasta la Revolución Francesa. Por otra parte, fué precisamente en Francia donde surgieron en la segunda mitad del siglo XVIII los más eminentes discípulos del gran inglés: D'ALEMBERT, LAGRANGE, LAPLACE, que desarrollaron con los eficaces medios del análisis infinitesimal la doctrina newtoniana asegurando así su triunfo definitivo.

Desde la segunda mitad del siglo XVIII, la validez de la mecánica newtoniana ya no fué puesta más en duda, aunque las bases conceptuales de los *Principia* —en particular las nociones de espacio, de tiempo y de movimientos absolutos— fueron sometidas a fines del siglo pasado a una detenida crítica por HENRI POINCARÉ, ERNST MACH y otros. Finalmente, la imprescindible revisión de estos conceptos motivó en los años 1905 a 1916 la estructuración de la mecánica relativista de ALBERT EINSTEIN, que confirió a las leyes de la mecánica una expresión independiente de la elección del sistema de coordenadas. También el fenómeno de la gravitación recibió, en la nueva mecánica, una descripción distinta de la newtoniana, más general y más flexible. Sin embargo, lejos de desvirtuar la ley clásica, las concepciones formuladas en la teoría general de la relatividad contienen como caso especial la ley de NEWTON, y deja prácticamente intacta la posición central que ella sigue ocupando en la astronomía.

7. — Los *Principia* de NEWTON no señalan sólo una etapa decisiva en la exploración del mundo físico, sino que inician también una nueva época en el enfoque filosófico del conocimiento. LEONARDO DA VINCI y GALILEO habían afirmado que el magno libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático, pero fué NEWTON quien elevó este aserto a la jerarquía de una verdad pragmática magníficamente demostrada a través de los descubrimientos expuestos en los *Principia.* GALILEO había dado el primer ejemplo de una *ley* dinámica matemáticamente expresada, que abarcaba con una sola fórmula todo un conjunto de fenómenos; con NEWTON la joven ciencia experimental se amplía: aparece el primer paradigma de *teoría física,* reuniendo en una fórmula, ya no un conjunto de fenómenos sino un conjunto de leyes. La teoría científica se constituye con

NEWTON como una mera descripción matemática de los hechos, desprovista de la pretensión de ofrecer una explicación de los mismos. La totalidad de los ejemplos reunidos en el tercer libro de los *Principia*, concurre a demostrar que no es necesario conocer ni la naturaleza íntima, ni las causas de la atracción, para controlar y prever los fenómenos gravíficos. DESCARTES ya reprochaba a GALILEO que no podía explicar la naturaleza de la pesadez; LEIBNIZ objetó a NEWTON que ignoraba las causas de la gravitación. Empero, los siglos transcurridos desde la publicación de los *Principia* no tardaron en desmentir a DESCARTES y a LEIBNIZ: al ahondar la matematización de la descripción de los hechos observables, al eliminar la búsqueda de la esencia de la "cosa", al disminuir progresivamente la importancia de las explicaciones causales, la teoría científica ha seguido y sigue aún hoy el rumbo trazado por NEWTON.

Mas, las consecuencias epistemológicas representan sólo un aspecto —y no el más importante— de la poderosa influencia que le cupo ejercer a los *Principia* en la historia del pensamiento. La idea de concebir el mundo en términos mecánicos— idea insinuada por DESCARTES como un postulado, y evidenciada por GALILEO y por HUYGENS como una posibilidad más o menos lejana— se convierte con NEWTON en una magnífica realidad para un campo muy extenso de fenómenos. Los *Principia* mostraron con indiscutible éxito que una gran parte de la naturaleza inanimada puede ser interpretada por leyes mecánicas, y sugirieron que tales leyes podrían un día ser aplicadas a la totalidad del mundo. Toda la ciencia de los siglos XVIII y XIX y una parte de las corrientes filosóficas nacidas desde la época de NEWTON, llevan el inconfundible sello de la doctrina mecanicista que emana con deslumbrante claridad de las demostraciones y de los resultados de los *Principia*. Sin embargo, las leyes mecánicas que ha modificado, la ley de la gravitación universal que ha descubierto, en la concepción de NEWTON no son sino manifestaciones del poderío y de la sabiduría de Dios, "el Señor universal", cuya omnipresencia y eternidad constituyen el espacio y el tiempo,

como afirma con un fervor casi bíblico el gran físico en el solemne escolio final de los *Principia*.

Espíritu profundamente religioso, NEWTON estimaba que las leyes naturales y la revelación por las Sagradas Escrituras son expresiones equivalentes de la Divinidad. Su firme fe, así como su modestia frente a la Incógnita de la naturaleza y a las maravillosas manifestaciones naturales que él había logrado conocer, impidieron al genial investigador acercarse con razonamientos científicos a las primeras y últimas causas. Sin embargo, desconociendo la prudente reserva de NEWTON, los filósofos y mecanicistas franceses del siglo de la *Encyclopédie*, al continuar la obra del gran inglés, no vacilaron en sustituir la Divina Providencia por la ley de la gravitación universal, forjando así —cual ironía de la historia— el fundamento de una visión atea y materialista del mundo con ayuda de la mecánica de NEWTON, de fundamentos religiosos y espiritualistas.

FIG. 64. — Medalla conmemorativa con la efigie de NEWTON del año 1731.