



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

14
261

FACULTAD DE CIENCIAS

GALILEO GALILEI:
UNA REVISION METODOLOGICA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C O
P R E S E N T A:
DIEGO GARCIA REYES



MEXICO, D.F.



1994

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION COORDINADORA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

M. EN C. VIRGINIA ABRIN BÁTULE
Jefe de la División de Estudios Profesionales
Facultad de Ciencias
Presente

Los abajo firmantes, comunicamos a Usted, que habiendo revisado el trabajo de Tesis que realiz(ó)ron el pasante(s) GARCIA REYES DIEGO

con número de cuenta 9052318-4 con el Título:

"GALILEO GALILEI: UNA REVISION METODOLOGICA"

Otorgamos nuestro Voto Aprobatorio y consideramos que a la brevedad deberá presentar su Examen Profesional para obtener el título de FISICO

GRADO	NOMBRE(S)	APELLIDOS COMPLETOS	FIRMA
	FIS.	JOSE ERNESTO MARQUINA FABREGA	
Director de Tesis	DR.	LUIS ESTRADA MARTINEZ	
	DR.	SAHEN HACYAN SALERYAN	
	FIS.	JOSE LUIS ALVAREZ GARCIA	
Suplente	DR.	JUAN MANUEL LOZANO MEJIA	
Suplente			

Para mi padre, con gran cariño y admiración

Para Paula y Karina

**A Pepe Marquina, gracias por mantener en mí
la confianza en la Ciencia, como empresa
humana digna de ser vivida**

**A todos aquéllos que han mostrado un
genuino interés por este trabajo, mi
más reconocida gratitud**

Índice

Introducción		1
Capítulo 1.	Galileo y el Método	3
Capítulo 2.	Galileo, astrónomo	8
	2.1 La astronomía en tiempos de Galileo	8
	2.2 Primeras incursiones en astronomía	10
	2.3 El <i>Sidereus Nuncius</i> : el telescopio y la observación en la nueva física	12
	2.4 Otros descubrimientos astronómicos	18
	2.5 Una incursión en los caminos de la fe	20
	2.6 Las controversias en astronomía	22
	2.7 Los métodos del Galileo astrónomo	24
Capítulo 3.	El Diálogo, nexa conflictivo	27
	3.1 El <i>Diálogo sobre los Dos Máximos Sistemas del Mundo</i>	27
	3.2 La crítica a Aristóteles	36
	3.3 Las contradicciones de la obsesión copernicana	40
	3.4 El problema del movimiento terrestre	45
	3.5 Una teoría mecánica imposible	52
	3.6 Los elementos metodológicos del <i>Diálogo</i>	56
Capítulo 4.	Galileo, mecánico	60
	4.1 El contenido de los <i>Discorsi</i>	61
	4.2 La resistencia de los sólidos: la nueva ciencia de los <i>Discorsi</i>	69
	4.3 La antigua ciencia del movimiento	75
	4.4 La vieja ciencia reconstruida	78
	4.5 La matemática, lenguaje de la mecánica	87
	4.6 El método experimental y el experimento pensado	89
	4.7 Los métodos del Galileo mecánico	97
Capítulo 5.	Il Saggiatore	106
	5.1 Otra polémica en astronomía	100
	5.2 El contenido científico de <i>Il Saggiatore</i>	104
	5.3 El manifiesto metodológico de una ciencia nueva	108

Capítulo 6. Galileo y las metodologías	115
6.1 Las matemáticas y la experimentación en Galileo	116
6.2 Galileo, Platón y Aristóteles	119
6.3 Galileo Galilei, el padre de una ciencia rica en métodos (conclusión)	123
Bibliografía	127

Introducción

Cuando se habla de método científico las opiniones discordantes y las controversias apasionadas resultan interminables y es que, sin ánimo de profundizar en una discusión por lo demás complicada y fuera de lugar, se puede decir que no existe tal cosa como un único e inalterable método para hacer ciencia. Una gran cantidad de estudiosos ha dedicado sus esfuerzos a la estructuración de lo que ha llamado, desde su particular punto de vista, el Método, pero siempre existen argumentos en favor de otros esquemas.

Resulta un hecho interesante el notar que, pese a las diferencias que puedan existir entre las metodologías defendidas por multitud de epistemólogos, científicos o no, la mayoría de ellas, si no es que todas, adoptan a Galileo Galilei como su creador. Así, aun cuando las polémicas en torno a lo que debe ser el "verdadero método" no han sido resueltas, casi nadie discute el hecho de que Galileo es el "padre del método científico", cualquiera que éste sea.

El objetivo fundamental de esta tesis es hacer una revisión de las obras más importantes de Galileo para distinguir los caminos metodológicos que pudo seguir a lo largo de su trabajo y contrastarlos con aquellos que le han atribuido algunos de sus más connotados estudiosos. Para lograr esto, luego de dar una idea general de las opiniones que giran en torno al tema, analizaremos su obra astronómica, representada fundamentalmente por el *Sidereus Nuncius* (*El Mensajero Sideral*) de 1610. Posteriormente, a través de su *Diálogo sobre los Dos Máximos Sistemas del Mundo* de 1632, encontraremos la conexión entre astronomía y mecánica, impregnada por el conflicto surgido en su defensa del copernicanismo. Siguiendo con la mecánica, discutiremos sus *Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias* de 1638 para, finalmente, retornar a 1623 y a otro libro sobre astronomía, *Il Saggiatore* (*El Aguilatador*), en donde definió, de forma muy concreta, algunos elementos metodológicos que heredó la ciencia moderna. Este orden en la exposición, aunque no estrictamente cronológico, nos servirá para concluir algunos aspectos interesantes de la metodología galileana.

Encontraremos, entonces, que el hecho de que casi cualquier método sea atribuible a Galileo revela una riqueza en la obra del

gran físico toscano que no es enmarcable en ninguna estructura rígida e inalterable, sino que más bien toma forma dentro de un esquema de flexibilidad aún más amplio que el que Feyerabend (1989) presenta en su magnífica obra *Contra el método*. En este sentido, podremos concluir que intentar enclaustrar la obra de Galileo en una sólo metodología es dar una muy pobre visión de él y de sus aportaciones, así como del proceder de la ciencia misma^(*).

(*) Como no es la finalidad de este escrito el dar una definición de método - lo que representa un problema antiguo y no resuelto -, se tomarán como sinónimos los términos "metodología" y "método". De acuerdo con el contexto, éstos podrán significar los procedimientos empleados para hacer ciencia o la justificación que se encuentra detrás de ellos. Por su parte, epistemología se referirá a la actividad filosófica que se ocupa en general del "problema del método".

Capítulo 1. Galileo y el Método

La obra de Galileo ha sido utilizada para apoyar un sinnúmero de metodologías para hacer ciencia. Casi todo historiador y epistemólogo ha apelado al "Caso Galileo" con el propósito de justificar su particular apreciación de cómo deben proceder la razón, la ciencia y el método. Esta actitud tiene su base en la enorme e innegable importancia de la obra galileana como piedra angular de una de las revoluciones científicas más determinantes de la historia humana: la iniciada en el siglo XVI con la obra de Copérnico y culminada en el XVII con la de Newton (Thuillier, 1983). Si bien Copérnico dio el fundamento para construir una crítica definitiva al sistema descriptivo heredado de Aristóteles y Ptolomeo, que predominó durante casi dos milenios, fue Galileo quien sentó las bases para el funcionamiento ulterior de la ciencia. Galileo tuvo todos los elementos necesarios para producir una revolución en la ciencia, y la que realizó al interior de la Revolución Copernicana no es ciertamente despreciable, ya que permitió a sus sucesores plantear nuevos criterios de verdad y desarrollar mecanismos novedosos para la adquisición del conocimiento. En este contexto, no es de extrañar que el papel del físico italiano haya sido exagerado por los científicos en general, al grado de considerarlo el creador de la ciencia moderna y del método científico o experimental, ni que sus contemporáneos y sucesores más inmediatos hayan recibido una influencia tan poderosa de su obra, ni que incluso el propio Newton le haya dado la paternidad de sus dos primeras leyes del movimiento (Cohen, 1985).

En cuanto al problema del método, la influencia de Galileo se deja sentir desde el momento en que es el primer científico que aborda a la ciencia desde un punto de vista que podemos llamar moderno. La forma de realizar experimentos e interpretar sus resultados, el papel de las matemáticas como lenguaje y herramienta de lógica deductiva, la clasificación de cualidades de acuerdo con su cabida en el lenguaje y el esquema descriptivo, el aislamiento en que coloca a la ciencia con respecto de la religión, todos ellos son elementos que la ciencia moderna ha adoptado en líneas generales y en cuya génesis la opinión galileana jugó un rol de fundamental importancia.

Los problemas empiezan cuando se trata de definir qué tipo de metodología empleó Galileo para hacer avanzar exitosamente la empresa de sentar las bases para una ciencia naciente. Feyerabend (1989) utiliza su obra como ejemplo de que no existe ni puede existir tal cosa como un método científico "correcto", de que la idea de un conjunto de reglas inamovibles no tiene bases porque toda regla ha de ser violada, voluntaria o involuntariamente, en algún momento, si no se quiere llegar a un estado de estancamiento conceptual. El hecho de que este autor acuda a Galileo es ciertamente revelador, ya que implica que el científico toscano no debió ligarse a una metodología rígida e inalterable, sino que pudo proceder de acuerdo con el principio de que "todo vale" (Feyerabend, 1989) es decir, con una flexibilidad extraordinaria cuya única finalidad consistió en hacer crecer el conocimiento científico.

Dentro de la tradición de análisis y crítica a la obra galileana encontramos algunos momentos de suma importancia que permiten ver las principales vertientes metodológicas que la han querido hacer suya. En el marco del positivismo existe la concepción del Galileo "padre del método experimental", en la que se le coloca como creador de una ciencia basada fundamentalmente en la observación y análisis de la experiencia, encarnada en la forma del experimento cuidadoso y exhaustivo, de la medición precisa y de la obtención de conclusiones a partir de datos empíricos, siendo éstas válidas siempre que el propio experimento así lo corrobore. El experimento en Galileo constituye, como lo expresa Lobo (1989), la única fuente de la verdad.

Esta imagen empirista encuentra una profunda crítica en los estudios de Koyré quien, como declara Thuillier (1983), tuvo el mérito de destruir la idea de un Galileo que construyó su ciencia limitándose a ver "cómo rodaban las bolas" (p.589), siendo imprescindible un considerable esfuerzo de abstracción para dar estructura a la nueva física. Koyré y sus seguidores inclinaron la balanza hacia la idea de un Galileo racionalista, al grado de considerarlo incapaz de realizar un experimento real y preciso. En el fondo de esta idea se hallan la gran exactitud que el físico expone en algunas de sus más importantes experiencias y la improbabilidad de

que contase con los recursos materiales adecuados para lograrla (Koyré, 1985). En su obra *Estudios Galileanos*, Koyré (1988) declara que casi todos los experimentos de Galileo fueron mentales. Pese a la innegable formalidad en el análisis de sus aportaciones, a las que además pudo colocar en el contexto de su época mediante el estudio exhaustivo de la física heredada de los griegos y del medioevo, Koyré inauguró una imagen extrema de la ciencia galileana como contrapunto del empirismo al cual fue reacción: la imagen del Galileo racionalista para quien, como Koyré (1988) insiste frecuentemente, "la buena física se hace a priori". En su artículo *Orígenes de la ciencia moderna* Koyré (1985) esboza su concepto de un método en Galileo en el que, como premisa fundamental, se marca un claro predominio de la razón sobre la experiencia, de la teoría sobre los hechos. Todo el juego de la ciencia se realiza con el razonamiento, y toda posible contrastación con el mundo de la experiencia sensible surge de la teoría y es interpretada por ella.

La influyente obra de Koyré halló a su vez una importante crítica en la revaloración que Drake (1973) hizo de los experimentos de Galileo con planos inclinados. El trabajo de Drake inició una serie de reconsideraciones en torno al Galileo experimentalista, como las de MacLachlan (1973) y el experimento de intercambio de agua y vino expuesto por Galileo en la Primera Jornada de los *Discorsi*, o las de Naylor (1976) y el experimento de péndulos isócronos que se describe en la Cuarta Jornada de la misma obra. Estas aportaciones han permitido nuevamente que la balanza se incline hacia la imagen de un Galileo empirista, aunque concebido ya bajo una óptica más moderada que el empirismo a ultranza, ante el que aparentemente reaccionó Koyré.

En el trasfondo de esta polémica parece encontrarse la ancestral controversia entre racionalismo y empirismo o, si se quiere, entre platonismo y aristotelismo. Es conocido el debate entre ambas escuelas filosóficas y, siendo Galileo una figura de tal importancia epistemológica, su obra no podía quedar relegada de tal contienda. Los escritos de Koyré dibujan a un Galileo platónico en tanto que Drake y sus seguidores se inclinan a ver un aristotelismo en su labor científica.

Entre las dos posturas extremas cabe mencionar algunas que intentan mantener un equilibrio. Geymonat (1986) afirma que Galileo estuvo plenamente conciente de la complejidad del problema del método, y que evitó por ello cualquier posición dogmáticamente empirista o racionalista. Siguiendo esta idea, Lobo (1989) coincide con Geymonat en afirmar que tal fue la razón por la que Galileo se hubiera negado a escribir un "tratado del método" para inaugurar la nueva ciencia. Sin embargo, Geymonat (1986) inclinará un tanto la balanza hacia el empirismo al hacer del gusto de Galileo por las "artes mecánicas" y la técnica la base de su revolución metodológica. Por su parte, Fischer (1986), aunque también ligeramente partidario del empirismo en la obra de Galileo, resalta como base del razonamiento del científico su repudio a pactar compromisos con autoridades o experiencias sensibles, su consistencia lógica y deductiva y su desprecio a las "cualidades ocultas" en la descripción de la naturaleza. El mismo Drake (1986) toma una postura más centrada en su biografía *Galileo*, cuando afirma que el físico italiano no dio más peso a la "experiencia sensible" que a las "demostraciones necesarias" (p.112). Esta misma idea la expone Hall (1981), pero con una cierta tendencia hacia el racionalismo al aclarar que, pese a todo, Galileo no confía suficientemente en la experiencia sensible y prefiere abordarla a través de la razón.

De la obra de Galileo Galilei pueden encontrarse infinidad de opiniones y comentarios, capaces de apoyar casi cualquier postura epistemológica que se desee. Lo que es imposible negar es el hecho de que representa un parteaguas fundamental en la metodología: la ciencia se hacía de ciertas maneras antes de Galileo y se hace, hasta la fecha, de ciertas otras después de él. En este sentido, su papel como innovador epistemológico resulta prácticamente incontrovertible.

Sin olvidar el marco que pueden dar las aportaciones de los ya mencionados estudiosos y algunos otros más, es conveniente introducirse en la obra propiamente dicha para percatarse de su gran riqueza metodológica. Siguiendo a Alvarez & Marquina (1993b), es muy adecuado hacer una distinción entre los "dos frentes" en los cuales Galileo llevó a cabo su proyecto científico-filosófico: la física del movimiento y la astronomía. Dicha diferenciación es muy útil en el

problema de la epistemología galileana por cuanto que es notable la separación que el propio científico hace de su proceder en ambas ramas. Con esta idea, los capítulos que siguen estarán dedicados al análisis y comentario de los elementos epistemológicos en las diversas facetas de la obra de Galileo.

Capítulo 2. Galileo, astrónomo

Podemos considerar que la obra astronómica de Galileo gira en torno a dos elementos fundamentales: la defensa observacional del copernicanismo y el papel que el telescopio jugó en dicha defensa.

Un aspecto importante es el hecho de que Galileo no era astrónomo especializado, como sí lo fueron algunos de los jesuitas del *Collegio Romano* contra los cuales polemizó sobre sus observaciones. Prueba de ello es que fue hasta la supernova del año de 1604, cuando el científico contaba ya con cuarenta años y llevaba casi veinte en sus investigaciones sobre mecánica, que demostró interés por la astronomía, y eso hasta que una carta llamó su atención sobre el fenómeno, seis días después de ocurrido (Fischer, 1986).

Esa tardía incursión en la astronomía repercutió, indudablemente, en su forma de argumentar dentro de ella, muy diferente a la que usó en sus estudios de mecánica, y representa una separación de metodologías entre ésta y aquélla.

Es importante, antes de introducirnos en la obra galileana sobre astronomía, dar una breve semblanza de cuál era el estado de dicha ciencia en el tiempo en que Galileo inició sus observaciones.

2.1 La astronomía en tiempos de Galileo

Para finales del siglo XVI el esquema astronómico que se había manejado por más de mil quinientos años estaba en decadencia. El sistema de Ptolomeo, creado según los preceptos filosóficos de Aristóteles, ya no era suficiente para describir los movimientos planetarios con la exactitud requerida. El perfeccionamiento de la observación astronómica, debido fundamentalmente a los trabajos del danés Tycho Brahe, hacía ya incompatibles los datos con los cálculos teóricos que, desde la génesis del sistema, habían sido en extremo complicados. En efecto, la utilización del círculo como única curva posible para describir los movimientos planetarios (herencia de una concepción estético-filosófica del Cosmos griego) había requerido, desde Ptolomeo, que, para ajustar las observaciones, fuese necesario recurrir a epiciclos, excéntricas y deferentes; composiciones de movimientos circulares; y a ecuanes,

que descentraban incluso los movimientos uniformes de las anteriores y rompían toda posible simetría (Koestler, 1989).

La obra de Nicolás Copérnico, *De Revolutionibus Orbium Caelestium* (1543), había sido la primera tentativa seria de cambiar tal estado de cosas y establecer una nueva visión de los movimientos planetarios, pero sin romper con el esquema ancestral de las trayectorias circulares. A resultas de esto, el sistema copernicano tenía, a los ojos de la mayoría de los astrónomos de la época, el grave defecto de no simplificar demasiado los cálculos (seguida recurriendo a todos los tipos de órbitas que Ptolomeo utilizaba y sólo prescindía de los ecuantos) y, sin embargo, cambiar de lugar a la Tierra y al Sol, haciendo de éste y no de la primera el centro de los movimientos planetarios. Este defecto, no obstante, podía ser excusado cuando de "salvar los fenómenos" se trataba, y la astronomía de fines del Medievo tenía una postura francamente instrumentalista. Es por ello que el sistema copernicano no despertó reacciones negativas en sus inicios, viéndosele exclusivamente como un artilugio de cálculo, favorable en ciertas circunstancias. Para la época de Galileo empezaba a surgir una postura, sin embargo, que ya requería de un análisis cuidadoso: la posibilidad de la realidad física de dicho sistema. El astrónomo Johannes Kepler fue el primer y más entusiasta defensor de esta posición, pero sus argumentaciones en este campo quedaron lejos de ser efectivas, siendo él, no obstante, quien sentó las bases para la comprensión cuantitativa del movimiento de los planetas a través de sus tres leyes, ignoradas por Galileo pero justipreciadas por Newton. Correspondió al propio Galileo el mérito de colocar sobre la mesa y defender los argumentos más efectivos en favor de la realidad física de la hipótesis copernicana. Esta efectividad, como veremos, radicó en algunos de los elementos metodológicos, no siempre racionales, más interesantes del Galileo astrónomo.

Paralelamente a la posición de Kepler y Galileo se había forjado otra en extremo ingeniosa: la propuesta por Tycho Brahe. El astrónomo danés fue el más concienzudo y confiable observador de los cielos en la época anterior al telescopio. Sus

observaciones le hicieron ver, más que a ningún otro, la imposibilidad matemática de ajustar el sistema ptolemeico a los datos. Por otro lado, respetuoso de la tradición, consideró imposible un sistema como el copernicano, en el que el Sol se encontrase como centro de todos los movimientos planetarios, la Tierra incluida. Expuso, entonces, un esquema en el que la Tierra continuaba siendo centro del sistema pero el Sol, a su vez, de las trayectorias circulares de todos los demás planetas. Así, el Sol con toda su compañía planetaria giraba en torno a la Tierra, inmóvil en el centro del Cosmos como quería la tradición aristotélica. De esta forma podía ajustar, epiciclos, excéntricas y deferentes de por medio, los datos observacionales con tanta exactitud como el sistema propuesto por Copérnico (Fischer, 1986).

En la época de Galileo, la mayoría de los astrónomos especializados optaron por el sistema de Brahe como postura intermedia entre los de Ptolomeo y Copérnico. Sus ventajas cuantitativas lo hacían superior al primero y el geocentrismo filosóficamente más adecuado que el segundo. La confrontación astronómica ya no era, aunque el físico toscano no lo advirtiese, entre Ptolomeo y Copérnico, sino entre éste y Tycho Brahe (Alvarez & Marquina, 1993b).

2.2 Primeras incursiones en astronomía

El 9 de octubre de 1604 apareció una supernova. Galileo se encontraba enfrascado en sus estudios de mecánica y no advirtió el fenómeno sino hasta el 15 de octubre, cuando una carta del astrónomo Baldessare Capra lo puso sobre aviso. A partir de ese momento fijó su atención en la nova hasta que ésta se debilitó y terminó desapareciendo en marzo del año siguiente. Este repentino interés de Galileo por la estrella nueva se explica por su búsqueda de las consecuencias que ella podría tener para la confrontación entre los sistemas de Copérnico y Ptolomeo (Fischer, 1986). Y es que, pese a que su campo de estudio fundamental era la mecánica, el físico tenía una definida postura cosmológica: se había adherido al copernicanismo al menos desde 1597, cuando escribió en una carta una réplica ante ciertos argumentos que Mazoni había publicado contra dicho esquema (Drake, 1986). Además,

aun cuando jamás se había dedicado a la astronomía observacional, parece ser que ya tenía una posición muy definida en lo que al proceder general en esta ciencia se refiere. Desde sus cuadernos escolares, Galileo se manifiesta claramente contra una postura instrumentalista en ella. Todo sistema astronómico que se postule como adecuado en el cálculo debe ser, según él, posible en la realidad (Fischer, 1986). Esta idea será determinante en la forma en que terminará adoptando y defendiendo al modelo copernicano.

Por la época de la supernova, Galileo se dedicaba al análisis y crítica de los argumentos mecánicos de Aristóteles, más que a la defensa del heliocentrismo, (Fischer, 1986) y su imprevisto abandono de la mecánica por la astronomía puede explicarse por el deseo de encontrar en ella más razones en contra del edificio aristotélico.

Desde aquí se delinea ya una actitud que fue, como bien lo expresa Fischer (1986), uno de los fundamentos más importantes de los éxitos galileanos: el razonamiento "consecuente y deductivo" (p.139), que jamás se detenía sino hasta las últimas consecuencias alcanzables por sus críticas y argumentos. Si existe una constante metodológica en el proceder de Galileo a lo largo de toda su obra, bien puede ser ésta.

En su interés por la nova de 1604, Galileo demuestra la necesidad de explorar todo posible argumento en favor de su postura antiaristotélica en la mecánica. El científico dictó tres conferencias sobre el tema en las que defendió, basándose en observaciones cuidadosas, el hecho de que el fenómeno se encontraba por encima de la esfera de la Luna, debido a su ausencia de paralaje (Drake, 1986). Este fue el primer ataque público de Galileo a un concepto aristotélico: la perfección de los cielos. A raíz de esta manifestación, no tanto de copernicanismo sino de antiaristotelismo, Galileo se vio sumergido en su primera gran controversia sobre astronomía. El astrónomo jesuita Cremonini, a través de su alumno Lorenzini, defendió la posición de la nova como parte de la mutable esfera infralunar. Galileo escribió, bajo el seudónimo de Cecco di Ronchitti, un *Diálogo a propósito de la nueva estrella* (1605) donde se

manifiesta ya su habilidad didáctica y en el que un campesino toscano destroza los argumentos peripatéticos - haciendo gala de una dialéctica que poco tiene que ver en muchas ocasiones con las razones astronómicas -, aprovechándose de la constante confusión del inexperto Lorenzini entre "paralaje" y "paralapsis" para satirizar contra la ingenuidad aristotélica (Fischer, 1986). Aquí tenemos otro elemento metodológico que será básico en su obra, fundamentalmente en la astronómica: la apelación a la propaganda y a los trucos psicológicos para convencer de sus argumentos (Feyerabend, 1989).

Pese a los esfuerzos dedicados por Galileo en el tiempo en que duró la nova, no pudo establecer paralaje alguno que le permitiese determinar su posición más precisamente. Por los cambios que introdujo en la segunda edición de su pequeño *Diálogo* parece concluirse que durante un tiempo dio por fracasado al sistema copernicano. Al no poder sacar nada en claro de sus observaciones, y como el fenómeno fue desapareciendo con los meses, el físico terminó su primera incursión en el terreno de la astronomía observacional y retornó a sus estudios de mecánica (Fischer, 1986).

2.3 El *Sidereus Nuncius*: el telescopio y la observación en la nueva física

Luego de casi un lustro de hallarse sumergido en sus investigaciones del movimiento, Galileo regresa al campo de la astronomía gracias a su interés, primordialmente económico (Galileo, 1988a), en el telescopio que venía de los Países Bajos. En el *Sidereus Nuncius* de 1610 describe su reconstrucción del aparato:

"Cerca de diez meses hace ya que llegó a nuestros oídos la noticia de que cierto belga había fabricado un antejo mediante el que los objetos visibles muy alejados del observador se discernían muy claramente como si se hallasen muy próximos. Sobre dicho efecto, en verdad admirable, contábase 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, Jacobo Badovere, de París, 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."

(Galileo, 1988a; p.38; las negritas no se encuentran en el original).

En la parte resaltada, Galileo explica cómo partiendo de argumentos teóricos.- la "teoría de las refracciones" - consigue hacer un anteojo. Ya desde aquí podemos encontrar justificaciones para apoyar ciertas metodologías en su obra. De entrada, el científico se coloca manifiestamente en una postura racionalista, muy al estilo de como Koyré quiere que sea el proceder galileano. Sin embargo, en *Il Saggiatore* (1623) se muestra una posición totalmente opuesta:

"Fue así el razonamiento: este artificio, o consta de una sola lente o de más de una. De una sola no puede ser, pues su figura o es convexa, es decir, más gruesa en el medio que en sus extremos, o es cóncava, es decir, más delgada en el centro, o está comprendida entre superficies paralelas; ésta última no altera en absoluto los objetos visibles aumentándolos o disminuyéndolos; la cóncava los disminuye y la convexa los aumenta, si bien los muestra bastante indistintos y confusos; en consecuencia, una sola lente no basta para producir el efecto. Pasando después a dos, y sabiendo que la lente de superficies paralelas no altera en absoluto, como ya se ha dicho, concluí que el efecto no se podía seguir tampoco del acoplamiento de ésta, con cualquiera de las otras dos. Quedé, pues, constreñido a experimentar con la composición de las otras dos, esto es, de la convexa y la cóncava, y ví que así se producía el efecto; tal fue el proceso de mi razonamiento en el cual de ninguna ayuda me sirvió la preconcebida idea de la verdad de la conclusión" (Galileo, 1981b; p.114).

De esto podemos concluir que el propio Galileo era capaz, en dos textos diferentes, de mostrar procedimientos distintos de aproximación a un resultado (en este caso la construcción de un telescopio). Su verdadero proceder debió ser una mezcla de ambas metodologías. Si bien es cierto que sus primeros telescopios debieron construirse con un alto grado de empirismo - ya que Galileo no era experto en óptica geométrica (por lo demás una ciencia nacida teóricamente con los trabajos de Giovanni Battista Della Porta y Johannes Kepler en la última década del siglo XVI y la primera del XVII) - también es un hecho que el propio Galileo se hizo de un ejemplar de la *Dióptrica* de Kepler de 1611 con el fin de mejorar su aparato y, al parecer, quedó defraudado (Fischer, 1986). No se conforma con el logro empírico y, todavía en una carta a Giovanni Tarde en 1614, se lamenta de que la teoría

de las refracciones no es bien conocida y que el libro de Kepler de 1611 es muy oscuro (Geymonat, 1986).

Pese a su ignorancia en el funcionamiento teórico del telescopio, Galileo no vacila en utilizarlo para sus fines astronómicos. Una vez que lo ha aprovechado con los objetivos comerciales que le permitieron doblar su sueldo en la Universidad de Padua, el físico italiano lo dirige al cielo. Esta nueva actitud y la que muy pronto le siguió, la divulgación de sus observaciones, constituyen dos de sus principales méritos en el campo astronómico. Con ellos cambia por completo el nivel de discusión del copernicanismo. En su revolución de las bases observacionales de la astronomía, Galileo descubre un camino tan fructífero que se erigió como uno de los pilares fundamentales de la ciencia moderna: la potenciación de los sentidos haciendo uso de la técnica (Cohen, 1985). Como veremos, este proceder, situado en el contexto de su época, resulta extremadamente problemático y revolucionario.

En 1610 Galileo publicó los primeros resultados de sus observaciones con el telescopio en el *Sidereus Nuncius* (usualmente traducido como *El Mensajero Sideral*). El libro, conciso y directo, representa también una innovación. No es solamente la publicación de observaciones astronómicas lo que le da importancia, sino el estilo. Como afirma Koestler (1986) el *Sidereus Nuncius* está escrito en muchos pasajes con el lenguaje de la ciencia moderna.

El primer descubrimiento astronómico que Galileo expone en su libro es el de las irregularidades en la superficie lunar. Con una descripción asombrosamente detallada, el físico explica que las manchas que se observan en la Luna son en realidad escabrosidades iluminadas de maneras diversas por el Sol. Nuestro satélite está lleno de montañas y valles muy semejantes a los que se encuentran en la Tierra (Galileo, 1988a). Valiéndose de las sombras en el límite sinuoso entre la región de luz y la de penumbra de la Luna en fase creciente o menguante, Galileo es capaz de calcular geoméricamente, con un error grande pero no exagerado, la altura de algunas de las elevaciones del relieve lunar. Busca una explicación de por qué la circunferencia del satélite se ve

perfecta. Aunque su conclusión sobre la existencia de una atmósfera que hace difusos los contornos en la periferia es equivocada, cabe notar la profundidad de la crítica a la que Galileo somete sus propias conclusiones, intentando rebatir toda posible objeción a ellas. Posteriormente, discute la procedencia de la claridad que se observa en la región de penumbra de la Luna en cuarto, concluyendo que se trata del reflejo de luz que procede de la Tierra, que a su vez la refleja al recibirla del Sol. Galileo usa esta conclusión para atacar la idea de que la Tierra es un mundo "carente de luz y movimiento" (Galileo, 1988a; p.61) aprovechando la ocasión para introducir, por primera vez de manera pública, su apoyo a la teoría del movimiento de nuestro planeta.

Como segundo descubrimiento, da a conocer algunas estrellas invisibles a simple vista pero perfectamente discernibles a través del telescopio. Describe nuevas estrellas en las Pléyades y en el Cinturón y la Espada de Orión. Expone, adicionalmente, que las nebulosas y la Vía Láctea son conglomerados de miles de estrellas que resultan imposibles de ver sin la ayuda del anteojo (Galileo, 1988a).

Finalmente, como última observación, anuncia la existencia de cuatro satélites en torno a Júpiter. Con una exactitud sorprendente detalla sus observaciones diarias, a diversas horas de la noche, durante casi dos meses (del 7 de enero al 2 de marzo de 1610). Describe y dibuja las posiciones de las pequeñas lunas con respecto a Júpiter y de ellas concluye que, sin lugar a dudas, orbitan en torno al planeta (Galileo, 1988a). Aquí Galileo hace astronomía al estilo de la ciencia moderna, siendo perfectamente metódico y constante en sus observaciones, llevando una bitácora en la que describe todas las variaciones observadas - cambios de brillo, posición respecto a la eclíptica, tránsito del sistema joviano cerca de una estrella fija, etc. - y detallando las circunstancias observacionales cuando éstas son adversas (como la presencia de nubes).

El efecto del *Sidereus Nuncius* fue enorme, tanto en los círculos especializados como entre la gente común. Su estilo accesible y breve permitió a muchos inexpertos participar de los

descubrimientos astronómicos. La precisión de las observaciones dejaba poco terreno de discusión cuantitativa a los astrónomos profesionales. El apoyo que los diversos resultados de Galileo dieron a posiciones de crítica al aristotelismo constituyó uno de los problemas filosóficos más importantes para los seguidores de la tradición escolástica. Los relieves lunares manifestaban semejanzas entre la Tierra y la Luna, terminando así con la postura aristotélica de una separación total entre las regiones supra y sublunar. La existencia de estrellas desconocidas e invisibles a simple vista, derrumbaba la idea de que los cuerpos celestes habían sido creados para deleite humano. Los satélites de Júpiter, aunque no eran una prueba del sistema de Copérnico, sí destruían la imagen de un esquema del mundo en el que todos los movimientos se encontraban centrados en la Tierra. Como declara Koestler (1986) no era éste o aquél detalle lo que lo hacía importante, sino el conjunto del *Sidereus Nuncius* lo que causaba tan gran efecto. Por otro lado, Galileo no dejaba de lado el uso de sus resultados con el fin de apoyar la posición copernicana y la crítica al aristotelismo. A pesar de que ideas como la de los relieves en la Luna ya habían sido manejadas antes - el astrónomo inglés Harriot ya tenía mapas lunares en 1609, aunque no publicados -, Galileo es el primero en colocarlas en el contexto adecuado para producir los efectos de crítica al esquema tradicional del mundo.

Uno de los elementos más controvertidos para la aceptación de los resultados del *Sidereus Nuncius* fue el ataque a las observaciones telescópicas. La tradición aristotélica mantenía una confianza ilimitada en los sentidos humanos, los cuales no podían dar una idea engañosa del mundo. Pretender que un aparato como el anteojo pudiese mejorar una de las percepciones sensibles constituía una idea totalmente nueva y muy problemática. Por otro lado, aun superada esta dificultad y la que representaba el acostumbrarse a mirar a través de un sistema que, la mayoría de las veces, sólo entregaba imágenes borrosas, existían otras que concernían a los astrónomos especializados: a) aceptar como datos objetivos las imágenes sin una teoría bien desarrollada y

b) interpretar esos datos, una vez aceptados, con base en teorías interpretativas novedosas (Solís en Galileo, 1988a). La tajante separación que, en la época de la publicación del *Sidereus Nuncius*, existía entre Galileo y los astrónomos profesionales se encontraba centrada en la confianza que el primero había adquirido en sus observaciones con el telescopio. Actitudes como las de Libri y Cremonini - los jesuitas que se negaron a observar a través del instrumento -, tan criticadas por la posteridad, hallan una justificación en el problema de aceptar lo que se veía con el novedoso y mal sustentado aparato (Solís en Galileo, 1988a). La única defensa que los aristotélicos encontraban contra esta nueva forma de copernicanismo, apoyado en una base empírica dudosa, era negarse a mirar a través del antejo, o bien catalogar las observaciones como defectos ópticos o distorsiones en las lentes. El poca valía que de no poca valía en el terreno científico y filosófico siguiera esta línea, muestra lo radicalmente nuevo que significaba el dar crédito a los resultados sacados de un instrumento y basar en ellos el conocimiento de la naturaleza (Cohen, 1985). Ya hemos comentado cómo el propio Galileo no tenía una explicación teórica del antejo. Si confiaba en él no es, por lo tanto, por razones teóricas, sino por haberlo probado cientos de veces en las condiciones controladas de la observación terrestre y haber extrapolado su confianza a las circunstancias donde no tenía el control. Su proceder en este sentido resulta, en principio, tan racional como haber utilizado los resultados matemáticos de Kepler (Geymonat, 1986). Sin embargo, el convencimiento al que Galileo llegó, merced a sus múltiples pruebas terrestres, no era algo que pudiese transmitirse de inmediato a sus opositores, y mucho menos si ello conllevaba implícitamente un ataque frontal a una filosofía por ellos aceptada. Además, como Feyerabend (citado por Fischer, 1986; p.83) declara, la extensión que Galileo hace del uso del antejo de la observación terrestre a la celeste implica también un cambio filosófico muy importante. Un peripatético bien podía no aceptar tal extrapolación con base en la separación que el aristotelismo hace de la física sublunar y la supralunar: el que el telescopio sirva en la Tierra no implica, de ninguna

manera, que funcione igualmente para los cielos. Para aceptar la observación telescópica se requiere de un cambio en la filosofía que Galileo da:

"Hacemos de nuestros ojos fuente de propagación de toda luz, y creemos que lo que nuestros ojos no ven no es iluminado; ¿acaso los objetos luminosos cuando no los vemos es porque no llega luz a ellos?" (Galileo, citado en Geymonat, 1986; p.53)

De esta manera, el científico reformula el proceder empírico. Aceptar que los sentidos humanos pueden encontrarse limitados es ya un cambio importante de actitud epistemológica; llegar a la conciencia de que, pese a tales limitaciones, hay que seguir confiando en ellos e inventar los medios para perfeccionar su percepción, inaugura una tradición observacional que habría de marcar el empirismo en la nueva ciencia (Geymonat, 1986).

La aceptación de la observación telescópica implicaba ese cambio de filosofía que, en general, la mayoría de los astrónomos especializados de la época de Galileo no tuvieron demasiada dificultad en dar. Muchos de ellos que, en un principio, habían criticado e incluso negado el valor del anteojo, una vez que tuvieron la oportunidad de probar el instrumento y convencerse, también empíricamente, de su funcionamiento, dieron fácilmente el giro filosófico requerido y tomaron como aceptables las observaciones celestes con él realizadas. Es sabido que astrónomos jesuitas como Clavius y Scheiner se convirtieron rápidamente en hábiles observadores con el telescopio. De esta forma, en los años que siguieron a la publicación del *Sidereus Nuncius*, la mayoría de los astrónomos destacados se encontraban ya muy lejos de menospreciar o negar el valor del instrumento (Fischer, 1986). Sin embargo, la confianza que muchos especialistas adquirieron en los datos tomados con el anteojo no implicó, como lo quería Galileo, su convencimiento en el sistema copernicano. Los astrónomos jesuitas, aunque de acuerdo con la veracidad de las observaciones, no lo estuvieron con la interpretación que Galileo dio de ellas (Geymonat, 1986).

2.4 Otros descubrimientos astronómicos

Armado con su telescopio, Galileo continuó realizando observaciones astronómicas. El revuelo que había causado el

Sidereus Nuncius había dado paso a que multitud de astrónomos, aficionados y profesionales, se hicieran de anteojos - bastante difundidos incluso por el propio Galileo que montó un taller para construirlos - y los dirigieran al cielo. El físico italiano vio amenazada su preminencia como descubridor de los fenómenos celestes y apeló a anagramas para proteger la prioridad de sus observaciones. En una carta de julio de 1610, a Belisario Vinta, da a conocer el extraño aspecto del planeta Saturno, que aparece a través del telescopio como "triple". Había encontrado los anillos de Saturno y, por la imperfección de su instrumento, los había interpretado como dos estrellas que se situaban a ambos lados del planeta central. En cartas posteriores muestra su perplejidad ante la forma cambiante de esas "estrellas" que bordean a Saturno y hace algunos dibujos que, actualmente, podemos identificar fácilmente como los anillos (Galileo, 1988a). Un poco más tarde, en diciembre, hace circular un anagrama, que luego descifra, anunciando las fases de Venus. Con esta nueva información, Galileo concluye el movimiento de Venus en torno al Sol y, en una carta a Giuliano de Medici de enero de 1611, generaliza a "...Mercurio y todos los demás planetas" (Galileo, 1988a; p.183). Escribe a Paolo Sarpi, en febrero de 1611, mostrándose más cauteloso y afirmando que "[...] Además estoy seguro de que veremos a Mercurio pasar por los mismos cambios" (Galileo, 1988a; p.185).

El entusiasmo de Galileo por el sistema copernicano, como hemos podido constatar ya varias veces, le llevaba a hacer declaraciones en extremo atrevidas, como la que incluye en la misiva a Mark Welser, de diciembre de 1612, en la que dice:

"[...] le digo a usted que también esta estrella [Saturno triple], quizá no menos que la apariencia de Venus cornuda, concuerda de admirable modo con el sistema copernicano, a cuyo universal orto vemos que nos conducen vientos propicios con tan brillantes escoltas que ya poco tenemos que temer a las tinieblas o contrariedades" (Galileo, 1988a; p.187).

El físico italiano buscaba argumentos por doquier para apoyar la construcción copernicana, mostrando siempre esa tendencia a usar todos los elementos plausibles para dar fuerza a una postura determinada, siendo ésta también una actitud que se manifestará como una constante a lo largo de toda su obra.

2.5 Una incursión en los caminos de la fe

La actitud galileana de apoyar por donde fuera posible una determinada posición se advierte con especial importancia en su búsqueda para hacer compatible el sistema copernicano con los dogmas religiosos. En la Italia de fines del Medievo la fe católica constituía uno de los pilares centrales de la vida cotidiana. El físico toscano debió saber perfectamente que una buena manera de lograr que el esquema copernicano fuese aceptado por la gente era mostrar que no contravenía las enseñanzas religiosas o que, al menos, no lo hacía en mayor medida que el aristotélico-ptolomeico. Cabe también explicar este deseo en su intento por hallar un lazo entre el nuevo sistema astronómico y sus convicciones religiosas particulares.

La incursión en los asuntos religiosos se inició en 1611, con el *Tratado contra el movimiento de la Tierra* de Delle Colombe, un laico, en el que se afirmaba que el sistema copernicano no podía ser congruente con las Sagradas Escrituras. A resultas de este escrito, Galileo dirigió una carta a su amigo Castelli en la que daba su visión particular de las cosas. La carta, ampliada considerablemente en 1615 y dirigida a la Duquesa Cristina de Lorena, constituyó el resumen de la postura de Galileo ante la religión y la base de los conflictos que, desde 1616, marcaron la relación entre el nuevo sistema del mundo y la opinión religiosa (Koestler, 1986).

El frente intelectual de la Iglesia Católica, la Compañía de Jesús, había aceptado con resignación el resquebrajamiento del sistema tradicional del mundo. Había optado por la posición conciliatoria de Tycho Brahe en astronomía y se encontraba a la espera de nuevos descubrimientos. Los astrónomos jesuitas adoptaron, como ya lo mencionamos, la observación telescópica y la perfeccionaron. El ambiente religioso se hallaba abierto a las nuevas ideas e, incluso, empezaba a asimilar la posibilidad de tener que cambiar el esquema del mundo. El cardenal Dini había dicho a Galileo que las Sagradas Escrituras se inclinaban a apoyar más al nuevo sistema que al aristotélico y que, incluso, la aceptación de la rotación terrestre podría considerarse "en caso

de la mayor de la necesidades" esto es, cuando se presentaran pruebas contundentes (Koestler, 1986; p.344). Cristoforus Clavius, el astrónomo más reputado de la Cristiandad, había manifestado a su colega Scheiner que los astrónomos "debían empezar a pensar en otro sistema cósmico" (Shea, 1970; p.502).

Sin embargo, la apertura que se daba en los círculos ilustrados de la religión no era, ni con mucho, suficiente para aceptar una crítica al interior de la fe misma. La polémica Carta a la *Gran Duquesa Cristina* de 1615 invadía los territorios que la religión aún no perdía pero que podía considerar amenazados. En ella, Galileo no expone una discusión astronómico-física del sistema de Copérnico sino que lo plantea como un esquema probado fuera de toda duda (Koestler, 1986). A lo que se dedica a lo largo de la misiva es a mostrar cómo el copernicanismo es perfectamente congruente con la Biblia, si ésta se interpreta adecuadamente. Aquí, Galileo interviene en un terreno en extremo resbaloso. Crítica en el inicio de la carta a aquéllos que, sin entender las Sagradas Escrituras, se atreven a dar sus opiniones sobre ellas. Luego explica cómo hay gente que, sin tener argumentos sólidos en contra del sistema de Copérnico, se escuda en el sentido literal de algunos pasajes bíblicos para atacarlo. Posteriormente, estableciendo ya lo que será la tónica de la carta, afirma que la autoridad de las Sagradas Escrituras llega hasta donde empiezan las demostraciones, y que la labor de los intérpretes estará centrada en mostrar que las Escrituras no contradicen a las demostraciones ciertas. De esta manera, no ocurre que los Textos Sagrados desmientan al sistema copernicano, sino que no han sido adecuadamente interpretados (Galileo, 1989a). Al final de la carta hace una discusión del milagro de Josué, en un ejercicio de dialéctica que llevará a Koestler (1986) a afirmar que Galileo desprecia la inteligencia de sus oponentes al concluir que, en realidad, incluso tomado literalmente, ese pasaje no sólo no desmiente, sino que apoya al esquema copernicano.

La Carta a la *Gran Duquesa Cristina* es un documento muy revelador. Galileo funda con ella una actitud que habrá de marcar a la ciencia nueva: la limitación de los asuntos religiosos al

terreno de la fe, que no tiene cabida en la ciencia. Por encima de cualquier acto de fe se encuentra la demostración necesaria, la prueba científica, que en último caso ayudará a interpretar, si eso es posible, las afirmaciones religiosas. Con su hábil pluma, el físico toscano volteó la situación y colocó a la ciencia en el puesto que la religión había ocupado. Es la ciencia la que juzga y no la religión. Es la ciencia la que establece criterios de verdad ante los que, en último caso, la religión ha de ajustarse o bien claudicar. En nuestra época esta postura es completamente natural e, incluso, necesaria; en la de Galileo constituyó un reto a la autoridad y a las estructuras religiosas y, a fin de cuentas, el origen del lamentable proceso que iniciaría en 1616 con la inclusión del libro de Copérnico en el Índice de libros condenados y terminaría en 1633 con la abjuración pública de Galileo ante el Tribunal del Santo Oficio en Roma.

2.6 Las controversias en astronomía

Ya vimos que la primera incursión de Galileo en el terreno astronómico estuvo marcada por una controversia sobre la posición de la estrella nueva de 1604; es curioso constatar que la última también giró en torno a una polémica, ahora sobre tres cometas que aparecieron en el año de 1618. De la primera ya dimos cuenta en el apartado 2.2, la última será nuestro pretexto para comentar una de las obras maestras de la pluma galileana, *Il Saggiatore*. En la primera, Galileo usó el argumento del paralaje para mostrar que la nova se encontraba por encima de la esfera de la Luna con el fin de criticar la postura aristotélica, en la última desmonta su propio argumento para probar que los cometas son ilusiones ópticas y se hallan por tanto bajo la esfera lunar, ahora con el fin de polemizar contra los defensores del sistema de Tycho Brahe (Fischer, 1986). Esta última polémica nos dará oportunidad de regresar al terreno astronómico cuando nos ocupemos de *Il Saggiatore*, en donde se encuentra deliciosamente mezclada con apreciaciones muy profundas sobre la nueva ciencia.

En medio de estas dos controversias y las derivadas de la utilización del telescopio, de las que ya hemos hecho alguna mención en los apartados 2.3 y 2.4, se encuentra otra que resalta

por haber enfrentado a Galileo con uno de los astrónomos observacionales más importantes de su tiempo: Christopher Scheiner, jesuita de la Universidad de Ingolstadt. En el otoño de 1611 Scheiner, bajo el seudónimo de Apeles, envió tres cartas a Mark Welser de Augsburgo en las que manifestaba que había descubierto manchas en el Sol (Shea, 1970). No era la primera persona en observarlas, ya que Harriot, Fabricius, Cysat y Galileo las encontraron por la misma época y el segundo incluso había publicado algo sobre ellas. El posterior reclamo de Galileo como descubridor inicial no puede, por ende, sustentarse (Koestler, 1986). La controversia interesante se inicia cuando Galileo, a su vez, envía tres cartas a Welser en las que critica los puntos de vista de Scheiner y detalla sus observaciones y conclusiones. Estas cartas, reunidas bajo el título de *Historia y demostraciones en torno a las manchas solares* (1613), nos muestran una vez más a Galileo como astrónomo moderno.

Scheiner mantiene una postura abierta como la que ya hemos dicho que imperaba entre sus colegas. Sin embargo, tiene muchas dificultades para interpretar lo que pueden significar las manchas en una región que acostumbraba creer inmutable. Su proceder racional y metódico le hace pasar de la idea de que fueran defectos del ojo o la atmósfera a la de que no pueden encontrarse directamente sobre la superficie solar. Aquí aparece la primera crítica de Galileo. Describiendo cuidadosamente la apariencia de las manchas y su movimiento, muestra cómo pueden ser explicados si aquéllas se encuentran sobre la superficie. Después de apelar a la observación se sumerge en una demostración matemática en la que analiza, con herramientas geométricas, la posición y el movimiento de las manchas y cómo se verían en caso de estar alejadas de la superficie solar, para concluir formalmente que se hallan sobre ésta. Sin conceder oportunidad alguna a sus oponentes destaca que, incluso si las manchas se hallasen apartadas del cuerpo solar, no podrían estar lo suficientemente lejos como para salvar el argumento aristotélico de la inmutabilidad de los cielos (Galileo, 1988a). Continuando con sus observaciones, Galileo llega a la conclusión de que el Sol tiene un movimiento de rotación, aunque

se manifiesta en desacuerdo con el periodo al que Scheiner había llegado (15 días) (Shea, 1970).

El ataque que los dos físicos hacen al problema de las manchas solares es una muestra de la diferencia epistemológica básica que existe entre Galileo y sus contemporáneos. Ambos tienen el mismo tipo de observaciones pero su interpretación de ellas es radicalmente distinta. Mientras Galileo no tiene dificultad para aceptar que las manchas se encuentran sobre la superficie solar y que experimentan cambios de forma y tamaño sobre ella, Scheiner termina afirmando que son planetoides y llega a tomar sus cambios de forma y el oscurecimiento de sus orillas como posibles fases producto de sus revoluciones en torno al Sol (Shea, 1970). Galileo desprecia de inmediato la idea de astros girando alrededor del Sol, basado fundamentalmente en la uniformidad que ha de respetarse en los movimientos planetarios, y prefiere pensar en algo parecido a la nubes terrestres, ya que los cambios de forma de las manchas y su contigüidad al Sol las hacen de conducta muy semejante a ellas. Aquí tenemos otro elemento muy común en el proceder de Galileo: la utilización de analogías observacionales para ayudar a la interpretación. Para el físico italiano no se debe despreciar la oportunidad para comparar dos fenómenos, por incompatibles que puedan parecer, ya que puede permitir una explicación más rica y adecuada de alguno de ellos (Shea, 1970).

Las razones más poderosas y la habilidad dialéctica de Galileo le dan la victoria frente a Scheiner, pero ello no debe alejarnos del contexto en el que se dio la contienda. Galileo representa una posición filosófica absolutamente novedosa, a la que gente como Scheiner no acertaba a adaptarse pese a que ya tenía una apertura ante los cambios mucho mayor que sus antepasados inmediatos. En este sentido, el triunfo de Galileo y la derrota de Scheiner deben ayudarnos a valorar la audacia metodológica del primero y la libertad intelectual del segundo.

2.7 Los métodos del Galileo astrónomo

Una vez que hemos recorrido los aspectos más importantes de la obra astronómica de Galileo, salvo el problema de los cometas que

dejaremos para después, podemos hacer una síntesis de su proceder en cuanto a esta ciencia se refiere.

Primeramente, cabe destacar su negación a aceptar el carácter instrumentalista de la astronomía, con lo que ya se aparta de la tradición ptolomeica. Para Galileo todo sistema astronómico debe tener posibilidad de ser real. El esquema copernicano por el que lucha no es, por tanto, hipotético, y su verdad se coloca por encima de cualquier artificio de cálculo. Esta idea la expresa con toda claridad en sus *Consideraciones sobre la Opinión Copernicana* de 1615, cuando escribe que "negar que los movimientos planetarios operan realmente sobre excéntricas y epiciclos es como negarle la luz al Sol, es ciertamente contradecirse uno mismo" (Galileo, 1988b; p.84); y, más adelante, cuando manifiesta que si ha de condenarse el movimiento de la Tierra, igualmente eso ha de hacerse con la excéntricas y epiciclos. Sin embargo, como lo demostrará su *Diálogo*, esta postura tiene sus retrocesos y sutilezas.

Fundamental es también su aproximación a la observación telescópica, que ya hemos analizado, en la que se advierte una mezcla de empirismo y pragmatismo con una inquietud teórica no satisfecha. Quienes quieren ver en Galileo únicamente a un racionalista deberán, sin duda, analizar con cuidado el proceso que lo llevó a confiar en su anteojo (Geymonat, 1986).

La crítica galileana a la perfección de los sentidos se extiende a la de los criterios de perfección en general. Su ataque a la idea de una esfera lunar perfecta o de un Sol inmutable, y su posterior respuesta al argumento de Clavius de una cubierta invisible que, a fin de cuentas, haría al orbe lunar perfectamente esférico, resumen maravillosamente esta nueva actitud epistemológica. Con su concepto de la perfección relativa a algo y no absoluta en sí misma, Galileo cambia los parámetros para juzgar lo que hasta entonces se ha llamado "perfecto" o "imperfecto". Con la respuesta a Clavius, en la que coloca al argumento de éste como "una bella obra de la imaginación" pero lo excluye de la ciencia por el problema de que "ni está demostrado ni es demostrable" (Galileo, 1988a; p.198), inaugura un criterio por el que se ha de

regir la ciencia moderna: el de incluir solamente como ciertas aquellas proposiciones sujetas a demostración rigurosa (Geymonat, 1986).

Sin embargo, la seguridad con la que argumenta en las observaciones telescópicas empieza a desvanecerse con su interpretación. Es cierto que usa prácticamente todos sus resultados en el apoyo de la teoría copernicana, pero sabe bien que no tiene una prueba incontrovertible. En estas circunstancias, acude a métodos más de la dialéctica que de la ciencia. En su Carta a la Gran Duquesa Cristina se nos muestra un Galileo que, carente de demostración contundente, apela a una reinterpretación de los criterios de verdad más en boga de sus tiempos: los religiosos. La aparente seguridad con la que ataca a sus adversarios en sus controversias astronómicas y su megalomanía en la ciencia de los cielos, que lo llevó en *Il Saggiatore* a declarar su primacía en los descubrimientos celestes, son una prueba de la debilidad de sus argumentos situados en el contexto de su época. Podía disuadir, pero no convencer sin lugar a duda. Su inseguridad llegará al máximo cuando, en la controversia sobre los cometas, llegue a voltear el argumento del paralaje para apoyar la posición contraria a la de los astrónomos especializados (Koestler, 1986).

Parece ser que, en astronomía, Galileo mantiene una doble actitud: la del astrónomo observacional, seguro y riguroso, creador de todo un estilo de hacer ciencia con la ayuda de instrumentos, y la del astrónomo teórico, obsesionado con la idea de hacer triunfar la teoría copernicana y, careciendo de pruebas indiscutibles, innovador también en los métodos de la propaganda y el convencimiento dialéctico, sustentado sólo a medias por argumentos racionales.

Esta dualidad del Galileo astrónomo será determinante cuando, en su actitud metodológica de acudir a todos los caminos posibles en auxilio de una idea - el sistema copernicano -, haga entrar a la astronomía en contacto con el otro gran cuerpo de conocimientos que ha desarrollado: la mecánica. Será de esta unión que surja una de sus obras más ricas en contenido metodológico, el *Diálogo sobre los Dos Sistemas Máximos* de 1632.

Capítulo 3. El Diálogo, nexa conflictivo

El *Diálogo sobre los Dos Máximos Sistemas del Mundo: Ptolomeico y Copernicano* de 1632 es una obra en extremo importante por varias razones. En primer lugar, constituye la primera defensa completa del sistema copernicano que, al mismo tiempo, aduce argumentos mecánicos y astronómicos para refutar todas las posibles objeciones a la hipótesis heliocéntrica y a la del movimiento terrestre, estableciendo así un lazo entre los dos campos más importantes de las investigaciones de Galileo. En segundo término, al ser escrita en forma dialogada y en italiano, no en el latín de los especialistas, su público fue mucho más amplio que el que se esperaba para un libro de ciencia, complementándose esto con el estilo didáctico y ameno de la prosa galileana. En tercer lugar, es la obra del físico toscano en la que más claramente quedarán plasmadas las enormes dificultades epistemológicas contra las que habría de luchar su pensamiento. Finalmente, éste fue el libro que terminó por desencadenar, en 1632, el lamentable proceso eclesiástico contra la obra y la persona de Galileo Galilei.

En el *Diálogo* el científico hará gala de sus más extraordinarias habilidades dialécticas. Al carecer de pruebas astronómicas contundentes en favor del modelo heliocentrista, y como el copernicanismo implicaba necesariamente el movimiento terrestre, Galileo recurrirá a la mecánica. Sin embargo, en este terreno tampoco podrá encontrar fácilmente apoyo a su posición, de manera que se dedicará a refutar con todo detalle las objeciones tradicionales al movimiento de la Tierra, aprovechándose de su gran habilidad persuasiva y didáctica. Sólo en última instancia expondrá su teoría de las mareas, en la que presumirá que la mecánica misma presenta una demostración incontrovertible de la rotación y traslación de nuestro planeta, convirtiéndose así en una de las más desconcertantes producciones de su pensamiento.

3.1 El Diálogo sobre los Dos Máximos Sistemas del Mundo

Esta gran obra de difusión y defensa de la teoría copernicana se encuentra dividida en cuatro jornadas o días, en cada uno de los cuales comentan y discuten tres personajes que se harán clásicos de la pluma galileana. Salviati, que es el hombre más ilustrado de

los tres, representa la posición de la nueva ciencia. Es un gran expositor de las demostraciones y argumentos de Galileo, incisivo en la crítica y convenientemente sordo a objeciones peligrosas para sus objetivos. Sagredo, el árbitro del debate, es el lector a quien hay que convencer. Es culto, interesado y abierto de mente, siempre deseoso de ampliar sus conocimientos aún a costa de un cambio de visión del mundo. Partiendo de una formación tradicional, que ya no le satisface, será quien vaya aceptando, más fácilmente de lo que cabría esperar, las nuevas ideas. Finalmente, tenemos a Simplicio, el aristotélico, el hombre que verá a lo largo de la obra que su esquema se resquebraja siendo incapaz de defenderlo. Es una encarnación, en el mejor de los casos, de la ingenuidad que Galileo achaca a los escolásticos, en el peor, de la necedad y la cerrazón mental. Estos personajes tienen, además, su inspiración en la realidad. Giovanni Francesco Sagredo y Filippo Salviati fueron dos de los mejores amigos de Galileo. Simplicio fue probablemente algún escolástico que el autor escudó bajo el nombre de un comentarista de Aristóteles, aprovechándolo, tal vez, para hacer una irónica alusión a la "simplicidad" de la mentalidad peripatética (Geymonat, 1986).

La obra, dedicada al Gran Duque de Toscana, se inicia con un prefacio "Al Lector Perspicaz" en el que Galileo expone sus principales objetivos:

"Primero, trataré de mostrar que todos los experimentos practicables sobre la Tierra son insuficientes para probar su movilidad, ya que son adaptables indiferentemente a una Tierra en reposo o en movimiento. [...] Segundo, serán examinados los fenómenos celestes, reforzando la hipótesis copernicana hasta que se vea que ésta debe triunfar absolutamente. [...] En tercer lugar, propondré una especulación ingenua. Sucede que hace mucho dije que el problema no resuelto de las mareas oceánicas podría recibir cierta luz asumiendo el movimiento de la Tierra" (Galileo, 1967; p.6).

Pese a la prudente manera de introducir su teoría de las mareas como una "especulación ingenua", Galileo hará de ella el eje fundamental de su justificación mecánica del copernicanismo, al grado de que, en un principio, la obra debía llevar por título *Diálogo sobre el Flujo y Reflujo de las Mareas*. Si se dio a la imprenta con otro nombre fue porque el autor recibió, de algunos

amigos, el consejo de no subrayar, de entrada, un argumento en franco apoyo al sistema copernicano (Drake, 1986).

Luego del prefacio al lector se inicia la Primera Jornada. En ella, Galileo se dedicará a atacar el edificio aristotélico en algunos de sus puntos generales más importantes. Así, el espacio es tridimensional porque sólo pueden trazarse tres líneas mutuamente perpendiculares, no porque el número tres sea más perfecto que otros. Afirma que no tiene fundamento la idea peripatética de que sólo existe un único centro de todos los movimientos circulares. Sin embargo, coincide con tomar al circular como el más perfecto y eterno de los movimientos, dejando al rectilíneo el papel de ser el origen del circular y el que restablece el orden del Cosmos, siendo incapaz de perpetuarse. En un ataque frontal contra las concepciones esencialistas de la vieja ciencia, destierra la idea de que los movimientos simples correspondan a cuerpos simples y los compuestos a compuestos, o bien que los cuerpos celestes sean perfectos solamente porque su movimiento se realiza en trayectorias perfectas (circulares). La naturaleza de los cuerpos - su esencia - nada tiene que ver con su movimiento. Posteriormente, se introduce en algunas de sus conclusiones mecánicas: el aumento de velocidad de un móvil se obtiene pasando por todos los grados de lentitud, el "ímpetus" (concepto que irá evolucionando a lo largo de toda la obra y que, a estas alturas, puede identificarse con cantidad de movimiento) adquirido durante la caída de un móvil es el mismo que se requiere para su ascenso a la misma altura, los tiempos de caída por la altura y la pendiente de un plano inclinado están en la misma razón que sus longitudes respectivas, etc. Acepta que los cuerpos pesados tienden hacia el centro de la Tierra, pero niega que de ahí se deduzca que éste se halla en el centro del Universo. En su crítica contra la aristotélica inmutabilidad de los cielos, Galileo apela a los cambios celestes que marcaron algunas de las controversias en astronomía de las que ya hemos hecho mención. Así, las novae se encuentran en la región supralunar, al igual que los cometas, a los que prefiere no hacer demasiada referencia, tal vez por la polémica en la que defendió su carácter ilusorio.

Retoma entonces el problema de la luminosidad secundaria de la Luna que había dejado abierto en el *Sidereus Nuncius*. Haciendo un ameno y concienzudo análisis de las propiedades reflectantes de las superficies, en el que, incluso, pone a sus personajes a hacer observaciones con paredes y espejos iluminados por el Sol, concluye que la Luna no puede ser absolutamente lisa y esférica porque entonces sería invisible. La capacidad de difundir la luz de las superficies irregulares hace de la Tierra un cuerpo luminoso, en mucha mayor medida que la Luna, debido a su gran cantidad de relieves, a las nubes y a la abundancia de agua. Habiendo así atacado el concepto de la Tierra como un orbe oscuro y tenebroso, continúa reflexionando sobre la perfección que el intelecto humano puede alcanzar en los razonamientos matemáticos y geométricos, únicos en los que es equiparable a la mente divina para, finalmente, terminar su Primera Jornada con un entusiasta elogio al lenguaje, como medio de hacer que los pensamientos salven las fronteras del tiempo y el espacio (Galileo, 1967).

La Segunda Jornada contiene algunos de los pasajes clásicos de la literatura galileana. Se encuentra dedicada, como preámbulo indispensable a las consideraciones astronómicas de la Tercera Jornada y a las mecánicas de la Cuarta, a rebatir la mayor cantidad posible de argumentos en contra de la movilidad de la Tierra. Inicia aclarando que el movimiento de nuestro planeta no es perceptible por quienes lo compartimos con él y, de inmediato, enuncia la regla que permitirá estudiar este problema: se debe observar el comportamiento de cuerpos separados de la superficie terrestre y determinar si esas mismas observaciones son compatibles con una Tierra en movimiento. El primer argumento que coloca sobre la mesa es el de que una Tierra móvil es racionalmente más lógica que todas las esferas celestes girando en torno a ella. Declara que resulta muy difícil entender los movimientos de la Luna o de los satélites de Júpiter con la Tierra en reposo, y que el movimiento del *primum mobile* - el motor inmóvil de la física aristotélica - debería ser poderosísimo y demasiado rápido para mantener al Cosmos en actividad. Posteriormente, aclara que "lo que se ve" es explicado

equivalentemente por ambos sistemas. Expone, entonces, algunos de los argumentos aristotélicos en contra del movimiento terrestre: el tiro vertical y la caída libre no se verían rectos, ya que la Tierra se movería debajo del móvil mientras éste alcanza el suelo. Entonces, se dedica a montar uno de los elementos más determinantes en su discusión: la caída de objetos desde el mástil de un barco. Haciendo que sus personajes acepten, casi sin cuestionamientos, que las conclusiones obtenidas para el barco son generalizables para la Tierra misma, procede a enunciar las bases de la relatividad del movimiento. Un desplazamiento será operativo siempre que no lo compartan el observador y el móvil; la piedra que cae del mástil comparte el movimiento del navío, de manera que quien viaje en él la verá caer recta, a diferencia de quien esté inmóvil en la costa, que no participa del movimiento del barco y verá a la piedra describir una curva. De la misma manera, la bala de cañón que cae de una torre no es dejada atrás por una Tierra en rotación porque participa del movimiento de ésta, al igual que el observador bien asentado en el piso, quien la verá caer recta. Sin embargo, para alguien colocado fuera de la Tierra, digamos en el Sol, la trayectoria de la bala será una curva ya que, al igual que el hombre de la costa en el caso del navío, no participa del movimiento terrestre. La curva, nos dice Galileo, será un círculo o una trayectoria muy aproximada a él. El físico italiano aprovecha la discusión para criticar uno de los conceptos más arraigados de la visión aristotélica: la imposibilidad de que movimientos diferentes puedan combinarse en un cuerpo simple. La trayectoria de la bala que cae de la torre es, en realidad, una combinación del movimiento recto de caída hacia el centro del orbe terrestre y de la rotación y traslación del planeta mismo en el espacio. Para el observador parado sobre la superficie de la Tierra sólo es operativo el movimiento rectilíneo de caída, único que él no comparte con la bala. Posteriormente, ataca el argumento de que el disparo de un cañón tendría alcances diferentes, según se hiciera a favor de la rotación de la Tierra o en contra. Usando el símil de un arquero sobre un carro, concluye que su avance es suficiente para equilibrar los alcances de las flechas que,

respecto al vehículo, serán idénticos. Una vez más, hace que sus personajes acepten sin discusión la extensión de este razonamiento al caso de la Tierra. Mediante el ejemplo de un dibujante que viaja en un buque mientras hace sus bosquejos, muestra las características de la relatividad del movimiento, al resaltar las curvas que el lápiz traza según el dibujante y según algún observador anclado en tierra. Explica cómo un tiro vertical de cañón haría que la bala retornase a la boca de éste, por la conservación del movimiento que, igualmente, justificaría porqué un cazador ha de mover la escopeta en un semicírculo si quiere acertar al ave en vuelo. A continuación, critica la explicación aristotélica del desplazamiento de proyectiles, argumentando que el aire no tiene la fuerza suficiente como para mantener el movimiento de un grave. Siguiendo en su crítica a estas objeciones clásicas, el científico sostiene que el aire de la atmósfera, igualmente, sigue el movimiento de nuestro planeta, al ser arrastrado por sus irregularidades, de forma que lleva consigo a las aves y las nubes. Entra después en una discusión sobre la imposibilidad de que los objetos sobre la Tierra fueran lanzados hacia el espacio por la fuerza centrífuga, producto de la rotación. Aduce geoméricamente que, en un círculo, como el ángulo entre la circunferencia y la tangente puede ser tan pequeño como se quiera - con tal de estar lo suficientemente cerca de su punto de contacto -, basta con una tendencia mínima hacia el centro para que el cuerpo no salga despedido por la tangente. Por esa razón, los graves, que tienden hacia el centro de la Tierra, no son susceptibles jamás de ser lanzados de ésta por su rotación. Sin embargo, en el momento en que nuestro planeta se detuviera por algún motivo, los cuerpos sobre ella sí que serían despedidos de su superficie por la recta tangente, con lo que Galileo esboza, al añadir además la resistencia de un cuerpo en reposo a ser puesto en movimiento, lo que vendría a ser la Primera Ley de Newton (y que, por añadidura, ignoró en su explicación de 1615 del milagro de Josué). Enuncia de pasada su resultado mecánico de que todos los cuerpos, independientemente de sus pesos, caen al mismo tiempo. Luego declara la equivalencia entre cuerpos con idéntico

movimiento y cuerpos en reposo, concluyendo que tales estados no alteran la naturaleza del objeto. Entre otras objeciones, destruye la de que un móvil que realice movimientos compuestos debe estar articulado, o bien que debería cansarse. También continúa con su inexorable crítica a la filosofía aristotélica al mencionar que las esferas reales son tangentes a los planos reales en un único punto, o bien dejan de ser esferas y planos. En una brillante síntesis de sus argumentos, Galileo retorna al barco en movimiento uniforme y a un camarote cerrado en él, donde los insectos son capaces de volar, las gotas de agua de caer y todos los fenómenos físicos de suceder como si el barco estuviera en reposo. Sentencia que, de no querer adaptarse al concepto del movimiento terrestre, debe demostrarse su falsedad. Al final de la Jornada, el autor acepta que no ha dado una prueba concluyente de la movilidad de la Tierra, pero que ha removido la imposibilidad de que esto ocurra (Galileo, 1967).

Su Tercera Jornada está básicamente dedicada a la astronomía. Inicia con el análisis y crítica de las observaciones de la nova de 1572 que fueron interpretadas como pruebas concluyentes de que se hallaba bajo la esfera de la Luna. Galileo obtiene de esos mismos datos la conclusión opuesta y se detiene en comentar el problema de los errores de medición, que dan poca confiabilidad a los resultados, a lo que suma el hecho de haber sido obtenidos en tiempos diferentes y con instrumentos distintos. En resumen, concluye como más probable un paralaje nulo o indistinguible en la nova, lo que la coloca en la región supralunar. Posteriormente, hace que Símplicio pinte, de acuerdo con las apariencias, el sistema copernicano, mostrando cómo éste está perfectamente conforme con aquéllas. Galileo acepta que el esquema es burdo y que hay algunas observaciones que lo contradicen, pero que no son lo suficientemente concluyentes como para desecharlo. Hay algunas, incluso, como la inmutabilidad del brillo de Venus, que hallan respuesta en el mismo modelo (las fases venusinas). Hace ver cómo los satélites de Júpiter apoyan la existencia de sistemas como el Tierra-Luna, y cómo las fases de Venus son un argumento en favor del heliocentrismo, lo que lo hace una hipótesis muy probable. Más

adelante declara, incluso, cómo la hipótesis del movimiento terrestre echa abajo el complicado sistema de epiciclos de la vieja teoría. Entra entonces en una discusión sobre las manchas solares, de las que se declara su descubridor exclusivo. Comenta sobre el carácter cambiante de las manchas y el hecho de que se encuentren sobre la misma superficie solar. Concluye, como ya lo había hecho en sus cartas a Mark Welser sobre el particular, que el Sol rota inclinado respecto a la eclíptica y que el aspecto de las manchas puede ser explicado con un movimiento anual de la Tierra. Afirma que, de tenerse un sistema geocéntrico, el Sol debería estar dotado de dos movimientos sobre su eje y dos alrededor de la Tierra, lo que le parece en extremo complicado y muy improbable. Habla un poco sobre su telescopio y cómo éste quita los rayos parásitos a las imágenes de los cuerpos brillantes. Hace una apología del instrumento y critica a quienes se han negado a aceptarlo. Más adelante, explica cómo pueden cambiarse los polos celestes moviendo al observador sobre la Tierra y cómo los ángulos de paralaje son mayores cerca de los polos de la eclíptica, concluyendo que el paralaje estelar sería una prueba irrefutable en favor del movimiento terrestre. Galileo expone, entonces, los diversos movimientos atribuidos a nuestro planeta y los efectos que cada uno tiene. El movimiento diurno explica el día y la noche, el anual, junto con la inclinación del eje terrestre, las estaciones. Luego entra en algunas especulaciones donde muestra su agrado por la teoría magnética de Gilbert, aventurando que el magnetismo de la Tierra podría ser el responsable de la inclinación constante de su eje de rotación. Comenta algunas de las propiedades de los imanes y afirma que ésta es una rama de la ciencia que requiere de gran estudio y reflexión. Se lamenta de que Gilbert no haya sido más matemático y, finalmente, concluye que aún no hay argumentos que apoyen más al helio que al geocentrismo (Galileo, 1967).

Para terminar su gran obra, Galileo dedica su Cuarta Jornada a exponer y discutir su "especulación ingenua", la teoría de las mareas. Empieza por declarar que éstas confirman el movimiento terrestre y son, a su vez, justificadas por éste. Al ser el agua

fluida y no estar encadenada a la Tierra, puede ayudar a investigar sus movimientos. Aclarando que en este terreno no tiene ninguna verdad incontrovertible, ataca sin embargo la hipótesis de la influencia lunar como causa de las mareas. Identifica primero tres periodos del fenómeno: diurno, mensual y anual. Luego se dedica a exponer cómo se comporta el agua en un recipiente, resaltando que la forma de hacer que ésta suba de nivel de un lado y baje del otro es a través de una inclinación del contenedor, o bien, de una aceleración o desaceleración del mismo. Como la primera causa es inaplicable a nuestro planeta será válida la segunda. Entonces, se pasa a un sistema de referencia anclado en el Sol, de manera que puedan verse las sumas que ocurren entre los movimientos de rotación y traslación terrestre cuando van en la misma dirección y sus restas cuando van en la opuesta. Así, un punto dado de la superficie de la Tierra irá a veces más rápido y a veces más lento, sin que por ello la rotación y la traslación dejen de ser movimientos circulares uniformes. A estas aceleraciones y retardos se suma el peso del agua, que tiende a regresarla a su nivel inicial, originándose un conjunto de oscilaciones en todo el cuerpo acuoso. Esto se combina con una serie de factores distorsionantes que son responsables de los periodos desiguales que se dan en diferentes mares: la profundidad, longitud y orientación de las cuencas oceánicas - que hacen más o menos frecuentes las oscilaciones -, la comunicación entre mares y la desembocadura de ríos. En cantidades reducidas de agua las oscilaciones son muy pequeñas y rápidas, por lo que resultan indistinguibles. Luego de una discusión sobre la caída por un arco de circunferencia y la cuerda que conecta sus extremos concluye que, dependiendo de la posición de la Luna con respecto a la Tierra, el sistema de los dos cuerpos tenderá a moverse más o menos rápidamente en torno al Sol, afectando esto a las mareas mensualmente. El ciclo anual lo explica por la inclinación del eje terrestre sobre la eclíptica. Con todas las condiciones distorsionantes que propone, el autor concluye que es posible ajustar cualquier periodo de mareas imaginable. Finalmente, hace un recuento de argumentos en favor del sistema copernicano: los

movimientos retrógrados de los planetas que son mejor explicados con el heliocentrismo, las apariencias de las manchas solares que enseñan un Sol que rota sobre su eje, las mareas. El posible paralaje estelar y ciertos cambios en la línea del meridiano resultarán en el futuro, dice Galileo, argumentos indiscutibles en apoyo del movimiento terrestre. Poniendo en boca de Simplicio el argumento del Papa Urbano VIII (Geymonat, 1986) de que Dios habría podido hacer que las mareas funcionaran por cualesquiera infinito número de causas, inescrutables para los hombres, y prometiendo un escrito sobre el movimiento local, Galileo concluye su gran obra en defensa del sistema copernicano (Galileo, 1967).

3.2 La crítica a Aristóteles

En su defensa del copernicanismo, Galileo sabía, o intuía, que para instaurar una nueva física, totalmente diferente de la vieja, había que derruir ésta desde sus cimientos y crear una filosofía en apoyo de la primera (Koyré, 1988). Ahora bien, la física que había que echar por Tierra no era cualquiera, ya que formaba parte de un esquema que había sido aceptado y difundido, con sus notables altibajos, a lo largo de casi dos mil años. Se trataba de un sistema totalizador, capaz de explicarlo todo y resolverlo todo, de un edificio que contenía en su interior elementos de las más variadas ocupaciones e intereses humanos, desde el arte hasta la política, desde la ciencia hasta la religión. El aristotelismo, convertido en fundamento científico-filosófico de la Religión Católica y discutido, analizado, comentado hasta la saciedad por la escolástica medieval, no era un hueso fácil de roer; mucho menos si la crítica venía de campos tan reducidos, en comparación con él, como los de la mecánica y la astronomía. Por eso, el ataque que Galileo hace en su *Díálogo* al problema de destruir el sistema aristotélico es brillante. Puede hacer la crítica desde la física exclusivamente, de modo que despoja de entrada al esquema aristotélico de la metafísica, o bien diciendo que no es válida o bien armonizándola con la nueva física. De esta forma, coloca al lado de la física tradicional una totalmente nueva, con un poder de discursividad equivalente siempre que se mantenga restringida a ciertos terrenos. Es decir; establece un nuevo sistema pero sin el

apoyo de una metafísica (Fischer, 1986). La filosofía que aparecerá en sustitución de la carente metafísica será la que mantenga bien clara la separación entre la nueva ciencia y cualesquiera elementos "irracionales" (metafísicos). Así pues, como vimos en el contenido del *Diálogo*, Galileo dedica toda su Primera Jornada y cuantas oportunidades encuentra a lo largo de la obra para hacer esa separación, para tachar o reformular los elementos de la metafísica aristotélica de tal manera que no obstaculicen la aceptación de la nueva física.

Así, es fundamental la crítica al concepto aristotélico de la naturaleza de los objetos como determinante para su comportamiento físico: un cuerpo es perfecto porque su movimiento es perfecto o bien es complejo y debe por tanto presentar movimientos complejos. Galileo responde:

"SAGREDO: [...] Ahora, deséais usar cuerpos simples o compuestos para encontrar qué movimiento es simple y cuál está mezclado - una excelente regla para nunca entender ni los movimientos ni los cuerpos" (Galileo, 1967; p.17).

O, en otro lugar:

"SIMPLICIO: [...] la observación nos enseña que las acciones y movimientos de objetos de diversa naturaleza son diferentes. Y la razón confirma esto, ya que de otra manera no tendríamos forma de comprender y distinguir sus naturalezas, si no tuvieran sus movimientos y acciones que revelaran sus sustancias a nuestro entendimiento.

SALVIATI: Dos o tres veces en los argumentos de este autor [un comentarista de Aristóteles] he notado que, con el fin de probar que las cosas son de tal o cual manera, él hace uso del argumento de que en esta forma se acomodan a nuestra comprensión, y que de otra manera nosotros no tendríamos conocimiento de éste o aquél detalle..." (Galileo, 1967; p.264).

Así, el físico italiano arremete contra una piedra angular de la metafísica aristotélica, separando el estudio de la naturaleza de los objetos del discurso de la ciencia.

La crítica anterior se extiende más lejos cuando, en múltiples ocasiones, objeta los criterios de perfección tradicionales y el papel que éstos juegan en la obtención de conclusiones sobre el mundo en general. Así, en medio de la primera discusión de la obra, en la que refuta el argumento de la

tridimensionalidad del espacio por la perfección del número tres, Salviati dice:

"[...] No siento ninguna compulsión en defender que el número tres es un número perfecto, tampoco que tiene la facultad de conferir perfección a sus poseedores. [...] Por lo tanto, hubiera sido mejor para él [Aristóteles] dejar estas sutilezas a los retóricos, y probar su punto con demostraciones rigurosas como las que son apropiadas en las ciencias demostrativas" (Galileo, 1967; p.11; las negritas no se encuentran en el original).

Galileo mantiene esta mentalidad a lo largo de su obra, calificando siempre los criterios de perfección como relativos y no necesariamente determinantes del comportamiento de la naturaleza.

En otro aspecto de su crítica, propugna una diferenciación de cualidades con el fin de atacar los problemas. Así como la perfección es un concepto relativo y que, en último caso, nada tiene que ver con el comportamiento físico del objeto en cuestión, así también la existencia de irregularidades en la Luna o su esfericidad no juegan ningún papel en su carácter corruptible o incorruptible: la incorruptibilidad de los cuerpos es independiente de su forma. Mientras Aristóteles construyó un sistema en el que todas las cualidades eran interdependientes, Galileo defiende uno en el que la separación entre ellas permitirá, a fin de cuentas, reducir los problemas al terreno donde pueden ser efectivamente resueltos y sus soluciones generalizadas. Mientras en Aristóteles cada objeto debía comportarse de acuerdo con su naturaleza, en Galileo existe una conducta general a la que se amoldan todos los objetos, de acuerdo con sus características externas particulares, pero sin importar su esencia. Bien escribe Osler (1973) que la filosofía galileana constituyó una evolución del esencialismo característico de la vieja epistemología al no esencialismo de la nueva.

Uno de los más graves problemas que el autor del *Diálogo* hubo de enfrentar en su crítica al aristotelismo es el gran acuerdo que esta filosofía mantiene con el sentido común. Como afirma Tannery (citado por Koyré, 1988; p.194) el sistema aristotélico se ajusta mucho mejor a nuestra experiencia que el copernicano. La manera en que Galileo enfrenta esta situación revela la gran riqueza de su metodología. En lugar de discutir la experiencia o la observación,

en las que todos están de acuerdo, intenta hacer notar los conceptos que "contaminan" los enunciados observacionales (Feyerabend, 1989). La experiencia no es negada, solamente es interpretada desde un nuevo punto de vista. Para lograr esto, el físico toscano debe retirar del discurso algunos argumentos que impiden, por ejemplo, la generalización de ciertas experiencias. Así, busca una conexión entre la física terrestre y la celeste, la cual era negada por la vieja ciencia debido a la diferencia de movimientos y naturalezas entre los cuerpos infra y supralunares:

"SALVIATI: [...] Yo respondo que ninguna de las condiciones por las que Aristóteles distingue cuerpos celestes de elementales [terrestres] tiene otro fundamento que aquél que deduce de la diferencia en el movimiento natural entre los primeros y los últimos. En ese caso, si se niega que el movimiento circular es peculiar a los cuerpos celestes y se afirma que pertenece a todos los móviles, entonces uno debe escoger entre dos consecuencias necesarias. O bien los atributos generable-ingenerable, alterable-inalterable, divisible-indivisible, etc. satisfacen igualmente a todos los cuerpos del mundo - tanto los celestes como los elementales o Aristóteles ha deducido erróneamente, del movimiento circular, esos atributos que ha asignado a los cuerpos celestes" (Galileo, 1967; p.37).

Es decir, cuerpos celestes y terrestres pueden y deben ser tratados de la misma forma por la física. Esta actitud podría explicar, en principio, las audaces generalizaciones que Galileo acostumbra hacer de observaciones realizadas en sistemas dinámicos sobre la Tierra al comportamiento del planeta mismo.

Quedan por analizar múltiples aspectos del ataque galileano al edificio aristotélico. Sin embargo, el cuestionamiento a las posturas esencialistas, a las propiedades dadas por la naturaleza de los objetos, a la confusión de cualidades, a la falta de definición de los términos empleados, son ejemplos suficientes y fundamentales para situar en perspectiva la crítica de Galileo.

Cabe mencionar, no obstante, que el científico también mantuvo algunos elementos del antiguo esquema. Las razones que tuvo para ello pueden encontrarse en aspectos de su formación, que no acertó a separar jamás de sus concepciones básicas del mundo, como la fijación por los movimientos circulares y la finitud del universo (Fischer, 1986). Más aún, se pueden hallar, como luego veremos, multitud de ejemplos en su proceder científico que hablan

claramente del apoyo a métodos pregonados por Aristóteles, lo que nos permite hacer la distinción entre su crítica al edificio aristotélico y la admiración que pudo sentir hacia la forma en que el filósofo griego lo construyó. Como quiera que sea, los argumentos aducidos en contra del aristotelismo en general, combinados con los encaminados a apoyar el movimiento terrestre, constituyen una impresionante compilación de razones que lograron, en un plazo bastante corto, un cambio filosófico enorme en los contemporáneos y sucesores de Galileo.

3.3 Las contradicciones de la obsesión copernicana

La aportación real de Copérnico fue rescatar, para el final del Medioevo, la posibilidad de un sistema con el Sol en su centro, pero no simplificar excesivamente los cálculos astronómicos. Como ya lo dijimos en el capítulo anterior, la hipótesis copernicana no prescindía de la compleja estructura de epiciclos, deferentes y excéntricas al que la astronomía ptolomeica había apelado desde sus inicios. La eliminación de los ecuantos, puntos desde los cuales el movimiento planetario debería verse como uniforme, había sido el único logro en este terreno por parte de Copérnico. El sistema propuesto en su *De Revolutionibus Orbium Caelestium* usaba cuarenta y ocho círculos que excedían por ocho a la versión de Peurbach, del siglo XV, la más moderna del ptolomeico (Koestler, 1989). A pesar de esto, en la Tercera Jornada de su *Diálogo*, Galileo hace que Simplicio dibuje el sistema copernicano como formado por círculos perfectos, todos concéntricos con el Sol, e incluso afirma:

"SALVIATI: [...] ¿Y qué diremos del movimiento aparente de un planeta, tan irregular que no sólo es rápido un tiempo y lento otro, sino que a veces se detiene completamente e incluso regresa un largo trecho después de hacerlo? Para salvar estas apariencias, Ptolomeo introduce vastos epiciclos, adaptándolos uno por uno a cada planeta, con ciertas reglas sobre movimientos incongruentes - todos lo cual puede ser eliminado con un movimiento muy simple de la Tierra. [...] Estas y otras anomalías son curadas por un único y simple movimiento anual de la Tierra" (Galileo, 1967; p.342; las negritas no se encuentran en el original).

A continuación, da una explicación geométrica de cómo, en efecto, el movimiento terrestre puede explicar retrogradaciones tanto de los planetas exteriores como de los interiores. El lector

del *Diálogo*, el no especialista al que está dirigido, termina este pasaje con la certeza de que, en efecto, el modelo copernicano describe mucho más simplemente las apariencias astronómicas que el ptolemaico. Sin embargo, las cosas no son tan simples. El que el propio Copérnico haya debido recurrir a la parafernalia de círculos sobre círculos del antiguo sistema para ajustar sus cálculos astronómicos habla de una incongruencia entre éstos y el esquema sobresimplificado que Galileo nos expone. El que Kepler haya luchado a brazo partido para resolver el caso de Marte, que lo llevó, muy a su pesar, a proponer órbitas elípticas, nos muestra la dificultad real del problema astronómico que el heliocentrismo traía consigo (Koestler, 1986). Sin embargo, Galileo ignora el obstáculo y con ello espera convencer, con un argumento de suma importancia, el de la simplicidad, del sistema copernicano.

Este proceder ha despertado interminables discusiones. Desde Koestler (1986), que lo califica de "distorsión de los hechos" y "propaganda engañosa" (p.381), hasta Hall (1981), que resalta a un Galileo que luchaba por el heliocentrismo y no por establecer un sistema planetario, podemos encontrar muchas posturas intermedias. Lo cierto es que el asunto no termina aquí. Se podría ingenuamente conceder, a partir de la pura lectura del *Diálogo*, que Galileo, en efecto, concebía así al sistema copernicano. Es sabido que el libro de Copérnico ha sido, históricamente, uno de los textos científicos de más difícil lectura y comprensión. Son solamente los once primeros capítulos del Libro Primero los que son inteligibles para la mayoría de los estudiosos y ahí Copérnico pinta un sistema como el que Galileo retoma en el *Diálogo* (Koestler, 1989). Puede pensarse, entonces, que el físico toscano quien, como ya dijimos, no era un experto en astronomía y carecía de elementos teóricos especializados en ese campo, únicamente leyó esos once capítulos del *De Revolutionibus* y se hizo de una idea muy simplificada del modelo copernicano. Sin embargo, en otros textos, Galileo nos muestra que no fue así. En las *Cartas sobre las Manchas Solares* de 1613 (citadas por Fischer, 1986) mantiene una postura ambigua ante el problema, diciendo por un lado que los

movimientos planetarios seguramente tienen lugar sobre epiciclos y excéntricas y, por otro, que tal descripción sólo tiene sentido para los cálculos astronómicos, pero no debe creerse en ella. Es decir, confiesa que conoce los problemas astronómicos del sistema copernicano, pero no se ha hecho de una alternativa para resolverlos. Posteriormente, en 1615, escribe las *Consideraciones sobre la Opinión Copernicana* que, curiosamente, nunca dio a la imprenta. Y decimos curiosamente porque en ellas aclara su postura ante la astronomía copernicana, demostrando que, si no leyó por completo el libro de Copérnico, al menos sí conoció lo suficientemente a fondo su sistema como para saber los conflictos astronómicos a los que se enfrentaba.

Inicia las *Consideraciones* con dos premisas fundamentales: que es una falacia el que no haya manera de probar el movimiento terrestre y que es igualmente erróneo pensar que Copérnico y sus seguidores hablaron hipotéticamente. A lo largo del escrito argumenta en muchas ocasiones de una forma a la que no nos tiene acostumbrado. Apela frecuentemente a la autoridad de Copérnico, y de muchos hombres ilustres que han compartido su idea, no dudando en tachar de ignorantes que no han leído el *De Revolutionibus* a quienes atacan el nuevo sistema. En medio de este discurso define una postura. Distingue entre dos tipos de suposiciones que hacen los astrónomos: a) las que creen verdaderas (como el que el Sol o la Tierra se hallen inmóviles en el centro del Universo), y b) las que usan para ajustar sus cálculos (como los epiciclos y las excéntricas). Sobre las segundas Galileo dice:

"Estas últimas son utilizadas por el astrónomo a fin de satisfacer sus cálculos sin comprometerse en modo alguno a afirmar que son verdaderas en la naturaleza" (Galileo, 1988b; p.81).

El científico italiano afirma que Copérnico coloca dentro de las primeras suposiciones a su sistema, pero usa las segundas, que ya venían de la astronomía antigua, para describir los movimientos planetarios. Sin embargo, declara que todo cuanto ha dicho Copérnico es verdadero, incluyendo las excéntricas y epiciclos. Si ha de desterrarse el sistema copernicano, igual ha de hacerse con estos artilugios de cálculo que, en realidad, no deben ser eso sino realidades incontrovertibles (Galileo, 1988b). Es decir, no

es posible tener un sistema verdadero a medias. Vemos que la postura indefinida que adoptara dos años antes en las *Cartas sobre las Manchas Solares* se ha esfumado. En su lugar queda un elemento básico de la nueva epistemología: no es concebible una ciencia en la que las observaciones deban ser explicadas, en su detalle, con un artificio ajeno y apartado de la teoría que las describe en forma general; lo que concluya la ciencia ha de ser, en definitiva, real y verdadero. En un contexto más restringido, ésta es una de las más claras manifestaciones, como ya lo hemos mencionado, de su postura no instrumentalista en astronomía.

Entonces, ¿qué sucede en el *Diálogo*? ¿Por qué Galileo no dio a conocer esta posición que, aparentemente al menos, tiene bases muy arraigadas en su proceder científico? ¿Qué lo llevó a exponer un sistema copernicano con todas las bonomías sin conceder al ptolomeico un ápice de ellas? La discusión en torno a estas interrogantes es, como dijimos al principio de este apartado, enconada. Koestler (1986) califica al Galileo de la Tercera Jornada del *Diálogo* como "absolutamente despreciable" (p.381). Drake (1986) subraya el gusto del físico toscano por aproximar y el hecho de que su simplificación al modelo copernicano se aproxima lo suficiente a los datos como para acabar con la resistencia al heliocentrismo, sin necesidad de entrar en complicaciones cuantitativas. Fischer (1986) afirma que, con este proceder, Galileo ha definido una posición intermedia entre astrónomos, que creen en epiciclos y excéntricas, y filósofos, que sólo aceptan movimientos circulares concéntricos. Por su parte, Hall (1981) opina que tal actitud, al igual que su rechazo a las órbitas elípticas de Kepler, obedeció a una lucha por el heliocentrismo como doctrina filosófica, más que como sistema descriptivo; por ello el *Diálogo* presenta una teoría sin un sistema planetario. En este sentido, la cruzada por una realidad física del sistema copernicano debía ir de la mano con la defensa del postulado heliocéntrico, mas no con la de una descripción cuantitativa que pudiera considerarse deficiente.

Si bien la posición de Koestler (1986) nos parece demasiado intransigente, y las de Fischer (1986) y Drake (1986)

condescendientes en exceso, es cierto que Galileo da con su proceder elementos en pro de cada una de ellas. El "Manifiesto Copernicano", como Geymonat llama al *Diálogo*, no era un libro para especialistas sino uno de difusión y convencimiento para el "lector honrado" (Koyré, 1988; p.200). Es claro que, en una obra de tales características, poco provecho sacaría el autor de entrar en detalles cuantitativos de tan difícil comprensión como los complicados ajustes de órbitas de la astronomía ptolomeica o copernicana. También es cierto que una cierta simplificación de la nueva teoría, sobre una moderada exageración de las dificultades de la vieja, es un recurso retórico de justificada utilización. Sin embargo, Galileo no se detiene ahí. Como hemos visto, hace del modelo copernicano la solución de todos los problemas del ptolomeico, negando al primero todas las desventajas que exagera en el segundo. En este momento estamos a un paso de la conclusión de Koestler, de calificar a Galileo como un propagandista poco escrupuloso de la tesis copernicana. No obstante, olvidamos un elemento crucial: la finalidad última del *Diálogo*. Como ya hemos comentado, la forma en que el científico buscaba una victoria para el nuevo sistema del mundo implicaba una completa destrucción del antiguo esquema. Esta destrucción, iniciada por una crítica a la metafísica, se continúa en una aceptación de la verdad de la nueva física. El Galileo del *Diálogo* no podía darse el lujo de llevar la batalla al terreno donde la tenía perdida de antemano: el ajuste de las observaciones astronómicas. Debía luchar por algo más general, el postulado heliocéntrico. La crítica debía hacerla más por la filosofía que por la matemática. Es por ello que, con la ligereza que tanto sorprende a Koestler (1986), ignora las dificultades de la astronomía copernicana y las elipses de Kepler que, al igual que los círculos, no tenían el peso filosófico ni el valor discursivo que necesitaba para convencer de su doctrina (Hall, 1981). Desde luego que apela a la propaganda al criticar en Ptolomeo de lo que bien sabe que Copérnico también adolece, pero resulta excesivo juzgarlo tan duramente como quiere Koestler (1986). El fin era mucho más valioso y prometedor, y los argumentos cuantitativos demasiado pobres para cimentar en ellos

una discusión de provecho. La aparentemente voluntaria retención de su opinión en las *Consideraciones* muestra cuán conciente estuvo de esta situación y de la necesidad ulterior de construir toda una astronomía coherente.

3.4 El problema del movimiento terrestre

Quizás la mayor dificultad a la que Galileo había de enfrentarse en el *Diálogo* fue la de convencer de la viabilidad del movimiento de la Tierra. Haciendo abstracción de este problema, podía concederse que ambos sistemas en pugna (ptolomeico y copernicano) describieran igualmente las apariencias celestes más inmediatas. Tal proceder era el que había puesto al copernicanismo en el mismo nivel que el esquema ptolomeico en el cálculo astronómico (Koestler, 1989). Pero ya vimos que Galileo buscaba la verdad física del modelo copernicano, despreciando la idea de tomarlo como un mero artificio para ajustar datos. Para convencer de esto, lo más complicado que debía enfrentar era la resistencia tradicional al movimiento terrestre. Ahora, esta resistencia no estaba solamente sustentada por una doctrina filosófica, la aristotélica, sino por la más obvia y elemental experiencia. Sean cuales fueren los argumentos racionales en favor de un esquema u otro, es un hecho que nosotros no vemos ni sentimos el desplazamiento de nuestro planeta. Como bien lo expresa Feyerabend (1989): "¿Cómo puede uno dejar de darse cuenta del rápido movimiento de tal cantidad de materia como la Tierra se supone que es!" (p.57). La clara contradicción que la movilidad terrestre guarda con nuestras sensaciones debía ser mucho más definida en una época en la que estas últimas eran generalmente tomadas como la única vía para acceder a la realidad del mundo.

La manera en la que el físico italiano aborda este problema representa una de las más brillantes exposiciones de su ingenio y agudeza discursiva. La Segunda Jornada de su *Diálogo*, pletórica de ejemplos y demostraciones accesibles, resulta una magnífica exposición de las numerosas dificultades que ha de vencer y de cómo lo va logrando, hasta llegar a la conclusión de que, cuando menos, el movimiento terrestre es factible. Aquí ha renunciado ya a la posición que adoptara en 1615 en la Carta a la Gran Duquesa

Cristina, sacando de la discusión cualesquiera argumentos teológicos. Esto podría deberse a su conciencia en el Diálogo de separar la metafísica del discurso, para no entrar en conflicto con las partes más acabadas del constructo aristotélico y las más peligrosamente comprometidas con el dogma católico (Fischer, 1986; Geymonat, 1986). A cambio de esto, Galileo se introduce en una reveladora discusión sobre la relatividad del movimiento. Ante la objeción de que, de moverse la Tierra, una bala de cañón o una piedra arrojadas desde lo alto de una torre debían ser dejadas atrás, no duda en confirmar la experiencia:

"SALVIATI: [...] Este no es el caso Simplicio; porque así como yo (que soy imparcial entre estas dos opiniones, y llevo la máscara de Copérnico sólo como un actor en esta representación nuestra) nunca he visto ni espero ver la piedra caer de otra manera que perpendicularmente, así creo que aparece a los ojos de cualquiera otro. Es por lo tanto mejor dejar de lado la apariencia, en la que todos estamos de acuerdo y usar el poder de la razón o para confirmar su verdad o para revelar su falacia" (Galileo, 1967; p.256; las negritas no se encuentran en el original).

Es decir, la apariencia no es discutida. Lo que Galileo quiere es penetrar en su interpretación y mostrar que ésta puede hacerse desde un punto de vista radicalmente diferente. Aquí entra un elemento alrededor del que girará toda la argumentación: lo que Feyerabend (1989) llama "interpretaciones naturales" (p.53). Estas no son otra cosa que enunciados con los que se describen apariencias, tan ligados a éstas que los damos por ciertos con el sólo hecho de observar aquéllas. Por la época de Galileo, una interpretación natural perfectamente arraigada era la del carácter "operativo" (Galileo, 1967; p.171) o absoluto de todo movimiento. La cosmología aristotélica suponía la existencia de un centro inmóvil, respecto del cual se realizan todos los movimientos y se refieren todas las observaciones (Hall, 1981). Galileo ha de convencer de una "relatividad física" del movimiento, que es muy diferente de la "relatividad óptica", aceptada por los astrónomos para fines de cálculo (Koyré, 1988). La "relatividad física" implicará que un movimiento es "operativo" sólo entre cuerpos que no lo comparten (Galileo, 1967). De esta forma es posible, para describir un cierto desplazamiento, colocarse en un objeto que

carece de él. El movimiento real será descrito, entonces, desde un sistema de referencia en total reposo, que será el espacio absoluto de la física newtoniana, respecto al que todos los desplazamientos son "operativos" (Feyerabend, 1989). La diferencia está, en la nueva terminología, en que Aristóteles consideraba como absoluto cualquier sistema de referencia, mientras que para Galileo todos son relativos, salvo el que corresponde al observador privilegiado totalmente inmóvil en el Universo. De esta forma, la piedra, efectivamente, cae en línea recta para un observador parado en la Tierra, porque la caída rectilínea hacia el centro del planeta es el único movimiento que no comparten el observador y la torre con la piedra. Pero en el espacio absoluto la piedra seguirá una trayectoria que Galileo nos describe como un arco de circunferencia o, "si no exactamente ésta, muy cercana a ella" (Galileo, 1967; p.167).

Ahora bien, esto es lo que Galileo hace, relativizar físicamente al movimiento, pero ¿cómo lo explica? La forma en que ha de convencer al lector implica un cambio en su mentalidad, implica llevarlo a un nuevo conjunto de interpretaciones naturales, implica hacerlo relativista. Conlleva además una profunda transformación psicológica, que debe conducirlo a entender y aceptar hasta qué límite la percepción sensible, a la que ha dado total crédito siempre, sigue entregando información real sobre el movimiento observado. Aquí Galileo es admirable. Con constantes apelaciones a la reminiscencia socrática, hace "recordar" al lector toda una gama de experiencias en las que el carácter relativo (tanto óptico como físico) del movimiento es patente. Recurriendo a un barco que se mueve uniformemente, Galileo nos "recuerda" cómo la piedra que se deja caer desde lo alto del mástil cae al pie, siendo la trayectoria perfectamente recta para quien la lanza pero resultando curva para un observador en reposo sobre un puente y, viceversa, la piedra tirada por éste último al bote que pasa debajo no caerá verticalmente para alguien en él (Galileo, 1967). O bien, en un argumento elegante y convincente, el físico italiano esboza lo que, con justicia, conocemos como "transformaciones galileanas":

"SALVIATI: Entonces, cuando la flecha es disparada en la dirección del carruaje, el arco imprime sus tres grados de velocidad a una flecha que ya posee un grado, gracias al carruaje que la lleva a esa velocidad en esa dirección. Así, cuando la muesca deja la cuerda lo hace con cuatro grados de velocidad. Por otro lado, disparando en el otro sentido, el mismo arco confiere sus tres grados a una flecha moviéndose un grado en la dirección opuesta, de tal forma que a su separación de la cuerda sólo dos grados de velocidad permanecen con ella. Pero vos mismo habéis ya declarado que, para hacer los tiros iguales, se requiere que la flecha vaya con cuatro grados en un caso, y con dos en el otro. Así, sin cambiar el arco, el curso mismo del carruaje regula los vuelos; [...] Ahora aplicad este argumento al cañón, y encontraréis que si la Tierra se mueve o si permanece quieta, los disparos hechos con la misma fuerza deben siempre llegar igual de lejos no importando en qué dirección se manden" (Galileo, 1967; p.170; las negritas no se encuentran en el original).

En un maravilloso resumen de todas las experiencias que ha expuesto y como respuesta a buena parte de las objeciones al movimiento terrestre, Galileo escribe:

"SALVIATI: Como indicación final de la nulidad de los experimentos hasta aquí expuestos, me parece éste el lugar para mostraros una forma de probarlos muy fácilmente. Encerráos con algún amigo en una cabina bajo cubierta en algún barco grande, y tened con vos algunas moscas, mariposas y otros pequeños animales voladores. Tened un gran recipiente con agua y algunos peces; colgad un bote que se vacíe gota a gota en una vasija amplia abajo de él. Con el barco quieto observad cuidadosamente cómo los pequeños animales vuelan con igual velocidad a todos lados de la cabina. El pez nada indiferentemente en todas direcciones; las gotas caen en la vasija; y, lanzando algo a vuestro amigo, no necesitáis tirarlo más fuerte en una dirección que en otra, siendo iguales las distancias; saltando con vuestros pies juntos, pasaréis iguales espacios en toda dirección. Cuando hayáis observado todas estas cosas cuidadosamente (aunque no haya duda de que cuando la nave esté quieta todo ocurrirá de esta manera), dejad que el barco proceda con cualquier velocidad que gustéis, hasta que el movimiento sea uniforme y no fluctúe. No descubriréis el menor cambio en todos los efectos mencionados, tampoco podréis decir por alguno de ellos si el barco se mueve o permanece quieto. [...] La causa de todas estas correspondencias es el hecho de que el movimiento del barco es común a todas las cosas contenidas en él, incluso el aire. Esto es por lo que os dije que debía ser bajo cubierta; porque arriba en aire abierto, que no seguiría el curso del navío, se observarían diferencias más o menos notables en algunos de esos efectos" (Galileo, 1967; p.186; las negritas no se encuentran en el original).

El pasaje es admirable. En él, el autor sintetiza con un sólo ejemplo la mayoría de las dificultades que la vieja visión del mundo atribuía al movimiento terrestre: el vuelo de las aves, la

caída vertical de la lluvia, el desplazamiento de los buques, los disparos con igual fuerza de cañón en favor y en contra de la rotación, etc. (Fischer, 1986). Así, con este tipo de explicaciones simples y, lo más importante, que están dentro de nuestro sentido común - aquél que era el más poderoso defensor de Aristóteles -, el físico italiano cambia las interpretaciones naturales del lector o, cuando menos, lo lleva a identificar y cuestionar las viejas. Emplea, pues, el método que Feyerabend (1989) propone para detectar tales interpretaciones: la contrainducción, es decir, la afirmación de una regla externa de comparación (el movimiento terrestre) para hallar en el viejo esquema los enunciados observacionales que, aunque dudosos, los tomamos inadvertidamente como expresión obvia de las apariencias.

Sin embargo, detenerse aquí implica juzgar las cosas con ligereza. Es cierto que los ejemplos de Galileo llevan al lector a preguntarse si sus percepciones son en realidad tan absolutas y definitivas, y la interpretación que hacía de ellas tan directa, como venía creyendo, pero esto no significa que deba aceptar acríticamente la extensión de los experimentos en el navío o en el carruaje a la caída de la piedra desde la torre, el vuelo de las aves o los disparos de cañón hacia oriente y poniente. La generalización es tanto más difícil en cuanto que traiciona la antigua separación entre los procesos celestes y los terrestres, ya que, aceptando a la Tierra como un astro más, su comportamiento global no tendría que obedecer a las mismas reglas que el de cualquiera de sus partes (Koyré, 1988). Además, como confiesa el mismo Salviati:

"[...] el movimiento de la nave no es su movimiento natural, así que el de todas las cosas en ella es accidental; [...] Pero la rotación diurna es tomada como un movimiento propio y natural del globo terráqueo, y en consecuencia aquél de todas sus partes, como una cosa impresa indeleblemente en ellas por la naturaleza" (Galileo, 1967; p.142).

De modo que, de moverse la Tierra, su desplazamiento y el de todos los objetos ligados a ella sería "natural" desde la óptica aristotélica, mientras que todo lo que ocurre en un móvil hasta cierto punto independiente, como el barco o el carruaje, sería forzado. Aquí aparece el punto más débil de la argumentación de

Galileo y donde hace uso de otra de sus armas metodológicas fundamentales. Deja de lado el problema, luego de discutir algunas otras diferencias como el arrastre del aire, notorio en la Tierra e ignorable en el buque, y hace que sus personajes concluyan:

"SALVIATI: [...] decidme, Simplicio: ¿Os sentís convencido de que el experimento en el barco ajusta tan bien con nuestro propósito que uno puede creer razonablemente que lo que vea ocurrir ahí debe también tener lugar en el globo terráqueo?"

SIMPLICIO: Hasta aquí, sí; y aunque vos habéis sacado algunas disparidades triviales, no me parecen suficientes para cambiar mi convicción.

SALVIATI: Espero entonces que os atengáis a ella, e insistiréis firmemente que el resultado en la Tierra debe corresponder a aquél en el barco, de modo que cuando el último se perciba como perjudicial a vuestro caso no estaréis tentado a cambiar de opinión" (Galileo, 1967; p.143; las negritas no se encuentran en el original).

Asunto resuelto. El autor saca del discurso las dificultades de la generalización exponiendo algunas - como la de la diferencia entre movimientos naturales y forzados - que han sido criticadas a lo largo de toda la obra como parte del edificio aristotélico y deberán caer al fin, minimizando otras - como el problema del aire que no es dejado atrás por la Tierra y sí por el barco - e ignorando las más peligrosas - como el hecho de que el barco carece de un equivalente al movimiento rotacional diurno atribuido a nuestro planeta (Fischer, 1986).

El lector, llevado por la tónica de la discusión, no tiene muchos problemas en aceptar este manejo del problema y conceder la conclusión. Galileo ha triunfado, porque recordará en todo momento lo que Simplicio ha admitido de Salviati en la cita anterior. Así, toda su argumentación del barco es aplicable directamente a la Tierra y, por una extensión que el autor hace ver totalmente natural, los tiros de flechas desde un carro o la escopeta que sigue al ave en un semicírculo son equivalentes al cañón que dispara a este y a oeste, o al que lo hace verticalmente.

De esta forma, Galileo usa un truco parecido al que empleó cuando expuso el sistema planetario de Copérnico: la simplificación del problema. Pero mientras que en la Tercera Jornada no construye nada más sobre esta simplificación, en la

Segunda basa en ella toda su introducción de la conrainductiva tesis del movimiento de la Tierra.

Ahora, todo lo discutido hasta aquí ha mostrado el proceder de Galileo ante las más inmediatas objeciones al desplazamiento terrestre. Pero había una en particular ante la que adoptaría una actitud más formal y que lo pondría en contacto con sus reflexiones más profundas en mecánica: el problema de la fuerza centrífuga. Tal vez pueda concederse que la Tierra se mueva sin que nuestros sentidos lo adviertan, pero nosotros sabemos que todo lo que gira tiende a salir expulsado por la tangente de la circunferencia. ¿Cómo es posible, entonces, que los objetos sobre nuestro planeta, cuyo desplazamiento circular se supone tan veloz, no salgan disparados de su superficie? La respuesta que, luego de tortuosas digresiones y de un razonamiento geométrico, da Galileo, puede resumirse como sigue:

La circunferencia terrestre es muy extensa, de tal forma que, a escala reducida, puede aproximarse por una recta. La tangente en un punto dado es igualmente una recta, y el ángulo entre ésta y la circunferencia será tan agudo como se quiera, de tal forma que cualquier tendencia, por mínima que sea, que exista hacia el centro del círculo, superará con creces la proyección por la tangente. En pocas palabras, como circunferencia y tangente se hallan tan próximas, basta una ínfima tendencia al centro para que un cuerpo permanezca sobre la primera. De esta forma, como todo grave tiende naturalmente hacia el centro de la Tierra, no habrá manera de que la rotación lo despida por la tangente (Galileo, 1967).

Si bien el argumento es erróneo, desde nuestra perspectiva, y Galileo dio en él a la geometría el papel que correspondía a la dinámica - nuestra solución se encontraría en comparar las dos tendencias que hoy llamamos fuerzas (gravitatoria vs. centrífuga) (Hall, 1981) - también es ciertamente revelador de algunos de sus conceptos y fijaciones en la mecánica. Tenemos su concepto de inercia, del que posteriormente hablaremos bastante, que ha sido denotado como de "inercia circular" (Feyerabend, 1989). No era aún, pues, la inercia newtoniana en la que un cuerpo en movimiento

tiende a seguir en una recta - con lo que, en efecto, toda rotación impulsa al objeto hacia la tangente -, sino la tendencia a continuar en movimiento circular. En muchas ocasiones, Galileo llega a tener en sus manos la inercia de la Primera Ley de Newton, pero siempre la hace a un lado porque los cuerpos tienen peso y, por ende, una tendencia hacia el centro. El físico italiano no concibe un cuerpo sin peso. El plano horizontal real es el que puede dibujarse sobre la superficie terrestre, una superficie esférica. El desplazamiento sobre este plano sirve a Galileo para criticar el concepto tradicional de que todo movimiento es natural o violento. Sobre un plano horizontal el objeto siempre equidista del centro, no hay violencia ni tendencia sobre él. Por eso no hay movimiento recto natural (Koyré, 1988). Por eso también la respuesta del científico a la objeción expuesta es que no habría rotación, por veloz que fuera, que expulsara a los objetos de la superficie terrestre: el peso los mantendría siempre atados a ella.

Sin embargo, es curioso que esta conclusión, que Galileo mantuvo siempre, le permitiera, junto con su concepto medieval de las órbitas circulares, colocar en el mismo marco de ideas a los movimientos terrestres y celestes, e iniciar la empresa que Newton concluyó de unificar la física de ambos terrenos (Hall, 1981).

3.5 Una teoría mecánica imposible

En 1616 Galileo escribía al cardenal Orsini:

"[...] estoy grandemente inclinado a admitir que la causa de las mareas puede residir en algún movimiento de las cuencas que contienen el agua de mar; así, atribuyendo algún movimiento al globo terráqueo, los movimientos del mar podrían originarse de él" (Galileo, 1989b; p.122).

En la misma carta detalla una teoría que, dieciséis años más tarde, transcribiría apenas con alguna variación en la Cuarta Jornada de su *Diálogo*. El argumento fuerte de la exposición se encuentra en atribuir la causa principal de las mareas al movimiento desigual de la superficie terrestre, visto desde un sistema de referencia inmóvil y externo a la Tierra, digamos el Sol. Parados ahí podremos constatar que, en la combinación de la traslación y la rotación de nuestro planeta, hay momentos en que

un punto sobre su superficie va más rápido al ir ambas en el mismo sentido, otros en los que va más lento al ir en direcciones contrarias y otros a una velocidad media cuando la rotación es "perpendicular" a la traslación. Galileo concluye:

"[...] vemos que cualquier cuerpo de agua (sea mar, lago o estanque) tiene un movimiento continuo no uniforme, ya que es retardado durante algunas horas al día y muy acelerado durante otras; tenemos entonces la causa y el principio por los que el agua contenida en él, siendo fluida y no atada firmemente al contenedor, fluye y se mueve ahora en ésta y ahora en la dirección opuesta" (Galileo, 1989b; p.124).

Desde 1616 hasta 1632 el científico mantuvo su teoría casi idéntica. La Cuarta Jornada del *Diálogo* parece una transcripción a parlamentos teatrales de la carta de Orsini. Durante dieciséis años no se dio, o aparentó no haberse dado cuenta, de que explicar así el fenómeno de las mareas era una clara y flagrante violación a las más caras conclusiones de su mecánica. Más aún, pese a que en múltiples ocasiones aclara que su teoría es tan sólo una sugerencia, una "especulación ingenua" como escribe en el prefacio del *Diálogo*, en igual número de oportunidades la comenta como un argumento convincente e, incluso, como la prueba irrefutable o el "arma secreta" en favor del movimiento de la Tierra (Koestler, 1986). Como ya dijimos, quiso hacer de ella el argumento más sólido del *Diálogo* desde el título original que había pensado: *Diálogo sobre el Flujo y Reflujo de las Mareas*.

He aquí otro tema en el que la discusión no termina. Koestler (1986) afirma que "[...] su concepción [la de la teoría de las mareas] sólo puede explicarse en términos psicológicos, [...] no era un error sino una ilusión" (p.362); Geymonat (1986) declara que "incluso los más grandes científicos caen a veces en errores mayúsculos" (p.149); Fischer (1986), refiriéndose a la opinión de que Galileo tal vez 'ho creyera en su teoría, dice: "[Galileo] ya no era el empirista del *Sidereus Nuncius*" (p.142) y Drake (1986) escribe que, aunque incorrecta, tal teoría es "perfectamente científica" (p.119).

La dificultad es clara. El enconado defensor de la relatividad del movimiento da un salto hacia atrás, retrocede a la dinámica aristotélica, hace del desplazamiento terrestre uno

"operativo" y declara que los cuerpos acuosos resienten los cambios de velocidad de la Tierra. Pero, entonces, ignora toda la brillante argumentación de su Segunda Jornada y retorna al centro inmóvil del mundo: como todo movimiento es absoluto y, parado en el Sol, yo veo cómo la superficie terrestre se acelera y desacelera, entonces esas variaciones existen realmente (movimiento "operativo") y deben manifestarse en aquello que no esté firmemente atado, es decir, el agua. (Notemos que, para la atmósfera, Galileo atribuye siempre a un arrastre por parte de las irregularidades terrestres el que "siga" a la rotación del planeta, existiendo una deriva que provoca una brisa ligera en la dirección contraria al giro (Galileo, 1967). Este es un elemento al que no da mucha importancia y, por ello, su falacia desde nuestra mecánica puede entenderse como un simple error).

Ahora, Galileo maquilla lo más posible esta "causa más fundamental y efectiva", como él mismo la llama (Galileo, 1967; p.248), con todas las distorsiones y digresiones a las que puede recurrir. Discute cuidadosamente el comportamiento del agua en un recipiente al que inclina, acelera y detiene. Estudia la influencia que puede tener la forma del recipiente y la usa para mostrar cómo hay mares con periodos de mareas diferentes. Mete el factor del peso del agua que, combinado con la causa principal, crea oscilaciones de diversas frecuencias dependiendo de la profundidad y anchura del contenedor, siendo ésta la razón de la ausencia de mareas observables en poca agua. Comenta el papel de los estrechos, de la desembocadura de los ríos y de la orientación de los mares. Combina, en otra falacia mecánica, el movimiento lunar con el terrestre para establecer que el sistema Tierra-Luna se traslada más rápido en torno al Sol en cierto intervalo del mes lunar y más lento en otro: más veloz cuando la Luna se halla en conjunción, porque el sistema completo está a menos distancia del Sol - y más cerca del centro de giro un cuerpo en órbita se desplaza más rápido -, y más lento cuando nuestro satélite está en oposición, por la razón contraria (Galileo, 1967).

Con el manejo de los factores distorsionantes que hace en la carta a Orsini, y más insistentemente en el *Diálogo*, Galileo

puede, en principio, explicar cualquier irregularidad en los movimientos periódicos de las grandes masas acuosas del planeta.

Pero, ¿cómo entender el proceder del físico ahora? Tenemos una teoría que debía de parecerle falsa más que a nadie y, sin embargo, no sólo la desarrolla y expone en una carta sino que, dieciséis años más tarde, la publica sin cambios notables en un libro como uno de sus argumentos cruciales. En su discusión de la Segunda Jornada del *Diálogo*, Galileo concluye que ha removido las objeciones al desplazamiento terrestre, pero no hay forma aún de probar éste. Más todavía, como lo aseguró desde el prefacio "Al Lector Perspicaz" que ya citamos (Galileo, 1967; p.6), dicha forma no puede existir si el experimento se desarrolla sobre la Tierra. La Cuarta Jornada y toda su actitud en torno a la teoría de las mareas contradicen este postulado, que ha emergido directamente de sus más profundas reflexiones mecánicas.

La explicación debe encontrarse en la urgencia de una prueba irrefutable del movimiento terrestre. Con el maravilloso manejo del que nos dio una muestra en la Segunda Jornada del *Diálogo*, el físico toscano puede convencernos de que, en efecto, las cosas serían iguales en una Tierra quieta que en una moviéndose. Pero esto no demuestra que nuestro planeta en realidad se desplace (Fischer, 1986). El paralaje estelar, única prueba que Galileo sabía incontrovertible, era inobservable, por lo que construyó, como afirma Koestler (1986), un sustituto. Como ocurrió en el caso de la sobresimplificación de la astronomía copernicana, recurre a su arma metodológica de emergencia: la propaganda. Apelando a la antigua física construye una teoría que un aristotélico inteligente - ignorando de momento su enorme legado de objeciones - propondría para explicar las mareas en una Tierra móvil, y hace aparecer esta teoría como el producto de la nueva física, que apoya las tesis copernicanas. Para nosotros, parados sobre el edificio que surgió de las ruinas del aristotélico, la trampa es notoria y nos parece hasta burda, pero la persistencia de los "fantasmas peripatéticos" en los contemporáneos y sucesores inmediatos de Galileo provocó que no fuese advertida ni jugase papel alguno en la época (Fischer, 1986). Indudablemente, la

propaganda galileana surtió el efecto apetecido, al menos dentro del discurso del *Diálogo*. El que Galileo haya estado o no conciente de las inconsistencias de su teoría es un asunto de juicio difícil. Cuesta creer que no las haya reconocido y parece más sensato aceptar, como quiere Koestler (1986), que su sustituto de urgencia al paralaje estelar ausente se convirtiera en una idea fija, una obsesión ante la que ya no cupo crítica. En cualquier caso, el "arma secreta" en favor del movimiento terrestre viene a confirmarnos la inexorable voluntad de Galileo de mantener la defensa del copernicanismo, y la pluralidad de metodologías a las que era capaz de recurrir para lograrlo.

3.6 Los elementos metodológicos del *Diálogo*

El *Diálogo sobre los Dos Máximos Sistemas del Mundo* es una obra fundamental por muchas razones. Es el primer libro donde, de manera accesible, se dan a conocer los puntos básicos de la doctrina copernicana y sus diferencias con el aristotelismo. En él, Galileo pretende forzar una decisión entre el sistema copernicano y el ptolomeico (Fischer, 1986) y, en general, en contra de las enseñanzas peripatéticas. Cabe hacer notar que, ya desde el título, el autor no estaba dispuesto a aceptar al modelo de Brahe como viable (Geymonat, 1986), lo que sugiere de entrada su aversión por las teorías de compromiso, instrumentalistas, que se contentaran con el ajuste de las apariencias. El *Diálogo*, además, es una obra escrita para el no especialista. El uso del italiano, en lugar del latín, manifiesta de entrada hacia quién va dirigido. Está pensado para el hombre culto e interesado, para el cortesano o burgués de la época, para un Sagredo dispuesto a erradicar de sí a su Simplicio. Aunque se dedica a criticar al escolástico, no es un libro para ser leído por él (Koyré, 1988). Es por ello que Galileo hace uso de sus dotes literarias y pedagógicas. La forma dialogada, herencia de la didáctica griega y de nuevo en boga para el siglo XVI (Drake, 1986), da al libro un tono ligero y ameno, reforzado por las frecuentes digresiones que lo hacen desordenado para el lector moderno. Como obra de difusión es admirable y, con ella, Galileo da la primera muestra de una necesidad que creció con la nueva física: la de dar a conocer los

quehaceres científicos al lector no versado. Su objetivo podía ser, en principio, muy otro (ganar un auditorio importante en apoyo del copernicanismo), pero indudablemente puede tomarse a este libro como un clásico de la divulgación de la ciencia.

Por otro lado, la exposición encauzada a cambiar la mentalidad del lector y derrumbar en él los preceptos aristotélicos puede ser vista, como explica Koyré (1988), como un resumen de los caminos seguidos por los razonamientos galileanos. Por eso tenemos tantos retrocesos, tantos términos (ímpetus, fuerza, movimiento natural, etc.) cuyo significado irá evolucionando a lo largo de la obra, tantas digresiones, tantas evasiones a cuestiones espinosas y tanto regocijo por los triunfos. El no ocultar al lector estos senderos turbulentos del pensamiento, el llevarlo a través de ellos con la seguridad del guía que ya los conoce bien, es parte de la gran capacidad persuasiva del *Diálogo*.

El libro, además, constituye un manifiesto en contra de las metodologías aristotélicas. El repudio a la matemática, la confianza total en los sentidos, la apelación a la autoridad, los criterios absolutos de perfección, la búsqueda de esencias, son criticados una y otra vez. En cambio, revalora el papel de la experiencia y cómo ha de entrar en juego con la razón. Insiste en la realización de experimentos o en ignorarlos cuando el razonamiento garantiza su resultado, en una de sus actitudes metodológicas que más discusiones propiciará cuando analicemos la mecánica de sus *Discorsi*.

Pero lo más determinante de todo es el proceder contrainductivo, plagado de ejemplos y de apelaciones a la anamnesis socrática, para cambiar lenta, gradual pero inevitablemente las interpretaciones naturales propias de la época. El lector, ayudado por las "reminiscencias" que el autor le va oportunamente "recordando", se desliza de una visión del mundo a otra casi sin advertirlo (Koyré, 1988) y, al final, o se encuentra convertido en relativista o tiene serias dudas sobre un esquema ante el que no se cuestionaba. La anamnesis juega, entonces, un papel preponderante. Es la "muleta psicológica"

(Feyerabend, 1989; p.72) que obliga a olvidar lo que ocurre en el trasfondo y a aceptar que los conceptos que creemos nuevos en realidad no lo son tanto; es el arma metodológica, la forma más refinada de propaganda que cambiará, sin que tengamos idea precisa de cuándo o cómo, nuestro lenguaje observacional, nuestra experiencia misma (Feyerabend, 1989).

Todos estos elementos hacen del *Diálogo* un libro impresionantemente convincente, incluso para el lector moderno, quien descubre en él multitud de formas nuevas para entender conceptos que ya daba por bien conocidos. Impresiona que, pese a la certeza que tenemos de su falacia, Galileo sea capaz de interesarnos genuinamente en su teoría de las mareas o en su simplificación propagandística del sistema copernicano. Nos cuesta juzgar con la dureza de Koestler (1986) su manejo tendencioso del copernicanismo, nos admira su capacidad discursiva, nos cautiva su retórica. No es difícil imaginarse, dejando de lado todas las causas políticas y personales que intervinieron, por qué el *Diálogo* fue tomado como un libro peligroso para el Catolicismo y por qué, en última instancia, desencadenó el aciago proceso eclesiástico contra Galileo.

La obra es, finalmente, el lazo entre astronomía y mecánica, los dos cuerpos de conocimiento en los que el físico italiano ha incursionado. Pero es un nexo problemático, porque pone en contacto las partes más débiles del discurso astronómico galileano, la interpretación de las observaciones y la obsesión por los círculos de las que ya hemos hablado, con una mecánica que, además de ser nueva y de conflictiva aceptación, recurre en auxilio de una teoría inconsistente y contradictoria (las mareas). Sin embargo, esa unión resultará, a la larga, la base de la fusión entre la física terrestre - donde creció la mecánica - y la celeste - dominio de la astronomía. Bien sabemos lo que esa unión significó en provecho de la ciencia que heredamos de Galileo y Newton.

Precisamente de mecánica, en donde Galileo hará sus más reconocidas aportaciones, tratará la obra magna de su quehacer científico. Un libro que escribió en sus últimos años, cuando el

malhadado juicio lo obligó a permanecer recluido en su villa de Arcetri, y que constituyó un parteaguas fundamental en la forma de hacer y escribir ciencia. Nos referimos a las *Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias relativas a los Movimientos de Traslación* de 1638, generalmente citadas como los *Discorsi* por su título original. De esta obra trataremos en el capítulo siguiente.

Capítulo 4. Galileo, mecánico

La obra madura de la mecánica galileana se encuentra resumida en las *Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias relativas a los Movimientos de Traslación* de 1638, que son, en realidad, una reconstrucción y profundización de viejos resultados que Galileo desarrolló fundamentalmente en su periodo en Padua (1592-1610) (Fischer, 1986; Geymonat, 1986). De ahí, tal vez, que en el *Diálogo* ya hiciera referencia a su libro sobre "las dos nuevas ciencias", esbozase algunas demostraciones y emplease ciertos resultados que aparecerían justificados en él (Galileo, 1967).

Los *Discorsi* (como, siguiendo la tradición, nombraremos a las *Consideraciones* según su título original) constituyen la otra gran producción científica de Galileo. En ellos ha cambiado la actitud del físico divulgador de la ciencia, para transformarse en la de constructor de un edificio teórico nuevo. Si en el *Diálogo* se ha empeñado en derrumbar el antiguo esquema, en los *Discorsi* sentará las bases fundamentales para el que lo reemplazará. En ese cambio de actitud juegan un papel preponderante las armas que ha entronizado en sus reflexiones sobre la ciencia: una nueva experiencia y una nueva lógica. La primera se traducirá en nuestro moderno concepto de experimento, la segunda en el uso de la matemática. La relación entre ambas resultará uno de los elementos más problemáticos del Galileo mecánico. En los *Discorsi*, además, renunciará voluntariamente al estilo literario que hacía del *Diálogo* una obra de genuina difusión y escribirá con la concreta y deductiva forma de la demostración geométrica. Buscará hacer de la matemática el lenguaje de la investigación (Solís en Galileo, 1981a) y, de esta manera, dará a ciertas partes de su libro una imagen de rigor que se hará cotidiana en la literatura científica moderna.

Es en los *Discorsi* en donde Galileo hará gala de sus mayores y mejor sustentados logros. A diferencia de la inseguridad que en el *Diálogo* lo obligaba a una apelación a los trucos psicológicos, que ya mencionamos, en las nuevas ciencias argumentará con el formalismo que le dio la imagen de científico metódico que muchos le atribuyen. Por esto, un análisis de los *Discorsi* nos permitirá introducirnos en algunos de los aspectos más determinantes de la visión que la

posteridad se ha trazado de la metodología y las aportaciones del gran físico toscano.

4.1 El contenido de los Discorsi

Las *Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias relativas a los Movimientos de Traslación* están, al igual que el *Diálogo sobre los Dos Sistemas Máximos*, divididas en cuatro jornadas o días. Galileo, sin embargo, planeaba completar dos jornadas más, que han sido reconstruidas a partir de sus notas de forma no muy satisfactoria, por lo que no suelen publicarse en las ediciones actuales de la obra. En la impresión de 1638 se añadió, además, un apéndice sobre centros de gravedad, redactado en sus años de juventud, que tampoco se acostumbra publicar hoy (Solís en Galileo, 1981a; p.46).

Las dos nuevas ciencias a las que hace referencia el título son la de la resistencia de materiales y la de los movimientos uniforme y acelerado, ésta última con su célebre aplicación al desplazamiento de proyectiles. Aparecen en la obra los tres mismos personajes del *Diálogo*: Salviati, el convincente expositor de las demostraciones y razonamientos de Galileo, Sagredo, el hombre culto pero no especialista al que hay que convencer, y Simplicio, el poco hábil defensor del viejo esquema. Sin embargo, el estilo dialogado le resultará limitado al autor cuando quiera exponer sus más formales demostraciones matemáticas, de manera que hace a Salviati leer, a partir de la Tercera Jornada, un texto en latín - los diálogos se encuentran en italiano - del "Académico" (nombre con el que siempre se hace referencia, desde el *Diálogo*, a Galileo). La división que impone esta ruptura del diálogo es acentuada aún más por la separación de los temas. En efecto, las dos primeras jornadas, de redacción más parecida al *Diálogo*, contienen las conclusiones de Galileo en sus investigaciones sobre estática y resistencia de materiales. Obedeciendo a su gusto renacentista por las "artes mecánicas" (Solís en Galileo, 1981a; p.17), el autor se introduce, como veremos, en reflexiones sobre las propiedades de la materia. En el camino se desviará por múltiples digresiones que, a diferencia del *Diálogo*, regresarán las más de las veces a proposiciones matemáticas, donde la geometría, las razones y las proporciones - las armas

formales más trabajadas de la lógica galileana - jugarán el papel preponderante y más convincente de la argumentación. Para las dos últimas jornadas la exposición se hace totalmente rigurosa. La nueva ciencia sobre los movimientos locales es expuesta ya en el lenguaje recién adoptado. Las digresiones son mínimas y la matemática lleva de la mano al discurso. Los esbozos de las dos jornadas no concluidas nos dejan ver que su tema sería la teoría euclidiana de las proporciones, para la quinta, y el problema de la percusión, para la sexta. Interesante en esta última es, además, que el poco afortunado Simplicio deja la escena para ser sustituido por Aproino, un amigo de Galileo de sus años en Padua (Geymonat, 1986).

Pero vayamos a la obra. Luego de una dedicatoria y misiva al conde de Noailles, en la que se agradece su interés por el libro, y de unas entusiastas palabras del impresor en elogio de Galileo y sus estudios, se inicia la Primera Jornada, cuyo contenido es anunciado como: "Primera nueva ciencia, acerca de la resistencia de los cuerpos sólidos a la fractura" (Galileo, 1981a; p.63). Sagredo declara, de entrada, que todas las leyes mecánicas están fundamentadas en la geometría. Para lograr esta relación se requiere considerar a la materia libre de todas sus imperfecciones; sólo así puede tratársela con la pureza que se precisa en la matemática. Partiendo, entonces, de una idealización de la materia, Galileo propone el estudio de una nueva ciencia, que tratará de la resistencia de los cuerpos. En ella tomará muchos de los resultados de Aristóteles, pero irá explicándolos y deduciéndolos de principios fundamentales, a través de demostraciones matemáticas. Explica cómo una cuerda, rota por torsión, se ha separado por la ruptura de las fibras que la conforman, de igual manera que cuando se rompe por tensión. Luego de una digresión en la que explica un invento para deslizarse por una cuerda sin dañarse las manos, Galileo expone que los cuerpos no fibrosos se mantienen unidos por la famosa repugnancia al vacío y por algún aglutinante entre sus partículas constituyentes. Enseña cómo dos láminas perfectamente pulidas de mármol, metal o vidrio, se deslizan fácilmente una sobre la otra, pero, cuando se quiere separarlas, mostrarán una gran resistencia. Esto prueba cómo, en pequeñas regiones y por tiempos reducidos, la naturaleza no admite el

vacío. Tal argumento, además, podría extenderse a las menores partículas que forman el sólido, siendo, tal vez, una de las causas de su cohesión, aunque no la única. Critica la idea aristotélica del desplazamiento a velocidad infinita en el vacío, aduciendo que, de ser cierta, el aire penetraría instantáneamente entre las láminas y su separación sería inmediata. Describe, entonces, un experimento para medir la "fuerza" del vacío, mediante pesos aplicados a una columna de agua cerrada herméticamente. Luego aclara que una bomba de succión jala un cilindro de agua, el cual, al rebasar una cierta longitud, se "rompe". De igual manera, un hilo de cualquier material tendrá una longitud característica, para la cual ya no podrá soportar su propio peso. Discutiendo nuevamente sobre los vacíos que, probablemente, ayudaran a aglutinar las menores partículas de la materia, se introduce en un análisis geométrico de lo infinitamente pequeño. Estudiando el proceso límite mediante el que un polígono se transforma en círculo, al aumentar a un número infinito de lados inextensos, busca probar la posibilidad de tener innumerables vacíos sin dimensiones entre la infinidad de partículas indivisibles que forman la materia (adhiriéndose con ello a la antigua tradición de Demócrito). Resalta que la única forma de entender lo indivisible es asociándolo con lo infinito. De esta manera, se pueden comprender las magnitudes continuas como una infinidad de indivisibles. Al llevar sus dimensiones al límite infinito, el círculo o la esfera pierden su ser y se vuelven una recta o un plano. Elucubrando sobre la naturaleza de los fluidos, aventura que éstos pueden estar compuestos por infinitos indivisibles, sin vacíos interpuestos. Por ello, un sólido muy triturado se comporta más como un fluido que cuando está entero. Explica su célebre experimento de los dos hombres con linternas que, puestos de acuerdo para que uno descubra la suya en cuanto vea la luz de la otra, se separan algunas millas y determinan si las respuestas luminosas se alargan como producto de la mayor distancia que la luz ha de recorrer. Pese a no encontrar diferencia, Galileo se niega a afirmar que la luz se desplace a velocidad infinita, ya que usó distancias muy cortas en el intento. Continúa con algunas demostraciones geométricas sobre polígonos y círculos, tomando a éstos siempre como casos límite. Luego demuestra la

relación geométrica entre longitudes y superficies de cilindros, aplicándolos a lo que se observa en el proceso de dorar alambres de plata. Analiza la rarefacción y condensación, exponiendo cómo la primera es más fácil de observar y concluyendo que, ahí donde la experiencia no llega, entra la razón. Ante el concepto aristotélico de que los cuerpos más pesados caen más rápido, expone el experimento mental de tener dos piedras de diferentes tamaños (importa que sean de igual materia) que se dejan caer, separadas primero, unidas después. Según Aristóteles, cuando van desunidas, la más pesada cae antes; sin embargo, cuando se une a la menor, como cada una ha de tener una velocidad propia en la caída, la más leve restará velocidad a la mayor, y así la unión irá más lento que ésta última. Pero las dos piedras juntas pesan más que la mayor, por lo que no pueden caer más lentamente. La contradicción descalifica, entonces, que la piedra más pesada caiga más rápido. Galileo aclara que el problema se halla en tomar el peso de los graves igual en reposo que en movimiento. En una balanza una piedra presiona más que la otra, pero en la caída no es así. Entonces, los cuerpos del mismo peso específico deberían caer igual y aunque, en la realidad, la piedra más pesada caiga antes que la ligera, por efectos del medio que Aristóteles no analizó, la diferencia es mucho menor que lo que el filósofo griego afirmaba. Luego estudia la caída de cuerpos en el agua y en el aire, concluyendo que importa mucho la acción del medio. Si bien en el agua dos objetos pueden caer a velocidades muy diferentes, en el aire van a hacerlo casi a la misma. La desigualdad de las velocidades en un medio crecerá con su resistencia. Confesando que no conoce la razón por la que las grandes gotas de agua pueden sostenerse, expone un experimento en el que se observa el limpio intercambio de agua y vino entre dos recipientes, conectados por un pequeño orificio. Luego analiza el movimiento en el vacío. Haciendo a un lado el razonamiento aristotélico, por el que la velocidad en el vacío sería infinita, extrapola el resultado de que, en medios menos densos, la diferencia entre las velocidades de móviles de pesos distintos es menor, para llegar a que en el de densidad nula (vacío) se desvanece y todos los cuerpos caen con igual velocidad. Posteriormente, enunciando que la caída es un movimiento de aceleración uniforme, explica el porqué de

la velocidad terminal de descenso al equilibrarse la resistencia del medio con el desplazamiento del móvil. La velocidad de un cuerpo estará dada por el exceso de su peso específico con respecto al del medio. Luego aclara que dejar caer objetos desde cierta altura para probar esto tiene sus dificultades, debido a la acción poco cuantificable del medio y a la rapidez de la caída. Entonces propone el uso de un plano inclinado para simular estos comportamientos y poderlos estudiar, y luego de un péndulo para ahorrarse la dificultad del rozamiento del plano. Afirma que, independientemente de la amplitud, todas las oscilaciones de un péndulo dado son isócronas. Regresa a la caída libre y muestra cómo, en cuerpos pequeños, la razón entre superficie y volumen (por tanto entre superficie y peso) es mayor que en los grandes, de modo que caen más lento en un medio dado que éstos. Finalmente, comenta algunas características de la resonancia del sonido (Galileo, 1981a).

La Segunda Jornada lleva por contenido, en palabras de Galileo: "Cuál podría ser la causa de tal cohesión" (Galileo, 1981a; p.63). El autor inicia exponiendo los postulados en los que ha de basar toda su ulterior discusión: las bien conocidas propiedades de las palancas y el hecho de que un objeto pueda mantener su peso aun cambiando de forma. Prueba entonces la primera proposición, en la que afirma que los cuerpos sólidos soportan menos una tensión transversal que una longitudinal. Luego demuestra geoméricamente algunas proposiciones, en las que se relacionan las dimensiones de prismas y cilindros con sus resistencias, tanto a romperse bajo una fuerza externa como bajo su propio peso. Con estos resultados, se introduce en una profunda reflexión sobre las resistencias de estructuras naturales y artificiales. Los objetos no podrían aumentar su tamaño sin límite, porque se vendrían abajo por su propio peso. Por otro lado, mientras mayor sea el cuerpo, menos resistente es, y sus proporciones han de aumentar de formas desiguales, más a lo ancho que a lo alto. Por esos problemas, los seres más grandes de la Tierra viven en el agua, donde su peso con relación al medio es menor. Demostrando otras proposiciones sobre resistencias transversales de cilindros y prismas, y sobre cilindros huecos, Galileo hace algunos comentarios de la enorme importancia que las matemáticas tienen en estas

demostraciones. Analiza la curva en la que una viga ha de cortarse para que su resistencia transversal sea igual en todo punto, resultando una parábola, que el autor confunde con la catenaria al sugerir trazarla con la ayuda de una cordel o cadena (Galileo, 1981a). La jornada termina de una forma brusca ya que, aparentemente, no se concluyó. Esta será, tal vez, la causa de que la Tercera Jornada, igualmente, inicie de forma abrupta (Solís en Galileo, 1981a; p.262).

"La otra ciencia nueva, acerca de los movimientos locales" es el encabezado que Galileo coloca a su Tercera Jornada, con los subtemas: "Sobre el movimiento uniforme" y "Sobre el naturalmente acelerado" (Galileo, 1981a; p.63). Se inicia, sin mayor explicación, con el texto que el "Académico" puso en manos de Salviati. Luego de una introducción, en la que se enumeran los descubrimientos principales de esta nueva ciencia, aparece la definición del movimiento uniforme y cuatro axiomas derivados de ella. Luego vienen seis proposiciones, geoméricamente demostradas, en las que se deduce de maneras diversas, la relación directa entre velocidad y distancia, y la inversa entre la primera y el tiempo. Luego pasa a definir el movimiento uniformemente acelerado, no sin antes aclarar algunos de los problemas para llegar a tal definición y la necesidad de que ésta se adapte convenientemente a las experiencias. Discute ahora el problema de cambios infinitesimales de velocidad, enseñando cómo, en efecto, existen velocidades tan pequeñas como se quiera. Galileo declara que no importa cuánto tiempo esté en reposo un objeto antes de caer, su descenso desde una altura dada siempre será idéntico, es decir, no hay un "impetus" que se pierda en la espera. Por otro lado, lo que debe hacerse es estudiar cómo caen los cuerpos, no por qué. El autor explica cómo puede conocerse aproximadamente una velocidad por la magnitud del golpe del objeto al caer al suelo. A continuación, detalla un error en el que incurrió durante mucho tiempo, de creer que la velocidad en un movimiento uniformemente acelerado es proporcional al espacio recorrido. Redefine ahora, con la mayor precisión, movimiento uniforme o naturalmente acelerado como el que, "partiendo del reposo, adquiere, en tiempos iguales, iguales incrementos de rapidez" (Galileo, 1981a; p.288). Enuncia, sin

demostración, que la velocidad de un móvil por planos de inclinación diferente, pero de igual altura, es la misma. Usando un péndulo muestra cómo un objeto, que baja de cierta altura, tiene el impulso necesario para subir a la misma, siempre que se ignoren las resistencias externas. Inicia las demostraciones geométricas formales con un primer teorema, donde afirma que el tiempo con que un móvil recorre una cierta distancia desde el reposo, con movimiento acelerado uniformemente, es igual al tiempo con que recorrería el mismo espacio con movimiento uniforme, a la mitad de la velocidad máxima alcanzada con la aceleración. En el segundo teorema afirma cómo las distancias recorridas en aceleración uniforme son proporcionales al cuadrado de los tiempos. Luego describe los experimentos del plano inclinado, en los que se prueban en la realidad los teoremas anteriores. Posteriormente, en un escolio, concluye cómo los resultados en el plano inclinado equivalen, en el límite, a la caída libre. Luego viene una parte que, aparentemente, fue añadida por Viviani luego de la muerte de su maestro Galileo (Solís en Galileo, 1981a; p.302), en la que expresa las opiniones de éste sobre la tendencia de un objeto al reposo o movimiento en un plano perfectamente horizontal, demostrando lo que el físico toscano había dejado como postulado sobre la velocidad igual de caída por planos de la misma altura. Terminada la aportación de Viviani, aparece el tercer teorema en el que prueba que los tiempos de caída por el plano inclinado y por su altura, desde el reposo, son proporcionales a la razón entre sus longitudes. Continúa demostrando geoméricamente teoremas sobre movimiento en planos inclinados: razones entre los tiempos de caída por planos de igual longitud, de diferente altura, inclinación y longitud, por planos que van de los polos de una circunferencia a ésta, por los que conectan cualesquiera dos puntos de la circunferencia, etc. Complementa todo ello con multitud de corolarios que resumen todas las posibles variaciones de los teoremas. Luego estudia el comportamiento del móvil en planos inclinados, pero no partiendo del reposo. Demuestra varios teoremas sobre el particular y se plantea problemas diversos, a resolver con lo hasta ahí probado. Entre ellos, busca la longitud de una vertical, por la que un móvil descienda en igual tiempo que por un plano

inclinado dado. En muchas de sus representaciones geométricas usa las distancias que ha dibujado para significar tiempos. Luego de agotar mediante teoremas, corolarios y problemas, una enorme cantidad de variaciones de la caída vertical y por planos inclinados, detalla cómo, en el plano horizontal, el movimiento será uniforme y eterno. Luego analiza los descensos por un plano inclinado, seguidos de los ascensos por otro y la caída de un plano inclinado al horizontal. Estudia, de una colección de planos inclinados, cuál es el de descenso más rápido, y lo usa para investigar tiempos de caída por planos inscritos en círculos, concluyendo que es más rápida la bajada por un arco de circunferencia que por la cuerda a sus extremos, resultado ya usado en el *Diálogo* (Galileo, 1967). Termina la Jornada con un comentario en favor de las matemáticas, y de la posibilidad de que éstas sean usadas por mentes poderosas en el avance de la nueva ciencia (Galileo, 1981a).

La Jornada Cuarta, "Del [movimiento] violento o propio de los proyectiles" (Galileo, 1981a; p.63), inicia casi de inmediato con el texto del "Académico", en que se afirma que el movimiento de un proyectil es combinación de otros dos. Define como proyección a este desplazamiento, producto del horizontal uniforme de un móvil (al que, de improviso, se le retira el plano sobre el que venía) y del vertical naturalmente acelerado. Su primer teorema resuelve, entonces, el problema de la trayectoria, a la que define como una "línea semiparabólica" (Galileo, 1981a; p.384). Antes de la demostración, discute con detalle el origen cónico de la parábola y sus propiedades analíticas. Usa, por vez primera, una gráfica distancia-tiempo para dibujar la relación entre la caída vertical del móvil y el tiempo transcurrido. Luego enseña cómo puede tomarse un pequeño arco de círculo sobre la Tierra como una recta, de modo que la parábola de la proyección apenas y se altera. Declarando que de cuestiones como el rozamiento no puede tratarse con rigor prefiere recurrir a la idealización. Además, concluye que aun con la resistencia del aire, la trayectoria es casi una parábola, lo que quiere apoyar con un experimento que demuestre la total isocronía de dos péndulos de la misma longitud, oscilando con amplitudes muy diferentes. Tal isocronía sería un argumento en apoyo de la poca

influencia que la resistencia del aire tendría sobre la proyección. Luego se dedica al estudio general del movimiento compuesto, primero por dos uniformes, y después por uno uniforme y uno naturalmente acelerado. Establece la necesidad de convenir las unidades de tiempo, velocidad e impulso [*impetus*] (Galileo, 1981a; p.410). Investiga la fuerza del impacto de un proyectil, en trayectoria parabólica, a diversos ángulos y en distintos puntos de su camino. Resuelve el problema de la altura vertical de caída de un móvil que se quiere que se desvíe por una parábola dada, y todas las variaciones que se le ocurren de esto. Encuentra la proyección de mayor alcance: el ángulo semirecto (45°). Demuestra algunos teoremas sobre tiros parabólicos de igual amplitud y otros sobre parábolas en relación con el impulso [*impetus*]. Expone los resultados cuantitativos de algunos experimentos sobre estos teoremas. Posteriormente, compara la desviación de la horizontal en la proyección con la curva que forma una cadena sujeta de sus extremos (la catenaria), diciendo que son muy parecidas. Analiza porqué las cuerdas o cadenas horizontales no pueden ser estiradas totalmente, pensando primero que no tienen peso y luego concentrando éste a la mitad. Luego comenta algunos puntos sobre la dificultad de la teoría de las percusiones y del estudio de centros de gravedad, hecho en la juventud del "Académico", temas por donde, en principio, debía continuar la obra que aquí quedó, inconclusa, por la ceguera y muerte de su autor.

4.2 La resistencia de los sólidos: la nueva ciencia de los

Discorsi

Las dos primeras jornadas de los *Discorsi*, como hemos visto, tienen como tema principal el estudio de la resistencia de los sólidos. Con esto, Galileo inaugura una rama de la mecánica que, a su vez, determinará el interés por otras como la estructura de la materia y la semejanza física. Cuestiones como el átomo, el vacío y la continuidad son advertidas por el científico como medulares en esta investigación, y en ellas aparecen bien delineadas ya las diferencias y semejanzas entre el proceder del matemático y el del físico (Geymonat, 1986). Así, apenas iniciada la Primera Jornada, el autor, en boca de Salviati, advierte:

"[...] no sé si podré, sin caer en el riesgo de ser arrogante, decir que recurrir a las imperfecciones de la materia, capaces de contaminar las purísimas matemáticas, tampoco es suficiente para explicar la desobediencia de las máquinas, en la realidad, a las leyes abstractas e ideales de la mecánica. [...] Y puesto que doy por supuesto que la materia es inalterable; es decir, siempre la misma, es evidente que de ella pueden deducirse demostraciones no menos que de las puras y abstractas matemáticas" (Galileo, 1981a; p.69).

Desde el comienzo pone las reglas del juego. Si aceptamos idealizar a la materia, es decir, ignorar sus imperfecciones, podremos proceder con el rigor de la matemática para obtener conclusiones sobre ella. Pero se niega también a dejar que el lenguaje tome una importancia superior a la de la física misma. Este proceder es, sin duda, determinante del extraordinario éxito que obtiene en su tratamiento del problema del continuo (Geymonat, 1986), al cual termina enfrentando con una combinación de física y matemática, que suple lo que falta a la segunda con conceptos desarrollados en la primera:

"SALVIATI: [...] Y esto que hemos dicho de las simples líneas debe extenderse también a las superficies y a los cuerpos sólidos, considerándolos compuestos de infinitos e inextensos [*non quanti*] átomos. [...] Pero si lo que intentamos es la más profunda y última división de estos cuerpos en sus primeros componentes inextensos [*non quanti*] e infinitos, podremos concebir tales componentes desplegados en un espacio inmenso sin la interposición de espacios vacíos extensos [*quanti*], sino solamente con una infinidad de vacíos inextensos [*non quanti*]. Así, no repugna que una pequeña bola de oro, por ejemplo, se extienda en un espacio muy grande sin tener que admitir vacíos extensos [*quanti*], siempre y cuando admitamos que el oro está compuesto de indivisibles en número infinito" (Galileo, 1981a; p.99).

Para, más adelante, dejar este juego lógico por lo que es más razonable en física:

"SALVIATI: Pero utilizando el método que yo propongo y que consiste en distinguir y descomponer de un sólo golpe toda la infinidad [...] pienso que deberían tranquilizarse y admitir esta composición de las magnitudes continuas en átomos **absolutamente indivisibles**. [...] Sin caer, [...] en el inconveniente de tener que admitir espacios vacíos [...]" (Galileo, 1981a; p.130; las negritas no se encuentran en el original).

Es decir, Galileo aplicará la matemática - la geometría del polígono que tiende al círculo al hacer infinitos sus lados - a la materia, hasta el límite físico (no matemático) de un átomo indivisible. Este retorno semimatemático a la doctrina de Demócrito

tiene elementos muy novedosos. Le permitirá, como se observa en las Jornadas Tercera y Cuarta de los *Discorsi*, tratar a los infinitos e infinitésimos para describir y deducir las propiedades del movimiento, aun careciendo del cálculo infinitesimal, desarrollado después.

Muy interesante es, también, su intento de explicar las propiedades macroscópicas de la materia en términos de las microscópicas. Al igual que con la física celeste y terrestre, se niega a mantenerse en niveles descriptivos separados y busca la unificación. Así, luego de declarar que en los cuerpos no fibrosos la cohesión entre sus partes debe proceder de un aglutinante y no de fibras, especula como sigue:

"SALVIATI: [...] ¿Quién sabe si habrá otros vacíos pequeñísimos entre las partículas ínfimas que garantice la cohesión de todas las partes de un sólido [...]?" (Galileo, 1981a; p.90).

Y, más adelante:

"SALVIATI: [...] podía suceder debido a que las partículas más sutiles del fuego, al penetrar por los poros estrechos del metal (a través de los cuales y dada su estrechez no podían pasar ni el aire ni otros muchos fluidos) llenasen estos vacíos mínimos, liberando así a las partículas más pequeñas de la presión ejercida por estos mismos vacíos, al atraerse mutuamente, impidiendo su separación. De este modo, al poder moverse libremente, su masa se haría fluida, permaneciendo en este estado mientras quedasen entre ellos los corpúsculos de fuego [*ignicoli*]. Al desaparecer éstos, los vacíos primitivos volverían a su sitio, dándose de nuevo la atracción entre ellos y, consecuentemente, la unión de sus partes. [...] si bien estos vacíos serían muy pequeños y, por tanto, cada uno de ellos podría ser vencido fácilmente, no obstante, la innumerable multitud multiplica innumerablemente (por decirlo de alguna manera) las resistencias" (Galileo, 1981a; p.91).

Así, da al vacío el papel de aglutinante, siguiendo de una forma más elaborada la "aversión" de la Naturaleza al vacío que sostenía Aristóteles. Y, de esta manera, es capaz de dar una explicación de la fusión por fuego de los metales o bien de la gran cohesión de los sólidos. Ha conectado, pues, la estructura de la materia con sus propiedades más visibles. Pese a que lo que hoy conocemos de estos temas es mucho más complejo que lo que Galileo nos esbozó, resulta interesante notar que tenía ciertas intuiciones generales - como el hecho de sumar innumerables fuerzas (en su caso, dadas por

repulsiones al vacío) para dar una cohesión macroscópica respetable - que mantienen todavía su validez.

En su característico proceder exhaustivo, en el que no deja posibilidad alguna por analizar, Galileo extiende su estudio al de la naturaleza de la luz, derivándolo directamente de la sutileza y penetrabilidad del fuego que citamos arriba:

"SALVIATI: El oro y la plata, pulverizados más sutilmente bajo la acción de ácidos [*acque forti*] que lo que se conseguiría con la mejor lima, con todo, siguen siendo polvo y no se convierten en fluidos ni se licúan a no ser que los disuelvan en sus últimos componentes los indivisibles del fuego o los rayos del Sol, siendo aquéllos, creo yo, infinitos e indivisibles.

[...]

SAGREDO: [...] Pero, volviendo al maravilloso efecto de los rayos solares al licuar los metales, ¿hemos de creer que una acción tan violenta tenga lugar sin movimiento o, por el contrario, que ha de comportar un movimiento muy rápido?

SALVIATI: [...] no podría concebir que la acción de la luz, aunque purísima, pudiese tener lugar sin movimiento, y un movimiento de enorme rapidez" (Galileo, 1981a; p.120).

De modo que la luz, además de ser tan sutil como para penetrar y disgregar los vacíos más pequeños, deberá moverse a gran velocidad, y Galileo procede a investigarla, con su famoso experimento de las linternas.

Vemos que el físico italiano intenta, de su explicación de los indivisibles, crear un marco que englobe todos los fenómenos relacionados con la materia y la energía que analiza. Sus tres elementos serán, pues, la partícula indivisible (átomo), el espacio vacío entre átomos que los mantiene unidos y la penetrabilidad de formas diversas de la energía (luz y fuego) para disgregar tales vacíos. En suma, un magnífico intento, aunque aún rudimentario, de construir una teoría general de la materia y la energía.

El análisis que Galileo hace, en las dos primeras jornadas de los *Discorsi*, de la resistencia de prismas y cilindros, lo llevará a conclusiones muy acertadas, en líneas generales, sobre el tamaño de estructuras naturales y artificiales. Con esto definirá otra disparidad entre física y matemáticas a tomar en cuenta en la nueva ciencia. Mientras, matemáticamente, dos objetos son semejantes con tal de que sus dimensiones respectivas guarden una proporcionalidad cualquiera, físicamente debe existir un límite para ella. Es decir,

mientras en matemáticas un cuerpo puede ser semejante a otro de talla arbitrariamente grande, en física existe un límite para los tamaños, dado por el peso del cuerpo, la forma de su estructura y la resistencia de su material (Lobo, 1989). Por ejemplo, leamos el siguiente pasaje:

"SALVIATI: [...] quien quisiera mantener, en un inmenso gigante, las proporciones que se dan entre los miembros de un hombre normal, tendría o bien que encontrar un material mucho más duro y resistente para formar así los huesos, o bien que admitir una disminución de su potencia en relación con la de los hombres de estatura normal; de otro modo, si su altura creciese de manera desmesurada, acabaría derrumbándose por obra de su propio peso. Esto se ve, de modo complementario, cuando observamos cómo, al disminuir los cuerpos, no disminuye en la misma proporción su fuerza, sino que, más bien, se hacen más resistentes al ser más pequeños. Por eso pienso que un perro pequeño podría llevar sobre sí dos o tres perros iguales a él, mientras que no creo que un caballo pudiese sostener ni siquiera un caballo de sus mismas medidas" (Galileo, 1981a; p.237).

Con reflexiones como ésta, el autor de los *Discorsi* nos introduce un nuevo concepto, el de semejanza física, que será expresado matemáticamente por un factor de proporcionalidad, adimensional (hoy llamado "número pi"), pero que relaciona ahora cantidades no necesariamente geométricas y permite encontrar objetos cuyo comportamiento físico sea el mismo (Lobo, 1989).

En la cuestión del tamaño de estructuras esto se traduce, como ya lo vimos en la cita anterior, en la idea del "tamaño límite". Si se quiere guardar la semejanza geométrica para cuerpos cada vez mayores, habrá una medida después de la cual el objeto no podrá sostenerse y caerá por efecto de su propio peso. Este tamaño, desde luego, dependerá mucho de la forma de la estructura. Por eso, Galileo usa en su ejemplo la comparación entre el perro y el caballo, anatómicamente parecidos. Nos dice, entonces, que para mantener la semejanza geométrica, sin disminuir la resistencia física, al incrementar el tamaño, o bien se aumenta la resistencia mecánica del material, o bien se disminuye su peso específico, lo que hoy entendemos por la constancia del "número de Galileo" (un "número pi") dado por el cociente $\delta l/\lambda$, donde δ es el peso específico, l una dimensión característica (que será la que aumente con el tamaño) y λ la resistencia mecánica del material (Lobo, 1989). La disminución de δ (que debe ser tomada, claro, en relación con el medio) explicará,

por ejemplo, la posibilidad de seres de grandes dimensiones en el agua.

Pero Galileo no se detiene aquí, en la Proposición VIII de la Segunda Jornada plantea el problema:

"Dado un cilindro o prisma que tenga la mayor longitud compatible con no acabar rompiéndose debido a su propio peso, y dada una longitud mayor, encontrar el grosor de otro cilindro o prisma que bajo la longitud dada sea el único y el mayor capaz de resistir su propio peso" (Galileo, 1981a; p.233).

Con la solución de esta proposición, el científico llega al concepto de "distorsión". Una tercera forma de mantener la resistencia a la carga será deformar al objeto, hacer que sus dimensiones transversales aumenten mucho más que las longitudinales (Lobo, 1989). Por eso, Galileo cita a Ariosto:

"[...] lo cual, tal vez, intuyó nuestro sagaz Poeta cuando, describiendo un grandísimo gigante, decía:

Imposible reconocer su altura,
Tan desmesuradamente grande es su grosor"
(Galileo, 1981a; p.236).

De manera que, como nos tiene acostumbrados, el físico italiano agota todas las consecuencias de sus razonamientos.

El interés que Galileo demuestra por todos estos temas tiene su explicación, además de en la inagotable curiosidad e inquietud de su pensamiento, en la importancia que confiere a la técnica y a las aplicaciones materiales de la ciencia, "las execradas artes mecánicas del elitismo clásico griego" como las llama Solís (en Galileo, 1981a; p.17). El mismo autor inicia sus *Discorsi* hablando del gran provecho que tiene, para los "intelectos que especulan" (Galileo, 1981a; p.67), el observar y reflexionar sobre los quehaceres artesanales del arsenal de Venecia. Ahí tuvo su génesis el problema de los efectos del tamaño - que tan agudamente extiende a los fenómenos naturales -, su deseo de explicar la resistencia de los sólidos a la ruptura e, indirectamente, su adhesión al atomismo y sus explicaciones de la cohesión de la materia. Aunque sus resultados en estos asuntos trascendieron, con mucho, el ámbito de la técnica, inaugurando la ciencia de la resistencia de los materiales (Lobo, 1989), conviene tener presente que aquella fue su principal motivación y a la que, en última instancia, deseaba aplicar sus conclusiones. No hay que

olvidar, pues, que las dos primeras jornadas de los *Discorsi* nos revelan un pragmatismo que, en las últimas y más influyentes, parece desaparecer casi por completo. Pero antes de introducirnos en las consideraciones sobre la segunda nueva ciencia, la referente al movimiento local, describamos con algún detalle la concepción que, antes de Galileo, se tenía de los fenómenos de los que trata.

4.3 La antigua ciencia del movimiento

La cosmología aristotélica, como constructo totalizador del conocimiento y la descripción del mundo, tenía como uno de sus más importantes elementos la teoría del movimiento. El Cosmos de Aristóteles, las esferas concéntricas sobre las que Ptolomeo erigió su astronomía, se basaba en un concepto de orden muy estricto. De acuerdo con su naturaleza, cada cosa tenía un lugar en el Universo, al cual pertenecía y del cual se resistía a salir. De esta forma, el lugar natural de los cuerpos pesados era el centro del mundo, que, por la construcción peripatética, correspondía al centro del orbe terrestre. Por otra parte, las materias "leves", como el fuego y el aire, pertenecían a las regiones celestes, a las que tendían en todo momento (Alvarez & Marquina, 1993b). De esta suerte, el orden perfecto tendría como consecuencia el reposo absoluto. Si todo objeto del Cosmos ocupara su lugar natural, ahí permanecería eternamente, porque de él no tendría tendencia alguna a salir. Pero es posible realizar "violencia" sobre los cuerpos, apartarlos de su sitio, sacarlos de donde pertenecen. Esto constituye el movimiento violento y su reacción, aquel proceso que busca restaurar el orden, será el movimiento natural. Así, para un cuerpo pesado, movimiento violento será levantarlo de la Tierra, alejarlo del centro del mundo que es su lugar propio entre todos los lugares del Universo; su movimiento natural será, por tanto, la caída (Koyré, 1988). Entonces, de acuerdo con los cuatro elementos que, según las doctrinas griegas, forman a los objetos, los movimientos naturales deben ser dos: hacia arriba para los elementos leves (fuego y aire) y hacia abajo para los graves (tierra y agua) (Geymonat, 1986).

Con esta concepción, el movimiento no puede sino ser un estado transitorio y depender de un motor, interno - la propia naturaleza del cuerpo - en el movimiento natural o externo - el agente que

separa al objeto de su sitio, en el violento. Así, sin motor no hay movimiento; el aristotelismo no concebía la acción a distancia (Koyré, 1985; 1988).

Esta diferencia entre movimientos naturales y violentos impidió, en Aristóteles, un estudio unificado de ambos. Los dos eran procesos cuyas causas eran ajenas. Los primeros eran tratados por la física mientras que los segundos eran el tema de la mecánica (Fischer, 1986). Pero las implicaciones de esta visión de las cosas eran más profundas de lo que, a primera vista, parece. En primer lugar, dado que el reposo es entendido como una privación, no requiere una causa, es un estado en el que el cuerpo puede permanecer indefinidamente. Por otro lado, el movimiento es un proceso, es el producto del motor (interno o externo), depende de su causa. El reposo es un estado, la meta final del movimiento, donde permanecerá sin afectar su esencia. El movimiento, por su parte, es un proceso que implica corrupción o actualización del móvil; conlleva, entonces, un cambio de naturaleza. Así, reposo y movimiento se encuentran en niveles ontológicos diferentes. Esto tiene como consecuencia que, como todo movimiento afecta al cuerpo que lo posee, lo hará con los demás movimientos que puedan estar en él en ese instante. La limpia combinación de movimientos no es, entonces, posible. Dos de ellos se estorbarán necesariamente (Koyré, 1985).

En segundo término, el movimiento natural buscará llevar al móvil a su sitio con la mayor rapidez y por el camino más corto que el medio le permite. Es claro, entonces, que donde la resistencia de éste fuese nula, es decir, en el vacío, el objeto llegaría a su lugar natural con la mayor rapidez pensable, con una velocidad infinita. A Aristóteles, como a cualquiera de nosotros, le parece absurdo este resultado y lo usa como prueba lógica de la imposibilidad natural de que exista el vacío. Nótese, además, que el movimiento violento, al requerir de un motor externo, también resulta irrealizable en el vacío (Koyré, 1988). Esto define otro aspecto básico de la cosmología aristotélica: la negación del vacío. En el Cosmos, este concepto carece de realidad, la Naturaleza lo repudia (horror vacui) (Alvarez & Marquina, 1993b; Koyré, 1985). Por añadidura, la experiencia cotidiana muestra cómo, en efecto, los procesos naturales de nuestro

entorno ocurren siempre evitando la formación de todo vacío. Como afirma Kuhn (1978), era imposible cuestionar las bases experimentales de este principio.

Y este "horror vacui" sirvió al genio del pensamiento de Aristóteles para dar salida al elemento más conflictivo de su teoría del movimiento: el problema del lanzamiento. Si, como hemos visto, todo movimiento violento requiere de un motor externo que lo perpetúe, y cesando su acción cesará su efecto, ¿cuál es el motor que impulsa a un proyectil? Aristóteles responde: el medio mismo. El cuerpo lanzado, al abandonar su motor inicial (el que lo arroja) dejará un espacio vacío tras de sí que el medio (aire, agua) llenará, inmediata y violentamente, como resultado del "horror vacui", impulsando al móvil y repitiendo el proceso indefinidamente (Koyré, 1988). Pero, desafortunadamente para el aristotelismo, aquí se incurre en un error insalvable, que hará de la teoría del lanzamiento el punto más débil de la dinámica peripatética y el objeto de la crítica medieval (Alvarez & Marquina, 1993b). Si el motor del proyectil es el medio mismo, entonces el movimiento deberá perpetuarse en tanto exista medio, lo que no se observa jamás. A esto se suman otras objeciones, como lo poco probable de que un cuerpo pesado sea movido por un medio tenue como el aire o, lo más importante, el dar al medio el doble papel de motor y resistencia (Koyré, 1985). Hoy podemos, incluso, darnos cuenta de que la imposibilidad aristotélica de combinar desplazamientos evitaría que, al tiempo que el aire ejerciera su violencia, la tendencia hacia el centro del mundo hiciera caer finalmente al proyectil.

La explicación de Aristóteles del lanzamiento fue la parte más criticada de su dinámica por los estudiosos pregalileanos. Estimuló la formulación de la teoría del impetus que, inspirada por Juan Filopón desde el siglo VI, enunciada por Jean Buridan y defendida por los nominalistas parisinos en el XIV, se difundió en Italia gracias a Niccolò Tartaglia y fue adoptada por Giovanni Battista Benedetti (siglo XVI) quien, como veremos, resultó una de las más profundas influencias del joven Galileo Galilei (Alvarez & Marquina, 1993b; Geymonat, 1986; Kuhn, 1978).

El impetus, como declara Koyré (1988), es un concepto ambiguo para la física medieval. Sin embargo, basta para solucionar el problema del lanzamiento e, incluso, más. Jean Buridan, de los nominalistas de París, lo define como algo que el motor imprime al proyectil, una "fuerza motriz" que prolonga el movimiento pero se agota gradualmente por la resistencia del medio (aire) (Kuhn, 1978). Es, además, algo así como un "hábito" que se transfiere del motor al móvil, tanto más cuanto más ejerce el primero su acción sobre el segundo (Koyré, 1988).

En su escrito juvenil *De Motu*, Galileo tomará al impetus como una cantidad semejante en comportamiento al calor. Los cuerpos tendrán, de acuerdo con su mayor peso, una mayor capacidad de imprimirse de esta "fuerza motriz" (Alvarez & Marquina, 1993b) que, al igual que el calor, puede transferirse de un objeto a otro.

El impetus, además, daba una explicación a los fenómenos acelerados de caída. El movimiento natural de un grave produce un aumento gradual de su peso y, por consiguiente, una serie de impetus que se van sumando y aumentan la velocidad a cada instante (Koyré, 1988).

Esta teoría resultó, entonces, el principio de una crítica a la mecánica aristotélica que Galileo culminó con los *Discorsi* y que terminó por hacer a un lado a la propia física del impetus.

4.4 La vieja ciencia reconstruida

Las conclusiones dinámicas de los *Discorsi* fueron el final de un largo camino, que Galileo inició en sus escritos juveniles, cuando las influencias de Benedetti y Arquímedes le hicieron combinar, siguiendo la traza del primero, la física del impetus con las reflexiones del segundo sobre estática de fluidos.

Este proceso de maduración nos revela algunos elementos de los métodos galileanos que conviene destacar. Tenemos, en primera instancia, el claro influjo que las obras de Arquímedes y Benedetti tuvieron sobre las primeras investigaciones mecánicas de Galileo y, muy importante, el atesoramiento que éste hace, durante toda su obra, de los elementos rescatables de sus predecesores para la nueva dinámica.

Así, por ejemplo, Benedetti hace la siguiente demostración sobre la caída:

"En cuanto a los cuerpos compuestos de la misma materia, tendrán en el vacío la misma velocidad natural. En efecto, sean dos cuerpos homogéneos o y g, y sea g la mitad de o. Sean, asimismo, dos cuerpos homogéneos a los primeros, a y e, ambos iguales a g; supongamos que los dos cuerpos están situados en los extremos de una línea cuyo medio es i: está claro que el punto i tendrá tanto peso como el centro de o; también i, por la virtud de los cuerpos a y e se moverá en el vacío con la misma velocidad que el centro de o. Pero si dichos cuerpos a y e estuvieran separados de dicha línea, no modificarían por eso su velocidad, y cada uno de ellos sería tan rápido como g. Luego g sería tan rápido como o" (citado por Koyré, 1988; p.50).

Y Galileo, en la Primera Jornada de los *Discorsi*, escribe:

"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 [...] Pero decidme antes, señor Simplicio, si admitís que a todo cuerpo pesado en caída libre le corresponda 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 [...].

SALVIATI: Entonces, si nosotros tuviéramos dos móviles, cuyas velocidades naturales fuesen distintas, es evidente que si uniéramos ambos, el más rápido perdería velocidad por obra del más lento, mientras que éste aceleraría debido al más rápido. [...] 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 por resultado una más grande que la primera que se movía con ocho grados de velocidad; de lo que se sigue que tal compuesto se moverá a más velocidad que la primera de las dos piedras sola, lo que contradice nuestra 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". (Galileo, 1981a; p.148).

Aunque no es exactamente la misma demostración, ya que Galileo busca la reducción al absurdo para, además, mostrar la contradicción de la explicación aristotélica, es evidente a quién corresponde la primacía de la idea y a quién el mérito de haberla sabido apreciar. Incluso aquí, en los *Discorsi*, Galileo manifiesta la influencia arquimediana de tomar cuerpos con igual peso específico ("la misma materia") para hacer de lado los efectos del medio. La brillante extensión de estos conceptos será la que lo lleve a enunciar la ley de caída de graves en el vacío. Nuevamente siguiendo a Benedetti, el

físico muestra cómo el movimiento de caída en el vacío no se realizaría con velocidad infinita. La velocidad es proporcional al peso relativo del cuerpo, que es la resta de su peso real menos la resistencia del medio; si ésta última se anula, como en el caso del vacío, la velocidad es proporcional al peso absoluto del cuerpo. El error de Aristóteles, hace ver Benedetti-Galileo, se encontró en tomar la velocidad de caída como proporcional a la razón del peso absoluto entre la resistencia. Si la última se anula, la primera se hace infinita (Koyré, 1985). Pero ni Benedetti ni Galileo se mantienen ahí. El razonamiento anterior conlleva, necesariamente, un acuerdo con el elemento aristotélico de que la velocidad de caída es una constante proporcional al peso (aunque aquí ya será al peso relativo que, como vimos, varía con el medio). Una causa constante produce un efecto constante (Koyré, 1988). Sin embargo, la caída se realiza, en realidad, con un cambio de velocidad. Benedetti usa la teoría del impetus que, como vimos, justifica esa variación (Fischer, 1986). Galileo enunciará, en última instancia, el principio no probado de que la caída es un movimiento de aceleración uniforme (Hall, 1981). Extrapolará, de forma admirable, la observación de que, en medios cada vez más sutiles, la diferencia instantánea de velocidades entre dos cuerpos, primero de iguales y luego de cualesquiera pesos específicos, se hace menor, hasta que, en un paso al límite que muestra una vez más su seguridad conceptual en estos terrenos, se anule para la caída en el vacío:

"SALVIATI: [...] Hemos visto ya que las diferencias de velocidad de los móviles con pesos distintos son cada vez mayores a medida que los medios atravesados ofrecen más resistencia [...] Habiendo visto, repito, todo esto, yo llegaría a la conclusión de que si se eliminara absolutamente la resistencia del medio (en el vacío), todos los cuerpos descenderían a la misma velocidad" (Galileo, 1981a; p.161).

Benedetti se quedó en el descenso de cuerpos de igual materia. Galileo, rescatando de su antecesor los razonamientos más valiosos, consiguió formular un principio de sorprendente generalidad. Sin embargo, tampoco se conformará con esto. De hecho, éste será su punto de partida. Porque quiere describir el movimiento de caída de forma cuantitativa. Quiere conocer las posiciones y velocidades del móvil a un tiempo dado. Aquí es donde su separación de Aristóteles, de Arquímedes y de Benedetti se hace total. Basta leer la Jornada

Tercera de los *Discorsi* para convencerse de ello. Para empezar, propone, ya desde la Primera Jornada, formas de estudiar el rápido movimiento de caída sin necesidad de una medición precisa de muy cortos intervalos de tiempo, la cual era imposible para la época:

"SALVIATI:[...] Además, para darme la posibilidad de captar movimientos extraordinariamente lentos, en los que la resistencia del medio altera mucho menos el efecto que el simple peso, se me ha ocurrido hacer descender a los móviles sobre un plano inclinado, no muy elevado con respecto a la horizontal, y sobre el cual, tan bien como en la caída vertical, se podrá ver cómo se comportan los cuerpos con pesos diferentes. Además, y matizando el experimento, he querido eliminar los obstáculos que pudiesen derivarse del contacto de estos móviles con el plano inclinado. Finalmente he cogido dos bolas, una de plomo y la otra de corcho, siendo aquella cien veces más pesada que ésta. Até, después, cada una a dos cordones iguales, muy delgados y de una longitud de cuatro o cinco brazas, colgándolas a cierta altura. Habiendo separado, luego, las dos bolas de la perpendicular, las he dejado que se pusieran en marcha al mismo tiempo; [...]" (Galileo, 1981a; p.176).

Independientemente de si, como luego discutiremos, este tipo de experiencias pueden llevar directamente a las conclusiones que Galileo afirma, lo que es un hecho es que, cuando menos conceptualmente, son una excelente base para su discusión posterior. El movimiento de caída es muy difícil de observar en detalle, no así el que se realiza sobre un plano poco inclinado o el de un péndulo, donde se pueden contar cientos de oscilaciones. Nuevamente, como lo hace tantas veces en su obra, el físico italiano simplifica el problema, pero, a diferencia de lo que pasó con sus esquema del sistema copernicano o su generalización del camarote del barco a la Tierra, aquí lo hace a sabiendas de poder recuperar, con un paso al límite (el plano "vertical", la infinidad de oscilaciones), el problema real y hallar su solución. En mecánica, Galileo manejará la aproximación de forma mucho más rigurosa y racional que en astronomía.

Una vez propuestas estas formas de aproximación al problema, el científico las estudiará concienzudamente. Por ello, la Tercera Jornada de los *Discorsi* rebosa de demostraciones sobre el movimiento en planos inclinados, con todas las variaciones posibles, y con diversas investigaciones sobre péndulos. Además, la conexión, lo que será el paso al límite, es establecida por Galileo, con gran habilidad, de forma inversa a como cabría esperar:

"Escolio.

Tengamos presente que lo demostrado hasta el momento con respecto a las caídas verticales, se cumple del mismo modo también en los movimientos que se realizan sobre planos inclinados, sea cual fuere tal inclinación. Se ha supuesto, efectivamente, que en estos últimos los grados de velocidad [accelerationis gradus] aumentan según la misma proporción, es decir, según el aumento de tiempo, o lo que es lo mismo, según la serie de los números naturales" (Galileo, 1981a; p.302; las negritas no se encuentran en el original).

Entonces, no maneja al movimiento de caída como uno sobre un plano inclinado a 90° , sino al revés: cualquier desplazamiento sobre una pendiente arbitraria lo ve como uno de caída. De esta forma, puede relacionar sus primeros resultados sobre movimientos uniformemente acelerados, como la regla de la velocidad media - la famosa regla mertoniana de la física medieval, que Galileo cree haber descubierto (Hall, 1981) -, con el accesible comportamiento del móvil en el plano inclinado. Así, no es la caída vertical el movimiento por el plano de inclinación límite, sino tan sólo uno más de un conjunto de fenómenos que se rigen por las mismas leyes.

En todo esto, sin embargo, tenemos un elemento que Galileo no demuestra (de hecho, no puede demostrar), y es que el movimiento real de caída sea uno de aceleración uniforme (Hall, 1981). Puede - como veremos, lo hace - probar experimentalmente que el descenso por planos inclinados de poca pendiente se realiza, aproximadamente, con ella. Pero, en rigor, eso no implica que el paso al límite, sea directo o inverso, se comporte así. Galileo, en una actitud novedosa y fundamental para la nueva ciencia, lo toma como un postulado, incluso como un axioma. Así, cuando habla del aumento de velocidad en la caída, dice:

"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" (Galileo, 1981a; p.276).

Su prueba está en los planos inclinados, no en la caída misma, de modo que, en el fondo, postula la extrapolación de los unos a la otra o, lo que es lo mismo, la uniformidad de la aceleración en el descenso vertical. Extraordinario juego de la nueva ciencia que le permite avanzar aun cuando, en principio, algunos de sus axiomas ni sean evidentes, ni susceptibles de prueba.

En Galileo y la caída el postulado fue maravillosamente prolífico. Es cierto que la extrapolación de la bola que rueda en el plano a la que cae es un exceso, pero por un aspecto secundario que Galileo no podía prever porque no tenía elementos siquiera para ello: el momento de inercia rotacional (Naylor, 1976). Sin embargo, el punto fundamental está a salvo. La caída libre es un movimiento uniformemente acelerado y, a la más pura usanza aristotélica, la causa constante (peso) producirá un efecto constante (aceleración) (Koyré, 1985).

El análisis del proceso seguido por Galileo en su estudio de la caída nos revela importantes facetas de su metodología. Otra de las más interesantes es la corrección del error que compartió con Leonardo da Vinci y René Descartes, de pensar que el aumento de velocidad en el descenso, y en cualquier movimiento uniformemente acelerado, era proporcional a la distancia desde el origen del desplazamiento. El desacierto, común como vemos, se deriva de la facilidad que existía, en la matemática de la época, para representar el espacio, y la dificultad de hacerlo con el tiempo (Alvarez & Marquina, 1993b). Las matemáticas que Galileo usó en la mayoría de sus demostraciones eran, primordialmente, geometría y teoría de proporciones. La geometría euclidiana trata de longitudes, la teoría de proporciones cuantifica relaciones entre ellas. Antes de Descartes y Galileo la representación del tiempo era un problema, en el mejor de los casos, ambiguo, cuando no de imposible tratamiento. Pero en algún momento entre su mecánica de Padua y los *Discorsi*, Galileo respondió a la necesidad que la nueva dinámica imponía y buscó un tratamiento geométrico para el tiempo. Seguramente, este proceso le permitió hallar la relación correcta: la velocidad de caída es proporcional al tiempo de descenso. Este manejo lo muestra en gran cantidad de demostraciones de los *Discorsi*, en las que, luego de tratar distancias, usa los mismos dibujos para analizar los tiempos. Finalmente, llega a una representación idéntica a las modernas cuando, en el tiro horizontal, describe el tiempo en un eje de coordenadas y la distancia en el perpendicular, mostrando la proporcionalidad entre ésta última y el cuadrado del primero (Galileo, 1981a; p.389). Así, esboza para la nueva física un sistema

de representación gráfica que, debidamente perfeccionado, resultará una herramienta indispensable en el estudio y comprensión de multitud de fenómenos.

El desarrollo del pensamiento galileano, desde la física de Benedetti hasta su magistral manejo y solución del problema de la caída, representa también la formación de una estructura que englobará toda la dinámica de los *Discorsi*. Koyré (1988) lo expresará con una simple frase: "la física de Galileo podría definirse como la física de la caída" (p.227). En efecto, el físico toscano mantendrá, de forma más sofisticada, el concepto de "movimiento natural", pero despojándolo de su carácter esencialista (Osler, 1973) y, ante todo, restringiéndolo a uno sólo: el movimiento de caída (Alvarez & Marquina, 1993b). Así, todo objeto en el Universo es un grave que tiende a caer y, si no lo hace, será, siguiendo otra vez a Arquímedes, por la acción de un medio de peso específico mayor. Las consecuencias de esto para la imagen filosófica del movimiento son importantísimas. Mientras en Aristóteles los tipos de movimiento natural revelaban la naturaleza de los cuerpos, en Galileo la caída sólo expresa una característica común a todos ellos: el peso (Koyré, 1988). En la física de Galileo es el peso el elemento más determinante para el comportamiento de un cuerpo. Y existen circunstancias en las que el peso, única propiedad que define diferencias entre los móviles, no juega papel alguno, a saber, cuando el movimiento se realiza equidistante del centro de la Tierra (o del orbe al que tiende el grave). Este es el desplazamiento que Galileo define como horizontal. Así, el plano horizontal será una superficie esférica concéntrica con la Tierra, aproximable por un plano euclidiano cuando pensamos a escala reducida (Koyré, 1988). El movimiento en este "plano", de eliminar todos los accidentes de la materia, deberá ser uniforme y eterno, porque el cuerpo no cae al estar restringido, ni se separa de la superficie ya que el peso lo mantiene en ella. Nos hallamos a las puertas del principio de inercia. El porqué Galileo no acertó a cruzarlas es otro más de los aspectos reveladores de su epistemología.

En primer punto, este desplazamiento perpetuo en el "plano" horizontal de la física galileana establece la novedosa idea de un

movimiento sin motor, sin causa. De esta manera, el movimiento adquiere el mismo *status* ontológico que el reposo; ambos simplemente son, existen sin necesidad de explicación y, por tanto, constituyen estados (Alvarez & Marquina, 1993b), opuestos, sí, pero equivalentes; pasar de uno a otro no afecta al cuerpo, permanecer en alguno de ellos, tampoco (Koyré, 1988). Es por esto que el movimiento es universal, está regido por iguales leyes para todos los cuerpos del Universo: la caída ocurre por el peso, que todos los objetos poseen y que actúa siempre de la misma manera; el movimiento circular en torno al centro no precisa causa, se comporta equivalentemente para todos los móviles (Hall, 1981). Es por esto también que, al no afectar al móvil, el movimiento puede combinarse con otros y dar una resultante. Todo movimiento, a su vez, podrá verse como suma geométrica de otros. El más claro logro de esta consecuencia es la descripción del tiro parabólico:

"[...] Nace de aquí [del tiro horizontal] un movimiento compuesto de un movimiento horizontal uniforme más un movimiento descendente naturalmente acelerado [...]" (Galileo, 1981a; p.384; las negritas no se encuentran en el original).

En segundo lugar, la conservación del movimiento circular, a la que usualmente se denota como "inercia circular" (Fischer, 1986), se halla tan lejos y tan cerca de la inercia de la Primera Ley de Newton que no puede menos que causar interés y polémica. Es un hecho que el propio Newton consideró que Galileo había llegado al principio de inercia, ya que le da la paternidad de sus dos primeras leyes (Cohen, 1985). También es cierto que, luego de Galileo, la inercia rectilínea fue un concepto de fácil y casi acrítica aceptación (Koyré, 1988). En este sentido, la mecánica galileana, de alguna forma, se aproximó con mucho al principio de inercia clásico. Por otro lado, conceptualmente se encontró lejos. La conservación del movimiento, en su formulación más acabada de los *Discorsi* (Solís en Galileo,, 1981a) dice así:

"Además, se puede suponer con razón que, sea el que fuere el grado de velocidad que se dé en un móvil, queda por naturaleza indeleblemente impreso en él con tal de que no intervengan causas externas que lo aceleren o retarden; tal estado constante sólo ocurre en el plano horizontal. En efecto, en los planos inclinados descendentes se encuentra presente una causa de aceleración, mientras que cuando la inclinación se considera hacia arriba, lo que está presente es una causa de deceleración. Se sigue de aquí, igualmente,

que el movimiento sobre el plano horizontal tiene también la propiedad de ser eterno, ya que si es uniforme no aumenta ni disminuye, ni mucho menos cesa" (Galileo, 1981a; p.346; las negritas no se encuentran en el original).

Lo que nos permitiría resumir la ley de inercia galileana como sigue: un movimiento sin fricción es de inercia y, por tanto, eterno y uniforme, cuando no varía la distancia del móvil al centro; si éste está alejado infinitamente, es un desplazamiento rectilíneo, en caso contrario, será circular (Fischer, 1986). Aunque Galileo ha superado la consecuencia rigurosa de la teoría del impetus, en la que éste se agota por causar movimiento el cual, por ende, no puede ser eterno (Koyré, 1988), no alcanza a renunciar a la noción de pesantez ni a la del centro del mundo. El peso es inherente a todo cuerpo. No puede pensarse en un objeto sin peso. Para el científico toscano, el peso es algo así como lo que la masa es para nosotros (Alvarez & Marquina, 1993b). Así, el movimiento no puede conservarse más que apoyado en la superficie equidistante del centro; de desaparecer ésta, el móvil de inmediato caerá:

"Imaginémonos un móvil proyectado sobre un plano horizontal del que se ha quitado el más mínimo roce [...] 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. Si, por el contrario, nos imaginamos un plano limitado y en declive, el móvil, que suponemos dotado de gravedad, una vez que ha llegado al extremo del plano y continúa su marcha, añadirá al movimiento precedente, uniforme e inagotable, esa tendencia hacia abajo, debida a su propia gravedad" (Galileo, 1981a; p.384; las negritas no se encuentran en el original).

La aserción "...que suponemos dotado de gravedad" se mantiene siempre. Y es que, pese a que Galileo no define nunca el término "gravedad" - incluso confiesa no saber qué la hace funcionar realmente (Galileo, 1967) -, está seguro de que es un principio inherente del cuerpo, por lo que es constante y la misma para todo objeto, se encuentre donde se encuentre. No es, por tanto, una fuerza de atracción que pueda variar con la distancia (Koyré, 1985). La imposibilidad del físico para abstraerse de una propiedad cuyo origen desconoce, su persistencia de mantenerla siempre y de jamás ignorarla en sus consideraciones sobre el movimiento (luego comentaremos dónde sí lo hace), puede verse como una manifestación muy interesante de formalidad metodológica. Al no poder explicar el peso, tampoco puede,

aunque se encuentre a un paso de ello, hacer abstracción de él y explorar lo que ocurrirá en el objeto resultante. Por eso fue capaz de construir una física tan llena de aciertos y que, al mismo tiempo, no concluyera explícitamente el principio básico de la nueva dinámica.

4.5 La matemática, lenguaje de la mecánica

Punto ineludible que no puede escapar al lector de los *Discorsi* es que, en sus argumentaciones más importantes, aquellas que en las Jornadas Tercera y Cuarta sientan las bases de la nueva dinámica, emplea una lógica que en mucho dista de la acostumbrada por la escolástica; que es diferente, también, a la empleada en la mayor parte del *Diálogo* (aun cuando en esta obra ya hubiese importantes anticipos de ella). Se trata de la matemática, el nuevo lenguaje que Galileo adoptará para la ciencia que construye. El lenguaje que, descriptivo, se trasciende a sí mismo para convertirse en deductivo. El aristotelismo había dejado muy clara una separación entre la matemática y la física. Ahí donde se tratara con la materia, con el mundo real, no cabía una descripción matemática (Drake, 1986). La realidad era mucho más complicada que los enunciados de la geometría o la teoría de proporciones. Además, los objetos concretos tenían una naturaleza que no era descriptible matemáticamente, una esencia que los hacía diferentes entre sí y, por tanto, incompatibles con una lógica rígida y general en sus conclusiones. Esta descalificación de la matemática en la descripción del mundo físico se extendió con la doctrina aristotélica. El joven Galileo se mantuvo, en sus primeros trabajos, con esa idea (Drake, 1986), y no fue sino hasta que su ciencia fue madurando que adoptó el lenguaje, fundamentalmente geométrico, que lo llevó a sus más reconocidos resultados. En los *Discorsi*, el autor da por hecho el empleo de la nueva lógica:

"SAGREDO: Pero, dado que todas las leyes de la mecánica tienen sus fundamentos en la geometría [...]" (Galileo, 1981a; p.68).

Mecánica y geometría (para Galileo, matemática), las dos ciencias que se harán inseparables en los *Discorsi* al grado de hacer que la primera se enuncie y demuestre con los formatos de la segunda. Así, el texto del "Académico" en las dos últimas jornadas presenta una estructura deductiva y consecuente que, hasta entonces, sólo era

concebible en un escrito formal de matemáticas. Se parte de definiciones y axiomas de los que se deducen proposiciones y se demuestran teoremas, se resuelven problemas y se enuncian corolarios. Galileo ha reescrito la mecánica. Independientemente de sus logros conceptuales, como las leyes de la caída o del tiro parabólico, ha inaugurado una forma de escribir la física. La dúctil lógica clásica, que permitía las digresiones y los juegos retóricos del *Diálogo*, ha dado paso al riguroso esquema del lenguaje matemático. La gran innovación de Galileo, de la que los *Discorsi* son su más fehaciente prueba, es meter a la matemática en la descripción del movimiento y vincularla con la realidad observable (Cohen, 1985). Es hacer de la matemática lenguaje y lógica de una ciencia. No al estilo del neoplatonismo, que la toma como una representación de la esencia de los fenómenos, sino de forma totalmente novedosa, al buscar para la explicación de éstos su rigor en la deducción y la demostración. Es el instrumento eficaz en la discusión coherente de problemas reales (Geymonat, 1986). A partir de los *Discorsi*, la mecánica mantendrá este lenguaje que, casi de inmediato (nótese la limitación de la geometría cuando Galileo trata el problema del continuo y su, históricamente, pronta solución con el cálculo de Leibniz y Newton), se verá retroalimentado por las propias necesidades de la física. La conexión entre matemáticas y física, más particularmente entre matemáticas y mecánica, adquiere con Galileo su carácter de postulado para la nueva epistemología.

El físico italiano no fue precisamente quien, por vez primera en la historia, quiso poner en contacto estas dos ramas del pensamiento humano (matemáticas y física). Ya los antecedentes griegos - Platón y Pitágoras - y medievales - mertonianos, nominalistas - daban por hecha una relación, con connotaciones místicas en los primeros, sin significado profundo en los segundos. Pero fueron Galileo y Kepler quienes inauguraron un "matematicismo físico" más moderno (Alvarez & Marquina, 1993b), siendo el del primero, libro de elementos metafísicos, el que más influyó y, por ende, el que más se parece al de la ciencia newtoniana. Este matematicismo galileano, cuyo ejemplo más acabado, como dijimos, fueron los *Discorsi*, permitió a la nueva ciencia incorporar una

estructura lógica que, a la vez que le dio sustento, le confirió un esquema de desarrollo conceptual de capacidad y alcances extraordinarios.

Resta reflexionar sobre la forma en que este lenguaje habría de relacionarse con la realidad observable, con ese mundo material al que Aristóteles negó toda descripción matemática. Y el nexa es, ciertamente, interesante. En los *Discorsi* Galileo lo expone y usará en múltiples ocasiones, demostrando una vez más la libertad metodológica de su ciencia. Se trata del experimento, la forma reestructurada de observación cuidadosa del Universo y de conexión entre ésta y el idioma para su descripción.

4.6 El método experimental y el experimento pensado

Galileo no fue el primero en hacer experimentos, pero sí en hacer de éstos una parte integrante de su ciencia (Cohen, 1985). Hay, además, un gran salto entre la experiencia de la vieja física, la aristotélica, y el experimento galileano. En tanto que la primera era la base única de la teorización (Koyré, 1988), el segundo se delineó como el puente entre la realidad y la teoría. Los experimentos de Galileo, en general, se construyeron a partir de teorías con el fin de hacer una contrastación con la realidad (Alvarez & Marquina, 1993b). Sin embargo, el puente fue cruzado por el científico toscano, en muchas ocasiones, de formas harto disímolas, que hacen difícil el poder considerarlo como el creador de un único y rígido "método experimental".

En sus aportaciones mecánicas puede verse claramente la flexibilidad con la que Galileo aborda el problema de la experimentación. La física de los *Discorsi* aparece sustentada por multitud de experimentos que el autor siempre describió como simples o, cuando menos, perfectamente realizables. Pero existen gran cantidad de sutilezas que no pueden pasar desapercibidas al lector cuidadoso, ni mucho menos al estudioso. Por ello, y por la innegable importancia del tema, la discusión sobre la experimentación galileana (básicamente la de los *Discorsi*) ha perdurado hasta hoy, llevando a la figura de Galileo desde la mitificación del experimento de Pisa (Koyré, 1985) hasta la negación de sus habilidades e intereses experimentales (Koyré, 1988). Y es que en los *Discorsi* el autor no

sólo estructura el tipo de experiencia que, junto con el análisis matemático del que ya hablamos (Cohen, 1985), lo colocaría como uno de los fundadores de la moderna experimentación, sino que también desarrolla otras formas de aproximarse a la realidad, tan difícil a veces de aprehender.

Respondiendo al problema aristotélico de la complejidad de los real, incapaz de matematización (Koyré, 1988), Galileo recurre en muchas ocasiones a la idealización extrema, el experimento mental. Entendido éste como el no realizable por razones lógicas o falta de equipo (MacLachlan, 1973), tiene la extraordinaria ventaja de poder manejarse absolutamente en los terrenos del lenguaje matemático (Fischer, 1986), de contrastar en la teoría misma lo que el experimento busca en la compleja materia (Koyré, 1985). Así, el nexo con el lenguaje, problemático cuando se trata de la traducción desde la realidad, no representa aquí dificultad alguna, porque todo se realiza al interior del mismo. Desde luego, por otro lado, que hay inconvenientes. Los postulados de la teoría no pueden ser probados de esta manera (Fischer, 1986); el experimento mental requiere de ellos y, hacerlo, sería necesariamente una petición de principio. Por otro lado, la idealización a ultranza puede llevar a imágenes totalmente apartadas de la realidad (Koyré, 1985). Por eso, Galileo recurrirá a experimentos mentales al igual que a reales, no dejando muchas veces en claro cuándo se trata de unos o de otros. También apela al experimento que MacLachlan (1973) define como "imaginario", cuando (como en la caída de objetos desde el mástil del barco en el *Diálogo*) no lo realiza por estar - teóricamente - completamente seguro de su resultado.

Este juego galileano con los niveles diversos de experiencia, en los que muchas veces basa la prueba de sus conclusiones matemáticas, se manifiesta brillantemente en pasajes de los *Discorsi* que, a fuerza de la polémica que originaron, se han hecho clásicos. Por ejemplo, en la Tercera Jornada, Salviati describe un cuidadoso experimento con un plano inclinado. Por la riqueza de detalle, el pasaje merece ser citado en toda su extensión:

"[...] En un listón o, lo que es lo mismo, en un tablón de una longitud aproximada de doce codos, de medio codo 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 codos, 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 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. Establecida exactamente esta operación, hicimos que esa misma bola descendiese solamente por una cuarta parte de la longitud del canal en cuestión. Medido el tiempo de la caída, resulta ser siempre, del modo más exacto, precisamente la mitad del otro. Haciendo después el experimento con otras partes, bien el tiempo de la longitud completa con el tiempo de la mitad, con el de dos tercios, con el de tres cuartos o con cualquier otra fracción, 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 lo que a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande llena de agua, sostenida a una buena altura y que, a través de un pequeño canal muy fino, iba vertiendo un hilillo de agua, siendo recogido en un vaso pequeño durante todo el tiempo que la bola descendía, bien por todo el canal o sólo por alguna de sus partes. Se iban pesando después en una balanza muy precisa aquellas partículas de agua recogidas del modo descrito, con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias y proporciones de los tiempos. Ocurría esto con tal exactitud que, como he indicado, tales operaciones, repetidas muchísimas veces, jamás diferían de manera sensible" (Galileo, 1981a; p.299; las negritas no se encuentran en el original).

Indudablemente, tenemos la detallada descripción de un experimento al estilo moderno (Thullier, 1983): la preparación acuciosa del equipo, la repetición numerosa con variaciones controladas, la referencia a instrumentos de medición (cronómetro de agua), la conclusión cuantitativa confirmada. Koyré (1985, 1988), sin embargo, llama nuestra atención sobre algunos puntos importantes. Para él, la realidad no está a la altura de la idea. Los medios materiales con los que Galileo podía contar, en una época de precaria tecnología, eran demasiado rudimentarios. Las exactas coincidencias de tiempos de caída que nos presume el experimentador no podían ser

tales. Igualmente argumenta contra todos los experimentos de los *Discorsi*, a los que despoja de cualquier valor como experiencias reales y los coloca en el plano de experimentos pensados (Koyré, 1985, 1988; Thuillier, 1983). Este escepticismo ante el Galileo empirista tiene, por añadidura, antecedentes lejanos. Marin Mersenne, uno de los experimentadores más hábiles de la época (Drake, 1973), en su *Harmonie universelle* de 1637, ya dudaba de que el físico toscano hubiese llevado a cabo sus experimentos con planos inclinados (Thuillier, 1983; p.588).

Aunque los razonamientos de Koyré son muy convincentes, es un hecho que resulta imposible negar a la ciencia de Galileo todo carácter experimental. En un intento por revalorar las experiencias de los planos inclinados, Thomas Settle (en Drake, 1973; Thuillier, 1983) repitió algunas (entre las que se halla la descrita en el pasaje arriba citado), tratando en todo lo posible de reconstruir las condiciones y procedimientos empleados por Galileo. Sus resultados, aunque muy buenos, no permitieron hacer frente a la bien sustentada opinión de Koyré. Fue hasta que Drake (1973) publicó su análisis de algunos manuscritos inéditos de Galileo, hallados en la Biblioteca Nacional de Florencia y que, aparentemente, datan de la primera década del siglo XVII, cuando se tuvieron elementos para concluir que éste era un experimentador mucho más eficaz de lo que Koyré afirmaba (Thuillier, 1983). Los escritos sobre los que Drake apoyó su estudio tratan de una variación del experimento descrito en la extensa cita anterior, que permitió a Galileo investigar, sorprendentemente, la inercia horizontal. Dejando caer la bola a lo largo de la pendiente salía proyectada horizontalmente, desde cierta altura, por la acción de un deflector en la base del plano inclinado. Empleando su ley de caída para pendientes diversas del plano, el científico podía calcular las razones (siempre hemos de notar que Galileo maneja razones) entre una velocidad de referencia (la de la caída desde una altura fija dada) y las que resultan del descenso desde diversas alturas del plano, para así hallar la velocidad inicial para la proyección y calcular el alcance de ésta, al que se compararía con el obtenido experimentalmente. Galileo buscaba comprobar, de esta forma, que el movimiento horizontal sin el rozamiento de un plano se

perpetuaría uniformemente, de no ser desviado por el peso. Para ello, quería constatar que la distancia alcanzada por la proyección sólo era determinada por la velocidad horizontal inicial y la aceleración uniforme de la caída vertical.

Pues bien, en los textos inéditos aparecen una serie de esquemas y datos numéricos, que Drake interpretó como los resultados del experimento llevado a cabo por Galileo y la comparación que éste hace con los obtenidos de su teoría (Drake, 1973). Exponiendo, además, las conclusiones que obtuvo de repetir cuidadosamente los experimentos, Drake asegura que, en efecto, el físico italiano no pudo menos que haberlos realizado. Sus datos son perfectamente congruentes con los obtenidos por Drake, y las diferencias que aparecen entre éstos y los calculados teóricamente resultan explicables por el momento de inercia rotacional, que Galileo ignoraba, y hace diferente el rodamiento por el plano de la caída libre en aproximadamente un 15% (Drake, 1973; Naylor, 1976). Notorio es que el autor de los *Discorsi* achacó esa desviación a los efectos del deflector, por lo que decidió, en una experiencia posterior, retirar éste. Escribe los resultados obtenidos, pero se ve incapaz de obtener cifras teóricas para contrastarlos porque no sabe cómo descomponer un movimiento de proyección oblicuo. Drake (1973) hizo los cálculos y encontró que se aproximan a los datos galileanos con errores menores del 2%. Remarcable es que Galileo carecía aún de los teoremas de tiro parabólico, pero aun con ellos restaría la discrepancia por el momento de inercia rotacional (Naylor, 1976). Pese a esto, sus resultados son extremadamente buenos y, lo más importante, este último experimento no deja duda de que, en efecto, no puede tratarse de uno mental o de un ajuste teórico de datos, ya que el físico carecía de los elementos para contrastar sus conclusiones.

En resumen, Drake (1973) ha rescatado la imagen del Galileo experimentalador. Sus manuscritos inéditos nos revelan al físico experimental moderno, el que hace cálculos teóricos, diseña dispositivos, hace comparaciones cuantitativas. Las discrepancias tan pequeñas nos sugieren una maestría experimental notable. Esto es, además, apoyado por la certidumbre de que Galileo era un experto en

aparatos de medida; recuérdese su interés por ellos y su construcción del compás geométrico militar (Thuillier, 1983).

Pero, como ocurre tantas veces en la obra galileana, las cosas no quedan ahí. Leamos otro célebre pasaje de los *Discorsi*:

"En cuanto al segundo caso, en el que hay que poner de manifiesto que la resistencia del aire con respecto a un móvil que va a gran velocidad no es mucho mayor que si se mueva lentamente, el experimento siguiente es buena prueba de ello. Cuélguese de dos hilos de la misma longitud, de cuatro o cinco codos, pongamos por caso, dos bolas de plomo que sean iguales también. Una vez suspendidos dichos hilos a cierta altura, empujemos los pesos desviándolos de la perpendicular, pero de forma tal que uno se aleje una distancia de ochenta o más grados, mientras que el otro no se aleje más de cuatro o cinco. De esta forma, si se los deja caer libremente, uno cae y, tras atravesar la perpendicular, describe arcos muy grandes de 160, 150, 140 grados, etc., disminuyéndolos poco a poco; el otro, por su parte, recorrerá arcos pequeños de diez, ocho, seis, etc. grados, disminuyéndolos también poco a poco.

He de decir, ante todo, que en el tiempo en que uno de los péndulos pasa sus grados respectivos, 180, 160, etc., el otro pasará lo 10, 8, etc., suyos. De todo lo cual se infiere con claridad que la velocidad de la primera bola será dieciséis o dieciocho veces mayor que la velocidad de la segunda; de modo que si el aire ofrece a la velocidad más grande una resistencia superior a la que ofrece a la menor, la frecuencia de vibración será menor en los grandes arcos de 180, 160 grados, etc., que en los pequeños arcos de diez, ocho, cuatro e incluso dos y un grados. Ahora bien, esto contradice a la experiencia, ya que si dos personas se ponen a contar las vibraciones, una de las más largas y la otra las más cortas, se encontrarán con que contarán no sólo decenas sino centenas de tales vibraciones sin que difieran lo más mínimo en una sola o en parte de una" (Galileo, 1981a; p.397; las negritas no se encuentran en el original).

La isocronía de las oscilaciones pretendida por Galileo es impresionante. Hoy sabemos que, como el periodo depende del seno del ángulo, tal pretensión es excesiva. Más aún, resulta imposible no darse cuenta de ella en un experimento como el descrito. Naylor (1976) repitió la experiencia usando dos péndulos de plomo con longitud de 100 pulgadas. Dejando que uno de ellos cubriese arcos de 120° y el otro de 10°, encontró que el desfaseamiento ya es de un cuarto de oscilación para el octavo o noveno periodo. Naylor concluye que, evidentemente, Galileo no podía ignorar esta situación, de manera que no debió tomar estos experimentos muy seriamente. Le parece que tal demostración experimental fue buscada después de tener su teoría y, en realidad, lo único que trataba era de apoyar su idea.

Y lo cierto es que su idea era fundamental: la resistencia del aire no debía afectar el movimiento de proyectiles de una manera sensible, al menos para un cierto intervalo de velocidades iniciales. De ahí su interés por comparar las grandes con las pequeñas oscilaciones y encontrar que no discrepaban. Esto apoyaría, desde luego, sus resultados de las experiencias sobre proyección, de las que ya hemos hablado, porque le permitiría hacer cálculos teóricos sin necesidad de abordar el problemático manejo de la resistencia del medio, dependiente, como él sabía, de la velocidad.

Como el resultado del experimento no puede ser el que Galileo espera, entonces apela por una vez en la mecánica, a la sobresimplificación que, en otros contextos, era su mejor arma. Naylor (1976) la define como "demostración didáctica". El experimento del plano inclinado y la proyección horizontal que Drake (1973) estudió podía usarse para lo mismo. La "inercia horizontal", para un cierto intervalo de velocidades iniciales, podía tomarse como un hecho, y el alcance del proyectil ser calculado sin considerar la resistencia del aire. Pero este experimento no podía ser publicado y esperar que convenciera, menos aún con las discrepancias que Galileo no sabía explicar y que hoy, como dijimos, se atribuyen a la inercia rotacional. Por eso, prefirió exponer una experiencia que, aunque errónea, podía ser lo suficientemente convincente como para apoyar su argumento de la ignorabilidad de la resistencia del medio (Naylor, 1976).

Esta conclusión no es, como cabe esperar, la única. Drake (1975) prefiere hacer un análisis del texto original de los *Discorsi* y encontrar que la última parte del pasaje de los péndulos isócronos, donde dice "... sin que difieran lo más mínimo en una sola [oscilación] o en parte de una" (Galileo, 1981a; p.237), puede traducirse del original italiano "... senza discordar d'una sola [vibrazione], anzi d'un sol punto" (en Drake, 1975; p.92) de manera que "anzi" se refiera a "a lo más", con lo que podría quedar: "... sin que difieran en una sola o, a lo más, en una sola" (Drake, 1975; p.93). Y Drake (1975) recurre a los experimentos de MacLachlan en los que halla que, para oscilaciones iniciales de 80° y 10° (respecto a la vertical) en los péndulos respectivos, el

desfasamiento es, a lo más, de un periodo, para tantas oscilaciones como 150. Drake (1975) apoya su punto con un análisis de la traducción latina de los *Discorsi*, que fue la que más probablemente revisó Galileo. Sin embargo, concediendo esto, el mismo Drake termina confesando que, así tomado el experimento, no probaría la ignorabilidad del medio en el tiro de ciertos proyectiles, ni mucho menos en todos los casos que Galileo afirma. El físico fallaría, entonces, al apelar a esta experiencia como argumento,

Para completar un esquema, que ya se perfila complicado, basta enunciar otro famoso experimento de los *Discorsi*:

"**SALVIATI:** [...] En realidad, se observa, entre el aire y el agua, un gran desacuerdo, cosa que he constatado a través de otra experiencia. Se trata de lo siguiente: si lleno de agua un globo de cristal en el que se ha hecho un agujero tan pequeño como el grosor de una paja, y si, una vez lleno, lo vuelco con el agujero hacia abajo, el agua, a pesar de su peso y prontitud para descender en el aire, y el aire, igualmente dispuesto a elevarse en el agua dada su extrema ligereza, no se ponen de acuerdo, la una para caer, saliendo por el orificio, y el otro para subir, entrando por el mismo. Por el contrario, permanecen, más bien, los dos hostiles y desconfiados. Si presento, por el contrario, a aquel orificio un vaso con vino tinto, que es en una medida casi insensible más ligero que el agua, lo vemos inmediatamente elevarse lentamente a través del agua en forma de trazos rojizos, mientras que el agua, con la misma lentitud, descenderá por el vino sin mezclarse hasta que el globo esté completamente lleno de vino, por lo que el agua caerá toda al fondo del vaso colocado debajo. [...]" (Galileo, 1981a; p.160).

Koyré (1985) desacredita totalmente la experiencia. La considera absolutamente falsa y declara que, obviamente, se debe producir una mezcla. Incluso, explica cómo podría lograrse un resultado más parecido al que describe Galileo, conectando los recipientes mediante dos aberturas en lugar de una (citado por MacLachlan, 1973; p.377). El experimento, sentencia Koyré, es, evidentemente, pensado.

MacLachlan (1973) critica la postura de Koyré y describe la cuidadosa repetición de la experiencia galileana. Muestra cómo es crucial el diámetro del agujero para obtener el resultado apetecido: si es muy pequeño, no habrá intercambio; muy grande y se dará, como seguramente pasó a Koyré, una mezcla. Sin embargo, concluye, es perfectamente posible que Galileo hiciera el experimento y obtuviera lo que describe.

Por su parte, en una posición más centrada, Thuillier (1983) repite también el dispositivo y encuentra que el intercambio es casi perfecto, salvo al final, cuando el poco vino que resta ya no sube más. Afirma, entonces, que Galileo debió observar el comportamiento general del fenómeno y "embellecer" el resultado, extendiendo el limpio intercambio a toda la cantidad de vino.

Con estos ejemplos de experimentación, enunciados en los *Discorsi*, podemos percatarnos de la gran versatilidad del Galileo experimental en la mecánica. Desde el rigor empírico que Drake (1973) reveló, con su rescate de los manuscritos inéditos sobre "inercia horizontal", hasta los discutibles resultados, evidentemente exagerados, de sus experimentos del péndulo, nos encontramos con la postura intermedia de la experiencia idealizada del intercambio total entre agua y vino. Por otro lado, tenemos evidentes experimentos pensados, como su extrapolación a un vacío, al que no puede acceder, partiendo de lo observado en medios cada vez más sutiles (Galileo, 1981a). Es un hecho, pues, que si bien Galileo no fue el empirista a ultranza que basó toda su mecánica en la experimentación, tampoco resulta el racionalista que sólo recurrió al experimento pensado como lo quiere Koyré.

4.7 Los métodos del Galileo mecánico

El científico de los *Discorsi*, el Galileo maduro que ha inaugurado una nueva física, nos demuestra en su obra de mecánica la enorme riqueza de la que es capaz su metodología. Conciente, como hemos visto, de la importancia de vincular la descripción del mundo físico con el lenguaje matemático, encuentra el mejor argumento para defender tal necesidad: hacerlo. Por vez primera en la historia una obra de física es escrita con tan enorme rigor, con tanto cuidado en puntualizar los términos a emplear, en dejar claras las definiciones y en apoyar los axiomas. Galileo se empeña en hacer deducciones formales, en las que no quepa duda del empleo de los postulados originales. Nos enseña cómo es perfectamente compatible el esquema matemático con el razonamiento físico. Busca demostrar cómo la mecánica es una ciencia autocontenida, que sólo se fundamenta en sí misma y para la que ha encontrado el lenguaje ideal (Fischer, 1986). La conexión con la realidad, ese experimento que tan confuso puede

resultar a veces, es ilustrada como la más simple de las actividades, como el paso inmediato para comprobar que, en efecto, el razonamiento matemático brinda conclusiones veraces sobre el mundo real. Por eso, ignora intencionalmente los conflictos, idealiza y hace experimentos mentales, sin siquiera anunciarlos. La experimentación será, para la mecánica, la sofisticada mutación de las armas propagandísticas que eran la sobresimplificación y la anamnesis en sus reflexiones astronómicas. Pero, a diferencia de lo que ocurrió en éstas últimas, en mecánica Galileo está perfectamente seguro de lo que hace y porqué. Si oculta los resultados o simplifica la experiencia será porque sabe en dónde fallan los primeros, o porqué no es convincente la segunda. A diferencia de lo que pasa en su obra astronómica, o en la conflictiva conexión entre mecánica y astronomía que desarrolló en el *Diálogo*, manifiesta en los *Discorsi* una enorme seguridad conceptual. Ha reconstruido una ciencia para la que la crítica de sus antecesores ya estaba avanzada, se sabe con pruebas muy poderosas en favor de la validez de sus conclusiones y, ante todo, está convencido de la estructura lógica de sus razonamientos.

Fundamental es, además, que ahí donde no se encuentra seguro se mantenga en una postura prudente. Muy interesante en este sentido es, como ya lo comentamos, su imposibilidad de abstraer el peso en la dinámica, al no tener idea de la naturaleza de la "gravedad". El que no haya enunciado el principio de inercia de la Primera Ley de Newton representa, reiteramos, la extraordinaria formalidad de su mecánica madura. Más aún cuando, y conviene comentarlo, en sus reflexiones sobre estática ha hecho abstracción del peso en multitud de ocasiones. Bástenos leer algunas de sus demostraciones de la Segunda Jornada de los *Discorsi* para percatarnos de que, para facilitar el análisis, ignora el peso de los sólidos y sólo considera las cargas externas sobre ellos (Galileo, 1981a). Pero el artificio de cálculo que tiene sentido en el estudio de la resistencia no puede funcionar más cuando se trata de describir el carácter real del movimiento. He aquí un cambio epistemológico que Galileo ha dado en los *Discorsi*: se puede idealizar, se puede imaginar lo que pasaría con un cuerpo sin peso o en el espacio vacío, pero siempre hay que regresar al mundo real, y en el mundo real no existen objetos sin peso ni espacios

vacíos. Si existieran, nos quiere decir Galileo, habrá que cambiar la teoría como, en efecto, ocurrió. Por eso la dinámica no puede ignorar el peso. Por eso hay que probar que la resistencia de los medios puede despreciarse en el movimiento de proyectiles, pero jamás postular que no existe. Por eso, en fin, la insistente recurrencia al experimento.

Por otro lado, se encuentra la convicción de que la razón no puede ser detenida (Galileo, 1967). Galileo preconiza el triunfo de la ciencia, el instrumento por el que la mente humana accede al conocimiento. Así puede explicarse su actitud, en medio del riguroso desarrollo de la dinámica, de aceptar, sin demostración alguna, postulados cuya importancia es fundamental. No olvidemos, por ejemplo, que nunca prueba realmente la uniformidad de la aceleración de la gravedad. No puede ni debe condenarse esta aparente falta de formalismo. Si Galileo no actúa de ese modo no puede construir su dinámica y asunto concluido. El permitirse dar por hechos ciertos principios, esperando que el desarrollo posterior de la ciencia se ocupe de justificarlos, es una prueba de fe en la razón, en los logros científicos y, sobre todo, una muestra de flexibilidad epistemológica que no debe subvalorarse.

La obra de Galileo Galilei marca un parteaguas, como lo dijimos al principio de este escrito, en la metodología. Hemos recorrido, con algún detalle, los caminos que lo llevaron a sus más importantes y reconocidas aportaciones. Nos hemos dado cuenta de que el problema epistemológico de la ciencia galileana se complica por la extraordinaria riqueza y pluralidad de sus procedimientos. Galileo será, con mucho, el primer científico que podemos llamar moderno. Y es esta modernidad la que permea cada página de un libro que, aunque físicamente contradictorio y confuso, aparece escrito desde el punto de vista de la nueva ciencia. Sus argumentos, sus críticas, su proceder cuidadoso y exhaustivo, lo hacen efectivamente un compendio metodológico. Nos referimos a *Il Saggiatore* (*El Ensayador* o *El Aquilatador*, como suele traducirse) de 1623, del que nos ocuparemos ahora.

Capítulo 5. Il Saggiatore

Galileo Galilei se distinguió por su capacidad polémica. Como hemos visto, buena parte de sus descubrimientos astronómicos se encontraron enmarcados en, algunas veces violentas, discusiones sobre prioridades, observaciones e interpretaciones. Es curioso que todas ellas excepto una - la originada por la paternidad del compás geométrico-militar contra Baldessare Capra en 1607 (Geymonat, 1986) - se refieran a la astronomía. Esto puede darnos, una vez más, idea de la inseguridad con la que Galileo, no especialista en esta ciencia, pisaba sus terrenos y precisaba recurrir a la propaganda y la controversia, donde sus grandes habilidades dialécticas suplían lo que a su discurso le faltaba.

La construcción y el uso del telescopio, las manchas solares, la interpretación de las Sagradas Escrituras en favor del sistema copernicano, todas ellas son discusiones de Galileo con sus contemporáneos, representantes de la vieja ciencia. Y a éstas hay que sumar otra de capital importancia, ya que originó uno de los libros más maravillosamente contradictorios del pensamiento galileano: la controversia contra Horatio Grassi, jesuita del Collegio Romano, sobre los cometas de 1618.

De ahí surgió *Il Saggiatore*. Una obra donde Galileo, polemista extraordinario, pone en ridículo a un adversario a quien asistía casi completamente la razón, donde expone una explicación sobre los cometas que, muchos aseguran, ni el mismo creyó (Revuelta en Galileo, 1981b), donde, en medio de acres críticas, aparece delineado el espíritu de una nueva ciencia. Una obra que, colocada en el contexto de su época, puede verse como la hábil respuesta de Galileo ante el abierto rechazo que, en 1616, la Iglesia Católica manifestara contra el copernicanismo. Pero vayamos a los detalles...

5.1 Otra polémica en astronomía

En el otoño de 1618 aparecieron tres cometas. Era la primera vez, después de la popularización que Galileo promoviera del telescopio en los círculos especializados, que un fenómeno de tal naturaleza tenía lugar. Por esta razón, la atención que se le prestó fue muy

grande y permitió a los astrónomos jesuitas manifestar claramente su adhesión al sistema de Tycho Brahe.

Aristóteles había explicado los cometas como fenómenos meteorológicos, ya que, por su carácter transitorio, debían hallarse en la mutable esfera sublunar (Fischer, 1986; Geymonat, 1986). Ni Ptolomeo ni Copérnico habían tocado el problema (Revuelta en Galileo, 1981b). Brahe, a partir de sus observaciones del cometa de 1577, los consideró como astros pequeños de materia parecida a la planetaria, cuyas trayectorias se hallaban entre las órbitas de los planetas que giraban en torno al Sol (Geymonat, 1986).

El jesuita Horatio Grassi Savonensis, en su *Disputatio astronomica de tribus cometis* de 1619, manifestó la posición que la astronomía especializada tomara respecto al fenómeno. Las observaciones cuidadosas, recogidas en varios lugares de Europa, obligaban a situar al mayor de los tres cometas - sobre el que, de hecho, giró toda la discusión (Geymonat, 1986) - sobre la esfera lunar, ya que el paralaje era siempre menor a 1° (Fischer, 1986). Esto era un punto más en contra del sistema ptolomeico, por lo demás ya caído en descrédito desde los descubrimientos de 1611, y a favor de la nueva postura que Brahe propusiera. Como hemos dicho, el sistema ticomico tenía la enorme ventaja de explicar las observaciones sin renunciar al geocentrismo. Por esto, y por la expresa prohibición eclesiástica de 1616 de tratar al copernicanismo como opción viable, el modelo de Tycho Brahe tenía cada vez más adeptos entre los astrónomos expertos. Así, en su *Disputatio*, Grassi exponía prácticamente la misma explicación de los cometas que Brahe enunciara, mostrando por ello su clara preferencia por el sistema ticomico. Pero ya hemos hablado del rechazo que Galileo sentía por las posturas de compromiso, en especial por la que abandonaba al esquema ptolomeico sin, por otra parte, considerar al copernicano (Revuelta en Galileo, 1981b). Es muy probable que, por esta razón, instase a su amigo y alumno Mario Guiducci a que escribiera su *Discorso delle comete*, con el fin de refutar a Grassi. La respuesta del jesuita no se hizo esperar. Adivinando acertadamente que tras Guiducci se encontraba

la mano de Galileo (Fischer, 1986), publicó, en el mismo 1619 y bajo el seudónimo de Lothario Sarsi Sigensano, su *Libra astronomica ac philosophica*, en donde atribuye abiertamente a éste el *Discorso* y ataca sus conclusiones (Geymonat, 1986). Galileo tarda más de dos años en escribir una extensa réplica, dirigida a Virginio Cesarini, maestro de cámara del Papa Urbano VIII y dedicada a éste último. Se llamó *Il Saggiatore, nel quale con bilancia esquisita e giusta si ponderano le cose contenute nella Libra astronomica e filosofica di Lothario Sarsi Sigensario* (*El Aquilatador, en el que con una balanza justa y precisa se sopesan las cosas contenidas en los 'Libra astronomica e filosofica' de Lothario Sarsi Sigensano*) y apareció en 1623. Grassi escribió todavía una poco brillante contestación que se publicó en 1626 y que Galileo ignoró (Geymonat 1986; Revuelta en Galileo, 1981b).

Il Saggiatore es una obra maestra de literatura polémica (Geymonat, 1986). En él, Galileo se dedica destruir, puntual y detalladamente, cada uno de los argumentos de Sarsi (Grassi). No en vano puso ese título al libro, en respuesta del que Grassi empleara para el suyo (Geymonat, 1986) y como el mismo Galileo nos aclara:

"[...] He mantenido, sin embargo, la misma determinación de hablar con V.S. Ilma. y de escribiros a Vos, sea cual fuere la forma en que esta respuesta se haya convertido, la cual he querido titular *El Ensayador* [*Il Saggiatore*], manteniéndome dentro de la misma metáfora empleada por Sarsi ["libra" significa "balanza"]. Pero puesto que me ha parecido que al sopesar las proposiciones del Sr. Guiducci, él se ha servido de una romana y lo ha hecho casi a bulto, yo he querido servirme de una balanza de orfebres, que son tan precisas que pueden pesar hasta un sexagésimo de grano, y usando de ella con todo el esmero posible, sin pasar por alto ninguna de las proposiciones por él presentadas, hacer de todas su ensayo, las iré enumerando para distinguir las y anotarlas, de modo que si acaso Sarsi las leyese y le vinieran ganas de responder, pueda hacerlo más fácilmente, sin dejar atrás cosa alguna" (Galileo, 1981b; p.42).

El tratamiento que Galileo hace de Sarsi no es nunca más benigno que el que deja ver esta cita. En efecto, el libro rebosa de sátiras, burlas y abiertos ataques al autor de la *Libra*. Desde llamarlo mentiroso hasta demostrar su ignorancia de la lógica más elemental, el físico italiano muestra su habilidad retórica y, en el trasfondo, su inseguridad en el terreno astronómico que lo

lleva a asegurar, en más de una ocasión, su derecho y prioridad sobre todos los descubrimientos celestes (Galileo, 1981b).

Esta pretendida autoridad en la astronomía hará que Galileo pretenda poseer una refutación científica de las afirmaciones de Grassi. Sin embargo, el hecho es que no la tiene, ni contra la teoría del autor de la *Libra* ni contra el sistema ticonico en general. Como su lucha es más en contra del último, apelará a la propaganda que le inspira la controversia sobre la primera (Fischer, 1986). Esta posición se reafirma por la expresa advertencia que, a raíz del decreto de 1616, la autoridad eclesiástica había hecho sobre la inconveniencia de enseñar y difundir la doctrina de Copérnico (Reuelta en Galileo, 1981b). A Galileo le estaba vetado defender al copernicanismo, pero no argumentar en contra de los sistemas oponentes, de los que el de Brahe era el más representativo (Fischer, 1986). Por esto, *Il Saggiatore* está escrito de forma que desprestigie al sistema ticonico en su totalidad, a veces de manera muy directa, ya sea atacando sus fallas lógicas o bien criticando abiertamente a su autor:

"[...] según afirma Tycho, que es el Aguila, mejor dicho, el Buitre [...]" (Galileo, 1981b; p.60).

O, más adelante:

"[...] no veo por qué razón se debe elegir a Tycho, anteponiéndolo a Ptolomeo o a Copérnico, pues de estos dos tenemos sistemas completos que abarcan al mundo entero, construidos con gran habilidad y conducidos a su fin, mientras que Tycho no creo que lo haya hecho; [...] tampoco creo que Tycho haya demostrado la falsedad de los otros dos [...]" (Galileo, 1981b; p.63).

En particular, esta última cita describe muy bien el malestar que Galileo pudo sentir respecto al sistema de Brahe. Para él, los sistemas eran el de Ptolomeo y el de Copérnico - cosa que, como hemos comentado, queda muy clara en el título del *Diálogo* - y, aunque careciese de pruebas concretas en su contra, no deseaba considerar al modelo ticonico. Lo más simple es pensar que esto último lo hacía solamente por la falta de demostraciones, lo más razonable que, además, le molestase sobremanera el carácter de compromiso y adecuación de la hipótesis ticoniana.

Como quiera que sea, *Il Saggiatore* no parece comprensible sólo en el contexto de crítica al sistema de Brahe que hemos expuesto (Fischer, 1986). Su valor científico, como veremos, es poco rescatable. En cambio, tiene una importancia epistemológica con la que difícilmente se equipara la de las otras obras galileanas. Y es que, en medio de las acerbas opiniones y los artificiosos razonamientos, aparecen comentarios de extraordinaria claridad sobre la manera de hacer y pensar en ciencia. Curiosamente, este libro, retrógrado en el aspecto científico, que presenta a un Galileo trastabillante en su terreno débil (el astronómico), que, además, nos muestra el sarcasmo inmisericorde de la pluma del polemista, constituye un excepcional resumen de las actitudes y métodos de la ciencia moderna.

5.2 El contenido científico de *Il Saggiatore*

Como hemos visto en el apartado anterior, *Il Saggiatore* era una respuesta, en principio científica, a la *Libra astronomica ac philosophica* de Horatio Grassi. Como también lo comentamos, Galileo trata en ella de atacar al sistema de compromiso de Tycho Brahe. Con este fin, deberá de proponer una explicación científica del fenómeno de los cometas que, como premisa fundamental, contradiga a la dada por su opositor y, en general, por la astronomía ticomónica. Sin embargo, al hacer esto, deberá rebatir un argumento que, en la ocasión de la nova de 1604 ya discutida en el Capítulo 2, había defendido como cierta y tenía todas las ventajas observacionales a su favor: el paralaje. Los cometas presentaban un paralaje que, claramente, los situaba por encima de la esfera de la Luna, y Grassi, junto con los astrónomos jesuitas, lo admitía. De esta forma, Ptolomeo perdía sus últimos adeptos y Brahe los ganaba. Pero, como vimos, Galileo no deseaba eso. Por ello, se dedicará en *Il Saggiatore* a atacar su propio argumento, pero no con la necesidad de negarlo, sino de probar que no es aplicable a los cometas por el simple hecho de que éstos no son cuerpos reales. De esta manera, conforme avanza en su obra criticando y refutando los argumentos de Grassi, va poniendo en claro las razones a favor del carácter ilusorio de estos fenómenos.

Con su usual cuidado de agotar, más aún en la polémica, todos los caminos posibles para llegar a su objetivo, Galileo inicia criticando a Sarsí por no haber notado que el cometa (tanto Grassi como Galileo se refieren al mayor de los tres cometas de 1618) apareciera en la constelación de Escorpión, en lugar de la de Libra donde éste lo sitúa desde el sugestivo título de su libro. Aprovecha la ocasión para comparar los ataques de Sarsí con los de los escorpiones. Posteriormente, ya entrando en materia, discute a Sarsí que meta en sus razones a Ptolomeo y Copérnico - que nunca estudiaron el tema - indicándole que debe restringirse a la teoría cometaria de Tycho quien, a su vez, no fue capaz de proponer un sistema completo y, por tanto, no es lo óptimo considerarlo antes que los otros para la descripción de los movimientos celestes. Declara entonces que está de acuerdo en usar el argumento del paralaje, siempre que se haga sobre un objeto real. Ante la aseveración de Sarsí de que el cometa es en todo diferente a ilusiones ópticas como los halos, el arco iris o las coronas, Galileo afirma que, antes de la polémica, ni Sarsí ni sus antecesores pensaron nunca en la posibilidad del carácter aparente del fenómeno. Le explica cómo su "maestro" Grassi pensó, uniéndose a Kepler, que el cometa pudiera ser una reflexión. Luego defiende el carácter rectilíneo de su movimiento, en lo que coincide con Kepler, y ataca a Sarsí por querer deducir de él un desplazamiento por un círculo máximo. Comenta algunos aspectos del movimiento aparente del cometa y su relación con el real. Entonces ataca a Sarsí por atribuirle una trayectoria oval. Ante la crítica de éste último sobre su uso del telescopio, Galileo responde que ni dijo que aumentara infinitamente a los objetos, ni que los iluminara, como Sarsí declara. Analiza brevemente el funcionamiento del anteojo, que no puede incrementar el tamaño angular a la vez que concentrar los rayos luminosos, de manera que no hará a un cuerpo más brillante de lo que ya es. Describe entonces el proceso empírico que lo llevó a construir el telescopio. Luego critica a Sarsí el razonamiento de que el alargamiento o acortamiento del instrumento pueda servir para medir distancias. Aunque el hacer más largo el tubo ayuda al aumento, esto sólo es una de sus

causas. Regresando al cometa, Galileo declaró que hay graves dudas de que esté sobre la esfera lunar, aunque no afirma positivamente lo contrario. Explica cómo su apariencia deja ver que está hecho de materia diferente a la de los planetas. Muestra cómo Sarsi no podía comparar el brillo del fenómeno con el de Mercurio, ya que este último estaba muy cerca del Sol para ser visto en esa época. Luego aclara que él sólo ha sugerido que el cometa pudiera ser una reflexión en los vapores terrestres, que se han elevado en línea recta. Se dedica entonces a rebatir, punto por punto, las objeciones de Sarsi sobre esta sugerencia, defendiendo que los vapores terrestres sí pueden ascender y permanecer el tiempo requerido en la región donde aparece el fenómeno, que el Sol sí puede causar tales reflejos en zonas restringidas y que el cometa no tiene nada que ver con las manchas solares. Ante la observación de Sarsi de que el efecto no actúa como las demás ilusiones ópticas (halo, arco iris) que siguen a su fuente, Galileo afirma que el cometa es diferente y que, además, los reflejos se mueven en sentido contrario al de la luz que los forma - lo que ilustra con el del Sol en el mar. Además, la materia donde se produce el fenómeno también cambia y se desplaza. Ante la idea de que, si fuera una apariencia, el efecto sería de poca duración, responde que ello no concluye nada, pues no se tiene certeza de cómo actúa el material que los produce y, además, las permanencias suelen variar mucho. Negando que haya sugerido el movimiento terrestre para explicar el comportamiento del cometa, discute ciertos aspectos de su trayectoria: que no llega al cenit, que tiende hacia el polo, etc. Luego comenta que, a diferencia de Kepler que la creyó curva, él piensa que la cola cometaria es recta en realidad. Más adelante, defiende su teoría de los relieves en la Luna y las manchas solares. Discute con cuidado el tema del arrastre de fluidos por superficies lisas, exponiendo ciertos experimentos con vasos giratorios para probar que no mueven al aire en su interior salvo muy cerca de su superficie. Describe cómo el agua tampoco gira fácilmente con el vaso. Todo ello le sirve para mostrar que la esfera lunar no puede arrastrar los vapores terrestres y destruir el efecto. Luego discute sobre el

calor, aclarando que no cree que los cuerpos deban enrarecerse para calentarse. Es el conferir calor lo que produce disminución de materia, no recibirlo. Aclara cómo el no poder medir tal detrimento por su pequeñez no implica su inexistencia. Continúa discutiendo ahora la idea aristotélica de que el vuelo de una flecha la caliente, afirmando que es al revés. Critica el papel de las experiencias azarosas e irrepetibles. Luego hace algunos comentarios sobre los sentidos y las cualidades por ellos perceptibles. Enseña cómo los resplandores de objetos luminosos se encuentran en el ojo. Explica que el Sol y la Luna se ven mayores en el horizonte no porque iluminen o inflamen los vapores, sino por su forma esférica y su lejanía. Hablando de nuevo del telescopio, afirma que éste quita el resplandor parásito a los cuerpos luminosos y que su aumento es siempre en igual proporción, lo que muestra con una prueba geométrica. Analiza la comparación del brillo de una vela con el de las estrellas fijas, para así mostrar que éstas no pueden ser más luminosas que el cometa. Posteriormente, afirma que, como una llama debe apuntar hacia afuera de la Tierra y la cola del cometa no lo hace, entonces éste no es una llama. Finalmente, para concluir sus argumentos científicos, Galileo advierte que la materia de que se genera el fenómeno no puede ser la misma que la que forma los vientos, apoyando así otra vez su carácter ilusorio (Galileo, 1981b).

Como vemos, el físico toscano construye una crítica a la teoría cometaria de Grassi - y de Brahe - sin, a la vez, dejar fincada una equivalente. Pese a sus sugerencias de considerar a los cometas fenómenos meteorológicos como enseñaba Aristóteles, se guarda bien de afirmar positivamente que lo sean. Prefiere mostrar lo que no son y, en esto, dejar bien claro que una de las cosas que no son es cuerpos reales, para así hacer inaplicable en ellos el argumento del paralaje, que tan bien había defendido en el caso de la nova de 1604. Por supuesto, la adecuación de la teoría es notoria (Fischer, 1986), y permite apoyar la idea de que sólo fue edificada como parte de una controversia que Galileo quería mantener en contra del sistema de compromiso de Tycho Brahe. A diferencia de la teoría de las mareas, tal vez una idea fija como

lo hemos comentado, el argumento de los cometas pudo ser, muy probablemente, ideado por Galileo con plena conciencia de su falsedad (Geymonat, 1986).

5.3 El manifiesto metodológico de una ciencia nueva

Si *Il Saggiatore* se hubiera limitado a ser la agresiva exposición de argumentos en contra de la teoría cometaria de Grassi, asistida tan sólo por la búsqueda de elementos para desprestigiar al sistema ticónico, no hubiera llegado al curioso concepto en el que se le tiene y más frecuentemente se le cita: el de ser el primer libro que determina los cánones metodológicos de la nueva ciencia.

Es notorio que Galileo nunca escribiera un tratado metodológico al estilo de Descartes (Geymonat, 1986). Esto puede significar, como afirma Fischer (1986), su deseo de construir una ciencia nueva pero su imposibilidad de anteponer a la antigua un esquema filosófico tan amplio como el de ésta. Como quiera que sea, las apreciaciones epistemológicas que aparecen en *Il Saggiatore* bastan y sobran para entender las características primordiales de la ciencia que Galileo proponía. Bien lo resume Revuelta (en Galileo, 1981b) cuando escribe: "Galileo tiene una conciencia metódica del nuevo saber, que es lo que en definitiva hace del libro una obra sobre la ciencia nueva en general" (p.18).

Ahora, esta "conciencia metódica" puede ser entendida de maneras diversas. Es cierto, como podremos notarlo más adelante, que Galileo da pautas fundamentales por las que debe guiarse la actividad científica, y que la distinguirán notoriamente del proceder anterior. Pero debemos ser cautos si queremos de aquí extraer una receta sobre la forma de hacer ciencia. Galileo cambia los aspectos generales, mas no define nunca los particulares de la metodología.

Así, por ejemplo, rechaza del ámbito científico la apelación a la autoridad de los antepasados como argumento para apoyar una teoría dada:

"[...] Me parece, por lo demás, que Sarsi tiene la firme convicción de que para filosofar es necesario apoyarse en la opinión de cualquier célebre autor, de manera que si nuestra mente no se esposara con el razonamiento de otra, debería quedar estéril e infecunda; tal vez piensa que la filosofía es como las novelas, producto de la fantasía de un hombre, como por ejemplo la *Iliada* o

el *Orlando furioso*, donde lo menos importante es que aquello que en ellas se narra sea cierto" (Galileo, 1981b; p.62).

E, inmediatamente después, en el más célebre pasaje de su libro y, tal vez, de su obra toda, expone cuál es el camino a seguir para acceder al conocimiento:

"[...] Sr. Sarsí, las cosas no son así. La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el Universo, pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto" (Galileo, 1981b; p.63).

De modo que no es a la autoridad a la que habrá que seguir en el camino de la ciencia ("filosofía") sino a la razón, y a la razón guiada por una nueva lógica: la matemática.

Se ha querido sacar de este pasaje la prueba del platonismo del pensamiento galileano, el argumento en favor de un iluminismo a ultranza que reduce al Universo a un libro que leer e interpretar. Lo cierto es que puede verse en él una posición mucho más coherente con la creación de una ciencia. Galileo expone bellamente cuál es la lógica que ha de llenar al discurso del nuevo conocimiento. Así como los silogismos invadían los viejos razonamientos, serán la geometría y las proporciones de las que rebosen los nuevos. Pero estas matemáticas permanecerán en lógica, en lenguaje, no serán un fin en sí mismas como quiere el platonismo (Drake, 1986). Bastante prueba de ello, en el pasaje que citamos, es que su aparición se da en contra de la fantasía y en favor del razonamiento adecuado, no en sustitución de los fenómenos (Geymonat, 1986).

El "libro de la Naturaleza", aquel que el dialéctico Galileo contrapone al libro de la autoridad (Geymonat, 1986), estará escrito en "caracteres geométricos", pero su contenido es mucho más amplio y profundo que las simples combinaciones de tales caracteres, tal y como ocurre con las palabras de un libro de poesía. El símil, como vemos, es estupendo. Y Galileo ha declarado un primer punto metodológico que impregnará fundamentalmente a la

física, y a través de ella, con mayor o menor éxito, a la ciencia toda.

En otro famoso párrafo, escribe:

"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 éste o en aquél lugar, en éste o en aquél 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 eliminando 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 aquéllos" (Galileo, 1991-I; p.294).

Hay quien, como Koestler (1986), ve en estas palabras la primera prueba del mecanicismo que caracterizará a la ciencia y, sin duda, hay algo de razón en ello. Esta distinción entre las propiedades de los objetos que dependen de las percepciones del individuo y las que le son ajenas será una de las piedras angulares del proceder científico moderno, pero eso no quiere decir necesariamente que las únicas cualidades válidas de la materia son las segundas, en tanto que las primeras deban despreciarse como vanas y metafísicas. Una afirmación así en el Galileo que, en toda su obra, apela a emociones, gustos y sensaciones para dejar clara su física, que está lejos de subestimar el papel de los sentidos en la adquisición del conocimiento, que, incluso, hace un esfuerzo por dejar claro el alcance de estos últimos, resultaría contradictoria y poco representativa de la riqueza de su pensamiento. Lo que distingue claramente es aquello que puede describir de lo que no (Drake, 1986). Puede hacer mediciones, puede vincularlas con la matemática, puede repetir experimentos; pero no puede cuantificar

ni analizar las sensaciones, las cualidades que son propias y exclusivas de la vida. Lejos de menospreciarlas, las separa por no saber manejarlas y explicarlas. Lejos de pensar que la ciencia y su matemática son suficientes para entenderlas, como quiere el mecanicismo, está conciente de su complejidad y de que, en principio, el lenguaje que ha adoptado no puede dar cuenta de ellas. Por eso la diferenciación entre cualidades que, en general, los filósofos acostumbran confundir (Drake, 1986).

Pero la riqueza de *Il Saggiatore* no para con estas dos o tres célebres y siempre comentadas observaciones. El libro todo está repleto de frases sugestivas que conminan al lector a ignorar a la autoridad en favor de la razón, a dar a la observación el papel de árbitro cuidadoso de los argumentos teóricos, a evitar en el discurso las proposiciones que estén de sobra, a definir con claridad los términos a emplear, a precisar el carácter de los instrumentos de observación y medición como extensiones de los sentidos, a aclarar que lo inexistente es inobservable, en fin, a entender que la nueva ciencia tiene, también, nuevas reglas generales de funcionamiento; lo que no quiere decir, digámoslo de una vez, que posea un método riguroso.

Veamos, como ilustración de lo anterior, las siguientes citas que se explican por sí mismas (todas en Galileo, 1981b; las negritas no se encuentran en el original):

"Juzgar, pues, de la importancia de alguien en filosofía por el número de sus seguidores, lo considero método poco seguro" (p.74).

"Tal vez pretende que para su Maestro cualquier ligera excusa es suficiente, mientras que para mí una más sólida sería inútil; [...]" (p.84).

"Llámanse líneas regulares aquellas que, conocida su única, firme y determinada descripción, se pueden definir y demostrar de ellas sus accidentes y propiedades; [...] Pero las líneas irregulares son aquellas que no teniendo determinación alguna, son infinitas y casuales, y por ello indefinibles; [...] Así, el decir: 'Tal accidente sucede gracias a una línea irregular', es lo mismo que decir: 'No sé por qué sucede'" (p.86).

"[...] si realmente no existiera nada, de nada servirían todos los telescopios del mundo para hacerlos llegar a ver algo" (p.96).

"[...] Sarsí, sin precisar los límites y confines entre la proximidad y la lejanía, ha dividido los objetos en lejanos y próximos, errando de la misma manera que erraría quien dijese: 'las cosas del mundo o son grandes o son pequeñas', [...] de esta indeterminación nace el que las mismas cosas puedan ser consideradas próximas o lejanas, grandes o pequeñas, llamar lejanas a las más próximas y próximas a las más lejanas, a las más pequeñas, grandes y a las más grandes, pequeñas; [...] Debía, pues, para evitar estos equívocos, hacer constar su división de tres términos por lo menos, diciendo: 'de los objetos visibles, unos están próximos, otros lejanos y otros a una distancia media', [...] tampoco aquí debía de haberse detenido, sino que debía haber añadido una precisa determinación en la distancia de ese límite" (p.123)

"Y así, si el mayor o menor aumento no estriba en la materia del telescopio, sino en la figura, de manera que la más larga aumenta más, cuando se conserve la misma materia pero se cambie el intervalo entre lente y lente, será como si se obtuvieran instrumentos diferentes" (p.132).

"[...] no sé si basta para hacer que el cometa sea un semi-planeta y como a tal le convengan las propiedades de los otros planetas, con que Sarsí, su Maestro y otros autores lo hayan querido y nombrado así, pues si su voluntad y su voz son tan potentes como para dar el ser a las cosas queridas y nombradas por ellos, les suplicaría que me hicieran la gracia de querer y nombrar como oro a muchos hierros viejos que tengo por la casa" (p.142).

"Cuando se quiere convencer al adversario, hay que afrontarlo con sus aserciones más favorables y no con las más perjudiciales, de lo contrario, se le deja siempre la posibilidad de la retirada indiferente [...]" (p.211).

"[...] al no haber leído nunca las crónicas sobre la nobleza de las figuras, no sé cuáles de ellas son más nobles que otras, más o menos perfectas; yo creo que todas son antiguas y nobles en un cierto modo, o mejor dicho, que en cuanto a sí mismas, no son ni nobles ni perfectas, ni innobles ni imperfectas; para hacer un muro, creo que las cuadradas son más perfectas que las esféricas, pero para hacer rodar un carro, juzgo más perfectas las redondas que las triangulares" (p.234).

"[...] el decir: 'este cuerpo en la balanza no ha disminuido de peso, luego no se ha consumido parte alguna de él', es un razonamiento bastante falaz, pudiendo suceder que se haya consumido y su peso, no sólo no haya disminuido, sino que incluso alguna vez haya aumentado, lo cual sucederá siempre que aquello que se consume sea menos grave en especie que el medio en el que se pesa; [...]" (p.265).

"[...] en cuanto a la autoridad, tanto vale la de uno solo, como la de cien juntos, para hacer que el efecto sea cierto o no" (p.274).

"No puedo por menos de volver a maravillarme de que Sarsi insista probarme mediante testimonios, lo que en cualquier momento puede ver mediante la experiencia" (p.278).

"[Hablando sobre los experimentos irrepetibles y azarosos] Me esfuerzo excesivamente, pues siempre os quedaría la retirada diciendo que nos faltaba algún requisito necesario" (p.289).

"Por fuerza habréis de responder que sí, pues estas son cosas eternas y experimentables, de modo que no se puede esperar que por medio de los silogismos se dé a entender que la cosa sucedió de otra manera" (p.320).

Como podemos ver, *Il Saggiatore* es más que un libro de polémica donde se defiende una hipótesis científica de poca valía; es una obra con una perspectiva diferente. No son sólo los pasajes famosos sobre cualidades y lenguaje, no son sólo citas como las anteriores, los que lo hacen metodológicamente importante. Es, de manera fundamental, el punto de vista desde el que Galileo lo escribió. *Il Saggiatore* es, tal vez, el primer libro en el que un científico se para totalmente en el nuevo edificio y, desde ahí, hace apreciaciones sobre el viejo. Es una obra con la que un científico moderno alecciona al escolástico, al defensor de la antigua epistemología, sobre los criterios que han de regir a la ciencia. Para el lector de hoy, formado por entero en el esquema posgalileano, pasa inadvertido este espíritu novedoso que permea todo el libro. Le parece una crítica de poco valor teórico con algunos destellos metodológicos brillantes, pero pasa por alto, en su primera aproximación, que Galileo ya está hablando en su idioma y que ataca a Grassi en multitud de puntos donde él también lo haría.

Leer *Il Saggiatore* es un deleite, releerlo sumamente instructivo. Nos enseña cómo Galileo Galilei, innovador epistemológico, fue capaz de enseñar una ciencia con metodologías por completo nuevas y, sin embargo, carente de la unidad y rigor del Método que otros han querido darle. Nos enseña con qué claridad de pensamiento el físico italiano abordó los problemas relativos a la forma general del quehacer científico. Nos muestra, en suma, que el cambio entre la antigua y la nueva concepción del

mundo sólo se dio con un cambio de mentalidad que Galileo, con su excepcional libertad intelectual, consiguió dar.

Il Saggiatore, por todo ello, puede ser considerado como más efectivo y, por ende, más valioso que un tratado sobre el método, porque enuncia las bases para una ciencia nueva al tiempo que renuncia a las cadenas epistemológicas que aquél necesariamente implica.

Capítulo 6. Galileo y las metodologías

Hemos recorrido algunos de los más tortuosos y representativos caminos del pensamiento de Galileo. La riqueza de su proceder no puede, pues, pasarnos desapercibida. No sólo es porque se trate de un científico de capital importancia en la historia de la física por lo que tantas controversias se han originado en torno a su metodología. Esto se debe, en muy importante medida, a la pluralidad extraordinaria de sus métodos y a la clara estatura de su revolución epistemológica. Y es que la afirmación hecha al inicio de este escrito sobre la posibilidad de atribuir al físico toscano casi cualquier actitud en favor del crecimiento de la ciencia, adquiere, ya con la conciencia de sus logros, un mayor significado. Galileo fue todo e hizo de todo: desde la más rigurosa experimentación hasta el análisis cualitativo y poco formal, desde el uso de la matemática como lenguaje y lógica hasta la especulación atrevida, desde la intuición sustentada por la observación repetida hasta la propaganda y la coerción. Galileo fue mecánico y astrónomo, artesano y experimentador, matemático y poeta, polemista, político y teólogo, filósofo y literato, crítico de arte y revolucionario. En su obra, como podemos ya vislumbrar, hallan cabida el empirismo y el racionalismo, el positivismo y el iluminismo, al tiempo que las actitudes pragmáticas y escépticas. Descubrimos en ella, pues, pasajes que pueden interpretarse en favor de casi cualquier metodología.

Entre las discusiones sobre el proceder galileano tenemos, sin embargo, algunas que se han distinguido por su particular vehemencia y, sobre todo, por la enorme importancia, para entender el quehacer científico, de las posiciones que se defienden. Una de ellas la delineamos cuando se trató de los *Discorsi*, y versa sobre la imagen del Galileo experimentador en contraposición con la del Galileo teórico; otra, en principio extensión de la anterior, sobre su posible adhesión a la epistemología aristotélica o a la platónica. De estas cuestiones trataremos en el presente capítulo, con el fin de redondear y completar el esquema metodológico del científico toscano.

6.1 Las matemáticas y la experimentación en Galileo

Tenemos dos imágenes fundamentales. Una, la del Galileo de las experiencias del plano inclinado, empirista y habilísimo artífice del experimento real, otra, la del Galileo que lee "caracteres geométricos" en el "libro del Universo" (Galileo, 1981b; p.63), apriorista y racionalista, para quien la experimentación juega el muy secundario papel de contrastación imprecisa de resultados teóricos. La primera fue, tal vez, la que más perduró en el pensamiento de los sucesores del físico toscano. La ciencia posgalileana, la que cristalizó en la obra de Newton, se caracterizó por la notable evolución de las técnicas experimentales. Desde el cronómetro de agua de Galileo hasta los más sofisticados relojes mecánicos, producto de la ciencia newtoniana; desde la imposibilidad de lograr el vacío hasta el experimento de Michelson y Morley, la técnica avanzó a pasos agigantados. La revolución industrial del siglo XIX tuvo, con mucho, su génesis en el desarrollo técnico basado e inspirado por la empresa científica. No es de extrañar, pues, que en este marco se viese a Galileo como el impulsor del "método experimental". Aquí surgió una imagen que, aun ahora, aparece en muchos textos de difusión: Galileo fue un científico que, basándose en el experimento, logró revolucionar a la ciencia. Es el Galileo sobre el que creció el mito de las experiencias de la Torre de Pisa (Koyré, 1985), y sobre el que se inspiró la figura del astrónomo probando con su telescopio la validez del sistema de Copérnico.

La crítica de Alexandre Koyré, de la que ya hemos hablado en varias ocasiones, tuvo el enorme mérito de hacer notar, para la segunda mitad de este siglo, que el concepto de un Galileo empirista era una exageración. No es concebible que una revolución científica de la talla de la galileana se hubiese originado de "contemplar cómo rodaban las bolas" (Thuillier, 1989; p.589).

Koyré, sin embargo, se pasó de largo. Sus cuestionamientos, apoyados, como hemos dicho, en profundos estudios de los antecesores y el contexto de la obra de Galileo, fomentó la imagen racionalista del científico, al grado de tomarlo por un apriorista que deducía todo del lenguaje matemático, de definirlo por, como

veremos pronto, un platónico. También resaltamos la importancia que trabajos como los de Drake (1973), MacLachlan (1973) y Naylor (1976) tuvieron en la revaloración de la experimentación galileana.

Con todo esto, ¿qué podemos decir ahora sobre el papel que el experimento jugó en la ciencia de Galileo, en comparación con el que tuvo el razonamiento a priori, generalmente matemático?

En primer punto, y esto es un hecho que conocemos, curiosamente y en gran medida, gracias a Koyré (1985, 1988), sea cual fuere la posición que la experimentación tuvo en la física galileana, ésta se presentó como radicalmente diferente de la usual en la antigua ciencia. El experimento moderno, sea real, imaginario o mental (en la clasificación de MacLachlan (1973) que mencionamos en el apartado 4.6) es distinto por completo de la cualitativa y, hasta cierto punto, azarosa observación de los fenómenos que practicaban los griegos y escolásticos medievales (Alvarez & Marquina, 1993a; Geymonat, 1986). En este contexto, podemos claramente hacer de Galileo un renovador del papel de la observación y la experiencia en la empresa científica y, hasta cierto punto, un "padre de la experimentación moderna", al haber sentado bases fundamentales para el comportamiento de ésta: el experimento debe ser repetible y repetido, los resultados prácticos y teóricos contrastados, las imperfecciones de la materia consideradas y reducidas al mínimo posible, etc. Sin embargo, y el análisis que hicimos de sus famosos experimentos de los *Discorsi* (apartado 4.6) no deja duda sobre ello, cuándo ha de recurrirse a esta experimentación, cómo han de interpretarse sus resultados, en qué momento habrá que ignorarla o, incluso, imaginarla, son puntos que Galileo nunca deja en claro. De manera que nos enseña ciertos requisitos que, en la ciencia moderna, ha de cumplir el experimento, pero elude o, tal vez, no logra definir, de qué forma éste ha de entrar en juego con el resto del quehacer científico. Galileo no consigue - o no quiere -, entonces, determinar la naturaleza de un "método experimental" como nosotros lo entendemos (Alvarez & Marquina, 1993a; Geymonat, 1986).

En segundo lugar, uno de los requisitos principales de la experimentación galileana es el lenguaje con el que la Naturaleza ha de ser interrogada y sus respuestas interpretadas. En esto difiere también de la simple experiencia de la ciencia aristotélica, que se limitaba a la observación directa de la realidad (Alvarez & Marquina, 1993a; Koyré, 1988). El experimento de la nueva física presupone un razonamiento cuidadoso, construido por lo general con el lenguaje matemático, para determinar qué es lo que se necesita investigar y cómo comprender lo que resulta. Esto puede tener su base en la estructura que, como hemos comentado, Galileo presupone para su ciencia formal: esa orientación axiomática (Fischer, 1986) que, partiendo de supuestos cuya base puede ser teórica o empírica, pero que, siempre, son escritos en el lenguaje adoptado, se construye en buena parte con la deducción al interior del mismo para, de acuerdo con las circunstancias, contrastarla empíricamente o no. La necesidad de corroboración de las conclusiones en la realidad es, sin embargo, imperiosa en esta edificación axiomática de la ciencia galileana (Fischer, 1986) al grado de que, como vimos en muchos pasajes de su obra - desde la justificación del telescopio hasta el experimento de los péndulos isócronos -, cuando carece de ella presume siempre que la tiene. Notemos, sin embargo, y esto es fundamental, que cuando no cuenta con la prueba empírica y está convencido de su punto teórico, Galileo no se detiene y da por hecho éste último, ya sea empleando la propaganda o, simplemente, tomándolo como postulado sin demostración.

Pero esto último deja la impresión, al lector moderno, de una postura predominantemente racionalista. En muchas partes de su obra, y Koyré (1985, 1988) ha sacado gran partido de ello, maneja a la experiencia de una manera que nos parece exagerada o poco formal, dando oportunidad a pensar que su prioridad era la construcción matemática, que sólo permite un razonamiento apriorista.

Es absolutamente cierto que Galileo, en efecto, dio a la matemática un papel en el discurso científico muy importante y novedoso. La convirtió, como hemos dicho ya varias veces, en el

lenguaje para escribir la física y en la lógica para razonar en ella. Esto la hace uno de los elementos más notorios de la ciencia galileana, más, desde luego, que el experimento, del cual sólo tenemos las descripciones, exageradas o no, que Galileo nos dejó. Mientras el razonamiento matemático, tan evidente y riguroso en los *Discorsi*, lo tenemos ahí, a la manera en la que su autor lo concibió, los procedimientos experimentales se pierden en las dudas sobre su validez. De la pura obra escrita de Galileo es más coherente deducir, en primera instancia, el carácter apriorista de su método. Por eso fue importante la renovación encabezada por Drake (1973) de la imagen del físico experimentador.

Con el panorama así completado, nos encontramos a un Galileo que, extremadamente flexible, se adhirió sin embargo a un esquema lógico (la matemática) y a un requerimiento fundamental (la contrastación empírica). Sus fluctuaciones entre ambos elementos halla su causa en la falta de esclarecimiento, propia de la obra galileana, de la relación entre razón y experiencia (Alvarez & Marquina, 1993a; Geymonat, 1986).

Es precisamente esta indefinición la que permitió que la discusión sobre racionalismo o empirismo en el proceder de Galileo se llevase al terreno de la disputa filosófica, para tomar parte en el secular enfrentamiento entre las escuelas de Platón y Aristóteles (Alvarez & Marquina, 1993a; Koyré, 1988).

6.2 Galileo, Platón y Aristóteles

El Medievo europeo había rescatado las doctrinas de Aristóteles, gracias al atesoramiento que lo árabes habían hecho de las obras helénicas durante los siglos de barbarie en Europa. El completísimo edificio aristotélico había subyugado a los estudiosos desde el nacimiento de las primeras universidades. La "cristianización" del aristotelismo, iniciada por Avicena y brillantemente concluida por Santo Tomás, habían hecho de él la base de la visión científico-filosófico-religiosa que impregnó el saber de los escolásticos contra los que la Revolución Copernicana hubo de contender. Por su parte, las doctrinas de Platón, durante la Edad Media mal difundidas y peor enseñadas, empezaban a tener gran auge a principios del Renacimiento (Koyré, 1985). No es de

extrañar que, dada esta situación, pensadores como Copérnico, Bruno, Kepler y Galileo se valiesen de ese neoplatonismo para hacer frente a la bien fincada escolástica (Alvarez & Marquina, 1993a). Y es que el platonismo, como doctrina filosófica, tenía muchas características que se contraponían con la escuela de Aristóteles.

En particular, y lo que más nos interesa en el terreno que nos ocupa, se encuentra la diferente relación que cada una de estas doctrinas afirma entre la razón y el mundo sensible. En tanto que el aristotelismo concebía que el conocimiento del Cosmos venía dado por la percepción directa de los sentidos, a la que se aplicaba luego un análisis racional sentado en la lógica, el platonismo preconizaba a la razón como único medio para llegar al saber, considerando a la experiencia sensible el camino para acceder a un mundo cambiante e imperfecto, vago reflejo del inmutable que sólo la razón conocía.

En este contexto, el platonismo, apoyado por la doctrina pitagórica, ensalzó al conocimiento matemático como la mejor acabada y más adecuada forma del razonamiento, contraponiéndose de este modo al rechazo aristotélico, que la veía como simple juego de geometrías (Alvarez & Marquina, 1993a; Koyré, 1985, 1988). Así, la matemática se estableció en la filosofía de Platón como el noble fin al que tendía la razón. Las connotaciones místicas de esta posición se hacen diáfanas en las enseñanzas de Pitágoras, y son retomadas por el neoplatonismo renacentista como puede verse en las obras de Bruno y Kepler (Alvarez & Marquina, 1993a; Koyré, 1988). Cabría pensar, entonces, que lo mismo pasaría con Galileo. Citemos otra vez, por ejemplo, el siguiente pasaje (apartado 4.2):

"SALVIATI: [...] no sé si podré, sin caer en el riesgo de ser arrogante, decir que recurrir a las imperfecciones de la materia, capaces de contaminar las purísimas matemáticas, tampoco es suficiente para explicar la desobediencia de las máquinas, en la realidad, a las leyes abstractas e ideales de la mecánica" (Galileo, 1981a; p.69; las negritas no se encuentran en el original).

A diferencia de las doctrinas aristotélicas, serán las "imperfecciones de la materia" las que "contaminen" al lenguaje, y no éste el que se quede corto. El uso del adjetivo "purísimas" y

el hablar de "contaminación" sugieren una cierta mística en la misión que Galileo da a la matemática. Además, a lo largo de su obra, abundan pasajes que podrían interpretarse de igual manera. No olvidemos su célebre párrafo de *Il Saggiatore* sobre el "libro del Universo" (Galileo, 1981b), o bien sus abiertas manifestaciones en favor del platonismo en el *Diálogo* (Galileo, 1967) y los *Discorsi* (Galileo, 1981a). Recordemos su constante apelación a la anamnesis, de clara inspiración platónica, y su recurrencia a experimentos mentales y a la idealización, con el fin de manejar los conceptos en el exacto mundo de las ideas.

No obstante, Galileo se encuentra muy lejos del misticismo platónico (Geymonat, 1986), Las matemáticas podían ser "purísimas" para el físico italiano, pero jamás sagradas. El neoplatonismo le permitió adoptar un matematicismo y romper con el pensamiento aristotélico, pero sin caer en la mística y la numerología (Alvarez & Marquina, 1993a). En el mejor de los casos, como lo explica Koyré (1988), Galileo se habría adherido a una variante del platonismo que él llama "platonismo de los matemáticos" (p.202), diferente del neoplatonismo mágico-místico, y que no es otra cosa que mero matematicismo. Sin embargo, el interés galileano por la matemática no fue, tampoco, el de un matemático. Prueba de ello es que jamás considera a la matemática pura, ni la cultiva ni la lee (Cohen, 1985; Geymonat, 1986). Su matemática no es tan parecida a la de Platón como a la de los calculistas y agrimensores (Alvarez & Marquina, 1993a). Esto nos conduce a la misma conclusión que el apartado anterior: la matemática en Galileo es una herramienta, un auxiliar de la lógica (Geymonat, 1986).

¿Por esto daremos por descontada la filiación platónica de la ciencia galileana? Desde luego que no. La influencia de Platón es nodal en su obra, como él mismo acepta y por algunos métodos que usa (idealización, reminiscencia).

No obstante, también se une a la epistemología aristotélica. Galileo está muy lejos de ignorar, como ya lo hemos dicho, el papel de la experiencia. Tan importante es en él que, de manera fundamental, busca revalorar a la observación y darle una posición

importante en la nueva física. Su recurso a la experimentación como forma renovada de experiencia nos indica que, al menos en principio, Galileo puede ser también considerado un aristotélico. Además, hay elementos principales de su ciencia que muestran su apego a conceptos peripatéticos, como su noción de pesantez, incapaz de abstraerse del aristotélico centro del mundo, o bien su fijación por los movimientos celestes circulares o, incluso, su negación del instrumentalismo en astronomía y del uso de la matemática para "salvar" fenómenos (Alvarez & Marquina, 1993a).

Hay multitud de aspectos de la obra galileana que pueden tomarse a favor de una tendencia platónica, otros muchos en pro de una aristotélica. Hay también puntos que son prácticamente incontrovertibles. Entre ellos ya mencionamos los papeles fundamentales que, tanto la matemática como la experimentación, jugaron en la empresa científica de Galileo. Otro elemento de suma importancia será esa transición que Osler (1973) resalta, en la obra del físico italiano, de una epistemología esencialista, que preconiza la posibilidad de que las naturalezas internas (esencias) de los objetos sean cognoscibles, a una no esencialista, que defiende lo contrario. Como, dentro de esta clasificación, Platón caería en el no esencialismo y Aristóteles en el esencialismo (Osler, 1973), hay quien quiere ver en ello la evolución de Galileo de la metodología aristotélica a la platónica.

Pero decir esto es mucho decir. Lo más sensato, como declara Shea (1970), sería aceptar que Galileo ni elaboró - cuando menos concientemente - ni siguió filosofía alguna. La gran riqueza y pluralidad de sus métodos puede, por esto mismo, justificar su filiación tanto platónica como aristotélica o bien, como acertadamente concluyen Alvarez & Marquina (1993a), mostrar que no es la controversia Platón-Aristóteles la idónea para darle cabida.

Como quiera que sea, la polémica en torno a un Galileo platónico o uno aristotélico pierde ciertamente su significado, cuando hallamos en su obra un espíritu del todo nuevo y una renuncia a vincularse con filosofías particulares previas (Alvarez & Marquina, 1993a).

6.3 Galileo Galilei, el padre de una ciencia rica en métodos (conclusión)

Hemos recorrido y analizado los caminos más representativos de la obra galileana. Nos hemos encontrado con multitud de posibilidades al interior de su epistemología. No es de extrañar, como hemos dicho, que su ciencia pueda ser vista desde casi cualquier metodología y usada para apoyar a prácticamente todas. Por otro lado, hemos hallado algunos aspectos de gran importancia, que permiten clasificar los procedimientos empleados por el gran físico en dos grupos generales, que podríamos llamar el formal y el propagandístico.

En el primero cabría casi toda su mecánica, en el segundo su astronomía; en el primero su física matemática, rigurosa, con apelaciones perfectamente construidas a la experimentación (ya fuera real, pensada o imaginaria (Naylor, 1976)); en el segundo sus afirmaciones atrevidas, sus especulaciones, sus teorías *ad hoc*, la anamnesis, la sobresimplificación y la dialéctica.

Pero la clasificación no puede ser, ni con mucho, rígida. Por ejemplo, en el terreno formal entraría la observación escrupulosa con el telescopio (Galileo, 1988a), en el propagandístico, muchos experimentos simplificados de los *Discorsi* (Galileo, 1981a). En la mecánica abundan puntos en los que recurrió a trucos psicológicos, en tanto que en astronomía aparecen joyas de rigor que sentaron bases para la ciencia ulterior.

Todo lo que hemos comentado a lo largo de este escrito parece apuntar en una dirección: no puede ser válido buscar una única metodología que englobe a la obra de Galileo. El físico italiano fue, decididamente, un revolucionario y un innovador. Para lograr sus objetivos lo que menos lo detuvo fue el deseo de establecer o ligarse a un método. Precisamente gracias a ello es que su ciencia progresó tanto. El carácter iluminista de muchas de sus declaraciones deja ver su fe en el triunfo de la razón y, por ende, de la ciencia. Para lograr este triunfo se requería de una enorme flexibilidad metodológica, y el gran mérito de Galileo fue el estar conciente de ello.

Por otro lado, el complicado factor humano, que quedó por completo fuera de los alcances de nuestro estudio, enriquece aun más el panorama. Ante todo, Galileo fue un Hombre. Muchas de sus características personales, como su gusto por la polémica, permearon su obra. Sus aficiones, debilidades y ambiciones le permitieron llevar adelante, por caminos en extremo accidentados, una empresa científica de la que somos herederos. Su choque con la Iglesia Católica, del que ésta nunca se recuperó, estuvo marcado por su conflictiva y contradictoria personalidad (Koestler, 1986).

La ciencia galileana fue una victoria que permitió a Newton construir sobre terreno desbrozado. Y este triunfo dependió, en muy buena parte, de la elasticidad epistemológica de Galileo. Una de las mejores pruebas de esa flexibilidad es que Feyerabend (1989) la usa como uno de los argumentos más convincentes para defender la inexistencia del "método científico". En efecto, siempre es posible hallar multitud de puntos en los que Galileo se aparta de un método particular. No hay una estructura que englobe a todos los procedimientos de su ciencia, a no ser que se rija por el principio de que "todo vale" (Feyerabend, 1989). Pero aun ésta no es adecuada si atendemos al hecho de que, para Galileo, hay cosas que "no valen" - como la apelación a las causas ocultas. En fin, tal vez el problema se encuentre en buscar una clasificación metodológica dentro de una ciencia cuya pluralidad, paradójicamente, le permite una unidad impresionante; unidad encaminada al único fin de hacer progresar el conocimiento.

Desde luego que nuestro estudio no pudo ser sino parcial. No hemos abarcado el desarrollo del pensamiento galileano desde sus primeras obras hasta su madurez, lo que podría darnos más luz sobre la evolución de sus métodos. Tampoco hemos profundizado en el estado de la ciencia de su época, para lo que Koyré (1985, 1988) es un excepcional guía. Nos faltaron de analizar muchos textos de sus comentaristas. Ignoramos factores de suma importancia pero difícil estudio, como la influencia que sus apreciaciones estéticas pudieron tener en su física - no debemos olvidar, por ejemplo, su gusto por el austero Ariosto y su repudio por el barroco Tasso (Koyré, 1985). Evadimos el espinoso problema,

muy revelador también, de su juicio por la Inquisición en 1632. No tocamos siquiera la influencia que su obra tuvo en las teorías epistemológicas construidas en los siglos posteriores. Evitamos, en fin, las posibilidades de generalización de los métodos galileanos al proceder de la ciencia toda. Como vemos, el tema es de una amplitud y alcances extraordinarios, y este escrito no es sino una introducción a algunos rasgos importantes.

Para abordar cualquiera de los asuntos anteriores lo recomendable, sin duda, será hacerlo por la lectura de las principales obras galileanas. Es un hecho sumamente interesante y aleccionador el que los libros en los que se plasmó la física de Galileo sean de tan agradable lectura. Su estilo literario nos ha entregado textos en los que la ciencia más rigurosa no entra en conflicto con la prosa bien construida y amena. Leer a Galileo es un placer y es infinitamente preferible que, quien desee introducirse en su obra, lo haga a través de ella misma y no por las referencias de sus comentaristas.

Hay, también, estudiosos como Fischer (1986), Drake (1986), Geymonat (1986), Koestler (1986) y Koyré (1985, 1988) que aportan visiones frescas y, no hay que olvidarlo, muy comprometidas de la obra galileana. Leerlos y contrastarlos es el segundo paso para abordar estos temas. Así se pueden obtener muchas posibles visiones sobre la epistemología del gran científico italiano. Decidir entre ellas o contra ellas dependerá, en gran medida, de las inclinaciones metodológicas de quien las interprete.

Pero, sea cual fuere el resultado de esta elección - no pretendemos que la esbozada a lo largo de este trabajo sea más que otra de tantas plausibles -, lo cierto es que la obra de Galileo Galilei muestra una riqueza, tanto conceptual como epistemológica, suficiente para mantenerlo en el lugar de uno de los más completos y excepcionales científicos de todos los tiempos. Las innumerables facetas de su física y la maravillosa complejidad y creatividad de su pensamiento fueron las necesarias para cristalizar la revolución iniciada por Copérnico, y que sólo culminó con la gran síntesis newtoniana.

El mejor resultado que este trabajo puede obtener sería, entonces, llamar la atención sobre algunos elementos importantes para comprender y valorar la gran obra galileana, que, indudablemente, merece ser comprendida y valorada desde todos los ángulos posibles.

Bibliografía

- Alvarez, J.L. & J.E. Marquina (1993a) "Galileo Galilei: ¿Platónico o Aristotélico? ¿Realmente hizo experimentos?", Contactos, v.8, p.7-21
- Alvarez, J.L. & J.E. Marquina (1993b) "Galileo y la ciencia Medieval", Contactos, v.9, p.7-22
- Cohen, B.I. (1985) Revolution in Science, USA: Harvard University Press
- Drake, S. (1973) "Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts", Isis, v.64, n.223, p.291-305
- Drake, S. (1975) "New Light on a Galilean Claim about Pendulums", Isis, v.66, n.231, p.92-95
- Drake, S. (1986) Galileo, España: Alianza
- Feyerabend, P.K. (1989) Contra el Método, España: Ariel
- Fischer, K. (1983) Galileo Galilei, España: Herder
- Galilei, G. (1967) Dialogue concerning the Two Chief World Systems - Ptolemaic & Copernican, USA: University of California Press
- Galilei, G. (1981a) Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Nuevas Ciencias, España: Editora Nacional
- Galilei, G. (1981b) El Ensayador, Argentina: Aguilar
- Galilei, G. (1988a) "El Mensajero Sideral" en Galileo G. & J. Kepler, El Mensaje y el Mensajero Sideral, México: Alianza
- Galilei, G. (1988b) "Consideraciones sobre la Opinión Copernicana" en Copérnico N., T. Digges & Galilei, G., Opúsculos sobre el Movimiento de la Tierra, México: Alianza
- Galilei, G. (1989a) "Letter to the Grand Duchess Christina" en Finocchiaro, M.A., The Galileo Affair. A Documentary History, USA: The University of California Press
- Galilei, G. (1989b) "Discourse on the Tides (Letter to Cardinal Orsini)" en Finocchiaro, M.A., The Galileo Affair. A Documentary History, USA: The University of California Press
- Geymonat, L. (1986) Galileo Galilei, España: Nexos
- Hall, A.R. (1981) From Galileo to Newton, USA: Dover Publications, Inc.

- Koestler, A. (1986) Los Sonámbulos Vol.II, España: Salvat
- Koestler, A. (1989) Los Sonámbulos Vol.I, España: Salvat
- Koyré, A. (1985) Estudios de Historia del Pensamiento Científico, México: Siglo XXI
- Koyré, A. (1988) Estudios Galileanos, México: Siglo XXI
- Kuhn, T.S. (1978) La Revolución Copernicana, España: Ariel
- Lobo, F. (1989) "Galileo y los Efectos del Tamaño", Ciencia Hoy, v.1, n.5, p.45-55
- MacLachlan, J. (1973) "A Test of an 'Imaginary' Experiment of Galileo's", Isis, v.54, n.223, p.374-379
- Naylor, R. (1976) "Galileo: Real Experiment and Didactic Demonstration", Isis, v.67, n.240, p.398-419
- Osler, M. (1973) "Galileo, Motion and Essences", Isis, v.64, n.224, p.504-509
- Shea, W.R. (1970) "Galileo, Scheiner and the Interpretation of Sunspots", Isis, v.61, n.209, p.498-519
- Thuillier, P. (1983) "Galileo y la Experimentación", Mundo Científico, v.3, n.26, p.584-597