

LA REVOLUCIÓN SILENCIOSA O LA IGNORADA FUNCIÓN DE LA MEDICIÓN EN LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

The silent revolution: or the ignored function of the measurement in the scientific revolution

Godfrey Guillaumin Juárez*

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

RESUMEN: Filósofos de la ciencia historicistas e historiadores de la ciencia han formulado la idea de *revolución copernicana* como el cambio de la teoría astronómica de Ptolomeo por la de Copérnico, entre 1543 y 1687. Aquí se presenta una versión diferente del abandono de la astronomía de Ptolomeo. Tal como aparece en el *Almagesto*, dicha astronomía está conformada por seis tesis interrelacionadas, las cuales se eliminaron entre 1543 y 1838. Pero lo más importante desde el punto de vista cognitivo es que cada una de esas tesis, excepto la primera, fueron eliminadas con procedimientos de medición científica, diferentes y mejores en cada caso, y crecientemente precisos y confiables. A esa sustitución se le nombra aquí *eliminación creativa* y al proceso completo *revolución silenciosa*.

PALABRAS CLAVE: revolución copernicana, medición científica, eliminación creativa, eliminación simple, revolución silenciosa.

ABSTRACT: Historicist philosophers of science and historians of science have formulated the idea of the Copernican revolution as a theory change from Ptolemy's astronomical theory to Copernicus' one, between 1543 and 1687. Here I present a different version of the abandonment of Ptolemy's astronomy. As it appears in the *Almagest*, this astronomy was made up of six interrelated theses, which were eliminated between 1543 and 1838. But most important from the cognitive point of view, each of these theses, except the first one, were eliminated with different and better scientific measurements procedures, which were increasingly accurate and reliable in each case. I call this elimination *creative removal*, and the complete process *silent revolution*.

KEYWORDS: Copernican revolution, scientific measurement, creative removal, simple removal, silent revolution.

Fecha de recepción:
2 de junio de 2017

Fecha de aceptación:
22 de agosto de 2017

*Profesor del Departamento de Filosofía de la Universidad Autónoma Metropolitana y miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II. Sus áreas de competencia son la historia de la epistemología; historia y epistemología de la medición científica; historia de la astronomía antigua y progreso científico. Su libro más reciente es *Génesis de la medición celeste. Una historia cognitiva del desarrollo de la medición científica* (México: UAM/Tirant, 2016).

Contacto: guillaumin.godfrey@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los cambios profundos y radicales en el desarrollo del conocimiento científico, llamados genéricamente *revoluciones científicas*, han sido estudiados por filósofos de la ciencia historicistas y por algunos historiadores de la ciencia. Tres historiadores clásicos en este tema son Herbert Butterfield (1900-1979), con su trabajo titulado *Los orígenes de la ciencia moderna*,¹ Rupert Hall (1920-2009), con su texto *La revolución científica: 1500-1750*,² e I. B. Cohen, *La revolución en la ciencia*.³ Los tres colocaron la idea de *revolución científica* en el centro de su análisis histórico, e incluso (Cohen) en el centro de su análisis meta-histórico, al intentar establecer cuatro condiciones necesarias para identificar correctamente una revolución científica, a saber: 1) los científicos involucrados deben percibirse a ellos mismos participando en un cambio profundo de su disciplina; 2) los documentos históricos deben consignar dicho cambio; 3) tanto los historiadores como filósofos posteriores deben estar de acuerdo en que hubo tal cambio, y 4) los científicos posteriores que trabajen en dicho campo deben estar de acuerdo en que hubo dicho cambio.⁴

Por su parte, los filósofos de la ciencia historicistas encuentran en el libro *La estructura de las revoluciones científicas*⁵ de Thomas Kuhn (1922-1996) las raíces recientes de la disciplina y la fuente de muchos rompecabezas filosóficos, tales como la inconmensurabilidad, el progreso científico a través de revoluciones científicas y la irracionalidad del cambio científico. Kuhn, junto con otros filósofos como Paul Feyerabend (1924-1994), criticaba particularmente la llamada “concepción heredada” de la ciencia, la cual excluía sistemáticamente a la historia de la ciencia a favor de un estudio completamente formalista de las teorías científicas. Kuhn mantenía una concepción rupturista del desarrollo científico y las revoluciones científicas eran un ejemplo. Una de las dificultades naturales que genera la idea de revolución científica, entendida como ruptura, tiene relación directa con la idea de progreso científico; es decir, en qué sentido, y cómo, es posible hablar de progreso científico si de vez en cuando hay rupturas en el conocimiento científico.

Ahora bien, pese a que la idea de revolución científica ha estado en el centro de tales estudios, sigue siendo uno de los problemas centrales —tanto para historiadores de la ciencia como filósofos de la ciencia historicistas— caracterizar satisfactoriamente qué es una revolución científica. Los criterios de Cohen mencionados, que responderían la pregunta, han sido considerados demasiado restrictivos, por lo que dejan fuera cambios

¹ Butterfield, *Orígenes*, 1958 (1949).

² Hall, *Revolución*, 1985 (1954).

³ Cohen, *Revolución*, 2002.

⁴ Cohen, *Revolución*, 2002, capítulo 2.

⁵ Kuhn, *Revolución*, 1996 (1962).

radicales del conocimiento científico que podrían contar como revolucionarios. Incluso hay controversia respecto a la época histórica en que encontramos revoluciones científicas. Por ejemplo, entre los historiadores arriba mencionados hubo un relativo acuerdo respecto a situar entre 1500 y 1700 la *revolución científica*. Sin embargo, recientemente Peter Bowler e Iwan Morus han afirmado que las revoluciones científicas se han presentado en eventos, disciplinas y épocas diferentes, que incluso abarcan los siglos XIX y XX.⁶ Entre los filósofos de la ciencia que inicialmente señalaron que era necesario distinguir entre tipos diferentes de revoluciones científicas estuvo Ernan McMullin (1924-2011), quien sostenía haber identificado por lo menos tres tipos: las revoluciones científicas *superficiales*, como el descubrimiento de la radiación por Roentgen; las revoluciones *intermedias*, como el descubrimiento del oxígeno; y las revoluciones *profundas*, como la revolución de Newton.⁷

Recientemente, en una serie de artículos filosóficos, se han estado estudiando con especial detalle diversos aspectos del concepto de revolución científica y tipologías nuevas. Ladislav Kvasz propone distinguir el aspecto *social* del *cognitivo* al hablar de revoluciones científicas; al segundo le llama *ruptura epistémica*. A su vez distingue cuatro tipos diferenciados, tanto en alcance como en profundidad, de *rupturas epistémicas*.⁸ Por su parte, la propuesta de Xiang Chen se basa en estudiar particularmente los cambios revolucionarios que transforman conceptos de *objetos* en conceptos de *procesos*. Particularmente estudia la llamada revolución copernicana para mostrar que es posible localizar dicha transformación conceptual.⁹ Brad Wray, por su parte, señala que los eventos que se consideran revoluciones científicas son en realidad muy diversos, y que se distinguen en muchas formas posibles. Sin embargo, sostiene que al revisar detalladamente la obra de Kuhn es posible extraer tres condiciones necesarias que caracterizan a las revoluciones científicas, a saber: 1) involucran cambios taxonómicos; 2) son

generadas por decepción de prácticas existentes, y 3) no pueden ser resueltas recurriendo a estándares compartidos. Wray sostiene que un argumento de Kuhn que no debe de perderse de vista es que las revoluciones suceden en comunidades de científicos, y no a científicos individuales.¹⁰

En el marco de estos trabajos recientes, mi objetivo aquí es presentar una versión inédita de la llamada *revolución copernicana*. La versión tradicional de esta revolución, entre filósofos e historiadores, se sostiene en tres pilares: 1) aquello que se abandonó fueron *teorías científicas*; 2) Copérnico inició el abandono de la teoría planetaria de Ptolomeo en 1543, y 3) dicho abandono lo concluyó Newton en 1687.¹¹ Ahora sabemos que tales tesis no son completamente correctas. En otro lugar he analizado detalladamente los puntos 1 y 2 y he mostrado que en realidad fue la tradición de astronomía árabe la que inició una reformulación profunda de los modelos planetarios (no teorías) de Ptolomeo a lo largo de seis siglos (del IX al XIV).¹² Aquí me concentraré sólo en el tercer pilar y presentaré, en términos generales, por motivo de espacio, cómo las tesis centrales de la astronomía de Ptolomeo se abandonaron completamente sólo hasta mediados del siglo XIX.

Mi argumento es simple y se articula alrededor de dos puntos, uno histórico y otro cognitivo. El *histórico* sostiene que cuando se analiza el *Almagesto* de Ptolomeo uno encuentra que su astronomía se articulaba principalmente de seis tesis astronómicas estrechamente interrelacionadas. Copérnico socavó solamente una de ellas, al intercambiar las posiciones del Sol y la Tierra en los modelos planetarios antiguos; pero fueron astrónomos posteriores quienes minaron las tesis restantes en un periodo que comprende de los siglos XVII al XIX, con lo cual históricamente el periodo de abandono de tesis que aparecen en el *Almagesto* es mucho más extenso del que tradicionalmente se considera. El punto *cognitivo* lo encuentro más interesante y, en síntesis, sostiene que el abandono de cada una de las seis tesis ptolemaicas, excepto en el caso de Copérnico, fue posible mediante la invención y aplicación de pro-

⁶ Bowler y Morus, *Panorama*, 2007.

⁷ McMullin, "Rationality", 1993.

⁸ Kvasz, "Kuhn's", 2014, pp. 78-84.

⁹ Chen, "Different", 2010, pp. 182-191.

¹⁰ Wray, "Kuhnian", 2007, pp. 61-73.

¹¹ Kuhn, *Revolución*, 1996.

¹² Guillaumin, *Génesis*, 2016.

cedimientos inéditos de medición astronómica. Tales procedimientos fueron cada vez más precisos, complejos y confiables, sin los cuales no hubiera sido posible (material, metodológica y epistemológicamente) abandonar las tesis astronómicas ptolemaicas. Si esto último es correcto, tal como aquí lo mostraré, entonces la *medición científica* (más que la *explicación científica* o el uso de *teorías*) adquiere un papel histórico-cognitivo central como generadora de un complejo proceso de *eliminación creativa* de tesis astronómicas *antiguas*, sustituyéndolas por otras *nuevas* e inesperadas, lo cual se puede llamar *sustitución (métricamente) ampliativa*. Así, aquí no presento la *revolución copernicana* como una sustitución de *teorías astronómicas* de 1543 a 1687, sino como un *complejo proceso cognitivo ampliativo de expansión creciente* aún más largo, de 1543 a 1838, a través del cual *simultáneamente* se *eliminan* por sustitución una a una las tesis ptolemaicas, en distintos momentos y mediante diferentes procedimientos de medición, y se *sustituyen* por tesis cada vez más precisas, exactas y confiables. Al proceso completo lo denomino la *revolución silenciosa*.

LAS TESIS FUNDAMENTALES DE LA ASTRONOMÍA PTOLEMAICA

El conocimiento, prácticas y métodos de la astronomía griega antigua fueron compilados por Claudio Ptolomeo (ca. 100-170 d. C.) en la *Syntaxis Mathematica*, obra conocida posteriormente como el *Almagesto*, a mediados del primer siglo de nuestra era.¹³ El texto consta de 13 libros, cada uno de los cuales trata de lo siguiente: inicia explicando cuáles son los principios físicos y cosmológicos de los cuales parte su estudio (libro I); explica los principales parámetros astronómicos, cómo y con qué instrumentos determinarlos y qué matemática usar, es decir: duración del día, latitud, longitud, equinoccios y solsticios, la eclíptica, así como la duración del año, el movimiento del Sol alrededor de la Tierra fija y la idea de epiciclos (libros II y III). Los libros IV y V explican cómo describir y calcular el movimiento de

la Luna; cómo medir la paralaje lunar y cómo medir los tamaños y distancias relativos del Sol y la Luna a la Tierra. El estudio de los eclipses lunares y solares, así como las técnicas para derivar información astronómica relevante a partir de ellos se desarrolla en el libro VI. El movimiento de las estrellas fijas, su número, sus posiciones relativas a la eclíptica y su nivel de brillo están expuestos en los libros VII y VIII, en donde Ptolomeo presenta un catálogo de 1022 estrellas. De los libros IX al XI desarrolla los modelos matemáticos en longitud para los cinco cuerpos celestes que presentan movimiento aparentemente errático (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno); y específicamente en el libro XII estudia el movimiento retrógrado de los planetas y cómo éste puede ser geoméricamente representado mediante círculos en movimiento uniforme. En el libro XIII estudia las configuraciones matemáticas apropiadas para calcular el movimiento en latitud de los planetas, que son modelos diferentes de los que desarrolló en los libros IX al XII.

Los principios físicos expuestos en el libro I y a favor de los cuales ofrece evidencia terrestre y/o celeste son: 1) los cielos [la bóveda celeste] se mueven como una esfera; 2) la Tierra, considerada en su totalidad, es sensiblemente una esfera; 3) la Tierra está en el centro de los cielos [de la bóveda celeste]; 4) la Tierra tiene la razón de un punto respecto a los cielos; 5) la Tierra no tiene ningún movimiento de lugar a lugar; 6) los cielos tienen primariamente dos movimientos uniformes: el giro uniforme de Este a Oeste y la precesión.

El libro VII del *Almagesto* está dedicado al estudio de las estrellas fijas, las cuales están colocadas sobre una esfera celeste en movimiento uniforme y circular. Para Ptolomeo, los cielos se mueven como una esfera, ya que “si uno asume cualquier otro movimiento, para los cuerpos celestes, necesariamente se sigue que sus distancias, medidas hacia arriba desde la Tierra, deben variar, dónde sea y cómo sea que uno suponga que la Tierra esté situada [...] Ninguna otra hipótesis sino ésta puede explicar cómo la construcción [y uso] de relojes de Sol producen los resultados correctos” (*Almagesto*, 1.3). Nótese que las observaciones a simple vista armonizan con los supuestos con que se construyen y usan los instrumentos que miden esas mismas observaciones.

¹³ G. Toomer (ed.), *Ptolemy's Almagest*, 1998. Todas las citas del *Almagesto* son traducciones mías.

Ahora bien, a diferencia de los planetas que son luminarias de movimiento errático, las estrellas no tienen movimiento unas respecto a las otras, aunque la esfera sobre la cual están colocadas sí se mueve.¹⁴ Ptolomeo sostiene que “no tiene lugar un cambio en las posiciones relativas de las estrellas hasta el presente. Al contrario, las configuraciones observadas en el tiempo de Hiparco [250 años antes de Ptolomeo] son vistas como absolutamente idénticas a las de ahora”. Ello es así no sólo para las estrellas de las constelaciones del Zodíaco, sino para todas las demás constelaciones. Y continúa diciendo:

Esto puede fácilmente ser visto por cualquiera cuya voluntad sea hacer una inspección del asunto y examinar, en el espíritu de amor a la verdad, si los fenómenos referidos concuerdan con aquellos registrados en la época de Hiparco. En cualquier caso, para proveer un examen [test] completo del asunto, nosotros también aduciremos aquí unas pocas observaciones, *i.e.*, aquellas que son las más adecuadas para la comprensión fácil y también que nos ofrezcan un panorama de todo el método de comparación (*Almagesto*, VII.1).

Finalmente, el asunto de la paralaje. La paralaje es el aparente cambio de la posición de un objeto cuando es observado alternativamente desde diferentes puntos de vista. En otras palabras, es la diferencia angular entre las direcciones de un objeto visto desde dos puntos de observación distintos. Entre más lejos se encuentre el objeto observado, más pequeña será la paralaje. Desde la antigüedad griega se usaban métodos de triangulación para establecer distancias geodésicas, porque sabiendo la distancia que hay entre los dos puntos de observación (llamada “línea base”) y la distancia angular de la paralaje se puede deducir trigonométricamente la distancia a la cual está el objeto observado. Este método geodésico aplicado a la astronomía se convirtió en un elemento clave para calcular las distancias de la Tierra a la Luna y al Sol; solamente se requería

saber la distancia de la *línea base* elegida y el ángulo de la paralaje.

Ptolomeo, siguiendo los métodos diseñados por Hiparco, determinó la paralaje horizontal de la Luna en $1^{\circ} 26'$, tomando como *línea base* el radio de la circunferencia de la Tierra.¹⁵ Ese valor es muy grande y corresponde a una distancia absoluta a la Luna de 39.75 radios terrestres; sin embargo, su modelo lunar daba una distancia relativa de 40.25 partes. “El error puede ser adscrito a una combinación de factores, tales como el fallo de la observación correcta debido a los efectos de la refracción atmosférica, errores en los instrumentos e imprecisiones de su teoría”.¹⁶ Ptolomeo decidió establecer la distancia a la Luna en términos de límites superiores e inferiores, por lo que la distancia promedio de la Tierra a la Luna era de 59 y $67 \frac{1}{3}$ radios terrestres (*Almagesto*, v). El valor correcto es poco más de 60 radios terrestres, sin embargo, la distancia al Sol la calculó muy por debajo del valor que usamos, ya que fue aproximadamente 50 veces menor que nuestro valor. Dadas las limitaciones en los instrumentos de observación, Ptolomeo consideraba imperceptible la paralaje horizontal solar, por lo cual la calculó en $2' 50''$, cuando la correcta son $8.5''$.¹⁷ Para Ptolomeo, las estrellas no presentan paralaje, principalmente porque la Tierra está inmóvil en el centro del universo y porque, al estar mucho más lejos que el Sol, el radio terrestre no serviría como línea base de medición.

En resumen, las tesis centrales del *Almagesto* tienen relación con la posición y el tamaño de la Tierra; con los movimientos, posiciones, distancias y tamaños del Sol y la Luna respecto a la Tierra; con el número, posiciones y movimientos de las estrellas fijas y de los planetas; con las técnicas e instrumentos para determinar geométrica y proporcionalmente parámetros astronómicos, así como con el funcionamiento de los métodos geométricos para dicha determinación. A todo ello le llamo

¹⁴ La esfera de las estrellas fijas presentaba para Ptolomeo dos movimientos: una rotación sobre su propio eje cada 24 horas y un movimiento de precesión de su eje cada 23 000 años, éste último descubierto por Hiparco.

¹⁵ “Horizontal” quiere decir que uno de los lados del triángulo forma un ángulo recto respecto a la línea base.

¹⁶ Van Helden, *Measuring*, 1986, p. 16.

¹⁷ Ptolomeo deja sin decidir la cuestión de la paralaje para Mercurio y Venus. En sus modelos planetarios, Mercurio y Venus los coloca entre la Luna y el Sol, con lo cual sería, en principio, posible medir directamente sus paralajes o, por lo menos, calcularlas.

astronomía ptolemaica, y constituye en su conjunto una *red cognitiva métrica* de prácticas y parámetros en interdependencia mutua. Por ejemplo, aunque los modelos planetarios son geoméricamente independientes unos de otros, todos necesitaban del modelo del Sol, ya que en todo momento la posición del planeta es referida a la posición del Sol. Igualmente, el cálculo de la aparición de los eclipses requería de un modelo confiable del Sol; ya fueran eclipses de Luna o de Sol, la posición de este último era determinante. También incluye los instrumentos que debían utilizarse para realizar observaciones astronómicas específicas y qué tipo de datos observacionales eran requeridos, etc.¹⁸ El *Almagesto* indica *qué* principios físicos aceptar y *cómo* fundamentarlos; explica *qué* tipo de modelos planetarios usar y *cómo* construirlos y operarlos; analiza *qué* datos utilizar y *cómo* obtenerlos y analizarlos.

PRIMERA TESIS ELIMINADA
(NO-CREATIVAMENTE):

LA TIERRA INMÓVIL SE MUEVE

En 1543, Nicolás Copérnico (1473-1543) publicó el *De revolutionibus orbium coelestium* cuya idea central era intercambiar el lugar que ocupaban la Tierra y el Sol en los modelos planetarios de Ptolomeo.¹⁹ El modelo de la Luna quedaba igual porque en ambos autores es un modelo geocéntrico. Ptolomeo había ofrecido evidencia terrestre a favor de la idea de que “la Tierra no puede tener ningún movimiento en ninguna de las direcciones mencionadas [movimiento de rotación], o incluso cualquier otro movimiento de su posición en el centro” (*Almagesto*, I.6). Copérnico, sin embargo, sostenía que “es más probable la movilidad de la tierra que la quietud, sobre todo con respecto a la revolución diaria, mucho más propia de la tierra” (*De revolutionibus*, I.X). La mayoría de los datos observacionales que Copérnico utilizó eran conocidos en la antigüedad, aquellos

datos a partir de los cuales Ptolomeo había sostenido la inmovilidad de la Tierra. Por lo que Copérnico los reinterpretó para apoyar la tesis contraria. De esa forma, los datos no tenían en sí mismos poder de decisión para distinguir entre ambos modelos, “cuando Copérnico usó las observaciones antiguas y las suyas propias [que no sumaban 20] en su trabajo ello no fue, y no podía ser, con el propósito de refutar directamente las ideas antiguas respecto a la estructura del Universo”.²⁰ En la época de Copérnico, el uso de instrumentos astronómicos, así como la precisión que alcanzaban, no era particularmente diferente que en la antigüedad, “los instrumentos descritos en su trabajo [de Copérnico] —el triángulo paraláctico, el astrolabio esférico y el cuadrante solar— son los que Ptolomeo usó, y las descripciones de ellos son parafraseadas del *Almagesto*”.²¹ No había con Copérnico nuevos instrumentos, nuevas prácticas de observación, ni nuevos usos de datos; consecuentemente, tampoco nuevos hábitos de observación ni nuevas reglas metodológicas para operar instrumentos. Copérnico construyó modelos planetarios no-ptolemaicos con instrumentos y datos ptolemaicos.

Es notable el uso deficiente (desde estándares actuales) que Copérnico realizó de los datos a la hora de intentar ajustar los datos conocidos desde la antigüedad con su nuevo modelo. Janice Henderson estudió los cálculos y uso de datos que realizó Copérnico en la elaboración de cada modelo planetario y sostiene que

lo que he aprendido de mi análisis del trabajo de Copérnico y de Reinhold es el marcado contraste entre los dos hombres en sus tratamientos de los detalles numéricos. Copérnico es bastante poco fiable y desigual en este respecto. En el capítulo sobre las distancias solares y lunares, uno tiene varios ejemplos en Copérnico de alteración de sus datos observacionales, cometiendo errores de cálculo y realizando correcciones parciales que no se sostienen, resultando en inconsistencias internas en las ediciones impresas del *De revolutionibus*.

¹⁸ En otro lugar he analizado en detalle *qué* principios físicos, modelos y datos utilizó la tradición de astronomía ptolemaica y *cómo* se fundamentaron, usaron y construyeron, véase Guillaumin, *Génesis*, 2016, capítulo 8.

¹⁹ Copérnico, *Sobre*, 1997.

²⁰ Dobrzycki, “Role”, 1975, p. 28.

²¹ Dobrzycki, “Role”, 1975, p. 28.

Respecto a las distancias solares:

mi análisis de los manuscritos de Copérnico revela que fue particularmente descuidado en el cómputo de sus dimensiones básicas del sistema solar. Él no derivó independientemente los parámetros que usó, sino solamente modificó los valores de Ptolomeo. Esto tiene la ventaja, por supuesto, de producir una distancia solar que no difería grandemente de la determinada por Ptolomeo, lo cual era sin duda la intención de Copérnico.²²

Además, Copérnico conservaba de Ptolomeo lo que en la época se le conocía como el *axioma de la astronomía*, a saber, el movimiento de todo cuerpo celeste es circular y uniforme. La diferencia principal del modelo de Copérnico consistía en que explicaba de manera natural, sin recurrir a supuestos *ad hoc*, 27 temas específicos. Uno de los más notables era el movimiento retrógrado de los planetas.²³

SEGUNDA TESIS ELIMINADA: LAS ESFERAS SON ELIPSES

Tycho Brahe (1546-1601) admiró la hipótesis copernicana por considerarla más elegante que la de Ptolomeo, e incluso sostuvo que Copérnico “resuelve bien todos los otros aspectos del arreglo de Ptolomeo que son confusos y superfluos, y en ninguna forma peca contra los principios de la matemática”.²⁴ No obstante, conservó la idea ptolemaica de una Tierra inmóvil en el centro del Universo. Hacia finales de la década de 1560, Tycho “se sorprendió al descubrir que no sólo la predicción [la conjunción entre Júpiter y Saturno de 1563] realizada con las antiguas *Tablas Alfonsinas* erró por cerca de un mes, sino que incluso las tablas modernas copernicanas establecían ese mismo evento unos días antes”.²⁵ Ese tipo de falta de concordancia entre datos y cálculos

le llevó a pensar, a inicios de 1570, que era necesario construir “una nueva astronomía basada enteramente sobre la lógica y las matemáticas, *sin el recurso a ninguna hipótesis*. [Él] estaba de acuerdo en la necesidad de nuevas y más precisas observaciones *antes de intentar explicar* los movimientos celestes, y es obvio que Tycho era consciente de la necesidad de adecuados instrumentos para obtener esas observaciones”.²⁶

Para ello, a inicios de 1576 empezó la construcción en la isla de Hven de un observatorio que albergaría una serie de instrumentos cuya precisión era inédita. A finales de 1576 construyó un *cuadrante acimutal metálico* cuya precisión estimada era de 48.8 segundos de arco. En 1580 estaba listo un *globo de cálculo* el cual utilizaba para registrar las posiciones de estrellas, que para el año de 1595 se contaban ya mil; igualmente servía para localizar las coordenadas acimutales y convertirlas en coordenadas celestes convencionales. En 1581 terminó una *esfera armilar* de 1.6 metros de diámetro, y en 1582 un *sexante triangular* de 1.6 metros de radio. Para 1585 terminó un *gran círculo armilar* de tres metros de diámetro cuya precisión estimada era de 38.6 segundos de arco. Un *cuadrante móvil de madera* de 1.6 metros de radio cuya precisión estimada era de 32.3 segundo de arco estaba en uso para 1586, y dos años después un *cuadrante metálico móvil* cuya precisión estimada era de 36.3 segundos de arco. Los instrumentos eran de una *precisión* tan insólita que Tycho rechazaba todas las observaciones astronómicas anteriores al siglo XVI, incluyendo las de Copérnico.²⁷ Además, Tycho tuvo que desarrollar nuevas formas de procesar grandes cantidades de datos, y una de esas nuevas estrategias consistía en conseguir un mismo dato mediante la *reducción* de una serie de observaciones combinando los resultados obtenidos a partir de diferentes instrumentos.²⁸ Tycho había transformado la práctica de computar posiciones celestes.

Siguiendo a Berhard Walther (1430-1504), Tycho intentó usar relojes mecánicos para determinar las posiciones de objetos celestes, pero sin éxi-

²² Henderson, *On*, 1991, pp. 10-11.

²³ Swerdlow ha estudiado cómo Copérnico podía explicar de manera armónica veintisiete *ítems* que en Ptolomeo requerían supuestos *ad hoc*, o bien quedaban sin explicación satisfactoria, véase Swerdlow, “*Essay*”, 2004, pp. 64-120.

²⁴ Tycho Brahe, *apud* en Blair, “*Tycho*”, 1990, p. 360.

²⁵ Gingerich y Voelkel, “*Tycho*”, 2005, p. 78.

²⁶ Hellman, “*Brahe*”, 1972, p. 402. Énfasis mío.

²⁷ Blair, “*Tycho*”, 1990, p. 360.

²⁸ Wesley, “*Accuracy*”, 1978, p. 43.

to. Ya que la rotación de la Tierra (o de la bóveda celeste en Ptolomeo) sobre su eje es de 15° cada hora, medir el tiempo provee una alternativa para la medición angular de la distancia entre dos cuerpos celestes. Los relojes mecánicos, a diferencia de los solares o de cualquier otro tipo, tenían la ventaja de adaptarse tanto para dar la hora como para medir el tiempo. También eran capaces de medir cualquier intervalo de tiempo, a diferencia del reloj de arena que tenía una duración fija de tiempo. Sin embargo, “los relojes de su tiempo no eran confiables y un error de sólo 4 minutos de tiempo introducía un error en el espacio de un grado completo. Ningún reloj en aquella época podría haber sido preciso en menos de 15 minutos por día, y el error de una hora era común.”²⁹ Tycho describe que intentó usar dos relojes capaces de indicar los segundos y los minutos, con el fin de que cualquier error en la precisión de un reloj fuera inmediatamente indicado por su variación con respecto al segundo reloj. El tiempo correcto era inicialmente establecido mediante observación. Cada observación requería tres asistentes: uno hacía la observación y anunciaba la posición; otro llevaba el tiempo con ambos relojes y lo anunciaba, mientras que el tercero tomaba nota de la información de los dos primeros. Sin embargo, debido a problemas con la precisión de ambos relojes, parece que Tycho no utilizó sistemáticamente ese método y siguió el modo tradicional de usar instrumentos de observación para medir distancias angulares.³⁰

Tycho no sólo había transformado la *construcción* de instrumentos astronómicos, también renovó su *uso* astronómico. Uno de sus procedimientos de medición más utilizados estaba organizado en tres pasos. El primero consistía en establecer la posición de una estrella de referencia, α *Arietis*; en segundo lugar, medía las posiciones de las estrellas del zodiaco tomando sus distancias desde la estrella de referencia; y, finalmente, las posiciones de otras estrellas eran obtenidas a partir de sus distancias con la de referencia. Así, el catálogo entero dependía de la correcta determinación de la posición de α *Arietis*.

Johannes Kepler (1571-1630) se reunió con Tycho hacia 1600, y tras la muerte de éste tuvo acceso a los datos que por dos décadas había recopilado, especialmente sobre Marte. Kepler había publicado en 1595 su *Mysterium Cosmographicum*, en donde había desarrollado un modelo planetario heliocéntrico en el cual las distancias planetarias calculadas por Copérnico se generaban al hacer corresponder a cada esfera planetaria uno de los cinco sólidos perfectos. A partir de aquí el problema de Kepler fue Marte. Inicialmente intentó usar la gran cantidad de datos que se tenían sobre Marte para poner a prueba su modelo; sin embargo descubrió, tras una gran variedad de análisis totalmente nuevos, que esos datos son compatibles con dos enunciados formulados en términos de proporciones, a saber: 1) una línea entre el planeta y el Sol barre áreas iguales en cantidades iguales de tiempo (conocida ahora como segunda ley de Kepler); y 2) la trayectoria del planeta es elíptica y el Sol ocupa uno de los focos. Kepler publicó su hallazgo en su *Astronomia Nova* de 1609. A diferencia de Copérnico, quien usaba el centro de la órbita de la Tierra como referencia, Kepler establece esas dos relaciones de proporcionalidad (ahora conocidas como leyes de Kepler), para determinar las distancias y el movimiento planetario a partir del Sol verdadero; pero también establecían que el axioma de la astronomía no corresponde con los datos, sino que más bien la trayectoria de los planetas es elíptica y de velocidad variable.

Uno de los aspectos más notables que desarrolló Kepler fueron diversos métodos geométricos para analizar la enorme cantidad de datos con que contaba sobre Marte.

Ptolomeo y Copérnico [...] se habían restringido a sí mismos en sus propias obras al mínimo número de observaciones requeridas para derivar los parámetros orbitales, y así el problema del error observacional o los datos redundantes en conflicto no es explícitamente considerado [...] vemos por primera vez en la historia de la ciencia [con Kepler] cómo un astrónomo lucha por establecer un modelo teórico a partir de una redundancia conflictiva de datos.³¹

²⁹ King, *History*, 2003, p. 19.

³⁰ Andrewes, “Time”, 1985, p. 70.

³¹ Gingerich, *Eye*, 1993, p. 367.

En contraste, Kepler introdujo nuevas consideraciones analíticas, a lo largo de toda su *Astronomia nova*, para controlar errores observacionales: revisaba varias veces con diferentes datos un mismo parámetro; revisaba las consecuencias de los cálculos mediante datos diferentes a los utilizados para generar dicho cálculo; empleaba una gran cantidad de datos diversos para controlar la precisión de cada uno de los datos utilizados, etc.³² Después de Kepler, los estándares de precisión y de elaboración y revisión de hipótesis fueron mucho más rigurosos.

Fueron tres las novedades de fondo que Kepler introdujo en la práctica astronómica: haber colocado el análisis de datos como regulador y reformador de los modelos planetarios; haber colocado al Sol verdadero (no el Sol *medio*) como punto fijo desde el cual se miden las distancias y tiempos planetarios; y elaborar un modelo planetario que simultáneamente determinara la longitud y la latitud celeste de los planetas. Ninguno de estos tres elementos de medición estaban presentes en la práctica astronómica anterior a Kepler.

Por otra parte, y a pesar de los avances en instrumentos y en los innovadores procedimientos de análisis de datos, tanto Kepler como Tycho mantuvieron el valor de la paralaje solar en alrededor de tres minutos, lo cual era el valor que Ptolomeo aceptaba: Tycho acepta los 3' mientras que Kepler la calculó en 2'24".³³ Igualmente, uno de los valores que conservaron de la antigüedad es la inexistencia de paralaje estelar. Ptolomeo había sostenido que "ninguna estrella [ni planeta] tiene una paralaje detectable (lo cual es el único fenómeno a partir del cual las distancias pueden ser derivadas)" (*Almagesto*, IX.1). Esa falta de detección era la razón principal por la cual Tycho había conservado en su modelo planetario a la Tierra inmóvil y en el centro del Universo, mientras que para Kepler ello era una de las princi-

pales anomalías, porque para cualquier modelo que colocara a la Tierra en movimiento alrededor del Sol, las estrellas cercanas a la Tierra deberían verse desplazadas respecto a las más lejanas conforme la Tierra avanza a través de su órbita.

El mismo año en que Kepler publicó su *Astronomia Nova*, Galileo Galilei (1564-1642) utilizaba por primera vez un telescopio para observar diversos cuerpos celestes. Galileo había recibido un catalejo inventado por Hans Lippershey (1570-1619) y lo mejoró a 20 aumentos. El año siguiente construyó otro de 30 aumentos. Galileo no era propiamente un astrónomo, pero dio el primer paso hacia una nueva forma de *observación astronómica* mediante la cual descubría aspectos no identificables a simple vista. Observó y reportó lo que fueron hallazgos totalmente inesperados: la superficie montañosa de la Luna, las manchas solares, cuatro satélites en Júpiter, muchas más estrellas que las observadas a simple vista. Todo ello lo publicó en 1610 en el *Sidereus Nuncius*. En julio de ese mismo año, observó un extraño aspecto de Saturno que inicialmente interpretó como si fueran tres cuerpos. Dos años después habían desaparecido para dejar solo uno, lo cual dejó perplejo a Galileo. Fue Kepler, sin embargo, y no Galileo, quien se dio cuenta del tipo de uso pertinente y relevante que podría hacerse del telescopio para el avance de la astronomía. Kepler escribió a Galileo diciéndole que el telescopio podría ser usado para medir con precisión los diámetros del Sol y la Luna, así como la porción eclipsada de la Luna durante los eclipses, con el fin de establecer las distancias y tamaños del Sol, la Luna y la Tierra.³⁴ Kepler publicó en 1611 la *Dioptrice*, donde explicaba teóricamente el funcionamiento de los lentes utilizados en los telescopios y proponía lentes de curvatura hiperbólica para corregir la aberración esférica. Sin embargo, para 1621 Kepler había descubierto que los métodos para establecer distancias y tamaños, que provenían desde Ptolomeo, eran improcedentes, por lo que decidió abandonarlos y, consecuentemente, el uso del telescopio para dicho fin.

³² Para un análisis detallado de algunos de los complejos análisis desarrollados por Kepler véase Buchwald, "Discrepant", 2006, pp. 565-649.

³³ La paralaje solar es el ángulo subtendido en el centro del Sol por el radio medio de la Tierra, y es un parámetro fundamental para calcular el tamaño del sistema solar ya que, conociendo ese ángulo y el valor del radio medio de la Tierra, se puede calcular la distancia absoluta media entre la Tierra y el Sol. Entre menor sea el valor de la paralaje solar, mayor será la distancia Tierra-Sol.

³⁴ Van Helden, *Measuring*, 1986, p. 78.

TERCERA TESIS ELIMINADA: LOS GRANDES PLANETAS ETÉREOS SON PEQUEÑOS CUERPOS SÓLIDOS Y LAS PEQUEÑAS DISTANCIAS ENTRE ELLOS SON MONUMENTALES

Hacia 1630 había cuatro modelos planetarios: Ptolomeo, Tycho, Copérnico y Kepler; y si bien cada uno de ellos asignaba a la Tierra y al Sol posiciones y funciones métricas y dinámicas diferentes, todos ellos compartían los mismos valores de los tamaños y las distancias de los planetas. Los valores aceptados a inicios del siglo XVII, y que habían sido muy similares desde Ptolomeo para las distancias planetarias, eran: distancia promedio Tierra-Luna, 64 radios terrestres (rt); distancias de la Tierra a Mercurio, 170 rt; a Venus, 1 100 rt; al Sol, 1 200 rt; a Marte, 8 500 rt; a Júpiter, 14 000 rt; y a Saturno, 20 000 rt. “La concepción tradicional sobre los tamaños y las distancias dentro del orbe de Saturno sorprendentemente había cambiado poco para 1630. No fue sino hasta después de 1631 que tuvo lugar un cambio real”.³⁵ Tal cambio, que llevó mucho tiempo y no fue fácil, se debió a una interrelación específica (un mutuo ajuste) entre *valores matemáticamente calculados* y uso específico de *instrumentos de detección considerablemente precisa*. Este mutuo ajuste tendrá efectos auto-correctivos tanto en los *datos observados* como en los *valores calculados* y será una de las herramientas cognitivas más relevantes de la medición astronómica moderna.

Hacia el final de su vida, Kepler concluyó y publicó las *Tablas Rudolfinas*, las cuales eran de una precisión jamás antes alcanzada;³⁶ al calcular las efemérides para el año de 1631 se dio cuenta de que el 6 de diciembre Venus pasaría frente al Sol y sería visible en América, mientras que para el 7 de noviembre del mismo año Mercurio estaría en tránsito y sería visible en Europa. Kepler escribió un pequeño panfleto encomiando a los astrónomos para hacer los preparativos necesarios para llevar a cabo tales observaciones. Se trataba de la primera predicción realizada con datos *muy precisos* de un fenómeno in-

esperado. Las observaciones de Venus no se llevaron a cabo, pero Pierre Gassendi (1592-1655) confirmó en París la predicción para Mercurio respecto al momento del evento. Gassendi usó un cuarto oscurecido en el cual la imagen del Sol era recibida mediante un telescopio galileano simple y proyectada sobre una pieza de papel. Sin embargo, la predicción falló respecto al tamaño de Mercurio. Kepler había sostenido que Mercurio ocuparía una décima parte del diámetro del Sol, sin embargo, resultaba mucho más pequeño. De hecho, poco antes de las 9 de la mañana del 7 de noviembre, Gassendi vio una pequeña mancha oscura esférica sobre el Sol que pensó era una mancha solar, porque no tenía el gran tamaño aparente esperado. Sin embargo, a diferencia de las manchas solares genuinas, ésta empezó a avanzar mucho más rápido. Ello le hizo darse cuenta, finalmente, después de revisar sucesivamente la imagen del Sol en distintos lapsos, que se trataba en realidad de Mercurio. Gassendi había dividido el diámetro del Sol en 60 partes iguales (cada división correspondería a 30 segundos de arco), con lo cual esperaba, de acuerdo con Kepler, que el diámetro de Mercurio fuera de aproximadamente seis partes. Estableció, sorprendido, que el diámetro aparente de Mercurio en relación al diámetro aparente del Sol era de poco más de dos tercios de una división; es decir, 20 segundos.³⁷

Gassendi publicó su observación en *Mercurius in Sole Visus et Venus Invisa* (1632). Además de subrayar lo inesperadamente *pequeño* que resultó Mercurio, también indicó que era un cuerpo *opaco*. Ambas afirmaciones iban en contra de lo que la tradición pensaba porque los planetas y estrellas eran considerados por igual “cuerpos luminosos”: luminarias con luz propia.³⁸ Ambas ideas eran tan difíciles de creer que incluso el propio Gassendi, en su magna obra *Institutio Astronomica* (1647), menciona sus observaciones de Mercurio, pero utilizó los valores tradicionales en su presentación de

³⁵ Van Helden, *Measuring*, 1986, p. 2.

³⁶ Por ejemplo, el error para la posición de Marte en las *Tablas Rudolfinas* era de ± 10 minutos, mientras que en las tablas anteriores a Kepler era de 5°, véase Gingerich, *Eye*, 1993, p. 332.

³⁷ Hubo fuerte oposición al escrito de Gassendi; por ejemplo, Wilhelm Schickhard (1592-1635), amigo y asistente de Kepler, usó argumentos ópticos para mostrar cómo, a pesar de su pequeño tamaño, en realidad Mercurio tenía el tamaño predicho por Kepler, véase van Helden, “Importance”, 1976, pp. 4-5.

³⁸ Cfr. *Almagesto*, VIII.4 y VIII.6.

las dimensiones del mundo. “Por mucho, el mayor impacto de la observación de Gassendi fue la revaloración del diámetro aparente de Mercurio que se necesitaba y las implicaciones que ello tenía para los tamaños de los otros planetas”.³⁹

Las efemérides derivadas de las *Tablas Rudolfinas*, en donde Kepler se percató del tránsito de Venus de 1631, abarcaban eventos sólo hasta 1636.⁴⁰ En ese año nadie se había percatado que volvería a haber un tránsito de Venus hacia finales de 1639. Fue Jeremiah Horrocks (1618-1641), un joven astrónomo inglés ferviente seguidor de Kepler, quien descubrió que hacia finales de noviembre de 1639 habría otro tránsito de Venus. Horrocks había estudiado en el Emmanuel College de la Universidad de Cambridge y había hecho amistad con William Crabtree (1610-1644). Ambos se habían percatado, desde 1636, que las principales tablas astronómicas en uso, incluyendo aquellas basadas en las observaciones de Tycho Brahe, no eran precisas a la hora de hacer predicciones de eclipses, conjunciones y ocultaciones lunares: “El problema de las tablas inexactas, realmente, fue la inspiración de toda la empresa astronómica sobre la cual Horrocks y Crabtree se embarcaron juntos a mediados de la década de 1630”.⁴¹ Las tablas derivadas de los datos de Tycho eran mucho más confiables que sus antecesoras, pero aún no suficientemente precisas; ello generó en Horrocks y Crabtree el estímulo necesario para mejorar aún más los métodos de observación astronómica.

Utilizaron como instrumento de observación un “Canon” o vara de Jacobo, el cual tenía forma de una “T”, en donde el bastón más largo forma el radio de un círculo, mientras que el más corto actúa como la tangente del mismo círculo. Horrocks había marcado en el bastón corto una escala de varios lugares decimales, señalados con líneas diagonales tal como Tycho lo había hecho, y colocó dos mirillas móviles sobre el bastón corto de manera tal que en cada observación las podía recorrer para medir la distancia angular de los dos objetos o punto medidos. Con ese instrumento registró las variaciones estacionales

del diámetro angular de la Luna, llegando en 1638 a una conclusión sorprendente: “la órbita de la Luna alrededor de la Tierra no era el círculo excéntrico de la astronomía ptolemaica tradicional, sino una *elipse kepleriana*”.⁴² Así se confirmaba que las leyes de Kepler se aplicaban también para la Luna. Sin el manejo adecuado, paciente e inteligente de ese instrumento (para fines de medición) no hubiera sido posible obtener la información empírica requerida, y sin los principios físicos correctos no hubiera sido posible interpretar dicha información de manera tal que generara una gran precisión en las predicciones.

En octubre de 1639, Horrocks se dio cuenta de que para el 4 de diciembre de ese año (calendario gregoriano) habría un tránsito de Venus, y así se lo comunicó a Crabtree. Horrocks y Crabtree fueron los únicos dos astrónomos en prepararse para realizar la observación del evento. Horrocks utilizó un telescopio, del cual no ofreció mayores detalles, para realizar una proyección sobre papel del disco solar, e hizo coincidir la imagen del Sol sobre un círculo de seis pulgadas de diámetro que había dibujado en el papel. El diámetro horizontal lo dividió en treinta partes iguales. El día predicho era el domingo 24 de noviembre (calendario juliano) alrededor de las 15:00 horas. Para asegurar la observación, Horrocks empezó las observaciones del Sol desde el 23 de noviembre. A las 15:15 horas del 24 de noviembre observó que el tránsito ya había comenzado. Crabtree, en Salford, observó a la misma hora que Venus transitaba “sobre” el Sol. “Durante la siguiente media hora antes de la puesta de Sol, Horrocks realizó tres mediciones precisas de Venus sobre el disco solar [...] y los datos que extrajo de ellas serían de la más alta importancia científica”.⁴³ Horrocks midió el tamaño lineal del pequeño círculo oscuro como una fracción del diámetro solar proyectado, y concluyó que el planeta subtendía un diámetro angular no más grande que 1'12", lo cual era diez veces más pequeño que las figuras comúnmente aceptadas para el diámetro de Venus en conjunción inferior.⁴⁴ La información de las mediciones le permitió *calcular* los tiempos de ingreso y egreso de Venus al disco

³⁹ Van Helden, “Importance”, 1976, pp. 7-8.

⁴⁰ Kollerstrom, “William”, 2005, p. 36.

⁴¹ Chapman, “Horrocks”, 2004, p. 5.27.

⁴² Chapman, “Horrocks”, 2004, p. 5.28.

⁴³ Chapman, “Horrocks”, 2004, p. 5.30.

⁴⁴ Chapman, “Jeremiah”, 1990, p. 338.

solar, ya que ninguno de los dos son observables; también la posición exacta del nodo y de la paralaje solar. Comparativamente con datos anteriores, los valores que encontró Horrocks son los siguientes:

	Paralaje solar (radio terrestre/UA)	Distancia Tierra-Sol (en radios terrestres)
Ptolomeo	2' 50"	1,210
Copérnico	2' 55"	1,179
Tycho Brahe	2' 54"	1,183
Kepler	0' 59"	3,470
Horrocks	0' 14"	15,000
[valor actual]	0' 8.5"	24,000

La paralaje solar fue el parámetro clave que indicaba qué tan lejos estaba el Sol y, consecuentemente, qué tan grande era el sistema solar (la distancia del Sol al orbe de Saturno).⁴⁵ Horrocks había reducido la paralaje solar unas cuatro veces respecto al valor de Kepler y casi trece veces respecto al de Tycho, lo cual le permitía calcular la distancia Tierra-Sol en 15 000 radios terrestres. Ambos valores eran poco creíbles, porque resultaba que el tamaño del sistema solar era de dimensiones monumentales muy difíciles de aceptar.⁴⁶ Horrocks murió el 3 de enero de 1641 sin haber publicado su manuscrito, que publicaría Hevelius en 1662, bajo el título *Venus in Sole Visa*.

CUARTA TESIS ELIMINADA: LA TIERRA REDONDA NO ES ESFÉRICA

La práctica de observación astronómica sufrió una serie de cambios profundos a partir de la década de 1640, y pasó a otra fase de desarrollo con el invento de tres instrumentos independientes, pero

⁴⁵ Más adelante, en la sección 8, regresaré al análisis de la medición de la paralaje.

⁴⁶ Johannes Hevelius (1611-1687) publicó en 1662 el trabajo de Horrocks y “corrigió” el valor de la paralaje solar de Horrocks de 14 arcosegundos a 41, ya que era incapaz de dar crédito al drástico aumento del tamaño del sistema solar. Isaac Newton (1642-1727) incluso utilizó en la primera edición de sus *Principios matemáticos de filosofía natural* (1687) el valor de 40 arcosegundos de Hevelius, véase: Aughton, *Transit*, 2004, pp. 190-191.

usados en conjunto. Esos tres instrumentos fueron el micrómetro, las mirillas telescópicas sobre instrumentos graduados y el reloj de péndulo. Sin la construcción y uso coordinado de estos instrumentos no hubiera sido posible que la observación astronómica se transformara en una de las herramientas de medición más fértiles.⁴⁷ El valor verdadero del telescopio no estaba en simplemente descubrir nuevos fenómenos astronómicos que escapan a la observación a simple vista, sino “en la combinación con otros instrumentos que le permiten transformarlo en una herramienta de medición.”⁴⁸

El desarrollo de mirillas telescópicas no hubiera sido posible sin el trabajo teórico de Kepler para entender el funcionamiento de las lentes y de sistemas ópticos.⁴⁹ Particularmente en el telescopio kepleriano, a diferencia del galileano, la imagen que se forma está invertida debido a que los rayos de luz se cruzan dentro del tubo del telescopio en algún punto entre el objetivo y el ocular. Ese punto de cruce ofrece la distancia focal que constituyó el inicio de las mirillas telescópicas y del micrómetro. William Gascoigne (1612-1644), amigo de Crabtree, ya usaba en 1641 una mirilla de su propia invención. En una carta a Crabtree, Gascoigne explicó qué era esa mirilla y cómo utilizarla, en específico para medir la refracción, la paralaje de la Luna y los diámetros de los planetas. Gascoigne le dice el 25 de enero de 1641 que

Si [el punto focal de un telescopio] se coloca la escala que mide, o un cabello, que se observe a través

⁴⁷ Esta transformación radical de la observación astronómica gracias al uso de instrumentos compuestos para detectar simultáneamente diferentes parámetros con gran precisión (tiempo, posición y distancias relativas) es un evento único de la astronomía europea. Ninguna otra cultura de astronomía avanzada había desarrollado este tipo de instrumentos.

⁴⁸ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 35.

⁴⁹ En 1611 Kepler publicó *Dioptrice*, en donde establecía las bases teóricas de los lentes convergentes biconvexas y divergentes bicóncavas, así como la explicación sobre por qué la combinación de ambas producía un telescopio galileano; desarrolló los conceptos de imagen real y virtual; imagen invertida y recta; los efectos de la distancia focal en el aumento o reducción de la imagen. Igualmente, describía como mejorar el sistema óptico de los telescopios usando dos lentes convexas las cuales producirían un mayor aumento que la combinación, usada por Galileo, de una lente convexa con una cóncava.

del cristal, puedes usarlo sobre un cuadrante, para encontrar la altitud de la estrella menos visible dentro [del telescopio]. Si la noche es muy oscura para que el cabello no se observe, uno puede colocar un candil en un farol de manera tal que emita luz suficiente sobre el cristal.⁵⁰

Parece que esa mirilla había pasado, en diciembre de ese mismo año, de ser una simple escala, insertada en un telescopio, a un micrómetro: “un instrumento por derecho propio que usaba punteros corredizos cuya separación está determinada por un par de tornillos”.⁵¹ Esta forma de realizar observaciones astronómicas, a la cual se le fueron añadiendo otras, “permaneció como el estándar de la práctica de observación durante los siguientes dos siglos”.⁵² Lo que elevó el instrumento de Gascoigne de un simple dispositivo ingenioso de mirilla a un instrumento de potencial científico independiente fue su invento de un mecanismo mediante el cual el hilo del visor podía ser movido a través del campo de visión usando tornillos para dicho movimiento. Propiamente el uso de tornillos medidores y ajustadores es lo que constituyó el micrómetro, a diferencia de la simple mirilla. A partir del invento de Gascoigne, “el micrómetro de tornillo había hecho posible la medición de ángulos de una precisión sin precedentes hasta esa fecha”.⁵³

Por otra parte, una mejoría significativa en la cronometría fue la aplicación de los recién descubiertos principios que rigen el movimiento de péndulos. Fue Christian Huygens (1629-1695) quien, hacia finales de la década de 1660, construyó un reloj de péndulo funcional, motivado en gran medida por la creciente necesidad en la astronomía por realizar mediciones de tiempo más precisas. Si bien Galileo ya había estudiado un reloj que fuera controlado por un péndulo, el construido por Huygens utilizó un método que hacía oscilar al péndulo en un arco cicloide, lo cual permitía que, sin considerar su amplitud o peso, siempre oscilara en el mismo periodo de tiempo. Johannes Hevelius (1611-1687)

y Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) fueron dos de los primeros astrónomos en utilizar el reloj de péndulo para medir el tiempo en sus observaciones. Huygens publicó en 1659 su *Systema Saturnium*, en donde establece que Saturno tiene un anillo; ahí utilizó un micrómetro construido con una barra de metal en forma de cuña en el plano focal del ocular de su telescopio y moviendo la barra hasta cubrir exactamente el objeto que quería medir. “El ancho de la barra en este punto, comparado con el grado total del campo de visión (comprobado por comparación con un reloj de péndulo el tiempo transcurrido por una estrella cerca del ecuador en cruzar su diámetro) le permitió deducir el diámetro aparente del objeto observado”.⁵⁴ Así, las observaciones astronómicas dejaban gradualmente de ser directas y se empezaban a convertir en información inferida de la combinación de diversos instrumentos trabajando coordinadamente. De esa manera, Huygens midió los diámetros de los planetas, las posiciones de sus satélites y el tamaño aparente del anillo de Saturno.

Un descubrimiento geodésico inesperado, derivado del uso coordinado de dichos instrumentos astronómicos, fue que la forma de la Tierra no es perfectamente esférica. En 1672, Cassini y su asistente Jean Richer (1630-1696) buscaban medir la paralaje de Marte durante su perihelio en oposición. Para ello Richer viajó a Cayena, Guayana Francesa, para determinar la posición de Marte y posteriormente comparar sus datos con los obtenidos para el mismo fin por Cassini en París. Richer descubrió inesperadamente que el péndulo de su reloj, que había ajustado en París para marcar los segundos, oscilaba más lento en Cayena, con un retraso de dos minutos por día, y tenía que ser acortado alrededor de 2.8 milímetros para que marcara los segundos verdaderos, por lo que la latitud terrestre parecía afectar la oscilación. Durante diez meses, Richer repitió esos experimentos y concluyó que debido a que Cayena está 40° más cerca del ecuador terrestre que París, parecía como si la atracción de la gravedad terrestre disminuía en el ecuador. En 1682 otros observadores fueron enviados por la Academia de París a Cabo

⁵⁰ Gascoigne en Derham, “Extracts”, 1717, p. 604.

⁵¹ Sellers, *Search*, 2012, p. 39.

⁵² Chapman, *Dividing*, 1995, p. 36.

⁵³ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 44.

⁵⁴ King, *History*, 2003, p. 97.

Verde y a las Antillas para confirmar cuánto tenían que acortar la longitud del péndulo para que marcará los segundos reales. Los resultados confirmaron la precisión de las mediciones de Richer y la consecuencia directa de esas mediciones era que la forma de la Tierra era de un esferoide oblató.⁵⁵

QUINTA TESIS ELIMINADA:
LAS ESTRELLAS FIJAS SE MUEVEN

Durante el siglo XVIII, la construcción de instrumentos astronómicos se profesionalizó y perfeccionó. “El constructor de instrumentos científicos, en el sentido moderno, no aparece sino hasta alrededor de 1740”.⁵⁶ Durante la primera mitad del siglo XVIII dominó en astronomía la construcción de instrumentos de alta precisión como los grandes sextantes y cuadrantes, y en la segunda mitad los primeros telescopios acromáticos y el telescopio de tránsito. El desarrollo de los relojes de precisión en Inglaterra, en la primera mitad del siglo XVIII, tuvo profundos efectos en el avance de la astronomía de la época. “Fue durante este periodo que el reloj regulador fue desarrollado. Este tipo de reloj, así llamado porque proveía el estándar de tiempo mediante el cual otros relojes eran regulados, fue específicamente diseñado para la cronometría de precisión”.⁵⁷ El reloj regulador tenía, entre otros componentes, un péndulo que compensaba las variaciones de temperatura. Hacia finales del siglo XVIII, en la astronomía “los procedimientos de observación dependen de la realización de la interdependencia mutua de cuatro diferentes instrumentos; cuadrante mural, telescopio de tránsito, sector de cenit y reloj regulador”.⁵⁸ Para Bernard Cohen, dos ejemplos sirven para ilustrar con claridad el enorme incremento en la precisión de esa época. Considérese que de la época de Tycho Brahe a la de John Flamsteed (1646-1719) la precisión en

la observación astronómica se incrementó de alrededor de 1 minuto de arco a 20 segundos, esto es, un factor de 3. En contraste, durante el siglo XVIII la precisión se mejoró por un factor de 200. Este mismo incremento en la precisión puede ser visto en la medición del tiempo. Los primeros relojes de péndulo, construidos hacia finales del siglo XVII, eran buenos dentro de un margen de 10 segundos al día, pero para el año de 1800 los cronómetros eran buenos dentro de un quinto de segundo al día.⁵⁹

Son los instrumentos compuestos, y no sólo la matemática, los responsables directos de que a algunas ciencias se les denomine “exactas”.

Edmond Halley (1656-1742) fue sucesor de John Flamsteed como director del Observatorio Real. Flamsteed había sido nombrado en 1675 el primer astrónomo real, y en ese mismo año inauguraba un Observatorio Real. Una de las primeras acciones de Flamsteed fue instalar los más precisos relojes de péndulo para realizar observaciones astronómicas. Para ello recurrió al afamado constructor de relojes londinense, Thomas Tompion.⁶⁰ A partir de 1675, y por varios años, Flamsteed consiguió diversos instrumentos, como un sextante con mirilla telescópica y con micrómetro que empleaba una graduación con tornillo inventado por Robert Hooke (1635-1703). Ese sextante era el primer instrumento con engranaje ecuatorial, y “representó una mejoría sustancial, tanto óptica como mecánicamente, sobre los utilizados por Tycho y Hevelius”.⁶¹ Flamsteed, entre otras cosas, realizó el primer catálogo de estrellas con telescopio, el *Historia Coelestis*, publicado póstumamente en 1725, el cual contenía alrededor de 3 000 estrellas, con una precisión de alrededor de 10 segundos de arco, y “formó una base sólida para la astronomía de precisión durante casi un siglo”.⁶²

Halley realizó una gran variedad de contribuciones a la astronomía posicional; por ejemplo: elaboró un catálogo estelar del hemisferio sur desde la isla Santa Elena, estudió el tamaño del Universo y realizó un estudio sobre cometas, pero “el logro más notable en astronomía estelar fue su descubri-

⁵⁵ Isaac Newton interpretó los resultados de estas mediciones afirmando que la Tierra es más alta en el ecuador que en los polos debido a la naturaleza rotacional de los cuerpos esferoides en rotación, como la Tierra o la Luna. Cfr. *Principia*, Libro III, Prop. 20, Problema IV, ver Olmsted, “Scientific”, 1942, pp. 117-128.

⁵⁶ King, *History*, 2003, p. 102.

⁵⁷ Andrewes, “Time”, 1985, p. 78.

⁵⁸ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 82.

⁵⁹ Cohen, *Triumph*, 2005, p. 97.

⁶⁰ Andrewes, “Time”, 1985, p. 77.

⁶¹ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 52.

⁶² King, *History*, 2003, p. 63.

miento del movimiento estelar”.⁶³ En 1710 Halley empezó a estudiar con detalle los catálogos estelares antiguos, particularmente el de Ptolomeo y al poco tiempo notó que había algunas discrepancias, incluso tomando en cuenta la precesión y los errores de observación. En 1718 informó a la Royal Society lo siguiente:

Habiendo tenido la ocasión de examinar la cantidad de la precesión de los puntos equinocciales, me di a la penosa tarea de comparar las declinaciones de las estrellas fijas ofrecidas por Ptolomeo, en el tercer capítulo del libro VII de su *Almagesto*, observadas por Timocares y Aristilo alrededor de 300 años a. C., y por Hiparco alrededor de 170 años después de ellos, es decir, alrededor de 130 años a. C., con lo cual hemos encontrado que, y por el resultado de una gran cantidad de cálculos, concluyo que las estrellas fijas en 1800 años avanzaron un poco más de 25 grados en longitud, o que la precesión es de un poco más de 50 segundo por año.

Nótese cómo todavía ya entrado el siglo XVIII, Halley seguía discutiendo ideas de los antiguos astrónomos griegos, y de hecho después de tomar en cuenta y compensar algunos errores de observación de los antiguos, Halley decía: “Y mientras continuaba en esta indagación, me sorprendió encontrar las latitudes de tres de las estrellas principales en los cielos directamente en contradicción con la supuesta gran oblicuidad de la eclíptica, que parece confirmada por las latitudes de muchas de las [estrellas] restantes”.⁶⁴

Las tres estrellas eran Sirio, Arturo y Aldebarán, las cuales no estaban en sus posiciones originales registradas por los antiguos: Aldebarán estaba ahora 15 minutos de arco desplazada, Sirio 30 minutos y Arturo 22 minutos. Cada una presentaba un desplazamiento en cantidad y en dirección diferente de las otras, por lo que se trataba de un “movimiento propio”. A Halley le inquietaba el porqué Tycho Brahe no había subrayado ese desplazamiento, particularmente para el caso de Sirio, ya que el desplazamiento excedía la tolerancia de error que Tycho

aceptaba, lo cual en parte lo intentó explicar por el efecto de la refracción. Lo que Flamsteed y Halley estaban mostrando no sólo era un universo más complejo y de distancias variables entre las estrellas, sino sobre todo que a partir de ahora la observación astronómica era posible solamente con el uso coordinado de diversos instrumentos que proporcionaban datos inaccesibles a la observación directa y, por lo tanto, susceptibles de interpretación. Uno de los casos más célebres hacia mediados del siglo XVIII fue James Bradley (1693-1762).

Bradley sucedería a Halley como director del Observatorio Real en 1742, y en 1748 escribió:

[L]a gran exactitud con la cual son construidos ahora los instrumentos le ha permitido a los astrónomos del presente descubrir varios cambios en las posiciones de los cuerpos celestes; las cuales debido a su pequeñez habían escapado a los antiguos astrónomos. [...] Siempre se ha encontrado que los progresos de la astronomía tienen una gran dependencia de la observación precisa, que hasta que fue lograda, ésta ha avanzado lentamente.⁶⁵

Bradley se refería específicamente al telescopio de tránsito, el cual, hacia mediados del siglo XVIII, representaba uno de los logros tecnológicos más avanzados de la época. El telescopio de tránsito había sido inventado en las últimas décadas del siglo XVII por Römer, y sólo fue posible usarlo para mediciones astronómicas después de haber sido inventado un reloj regulador confiable, ya que “era un instrumento sencillo en su forma, pero demandaba gran exactitud al ser ajustado”.⁶⁶ Bradley se da cuenta de que las mediciones precisas son solamente posibles si sus técnicas de observación son iguales en rigor a las técnicas con que son construidos los instrumentos, con lo cual los constructores de instrumentos se convierten en un elemento fundamental de la astronomía. Con Bradley encontramos una nueva concepción en el uso y construcción de instrumentos astronómicos de muy alta precisión, por ejemplo:

⁶³ Ron, “Halley”, 1972, p. 70.

⁶⁴ Halley, “Considerations”, 1717, p. 736.

⁶⁵ Bradley, “Letter”, 1748, p. 2.

⁶⁶ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 83.

Bradley fue el primero en desarrollar una técnica de observación en la cual el cuadrante, sector, tránsito y reloj proveían cuatro interdependientes controles-cruzados (*cross-checks*) para detectar errores [...] Fue con sus observaciones hechas con su sector de cenit en la década de 1720 que los orígenes de su técnica fueron primeramente establecidos, y la cual creció hasta su completa madurez en Greenwich después de 1750.⁶⁷

En 1725, Samuel Molyneux (1689-1728) quería mejorar la medición de la paralaje estelar, lo que años antes había intentado, sin éxito, Robert Hooke. Molyneux había colocado en su casa de Kew Green un telescopio de cenit de alta precisión construido por George Graham (1673-1751), uno de los mejores constructores de relojes de precisión y de instrumentos astronómicos. El instrumento fue colocado verticalmente y Molyneux invitó a su amigo Bradley a realizar las observaciones de γ *Draconis*, una estrella que se encuentra muy cerca del cenit, con lo cual se evitan los efectos indeseables de la refracción. Igualmente, dicha estrella culmina prácticamente en el cenit de Greenwich, lo que la hace particularmente útil para medir distancias al cenit. Así, lo que se buscaba era determinar la paralaje “absoluta” de γ *Draconis* a partir de la variación de las distancias al cenit. Bradley afirmaba que ese instrumento era capaz de medir posiciones estelares dentro de un margen de 1" de precisión, por lo que era un instrumento óptimo para llevar a cabo la medición. Después de registrar 80 posiciones de γ *Draconis* durante dos años, descubrieron que la estrella exhibía una oscilación anual de 20" desde su posición nominal en el cielo. Dicha oscilación era muy grande y en dirección incorrecta para ser debida a la paralaje.⁶⁸ Después de revisar el instrumento en busca de fallos y confirmar que su funcionamiento era correcto, Molyneux abandonó las observaciones, pero Bradley decidió continuar el estudio de este inesperado movimiento aparente, para lo cual pidió a Graham construir otro telescopio de cenit de igual precisión pero más versátil que el usado por Molyneux, que le

permitiera medir más estrellas. Graham construyó el nuevo instrumento de 12 ½ pies de radio que proporcionaba un arco de observación de 12° 30' con lo cual se podían observar alrededor de 200 estrellas.⁶⁹ En 1728 Bradley razonó que la dirección aparente de la luz de la estrella que alcanza al observador es alterada por el desplazamiento de la Tierra a través de su órbita, con lo cual la posición de la estrella parece oscilar conforme la Tierra circula alrededor del Sol, lo cual publicó en 1727.⁷⁰ A ese fenómeno se le llamó *aberración de la luz*.⁷¹ “El descubrimiento de la aberración de la luz, a pesar del resultado fallido para determinar la paralaje, fue uno de los más grandes, si no el más grande de los logros en la astronomía posicional del siglo XVIII”.⁷²

Bradley continuó sus observaciones con su telescopio de cenit por otros veinte años y descubrió otro movimiento aparente. Ahora se trataba de una oscilación de la posición estelar de alrededor de 9". Supuso que era debido a las atracciones variables que la Luna ejercía sobre la Tierra, de modo tal que hacían que el eje de rotación de ésta tuviera un “zig-zagueo” en su trayectoria de precesión. Observó la Luna durante 18 años, periodo en que la posición de los nodos lunares completa un ciclo, con el fin de establecer correlaciones con el nuevo movimiento detectado. Con ello, Bradley pudo concluir que, efectivamente, el eje de rotación de la Tierra sufre un movimiento de oscilación o nutación que está correlacionado con el movimiento orbital de la Luna; conclusiones que publicó en 1748. Cierra Bradley su comunicación sosteniendo que *sus observaciones no son ya compatibles con el principio antiguo de que las distancias angulares de las estrellas son siempre las mismas* o que no tienen movimiento real por sí mismas, “una suposición que a pesar de haber sido usualmente hecha por los astrónomos anteriores, sin embargo parece estar fundada en principios demasiado inciertos, para ser admitidos para todos los casos”.⁷³ Así, el avance del conocimiento astro-

⁶⁷ Chapman, *Dividing*, 1995, pp. 88-89.

⁶⁸ Hirshfeld, A., “Bradley, James”, en Bracher *et al.*, *Biographical*, 2006, p. 161.

⁶⁹ King, *History*, 2003, p. 112.

⁷⁰ Bradley, “Letters”, 1727, pp. 637-661.

⁷¹ A partir de esas observaciones Bradley, calculó la velocidad de la luz en 295 000 km/s (183 000 millas/s), valor con un error de sólo 2 % respecto al valor actual.

⁷² King, *History*, 2003, p. 112.

⁷³ Bradley, “Letter”, 1748, p. 39.

nómico dependía totalmente, a mediados del siglo XVIII, de la precisa construcción y uso correcto de instrumentos astronómicos especialmente diseñados para usos específicos. A este respecto, Bradley afirmaba, en 1751, que:

Soy consciente de que si mis propios esfuerzos han sido, en algún aspecto, eficaces para el avance de la astronomía, ello se ha debido principalmente al consejo y asistencia que recibí de mi notable colega el Sr. George Graham; cuya gran habilidad y juicio en mecánica junto con un completo conocimiento práctico de los usos de los instrumentos astronómicos, le permitieron planear y construirlos de la manera más perfecta.⁷⁴

Antes de que finalizara el siglo XVIII, William Herschel (1738-1822) intentaba medir la paralaje estelar, para lo cual utilizó un método de comparar la distancia angular entre dos estrellas muy juntas. Tal método partía del supuesto de que si una de las dos estrellas del par está muy lejos del Sol y la otra estrella del par está muy cerca, entonces la paralaje de la que está más cercana debe ser detectada como resultado de las frecuentes mediciones, a lo largo de varios meses, de las distancias angulares entre las dos estrellas. Herschel intentó medir la paralaje estelar “relativa” de esa forma y no lo logró, más bien descubrió algo inesperado: que muchas de las estrellas que a simple vista se observan como si fueran una sola, en realidad son estrellas binarias, y también le llevó al descubrimiento del movimiento del Sol.

A pesar de sus diferencias, los modelos planetarios de Ptolomeo, Copérnico, Kepler y Newton habían compartido dos tesis respecto al centro del sistema planetario (ya sea la Tierra, el Sol medio o el Sol verdadero): 1) está en el centro (físico y/o geométrico) del universo; 2) es fijo (no tiene movimiento) respecto a la bóveda de estrellas; sin embargo, Herschel mostrará que ello es falso. En 1760, Tobias Mayer (1723-1762) publicó en Gotinga un informe sobre los movimientos propios de 80 estrellas, comparando sus posiciones con las registradas por Römer en 1706. Mayer estableció que el Sol

tendría que tener igualmente un movimiento propio y que las estrellas hacia las cuales se dirige el sistema solar, es decir, el ápex solar, parecerían estarse separando unas de otras, mientras que las estrellas ubicadas en la dirección opuesta, el antápex solar, parecerían como si se estuvieran aglomerando.⁷⁵ Sin embargo, Mayer no pudo detectar ningún patrón de movimiento del Sol a partir de su evidencia observacional.

En 1783, Herschel publicó un trabajo titulado “On the proper Motion of the Sun and Solar System”,⁷⁶ en el cual empieza comparando algunas posiciones de estrellas que aparecían en el gran catálogo de Flamsteed con las observaciones realizadas por él mismo. Divide en tres partes las diferencias que ha encontrado: 1) las estrellas que están perdidas o que han sufrido un cambio sustantivo de posición desde los tiempos de Flamsteed (alrededor de 25 estrellas); 2) las estrellas que han cambiado sus magnitudes desde la época de Flamsteed (alrededor de 40 estrellas) y 3) las estrellas que novedosamente llegan a ser visibles (cerca de 12 nuevas estrellas).⁷⁷ Después de descartar posibles errores de observación que se pudieron haber cometido, Herschel analizó los datos observacionales mediante diversos modelos geométricos y estableció cuatro teoremas mediante los cuales pudo deducir algunas conclusiones. Encontró que en la gran mayoría de los casos en que la posición aparente de las estrellas ha cambiado, la dirección de dicho cambio sugiere que el ápex solar es hacia el norte de λ *Herculis* en la constelación de Hércules. En otras palabras, suponiendo que el sistema solar en su conjunto se desplaza hacia dicha constelación, entonces tendrían explicación la mayoría de los desplazamientos de las estrellas conocidas y la aparición de otras estrellas no registradas anteriormente. Con lo cual, Herschel afirmó en 1783:

Pienso que ya no estamos autorizados en suponer que el Sol está en reposo como tampoco lo estaríamos al negar el movimiento diurno de la Tierra, excepto respecto a esto, ya que las prue-

⁷⁴ Bradley, J., en King, *History*, 2003, pp. 113-114.

⁷⁵ North, *Historia*, 2001, p. 302.

⁷⁶ Herschel, “On”, 1783, pp. 247-283.

⁷⁷ Herschel, *Scientific*, 1912.

bas de lo segundo son muy numerosas, mientras que de lo primero descansan sólo en algunos pocos aunque fundamentales testimonios.⁷⁸

Al final del trabajo, Herschel menciona que se esperaba establecer la cantidad del movimiento del Sol, para lo cual solamente ofrece algunos indicios que futuras observaciones podrán o bien confirmar o mejorar; al respecto, Herschel sostiene que “podemos estimar de una manera general que el movimiento del Sol concluyentemente no puede ser menor que aquel que la Tierra tiene en su órbita anual”.⁷⁹ “El descubrimiento de los movimientos propios de las estrellas abrió la posibilidad de discutir una visión completamente nueva de la astronomía [...] los astrónomos pronto iniciaron un programa de mediciones sistemáticas de los movimientos propios de las estrellas”.⁸⁰

SEXTA TESIS ELIMINADA: DETECTANDO LA INDETECTABLE PARALAJE ESTELAR

Copérnico, al suponer que la Tierra gira alrededor del Sol generaba naturalmente una línea base enorme para medir la paralaje de las estrellas, a saber, el diámetro de la órbita de la Tierra. Se debía simplemente medir la posición de alguna estrella con respecto al fondo de estrellas y esperar seis meses para volver a medir la posición de la misma estrella y medir su desplazamiento aparente. Sin embargo, la paralaje estelar no se detectaba, lo cual tenía dos consecuencias directamente en contra de la idea de que la Tierra gira alrededor del Sol: o bien la Tierra estaba fija (y consecuentemente la hipótesis de Copérnico es falsa) o bien se mueve alrededor del Sol y

las estrellas están infinitamente lejos como para no detectar su paralaje. Si ello fuera así, el tamaño real de las estrellas debería ser desproporcionadamente enorme como para poder observarlas a una distancia infinita.

Hemos visto cómo Horrocks derivó el valor de la paralaje solar en 14" a partir del estudio de una observación astronómica privilegiada y muy poco común, pero la paralaje estelar seguía sin ser detectada. Igualmente infructuosos fueron los intentos de Hooke, Molyneux y Bradley, a pesar de que los dos últimos contaban con instrumentos muy precisos para llevar a cabo dicha medición y con relojes muy confiables. Sin embargo, el desarrollo de instrumentos geodésicos, de navegación y astronómicos fue particularmente importante durante el siglo XVIII atendiendo otros problemas, como la medición de la longitud terrestre en altamar. Entre los diversos desarrollos en los instrumentos durante esta época, fueron tres los que, tras décadas de mejoras e innovaciones, resultaron particularmente importantes para la astronomía: el componente óptico, el heliómetro y la división del círculo y el círculo meridiano.

El componente óptico tiene que ver con la diferente óptica que utilizan los telescopios. Newton había establecido en 1672 que la refracción de la luz va siempre acompañada por dispersión o aberración cromática. Para evitar ese fenómeno en el uso de telescopios, Newton desarrolló un telescopio reflector que utilizaba un par de espejos internos. Sin embargo, en 1729 Chester Moor Hall, un abogado e inventor inglés, descubrió que la aberración cromática desaparecía juntando un lente convexo de vidrio Flint y uno cóncavo de vidrio Crown.⁸¹ En 1753, John Dollond (1706-1761), quien fue uno de los constructores y teóricos de instrumentos ópticos en Londres más reconocido, publicó un trabajo en el que explicaba cómo mejorar los telescopios refractores utilizando una combinación de lentes.⁸² Además presentaba un nuevo instrumento que había diseñado para medir con mayor preci-

⁷⁸ Herschel, *Scientific*, 1912, pp. 121-122.

⁷⁹ Herschel, *Scientific*, 1912, p. 125.

⁸⁰ A pesar de los argumentos de Herschel, hubo otros astrónomos que no estaban de acuerdo con su conclusión, particularmente Jean-Baptist Biot (1774-1862) y Friedrich Bessel (1784-1846) para quienes la evidencia observacional no justificaba el movimiento del Sol. Sin embargo, en 1841, y ante la Academia de San Petersburgo, Otto Wilhem Struve (1819-1905), con la adquisición de nuevos datos gracias a nuevos instrumentos, estableció que la velocidad del Sol era de alrededor de 11 500 km/h, véase North, *Historia*, 2001, p. 302.

⁸¹ Mientras que el vidrio Flint tiene un índice de refracción relativamente alto y presenta alta dispersión, el índice del vidrio Crown es relativamente bajo y de baja dispersión.

⁸² Dollond, “Letter”, 1753, pp. 103-107.

sión la variación del diámetro aparente del Sol en distintos momentos del año, es decir, un heliómetro. El instrumento consistía en dividir el objetivo del telescopio en dos mitades semicirculares, las cuales pueden deslizarse lateralmente de manera independiente mediante un tornillo vernier. Ello permite deslizamientos controlados muy finos. A diferencia de los micrómetros ordinarios de la época, el heliómetro permitía medir con gran precisión solamente las extremidades de la imagen dividida. Si bien originalmente estuvo diseñado para medir el diámetro aparente del Sol, resultó muy útil para medir el diámetro de otros cuerpos celestes, como la Luna, planetas y estrellas. En 1757, Dollond publicó un estudio teórico sobre por qué se evitaba la dispersión cromática con el uso de tales lentes, refutando las conclusiones a las que Newton había llegado sobre la dispersión cromática. “Debido a la importancia práctica de sus investigaciones [John Dollond] recibió en 1761 la Medalla Copley y fue elegido miembro de la Royal Society”.⁸³ Su hijo, Peter Dollond, continuó el trabajo sobre la dispersión e instrumentos astronómicos, mejorando y construyendo el micrómetro de cristal bipartito.

La mayoría de los instrumentos de geodesia, navales y astronómicos, se componen de piezas que son segmentos de círculo y son las que llevan la escala, generalmente en grados, mediante la cual se realiza la medición pertinente. El problema que enfrentan los constructores de tales instrumentos es cómo construir de manera precisa y confiable esas piezas con escalas micrométricas. Ese era el problema de la división del círculo. En astronomía tal división era clave para detectar fenómenos que hasta entonces habían sido indetectables con los instrumentos construidos hasta esa época, precisamente como la paralaje estelar. La graduación de los instrumentos de observación astronómica fue un asunto importante desde la antigüedad en el arte de su construcción.

La fase “pre-histórica” de la división de los instrumentos es oscura, aunque entre 1670 y 1740 es posible discernir tres influencias significativas en el

desarrollo de tales instrumentos: Robert Hooke, el mercado de los relojes y la invención del cuadrante de Hadley. Las maquinarias reconocibles más tempranas no fueron construidas para escalas graduadas, sino para producir trabajo de engranaje horológico. Pero con la invención de un instrumento náutico confiable por Hadley en 1731, se creó un incentivo para producir escalas baratas y abundantes grabadas con estándares astronómicos de precisión.⁸⁴

Sin embargo, y a pesar de estos intentos tempranos para la división de las escalas en instrumentos, “el primer impacto real sobre la manufactura de instrumentos fue debido a Ramsden”.⁸⁵ Jesse Ramsden (1735-1800) fue matemático, artesano y un muy habilidoso constructor de instrumentos de alta precisión, que en 1762 estableció en Londres un pequeño taller para la construcción de diversos instrumentos geodésicos y náuticos, aunque su principal contribución fue una herramienta para construir y calibrar diferentes instrumentos: la *máquina de división* (*Dividing engine*).⁸⁶ Así como unas décadas antes se había inventado el *reloj regulador* para calibrar los relojes astronómicos, la máquina de división servía para calibrar con gran precisión diversos instrumentos y su diseño era notable. Hacia mediados del siglo XVIII, la mejor división del círculo tenía límites de tres segundos de arco, pero las máquinas que diseñó Ramsden alcanzaban $\frac{1}{2}$ de segundo de arco. La primera máquina de división la construyó en 1766 y era adecuada para alcanzar mayor precisión en instrumentos geodésicos y de navegación; pero en 1775 construyó un instrumento muy superior para alta precisión en instrumentos astronómicos. Consistía en

⁸⁴ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 124. John Hadley (1682-1744), un matemático y constructor inglés, inventó un octante (o cuadrante de Hadley), y pensaba que ese instrumento podría ser usado para encontrar la longitud terrestre determinando las distancias lunares.

⁸⁵ Bennett, *Divided*, 1987, p. 138.

⁸⁶ En 1777 publicó un trabajo titulado *Description of an engine for dividing mathematical instruments*, en <https://archive.org/details/descriptionofeng00rams>, consultado el 20 de mayo de 2016.

⁸³ King, *History*, 2003, p. 150.

sujetar el círculo o arco que iba a ser graduado a una rueda horizontal de 113 centímetros de diámetro; un golpe hacia abajo en un pedal hacía girar la rueda una distancia de 10 minutos de arco y la línea divisoria era marcada a mano, el punto de corte se indicaba en un marco radial. Una placa de bronce sobre un tornillo sin fin era ulteriormente dividida en 60 partes, de manera tal que Ramsden podía hacer las graduaciones a cada 10 segundos de arco.⁸⁷

Esta máquina “era capaz de ejecutar las más delicadas de las escalas náuticas, con una velocidad y precisión consistente, que ganó para su inventor el primer premio público en concederse para un método de graduación mecánica”.⁸⁸ Correlativamente, la máquina de división generaba criterios epistemológicos muy altos en la obtención de datos ya que

la graduación mecánica ofreció la posibilidad no sólo de instrumentos más baratos y más abundantes, sino una precisión fácilmente atestiguada que estaba libre de errores de, incluso, el mejor artesano. Mientras que es verdad que los errores de la máquina de división descendían sobre cada escala que era grabada, una vez que esos errores habían sido comprobados, podían ser eliminados mediante corrección rutinaria de una manera que era imposible con la variedad de errores de las escalas hechas a mano.⁸⁹

La máquina de Ramsden permitía la investigación confiable y segura de aspectos astronómicos que estaban más allá de los límites cognitivos de los otros instrumentos de la época, así como proporcionaba el medio adecuado para detectar y corregir errores de calibración indetectables por el mejor artesano.

Uno de los instrumentos astronómicos más importantes de Ramsden fue su círculo meridiano. Era un telescopio de refracción montado sobre un eje orientado de Este a Oeste (para que quedara alineado con el meridiano). Además, este instrumento estaba provisto de un círculo *completo* (a diferencia del cuadrante mural que solamente era un cuarto de círculo)

y con escala finamente graduada que solamente se podía leer con un microscopio micrométrico.

El círculo completo permitía evaluar más fácilmente los errores en el centrado y en otras operaciones de pivoteado. Se utilizaban cronómetros de precisión (‘reguladores’) en las mediciones de ciertos ángulos, para lo cual se cronometraba el tiempo que tardaban las estrellas en cruzar una retícula de alambre iluminado en el plano focal del telescopio de tránsito.⁹⁰

La precisión, confiabilidad y versatilidad en la observación de este instrumento permitió “desarrollar nuevas teorías de los errores instrumentales, y como consecuencia de esto las mediciones angulares se volvieron mucho más precisas”.⁹¹ En astronomía,

el desarrollo más importante de finales del siglo XVIII es representado por la primera nueva generación de círculos astronómicos, es decir, círculos completos divididos con miras telescópicas. Capaces de la división más exacta y de lecturas más precisas, y susceptibles de técnicas para la reducción de errores, ellos pronto establecieron, a inicios del siglo XIX, un nuevo patrón para los instrumentos fundamentales en la astronomía.⁹²

Uno de los astrónomos que se vieron beneficiados por la creciente mejoría en la práctica de observaciones finas, confiables y de gran precisión fue Wilhem Bessel (1784-1846), quien aprendió astronomía por cuenta propia. En 1807, Wilhem M. Olbers (1758-1840) le encargó a Bessel realizar una reducción de las observaciones de Bradley de las

⁹⁰ North, *Historia*, 2001, p. 315.

⁹¹ North, *Historia*, 2001, p. 315.

⁹² Bennett, *Divided*, 1987, p. 128. Durante la primera mitad del siglo XIX los instrumentos astronómicos se vieron beneficiados por los avances industriales de Inglaterra, Francia y Alemania. Ya a inicios de ese siglo había talleres y fábricas, especialmente en Alemania, que competían con los avanzados logros de los Dollond, Ramsden y Cary en Londres. Especialmente firmas como las de J. G. Repsold en Hamburgo, 1802, y G. Reichenbach en Munich, 1804. Alemania, además, tuvo la fortuna de que uno de los mejores matemáticos de la época, Carl Friedrich Gauss, se interesara activamente en los aspectos prácticos de la manufactura de instrumentos, véase North, *Historia*, 2001, p. 315.

⁸⁷ King, *History*, 2003, p. 162.

⁸⁸ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 130.

⁸⁹ Chapman, *Dividing*, 1995, p. 130.

posiciones de 3 222 estrellas a una fecha fija (1755), las cuales Bradley había registrado de 1750 a 1762 en el Observatorio Real de Greenwich. Bessel “estuvo particularmente interesado en los factores que impactan la precisión de las observaciones y estudió la precesión, la nutación, la aberración y la refracción, además de desarrollar una teoría de los errores”.⁹³ En 1810 fue nombrado director del reciente observatorio de Königsberg, donde trabajó el resto de su vida. En 1813 Bessel inició en Königsberg un programa de observaciones con un tránsito construido por Peter Dollond y un círculo construido por Cary.⁹⁴ En su tarea de revisión de observaciones, analizó el catálogo hecho por Bradley, quien ya había introducido correcciones de posiciones de catálogos existentes. Bessel, a su vez, corrigió los errores en el catálogo de Bradley, ya que necesitaba valores precisos de la aberración y la refracción. Finalmente, en 1818 publicó sus *Fundamentos de la astronomía para el año 1755*, el cual contenía las posiciones reducidas de 3 222 estrellas, junto con una teoría completa de astronomía esférica y la reducción de datos; también ofrecía los movimientos propios de las estrellas, tal como habían sido derivadas de las observaciones de Bradley, Piazzi y Bessel mismo. Este trabajo “representa un hito en la historia de las observaciones astronómicas, porque hasta entonces las posiciones de las estrellas no podían ser dadas con comparable precisión: a través del trabajo de Bessel, las observaciones de Bradley fueron convertidas en la marca del inicio de la moderna astrometría”.⁹⁵ En 1821, Bessel acuñó la expresión “la ecuación personal”, que se refiere a los inevitables efectos de percepción del observador y circunstancias contextuales sobre las mediciones astronómicas, especialmente en la determinación del tiempo de los tránsitos.⁹⁶

⁹³ Bracher, Marché y Ragep, *Biographical*, 2006, p. 116.

⁹⁴ William Cary (1759-1825) sirvió “como aprendiz de Ramsden y, además de grandes instrumentos, construyó globos, reglas, microscopios, clinómetros, brújulas y teodolitos de tránsito [...] Entre los grandes instrumentos de Cary estuvo su impresionante círculo altazimutal hecho para Colonel Beaufoy, y un instrumento de tránsito hecho en 1805 para el observatorio de Moscú”, King, *History*, 2003, pp. 170-172.

⁹⁵ Fricke, “Bessel”, 1972, p. 99.

⁹⁶ La *ecuación personal* está relacionada con errores de observación que se originan “en la limitación de los sentidos su naturaleza subjetiva [...] Trabajando en un periodo de gran intereses en

A partir de 1819 cambiaron los telescopios en el observatorio de Königsberg, “el modesto equipo del observatorio fue marcadamente mejorado por la adquisición de un círculo meridiano Reichenbach-Uttschneider en 1819; un gran heliómetro Fraunhofer-Uttschneider en 1829 y un círculo meridiano Repsold en 1841”.⁹⁷ A partir de 1819, Bessel utilizó el círculo meridiano para dos fines: en la determinación de los movimientos de las estrellas, de manera tal que sus posiciones pudieran ser predichas para todo tiempo, y en la definición de un sistema de referencia para las posiciones de las estrellas. Entre 1821 y 1833 determinó las posiciones de aproximadamente 75 000 estrellas en zonas de declinación entre -15° y $+45^\circ$, y con esas observaciones desarrolló los métodos para determinar errores instrumentales, incluyendo aquellos de la división del círculo, y los eliminó de sus observaciones.⁹⁸ Una vez contando con un catálogo de estrellas que medían las posiciones desde una fecha fija y con una precisión inédita, Bessel intentó medir la paralaje estelar.

Bessel sabía de los fracasos de Bradley y de Herschel para medir la paralaje estelar, y en realidad de todos los astrónomos anteriores. Particularmente comprendía que una de las fallas de Herschel había sido suponer que el brillo mayor de una estrella, comparativamente con su par, indica mayor proximidad a nosotros.⁹⁹ Bessel atacó el problema con un supuesto diferente, a saber: que entre mayor sea el movimiento propio de una estrella, menor es la distancia al Sol, por lo que se tendría que escoger una estrella que presente un movimiento propio muy grande como punto de referencia para medir

los errores de la observación astronómica y sus tratamientos matemáticos, Bessel percibió en 1816, la importancia del incidente de Kinnebrooke y publicó un análisis del caso en 1822”, Hon, “Towards”, 1989, p. 490. Ese incidente tuvo lugar en enero de 1796 en el Observatorio Real de Greenwich. N. Maskelyne (1732-1811) despidió a su asistente Kinnebrooke debido a que éste último registraba los tiempos que medía de los tránsitos estelares casi un segundo más que lo que el propio Maskelyne lo hacía, lo cual era grave ya que la calibración del reloj de Greenwich dependía de tales observaciones.

⁹⁷ Fricke, “Bessel”, 1972, p. 98.

⁹⁸ Fricke, “Bessel”, 1972, p. 100.

⁹⁹ Ese supuesto sería correcto si todas las estrellas tuvieran la misma luminosidad y la absorción de luz del medio interestelar fuera homogénea, lo cual ahora sabemos que no es así.

la paralaje estelar. Bessel escogió la estrella designada en el catálogo de Flamsteed como 61 *Cygni* debido a que presenta un movimiento propio de 5.2" por año. Para realizar la medición Bessel utilizó el heliómetro Fraunhofer-Utzhneider y escogió dos estrellas cercanas a 61 *Cygni* a unos 8' y 12' de arco. 61 *Cygni* es de hecho una estrella binaria, y entre ambas presentan una diferencia de brillo de casi una magnitud y unos 16" de arco entre ellas. Ello mejora la precisión de la determinación de la paralaje porque el punto medio entre ambas puede ser tomado como referencia para la medición. Después de observar durante 18 meses, Bessel tenía suficientes datos para determinar confiablemente la paralaje de 61 *Cygni* en 0.314", con una media de error de $\pm 0.020''$, por lo que la distancia del Sol a 61 *Cygni* era de 6.9×10^5 radios de la órbita terrestre.¹⁰⁰ Bessel publicó su resultado en 1838, y fue la primera vez en la historia que se podía conocer la distancia absoluta a una estrella. El supuesto de Bessel respecto al mayor movimiento propio de las estrellas resultó correcto y “permaneció como criterio para la elección de estrellas para programas de paralaje [...] El trabajo pionero de Bessel [y posteriormente los de] Henderson y Struve, no sólo abrió una nueva era de la investigación astronómica sino también presentó los fundamentos para la investigación de la estructura de nuestro sistema solar”.¹⁰¹

CONCLUSIONES

A la luz del presente estudio es posible establecer algunas conclusiones:

1. La llamada astronomía ptolemaica se componía de seis tesis centrales las cuales no fueron abandonadas todas juntas al mismo tiempo. El proceso de *eliminación* duró alrededor de trescientos años (1543-1838), y no, como tradicionalmente se ha mantenido, de 1543 a 1687.

2. El proceso de *eliminación* no fue de tipo “todo a la vez”, sino contrariamente, de “sustitución pieza por pieza con coexistencia de tesis antiguas/nuevas”.
3. En todos los casos, excepto en Copérnico, dicho proceso de *eliminación* fue posible mediante la *creación* de procedimientos inéditos de *medición científica*.
4. Comparativamente, las últimas tesis en eliminarse requirieron de procedimientos de medición de *varios cientos de órdenes de precisión y exactitud mayores* que lo requerido para las primeras tesis en ser eliminadas.
5. Derivado del punto 4, el proceso de *eliminación* consistió en la *creación* de procedimientos de medición cada vez de mayores capacidades tecnológicas y matemáticas que requerían, correlativa y recíprocamente, de mayores habilidades cognitivas, por lo cual se podría denominar a ello *eliminación creativa*.
6. El conocimiento, la matemática y la tecnología para *plantear* una tesis (científica o que aparece en un corpus científico) es *varios órdenes inferior* (tecnológica, metodológica, matemática, epistémica, lógica y cognitivamente) que lo requerido para *eliminarla creativamente*.
7. Toda teoría filosófica de cambio científico que sostenga que el cambio teórico es total e instantáneo, y de una teoría por otra, es histórica, epistémica y cognitivamente incompatible con el presente estudio, principalmente derivado de la conclusión 2.
8. Los procedimientos de medición astronómica utilizados en la *eliminación creativa* de la astronomía ptolemaica estuvieron constituidos por interrelaciones de retroalimentación entre datos, matemática y ontología; solamente después de varias fases se logró una integración óptima entre esos tres componentes.
9. Sin la creación, uso y mejora de procedimientos de medición científica no hubiera sido posible la *eliminación creativa* de la astronomía ptolemaica, aunque sí su *eliminación simple*, o mera *sustitución explicativa*, es decir, reordenamiento de los *mismos* datos para generar *diferentes* explicaciones.

¹⁰⁰ En la época de Bessel se sabía que el radio de la órbita terrestre promedio era de unos 150 000 000 km, por lo que en años luz 61 *Cygni* estaría a 10.9.

¹⁰¹ Fricke, “Bessel”, 1972, p. 101.

10. La *eliminación creativa* supuso la *expansión de prácticas de medición*. Por *expansión* se quiere decir mejoría de instrumentos y de habilidades cognitivas, creación de nuevos instrumentos, creación de nuevos estándares epistémicos y nuevas reglas, ampliación del conocimiento de la naturaleza, creación de nuevas técnicas y escalas de medición, nuevas técnicas matemáticas de procesamiento de datos, nuevos controles de errores, etcétera.
 11. Copérnico realizó una *eliminación simple* de la tesis ptolemaica sobre las posiciones del Sol y la Tierra, conservando todas las demás. Ello fue así principalmente porque no modificó, mejoró ni renovó las técnicas básicas de medición astronómica anteriores.
 12. En la medida en que la *eliminación creativa* de cada tesis ptolemaica requirió de una interrelación cada vez más armónica entre datos, instrumentos y herramientas matemáticas cada vez más precisos, exactos y confiables, la *eliminación creativa* de todas las tesis ptolemaicas constituyó un *complejo proceso cognitivo ampliativo de expansión creciente*.
- tronon. Reg. &c. Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars", *Philosophical Transactions*, vol. 35, 1727, pp. 637-661.
 _____, "A Letter to the Right Honourable George Earl of Macclesfield concerning an Apparent Motion Observed in Some of the Fixed Stars; By James Bradley D. D. Astronomer Royal, and F. R. S.", *Philosophical Transactions*, vol. 45, 1748, pp. 1-43.
 Buchwald, J. Z., "Discrepant Measurements and Experimental Knowledge in the Early Modern Era", *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 60, 2006, pp. 565-649.
 Butterfield, Herbert, *Los orígenes de la ciencia moderna*, Madrid: Taurus, 1958.
 Cohen, L. Bernard, *La revolución en la ciencia*, Barcelona: Gedisa, 2002.
 _____, *The triumph of numbers. How counting shaped modern life*, New York: Norton & Company, 2005.
 Copérnico, Nicolás, *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, Madrid: Técnos, 1997.
 Chapman, A., "Jeremiah Horrocks, the transit of Venus, and the 'New Astronomy' in early seventeenth-century England", *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 31, 1990, pp. 333-357.
 _____, *Dividing the Circle. The Development of Critical Angular Measurement in Astronomy 1500-1850*, New York: John Wiley & Sons, 1995.
 _____, "Horrocks, Crabtree and the 1639 transit of Venus", *Astronomy & Geophysics*, vol. 45, 2004, pp. 5.26-25.31.
 Chen, X., "A different kind of revolutionary change: transformation from object to process concepts", *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 41, 2010, pp. 182-191.
 Derham, W., "Extracts from Mr. Gascoigne's and Mr. Crabtree's Letters, Proving Mr. Gascoigne to Have Been the Inventor of the Telescopic Sights of Mathematical Instruments, and Not the French. By W. Derham, Prebend of Windsor, and R. Soc. Soc.", *Philosophical Transactions*, vol. 30, 1717, pp. 603-610.
 Dobrzycki, J., "The Role of Observations in the Work of Copernicus", *Vistas in Astronomy*, vol. 17, 1975.

FUENTES

- Andrewes, W. J. H., "Time for the Astronomer 1484-1884", *Vistas in Astronomy*, vol. 28, 1985, p. 70.
- Aughton, P., *The Transit of Venus, The Brief, Brilliant Life of Jeremiah Horrocks*, London: Weidenfeld & Nicolson, 2004.
- Bennett, J., *The Divided Circle. A History of Instruments for Astronomy Navigation and Surveying*, Oxford: Christie's Collectors, 1987.
- Blair, A., "Tycho Brahe's Critique of Copernicus and the Copernican System", *History of Ideas*, vol. 51, 1990, pp. 355-377.
- Bowler, Peter e Iwan Morus, *Panorama general de la ciencia moderna*, Barcelona: Crítica, 2007.
- Bracher, K., et al. (eds.), *The Biographical Encyclopedia of Astronomers*, New York: Springer, 2006.
- Bradley, J., "A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley As-

- Dollond, J., "A Letter from Mr. John Dollond to Mr. James Short, F. R. S. Concerning an Improvement of Refracting Telescopes", *Philosophical Transactions*, vol. 48, 1753, pp. 103-107.
- Fricke, W., "Bessel, Friedrich Wilhelm", *Dictionary of Scientific Biography, Vol. II. Emil Fischer-Gottlieb Haberlandt*, Nueva York: Charles Scribner's Sons, 1972.
- Gingerich, O., *The Eye of Heaven. Ptolemy, Copernicus, Kepler*, New York: American Institute of Physics, 1993.
- Gingerich, O. and James V., "Tycho and Kepler: Solid Myth versus Subtle Truth", *Social Research*, vol. 72, 2005, pp. 77-106.
- Guillaumin, Godfrey, *La génesis de la medición celeste*, México: UAM/Tirant, 2016.
- Hall, Rupert, *La revolución científica: 1500-1750*, Barcelona: Crítica, 1985.
- Halley, E., "Considerations on the Change of the Latitudes of Some of the Principal Fixt Stars. By Edmund Halley, R. S. Sec.", *Philosophical Transactions (1683-1775)*, vol. 30, 1717, pp. 736-738.
- Hellman, C. D., "Brahe, Tycho", *Dictionary of Scientific Biography, Vol. II. Emil Fischer-Gottlieb Haberlandt*, New York: Charles Scribner's Sons, 1972.
- Henderson, J. A., *On the Distances between Sun, Moon & Earth. According to Ptolemy, Copernicus & Reinhold*, The Netherlands: E. J. Brill, 1991.
- Herschel, W., "On the proper Motion of the Sun and Solar System", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 73, 1783, pp. 247-283.
- _____, *The Scientific Papers of Sir William Herschel (1)*, Cambridge: Cambridge University Press, 1912.
- Hon, G., "Towards a Typology of Experimental Errors: an Epistemological View", *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 20, 1989, pp. 469-504.
- Horowich, P. (ed.), *World changes. Thomas Kuhn and the Nature of Science*, Cambridge: The MIT Press, 1993.
- King, H. C., *The History of the Telescope*, New York: Dover Publications, 2003.
- Kollerstrom, N., "William Crabtree's Venus transit observation", *Proceedings of the International Astronomical Union, 2004 (IAUC196)*, 2005, pp. 34-40.
- Kuhn, Thomas, *La revolución copernicana*, Barcelona: Ariel, 1996.
- Kvasz, L., "Kuhn's Structure of Scientific Revolutions between sociology and epistemology", *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, vol. 46, 2014, pp. 78-84.
- McMullin, E., "Rationality and Paradigm Change in Science", en *World Changes. Thomas Kuhn and the Nature of Science*, P. Horowich (ed.), Cambridge: The MIT Press, 1993.
- North, J. D., *Historia Fontana de la astronomía y la cosmología*, México: Fondo de Cultura Económica, 2001.
- Olmsted, J. W., "The Scientific Expedition of John (sic) Richer to Cayenne (1672-1673)", *Isis*, vol. 34, 1942, pp. 117-128.
- Ron, C., "Halley, Edmond", *Dictionary of Scientific Biography, vol. I. Emil Fischer-Gottlieb Haberlandt*, New York: Charles Scribner's Sons, 1972.
- Sellers, D., *In Search of William Gascoigne*, New York: Springer, 2012.
- Swerdlow, N. M., "An Essay on Thomas Kuhn's First Scientific Revolution, 'The Copernican Revolution'", *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 148, 2004, pp. 64-120.
- Toomer, G. (ed.), *Ptolemy's Almagest*, New Jersey: Princeton University Press, 1998.
- Van Helden, A., "The Importance of the Transit of Mercury of 1631", *Journal of History of Astronomy*, vol. 7, 1976, pp. 1-10.
- _____, *Measuring the Universe. Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley*, Chicago: The University of Chicago Press, 1986.
- Wesley, W., "The Accuracy of Tycho Brahe's Instruments", *Journal of History of Astronomy*, vol. 9, 1978, pp. 42-53.
- Wray, B., "Kuhnian Revolutions Revisited", *Synthese*, vol. 158, 2007, pp. 61-73.