

Alejandro Mayorga

## Demostración geométrica y explicación en Galileo A propósito de las cartas de 1612 sobre las manchas solares

---

**Summary:** *In 1613 three long letters, in which Galileo analyzed the problem of the solar spots, were published by Federico Cesi. In his attempt of finding a coherent explanation for this phenomenon, Galileo brought out an hypothesis based upon two postulates: the contiguity of the spots to the solar surface and the solar rotation. These suppositions required both a geometrical demonstration -which conferred them logical necessity-, and to be endowed with empirical content. Since Copernicanism failed in providing a theory of the forces needed to give account of the planetary array and terrestrial movement, Galileo was forced to use the argument by analogy with terrestrial phenomena. The extension of terrestrial phenomena to the celestial domain was justified in the Galilean thought by the principle of homogeneity. These components, geometrical demonstration and physical interpretation -i.e. terrestrial-, are necessary for the Galilean explanation. This paper aims to give a description of the way by which Galileo fused them in an explanatory argument for the solar spots.*

**Resumen:** *En 1613, Federico Cesi publicó tres extensas cartas en las cuales Galileo discutía el problema de las manchas solares. En su intento de hallar una explicación coherente del fenómeno, Galileo postuló una hipótesis basada en dos supuestos básicos: la contigüidad de las manchas a la superficie solar y la rotación del Sol. Dichos supuestos requerían de una demostración geométrica que les confiriera necesidad lógica y de ser dotados de contenido empírico. Como el copernicanismo carecía de una teoría de las fuerzas requeridas para explicar el arreglo planetario y el movimiento*

*terrestre, Galileo se vio obligado a recurrir al argumento por analogía con los fenómenos terrestres. En el pensamiento galileano esta extensión de los fenómenos terrestres al cosmos se justifica por el principio de homogeneidad. Estos dos componentes, demostración geométrica e interpretación física, es decir terrestre, son fundamentales para la explicación galileana. El presente trabajo intenta describir la manera en que Galileo articuló esos componentes en un argumento explicativo para el fenómeno de las manchas solares.*

En 1611 el teólogo jesuita *Cristopher Scheiner* de la Universidad de Ingolstadt (Alemania) envió tres cartas a *Mark Welser* (Augsburg) informándole acerca de su descubrimiento de manchas en el cuerpo solar. Esto suscitó una dura controversia entre Scheiner y *Galileo Galilei* por la paternidad del descubrimiento y por la explicación del fenómeno.

En el verano de 1611 *Johannes Fabricius* de Wittenberg había observado manchas similares. Fabricius es el primero en publicar acerca de las manchas, en su obra *Phrysi de maculis in Sole observatis ...*, en el mes de junio de 1611. Sin embargo, la primera mención de Scheiner data del 21 de octubre de 1611 y la primera referencia escrita de Galileo tiene como fecha 1 de octubre del mismo año.

Tanto Scheiner como Galileo parecían desconocer la mención hecha por Fabricius, aunque parece posible que Galileo conociera la existencia de las manchas en forma independiente de Scheiner y de Fabricius. Scheiner resintió que Galileo se quisiera endosar la prioridad del descubrimiento, expresada

por este en el prefacio de la edición romana de las cartas galileanas. Al respecto, Drake considera que el rencor surgido a raíz de este debate habría de tener serias consecuencias para Galileo años después en su enfrentamiento con la Inquisición.<sup>1</sup>

En junio de 1612 Welser editó las cartas de Scheiner bajo el título *Tres epistolae de maculis solaribus* y envió copias a los miembros de la *Accademia del Lincei*, en particular a Galileo. El 6 de enero de 1612 Welser escribió a Galileo: "En relación con estas manchas, hágame el favor de decirme francamente su opinión; si usted juzga que están hechas de materia celeste, o si no dónde cree que están situadas y cuál es su movimiento".<sup>2</sup>

Scheiner estaba imposibilitado de usar su nombre verdadero, por lo que firmaba sus cartas con el seudónimo de «*Apelles latens post tabulam*», pero Galileo lo identificó como jesuita y lo censuró en dos cartas que envió a Welser en 1612.

En el verano de 1612 Scheiner publicó una versión ampliada del tema bajo el título *De maculis solaribus et stellis circa Jovem errantibus accuratior disquisitio*, lo cual dio oportunidad para que Galileo escribiera una tercera carta. El 22 de marzo de 1613 *Federico Cesi* publicó las cartas galileanas en Roma, con el título *Istoria e dimostrazione intorno alle macchie solari e loro accidenti*. Además de lo novedoso de los métodos usados en las demostraciones sobre la contigüidad de las manchas a la superficie solar y de una de sus primeras exposiciones del principio de inercia, en estas cartas Galileo hizo patente por vez primera su adhesión a la astronomía copernicana.

## I. Las cartas de Scheiner

La primera carta de Scheiner data del 12 de noviembre de 1611. En ella afirmó haber observado, siete meses antes, manchas en el Sol, aunque en esa ocasión no les confirió ninguna importancia sino hasta que las observó en el mes de octubre de ese mismo año. Consciente de la importancia del descubrimiento, procedió a examinar tres supuestos sobre la naturaleza de las manchas:

- 1) primero supuso que se debían a un defecto de la vista, pero lo rechazó pues varios observadores las habían registrado en forma independiente,
- 2) luego supuso que se debían a una falla en las lentes del telescopio, supuesto que descartó

pues se habían observado con diferentes telescopios, y

- 3) por último, supuso que se debían a alguna perturbación de la atmósfera. Este supuesto lo descartó por varias razones: i) dado el pequeño diámetro visual del disco solar ninguna nube o vapor podía seguir el movimiento diurno del astro desde la salida hasta la puesta; ii) las manchas no mostraban desplazamiento paraláctico, por lo que debía situarlas más allá de la esfera lunar, en la región denominada por *Aristóteles supralunar*; iii) el movimiento de las manchas sobre el disco solar era constante; y iv) se podían observar a través de nubes tenues.

Así, Scheiner se vio conducido a concluir que las manchas se ubicaban "en el sol o fuera del sol, en alguna región celestial" y planteo su hipótesis: "... no pienso que sean manchas, sino más bien cuerpos que eclipsan parcialmente al sol; es decir, estrellas o bien situadas entre el sol y nosotros o bien girando alrededor del sol".<sup>3</sup>

De acuerdo con Scheiner el descubrimiento de las manchas permitía resolver dos de los principales problemas de la astronomía: la posición de Venus y de Mercurio, y el tamaño relativo del Sol. En su segunda carta, al no observar Venus como una mancha excepcional sobre la superficie solar (lo cual debía suceder según el pronóstico de la conjunción de Venus y el Sol, durante un lapso de cuarenta horas, el 11 de diciembre de 1611, y que debía producirse, según Scheiner, si Venus estaba entre el Sol y la Tierra, tal y como lo enseñaba la astronomía tradicional), Scheiner procede a considerar cuatro explicaciones posibles: i) las observaciones eran imprecisas; ii) los cálculos que fijaban la conjunción eran imprecisos; iii) Venus brillaba con luz propia; y iv) Venus no giraba alrededor de la Tierra sino alrededor del Sol. Scheiner descarta las tres primeras pues entraban en contradicción con lo cuidadoso de las observaciones, la precisión de los cálculos y "los experimentos, los argumentos y la doctrina común de todos los matemáticos".<sup>4</sup> Así, Venus debía girar alrededor del Sol.

En la tercera carta, Scheiner expresó que, salvando al Sol de cualquier índice de corruptibilidad, era posible "liberar al sol de la ofensa de las manchas", puesto que si las manchas estaban sobre la superficie solar debían aparecer en la misma posición cada 15 días. Sin embargo, al observar las manchas durante dos meses se percató que eso no ocurría, por lo que concluyó que las manchas

no estaban sobre la superficie solar. En este resultado se hace patente que Scheiner aceptaba el postulado acerca de la incorruptibilidad de los cielos, principio fundamental de la cosmología aristotélica: no considera la posibilidad de que las manchas no fueran permanentes, variando en forma y tamaño. Pero esto suponía admitir cambios reales en los cielos y no solo una reorganización de sus partes. Scheiner estaba obligado a ubicarlas en el Sol, pues las manchas no presentaban paralaje, pero "situar manchas en el Sol habría significado admitir un cambio radical en el cosmos aristotélico; ver estrellas nuevas solo implicaba afirmar que siempre habían estado allí, aunque sin ser vistas".<sup>5</sup>

Las explicaciones que Scheiner dio acerca de que Venus podía eclipsar al Sol y los obstáculos que se le van presentando, hicieron que llegara a comprender que su teoría estaba seriamente resquebrajada y, siguiendo a *Cristopher Clavius* del *Colegio Romano*, propuso la necesidad de un nuevo sistema cósmico que superara las deficiencias del sistema astronómico tradicional: "Aún se duda si las manchas están en el sol o lejos de él; si se pueden considerar nubes o no. Pero una cosa parece muy segura: no se pueden mantener ya las enseñanzas corrientes de los astrónomos acerca de la solidez y la constitución de los cielos, especialmente en las regiones del sol y de Júpiter"<sup>6</sup>. Scheiner no estaba pensando en *Copérnico* sino en *Tycho Brahe*, cuyo sistema era equivalente matemáticamente al copernicano, por lo que los nuevos hechos, que no podían ser asimilados por el aparato cosmológico y astronómico tradicional basado en los principios de incorruptibilidad e inmutabilidad de los cuerpos celestes, se explicaban en una manera satisfactoria dentro del sistema propuesto por Tycho.<sup>7</sup>

## II. Las cartas galileanas

El 4 de mayo de 1612 Galileo respondió a Welser con una extensa carta en la que expresó la dificultad del asunto por considerar: "La dificultad de esta materia, combinada con mi incapacidad de realizar muchas observaciones regulares, ha mantenido (y mantiene todavía) mi juicio en suspenso".<sup>7</sup>

Es conveniente resaltar el tono cauteloso con el que Galileo abre el tema: "... realmente, yo debo ser más cauto y prudente que la mayor parte de la gente al pronunciarme sobre cualquier cosa nueva.

Como su Excelencia conoce bien, ciertos descubrimientos recientes, que se apartan de las opiniones comunes y populares, han sido negados e impugnados ruidosamente, obligándome a mantener en silencio toda idea nueva hasta que posea más para probarla".<sup>8</sup> Galileo se refiere a los descubrimientos realizados durante 1609-1610 que aparecieron publicados en su obra *Sidereus Nuncius* (1610) y que generaron una seria polémica tanto en los medios académicos como religiosos acerca de la confiabilidad de la observación telescópica. Galileo utilizaba estas observaciones para hacer entrar en contradicción los postulados de inmutabilidad e incorruptibilidad del cosmos. Por esta razón Galileo intentó exponer no lo que las manchas fueran en realidad sino refutar lo que consideró falso en las cartas de Scheiner.

En primer lugar, Galileo concuerda con Scheiner en cuanto a la realidad de las manchas, por lo que argumenta que no son meras apariencias o ilusiones de la vista o producidas por las lentes, y aduce haberlas observado anteriormente: "Yo las he observado durante unos ocho meses, habiéndoselas mostrado a varios amigos míos ... muchos clérigos y hombres honorables de Roma las han observado ahí".<sup>9</sup> Afirma, además, que las manchas no son estacionarias sino que parecen moverse regularmente en relación con el Sol. Sin embargo, está en desacuerdo con la dirección del movimiento propuesta por Scheiner: "... este movimiento es en la dirección opuesta a la que dice Apelles, es decir, estas se mueven de oeste a este, inclinándose de sur a norte y no de este a oeste y de norte a sur".<sup>10</sup> Esta observación es importante porque es la que va a permitir a Galileo postular su hipótesis acerca de la contigüidad de las manchas a la superficie solar, ya que esta supone que las manchas siguen al cuerpo solar en su movimiento de rotación.

Scheiner intentó determinar la posición de las manchas mostrando que no eran fenómenos atmosféricos ni se encontraban sobre la superficie solar, por lo que apeló a la ausencia de paralaje presentados por estas. Pero Galileo sostenía que aún no se había mostrado de manera concluyente que las manchas no se encontraban sobre la superficie solar: "... pues no se prueba nada con decir ... que es increíble que existan manchas oscuras en el Sol simplemente debido a que el Sol es el más lúcido de los cuerpos." y opuso que "los nombres y atributos deben acomodarse a la esencia de las cosas, ya que las cosas vienen primero

y los nombres después”<sup>11</sup>. Se refleja aquí el ataque de Galileo a la cosmología tradicional, para la cual el Sol era un cuerpo puro y lúcido, sin impurezas ni manchas. Si lo que debe anteponerse a todo juicio es lo que nos atestigua el sentido de la vista - Galileo recurre a Aristóteles para resaltar la primacía de la observación-, entonces ahora que el Sol se presenta ante las lentes del telescopio como parcialmente impuro y manchado, debería llamarse “manchado y no puro”. Galileo va más allá de la simple descripción de lo observado, al interpretar lo observado apelando a su firme convicción de un universo homogéneo donde no vale la distinción entre lo sublunar y lo supralunar. Así, interpreta las manchas solares basándose en una analogía con las nubes terrestres: para que las manchas solares produzcan la oscuridad y opacidad requeridas solo es necesario suponer su densidad y opacidad similares a la de una nube terrestre.

Scheiner había supuesto que las manchas eran permanentes, y pensó que si estaban sobre la superficie solar debían moverse debido a la rotación del Sol, regresando cada mes: “Siempre he considerado inconveniente situar manchas más oscuras que cualquiera vista en la luna (con la excepción de alguna pequeña) en el cuerpo brillante del sol. No es plausible, porque si estuvieran sobre el sol su movimiento implicaría que el sol gira, y entonces veríamos regresar las manchas en el mismo orden y en la misma posición que tenían entre sí y con respecto al sol. Hasta ahora, nunca han aparecido, aunque otras manchas han seguido a las primeras a lo largo del disco solar. Esto indica que no están en el sol”.<sup>12</sup>

Es probable que al elaborar su razonamiento Scheiner recurriera a la analogía con las irregularidades presentadas por la Luna, pero Galileo duda de la permanencia de las manchas y sostiene que estas surgen y se desvanecen en períodos cortos. Al suponer que algunas se *producen* y otras *decaen*, abre la posibilidad de que el movimiento rotacional del Sol sobre su propio eje las arrastre consigo. Así, no se estaría en capacidad de determinar cuáles manchas son idénticas a otras previas, o cuáles poseen el mismo arreglo o forma. Con este supuesto Galileo intenta resolver el cambio aparente que presentan las manchas: como se opone a los sentidos, entonces es muy difícil y aún imposible probar su permanencia y estabilidad.

En cuanto a la afirmación hecha por Scheiner de que las observaciones de las manchas proporcionaban un método para determinar si Venus y

Mercurio giraban alrededor del Sol o de la Tierra, Galileo expresa que él ya ha descubierto y comunicado un método elegante, palpable y conveniente de determinarlo: “Este es el hecho de que Venus cambie de forma precisamente como lo hace la Luna”.<sup>13</sup> Esta observación había sido comunicada en una carta enviada a Clavius el 30 de diciembre de 1610 y era el principal argumento en favor de la tesis copernicana. Las fases de Venus probaban también que Venus era opaco y que, contrariamente a la creencia aceptada, no poseía luz propia.

Scheiner intentó probar que las manchas no estaban en la órbita lunar ni en la de Venus, pero al hacerlo, según Galileo, continuaba adherido a los constructos de Ptolomeo como si fueran reales: “... él continúa adherido a las excéntricas, deferentes, ecuantas, epiciclos y cosas similares como si fueran reales, actuales y distintas”.<sup>14</sup> Sin perder la oportunidad para mostrarle a su contendiente la incoherencia interna de los argumentos que presentaba, Galileo afirma que Scheiner había sostenido antes que Venus no poseía una órbita por debajo del Sol, o sea que no gira alrededor de la Tierra sino que gira alrededor de este. Scheiner había sostenido lo mismo para Mercurio, pero al poseer este una elongación máxima mucho menor que la de Venus se hacía preciso ubicarlo más cerca del Sol. Sin embargo, Scheiner situó a Mercurio después de la Luna, seguido por Venus y utilizando la prueba del paralaje concluyó que las manchas solares no se encontraban en la órbita de Mercurio. Aún así afirmó que este método no se podía aplicar a Venus debido a su pequeño paralaje; pero Venus presentaba algunas veces un paralaje mucho mayor que el de Mercurio y que el del Sol, por lo cual debía ubicarse en una órbita más cercana a la Tierra.

Galileo ataca lo contradictorio de los métodos utilizados por Scheiner y muestra lo insostenible del “viejo mecanismo” de las esferas sólidas cristalinicas: “Estas no son mantenidas por los astrónomos filosóficos quienes, yendo más allá de la demanda que ellos tienen, de alguna manera, de salvar las apariencias, buscan investigar la constitución verdadera del universo ...”.<sup>15</sup> Galileo ataca los constructos de la astronomía tradicional apelando a la simplicidad que debe prevalecer en la naturaleza: “... que la naturaleza, para suplir aquellos, realmente haga uso de esa mezcla de esferas y orbes compuestos por los astrónomos es, pienso, no tanto algo que estemos dispuestos a creer sino que es una conveniencia en los cálculos astronómicos”.<sup>16</sup> Esta idea

fue retomada en su opúsculo *Consideraciones sobre la opinión copernicana* (1615) en el que afirmó: "... todas las verdades en la naturaleza deben formar un todo armonioso, mientras que entre las hipótesis falsas y los efectos verdaderos se manifiesta una ostentosa disonancia ...".<sup>17</sup>

Una vez debilitados los argumentos de Scheiner, Galileo procedió a formular una tímida hipótesis acerca de las manchas solares, utilizando la analogía con las nubes terrestres: "... las manchas solares se producen y disuelven sobre la superficie solar y ... son contiguas a este, mientras que el sol, rotando sobre su eje en aproximadamente un mes lunar, las transporta consigo; regresando, quizás, algunas de ellas cuya duración sea mayor de un mes, pero tan cambiadas en forma y patrón que no nos es fácil reconocerlas".<sup>18</sup> Galileo no asegura que las manchas sean nubes o que estén compuestas del mismo material que el de las nubes terrestres. Solo se remite a decir que no se conoce algo que se les asemeje más, y deja en suspenso lo que sean en realidad. Este mismo razonamiento por analogía con los fenómenos terrestres ya lo había utilizado en el *Sidereus Nuncius* (1610) y fue muy fructífero en la búsqueda de explicaciones para varios fenómenos celestes que ponían en apuros el aparato conceptual aristotélico (por ejemplo, en la explicación de las manchas lunares, consideradas por Aristóteles fenómenos atmosféricos, sin poder dar razón de su estabilidad). Una vez más se patentiza el rechazo del postulado de heterogeneidad del cosmos y la afirmación de un cosmos compuesto por las mismas sustancias y sometido a las mismas leyes.

Al final de esta primera carta, Galileo procede a enumerar las características de las estrellas, mostrando por qué era inconveniente dar tal nombre a las manchas solares. Las estrellas, nos dice, sean fijas o errantes (planetas), parecen mantener la forma esférica, no se destruyen en un lugar y se generan en otro, sino que son permanentes, sus movimientos son periódicos, retornando después de ciertos intervalos de tiempo. Ninguna de estas características pertenece a las manchas solares, las que considera *cueros* opacos más densos que el material del cielo y que sobresalen contra la superficie solar, que son iluminados por uno de sus lados y producen una sombra profunda sobre el otro lado. Todas estas características son consideradas propias de los cueros opacos.

El comportamiento observado en las manchas parecía apoyar la hipótesis galileana de la contigüidad de las manchas a la superficie solar y de que su movimiento se debía a la rotación del Sol. Sin embargo, Galileo no poseía argumentos que apoyaran tal suposición. No fue sino hasta su segunda carta, fechada el 14 de agosto de 1612, cuando Galileo informe a su amigo Welser que "una carencia total de evidencia contradictoria muestra que mi opinión se ajusta con la verdad".<sup>19</sup> Además, en ella despliega las razones sobre las que se fundamenta su hipótesis, aduciendo que está *completamente confirmada* por observaciones cotidianas regulares.

Al no haber evidencia que hiciera entrar en contradicción la hipótesis, Galileo extrae la consecuencia engañosa de que esta es verdadera. Descarta de plano cualquier otra explicación posible del fenómeno. Sin embargo, esto se comprende al anotar que para Galileo solo existen dos explicaciones científicas posibles de los fenómenos: la sostenida por la tradición aristotélico-escolástica (física y cosmología aristotélicas, astronomía ptolemaica), y la derivada de la tesis copernicana. Debido a que es imposible derivar de la primera los fenómenos observados sin entrar en contradicción, mientras que de la segunda se siguen necesariamente, entonces es preciso que la hipótesis de Scheiner sea falsa y la suya verdadera. Con el fin de establecer el estatus de su hipótesis, Galileo procede a distinguir entre aquello que nos es dado inmediatamente en la percepción, y lo que es alcanzado por razonamiento: "Las diferentes densidades y grados de oscuridad de las manchas, sus cambios de forma y sus agrupamientos y separaciones, son evidentes directamente a nuestra vista, sin ninguna necesidad de razonar ... Pero que las manchas son contiguas al Sol y que son transportadas alrededor de aquel por su rotación, puede solo deducirse y concluirse mediante razonamiento a partir de ciertos eventos particulares que suministran nuestras observaciones".<sup>20</sup>

### Los dos supuestos básicos de la hipótesis galileana

Una vez aceptados como no problemáticos aquellos que podemos considerar *datos de observación*, Galileo pasa a considerar el núcleo de su hipótesis, a saber, i) la contigüidad de las manchas a la superficie solar y ii) la rotación del Sol. Según

se desprende de la analogía, las manchas, lo mismo que la atmósfera terrestre, le pertenecen al Sol, por lo tanto, participan de su movimiento; a esto se debe su comportamiento, y entonces no es necesario suponerlas girando en órbitas ubicadas a cierta distancia de la superficie solar. Estos dos elementos de la hipótesis deben ser *probados* mediante *demonstraciones rigurosas*, de tal manera que el comportamiento observado en las manchas se derive de razones necesarias. Este es el propósito de la segunda carta de Galileo.

### i. Contigüidad de las manchas

Para demostrar que las manchas están ubicadas sobre o muy cerca de la superficie solar Galileo se apoya en tres *características observables* de las manchas que, según él, no tenían explicación dentro de cualquier otro contexto:

i) La primera *característica* es que las manchas se observaban más tenues cuando estaban más cerca del borde del disco solar que del centro: "... las manchas, en su primera aparición y desaparición final cerca de los bordes del Sol, generalmente parecen tener muy poco ancho, pero poseer la misma longitud que ellas mostraban en las partes centrales del disco solar".<sup>21</sup>

Explica el fenómeno aludiendo a la reducción de las dimensiones de un cuerpo ocasionada por la perspectiva cuando este se mueve sobre una superficie esférica (escorzamiento): las manchas, al ser arrastradas hacia el centro de la superficie solar aumentarían su longitud, preservando la misma extensión; esto no se observaría si el movimiento de las manchas se realizara tan siquiera a cortas distancias del Sol.

ii) La segunda es que la distancia recorrida por las manchas aumentaba al acercarse al centro del disco solar y disminuía cuando se acercaban a la circunferencia, es decir, la distancia recorrida era inversamente proporcional a la distancia del centro del disco solar: "Los espacios atravesados en tiempos iguales por la misma mancha se hacen tanto menores cuánto más cerca esté situada la mancha del borde del Sol".<sup>22</sup> Esto no sucedería si las manchas estuvieran situadas aún en órbitas ligeramente distantes del Sol, pues los espacios recorridos en tiempos iguales diferirían muy poco en contraste con la superficie solar.

iii) La última *característica* es que el espacio entre dos manchas aumentaba paulatinamente

conforme se acercaban al centro: "Algunas de estas separaciones se mantienen constantes, otras aumentan grandemente hacia el centro del disco solar, siendo muy estrechas en cualquier otra parte e insensibles cerca del borde; todavía otras muestran una variabilidad extrema".<sup>23</sup> Estas se pueden explicar si se supone que las manchas se mueven sobre la superficie solar y debido a la rotación del Sol: "Los eventos son tales que pueden ser encontrados únicamente en el movimiento circular realizado por diferentes puntos sobre un globo giratorio".<sup>24</sup> Pero, además, se hace necesario considerar que las manchas no están fijas ni inmóviles sobre el disco solar, sino que constantemente están sujetas a cambios: "... continuamente cambian en forma, se reúnen y dispersan".<sup>25</sup> Estos cambios se hacen despreciables al compararse con aquellos que se derivan de la rotación solar. A pesar de que no son fijas, las manchas presentan un comportamiento regular al desplazarse sobre la superficie solar.

Galileo concluye que no hay otra explicación posible del fenómeno: todas las observaciones calzan perfectamente con los supuestos de la contigüidad de las manchas, la esfericidad y la rotación del cuerpo solar. Refiérase a la Figura 1.

### ii. Rotación solar

Para dar cuenta de la rotación solar Galileo procede primero a diferenciar entre lo que está *probado* y lo que es *probable*. Para Galileo es necesario dar por establecido que las manchas están situadas sobre o muy cerca de la superficie solar, que no se componen de un material fijo ni estable, sino de uno que varía en forma y tamaño, que presentan ciertos cambios como resultado de movimientos irregulares, que se generan y decaen en períodos determinados y que rotan alrededor del Sol. Sin embargo, el movimiento de rotación del cuerpo solar aún no se ha probado: "... permanece sin responder si esto sucede debido a que el Sol mismo rota y las arrastra consigo o si el Sol se mantiene inmóvil y las manchas son conducidas mediante una rotación de algún material circundante".<sup>26</sup>

Así, en cuanto al movimiento de las manchas es preciso examinar dos explicaciones posibles: i) este movimiento se debe al movimiento de la sustancia que rodea el cuerpo solar y no al Sol mismo, ii) el movimiento se debe a la rotación del Sol.

Los cambios observados en la forma de las manchas sugerían que el medio que rodeaba al Sol era fluido y blando, mientras que se concebía al Sol como un cuerpo sólido, compuesto de un material consistente. En este supuesto basa Galileo su conclusión de que el movimiento de las manchas se debe a la rotación solar: "... un movimiento ordenado, tal como el movimiento universal de todas las manchas, parece incapaz de tener su raíz y fundamento en una sustancia fluida, cuyas partes no están cohesionadas y que está, por consiguiente, sujeta a conmociones, disturbios y otros movimientos accidentales".<sup>27</sup> Según Galileo, el movimiento ordenado de las manchas solo podía tener lugar sobre un cuerpo sólido y consistente donde "el movimiento del todo y de las partes sea necesariamente uno"<sup>28</sup> y el Sol es un cuerpo de esta clase.

Pero si el medio no puede explicar el movimiento ordenado de las manchas, ¿qué justificación podemos dar de la rotación solar?. Para abrir la posibilidad de la rotación solar Galileo propone, por vez primera, una concepción del movimiento inercial: "Pues me parece haber observado que los cuerpos físicos poseen una inclinación física a algún movimiento (como los cuerpos pesados a descender), este movimiento es ejercido por ellos mediante una propiedad intrínseca y sin necesidad de un motor particular externo, siempre que ellos no estén impedidos por algún obstáculo ... Y, por consiguiente, si todos los impedimentos externos son removidos, un cuerpo pesado sobre una superficie esférica concéntrica con la Tierra será indiferente al reposo y a los movimientos hacia cualquier parte del horizonte y se mantendrá a sí mismo en el estado en que fue una vez colocado; esto es, si fue colocado en un estado de reposo conservará ese estado y si es situado en movimiento hacia el oeste (por ejemplo) se mantendrá a sí mismo en ese movimiento".<sup>29</sup>

Aunque Galileo plantea que todo cuerpo posee una tendencia innata hacia cierto tipo de movimiento a menos que se le pongan impedimentos, no llega a plantear correctamente el principio de inercia. El principio de inercia en su forma clásica, es decir, tal y como fue entendido por Descartes y Newton, no afirma la persistencia de cualquier movimiento: en ausencia de fuerzas externas un cuerpo tiende a permanecer en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme. El principio no se aplica ni al movimiento cir-

cular ni de rotación; además, en la física clásica se abandonan las *naturalezas*, los movimientos *naturales* y *violentos* en la explicación. Para vencer a sus oponentes Galileo necesita establecer de una vez por todas la primacía del movimiento circular sobre el rectilíneo; esto explica la manera en la cual formuló el movimiento inercial: el movimiento circular no aleja ni acerca un cuerpo a su centro de revolución, razón por la cual puede mantenerse en movimiento uniforme. Por otra parte, según la concepción galileana, el movimiento circular es el único que podría tener lugar en un cosmos ordenado. No existe en el mundo un movimiento horizontal sino solo el movimiento sobre un segmento de círculo. El plano horizontal, de acuerdo con Galileo, es aquel cuyos puntos equidistan del centro.<sup>30</sup> En este sentido Galileo continúa adherido a la obsesión tradicional por la perfección del movimiento circular con el propósito de desterrar de la física los movimientos *violentos* propuestos por la tradición aristotélica. Mantiene la idea de que los cuerpos poseen inclinaciones naturales hacia ciertos tipos de movimiento, razón por la que el Sol no puede poseer *repugnancia interna* ni *impedimentos externos* al movimiento de rotación, pues es un cuerpo esférico y balanceado sobre su propio centro (como la Tierra).

El Sol rota sobre sí mismo porque le es inherente a su forma esférica y porque no posee impedimentos a dicho movimiento. Galileo desconoce todo tipo de fuerzas que no sean aquellas que se ejercen por contacto o mediante la acción magnética: todo lo que rodea al Sol es su medio y, por tanto, le pertenece, por lo que, si fuera el medio el que se moviera, se lo participaría también al Sol. El movimiento de rotación se separa así de la composición del cuerpo, mientras que en la cosmología tradicional ese movimiento era propio del éter, sustancia que componía los cuerpos celestes. Y ya que se debe situar necesariamente la rotación aparente de las manchas en el cuerpo solar, la rotación del Sol "parece mejor ponerla ahí por naturaleza y no por participación ...".<sup>31</sup>

De esta manera Galileo fundamenta los dos elementos de su hipótesis acerca de las manchas solares. Las manchas participan del movimiento de rotación del Sol y no existe ningún impedimento externo para esto, al igual que los cuerpos terrestres y su atmósfera participan del movimiento triple de la Tierra.

### III. Demostración geométrica y explicación científica en Galileo

La manera en que Galileo utilizó la demostración geométrica en las cartas sobre las manchas solares permite echar un poco de luz acerca de lo que él entendió por una explicación científica.

Como se desprende de la sección anterior, la explicación galileana presenta dos momentos: una *prueba geométrica* y un *comentario*. Esto implica la construcción de un argumento deductivo, inscrito dentro de un modelo, acompañado por un comentario. Las demostraciones geométricas establecen conexiones lógicamente necesarias mediante sus características estructurales, al introducir certeza en sus conexiones; por su parte, el comentario establece las limitaciones, el carácter analógico y el alcance del modelo. Aunque den certeza lógica, las demostraciones no constituyen una explicación del fenómeno: las explicaciones deben aportar conocimiento empírico. Para conferirle contenido empírico a la demostración geométrica y establecer la conexión con la realidad, Galileo recurre al comentario, el cual debe derivarse de una concepción del mundo coherente y unificada, si se desea que la demostración aporte certeza empírica. Sin embargo, el copernicanismo no representaba un enfoque coherente, ya que carecía de una teoría de las fuerzas requeridas para dar cuenta del arreglo planetario propuesto y del triple movimiento terrestre.<sup>32</sup> Esto hacía que el comentario y la interpretación de las demostraciones galileanas no fueran uniformes y que no fuera posible tener certeza de las relaciones empíricas y, por consiguiente, de las explicaciones.

Esa variación interpretativa es reflejo de lo que para Galileo es posible conocer: extensionalmente, nuestro conocimiento de lo que existe es ínfimo, pero intensionalmente, podemos llegar a conocer algunas de las cosas de manera perfecta y con tanta certeza como la de la naturaleza misma. La geometría y la aritmética son ejemplos de estas últimas. Además, la posibilidad de alcanzar el conocimiento está limitada por nuestras facultades y por la naturaleza. La geometría nos permite conocer algo al idealizar las abstracciones obtenidas a partir de los fenómenos; apelamos a la experiencia para realizar el comentario que será posteriormente utilizado en demostrar la relevancia de las abstracciones empíricas. Esa confianza de Galileo en la geometría se circunscribe dentro de la incertidumbre de poder dar explicaciones físicas del

mundo: la geometría es el criterio de certeza en un mundo de magnitud y variación infinitas, pero la certeza de la demostración geométrica no ofrece ninguna explicación del fenómeno.

Para Galileo, el conseguir apoyo para una hipótesis consistía en recurrir a explicaciones más que al peso de las observaciones. Esta explicación solo valía para una interpretación física, o sea terrestre, de un conjunto de proposiciones geométricas y su posterior extensión a otro conjunto de fenómenos. Pero, desde esta perspectiva no se garantizaba la verdad de la segunda inferencia. Consciente del problema, Galileo tomó ejemplos terrestres y los extendió al dominio celeste profundamente convencido de la homogeneidad en la composición del universo y en la universalidad de sus leyes, así como en la universalidad de las matemáticas: Dios había creado el universo de acuerdo con los principios de la geometría, las matemáticas subyacían en la estructura misma del cosmos. Así, Galileo poseía razones para justificar el uso de la geometría en la explicación fenoménica: su aceptación general, la claridad concedida a la demostración, el rigor y la necesidad de la prueba.

Galileo finalizó la discusión sobre las manchas solares afirmando "He demostrado que las manchas solares no son estrellas ni materiales permanentes, y que no están situadas a cierta distancia del Sol, sino que se producen y disuelven sobre este en una manera similar a las nubes y vapores terrestres".<sup>33</sup> Sin embargo, no todo lo que Galileo informó acerca de las manchas solares posee fundamento: por ejemplo, la afirmación de que el eje de rotación solar es perpendicular al plano de la eclíptica (deducción realizada a partir de que, en el período en el cual se realizaron las observaciones de las manchas, estas se encontraban en determinadas regiones del disco solar y su movimiento era paralelo a la eclíptica).

### IV. La nueva actitud para la investigación de la naturaleza

En respuesta a la *Accuratio disquisitio* de Scheiner Galileo escribió una tercera carta, fechada 1 de diciembre de 1612, en la que expuso la nueva actitud ante la investigación de la naturaleza: "... en nuestra especulación buscamos penetrar la esencia interna y verdadera de las sustancias naturales o contentarnos con un conocimiento de algunas de sus propiedades. Respecto de la primera,

sostengo que es imposible garantizarla tanto de las sustancias elementales más cercanas como de las cosas celestes más remotas. Las sustancias que componen la Tierra y la Luna me parecen tan desconocidas como aquellas que componen nuestras nubes y las manchas solares. En la comprensión de las sustancias que están al alcance de nuestras manos no veo que tengamos ventaja alguna, excepto un copioso detalle. Todas las cosas entre las que vagan los hombres se mantienen igualmente desconocidas, y pasamos por las cosas cercanas o distantes sin adquirir realmente ningún o muy poco conocimiento ... Pero si lo que deseamos fijar en nuestras mentes es la aprehensión de algunas propiedades de las cosas, entonces me parece que no debemos perder la esperanza en nuestra capacidad para adquirirla, ya sea respecto de los cuerpos distantes, o bien respecto de aquellos más cercanos - y quizás, en algunos casos, de manera más precisa en los primeros que en los últimos".<sup>34</sup>

En contraposición con Aristóteles, Galileo sostiene que el conocimiento de las esencias es imposible de alcanzar, tanto de las sustancias terrestres como de las celestes, pero podemos construir un conocimiento basado en algunas propiedades de las cosas, ya sean cercanas o distantes: son aquellas *cualidades primarias* que pueden ser objeto de medición, como la forma, tamaño, número, posición y cantidad de movimiento, las cuales considera *propiedades objetivas de los cuerpos*.<sup>35</sup> Es por esta razón que desde la primera carta Galileo se niega a especular acerca de la naturaleza de las manchas y se dedica a investigar aquellas propiedades, mediante la observación regular, los dibujos precisos de la forma, tamaño, posición, movimiento, opacidad y cambio de las manchas sobre el disco solar. Son estas características observables de las manchas las que Galileo intentó explicar mediante sus dos supuestos.

Por otra parte, los seguidores de Aristóteles creían que el conocimiento real de las cosas era posible, pero esto implicaba "penetrar en la esencia de las cosas e interpretar su naturaleza".<sup>36</sup> Para Galileo, no era posible inferir nada acerca de la naturaleza de las manchas partiendo de lo observado. Se da así una inversión en el estudio de la naturaleza: se abandona la explicación fundada en cualidades, la cual buscaba aprehender la esencia de una cosa, y se la sustituye por una basada en propiedades cuantificables, que se basa en la convicción de que el libro de la naturaleza está escrito en el lenguaje de las matemáticas, clave para la

comprensión de la realidad, y en la renuncia a la autoridad doctrinal en asuntos científicos.

En esa doble perspectiva (epistemológica y matemática) debe considerarse el aporte de Galileo a la construcción de la ciencia moderna. En la posición galileana se vislumbra la línea de pensamiento que conduce hacia una concepción mecanicista del mundo y hacia una ciencia mecánica en que la mecanización se refiere tanto a lo teórico como al método, en un sentido amplio que abarca tanto los contenidos (la sustancia) de la ciencia (naturaleza como un mecanismo, filosofía mecanicista) como su método (filosofía experimental). Desde la perspectiva epistemológica el cambio consistió en reconocer la prioridad de la *experiencia* en los asuntos científicos, prioridad que quedará expresada posteriormente en palabras de Pascal al afirmar que en física la experiencia tiene un poder de convencimiento mucho mayor que el de la razón.

La ciencia moderna se enfrentó a una tradición y trató de romperla. Galileo, como sus sucesores inmediatos, intentaron articular una concepción, basada en el rechazo del infalibilismo epistemológico, que reemplazara la caracterización tradicional de ciencia. Contrariamente a la epistemología aristotélica, que resalta la universalidad y la verdad de los primeros principios, la ciencia moderna parte del supuesto de que nada es cierto, de que todo lo que pretende la universalidad es igualmente falible. Hacia esta dirección se encamina Galileo, aunque no llega a delinearla completamente.

Galileo fue más allá de una simple defensa del copernicanismo, puesto que anticipó cambios en metodología, criterios de evidencia y criterios de relevancia explicativa que fueron significativos para el desarrollo ulterior de la ciencia del siglo XVII. En su concepción de lo que implicaba una explicación de los fenómenos físicos, podemos situar los comienzos de una nueva concepción de ciencia, que establece, por un lado, el concepto de explicación como justificativa y, por otro, el desarrollo de un nuevo criterio de apoyo empírico.<sup>37</sup> Está de más mencionar su aporte a la construcción de una nueva base empírica que permitiera inclinar muchas de las polémicas de su tiempo en favor del copernicanismo.

## Notas

1. Drake, S. 1983. *Galileo*. Alianza Editorial. Madrid. p. 86.
2. Galileo Galilei. 1613. *History and Demonstrations Concerning Sunspots and their Phenomena*. En

Drake, S. 1957. *Discoveries and Opinions of Galileo*. Double Day Anchor Books. New York. p. 89. En lo que sigue se referirá a esta obra como HD.

3. Shea, W. 1983. *La revolución intelectual de Galileo*. Ariel. Methodos. Barcelona. p. 69.

4. Ibid. p. 69.

5. Ibid. p. 69.

6. Ibid. p. 72.

7. HD. p. 90.

8. HD. p. 90.

9. HD. p. 91.

10. HD. p. 91.

11. HD. p. 92.

12. Shea, W. 1983. *Opus cit.* p. 68.

13. HD. p. 90.

14. HD. p. 96.

15. HD. p. 97.

16. HD. p. 97.

17. Galileo. 1615. *Consideraciones sobre la opinión copernicana*. En Copérnico, Digges, Galileo. 1983. *Opúsculos sobre el movimiento de la Tierra*. Alianza Editorial. Madrid. p. 79.

18. HD. p. 102.

19. HD. p. 106.

20. HD. pp. 106-7.

21. HD. p. 107.

22. HD. p. 108.

23. HD. p. 108.

24. HD. p. 108.

25. HD. p. 109.

26. HD. p. 112.

27. HD. p. 112.

28. HD. p. 112.

29. HD. p. 113.

30. Koyré, A. 1985. *Estudios Galileanos*. Siglo XXI Editores. 3a. edición. México. p. 151. Para consultar el sentido en que Descartes y Newton postularon el movimiento inercial, refiérase a Descartes, R. 1633. *El mundo*.

*Tratado de la luz*. Edición bilingüe de S. Turró. 1989. Anthropos. Barcelona, Capítulo VII: "... cada parte de la materia en particular permanece siempre en un mismo estado mientras el encuentro con otras no le obliga a cambiarlo ... si ha empezado a moverse, continuará siempre con la misma fuerza hasta que otras la detengan o la disminuyan." (p.111), "... Yo no concibo ningún otro movimiento a excepción del que es más fácil de concebir que las líneas de los géometras: el que hace que los cuerpos pasen de un lugar a otro y ocupen sucesivamente todos los espacios que hay entre ambos." (p. 115); Newton, I. 1687. *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Traducción de A. Escotado. 1987. Editorial Tecnos. Madrid: "Todos los cuerpos permanecen en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas [externas]." (p. 41). Es decir, el movimiento inercial solo considera el movimiento rectilíneo uniforme, cualquier desviación de ese movimiento se debe a la interacción del cuerpo con otro(s) cuerpo(s).

31. HD. p. 115.

32. Para el modelo galileano de explicación puede consultarse: Pitt, J. 1988. *Galileo, Rationality and Explanation*. *Philosophy of Science*. 55(1): 87-103. Para las limitaciones del copernicanismo: Helena, A. 1985. *Las quimeras de los cielos. Aspectos epistemológicos de la revolución copernicana*. Siglo XXI editores. Madrid; Kuhn, T. S. 1985. *La revolución copernicana*. Ariel. Methodos. Barcelona.

33. HD. p. 143.

34. HD. pp. 123-4.

35. Losee, J. 1981. *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*. Alianza Universidad. 3a. edición. Madrid. p. 62.

36. Shea, W. 1983. *Opus cit.* p. 91.

37. Ver Hooykaas, R. 1987. *The Rise of Modern Science: When and Why?* *BJPhSc*. 20:471.