Galileo y la revolución científica. En el 400 aniversario de la construcción del telescopio

Ederlinda VIÑUALES GAVÍN

IES Goya. Avda. de Goya, n.º 45. E-50006 Zaragoza. España.
C/e: ederlinda.vinuales@gmail.com

Propósito

En el aniversario de la construcción de su telescopio, queremos sacar a Galileo del infierno, a pesar de su desfallecimiento en el convento de Santa María de Minerva y otros deslices. El castigo de recibir y dialogar con todos los científicos que allí descienden es excesivo (GONZÁLEZ y RIOJA, 2007). Su contribución al desarrollo de la ciencia, que está en continuo e inacabado progreso, así nos lo aconseja, por lo cual es justo tener de Galileo un recuerdo universal.

La revolución científica, una revolución astronómica

La revolución científica es el término usado tradicionalmente para describir los triunfos intelectuales de la Astronomía y de las ciencias físico-matemáticas en la Europa de los ss. XVI y XVII.

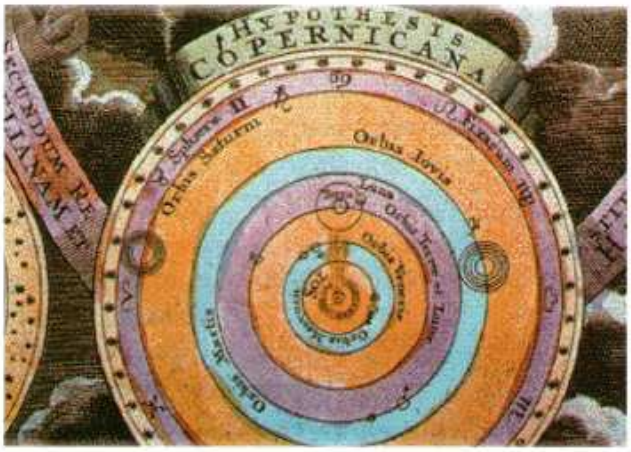

Figura 1. Grabado que recoge la hipótesis de Copérnico con el Sol inmóvil en el centro del Universo y el resto de los planetas girando en torno a él.

Los filósofos y científicos de la Grecia clásica establecieron diversos métodos para el conocimiento de la realidad y, aunque a veces se inclinaban hacia la metafísica dogmática, otras los buscaron con éxito, en el apoyo de la experiencia.

Pasada la Edad Media, la ciencia prosigue su desarrollo llegando a una época de grandes avances: el Renacimiento. Durante este periodo surgen nuevos sistemas astronómicos que modifican el saber de los antiguos. El hombre, la sociedad, el mundo, se conciben de modo diferente en una época floreciente culturalmente en Europa y que dará lugar a la llamada ciencia moderna. Copérnico y Kepler, Bacon, Tycho Brahe, Galileo y Newton son algunos de los grandes nombres de este triunfo de la razón científica que culminará en el s. XVIII.

En lo que se refiere a conceptos fundamentales, el elemento central de la Revolución Científica es el abandono de la visión cosmológica en la que la Tierra ocupaba el centro del Universo (sistema geocéntrico de Ptolomeo) y de la física aristotélica (la dinámica en particular), por una en la que los planetas se movían en torno al Sol (sistema heliocéntrico), una idea que aunque ya la habían considerado algunos antiguos, entre ellos el pitagórico Filolao y Aristarco, fue introducida con detalle por Nicolás Copérnico en su *De revolutionibus orbium coelestium* (Las revoluciones de las esferas celestes).

Sin embargo, Copérnico no desarrolló una dinámica que hiciera plausible la idea de una Tierra en movimiento. Fue Galileo Galilei quien más hizo por el desarrollo de una «ciencia del movimiento» que diese sentido al sistema heliocéntrico.

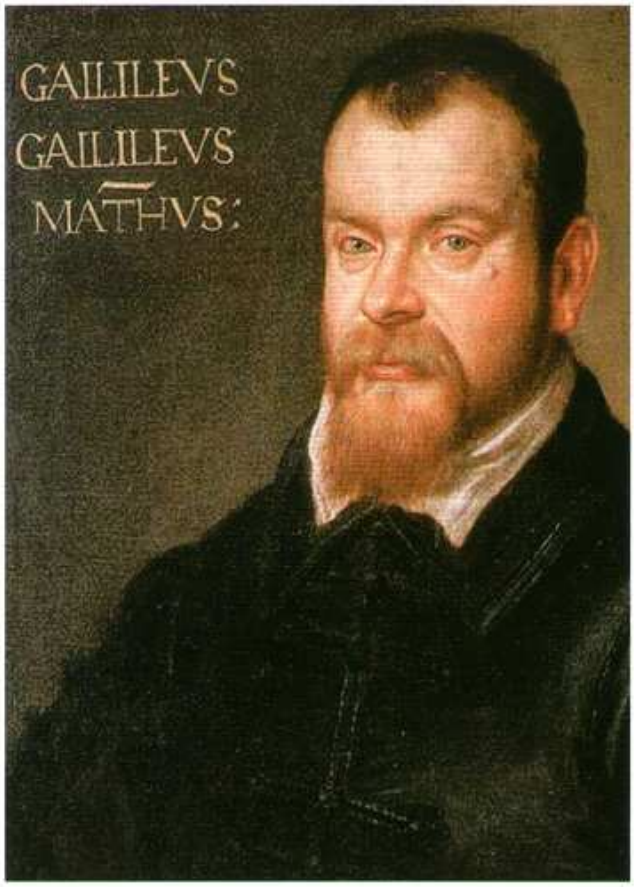

Figura 2. Retrato de Galileo Galilei

Ya alrededor de 1700, los hombres cultos concibieron el Universo como una estructura mecánica semejante a un reloj; la Tierra era vista como un planeta que giraba alrededor del Sol y se suponía que los misterios de la naturaleza estaban abiertos a la investigación por medio de la experimentación y el análisis matemático. Que el universo estuviera escrito en lenguaje matemático no era sino la confirmación de que la dinámica del cosmos se puede representar y calcular mediante fórmulas precisas.

Galileo Galilei

Los ss. XVI y XVII fueron una época de renovación en Astronomía. Con la ayuda de las observaciones que fue acumulando Tycho Brahe, Kepler obtendrá la formulación de sus famosas leyes que preparan el inicio de la Astronomía moderna; aunque a pesar del avance que supusieron, las leyes de Kepler no pudieron explicar las desviaciones que se revelaban a través de las observaciones. Su causa estaba relacionada con el hecho de que dichas leyes se habían enunciado suponiendo que la única fuerza gravitacional que se ejercía sobre un planeta era la del Sol, sin tener en cuenta las de los otros planetas, etc. Fueron las primeras afirmaciones precisas y verificables acerca de las relaciones que gobiernan algunos fenómenos en el Universo, expresados en términos matemáticos. Quedó borrada la idea de esferas concéntricas para dar paso a una visión de cuerpos similares a la Tierra que se mueven en el espacio sometidos a fuerzas físicas.

Con Galileo la Astronomía comienza una nueva época. Realizará importantes descubrimientos mediante el uso del telescopio para observar el cielo, lo cual contribuye a confirmar la veracidad del sistema copernicano. Se descubrirán nuevos objetos y la lente no será solo un instrumento de observación, sino que se podrá convertir también en un instrumento de medida.

Todo ello constituye la base sobre la que se apoyan los estudios de Newton el cual formulará matemáticamente las leyes del movimiento en el Universo.

Así, en 150 años, de Copérnico a Newton, cambia por completo la representación del Universo. Nadie pone en duda el heliocentrismo del Sistema Solar y el concepto geocéntrico de esferas fijas de Tolomeo queda olvidado. Las órbitas de los planetas han quedado reducidas a elípticas en torno al Sol y los cometas siguen trayectorias bien definidas alrededor de dicha estrella. Se conocen las montañas de la Luna, las fases de Venus, los satélites de Júpiter y Saturno...

Galileo y sus trabajos astronómicos

Breve biografía de Galileo

Galileo (Pisa, 1564 – Arcetri, 1642) procede de una familia culta florentina, estudió casi exclusivamente matemáticas en la Universidad, donde muy joven fue profesor.

Pero Galileo no fue un profesor sin más. En 1609 se encontraba en Venecia. Esta romántica ciudad, después de librarse de la competencia genovesa, dominaba el comercio entre Europa y Oriente: especias, azúcar, algodón, seda y metales preciosos llegaban a su puerto en barcos venecianos.

Entre una maraña de postes y cuerdas, los obreros del Arsenal construían los navíos que traerían a Venecia las riquezas de todo el mundo. Galileo pasea entre estos hombres atareados, observa, toma apuntes y hace preguntas.

Para construir los barcos se necesitan máqui-

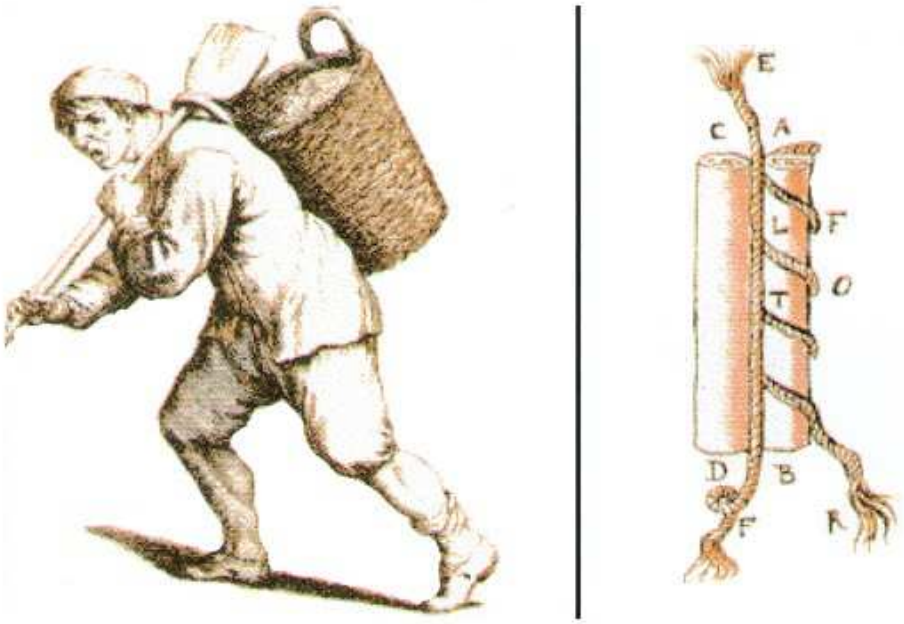

Figura 3. a) Obrero. b) Dibujo de aparejo que figura en su libro Consideraciones y demostraciones matemáticas de dos ciencias nuevas *(1638).*

nas, aparejos, tornos, planos inclinados y muchas otras herramientas. Todas estas máquinas están movidas por el hombre, que tiran de las cuerdas o se apoyan en palancas; en esta época no hay motores, excepto los caballos, que no se usan mucho en el Arsenal.

El funcionamiento de estas máquinas forma parte de las «matemáticas» que Galileo debe enseñar, además de las fortificaciones y la Astronomía, a sus estudiantes de la Universidad de Padua, situada a unos 30 km.

Para sus colegas, el mundo del trabajo, de los artesanos y de los marineros no tiene nada que ver con la Universidad. Además, sus clases son simples comentarios de obras de autores antiguos, sobre todo de Aristóteles, que datan del s. IV a. C.

Pero Galileo no se conforma con eso. Piensa que las leyes físicas deben basarse en experimentos. Y si los experimentos contradicen a Aristóteles, no duda en desmentir al mismísimo Aristóteles.

Si desde hace dos mil años las ciencias apenas han progresado, no hay razón para renunciar a que ahora progresen. Porque las técnicas sí que progresan, basta darse una vuelta por el Arsenal.

Galileo es un buen dibujante, conocido y apreciado por los artistas venecianos. Así, todo aparejo mecánico que ve lo dibuja y a la vez toma notas para modificar y mejorar la máquina en cuestión. Toca el piano al igual que su padre, que era comerciante de telas, músico, compositor y había escrito varios libros de armonía.

Galileo vivió en la misma época que Kepler, aunque sus estudios estuvieron dirigidos en distinta dirección. Al igual que Kepler, siempre estuvo convencido de la teoría copernicana, pero hubo de estar muchos años enseñando las teorías anteriores por falta de pruebas con las que refutarlas.

Su fama como astrónomo data de sus observaciones de la nova de 1604 en la constelación de Ofiuco. La imposibilidad de medir la paralaje de este astro prueba, según Galileo, su lejanía y, por otra parte, ya que es un fenómeno celeste, refuta la idea aristotélica de inmutabilidad del cielo.

En 1609 construyó el anteojo ocular divergente, que lleva su nombre. En el año 1610 se produce un hecho fundamental para el posterior progreso de la Astronomía: Galileo es el primero en dar uso científico al catalejo. Obtiene una nueva visión de la Luna, desconocida hasta entonces (estudia la altura de sus montañas, discute la posibilidad de la existencia de atmósfera,...), describe la constelación de Orión, las Pléyades y la Vía Láctea como un tupido conjunto de estrellas y no como una nebulosidad que reflejara el brillo del Sol.

Uno de los principales descubrimientos de Galileo fue el de los satélites de Júpiter. Durante una observación de Júpiter, Galileo vio tres nuevos astros alineados en la dirección de la eclíptica. En las siguientes observaciones estos astros seguían estando cerca de Júpiter, pero su posición relativa, así como el

Figura 4. Anteojos conservados en el museo de Florencia construidos por Galileo.

Foto: J

Figura 5. Fotografía de Júpiter con uno de sus satélites en la parte superior derecha. Fotografía cedida por el Grupo GAS, (Grupo Astronómico Silos).

número de ellos (se podían ver dos, tres o cuatro) cambiaba. Así llegó al convencimiento de que no se trataba de astros fijos, sino errantes: tenían que ser satélites de Júpiter. Era un importante descubrimiento, ya que la Tierra dejaba de ser, como en el sistema tolemaico, el único centro de todo movimiento celeste; por otra parte, la objeción sobre por qué si todos los planetas giran alrededor del Sol la Luna constituye una excepción girando alrededor de la Tierra, quedaba destruida por la existencia de estas lunas de Júpiter.

Antes de seguir adelante con los descubrimientos astronómicos del s. XVII, conviene subrayar lo siguiente: hasta entonces la primacía de las consideraciones teóricas había enmascarado un carácter esencial de la Astronomía, el de que es una ciencia de observación; y la primera lente de Galileo es el símbolo de la nueva Astronomía. Los descubrimientos fruto de la observación permiten que la investigación teórica no se aleje de la realidad. Así, la necesidad de verificar las teorías hace urgente el perfeccionamiento de los instrumentos, y éstos, por otra parte, permiten nuevos descubrimientos. Hay que reconocer pues, la revolución que este hecho aportó a la ciencia de este siglo.

Otros planetas también reservaban a Galileo aspectos muy interesantes. En las primeras observaciones de Saturno, se le presentó como un planeta triple, aunque poco tiempo después lo vio simple. Su anteojo era insuficiente para permitirle ver el aspecto de los anillos, que adquieren disposiciones distintas, según el ángulo desde el cual es visto.

Sí que pudo observar bien, en cambio, las fases de Venus, observación que le dio la certeza de que Venus, y también Mercurio, giraban alrededor del Sol confirmando nuevamente el sistema de Copérnico, confirmación que se reafirmó también con su descubrimiento de que el tamaño aparente de Venus cambiaba y que cuando su tamaño era el menor su iluminación era máxima y al revés, así como que su figura, con el sistema geocéntrico, nunca podía formar un círculo perfecto vista desde la Tierra. Ptolomeo quedaba obsoleto.

Todas las ideas y descubrimientos que empezó a difundir, y no solo en ambientes científicos, comenzaron a preocupar a varios teólogos en la época de la Inquisición. En su obra *Diálogo sobre los dos máximos sistemas*, Galileo resume su posición y expone sus ideas sobre el sistema del mundo en oposición con las de Aristóteles.

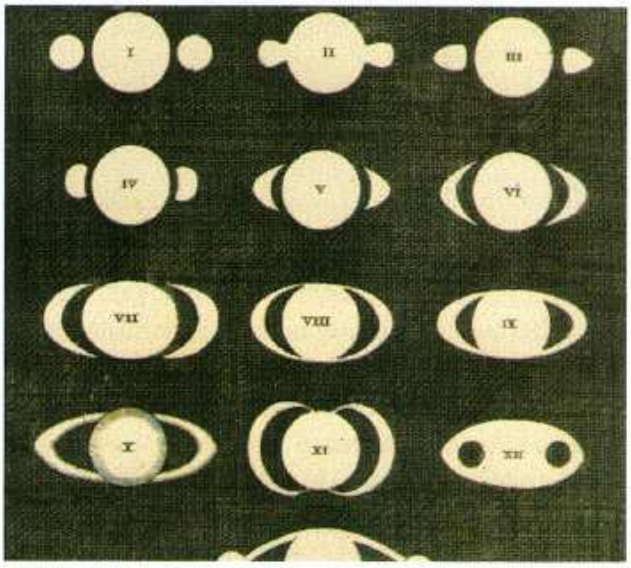

Figura 6. Aspectos sucesivos de Saturno atribuidos a Galileo y publicados por Huyghens en 1659 en su Systema saturni.

En 1610 Galileo marchó a Toscana, donde se encontró con un grupo de adversarios que en 1615 le denunciaron a la Curia por defender la ideas de Copérnico. No les fue difícil llevar a Galileo a los tribunales, ya que la mayoría de los intelectuales europeos de aquella época defendían las tesis de Aristóteles y Tolomeo frente a las de Copérnico. Una vez recibida la orden de no profesar más su doctrina , se marchó a Florencia.

En 1632 volvió a defender, aunque de forma tímida, su punto de vista en el libro *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, tolomeico y copernicano*. Fue acusado a la Inquisición, ante cuyo tribunal tuvo que comparecer cuando tenía ya setenta años. El proceso duró veinte días. Condenado, fue autorizado a retirarse a un lugar cercano a Florencia. Los últimos años de su vida estuvieron invadidos por la

tristeza: murió una de sus hijas y se quedó ciego.

Como es sabido, Galileo tuvo que abjurar de todas sus afirmaciones y murió en 1642 dejando una obra que, junto con la de Kepler, se puede considerar como el comienzo de una labor que Newton continuará y culminará.

Galileo copernicano

Galileo en 1597 escribe al astrónomo alemán Kepler: *Desde muchos años me he convertido a la doctrina de Copérnico... He escrito sobre esta materia muchas consideraciones, razonamientos y refutaciones que hasta hoy no he osado publicar.*

Así pues, en 1609, fecha que hoy conmemoramos, hacía por lo menos 20 años que Galileo era partidario de Copérnico aunque aún no había dicho nada al respecto. Es más, de acuerdo con el programa de la Universidad, a sus alumnos les enseñaba la vieja Astronomía de Tolomeo, con una Tierra inmóvil en el centro del Universo.

La prudencia en proclamar sus ideas se debía a que no sólo contradecían a Tolomeo sino también a la interpretación habitual de la Biblia.

Aunque la Iglesia no había prohibido oficialmente la teoría de Copérnico, la Inquisición había condenado a Giordano Bruno a morir en la hoguera, en parte, por defender esta teoría.

Es cierto que Galileo no iba a ser condenado a la hoguera sólo por defender públicamente la Astronomía de Copérnico. Pero sin duda llamaría la atención de la Inquisición y debería afrontar una agria polémica con todos sus colegas, que ya le reprochaban su falta de acatamiento de la autoridad de Aristóteles.

Galileo no temía los riesgos ni la polémica pero necesitaba un apoyo sólido para luchar por sus ideas. Y para él nada había tan sólido como la experiencia. Aunque estaba convencido de que Copérnico había acertado, por el momento no tenía pruebas, y si quería convencer a los demás necesitaba argumentos convincentes. Sus argumentos serían los resultados de sus experimentos.

Con la esperanza de que el anteojo le diese argumentos, se dispuso a fabricar uno. En seguida se dio cuenta de que las lentes no podían ser como las de los anteojos que fabricaban los ópticos. Para tener un aumento suficiente y una imagen clara necesitaba que una

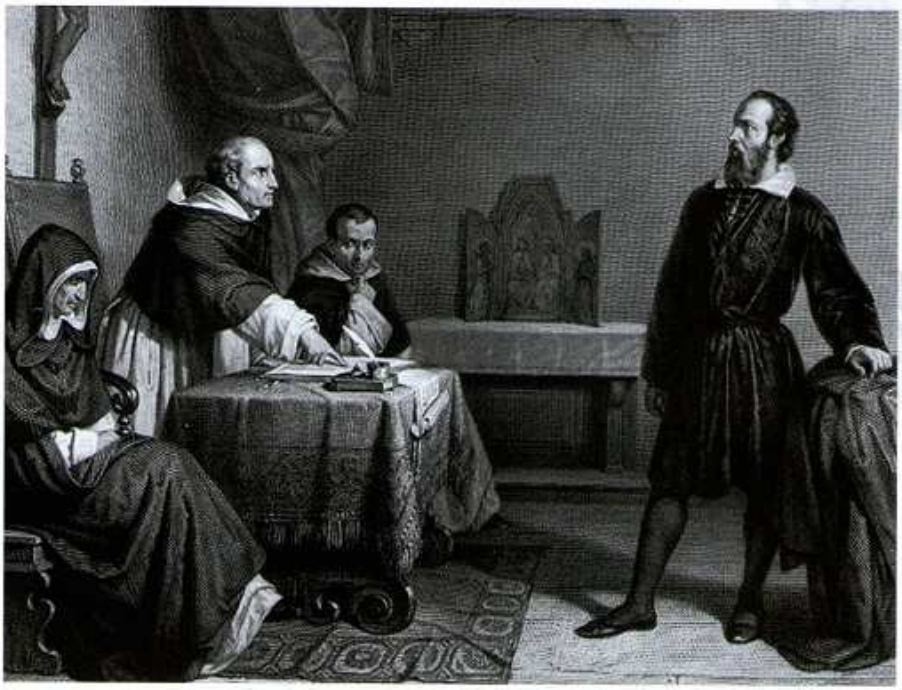

Figura 7. Galileo ante el tribunal.

de ellas fuese ligeramente convexa, y la otra muy cóncava. En cambio las que fabricaban los ópticos de la época eran muy convexas o ligeramente cóncavas. Así que Galileo tuvo que tallar y pulir sus propias lentes. Consiguió fabricar un anteojo que aumentaba nueve veces sin deformar las imágenes.

Cuando el gobierno de la república, tuvo conocimiento de las pruebas que Galileo había realizado con éxito, le pidió una demostración. No lo dudó ni un momento y convocó a un grupo de senadores en lo alto de un campanario de Venecia. Los senadores estaban entusiasmados; les parecía arte de magia: la iglesia de Padua que se encuentra a 32 km del campanario donde les citó, con el anteojo parecía estar a tres kilómetros y medio. Murano, a dos kilómetros y medio, se acercó hasta 300 m y hasta se podía distinguir a las personas. El entusiasmo de los senadores era comprensible.

Galileo brinda el instrumento a la república de Venecia. Muy impresionado por las posibles aplicaciones militares del nuevo sistema, el senado vota por unanimidad la confirmación de su puesto vitalicio y le duplica el sueldo.

En cuatro meses el anteojo había hecho famoso a Galileo y le había proporcionado desahogo

Figura 8. Venecia y el anteojo.

económico. Así pues, regresó a Padua dispuesto a perfeccionar su anteojo que llegaría a aumentar su resolución veinte veces. Con este anteojo Galileo no apuntó a Murano sino al cielo y descubrió en el cielo un mundo de maravillas que superaban con creces todas sus ilusiones.

El primer objeto celeste al que Galileo dirige el anteojo es la Luna. Su asombro es indescriptible. La Astronomía oficial enseña que la Luna es una bola lisa y perfecta, tersa como un cristal. Pero lo que Galileo ve a través de su anteojo es todo lo contrario. A Galileo no le cabe la menor

Foto: cedida por el Grupo GAS.

Figura 9. Fotografía de la Luna donde se aprecia su relieve.

duda: la Luna es montañosa. Y aporta pruebas.

Explica que cerca del límite entre la sombra y la luz hay pequeñas manchas negras en la luz y puntos brillantes en la sombra. Conforme va desplazándose el límite, disminuyen las manchas negras y aumentan las manchas luminosas. Es como en la Tierra: cuando el Sol se eleva en el cielo aumenta la parte iluminada de las montañas, y disminuyen las partes oscuras de los valles. Galileo describe estas montañas y estos valles de la Luna y dibujó meticulosamente su relieve.

Basándose en la longitud de la sombra, Galileo calculó la altura de esas montañas hallando que alguna de ellas tienen 7.000 metros, mucho más que todas las montañas terrestres conocidas en su época.

Tras demostrar que la Luna es montañosa como la Tierra, Galileo afirmó que es luminosa como ella, es decir, refleja la luz del Sol.

Galileo dirige su anteojo a las estrellas y ve mucho más que a simple vista. En su libro *El mensajero de los astros* cuenta: *«Tenía la intención de representar toda la constelación de Orión, pero he renunciado debido a la cantidad de estrellas que contiene, más de quinientas, y a la falta de tiempo»*. De modo que sólo dibuja el talabarte y la espada de Orión, con 80 estrellas más de las que se distinguen a simple vista.

Foto: Cedida por el Grupo GAS.

Figura 10. Fotografía de la Luna en cuarto.

Asimismo, las seis estrellas brillantes que forman el grupo de las Pléyades se le aparecieron rodeadas de un enjambre de 40 estrellas, invisibles hasta entonces.

Pero fue la Vía Láctea la que le reveló los mayores campos de estrellas. Ya no eran decenas, sino miles. Los seres humanos llevaban milenios preguntándose sobre la naturaleza de esa banda luminosa difuminada que atravesaba el firmamento.

A principios de 1610 un nuevo anteojo ya estaba listo. Aumentaba 30 veces. Era el quinto que fabricaba Galileo.

Con este nuevo anteojo Galileo obtuvo mejores observaciones de Júpiter que confirmaron la existencia de cuatro de sus satélites. Este descubrimiento resultó ser un duro golpe para los todavía partidarios del aristotelismo y de Tolomeo.

Mientras luchaba por dar a conocer sus primeros descubrimientos, Galileo prosiguió con sus observaciones, primero en Padua y luego en Florencia. Así descubrió que Saturno tenía un aspecto extraño.

Primero pensó que las dos manchas que se veían a ambos lados del planeta eran satélites, mucho más grandes y cercanos que los de Júpiter. Pero no giraban alrededor de Saturno. Poco después desaparecieron por un tiempo, para reaparecer más tarde. Su anteojo no tenía aumentos suficientes para permitirle descubrir que las protuberancias que observaba eran el complejo sistema de los anillos de Saturno.

También descubrió que Venus, al igual que la Luna, presentaba fases aunque no se atrevió a publicarlo hasta estar completamente seguro. Al mismo tiempo, temiendo que otros se adelantaran a su descubrimiento, tomó precauciones y en septiembre de 1910 le envió a Kepler una frase en latín un tanto extraña: *«Haec immatura a me iam frustra leguntur o. y.»* (*«En vano estas cosas son leídas por mí, prematuramente, o. y.»*). Era un anagrama que una vez ordenadas las letras de esta frase forman otra con un significado mucho más claro. De este modo, si Galileo se daba cuenta de que estaba equivocado, no habría publicado nada falso, y si tenía razón y otro se atribuía el descubrimiento, le bastaría con revelar el significado de su anagrama para reclamar su prioridad. Galileo estaba en lo cierto y en diciembre le envió a Kepler, que estaba en Praga, la clave del anagrama. El significado era el siguiente: Venus cambia de forma igual que la Luna. Es decir; Venus tiene fases como la Luna, unas veces está llena, otras en creciente o en menguante. Era un descubrimiento sensacional, pues demostraba que Venus unas veces está detrás del Sol y otras delante.

Con Venus, Galileo aporta pruebas decisivas a favor de Copérnico. En el sistema de Tolomeo todo giraba alrededor de la Tierra, y las trayectorias de los cuerpos celestes no podían cruzarse. En un sistema así era imposible que Venus estuviera unas veces delante del Sol y otras detrás. El descubrimiento de las fases de Venus y la observación de que su tamaño aparente cambia-

SIDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens
vnicuique, præsertim verò
PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quæ à
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnasij Publico Mathematico
PERSPICILLI
Nuper à se reperti beneficio sunt obseruata in LVNÆ FACIE, FIXIS IN-
NVMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,
Apprime verò in
QVATVOR PLANETIS
Circa IOVIS Stellam disparibus intervallis, atque periodis, celeri-
tate mirabili circumvolutis; quos, tiemini in hanc vsque
diem cognitos, nouissimè Author deprè-
hendit primus; atque
MEDICEA SIDERA
NVNCVPANDOS DECREVIT.
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.
Superiorum Permissu, & Priuilegio.

Figura 11. Portada de su libro El mensajero de los astros.

DIALOGO
di
GALILEO GALILEI LINCEO
AL SER.mo FERD. II. GRAN. DVCA DI
TOSCANA

Figura 12: Portada de su libro
Diálogo sobre los dos sistemas máximos del mundo.

ba y que cuando estaba en su menor tamaño su iluminación era máxima y al revés, fue el argumento decisivo contra el antiguo sistema tolemaico.

Además, esas fases demostraban claramente que Venus no tenía luz propia: al igual que la Luna y la Tierra, poseía una cara iluminada por el Sol y otra oscura. De modo que el Sol siempre desempeña la misma función, y los otros planetas eran como la Tierra.

Agradecimientos

A Marta Dueñas, Licenciada en Física. Astrónoma, miembro del Grupo Astronómico Silos de Zaragoza desde 1989. <marta_duenas@yahoo.es>. Ha aportado algunas ideas de interés y ha cedido amablemente unas fotografías muy apropiadas.

A Juan Luis Ríos Mitchell, Licenciado en Filosofía. Profesor de Bachillerato. Miembro de ApEA (Asociación de profesores para la Enseñanza de la Astronomía). <jlrios@marianistas.net>. Ha corregido y puesto al día el documento original.

Bibliografía citada en el texto y complementaria

García Hourcade, J. L. 2000. *La rebelión de los astrónomos. Copérnico y Kepler*. Nivela S. L., Madrid.

González Recio, J. L. y Rioja, A. 2007. *Galileo en el infierno*. Trotta, Madrid.

Harman, P. M. 1987. La revolución científica. Crítica, Barcelona.

López Piñero, J. L.. 1979. *Ciencia y técnica en la sociedad española de los siglos XVI y XVII*. Labor, Barcelona.

Maury, J. P. *Galileo. El mensajero de los dioses. Claves*. Edi. B. Grupo Z.

Thuillier, P. Galileo y la experimentación. *Mundo Científico* nº **26**, vol. 3.

Viñuales, E. 1991. *Astronomía: Actualidad e Historia*. Cuadernos Interdisciplinares, nº 1, Universidad de Zaragoza, Mira Editores, Zaragoza.

Viñuales , E. 1991. *Astronomía: Aspectos científicos y culturales*. Cuadernos Interdisciplinares, nº 3, Universidad de Zaragoza, Mira Editores, Zaragoza.

Viñuales , E. y Ros, R. M. 1997. *Planetas exteriores. Prácticas*. Equipo Sirius, S. A., Madrid.

La autora:

Ederlinda Viñuales Gavín. Doctora en Matemáticas y catedrática en el I.E.S. Goya de Zaragoza. Es autora de numerosas publicaciones en revistas nacionales e internacionales, y autora o coautora de una docena de libros. Miembro de la IAU (International Astronomical Union), la SEA (Sociedad Española de Astronomía), la ESA (European Space Agency), la EAAE (European Asotiation Astronomical Education) y la ApEA (Asociación de profesores para la Enseñanza de la Astronomía). ederlinda.vinuales@gmail.com