

LA FÍSICA DE GALILEO

Miguel Hernández González

Profesor de Física

I. B. Rafael Arozarena

1. Introducción

Galileo comienza su obra de madurez «Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias» (1638), con una exaltación de la actividad de los artesanos puesta en boca de Salviati, —portavoz de sus ideas—: *«Pienso que la frecuente actividad en vuestro famoso arsenal, Señores Venecianos, ofrece un gran campo para filosofar a los intelectos que especulan, especialmente en aquella parte que se denomina mecánica, en donde se construyen continuamente todo tipo de instrumentos y de máquinas por medio de un gran número de artesanos, algunos de los cuales han de ser muy entendidos y con un talento muy agudizado debido tanto a las observaciones que sus predecesores hayan hecho como a lo que van descubriendo ellos mismos sin interrupción».*

Reconoce así la justeza de esa batalla que, iniciada en el siglo XV y acentuada a lo largo del XVI, había enfrentado a artesanos y «filósofos». La reivindicación de que el libro de la naturaleza es mucho más rico y complejo que ningún otro libro y la afirmación de la nobleza de las artes mecánicas y del trabajo manual es perceptible en las obras de Brunelleschi, Ghiberti, Leonardo, Benvenuto Cellini, Palladio, Valturio da Rimini, Durero, Tartaglia, Giorgio Agricola, Guidobaldo del Monte, Thomas Harriot, etc.; obras que abarcan campos tan diversos como la pintura, la arqui-



itectura, el arte militar y de guerra, la navegación, la medicina, la cerámica, la ingeniería, la hidráulica o la mecánica.

En esta perspectiva hay que entender tanto las invectivas de Rabelais en su «*Gargantúa*» (1534): «*Enojados contra la naturaleza, que ignoran, los dialécticos se han construido otra, a saber, la de las formalidades, las relaciones, las ideas platónicas y otras monstruosidades que ni los mismos que las han inventado pueden entender. A todas estas cosas les atribuyen un nombre lleno de dignidad y las llaman metafísica. Si alguien tiene un entendimiento enteramente ignorante de la naturaleza o con verdadero horror a ella, y su mente es en cambio propensa a usos abstrusos y a ensoñaciones de loco, dicen que el tal posee talento metafísico*», como las recomendaciones del marinero inglés Robert Norman, constructor de brújulas y autor de una obra «*The newe attractive*» (1581), al que citará con respeto Gilbert en su influyente «*De magnetete*» (1600): «*Desearía aconsejar a los hombres instruidos que sean modestos al publicar sus concepciones y no condenen desdeñosamente a los que tratan de descubrir los secretos de sus artes y oficios y publican sus hallazgos para provecho y utilidad de los demás. Les aconsejo que no los condenen más de lo que quisieran que otros los condenasen a ellos mismos por haber prometido mucho y haber cumplido poco o nada en absoluto*».

Reflejo, todo ello, de la insatisfacción ante un saber libresco que permenece alejado de la práctica concreta. Puesta en cuestión de un cuerpo de saber al que muchos hechos desmienten¹; condena de la escisión entre la labor de las manos y la elaboración de las teorías científicas como bien expone Vesalio en su magna obra «*De corporis humani fabrica*» (1543) publicada el mismo año que el «*De revolutionibus...*» copernicano y, como esta última obra, de importancia fundamental para la Revolución Científica: «*Y así ha venido a suceder que esta deplorable división del arte de la medicina ha introducido en nuestras escuelas el odioso sistema hoy en boga de que uno lleve a cabo la disección del cuerpo humano y otro vaya describiendo sus partes. Este último, encaramado en lo alto de un púlpito, como una corneja, (...), repite hasta el hastío noticias relativas a hechos que él jamás ha observado directamente sino que se las ha aprendido de memoria en libros ajenos o tiene una descripción de ellos ante los ojos. El diseccionador, ignorante del arte de hablar, no está capacitado para explicar la disección a los alumnos y dispone malamente la demostración que debería seguir a las explicaciones del médico, mientras que éste nunca pone manos a la labor, sino que va orientando despreciativamente el buque con la ayuda del manual y habla*».

1. «Mediante la práctica, demuestro la falsedad de muchos aspectos de las teorías de muchos filósofos, aún de aquellos más antiguos e importantes. En menos de dos horas cualquier persona podrá darse cuenta de ello, con sólo tomarse la molestia de venir a mi laboratorio» Bernard Palissy, ceramista, en sus *Discours Admirables*, 1580.



Esta atmósfera preñada de contestación a los viejos saberes impregna un mundo más amplio y abierto que el imaginado por los antiguos, cuyas respuestas se han vuelto insuficientes; un mundo y una sociedad en la que se deshacen vínculos y lazos tenidos por inmutables, donde el mismo tiempo pasa de ser «tiempo vivido» que se rige por la salida y ocaso del sol a ser controlado por artificios mecánicos. Una sociedad que se disuelve y en la que se establecen nuevas relaciones económicas, sociales y políticas. Época de crisis y desasosiego en la que brillan las personalidades audaces.

En la obra del mismo Galileo encontramos ecos de esta situación, así como la apuesta decidida en favor de una actitud indagadora, de libre pensamiento, receptiva y exploratoria ante los nuevos tiempos y los nuevos hechos:

«Salviati: (...) Son sus seguidores los que le han dado la autoridad a Aristóteles y no él quien la ha usurpado o se la ha atribuido; como es más fácil ampararse bajo la protección de otro que comparecer a pecho descubierto, temen arriesgar y alejarse un solo paso de él, y antes que alterar en algo el cielo de Aristóteles, prefieren negar impertinentemente lo que ven en el cielo de la naturaleza (...).

Simplicio: Pero si se abandona a Aristóteles, ¿quién servirá de escolta en la filosofía? Nombrad a algún autor.

Salviati: Hay necesidad de escolta en los países desconocidos y salvajes, pero en los lugares abiertos y llanos sólo los ciegos necesitan guía; y quien es tal, mejor que se quede en casa, pero quien tenga ojos en la frente y en la mente, de estos se ha de servir como escolta (...). Señor Simplicio, acudid con razones y demostraciones, vuestras o de Aristóteles, y no con textos y con la nuda autoridad, porque nuestros razonamientos han de versar sobre el mundo sensible, y no sobre un mundo de papel».

En una época fluida como ésta, hemos de imaginar la actividad de Galileo Galilei (Pisa 1564 - Arcetri 1642). Su figura, —centro de múltiples controversias y símbolo de innumerables causas—, presenta tantas facetas interesantes que sería absurdo pretender agotarlas en un par de charlas. Centraremos, por ello, el contenido de nuestra exposición en su física y, con más exactitud, en su versión final, es decir, tal y como aparece en sus obras maestras de madurez —«Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo» (1632) y el ya citado «Consideraciones y demostraciones sobre dos nuevas ciencias» (1638)—. Subyace en la exposición, no obstante, el reconocimiento de la importancia del «Mensaje sideral» (1610) e «Historia y demostraciones en torno a las manchas solares y sus accidentes» (1613) en lo que se refiere al descubrimiento y cartografía de un «nuevo cielo»; de «El ensayador» (1623) como texto en el que pueden rastrearse algunas de las claves del método y de la metafísica galileana; y de la «Carta a Cristina Lorena» (1615) no sólo para atisbar la sinrazón de su condena



por la Inquisición sino, sobre todo, para «atrapar» algunos de los rasgos de su polémica personalidad a través de su encendida defensa de la autonomía de la ciencia frente a la religión.

No nos será, pues, posible recomponer en toda su viveza al Galileo humano, brillante y obstinado polemista, cortesano y amigo de los grandes de su tiempo al mismo tiempo que ferviente defensor del acceso del pueblo a la cultura, siempre atento a los descubrimientos técnicos y constructor, el mismo, de instrumentos de observación, visitante asiduo de forjas y armerías en las que se acumula un saber, necesitado de depuración, pero práctico; buen cristiano preocupado por el porvenir de la Iglesia, pero no creyente ciego en una autoridad que los hechos desmienten; y, por encima de todo, profundamente convencido de la dignidad humana y confiado en la suprema potencia de un intelecto cuasi divino que «es capaz de conocer como Dios, aunque no tanto como Dios».

Tampoco nos detendremos, en la condena de Galileo por el Santo Oficio, —ejemplo paradigmático del conflicto entre Fé y Razón—, ni entraremos a fondo en la polémica, suscitada por Koyré y contestada por Geymonat, Drake y otros, en torno al pretendido platonismo de Galileo y al papel de los experimentos en la construcción de la ciencia nueva. Sólo de un modo marginal, y al hilo de la exposición de la física galileana, mencionaremos la controversia entre defensores de la tesis continuista o rupturista de esta física en relación con la medieval; no profundizaremos, pues, en lo que de originalidad sustancial pudiera haber en el pisano frente a otras figuras por él oscurecidas.

Esta enumeración incompleta de temas nos da, sin embargo, la medida de la importancia de Galileo, porque sólo a las figuras realmente grandes y seminales se les escruta y discute con tanta pasión.

2. La ciencia de Galileo

El tema central de la física de Galileo es el movimiento, bien en relación con la controversia originada por la necesidad de dotar de base «real» al esquema copernicano bien en relación con el aparentemente menos importante movimiento local en las proximidades de la Tierra, y a él dedicará sus obras más importantes.

Observado con la perspectiva que da una historia que ahora conocemos, puede afirmarse que uno de los más importantes logros de Galileo fue su escalonamiento de los problemas físicos relativos al movimiento a fin de plantearlos en términos cuantitativos. Así, en la Jornada Tercera de los Discorsi dedicada al estudio de este tema, dirá: *«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 (...). En efecto, que yo sepa nadie ha demostrado que un móvil que cae partiendo del 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.

Se ha podido observar que los cuerpos lanzados, es decir, los proyectiles, describen una línea curva de cierto tipo; ahora bien, que tal línea es una parábola no lo ha mostrado nadie (...).

Construye Galileo, en este libro, los fundamentos de la ciencia de la Cinemática clarificando los conceptos de movimiento uniforme y movimiento uniformemente acelerado —que refiere en todo momento al movimiento de caída libre—, para finalmente obtener, por medio de demostraciones matemáticas «necesarias», la trayectoria de los proyectiles como composición de esos dos movimientos previamente analizados.

Podrá así concluir el proemio con que inicia la Tercera Jornada con estas palabras: «(...) se abren las puertas de una inmensa e importantísima ciencia, de la que estas investigaciones nuestras pondrán los fundamentos. Otras mentes, más agudas que la mía, penetrarán, después, hasta sus lugares más recónditos (...), consciente de dejar fuera de su investigación el tema de las fuerzas como claramente confirman las palabras de Salviati pronunciadas, durante esa Jornada, después de una larga e interesante exposición de Sagredo sobre la teoría del ímpetus:» (...) *No me parece éste el momento más oportuno para investigar la causa de la aceleración del movimiento natural y en torno a la cual algunos filósofos han proferido distintas opiniones (...).*

Este escalonamiento se mostró enormemente fértil no sólo en el estudio de la física terrestre sino, lo que quizás fue más trascendental, en el análisis de la física celeste. En efecto, la historia de la Astronomía muestra, también a toro pasado, la importancia que tuvo elegir adecuadamente un Sistema de Referencia desde el que observar (Copérnico). Al mismo tiempo, esa misma historia, señala como un hito trascendental la importancia de los datos observacionales (Tycho Brahe) y su uso para dar una descripción cinemática correcta de los movimientos planetarios (Kepler). Sólo en última instancia, después de poseer el sustrato anterior, fue posible abordar, desde una posición fundamentada, el tema clave y preguntarse por la ley que explique las razones de los movimientos (Newton).

Galileo es, sin lugar a dudas, el prototipo de científico moderno porque, sin que nosotros pretendamos negar la importancia que las ideas metafísicas pudieran tener en la articulación de su manera de ver la naturaleza, se mantuvo ajeno a las grandes teorizaciones y a diferencia de sus contemporáneos, Kepler o Descartes, embridó su imaginación. La física galileana olvida las grandes cuestiones, al menos en la for-



mulación que hasta entonces habían tenido (llegar a comprender por qué las cosas son como las conocemos, por qué no pueden ser de otra manera y por qué es mejor que sean como son), y se ocupa casi exclusivamente del movimiento local sin siquiera aspirar a ofrecer una explicación causal. Se coloca así, resueltamente, en las antípodas tanto de la filosofía aristotélica como, en gran medida, de otros sistemas filosóficos con pretensiones de totalidad como el cartesiano: *«Esta vana presunción de entenderlo todo (aspiración de la Filosofía) no puede deberse sino al hecho de no haber entendido nada, dado que si alguien hubiera llegado al menos una vez a comprender algo perfectamente y hubiera sabido verdaderamente cómo se adquiere el conocimiento, sería consciente de que nada sabe acerca de la infinidad de las restantes verdades».*

Quizás su aportación sustancial sea, después de todo, el haber puesto de manifiesto algo que, con toda precisión, resumió Ernest Mach en frase afortunada: *«los sentidos no mienten, pero no nos dicen la verdad».*

La posición de Galileo ante el testimonio de los sentidos es, sin duda, compleja, problemática y ello va a tener una repercusión esencial para el desarrollo de nuestra moderna visión del mundo: hay que usarlos, pero en unos casos hay que concederles credibilidad en tanto que en otros hay que ir más allá de ellos. Se trata por tanto de afinarlos e ir hasta el fondo, deshaciendo equívocos aparentes y reconciliando el desajuste entre lo percibido y la realidad subyacente². Habrá que interrogar a la Naturaleza de un nuevo modo y habrá que intentar, siempre que sea posible, que ésta conteste en el lenguaje que le es propio: las Matemáticas. No se podrá, por tanto, preguntar de otra forma que no sea aquella que pueda articularse en el lenguaje de las cantidades, en el lenguaje de las proporciones, los números y la Geometría. Será necesario pues, matematizar los problemas y reducir el mundo de las cualidades a un mundo de cantidades. En «El ensayador» ofrece una buena muestra de lo que entiende por esta reducción cuando aborda el tema de la naturaleza del calor: *«(...) Me queda ahora, de acuerdo con la promesa que hice antes a V.S Ilma., hacer alguna consideración sobre la proposición «El movimiento es causa del calor», mostrando de que manera me parece que pueda ser cierta. Antes, será necesario que haga alguna consideración sobre esto que llamamos calor, pues me temo que en general existe una idea bastante alejada de la verdad, si se cree que se trata de un verdadero accidente, afección y cualidad que reside realmente en la materia que sentimos que se calienta.*

2. Veis, pues, cuánta es la fuerza de la verdad, ya que la misma experiencia, que en un principio parecía mostrarnos una cosa, una vez que la observamos más de cerca, nos asegura de lo contrario (Jornada Tercera de los Discorsi..., pág. 280).



Digo que en el momento en que imagino una materia o sustancia corpórea, me siento en la necesidad de imaginar, al mismo tiempo, que esta materia está delimitada y que tiene esta o aquella forma, que en relación con otras es grande o pequeña, que está en este o en aquel lugar, en este o en aquel tiempo, que se mueve o que está en reposo, que está o no en contacto con otro cuerpo, que es una, pocas o muchas; ni con gran imaginación puedo separarla de estas condiciones; pero que deba ser blanca o roja, amarga o dulce, sonora o muda, de olor agradable o desagradable, no me siento en la necesidad de forzar mi mente para tener que representármela acomodada con tales condiciones; más bien, si los sentidos no las hubieran advertido, tal vez la razón o la imaginación por sí mismas no lo hubieran logrado nunca. Por todo ello pienso que estos sabores, olores, colores, etc., por parte del sujeto en el que parece que residen, no son más que meros nombres, y tienen únicamente su residencia en el cuerpo sensitivo, de manera que eliminado el animal sensitivo, se eliminan todas estas cualidades; sin embargo, nosotros, puesto que les hemos puesto nombres particulares y diferentes de aquellos primeros y reales accidentes, quisiéramos creer que también éstos son verdadera y realmente diferentes de aquellos».

La distinción entre las cualidades primarias (¿cuantificables!) y las cualidades secundarias es todo un programa para la acción y a ella dedicará Galileo gran parte de su esfuerzo.

3. *El movimiento*

A fin de resaltar la importancia de la aportación de Galileo a nuestro «modo de ver el mundo» —haciendo un uso crítico del testimonio de los sentidos—, así como las dificultades que esta mutación conllevó, quizás convenga ya abordar ese viejo problema que nos sirvió para ilustrar, en su momento, la concepción aristotélica del movimiento y —como ya tuvimos ocasión de mostrar— para articular el Cosmos.

El tratamiento aristotélico tanto del movimiento de caída de los cuerpos pesados (movimiento natural) como del movimiento de proyectiles (movimiento violento) había suscitado serias objeciones por las cuestiones que quedaban sin resolver. No es extraño que fuera el centro de atención de numerosos comentaristas que trataron de construir una explicación más convincente.

Recordemos los presupuestos del análisis aristotélico del movimiento así como algunas de las cuestiones que dejaba irresueltas:

1. De acuerdo con la dinámica aristotélica el mantenimiento de un movimiento exige la acción de un motor que actúa por contacto ¿cual es ese motor durante la caída de un cuerpo?, ¿cual es ese motor en el lanzamiento de un proyectil?



2. Una causa (fuerza diríamos ahora) constante produce un efecto (velocidad) constante ¿por qué se aceleran los cuerpos que caen?

Alrededor de estas cuestiones giró el trabajo de múltiples pensadores que apuntaron numerosas y muy diversas soluciones. Analizado el tema desde una perspectiva actual, puede entenderse la razón de los intentos fallidos si se tiene en cuenta que lo que había que clarificar está íntimamente relacionado con conceptos tan profundos como la inercia, la fuerza y la aceleración, la conexión entre fuerza y movimiento, la acción a distancia y la gravitación, así como por una real comprensión de la acción del medio en el que el movimiento tiene lugar y por una recuperación de la posibilidad de existencia del vacío. Esta lenta clarificación condujo a la disolución de un universo, hasta entonces finito, limitado, heterogéneo y ordenado, y a su sustitución por otro con características muy distintas cuya estructura última aún está por determinar.

Abordemos pues, de un modo necesariamente sintético y a grandes rasgos, algunas estas respuestas:

3.1. *Caída de graves*

Para Aristóteles este movimiento hacia el «centro» es conceptualizado como el movimiento natural propio de la tierra (uno de los cuatro elementos de que está compuesto el mundo sublunar). La necesidad de un motor que, actuando por contacto (motor conjunctus), mantenga el movimiento según exige lo que podríamos denominar Principio Fundamental de su Dinámica, obliga no sólo a identificarlo en este proceso de caída sino a dar cuenta de la razón de por qué los graves caen con distintas velocidades y por qué el movimiento de cada uno de ellos no es constante sino acelerado (al menos en sus fases iniciales) tal y como muestra la experiencia. A la primera cuestión no acierta a responder sin ambigüedad, por lo que el motor conjunctus queda sin aparecer, oculto tras múltiples consideraciones sobre agentes remotos, inmediatos e instrumentales, así como sobre impedimentos y remoción de impedimentos. A la segunda pregunta Aristóteles contesta (aunque no en unos términos tan precisos como los que ahora le atribuimos) suponiendo que la velocidad del cuerpo que cae es proporcional al peso e inversamente proporcional a la densidad del medio. La razón por la que un cuerpo concreto aumenta de velocidad en la caída tampoco aparece nítidamente respondida en sus obras aunque parezca insinuarse un aumento de peso a medida que el objeto cae.

La exégesis escolástica del aristotelismo volverá sobre estas cuestiones, tan insatisfactoriamente respondidas, y durante los siglos XIII y XIV someterá a revisión los presupuestos del Maestro.



Pueden distinguirse varias teorías que, en síntesis, podemos agrupar así:

1. El agente hay que buscarlo en el medio:

Es Averroes el que sostiene la tesis de que el medio en el que el objeto cae, puesto en movimiento, succiona y tira del grave hacia abajo.

2. El agente hay que buscarlo en el cuerpo grave:

Esta adscripción al propio cuerpo grave de la capacidad para iniciar y mantener el movimiento rompe, en cierta medida, con la distinción que el Maestro había establecido entre motor y móvil que, aquí, aparecen confundidos. El comportamiento del grave recuerda el de un ser animado a pesar de que se diferencie entre el motus a se propio de éste y el motus per se de aquél.

Para otra escuela, integrable dentro de la corriente explicativa con la que encabezamos este apartado, un grave cae porque al hacer ésto puede unirse a la totalidad de los cuerpos a los que está relacionado por naturaleza. Una concepción de este tipo (tendencia hacia lo similar) iba a ser defendida por Nicolás de Oresme y posteriormente adoptada por Nicolás Copérnico.

3. El agente se encuentra en la esfera celeste:

La causa del movimiento de caída habría que buscarla, según los pocos adherentes a esta teoría, parcial o totalmente en la repulsión ejercida sobre el grave por las esferas celestes. Sus características de acción a distancia la hacen singular en un contexto en el que tales explicaciones están proscritas.

4. El agente radica en el centro del universo:

Para algunos autores existía una fuerza atractiva ejercida por el lugar natural que permitía explicar, aunque a costa de usar también la idea de acción a distancia, la aceleración del móvil en su caída.

5. El agente está en toda la esfera sublunar:

De acuerdo con las ideas defendidas por Roger Bacon y Grosseteste se supone que en toda la esfera sublunar actúa una cierta virtus caelestis inmaterial que, expandiéndose esféricamente desde el centro y atenuándose a medida que nos alejamos de él, tira del grave.

Galileo hará mención a algunas de ellas cuando aborde, de modo marginal, este problema en los Discorsi:

«Salviati: Algunos la han explicado (la causa de la aceleración del movimiento natural) por la proximidad al centro; otros, por la disminución de la parte del medio que queda por atravesar; otros, finalmente, por cierta impulsión del medio ambiente, el cual, al volver a cerrarse por detrás del móvil, lo va presionando y proyectando continuamente (...)



A estas teorías les sucedió la denominada teoría del ímpetus de la que hay que buscar sus primeras expresiones en Juan Filopon, que la usó para explicar el movimiento de proyectiles, y cuyo desarrollo más acabado se encuentra en Juan Buridán (1300-1358) y la Escuela de París.

Para ilustrar el contenido de esta teoría aplicada al problema que nos ocupa, nada mejor que la exposición que el mismo Galileo pone, significativamente (¡y así no se compromete!), en boca de Sagredo: *«Me parece que de los razonamientos que acabáis de aducir se podría obtener una solución apropiada a la discutida cuestión filosófica en la que se plantea cual sea la causa de la aceleración del movimiento natural de los graves. Puesto que, según creo, en el caso del grave que es impelido hacia arriba, la fuerza imprimida por el cuerpo que lo proyecta va disminuyendo continuamente. Esta fuerza, mientras sea superior a la que actúa en sentido contrario, o sea, a la gravedad, lo impulsa hacia lo alto. Ahora bien, una vez que hayan alcanzado una y otra un estado de equilibrio, el móvil deja de ascender pasando al estado de reposo, en el cual el impulso (ímpetu) que se le había imprimido no queda aniquilado sin más ni más, sino que comienza a desaparecer lo que antes prevalecía sobre la gravedad del móvil y que era la causa de que lo hiciera subir. Al ir disminuyendo este impulso sobreañadido y comenzar, consecuentemente, a tomar ventaja el peso (gravitá), empieza la caída con lentitud a causa de la fuerza (virtú) que traía impresa el móvil y buena parte de la cual permanece todavía en éste. Ahora bien, en cuanto que dicha fuerza va disminuyendo continuamente, siendo superada cada vez más por la gravedad, el resultado es la continua aceleración del movimiento.*

Simplicio: La idea es aguda, pero tiene más de sutil que de cierta, ya que, incluso en el caso de que fuese concluyente, no serviría sino para explicar aquellos movimientos naturales a los que les precede un movimiento violento, en los que queda aún activa parte de la fuerza externamente aplicada. Allí, sin embargo, en donde no se da tal resto, sino que el móvil parte de un estado de reposo prolongado, el razonamiento pierde toda su fuerza.

Sagredo: Me parece que os equivocáis y que esta distinción que hacéis, entre los dos casos, es superflua o, para decirlo con mayor rigor, no existe. Pero decidme, ¿puede un proyectil recibir, del cuerpo que lo lanza, mucha o poca fuerza de modo que se le pueda hacer subir cien codos, veinte, cuatro o uno?

Simplicio: Sin duda alguna.

Sagredo: No es menos cierto, por tanto, que tal fuerza imprimida por el móvil podrá superar la resistencia del peso tan exigüamente que sólo la eleve a la altura de un dedo. Finalmente, la fuerza del proyector puede ser tal que se equilibre con la resistencia del peso de forma que el móvil no salga lanzado, sino que quede simplemente sostenido. Así, si cogéis en vuestra mano una piedra, ¿qué hacéis si no



es imprimirle una fuerza que la impele hacia arriba y que es equivalente al poder de su peso que la atrae hacia abajo? ¿No continuáis conservando esa fuerza impresa todo el tiempo que la sostenéis en vuestra mano? ¿Disminuye acaso dicha fuerza por mucho que la mantengáis en vuestra mano? Y este soportar que impide la caída de la piedra, ¿qué importa que se haga con vuestra mano, con una tabla o con una cuerda de la que cuelgue la piedra? Nada, en absoluto. Llegad por tanto, señor Simplicio, a la conclusión de que el hecho de que preceda a la caída de la piedra un reposo grande o breve o instantáneo, no trae consigo una diferencia, con tal de que la piedra no parta nunca sometida a una fuerza contraria a su gravedad y que sea suficiente para mantenerla en reposo» (...) Jornada Tercera de los Discorsi.

Hay en Galileo una aproximación al tema de la caída de graves que debe mucho a Arquímedes, no en vano la física arquimedea había sentado, en su obra «Tratado sobre los cuerpos flotantes», las bases para una clarificación de los conceptos de grave y leve que sólo pueden entenderse, desde entonces, como conceptos relativos. El físico de Pisa hará un uso intensivo de esos resultados y someterá a un detallado análisis el proceso de caída de cuerpos en medios resistentes para finalmente concluir con su osada, —pero por otra parte bien fundada—, afirmación de que *«si se eliminara absolutamente la resistencia del medio, todos los cuerpos descenderían con la misma velocidad»*. Merece la pena, como casi siempre, citar in extenso a Galileo porque difícilmente podríamos sustituir la claridad de su argumentación y la pasión de su exposición:

«Sagredo: (...) en cuanto al vacío, me gustaría escuchar la demostración que da Aristóteles, así como su refutación; y también lo que vos, señor Salviati, le objetáis (...).

Simplicio: Aristóteles, (...), arremete contra ciertos filósofos antiguos, quienes recurrían al vacío por considerarlo necesario para el movimiento, diciendo que éste no podría darse sin aquél. Aristóteles les replica demostrando que, muy al contrario, al tener lugar el movimiento es el vacío lo que hay que descartar. (...) Hace dos suposiciones, una de las cuales trata de los móviles con pesos diferentes, que se mueven en el mismo medio y la otra, de un mismo móvil moviéndose en medios diferentes. Por lo que se refiere a la primera, supone que los móviles de peso diferente se mueven en el mismo medio con velocidades distintas, las cuales mantienen entre sí la misma proporción que sus pesos respectivos. (...) En el segundo caso, parte del principio de que las velocidades de un mismo móvil, en medios diferentes, son inversamente proporcionales al espesor o densidad de tales medios (...) Y de esta segunda suposición deriva lo siguiente: dado que lo tenue del vacío supera infinitamente la corporeidad, por muy sutil que sea, de cualquier medio pleno, todo móvil que se mueva en este medio pleno durante cierto tiempo, recorriendo cierto



espacio, debería moverse por el vacío en un sólo instante: Ahora bien, el movimiento instantáneo es imposible, luego es imposible que se de el vacío como fundamento del movimiento.

Salviati: (...) En lo que atañe al primer supuesto, dudo seriamente que Aristóteles haya hecho la experiencia consistente en tomar dos piedras, una de las cuales es diez veces más pesada que la otra, para dejarlas caer al mismo tiempo desde una altura, pongamos de cien brazas, y ver si descienden con velocidades tan diferentes que en el momento en que una está tocando el suelo, nos encontremos con que la otra no ha recorrido ni siquiera diez brazas.

Simplicio: De sus mismas palabras se deduce, sin embargo, que él lo ha experimentado, ya que dice: Vemos que el más pesado. Ahora bien, tal verse alude a una experiencia llevada a cabo.

Sagredo: Yo, sin embargo, que no he hecho la prueba, os aseguro que una bala de cañón que pese cien, doscientas o más libras, no aventajará ni siquiera en un palmo en su llegada al suelo, a una bala de mosquete de media libra, aunque la altura de caída sea de doscientas brazas.

Salviati: Sin recurrir a otras experiencias, podremos probar claramente, sin embargo, con una demostración breve y concluyente, que no es verdad que un móvil más pesado se mueva a más velocidad que un móvil más liviano, con tal de que ambos sean de la misma materia, como es el caso, sin duda, de aquellos de los que habla Aristóteles. Pero decidme antes, señor Simplicio, si admitís que a todo cuerpo pesado en caída libre le corresponde una velocidad determinada, de modo tal que no se pueda aumentar o disminuir a no ser que le hagamos violencia o le pongamos alguna resistencia.

Simplicio: Está fuera de toda duda que el mismo móvil en el mismo medio tiene una velocidad reglamentada y determinada por la naturaleza, la cual no podrá aumentarse a no ser por un impulso nuevo ni disminuirse si no es recurriendo a algo que la obstaculice y la retarde.

Salviati: Entonces, si nosotros tuviéramos dos móviles, cuyas velocidades naturales fueran distintas, es evidente que si uniésemos ambos, el más rápido perdería velocidad por obra del más lento, mientras que éste aceleraría debido al más rápido (...) Pero si esto es así, y si es verdad, por otro lado, que una piedra grande se mueve, por ejemplo, con una velocidad de ocho grados y una piedra pequeña, con una velocidad de cuatro, si las unimos, el resultado de ambas, según lo dicho, será inferior a ocho grados de velocidad. Ahora bien, las dos piedras juntas dan como resultado una más grande que la primera que se movía a ocho grados de velocidad, de lo que se sigue que tal compuesto se moverá a más velocidad que la primera de las piedras sólo, lo cual contradice vuestra hipótesis. Veis, pues, cómo suponiendo que



el móvil más pesado se mueve a más velocidad que el que pesa menos, concluyo que el más pesado se mueve a menos velocidad.

Después de algunas precisiones Salviati, en esta primera fase argumentativa, afirma que «*los móviles, grandes o pequeños, se mueven a la misma velocidad si tienen el mismo peso específico (gravità in spezie)*» para, más adelante, criticar el que Aristóteles, al sólo tener en cuenta el peso, haya «*dejado de lado cualquier otra consideración, tanto en lo que atañe a las figuras como a los momentos mínimos, cosas sobre las que el medio influye grandemente, alterando de esta manera el simple efecto de la gravedad*».

El Diálogo prosigue sometiéndolo a estudio el segundo de los presupuestos sobre los que apoyaba Aristóteles su análisis de la caída «*las velocidades de un mismo móvil, en medios diferentes, son inversamente proporcionales al espesor o densidad de tales medios*». Después de mostrar las múltiples contradicciones que tal proposición acarrea, Galileo expone por medio de Salviati sus propias conclusiones «*Después de haberme asegurado de que no es cierto que el mismo móvil, en medios de diferente resistencia, se mueva a una velocidad proporcional a la penetrabilidad de dichos medios ni que, en el mismo medio, móviles de distinto peso mantengan entre sus velocidades la misma proporción que entre sus pesos (específicos) comencé a poner en relación estos dos tipos de sucesos y a observar qué es lo que ocurriría con móviles de diferente peso, colocados en medios con resistencias distintas. Pude comprobar entonces que la desigualdad de las velocidades era siempre, en los medios más resistentes, mayor que en los más penetrables y, en un grado tal, que dos móviles que descendieran en el aire diferirán poquísimamente en su velocidad de caída, mientras que en el agua, el uno se moverá a una velocidad diez veces mayor que el otro. Más aún, habrá algún móvil que descienda rápidamente en el aire y que no sólo no descienda en el agua sino que permanezca inmóvil del todo o incluso que se desplace de abajo hacia arriba (...)*» y, más adelante, después de algunas consideraciones sobre las extrañas propiedades de cohesión de las gotas de agua, afirmará «*(...) Habiendo visto, repito, todo esto, yo llegaría a la conclusión de que si se eliminara absolutamente la resistencia del medio, todos los cuerpos descenderían a la misma velocidad*». Es interesante señalar que a esta afirmación llega Galileo por un proceso de abstracción, a partir sin duda de experimentos por él realizados, en el que está implícito un paso al límite «*(...) Si llegamos a constatar, efectivamente, que los móviles de diferentes pesos se mueven a velocidades cada vez menos distintas entre sí a medida que los medios atravesados son cada vez menos resistentes, y que, finalmente, en el medio más tenue de todos, aunque no sea todavía el vacío, la desigualdad de las velocidades entre móviles con pesos extremadamente desiguales es*



pequeñísima y casi inobservable, me parece que podremos admitir como conjetura altamente probable que en el vacío sus velocidades serían absolutamente iguales».

Hay, a lo largo de esta Primera Jornada, un estudio bastante profundo de la caída de graves en medios resistentes que, apoyándose en los conceptos desarrollados por Arquímedes, distingue la existencia de dos fases en dicho movimiento, una inicial acelerada y otra final en la que se adquiere una velocidad constante (velocidad límite) «(...) He de decir, por tanto que un cuerpo pesado tiene, por naturaleza, un principio intrínseco que lo mueve hacia el centro común de los graves (esto es, hacia el centro de nuestro globo terrestre) con movimiento continuamente acelerado; es decir, que en tiempos iguales se añaden nuevos impulsos iguales y nuevos grados de velocidad. Pero hay que entender que esto se cumple con la condición de que se eliminen todos los obstáculos accidentales y externos, entre los cuales hay uno que no podemos eliminar: es la resistencia que ofrece el medio pleno y que el móvil en su caída, ha de abrir y separar hacia los lados. A este movimiento transversal, el medio, aunque sea fluido, penetrable y en reposo, opone una resistencia mayor o menor según que deba abrirse a más o menos velocidad para dejar paso al móvil. Este, al irse acelerando continuamente, como ya he indicado, por su propia naturaleza, encuentra como consecuencia una resistencia cada vez mayor por parte del medio, retardándose por ello y disminuyendo los grados de velocidad adquiridos. Finalmente, y como consecuencia, la velocidad alcanza un punto tal, y la resistencia del medio tal magnitud, que ambas llegan a equilibrarse, eliminando la aceleración y reduciendo al móvil a un movimiento constante y uniforme, en el que se mantendrá ya siempre (...)

3.2. El movimiento de proyectiles

A este tema se dedica la Jornada Cuarta de los «Discorsi», pero de ello ha tratado también en los Diálogos cuando utiliza la artillería (y no en sentido metafórico) para argumentar sobre la movilidad o inmovilidad de la Tierra.

También aquí existe una larga tradición que desde Aristóteles, pasando por los escolásticos, los físicos parisinos y los antecesores inmediatos de Galileo como Tartaglia y Benedetti, llega hasta él.

La imposibilidad de esconder aquí, tras el disfraz de naturaleza propia, el motor responsable del movimiento violento obligó a Aristóteles a desarrollar una teoría más completa y menos vaga que la utilizada en la explicación del movimiento natural de la caída de graves. Dirá que mientras un cuerpo está siendo arrojado, el projector está en contacto con él y actúa, por tanto, como motor conjunctus. Durante este período de tiempo pone también en movimiento las capas adyacentes del medio, junto



con el *projectum*, comunicando además a aquél una *virtus movens*, una capacidad para poner algo más en movimiento. Transfiere así su función de projector a esa capa del medio que repite sucesivamente la acción del projector original aunque ligeramente debilitada. Agotada la capacidad para imprimir la *virtus movens* el *projectum* cae con su movimiento natural y el medio queda en reposo.

Otras teorías como la de la antiperistasis dejarán paso a los partidarios de la teoría del *impetus* cuyos rasgos generales hemos explicitado previamente y cuya naturaleza (la de este *impetus*) hay que entender como similar a la cualidad sonora que adquiere una campana animada por un golpe. La cualidad sonora impresa o introducida por el golpe no es natural a ésta; es tan poco natural como la cualidad motriz introducida por el lanzamiento de la piedra, pero una vez introducida o impresa, está ahí, pertenece a la campana, a la piedra, y no al badajo o a la mano. Y a partir de entonces tiene una existencia independiente y no tiene necesidad de estar continuamente unida a su fuente: el movimiento del móvil es un efecto de la fuerza (cualidad motriz) que lo anima. No hay necesidad de motor exterior para mantenerlo. Esta cualidad motriz es, al igual que el sonido de la campana, percedero y se agota.

Galileo fiel a su compromiso esencialmente cinemático argumentará, en esta Cuarta Jornada, olvidándose de las fuerzas y apoyándose en dos resultados previamente asentados: el principio general de composición de movimientos y la composición, en este caso, de un movimiento horizontal rectilíneo uniforme con un movimiento, también rectilíneo, uniformemente acelerado. Su habilidad matemática le permitirá, como ya se mostró en la ponencia anterior sobre Galileo matemático, obtener la trayectoria parabólica del proyectil así como calcular el impulso del proyectil en un punto cualquiera de la mencionada trayectoria.

3.3. *La Tierra en movimiento: argumentos y contraargumentos*

Desde el momento en que Copérnico, por razones muy concretas y que tienen que ver con sus concepciones metafísicas, se decide a publicitar su modelo para el Cosmos, aparece en primer plano la cuestión del soporte físico para un esquema descriptivo que, pese a los necesarios disfraces, él siempre consideró real. Buena prueba de ello es que intentó desarrollar una física con la que dar respuesta a las serias objeciones de sus oponentes a los movimientos diurno y anual de la Tierra. También Kepler -apoyándose en la, recientemente puesta de actualidad por Gilbert, caracterización de la Tierra como un gigantesco imán - intentará dotar de realidad física al movimiento de los planetas iniciando así la mecánica celeste.

Estos intentos no son nuevos; reflejan la convicción de que resulta necesario conocer la realidad de los movimientos planetarios y que la teoría de la «doble verdad»



es producto de la impotencia, de la ignorancia en torno a los mecanismos que regulan el Cosmos. ¿No intentó acaso, el mismo Ptolomeo en su «Hipótesis de los planetas» dotar de fundamentación física a su modelo de epiciclos, deferentes, ecuantes, etc.? ¿No es ello una muestra de lo difícil que resulta sostener un modelo explicativo de los movimientos del Cosmos que «salve los fenómenos» pero olvide la realidad?

Gran parte de la tarea de Galileo en los «Diálogos» será desarrollar una física para un sistema móvil y así dirá, en la exposición de intenciones al discreto lector con la que encabeza el texto: *«En primer lugar, intentaré mostrar que todas las experiencias realizadas en la Tierra son medios insuficientes para concluir su movilidad y pueden adaptarse indiferentemente tanto a la Tierra móvil como en reposo».*

Nada mejor para calibrar el éxito de su empresa que remitirse a las vivaces páginas de ese libro (del que nos centraremos en las dos primeras jornadas), donde Salviati, Sagredo y Simplicio argumentan y contraargumentan. En la Primera Jornada se presentan las razones aristotélicas de la separación del Cosmos en dos zonas y se cuestionan tales razones. En la Segunda Jornada se examinan los argumentos en contra y a favor del movimiento diurno de la Tierra y en la Tercera se hace lo mismo en relación con el movimiento anual para, finalmente, proponer en la Cuarta Jornada una explicación (¡falsa!) del fenómeno de las mareas apoyado en el movimiento de la Tierra.

Primera Jornada

Tal y como señalábamos previamente, en esta Jornada se dan razones para justificar la escisión del Cosmos en dos zonas y para, así, concluir que la Tierra es diferente de los cuerpos celestes.

Simplicio: «(...) los cuerpos que son generables, corruptibles, alterables, etc., son muy diversos de aquellos que son ingenerables, incorruptibles, inalterables, etc.; la Tierra es generable, corruptible, alterable, etc.: por tanto, la Tierra es muy diversa de los cuerpos celestes» «(...) La sensata experiencia nos muestra cómo en la Tierra se dan continuamente generaciones, corrupciones, etc., de las cuales, ni por nuestros sentidos, ni por la tradición o memoria de nuestros antiguos se ha visto alguna en el cielo, por tanto el cielo es inalterable, etc. y la Tierra alterable, etc. y, por tanto, diversa del cielo».

«Un cuerpo que es por naturaleza oscuro y privado de luz, es diverso de los cuerpos luminosos y resplandecientes; la Tierra es tenebrosa y sin luz, y los cuerpos celestes resplandecientes y llenos de luz, por tanto (...)».

Galileo, por medio de su portavoz, contraargumenta utilizando todo el arsenal de nuevas observaciones que el mismo ha realizado y cuyo contenido ha expuesto



en sus libros más directamente astronómicos y astrofísicos: La Luna es un cuerpo rugoso lleno de montañas y cráteres, nuevas estrellas aparecen donde antes no existían, la Tierra no es el único «centro» dado que los planetas mediceos orbitan alrededor de Júpiter, el mismo Sol aparece con manchas, etc.

A lo largo de esa discusión se abordan además, con un ingenio enorme, problemas de óptica referidos a la reflexión especular y rugosa, problemas de dinámica en los que hace uso de péndulos, planos inclinados e incluso túneles horadados a través del globo terráqueo; se especula en torno a la confusa noción de gravedad y se reflexiona sobre cuestiones metodológicas en las que se reafirma tanto la importancia de la observación sistemática de la naturaleza, la experimentación, como la adecuación del lenguaje matemático para la descripción de los fenómenos de la naturaleza.

Al final de la Jornada Galileo proclamará audazmente: «(...) *el entender se puede tomar de dos modos, es decir, intensive y extensive; y que extensive, esto es, en cuanto a la multitud de los inteligibles, que son infinitos, el entender humano es como nulo, aunque éste entendiese mil proposiciones, porque mil, respecto del infinito es como cero: pero, tomando el entender intensive, en cuanto tal término indica intensivamente, es decir, perfectamente, afirmo que el entendimiento humano puede entender algunas proposiciones de esta manera, y por tanto, tener de ellas absoluta certeza; así son, por ejemplo, las ciencias matemáticas, es decir, la aritmética y la geometría, de las cuales el intelecto divino sabe infinitas proposiciones más, porque las sabe todas, pero, de las pocas comprendidas por el entendimiento humano, creo que el conocimiento es igual al divino en cuanto a la certeza objetiva, puesto que llega a comprender su necesidad, y sobre ésta, no parece que pueda existir seguridad mayor*».

Es este carácter de certeza indubitable de las proposiciones matemáticas lo que le resulta especialmente atrayente a Galileo, al igual que a Kepler, y ambos aparecerán plenamente convencidos de que Dios ha elegido este lenguaje para configurar la arquitectura del mundo natural: un Dios geómetra que se expresa a través de su obra máxima, —la Naturaleza—, se va abriendo paso frente a un Dios ignoto, revelado sólo por intermedio de los libros sagrados. Ecos de esta lucha pueden hallarse en las cartas que Galileo dirigió a Benedetto Castelli, Monseñor Piero Dini y, sobre todo, la que tuvo como destinataria a la Gran Duquesa de Toscana Cristina Lorena. Cartas en las que se polemiza sobre «*si hablan de Ciencia las Sagradas Escrituras*» y en las que se trata de delimitar las fronteras entre la ciencia y la fe y salvar, de este modo, la autonomía de la ciencia. Así, dirigiéndose al primero, dirá: «(...) *en las discusiones sobre cuestiones naturales habría que dejar (a las Sagradas Escrituras) en último término porque, procediendo de igual modo del Verbo Divino la Sa-*



grada Escritura y la Naturaleza (...) y habiendo convenido que las Escrituras (...), dicen muchas cosas, aparentemente y ateniéndonos al significado de las palabras, distinto de la verdad absoluta; y, por el contrario, siendo la naturaleza inexorable e inmutable, sin preocuparse para nada que sus ocultas razones y modos de obrar estén o no al alcance de la comprensión de los hombres, parece que aquéllos de los efectos naturales que la experiencia sensible nos pone delante de los ojos o en que concluyen las demostraciones necesarias, no pueden ser puestas en duda por pasajes de las Escrituras que dijiesen aparentemente cosas distintas, ya que no toda palabra de la Escritura es tan inequívoca como lo es todo efecto de la naturaleza. En una época marcada por la polémica en torno a la interpretación libre del Libro Sagrado así como por la puesta en cuestión de la autoridad papal, tales declaraciones habría que calificarlas, como mínimo, de osadas. Tal osadía e ingenuidad, añadiríamos nosotros, acabaría Galileo pagándolas muy caras.

La profesión de fe en las matemáticas como clave con la que desentrañar los fenómenos naturales aparece claramente expresada en los primeros pasajes de «El ensayador» —libro de polémica en el que junto a errores de bulto sobre el objeto central de la controversia (los cometas y su naturaleza) se pueden encontrar profundos aciertos sobre metodología científico y atinadas reflexiones sobre el controvertido asunto de las cualidades primarias y secundarias—: «(...) *La filosofía (de la Naturaleza) está escrita en ese gran libro que siempre está delante de nuestros ojos —quiero decir, el universo— pero que no podemos entender si no aprendemos primero el lenguaje, y comprendemos los símbolos en los que está escrito. El libro está escrito en lenguaje matemático y los símbolos son triángulos, circunferencias y otras figuras geométricas, sin cuya ayuda es imposible comprender ni una palabra de él, sin lo cual se deambula en vano a través de un oscuro laberinto.*»

El objetivo que persigue Galileo en la larga discusión que recorre la Primera Jornada del Diálogo aparece reflejado con nitidez en la recapitulación con la que se inicia la Jornada siguiente : «*hemos mostrado que la Tierra goza de las mismas perfecciones que los otros cuerpos integrantes del universo y que, en definitiva, es un globo móvil y errante como el de la Luna, o el de Júpiter, o el de Venus o el de cualquier otro planeta.*»

El uso del término «perfección» para referirse a la Tierra no es neutro, como tampoco lo son las múltiples matizaciones y precisiones de las que aparece plagado este diálogo, puesto que supone una inversión clara de las propiedades atribuidas por los aristotélicos a los objetos celestes de los que Galileo afirma: «(...) *No puedo sin gran admiración, y añadiré que con gran repulsa de mi intelecto, oír que se atribuya como gran nobleza y perfección de los cuerpos naturales e integrantes del universo, el que sean impasibles, inmutables, inalterables, etc., y por contra, consideran*



como gran imperfección, el ser alterable, generable, mutable, etc; yo considero a la Tierra nobilísima y admirable por tantas y tan diversas alteraciones, mutaciones, generaciones, etc; pues si ésta no estuviera sujeta a estas alteraciones, y fuese toda ella un entero desierto de arena o una masa de rocas, o que en el tiempo del diluvio, helándose las aguas que la cubrían, hubiese quedado como un globo inmenso de cristal, donde nunca nada naciese, ni se alterase o se cambiase, la tendría por un corpacho inútil al mundo, improductivo, y para decirlo brevemente, superfluo y como si no existiese en la naturaleza (...). Son perceptibles aquí los ecos de ese «nuevo orden» que recorre todas las esferas de la vida social, política, cultural y también científica de la época y que hacía exclamar a Campanella, a propósito de los hombres que no ejercitan ningún arte útil a la vida humana, «(...) *son parásitos o desechos (excrementa) de la república, como lo son muchos nobles de estos tiempos*».

Segunda Jornada

Se aborda aquí la cuestión del movimiento diario de la Tierra y a lo largo de la exposición Galileo utilizará, sin reparar en medios, todo su ingenio y sus recursos, —dialécticos y observacionales—, para desmontar la visión aristotélica del Cosmos y para fundamentar una nueva.

Datos astronómicos, recogidos ya en esa Gaceta Astronómica que con el definitivo título de «El Mensaje Sideral» anuncia «*recientes observaciones realizadas por medio de un nuevo antejo en la faz de la Luna, en la Vía Láctea, en las estrellas nebulosas y en innumerables fijas, así como también en cuatro plauetas nunca vistos hasta ahora, bautizados con el nombre de astros medíceos*», y observaciones y experiencias que contradicen el articulado esquema de la física aristotélica se acumulan en las páginas de un diálogo en el que el confundido Simplicio asiste inerme a la destrucción de sus más íntimas creencias. Todo será válido para acabar con una forma de pensar que se ha convertido en freno para el avance de la ciencia.

Un listado incompleto de los temas, además de los que se refieren directamente al movimiento de la Tierra y que aquí se comentan, quizás sirva para poner de manifiesto la riqueza científica del texto, pero nada puede transmitir y sustituir el goce que produce su lectura: defensa del principio de economía en ciencia (Ockham), la simplicidad como guía en la construcción de teorías científicas, reivindicación del libre pensamiento, el estudio de la naturaleza con un nuevo enfoque, paradojas en torno al tiempo de caída de cuerpos en caída o lanzados, la composición de movimientos y su utilización para explicar la inexistencia de efectos centrífugos, etc.

El contenido sustancial de esta Jornada es la desarticulación de las objeciones que, contra el movimiento de la Tierra, habían esgrimido Aristóteles, Ptolomeo y



los anticopernicanos recientes. Simplicio hace una enumeración de las aristotélicas, en tanto que Salviati resume las demás, del siguiente modo: *«Los argumentos que se presentan sobre esta materia son de dos clases: unos guardan relación con los accidentes terrestres y ninguna con las estrellas, y otros se deducen a partir de las apariencias y observaciones de las cosas celestes. Los argumentos de Aristóteles están sacados en su mayor parte de las cosas que nos rodean y deja los otros a los astrónomos; así pues, si así os parece, examinaremos en primer lugar los deducidos de las experiencias terrestres, y después analizaremos los de la otra clase. Además, puesto que Ptolomeo, Tycho y otros astrónomos y filósofos (...) presentan otros nuevos, considero que bien se podrían oír todos a la vez, para no tener que hacer la réplica luego, con las mismas o similares respuestas dos veces (...) Todos presentan como mejor prueba, la deducida de la experiencia de los cuerpos graves, los cuales, cayendo desde lo alto, siempre lo hacen por una línea recta y perpendicular a la superficie de la Tierra; argumento considerado irrefutable, pues, si ella se moviese con la rotación diurna, al dejar caer una piedra desde lo alto de una torre, y al ser arrastrada la torre por la rotación de la Tierra durante el tiempo que la piedra emplea en su caída, aquella correría muchos centenares de brazas hacia oriente, y la piedra, en consecuencia, habría de caer otro tanto espacio desplazada de la torre. Este efecto lo confirman con otra experiencia, es decir, dejando caer una bola de plomo desde la cima del mástil de una nave en reposo y señalando el lugar exacto donde esa bola incide, que es próximo al pié del mástil; y dejando caer la misma bola desde el mismo punto de la cima del mástil, estando la nave en movimiento, se observará que el punto de incidencia estará alejado del primer punto señalado en tanto espacio cuanto ha sido el del avance de la nave; y esto lo explican diciendo que el movimiento natural de una bola puesta en libertad es el de dirigirse en línea recta hacia el centro de la Tierra. Se robustece tal argumento con la experiencia de un proyectil lanzado hacia arriba a grandísima distancia, como sería por ejemplo un proyectil lanzado por una pieza de artillería enderezada perpendicularmente sobre el horizonte; (...) Añaden, además, una tercera y muy eficaz experiencia, consistente en lanzar con un cañón una bala hacia levante y después otra con igual carga y con la misma elevación hacia poniente; el tiro hacia poniente resultará extremadamente más largo que el lanzamiento hacia levante: pues mientras la bala se dirige hacia occidente, la artillería es transportada por la Tierra hacia oriente y, por tanto, la bala incidirá en tierra a una distancia resultante de la suma de dos viajes: uno, el hecho por ella hacia occidente, y el otro, el del cañón, transportado por la Tierra hacia levante; y al contrario, del viaje hecho por la bala lanzada hacia levante, será necesario restarle el que la artillería ha hecho siguiéndola en su movimiento (...) pero la experiencia nos muestra que ambos tiros son iguales, por tanto*



la artillería está inmóvil y, en consecuencia, también la Tierra. Y, al igual que con estos tiros, sucedería con otros lanzados hacia el norte o hacia el sur, los cuales confirmarían la estabilidad de la Tierra; pues nunca se daría en la diana que se hubiese tomado como blanco, sino que siempre saldrían los tiros ladeados hacia poniente, debido al movimiento que tendría el blanco al ser transportado por la Tierra mientras la bala está por el aire. (...) Presentan Ptolomeo y sus seguidores otra experiencia, similar a la de los proyectiles, y es ésta: hay cosas que, separadas de la Tierra se mantienen largo tiempo en el aire, como, por ejemplo, las nubes o los pájaros voladores; y de la misma manera que no se puede decir que son transportados por la Tierra, puesto que no está adheridos a ella, no parece posible que puedan seguir la velocidad de esta, pues nos parecería que se movían velocísimamente hacia occidente; pues si nosotros, transportados por la Tierra recorremos en 24 horas 16.000 millas, ¿cómo podrían los pajaros resistir a una similar corriente?; más bien, al contrario, sin ninguna sensible diferencia, los vemos volar tanto hacia levante como hacia occidente, como hacia cualquier parte. Además, si cuando corremos a caballo, sentimos perceptiblemente que el aire nos golpea la cara, ¿qué viento no deberíamos sentir del oriente, transportados en tan rápida carrera contra el aire?. Y, sin embargo, este efecto no se siente en absoluto. Y he aquí aún otra muy ingeniosa razón, obtenida de una experiencia cierta, y es la siguiente: el movimiento circular tiene la facultad de expulsar, despedir y arrojar de su centro las partes del cuerpo que se mueve, siempre que el movimiento no sea demasiado lento o que esas partes no están sólidamente pegadas al cuerpo móvil (...) Y así, si la Tierra se mueve con tanta y mayor velocidad, ¿qué materia pesada, qué fuerza de cal o cemento sujetaría las piedras, a las casas y a las ciudades enteras, para que con tanta precipitada velocidad no fueran despedidas hacia el cielo? (...) Quedan las razones de la otra clase, es decir, las que guardan relación con las apariencias celestes, pero como constituyen un tema diferente (negar el movimiento anual de la Tierra), podrán ser presentadas después (...).

La eliminación de todas estas objeciones constituye el argumento de esta trascendental Jornada cuya culminación es el que, probablemente sea uno de los pasajes más famosos de la obra galileana: aquél en el que, con su prosa clara y punzante, enuncia lo que con posterioridad pasará a denominarse Principio de Relatividad de Galileo: «(...) Y para cerrar con un último broche todas las experiencias presentadas hasta ahora, me parece momento oportuno el mostrar cómo experimentarlas todas fácilmente. Encerraos con algún amigo en la mayor estancia que esté bajo la cubierta de algún navío y procurad que haya en ella moscas, mariposas y otros semejantes animales voladores; procuraos también un gran vaso de agua con algunos peces dentro; añádase también un recipiente, que habrá de ser colgado en lo alto



de modo que vaya vertiendo su contenido gota a gota, sobre otro vaso colocado debajo, que sea de boca estrecha; pues bién, si la nave no se mueve, veréis como estos animales se dirigen con igual velocidad hacia todas las partes de la estancia; a los peces se los verá nadar indiferentes en todas las direcciones, y las gotas que caen del recipiente entrarán todas en el vaso colocado debajo; también si vos arrojáis alguna cosa a vuestro amigo, no necesitaréis de más fuerza para echarla hacia un lado o hacia otro, siempre que las distancias sean iguales; y si saltáis, como haciendo carrera de sacos, iguales espacios saltaréis en todas las direcciones. Observad con atención cómo estas cosas suceden así, bien que no haya por qué dudar de que así sea, pues si la nave está quieta, esto es lo normal; ahora, pues, haced mover la nave con la velocidad que se quiera; si el movimiento es uniforme y no fluctuante hacia un sitio u otro, vos no observaréis la más ligera mutación en los efectos enumeradas, y por ninguno de ellos podréis averiguar si la nave se mueve o está inmóvil. (...) La causa de toda esta correspondencia estriba en que el movimiento de la nave es común a todas las cosas contenidas en ella, incluido el aire, que por eso dije que la experiencia se hiciera bajo cubierta, pues si la experiencia se hiciera al aire libre y, por tanto sin que éste siguiera el curso de la nave, se verían algunas diferencias notables a los efectos nombrados; no hay duda de que el humo se quedaría atrás, al igual que el aire, las moscas y las mariposas, obstaculizadas por el aire, no podrían seguir el movimiento de la nave, si se separan de ella en un cierto espacio; más, si se mantuvieran próximas a la nave, debido a que ésta tiene una superficie desigual y, por tanto, capaz de arrastrar la parte de aire que está contigua a ella, éstas, digo, seguirían sin dificultad ni fatiga a la nave (...); pero en las gotas que caen, la diferencia sería escasísima y en cuanto a los saltos y a las cosas que se arrojan, la diferencia sería imperceptible».

4. El problema de la fuerza

El concepto de fuerza no es nada sencillo y su depuración ha sido consecuencia de un largo de proceso.

Para entender las razones por las que Galileo elude pronunciarse sobre las causas del movimiento de caída de los cuerpos, quizás convendría recordar que la noción intuitiva de fuerza va asociada al «contacto» (empujar, halar, resistir, etc.) y que en este tipo de acciones es fácilmente identificable el agente responsable (motor o resistencia). De ahí las dificultades que surgen tanto en el movimiento de caída —al que hábilmente se le denomina «natural» para así obviar sus causas motoras— como en los movimientos de objetos lanzados —fuente de innumerables problemas para toda la física desde Aristóteles—; de ahí, también, la adjudicación de una naturaleza



especial a los móviles objetos celestes. En todos estos casos no aparece de modo identificable el motor responsable del movimiento y, por ello, hasta que no se clarificó adecuadamente tanto la noción de gravedad como el principio de inercia, reinó la confusión. El mismo Galileo, una vez que hubo acabado con la separación del Cosmos en dos zonas adscribiendo a la Tierra y a los cielos unas propiedades similares, tuvo que afrontar en sus reflexiones el tema de las causas del movimiento y en un pasaje, justamente famoso, de la Jornada Segunda de los Diálogos prefigura el Principio de Inercia así como la conexión existente entre fuerza y aceleración:

Salviati: (...) Y así, pues, decidme: si vos tenéis una superficie plana, tan lisa como un espejo, y de materia dura como el acero y que no esté paralela al horizonte, sino un poco inclinada, y colocáis sobre ella una bola perfectamente esférica y de materia grave y durísima, por ejemplo, de bronce, dejada en libertad ¿qué creéis vos que haría?; ¿no creéis vos, como yo lo creo, que ella permanecería quieta? (...).

Simplicio: Yo no creo que permaneciese quieta, sino que estoy seguro de que se movería por la pendiente con toda espontaneidad (...).

Salviati: Y esto lo afirmáis como cosa segura, no porque yo os lo haya enseñado, puesto que yo intentaba persuadirlos de lo contrario, sino por vos mismo y por vuestro natural juicio. (...) Y ¿cuánto duraría en su movimiento esa bola y con qué velocidad?. Advertid que he hablado de una bola perfectamente redonda y de un plano exquisitamente pulimentado y liso, para así alejar todos los impedimentos externos y accidentales; y así también quiero que vos hagáis completa abstracción del aire, con su resistencia, y de todos los otros obstáculos accidentales, si es que otros pueden existir.

Simplicio: Lo he comprendido todo perfectamente, (...) la bola continuaría en movimiento infinitamente, si tanto durase la pendiente del plano, y con un movimiento continuamente acelerado; pues esta es la naturaleza de los cuerpos graves, (...) y cuanto mayor fuese la inclinación, mayor sería la velocidad.

Salviati: Y si alguien quisiese que esa misma bola se moviese hacia arriba sobre esa misma superficie, ¿creéis vos que se movería?

Simplicio: Espontáneamente no, sino lanzada o empujada con violencia. (...) El movimiento iría languideciendo y retardándose siempre, por ser contrario a su naturaleza, y sería más o menos largo, según el mayor o menor impulso que hubiera recibido, y según la menor o mayor inclinación del plano.

Salviati: (...) Ahora decidme lo que sucedería al mismo móvil, en una superficie que no fuese inclinada.

Simplicio: (...) Si no hay inclinación, en el plano, no se da tendencia natural hacia el movimiento, de modo que el móvil sería indiferente a la propensión y a la



resistencia al movimiento; me parece, por tanto, que debería permanecer naturalmente quieto (...).

Salviati: Así sucedería siempre que el móvil fuera colocado en estado de reposo; pero si le fuese comunicado algún movimiento ¿qué sucedería?

Simplicio: Sucedería que se movería hacia aquella parte hacia la que fue empujado.

Salviati: Pero ¿con qué clase de movimiento, con el continuamente acelerado, como sucede en los planos descendentes, o con el sucesivamente retardado, como sucede en los planos ascendentes?

Simplicio: Yo no creo que se diera causa de aceleración o de retraso, al no haber ninguna clase de inclinación.

Salviati: Sí, pero si no existiese causa de retraso, tampoco deberá haberla de quietud; ¿cuánto tiempo creéis vos que el móvil continuaría en su movimiento?

Simplicio: Tanto cuanto durase la longitud de esa superficie no inclinada.

Salviati: Por tanto, si ese espacio no tuviese fin, ¿el movimiento por él sería igualmente sin fin, es decir, perpetuo?

Simplicio: Me parece que sí, si el móvil fuera de materia duradera.

El texto anterior, que hemos querido citar in extenso, termina con lo que parece ser una formulación del Principio de Inercia —al que Galileo tanto se aproximó en múltiples ocasiones sin conseguir, sin embargo, atrapar—; al mismo tiempo, a lo largo de la argumentación, sugiere lo que más tarde será la Ley fundamental de la Dinámica: «*La fuerza no es la causa del movimiento sino la causa de que el movimiento cambie*». Encerraría, pues, gran parte de lo que va a constituir el trabajo de Newton.

La continuación del diálogo, sin embargo, muestra que Galileo dirige sus conclusiones —y en consecuencia yerra— hacia la enunciación de un Principio de Inercia Circular mediante el cual poder justificar el modelo copernicano.

Salviati: (...). Decidme ahora: ¿cual creéis vos que es la causa de que una bola se mueva espontáneamente sobre el plano inclinado, y no sin violencia, por el elevado?

Simplicio: Porque la tendencia de los cuerpos graves es la de moverse hacia el centro de la Tierra, y sólo por violencia pueden moverse hacia arriba, hacia la circunferencia; y en un plano descendente, cada vez se adquiere mayor proximidad al centro, mientras que en el ascendente, cada vez es mayor la separación.

Salviati: Por eso una superficie que no estuviera inclinada tendría todas sus partes igualmente distantes del centro. Pero ¿existe en el mundo alguna de esas superficies?

Simplicio: No faltan; he ahí la del globo terrestre, si fuera lisa y no como en realidad es, quiero decir, escabrosa y montañosa; pero existe la del agua, si ésta está plácida y tranquila.



El movimiento perdurará sobre esa superficie ideal circular en la que se ha convertido el plano horizontal galileano. Mediatizado por el mundo real Galileo no dará el salto hacia un mundo vacío en el que una bola se mueve en línea recta con un movimiento sin fin e infinito. Será a Descartes, que como físico no tiene la consistencia y solidez de Galileo, al que corresponderá sin embargo el honor de «haber proporcionado una fórmula 'clara y distinta' del principio de inercia».

Con estas claves resulta menos llamativo el «olvido», en la obra de Galileo, de todo el trabajo de Kepler, —al que considera un místico más que un físico y del que confiesa *haber pensado siempre que poseía una inteligencia sutil y libre (aunque tal vez demasiado libre), siendo mi manera de filosofar muy otra que la suya*—, y en concreto del relativo a la ruptura del mito de la circularidad.

En efecto, ya se señaló en una ponencia anterior que la introducción de órbitas irregulares (excéntricas recorridas con velocidad no uniforme o elipses) pone en un primer plano la cuestión clave, alrededor de la que girará la Astronomía hasta Newton: ¿cual es la causa (la fuerza) responsable del movimiento de los objetos planetarios? Uno de los primeros intentos por responder a esta cuestión la protagoniza el mismo Kepler quien encuentra en los estudios de Gilbert sobre el magnetismo un soporte, y así imaginará al Sol rotante como fuente de unos efluvios que arrastran a los planetas y los desplazan en sus trayectorias. Galileo verá en estas misteriosas acciones una reintroducción del animismo y rechazará esa acción a distancia aferrándose a un sistema, el Copernicano, que se automantiene apoyándose en el Principio de Inercia circular. Tampoco aceptará esta acción a distancia el filósofo francés Descartes quien, sin embargo, reconoce los hallazgos keplerianos y articula, para dar cuenta de esas desconocidas fuerzas, una física corpuscular en un espacio pleno plagado de vórtices.

Este copernicanismo y este horror a la acción a distancia explican algunos de los notorios errores del científico de Pisa quien, en «El ensayador» (1623), sostendrá contra toda evidencia la naturaleza atmosférica de los cometas cuyas órbitas alargadas no se ajustan al patrón copernicano y cuyo movimiento resulta, en su esquema físico, inexplicable:

5. Algunas consideraciones sobre el Método

Quizás sea llegado el momento de señalar algunas de las precisiones que Galileo hace, en diferentes textos, a propósito del modo en el que se descubren las leyes de la naturaleza.

«Salviati: (...) afirmo que hemos visto en nuestro siglo accidentes y observaciones tan nuevas y de tal magnitud, que no me cabe ninguna duda que, si Aristóteles



viviera en nuestro tiempo, no vacilaría en cambiar de opinión. Lo que se deduce de su mismo modo de filosofar; pues cuando él escribe que los cielos son inalterables, etc., porque nunca se ha visto que se genere alguna cosa nueva, o disuelta alguna de las antiguas, deja entender implícitamente que cuando se vean tales accidentes, habrá de juzgarse lo contrario, y anteponer, como conviene, la experiencia sensorial al razonamiento natural, pues aunque no hubiese querido hacer caso de los sentidos, al menos no hubiera argumentado la inmutabilidad por el hecho de no ver sensorialmente mutación alguna.

Simplicio: Aristóteles establece el principal fundamento de su discurso a priori, mostrando la inalterabilidad necesaria del cielo en sus principios naturales, manifiestos y claros; y lo mismo establece luego a posteriori, por los sentidos y por las tradiciones de los antiguos.

Salviati: Ese que vos decís es el método con que escribió su doctrina, pero no creo que coincida este método con el que usó para investigar lo que escribió; pues estoy casi seguro de que él procuró en primer lugar, por vía de los sentidos, de las experiencias y de las observaciones, asegurarse al máximo de la conclusión, y luego anduvo buscando los medios para poderla demostrar, ya que así procede la mayor parte de las veces en las ciencias demostrativas; esto sucede porque, cuando la conclusión es verdadera, sirviéndose del método resolutivo, fácilmente se encuentra alguna proposición ya demostrada o se llega a cualquier principio claro por sí mismo; pero si la conclusión es falsa, se puede proceder al infinito sin encontrar nunca verdad alguna conocida, si antes no encontrase algún imposible o absurdo manifiesto».

Galileo aparece reivindicando aquí, claramente, la importancia de la empiria para estudiar la naturaleza y, en su caso, ese estudio exige, por estar aquella escrita en el lenguaje de las matemáticas, cuantificación, medida. Dicho en otras palabras, la realización de experimentos. El juez que dictamina sobre la certeza o no de una teoría es esta observación matizada y controlada.

También se permite Galileo licencias expositivas, —en un sentido próximo al que atribuye a Aristóteles—, cuando en distintas partes del diálogo anterior afirma que no le resulta necesario hacer experimentos para afirmar que la bola dejada caer desde lo alto del mástil de un barco navegando en aguas tranquilas caerá al pie de aquél o para mantener que una inclinación de 45° provoca un lanzamiento de alcance máximo: «*Simplicio:* Conque vos no habéis hecho no cien, sino ni siquiera una prueba, ¿y afirmáis su resultado con tan completa seguridad?. Yo vuelvo a mi incredulidad y continúo convencido de que la experiencia ha sido hecha por los principales autores que se sirven de ella, y de que muestra lo que éstos afirman.

Salviati: Yo, sin experiencia, estoy seguro de que el efecto será tal como os digo, porque así es necesario que sea, y añadido además que vos mismo sabéis también



que no puede suceder de otro modo, aunque fingís o simuláis fingir no saberlo. Pero yo soy tan buen arreglador de cerebros que os lo haré confesar a la fuerza (...).

La necesidad de convencer a sus oponentes y, no lo olvidemos, por elevación a la curia romana y al mismísimo Papa de que lo que se defiende no es herético o contra natura explica, a nuestro juicio, el uso recurrente de la doctrina platónica de la reminiscencia.

Por ello, extraer de aquí argumentos para sostener un esencial platonismo de Galileo nos parece excesivo.

Por otra parte, la razón de esta boutade galileana en torno a lo innecesario de la prueba experimental, hay que buscarla más bien en el hecho de que toda ley a la que se llega por medio de la medición tiene necesariamente una forma matemática, razón por la cual su manejo (su dinámica propia) en las convenientes proporciones revelará consecuencias no menos ciertas que la medida necesariamente corroborará.

No hay duda de que, a lo largo de este proceso de mutua interrelación entre experimento y construcción teórica, Galileo llegó a darse cuenta de que las matemáticas eran fundamentales para la física, no porque el mundo de papel de las matemáticas fuera más interesante que el mundo sensible que nos rodea, sino porque el lenguaje de las matemáticas le permitía leer el «gran libro de la naturaleza».

Galileo al afirmar que el libro de la naturaleza está escrito en el lenguaje de las matemáticas y que sólo las cualidades primarias son susceptibles de conocimiento científico objetivo demarca el terreno de la Ciencia.

Conocer científicamente será, pues, establecer relaciones (efecto-cause), —expresadas en ese lenguaje—, entre cantidades que miden cualidades primarias. A estas relaciones llegará observando la Naturaleza con una mirada «cargada de teoría». Hay, pues, un proceso de inducción guiado por una pregunta «interesada». Acertar con la pregunta exige imaginación creadora e intuición científica.

La inducción incorpora abstracción, idealización a fin de «aislar» lo relevante (de ahí la importancia de los experimentos, a veces mal llamados mentales), desmenuzamiento de la complejidad real de un fenómeno y reducción a sus esqueleto sustancial. Se construye, así, un modelo al que se incorporan relaciones matemáticas de las que se extraen consecuencias apoyadas en la dinámica interna del lenguaje, para, finalmente, someter al veredicto de la experiencia las conclusiones extraídas.

Este proceder ha venido repitiéndose, con extraordinaria fortuna y con variantes de mayor o menor detalle, en todos los ámbitos de la Ciencia. Constituye la esencia del denominado Método Científico.



BIBLIOGRAFÍA

Biografías de Galileo:

DRAKE S. Galileo. Ed. Alianza Bolsillo.

GEYMONAT L. Galileo. Ed. Tecnos.

SHEA W.R. La revolución intelectual de Galileo. Ed. Ariel.

Estudios sobre aspectos de la obra de Galileo:

KOYRÉ A. Estudios Galileanos. Ed. Siglo XXI.

Estudios de historia del pensamiento científico.

Ed. Siglo XXI.

Del mundo cerrado al universo infinito. Ed. Siglo XXI.

COHEN I.B. El nacimiento de una nueva física. Ed. Alianza Univ.

HALL A.R. From Galileo to Newton. Ed. Dover.

La Revolución Científica 1500-1750. Ed. Grijalbo.

Obras de Galileo:

GALILEO GALILEI El mensaje sideral. Ed. Alianza Bolsillo.

Carta a Cristina Lorena. Ed. Alianza Univ.

Opúsculos sobre el sistema copernicano. Ed. Alianza Bolsillo.

El ensayador. Ed. Sarpe.

Diálogo sobre los dos sistemas máximos. Ed. Aguilar.

Consideraciones y demostraciones sobre dos nuevas ciencias.

Ed. Editora Nacional.

Otras obras consultadas:

COPERNICO N. Sobre las revoluciones de los orbes celestes. Ed. Editora Nacional.

DIJKSTERHUIS E.J. The mechanization of the World Picture. Princeton.

ROSSI P. Los filósofos y las máquinas 1400-1700. Ed. Labor.