

## Un nuevo juicio a Galileo: Aristóteles frente a Copérnico

Yolanda Cadenas Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Doctora en Filosofía por la Universidad Complutense de Madrid (España).  
Investigadora y Docente en la Universidad Autónoma de Nayarit en Tepic (Nayarit, México).  
Dirección: Callejón Guadalupe Victoria, 31.6080 Tepic (Nayarit, México).  
E-Mail: yolcadenas@hotmail.com. Tel. 311 151 63 33.

**Resumen:** Este artículo persigue demostrar que la defensa galileana del sistema heliocéntrico de Copérnico fue una defensa irracional porque iba en contra de la racionalidad científica de su época. Se trató más bien de un convencimiento personal a favor de aquél pero, en tanto que era algo personal, no había motivos para que los demás científicos contemporáneos suyos lo aceptaran. Aquí no entraré en los mal denominados *argumentos teológicos* ni en la postura de la Iglesia católica; así como tampoco en los argumentos caricaturescos que el propio Galileo pone en boca de los aristotélicos, pues sólo me remitiré a los argumentos científicos.

**Palabras clave:** Galileo. Aristotelismo. Heliocentrismo. Geocentrismo. Física clásica.

**Abstract:** This article seeks to demonstrate that the Galilean defense of the heliocentric system of Copernicus was an irrational defense because it was at odds with the scientific rationality of his time. It was rather a personal conviction in favor of that, but while it was something personal, there was no reason for other scientists of his time to accept it. Here I will not go into the wrong so-called *theological arguments* nor in the position of the catholic Church; neither in the cartoony arguments that Galileo himself puts in the mouth of the Aristotelian, because I will only refer to the scientific arguments.

**Key Words:** Galileo. Aristotelianism. Heliocentrism. Geocentrism. Classical physics.

**Introducción:** Por lo general se considera a Leonardo da Vinci como el modelo del *hombre renacentista*; sin embargo, Galileo Galilei es al menos tan renacentista o más que el primero. Aquello que avala tal afirmación es el hecho de que Galileo – nacido en Pisa el 15 de febrero de 1564 y muerto el año en que nació Newton, 1642 – fue docente en la Universidad de Padua; matemático, físico y filósofo; fue, según los expertos en el tema, una de los mejores escritores en prosa de su época; tocaba instrumentos con gran destreza y componía sus propias melodías; dibujaba y, además, se paseaba por las calles de su ciudad, no sólo para degustar los más delicados vinos, sino como inventor para observar a los artesanos con el objetivo de diseñar algún aparato o dispositivo que ayudara a facilitar el trabajo de éstos. En palabras de Altshuler:

Los eruditos añaden que fue – ¡raro fenómeno! – figura literaria de primera magnitud y aseguran que escribió la mejor prosa italiana de los siglos XVII y XVIII. Componía música y la ejecutaba admirablemente a la vihuela y al órgano. Dibujaba con gran arte, al extremo de que, preguntado en la vejez qué le hubiera gustado ser de no haber sido hombre de ciencia, respondió que pintor. También sabemos que, tanto como disfrutar del buen vino, se complacía en conversar con los artesanos y en aplicar la ciencia a sus problemas prácticos. He aquí, pues, a justo título, la imagen de un hombre verdaderamente excepcional, a caballo entre el Renacimiento y la ciencia moderna. (2002: 14).

Al margen de lo anterior, se conoce a Galileo por sus aportaciones a la teoría de *la resistencia de los materiales* y, sobre todo, a la *cinemática* o mecánica del movimiento geométrico – que es la base física y matemática de la gran síntesis dinámica<sup>1</sup> de Sir Isaac Newton (1642-1727) – y, debido a esto, por ser uno de los primeros pilares de la ciencia clásica. También se le considera el precursor del *método experimental*: la matematización de la realidad – esto es, de los conceptos de la física – y la utilización, como base de la ciencia, de los experimentos, tanto reales como ideales. Además de sus importantes descubrimientos astronómicos; así como por haber sido el primero en utilizar el telescopio – que fue perfeccionado por él mismo – para observar el cielo. Sin embargo, lo más evocado de Galileo por el público en general es su defensa del sistema heliocéntrico de Copérnico y el juicio inquisitorial que padeció en 1633 cuando fue acusado de herejía. En este punto concuerdo de nuevo con Altshuler cuando afirma lo siguiente:

Es cosa generalmente aceptada que se tome a Galileo como fundador de dos ciencias físicas de importancia capital: la mecánica del movimiento y la resis-

---

<sup>1</sup> Donde Newton completa el edificio de la mecánica del movimiento atendiendo a las causas de éste en sus manifestaciones de *fuerzas* y obedeciendo todos los cuerpos – tanto terrestres como celestes – a las mismas leyes mecánicas de cálculo recogidas en su magna obra: *Principios matemáticos de la filosofía natural* que fue publicado – gracias a su amigo Edmond Halley – con el título en latín de *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, el 5 de julio de 1687; también es conocido simplemente como *Principia*.

tencia de los materiales, y que se le considere asimismo el padre de la ciencia moderna. Sus importantes descubrimientos astronómicos son, por supuesto, bien conocidos e indiscutibles, y también se le recuerda por haber concebido o desarrollado algunos instrumentos importantes, como el termoscopio, el reloj de péndulo y el telescopio. Pero, sin duda alguna, lo que más lo distingue del resto de los científicos que le sucedieron es su protagonismo en el escandaloso juicio inquisitorial que se le siguió, ya viejo y enfermo. (2002: 14).

Sin cuestionar de ninguna manera las gloriosas aportaciones de Galileo a la ciencia<sup>2</sup>, en este artículo me centraré en lo último, esto es, en su defensa de las ideas de Copérnico y la irracionalidad – a mi juicio – con la que realizó tal defensa. En este punto se ha de distinguir entre la crítica racional que los científicos aristotélicos de su época realizaban al sistema copernicano y la postura acrítica, dogmática e irracional de la Iglesia católica y sus partidarios o seguidores<sup>3</sup>. Si bien Galileo tardó unos dos años en convencer de sus ideas a algunos de sus colegas contemporáneos y, al menos, medio siglo para que éstas empezaran a adquirir un fundamento racionalmente científico<sup>4</sup>, la Iglesia católica no reconoció su error, respecto a la acusación de herejía de Galileo ni se retractó del juicio inquisitorial en su contra, hasta el siglo XX.

No entraré a debatir la postura teológica debido a su propio carácter dogmático y, por supuesto, acrítica. Así como tampoco lo haré en relación con los “argumentos” en contra del aristotelismo que Galileo puso en boca del personaje Simplicio en su obra de 1632, *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo*<sup>5</sup> porque muchos de ellos son simplistas y no tienen en cuenta el poderoso fundamento científico de la física aristotélica que era la teoría científica que estaba vigente entonces; además, ni el uno ni el otro son el objetivo de estas reflexiones. Sólo me centraré en los argumentos estrictamente científicos de los aristotélicos, por una parte y, por otra, en los argumentos de

---

<sup>2</sup> Para indagar en tales aportaciones recomiendo tanto la lectura de Holton, 2004: 91-158 como la de Rodríguez Jorge; Torres Castilleja, 2010: 1-235. O bien, la propia obra de Galileo, *Consideraciones y demostraciones matemáticas acerca de dos nuevas ciencias*, cuyo título original fue escrito en italiano (y no en latín, como era costumbre en su época): *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze* (1638); el cual, si bien es el último libro publicado por Galileo, en él se recopila gran parte de su trabajo de los treinta años anteriores. Su traducción suele abreviarse como *Dos nuevas ciencias* y, a veces, como *Diálogos sobre dos nuevas ciencias* o *Discurso sobre dos nuevas ciencias*.

<sup>3</sup> Si se desea profundizar en esta cuestión existe una gran literatura, pero en este artículo recomiendo el libro de Artigas; Shea, 2009.

<sup>4</sup> Galileo publicó su *Diálogo sobre los dos sistemas máximos del mundo* en 1632 y Newton sus *Principia* en 1687, aunque no fue aceptada por la comunidad científica inmediatamente, sino que tuvieron que pasar varios años para que esto sucediera, sobre todo, en la Europa Continental.

<sup>5</sup> Fue publicado en Florencia el 22 de febrero de 1632 bajo el título original en italiano *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano*.

los seguidores del sistema copernicano, ciñéndome lo más fielmente posible al contexto histórico en que vivió Galileo y a la ciencia física de este momento sin extrapolar dicho contexto al de la física clásica, que aún no había sido constituida.

### **Galileo y el geocentrismo de Aristóteles**

En el momento histórico en que vivió Galileo fue el aristotelismo y su física – o filosofía natural – aquello que caracterizó a la ciencia. La física de Aristóteles fue la teoría que, hasta ahora, más ha perdurado en la historia de la humanidad, pues estuvo vigente durante algo más de dos mil años:

Aristóteles (384-322) nacido en Estagira, colonia griega de Tracia, fue discípulo de Platón y preceptor de Alejandro por encargo de su padre Filipo de Macedonia [...] Fue hombre de saber enciclopédico y *el primero capaz de expresarse en forma científica*. Por eso dominó el pensamiento occidental durante veinte siglos. Como científico fue esencialmente biólogo. *En cuanto a la física, muchas de sus ideas son erróneas desde nuestro punto de vista actual pero en general proceden de la observación y en este sentido su obra es una defensa de la experiencia como fuente primordial del conocimiento de la naturaleza*. Esta preferencia por la observación le hace destacar lo cualitativo con cierto desdén por la matemática. Desconfía de la deducción y le anima un espíritu nuevo en cuanto a su inquietud por la realidad. *Fue en todo caso un innovador* lo que no puede decirse de todos sus seguidores. (Sánchez del Río, 1985: 12; énfasis propio).

Algunos científicos desde la *modernidad* (etapa histórica que abarca desde el siglo XVI hasta el XVIII) consideran que la física aristotélica, por ser cualitativa, pertenece al ámbito filosófico antes que al área de la física; pero esta ciencia tuvo que comenzar de alguna forma y – les guste o no a tales científicos modernos y contemporáneos –, con la física aristotélica fue como se inició, de modo que Aristóteles no fue sólo filósofo, sino también un *científico* y, como afirma Sánchez del Río en la anterior cita, fue un *innovador por ser el primero en expresarse de forma científica en el ámbito de la física y por indagar en el conocimiento de la naturaleza y del movimiento atendiendo a sus causas a partir de la observación y de la experiencia*.

Por tanto, puede afirmarse que, si bien su física era cualitativa y no matematizó ningún concepto, sí fue una teoría científica dentro de los cánones científicos de su época aunque no se considere “ciencia” en el marco moderno. Pero, se ha de reconocer que ésta ha pasado por diferentes estadios en su evolución o maduración, que suelen considerarse tres hasta la fecha: la ciencia antigua o pre-clásica; la ciencia clásica o ciencia moderna y la ciencia contemporánea. Además, muchos problemas, planteamientos y conceptos que se consideraron científicos en una determinada época, dejaron de serlo en otra y viceversa; es decir, algo que no se consideró científico en un determinado marco concep-

tual sí se incluyó en otro nuevo ámbito científico<sup>6</sup>. El antecedente histórico de la ciencia clásica es la ciencia antigua o pre-clásica que no debe confundirse con el pensamiento pre-científico, pues éste sólo se aplica a la antigua época en que los seres humanos buscaban una explicación mágica o sobrenatural (dioses) de los acontecimientos naturales. En suma, sí hubo pensamiento científico antes de los trabajos de Galileo y no puede caracterizarse como pre-científico a todo el conocimiento que se enmarcó teórica y conceptualmente en un sistema científico antes de pasar al siguiente estadio que constituyó la ciencia moderna.

Este tipo de conocimiento científico pre-clásico (pero no pre-científico) comparte con todos los demás el hecho de lograr cohesionar el conocimiento de cualquier área científica en una teoría o *sistema* conceptualmente coherente y lógicamente consistente bajo principios, conceptos y fundamentos necesariamente entrelazados por una interconexión precisa y reforzados por una vinculación íntima e inquebrantable, de manera que si se elimina o se modifica sustancialmente algún elemento fundamental del sistema, éste se colapsa y se desmorona. Así se conforma un marco científico donde todos sus elementos están organizados sin contradecirse entre sí y mantienen una correlación vinculante y correctamente fundamentada que ha sido elaborada con argumentos bien contruidos. Ahora bien, en el ámbito del conocimiento físico o de la filosofía natural<sup>7</sup>, además de todo lo anterior, el sistema se conforma con el objetivo de explicar los movimientos o cambios que se dan en la naturaleza<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup> Por ejemplo, el flogisto o el calórico fueron consideradas sustancias con realidad física que constituían objeto de estudio científico en una determinada época y que, más tarde, fueron excluidas de aquél cuando se entendió que el oxígeno era el responsable de los fenómenos, como la oxidación, que se le atribuían anteriormente al flogisto. De igual modo que el calórico, como sustancia, también desapareció del horizonte científico durante el avance de la termodinámica cuando fue sustituido por la energía térmica y la temperatura como las causas de los fenómenos que habían sido atribuidos a dicha sustancia, el calórico. También el espacio absoluto de la física clásica o moderna fue suprimido por la física contemporánea y ciertos principios de conservación también fueron modificados al igual que se plantearon otros nuevos principios de conservación y elementos o conceptos científicos que no estaban presentes en la física anterior, la física clásica, como el principio de conservación de la simetría o conceptos como el de 'superposición de estados', 'entrelazamiento cuántico' e incluso la realidad 'virtual' de las partículas que tienen una existencia potencial pero no actual, aunque pueden pasar de aquel estado a este otro; es decir, el paso de "la potencia al acto" que es una idea aristotélica no presente en la ciencia clásica o moderna pero sí en la física contemporánea o modelo estándar de física de partículas.

<sup>7</sup> Es bien conocido que el vocablo 'física' proviene del griego, *physis*, y significa 'naturaleza'; de ahí que durante siglos se conociera a la física como filosofía natural, incluso se recordará que el título elegido por Newton para su magna obra es "Principios matemáticos de la filosofía natural".

<sup>8</sup> En el marco de la física clásica se denominó 'mecánica' a la rama de la física que estudia el movimiento natural tanto en su aspecto cinemático o geométrico, que es una mera descripción matemática del movimiento sin atender a sus causas, como en su faceta *dinámica* cuando ya sí se introduce en la explicación del movimiento las causas de éste en términos de fuerzas.

Si respetamos todos los anteriores preceptos de la ciencia en general y de la física en concreto, entonces se ha de admitir que la física aristotélica es una teoría científica que constituye un *sistema* explicativo de la naturaleza sin recurrir a nada sobrenatural. Si bien siglos atrás los conocidos como “filósofos milesios” también se preocuparon por dar una explicación de la naturaleza – y, de hecho, Aristóteles tomó algunas de sus ideas –, ellos no lograron sistematizarlas en una teoría como sí hizo el filósofo de Estagira. Por ello, la suya fue la primera teoría física que conformó un sistema y un marco conceptual cuyo objetivo era *explicar el movimiento atendiendo a sus causas*; el mismo propósito que persigue la dinámica clásica<sup>9</sup>. Por este motivo, Aristóteles comienza así su *Física*:

Puesto que el saber y el comprender en todas las investigaciones que tienen principios o causas o elementos, se da a partir del conocimiento de éstos (pues creemos conocer cada cosa una vez que conocemos las primeras causas y los primeros principios hasta los elementos), es obvio que también acerca de la ciencia de la naturaleza se debe intentar determinar primero lo que se refiere a sus principios. (2001:1).

Entrando ya en el contenido de la teoría aristotélica, comenzaré con la indicación de que, según ésta, el estado natural del cosmos, incluida la Tierra, es el *estado de reposo* (inmutable, ordenado, sin cambios) y, si bien los cielos permanecen en este estado, en el mundo sublunar, por el contrario, sólo contemplamos el caos de constantes cambios. Por lo tanto, se hace necesario explicar estos cambios o movimientos y, como dice Aristóteles, estudiando las causas (o *principios*) por las cuales se producen. Como es bien conocido, separó la física terrestre de la física celeste (astronomía y cosmología), aportando explicaciones diferentes del mundo sublunar y del supralunar<sup>10</sup>. Por razones de espacio y de relevancia con respecto al tema de este estudio, no voy a profundizar en la física terrestre y sólo mencionaré las ideas de ésta que mantengan una relación con los argumentos de los aristotélicos en defensa del sistema geocéntrico ptolemaico propio de la astronomía y de la física celeste. Expondré los aspectos fundamentales de su física terrestre porque son imprescindibles para entender tanto su física celeste como los argumentos

---

<sup>9</sup> Es decir, lo mismo que más tarde hará Newton en su dinámica – explicar el movimiento según sus causas –, aunque, desde luego, ya se trata de una teoría cuantitativa con sus propios conceptos a partir de los cuales definió las magnitudes físicas y las leyes matematizadas con las que explicó las causas de los movimientos de todos los cuerpos materiales – tanto en la Tierra como en el resto del universo – en función de conceptos dinámicos como el de *fuerza*, donde se relaciona la masa con la aceleración.

<sup>10</sup> Un resumen breve pero conciso acerca de la física terrestre y la celeste de Aristóteles se halla, entre otros libros, en Biro, 2009: 17-29; así como también un estudio más profundo en Koyré, 2005b: 7-52, o bien del mismo autor, Koyré, 2000: 16-17 y 76-82.

que manejaron los aristotélicos para defender el sistema geocéntrico de Ptolomeo en la época de Galileo.

En la Tierra sólo existe caos, perpetuos cambios e imperfección, lo cual impide que todo se mantenga en reposo en su *lugar natural* o *lugar propio* y propicia que esté sometido a la imperfección de un caos provocado por los incesantes movimientos que se dan en esta región o mundo sublunar; en consecuencia, se ha de averiguar por qué ocurre esto<sup>11</sup>. En cuanto a la naturaleza de todos los cuerpos terrestres es el estar constituidos por los conocidos cuatro elementos: agua, aire, tierra y fuego. En relación con esto, Aristóteles en el libro IV escribe:

Además las traslaciones de los cuerpos naturales simples, como fuego, tierra y los de esta índole no sólo indican que el *lugar es algo*, sino *que tiene cierta fuerza*. En efecto, cada cuerpo es llevado, a no ser que haya un impedimento, a su *lugar propio* uno hacia arriba, otro hacia abajo; *arriba y abajo son partes y especies del lugar*, como también los restantes de las seis direcciones [...] En efecto, “arriba” no es cualquier parte, sino hacia donde se trasladan el fuego y lo ligero; del mismo modo, “abajo” no es cualquier parte, sino hacia donde cae lo pesado y lo terrenal, *así que estas direcciones no se distinguen sólo por su posición, sino también por la fuerza*. (2001: 69-70; énfasis propio).

La noción de “lugar” cumple un rol fundamental en su física porque, como él mismo acaba de afirmar en la cita anterior, el lugar es “algo” hacia donde se dirigen los cuerpos y donde se mantienen en reposo cuando se trata de su lugar propio o natural. Aún más, el lugar *ha de ser algo* porque si no lo fuera, entonces, no sería o existiría: “sería nada” y estaría vacío; lo cual es un sinsentido. De manera que en el pensamiento aristotélico no existe el vacío: su universo es un cosmos ordenado y lleno (sin “lugares vacíos”) donde se distinguen claramente las posiciones de los cuerpos y las direcciones en las que se mueven porque, si hubiera vacío, los cuerpos no podrían trasladarse “cruzando o desplazando la nada”. Por todo esto, el lugar no es un “receptáculo vacío” – como sí se entenderá así el *espacio absoluto* de la física clásica – sino que siempre está “lleno de algo”, sea agua, aire, tierra, fuego (o alguna mezcla de ellos), o bien de éter, que son medios materiales, más o menos elásticos, a través de los cuales se mueven los cuerpos por desplazamiento<sup>12</sup>; he aquí la razón de por qué se afirma en esta cosmovisión que la naturaleza aborrece el vacío (*horror vacui*).

---

<sup>11</sup> Por el contrario, el mundo supralunar, que nos presenta Aristóteles en la física celeste, se caracteriza por su perfección, inmutabilidad, orden y por estar todos los cuerpos astrales compuestos de un material muy diferente a cualquiera que pudiera encontrarse en la Tierra: el *éter* o *quinta esencia* aristotélica, puesto que ningún elemento terrestre tiene la capacidad de infundir la perfección, la inmutabilidad y el orden que se *observa* en la región celestial.

Protrepis, Año 4, Número 7-8 (noviembre 2014 - abril 2015, mayo - octubre 2015).  
www.protrepis.cucsh.udg.mx

Además de esto, Aristóteles defiende que “el lugar es algo” porque posee *cierta fuerza*, la cual determina el movimiento del cuerpo, ya que es la propia naturaleza – que actúa ordenando o acomodando los cuerpos en su lugar propio –, en su acepción de *cosmos ordenado*, la que ha estipulado los “lugares naturales” hacia donde se dirige cada cuerpo naturalmente en función del elemento que lo compone; a este tipo de movimiento, Aristóteles lo denominará “movimiento natural”. Por consiguiente, si no existieran lugares naturales, como el lugar natural del fuego, que es arriba y el lugar natural de la tierra, que es abajo, el espacio sería homogéneo y no podríamos diferenciar ninguna dirección ni el lugar en el que nada está, ni tan siquiera donde nosotros mismos estamos; así como tampoco se podría establecer la causa del movimiento de todo cuerpo, la cual es la *tendencia, tensión, empuje, tracción o arrastre* “forzoso” hacia su lugar natural, o bien la presencia de una fuerza externa que se propone sacar o desviar al cuerpo de él. Por esta razón, el filósofo estagirita distingue entre “movimientos naturales” y “movimientos violentos”.

Los primeros, como ya describí, son aquéllos hacia los que se dirige inevitablemente el cuerpo en la búsqueda de su lugar natural, el cual está *forzando* al propio cuerpo a hacerlo: el fuego y todo lo ligero se mueve naturalmente hacia arriba; la tierra y todo lo más pesado se dirige hacia abajo. En cambio, los movimientos violentos son aquéllos que “violentan” – valga la redundancia – u obligan al cuerpo a salir de su lugar natural por medio de una fuerza externa a ellos. Por ejemplo, cuando uso la fuerza física de los músculos de mi cuerpo para levantar una pequeña piedra del suelo y lanzarla hacia arriba, estoy imprimiendo una fuerza externa a la piedra que la obliga a salir de su lugar natural; la cual volverá a caer cuando la piedra haya podido superar la fuerza impulsora de mis músculos, es decir, cuando la fuerza interna de la materia – su principio activo que la dirige hacia su lugar natural (el suelo) – haya logrado vencer a la fuerza externa con la cual mis músculos violentaron su estado natural, que es mantenerse en reposo en el lugar natural que le es propio.

En definitiva, los cuerpos materiales poseen una fuerza interna, o un principio de movimiento, que hacen de la materia algo activo y del espacio – que cruzan y por el que se mueven – un espacio lleno, heterogéneo y relativo pues son las relaciones entre los cuerpos aquello que lo determina, ordena y conforma<sup>13</sup>: las direcciones espaciales son relativas o dependientes de los lugares naturales cuyas posiciones ocupan los cuerpos entre sí.

---

<sup>12</sup> Como ocurre, por ejemplo, cuando nadamos pues el movimiento de nuestro cuerpo provoca el desplazamiento de las partes o porciones del agua. De igual modo, cuando nos trasladamos por el espacio de manera ordinaria, aquello que hacemos a cada paso es desplazar las posiciones del aire, que nos rodea, envuelve y, por supuesto, llena dicho espacio.

He aquí el primer argumento *físico* en contra del movimiento terrestre lejos del centro cósmico, pues, debido a todo lo anterior, si la Tierra se moviera y no estuviera en reposo, ocupando su lugar natural o “propio” en el centro, entonces no podríamos distinguir según la física aristotélica – que recordemos que era la ciencia que estaba vigente en la época de Galileo – entre las direcciones de “arriba” y “abajo”, provocando un caos en la naturaleza del movimiento del universo, donde – según la expresión aristotélica – *hasta las aves perderían su orientación*.

Una posible objeción acerca de si esto constituye o no un argumento físico en contra del movimiento terrestre es que los lugares naturales no son empíricamente demostrables; sin embargo, esta objeción se puede aplicar a muchos otros principios y nociones tanto de la física clásica como de la física contemporánea. Por ejemplo, el principio de inercia y el espacio absoluto de la física clásica tampoco han sido nunca observados ni demostrados de manera empírica; de hecho, son postulados teóricos del marco clásico donde se ha idealizado la realidad física para que sirva de fundamento a sus ecuaciones sobre el movimiento de los cuerpos. En el caso de los lugares naturales y del principio activo de la materia en la física aristotélica ocurre lo mismo<sup>14</sup>, pues son postulados teóricos que otorgan una base sobre la cual cimentar la explicación del movimiento y de sus causas en el marco de la física de Aristóteles y, así, constituir un argumento teórico que hunde sus raíces en la experiencia de observar que lo pesado cae y lo ligero sube.

---

<sup>13</sup> De un modo *semejante* a lo que ocurre en la física relativista de Einstein, pues en ella el espacio ya no es el de la física clásica – absoluto, homogéneo e infinito –, sino relativo, heterogéneo y cerrado (finito pero ilimitado como ocurre con la figura de una esfera), de tal manera que es la materia – la presencia de un cuerpo masivo – aquello que da forma al espacio creando campos gravitatorios que lo curvan y distorsionan, contrayendo algunas zonas y dilatando otras de manera que las partes o lugares del espacio no son iguales entre sí, haciendo heterogéneo al espacio. Por supuesto, en la física de Einstein no son los *lugares naturales* aquello que destruye la homogeneidad del espacio, sino la presencia de un cuerpo masivo y su campo gravitatorio (algo que se asemeja más a la *materia activa* de Aristóteles que a la *materia pasiva* de la física clásica); pero, de una forma u otra, son las relaciones entre los cuerpos materiales aquello que ordena y da su forma al espacio estableciendo un principio de diferenciación entre las distintas partes, regiones o lugares espaciales.

<sup>14</sup> Dicho con otras palabras, si la objeción a este argumento físico contra el copernicanismo es que los lugares naturales no son empíricamente demostrables, entonces también deberíamos aplicar el mismo criterio y la misma objeción a gran parte de la ciencia, como en el ejemplo del principio clásico de inercia y la noción de espacio absoluto, dado que ninguno ha sido empíricamente demostrado ni observado: nunca hemos comprobado que un cuerpo mantenga su estado inercial de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo indefinidamente pues esto sólo podría ocurrir en el marco de un espacio absoluto que tampoco ha podido observarse nunca. Tanto el principio de inercia como el espacio absoluto son idealizaciones de la física clásica que no tienen una correspondencia empírica pero que operan como postulados teóricos ideales para otorgar una base o fundamento a las leyes clásicas del movimiento.

Aún más, esta idea acerca de que los cuerpos tienden al reposo cuando están ocupando su lugar natural y cuyo estado de reposo sólo se altera cuando interviene una fuerza externa a ellos que los obliga a moverse y salir de dicho lugar no es tan diferente, como se suele pensar, a la noción inercial de la física clásica cuando ésta afirma que todo cuerpo permanece en su estado inercial de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que intervenga una fuerza externa que les obligue a cambiar de estado: si algo está en reposo, seguirá estándolo indefinidamente y si está en movimiento inercial (que es el uniforme y rectilíneo), seguirá moviéndose de esta forma permanentemente en el marco de un espacio absoluto (homogéneo, plano e infinito) siempre y cuando no aparezca una fuerza que lo altere. Por supuesto que también hay grandes diferencias entre la idea de la física aristotélica y de la física clásica. Una de ellas es que en esta última la materia es pasiva (o inerte) porque obedece al principio de inercia como algo externo a la naturaleza de la materia y, por lo cual, tal principio sólo puede concebirse en el marco de un espacio absoluto entendido como un “receptáculo vacío” y homogéneo donde no hay fuerzas que saquen al cuerpo de su estado inercial (o bien de reposo, o bien de movimiento inercial: uniforme y rectilíneo). En cambio, en la física de Aristóteles, la materia permanece en reposo en su lugar natural – o en movimiento circular si se trata de un cuerpo celeste, pues es su estado de movimiento natural – porque habita en su propio seno un principio activo o una “fuerza” con la que se resiste a cambiar de estado (de reposo o de movimiento circular) para no salir de su lugar natural, o bien, si está fuera de él (debido a una fuerza externa), empleará su propia fuerza interna para volver a él. Otra de las diferencias es que el movimiento inercial – y, por lo tanto, uniforme y perpetuo – de la física clásica es el rectilíneo; por el contrario, en la física aristotélica el movimiento constante y uniforme o inmutable – sin cambios – es el circular. Más adelante volveré sobre esta idea del movimiento circular pero, no sin antes señalar otra diferencia más: los lugares naturales aristotélicos no permiten la existencia de un espacio absoluto y homogéneo, pues los propios lugares naturales están marcando diferencias en el espacio, el cual sólo puede ser heterogéneo y relativo.

En cuanto a la física celeste o cosmología, Aristóteles defendió el sistema geocéntrico que había protagonizado, desde siglos atrás, la explicación de los cielos y que se fue constituyendo gracias a las aportaciones de diversos astrónomos en la conocida como *Astronomía Ptolemaica*; defendida por Platón, Eudoxo, al igual que los filósofos y astrónomos restantes a excepción de muy pocos entre los que se encuentra Aristarco de Samos (siglo II a. de N.E.), pasando por Hiparco de Nicea (?-? 127? a. de N.E.), por ejemplo, hasta Ptolomeo. Tal sistema geocéntrico consistía en círculos o esferas concéntricas en torno a la Tierra – que estaba en el centro por ser el cuerpo más pesado del cosmos – y alrededor de la cual se movían cada uno de los cinco planetas observados entonces, o también denominados *cuerpos errantes*. Además de un

último círculo o, más bien, esfera que conformaba la conocida como de las estrellas fijas, donde se hallaba el *motor inmóvil* que propuso este filósofo y que ponía en movimiento a todo lo demás.

Como se recordará, el cosmos griego es esférico, cerrado, ordenado y eterno: es ordenado porque cada elemento celeste está ocupando su lugar natural siguiendo un movimiento circular que es el movimiento natural que le corresponde por ser considerado en esa época *inmutable*, perfecto y eterno (sin tener las limitaciones de un inicio ni de un final). El universo de los griegos debe ser eterno porque la idea contraria – esto es, que tuviera un inicio – implicaría que en algún momento fue creado y esta noción de creación no estaba en la mentalidad, cultura o imaginario colectivo de esta época en Grecia: el cosmos no puede tener principio ni fin para poder ser perfecto (ilimitado) del mismo modo que la esfera es perfecta porque ésta no tiene límites que marquen un principio ni un fin y, en cierto sentido, también se puede decir que es “eterna”. Además, es cerrado por la forma que le caracteriza de ser una gran esfera – la cual es una figura cerrada –, dado que, según las *observaciones realizadas* hasta entonces, la bóveda celeste se percibía de esta forma<sup>15</sup> – y no un plano infinito – que, a su vez, contiene otras esferas concéntricas; el modelo sería algo parecido a una cebolla cuyo centro es la Tierra y está envuelta por varias capas, que son las esferas correspondientes a los planetas, hasta llegar a la última capa o bóveda celeste, la de las estrellas fijas.

Este modelo de esferas concéntricas tiene problemas de consistencia porque ciertos fenómenos observados no podían ser explicados por el modelo teórico a no ser que se le incorporaran algunos artificios matemáticos – las órbitas deferentes, los epiciclos, el punto ecuante y el punto geométrico del centro del cosmos – que cuestionaban ontológicamente la realidad física de dicho modelo puesto que, de hecho, no existían al no tener un referente real en la naturaleza. Pese a ello, tales artificios eran ingeniosos y lograban su objetivo de explicar el movimiento retrógrado de los planetas, la trayectoria excéntrica de éstos, el movimiento aparentemente “no inmutable” – esto es, no uniforme o de velocidad no constante –, entre otros. Así, conseguían “salvar las aparien-

---

<sup>15</sup> “Las «estrellas fijas» y la Vía Láctea parecían moverse durante la noche como si estuvieran rígidamente unidas a una bóveda invisible que girase alrededor de un punto fijo en el cielo (que ahora llamamos *Polo Norte Celeste*). Por las *observaciones realizadas desde distintos puntos de la superficie terrestre podía deducirse que esta bóveda era como una gran esfera que rodeaba a la Tierra y la propia Tierra era una esfera* [...] durante el tercer siglo a. de C. se conocía con suficiente exactitud el tamaño de la Tierra, pero hubo que esperar hasta el siglo XIX para que los científicos pudieran determinar, aproximadamente, la distancia de algunas estrellas a la Tierra [...] Los griegos estaban familiarizados con el hecho de que la «esfera celeste» hipotética que contenía las estrellas parecían girar uniformemente de Este a Oeste volviendo a su punto de partida cada veinticuatro horas. Nos referimos a este movimiento como rotación *diurna*”. (Holton, 2004: 5-6; énfasis propio). Hoy en día se afirma que la Tierra se mueve en un movimiento contrario al de las estrellas fijas, es decir, de Oeste a Este.

cias”, explicando el movimiento *aparentemente* no circular ni uniforme de los planetas alrededor de su centro físico, la Tierra, pero que sí eran circulares y con velocidad uniforme alrededor del punto ecuante y del centro geométrico del Universo, aunque no fueran físicamente reales.

Las órbitas deferentes eran, simplemente, aquéllas donde los planetas giraban circularmente en torno al centro del universo, la Tierra. Los epiciclos eran pequeñas órbitas alrededor de las cuales también giraba el planeta y que, a su vez, se movían circularmente siguiendo la órbita deferente de su correspondiente cuerpo planetario. La trayectoria excéntrica de algunas deferentes consistía en estar levemente desviada del centro. El movimiento retrógrado de los planetas se explicaba por la presencia de epiciclos que giraban en torno a las deferentes de éstos, el cual consistía en que, desde la teoría geocéntrica y a simple vista, podía observarse que los planetas trazaban bucles alrededor de su órbita en torno a la Tierra; es decir, parecía que su posición no siempre avanzaba hacia el Este en su trayectoria diaria, pues en ciertos momentos parecían detenerse y retroceder durante días o semanas para luego volver a parar y reiniciar su marcha hacia el Este. Era como si los planetas a veces avanzaran en una dirección y luego en otra, retrocediendo en su órbita; marchaban hacia adelante y hacia atrás.

Además, para poder ajustar las órbitas circulares y de velocidad uniforme a las observaciones del movimiento de los planetas, que no coincidían del todo, pues parecían cambiar de velocidad, Ptolomeo introdujo el *punto ecuante* vinculado al epiciclo en torno al cual orbita el cuerpo celeste: cada uno de estos epiciclos sí forman círculos perfectos y con velocidad uniforme respecto al punto ecuante correspondiente a cada planeta, pero dicho punto no coincidía con la posición central de la Tierra y cada planeta tenía su propio ecuante en relación con su respectivo epiciclo. Así, con el punto ecuante se solucionaba el “aparente” cambio de velocidad de los planetas en torno a sus epiciclos, pues, si pudiéramos mirar al planeta desde este punto, veríamos que su velocidad sí es uniforme.

En cuanto a las órbitas excéntricas añadiré que éstas se refieren a que los planetas no trazan un círculo perfecto en torno a la Tierra y, en consecuencia, la posición de la Tierra se encuentra algo desplazada respecto al centro geométrico del cosmos; dicho centro se localizaba en otro punto, pero no le concedían realidad física – pues el centro físico y real es la propia Tierra –, sino sólo matemática como un artilugio para seguir utilizando movimientos u órbitas circulares. Así, conseguían explicar el movimiento aparentemente no circular ni uniforme de los planetas alrededor de su centro físico, la Tierra, pero que sí eran circulares y con velocidad uniforme alrededor del punto ecuante y del centro geométrico del universo, que – insisto – no eran físicamente reales; pues sólo eran de naturaleza geométrica que servían de artilugios matemáticos sin ninguna realidad física.

Dicho brevemente, con los planetas rotando dentro de sus epiciclos, que giraban a su vez siguiendo la órbita de sus deferentes, se explicaba el movimiento retrógrado de los planetas; con el punto ecuante se solucionaba el “aparente” cambio de velocidad de los planetas en torno a sus epiciclos; con las órbitas excéntricas cuyo centro geométrico está desplazado y no coincide con su centro físico real, esto es, la Tierra, los ptolemaicos conseguían mantener la idea incuestionable del movimiento circular porque sí lo era con respecto a aquel centro geométrico<sup>16</sup>. Los astrónomos ptolemaicos tenían algo así como una “caja de herramientas” de la cual sacaban el instrumento o herramienta matemática que pudiera dar cuenta de algún desajuste entre las observaciones realizadas y la persistente idea de las órbitas circulares de velocidad uniforme, pues consideraban, desde la antigüedad, que tanto el círculo como la esfera eran la imagen de la perfección misma y que, por lo tanto, se correspondía con la perfección celeste.

El problema de este modelo y de cualquier otro que consistiera en esferas y círculos concéntricos – sea la Tierra o el Sol el elemento que estuviera en el centro – es que, para dar explicaciones o descripciones astronómicas cada vez más detalladas, se necesita introducir más y más círculos en el caso del geocentrismo y, en el caso de ambos, desplazar a la Tierra o al Sol del centro geométrico del universo.

Tales inconvenientes provenían de la idea de perfección del círculo que, incluso se vinculaba a la naturaleza o esencia de los cuerpos astrales, pues era una necesidad teórica postular que todo lo que conformaba el cielo estuviera compuesto de algo totalmente distinto a los elementos terrestres dado que éstos no podían dar cuenta de la perfección celeste. Por ello, era fundamental introducir un *quinto elemento* o *quinta esencia*, el *éter*, porque éste era un elemento puro, inmutable y el más liviano que pudiera imaginarse, *cuyo estado natural era estar moviéndose en círculos*: un movimiento constante y perfecto, que no tiene principio ni fin, el cual es afín a la naturaleza de aquél<sup>17</sup>.

Se trata de una idea arcaica que el círculo y la esfera son la imagen de la perfección misma y, por lo tanto, era *obvio* que se debía corresponder con la

---

<sup>16</sup> Para mayor información sobre estas argucias de la teoría geocéntrica puede consultarse Holton, 2004: 20-30.

<sup>17</sup> “El éter es, por definición, puro e inmutable. Tiene su propio movimiento natural apropiado a su naturaleza, movimiento sin principio ni fin y que se mantiene siempre en su lugar natural: “movimiento circular”. Así, el uso de círculos para explicar los movimientos de los cuerpos celestes, como fue sugerido por Platón, no era simplemente una conveniencia matemática; era una necesidad filosófica en el sistema de Aristóteles”. (Holton, 2004: 11-12). Al caracterizar Holton en este texto “el uso de círculos para explicar los movimientos de los cuerpos celestes” como “necesidad filosófica”, pienso que no llega a expresar el alcance de tal necesidad en toda su magnitud porque, además se trata de una necesidad ideológica, científica, lógica y cultural; es una necesidad absoluta.

perfección celeste. La perfección del círculo – y de la esfera – era una idea tan arraigada en la cultura y en la forma griega de conceptualizar que no sólo era indiscutible, sino que se asumía de manera acrítica por pertenecer, antes que al ámbito del pensar consciente, a un precepto ubicado como una estructura tácita en el intelecto griego que era extremadamente difícil – si no imposible – de combatir y de explicitar de manera racional y reflexiva.

Si bien la idea de perfección del círculo no era un argumento científico, sino un supuesto latente en la mentalidad preclásica, una vez asumida esta suposición, era lógicamente razonable vincularla a la perfección e inmutabilidad del liviano y sutil éter que era el elemento constituyente de un cosmos también esférico y perfecto.

En definitiva, según la física aristotélica, la causa del movimiento de todos los cuerpos terrestres era que se movían buscando su lugar natural para permanecer en reposo en él y del que habían sido sacados por una fuerza externa a ellos. En cambio, el mundo celeste se movía en círculos concéntricos dentro de su propia esfera y con velocidad uniforme porque éste era su movimiento natural – perfecto, ordenado e inmutable –; en cuanto al elemento natural que integraba y constituía todo el mundo celeste era el éter: la sustancia más liviana y sutil jamás concebida.

Es cierto que este éter o quinta esencia aristotélica jamás ha sido observada y que tampoco puede ser empíricamente demostrada, pero, al igual que ocurre con los lugares naturales – o con el principio de inercia en la física clásica –, es un principio teórico que se postula como fundamento para conservar la coherencia del marco de la física aristotélica: debe existir un quinto elemento (el éter) que es completamente diferente a cualquiera que pueda hallarse en la Tierra, dado que ningún elemento terrestre conocido puede ser la sustancia que conforme a los cuerpos celestes debido a que ninguno de aquellos elementos es capaz de sustentar la perfección, inmutabilidad y orden que se observa en la región celestial; así como tampoco el tipo de movimiento natural de los cuerpos de esta región, el cual requiere que estos orbes celestes sean los objetos más livianos y “etéreos” del universo para que dicho movimiento natural sea uniforme, inmutable y eterno, tal y como es el propio cosmos. Por ello – y esto es lo decisivo –, era más fácil mover todos los cuerpos celestes y las esferas que los contenían, esto es, lo más liviano y cuyo estado natural era estar en movimiento circular, que hacer que la Tierra se moviera, la cual se encontraba en su *lugar natural* en el centro del universo e inmóvil por la naturaleza de su pesantez. En este sentido se pronuncia Herbert Butterfield en su libro *Los orígenes de la ciencia moderna*:

Por lo menos algunas de las ventajas del sistema de Copérnico son más bien una ilusión óptica de los siglos más recientes. Hoy en día podemos decir que se requiere menor esfuerzo para mover la Tierra en su giro sobre su eje que para desplazar todo el Universo en su revolución de veinticuatro horas alrededor de

la Tierra; pero en la física aristotélica se requería algo colosal para desplazar la Tierra pesada e inerte, en tanto que los cielos estaban hechos de una sustancia sutil que se suponía sin peso, y les era comparativamente más fácil hacerlos girar, puesto que el girar estaba de acuerdo con su naturaleza. (p. 27).

He aquí el segundo gran argumento en contra del movimiento de la Tierra, pues aquello que sí era concebible, comprensible e, incluso, lógico en esta época era que todo el cosmos, debido a su levedad, se moviera en torno a la Tierra y no ésta, ya que era el elemento más pesado y, por esta causa, ocupaba inmóvil y en reposo el centro del universo que era su lugar natural: ¿qué fuerza tan descomunal presente en todo aquél sería capaz de hacer mover la Tierra de dicho centro o lugar natural?

### **Galileo y el heliocentrismo**

En el periodo histórico en que vivió Galileo no eran muchos los argumentos o pruebas a favor de la teoría heliocéntrica, no obstante y pese a los anteriores inconvenientes provenientes de la física aristotélica, se les debe dar su merecido reconocimiento pues sí tuvo facetas positivas<sup>18</sup>. Entre ellas está el gran logro de eliminar el artificio matemático que había introducido Ptolomeo y conocido como el *ecuante* para explicar el movimiento aparentemente no circular ni uniforme de los planetas alrededor del centro físico de su propio epiciclo, al cual me referí más atrás: ahora todos los movimientos eran circulares y uniformes respecto a sus centros propios.

Además el sistema de Copérnico tiene la ventaja de poder asumir las fases del planeta Venus que Galileo descubrió usando el telescopio y por qué este planeta nunca aparece lejos del Sol. También aporta una explicación parcial, algo más precisa o sencilla – desde el punto de vista matemático – del movimiento irregular de la órbita lunar porque reduce (aunque no es suprimido del todo) el uso del otro artificio matemático de los ptolemaicos, la *órbita excéntrica*, para dar razón de aquél.

Si bien el heliocentrismo no puede prescindir del todo de los epiciclos, los círculos deferentes y las órbitas excéntricas, sí tiene una explicación mejor de la *precesión* de los equinoccios: es simplemente otro aspecto del movimiento gradual del polo Norte celeste<sup>19</sup>.

Otra solución que aportó, aunque también parcial, fue al problema del movimiento retrógrado de los planetas evitando que los círculos de las órbitas

---

<sup>18</sup> “Esta representación heliocéntrica tiene, al menos, una ventaja inmediata: da una interpretación del hecho de que los planetas se aproximen a la Tierra en unas ocasiones y en otras se alejen, explicando así las observaciones de la variación del brillo de los planetas durante el año”. (Holton, 2004: 17).

Protrepis, Año 4, Número 7-8 (noviembre 2014 - abril 2015, mayo – octubre 2015).  
www.protrepis.cucsh.udg.mx

deferentes y los círculos de los epiciclos – en torno a los cuales se mueven los planetas – giraran en diferentes direcciones opuestas. Pues, desde una teoría heliocéntrica, que además propusiera que los planetas se mueven a distintas velocidades orbitales unos de otros y que también orbitan en torno a sus propios epiciclos – que, como ya advertí, no fueron eliminados del todo en la teoría de Copérnico –, puede explicarse en parte ese aparente movimiento retrógrado o de retroceso, porque es la Tierra, que gira a su propia velocidad, la que se ve adelantada por otros planetas más veloces. Pero, cuando éstos son más lentos, es la Tierra la que se adelanta y parece que hemos dejado atrás al planeta; es decir, parece que ha retrocedido. La explicación de este fenómeno es algo más sencilla desde el sistema copernicano, con los presupuestos que antes he indicado, que desde la teoría geocéntrica pues la primera evita que los círculos, en torno a los cuales se mueven los planetas, tuvieran diferentes direcciones. De la siguiente manera el propio Copérnico – en una cita incluida por Holton – explica el movimiento retrógrado de los planetas desde el nuevo sistema astronómico:

La ventaja más obvia del sistema heliocéntrico es la de ofrecer una explicación mucho más natural del movimiento retrógrado de los planetas [...] Según explica Copérnico en el *Commentariolus*: “Esto ocurre en razón al movimiento no sólo del planeta, sino también de la Tierra, que cambia de posición en el gran círculo (su órbita alrededor del Sol). Pues como la Tierra se mueve más rápidamente que el planeta, la visual dirigida hacia el firmamento retrocede y la Tierra neutraliza con exceso el movimiento del planeta. Esta regresión es más notable cuando la Tierra está más cerca del planeta”. Sin embargo, la Tierra tiene dos movimientos distintos en el sistema de Copérnico: gira alrededor de su propio eje y se mueve alrededor del Sol. Esto no sólo simplifica la explicación de los movimientos planetarios, sino que permite aceptar que la esfera exterior de las estrellas fijas permanece en reposo. Copérnico no previó que este cambio, aparentemente trivial, podía conducir a consecuencias enormes; si las estrellas no giraban en conjunto, no era necesario que todas estuvieran situadas a la misma distancia de la Tierra; quizás estaban dispersas por todo el espacio hasta el infinito. (2004: 34-36).

En efecto, dado que en el sistema copernicano la Tierra tiene dos movimientos distintos (el de rotación sobre su propio eje y el de traslación alrededor del Sol), esto abría la posibilidad de que la última esfera, la de las estrellas fijas,

---

<sup>19</sup> Tal *precesión* consiste en que la posición del Sol en el Zodíaco en el equinoccio de primavera (el 21 de marzo) varía gradualmente a lo largo de los siglos – hace tres mil años el Sol estaba entre las estrellas de la constelación de Aries, después se desplazó a la de Piscis, donde aún se encuentra, y, más adelante, estará en la constelación de Acuario –, ya que el punto donde se corta la eclíptica y el ecuador celeste proyectado sobre la bóveda de las estrellas fijas se desplaza con un movimiento en sentido contrario al del Sol, el cual ya había sido detectado y medido con precisión por el astrónomo griego Hiparco de Nicea.

estuviera en reposo y que las estrellas no se movieran a la par unas de otras girando dentro de la misma esfera – en contra de la teoría geocéntrica –, lo cual hace innecesario la existencia de la última de las esferas y que todas las estrellas mantengan la misma distancia con respecto a la Tierra. Por lo tanto, desaparecería el cosmos griego cerrado, finito y esférico y aparecería el universo infinito<sup>20</sup>, tal y como proclamó Giordano Bruno quien fue quemado en la hoguera por herejía, como bien es conocido, por defender tales ideas que, según la Iglesia católica, contradecían las palabras divinas de la Biblia.

No obstante, el contradecir a la Biblia no era relevante para los físicos aristotélicos, sino que aquéllas infringían los pilares fundamentales de la cosmología aristotélica y tal atentado contra la existencia de la esfera de las estrellas fijas y del cosmos griego (cerrado, finito y esférico), puede considerarse otra objeción física dentro del ámbito científico de esta época y un argumento más en contra del copernicanismo. Aunque no lo será desde el marco teórico o conceptual de la física clásica, pero – insisto –, en el momento histórico en que Galileo realizó su defensa, tal física aún no existía.

Pese a las ventajas anteriormente descritas, los argumentos en contra del sistema copernicano se mantenían en pie porque, según este sistema, las órbitas en torno a las que se movían los planetas seguían siendo círculos concéntricos como en el sistema ptolemaico. Galileo ignoró el trabajo de Kepler – donde las órbitas son elípticas y la velocidad de los planetas no es uniforme pues cambia según están más cerca o más lejos del Sol – y se mantuvo a favor de las órbitas circulares del sistema copernicano que tan incansablemente defendió.

Para Copérnico [y, por extensión, para Galileo] cualquier tipo de movimiento celeste distinto del circular uniforme era “obviamente” imposible: “la inteligencia retrocede con horror” ante cualquier otra hipótesis; “sería inconcebible suponer una cosa tal en una creación constituida del mejor modo posible”. Estos argumentos eran del mismo tipo que los aportados por sus antagonistas escolásticos, excepto que para éstos la inmovilidad de la Tierra era igualmente *obvia*. (Holton, 2004: 33-34).

Debido a esto, el copernicanismo compartía las mismas objeciones, que se les hacía a los aristotélicos, en relación con las consecuencias que implicaba la circularidad de las órbitas en torno a las que se movían los planetas con velocidad uniforme: si tales órbitas seguían siendo círculos concéntricos – tal y como en el sistema ptolemaico –, no podrán ser eliminados del todo los epiciclos (aunque sí reducir su número) ni las órbitas excéntricas. Tampoco será posible evitar que el Sol, si bien se consideraba el centro físico real del universo, estuviera desplazado del centro geométrico de aquél – del mismo

---

<sup>20</sup> Para profundizar en este tema es muy recomendable consultar Koyré, 2005a.

Protrepis, Año 4, Número 7-8 (noviembre 2014 - abril 2015, mayo – octubre 2015).  
www.protrepis.cucsh.udg.mx

modo que ocurría en el modelo ptolemaico con la Tierra desplazada de dicho centro –. En este sentido, Holton escribe lo siguiente:

El centro común de las esferas principales se encontraba ligeramente desplazado a un lado del Sol inmóvil, de modo que el sistema no era totalmente heliocéntrico, igual que en el de Ptolomeo, la Tierra no coincidía con el centro del movimiento del Sol. (2004: 34).

Este centro, aunque no tuviera realidad física, implicaba un problema ontológico que no se logrará resolver hasta que se asuman, tal y como hizo Newton en su dinámica, las órbitas elípticas – donde ya no hay un solo centro, sino dos focos descentralizados: uno de ellos vacío y el otro ocupado por el Sol – que introdujo Kepler junto con sus tres leyes para el movimiento planetario donde la velocidad de los planetas no era uniforme, pues cambiaba según estaban más cerca o más lejos del Sol<sup>21</sup>. Pero esta tesis se consideró inaceptable porque, de hecho, tanto los antiguos griegos como Galileo consideraban que el movimiento uniforme era el que se realizaba en círculos. Se necesitó el genio geométrico de Descartes para poner de manifiesto que el movimiento circular no es uniforme porque la velocidad se determina tanto por su valor escalar como por su valor vectorial y, en el caso del círculo, éste cambia constantemente de dirección o velocidad vectorial, aunque conserve la escalar; de modo que el movimiento o la velocidad uniforme no es la que se realiza en círculos sino en línea recta cuando ésta no cambia ninguno de los valores anteriores. Éste fue un gran error de Galileo pues el sistema de círculos que estaba defendiendo no se correspondía con la supuesta uniformidad del movimiento de los planetas alrededor del Sol.

Otra cuestión polémica es la paralaje de las estrellas que consiste en la desviación angular de la posición aparente de las llamadas *estrellas fijas* con respecto a observaciones realizadas en diferentes lugares de la Tierra<sup>22</sup>. Esto implica que si la Tierra se moviera e interpusiéramos un objeto entre esos puntos diferentes de observación y una estrella fija, cada observador lo vería en direcciones distintas: a uno le parecería verlo a la derecha de la estrella y al otro a su izquierda. Si bien, mucho más adelante se pudo calcular que la *esfera de las estrellas fijas* está a una gran distancia de la Tierra y, por esta razón, no se percibe dicha paralaje, dicho fenómeno no pudo observarse a simple vista en la época antigua ni en la de Galileo y, de hecho, fue un argumento en contra de la teoría heliocéntrica porque entonces se asumía que la distancia entre dichas estrellas y la Tierra era mucho menor de la que en realidad es y, en consecuencia, no podía defenderse que existiera la paralaje de aquéllas.

---

<sup>21</sup> Para saber más sobre las leyes de Kepler puede consultarse: Holton, 2004: 57-70. O bien: Navarro, 2005: 297-321.

Otras objeciones, aunque de menor peso, eran que si la Tierra rotaba entonces ardería por la fricción de la rapidez de su movimiento y que las aves en su vuelo y las nubes no podrían igualar tal velocidad de la Tierra y que, por tanto, todo ello quedaría atrás. Tal y como escribe Holton, Copérnico refutó estas objeciones con “notable ingenio” pero no estoy tan segura como él que también lo hiciera con “éxito” pues, de hecho, provinieron más bien de la retórica que de alguna base científica:

Copérnico respondió con notable ingenio y éxito a algunas objeciones que estaba seguro harían a su sistema heliocéntrico, como anteriormente las habían hecho a Aristarco. Al argumento de que la Tierra, al girar con gran rapidez sobre su propio eje, se pondría incandescente como un volante que gira demasiado deprisa, contestaba: “¿por qué no temen los defensores de la teoría geocéntrica que ocurra lo mismo a la esfera celeste en su rotación, mucho más deprisa a causa de su tamaño mayor?”. Asimismo, al argumento de que los pájaros en vuelo y las nubes quedarían atrás por la rápida rotación de la Tierra, contestaba que la atmósfera se mueve juntamente con la Tierra. A la antigua pregunta de la falta de paralaje de las estrellas fijas, daba, como Aristarco, esta contestación lógica (aunque los griegos no la aceptasen): “[...] Esta distancia a las estrellas fijas (decía en otro lugar) es «tan inmensa que hace imperceptible para nosotros su aparente movimiento anual...»”. (2004: 40-41).

A la primera objeción Copérnico sólo respondió de manera retórica con otra pregunta que no daba ninguna solución porque no contenía ninguna respuesta o explicación. En cuanto a la segunda respuesta, mencionada en el texto, sólo se trataba de una suposición que carecía de fundamento científico porque *en su época* no había evidencias teóricas ni empíricas de esto y, en lo referente a la tercera, tuvo también que *suponer* que dicha distancia era enorme para responder a esa objeción; pero, sin pruebas ni razones físicas y sin observaciones que justificaran esto, tal suposición era inadmisibles para la ciencia de su época. De hecho, Copérnico tenía razón pues el paralaje de las estrellas existe, pero es muy pequeña porque la distancia respecto a las *estrellas fijas* es demasiado grande, como mencioné más atrás, pero, dado que no pudo medirse hasta 1838 – casi dos siglos después –, su argumento fue un mero supuesto sin fundamento científico ni apoyo experimental u observacional.

De nuevo, tanto Copérnico como Galileo estaban en lo cierto, no obstante, en

---

<sup>22</sup> Esta objeción de la paralaje de las estrellas fijas también se le presentó a Aristarco en su época: “Los pensadores griegos ofrecían un profundo e ingenioso razonamiento para refutar a Aristarco. Si la Tierra se moviese alrededor del Sol, habría puntos en el largo recorrido de su órbita en que estaría comparativamente más cerca de una determinada estrella fija y otros puntos en que estaría más alejado. Por tanto, la dirección en la que miraríamos una estrella sería distinta en las distintas posiciones. Este fenómeno, llamado paralaje anual de las estrellas fijas debería tener lugar según la hipótesis heliocéntrica de Aristarco, pero no había sido observado por los astrónomos griegos”. (Holton, 2004: 18).

su época no era observable y sólo podía considerarse como una solución de compromiso o hipótesis *ad hoc*.

Sólo Galileo pudo aportar algunas pruebas experimentales en defensa del heliocentrismo cuando perfeccionó el telescopio y lo dirigió al cielo. Sin embargo, dichas “pruebas” eran cuestionadas como tales, pues, en la mayoría de las ocasiones el “ojo sólo ve lo que quiere ver” y Galileo quería ver el sistema heliocéntrico. Cuando éste quiso justificar la tesis de Copérnico acerca de que la Tierra se mueve y que el Cielo no es un lugar incorrupto, buscó convencer a los demás utilizando las observaciones realizadas con el telescopio para hacer ver a sus oponentes los “hechos” acerca de los cuatro satélites mayores (o lunas) del planeta Júpiter, las manchas solares, valles y montañas en nuestra Luna y las fases del planeta Venus. Galileo también pudo haber observado con su telescopio otros “hechos” que no armonizaban con el sistema de Copérnico y, no obstante, no los “vio” o los ignoró. Entre ellos podría haber comprobado la falta de paralaje de las estrellas fijas que, como expliqué más atrás, fue un argumento en contra del movimiento terrestre característico del sistema copernicano; tampoco admitió el no haber registrado que dichas estrellas giraran de manera aislada unas de otras, así como también obvió el hecho de que las observaciones que realizaba con su telescopio no mostraban ninguna evidencia acerca de que estas mismas estrellas estuvieran cada una de ellas a diferentes distancias de la Tierra, lo cual, como ya expliqué, haría desaparecer el cosmos griego cerrado, finito y esférico para hacer de él un universo infinito que era una consecuencia del copernicanismo. Todas estas observaciones – o falta de observaciones – que Galileo supuestamente no “captó” con su telescopio, o que omitió, apoyarían a la teoría aristotélica, en contra, por supuesto, del sistema copernicano; sin embargo, tales observaciones no formaban parte de la *expectativa* de Galileo puesto que él *sólo esperaba observar* pruebas favorables al sistema de Copérnico. Ciertamente, mucho más adelante, se pudo observar la paralaje de las estrellas, la enorme distancia de éstas a la Tierra y que no conforman una última esfera donde giran conjuntamente y que están a la misma proximidad todas ellas de la Tierra. Pero el telescopio de Galileo no estaba capacitado para realizar tales observaciones en contra del sistema geocéntrico y, sin embargo, no mencionó las observaciones contrarias a éstas que sí podía captar – aunque fuera por falta de precisión del dispositivo – y que avalaban la cosmovisión aristotélica que constituía la tradición científica de su época.

En definitiva, el inconveniente que tiene este tipo de “pruebas” es que toda observación posee una fuerte carga teórica: la observación científica generalmente se apoya en supuestos teóricos y expectativas que “filtran” lo que se “ve” o “no se ve” y tanto estas observaciones como sus dispositivos de medida y las experimentaciones están impregnadas de un determinado marco teórico que indica al científico cómo realizarlas. Pues bien, aquellos científicos aris-

totélicos, que no admitían el marco teórico de Galileo, *dado que en su época ni tan siquiera existía*, no aceptaron estas pruebas porque apenas “vieron” aquello que sí “veía” Galileo y, en el mejor de los casos, sólo veían unas manchas que podían haberse producido por cualquier otra causa. A este mismo respecto se pronuncia Chalmers:

Lo que ven los observadores, las experiencias subjetivas que tienen cuando ven un objeto o una escena, no está determinado únicamente por las imágenes formadas en sus retinas sino que depende también de la *experiencia*, el *conocimiento* y las *expectativas* del observador. Este aspecto está implícito en la constatación indiscutible de que uno tiene que aprender para llegar a ser un observador competente en ciencia [...]. Una dificultad concierne a la medida en que *las percepciones reciben la influencia de la preparación y las expectativas del observador, de tal manera que lo que a uno le parece un hecho observable no lo será necesariamente a otro*. La segunda fuente de dificultades se origina en la dependencia que los juicios acerca de la verdad de los enunciados observacionales tienen en lo ya conocido o supuesto, haciendo así que los hechos observables sean tan falibles como los supuestos que le sirven de base. Ambos tipos de dificultad sugieren que la base observable de la ciencia no es tan directa y segura como se ha supuesto amplia y tradicionalmente. (2003: 7 y 17; énfasis propio).

Este hecho también lo hemos padecido cuando, por ejemplo, un médico nos hace una radiografía y luego, cuando nos la enseña, insiste en que veamos aquello que él ve, pero no es así, es decir, no vemos nada de lo que él observa. Aunque, para librarnos de la insistencia de aquél, acabemos admitiendo que sí lo vemos pese a no ser cierto.

Uno de los ejemplos que utiliza Chalmers es, precisamente, la observación que realizó Galileo a través del telescopio de las cuatro lunas en la órbita de Júpiter, que en el contexto de este artículo es mucho más que un simple ejemplo porque de su aceptación o de su rechazo dependerá la posibilidad de considerarlo o no como una prueba favorable al sistema copernicano. La cuestión era que si Júpiter tenía lunas que orbitaban en torno a él y que eran “arrastradas” por el planeta en su movimiento – que tanto copernicanos como aristotélicos admitían que se movía al igual que el resto de ellos –, esto hacía que se desmoronara una de las objeciones de los aristotélicos en contra del movimiento de la Tierra en torno al Sol, referida, en esta ocasión, al hecho de que si la Tierra se moviera, la Luna se retrasaría respecto ella y se quedaría atrás. Pero, si Júpiter se mueve igual que lo podría hacer la Tierra – según el sistema copernicano – y tiene lunas que se mueven junto a él, entonces se puede entender el mismo fenómeno aplicado ahora a la Tierra y la Luna. En este mismo contexto, si se admitía que el planeta Venus tenía fases, al igual que nuestra Luna, entonces se rompería la diferencia substancial entre el Cielo y la Tierra, mostrando la homogeneidad entre ambos; del mismo modo que las manchas solares y la observación de valles y crestas en la Luna atentarían

contra la perfección e incorruptibilidad celeste.

Sin embargo, fue muy difícil convencer a sus contemporáneos de estos hechos porque algunos no veían nada; otros veían unas “manchitas” pero afirmaban que podría tratarse de una falla en las lentes que el mismo Galileo había perfeccionado; e, incluso, los más suspicaces o desconfiados, denunciaban – con algo de malicia – que las había deformado deliberadamente para invalidar la idea de perfección de los cuerpos celestes y para apoyar sus afirmaciones acerca de la homogeneidad entre Tierra y Cielo y del movimiento de la Tierra; en definitiva, para demostrar la realidad del sistema copernicano.

Una vez que ya se ha llegado hasta aquí, he de especificar el punto clave que provocó la polémica con los aristotélicos: Galileo defendió el sistema copernicano no sólo como un modelo matemático – sin realidad física – como cualquier otro que sirviera a los astrónomos de instrumento matemático de predicción y cálculo de los fenómenos astronómicos; esta postura habría sido aceptada porque, de hecho, los astrónomos de su época también estaban dispuestos a aceptarla de este modo, es decir, como mero instrumento matemático de predicciones y cálculos astronómicos. Pero, la tenacidad de Galileo iba mucho más allá y, contrario a la concepción instrumentalista, su defensa del sistema heliocéntrico de Copérnico incluía la *realidad física* de éste. Lo cual fue el detonante de todos estos problemas científicos que plantearon los físicos aristotélicos quienes sí eran realistas y perseguían el objetivo de disponer de una descripción y explicación del mundo atendiendo a sus causas reales, desvelando los misterios entrañados en la realidad física. Pero tal objetivo no era compartido, en general, por los astrónomos ptolemaicos, quienes solían tener una inclinación instrumentalista sin preocuparse por la realidad física o no del sistema astronómico que usaban.

Ahora bien, el problema crucial que implicaba el realismo de la defensa galileana y que predomina sobre todos los demás es que no pudo ofrecer una teoría física alternativa a la de Aristóteles, la cual avalara el resultado de sus observaciones. Esto no ocurrió hasta que Newton completó la rama de la física, denominada mecánica – dividida en cinemática y dinámica –, al formalizar su gran síntesis física y matemática entre la naturaleza tanto del ámbito terrestre como del mundo astral que dio una explicación en función de sus causas del movimiento de todos los cuerpos, tanto terrestres como celestes. Galileo sólo desarrolló la matematización de una parte de la mecánica – la cinemática – que, si bien es la base de toda la física clásica, no fue suficiente para aportar una alternativa física a la aristotélica.

En definitiva, Galileo es el artífice de la cinemática clásica, pero ésta “únicamente” describe la naturaleza geométrica del movimiento – sin atender a sus causas físicas – utilizando las matemáticas y su llamado *método experimental*. No obstante, esto sólo lo realiza en el nivel mesocósmico, o escala humana,

de la realidad física correspondiente a los aconteceres en la Tierra y no abarca la escala macrocósmica de los cielos; aún peor, dicha descripción del movimiento carece de una explicación de las causas de éste – como ya dije, pero sobre lo cual he de insistir debido a su relevancia –.

Por consiguiente, *Galileo no pudo aportar causas del movimiento diferentes a las de la física aristotélica y no había razones científicas en su época para defender el sistema copernicano*; sólo hasta la dinámica de Newton se pudo ofrecer un fundamento científico para un sistema “medianamente” heliocéntrico.

### **Conclusión: la irracionalidad de la defensa heliocéntrica de Galileo**

En general, los argumentos y las observaciones mejor fundadas estaban del lado de la teoría geocéntrica: la razón científica de su época estaba de parte de los aristotélicos y ptolemaicos pues sus afirmaciones no provenían de un sentido común pre-científico, sino todo lo contrario: conformaban una teoría científica, la física aristotélica, que, si bien es una teoría pre-clásica y cualitativa, no por ello deja de ser una teoría científica según los cánones de la ciencia antigua, la cual era coherente, consistente, sistematizada y correctamente argumentada, tal y como expuse casi al principio de este artículo. Había muchos argumentos científicos de su época, por supuesto, que daban la razón al geocentrismo porque las únicas teorías físicas y astronómicas plenamente elaboradas hasta ese momento eran las de Aristóteles y Ptolomeo; no se trataba únicamente de los argumentos burlescos que puso Galileo en boca de los físicos aristotélicos, donde los ridiculizaba, ni de la presión de la Iglesia con sus dogmas religiosos vinculados a la teoría geocéntrica.

En cambio, la defensa del sistema copernicano por parte de Galileo estaba fuertemente mediatizada por el factor subjetivo de una convicción personal o intuición. Ni Copérnico ni Galileo pudieron responder a los argumentos físicos y racionales de la tradición científica del momento en contra de la teoría heliocéntrica: no tenían respuestas científicas y los pocos argumentos que ofrecieron, sobre los que escribí en la sección de “Galileo y el Heliocentrismo”, fueron considerados hipótesis *ad hoc*, de compromiso, sin fundamento teórico o justificación racional y que, además, ni tan siquiera tenían un *pleno* apoyo observacional. En cierta ocasión, Galileo vaticinó que en el futuro vendría una nueva teoría física que completaría aquella que él inició – su cinemática – y avalaría todos los aspectos y argumentos favorables al sistema heliocéntrico de Copérnico: pero, pese a tener razón nuevamente, en su tiempo esto no pasó de ser una idea futurista o visionaria como la de un oráculo o adivino, sin una base científica.

En suma, estamos tan acostumbrados al heliocentrismo que hemos olvidado que la postura científicamente razonable en esta discusión era la que sostenían los físicos aristotélicos frente a la defensa irracional – desde el punto

de vista científico – de Galileo, fundada en una intuición intelectual que, si bien resultó ser acertada, no dejó de ser casi un acto de fe. Dentro del ámbito de la ciencia de la época de Galileo, la teoría heliocéntrica era irracional, anticientífica, ilógica y físicamente inconsistente porque no había razones importantes para asumirla como una explicación realista; todo lo contrario, aceptar algo así para los científicos de entonces era insensato, ingenuo, pueril, absurdo, irrazonable, disparatado, incongruente, infundado, descabellado, extravagante... Es decir, científicamente inaceptable porque implicaba la renuncia a una teoría física, la aristotélica, que estaba bien cimentada, elaborada, argumentada y fundamentada a la hora de explicar la naturaleza y el movimiento del cosmos atendiendo a sus causas; además, esta petición de renunciar a la física aristotélica se formulaba sin ofrecer otra teoría alternativa que explicara, al menos, lo mismo que la anterior. Si no se aportaba otro tipo de explicación física, desaparecería todo el conocimiento que se tenía hasta entonces acerca de la naturaleza y de las causas del movimiento de los cuerpos terrestres y celestes. Tal catástrofe en la física y en la cosmología supondría una regresión casi prehistórica en el ámbito del conocimiento humano y algo así era entonces tan inaceptable como lo sería en la actualidad. Esto mismo lo describe Butterfield con una gran claridad y contundencia:

Sobre todo, si se concede a Copérnico una cierta ventaja en el aspecto de la simplicidad geométrica, el sacrificio que habría que hacer sería poco menos que tremendo. Se perdería toda la cosmología aristotélica, todo el sistema intrincadamente ensamblado en el cual se había establecido tan bellamente la nobleza de los distintos elementos y su disposición jerárquica. De hecho, habría que arrojar por la borda todo el armazón de la ciencia existente, y fue aquí donde Copérnico [y Galileo] claramente falló en descubrir otra alternativa satisfactoria. Había conseguido una geometría más bella de los cielos, pero en ella no se atendía a las razones y explicaciones que se habían dado antes para explicar los movimientos del cielo. (1981: 27).

Con el tiempo, la ciencia evolucionó y las razones que antes eran científicas dejaron de serlo porque se sustituyó una teoría física por otra: la física clásica, que fue erigida sobre las grandes síntesis de Newton y de Maxwell. Se podría decir que si bien en la época de Galileo fueron los ptolemaicos y aristotélicos quienes ganaron la batalla acerca de la racionalidad científica del sistema geocéntrico, tiempo después, fue Galileo quien ganó la guerra entre los dos sistemas que estaban en disputa. Pero he de volver a subrayar que tal hecho sólo se produjo hasta que Newton concibió su dinámica – que se une a la cinemática para completar la rama de física denominada mecánica – donde se logra una gran síntesis física y matemática entre la naturaleza tanto del ámbito terrestre como del mundo astral, aportando la misma explicación del movimiento de todos los cuerpos (terrestres y celestes) en función de sus causas – que, insisto, eran las mismas para ambos –.

Newton logró unificar las leyes científicas del movimiento, atendiendo a sus

causas, tanto para la Tierra como para el Cielo y una nueva cosmología nació donde era más razonable, debido a su simplicidad, que fuera la Tierra el cuerpo que se moviera a que lo hiciera el resto del universo conocido, pues todos los cuerpos celestes y terrestres estaban compuestos por las mismas sustancias y todos ellos obedecían a las mismas leyes de movimiento; los cuerpos celestes ya no eran incorruptibles, perfectos ni livianos.

A partir de esta nueva teoría física, sí se dispuso de un fundamento científico para el modelo del Sistema Solar. Por ejemplo, desde una teoría heliocéntrica, aunque no con órbitas circulares sino elípticas, que además de proponer que los planetas giran a distintas velocidades orbitales unos de otros, también estipulara que varían su velocidad dentro de la propia órbita (cuando se acercan al Sol se mueven más rápido y más lento según se alejan), puede explicarse aquel aparente movimiento retrógrado o de retroceso de los planetas, porque es la Tierra, que gira a su propia velocidad, la que se ve adelantada por otros planetas más veloces; pero, cuando éstos se alejan del Sol, pierden velocidad y si coincide con que la Tierra se ha acercado al Sol, moviéndose más rápido, es entonces cuando la Tierra se adelanta y parece que hemos dejado atrás al planeta; es decir, parece que ha retrocedido. La explicación de este fenómeno sí es completa cuando se asumen las órbitas elípticas y, por supuesto, las leyes del movimiento de los planetas de Kepler.

Apareció toda una nueva cosmovisión de la naturaleza fundamentada en una nueva teoría física que supuso un enorme incremento en el conocimiento humano y, con ello, cambió la racionalidad científica: aquello que es razonable científicamente en el ámbito de una teoría puede ser irracional en otra. Esto sucede muy a menudo en la ciencia aunque nos parezca, erróneamente, que la razón científica es universal y absoluta. Aún más, gracias a la naturaleza relativa de la racionalidad científica pueden, de hecho, surgir nuevas teorías basadas en ideas que, inicialmente y desde el marco científico que dejan atrás, son consideradas irracionales – como le ocurrió a la física cuántica, antes de configurarse como una teoría completa, respecto a la física clásica –. Es posible que esta circunstancia fuera la que condujera a Einstein a realizar, en cierta ocasión, la declaración que parafraseo a continuación: *para que haya avances en la ciencia, hay que “pecar” a veces contra la razón.* **☞**

### **Bibliografía:**

Altshuler, José (2002) *A propósito de Galileo*. México DF: Fondo de Cultura Económica.

Aristóteles (2001) *Física*. México DF: Universidad Autónoma de México.

Artigas, Mariano; Shea, William (2009) *El caso Galileo. Mito y realidad*. Madrid: Ediciones Encuentro.

- Biro, Susana (2009) *La mirada de Galileo*. México DF: Fondo de Cultura Económica.
- Butterfield, Herbert (1981) *Los orígenes de la ciencia moderna*. México DF: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Chalmers, Alan (2003) *¿Qué es esa cosa llamada Ciencia?* Madrid: Siglo Veintiuno de España Editores.
- Holton, Gerald (2004) *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Koyré, Alexandre (2000) *Estudios de historia del pensamiento científico*. México DF: Siglo Veintiuno.
- Koyré, Alexandre (2005a) *Del Universo cerrado al Universo infinito*. México DF: Siglo Veintiuno.
- Koyré, Alexandre (2005b) *Estudios Galileanos*. México DF: Siglo Veintiuno.
- Navarro, Víctor (2005) Edad Moderna en Ordoñez, Javier; Navarro, Víctor y Sánchez Ron, José Manuel. *Historia de la Ciencia*. Madrid: Espasa Calpe.
- Rodríguez Jorge, Luis Felipe y Torres Castilleja, Silvia (comps.) (2010) *Galileo. Su tiempo, su obra y su legado*. México DF: El Colegio Nacional.
- Sánchez del Río, Carlos (1985) *Los principios de la física en su evolución histórica*. Madrid: Editorial de la Universidad Complutense.

Recibido: Agosto 12, 2014. Aceptado: Junio 20, 2015