



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

DIRECCIÓN GENERAL DE DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA

FACULTAD DE CIENCIAS

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FILOSÓFICAS

CAMPO DE CONOCIMIENTO: HISTORIA DE LA CIENCIA

MIDIENDO EL MOVIMIENTO DE LOS CUERPOS CELESTES, CONOCIENDO LA LUZ

ASPECTOS EPISTÉMICOS Y COGNITIVOS DE LA MEDICIÓN CIENTÍFICA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

PRESENTA:

CARLOS ANDRÉS GONZÁLEZ SIERRA

TUTOR:

DR. GODFREY GUILLAUMIN JUÁREZ

DEPARTAMENTO DE FILOSOFÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA - IZTAPALAPA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE DE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Para mis padres,

quienes siempre han creído en mis locuras y me han apoyado en las aventuras a las que éstas me han llevado.

Agradecimientos

Al ser este trabajo de grado mi primer resultado investigativo significativo, quiero aprovechar este espacio para expresar mi gratitud hacia todas las personas que me han ayudado a ser la persona que escribió estas líneas.

Antes que nada, quiero agradecer profundamente a mis padres no sólo por la formación que cariñosamente me brindaron y los valores que en mí inculcaron, sino también por su apoyo incondicional en las decisiones que, muchas veces contrarias a sus deseos, he tomado a lo largo de mi vida. A mi hermana Mónica quien, con mucha paciencia y cariño, ha sido siempre mi confidente, mi guía en la vida, mi punto de apoyo y una inagotable fuente de motivación. A mi hermano Juan Francisco por el cariño que siempre me ha ofrecido y los millones de consejos que me ha regalado. A mi cuñado Francisco Javier por todo lo que me ha enseñado desde que llegó a nuestra familia y por su apoyo incondicional. A mis cuatro sobrinas por todo el cariño con que me han colmado desde su llegada a este mundo y por haberme permitido descubrir una nueva faceta de la vida.

Deseo también agradecer a todos los amigos con quienes, al decir de Wittgenstein, he *gastado kilómetros de tonterías*. Especialmente a David, Laura, Juan Pablo y Gabriel, quienes a pesar de la distancia geográfica que hemos experimentado por nuestros diversos intereses académicos y decisiones de vida, han estado siempre conmigo y con quienes he compartido momentos maravillosos. También a Vanessa por sus muchísimos años de amistad y por su ayuda en la digitalización del *modelo geométrico* de James Bradley que presento en el tercer capítulo.

La realización de este trabajo de grado resultó ser un episodio académico bastante peculiar, ya que me permitió integrar los dos campos de estudio por los que transité en mi vida como estudiante de pregrado: la Física y la Filosofía. Por ello, quiero aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas que durante aquellos días de mi vida contribuyeron a mi formación académica, las cuales ayudaron a convertirme en el académico que escribió estas líneas.

De esta manera, manifiesto mi más profunda gratitud a todos los profesores con quienes tomé clase durante mis tres años como estudiante de Física en la Universidad de Antioquia. Especialmente al Dr. Lorenzo de la Torre quien, sin yo darme cuenta, plantó la

semilla de la duda con respecto al estatus epistémico de ciertos conocimientos fundamentales de la Física. También al Dr. Jorge Iván Zuluaga quien a lo largo de todos los cursos de astronomía que con él tomé fue motivando paulatinamente mi interés por la *medición de la velocidad la luz*.

Agradezco también a todos los profesores con los que tomé clases durante mis años como estudiante del pregrado en Filosofía y Letras en la Universidad Pontificia Bolivariana. Especialmente al Dr. Raúl López y a la Dra. Lucila García por sus valiosas clases, su apoyo académico fuera de las aulas y su constante motivación. Una mención aparte merece el Dr. Porfirio Cardona Restrepo quien más que un profesor ha sido mi mentor, guía académico y gran amigo. No sería el académico que escribí este trabajo sin sus enseñanzas, su motivación y su apoyo incondicional.

Extiendo mis palabras de gratitud a todos los profesores con los que tomé clases en mis dos años como estudiante de la Maestría en Filosofía de la Ciencia en la Universidad Nacional Autónoma de México. También a todos los compañeros que me acompañaron dentro y fuera de las aulas. Especialmente a Gabriela, Armín, Maria Amelia, Jorge Armando, Carlos y Jorge Fabián. Con todos ellos aprendí numerosas maneras de apreciar este vasto universo que es la Ciencia. Igualmente, agradezco a todo el personal administrativo del posgrado en Filosofía de la Ciencia por su colaboración y orientación. Particularmente, a la secretaria académica Marisela López por la constante ayuda que me brindó.

Tanto los estudios de maestría en Filosofía de la Ciencia entre Agosto de 2013 y Julio de 2015 así como la elaboración de este trabajo de grado no habrían sido posibles sin el apoyo económico del programa de becas de CONACYT. Por este apoyo extiendo mi más profunda gratitud a todo el pueblo mexicano que hace posible este tipo de oportunidades a los estudiantes e investigadores.

Manifiesto mi más profundo y sincero agradecimiento a mi asesor, el Dr. Godfrey Guillaumin Juárez, no sólo por haber despertado en mí el interés por los apasionantes problemas de la *medición científica*, sino también por haber compartido conmigo sus más recientes investigaciones y haberme hecho participe de las mismas. Este trabajo no sería el mismo sin las muchas horas que dedicamos a discutir acerca de la *medición científica*.

Tampoco lo sería sin sus pertinentes comentarios, sus valiosas correcciones, sus inagotables sugerencias bibliográficas y su constante motivación.

Agradezco también a los miembros del jurado, el Dr. Sergio Martínez, el Dr. José Marquina, la Dra. Fernanda Samaniego y el Mtro. Rafael Martínez, por haber tenido la paciencia para leer una primera versión de este trabajo. Sus valiosas correcciones y comentarios fueron cruciales para *optimizar* y *robustecer* las ideas que aquí presento.

De mi estancia en México no me llevo más que gratos recuerdos. Éstos no habrían sido posibles sin la generosidad y la amistad que me brindaron todas las personas que aquí conocí. En especial deseo agradecer a May, Marco y Gabriel por el cariño que me ofrecieron y por haberme abierto las puertas de sus casas. Durante los dos años y medio que aquí viví las familias Cadena Torres y Miramontes Téllez me recibieron como un miembro más de sus hogares, razón por la cual estaré eternamente agradecido. Extiendo también mi gratitud a todos los amigos que hice en Zumpango de Ocampo, tanto en los campos de fútbol como fuera de ellos. De igual forma, agradezco a mi profesora de francés Jeanne Tetart por la ayuda que me ofreció en la lectura y traducción de algunos textos en francés que utilicé en la elaboración de este trabajo.

Finalmente, deseo manifestar que para mí fue una grata coincidencia el haber concluido este trabajo de grado, el cual está dedicado al problema de la transmisión en el tiempo de la luz, en el mismo año en que se celebró el *Año Internacional de la Luz*. Espero que las ideas aquí contenidas contribuyan, así sea un poco, al crecimiento del conocimiento científico acerca de la luz.

México, D.F. Noviembre de 2015

Contenido

Cronología	viii
Introducción General	12
1. De las respuestas metafísicas a las experimentales. El problema de la transmisión instantánea de la luz en el pensamiento de Galileo y Descartes ..	32
1.1. Introducción	32
1.2. Linternas, montañas y telescopios: la tradición galileana y la idea de experimentar para resolver un interrogante milenario	34
1.3. Espejos, antorchas y eclipses: el rol de la experimentación en la doctrina cartesiana de la transmisión instantánea de la luz	40
1.4. A manera de conclusión: experimentando con la luz, <i>cinematizando</i> su transmisión	49
2. De la medición de los movimientos de los satélites de Júpiter a la propagación sucesiva de la luz. El trabajo de Ole Rømer como <i>evidencia</i> para sustituir el <i>principio físico</i> de la transmisión instantánea de la luz	53
2.1. Introducción	53
2.2. Mapas, relojes y eclipses de los satélites de Júpiter: el contexto métrico del trabajo de Rømer	55
2.3. La <i>ecuación de la luz</i> : el trabajo astronómico de Rømer desde la perspectiva del <i>coherentismo progresivo</i>	63
2.4. De <i>mora luminis</i> : el contexto métrico de Rømer desde la perspectiva de la <i>integración cognitiva</i>	66
2.4.1. <i>Crisis epistemológica</i> : la recepción del trabajo de Rømer y el problema de cómo justificar la sustitución de un <i>principio físico</i>	68
2.4.2. <i>Cambio conceptual</i> : de propagaciones que van más allá de la imaginación y velocidades extrañas	72
2.5. A manera de conclusión: midiendo los cuerpos celestes, sustituyendo <i>principios físicos</i> , pensando la <i>velocidad de la luz</i>	77

3. De la medición de un nuevo movimiento de las estrellas fijas a la propagación sucesiva de la luz. El trabajo de James Bradley como <i>auto-corrección</i> en las operaciones de medición de las posiciones estelares	80
3.1. Introducción	80
3.2. Los sectores de Graham, las observaciones de Bradley y la estrella γ Draconis: el descubrimiento de un nuevo movimiento de las estrellas fijas	82
3.2.1. La afirmación de los <i>principios físicos</i> de la propagación sucesiva de la luz y el movimiento de translación de la Tierra: una justificación coherentista desde el <i>principio de respeto</i>	92
3.3. La <i>velocidad de la luz</i> y el desarrollo de un <i>modelo geométrico</i> : el trabajo de Bradley como un <i>dar sentido</i> al nuevo movimiento de las estrellas fijas	95
3.3.1. La <i>aberración de la luz</i> : la idea de <i>progreso</i> en la medición astronómica de las posiciones de las estrellas	101
3.4. A manera de conclusión: midiendo un nuevo movimiento de las estrellas, afirmando la propagación sucesiva de la luz, mejorando las mediciones astronómicas	103
Conclusión General	107
Referencias	113

Cronología

- 1604 Johannes Kepler publica *Ad Vitellionem paralipomena. Astronomiae pars óptica*. Allí Kepler, entre otras muchas cosas, argumenta metafísicamente en favor de la transmisión instantánea de la luz.
- 1609 Johannes Kepler publica la *Astronomia Nova*.
- 1610 Galileo Galilei observa a través de un telescopio por vez primera cuatro cuerpos que orbitan Júpiter y publica el *Siderius Nuncius* donde expone los hallazgos hechos a través de sus observaciones con el telescopio.
- 1614 Simon Mayr publica el *Mundus Jovialis* donde afirma haber comenzado a observar los satélites de Júpiter un día antes que Galileo y, además, presenta tablas de los parámetros del movimiento de los cuerpos de dicho sistema.
- c. 1615 Isaac Beeckman se adhiere a la doctrina de la propagación sucesiva de la luz.
- 1625 Nace Gian Domenico Cassini en Perinaldo, Italia.
- 1629 Nace Christiaan Huygens en La Haya, Holanda.
- 1633 René Descartes termina la obra *El Mundo o El Tratado de la Luz* pero decide no publicarla.
- 1634 René Descartes envía una carta a un interlocutor desconocido en la que discute la realización de un experimento astronómico para justificar la transmisión instantánea de la luz.
- 1635 Nace Robert Hooke en la Isla de Wight, Inglaterra.
- 1637 René Descartes publica *El Discurso del Método* junto con tres ensayos: *La Dióptrica*, *Los Meteoros* y *La Geometría*.
- 1638 Galileo Galilei publica las *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* [*Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*] donde, entre otras muchas cosas, expone un experimento para determinar si la luz se transmite instantáneamente o si requiere de tiempo para transmitirse.
- René Descartes envía una carta a Marín Mersenne con un comentario acerca de los recién publicados *Discorsi* de Galileo donde afirma que el experimento presentado por este último para determinar si la luz se transmite instantáneamente, o si requiere de tiempo, es inútil frente al experimento astronómico propuesto por el mismo Descartes.
- 1642 Muere Galileo Galilei en Arcetri, Italia.
- Nace Isaac Newton en Woolsthorpe, Inglaterra.
- 1644 Nace Ole Christensen Rømer en Århus, Dinamarca.
- 1650 Muere René Descartes en Estocolmo, Suecia.
- 1652 Gian Domenico Cassini comienza a realizar observaciones del sistema joviano.
- 1656 Nace Edmond Halley en Haggerston, Inglaterra.
- 1664 Se publica póstumamente *El Mundo o El Tratado de la Luz* de René Descartes.

- Gian Domenico Cassini inicia una nueva serie de observaciones del sistema joviano con un telescopio construido por Giuseppe Campani.
- 1667 Se publica el *Saggi di Naturali Esperienze* en el que se expone una serie de experimentos llevados a cabo por la *Accademia del Cimento* entre 1657-1667. Entre estos se cuenta la realización de un experimento similar al propuesto por Galileo Galilei en los *Discorsi* para determinar si la luz se transmite instantáneamente o si requiere de tiempo.
- 1668 Gian Domenico Cassini publica las *Ephemerides Bononiensis mediceorum syderum* donde presenta tablas de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano.
- 1669 Gian Domenico Cassini se muda a Francia para formar parte de la recién instaurada *Académie Royale des Sciences* y colaborar con la construcción del *Observatoire Royale* en París.
- c. 1670 Robert Hooke observa un movimiento anual en la estrella γ Draconis y lo atribuye a un efecto paraláctico.
- 1671 Finaliza la construcción del *Observatoire Royale* en París, Francia.
Jean Picard viaja a Dinamarca para realizar observaciones de los eclipses de los satélites de Júpiter en Copenhague y Uraniburgo con el objetivo de determinar la diferencia de longitud entre estas dos ciudades y París. En dicha expedición conoce a Ole Christensen Rømer quien se encontraba estudiando las observaciones astronómicas realizadas por Tycho Brahe.
- c. 1672 Christiaan Huygens completa su teoría ondulatoria de la luz.
- 1672 Jean Picard completa las observaciones de los eclipses de los satélites de Júpiter en Dinamarca y regresa a Francia junto con Ole Christensen Rømer, quien se instala en París para trabajar en el *Observatoire Royale* junto con Gian Domenico Cassini y el mismo Picard.
- 1673 Nace George Graham en Kirklington, Inglaterra.
- 1676 En el mes de Septiembre Ole Christensen Rømer anuncia a los miembros de la *Académie Royale des Sciences* que el eclipse del primer satélite de Júpiter que se esperaba para el día 9 de Noviembre de ese año ocurriría 10 minutos más tarde de lo que se había calculado en el mes de Agosto utilizando las tablas de Gian Domenico Cassini. En la fecha anunciada se comprueba dicha predicción en el *Observatoire Royale* y Rømer expone el día 21 de Noviembre ante la *Académie* que dicho retraso se debía a la necesidad de incluir una nueva *ecuación de la luz* para calcular la ocurrencia de los eclipses de Júpiter, la cual se deriva del hecho de que la luz requiere de tiempo en su transmisión. Antes de finalizar el año se publica un reporte de la intervención de Rømer en el *Journal des Sçavans* bajo el título “Demonstration touchant le mouvement de la lumiere trouvé par M. Rómer de l’Academie Royale des Sciences”.
- 1677 Se publica una traducción al inglés del trabajo de Ole Christensen Rømer en las *Philosophical Transactions*.

- c. 1678 Christiaan Huygens presenta ante la *Académie Royale des Sciences* su teoría ondulatoria de la luz.
- 1680-1682 Robert Hooke dicta una serie de conferencias sobre diversas temáticas. Entre ellas imparte una serie de charlas sobre la naturaleza de la luz. En ellas Hooke discute el trabajo de Ole Christensen Rømer sobre la propagación sucesiva de la luz.
- 1689 Nace Samuel Molyneux en Chester, Inglaterra.
- 1690 Christiaan Huygens publica el *Traité de la lumière* donde expone su teoría ondulatoria de la luz.
- 1693 Gian Domenico Cassini publica *Les Hypothèses et les tables des satellites de Jupiter* donde se disculpa por la inexactitud de las tablas de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano publicadas en 1668 y, en esta nueva ocasión presenta nuevas tablas aún más exactas de tales parámetros.
- Gian Domenico Cassini publica *De l'Origine et du progrès de l'astronomie* donde, entre otras cosas, expone las razones por las cuales se abstiene de aceptar la propagación sucesiva de la luz.
- Nace James Bradley en Sherborne, Inglaterra.
- 1694 Edmond Halley publica en las *Philosophical Transactions* una traducción al inglés, así como una adaptación al sistema británico, de las nuevas tablas de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano presentadas por Gian Domenico Cassini el año anterior. Dicho trabajo se publicó bajo el título: "Monsieur Cassini his New and Exact Tables for the Eclipses of the First Satellite of Jupiter, reduced to the Julian Stile, and Meridian of London". Allí cuestiona la solución propuesta por Cassini para la segunda irregularidad del primer satélite de Júpiter y defiende la propagación sucesiva de la luz sugerida por Ole Christensen Rømer.
- 1695 Muere Christiaan Huygens en La Haya, Holanda.
- 1703 Muere Robert Hooke en Londres, Inglaterra.
- 1704 Isaac Newton publica la *Óptica*. En ella hace dos menciones de la propagación sucesiva de la luz basándose en el trabajo acerca de los satélites de Júpiter de Ole Christensen Rømer.
- 1705 Se publican póstumamente las conferencias dictadas por Robert Hooke entre 1680-1682.
- 1710 Muere Ole Christensen Rømer en Copenhague, Dinamarca.
- 1707 Eustachio Manfredi comienza en Boloña una serie de exhaustivas observaciones de numerosos movimientos de las estrellas fijas en su ascensión recta, observaciones que se extienden hasta 1728.
- 1712 Muere Gian Domenico Cassini en París, Francia.
- James Bradley comienza a realizar observaciones de los movimientos de los satélites de Júpiter, las cuales se extienden hasta 1732.
- 1719 James Pound publica en las *Philosophical Transactions* nuevas tablas de los parámetros del movimiento del primer satélite de Júpiter para calcular la ocurrencia de sus eclipses bajo el

- título “New and Accurate Tables for the Ready Computing of the Eclipses of the First Satellite of Jupiter, by Addition Only”.
- 1725 Samuel Molyneux, George Graham y James Bradley deciden repetir las observaciones hechas por Robert Hooke alrededor de 1670 de la estrella γ Draconis para establecer si dichas observaciones correspondían a un efecto paraláctico. George Graham construye un sector de cenit para llevar a cabo dicha empresa, el cual es instalado en Kew en el mes de Noviembre. Utilizando este instrumento Bradley observa en el mes de Diciembre un movimiento contrario al esperado por un efecto paraláctico de la estrella γ Draconis.
- 1726 Samuel Molyneux, George Graham y James Bradley continúan las observaciones del nuevo movimiento descubierto para la estrella γ Draconis y comienzan a estudiar si dicho movimiento se da en otras estrellas. Se observa un movimiento de características similares en la estrella 35 Camelopardalis.
- Muere Isaac Newton en Kensington, Inglaterra.
- 1727 George Graham construye un nuevo sector de cenit para James Bradley, el cual permite a este último estudiar los parámetros del nuevo movimiento descubierto en 1725 en un número mayor de estrellas. El instrumento es instalado en Wansted en el mes de Agosto.
- 1728 Muere Samuel Molyneux en Kew, Inglaterra.
- James Bradley envía una carta al astrónomo real Edmond Halley en la que presenta el descubrimiento de un nuevo movimiento de las estrellas fijas y su explicación del mismo mediante la idea de la aberración de la luz. Dicha carta es leída ante la *Royal Society* y publicada en las *Philosophical Transactions* bajo el título “A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. giving an Account of a new discovered Motion of the Fix’d Stars”.
- 1729 Eustachio Manfredi publica *De annis inerrantium stellarum aberrationibus* en la cual reclama haber demostrado la falsedad del sistema copernicano. Allí sostiene que los movimientos en ascensión recta que había estado observando desde 1707 no se deben a ningún efecto paraláctico y que no son más que una aberración.
- 1737 Pierre Louis Maupertuis envía una carta a James Bradley en la que le solicita a este último la información que tuviese sobre la aberración estelar de α y δ Draconis, y le pregunta si en sus propias observaciones había estado aplicando las correcciones pertinentes por la aberración de la luz de manera adecuada.
- 1762 Muere James Bradley en Chalford, Inglaterra.

Introducción General

No se aprende lo que significa “determinar la longitud” aprendiendo lo que es la longitud y lo que es determinar; sino que el significado de la palabra “longitud” se aprende entre otras cosas aprendiendo lo que es determinar longitudes.

(L. Wittgenstein. *Investigaciones Filosóficas*)

1. *Panorama filosófico*: filosofía de la ‘ciencia en práctica’ y epistemología de la medición

En la lección inaugural del curso de física experimental [“Introductory Lecture on Experimental Physics”] de la Universidad de Cambridge, impartida en Octubre de 1871, James Clerk Maxwell destacó dos elementos significativos acerca del estado de la ciencia de su época. Por un lado, reconocía la importancia que el trabajo experimental había adquirido en la física, lo que había llevado a dicha institución a la construcción de un laboratorio y la implementación de un curso en esta área. Por otro, discernía dos formas en que la experimentación contribuía a la física: una ilustrativa y una investigativa. La primera de ellas se refiere a la enseñanza de las ideas científicas y su esclarecimiento, *i.e.*, un uso *pedagógico*. La segunda –la verdadera función de la experimentación de acuerdo con Maxwell– consiste en obtener un estimado numérico de cierta magnitud a través de algún método, esto es, la *medición* [*measurement*] (cf. Maxwell, 1871/1965).

Si bien es cierto que la definición del término *medición* es bastante ambigua –como lo indica K. Berka (1983, Cap. 2)– y que en sí misma representa un problema filosófico central sobre el que poco acuerdo se ha alcanzado –como lo señala E. Tal (2015) en el comienzo de la entrada “Measurement in Science” preparada para la *Stanford Encyclopedia of Philosophy*¹–, considero que la anterior caracterización de Maxwell (1871/1965) –aunque bastante restringida– captura la idea básica de lo que hoy en día se entiende por

¹ En dicha entrada E. Tal (2015) sostiene que gran parte de los autores contemporáneos concuerdan en afirmar que la *medición científica* es una actividad que involucra la interacción con un sistema concreto con el propósito de *representar* ciertos aspectos de dicho sistema en términos abstractos. El problema de esta definición –añade el mismo E. Tal (2015)– es que se adapta también a otras actividades que no son consideradas comúnmente como medición.

*medición científica*². Adicionalmente, como lo muestra Berka (1983) en su estudio, uno de los principales problemas sobre la caracterización y la definición de la *medición* es establecer la naturaleza de los métodos utilizados en la obtención de los estimados numéricos. Señala allí que desde el ámbito de las mediciones físicas se ha enfatizado en los aspectos experimentales mientras que desde el de las mediciones extra-físicas se ha hecho hincapié en los aspectos matemáticos. En su lugar, comparto su idea –también desarrollada por G. Guillaumin (2012)– de que la naturaleza de dichos métodos es de carácter *empírico-matemática*. Con todo lo anterior en mente, es valioso retomar la argumentación de Maxwell (1871/1965) con respecto a la forma investigativa de la *experimentación*, la cual continúa de la siguiente manera:

[...] the history of science shews [shows] that even during that phase of her progress in which she devotes herself to improving the accuracy of the numerical measurement of quantities with which she has long been familiar, she is preparing the materials for the subjugation of new regions, which would have remained unknown if she had been contented with the rough methods of her early pioneers. (p. 244)

En la anterior cita se puede apreciar como Maxwell –durante la segunda mitad del siglo XIX– establecía ya una relación directa entre el desarrollo de los métodos de *medición científica* (con el propósito de incrementar la exactitud de los estimados numéricos) y la producción de nuevo conocimiento científico. Precisamente, la reflexión filosófica acerca de la relación entre *medición científica* y conocimiento es lo que recientemente ha sido denominado como *epistemología de la medición* [*epistemology of measurement*] (cf. Mari, 2003, 2005; Tal 2012, 2013, 2015), la cual es definida por E. Tal (2015) de la siguiente manera:

In the broadest sense, the epistemology of measurement is the study of the relationships between measurement and knowledge. Central topics that fall under the purview of the epistemology of measurement include the conditions under which measurement produces knowledge; the content, scope, justification and limits of such knowledge; the reasons why particular methodologies of measurement and standardization succeed or fail in supporting particular knowledge claims, and the relationships between measurement and other knowledge-producing activities such as observation, theorizing, experimentation, modelling and calculation. (s.p.)

² El *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM, 2012) define medición [*measurement*] de la siguiente manera: “process of experimentally obtaining one or more **quantity values** that can reasonably be attributed to a **quantity**” (p. 16, énfasis del texto original).

Ciertamente, al ser una de las prácticas más características y cotidianas de la ciencia, la *medición científica* ha sido objeto de reflexión de la filosofía de la ciencia desde sus orígenes como disciplina, centrandose principalmente su atención en problemas relacionados con la fundamentación matemática, la metafísica o la semántica de la medición³ (cf. Tal, 2012, 2013, 2015; Guillaumin, 2012). En este sentido, es importante apreciar que –pese a una afirmación como la de Maxwell– la filosofía de la ciencia prestó escasa atención a problemáticas relacionadas con la *epistemología de la medición* durante los últimos años del siglo XIX y la mayor parte del siglo XX⁴. Sin embargo, a partir de la primera década del siglo XXI un número significativo de investigaciones en las áreas de la filosofía y la historia de la ciencia ha mostrado un renovado interés por dichas problemáticas, dando pie a lo que Tal (2015) ha llamado un *giro epistémico* [*epistemic turn*] en la reflexión filosófica acerca de la medición, el cual describe de la siguiente manera: “Rather than emphasizing the mathematical foundations, metaphysics or semantics of measurement, philosophical work in recent years tends to focus on the presuppositions and inferential patterns involved in concrete practices of measurement, and on the historical, social and material dimensions of measuring” (s.p.). En este sentido, trabajos como los de H. Chang (2004, 2007), B. van Fraassen (2008), E. Tal (2012) y G. Guillaumin (2012, 2015a, 2015b), los cuales se caracterizan por un enfoque principalmente histórico-filosófico y por enmarcarse en el estudio de prácticas concretas de *medición científica*, son ejemplos claros de tal *giro epistémico*.

De acuerdo con las ideas expuestas en el párrafo anterior, considero que para una mejor comprensión del lugar en el que teóricamente se ubica el presente trabajo y los objetivos que a través del mismo se pretenden desarrollar, resulta necesario esclarecer lo

³ Algunos ejemplos de las problemáticas estudiadas por la filosofía de la ciencia en torno a la *medición científica* son las propiedades matemáticas de las escalas de medición y sus condiciones de aplicación, o el significado y uso de los términos cuantitativos (cf. Tal 2015). Se sugiere consultar los trabajos de H. Chang & N. Cartwright (2008) y de E. Tal (2013, 2015) para una sucinta presentación histórica de la manera en que diferentes corrientes de la filosofía de la ciencia abordaron tales problemáticas en torno a la *medición científica*. Entre ellas sobresalen las aproximaciones del *convencionalismo* y el *operacionalismo*.

⁴ Una excepción notable es el trabajo de T. S. Kuhn (1961/1993) quien en un texto titulado “La función de la medición en la física moderna” reflexiona acerca de la relación que existe entre la *medición* y las teorías en la física. En este sentido, cuestiona el carácter *confirmatorio* de la *medición* en relación con las teorías y aborda la problemática de la *carga teórica* en los métodos cuantitativos. Concluye que los últimos no surgen hasta una etapa muy avanzada del desarrollo del conocimiento teórico y que, en gran parte, se encuentran orientados por este último. Por lo tanto, considera que las *mediciones* no *confirman* ni *refutan* una teoría de forma aislada y que, en consecuencia, es necesario hacerlo en contraste con otras teorías posibles.

que se entiende por las nociones de práctica y conocimiento científico. Así, la noción de práctica científica es comprendida en la manera como lo desarrolla la *Society for Philosophy of Science in Practice*⁵ (SPSP), la cual sugiere que el trabajo científico se caracteriza ante todo como una serie de *acciones y actividades* de diversa naturaleza –e.g., mentales, físicas, sociales, instrumentales, entre otras– dirigidas a la consecución de ciertos objetivos epistémicos. En este sentido, propone que un estudio de la ciencia no puede limitarse al análisis de las proposiciones científicas y las relaciones lógicas que existen entre ellas, sino que debe partir de un análisis del amplio espectro de actividades que se realizan en el trabajo científico. En este mismo orden de ideas, el conocimiento científico no se percibe tan sólo como el conocimiento de carácter teórico, sino como la concatenación de los diversos conocimientos o *saberes* involucrados en las diferentes actividades especificadas anteriormente, entre los que se incluye el conocimiento de carácter teórico.

1.1. Elementos cognitivos y epistémicos de las prácticas de medición científica

Localizado en el marco de la *epistemología de la medición*, este trabajo se constituye como una reflexión acerca de la relación que existe entre las prácticas de *medición científica* y el conocimiento científico. De esta manera, siguiendo las propuestas de L. Mari (2003, 2005) y E. Tal (2012, 2013), el pilar fundamental de esta investigación es la idea de que uno de los elementos constitutivos de las prácticas de *medición científica* es que ellas permiten obtener información acerca del mundo empírico y, en consecuencia, tienen un impacto en el crecimiento del conocimiento científico. Particularmente, motivado por los trabajos de H. Chang (2004, 2007) y G. Guillaumin (2012, 2015a, 2015b), considero que hay dos modos fundamentales en los que las prácticas de *medición científica* tienen consecuencias de vital importancia para el desarrollo del conocimiento científico (consecuencias tales como la construcción de nuevos instrumentos, la implementación de nuevas metodologías, la aplicación de herramientas de carácter matemático, el descubrimiento de nuevos campos de investigación o problemas científicos, o el desarrollo de nuevas ideas y conceptos

⁵ Al respecto, se recomienda consultar el trabajo de H. Chang (2011) quien presenta de manera abstracta y esquemática algunos de los elementos significativos de dicha perspectiva.

científicos). A estos dos modos los denominaré los elementos *epistémicos* y *cognitivos* de dichas prácticas.

De esta manera, mientras que los elementos *cognitivos* se refieren a las condiciones materiales e intelectuales bajo las cuales la *medición científica* puede producir conocimiento científico, los elementos *epistémicos* se encuentran ligados con el problema de la justificación de dicho conocimiento. En términos más amplios, los elementos *cognitivos* abarcan las herramientas conceptuales, matemáticas e instrumentales desarrolladas a partir de las prácticas de *medición científica* que permiten pensar, concebir y abordar de manera particular un cierto problema en la ciencia. Por su parte, los elementos *epistémicos* denotan las implicaciones que tienen estas mismas prácticas en las discusiones en torno a la justificación de un cierto conocimiento científico. Igualmente, resulta valioso destacar que, aunque analíticamente considero que es posible establecer una distinción clara entre estos dos elementos de las prácticas de *medición científica*, en el desenvolvimiento de dichas prácticas ambos se encuentran estrechamente ligados, manifestando incluso una continua retroalimentación.

Por último, es importante aquí precisar que, aunque este trabajo hace un énfasis particular en la idea de que las prácticas de *medición científica* son un motor significativo para el desarrollo del conocimiento científico, de ninguna manera es mi intención afirmar que son el único o el mejor motor para lograr dicho objetivo. Por tal motivo, comparto con Tal (2012, 2015) la idea de que existen otras prácticas científicas significativas para la producción de conocimiento científico –*e.g.*, modelamiento, simulación, teorización, explicación, entre otras– y que, por ello, resulta importante también estudiar la relación que existe entre la *medición científica* y dichas prácticas.

1.2. Precisión, exactitud y apreciación: *distinción conceptual desde la metrología y la epistemología de la medición*

Cuando se hace referencia a los valores numéricos obtenidos en las prácticas de *medición científica*, los conceptos de *precisión* [*precision*] y *exactitud* [*accuracy*] son utilizados con frecuencia de manera indiferente en el lenguaje común. Sin embargo, tanto la *metrología* como la *epistemología de la medición* hacen una distinción entre ambos. La importancia de

dicha distinción radica en que el mejoramiento de cada uno de ellos implica la implementación de habilidades *cognitivas* diferentes y conlleva la solución de problemas *epistémicos* de diversa naturaleza. Por ejemplo, en la historia de las mediciones astronómicas –la cual será el centro de atención de la presente investigación– Guillaumin (2015a, n. 42) destaca que la *precisión* de las mediciones está relacionada con el grado de refinamiento con que las operaciones con instrumentos astronómicos son llevadas a cabo, lo cual implica diversos aspectos cognitivos como las habilidades individuales para utilizar un cierto instrumento, ciertas consideraciones ópticas y la comprensión técnica de ciertos aparatos; mientras que la *exactitud* se encuentra asociada con la utilización de diferentes procedimientos matemáticos –generalmente de carácter geométrico– en la obtención de un valor numérico para cierto parámetro astronómico. Teniendo en cuenta lo anterior, la *precisión* se refiere a qué tan cercanos o concordantes son los valores numéricos que resultan de una amplia cantidad de repeticiones de un mismo procedimiento métrico. Por su parte, la *exactitud* indica que tan cercano es un valor numérico en relación con un valor estándar aceptado o con su *verdadero* valor⁶ (cf. JGCM, 2012; Tal, 2015; Guillaumin, 2015a).

De igual forma, cuando se hace referencia a la calidad de los instrumentos utilizados en las prácticas de *medición científica*, es también frecuente el uso del concepto de *precisión* [*precision*] en el lenguaje común. No obstante, dado que este último es empleado en la evaluación de qué tan concordantes son los valores numéricos que resultan de una amplia cantidad de repeticiones de un mismo procedimiento métrico, es habitual en la *metrología* emplear el término *grado de apreciación* para indicar la capacidad de un instrumento de proporcionar valores numéricos con un mayor detalle. En el caso de la astronomía, por ejemplo, el incremento en el *grado de apreciación* de los instrumentos utilizados para medir posiciones estelares se puede valorar en que los datos se obtengan en unidades más detalladas, *i.e.*, ya no en grados o minutos, sino también en segundos (o fracciones de segundo) de arco. A lo largo de este trabajo se distinguirá entre ambos conceptos con el propósito de hacer una demarcación clara entre el mejoramiento de los

⁶ Una analogía común para representar dicha distinción es la del juego de dardos: los lanzamientos que impactan en la cercanía de la diana son comparables con los *valores exactos* de un procedimiento de medición, mientras que una serie de lanzamientos que son cercanos entre ellos –sin importar si impactan cerca a la diana– son equiparables con los *valores precisos* (cf. Tal, 2015).

procedimientos métricos y el de los instrumentos que se utilizan en ellos. Sin embargo, como se verá a lo largo del texto, el mejoramiento tanto de la *precisión* como de la *exactitud* de ciertos procedimientos de *medición* tiene una estrecha relación con el incremento del *grado de apreciación* de los instrumentos.

2. Panorama histórico: la medición astronómica y el conocimiento acerca de la luz

A comienzos del siglo XVII, Johannes Kepler (Alemania, 1571-1630) consideró que siendo la luz la mensajera de los objetos celestes, y el ojo humano el que finalmente recibe esa información, la óptica debe de ser una parte fundamental de la astronomía. Por lo tanto, un estudio de las leyes geométricas a las que se encuentra sometida la luz y de la fisiología del ojo humano fueron un elemento constitutivo de la *nueva astronomía* que tenía como objetivo desarrollar, y cuyos resultados presentó en 1604 bajo el título *Ad Vitellionem paralipomena. Astronomiae pars optica* (conocido como la *Óptica*). El objetivo primordial de dicho trabajo era comprender y corregir los *errores* que la naturaleza de la luz podía generar en la obtención de datos observacionales astronómicos (cf. Kepler, 1604/2000, Prefacio; Hon, 2006; Guillaumin 2015b, Cap. 18). Frente a lo anterior, G. Hon (2006) argumenta que: “Given that astronomical observations take place through the mediation of light and the casting of shadow, and that the media between the stars and the eye have a variety of modifying effects, and that the things that are observed in the heavens are either motions, arcs, or luminous bodies, there arises the optical part of astronomy” (p. 207).

Como consecuencia, la astronomía sufrió una transformación metodológica sustantiva en la que tanto la naturaleza de la luz, el medio en el que ella se desplaza, los instrumentos que permiten su recolección, y el ojo humano comenzaron a ser concebidos como una *f fuente de error* considerable en la obtención de datos observacionales astronómicos mediante hallazgos de carácter óptico, fisiológico e instrumentales completamente inéditos (cf. Guillaumin, 2015b, Cap. 18). De esta manera, la práctica astronómica desarrollada posteriormente consideró los efectos de la naturaleza de la luz en las prácticas de *medición astronómica*, teniéndolos en cuenta a la hora de elegir los métodos de observación astronómica a utilizar, de la realización de análisis de datos observacionales astronómicos y en la construcción de nuevos instrumentos.

Particularmente, una de las propiedades de la naturaleza de la luz que Kepler – siguiendo el razonamiento de Aristóteles– incluyó en la parte óptica de la astronomía fue la siguiente:

The motion of light is not in time, but in a moment. For as is demonstrated by Aristotle in the books on motion, there is a certain proportionality of time to that ratio that exists between the moving power and the weight to the medium. But this moving force has an infinite ratio to the light to be moved, because light has no matter, and therefore, no weight. So the medium does not resist light, because light lacks matter by which resistance could occur. Therefore, the swiftness is infinite. (cf. Kepler, 1604/2000, Cap. 1, Prop. 5 [p. 21]; énfasis del autor)

Es importante señalar, frente a la anterior proposición de Kepler, que el problema de si la luz se transmite de manera instantánea o si requiere de tiempo había sido ampliamente discutido desde la antigüedad griega. A pesar de esto, arraigados principalmente en la tradición aristotélica, la gran mayoría de investigadores del mundo natural hasta el siglo XVII consideraban que la luz se transmitía instantáneamente. Lo que es más, es razonable pensar que para muchos filósofos de este siglo, tanto en el ámbito de la astronomía como de la óptica, el trabajo de Kepler constituyó un estímulo adicional para aceptar dicha propiedad de la luz y utilizarla como punto partida para sus investigaciones. No obstante, la tradición experimental que se comenzó a desarrollar a lo largo del siglo XVII cuestionaría esta afirmación acerca de la luz, argumentando que era necesario someter dicho interrogante al juicio de la experiencia. Sería precisamente en el seno de ciertas prácticas de *medición astronómica* de finales de dicho siglo y comienzos del XVIII que se encontraría la primera evidencia de carácter empírico en favor de que la luz requiere de tiempo en su transmisión. Tales prácticas de *medición astronómica* constituyen el horizonte histórico de esta investigación.

2.1. La propagación sucesiva de la luz y la astronomía

La historia de la ciencia enseña que el problema de si la luz es un fenómeno que se trasmite de manera instantánea o si requiere de tiempo ha tenido una relación tan estrecha como antigua con la observación de los astros. Ya en la antigüedad, Herón de Alejandría – considerando que la visión se debe a una emanación (*rayo visual*) que procede de los ojos y que impacta en los objetos– había sugerido que el *rayo visual* debe de transmitirse

instantáneamente, ya que cuando en la noche se vuelve la cabeza hacia los cielos con los ojos cerrados y súbitamente se abren, no se percibe en la experiencia un intervalo de tiempo para ver las estrellas (cf. Cohen, 1940, § 3). Asimismo, los trabajos astronómicos de Ole Rømer y de James Bradley son considerados como las primeras evidencias empíricas en favor de la idea de que la luz requiere de tiempo en su propagación⁷. Finalmente, en un trabajo acerca de las primeras mediciones terrestres de la *velocidad de la luz*, realizadas en París durante el segundo tercio del siglo XIX, W. Tobin (1993, pp. 253-257) muestra que aunque en los libros de texto de física o en las enciclopedias contemporáneas se ha enfatizado el impacto que dichas mediciones tuvieron en el ámbito del electromagnetismo y de la relatividad, ellas fueron inspiradas ante todo por problemas de carácter astronómico. Específicamente, señala que durante dicho periodo la *medición de la velocidad de la luz* fue motivada principalmente por astrónomos que estaban trabajando en la determinación de la *paralaje solar* y del tamaño de la órbita terrestre⁸.

De acuerdo con el horizonte histórico demarcado con anterioridad para la realización de esta investigación, los trabajos de Rømer y de Bradley serán el principal foco de análisis. El trabajo de Rømer formó parte de un amplio proyecto métrico llevado a cabo en Francia durante la segunda mitad del siglo XVII –liderado por Gian Domenico Cassini (Italia, 1625-1712)– para determinar con la mayor exactitud posible la diferencia de longitudes entre diversas localidades terrestres. La ejecución de dicho proyecto implicó la realización de mediciones de altísima precisión de los movimientos del primer satélite de Júpiter y de la creación de tablas que permitieran calcular con un alto grado de exactitud las efemérides de sus eclipses. Por su parte, el trabajo de Bradley se inscribe en la realización de mediciones de altísima precisión de un nuevo movimiento de las estrellas fijas que él mismo había descubierto junto con Samuel Molyneux (Inglaterra, 1689-1728) y George Graham (Inglaterra, 1674-1751) durante el desarrollo de un proyecto para corroborar si una serie de observaciones de la estrella γ Draconis llevadas a cabo por Robert Hooke (Inglaterra, 1635-1703) correspondían al efecto de la *paralaje estelar*.

⁷ Desde el ámbito de la historia de la *medición de la velocidad de la luz* lo anterior se puede apreciar en los trabajos de K. D. Froome & L. Essen (1969) y de S. R. Filonovich (1986). Por su parte, desde la perspectiva de la historia de la astronomía, ello se puede constatar en el trabajo de J. D. North (1994/2001).

⁸ El fundamento de tal afirmación por parte de W. Tobin (1993, p. 257) es que existe un grupo de cuatro parámetros astronómicos (*viz.*, la velocidad de la luz, la aberración de la luz, la paralaje solar y el tiempo que tarda la luz en recorrer la órbita terrestre [*light time*]) que forman un conjunto sobredeterminado [*overdetermined set*], dado que conociéndose tres de estos parámetros se puede calcular el restante.

3. *Objetivo de la presente investigación y presentación de las herramientas de análisis filosófico*

Con todo lo que hasta este punto se ha expuesto, el presente trabajo se propone realizar un estudio histórico-filosófico de aquellos trabajos científicos que son considerados los primeros intentos en presentar evidencia empírica de que la transmisión de la luz requiere de tiempo. En este sentido, el *objetivo general* de esta investigación es mostrar que la *medición científica* de ciertos fenómenos astronómicos tuvo una relación directa, tanto *epistémica* como *cognitivamente*, con la producción de conocimiento científico acerca del fenómeno físico de la luz, en particular, con el problema de determinar si su transmisión es instantánea o temporal⁹. Con lo expresado anteriormente, la pregunta problematizadora que orienta la investigación es la siguiente: ¿cómo durante el siglo XVII y hasta mediados del XVIII ciertas *mediciones astronómicas* generaron conocimiento en el ámbito de la *óptica*? En otras palabras, ¿cómo la *medición científica* de los parámetros del movimiento de los satélites de Júpiter y de un nuevo movimiento de las estrellas fijas contribuyó al crecimiento del conocimiento científico acerca de la propagación sucesiva de la luz?

Para dar respuesta a este interrogante se presentará una narrativa histórica acompañada de un análisis filosófico de los primeros esfuerzos empíricos para dar respuesta al problema de si la luz se transmite instantáneamente o en el tiempo en un periodo que va desde comienzos del segundo tercio del siglo XVII hasta finales del primer tercio del siglo XVIII. De esta manera, se analizarán principalmente las contribuciones a este problema hechas por Galileo Galilei (Italia, 1564-1642), René Descartes (Francia, 1596-1650), Ole Christensen Rømer¹⁰ (Dinamarca, 1644-1710) y James Bradley¹¹

⁹ A lo largo del presente trabajo se utilizarán tanto las expresiones transmisión instantánea o temporal de la luz como las expresiones características de la época que se estudia (siglos XVII y XVIII), esto es, propagación instantánea o sucesiva de la luz (cf. Cassini, 2014, p. 124).

¹⁰ En la literatura, tanto de la ciencia como de la historia de la ciencia, es común encontrar diferentes formas de escribir el apellido de este célebre astrónomo danés, *e.g.*, Römer, Roemer o Romer. Éstas se encuentran generalmente asociadas con ciertas apropiaciones de las diferentes tradiciones de los idiomas. Siendo uno de los personajes centrales del análisis histórico-filosófico de este trabajo se utilizará la escritura original de su nombre, *viz.*, Rømer. Sin embargo, cuando su nombre aparezca en una cita textual, se respetará la manera en que haya sido escrito por el autor.

¹¹ Se recomienda consultar las semblanzas biográficas de Ole Rømer y James Bradley preparadas por Z. Kopal (1981) y A. F. O'D. Alexander (1981) –respectivamente– para el *Dictionary of Scientific Biography*.

(Inglaterra, 1693-1762). De igual forma, se estudiará la recepción que en la comunidad científica de este periodo histórico tuvieron las contribuciones de dichos investigadores, así como las discusiones –principalmente de carácter epistémico– que sus trabajos suscitaron. El hilo conductor de dicha narrativa será la concatenación de los desarrollos conceptuales posibilitados por estos trabajos y de los diferentes resultados métricos obtenidos en el área de la astronomía.

En este punto resulta importante señalar que, de acuerdo con la caracterización de la *medición científica* que se encuentra en la base de la presente investigación –la cual fue expuesta en la primera sección de esta “Introducción General”–, las prácticas de medición en la astronomía serán comprendidas aquí como la determinación numérica de una cierta magnitud astronómica (como lo son las distancias de los cuerpos celestes, sus tamaños, sus posiciones o los parámetros significativos de sus movimientos) a través de operaciones de carácter *empírico-matemático* (cf. Guillaumin, 2015b). En los dos casos concretos que son el centro de atención de este estudio sobresalen la determinación de diferentes parámetros del movimiento de los cuerpos celestes o de sus posiciones en el firmamento, ya sea en el pasado, el presente o el futuro.

Para la realización del análisis filosófico que pretendo llevar a cabo me apoyaré particularmente en dos aproximaciones que forman parte de lo que se ha denominado el *giro epistémico* en la reflexión filosófica de la *medición científica*, viz., la idea de *iteración epistémica* desarrollada por Chang (2004, 2007) y la noción de *integración cognitiva* elaborada por Guillaumin (2012, 2015a, 2015b). Por tal motivo, en lo que resta de esta sección presentaré de manera sucinta y esquemática los elementos de ambas posturas que resultan significativos y relevantes para esta investigación.

3.1. *La medición científica desde la perspectiva del coherentismo progresivo: la idea de iteración epistémica*

Al abordar el problema epistémico de la justificación del conocimiento científico, Chang (2004, 2007) procura proveer una solución que vaya más allá de la dicotomía tradicional

entre *fundacionismo* y *coherentismo*. El problema con el *fundacionismo*¹² (en un sentido estándar) –afirma Chang (2007)– es que ha fallado en encontrar un conjunto suficiente de *creencias auto-justificables* [*self-justifying beliefs*] que funcionen como soporte en la construcción del conocimiento científico, y muchas de las que aparentemente se ha considerado lo son, han terminado requiriendo siempre de una justificación ulterior, situación que deriva en una suerte de *circularidad*. Por su parte, el *coherentismo* (en un sentido estándar) –continúa Chang (2007)– implica la aceptación de que cualquier *sistema de conocimiento* que sea consistente internamente puede ser aceptado en la ciencia, lo que ha llevado a no poder justificar el reemplazo de un *sistema de conocimiento* consistente por otro que también lo sea. Esta constante amenaza del relativismo no le ha permitido al *coherentismo* desarrollar una imagen clara del *progreso científico*. Frente a estas dos alternativas, Chang (2004, 2007) sugiere la idea del *coherentismo progresivo* [*progressive coherentism*]. Dicha idea conserva la noción coherentista de que no existe un fundamento firme e indubitable sobre el cual construir el edificio del conocimiento científico, pero permite una comprensión del progreso en la ciencia a través de lo que denomina *iteración epistémica*. En este sentido sostiene que:

The alternative I propose is a brand of coherentism buttressed by the method of ‘epistemic iteration’. In epistemic iteration we start by adopting an existing system of knowledge, with some respect for it but without any firm assurance that it is correct; on the basis of that initially affirmed system we launch inquiries that result in the refinement and even correction of the original system. It is this self-correcting progress that justifies (retrospectively) successful courses of development in science, not any assurance by reference to some indubitable foundation. (Chang, 2004, p. 6)

La idea de la *iteración epistémica* parte del paralelo establecido por C. S. Peirce entre un buen razonamiento [*good reasoning*] y una iteración matemática: ambos están orientados a una *auto-corrección* por medio de una serie sucesiva de etapas [*stages*]. De esta manera, la *iteración epistémica* resulta ser un método en el que etapas sucesivas de *sistemas de conocimiento* que se construyen sobre su antecesor son desarrolladas con el objetivo de

¹² En términos generales, H. Chang (2004, 2007) entiende por *fundacionismo* la corriente de pensamiento filosófico que considera que existe un grupo de creencias o afirmaciones *auto-justificadas* que se encuentran en la base de los sistemas de conocimiento científico, esto es, que funcionan como *fundamento* último para la justificación del conjunto restante de afirmaciones o creencias. En este sentido, resulta iluminadora la siguiente definición de R. Foley: “According to foundationalists, epistemic justification has a hierarchical structure. Some beliefs are self-justifying and as such constitute one’s evidence base. Other are justified only if they are appropriately supported by these basic beliefs” (Foley ctd en Chang, 2007, p. 5).

mejorar y corregir ciertos elementos de las etapas previas (cf. Chang, 2004, pp. 44-48). Así, un cierto *sistema de conocimiento*, que pese a no tener una justificación última –en el sentido deseado por un fundacionista– pudiese permitir el desarrollo de alguna línea de investigación [*inquiry*] del mundo natural, es afirmado como punto de partida. En el caso de que dicha línea de investigación derivase en el refinamiento o corrección del *sistema de conocimiento* afirmado inicialmente, entonces se podrá justificar de manera *retrospectiva* la decisión de haber afirmado dicho *sistema*. Lo anterior, no obstante, conlleva dos cuestionamientos: por un lado, ¿qué criterios permiten evaluar la pertinencia de afirmar un cierto *sistema de conocimiento* como punto de partida? y, por otro, ¿cómo es posible evaluar que el desarrollo de una línea de investigación ha alcanzado un refinamiento o corrección frente al *sistema de conocimiento* inicial?.

Con respecto a la primera inquietud, Chang (2004) propone que es posible guiarse por lo que denomina *principio de respeto* [*principle of respect*]. Dicho principio indica que la afirmación de un *sistema de conocimiento* como punto de partida se encuentra arraigada en la valoración realizada por los investigadores acerca de los logros alcanzados con dicho *sistema* y la plausibilidad de obtener desarrollos significativos a través de él. En este sentido, se trata de un *respeto* por los *sistemas de conocimiento* basado –a partir de la misma práctica científica– en su propia historia y en la apreciación de su futura aplicabilidad, y no simplemente en desechar un *sistema de conocimiento* por no tener un fundamento firme o porque existen dudas razonables acerca de su estatus epistémico. No obstante, Chang (2004) reconoce que la aplicación de este *principio de respeto* no asegura el éxito y que pueden existir situaciones en las que la afirmación de un *sistema de conocimiento* no derive en una mejora. Lo anterior únicamente podrá evaluarse retrospectivamente, lo cual conduce al segundo cuestionamiento: ¿cómo se puede juzgar si la afirmación de un *sistema de conocimiento* efectivamente permitió alcanzar un cierto grado de *progreso científico*? Para ello, Chang (2004) sostiene que es posible orientarnos por los *valores* o *virtudes epistémicas* que han sido sugeridos por diversos autores en la literatura de la filosofía de la ciencia (*e.g.*, Kuhn, van Fraassen, entre otros).

Frente a lo anterior, Chang reconoce que aunque es cierto que no se ha alcanzado un acuerdo último en relación con cuál es el conjunto de *valores epistémicos* que se debe utilizar en la evaluación y justificación del conocimiento científico, sí existe una suerte de

consenso en torno a su conveniencia [*desirability*] y una semejanza entre los que han sido propuestos por diferentes autores. Por lo tanto existen dos maneras en que se puede obtener un progreso en la ciencia a través de la *iteración epistémica: enriquecimiento* [*enrichment*] y *auto-corrección* [*self-correction*]. Ambas –indica Chang (2004)– involucran una mejora [*enhancement*] en algún *valor o virtud epistémica*, pero mientras que la primera refiere tan sólo al refinamiento del *sistema de conocimiento* afirmado como punto de partida, la segunda consiste en la alteración de los contenidos del *sistema* inicial como resultado de la aplicación de la línea de investigación que éste permitió desarrollar.

Finalmente, resulta importante destacar que para Chang (2004) estos dos últimos elementos que se han presentado –*viz.*, el *principio de respeto* como punto de partida y la mejora en los *valores epistémicos* como indicador del progreso– denotan un carácter tanto conservador como pluralista de su idea de *iteración epistémica*: es conservador en cuanto que considera el contexto histórico de los *sistemas de conocimiento* que se afirman inicialmente, y es pluralista en cuanto que no existe una jerarquía o conjunto único de los *valores epistémicos* que se pueden mejorar (cf. Chang, 2004, p. 231).

Con todo lo anterior, al reconocer que la *medición científica* es una de las prácticas científicas en las que mayor *progreso* se ha conseguido a lo largo de la historia de la ciencia y que, al mismo tiempo, es una de las áreas en las que más se puede apreciar la *circularidad* a la que conduce el *fundacionismo empirista* –especialmente el reflejado en el *convencionalismo* y el *operacionalismo*–; Chang (2004) utiliza algunos episodios de la historia de la medición de la temperatura –*i.e.*, de la termometría– durante los siglos XVIII y XIX para ilustrar su idea de *coherentismo progresivo*. De esta forma, Chang (2004, 2007) piensa que ciertos episodios históricos de las prácticas de *medición científica* pueden ser comprendidos de mejor manera desde la perspectiva de la *iteración epistémica*. Así, muestra que el conocimiento empleado en algunas operaciones (o métodos) de medición en la ciencia en muchas ocasiones ha carecido de un fundamento firme e indubitable. Sin embargo, es también posible observar que en algunos de estos episodios históricos –pese a la ausencia de un fundamento último de dicho conocimiento– se han obtenido mejoras significativas en etapas posteriores de dichas operaciones de medición. Con ello en mente, señala que:

In making attempts to justify measurement methods, we discover the circularity inherent in empiricist foundationalism. The only productive way of dealing with that circularity is to accept it and admit that justification in empirical science has to be coherentist. Within such coherentism, epistemic iteration provides an effective method of scientific progress, resulting in the enrichment and self-correction of the initially affirmed system. This mode of scientific progress embraces both conservatism and pluralism at once. (Chang, 2004, p. 220)

3.2. Elementos conceptuales, matemáticos e instrumentales en la medición astronómica: la idea de integración cognitiva

Guillaumin (2012, 2015a) afirma que la *medición científica* debe ser comprendida no como un acto simple en el que se obtiene un valor numérico para un cierto parámetro o magnitud física, sino como un complejo *proceso dinámico* que se desarrolla históricamente. Su punto de partida es que, aunque las prácticas de *medición científica* se caracterizan como un procedimiento (u operación), ellas involucran tres recursos (o elementos) cognitivos claramente diferenciados pero que se encuentran estrechamente interrelacionados, *viz.*, recursos conceptuales, matemáticos e instrumentales. Aunque los anteriores elementos se pueden identificar a lo largo de la historia de ciertos procedimientos de medición, cada uno de ellos experimenta una serie de modificaciones y transformaciones de manera diferenciada y a un ritmo particular, esto es, hay un *crecimiento* histórico diferenciado de cada uno de los recursos cognitivos involucrados en la *medición científica*. ¿Por qué ocurren dichas modificaciones? Guillaumin (2015b) sugiere que una de las principales motivaciones detrás del *crecimiento* de cada uno de los recursos cognitivos mencionados es la identificación y la corrección de las *equivocaciones y/o errores*¹³ que pueden existir en cada uno de ellos en un determinado momento.

De esta manera, aunque el *crecimiento* es un proceso continuo, mas no lineal, analíticamente es susceptible de ser dividido en una serie de fases sucesivas, aunque no necesariamente acumulativas, de un procedimiento de medición, las cuales son caracterizadas por el tipo de *equivocaciones y/o errores* cuya corrección se consideró

¹³ Resulta significativo señalar que G. Guillaumin (2015b) sigue a G. Hon en la distinción que éste último sugiere entre *equivocaciones* y *errores*. De esta manera, las primeras se encuentran asociadas con *fallas* de carácter psicológico que en principio pueden ser evitables, las cuales resultan de descuidos o distracciones por parte de los investigadores. Por otro lado, los segundos son *fallas* de carácter epistémico que son inevitables. En otras palabras, los *errores* son afirmaciones que en un determinado momento histórico y durante un largo periodo de tiempo se consideraban verdaderas y justificadas, y que luego son consideradas falsas (o viceversa).

crucial. En este sentido, el *crecimiento* de alguno de los recursos cognitivos involucrados en un determinado procedimiento de *medición científica* significa la generación de una nueva fase histórica de dicho procedimiento. La noción de *progreso* resulta entonces ser de carácter cognitivo y destaca la generación de nuevas fases históricas de los procedimientos de *medición científica*, las cuales identifiquen y solucionen las *equivocaciones y/o errores* que existían en fases previas¹⁴. La identificación y corrección de estos dos tipos de *fallas* es el elemento cognitivo crucial para el desarrollo del conocimiento a través de las prácticas de *medición científica* y es posible únicamente a través de una *integración* gradual de los tres recursos cognitivos señalados con anterioridad. Precisamente, esto es a lo que Guillaumin (2012, 2015a, 2015b) denomina *integración cognitiva*. Con todo esto en mente, el núcleo de su propuesta es que el desarrollo de la *medición científica* requiere de una *dinámica integrativa* entre los tres elementos cognitivos mediante relaciones recíprocas de *acoplamiento* [*coupling*] y *auto-ajuste* [*self-adjustment*], de manera tal que el grado de integración llega a ser óptimo sólo en las últimas fases.

Para ilustrar de manera más clara las ideas expuestas en el párrafo anterior, Guillaumin (2015b) ha desarrollado una herramienta analítica que ha llamado el *esquema de integración cognitiva* (figura 1). Es importante señalar que éste no es un esquema con el que pretende dar cuenta de toda la historia de la *medición científica*, sino un instrumento de análisis con el cual es posible identificar para una determinada fase histórica de un procedimiento u operación de medición cada uno de los siguientes elementos: los tres recursos cognitivos involucrados (conceptuales, matemáticos e instrumentales), los criterios de justificación de cada uno de estos recursos¹⁵ y las relaciones que se establecen entre estos seis conjuntos. Asimismo, debe resaltarse que no es un esquema estático sino

¹⁴ Como se puede apreciar en esta descripción, G. Guillaumin (2015b) hace una distinción entre las nociones de *crecimiento* y *progreso*. De esta manera, uno de los propósitos de su aproximación al problema de la *medición científica* es comprender por qué las prácticas de *medición científica* generan un *crecimiento* del conocimiento métrico-cuantitativo del mundo físico y cómo éste contribuye al *progreso* de las prácticas métricas. Por lo tanto, el *crecimiento* es una noción histórica que caracteriza el desarrollo y transformación de los recursos cognitivos involucrados en los procedimientos de medición, mientras que el *progreso* es una idea cognitiva que califica el estado de una determinada fase histórica de un procedimiento de medición en relación con sus precursoras.

¹⁵ Como se había advertido con anterioridad, los tres recursos cognitivos involucrados en los procedimientos de *medición científica* son claramente diferenciables aunque se encuentren estrechamente interrelacionados. Uno de los elementos que permite apreciar dicha diferenciables es que cada uno de ellos cuenta con un conjunto propio de criterios epistémicos de justificación. Esta idea se desarrollará con mayor profundidad al explicar los componentes del *esquema de integración cognitiva*.

dinámico, en el sentido en que posibilita una comprensión de las operaciones de medición a través del análisis de sus sucesivas fases históricas. Con todo lo anterior en mente, resulta significativo para el propósito de la presente investigación describir cada uno de los componentes del *esquema de integración cognitiva*.

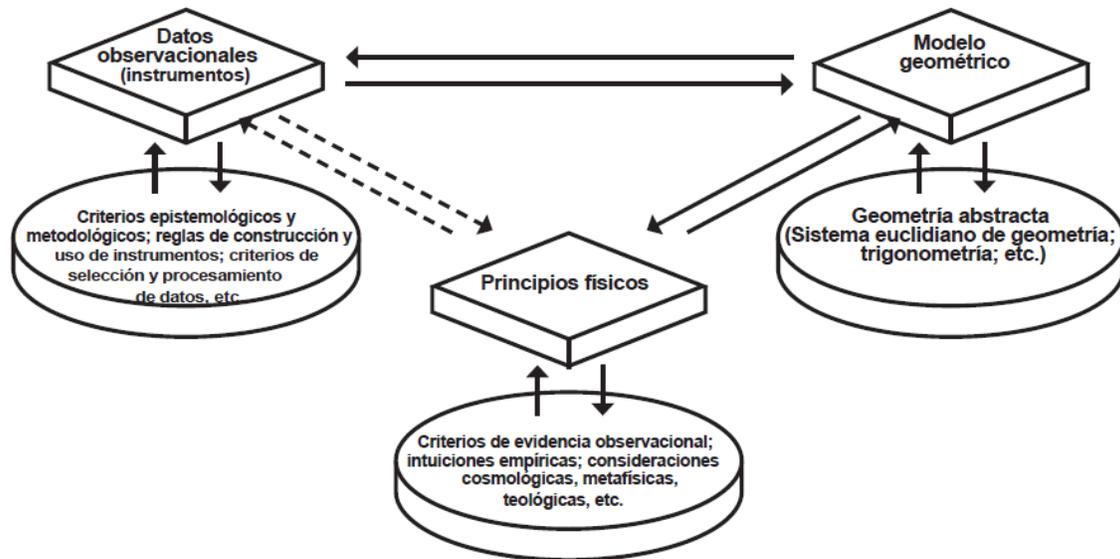


Figura 1

Esquema de integración cognitiva en tres dimensiones

Nota: Agradezco al Dr. Godfrey Guillaumin el haberme facilitado esta figura de su *esquema de integración cognitiva* para una comprensión más clara de las ideas que aquí pretendo exponer acerca de su trabajo. Es importante indicar que las líneas continuas significan que hay una *retroalimentación positiva* entre los elementos que conectan, mientras que las discontinuas significan una *retroalimentación negativa*.

En primera instancia, los recursos conceptuales están caracterizados por los *supuestos ontológicos*, los cuales a través de un conjunto de *principios físicos* señalan la manera en que se considera qué es el mundo natural. Dichos *principios físicos*, entonces, describen la manera como se piensa que son los objetos físicos que participan en los procedimientos de medición y las relaciones que existen entre ellos. Los elementos que justifican tales *principios físicos* son bastante heterogéneos y pueden incluir desde consideraciones metafísicas o teológicas hasta criterios de evidencia empírica. En segundo

lugar, los recursos matemáticos son los *modelos geométricos* utilizados para la realización de cálculos. Los criterios de justificación de dichos *modelos geométricos* son establecidos por sistemas (o teorías) matemático-geométricos. Por su parte, los recursos instrumentales se relacionan con los diferentes instrumentos científicos que se emplean para la obtención de los *datos observacionales* relevantes en los procedimientos de medición. La justificación de este tipo de recursos está determinada por las reglas de construcción y funcionamiento de los instrumentos, las metodologías empleadas por los investigadores y los criterios epistémicos utilizados para evaluar la confiabilidad de los *datos observacionales*. Por último, cada uno de estos recursos cognitivos tiene una relación recíproca con los otros dos y con su respectivo conjunto de criterios de justificación, determinando así un grupo de seis relaciones bi-direccionales.

De acuerdo con lo anterior, es posible apreciar que existen seis *loci* o focos en los que –en una determinada fase histórica– pueden localizarse las *equivocaciones y/o errores* de los procedimientos de medición, los cuales corresponden a los tres recursos cognitivos y sus respectivos conjuntos de criterios de justificación. Así, la corrección de una *equivocación y/o error* se consigue mediante la modificación del componente (o componentes) en el que se localice dicha *falla*, lo cual deriva en la generación de una nueva fase histórica del procedimiento de medición. Sin embargo, la estrecha interrelación que existe entre los tres recursos cognitivos impide que los cambios en uno de los componentes del *esquema de integración cognitiva* ocurran de manera secuencial y aislada. En su lugar, la modificación de alguno de los elementos pertenecientes a dicho esquema genera mutua y simultáneamente cambios diferenciados en alguno de los otros componentes. Lo anterior significa que entre los elementos que conforman el *esquema de integración cognitiva* existe una *retroalimentación*.

Un elemento importante es que como cualquier sistema dinámico dicha *retroalimentación* puede ser tanto *positiva* como *negativa*: *positiva* cuando conduce a la estabilidad y optimización del funcionamiento del sistema; *negativa* cuando lleva a su desarticulación o una reducción en su funcionalidad. Por lo tanto, la *retroalimentación positiva* en el *esquema de integración cognitiva* significa una mejor *integración* entre los tres recursos cognitivos (conceptuales, matemáticos e instrumentales) que conduzca a una reducción de las *equivocaciones y/o errores* en los procedimientos de medición. El

elemento cognitivo central de este proceso *dinámico* es que la identificación y corrección de tales *fallas* implica no sólo su eliminación sino también el desarrollo de conocimiento científico en la medida en que genera criterios epistémicos para evitarlos. En otras palabras, dicho esquema no sólo indica la localización de las modificaciones requeridas para alcanzar una mejor *integración*, sino una comprensión del porqué deben realizarse.

Con todo esto en mente, Guillaumin (2012, 2015a, 2015b) analiza diferentes fases históricas en la medición de parámetros astronómicos utilizando el *esquema de integración cognitiva*, con el objetivo de comprender cómo es que el *progreso* de los procedimientos de medición de dichos parámetros en un largo periodo de tiempo –que se extiende desde la antigüedad griega hasta la astronomía kepleriana– posibilitó el *crecimiento* del conocimiento astronómico.

4. Estructura del presente trabajo de grado

Utilizando las dos perspectivas sobre la *medición científica* –expuestas en la sección anterior– como herramientas de análisis filosófico, el presente trabajo será dividido entonces en tres capítulos correspondientes a tres *fases históricas* del desarrollo del conocimiento científico acerca de la propagación sucesiva de la luz en diferentes contextos métricos. En cada una de esas *fases* se analizará la relación de dicho conocimiento con los elementos cognitivos involucrados en operaciones de medición particulares –en el caso de Rømer el movimiento de los cuerpos del sistema joviano y en el de Bradley las posiciones estelares en el firmamento. Uno de los elementos epistémicos centrales del presente estudio será que dicha relación posibilitó la generación de nuevas etapas [*stages*] en estas operaciones concretas de medición. Por lo tanto, en este punto es importante enfatizar en la distinción que aquí se hace entre *fase histórica* y *etapa*, la cual es principalmente de carácter analítico: mientras que la idea de *fase* se aplicará al análisis de momentos históricos significativos del desarrollo del conocimiento científico acerca de si la luz se propaga instantáneamente o en el tiempo en relación con diversos contextos métricos, la noción de *etapa* se utilizará para analizar el *progreso* obtenido en operaciones de medición concretas mediante la afirmación de *sistemas de conocimiento* que consideren la manera en que se propaga la luz.

De igual manera, como se verá a lo largo del trabajo, otro de los principales elementos epistémicos es el hecho de que las tres *fases históricas* son sucesivas. Esto significa que cada una de ellas se desarrolla a partir de los resultados métricos y del crecimiento de alguno de los componentes cognitivos de su predecesora. Teniendo esto en mente, el principal resultado cognitivo de esta investigación será apreciar que cada una de las *fases históricas* permitió el desarrollo de nuevos conceptos (o el crecimiento de conceptos ya utilizados) para pensar y abordar el problema de la propagación sucesiva de la luz.

Para finalizar, me permito hacer una última advertencia al lector. Dado que cada uno de los capítulos de este texto estudia los elementos epistémicos y cognitivos de tres *fases históricas* acerca de la relación del conocimiento de la propagación sucesiva de la luz con los elementos involucrados en un contexto métrico determinado, es posible realizar una lectura selectiva de los capítulos, esto es, detenerse sobre tan sólo alguno de ellos. No obstante, como lo podrá apreciar el mismo lector, al observar que cada una de las *fases históricas* tiene una relación con su antecesora y su sucesora, se hará evidente que una mejor comprensión de las ideas aquí desarrolladas implica una mirada global del trabajo en su totalidad.

Capítulo 1

De las respuestas metafísicas a las experimentales

El problema de la transmisión instantánea de la luz en el pensamiento de Galileo y

Descartes

Un hilo de luz que viaja en la oscuridad basta para hacer claridad en el pensamiento; basta para traerla renovada, desde el brillante y a la vez oscuro desorden de los sentidos, hasta el claro rigor del diseño de un experimento que puede entregarnos su esencia; que puede llevarnos a la abstracción que la convierte en una luz entendida. Luz en el entendimiento, luz en la luz. Iluminar nuestro interior es traer a nosotros la luz.

(A. Sepúlveda. “Fragmentación de la luz”. *El instante luminoso*)

1.1. Introducción

Desde los antiguos griegos se planteaba ya el problema de si la luz es un fenómeno que se transmite de forma instantánea o en el tiempo [*in tempore*]. Entre los pensadores clásicos – *e.g.*, Aristóteles, Herón de Alejandría, entre otros– fue común la idea de que ésta se transmitía instantáneamente (cf. Cohen, 1940; Picolet, 1978). Más tarde, en el mundo árabe, grandes estudiosos de la óptica –como Al-Hazen– sugirieron que se transmitía en el tiempo. Esta discusión se encuentra también en algunos autores de la baja Edad Media – *e.g.*, John Pecham, William de Conches, Adelard de Bath, Roger Bacon, Witelo, Jean Buridan, Blasius de Parma y Robert Grosseteste–, quienes retomando a pensadores clásicos y árabes esgrimieron argumentos en favor de ambas posibilidades (cf. Cohen, 1940; Lindberg, 1978)¹⁶. En ellos se puede apreciar que durante este periodo histórico la discusión acerca de los temas relacionados con la luz se daba principalmente en tres planos: el fisiológico, el metafísico y el matemático-geométrico. Específicamente, en lo concerniente al problema de su transmisión, la manera tradicional de proceder era

¹⁶ Las primeras tres contribuciones del libro *Roemer et la vitesse de la lumière*, editado por R. Taton (1978) presentan de manera detallada los argumentos esgrimidos desde la antigüedad griega hasta la baja Edad Media en favor de cada una de las posturas. Asimismo, I. B. Cohen (1940) en el primer apartado de su artículo “Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676)” realiza una presentación sucinta de las mismas.

establecer la naturaleza de la luz a partir de consideraciones metafísicas y, de acuerdo con éstas, deducir si debía transmitirse instantáneamente o en el tiempo. C. D. Lindberg (1978) sintetiza esta idea de la siguiente manera:

[...] those who were interested in the problem [de la transmisión instantánea o en el tiempo de la luz], whether in 1400 [d. C.] or 400 [d. C.], had no choice but to seek a solution that would bring the various authorities into harmony with a minimum of violence to their words; *to draw inferences from current theories of the nature of light or, if that proved indecisive or unpersuasive, from established doctrines about God and the universe*; or to cast about for mathematical or logical arguments that would demonstrate the necessity or the absurdity of one of the alternatives. (p. 67; énfasis añadido)

Comprender qué tipo de fenómeno físico es la luz no fue un problema ajeno a las investigaciones acerca del mundo natural a comienzos del siglo XVII. Concretamente, durante el segundo tercio de dicho siglo pensadores como Galileo Galilei y René Descartes se interesarían en la problemática acerca de si la transmisión de la luz es instantánea o requiere de tiempo. Sin embargo, la abordarían desde una perspectiva que se encontraba en consonancia con los programas de *filosofía natural* que estaban desarrollando y que procuraban promover a lo largo de Europa. Como consecuencia, la manera de enfrentarse a tal interrogante sufriría una transformación en el ámbito epistémico: la experimentación comenzaría a considerarse como el terreno propicio para obtener una respuesta justificada.

Con todo esto en mente, mi objetivo en este capítulo es analizar algunos de los trabajos de Galileo y Descartes en los que se hace alusión al problema de si la luz se transmite de manera instantánea o en el tiempo –los cuales son considerados los primeros esfuerzos experimentales para dar respuesta a dicho interrogante– con el propósito de identificar los elementos epistémicos que ambos pensadores elaboraron en torno a esta problemática y las implicaciones de carácter cognitivo que suscitaron. Lo anterior resulta de vital importancia para la presente investigación ya que ello constituye el trasfondo conceptual del desarrollo del contexto de las mediciones astronómicas en el que se insertaron los trabajos tanto de Ole Rømer como de James Bradley. Es importante hacer énfasis en esta última idea, ya que aunque a simple vista puede parecer que las investigaciones de Galileo y Descartes no se insertan de manera explícita en un contexto métrico, sus aportes fueron históricamente determinantes para las siguientes fases históricas de la relación entre las mediciones astronómicas de los movimientos de los cuerpos celestes y el desarrollo del conocimiento acerca de la propagación sucesiva de la luz.

1.2. Linternas, montañas y telescopios: la tradición galileana y la idea de experimentar para resolver un interrogante milenario

Galileo (1638/1981) se refiere al problema de si la luz se transmite instantáneamente o en el tiempo en la jornada primera de su libro *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (en adelante *Discorsi*). Esta primera jornada transcurre con la discusión acerca de las causas de la resistencia de los cuerpos sólidos a su fractura o rompimiento. En esencia, lo que se trata de responder es por qué si dos cuerpos tienen la misma forma geométrica se comportan de manera diferente debido a su tamaño. Galileo –a través de las palabras de Salviati¹⁷– sugiere que la cohesión de los cuerpos sólidos se debe a la existencia de infinitos vacíos indivisibles, lo cual lo lleva a la presentación de algunas consideraciones matemáticas acerca de los infinitos y los indivisibles. Tras esto se discute si no es posible que los fluidos sólo sean la separación de la materia en todas sus partes indivisibles. Al alcanzar este punto se pone en consideración la acción del fuego y de la luz sobre los sólidos.

Allí, recordando la historia de Arquímedes y cómo supuestamente utilizaba espejos cóncavos para prender fuego a las embarcaciones de tropas invasoras, Sagredo –otro de los interlocutores del diálogo– se pregunta si la acción de la luz sobre los sólidos puede pensarse sin que intervenga el movimiento o ha de ser el resultado de un movimiento *velocísimo*. Frente a este problema Salviati señala que siguiendo lo que ha visto en otras acciones sobre los sólidos, ésta no puede pensarse como una acción sin movimiento. Precisamente, es en esta coyuntura que Sagredo introduce la cuestión de si tal movimiento debe ser instantáneo o si acaso requiere de tiempo. Respecto a esta cuestión, el tercer interlocutor del diálogo –Simplicio– afirma que el movimiento de la luz debe ser instantáneo debido a que la experiencia común muestra que en la explosión de un cañón su resplandor llega antes que el sonido. No satisfecho con esta respuesta, Sagredo replica que

¹⁷ Es valioso recordar que los tres interlocutores que participan en los diálogos galileanos tienen un significado: Salviati representa al mismo Galileo, y a través de este personaje es que el pensador italiano expresa sus propias ideas; Sagredo personifica al espíritu culto y educado de su época que, no obstante, no se ha adentrado en el estudio de las matemáticas ni se encuentra familiarizado con las últimas ideas y descubrimientos; y Simplicio encarna al filósofo peripatético-escolástico que constantemente invoca las opiniones y argumentos aristotélicos.

de esa experiencia sólo se puede concluir que el movimiento de la luz es mucho más rápido que el del sonido, no que sea instantáneo. Es aquí que Salviati sugiere un experimento que él mismo ha diseñado para dar respuesta a este interrogante y procede a dar una descripción detallada del mismo:

Dos hombres toman una luz cada uno y la esconden en el interior de una linterna o cualquier otro aparato capaz de cubrirla, de modo que puedan ir encendiéndola y apagándola, poniendo la mano delante, en cuanto ven a su compañero. Después, colocándose uno enfrente del otro a la distancia de unos pocos codos, empiezan a encender y a apagar la luz según la siguiente regla: cada vez que uno de los dos ve la luz del otro, enciende inmediatamente la suya. Después de algunos ensayos, se habrá ajustado la maniobra hasta el punto que, sin error posible, en cuanto uno encienda le responderá inmediatamente el otro, de forma que en el momento que una encienda su luz, verá al mismo tiempo aparecer ante sus ojos la de su compañero. Asegurada esta práctica en esta distancia tan pequeña, coloquemos ahora a estos hombres, y con dos luces semejantes, a la distancia de dos o tres millas el uno del otro. Comenzando de noche la misma experiencia, van observando atentamente si las respuestas a sus respectivos encender y apagar guardan, a esta distancia, la misma cadencia que antes. Si es así, se podrá concluir, con bastante seguridad, que la expansión de la luz es instantánea, ya que si ésta necesitara tiempo en una distancia de tres millas, si tenemos en cuenta la ida de una y la vuelta de la otra, la demora tendría que ser suficientemente observable. Y si se repitiese la experiencia con distancias mayores, con ocho o diez millas de distancia, por ejemplo, nos podríamos servir del telescopio, colocando a los observadores con cuidado en el lugar en el que habría de practicarse por la noche la experiencia. Las luces, aunque no fuesen muy potentes, lo que las haría invisibles a simple vista dada la distancia, podrían, sin embargo, encenderse y apagarse fácilmente gracias a la ayuda del telescopio¹⁸, que ajustaría debidamente las apariciones y desapariciones de la luz, posibilitando así la visión. (Galileo, 1638/1981, pp. 123-124 [§88])

Tras presentar el diseño del experimento, el mismo Salviati señala que sólo ha llevado a cabo el experimento en distancias cortas. Por esta razón se abstiene de ofrecer una conclusión definitiva con respecto a la transmisión instantánea de la luz, y tan sólo refiere que, de no ser este el caso, su propagación debe ser *velocísima*. Lo anterior se puede observar con el siguiente extracto del diálogo:

La verdad es que yo sólo he realizado la experiencia a poca distancia; es decir, a menos de una milla, por lo que no he podido asegurarme de si la aparición de la luz es instantánea. Pero si no es instantánea, he constatado que es velocísima, por no decir momentánea. (Galileo, 1638/1981, p. 124 [§88-89]; énfasis añadido)

¹⁸ Es valioso resaltar cómo en esta breve sugerencia, Galileo propone que para solucionar el problema de poder observar y coordinar con claridad el abrir y cerrar de las linternas se *podría* utilizar el telescopio. Lo anterior es importante porque con Galileo se introduce la discusión epistémica de si el telescopio es apropiado para la investigación del mundo natural y la obtención de *datos observacionales* confiables (cf. Feyerabend, 2003), y ya para el caso de Rømer –epistémicamente– la utilización de este instrumento es asumida como justificada.

Más adelante, Salviati señala cómo paulatinamente en el discurrir de este diálogo se han ido adelantando en la discusión de varias problemáticas sin alcanzar ninguna orilla. Con ello se da por concluido este breve interludio en el que se trata el problema de la luz y se propone un experimento para dar respuesta al interrogante de si ésta se transmite de manera instantánea o si requiere de tiempo, y se retoman las consideraciones geométricas y la discusión acerca de la materia que Galileo estaba exponiendo anteriormente.

Cabe aquí destacar que este experimento no permaneció tan sólo en el ámbito propositivo del diálogo galileano o como un experimento mental, ya que poco tiempo después experiencias con condiciones muy similares a las allí planteadas fueron efectivamente realizadas entre 1657 y 1667 por la *Accademia del Cimento* y registradas en su *Saggi di Naturali Esperienze* (1667/1971) (cf. Cohen, 1940, §7; Gómez, 2009). Frente a los resultados que allí se registran se indica que igualmente fueron *no-concluyentes* y que tan sólo se realizaron para una distancia correspondiente a una milla. Así, en los registros de la *Accademia* se encuentra la siguiente afirmación: “At a distance of a mile (which means two, as one light has to go and the other to return) we have not been able to find any [delay]. Whether it would be possible to succeed in perceiving some sensible delay at a greater distance is an experiment that we have not yet been able to make” (Knowles, 1667/1971, §CCLXV).

Metodológicamente, se puede apreciar que el objetivo del experimento consiste en detectar si existe un retraso temporal adicional en la cadencia con que se abren y cierran las linternas de los experimentadores a medida que se incrementa la distancia, *i.e.*, si cada vez que se incrementa la distancia entre las linternas se percibe un aumento en el intervalo temporal entre las acciones de abrir y cerrar las linternas que se había determinado para distancias menores¹⁹. De igual forma, como lo muestra la afirmación de Salviati resaltada con cursivas en la cita inmediatamente anterior de los *Discorsi* y en las experiencias consignadas por la *Accademia del Cimento*, uno de los mayores desafíos metodológicos consiste en poder observar con claridad la luz a medida que se aumenta la distancia entre los observadores, ya que es sólo a través de este aumento se asegura que un posible retraso (frente a la cadencia identificada en la experiencia a una milla de distancia) sea detectable.

¹⁹ Para un análisis metodológico más detallado del experimento galileano se sugiere consultar el trabajo de A. Cassini (2014), específicamente la tercera sección. En este mismo trabajo se realiza, además, un análisis epistemológico de este experimento desde la perspectiva de los *experimentos cruciales*.

Más allá de lo básico que metodológicamente resulta el experimento planteado por Galileo, de las dificultades que surgieron en su realización y de lo inconcluyente de sus resultados debido a éstas; deseo resaltar para la presente investigación dos elementos que se pueden observar por separado, pero que se encuentran directamente relacionados: primero, destacar el contexto y temática de la discusión en la cual es sugerido y, segundo, su significado en términos epistémicos y cognitivos.

Como se mencionó anteriormente, el problema que se está tratando en esta primera jornada es por qué si dos cuerpos tienen la misma forma geométrica se comportan de manera diferente debido a su tamaño. Galileo allí está presentando sus consideraciones frente a la composición de la materia. Es valioso, alcanzado este punto, preguntar por qué surge la problemática de la propagación de la luz al tratar esta temática en particular. Los estudios de S. Gómez (2001; 2008; 2013) en torno a las investigaciones galileanas sobre la luz muestran que aunque éste no es un tema ampliamente desarrollado en su obra, fue uno que inquietó a Galileo durante toda su vida, y sus ideas al respecto alcanzaron el punto culminante en el mencionado interludio de los *Discorsi*.

Precisamente, el contexto en el cual se insertan las consideraciones de Galileo acerca de la luz es el debate entre las ideas aristotélicas y las neo-platónicas en torno a la naturaleza de aquella, las cuales tienen una conexión directa con el problema físico de la materia y en la cual juega un papel determinante la problemática acerca de su transmisión instantánea o en el tiempo. La idea de Gómez (2001; 2008; 2013) es que un seguimiento de las obras de Galileo en las que trata el tema de la luz revela un proceso de *mecanización de la luz*, esto es, un proceso mediante el cual las preguntas acerca de la naturaleza de la luz *no* se resuelven más a través de consideraciones metafísicas y geométricas, sino que deben abordarse desde una concepción mecánica para luego someterse a la experiencia. En este sentido, Gómez (2013) argumenta que:

These considerations also prove that for Galileo to speak about the velocity of light did not mean that he overlooked the problem of its atomic composition, *because both questions were interrelated*. This becomes clearer if we look at the kind of problems that the three protagonists of the *Discorsi* were discussing before and after those brief pages on light: namely the composition of fluids, condensation and rarefaction. In fact, after describing the diffusion of light as a phenomenon of expansion, Galileo went on in the First Day treating the questions of condensation and rarefactions. (p.214; énfasis añadido)

Con esto en mente, en los *Discorsi* se está poniendo de manifiesto que para dar respuesta al problema de si la luz se transmite instantáneamente o si requiere de tiempo no se necesita primero establecer su naturaleza, sino que, por el contrario, una solución experimental de ese interrogante podría contribuir al estudio de qué tipo de fenómeno físico es la luz²⁰. Epistémicamente, lo anterior resulta significativo, ya que –como se señaló en la introducción de este capítulo– la justificación tradicional a una afirmación concerniente a la propagación de la luz se encontraba en los presupuestos metafísicos acerca de la naturaleza de la luz. Galileo, por su parte, sugiere que dicho problema debe afrontarse experimentalmente y que los resultados así obtenidos resultan cruciales en la comprensión del fenómeno de la luz. Esta idea se encuentra sintetizada de manera clara en la siguiente afirmación de Gómez (2013): “Shouldn’t we, perhaps, speak of an attempt to mechanize light, which until then had been treated only metaphysically by Neoplatonic philosophers or mathematically by geometrical optics” (p. 202).

De esta manera, la forma en que Galileo propone abordar el problema físico de la luz –en los *Discorsi* y en otras obras– representa, ante todo, una suerte de continuidad en su concepción experimental del proceder científico. En este mismo sentido, Gómez (2008) argumenta que:

The case of the nature of light is a good example of the thread of continuity (not identity) that connects different phases of Galilean atomism: from the assertions regarding sunspots to the pages of the *Discorsi* concerning the velocity of light, we do not find either renouncement of fundamental ideas or concepts, or a replacement of *the aim to understand the nature of light by an experimental and quantitative study of its velocity*. (p. 211; énfasis añadido)

La anterior cita permite no sólo apreciar la importancia de la experimentación en la propuesta galileana, sino la manera en que ello se extiende a los problemas relacionados con la luz. Inclusive, en ella se puede observar que la tradición experimental que estaba intentando desarrollar Galileo se encontraba estrechamente ligada con una cuantificación del mundo natural. Dicha mirada se halla también en el experimento que propone para establecer si la luz se transmite de manera instantánea o en el tiempo. Si bien en este

²⁰ A este respecto resulta iluminadora la siguiente afirmación de S. R. Filonovich (1986): “The problem of the velocity of light allowed two approaches. On the one hand, the value of this velocity is determined by the nature of light, and without learning this nature it is difficult to arrive at the final conclusion on whether this velocity is finite or infinite. On the other hand, one may try and solve this problem in experience even without knowing the true nature of light, as it follows from Galileo’s suggestion” (p. 16).

experimento Galileo no se refiere a la *velocidad de la luz* más que en términos cualitativos, *i.e.*, como una propagación *velocísima* (cf. Galileo, 1638/1981, p. 124 [§88-89]), metodológicamente –como se había señalado con anterioridad– resultan cruciales las mediciones de los intervalos temporales y de las distancias. En este sentido, siguiendo a A. Cassini (2014), considero que la idea de un estudio cuantitativo de la *velocidad de la luz* – como se expresa en el apartado en cursivas de la anterior cita de Gómez (2008)– en el contexto galileano se refiere a la idea de cuantificar y medir tanto las distancias como los intervalos temporales involucrados en el experimento. De tal suerte, A. Cassini (2014) sostiene que:

[El experimento de Galileo] No requiere, además, la noción de velocidad de la luz, sino solo determinar si su propagación requiere de tiempo. El resultado del experimento se puede describir exclusivamente en términos de los conceptos de distancia y duración. [...] De manera más general, el resultado de cualquier experimento del tipo de Galileo, no importa cuán grande sea la carga teórica instrumental que tenga, es decir, cuán sofisticado sean los instrumentos de medición empleados, puede describirse sin emplear más que conceptos cinemáticos. (p. 141)

Se puede observar a través de esta última cita que tanto la utilización de los conceptos de distancia y duración como la idea de que son susceptibles de ser cuantificados y medidos resultan ser cruciales en el diseño del experimento galileano expuesto en los *Discorsi*. En este sentido, cognitivamente el problema de la propagación instantánea o temporal de la luz comienza a ser pensado a través de dichos conceptos cinemáticos. Por lo tanto, considero que la *mecanización de la luz* en el pensamiento galileano que sugiere Gómez (2001; 2008; 2013) no sólo debe ser comprendida como una extensión del programa experimental que Galileo estaba desarrollando hacia la investigación del fenómeno físico de la luz, sino también como la propuesta de pensar algunos de los problemas relacionados con la luz a través de nociones mecánicas cuantificables y susceptibles de ser medidas. En el caso particular de su transmisión, se trata de concebirlo a través de nociones espaciales y temporales.

1.3. Espejos, antorchas y eclipses: el rol de la experimentación en la doctrina cartesiana de la transmisión instantánea de la luz²¹

La primera de las referencias cartesianas al problema de la transmisión instantánea de la luz se encuentra en una carta enviada a un interlocutor desconocido con fecha del 22 de agosto de 1634²². Descartes comienza por referir el experimento que su interlocutor había propuesto durante su último encuentro con la intención de probar que la luz requiere de tiempo para su transmisión, el cual consiste en ubicar un espejo cuando ya haya oscurecido a una distancia de un cuarto de milla frente a un hombre con una antorcha encendida y determinar si se percibe (o detecta) un retraso [*time-lag*] entre el instante en que se siente el movimiento de la mano y el instante en que se observa su reflejo. Es importante resaltar aquí que este experimento, metodológicamente, es similar al de Galileo: su objetivo consiste en observar si existe un retraso temporal entre dos acciones en las que interviene la luz. Su principal diferencia radica en que, en principio, el primero puede ser llevado a cabo por una persona, mientras que el de Galileo requiere de la coordinación de –al menos– dos personas (cf. Cassini, 2014, pp. 131-133). Luego de esta descripción, Descartes añade que:

So confident were you about the outcome of this experiment that you acknowledged that your entire philosophy would have to be regarded as false if the experiment showed that there was no observable time-lag between the instant when the movement was felt by the hand and the instant it was seen in the mirror. If, however, such a time-lag were detected, my philosophy would, I admitted, be completely overturned. *Thus the point of contention between us, note, was not so much the question whether light travels instantaneously or during a time-interval, but rather the question of the*

²¹ Puede resultar extraño estudiar las observaciones de Descartes acerca de la instantaneidad de la transmisión de la luz luego de haber abordado las reflexiones de Galileo en torno a este tema, especialmente al considerar que algunos de los textos en los cuales el pensador francés se refiere a este problema anteceden cronológicamente a los del italiano. Sin embargo, si se tiene en cuenta que precisamente uno de estos textos es una carta a M. Mersenne (Descartes, 1991b, Descartes a Mersenne, 11 Octubre, 1638) en la que Descartes presenta sus comentarios a los *Discorsi* de Galileo (refiriéndose entre ellos al experimento propuesto por este último para determinar si la luz se transmite instantáneamente o si requiere de tiempo), se puede observar que este orden de exposición resultará conveniente para el análisis que se pretende realizar en este capítulo.

²² La edición de las obras de Descartes elaborada por C. Adam & P. Tannery (cuya traducción al inglés por parte de J. Cottingham *et al.* se utilizó para la realización de este trabajo) sugiere que el receptor de esta carta fue I. Beeckman. Sin embargo, más adelante, con el descubrimiento de los diarios de I. Beeckman, los mismos editores pusieron en duda esta conjetura, ya que no existe en ellos ninguna referencia que permita establecer con certeza que se haya reunido con Descartes en 1634 (hecho que se señala en el comienzo de la carta). El estudio de estos diarios, no obstante, permite establecer que I. Beeckman se adhirió a la doctrina de que la transmisión de la luz requiere de tiempo alrededor de 1615-1616, y que ideó diferentes experimentos para probar esta idea. A pesar de esto, ninguno de estos experimentos coincide exactamente con el que Descartes alude en la mencionada carta. Otras ediciones de la correspondencia cartesiana han sugerido otros posibles receptores sin haberse alcanzado un consenso al respecto (cf. Sabra, 1981, pp. 48-49, n. 14).

outcome of this experiment. (Descartes, 1991b, p. 46 [AT I 308], Descartes a [Beeckman], 22 Agosto, 1634; énfasis añadido)

Esta cita –especialmente el apartado en cursivas– permite apreciar el papel que tanto Descartes como su interlocutor otorgan al experimento: la discusión que habían sostenido no versaba sobre la doctrina de la instantaneidad de la transmisión de la luz (o su contraria), sino sobre el impacto que tiene su resultado [*outcome*] en sus respectivos planteamientos, hasta el punto de llegar a anularlos [*overturn*]. Lo anterior resulta significativo epistémicamente en la medida en que revela el rol que atribuyen al experimento como garante de la observación. De tal forma, el experimento es la manera en que se puede justificar que una observación de un hecho del mundo natural es cierta. En este caso en particular, un experimento funcionaría como la constatación de que en el mundo natural de hecho se observa que la luz se propaga instantáneamente o en el tiempo.

¿Por qué resulta importante para Descartes determinar si la luz se transmite instantáneamente o en el tiempo? Para dar respuesta a este interrogante, resulta relevante analizar las posteriores menciones a este problema en el *corpus cartesiano*. Éstas se encuentran en *La Dióptrica* (1637/1987) y en *El Mundo o El Tratado de la Luz* (1664/1991a; en adelante *El Mundo*). En la primera de estas obras, Descartes establece que su objetivo es hablar sobre la luz para explicar cómo sus rayos penetran en el ojo y cómo son desviados por la interacción con diversos cuerpos²³ (cf. Descartes, 1637/1987, p. 60). Para llevar este propósito a cabo, en el primero de los discursos que componen dicha obra intenta dar cuenta de algunas de las propiedades conocidas y observadas de la luz a través de ciertas analogías (o comparaciones), entre las cuales incluye su transmisión instantánea a través de rayos que se comportan como líneas rectas cuyo movimiento se altera en el

²³ Igualmente, en el segundo discurso intenta dar cuenta de los fenómenos conocidos de la reflexión y la refracción a través de analogías con pelotas de *tenis* que interactúan con distintas superficies. Respecto al tema de la *velocidad de la luz*, el apartado de la refracción resulta de particular interés puesto que en la analogía desarrollada considera el cambio de velocidad de una pelota al cambiar de medio. La pregunta que surge es cómo se puede entender este cambio de velocidad cuando se consideran ya no pelotas, sino rayos de luz, cuya transmisión –ha sostenido previamente– es instantánea (cf. Cohen, 1940, §9; Filonovich, 1986). Dicho cuestionamiento fue tenido en cuenta en la controversia que sostuvo con P. de Fermat en torno a la Ley de Refracción (o Ley de Snell). En el presente trabajo no se profundizará en esta discusión. Sin embargo, para profundizar en este asunto se recomienda consultar el trabajo de J. R. Martínez (2000) quien muestra que el problema debe abordarse desde el papel que desempeña la analogía o comparación en el pensamiento cartesiano. Asimismo, se sugiere consultar los capítulos 3 y 4 del trabajo de A. I. Sabra (1981) donde se analiza con detenimiento la controversia entre Descartes y Fermat en torno a la reflexión y la refracción de la luz.

contacto con ciertos obstáculos. De esta forma, sostiene que así como la acción entre un objeto y el bastón con el cual un invidente se ayuda para percibir el mundo se transmite de manera instantánea a través de este último, igualmente se transmite la acción entre los cuerpos luminosos y el ojo de un observador:

Para establecer una comparación a partir de esto, deseo que penséis que la luz no es otra cosa en los cuerpos, que son llamados luminosos, que un cierto movimiento o una acción muy rápida que se dirige hacia nuestros ojos a través del aire y de los otros cuerpos transparentes, de igual forma que el movimiento o la resistencia de los cuerpos que encuentra este ciego llega a su mano a través del bastón. *Tal consideración os impedirá encontrar extraño, en primer lugar, que la luz pueda extender sus rayos en un instante desde el sol hasta nosotros, pues sabéis que la acción que mueve uno de los extremos del bastón debe alcanzar instantáneamente al otro y que así debería suceder aunque la distancia entre sus extremos fuese mayor que la existente entre la tierra y los cielos.* (Descartes, 1637/1987, p. 61 [AT VI 83]; énfasis añadido)

Por su parte, en *El Mundo* Descartes desarrolla toda una teoría mecánica de la materia a través de la cual pretende explicitar la naturaleza de ciertos fenómenos que se observan en el mundo natural –entre los cuales se cuentan el movimiento planetario, la caída de los cuerpos y la luz– y dar cuenta de sus propiedades. En el capítulo 13 establece que la luz no es más que la tendencia a alejarse con movimiento lineal (de acuerdo con la tercera ley del movimiento que había sugerido en los capítulos previos) que poseen los cuerpos que giran circularmente, y que en este caso transmiten los cuerpos luminosos compuestos por el primer tipo de materia a través del segundo tipo de materia y que llegan a un observador. En el siguiente capítulo muestra la pertinencia de dicha teoría al exponer cómo da cuenta de las 12 principales propiedades de la luz que se observan en el mundo, siendo la tercera de ellas su transmisión instantánea (cf. Descartes, 1664/1991a, pp. 156-157 [AT XI 99]).

De acuerdo con lo anterior, es importante destacar que en *El Mundo* la transmisión instantánea de la acción que Descartes identifica con la luz es una consecuencia directa de toda la teoría mecánica allí desarrollada y está asegurada por los principios *a priori* que él mismo ha *demostrado* en otras obras –como el *Discurso del Método*. Su forma de proceder, entonces, es mostrar que al coincidir las propiedades de la luz que se observan en el mundo y las propiedades que se pueden derivar de la acción postulada por su teoría mecánica, ambas (luz y transmisión de la tendencia al movimiento lineal del primer tipo de materia que compone los cuerpos luminosos a través del segundo tipo de materia) deben ser el

mismo fenómeno²⁴. Alcanzado este punto se puede apreciar cuál es el papel desempeñado por la experimentación en el proceder cartesiano y, más específicamente, en el caso de la transmisión instantánea de la luz: ella provee una constatación de aquellos fenómenos que se declaran como observados en el mundo y los cuales deben explicarse –de acuerdo con Descartes– a través de una teoría mecánica.

En este sentido, los experimentos establecen con certeza cuáles son los fenómenos físicos de los cuales debe darse cuenta de manera teórica. En el caso de la transmisión instantánea o en el tiempo de la luz, es el experimento el que debería constatar cuál de las dos es la que *de hecho* se observa en el mundo, para luego poder desarrollar una teoría que dé cuenta del fenómeno observado. Lo anterior se encuentra sintetizado en las siguientes palabras de A. I. Sabra (1981): “Experiments are in his system assigned a different but essential function: they propose problems by pointing out the *existent* effect which it is the business of the physicist to explain; and they provide crucial tests between competing *possible* explanations” (p. 41; énfasis del autor)²⁵.

En suma, siguiendo a Sabra (1981) y a D. M. Clarke (1992), lo anterior se encuentra directamente relacionado con la forma en que Descartes caracterizaba el proceder científico, *i.e.*, su *filosofía de la ciencia*. Por un lado, encontrar aquello que se observa en la naturaleza y, por otro, dar cuenta de lo que es observado con una teoría mecánica que se fundamente en unos principios *a priori* (cf. Sabra, 1981, Cap. I). El rol del experimento, entonces, es proveer una constatación de lo que se declara como observado (cf. Clarke, 1992, pp. 280-281). Los experimentos discutidos en la carta al interlocutor desconocido pretenden constatar la observación de que la luz se transmite instantáneamente, la cual es una de las propiedades de las que Descartes pretende dar cuenta en su obra *El Mundo o El Tratado de la Luz* (completada en 1633, pero cuya publicación se retrasó hasta 1664). En este sentido –como él mismo lo indica en la carta–, si el experimento mostrara lo contrario (*i.e.*, que la transmisión de la luz requiere de tiempo), lo propuesto en esta obra habría de

²⁴ Lo anterior se observa con claridad con las siguientes palabras, las cuales denotan su objetivo en el decimocuarto capítulo de *El Mundo* (1664/1991a) tras haber presentado las 12 propiedades de la luz: “He aquí las principales propiedades de la luz, *las cuales convienen todas a esta acción*, tal como vais a ver” (p. 156 [AT XI 98]; énfasis añadido).

²⁵ En este sentido, A. I. Sabra (1981) destaca en el segundo capítulo de su libro que, en relación con la metodología cartesiana, el caso de la transmisión instantánea de la luz en el *corpus cartesiano* revela que Descartes cree tener un fundamento o justificación experimental (en la observación astronómica de los eclipses entre el Sol, la Tierra y la Luna) para incluirla entre los efectos o propiedades que deben ser explicados teóricamente de manera *deductiva* a través de sus principios.

ser descartado, puesto que su teoría mecánica da cuenta de una propiedad de la luz que, en principio, no se observa. En este sentido, Sabra (1981, pp. 47-48) señala que la transmisión instantánea de la luz forma parte fundamental de *todo* el sistema físico cartesiano. De allí la promesa a su interlocutor de que si se probaba experimentalmente lo contrario, reconocería no saber nada de filosofía natural²⁶.

Con todo lo anterior, se puede comprender el interés de Descartes en sugerir un experimento cuyo resultado sea más fácilmente observable, esto es, su preocupación por superar las limitaciones metodológicas que percibe en el experimento de su interlocutor. Propone, entonces, en la carta al interlocutor desconocido, recurrir a las observaciones de los eclipses entre el Sol, la Tierra y la Luna para obtener evidencia experimentalmente justificada de la transmisión instantánea de la luz. Su idea de fondo es que si la transmisión de la luz ocurriese en el tiempo, debería ser posible detectar un retraso entre el momento en que ocurre la co-linealidad (sizigia) de estos cuerpos celestes y el momento en que se observa la Luna eclipsada. Su conclusión es que dado que no se observa dicho retraso, la luz debe transmitirse de manera instantánea. Resulta pertinente, entonces, analizar con detenimiento el experimento astronómico propuesto por Descartes, quien comienza estableciendo que:

In order to describe the experiment, I first asked whether you thought that the moon gets its light from the sun, and whether eclipses occur because the earth comes between the sun and the moon or the moon comes between the sun and the earth. You answered in the affirmative. I then asked how you suppose the light from the star reaches us, and you replied 'in straight lines'. Thus, on your view, the sun does not appear in its true position when you look at it, but in the position which it was in at the moment when the light which makes it visible was first emitted from it. Finally, I asked you to determine what the smallest observable interval would be between the instant when the torch is moved and the instant at which the movement appears in the mirror a quarter of mile away. *The day before, you stipulated that this time-interval would have to be at the very least as short as a single pulse beat; but then, more generously, you conceded that it could be as short as I liked. So, to show that I did not want to take advantage of your concession, I assumed that the interval was no longer than one-twenty-fourth of a pulse beat; and I said that the interval which, you entirely agreed, would be quite undetectable in your experience would turn out to be perfectly detectable in mine.* Let us now suppose that the distance between the moon and the earth is fifty times the radius of the earth, and the radius is 600 miles long, which it ought to be at the very least if both astronomy and geometry are to hold. Now if light takes one-twenty-fourth of the interval of a pulse to cross a quarter of mile twice, it will take an interval of 5,000 pulse beats, i.e. at least one hour, to cross the space between the moon and the earth twice, as is obvious when you work it out. (Descartes, 1991b, pp. 46-47 [AT I 308-309], Descartes a [Beeckman], 22 Agosto, 1634; énfasis añadido)

²⁶ Es valioso mencionar que S. Sakellariadis (1982) sostiene, por el contrario, que esta afirmación cartesiana es una respuesta al tono de certeza con el que habla su interlocutor y no que Descartes creyera que su edificio filosófico pudiera derrumbarse con tan sólo un dato empírico.

En la anterior cita, Descartes presenta el conjunto de suposiciones acerca del mundo que asume como punto de partida para la realización satisfactoria de su experimento. A través de ellos se describen las propiedades y relaciones de los objetos y fenómenos físicos que le resultan relevantes en su diseño experimental: establece que la Luna refleja la luz proveniente del Sol, que ella se transmite a través de líneas rectas, la manera en que ocurren los eclipses, entre otras. En este mismo orden de ideas, el apartado subrayado con cursivas permite destacar que Descartes plantea también su experimento utilizando términos cinemáticos, esto es, cognitivamente piensa el problema como una relación entre los conceptos duración y distancia.

Con esto en mente, su interlocutor sugiere que el intervalo temporal que le toma a la luz recorrer una distancia de media milla debe ser al menos tan corto como una pulsación (es decir, aproximadamente un segundo), pero luego dice a Descartes que puede ser tan corto como a éste último le parezca. Descartes, con el ánimo de no tomar ventaja de esta última concesión, propone que dicho intervalo no debe ser mayor a $1/24$ de pulso y cuestiona a su interlocutor preguntándole si dicho intervalo temporal podría ser detectado mediante su experimento, a lo que éste responde de manera negativa. Habiendo ambos acordado que tal intervalo temporal sería indetectable en el experimento de su interlocutor, Descartes extrapola esta situación para la distancia entre la Luna y la Tierra, y utilizando las consideraciones geométricas y los *datos observacionales* astronómicos que le eran familiares, calcula que en el caso de que a la luz le tomase $1/24$ de segundo en recorrer una distancia de media milla²⁷, se debería apreciar un intervalo temporal de aproximadamente una hora entre la co-linealidad (sizigia) del Sol, la Luna y la Tierra en un eclipse y su observación²⁸.

²⁷ Los trabajos de C. B. Boyer (1941) y de S. Sakellariadis (1982) presentan un estudio histórico acerca de la relación entre la unidad de medida a la que Descartes se refiere como *milla* (y, también, a la de *liga*) y la unidad de milla como se define en la actualidad. En el análisis que aquí realizo lo que deseo destacar es la apreciación del problema en términos cinemáticos cuantificables y medibles que Descartes realizó, y no una comparación con qué tan exacto pudo haber estado en sus estimaciones con relación a lo que hoy es conocido.

²⁸ Cabe destacar aquí que S. Sakellariadis (1982) muestra que más allá de las consideraciones acerca del intervalo de tiempo mínimo que puede ser detectado en el experimento astronómico de Descartes, éste es impropedente para determinar si la luz se transmite de manera instantánea o en el tiempo. Su argumento establece que en el experimento cartesiano no hay manera de observar la co-linealidad de la imagen del Sol, la Tierra y la Luna. Señala que a lo sumo se podrían calcular dichas posiciones, pero que ello requeriría un conocimiento previo acerca de la transmisión de la luz y de su *velocidad*. A lo anterior, puede añadirse la conclusión que alcanza.

Con relación a lo anterior, considero que resulta pertinente detenerse sobre la revisión que 56 años más tarde realizó de este experimento Christiaan Huygens (Holanda, 1629-1695) en el primer capítulo de su *Traité de la lumière* (1690/1962). Allí indicó que a medida que se piensa un menor intervalo temporal para la transmisión de la luz en la distancia de media milla, el intervalo temporal a detectar en el experimento astronómico disminuiría también, hasta el punto de hacerse difícil también su detección (cf. Cohen, 1940, §8; Sabra, 1981, p. 58; Filonovich, 1986). Ciertamente, como argumenta A. Cassini (2014), un experimento de este tipo no podría refutar en términos epistemológicos la propagación sucesiva de la luz, ya que en el mejor de los casos sólo podría demostrar que considerando un cierto intervalo temporal no se obtiene el resultado predicho, pero siempre queda abierta la pregunta de si tal resultado podría obtenerse al tomarse en cuenta un intervalo todavía menor²⁹.

Frente a esta idea resulta acertado preguntarse: ¿por qué Descartes no consideró un intervalo temporal menor? Pienso que dicho interrogante no puede responderse de manera satisfactoria sin considerar las creencias sobre el mundo natural de la época en que se planteó el experimento. Por lo tanto, aunque en retrospectiva es válido preguntarse por qué Descartes no tomó en cuenta intervalos temporales menores a 1/24 de segundo para una distancia de media milla (lo que habría resultado en intervalos menores a una hora para el caso del eclipse), ello debe ir acompañado de cuestionar también si dichos intervalos tienen sentido o pueden ser pensados razonablemente en dicho contexto histórico. Por lo tanto, sugiero que esto es precisamente lo que sucede en el caso de Descartes, es decir, que pensar intervalos temporales menores a 1/24 de segundo para un desplazamiento en media milla carecía de sentido en la manera en que se concebía que era el mundo.

Con esto en mente, resulta destacable que en el momento de enunciar el conjunto de sus suposiciones acerca del mundo, Descartes le pregunte a su interlocutor qué tan pequeño piensa que puede ser este intervalo y que proponga un intervalo de tales características. En adición a lo anterior, como se verá en el siguiente capítulo en el caso de Rømer, un gran sector de la comunidad científica mostró una fuerte reserva en aceptar los resultados de su

²⁹ A. Cassini (2014) en su análisis de la epistemología de los experimentos cruciales en el caso de Galileo concluye que no existe ningún experimento crucial que pueda demostrar la instantaneidad de la transmisión de la luz y que elimine la hipótesis de su transmisión en el tiempo. Su trabajo muestra que el caso contrario sí es posible, *i.e.*, un experimento crucial que niegue la instantaneidad de su transmisión y que establezca su *propagación sucesiva*.

trabajo, ya que consideraban que razonablemente no podían pensar un movimiento o desplazamiento que ocurriese en 22 minutos para una distancia equivalente a la del diámetro de la órbita terrestre. En suma, lo que deseo apuntar es que aunque cognitivamente es importante el haber planteado el problema mediante los conceptos de distancia y duración, en el caso cartesiano existía también una limitante –de carácter cognitivo– al pensar de qué orden puede ser su relación. En consecuencia, el problema de si la luz se transmite de manera instantánea o en el tiempo se encuentra atravesado por la posibilidad de pensar intervalos temporales cada vez más cortos para determinadas distancias, lo cual sólo se lograría con los desarrollos métricos posteriores y los conceptos que ellos permitieron desarrollar³⁰.

Descartes concluye la descripción de su experimento astronómico de la siguiente manera:

I have argued on the basis of the points which you conceded. Now, so we can arrive at the same conclusion, let ABC be a straight line, with A, B and C the places where the sun, the earth and the moon respectively are for the time being situated (whether it is the sun that moves or the earth does not matter). Thus:



Let us now suppose that from the earth B the moon is observed to undergo an eclipse at point C. From what you have conceded, the eclipse must be seen at exactly the moment when the light which was emitted by the sun when it was at A reaches the eye after being reflected from the moon, unless it has been blocked by the earth at B. Hence the eclipse at C can only be seen an hour after the sun is seen at A, if the points you conceded are indeed correct, that is, if the movement of the torch is seen in the mirror situated a quarter of mile away one-twenty-fourth of a pulse beat after it is felt in the hand. But as the careful and painstaking observations of every astronomer testify and countless experiments confirm, if the moon, while it is undergoing an eclipse, is observed at C from the earth B, the sun must be observed at A at the very same moment, and not an hour earlier. *When we observe the position of the sun in relation to the earth and the moon, the interval of an hour is much more readily observed than the interval one-twenty-fourth of a pulse beat is in your experiment. Your experiment, then, is ineffectual, whereas mine, which is the astronomers' experiment, shows much more clearly that light takes no detectable time to be seen.* So I said that this argument was demonstrative, whereas you called it fallacious and question begging... (Descartes, 1991b, pp. 46-47 [AT I 308-309], Descartes a [Beckman], 22 Agosto, 1634; énfasis añadido)

De acuerdo con la anterior cita, Descartes no sólo recurre a los conceptos de distancia y duración para abordar el problema de la transmisión de la luz, sino que los concibe como susceptibles de ser utilizados en cálculos matemático-geométricos y de ser medidos con

³⁰ Sobre este punto se profundizará con mayor detenimiento en la cuarta sección del siguiente capítulo.

cierta precisión. Como resultado de esta última idea, la anterior exposición del experimento cartesiano revela también que era consciente de las dificultades involucradas en la medición de intervalos temporales tan cortos como el de $1/24$ de segundo. En este orden de ideas, metodológicamente lo que muestra es que en su experimento, al elevarse la mirada a los astros, se pretendía aumentar la distancia a través de la cual debe transmitirse la luz y, en consecuencia, hacer fácilmente observable y medible lo que en la Tierra resulta difícil. Esta idea se relaciona directamente con una carta en que Descartes expone sus comentarios a Marin Mersenne (Francia, 1588-1648) acerca de los *Discorsi* de Galileo. Allí, con respecto al problema de la transmisión de la luz Descartes apunta que: “His experiment [el de Galileo] to determine whether light is transmitted instantaneously is useless; for eclipses of the moon have an exact bearing on the calculation in question, *and thus are clearly far superior to any observations we could make on earth...*” (Descartes, 1991b, p. 126 [AT II 384], Descartes a Mersenne, 11 Octubre, 1638; énfasis añadido).

En este sentido, Descartes no sólo está pensando el problema en términos del concepto de duración, sino que sugiere una mejora metodológica para detectar intervalos temporales tan cortos como los involucrados en el problema de la transmisión de la luz. Finalmente, y a pesar de que –como acertadamente señala S. Sakellariadis (1982; cf. n. 28 de este capítulo)– Descartes nunca indicó como se puede apreciar (o calcular) la colinealidad (sizigia) de los cuerpos celestes independientemente de su observación a través de la luz, el pensador francés concluye que no habiéndose registrado nunca un retraso de este orden en las numerosas observaciones astronómicas realizadas entre las dos situaciones que considera, la luz ha de transmitirse instantáneamente.

En suma, todo lo expuesto en esta sección permite apreciar que el estudio del fenómeno físico de la luz desempeñó un rol importante en el pensamiento cartesiano. Asimismo, el problema de si la luz se transmite de manera instantánea o en el tiempo ocupó un lugar central en dicho estudio. Considerando que el objetivo del investigador del mundo natural es proveer una teoría mecánica fundamentada en principios de carácter *a priori* que dé cuenta de las propiedades de los fenómenos que se observan en el mundo, pensaba que el papel de los experimentos es constatar cuáles son *de hecho* estas propiedades. Convencido de que una de las propiedades de la luz es su transmisión instantánea, y habiendo desarrollado una teoría mecánica de la luz que daba cuenta de tal propiedad,

propuso un experimento de carácter astronómico que, en su consideración, demostraba con suficiencia dicha propiedad. Un análisis de dicho experimento permite observar que los conceptos de distancia y duración –al igual que en el caso galileano– resultaron ser cruciales. Particularmente, el estudio de su trabajo enseña que el concepto de duración se encontraba sometido tanto a dificultades de carácter metodológico como cognitivo: la primera se refiere a los problemas de detectar intervalos temporales tan cortos como los que involucra la transmisión de la luz, mientras que la segunda señala el problema de pensar razonablemente duraciones cada vez más cortas para una determinada distancia fija.

1.4. A manera de conclusión: experimentando con la luz, cinematizando su transmisión

El análisis de los trabajos de Galileo y Descartes donde se aborda el problema de si la luz es un fenómeno que se transmite de manera instantánea o si requiere de tiempo –más allá de los resultados que ellos arrojaron– permite observar un cambio significativo en la manera de enfrentar este interrogante, el cual resultó ser crucial en trabajos posteriores. La tradición experimental en la que –en mayor o menor grado– se encontraban inmersos ambos pensadores se extendió a la investigación natural acerca de la luz. Con esto en mente, aunque la experimentación desempeña diferentes roles en la *filosofía natural* de estos dos pensadores, ambos consideraron *pertinente y necesario* someter la pregunta acerca de la propagación de la luz a experimentos y utilizar los resultados obtenidos en ellos en la investigación para generar conocimiento científico acerca del fenómeno físico de la luz. Lo anterior representó un cambio epistémico importante con respecto a los pensadores que anteriormente habían abordado este mismo problema, quienes primero daban una respuesta metafísica a qué tipo de fenómeno es la luz y de allí deducían los argumentos para elegir entre una u otra posibilidad acerca de su transmisión.

De esta manera, contemplados desde el *esquema de integración cognitiva* de G. Guillaumin (2015b) –expuesto en la “Introducción General”– los trabajos de Galileo y Descartes corresponden a una primera fase histórica de la relación entre las mediciones astronómicas y el desarrollo del conocimiento acerca de la propagación sucesiva de la luz, en la cual se dio un crecimiento diferenciado del elemento de los *principios físicos* como resultado de una serie de transformaciones en las relaciones entre dicho elemento cognitivo

y sus criterios particulares de justificación³¹. A esta situación Guillaumin (2015b) la denomina una *crisis epistemológica*³², la cual consiste en poner en tela de juicio los criterios epistémicos con los que de manera tradicional se justifican los elementos pertenecientes al conjunto de los *principios físicos*. De tal manera se puede apreciar que la tradición experimental que se estaba desarrollando a comienzos del siglo XVII cuestionó de manera profunda los criterios metafísicos de la tradición aristotélica en los que tradicionalmente se justificaba el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz, generando una *crisis epistemológica*.

En adición a lo anterior, de acuerdo con el planteamiento de Guillaumin (2015b), una de las características esenciales de dichas *crisis epistemológicas* es que se consolidan como un escenario propicio para reconsiderar ciertas ideas de la ciencia, de tal modo que ésta se haga cada vez más compatible con los *principios físicos* que allí se están gestando. De tal suerte sostiene que: “[...] determinados *principios físicos* generan una serie de ideas sobre la física que han de ser compatibles con esos principios” (Cap. 14). Esta reconsideración de ideas sobre la ciencia a raíz de las discusiones en torno a los *principios físicos* cae bajo lo que denominaré *cambio conceptual*, esto es, la generación de nuevas herramientas conceptuales para pensar diferentes problemas de la ciencia.

En este sentido, en el seno de la *crisis epistemológica* en torno a la justificación del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz que se revela a través de los trabajos de Galileo y Descartes ocurrió un *cambio conceptual* significativo: el problema de la transmisión de la luz comenzó a plantearse en términos cinemáticos cuantificables –con mayor o menor detalle– a través de los conceptos de distancia y duración. Resulta también

³¹ Deseo agradecer al Dr. Godfrey Guillaumin el haberme señalado este importante punto durante nuestras discusiones, el cual resultó ser crucial para el desarrollo final de las ideas que son presentadas en este trabajo de grado.

³² En el capítulo 14 de su estudio histórico-filosófico G. Guillaumin (2015b) establece que el trabajo de N. Copérnico significó también una *crisis epistemológica*. Al proponer su sistema heliocéntrico, esto es, al sugerir un *cambio ontológico* con la sustitución del *principio físico* de la centralidad e inmovilidad de la Tierra, N. Copérnico desató *implícitamente* una *crisis epistemológica*, ya que puso en duda los criterios epistemológicos clásicos sobre los cuales se aceptaban los *principios físicos* acerca de la inexistencia de un movimiento terrestre. Dicha *crisis epistemológica* reveló la necesidad de la elaboración de una nueva física y fue, precisamente, el paso que dieron personajes como J. Kepler, Galileo y Descartes. Lo anterior se puede observar con claridad en la siguiente cita: “Planteado de esta forma [a través de la idea de *integración cognitiva*], la modificación que generó N. Copérnico además de ser *explícitamente* astronómica, fue *implícitamente* epistemológica. Al cambiar un *principio físico* de la astronomía cambian necesariamente los *elementos* sobre los cuales está justificado, i.e., se desata una crisis epistémica” (Guillaumin, 2015b, Cap. XVI).

importante recordar que –como lo plantea A. Cassini (2014; cf. secc. 2 de este capítulo) – dicho problema tanto en el experimento cartesiano como en el galileano no necesitó ser planteado en término del concepto de *velocidad*. Sin embargo, es significativo que ambos autores lo hayan planteado en términos del intervalo temporal que le toma a la luz el recorrer una distancia fija (ya sea un cuarto de milla, la distancia entre la Tierra y la Luna, o el radio de la órbita terrestre). La anterior fue la manera en que cognitivamente se pensó el problema tanto en los trabajos de Rømer como de Bradley, y en la que métricamente se presentaron sus resultados.

Como se pudo apreciar a lo largo de este capítulo, lo anterior significó un cambio cognitivo al plantear dicho problema utilizando relaciones espaciales y temporales, las cuales consideraban como susceptibles de ser medidas con precisión y de ser utilizadas en cálculos geométrico-matemáticos. Considero que lo anterior se puede comprender de manera más clara a partir de la idea que A. Koyré (1948/1994; 1953/1991, pp. 274-276) refiere como el paso del mundo del *aproximadamente* al de la *precisión*. Al respecto afirma que: “No es el termómetro lo que le falta [al alquimista], es la idea de que el calor sea susceptible de una medición exacta” (Koyré, 1948/1994, p. 129). Parafraseándolo, considero que en el caso del problema de si la luz se transmite instantáneamente o en el tiempo, no es que los investigadores carecieran de las herramientas para determinar distancias y duraciones, sino que uno de los elementos que faltaba era la idea de que dicho problema podía abordarse a través de estos conceptos y que ellos eran susceptibles de ser cuantificados y medidos con cierta precisión.

Al visualizar el problema de la propagación de la luz de esta manera, Galileo y Descartes contribuyeron a dar este paso del mundo del *aproximadamente* al de la *precisión*. Una idea similar se puede encontrar en el pensamiento de T. S. Kuhn (1976/1993), quien al referirse a la transformación de las *ciencias clásicas* durante la *Revolución Científica* –entre las que cuenta la óptica–, afirma que dicha transformación: “[...] es atribuible, con más exactitud, a nuevas maneras de contemplar fenómenos ya estudiados, que a un conjunto de descubrimientos experimentales imprevistos” (p. 71). Precisamente, una manera novedosa de contemplar el fenómeno de la transmisión de la luz –ya estudiado desde la antigüedad griega– se gestó en el contexto de las transformaciones epistémicas que sugerían Galileo y

Descartes al situar la experimentación como un criterio relevante para la justificación del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz.

En síntesis, el crecimiento diferenciado que se dio en el elemento cognitivo de los *principios físicos* mediante la consideración epistémica tanto galileana como cartesiana de que la justificación de la transmisión instantánea de la luz debería someterse a la experimentación y que los resultados que allí se obtuvieran deberían ser considerados en la producción de conocimiento científico acerca del fenómeno físico de la luz, se constituyó como un punto de partida para el desarrollo de los contextos de medición astronómica en los que se insertan los trabajos de Rømer y de Bradley. Como se verá en el siguiente capítulo, fue precisamente el cuestionamiento de estos criterios tradicionales para justificar dicho *principio* y la búsqueda de un experimento que pudiera dar una respuesta al interrogante acerca de si la luz se transmite instantáneamente o si requiere de tiempo, lo que propició que se considerara pertinente explorar los resultados métricos a los que podría conducir la afirmación de la propagación sucesiva de la luz. En este mismo orden de ideas, el *cambio conceptual* que se generó en esta discusión de carácter epistémico –*viz.*, pensar el problema de la transmisión de la luz a través de los conceptos de distancia y duración– estuvo en el centro de la manera en que cognitivamente estos dos últimos investigadores del mundo natural concibieron los problemas de carácter métrico que posteriormente afrontaron.

Capítulo 2

De la medición de los movimientos de los satélites de Júpiter a la propagación sucesiva de la luz

El trabajo de Ole Rømer como *evidencia* para sustituir el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz

[...] Light takes up more time in Travelling from the Stars to us, than we in making a West-India Voyage (which is ordinarily performed in six Weeks).

(F. Roberts. “Concerning the Distance of the fixed Stars”)

2.1. Introducción

En Septiembre de 1676 Ole Rømer anunció a los miembros de la *Académie des Sciences* que el próximo eclipse del primer satélite de Júpiter que se esperaba para el 9 de Noviembre ocurriría 10 minutos más tarde de lo que se esperaba de acuerdo con las tablas de los movimientos de los satélites jovianos elaboradas por Gian Domenico Cassini. Dicha predicción se comprobó el día del eclipse en el *Observatoire Royal* de París, y el día 21 del mismo mes el astrónomo danés tuvo la oportunidad de exponer ante los miembros de la academia un trabajo en el cual sugería que dicho retraso se debía a la *necesidad* de introducir una nueva ecuación –*ecuación de la luz*– en la elaboración de las tablas de los movimientos de los satélites de Júpiter y en el cálculo de la ocurrencia de sus eclipses. Dicha ecuación, argumentaba Rømer, se derivaba del hecho de que la luz requería de tiempo para su transmisión desde el satélite hasta la Tierra y que, de acuerdo con sus cálculos, la luz tarda alrededor de 22 minutos en atravesar el diámetro de la órbita terrestre. Una publicación del trabajo de Rømer (a manera de reporte de su intervención) apareció poco tiempo después en el *Journal des Sçavans* bajo el título “Demonstration touchant le mouvement de la lumiere trouvé par M. Rómer de l’Academie Royale des Sciences” (cf. Cohen, 1940, §2, 17).

La anterior es una presentación sucinta de uno de los más importantes momentos en la historia de la medición de la *velocidad de la luz* y el cual es quizás uno de los episodios

más estudiados por la historiografía que sobre dicha medición se ha elaborado. Dentro de estos estudios historiográficos una considerable cantidad (cf. Boyer, 1941; Van Helden, 1983; Wróblewski, 1985; Filonovich, 1986; Cassini, 2015) muestran que Rømer no realizó una medición de la *velocidad de la luz* y que, más bien, su propósito era demostrar que su transmisión no era instantánea sino que requería de tiempo. En este sentido, dichos trabajos revelan que una especie de *pseudo-historia* se fue desarrollando con el pasar de los años en la cual se presentaba al astrónomo danés no sólo como el primero en haber presentado evidencia empírica de consideración para justificar la propagación sucesiva de la luz, sino también como el primero en haber presentado un valor numérico de su velocidad³³. De esta manera, estos autores hacen énfasis en el carácter cualitativo del trabajo de Rømer y desestiman la idea según la cual fue el primero en realizar una medición de la *velocidad de la luz*, esto es, se acentúa el hecho de que su trabajo pretende demostrar que la luz se transmite en el tiempo. A pesar de lo anterior –i.e., que el trabajo de Rømer en sentido estricto no es una medición de la *velocidad de la luz*–, dicho trabajo sí se inscribe en el contexto de mediciones astronómicas de gran exactitud del movimiento de los satélites de Júpiter. Son precisamente las consecuencias epistémicas y cognitivas de estas últimas mediciones las que pretendo estudiar en este capítulo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, mi intención en este capítulo es mostrar que el trabajo de Rømer puede comprenderse ante todo como un esfuerzo dirigido a sustituir el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz –el cual era afirmado por la mayor parte de la comunidad científica de aquella época– en el contexto de un amplio proyecto de determinación de las longitudes de algunas localidades terrestres, el cual involucraba a su vez mediciones astronómicas de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano. Para tal propósito resultará significativo apreciar que la sustitución de dicho *principio físico* se inserta en el contexto de las discusiones epistémicas acerca de cuáles son los criterios para justificar un *principio físico* concerniente a la manera en que se transmite la luz –las cuales fueron analizadas en el capítulo anterior. De igual forma, será importante observar que la idea del astrónomo danés de sustituir dicho *principio* propició la generación

³³ En el “Acto I” de su artículo, A. Wróblewski (1985) presenta varios ejemplos de libros de texto [*textbooks*] –todos de la tradición anglosajona– donde aparece esta *pseudo-historia*, según la cual Rømer realizó una medición de la *velocidad de la luz* y determinó su valor numérico. A estos ejemplos deseo añadir los libros de K. D. Froome & L. Essen (1969) y A. Sepúlveda (2012, p. 232).

de una nueva etapa en las operaciones de medición de los parámetros del movimiento de los satélites de Júpiter y del cálculo de las efemérides de sus eclipses, la cual permitió un aumento en la exactitud de dichas operaciones métricas aplicadas al movimiento del primer satélite.

Como consecuencia de la mejora de tales prácticas métricas, Rømer consideraba que su trabajo *demostraba experimentalmente* la necesidad de sustituir el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz. En otras palabras, el astrónomo danés no sólo proponía afirmar la propagación sucesiva de la luz, sino que consideraba haber provisto una *evidencia empírica suficiente* para justificarlo. Esta última situación derivó en una renovada discusión epistémica acerca de los criterios de justificación de dicho *principio físico*. Al igual que en el caso de Galileo y Descartes, tales discusiones tuvieron implicaciones sustantivas de carácter cognitivo. Con todo esto en mente, tras estudiar el contexto métrico en el cual se inscribe el trabajo de Rømer y analizar la exposición de su argumentación, realizaré un análisis de la recepción que su propuesta tuvo en aquella época y las discusiones generadas a su alrededor.

2.2. Mapas, relojes y eclipses de los satélites de Júpiter: el contexto métrico del trabajo de Rømer

A lo largo del siglo XVII uno de los problemas en los que mayor esfuerzo intelectual se concentró fue el de la medición de la longitud de diferentes puntos de la Tierra. Dicho problema no sólo era de interés para la comunidad científica de la época, sino que su importancia en términos prácticos fue tal que muchas de las coronas europeas decidieron ofrecer un significativo premio económico a quien presentase un método viable para su medición, especialmente uno que pudiera aplicarse con facilidad en altamar (cf. North, 1989; Débarbat & Wilson, 1989). Tras el descubrimiento –a comienzos de 1610– de los satélites de Júpiter, y habiendo estudiado con detalle sus movimientos, Galileo consideró que la observación de sus eclipses mediante el uso de telescopios podría ser utilizada para la determinación exacta de las diferencias de longitud entre dos lugares. La idea básica de tal propuesta era que elaborándose tablas precisas de los movimientos de dichos satélites, se podría calcular con exactitud la hora en que se observaría un eclipse en un lugar de

referencia (*e.g.*, París). Luego, al observarse el mismo eclipse en otro lugar de la Tierra y estableciéndose con precisión la hora en que ocurría en ese sitio, se podría computar la diferencia de longitudes entre los dos lugares utilizando ambos registros horarios (el del lugar de referencia y el medido en la segunda ubicación).

Muchos investigadores de la época se sumaron a la idea galileana. Sin embargo, como lo muestra J. D. North (1989), las dificultades prácticas de aplicar éste método en las embarcaciones eran significativas: desarrollar un sistema de estabilización para ubicar los telescopios –los cuales llegaban a medir dos metros en aquella época– en los barcos, sin contar que la preparación astronómica de las tripulaciones no era siempre la más adecuada para realizar este tipo de observaciones. A pesar de estas complicaciones en su aplicación marítima, el método de la observación de los eclipses jovianos fue ampliamente utilizado para la medición de longitudes en tierra. La única modificación era que en su aplicación terrestre sólo se requería medir con precisión el momento de ocurrencia de un mismo eclipse en dos localidades diferentes. Justamente es en esta empresa científica que aparecen en escena los dos actores que se estudiarán en el presente capítulo: Gian Domenico Cassini y Ole Christensen Rømer.

Ya desde 1664, siendo profesor universitario en Italia, G. D. Cassini se había interesado por el estudio del movimiento de los satélites de Júpiter y por la elaboración de tablas más precisas de sus parámetros que aquellas con las que se contaba en su época. Por lo tanto, tras un periodo de observación cuidadosa de más de dos años del sistema joviano, publicó en 1668 sus *Ephemerides Bononiensis mediceorum syderum* (en adelante *Ephemerides*). En esta obra presentó una serie de tablas de algunos de los parámetros del movimiento de los satélites jovianos –entre los que se destaca el periodo medio de sus revoluciones– los cuales podían ser utilizados para calcular la ocurrencia de sus eclipses³⁴. En esta misma publicación, sugirió que estos eclipses podrían ser utilizados para medir la diferencia de longitudes entre dos lugares (siguiendo el método terrestre descrito anteriormente). La altísima exactitud de las predicciones que se derivaban del uso de sus tablas y el amplio trabajo observacional sobre el que estaban elaboradas le significó una excelente reputación a lo largo de toda Europa (cf. North, 1989, p. 198).

³⁴ Es importante precisar que las tablas astronómicas son herramientas metodológicas construidas a partir de los *datos observacionales* que, en conjunto con los *modelos geométricos*, permiten calcular las posiciones pasadas, presentes y futuras de los cuerpos celestes.

Dicha reputación le valió una invitación a Francia para formar parte de la recién creada *Académie Royale des Sciences*, donde participó en un gran número de proyectos astronómicos de la época y llegó a convertirse en uno de los astrónomos más importantes de su tiempo. Entre estos proyectos destaca el de la medición de la diferencia entre las longitudes de París y Uraniburgo –llevado a cabo junto con Jean Picard (Francia, 1620-1682)–, el cual tenía como objetivo poder aprovechar al máximo las observaciones astronómicas de Tycho Brahe (Dinamarca, 1546-1601) en el recién construido *Observatoire Royal* en París. Este trabajo se llevó a cabo utilizando el método de los eclipses de los satélites de Júpiter sugerido por G. D. Cassini en sus *Ephemerides*. De este modo, Picard partió hacia Dinamarca en Julio de 1671 y durante ocho meses realizó observaciones de los eclipses de los satélites tanto en Uraniburgo como en Copenhague, mientras que simultáneamente G. D. Cassini realizaba observaciones de los mismos fenómenos astronómicos en la capital francesa. La siguiente cita de S. Débarbat & C. Wilson (1989) permite observar el tipo de instrumentos utilizados en esta empresa y su alto grado de apreciación:

The letters exchanged between Picard and Cassini bear witness to the care with which the operations were conducted. The project was completed in 1672 after eight months of work. The instruments used included sectors and quadrants with sighting pins or telescopic sights, the latter equipped with micrometers that Auzout and Picard had been using since the mid-1660s. The observers also employed aerial telescopes of great length: since the middle of the century opticians, among them Eustachio Divini and Campani in Rome had been fabricating large objective lenses up to 12 cm in diameter and with focal lengths that could reach several dozen metres. The quality of the glass and the excellence of the polishing made possible important and much publicized discoveries.

Observation of an eclipse of a satellite of Jupiter was made by noting the clock-time when the phenomenon occurred. The clock, set to local mean time, had to be capable of keeping time with sufficient precision between resettings, which were usually undertaken by observations of the Sun at midday. Picard, Cassini and their collaborators used clocks with pendulums adjusted to periods of a second or half-second; with such clocks it was possible to time events with a precision of a quarter of a second. (pp. 150-151)

En esta expedición a Dinamarca Picard conoció a Rømer, quien se encontraba estudiando las observaciones de Brahe. Tras la expedición, Rømer se instaló en París y se unió al equipo de trabajo liderado por G. D. Cassini, el cual en los años siguientes –utilizando el mismo método de las observaciones de los satélites jovianos– dedicaría un esfuerzo significativo en rectificar la longitud de diversas localidades francesas. En consecuencia, las mediciones de los parámetros de los movimientos de los satélites jovianos, las

observaciones de los eclipses de estos cuerpos celestes y la elaboración de tablas para el cálculo de sus ocurrencias estuvieron siempre en el centro del trabajo científico de G. D. Cassini y Rømer.

Los *datos observacionales* de los registros horarios en que ocurrían los eclipses recopilados durante el trabajo de la medición de las diferencias de longitudes –tanto los obtenidos en Dinamarca como en territorio francés– fue revelando una serie de notables divergencias con respecto a las predicciones de las tablas de G. D. Cassini, divergencias que alcanzaban valores de hasta varios minutos. Este último hecho resultó inquietante para el grupo de trabajo dado el conocido grado de apreciación de sus instrumentos y su cuidadoso programa de obtención de *datos*. Una de estas divergencias –lo que se denominaría eventualmente como *segunda irregularidad*³⁵ [*second inequality*]– era que las observaciones de las inmersiones en los eclipses del primer satélite de Júpiter después de la conjunción hasta antes de la oposición iban ocurriendo cada vez más con mayor anticipación en relación con lo calculado a partir de las tablas de G. D. Cassini. Algo similar ocurría con las observaciones de las emersiones, siendo que allí se observaban cada vez más tarde de lo calculado (cf. Grillet, 1978, p. 138).

En consecuencia, el grupo de G. D. Cassini –incluyendo a Rømer– se embarcó en un estudio comparativo de los *datos observacionales* obtenidos a lo largo de un periodo cercano a diez años y de los cálculos realizados mediante sus tablas (cf. Débarbat & Wilson, 1989, p. 152). Éste es precisamente el contexto en el que se inscribe el trabajo de Rømer –presentado y publicado en 1676³⁶. A partir de todo lo hasta aquí expuesto, resulta

³⁵ Una *primera irregularidad* se había también apreciado y se atribuyó a que las órbitas de los satélites de Júpiter son excéntricas (cf. Grillet, 1978), mientras que el *modelo geométrico* que se utilizaba junto con las tablas de G. D. Cassini describía dichas órbitas como circulares (lo cual se apreciará más adelante en este mismo capítulo en la descripción del trabajo de Rømer). De esta manera, una *primera ecuación* había sido introducida en las tablas para calcular con mayor exactitud las efemérides de los eclipses de dichos satélites.

³⁶ Es importante señalar que existe una discusión historiográfica en torno a la primacía y la fecha exacta de la idea de proponer la propagación sucesiva de la luz para dar cuenta de la *segunda irregularidad* en el movimiento del primer satélite joviano. De acuerdo con las *Memorias* de la *Académie des Sciences* escritas por dos de sus secretarios en años posteriores, *viz.*, J.-B. Du Hamel (1698) y B. Fontenelle (1707); G. D. Cassini fue el primero en haber sugerido dicha hipótesis ante la *Académie* (incluso, de acuerdo con J.-B. Du Hamel ésta fue propuesta por primera vez en 1674). Lo que ha generado confusión entre los historiadores de la ciencia es la actitud posterior que asumió G. D. Cassini como el mayor opositor a la aceptación de una hipótesis que él mismo –de acuerdo con las fuentes mencionadas– parecía haber propuesto. Además, también resulta confuso el hecho de que G. D. Cassini nunca intentó un reclamo por dicha primacía. Para una mayor profundidad en esta discusión historiográfica se sugiere consultar el trabajo de I. B. Cohen (1940, §16), K. M. Pedersen (1978), A. I. Sabra (1981, pp. 205-206), A. Van Helden (1983) y L. Bobis & J. Lequeux (2008). Aunque entre ellos se encuentran opiniones diversas en cuanto al crédito que se le debe dar a G. D. Cassini,

valioso destacar nuevamente el altísimo grado de apreciación y desarrollo de los instrumentos que se emplearon en la realización de las observaciones, lo cual derivaba en una alta confiabilidad en los *datos observacionales*. La problemática que abordaron, entonces, era la de comprender por qué había una discrepancia entre dicho conjunto y los cálculos realizados a través de las tablas de G. D. Cassini, así como procurar una herramienta que permitiese calcular con un mínimo de divergencia las efemérides de los eclipses de los satélites. Con todo lo anterior en mente, la publicación en el *Journal des Sçavans* comienza con las siguientes palabras:

Philosophers have been labouring for many years to decide by some experience, whether the action of the Light be conveyed in an instance to distant places, or whether it requireth time. M. Romer of the R. Academy of the Sciences hath devised a way, *taken from the Observations of the first Satellit of Jupiter, by which he demonstrates*, that for the distance of about 3000 leagues, such as is very near the bigness of the Diamater of the Earth, Light needs not one second of time³⁷. (Rømer, 1676/1940, p. 377 [893]; énfasis añadido)

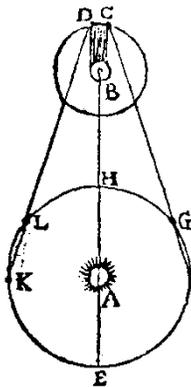
En estas líneas está esbozado el objetivo del trabajo del astrónomo danés: inmerso en un proyecto de operaciones de gran exactitud para medir los movimientos del primer satélite de Júpiter (el cual, a su vez, formaba parte de una serie de proyectos que tenían como finalidad la determinación de longitudes de diversas localidades terrestres), Rømer consideró haber encontrado una prueba suficiente para adoptar el *principio físico* según el cual la transmisión de la luz requiere de tiempo, y que es tal que le lleva menos de un segundo en atravesar una distancia equivalente al diámetro de la Tierra.

De lo anterior es significativo destacar dos ideas que serán cruciales para el análisis que en este capítulo se pretende llevar a cabo: en primer lugar, es importante observar que aquí Rømer plantea el problema empleando los conceptos de distancia y duración que se desarrollaron a lo largo de la discusión de carácter epistémico suscitada por los trabajos de Galileo y Descartes. Asimismo, es valioso destacar que expresa su resultado –como lo

todos parecen estar de acuerdo en que en última instancia la defensa de una propagación sucesiva de la luz a raíz de la evidencia astronómica de la *segunda irregularidad* observada en el movimiento del primer satélite de Júpiter fue realizada por Rømer y que su opositor fue G. D. Cassini. Esto último es lo que resulta relevante para lo que pretendo plantear en este escrito y por ello lo referiré como *el trabajo de Rømer*.

³⁷ Para el análisis de la publicación del trabajo de Rømer se utilizará la traducción que apareció en las *Philosophical Transactions* en Inglaterra un año después (1677) de ser publicada en el *Journal des Sçavans* – la cual tradicionalmente se le atribuye a E. Halley–, y cuyo manuscrito fue incluido –junto con el manuscrito en francés– en el artículo de I. B. Cohen (1940). Una versión adaptada al inglés contemporáneo se puede consultar en W. F. Magie (1935, pp. 335-337).

había hecho Descartes— mediante el intervalo temporal que le toma a la luz recorrer una distancia fija. En este sentido, el astrónomo danés concibió el problema de la transmisión de la luz en términos cinemáticos, refiriéndolo como una relación entre el tiempo requerido para atravesar una determinada distancia. Lo anterior refleja el atrincheramiento del *cambio conceptual* que se destacó al final del capítulo anterior y su aplicación a un contexto posterior de mediciones astronómicas. En segunda instancia, en la frase subrayada con cursivas se puede apreciar que, a partir del trabajo de análisis de estas operaciones métricas, Rømer pensaba haber *demostrado con evidencia suficiente* que la sustitución de dicho *principio físico era necesaria*. Con esto en mente, la exposición de sus consideraciones continúa de la siguiente manera:



Let A be the Sun, B Jupiter, C the first Satellit of Jupiter, which enters into the shadow of Jupiter, to come out of it at D; and let EFGHKL be the Earth placed at divers distances from Jupiter.

Now, suppose the Earth, being in L towards the second Quadrature of Jupiter, hath seen the first Satellit at the time of its emersion or issuing out of the shadow in D; and that about 42 ½ hours after, (vid. after one revolution of this Satellit,) the Earth being in K, do see it returned in D; it is manifest, that if the Light require time to traverse the interval LK, the Satellit will be seen returned later in D, than it would have been if the Earth had remained in L, so that the revolutions of this Satellit being thus observed by the Emersions, will be retarded by so much time, as the Light shall have taken in passing from L to K, and that, on the contrary, in the other quadrature FG, where the Earth by approaching goes to meet the Light, the revolutions of the Immersions will appear to be shortned by so much, as those of the Emersions had appeared to be lengthned. And because in 42 ½ hours, which this Satellit very near takes to make one revolution, the distance between the Earth and Jupiter in both the Quadratures varies at least 210 Diameters of the Earth, it follows, that if for the account of every Diameter of the Earth there were required a second of time, the Light would take 3 ½ minutes for each of the intervals GF, KL; which would cause near half a quarter of an hour between two revolutions of the first Satellit, one observed in FG, and the other in KL, whereas there is not observed any sensible difference. (Rømer, 1676/1940, p. 377 [893])

En la anterior cita se encuentran especificados, de acuerdo con la idea de *integración cognitiva* (Guillaumin, 2015b), tanto el *modelo geométrico* empleado en la realización de los cálculos pertinentes así como los *principios físicos* establecidos para la realización de las mediciones de los parámetros del movimiento del primer satélite de Júpiter. A través de ambos, Rømer establece como punto de partida —a raíz de las demostraciones y los cálculos provistos por la astronomía kepleriana y del trabajo previo de G. D. Cassini sobre el sistema joviano— que la Tierra se mueve en una órbita alrededor del Sol, que el valor medio de una revolución del primer satélite alrededor de Júpiter es de aproximadamente 42 horas

y media, y que en este mismo tiempo la distancia entre la Tierra y Júpiter varía en aproximadamente 210 veces el diámetro de la Tierra. A lo anterior añade la sugerencia de afirmar que la propagación de la luz requiere de tiempo y propone pensar que es tal que necesita de un segundo para recorrer una distancia equivalente a un diámetro terrestre (alrededor de 3000 ligas). En este sentido, indica que si éste fuera el caso debería detectarse una diferencia temporal de alrededor de medio cuarto de hora en los periodos medidos para dos revoluciones en cuadrantes diferentes del primer satélite de Júpiter³⁸. Sin embargo, afirma que tal diferencia entre los periodos de revolución no se ha registrado en el conjunto de los *datos observacionales*. ¿Debía entonces abandonarse la sugerencia de adoptar el *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz? El razonamiento de Rømer prosigue de la siguiente manera:

Yet doth it not follow hence, that Light demands no time. For after M. Romer had examin'd the thing more nearly, he found, that what was not sensible in two revolutions became very considerable in many being taken together, and that, for example, forty revolutions observed on the side F, might be sensibly shorter, than forty others observed in any place of the Zodiack where Jupiter may be met with; and that in proportion of twenty two for the interval of HE, which is the double of the interval that is from hence to the Sun. (Rømer, 1676/1940, p. 378 [894])

A través de la anterior cita se puede apreciar como el astrónomo danés indicó que lo que no se lograba detectar a través de dos mediciones del periodo de revolución del primer satélite de Júpiter mediante observaciones de los eclipses en diferentes cuadraturas, se hacía notable al medirse el periodo de revolución con base en una serie numerosa de observaciones en cada una de las cuadraturas –40 de acuerdo con lo señalado en la exposición. Esto significa que al promediar los resultados de las mediciones del periodo de revolución del primer Satélite a partir de observaciones en cada una de las cuadraturas, el periodo de revolución promedio calculado con las mediciones hechas cuando la Tierra se encuentra acercándose a Júpiter resulta ser menor que el calculado con aquéllas realizadas en la situación contraria.

³⁸ Como resulta claro del *modelo geométrico* presentado por Rømer, observaciones de las emersiones del satélite sólo podrían realizarse en la situación en que la Tierra se está alejando de Júpiter y observaciones de las inmersiones únicamente en la situación contraria, *i.e.*, la Tierra acercándose a Júpiter. Estas dos situaciones astronómicas de la posición de la Tierra con respecto a Júpiter son denominadas como las dos cuadraturas de Júpiter.

Por lo tanto, considerar y comparar los promedios de los resultados de las mediciones del periodo de revolución del primer satélite de Júpiter tanto para el caso de las inmersiones como el de la emersiones, esto es, un análisis estadístico de los *datos observacionales* (a través del cálculo de promedios) fue uno de los elementos centrales que permitió a Rømer –en conjunto con los *datos* obtenidos durante ocho años, el *modelo geométrico* del fenómeno y los *principios físicos* afirmados– calcular que la propagación de la luz es tal que necesita de alrededor de 22 minutos para atravesar una distancia equivalente al diámetro de la órbita terrestre³⁹. En este sentido, en su estudio sobre el trabajo de Rømer, Cohen (1940) sostiene que: “In his paper Roemer stressed what was for him the central point, that observations of immersions of the first satellite gave a smaller period of revolution than similar observations of emersions” (§17). La presentación del razonamiento del astrónomo danés prosigue con la siguiente idea:

The necessity of this new Equation of the retardment of Light, is established by all the observations that have been made in the R. Academy, and in the Observatory, for the space of eight years, *and it hath been lately confirmed by the Emersion of the first Satellit observed at Paris the 9th of November last at 5 a Clock, 35'. 45". at Night, 10 minutes later than it was to be expected, by deducing it from those that had been observ'd in the Month of August, when the Earth was much nearer to Jupiter: Which M. Romer had predicted to the said Academy from the beginning of September.*

But to remove all doubt, that this inequality is caused by the retardment of the Light [*mora luminis*], he demonstrates, that it cannot come from any excentricity, or any other cause of those that are commonly alledged to explicate the irregularities of the Moon and the other Planets; though he be well aware, that the first Satellit of Jupiter was excentrick, and that, besides, his revolutions were advanced or retarded according as Jupiter did approach to or recede from the Sun, as also that the revolutions of the primum mobile were unequal; yet saith he, these three last causes of inequality do not hinder the first from being manifest. (Rømer, 1676/1940, p. 378 [894]; énfasis añadido)

Como resultado de su razonamiento, Rømer propuso que era *necesaria* la inclusión de una *segunda ecuación* –que llamó *ecuación de la luz*– en las operaciones de cálculo de la ocurrencia de los eclipses del primer satélite de Júpiter que involucraban el *modelo geométrico* especificado con anterioridad y las tablas desarrolladas por G. D. Cassini, la cual permitía calcular con mayor exactitud las efemérides de los eclipses de dicho cuerpo celeste. En este orden de ideas, mediante una predicción más exacta de la ocurrencia de un nuevo eclipse del primer satélite de Júpiter que se esperaba para el día 9 de Noviembre de

³⁹ Estos cálculos no aparecen de forma explícita en el artículo publicado en 1676. No obstante, se han hecho esfuerzos para reconstruir la manera en que Rømer los pudo haber realizado utilizando un manuscrito hallado en Dinamarca a comienzos del siglo XX –atribuido a él–, el cual contiene una lista de los eclipses de Júpiter entre 1668-1677. Para ello se sugiere consultar los trabajos de I. B. Cohen (1940, §21-24) y de S. R. Filonovich (1986, pp. 42-44).

1676, mostró el tipo de mejora que se conseguía con la consideración de dicha *ecuación de la luz*. De igual forma, sugirió que dicha herramienta metodológica procedía de la sustitución del largamente arraigado *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz por uno que afirmase su propagación sucesiva. Por lo tanto, en el segundo párrafo de la anterior cita, el astrónomo danés señaló que la *segunda ecuación* no podía proceder de alguna otra fuente –*e.g.*, que la órbita del primer satélite era excéntrica y no circular como lo asumía el *modelo geométrico*, o el cambio de su periodo debido a su proximidad o lejanía al Sol–, ya que estas hipótesis habían sido consideradas en el análisis de los *datos observacionales*⁴⁰.

En síntesis, los *datos observacionales* recogidos a lo largo de un amplio trabajo métrico de determinación de longitudes de diferentes localidades terrestres por parte de la *Académie des Sciences* durante un periodo de 8 años revelaron una serie de divergencias con respecto a los cálculos realizados mediante un *modelo geométrico* derivado de la astronomía copernicana y las tablas elaboradas por G. D. Cassini– denominada *segunda irregularidad*. A partir de un análisis detallado y cuidadoso de dichos *datos*, Rømer logró desarrollar una nueva herramienta metodológica que permitía corregir las divergencias identificadas y resultaba en una mejora significativa de los cálculos de la ocurrencia de los eclipses, herramienta que en su consideración debía racionalizarse a través del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz.

2.3. La ecuación de la luz: el trabajo astronómico de Rømer desde la perspectiva del coherentismo progresivo

En la sección anterior se mostró cómo el proyecto métrico de la determinación de las longitudes de diversas localidades terrestres posibilitó la recolección de un amplio conjunto de *datos observacionales* de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano y de la ocurrencia de sus eclipses. No obstante, esos *datos observacionales*

⁴⁰ Como se verá más adelante en este capítulo, este punto resulta de gran interés debido a que una de las principales razones por la que cierto sector de la comunidad científica de su época –especialmente la liderada por G. D. Cassini– se resistió a la sustitución del *principio* de la transmisión instantánea de la luz fue que, aunque la irregularidad sistemática en la medición de los periodos promedios de la revolución del primer satélite de Júpiter que presentó Rømer era innegable, ella podría deberse a algún otro fenómeno todavía desconocido.

revelaban una serie de divergencias con respecto a los previstos mediante la herramienta para calcular la ocurrencia de dichos eclipses más exacta de aquella época, *viz.*, las tablas elaboradas por G. D. Cassini y publicadas en 1668. A partir de un análisis de este conjunto de *datos* –en el cual también tomó parte G. D. Cassini–, Rømer argumentó que era *necesario* introducir una *ecuación de la luz* para corregir algunas de estas divergencias. De acuerdo con su exposición, dicha *ecuación* se desprendía de la sustitución del ampliamente utilizado *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz. Aún más, utilizando la *ecuación de la luz*, logró predecir con mayor exactitud la ocurrencia de un nuevo eclipse del primer satélite de Júpiter en el mes de Noviembre de 1676.

Con todo esto en mente, es posible apreciar que partiendo de las operaciones de cálculo de la ocurrencia de los eclipse de los satélites de Júpiter utilizadas en su época –las cuales se basaban en la utilización de las tablas preparadas por G. D. Cassini–, el astrónomo danés al sustituir tan sólo un *principio físico* relacionado con la naturaleza de la luz, desarrolló una nueva etapa [*stage*] en el contexto de medición del movimiento de los satélites de Júpiter, la cual no sólo permitió un incremento significativo en la concordancia entre dichas operaciones y un grupo altamente confiable de *datos observacionales*, sino también obtener un mayor grado de exactitud en el cálculo de futuros eclipses de los satélites de Júpiter y en la elaboración de tablas de sus efemérides. En este orden de ideas, Rømer logró una mejora [*enhancement*] significativa en la virtud epistémica de la exactitud [*accuracy*] en el sentido en que es propuesto por T. S. Kuhn (1973/1993)⁴¹. Por lo tanto, considero que es posible afirmar que el trabajo de Rømer condujo a un *progreso* en el amplio contexto de medición del movimiento del primer satélite de Júpiter y del cálculo de la ocurrencia de sus eclipses en el sentido en que es sugerido por H. Chang (2004, 2007).

De acuerdo con la propuesta de Chang (2004), un *sistema de conocimiento* [*system of knowledge*] se entiende como la colección de diversas piezas o elementos [*items*] de conocimiento científico que se tienen en una determinada etapa de su historia. Considero que la noción de los *supuestos ontológicos* de Guillaumin (2015b) –*i.e.*, la afirmación de un grupo de *principios físicos*– captura de manera clara lo que Chang (2004) denomina como

⁴¹ En la traducción al español elaborada por R. Helier (1993) este criterio es traducido como *precisión*. Sin embargo, en la versión original en inglés T. S. Kuhn (1973) lo define como *accuracy*. De acuerdo con lo que se expuso en la “Introducción General”, considero que el concepto de *exactitud* captura de mejor manera la idea desarrollada por T. S. Kuhn. Por tal motivo, en el presente trabajo me referiré a dicho criterio kuhniano mediante esta última expresión.

la afirmación de un *sistema de conocimiento* como punto de partida para la realización de una *medición científica*, ya que la idea de *principio* –como es desarrollada por Guillaumin (2015b)– refiere concretamente a la idea de un punto de partida. Teniendo esto en mente, la afirmación de que la luz requiere de tiempo en su transmisión es el punto de partida del astrónomo danés para generar una nueva etapa [*stage*] histórica de las operaciones de medición del movimiento del primer satélite de Júpiter, la cual resultó en una forma de mejora [*enhancement*] frente a su predecesora.

No obstante, alcanzado este punto es pertinente preguntarse el porqué de dicha sugerencia por parte de Rømer. Aunque en su trabajo no presenta las razones por las cuales afirmó dicho *principio físico* como punto de partida, sugiero que sí se da un indicio importante al respecto con las palabras con que comienza la publicación en la que se presenta su trabajo: “Philosophers have been labouring for many years to decide *by some experience*, whether the action of the Light be conveyed in an instance to distant places, or whether it requireth time” (Rømer, 1676/1940, p. 377 [893]; énfasis añadido). A través de esta cita es posible apreciar una referencia a las discusiones epistémicas que se presentaron en el capítulo anterior, *viz.*, que los criterios de justificación del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz –el cual tradicionalmente se había afirmado en la investigación del mundo natural– estaban siendo cuestionadas, y en su lugar se sugería someter a la experimentación la problemática de si la luz se transmite instantáneamente o en el tiempo⁴². Lo anterior permite entender con claridad cómo es que el trabajo astronómico de Rømer corresponde a una segunda fase histórica de la relación entre las mediciones astronómicas y el desarrollo del conocimiento acerca de la propagación sucesiva de la luz, la cual se generó en gran medida gracias a las discusiones epistémicas suscitadas por los trabajos de Galileo y Descartes, y que fueron incorporadas por Rømer en su trabajo de mediciones astronómicas.

Como se advirtió anteriormente, al afirmar el *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz, Rømer logró desarrollar una herramienta metodológica que denominó

⁴² Al respecto J. D. North (1989) argumenta que el experimento cartesiano del eclipse para probar la transmisión instantánea de la luz estaba en el *aire* en la década de 1660, ya que era ampliamente discutido en la comunidad científica de París y se encuentra una referencia directa al mismo en la *Micrographia* de R. Hooke publicada en 1665. En este sentido sostiene que: “Descartes’ ideas on the velocity of light were constantly under discussion in Paris, especially in connection with the ‘proof’ he gave of the law of sines, and I cannot help feeling that the general principles of eclipse tests must have been actively discussed publicly in the period terminating with Rømer’s discovery” (North, 1989, p. 200).

ecuación de la luz, la cual le permitió generar un *progreso* en las operaciones de la medición del movimiento del primer satélite de Júpiter. Al respecto, North (1989) sostiene que: “After Rømer, astronomers were left in a curious situation. The best available ‘calculus’ of the Jupiter satellites was drawn up according to *principles* involving a mysterious ‘second equation’ which no one appeared to be in a hurry to rationalize by the application of *Rømer’s principle*” (p. 202; énfasis añadido). En esta cita se puede apreciar que aunque la adopción de la *segunda ecuación* sugerida por Rømer resultaba en una mejora sustancial de los cálculos de la ocurrencia de los eclipses del primer satélite de Júpiter, no todos los investigadores del mundo natural estaban dispuestos a aceptar la racionalización de esta herramienta metodológica a partir del *principio físico* de la transmisión temporal de la luz.

Una de las principales reservas que existía frente a la adopción de este *principio* se debía principalmente a que la *ecuación de la luz* no contó con igual éxito en el cálculo de la ocurrencia de eclipses y en la elaboración de tablas de las efemérides de los otros tres satélites de Júpiter conocidos en aquella época. A lo anterior, resulta valioso añadir que – como se indicó en la anterior sección de este capítulo– Rømer no sólo sugería la adopción de la propagación sucesiva de la luz, sino que consideraba haber *demostrado con evidencia suficiente* que aquello era necesario. Dicha situación propició que se generara de nueva cuenta una discusión en la comunidad científica de su época acerca de cuáles eran los criterios epistémicos suficientes para llevar a cabo la sustitución del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz.

2.4. *De mora luminis: el contexto métrico de Rømer desde la perspectiva de la integración cognitiva*

La presentación detallada que en la segunda sección de este capítulo se hizo del trabajo de Rømer permitió observar con claridad los tres elementos cognitivos del *esquema de integración cognitiva* (Guillaumin, 2015b) en el contexto de la medición de los movimientos del primer satélite de Júpiter. En primer lugar, un *modelo geométrico* que, en conjunto con las tablas elaboradas por G. D. Cassini, permitía calcular la ocurrencia de los eclipses de los satélites de Júpiter. En segunda instancia, un conjunto de *datos*

observacionales que incluye la medición de los parámetros de los movimientos de dichos cuerpos celestes –entre los que sobresale el periodo medio de sus revoluciones–, la observación de sus eclipses y la medición *directa* mediante relojes de alta precisión del momento de su ocurrencia. Finalmente, el conjunto de sus *supuestos ontológicos* que incluye los *principios físicos* concernientes al movimiento de la Tierra, Júpiter y los satélites. Entre estos últimos se encontraba también una consideración acerca de la transmisión de la luz. Desde dicha perspectiva se puede apreciar que Rømer al sustituir tan sólo un *principio físico* alcanzaba un grado óptimo de *integración cognitiva*, esto es, al modificar el *principio* de cómo se transmite la luz lograba un grado óptimo de retroalimentación y coherencia entre el conjunto de los *datos observacionales* y las herramientas de cálculo de la ocurrencia de sus eclipses. Es importante precisar que mediante la consideración de dicho *principio físico*, el astrónomo danés no modificaba el *modelo geométrico* utilizado en los cálculos, sino que permitía el desarrollo de una nueva herramienta metodológica que debería ser considerada en la realización de dichos cálculos junto con las tablas elaboradas por G. D. Cassini.

Guillaumin (2015b) denomina a la sustitución de alguno de los elementos correspondientes al conjunto de los *principios físicos* un *cambio ontológico*, ya que consiste en la modificación de la manera como se asume que es el mundo natural. Teniendo en cuenta todo lo anterior, la idea de una *mora luminis* en el trabajo de Rømer –es decir, que al requerir de tiempo la transmisión de la luz, existe un retraso en la observación de los eclipses debido a la distancia variable entre la Tierra y Júpiter– está dirigida a la realización de un *cambio ontológico*. En adición a esto, como se señaló al final de la sección anterior, el astrónomo danés no sólo proponía la realización de un *cambio ontológico* acerca de la transmisión de la luz, sino que consideraba que al haber desarrollado una herramienta metodológica que corregía los *errores* del procedimiento de cálculo de G. D. Cassini, y que resultaba en un incremento en su exactitud, esto era una *evidencia suficiente* para justificar dicho *cambio ontológico*. No obstante, aunque la comunidad científica de su época consideró pertinente la adopción de la *segunda ecuación*, no toda ella –particularmente el sector francés– compartía con Rømer que ello fuera *evidencia suficiente* para sustituir el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz.

Lo anterior significa que el trabajo de Rømer no sólo consideraba un cambio en los supuestos acerca del mundo, sino que aunado a ello se encontraba una discusión epistémica acerca de los criterios de justificación suficientes para llevar a cabo dicho cambio: ¿cuál es la *evidencia* suficiente para adoptar la propagación sucesiva de la luz? Como se indicó en el capítulo anterior, a dicha situación Guillaumin (2015b) la denomina una *crisis epistemológica*. En términos más generales, considero que la reserva que la comunidad científica de la época mostró frente a la adopción de la propagación sucesiva de la luz revela que aunque la modificación que se pretendía era *explícitamente* un *cambio ontológico*, existía *implícitamente* una discusión epistémica. Esta tensión entre los criterios *tradicionales* y los que *implícitamente* se proponían en el trabajo del astrónomo danés se puede apreciar en una cita atribuida a Bernard Le Bovier de Fontenelle (Francia, 1657-1757) –quien fuera secretario vitalicio de la *Académie des Sciences*–, la cual se encuentra en la narrativa del episodio histórico del trabajo de G. D. Cassini y Rømer presentada en la *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*: “Il falut donc admettre le Retardement de la Lumiere, si vrai-semblance selon la Physique, quand il ne seroit pas prouvé par l'Astronomie [Tuvimos entonces que admitir que el retraso de la luz, tan verosímil según la física, no sería demostrado por la astronomía]” (Fontenelle, 1733 ctd en Sabra, 1981, p. 206). Por lo tanto, en lo que resta del capítulo me propongo mostrar los principales elementos de la *crisis epistemológica* suscitada por el trabajo astronómico de Rømer y las implicaciones cognitivas que dicha *crisis* provocó en el desarrollo del conocimiento científico de la propagación sucesiva de la luz.

2.4.1. Crisis epistemológica: la recepción del trabajo de Rømer y el problema de cómo justificar la sustitución de un principio físico

La sugerencia de Rømer de adoptar el *principio físico* de la transmisión en el tiempo de la luz no fue inmediatamente aceptada y suscitó opiniones divididas, exhibiendo una marca geográfica acentuada⁴³. Mientras la gran mayoría de la comunidad inglesa –encabezada por

⁴³ Considero importante precisar que aunque la marca geográfica en la que se dividió la comunidad científica de aquella época en torno al trabajo presentado por Rømer es bastante fuerte, ello no significa que *todos* los investigadores de Francia hayan seguido las ideas de G. D. Cassini o que *todos* los investigadores de Inglaterra hayan hecho lo mismo con los argumentos de E. Halley. Como se observará en esta sección, R.

Edmond Halley (Inglaterra, 1656-1742) y Christiaan Huygens– alabó el trabajo del astrónomo danés y se apresuró en promover la sustitución de dicho *principio físico*; la comunidad francesa –encabezada por G. D. Cassini y sus descendientes– consideraba que la *evidencia* aportada por Rømer en su trabajo no era suficiente para modificar tal *principio físico* y argumentaba que la *segunda ecuación* utilizada para rectificar las divergencias debidas a la *segunda irregularidad* en el movimiento del primer satélite joviano podía racionalizarse a través de una causa todavía desconocida⁴⁴.

La existencia de esta irregularidad en el movimiento del primer satélite de Júpiter nunca fue puesta en duda, ya que –como se señaló en la segunda sección del presente capítulo– tanto el altísimo desarrollo y grado de apreciación de los instrumentos utilizados como el cuidadoso programa de observación conferían una gran confiabilidad al conjunto de los *datos observacionales*⁴⁵. Por lo tanto, la discusión se puede comprender bajo el cuestionamiento de si la *evidencia* presentada por el astrónomo danés era suficiente para realizar el *cambio ontológico* que proponía. Por ello resulta iluminador citar en toda su extensión un apartado de G. D. Cassini (1693 ctd en North, 1989), donde –alrededor de 17 años después de la publicación del trabajo de Rømer– expone de manera sintética las razones por las cuales rehusaba aceptar la sustitución del *principio físico* concerniente a la propagación de la luz:

The observations which the Academy made of the satellites of Jupiter provided an occasion to examine one of the most beautiful problems of physics, which is, to know whether the movement of light is successive, or whether it is effected in an instant. The times of two successive emersions of the first satellite during one of Jupiter's quadratures were compared with the times of two successive immersions of the same satellite during the opposite quadrature, and although the light of the satellite

Hooke argumentó en contra de aceptar el *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz como resultado del trabajo del astrónomo danés. Por lo tanto, al referirme a la *comunidad inglesa* o la *comunidad francesa* lo hago para facilidad de la narración, ya que es la manera en que la historiografía tradicionalmente lo ha hecho.

⁴⁴ Para un análisis más detallado de la recepción del trabajo de Rømer en la comunidad científica de su época se recomienda consultar los trabajos de I. B. Cohen (1940, §18-20), M. B. Hall (1978), A. I. Sabra (1981, pp. 205-207), J. D. North (1989, pp. 197-208) y S. Débarbat & C. Wilson (1989, pp. 154-155).

⁴⁵ Esta idea sirve también para apreciar la independencia que destaca G. Guillaumin (2015b) entre cada uno de los elementos de la *medición científica* presentados en su *esquema de integración cognitiva* y, principalmente, que cada uno de ellos cuenta con sus propios criterios de justificación. De esta manera, los *datos observacionales* que habían sido obtenidos gracias a las operaciones para medir las longitudes de ciertas localidades terrestres empleadas por el equipo de trabajo del que tomaron parte G. D. Cassini, J. Picard y el mismo Rømer eran ampliamente aceptados debido al alto grado de apreciación de los instrumentos y su cuidadoso programa de observación. J. D. North (1989, pp. 203-208) estudia con detenimiento esas operaciones e instrumentos, mostrando de dónde provenía la aceptación y admiración generalizada de estos *datos* a lo largo de Europa. Asimismo, S. Débarbat (1978) realiza un análisis acerca de la calidad y exactitud de los *datos observacionales* utilizados por Rømer en la presentación de su trabajo.

during the first quadrature covers less distance to reach the Earth when it approaches Jupiter than in the second quadrature when Jupiter is separating from the Earth, and although the distance amounts to 60,000 leagues at the very least as between the two occasions, nevertheless, scarcely any appreciable difference was found between the two intervals of time. This gave occasion to believe that the observations one can make at the surface or even throughout space as far as the Moon, do not suffice to form a definite conclusion on the problem, and that, as a result, the methods which Galileo proposed for this effect in his mechanics, are useless. *It is not that the Academy, in the series of observations, failed to notice that the time of a considerable number of immersions of the same satellite is appreciably shorter than a similar number of emersions, which may be explained by the hypothesis of the successive movement of light; but that this did not seem enough to convince that the movement is really successive in fact*, for one is not certain that this inequality of times may not be produced either by the eccentricity of the satellite, or by the irregularity of its movement, or by some other cause at present unknown, which in time one might be able to clarify. (pp. 198-199; énfasis añadido)

El mismo espíritu se exhibe en el argumento que expone Robert Hooke en una serie de conferencias sobre la luz que dictó entre los años 1680-1682 y que fueron publicadas póstumamente en 1705. En la primera de estas conferencias, Hooke (1705) reflexionó acerca de algunas de las propiedades de la luz y abordó, desde una perspectiva histórica, el problema acerca de si la transmisión de la luz es instantánea o requiere de tiempo. Allí señaló que:

[...] though the ingenious Monsieur Romer pretends to have found a way, by which he hath experimentally proved, that this Propagation is not instantaneous but temporary, and so there is somewhat of time spent in the Passage of Light, from the illuminating Object to the Eye or Body enlightened, *yet if we examine his Experiment a little more considerately we may find reason to doubt, whether he hath from there grounds sufficient to make such a Conclusion*. (pp. 77-78; énfasis añadido)

A continuación, Hooke (1705) expone las dos razones que encuentra para dudar de la suficiencia de la argumentación del astrónomo danés⁴⁶. La primera de ellas es expresada de la siguiente manera:

But to consider a little further the ingenious Way of Monsieur Romer, I do very much doubt, that we are as much to seek for a true Theory of this Satellit of \mathcal{J} [Jupiter], as we are of our own Satellit the Moon, if not somewhat more, by reason that the Academy thereof may be complicated with more different Motions than even this of the Moon, which is affected only by two Bodies, viz. the Sun and the Earth; whereas I am of opinion, that the motion of this inmost Satellit may be acted on also by the other three exterior Satellits, and consequently there will need other Equations and Allowances to be made in the Calculation of its true Place, besides the Allowances for the Influences of the Sun, and the Body of Jupiter, which whether he did conceive or take any Cognizance of, I know not: *And*

⁴⁶ En esta sub-sección me detendré únicamente en la primera de las razones esgrimidas por R. Hooke (1705) y reservaré el análisis de la segunda para la sub-sección siguiente.

*therefore unless we are assured of the three intermediate times between the Eclipse of it, we cannot make a certain Conclusion*⁴⁷. (Hooke, 1705, p. 78; énfasis añadido)

Estas tres citas –*viz.*, la cita de G. D. Cassini y las dos de Hooke– permiten apreciar de manera clara que posterior al trabajo de Rømer no existía una reserva en relación con los *datos observacionales* utilizados por Rømer, ni con respecto a la necesidad de introducir una *segunda ecuación* en las operaciones para medir los movimientos del primer satélite de Júpiter y calcular las efemérides de sus eclipses. En su lugar, el cuestionamiento que en ellos se puede destacar era si dicha herramienta metodológica no podía proceder de algún otro *principio físico* todavía desconocido –como una suerte de perturbaciones por esclarecer entre los cuerpos pertenecientes al sistema joviano o una irregularidad en su movimiento– o de algún ajuste en los *modelos geométricos* –como la excentricidad de la órbita–, y que igualmente permitiese incrementar la exactitud de la medición de los movimientos de los otros tres satélites.

Comparto con L. Bobis & J. Lequeux (2008) la idea de que la historia de la ciencia ha considerado en un grado menor los significativos aportes de G. D. Cassini al crecimiento del conocimiento científico acerca de la propagación sucesiva de la luz, situación que se deriva principalmente de su continua reserva en aceptar que la *segunda ecuación* sugerida por Rømer se debía a la sustitución del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz. No sólo en este capítulo se ha podido apreciar que el trabajo del astrónomo danés tuvo como punto de partida las operaciones de medición de los movimientos del sistema joviano desarrolladas por el mismo G. D. Cassini en 1668, sino que este último tomó parte activa en el análisis cuidadoso de los *datos observacionales* que derivó en el desarrollo de la *ecuación de la luz*. En este mismo sentido, como lo señalan Bobis & Lequeux (2008), las reservas de G. D. Cassini –que se dirigían hacia la misma línea argumentativa que las de Hooke– eran bastante razonables en el contexto en que se dio la discusión epistémica que en esta sección se ha estudiado, y considero que la perspectiva de la *iteración epistémica* de Chang (2004) permite una mejor comprensión en retrospectiva de las mismas.

De esta manera, es importante recordar que la crítica del sector de la comunidad científica liderada por G. D. Cassini tenía como principal punto de partida que la *ecuación*

⁴⁷ Esta misma razón es nuevamente esgrimida por R. Hooke (1705) en contra de aceptar la sugerencia de Rømer de sustituir el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz en una de las conferencias posteriores de esta misma serie (cf. Sect. VI, p. 130).

de la luz fallaba en obtener el mismo grado de *progreso* con respecto a las operaciones de medición del movimiento de los otros tres satélites conocidos de Júpiter. Por lo tanto, es razonable afirmar que el *progreso* alcanzado en la nueva etapa [*stage*] de las operaciones de medición fue bastante restringido con respecto a lo que la comunidad científica pretendía. Frente a esta situación, retrospectivamente se podrían considerar dos situaciones: por un lado, aceptar dicho *progreso* como un primer paso iterativo en la mejora [*enhancement*] de las operaciones de medición del movimiento de los cuerpos del satélite joviano y explorar qué otros *principios físicos* –en conjunción con el de la propagación sucesiva de la luz– podrían contribuir a una mejora óptima en dicha operación métrica; por otro, buscar si la afirmación de otro *sistema de conocimiento* podía llevar a una mejora en la exactitud de las operaciones de medición para los cuatros satélites. Con todo lo anterior, pienso que es posible afirmar que esta última fue la opción por la que se decantó gran parte de la comunidad francesa –liderada por G. D. Cassini y sus descendientes– mientras que la primera fue la ruta elegida por la comunidad inglesa –con Halley y Huygens a la cabeza. Como lo señala el mismo Chang (2004), únicamente en manera retrospectiva es que se puede determinar que el camino por el que optaron los últimos resultó ser más fructífero para la medición de los movimientos de los satélites jovianos.

2.4.2. Cambio conceptual: *de propagaciones que van más allá de la imaginación y velocidades extrañas*

En el capítulo anterior se indicó que –de acuerdo con el planteamiento de Guillaumin (2015b)– las *crisis epistemológicas* son un escenario propicio para la generación y transformación de las herramientas cognitivas de carácter conceptual utilizadas para pensar y abordar diferentes problemas de la ciencia. Allí he llamado a dichas transformaciones *cambios conceptuales*. Con esto en mente, considero que la *crisis epistemológica* suscitada por el trabajo de Rømer en torno a la discusión epistémica sobre la justificación del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz fue un espacio en el que se generó un *cambio conceptual* significativo para abordar el problema de cómo se transmite la luz.

Hasta aquí se ha hecho énfasis en que Rømer nunca planteó el problema de la propagación sucesiva de la luz en términos del concepto de *velocidad*, esto es, su propuesta

sólo señala que la luz requiere de tiempo para su transmisión (22 minutos para recorrer una distancia equivalente al diámetro de la órbita terrestre o menos de un segundo para una distancia equivalente al diámetro terrestre) y nunca lo refiere como que la luz tiene una *velocidad finita* ni mucho menos utilizó el concepto de *velocidad de la luz*. En este sentido, planteó conceptualmente el problema utilizando los mismos términos cinemáticos en que lo hicieron Galileo y Descartes, *i.e.*, mediante los conceptos de distancia y duración.

En consecuencia, lo que aquí pretendo destacar es que la discusión epistémica sobre si la evidencia presentada por el astrónomo danés era suficiente para sustituir el *principio físico* de cómo se transmite la luz propició que *cognitiva y conceptualmente* el problema de la transmisión de la luz comenzara a plantearse a través del concepto de *velocidad*, esto es, que se reintrodujera la idea de la *velocidad de la luz* –que apareció vagamente en el trabajo de Galileo– con nuevas características, tales como su valor numérico. Para ello resulta valioso retomar la primera conferencia de Hooke (1705) sobre la luz, en la cual esgrimía dos razones para dudar sobre la suficiencia de los argumentos de Rømer. La segunda razón que allí presentó fue la siguiente:

But supposing this may prove it to be temporary, and not instantaneous, yet *we find it to be so exceeding swift that 'tis beyond Imagination*; for so far he thinks indubitable, that it moves a Space equal to the Diameter of the Earth, or near 8000 Miles, in less than one single Second of the time, which is in as short time as one can well pronounce 1, 2, 3, 4: And if so, why it may not be as well instantaneous I know no reason [...]. (Hooke, 1705, p. 78; énfasis añadido)

En esta cita se puede apreciar que Hooke pensaba que aun concediendo que los argumentos astronómicos presentados por Rømer fueran *evidencia* suficiente para aceptar que la propagación de la luz requería de tiempo, ella resultaba ser tan *veloz* [*swift*] que se encuentra *más allá de la imaginación* [*beyond imagination*]. En este sentido, sostiene que le es más fácil pensar una propagación instantánea de la luz que una tan *excesivamente veloz*⁴⁸. En este punto, es importante destacar que Hooke (1705) plantea su objeción en los

⁴⁸ Es valioso destacar que R. Hooke (1705) al formular este segundo argumento utilice la expresión *veloz* o *velocísima* [*swift*] para calificar la propagación de la luz que resultaría si se aceptara el trabajo de Rømer, ya que es la misma expresión utilizada por Galileo en los *Discorsi*, a saber, *velocísima* (en la traducción al inglés de esta obra galileana realizada por S. Drake en 1974 se emplea la expresión *very swift*). No obstante, considero que hay una diferencia de fondo entre ambas: mientras que Galileo la utiliza para referirse a un resultado que no ha podido obtener, R. Hooke lo hace considerando una relación numérica entre una distancia y una duración. Así, considero que el razonamiento de R. Hooke está inscrito en un contexto donde los valores numéricos de distancia y duración comienzan a ser centrales, es decir, su noción de *movimiento*

mismos términos que Rømer plantea el problema, es decir, que la transmisión de la luz es tal que requiere de menos de un segundo en recorrer una distancia equivalente al diámetro de la Tierra (incluyendo una aproximación de éste último). Sin embargo, este segundo argumento apunta a *rechazar* la propuesta del astrónomo danés por el hecho de que su resultado es *inconcebible* o *impensable*. El anterior es un aspecto cognitivo significativo, el cual revela un problema relacionado con los límites del conocimiento y de cómo se puede conocer. Hooke pone de manifiesto que no puede concebir un movimiento tan *veloz* como el que se derivaba del trabajo de Rømer, es decir, sus herramientas cognitivas no le permitían concebir un movimiento con esas características.

Huygens tomaría también parte en la discusión epistémica acerca de si los resultados presentados por Rømer eran suficientes para adoptar una transmisión en el tiempo de la luz. Es importante anotar que es muy probable que Huygens estuviera ya convencido de este *principio físico* antes de la publicación del trabajo de Rømer, debido a que era una necesidad de la teoría ondulatoria de la luz que muy probablemente había considerado ya alrededor de 1672 o 1673, y que presentó ante la *Académie des Sciences* en 1678 o 1679 (la cual fue publicada tan sólo hasta 1690). Por lo tanto, es razonable pensar que, de alguna manera, le interesaba defender el resultado del astrónomo danés como una evidencia empírica de una de las propiedades de la luz postulada por su teoría⁴⁹ (cf. Sabra, 1981, pp. 198-209; Verdet, 1976, pp. 169-178).

Con esto en mente, es significativo destacar la manera en que argumentó en su *Traité de la lumière* (1690/1662) en favor de una propagación sucesiva de la luz y de la prueba que de ello había presentado Rømer. Para ello sugiere comenzar de una experiencia que podría convencer de lo contrario, a saber, realizó una revisión del experimento astronómico de Descartes para establecer con certeza la transmisión instantánea de la luz (el cual fue estudiado en el capítulo anterior). Allí, replanteando dicho experimento en términos de que aquello que debe detectarse es un cierto ángulo entre la posición de los

velocísimo se plantea como consecuencia de un razonamiento numérico. De tal forma, mientras que Galileo utiliza esta expresión en un sentido cualitativo, R. Hooke la utiliza en un sentido cuantitativo.

⁴⁹ Al respecto, Sabra (1981) señala que: “[...] one is inclined to conclude that Huygens accepted Roemer’s ‘demonstration’ not so much because he saw in it an ‘impressive revelation of facts’ but, rather, because it was in agreement with what he had adopted as a physical hypothesis which, as we have seen, he had required for a clear explanation of the properties of light” (pp. 206-207).

astros en el momento de la co-linealidad (sizigia) y de la observación del eclipse⁵⁰, Huygens (1690/1962, pp. 4-7) sugiere que a medida que se concibe una mayor *velocidad de la luz* el ángulo a detectar disminuye, haciendo más difícil de observar el fenómeno astronómico que –de acuerdo con Descartes– habría de observarse (cf. Sabra, 1981, p. 204). Teniendo en mente el experimento cartesiano con relación a los resultados que recientemente había obtenido Rømer, señala:

But it must be noted that the *speed of light* in this argument has been assumed such that it takes a time of one hour to make the passage from here to the Moon. If one supposes that for this it requires only one minute of time then it is manifest that the angle CEG will only be 33 minutes; and if it requires only ten seconds of time the angle will be less than six minutes. And then it will not be easy to perceive anything of it in observations of the Eclipse; nor, consequently, will it be permissible to deduce from it that the movement of light is instantaneous.

It is true that we are here supposing a strange velocity that would be a hundred thousand times greater than that of Sound. For Sound, according to what I have observed, travels about 180 Toises in the time of one Second, or in about one beat of the pulse. But this supposition ought not to seem to be an impossibility; since it is not a question of the transport of a body with so *great a speed*, but of a successive movement which is passed on from some bodies. [...]

But that which I employed only as a hypothesis, has recently received great seemingness as an established truth by the ingenious proof of Mr. Römer which I am going here to relate, expecting him himself to give all that is needed for its confirmation. It is founded as is the preceding [la prueba cartesiana] upon celestial observations, and proves not only that Light takes time for its passage, but also demonstrates how much time it takes, and that its *velocity* is even at least six times greater than that which I have just stated. (Huygens, 1690/1962, pp. 6-7; énfasis añadido).

A continuación, presenta sucintamente el razonamiento astronómico presentado por Rømer y, a partir de su resultado de que la transmisión en el tiempo de la luz es tal que requiere de 22 minutos para atravesar una distancia equivalente al diámetro de la órbita terrestre, añade:

If one considers the vast size of the diameter KL [diámetro de la órbita terrestre], which according to me is some 24 thousand diameters of the Earth, one will acknowledge the *extreme velocity of Light*. For, supposing that KL is no more than 22 thousand of these diameters, it appears that being traversed in 22 minutes this makes the *speed* a thousand diameters in one minute, that is 16 2/3 diameters in one second or in one beat of the pulse, which makes more than 11 hundred times a hundred thousand toises; since the diameter of the Earth contains 2,865 leagues, reckoned at 25 to the degree, and each league is 2,282 Toises, according to the exact measurement which Mr. Picard made by order of the King in 1669. But Sound, as I have said above, only travels 180 toises in the same time of one second: hence the *velocity of Light* is more than six hundred thousand times greater than that of the Sound. This, however, is quite another thing from being instantaneous, since there is all the difference between a finite thing and an infinite⁵¹. (Huygens, 1690/1962, pp. 9-10; énfasis añadido)

⁵⁰ Vale la pena recordar que en el planteamiento original cartesiano lo que se pretende detectar es un intervalo temporal entre el momento de la co-linealidad y el de la observación del eclipse de la Luna.

⁵¹ Este apartado no es sólo significativo porque el problema de la transmisión temporal de la luz sea planteado explícitamente a través de la idea de una *velocidad de la luz*, sino porque es considerado como la primera

Como se puede observar de los apartados en cursiva de las dos últimas citas de Huygens, aparece en su trabajo explícitamente ya la noción de *velocidad de la luz*. Asimismo, señala que tan sólo considerando las velocidades que sugiere el experimento cartesiano, ellas son tales que resultan *extrañas* por ser cien mil veces mayor a la del sonido. Inclusive, muestra también que la *velocidad de la luz* que se deriva del trabajo de Rømer es seiscientas mil veces más grande que la del sonido, lo que la hace aún más *extraña*. En comparación con Hooke (1705) –además de que concibe el problema ya en términos del concepto de *velocidad*– es importante observar que las velocidades de ese orden no le son *inconcebibles*, sino tan sólo *extrañas*. En otras palabras, para él no se trataba ya de algo *impensable*, sino de algo *difícil de pensar*.

Con esto en mente, una de las consecuencias de su trabajo es mostrar por qué aunque el orden de la *velocidad de la luz* que resulta del trabajo de Rømer es *extraña*, ella tiene sentido y es concebible en el contexto de su teoría ondulatoria⁵². En consecuencia, los aportes tanto de Hooke como de Huygens en la discusión epistémica –desde bandos opuestos– acerca de si la evidencia astronómica sugerida por Rømer era suficiente para adoptar el *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz revela los alcances cognitivos de este amplio contexto métrico: las ideas de la física sufren una transformación tal que no sólo el concepto de *velocidad de la luz* comienza a tomar una mayor centralidad en el problema de su transmisión, sino también que su *valor numérico* empieza a cobrar una importancia en la práctica científica. Lo anterior significa que la física sufrió un *cambio conceptual* en la manera en que estudiaba el problema de la propagación de la luz: el concepto de *velocidad de la luz* fue tomando forma y atrincherándose como una herramienta cognitiva, al mismo tiempo que revelaba que había en el mundo natural *velocidades* más grandes de lo que anteriormente se había pensado.

ocasión en que aparece publicado un valor numérico determinado (o una formulación para tal determinación) de dicha velocidad (cf. Wróblewski, 1985, p. 625; Bobis & Lequeux, 2008, p. 100; Cassini, 2014, p. 128).

⁵² Se puede entonces afirmar que la teoría ondulatoria de la luz de C. Huygens (1690/1962) –de manera indirecta– es una herramienta cognitiva que le permite pensar un mayor límite para la *velocidad de la luz*, esto es, que le posibilita concebir una transmisión de la luz con las características señaladas por Rømer.

2.5. A manera de conclusión: midiendo los cuerpos celestes, sustituyendo principios físicos, pensando la velocidad de la luz

La lectura que se ha sugerido del trabajo de Rømer en el presente capítulo revela dos elementos significativos –uno cognitivo y uno epistémico–, los cuales pueden percibirse como dos caras de una misma moneda: por un lado, se ha mostrado que el propósito principal de dicho trabajo fue promover la sustitución del ampliamente afirmado *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz, teniendo como punto de partida las discusiones epistémicas en las que los *filósofos habían estado trabajando por muchos años* (las cuales fueron estudiadas en el capítulo anterior). Por otro, al haber generado una nueva etapa en las operaciones de medición de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano mediante el incremento en la exactitud del cálculo de las ocurrencias de los eclipses del primer satélite, Rømer consideraba haber ofrecido una *evidencia experimental suficiente* para llevar a cabo dicha sustitución y, como consecuencia, justificar la afirmación del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz.

Sin embargo, al cierre del siglo XVII no toda la comunidad científica había adoptado la propagación sucesiva de la luz como un *principio físico*. El hecho de que el *progreso* alcanzado en tales operaciones de medición mediante la consideración de la *ecuación de la luz* fuera restringido tan sólo al primer satélite dividió a la comunidad científica de aquella época en dos sectores: uno liderado por G. D. Cassini y otro por Halley. Dicha tensión reavivó la *crisis epistemológica* –estudiada en el capítulo anterior– por establecer cuáles son los criterios para justificar un *principio físico* acerca de la transmisión de la luz. En el seno de esta renovada *crisis epistemológica* se operó un *cambio conceptual*: el concepto de *velocidad de la luz* y la determinación de su valor numérico – *i.e.*, la idea de ser una magnitud susceptible de ser medida– comenzaron a tomar forma y relevancia.

Con lo anterior en mente, la idea de *iteración epistémica* propuesta por Chang (2004, 2007) ha permitido hacer una caracterización de cómo desde el contexto de las prácticas de medición astronómica se puede comprender de forma retrospectiva las agendas programáticas de investigación de los dos sectores en que se dividió la comunidad científica de finales del siglo XVII con respecto al trabajo de Rømer. Particularmente, se ha

mostrado, de forma *a posteriori*, que es posible afirmar que la comunidad inglesa –con Halley y Huygens a la cabeza– aceptó el *progreso restringido* obtenido en las operaciones de medición de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano mediante la consideración de la *ecuación de la luz* como un *primer paso iterativo* en la mejora de la exactitud de dichas operaciones. Como consecuencia, la comunidad inglesa aceptó la sustitución del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz por el de su propagación sucesiva, y emprendió la búsqueda de otros *principios físicos* –que en conjunto con la anterior sustitución– pudiese conducir a una mejora óptima de dichas operaciones.

Resulta interesante en este punto señalar que Isaac Newton (1704/1952) incluyó en la *Óptica* los resultados obtenidos por Rømer con respecto a la propagación sucesiva de la luz. En un primer momento, los menciona en la segunda definición del primer libro al referirse a la refrangibilidad de los rayos de luz. Más adelante, en el segundo libro, cuando está discutiendo el problema de la refracción de la luz, señala que: “*Light is propagated from luminous Bodies in time, and spends about seven or eight Minutes of an Hour in passing from the Sun to the Earth. This was first observed by Roemer, and then by others, by means of the Eclipses of the Satellites of Jupiter*” (Book II, Part III, Prop. XI; el énfasis es del original). A continuación, explica de manera resumida el razonamiento del astrónomo danés con el que éste intentó dar cuenta de la *segunda irregularidad* del primer satélite de Júpiter, a lo que añade:

Some inequalities of time may arise from the Excentricities of the Orbs of the Satellites; but those cannot answer in all the Satellites, and at all times to the Position and Distance of the Earth from the Sun. The mean motions of *Jupiter's* Satellites is also swifter in his descent from his Aphelium to his Perihelium, than in his ascent in the other half of his Orb. But this inequality has no respect to the position of the Earth, and in the three interior Satellites is insensible, as I find by computation from the Theory of their Gravity. (Book II, Part III, Prop. XI; el énfasis es del original)

Teniendo en cuenta la importancia de Newton en el seno de la comunidad científica inglesa, es razonable pensar que la inclusión de los resultados del trabajo de Rømer en su obra contribuyó a la aceptación del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz por parte de dicha comunidad. Lo que es más, resulta valioso apreciar la manera en que el mismo Newton utiliza los resultados de su teoría de la gravitación para respaldar la idea de que la *segunda ecuación* no podía proceder de la excentricidad de las órbitas de los satélites o de cambios de la velocidad en el movimiento orbital de estos. En suma, considero que

este apartado del trabajo newtoniano sintetiza claramente la posición de la comunidad inglesa frente al trabajo del astrónomo danés, y muestra la manera en que ésta intentó argumentar en contra de la idea de la comunidad francesa de que la *segunda ecuación* podía proceder de alguna modificación en los *modelos geométricos* (excentricidad de la órbita) o de algún otro *principio físico* (como el cambio de velocidad del movimiento orbital debido a una causa desconocida).

Todo lo anterior resultará de vital importancia para comprender ciertos aspectos epistémicos del trabajo de mediciones astronómicas de los parámetros de un nuevo movimiento de las estrellas fijas, el cual fue realizado por James Bradley en el siglo XVIII y que será estudiado con profundidad en el siguiente capítulo. En este sentido, el hecho de que Bradley –con Halley⁵³ como uno de sus principales mentores– fuese educado en el marco de las ideas newtonianas y entrenado en el seno de una comunidad que aceptaba la sustitución del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz fue determinante para el desarrollo del contexto de mediciones astronómicas en el que se inserta su trabajo. Aún más, el *cambio conceptual* que se gestó en la discusión de carácter epistémico suscitada por el trabajo del astrónomo danés –*viz.*, pensar el problema de la transmisión de la luz a través del concepto de la *velocidad de la luz* (el cual apareció ya explícitamente en su trabajo)– estuvo en el centro de la manera en que cognitivamente el astrónomo británico concibió los problemas de carácter métrico que afrontó al descubrir un nuevo movimiento de las estrellas fijas, y fue crucial para lograr formular la idea de la *aberración de la luz*.

⁵³ E. Halley fue uno de los primeros en adoptar la *ecuación de la luz* y en criticar abiertamente a G. D. Cassini por su obstinado rechazo de la propagación sucesiva de la luz (cf. Hall, 1978; Débarbat & Wilson, 1989, pp. 154-155).

Capítulo 3

De la medición de un nuevo movimiento de las estrellas fijas a la propagación sucesiva de la luz

El trabajo de James Bradley como *auto-corrección* en las operaciones de medición de las posiciones estelares

All Things therefore being duly compared, it will be reasonable to determine, that Light is propagated from the Sun to the Earth in less than half a Quarter of an Hour: Which Distance, seeing it is determin'd by the best Astronomers to contain somewhat above Eighty Millions of Miles, it gives us occasion to admire, and be even astonish'd at this prodigiously swift Propagation of Light; in comparison of which indeed, all other Things in the World which seem to us the swiftest, are of Right to be esteem'd to be very slow. For the Earth itself, although in its yearly Circumvolution about the Sun, it be mov'd with no small Velocity, yet it reacheth not the Ten-thousandth Part of this Celerity; as would most easily appear by Computation. Unless Demonstration were able to extort and enforce Assent, we might not unreasonably cry out that the Thing is absurd, false, incredible; but being over-born with the Evidence, let us learn to wonder at Light as a certain Miracle of Nature, and from Material Things to erect our Minds, to adore its Infinite Author and Fountain, *who dwells in Light inaccessible*.

(W. Whiston. "Lecture XXI". *Astronomical Lectures*)

3.1. Introducción

En Enero de 1729 se presentó ante la *Royal Society* una carta que James Bradley había enviado al astrónomo real Edmond Halley, en la cual se exponía el descubrimiento de un nuevo movimiento de las estrellas fijas. En dicha comunicación, Bradley no sólo expuso el trabajo astrométrico que llevó al descubrimiento de este nuevo movimiento, sino que argumentaba que en realidad es una divergencia *aparente* de las posiciones *reales* de las estrellas en el firmamento, la cual se debe a un efecto combinado de la *velocidad orbital* de la Tierra y la *velocidad finita de la luz* con que se disciernen las estrellas (Sarton, 1931, §1). Dichas consideraciones le permitieron calcular que la luz tarda 8 minutos y 13 segundos en recorrer una distancia equivalente a la que existe entre el Sol y la Tierra. Su trabajo ha sido considerado, entonces, como la primera evidencia empírica del movimiento de translación

de la Tierra alrededor del Sol (cf. North, 2001, p. 292) y como una *confirmación* de la transmisión en el tiempo de la luz (cf. Cohen, 1940, §28). Como consecuencia del descubrimiento y esclarecimiento de dicho fenómeno –denominado posteriormente como *aberración de la luz* o *aberración estelar*– fue posible una mejora sustantiva en las prácticas de medición y observación astronómica, debido a que sus efectos comenzaron a considerarse –casi inmediatamente– como una *fente de error* en la medición de las posiciones estelares.

Es valioso destacar que –al igual que lo observado en el capítulo anterior en el caso de Ole Rømer– el trabajo de Bradley suele presentarse como una nueva y más exacta medición de la *velocidad de la luz*. Sin embargo, como lo muestran los trabajos historiográficos de C. B. Boyer (1941) y A. Cassini (2015), esto no es más que una suerte de *pseudo-historia* que se fue estableciendo con el pasar de los años. De esta manera, tales autores enfatizan en el hecho de que el trabajo de Bradley contribuyó a establecer la propagación sucesiva de la luz y no pretendía medir la magnitud de su *velocidad*. A pesar de lo anterior –i.e., que el trabajo de Bradley en sentido estricto no es una medición de la *velocidad de la luz*–, dicho trabajo sí se inscribe en un contexto astrométrico de gran precisión (entendiendo la astrometría como la medición de la posición de las estrellas en el firmamento mediante la utilización de instrumentos de observación). Son precisamente las consecuencias epistémicas y cognitivas de estas últimas mediciones las que pretendo estudiar en el presente capítulo.

Partiendo del hecho de que el trabajo de Bradley se inscribe en el contexto de mediciones astronómicas de los parámetros de un movimiento de las estrellas fijas cuya naturaleza física le era desconocida, mi objetivo en este capítulo es mostrar que la afirmación del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz puede ser comprendida de mejor manera a través de la idea de *coherentismo progresivo* desarrollada por H. Chang (2004, 2007) que mediante la noción de *confirmación*. De esta forma, considero que el trabajo astrométrico de Bradley es un ejemplo claro de cómo ciertas prácticas de *medición científica* manifiestan un carácter *auto-correctivo* en su desarrollo histórico. Para tal propósito resultará significativo apreciar que la afirmación de dicho *principio físico* se inserta en el contexto de la práctica astronómica en la que fue entrenado Bradley, la cual aceptaba los resultados métricos obtenidos por Rømer como una nueva etapa [*stage*] en las

operaciones de medición de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano y consideraba pertinente utilizar como punto de partida los *supuestos ontológicos* que el astrónomo danés había afirmado.

En este mismo sentido, será importante observar que el concepto de la *velocidad de la luz* que se comenzó a gestar en el seno de las discusiones epistémicas suscitadas por el trabajo de Rømer fue crucial en la empresa de *dar sentido* a qué tipo de fenómeno físico era este nuevo movimiento de las estrellas fijas. Como consecuencia de las anteriores consideraciones, la idea de la *aberración de la luz* como una *f fuente de error* en la obtención de los *datos observacionales* de las posiciones estelares propició la generación de una nueva etapa [*stage*] en las operaciones de medición de dichas posiciones, la cual tendría un impacto directo en las prácticas de observación y medición astronómica. Con todo esto en mente, en el presente capítulo estudiaré el contexto astrométrico que permitió el descubrimiento de un nuevo movimiento de las estrellas fijas y analizaré el esfuerzo intelectual de Bradley para *dar sentido* a dicho movimiento. Asimismo, examinaré de manera breve el impacto que tuvo el trabajo del astrónomo británico en diferentes prácticas astronómicas.

3.2. Los sectores de Graham, las observaciones de Bradley y la estrella γ Draconis: el descubrimiento de un nuevo movimiento de las estrellas fijas

La detección de la paralaje estelar, esto es, del desplazamiento aparente de las estrellas debido al cambio de posición de la Tierra a lo largo del recorrido de su órbita, fue uno de los principales problemas observacionales astronómicos durante el último tercio del siglo XVII y a lo largo del siglo XVIII. Su detección se consideraba como la evidencia última del movimiento de translación de la Tierra alrededor del Sol y su determinación numérica permitiría determinar la distancia a la cual se encuentran las estrellas. Alrededor de 1670 Robert Hooke observó una variación anual en la posición de la estrella γ Draconis y atribuyó dicho fenómeno a un efecto paraláctico (cf. Sarton, 1931, §3; Stewart, 1964, p. 101; North, 2001, p. 291). En 1725 Samuel Molyneux, George Graham y James Bradley se embarcaron en la empresa de repetir las observaciones de Hooke y establecer si, de hecho,

a través de su experiencia se podía detectar la paralaje estelar⁵⁴. Así, Molyneux encargó a Graham la construcción e instalación de un sector de cenit de 24½ pies en su casa en Kew⁵⁵ y reclutó a Bradley debido a su capacidad para medir distancias angulares muy pequeñas (cf. Fisher, 2010, p. 23). Antes de continuar, resulta valioso destacar la importancia que el mismo Bradley atribuye al altísimo grado de apreciación de los instrumentos construidos por Graham. De esta manera, en la narración que presenta en la carta a Halley sostiene que:

This indeed was chiefly owing to our curious Member, Mr. George Graham, to whom the Lovers of Astronomy are also not a little indebted for several other exact and well-contrived Instruments. The Necessity of such will scarce be disputed by those that have had any Experience in making Astronomical Observations; and the Inconsistency, which is to be met with among different Authors in their Attempts to determine small Angles, particularly the annual Parallax of the fixt stars, may be a sufficient Proof of it to others. [...]

The Success of this Experiment evidently depending very much on the Accurateness of the Instrument that was principally to be taken Care of⁵⁶. (Bradley, 1729/1931, p. 638)

El altísimo grado de apreciación del instrumento de Graham es constatado por J. Fisher (2010), quien a partir de la anotación del diario de trabajo de Molyneux sobre la primera observación del movimiento de γ Draconis realizada por Bradley concluye que: “The extraordinary precision of Bradley’s observations and the remarkable accuracy of Graham’s instrument is evident in Molyneux’s memorandum. Bradley perceived a motion of 0.6” at a time when many observers, and most notably Bradley’s own mentor and correspondent

⁵⁴ J. Fisher (2010) en un cuidadoso estudio historiográfico del trabajo sobre la *aberración de la luz* de Bradley destaca cómo resulta paradójico que un investigador reconocidamente newtoniano como Bradley se haya involucrado en una tarea de confirmar las observaciones de R. Hooke, ya que una paralaje de la magnitud que éste último aseguraba haber encontrado (alrededor de 30”) hubiera resultado contraria al sistema de I. Newton. En este sentido, sugiere que aquél debió ser el objetivo de S. Molyneux y que el involucramiento en tal empresa por parte de Bradley debe comprenderse desde una suerte de desequilibrio en la jerarquía social de la época: “Molyneux was man of great wealth and political influence who had been Bradley’s patron and had gained him a living through his personal connections to the Prince of Wales. In contrast, Bradley had been left in a difficult social and financial position following the sudden demise intestate of his maternal uncle James Pound” (Fisher, 2010, p. 46). De esta manera, J. Fisher concluye que la mención que Bradley hace del objetivo inicial del trabajo como siendo la confirmación del movimiento anual que había detectado R. Hooke es una muestra del estilo retórico utilizado por el mismo Bradley en la presentación de sus resultados.

⁵⁵ Kew es una localidad ubicada al suroeste del centro de Londres (en Inglaterra), la cual en la época en que S. Molyneux, G. Graham y el mismo Bradley realizaron las observaciones de γ Draconis pertenecía al condado de Surrey, pero que en la actualidad pertenece al área denominada como Gran Londres [*Greater London*].

⁵⁶ Para una mejor comprensión de la calidad y precisión del trabajo de G. Graham como constructor de instrumentos se sugiere consultar la semblanza biográfica preparada por E. A. Battison (1981) para el *Dictionary of Scientific Biography*. De igual manera, se sugiere revisar la sección “Los fabricantes de instrumentos” que hace parte del capítulo XIV del libro de J. D. North (2001, pp. 289-295) donde se destaca la importancia que tuvo el desarrollo instrumental en la astronomía del siglo XVIII y donde se estudia el trabajo del mismo G. Graham. Finalmente, una descripción sintética del funcionamiento del sector de cenit construido por G. Graham para S. Molyneux se encuentra en el trabajo de A. Stewart (1964, pp. 101-103).

Halley, did not believe such minute motions could be firmly established” (Fisher, 2010, p. 24; cf. Stewart, 1964, p. 103). Habiendo establecido la importancia del grado de apreciación del instrumento de Graham y habiendo descrito el método de observación que el grupo de trabajo había decidido⁵⁷, Bradley procede a describir la situación en la cual se observó por primera vez el nuevo movimiento en la estrella que habían elegido como objeto de estudio.

De esta manera, tras instalar el sector en Kew hacia finales de Noviembre de 1725, y no esperando ningún movimiento por efecto paraláctico durante esta época, los integrantes del equipo realizaron algunas observaciones los días 3, 5, 11 y 12 de Diciembre con el objetivo de verificar la precisión del instrumento, observaciones en las cuales no se percibió ninguna variación en la declinación de γ Draconis. Sin embargo, motivado por su curiosidad, el día 17 del mismo mes Bradley decide observar nuevamente el paso de la estrella y en su comunicación apunta que:

[...] when having adjusted the Instrument as usual, I perceived that it passed a little more Southerly this Day than when it was observed before. Not suspecting any other Cause of this Appearance, we first concluded, that it was owing to the Uncertainty of the Observations, and that either this or the foregoing were not so exact as we had before supposed; for which Reason we purposed to repeat the Observations again, in order to determine from whence this Difference proceeded; and upon doing it on December 20th, I found that the Star passed still more Southerly than in the former Observations. This sensible Alteration the more surprized us, in that it was the contrary way from what it would have been, had it proceeded from an annual Parallax of the Star. (Bradley, 1729/1931, pp. 639-640)

Como lo evidencia la anterior cita, el grupo de trabajo se mostró perplejo frente a este desplazamiento hacia el sur en la declinación de γ Draconis, especialmente porque ocurría en dirección contraria a lo que se hubiese esperado si se debiera al efecto paraláctico (cf. Stewart, 1964, p. 103). La primera idea que consideró el grupo para dar cuenta del desplazamiento observado fue que se encontraba relacionado con la precisión del instrumento. Así, en los meses posteriores, mientras seguían realizando las mediciones de la posición de su estrella de estudio, continuamente verificaron el correcto funcionamiento del instrumento. De tal suerte, Fisher (2010) sostiene: “Bradley continued to rectify the

⁵⁷ Es valioso señalar que mucho del método observacional que el equipo decidió utilizar estaba basado en el que había sido delineado por R. Hooke (incluso el diseño del instrumento de G. Graham). Ante todo, se decide observar la estrella γ Draconis dado que su paso en las cercanías al cenit posibilitaba reducir los efectos de la refracción y que su brillo permitía realizar tanto observaciones diurnas como nocturnas. Asimismo, para detectar el movimiento de dicha estrella, decidieron registrar si existían variaciones en su declinación (cf. Stewart, 1964, p. 101; Fisher, 2010, p. 23).

instrument, constantly fretting lest the motion be than a consequence of some instrumental or systemic error” (p. 27).

A comienzos del mes de Marzo de 1726 observaron que la estrella estaba 20” más al sur de lo que se encontraba cuando hicieron la primera observación. Durante un breve periodo no detectaron ninguna variación en su declinación hasta que a mediados de Abril observaron que se comenzaba a mover hacia el norte, alcanzando a principios de Junio la misma distancia respecto del cenit que habían registrado en sus primeras observaciones. Tiempo más tarde, observaron como la estrella continuó con su aparente movimiento hacia el norte hasta que en Septiembre registraron un nuevo periodo estacionario –alrededor de 20” más al norte que en Junio y no menos de 39” más al norte que en Marzo– y, posteriormente, detectaron un movimiento hacia el sur hasta que en Diciembre de 1726 alcanzó nuevamente la misma posición inicial con respecto del cenit.

La regularidad en el movimiento de la estrella que se logra apreciar en la anterior descripción, sumada a las constantes rectificaciones y calibración del instrumento, permitió al grupo convencerse gradualmente de que el nuevo movimiento que habían detectado para γ Draconis no estaba asociado con algún problema instrumental (es decir, el conjunto de los *datos observacionales*) y que, de hecho, existía un cierto fenómeno físico. De esta manera, como lo sugiere Fisher (2010), al no tener ningún marco teórico que pudiera dar cuenta de este movimiento, el grupo comenzó a considerar posibles causas o conjeturas. En su comunicación a Halley, Bradley presenta dos causas que por ellos fueron consideradas: la nutación del eje de la Tierra o la refracción ocasionada por el paso de la Tierra a través de un medio denso que afectara la figura de la atmósfera terrestre⁵⁸. Sin embargo, ambas consideraciones fueron eventualmente descartadas por el equipo de trabajo con base en posteriores observaciones. Principalmente, de acuerdo con la conjetura de que el nuevo movimiento se debiera a una nutación, debería ser posible observar un movimiento de las mismas características pero en sentido contrario en una estrella con una declinación similar

⁵⁸ J. Fisher (2010) señala que la consideración de estos dos fenómenos como posibles causas del nuevo movimiento que habían detectado –al igual que una paralaje de la magnitud que había afirmado detectar R. Hooke (cf. n. 54 de este capítulo)– resulta paradójica frente a lo que habría podido sugerir un newtoniano convencido como Bradley (y como G. Graham); ya que de comprobar tales fenómenos, se pondría en riesgo la estabilidad del sistema de I. Newton (en este sentido, vale la pena anotar que aunque este último había sugerido la existencia de una nutación del eje de la Tierra debido a la acción de la Luna, ella sería de una magnitud casi indetectable y no, ciertamente, de una magnitud tan grande como la sugerida por este nuevo movimiento). Por lo tanto, J. Fisher (2010) sugiere, nuevamente, que estas conjeturas probablemente se debieron a S. Molyneux.

a la de γ Draconis pero con una ascensión recta de alrededor de 12 horas de diferencia. Las observaciones correspondientes fueron realizadas en los primeros meses de 1726 para una estrella con tales características (35 Camelopardalis), y aunque se apreció un movimiento similar en el sentido contrario al de γ Draconis, la diferencia entre los desplazamientos para un mismo periodo de tiempo (9.1" para la estrella de estudio y 5" para la estrella de control en un tiempo cercano a un mes) fue suficiente para que el equipo abandonara dicha conjetura.

Alcanzado este punto, y a partir de la comparación de los *datos observacionales* obtenidos para ambas estrellas –tanto la que era su objeto de medición como la de control utilizada en la conjetura de la nutación–, Bradley concibió que un estudio más profundo de tal movimiento requeriría la observación de un mayor número de estrellas, para lo cual el instrumento fabricado e instalado en Kew por Graham era insuficiente. Lo anterior se debía a que dicho instrumento había sido diseñado con el objetivo de observar únicamente γ Draconis, razón por la cual su campo de visión era muy reducido en las cercanías del cenit (tan sólo permitía una variación de 7 u 8 minutos con respecto a éste). De tal suerte, Bradley afirma en su carta a Halley que:

Upon comparing the Observations with each other, it was discovered, that in both the fore-mentioned Stars [γ Draconis y 35 Camelopardalis], the apparent Difference of Declination from the Maxima, was always nearly proportional to the versed Sine of the Sun's Distance from the Equinoctial Points. This was an inducement to think, that the Cause, whatever it was, had some Relation to the Sun's Situation with respect to those Points. But not being able to frame any Hypothesis at that Time, sufficient to solve all the Phaenomena, and being very desirous to search a little farther into this Matter; I began to think of erecting an Instrument for my self at Wansted, that having it always at Hand, I might with the more Ease and Certainty, enquire into the Laws of this new Motion. (Bradley, 1729/1931, p. 642)

El nuevo instrumento (figuras 2 y 3) –elaborado también por Graham– tenía una longitud menor que aquél construido previamente para Molyneux: 12½ pies frente a los 24½ pies del primer sector. Sin embargo, contaba con un altísimo grado de apreciación –alrededor de 0.5"– y fue diseñado de tal forma que permitía observaciones de hasta 6.5° en cada lado del cenit, lo cual posibilitaba a Bradley estudiar poco más de 200 estrellas incluidas en el *British Catalogue*, de las cuales posteriormente se concentró en unas 12 debido a que su magnitud era la adecuada para observaciones tanto diurnas como nocturnas durante todo el año (cf. Bradley, 1729/1931, pp. 643-644; Stewart, 1964, p. 104; Fisher, 2010, pp. 32-38).

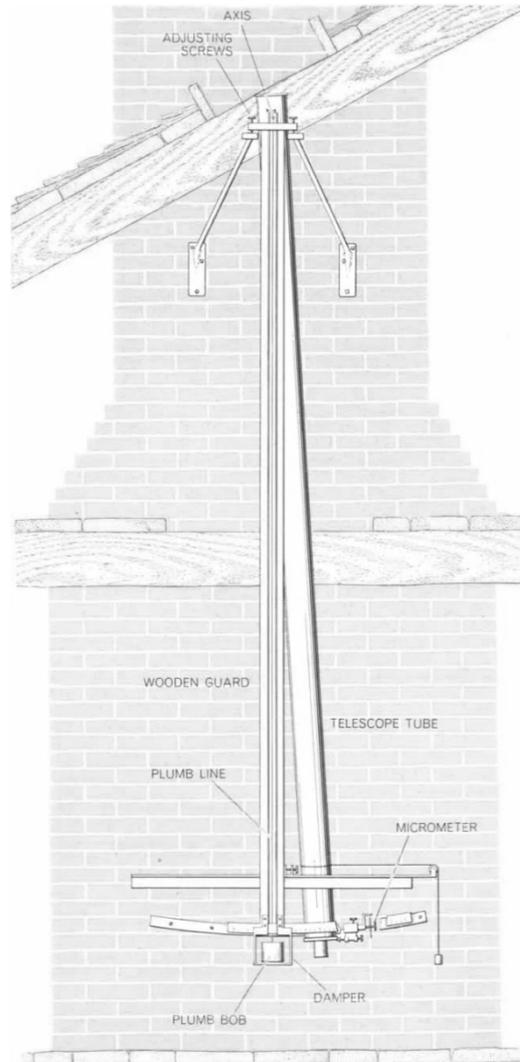


Figura 2

Telescopio de Bradley, instalado en una casa cerca de Londres

Nota: Tomado de A. Stewart, 1964, p. 101

El telescopio cilíndrico de 12.5 pies se mueve en la dirección norte-sur de acuerdo con la posición esperada de la estrella que se va a observar y se sujeta (utilizando los soportes *F* y *G* de la figura 3). El arco inferior (*J* en la figura 3), que se encuentra sujeto al telescopio, contiene las divisiones de los 12.5° –en espacios de $5'$ – sobre los que se puede mover el telescopio. La intersección de la línea de la plomada (*plumb line*) –dirigida siempre al cenit– con dicho arco indica una primera parte de la medición de la posición de la estrella con respecto al cenit. Con el tornillo del micrómetro (*micrometer* en la figura 2, *H* en la figura 3) se ajusta el telescopio hasta que la intersección alcance la marca más cercana sobre el arco. La segunda parte de la medición se obtiene girando el mismo tornillo del micrómetro cuando la estrella entra en el campo de visión del telescopio, el cual desplaza un filamento –orientado en la dirección este-oeste– sobre la imagen. Lo que se busca es desplazar dicho filamento hasta que se encuentra alineado con la estrella. El tornillo está graduado de tal manera que un giro completo suyo corresponde a un segundo de arco de la posición de la estrella. De esta manera, la medición de la posición de la estrella con respecto al cenit se obtiene adicionando (o substrayendo según sea el caso) la marca sobre el arco de metal con el número de giros del tornillo del micrómetro (cf. Pearson, 1829/2013; Stewart, 1964; Fisher, 2010).

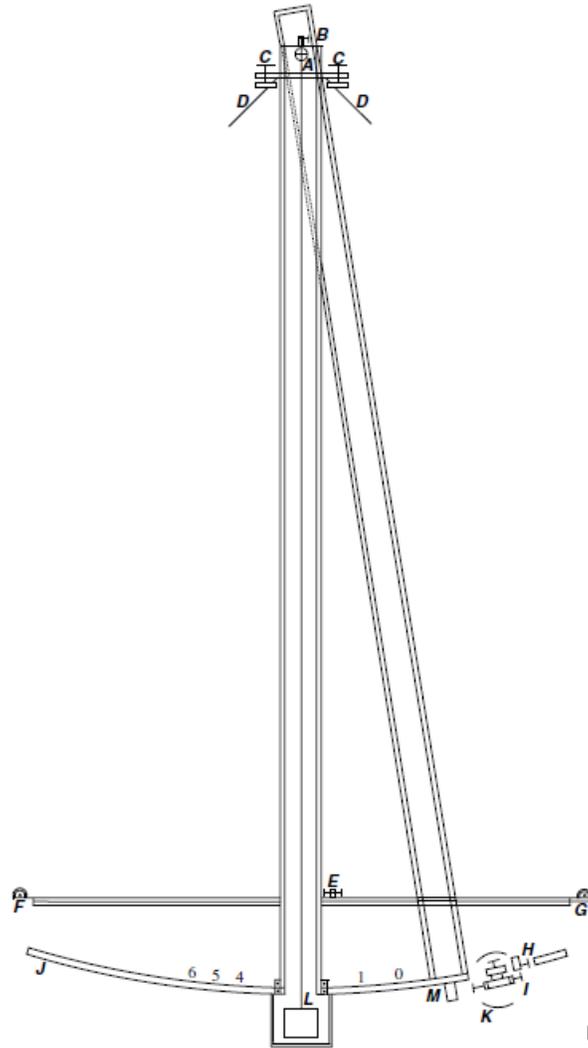


Figura 3

Diagrama del sector de cenit construido por George Graham para James Bradley en Wansted (sin escala)

A: Y sobre la que descansa la plomada; B: tornillo para regular la plomada; C: tornillos de ajuste; D: soportes de hierro; E: tornillo y soporte para asegurar el resguardo de madera a los soportes de metal F, G; F, G: soportes de metal; H: tornillo del micrómetro; I: tornillo para liberar la presión del telescopio del tornillo del micrómetro cuando el instrumento no está en uso; J: soporte trasero sobre el cual se desliza el micrómetro; K: el arco a la derecha del telescopio se encuentra desprendido para mostrar el tornillo del micrómetro; L: peso de la plomada; M: ocular.

Nota: Tomado y traducido de J. Fisher, 2010, p. 33

El nuevo sector de cenit fue instalado el 17 de Agosto de 1727 en la casa de Bradley en Wansted⁵⁹. Fisher (2010) señala que la incorporación del nuevo instrumento cambió de manera significativa el curso de la investigación del nuevo movimiento que el grupo conformado por Molyneux, Graham y Bradley había descubierto. Por lo tanto, resulta significativo citar en toda su extensión la idea por él sugerida:

At Wansted, Bradley entirely changed the character of the investigation. The instrument that Bradley commissioned from Graham was designed with an entirely different objective in mind. The new instrument was designed to allow Bradley to observe many different bright stars, ‘since it gave me an opportunity of making choice of several stars very different both in magnitude and situation; there being more than two hundred inserted in the British Catalogue that may be observed with it’. Instead of dwelling on the search for possible ‘causes’ Bradley now followed his most fundamental presuppositions, for his observations of both γ Draconis and 35 Camelopardalis at Kew suggested that the inexplicable and counterintuitive motions observed were evidence of what he intuited was a general motion by all the stars. *He set out to elucidate the parameters of these motions and then determine the law that explained them.* (Fisher, 2010, pp. 34-35; énfasis añadido)

La anterior cita –en especial el último apartado que ha sido subrayado con cursivas– permite apreciar que a partir del momento de la instalación del nuevo instrumento en Wansted, Bradley se embarcó en un proyecto de medición de diferentes parámetros del nuevo movimiento de las estrellas fijas mediante la medición *directa* de las posiciones de un grupo de estrellas de estudio más amplio a través de dicho instrumento⁶⁰. El objetivo de este proyecto era establecer una relación matemática entre tales parámetros que le posibilitara una comprensión del fenómeno.

Por lo tanto, considero posible afirmar que a partir de que Bradley comenzó a realizar las observaciones con el nuevo instrumento, la investigación para determinar qué tipo de fenómeno físico era el nuevo movimiento de las estrellas se inscribe en un nuevo

⁵⁹ Wansted es una localidad ubicada al noreste del centro de Londres (en Inglaterra), la cual en la época en que G. Graham y Bradley instalaron el nuevo instrumento para estudiar el movimiento de las estrellas fijas que habían descubierto pertenecía al condado de Essex, pero que en la actualidad pertenece al área denominada como Gran Londres [*Greater London*].

⁶⁰ Es importante destacar que en el *esquema de integración cognitiva* de Guillaumin (2015b) el elemento de los *datos observacionales* puede incluir mediciones *directas* realizadas con instrumentos (cf. Preámbulo). Este punto es de crucial importancia para comprender el alcance del trabajo de Bradley, ya que la medición de los parámetros del nuevo movimiento de las estrellas fijas tuvo como objeto central mediciones de las posiciones de las estrellas de un grupo de estudio a través del nuevo instrumento construido por Graham. Algo similar ocurre en el trabajo de Rømer, en el cual la medición del movimiento de los cuerpos del sistema joviano requirió en el conjunto de los *datos* la medición *directa* mediante el uso de relojes del momento en que ocurrían dichos eclipses. Sin embargo, mientras que en el caso del astrónomo danés se consiguió una mejora en la exactitud del cálculo de la ocurrencia de dichos eclipses (*modelos geométricos*), en el del astrónomo británico se obtuvo una mejora en la precisión de las mediciones *directas* de las posiciones estelares (*datos observacionales*).

contexto métrico de la determinación de sus parámetros y el estudio de sus relaciones matemáticas, *i.e.*, de razones y proporciones entre dichos parámetros. Asimismo, resulta significativo señalar que tales mediciones se realizaron sobre un fenómeno físico que hasta ese momento era desconocido para los investigadores. En el marco de este nuevo contexto métrico resulta valioso retomar la descripción que el mismo Bradley (1729/1931) –en su comunicación a Halley– hizo sobre el extenso trabajo de recopilación de *datos observacionales* llevado a cabo en los meses siguientes a la instalación del nuevo sector de cenit. De esta manera, señala que:

[...] I had not been long observing, before I perceived, that the Notion we had before entertained of the Stars being farthest North and South, when the Sun was about the Equinoxes, was only true of those that were near the solstitial Colure: And after I had continued my Observations a few Months, I discovered, what I then had apprehended to be a general Law, observed by all the Stars, viz. That each of them became stationary, or was farthest North or South, when passed over my Zenith at fix of the Clock, either in the Morning or Evening. I perceived likewise, that whatever Situation the Stars were in with respect to the cardinal Points of the Ecliptick, the apparent Motion of every one tended the same Way, when they passed my Instrument about the same Hour of the Day or Night; for they all moved Southward, while they passed in the Day, and Northward in the Night; so that each was farthest North, when it came about Six of the Clock in the Evening, and farthest South, when it came about Six in the Morning.

Though I have since discovered, that the Maxima in most of these Stars do not happen exactly when they come to my Instrument at those Hours, yet not being able at this time to prove the contrary, and supposing that they did, I endeavoured to find out what Proportion the greatest Alteration of Declination in different Stars bore to each other; it being very evident, that they did not all change their Declination equally. I have before taken notice, that it appeared from Mr. Molyneux's Observations, that γ Draconis altered its Declination about twice as much as the fore-mentioned small Star [35 Camelopardalis] almost opposite to it; *but examining the matter more particular, I found that the greatest Alteration of Declination in theses Stars, was as the Sine of the Latitude of each respectively.* This made me suspect that there might be the like Proportion between the Maxima of other Stars; but finding, that the Observations of some of them would not perfectly correspond with such an Hypothesis, and not knowing, whether the small Difference I met with, might not be owing to the Uncertainty and Error of the Observations, I deferred the farther Examination into the Truth of this Hypothesis, till I should be furnished with a Series of Observations made in all Parts of the Year; which might enable me, not only to determine what Errors the Observations are liable to, or how far they may safely be depended upon; but also to judge, whether there had been any sensible Change in the Parts of the Instrument itself. (Bradley, 1729/1931, pp. 644-645; énfasis añadido)

Dos elementos resultan significativos en esta cita de la presentación que Bradley hace de su trabajo. En primera instancia, permite apreciar el tipo de parámetros del movimiento que el astrónomo consideró pertinentes en su investigación, entre los cuales se pueden contar la máxima alteración en la declinación de las estrellas y el momento de su ocurrencia en el año. Lo que es más, como se puede apreciar a partir del apartado subrayado con cursivas, con sólo unos pocos meses de observaciones Bradley había establecido ya que existía una

relación matemática sobresaliente en uno de aquellos parámetros del nuevo movimiento: el máximo cambio en la declinación de una estrella parecía depender del seno de su latitud. Asimismo, intuía que dicha relación podría constituir una clave en la comprensión del fenómeno físico que estudiaba.

No obstante, y esto me lleva al segundo elemento que deseo destacar, se puede apreciar que Bradley consideraba que la obtención de un conjunto de *datos observacionales* de las posiciones de las estrellas de su grupo de estudio durante todo un año era algo necesario antes de establecer con certeza dicha relación matemática y de conjeturar alguna causa para *dar sentido* al nuevo movimiento. Este último elemento es una muestra del cuidadoso trabajo metodológico del astrónomo británico, el cual se refleja también en la constante calibración y verificación de los instrumentos. De esta manera, con el conjunto de *datos observacionales* obtenido entre 1727 y 1728⁶¹, Bradley se convenció cada vez más de que la relación matemática señalada anteriormente era una ley general que se cumplía para todas las estrellas. Con base en dicha relación, Bradley (1729/1931) señala en la carta que:

At last, I conjectured, that all the Phaenomena hitherto mentioned, proceeded from the progressive Motion of Light and the Earth's annual Motion in its Orbit. For I perceived, that, if Light was propagated in Time, the apparent Place of a fixt Object would not be the same when the Eye is at Rest, as when it is moving in any other Direction, than that of the Line passing through the Eye and Object; and that, when the Eye is moving in different Directions, the apparent Place of the Object would be different. (Bradley, 1729/1931, p. 646)

Este punto es crucial en la comprensión del trabajo de Bradley, ya que como se verá más adelante, la introducción de los dos *principios físicos* destacados en la anterior cita, *viz.*, la propagación sucesiva de la luz y el movimiento orbital de la Tierra, fue determinante en la elaboración de un *modelo geométrico* que le permitió comprender de mejor manera el fenómeno físico que estaba tratando de esclarecer –el nuevo movimiento de las estrellas fijas– y calcular sus principales parámetros. Sin embargo, antes de estudiar con mayor profundidad el desarrollo de dicho *modelo geométrico*, considero que resulta significativo detenerse sobre el problema de cómo se puede justificar la afirmación de sendos *principios*,

⁶¹ Se sugiere consultar el trabajo de J. Fisher (2010) quien realiza una presentación sucinta y clara de los parámetros del movimiento obtenidos por Bradley mediante sus observaciones de las estrellas de estudio. De igual forma, J. Fisher (2010, pp. 35-37) al presentar dichos parámetros a través de tablas permite una comprensión de la naturaleza de las relaciones matemáticas que estaba buscando establecer el astrónomo británico.

esto es, considerar la problemática de carácter epistémico implícita en la introducción de dos *principios físicos* que, aunque ampliamente utilizados por la comunidad científica de su época, se encontraban aún en discusión.

3.2.1. La afirmación de los principios físicos de la propagación sucesiva de la luz y el movimiento de translación de la Tierra: una justificación coherentista desde el principio de respeto

En el capítulo anterior se mostró cómo en el cierre del siglo XVII una gran parte de la comunidad científica –principalmente la francesa– consideraba que el *progreso* en las mediciones astronómicas alcanzado por Rømer era insuficiente para justificar la adopción del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz. Asimismo, en el comienzo de este capítulo se señaló que uno de los principales problemas que ocupó a los investigadores de finales del siglo XVII y del siglo XVIII fue el de la detección de una paralaje de las estrellas que se constituyera como *evidencia* última e incontrovertible del movimiento de translación de la Tierra en una órbita alrededor del Sol (cf. Sarton, 1931, §3). De esta manera, resulta claro que, aunque gran parte de la comunidad científica de esta época utilizaba dichos *principios físicos* en sus investigaciones, el problema de su justificación estaba todavía en el centro de las discusiones científicas de la época en que Bradley se encontraba haciendo las mediciones de los parámetros del nuevo movimiento de las estrellas fijas. El mismo Bradley (1729/1931) en varios apartados de la carta que envía a Halley muestra ser consciente de esto. Especialmente, resultan significativas sus palabras al final de la carta a Halley con las que anticipa las posibles críticas de los anti-copernicanos con respecto a las conclusiones de su trabajo:

There appearing therefore after all, no sensible Parallax in the fixt Stars, the Anti-Copernicans have still room on that Account, to object against the Motion of the Earth; and they may have (if they please) a much greater Objection against the Hypothesis, by which I have endeavoured to solve the fore-mentioned Phaenomena; by denying the progressive Motion of Light, as well as that of Earth. (Bradley, 1729/1931, p. 660; énfasis añadido)

De allí resulta claro que aunque Bradley se encontraba convencido de haber medido con éxito los parámetros del nuevo movimiento, y de que el *modelo geométrico* que había

desarrollado lograba dar cuenta de qué tipo de fenómeno físico es este movimiento (lo cual analizaré con detenimiento en la siguiente sección del presente capítulo), también era consciente que la utilización de estos dos *principios físicos* –que aún no habían sido justificados de manera independiente– podría resultar problemática. Considero, no obstante, que estos son precisamente el tipo de cuestionamientos que surgen cuando se piensa la justificación del conocimiento científico en el contexto de la *medición científica* –en este caso de la medición astronómica– desde una perspectiva fundacionista.

Por el contrario, sugiero que si esta situación se piensa desde una postura *coherentista* como la desarrollada por H. Chang (2004) a través de su idea de *iteración epistémica*, se puede obtener una comprensión del porqué Bradley estaba justificado en proceder de la manera en que –de hecho– lo hizo. En este sentido, Chang (2004) sostiene que: “In the framework of coherentism, inquiry must proceed on the basis of *an affirmation of some existing knowledge*. [...] Starting from an existing system of knowledge means building on the achievements of some actual past group of intelligent beings” (p. 224; énfasis añadido). Esta especie de punto de partida propuesto por Chang está basado en lo que denomina un *principio de respeto*, esto es, que en el desarrollo de las *mediciones científicas*, cuando no existe ningún otro sistema de conocimiento que prometa éxito o que lo haya alcanzado, se puede asumir como un punto de partida viable algún sistema que sí prometa éxito, aún si no está justificado –en el sentido en que un fundacionista lo desearía– e, incluso, si existen razones para dudar del mismo. Lo anterior se puede apreciar en la siguiente cita:

The initial affirmation of an existing system of knowledge may be made uncritically, but it can also be made while entertaining a reasonable suspicion that the affirmed system of knowledge is imperfect. The affirmation of a known system is the only option when there is no alternative that is clearly superior. (Chang, 2004, p. 225)

En su trabajo historiográfico sobre Bradley, Fisher (2010) sugiere que aun cuando la introducción de la propagación sucesiva de la luz y del movimiento de translación de la Tierra como elementos determinantes en la elaboración de un *modelo geométrico* que diera cuenta del nuevo movimiento descubierto por su grupo de trabajo puede parecer algo

precipitado y gratuito⁶², se puede obtener una mejor comprensión de su razonamiento si se tiene en cuenta el trabajo que realizó en su juventud –entre 1715 y 1719– sobre los satélites jovianos. En este sentido, sostiene que la afirmación de estos *principios físicos* por parte de Bradley está basada en años de práctica astronómica⁶³ (cf. Fisher, 2010, pp. 38-41).

Vale la pena recordar, como se indicó en el capítulo anterior, que la comunidad inglesa –en su mayoría– había aceptado el trabajo de Rømer como *evidencia* para la sustitución del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz por el de su propagación sucesiva. Precisamente, siendo ésta la tradición investigativa en la cual fue entrenado Bradley –con Halley como uno de sus principales mentores– pienso que es posible afirmar no sólo que Bradley estaba familiarizado con la idea de que la luz requería de tiempo en su transmisión y del movimiento de translación de la Tierra, sino que contaba con la experiencia práctica para juzgar el probable éxito de afirmarlos como puntos de partida en su trabajo. Así, resulta reveladora la siguiente idea del mismo Fisher (2010):

Yet, although he [Bradley] was supremely confident that he had discovered the causes of the motion and determined its parameters, he also recognized that the hypothesis is open to many different objections. *Neither the finite or progressive motion of light nor the motion of the Earth in its orbit have been independently confirmed.* In his account Bradley imputes the motion of the Earth from the supposition that the velocity of light is finite, based on the evidence of his sustained observations of the Jovian system. The progressive motion of light is predicated on the supposition that the Earth is in motion around the Sun based on the development of his ephemerides of the satellites of Jupiter, the variations being caused by the imputed motion of the Earth and Jupiter in their respective orbits around the Sun. (p. 39; énfasis añadido)

Considero que lo anterior es una muestra clara del *principio de respeto* al que se refiere Chang (2004): Bradley estableció como punto de partida estos dos *principios* a pesar de no haber sido confirmados de manera independiente y aun existiendo razones para dudar de su afirmación –como las expresadas por la mayoría de la comunidad francesa.

Con esto en mente, se puede observar con claridad cómo el trabajo astronómico de Bradley corresponde a una tercera fase histórica de la relación entre las mediciones

⁶² Basado en la narración que T. Thomson presenta en la *History of the Royal Society*, S. P. Rigaud –primer biógrafo de Bradley– sugirió que la elaboración de la hipótesis de que el nuevo movimiento de las estrellas fijas se debe al efecto combinado de la propagación sucesiva de la luz y del movimiento de translación de la Tierra se le ocurrió a Bradley durante una fiesta en un bote en el río Támesis al observar el movimiento de la veleta que se encontraba en su mástil (cf. Stewart, 1964, p. 105-106; Fisher, 2010, p. 38). Sin embargo, ninguna referencia de esta historia se encuentra en la correspondencia de Bradley a E. Halley.

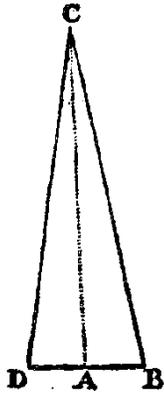
⁶³ Un recuento detallado de las investigaciones que Bradley realizó sobre los satélites de Júpiter en la segunda década del siglo XVIII puede encontrarse en los trabajos de S. Débarbat & C. Wilson (1989, pp. 155-157) y de J. D. North (1989, pp. 208-211).

astronómicas y el desarrollo del conocimiento acerca de la propagación sucesiva de la luz. Dicha fase se generó en gran medida gracias a los resultados métricos obtenidos por Rømer y el *cambio conceptual* gestado en el seno de las discusiones epistémicas suscitadas por su trabajo acerca de cómo justificar el *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz. Estos últimos elementos fueron incorporados por Bradley en su trabajo sobre el nuevo movimiento de las estrellas fijas que había descubierto junto con Molyneux y Graham, ya que le eran familiares debido a su entrenamiento en el seno de la comunidad inglesa, la cual los había incorporado en las operaciones de mediciones astronómicas de los parámetros del movimiento de los cuerpos del sistema joviano.

Sin embargo, vale la pena recordar que la fortaleza de la propuesta coherentista de la *medición científica* de Chang –como él mismo lo reconoce– radica principalmente en un esclarecimiento del *progreso* (cf. Chang, 2007, pp. 2-3). En este sentido, resulta importante no sólo evaluar la pertinencia del *sistema de conocimiento* que se afirma como punto de partida –en este caso los *principios físicos* de la propagación sucesiva de la luz y el movimiento de translación de la Tierra–, sino también el tipo de *progreso* que se obtiene a partir de los mismos. Esto último es lo que me propongo estudiar en el siguiente apartado.

3.3. *La velocidad de la luz y el desarrollo de un modelo geométrico: el trabajo de Bradley como un dar sentido al nuevo movimiento de las estrellas fijas*

Luego de introducir los *principios físicos* de la propagación sucesiva de la luz y del movimiento de translación de la Tierra alrededor del Sol, Bradley (1729/1931) expone en su correspondencia a Halley un *modelo geométrico* con el que considera haber dado cuenta del nuevo movimiento de las estrellas fijas que el grupo de trabajado liderado por Molyneux había descubierto en Kew. Considero relevante citar en toda su extensión la descripción que el mismo Bradley realiza de dicho *modelo*:



I considered this Matter in the following Manner. I imagined CA to be a *Ray of Light*, falling perpendicular upon the Line BD; then if the Eye is at rest at A, the Object must appear in the Direction AC, whether Light be propagated in Time or in an Instant. But if the Eye is moving from B towards A, and Light is propagated in Time, with a *Velocity* that is to the Velocity of the Eye, as CA to BA; the Light moving from C to A, whilst the Eye moves from B to A, *that Particle of it*, by which the Object will be discerned, when the Eye in its Motion comes to A, is at C when the Eye is at B. Joining the points B, C, I supposed the Line CB, to be a Tube (inclined to the Line BD in the Angle DBC) of such a Diameter, as to admit of but one *Particle of Light*; then it was easy to conceive, that the *Particle of Light* at C (by which the Object must be seen when the Eye, as it moves along, arrives at A) would pass through the Tube BC, if it is inclined to BD in the Angle DBC, and accompanies the Eye in its Motion from B to A; and that it could not come to the Eye, placed behind such a Tube, if it had any other Inclination to the Line BD. If instead of supposing CB so small a Tube, we imagine it to be the Axis of a larger; then for the same Reason, the *Particle of Light* at C, could not pass through that Axis unless it is inclined to BD, in the Angle CBD. In like manner, if the Eye moved the contrary way, from D towards A, with the same Velocity; then the Tube must be inclined in the Angle BDC. Although therefore the true or real Place of an Object is perpendicular to the Line in which the Eye is moving, yet the visible Place will not be so, since that, no doubt, must be in the Direction of the Tube; but the Difference between the true and apparent Place will be (*caeteris paribus*) greater or less, according to the different Proportion between the *Velocity of Light* and that of the Eye. So that if we could suppose that Light was propagated in an Instant, then there would be no Difference between the real and visible Place of an Object, altho' the Eye were in Motion, for in that case, AC being infinite with Respect to AB; the Angle ACB (the Difference between the true and visible Place) vanishes. But if Light be propagated in Time (*which I presume will readily be allowed by most of the Philosophers of this Age*) then it is evident from the foregoing Considerations, that there will be always a Difference between the real and visible Place of an Object, unless the Eye is moving either directly towards or from the Object. And in all Cases, the Sine of the Difference between the real and visible Place of the Object, will be to the Sine of the visible Inclination of the Object to the Line in which the Eye is moving, as the Velocity of the Eye to the *Velocity of Light*⁶⁴. (Bradley, 1729/1931, pp. 646-648; énfasis añadido)

En la anterior exposición, Bradley concibió el problema de una manera simplificada: una estrella localizada en la dirección de la línea CA –perpendicular a la línea BD– cuya luz se propaga a través de partículas en esa misma dirección con una velocidad finita –que denominaré *c*. Para esta configuración geométrica consideró tres situaciones posibles, las cuales ilustro mediante la figura 4: una en la que el observador se encontrase en reposo en el punto A, otra en la que el observador se desplazase sobre la línea BD de B hacia A con una cierta velocidad –que llamaré *v*–, y una en la que el observador se desplazase sobre la línea BD de D hacia A con la misma velocidad *v*. Adicionalmente, para las dos últimas

⁶⁴ Para el análisis de la carta que envió Bradley a E. Halley –la cual fue presentada ante la *Royal Society* en Enero de 1729– se ha utilizado la versión que apareció en los *Philosophical Transactions*, y cuyo manuscrito fue incluido en un artículo de G. Sarton (1931) sobre el descubrimiento de la *aberración de la luz*. Una versión adaptada al inglés contemporáneo de este apartado específico se puede consultar en W. F. Magie (1935, pp. 337-340). Allí W. F. Magie adapta únicamente la parte de la carta de Bradley que hace referencia a la propagación sucesiva de la luz y al cálculo del tiempo que le toma en recorrer una distancia equivalente al radio de la órbita terrestre.

situaciones, estableció que la proporción entre las dos velocidades v y c es tal que cuando el observador alcance el punto A desde B (o desde D), la partícula de luz llegará simultáneamente al punto A desde C.

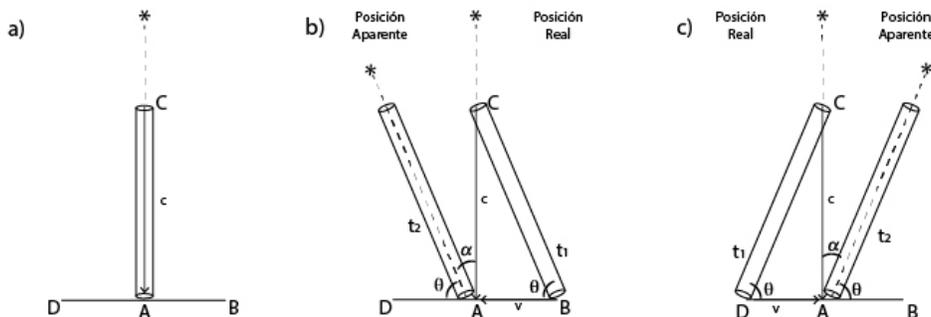


Figura 4

Adaptación del modelo geométrico desarrollado por J. Bradley considerando el concepto de velocidad de la luz (c)

Con esto en mente, en la primera situación la luz de la estrella *parecerá* al observador venir siempre en la dirección de la línea que une al observador con la estrella, esto es, como el observador se encuentra ubicado en reposo en el punto A, apreciará la luz propagándose en la dirección CA. Vale la pena notar que en esta situación ocurriría lo mismo si la luz se transmitiese instantáneamente (cf. figura 4a). Por el contrario, Bradley muestra que algo diferente ha de ocurrir en las restantes situaciones (cf. figura 4b y 4c). En la segunda situación, consideró para un instante t_1 al observador ubicado en el punto B y a la partícula de luz por la que ha de ser discernida la estrella encontrándose en el punto C. Si la línea BC fuera un tubo de un diámetro lo suficientemente pequeño como para permitir el ingreso de una sola partícula de luz, dicho tubo habría de estar inclinado sobre la línea BD en un ángulo θ , el cual depende de la proporción entre las velocidades v y c . Para que la partícula de luz pueda alcanzar al observador en el punto A, el tubo BC debe mantener la misma inclinación θ durante todo su desplazamiento sobre la línea BD. Luego, en el instante t_2 cuando la partícula alcanza al observador en el punto A, debido a la inclinación θ del tubo BC la luz *parecerá* provenir de una posición diferente en la dirección del eje del tubo. Como consecuencia, habrá una diferencia angular α entre la *posición real* de la estrella y la *posición aparente* en la que es apreciada por el observador. Finalmente, algo

similar ocurriría en la tercera situación. No obstante, en los dos últimos casos la luz *parecerá* provenir de una posición diferente –aunque con la misma diferencia angular α – dependiendo de la dirección del movimiento del observador.

De acuerdo con el anterior *modelo geométrico*, el nuevo movimiento de las estrellas fijas es un movimiento *aparente* que resulta de la propagación sucesiva de la luz y del movimiento de translación de la Tierra. En este punto resulta valioso detenerse sobre varios elementos de la exposición del *modelo geométrico* sugerido por Bradley (1729/1931). En primer lugar, debe recordarse el *cambio conceptual* que se señaló en el capítulo anterior al analizar las consideraciones de Christiaan Huygens sobre el trabajo de Rømer, esto es, que el concepto de *velocidad de la luz* comenzó a utilizarse para abordar el problema de si ella se transmite instantáneamente o requiere de tiempo. De esta manera, resulta significativo apreciar que Bradley no sólo afirmó la propagación sucesiva de la luz como punto de partida para elaborar su *modelo geométrico*, sino que utilizó explícitamente el concepto de *velocidad de la luz* en su elaboración.

En consecuencia, el trabajo de Bradley permite valorar la importancia del *cambio conceptual* que ocurrió a finales del siglo XVII, ya que la consideración de dicho concepto por parte del astrónomo británico ayudó a orientar cognitivamente su razonamiento geométrico. Incluso, es valioso apreciar que pese a que Bradley no define de manera específica lo que entiende por *velocidad* y la expresa como una razón entre el tiempo que le toma a la luz en recorrer una distancia fija –el radio de la órbita terrestre–, el *modelo geométrico* que aquí se ha ilustrado contiene algunos elementos básicos de lo que hoy se denomina como *geometría vectorial*, particularmente en lo relativo al uso de la *velocidad* como un vector. Dicha idea es valiosa de destacar porque precisamente pensarlos en esos términos *cuasi-vectoriales* resultó cognitivamente determinante para la realización de los cálculos posteriores y en el desarrollo de la idea de la *aberración de la luz*. En este sentido, el trabajo de Bradley no sólo parte del *cambio conceptual* que se había consolidado hacia finales del siglo XVII en la discusión epistémica alrededor del trabajo de Rømer –i.e., pensar el problema de la propagación en términos de la *velocidad de la luz*–, sino que contribuye a su desarrollo: comienza a concebir dicha *velocidad de la luz* en términos cercanos a los de un vector. En este sentido, el trabajo del astrónomo británico implicó una

suerte de *cambio conceptual*. Sin embargo, más que el desarrollo de un nuevo concepto, dicho *cambio* se puede caracterizar como el crecimiento de uno ya establecido⁶⁵.

En segunda instancia, Bradley afirmó también, como punto de partida, el *principio físico* según el cual la luz se transmite a través de partículas. Este hecho no debe resultar extraño al considerar que el astrónomo británico era un newtoniano convencido (cf. Fisher, 2010). Sin embargo, es valioso destacar que haya introducido un supuesto acerca de qué tipo de fenómeno físico es la luz en relación con su propagación sucesiva⁶⁶. Finalmente, Bradley enfatizó el hecho de que este *modelo geométrico* del problema le permitía dar cuenta de la relación matemática que había establecido a través de las observaciones, *viz.*, que existe una relación entre el máximo desplazamiento de las estrellas hacia el norte o sur con el seno de sus latitudes. Aún más, amplió esta idea al encontrar que dicha relación depende también de la proporción entre la *velocidad de la luz* y la velocidad orbital de la Tierra.

Basándose, entonces, en su *modelo geométrico*, Bradley (1729/1931) –en su carta a Halley– muestra a continuación que si se asume la órbita de la Tierra como una circunferencia (con el objetivo de simplificar los cálculos), una estrella ubicada en el polo de la eclíptica (*i.e.*, de manera perpendicular al plano de la órbita terrestre), parecería describir un movimiento circular alrededor de dicho polo, cuyo radio dependería de la proporción entre la *velocidad de la luz* y la velocidad orbital de la Tierra. También expone que en el caso de estrellas localizadas en diferentes posiciones con respecto a la eclíptica (*i.e.*, con latitudes entre 0 y 90°), ellas parecerían describir un movimiento elíptico. El siguiente paso de Bradley (1729/1931) fue, de acuerdo con las anteriores consideraciones y con los *datos observacionales* obtenidos a lo largo de su investigación, calcular cuál sería el

⁶⁵ Teniendo en cuenta que Bradley había sido formado en el pensamiento newtoniano, considero razonable pensar que el desarrollo del *modelo geométrico* para *dar sentido* a este nuevo movimiento de las estrellas fijas está arraigado en los avances matemáticos y conceptuales alcanzados por I. Newton en los *Principia*. En este sentido, los elementos *cuasi-vectoriales* con que allí se concibe la idea de *velocidad* muy probablemente se derivan del trabajo newtoniano. No obstante, lo que quiero enfatizar es que la incorporación de las ideas newtonianas en el problema de la propagación sucesiva de la luz resultó ser cognitivamente determinante para abordar el problema métrico al que se enfrentaba Bradley.

⁶⁶ En el siglo XIX la relación entre el problema de la *velocidad de la luz* y la determinación acerca de qué tipo de fenómeno físico se volvió cada vez más importante. Incluso, cuando se adoptó la teoría ondulatoria de la luz –entre otras cosas, a raíz de las prácticas métricas de J. B. L. Foucault– una explicación de la *aberración de la luz* en términos ya no de su naturaleza corpuscular –*i.e.*, de partículas– sino ondulatoria se planteó como una necesidad. En esta empresa científica tomaron parte activa investigadores del mundo natural como T. Young, A.-J. Fresnel y G. Stokes.

máximo desplazamiento de las estrellas de su grupo de estudio en el caso de que ellas se encontraran en el polo de la eclíptica. Para ello calculó un valor numérico de entre 40" y 41". Habiendo establecido que este máximo desplazamiento aparente tiene una relación con la proporción entre la *velocidad de la luz* y la velocidad orbital de la Tierra, calculó que esta proporción es de 10210. Dicha proporción le permitió, a su vez, establecer que a la luz le toma alrededor de 8 minutos y 13 segundos en atravesar una distancia equivalente al radio de la órbita terrestre⁶⁷ (cf. Bradley, 1729/1931, pp. 648-656; Stewart, 1964, pp. 106-107). Alcanzado este punto, Bradley destaca que:

It is well known, that Mr. Romer, who first attempted to account for an apparent Inequality in the Times of the Eclipses of Jupiter's Satellites, by the Hypothesis of the progressive Motion of Light, supposed that it spent about 11 Minutes of Time in its Passage from the Sun to us: but it hath since been concluded by others from the like Eclipses, that it is propagated as far in about 7 Minutes. The Velocity of Light therefore deduced from the foregoing Hypothesis, is as it were a Mean betwixt what had at different times been determined from the Eclipses of Jupiter's Satellites.

These different Methods of finding the Velocity of Light thus agreeing in the Result, *we may reasonably conclude, not only that these Phaenomena are owing to the Causes to which they have been ascribed [...].* (Bradley, 1729/1931, p. 653)

Finalmente, Bradley dedica la última parte de su correspondencia a Halley en mostrar la concordancia [*agreement*] que existe entre los parámetros del movimiento aparente calculados a través del *modelo geométrico* que había elaborado y los *datos observacionales* obtenidos con el segundo instrumento construido por Graham. Allí presenta la comparación tan sólo para dos estrellas, *viz.*, γ Draconis y η Ursae Majoris. Al respecto afirma que:

I find upon Examination, that the Hypothesis agrees altogether as exactly with the Observations of this Star [η Ursae Majoris], as the former [γ Draconis]; for in about 50 that were made of it in a Year, I do not meet with a Difference of so much as 2", except in one, which is mark'd as doubtful on Account of the Undulation of the Air, &c. And this does not differ 3" from the Hypothesis. (Bradley, 1729/1931, pp. 658-659)

Con todo lo que ha sido presentado en esta sección, considero que estas dos últimas citas de la carta de Bradley (1729/1931) pueden interpretarse como muestras de que su trabajo de mediciones astronómicas de los parámetros del nuevo movimiento de las estrellas fijas alcanzó un grado óptimo de *integración cognitiva* en el sentido propuesto por G.

⁶⁷ Aunque Bradley (1729/1931) no presenta de manera detallada los cálculos con los que obtiene este valor numérico, se sugiere consultar el trabajo de S. R. Filonovich (1986, pp. 58-60), quien presenta una reconstrucción de la manera en que es posible que lo haya calculado.

Guillaumin (2015a, 2015b). De esta manera, se puede apreciar en este punto que dichas citas indican un grado óptimo de *retroalimentación positiva* entre el *modelo geométrico* elaborado y los *datos observacionales* de posiciones estelares obtenidos durante aproximadamente tres años de trabajo con los instrumentos construidos por Graham. Inclusive, Bradley (1729/1931) indica que su empresa de medición no sólo concuerda con los *datos* obtenidos por él mismo, sino con los obtenidos por Rømer y otros astrónomos (e.g., Halley) en lo concerniente con el tiempo que le toma a la luz en recorrer una distancia equivalente al radio de la órbita terrestre.

3.3.1. La aberración de la luz: la idea de progreso en la medición astronómica de las posiciones de las estrellas

En la sección anterior se mostró cómo fue que Bradley, con la afirmación de los *principios físicos* de la propagación sucesiva de la luz y el movimiento de translación de la Tierra, desarrolló un *modelo geométrico* que le permitió alcanzar un grado óptimo de *integración cognitiva* en las operaciones de medición de los parámetros del nuevo movimiento de las estrellas fijas que él mismo había descubierto junto con Molyneux y Graham. Con esto en mente argumentó que las posiciones de las estrellas en el firmamento, cuando son observadas desde la Tierra, no corresponden a la *posición real*, sino que existe una pequeña divergencia *aparente* –de un valor máximo de alrededor de 40”– como consecuencia del efecto combinado del cambio constante de la *velocidad orbital* de la Tierra –no sólo en su magnitud sino también en su dirección– y de la *velocidad de la luz*. Como consecuencia, en los años posteriores a la presentación de su descubrimiento ante la *Royal Society*, la consideración de dicho fenómeno –que hoy tiene el nombre de *aberración de la luz* o *aberración estelar*⁶⁸– tomó cada vez más importancia en las prácticas de medición de las

⁶⁸ Este movimiento aparente de las estrellas fijas es lo que hoy en día se conoce bajo el nombre de *aberración de la luz* o *aberración estelar*. J. Fisher (2010) muestra que en los años posteriores a la publicación de su carta a E. Halley, Bradley tuvo dificultad en establecer un nombre apropiado para dicho fenómeno. Al principio intentó llamarlo *paralaje debido al movimiento de la luz* pero tal nombre se prestaba a confusiones, ya que – estrictamente hablando– no se debe a ninguna forma de paralaje y la comunidad científica tendía a confundirlo con la paralaje estelar. El nombre de *aberración* lo adaptó del trabajo del astrónomo italiano E. Manfredi, quien de manera paralela a Bradley e inmerso en un marco anti-copernicano, investigó este nuevo movimiento con el objetivo de probar que no correspondía a la paralaje estelar. Aunque E. Manfredi había estudiado este movimiento anual en algunas estrellas, no creía que fuera un fenómeno presente en todas ellas. Por lo tanto, lo consideró una *aberración* de unas cuantas estrellas (de allí su nombre).

posiciones estelares⁶⁹, *i.e.*, en la astrometría. Así, resultan significativas las palabras de M. Haskin (1978) al valorar el trabajo de Bradley:

[...] he gave physical proof of the motion of the Earth around the Sun, and he derived the excellent value of 8 minutes 13 seconds as the time light takes to reach us from the Sun. *But the discovery of aberration itself was of outstanding importance in that it revealed a major source of error in measurements of the positions of stars.* (p. 239; énfasis añadido)

La anterior cita permite apreciar que lo que el grupo de trabajo liderado por Molyneux había considerado como un nuevo movimiento de las estrellas fijas era en realidad la expresión de un *error* en la medición de las posiciones estelares, el cual, debido a su pequeña magnitud, sólo comenzó a ser percibido mediante la utilización de instrumentos astronómicos con un altísimo grado de apreciación –como los sectores de cenit construidos por Graham– que permitían obtener *datos observacionales* de dichas posiciones en el orden de la fracción de segundos. En otras palabras, Bradley argumentaba que en las operaciones de medición de las posiciones de las estrellas, la obtención de los *datos observacionales* se encuentra sometida a una *f fuente de error* que no se relaciona con el funcionamiento de los instrumentos astronómicos, sino con el hecho de que ellos se mueven junto con la Tierra en una órbita alrededor del Sol a lo que se le suma que la luz con que se disciernen las estrellas posee una *velocidad finita*.

En consecuencia, el *modelo geométrico* desarrollado en la medición de los parámetros de dicho *movimiento aparente* resultó ser una herramienta metodológica para corregir tal *error* en las operaciones de medición de las posiciones estelares. Con todo esto en mente, considero que es posible apreciar que a partir de la medición de los parámetros de un supuesto nuevo movimiento de las estrellas fijas, utilizando las operaciones astrométricas características de su época y afirmando los *principios físicos* de la propagación sucesiva de la luz y el movimiento de translación de la Tierra, Bradley alcanzó una nueva etapa [*stage*] en dichas operaciones de medición. Frente a esta última idea, resultan iluminadoras las siguientes palabras de A. Stewart (1964): “[...] Bradley’s work set a new standard for precision in astronomical observation, thereby producing a great stimulus for further *accurate measurements* of the stars” (p. 108; énfasis añadido).

⁶⁹ Este hecho se puede apreciar en la carta que le envió P.-L. Maupertuis a Bradley en 1737 solicitándole la información disponible sobre la *aberración* de dos estrellas (α y δ Draconis) y cuestionándolo acerca de si en sus observaciones había aplicado las correcciones pertinentes de manera adecuada (cf. Fisher, 2010, p. 45).

La anterior cita revela que la herramienta metodológica desarrollada por Bradley posibilitó un incremento en la precisión de las mediciones *directas* de las posiciones estelares. Por lo tanto, de manera similar a lo sucedido en el caso de Rømer estudiado en el capítulo anterior, considero que es posible afirmar que el trabajo de Bradley resultó en una mejora [*enhancement*] significativa de la *virtud epistémica* de la precisión [*precision*] en la obtención de *datos observacionales*. Como resultado, la nueva etapa [*stage*] en las operaciones de medición de las posiciones estelares generada por el trabajo de Bradley llevó a un *progreso* en las prácticas de medición y observación astronómica en el sentido propuesto por Chang (2004).

3.4. A manera de conclusión: midiendo un nuevo movimiento de las estrellas, afirmando la propagación sucesiva de la luz, mejorando las mediciones astronómicas

A lo largo de todo este capítulo se pudo apreciar que analíticamente es posible dividir en tres momentos el trabajo de Bradley que condujo a la formación de la idea de la *aberración de la luz*. El primer momento corresponde al descubrimiento de un nuevo movimiento de las estrellas fijas –por parte del grupo de trabajo conformado por Molyneux, Graham y Bradley– como resultado de una serie de mediciones de la posición de γ Draconis, las cuales tenían como objetivo establecer si una serie de observaciones realizadas previamente por Hooke –alrededor del año 1670– correspondían al efecto de la paralaje estelar. La construcción por parte de Graham de un sector de cenit con un altísimo grado de apreciación –el cual permitía la detección de variaciones de hasta medio segundo de arco en la posición de dicha estrella– fue determinante para la realización de tales mediciones.

Un segundo momento corresponde al esfuerzo intelectual emprendido por Bradley para *dar sentido* a este nuevo movimiento. Con este objetivo en mente, Bradley consideró que era necesario llevar a cabo un cuidadoso proyecto de medición de los parámetros de dicho movimiento para un grupo de estrellas más extenso. De tal forma, fue necesaria la construcción de un nuevo sector de cenit que mantuviese –o mejorase– el grado de apreciación del primer instrumento pero que posibilitase el estudio de un área más extensa del firmamento. Utilizando dicho instrumento, el astrónomo británico llevó a cabo una

cuidadosa recolección de *datos observacionales* de las posiciones de dichas estrellas durante un año completo.

Finalmente, un último momento corresponde a la elaboración de un *modelo geométrico* que posibilite calcular los parámetros del nuevo movimiento de las estrellas fijas y que diese cuenta de los *datos observacionales* recogidos durante ese periodo. Basado en la agenda investigativa de la práctica astronómica en la cual fue entrenado Bradley –la cual aceptaba los resultados del trabajo astronómico de Rømer y sus *supuestos ontológicos*–, el astrónomo británico afirmó los *principios físicos* de la propagación sucesiva y del movimiento de traslación de la Tierra como punto de partida para la elaboración de dicho *modelo geométrico*. Asimismo, se pudo apreciar con claridad que el astrónomo británico concibió cognitivamente el problema en términos de los conceptos de la *velocidad de la luz* y de la *velocidad orbital* de la Tierra, integrándolos a su razonamiento geométrico en términos muy cercanos a lo que hoy en día se concibe como geometría vectorial.

Habiendo alcanzado un grado óptimo de integración entre los *datos observacionales* recogidos durante un periodo cercano a los tres años utilizando los instrumentos construidos por Graham, el *modelo geométrico* que desarrolló para calcular los parámetros de este nuevo movimiento y el conjunto de sus *supuestos ontológicos* –entre los que destacaba la afirmación de los *principios físicos* de la propagación sucesiva de la luz y del movimiento de traslación de la Tierra–, Bradley argumentó que este nuevo movimiento era en realidad la manifestación de una *divergencia aparente* de las posiciones de las estrellas debida al efecto combinado de la *velocidad finita de la luz* que proviene de las estrellas y de la *velocidad orbital* de la Tierra. En consecuencia, tal divergencia era una *f fuente de error* de una magnitud tan pequeña que sólo podía ser detectada mediante la utilización de instrumentos con un alto grado de apreciación, la cual no dependía del funcionamiento de los instrumentos astronómicos sino del hecho de que ellos se desplazan junto con la Tierra en su movimiento de traslación alrededor del Sol.

Teniendo en cuenta que el *modelo geométrico* de Bradley permitía el cálculo de los parámetros de este movimiento aparente, dicho *modelo* se incorporó como una herramienta metodológica que permitía calcular cuál es la *posición real* de las estrellas al ser observadas y aumentar la precisión en la medición de la posición de éstas. En este sentido, el caso de

estudio histórico de Bradley revela que todo un trabajo cuidadoso de medición de posiciones estelares le permitió tanto la identificación de una *fuerza de error* en la medición de dichas posiciones –hasta ese momento desconocida– así como el desarrollo de una herramienta para su *corrección*. Con todo lo anterior en mente, considero que es posible afirmar que la astrometría –caracterizada como la medición de las posiciones estelares mediante instrumentos de observación– revela a través del trabajo de Bradley su carácter *auto-correctivo*.

La idea del *coherentismo progresivo* de Chang (2004) sugiere una forma de comprender el problema epistémico de la justificación del conocimiento científico sin necesidad de apelar a un fundamento último e indubitable, esto es, por fuera del contexto del fundacionismo. En su lugar, propone que en ciertos casos específicos del conocimiento generado a través de las prácticas de *medición científica*, el problema de su justificación se encuentra ligado al problema del *progreso*. De esta manera, tanto la *coherencia interna* como las *mejoras* que se desarrollan frente a etapas [*stages*] precedentes en las operaciones de medición de un determinado fenómeno son elementos que respaldan de manera retrospectiva la confianza depositada en ciertos *sistemas de conocimiento* o *supuestos ontológicos*.

Como se puede apreciar en las palabras con que Bradley concluye su carta a Halley, el astrónomo británico era consciente de que su trabajo no ofrecía el tipo de *evidencia empírica* que la comunidad científica de su época pedía para justificar la afirmación de los *principios físicos* de la propagación sucesiva de la luz o del movimiento de translación de la Tierra. En su lugar, el rápido atrincheramiento de la herramienta metodológica para corregir las mediciones de las posiciones estelares en las prácticas astronómicas de la comunidad científica de aquella época, y el impacto que ello tuvo en dichas prácticas –sumado a los logros también obtenidos por Rømer años atrás– contribuyó a aumentar la confianza depositada en tales *principios físicos* de manera retrospectiva. Considero entonces que la práctica astrométrica de Bradley más que ser comprendida como una *confirmación* de la propagación sucesiva de la luz, debe ser apreciada como un ejemplo claro de *coherentismo progresivo*. En otras palabras, deseo sugerir que Bradley más que proveer un fundamento último e incontrovertible de la propagación sucesiva de la luz, desarrolló elementos cognitivos y metodológicos que ayudaron a aumentar la confianza en esta pieza [*item*]

particular de conocimiento científico y que fomentaron su adopción dentro de la comunidad científica.

Finalmente, considero valioso destacar dos elementos cognitivos sobresalientes en el trabajo de Bradley. Por un lado, la utilización del concepto de *velocidad de la luz* para abordar el problema de su transmisión reveló un crecimiento frente al mismo concepto que se había gestado en las discusiones epistémicas de finales del siglo XVII. En este sentido, se pudo apreciar que su caracterización *cuasi-vectorial* fue determinante cognitivamente para la elaboración de un *modelo geométrico* que le permitiese calcular los parámetros de dicho movimiento y que, a la postre, se consolidaría como una herramienta metodológica para la corrección de la medición de las posiciones estelares. Por otro, enfrentado a un nuevo movimiento de las estrellas fijas que no era aprehensible mediante ningún marco teórico disponible en aquella época, la manera en cognitivamente Bradley decidió abordar el problema fue la de medir en primera instancia sus parámetros. Desde esta perspectiva, su proceder no fue el de primero establecer teóricamente que tipo de fenómeno físico era dicho movimiento para luego someterlo a un análisis métrico, sino que la realización de una serie de mediciones cuidadosas de sus parámetros fue lo que le permitió comprender su naturaleza. Este último elemento contribuye de manera significativa a apreciar el modo en que las prácticas de *medición científica* posibilitan la producción de nuevo conocimiento científico.

Conclusión General

[...] sometimes an observer, attributing too much to his own diligence and carefulness that he had applied among the things to be observed, and supposing the place of the celestial body to be known with complete precision, throws the demonstration into difficulty: the nature of light, beset by the inconsistency of optical causes, does not always allow such precision of instruments.

(J. Kepler. *Optics*)

En la presentación del *panorama histórico* en el que se introduce esta investigación se indicó que Kepler, a comienzos del siglo XVII, consideró que la *óptica* debía ser una parte fundamental de la *astronomía*, en la medida en que era relevante conocer los *errores* que la naturaleza de la luz podía ocasionar en las *mediciones astronómicas*. Como consecuencia, se argumentó allí que la *astronomía* sufrió una transformación metodológica sustantiva en la que tanto la naturaleza de la luz, el medio en el que ella se desplaza, los instrumentos que permiten su recolección y el ojo humano comenzaron a ser concebidos como una *f fuente de error* considerable en la obtención de *datos observacionales*. Precisamente, considero que este entramado metodológico entre la *óptica* y la *astronomía* revelado por Kepler es la clave para dar respuesta a la pregunta que ha motivado la presente investigación, *viz.*, ¿cómo durante el siglo XVII y hasta mediados del XVIII ciertas *mediciones astronómicas* generaron conocimiento en el ámbito de la *óptica*?

Pensado desde el *esquema de integración cognitiva*, la consideración de la *óptica* como parte central de las prácticas de *medición astronómica* hizo necesario que en los *supuestos ontológicos* no sólo se incluyeran *principios físicos* acerca de las causas del movimiento de los cuerpos celestes, sino también *principios* concernientes con la naturaleza de la luz. Por lo tanto, como parte de una larga tradición aristotélica, uno de los *principios* afirmados en esta *nueva parte óptica de la astronomía* fue el de la transmisión instantánea de la luz. Inclusive, vale la pena recordar que el mismo Kepler en la *Óptica* argumentó –mediante razones de carácter metafísico– que siendo la luz inmaterial, su propagación toma lugar en un instante y no en el tiempo (cf. Kepler, 1604/2001, Cap. I, Prop. 5; Cohen, 1940, §6).

No obstante, tres décadas más tarde, el desarrollo de diferentes tradiciones experimentales de investigación del mundo natural generó una *crisis epistemológica* en el problema de cómo se debe justificar dicho *principio físico* –en cuyo seno se encuentran los trabajos de Galileo y Descartes–, al considerar que el problema de si la luz se transmite instantáneamente o requiere de tiempo debería someterse al juicio de la experiencia. Aunque una respuesta de carácter experimental que satisficiera los criterios que allí se estaban estableciendo tardó más de dos siglos en obtenerse –con el trabajo de Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (Francia, 1819-1896) en 1849–, el hecho de que se hubiese cuestionado la manera en que tradicionalmente se justificaba el *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz fue una motivación sustantiva para que los astrónomos de la segunda mitad del siglo XVII, enfrentados a nuevos problemas de exactitud y precisión en las prácticas de *medición astronómica*, reconsideraran la relación metodológica entre *óptica* y *astronomía* que había anunciado Kepler a comienzos de la centuria, y pensaran que la sustitución del *principio físico* de la transmisión instantánea de la luz podría suscitar algunas claves para la solución de sus dificultades.

Aun existiendo razones considerables para dudar del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz, Ole Christensen Rømer y James Bradley decidieron afirmar *sistemas de conocimiento* que incluyeran dicho *principio físico* como punto de partida en los contextos de *medición astronómica* en que se encontraban trabajando y explorar los resultados métricos a los que ello podría conducir. En el caso del astrónomo danés, el fruto recogido de dicha elección fue el desarrollo de una nueva herramienta metodológica, la *ecuación de la luz*, la cual le permitió obtener un incremento en la exactitud de los cálculos de la ocurrencia de los eclipses del primer satélite de Júpiter. En el caso del astrónomo británico, el fruto recogido fue el descubrimiento de una *f fuente de error* en la práctica astrométrica que hasta ese momento había sido desconocida, la *aberración de la luz*, y el desarrollo de una herramienta metodológica que permitía su corrección, situación que derivó en un incremento en la precisión en la obtención de *datos observacionales* de las posiciones estelares.

En la “Introducción General” del presente trabajo de grado se indicó que una de las principales características de la idea de *práctica* es concebir que el conocimiento científico no se limita únicamente al conocimiento de carácter teórico, sino que existen diversas

formas de conocimiento o *saberes* involucrados en las diferentes prácticas científicas. Aún más, se estableció que el conocimiento científico es una concatenación de estos múltiples *saberes*. Con esta idea en mente, es posible observar que en el caso de las prácticas de *medición astronómica* estudiadas a lo largo de esta investigación fue precisamente el crecimiento del *conocimiento metodológico* involucrado en dichas prácticas el que contribuyó al desarrollo posterior de conocimiento de carácter teórico sobre el fenómeno físico de la luz.

En el momento en que cada uno de estos dos investigadores del mundo natural decidió afirmar el *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz como punto de partida para abordar los problemas métricos que enfrentaban, *no había* forma de saber de antemano el impacto que dicha decisión tendría sobre los respectivos contextos métricos en que sus trabajos se encontraban inmersos. Sin embargo, al considerarlos de manera retrospectiva, es razonable afirmar que en ambos casos el impacto fue tal que propiciaron un *progreso* en las prácticas de *medición astronómica* –entendido en la manera en que lo hace H. Chang– mediante el desarrollo de un nuevo *conocimiento metodológico* que se localiza en la relación entre la *óptica* y la *astronomía*. La posterior aplicación de este *conocimiento metodológico* en las prácticas de *medición astronómica* derivó en una optimización tanto de su precisión como de su exactitud. De igual forma, esta optimización de las prácticas de *medición astronómica* contribuyó al *robustecimiento* del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz, y a su posterior *atrincheramiento* en la práctica científica que le sucedió a Rømer y Bradley.

Considero que lo anterior refleja una forma de *co-robustecimiento*⁷⁰ entre las prácticas de *medición científica* y el conocimiento teórico. En este sentido, la afirmación del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz contribuyó al *robustecimiento* de las prácticas de *medición astronómica*, al permitir el desarrollo de herramientas metodológicas que derivaron en un incremento en la precisión y la exactitud de dichas

⁷⁰ La idea de *robustecimiento de los logros científicos*, desarrollada originalmente por W. C. Wimsatt, ha tenido un renovado interés en la *filosofía de la 'Ciencia en Práctica'*. La manera en que tradicionalmente se ha comprendido la noción de *robustez* se puede expresar de la siguiente manera: “X is robust = X remains invariant under a multiplicity of (at least partially) independent derivations” (Soler, 2012, p. 3). Sin embargo, literatura reciente ha indagado en la naturaleza tanto de lo que puede ocupar el lugar de X en esta proposición como del grado de *fortaleza* o *solidez* que deben tener las múltiples derivaciones (cf. Soler, 2012, secc. 7). En este sentido, se ha argumentado que ciertas *prácticas científicas* revelan una forma de *co-robustecimiento* o *co-estabilización* en las que mediante diversos procesos dinámicos se robustecen tanto X como las derivaciones.

prácticas. A su vez, el fortalecimiento que alcanzaron estas prácticas posibilitó el *robustecimiento* del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz. Esto último contribuyó, igualmente, a que la propagación sucesiva de la luz fuera incorporada en las investigaciones de carácter óptico que se llevaron a cabo a lo largo de los siglos XVIII y XIX. En este sentido, pienso que es razonable concluir que la propagación sucesiva de la luz, como conocimiento teórico acerca de este fenómeno físico, *emerge* en el desarrollo de nuevo *conocimiento metodológico* relevante para las prácticas de *medición astronómica*.

Sin embargo, este entramado metodológico de *óptica* y *astronomía* no sólo permite comprender epistémicamente la manera en que se justificó la adopción de dicho *principio físico* en el seno de la *óptica*. Como se pudo apreciar a lo largo de todo este trabajo, las prácticas de *medición astronómica* aquí estudiadas fueron un espacio propicio para la creación de nuevos *conceptos*, y el crecimiento de algunos ya establecidos, con los cuales abordar y pensar problemas relacionados con el fenómeno físico de la luz. Particularmente, el concepto de *velocidad de la luz* sobre el cual Galileo Galilei preguntaba en sus *Discorsi* cómo debería pensarse su naturaleza y cuán grande era (a lo que respondió cualitativamente que si no era instantánea debería ser *velocísima*, y lo pensó mediante los conceptos de distancia y duración), no es el mismo concepto de *velocidad de la luz* de Christiaan Huygens en el que su determinación numérica no sólo comienza a ser un elemento central sino que debe mostrarse también cómo es qué puede ser razonablemente pensado (a lo que afirmó que ciertamente siendo una *velocidad extraña* puede ser razonablemente pensada), ni es el mismo concepto de *velocidad de la luz* con características *cuasi-vectoriales* que empleó James Bradley en su razonamiento geométrico. Con esto en mente, los problemas métricos que enfrentó la *astronomía* durante esta época, y las discusiones epistémicas que se generaron en su interior, posibilitaron el crecimiento del concepto de *velocidad de la luz* mediante la adición de nuevas características y su continua depuración. El entramado metodológico entre *astronomía* y *óptica* permitió, entonces, aumentar y optimizar el arsenal conceptual con que cognitivamente esta última disciplina piensa y aborda el fenómeno físico de la luz.

Lo anterior refleja el porqué de la afirmación de L. Wittgenstein que se utilizó como epígrafe de este trabajo de grado. En este sentido, siguiendo al pensador austriaco considero que es válido afirmar que no se aprendió a ‘determinar la *velocidad de la luz*’ conociendo

con anterioridad lo que es la *velocidad de la luz*, sino que se fue aprendiendo lo que es la *velocidad de la luz* en la medida en que fue aprendiendo a ‘determinar la *velocidad de la luz*’. Ciertamente, a lo largo de este estudio se ha hecho énfasis continuamente en que las prácticas métricas tanto de Rømer como de Bradley no son de ninguna manera mediciones de la *velocidad de la luz*. Sin embargo, teniendo en cuenta todo lo expuesto en esta investigación, considero que sus prácticas de *medición astronómica* –vistas desde la amplia perspectiva de la *medición científica* aquí desarrollada– constituyeron un largo proceso de aprendizaje para la ciencia de lo que es *determinar la velocidad de la luz*, ya que a través de ellas se desarrolló el andamiaje epistémico, cognitivo y metodológico con el cual se construirían las prácticas de *medición científica* con que se buscaría determinar su *magnitud* durante los siglos XIX y XX.

Al mismo tiempo, las prácticas de *medición astronómica* en que participaron Rømer y Bradley posibilitaron desarrollar una mejor comprensión de lo que es la *velocidad de la luz*. Incluso, es posible afirmar que ellas contribuyeron a entender de manera más detallada las nociones de *concepto* y *magnitud* de la *velocidad*, las cuales han desempeñado siempre un papel central en la historia de la ciencia (particularmente en la historia de la física). Entre otras cosas, permitieron a los científicos aprender que hay en el mundo natural velocidades más grandes de lo que sus pioneros pudieron alguna vez imaginar.

Con lo anterior en mente, la realización de esta investigación me ha permitido apreciar que tanto en la filosofía como en la historia de la ciencia es necesario un estudio más amplio y detallado de la manera en que las prácticas de *medición científica* de los siglos XIX y XX –no sólo para determinar la *magnitud* de la *velocidad de la luz*, sino de muchos otros fenómenos físicos– contribuyeron al crecimiento del conocimiento científico acerca del fenómeno físico de la luz y de su velocidad. En consecuencia, considero que las ideas y los argumentos presentados en este trabajo de grado se constituyen como un primer paso dirigido hacia tal propósito, y espero que su lectura llegue a ser una invitación para que se den muchos pasos más en esta misma dirección.

Finalmente, me gustaría concluir presentando una breve reflexión meta-histórica acerca de las dos perspectivas acerca de la *medición científica* que me han acompañado durante la realización de esta investigación. H. Chang (2007) señala que sus estudios históricos han mostrado la aplicabilidad de su idea de *iteración epistémica* en la

comprensión de ciertos episodios de la termometría (Chang, 2004) y del análisis químico (Chang, 2007, Secc. 4). Adicionalmente, otros breves estudios en los que ha participado le han permitido vislumbrar que esta misma idea puede aplicarse también en la comprensión de prácticas de medición de otros fenómenos (*e.g.*, el tiempo, la presión, la distancia, el peso, la fuerza, la luminosidad y la carga eléctrica; cf. Chang, 2007, p. 19). Considero que los casos de estudio de Rømer y Bradley presentados a lo largo de este estudio permiten apreciar que la idea coherentista de la *iteración epistémica* arroja también ciertas luces en la comprensión de la práctica de la *medición astronómica*. Por su parte, G. Guillaumin (2012, 2015a, 2015b) indica que su idea de *integración cognitiva* permite un entendimiento claro de las prácticas de medición en la *astronomía* desde la antigüedad griega hasta Kepler. Pienso asimismo que tanto los casos de estudio de Rømer como de Bradley ponen en evidencia que la idea de *integración cognitiva* permite un esclarecimiento de las prácticas de *medición astronómica* en ciertos episodios históricos posteriores a la astronomía kepleriana.

En este mismo orden de ideas, sugiero que, por lo menos en el caso específico de la *medición astronómica*, ambas perspectivas –la de Chang y la de Guillaumin– resultan complementarias. De tal forma, mientras que la perspectiva del *coherentismo progresivo* respaldada por la noción de *iteración epistémica* permitió una comprensión clara de cómo las *mejoras* obtenidas en las operaciones particulares de *medición astronómica* que aquí se estudiaron justificaron retrospectivamente la integración del *principio físico* de la propagación sucesiva de la luz en el seno de la *óptica*, el *esquema de integración cognitiva* posibilitó una comprensión más detallada del tipo de problemas que se enfrentaron en dichas operaciones métricas, una mirada más localizada del tipo de mejoras metodológicas que en ellas se introdujeron y una apreciación global de los *cambios conceptuales* generados.

Referencias

- Alexander, A. F. O'D. (1981). Bradley, James. En C. C. Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography* (Vols. 1-2). New York: Charles Scribner's Sons.
- Battison, E. A. (1981). Graham, George. En C. C. Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography* (Vols. 5-6). New York: Charles Scribner's Sons.
- Berka, K (1983). Measurement. En K. Berka, *Measurement. Its Concepts, Theories and Problems* (A. Riska, trad., pp. 14-36). Dordrecht: Reidel Publishing Company.
- Bovis, L. & Lequeux, J. (2008). Cassini, Rømer and the Velocity of Light. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 11(2), 97-105.
- Boyer, C. B. (1941). Early Estimates of the Velocity of Light. *Isis*, 33(1), 24-40.
- Bradley, J. (1931). A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Proffesor of Astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. giving an Account of a new discovered Motion of the Fix'd Stars. En G. Sarton, *Discovery of the Aberration of Light* (pp. 241-265). (Obra original publicada en 1729, *Philosophical Transactions*, 35, 637-661)
- Cassini, A. (2014). El experimento crucial de Galileo: un análisis epistemológico. *Análisis Filosófico*, 34(2), 119-145.
- _____. (2015). De Römer a Fizeau: Experimentos cruciales sobre la velocidad de la luz. En P. Melogno (comp.), *Ciencia, matemática y experiencia. Estudios en historia del conocimiento científico* (pp. 119-135). Montevideo: Índice Grupo Editorial.
- Chang, H. (2004). *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. New York: Oxford University Press.
- _____. (2007). Scientific Progress: Beyond Foundationalism and Coherentism. *Royal Institute of Philosophy Supplement*, 61, 1-20.
- _____. (2011). The Philosophical Grammar of Scientific Practice. *International Studies in the Philosophy of Science*, 25(3), 205-221.

- Chang, H., & Cartwright, N. (2008). Measurement. En S. Psillos & M. Curd (eds.), *The Routledge Companion to Philosophy of Science* (pp. 367-375). London & New York: Routledge.
- Clarke, D. M. (1992). Descartes' philosophy of science and the scientific revolution. En J. Cottingham (ed.), *The Cambridge Companion to Descartes* (pp. 258-285). Cambridge: Cambridge University Press.
- Cohen, I. B. (1940). Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676). *Isis*, 31(2), 327-379.
- Débarbat, S. (1978). La qualité des données d'observations traitées par Roemer. En R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 143-157). Paris: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Débarbat, S. & Wilson, C. (1989). The Galilean satellites of Jupiter from Galileo to Cassini, Römer and Bradley. En R. Taton & C. Wilson (eds.), *The General History of Astronomy* (Vol. 2, pp. 144-157). Cambridge: Cambridge University Press.
- Descartes, R. (1987). La Dióptrica. En G. Quintás Alonso (trad.), *Discurso del Método, Dióptrica, Meteoros y Geometría* (pp. 57-175). Madrid: Alfaguara.
- _____. (1991a). *El Mundo o el Tratado de la Luz* (A. Rioja, trad.). Madrid: Alianza Editorial. (Obra original publicada en 1664 bajo el título *Le Monde ou le Traité de la Lumière*)
- _____. (1991b). *The Philosophical Writings of Descartes* (Vol. 3, *The Correspondence*; J. Cottingham et al., trads.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Feyerabend, P. (2003). *Tratado contra el método: Esquema de una teoría anarquista del conocimiento* (D. Ribes, trad.). Madrid: Tecnos.
- Filonovich, S. R. (1986). *The Greatest Speed* (M. Burov, trad.). Moscow: Mir Publishers.
- Fisher, J. (2010). Conjectures and reputations: The composition and reception of James Bradley's paper on the aberration of light with some reference to a third unpublished version. *The British Journal for the History of Science*, 43(1), 19-48.

- Froome, K. D. & Essen, L. (1969). *The Velocity of Light and Radio Waves*. London & New York: Academic Press.
- Galilei, G. (1974). *Two new sciences: including centers of gravity & force of percussion* (S. Drake, trad.). Madison: University of Wisconsin Press. (Obra original publicada en 1638 bajo el título *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*)
- _____. (1981). *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (J. Sádaba, trad.; C. Solís, Ed.). Madrid: Editora Nacional. (Obra original publicada en 1638 bajo el título *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze*)
- Gómez, S. (2001). Galileo y la naturaleza de la luz. En C. Solís & J. Montesinos (eds.), *Il largo campo del filosofare: Eurosymposium Galileo 2001* (pp. 403-418). La Orotava: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia.
- _____. (2008). The Mechanization of Light in Galilean Science. *Galileana: Journal of Galilean Studies*, 5, 207-244. Recuperado de <http://bibdig.museogalileo.it/Teca/Viewer?an=917416>
- _____. (2009). Experiments and Thoughts on Light around the Accademia del Cimento. En M. Beretta, A. Clericuzio & L. M. Principe (eds.), *The Accademia del Cimento and its European Context* (pp. 45-58). Sagamore Beach: Watson Publishing International LLC.
- _____. (2013). From a Metaphysical to a Scientific Object: Mechanizing Light in Galilean Science. En D. Garber & S. Roux (eds.), *The Mechanization of Natural Philosophy* (pp. 191-215). s. l.: Springer.
- Grillot, S. (1978). La découverte de la vitesse finie de la lumière. En R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 137-142). Paris: Libraire Philosophique J. Vrin.
- Guillaumin, G. (2012). De las cualidades a las magnitudes: medición científica como integración cognitiva en el surgimiento de la astronomía moderna. *Signos filosóficos*, 14(28), 57-89.

- _____. (2015a, en prensa). Scientific Measurement as Cognitive Integration. The Role of Cognitive Integration in the Growth of Scientific Knowledge. En N. Mößner & A. Nordmann (eds.), *Reasoning in Measurement*. London: Routledge.
- _____. (2015b, en prensa). *Génesis de la medición celeste. Una historia cognitiva del crecimiento de la medición científica*.
- Hall, M. B. (1978). Roemer et l'Angleterre (1673-1729). En R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 159-168). Paris: Libraire Philosophique J. Vrin.
- Hon, G. (2009). Kepler's Conception of Error in Optics and Astronomy. En R. L. Kremer & J. Włodarczyk (eds.), *Johannes Kepler: From Tübingen to Żagań (Studia Copernicana)* (pp. 205-222). Warsaw: Institute for the History of Science, Polish Academy of Sciences & Copernicus Center for Interdisciplinary Studies.
- Hooke, R. (1705). Lectures of Light, Explicating its Nature, Properties, and Effects, &c. En R. Waller (ed.), *The posthumous works of Robert Hooke, M.D. S.R.S. Geom. Prof. Gresh. &c. containing his Cutlerian lectures, and other discourses, read at the meetings of the illustrious Royal Society. In which I. The present Deficiency of Natural Philosophy is discoursed of, with the Methods of rendering it more certain and beneficial. II. The Nature, Motion and Effects of Light are treated of, particularly that of the Sun and Comets. III. An Hypothetical Explication of Memory; how the Organs made use of by the Mind in its Operation may be Mechanically understood. IV. An Hypothesis and Explication of the cause of Gravity, or Gravitation, Magnetism, &c. V. Discourses of Earthquakes, their Causes and Effects, and Histories of several; to which are annex, Physical Explications of several of the Fables in Ovid's Metamorphoses, very different from other Mythologick Interpreters. VI. Lectures for improving Navigation and Astronomy, with the Descriptions of several new and useful Instruments and Contrivances; the whole full of curious Disquisitions and Experiments. Illustrated with sculptures. To these discourses is prefixt the author's life, giving an Account of his Studies and Employments, with an Enumeration of the many Experiments, Instruments, Contrivances and Inventions, by him made and produc'd as Curator of Experiments to the Royal Society* (pp. 71-148). [Eighteenth Century Collections

- Online]. Recuperado de http://find.galegroup.com.pbidi.unam.mx:8080/ecco/infomark.do?&source=gale&prodId=ECCO&userGroupName=unam_ecco&tabID=T001&docId=CW3316991389&type=multipage&contentSet=ECCOArticles&version=1.0&docLevel=FASCIMILE
- Huygens, C. (1962). *Treatise on Light*. New York: Dover Publications. (Obra original publicada en 1690 bajo el título *Traité de la Lumière*)
- Joint Committee for Guides in Metrology (2012). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)* (3ª ed.). Sèvres: JCGM. Recuperado de <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
- Kepler, J. (2000). *Optics. Paralipomena to Witelo & Optical Part of Astronomy* (W. Donahue, trad.). Santa Fe: Green Lion Press. (Obra original publicada en 1604 bajo el título *Ad Vitellionem paralipomena. Astronomiae pars optica*)
- Knowles, W. E. (1971). *The Experimenters: A Study of the Accademia del Cimento*. Baltimore & London: The Johns Hopkins Press.
- Kopal, Z. (1981). Römer, Ole Christensen. En C. C. Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography* (Vols. 11-12). New York: Charles Scribner's Sons.
- Koyré, A. (1991). Un experimento de medición. En A. Koyré, *Estudios de historia del pensamiento científico* (pp. 274-305; E. Pérez & E. Bustos, trads.). México: Siglo XXI editores. (Obra original publicada en 1953 bajo el título “An experiment in measurement”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 97(2))
- _____. (1994). Del mundo del “aproximadamente” al universo de la precisión. En A. Koyré, *Pensar la ciencia* (pp. 117-145; A. Beltrán, trad.). Barcelona: Ediciones Paidós. (Obra original publicada en 1948 bajo el título “Du monde de l’‘a-peu-près’ à l’univers de la précision”, *Critique*, 28, pp. 341-362)
- Kuhn, T. S. (1993). La función de la medición en la física moderna. En T. S. Kuhn, *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia* (R. Helier, trad.). México: Conacyt - Fondo de Cultura Económica. (Obra

- original publicada en 1961 bajo el título “The Function of Measurement in Modern Physical Science”, *Isis*, 52, 161-190)
- _____. (1993). Objetividad, juicios de valor y elección de teoría. En T. S. Kuhn, *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia* (R. Helier, trad.). México: Conacyt - Fondo de Cultura Económica. (Conferencia Machette, presentada en la Furman University el 30 de Noviembre de 1973 bajo el título “Objectivity, Value Judgement, and Theory Choice”)
- _____. (1993). La tradición matemática y la tradición experimental en el desarrollo de la física. En T. S. Kuhn, *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia* (R. Helier, trad.). México: Conacyt - Fondo de Cultura Económica. (Obra original publicada en 1976 bajo el título “Mathematical versus Experimental Tradition in the Development of Physical Science”, *Journal of Interdisciplinary History*, 7, 1-31)
- Lindberg, D. C. (1978). Medieval Latin Theories of the Speed of Light. En R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 45-72). Paris: Libraire Philosophique J. Vrin.
- Magie, W. F. (1935). *A Source Book in Physics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Mari, L. (2003). Epistemology of measurement. *Measurement*, 34, 17-30.
- _____. (2005). The problem of foundations of measurement. *Measurement*, 38, 259-266.
- Martínez, J. R. (2000). La refracción según la *Dioptrique*. ¿Engaño cartesiano? En C. Álvarez & J. R. Martínez (coords.), *Descartes y la ciencia del siglo XVII* (pp. 244-271). México: Siglo XXI & Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maxwell, J. C. (1965). Introductory Lecture on Experimental Physics. En W. D. Niven (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Vol. 2, pp. 241-255). New York: Dover. (Obra original publicada en dos volúmenes en 1890 por Cambridge University Press bajo el mismo título, fue publicada en dos volúmenes encuadernados como uno solo en la versión de Dover. La lección inaugural fue presentada por James Clerk Maxwell en la Universidad de Cambridge en Octubre de 1871)

- Newton, I. (1952). *Opticks or a Treatise of the Refrlections, Refractions, Inflections & Colours of Light* (4^a ed.). Dover: New York. (Obra original publicada en 1704 y cuya cuarta edición se publicó en 1730)
- North, J. D. (1989). The Satellites of Jupiter, from Galileo to Bradley. En J. D. North, *The Universal Frame: Historical Essays in Astronomy, Natural Philosophy and Scientific Method* (pp. 185-213). London & Ronceverte: The Hambledon Press.
- _____. (2001). *Historia Fontana de la astronomía y la cosmología* (E. Torres, trad.). México: Fondo de Cultura Económica (Obra original publicada en 1994 bajo el título *The Fontana history of astronomy and cosmology*)
- Pearson, W. (2013). Graham's Zenith Sector. En W. Pearson, *An Introduction to Practical Astronomy: Containing Descriptions of the Various Instruments that have been usefully employed in determining the Places of the Heavenly Bodies* (Vol. 2, pp. 531-533). Cambridge: Cambridge University Press. (Obra original publicada en 1829)
- Pedersen, K. M. (1978). La vie et l'ouvre de Roemer. R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 113-128). Paris: Libraire Philosophique J. Vrin.
- Picolet, G. (1978). La vitesse de la lumière d'après les auteurs anciens. En R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 1-17). Paris: Libraire Philosophique J. Vrin.
- Roemer, O. (1940). A Demonstration concerning the Motion of Light, communicated from Paris in the Journal des Scavans, and here made in English. En I. B. Cohen, *Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676)* (pp. 377-378). (Obra original publicada en 1676, *Journal des Scavans*)
- Sabra, A. I. (1981). *Theories of Light from Descartes to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sakellariadis, S. (1982). Descartes' Experimental Proof of the Infinite Velocity of Light and Huygens' Rejoinder. *Archive for History of Exact Sciences*, 26(1), 1-12.
- Sarton, G. (1931). Discovery of the Aberration of Light. *Isis*, 16(2), 233-239, 241-265.

- Sepúlveda, A. (2012). *Los conceptos de la física. Evolución histórica* (3ª ed.). Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Soler, L. (2012). The Solidity of Scientific Achievements: Structure of the Problem, Difficulties, Philosophical Implications. En L. Soler *et al* (eds.), *Characterizing the Robustness of Science: After the Practice Turn in Philosophy of Science*. s. l.: Springer.
- Stewart, A. B. (1964). The Discovery of Stellar Aberration. *Scientific American*, 210(3), 100-109.
- Tal, E. (2012). *The Epistemology of Measurement: A Model-Based Account* (Tesis Doctoral, University of Toronto, Toronto, Canadá). Recuperada de https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/34936/1/Tal_Eran_201211_PhD_thesis.pdf
- _____. (2013). Old and New Problems in Philosophy of Measurement. *Philosophy Compass*, 8(12), 1159-1173.
- _____. (2015). Measurement in Science. En E. N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Edición Verano 2015). Recuperado de <http://plato.stanford.edu/entries/measurement-science/>
- Taton, R. (Ed.) (1978). *Roemer et la vitesse de la lumière*. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Tobin, W. (1993). Toothed Wheels and Rotating Mirrors: Parisian Astronomy and Mid-Nineteenth Century Experimental Measurements of the Speed of Light. *Vistas in Astronomy*, 36, 253-294.
- Van Fraassen, B. C. (2008). Windows, Engines, and Measurement. En B. C. van Fraassen, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective* (pp. 91-185). Oxford: Clarendon Press.
- Van Helden, A. (1983). Roemer's Speed of Light. *Journal for the History of Astronomy*, 14, 137-141.

- Verdet, J.-P. (1978). La théorie de la lumière de Huygens et la découverte de Roemer. En R. Taton (ed.), *Roemer et la vitesse de la lumière* (pp. 169-178). Paris: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Wróblewski, A. (1985). De Mora Luminis: A spectacle in two acts with a prologue and an epilogue. *American Journal of Physics*, 53(7), 620-630.