I. Bernard Cohen

El nacimiento de la nueva física

Versión española de
Manuel Sellés García

Alianza
Editorial

Título original:
The Birth of a New Physics. Revised and Updated. Esta obra ha sido publicada en inglés por W. W. Norton & Company, New York.

Calle Milán, 38, 28043 Madrid; teléf. 200 00 45
ISBN: 84-206-2609-0
Depósito legal: M. 35 883-1989
Compuesto en Fernández Ciudad, S. L.
Impreso en Lavel. Los Llanos, nave 6. Humanes (Madrid)
Printed in Spain

A
Stillman Drake,
Paolo Galuzzi,
Richard S. Westfall y
Eric Aiton,
quienes han arrojado luz sobre
el pensamiento de
Galileo, Newton,
Kepler y
Leibniz

INDICE

PREFACIO

El nacimiento de la nueva física se ha escrito para el lector común, para estudiantes de enseñanzas medias o universitarias (bien sean de ciencias, filosofía o historia), para historiadores y filósofos y para cualquiera que desee comprender el carácter dinámico y aventurero de la ciencia. Espero que los mismos científicos puedan encontrar también placer y provecho aprendiendo acerca de las etapas que condujeron al clímax de la Revolución Científica, la producción de la mecánica newtoniana y la mecánica celeste.

El propósito de este libro no es el de presentar una historia popular de la ciencia ni exponer al lector común algunos de los resultados recientes de la investigación en historia de la ciencia. Antes bien, la intención es explorar un aspecto de esa gran Revolución Científica que acaeció durante los siglos XVI y XVII, clarificar ciertos rasgos fundamentales de la naturaleza y desarrollo de la ciencia moderna. Un tema importante es el efecto que la estructura estrechamente vinculada de las ciencias físicas tiene sobre la formación de una ciencia del movimiento. Desde el siglo XVII hemos visto una y otra vez que una modificación importante en cualquier parte de las ciencias físicas ha de producir con el tiempo cambios en todas las demás; otra consecuencia es la imposibilidad general de probar o demostrar una afirmación científica aislada, o exclusivamente en sí misma, al ser cada prueba más bien una verificación de la proposición particular bajo discusión juntamente con todo el sistema de la ciencia física.

La característica principal, tal vez única, de la ciencia moderna es su aspecto dinámico, la manera en que los cambios acontecen constantemente. Desgraciadamente, las necesidades de presentación lógica en los libros de texto elementales y las obras generales sobre ciencia impiden al estudiante y al lector obtener una idea precisa de esta particular propiedad dinámica. De aquí que otro de los principales objetivos de este libro sea tratar de indicar la fuerza penetrante y el profundo efecto que una sola idea puede tener en la alteración de toda la estructura de la ciencia.

Debido a que este libro no es una historia de la ciencia, sino más bien un ensayo histórico acerca de uno de los mayores episodios en el desarrollo de la ciencia, no se ocupa plenamente de cada aspecto del nacimiento de la dinámica o astronomía modernas. Por ejemplo, la reforma de Tycho Brahe de la astronomía observacional se menciona sólo de pasada, así como la concepción de Kepler del movimiento y de sus causas. Un tema que no se trata en absoluto es el sistema filosófico cartesiano, incluyendo la idea de un sistema cosmológico basado en vórtices. En muchos sentidos, la ciencia cartesiana representa la parte más revolucionaria de la nueva ciencia del siglo XVII Otras figuras principales cuyo trabajo tendría que ser incluido en una historia completa son Christiaan Huygens y Robert Hooke.

Quisiera agradecer mi deuda intelectual con Alexandre Koyré, de la École Pratique des Hautes Études (París) y el Institute for Advanced Study (Princeton), nuestro maestro en el especializado arte del análisis histórico conceptual. Majorie Hope Nicolson (Universidad de Columbia) nos ha hecho conscientes del vasto significado intelectual de la «nueva astronomía», y particularmente de los descubrimientos telescópicos de Galileo. Durante más de una década, para mi mayor deleite y provecho, pude discutir muchos de los problemas de la ciencia medieval con Marshall Clagett (Universidad de Wisconsin, Institute for Advanced Study), y más recientemente con John E. Murdoch (Universidad de Harvard) y Edward Grant (Universidad de Indiana). Durante casi cuatro décadas me he beneficiado de las críticas de Edward Rosen (Universidad de la Ciudad de Nueva York) junto con sus eruditas contribuciones. Más recientemente me he formado una nueva idea de la ciencia copernicana gracias a Noel Swerdlow (Universidad de Chicago). He aprendido mucho de Albert Van Helden (Universidad de Rice) acerca de la historia y primeros usos del telescopio. Me siento especialmente obligado con Stillman Drake, quien a lo largo de los años ha sido más generoso de lo común permitiéndome conocer sus estudios galileanos no publicados y respondiendo a mis preguntas, y que ha realizado una lectura crítica del

manuscrito de este libro, primero en su edición original de hace veinticinco años y ahora, de nuevo, en su revisión.

La primera edición de *El nacimiento de la nueva física,* dedicada a mi hija, la doctora Frances B. Cohen, se escribió para las Science Series, parte de una nueva aproximación a la enseñanza, el estudio y la comprensión de la física creada por el Physical Science Study Committee, encabezado por Jerrold Zacharias y el difunto Francis L. Friedman, del M.I.T. La preparación de esa edición fue facilitada de todas las formas imaginables por el personal del P.S.S.C. (especialmente Bruce Kingsbury); en particular, encontré en John H. Durston un amable editor que me ayudó a reducir mi labor a proporciones manejables. Continúo estando especialmente satisfecho de que las fotografías reproducidas como las láminas VI y VII fueran realizadas específicamente para este libro por mi antigua maestra y en otro tiempo estudiante Berenice Abbott, uno de los grandes fotógrafos de América.

La primera edición ha sido impresa y reimpresa muchas veces, y ha sido traducida al danés, finlandés, francés, alemán, hebreo, italiano, japonés, polaco, español, sueco y turco. La más reciente de estas versiones, en italiano, ha sido revisada y enmendada considerablemente (incluyendo algunas correcciones presentadas a mi atención por Edward Rosen). Ahora, tras un intervalo de unos veinticinco años, el libro ha sido actualizado para tomar en consideración desarrollos y descubrimientos en la historia de la ciencia, principalmente con respecto a Galileo, pero también con respecto a Newton. Muchas de las correcciones y materiales nuevos se han insertado en el texto, pero otros habrían ocasionado serios desequilibrios y destruido el ritmo narrativo del original. Así, pues, estos últimos han sido incorporados en una serie de apéndices numerados, remitidos en el texto, que amplían ciertos puntos cruciales de estudio y comprensión, y que son esenciales para un juicio equilibrado relativo a algunos de los episodios más significativos en el inicio de la existencia de la ciencia física moderna.

Aparte de los apéndices, la diferencia más notable entre la primera edición y la actual reside en el tratamiento de Galileo. Durante el intervalo entre las ediciones hemos averiguado (inicialmente gracias a la audaz reproducción llevada a cabo por Thomas B. Settle de uno de los experimentos más famosos de Galileo) que las experiencias descritas por Galileo pueden arrojar efectivamente los resultados que declara. Por lo tanto, se ha producido un desplazamiento considerable en la opinión especializada. Ya no se cree que Galileo se inclinó por describir únicamente «experimentos mentales», los cuales nunca realizó o no pudo haber realizado en la forma en que los describió.

Antes bien, hemos llegado a ver a Galileo como un maestro del arte experimental. En segundo lugar, gracias, en la mayor medida, a los esfuerzos especializados de Stillman Drake, hemos descubierto la importancia crucial de los experimentos en la formulación y prueba (y aun su descubrimiento) por Galileo de las ideas básicas sobre el movimiento.

Me siento muy feliz de que esta nueva edición sea publicada por W. W. Norton & Company. Estoy agradecido a Edwin Barber, un vicepresidente, por su interés en mi trabajo. Es bueno saber que el mundo de la edición y venta del libro aún conserva un lugar para un editor «veterano» al que le gustan los libros y los autores.

I. BERNARD COHEN

Universidad de Harvard
Cambridge, Mass.

18 de septiembre de 1984

EL
NACIMIENTO
DE
LA NUEVA FISICA

Capítulo 1

LA FISICA DE UNA TIERRA MOVIL

Por extraño que pueda parecer, los puntos de vista que tienen muchas personas sobre el movimiento forman parte de un sistema de física que fue propuesto hace más de dos mil años y que se mostró experimentalmente inadecuado hace por lo menos mil cuatrocientos años. Es una cuestión de hecho que hombres y mujeres presumiblemente cultos se inclinan todavía hoy a pensar sobre el mundo físico como si la Tierra estuviese en reposo, en lugar de en movimiento. Con esto no quiero decir que estas personas «realmente» piensen que la Tierra está en reposo; si se les pregunta responderán que de hecho «saben» que la Tierra describe una revolución diaria en torno a su eje y que, al mismo tiempo, se mueve en una gran órbita anual alrededor del Sol. Aun cuando llegan a explicar ciertos sucesos físicos comunes, estas mismas personas no son capaces de explicar cómo es que pueden suceder estos fenómenos cotidianos, tal y como ocurren, sobre una Tierra móvil. En particular, estos errores de física tienden a centrarse sobre el problema de la caída de los cuerpos, sobre el concepto general de movimiento. Podemos ver así ejemplificado el viejo precepto: «Ser ignorante acerca del movimiento es ser ignorante acerca de la naturaleza.»

¿Dónde caerá?

En la incapacidad de enfrentarse a cuestiones de movimiento en relación con la Tierra móvil, el individuo medio está en la misma situación que algunos de los más grandes científicos del pasado, lo cual puede ser una considerable fuente de consuelo. La principal diferencia está, no obstante, en que para el científico del pasado la incapacidad de resolver estas cuestiones era un signo de los tiempos, mientras que para nuestros modernos tal incapacidad es, desgraciadamente, un indicio de ignorancia. Característico de estos problemas es un grabado del siglo XVII (Lámina 1) que muestra un cañón apuntando al aire. Observe la cuestión que plantea, «*Retombera-t-il?*» (¿Volverá a caer en el mismo sitio?). Si la Tierra está en reposo, no hay duda de que la bala disparada verticalmente en el aire debería finalmente volver directamente de nuevo al interior del cañón. Pero ¿qué sucedería sobre una Tierra móvil? ¿Y por qué? El grabado ilustra en realidad un problema aún más complejo de movimiento. Aquí sólo necesitamos advertir que la naturaleza de la trayectoria de un cuerpo o proyectil arrojado o dejado caer verticalmente fue contemplada muy pronto como uno de los obstáculos intelectuales a la hora de aceptar la idea de que la Tierra se mueve.

Suponga que la Tierra está en movimiento. Entonces una flecha disparada al aire debe moverse junto con la Tierra mientras asciende y más tarde desciende; de otro modo, encontraría a la Tierra a mucha distancia del arquero. Una respuesta tradicional inmediata es que el aire debe moverse con la Tierra y que, por tanto, la flecha, en su ascenso y descenso, es arrastrada con él. Pero los oponentes tenían una réplica disponible: Aun si se supusiera que el aire se mueve —una suposición difícil, puesto que no hay causa aparente para que el aire se mueva con la Tierra—, ¿no podría moverse mucho más lentamente que la Tierra, ya que es tan distinto en esencia y en cualidad? De aquí que, en cualquier caso, ¿no podría quedar atrás la flecha? ¿Y qué sucede con los fuertes vientos que un hombre en una torre experimentaría si la Tierra estuviera precipitándose a través del espacio?

Para ver más nítidamente estos problemas podemos ignorar por un momento a la Tierra misma. Después de todo, el hombre y la mujer medios podrían muy bien replicar: Yo no soy capaz de explicar *cómo* una bola soltada desde una torre chocará contra el suelo al pie de la misma aun a pesar de que la Tierra esté moviéndose. Pero *sí sé* que una bola que se deja caer desciende verticalmente y *sí sé* que la Tierra está en movimiento. Por tanto, *debe* existir alguna explicación, aun cuando no sepa cuál es.

Ocupémonos entonces de otra situación completamente distinta. Simplemente suponga que somos capaces de construir algún tipo de vehículo que se mueva muy rápidamente —tan rápidamente que alcance una velocidad de aproximadamente 30 kilómetros por segundo—. Un experimentador está en el extremo de este vehículo, sobre una plataforma de observación en el último vagón, si se trata de un tren. Mientras el tren se precipita hacia adelante a una velocidad de 30 kilómetros por segundo, toma de su bolsillo una bola de hierro de alrededor de medio kilo de peso y la arroja verticalmente al aire hasta una altura de 5 metros. El ascenso dura alrededor de un segundo, y la bola invierte otro segundo en caer. ¿Cuán lejos se ha desplazado el hombre en el extremo del tren? Puesto que su velocidad es de 30 kilómetros por segundo, habrá viajado 60 kilómetros desde el lugar donde arrojó la bola al aire.

Estamos en una posición parecida a la del hombre que trazó el grabado de un cañón disparando una bala al aire. Preguntamos: ¿Dónde caerá? ¿Encontrará la vía en o muy cerca del lugar desde el que fue arrojada? ¿O bien, de un modo u otro, llegará tan cerca de las manos del hombre que la lanzó que éste sería capaz de recogerla, aun a pesar de que su tren está moviéndose a una velocidad de 30 kilómetros por segundo? Si responde que la bola encontrará a la vía algunas millas por detrás del tren, entonces claramente no entiende la física de la Tierra en movimiento. Pero si cree que el hombre en el extremo posterior del tren podrá recoger la bola, entonces tendrá que afrontar esta cuestión: ¿Qué «fuerza» hace que la bola se mueva hacia adelante a una velocidad de 30 kilómetros por segundo a pesar de que el hombre que la lanza le imprime una fuerza hacia arriba y no a lo largo de la vía? (Quienes puedan sentirse preocupados por las posibilidades de la fricción del aire pueden imaginar que el experimento se lleva a cabo en el interior de un vagón cerrado del tren.)

La idea de que una bola lanzada hacia arriba desde el tren en movimiento continuará moviéndose a la ida y a la vuelta sobre una trayectoria vertical, así como la de que caerá sobre la vía en un punto alejado por detrás del tren, están estrechamente relacionadas con otra idea sobre los objetos en movimiento. Ambas forman parte del sistema de física de hace unos dos mil años. Vamos a examinar por un momento este segundo problema, ya que sucede que las mismas personas que no entienden cómo los objetos parecen caer verticalmente sobre una Tierra móvil, tampoco están completamente seguras de lo que sucede cuando caen objetos de distinto peso. Cada cual es consciente, de hecho, de que la caída de un cuerpo en el aire depende de su forma. Esto puede demostrarse fácilmente si hace un paracaídas con un pañuelo, anudando las cuatro puntas del pañuelo a cuatro trozos de cordel y sujetándolos juntos a un pequeño peso. Enrolle este paracaídas en una bola, láncelo al aire y observará que descenderá pausadamente. Pero ahora enróllelo de nuevo en una bola, tome un trozo de hilo de seda y átelo en torno al pañuelo y al peso de modo que el pañuelo no pueda abrirse en el aire y, como observará, el mismo objeto caerá a plomo al suelo. Cuerpos del mismo peso, pero de distinta forma caen con diferentes velocidades. Pero ¿qué sucede con objetos de la misma forma, pero de distinto peso? Suponga que fuera a la cima de una alta torre, o al tercer piso de un edificio, y que dejase caer desde esa altura dos objetos de forma idéntica, bolas esféricas, una que pese 10 kilos y la otra 1 kilo. ¿Cuál llegaría primero al suelo? ¿Y cuán rápido lo alcanzaría? Si la relación entre los dos pesos, en este caso un factor de 10 a 1, marca una diferencia, ¿se observaría la misma diferencia en el tiempo de caída si los pesos fueran, respectivamente, de 10 y 100 kilos? ¿Y qué sucedería si fuesen de 1 y 10 miligramos?

Respuestas alternativas

La progresión usual en el conocimiento de la física procede, aproximadamente, así: Primero, existe la creencia de que si las bolas de 1 y 10 kilos se sueltan simultáneamente, la bola de 10 kilos llegará primero al suelo, y que la bola de 1 kilo tardará diez veces más en alcanzar el suelo que la bola de 10 kilos. Sigue entonces una etapa de mayor sofisticación, en la cual el estudiante probablemente ha aprendido de un libro de texto elemental que la anterior conclusión está injustificada, que la «verdadera» respuesta es que ambas llegarán al suelo al mismo tiempo, sean cuales fueren sus pesos respectivos. La primera respuesta puede denominarse «aristotélica», debido a que concuerda con los principios físicos que el filósofo griego Aristóteles formuló unos 350 años antes del inicio de la era cristiana. La segunda ejemplifica el criterio del «libro de texto elemental», puesto que se encuentra en muchos de tales libros. Hasta se dice en ocasiones que este segundo parecer fue «probado» en el siglo XVII por el científico italiano Galileo Galilei. Una versión típica de esta historia es que Galileo «hizo que unas bolas de distintos tamaños y materiales cayesen en el mismo instante desde lo alto de la Torre Inclinada de Pisa. Vieron [sus amigos y colegas] a las bolas iniciar juntas la caída y caer juntas, y las oyeron golpear conjuntamente el suelo. Algunos quedaron convencidos; otros volvieron a sus habitaciones para consultar los libros de Aristóteles discutiendo la evidencia».

Tanto el parecer aristotélico como el del «libro de texto elemental» están equivocados, como ha sido demostrado por el experimento desde hace al menos 1.400 años. Retrocedamos al siglo VI, cuando Juan Filopón (o Juan el Gramático), un erudito bizantino, estaba estudiando esta cuestión. Filopón arguyó que la experiencia contradice las opiniones sostenidas comúnmente sobre la caída. Adoptando lo que podríamos llamar una posición bastante «moderna», dijo que un argumento basado sobre la «observación real» es mucho más efectivo que «cualquier tipo de argumento verbal». He aquí su argumento basado en el experimento:

> Si dejas caer desde la misma altura dos pesos de los cuales uno es muchas veces más pesado que el otro, verás que la proporción de los tiempos requeridos para el movimiento no depende de la proporción de los pesos, sino que la diferencia en tiempo es una muy pequeña. Y así, si la diferencia en los pesos no es considerable, esto es, si uno es, digamos, doble que el otro, no habrá diferencia de tiempo, o ésta será imperceptible, a pesar de que la diferencia en peso no es de ningún modo despreciable, con un cuerpo que pesa tanto como el doble que el otro.

En esta afirmación encontramos una prueba experimental de que el parecer «aristotélico» está equivocado, debido a que los objetos que difieren grandemente en peso, o aquellos que difieren en peso en un factor de dos, llegarán al suelo casi al mismo tiempo. Pero observe que Filopón también sugiere que el parecer del «libro de texto elemental» puede ser incorrecto, porque ha encontrado que los cuerpos de distinto peso pueden caer desde la misma altura en tiempos ligeramente diferentes. Tales diferencias pueden ser tan pequeñas como para tornarse «imperceptibles». Un milenio más tarde, el ingeniero, físico y matemático flamenco Simon Stevin realizó un experimento similar. Su informe dice:

> La experiencia contra Aristóteles es la siguiente: Tomemos (como el muy docto Mr. Jan Cornets de Groot, diligentísimo investigador de los secretos de la naturaleza, y yo mismo hemos hecho), dos esferas de plomo, una diez veces mayor y más pesada que la otra, y dejémoslas caer juntas desde una altura de 30 pies sobre un tablero o algo sobre lo cual produzcan un sonido perceptible. Se encontrará entonces que la más ligera no se demorará en su camino diez veces más que la más pesada, sino que caerán juntas sobre el tablero tan simultáneamente que sus dos sonidos parecerán ser uno y el mismo golpe.

Stevin estaba obviamente más interesado en demostrar que Aristóteles estaba equivocado que en tratar de discernir si había una muy ligera diferencia, la cual podría haberse acentuado un tanto si hubiera dejado caer los pesos desde una altura mayor. Por tanto, su informe no es tan preciso como el que Filopón dio a fines del siglo VI. No tomó en consideración la pequeña, aunque quizá con frecuencia «imperceptible», diferencia en tiempo.

Galileo, quien realizó este experimento en particular con mayor cuidado que Stevin, informó definitivamente:

> Pero yo ... que he hecho la prueba puedo asegurar que una bala de cañón, que pesa uno o dos centenares de libras, o más, alcanzará el suelo apenas un instante por delante de una bala de mosquete que pesa sólo medio onza, con tal que ambas se dejen caer desde una altura de 200 codos ... la mayor aventaja a la menor dos pulgadas, es decir, cuando la mayor ha alcanzado el suelo, la otra está a dos pulgadas del mismo.

La necesidad de una nueva física

¿Qué tiene que ver, puede todavía preguntarse, la velocidad relativa de la caída de objetos ligeros y pesados con un sistema del mundo en el que la Tierra está en movimiento o con los primeros sistemas en los cuales la Tierra estaba en reposo? La respuesta está en el hecho de que el viejo sistema de física asociado con el nombre de Aristóteles era un sistema completo de ciencia desarrollado para un universo en cuyo centro la Tierra está en reposo; por tanto, derrocar ese sistema poniendo la Tierra en movimiento requirió una nueva física. Naturalmente, si pudiera mostrarse que la vieja física era inadecuada, o que conducía a conclusiones erróneas, se tendría un argumento muy poderoso para rechazar el antiguo sistema del universo. A la inversa, para hacer aceptar a la gente un nuevo sistema sería necesario proveer para el mismo una nueva física.

Supongo, de hecho, que usted, el lector de este libro, acepta el punto de vista «moderno», que sostiene que el Sol está en reposo y que los planetas se mueven a su alrededor. Por el momento no vamos a inquirir lo que queremos decir al afirmar «El Sol está en reposo», o cómo podemos probarlo, sino que simplemente nos concentraremos en el hecho de que la Tierra está en movimiento. ¿Cuán rápido se mueve? La Tierra gira en torno a su eje una vez cada 24 horas. En el ecuador, la circunferencia de la Tierra es aproximadamente de 40.000 kilómetros, y por tanto la velocidad de rotación de un observador situado en el ecuador terrestre es de unos 1.660 kilómetros por hora. Esto supone una velocidad lineal de alrededor de 460 metros por segundo. Conciba el siguiente experimento. Una piedra se lanza al aire verticalmente hacia arriba. El tiempo durante el que sube es, digamos, dos segundos, mientras que para su descenso se requiere una duración similar. Durante cuatro segundos la rotación de la Tierra desplazará el lugar desde el que fue lanzado el objeto a una distancia de unos 1.850 metros, un poco menos de dos kilómetros. Pero la piedra no encuentra a la Tierra a esta distancia; cae muy cerca del punto desde el que fue lanzada. Preguntamos: ¿Cómo es posible esto? ¿Cómo puede estar girando la Tierra a esta tremenda velocidad de 1.660 kilómetros por hora sin que oigamos al viento silbar a medida que la Tierra deja el aire tras ella? O, para tomar otra de las objeciones clásicas a la idea de una Tierra en movimiento, considere un pájaro posado sobre la rama de un árbol. El pájaro ve un gusano en el suelo y se arroja del árbol. Mientras tanto la Tierra va girando a esta enorme marcha, y el pájaro, a pesar de aletear todo lo que puede, nunca cobrará suficiente velocidad para apropiarse del gusano —a menos que el gusano esté situado al oeste. Pero es un hecho de observación que los pájaros vuelan desde los árboles al suelo y comen gusanos que están tanto al este como al oeste. A menos que usted pueda orientarse con claridad a través de estos problemas sin un momento de vacilación, no vive realmente con plenitud la física moderna, y para usted la aserción de que la Tierra gira en torno a su eje una vez cada 24 horas no tiene verdaderamente *pleno significado físico.*

Si la rotación diaria presenta un serio problema, piense en el movimiento anual de la Tierra en su órbita. Es relativamente simple calcular la velocidad con la que la Tierra se mueve en su órbita alrededor del Sol. Hay 60 segundos en un minuto y 60 minutos en una hora, o 3.600 segundos en una hora. Multiplique este número por 24 para obtener 86.400 segundos en un día. Multiplique esto por 365 ¼ días, y el resultado será algo más de 30 millones de segundos en un año. Para encontrar la velocidad a la que se mueve la Tierra alrededor del Sol, tenemos que calcular la longitud de la órbita terrestre y dividirla por el tiempo que tarda la Tierra en completarla. Esta trayectoria es aproximadamente un círculo con un radio de unos 150 millones de kilómetros, y una circunferencia de unos 900.000.000 de kilómetros (la circunferencia es igual al radio multiplicado por 2π). Esto equivale a decir que la Tierra se mueve a través de unos 900.000.000.000 de metros cada año. La velocidad de la Tierra es entonces

$$\frac{900.000.000.000 \text{ metros}}{30.000.000 \text{ segundos}} = 30.000 \text{ metros/seg.}$$

Cada una de las cuestiones suscitadas sobre la Tierra en movimiento puede ser planteada de nuevo de forma ampliada con respecto a una Tierra moviéndose en una órbita. Esta velocidad de 30.000 metros por segundo, o de 30 kilómetros por segundo, nos muestra la gran dificultad encontrada al principio del capítulo. Preguntémonos esta cuestión: ¿Es posible que nos movamos a una velocidad de 30 kilómetros por segundo sin ser conscientes de ello? Supongamos que dejamos caer un objeto desde una altura de 5 metros; le tomaría alrededor de un segundo llegar al suelo. De acuerdo con nuestro cálculo, mientras este objeto estaba cayendo, la Tierra tendría que haber estado desplazándose rápidamente por debajo, ¡y el objeto llegaría al suelo como a unos 30 km del punto desde el que se dejó caer! Y en cuanto a los pájaros sobre los árboles, si un pájaro agarrado desesperadamente a una rama se suelta por un instante, ¿no se perdería para siempre en el espacio? Con todo, el hecho es que los pájaros no están perdidos en el espacio, sino que continúan habitando la Tierra y sobrevolándola con sus alegres trinos.

Estos ejemplos nos muestran cuán difícil es en realidad afrontar las consecuencias de una Tierra en movimiento. Es evidente que nuestras ideas comunes son inadecuadas para explicar los hechos de la experiencia cotidiana observados sobre una Tierra que está girando o moviéndose en su órbita. No cabe dudar, por tanto, que el cambio desde el concepto de una Tierra estacionaria a una Tierra en movimiento implicó necesariamente el nacimiento de una nueva física.

Capítulo 2

LA VIEJA FISICA

A la vieja física se la conoce a veces como la física del sentido común, debido a que es la física en la que cree la mayor parte de la gente y de acuerdo con la que actúa intuitivamente. Es el tipo de física que parece atractiva a cualquiera que usa su inteligencia natural, pero que no ha sido educado en los principios modernos de la dinámica. Sobre todo, se trata de una física que está particularmente bien adaptada a los conceptos de una Tierra en reposo. Algunas veces se conoce como física aristotélica, debido a que la principal exposición de la misma en la antigüedad procede del filósofo-científico Aristóteles, *quien vivió en Grecia en el* siglo IV a.C. Aristóteles fue un discípulo de Platón, y fue él mismo tutor de Alejandro Magno, el cual, al igual que Aristóteles, procedía de Macedonia.

La física del sentido común de Aristóteles

Aristóteles fue una figura importante en el desarrollo del pensamiento, y no sólo por sus contribuciones a la ciencia. Sus escritos sobre política y economía son obras maestras, y sus trabajos sobre ética y metafísica desafían todavía a los filósofos. A Aristóteles se le ve como el fundador de la biología; Charles Darwin le rindió homenaje hace un centenar de años: «Cuvier y Linneo han sido en muchos sentidos mis dos dioses, pero ninguno de ellos llega a la suela de los zapatos del viejo Aristóteles.» Fue Aristóteles quien primero introdujo el concepto de clasificación de los animales, y también quien llevó a una alta cota el método de observación controlada en las ciencias biológicas. Uno de los temas que estudió fue la embriología del polluelo; su ambición era descubrir la secuencia del desarrollo de los órganos. Abrió metódicamente en días sucesivos huevos de polluelo fertilizados, y realizó cuidadosas comparaciones para descubrir las etapas a través de las cuales se desarrolla el polluelo desde un embrión informe a un joven pollo perfectamente formado. También fue el primero en formalizar el proceso de razonamiento deductivo, en la forma del silogismo:

Todos los hombres son mortales.
Sócrates es un hombre.
Por consiguiente, Sócrates es mortal.

Aristóteles señaló que lo que hace de tal conjunto de tres afirmaciones una progresión válida no es el contenido particular de «hombre», «Sócrates», y «mortal», sino su forma. Otro ejemplo: todos los minerales son pesados, el hierro es un mineral, por tanto el hierro es pesado. Esta es una de las muchas formas válidas de silogismo que describió en su gran tratado sobre lógica y razonamiento, que abarcaba tanto la deducción como una forma de inducción.

Aristóteles también subrayó la importancia de la observación en las ciencias, especialmente en la astronomía. Por ejemplo, entre los muchos argumentos que formuló para probar que nuestro planeta es más o menos una esfera, se hallaba la forma de la sombra proyectada por la Tierra sobre la Luna, tal como se observa durante un eclipse. Si la Tierra es una esfera, entonces la sombra que proyecta es un cono; así cuando la Luna entra en la sombra de la Tierra, la forma de esta sombra será siempre aproximadamente circular.

La importancia de la observación puede verse claramente en la descripción de Aristóteles del arco iris producido por la Luna:

> El arco iris se ve de día, y antiguamente se pensaba que nunca aparecía de noche como un arco iris de la Luna. Esta opinión se debía a la rareza del acontecimiento; no fue observado porque, aunque sucede, lo hace muy raramente. La razón es que los colores no son fáciles de ver en la oscuridad y que deben coincidir muchas otras condiciones, y todo esto en un solo día del mes. Para que haya un arco iris de Luna debe ser Luna llena, y además sólo cuando la Luna está saliendo o poniéndose. De modo que hemos conocido sólo dos casos de un arco iris lunar en más de cincuenta años.

Estos ejemplos bastan para mostrar que Aristóteles no puede describirse simplemente como un «filósofo de sillón». Es cierto, sin embargo, que no sometió cada afirmación a la prueba del experimento. Indudablemente daba crédito a lo que había oído contar a sus maestros, del mismo modo que generaciones sucesivas creyeron lo que había dicho Aristóteles. A menudo se toma esto como base para criticar como científico tanto a Aristóteles como a sus sucesores. Pero se debería tener presente que los estudiantes nunca verifican todas las afirmaciones que leen, ni aún la mayor parte de ellas, especialmente aquellas halladas en los libros de texto o manuales. La vida es demasiado corta.

El movimiento «natural» de los objetos

Vamos a examinar ahora las afirmaciones de Aristóteles sobre el movimiento. Para su discusión era fundamental el principio de que todos los objetos que encontramos en esta Tierra están constituidos por «cuatro elementos», aire, tierra, fuego y agua. Estos son los «elementos» de los que hablamos en la conversación ordinaria cuando decimos que alguien afuera, en una tormenta, ha «desafiado a los elementos». Queremos decir que tal persona ha estado en un huracán, en un vendaval de polvo, una tempestad, etc., no que se ha esforzado a través de un tornado de hidrógeno puro o de fluor. Aristóteles observó que algunos objetos de la Tierra parecen ser ligeros y otros parecen ser pesados. Atribuyó la propiedad de ser pesado o ligero a la proporción en cada cuerpo de los distintos elementos —siendo la tierra «naturalmente» pesada y el fuego «naturalmente» ligero, y el agua y el aire intermedios entre estos dos extremos. ¿Cuál, preguntó, es el movimiento «natural» de tales objetos? Respondió que si un cuerpo es pesado, su movimiento natural será hacia abajo, mientras que si es ligero, su movimiento natural será hacia arriba. El humo, al ser ligero, asciende en derechura hacia arriba a menos que sea arrastrado por el viento, mientras que una piedra, una manzana, o un pedazo de hierro descienden verticalmente cuando se sueltan. Por consiguiente, para Aristóteles, el movimiento «natural» (o sin impedimento) de un objeto terrestre es ascendente o descendente, calculándose el arriba y el abajo a lo largo de una línea recta trazada desde el centro de la Tierra a través del observador.

Aristóteles, por supuesto, fue consciente de que muy a menudo los objetos se mueven de maneras distintas a las que se acaban de describir. Por ejemplo, una flecha disparada desde un arco inicia aparentemente su vuelo en una línea recta que es más o menos perpendicular a una línea trazada desde el centro de la Tierra hasta el observador. Una bola en el extremo de una cuerda puede ser volteada en un círculo. Una piedra puede ser lanzada verticalmente hacia arriba.

Tal movimiento, de acuerdo con Aristóteles, es «violento» o contrario a la naturaleza del cuerpo. Dicho movimiento acontece sólo cuando alguna fuerza está actuando para iniciar y mantener al cuerpo moviéndose contrariamente a su naturaleza. Una piedra atada con una cuerda se puede levantar y así someter a un movimiento violento, pero en el momento en que la cuerda se rompa comenzará a caer con un movimiento natural, buscando su lugar natural.

Vamos a considerar ahora el movimiento de objetos celestes: las estrellas, los planetas, y el mismo Sol. Estos cuerpos parecen moverse en círculos alrededor de la Tierra, saliendo por el este el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas, viajando a través del cielo, y poniéndose por el oeste (excepto aquellas estrellas circumpolares que se mueven en pequeños círculos, y que nunca se ocultan por debajo del horizonte). De acuerdo con Aristóteles, los cuerpos celestes no están hechos de los mismos cuatro elementos que los cuerpos terrestres. Están hechos de un «quinto elemento» o «éter». El movimiento natural de un cuerpo compuesto de éter es circular, de modo que el movimiento circular observado en los cuerpos celestes es su movimiento natural, acorde con su naturaleza, tal como el movimiento hacia arriba o hacia abajo en línea recta es el movimiento natural para un objeto terrestre.

Los cielos «incorruptibles»

En la filosofía aristotélica, los cuerpos celestes tienen una o dos propiedades más de interés. El éter del cual están hechos es un material que es inmutable o, para usar el viejo término, «incorruptible». Esto contrasta con los cuatro elementos que encontramos sobre la Tierra —están sometidos a cambio, es decir, son «corruptibles». Así, sobre la Tierra encontramos tanto «nacimiento» como «degradación» y «desaparición», al nacer y morir los seres. Pero en los cielos nada cambia nunca; todo permanece igual: las mismas estrellas, los mismos planetas eternos, el mismo Sol, la misma Luna. Los planetas, las estrellas y el Sol se consideraban «perfectos» y a lo largo de los siglos se compararon a menudo a eternos diamantes o piedras preciosas debido a sus cualidades inmutables. El único objeto celeste en el que podía detectarse algún tipo de cambio o «imperfección» era la Luna —pero la Luna, después de todo, es el cuerpo celeste más próximo a la Tierra, y se tenía como una especie de frontera entre la región terrestre del cambio (o corruptibilidad) y la región celeste de permanencia e incorruptibilidad.

Obsérvese que en este sistema todos los objetos celestes que circundan a la Tierra son más o menos semejantes y son todos distintos de la Tierra —en características físicas, composición, y «propiedades esenciales». Se puede entender así por qué la Tierra permanece en reposo sin moverse, mientras que todos los objetos celestes se mueven. Además, no sólo se decía que la Tierra no tenía «movimiento local», o movimiento de un lugar a otro, sino que tampoco se suponía que girase sobre su eje. La principal razón física para esto, según el viejo sistema, era que no es «natural» para la Tierra tener un movimiento circular; esto sería contrario a su naturaleza, ya se tratase de un movimiento orbital alrededor del Sol o de una rotación diurna sobre su propio eje.

Los factores del movimiento

Vamos a examinar ahora un poco más de cerca la física aristotélica del movimiento de cuerpos terrestres. En todo movimiento, decía Aristóteles, hay dos factores principales: la fuerza motriz, que denotaremos aquí por F, y la resistencia, que denotaremos por R. Para que exista movimiento, de acuerdo con Aristóteles, es necesario que la fuerza motriz sea mayor que la resistencia. Por lo tanto, nuestro primer principio del movimiento es

$$F > R \qquad [1]$$

es decir, la fuerza debe ser mayor que la resistencia. Vamos a explorar a continuación los efectos de distintas resistencias, manteniendo constante en todos los casos la fuerza motriz. Nuestro experimento se llevará a cabo con cuerpos en caída, cada uno de los cuales se dejará caer libremente, iniciando la caída a partir del reposo, a través de un medio resistente distinto. Para mantener las condiciones constantes, procuraremos que todos los cuerpos en caída sean esferas, de modo que el efecto de su forma sobre su movimiento sea el mismo. Por supuesto, Aristóteles era perfectamente consciente de que la velocidad de un objeto, a igualdad de todas las otras condiciones, depende en general de su forma, un hecho que ya hemos demostrado con nuestro paracaídas.

Ahora, el experimento. Se usan dos bolas idénticas, del mismo tamaño, forma y peso. Permitiremos a las dos caer simultáneamente, una a través del aire, la otra a través del agua. Para llevar a cabo este experimento se necesita un largo cilindro lleno de agua; sostenga las dos bolas una junto a otra, una sobre al agua y la otra a la misma altura, pero justo fuera de esta columna de agua (fig. 1). Cuando las suelte simultáneamente, verá que, sin lugar a dudas, la velocidad de la que se mueve a través del aire es muchísimo mayor que la de la que está cayendo a través del agua. Para probar que el resultado del experimento no deriva del hecho de que las bolas están hechas de acero o tengan un peso en particular, el experimento puede repetirse usando bolas de acero menores, o un par de bolas de vidrio o de latón, etc. En menor escala, cualquiera puede repetir este experimento utilizando dos «canicas» de vidrio y un vaso de whisky lleno de agua hasta el borde. Su resultado puede escribirse en una ecuación, mediante la cual expresamos el hecho de que, bajo circunstancias iguales, la velocidad en el agua (que ofrece gran resistencia o dificultad al movimiento) es menor que la velocidad en el aire (que no impide el movimiento tanto como el agua):

$$V \propto \frac{1}{R} \qquad [2]$$

es decir, que la velocidad es inversamente proporcional a la resistencia del medio a través del que se mueve el cuerpo. Es una experiencia común que el agua resiste al movimiento; cualquiera que haya intentado correr por el agua a la orilla de una playa sabe cuánto frena el agua su movimiento, en comparación con el aire.

Ahora llevaremos a cabo el experimento con dos cilindros, uno lleno de agua y el otro lleno de aceite (fig. 2). El aceite resiste al movimiento aún más que el agua; cuando se sueltan simultáneamente

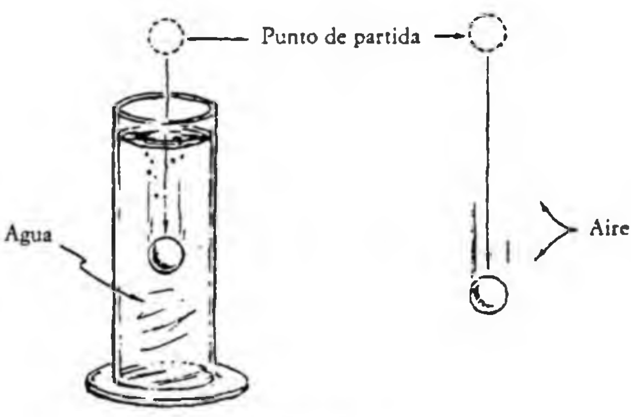


FIGURA 1

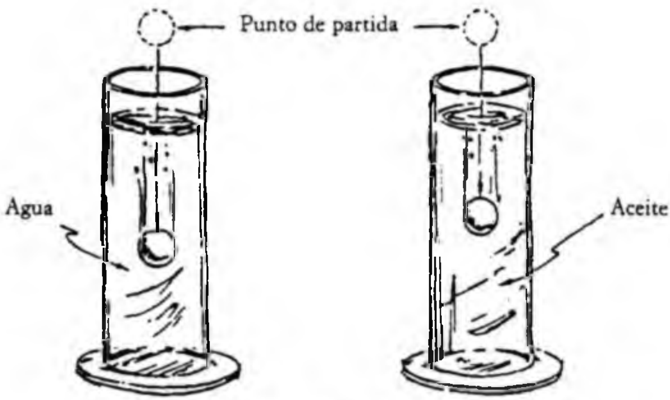


FIGURA 2

dos esferas idénticas de acero, la que pasa por el agua llega al fondo mucho antes que la que cae a través del aceite. Debido a que la resistencia R_{ac} del aceite es mayor que la resistencia R_{ag} del agua, podemos predecir ahora que, si cualquier par de objetos idénticos se deja caer a través de estos líquidos, el que cae por el agua recorrerá una altura dada más rápidamente que el que atraviesa el aceite. Esta predicción es fácil de verificar. Por consiguiente, como hemos hallado que la resistencia R_{ag} es mayor que la resistencia R_{ai} del aire

$$\begin{aligned} R_{ac} &> R_{ag} \\ R_{ag} &> R_{ai} \end{aligned} \qquad [3]$$

la resistencia del aceite tiene necesariamente que ser mayor que la del aire.

$$R_{ac} > R_{ai} \qquad [4]$$

También puede verificar esto repitiendo el experimento inicial con un cilindro lleno con aceite en vez de agua.

Vamos a considerar ahora los efectos de distintas fuerzas motrices. En este experimento usaremos de nuevo el cilindro largo lleno de agua. En él dejamos caer simultáneamente una bola de acero grande y otra pequeña. Encontramos que la bola grande, la más pesada de ambas, llega al fondo antes que la más ligera. Aquí, se puede argumentar, el tamaño podría tener algún efecto, pero si tiene alguno, la bola grande debería encontrar una resistencia mayor que la pequeña. Por lo tanto, el experimento podría servirnos como indicio de que, cuanto mayor la fuerza empleada para superar una resistencia dada, tanto mayor es la velocidad. Se puede repetir este experimento utilizando esta vez una bola de acero y otra de vidrio, de forma que ambas tengan exactamente el mismo tamaño, pero pesos distintos. Una vez más hallamos que la bola más pesada parece ser mucho más capaz de superar la resistencia del medio; así, llega primero al fondo o alcanza mayor velocidad. También es posible realizar el experimento con aceite y con varios otros líquidos —alcohol, leche, etc.— para llegar al mismo resultado general. En forma de ecuación, podemos constatar las conclusiones del experimento como sigue:

$$V \propto F \qquad [5]$$

es decir, siendo iguales todas las circunstancias restantes, cuanto mayor es la fuerza, tanto mayor es la velocidad.

Podemos combinar ahora la ecuación [2] con la ecuación [5] en una única ecuación como sigue:

$$V \propto \frac{F}{R} \qquad [6]$$

es decir,- la velocidad es proporcional a la fuerza motriz e inversamente proporcional a la resistencia del medio, o bien, la velocidad es proporcional a la fuerza dividida por la resistencia. Esta ecuación se conoce frecuentemente como la ley aristotélica del movimiento. Deberíamos señalar que el mismo Aristóteles no escribió sus resultados en forma de ecuaciones, una manera moderna para expresar este tipo de relaciones. Aristóteles y la mayoría de los primeros científicos, inclusive Galileo, preferían comparar velocidades con velocidades, fuerzas con fuerzas y resistencias con resistencias. Así, en vez de escribir la ecuación [5] como lo hemos hecho, habrían preferido la aserción

$$V_v : V_a : : F_v : F_a$$

El cociente de las velocidades de las bolas de vidrio y de acero se compara con el cociente de las fuerzas con las cuales estas bolas caen hacia abajo. Esto es equivalente a la constatación general de que la velocidad de la bola de vidrio es a la velocidad de la bola de acero como la fuerza motriz de la bola de vidrio a la fuerza motriz de la bola de acero.

Vamos a estudiar ahora la ecuación [6], a fin de descubrir algunas de sus limitaciones. Está claro que esta ecuación no se puede aplicar en general ya que, si la fuerza motriz fuese igual a la resistencia, la ecuación no daría el resultado de que la velocidad V es igual a cero; ni un resultado cero cuando la fuerza F es menor que la resistencia R. Por lo tanto, la ecuación [6] está sometida a la limitación arbitraria impuesta por la ecuación [1], y sólo es cierta cuando la fuerza es mayor que la resistencia. En otras palabras, la ecuación es una constatación limitada, y no universal, sobre las condiciones del movimiento.

Se ha dicho en ocasiones que esta ecuación pudo surgir del estudio de una balanza de brazos desiguales, digamos con pesos idénticos en los dos brazos, o quizás de una balanza de brazos iguales con pesos distintos en sus extremos. En este caso es imposible que F sea menor que R, ya que el peso mayor es siempre la fuerza motriz, mientras que el peso menor siempre es la resistencia. Además, tratándose de una balanza de brazos iguales, si $F=R$ no habrá movimiento.

La ley del movimiento tiene dos últimos aspectos que debemos introducir antes de abandonar el tema. El primero es que la ley en sí misma no nos dice nada sobre las etapas según las cuales un objeto que cae desde el reposo adquiere la velocidad V. La ley sólo nos dice algo acerca de la velocidad misma: Obviamente es algún tipo de velocidad «promedio» o velocidad «final», ya que simplemente se mide el intervalo de tiempo empleado en atravesar una distancia determinada

$$V \propto \frac{D}{T} \qquad [7]$$

lo cual es aplicable a una velocidad media o al movimiento a velocidad constante, pero no al acelerado o a velocidades que cambian constantemente. ¿No sabía Aristóteles que la velocidad de un cuerpo que está cayendo comienza desde cero y alcanza su valor final por etapas graduales?

El movimiento de los cuerpos que caen a través del aire

Quizá de mayor importancia para nosotros que cualquiera de los argumentos anteriores es el resultado de otro experimento. Hasta aquí nos hemos referido al tipo de experiencia positiva que nos haría confiar en la ley del movimiento de Aristóteles, pero hemos omitido un experimento muy crucial. Volvamos a considerar dos objetos del mismo tamaño y forma, pero de distinto peso, o de diferente fuerza motriz F. Hemos dicho que si éstos se dejasen caer simultáneamente en agua, o aceite, se observaría que el más pesado desciende más rápidamente. (El lector —antes de continuar con el resto de este capítulo y lo que queda del libro— encontrará interesante detenerse y realizar estos experimentos por sí mismo.) Llegamos ahora al último de esta secuencia de experimentos; consiste en dejar caer dos objetos del mismo tamaño, pero de diferente peso, en el mismo medio, que debe ser el *aire*. Vamos a suponer que el peso de uno de nuestros objetos es exactamente el doble que el peso del otro, lo que podría implicar, según el punto de vista antiguo, que la velocidad de objeto más pesado debería ser justamente el doble de la del más ligero. Para una altura de caída constante, la velocidad es inversamente proporcional al tiempo, así que

$$V \propto \frac{1}{T} \qquad [8]$$

o bien,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_2}{T_1} \qquad [9]$$

es decir, las velocidades son inversamente proporcionales a los tiempos de descenso. Por lo tanto, el tiempo de descenso de la bola más pesada debería ser exactamente la mitad del tiempo de descenso de la más ligera. Para llevar a cabo esta experiencia, póngase de pie sobre una silla y deje caer juntos los dos objetos de modo que golpeen el suelo desnudo. Una buena manera de dejarlas caer más o menos simultáneamente es sostenerlas horizontalmente entre los dedos índice y corazón de una mano. Entonces abra de repente los dedos, y las dos bolas empezarán a caer juntas. ¿Cuál es el resultado de este experimento?

En lugar de describirlo, permítame sugerirle que lo haga usted mismo. Luego compare su resultado con los obtenidos por Juan el Gramático y también con la descripción que hizo Stevin en el siglo XVI, y finalmente con la que nos facilitó Galileo en su famoso libro *Dos nuevas ciencias* hace unos 350 años (véase pp. 20-22 anteriores). Como Juan el Gramático, Stevin, Galileo y otros hallaron fácilmente, el experimento contradice las predicciones de la teoría aristotélica [1].

[1] Para distancias de caída relativamente cortas, digamos desde el techo al suelo de una habitación ordinaria, ambas bolas tocarán el suelo con un único

Una pregunta que se debería hacer en este punto es la siguiente: Evidentemente, la ecuación [6] no es válida para el aire, pero ¿lo sería en realidad para los otros medios que hemos explorado? Para averiguar si la ecuación [6] es o no es una aserción cuantitativamente correcta, pregúntese si era simplemente una definición de «resistencia» o, si hay alguna otra forma de medir la «resistencia», cómo se medirían las velocidades. ¿Será suficiente, para medir la velocidad, utilizar la ecuación [8] y medir el tiempo de caída? [2]

En cualquier caso, creo que la mayor parte de los lectores pensará que, a excepción del experimento de dos objetos desiguales cayendo a través del aire, el sistema aristotélico suena lo bastante razonable como para poder creerlo. No tenemos motivo para condenar demasiado a Aristóteles ni a cualquier físico aristotélico que jamás haya hecho el experimento de dejar caer simultáneamente dos objetos de peso desigual a través del aire.

La imposibilidad de una tierra en movimiento

Pero, se preguntará todavía, ¿qué tiene que ver todo esto con el tema de si la Tierra está en reposo en lugar de en movimiento? Busquemos la respuesta en el libro de Aristóteles *Sobre los cielos*. Aquí se encuentra la afirmación de que algunos han considerado a

---

golpe, a no ser que haya un «error de partida», un error que proviene de que las dos bolas no se soltaron simultáneamente. Se encontrará una ligera diferencia, tal como observaron Galileo y Juan el Gramático, para un mayor trayecto de caída.

[2] No sabemos cuántos científicos antes de Galileo y Stevin pueden haber realizado experimentos de caída de cuerpos. En un artículo sobre «Galileo and Early Experimentation» (en Rutherford Aris, H. Ted Davis, y Roger H. Stuewer, eds., *Springs of Scientific Creativity*, Minneapolis, University de Minnesota Press, 1983), Tomas B. Settle describe tales experimentos realizados por algunos italianos del siglo XVI. Benedetto Varchi, un florentino, escribió en un libro de 1544 que «Aristóteles y todos los otros filósofos» nunca dudaron, sino que «creyeron y afirmaron» que la velocidad de caída de un cuerpo está en razón de su peso, pero la «prueba Experimental [*prova*] ... demuestra que no es verdad». No está claro si Varchi hizo realmente el experimento o si estaba informando de un experimento hecho por otros, Fra Francesco Beato y Luca Ghini. Giuseppe Moletti, un matemático que ocupó el mismo puesto de profesor de matemáticas en Pisa que más tarde tuvo Galileo, escribió un tratado en 1576 en el que describió cómo había refutado la conclusión de Aristóteles, según la cual una bola de plomo de 20 libras que cae desde una torre tendría una velocidad 20 veces mayor que otra de una libra. «Ambas llegan al mismo tiempo», escribió Moletti, « y he hecho la prueba [*prova*] de ello, no una vez, sino muchas veces». Moletti también hizo un ensayo con bolas del mismo tamaño, pero de distinto material (y por tanto de distinto peso), una de plomo y otra de madera. Halló que, cuando se sueltan las dos simultáneamente desde un lugar alto, «descienden y llegan a tierra o al suelo en el mismo instante de tiempo».

la Tierra en reposo, mientras que otros han dicho que se mueve. Pero existen muchas razones por las cuales la Tierra no puede moverse. Según Aristóteles, para poseer una rotación alrededor de un eje, cada parte de la Tierra debería describir un círculo, sin embargo, el estudio del comportamiento real de sus partes muestra que el movimiento terrestre natural se produce en línea recta hacia el centro. «Por ello, el *movimiento, siendo impuesto* [*violento*] *y no natural*, no podría ser eterno; sin embargo, el orden del mundo es eterno.» El movimiento natural de todas las porciones de materia terrestre se dirige hacia el centro del universo, que da la casualidad de que coincide con el centro de la Tierra. Como «prueba» de que los cuerpos terrestres se mueven realmente hacia el centro de la Tierra, dice Aristóteles: «Observamos que los graves que se mueven hacia la tierra *no lo hacen en líneas paralelas*», sino que aparentemente forman un poco de ángulo entre sí. «Podemos añadir a nuestras razones anteriores», apunta después, «que los objetos pesados, si se arrojan con fuerza hacia arriba en línea recta, vuelven a su punto de partida, aun si la fuerza los lanza a una distancia ilimitada». Así, si un cuerpo se lanzara en derechura hacia arriba y entonces cayera directamente hacia abajo, calculando estas direcciones con respecto al centro del universo, no llegaría a la tierra exactamente en el punto desde el cual fue lanzado, si la Tierra se moviese durante el intervalo. Esto es una consecuencia directa de la cualidad «natural» del movimiento rectilíneo de los objetos terrestres.

Los argumentos precedentes muestran cómo se pueden aplicar los principios de Aristóteles sobre el movimiento natural y el violento (no natural) para demostrar la imposibilidad del movimiento terrestre. Pero ¿qué sucede con la «ley del movimiento» de Aristóteles, expresada en la ecuación [6] o en la ecuación [9]? ¿Cuál es su relación específica con el reposo de la Tierra? La respuesta está expresada claramente al principio del *Almagesto* de Ptolomeo, la antigua obra estándar sobre astronomía geocéntrica. Ptolomeo escribió, siguiendo los principios aristotélicos, «que si la Tierra tuviese un movimiento habría llegado en el proceso del descenso a adelantar a cualquier otro cuerpo que cayera, en virtud de su enorme exceso de tamaño, y habría dejado atrás flotando en el aire a los animales y a todos los pesos separados, mientras que la Tierra, por su parte, a esta gran velocidad se habría caído del mismo universo». Esto es una clara consecuencia de la noción de que los cuerpos caen con una velocidad proporcional a sus pesos respectivos. Y muchos científicos debieron estar de acuerdo con el comentario final de Ptolomeo: «Pero de hecho, esta sugerencia debe considerarse tan sólo para ver que es totalmente ridícula.»

Capítulo 3

LA TIERRA Y EL UNIVERSO

El año 1543 se considera, con mucha frecuencia, como el año del nacimiento de la ciencia moderna. En este año se publicaron dos importantes libros que provocaron cambios significativos en la concepción del hombre sobre la naturaleza y el mundo: uno era el *De revolutionibus orbium coelestium* [*Sobre las revoluciones de los orbes celestes*] del clérigo polaco Nicolás Copérnico, y el otro el *De la estructura del cuerpo humano,* del flamenco Andreas Vesalio. Este último trataba sobre el hombre desde el punto de vista de la observación anatómica exacta, y reintrodujo en la fisiología y la medicina el espíritu de empirismo que había caracterizado los escritos de los anatomistas y fisiólogos griegos, de entre los cuales el último y más importante sería Galeno. El libro de Copérnico introducía un nuevo sistema de astronomía, que se oponía a la noción generalmente aceptada de que la Tierra estaba en reposo. Aquí solamente pretendemos discutir ciertos rasgos determinados del sistema copernicano, sobre todo algunas consecuencias que surgen al considerar a la Tierra en movimiento. No nos detendremos en detallar las ventajas y desventajas relativas del sistema en su conjunto, ni tan siquiera haremos una comparación detenida de sus méritos con los del sistema anterior. Nuestro principal objeto es el de explorar qué consecuencias tuvo el concepto de una Tierra en movimiento para el desarrollo de una ciencia: la dinámica.

Copérnico y el nacimiento de la ciencia moderna

En la Grecia antigua se sugirió que la Tierra podría tener una rotación diaria sobre su eje, y completar una revolución anual sobre una enorme órbita alrededor del Sol. Propuesto por Aristarco en el siglo III a.C., este sistema fue rechazado frente a uno en el que la Tierra estaba en reposo. Había una gran oposición a la idea de que la Tierra pudiera moverse. Incluso cuando, casi 2000 años más tarde, Copérnico publicó su tratado sobre un sistema del universo basado en una combinación de los dos movimientos terrestres, no hubo aceptación inmediata. Con el tiempo, naturalmente, el libro de Copérnico mostró contener las semillas de toda la revolución científica que culminó en la magnífica fundamentación que dio Isaac Newton a la física moderna. Mirando hacia atrás, podemos ver cómo la aceptación del concepto copernicano de una Tierra en movimiento implicaba necesariamente una física no aristotélica. ¿Era ésta una consecuencia aparente para los contemporáneos de Copérnico? ¿Y por qué no llevó a cabo el mismo Copérnico esta revolución científica que transformó al mundo en una medida tal que todavía no somos completamente conscientes de todas sus consecuencias? En este capítulo exploraremos estas cuestiones, y veremos en particular por qué la propuesta de Copérnico de un sistema del mundo en el que la Tierra se mueve y el Sol está en reposo no era por sí sola suficiente para rechazar la vieja física.

Para empezar, debemos dejar claro que Copérnico (1473-1543) fue, en muchos aspectos, más un conservador que un revolucionario. Muchas de las ideas que introdujo ya había sido escritas, y una y otra vez le impidió avanzar el hecho de que era incapaz de ir más allá de los principios básicos de la física aristotélica. Cuando hoy en día hablamos del «sistema copernicano», nos solemos referir a un sistema del universo bastante diferente del descrito en el *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico. La razón de este proceder es que deseamos rendir homenaje a Copérnico por sus innovaciones, y lo hacemos a expensas de la exactitud literal, refiriéndonos al sistema heliocéntrico de la era post-copernicana como «copernicano». Sería más propio llamarlo «kepleriano», o por lo menos «keplero-copernicano».

El sistema de las esferas concéntricas

Pero antes de describir el sistema copernicano, permítame exponer algunas de las características fundamentales de los dos principales sistemas pre-copernicanos. Uno de ellos, atribuido a Eudoxo, fue mejorado por otro astrónomo griego, Calipo, y recibió su toque final de Aristóteles. Se trata del sistema conocido como de las «esferas concéntricas». En este sistema, cada planeta —y también el Sol y la Luna— se consideraban fijos, en el ecuador de una esfera independiente que giraba sobre su eje, con la Tierra estacionaria en el centro. Mientras giraba cada esfera, los extremos de los ejes de rotación estaban fijos en otra esfera, que también estaba girando, con un período diferente y alrededor de un eje que no tenía la misma orientación que el eje de la esfera interior.

Para algunos planetas podían existir hasta cuatro esferas, cada una insertada en la siguiente, con el resultado de que podía producirse una gran variedad de movimientos. Por ejemplo, una de estas esferas podía dar cuenta del hecho de que, dondequiera que se encontrara el planeta entre las estrellas, pudiera dar una vuelta alrededor de la Tierra cada 24 horas. Habría otra de tales esferas para mover al Sol en su revolución diaria aparente, otra para la Luna, y otra para las estrellas fijas. El conjunto de esferas interiores para cada planeta explicaría el hecho de que un planeta no sólo parece moverse a través del cielo con un movimiento diario, sino que también cambia su posición con respecto a las estrellas fijas de un día para otro. Así, un planeta se encontrará a veces en una constelación y a veces en otra. El nombre de «planeta» se derivó del verbo griego que significa «vagar», debido a que los planetas se veían errar entre las estrellas fijas noche tras noche. Una de las características observadas en ese vagar es que no tiene una dirección constante. La dirección habitual del movimiento es un lento progreso hacia el este, pero cada cierto tiempo el planeta detiene este movimiento (alcanzando un punto estacionario) y luego (fig. 3) se mueve durante un corto tiempo hacia el oeste, hasta que llega a otro punto estacionario, tras lo cual reemprende de nuevo su movimiento inicial hacia el este a través de los cielos. El movimiento hacia el este se conoce como movimiento «directo», y el movimiento hacia el oeste como «retrógrado». Mediante una apropiada combinación de esferas, Eudoxo fue capaz de construir un modelo para mostrar cómo las combinaciones de movimientos circulares podían producir los aparentes movimientos «directo» y «retrógrado» observados en los planetas. De alguna manera, se trata del mismo tipo de «esferas» que aparecen en el título del libro de Copérnico.

Después del declive de Grecia, la ciencia cayó en manos de los astrónomos islámicos o árabes. Algunos de entre ellos elaboraron el sistema de Eudoxo y Aristóteles e introdujeron muchas otras esferas para obtener una concordancia más exacta entre las predicciones de

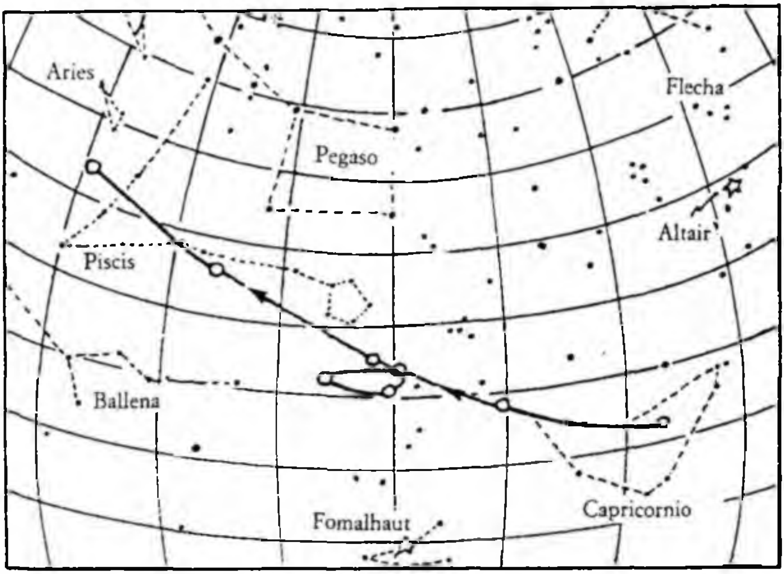


FIGURA 3

este sistema y la observación. Se llegó a pensar que estas esferas, que habían llegado a obtener un cierto grado de realidad, estaban hechas de cristal; el sistema adquirió el nombre de «esferas cristalinas». Debido a que se creía que la orientación de las estrellas y planetas tenía una importante influencia sobre todos los asuntos humanos, hombres y mujeres llegaron a pensar que la influencia del planeta emanaba, no del objeto en sí, sino de la esfera a la que estaba unido. En esta creencia podemos ver el origen de la expresión «esfera de influencia», que todavía hoy se utiliza en un contexto político y económico.

PTOLOMEO Y EL SISTEMA DE EPICICLOS Y DEFERENTES

El otro sistema principal de la antigüedad que rivalizaba con éste fue el elaborado por Claudio Ptolomeo, uno de los astrónomos más importantes del mundo antiguo, y se basaba en alguna medida en conceptos que habían sido introducidos por el geómetra Apolonio de Perga y el astrónomo Hiparco. El resultado final, que se conoce generalmente como el sistema ptolemaico, en contraste con el sistema de Eudoxo-Aristóteles de esferas homocéntricas (con centro común), tenía una enorme flexibilidad y, en consecuencia, una enorme complejidad. Los mecanismos fundamentales se utilizaban en varias combinaciones. En primer lugar, imagine un punto *P* moviéndose uniformemente en un círculo alrededor del punto *T*, tal como se ve en la figura 4A. Se trata de un caso de movimiento circular uniforme, que no permite ni puntos estacionarios ni retrogradación. Tampoco da cuenta del hecho de que los planetas no tienen una velocidad constante cuando se mueven aparentemente alrededor de la Tierra. A lo sumo, se podría obervar tal movimiento sólo en el comportamiento de las estrellas fijas, pues Hiparco había visto que incluso el Sol se mueve con una velocidad variable, una observación relacionada con el hecho de que las estaciones no tienen la misma duración. En la figura 4B, la tierra no se encuentra en el centro exacto C de este círculo, sino fuera del centro, en el punto *T*. Está claro entonces que, si el punto *P* corresponde a un planeta (o al Sol), visto desde la Tierra, éste no parecerá moverse uniformemente con respecto a las estrellas fijas, aunque su movimiento a lo largo del círculo sea, de hecho, uniforme. Si la Tierra y el cuerpo celeste forman un sistema excéntrico como éste, en lugar de un sistema homocéntrico, habrá momentos en que el Sol o el planeta se encontrarán muy cerca de la Tierra (perigeo), y momentos en que el Sol o el planeta estén muy alejados de ella (apogeo). Se puede esperar entonces una variación en el brillo de los planetas, cosa que también se observa.

Introduciremos ahora uno de los mecanismos principales que utilizaba Ptolomeo para explicar el movimiento de los planetas. Vamos

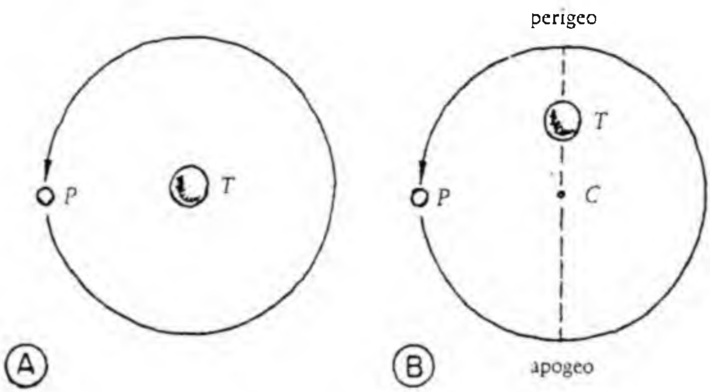


Figura 4

a suponer que, mientras el punto *P* se mueve uniformemente sobre un círculo alrededor del centro *C* (fig. 5), un segundo punto *Q* se mueve en un círculo alrededor del punto *P*. Como resultado tendríamos una curva con una serie de rizos o lóbulos. El círculo grande sobre el que se mueve *P* se llama el círculo de referencia, o el deferente, y el círculo pequeño en el que se mueve *Q* se llama el epiciclo. Por ello, el sistema ptolemaico se describe frecuentemente como un sistema basado en epiciclos y deferentes. Está claro que la curva que resulta de la combinación de epiciclo y deferente es tal que el planeta se encuentra más cerca del centro en un momento dado que en otros, que también existen puntos estacionarios, y que cuando el planeta se encuentra en el interior de cada rizo, un observador en *C* lo verá con movimiento retrógrado. Para que el movimiento esté

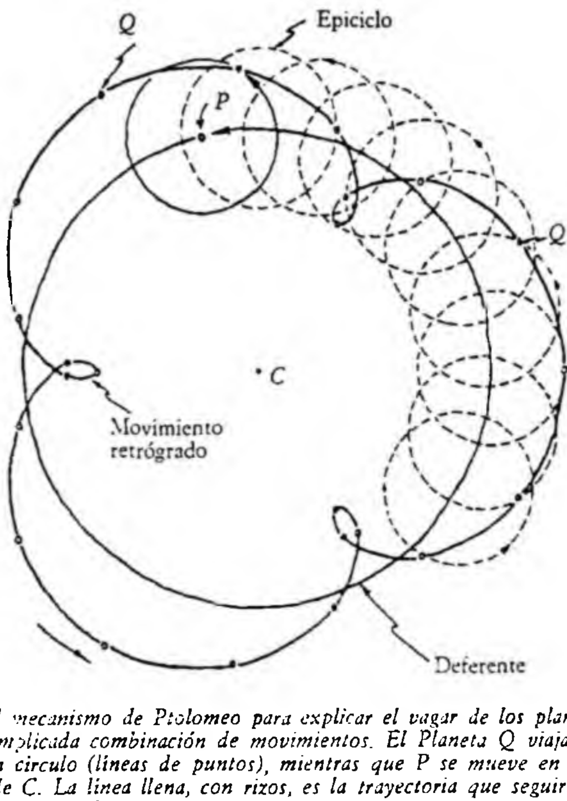


Fig. 5.—*El mecanismo de Ptolomeo para explicar el vagar de los planetas suponía una complicada combinación de movimientos. El Planeta Q viaja alrededor de P en un círculo (líneas de puntos), mientras que P se mueve en un círculo alrededor de C. La línea llena, con rizos, es la trayectoria que seguiría Q en el movimiento combinado.*

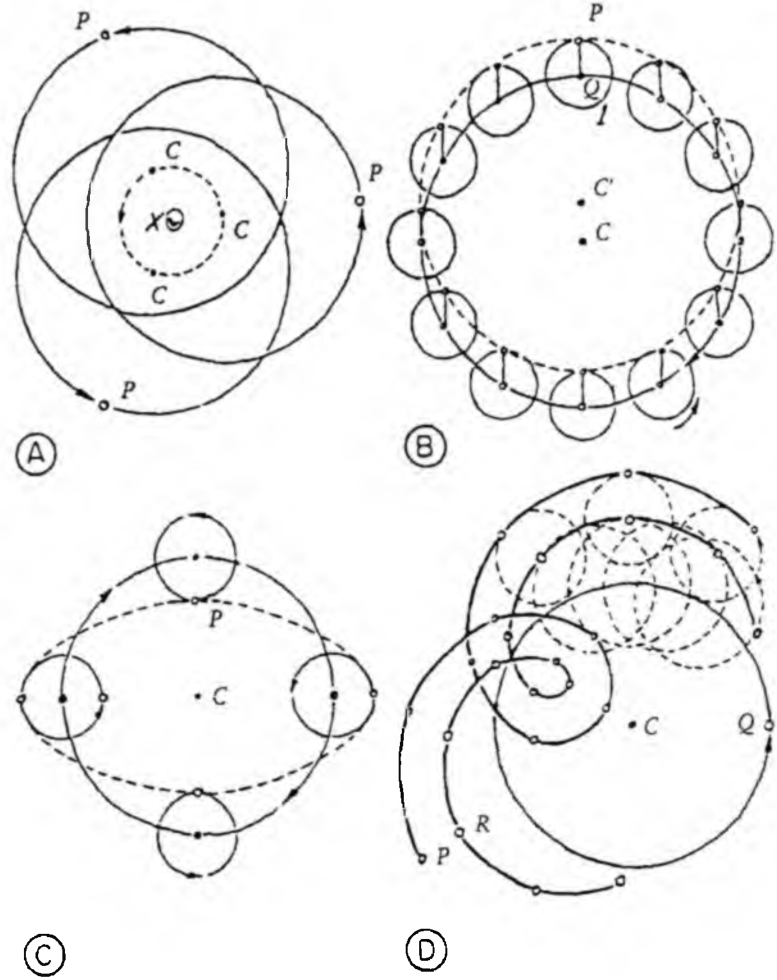


FIG. 6.—*Con el epiciclo y el deferente (y con ingeniosidad), los astrónomos podían describir casi cualquier movimiento planetario observado y seguir todavía manteniéndose dentro de los límites del sistema ptolemaico. En (A), el punto P se mueve en un círculo con centro en C, el cual se mueve sobre un círculo menor centrado en X. En (B), la combinación de deferente y epiciclo tiene el efecto de trasladar el centro aparente de la órbita de P desde C a C'. En (C), la combinación da como resultado una curva elíptica. La figura en (D) muestra la trayectoria de P al moverse sobre un epiciclo superpuesto a otro epiciclo; el centro del círculo de P es R, el cual se mueve sobre un círculo cuyo centro, Q, se halla sobre un círculo centrado en C.*

conforme con la observación tan sólo es necesario escoger el tamaño relativo del epiciclo y del deferente y las velocidades relativas de rotación de los dos círculos, de modo que concuerde con las apariencias.

Se desprende claramente de su libro que Ptolomeo nunca se comprometió con la cuestión de si existen epiciclos y deferentes «reales» en los cielos. De hecho, parece mucho más probable que considerara al sistema que describió como un «modelo» del universo, y no necesariamente como su «verdadera» imagen —cualquiera que sea el significado de estas palabras. Es decir, se trataba del ideal griego, que alcanzaba su más alta cota en los escritos de Ptolomeo, de construir un modelo que permitiera al astrónomo predecir las observaciones, o —para utilizar la expresión griega— «salvar las apariencias». Si

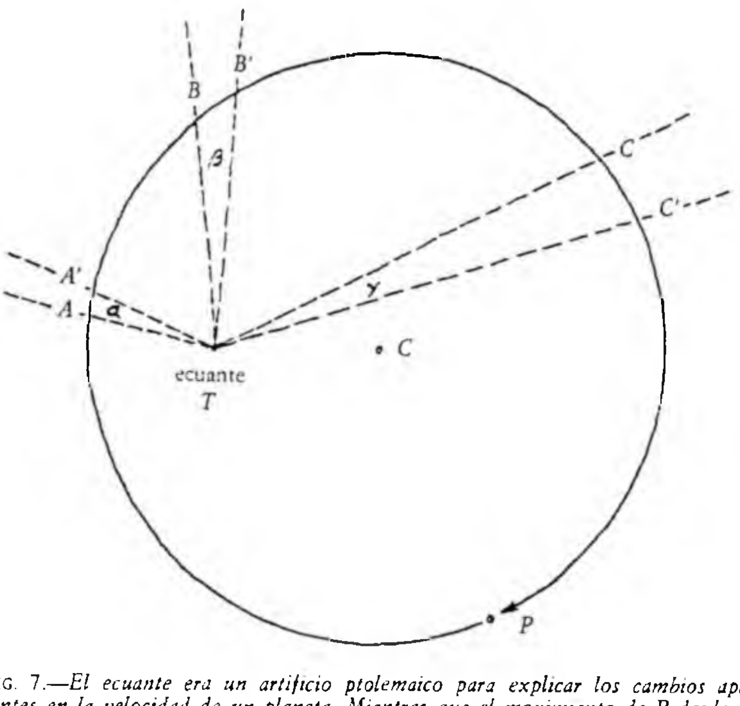


FIG. 7.—*El ecuante era un artificio ptolemaico para explicar los cambios aparentes en la velocidad de un planeta. Mientras que el movimiento de P desde A a A', desde B a B', y desde C a C' no sería uniforme con respecto al centro del círculo, C, si lo sería con respecto a otro punto, T, el ecuante, porque los ángulos α, β, γ son iguales. El planeta se mueve por cada uno de los arcos AA', BB', y CC' en el mismo tiempo pero, obviamente, con diferentes velocidades.*

bien despreciado a menudo, este enfoque de la ciencia es muy similar al del físico del siglo xx, cuya meta principal es también la de construir un modelo que suministre ecuaciones que predigan los resultados del experimento. A menudo el físico actual tiene que contentarse sólo con ecuaciones, a falta de un «modelo» en el sentido práctico y ordinario de la palabra.

Se pueden mencionar brevemente ciertas otras características del viejo sistema ptolemaico. La Tierra no tiene que encontrarse necesariamente en el centro del círculo deferente, o dicho de otro modo, el círculo deferente (fig. 6A) podría ser excéntrico en vez de homocéntrico —es decir, tener un centro que no fuera el de la Tierra. Además, mientras que el punto *P* se mueve sobre el círculo grande (fig. 6B) de referencia, o el deferente, su centro *C* podía estar moviéndose sobre un círculo pequeño, una combinación que no necesariamente produce una retrogradación, pero que podía tener el efecto de elevar al círculo, o de transponerlo, o de producir un movimiento elíptico (fig. 6C). Finalmente, había un mecanismo conocido como el «ecuante» (fig. 7). Se trata de un punto fuera del centro de un círculo sobre el que se podía «uniformizar» el movimiento. Es decir, consideremos un punto *P* que se está moviendo sobre un círculo con centro en *C* en relación con un ecuante. El punto *P* se mueve de tal manera que una línea trazada desde *P* al ecuante barre ángulos iguales en tiempos iguales; esto tiene el efecto de que, para un observador que no se encuentre en el ecuante, *P* no se mueve uniformemente en su trayectoria circular. Estos artificios se podían utilizar en muchas combinaciones diferentes. El resultado era un sistema de gran complejidad. Muchos sabios no podían creer que un sistema de cuarenta o más «ruedas dentro de otras ruedas» pudiera estar girando en los cielos, que el mundo pudiera ser tan complicado. Se dice que Alfonso X, rey de Castilla y León, llamado Alfonso el Sabio, quien fue mecenas de un famoso conjunto de tablas astronómicas en el siglo XIII, no podía creer que el sistema del universo fuera tan intrincado. Cuando se le enseñó el sistema ptolemaico por vez primera, comentó, según la leyenda: «Si el Todopoderoso me hubiera consultado antes de embarcarse en la Creación, le hubiera recomendado algo más sencillo.»

No hay lugar en donde hayan sido expresadas tan claramente las dificultades para comprender el sistema ptolemaico como en el famoso poema de John Milton *El paraíso perdido*. Milton había sido maestro de escuela, había enseñado en la práctica el sistema ptolemaico y sabía, por ello, de qué estaba hablando. En estas líneas, el ángel Rafael responde a las preguntas de Adán sobre la construcción del universo y le dice que seguramente las actividades del hombre harían reír a Dios:

... cuando se pongan a modelar el cielo
y a calcular las estrellas, cómo ordenarán
la inmensa estructura, cómo construirán, destruirán, tramarán
para salvar las apariencias, cómo ceñirán la esfera
con céntricas y excéntricas garabateadas sobre ella,
ciclos y epiciclos, orbes dentro de orbes...

Antes de comenzar con las innovaciones de Copérnico, puede resultar apropiado hacer algún comentario final sobre el viejo sistema de astronomía. En primer lugar, está claro que parte de la complejidad surge del hecho de que las curvas que representan los movimientos aparentes de los planetas (fig. 5) son combinaciones de círculos. Si hubiera sido posible utilizar simplemente una ecuación para una

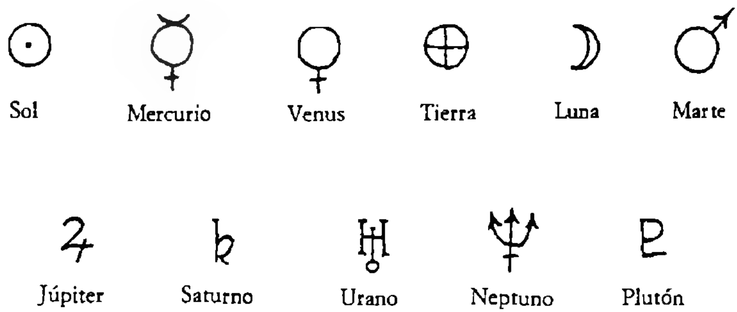


FIG. 8.—*Los orígenes de los viejos símbolos planetarios se pierden en la antigüedad, pero las derivaciones habitualmente aceptadas provienen de la mitología griega y latina. El símbolo del Sol representaba probablemente un escudo con ombligo. El símbolo para Mercurio, o representaba su caduceo, el bastón que llevaba, o su cabeza con el gorro alado. El símbolo de Venus era el espejo asociado con la diosa del amor y de la belleza. El símbolo de Marte, dios de la guerra, se cree que representa, o la cabeza y casco con pluma que se balancea, o la lanza y el escudo del guerrero. El símbolo para Júpiter también tiene derivaciones alternativas —o bien un tosco jeroglífico del águila, «ave de Júpiter», o la primera letra de Zeus, el nombre griego de Júpiter. El símbolo de Saturno es una antigua guadaña, emblema del dios del tiempo. El símbolo de Urano es la primera letra del apellido de su descubridor, Sir William Herschel (1738-1822), con el planeta suspendido del crucero. El tridente ha sido siempre el símbolo de Neptuno, el dios del océano. El símbolo de Plutón es un evidente monograma. Es interesante que los alquimistas usaran el símbolo de Mercurio para el metal mercurio y el símbolo de Venus para el cobre. Hoy en día, los genetistas designan lo femenino con el símbolo de Venus y lo masculino con el símbolo de Marte.*

curva lobulada tal como la lemniscata, el trabajo habría sido mucho más fácil. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que en los tiempos de Ptolomeo no existía la geometría analítica, que utiliza ecuaciones, y que había crecido una tradición, consagrada tanto por Aristóteles como por Platón, según la cual el movimiento de los cuerpos celestes debe explicarse en términos de un sistema natural de movimiento —quizá como consecuencia del argumento de que un movimiento circular no tiene ni comienzo ni fin y que, por lo tanto, es el más apropiado para unos planetas inmutables, incorruptibles, y en eterno movimiento. Sea como fuere, como veremos, la idea de explicar el movimiento planetario sólo mediante combinaciones de círculos perduró en la astronomía durante un tiempo muy largo.

El sistema ptolemaico no sólo funcionaba o se podía hacer funcionar, sino que encajaba perfectamente en el sistema de física aristotélica. Se asignaron a las estrellas, los planetas, el Sol y la Luna movimientos en círculos o en combinaciones de círculos, su «movimiento natural», mientras que la Tierra no participaba de los mismos, al hallarse en su «lugar natural» en el centro del universo, y en reposo. En el sistema ptolemaico, pues, no había necesidad de buscar un nuevo sistema de física distinto del que concordaba igualmente bien con el sistema de las esferas homocéntricas. A veces, estos dos sistemas se describen como «geostáticos», porque en ambos la Tierra está en reposo; la expresión más habitual es «geocéntrico», porque en los dos la Tierra se encuentra en el centro del universo.

Innovaciones copernicanas

Cuando Copérnico elaboró su propio sistema, éste tenía mucho parecido con el sistema de Ptolomeo. Copérnico admiraba mucho a Ptolomeo; siguió al *Almagesto* al organizar su libro, ordenar los distintos capítulos y elegir la secuencia en que iba a introducir los distintos temas.

El paso de un sistema geostático a uno heliostático (con el Sol inmóvil) implicaba ciertas explicaciones nuevas. Para verlas, comencemos como Copérnico, examinando primero la forma más sencilla de un universo heliostático. El Sol está en el centro, fijo e inmóvil, y a su alrededor se mueven en círculos, y en este orden, Mercurio, Venus, la Tierra con su luna, Marte, Júpiter, y Saturno (fig. 8a). Copérnico explicaba los movimientos diarios aparentes del Sol, la Luna, las estrellas y los planetas, basándose en que la Tierra gira sobre su eje una vez al día. Las restantes apariencias principales derivaban, según él, de un segundo movimiento de la Tierra, cons-

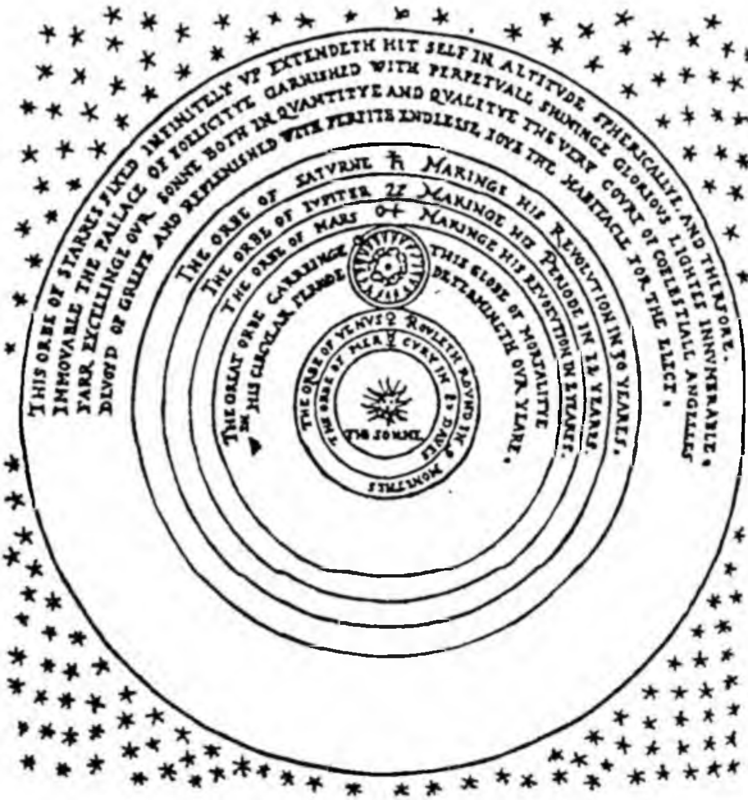


Fig. 8A.—*Este diagrama del sistema copernicano se ha tomado de* A Perfit Description of the Caelestial Orbes *[Una perfecta descripción de los orbes celestes] (1576), que presenta una traducción al inglés de una parte del* De Revolutionibus *de Copérnico. Digges ha añadido una característica al sistema, al hacer infinita la esfera de las estrellas fijas.*

tituido por una revolución orbital alrededor del Sol, como las órbitas de los otros planetas. Cada planeta tiene un período diferente de revolución, siendo estos períodos tanto mayores cuanto más alejado se encuentra el planeta del Sol. Así resulta fácil explicar el movimiento retrógrado. Considere a Marte (fig. 9), cuyo movimiento alrededor del Sol es más lento que el de la Tierra. Se muestran siete posiciones de la Tierra y de Marte en un momento en que la Tierra sobrepasa a Marte y éste está en oposición (es decir, cuando una línea

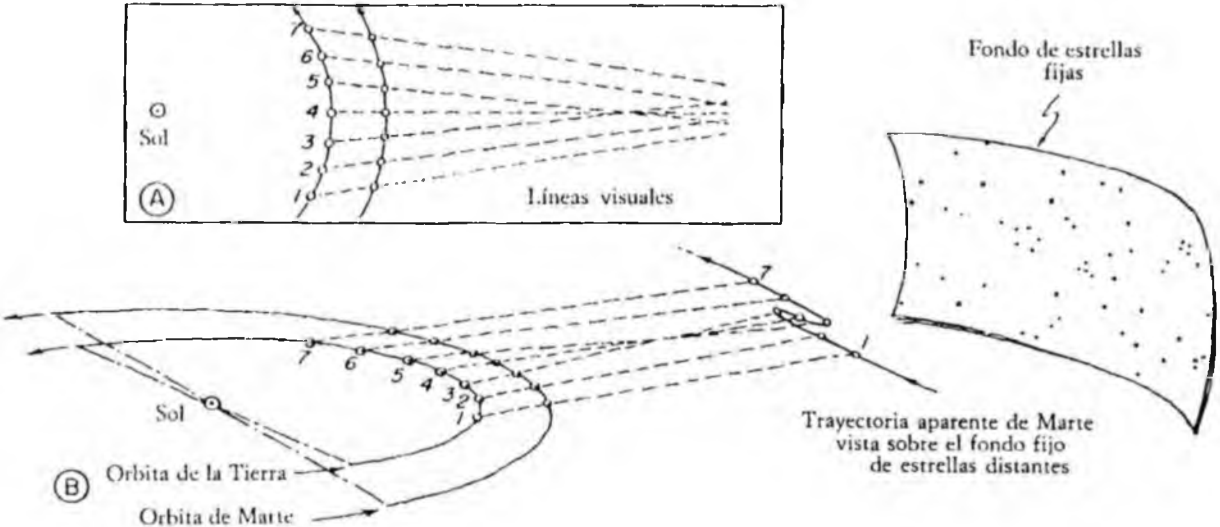


FIG. 9.—*En el sistema copernicano, el movimiento retrógrado aparente de los planetas tiene una explicación sencilla; es una cuestión de velocidades relativas. Aquí las líneas visuales muestran por qué un planeta superior, más alejado del Sol que la Tierra, parece volver atrás. Se debe a que viaja alrededor del Sol más lentamente que la Tierra.*

trazada desde el Sol a Marte pasa por la Tierra). Se observará que la línea trazada desde la Tierra a Marte en cada una de estas posiciones sucesivas se inclinará primero hacia adelante, luego hacia atrás, y luego de nuevo hacia adelante. De esta manera Copérnico no sólo pudo explicar «naturalmente» cómo se produce el movimiento retrógrado, sino que también pudo mostrar por qué se ve este movimiento en Marte solamente cuando se encuentra en oposición, correspondiendo al tránsito del planeta por el meridiano a medianoche. Cuando está en oposición, el planeta se encuentra en el lado opuesto de la Tierra, visto desde el Sol. Por ello alcanzará su posición más alta en el cielo a medianoche, o cruzará el meridiano a medianoche. De forma análoga (fig. 10), se puede ver que, en el caso de un planeta inferior (Mercurio o Venus), la retrogradación ocurriría sólo en la conjunción inferior, que corresponde al tránsito del planeta por el meridiano al mediodía. (Cuando Venus o Mercurio se encuentran en línea recta entre la Tierra y el Sol, su posición se llama conjunción. Estos planetas están en el centro de retrogradaciones en la conjunción inferior, cuando se encuentran entre la Tierra y el Sol. Entonces cruzan el meridiano junto con el Sol al mediodía.) Estos dos hechos tienen pleno sentido en un sistema heliocéntrico o heliostático, pero si la *Tierra* fuera el centro del movimiento, como en el sistema ptolemaico, ¿por qué habría de depender la retrogradación de los planetas de su orientación con respecto al *Sol*?

Prosiguiendo con el modelo simplificado de órbitas circulares, observemos ahora que Copérnico era capaz de determinar la escala del Sistema Solar. Considere a Venus (fig. 11). Venus se ve tan sólo como estrella de la tarde o de la mañana, debido a que se encuentra, o bien un poco por delante del Sol, o bien un poco por detrás, pero nunca a 180 grados del Sol, como puede ser el caso de un planeta superior. El sistema ptolemaico (fig. 11A) explicaba esto sólo mediante la suposición arbitraria de que los centros de los epiciclos de Venus y Mercurio estaban permanentemente fijos en una línea trazada desde la Tierra al Sol; es decir, que los deferentes de Mercurio y Venus, igual que el Sol, se movían una vez cada año alrededor de la Tierra. En el sistema copernicano sólo había que suponer que las órbitas de Venus y de Mercurio (fig. 11B) se hallaban dentro de la órbita de la Tierra.

En el sistema de Copérnico, además, se podía calcular la distancia de Venus al Sol. Las observaciones realizadas noche tras noche indicarían cuándo podía verse Venus en su mayor elongación (separación angular) del Sol. En este momento se podía determinar su separación angular. Como puede verse en la figura 12, la máxima elongación

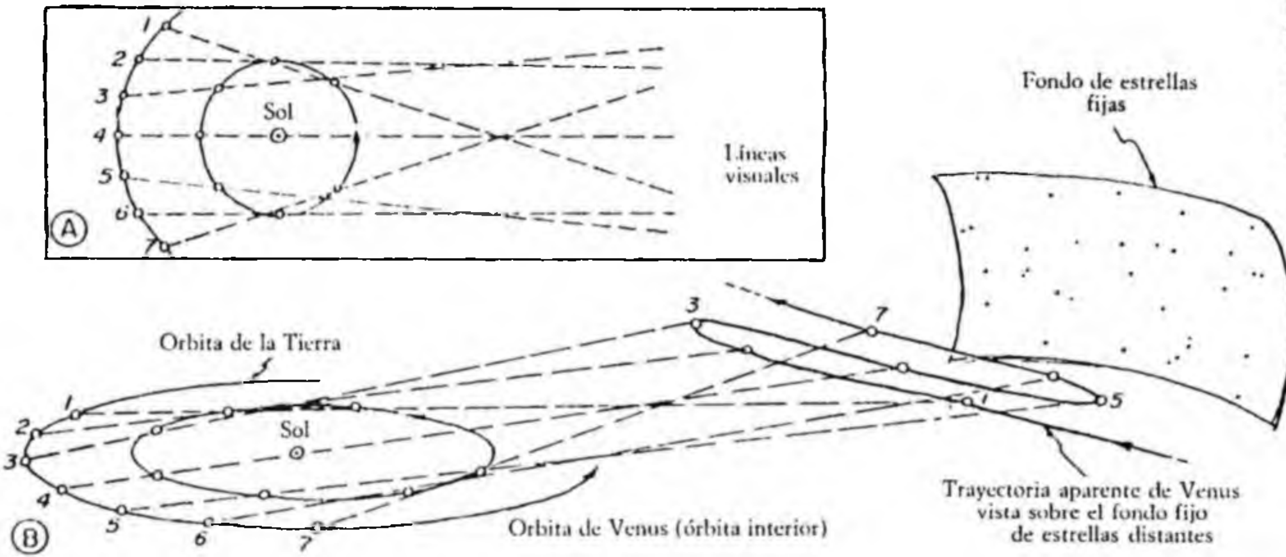


FIG. 10.—*El movimiento retrógrado de un planeta inferior, cuya órbita se encuentra entre la Tierra y el Sol, también se explica fácilmente mediante líneas visuales. Venus viaja alrededor del Sol más rápido de lo que lo hace la Tierra.*

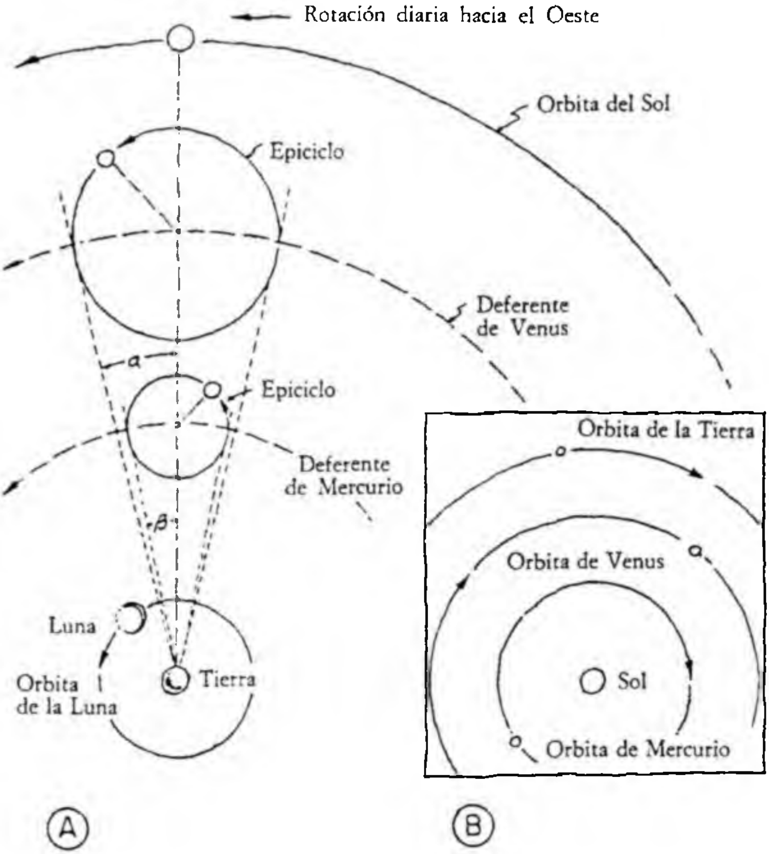


FIGURA 11

se da cuando una línea trazada desde la Tierra a Venus es tangente a la órbita de Venus y por lo tanto perpendicular a la línea trazada desde el Sol a este planeta. Mediante simple trigonometría podemos escribir esta ecuación y, con una tabla de tangentes, calcular fácilmente la longitud VS.

$$\frac{VS}{TS} = \text{sen } \alpha \qquad [1]$$

La distancia TS, o el tamaño medio del radio de la órbita de la Tierra en el sistema copernicano, se conoce como «unidad astronómica». Por lo tanto, la ecuación [1] puede reescribirse como

$$VS = (\text{sen } \alpha) \times 1\text{AU} \qquad [2]$$

Con este método sencillo, Copérnico pudo determinar las distancias planetarias (en unidades astronómicas) con gran exactitud, como puede verse en la tabla siguiente, que muestra los valores de Copérnico y los valores aceptados en la actualidad para las distancias de los planetas al Sol. (El método de Copérnico para determinar estas distancias difiere ligeramente en el caso de los tres planetas «superiores»: Marte, Júpiter y Saturno.)

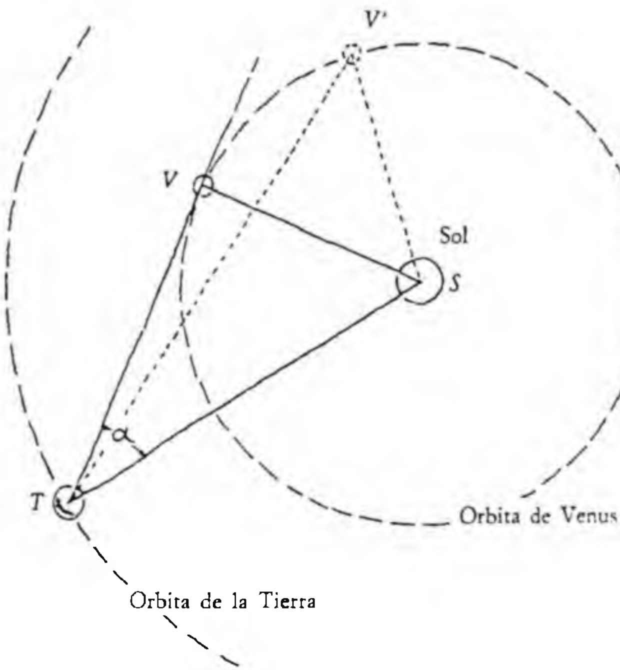


FIG. 12.—*El cálculo de la distancia entre Venus y el Sol se hizo posible con el sistema de Copérnico. Cuando la separación angular (es decir, el ángulo α de Venus desde el Sol) es máximo, la línea visual desde la Tierra a Venus (TV) es tangente a la órbita de Venus y por ello perpendicular al radio VS. Calcular la longitud de VS es un fácil problema de trigonometría elemental. En el caso de cualquier otra orientación, por ejemplo V', la separación angular no es máxima.*

COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE COPÉRNICO Y LOS MODERNOS PARA LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA SOLAR

Planeta	*Período sinódico * medio*		*Período sidéreo*		*Distancia media al Sol ***	
	C	M	C	M	C	M
Mercurio	116d	116d	88d	87,91d	0,36	0,391
Venus	584d	584d	225d	225,00d	0,72	0,721
Tierra			365¼d	365,26d	1,0	1,000
Marte	780d	780d	687d	686,98d	1,5	1,52
Júpiter	399d	399d	12a	11,86a	5	5,2
Saturno	378d	378d	30a	29,51a	9	9,5

* El período sinódico es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos conjunciones de los mismos cuerpos.
** Expresada en unidades astronómicas.

Además, Copérnico era capaz de determinar con análoga precisión el tiempo que necesita cada planeta para completar una revolución de 360 grados alrededor del Sol, o su período sidéreo. Como conocía los tamaños relativos de las órbitas planetarias y los períodos sidéreos de los planetas, pudo predecir con un aceptable grado de exactitud las futuras posiciones de los planetas (es decir, sus respectivas distancias de la Tierra). En el sistema ptolemaico, las distancias de los planetas no desempeñaron ninguna función, ya que no había forma de determinarlas a partir de la observación. En tanto que los tamaños y períodos relativos del movimiento sobre deferente y epiciclo fueran iguales, las observaciones o apariencias serían idénticas, como puede verse en la figura 13. En el caso de la Luna puede apreciarse con claridad que el sistema ptolemaico trabajaba sobre todo con ángulos en lugar de con distancias. Una de las características más significativas del sistema ptolemaico era que la posición aparente de la Luna podía describirse con un grado de exactitud relativamente alto. Pero esto requería un artificio especial, y si la Luna hubiera seguido realmente el camino ideado, hubiera experimentado una enorme variación en su tamaño aparente, mucho mayor de la que se observa. Hasta hace pocos años, se creía que la teoría de la Luna de Copérnico era una de sus innovaciones más originales. Pero ahora sabemos que existía una teoría idéntica en la astronomía islámica.

He dicho anteriormente que el sistema de un único círculo para cada planeta, con un único círculo para la Luna y dos movimientos diferentes para la Tierra, constituye una versión simplificada del

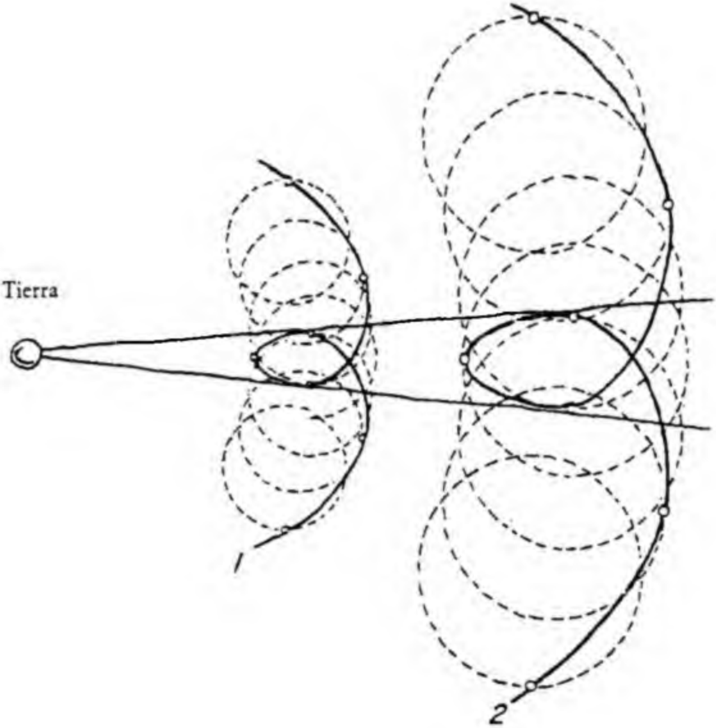


Fig. 13.—*En el sistema ptolemaico, las predicciones de posiciones planetarias se apoyaban en medidas de ángulos, no de distancias. Esta ilustración muestra que el resultado de las observaciones sería el mismo, independientemente de la distancia, si los períodos relativos del movimiento fueran los mismos.*

sistema copernicano. La realidad es que tal sistema no concuerda con la observación, salvo de una manera muy aproximada. Con el fin de hacer más exacto su sistema, Copérnico se vio en la necesidad de introducir cierto número de complejidades, muchas de las cuales nos recuerdan los artificios utilizados en el sistema ptolemaico. Por ejemplo, para Copérnico era evidente (al contrario de lo que había sido evidente para Hiparco) que la Tierra no puede moverse uniformemente en un círculo con el Sol como centro. Por ello, Copérnico situó al Sol, no en el centro de la órbita de la Tierra, sino a alguna distancia de éste. El centro del Sistema Solar, y del universo, en el sistema de Copérnico, no era en modo alguno el Sol, sino más bien un «sol medio», o centro de la órbita de la Tierra. Por consiguiente, es preferible aludir al sistema de Copérnico como a un sistema heliostático en lugar de un sistema heliocéntrico. Copérnico se oponía enérgicamente al sistema del ecuante, que había sido introducido por Ptolomeo. Para Copérnico era necesario, como lo había sido también para los astrónomos griegos de la antigüedad, que los planetas se movieran uniformemente en círculos. Para producir órbitas planetarias alrededor del Sol que arrojaran resultados conformes con la observación real, sin embargo, terminaba por introducir círculos moviéndose en círculos, al igual que había hecho Ptolomeo. La diferencia principal aquí es que Ptolomeo había introducido una tal combinación de círculos para explicar ante todo el movimiento retrógrado, mientras que Copérnico (fig. 14) explicaba el movimiento retrógrado, como ya hemos visto, mediante el hecho de que los planetas se mueven en sus órbitas sucesivas a diferentes velocidades[1]. La comparación de las dos figuras que representan los sistemas de Copérnico y Ptolomeo no muestra que uno de ellos fuese, de alguna manera evidente, «más sencillo» que el otro.

Copérnico versus Ptolomeo

¿Cuáles eran las ventajas y desventajas del sistema copernicano, comparadas con las del ptolemaico? En primer lugar, una indudable ventaja del sistema copernicano era la relativa facilidad en explicar el movimiento retrógrado de los planetas y en mostrar por qué sus posiciones relativas al Sol determinaban tal movimiento. Una segunda ventaja de este sistema era que proporcionaba una base sobre la que determinar las distancias de los planetas al Sol y a la Tierra.

A veces se dice que el sistema de Copérnico constituyó una gran simplificación, pero esto se debe a un malentendido. Si se considera al sistema copernicano en su forma rudimentaria de un único círculo para cada planeta alrededor del Sol, entonces esta suposición es válida. Pero un tal sistema de círculos puros y simples sólo puede ser una cruda aproximación, como bien sabía Copérnico. Hemos visto que, para obtener una representación más exacta de los movimientos planetarios, recurría a la combinación de un círculo moviéndose en

[1] Una última complejidad del sistema de Copérnico surgió de las dificultades que experimentó a la hora de explicar por qué el eje de rotación de la Tierra permanece fijo en su orientación con respecto a las estrellas, a pesar de que la Tierra se mueve en su órbita. El «movimiento» introducido por Copérnico resultó ser innecesario. Galileo mostró más tarde que, debido a que no hay fuerza alguna actuando para girar el eje de la Tierra, éste *no* debe moverse, sino permanecer siempre paralelo a sí mismo.

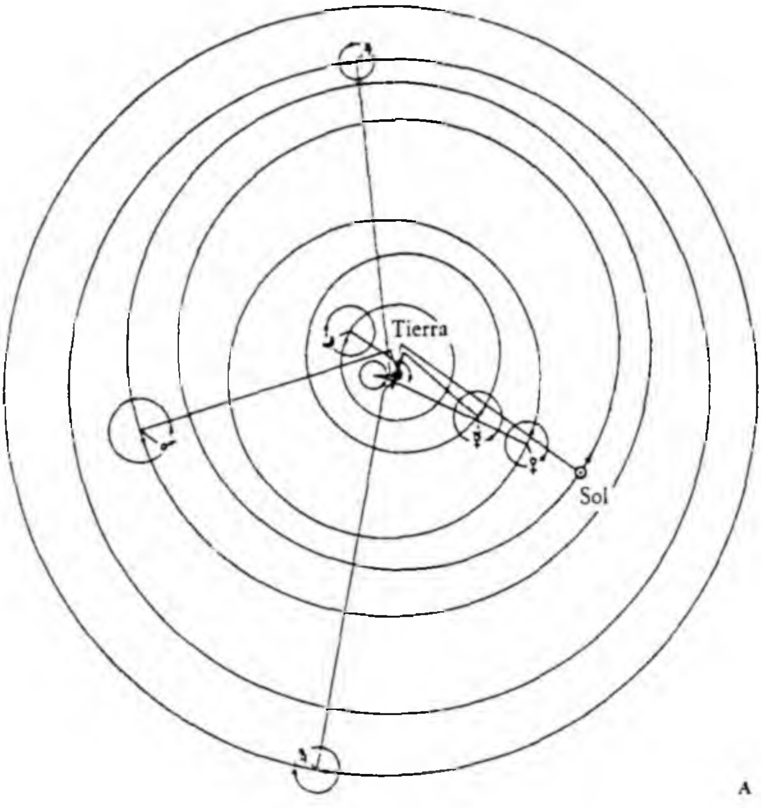
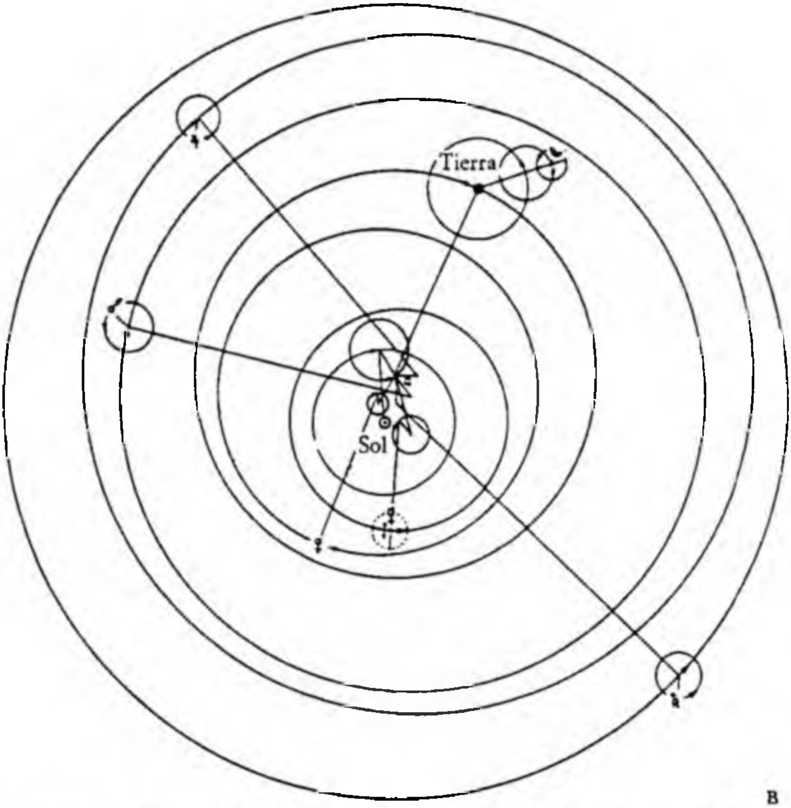


Fig. 14.—*El sistema ptolemaico (A) y el sistema copernicano (B) eran de una complejidad más o menos parecida, como se puede ver en esta comparación. Los puntos del extremo interior de los radios de los deferentes de los planetas (círculos grandes) denotan los centros de las órbitas en relación con el centro de la órbita del Sol en el sistema ptolemaico y en relación al Sol en el sistema*

círculo, en alguna medida reminiscente de las construcciones epicíclicas de Ptolomeo, si bien con un propósito distinto.

Vamos a explorar a continuación los motivos para no aceptar el sistema copernicano. Una razón muy importante era la ausencia de cualquier paralaje anual de las estrellas fijas. El fenómeno de la paralaje consiste en el desplazamiento que se produce en la línea visual cuando se ve al mismo objeto desde dos posiciones diferentes. Sobre este principio se construyen los telémetros para la artillería y para



copernicano. Advierta el uso de epiciclos en ambos sistemas. En este diagrama, los centros de los epiciclos de Venus (♀) y Mercurio (☿) han sido desplazados para mejorar la visualización. En el sistema ptolemaico, los centros de estos dos epiciclos permanecen fijos en una línea recta trazada desde la Tierra al Sol (según William D. Stahlman).

las cámaras fotográficas. Considere el movimiento de la Tierra en el sistema copernicano. Si se examinan las estrellas a intervalos de seis meses, esto equivale a hacer observaciones desde los extremos de una línea base de una longitud de 300 millones de kilómetros (fig. 15), ya que el radio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol es de 150 millones de kilómetros. Como Copérnico y los astrónomos de su época no podían determinar ninguna paralaje en las estrellas fijas mediante tales observaciones semestrales, había que suponer que

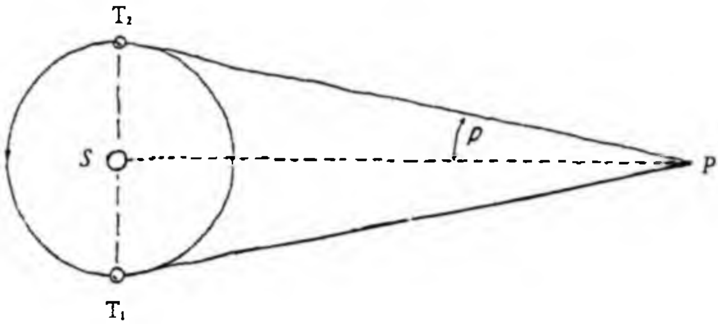


FIG. 15.—*La paralaje anual de una estrella es el ángulo p, con el cual es posible calcular la distancia desde el Sol y la Tierra. La posición de la Tierra a intervalos de 6 meses se designa por T_1 y T_2. La distancia T_1 T_2 suministra una línea base de 300.000.000 kilómetros de longitud, desde la cual se puede observar a la estrella P y obtener el ángulo T_1 PT_2, o 2p.*

las estrellas se encontraban a una enorme distancia, si es que verdaderamente la Tierra está moviéndose alrededor del Sol. Era mucho más fácil decir que la ausencia de cualquier paralaje anual observada en las estrellas fijas tendía a refutar todo el fundamento del sistema copernicano. Muchos siglos después de Copérnico, de hecho hace aproximadamente unos 150 años, telescopios muy perfeccionados permitieron observar a los astrónomos esta paralaje en las estrellas fijas. Hasta esa fecha, sin embargo, la existencia de tal paralaje (que tenía que ser muy pequeña) tuvo que ser aceptada por los astrónomos como cuestión de fe.

Tras el fracaso de la observación astronómica, vamos ahora a tratar del fracaso de la mecánica. ¿Cómo explicaba Copérnico el movimiento de los cuerpos en una Tierra que se mueve? Se trata de los problemas que ya hemos discutido en el primer capítulo, ninguno de los cuales explicó adecuadamente Copérnico. Suponía que, de un modo u otro, el aire alrededor de la Tierra se mueve con ella, y que este aire está de alguna manera ligado a la misma. De acuerdo con Edward Rosen, «la teoría de la gravedad de Copérnico postulaba un proceso separado de cohesión gravitatoria para cada cuerpo celeste individual, no sólo la Tierra, sino también el Sol, la Luna y los planetas, cada uno de ellos mantenido en su forma esférica por la operación de esta tendencia. Los objetos situados en el aire cercano a la Tierra podían estar sometidos a dicha tendencia, o el aire cercano y los objetos en él podían compartir la rotación de la Tierra porque son contiguos a ella. Ofreciendo estas sugerencias alternativas

(*Revolutionibus* I, 8-9), Copérnico contribuyó a sembrar las simientes de lo que más tarde se desarrollaría en los conceptos de la gravitación universal y de la inercia».

Pero había otro problema, de alguna manera aún más difícil de explicar —la naturaleza del mismo Sistema Solar. Si Copérnico todavía se atenía a los principios de la física aristotélica —y nunca inventó una nueva física para reemplazarla— ¿cómo podía explicar que la Tierra parece realizar una rotación diaria y moverse en una órbita circular anual, movimientos ambos contrarios a su naturaleza? De hecho, Copérnico se vio obligado a decir que la Tierra, al girar alrededor del Sol, era «simplemente otro planeta». Pero la afirmación de que la Tierra es «simplemente otro planeta» se interpretaría forzosamente como una negación del principio aristotélico de que la Tierra y los planetas están hechos de diferentes materiales, están sujetos a diferentes conjuntos de leyes físicas, y por ello se comportan de manera diferente. El que la Tierra se moviera en una órbita circular alrededor del Sol podía parecer que implicaba que nuestro planeta sufría un movimiento violento; pero la física aristotélica atribuía un movimiento natural lineal sólo a objetos constituidos por materia terrestre, y no a la Tierra en su conjunto. En la antigua física aristotélica, la Tierra, en realidad, no podía tener ningún tipo de movimiento, ni natural ni violento. Copérnico argumentaba que, en general, «la rotación es natural a la esfera»; y así llegó (*Revolutionibus* I, 8) a concluir que ya que la Tierra tiene forma esférica —«si alguien opinara que la Tierra gira, seguramente diría que su movimiento es natural y no violento». Aunque Copérnico introducía los preceptos básicos de Aristóteles (como aquel de que la Tierra no puede moverse), no elaboró un nuevo sistema físico plenamente viable y adecuado al tipo de problemas que suponía el concepto de que nuestro planeta está en movimiento.

Muchos de los que han leído el libro de Copérnico habrán quedado desconcerados por su afirmación de que la Tierra tiene necesariamente una rotación sobre su eje tanto como un movimiento sobre un gran círculo alrededor del Sol, y que esto era consecuencia de que tiene una forma esférica. Como hemos visto, Copérnico argumentaba que un movimiento esférico es «natural» para una esfera. ¿Cómo, entonces, podía sostener también que el Sol, que tiene una forma esférica, está parado y, ni gira sobre su eje, ni se mueve en una revolución anual?

Un último problema de carácter físico al que tuvo que enfrentarse se refería a la Luna. En el sistema copernicano era posible explicar que, aunque la Tierra gire alrededor del Sol, los objetos que caen siguen cayendo en línea recta hacia abajo, y que los pájaros no se pierden, porque el aire, de una manera u otra, está vinculado a la Tierra. Es decir, Copérnico (*Revolutionibus* I, 8) suponía que, debido a que el aire alrededor de la Tierra está de algún modo «ligado» a la misma, participa en sus movimientos; esto es, gira con la Tierra y se mueve junto con el planeta en su órbita a través del espacio. Por lo tanto, mientras la Tierra gira sobre su eje y cumple su órbita alrededor del Sol, el aire hace que los objetos que caen mantengan su posición respecto al suelo mientras están cayendo, de modo que —para un observador terrestre— parecen caer en línea recta. Su movimiento es, consecuentemente, «doble; siendo en cada caso un compuesto de recto y circular». Copérnico no discute el argumento relativo a pájaros u otras criaturas vivientes, ni siquiera a las nubes, pero el caso es en gran medida el mismo que para el lanzamiento y la caída de cuerpos. No obstante, este argumento no puede extenderse a la Luna, debido a que Copérnico pensaba que solamente el aire relativamente cercano a la Tierra es arrastrado con ella. Si nos alejamos de la Tierra llegamos a «aquella parte del aire» que, sostiene Copérnico, «no se ve afectada por el movimiento de la Tierra por su gran distancia de ella». La Luna requiere otro tipo de explicación. Para Copérnico era ésta una cuestión difícil de resolver.

Hasta ahora hemos limitado nuestra atención a dos aspectos del sistema copernicano: que resultaba por lo menos tan complejo como el sistema ptolemaico, y que si se aceptaba se presentaban problemas físicos aparentemente irresolubles. Si a estas objeciones añadimos algunas otras dificultades generales del sistema copernicano, puede comprenderse fácilmente que la publicación de su libro en 1543 no pudiera, por sí misma, llegar a revolucionar el pensamiento físico o astronómico.

Problemas con un universo copernicano

Aparte de los problemas puramente científicos, el concepto de una Tierra en movimiento originaba unos serios retos intelectuales. Después de todo, es bastante tranquilizador pensar que nuestro hogar está fijo en el espacio y que tiene su propio lugar en el esquema de las cosas, en vez de ser un insignificante puntito dando vueltas sin fin en uno u otro lugar del vasto o quizá incluso infinito universo. La singularidad aristotélica de la Tierra, basada en su posición supuestamente fija, daba a la gente un sentimiento de orgullo que difícilmente podría surgir al sentirse habitantes de un planeta relativamente pequeño (en comparación con Júpiter o Saturno), en un lugar más bien insignificante (la tercera posición de entre siete órbitas planetarias sucesivas). La afirmación de que la Tierra es «simplemente otro planeta» sugiere que posiblemente ni tan siquiera se distinga por ser el único globo habitado, y esto implica que los terrestres no son únicos. Y quizá haya otras estrellas que son soles con sus planetas, cada uno con otras clases de hombres y mujeres. La mayoría de la gente del siglo XVI no estaba preparada para tales ideas, y el testimonio de sus sentidos fortalecía sus prejuicios. ¡Un planeta, claro que sí! Cualquiera que mira a un planeta —Venus, Marte, Júpiter o Saturno— «verá» inmediatamente que se trata de «otra estrella» y no de «otra Tierra». El hecho de que estas «estrellas» planetarias son más brillantes que las otras, que deambulan respecto a las otras, y que tienen ocasionalmente un movimiento retrógrado no las convierte en algo diferente a las demás estrellas (o estrellas fijas); tales propiedades, «obviamente», no hacen que las «estrellas errantes» (que llamamos planetas) tengan algún parecido con nuestra Tierra. Y por si no fuera suficiente que todo el «sentido común» se rebele contra la idea de que la Tierra sea «simplemente otro planeta», está el testimonio de las Escrituras. Una y otra vez la Sagrada Escritura menciona un Sol en movimiento y una Tierra inmóvil. Incluso antes de la publicación del *De revolutionibus,* Martin Lutero se había enterado de las ideas de Copérnico y las había condenado violentamente por contradecir la Biblia. Y todos sabemos muy bien que la subsiguiente defensa de Galileo en favor del nuevo sistema le puso en conflicto con la Inquisición romana.

Debería haber quedado claro, por tanto, que la alteración del marco del universo propuesta por Copérnico no se podía lograr sin hacer estremecer toda la estructura de la ciencia y de nuestra concepción sobre nosotros mismos. El libro de Copérnico condujo finalmente a una fermentación en el pensamiento sobre la naturaleza del universo, y de la Tierra, que, en el transcurso del tiempo, provocaría profundos cambios. En este sentido, podemos fijar la fecha del inicio de la revolución científica en 1543. Los problemas planteados y sus implicaciones penetraron los mismos fundamentos de la física y de la astronomía. Por lo dicho hasta ahora debería hacerse evidente la forma en que los cambios en un sector de las ciencias físicas afectan a todo el conjunto de las ciencias. Hoy en día los científicos están familiarizados con este fenómeno, al haber sido testigos del desarrollo de la moderna física atómica y de la teoría cuántica. En ningún lugar, sin embargo, se puede observar mejor la unidad de estructura de la ciencia que en el hecho de que el sistema copernicano, tanto en su forma más sencilla como en la más compleja, no podía mantenerse por sí mismo tal como fue expuesto por Copérnico. Requería una modificación de las ideas vigentes en la época acerca de la naturaleza de la materia, la naturaleza de los planetas, del Sol, de la Luna y de las estrellas, y acerca de la naturaleza y acciones de la fuerza en relación con el movimiento. Como bien se ha dicho, la significación de Copérnico no residía tanto en el sistema que propuso como en el hecho de que este sistema sería la mecha que iba a encender la gran revolución en la física que asociamos con nombres de científicos tales como Galileo, Johannes Kepler e Isaac Newton. La llamada revolución copernicana fue en realidad una revolución posterior de Galileo, Kepler y Newton.

Capítulo 4

LA EXPLORACION DE LAS PROFUNDIDADES DEL UNIVERSO

El desarrollo de la ciencia sigue unos ritmos no del todo diferentes a los de la música. Como en las sonatas, ciertos temas se repiten en una secuencia de variaciones más o menos ordenada. El lugar de Copérnico en la historia de la ciencia puede ilustrar bien este proceso. Aunque su sistema no fue ni tan sencillo ni tan revolucionario como se presenta con frecuencia, su libro planteó todas las cuestiones que habían estado ocultas tras cada esquema cosmológico desde la antigüedad. Las complicadas pruebas de la inmovilidad de la Tierra que habían dado Aristóteles y Ptolomeo nunca podían ocultar del todo a cualquier lector que era posible otro parecer, aquel que ambos habían atacado.

La evolución de la nueva física

Como en toda composición de música bien estructurada, el principal tema corpernicano aparece en partes separadas. Un hombre de la antigüedad, Heráclides de Ponto, había presentado la idea de la rotación de la Tierra, pero no del movimiento orbital, mientras que Aristarco poseía un esquema según el cual la Tierra giraba sobre su eje y a la vez daba vueltas alrededor del Sol al igual que los planetas. En el medievo latino anterior a Copérnico no era infrecuente hallar pensadores, como el francés Nicolás Oresme y el alemán Nicolás de

Cusa, que consideraban un posible movimiento (un movimiento de rotación) de la Tierra, y hubiera resultado verdaderamente extraordinario que el tema de la Tierra móvil no se hubiera presentado de nuevo después de Copérnico. El *De revolutionibus* contenía la más completa explicación de un universo heliostático jamás elaborada, y para los especialistas en astronomía y los cosmólogos proponía mucho de nuevo y de importante. De la misma manera en que la lógica de una sonata lleva de la exposición original de un tema a sucesivas variaciones, pero sin dictar exactamente cómo serán estas variaciones, así la lógica del desarrollo de la ciencia nos permite predecir cuáles habrían tenido que ser algunas de las consecuencias de las ideas de Copérnico, qué cambios en el pensamiento se producirían necesariamente una vez aceptada esta nueva concepción del mundo. Pero sólo el conocimiento de la historia misma revela que la aceptación gradual de las ideas copernicanas por un estudioso aquí y otro allá se vio interrumpida brutalmente en 1609, cuando un nuevo instrumento científico cambió el nivel y el tono de la discusión sobre los sistemas copernicano y ptolemaico en tal medida que este año eclipsa al de 1543 en el desarrollo de la astronomía moderna.

Fue en 1609 cuando los científicos comenzaron por vez primera a utilizar el telescopio para hacer estudios sistemáticos de los cielos. Las revelaciones demostraron que Ptolomeo había cometido errores específicos e importantes, que el sistema copernicano encajaba con pulcritud los nuevos hechos resultantes de la observación y que la Luna y los planetas tenían propiedades que los hacían muy parecidos a la Tierra de diversas maneras, y manifiestamente distintos de las estrellas.

Después de 1609, toda discusión de los respectivos méritos de los dos grandes sistemas del mundo debía tratar inevitablemente de fenómenos que habían estado fuera del alcance e incluso de la imaginación tanto de Ptolomeo como de Copérnico. Y una vez que se vio que el sistema heliocéntrico podía tener una posible base en la «realidad», se intensificó la búsqueda de una física que pudiera aplicarse con igual validez en una Tierra en movimiento y en todas las partes del universo. La introducción del telescopio habría sido suficiente por sí misma para cambiar el curso de la ciencia, pero otro acontecimiento de 1609 aceleró aún más la revolución: Johannes Kepler publicó su *Astronomia nova*, la cual no sólo simplificó el sistema copernicano al descartar todos los epiciclos, sino que también estableció firmemente dos leyes del movimiento planetario, como veremos en otro capítulo.

Galileo Galilei

El científico que fue el principal responsable de la introducción del telescopio como instrumento científico, y que puso los cimientos de la nueva astronomía observacional y de una nueva física fue Galileo Galilei. En 1609 era profesor en la Universidad de Padua, en la República de Venecia, y tenía cuarenta y cinco años, edad considerablemente mayor que aquella en la que la gente cree que se hacen los descubrimientos científicos de gran importancia. El último gran italiano, a excepción de nobles y reyes, que la posteridad conocería por su nombre de pila, Galileo, nació en Pisa, Italia, en 1564, casi en el mismo día de la muerte de Miguel Angel y un año antes de que naciera Shakespeare. Su padre le envió a la Universidad de Pisa, donde su sarcástica combatividad le ganó rápidamente el apodo de «provocador». Aunque en un principio pensó en estudiar medicina —estaba mejor remunerada que la mayoría de las otras profesiones— pronto advirtió que no era una carrera para él. Descubrió la belleza de las matemáticas y de ahí en adelante dedicó su vida a este tema, junto con la física y la astronomía. No sabemos con exactitud cuándo o cómo se hizo copernicano, pero según su propio testimonio esto ocurrió antes de 1597.

Galileo hizo su primera contribución a la astronomía antes de que hubiera utilizado un telescopio. En 1604 una «nova» o nueva estrella apareció repentinamente en la constelación de Ofiuco. Galileo demostró que se trataba de una «verdadera» estrella, ubicada fuera, en los espacios celestes, y no dentro de la esfera de la Luna. Es decir, Galileo encontró que esta nueva estrella no tenía una paralaje medible y que, por lo tanto, se hallaba muy lejos de la Tierra. Asestó así un buen golpe al sistema de la física aristotélica, pues demostró que el cambio *podía* darse en los cielos a pesar de Aristóteles, quien había mantenido que los cielos eran inmutables, y limitado la región donde era posible el cambio a la Tierra y sus alrededores. Su prueba le pareció a Galileo tanto más decisiva cuanto que se trataba de la segunda nova sin paralaje medible encontrada por los observadores. La anterior de 1572, en la constelación de Casiopea, había sido estudiada por el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601), la figura más destacada en la astronomía entre Copérnico y Galileo. Entre los logros de Tycho se halla el diseño y la construcción de mejores instrumentos para las observaciones a simple vista y el establecimiento de nuevos órdenes de exactitud en la observación astronómica. La nova de Tycho, cuyo brillo en su apogeo competía con el de Venus, para luego desvanecerse paulatinamente, lució durante dieciséis meses. Esta estrella no tenía ninguna paralaje perceptible, y tampoco participaba del movimiento de los planetas, sino que mantenía una orientación constante en relación con las demás estrellas fijas. Tycho concluyó correctamente que era posible el cambio en la región de las estrellas fijas, al margen de lo que hubiera dicho Aristóteles o cualquiera de sus partidarios. Las observaciones de Tycho contribuyeron a acumular pruebas contra Aristóteles, pero el golpe decisivo tuvo que esperar hasta la noche en que Galileo enfocó por vez primera su telescopio hacia las estrellas.

El telescopio: un paso gigante

La historia del telescopio es por sí misma un tema interesante. Algunos especialistas han intentado establecer que tal instrumento había sido concebido ya en la Edad Media. En un libro publicado por Thomas Digges en 1571 se describía un instrumento quizá parecido a un telescopio, y alrededor de 1604 un científico holandés poseía un telescopio con una inscripción que afirmaba que había sido construido en Italia en 1590. El efecto, si es que hubo alguno, que tuvieron estos tempranos instrumentos sobre el desarrollo definitivo de los telescopios nos es desconocido; quizá sea éste un ejemplo de un invento que se efectuó y más tarde se perdió. Pero en 1608 este instrumento fue reinventado en Holanda, y hay por lo menos tres personas que reclaman para sí el honor de haber construido el «primero». Nos preocupa poco aquí quién merece realmente tal honor, ya que nuestro problema principal consiste en averiguar cómo cambió el telescopio el curso del pensamiento científico. En algún momento, a principios de 1609, Galileo conoció un informe sobre el telescopio, el cual, sin embargo, no contenía ninguna información específica sobre la manera en que el instrumento estaba construido. Anotó:

> ...llegó a mis oídos la noticia de que cierto flamenco había fabricado un anteojo mediante el que los objetos visibles muy alejados del ojo del observador se discernían claramente como si se hallasen próximos. Sobre dicho efecto, en verdad admirable, contábanse algunas experiencias a las que algunos daban fe, mientras que otros las negaban. Este extremo me fue confirmado pocos días después en una carta de un noble galo, Jacques Badovere, de París [un antiguo discípulo de Galileo], lo que constituyó el motivo que me indujo a aplicarme por entero a la búsqueda de las razones, no menos que a la elaboración de los medios por los que pudiera alcanzar la invención de un instrumento semejante, lo que conseguí poco después basándome en la doctrina de las refracciones. Y, ante todo, me procuré un tubo de plomo a cuyos extremos adapté dos lentes de vidrio, ambas planas por una cara, mientras que por la otra eran convexa la

una y cóncava la otra. Acercando luego el ojo a la cóncava, vi los objetos bastante grandes y próximos, ya que aparecían tres veces más cercanos y nueve veces mayores que cuando se contemplaban con la sola visión natural. Más tarde me hice otro más exacto que representaba los objetos más de sesenta veces mayores. Por último, no ahorrando en gastos ni fatigas, conseguí fabricar un instrumento tan excelente que las cosas con él vistas parecen casi mil veces mayores y más de treinta veces más próximas que si se observasen con la sola facultad natural.

Galileo no era el único observador que apuntaba el nuevo instrumento hacia el cielo. Incluso es posible que dos observadores —Thomas Harriot en Inglaterra y Simon Marius en Alemania— hayan ido en algunos aspectos por delante de él. Pero parece que hay un acuerdo general en que puede concederse a Galileo el mérito de haber sido el primero en utilizar el telescopio para fines astronómicos, y que esta atribución queda justificada por «la manera persistente con la que examinó objeto tras objeto, siempre que parecía haber una perspectiva razonable de obtener resultados; por la energía y agudeza con las que seguía cada pista; por la independencia de espíritu con la que interpretó sus observaciones, y sobre todo por la perspicacia con la que reconocía su importancia astronómica», como afirmó Arthur Berry, historiador de la astronomía británico. Además, Galileo fue el primero en publicar un informe sobre el universo visto a través de un telescopio. El «mensaje» que Galileo diseminó por todo el mundo en su libro de 1610 revolucionó la astronomía (véase el apéndice 1).

Es imposible exagerar los efectos de los descubrimientos telescópicos sobre la vida de Galileo; tan profundos fueron. Esto es cierto no sólo con respecto a su vida y pensamiento personales, sino que también es igualmente cierto en lo que se refiere a su influencia sobre la historia del pensamiento científico. Galileo había vivido la experiencia de percibir los cielos tal y como son en realidad quizá por primera vez [1], y dondequiera que miraba encontraba una prueba que apoyaba al sistema copernicano frente al ptolemaico, o que cuanto menos debilitaba la autoridad de los antiguos. Esta portentosa experiencia —observar las profundidades del Universo, ser el primer mortal en conocer e informar al mundo cómo son realmente los cielos— causó a Galileo una impresión tan honda que sólo considerando los acontecimientos de 1609 en su justa proporción se puede comprender el rumbo que tomaría su vida a partir de entonces. Y sólo de esta manera podemos apreciar cómo aconteció aquella gran revolución

[1] No podía saber si, de hecho, algunos otros observadores se habían anticipado a su estudio de los cielos a través de un telescopio.

en la ciencia de la dinámica de la que puede decirse con propiedad que marca el comienzo de la física moderna.

Para ver cómo se produjeron estos acontecimientos volvamos a los relatos de Galileo sobre sus descubrimientos en un libro que llamó *Sidereus nuncius*, es decir, *El mensajero sideral* (que es posible traducir también como *El mensajero estelar* o *El mensaje estelar*). En su subtítulo se dice que el libro revela «grandes y muy admirables maravillas e invita a contemplarlas a todos, aunque en especial a los filósofos y astrónomos». Los nuevos fenómenos observados, según declara la portada del libro, se podían hallar «en la faz de la Luna, en innumerables fijas, en la Vía Láctea, en las estrellas nebulosas, aunque sobre todo en cuatro planetas que giran con admirable rapidez en torno a la estrella de Júpiter con desiguales intervalos y períodos, de los que nadie supo hasta este día y que hace poco observó por vez primera el autor, decidiendo llamarlos astros mediceos».

El paisaje de la Luna

Inmediatamente después de describir la construcción y el uso del telescopio, Galileo se ocupa de los resultados. Revisaría «las observaciones realizadas en los últimos dos meses, invitando a todos los amantes de la verdadera filosofía a la contemplación de grandes cosas».

El primer cuerpo celeste a estudiar era la Luna, el objeto más prominente de los cielos (a excepción del Sol), y el más cercano a nosotros. Los toscos grabados en madera que acompañan al texto de Galileo no pueden transmitir la sensación de maravilla y deleite que en él despertó esta nueva visión de la Luna. El paisaje lunar, visto a través del telescopio (láminas 2 y 3), se despliega ante nosotros como un mundo muerto —un mundo sin color y, en la medida en que se puede apreciar, un mundo sin ningún tipo de vida. Pero la característica que más claramente se destaca en la fotografía, y que tanto impresionó a Galileo en 1609, es que la superficie de la Luna parece ser una especie de fantasmal paisaje *terrestre*. Nadie que vea estas fotografías, y nadie que mire a través de un telescopio, puede evitar la sensación de que la Luna es una Tierra en miniatura, por muy muerta que pueda parecer y de que allí hay montañas y valles, océanos y mares con sus islas. Todavía hoy nos referimos a estas regiones parecidas a océanos con el término «maria», si bien sabemos, como más tarde descubrió Galileo, que no hay agua en la Luna, y que éstas no son mares en modo alguno (véase el apéndice 2).

Las manchas de la Luna, sea lo que fuere lo que se hubiera dicho sobre ellas antes de 1609, fueron vistas por Galileo bajo una luz nueva y distinta (lámina 4). Halló «que la superficie de la Luna no es de hecho lisa, uniforme y de esfericidad exactísima, tal y como ha enseñado de ésta y otros cuerpos celestes una numerosa cohorte de filósofos, sino que, por el contrario, es desigual, escabrosa y llena de cavidades y prominencias, no de otro modo que la propia faz de la Tierra, que presenta aquí y allá las crestas de las montañas y los abismos de los valles». El brillante estilo con el que Galileo describe el carácter terrestre de la Luna es manifiesto en el siguiente extracto:

> Mas ocurre también que no sólo los confines entre las tinieblas y la luz se ven desiguales y sinuosos en la Luna, sino que además, lo que representa una mayor maravilla, en la parte tenebrosa de la Luna aparecen innumerables puntos luminosos completamente separados y desgajados de la región iluminada, alejándose de ella un intervalo no pequeño. Estos puntos, poco a poco y transcurrido un cierto tiempo, aumentan de tamaño y de luz, uniéndose después, al cabo de dos o tres horas, a la restante parte iluminada que se ha tornado mayor. Pero, entretanto, más y más cúspides, cual si brotasen aquí y allí, se encienden en la parte tenebrosa, crecen y terminan también por unirse a la misma superficie luminosa que se ha ido dilatando cada vez más. ¿Acaso no ocurre lo mismo en la Tierra, donde antes de la salida del Sol las más altas cimas de los montes se hallan iluminadas por los rayos solares, mientras que la sombra ocupa aún las llanuras? ¿Acaso al cabo de un tiempo no se va dilatando aquella luz a medida que se iluminan las partes medias y más amplias de esos mismos montes y, una vez que el Sol ha salido, no terminan por unirse las partes iluminadas de llanuras y colinas? La variedad de tales elevaciones y cavidades de la Luna parece superar en todos los sentidos la aspereza de la superficie terrestre, como más adelante demostraremos.

No sólo describió Galileo la aparición de montañas en la Luna; también midió su altura [2]. Es característico de Galileo, como científico de la escuela moderna, el que tan pronto como encontraba cualquier tipo de fenómeno, quisiera medirlo. Está muy bien que nos informen de que el telescopio revela la existencia de montañas en la Luna, como las que hay en la Tierra. ¡Pero cuánto más extraordinario es, y cuánto más convincente, que nos informen de que hay montañas en la Luna y que tienen exactamente una altura de 4 millas! El cálculo que hizo Galileo de la altura de las montañas de la Luna ha resistido la prueba del tiempo, y hoy día concordamos con la estimación que hizo de su altura máxima. (Los interesados encontrarán

[2] Una de las maravillas de nuestra época es que los astronautas hayan viajado a la Luna y observado que su superficie es tal y como Galileo la había descrito; una hazaña que millones de observadores pudieron ver en sus pantallas de televisión, y que ha quedado registrada para la posteridad en el testimonio de fotografías y muestras de roca.

en la figura 16 el método que empleó Galileo para calcular la altura de estas montañas.)

Para ver que es todo un abismo el que separa la descripción realista que Galileo da de la Luna, que se parece a la descripción que podría dar un piloto de la Tierra vista desde el aire, de la concepción comúnmente aceptada, lea las siguientes líneas de la *Divina comedia*, de Dante. Escrita en el siglo XIV, esta obra se considera generalmente como la máxima expresión de la cultura medieval. En esta parte del poema Dante ha llegado a la Luna y discute ciertas de sus características con Beatriz, quien le habla con la «voz divina». Así es como le pareció la Luna a este viajero medieval del espacio:

Parecíame que nos envolvía una nube lúcida, densa, sólida y bruñida, como un diamante herido por los rayos del Sol.
La perla eterna nos recibió dentro de sí como el agua que, permaneciendo unida, recibe un rayo de luz...

Dante le preguntaba a Beatriz:

«Pero decidme: ¿qué son esas oscuras señales sobre este cuerpo, que allá abajo en la Tierra dan ocasión a la gente de contar la patraña de Caín?»
Se sonrió un poco y me dijo: «Y si la opinión de los mortales se extravía, allá donde la llave de los sentidos no puede abrir,
en verdad no deberían herirte ya las flechas de la admiración; pues ves que si la razón cede a los sentidos, debe tener muy cortas las alas...»

Dante había escrito que los sentidos del hombre le engañan, que la Luna es en realidad eterna, perfecta y absolutamente esférica, e incluso homogénea. Creía que no se debía sobrestimar el poder de la razón, ya que la mente humana no es lo suficientemente poderosa como para desentrañar los misterios cósmicos. Galileo, por otro lado, confiaba en la revelación de los sentidos ampliada por el telescopio, y así concluyó:

De este modo, si alguien quisiese resucitar la antigua opinión de los pitagóricos según la cual la Luna sería algo así como otra Tierra, la parte más luminosa de ella representaría más bien la superficie sólida, mientras que la más oscura sería el agua. Por mi parte, nunca he dudado de que, en el globo terrestre visto desde lejos cuando se halla iluminado por los rayos solares, la superficie de la tierra se ofrece a la vista más luminosa y la líquida más oscura.

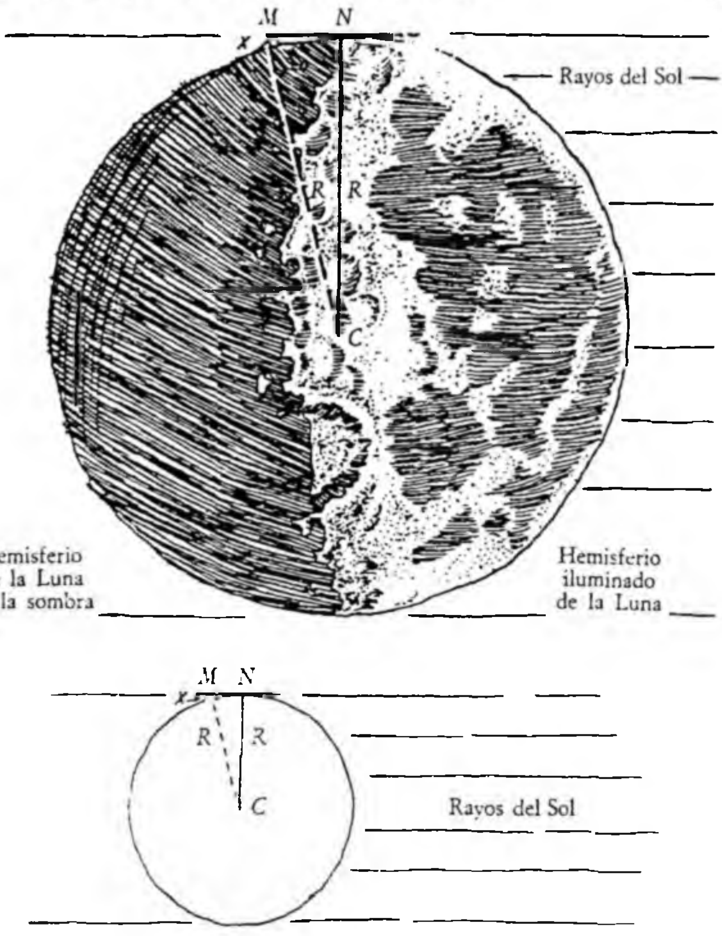


FIG. 16.—*La medición que efectuó Galileo de la altura de las montañas de la Luna era sencilla pero convincente. El punto N es el terminator (frontera) entre las partes iluminada y no iluminada de la Luna. El punto M es una mancha brillante observada en la región de la sombra; Galileo supuso correctamente que la mancha brillante era el pico de una montaña, cuya base permanecía en la sombra debido a la curvatura de la Luna. Podía calcular el radio de la Luna a partir de su distancia a la Tierra, ya conocida, y podía estimar la distancia NM a través de su telescopio. Entonces, por el teorema de Pitágoras,* $CM^2 = MN^2 + CN^2$ *o, como R es el radio y x la altura del pico,*

$$(R + x)^2 = R^2 + MN^2$$
$$R^2 + 2Rx + x^2 = R^2 + MN^2$$
$$x^2 + 2Rx - MN^2 = O,$$

ecuación que se resuelve fácilmente para x, la altura del pico.

Aparte de la afirmación sobre el agua, que Galileo corrigió más tarde, la importancia de esta conclusión reside en que Galileo vio que la superficie de la Luna aporta una prueba de que la Tierra no es única. Como la Luna se parece a la Tierra, había demostrado que cuanto menos el cuerpo celeste más cercano no goza de esta uniforme perfección esférica atribuida por las autoridades clásicas a todos los cuerpos celestes. No se refirió a esto sólo de pasada; algo más adelante vuelve sobre esta idea, cuando compara una parte de la Luna con una región específica de la Tierra: «El lugar que se halla casi en el centro de la Luna está ocupado por una cavidad mayor que todas las demás, siendo de una figura perfectamente redonda... Por lo que atañe a las luces y sombras, ofrece el mismo aspecto que habría de presentar sobre la Tierra la superficie similar de Bohemia si se hallase circundada por montes altísimos dispuestos perfectamente en círculo.»

Luz cenicienta

En este punto, Galileo introduce un descubrimiento aún más sorprendente: la luz lunar cenicienta. Este fenómeno puede verse en la fotografía reproducida en la lámina 5. En la misma se pone de manifiesto, al igual que puede verse examinando la Luna a través de un telescopio, lo que Galileo llamaba una iluminación «secundaria» de la superficie oscura de la Luna. Es posible demostrar geométricamente que esta iluminación concuerda a la perfección con la luz del Sol que refleja la Tierra hacia las regiones oscuras de la Luna. No puede ser una luz propia de la Luna, ni una contribución de la luz estelar, ya que entonces se manifestaría durante los eclipses, y esto no es así. Tampoco puede provenir de Venus o de cualquier otra fuente planetaria. ¿Qué hay de tan notable, preguntaba Galileo, en una Luna iluminada por la Tierra? «En justa y agradecida compensación devuelve la Tierra a la Luna una iluminación pareja a la que recibe casi continuamente de la misma Luna en las más profundas tinieblas de la noche.» Por muy asombroso que pudiera haber parecido este descubrimiento a los lectores de Galileo, hemos de apuntar que la luz cenicienta había sido estudiada con anterioridad por el maestro de Kepler, Michael Mästlin, en una disputa sobre eclipses (1596), y por el mismo Kepler en su tratado sobre óptica de 1604.

Galileo termina su descripción de la Luna informando a sus lectores de que examinará este tema más extensamente en su libro sobre *El sistema del mundo*. «En este libro —dice—, con numerosas razones y experiencias mostraré cuán potente es la luz solar reflejada por la Tierra a quienes pretendan que ha de atribuirse a la danza de las estrellas, sobre todo por hallarse [la Tierra] carente de luz y movimiento. Por nuestra parte, confirmaremos con demostraciones y aun con mil razones naturales que aquélla es errante y superior en brillo a la Luna, y no un sumidero de inmundicias y heces terrenales.» Este fue el primer anuncio de Galileo de que estaba escribiendo un libro sobre el sistema del mundo, una obra que se demoró muchos años y que —cuando finalmente se publicó— motivó su proceso por la Inquisición romana y su condena y subsiguiente encarcelamiento.

Pero fíjese en lo que Galileo había probado hasta entonces. Mostró que los antiguos estaban equivocados en sus descripciones de la Luna. La Luna no es el cuerpo perfecto que habían mostrado, sino que se parece a la Tierra, la cual, por lo tanto, no puede considerarse única, y, en consecuencia, distinta de todos los objetos celestes. Y, por si esto no fuera suficiente, sus estudios sobre la Luna habían mostrado que la Tierra brilla. Ya no era válido decir que la Tierra no es un cuerpo brillante como los planetas. Y si la Tierra brilla al igual que la Luna, ¡quizás los planetas también brillan del mismo modo, reflejando la luz del Sol! Recuerde que en 1609 todavía seguía sin resolver la cuestión de si los planetas brillan con luz propia, como el Sol y las estrellas, o si brillan a causa de la luz reflejada, como la Luna. Como veremos en breve, uno de los mayores descubrimientos de Galileo fue que los planetas brillan por la luz que reflejan al circundar al Sol en sus órbitas.

Abundancia de estrellas

Antes de tratar de este tema vamos a mencionar brevemente algunos de los otros descubrimientos de Galileo. Cuando Galileo miró las estrellas fijas encontró que, al igual que los planetas, «no parecen aumentar de tamaño en la misma proporción según la cual se incrementan los restantes objetos, incluyendo la Luna». Además, llamó la atención sobre «la diferencia que media entre el aspecto de los planetas y las estrellas fijas» en el telescopio. «Los planetas presentan sus globos exactamente redondos y delineados y, a modo de lunitas completamente inundadas de luz, aparecen orbiculares, mientras que las estrellas nunca se ven delimitadas por un contorno circular, sino que presentan como fulgores cuyos rayos vibran en torno y centellean notablemente.» Tenemos aquí la base de una de las grandes respuestas de Galileo a los detractores de Copérnico. Evidentemente, las estrellas tienen que estar a una distancia enorme de la Tierra en comparación con los planetas, ya que un telescopio puede aumentar los planetas hasta que parezcan discos, pero no puede hacer lo mismo con las estrellas fijas.

Galileo relató cómo se sintió «abrumado por la ingente abundancia de estrellas», tantas que encontró que, «diseminadas en torno a las antiguas y dentro de los límites de uno o dos grados se reúnen más de quinientas». A las tres estrellas ya conocidas en el Cinturón de Orión y a las seis de la Espada (véase fig. 17) añadió «ochenta recientemente contempladas». Presentó los resultados de sus observaciones en varios dibujos con un gran número de estrellas descubiertas por vez primera entre las estrellas antiguas. Aunque Galileo no lo dijera explícitamente, esto significaba que apenas era necesario confiar en los antiguos, ya que éstos no habían visto jamás la mayoría de las estrellas, y habían hablado basándose en elementos de juicio lamentablemente incompletos. Galileo expuso una desventaja de la observación a simple vista en términos de «la naturaleza o carácter de la Vía Láctea». Con la ayuda del telescopio, escribió, se ha examinado la Vía Láctea, «dirimiendo así con la certeza que dan los ojos todos los altercados que han atormentado durante tantos siglos a los filósofos y liberándonos de las disputas verbales». Vista a través del telescopio, la Vía Láctea «no es otra cosa que un conglomerado de innumerables estrellas reunidas en montón. Hacia cualquier región que se dirija el anteojo, inmediatamente se presenta a la vista una ingente cantidad de estrellas». Y esto era cierto no sólo para la Vía Láctea, sino también para «las estrellas que hasta este día han denominado todos los astrónomos 'nebulosas'», y que «son cúmulos de estrellitas admirablemente esparcidas». Y ahora la gran noticia:

> Hemos expuesto brevemente lo que hasta ahora hemos observado respecto a la Luna, las estrellas inerrantes y la Galaxia. Resta lo que parece más notable de la presente empresa, cual es mostrar y dar a conocer cuatro PLANETAS nunca vistos desde el comienzo del mundo hasta nuestros días y las circunstancias de su descubrimiento y observación, así como sus posiciones y las observaciones realizadas los dos últimos meses acerca de sus desplazamientos y cambios. Asimismo invitamos a todos los astrónomos a que se dediquen a la investigación y definición de sus períodos, cosa que nosotros no hemos podido hacer en absoluto hasta hoy por falta de tiempo. Sin embargo, advertimos nuevamente, a fin de que no se entreguen inútilmente a tal inspección, que se precisa un anteojo muy exacto, como el que describimos al comienzo de este discurso.

Es interesante observar que Galileo llamaba los objetos que acababa de descubrir «estrellas Mediceas», aunque nosotros las llamaríamos lunas o satélites de Júpiter [3]. Hemos de recordar que en los

[3] Nuestro término «satélite» se convirtió en parte del lenguaje estándar de la ciencia sólo después de que fuera utilizado en este sentido por Newton en sus *Principia* (1687).

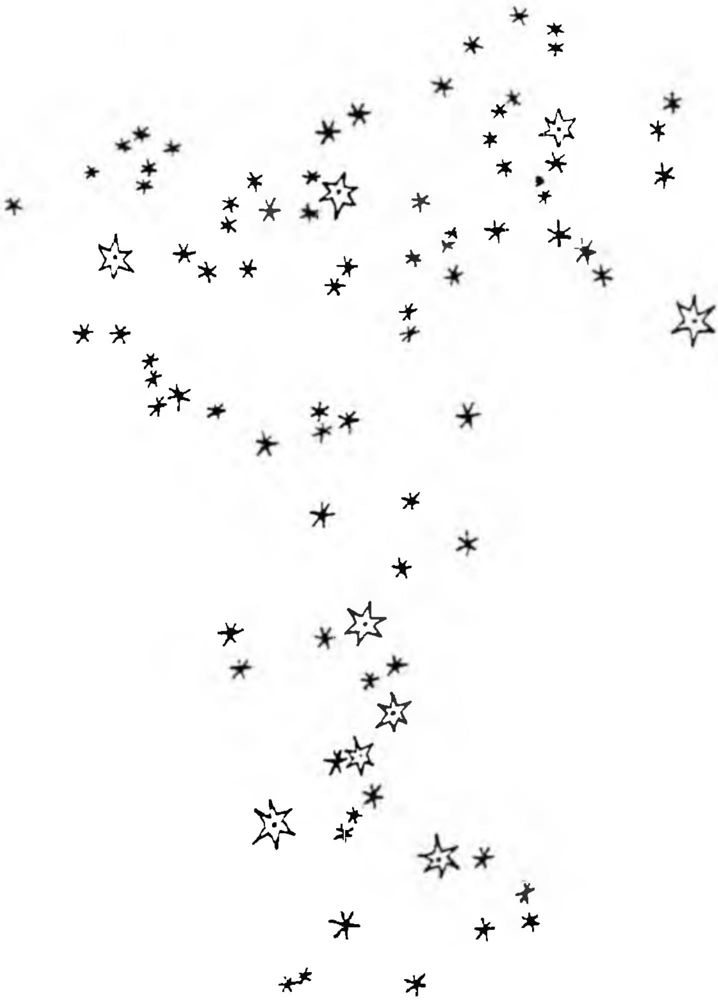


FIG. 17.—*El Cinturón y Espada de Orión, visto a través del telescopio de Galileo, contenía ochenta estrellas más (las más pequeñas) de las que se podían discernir a simple vista.*

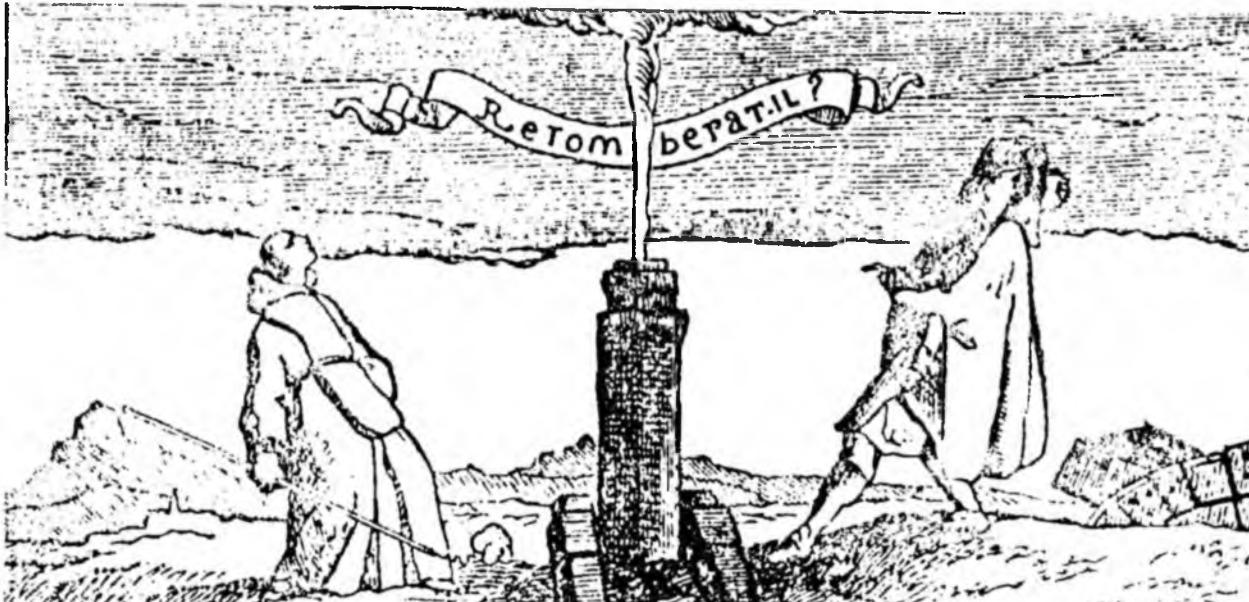


LÁMINA 1.—*«¿Volverá a caer en el mismo sitio?» Este antiguo grabado en madera, tomado de la correspondencia de René Descartes, ilustra un experimento propuesto por el Padre Mersenne, contemporáneo y amigo de Galileo, para verificar el comportamiento de cuerpos en caída. «Retombera-t-il?» pregunta la leyenda. ¿Volverá a caer aquí la bala del cañón?*

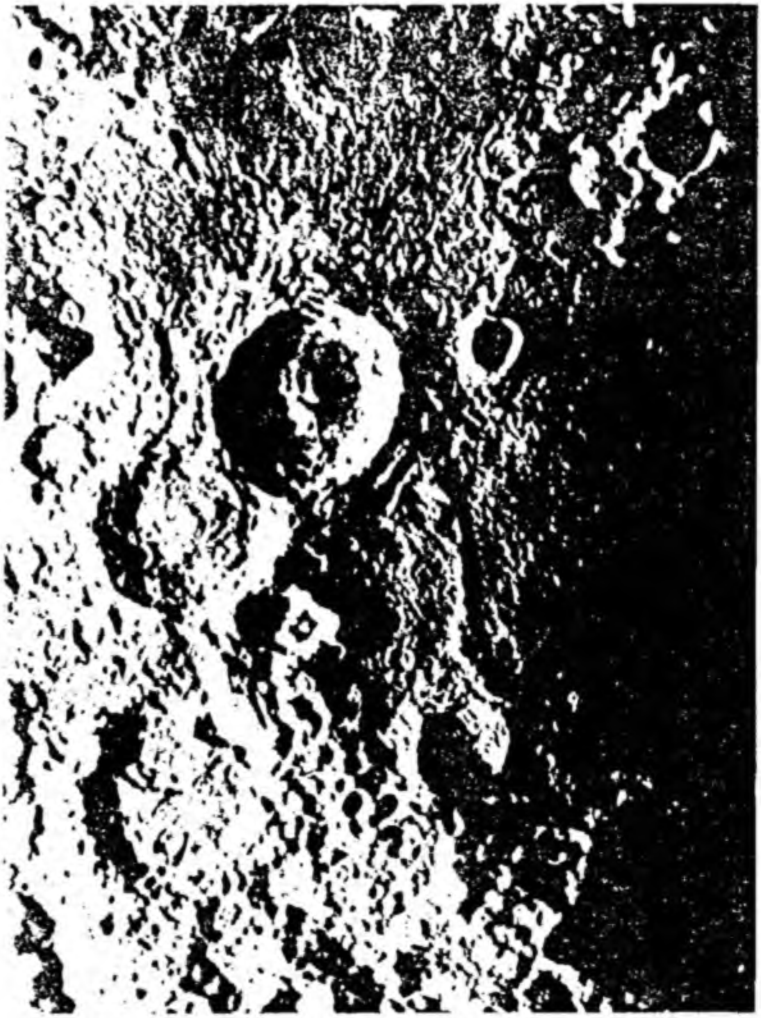


LÁMINA II.—*Un paisaje como el de la Tierra, pero muerto, fue lo que impresionó a Galileo la primera vez que enfocó su telescopio hacia la Luna.*

LÁMINA III.—*Galileo fue el primero en ver los cráteres de la Luna. Sus observaciones acabaron con la vieja creencia de que la Luna era lisa y perfectamente esférica.*

LÁMINA IV.—*Se reproduce aquí un dibujo de la Luna hecho por el mismo Galileo, pero al revés con respecto a la forma en que se muestran habitualmente las fotografías astronómicas. Las cámaras telescópicas toman las fotos invertidas.*

tiempos de Galileo casi todos los objetos celestes se denominaban estrellas —un término que podía incluir tanto las estrellas fijas como las estrellas errantes (o planetas). De aquí que los objetos recién descubiertos, que eran «errantes» y, por tanto, del tipo de los planetas, pudieran llamarse también estrellas. La mayor parte del libro de Galileo, de hecho, está dedicada a sus metódicas observaciones de Júpiter y de las «estrellas» que estaban próximas. Unas veces se las veía al este y otras al oeste de Júpiter, pero nunca muy lejos del planeta. Acompañaban a Júpiter «no sólo en su movimiento directo, sino también en el retrógrado», de forma que era evidente que estaban de alguna manera relacionados con el planeta.

El testimonio de Júpiter

La primera idea, la de que éstas podrían ser simplemente algunas nuevas estrellas cerca de las cuales se veía a Júpiter, fue desechada cuando Galileo observó que estos objetos recién descubiertos seguían su camino junto a Júpiter (véase apéndice 2). También le fue posible mostrar que los tamaños de sus respectivas órbitas alrededor de Júpiter eran diferentes, al igual que sus tiempos periódicos. Permitámosle exponer con sus propias palabras las conclusiones que extrajo:

> Tenemos aquí un argumento notable y óptimo para eliminar los escrúpulos de quienes, aceptando con ecuanimidad el giro de los planetas en torno al Sol según el sistema copernicano, se sienten con todo turbados por el movimiento de la sola Luna en torno a la Tierra, al tiempo que ambas trazan una órbita anual en torno al Sol, hasta el punto de considerar que se debe rechazar por imposible esta ordenación del universo. En efecto, ahora tenemos, no ya un planeta girando en torno a otro al tiempo que ambos recorren una gran órbita en torno al Sol, sino ciertamente cuatro estrellas que, como la Luna alrededor de la Tierra, nuestros sentidos nos ofrecen errando en torno a Júpiter, a la vez que todas ellas recorren junto con Júpiter una gran órbita en torno al Sol en el lapso de doce años.

Júpiter, un modelo a pequeña escala de todo el sistema copernicano, en el que cuatro pequeños cuerpos se mueven alrededor del planeta del mismo modo en que los planetas se mueven alrededor del brillante Sol, constituyó, por tanto, la respuesta a una de las principales objeciones al sistema copernicano. En este punto, Galileo no podía explicar por qué era posible que Júpiter se moviera en su órbita sin perder a los cuatro acompañantes que le rodeaban, como tampoco era realmente capaz de explicar cómo podía moverse la Tierra a través del espacio sin perder la Luna que gira a su alrededor. Pero, supiera o no la razón, estaba perfectamente claro que, en todos y cada uno de los sistemas del mundo que se habían podido concebir, Júpiter se movía en una órbita, y si podía hacer esto sin perder cuatro de sus lunas, ¿por qué no podía moverse la Tierra sin perder una única luna? Además, si Júpiter tiene cuatro lunas, la Tierra ya no puede considerarse excepcional en sentido de ser el único objeto en el universo con una luna. Por lo demás, poseer cuatro lunas es ciertamente más impresionante que tener sólo una.

Aunque el libro de Galileo termina con la descripción de los satélites de Júpiter, será conveniente, antes de que exploremos las implicaciones de su investigación, discutir otros tres descubrimientos astronómicos que hizo con su telescopio. El primero era el hallazgo de que Venus muestra fases. Por una serie de razones, este descubrimiento lo llenó de alegría. En primer lugar, esto demostraba que Venus brillaba por la luz reflejada, y no por una luz propia; esto significaba que Venus, en este aspecto, es igual que la Luna y también que la Tierra (la cual, como Galileo había descubierto anteriormente, brilla por la luz reflejada del Sol). Aquí había otra característica similar entre los planetas y la Tierra; otra brecha en la antigua barrera filosófica entre la Tierra y los objetos «celestes». Además, como se puede ver en la figura 18A, si Venus se mueve en una órbita alrededor del Sol, no sólo pasará por un ciclo de fases completo, sino que, visto con un aumento constante, las diferentes fases se mostrarán de diferentes tamaños, debido al cambio en la distancia entre Venus y la Tierra. Por ejemplo, cuando Venus se encuentra en una posición tal que podemos verlo como un círculo completo o casi completo, correspondiente a la Luna llena, el planeta está en el lado opuesto de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, o a la máxima distancia desde la Tierra. Cuando Venus se presenta como un medio círculo, correspondiente a un cuarto de Luna, el planeta no está tan lejos de la Tierra. Finalmente, cuando apenas vemos una luna creciente, Venus ha de encontrarse en el punto más próximo a la Tierra. Deberíamos esperar, por tanto, que Venus apareciese muy grande cuando se muestra con un creciente apenas perceptible; que cuando tiene la apariencia de un cuarto de luna sea de tamaño moderado; y que cuando vemos el disco completo sea muy pequeño.

Según el sistema ptolemaico, Venus (como Mercurio) no debería verse nunca lejos del Sol, y, por tanto, podría observársele sólo como una estrella matutina o vespertina cerca del lugar donde el Sol haya salido o se haya puesto. El centro del epiciclo de la órbita estaría permanentemente alineado con el centro de la Tierra y el centro del Sol, y se movería alrededor de la Tierra con un período de un año, al igual que el Sol. Sin embargo, está perfectamente claro, como po-

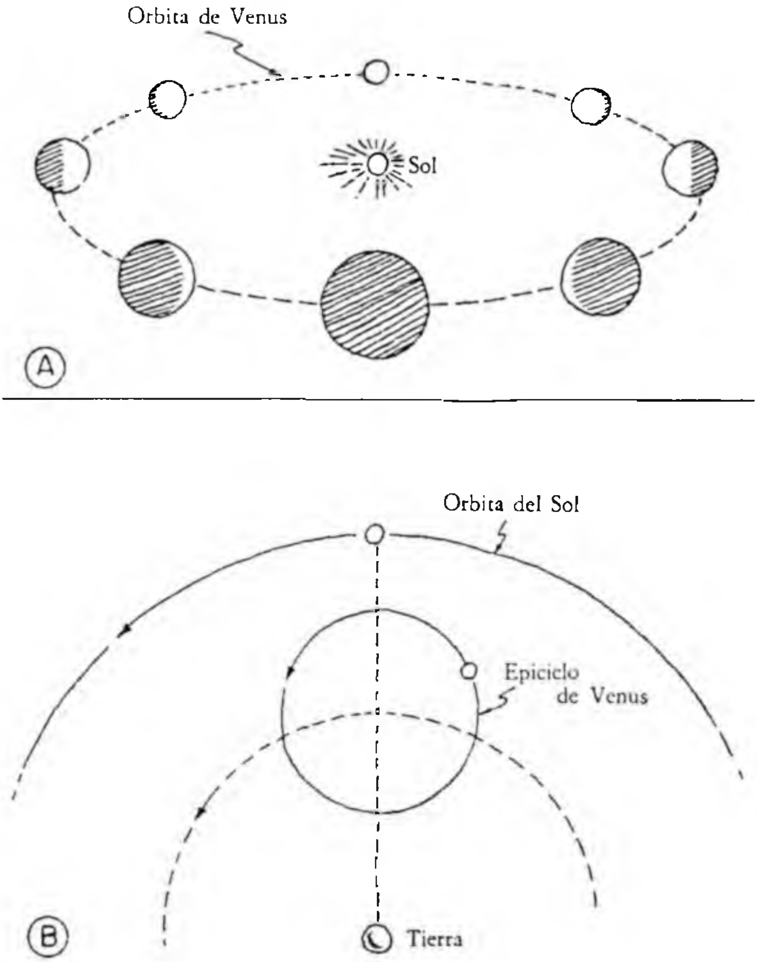


Fig. 18.—*Las fases de Venus, observadas por vez primera por Galileo, constituían un poderoso argumento contra la astronomía antigua. En (A) puede ver cómo la existencia de fases concuerda con el sistema de Copérnico y cómo el cambio en el diámetro aparente relativo de Venus apoya el concepto de que el planeta tiene una órbita solar. En (B) puede ver por qué este fenómeno sería imposible en el sistema ptolemaico.*

demos ver en la figura 18B, que bajo estas circunstancias nunca se podría ver la secuencia completa de fases que Galileo había observado —y que nosotros podemos observar. Por ejemplo, la posibilidad de ver Venus como un disco se da solamente si Venus se encuentra más alejado de la Tierra que el Sol; de acuerdo con los principios ptolemaicos, esto nunca puede suceder. Esto era, pues, un golpe sumamente decisivo contra el sistema ptolemaico.

No necesitamos extendernos mucho sobre los otros dos descubrimientos telescópicos de Galileo, debido a que tienen menos impacto que los anteriores. El primero fue el descubrimiento de que Saturno parece tener en ocasiones un par de «orejas», y que estas «orejas» cambian a veces su forma e incluso llegan a desaparecer. Galileo nunca pudo explicar este extraño fenómeno, porque su telescopio no podía resolver los anillos de Saturno. Pero al menos obtuvo un elemento de juicio que demostraba cuán erróneo era considerar a los planetas como cuerpos celestes perfectos, cuando podían tener formas tan singulares. Una de sus observaciones más interesantes fue la de las manchas en el Sol, descritas en un libro que llevaba por título *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares y sus accidentes* (1613). Estas manchas no sólo eran la prueba de que ni siquiera el Sol era el astro perfecto descrito por los antiguos; Galileo también fue capaz de mostrar, a partir de su observación, que se podía probar la rotación del Sol, e incluso calcular la velocidad con la cual gira sobre su eje. Pero aunque el hecho de que el Sol rota llegó a ser extremadamente importante en la mecánica del mismo Galileo, esto no implicaba que forzosamente hubiera de producirse una revolución anual de la Tierra alrededor del Sol.

Un nuevo mundo

Como se puede imaginar, el entusiasmo causado por estos nuevos descubrimientos fue de boca en boca, y la fama de Galileo se extendió. Bautizar a los satélites de Júpiter con el nombre de «estrellas mediceas» tuvo el esperado efecto de conseguirle el puesto de matemático del Gran Duque Cósimo de Médicis y le facilitó el retorno a su querida Florencia. El descubrimiento de los nuevos planetas fue saludado como el descubrimiento de un nuevo mundo, y Galileo fue aclamado como igual a Colón. No fueron sólo los científicos y filósofos los que se entusiasmaron con los nuevos descubrimientos; todas las personas inteligentes y cultas, poetas y cortesanos y pintores, respondieron de la misma forma. Una pintura del artista Cigoli para una capilla de Roma usó como motivo los descubrimientos telescópicos de Galileo sobre la Luna. En un poema de Johannes Faber, Galileo recibe la siguiente alabanza:

Cede, Vespucio, y permite que Colón lo haga. Cada uno de estos intentos, cierto es, un viaje a través del mar desconocido...
Pero sólo tú, Galileo, diste a la especie humana la sucesión de las estrellas, nuevas constelaciones del cielo.

El cardenal Maffeo Barberini escribió un poema en elogio de los descubrimientos de Galileo, aunque más tarde —como el Papa Urbano VIII— ordenaría que Galileo fuese procesado por la Inquisición; manifestó a éste que quería añadir lustre a su poesía relacionándola con el nombre de Galileo. Ben Jonson escribió una mascarada que alude a los descubrimientos astronómicos de Galileo; tituló su obra *Noticias del mundo* —no el nuevo mundo de América, sino la Luna, de donde nos llegan las noticias a través del telescopio (si bien aquí llegan a través de la poesía). Para hacerse una idea de la manera en que se difundieron estas noticias, lea el siguiente extracto de una carta escrita el mismo día en que el *Sidereus nuncius* de Galileo apareció en Venecia, el 13 de marzo de 1610, por sir Henry Wotton, el embajador británico allí:

> Ocupándome ahora de los acontecimientos actuales, por la presente le envío a Su Majestad la noticia más extraña (como con justicia puedo llamarla) que jamás haya recibido de parte alguna del mundo; se trata del libro que adjunto (recibido este mismo día) del Profesor Matemático en Padua, quien con la ayuda de un instrumento óptico (que amplía y a la vez aproxima el objeto) inventado por primera vez en Flandes, y mejorado por él, ha descubierto cuatro nuevos planetas que giran alrededor de la esfera de Júpiter, aparte de muchas otras estrellas fijas desconocidas; asimismo, la verdadera causa de la *Vía Láctea*, tan largamente buscada; y, por último, que la Luna no es esférica, sino dotada de muchas prominencias, y, lo que es lo más extraño de todo, iluminada con la luz solar por reflexión desde el cuerpo de la Tierra, como parece que dice. Así que en cuanto al tema, primero ha desbaratado toda la astronomía anterior —porque necesitamos de una nueva esfera para salvar las apariencias— y luego toda la astrología. En virtud de estos nuevos planetas tiene que variar por necesidad la parte judiciaria, y ¿por qué no puede haber allí aún más? Sobre estas cosas he sido tan atrevido de hablar a Su Señoría, de las cuales aquí todos los rincones están llenos. Y el autor corre la suerte de o bien ser enormemente famoso o tremendamente ridículo. Con el próximo barco, Su Señoría recibirá de mi parte uno de los mencionados instrumentos, tal como ha sido mejorado por este hombre.

Cuando Kepler escribió sobre los descubrimientos de Galileo en el prefacio de su *Dióptrica*, más parecía un poeta que un científico:

«¿Y ahora, querido lector, qué haremos con nuestro telescopio? ¿Lo tendremos como una varita mágica de Mercurio para cruzar con ella el éter líquido y, como Luciano, guiar a una colonia a la inhabitada estrella vespertina, seducidos por la dulzura del lugar? ¿O lo tendremos por una flecha de Cupido que, entrando por nuestros ojos, ha penetrado en lo más profundo de nuestra mente para encender en nosotros el amor por Venus?» Embelesado, Kepler escribió: «¡Oh telescopio, instrumento de tanto conocimiento, más precioso que cualquier cetro! ¿Acaso quien te tiene en su mano no se convierte en rey y señor de la obra de Dios?»

En 1615, James Stephens podía llamar a su amante «mi catalejo, a través del cual observo la vanidad del mundo». Y Andrew Marvell escribió sobre el descubrimiento de las manchas solares de Galileo:

Así el Hombre su audaz tubo al Sol dirigió
y desconocidas manchas de las brillantes estrellas describió;
se ven oscurecerle, si bien de muy cerca complacen,
y parecen sus cortesanos, mas son su enfermedad.
A través del tronco óptico el planeta pareció escuchar,
y las arroja, desde entonces, en su carrera.

John Milton estaba bien enterado de los descubrimientos de Galileo. Milton, cuyas opiniones sobre el epiciclo se citaron en el capítulo 3, dijo que, cuando estuvo en Italia «hallé y visité al famoso Galileo, envejecido como prisionero de la Inquisición». En su *Paraíso perdido* se refiere más de una vez a la «lente de Galileo» o a la «lente óptica» del «artista toscano», y a los descubrimientos realizados con este instrumento. Escribiendo sobre la Luna en relación con los fenómenos más importantes descubiertos por Galileo, Milton se refiere a «nuevos países, ríos o montañas en su manchado globo»; y el descubrimiento de los planetas de Júpiter sugería que otros planetas también podían tener sus acompañantes: «... y otros soles, quizá con sus cortejantes lunas, vos divisaréis». Pero, aparte de las referencias específicas a los descubrimientos astronómicos de Galileo, lo que principalmente impresionó a Milton fue la inmensidad del universo y las innumerables estrellas descritas por él:

... estrellas
numerosas, y cada estrella quizá un mundo
destinado a habitación.

Esto transmite el espantoso pensamiento de la inmensidad del espacio, y el hecho de que la Tierra en movimiento debe ser una minúscula punta de alfiler sin lugar fijo en él.

Pocos años después de la publicación del libro de Galileo apareció una sensible reacción al mismo en las obras del poeta John Donne. Las investigaciones y descubrimientos de Galileo afloran una y otra vez en los escritos de Donne, y discute en particular a *El mensajero sideral* en una obra titulada *Ignatius his conclave,* en la cual se describe a Galileo como al «que recientemente ha pedido a los otros mundos, las estrellas, que se acerquen a él, y le den cuenta de sí mismos». Más tarde, Donne se refiere a «Galileo, el florentino... quien para estas fechas ya se ha instruido a fondo sobre todas las colinas, bosques y ciudades del nuevo mundo, la Luna. Y como obtuvo tantos resultados con sus primeras lentes, que vio la Luna a tan poca distancia que quedó del todo satisfecho, y las partes más ínfimas de ella, habiendo crecido ahora a una mayor perfección en su arte, hará que le construyan nuevas lentes, ... podrá traer la Luna, como una nave flotando sobre las aguas, tan cerca de la Tierra como quiera».

Antes de 1609 el sistema copernicano parecía ser una mera especulación matemática, una propuesta hecha para «salvar las apariencias». La suposición básica de que la Tierra era «simplemente otro planeta» había sido tan contraria a todos los dictados de la experiencia, la filosofía, la teología y el sentido común, que muy pocas personas se habían enfrentado a las impresionantes consecuencias del sistema heliostático. Pero después de 1609, cuando se descubrió a través de los ojos de Galileo cómo era el universo, tuvieron que aceptar el hecho de que el telescopio mostraba que el mundo no era ptolemaico ni aristotélico, en el sentido de que la singularidad que se atribuía a la Tierra (y la física basada en esta supuesta singularidad) no podía corresponder a la realidad. Sólo quedaban abiertas dos posibilidades: una era negarse a mirar a través del telescopio o negarse a aceptar aquello que se veía por él; la otra era rechazar la física de Aristóteles y la vieja astronomía geocéntrica de Ptolomeo.

En este libro estamos más interesados en el rechazo de la física aristotélica que en el de la astronomía ptolemaica, si bien una acompañaba a la otra. La física aristotélica, como hemos visto, se basaba en dos postulados que no soportarían el ataque copernicano: uno era la inmovilidad de la Tierra; el otro era la distinción entre la física de los cuatro elementos terrestres y la física del quinto elemento celeste. Podemos entender así que, después de 1610, se hiciera cada vez más claro que había que abandonar la vieja física y establecer una nueva —una física adecuada a la Tierra móvil que requería el sistema copernicano [4].

[4] Las observaciones de Galileo de las fases y tamaños relativos de Venus, y de la ocasional fase gibosa de Marte, probaron que Venus, y presumiblemente

Sin embargo, la mayoría de los pensadores de los decenios que siguieron a las observaciones telescópicas de Galileo no se preocupaban tanto por la necesidad de un nuevo sistema de física como por la de un nuevo sistema del mundo. Había desaparecido para siempre el concepto de que la Tierra tenía un lugar fijo en el centro del universo, ya que ahora se la concebía en movimiento, nunca en el mismo sitio durante dos instantes inmediatamente sucesivos cualesquiera. También se había desvanecido la idea tranquilizadora de que la Tierra es única, que es un objeto individual sin parangón en todo el universo, que nuestra singularidad requiere de una habitación singular. Había otros problemas que pronto surgieron, uno de los cuales era el tamaño del universo. Para los antiguos el universo era finito, siendo cada una de las esferas celestes, incluyendo la de las estrellas fijas, de un tamaño finito y moviéndose en su movimiento diurno de tal forma que cada una de sus componentes tenía una velocidad finita. Si las estrellas estuvieran a una distancia infinita no podrían moverse en su movimiento diurno circular alrededor de la Tierra con una velocidad finita, ya que la trayectoria de un objeto situado a una distancia infinita no puede ser finita. Por tanto, en el sistema geostático las estrellas fijas no podían estar infinitamente alejadas. Pero en el sistema copernicano, donde las estrellas fijas no solamente estaban fijas una respecto a otra, sino que de hecho se consideraban fijas en el espacio, no había tal limitación sobre su distancia.

No todos los copernicanos consideraban infinito al universo, y el mismo Copérnico ciertamente pensaba en el universo como finito, al igual que Galileo. Pero otros percibían que los descubrimientos de Galileo indicaban la presencia de innumerables estrellas a infinitas distancias, y a la misma Tierra disminuida a una partícula. La imagen del trastorno de «este pequeño mundo del ser humano», y lo que se había llamado «la comprensión de cuán insignificante es el papel que desempeña el mundo en un universo ampliado y en aumento»

---

los otros planetas, se mueven en órbitas alrededor del Sol. No hay observación planetaria mediante la cual nosotros, situados sobre la Tierra, podamos probar que ésta se mueve en una órbita alrededor del Sol. De este modo, todos los descubrimientos que Galileo efectuó con el telescopio pueden acomodarse al sistema inventado por Tycho Brahe poco antes de que Galileo iniciara sus observaciones de los cielos. En este sistema tychónico, los planetas Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno se mueven en órbitas alrededor del Sol, mientras que el Sol se mueve en una órbita alrededor de la Tierra en un año. Además, la rotación diaria de los cielos se transmite al Sol y a los planetas, de forma que la Tierra misma no gira ni da vueltas en una órbita. El sistema tychónico atraía a aquellos que buscaban salvar la inmovilidad de la Tierra al mismo tiempo que aceptaban algunas de las innovaciones copernicanas.

fueron brillantemente expresados en estas líneas de un eclesiástico y poeta sensible, John Donne:

Y la nueva filosofía todo lo pone en duda,
el elemento del fuego está casi extinguido;
el Sol está perdido, y la Tierra, y ningún humano entendimiento
sabe decir dónde ir a buscarlo.
Y los hombres confiesan libremente el fin de este mundo
cuando en los planetas y el firmamento
buscan tanto de nuevo; entonces ven que esto
se descompone otra vez en sus átomos.
Todo está en pedazos, toda coherencia perdida,
todo sólo materia, y todo relación.

Capítulo 5

HACIA UNA FISICA INERCIAL

Tras la segunda década del siglo XVII la realidad del sistema copernicano dejó de ser una vana especulación. El propio Copérnico, consciente de la índole de sus argumentos, había manifestado bastante explícitamente, en el prefacio de *Sobre las revoluciones de las esferas celestes,* que «la matemática es para los matemáticos». Otro prefacio, sin firma, recalcaba la recusación. Insertado en el libro de Osiander, un eclesiástico alemán a cuyas manos fue confiada la impresión, el segundo prefacio decía que el sistema copernicano no se exponía para que se debatiera sobre su verdad o falsedad, sino que simplemente era otro método más de cálculo. No hubo dificultades hasta que Galileo hizo sus descubrimientos con el telescopio; entonces cobró urgencia la resolución de los problemas de la física de una Tierra en movimiento. Galileo dedicó una parte considerable de su energía intelectual a este objetivo, y con resultados provechosos, ya que estableció los cimientos de la ciencia moderna del movimiento. Intentaba resolver dos problemas distintos: primero, explicar el comportamiento de cuerpos en caída sobre una Tierra en movimiento, los cuales caen exactamente como si se encontraran en una Tierra en reposo, y segundo, establecer nuevos principios para el movimiento de caída de cuerpos en general.

Movimiento lineal uniforme

Vamos a comenzar con el estudio de un problema limitado: el movimiento lineal uniforme. Bajo esta denominación se entiende un movimiento efectuado en línea recta de tal modo que, escogiendo dos intervalos iguales de tiempo cualesquiera, la distancia cubierta durante ellos siempre será idéntica. Esta es la definición que Galileo facilitó en su último y quizá más importante libro, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias,* publicado en 1638, después de su proceso y condena por la Inquisición romana [1]. En esta obra, Galileo expuso sus conclusiones más maduras en relación con la nueva ciencia del movimiento que había fundado. Subrayó particularmente el hecho de que, al definir el movimiento uniforme, es importante asegurarse de que la palabra «cualesquiera» esté incluida, pues de lo contrario, decía, la definición carecería de sentido. Aquí estaba ciertamente criticando a algunos de sus contemporáneos y predecesores.

Supongamos que existe tal movimiento en la naturaleza; podemos preguntar con Galileo: ¿Qué experimentos podríamos imaginar para demostrar su naturaleza? Si nos encontrásemos en un barco o carruaje que se mueve uniformemente en línea recta, ¿qué le ocurriría realmente a un grave al dejarlo caer libremente? La respuesta, como demostrará el experimento, es que en tales circunstancias la caída será en línea recta hacia abajo respecto del marco de referencia (digamos la cabina del barco o el interior del carruaje), y será así independientemente de que el marco de referencia esté parado respecto a los alrededores o se esté moviendo en línea recta a una velocidad constante. Expresándolo de otra manera, podemos establecer la conclusión general de que ningún experimento puede ejecutarse en una habitación sellada que se mueve en línea recta a velocidad constante que nos diga si estamos parados o nos estamos moviendo. En la experiencia real podemos distinguir frecuentemente si estamos quietos o en movimiento, porque podemos ver desde una ventana si hay algún movimiento relativo entre nosotros y la Tierra. Si la habitación no está perfectamente sellada podremos notar al aire desplazándose y originando una corriente. O podremos sentir la vibración del movimiento u oír el rechinar de las ruedas de un carruaje, un automóvil o un tren. Se halla implicada aquí una forma de relatividad, y esto fue constatado muy claramente por Copérnico, porque era esencial para su argumentación establecer que cuando dos objetos, como el Sol y la Tierra, se mueven el uno respecto al otro, es imposible distinguir cuál está parado y cuál está moviéndose. Copérnico podía señalar el ejemplo de dos barcos en el puerto, uno alejándose del otro. Un hombre situado en uno de ellos pregunta cuál de los dos, si es que hay alguno,

[1] Esta obra fue publicada en Leiden. Galileo, evidentemente, no aprobaba el título (elegido por el editor), el cual «consideraba inadecuado y plebeyo».

está anclado, y cuál está saliendo con la marea. La única forma de averiguarlo es observar la tierra, o un tercer barco anclado. En términos actuales, podríamos usar el ejemplo de dos trenes que se dirigen en dirección contraria sobre vías paralelas. Muchos de nosotros hemos tenido la experiencia de observar un tren en un andén adyacente y pensar que nos estamos moviendo, sólo para descubrir, una vez que el otro tren ha abandonado la estación, que hemos estado quietos todo el tiempo.

Una chimenea de locomotora y un barco en movimiento

Antes de seguir estudiando este punto es conveniente hacer un experimento. Esta demostración utiliza un tren de juguete que viaja sobre una vía recta con un movimiento que se aproxima mucho al movimiento uniforme. La chimenea de la locomotora contiene un pequeño cañón, accionado por un muelle, construido de tal forma que pueda lanzar verticalmente en el aire una bola de acero o una canica. Cuando el cañón está cargado y el muelle dispuesto, un dispositivo debajo de la locomotora acciona un pequeño gatillo. En la primera parte del experimento, el tren permanece en su lugar sobre las vías. Se arma el muelle, se mete la bola en el pequeño cañón y se acciona el disparador. En la lámina 6A una serie de fotos estroboscópicas sucesivas muestra la posición de la bola a intervalos idénticos. Observe que la bola viaja hacia arriba en línea recta, llega al máximo y luego cae hacia abajo en línea recta sobre la locomotora, golpeando casi en el mismo punto del que había sido lanzada. En el segundo experimento, el tren está en movimiento uniforme y se acciona de nuevo el muelle. La lámina 6B muestra lo que sucede. La comparación entre ambas series de fotos nos convencerá, de paso, de que la parte del movimiento que es hacia arriba es igual a la que es hacia abajo en ambos casos, y de que es independiente de que la locomotora esté en reposo o en movimiento. Volveremos sobre esto más avanzado este capítulo; de momento nos interesa principalmente el hecho de que la bola seguía moviéndose hacia adelante con el tren, y que cayó sobre la locomotora al igual que cuando el tren estaba parado. Obviamente este experimento concreto, por lo menos si se limita a determinar si la bola vuelve o no al cañón, nunca nos dirá si el tren está parado o moviéndose en línea recta con una velocidad constante.

Incluso aquellos que no saben explicar este experimento pueden llegar a una conclusión muy importante. Que Galileo fuera incapaz de explicar cómo podía moverse Júpiter sin perder a sus satélites no restaba efectividad al fenómeno como respuesta a aquellos que preguntaran cómo podía moverse la Tierra sin perder su Luna. Igualmente nuestro experimento con el tren —aun sin explicación— sería suficiente respuesta al argumento de que la Tierra debe estar en reposo, porque, de lo contrario, una bola que se suelta no caería verticalmente para tocar el suelo en un punto directamente debajo, y una bala de cañón lanzada verticalmente hacia arriba nunca volvería al cañón.

Deberíamos observar, y esto es un punto importante sobre el cual volveremos en otro capítulo, que el experimento que acabamos de describir no está exactamente relacionado con la situación real de una Tierra en movimiento, porque durante la rotación diaria de la Tierra todo punto de su superficie se mueve en un círculo, mientras que en su órbita anual la Tierra viaja sobre una gigantesca elipse. No obstante, es cierto que, en experimentos ordinarios, en los que el movimiento de caída ocuparía normalmente sólo unos pocos segundos, o como mucho unos pocos minutos, la desviación del movimiento de cualquier punto de la Tierra de una línea recta es lo suficientemente pequeña como para ser insignificante.

Galileo habría dado su aprobación a nuestro experimento. En su día, el experimento fue discutido, pero pocas veces ejecutado. (En cuanto a los experimentos de inercia de Galileo, véase el apéndice 9.) El marco de referencia habitual era un barco en movimiento. Este fue un problema tradicional, introducido por Galileo en su famoso *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo,* como medio para refutar las creencias aristotélicas. En el transcurso de esta discusión, Galileo hace decir a Simplicio, el personaje del diálogo que representa al aristotélico tradicional, que, en su opinión, un objeto que se suelta desde el mástil de un barco en movimiento tocará su cubierta en algún lugar detrás del mástil. Tras algunas preguntas, Simplicio admite que nunca ha realizado este experimento, pero está persuadido de que Aristóteles o alguno de sus seguidores debe haberlo llevado a cabo, o de otro modo no se tendría noticia de ello. ¡Ah, no!, dice Galileo, esto es ciertamente una suposición errónea, porque está claro que ellos nunca han hecho este experimento. ¿Cómo puede Galileo estar tan seguro de ello?, pregunta Simplicio. Recibe la siguiente respuesta: La prueba de que este experimento nunca fue realizado reside en que su resultado es falso. Galileo ha dado el resultado correcto. El objeto caerá al pie del mástil, tanto si el barco está en movimiento como si está en reposo. A propósito, Galileo afirma en otro lugar que había ejecutado un experimento de esa índole, aunque no lo mencionara en su tratado. En su lugar dijo: «Yo, sin experimentarlo, sé que el resultado tiene que ser como yo digo, porque es necesario que así sea.»

¿Por qué un objeto que cae del mástil de un barco en reposo toca la cubierta en el mismo lugar en el que lo haría cayendo del mástil de un barco que se mueve en línea recta con velocidad constante? Para Galileo no bastaba que esto fuera así; requería algún principio que sería fundamental para un sistema de física que explicara los fenómenos observados sobre una Tierra en movimiento.

La ciencia del movimiento de Galileo

Nuestro experimento con el tren de juguete, al cual nos referiremos de nuevo en el último capítulo, ilustra tres importantes aspectos de la obra de Galileo sobre el movimiento. En primer lugar, tenemos el principio de inercia, objeto de los esfuerzos de Galileo, el cual, como veremos en el capítulo final, requería el genio de Isaac Newton para plasmarse en su formulación moderna y definitiva. En segundo lugar, las fotografías del camino descendido por la bola en intervalos iguales sucesivos ilustran sus principios sobre el movimiento uniformemente acelerado. Finalmente, en el hecho de que la tasa de caída hacia abajo durante un movimiento hacia adelante es igual a la tasa de caída hacia abajo en reposo tenemos un ejemplo de los famosos principios de independencia y composición de vectores —velocidad de Galileo.

Examinaremos estas tres cuestiones considerando primero los estudios de Galileo sobre el movimiento acelerado en general, luego su obra con respecto a la inercia y por último sus análisis de movimientos complejos.

Cuando estudiaba el problema de la caída de cuerpos, Galileo, como sabemos, hizo experimentos que consistían en soltar objetos desde lo alto y —señaladamente en Pisa durante su juventud— desde una torre. No podemos saber si esta torre fue la famosa Torre Inclinada de Pisa o alguna otra; sus propios registros sólo manifiestan que se trataba de alguna torre. Más tarde su biógrafo Viviani, quien lo conoció durante sus últimos años, nos ha contado una fascinante historia que desde entonces se ha arraigado en la leyenda de Galileo. De acuerdo con Viviani, Galileo, en su deseo de refutar a Aristóteles, subió a la Torre de Pisa, «en presencia de todos los otros profesores y filósofos y de todos los estudiantes» y «mediante repetidos experimentos» demostró «que la velocidad de objetos en movimiento de la misma composición, de peso desigual, que se mueven a través del mismo medio, no se rige por la proporción de su peso, como les fue atribuido por Aristóteles, sino que se mueven con igual velocidad...». Como no existe otra fuente que documente esta demostración pública, los especialistas en la materia se inclinan por dudar que sucediera, especialmente porque al ser contada y vuelta a contar se torna cada vez más fantasiosa. No sabemos si fue inventada por Viviani o si Galileo se lo contó en su vejez, sin recordar exactamente qué era lo que había sucedido muchas décadas antes. El hecho es que los resultados no concuerdan con los facilitados por el propio Galileo porque, como hemos mencionado en un capítulo anterior, Galileo destacó muy claramente que objetos de peso desigual no alcanzan exactamente la misma velocidad, al tocar el suelo el más pesado de los dos un poco antes que el más ligero.

Un experimento como éste, si se ejecuta, sólo puede dar como resultado la prueba de que Aristóteles estaba equivocado. En los tiempos de Galileo, demostrar que Aristóteles estaba equivocado en algún aspecto era un logro difícilmente importante. Pierre de la Ramée (o Ramus) hizo saber algunas décadas antes que todo en la física de Aristóteles era poco científico. Las insuficiencias de la ley de movimiento aristotélica habían sido evidentes desde hacía por lo menos cuatro siglos, y durante ese tiempo se había acumulado una considerable cantidad de críticas. Si bien asestaron otro golpe a Aristóteles, los experimentos de la torre, bien se trate de la Torre Inclinada o de otra cualquiera, ciertamente no revelaron a Galileo una ley nueva y correcta sobre la caída de cuerpos. Sin embargo, la formulación de la ley fue uno de sus mayores logros (véase el apéndice 4).

Para apreciar todo el alcance de los descubrimientos de Galileo debemos comprender la importancia del pensamiento abstracto, al que éste recurrió como una herramienta que, refinada al máximo, constituía para la ciencia un instrumento mucho más revolucionario de lo que incluso pudiera serlo el telescopio. Galileo mostraba cómo la abstracción puede relacionarse con el mundo de la experiencia, cómo a partir del pensamiento sobre «la naturaleza de las cosas» se pueden derivar leyes relativas a la observación directa. En este proceso el experimento era de extrema importancia para él, como recientemente hemos podido saber gracias, en gran medida, a las ingeniosas investigaciones de Stillman Drake. Vamos a esbozar las principales etapas de los procesos de pensamiento de Galileo, tal como él nos las describe en su *Dos nuevas ciencias*.

Galileo dice:

> No hay, tal vez, en la naturaleza nada más viejo que el movimiento y no faltan libros voluminosos sobre tal asunto, escritos por los filósofos. A pesar de todo esto, muchas de sus propiedades, muy dignas de conocerse, no han sido observadas ni demostradas hasta el momento.

Galileo reconocía que otros antes que él habían observado que el movimiento natural de caída de un grave es continuamente acelerado. Pero dijo que su logro era haber hallado «la proporción según la cual tiene lugar tal aceleración». Estaba orgulloso de ser él quien había encontrado por primera vez «que un móvil que cae partiendo de una situación de reposo recorre, en tiempos iguales, espacios que mantienen entre sí la misma proporción que la que se da entre los números impares sucesivos comenzando por la unidad». También probó que «los cuerpos lanzados» no describen simplemente una trayectoria curva de algún tipo; su trayectoria, de hecho, es una parábola.

Al estudiar los pensamientos de Galileo sobre el movimiento tenemos dos opciones muy diferentes. Una es intentar trazar el desarrollo de sus ideas a través de sus manuscritos, correspondencia y otros documentos; la otra es resumir la presentación pública que mostró en sus *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. La primera opción es necesariamente tentativa, ya que depende en parte de la interpretación de ciertas páginas manuscritas que contienen datos numéricos y diagramas a los que no acompaña comentario o explicación alguna (véase el apéndice 4); se trata del archivo privado, que solamente se empezó a descifrar en el decenio de 1970. La segunda opción, los registros públicos, incluye la presentación que Galileo pretendía que estudiemos. Es esta presentación pública (editada) la que realmente condicionó el avance de la ciencia en el campo del movimiento, desde la revolucionaria nueva cinemática de Galileo a la moderna ciencia de la dinámica. Llamamos cinemática al objeto de estudio de Galileo, porque se trataba en gran medida de un estudio de movimientos uniformes y acelerados que no prestaba mucha atención a las fuerzas, mientras que la dinámica revela las fuerzas que actúan sobre cuerpos para producir o modificar el movimiento, y las leyes que relacionan las fuerzas con los cambios que producen en éste. Si bien Galileo era consciente de que las aceleraciones son el resultado de la acción de fuerzas (por ejemplo, la aceleración en la caída está producida por la fuerza del peso de los cuerpos), no se concentraba en esta parte de la cuestión. No obstante, debido a que tuvo en cuenta las fuerzas y los movimientos en algunos casos especiales e importantes, quizá deberíamos describir su disciplina como cinemática con algo de dinámica. Newton creía que Galileo conocía y había utilizado los dos primeros de sus tres «axiomas o leyes de movimiento», que incorporan los principios más fundamentales de la dinámica.

Primero, Galileo examina las leyes del movimiento uniforme, en el cual la distancia es proporcional al tiempo, y la velocidad es, por ello, constante. Luego estudia el movimiento acelerado. «Investigar y explicar la definición que corresponde con exactitud al movimiento acelerado que nos brinda la naturaleza» es para Galileo el problema principal. Cualquiera puede «imaginar arbitrariamente ciertas formas de movimiento», según él. Pero, «desde el momento que la naturaleza se sirve de una determinada forma de aceleración en los cuerpos pesados en caída libre», decidió «estudiar sus propiedades» a fin de asegurarse de que la definición del movimiento acelerado que estaba a punto de utilizar concordara «con la esencia del movimiento naturalmente acelerado». Galileo dice, además, que en el «estudio del movimiento naturalmente acelerado» seremos guiados «de la mano», por decirlo así, por «la observación de las costumbres y reglas que sigue la misma naturaleza en todas sus obras restantes», en «cuya ejecución suele hacer uso de los medios más inmediatos, más simples y más fáciles». Galileo estaba invocando aquí un famoso principio, que en realidad se remonta a Aristóteles, que la naturaleza siempre trabaja de la manera más sencilla posible, o del modo más económico. Dice Galileo:

> Cuando observo ... una piedra que cae desde cierta altura, partiendo de una situación de reposo, que va adquiriendo poco a poco, cada vez más velocidad, ¿por qué no he de creer que tales aumentos de velocidad no tengan lugar según la más simple y evidente proporción? Ahora bien, si observamos con cierta atención el problema, no encontraremos ningún aumento o adición más simple que aquél que va aumentando siempre de la misma manera.

Procediendo según el principio de que la naturaleza es sencilla, de manera que el cambio más simple es aquel en que el cambio en sí mismo es constante, Galileo afirma que si el incremento de velocidad es igual en cada intervalo sucesivo de tiempo, se trata claramente del movimiento acelerado más sencillo posible. Poco después, Galileo pone en boca de Simplicio (el aristotélico) que él se atiene a una opinión diferente, a saber, que un cuerpo que cae va «aumentando su velocidad en proporción al espacio»; y nosotros, como lectores críticos, hemos de admitir que esto ciertamente parece ser tan «sencillo» como la definición del movimiento acelerado de Galileo. De las dos posibilidades

$$V \propto T \qquad [1]$$

$$V \propto D \qquad [2]$$

¿cuál es la más sencilla? ¿No son ambas ejemplos de «un aumento... que se repite a sí mismo siempre de la misma manera», bien el mismo incremento de velocidad en iguales intervalos de tiempo o bien el mismo incremento en iguales espacios? Son igualmente sencillas porque ambas son ecuaciones de primer grado, ambas ejemplos de una proporcionalidad simple. Por lo tanto, ambas son mucho más sencillas que cualquiera de las seis posibilidades que siguen:

$$V \propto \frac{1}{T} \qquad [3]$$

$$V \propto \frac{1}{T^2} \qquad [4]$$

$$V \propto T^2 \qquad [5]$$

$$V \propto \frac{1}{D} \qquad [6]$$

$$V \propto \frac{1}{D^2} \qquad [7]$$

$$V \propto D^2 \qquad [8]$$

¿En qué nos podemos basar para rechazar la relación que sugiere Simplicio, expresada por la ecuación [2]? Como cada una de las ecuaciones [1] y [2] es formalmente tan sencilla como la otra, Galileo se ve obligado a introducir otro criterio para su elección. Sostiene que la posibilidad número 2 —la velocidad aumenta en proporción a la distancia de caída recorrida— conducirá a una inconsistencia lógica, a diferencia de la relación dada en la ecuación [1]. Por lo tanto, podría parecer que, debido a que una de las suposiciones «sencillas» conduce a una inconsistencia y la otra no, la única posibilidad es que los cuerpos en caída tengan velocidades que se incrementan en proporción al tiempo que llevan cayendo.

Esta conclusión, tal como se presenta en la última y más madura obra de Galileo, tiene un interés especial para el historiador, ya que el argumento con el que Galileo «demuestra» que la consecuencia de la ecuación [2] es una inconsistencia lógica contiene un error. No hay inconsistencia «lógica» aquí; el problema es simplemente que esta relación es incompatible con la suposición de que el cuerpo parte del reposo. El historiador también se interesa por descubrir que, en una época más temprana de su vida, Galileo escribió sobre este mismo tema a su amigo fray Paolo Sarpi de manera totalmente distinta. En esta carta, Galileo parece haber pensado que la velocidad de cuerpos en caída libre aumenta en proporción directa a la distancia recorrida. A partir de esta suposición, Galileo creía que podría deducir que la distancia atravesada ha de ser proporcional al cuadrado del tiempo, o que la suposición de la ecuación [2] conduce a la ecuación

$$D \propto T^2 \qquad [9]$$

Luego continúa diciendo Galileo que la proporcionalidad de la distancia al cuadrado del tiempo es «bien conocida». Entre la carta a Sarpi y la publicación del *Dos nuevas ciencias,* Galileo corrigió este aparente error (véase el apéndice 5).

En cualquier caso, en *Dos nuevas ciencias,* Galileo demuestra que la relación indicada por la ecuación [9] se sigue de la ecuación [1]. Utiliza para ello un teorema auxiliar:

> Proposición I. Teorema I. El tiempo en el cual un espacio dado es recorrido por un móvil que parte del reposo con movimiento uniformemente acelerado, es igual al tiempo en el que aquel mismo espacio habría sido recorrido por el mismo móvil con un movimiento uniforme cuyo grado de velocidad fuese la mitad del grado de velocidad máxima alcanzado al final del movimiento uniformemente acelerado precedente.

Por medio de este teorema y de los teoremas sobre el movimiento uniforme, Galileo llega a la

> Proposición II. Teorema II. Si un móvil cae, partiendo del reposo, con un movimiento uniformemente acelerado, los espacios por él recorridos en cualquier tiempo que sea están entre sí como el cuadrado de la proporción entre los tiempos, o lo que es lo mismo, como los cuadrados de los tiempos.

Este es el resultado que se expresa en la ecuación [9], y conduce al Corolario I. En este corolario, Galileo demuestra que si un objeto cae desde el reposo con un movimiento uniformemente acelerado, los espacios D_1, D_2, D_3, ... que recorre en intervalos iguales sucesivos de tiempo «estarán entre sí (en la misma proporción) como los números impares, comenzando desde la unidad, es decir, como 1, 3, 5, 7, ...». Galileo señala inmediatamente que esta serie de números impares se deriva del hecho de que las distancias recorridas en el primer intervalo de tiempo, en los dos primeros intervalos de tiempo, en los tres primeros intervalos de tiempo, ... son como los cuadrados 1, 4, 9, 16, 25, ...; las diferencias entre ellos son los números impares. La conclusión tiene para nosotros un interés especial, ya que la creencia de que las verdades fundamentales de la naturaleza se revelaban por relaciones de figuras geométricamente regulares y relaciones numéricas formaba parte de la tradición platónica, un punto de vista al que Galileo declara su devoción en una parte anterior del libro. Le hace decir a Simplicio: «Tened por seguro que si hubiera de comenzar mis estudios, seguiría el consejo de Platón y comenzaría por las matemáticas, las cuales proceden con mucho escrúpulo y no admiten como algo cierto sino aquello que se demuestra con todo rigor.» Para Galileo constituye evidentemente un indicio de la solidez de su discusión sobre la caída de graves el que pueda concluir: «Por lo tanto, cuando los grados de velocidad aumentan, en tiempos iguales, según la serie de los números naturales, los espacios recorridos, en los mismos tiempos, adquieren incrementos según la serie de los números impares desde la unidad.» [2]

---

[2] Las etapas que sigue Galileo (en las *Dos nuevas ciencias*) desde la definición del movimiento uniformemente acelerado

$$V \propto T$$

hasta la ley del movimiento acelerado o la ley de caída libre (la ley del cuadrado del tiempo)

$$D \propto T^2$$

son fáciles de reescribir en un sencillo lenguaje algebraico. En un tiempo T_0, comenzando desde un estado de reposo, un objeto adquiere una velocidad V_0. El promedio o la velocidad media es $\frac{1}{2}V_0$. La distancia atravesada bajo aceleración durante el tiempo T_0 es la misma que recorrería el objeto si se hubiera movido durante el mismo intervalo de tiempo con una velocidad constante igual a la velocidad media. La distancia D_0 recorrida a la velocidad constante $\frac{1}{2}V_0$ es

$$D_0 = \tfrac{1}{2}V_0T_0$$

Pero como

$$V_0 \propto T_0$$

resulta que

$$D_0 = \tfrac{1}{2}V_0T_0 \propto T_0^2.$$

Para ver cómo las secuencias numéricas de Galileo son el resultado de la ley del cuadrado del tiempo para la distancia, consideremos los intervalos de tiempo T, $2T$, $3T$, $4T$, $5T$, ... Entonces las distancias serán como T^2, $4T^2$, $9T^2$, $16T^2$, $25T^2$, ..., o como 1, 4, 9, 16, 25, ... Las distancias recorridas en el primer, segundo, tercer, cuarto, quinto, ... intervalo de tiempo serán entonces como las diferencias entre los términos sucesivos de esta serie, o como 1, 3, 5, 7, 9, ... Si la constante de aceleración en el movimiento uniformemente acelerado es A, de manera que $V = AT$, entonces la última ecuación se convierte (para D_0, V_0, T_0) en

$$D_0 = \tfrac{1}{2}V_0T_0 = \tfrac{1}{2}(AT_0)T_0 = \tfrac{1}{2}AT_0^2$$

y en general en

$$D = \tfrac{1}{2}AT^2,$$

la familiar ecuación para la ley del cuadrado del tiempo de Galileo que se encuentra en los libros de texto. En el caso especial de la caída libre, la constante

Aunque el aspecto numérico de la investigación es satisfactorio para Salviati (el interlocutor en las *Dos Nuevas Ciencias* que habla por Galileo), y para Sagredo (el hombre de cultura general y buena voluntad que usualmente lo apoya), Galileo reconoce que este punto de vista platónico difícilmente puede contentar a un aristotélico. Por ello, Galileo declara a través de Simplicio:

> Estoy plenamente convencido de que la cosa es tal y como se la ha expuesto, una vez que se ha aceptado la definición de movimiento uniformemente acelerado. Pero que sea tal la aceleración de la que se sirve la naturaleza en lo que atañe al movimiento de la caída de los graves, es algo, en mi opinión, un tanto dudoso por el momento. Pienso que tanto por lo que a mí respecta como por aquellos que piensan como yo, es éste el momento oportuno de presentar algunos de esos experimentos de los que se dice que abundan y que en muchos casos concuerdan con las conclusiones que se han demostrado.

Galileo admite que Simplicio habla «como un verdadero hombre de ciencia» y que ha hecho una «demanda muy razonable». Sigue una descripción de un experimento famoso. Permitamos que Galileo nos lo cuente con sus propias palabras:

> En un listón o, lo que es lo mismo, en un tablón de una longitud aproximada de doce *braccia* [codos] *, de medio *braccio* de anchura más o menos y un espesor de tres dedos, hicimos una cavidad o pequeño canal a lo largo de la cara menor, de una anchura de poco más de un dedo. Este canal, tallado lo más recto posible, se había hecho enormemente suave y liso, colocando dentro un papel de pergamino lustrado al máximo. Después, hacíamos descender por él una bola de bronce muy dura, bien redonda y pulida. Habiendo colocado dicho listón de forma inclinada, se elevaba sobre la horizontal una de sus extremidades, hasta la altura de uno o dos *braccia*, según pareciera, y se dejaba caer (como he dicho) la bola por dicho canal, tomando nota como en seguida he de decir del tiempo que tardaba en recorrerlo todo. Repetimos el mismo experimento muchas veces para asegurarnos bien de la cantidad de tiempo y pudimos constatar que no se hallaba nunca una diferencia ni siquiera de la décima parte de una pulsación.

A esto Simplicio responde: «Hubiera sido para mí una gran satisfacción haber estado presente en tales experimentos, pero teniendo

---

se denota por g (llamada a veces la «aceleración de la gravedad»), de manera que esta ecuación se transforma en

$$D = \tfrac{1}{2}gT^2$$

en la cual g tiene un valor numérico de aproximadamente 980 cm/seg en cada segundo.

* Se trata del *braccio* florentino, de unos 58,4 cm. Coincide aproximadamente con nuestro codo real, de 57,4 cm. *(N. del T.)*

por cierta vuestra diligencia al realizarlos y vuestra fidelidad en referirlos, no tengo ningún escrúpulo en aceptarlos como del todo probados y verdaderos.»

El procedimiento de Galileo, tal como lo acabamos de describir, difiere radicalmente de lo que habitualmente se describe en los libros de texto elementales como el «método científico». Porque, en todas estas obras, se dice que el primer paso es «recoger todas la información relevante», etc. La forma habitual de proceder, se nos dice, es recoger un gran número de observaciones, o realizar una serie de experimentos, luego clasificar los resultados, generalizarlos, buscar una relación matemática y, finalmente, hallar una ley. Pero Galileo se nos presenta de modo diferente —pensando, creando ideas, trabajando normalmente con un lápiz o una pluma y papel. Naturalmente, Galileo no era meramente un filósofo «de sillón», un especulador puro. Ahora sabemos que había estado realizando experimentos y que su pensamiento creativo se caracterizaba por una interacción constante entre abstracción y realidad, entre ideas teóricas y datos experimentales. En las *Dos nuevas ciencias,* sin embargo, Galileo hace hincapié en el audaz principio general de que la naturaleza es sencilla. Nos da la imagen de un científico experimental cuyos pensamientos son dirigidos por abstracciones de la naturaleza. Busca las relaciones simples de primer grado antes que aquellas otras de orden más elevado. Su meta es hallar la relación más sencilla que no conduzca a una contradicción. Empero, aunque la experimentación había sido una fuerza que le guiaba en el desarrollo de sus ideas, cuando llegó a la presentación final, el experimento del plano inclinado servía más bien como experimento de comprobación que como experimento de investigación, y fue introducido por Galileo en respuesta a la exigencia del artistotélico Simplicio, el portavoz de la doctrina que Galileo estaba criticando. Galileo presenta el informe sobre el experimento con una exposición preliminar que explica cuidadosamente su finalidad. Será útil que examinemos este párrafo (puesto por Galileo en boca de Salviati):

Vos, como un verdadero hombre de ciencia, exigís algo muy razonable. Es éste el modo de actuar de aquellas ciencias que aplican las demostraciones matemáticas a los fenómenos naturales, como es el caso de la perspectiva, de la astronomía, de la mecánica, la música y otras muchas, las cuales confirman sus principios, que son los fundamentos de toda la estructura subsiguiente, con experimentos bien establecidos. Espero, de cualquier forma, que no os parezca una pérdida de tiempo el haber discutido con cierto detenimiento acerca de este primer y fundamental principio sobre el cual se apoya la inmensa máquina de infinitas conclusiones, sacadas por el autor, de las que sólo una pequeña parte aparecen en este libro. Bastante habrá hecho aquél con abrirnos de par en par la puerta hasta ahora cerrada a mentes bien capaces. Por lo que se refiere a los experimentos, no han sido pasados tampoco por alto por parte del autor; con el fin de dejar bien probado que la aceleración de los graves que caen de modo natural se da en la proporción antes desarrollada, me he visto muchas veces en su compañía.

Ciertamente, Galileo deja claro en esta exposición que el objeto de estos experimentos sobre un plano inclinado no era encontrar la ley original, sino verificar que de hecho pueden darse en la naturaleza aceleraciones tales como las que estudiaba realmente. Causó verdadero asombro el hallazgo de que Galileo había descubierto en realidad las leyes del movimiento de una manera totalmente diferente de como lo presentó públicamente en su último tratado, las *Dos nuevas ciencias*. Su secreto estuvo muy bien guardado durante más de tres siglos y medio, hasta que Stillman Drake encontró apuntes de Galileo y llamó la atención sobre ellos; parecen ser sin lugar a dudas el registro de experimentos sobre cuerpos en movimiento, de alguna manera relacionados con las leyes del movimiento que había encontrado. Este es uno de los grandes descubrimientos en la historia de la ciencia de nuestros tiempos, incluso a pesar de que hasta ahora ni una sola de las interpretaciones de las etapas del pensamiento de Galileo haya sido universalmente aceptada. (Véase sobre este tema el apéndice 4, con referencia a la investigación de Winifred L. Wisan y de R. H. Naylor; véase también el artículo de M. Segre en la Guía para lecturas adicionales, p. 250. El experimento descrito en las *Dos nuevas ciencias* es, sin embargo, de un tipo distinto. Pero obsérvese que en realidad lo que se demuestra en tales series de experimentos no es que la velocidad sea proporcional al tiempo, sino sólo que la distancia es proporcional al cuadrado del tiempo, asumiéndose que el experimento justifica también el principio de que la velocidad es proporcional al tiempo (véase el apéndice 6).

Y además debemos advertir que, al introducir el experimento, Salviati dice que él mismo había hecho esta particular serie de observaciones en compañía de Galileo «con el fin de dejar bien probado que la aceleración de los graves que caen de modo natural se da en la proporción antes desarrollada». Y no obstante, esta particular serie de observaciones de bolas rodando sobre planos inclinados no tiene aparentemente nada que ver con la aceleración de objetos en caída libre. En la caída libre, el movimiento de los cuerpos no encuentra obstáculo de ningún tipo, a excepción del pequeño efecto de la resistencia del aire. Pero en este caso, el movimiento del objeto está lejos de ser libre, ya que el cuerpo está constreñido a la superficie del plano. En ambos casos, sin embargo, la aceleración está producida por la gravedad. En los experimentos del plano inclinado, el efecto de caída de la gravedad está «diluido», sólo una parte de la gravedad actúa en la dirección del plano. De estos experimentos resulta que la distancia es proporcional al cuadrado del tiempo cualquiera que sea la inclinación del plano, cualquiera que sea su pendiente. Los experimentos están relacionados con la caída libre porque es posible suponer que en el caso límite, en el que el plano es vertical, se puede esperar que la ley siga siendo válida. Pero en este caso límite de caída libre, la bola no rueda en su movimiento hacia abajo como lo hace en el plano inclinado —un punto que Galileo nunca menciona—. Es, sin embargo, una condición muy importante, porque hoy sabemos por la mecánica teórica que se trata de un factor primordial que impediría que el experimento suministre un valor numérico exacto para la aceleración en la caída libre. Es decir, no es posible utilizar el método de componentes para obtener la aceleración de la caída libre a partir de la aceleración sobre un plano inclinado, porque en este caso el descenso se ve acompañado por la rotación, mientras que en el otro no. De modo que para un escéptico astuto estaría lejos de ser evidente que el experimento del plano inclinado muestre que la caída libre es uniformemente acelerada, o incluso que la caída libre concuerda con la ley del cuadrado del tiempo para la distancia, aunque los experimentos sí mostraron que la ley del cuadrado del tiempo existe en la naturaleza y, por lo tanto, que en ésta existen movimientos uniformemente acelerados.

En nuestros días, cierto número de especialistas ha repetido el experimento del plano inclinado de Galileo; el primero en hacerlo fue Thomas B. Settle. Los resultados concordaron plenamente con el informe de Galileo de que para distintos tramos

> llegábamos a la conclusión, después de repetir tales pruebas una y mil veces, que los espacios recorridos estaban entre sí como los cuadrados de sus tiempos. Esto se podía aplicar a todas las inclinaciones del plano, es decir, del canal a través del cual se hacía descender la bola. Observamos también que los tiempos de las caídas por diversas inclinaciones del plano guardan entre sí de modo riguroso una proporción que es, como veremos después, la que les asignó y demostró el autor.

En la actualidad no tenemos problema alguno en aceptar la afirmación de Galileo de que «tales operaciones, repetidas muchísimas veces, jamás diferían de una manera sensible» y que la exactitud del experimento era tal que la diferencia entre dos observaciones nunca excedía «de la décima parte de una pulsación».

Galileo no se preocupó demasiado de medir los tiempos de caída libre vertical de un objeto. Suponía que tales datos podían obtenerse de experimentos realizados con bolas que ruedan sobre planos inclinados, sin advertir la diferencia entre los movimientos de rodadura y de libre deslizamiento por el plano. En sus escritos publicados sobre el movimiento, Galileo no incluyó ningún cálculo de la aceleración de un objeto en caída libre basado en el límite del movimiento sobre un plano inclinado. En una carta a Baliani, sin embargo, sí explicó una manera de utilizar los experimentos sobre un plano inclinado para determinar la velocidad (y por tanto, la aceleración) de un movimiento de caída libre en vertical.

En la Jornada Segunda de su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo,* Galileo calculó el tiempo que necesitaría una bala de cañón para caer desde la Luna a la Tierra. En «repetidas experiencias», escribió, una bala de hierro que pesa 100 libras «cae desde una altura de 100 codos en 5 segundos». Sus propias palabras (*Dialogue Concerning the Two Chief World Systems,* Second Day, trad. Stillman Drake, p. 223) son: «... supongamos que queremos hacer el cálculo para una bala de hierro de 100 libras, la cual en repetidas experiencias cae desde una altura de 100 codos en 5 segundos». Utilizando la familiar ley de $D=\frac{1}{2}gT^2$, Drake se encuentra con que estas «repetidas experiencias» proporcionan un valor para la aceleración en caída libre (g) de 467 cm/seg^2, en contraste con los 980 cm/seg^2 (véase además la discusión de Drake en la p. 480 de su traducción). Debatiendo el tema conmigo, Drake me informó que «un documento de trabajo todavía sin publicar incluye el cálculo que hizo Galileo de la caída a través de 45 ¼ m en 3,11 segundos, siendo el tiempo en realidad de 3,04 segundos».

El mismo Galileo discute estos datos en su carta a Baliani del 1 de agosto de 1639 (traducida por Drake en *Galileo at Work*). Baliani había escrito a Galileo en 1632 preguntándole cómo sabía que un grave cae 100 codos *(braccia)* en 5 segundos, añadiendo que en Génova no había ninguna torre de esta altura desde la cual intentar el experimento; también se refirió a la distancia de 4 codos de caída en el primer segundo, que era extremadamente difícil de verificar. Cuando Galileo respondió algunos años más tarde, admitió que si Baliani intentaba verificar mediante «el experimento si aquello que escribí sobre los 100 *braccia* en cinco segundos es verdad», Baliani podía «hallar que no es cierto». Explicó que el fin del argumento era refutar al padre Scheiner, quien había escrito sobre el tiempo que necesitaría una bala de cañón para caer desde la Luna a la Tierra; para el cómputo del tiempo de caída del propio Galileo «tenía poca importancia si los cinco segundos para 100 *braccia* eran ciertos o no». Para nosotros es más significativa la incorrecta suposición de Galileo de que una bala de cañón cayendo desde la Luna a la Tierra mantendría una aceleración constante[3].

Las frases de Galileo en los *Diálogos* parecen decir que «en repetidas experiencias» se había obervado que la bala de hierro de 100 libras descendía desde una altura de 100 codos en 5 segundos. ¿Sería posible, sin embargo, que Galileo sólo estuviera suponiendo que «en repetidas experiencias» se podría obtener este resultado? ¿Era esto lo que quiso decir, que sólo imaginaba que deseábamos hacer un cálculo? Si solamente estaba escribiendo *ex suppositione*, entonces habría dicho, en efecto, «*supongamos* que la experiencia muestra que una caída de 100 *braccia* requiere 5 segundos», y no que «repetidas pruebas han demostrado esto». Su frase es sintácticamente ambigua.

Pero al menos uno de los contemporáneos de Galileo, el Padre Marin Mersenne, leyó sencillamente el texto y concluyó que Galileo alegaba que había encontrado el resultado que suministraba a través de «repetidas experiencias». Galileo «supone», escribió Mersenne

---

[3] La forma en que Galileo calculaba la caída libre consistía en deducir el valor a partir del movimiento sobre un plano inclinado. Como explicó a Baliani en 1639 (*Galileo at Work*, pp. 399-400); «... el descenso de esta bola por un canal, arbitrariamente inclinado, nos dará todos los tiempos —no sólo de 100 *braccia*, sino de cualquier otra cantidad de caída vertical— en tanto que (como usted mismo ha demostrado) la longitud de dicho canal, o llamémoslo plano inclinado, es una media proporcional entre la altura vertical de dicho plano y la longitud de toda la distancia vertical que sería atravesada en el mismo tiempo por el móvil en caída. Suponiendo entonces, por ejemplo, que dicho canal tiene una longitud de 12 *braccia* y que su altura vertical es de medio *braccio*, un *braccio*, o dos, la distancia atravesada en la vertical será de 288, 144 o 72 *braccia*, como es evidente. Ahora nos queda por encontrar la cantidad del tiempo de descenso por el canal. Esta la obtendremos de la maravillosa propiedad del péndulo, la cual es que hace todas sus vibraciones, grandes o pequeñas, en tiempos iguales». Para reducir el movimiento de un determinado péndulo a segundos, sigue explicando Galileo, sería necesario calibrarlo contando el número de vibraciones durante 24 horas, a determinar por un grupo de «dos o tres o cuatro amigos pacientes y curiosos». Ellos marcarían el transcurso de 24 horas a partir del instante en que una «estrella fija» «se encontrara frente a algún marcador fijo» hasta «el retorno de la "estrella fija" al punto de partida». Galileo sugiere esto en su carta a Baliani como un método para determinar la distancia caída en algún tiempo dado, pero no declara explícitamente que él mismo haya ejecutado estos experimentos cuantitativos. Esto podría constituir un argumento a favor de que, contrariamente al sentido aparente de los *Diálogos* (con la frase «repetidas experiencias»), y tal como habían interpretado Mersenne y otros, Galileo estaba sólo introduciendo números por mor de la discusión.

a Nicolas Claude Fabri de Peiresc, el 15 de enero de 1635, «que una bala [*boulet*] cae 100 *braccia* en 5 segundos; de lo cual se deduce que la bala no caerá más de cuatro *braccia* en un segundo». El propio Mersenne estaba convencido de que «caerá [en un segundo] desde una altura mayor». En su *Harmonie Universelle* [Armonía Universal] (París, 1636, vol. 1, p. 86), Mersenne se extiende sobre la diferencia entre los resultados numéricos que obtuvo en París y sus alrededores y los que Galileo informaba desde Italia. Lamentaba que pudiera parecer que estaba reprochando a «un hombre tan eminente por [haber tenido] poco cuidado en sus experimentos». Sigue siendo todavía un enigma el por qué un experimentador tan cuidadoso como Galileo pudo haber dado un valor tan malo. Quizá estaba sugiriendo un «número redondo» para facilitar el cálculo, pero, en ese caso, ¿por qué escribir «en repetidas experiencias»?

Retrospectivamente, queda claro para nosotros que en lo expuesto por Galileo en las *Dos nuevas ciencias,* el experimento del plano inclinado fue introducido con el fin de que sirviera para comprobar si los principios, a los que había llegado mediante el método de abstracción y las matemáticas, serían efectivamente aplicables al mundo de la naturaleza. En lo que concierne al eventual lector, la veracidad de la ley de Galileo sobre caída de cuerpos quedaba garantizada, ante todo, por la exactitud de la lógica y de las definiciones, por la ejemplificación de la simplicidad de la naturaleza y las relaciones entre números, y no meramente por una serie de experimentos u observaciones. Posiblemente Galileo estaba adoptando aquí la misma actitud que en su discusión de la caída de un cuerpo desde el mástil de un barco, donde de nuevo eran la naturaleza de las cosas y las relaciones necesarias las que contaban, antes que conjuntos particulares de experiencias. Debe mantenerse el resultado correcto, de acuerdo con Galileo, incluso frente a la evidencia de los sentidos (en forma de experimentos u observaciones) que pueda mostrarse antagónica. En ningún lugar expresó Galileo este punto de vista más enérgicamente que al discutir la evidencia de los sentidos contra el movimiento de la Tierra. «Que las razones contra el movimiento diurno de la Tierra, ya examinadas por nosotros, tengan muy grande verosimilitud, ya lo hemos visto», escribió Galileo, «y el haberlas tomado los ptolemaicos, los aristotélicos y todos sus seguidores como muy concluyentes, es un buen argumento de su eficacia; pero las experiencias que contrarían el movimiento anual son de tan gran verosimilitud que, vuelvo a repetirlo, no puedo encontrar término a mi admiración, al ver cómo en Aristarco y en Copérnico haya podido hacer la razón tanta violencia contra los sentidos, para que, en contra de éstos, ella se haya hecho la dueña de sus credulidades» *(Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo).*

Para recapitular, Galileo demostró matemáticamente que un movimiento que parte de un estado de reposo, en el que la velocidad experimenta el mismo cambio en cada intervalo igual de tiempo (llamado movimiento uniformemente acelerado), corresponde al recorrido de distancias que son proporcionales a los cuadrados de los tiempos transcurridos. Luego mostró mediante un experimento que el movimiento sobre un plano inclinado ejemplifica esta ley. A partir de estos dos resultados, Galileo razonó que el movimiento de la caída libre es un caso de tal movimiento uniformemente acelerado. En ausencia de cualquier resistencia del aire, el movimiento de un cuerpo en caída libre estará siempre acelerado según esta ley. Cuando Robert Boyle, unos 30 años más tarde, fue capaz de extraer el aire de un cilindro, mostró que en este vacío todos los cuerpos caen con idéntica velocidad independientemente de la forma que tengan. Se dispuso así de la prueba de lo que había afirmado Galileo —una extrapolación de la experiencia—, que sin resistencia del aire, todos los objetos caen igualmente, con la misma aceleración. Por tanto, la velocidad de un objeto que cae, salvo por el factor usualmente insignificante de la resistencia del aire, depende sólo de la duración del tiempo de caída, y no de su peso o de la fuerza que lo mueve, como había supuesto Aristóteles. Hoy sabemos que el valor correcto de la aceleración en la caída libre (a veces llamado «aceleración de la gravedad») ronda los 9,8 metros por segundo de cambio de la velocidad en cada segundo.

El logro supremo de Galileo no consistió solamente en demostrar que Aristóteles se había equivocado y en descubrir que todos los cuerpos, salvo el factor de resistencia de aire, caen juntos a pesar de que sus pesos sean diferentes; otros antes que él habían observado este fenómeno. No, lo que fue original en Galileo y revolucionario en sus implicaciones era el descubrimiento de las leyes de la caída de cuerpos y la introducción de un método que combinaba la deducción lógica, el análisis matemático y el experimento.

Los predecesores de Galileo

Si queremos apreciar con propiedad la grandeza de Galileo, debemos compararlo con sus contemporáneos y predecesores. Cuando veamos en el capítulo final el grado en que Newton dependió de los logros de Galileo, llegaremos a comprender algo de su importancia histórica. Pero ahora veremos exactamente su significado mediante una evaluación de su originalidad más realista de la que se puede encontrar en la mayoría de los libros de texto y en demasiadas historias.

Recuérdese que una característica de la física griega tardía (alejandrina y bizantina) consistía en la crítica de Aristóteles antes que en la aceptación de cada una de sus palabras como si fuese la verdad absoluta. El mismo espíritu crítico era típico del pensamiento científico islámico y de los escritos del occidente latino medieval. Así Dante, cuyas obras se consideran frecuentemente como el apogeo de la cultura europea medieval, criticaba a Aristóteles por creer «que no había más que ocho cielos [esferas]» y que «el cielo [la esfera] del Sol vendría directamente después de la de la Luna, es decir, que estaría en segundo lugar desde nuestra posición».

Los estudiosos sometieron a la ley del movimiento de Aristóteles a varias correcciones, cuyas características principales eran: 1) concentración en las etapas graduales a través de las cuales cambia el movimiento, es decir, en la aceleración; 2) el reconocimiento de que al describir un movimiento cambiante, sólo es posible hablar de velocidad en un momento dado; 3) una definición cuidadosa del movimiento uniforme —un estado descrito en un resumen de 1369 (por Juan de Holanda) como aquel en el cual «el objeto atraviesa un espacio igual en cada intervalo de tiempo igual» *(in omni parte equali temporis)* (que contradice la afirmación de Galileo de la p. 98 de que él habría sido el primero en definir así el movimiento uniforme); 4) el reconocimiento que el movimiento acelerado podría ser o bien uniforme o bien no uniforme, como queda reflejado en el siguiente esquema:

Movimiento
- *Movimiento uniforme*
- o
- *Movimiento no uniforme* (acelerado)
  - *Movimiento uniformemente acelerado*
  - o
  - *Movimiento no uniformemente acelerado*

En su exposición, Galileo pasó por este mismo tipo de análisis. El movimiento más sencillo, dijo, es el uniforme (el cual definió a la manera de los escolásticos del siglo XIV). A éste le sigue el movimiento acelerado, que puede ser bien uniformemente o bien no uniformemente acelerado. Eligió el más sencillo, y luego exploró si la aceleración es uniforme con respecto al tiempo o a la distancia.

Cuando examinaban cómo puede cambiar uniformemente la velocidad, los escolásticos del siglo XIV probaron lo que se conoce a veces como la «regla de la velocidad media». Esta afirma que el efecto (distancia) de un movimiento uniformemente acelerado durante cualquier intervalo de tiempo es exactamente el mismo que se produciría si durante este intervalo el cuerpo en movimiento hubiera experimentado un movimiento uniforme que fuera el promedio del movimiento acelerado. Veamos esta regla expresada en símbolos. Supongamos que durante el tiempo T un cuerpo es acelerado uniformemente desde una velocidad inicial V_1 hasta una velocidad final V_2. ¿Cuán lejos (D) irá? Para encontrar la respuesta, determinemos la velocidad media $\bar{V}$ durante el intervalo de tiempo; entonces la distancia D es la misma que habría recorrido el cuerpo en el caso de que se hubiera movido a la velocidad constante $\bar{V}$ durante el tiempo T, o $D = \bar{V}T$. Además, como el movimiento es un ejemplo de aceleración uniforme, la velocidad media $\bar{V}$ durante el intervalo de tiempo es la media entre la velocidad inicial y final, es decir

$$\bar{V} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Esto está muy cerca del teorema utilizado por Galileo para demostrar su propia ley, que relaciona la distancia con el tiempo en el movimiento acelerado. ¿Cómo lo probaron los hombres del siglo XIV? Las primeras pruebas se produjeron en el Merton College, en Oxford, mediante un tipo de «álgebra de palabras», pero en París Nicolás Oresme demostró el teorema geométricamente, utilizando un diagrama (fig. 19) muy parecido a aquel que se encuentra en las *Dos nuevas ciencias*[4].

Una diferencia importante entre las exposiciones de Galileo y Oresme es que la de este último estaba redactada en términos de cualquier «cualidad» cambiante que se pudiera cuantificar —inclu-

[4] De la ecuación para la velocidad media ($\bar{V}$) resulta que si la velocidad inicial V_1 es cero, correspondiente a un movimiento a partir del reposo, entonces, para cualquier velocidad V en un tiempo T, $\bar{V} = \frac{1}{2}(O + V) = \frac{1}{2}V$. Sustituyendo este resultado en la ecuación $D = \bar{V}T$ tenemos $D = \frac{1}{2}(V)T$. Como el movimiento uniformemente acelerado es por definición un movimiento en el que la velocidad es proporcional al tiempo, o $V \propto T$, la relación $D = \frac{1}{2}(V)T$ lleva a $D \propto T^2$, el resultado obtenido por Galileo de que en un movimiento uniformemente acelerado a partir del reposo, la distancia es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido. Si la constante de proporcionalidad es A (llamada «la aceleración»), de manera que $V = AT$, entonces la ecuación $D = \frac{1}{2}(V)T$ se convierte en $D = \frac{1}{2}(AT)T$ o en $D = \frac{1}{2}AT^2$. Véase también pág. 95.

yendo «cualidades» físicas como velocidad, desplazamiento, temperatura, blancura, peso, etc., pero también «cualidades» no físicas como amor, caridad, y gracia. En ningún momento, sin embargo, efectuaron estos hombres del siglo XIV una prueba de sus resultados, como lo hizo Galileo, para ver si eran aplicables al mundo real de la experiencia. Para estos hombres, el ejercicio lógico de probar la «regla de la velocidad media» constituía en sí mismo una experiencia satisfactoria. Por ejemplo, los científicos del siglo XIV, por lo que sabemos, nunca exploraron ni siquiera la posibilidad de que dos objetos de peso desigual pudieran caer prácticamente juntos. No obstante, si la escolástica del siglo XIV que había descubierto la «regla de la velocidad media» no aplicó el concepto de una aceleración uniforme en el tiempo a la caída de graves, sí lo hizo uno de sus sucesores del siglo XVI. En la época de Galileo, la afirmación de que la velocidad en la caída de graves se incrementa continuamente como una función del tiempo había sido publicada en el libro del español Domingo de Soto, en el que la «regla de la velocidad media» estaba al alcance de la mano. Pero esta afirmación de de Soto apareció como un «aparte» y no se presentó como un teorema importante de la naturaleza. Estaba prácticamente enterrada debajo de una masa de teología y filosofía aristotélica (véase el apéndice 7).

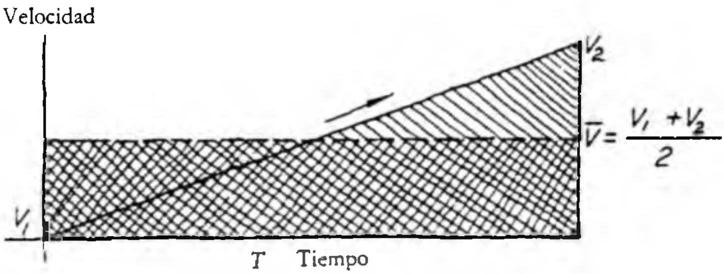


FIG. 19.—*Nicolás Oresme de París utilizaba la geometría para probar que un cuerpo uniformemente acelerado desde una velocidad inicial V_1 a una velocidad final V_2 atravesaría la misma distancia D en el mismo intervalo de tiempo T que emplearía moviéndose a una velocidad constante $\bar{V}$, la media entre V_1 y V_2. Asumía que el área por debajo del gráfico de la velocidad trazado en función del tiempo sería la distancia D. Para el movimiento uniformemente acelerado, el gráfico sería una línea inclinada, y para el movimiento uniforme la línea horizontal. El área por debajo de la primera sería el área de un triángulo o $\frac{1}{2}T \times \times V_2$. El área de la segunda sería el área del rectángulo o $T \times \frac{1}{2}V_2$, siendo la altura del triángulo el doble de la del rectángulo. Las áreas y, por lo tanto, las distancias atravesadas, serían iguales.*

Otro concepto medieval importante para comprender el pensamiento científico de Galileo es el «impetus». Se trata de una propiedad que se suponía que mantenía moviéndose cosas como los proyectiles, una vez que habían abandonado el «proyector». El impetus se parece al momento y a la energía cinética, pero en realidad no tiene un equivalente exacto en la dinámica moderna. Era un lejano predecesor del concepto de inercia de Galileo, que se desarrolló hasta el moderno concepto newtoniano[5].

Por lo tanto, la originalidad de Galileo no era aquella de la que se presumía. Ya no necesitamos creer en algo tan absurdo como que no se habían hecho progresos en la comprensión del movimiento entre los tiempos de Aristóteles y los de Galileo. Y podemos pasar por alto los muchos relatos que pretenden que Galileo inventó la moderna ciencia del movimiento ignorando por completo cualquier predecesor medieval o antiguo.

Esto era un punto de vista alentado por el mismo Galileo, cuyo sostenimiento, empero, era más justificable hace cien años que en la actualidad. Una de las más provechosas áreas de investigación en la historia de la ciencia en los últimos tres cuartos de siglo —iniciada principalmente por el erudito y científico francés Pierre Duhem— fue la de las «ciencias exactas» de la Edad Media. Estas investigaciones descubrieron una tradición de crítica de Aristóteles que preparó el camino para las contribuciones de Galileo. Para precisar exactamente la medida en que éste sobrepasó a sus predecesores, podemos perfilar más certeramente sus dimensiones heroicas. De este modo, además, la historia de la vida de Galileo se torna más real para nosotros, porque somos conscientes de que en el progreso de las ciencias, cada uno construye sobre lo ya edificado por sus antecesores. Nunca este aspecto de la labor científica fue mejor expresado que en las siguientes palabras de Lord Rutherford (1871-1937), fundador de la física nuclear:

> ... No está en la naturaleza de las cosas que el hombre por sí sólo haga de repente un descubrimiento vital; la ciencia avanza paso a paso, y cada uno depende del trabajo de sus predecesores. Al tener noticias de un repentino descubrimiento inesperado —que cae como una bomba, por decirlo así— siempre se puede estar seguro de que maduró por la influencia de un hombre sobre otro, y es esa influencia mutua la que produce esta enorme posibilidad de avan-

---

[5] Stillman Drake ha argumentado que «los filósofos naturales del medievo adoptaron la teoría del impetus para su regla de la caída, y ésta excluía la posibilidad de considerarla como un tipo de movimiento uniformemente diforme». Se trata de una explicación ingeniosa del «por qué nadie nunca planteó explícitamente la cuestión de si las velocidades cambian con el tiempo o con la distancia».

ce científico. Los científicos no dependen de las ideas de *una única persona* sino del saber combinado de miles de personas, pensando todas en el mismo problema y cada uno aportando su pequeño grano para añadirlo a la gran estructura del saber que se está levantando paulatinamente.

Ciertamente, ambos, Galileo y Rutherford, representan el espíritu de la ciencia.

Sin embargo, fue Galileo quien, por primera vez, mostró cómo resolver el complejo movimiento de un proyectil en dos componentes separadas y diferentes —una uniforme y otra acelerada— y fue Galileo el primero que sometió las leyes del movimiento a la prueba de experimentos rigurosos y probó que se podían aplicar al mundo real de la experiencia. Si parece que esto es sólo un pequeño logro, recuérdese que los principios que Galileo precisó y que utilizó como una parte de la física antes que como una parte de la lógica eran conocidos desde mediados del siglo XIV, sin que nadie, durante este intervalo de 300 años, fuera capaz de discernir cómo relacionar tales abstracciones con el mundo de la naturaleza. Quizá es aquí donde podemos ver mejor la particular grandeza de su genio. al combinar la perspectiva matemática del mundo con la empírica, obtenida mediante la observación, la experiencia crítica y el experimento real (véanse los apéndices 9 y 10).

La formulación de la ley de inercia

Vamos a explorar un poco más la contribución de Galileo a la metodología científica al insistir en una relación exacta entre las abstracciones matemáticas y el mundo de la experiencia. Por ejemplo, la mayoría de las leyes del movimiento, tal como las formuló Galileo, sólo se cumplirían en el vacío, donde no habría resistencia del aire. Pero en el mundo real es necesario tratar el movimiento de los cuerpos en diferentes tipos de medios, los cuales presentan resistencia. Si las leyes de Galileo habían de aplicarse al mundo real que le rodeaba tenía que saber con exactitud cuál sería el efecto de la resistencia del medio. En particular, Galileo fue capaz de mostrar que el efecto del aire sobre cuerpos de algún peso, con una figura tal que no se presente una resistencia enorme al movimiento, era casi insignificante. Era este ligero factor de resistencia del aire el responsable de la pequeña diferencia entre los tiempos de descenso de objetos ligeros y pesados desde una determinada altura. Esta diferencia era importante, ya que indicaba que el aire ofrece alguna resistencia, pero su pequeñez mostraba cuán ínfimo es normalmente el efecto de la misma.

Galileo pudo demostrar que un proyectil sigue la trayectoria de una parábola porque el proyectil posee simultáneamente una combinación de dos movimientos independientes: un movimiento uniforme en la dirección de avance horizontal, y un movimiento uniformemente acelerado hacia abajo, en la dirección vertical.

Comentando este resultado, Galileo hace decir a Simplicio, bastante razonablemente, que

pienso que no es posible evitar la resistencia del medio, la cual ha de destruir la uniformidad del movimiento horizontal, así como la ley de la aceleración en los cuerpos que caen. De todas estas dificultades se deduce que es sumamente improbable que lo que se ha demostrado, al apoyarse en supuestos tan poco dignos de confianza, se pueda experimentar prácticamente.

Entonces Salviati le responde:

Todas las dificultades y objeciones suscitadas están tan bien fundadas que pienso que no es posible solucionarlas. Por lo que a mí me atañe, las acepto todas, como pienso que las admitiría también nuestro autor. Concedo igualmente que las conclusiones probadas en abstracto se alteran y son tan engañosas en concreto que ni el movimiento transversal es uniforme ni la aceleración natural tiene lugar según la proporción que hemos supuesto, ni la línea descrita por el proyectil es una parábola, etc.

Galileo pasa entonces a probar que

en el caso de los proyectiles que usamos nosotros, que están hechos de materiales pesados y de figura redonda, o incluso con materiales menos pesados con forma cilíndrica, como son las flechas lanzadas con hondas o arcos, la desviación que tenga su movimiento del curso exacto de la parábola será insignificante. Más aún (y me gustaría tomarme un poco más de libertad) os puedo mostrar, por medio de un par de experiencias, que las dimensiones de nuestros instrumentos son tan pequeñas que las resistencias externas y accidentales, entre las cuales la del medio es la más considerable, son apenas observables.

En uno de sus experimentos con cuerpos en caída libre, Galileo utilizó dos bolas, la una diez o doce veces más pesada que la otra; «tal sería el caso, por ejemplo, de una bola de plomo y otra de madera, ambas descendiendo desde una altura de 150 ó 200 *braccia*». Según Galileo,

considerando el caso de dos bolas que tengan la misma dimensión, siendo el peso de una diez o doce veces mayor que el de la otra; tal sería el caso, por ejemplo, de una bola de plomo y otra de madera, ambas descendiendo desde una altura de 150 ó 200 codos. Puesto que las dos llegan a tocar tierra con una diferencia de velocidad pequeñísima, tal experimento nos confirma que la resistencia y el retraso causado por el aire es mínimo; porque si la bola de plomo, que parte en el mismo instante y desde la misma altura que la bola de madera, sufriera poco el efecto del retraso mientras que la de madera lo padeciera mucho más, aquélla debería llegar a tierra con una notable ventaja con respecto a ésta, al ser su peso diez veces mayor. Ahora bien, no es esto lo que sucede, sino que, por el contrario, su ventaja no llegará ni siquiera a la centésima parte de toda la distancia recorrida en la caída. En el caso de una bola de plomo y otra de piedra, siendo el peso de esta última un tercio o la mitad de aquélla, sería imperceptible la diferencia de sus tiempos respectivos al tocar tierra.

A continuación, Galileo muestra que, aparte el peso,

la resistencia del aire con respecto a un móvil que va a gran velocidad no es mucho mayor que si se mueve lentamente.

Asumió que la resistencia del aire a los movimientos bajo estudio «llega a perturbarlos a todos y los perturba en una variedad infinita de modos, como infinitos son los modos en que varían las figuras, los pesos y las velocidades de los móviles». Entonces explica:

Por lo que atañe a la velocidad, a medida que ésta sea mayor, mayor también será la resistencia ofrecida por el aire; esta oposición crecerá a medida que los móviles sean menos pesados, de forma que si bien el cuerpo que desciende debería recorrer, con movimiento acelerado, un espacio proporcional al cuadrado de la duración de su movimiento, no obstante, por muy pesado que sea tal móvil, si cae desde una altura muy considerable, será tal la resistencia que sobre él ejerza el aire que le impedirá que vaya incrementando su velocidad hasta reducirlo a un movimiento uniforme e igual. Esta uniformidad se alcanzará tanto más rápidamente y en menor altura cuanto menos pesado sea el móvil.

En esta conclusión sumamente interesante, Galileo afirma que si un objeto cae durante un tiempo lo suficientemente largo, la resistencia del aire aumentará en alguna proporción a la velocidad, hasta que dicha resistencia iguale y compense al peso que atrae el objeto a la tierra. Si dos objetos tienen el mismo tamaño, y la misma resistencia debido a que tienen una forma similar, el más pesado acelerará durante más tiempo porque tiene un peso mayor. Continuará acelerando hasta que la resistencia (proporcional a la velocidad, que a su vez es proporcional al tiempo) iguale al peso. Lo que nos interesa no es tanto este importante resultado como la conclusión general de Galileo: Cuando la resistencia se torna tan grande que iguala al peso del grave, esta resistencia impedirá todo aumento de velocidad y transformará el movimiento en uniforme. Lo que quiere decir que, si la suma de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto (en este caso, la fuerza dirigida hacia abajo, del peso y la fuerza dirigida

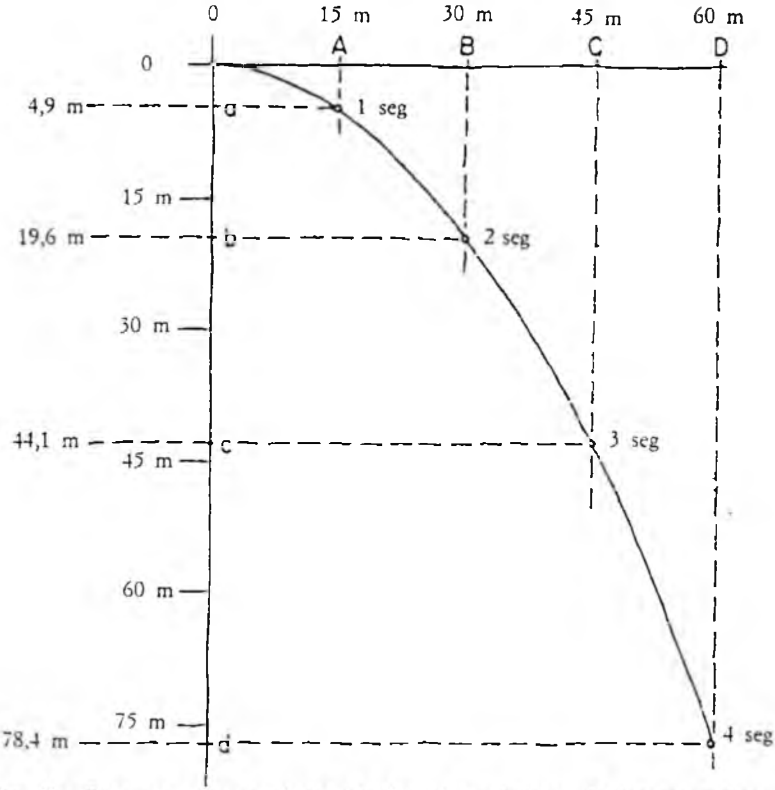


FIG. 20.—*Para ver cómo analizaba Galileo el movimiento de los proyectiles, consideremos una granada lanzada horizontalmente desde un cañón emplazado al borde de un acantilado, a una velocidad de 15 metros por segundo. Los puntos A, B, C, D muestran dónde se encontraría la granada al transcurrir los sucesivos segundos, si no hubiese resistencia del aire y ninguna componente hacia abajo, produciéndose en este caso un movimiento horizontal uniforme, avanzando la granada a 15 metros por segundo. En dirección hacia abajo hay un movimiento acelerado. Los puntos a, b, c, d muestran dónde estaría la granada, si cayera sin encontrar resistencia del aire y sin movimiento hacia adelante. Como la distancia se calcula según la ley*

$$D = \tfrac{1}{2}AT^2$$

y la aceleración A es de 9,8 m/seg², las distancias correspondientes a estos tiempos son

T	T^2	$\frac{1}{2}AT^2$	D
1 seg	1 seg²	4,9 m/seg² × 1 seg²	4,9 m
2 seg	4 seg²	4,9 m/seg² × 4 seg²	19,6 m
3 seg	9 seg²	4,9 m/seg² × 9 seg²	44,1 m
4 seg	16 seg²	4,9 m/seg² × 16 seg²	78,4 m

hacia arriba de la resistencia) se equilibra o arroja un valor neto de cero, el objeto, a pesar de todo, continuará moviéndose y se moverá uniformemente. Esto es antiaristotélico, ya que Aristóteles sostenía que, cuando la fuerza motriz iguala a la resistencia, la velocidad es cero. Se trata, de un modo limitado, de una formulación de la primera ley del movimiento de Newton, o principio de la inercia. De acuerdo con este principio, la ausencia de una fuerza externa neta permite a un cuerpo moverse en línea recta con velocidad constante, o quedar en reposo, y establece por lo tanto una equivalencia entre el movimiento rectilíneo uniforme y el reposo, un principio que puede considerarse uno de los fundamentos más importantes de la moderna física newtoniana (véase el apéndice 8).

¿Pero el principio de Galileo es realmente el mismo que el de Newton? Observemos que, en su declaración, Galileo no hace ninguna referencia a una ley general de la inercia, sino solamente al caso particular del movimiento de descenso. Este es un movimiento limitado, ya que solamente puede continuar hasta que el grave toca el suelo. No hay posibilidad, por ejemplo, de que un tal movimiento continúe uniformemente en línea recta sin límite, como se puede deducir de la formulación más general de Newton.

En las *Dos nuevas ciencias,* Galileo se acercó al problema de la inercia en relación sobre todo con su estudio de la trayectoria de un proyectil; buscaba demostrar que ésta consistía en una parábola (fig. 20). Galileo considera un cuerpo arrojado en dirección horizontal. Tendrá entonces dos movimientos separados e independientes. En dirección horizontal se moverá con velocidad uniforme, salvo por el pequeño efecto de frenado de la resistencia del aire. Al mismo tiempo, su movimiento hacia abajo será acelerado, precisamente del mismo modo que el de un objeto en caída libre. La combinación de estos dos movimientos es la que origina que la trayectoria sea parabólica.

Como en realidad la granada tiene los dos movimientos simultáneamente, la trayectoria resultante es la que corresponde a la curva.

Para los que gustan de un poco de álgebra, sea v la velocidad constante horizontal y x la distancia horizontal, de modo que $x = vt$. Sea y la distancia en la dirección vertical de modo que $y = \frac{1}{2}AT^2$. Entonces, $x^2 = v^2t^2$, o bien

$$\begin{cases} \dfrac{x^2}{v^2} = t^2 \\ \dfrac{2y}{A} = t^2 \end{cases}$$

y $\dfrac{x^2}{v^2} = \dfrac{2y}{A}$ *o* $y = \dfrac{A}{2v^2}x^2$ *, que es de la forma $y = kx^2$, donde k es una constante, y que es la clásica ecuación de la parábola.*

Para su postulado de que la componente hacia abajo del movimiento es la misma que la de un cuerpo en caída libre, Galileo no suministró ninguna prueba experimental, si bien indicó la posibilidad de efectuar una. Concibió una pequeña máquina en la que una bola se proyecta horizontalmente sobre un plano inclinado (fig. 21), para que describa una trayectoria parabólica (véase el apéndice 9).

Hoy día es fácil demostrar esta conclusión tomando un par de bolas y lanzando una horizontalmente, mientras que a la vez se deja caer a la otra libremente desde la misma altura. El resultado de este experimento se ilustra en la lámina 7, donde una serie de fotografías estroboscópicas tomadas en instantes sucesivos muestra que, aunque una de las bolas se mueva hacia adelante mientras la otra cae verticalmente, las distancias de descenso en los sucesivos segundos son las mismas para ambas. La misma situación se tendría en el caso de una bola que cae dentro de un tren que se mueve a velocidad constante sobre una vía recta. Cae *verticalmente* segundo a segundo tal como lo haría si el tren estuviese parado. Como también se mueve horizontalmente a la misma velocidad uniforme del tren, su verdadera trayectoria con respecto a la tierra es una parábola. Otro moderno ejemplo es el de un avión que vuela horizontalmente a velocidad constante y que suelta una bomba o un torpedo. La caída hacia abajo es la misma que se daría si la bomba o el torpedo se hubiese dejado caer desde un objeto en reposo a la misma altura, digamos un globo cautivo en un día de calma. Al tiempo que la bomba o el torpedo cae del avión, seguirá moviéndose hacia adelante con la velocidad uniforme horizontal de éste y, salvo por los efectos del aire, permanecerá directamente por debajo del aparato. Pero para un observador fijo en tierra, su trayectoria será una parábola.

Consideremos finalmente una piedra que se deja caer desde una torre. Con respecto a la tierra (y para una caída tan corta el movimiento de la Tierra puede considerarse lineal y uniforme) cae en

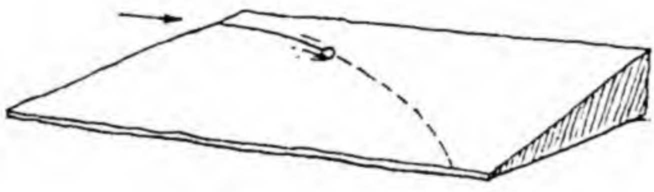


FIG. 21.—*El sencillo aparato que utilizaba Galileo para demostrar el movimiento de proyectiles era una cuña. Una bola puesta en movimiento horizontal en el punto más alto de la cuña cae hacia el fondo del plano inclinado en una trayectoria parabólica.*

LÁMINA V.—«*En un intercambio justo y gracioso*», *como dijo Galileo, la Tierra aporta iluminación a la Luna. Esta fotografía, realizada en el observatorio de Yerkes, muestra iluminada por la Tierra una parte de la Luna que de otro modo estaría en la sombra*

LÁMINA VI.—*Una bola lanzada mediante un cañón de muelle desde la chimenea de una locomotora de juguete en movimiento describe una parábola y aterriza en la locomotora, en lugar de subir y bajar en línea recta, como sería el caso cuando la locomotora está parada. Estas fotos estroboscópicas, con exposiciones a intervalos de 1/30 segundos, ilustran vívidamente uno de los argumentos de Galileo sobre el comportamiento de objetos en caída y zanjan el antiguo debate sobre cuerpos soltados desde los mástiles de barcos en movimiento. Si la velocidad de la locomotora fuese absolutamente uniforme y si la bola no encontrara resistencia del aire, aterrizaría en la chimenea. (De hecho, incluso bajo las condiciones imperfectas del experimento, la bola, las más de las veces, toca la chimenea.) Adviértase que la bola alcanza la misma altura independientemente de si la locomotora está parada o en movimiento. Nótese también que en la foto en la que la locomotora está parada, las distancias recorridas por la bola en los intervalos de exposición se corresponden casi exactamente. Al ascender, la gravedad la frena; al descender, la gravedad la acelera. Fotografías de Berenice Abbot.*

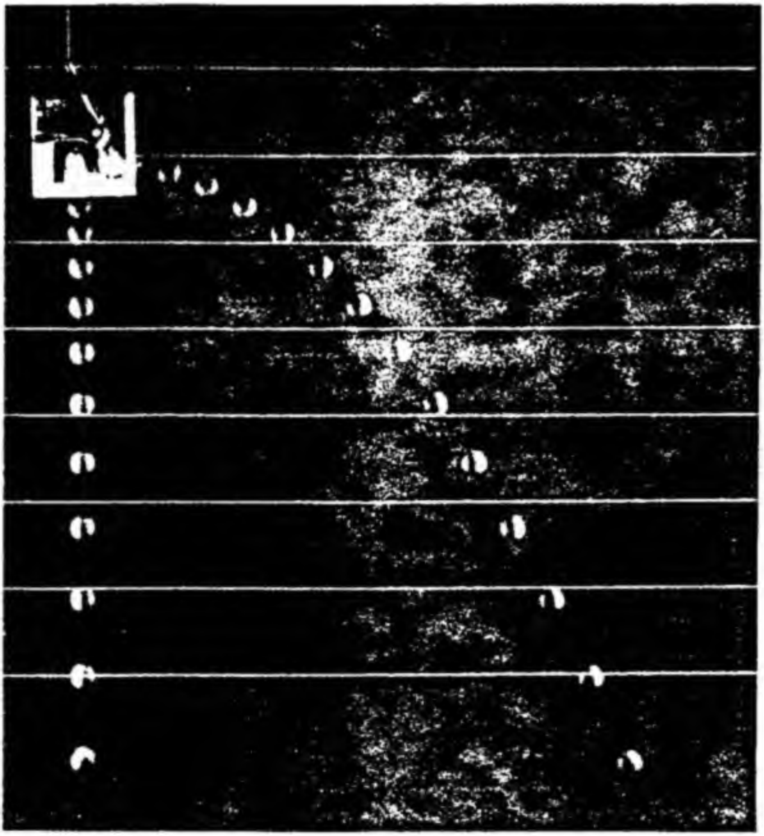


LÁMINA VII.—*Esta fotografía estroboscópica ilustra la independencia de las componentes vertical y horizontal del movimiento del proyectil. En intervalos de 1/30 segundos, la bola proyectada, que describe una trayectoria parabólica, recorre al caer exactamente la misma distancia que la bola que se deja caer verticalmente. Fotografía de Berenice Abbot.*

LÁMINA VIII

línea recta hacia abajo. Pero con respecto al espacio determinado por las estrellas fijas, retiene el movimiento compartido con la Tierra en el momento de ser soltada y, por consiguiente, su trayectoria es una parábola.

Estos análisis de trayectorias parabólicas se basan todos en el principio de Galileo de separar un movimiento complejo en dos movimientos (o componentes) que forman entre sí un ángulo recto. Ciertamente es una medida de su genio el que viera que un cuerpo podía tener simultáneamente una componente de velocidad horizontal uniforme y no acelerada y otra vertical y acelerada —sin afectar una a la otra en manera alguna. En cada uno de estos casos, la componente horizontal ilustra la tendencia de un cuerpo que su mueve a velocidad constante en línea recta a continuar este movimiento, aunque pierda su contacto físico con la fuente original de dicho movimiento uniforme. Esto se puede también describir como una tendencia de todo cuerpo a resistirse a cualquier cambio en su estado do movimiento, una propiedad conocida generalmente desde los tiempos de Newton como la inercia de un cuerpo. Ya que la inercia es de una importancia tan evidente a la hora de comprender el movimiento, profundizaremos algo más en los conceptos de Galileo —no tanto para mostrar sus limitaciones como para ilustrar cuán difícil era formular la ley completa de inercia y desbaratar los últimos vestigios de la vieja física.

Pero primero podemos observar que en su análisis de la trayectoria parabólica, Galileo parte de una cinemática estricta e introduce algunas consideraciones de dinámica. La razón por la que existe una aceleración en la componente vertical del movimiento, pero no en la componente horizontal, es que la gravedad actúa vertical y no horizontalmente. Galileo no concibió las fuerzas como abstracciones, y no generalizó los principios que utilizaba para analizar los movimientos de proyectiles de modo que descubriera una versión cualitativa de la segunda ley de Newton. Pero, más tarde, los científicos vieron en esta parte de su obra las semillas de la dinámica. (Para un resumen de los logros de Galileo en la ciencia del movimiento véase el apéndice 10.)

Dificultades y logros de Galileo: la ley de la inercia

Hacia el final de su *Dos nuevas ciencias*, Galileo introduce así el tema del movimiento de los proyectiles:

> Imaginémonos un móvil proyectado sobre un plano horizontal del que se ha quitado el más mínimo roce; sabemos ya que en tal cosa, y según lo que

> hemos expuesto detenidamente en otro lugar, dicho movimiento se desenvolverá sobre tal plano con un movimiento uniforme y perpetuo, en el supuesto de que este plano se prolongue hasta el infinito.

¿Pero puede haber un plano que «se prolongue hasta el infinito» en el mundo físico de Galileo? En el mundo real, ciertamente, nunca se encontraría un tal plano.

Al discutir el movimiento sobre un plano, Galileo admite las dificultades que menciona Simplicio:

> Una de ellas [de estas dificultades] consiste en suponer que el plano horizontal, al carecer de inclinación tanto hacia arriba como hacia abajo, es una línea recta y parecería que en una tal recta todos sus puntos fuesen igualmente distantes del centro, lo cual no es cierto. La razón de ello estriba en que cuando uno se va alejando del centro hacia uno de los extremos, resulta que se aleja también más y más del centro [de la Tierra] y, en consecuencia, va hacia arriba.

Así, si una bola se mueve sobre cualquier plano de extensión considerable tangente a la superficie de la Tierra, comenzará a moverse cuesta arriba, lo que destruiría la uniformidad de su movimiento. Pero en el mundo real del experimento las cosas son distintas; Galileo afirma que

> en la práctica, nuestros instrumentos y las distancias con las que operamos son tan pequeños en comparación con la distancia que nos separa del centro del globo terrestre, que podemos tomar tranquilamente un minuto de un grado del círculo máximo como si fuese una línea recta, y dos perpendiculares que cuelgan de sus extremos como si fuesen paralelas.

Y explica lo que significaría considerar un arco como una línea recta:

> He de añadir, llegados a este punto, que podemos decir que tanto Arquímedes como los otros dieron por supuesto, en sus consideraciones, que estaban separados por una distancia infinita del centro de la Tierra, en cuyo caso sus suposiciones no eran falsas y sus demostraciones eran absolutamente concluyentes. Por tanto, cuando queremos aplicar las conclusiones que hemos probado y que se refieren a distancias inmensas, hemos de hacer las correcciones necesarias, ya que nuestra distancia al centro de la Tierra, aunque no sea realmente infinita, es tal que se puede considerar inmensa si la comparamos con la insignificancia de nuestros instrumentos.

Al igual que en su discusión de la resistencia del aire, Galileo quiere saber aquí precisamente cuál sería el efecto de un factor al que desea ignorar. ¿Cuánto error se introduce al considerar como un plano una pequeña parte de la Tierra? Muy poco, para la mayoría de los problemas.

Anteriormente, al introducir el pensamiento de Galileo sobre velocidades terminales, se llamó la atención sobre su idea de que la resistencia del aire aumenta como alguna función de la velocidad. Así, después de caer durante algún tiempo, un grave puede generar una resistencia del aire igual a su peso, y luego no experimentar ninguna aceleración adicional. Bajo una fuerza resultante externa nula, el grave se moverá en línea recta a una velocidad constante. Esto ilustra claramente cómo un movimiento vertical descendente hacia la tierra puede ejemplificar el principio de inercia. Asimismo, el proyectil parecía constituir un ejemplo del principio de inercia en su movimiento horizontal, la componente de velocidad a lo largo de la tierra. Sin embargo, ahora se nos dice que, si el movimiento horizontal significa un movimiento a lo largo de un plano tangente a la Tierra, este movimiento no puede ser realmente inercial, ya que en cualquier dirección a partir del punto de tangencia el cuerpo, aunque siga moviéndose sobre el plano, ¡estará moviéndose cuesta arriba! Evidentemente, tenemos que aceptar la conclusión de que, si un tal movimiento ha de ser inercial y mantenerse a velocidad constante *sin una fuerza exterior,* el «plano» sobre el que se mueve el cuerpo no es en modo alguno un auténtico plano geométrico, sino una parte de la superficie de la Tierra, que se puede considerar plana únicamente debido al radio relativamente grande de nuestro planeta. Se podría pensar que, para Galileo, el principio de inercia era limitado; se restringía a objetos, bien en movimiento descendente sobre segmentos de una línea recta que termina en la superficie de la Tierra, bien sobre pequeñas áreas de esta misma superficie. Debido a que este último movimiento no se realiza en realidad sobre una línea recta, a veces se alude al concepto de Galileo como a un tipo de «inercia circular». Pero esto no está justificado, ya que atribuye a Galileo un principio falso: no existe ningún tipo de «inercia» que por sí misma, y sin mediar nada más, pueda mantener a un cuerpo en un movimiento circular constante.

Para aclarar el punto de vista de Galileo, podemos volver sobre su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo.* En esta obra escribe sin ambigüedades sobre el movimiento que él llamaría inercial en términos de un principio más bien circular que lineal. Aquí —como en las *Dos nuevas ciencias*— discute un movimiento compuesto de otros dos separados e independientes: movimiento uniforme en un círculo y movimiento acelerado en línea recta hacia el centro de la Tierra. La razón por la que Galileo pensaba en términos de un tipo de inercia no lineal parece ser el deseo de explicar cómo, en una Tierra en rotación, un cuerpo siempre caerá del mismo modo en que lo haría en el caso de que la Tierra estuviera en reposo.

Evidentemente, la caída hacia abajo en línea recta de un grave sobre una Tierra que gira implicaba para Galileo que el grave que cae tiene que continuar girando con ella. Así concibió que una bola que cae desde una torre continuará moviéndose a través de arcos circulares iguales en tiempos iguales (como lo hace cualquier punto de la Tierra), mientras que, no obstante, está descendiendo de acuerdo con la ley de cuerpos uniformemente acelerados hacia el centro de la Tierra.

Hay un momento del *Diálogo* en el que casi parece que Galileo expresó el principio de inercia. Salviati pregunta a Simplicio qué le sucedería a una bola situada en un plano inclinado. Simplicio está de acuerdo en que aceleraría hacia abajo espontáneamente. Similarmente, para remontar la pendiente, se necesitaría una fuerza para «empujarla hacia adelante o incluso para mantenerla en su sitio». ¿Qué pasaría si un cuerpo como éste fuera «colocado sobre una superficie sin pendiente?» Simplicio dice que no habría ni una «tendencia natural hacia el movimiento» ni una «resistencia a ser movido». Por tanto, el objeto permanecería estacionario, o en reposo. Salviati asiente en que esto pasaría si la bola fuera colocada con suavidad, mas ¿qué sucedería si fuese empujada en una dirección cualquiera? Simplicio responde que se movería en esa dirección y que no habría «causa de aceleración o deceleración, al no haber ninguna inclinación» para que «llegue a pararse». Salviati pregunta entonces cuán lejos seguiría moviéndose la bola en estas circunstancias. La respuesta es «tan lejos como la extensión de la superficie continue sin subir o bajar». Salviati continúa diciendo: «Entonces, si un espacio como éste fuera ilimitado, ¿el movimiento por él sería igualmente ilimitado, es decir, perpetuo?» A lo que Simplicio asiente.

Podría parecer que en este punto Galileo ha postulado la forma moderna del principio de inercia, según la cual un cuerpo proyectado sobre un plano infinito continuaría moviéndose uniformemente por siempre. Y esto queda subrayado al decir Simplicio que el movimiento sería «perpetuo» si «el cuerpo fuera de materia duradera». Mas luego Salviati le pregunta cuál sería, en su opinión, «la causa de que la bola se mueva espontáneamente sobre un plano inclinado hacia abajo, pero sólo con violencia sobre uno elevado». Simplicio contesta que «la tendencia de los graves es moverse hacia el centro de la Tierra, y moverse hacia arriba por su circunferencia solamente a la fuerza» al ser puestas en un movimiento violento. Salviati continúa: «Entonces para que una superficie esté [inclinada] ni hacia abajo ni hacia arriba, todas sus partes deben estar igualmente alejadas del centro. ¿Existen superficies como éstas en el mundo?» Simplicio responde: «Muchas de ellas; así sería la superficie de nuestro globo terrestre si fuera lisa, y no áspera y montañosa como es. Pero existe la del agua, cuando está plácida y tranquila.» Salviati prosigue diciendo que, por consiguiente, «un barco que se mueve sobre el mar en calma es uno de estos móviles que se mueve sobre una superficie que no está inclinada y, si fueran eliminados todos los obstáculos externos y accidentales, estaría por tanto en condiciones de avanzar incesante y uniformemente con el impulso recibido una sola vez». Simplicio asiente: «Parece que debe ser [así].»

Así, evidentemente, lo que en principio pareció ser un plano infinito ha encogido en la discusión y se ha convertido en un segmento de la superficie esférica de la Tierra. Y este movimiento que se decía «perpetuo», y que parecía ser un movimiento uniforme a lo largo de un plano infinito, se ha convertido en un barco cruzando un mar en calma, o en cualquier otro objeto que se mueva a lo largo de una esfera lisa como la Tierra. Y es precisamente éste el punto que Galileo quería probar, porque ahora puede explicar que una piedra que se deja caer desde un barco continuará moviéndose alrededor de la Tierra mientras se mueve el barco, y así, soltada desde lo alto del mástil, caerá al pie del mismo. «Ahora, en cuanto a esa piedra que está en lo alto del mástil. ¿No se está moviendo, transportada por el barco por la circunferencia del círculo y alrededor de su centro? Y, consiguientemente, ¿no hay en ella un movimiento indeleble, al haberse eliminado todos los impedimentos externos? ¿Y no es su movimiento tan rápido como el del barco?» A Simplicio se le permite llegar a su propia conclusión: «Vos queréis decir que la piedra, moviéndose con un movimiento impreso en ella indeleblemente, no puede abandonar el barco, sino seguirlo, y finalmente caer en el mismo lugar donde caería si el barco estuviera inmóvil.»

Una de las razones por las que a Galileo le habría parecido objetable el principio de inercia en su forma newtoniana es la de que implica un universo infinito. El principio newtoniano de inercia afirma que un cuerpo que se mueve sin la acción de fuerza alguna continuará moviéndose siempre en línea recta a velocidad constante, y si se mueve por siempre a velocidad constante, debe tener la potencialidad de moverse a través de un espacio ilimitado y sin fronteras. Mas Galileo afirma en su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* que «todo cuerpo constituido en un estado de reposo, pero por su naturaleza capaz de movimiento, se moverá, al ser puesto en libertad, sólo si posee una inclinación natural hacia algún lugar en particular». Luego un cuerpo no puede simplemente *alejarse* de un sitio, sino solamente *dirigirse* a él. También afirma sin dejar lugar a dudas: «Además, siendo el movimiento rectilíneo por naturaleza infinito (ya que una línea recta es infinita e indeterminada), es imposible que alguna cosa tenga por naturaleza el principio de moverse en línea recta; o, en otras palabras, de moverse hacia un lugar a donde le es imposible llegar, no existiendo ningún punto final. Pues la naturaleza, como el mismo Aristóteles dice muy bien, nunca emprende algo que es imposible hacer, ni se empeña en mover hacia donde no es posible llegar.» Por consiguiente, es obvio que Galileo, cuando habla de movimiento rectilíneo, se refiere al movimiento a lo largo de una parte limitada de una línea recta, o, como diríamos en términos técnicos, a lo largo de un segmento de una línea recta. Para Galileo, al igual que para sus predecesores medievales, movimiento todavía significa «movimiento local», una traslación de un lugar a otro, un movimiento hacia un destino fijo y no uno que simplemente continúa eternamente en alguna dirección particular —salvo en el caso de movimientos circulares.

La primera referencia publicada de Galileo a algún tipo de inercia aparece en su famosa *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares y sus accidentes* publicada en Roma en 1613, cuatro años después de que comenzara sus observaciones con el telescopio. Hablando de la rotación de las manchas alrededor del Sol, desarrolló un principio de inercia restringida, sosteniendo que un objeto situado sobre una trayectoria circular continuará eternamente este recorrido a velocidad constante a lo largo de un círculo, a no ser que actúe una fuerza exterior. Dice lo siguiente:

> Pues me parece haber observado que los cuerpos físicos poseen una inclinación física a algún movimiento (como la de los graves hacia abajo), el cual es ejercido por ellos a través de una propiedad intrínseca y sin necesidad de un motor externo particular, siempre que no se hallen impedidos por algún obstáculo. Y tienen repugnancia a algún otro movimiento (como la de los mismos graves a moverse hacia arriba), y por tanto nunca se mueven de esa manera a menos que sean violentamente arrojados por un motor externo.
>
> Finalmente, son indiferentes a algunos movimientos, como lo son estos mismos graves al movimiento horizontal, con respecto al cual no tienen ni inclinación (ya que no es hacia el centro de la Tierra), ni repugnancia (ya que no los aleja de este centro). Y por esta razón, eliminados todos los obstáculos externos, un grave situado sobre una superficie esférica concéntrica con la Tierra será indiferente al reposo y a los movimientos hacia cualquier parte del horizonte. Y se mantendrá él mismo en ese estado en el que ha sido situado; es decir, si se halla moviéndose hacia el oeste (por ejemplo), se mantendrá en este movimiento. Así un barco, por ejemplo, habiendo recibido en una ocasión algún ímpetu a través del mar en calma, se moverá continuamente en torno a nuestro globo sin detenerse nunca; y situado en reposo permanecerá perpetuamente en reposo, si en el primer caso se pudieran eliminar todos los obstáculos externos, y en el segundo no se adicionara una causa externa de movimiento.

Podemos observar aquí que el movimiento continuo examinado por Galileo no es circular en general, sino sólo circular en la medida en que se trata de un círculo sobre la superficie de la Tierra, o sobre una superficie esférica mayor, concéntrica con la Tierra. Hemos visto que Galileo no consideraba a un pequeño arco de un círculo terrestre notablemente diferente de una línea recta. Aún más importante, no obstante, es su introducción (en el segundo párrafo que acabamos de citar)[6] del concepto de un «estado» —de movimiento o de reposo— el cual (véase el apéndice 8) se convertiría en uno de los conceptos más importantes de la nueva física inercial de Descartes y de Newton. El problema se vuelve más complicado debido al hecho de que Galileo estaba indudablemente actuando conforme a las ideas generales de su tiempo, en las que se otorgaba un lugar especial a los movimientos circulares. Este era el caso, no sólo de la física aristotélica, sino también del planteamiento copernicano del universo. Copérnico, haciéndose eco de una idea neoplatónica, había dicho que el universo es esférico «bien porque esta figura es la más perfecta..., bien porque es la más capaz [es decir, de entre todos los sólidos posibles, la esfera es la que posee el mayor volumen para una superficie dada] y por ello es la más apropiada para lo que ha de contener y preservar todas las cosas; o también porque todos sus elementos perfectos, a saber, el Sol, la Luna y las estrellas, están así formados, o también porque todas las cosas tienden a asumir esta forma, como se ve en el caso de las gotas de agua y cuerpos líquidos en general si se forman libremente». Como la Tierra es esférica, Copérnico preguntó: «¿Por qué, entonces, dudamos en conceder a la Tierra este poder de movimiento propio de su forma [esférica], en vez de suponer un deslizarse alrededor de todo el universo, cuyos límites son desconocidos e incognoscibles?» La insistencia de Galileo en los círculos y en el movimiento circular puede interpretarse como concomitante de su defensa del sistema copernicano.

Si contemplamos a Galileo como un producto de su tiempo, todavía aprisionado por los principios de circularidad en la física, podemos observar la medida en que las pautas generales que fijan el pensamiento de una época pueden limitar a los genios más grandes. Y las consecuencias, en el caso de Galileo, son particularmente interesantes en el contexto del presente libro. Queremos llamar la atención sobre dos de ellas, que se examinarán en el capítulo siguiente.

---

[6] Los puntos de vista de Galileo sobre el movimiento inercial son examinados en *The New Science of Motion* de Winifred L. Wisan (1974), pp. 261-263; también se puede encontrar allí una valiosa presentación del principio «protoinercial» de predecesores de Galileo tales como Cardano y Benedetti (pp. 149-150, 205, 236-237).

Ante todo, el apego de Galileo a los círculos para órbitas planetarias le impidió aceptar el concepto de órbitas elípticas, el extraordinario descubrimiento de su contemporáneo Kepler, publicado en 1609, juntamente cuando Galileo apuntaba su telescopio hacia los cielos. En segundo lugar, al restringir el principio de inercia, tal como él lo concebía, a cuerpos en rotación y a graves moviéndose libremente sobre esferas lisas con el mismo centro que la Tierra (con la excepción de objetos terrestres recorriendo segmentos limitados de líneas rectas), nunca logró concebir una verdadera mecánica celeste. Aparentemente no intentó explicar el movimiento orbital de los planetas mediante algún tipo de principio inercial de acción circular, y, como muy bien dijo Stillman Drake, el primer experto americano sobre Galileo, «no hizo ninguna tentativa de explicar la causa de los movimientos planetarios, salvo para insinuar que si la naturaleza de la gravedad fuese conocida, esto también se podría descubrir». Este era un logro reservado para Newton.

Veremos que Newton estableció una física inercial que proporciona una dinámica tanto de cuerpos celestes como de objetos terrestres, y en la que sólo hay *inercia lineal,* sin ninguna inercia circular en absoluto. De hecho, una no pequeña parte del genio de Newton se exhibe en su análisis de los movimientos orbitales planetarios, donde se sirve de una idea que le comunicó Hooke, según la cual, en el movimiento curvilíneo, hay una componente inercial *en la dirección lineal,* combinada con una caída continua desde la línea recta a la trayectoria orbital. Así, a diferencia de Galileo, Newton demostró que el movimiento a lo largo de un círculo no es inercial; por consiguiente, requiere una fuerza. Newton y su contemporáneo Christiaan Huygens mostraron que en el movimiento circular uniforme hay una aceleración que no es uniforme y por tanto de un tipo que se hallaba fuera del alcance de Galileo.

En opinión de algunos especialistas, toda la carrera científica de Galileo representa su batalla en favor del sistema copernicano. Ciertamente, su lucha contra Aristóteles y Ptolomeo pretendía destruir tanto el concepto de un universo geostático como la física basada en él. El telescopio le permitió hacer tambalear los fundamentos de la astronomía ptolemaica, y sus investigaciones en la dinámica le llevaron a un nuevo punto de vista, según el cual los acontecimientos en una Tierra en movimiento tendrían la misma apariencia que en una Tierra estacionaria. Galileo no explicó realmente cómo podía moverse la Tierra, pero demostró positivamente por qué los experimentos terrestres tales como la caída de graves no pueden probar ni refutar el movimiento de la Tierra.

La armonía de la vida científica de Galileo, en la que combinaba la astronomía observacional y la física matemática, deriva de su dedicación a un universo centrado en el Sol —una dedicación reforzada por casi cada descubrimiento principal de los que hizo tanto en física como en astronomía. Habiendo sido el instrumento a través del cual los gloriosos aspectos de la creación en los cielos se habrían revelado plenamente, por vez primera, a un mortal, Galileo debió sentir una especial urgencia por convertir a todos sus semejantes al verdadero sistema del mundo —es decir, al copernicano—. Su conflicto con la Iglesia Católica Romana surgió porque Galileo, en lo profundo de su corazón, era un verdadero creyente. No había para él ninguna vía de compromiso, ninguna manera de poseer dos cosmologías separadas, una secular y otra teológica. Si el sistema copernicano era el verdadero, como él creía, entonces ¿qué otra cosa podía hacer, sino luchar con cada arma de su arsenal de lógica, retórica, observación científica, teoría matemática, y astuta perspicacia para que su Iglesia aceptara el nuevo sistema del mundo? Desgraciadamente para Galileo, no era el momento para que la Iglesia acometiera este cambio, o así lo parecía entonces, tras el Concilio de Trento y sus insistencia sobre la interpretación literal de las Escrituras. No había manera de evitar el conflicto, y las consecuencias todavía prolongan su eco a nuestro alrededor en un sinfín de escritos polémicos. En el contraste entre la heroica postura de Galileo al intentar reformar la base cosmológica de la teología ortodoxa y su capitulación al renegar, humillado y de rodillas, de sus convicciones copernicanas, podemos percibir las tremendas fuerzas con que tropezó el nacimiento de la ciencia moderna. Y posiblemente vislumbremos algo del espíritu de este gran hombre al recordarlo, después de su proceso y condena, viviendo bajo un tipo de vigilancia o arresto domiciliario, como lo vio Milton en Arcetri, y completando su obra científica más importante, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias.* Este libro constituyó la base sobre la cual la siguiente generación de científicos comenzaría la gran exploración de los principios dinámicos de un universo heliocéntrico.

Capítulo 6

LA MUSICA CELESTE DE KEPLER

Desde la época de los griegos, los científicos han insistido en que la naturaleza es simple. Una conocida máxima de Aristóteles es que «la naturaleza no hace nada en vano, nada superfluo». Otra expresión de esta filosofía ha llegado a nosotros a través de un monje y estudioso del siglo XIV, Guillermo de Occam. Conocida como su «ley de economía» o «la navaja de Occam» (quizá por su implacable extirpación de lo superfluo), mantiene que «los entes no deben multiplicarse innecesariamente». «Es vano hacer con más lo que puede ser hecho con menos», resume quizá esta actitud. Como Newton declaró en los *Principia*, «la naturaleza no hace nada en vano, y más causas son vanas donde pocas bastan». La razón es que «la naturaleza es simple y no se permite el lujo de causas superfluas».

Hemos visto a Galileo asumir un principio de simplicidad en su método de abordar el problema del movimiento acelerado, y los escritos de la moderna ciencia física proporcionan innumerables ejemplos. Claro está, la física de hoy día está en un apuro, o al menos en una situación incómoda, a causa de que las recientemente descubiertas «partículas elementales» nucleares exhiben una tenaz aversión a aceptar leyes sencillas. Hace tan sólo unos pocos decenios los físicos suponían complacientemente que el protón y el electrón eran las únicas «partículas fundamentales» que necesitaban para explicar el átomo. Pero ahora se ha ido infiltrando una «partícula fundamental» tras otra, hasta tal punto que parece que muy posiblemente existan *tantas como elementos químicos*. Enfrentado con esta desconcertante colección, el físico medio está tentado de hacerse eco de Alfonso el Sabio y lamentar el hecho de que no haya sido consultado antes.

Cualquiera que examine la figura 14 (págs. 57-58) verá en seguida que ni el sistema ptolemaico ni el copernicano eran, en cualquier acepción de la palabra, «sencillos». Hoy sabemos por qué estos sistemas carecían de simplicidad. Limitar los movimientos celestes a círculos introducía muchas curvas y centros de movimiento por demás innecesarios. Si los astrónomos hubieran usado algunas otras curvas, especialmente la elipse, un número menor de ellas podría haber hecho mejor el trabajo. Una de las grandes contribuciones de Kepler a la astronomía fue haber encontrado esta verdad.

La elipse y el universo kepleriano

La elipse nos permite centrar el sistema solar en el Sol verdadero en lugar de en algún «Sol medio» o el centro de la órbita de la Tierra, como hizo Copérnico. De este modo el sistema kepleriano presenta un universo de estrellas fijas en el espacio, un Sol fijo y una *única* elipse para la órbita de cada planeta, con una adicional para la Luna. En realidad, muchas de estas elipses, excepto para la órbita de Mercurio, se parecen tanto a círculos que a primera vista el sistema kepleriano parece ser el sistema copernicano simplificado mostrado en la página 58 del capítulo 3: un círculo para cada planeta en su movimiento alrededor del Sol y otro para la Luna.

Una elipse (fig. 22) no es una curva tan «sencilla» como un círculo, como vamos a ver. Para trazar una elipse (fig. 22 A) se clavan dos alfileres o chinchetas en una tabla, y a ellos se atan los extremos de un trozo de hilo. Ahora se traza la curva moviendo un lápiz dentro del rizo de hilo de modo que el hilo siempre permanezca tenso. De este método de dibujar la elipse es evidente la siguiente condición definidora: cada punto P sobre la elipse tiene la propiedad de que la suma de las distancias desde él a los otros dos puntos F_1 y F_2, conocidos como *focos,* es constante. (La suma es igual a la longitud del cordel.) Para cada par de focos, la longitud del cordel escogida determina el tamaño y forma de la elipse, la cual también puede variarse usando la misma longitud de cordel y situando los alfileres más cerca, o más lejos, uno de otro. De este modo una elipse puede tener una forma (fig. 22 B) con más o menos las proporciones de un huevo, un cigarro o una aguja, o puede ser casi redonda e igual a un círculo. Pero, a diferencia del verdadero huevo, cigarro o aguja, la elipse debe ser siempre simétrica (fig. 23) con respecto a los ejes, uno de los cuales (el eje mayor) es una línea trazada de un

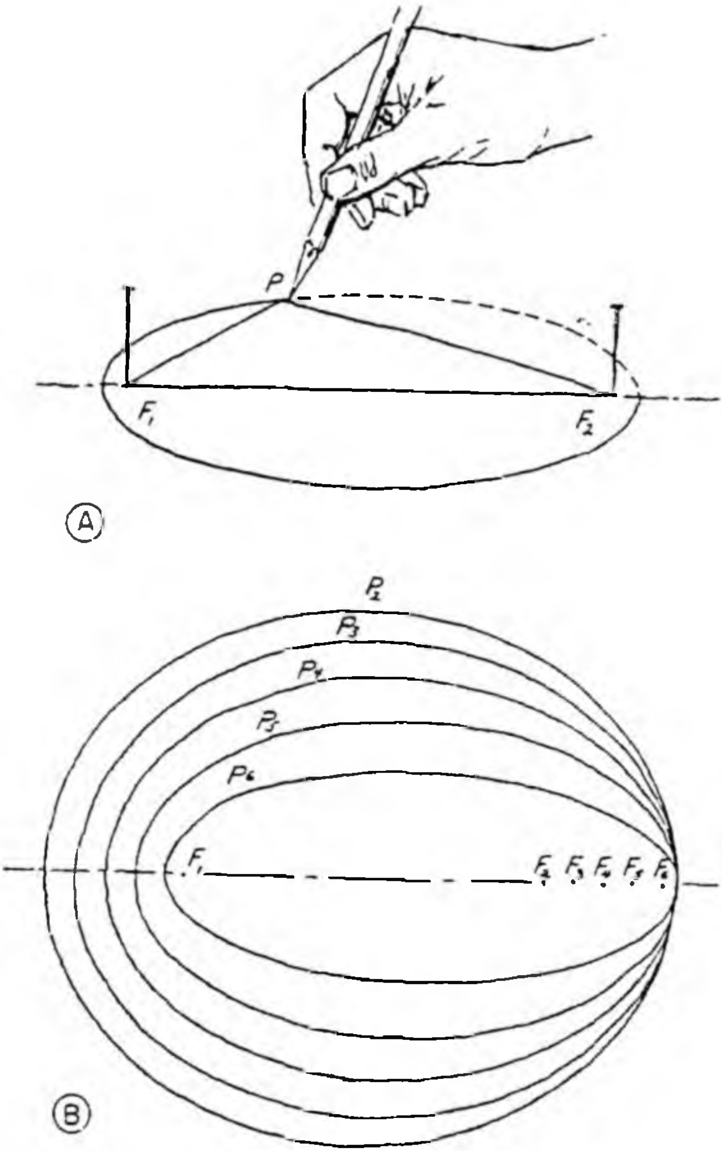


FIG. 22.—*La elipse, dibujada en la forma que se muestra en (A), puede adoptar todas las formas que se muestran en (B) si se usa el mismo cordel, pero se varía la distancia entre los alfileres, situando uno de ellos en* F_2, F_3, F_4, *etc.*

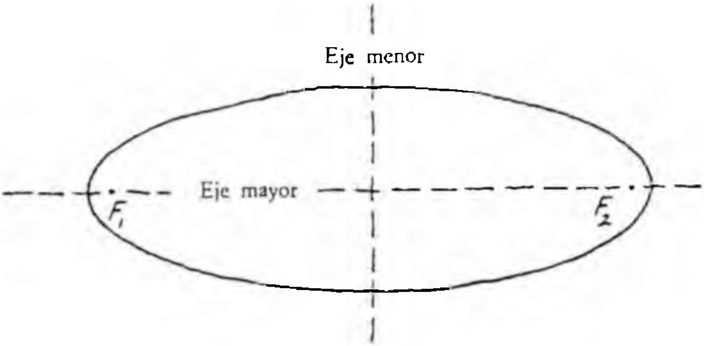


Fig. 23.—*La elipse siempre es simétrica con respecto a sus ejes mayor y menor.*

lado a otro de la elipse y que pasa por los focos, y el otro (el eje menor) es una línea trazada de un lado a otro de la elipse a lo largo de la perpendicular al eje mayor y que lo bisecta. Si los dos focos se aproximan hasta coincidir, la elipse se transforma en un círculo; otra manera de expresar esto es decir que el círculo es una forma «degenerada» de la elipse.

Las propiedades de la elipse fueron descritas en la antigüedad por Apolonio de Perga, el geómetra griego que inauguró el esquema de epiciclos usado en la astronomía ptolemaica. Apolonio mostró que la elipse, la parábola (la trayectoria de un proyectil de acuerdo con la mecánica galileana), el círculo y otra curva denominada la hipérbola se pueden formar pasando planos con diferentes inclinaciones a través de un cono recto o cono de revolución. Pero hasta la época de Kepler y Galileo nadie había mostrado que las secciones cónicas se dan en los fenómenos naturales del movimiento.

No discutiremos en este libro las etapas por las que Johannes Kepler llegó a hacer sus descubrimientos. No porque el tema esté desprovisto de interés. ¡Lejos de ello! Pero ahora estamos interesados en el nacimiento de una nueva física, y la forma en que se relaciona con los escritos de la antigüedad, la Edad Media, el Renacimiento y el siglo XVII. Los libros de Aristóteles fueron ampliamente leídos, del mismo modo que lo fueron los escritos de Galileo y de Newton. Se estudiaba cuidadosamente el *Almagesto* de Ptolomeo y el *De revolutionibus* de Copérnico. Pero los escritos de Kepler no fueron leídos con tanta generalidad. Newton, por ejemplo, conocía los trabajos de Galileo, pero aparentemente no leyó los trabajos astronómicos de Kepler. Su conocimiento de las leyes de Kepler lo

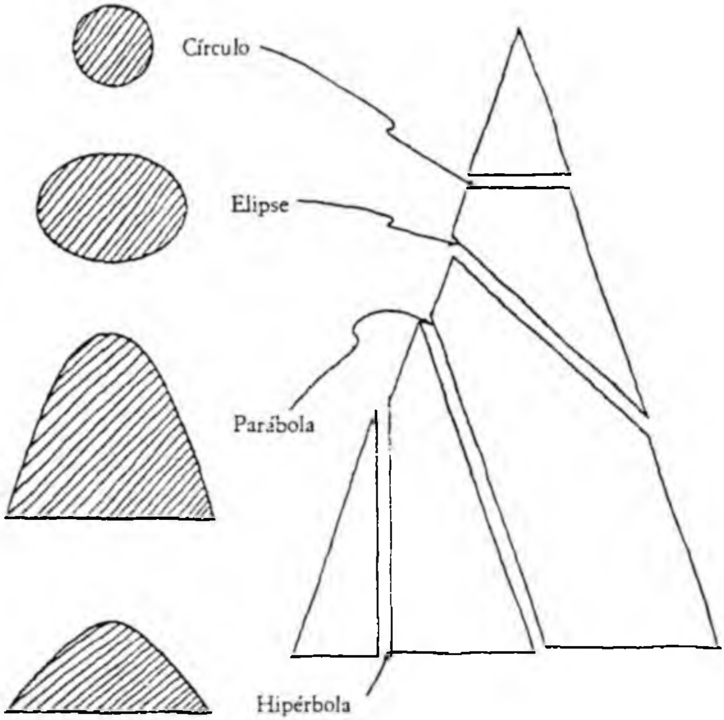


FIG. 24.—*Las secciones cónicas se obtienen seccionando un cono en las formas que se muestran. Advierta que el circulo se obtiene mediante un corte paralelo a la base del cono, y la parábola mediante uno paralelo a un lado.*

adquirió de segunda mano, del manual de astronomía de T. Streete y del libro de texto de V. Wing. Aun en la actualidad los principales trabajos de Kepler no están disponibles en traducciones completas al inglés, francés o italiano.

Este descuido de los textos de Kepler no es difícil de entender. El lenguaje y el estilo son de una dificultad y prolijidad inimaginables, lo cual, en contraste con la claridad y vigor de cada palabra de Galileo, parece tremendamente enojoso. Esto es de esperar, pues los escritos reflejan la personalidad de su autor. Kepler fue un místico atormentado, que tropezó con sus grandes descubrimientos en un fantástico avanzar a tientas que ha llevado a uno de sus biógrafos [1] a

[1] Arthur Koestler, *The Sleepwalkers*, Londres, Hutchinson & Co., 1959. [Trad. cast., *Los sonámbulos*, Buenos Aires, Eudeba, 1963 y Barcelona, Salvat, 1986.]

calificarlo de «sonámbulo». Tratando de probar una cosa, descubría otra, y en sus cálculos cometió algunos errores de bulto que se cancelaban entre sí. Fue completamente distinto de Galileo y de Newton; sus resueltas búsquedas de la verdad posiblemente nunca podrían merecer la descripción de sonambulismo. Kepler, que escribió bosquejos de sí mismo, dijo que se tornó copernicano cuando era estudiante y que «había tres cosas en particular, a saber, el número, distancias y movimientos de los cuerpos celestes, para las cuales yo buscaba celosamente las razones por las que eran como eran, y no de otra forma». Sobre el sistema centrado en el Sol de Copérnico, Kepler escribió en otro momento: «Ciertamente sé que le debo este servicio: que desde que lo confirmé como cierto en lo más profundo de mi alma, y desde que contemplé su belleza con increíble y embelesado deleite, debo también defenderlo públicamente ante mis lectores con toda la fuerza de que dispongo.» Pero no fue suficiente defender el sistema; se dispuso a dedicar su vida entera a encontrar una ley o un conjunto de leyes que mostraran cómo el sistema se mantiene unido, por qué los planetas tienen las órbitas particulares en las que se encuentran y por qué se mueven como lo hacen.

La primera entrega de este programa, publicada en 1596, cuando Kepler tenía veinticinco años de edad, se titulaba *Prodromus*. En este libro Kepler anunciaba lo que consideraba un gran descubrimiento relativo a las distancias de los planetas al Sol. Este descubrimiento nos muestra cuán enraizado estaba Kepler en la tradición platónico-pitagórica, cómo buscó encontrar regularidades en la naturaleza asociadas con las regularidades de las matemáticas. Los geómetras griegos habían descubierto que había cinco «sólidos regulares», que se muestran en la figura 25. En el sistema copernicano hay seis planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. De aquí se le ocurrió a Kepler que cinco sólidos regulares pueden separar seis órbitas planetarias.

Comenzó con el más simple de estos sólidos, el cubo. Un cubo puede ser circunscrito por una y sólo una esfera, precisamente del mismo modo en que una y sólo una esfera puede ser inscrita en un cubo. Por lo tanto, podemos tener un cubo que es circunscrito por la esfera número 1 y contiene a la esfera número 2. Esta esfera número 2 contiene al siguiente sólido regular, el tetraedro, el cual, a su vez, contiene a la esfera número 3. Esta esfera número 3 contiene al dodecaedro, el cual, a su vez, contiene a la esfera número 4. Ahora sucede que en este esquema los radios de las sucesivas esferas se hallan más o menos en la misma proporción que las distancias medias de los planetas en el sistema copernicano, excepto para Júpiter —lo cual no es sorprendente, dijo Kepler, considerando cuán lejos se halla

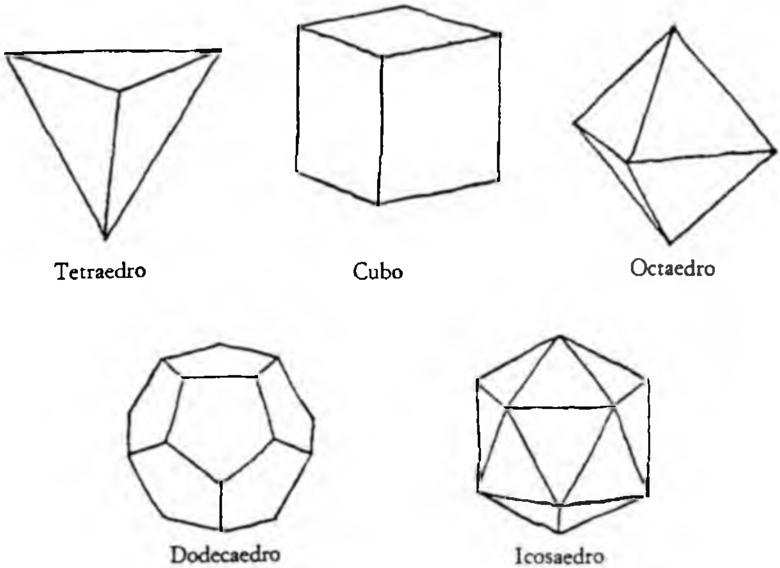


FIG. 25.—*Los poliedros «regulares». El tetraedro tiene cuatro caras, siendo cada una un triángulo equilátero. El cubo tiene seis caras, cada una de ellas un cuadrado. El octaedro tiene ocho caras, cada una un triángulo equilátero. Cada una de las doce caras del dodecaedro es un pentágono equilátero. Las veinte caras del icosaedro son todas triángulos equiláteros.*

Júpiter del Sol. El primer esquema kepleriano (fig. 26), entonces, fue éste:

Esfera de Saturno
Cubo
Esfera de Júpiter
Tetraedro
Esfera de Marte
Dodecaedro
Esfera de la Tierra
Icosaedro
Esfera de Venus
Octaedro
Esfera de Mercurio

«Emprendí la tarea —dijo— de probar que Dios, en la creación de este universo móvil y la disposición de los cielos, tuvo en cuenta los cinco cuerpos regulares de la geometría célebres desde los días de Pitágoras y Platón, y que El había acomodado a su naturaleza, el número de los cielos, sus proporciones y las relaciones de sus movimientos.» Aun a pesar de que este libro no alcanzó un éxito incondicional, estableció la reputación de Kepler como un hábil matemático y como un hombre que realmente sabía algo de astronomía. Sobre la base de este logro, Tycho Brahe le ofreció un trabajo.

De Tycho Brahe (1546-1601) se ha dicho que fue el reformador de la observación astronómica. Usando instrumentos enormes y bien construidos, había incrementado tanto la precisión de las determinaciones a simple vista de las posiciones planetarias y de las localizaciones de las estrellas relativas una a otra, que se hizo claro que ni el sistema de Ptolomeo ni el de Copérnico podían predecir verdaderamente las apariencias celestes. Además, en contraste con astrónomos anteriores, Tycho no se limitó a observar los planetas en un momento dado y suministrar entonces los factores para una teoría o para buscar tal teoría; en su lugar, observó un planeta siempre que era visible, noche tras noche. Cuando Kepler, con el tiempo, se convirtió en el sucesor de Tycho, heredó la más amplia y exacta colección de observaciones planetarias —especialmente para el planeta Marte— que fuera reunida jamás. Como se recordará, Tycho no creía ni en el sistema ptolemaico ni en el copernicano, sino que había propuesto un sistema geocéntrico de su propia invención. Kepler, fiel a una promesa que le había hecho a Tycho, intentó encajar los datos de Tycho sobre el planeta Marte en el sistema tychónico. Fracasó, como fracasó también a la hora de encajar los datos en el sistema copernicano. Pero veinticinco años de labor produjeron una nueva y perfeccionada teoría del sistema solar.

Kepler presentó sus primeros resultados principales en un trabajo titulado «*Nueva astronomía... presentada en forma de comentarios sobre los movimientos de Marte*», publicado en 1609 [2], el año en el cual Galileo apuntó por primera vez su telescopio en dirección a los cielos. Kepler había llevado a cabo setenta tentativas distintas de disponer los datos obtenidos por Tycho en los epiciclos copernicanos y en los círculos tychónicos, pero siempre fracasó. Evidentemente, era necesario renunciar a todos los métodos aceptados de calcular las

---

[2] Como indica el título, se trata de una *Astronomia nova*, una «nueva astronomía», en el sentido de relacionar los movimientos planetarios con sus causas para llegar a una «física celeste». Kepler no tuvo éxito en alcanzar este particular objeto —la primera obra moderna que revela la relación entre movimientos celestes y causas físicas fue los *Principia* de Newton (1687).

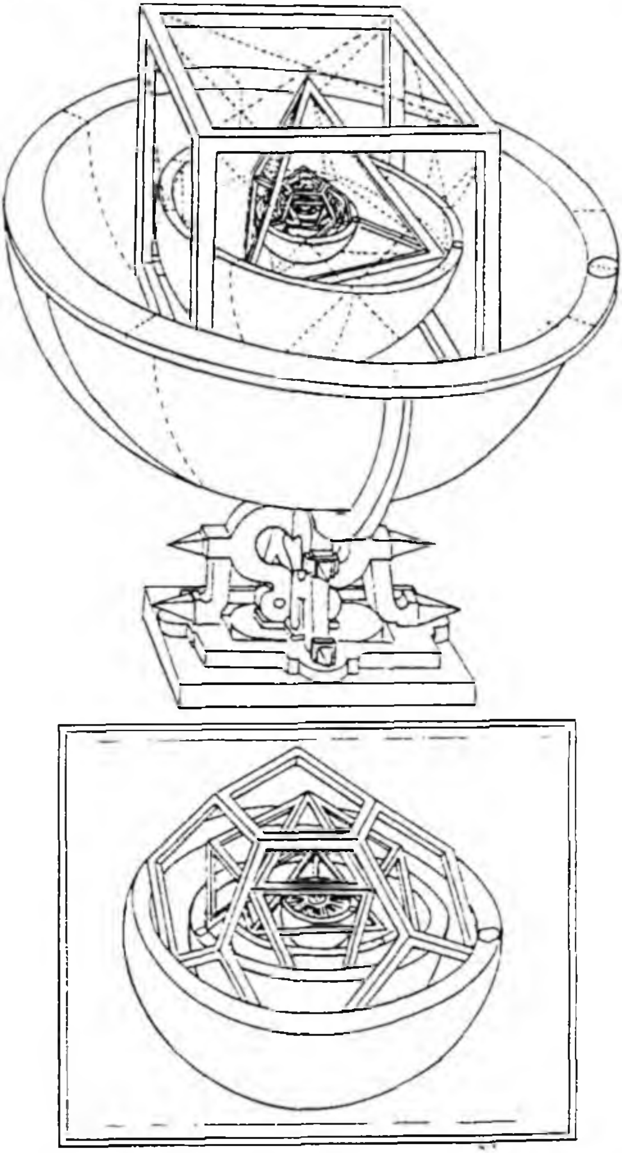


FIG. 26.—*El modelo del universo de Kepler. Apreció más a este extraño dispositivo, que consiste en los cinco sólidos regulares encajados uno en otro, que a las tres leyes sobre las que reposa su fama. De su libro de 1596.*

órbitas planetarias o rechazar las observaciones de Tycho como inexactas. El fracaso de Kepler no parece tan desafortunado como él creía. Después de calcular excéntricas, epiciclos y ecuantes en ingeniosas combinaciones, fue capaz de obtener un acuerdo entre las predicciones teóricas y las observaciones de Tycho con una discrepancia de sólo 8 minutos (8') de arco. Copérnico mismo nunca había esperado alcanzar una precisión mayor de 10', y las *Tablas prusianas*, calculadas por Reinhold sobre la base de los métodos copernicanos, llegaban a discrepar hasta en 5°. En 1609, antes de la aplicación de los telescopios a la astronomía, 8' no era un ángulo grande; 8' es precisamente el doble de la separación mínima entre dos estrellas que el ojo medio puede distinguir sin ayuda como entidades separadas.

Pero Kepler no iba a quedar satisfecho con cualquier aproximación. Creía en el sistema copernicano centrado en el Sol y también creía en la exactitud de las observaciones de Tycho. Así, escribió:

> Puesto que la divina bondad nos ha dado en Tycho Brahe un observador muy cuidadoso, de cuyas observaciones el error de 8' se muestra en este cálculo ... es justo que reconozcamos con gratitud y hagamos uso de este don de Dios... Pues si yo hubiera tratado los 8' de longitud como despreciables, habría corregido ya suficientemente la hipótesis ... descubierta en el Capítulo XVI. Pero como no pueden ser ignorados, tan sólo estos 8' han señalado el camino hacia una completa reforma de la astronomía, y se han constituido en el objeto de gran parte de este trabajo.

Comenzando de nuevo, Kepler dio finalmente el paso revolucionario de rechazar del todo los círculos, probando con una curva oviforme y finalmente con la elipse. Para apreciar cuán revolucionario fue en realidad este paso, recuérdese que tanto Aristóteles como Platón habían insistido en que las órbitas planetarias debían ser combinaciones de círculos, y que este principio fue una característica común tanto al *Almagesto* de Ptolomeo como al *De revolutionibus* de Copérnico. Galileo, amigo de Kepler, ignoró cortésmente la extraña aberración. Pero la victoria final fue de Kepler. No sólo se desembarazó de innumerables círculos, no requiriendo sino una curva oval por planeta, sino que hizo exacto al sistema y encontró una relación completamente nueva e insospechada entre la localización de un planeta y su velocidad orbital.

Las tres leyes

El problema de Kepler no fue sólo determinar la órbita de Marte, sino hallar al mismo tiempo la órbita de la Tierra. La razón es que

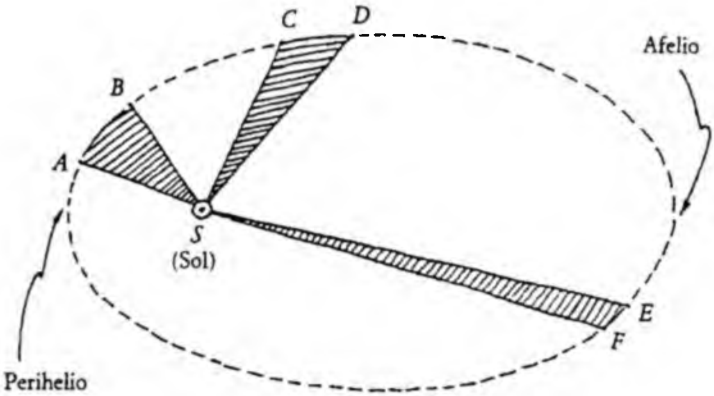


FIG. 27.—*Ley de Kepler de las áreas iguales. Como un planeta atraviesa los arcos AB, CD y EF en tiempos iguales (ya que las áreas SAB, SCD y SEF son iguales), viaja más rápido en el perihelio, cuando está más cerca del Sol, y más lento en el afelio, cuando se halla más alejado. La forma de esta elipse es la de una órbita cometaria. Las elipses planetarias se aproximan mucho más a un círculo.*

nuestras observaciones de Marte se efectúan desde la Tierra, la cual no se mueve uniformemente en un círculo perfecto alrededor del Sol. Afortunadamente, sin embargo, la órbita de la Tierra es casi circular. Kepler descartó la idea de Copérnico de que todas las órbitas planetarias deben centrarse en el punto medio de la órbita de la Tierra. Descubrió, en cambio, que *la órbita de cada planeta tiene la forma de una elipse con el Sol situado en un foco.* Este principio se conoce como la primera ley de Kepler [3].

La segunda ley de Kepler nos informa acerca de la velocidad con la que un planeta se mueve en su órbita. Esta ley establece que *en cualesquiera intervalos de tiempo iguales, una línea trazada desde el planeta al Sol barrerá áreas iguales.* La figura 27 muestra áreas iguales para tres regiones de una órbita planetaria. Como las tres regiones sombreadas tienen la misma área, el planeta se mueve más rápidamente cuando está más cerca del Sol y más lentamente cuando está

[3] En su libro sobre Marte, Kepler deriva primero una ley general de áreas que es independiente de cualquier órbita en particular. Sólo más tarde, y a fuerza de un enorme trabajo de cálculo, inventó el concepto de una órbita elíptica, para luego hallar que la órbita encajaba con las observaciones de Marte. Alrededor de ochenta años más tarde, Newton, en sus *Principia,* comenzaría con la ley sobre áreas (prop. 1-3) y sólo después (prop. 11) se ocuparía de la ley sobre órbitas elípticas.

más alejado. Esta segunda ley nos indica así inmediatamente que la irregularidad aparente en la velocidad con la que los planetas se mueven en sus órbitas es una variación que es función de una sencilla condición geométrica.

La primera y segunda leyes muestran claramente cuánto alteró y simplificó Kepler el sistema copernicano. Pero la tercera ley, conocida también como la ley armónica, es aún más interesante. Se denomina ley armónica debido a que su descubridor pensó que demostraba las verdaderas armonías celestes. Kepler hasta tituló el libro en el cual la anunciaba *La armonía del mundo* (1619). La tercera ley establece una relación entre los tiempos periódicos en los cuales los planetas completan sus órbitas alrededor del Sol y sus distancias medias al Sol. Hagamos una tabla de los tiempos periódicos (T) y de las distancias medias (D). En esta tabla y en el texto que sigue las distancias se dan en unidades astronómicas. Una unidad astronómica es, por definición, la distancia media de la Tierra al Sol. Esta tabla nos muestra que no hay una relación sencilla entre D y T. Por esta razón Kepler trató de ver qué sucedería si tomaba

	Mercurio	*Venus*	*Tierra*	*Marte*	*Júpiter*	*Saturno*
Tiempo medio T (años)	0,24	0,615	1,00	1,88	11,86	29,457
Distancia media desde el Sol D (Unidades astronómicas)	0,387	0,723	1,00	1,524	5,203	9,539

los cuadrados de estos valores, D^2 y T^2. Estos pueden ser tabulados como sigue (usando valores actuales):

	Mercurio	*Venus*	*Tierra*	*Marte*	*Júpiter*	*Saturno*
T^2	0,058	0,378	1,00	3,53	141	867,7
D^2	0,150	0,523	1,00	2,323	27,071	90,993

Todavía no hay una relación discernible entre D y T^2, o entre D^2 y T, o aun entre D^2 y T^2. Cualquier mortal ordinario habría renunciado en este punto. ¡Kepler no! Se hallaba tan convencido de que estos números debían estar relacionados que nunca habría renunciado. La siguiente potencia es el cubo. Resulta que T^3 no tiene ninguna utilidad, pero D^3 depara los siguientes números. Obsérvelos y luego retorne a la tabla de cuadrados.

	Mercurio	*Venus*	*Tierra*	*Marte*	*Júpiter*	*Saturno*
D^3	0,058	0,378	1,00	3,54	141	867,9

Aquí se hallan entonces las armonías celestes, la tercera ley, que establece que *los cuadrados de los tiempos de revolución de cada dos planetas alrededor del Sol* (la Tierra incluida) *son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol.*

En lenguaje matemático, podemos decir que «T^2 es siempre proporcional a D^3», o bien que

$$\frac{D^3}{T^2} = K$$

donde K es una constante. Si escogemos como unidades para D y T la unidad astronómica y el año, entonces K tiene el valor numérico de la unidad. (Pero si la distancia se midiera en kilómetros y el tiempo en segundos, el valor de la constante K no sería la unidad.) Otra manera de expresar la tercera ley de Kepler es

$$\frac{D_1^3}{T_1^2} = \frac{D_2^3}{T_2^2} = \frac{D_3^3}{T_3^2} = \frac{D_4^3}{T_4^2} = \ldots\ldots\ldots = K$$

donde D_1 y T_1, D_2 y T_2, ..., son las respectivas distancias y períodos de cada planeta en el sistema solar.

Para ver cómo puede aplicarse esta ley, vamos a suponer que se descubriera un nuevo planeta a una distancia media de 4UA del Sol. ¿Cuál es su período de revolución? La tercera ley de Kepler nos dice que el cociente D^3/T^2 para este nuevo planeta debe ser el mismo que el cociente D_o^3/T_o^2 para la Tierra. Es decir.

$$\frac{D^3}{T^2} = \frac{(1AU)^3}{(1^a)^2}$$

Como $D = 4AU$,

$$\frac{(4AU)^3}{T^2} = \frac{(1UA)^3}{(1^a)^2}$$

$$\frac{64}{T^2} = \frac{1}{(1^a)^2}$$

$$T^2 = 64 \times (1^a)^2$$

$$T = 8^a$$

También se puede resolver el problema inverso. ¿Cuál es la distancia del Sol a un planeta que tiene un período de 125 años?

$$\frac{D^3}{T^2} = \frac{(1UA)^3}{(1^a)^2}$$

$$\frac{D^3}{(125^a)^2} = \frac{(1UA)^3}{(1^a)^2}$$

$$\frac{D^3}{(125 \times 125)} = \frac{(1UA)^3}{1}$$

$$D^3 = 25 \times 25 \times 25 \times (1UA)^3$$

$$D = 25UA$$

Pueden resolverse problemas análogos para cualquier sistema de satélites. La trascendencia de esta tercera ley es que se trata de una ley de necesidad; es decir, establece que, en cualquier sistema de satélites, es imposible para éstos moverse a cualquier velocidad o a cualquier distancia. Una vez se ha dado la distancia, la velocidad está determinada. En nuestro Sistema Solar esta ley implica que el Sol suministra la fuerza rectora que mantiene a los planetas moviéndose como lo hacen. De ninguna otra manera podemos dar cuenta del hecho de que la velocidad esté tan puntualmente relacionada con la distancia al Sol. Kepler pensaba que la acción del Sol era, cuanto menos en parte, magnética. Se sabía en su día que un imán atrae a otro imán aún a pesar de que los separen distancias considerables.

El movimiento de un imán produce movimiento en el otro. Kepler estaba informado de que un físico de la reina Isabel, William Gilbert (1544-1603), había mostrado que la Tierra es un enorme imán. Si todos los objetos en el Sistema Solar son semejantes antes que diferentes, como había mostrado Galileo y como supone el sistema heliocéntrico, ¿por qué el Sol y los otros planetas no podrían ser también imanes como la Tierra?

La suposición de Kepler, pese a ser atractiva, no conduce directamente a una explicación de por qué los planetas se mueven en elipses y barren áreas iguales en tiempos iguales. Ni nos dice por qué la particular relación distancia-período que encontró es efecivamente válida. Ni parece relacionada de alguna forma con problemas tales como la caída de graves —conforme a la ley galileana de caída— sobre una Tierra estacionaria o en movimiento, ya que la piedra corriente o el trozo de madera no son magnéticos. Y sin embargo veremos que Newton, el cual respondió con el tiempo a estas cuestiones, basó sus descubrimientos en las leyes encontradas por Kepler y Galileo.

Kepler versus los copernicanos

¿Por qué los bellos resultados de Kepler no fueron universalmente aceptados por los copernicanos? Entre el momento de su publicación (I, II, 1609; II, 1619) y la publicación de los *Principia* de Newton en 1687, hubo muy pocos trabajos que contuvieran referencias a las tres leyes de Kepler. Galileo, que había recibido copias de los libros de Kepler y que ciertamente tenía conocimiento de la sugerencia de las órbitas elípticas, nunca mencionó en sus escritos científicos ninguna de las leyes de Kepler, ni para alabarlas ni para criticarlas. En parte, la reacción de Galileo debe haber sido copernicana, anclada en la creencia de la auténtica circularidad, implícita en el mismo título del libro de Copérnico: *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*. Esta obra se abría con un teorema: 1. *Que el mundo es esférico*. Este era seguido poco después por una discusión del tema «Que el movimiento de los cuerpos celestes es regular y circular, perpetuo o compuesto por movimientos circulares». Aquí el principal argumento es:

> La movilidad de la esfera es girar en un círculo, expresando mediante el mismo acto su forma, en un cuerpo simplicísimo, donde no se puede encontrar ni principio ni fin, ni distinguir uno de otro, mientras la esfera pasa hacia los mismos puntos volviendo hacia los mismos... Y no menos conviene confesar que los movimientos son circulares, o compuestos por muchos círculos, porque

mantienen las irregularidades según una ley fija y con renovaciones constantes: lo que no podría suceder si no fueran circulares. Pues el círculo es el único que puede volver a recorrer el camino recorrido. Como, por ejemplo, el Sol, con su movimiento compuesto de círculos, nos trae de nuevo, una vez y otra, la irregularidad de los días y las noches y las cuatro estaciones del año.

De este modo, Kepler estaba comportándose de una forma altamente no-copernicana por no aceptar que las órbitas planetarias son «círculos» o «compuestas de círculos»; además, había llegado en parte a esta conclusión por la reintroducción, en una etapa de su pensamiento, del aspecto de la astronomía ptolemaica que más había objetado Copérnico, el *ecuante*. En su astronomía, Kepler introdujo una sencilla aproximación para ocupar el lugar de la ley de las áreas. Kepler dijo que una línea trazada desde cualquier planeta al foco vacío de su elipse (fig. 28) gira uniformemente, o lo hace muy aproximadamente. El foco vacío, o el punto sobre el cual tal línea giraría describiendo ángulos iguales en tiempos iguales, es el ecuante. (Incidentalmente, podemos observar que este último «descubrimiento» de Kepler no es cierto.)

Desde casi todo punto de vista, las elipses deben haber parecido objetables. ¿Qué tipo de fuerza podría conducir a un planeta a lo largo de una trayectoria elíptica con justamente la variación precisa

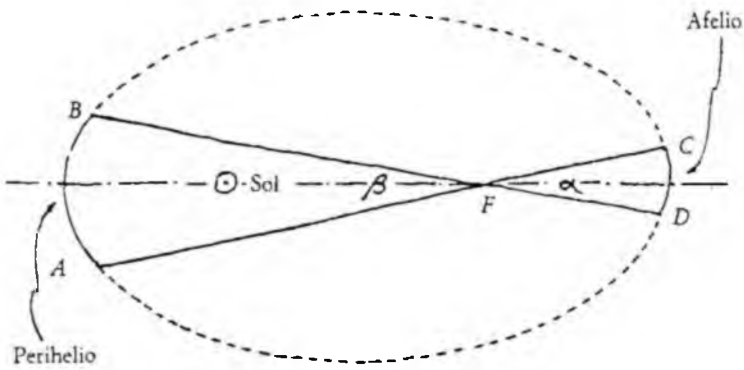


FIG. 28.—*Ley de Kepler del ecuante. Si un planeta se mueve de modo que en tiempos iguales barre ángulos iguales con respecto a un foco vacío en F, recorrerá los arcos AB y CD en el mismo tiempo, puesto que los ángulos α y β son iguales. De acuerdo con esta ley, el planeta se mueve más rápido por el arco AB (en el perihelio) que por el arco CD (en el afelio), como predice la ley de las áreas iguales. No obstante, esta ley es sólo una tosca aproximación. En el siglo XVII se añadieron a la misma ciertos factores de corrección para hacerla dar unos resultados más aproximados.*

de velocidad demandada por la ley de las áreas? No reproduciremos la discusión de Kepler sobre este punto, sino que limitaremos nuestra atención a un aspecto del mismo. Kepler supuso que algún tipo de fuerza o emanación sale del Sol y mueve los planetas. Esta fuerza —a veces denominada una *anima motrix*— no se disemina desde el Sol en todas direcciones. ¿Por qué debería hacerlo? Después de todo, su función es sólo mover los planetas, y todos los planetas se encuentran en, o muy aproximadamente en, un solo plano, el plano de la eclíptica. De aquí Kepler supuso que esta *anima motrix* se diseminaba sólo en el plano de la eclíptica. Había descubierto que la luz, la cual se propaga en todas direcciones desde una fuente luminosa, disminuye en intensidad como el inverso del cuadrado de la distancia; es decir, que si hay una cierta intensidad o brillo a tres metros de una lámpara, el brillo a seis metros de ella será una cuarta parte del anterior, porque cuatro es el cuadrado de dos y la nueva distancia es el doble de la antigua. En forma de ecuación,

$$\text{intensidad} \propto \frac{1}{(\text{distancia})^2}$$

Pero Kepler sostuvo que la fuerza solar no se disemina en todas las direcciones de acuerdo con la ley de la inversa del cuadrado, como lo hace la luz solar, sino sólo en el plano de la eclípica y de acuerdo con una ley bastante diferente. Es a partir de esta doblemente errónea suposición que derivó su ley de las áreas —¡y lo hizo *antes* de haber encontrado que las órbitas planetarias son elipses! La diferencia entre su procedimiento y el que consideraríamos «lógico» es que *no* descubrió primero la trayectoria verdadera de Marte alrededor del Sol, y calculó entonces su velocidad en términos del área barrida por una línea trazada desde el Sol a Marte. Este no es sino un ejemplo de la dificultad en seguir a Kepler a través de su libro sobre Marte.

El logro kepleriano

A Galileo le desagradaba particularmente la idea de que las emanaciones solares o misteriosas fuerzas actuando a distancia pudieran afectar la Tierra o cualquier parte de la Tierra. No sólo rechazó la sugerencia de Kepler de que el Sol puede ser el origen de una fuerza atractiva que mueve la Tierra o los planetas (en la cual estaban basadas las primeras dos leyes de Kepler), sino que también rechazó especialmente la sugerencia de Kepler de que una fuerza lunar o emanación pudiera ser una causa de las mareas. Así, escribió:

Pero entre todos los grandes hombres que han filosofado sobre este notable efecto, estoy más sorprendido con Kepler que con cualquier otro. A pesar de su mente abierta y aguda, y a pesar de que tiene en las puntas de sus dedos los movimientos atribuidos a la Tierra presta su oído, sin embargo, y su aprobación al dominio de la Luna sobre las aguas, y a propiedades ocultas, y a puerilidades de este tipo.

En cuanto a la ley armónica, o tercera ley, podemos preguntar con la voz de Galileo y sus contemporáneos, ¿esto es ciencia o numerología? Kepler ya se había comprometido públicamente con la opinión de que el telescopio revelaría no sólo los cuatro satélites de Júpiter descubiertos por Galileo, sino también dos de Marte y ocho de Saturno. La razón para estos números en particular era que así el número de satélites por planeta se incrementaría de acuerdo con una secuencia geométrica regular: 1 (para la Tierra), 2 (para Marte), 4 (para Júpiter), 8 (para Saturno). ¿No era la relación distancia-período de Kepler algo del mismo puro malabarismo de número antes que verdadera ciencia? ¿Y no se podrían hallar pruebas del aspecto generalmente acientífico de todo el libro de Kepler en la forma en que intentó acomodar los aspectos numéricos de los movimientos y localizaciones de los planetas en las cuestiones planteadas por la tabla de contenidos del Libro Quinto de su *Armonía del mundo*?

1. Acerca de las cinco figuras sólidas regulares.
2. Sobre la relación entre ellas y las razones armónicas.
3. Resumen de la doctrina astronómica necesaria para la contemplación de las armonías celestes.
4. En qué cosas relativas a los movimientos planetarios han sido expresadas las armonías simples y que todas aquellas armonías que están presentes en el canto se encuentran en los cielos.
5. Que las claves de la escala musical, o tonos del sistema, y los tipos de armonías, la mayor y la menor, están expresadas por ciertos movimientos.
6. Que cada Tono o Modo musical está expresado en cierta forma por uno de los planetas.
7. Que los contrapuntos o armonías universales de todos los planetas pueden existir y ser distintos uno de otro.
8. Que los cuatro tipos de voz están expresados en los planetas: soprano, contralto, tenor, y bajo.
9. Demostración de que para asegurar esta disposición armónica, esas mismas excentricidades planetarias que tiene cada planeta como propias, y no otras, tenían que ser establecidas.
10. Epílogo acerca del Sol, por vía de muy fecundas conjeturas.

Abajo se muestran las «melodías» desempeñadas por los planetas en el esquema kepleriano.

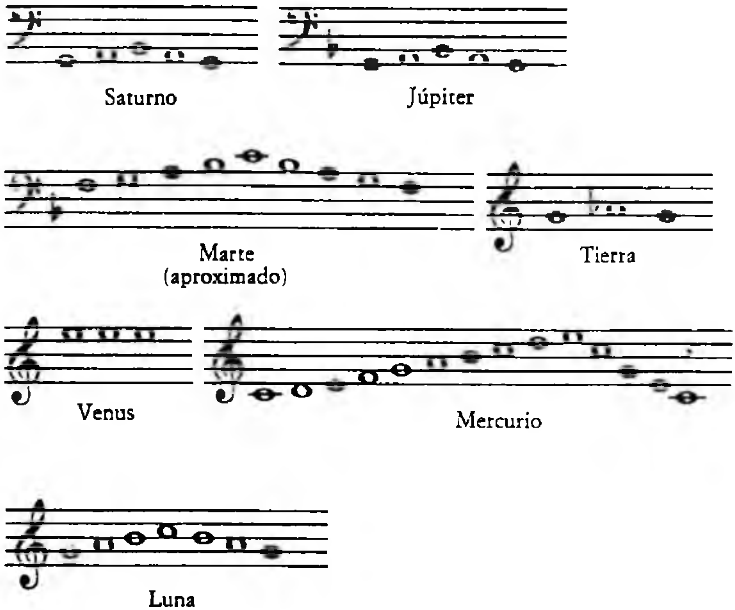


FIG. 29.—*La música de los planetas de Kepler, de su libro* La armonía del mundo. *No es sorprendente que un hombre como Galileo nunca se molestara en leerlo.*

Seguramente un hombre como Galileo encontraría difícil considerar tal libro como una contribución seria a la física celeste.

El último libro importante de Kepler fue un *Epítome de la astronomía copernicana,* terminado para publicación nueve años antes de su muerte en 1630. En él defendió sus desviaciones del sistema copernicano original. Pero lo que es de mayor interés para nosotros es que en este libro, como en la *Armonía del mundo* (1619), volvió a presentar orgullosamente sus primeros descubrimientos relativos a los cinco sólidos regulares y a los seis planetas. Era, mantenía todavía, la razón para que el número de planetas fuera seis.

Deber haber supuesto casi tanto trabajo desenmarañar las tres leyes de Kepler de entre el resto de sus escritos como rehacer los descubrimientos. Kepler merece el crédito de haber sido el primer científico en reconocer que el concepto copernicano de la Tierra como un planeta y los descubrimientos de Galileo demandaban una física —que se aplicara igualmente a los objetos celestes y a los cuerpos terrestres ordinarios. Pero, ¡ay!, Kepler permaneció tan enredado en la física aristotélica que cuando intentó proyectar en los cielos una física terrestre, las bases todavía surgieron esencialmente de Aristóteles. De este modo, el principal *objetivo de la física kepleriana* permaneció inalcanzado, y la primera física factible para el cielo y la Tierra no derivó de Kepler, sino de Galileo, y cobró su forma bajo la dirección magistral de Isaac Newton [4].

[4] Kepler introdujo el término «inercia» en la física del movimiento, pero el sentido de la «inercia» kepleriana era muy distinto del significado posterior (y actual) de este término; véase el apéndice 8.

Capítulo 7

EL GRAN PROYECTO. UNA NUEVA FISICA

La publicación de los *Principia* de Isaac Newton en 1687 fue uno de los acontecimientos más notables en toda la historia de la ciencia física. En esta obra se puede encontrar la culminación de miles de años de esfuerzos por comprender el sistema del mundo, los principios de la fuerza y del movimiento, y la física de los cuerpos que se mueven en medios diferentes. No es pequeño testimonio de la vitalidad del genio científico de Newton el que, a pesar de que la física de los *Principia* haya sido alterada, perfeccionada, y desafiada desde entonces, aún emprendamos la resolución de muchos problemas de mecánica celeste y de la física de grandes cuerpos procediendo esencialmente como lo hizo Newton hace unos 300 años. Los principios newtonianos de mecánica celeste guían nuestros satélites artificiales, nuestras lanzaderas espaciales, y cada astronave que lancemos a explorar las vastas extensiones de nuestro Sistema Solar. Y si no bastara con esto para satisfacer los cánones de grandeza, se puede decir que Newton fue igualmente grande como matemático puro. Inventó los cálculos diferencial e integral (producidos simultánea e independientemente por el filósofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz), que constituyen el lenguaje de la física; desarrolló el teorema del binomio y varias propiedades de las series infinitas; y estableció los fundamentos del cálculo de variaciones. En óptica, Newton inició el estudio experimental del análisis y composición de la luz, mostrando que la luz blanca es una mezcla de luz de muchos colores, cada uno con un índice de refracción característico. Sobre estas investigaciones han surgido la ciencia de la espectroscopia y los métodos de análisis colorimétrico. Newton inventó un telescopio reflector y mostró así a los astrónomos cómo trascender las limitaciones de los telescopios confeccionados con lentes. En resumen, se trató de un fantástico logro científico —de un tipo que nunca ha sido igualado y puede que nunca llegue a serlo.

En esta obra nos ocuparemos exclusivamente del sistema de dinámica y gravitación de Newton, los problemas centrales para los que han sido una preparación los capítulos precedentes. Si los ha leído cuidadosamente, tiene en mente todos menos uno de los principales ingredientes que se requieren para la comprensión del sistema newtoniano del mundo. Pero aun si éste fuese dado —el análisis del movimiento circular uniforme—, todavía se requeriría la mano conductora de Newton para colocar juntos estos ingredientes. Requirió genio suministrar el nuevo concepto de gravitación universal. Vamos a ver lo que Newton hizo realmente.

Antes que nada, debe comprenderse que el mismo Galileo nunca intentó presentar esquema alguno de fuerzas que dieran cuenta del movimiento de los planetas, o de sus satélites. En cuanto a Copérnico, el *De revolutionibus* no contiene ninguna insinuación de importancia en una mecánica celeste. Kepler había intentado suministrar una mecánica celeste, pero el resultado nunca fue muy feliz. Sostuvo que el *anima motrix* que emanaba del Sol causaría que los planetas girasen en círculos alrededor de éste. Supuso además que las interacciones magnéticas del Sol y un planeta podrían desplazar al planeta a una órbita elíptica a partir de una revolución que de otro modo sería circular. Otros que meditaron los problemas del movimiento planetario propusieron sistemas de mecánica que contenían ciertas características que iban a aparecer más tarde en la dinámica newtoniana. Uno de éstos fue Robert Hooke, quien pensó bastante comprensiblemente que Newton le debería haber dado más crédito que una mera referencia de pasada por haber anticipado partes de las leyes de la dinámica y la gravitación.

Las intuiciones newtonianas

El capítulo culminante en el descubrimiento de la mecánica del universo comienza con una preciosa historia. Hacia el tercer cuarto del siglo XVII, un grupo de hombres se había ilusionado tanto por desarrollar las nuevas ciencias matemáticas experimentales que se asociaron de común acuerdo para realizar experimentos, presentarse uno a otro problemas por resolver, e informar de sus propias investigaciones y de aquellas de otros reveladas por correspondencia, libros o folletos. Así sucedió que Robert Hooke, Edmond Halley, y sir Christopher Wren, el principal arquitecto de Inglaterra, se reunieron para discutir esta cuestión: ¿Bajo qué ley de fuerza seguiría un planeta una órbita elíptica? A partir de las leyes de Kepler —especialmente la tercera ley o armónica, pero también la segunda o ley de las áreas— estaba claro que, de un modo u otro, el Sol debe controlar o cuanto menos afectar el movimiento de un planeta de acuerdo con la proximidad relativa del planeta al Sol. Aun si los mecanismos particulares propuestos por Kepler (una *anima motrix* y una fuerza magnética) tenían que ser rechazados, no podía haber duda de que algún tipo de interacción planeta-Sol mantenía a los planetas en sus cursos. Además, una intuición más penetrante que la de Kepler percibiría que cualquier fuerza que emane del Sol debe diseminarse en todas direcciones desde este cuerpo, disminuyendo presumiblemente de acuerdo con la inversa del cuadrado de su distancia al Sol —del mismo modo que la intensidad de la luz disminuye en relación con la distancia—. Pero decirlo es algo muy distinto de *probarlo* matemáticamente. Para probarlo se requeriría una física completa con métodos matemáticos aptos para resolver todos los problemas concomitantes y consiguientes. Cuando Newton se negó a reconocer el mérito de los autores que presentaban afirmaciones generales sin ser capaces de probarlas matemáticamente o de acomodarlas en un marco dinámico válido, estaba bastante justificado al decir, como lo hizo de las pretensiones de Hooke: «Qué bonito, ¿no? Resulta que los matemáticos que hacen los descubrimientos, establecen las cosas y hacen todo el negocio han de contentarse con ser simples calculadores y peones y otro que no hace nada, si no es alardear y usurpar todo, ha de llevarse toda la invención, tanto de los que lo siguen como de los que lo preceden.»

En todo caso, hacia enero de 1684, Halley había concluido que la fuerza que actúa sobre los planetas para mantenerlos en sus órbitas «decrece en la proporción de los cuadrados de las distancias recíprocamente»,

$$F \propto \frac{1}{D^2}$$

pero no fue capaz de deducir de esta hipótesis los movimientos observados en los cuerpos celestes. Cuando Wren y Hooke se reunieron más avanzado el mes, concordaron con la suposición de Halley de una fuerza solar. Hooke se jactó de «que sobre este principio todas las leyes de los movimientos celestes iban a ser [*i. e.*, deberían ser] demostradas, y que él mismo lo había hecho». Pero pese a las repetidas incitaciones y a la oferta de Wren de un considerable premio monetario, Hooke no llegó a —y presumiblemente no pudo— presentar una solución. Seis meses después, en agosto de 1684, Halley decidió ir a Cambridge a consultar a Isaac Newton. A su llegada se enteró de las «buenas noticias» de que Newton «había hecho esta demostración a la perfección». He aquí el relato casi contemporáneo de DeMoivre de esta visita:

> Después de estar juntos algún tiempo, el Dr. Halley le preguntó cuál pensaba que debía ser la curva descrita por los planetas suponiendo que la fuerza de atracción hacia el Sol fuese recíproca al cuadrado de su distancia a él. Sir Isaac respondió inmediatamente que debía ser una elipse. El Doctor, sorprendido por la alegría y el asombro, le preguntó cómo lo sabía. Porque, respondió, lo he calculado. Tras lo cual el Dr. Halley le preguntó inmediatamente por sus cálculos. Sir Isaac miró entre sus papeles y no pudo hallarlos, pero prometió rehacerlos y enviárselos. Sir Isaac, tratando de cumplir su promesa, puso de nuevo manos a la obra, pero no logró llegar a la conclusión que creía haber obtenido antes mediante un examen cuidadoso. No obstante, ensayó una nueva vía que, aunque más larga que la anterior, le condujo de nuevo a su primitiva conclusión. Entonces examinó con cuidado las causas por las que su primer cálculo resultó ser erróneo, y halló que, al dibujar una elipse deprisa y a mano, había dibujado los dos ejes de la curva en lugar de dibujar dos diámetros un tanto inclinados uno hacia el otro, de modo que posiblemente fijó su imaginación en dos diámetros conjugados, lo cual era un requisito imprescindible. Al darse cuenta, hizo que ambos cálculos coincidieran.

Acicateado por la visita de Halley, Newton reanudó el trabajo sobre una cuestión que había llamado su atención a los veintitantos años, cuando había establecido los fundamentos de sus otros grandes descubrimientos científicos: la naturaleza de la luz blanca y del color y los cálculos diferencial e integral. Puso ahora en orden sus indagaciones, hizo grandes progresos, y en el otoño de ese año discutió su investigación en una serie de conferencias sobre dinámica que impartió en la universidad de Cambridge, como lo requería su cátedra. Finalmente, con el estímulo de Halley, un borrador de estas conferencias, *De motu corporum*, se convirtió en uno de los más grandes e influyentes libros que haya concebido el hombre. Más de un científico se ha hecho eco del sentir que Halley expresó en la oda que escribió como prefacio a los *Principia* de Newton (o, para dar a la obra maestra de éste su título completo, los *Philosophiae naturalis principia mathematica, Principios matemáticos de la filosofía natural,* Londres, 1687):

Vosotros, los que gozáis del néctar celeste,
Celebrad conmigo a quien tales cosas nos muestra,
A Newton que abre el cerrado cofre de la verdad,
A Newton, amado de las musas, en cuyo limpio pecho
Habita Febo, de cuya mente se apoderó con todo su Numen;
Pues no está permitido a un mortal tocar más de cerca a los dioses.

Los «principia»

Los *Principia* están divididos en tres partes o libros; fijaremos nuestra atención en el primero y el tercero. En el Libro Primero Newton desarrolla los principios generales de la dinámica de cuerpos en movimiento, y en el Libro Tercero aplica estos principios al mecanismo del universo. El Libro Segundo trata de un aspecto de la mecánica de fluidos, de la teoría de ondas, y de otros aspectos de la física.

En el Libro Primero, a continuación del prefacio, de un conjunto de definiciones, y de una discusión sobre la naturaleza del tiempo y del espacio, Newton presentó los «axiomas, o leyes del movimiento»:

Ley Primera

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser en tanto que sea obligado por fuerzas impresas a cambiar su estado.

Ley Segunda

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime. [Véase la nota suplementaria de la pág. 187.]

Observe que si un cuerpo está en movimiento uniforme sobre una línea recta, una fuerza que forme ángulo recto con la dirección del movimiento del cuerpo no afectará al movimiento de avance. Esto se sigue del hecho de que la aceleración está siempre en la misma dirección de la fuerza que la produce, de modo que en este caso la aceleración está en ángulo recto con la dirección del movimiento. Así, en el experimento del tren de juguete del capítulo 5, la principal fuerza que actúa es la fuerza de gravedad, dirigida hacia abajo, que produce una aceleración vertical. La bola, bien esté moviéndose hacia adelante o en reposo, se ve así obligada a retardar su movimiento ascendente hasta que llega al reposo, y entonces es acelerada en su camino de descenso.

La comparación de los dos conjuntos de fotografías (p. 121) muestra que los movimientos de ascenso y descenso son exactamente los mismos, bien esté el tren en reposo o en movimiento uniforme. En la dirección de avance no hay efectos del peso o gravedad, puesto que éste actúa únicamente en una dirección vertical. La única fuerza en la dirección de avance u horizontal es la pequeña cantidad de la fricción del aire, que es casi despreciable; por lo que puede decirse que en la dirección horizontal no hay ninguna fuerza actuando. De acuerdo con la primera ley de Newton del movimiento, la bola continuará moviéndose hacia adelante con movimiento uniforme en línea recta precisamente del mismo modo en que lo hace el tren —un hecho que se puede confirmar inspeccionando la fotografía—. La bola permanece sobre la locomotora tanto si el tren está en reposo como si está en movimiento uniforme en línea recta. Esta ley de movimiento se denomina algunas veces el *principio de inercia,* y la propiedad que tienen los cuerpos materiales de continuar en un estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta es conocida en ocasiones como la *inercia* de los cuerpos [1].

Newton ilustró la Primera Ley refiriéndose a proyectiles que continúan en sus movimientos de avance «a no ser en cuanto son retardados por la resistencia del aire y son empujados hacia abajo por la gravedad», y se refirió también a «los cuerpos más grandes de los cometas y de los planetas». (Sobre el aspecto inercial del movimiento de «cuerpos más grandes» tales como «cometas y planetas», véase el apéndice 12). Con este plumazo, Newton postuló la opinión opuesta a la física aristotélica. En esta última, ningún cuerpo celeste puede moverse uniformemente en línea recta en ausencia de una fuerza, ya que esto sería un movimiento «violento» y por lo tanto contrario a su naturaleza. Ni podría un objeto terrestre, como hemos visto, moverse a lo largo de su línea recta «natural» sin un motor externo o una fuerza motriz interna. Newton, presentando una física

---

1 La primera formulación conocida de esta ley la efectuó René Descartes en un libro que no publicó. Apareció impresa por vez primera en una obra de Pierre Gassendi. Pero antes de los *Principia* de Newton no existía una física inercial completamente desarrollada. No deja de ser significativo que este primer libro de Descartes estuviera basado en el punto de vista copernicano; Descartes lo suprimió al saber de la condena de Galileo. Gassendi fue, igualmente, un copernicano. Llevó a cabo experimentos con objetos en caída desde barcos y carruajes en movimiento, para comprobar las conclusiones de Galileo sobre el movimiento inercial. Descartes publicó por vez primera su versión de la ley de inercia en sus *Principios de filosofía* (1644); su formulación anterior, en su obra *El mundo,* se publicó después de su muerte en 1650. Véase el apéndice 8.

que aplica simultáneamente tanto a objetos terrestres como celestes, afirmó que en ausencia de una fuerza los cuerpos no permanecen quietos o llegan al reposo como suponía Aristóteles, sino que pueden moverse rectilíneamente con velocidad constante. Esta «indiferencia» de todo tipo de cuerpos al reposo o al movimiento uniforme en línea recta en ausencia de una fuerza constituye claramente una forma superior de la afirmación de Galileo en su libro sobre las manchas solares (p. 98), radicando la diferencia en que en ese trabajo Galileo estaba escribiendo acerca del movimiento uniforme sobre una gran superficie esférica concéntrica con la Tierra.

Newton dijo de las leyes del movimiento que eran «principios aceptados por los matemáticos y confirmados por muy amplia experiencia. Por las dos leyes primeras y los dos Corolarios primeros, Galileo descubrió que la caída de los graves ocurre según la razón cuadrada del tiempo y que el movimiento de los proyectiles ocurre en parábola, de acuerdo con la experiencia, a no ser en la medida en que tales movimientos se retardan un poco por la resistencia del aire». Los «dos Corolarios» versan sobre los métodos utilizados por Galileo y muchos de sus predecesores para combinar dos fuerzas distintas o dos moviimentos independientes. Cincuenta años después de la publicación de *Dos nuevas ciencias* de Galileo le resultaba difícil de concebir a Newton, quien ya había establecido una física inercial, que aquél hubiera llegado tan cerca como lo hizo del concepto de inercia sin haber abandonado totalmente la circularidad y sin haber conocido el verdadero principio de inercia lineal.

Newton estaba siendo muy generoso con Galileo porque, a pesar de que se pueda argumentar que Galileo «realmente llegó» a disponer de la ley de inercia o Primera Ley de Newton, se requiere un gran esfuerzo de imaginación para asignarle alguna contribución a la Segunda Ley. Esta ley tiene dos partes. En la segunda mitad de la formulación de Newton de la Segunda Ley, el «cambio de movimiento» producido por una fuerza «impresa» o «motriz» —ya se trate de un cambio en la velocidad con la que se mueve un cuerpo o de un cambio en la dirección en que está moviéndose— se dice que se produce «según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime». Mucho de esto está ciertamente implícito en el análisis de Galileo del movimiento de proyectiles, ya que Galileo asumió que en la dirección de avance no hay aceleración porque no existe fuerza horizontal, excepto la acción despreciable de la fricción del aire; pero en la dirección vertical hay una aceleración o incremento continuo de la velocidad de caída, a causa de la fuerza del peso, que actúa hacia abajo. Pero la primera parte de la Segunda Ley —que el cambio en la magnitud del movimiento está relacionado con la fuerza motriz— es algo nuevo; sólo un Newton pudo haberlo visto en los estudios de Galileo sobre la caída de cuerpos. Esta parte de la ley dice que si un objeto estuviera afectado primero por una fuerza F_1, y luego por alguna otra fuerza F_2, las aceleraciones o cambios producidos en la velocidad, A_1 y A_2, serían proporcionales a las fuerzas, es decir

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2},$$

o bien

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Pero al analizar la caída, Galileo se estaba ocupando de una situación en la que sólo actúa una fuerza sobre cada cuerpo, su peso P, y la aceleración que producía era g, la aceleración de un cuerpo en caída libre. (Sobre las dos formas de la Segunda Ley de Newton, véase la p. 187.

Donde Aristóteles había dicho que una fuerza determinada imprimía a un objeto una cierta velocidad característica, Newton decía ahora que una fuerza dada siempre produce en ese cuerpo una aceleración concreta A. Para conocer la velocidad V, debemos saber durante cuánto tiempo T ha actuado la fuerza, o en qué medida ha sido acelerado el objeto, de modo que la ley de Galileo

$$V = AT$$

se pueda aplicar.

En este punto vamos a ensayar un experimento mental, en el que suponemos que tenemos dos cubos de aluminio, siendo el volumen de uno justamente el doble del volumen del otro. (Incidentalmente, «duplicar» un cubo —o hacer un cubo que tenga justamente el doble del volumen de algún cubo determinado— es tan imposible dentro del marco de la geometría euclídea como trisecar un ángulo o cuadrar un círculo). Sometamos ahora al cubo menor, a una serie de fuerzas F_1, F_2, F_3, ..., y determinemos las correspondientes aceleraciones A_1, A_2, A_3, ... De acuerdo con la Segunda Ley, hallaremos que existe un cierto valor constante para el cociente entre la fuerza y la aceleración

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F_3}{A_3} = \ldots = m_p$$

al cual, para este objeto, llamaremos m_p. Ahora repitamos estas operaciones con el cubo mayor y hallaremos que el mismo conjunto de fuerzas F_1, F_2, F_3, ..., produce respectivamente *otro* conjunto de aceleraciones a_1, a_2, a_3, ... De acuerdo con la Segunda Ley de Newton, el cociente fuerza-aceleración es de nuevo una constante, que para este objeto podemos llamar m_g

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{F_3}{a_3} = \ldots = m_g$$

Para el objeto mayor, la constante resulta ser justamente el doble que la constante obtenida para el menor y, en general, en la medida en que nos ocupemos de una sola variedad de materia como el aluminio puro, *esta constante* es proporcional al volumen y así *es una medida de la cantidad de aluminio de cada muestra*. Esta constante particular es una medida de la resistencia de un objeto a la aceleración, o una medida de la tendencia de ese objeto a permanecer como está —ya sea en reposo, o en movimiento en línea recta—. Pues observe que m_g era el doble de m_p; para imprimir a ambos objetos la misma aceleración o cambio de movimiento, la fuerza requerida para el objeto mayor es justamente el doble de la que se requería para el menor. La tendencia de cualquier objeto a continuar en su estado de movimiento (a velocidad constante en línea recta) o en su estado de reposo se llama su *inercia*; de aquí que la Primera Ley de Newton se denomine también el principio de inercia. La constante determinada hallando el cociente constante fuerza-aceleración para cualquier cuerpo dado puede entonces llamarse la inercia del cuerpo. Pero para nuestros bloques de aluminio esta misma constante es también una medida de la «cantidad de materia» en el objeto, la cual se denomina su *masa*. Precisemos ahora la condición para que dos objetos de distinto material —digamos uno de latón y otro de madera— tengan la misma «cantidad de materia»: es la de que tengan la *misma masa*, o la *misma inercia*.

En la vida corriente, no comparamos la «cantidad de materia» en los objetos en términos de sus inercias, sino en términos de su peso. La física newtoniana deja claro por qué podemos hacerlo, y a través de su clarificación somos capaces de entender por qué en cualquier lugar de la Tierra dos pesos desiguales tienen la misma tasa de caída en el vacío. Pero podemos observar que cuanto menos en una situación común comparamos siempre las inercias de los objetos en lugar de sus pesos. Esto sucede cuando una persona sopesa dos objetos para saber cuál es el más pesado, o el que tiene la mayor masa. No los extiende para ver cuál tira más de su brazo hacia abajo; en lugar de esto, los balancea arriba y abajo para ver cuál es más fácil de mover. De este modo determina cuál tiene mayor resistencia a cambiar su estado de movimiento en línea recta o de reposo —esto es, cuál tiene mayor inercia. (Sobre el concepto de inercia de Newton, véase el apéndice 15.)

Formulación final de la ley de inercia

En un punto de sus *Consideraciones y demostraciones sobre dos nuevas ciencias,* Galileo imaginó una bola rodando sobre un plano y señaló que «dicho movimiento se desenvolverá sobre tal plano con un movimiento uniforme y perpetuo, en el supuesto de que este plano se prolongue hasta el infinito». Un plano ilimitado está bien para un matemático puro, que es, en cualquier caso, un platónico. Pero Galileo era precisamente un hombre que combinaba tal platonismo con un interés por las aplicaciones al mundo real de la experiencia sensible. En el *Dos nuevas ciencias,* Galileo no estaba únicamente interesado en las abstracciones como tales, sino en el análisis de los movimientos reales sobre o cerca de la Tierra. Así se comprende que habiendo hablado de un plano sin límites no prosiga con tal ficción, sino que pregunte qué sucedería sobre tal plano si se tratase de un plano terrestre real, lo que para él significa que es «limitado y en declive». La bola, en el mundo real de la física, llega al extremo del plano y comienza a caer al suelo. En este caso,

> el móvil, que suponemos dotado de gravedad, una vez que ha llegado al extremo del plano y continúe su marcha, añadirá al movimiento precedente, uniforme e inagotable, esa tendencia hacia abajo, debida a su propia gravedad. Nace de aquí un movimiento compuesto de un movimiento horizontal uniforme más un movimiento descendente naturalmente acelerado. Pues bien, a este tipo de movimiento lo llamo proyección.

A diferencia de Galileo, Newton marca una clara separación entre el mundo de las matemáticas abstractas y el mundo de la física, al cual aún denominaba filosofía. Así, los *Principia* incluían a la vez «principios matemáticos» como tales y aquellos otros que pueden ser aplicados en la «filosofía natural», pero las *Dos nuevas ciencias* de Galileo incluían tan sólo aquellas condiciones matemáticas ejemplificadas en la naturaleza. Por ejemplo, Newton sabía claramente que la fuerza atractiva ejercida por el Sol sobre un planeta varía como el inverso del cuadrado de la distancia

$$F \propto \frac{1}{D^2}$$

pero en el Libro Primero de los *Principia* exploró las consecuencias, no sólo de esta fuerza en particular, sino también de otras con una dependencia de la distancia bastante diferente, incluyendo

$$F \propto D$$

«El sistema del mundo»

Al principio del Libro Tercero, que estaba dedicado al «sistema del mundo», Newton explicó cuánto difería de los dos precedentes, que se habían ocupado «del movimiento de los cuerpos»:

> He ofrecido en los Libros anteriores principios de filosofía, aunque no tanto filosóficos cuanto meramente matemáticos, a partir de los cuales tal vez se pueda disputar sobre asuntos filosóficos. Tales son las leyes y condiciones de los movimientos y las fuerzas, que en gran medida atañen a la filosofía. Sin embargo, para que no parezcan estériles, los he ilustrado con algunos Escolios filosóficos en los que he tratado sobre aquellas cosas que son más generales y en las cuales la filosofía parece hallar mayor fundamento, tales como la densidad y resistencia de los cuerpos, los espacios vacíos de cuerpos y el movimiento de la luz y de los sonidos. Nos falta mostrar, a partir de estos mismos principios, la constitución del sistema del mundo.

Creo que es justo decir que fue la libertad de considerar los problemas de un modo puramente matemático o de un modo «filosófico» (o físico) lo que permitió a Newton expresar la primera ley y desarrollar una completa física inercial. Después de todo, la física como ciencia se puede desarrollar de una forma matemática, pero debe apoyarse siempre en la experiencia —y la experiencia nunca nos muestra un movimiento inercial puro—. Aun en los limitados ejemplos de inercia lineal discutidos por Galileo, había siempre alguna fricción del aire y el movimiento cesaba casi enseguida, como cuando un proyectil golpea el suelo. En todo el ámbito de la física explorada por Galileo no hay un solo ejemplo de un objeto físico que tuviera siquiera una componente de movimiento inercial puro durante más de un breve lapso de tiempo. Quizás por esta razón

Galileo nunca formuló una ley general de inercia. Tenía demasiado de físico.

Pero como matemático, Newton podía concebir fácilmente a un cuerpo moviéndose para siempre con velocidad constante a lo largo de una línea recta. El concepto «para siempre», que implica un universo infinito, no le espantaba. Observe que esta afirmación de la ley de inercia, según la cual la condición natural de los cuerpos es moverse en línea recta a velocidad constante, se da en el Libro Primero de los *Principia,* la parte que según dijo él era matemática antes que física. Ahora bien, si la condición natural del movimiento de los cuerpos es moverse uniformemente en línea recta, entonces este tipo de movimiento inercial debe caracterizar a los planetas. Estos, sin embargo, no se mueven en línea recta, sino en elipses. Usando un tipo de aproximación galileana a este problema singular, Newton diría que los planetas, por consiguiente, deben estar sometidos a dos movimientos: uno inercial (a velocidad constante a lo largo de una línea recta) y otro siempre en ángulo recto a esta línea arrastrando a cada planeta hacia su órbita. (Véanse, además, los apéndices 11 y 12).

A pesar de no moverse en línea recta, cada planeta, no obstante, representa el mejor ejemplo de movimiento inercial observable en el universo. Si no fuera por esa componente de movimiento inercial, la fuerza que continuamente aparta al planeta de la línea recta podría arrastrarlo hacia el Sol hasta que los dos cuerpos colisionaran. Newton usó este argumento en una ocasión para probar la existencia de Dios. Si los planetas no han recibido un impulso para proporcionarles una componente inercial (o tangencial) del movimiento, dijo, la fuerza atractiva solar no los arrastraría en una órbita, sino que trasladaría a cada planeta en línea recta hacia el mismo Sol. De aquí que no pueda explicarse el universo sólo en términos de materia.

Para Galileo, el movimiento circular puro aún podía ser inercial, como en el ejemplo de un objeto sobre o cerca de la superficie de la Tierra. Pero para Newton el movimiento circular puro no era inercial; era acelerado y requería una fuerza para su mantenimiento. Fue así Newton quien finalmente rompió las cadenas de la «circularidad», que todavía habían esclavizado a Galileo. De este modo, podemos entender que fuera Newton quien mostró cómo construir una mecánica celeste basada en las leyes del movimiento, ya que el movimiento orbital elíptico (o casi circular) de los planetas no es puramente inercial, sino que requiere adicionalmente la acción constante de una fuerza, que resulta ser la fuerza de la gravitación universal.

Así Newton, de nuevo a diferencia de Galileo, se dispone a «mostrar la constitución del sistema del mundo» o —como diríamos hoy— a mostrar cómo las leyes generales del movimiento terrestre pueden aplicarse a los planetas y a sus satélites.

En el primer teorema de los *Principia,* Newton mostró que si un cuerpo se moviese con un movimiento puramente inercial, entonces con respecto a cualquier punto situado fuera de la línea del movimiento debía ser aplicable la ley de las áreas iguales. En otras palabras, una línea trazada desde tal cuerpo a tal punto barrería áreas iguales en tiempos iguales. Imagine un cuerpo que se mueve con un movimiento puramente inercial a lo largo de la línea recta de la cual *PQ* es un segmento. Entonces, en una sucesión de intervalos de tiempo iguales (fig. 30), el cuerpo se moverá a través de distancias

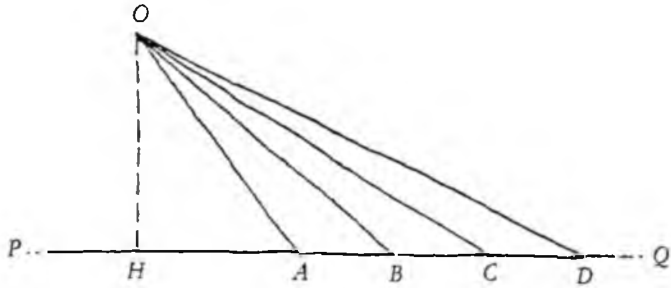


FIGURA 30

iguales *AB, BC, CD,* ... porque, como mostró Galileo, en un movimiento uniforme un cuerpo se mueve atravesando distancias iguales en tiempos iguales. Pero observe que una línea trazada desde el punto *O* barre áreas iguales en estos tiempos iguales, o bien, que las áreas de los triángulos *OAB, OBC, OCD,* ... son iguales. La razón es que el área de un triángulo es la mitad del producto de su altura por su base; y todos estos triángulos tienen la misma altura *OH* y bases iguales. Como

$$AB = BC = CD = \dots$$

se cumple que

$$\frac{1}{2} AB \times OH = \frac{1}{2} BC \times OH = \frac{1}{2} CD \times OH = \dots$$

es decir,

$$\text{área de } \Delta OAB = \text{área de } \Delta OBC = \text{área de } \Delta OCD = \ldots$$

Así, el primer teorema demostrado en los *Principia* mostraba que el movimiento puramente inercial conduce a una ley de áreas iguales, y por tanto está relacionado con la segunda ley de Kepler. Luego Newton demostró que si un cuerpo que se mueve con movimiento inercial puro recibiera a intervalos regulares de tiempo un impulso momentáneo (una fuerza que actúa sólo durante un instante), estando dirigidos todos estos impulsos hacia el mismo punto *S*, entonces el cuerpo se movería en cada uno de los intervalos de tiempo iguales entre impulsos de tal modo que una línea trazada a él desde *S* barriera áreas iguales. Esta situación se muestra en la figura 31.

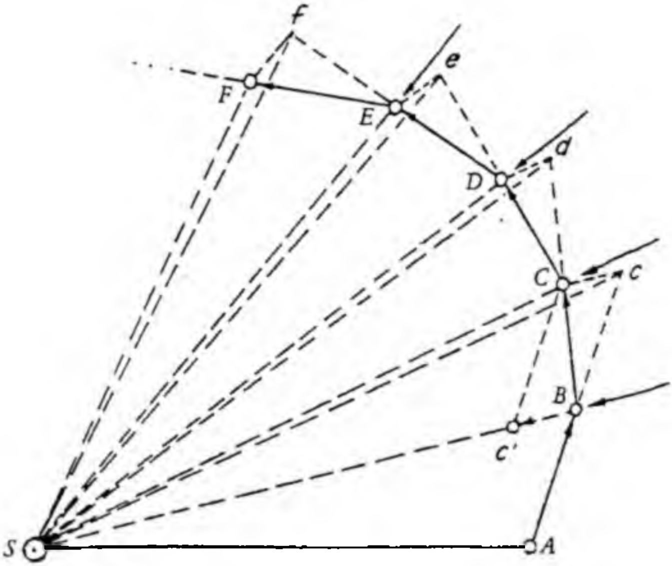


FIG. 31.—*Si en* B *el cuerpo no hubiera recibido ningún impulso, se habría movido, durante el tiempo* T, *a lo largo de la prolongación de* AB *hasta* c. *El impulso en* B, *sin embargo, le imprime al cuerpo una componente de movimiento hacia* S. *Si el único movimiento del cuerpo procediera de este impulso, durante* T *se habría movido desde* B *hasta* c'. *La combinación de estos dos movimientos,* Bc *y* Bc', *da como resultado un movimiento de* B *a* C *durante el tiempo* T. *Newton probó que el área del triángulo* SBC *es igual al área del triángulo* SBc. *Por tanto, aun cuando existe una fuerza impulsiva dirigida hacia* S, *sigue cumpliéndose la ley de las áreas.*

Cuando el cuerpo alcanza el punto *B* recibe un impulso hacia *S*. El nuevo movimiento es una combinación del movimiento original a lo largo de *AB* y de un movimiento hacia *S*, lo cual produce un movimiento rectilíneo uniforme hacia *C*, etc.: Los triángulos *SAB*, *SBC*, y *SCD* ... tienen la misma área. El siguiente paso, de acuerdo con Newton, es como sigue:

> Auméntese ahora el número de triángulos y disminúyase su altura *in infinitum* y su perímetro último *ADF* será una línea curva (por el Corolario 4 del Lema III); y por tanto la fuerza centrípeta, por la que un cuerpo es continuamente separado de la tangente de dicha curva, actúa continuamente; y áreas cualesquiera descritas *SADS*, *SAFS* proporcionales siempre a los tiempos en que se describen, serán, en este caso, proporcionales a los mismos tiempos. Q.E.D.

De esta forma, Newton procedió a probar:

Proposición 1. Teorema I.

Las áreas, descritas por cuerpos que giran sujetos a un centro de fuerzas inmóvil por radios unidos a dicho centro, están en el mismo plano inmóvil y son proporcionales a los tiempos.

En lenguaje sencillo, Newton demostró en el primer teorema del Libro Primero de los *Principia* que si un cuerpo es atraído continuamente hacia algún centro de fuerzas, su movimiento de otro modo inercial se transformará en movimiento sobre una curva, y que una línea trazada al cuerpo desde el centro de fuerzas barrerá áreas iguales en tiempos iguales. En la proposición 2 (teorema II) probó que si un cuerpo se mueve sobre una curva de modo que las áreas descritas por una línea trazada desde el cuerpo a algún punto son proporcionales a los tiempos, entonces debe existir una fuerza «central» (centrípeta) que impulse continuamente al cuerpo hacia este punto. El significado de la Ley I de Kepler no aparece hasta la proposición 11, cuando Newton se dispone a encontrar «la ley de la fuerza centrípeta tendente al foco de la elipse». Esta fuerza varía «inversamente como el cuadrado de la distancia». Entonces Newton demuestra que si un cuerpo que se mueve en una hipérbola o en una parábola está sometido a una fuerza centrípeta dirigida a un foco, la fuerza aún varía como la inversa del cuadrado de la distancia. Varios teoremas después, en la proposición 17, Newton prueba la conversa, que si un cuerpo se mueve sometido a una fuerza centrípeta que varía como la inversa del cuadrado de la distancia, la trayectoria del cuerpo debe ser una sección cónica: una elipse, una parábola, o una hipérbola. (Véase el apéndice 13.)

Podemos observar que Newton trató las leyes de Kepler exactamente en el mismo orden en que lo hizo el mismo Kepler: primero la ley de las áreas como un teorema general, y sólo después la forma particular de las órbitas planetarias como elipses. Lo que al principio parecía una manera de proceder un tanto extraña, se ha visto que representa una progresión lógica fundamental de un tipo que es el opuesto de la secuencia que se habría seguido en un método de abordarlo empírico u observacional.

¡En el razonamiento de Newton sobre la acción de una fuerza centrípeta que actúa sobre un cuerpo que se mueve con un movimiento puramente inercial, el análisis matemático, por vez primera, revela el verdadero significado de la segunda ley de Kepler, la de las áreas iguales! El razonamiento de Newton mostró que esta ley implica un centro de fuerzas para el movimiento de cada planeta. Ya que en el movimiento planetario las áreas iguales se calculan con respecto al Sol, la segunda ley de Kepler se convierte, en el tratamiento de Newton, en la base para probar rigurosamente que una fuerza central que emana del Sol atrae a todos los planetas.

Hasta aquí el problema planteado por Halley. Si Newton hubiera detenido su trabajo en este punto, todavía admiraríamos enormemente su logro. Pero Newton continuó, y los resultados fueron aún más sobresalientes.

El golpe maestro: la gravitación universal

En el Libro Tercero de los *Principia,* Newton mostró que, dado que los satélites de Júpiter se mueven en órbitas alrededor de este planeta, una línea trazada desde Júpiter a cada satélite «describe áreas proporcionales a los tiempos», y que la razón entre los cuadrados de sus tiempos y los cubos de sus distancias medias al centro de Júpiter es una constante, si bien con un valor distinto al de la constante para el movimiento de los planetas. Así, si T_1, T_2, T_3, T_4 son los tiempos periódicos de los satélites, y a_1, a_2, a_3, a_4 son sus respectivas distancias medias a Júpiter,

$$\frac{(a_1)^3}{(T_1)^2} = \frac{(a_2)^3}{(T_2)^2} = \frac{(a_3)^3}{(T_3)^2} = \frac{(a_4)^3}{(T_4)^2}$$

No sólo se aplican estas leyes de Kepler al sistema jovial, sino también a los cinco satélites de Saturno conocidos por Newton —un resultado totalmente ignorado por Kepler—. La tercera ley de Kepler no puede aplicarse al satélite terrestre, porque éste es único, pero

Newton expuso que su movimiento concuerda con la ley de áreas iguales. Por lo tanto, se puede ver que existe una fuerza central, que varía como la inversa del cuadrado de la distancia, que retiene a cada planeta en una órbita en torno al Sol y a cada satélite planetario en una órbita alrededor de su planeta.

Ahora da Newton el golpe maestro. Muestra que una única fuerza universal (a) mantiene a los planetas en sus órbitas alrededor del Sol, (b) retiene a los satélites en sus órbitas, (c) ocasiona que los objetos en caída desciendan como se ha observado, (d) retiene a los objetos sobre la Tierra, y (e) origina las mareas. Es la fuerza denominada de *gravitación universal*, y su ley fundamental puede escribirse

$$F = G\frac{mm'}{D^2}$$

Esta ley establece que entre cualesquiera dos cuerpos, de masas m y m', en cualquier lugar del universo en que se hallen, separados por una distancia D, existe una fuerza de atracción que es *mutua*, y cada cuerpo atrae al otro con una fuerza de idéntica magnitud, la cual es *directamente proporcional al producto de las dos masas* e *inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos*. G es una constante de proporcionalidad, y tiene el mismo valor en todas las circunstancias —sea en la atracción mutua de una piedra y la Tierra, de la Tierra y la Luna, del Sol y Júpiter, de una estrella y otra, o de dos guijarros en una playa—. Esta constante G se denomina la *constante de la gravitación universal* y puede compararse con otras constantes «universales» —de las cuales no hay muchas en el conjunto de la ciencia— tales como c, la velocidad de la luz, que figura tan prominentemente en relatividad, o h, la constante de Planck, que es tan básica en teoría cuántica.

¿Cómo encontró Newton esta ley? Es difícil describirlo con detalle, pero podemos reconstruir algunos de los aspectos básicos del descubrimiento.

Por un memorándum posterior (alrededor de 1714) sabemos que cuando Newton era joven «comencé a considerar que la gravedad se extendía a la órbita de la Luna, y habiendo hallado cómo estimar la fuerza con la que [un] globo que gira dentro de una esfera presiona la superficie de la esfera, partiendo de la regla de Kepler de los tiempos periódicos de los planetas, que se hallan en una proporción sesquiáltera [esto es, como la potencia 3/2] de sus distancias a los centros de sus órbitas, deduje que las fuerzas que mantienen a los planetas en sus órbitas deben ser recíprocamente como los cuadrados de sus distancias a los centros en torno a los que giran; por tanto, comparé la fuerza necesaria para mantener a la Luna en su órbita con la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra, hallando que ambas encajaban bastante aproximadamente».

Con esta declaración como guía, consideremos en primer lugar una esfera de masa m y velocidad v que se mueve sobre un círculo de radio r. Entonces, como Newton averiguó, y como el gran físico holandés Christiaan Huygens (1629-1695) también descubrió (y, para el disgusto de Newton, lo publicó primero; véase el apéndice 14), debe existir una aceleración central, de magnitud v^2/r. Es decir, que del hecho de que la esfera no está en reposo ni moviéndose a velocidad constante en línea recta se sigue una aceleración; por la Ley I y la Ley II, debe existir una fuerza y, por tanto, una aceleración. No demostraremos que esta aceleración tiene una magnitud v^2/r, pero usted puede ver que está dirigida hacia el centro si hace girar una bola en círculos al extremo de una cuerda. Se precisa una fuerza que empuje constantemente a la bola hacia el centro, y por la Ley II la aceleración debe tener siempre la misma dirección que la fuerza aceleradora. Así, para un planeta de masa m, que se mueve aproximadamente en un círculo de radio r con una velocidad v, debe existir una fuerza central F de magnitud

$$F = mA = m\frac{v^2}{r}.$$

Si T es el período, o el tiempo que invierte el planeta en moverse a lo largo de 360°, entonces en el tiempo T el planeta describirá un círculo de radio r, o una circunferencia de longitud $2\pi r$. Por lo tanto, la velocidad v es $2\pi r/T$, y

$$F = mA = mv^2 \times \frac{1}{r} = m\left[\frac{2\pi r}{T}\right]^2 \times \frac{1}{r}$$

$$= m \times \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \times \frac{1}{r}$$

$$= m \times \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \times \frac{1}{r} \times \frac{r}{r}$$

$$= \frac{4\pi^2 m \times r^3}{T^2 \times r^2} = \frac{4\pi^2 m}{r^2} \times \frac{r^3}{T^2}.$$

Como para cada planeta del Sistema Solar r^3/T^2 tiene el mismo valor K (por la regla o tercera ley de Kepler),

$$F = \frac{4\pi^2 m}{r^2} \times K = 4\pi^2 K \frac{m}{r^2}.$$

El radio r de la órbita circular corresponde en la realidad a D, la distancia media de un planeta al Sol. Por lo tanto, para cada planeta la ley de la fuerza que lo mantiene en su órbita debe ser

$$F = 4\pi^2 K \frac{m}{D^2}$$

donde m es la masa del planeta, D es la distancia media del planeta al Sol, K es la «constante de Kepler» para el Sistema Solar (igual al cubo de la distancia media de cada planeta al Sol dividido por el cuadrado de su período de revolución) y F es la fuerza con la que el Sol atrae al planeta y lo arrastra continuamente fuera de su trayectoria puramente inercial haciéndolo describir una elipse. Hasta aquí pueden conducir las matemáticas y la lógica a un hombre de talento superior que conoce las leyes newtonianas del movimiento y los principios del movimiento circular.

Pero reescribamos ahora la ecuación así:

$$F = \left[\frac{4\pi^2 K}{M_s}\right] \frac{M_s m}{D^2}$$

donde M_s es la masa del Sol, y digamos que la cantidad

$$\frac{4\pi^2 K}{M_s} = G$$

es una *constante universal*, que la ley

$$F = G \frac{M_s m}{D^2}$$

no se limita a la fuerza entre el Sol y un planeta. Se aplica también a cada par de cuerpos en el universo, convirtiéndose M_s y m en las masas m y m' de estos dos cuerpos, y D en la distancia entre ellos:

$$F = G \frac{mm'}{D^2}$$

No hay matemáticas —ya se trate del álgebra, la geometría o el cálculo— que justifiquen este audaz paso. Sólo se puede decir del mismo que constituye uno de esos triunfos que humillan al hombre ordinario en la presencia del genio. Y fíjese en lo que implica esta ley. Por ejemplo, este libro que sostiene en sus manos atrae al Sol en una medida calculable; la misma fuerza obliga a la Luna a recorrer su órbita y a una manzana a caer del árbol. Más avanzada su vida, Newton dijo que fue esta última comparación la que inspiró su gran descubrimiento. (Véase, además, el apéndice 14.)

La Luna (véase la fig. 32), si no fuese atraída por la Tierra, tendría un movimiento puramente inercial y, en un pequeño lapso *t*, se

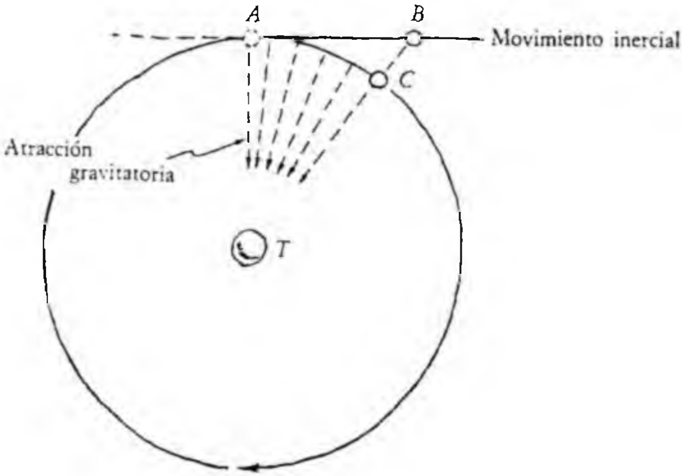


FIGURA 32

movería uniformemente a lo largo de una línea recta (una tangente) desde *A* a *B*. No lo hace, dijo Newton, porque mientras que su movimiento inercial la hubiera conducido de *A* a *B*, la atracción gravitatoria de la Tierra la habrá hecho caer hacia ella desde la línea *AB* hasta *C*. Así, la desviación de la Luna de una trayectoria rectilínea puramente inercial está causada por su continua «caída» hacia la Tierra —y esta caída es precisamente igual a la caída de una manzana—. ¿Es cierto esto? Bien, Newton sometió la proposición a una prueba, como sigue:

¿Por qué cae a la Tierra una manzana de masa m? Lo hace, podemos decir ahora, porque existe una fuerza de gravitación universal entre ella y la Tierra, cuya masa es M_t. Pero ¿cuál es la distancia entre la Tierra y la manzana? ¿Son los pocos pies que separan a la manzana del suelo? La respuesta a esta cuestión está lejos de ser obvia. Newton fue finalmente capaz de probar que la atracción entre un cuerpo pequeño y otro más o menos homogéneo y más o menos esférico es exactamente la misma que si toda la gran masa de este último cuerpo estuviese concentrada en su centro geométrico. Este teorema significa que, al considerar la atracción mutua de la Tierra y una manzana, la distancia D en la ley de la gravitación universal debe tomarse como el radio de la Tierra, R_t. Por lo tanto, la ley establece que la atracción entre la Tierra y una manzana es:

$$F = G\frac{mM_t}{R_t^2},$$

donde m es la masa de la manzana, M_t la masa de la Tierra y R_t el radio de la misma. Pero ésta es una expresión para el *peso* P de la manzana, porque el peso de cualquier objeto terrestre es simplemente la magnitud de la fuerza con la que es atraído gravitacionalmente por la Tierra. Así,

$$P = G\frac{mM_t}{R_t^2}.$$

Hay otra forma de escribir la ecuación para el peso de una manzana o de cualquier otro objeto terrestre de masa m. Usamos la Ley II de Newton, que afirma que la masa m de cualquier cuerpo es el cociente entre la fuerza que actúa sobre el mismo y la aceleración producida por esta fuerza,

$$\mathrm{m} = \frac{F}{A}$$

o bien

$$F = mA.$$

Advierta que cuando una manzana cae del árbol la fuerza que tira de ella hacia abajo es su peso P, de modo que

$$P = mA.$$

Como ahora tenemos dos expresiones matemáticas distintas de la misma fuerza o peso P, deben ser iguales entre sí, es decir,

$$mA = G\frac{mM_t}{R_t^2}$$

y podemos dividir ambos miembros por m para obtener

$$A = G\frac{M_t}{R_t^2}.$$

Así, por medio de los principios newtonianos, hemos explicado inmediatamente por qué en cualquier lugar de esta Tierra todos los cuerpos —cualquiera que sea su masa m o su peso P— tendrán la misma aceleración A cuando caigan libremente, como en el vacío. La última ecuación muestra que esta aceleración de caída libre está determinada por la masa M_t y el radio R_t de la Tierra y por una constante universal G, ninguna de las cuales *depende en modo alguno* de la masa particular m o del peso P del cuerpo que cae.

Vamos a escribir ahora la última ecuación de una forma ligeramente diferente,

$$A = G\frac{M_t}{D_t^2}$$

donde D_t representa la distancia desde el centro de la Tierra. En o cerca de la superficie de la Tierra, D_t es simplemente su radio R_t. Considere ahora un cuerpo situado a una distancia D_t de 60 radios terrestres del centro de la Tierra. ¿Con qué aceleración A' caerá hacia este centro? La aceleración A' será

$$A' = G\frac{M_t}{(60\,R_t)^2} = G\frac{M_t}{3600\,R_t^2} = \frac{1}{3600}\,G\frac{M_t}{R_t^2}.$$

Precisamente sabíamos que en la superficie de la Tierra una manzana o cualquier otro objeto poseerá una aceleración hacia abajo igual a $G\frac{M_t}{R_t^2}$, y hemos probado ahora que un cuerpo situado a 60 radios terrestres tendrá una aceleración que será justamente 1/3600 de ese valor. Por término medio, un cuerpo en la superficie de la Tierra recorre en un segundo, al caer hacia ésta, una distancia de 4,9 metros, por lo que a una distancia de 60 radios terrestres del centro de la Tierra un cuerpo recorrerá

$$1/3600 \times 4{,}9 \text{ m.} = 1/3600 \times 4{,}9 \times 100 \text{ cm.} = 0{,}1361 \text{ cm.}$$

Ocurre que existe un cuerpo, nuestra Luna, que se halla en el espacio a una distancia de 60 radios terrestres, y así Newton dispuso de un objeto para comprobar su teoría de la gravitación universal. Si la misma fuerza gravitatoria produce la caída de la manzana y de la Luna, entonces la Luna caerá en un segundo, para mantenerse en su órbita, 0,1361 centímetros desde su trayectoria inercial. Un cálculo aproximativo, basado en las suposiciones simplificadoras de que la órbita de la Luna es un círculo perfecto y que ésta se mueve uniformemente, sin ser afectada por la atracción gravitatoria del Sol, proporciona una distancia de caída en un segundo de 0,1369 centímetros —¡es decir, un notable acuerdo dentro de un margen de 0,0008 centímetros!—. Otra forma de ver cuán ajustadamente concuerda la observación con la teoría es observar que los dos valores difieren en 8 partes sobre unas 1.350, que viene a ser lo mismo que 6 partes en 1.000 ó 0,6 partes en 100 (0,6 %). Otra manera de hacer este cálculo (quizás siguiendo los pasos que el mismo Newton indica en la cita de la pág. 169) es como sigue:

1) Para un cuerpo sobre la Tierra (la manzana) la aceleración (g) de caída libre es

$$g = G\frac{M_t}{R_t^2}.$$

2) Para la Luna, la forma de la tercera ley de Kepler es

$$k = \frac{R_l^3}{T_l^2}$$

donde R_l y T_l son, respectivamente, el radio de la órbita de la Luna y su período de revolución. Si la fuerza gravitatoria *es* universal, entonces la relación deducida anteriormente para planetas que se mueven en torno al Sol

$$G = \frac{4\pi^2 K}{M_s}$$

puede reescribirse para el caso de la Luna moviéndose en torno a la Tierra, en la forma

$$G = \frac{4\pi^2 k}{M_t}.$$

Por lo tanto, podemos calcular g de la ecuación (1) como sigue:

$$g = \left[\frac{4\pi^2 k}{M_t}\right] \frac{M_t}{R_t^2} = 4\pi^2 k \left[\frac{1}{R_t^2}\right]$$

$$= 4\pi^2 \left[\frac{R_l^3}{T_l^2}\right]\left[\frac{1}{R_t^2}\right] = 4\pi^2 \left[\frac{R_l^3}{T_l^2}\right]\left[\frac{1}{R_t^2}\right]\left[\frac{R_t}{R_t}\right]$$

$$= 4\pi^2 \left[\frac{R_l}{R_t}\right]^3 \left[\frac{R_t}{T_l^2}\right].$$

Como

$$\frac{R_l}{R_t} = 60, \text{ y } R_t = 6.400.000 \text{ metros}$$

$$T_l = 28\ d = 28 \times 24 \times 3600 \text{ seg}$$

podemos calcular que

$$g \approx 10 \text{ m/seg}^2.$$

Newton dijo, en el memorándum autobiográfico que he citado, que «comparó la fuerza necesaria para mantener a la Luna en su órbita con la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra».

En el Libro Tercero de los *Principia,* Newton muestra que la Luna, para mantenerse en su órbita observada, recorre al caer desde su trayectoria inercial en línea recta una distancia de $15^1/_2$ pies de París (una medida antigua) en cada minuto. Si se imagina a la Luna, dice, «desposeída de todo movimiento y abandonada a sí misma, de modo que, bajo la acción de toda aquella fuerza por la cual... es retenida en su órbita, desciende hacia la Tierra». En un minuto de tiempo descenderá atravesando la misma distancia que recorre cuando este descenso ocurre junto con el movimiento inercial normal.

Luego supone que este movimiento hacia la Tierra se debe a la gravedad, una fuerza que varía inversamente al cuadrado de la distancia. Entonces en la superficie de la Tierra esta fuerza sería mayor que en la órbita de la Luna en un factor de 60×60. Como, por la segunda ley de Newton, la aceleración es proporcional a la fuerza aceleradora, un cuerpo traído desde la órbita de la Luna a la superficie de la Tierra sufriría un incremento en su aceleración de 60×60. Así, argumenta Newton, si la gravedad es una fuerza que varía inversamente como el cuadrado de la distancia, un cuerpo en la superficie de la Tierra caería, partiendo del reposo, a través de una distancia de aproximadamente $60 \times 60 \times 15^1/_2$ pies de París en un minuto, ó $15^1/_2$ pies de París en un segundo.

Del experimento con el péndulo de Huygens, Newton obtuvo el resultado de que sobre la Tierra (en la latitud de París), un cuerpo recorre al caer precisamente una distancia como ésta. Así probó que es la fuerza de gravedad de la Tierra la que retiene a la Luna en su órbita. Efectuando el cálculo, predijo a partir de las observaciones del movimiento de la Luna y de la teoría de la gravitación que la distancia de caída recorrida por un cuerpo sobre la Tierra en un segundo sería de 15 pies de París, 1 pulgada y 1 4/9 líneas (1 línea = 1/12 de pulgada). El resultado de Huygens para la caída libre en París era de 15 pies de París, 1 pulgada y 1 7/9 líneas. La diferencia era de 3/9 o 1/3 de una línea, y por lo tanto de 1/36 de una pulgada —una cantidad verdaderamente muy pequeña—. Por la época en que Newton escribió los *Principia,* había hallado un acuerdo mucho mejor entre la teoría y la observación que en esta prueba aproximativa realizada veinte años antes.

Newton dijo en esta prueba que la observación concordaba «bastante aproximadamente» con la predicción. En esta frase se hallaban involucrados dos factores. El primero, que escogió un valor poco adecuado para el radio de la Tierra y obtuvo así malos resultados numéricos, los cuales sólo concordaban más o menos, o «bastante aproximadamente». El segundo, que como no había sido capaz de probar rigurosamente que una esfera homogénea atrae gravitacionalmente como si toda su masa estuviera concentrada en su centro, la prueba era, en el mejor de los casos, tosca y aproximativa.

Pero este ensayo le demostró a Newton que era válido su concepto de la gravitación universal. Puede apreciar lo notable que fue si considera la naturaleza de la constante G. Hemos visto antes que $G = \dfrac{4\pi^2 K}{M_s}$, y bien podemos preguntarnos qué tienen que ver tanto K (el cubo de la distancia de cada planeta al Sol, dividido por el cuadrado del tiempo periódico de la revolución de ese planeta en torno al mismo) como M_s (la masa del Sol), con la atracción de la Tierra sobre una piedra, o la atracción de la Tierra sobre la Luna. Si la circunstancia de que la Tierra esté dentro del Sistema Solar minimiza el prodigio de que G pueda aplicarse a la piedra y a la Luna, considere un sistema de estrellas dobles situado a millones de años luz de distancia del Sistema Solar. Tal par de estrellas pueden constituir una binaria eclipsante, en la cual una de las estrellas gira en torno a la otra, tal como la Luna lo hace en torno de la Tierra. Ahí afuera, más allá de cualquier posible influencia del Sol, la misma constante $G = \frac{4\pi^2 K}{M_s}$ se aplica a la atracción de cada una de estas estrellas por la otra. Esta es una constante universal *a pesar del hecho* de que, en la forma en que Newton la descubrió, estuviera basada en elementos de *nuestro Sistema Solar*. Evidentemente, la operación de dividir la constante de Kepler por la masa del cuerpo central alrededor del cual giran los otros elimina cualesquiera aspectos especiales de ese sistema particular —ya se trate de planetas girando en torno al Sol, o de satélites girando en torno de Júpiter o de Saturno. (Véase, además, el apéndice 15.)

Las dimensiones del logro

Unos pocos logros más de la dinámica newtoniana, o de la teoría de la gravitación, nos permitirán comprender sus dimensiones heroicas. Suponga que la Tierra no fuese una esfera totalmente perfecta, sino que fuese esferoidal —achada por los polos y abultada por el ecuador—. Considere ahora la aceleración A de un cuerpo que cae libremente en un polo, en el ecuador, y en dos lugares intermedios a y b. Claramente, el «radio» R de la Tierra, o la distancia desde el centro, se incrementaría desde el polo al ecuador, de modo que

$$R_p < R_b < R_a < R_e$$

Como resultado, la aceleración A de caída libre en estos lugares tendría diferentes valores:

$$A_p = G\frac{M_t}{R_p^2};\quad A_b = G\frac{M_t}{R_b^2};\quad A_a = G\frac{M_t}{R_a^2};\quad A_e = G\frac{M_t}{R_e^2},$$

así que

$$A_p > A_b > A_a > A_e.$$

Los siguientes datos, obtenidos a partir de observaciones actuales, muestran cómo varía la aceleración con la latitud:

Latitud	*Aceleración de caída libre*
0° (ecuador)	978,039 cm/seg^2
20°	978,641
40°	980,171
60°	981,918
90°	983,217

En los días de Newton, la aceleración de caída libre se hallaba determinando la longitud de un péndulo de segundos —uno que tiene un período de dos segundos—. La ecuación para el período T de un péndulo simple que oscila sobre un arco pequeño es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

donde l es la longitud del péndulo (calculada desde el punto de suspensión hasta el centro de la lenteja) y g es la aceleración de caída libre. Halley, cuando viajó de Londres a Santa Helena, encontró que era preciso acortar la longitud de su péndulo para que continuara batiendo segundos. La mecánica de Newton no sólo explica esta variación, sino que conduce a una predicción de la figura de la Tierra, un esferoide achatado en los polos y abultado en el ecuador.

Las variaciones de g, la aceleración de caída libre, implican variaciones concomitantes en el peso de cualquier objeto físico trasladado de una latitud a otra. Un análisis completo de esta variación en el peso requiere la consideración de un segundo factor, la fuerza que surge de la rotación que el objeto efectúa junto con la Tierra. El factor que interviene aquí es v^2/r, donde v es la velocidad lineal a lo largo de un círculo y r el radio de éste. En distintas latitudes se darán valores diferentes de v y de r. Además, para relacionar el efecto rotacional con el peso, debe tomarse la componente sobre una línea trazada desde el centro de la Tierra a la oposición en cuestión, puesto que el efecto rotacional se da en el plano del movimiento circular, sobre un paralelo de latitud. A causa de estas fuerzas rotacionales, de acuerdo con la física newtoniana, la Tierra adquirió su forma.

Una segunda consecuencia del abultamiento ecuatorial es la *precesión* de los equinoccios. En realidad, la diferencia entre los radios polar y ecuatorial de la Tierra no parece muy grande:

radio ecuatorial = 6.378,388 km
radio polar = 6.356,909 km

Pero si representamos a la Tierra como un globo de un metro, la diferencia entre los diámetros menor y mayor sería de alrededor de 3 milímetros. Newton mostró que la precesión se produce porque la Tierra está rotando sobre un eje inclinado con respecto al plano de su órbita, el plano de la eclíptica. Además de la atracción gravitacional que mantiene a la Tierra en su órbita, el Sol ejerce una atracción sobre el abultamiento, tendiendo así a enderezar el eje. Esta fuerza del Sol tiende a hacer al eje terrestre perpendicular al plano de la eclíptica (fig. 33A), o a hacer coincidir el plano del abultamiento (o del

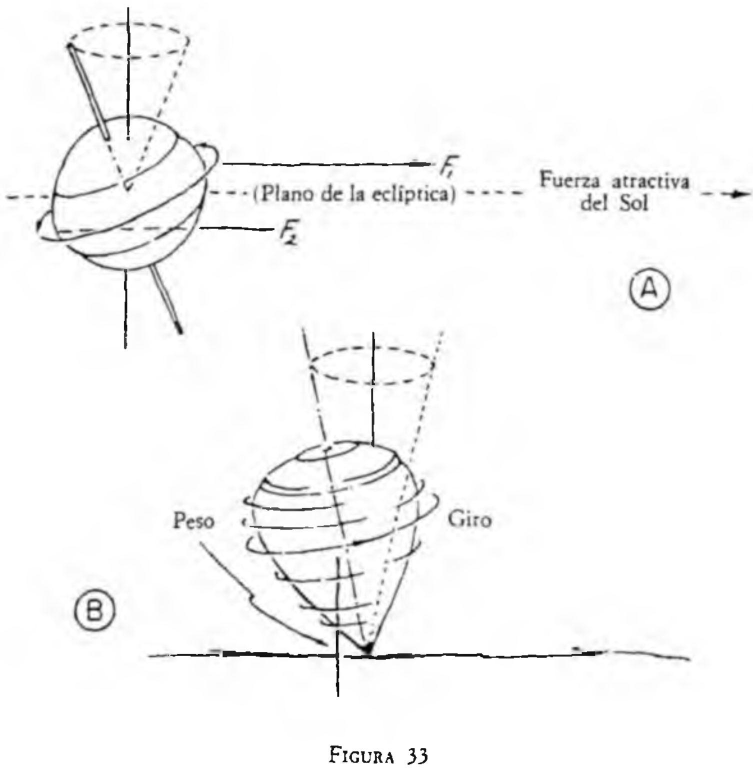


FIGURA 33

ecuador de la Tierra) con el plano de la eclíptica. Al mismo tiempo, la atracción de la Luna tiende a hacer coincidir al plano del abultamiento con el plano de su órbita (inclinada unos 5° con respecto al plano de la eclíptica). A este respecto, la fuerza de la Luna es algo mayor que la del Sol. Si la Tierra fuese una esfera perfecta, la atracción sobre ella del Sol o de la Luna sería simétrica, y no habría esta tendencia del eje de rotación a «enderezarse»; las líneas de acción de las atracciones gravitatorias del Sol y de la Luna pasarían por el centro de la Tierra. Pero si ésta fuese un esferoide achatado por los polos, como suponía Newton, entonces existiría una fuerza neta tendente a desplazar su eje. Y, por consiguiente, existiría un efecto predecible.

Ahora bien, un resultado de la física newtoniana es que si se ejerce una fuerza para cambiar la orientación del eje de un cuerpo en rotación, el efecto será que dicho eje, en lugar de cambiar su orientación, adoptará un movimiento cónico. Puede verse este efecto en una peonza. Usualmente, el eje de rotación no es absolutamente vertical. El peso de la peonza actúa, por lo tanto, para girar el eje sobre el punto de rotación a fin de ponerlo horizontal. El peso tiende a producir una rotación cuyo eje forma ángulo recto con el eje de giro de la peonza, y el resultado es el movimiento cónico de este último mostrado en la figura 33B. El fenómeno de la precesión se conoce desde su descubrimiento por Hiparco en el siglo II a.C., pero su causa era completamente desconocida antes de Newton. La explicación de éste no sólo resolvió un antiguo misterio, sino que fue un ejemplo de cómo se podía predecir la forma exacta de la Tierra aplicando la teoría a las observaciones astronómicas. Las predicciones de Newton se verificaron cuando el matemático francés Pierre L. M. de Maupertuis midió la longitud de un grado de arco de meridiano en Laponia y comparó el resultado con la longitud de un grado de meridiano cerca del ecuador. El resultado supuso una impresionante victoria de la nueva ciencia.

Otro logro de la teoría newtoniana fue una explicación general de las mareas, relacionándolas con la acción gravitatoria del Sol y de la Luna sobre las aguas de los océanos. Podemos comprender bien el espíritu de admiración que inspiró el famoso pareado de Alexander Pope:

La Naturaleza, y las Leyes de la Naturaleza estaban ocultas en la [*Noche.*
Dios dijo, ¡Que Newton sea! *y todo fue* Luz.

Viendo cómo la mecánica newtoniana permite al hombre explicar los movimientos de los planetas, satélites, piedras en caída, mareas, trenes, automóviles y cualquier otra cosa que esté acelerada —aumentando su velocidad, disminuyéndola, iniciando su movimiento o deteniéndose— hemos resuelto nuestro problema original. Pero restan uno o dos detalles que requieren alguna palabra más. Es cierto, como observó Galileo, que para los cuerpos ordinarios sobre la Tierra (que pueden considerarse girando en una gran órbita elíptica a una distanccia media del Sol de unos 93 millones de millas), la situación es muy parecida a la que se tendría si estuvieran sobre algo que se mueve en línea recta, y que, en lo que concierne a todos los problemas dinámicos, *existe* una indiferencia al movimiento rectilíneo uniforme o al reposo. Sobre la Tierra en rotación, donde el arco descrito durante cualquier intervalo de tiempo, como el del recorrido de una bala, es una parte de «círculo» menor que el de la órbita anual, puede invocarse otro tipo de principio newtoniano, el principio de conservación del momento angular.

El momento angular de un pequeño objeto que gira en un círculo (como una piedra soltada desde lo alto de una torre sobre una Tierra en rotación) viene dado por la expresión mvr, donde r es el radio de giro, m la masa, y v la velocidad a lo largo del círculo. El principio afirma que, bajo una gran variedad de condiciones (específicamente, en todas las circunstancias en las que no actúa una fuerza externa de un tipo especial), el momento angular permanece constante.

Se puede dar un ejemplo. Un hombre se halla sobre una plataforma giratoria, con sus brazos extendidos y sujetando un peso de 10 kilos en cada mano. Está girando lentamente sobre la plataforma, y entonces se le dice que lleve sus manos hacia el cuerpo sobre un plano horizontal, tal como indica la figura 34. Encuentra que gira cada vez más rápido. Al estirar sus brazos, de nuevo el giro se hará más lento. Cualquiera que no haya visto antes tal demostración (se trata de una postura estándar en el patinaje sobre hielo), quedará bastante sorprendido al contemplarla por primera vez. Veamos ahora por qué ocurren estos cambios. La velocidad v con la que giran las masas m que sostiene en sus manos es

$$v = \frac{2\pi r}{t}$$

donde t es el tiempo empleado en una rotación completa, durante la cual cada masa m describe una circunferencia de un círculo de radio r. Al principio, el momento angular es

$$mvr = m \times \frac{2\pi r}{t} \times r = \frac{2\pi m r^2}{t}.$$

FIGURA 34

Pero cuando el hombre lleva sus brazos al pecho, hace a r mucho menor. Si $\frac{2\pi m r^2}{t}$ tiene que mantener el mismo valor, como exige la ley de conservación, también debe disminuir t, lo que significa que el tiempo invertido en una revolución disminuirá cuando r lo haga.

¿Qué tiene que ver esto con una piedra que cae desde una torre? En lo alto de la torre, el radio de rotación es $R + r$, donde R es el radio de la Tierra y r la altura de la torre. Cuando la piedra alcanza el suelo, el radio de rotación es R. Por lo tanto, al igual que las masas llevadas hacia dentro por el hombre que gira, la piedra debe moverse en un círculo menor cuando está en la base de la torre que cuando está en su cima, y girará así con más rapidez. Lejos de quedar atrás, la piedra, de acuerdo con nuestra teoría, se adelantará un poco a la torre. ¿Qué magnitud tiene este efecto? Como el problema depende de t, el tiempo invertido en una rotación de 360°, podemos hacernos una idea mucho mejor de la magnitud del problema si estudiamos la velocidad angular que si consideramos alguna velocidad lineal (tal como hicimos en el capítulo 1). Mire las saetas en movimiento de un reloj, prestando especial atención a la de las horas. ¿Cuánto parecerá desplazarse en, digamos, cinco minutos, lapso de tiempo que corresponde a la caída de una bola desde una altura mucho mayor que la del Empire State Building? Ninguna cantidad apreciable. Ahora bien, la rotación de la Tierra a través de 360° se efectúa en precisamente el doble del tiempo que invierte nuestra aguja en una rotación completa (12 horas). Como en cinco minutos el movimiento angular o rotación de nuestra aguja no es distinguible a simple vista, un movimiento que es el doble de lento no produce prácticamente ningún efecto. Excepto en el caso de problemas de fuego de artillería de largo alcance, análisis de los movimientos de los vientos alisios, y otros fenómenos de una escala ampliamente mayor que la caída de una piedra, podemos despreciar el movimiento de rotación de la Tierra.

Tal fue la gran revolución newtoniana, que alteró toda la estructura de la ciencia y, claro está, cambió el curso de la civilización occidental. ¿Cuán lejos se ha llegado en los últimos 300 años? ¿Aún es cierta la mecánica newtoniana?

Se hace con demasiada frecuencia la afirmación de que la teoría de la relatividad ha mostrado que la dinámica clásica es falsa. ¡Nada más lejos de la verdad! Las correcciones relativistas se aplican a objetos que se mueven a unas velocidades v para las cuales el cociente v/c es una cantidad significativa, siendo c la velocidad de la luz, 300.000 kilómetros por segundo. A las velocidades alcanzadas en los aceleradores lineales, ciclotrones, y otros dispositivos para el estudio de las partículas atómicas y subatómicas, ya no es cierto que la masa m de un objeto físico permanezca constante. En vez de ello, se encuentra que la masa en movimiento viene dada por la ecuación

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

donde m es la masa de un objeto que se mueve a la velocidad v relativa al observador, y m_0 es la masa del mismo objeto observado en reposo. A esta corrección hay que unir la ya familiar ecuación de Albert Einstein que relaciona la masa y la energía, $E = mc^2$, y la negación de la validez de la creencia de Newton en un espacio «absoluto» y en un tiempo «absoluto». Y bien, ¿podemos aprobar el nuevo pareado que J. C. Squire añadió al de Pope anteriormente citado?

No duró: el Diablo, clamando «Hop,
que Einstein sea», restauró el status quo.

Pero para toda la gama de problemas discutidos por Newton —ejemplificados hoy día por el movimiento de estrellas, planetas, lunas, aeroplanos, naves espaciales, satélites artificiales, automóviles, pelotas de béisbol, cohetes y cualquier otro tipo de cuerpos voluminosos— las velocidades v alcanzables son tales que v/c, en la práctica, tiene el valor cero, y todavía es correctamente aplicable la dinámica newtoniana. (Existe, sin embargo, un ejemplo muy notable de fracaso de la física newtoniana: un error muy pequeño en la predicción del avance del perihelio de Mercurio —¡40" por siglo!—, para el que es preciso invocar a la teoría de la relatividad.) Así pues, para la ingeniería y para toda la física, excepto una parte de la física atómica y subatómica, es aún la física newtoniana la que explica los acontecimientos del mundo externo.

Si bien es cierto que la mecánica newtoniana es todavía aplicable a la extensión de fenómenos para los que fue concebida, el estudiante no debe cometer el error de pensar que es igualmente válido el marco de referencia en el cual se estableció originalmente este sistema. Newton creía que *existía* un sentido en el cual el espacio y el tiempo eran entidades físicas «absolutas». Todo análisis profundo de sus escritos muestra cómo, en su pensamiento, dependían sus descubrimientos de estos «absolutos». Con seguridad, Newton era consciente de que los relojes no miden el tiempo absoluto, sino sólo el tiempo local, y que en nuestros experimentos tratamos con el espacio local y no con el absoluto. En realidad, no sólo desarrolló una ley de fuerza gravitatoria y un sistema de reglas para calcular las respuestas a los problemas de la mecánica, sino que también construyó un sistema completo basado en una concepción del mundo, incluyendo las ideas de espacio, tiempo y orden. Hoy en día, tras el experimento de Michelson-Morley y la relatividad, ya no puede considerarse a esta concepción como una base válida para la ciencia física. Se considera que los principios newtonianos son sólo un caso especial, aunque extremadamente importante, de un sistema más general.

Algunos científicos sostienen que una de las mayores validaciones de la física newtoniana está constituida por el conjunto de predicciones relativas al movimiento de los satélites; nos han permitido poner en órbita a una sucesión de vehículos espaciales, y predecir lo que les sucederá en el espacio exterior. Puede ser así, pero para el historiador el mayor logro de la ciencia newtoniana debe ser siempre la primera explicación completa del universo sobre principios mecánicos —un conjunto de axiomas y una ley de gravitación universal que se aplican a toda la materia dondequiera que se encuentre: tanto sobre la Tierra como en los cielos. Newton reconoció que el único ejemplo en la naturaleza en el que se da un movimiento inercial puro que continúa y continúa, sin interferencias friccionales o de otro tipo que le obliguen a detenerse, es el movimiento de los satélites y planetas. Y aún no es éste un movimiento uniforme o sin cambios a lo largo de una línea recta, sino más bien a lo largo de una línea recta que cambia constantemente, ya que los movimientos planetarios son una combinación de un movimiento inercial con una caída continua desde el mismo. Advertir que los satélites y planetas ejemplifican el movimiento inercial puro requirió el mismo genio que se precisaba para comprender que la ley planetaria podía generalizarse para toda la materia en una ley de atracción universal, y que el movimiento de la Luna tiene el mismo carácter que el de una manzana que cae.

El sistema de mecánica de Isaac Newton llegó a simbolizar el orden racional del mundo, funcionando bajo la «regla de la naturaleza». La ciencia newtoniana no sólo podía dar cuenta de los fenómenos del presente y del pasado; también podían aplicarse los principios a la predicción de acontecimientos futuros. En los *Principia*, Newton probó que los cometas son parecidos a los planetas, moviéndose en grandes órbitas que deben ser (de acuerdo con las reglas newtonianas) secciones cónicas. Algunos cometas se mueven en elipses, y éstos deben retornar periódicamente desde el espacio remoto a las regiones visibles de nuestro Sistema Solar, mientras que otros visitan nuestro Sistema y nunca volverán. Edmond Halley aplicó estos resultados newtonianos al análisis de los registros cometarios del pasado, y encontró —entre otros— un cometa con un período de unos setenta y cinco años y medio. Efectuó la audaz predicción newtoniana de que este cometa reaparecería en 1758. Cuando lo hizo de acuerdo con lo previsto, si bien Newton y Halley habían fallecido mucho tiempo antes, por todo el mundo los hombres y mujeres experimentaron un nuevo sentimiento de respeto hacia el poder de la razón humana ayudada por las matemáticas. La nueva consideración hacia la ciencia se expresó con adjetivos tales como «asombroso», «fenomenal» o «extraordinario». Esta afortunada predicción de un acontecimiento futuro simbolizó la potencia de la nueva ciencia: la perfección de la comprensión matemática de la naturaleza, puesta de manifiesto por la capacidad de hacer fidedignas predicciones del futuro. No sorprendentemente, los hombres y mujeres de todas partes lo vieron como una promesa de que todo el conocimiento y la regulación de los asuntos humanos se sometería a un sistema racional similar de deducción e inferencia matemática asociado con el experimento y la observación crítica. El siglo XVIII no fue sólo el siglo de la Ilustración, sino que llegó a ser «la época por excelencia de la fe en la ciencia». Newton se convirtió en el símbolo de la ciencia triunfante, el ideal para todo pensamiento —en filosofía, psicología, gobierno, y en la ciencia de la sociedad.

El genio de Newton nos permite apreciar plenamente el significado de la mecánica galileana y de las leyes de Kepler del movimiento planetario, tal como se manifestó en el desarrollo de los principios de inercia requeridos por el universo copernicano-kepleriano. Fue un gran matemático francés, Joseph Louis Lagrange (1736-1813), quien mejor definió el logro de Newton. Sólo existe una ley en el universo, dijo, y Newton la descubrió. Newton no desarrolló completamente por sí mismo la dinámica moderna, sino que dependió en gran medida de ciertos de sus predecesores; esta deuda no minimiza en modo alguno la magnitud de su logro. Sólo acentúa la importancia de hombres tales como Galileo y Kepler, y Descartes, Hooke y Huygens, quienes fueron lo bastante grandes como para hacer significativas contribuciones a la empresa newtoniana. Sobre todo, en el trabajo de Newton podemos ver el grado en el que la ciencia es una actividad colectiva y acumulativa, y podemos apreciarlo en la magnitud de la influencia de un genio individual sobre el futuro de un esfuerzo científico cooperativo. En el logro de Newton vemos cómo avanza la ciencia por heroicos ejercicios de la imaginación, más que por la paciente recolección y clasificación de miríadas de hechos individuales. ¿Quién, tras estudiar la magnífica contribución de Newton al pensamiento, podría negar que la ciencia pura ejemplifica la cúspide del talento creativo del espíritu humano?

Nota suplementaria sobre las dos formas de la segunda ley de Newton

Los *Principia* de Newton contienen dos formas de la segunda ley. Desde la época de Newton, usualmente sólo consideramos el caso de una fuerza F que actúa continuamente sobre un cuerpo de masa m para imprimirle una aceleración A, siendo $F = mA$. Pero Newton daba primacía a otro caso, el de una fuerza instantánea —un impacto o golpe—, como cuando una raqueta de tenis golpea a la pelota, o una bola de billar percute a otra. En tales casos, la fuerza no produce una aceleración continua, sino un cambio instantáneo en la cantidad de movimiento del cuerpo (o momento). Este es el «cambio en el movimiento» que se dice que es proporcional a «la fuerza motriz impresa» en el enunciado de Newton de la Ley II citado en la página 157. Newton concebía que $F = mA$ es un caso límite de la ley de impacto, la situación que se produce cuando el tiempo transcurrido entre impactos sucesivos decrece indefinidamente, de modo que la fuerza alcanza por último la condición límite de actuar continuamente. La ley $F = mA$ fue, pues, considerada por Newton como una ley derivada de la del impacto, expuesta en la página 157.

Apéndice 1

GALILEO Y EL TELESCOPIO [1]

Galileo, ciertamente, no inventó el telescopio, y nunca pretendió haberlo hecho. Ni tampoco fue el primer observador en dirigir tal instrumento hacia los cielos. Un folleto de octubre de 1608, alrededor de un año antes de que Galileo construyera su primer instrumento, traía la noticia de que el catalejo no sólo podía hacer que los objetos terrestres distantes parecieran más próximos, sino que también permitía ver «aún las estrellas que ordinariamente son invisibles a nuestros ojos». Existe muy buenos testimonios de que Thomas Harriot había estado observando la Luna antes de que Galileo empe-

[1] Este apéndice está basado en una comunicación sobre este tema, de Albert Van Helden, en un congreso internacional sobre Galileo celebrado en Pisa, Padua, Venecia y Florencia en abril de 1983, y publicado en las actas de este congreso, editadas por Paolo Galluzzi: *Novità celesti e crisi del sapere* (supl. a *Annali dell'Instituto e Museo di Storia della Scienza,* Florencia, 1983). Véase también la monografía de Van Helden en la Guía de lecturas adicionales, en la página 247.

En *El mensaje sideral,* Galileo afirma que sólo había oído hablar del nuevo dispositivo, pero que en realidad no había visto ninguno, cuando aplicó sus conocimientos de la teoría de la refracción para construir un catalejo. Pero, por esta época, los nuevos instrumentos no eran infrecuentes en Italia, y uno ya había llegado a Padua y se estaba hablando de él. Quizá se encontraba en Venecia cuando el catalejo se estaba exhibiendo en Padua. En *El ensayador (Il saggiatore),* de 1623, volvió a relatar el papel que desempeñó en la creación del telescopio astronómico y discutió extensamente las etapas que le condujeron a reinventar este instrumento. Aquí, sin embargo, nos interesa menos la invención del telescopio que el uso que Galileo hizo del mismo.

zara sus observaciones telescópicas; las pretensiones de Simon Marius (p. ej., de que él había descubierto los satélites de Júpiter), están peor fundadas.

El informe de Galileo (véase la página 68) está tomado de su *Sidereus nuncius* (1610). Escribió otras versiones de su primer encuentro con el telescopio que difieren un tanto en los detalles, por ejemplo con respecto a su conocimiento de la construcción del instrumento (es decir, la combinación de dos lentes, una positiva y la otra negativa). Lo más significativo no estriba en que Galileo conociera (o no) el tipo de lentes que se necesitaban para hacer tal telescopio o catalejo, sino en que muy rápidamente hizo telescopios muy superiores en poder de aumento y en calidad a cualesquiera otros, telescopios lo bastante buenos como para servir al propósito del descubrimiento astronómico. En este sentido, Galileo transformó el tosco catalejo en un refinado telescopio astronómico.

Los contemporáneos de Galileo que construyeron o vendieron anteojos utilizaron lentes comunes de fabricantes de gafas que alcanzaban muy pocos aumentos (sobre tres o cuatro veces). Aun Thomas Harriot, quien aparentemente estuvo en posesión de catalejos mucho antes que Galileo, sólo fue capaz de llegar a un instrumento de 6 aumentos hacia agosto de 1609, momento en el cual Galileo (quien acababa de saber del instrumento ese mes o en el mes de julio anterior) había hecho ya uno de 8 o tal vez 9 aumentos. A finales de ese año había alcanzado 20 aumentos e introducido un diafragma para mejorar la imagen.

Galileo no sólo pulió sus propias lentes, de un aumento mayor que las utilizadas por los fabricantes de anteojos, sino que sus lentes eran, además, de mejor calidad, y sus instrumentos tenían la ventaja de incorporar la nueva característica de un diafragma. Albert Van Helden, el principal especialista en este tema, concluye: «Aún a pesar de que Harriot le precedió en observaciones lunares con el nuevo instrumento, Galileo fue probablemente el primero en comprender plenamente el sentido de las características lunares, la naturaleza similar a la terrestre de la Luna.» Hacia marzo de 1610, Galileo había descubierto estrellas antes nunca vistas, la diferencia en apariencia entre planetas (que presentan un disco a través del telescopio) y estrellas fugaces (que aparecen como centelleantes puntos de luz), las estrellas que componen la Vía Láctea, y los satélites de Júpiter. Estos descubrimientos se publicaron en el *Sidereus nuncius* en la primavera de 1610. Hacia julio, había descubierto protuberancias en Saturno y, más avanzado el año, las fases y variaciones correlativas en la magnitud de Venus.

Galileo, de hecho, encontró casi todo lo que se podía descubrir con este tipo de telescopio —siendo el primero en hacerlo debido a que fue el primero en tener un instrumento adecuado—. Pero hacia 1611 otros habían obtenido telescopios que les permitían distinguir fenómenos celestes, aun a pesar de que (como señala Van Helden) sus telescopios no eran probablemente tan buenos como los de Galileo. Así que aparecieron rivales que reclamaban el descubrimiento de las manchas solares en 1611. Van Helden comenta que éste fue «el último descubrimiento importante de esta fase inicial de la astronomía telescópica». Otros descubrimientos de importancia requerirían mayor aumento y una resolución que estaba más allá de la capacidad de las lentes de este primer período.

Hasta la década de 1630, Galileo estuvo todavía fabricando y distribuyendo telescopios. Pero las siguientes décadas presenciaron el surgimiento de nuevos instrumentos, no compuestos ya de una sola lente negativa como ocular y de una sola lente positiva como objetivo. En el decenio de 1630, otros astrónomos elaboraron mapas de la Luna y estudios de las manchas solares, observaron los tránsitos de Mercurio en 1631 y de Venus en 1639, y encontraron señales en la superficie de Júpiter. Galileo no participó en esos desarrollos posteriores.

El inicio de la «segunda ola de descubrimientos» con nuevos telescopios puede datarse en 1655, con el descubrimiento por Huygens de Titán, un satélite de Saturno. Más tarde, Huygens fue capaz de resolver las enigmáticas observaciones de Galileo sobre las protuberancias de Saturno. Encontró que consistían en un anillo plano que rodeaba al planeta.

La principal contribución de Galileo al telescopio ha sido resumida como sigue: Cambió «un débil catalejo en un potente instrumento de investigación». Fue el primero capaz de «pulir objetivos de gran distancia focal» (que eran de buena calidad) y fue el primero en equipar sus instrumentos con diafragmas. En suma, fue el primer científico en lograr «aumentos astronómicamente significativos con calidades aceptables». Van Helden concluye que Galileo «descubrió por sí mismo todas las cosas importantes que se podían descubrir con esta generación de instrumentos, excepto las manchas solares, que fueron descubiertas independientemente por varios otros observadores».

Apéndice 2

LO QUE GALILEO «VIO» EN LOS CIELOS[1]

El análisis de la experiencia de Galileo mirando los objetos celestes a través del telescopio en 1609 y años sucesivos muestra cómo su compromiso con las doctrinas copernicanas condicionó y aun, en alguna medida, dirigió la interpretación de lo que realmente observó. Los autores de historia de la ciencia transmiten a menudo la impresión de que en 1609 Galileo descubrió o «vio» montañas en la Luna y satélites de Júpiter. Una cuidadosa lectura de los documentos manuscritos de Galileo o del relato publicado de sus descubrimientos que él presenta en su *Mensaje Sideral* de 1610 muestra, sin embargo, que cuando Galileo examinó la Luna a través del telescopio, lo que realmente vio fue un gran número de manchas, tal como había esperado. Algunas de las manchas eran más oscuras y mucho mayores que las otras; Galileo las llamó «las manchas 'grandes' o 'antiguas'», puesto que éstas eran las que habían sido divisadas y descritas por los observadores a simple vista a lo largo de muchos siglos. Se distinguían de ciertas manchas más pequeñas y muy numerosas que nunca habían sido observadas hasta la invención del telescopio —o, como dijo Galileo, «nunca nadie las observó antes que yo». Estas nuevas manchas eran los datos crudos de la experiencia

[1] Este apéndice está basado en mi monografía «The influence of Theoretical Perspective on the Interpretation of Sense Data», en *Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze*, anno V (1980), fascicolo 1. Las citas de *El mensaje sideral* se han tomado de la obra de Stillman Drake *Discoveries and Opinions of Galileo*, Garden City, N.Y., Doubleday & Co., 1957. [La traducción al castellano se indica en la Guía de lecturas adicionales.]

de los sentidos. O, para decirlo de otra forma, lo que Galileo realmente *vio* a través del telescopio fue una colección de manchas de dos tipos. Transcurrió algún tiempo hasta que, como nos relata Galileo, transformó estos datos de los sentidos o imágenes visuales en un nuevo concepto: una superficie lunar con montañas y valles, el origen y causa de lo que había visto por el telescopio. A este respecto no puede haber ninguna duda, como el mismo Galileo dejó claro en su relato publicado. Dejémoslo hablar:

> De las tantas veces repetida inspección de estas manchas he derivado la opinión, que tengo por firme, de que la superficie de la Luna y de los demás cuerpos celestes no es de hecho lisa, uniforme y de esfericidad exactísima, tal y como ha enseñado de ésta y de otros cuerpos celestes una numerosa cohorte de filósofos, sino que, por el contrario, es desigual, escabrosa y llena de cavidades y prominencias, no de otro modo que la propia faz de la Tierra, que presenta aquí y allá las crestas de las montañas y los abismos de los valles.

Entonces describe Galileo las observaciones reales que ha hecho «a partir de las cuales ha podido inferir tales cosas». Advirtamos que muchas de ellas sugirieron al pensamiento de Galileo una analogía con fenómenos terrestres. Por ejemplo, ciertas «pequeñas manchas negruzcas» presentaban «la parte negruzca vuelta hacia el lugar en que se halla el Sol», mientras que en la cara opuesta al Sol aparecían «coronadas de contornos muy luminosos cual montañas refulgentes». Vemos un fenómeno similar en la Tierra a la salida del Sol, señala Galileo, «cuando, aún no inundados los valles de luz, vemos con todo que los montes que los circundan están ya todos resplandecientes y refulgentes». Otra «sorprendente» observación fue la de una serie de «puntos luminosos» en la región oscura de la Luna, mucho más allá del terminator. Encontró que éstos aumentaban gradualmente de tamaño y finalmente se unían «a la restante parte iluminada [de la Luna] que se ha tornado mayor». Estos, concluyó, debían ser picos montañosos brillantes, que se elevaban a tal altura sobre la superficie de la Luna que eran iluminados por los rayos del Sol, si bien sus bases se hallaban en la región de sombra o en la oscuridad. De nuevo Galileo recuerda a su lector una analogía terrestre, ya que «¿acaso no ocurre lo mismo en la Tierra, donde antes de la salida del Sol las más altas cimas de los montes se hallan iluminadas por los rayos solares, mientras que la sombra ocupa aún las llanuras?».

La transformación intelectual de estas observaciones lunares en conclusiones que concuerdan con lo que Galileo llama «la antigua opinión de los pitagóricos según la cual la Luna sería algo así como otra Tierra» fue impulsada por su compromiso con el sistema copernicano. Debió darse una enorme presión inconsciente para justificar la posición copernicana de que la Tierra es simplemente otro planeta, que *no es fundamentalmente distinto* de los otros planetas y de la Luna. Si la Tierra no es un cuerpo singular, no se halla especialmente condicionada a estar en reposo y en el centro del universo. Así, el compromiso de Galileo con el copernicanismo le llevó a transformar los datos de la observación en el argumento de que la Luna se parece a la Tierra.

Un proceso un tanto similar de transformación de los datos sensoriales de la experiencia se dio en relación con lo que Galileo llamó «la cuestión que en mi opinión es digna de ser considerada la más importante de todas —la revelación de cuatro Planetas nunca vistos desde el comienzo del mundo hasta nuestros días». En esta declaración, Galileo está usando el término «planeta» en el sentido griego original de cualquier cuerpo errante en los cielos, y se refiere a su descubrimiento de los satélites de Júpiter, o planetas secundarios que acompañan al planeta primario Júpiter. Lo que realmente «vio» no fue un conjunto de lunas o satélites. En realidad, el 7 de enero de 1610, observó «además del planeta... tres estrellitas, pequeñas sí, aunque en verdad clarísimas». Estos puntos luminosos, parecidos a estrellas a pesar de su proximidad a Júpiter, constituían los datos sensoriales efectivos. Al principio, Galileo sólo realizó la simple y obvia transformación de la visión de estos puntos luminosos y concluyó que había visto estrellas. Tal como manifestó, «consideré que eran del número de las fijas». Los únicos aspectos especiales que despertaron su curiosidad, prosiguió, fueron que «aparecían dispuestas exactamente en una línea recta paralela a la eclíptica, así como más brillantes que las otras de magnitud pareja». Tan lejos se hallaba de concebir que pudieran tratarse de satélites de Júpiter que nos dice que «me preocupé muy poco de las distancias entre ellas y Júpiter al considerarlas fijas, como dijimos al principio». Su segunda observación se produjo en la noche siguiente y mostró que «las estrellas eran todas tres occidentales, más próximas que la noche anterior unas a otras y a Júpiter y mutuamente separadas por similares distancias». Aun entonces, Galileo no sospechó que se trataba de satélites. En vez de ello, nos dice,

> Comencé con todo a preguntarme de qué modo podría Júpiter ponerse al oriente de todas las fijas mencionadas, hallándose la víspera a occidente de dos de ellas. Por consiguiente, temí que quizá [su movimiento] fuese directo, en contra del cálculo astronómico, adelantando a dichas estrellas por su movimiento propio, razón por la cual esperé a la noche siguiente con grandes ansias.

Tras nuevas observaciones, finalmente, «determiné y establecí fuera de toda duda que en el cielo había tres estrellas errantes en torno a Júpiter, a la manera de Venus y Mercurio en torno al Sol». Poco después, encontró que «cuatro son los astros errantes que realizan sus circunvoluciones en torno a Júpiter». No está desprovisto de interés el que Galileo estableciera una analogía entre los satélites o luces menores moviéndose alrededor de la luz mayor de Júpiter y el movimiento de Venus y Mercurio en torno a la brillante luz del Sol. Esta analogía indicaría que el copernicanismo de Galileo estaba directamente relacionado (según su propio testimonio) con su transformación de la idea de que había *estrellas* moviéndose *junto con* Júpiter en la idea de que había *satélites* moviéndose *alrededor* de Júpiter [2].

El ejemplo de los satélites de Júpiter difiere en un aspecto esencial de la anterior experiencia con las manchas de la Luna. El copernicanismo y el antiaristotelismo de Galileo precondicionaron obviamente su mente hacia la posibilidad de que la Luna pudiera ser similar a la Tierra. Pero no había nada en su propensión antiaristotélica o en su compromiso procopernicano que le preparara para la existencia de un modelo en miniatura del sistema copernicano en la forma de un sistema de satélites alrededor de Júpiter. Mirando hacia atrás, retrospectivamente, puede parecer verosímil el siguiente razonamiento: Si la Tierra no es singular, resultaría entonces que la Tierra no es el único planeta con un satélite. Esta línea de pensamiento quizá haya formado parte de la idea final de Galileo de que eran satélites de Júpiter. Pero, de hecho, Galileo no menciona la analogía con la Tierra y su Luna. En todo caso, hay una asombrosa gran diferencia entre un planeta que tiene una sola luna y la existencia de todo un sistema de cuatro nuevos «planetas» rodeando a Júpiter. Aun un copernicano tan firme como Kepler quedó quebrantado por la noticia de que Galileo había descubierto cuatro nuevos planetas o estrellas errantes, puesto que no sabía exactamente cómo podía incorporarlos a su esquema, en el cual la separación entre seis planetas estaba relacionada con la existencia de cinco, y sólo cinco, sólidos geométricos regulares.

---

2 Sobre las observaciones reales de Galileo y un nuevo «esclarecimiento sobre el proceso realmente seguido para alcanzar la conclusión de que estaba contemplando unos cuerpos que materialmente giraban en torno a Júpiter», véase Stillman Drake, *Galileo at Work: His Scientific Biography,* Chicago y Londres, The University of Chicago Press, 1978, 146-153, esp. 148-149.

Drake también ha mostrado que para Galileo constituyó una labor de proporciones heroicas el determinar los períodos y radios orbitales (o máximas elongaciones) de los satélites de Júpiter. Debió comprometerse grandemente con el concepto de satélites para emprender tal enorme labor. Véase Drake, «Galileo and Satellite Prediction», *Journal for the History of Astronomy* 10 (1979), 75-95.

Desde luego, el nuevo descubrimiento, una vez hecho, tenía una propiedad, y era que respondía a los reparos de los anticopernicanos, quienes argumentaban que la Tierra no podría moverse en su órbita (y recuerde que lo hace a la enorme velocidad de unos 30.000 kilómetros por segundo) sin perder su luna. Todos admitían que Júpiter se mueve; bien, pues si Júpiter puede moverse en una órbita sin perder cuatro lunas, ¡seguramente no habrá objeciones a que la Tierra pueda moverse sin perder a su única luna!

Poco tiempo después, Galileo (y otros) hizo otro notable descubrimiento, a saber, que el Sol tenía manchas. Estas manchas constituían el hecho, el dato de la observación sensorial. Lo significativo es cómo los transformó o interpretó la mente de Galileo. Es bien sabido que Galileo las reveló como manchas reales en la superficie del Sol, e interpretó así su movimiento como una indicación de que el Sol rota sobre su eje. Otros, que sostenían un punto de vista científico y filosófico distinto, intentaron dar otra interpretación, sosteniendo que se trataba de sombras proyectadas sobre el Sol, posiblemente por «estrellas», bien «fijas» o «errantes» (es decir, «planetas»), que «giraban a su alrededor al modo de Mercurio o Venus». Estas dos interpretaciones muestran cuán distintos puntos de vista interactúan con los datos de la observación en la mente de un científico. Un aristotélico tiene que pensar que el Sol es puro e inmaculado, mientras que un antiaristotélico como Galileo no se preocupaba por si el Sol tenía o no manchas, por si era inmutable o sufría cambios a diario. En el presente contexto, las manchas solares nos interesan en un sentido histórico, porque resulta que en la Edad Media hubo un cierto número de observaciones de estas manchas, pero tendían a ser interpretadas como casos del paso de un planeta (Mercurio o Venus) a través del disco del Sol, puesto que la filosofía predominante no permitía que estas observaciones fueran transformadas en la afirmación interpretativa de que el Sol tiene manchas [3].

La doctrina de la transformación contribuye a concretar el acontecimiento efectivo sobre el cual el historial del científico, su orientación filosófica, o su punto de vista científico interactúan con los datos sensoriales para suministrar el tipo de base sobre el que avanza la ciencia. La siguiente fase de la investigación sería identificar, clasificar e interpretar, en varios ejemplos, aquellas partes del historial de los científicos que actúan en los descubrimientos. Una primera

---

[3] Sobre el debate acerca de las manchas solares, véase la traducción de Stillman Drake de la *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares y sus accidentes* de Galileo, 59-144, esp. 91-92, 95-99. Bernard R. Goldstein ha escrito «Some Medieval Reports of Venus and Mercury Transits», en *Centaurus* 14 (1969), 49-59.

tarea consistiría en tratar de distinguir entre el efecto de la educación general en ciencia y filosofía y el efecto de la personalidad particular del científico. Sería importante tratar de encontrar el grado en que las transformaciones intelectuales están relacionadas con la educación o son independientes del científico particular. Apenas si se han dado los primeros pasos en esta área general del trasfondo filosófico del descubrimiento. En particular, éste fue el tema de un conjunto muy penetrante de observaciones hechas por N. R. Hanson, y ha sido explorado por Leonard K. Nash. La psicología de la gestalt puede hacer aquí grandes contribuciones. Y no hay duda de que los estudios de los psicólogos experimentales tales como R. L. Gregory y de los historiadores del arte como E. H. Gombrich acabarán por arrojar mucha luz sobre esta cuestión [4].

[4] Norwood Russell Hanson, *Patterns of Discovery: An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*, Cambridge, en la University Press, 1958. [Trad. cast., *Patrones de descubrimiento,* Madrid, Alianza, 1977.] Leonard K. Nash, *The Nature of the Natural Sciences,* Boston, Little, Brown and Company, 1963. Sobre la cuestión de la Gestalt en relación con el descubrimiento científico, véase, además de los trabajos de Hanson y Nash, Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions,* 2.ª ed., Chicago, The University of Chicago Press, 1970, 64, 85, 111, 122, 150. [Trad. cast., *La estructura de las revoluciones científicas,* Madrid, Fondo de Cultura Económica, 1975.] y Kuhn, *The Essential Tension,* Chicago, University of Chicago Press, 1977, xiii. [Trad. cast., *La tensión esencial,* México, F.C.E., 1978.] Véase también R. L. Gregory, *The Intelligent Eye,* Londres, Weidenfeld and Nicolson; Nueva York, McGraw Hill Book Co., 1970; Gregory, *Eye and Brain: The Psichology of Seeing,* Nueva York, McGraw Hill Book Co., World University Library, 1966. [Trad. cast., *Ojo y cerebro,* Madrid, Guadarrama.] R. L. Gregory y E. H. Gombrich, eds., *Illusion in Nature and in Art,* Nueva York, Charles Scribner's Sons, 1973, y E. H. Gombrich, *Art and Illusion,* Nueva York, Pantheon Books, 1960.

Apéndice 3

LOS EXPERIMENTOS DE GALILEO SOBRE CAIDA LIBRE

En algunos escritos inéditos de sus días de Pisa, Galileo describió experimentos de caída de pesos desiguales desde una torre. No indicó qué torre había utilizado, pero supongo que debe haber sido la famosa Torre Inclinada de Pisa. Cuando repetí este experimento, en compañía de un grupo de especialistas reunidos en Florencia y Pisa con ocasión de un Congreso Internacional de Historia de la Ciencia, descubrí que, a causa de las características arquitectónicas de la torre, era preciso asomarse con los brazos extendidos horizontalmente, sosteniendo un peso en cada mano. Claramente, el resultado del experimento —si los pesos llegan al suelo simultáneamente o en instantes distintos— depende del grado de simultaneidad con que se los suelte. Las notas de Galileo indican que, en ocasiones, una bola pesada podía comenzar su caída más lentamente que una ligera, alcanzándola luego durante el descenso. Se trataba de un resultado enigmático —y tanto más porque aparecía en sus manuscritos inéditos, los cuales podemos suponer que contienen un registro verdadero e imparcial de lo que realmente observó. En otras ocasiones, Galileo anotó que dos pesos desiguales caen casi simultáneamente, o que se daba tan sólo la pequeña diferencia que menciona en *Dos nuevas ciencias*.

Si Galileo fue un experimentador cuidadoso, ¿qué sucede con los resultados relativos a una bola ligera que se mueve por delante de la pesada? Ciertamente es un mérito de Galileo el que registrara este fenómeno (y dijo que lo había observado «muchas veces»); incluso trató de explicar este extraño caso, que no encajaba bien en sus teorías. Las afirmaciones de Galileo son inequívocas. Escribió que «si se hace la observación, el cuerpo más ligero, al comienzo del movimiento, se moverá por delante del más pesado y será el más veloz». De nuevo, si dos *esferas del mismo tamaño, teniendo una* el doble del peso de la otra, se «dejan caer desde una torre», se encontrará que al comienzo del movimiento «la más ligera se moverá por delante de la más pesada, y a lo largo de alguna distancia se moverá más rápidamente». Galileo intentó dar cuenta de este fenómeno en un capítulo de su tratado inédito sobre el movimiento titulado «Donde se da la causa del por qué, al principio de su movimiento natural, los cuerpos que son menos pesados se mueven más rápidamente que los más pesados». No sólo afirmó que había observado este fenómeno, sino que también citó una observación similar efectuada por Girolamo Borro en un libro de 1575; Borro fue profesor en Pisa, enseñando allí todavía durante los días de estudiante de Galileo. Borro dejó caer trozos de madera y de plomo del mismo peso, pero de tamaño desigual, y encontró que el «plomo descendía más lentamente». Escribió que la prueba se realizó «no sólo una vez, sino muchas veces», y «con el mismo resultado».

Debemos agradecer a Thomas B. Settle [1] la solución de este enigma. Informa que, cuando un experimenador sostiene dos pesos desiguales, con las palmas hacia abajo, en sus brazos extendidos, no es posible soltarlos simultáneamente. Aun cuando el experimentador esté totalmente convencido de que los dos han sido soltados en el mismo instante, la prueba fotográfica muestra incontrovertiblemente que la mano que sostiene el más pesado se abre invariablemente un corto tiempo después de la que sostiene el más ligero. Se trata, aparentemente, de un efecto de fatiga muscular diferencial que depende de la magnitud del peso. El descubrimiento de que en este caso, como en otros, los resultados del experimento concuerdan con los informes de Galileo, nos imprime confianza en éste como un agudo experimentador que registró e informó exactamente lo que había observado.

Además, este episodio suministra un testimonio adicional de que Galileo estaba haciendo experimentos con objetos en caída libre en una etapa muy temprana de su carrera, y de que los experimentos tuvieron una trascendencia real en su exploración de la ciencia del movimiento.

---

[1] «Galileo and Early Experimentation», en Rutherford Aris, H. Ted Davis, y Roger R. Stuewer, eds., *Springs of Scientific Creativity*, Minneapolis, University of Minnesota Press, 1983, 3-20.

Apéndice 4

EL FUNDAMENTO EXPERIMENTAL DE LA CIENCIA DEL MOVIMIENTO DE GALILEO

Hasta hace poco, nuestro conocimiento sobre los estudios del movimiento de Galileo se basaban en sus libros y tratados (los publicados por él durante su vida y aquellos editados más tarde y publicados tras su muerte), notas manuscritas, y correspondencia. Todo ello fue reunido en una magnífica edición de veinte volúmenes, bajo la dirección general de Antonio Favaro (1890-1909; reimpreso en 1929-1939, y de nuevo en 1964-1966). De estos materiales emergía una historia del desarrollo de sus ideas que llevaba, desde su primer pensamiento en términos de un tardío modo medieval de la física del impetus, a su descubrimiento de las leyes de la caída libre (que existe una aceleración constante que produce una velocidad que aumenta en proporción al tiempo y una distancia que aumenta como el cuadrado del tiempo), y a su brillante aplicación de los principios de resolución y composición de vectores velocidad para analizar las trayectorias de proyectiles.

En los decenios que siguieron a la Segunda Guerra Mundial, muchos especialistas —siguiendo el ejemplo de Alexandre Koyré— habían llegado a la conclusión de que en las etapas de descubrimiento y desarrollo de los principios del movimiento, el papel de los verdaderos experimentos fue mínimo. Se vio a Galileo como un pensador y analista, no como a quien sometió cuestiones directas a la prueba de la experiencia. Y aún se llegó a dudar de que Galileo hubiera realizado alguna vez el experimento del plano inclinado descrito en las *Dos nuevas ciencias* como una confirmación de las conclusiones a las que llegó mediante el análisis matemático. Muchos especialistas coincidieron en que la exactitud con que se daba cuenta de las observaciones, dentro de «un décimo de pulsación», excedía con mucho la capacidad de su aparato; había elementos de juicio aparentes de que Galileo probablemente *nunca* llevó a cabo este experimento. Lo mejor que podría decirse de Galileo era que había exagerado jactanciosamente los resultados. Esta opinión parecía tanto más justificada en la medida en que Galileo no proporcionaba datos numéricos. Estas dudas relativas al plano inclinado no se expresaron por vez primera en el siglo XX. En la misma época de Galileo, el padre Marin Mersenne escribió en la *Harmonie Universelle [Armonía universal]*, 1 (París, 1636), 112: «Dudo que Galileo realizara experimentos con el plano inclinado, pues nunca habla de ellos y la proporción dada contradice a menudo a los datos experimentales.»

Nuestro punto de vista sobre la cuestión ha sufrido hoy un giro radical. En 1961 Thomas B. Settle ideó y llevó a cabo un experimento que replicaba estrechamente el descrito por Galileo en las *Dos nuevas ciencias*. En su informe («An Experiment in the History of Science» [Un experimento en la historia de la ciencia], *Science*, 133 [1961], 19-23), Settle mostró que la exactitud de los resultados, precisamente como dijo Galileo, se hallaba holgadamente dentro de un décimo de latido del pulso. Otros confirmaron los resultados de Settle. Otro experimentador, James MacLachlan (*Isis*, 64 [1973], 374-79), repitió un efecto descrito por Galileo que había sido objeto de particular irrisión y había sido utilizado para subrayar el hecho de que los experimentos de Galileo eran sólo «experimentos mentales» y obviamente no era posible que arrojaran los resultados descritos por él. Pero MacLachan encontró que este experimento, impensable a primera vista, concordaba exactamente con la descripción de Galileo. Hemos visto (en el apéndice 3) que a principios del decenio de 1590, mientras se hallaba todavía en Pisa, Galileo estaba realizando experimentos de caída de cuerpos, y que existe una explicación razonable para el extraño resultado que relató de que un cuerpo ligero inicia su caída por delante de un cuerpo pesado cuando ambos se sueltan «simultáneamente».

El creciente conocimiento de los experimentos realmente llevados a cabo por Galileo ha conducido a una renovación del interés por tratar de dilucidar, tan precisamente como sea posible, el camino que siguió Galileo en su descubrimiento de las leyes del movimiento. ¿Fueron dirigidos sus pasos principalmente por el análisis intelectual, como sus trabajos publicados podrían hacernos creer? ¿O se desarrollaron sus ideas mientras se hallaba realizando experimentos? A principios del decenio de 1970, Stillman Drake realizó un nuevo estudio de los manuscritos de Galileo. Entre ellos encontró páginas que habían sido omitidas por Favaro en la edición de sus obras, a causa de que «contenían tan sólo cálculos o diagramas sin proposiciones o explicaciones que los asistieran» [1].

Drake concluyó su análisis de estos datos y diagramas afirmando que incluían «cuanto menos un grupo de notas que no se pueden explicar satisfactoriamente salvo que representen una serie de experimentos diseñados para poner a prueba una suposición fundamental, que conducía a un nuevo e importante descubrimiento». La suposición, según Drake, era la de la inercia lineal; el descubrimiento fue que un proyectil moviéndose lentamente (una bola que rueda hacia abajo por un plano inclinado, encuentra un deflector y es lanzada al espacio) tiene una trayectoria curva que se asemeja a una parábola. Drake confirmó la sospecha de Favaro de que Galileo había descubierto la trayectoria parabólica de los proyectiles en una fecha tan temprana como 1609 y que, además, en esta época conoció y redactó por completo las pruebas de las proposiciones relativas a los movimientos parabólicos esencialmente tal y como se presentan en la Cuarta Jornada de las *Dos nuevas ciencias*. Drake ha analizado también algunas otras páginas manuscritas que recogen datos concordantes con una forma de descubrimiento de la ley de caída libre por medio de experimentos.

La nueva imagen de Galileo que emerge de los estudios de Drake es la de un científico de corte moderno que explora la cuestión del movimiento a través de experimentos (en gran medida de la misma forma en que han procedido los físicos durante los dos siglos pasados), y comprometido con una filosofía de la ciencia similar a la adoptada por muchos físicos de este siglo. Drake minimiza la pretendida dependencia de Galileo de los precursores medievales, señalando la ausencia del concepto de velocidad media en sus primeros escritos y mostrando cómo usó una aproximación eudoxiana a la teoría de proporciones.

No todos los historiadores concuerdan por completo con el conjunto de los análisis y conclusiones de Drake [2]. Uno de los proble-

---

[1] Los análisis de Stillman Drake se han publicado en varios artículos, entre ellos «Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia», *Isis* 64 (1973), 291-305; «Galileo's Discovery of the Law of Free Fall», *Scientific American* 228, núm. 5 (mayo 1973), 84-92; «Mathematics and Discovery in Galileo's Physics», *Historia Mathematica*, 1 (1974), 129-150; y con James MacLachlan, «Galileo's Discovery of the Parabolic Trajectory», *Scientific American* 232, núm. 3 (marzo 1975), 102-110. Para una síntesis, véase el *Galileo at Work* de Drake.

[2] Dos de los principales especialistas que no se han mostrado de acuerdo con las conclusiones de Drake son Winifred L. Wisan y R. H. Naylor. El tra-

mas es que éste parece demasiado comprometido con una imagen de Galileo como físico moderno (por ejemplo, del siglo XIX o posterior), un hombre que rompió con la tradición, mientras que muchos historiadores se inclinan por ver a Galileo como un innovador que, sin embargo, tiene fuertes vínculos con los pensadores medievales y renacentistas [3]. Además, Drake no ha moderado sus opiniones. Por ejemplo, afirma abiertamente que «hallar elementos de juicio manuscritos de que Galileo se encontraba en el laboratorio de física como en su casa es algo que difícilmente me puede asombrar». Y ataca abiertamente a la opinión aceptada «por nuestros más sofisticados colegas», quienes, dice, han propuesto «interpretaciones filosóficas» cuyo único mérito reside en que «cuadran con las opiniones preconcebidas de un metódico desarrollo científico a largo plazo». Drake rechaza la idea, que considera peyorativa, de que «Galileo fue un especulador de sillón». Antes bien, quiere convencernos de que, en una «notable medida», Galileo «hizo uso en la ciencia de métodos experimentales que ahora damos por sentados, pero que en el siglo XVII no constituían una forma usual de proceder». Por lo tanto, sus resultados implican que la forma en que Galileo presenta sus principios y leyes del movimiento difiere radicalmente de su trayectoria de descubrimiento.

Aun cuando los especialistas no acepten los detalles de los análisis individuales de Drake y sus conclusiones, cabe poca duda de que sus investigaciones han mostrado que Galileo estaba efectuando

---

bajo más significativo de Winifred Wisan es «The New Science of Motion: A Study of Galileo's *De motu locali*», *Archive for History of Exact Sciences* 13 (1974), 103-306; véase también «Mathematics and Experiment in Galileo's Science of Motion», *Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze* 2 (1977), 149-160, y «Galileo and the Process of Scientific Creation», *Isis* 75 (1984), 269-286. Las ideas de R. H. Naylor se presentan en sus artículos «Galileo and the Problem of Free Fall», *British Journal for the History of Science* 7 (1974), 105-134; «The Role of Experiment in Galileo's Early Work on the Law of Fall», *Annals of Science* 37 (1980), 363-378, y Galileo's Theory of Projectile Motion», *Isis* 71 (1980), 550-570.

[3] Drake no sólo afirma que los experimentos desempeñaron un papel esencial en el descubrimiento por Galileo de las leyes del movimiento, y que su interpretación particular de los diagramas y datos de Galileo revela su trayectoria real de razonamiento y análisis; también niega la importancia para éste de los últimos estudios medievales sobre el movimiento. La amplitud y significación del conocimiento de Galileo (y su uso) de ideas de los siglos XIV y XV, y de conceptos, principios y métodos del siglo XVI, es objeto en la actualidad de un intenso estudio histórico por parte, entre otros, de William Wallace, Alistair Crombie, y Antonio Carrugo. John E. Murdoch y Edith D. Sylla han publicado una exploración de las ideas medievales sobre el movimiento que tiende a minimizar el significado de este desarrollo para la física del siglo XVII (véase el apéndice 7).

experimentos sobre el movimiento en una etapa temprana de su vida científica, y que tales experimentos estaban de algún modo muy estrechamente relacionados con sus grandes descubrimientos. Drake nos ha proporcionado una versión de los pasos que llevaron al descubrimiento de las leyes del movimiento que concuerda razonablemente con los diagramas y datos numéricos de Galileo. Queda todavía abierta la cuestión de si es posible que una versión algo diferente explique también estos escuetos apuntes. En ausencia de comentarios o anotaciones explicativas del mismo Galileo, cualquier reconstrucción debe ser un tanto tentativa e hipotética. Para efectuar estas reconstrucciones y dar un significado físico a los números, diagramas y notas ocasionales de Galileo, Drake ha tenido que hacer cierto número de suposiciones, conjeturar las posibles etapas intermedias de su pensamiento. Lo que emerge es una imagen consistente, pero que no ha sido universalmente aceptada.

En el contexto de nuestro estudio sobre el nacimiento de una nueva física, no obstante, podemos concluir como mínimo que Drake ha probado que, en el caso de Galileo, se dio una enorme diferencia entre lo que Alfred North Whitehead llamó una vez la «lógica del descubrimiento» y la «lógica de lo descubierto». El análisis de Drake de las páginas manuscritas de Galileo indica que las investigaciones experimentales debieron haber desempeñado una función esencial en la «lógica del descubrimiento», la manera en la que Galileo pudo haber obtenido sus resultados. Como su presentación publicada no incluye tal base experimental, debe, por lo tanto, constituir una «lógica de lo descubierto», una reelaboración del tema por Galileo efectuada de tal modo que el orden y forma de presentación de su nueva ciencia del movimiento siguiera alguna secuencia lógica predilecta. Sea como fuere, queda el hecho histórico de que durante los cuatro siglos transcurridos desde los días de Galileo hasta el presente, el desarrollo de la ciencia y del pensamiento científico influenciados por Galileo han tenido que depender de la presentación que nos legó en sus *Dos nuevas ciencias* [4].

---

[4] Muchos científicos e historiadores de finales del siglo XIX y principios del XX supusieron *acríticamente* que, puesto que Galileo fue el «padre» de la física moderna (si no de la ciencia moderna), fue igualmente el inventor e iniciador del método experimental. De lo que resultó que debía haber realizado todos sus descubrimientos mediante el experimento. Tan predominante fue esta opinión que los traductores de las *Dos nuevas ciencias* de Galileo, Henry Crew y Alfonso de Salvio, añadieron las palabras «por el experimento» al texto de Galileo, de modo que su introducción al tema del movimiento no aludía simplemente a los principios que Galileo mismo dijo que había «hallado» (*comperio*, «hallé»), sino que se le hacía decir que se trataba de nuevos principios que «he descubierto por el experimento».

Existe, no obstante, un conjunto de factores que apunta en favor de los argumentos de Drake, además del hecho de que su reconstrucción encaje con los números de las páginas manuscritas y diagramas de Galileo. Estos factores adicionales son ampliamente negativos; es decir, que suministran elementos de juicio a favor de que la trayectoria de Galileo hacia el descubrimiento —aun cuando resultase diferir en buena medida de la propuesta de Drake— no pudo haber sido el pulcro análisis que presentó en las *Dos nuevas ciencias*. Ante todo, en los primeros escritos de Galileo no se usa la idea de una aceleración continua, que tan prominentemente aparece en las *Dos nuevas ciencias*, y que presumiblemente pudo haber aprendido de los últimos escritos medievales sobre el movimiento. En este primer tratado sobre el movimiento (redactado en Pisa hacia 1590) exploró velocidades sobre planos inclinados, concluyendo incorrectamente que a lo largo de planos de diferentes longitudes, pero de la misma altura, las velocidades deben ser proporcionales a las longitudes de los mismos. En esa época consideraba evidentemente a la aceleración sólo como un efecto menor al comienzo del movimiento, y no como algo que opera continuamente. Tampoco aparece el verdadero concepto de aceleración en un tratado de mecánica compuesto en 1592, poco después de que fuese a Padua. Hacia 1602 había hallado que el tiempo sería siempre el mismo para un cuerpo «cayendo» libremente a lo largo de cualquier cuerda de un círculo vertical que terminase en su punto más bajo. Pero en su discusión de este resultado tampoco aparece la aceleración. Sólo en 1603-1604 comenzó a concentrarse en el concepto de aceleración, en su búsqueda de una regla que diera cuenta de la caída libre en términos de distancias, velocidades y tiempos. Ahora bien, el momento en la carrera de Galileo en el que fue más consciente de los últimos análisis medievales del movimiento debería haber sido casi con certeza al principio de sus investigaciones, cuando era un joven profesor en la universidad, no mucho después de que finalizara su período de estudiante. Y precisamente es éste el momento en el que el concepto de aceleración y sus consecuencias parece notablemente ausente de su pensamiento, o de poca importancia. De aquí que parezca haber seguido una trayectoria independiente de exploración y descubrimiento, en lugar de aplicar simplemente resultados anteriores.

Además, un concepto clave en el análisis del movimiento de los siglos XIV, XV y XVI fue la «velocidad media», que figuró prominentemente en el teorema de la velocidad media o la ley de la media. De nuevo parece que este concepto se encuentra en los primeros escritos de Galileo. En las *Dos nuevas ciencias*, que es su último trabajo, encontramos una exposición muy parecida a la del teorema de la velocidad media, pero desarrollado por Galileo en una forma algo distinta, como revela un análisis concienzudo. Aun cuando pudiera argumentarse que Galileo llegó a la teoría medieval del movimiento en una época más tardía. es decir, tras sus escritos de 1590-1602, sería todavía un misterio por qué el concepto de velocidad media no aparece en una posición destacada en sus escritos más maduros. Existe así alguna prueba de que las etapas de desarrollo del pensamiento de Galileo sobre el movimiento no siguen simplemente la línea de los pensadores medievales.

Se ha mencionado que una de las críticas dirigidas a Drake es que ha tenido que introducir ciertas suposiciones o hipótesis para las que no hay ninguna prueba directa, y que al hacerlo puede haber estado fuertemente motivado por el deseo de presentar una imagen de Galileo como un tipo esencialmente moderno de físico de una clase especial. Drake no hace ningún secreto de esta imagen, y se muestra bastante abierto acerca de sus suposiciones. Yo mismo me inclino a favor de muchos de sus análisis, pese a que me preocupa alguna de las hipótesis secundarias que se requieren para conseguir que sus conclusiones encajen con los datos registrados. Pero disiento enérgicamente de su postura polémica, expresada por él mismo en estas frases:

> Es cierto que si Galileo hubiese partido de una definición correcta de la aceleración uniforme, como lo hizo en su último libro publicado, habría llegado ineludiblemente a sus conclusiones; y es también cierto que tal definición se había enunciado en la Edad Media. Lo único que hubiera tenido que hacer era aplicar esta definición al caso de la caída libre, y luego haber añadido el postulado relativo a las velocidades al final de los planos inclinados, lo que parece ser realmente bastante trivial y fácil. Y así es como se presenta en los libros de texto el trabajo de Galileo, como una extensión bastante vulgar de los análisis medievales del movimiento.

Si desapruebo tal afirmación, lo hago como un crítico que ha sido durante decenios un amigo y admirador del autor. Fíjese en la segunda frase, que comienza diciendo: «Lo único que hubiera tenido que hacer...» Durante dos siglos enteros (XIV, XV) ninguno de los autores que escribió sobre este tema «aplicó esta definición al caso de la caída libre», y en el siguiente siglo (XVI) sólo lo hizo uno, pero de una forma trivial que no tuvo ningún efecto o influencia. Por lo tanto, los elementos de juicio prueban que efectuar tal aplicación debió ser un paso heroico y tremendo que nunca había sido dado por ninguno de los grandes filósofos (o filósofos naturales), teólogos o matemáticos preocupados por esta cuestión. Es sencillamente ahistórico referirse a este paso gigantesco, que de hecho requirió una actitud completamente nueva y revolucionaria respecto a las matemáticas y a la naturaleza, y el paso correlativo del postulado referente a velocidades en los extremos de los planos inclinados, como pareciendo ser «realmente bastante trivial y fácil». Y, aun cuando el uso por Galileo de conceptos medievales y leyes del movimiento uniforme y uniformemente acelerado aparezca sólo en su presentación final y no dé cuenta por completo de sus descubrimientos, constituye seguramente una gran distorsión hablar de «una extensión bastante vulgar de los análisis medievales del movimiento».

En resumen, Drake ha llamado la atención sobre algunos problemas fundamentales en la aceptación del análisis del movimiento que suministra Galileo en las *Dos nuevas ciencias* como si se tratase de un informe veraz y completo de sus etapas de descubrimiento. Adicionalmente, Drake ha mostrado de forma incontrovertible que, al principio de su carrera, Galileo estaba experimentando con el movimiento durante el descubrimiento de sus famosas leyes. Drake ha proporcionado también una reconstrucción alternativa del pensamiento de Galileo que concuerda con los datos, si asentimos a ciertas suposiciones no irrazonables. Pero existe un fundamento legítimo para no aceptar por completo cada parte de su reconstrucción y para preguntarnos en qué medida el que tenemos ahora es verdaderamente el único guión posible. Quizás un conjunto alternativo de suposiciones pueda combinar los diagramas y datos con algunos aspectos cuanto menos de la presentación que el mismo Galileo nos da en las *Dos nuevas ciencias*. No hay, sin embargo, razones para dudar de que el experimento desempeñase una función significativa en sus estudios sobre los principios del movimiento y el descubrimiento de sus leyes, en una forma que no estaba basada en pruebas hasta las investigaciones de Drake entre sus manuscritos en 1972. Puede decirse, en conclusión, que la reconstrucción de Drake *hace encajar* los diagramas y los datos. Es, por lo tanto, razonable concluir que está esencialmente en lo cierto, pese a que el entusiasmo del descubridor pueda haber reforzado su imagen de Galileo como un físico experimental moderno y restado importancia al papel del intelecto y a su deuda con alguno de los últimos conceptos y reglas medievales relativos al movimiento. En este caso tenemos que aceptar la curiosa situación de que Galileo no sólo presentó sus resultados en las *Dos nuevas ciencias* de una forma totalmente distinta a aquella en la que los había descubierto, sino que efectivamente encubrió cualquier indicio de los pasos que le llevaron a estos descubrimientos. En este informe introdujo un experimento (o la prueba del experimento) no en relación con el descubrimiento, como hemos visto, sino sólo un test o ensayo de que la relación $D \propto T^2$ se da en la naturaleza. Y esto aparece en una sección de las *Dos nuevas ciencias* en la que Galileo introduce el tema del movimiento con una referencia a las nuevas cosas «que yo descubrí» *(comperio)*. A los especialistas les ha llevado como tres siglos y medio descubrir y estudiar las páginas desparejadas de sus apuntes y cálculos y comenzar a penetrar más allá de la fachada lógica de las *Dos nuevas ciencias*, a fin de encontrar los primeros pasos de descubrimiento e innovación.

Apéndice 5

¿CREYO GALILEO EN ALGUN MOMENTO QUE EN EL MOVIMIENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO LA VELOCIDAD ES PROPORCIONAL A LA DISTANCIA?

En un estudio acerca de «Galileo's Work on Free Fall in 1604» [El trabajo de Galileo sobre la caída libre en 1604] (en *Physis,* 16 [1974], 309-22), Stillman Drake ha discutido la carta que Galileo escribió a Paolo Sarpi, en la que afirmaba que si puede suponerse que en la caída libre las velocidades aumentan como la distancia, podría probar que las distancias son como el cuadrado del tiempo. El análisis de Drake se basa en páginas manuscritas de los apuntes de Galileo. Drake concluye que Galileo estaba midiendo una *velocità* por efectos de impacto, como en la acción de un martinete, una magnitud que podría relacionarse con nuestra V^2 en vez de con V. Si entonces tradujéramos la afirmación condicional de Galileo a Sarpi al lenguaje de las proporciones algebraicas, Galileo habría dicho que la condición

$$V^2 \propto D$$

lleva a la relación

$$D \propto T^2.$$

Puede verse fácilmente que éste es simplemente otro aspecto de la relación fundamental

$$V \propto T$$

es decir,

$$V^2 \propto T^2.$$

En las *Dos nuevas ciencias*, sin embargo, Galileo admite bastante explícitamente que al principio había pensado que

$$V \propto S$$

y sólo más tarde se convenció del principio correcto, que

$$V \propto T.$$

Sagredo (en el diálogo de la Jornada Tercera) pregunta si el «movimiento uniformemente acelerado» no es «aquel en el cual la velocidad va aumentando en la misma proporción en la que aumenta el espacio que atraviesa». La respuesta de Salviati (quien generalmente habla por Galileo) es que encuentra «un consuelo considerable en tener un compañero tal en el error» y que «nuestro autor mismo... había incurrido durante cierto tiempo en la misma falacia». Simplicio (el miembro aristotélico del grupo de interlocutores) suma su voz: él también piensa que «la velocidad aumenta en proporción al espacio».

Apéndice 6

EL METODO HIPOTETICO-DEDUCTIVO

En su ensayo experimental, Galileo presenta la esencia del que ha sido llamado a la vez método matemático-experimental e hipotético-deductivo. Galileo deseaba comprobar la relación $V \propto T$, pero no encontraba la forma de establecer una correlación directa de velocidades y tiempos determinada por el experimento. Sabía, no obstante, que si $V \propto T$, entonces $D \propto T^2$; esto es, que $D \propto T^2$ puede deducirse de la hipótesis $V \propto T$. Sabía asimismo que podía efectuar un ensayo experimental de $D \propto T^2$. La confirmación de esta relación le hizo confiar en que $V \propto T$, de la que se deducía $D \propto T^2$, era válida.

En términos simbólicos, lo que hizo Galileo fue deducir B de A; a continuación comprobó B, y entonces concluyó que A era válida. Debe advertirse, no obstante, que este método no incluye una garantía de A. Por ejemplo, podría suceder que B pudiera deducirse también de A'. Además, se supone que el proceso de deducción de B de A es correcto. Tradicionalmente esto significa corrección en la deducción lógica. El método de Galileo consiste en derivar B de A con la ayuda de las matemáticas. Debido a que B se ha derivado de A por medio de las matemáticas y entonces se ha ensayado mediante experimentos, el método puede denominarse también matemático-deductivo. En el siglo XVII fue usado también el término «matemático-experimental». Se denomina a este método «hipotético-deductivo» porque queremos comprobar la *hipótesis* A, pero no podemos hacerlo mediante un experimento directo. Por eso *deducimos* B de A y entonces comprobamos la *deducción* de B por el experimento. (El uso por Galileo de este método en relación con la hipótesis $V \propto T$ y la deducción ensayable $D \propto T^2$ puede encontrarse en las págs. 98 ss. *supra*.)

Apéndice 7

GALILEO Y LA CIENCIA MEDIEVAL DEL MOVIMIENTO

Al intentar relacionar el desarrollo de las ideas de Galileo sobre el movimiento con los últimos análisis escolásticos debe tenerse cuidado en distinguir cualquier uso que pudiera haber hecho Galileo del trabajo de estos predecesores en el transcurso del descubrimiento (véase el apéndice 4) y en la presentación lógica de esta cuestión en las *Dos nuevas ciencias*. Además, debe tenerse presente que los autores medievales trataban con abstracciones y no con el mundo de la naturaleza tal y como nos es revelado por nuestros sentidos y conocido por el experimento y la observación. John Murdoch y Edith D. Sylla [1] han resumido así la cuestión:

> Aun cuando las causas de un movimiento se presentaran y midieran como las fuerzas y resistencias que determinan este movimiento, el interés no se dirigía a estas fuerzas y resistencias consideradas como residiendo en algún motor, móvil o medio particular, sino a fuerzas y resistencias con abstracción de los agentes y pacientes concretos.

Por consiguiente, es un error contemplar los «nuevos y característicos esfuerzos del siglo XIV como dirigiéndose muy directamente hacia la temprana ciencia moderna». Si bien «Galileo conocía los trabajos medievales sobre el movimiento», y pudo haber puesto el «teo-

[1] John E. Murdoch y Edith D. Sylla, «The Science of Motion», en David Lindberg, ed., *Science in the Middle Ages*, Chicago, The University of Chicago Press, 1978, 206-264.

rema medieval de la velocidad media y aun su prueba a su servicio en su investigación del movimiento naturalmente acelerado», debe recordarse que «lo que se estaba utilizando entonces no era sino una parte, un fragmento, de la 'ciencia del movimiento' medieval, una parte separada de su contexto y, en manos de Galileo, empleada para realizar una tarea completamente distinta».

En pocas palabras, «el objetivo, en realidad, la empresa entera, de muchos de los estudiosos medievales que trataban movimientos estaba a mundos de distancia del de Galileo y sus colegas». Aun el teorema de la velocidad media no se compaginó «nunca (excepto en una ocasión, casi por accidente) con el movimiento de caída libre, que es lo que hizo Galileo».

Estas críticas sirven para recordarnos que no pudo haberse dado una transición fácil desde estos últimos escritos escolásticos a la nueva y revolucionaria ciencia del movimiento de Galileo. De hecho, no hay mejor exponente del carácter verdaderamente revolucionarío de la nueva ciencia del movimiento de Galileo que la comparación entre estas abstracciones medievales divorciadas de cualquier contaminación de la naturaleza y la ciencia galileana basada de lleno en observaciones y experimentos y contrastada por su grado de conformidad con la naturaleza tal y como la muestran los experimentos.

Apéndice 8

KEPLER, DESCARTES Y GASSENDI Y LA INERCIA

En esta presentación he omitido las contribuciones de Kepler, Descartes y Gassendi. Kepler introdujo el término *inertia* en el discurso sobre el movimiento. Pero para Kepler la *inertia* (del término latino que significa indolencia o indiferencia) implicaba ante todo que la materia no puede por sí misma empezar a moverse o continuar en movimiento si está moviéndose. Mejor dicho, debido a su inercialidad la materia necesita de un motor. Siempre que el motor deja de actuar, el cuerpo debe volver al reposo, y debe hacerlo dondequiera que se halle. Por sí mismo y sin un motor un cuerpo no continuaría moviéndose a algún «lugar natural». De este modo, la física de Kepler implicaba que no podían existir lugares naturales que pudieran buscar los cuerpos, como había pensado Aristóteles. Esta radical conclusión era necesaria para Kepler. puesto que en el universo copernicano la Tierra está en constante movimiento y, por lo tanto, no puede existir un lugar fijo o natural para los cuerpos terrestres.

Descartes tenía una idea mucho más radical. Propuso la idea de que el movimiento uniforme en línea recta es un «estado», tal como lo es el reposo. Como un cuerpo puede mantenerse a sí mismo en cualquier «estado» sin la acción de una fuerza externa, Descartes, en esencia, estaba estableciendo una equivalencia dinámica entre un estado de reposo y un estado de movimiento, con tal de que este último sea uniforme y rectilíneo. Descartes expuso por primera vez este nuevo principio en una obra titulada *Le Monde,* es decir, *El mundo* o *El universo*. Pero no publicó este tratado, que estaba compuesto sobre una base copernicana. Cuando Descartes se enteró de la condena de Galileo por la Inquisición romana decidió que sería imprudente presentar *Le Monde* para su publicación.

Más tarde Descartes escribió y publicó otro trabajo que contenía la ley o principio de inercia, denominado *Principia philosophiae,* o *Principios de filosofía.* Mientras tanto la ley había sido publicada por Pierre Gassendi, un filósofo y científico francés. Gassendi también hizo experimentos para comprobar esta ley. Estos incluían el dejar caer pesos en carruajes y barcos en movimiento.

Los *Principia* de Descartes tuvieron una tremenda influencia; por ejemplo, fue ésta una obra que influyó grandemente en Isaac Newton. Los *Principia* de este último se denominaban así para hacerlos aparecer como una mejora de los de Descartes. Descartes había escrito unos *Principia philosophiae,* pero Newton daba un paso adelante creando unos *Philosophiae naturalis principia mathematica.* Es decir, que Newton no estaba tan preocupado por los principios de la filosofía en general como por la filosofía natural o ciencia física, y sus principios matemáticos. En su formulación de la ley de la inercia, Newton incluso usó ciertas expresiones que se encontraban en los *Principia* de Descartes, tal como *status* («estado») y *quantum in se est* («en cuanto que de él depende»). Y aún podría parecer que la presentación por Newton de esta ley como el primero de sus «axiomas o leyes del movimiento» *(axiomata, sive leges motus)* había sido condicionada por la calificación por Descartes de su ley como una de «ciertas reglas o leyes de la naturaleza» *(regulae quaedam sive leges naturae).*

Apéndice 9

EL DESCUBRIMIENTO POR GALILEO DE LA TRAYECTORIA PARABOLICA

El descubrimiento por Galileo de la trayectoria parabólica parece tener dos partes. Una es la prueba matemática de que un proyectil que se mueve en un espacio libre de resistencia tendrá dos componentes independientes: una componente vertical que obedece a la ley de la caída libre (precisamente como si no hubiera componente horizontal) y una componente horizontal de movimiento hacia adelante que es uniforme (precisamente como si no hubiera componente vertical). Verticalmente la distancia caída D_y es proporcional al cuadrado del tiempo T; horizontalmente, la distancia D_x, a través de la cual avanza el cuerpo, es proporcional al tiempo. La combinación de $D_y \propto T^2$ y $D_x \propto T$ da como resultado una parábola (véase el apéndice 10, sec. 8). Galileo conocía la ley de la caída libre ($D_v \propto T^2$) en una fecha tan temprana como 1604. Stillman Drake encuentra que es «seguro que Galileo descubrió la trayectoria parabólica no más tarde de 1608 y la probó matemáticamente a principios de 1609». Pero Galileo no mencionó este descubrimiento en su obra impresa hasta unos treinta años después, en sus *Dos nuevas ciencias.*

La reconstrucción de Drake del descubrimiento de Galileo se basa en la interpretación de algunos diagramas, datos numéricos y cálculos en algunas páginas sueltas de las notas de Galileo, sin texto explicativo. Drake muestra que estas notas concuerdan con un experimento en el cual una bola rueda hacia abajo por un plano inclinado y es luego desviada para que se mueva horizontalmente. Galileo, presumiblemente, estaba examinando el movimiento horizontal inercial, y este dispositivo le permitía lanzar bolas en dirección horizontal con una velocidad determinada. Drake concluye su análisis de estos documentos con la sugerencia de que Galileo debió haber observado la trayectoria parabólica como un subproducto de estos experimentos. Las pruebas suministradas por Drake no consisten sólo en que pudiera reproducir los números y resultados calculados por Galileo, sino también en que fue capaz de idear y construir un montaje experimental en el cual los datos que recogió eran lo «suficientemente parecidos a los datos registrados por Galileo como para verificar la hipótesis de que obtuvo experimentalmente conjuntos de números medidos hasta la tercera o cuarta cifras significativas». Si éste es un análisis correcto, no podemos más que sorprendernos de que en su discusión final (publicada) de las trayectorias parabólicas Galileo no se refiriera a algunos experimentos cuantitativos o tan siquiera insinuara que éstos eran posibles.

Apéndice 10

RESUMEN DE LOS PRINCIPALES DESCUBRIMIENTOS DE GALILEO EN LA CIENCIA DEL MOVIMIENTO

La obra *Dos nuevas ciencias* de Galileo presenta una teoría matemática de la caída libre de los cuerpos que en gran parte parece haber descubierto unos treinta años antes. Entre los principales descubrimientos de Galileo se cuentan los siguientes:

1. Contrariamente a la creencia común, un cuerpo pesado y otro ligero no caen desde un lugar elevado (por ejemplo, una torre) con velocidades proporcionales a sus pesos, sino con velocidades casi idénticas.

2. Si un cuerpo cae en el aire (o en cualquier otro medio resistente), la resistencia aumentará como alguna función de la velocidad; cuando la resistencia llegue a igualar al peso del cuerpo cesará la aceleración y el cuerpo continuará moviéndose hacia abajo con velocidad uniforme.

3. En determinadas circunstancias (por ejemplo, sobre un plano horizontal liso, o cuando la resistencia del aire iguala y cancela a la fuerza aceleradora del peso), un cuerpo continuará con el movimiento que se le ha impreso o ha adquirido. (Galileo supuso que este principio limitado o restringido de inercia también se aplicaba a una gran superficie esférica concéntrica con la Tierra, por ejemplo, la superficie de ésta. También vinculó este principio con la tendencia de un cuerpo a mantener la rotación.)

4. En la aceleración natural, o en el movimiento uniformemente acelerado, la velocidad crece como los enteros 1, 2, 3... (Escribimos algebraicamente esta ley, partiendo del reposo, como $V \propto T$ o $V = AT$.) Se sigue que la distancia crece como el cuadrado del tiempo, es decir, $D \propto T^2$ (en realidad, $D = {}^1/_2 AT^2$). Galileo mostró experimentalmente que $D \propto T^2$ es válida para el movimiento de una bola rodando hacia abajo por cualquier plano inclinado.

   (a) En tal movimiento las distancias recorridas en sucesivos intervalos iguales de tiempo son como los números impares 1, 3, 5, 7..., ya que las distancias totales recorridas son como los cuadrados (1, 4, 9, 16...) y 4 — 1 = 3, 9 — 4 = 5, 16 — 9 = 7...

5. La caída libre y el movimiento de rodadura hacia abajo sobre un plano inclinado son ejemplos de movimiento uniformemente acelerado. De aquí que las leyes de la caída libre sean $V \propto T$ y $D \propto T^2$.

   (a) A causa de su resistencia, la caída en el aire no es un ejemplo de aceleración uniforme pura; ésta es la razón de que cuando desde una torre se dejan caer dos cuerpos de peso desigual, el más pesado llegue al suelo justo un momento antes que el más ligero.

6. En el movimiento sobre un plano inclinado, la velocidad final será la misma para todos los ángulos de inclinación siempre que el punto de partida esté a la misma altura sobre el nivel de referencia.

   (a) El tiempo de descenso es el mismo a lo largo de todas las cuerdas de un círculo vertical que terminan en el punto más bajo de un círculo.
   (b) Si un cuerpo se acelera uniformemente durante un intervalo de tiempo dado, y entonces se desvía para que se mueva uniformemente con la velocidad adquirida, durante otro intervalo de tiempo igual se moverá uniformemente a través del doble de la distancia que recorrió bajo la aceleración inicial.

7. Las componentes vertical y horizontal de un movimiento compuesto son independientes; de aquí que un cuerpo (por ejemplo, un proyectil) pueda tener una componente de movimiento horizontal uniforme y una vertical de movimiento uniformemente acelerado, al ser la una independiente de la otra.

8. La trayectoria de un proyectil (despreciando el factor de la resistencia del aire) es una parábola. La razón es que el movimiento horizontal hacia adelante es uniforme, y el movimiento vertical es uniformemente acelerado. En coordenadas rectangulares, $x = V_0T$ e $y = \frac{1}{2} AT^2$. Como V_0 y $\frac{1}{2} A$ son constantes, digamos c y k, estas ecuaciones se transforman en $x = cT$ e $y = kT^2$, y, por consiguiente, $\frac{x^2}{c^2} = T^2$ e $\frac{y}{k} = T^2$, de donde $y = Kx^2$ (donde $K = \frac{k}{c^2}$), que es la ecuación de una parábola.

9. Galileo dijo que el movimiento puede ser un «estado» semejante a un «estado de reposo», lo que equivale a decir que un movimiento puede continuar indefinidamente de y por sí mismo, sin la mediación de fuerza externa alguna. El concepto de «estado de movimiento» fue desarrollado por Descartes y se convirtió en una pieza angular del edificio de la mecánica racional de Newton.

Podemos comprobar la validez de la «regla de la doble distancia» (6b) de Galileo usando sencillas operaciones algebraicas. En un movimiento uniformemente acelerado durante un tiempo T,

$$V = AT$$

$$D = \frac{1}{2} AT^2$$

Transcurrido el tiempo T, se permite que el cuerpo comience a moverse uniformemente con la velocidad adquirida V durante otro intervalo de tiempo igual a T. La distancia que recorrerá es

$$\text{«distancia»} = VT.$$

Pero como

$$V = AT$$

se sigue que

$$\text{«distancia»} = (AT) \times T = AT^2.$$

La cantidad AT^2 es el doble de $\frac{1}{2} AT^2 = 2\left(\frac{1}{2} AT^2\right) = 2D$.

En uno de sus primeros manuscritos, tal como lo interpreta Stillman Drake, Galileo intentó aplicar este resultado correcto al caso de una bola que rueda hacia abajo por un plano inclinado y es luego desviada horizontalmente por un deflector curvo. Las distancias observadas no coincidieron con las calculadas. La razón es clara para nosotros. Hubiera habido acuerdo si se hubiese tratado de un deslizamiento sin fricción por el plano inclinado, como podría ser el caso del *deslizamiento* de un bloque de hielo seco que flotara sobre un colchón de dióxido de carbono gaseoso, o un trozo de hielo ordinario deslizándose por un plano inclinado muy caliente. Pero aparentemente Galileo había estado experimentando con una bola que rodaba sobre un plano inclinado; no sabía que encontraría una gran discrepancia a causa del hecho de que el movimiento y energía de la bola no son traslacionales, sino que incluyen la rotación (un factor de dos séptimos del movimiento).

Apéndice 11

LA DEUDA DE NEWTON CON HOOKE: EL ANALISIS DEL MOVIMIENTO ORBITAL CURVILINEO

En un áspero debate, en el cual Hooke buscaba que Newton reconociera su anticipación de la ley de gravedad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, Newton comentó la contribución real de Hooke a su pensamiento. La contribución no consistió en que éste sugiriera la ley del inverso del cuadrado, la cual Newton correctamente pensaba que se seguía de una forma bastante simple (cuanto menos para órbitas circulares) del análisis del movimiento circular, una vez conocida la ley v^2/r. Lo que Hooke enseñó a Newton era mucho más fundamental, a saber, la forma correcta de analizar el movimiento curvilíneo.

En 1679 Hooke (nombrado recientemente secretario de la Royal Society de Londres) escribió a Newton una carta amistosa, expresando su esperanza de que éste enviase a la Sociedad algunas comunicaciones científicas. En esa ocasión, Hooke solicitó a Newton que hiciera un comentario sobre lo que Hooke llamó una «hipótesis... mía... de componer los movimientos celestes de los planetas a partir de un movimiento directo por la tangente y un movimiento atractivo hacia el cuerpo central». En su respuesta, Newton introdujo otra cuestión, pero no discutió la «hipótesis» de Hooke. En una carta posterior (6 de enero de 1680), Hooke escribió sobre «mi suposición» relativa a la fuerza de atracción que mantiene a los planetas en sus órbitas: esta «atracción siempre está en una proporción duplicada a la distancia desde el centro recíprocamente, y consiguientemente... la velocidad será... como Kepler supone recíprocamente a la distancia». Hablar de la atracción como en «una proporción duplicada a la distancia... recíprocamente» es una antigua forma de decir que la atracción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Se supone aquí que la velocidad es inversamente proporcional a la distancia. Hooke le subrayó a Newton que era importante resolver los problemas del movimiento planetario y del movimiento de la Luna, puesto que tal conocimiento podía llevar a resolver el problema de la longitud en el mar, el cual «será de gran interés a la humanidad». Hooke estaba *tan ufano* de su carta a Newton que la leyó públicamente en una reunión de la Royal Society. En una carta posterior (17 de enero) reiteró su «suposición» de «una fuerza atractiva central» y sugirió que el «excelente método» de Newton podría «fácilmente» permitirle «encontrar lo que esa curva debe ser» como resultado de esta fuerza y «sugerir una razón física de esta proporción».

En una de las respuestas de Newton a Hooke, afirmó clara y simplemente que no había oído hablar nunca de la «hipótesis» de Hooke de componer movimientos orbitales a partir de un movimiento tangencial y «un movimiento atractivo hacia el cuerpo central». Sabemos que Newton mismo había pensado en un tipo de fuerza centrífuga, es decir, una fuerza asociada con lo que parece una tendencia de todos los cuerpos que se mueven sobre curvas a empujar o ser empujados hacia afuera, lejos del centro.

El análisis de Hooke contiene la clave para el estudio de los movimientos celestes, y se tornó central para el desarrollo de la mecánica celeste de Newton en los *Principia*. En muchos documentos, Newton admitió que lo que le inició en este tema fue su correspondencia con Hooke. Newton le dio un nombre a la fuerza dirigida centralmente: «centrípeta». Lo hemos utilizado desde entonces. El tipo de análisis que hizo Newton, empleando lo que aprendió de Hooke, se muestra en la figura 32 de la página 172 y en la figura 31 de la página 166.

Al parecer, Newton elaboró su primer ensayo sobre mecánica celeste tras la correspondencia con Hooke en 1679-80. Fue a esto a lo que se refirió cuando le contó a Halley, durante su última visita en 1684, que había calculado la órbita de un planeta bajo la acción de una fuerza como la inversa del cuadrado. Pero Newton no necesitó que Hooke le dijera que la fuerza varía como el inverso del cuadrado de la distancia. Esto se seguía del álgebra más sencilla (véanse las págs. 170-71), una vez que se sabía que la fuerza en un movimiento circular es proporcional a v^2/r; cuanto menos, esto es así para órbitas circulares, y no tenía mucho de conjetura el que lo fuera también para elipses. Pero, como Newton supuso bastante correc-

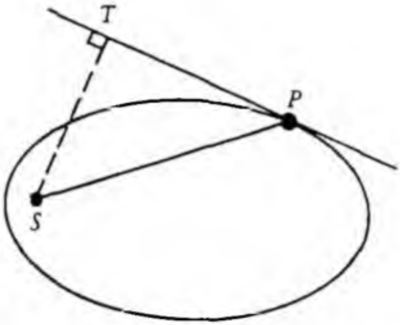


FIGURA 35

tamente, una cosa es hacer una buena conjetura y otra encontrar una verdad matemática y sus consecuencias. Es fácil hacer la primera, pero difícil hacer la última. El mismo había conjeturado que la fuerza podría ser como la inversa del cuadrado, pese a que había estado considerando infructuosamente una fuerza centrífuga en lugar de una centrípeta. Pero conocía la ley v^2/r mucho antes de que Huygens la publicara en 1673.

Newton era plenamente consciente de que Hooke no había entendido completamente aquello sobre lo que estaba escribiendo. A pesar de su perspicaz análisis del movimiento curvilíneo, cometió un importante error al concluir que la velocidad debería ser inversamente proporcional a la distancia. Como Newton probó fácilmente, la velocidad es inversamente proporcional a la perpendicular a la tangente. Supóngase en la figura un planeta en P. Lo que Hooke decía equivale a la afirmación de que la velocidad en P es inversamente proporcional a la distancia al Sol SP, es decir,

$$v \propto \frac{1}{SP}$$

pero Newton decía, en cambio, que la velocidad es inversamente proporcional a ST, el segmento trazado desde el Sol S perpendicularmente al punto T sobre la tangente a la órbita en P,

$$v \propto \frac{1}{ST}.$$

La ley de Hooke sólo se cumple en los ápsides. Además, su ley de la velocidad no concuerda con la ley de las áreas de Kepler. El mismo Kepler averiguó esto más tarde, tras lo cual abandonó la ley de la velocidad como la inversa de la distancia, de la que todavía pensaba Hooke que era una ley válida para el movimiento orbital planetario.

Por tanto, Newton juzgó correctamente que, en realidad, Hooke no entendía las consecuencias de su conjetura de que la fuerza atractiva varía como el inverso del cuadrado de la distancia, y que, por consiguiente, no merecía el reconocimiento por la ley de la gravitación universal. Este juicio podría haberse visto reforzado por el hecho de que Newton era consciente de que no necesitaba que Hooke le sugiriera el carácter inversamente proporcional al cuadrado de la fuerza. La reclamación de Hooke de la ley de la inversa del cuadrado ha enmascarado la deuda mucho más fundamental de Newton hacia él, el análisis del movimiento orbital curvilíneo. Reclamando demasiado mérito, Hooke se negó eficazmente a sí mismo el mérito que se le debía por una idea tan fructífera. (Para más información, véase mi *The Newtonian Revolution* [Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press, 1980, 1983]; traducida al castellano: *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas* [Madrid, Alianza, 1983], secs. 5.4, 5.5.)

Apéndice 12

LA INERCIA DE PLANETAS Y COMETAS

La afirmación de Newton de que el movimiento de los planetas y cometas ilustra el principio de inercia puede parecer un enigma, puesto que su movimiento es curvo. Newton supuso que sus lectores entenderían que tal movimiento tenía dos componentes: un movimiento lineal inercial a lo largo de la tangente a la curva y un movimiento continuamente acelerado «de caída» hacia el centro (centrípeto) que mantiene al movimiento sobre la curva en vez de alejarse en la dirección de la tangente. Como el movimiento de los planetas y cometas se ha mantenido durante mucho tiempo (sin disminuir por la fricción), e igualmente proseguirá durante largo tiempo, la componente tangencial de su movimiento orbital constituye el mejor ejemplo de un movimiento inercial que continúa incesantemente sin disminución sensible. Los movimientos terrestres, tales como los de los proyectiles, no son buenos ejemplos porque se trata de movimientos retardados por la fricción del aire y no se prolongan demasiado, ya que todos los proyectiles caen finalmente al suelo.

Newton también ilustró el movimiento inercial mediante el giro de una peonza o la rotación de la Tierra. En ambos casos las partículas individuales del cuerpo en rotación tienen una componente tangencial lineal de movimiento inercial, pero a causa de la fuerza de cohesión que mantiene unidas a estas partículas, no se alejan en la dirección de la tangente. De hecho, sabemos por la experiencia cuán correcto es este análisis, puesto que muchos cuerpos pueden hacerse girar tan rápidamente que sus partes se alejen, deshaciéndolos;

el motivo es que sus partes componentes poseen una velocidad tangencial tan grande que la fuerza de cohesión ya no es lo bastante fuerte como para mantenerlas moviéndose en una trayectoria circular. La situación sería análoga si la Luna sufriera súbitamente un gran incremento de velocidad. En este caso, la fuerza requerida para que la Luna cayera lo suficientemente rápido como para mantenerse en su órbita debería aumentar (de acuerdo con la ley de v^2/r). Esta fuerza se tornaría mayor que la fuerza gravitatoria que ejerce la Tierra en su atracción sobre la Luna, y ésta comenzaría a alejarse en dirección tangencial.

Apéndice 13

PRUEBA DE QUE DE LA LEY DE LA INVERSA DEL CUADRADO SE DEDUCE UNA ORBITA PLANETARIA ELIPTICA

En una serie de proposiciones (props. 11-13) del Libro Primero de los *Principia,* Newton prueba que si un planeta se mueve en una órbita describiendo una elipse, una parábola o un hipérbola la fuerza varía inversamente al cuadrado de la distancia a un foco. Para hacerlo invoca la ley de las áreas (props. 1, 2, 3) y una medida matemática de una fuerza muy original (prop. 6). Entonces, en la primera edición, en el corolario 1 a las proposiciones 11-13, Newton afirma, pero no prueba, la recíproca de las proposiciones 11-13: dada una fuerza que varía con la inversa del cuadrado, la órbita será una sección cónica. En la subsiguiente proposición 17 Newton muestra qué condición lleva a un círculo, una elipse, una parábola o una hipérbola, cuando la fuerza varía como el inverso del cuadrado de la distancia. En la segunda edición de los *Principia* añade los pasos de la demostración del corolario a las proposiciones 11-13.

Muchos autores han confundido las dos proposiciones: (a) que una sección cónica implica una fuerza que varía como la inversa del cuadrado, y (b) que una fuerza que varía como la inversa del cuadrado implica una sección cónica. La demostración de una no implica por sí misma, sin más, la prueba de la otra. Newton mismo era plenamente consciente de que una demostración de que «A implica B» no prueba que «B implica A». Por ejemplo, en la proposición 1 de los *Principia* prueba que si una fuerza centrífuga actúa sobre un cuerpo que posee una componente inicial de movimiento inercial, se cumple la ley de las áreas; pero luego introduce la proposición 2, para probar la conversa, que la ley de las áreas implica una fuerza centrípeta. En la primera edición de los *Principia* Newton realmente no suministró su demostración de que una fuerza que varía con la inversa del cuadrado implica una órbita planetaria elíptica, pero esto no significa necesariamente que no pensara que se precisaba tal demostración, o que no la tuviese en mente. Los *Principia* es un libro muy idiosincrásico. Mucho de lo que Newton omitió como «obvio» está lejos de parecer evidente a sus lectores, y, sin embargo, hay otras ocasiones en que se extiende ampliamente sobre lo que nos parece obvio o trivial.

Lo que Newton parece haber probado tras su correspondencia con Hooke (véase el apéndice 11) es que una órbita elíptica implica una ley de inversa del cuadrado, y el tratado que escribió tras la visita de Halley en 1684 prueba esta proposición. Este es también el caso en la primera edición de los *Principia.* Y, no obstante, de acuerdo con la narración de Conduitt de la visita de Halley, éste preguntó a Newton cuál podría ser la órbita de un planeta, dada una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (no qué fuerza podría ser, dada una órbita elíptica), y Newton respondió que la trayectoria sería una elipse y que él lo había «calculado». Desde luego, se trata del recuerdo de Conduitt de lo que Halley le contó acerca de una conversación con Newton sostenida muchos años antes. No podemos estar seguros de que éste sea un registro exacto de lo que Halley o Newton dijeron en esa famosa ocasión. En un intento posterior de explicar la historia de su evolución, Newton dijo que en 1676-77 (un error por 1679-80) «halló la proposición de que por una fuerza centrífuga [léase fuerza centrípeta] recíprocamente como el cuadrado de la distancia un planeta debe girar en una elipse alrededor del centro de la fuerza situado en el ombligo inferior [o foco] de la elipse, describiendo mediante un radio trazado a dicho centro áreas proporcionales a los tiempos».

Son posibles varias conclusiones, entre ellas: (1) Newton probó que la elipse implica una fuerza como la inversa del cuadrado y erróneamente pensó que había probado también la conversa; (2) Newton probó que la elipse implica una fuerza como la inversa del cuadrado y desarrolló (mentalmente o sobre el papel) la demostración de la conversa; (3) Newton no comprendió lo que había probado y pensó que había demostrado que una fuerza como la inversa del cuadrado implica una órbita planetaria elíptica; (4) Newton probó que la elipse implica una fuerza como la inversa del cuadrado y simplemente dio por supuesto que era posible probar la conversa. No es útil hacer hipótesis acerca de la historia posible en ausencia de cualquier elemento de juicio. Pero no es muy probable, en mi opinión y en la de otros estudiosos de Newton, que éste hubiera cometido la gran equivocación de (1), una obvia falacia lógica. Del mismo modo es impensable que un matemático de la capacidad de Newton pudiera haber cometido el error de (3). Pero (2) y (4) son posibles. No tenemos noticia de que Newton fuera criticado por no haber suministrado, en la primera edición de los *Principia*, una demostración de que una ley de la inversa del cuadrado implica una órbita elíptica, y que, por consiguiente, añadiera un corolario a las proposiciones 11-13 en la segunda edición, conteniendo tal demostración [1]. Cuanto menos en una ocasión, Newton mismo discutió este asunto. En una historia inédita del desarrollo de los *Principia* escribió: «Siendo muy obvia la demostración del primer corolario de las proposiciones 11, 12 y 13, la omití en la primera edición...»

Los hechos, pues, son que en la primera edición Newton afirmó (sin dar la demostración) que la ley como la inversa del cuadrado implica una órbita elíptica; en la segunda edición suministró tal demostración. Sólo podemos conjeturar o hacer hipótesis respecto de esta secuencia. Como dijo Newton, no es conveniente que edifiquemos el conocimiento basándonos en hipótesis.

---

[1] Los especialistas están en deuda con Robert Weinstock (*American Journal of Physics* 50, pp. 610-617) por haber llamado su atención sobre este problema. Pero hay poco acuerdo con su posición extrema, que corresponde a la posibilidad 1. Es una cuestión completamente distinta si la prueba que da Newton es o no rigurosa o aun digna de confianza; el Prof. Weinstock sostiene que no es en absoluto una demostración legítima.

Las afirmaciones autobiográficas de Newton están recogidas (y transcritas) en el apéndice I de mi *Introduction to Newton's Principia*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1971. Fueron redactadas durante las disputas de Newton sobre prioridad para establecer lo que por otros elementos de juicio sabemos que es una incorrecta cronología de descubrimiento, y por tanto deben tomarse con cierta precaución. Sobre esta cuestión, véase mi *The Newtonian Revolution*, Cambridge y Nueva York, Cambridge University Press, 1980, 1983, pp. 248-249. [Trad. cast., *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, Madrid, Alianza, 1983.]

Apéndice 14

NEWTON Y LA MANZANA: EL DESCUBRIMIENTO DE NEWTON DE LA LEY v^2/r

Newton dedicó mucho tiempo y energías a elaborar y presentar una cronología de sus descubrimientos que situaría a muchos de ellos en una fecha anterior a la que podrían garantizar los principales documentos históricos. La razón para su imposición sobre la historia de una cronología imaginada fue quizás la de fechar sus descubrimientos tan tempranamente que pudiera combatir con éxito a sus oponentes en las controversias que surgieron sobre la prioridad.

Newton pudo haber inventado la historia de la manzana, la cual podría fecharse a mediados del decenio de 1660, cuando declaró que había hecho la prueba de la Luna. Sabemos que él mismo contó la historia de la caída de la manzana, el origen de la tan repetida afirmación de que fue lo que motivó su idea de extender la gravedad a la Luna. Pudo también haber llegado a creer, en años posteriores y mucho después del suceso, que había calculado la caída de la Luna en el decenio de 1660, y hallado que la prueba concordaba aproximadamente. Pero lo que realmente estaba calculando no era la caída de la Luna, como en la famosa prueba de la Luna en el escolio a la proposición 4 del Libro Tercero de los *Principia*, sino algo bastante diferente [1].

[1] Acerca de los cálculos de Newton y su significado, véase mi monografía sobre «The *Principia,* Universal Gravitation, and the "Newtonian Style"», en Zev Bechler, ed., *Contemporary Newtonian Research,* Dordrecht (Holanda) y Boston, D. Reidel Publishing Co., 1982); y la sec. 5.3 de mi *The Newtonian Revolution.*

Por lo que respecta a su temprano descubrimiento de la ley v^2/r del movimiento circular uniforme, pisamos terreno más firme. En ese momento Newton estaba buscando una medida del «esfuerzo centrífugo»; sólo más tarde, en 1680 (véase el apéndice 11), se convirtió por obra de Hooke al concepto de la fuerza centrípeta. Después de que Halley informara a Newton de que Hooke deseaba que se le reconociese su contribución a la ley de la inversa del cuadrado, Newton envió a Halley un bosquejo de una demostración, basada en su investigación de unos veinte años antes, para que fuera añadida al final del escolio que seguía a la proposición 4 del Libro Primero de los *Principia*. Newton quería que todos los lectores tuviesen claro que conocía la ley v^2/r antes (cuanto menos, una década antes) de su publicación por Christiaan Huygens en su *Horologium oscillatorium* de 1673. Como la proposición 4 trata del movimiento circular uniforme, Newton estaba diciendo en realidad que hacía largo tiempo que había averiguado que, en este caso, la fuerza es como v^2/r, y de aquí sería fácil mostrar (con un poco de álgebra y la tercera ley de Kepler) que la fuerza es como $1/r^2$. De este modo, no hubiera necesitado que Hooke le hablara veinte años antes acerca de una fuerza como $1/r^2$.

En 1960, John Herivel analizó algunos de los primeros manuscritos de Newton sobre la fuerza y el movimiento, escritos por éste en un *Waste Book* a principios de 1665 o poco después. Herivel mostró que en este documento Newton había derivado la ley v^2/r de una forma muy original [2]. Por consiguiente, no cabe duda de que Newton había encontrado esta ley mucho antes y con completa independencia de Huygens.

[2] Véase John H. Herivel, «Newton's Discovery of the Law of Centrifugal Force», *Isis* 51 (1960), 546-563; también de Herivel, *The Background to Newton's Principia,* Oxford, Clarendon Press, 1965, 7-13.

Apéndice 15

NEWTON Y LAS MASAS «GRAVITATORIA» E «INERCIAL»

En la deducción de las páginas 173-75 se dan dos ecuaciones para la fuerza que actúa sobre un objeto terrestre, tal como una manzana. Una es la ecuación *gravitatoria,*

$$F = G\,\frac{mM_t}{R_t^2}$$

o bien,

$$P = G\,\frac{mM_t}{R_t^2}$$

y la otra es la ecuación *dinámica* o *inercial,*

$$m = \frac{F}{A}$$

o bien,

$$F = mA$$

la cual, en el caso del peso, se convierte en

$$P = mA.$$

Obsérvese que en el segundo grupo de ecuaciones la cantidad m es una medida de la inercia del cuerpo, es decir, de la resistencia *inercial* (F/A) del cuerpo a ser acelerado o sufrir un cambio en su estado de movimiento o de reposo. Para ser precisos, vamos a llamar a esta cantidad con un nombre especial del siglo XX, «masa inercial», y a remplazar el símbolo m por m_i para denotar esta cualidad inercial. Las ecuaciones finales de más arriba pueden reescribirse ahora como

$$F = m_i A$$

$$P = m_i A.$$

Vamos a considerar ahora la cantidad m (o la masa) que aparece en el primer grupo de ecuaciones

$$F = G \frac{m M_t}{R_t^2}.$$

Aquí m no tiene una conexión obvia con la resistencia *inercial* del cuerpo a ser acelerado, a experimentar un cambio en su estado. Más bien, esta cantidad es una medida (o es el factor determinante) de la respuesta *gravitatoria* del cuerpo a la Tierra. O, para usar el lenguaje de la física actual, es una medida (o el determinante) de la respuesta del cuerpo al campo gravitatorio de la Tierra (o a cualquier otro campo gravitatorio). De este modo puede dársele el nombre del siglo XX de «masa gravitacional». De acuerdo con esto, podemos usar el símbolo m_g para esta cantidad. Las primeras dos ecuaciones se transforman ahora en

$$F = G \frac{m_g M_t}{R_t^2}$$

$$P = G \frac{m_g M_t}{R_t^2}.$$

Cuando igualamos las dos expresiones para W, tenemos

$$m_i A = G \frac{m_g M_t}{R_t^2}.$$

Cancelar aquí el factor m equivale a suponer que

$$m_i = m_g$$

un paso que requiere un análisis adicional. ¿Es m_i siempre igual a m_g?

Ambas variedades de masa —masa *gravitacional* y masa *inercial*— corresponden a nuestro concepto intuitivo de «cantidad de materia.» En el caso de una sustancia pura tal como el aluminio, ambas serían proporcionales al volumen de aluminio (el cual sería una medida de la cuantía o «cantidad» de aluminio). El problema conceptual puede enunciarse como sigue: ¿Existe alguna razón lógica por la cual la respuesta de un cuerpo al campo gravitatorio (o su masa gravitacional) deba ser la misma que su resistencia a ser acelerado por fuerzas tanto no gravitatorias como gravitatorias (o su masa inercial)? De hecho, en el marco de la física newtoniana o «clásica», la respuesta es un no categórico. Sólo en la física post-newtoniana o relativista se da una necesaria «equivalencia» entre masa gravitacional y masa inercial. ¿Cómo, entonces, se enfrentó Newton a este problema?

Antes de presentar la solución de Newton, observemos el alto nivel de reflexión al que conduce su física. Mientras que Galileo se ocupó del peso de un cuerpo, Newton introdujo un muy diferente y moderno concepto de masa. Este concepto es original de Newton, si bien (como en el caso de cualquier nuevo concepto científico) se pueden encontrar algunos antecedentes —por ejemplo, en los escritos de Kepler sobre *moles* (un tipo de «voluminosidad») y en ciertas discusiones de Huygens.

Si la equivalencia entre las masas inercial y gravitacional no se sigue de la lógica, y no constituye una parte integral de la teoría, entonces la única forma en que se puede conocer es mediante experimentos. Newton reconoció por primera vez la necesidad de efectuar tal experimento en algún momento de 1685, tras completar la primera versión de su tratado *De motu*. El experimento utilizaría dos péndulos iguales, con lentejas conteniendo diversos tipos de materia; cualquier variación en la proporción de la masa inercial a la gravitacional se mostraría como una diferencia en el período de oscilación. Poco después, en un conjunto de *De motu corporum definitiones* [*Definiciones relativas al movimiento de cuerpos*], hace una lista de las sustancias con las que ha realizado el experimento: oro, plata, plomo, vidrio, arena, sal común, agua, madera y trigo. En las versiones preliminar y final del Libro Tercero de los *Principia* (prop. 6 del Libro Tercero, sec. 9 del *Sistema del mundo*), Newton describe con detalle el experimento. Había construido dos largos péndulos de la misma longitud, con lentejas a modo de vasijas en las que podía situar cantidades iguales de estas nueve sustancias. Como los péndulos tenían lentejas idénticas, hallaban el mismo factor de resistencia del aire. Había demostrado matemáticamente que la existencia del mismo período de oscilación para estas lentejas que contenían cantidades iguales de las nueve sustancias probaba que sus pesos eran proporcionales a sus cantidades de materia. Por inducción simple, Newton llegó a la ley general.

Newton describe la materia en términos de su *peso* y de su *cantidad;* esta última constituye, para él, la inercia de la materia. Las expresiones de masa *gravitacional* e *inercial* fueron introducidas en la física por los escritos de Albert Einstein sobre relatividad. Newton, además, no desarrolló las ecuaciones en la forma en que yo lo he hecho. Pero, esencialmente, procedió a desarrollar esta cuestión en la forma que estas ecuaciones simbolizan. Concluyó así que sus experimentos con el péndulo habían mostrado con gran exactitud los resultados durante largo tiempo observados (remontándose a los experimentos de la «torre» de Galileo) de que, aparte del pequeño factor de la resistencia del aire, todos los tipos de cuerpos pesados caen a tierra, desde alturas iguales, en tiempos iguales.

Una de las razones por las que es tan importante el concepto de masa de Newton es que la masa es una propiedad fundamental o permanente de los cuerpos, mientras que el peso es una propiedad accidental. La física de Newton mostró, por ejemplo, que el peso de un cuerpo (o el efecto sobre un cuerpo de la atracción de la Tierra) podía variar con su posición sobre la misma, al ser el peso una propiedad calculable de la latitud geográfica. Un cuerpo, por otra parte, pesaría menos en el espacio exterior que en la superficie de la Tierra, de acuerdo con la ley de la inversa del cuadrado. Además, el «peso» de un cuerpo hacia la Luna sobre la superficie de ésta sería notablemente diferente del que tendría sobre la superficie de la Tierra. Pero sea cual fuere el lugar en que un cuerpo pueda hallarse, su masa (de acuerdo con la física newtoniana) es siempre la misma —tanto su masa inercial (su resistencia a ser acelerado) como su masa gravitacional—. Además, la masa es una propiedad de importancia a considerar en relación con los cuerpos del espacio exterior —Sol, planetas, satélites y estrellas— aun cuando su «peso» (en el sentido de la atracción de la Tierra sobre ellos) no tiene importancia. Desplazando las discusiones de la física desde el peso a la masa, Newton hizo posible una ciencia universal en lugar de una ciencia terrestre local.

Muchos lectores saben que, en física relativista, la masa ya no se concibe como una constante independiente de un cuerpo. En vez de ello, resulta estar relacionada con la velocidad del cuerpo relativa al sistema de referencia. Pero para cuerpos ordinarios (es decir, aquellos cuyas velocidades son pequeñas con respecto a la velocidad de la luz), la diferencia entre las dos es despreciable.

Apéndice 16

LOS PASOS DE NEWTON HACIA LA GRAVITACION UNIVERSAL

En el otoño de 1684, después de la visita de Halley, Newton compuso su tratado *De motu,* en el que probó la siguiente proposición: El movimiento en una elipse de acuerdo con la ley de las áreas requiere que una fuerza central o centrípeta inversamente proporcional al cuadrado de la distancia esté dirigida hacia el punto con respecto al cual se calculan las áreas iguales. Puesto que los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en un foco, y puesto que una recta trazada desde el Sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales, Newton concluyó: 1) que debe existir una fuerza dirigida al Sol desde cada planeta, y 2) que esta fuerza dirigida al Sol varía inversamente al cuadrado de la distancia. Con evidente orgullo por el descubrimiento de la ley de la fuerza planetaria, escribió que había probado que, para citar sus propias palabras, «los planetas mayores giran en elipses con un foco en el centro del Sol, y los radios trazados [desde los planetas] al Sol describen áreas proporcionales a los tiempos, enteramente como supuso Kepler...».

En realidad, Newton no había probado esta proposición, ni continuó pensando en ella durante mucho tiempo. Estrictamente hablando, es falsa. Como Newton comprendió rápidamente, los planetas no se mueven exactamente de acuerdo con la ley de las áreas en sencillas órbitas elípticas keplerianas con el Sol en un foco. En lugar de esto, el foco se halla en el centro de masas común, porque no sólo el Sol atrae a cada planeta, sino también cada planeta atrae al Sol (y los planetas se atraen entre sí). Si Newton hubiera formulado ya su principio de gravitación universal, no habría propuesto, y aceptado que había probado, esta proposición errónea.

Newton se dio cuenta muy rápidamente de que no había probado que los planetas se mueven precisamente de acuerdo con la ley de órbitas elípticas y la ley de las áreas. Había hallado tan sólo que estas dos leyes planetarias de Kepler eran válidas para un «sistema» de un cuerpo: una única masa puntual moviéndose con una componente inicial de movimiento inercial en un campo de fuerzas centrales. Reconoció que el sistema de un cuerpo no corresponde al mundo real, sino a una situación artificial, la cual es más fácil de investigar matemáticamente. El sistema de un cuerpo reduce a la Tierra a una masa puntual y al Sol a un centro de fuerzas inmóvil.

En su júbilo prematuro, Newton había olvidado tomar en consideración lo que hoy conocemos como la tercera ley newtoniana del movimiento: que por cada acción debe existir una reacción igual y opuesta. En otras palabras, que si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre un cuerpo B, entonces el cuerpo B debe ejercer simultáneamente una fuerza igual y opuesta sobre el cuerpo A. En el caso del Sol y un planeta, digamos la Tierra, esta ley implica que si el Sol ejerce una fuerza sobre la Tierra para mantenerla en su órbita, entonces la Tierra debe ejercer una fuerza igual sobre el Sol. En teoría, cada uno de estos dos cuerpos atrae al otro, con el resultado de que cada uno debe moverse en una órbita alrededor de su centro de gravedad común. Como la masa de la Tierra es minúscula comparada con la masa del Sol, su centro de gravedad común está prácticamente en el centro del Sol, y el movimiento del Sol es virtualmente inexistente. Pero éste no es el caso para el Sol y Júpiter, el planeta más masivo del Sistema Solar, ni para la Tierra y la Luna.

El desarrollo del pensamiento de Newton sobre la acción y reacción tras haber completado el primer borrador del *De motu* se expone en las secciones que abren el Libro Primero de los *Principia*. En la introducción a la sección 11, Newton explica que se ha limitado hasta el momento a una situación que «es difícil que exista en el mundo real», a saber, los «movimientos de cuerpos atraídos hacia un centro inmóvil». La situación es artificial porque «las atracciones por lo general están dirigidas hacia los cuerpos y —por la tercera ley del movimiento— las acciones de cuerpos atrayentes y atraídos son siempre mutuas e iguales». Como resultado, «si hubiese dos cuerpos, ni el atrayente ni el atraído podrían estar en reposo». Antes bien, «ambos cuerpos (por el corolario cuarto de las leyes) girarán alrededor de un centro común, como por la atracción mutua».

Newton había visto que si el Sol atrae a la Tierra, ésta debe también atraer al Sol con una fuerza de igual magnitud. En este sistema de dos cuerpos, la Tierra no se mueve en una órbita sencilla alrededor del Sol. En lugar de esto, el Sol y la Tierra se mueven cada uno alrededor de su centro de gravedad mutuo. Una consecuencia adicional de la tercera ley del movimiento es que cada planeta es tanto un centro de fuerza atrayente como un cuerpo atraído; se sigue que un planeta no sólo atrae y es atraído por el Sol, sino que también atrae y es atraído por cada uno de los otros planetas. Newton ha dado aquí el paso trascendental desde un sistema interactivo de dos cuerpos a un sistema interactivo de muchos cuerpos.

En diciembre de 1684, Newton completó un borrador revisado del *De motu* que describía el movimiento planetario en el contexto de un sistema interactivo de muchos cuerpos. A diferencia del borrador anterior, el revisado concluía que «los planetas no se mueven exactamente en elipses ni describen dos veces la misma órbita». Esta conclusión llevó a Newton al siguiente resultado: «Hay tantas órbitas para un planeta como revoluciones describe, como en el movimiento de la Luna, y la órbita de cualquier planeta depende del movimiento combinado de todos los planetas, sin contar las acciones de todos éstos entre sí.» Entonces escribe: «Considerar simultáneamente todas estas causas de movimiento y definir estos movimientos mediante leyes exactas que permitan un cálculo accesible excede, si no me equivoco, la fuerza del entero intelecto humano.»

No existen documentos que indiquen cómo, en el mes o así transcurrido entre la redacción del primer borrador del *De motu* y su revisión, llegó Newton a percibir que los planetas actúan gravitacionalmente uno sobre otro. Con todo, las frases citadas más arriba expresan esta percepción en un lenguaje inequívoco: *eorum omnium actiones in se invicem* («las acciones de todos ellos unos sobre otros»). Una consecuencia de su atracción gravitatoria mutua es que ninguna de las tres leyes de Kepler es estrictamente cierta en el mundo de la física, siendo sólo verdaderas en un constructo matemático en el cual masas puntuales que no interactúan entre sí orbitan sobre un centro matemático de fuerzas o un cuerpo atrayente estacionario. La distinción que traza Newton entre la esfera de las matemáticas, en la cual las leyes de Kepler son verdaderamente leyes, y la esfera de la física, en la cual son sólo «hipótesis», o aproximaciones, es una de las características revolucionarias de la dinámica celeste newtoniana.

En la primavera de 1685, unos pocos meses después de revisar el *De motu,* Newton estaba cerca de terminar el primer borrador de los *Principia.* En la versión inicial de lo que iba a constituir un segundo libro, «El sistema del mundo», describió los pasos que le llevaron al concepto de interacciones gravitacionales planetarias. En estos pasos, la tercera ley del movimiento desempeña el papel principal. No existen razones para pensar que éstos no son los mismos pasos que le llevaron al mismo concepto unos pocos meses atrás, cuando revisó el *De motu*.

He aquí dos fragmentos del primer borrador del *Sistema del mundo* (recientemente traducido del latín por Anne Whitman y el autor) * que ponen de manifiesto el papel crucial de la tercera ley del movimiento:

20. *Convergencia de Analogías.*

Puesto que la acción de la fuerza centrípeta sobre el cuerpo atraído, a distancias iguales, es proporcional a la cantidad de materia de este último, es razonable también que sea *proporcional a la cantidad de materia* del cuerpo que atrae. Así pues, la acción es mutua, y hace que los cuerpos se atraigan mutuamente con acciones mutuas (por la Ley 3 del Movimiento) y por tanto debe ser conforme a cada uno de los dos cuerpos. Puede considerarse a un cuerpo como atrayente y al otro como atraído, pero esta distinción es más matemática que natural. En realidad la atracción es de cada cuerpo sobre cada cuerpo y por tanto del mismo género en todos.

21. *Y coincidencia.*

Y por esto es por lo que la fuerza atractiva se halla en cada uno. El Sol atrae a Júpiter y al resto de los planetas. Júpiter atrae a los satélites, y por la misma razón los satélites actúan mutuamente entre sí y sobre Júpiter, y todos los planetas entre ellos. Y aunque las acciones mutuas de dos planetas podrían distinguirse entre sí y ser consideradas como dos acciones mediante las cuales cada uno atrae al otro, *sin embargo, en tanto que son intermedias,* no son dos, sino una operación simple entre dos términos. Por la contracción de un solo cordón interpuesto entre ellos pueden dos cuerpos ser atraídos entre sí. La causa de la acción es doble, claramente la disposición de uno y otro cuerpo; pero en tanto que es entre dos cuerpos, es simple y única. No es una la operación por la que el Sol atrae por ejemplo a Júpiter y otra operación aquella por la que Júpiter atrae al Sol, sino una operación por la que el Sol y Júpiter intentan acercarse entre sí, por la acción por la que el Sol atrae a Júpiter intentan Júpiter y el Sol acercarse entre sí (por la Ley 3 del Movimiento) y por la acción por la que Júpiter atrae al Sol, intentan también Júpiter y el Sol acercarse mutuamente; el Sol, pues, no es atraído hacia Júpiter por una acción doble y tampoco lo es Júpiter hacia el Sol, sino que hay una sola acción intermedia por la que ambos tienden uno hacia otro.

Después, Newton concluyó que «de acuerdo a esta ley todos los cuerpos deben atraerse entre sí». Presentó con orgullo la conclusión y explicó por qué la magnitud de la fuerza atractiva es tan pequeña

* Existe una traducción al castellano, a cargo de E. Rada García: I. Newton, *El sistema del mundo,* Madrid, Alianza Ed., 1983. *(N. del T.)*

que es inobservable. «Es posible», escribió, «observar estas fuerzas tan sólo en los enormes cuerpos de los planetas».

En el Libro Tercero de los *Principia,* que trata también del sistema del mundo, pero de forma algo más matemática, Newton toca esencialmente de la misma manera el tema de la gravitación. Primero, en lo que se denomina la prueba de la Luna, extiende la fuerza del peso, o gravedad terrestre, a la Luna y demuestra que esta fuerza varía inversamente con el cuadrado de la distancia. Entonces identifica esta misma fuerza terrestre con la fuerza del Sol sobre los planetas y la fuerza de un planeta sobre sus satélites. A todas estas fuerzas las denomina ahora gravedad. Con la ayuda de la tercera ley del movimiento transforma el concepto de una fuerza solar sobre los planetas en el de una fuerza mutua entre el Sol y los planetas. Del mismo modo, transforma el concepto de una fuerza planetaria sobre los satélites en el de una fuerza mutua entre los planetas y sus satélites y entre estos últimos. La transformación intelectual final depara el principio universal de que todos los cuerpos interactúan gravitacionalmente.

Podemos ver ahora cómo la imaginación creativa de Newton le dirigió hacia el concepto de la gravitación universal. El mismo argumento que le condujo a las fuerzas interplanetarias puede aplicarse a sistemas de satélites, a la Tierra, y a una manzana. Ya que todas las manzanas deben ser cuerpos que originan una atracción gravitatoria y a la vez reaccionan a una atracción gravitatoria, deben atraerse entre sí. Finalmente esta cadena de razonamientos le lleva a la audaz conclusión de que dos cuerpos cualesquiera, en cualquier lugar del universo, interactúan gravitacionalmente. De este modo, la lógica de la física, guiada por una creativa intuición matemática, produce una ley de fuerza mutua que se aplica a todos los cuerpos, terrestres o celestes, dondequiera que puedan hallarse. Esta fuerza varía inversamente al cuadrado de la distancia y es proporcional a las masas gravitatorias:

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$$

o bien

$$F = G\frac{m_1 m_2}{D^2}$$

donde m_1 y m_2 son las masas, D la distancia entre ellas, y G la constante de la gravitación universal.

Ni que decir tiene que este análisis de las etapas del pensamiento de Newton no minimiza en modo alguno la extraordinaria fuerza de su genio creativo; antes bien, debería hacer plausible este genio. El análisis muestra la fecunda forma de pensar de Newton sobre física, en la cual las matemáticas se aplican al mundo externo tal como es revelado por el experimento y la observación crítica. Esta forma de razonamiento científico creativo, que ha sido denominada «el estilo newtoniano», está fielmente recogida en el título castellano del gran trabajo de Newton: *Principios matemáticos de la filosofía natural*.

GUIA DE LECTURAS ADICIONALES

Los asteriscos señalan los trabajos de los cuales se han tomado las citas, con el permiso de los editores, incluidas en este libro.

Contexto general y ciencia temprana

Marshall Clagett, *Greek Science in Antiquity*. Nueva York, Abelard-Schuman, 1955. Reimp. revisada, Nueva York, Collier Books; Londres, Collier-Macmillan, 1966.

O. Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity*. Princeton, Princeton University Press, 1952; 2.ª ed., Providence, R. I.: Brown University Press, 1957; Nueva York, Harper Torchbooks, 1962. También *Astronomy and History: Selected Essays*. Nueva York y Berlín, Springer-Verlag, 1983.

*Sir Thomas Little Heath, *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus: A History of Greek Astronomy to Aristarchus*. Oxford, Clarendon Press, 1913.

Edward Grant, *Physical Science in the Middle Ages*. Nueva York y Londres, John Wiley & Sons, 1971; Cambridge, Cambridge University Press, 1981. [Trad. cast., *La ciencia física en la Edad Media*. México, FCE, 1976.]

Alistair C. Crombie, *Medieval and Early Modern Science*. 2 vols., 2.ª ed., Garden City, Nueva York, Doubleday Anchor Books, 1959. Publicado también como *Augustine to Galileo*, 1952, 1961, 1979, etc. [Trad. cast., *Historia de la ciencia: De San Agustín a Galileo*, 2 vols., Madrid, Alianza, 1974.]

La revolución científica

Marie Boas, *The Scientific Renaissance 1450-1630*. Nueva York, Harper & Brothers, 1962; Harper Torchbooks, 1966.

mantienen las irregularidades según una ley fija y con renovaciones constantes: lo que no podría suceder si no fueran circulares. Pues el círculo es el único que puede volver a recorrer el camino recorrido. Como, por ejemplo, el Sol, con su movimiento compuesto de círculos, nos trae de nuevo, una vez y otra, la irregularidad de los días y las noches y las cuatro estaciones del año.

De este modo, Kepler estaba comportándose de una forma altamente no-copernicana por no aceptar que las órbitas planetarias son «círculos» o «compuestas de círculos»; además, había llegado en parte a esta conclusión por la reintroducción, en una etapa de su pensamiento, del aspecto de la astronomía ptolemaica que más había objetado Copérnico, el *ecuante*. En su astronomía, Kepler introdujo una sencilla aproximación para ocupar el lugar de la ley de las áreas. Kepler dijo que una línea trazada desde cualquier planeta al foco vacío de su elipse (fig. 28) gira uniformemente, o lo hace muy aproximadamente. El foco vacío, o el punto sobre el cual tal línea giraría describiendo ángulos iguales en tiempos iguales, es el ecuante. (Incidentalmente, podemos observar que este último «descubrimiento» de Kepler no es cierto.)

Desde casi todo punto de vista, las elipses deben haber parecido objetables. ¿Qué tipo de fuerza podría conducir a un planeta a lo largo de una trayectoria elíptica con justamente la variación precisa

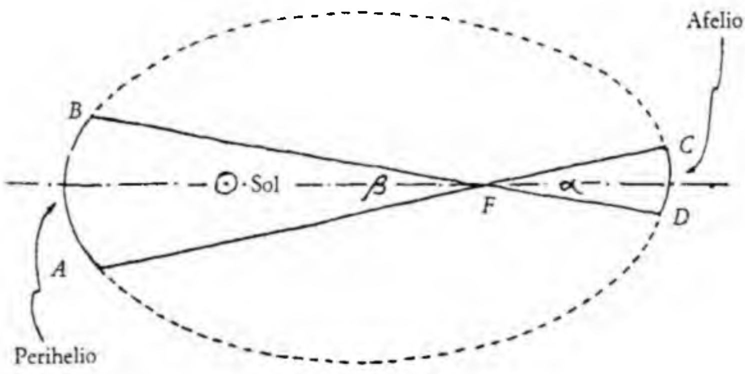


FIG. 28.—*Ley de Kepler del ecuante. Si un planeta se mueve de modo que en tiempos iguales barre ángulos iguales con respecto a un foco vacío en F, recorrerá los arcos AB y CD en el mismo tiempo, puesto que los ángulos α y β son iguales. De acuerdo con esta ley, el planeta se mueve más rápido por el arco AB (en el perihelio) que por el arco CD (en el afelio), como predice la ley de las áreas iguales. No obstante, esta ley es sólo una tosca aproximación. En el siglo XVII se añadieron a la misma ciertos factores de corrección para hacerla dar unos resultados más aproximados.*

de velocidad demandada por la ley de las áreas? No reproduciremos la discusión de Kepler sobre este punto, sino que limitaremos nuestra atención a un aspecto del mismo. Kepler supuso que algún tipo de fuerza o emanación sale del Sol y mueve los planetas. Esta fuerza —a veces denominada una *anima motrix*— no se disemina desde el Sol en todas direcciones. ¿Por qué debería hacerlo? Después de todo, su función es sólo mover los planetas, y todos los planetas se encuentran en, o muy aproximadamente en, un solo plano, el plano de la eclíptica. De aquí Kepler supuso que esta *anima motrix* se diseminaba sólo en el plano de la eclíptica. Había descubierto que la luz, la cual se propaga en todas direcciones desde una fuente luminosa, disminuye en intensidad como el inverso del cuadrado de la distancia; es decir, que si hay una cierta intensidad o brillo a tres metros de una lámpara, el brillo a seis metros de ella será una cuarta parte del anterior, porque cuatro es el cuadrado de dos y la nueva distancia es el doble de la antigua. En forma de ecuación,

$$\text{intensidad} \propto \frac{1}{(\text{distancia})^2}$$

Pero Kepler sostuvo que la fuerza solar no se disemina en todas las direcciones de acuerdo con la ley de la inversa del cuadrado, como lo hace la luz solar, sino sólo en el plano de la eclípica y de acuerdo con una ley bastante diferente. Es a partir de esta doblemente errónea suposición que derivó su ley de las áreas —¡y lo hizo *antes* de haber encontrado que las órbitas planetarias son elipses! La diferencia entre su procedimiento y el que consideraríamos «lógico» es que *no* descubrió primero la trayectoria verdadera de Marte alrededor del Sol, y calculó entonces su velocidad en términos del área barrida por una línea trazada desde el Sol a Marte. Este no es sino un ejemplo de la dificultad en seguir a Kepler a través de su libro sobre Marte.

El logro kepleriano

A Galileo le desagradaba particularmente la idea de que las emanaciones solares o misteriosas fuerzas actuando a distancia pudieran afectar la Tierra o cualquier parte de la Tierra. No sólo rechazó la sugerencia de Kepler de que el Sol puede ser el origen de una fuerza atractiva que mueve la Tierra o los planetas (en la cual estaban basadas las primeras dos leyes de Kepler), sino que también rechazó especialmente la sugerencia de Kepler de que una fuerza lunar o emanación pudiera ser una causa de las mareas. Así, escribió:

Pero entre todos los grandes hombres que han filosofado sobre este notable efecto, estoy más sorprendido con Kepler que con cualquier otro. A pesar de su mente abierta y aguda, y a pesar de que tiene en las puntas de sus dedos los movimientos atribuidos a la Tierra presta su oído, sin embargo, y su aprobación al dominio de la Luna sobre las aguas, y a propiedades ocultas, y a puerilidades de este tipo.

En cuanto a la ley armónica, o tercera ley, podemos preguntar con la voz de Galileo y sus contemporáneos, ¿esto es ciencia o numerología? Kepler ya se había comprometido públicamente con la opinión de que el telescopio revelaría no sólo los cuatro satélites de Júpiter descubiertos por Galileo, sino también dos de Marte y ocho de Saturno. La razón para estos números en particular era que así el número de satélites por planeta se incrementaría de acuerdo con una secuencia geométrica regular: 1 (para la Tierra), 2 (para Marte), 4 (para Júpiter), 8 (para Saturno). ¿No era la relación distancia-período de Kepler algo del mismo puro malabarismo de número antes que verdadera ciencia? ¿Y no se podrían hallar pruebas del aspecto generalmente acientífico de todo el libro de Kepler en la forma en que intentó acomodar los aspectos numéricos de los movimientos y localizaciones de los planetas en las cuestiones planteadas por la tabla de contenidos del Libro Quinto de su *Armonía del mundo*?

1. Acerca de las cinco figuras sólidas regulares.
2. Sobre la relación entre ellas y las razones armónicas.
3. Resumen de la doctrina astronómica necesaria para la contemplación de las armonías celestes.
4. En qué cosas relativas a los movimientos planetarios han sido expresadas las armonías simples y que todas aquellas armonías que están presentes en el canto se encuentran en los cielos.
5. Que las claves de la escala musical, o tonos del sistema, y los tipos de armonías, la mayor y la menor, están expresadas por ciertos movimientos.
6. Que cada Tono o Modo musical está expresado en cierta forma por uno de los planetas.
7. Que los contrapuntos o armonías universales de todos los planetas pueden existir y ser distintos uno de otro.
8. Que los cuatro tipos de voz están expresados en los planetas: soprano, contralto, tenor, y bajo.
9. Demostración de que para asegurar esta disposición armónica, esas mismas excentricidades planetarias que tiene cada planeta como propias, y no otras, tenían que ser establecidas.
10. Epílogo acerca del Sol, por vía de muy fecundas conjeturas.

Abajo se muestran las «melodías» desempeñadas por los planetas en el esquema kepleriano.

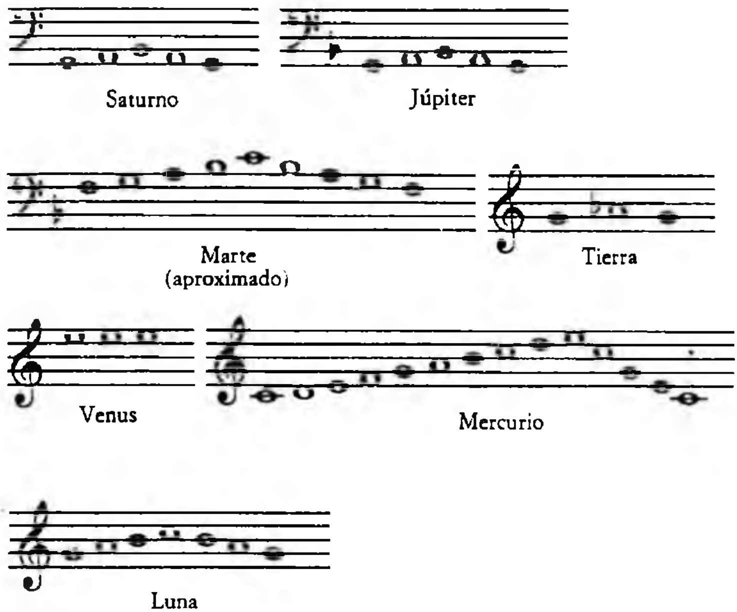


FIG. 29.—*La música de los planetas de Kepler, de su libro* La armonía del mundo. *No es sorprendente que un hombre como Galileo nunca se molestara en leerlo.*

Seguramente un hombre como Galileo encontraría difícil considerar tal libro como una contribución seria a la física celeste.

El último libro importante de Kepler fue un *Epítome de la astronomía copernicana,* terminado para publicación nueve años antes de su muerte en 1630. En él defendió sus desviaciones del sistema copernicano original. Pero lo que es de mayor interés para nosotros es que en este libro, como en la *Armonía del mundo* (1619), volvió a presentar orgullosamente sus primeros descubrimientos relativos a los cinco sólidos regulares y a los seis planetas. Era, mantenía todavía, la razón para que el número de planetas fuera seis.

Deber haber supuesto casi tanto trabajo desenmarañar las tres leyes de Kepler de entre el resto de sus escritos como rehacer los descubrimientos. Kepler merece el crédito de haber sido el primer científico en reconocer que el concepto copernicano de la Tierra como

2 (1947), 1-32. [Trad. cast., *Sobre las revoluciones*. Madrid, Editora Nacional, 198; ed. revisada, Madrid, Tecnos, 1987.]
*Johannes Kepler, *The Harmonies of the World*, Book 5, trad. de Charles Glenn Wallis. Great Books of the Western World, 16. Chicago, Encyclopaedia Britannica, 1952.
**The Principal Works of Simon Stevin*. Vol. 1. *General Introduction, Mechanics*. Ed. por E. J. Dijksterhuis. Amsterdam, C. V. Swets y Zeitlinger, 1955.

INDICE ANALITICO