



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

Campo de Conocimiento: Filosofía de la Ciencia

**EL PROGRESO CIENTÍFICO: UN ESTUDIO
SOBRE EL CRECIMIENTO COGNITIVO DE LA
PRÁCTICA DE MEDICIÓN**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

P R E S E N T A :

JAVIER MEDINA BARRIENTOS

TUTOR

DR. GODFREY GUILLAUMIN JUÁREZ
DEPARTAMENTO DE FILOSOFÍA, UAM IZTAPALAPA
CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2021
OCTUBRE



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

*A mis padres, María y Javier, quienes
me han apoyado de manera
incondicional en todo tiempo.*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos aquellos quienes me acompañaron en esta pequeña investigación y sin los cuales ésta no habría sido posible. Me gustaría agradecer al Dr. Godfrey Guillaumin, quien fue mi director de tesis tanto de licenciatura como de maestría, por su lectura profesional y paciente. Gracias a sus comentarios, correcciones y a su constante asesoramiento, todos los borradores entregados se vieron siempre beneficiados y definitivamente fueron mejorados gracias a éstos. En su conjunto, gracias a su lectura y comentarios, esta tesis no solo tomó una mejor forma y estructura, sino que fue en cierta manera una continuación de la investigación hecha en licenciatura. Así pues, gran parte de mi formación académica ha sido influenciada por él.

Me gustaría también agradecer a todos mis revisores por sus valiosos comentarios. Cada uno de ellos revisó todo el texto, no obstante, mencionó solo algunas aportaciones que me han dado. A la Dra. Susana Biro, por su enriquecimiento a la parte histórica de este trabajo; al Dr. Sergio Martínez, por sus señalamientos sobre las prácticas científicas en esta tesis; a la Dra. Natalia Carrillo, cuyos comentarios apuntaron al desarrollo de habilidades académicas; y al Dr. Ricardo, por sus aportaciones desde el punto de vista epistemológico a esta tesis. En su conjunto, todas sus revisiones ayudaron al mejoramiento del texto.

También me gustaría agradecer a las personas que me escucharon y me aportaron mucho con sus preguntas y sugerencias. Tal es el caso de mis compañeros del Seminario de campo de Filosofía de la Ciencia. De igual modo, me gustaría agradecer en especial a Adriana Martínez, quien no solamente leyó algunos borradores de esta tesis, dándome gran retroalimentación, sino que también sus palabras han sido de gran aliento en este proyecto.

Por supuesto, agradezco a mis padres y hermanos, quienes me han apoyado de manera incondicional a lo largo de mi formación. Estoy completamente convencido de que sin ellos ningún logro personal o académico habría sido posible.

Finalmente, pero no menos importante, me gustaría agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), institución que desde el 2005 me ha abierto sus puertas para mi formación académica. De igual modo, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por el apoyo económico, el cual me permitió dedicarme de tiempo completo a este proyecto.

Índice general

1. Introducción General	5
1.1. Medición y transición entre teorías	8
1.2. Progreso y crecimiento	10
2. Aproximaciones tradicionales al progreso y el papel de la medición	12
2.1. Introducción	12
2.1.1. Falsacionismo	13
2.1.2. Ciencia normal, crisis y medición	15
2.1.3. Eficacia en la resolución de problemas	18
2.1.4. Unificacionismo	19
2.1.5. Noción epistémica de progreso	21
2.1.6. Noción noética de progreso	22
2.1.7. La unidad de análisis	23
2.2. Sumario	24
3. La determinación de la Unidad Astronómica	26
3.1. Introducción	26
3.2. La primera medición científica de UA	29
3.2.1. El tránsito de Venus	29
3.2.2. Las grandes dimensiones del sistema solar	32
3.3. Un nuevo uso de un método viejo	37
3.3.1. La paralaje de Marte	38
3.4. A la espera de nuevos tránsitos	48
3.5. El método terrestre	50
3.5.1. La finitud de la velocidad de la luz	50
3.5.2. La aberración de la luz	52
3.5.3. La medición de Foucault	54

<i>Índice general</i>	4
3.6. Conclusión	60
4. Análisis. El Crecimiento cognitivo	64
4.1. Esquema del crecimiento cognitivo	65
5. Conclusión. Cuatro conceptos clave	72
5.1. Características del progreso de la práctica de medición	73
5.2. Relación de las conclusiones	81

1

Introducción General

Goethe escribió que «el hombre yerra en tanto se esfuerza». Esto tal vez sea cierto, sin embargo, Max Planck agregaba a ello que si solo eso fuera el caso, todo el esfuerzo mental de un investigador resultaría sin esperanza a menos que éste «se cruzara ocasionalmente con hechos recalcitrantes que forman prueba incontrovertible de la verdad que está buscando» (Planck, 1922, p. 3). Así introducía Planck lo que él consideraba uno de los grandes progresos de la ciencia: la teoría de la cuantización de la energía. Este enigmático físico llamaba la atención sobre el hecho de la existencia de distintos métodos para la determinación del valor de la constante de Planck, h .

Los reportes de algunos métodos usados para calcular h fueron recopilados por Birge (1919) para inferir su valor, de tal modo que encontró que h parecía converger en $(6,55 \pm 0,0025) \times 10^{-27} \text{ergxs}$.¹ Lo anterior le dio un argumento a Planck para defender la teoría de la cuantización de la energía, es decir, el hecho de que distintos métodos de medición converjan alrededor de un valor nos da un indicio no sólo de optar por una teoría, sino más que nada del progreso científico. El siguiente pasaje evidencia esto, en donde habla de la determinación de la masa molecular:

Nada puede ilustrar de mejor manera el rápido progreso de la física experimental

¹Para un análisis histórico sobre estos métodos, véase Petley (1985).

en los últimos veinte años que el hecho de que durante este período no solo uno, sino una multitud de métodos han sido descubiertos por medio de los cuales la masa de una sola molécula puede ser medida con casi la misma exactitud que la de un planeta. (Planck, 1922, p. 11).

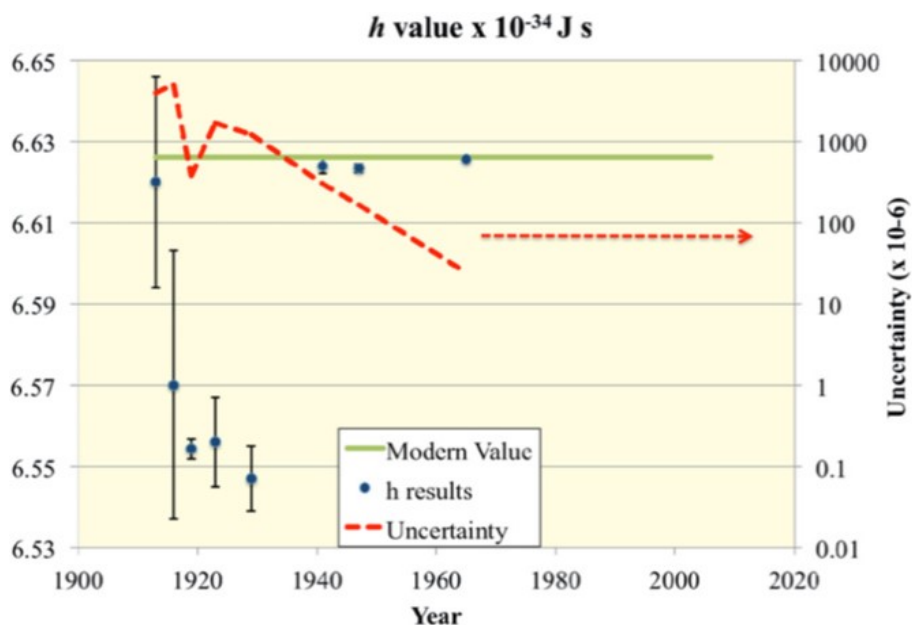


Figura 1.1: Gráfica que muestra los primeros valores históricos para h con relación al valor moderno (línea verde). Las líneas negras indican la incertidumbre relativa. La línea punteada muestra la incertidumbre cada vez menor. Tomada de (Steiner, 2012, p. 5).

El argumento que presenta Planck en pro del progreso científico es la convergencia a partir de distintos métodos de medición. Junto a él podemos colocar a Charles Peirce, principalmente conocido por ser el fundador del pragmatismo norteamericano, pero quien también realizó contribuciones en metrología mientras trabajaba para la Oficina de Pesos y Medidas de Estados Unidos. Algunas de sus mediciones y contribuciones incluyen, *inter alia*, observaciones de eclipses solares con el espectroscopio, el descubrimiento y medición de líneas espectrales de las auroras boreales, investigaciones fotométricas de la luz estelar, y determinar la intensidad de la gravedad con un péndulo (Lenzen, 1965). No es de sorprenderse que su trabajo como metrólogo moldeara sus reflexiones filosóficas. Ejemplo de ello es su artículo *Cómo esclarecer nuestras ideas*, en donde hace referencia a nueve métodos distintos para poder investigar la velocidad de la luz, diciendo que

[a]l principio pueden obtener resultados diferentes, pero, a medida que cada uno perfecciona su método y sus procedimientos, se encuentra con que los re-

sultados convergen ineludiblemente hacia un centro de destino. Así con toda la investigación científica. *Mentes diferentes pueden partir con los más antagónicos puntos de vista, pero el progreso de la investigación, por una fuerza exterior a las mismas, las lleva a la misma y única conclusión.* (C. S. Peirce, CP 5.407, énfasis añadido)

Es cierto que el argumento de Peirce tiene como fin defender la tesis de la convergencia a la verdad de la investigación, tema que no será objeto de esta tesis, sin embargo hay algo sobre este pasaje que podemos preguntar: *¿es cierto que el progreso de la investigación nos lleva a la misma y única conclusión?* Peirce responde afirmativamente, puesto que piensa que la lógica de la investigación está constreñida a la postre por la hipótesis de una realidad independiente de nuestras creencias, pero más aún, la investigación está en principio determinada no por «preguntas en papel», sino por dudas reales causadas por experiencia recalcitrante que se convierten en preguntas vivas, cuya respuesta depende de elementos de la propia realidad.

Un cuestionamiento similar es traído a cuento por Hacking (2000): *¿qué tan inevitables son los resultados de la ciencia exitosa?* Para responder, Hacking asume la historiografía propuesta por Nicholas Jardine (2000), a saber, un cambio de enfoque que va de las teorías científicas a las preguntas planteadas por las ciencias (p. 4).² Un enfoque en los escenarios de investigación—*i.e.*, un espectro de preguntas válidas para una comunidad—hace justicia, por un lado, al historiador interesado en la llamada parte «externalista» de la ciencia, puesto que las prácticas locales e instituciones son un componente determinante de tales escenarios, y, por otro lado, hace justicia también al interesado en la parte «internalista»,³ ya que un escenario de indagación revela el contenido y métodos de las doctrinas científicas. Teniendo de fondo esto, Hacking responde: la forma del conocimiento científico (el escenario de indagación) es contingente, y por tanto los resultados no son inevitables, pero el contenido (las respuestas) no tiene que ver con lo que nosotros decidamos creer o no.

¿Cómo podemos entender el progreso científico a partir de una perspectiva similar? Uno de los puntos de esta tesis es que la mayoría de los especialistas en el tema se han concentrado en entender este problema a partir del análisis de proposiciones aceptadas

²En realidad, me parece que esta historiografía se deriva naturalmente del pragmatismo de Peirce, puesto que para este último, cuando se trata del avance científico, no son las teorías las que están en el centro de análisis, sino la indagación que fija de manera eficiente nuestras creencias.

³Con esto no se pretende rescatar la distinción historia internalista/externalista; precisamente la historiografía propuesta por Jardine se coloca en un lugar en el que tanto lo llamado «internalista» como «externalista» tiene un papel importante para el planteamiento de preguntas relevantes como para su solución, disolviendo así dicha distinción.

(característica que sobrevive desde el empirismo lógico),⁴ lo cual no ha logrado capturar la dinámica de la ciencia como una empresa fundamentalmente indagatoria, ya que tal enfoque ha asumido que las ciencias son un conjunto de respuestas (y consecuencias lógicas de éstas) expresadas en enunciados, y que la tarea del filósofo es entender la relación lógica que hay entre tales enunciados y la evidencia. Sin embargo, especialmente a partir del siglo XVII la ciencia nos ha enseñado que es más que una institución que recopila proposiciones y doctrinas, se trata más bien de una empresa que postula preguntas con sentido sobre el mundo natural, y cuya supremacía «descansa en la iteración repetida de filtros institucionales de error» (Ross, Ladyman & Spurrett, 2007, p. 29) para responder a tales preguntas. Esto, me parece, no puede ser apreciado desde el análisis de conjuntos de enunciados, ya que es en la práctica en donde el científico se enfrenta a la detección y solución de tales errores. Pienso, pues, que un enfoque en las prácticas de medición nos ayudará a colocarnos en dicho nivel indagatorio—señalado ya desde hace más de un siglo por Peirce—y, a su vez, nos ayudará a entender qué función tiene la medición científica para el progreso de las ciencias, puesto que un análisis detallado de la medición enfatizaría el proceso de indagación, el crecimiento de dicha práctica, y, finalmente, el constante mejoramiento de nuestros filtros de error. El objetivo de esta investigación es poner a prueba dicha hipótesis.⁵

1.1. Medición y transición entre teorías

John Losee (2004) señala constantemente contraejemplos a las distintas teorías filosóficas del progreso científico, apelando a casos en los cuales los criterios propuestos no son ni suficientes ni necesarios. Interessantemente, él acepta el hecho de que sólo hay un caso en el

⁴Algunas excepciones a esto son los trabajos de Kitcher (1993), Chang (2004), y Guillaumin (2016).

⁵A lo largo del texto, el lector notará un tema que atraviesa esta tesis: a saber, el realismo. En efecto, uno de mis objetivos en mente al emprender un estudio sobre las prácticas de medición era concretar un argumento en pro de un tipo de realismo que autores como Hilary Putnam (1987), Roberto Torreti (1996) y Hasok Chang (2016) han calificado como ‘pragmático’. Debo decir, sin embargo, que este trabajo se queda muy corto para ello, empero, me gustaría explicitar el presupuesto. Es decir, en esta tesis se hace un fuerte énfasis en la convergencia de resultados de distintos métodos de medición, esto, por supuesto, asume una realidad que, si bien no depende de nuestras opiniones, como diría Peirce, tampoco está independientemente definida de nuestra práctica y lenguaje. Lo real, lo que los griegos llamaban *pragmata*, tiene que ver con nuestra forma de articular y lidiar con la situación y ambiente para podernos orientar de la mejor forma posible conforme a nuestros propósitos. No obstante, aunque haya distintas formas de lidiar con ello, sigue habiendo algo que hace resistencia a nuestras prácticas y a lo cual éstas se adaptan. Agradezco al Dr. Ricardo Vázquez por señalarme la importancia de hacer explícito este punto.

que no logra encontrar una instancia en la cual se cumpla el criterio y que al mismo tiempo la teoría no resulte progresiva, a saber, cuando se trata del argumento de la convergencia a través de la medición.⁶ No obstante, Losee defiende que dicha convergencia no es suficiente como criterio de progreso por dos razones: (i) las oportunidades para aplicar el criterio de convergencia son escasas en la historia de la ciencia, y (ii) tal criterio solo garantiza una transición (aunque no un remplazo) de un tipo de teoría a otra (*v.g.*, de una teoría en la cual la energía es distribuida continuamente a una en la que la energía está cuantizada), «esto, por supuesto, se queda corto al proveer un garante para la verdad de teorías específicas» (Losee, 2004, p. 157).

Pensemos, por ejemplo, en el caso discutido por Guillaumin (2017), en donde se señala que la transición entre Ptolomeo y Copérnico se trató de un cambio de teoría en donde hubo una mejora del poder explicativo, pero haciendo uso de los *mismos datos y mediciones* astronómicas empleadas por Ptolomeo. A diferencia de esto, la transición entre Copérnico y Kepler no se trató de un cambio de teoría, ya que éste último era un copernicano convencido, sino que Kepler realizó un análisis matemático y conceptual de los datos de Tycho y del fenómeno de la refracción para poder corregir errores en la observación, de tal modo que la integración cognitiva que Kepler logró devino mediciones más exactas:⁷ «Consecuentemente, podemos decir que entre Copérnico y Kepler, no hubo un cambio de teoría, sino un cambio de medición (metodológico y cognitivo), *i.e.*, hubo un cambio cognitivo sin un cambio de teoría» (Guillaumin, 2017, p. 189).

Pienso que Losee está en lo correcto cuando sugiere que el mejoramiento de la medición no necesariamente garantiza un cambio a una teoría más verdadera, pero esto apunta precisamente a que en ocasiones el progreso se da sin haber un conflicto entre teorías. Más aún, el cambio en la medición mencionado pudo no postular una teoría nueva, pero, junto con las observaciones de Galileo, ayudó a concretar un argumento en contra del consenso de la existencia de orbes celestes. Así pues, pensemos, por un lado, en el espectro de preguntas que se cerró con la disolución de dicho consenso, pero, por el otro, en el campo fértil de preguntas que se abrió con el consenso creciente sobre la existencia de cuerpos celestes mutables con trayectorias no circulares. Tal apertura no fue precisamente un cambio de teoría, pero sí un episodio progresivo. En otras palabras, hay un tipo de progreso científico

⁶El argumento concluye que las teorías son aproximadamente verdaderas sobre la base de que los valores de constantes físicas determinados por la aplicación de teorías que pertenecen a distintos dominios concuerdan (Losee, 2004, p. 128).

⁷El concepto de *integración cognitiva* se refiere al ajuste recíproco entre tres componentes de la práctica científica: datos observacionales, modelos matemáticos y principios físicos. El resultado de dicho acoplamiento positivo es un cambio/avance cognitivo. Ver Guillaumin (2016 y 2017).

que no está en función del cambio teórico o proposicional, sino en función del mejoramiento cognitivo. El objetivo, pues, de esta investigación es analizar la función que las mediciones tuvieron en episodios progresivos como el de Kepler.

1.2. Progreso y crecimiento

Por último, dado que el tipo de progreso que se analiza en este trabajo no es el mismo que se ha asumido comúnmente, me parece necesario hacer algunas aclaraciones conceptuales que se asumirán en esta tesis.

En general, podemos distinguir algunos conceptos como ‘cambio’, ‘desarrollo’, ‘progreso’, y ‘crecimiento’ del siguiente modo. Mientras que los primeros se distinguen por ser más que nada descriptivos, el de ‘progreso’ es normativo, en tanto nos remite a un «mejoramiento» en algún sentido (Niiniluoto, 2019). Por ‘cambio’ se entiende «el proceso o resultado de hacer que algo sea diferente o de llegar a ser diferente». Por otro lado, el concepto de ‘desarrollo’ es más complejo, ya que se refiere al acto de guiar o conducir algo a través de cambios, cada uno de los cuales es *preparatorio* para el siguiente. Este, pues, se trata del devenir histórico de algo. Por último, el ‘progreso’ se trata del *mejoramiento* gradual (en algún sentido) de algo en un periodo de tiempo.

Notemos que este último concepto, así definido, se aplica a un proceso en tanto que hay un mejoramiento, de otro modo tenemos un retroceso. En este sentido, autores como Lakatos o Laudan enfatizaron que en el desarrollo de una serie de teorías, hay algunas que no representan un progreso, sino una «degeneración». Así pues, distinguieron entre programas (o tradiciones) de investigación progresivos y programas degenerativos. El progreso, pues, es una subclase del desarrollo, ya que, aunque implique fases preparativas, no considera, por decirlo así, fases erróneas, sino solo las que mejoran el proceso. Es por ello que, para considerar el error, necesitamos otro concepto: a saber, el de crecimiento.

El *Merriam-Webster Dictionary* define crecimiento como «desarrollo progresivo», lo cual implica un proceso que considera no solo fases mejores, sino también “degeneraciones”. No obstante, lo importante de este desarrollo es que tanto las fases degenerativas como las que mejoran contribuyen al mejoramiento general del proceso. El crecimiento implica el progreso, mas no al revés. Así pues, el tipo de progreso que principalmente se analiza en esta tesis es el de crecimiento cognitivo (el cual se aclarará en el capítulo 5).

Por último, me gustaría aclarar que el crecimiento cognitivo es un concepto pensado a partir del análisis de ciertas prácticas de medición. De acuerdo con Hughes (2001), desde un punto de vista histórico, los parámetros fundamentales de la astronomía se pueden dividir

en dos categorías, a saber: «aquellas cantidades que nuestros predecesores han medido casi correctamente desde la primera vez, y aquellas que no» (p. 15) (esto, me parece, también se puede extender a otras ciencias). Algunos ejemplos de la primera categoría son el radio de la Tierra y de la Luna, la distancia de la Luna, y la duración del mes y del año. Una característica de esta categoría es que los cambios han sido menores, tratándose a veces solo de una corrección o agregado de puntos decimales. No obstante, la segunda categoría es más interesante, ya que la determinación de estos parámetros ha tomado mucho más tiempo, incluso hasta siglos. Algunos ejemplos de esto son la edad de la Tierra, la temperatura de la fotosfera solar, la masa del Sol, su luminosidad, la distancia a las estrellas más cercanas, la constante cosmológica, la paralaje solar y estelar, y la constante de Hubble. Los cambios registrados en este caso han representado redeterminaciones de la medición totalmente distintas a lo largo del tiempo, pero al final convergiendo en un valor. En vista de esto, el crecimiento cognitivo es el tipo de progreso científico que mejor describe la historia y avance en la determinación de parámetros de la categoría dos.

Partes del texto

El texto estará dividido en cuatro partes. Debido a que no podemos desechar sin más el análisis hecho sobre teorías científicas y progreso, primero se revisarán algunas posturas tradicionales sobre progreso científico y de qué modo integran éstas el papel de la medición, ¿es este, si es que lo hay, un rol importante? A su vez, esta sección nos dará un panorama muy general sobre cómo se ha entendido el progreso científico en la literatura filosófica. Después presentaré un caso de progreso en la historia de la astronomía a manera de contraste (perteneciente a la categoría dos de Hughes), es decir, una manera de evitar una discusión formal sobre el progreso científico es analizar cómo es que una práctica de hecho fue progresando, creciendo, y produciendo un mejor conocimiento sobre un parámetro, ya que así se podrá ver cuál fue la función de la medición en el avance de una ciencia. Después se presentará un análisis de la práctica de medición presentada en la sección anterior, y se hará explícito de mejor manera cómo entender el crecimiento cognitivo a partir de dicha práctica. Finalmente, se aclararán algunos conceptos clave a manera de conclusión, los cuales están implicados en el esquema de crecimiento cognitivo presentado en el capítulo 4.

—*The characteristic of scientific progress is our knowing that we did not know.*

Gaston Bachelard

2

Aproximaciones tradicionales al progreso y el papel de la medición

2.1. Introducción

Como se ha mencionado, la filosofía de la ciencia del siglo XX ha tenido una tendencia fuerte a analizar a las ciencias tomando como unidad de análisis a las teorías y proposiciones científicas. De este modo, problemas como el de la racionalidad, la explicación, y el progreso han sido estudiados desde este enfoque, asumiendo a su vez los siguientes rasgos positivistas: «[la historia de la ciencia] es *progresista* porque la ciencia progresa por acumulación de conocimiento positivo; es *presentista* porque evalúa los logros del pasado en relación con criterios actuales, y es *internista*, porque sostiene que factores externos como los sociales, los psicológicos, entre otros, no son parte de la racionalidad científica» (Guillaumin, 2018, p. 166). Así pues, desde esta perspectiva las teorías resultan de suma importancia para el progreso, ya que éstas contienen las proposiciones en las cuales se instancia la acumulación de conocimiento. No obstante, aunque este tipo de filosofía haya asumido que el progreso se da por una cierta acumulación, todavía no ha quedado totalmente claro qué es y cómo es que se da.

A pesar de ello, podemos decir que, en términos generales, tenemos una idea de progreso, la cual puede ser puesta en los siguientes términos: «decir que un paso de la etapa *A* a la etapa *B* constituye progreso significa decir que *B* es una *mejora* sobre *A* en algún respecto, *i.e.*, *B* es mejor que *A* con respecto a algunos estándares o criterios» (Niiniluoto, 2019, p. 2.2). El problema ha sido encontrar y ponerse de acuerdo sobre aquellos estándares bajo los cuales podemos juzgar que una etapa es más progresiva que otra. Esta cuestión ha caracterizado la historia de la reflexión sobre el progreso científico a lo largo del último siglo.

A continuación, pues, veremos algunas teorías sobre el progreso tradicionales y contemporáneas y, del mismo modo, revisaremos cuál es su relación con la medición científica, puesto que me parece que esta práctica ha representado un área en la que el progreso ha sido inequívoco y duradero,¹ pero que, sin embargo, no ha tenido un énfasis primario en la mayoría de teorías de progreso disponibles. En contraste, veremos que algunas de estas teorías enfatizan la *incorporación* de algún elemento que consideran importante (más hechos confirmados, más problemas resueltos, etc.), otras que enfatizan el progreso como un *derrocamiento* revolucionario de teorías o conjuntos de estas, y otras que incorporan aspectos de ambas características, habiendo así una variedad de criterios de progreso propuestos. No obstante, pese a estas diferencias, como ya se mencionó, una constante presente en la mayoría de estas es apelar ya sea a teorías científicas como unidad de análisis o a enunciados aceptados por los científicos para encontrar dicho criterio. Veamos brevemente las relaciones que pueden ser trazadas entre tales criterios y unidad de análisis con la medición científica.

2.1.1. Falsacionismo

La concepción de progreso de Karl Popper es una respuesta a lo asumido por los empiristas lógicos, para quienes el progreso estaba en función del poder explicativo de las teorías. La postura de Popper mezcla la incorporación (de contenido) y el derrocamiento de las teorías científicas. Él define el progreso científico como «el derrocamiento repetido de teorías científicas y su reemplazo por mejores—más que por acumulación de observaciones o de datos» (Popper, 1966, p. 285). Consecuentemente, el criterio a través del cual se puede distinguir a la mejor teoría es el de *relativa satisfactoriedad* (o de testabilidad o improbabilidad).

La idea de Popper surge a partir de simples cuestiones formales. Primero, notemos que el contenido de la conjunción de dos enunciados siempre será mayor o igual al contenido de cualquiera de sus partes, es decir:

¹Esta tesis se justificará en los dos últimos capítulos.

$$(1) \quad Ct(a) \leq Ct(ab) \geq Ct(b)$$

en donde $Ct(a)$ es ‘el contenido del enunciado a ’, y ab es la conjunción de los enunciados a y b . Ahora, recordemos que la probabilidad de una intersección es menor o igual a la probabilidad que tiene cada uno de sus componentes por separado, *i.e.*:

$$(2) \quad P(a) \geq P(ab) \leq P(b)$$

Lo que (1) y (2) estipulan juntos es que cuando incrementamos el contenido, automáticamente decrece la probabilidad, y viceversa. Por tanto: «es una consecuencia inescapable del hecho trivial de que si el aumento de conocimiento significa teorías con más contenido, entonces también esto debe significar teorías con probabilidad decreciente» (Popper, 1966, p. 286). Y si la baja probabilidad del evento descrito por un enunciado significa una alta probabilidad de que tal enunciado sea falsado, se sigue que «un alto grado de falsación, refutabilidad o testabilidad es uno de los objetivos de la ciencia —de hecho es precisamente el mismo objetivo que un alto contenido informativo» (1966, pp. 286-7).

Ahora bien, ¿cuál es el papel que juega la medición en esta teoría? Este se muestra cuando uno toma en cuenta que el criterio de progreso es el incremento de contenido informativo o de testabilidad (1966, p. 288), así pues, ¿qué pasa cuando dos teorías difieren *muy poco* en cuanto a dicho contenido?, ¿cómo podemos saber cuál de las dos implica una prueba más severa de testabilidad? Este problema—nos dice Popper—está conectado con la precisión en la medición de cada teoría, de tal modo que resulta imposible decidir qué teoría es más testable, y por tanto más progresiva, sin antes mejorar las mediciones que cada una implica. Por lo tanto «la regla de que las teorías deben tener el más alto grado de testabilidad alcanzable implica que el grado de precisión en la medición debe incrementar tanto como sea posible» (Popper, 1935/2005, pp. 108-9), lo cual—nos dice—solo es posible empleando métodos cuantitativos, ya que, en ausencia de ellos, los intervalos de medición rara vez pueden ser mejorados.

Sin embargo, me parece que el tratamiento que hace Popper sobre esta práctica es insatisfactorio por dos razones: (1) el papel que tiene la medición solo es derivado o secundario, ya que esta es una demanda para tener proposiciones con más grado de testabilidad, y a su vez poder decidir entre dos teorías en competencia, no obstante, no hay un análisis sobre el progreso que en sí mismo representan los procesos de medición; (2) para que la teoría de Popper funcionara, se requería que la medición tuviera independencia teórica para que esta pudiera fungir como una verdadera prueba de refutación,² puesto que, de otro modo, hay ambigüedad sobre qué es exactamente lo que se refuta: ¿la teoría puesta a prueba o las presuposiciones bajo las cuales opera el proceso de medición? Más aún, el

²Ver, por ejemplo, Popper (2013, p. 144) y David Gefen (2019, p. 10).

error de medición (algo presente en dichos procesos) no jugó un papel prominente en la epistemología de Popper, ya que, de nuevo, la prueba resultaría obscura: ¿la refutación se debe a la teoría o al error en la medición—la cual ocurre por una mera cuestión de probabilidad?³ Es interesante ver que Popper pone atención en la medición e intenta hacer compatible dicha práctica con su teoría, sin embargo, más allá de asumir que la medición sirve para decidir entre teorías, no hay un tratamiento a fondo sobre el papel que ésta tiene en el progreso científico.

2.1.2. Ciencia normal, crisis y medición

Es sabido que Thomas Kuhn rechazó la idea de ‘refutación teórica’ que Popper tenía, pues él señaló que las anomalías que las teorías científicas enfrentan son archivadas en muchas ocasiones, evitando el abandono abrupto de éstas ante una instancia no explicada. No obstante, hay dos puntos de encuentro con Popper cuando se trata de medición, a saber: dicha práctica llega a tener el papel de decidir entre teorías y de provocar crisis en estas. Por otro lado, es interesante que Kuhn es de los pensadores del siglo XX que más explícitamente expusieron la relación que la práctica de medición tiene con su teoría, encarnando dicha exposición en un famoso ensayo de 1961 y en su más obra más influyente.

Kuhn (1961) ve en la medición dos funciones principales particularmente para el progreso de las ciencias físicas. La más común se da en el período de ciencia normal y se presenta principalmente como una operación de consolidación, *i.e.*, una vez que una teoría ha sido aceptada y desarrollada debe haber ya un *acuerdo implícito* entre dicha teoría y el mundo, así pues, el trabajo de la medición es hacer tal acuerdo *explícito*. Es decir—anota Kuhn—, es moneda común en la práctica científica que ningún experimento producirá exactamente los valores esperados por la teoría, de tal modo que no se aspira nunca a un acuerdo perfecto entre el mundo y las predicciones, sino sólo a un *acuerdo razonable* (1961, p. 166).⁴ Así pues, uno de los problemas (*puzzles*) de los científicos es refinar o reducir el margen de dicho acuerdo razonable, de tal modo que éste sea cada vez más *explícito*, o, en palabras de Popper, que el grado de precisión en la medición nos dé más contenido informativo. No obstante, la solución a dicha cuestión es sólo eficaz a través de la medición,

³Sobre algunos problemas que resultan de la concepción de Popper sobre medición, ver Gefen (2019) y Whiting (2012).

⁴Kuhn pone el ejemplo de cómo es que las observaciones de las posiciones de los planetas se «desvían» de las posiciones predichas por las leyes de Kepler; pese a ello, se aceptaba un margen de error o un «acuerdo razonable» entre la teoría y las observaciones (1961, p. 170). El trabajo de Newton y de sus predecesores fue diseñar un aparato matemático para estimar las perturbaciones ejercidas por el sol y demás cuerpos celestes sobre un cuerpo, de tal manera que se redujeran los límites del «acuerdo razonable» anterior.

ya que la investigación cuantitativa resulta más poderosa para reducir tal límite. Podemos decir, pues, que la primera función de la medición científica es contribuir a la resolución de problemas (*puzzles*) en periodos de ciencia normal, explicitando así cada vez más el acuerdo entre teoría y mundo.⁵ Sin embargo, Kuhn agrega lo siguiente:

El grueso de la práctica científica es así una operación de depuración compleja y extenuante que consolida los fundamentos disponibles por los descubrimientos teóricos más recientes y que *provee de preparación esencial para descubrimientos posteriores*. La medición tiene su función científica más común y abrumadora en tales operaciones de depuración. (1961, 168, énfasis añadido)

La tesis de Kuhn es que la teoría y sus implicaciones cuantitativas son las que guían el camino de la medición y no al revés,⁶ no obstante, cuando la medición se «desvía» de la teoría, puede producir una «anomalía cuantitativa», la cual, a diferencia de otro tipo de anomalías, difícilmente puede ser explicada haciendo ajustes a la teoría; tales anomalías suelen ser persistentes y no parecen subsumirse tan fácil a la maquinaria explicativa de la teoría, desatando así una crisis. Se puede decir que parte de la función de la medición en periodos de ciencia normal no solo es reducir el margen de acuerdo razonable, sino jugar también un papel en la acumulación de evidencia que eventualmente conduzcan a un tiempo de crisis. Dicha función en estos casos se muestra en que al menos «los números registran el desvío de la teoría con una autoridad y finura que ninguna técnica cualitativa puede replicar, y ese desvío es comúnmente suficiente para comenzar una investigación» (1961, p. 180). Así pues, si bien Kuhn rechazó el abandono abrupto de las teorías debido a una anomalía (contra Popper), sí atribuyó a la medición un rol que, en ocasiones, puede conducir a crisis a las teorías.

Por otro lado, como es sabido, Kuhn defendió que es común que entre cambio de teorías (y paradigmas también) haya pérdidas en el poder explicativo, incluso en las ciencias físicas. A diferencia de esto, nos dice, es difícil encontrar un caso en el que se haya perdido exactitud cuantitativa en el proceso de transición de una teoría a otra, por lo que la medición no sólo

⁵Nótese que Popper estaría de acuerdo en que la medición tiene esta función de explicitar mejor el acuerdo entre teoría y mundo, la diferencia radica en que para Kuhn esta función es de consolidación de una teoría, mientras que para Popper hacer más explícito este ‘acuerdo razonable’ tiene el fin de hacer a la teoría más testable.

⁶Su famosa tesis «El camino de la teoría o la ley a la medición difícilmente puede ser recorrido en sentido opuesto» enfatiza la cuestión de la carga teórica en la medición. Hoy en día se acepta que la medición es dependiente de la teoría, sin embargo esto devino en el problema inverso de la «fundamentación observacional», *i.e.*, de especificar, entonces, cuál es el papel que la observación juega en la medición (Tal, 2020 y 2013).

puede acumular evidencia para desatar crisis, sino que también puede ayudar a llevar a término el conflicto entre teorías: «aparentemente hay más desideratas también, pero uno sospecha que, en caso de conflicto, la medición será el vencedor consistente» (1961, p. 185).

En suma, para Kuhn la medición científica tiene dos funciones en el progreso, por un lado consolida y contribuye a la resolución de problemas al reducir el «acuerdo razonable» entre teoría y observación y, por otro lado, tiene la capacidad de dar criterios cuantitativos que ayudan a darle fin al conflicto entre teorías. Me parece interesante notar que a pesar de que Kuhn está en desacuerdo con Popper sobre cómo se da la transición entre teorías, ambos tienen ideas similares sobre la función que la medición tiene para el progreso: ésta sirve para darle más contenido empírico a la teoría y, en ocasiones, ésta también puede ayudarnos a tomar una decisión en el conflicto entre teorías en competencia.⁷ En ambos casos, en tanto presentan un análisis sobre la ciencia, la teoría tiene supremacía sobre la práctica científica. Sin embargo, un hecho importante en el análisis de Kuhn es que él nota también que la medición puede motivar y abrir nuevos campos de investigación para los científicos, lo cual, como veremos en el capítulo siguiente, es una constante en la práctica de medición.⁸ No obstante, también debemos notar que hay una pequeña tensión aquí, pues para Kuhn no podemos decir que la medición represente un punto de vista absolutamente neutral para la comparación y evaluación de teorías en competencia. De hecho, para Kuhn no lo hay,⁹ ya que tal transición es también guiada por una serie de aspectos psicológicos que él llega a describir como una experiencia de «conversión» (1962/2006, Cap. X).

⁷Agradezco a la Dra. Natalia Carrillo por su observación sobre que, para Kuhn, la transición entre teorías y la transición entre paradigmas no son lo mismo, ya que la segunda es más radical, puesto que incluso cuestiones metodológicas de investigación cambian. Es cierto también que es extraño sugerir que, para Kuhn, la medición puede ser un medio para dar solución al conflicto entre teorías, puesto que ello entra en tensión con su idea de que no hay un punto neutral de decisión. En su artículo de 1961, Kuhn sugiere lo siguiente respecto de la física: «la medición puede ser un arma inmensamente poderosa en la batalla entre dos teorías, y esto, pienso, es su segunda función particularmente significativa. Más aún, es para esta función—la ayuda en la decisión entre teorías—y para ella solamente, que debemos reservar la palabra “confirmación”» (1961, pp. 183-4). La solución a esta tensión es notar que, para Kuhn, la medición es una *ayuda* en la decisión, mas no un experimento crucial que pone fin contundente al conflicto entre teorías. Agradezco a la Dra. Natalia Carrillo por hacerme ver esto.

⁸Por «práctica de medición» se entenderá un «conjunto de acciones e instrumentos coordinados y controlados para cumplir con un fin epistémico, *i.e.*, la determinación de alguna magnitud». En el capítulo 5 se aclarará mejor el término.

⁹Kuhn (1962/2006, pp. 94-98) enfatiza más la necesidad de una teoría paradigmática bajo la cual llevar a cabo la tarea de medición, lo cual apunta al problema de la carga teórica de la medición. Tal carga teórica hace que no tengamos un punto absoluto y neutral sobre el cual juzgar el cambio de teorías.

2.1.3. Eficacia en la resolución de problemas

Como ya se mencionó, Kuhn desecha la idea popperiana de refutación teórica, no obstante, propone que en la transición de paradigmas sí hay un corte de continuidad (ontológico, de problemas, de explicación, etc.) y, por tanto, un cambio radical. En contraste con esto, Larry Laudan (1978) abandona el cambio holista y radical de reglas metodológicas y fines cognitivos que se da en la transición de un paradigma a otro (o de un *PIC* a otro en el caso de Lakatos) y propone su modelo reticular, el cual describe un proceso gradual de ajuste y de cambio entre fines cognitivos, principios metodológicos y teorías. No obstante, cuando se trata de progreso, él enfatiza más la idea de Kuhn sobre que éste puede ser medido en función del incremento de la efectividad de resolución de problemas, intentando deshacerse del concepto de verdad en su acercamiento. Así pues, Laudan estipuló que «el progreso puede ocurrir si y solo si la sucesión de teorías científicas en cualquier dominio muestra un incremento en el grado de efectividad de resolución de problemas» (1978, p. 68).¹⁰

El papel que jugaría la medición en esta teoría me parece totalmente compatible con el rol que Kuhn le da a dicha práctica en períodos de ciencia normal, a saber: contribuye a la resolución de problemas y a explicitar el acuerdo razonable entre mundo y teoría. Sin embargo, debe notarse que más allá de esto sería especular sobre dicho rol en la postura de Laudan, ya que básicamente no existe un tratamiento particular sobre esta práctica en su famosa obra sobre progreso.¹¹ Se puede decir de Lakatos lo mismo. Recordemos que para este último, una serie de teorías científicas T_1, T_2, \dots, T_n dentro de un programa de investigación será *teóricamente progresiva* «si cada nueva teoría tiene algún exceso de contenido empírico sobre su predecesora, es decir, si predice algún hecho novedoso y hasta entonces inesperado» (Lakatos, 1970, p. 118); será *empíricamente progresiva* si se corrobora alguna parte (o todo) de dicho exceso de contenido empírico. Bajo esta perspectiva, la medición puede ser vista como una base sobre la cual corroborar el exceso de contenido empírico de una teoría respecto a otra, o incluso decidir entre dos programas de investigación, no obstante—defiende Lakatos—, la medición sin una teoría no tiene razón de ser, pues, nos dice, «cuando una teoría ‘interpretativa’ es eliminada, las mediciones ‘precisas’ llevadas acabo bajo el marco descartado pueden parecer, a la postre, más bien ridículas» (Lakatos, 1970, p. 140).

¹⁰Alan Musgrave (1979) defiende que esto no es realmente muy diferente de la aproximación tradicional del empirismo lógico, pues la solución de un problema empírico en Laudan puede ser escrita en términos del modelo *nomológico-deductivo*, a saber: $T, T \rightarrow P \vdash P$, en donde T es la teoría en cuestión y P la solución a un problema determinado.

¹¹La instancia ‘medición’ (*measurement*) no se da ni una sola vez en su (1978), mientras que ‘medida’ (*measure*) se da varias veces, pero solo en el sentido de ‘tener un modo de juzgar algo’.

En vista de lo anterior, podemos decir lo siguiente: parece que las aproximaciones de Lakatos y Laudan dan por sentado el papel que Kuhn le da a la medición, y que, por lo tanto, no hay un énfasis en procedimientos cuantitativos como criterio de progreso científico. Por tanto, no hay diferencia esencial estas dos aproximaciones y Popper o Kuhn, ya que el énfasis que los cuatro autores ponen está centrado en el análisis de los enunciados que son parte de la respuesta a los problemas científicos, mas no en el proceso de indagación y la función que la práctica científica tiene en éste.

2.1.4. Unificacionismo

Philip Kitcher (1993) señaló que gran parte de la filosofía de la ciencia del siglo XX ha tenido una tendencia fuerte por analizar los problemas de la ciencia de carácter filosófico a partir de un enfoque en proposiciones y teorías; desde el empirismo lógico hasta las aproximaciones de Kuhn y Laudan. Es por ello que, en contraste con las aproximaciones anteriores, Kitcher desarrolló una teoría de progreso que se enfoca en los cambios de «prácticas consensuadas» por la comunidad científica, más que en cambios de teorías (característica del empirismo lógico que todavía sobrevive en las aproximaciones de Lakatos y Laudan). De acuerdo con Kitcher, dicho enfoque en las prácticas científicas puede ayudarnos a apreciar en qué sentido la ciencia es acumulativa y racional. Así pues, propone que el avance de la ciencia se da en dos sentidos: por *progreso conceptual* y por *progreso explicativo*.

En términos generales, el progreso conceptual se logra cuando una práctica científica P_2 ajusta los límites de las categorías de una práctica predecesora P_1 para así lograr una conformidad más adecuada y específica a sus potenciales referentes (Kitcher, 1993, pp. 95, 104), en donde la referencia potencial de un término es un compendio de las maneras en que una comunidad puede fijar las instancias de tales referentes. A tal avance conceptual Kitcher le llama «refinamiento».

El progreso explicativo se da cuando una práctica mejora nuestro entendimiento de las dependencias de los fenómenos, *i.e.*, cuando una práctica P_2 corrige (ya sea agregando, eliminando o extendiendo) un esquema que explica de mejor manera una clase de fenómenos dependientes y específica algunas entidades o propiedades de las cuales aquellos fenómenos dependen (1993, p. 111).

El papel que tiene la medición en esta aproximación puede ser visto del lado del progreso conceptual, puesto que procesos de medición pueden ayudar a refinar nuestros conceptos cuantitativos. Más aún, cuando Kitcher discute la llamada *inducción pesimista*—la postura antirrealista que defiende que no tenemos base para aceptar como verdaderas nuestras teorías actuales debido a que la historia de la ciencia muestra que las teorías que alguna

vez se juzgaron como verdaderas fueron desechadas—nos dice que una de las cosas que tendría que demostrar el antirrealista es que efectivamente la historia de la ciencia revela la presencia de errores persistentes cuando adoptamos ciertas creencias a través de métodos específicos. Es cierto—dice Kitcher—que nuestros métodos y procedimientos de observación no son infalibles, sin embargo «no todos ellos son *igualmente* falibles». En otras palabras, cuando se trata de procesos de medición, vemos que éstos han tenido éxito en el refinamiento de nuestros conceptos. Kitcher defiende que el trabajo hecho en historia de la ciencia debería inclinarnos por un optimismo más que por un pesimismo:

«Ahora hay ejemplos en los que proyectos de medición se enfrentan con dificultad tras dificultad, otros en los que parece que vamos de logro en logro. Microscopios, telescopios, microscopios electrónicos, espectrómetros, todos parecen habernos dado un cuerpo de afirmaciones con grandes y crecientes grados de estabilidad». (Kitcher, 1993, p. 139)

No obstante, debemos notar también que el tipo de progreso que Kitcher propone está en función de un tipo de realismo que defiende que la ciencia es

una secuencia de prácticas que intenta incorporar enunciados verdaderos (tanto como sea posible) y articular la mejor unificación de éstos (tanto como sea posible). (Kitcher, 1993, p. 172)

Es decir, la versión de progreso que se ofrece depende, por un lado, de la posibilidad de refinar la adecuación de nuestros conceptos y, por tanto, de incorporar en la práctica enunciados verdaderos, y por otro lado, del desarrollo de esquemas explicativos correctos que unifiquen tales enunciados. Así pues, si bien Kitcher toma como unidad de análisis a las prácticas científicas, el criterio de progreso de éstas se encuentra fuertemente vinculado con una incorporación unificada de proposiciones verdaderas o adecuadas en la práctica. Por lo tanto, Kitcher reconoce que los instrumentos y mediciones pueden tener un rol importante en el progreso en tanto que el resultado de éstos han sido enunciados más estables que deberían ser incorporados en la práctica última e ideal, no obstante, al darles un lugar a tales enunciados en el criterio de progreso, me parece que hay un sentido en el cual la práctica científica de la que habla Kitcher viene a sustituir la noción de ‘teoría’ o ‘paradigma’ que antes ya había sido discutida.¹²

¹²Por supuesto, hay otros aspectos de la noción de ‘práctica’ de Kitcher que no son similares. Por ejemplo, él ha enfatizado cómo es que el avance de la ciencia se debe en gran medida a la organización y distribución del trabajo cognitivo en una comunidad científica. Esto no había sido enfatizado en propuestas anteriores.

2.1.5. Noción epistémica de progreso

Los debates contemporáneos que han tenido un lugar prominente sobre progreso no han sido muy diferentes en cuanto a la unidad de análisis tradicional que ha sido arrastrada desde el empirismo lógico. Alexander Bird (2007), por ejemplo, defiende una perspectiva de progreso epistémica, la cual distingue de la noción semántica y de la funcionalista-internalista. La diferencia radica en que la definición semántica sostiene que «el progreso es la acumulación de creencias científicas verdaderas (o verosímiles)» (2007, p. 65), mientras que una definición epistémica dice que «el progreso es la acumulación de conocimiento», por último, Bird identifica la noción funcionalista con la capacidad de resolución de problemas propuesta por Kuhn y Laudan.

Según Bird, la ventaja que tiene la definición epistémica sobre la semántica es que considera la justificación de las creencias; y sobre la funcionalista, que se considera la verdad de tales creencias. Un ejemplo que Bird usa para mostrar la superioridad de la noción epistémica del progreso es la medición de la velocidad de la luz, c . Supongase que tenemos una serie de mediciones $\langle H_1, H_2, \dots, H_n \rangle$ que se aproximan a c , ahora, debido a que el conocimiento implica verdad y que, por otro lado, la serie en cuestión representa una serie de *aproximaciones*, mas no de creencias verdaderas, la estrategia de Bird es defender que si la medición H es aproximadamente verdadera, entonces la proposición 'aproximadamente H ' o ' $A(H)$ ' es *totalmente* verdadera. Así pues, la serie $\langle A(H_1), A(H_2), \dots, A(H_n) \rangle$ será una secuencia de proposiciones verdaderas. Ahora, si alguno de los valores H fuese verdadero, pero llegásemos a él de manera accidental, la noción de progreso semántica no podría lidiar con tal problema y consideraría a dicha serie como progresiva; por otro lado, puesto que la noción funcionalista se intenta deshacer del concepto de 'verdad', entonces resulta problemático decir que la serie en general es progresiva en tanto se dice que se aproxima a la verdad. Así pues, la única vía es tomar en consideración la justificación y verdad de tal serie, lo cual hace la noción epistémica de progreso.

Si bien el conocimiento no se identifica con la verdad y la justificación, Bird acepta que este sí implica ambos conceptos. Por tanto, como se ve en el ejemplo presentado, la medición puede tener un papel importante en la noción de progreso epistémica en tanto puede servir de justificación para ciertas creencias. Sin embargo, la propuesta de Bird simplemente asume el papel que podría tener la medición en justificar creencias científicas, pero no se le asigna un rol central en el criterio de progreso, ya que, aunque la justificación es algo necesario para la noción de progreso epistémico, no es necesario realizar una medición para llevar a cabo tal justificación. Por otro lado, Bird sigue haciendo un análisis del problema en cuestión en términos de proposiciones verdaderas justificadas, no hay, como ya puede verse,

ni un enfoque ni una revisión a profundidad de alguna práctica científica, sino, más bien, un análisis en términos formales al modo de la epistemología tradicional. En este sentido, se ignora la reflexión sobre prácticas científicas y progreso desarrollada desde Kitcher en adelante.

2.1.6. Noción noética de progreso

Finnur Dellsén (2016) ha defendido, contra Bird, que el concepto clave en el progreso no es el conocimiento, sino el *entendimiento* científico, formulando así una versión *noética* del progreso que está en función del incremento del entendimiento. Así pues, nos dice, podemos encontrar episodios progresivos en los que el entendimiento incrementa pero no podemos decir que haya nuevas teorías o fenómenos conocidos, por otro lado, es posible señalar casos no progresivos que muestran un incremento en el conocimiento sin haber acumulación de entendimiento. Dellsén, pues, caracteriza al entendimiento científico como «comprender cómo explicar y predecir correctamente aspectos de un objetivo dado» (2016, p. 74).

Contra Bird, Dellsén ha defendido que la propuesta noética no requiere que el científico tenga justificación sobre las teorías, explicaciones y predicciones que usa para entender un determinado fenómeno. La estructura de tales casos es la siguiente: Sea T alguna teoría verdadera de la cual el científico, S, no tiene justificación y, por tanto, de la cual no se puede decir que sea conocida por S. Sea P un fenómeno real que no es conocido por S debido a la falta de justificación. Ahora, si suponemos que S descubre cómo T (una teoría verdadera) explica o predice P (un fenómeno real), entonces podemos decir que S ha ganado un entendimiento de P. Dellsén arguye que esta fue la manera en que Einstein logró un progreso científico al explicar el movimiento browniano (P) en términos de la teoría cinética del calor (T); en 1905, nos dice Dellsén, Einstein no tenía justificación para P ni para T y, sin embargo, hubo un progreso.

Lo que llama mi atención en esta propuesta es que Dellsén intenta mostrar que la justificación no es un elemento necesario para el progreso. Ahora, si tomamos en cuenta que la justificación era el ámbito en el que la medición podía tener un papel importante en la propuesta de Bird, entonces con lo que Dellsén parece comprometerse es que, si bien la justificación (y por tanto la medición) puede estar presente en los episodios progresivos, esta no es un elemento crucial para el progreso.

En efecto, uno de los ejemplos que él presenta para mostrar que es posible tener conocimiento, pero no entendimiento ni progreso, es el caso en el que se obtiene una serie correcta de reportes observacionales pobres que, si bien aumenta el conocimiento científico, no aumenta el entendimiento. El ejemplo que Dellsén (2016) presenta es ficticio, pero

pensemos en un caso en el que los reportes observacionales no son pobres, *v.g.*, las mediciones de Tycho sobre Marte: una lista de 923 observaciones hechas a lo largo de casi 18 años con los instrumentos más precisos del momento. Ahora, debido a que Tycho no logró comprender ni explicar la trayectoria de Marte, la noción de progreso noética afirma que tales mediciones no *constituyen* progreso científico, aunque debe notarse que sí lo *promueven* (pues eventualmente Kepler explicó dicha trayectoria). Dellsén (2018) enfatiza más la distinción entre progreso científico y promoción del progreso, defendiendo que los puros medios (tecnológicos, matemáticos, etc.) para lograr entendimiento o conocimiento no son en sí mismos progresivos cognitivamente, sino a lo sumo son promotores de este. Podemos decir, pues, que la noción noética de progreso no elimina el papel de las mediciones en la ciencia, sin embargo estas en sí mismas no son constitutivas del progreso, pues el concepto necesario y suficiente aquí es el de ‘entendimiento’. Por último, del mismo modo que Bird, Dellsén hace un análisis del progreso en términos formales, y no analiza la función que alguna práctica científica pueda tener para éste.

2.1.7. La unidad de análisis

A partir de lo anterior, se puede resaltar lo siguiente: (1) la unidad de análisis de las aproximaciones tradicionales, e incluso de algunas contemporáneas, son las teorías científicas y enunciados aceptados por los científicos; (2) el énfasis en la medición como práctica científica es secundario respecto al criterio de progreso propuesto, pues en muchos casos tal práctica es simplemente asumida, pero no hay un análisis sobre la función que dicha práctica puede tener para el progreso. A excepción de Kitcher—pero con ciertas reservas—, las aproximaciones filosóficas expuestas han asumido que el progreso debe ser revelado a partir del análisis de la transición de una teoría T_1 a una teoría T_2 , o de la transición de una proposición P_1 a una proposición P_2 , y han asumido que el progreso se da por algún tipo de acumulación (ya sea de fenómenos explicados, de contenido refutativo, de capacidad de resolución de problemas, de conocimiento o de entendimiento). Si bien es cierto que Kuhn, Lakatos y Laudan proponen una unidad de análisis más amplia con el fin de pensar el progreso en periodos históricos y de capturar el cambio revolucionario, los criterios de progreso que proponen se aplican a las teorías individuales abarcadas por el paradigma, programa de investigación o tradición de investigación, de tal modo que la unidad de análisis puede ser colapsada de nuevo a la teoría científica.

Tal vez por ello mismo resulta que (2) es una constante en tales aproximaciones, ya que al enfocarse en el análisis de los enunciados científicos y sus consecuencias, las prácticas quedan en el fondo, implícitas pero secundarias:

- El falsacionismo puede implicar una mayor precisión en la medición, no obstante, el requerimiento principal es tener mayor contenido empírico. Por otro lado, el hecho de que la medición tenga una carga teórica resulta muy problemático para la refutación de una teoría.
- Kuhn resalta características muy interesantes sobre la medición (como el poder de cerrar conflictos entre teorías y desatar nuevas investigaciones), sin embargo, para él, la medición no representa un punto desde el cual poder medir el progreso; la medición tiene principalmente un papel de consolidación de teoría.
- Lakatos y Laudan parecen asumir que la medición tiene un papel en la resolución de problemas, sin embargo, no hay un análisis sistemático de tal práctica en el progreso.
- Bird destaca la necesidad de la justificación para el progreso, dentro de lo cual podríamos colocar a la práctica de medición, sin embargo, sigue pensando en términos de creencias verdaderas y justificadas, mas que en prácticas científicas. No hay realmente un énfasis en la medición.
- Dellsén, argumentando contra la tesis medios-fin, llega a implicar que las mediciones no son constitutivas del progreso científico a menos que vengan acompañadas de entendimiento. La medición es a lo sumo promotora, mas no es en sí misma constitutiva del progreso.

2.2. Sumario

Las tres secciones anteriores han sugerido los siguientes puntos: (1) la medición puede jugar un papel importante para entender el progreso, puesto que presenta una convergencia de resultados y además abre campos fértiles de indagación; (2a) si es que el progreso se entiende desde la transición entre teorías, la medición no siempre nos ayuda a decidir por la teoría más verdadera, aunque debemos notar que (2b) hay instancias de progreso en las que no hay un cambio de teoría, sino metodológico relacionado con la medición; (3) las teorías tradicionales de progreso tiene como unidad de análisis la transición entre teorías o enunciados científicos, en donde la medición no tiene un papel primario. Lo que podemos decir hasta ahora es que si (2b) es correcto, eso haría que (2a) no sea problemático (como parece sugerir Losee (2004)), más aún, si (2b) es correcto, eso indica que el enfoque en teorías o enunciados (3) no es acertado, por el contrario, eso explicaría en parte su fracaso. La opción que propongo es explorar más detalladamente qué es lo que la medición puede

decirnos sobre el progreso científico (1), planteando dicho problema con un enfoque en la indagación científica.

Me parece que parte del fracaso de las aproximaciones tradicionales se encuentra en su enfoque en teorías, pues, como apunta Kitcher (1993), eso dificulta entender el progreso y la racionalidad.¹³ La pregunta es por qué. Para responder podemos anotar lo siguiente:

- (i) Las teorías de progreso científico intentan revelar el progreso en términos de la acumulación de *mejores* enunciados o teorías.

Aquí «mejores» significa distintas cosas dependiendo de la teoría (más verosímiles, más contenido empírico, más respuestas a problemas, etc.). No obstante:

- (ii) Si el progreso involucra el proceso de indagación para responder a una pregunta relevante sobre la naturaleza, entonces mostrar una serie de teorías o enunciados se queda corto al intentar revelar dicho progreso.

De (i) y (ii) se sigue que las teorías de progreso tradicionales, en tanto mantengan como unidad de análisis las doctrinas y enunciados científicos, no lograrán capturar de manera completa cómo es que las ciencias progresan.

Por otro lado, Hasok Chang (2007) menciona algunas razones para enfocarse en los procesos de justificación y mejoramiento de la medición para entender el progreso: la medición cuantitativa, en tanto que es una parte integral de la ciencia moderna, nos ayudará a entender un aspecto importante del progreso científico; a diferencia de cómo las teorías «vienen y van», el área de la medición es una de progreso inequívoco y duradero (2007, p. 7). A esto podemos agregar una razón más: analizar procesos de medición nos pone en el nivel de indagación ya antes mencionado (Sec. 1), *i.e.*, nos ayuda tanto a clarificar cómo es que los científicos responden a una pregunta relevante a través de dicha práctica como a mostrar cómo se abren espectros nuevos de preguntas a través de ésta.

En consecuencia, la cuestión a responder aquí es la siguiente: asumiendo las tres razones dadas para enfocarnos en dicha práctica como unidad de análisis, ¿qué función tiene la medición en el progreso de las ciencias? Los dos capítulos siguientes intentaré responder a esta interrogante, así pues, en el segundo, veremos un caso de estudio sobre la historia de la astronomía que nos ayudará a traer al frente ciertos elementos de las prácticas de medición, los cuales se analizarán más a detalle en el tercer capítulo.

¹³Por cuestiones de espacio no he señalado las principales fallas de las teorías de progreso científico, sin embargo, me parece que hay evidencia fuerte sobre el fracaso de todas ellas. Sobre los problemas que enfrentan, ver (Losee, 2004), (Dilworth, 2007), (Niiniluoto, 2019), (Niiniluoto, 1980).

—I often say that when you can measure what you are speaking about and express it in numbers you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind [...].

William Thomson, Lord Kelvin

3

La determinación de la Unidad Astronómica

3.1. Introducción

Hemos visto en el capítulo anterior algunas teorías filosóficas sobre el progreso científico, las cuales tienen como unidad de análisis ya sea a las teorías o a las proposiciones científicas. No obstante, esta aproximación resulta insuficiente para reconocer y analizar la dinámica tanto del conocimiento como de las prácticas científicas, pues la teoría es el producto de un proceso de indagación previo, en cuya realización podemos observar también una dimensión de la objetividad, de la racionalidad, y del crecimiento del conocimiento científico. Así pues, se vuelve también necesario reflexionar sobre el progreso teniendo como unidad de análisis a la práctica científica.¹

Al final del capítulo anterior se han dado algunas razones para enfocarse en prácticas

¹El siguiente capítulo aclarará cómo es que la práctica de medición tiene un crecimiento cognitivo. Provisionalmente, por ‘práctica científica’ se entiende «un conjunto de acciones coordinadas y controladas para cumplir con un fin epistémico». Martínez y Huang (2015, p. 92) señalan que las prácticas «tienen una estructura estable con la capacidad de reproducirse (con variantes) a través de diferentes procesos de aprendizaje». Esta es una característica importante que se asumirá en esta reconstrucción, ya que, como se verá más claramente en el siguiente capítulo, tal reproducción con variantes se puede entender como un proceso de pequeños cambios y ajustes a la práctica para que se dé un crecimiento en esta.

de medición científica, las cuales podemos resumir en que nos ayudan a entender (1) una dimensión cuantitativa de la ciencia, (2) un área de progreso inequívoco, y (3) parte del proceso de indagación científica. A esto podemos añadir que al poner en el centro a las prácticas de medición no se renuncia del todo a los análisis basados en teorías, ya que éstos también tienen su importancia y utilidad tanto para entender la misma práctica de medición como el progreso de éstas; por supuesto que las mediciones asumen ciertos supuestos, proposiciones y teorías, no obstante, lo que cambia ahora es el enfoque, a saber, pensar el progreso a partir del *crecimiento cognitivo* que se da a través del desarrollo y mejoramiento de las prácticas de medición,² manteniendo de este modo la importancia que tienen tanto las teorías como las prácticas en el progreso científico.

En este capítulo presentaré una parte de la historia de la medición de la Unidad Astronómica (UA), particularmente tres mediciones que se insertan entre los siglos XVII-XIX. Podemos señalar dos tipos de importancia que tuvo el poder determinar de manera precisa la distancia que hay entre la Tierra y el Sol, a saber, una importancia científica y otra epistemológica. La primera tiene que ver con el hecho de que, a partir del modelo copernicano y del trabajo de Kepler, lo que teníamos era «un mapa del sistema solar, *correcto en proporción, pero sin una escala en millas*» (Young, 1889, p. 384), precisamente la importancia científica que tuvo determinar UA fue encontrar la escala 1:1 que dicho mapa tenía, para así tener una verdadera concepción de las dimensiones, masas y distancias celestes. Así pues, como la distancia que hay entre la Tierra y el Sol (UA) sirve como unidad de medida para todas las demás distancias, cualquier grado de error en ésta representaría un error en aquellas, lo cual resulta muy problemático, ya que en distancias celestes sumamente grandes ese error se multiplica, provocando una gran imprecisión y, por tanto, un conocimiento exiguo sobre éstas.

²Por *crecimiento cognitivo* se entiende aquí un proceso de corrección y ajuste de herramientas cognitivas para conseguir un fin (cognitivo) a la vista. Aquí se puede dar tanto una incorporación o conservación de herramientas ya existentes, como una creación o introducción de nuevas herramientas. El capítulo siguiente está dedicado a clarificar dicho concepto. Tal noción de *crecimiento cognitivo* está basada en pláticas sostenidas con el Dr. Godfrey Guillaumin y en su concepto de ‘expansión de la experiencia’ en su (Guillaumin, 2019).

Por *herramienta cognitiva* entiendo aquí cualquier medio, físico o intelectual, empleado en la prosecución del fin cognitivo pretendido. Consecuentemente, telescopios, modelos matemáticos, tablas astronómicas, etc., pueden ser herramientas cognitivas si se emplean en la prosecución de un fin cognitivo. Tal concepto se basa en lo que Nersessian (1995) entiende por ‘cognitivo’, a saber, se refiere a «cómo los humanos razonan, juzgan, representan y llegan a entender» (1995, p. 194), así pues, un enfoque cognitivo en ciencia debe resaltar «las herramientas cognitivas que los científicos emplean y los artefactos que construyen en prácticas de pensamiento teóricas y experimentales» (*ibid.*).

La importancia epistemológica de esta y otras mediciones radica en que podemos apreciar la complejidad de la dimensión de justificación del conocimiento científico. Es decir, podremos apreciar que una manera en la que se obtuvo y se progresó en el conocimiento sobre UA fue usar herramientas cognitivas de prácticas anteriores (asumiéndoles como adecuadas), corregir o mejorar algunas otras herramientas, y, en ocasiones, abandonar herramientas que resultaron inadecuadas para el fin propuesto. Sin embargo, todo ello siempre fue sobre la base construida por las prácticas de medición de UA anteriores y disponibles, sin estas, no se hubiese presentado un crecimiento cognitivo. En este sentido el tipo de progreso que se presenta es lo que Hasok Chang llama *iteración epistémica*, es decir, a partir de la medición de un mismo parámetro se van creando etapas de conocimiento sucesivas, cada una de las cuales se construye a partir de la anterior, para así mejorar la obtención de ciertas metas epistémicas. Así pues, esta sucesión de aproximaciones tiene como fin alcanzar un grado de exactitud, que nos dará confianza sobre el conocimiento que tenemos (Chang, 2007, p. 18). Esto muestra, por supuesto, la insuficiencia del análisis tradicional de conocimiento como ‘creencia verdadera justificada’, la cual se ha asumido también en ciertas aproximaciones al progreso.³

Así pues, a continuación me concentraré en tres mediciones que se insertan dentro de los siglos mencionados arriba, a saber: la medición del tránsito de Venus y, con ello, de la paralaje solar de Horrocks (1639), la medición de la paralaje de Marte por parte de Giovanni Cassini y la expedición de Jean Richer a Cayena (1672), y finalmente la medición de la velocidad de la luz por parte de Léon Foucault (1862).

Tal vez el lector encuentre extraño la reconstrucción de dos casos muy cercanos en tiempo, y otro llevado a cabo casi dos siglos después. Las razones de esta elección son las siguientes. La importancia del primer caso radica en que podemos considerarle la primera medición moderna de la paralaje solar (π_{\odot}), el cual marca una nueva etapa en la determinación y precisión de dicho parámetro, pese a hacer uso de supuestos armónicos que sirvieron para subsanar la falta de herramientas y conocimiento astronómico. El segundo caso se trató de una gran mejora tanto en el valor propuesto como en el método trigonométrico usado, quedando, sin embargo, sometido a una gran variedad de ambigüedades. No obstante, éste representó uno de los grandes hitos de la medición de π_{\odot} , el cual se retomaría eventualmente con el fin de perfeccionarlo. En el trecho entre 1672 y 1862 encontramos básicamente dos métodos: el trigonométrico—a partir de mediciones del tránsito de Venus (en 1761 y 1769)—y el gravitatorio. Del primero se dará una pequeña reseña en este capítulo, del segundo no se dirá prácticamente nada aquí, principalmente a falta de

³Véase, por ejemplo, Bird (2007).

espacio. En vez de ello, he decidido hacer un salto hasta 1862, debido a que la medición de Foucault representó un caso muy interesante de cooperación entre la astronomía y la física para medir π_{\odot} . Esta medición es una instancia clara de una coordinación muy compleja tanto de conocimiento anterior como de herramientas cognitivas, lo cual sólo pudo haberse dado gracias a un desarrollo lento y gradual de habilidades intelectuales e instrumentales para poder mejorar el control de las condiciones de observación y medición.

Si bien es cierto que la historia de la determinación de UA no termina allí, me parece que estos casos son suficientes para poder apreciar el mejoramiento gradual en la exactitud del valor de π_{\odot} y apreciar, a su vez, el crecimiento de la práctica de medición de dicho valor. Así pues, mi objetivo en este capítulo será mostrar cómo se dieron estas mediciones y, a través de ello, mostrar (1) la continuidad que hay entre las prácticas de medición de UA y (2) el crecimiento controlado de dichas prácticas, anotando también en qué sentido las mediciones fueron mejorando a través de corregir conocimiento anterior y eliminar supuestos falsos.⁴ Eventualmente en el tercer capítulo se hará un análisis de los conceptos relevantes que surgen a partir de este análisis histórico, para poder entender el progreso y el crecimiento de la práctica de medición.⁵

3.2. La primera medición científica de UA

3.2.1. El tránsito de Venus

Jeremiah Horrocks (1618-1641) ha sido llamado «el padre de la astronomía británica». Se dice que este joven astrónomo tenía un talento comparable al de Newton, sin embargo su temprana y repentina muerte a los 22 años no permitió que el mundo viera todos los frutos de dicho talento.⁶ Horrocks también es conocido por ser «el primer astrónomo digno de mención que aceptó completamente y sin reservas los grandes resultados del trabajo de

⁴En el capítulo 5, sec. 5.1, se aclarará de mejor manera qué se entiende por «control». Provisionalmente es bueno señalar que este concepto se refiere al desarrollo de habilidades e instrumentos para coordinar y manipular la manera en que se observa o se recogen datos. Este control siempre se da en vista del cumplimiento de un fin epistémico, pues el asegurar de mejor manera este último regula dicho desarrollo de habilidades.

⁵Téngase en cuenta por ahora la distinción provisional entre ‘progreso’ y ‘crecimiento’ presentada en la introducción (Sec. 1.2), a saber, dado que el crecimiento toma en cuenta el mejoramiento y el retroceso, este es un concepto más amplio que implica al progreso, pero no al revés. La sección 5.2 del capítulo siguiente aclara de mejor manera lo que se entiende por «crecimiento cognitivo».

⁶«Eventualmente Newton mismo, mientras escribía su obra maestra, los *Principia*, reconoció su deuda con “nuestro compatriota Horrox”» (Ferne, 1996, p. 114).

Kepler» (Dreyer *apud* Applebaum, 1970, p. 65), de tal modo que este joven astrónomo fue el primer defensor de la astronomía de Kepler en Inglaterra.

Desde 1635 Horrocks comenzó a calcular efemérides a partir de las *Tabulae motuum coelestium perpetuae* de Lansberge, sin embargo llegó a la conclusión de que dichas tablas «no solo eran inadecuadas, sino también basadas en una teoría planetaria falsa» (DSB, 2008, p. 514), así, bajo el consejo de su amigo Crabtree, comenzó a estudiar las *Tablas Rudolfinas* de Kepler y pronto se dio cuenta de la superioridad de estas.

Kepler había predicho tránsitos de Venus para 1631 y 1761, pero no para 1639, lo cual hizo que los astrónomos no se dieran cuenta de tal fenómeno en ese año (Applebaum, 1970, p. 73). Guillaumin (2019) llama a esta predicción de Kepler «la primera predicción científica moderna», principalmente porque (i) era una afirmación matemáticamente calculada que (ii) tuvo un alto grado de precisión sobre el evento en cuestión, pues mientras que otras tablas erraban por días y hasta semanas, el error de Kepler fue solo de algunas horas (2019, p. 154). Basado en las tablas keplerianas, y corrigiendo algunos errores en éstas, Horrocks predijo con exactitud un tránsito de Venus en diciembre de 1639, convirtiéndose así en el primer astrónomo en realizar una medición sobre tal fenómeno. Podemos pensar en esta predicción como una extensión de «la primera predicción científica moderna». Parte de la importancia que el trabajo de Kepler tuvo para este episodio es que, gracias a éste, Horrocks supo con gran precisión la ventana de tiempo dentro de la cual ocurriría el evento. Sin las *tablas rudolfinas* como herramienta cognitiva, la medición en cuestión simplemente no podía realizarse. Aquí, pues, vemos un caso de incorporación y corrección de las herramientas cognitivas disponibles para poder cumplir con el fin cognitivo a la vista: medir el diámetro de Venus y calcular las dimensiones del sistema solar. Si bien tales herramientas aún tenían errores, eran las mejores en el momento, pues debido su gran precisión, fueron condición de posibilidad de la medición de Horrocks.

Así pues, *inter alia*, Horrocks se dio cuenta de un error sistemático de 8' en las tablas de Kepler,⁷ y así, al corregirle, supo que Venus transitaría la parte baja del disco solar el 4 de diciembre. Horrocks escribió de inmediato a su amigo William Crabtree en Manchester, para que ambos realizaran observación cuidadosa del evento, sin embargo, este último solo

⁷Para hablar de distancias y dimensiones aparentes en el cielo, uno no podría decir correctamente que dos estrellas cualesquiera están separadas por cinco o diez pies o centímetros. Es decir, no es correcto expresarles en dimensiones lineales. En vez de ello, los astrónomos expresan estas magnitudes en dimensiones angulares, particularmente en grados (°), minutos (') y segundos ("). Así pues, *v.g.*, mientras que el semi-diámetro *lineal* del Sol es alrededor de 697,000 kilómetros, su semi-diámetro *angular* es alrededor de 16'. «Las unidades angulares solas pueden ser correctamente usadas para describir distancias aparentes y dimensiones en el cielo» (Young, 1889, p. 7).

pudo observar unos cuantos minutos del tránsito debido al mal clima. No obstante, sus observaciones generales concordaban con las de Horrocks

Dentro de esa «primera predicción», Kepler incluyó otra en la cual su error fue mayor. En sus *Tablas rudolfinas* Kepler determinó cuál debía ser el tamaño aparente de Venus y de Mercurio en sus tránsitos por el Sol: Venus debería aparecer con un diámetro de $7'6''$ (aproximadamente un cuarto de del diámetro aparente del sol), mientras que Mercurio sería de $2\frac{1}{2}'$ (*i.e.*, una décima parte del diámetro solar) (Van Helden, 1985, p. 97). Sin embargo, Pierre Gassendi (1592-1655) observó el tránsito de Mercurio en 1631 y se sorprendió al notar que el tamaño del planeta era mucho más pequeño del predicho por Kepler, *i.e.*, $20''$ de arco (Van Helden, 1985, p. 99). Pronto Horrocks observaría un fenómeno similar.

De acuerdo con sus propias correcciones sobre la excentricidad del Sol y la teoría de Venus, aunado a su lectura del reporte de Gassendi sobre el tránsito de Mercurio, Horrocks se dio cuenta de que Venus aparecería mucho más pequeño de lo esperado por Kepler, y notó que el uso de una cámara obscura—tal como lo aconsejaba Kepler—no sería suficiente para la medición pretendida,⁸ así pues, exhortó a Crabtree a usar un método distinto, esto es, una proyección telescópica para poder apreciar el diámetro aparente de ambos cuerpos: La técnica a utilizar era proyectar con un telescopio la imagen del Sol sobre una pantalla en la cual debía estar dibujado un círculo de seis pulgadas de diámetro, para así hacer coincidir la imagen del Sol, a su vez, dicho diámetro debía estar dividido en treinta partes iguales para tener una escala de medición (Guillaumin, 2019, p. 160).

Kepler aconsejaba el uso de una cámara obscura para este tipo de observación, ya que, según él, «debido a su falta de vidrio, [la imagen] queda libre de distorsión» (Horrocks, 2012, p. 8), sin embargo, Horrocks sabía que este método no permitiría una imagen nítida. Para corregir esto, usó un telescopio galileano para proyectar perpendicularmente a su diagrama la imagen del Sol, además arregló los lentes del telescopio para obtener un enfoque nítido que rellenara exactamente el diagrama dibujado. Todo ello fue necesario para poder mover el aparato y seguir la posición del Sol a través del cielo (Aughton, 2004, p. 127). Horrocks, pues, tomó tres observaciones cuidadosas del tránsito: a las 15:15 hrs., 15:35 hrs. y 15:45 hrs., y así determinó que el diámetro angular aparente de Venus era de $1'16''$, mientras que el diámetro solar era de $31'30''$ (Figura 3.1) (Horrocks, 2012, p. 58). De nuevo vemos un caso de incorporación y mejoramiento de las herramientas, pues la idea de la cámara obscura es mantenida, a saber, obscurecer un cuarto y observar un haz de luz. No

⁸Tal como su nombre lo indica, la cámara obscura se trata de un cuarto oscuro, pero con un pequeño orificio en el techo, pared, o ventana, a través del cual la imagen del exterior es proyectada en el lado opuesto del orificio o en una pantalla (Gernsheim, 1969). Debido al pequeño tamaño de la imagen proyectada que pasa por el orificio, Horrocks notó que Venus aparecería tan pequeño que ni siquiera sería apreciado.

obstante, la incorporación del telescopio para lograr un tamaño y nitidez que permitieran la observación del evento introdujo un nuevo medio para lograr la medición.

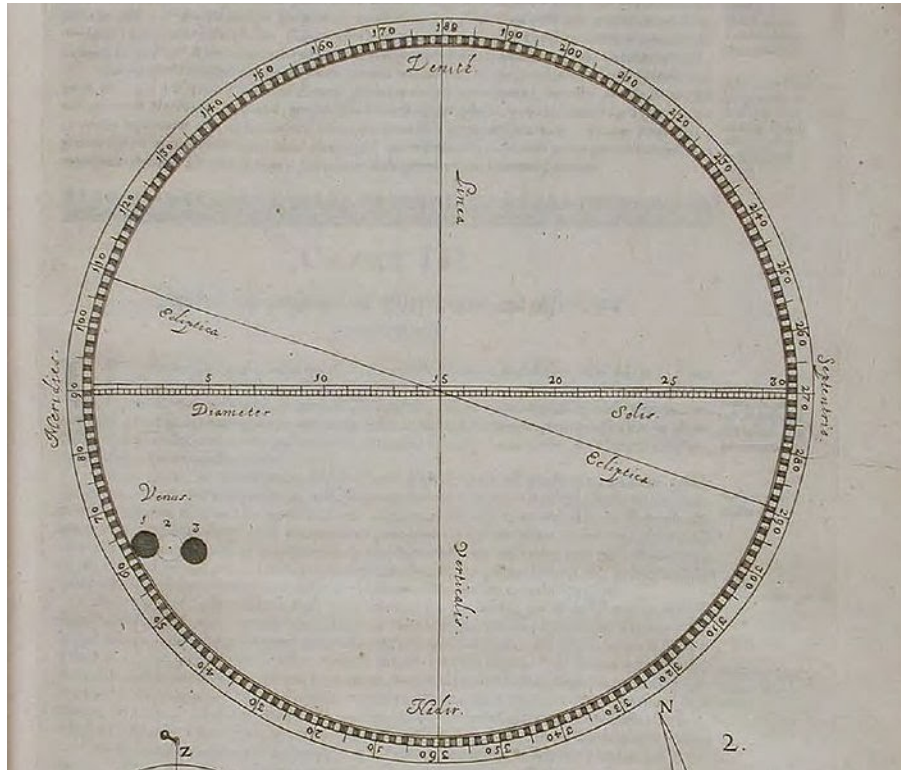


Figura 3.1: Dibujo de Hevelius sobre la observación de Horrocks del tránsito de Venus. Publicado de la edición de Hevelius de *Venus in sole visa* en 1662.

3.2.2. Las grandes dimensiones del sistema solar

¿Cómo usar estos datos para determinar el tamaño del sistema solar y la unidad astronómica? Para ello Horrocks sabía que las leyes de Kepler nos dan una relación precisa entre los períodos de los planetas y su distancia media con el Sol, de tal modo que si conseguimos medir alguna de las distancias planetarias, entonces podríamos saber el resto de éstas. De igual modo, si pudiéramos saber la distancia media Tierra-Sol, entonces podríamos saber las dimensiones del sistema solar. Consecuentemente, el método usado por los astrónomos para determinar dicha distancia (UA) es medir la *paralaje solar* (π_{\odot}).

La paralaje es un cambio aparente en las posiciones relativas de objetos que se encuentran a diferentes distancias cuando son vistos desde diferentes lugares (Mitton, 2007). Tal cambio tiene como resultado un ángulo que se forma a partir de la línea que une los puntos de observación. Por ejemplo, si uno extiende el brazo y coloca cualquier dedo de

la mano frente a los ojos, lo que tenemos es una distancia entre estos y el dedo. Ahora, supongamos que, a unos pocos metros detrás de nuestro dedo, hay un objeto fijo, digamos, una botella de agua. Así pues, si cerramos uno de nuestros ojos, veremos que nuestro dedo tiene una posición relativa a la botella, pero si ahora observamos solo con el otro ojo, nos daremos cuenta de que nuestro dedo cambia su posición también con relación a la misma botella. En este cambio de posición que hay entre ambos objetos observados (mi dedo y la botella) existe una diferencia angular (ángulo de paralaje), de tal modo que si logramos medir dicho ángulo a partir de las dos observaciones hechas, podremos trazar un triángulo rectángulo cuya base es $\frac{1}{2}$ de la distancia que hay entre nuestros ojos, y cuya altura es la distancia que hay entre el centro de nuestras observaciones (la nariz) y el objeto observado (el dedo).

El método de paralaje no era nuevo en astronomía, pues este ya había sido ocupado por Tycho Brahe más de medio siglo antes. A mediados de la década de 1580s, Tycho había terminado ya su modelo geoheliocéntrico como respuesta a los sistemas rivales de Copérnico y Ptolomeo, de tal modo que ahora había tres modelos astronómicos que «salvaban los fenómenos». Sin embargo, «una diferencia crucial entre el sistema ptolemaico por un lado y los sistemas copernicano y el tychónico por el otro era que bajo estos sistemas modernos Marte debía, en ciertos momentos, acercarse mucho más a la Tierra que bajo el sistema ptolemaico» (Wootton, 2015, p. 193), Tycho se dio cuenta de esto e intentó resolver el problema midiendo la paralaje diurna de Marte (Fig. 3.2), de tal modo que al poder calcular la distancia que había entre la Tierra y Marte, uno podría saber si ambos cuerpos se acercaban más de lo que el sistema ptolemaico permitía o no. Desafortunadamente Tycho no logró concretar su argumento contra Ptolomeo, en especial porque no calculó bien la refracción de la luz causada por la atmósfera en el horizonte (Wootton, 2015, p. 193),⁹. Sin embargo, el método de paralaje mostró su utilidad para la astronomía, ya que en el siglo XVII se se retomaría para medir la paralaje solar.

El problema con la medición de la paralaje solar, para así determinar la unidad astronómica, es que la luz del Sol no permite observar otros cuerpos en el fondo y, por tanto, no se puede saber de manera directa qué diferencia angular tiene respecto a tales cuerpos. Es por ello que Horrocks tenía que encontrar otro método para medir dicha paralaje, uno en el

⁹La refracción atmosférica es la desviación de la luz al pasar a través de la atmósfera, el índice de refracción es una función de la presión, temperatura y frecuencia atmosférica. La refracción atmosférica se divide en tres categorías: astronómica, terrestre, y geodésica. El fenómeno en cuestión es el de la primera categoría y se refiere a «los efectos de desviación de la luz para objetos que están fuera de la atmósfera terrestre y relativos a un observador que se encuentran dentro de la atmósfera» (Thomas & Joseph, 1996, p. 279).

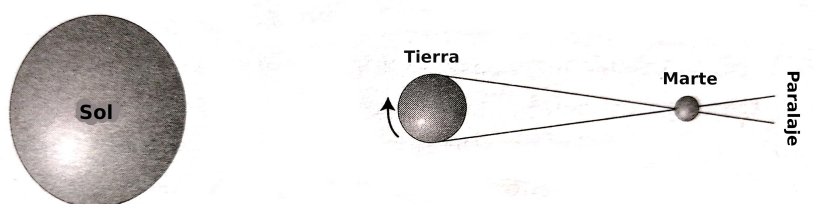


Figura 3.2: La paralaje de Marte. En este diagrama se muestra la triangulación que hay entre el diámetro de la Tierra y la posición de Marte. El ángulo de paralaje de Marte es la mitad del ángulo subtendido en la figura. Este método fue usado por Cassini y Richer en 1672 para medir π_{\odot} . Ilustración adaptada a partir del original en (Aughton, 2004, p. 137).

cual pudiese usar los datos obtenidos en el tránsito de Venus y la observación de Gassendi. Para este propósito, Horrocks supone una proporción de Kepler:

Johannes Kepler, fácilmente el mejor de los astrónomos, discutiendo las proporciones relativas de los planetas, piensa que “nada es más consistente con la naturaleza que el orden de sus magnitudes deba ser el mismo que el orden de sus esferas, de tal modo que, de los seis planetas primarios, Mercurio deba ser el menor y Saturno el mayor, en tanto que el primero se mueve sobre la órbita más pequeña y el segundo en la órbita más grande”. (Horrocks, 2012, p. 66)

Ahora, de las tres maneras de interpretar «magnitudes de los cuerpos» (en tanto diámetro, superficie, o volumen), Horrocks decide que la proporción en cuestión debe ser entre diámetros y órbitas planetarias, pues de alguna manera la evidencia de la que disponía sugería esto. Es decir, Horrocks asumió, por mor del argumento, que la distancia Tierra-Sol era de 98,409 unidades, figura calculada a partir de una distancia media de 100,000 unidades y de permitir el aplanamiento elíptico de la órbita terrestre.¹⁰ La distancia Venus-Sol era de 72,000, y la distancia Tierra-Venus, 26,409 unidades. Así pues, habiendo medido un ángulo de 1'16" de diámetro aparente para Venus, el ángulo de este mismo planeta, visto desde el Sol, resultaba de 28" (Aughton, 2004, p. 139). Del mismo modo, utilizando los 20" de diámetro aparente que Gassendi midió para Mercurio, la distancia Tierra-Mercurio, 67,525 unidades, y la distancia Mercurio-Sol, 38,806 unidades, resultaban 34" de arco como diámetro para Mercurio visto desde el Sol, el cual era casi el mismo diámetro que el de Venus.

¹⁰En este caso, las 100,000 unidades refieren a una figura utilizada por Kepler en su *hipótesis vicaria*. En el capítulo 32 de su *Astronomia Nova*, Kepler formuló la regla de las distancias, la cual es una proporción entre los tiempos que un planeta tarda en recorrer arcos iguales y su distancia con el Sol. Para esto simplemente asumió una órbita circular con un semi-diámetro dividido en 100,000 partes iguales, con el fin de estipular una unidad que le ayudase a establecer la proporción mencionada.

A continuación Horrocks se concentra en los demás planetas, para los cuales propone los siguientes valores en su capítulo 17 de su *Venus in sole visa*:

Planeta	Diámetro aparente desde la Tierra	Diámetro visto desde el Sol
Venus	1'16''	0'28''
Mercurio	$\pm 20''$	0'34''
Júpiter	37''	0'28''
Saturno	+ 30''	+ 30''

Cuadro 3.1: En esta tabla se muestran los valores sobre el diámetro que cada planeta debía guardar vistos desde el Sol; idealmente éste debía aparecer de 0'28''. De acuerdo con la proporción asumida por Horrocks, el diámetro de Marte es anómalo, ya que es mucho más pequeño de lo esperado; por otro lado, Horrocks propone que Júpiter debe guardar un diámetro de 0'28'' de acuerdo a un estimado que él mismo considera ser no muy exacto (Horrocks, 2012, p. 70). Por supuesto, esto representó parte de la imprecisión del método de Horrocks.

Hay algunas cosas que notar sobre esta tabla. Primero, Horrocks sabía que Marte no cumplía con su teoría, pues aparecía más pequeño de la proporción esperada, lo cual atribuía a la debilidad de la luz que emite el planeta (Horrocks, 2012, p. 70). Segundo, Horrocks tenía razones para suponer que el diámetro de todos los planetas, visto desde el Sol, debía ser de 28'', y que si bien los diámetros calculados no correspondían exactamente a tal dimensión, la mayoría de los planetas parecían guardar muy de cerca dicha proporción. De hecho, Horrocks atribuye la pequeña diferencia a errores en la observación. Según Peter Aughton (2004), si tal supuesto hubiera sido verdadero, habría pasado a la historia como la *ley de Horrocks*, el cual el mismo astrónomo expresa así:

Digo, por tanto, que cualquier planeta primario, que diste del Sol 15,000 semi-diámetros [de su propia órbita], aparece por tanto en su distancia media con el Sol casi 0'28''.
(Horrocks, 2012, p. 69)

Pese a que Horrocks tenía razones para establecer esto, dicho supuesto basado en armonía kepleriana es falso. Y si bien le permitió calcular la paralaje solar muy por debajo del valor tradicionalmente aceptado (2'-3'), realizando así una mejor medición que los antiguos,¹¹ a su vez no quedó libre de dudas. La gran incertidumbre emanada de tal método recaía en el hecho de que las observaciones eran inconsistentes con el modelo asumido por

¹¹Al respecto, Guillaumin (2019, 163, n. 13) anota que el argumento de Horrocks, el cual deduce su valor a partir del diámetro de Venus visto desde el Sol, y de un supuesto (falso) sobre armonía planetaria, no está en la antigüedad.

Horrocks, pues estas se desviaban por algunos segundos del diámetro predicho. Así pues, una de las fuentes de esta incertidumbre era asumir un presupuesto falso.¹²

Sin embargo, a pesar de esto, la medición de Horrocks sí era mejor en cuanto a la estimación correcta de las magnitudes de las distancias planetarias, y, claro, en cuanto a la medición de UA. Es decir, una vez asumido que la Tierra debía cumplir también con la proporción mencionada, y conociendo ya el diámetro de la Tierra, lo único que quedaba era hacer los cálculos. Así, «en tanto la línea que conecta el centro del Sol al centro de un planeta bisecta estos 28'' de diámetro, creando de este modo un par de triángulos rectángulos a través del diámetro ecuatorial de la Tierra, Horrocks consideró que la paralaje solar debía ser de 14'''» (Chapman, 2004, p. 17). Esta figura, por supuesto, daba una unidad astronómica de 15,000 r_t , valor que puede parecer muy lejano al aceptado hoy en día (23454.79 r_t), no obstante, debe notarse que el valor más preciso anterior a Horrocks era de 3470 r_t . Sin duda, Horrocks fue el primero en darse cuenta de las gigantescas dimensiones del sistema solar.

La medición de Horrocks se dio a partir de las siguientes herramientas cognitivas: la corrección de las *tablas rudolfinas* para predecir con precisión el evento, el telescopio galileano para proyectar nítidamente la imagen del sol en un diagrama con una escala de medición, un supuesto (falso) sobre armonías planetarias, y, finalmente, la tercera ley de Kepler. Estas herramientas, que permitieron una mejor determinación de UA, simplemente no estaban disponibles antes del siglo XVII. El método de Aristarco, *v.g.*, determinaba UA a través de resolver el triángulo que se forma entre el Sol, la Luna y la Tierra cuando la Luna está solo iluminada por la mitad, suponiendo que el ángulo que se formaba en el punto donde estaba la Luna era de 90°.¹³ Sin embargo, debido a que la superficie lunar es irregular, es casi imposible observar el momento en que la luna está iluminada por la mitad con el grado de precisión necesaria (Young, 1889, p. 388). Así pues, a pesar de la gran incertidumbre en su método, Horrocks midió π_{\odot} con un grado de precisión que los antiguos simplemente no podían alcanzar, y esto no debido a una falta de ingenio de estos, sino más bien debido a la falta de las herramientas cognitivas de las que Horrocks disponía.

¹²De acuerdo con la teoría de medición que Eran Tal (2012) defiende, podemos decir que esta medición era epistémicamente inexacta, en donde exactitud epistémica se define como «acuerdo cercano entre valores atribuidos razonablemente a una cantidad basado en su medición» (p. 30). Tal exactitud depende también del acuerdo entre la medición y el modelo asumido para ésta, así pues, dado que (1) había duda sobre la cercanía en acuerdo del diámetro de algunos planetas, y (2) dado que el modelo de Horrocks se basaba en un supuesto falso, la medición producía una gran incertidumbre.

¹³Para una descripción detallada sobre este método, consultar Young (1889, p. 388) y Rogers (2011, pp. 235-36).

Astrónomo	Paralaje solar	Distancia en r_t	au
Aristarco (280 AC)	2'59"	1150	0.04903
Ptolomeo	2'50"	1210	0.05159
Copérnico	2'55"	1179	0.05026
Tycho Brahe	2'54"	1183	0.05043
Lansberg	2'13"	1551	0.06612
Kepler	0'59"	3470	0.14794
Horrocks	0'14"	15000	0.63952
Valor Moderno	8".794143	23454.79	1

Cuadro 3.2: Tabla que muestra los valores aceptados en distintos momentos históricos. La tercera columna expresa la distancia en radios terrestres ($r_t = 6378.140$ km), y la última columna expresa la distancia como una fracción del valor moderno de la unidad astronómica ($au = 149,597,870.691$ km = $23454.79 r_t$). Notar que la distancia Tierra-Sol = $r_t \times [\tan(\text{paralaje solar})]^{-1}$. Tabla construida a partir de (Hughes, 2001) y (Aughton, 2004).

3.3. Un nuevo uso de un método viejo

La obra de Horrocks permaneció casi inédita y desconocida hasta que Johannes Hevelius (1611-1687) publicó el pequeño tratado como un apéndice de su *Mercurius in Sole Visus* en 1662, lo cual llamó la atención de muchos astrónomos.¹⁴ No obstante, el propio Hevelius se rehusó a aceptar lo gigantesco que resultaba ser el universo a partir de la medición de Horrocks, así que él mismo propuso una paralaje solar de 40" y, por tanto, una unidad astronómica = $5,000 r_t$, sin explicar, empero, cómo es que llegó a tal valor (Van Helden, 1985, p. 126). Incluso el mismo Newton, eventualmente, se negó a aceptar el valor de Horrocks en su primera edición de los *Principia*, proponiendo un valor de 20" de paralaje solar. Esta falta de convergencia provocaba mucha confusión sobre cuál debía ser el nuevo estándar para UA, pues lo que se sabía con certeza a principios del siglo XVII es que π_{\odot} debía ser menor a 1'.¹⁵ Este período de la medición de UA se puede caracterizar por una gran incertidumbre sobre su valor.

Al parecer a partir del método de Horrocks solo podíamos estar seguros de que el universo conocido por los astrónomos anteriores era muchísimo más pequeño de lo que

¹⁴Entre los científicos que admiraron la obra de Horrocks se encuentran Johannes Hevelius (1611–1687), John Wallis (1616–1703), Christian Huygens (1629–1695), John Flamsteed (1646–1719), y el propio Newton.

¹⁵Recordemos que el estándar que perduró desde la antigüedad hasta la obra de Kepler es la medición de Aristarco hecha en el 280 AC, quien propuso una paralaje solar de 2'59".

en realidad es, no obstante, el valor propuesto para π_{\odot} no quedaba fuera de dudas y ambigüedad. Más aún, Horrocks había sido el primero en observar y medir el diámetro aparente de Venus, pero no podía medir su paralaje, ya que para ello requería de al menos dos cosas: (1) de una segunda estación mucho más lejana de lo que estaba su amigo Crabtree para poder medir una diferencia angular y (2) sincronizar estas mediciones, para lo cual se necesitaban medios de los cuales Horrocks no disponía. Como tal, no podemos catalogar el método de Horrocks como un método trigonométrico, puesto que si bien propuso un valor para π_{\odot} a partir de una medición astronómica, llegó a este no por una triangulación, sino haciendo uso de un supuesto armónico falso; de hecho, el valor que primero obtuvo no fue el de π_{\odot} para así calcular UA, sino justamente al revés.

En la segunda mitad del siglo XVII se retomó y mejoró el método utilizado por Tycho, el cual, por sus características, sí podemos catalogar como trigonométrico para medir la unidad astronómica, a saber, medir la paralaje de Marte. Este es un claro ejemplo de *iteración epistémica*, ya que se mediría de nuevo el mismo parámetro, pero haciendo uso de mejores herramientas cognitivas y con un fin distinto: determinar la distancia media Tierra-Sol. A su vez, tal medición dependió del conocimiento disponible a partir de los datos de Tycho, pero también hubo una mejora en la medición. Veamos a grandes rasgos de qué manera se llevó a cabo esta nueva determinación de la paralaje de Marte.

3.3.1. La paralaje de Marte

Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), *v.g.*, quien era más admirado por sus habilidades observacionales que teóricas, dudaba de los métodos tradicionales usados para determinar la paralaje solar, es por ello que concentró gran parte de su atención al problema de la refracción, presentando la primera teoría de refracción astronómica basada en la ley de Snell (Mahan, 1962, p. 497).¹⁶ Y, puesto que era necesario hacer todavía correcciones para la refracción y para la paralaje, había una ambigüedad, así pues, a la llegada de Cassini a París en 1669, tales fenómenos se habían convertido en el programa central de la *Académie des Sciences* para reformar las tablas astronómicas. Nótese, pues, que este programa de investigación desarrollaría herramientas cognitivas de las cuales Tycho no disponía para concretar su argumento contra el sistema ptolemaico.

Los astrónomos notaron que en el otoño de 1672 ocurriría un evento extraño: Marte

¹⁶Vemos aquí la primera mejora con respecto al método de Tycho, ya que, recordemos, éste último no pudo medir satisfactoriamente la paralaje de Marte debido al problema de la refracción. La mejora en las tablas de refracción determinó en dónde y cómo se podía realizar esta medición. En este sentido, esta nueva iteración ya era progresiva con respecto a la anterior.

entraría en oposición estando en su perihelio, *i.e.*, pasaría muy cerca de la Tierra y su paralaje sería $2\frac{1}{2}$ veces más grande que la del Sol, haciendo menester una expedición astronómica en algún punto dentro de los trópicos (véase figura 3.3). Cassini y Jean Picard (1620-1682) esperaban que una estación cerca del ecuador eliminaría los efectos de refracción, puesto que los planetas y el Sol estarían muy cerca del zenit del observador. Así pues, se presentaría una oportunidad muy grande para mejorar las tablas solares y planetarias, así como poner a prueba las tablas existentes de refracción (Olmsted, 1942, p. 122). Más aún, todos los astrónomos estaban familiarizados con los intentos de Tycho de medir la paralaje de Marte, y también con el veredicto de Kepler a partir de los datos de Tycho sobre que la paralaje marciana debía ser a lo mucho de $2'$ y, por tanto, la paralaje solar debía ser de $1'$ a lo sumo. Así pues, con la invención de instrumentos como el telescopio, el micrómetro,¹⁷ y el reloj de péndulo,¹⁸ tal vez sería posible medir la paralaje de Marte en oposición, combinando dos formas del mismo método, a saber, midiendo la paralaje diurna de Marte (Cassini, fig. 3.4) y estableciendo una segunda estación de observación en un lugar cercano al ecuador (Richer).

Jean Richer (1630-1696) fue designado por la *Académie des Sciences* para viajar a Cayena en 1672-73 y así realizar distintas observaciones astronómicas, la más importante de las cuales era la paralaje de Marte. Por otro lado, en 1671-72 Jean Picard (1620-1682) viajó al observatorio de Tycho en la isla de Hven para determinar las coordenadas del Uraniborg con el siguiente método: en 1668 Cassini publicó sus efemérides de Júpiter, en donde describía con precisión los tiempos de los eclipses de los satélites joviales, así

¹⁷Un micrómetro es un instrumento que sirve para realizar mediciones lineales milimétricas muy precisas con la ayuda de un tornillo. Las magnitudes que se pueden medir son diámetros, grosores, y longitudes de cuerpos sólidos (Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, 2021). El primero en aplicar un micrómetro a un telescopio fue William Gascoigne (1620-44), quien después de haber notado que una araña había tejido su red frente a la lente de su telescopio, tuvo la idea de colocar hilos muy delgados, manipulados por dos tornillos, frente a la lente telescópica. De acuerdo con Townley, el micrómetro de Gascoigne podía medir 40,000 divisiones por pie (Brooks, 1991).

¹⁸El reloj de péndulo fue una innovación pensada por Galileo, pero materializada propiamente por Christiaan Huygens en 1656-1657. La idea básica fue utilizar la periodicidad fundamental de un péndulo para poder regular y contar el ritmo, o «tic-toc», de un reloj. En realidad, los relojes mecánicos grandes fueron introducidos al rededor de 1335 en Milán, los cuales contaban con un sistema de regulación basado en una rueda dentada movida por pequeñas pesas colgando de una polea. La precisión de estos relojes era tal que se perdía de un cuarto hasta media hora al día, sin que se tuvieran marcadores de minutos y segundos. Eventualmente, al utilizar el péndulo con ciertas adaptaciones, se logró obtener oscilaciones isocrónicas de aproximadamente un segundo. Sin duda, esta innovación revolucionó la precisión con la que se contaba el tiempo. Para una descripción completa, tanto mecánica como matemática, del reloj de péndulo, ver Baker & Blackburn (2005, 233ss.).

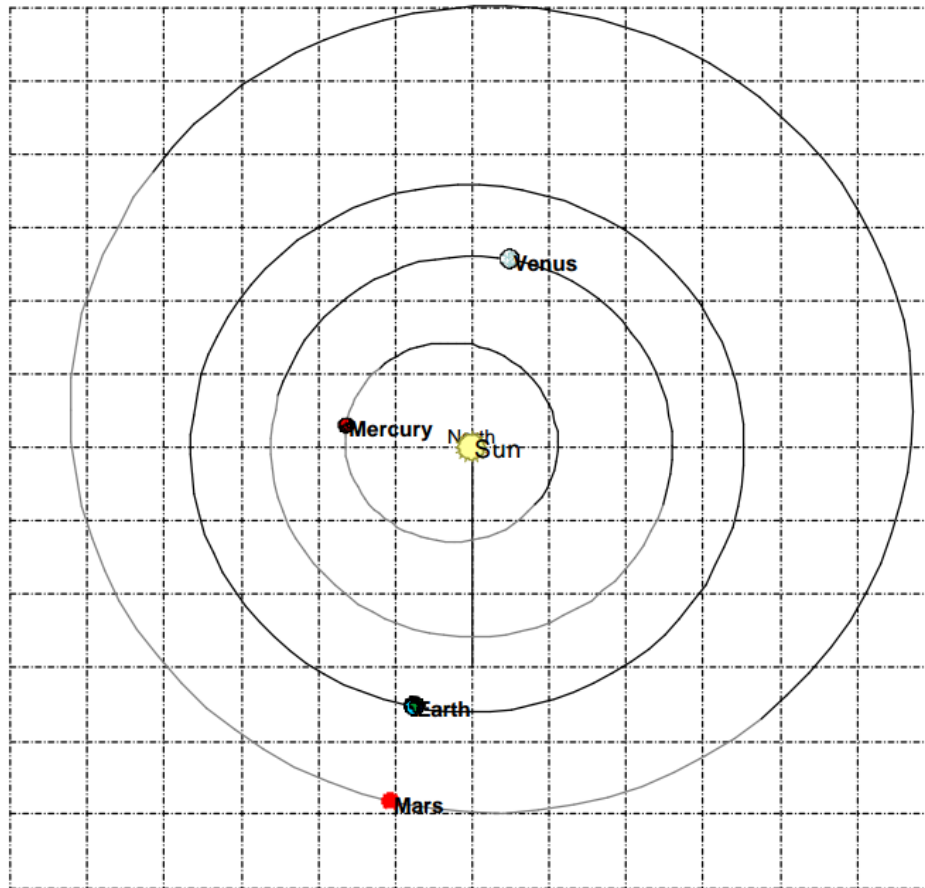


Figura 3.3: Ilustración de la oposición del 9 de septiembre de 1672, en la cual se observa que Marte, en perihelio, se encuentra en su punto más cercano a la Tierra. Imagen generada por TheSky y tomada de (JJMO, 2003).

pues, estando en dos puntos distantes en la Tierra, uno podía tomar como referencia el momento en el que el evento de algún eclipse satelital ocurría y, comparándole con la hora solar local respectiva, se obtenía una diferencia en tiempo, *i.e.*, una diferencia en longitud entre los puntos de observación en cuestión. Consecuentemente, dado que para calcular paralaje uno debe saber la distancia del triángulo base, y puesto que se emplearía una nueva forma de medición de paralaje, este método era «casi esencial para observaciones exitosas sobre paralaje» (Olmsted, 1942, p. 123). Mediciones similares serían también realizadas por Richer en Cayena y por Cassini en París.

En París, Cassini y Ole Rømer (1644-1710) se dispusieron a medir la paralaje diurna de Marte, *i.e.*, hicieron observaciones desde el mismo lugar, pero en distintos tiempos, de tal modo que la rotación de la Tierra sobre su propio eje serviría como desplazamiento de lugar. El observador en D (fig. 3.4) mediría las posiciones de Marte en A y A', mientras

que desde el centro de la Tierra, Marte se observaría en las posiciones B y B'. Para realizar esta observación, Cassini y Rømer no usaron un micrómetro, sino que usaron un reloj de péndulo para medir la diferencia en la ascensión recta entre Marte y las estrellas aledañas (véase figura 3.5),¹⁹ así, tomando observaciones a la misma hora el 8 y 9 de septiembre de 1672, la ascensión recta de Marte mostraba una diferencia de $67\frac{1}{2}$ segundos de tiempo. La diferencia entre el 9 y 10 fue de $66\frac{3}{4}$ segundos. Ahora, Cassini notó que el 9 de ese mes la diferencia en ascensión recta entre Marte y una estrella aledaña había sido de $21\frac{1}{2}$ segundos, y, de acuerdo con el desplazamiento de Marte por su movimiento diario, el planeta se había movido $19\frac{3}{4}$ segundos. Es decir que el movimiento aparente en ascensión recta debido a la paralaje de Marte era de $1\frac{3}{4}$ segundos. Esto quería decir que la paralaje horizontal de Marte había sido de $24''\frac{3}{4}$. «Del mismo modo, a partir de mediciones hechas en dos ocasiones distintas de septiembre, Cassini encontró paralajes entre $24''$ y $27''$ » (Van Helden, 1985, p. 137). Estos, pues, fueron los resultados empleando el método de paralaje diurna de Marte.

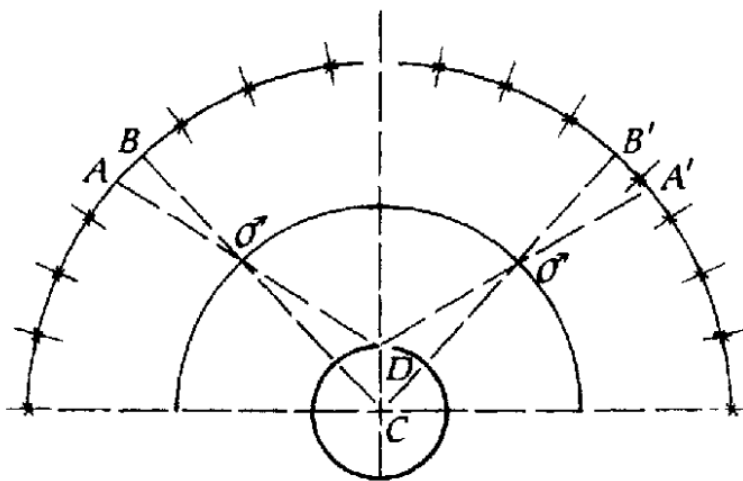


Figura 3.4: Paralaje diurna de Marte. Figura tomada de (Van Helden, 1985, p. 137).

No obstante, este método, que atribuía diferencias de 1 ó 2 segundos a la paralaje de Marte, no podía ser muy preciso, pues incluso un error en $\frac{1}{4}$ seg. resultaría en una diferencia de paralaje marciana de $4''$ (Van Helden, 1985, p. 138). De hecho, al enterarse del método usado, Flamsteed apuntó que: «El señor Cassini pretende haber encontrado [la distancia del Sol]... de lo cual, sin embargo, estoy seguro de que, a través de su método

¹⁹La ascensión recta es el equivalente celeste de la longitud terrestre, y esta, en conjunción con la declinación, proveen la posición de los objetos celestes. A diferencia de la declinación, la cual se mide en grados de norte a sur del ecuador celeste, la ascensión recta se mide en horas y a partir del punto en que la eclíptica cruza con el ecuador celeste en Marzo (Mitton, 2007).

de observación, no pudo haber descubierto» (Oldenburg, 1975, pp. 381-82). Cassini mismo era consciente de los errores que resultaban en su método, pues, *v.g.*, el 17 de septiembre él obtuvo una paralaje de Marte de $27''\frac{1}{3}$, sin embargo, esto no era consistente con las mediciones obtenidas días anteriores, puesto que en realidad Marte se había alejado ya de la Tierra y, por tanto, su paralaje debía ser menor, no mayor, que la obtenida el 9 de ese mismo mes. Cassini sabía que debía esperar el retorno de Richer de Cayena para que sus observaciones dieran un veredicto sobre el asunto de la unidad astronómica.

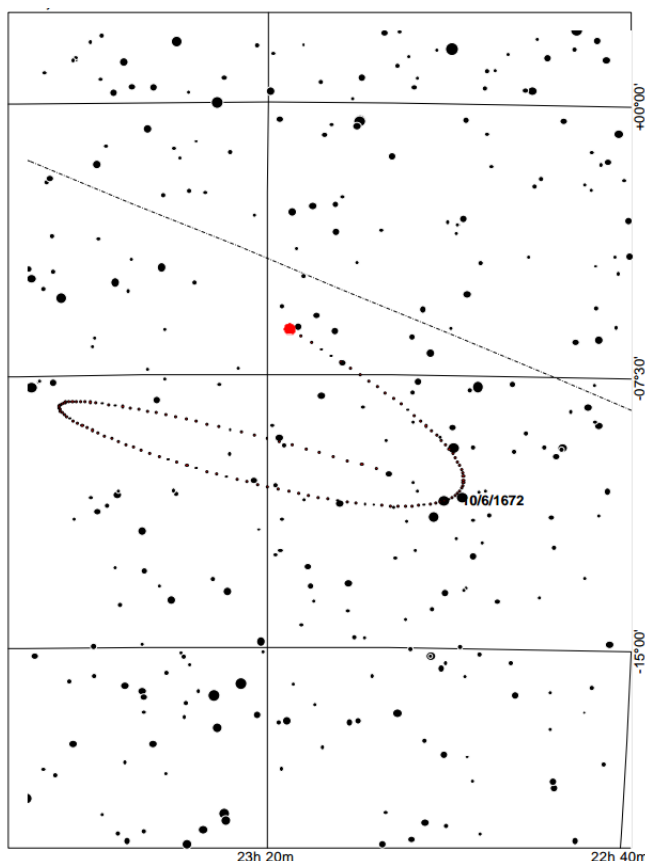


Figura 3.5: Ilustración que muestra el fondo de las estrellas fijas en la oposición de Marte de 09/09/1672, así como el movimiento retrógrado del planeta. Imagen generada por TheSky y tomada de (JJMO, 2003).

En Cayena, Richer realizó distintas mediciones, de entre las cuales había observaciones sobre Júpiter y sus satélites. Así, al observar un eclipse de uno de estos últimos, y de un eclipse lunar, fue posible obtener un valor satisfactorio para la diferencia de longitud entre París y Cayena (Olmsted, 1942, p. 125), estas observaciones resultaron en una diferencia de entre 3 hrs. 27 min. y 3 hrs. 42 min., eventualmente Cassini usaría 3 hrs. 39 min. para sus cálculos; por otro lado, se sabía que la latitud de Cayena era de 5° al norte del ecuador, obteniendo así figuras satisfactorias para la longitud y latitud de ambas ubicaciones.

Además, Richer puso mucho cuidado en las observaciones de la altitud meridiana de Marte desde agosto hasta octubre de 1672,²⁰ así como también de la misma medición con respecto a tres estrellas fijas en Acuario cercanas a Marte. No obstante, de todas las observaciones hechas en Cayena y en París, Cassini sólo eligió tres conjuntos de observaciones hechas en ambas ubicaciones, a saber, del 5, 9, y 24 de septiembre; y de estas solo usó las diferencias en declinación (y no en ascensión recta) entre Marte y una de las tres estrellas observadas, obteniendo con ello los resultados sobre Marte mostrados en la tabla 3.3.

Fecha (1672)	Declinación en Cayena	Declinación en París	Paralaje
5 Septiembre	32'22"	32'10"	12"
9 Septiembre	16'3"	15'50"	13"
24 Septiembre	15'28"	15'45"	17"

Cuadro 3.3: Tabla que muestra la declinación de Marte medida los mismo días en Cayena y en París. La última columna muestra la paralaje de Marte resultante. Los datos tomados en cuenta por Cassini pueden ser consultados en (Mem.Acad.r.Sci.Paris, 1730, pp. 100-104).

Debemos notar al menos dos cosas sobre estos datos: primero, debido a que Marte se iba alejando de la Tierra con el paso de los días, la paralaje detectada debía ser menor, sin embargo, los datos muestran lo contrario, pues del 5 al 24 de septiembre se detectó un incremento de 5" de paralaje. Al respecto, Cassini explicaba que «tal aumento debe ser atribuido a un error imperceptible en las observaciones» (Mem.Acad.r.Sci., 1730, p. 104); segundo, de todas las observaciones hechas en ambas ubicaciones, es curioso que Cassini solo haya tomado tres conjuntos de estas hechas los mismo días, y de estas tres, Cassini tomó un número intermedio entre las paralajes obtenidas entre el 9 y 24 de septiembre, concluyendo que la paralaje de Marte era de 15", obteniendo así un valor de $25''\frac{1}{3}$ de paralaje horizontal de Marte. Sin embargo, parece que Cassini tomó estas observaciones debido a que eran las únicas que concordaban con sus mediciones hechas en París, las cuales atribuían una paralaje horizontal de entre 24" y 27". Esto hacía que la respuesta a la pregunta por la paralaje de Marte, y por tanto, por la unidad astronómica, no fuese contundente, ya que incluso después de analizar los datos de Richer, había ambigüedad sobre los valores propuestos (Van Helden, 1985, p. 142).

Así, con un valor aceptado de $25''\frac{1}{3}$ para la paralaje de Marte, una distancia Tierra-Marte en el momento de las observaciones precedentes de $8100 r_t$, resultaba una para-

²⁰La altura meridiana es la altura máxima que un cuerpo celeste puede alcanzar sobre el horizonte, y ocurre precisamente en el instante en el que dicho cuerpo atraviesa el meridiano del observador.

laje solar de $9''\frac{1}{2}$, es decir, de una distancia media de 21712 r_t entre la Tierra y el Sol (Mem.Acad.r.Sci., 1730, p. 115).²¹

Astrónomo	Paralaje solar	Distancia en r_t	au
Aristarco (280 AC)	2'59''	1150	0.04903
Ptolomeo	2'50''	1210	0.05159
Copérnico	2'55''	1179	0.05026
Tycho Brahe	2'54''	1183	0.05043
Lansberg	2'13''	1551	0.06612
Kepler	0'59''	3470	0.14794
Horrocks	0'14''	15000	0.63952
Hevelius	0'40''	5156	0.21985
Cassini / Richer	0'9".5	21712	0.92569
Valor Moderno	8".794143	23454.79	1

Cuadro 3.4: Aumento de la tabla 3.2. Los valores añadidos son los de Hevelius y el de Cassini/Richer, en el primero parece haber un retroceso en la determinación de UA, aunque no es claro cómo Hevelius llegó a tal figura, mientras que el segundo se acerca mucho al moderno, sin embargo, no estaba libre de ambigüedad.

Cuando Cassini publicó en 1684 su análisis sobre los datos, apuntó sobre la imposibilidad de tener certeza sobre la unidad astronómica a través del método usado, pues una variación de 3 segundos en la paralaje de Marte resultaría en una variación de $1000r_t$ en la distancia Tierra-Marte, esto es, una diferencia de $2000r_t$ - $3000r_t$ en la distancia media Tierra-Sol (Mem.Acad.r.Sci., 1730, p. 115). Más aún, había todavía otras deficiencias en el método usado, una de ellas era que las observaciones debían sincronizarse para poder obtener un mejor grado de precisión, sin embargo, el éxito de estas mediciones dependían de la precisión de los instrumentos a la mano, como el reloj de péndulo y el micrómetro (el cual parece que ni Cassini ni Richer usaron). Aunado a esto, y de acuerdo con una gráfica de Pledge (1939) que muestra el grado de precisión con el que los astrónomos medían distancia angular a lo largo de la historia de la astronomía, notemos que en el tiempo de Cassini las mediciones más precisas tenían $10''$ de error, lo cual era bastante para la paralaje de Marte o del Sol (ver tabla 3.5). Por último, las tablas usadas para las efemérides de Júpiter no tomaban en cuenta las variaciones en tiempo de los eclipses de los satélites

²¹El valor presentado en el texto de Cassini es de $21600 r_t$. Este resultado se obtiene si se acepta un $r_t^* = 6345.21$ km, es decir, 0.99 del valor moderno para r_t .

joviales, debido a la finitud de la velocidad de la luz, variaciones que el propio Cassini notó, pero que deliberadamente ignoró (Oldenburg, 1975, pp. 109-10).²²

Astrónomo	Fecha	Exactitud (segundos de arco)
Tycho Brahe	1585	240
Flamsteed	1700	10
Piazzi	1800	1.5
Bessel	1845	0.3
Auwers	1880	0.1
Newcomb	1900	0.03

Cuadro 3.5: Exactitud sobre mediciones astronómicas angulares. Tomada de (Pledge, 1939) y (Hughes, 2001).

Todo ello hacía que la determinación de UA no quedase libre de dudas y que el acuerdo aún no pudiese ser alcanzado. Lo que había en ese siglo era un grado de incertidumbre muy alto, pues, de acuerdo con Hughes (2001), a lo largo del siglo XVII, los valores propuestos para la paralaje solar estaban entre $6''$ - $45''$. Es interesante notar que estos valores son un caso de una falta de lo que Eran Tal (2012) llama «exactitud de medición epistémica», la cual define como «la cercanía de acuerdo entre valores razonablemente atribuidos a una cantidad basada en su medición» (p.30), en donde el concepto relacionado relevante es el de ‘incertidumbre’. Así pues, la exactitud epistémica se da cuando una medición cae dentro de un rango corto de valores, sin embargo, cuando el rango en el que caen los valores es muy amplio, lo que tenemos es una falta de exactitud. Nótese que incluso en el caso de Cassini/Richer podemos decir que sus mediciones eran precisas, ya que éstas guardaban un acuerdo cercano, sin embargo, tenían muchas fuentes de incertidumbre ya que se atribuía errores a los instrumentos, así como también una inconsistencia con el modelo bajo el cual se hacían tales observaciones.²³

²²«Cassini no era consciente de la causa de estas discrepancias, la cual, tal como Olaus Rømer defendería convincentemente en 1676, se atribuía a la diferencia de tiempos que la luz tardaba en alcanzar la tierra cuando esta estaba en distintos puntos de su órbita. Y pese a que Cassini mismo había sugerido esta idea en 1675, eventualmente rechazó los argumentos de Rømer» (Oldenburg, 1975, 112, n. 2).

²³Recordemos que, de acuerdo con el modelo de movimiento planetario usado, la paralaje de Marte debía ser cada vez más pequeña conforme Marte se alejaba de la Tierra, no obstante, aunque las mediciones guardaban un acuerdo cercano entre ellas (precisión), éstas mostraban una paralaje cada vez más grande, lo cual era contrario a lo esperado por el modelo. Esta fuente de incertidumbre hacía que las mediciones no fuesen exactas ni convergentes, y, por tanto, que no hubiese mucha confianza sobre ellas.

Por otro lado, pese a que a lo largo del siglo XVII se preservó un alto grado de incertidumbre, en este tiempo los astrónomos desarrollaron varios métodos para poder determinar el valor de UA, algunos de los cuales fueron mejorados para ser usados de nuevo eventualmente. Estos pasos fueron absolutamente necesarios para la determinación posterior de la unidad astronómica, pues fue a través de la corrección de distintas fuentes de error en que se presentó una eventual convergencia.²⁴ Así pues, incluso cuando en 1684 (año en que Cassini publicó sus resultados) todavía había una falta de convergencia y gran incertidumbre, podemos mencionar algunas ventajas que este método utilizado guardaba respecto del método de Horrocks:

1. Mientras que Horrocks no podía medir la paralaje de Venus, pues necesitaba una medición en una estación lejana, Cassini y Richer midieron de dos maneras la paralaje de Marte: estableciendo una segunda estación lejana y midiendo paralaje diurna. De hecho, debido a esto, Cassini y Richer no asumieron falsamente (como Horrocks) que todos los planetas, vistos desde el Sol, debían subtender el mismo diámetro angular. Su método, pues, sí era uno trigonométrico el cual también guardaba ventajas con las mediciones de Tycho: mejores tablas para la refracción, y una segunda estación de comparación.
2. El método trigonométrico usado hacía uso de más evidencia astronómica, *i.e.*, mientras que Horrocks sólo usó la medición de Venus, y las leyes de Kepler (más un supuesto armónico falso), el método de los franceses usaba las mediciones sobre Marte, las leyes de Kepler, y las mejores tablas disponibles sobre las efemérides de Júpiter para poder calcular la longitud de sus estaciones de observación (por supuesto, esto último también era una ventaja sobre el método de Tycho).
3. Los instrumentos disponibles para 1672 eran más precisos que el telescopio galileano que usó Horrocks en 1639.²⁵ Por otro lado, si bien es cierto aparentemente ni Cassini ni Richer usaron el micrómetro, Flamsteed sí usó este instrumento para hacer las mismas mediciones sobre Marte, las cuales fueron comparadas por Cassini con sus propias mediciones, y llegando a un acuerdo de 25" de paralaje marciana (Oldenburg, 1975, pp. 110-111). Es decir que el resultado de Cassini estaba apoyado por los mejores

²⁴Al respecto de estos procesos de definición, Eran Tal escribe: «una condición necesaria para la posibilidad de incrementar la exactitud en la medición es que *los conceptos de unidad son continuamente re-coordinados con nuevos procesos de medición*» (Tal, 2012, p. 46)

²⁵La expedición a Cayena llevaba varios instrumentos con visión telescópica para medir arcos (Mem.Acad.r.Sci., 1729, pp. 236-38), por otro lado, entre 1610-1660 se presentó un gran mejoramiento en la calidad de los lentes usados para los telescopios (Van Helden, 1974, p. 46).

instrumentos del momento (instrumentos con visión telescópica, el reloj de péndulo y el micrómetro).

Otra cosa que podemos notar es que en el método empleado por Cassini/Richer hay un crecimiento en la práctica de medición del siguiente modo: hay una conservación del método de paralaje usado por Tycho, pero también un mejoramiento de este, puesto que (1) se usaron instrumentos con miras telescópicas, el reloj de péndulo para poder medir ascensión recta y el micrómetro (Flamsteed) para obtener mayor grado de precisión en distancias angulares; (2) aunque las tablas sobre Júpiter preservaban un error (que eventualmente Rømer explicaría), estas fueron usadas como una herramienta cognitiva para determinar de manera satisfactoria la longitud entre París y Cayena, sin estas, simplemente la expedición no hubiera tenido sentido para medir paralaje, y (3) Tycho simplemente no contaba con las leyes de Kepler para así determinar UA. De este modo, una nueva práctica de medición representaba a su vez nuevas capacidades cognitivas, pues ahora se podía medir con más precisión distancias angulares (micrómetro), comparar longitud en distintos lugares (efemérides de Júpiter), medir ascensión recta con más precisión (reloj de péndulo) y eliminar supuestos armónicos falsos.

Más aún, podemos ver que el crecimiento de esta práctica fue controlado. Olmsted (1942) señala que, con una posible excepción, antes de 1671 ninguna expedición importante de carácter estrictamente científico había tenido lugar (p. 118), pues antes había expediciones para recolectar cualquier objeto que resultara curioso o interesante, pero no había un plan de antemano. En cambio, con la expedición a Cayena «el propósito principal era *investigar*, no recolectar; no ver cosas que eran nuevas y diferentes; no recolectar materiales o datos de interés general para la ciencia. En lugar de ello, el propósito de la expedición era *investigar ciertos problemas científicos definidos*» (Olmsted, 1942, 127, énfasis añadido). Vemos, pues, que dicha expedición fue controlada por un fin epistémico a la vista, *i.e.*, el propósito principal era resolver el problema de la determinación de UA. Si bien es cierto que tal cuestión no quedó fuera de dudas, sí podemos decir que la práctica de medición de UA tuvo un crecimiento.

Es cierto que eventualmente Halley criticó los resultados de Cassini y las mediciones de Flamsteed (Van Helden, 1985), proponiendo una mejora en el método de medición de paralaje de Venus (el cual sería empleado en los tránsitos de 1761 y 1769), pues a su vez la práctica de medición y el avance de la ciencia requerían de una mejor precisión y un menor grado de incertidumbre. No obstante, la práctica de medición empleada por Cassini ya no era la misma que vemos con Tycho para medir paralaje de Marte, o con Horrocks para medir UA; la práctica había mejorado y a su vez necesitaba ser mejorada aún. Podemos

resumir esta medición de la siguiente manera:

Si la expedición a Cayena no resultó en la medición positiva de la paralaje de Marte, sí mostró que la paralaje solar era extremadamente pequeña, esto es, menor que $15''$. (Van Helden, 1985, p. 162)

3.4. A la espera de nuevos tránsitos

Algunos años después, Edmond Halley (1656-1742) realizó una expedición en el Atlántico Sur de 1676-78, para mapear las estrellas del sur. En dicha expedición, logró observar el tránsito de Mercurio, obteniendo una paralaje de este planeta de $1'6''$ y una paralaje solar de $45''$. No obstante, Halley pensó de inmediato que tales valores no podían ser correctos. De hecho, nunca estuvo satisfecho ni con esta ni con las mediciones de Flamsteed y Cassini. Es por ello que él mismo publicó en 1716 un pequeño artículo en donde exhortaba a los futuros astrónomos a realizar la observación del tránsito de Venus de 1761, pero ahora desde dos estaciones lejanas para medir paralaje. Esta nueva medición integraba el fenómeno observado por Horrocks, pero con principios metodológicos similares a los empleados por Cassini/Richer.

Conforme transcurrieron las primeras décadas del siglo XVIII, se asumió que el mundo intelectual debía esperar hasta 1761 para poder mejorar el valor en la paralaje solar. Por supuesto, entre tanto los astrónomos seguían midiendo tal parámetro observando oposiciones de Marte, no obstante, al parecer se mantenía un consenso general sobre que éste no debía ser mayor a $15''$, sin lograr una exactitud en un rango más pequeño (Van Helden, 1985, p. 154.). La solución provisional fue adoptar un valor intermedio de $12''\frac{1}{2}$.²⁶

Las expediciones correspondientes a los tránsitos de Venus de 1761 y 1769 no produjeron la exactitud esperada por Halley y la comunidad astronómica. No obstante, sí produjo una exactitud en el rango de un segundo de arco (Van Helden, 1985, pp. 155, 161). Es decir, mientras que para finales del siglo anterior y principios del XVIII se obtenían rangos, *v.g.*, entre $10''$ - $15''$ (Whiston 1696,1701), $9''$ - $12''$ (Pond & Bradley, 1717), $11''$ - $15''$ (Maraldi, 1719), y $10''$ - $14''$ (Delises, 1760), el parámetro a partir de las expediciones se encontraba en el rango de $8''.6$ - $9''.125$.²⁷

²⁶Es interesante notar que para el final del siglo XVII, la concepción general que se tenía del tamaño del universo estaba sufriendo un cambio muy drástico, pues gran parte del mundo letrado había aprendido que, de acuerdo con el sistema copernicano, el radio del cosmos entero era de $20,000r_t$. En contraste, a finales de este siglo se calculaba que tan solo la órbita de Saturno se aproximaba a los $200,000r_t$.

²⁷Este rango se obtiene a partir de la revisión del tránsito de Venus de Delambre (1770) y las subsecuentes mediciones en ese y el siguiente siglo, las cuales no fueron mayores a $9''.125$ (Henderson, 1832). Ver tabla

El siguiente par de tránsitos de Venus ocurriría en 1874 y 1882, poco más de siglo y medio de la exhortación de Halley en 1716. De acuerdo con Jimena Canales (2002), para finales del siglo XIX emergieron nuevos instrumentos y métodos para medir la paralaje solar, los cuales intentaban eliminar las diferencias individuales en la observación. Esto se debió a que los astrónomos comenzaban a dudar sobre la posibilidad de determinar con precisión el momento de contacto entre los dos cuerpos celestes, lo cual amenazaba la esperanza de Halley y compañía en el método trigonométrico detrás de la observación del tránsito en cuestión. En consecuencia, «los problemas que enfrentaba la astronomía geométrica obligaron a los astrónomos a ensuciarse las manos con la física, la fotografía, la cinematografía, la pedagogía, y con “experimentación mimética” que reproducía fenómenos astronómicos en la tierra, pero a menor escala» (2002, p. 587).

Así pues, para el tránsito de 1874 se recomendó el empleo de observadores especializados junto con daguerrotipos, los cuales fueron los primeros instrumentos fotográficos. Se pensaba que con estas técnicas fotográficas se podía suprimir el factor subjetivo por parte del observador—agitaciones nerviosas, ansiedades, impaciencia, ilusiones en sus sentidos, etc.—, y, sobretodo, eliminar el efecto de la gota negra.²⁸ No obstante, tales elementos no pudieron ser suprimidos. Para este fin, Jules Janssen diseñó su famoso «revolver fotográfico», el cual era un instrumento que fotografiaba Venus en intervalos regulares. Sin embargo, de acuerdo con Canales, tales innovaciones solo lograron probar lo difícil que resultaba eliminar las diferencias individuales en la observación.

No obstante, resulta interesante que precisamente a esta desventaja de los métodos visuales obligó a los astrónomos a voltear hacia métodos alternativos; principalmente se comenzó a usar con mayor confianza el foto-taquimétrico, el cual es un método físico que determina la paralaje solar a través de la medición de la velocidad de la luz. Este método resultó muy importante, ya que retroalimentó los métodos astronómicos usados anteriormente, ganando autoridad entre la comunidad astronómica. La siguiente sección presenta los elementos necesarios para el desarrollo de este método.²⁹

1 en Hughes (2001).

²⁸Desde el tránsito de 1761, Bergman reportó en su observación que una ligadura—como una gota negra—unía a silueta de Venus al fondo negro que rodeaba al Sol. Tal efecto tenía como implicación que los astrónomos no podían determinar el momento exacto de contacto entre ambos cuerpos, pues había diferencias desde 30 seg. hasta 1 min. (Pasachoff, Schneider & Golub, 2004).

²⁹Agradezco a la Dra. Susana Biro por señalarme lo problemático que resultaría, desde el punto de vista histórico, un salto de casi docientos años que hay entre Cassini y Foucault. Uno de los problemas más importantes es, por supuesto, la justificación de la elección de los casos. Para contestar a ello, he presentado una justificación en la introducción a este capítulo, así como agregar esta pequeñísima sección para subsanar ese «hueco» histórico. Debido al espacio que tengo en esta tesis, no he podido hacer justicia

3.5. El método terrestre

Young (1889, p. 387) menciona los métodos desarrollados, hasta el siglo XIX, para medir π_{\odot} . Entre ellos están los métodos antiguos, los métodos geométricos y trigonométricos (entre los cuales se encontraban las mediciones de Venus o la paralaje de Marte), métodos gravitacionales (que determinaban π_{\odot} a través de medir perturbaciones en la Luna, Venus o Marte por la fuerza de gravedad de la Tierra), y métodos que surgieron a través del estudio de la luz. La importancia del desarrollo de varios métodos para determinar la UA es que hubo una retroalimentación entre estos a lo largo de la historia de esta medición, de tal modo que esta retroalimentación produjo (1) una convergencia a un valor y (2) disminución en el grado de incertidumbre. La medición de Léon Foucault (1819-1868) es interesante en este sentido, porque, a partir de esta, los métodos trigonométricos se retroalimentan de tal modo que π_{\odot} fue llevada a otro nivel de exactitud. Sin embargo, para ello fue necesario incorporar otras mediciones y suposiciones. Veamos éstas a grandes rasgos.

3.5.1. La finitud de la velocidad de la luz

Ole Rømer (1644-1710) trabajó con Picard en su viaje al Uraniborg para medir la longitud, y fue convencido por éste último para ir a Francia y colaborar en el Observatorio de París bajo el liderazgo de Cassini. Así pues, trabajó con éste último en las mediciones sobre la paralaje de Marte en 1672, y realizó también observaciones sobre la longitud de diversas localidades francesas (González Sierra, 2015, p. 57). En 1676 Rømer da explicación de las discrepancias entre los tiempos de los eclipses de los satélites joviales, discrepancias que el mismo Cassini ya había notado, pero cuya investigación decidió postergar:

... pero como esos minutos [en las efemérides de Júpiter] resultaron ser diferentes en distintos tiempos (ya sea por la dificultad de la observación o por una verdadera variación) preferí ignorarlos por el momento... reservando la obtención de mayor precisión para investigaciones futuras. (Cassini *apud* Oldenburg, 1975, pp. 109-10)

Esta explicación, sin embargo, fue ofrecida por Rømer unos pocos años después. A partir de ocho años de observación en el Observatorio de París, éste dio cuenta sobre la causa de las discrepancias de la siguiente manera: sea A el Sol (Fig. 3.6), B , Júpiter, C , el primer satélite jovial (Io) al entrar en la sombra de Júpiter y D , el punto de su salida.

a los métodos y mediciones correspondientes a este tiempo. No obstante, espero haber tendido un puente que refuerce mi argumento central: la historia de la medición nos muestra que, a largo plazo, hay una mejora y un crecimiento de las herramientas cognitivas empleadas, incluso aunque en algunas instancias las determinaciones propuestas hayan estado rodeadas de controversias sobre la exactitud.

Asimismo, sea $EFGHLK$ diferentes posiciones de la Tierra sobre su órbita. Ahora, si suponemos que cuando la Tierra está en L , el satélite emerge de la sombra en D , entonces $42\frac{1}{2}$ horas más tarde (después de una revolución del satélite) la Tierra se encontrará en K . Ahora bien, si la luz tiene una velocidad finita, le tomará a esta un cierto tiempo para recorrer la distancia LK , de lo cual se sigue que la emersión del satélite, observada desde K , tardará más que la observación tomada desde L . Lo contrario ocurrirá desde los puntos de observación F y G , en tanto la Tierra se acerca Júpiter. Así pues, Rømer concluyó que:

Después de haber examinado la cuestión más de cerca, se ha encontrado que esta diferencia, la cual no es sensible en dos revoluciones [del satélite], se vuelve bastante considerable después de que muchas han tenido lugar, y que, por ejemplo, 40 revoluciones observadas desde F fueron sensiblemente más cortas que 40 [revoluciones] observadas desde el otro lado, en cualquier posición en la que Júpiter se encuentre, y esta es la razón de 22 (minutos de tiempo) para toda la distancia HE , la cual es dos veces la distancia de la Tierra al Sol. (Rømer, 1672/1969, p. 336)

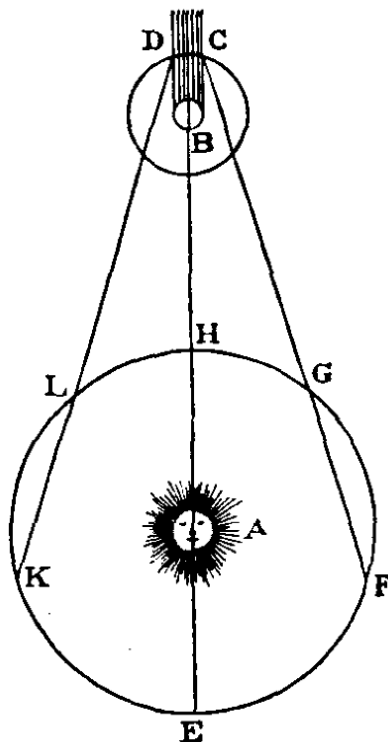


Figura 3.6: Figura usada por Rømer para dar cuenta de la discrepancia en tiempos en las observación de los eclipses joviales. Tomada de (Rømer, 1672/1969).

El fin de esta serie de observaciones fue demostrar la finitud de la velocidad de la luz, pues desde la antigüedad hasta incluso Kepler y Descartes se había creído que la luz viajaba

instantáneamente. Rømer, sin embargo, no dio un valor específico para dicha velocidad más allá de indicar que ésta tardaba 22 minutos en cruzar la órbita terrestre. Tal como lo señala Tobin (1993), podría parecernos curioso que Rømer no haya dividido el diámetro de la órbita terrestre entre los 22 minutos mencionados, pero esto seguramente se debió a que el valor de UA aún no se sabía con exactitud. Tengamos en mente que Richer regresó en 1673 de Cayena, y Cassini publicó el análisis de las observaciones de Marte hechas en ambas localidades hasta 1684, por tanto, para 1676 no había la suficiente certidumbre sobre el valor exacto de UA.³⁰ Sin embargo, Rømer introdujo esta nueva ecuación del retraso de la luz—la *ecuación de la luz*, *i.e.*, el tiempo que la luz tarda en viajar del Sol a la Tierra—como un nuevo método para poder calcular la velocidad de la luz. Esta relación que ahora se establecía entre c y la UA, sería ocupada eventualmente para determinar ésta última de mejor manera, no obstante, aún hacía falta otra parte de la ecuación.

3.5.2. La aberración de la luz

El método de la observación de los satélites joviales para determinar c fue usado por los astrónomos hasta 1726, año en el que James Bradley (1692-1762) descubrió el fenómeno de la aberración de las estrellas fijas mientras trabajaba en una serie de observaciones para detectar paralaje estelar. Este astrónomo inglés descubrió un movimiento aparente en γ *Draconis* tan sistemático que decidió buscar la causa de dicho movimiento: en diciembre de 1725, Bradley observó que la estrella en cuestión apareció más al sur que en sus observaciones previas—*i.e.*, en dirección contraria a lo esperado bajo el fenómeno de la paralaje estelar—, en marzo de 1726 se encontró que γ *Draconis* estaba unos 20" más al sur que en la primera observación. Sin embargo, en abril de ese año el fenómeno observado era el contrario, pues parecía que la estrella comenzaba a moverse hacia el norte hasta que en junio regresó al mismo lugar en el que había sido observada seis meses antes. En septiembre se encontró ahora 20" más al norte de la posición observada tres meses (o nueve meses) atrás, hasta que en diciembre de 1726—un año después de la primera observación—regresó a su posición original, habiéndose desplazado en ese año a lo largo de 40".

Después de poner a prueba distintas hipótesis, de descartar posibles errores en su instrumento, de asumir el resultado de Rømer sobre la finitud de la velocidad de la luz, y de construirse un nuevo instrumento dedicado a la observación de este fenómeno, Bradley llegó a la siguiente conclusión:

Por fin conjeturé que todos los fenómenos hasta ahora mencionados, proceden del

³⁰ «El valor que hubiese resultado, incorporando los valores del siglo 17 para la paralaje solar y el diámetro terrestre, es 215 000 km s⁻¹» (Tobin, 1993, n.6).

movimiento progresivo de la luz y el movimiento anual de la tierra sobre su órbita. Pues percibí que, si la luz se propagase en el tiempo, el lugar aparente del objeto [observado] no sería el mismo en el caso de que el ojo esté en reposo, que cuando este se mueve en cualquier otra dirección a aquella de la línea que pasa a través del ojo y el objeto; y que cuando el ojo se mueve en diferentes direcciones, el lugar aparente del objeto sería diferente. (Bradley, 1729, p. 646)

Tal como González (2015) anota, Bradley explicaba este fenómeno considerando tres casos: (1) sea CA (fig. 3.7a) un rayo de luz que cae perpendicular a BD , de este modo, si el observador está en reposo en A , el objeto observado deberá aparecer en la dirección AC , independientemente de si la velocidad de la luz (c) es instantánea o finita. Por otro lado, (2) si el observador se ubica en B , y se mueve en dirección BA con velocidad v (fig. 3.7b), y si c viaja con velocidad finita, entonces el tubo de observación deberá estar inclinado sobre la línea BC en un ángulo θ (un ángulo que depende de las velocidades v y c) de tal modo que la luz que proviene de C alcance al observador cuando éste se encuentre situado en A . Así pues, debido al ángulo de inclinación θ , cuando el rayo de luz alcance el punto A , este parecerá provenir de una dirección distinta a la línea CA , de tal modo que la posición aparente del objeto observado cambiará con una diferencia angular α . (3) Lo mismo ocurre cuando el observador se mueve en la dirección contraria, DA (fig. 3.7c).

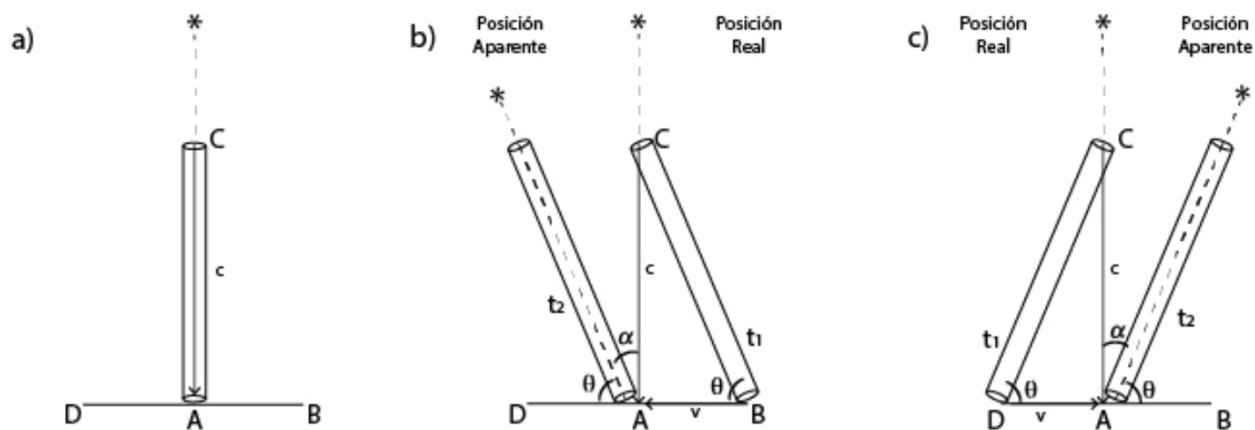


Figura 3.7: Adaptación de la figura usada por Bradley en 1729 para explicar el reciente fenómeno descubierto de la aberración de la luz estelar. Figura tomada de (González Sierra, 2015, p. 97).

De esta manera, Bradley estableció la siguiente proporción: $c:v::CA:BA$ (Bradley, 1729, p. 646), es decir, que la velocidad de la luz es a la velocidad del observador como el ángulo de la posición real es al ángulo de la posición aparente del objeto observado. Del mismo modo, de sus observaciones sobre γ *Draconis* infirió que ese ángulo de desplazamiento

aparente (aberración) era de $20''.2$, lo cual establecía una razón entre la velocidad de la luz y la velocidad anual de la tierra de 10210:1. De esto se seguía que el tiempo en que la luz tarda en recorrer la distancia Tierra-Sol es de 8 minutos y 12 segundos (Bradley, 1729, p. 340).

Al establecer esta proporción entre el ángulo de aberración y la razón que hay entre la velocidad de la luz y la velocidad de la Tierra sobre su órbita, lo que se hace es introducir un nuevo método para calcular no solo la velocidad de la luz,³¹ sino también la paralaje solar, pues asumiendo que se tiene calculada c , la ecuación puede ser puesta de tal forma que el diámetro de la órbita terrestre puede ser calculado. Esto es:

$$D = \frac{\tan \alpha}{2\pi}(ct) \quad (3.1)$$

en donde, α es el ángulo de aberración, c la velocidad de la luz, y t es el periodo de tiempo del año terrestre. No obstante, tal como lo señala Agnes Clerke (1908), antes de los experimentos de Fizeau y Foucault en el siglo XIX, lo que comúnmente se hacía era ocupar la aberración de la luz y el conocimiento imperfecto sobre UA para determinar la velocidad de la luz, ya que antes solo existía el método de Rømer para medir dicho valor. Fue hasta Foucault (1862), quien propuso un método exitoso e independiente de los astronómicos, que se incorporó en una misma medición el supuesto de la velocidad finita de la luz, y el ángulo de aberración, y c , con el fin de mejorar el valor de UA.

3.5.3. La medición de Foucault

Dos siglos después del trabajo de Rømer, Léon Foucault (1862) propuso una manera de medir c a través de un método terrestre, lo cual permitiría que el valor de UA fuese mejorado a partir de una medición independiente de las mediciones astronómicas de π_{\odot} . Es decir, mientras que a través de los métodos de Rømer y de Bradley era necesario usar el conocimiento imperfecto sobre UA para medir c , Foucault revertiría la ecuación para poder mejorar el conocimiento de UA (y por tanto de π_{\odot}), para lo cual, de nuevo, era necesario medir la velocidad de la luz de manera independiente de estos últimos valores. Harkness (1881) llamó a esta forma de calcular π_{\odot} el método físico o foto-taquimétrico, el cual mide la velocidad de la luz en la superficie terrestre. Éste método, nos dice, fue posible gracias a las mediciones de Fizeau y Foucault.

³¹De acuerdo con Dominique Raynaud (2013), la incertidumbre en la medición de c fue reducida por mucho desde la medición de Rømer, pues mientras que con el método de los eclipses joviales había una incertidumbre de $\pm 90,000$ km, con Bradley esta se redujo a $\pm 10,000$ km.

Antes de la medición de 1862, François Arago (1786-1853) había propuesto ya un método para medir la velocidad relativa de la luz en el aire y en el agua, tratando de demoler así la teoría corpuscular de la luz en favor de la teoría ondulatoria, y el mismo colega y amigo de Foucault, Hippolyte Fizeau (1819-1896), diseñó un instrumento para medir la velocidad absoluta de la luz. Ambos métodos eran terrestres en el sentido de que no necesitaban realizar ninguna medición astronómica ni realizar alguna expedición lejana para ello. Siguiendo la idea de Arago, Foucault (1850) estableció que la luz viajaba más lento en el agua que en el aire a través de un instrumento que tenía un espejo que rotaba, el cual dirigía la luz solar a dos medios, aire y agua, para así poder medir la velocidad relativa de la luz en éstos.

Eventualmente, Le Verrier (1811-1877), director del observatorio de París, intentaba aplicar la mecánica newtoniana al todo del sistema solar para determinar si es que la teoría gravitacional podía dar cuenta, por sí sola, de las órbitas planetarias. En consecuencia, intentaba determinar también las masas y distancias planetarias (Tobin, 1993, p. 277). Cuando estaba listo para tratar el movimiento solar en el cielo, se dio cuenta de que debía determinar de mejor manera la órbita terrestre, *i.e.*, era necesario mejorar el valor de UA antes propuesto. Así pues, Le Verrier, quien estaba muy familiarizado con el trabajo de Foucault, le pidió a éste determinar la velocidad absoluta de la luz con el método utilizado en 1850.

El instrumento que Foucault usó fue construido por Froment. Del mismo modo que el utilizado anteriormente en 1850, Foucault utilizaría el método del espejo giratorio, sin embargo, el arreglo instrumental tendría las siguientes innovaciones. El espejo era rotado por aire expulsado por un soplador de alta presión y una válvula que regulaba dicha presión, lo cual permitía ajustar y mantener la velocidad de rotación del espejo de una manera muy precisa. El arreglo también contaba con una pequeña rueda dentada de 25 mm de diámetro, la cual rotaba de manera exacta una vez por segundo, ajustando con esta la velocidad de rotación del espejo. Por último, se colocó una serie de cinco espejos cóncavos los cuales reflejaban la luz para que ésta recorriese una longitud de 20.2 m sin que perdiese intensidad en el recorrido (Tobin, 1993, p. 278).

La figura 3.8 muestra el arreglo del instrumento en cuestión. La luz era dirigida por un heliostato hacia el laboratorio en **a**, iluminando así una retícula **b** de vidrio plateado compuesta por 30 líneas transparentes de un décimo de milímetro. Así, el rayo de luz era proyectado hacia el espejo rotante **c**, el cual reflejaba la luz hacia el espejo cóncavo **m**₁ pasando a través de una lente acromática, **d**, usada para concentrar la imagen proyectada en un solo foco. El rayo luminoso continuaba su camino por los espejos **m**₂ hasta **m**₅, el cual reflejaba de vuelta el rayo hasta **c**, éste, a su vez, debido al tiempo transcurrido por

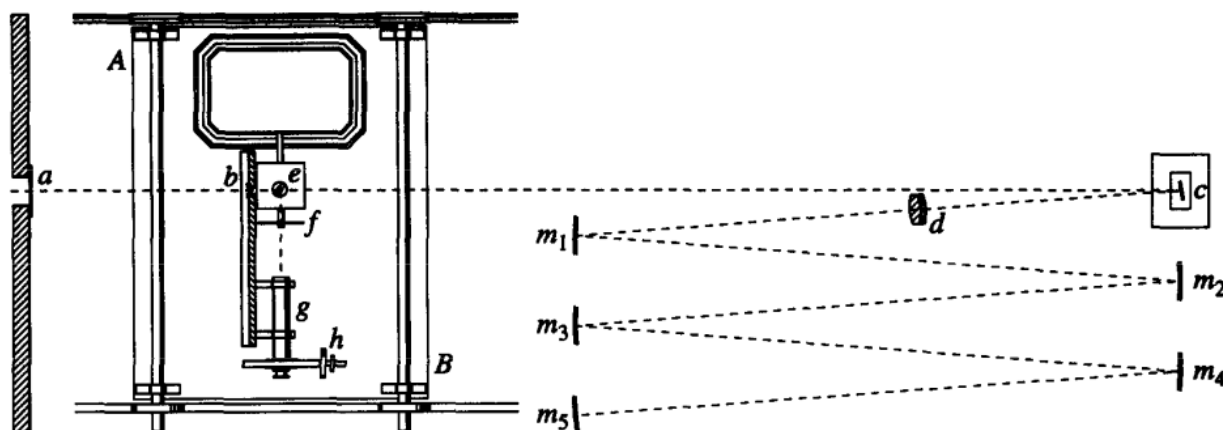


Figura 3.8: El arreglo del instrumento de Foucault para medir la velocidad de la luz y paralaje solar en 1862. La fuente de luz, a , transmitía el rayo a un espejo que rotaba, c , el cual reflejaba la luz hacia los espejos m_1 a m_5 , la luz regresaba a c , el cual tenía ya un ángulo de rotación θ , transmitiendo esta luz desviada hacia un microscopio y un micrómetro, g y h . La velocidad de la luz, V está dada por $V = \frac{8\pi nlr}{d}$, en donde n es el número de rotaciones por segundo del espejo c , l es la distancia de c a m_5 , r es la distancia desde c a b , y d es la desviación de la imagen en f . Descripción y diagrama tomados de (Tobin, 1993).

la luz en recorrer dos veces la distancia entre c y m_5 , había rotado ya con un ángulo θ . Por último, el rayo (el cual ya tenía una desviación en función de θ) era dirigido hacia un divisor de haz e , el cual reflejaba la luz hacia un punto cercano de la rueda dentada, lo cual era observado a través de un microscopio y un micrómetro.

El principio del experimento en realidad era sencillo, si la luz fuese transmitida instantáneamente, el ángulo y velocidad de rotación del espejo c no haría ninguna diferencia, sin embargo, si la luz tiene velocidad finita, y si c gira lo suficientemente rápido y se conoce su ángulo de rotación (θ), entonces uno debería observar una diferencia de posición entre el rayo de luz en el tiempo t_1 (cuando comienza su viaje hacia el primer espejo) y el tiempo t_2 (cuando regresa reflejado de c). Foucault encontró una diferencia detectable cuando el espejo rotaba a 400 revoluciones por segundo, midiendo una diferencia en la retícula de 0.7 mm (Tobin, 1993, p. 279). Así, en 1862, Foucault reporta el siguiente resultado en una nota presentada a la *Académie des Sciences*:

Como resultado final, la velocidad de la luz parece ser notablemente menor a la supuesta. De acuerdo con los valores aceptados comunmente, esta velocidad es de 308 millones de metros por segundo,³² mientras que el nuevo experimento del espejo

³²El valor al que Foucault se refiere aquí es el estimado por Arago en 1838 (Raynaud, 2013), no obstante, este detuvo sus observaciones debido a la pérdida más constante de la visión. Mientras que el valor resultante de las observaciones de Bradley era de 303 millones de metros por segundo, y el de Fizeau (1849)

rotante da un valor redondeado en 298 millones.

Me parece que podemos contar en la exactitud de este número en este sentido, a saber, que las correcciones que debamos aplicar a éste no deberán ser mayores a 500000 metros. (Foucault, 1969, pp. 343-44)

Ahora bien, una vez que la velocidad de la luz fue determinada con un método terrestre, este valor podía ser combinado con la medición de la aberración de la luz y con el tiempo de traslación de la tierra (ecuación 3.1), de tal modo que el diámetro de la órbita terrestre fuese calculado y, por tanto, también lo fuese la paralaje solar. Foucault presenta ese resultado en la misma nota ya mencionada:

Si aceptamos este nuevo número [sobre c] y lo combinamos con la constante de aberración de $20''.45$ para deducir de esto la paralaje del sol,³³ la cual es evidentemente una función de estos dos números, encontramos en lugar de $8''.57$ el valor notablemente más grande de $8''.86$; así la distancia media entre la Tierra y el Sol se disminuye cerca de $\frac{1}{30}$. (Foucault, 1969, p. 344)

Hay algunas cosas que notar sobre esto. Cuando Foucault dice que el valor encontrado con su método es «notablemente más grande», se refiere a $0''.29$ de diferencia. Si comparamos ésto con los valores propuestos en el siglo XVII a partir de Horrocks, nos damos cuenta de que ese «notablemente» tiene ya otro significado, pues mientras que anteriormente los valores variaban de entre $6''$ (Lahire en 1672) a $40''$ (Hevelius en 1666), *i.e.*, una diferencia de 186,374,656.95 km en UA, por otro lado, la diferencia de la que Foucault habla es de 5,024,613.20 km. Además, el método físico empleado por Foucault incorpora mediciones y supuestos que no eran accesibles para el astrónomo del siglo XVII: a saber, el descubrimiento de Rømer sobre la finitud de la velocidad de la luz reemplazaba el supuesto de la transmisión instantánea de ésta sostenido desde la antigüedad. La medición de la aberración de la luz era clave para poder determinar π_{\odot} con este método, sin esta medición, el resultado de Foucault hubiera sido simplemente la redeterminación de c (lo cual, por sí solo, hubiese representado ya un progreso sobre los valores anteriores). Por último, el mismo Foucault enfatiza sobre la incorporación de los instrumentos usados, los cuales, él no inventó pero supo coordinarlos para lograr su medición:

No hemos inventado ni el espejo giratorio, ni las lentes acromáticas, ni la red, ni el micrómetro; hemos tenido la gran fortuna de agrupar estos instrumentos adquiridos

era de 315 millones.

³³De acuerdo con (Tobin, 1993, tabla 1), los valores usados en el siglo XIX para la aberración de la luz eran el de Bradley (1728), de $20''.25$, y el de Struve (1843), de $20''.445$. Es a éste último al que Foucault hace alusión aquí.

por la ciencia de una manera que nos dotaron de la solución a un problema puesto doce años atrás. (Foucault *apud* Aczel, 2003, p. 88)

Para el siglo XIX los instrumentos usados eran muy superiores a los del físico o astrónomo de un siglo antes. El gran avance en ingeniería y tecnología ofrecía la oportunidad del desarrollo de un método como el foto-taquimétrico, pues en este tiempo ya era posible hacer rotar una rueda (o un espejo) a velocidades de cientos o miles de revoluciones por segundo, velocidades que también eran conocidas con exactitud. Esta tecnología abría la posibilidad de ofrecer una retroalimentación muy importante a los métodos astronómicos para calcular la unidad astronómica. Así pues, vemos que las ventajas del método empleado por Foucault sobre el de Cassini/Richer son las siguientes:

1. Los instrumentos utilizados eran simplemente más precisos, debido al desarrollo en la tecnología.
2. Foucault disponía de más herramientas cognitivas astronómicas adecuadas. Es decir, mientras Cassini y Richer sí hicieron uso de una herramienta como las efemérides de Júpiter, para el tiempo de Foucault no sólo se habían corregido las tablas usadas por estos dos astrónomos, sino que se había eliminado ya el supuesto de que la luz viaja con velocidad infinita. Además hizo uso del ángulo de aberración de la luz, lo cual era un fenómeno totalmente desconocido antes de 1726, así, la conjugación de la medición de la luz por un nuevo método y de la medición del ángulo de aberración, dieron como resultado un valor más preciso con menos incertidumbre.
3. Mientras que Cassini y Richer tenía que (1) realizar una expedición muy costosa a algún punto lejano para establecer una segunda estación de observación, y (2) las observaciones realizadas en ambas estaciones debían estar perfectamente sincronizadas (lo cual no era posible dado a los errores en las tablas sobre Júpiter), la medición de Foucault requirió de poco más de 20 m de distancia sin la necesidad de sincronizar la medición con alguna otra.
4. Foucault no dependía de la ocurrencia de algún fenómeno astronómico para su medición. Es decir, mientras que los tránsitos de Venus ocurren con un patrón que se repite cada 243 años con pares de tránsitos separados por ocho años, con una separación entre pares de 121 y 105 años, y mientras que la oposición de Marte en su perihelio ocurre cada 15 ó 17 años, Foucault no necesitaba esperar a que algún evento astronómico ocurriese, *i.e.*, no era necesario realizar una medición astronómica.

Astrónomo	Paralaje solar	Distancia en r_t	au
Aristarco (280 AC)	2'59"	1150	0.04903
Ptolomeo	2'50"	1210	0.05159
Copérnico	2'55"	1179	0.05026
Tycho Brahe	2'54"	1183	0.05043
Lansberg	2'13"	1551	0.06612
Kepler	0'59"	3470	0.14794
Horrocks	0'14"	15000	0.63952
Hevelius	0'40"	5156	0.21985
Cassini / Richer	0'9".5	21712	0.92569
Foucault	0'8".86	23280	0.99256
Valor Moderno	8".794143	23454.79	1

Cuadro 3.6: Aumento de la tabla 3.6. El valor añadido es el de Foucault, el cual se acerca más al valor moderno. A diferencia del valor propuesto por Cassini (quien selecciona solo algunas observaciones para su análisis), el de Foucault tenía menos grado de incertidumbre, pues dependía de conocimiento astronómico no disponible antes de 1726.

Si bien es cierto que la medición de Foucault no fue el punto final de esta indagación, sí podemos apreciar, sin embargo, un progreso cognitivo en el siguiente sentido: las herramientas cognitivas usadas eran mejores medios para medir UA, en donde «mejor» significa «más exactitud y menor incertidumbre en la medición», es decir, por un lado, a partir de Foucault las mediciones posteriores estuvieron en un rango de variación de 0".33, en donde la medición de 1862 se alejaba tan solo 0".7 del valor moderno; por el otro lado, la incertidumbre que propuso Foucault sobre su medición fue de 500,000 metros. Esta mejoría en la medición radicaba en una mayor precisión de sus instrumentos y en un mejor acuerdo entre éstos y el modelo que se usaba, pues tal modelo ya no incluía supuestos falsos utilizados anteriormente—como la proporción utilizada por Horrocks—, e incorporaba nuevos supuestos que mejoraban la calidad epistémica del modelo—por ejemplo, el supuesto de la velocidad finita de la luz y la incorporación de la aberración estelar—. El resultado, pues, fue una mejoría en la práctica de medición de UA.

3.6. Conclusión

Hemos visto a grandes rasgos tres mediciones de la unidad astronómica que corresponden al periodo de los siglos XVII-XIX. La medición de Horrocks ha sido incluida debido a que fue la primera estimación científica de UA después de 19 siglos de preservación de un solo estándar. Esta medición representó una mejoría con los métodos antiguos con respecto al uso de herramientas cognitivas más adecuadas—como las *tablas rudolfinas*, las leyes de Kepler, el telescopio, etc.— y respecto a la calidad de la medición misma. No obstante, vimos que la incertidumbre era muy alta, debido a deficiencias en la observación y al modelo usado; pese a esto, su importancia radica en descubrir que las dimensiones celestes eran muchísimo más grandes de las imaginadas anteriormente. También vimos que el método que usó Cassini fue una iteración progresiva con respecto a la medición de la paralaje de Marte de Tycho. De nuevo, las herramientas cognitivas usadas fueron producto de un proceso de investigación de la comunidad astronómica, al cual simplemente Tycho no tenía acceso. La medición de UA propuesta se acerca mucho al valor moderno, sin embargo, no dejaron de haber grandes dudas sobre cuál era el valor real. Podemos decir que el siglo XVII se dio cuenta del error sistemático desde la antigüedad (ya que las dimensiones concebidas para el universo eran mucho más pequeñas), mejoró los métodos existentes y desarrolló otros—como el gravitacional—para esta medición, no obstante, no logró llegar a una convergencia en el valor de UA. Por último, vimos que el desarrollo tecnológico del siglo XIX permitió una medición mucho más precisa como la de Foucault, la cual retroalimentó los métodos astronómicos utilizados anteriormente. Por otro lado, a finales del siglo XIX ya comenzaba a verse una convergencia de este valor, pues, mientras que la diferencia que Foucault señala con los valores aceptados anteriormente es de aproximadamente $0''.30$; para finales del siglo XIX (últimas dos décadas) los valores extremos del rango aceptado eran $8''.788 \pm 0.018$ (Downing, 1880) y $8''.911 \pm 0.084$ (tránsito de Venus, 1882), es decir, de una diferencia de $0''.123$, *i.e.*, 2,066,368 km.

La convergencia se puede apreciar en las figuras 3.9 y 3.10, las cuales muestran los valores calculados para UA expresados como una fracción del valor aceptado hoy en día. Esta convergencia y reducción de la incertidumbre finalmente tuvo lugar con la introducción del radar de pulsación, el cual era un método totalmente nuevo y el cual no tuvo competencia. Podemos decir que el progreso se dio gracias al crecimiento controlado de las herramientas cognitivas para poder resolver la pregunta sobre UA, este crecimiento tuvo como resultado la convergencia hacia un valor y la reducción de la incertidumbre en dicho valor.

Lo que se ha hecho en este capítulo es hacer una reconstrucción breve sobre estas tres

Gráfica de la desviación de los valores propuestos para UA entre 1500-2000.

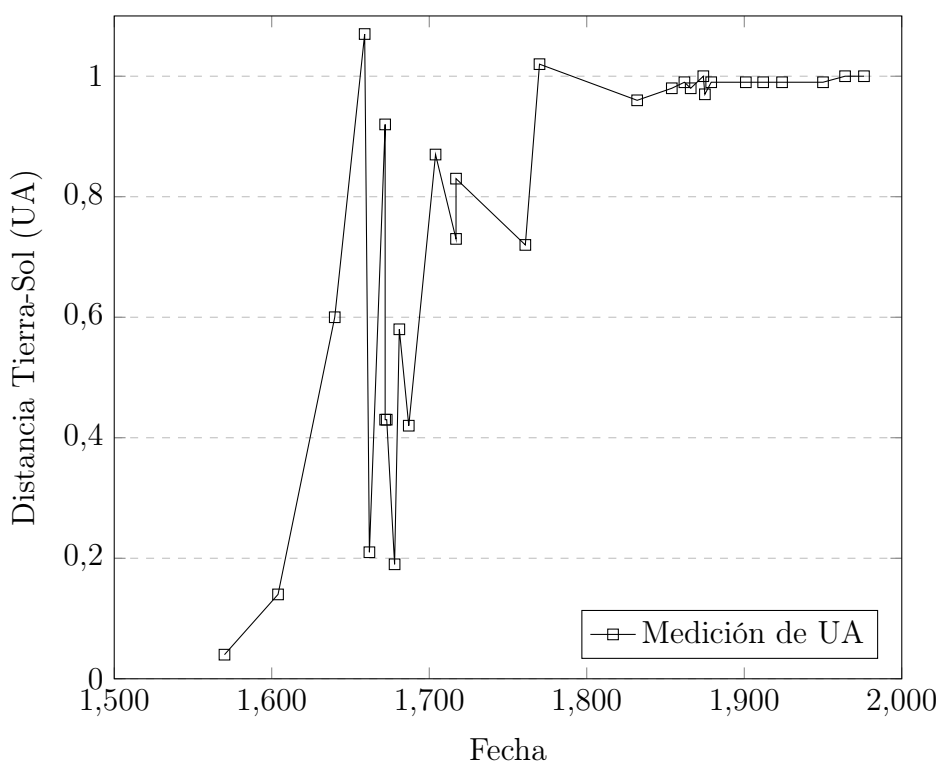


Figura 3.9: Medición y aceptación de los valores para UA en el periodo 1500 al 2000. El eje de las *ys* muestra la unidad astronómica como una fracción del valor aceptado actualmente (obtenido al dividir el valor propuesto entre 149,597,870.691 km), y el eje de las *xs* muestra la fecha de la medición. Gráfica reconstruida a partir de los valores publicados en (Hughes, 2001).

Gráfica de la desviación de los valores propuestos para UA entre 1800-2000.

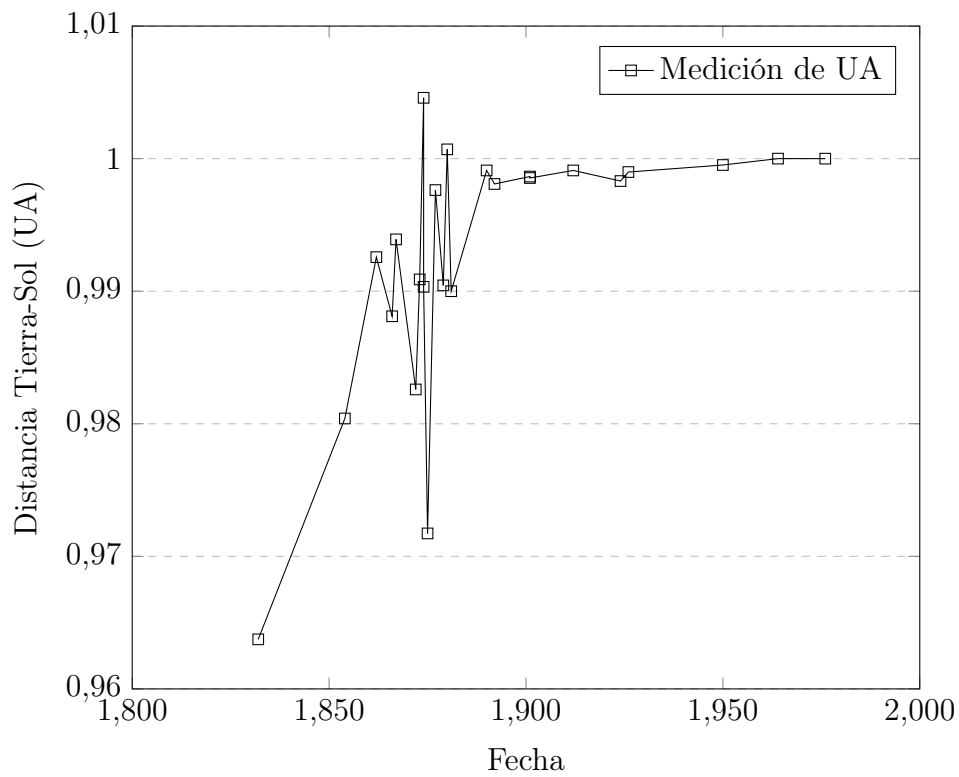


Figura 3.10: Medición y aceptación de los valores para UA en el periodo 1800 al 2000. En esta gráfica se muestra que desde 1850 el valor sugerido no se ha desviado más allá del 0.2% del valor aceptado hoy en día (Hughes, 2001).

mediciones, las cuales, me parece, muestran un progreso cognitivo en cuanto a la práctica de medición y nuestro conocimiento sobre UA. No obstante, es necesario aclarar de mejor manera qué significa que estas prácticas presentaron un progreso cognitivo. Es por ello que en el siguiente capítulo, explicaré de mejor manera qué es lo que se entiende por ‘crecimiento cognitivo’. Así pues, a través de esta explicación, se deberá aclarar en qué sentido podemos entender el progreso de la ciencia si preservamos un enfoque en las prácticas de la ciencia, más que en las teorías. No obstante, un reto será no desechar lo que hemos aprendido sobre el progreso a partir del análisis filosófico de éstas últimas.

—The progress of inquiry is identical with advance in the invention and construction of physical instrumentalities for producing, registering, and measuring changes.

Moreover, there is no difference in logical principle between the method of science and the method pursued in technologies.

John Dewey

4

Análisis. El Crecimiento cognitivo

Lo que se presentará en este pequeño capítulo es el esquema general del crecimiento cognitivo que podemos extraer de la práctica de medición de UA. Como ya se habrá notado, se han estado utilizando dos conceptos muy cercanos, pero al final distintos: progreso y crecimiento. En general, me parece mejor el empleo del segundo concepto para hablar del avance de la ciencia, puesto que éste implica un avance general a partir de la creación de fases mejores y, en algunas ocasiones, a partir de fases “degenerativas”. Así pues, mientras que el concepto de progreso sólo se refiere al «mejoramiento» de las fases, el de crecimiento es más amplio, puesto que implica ambas posibilidades, con el fin de aumentar la probabilidad de que fases posteriores sean un mejoramiento.¹

A partir del capítulo anterior podemos definir el crecimiento cognitivo como el proceso de ajuste controlado de la práctica científica, en donde se presenta un mejoramiento de las herramientas cognitivas con el fin de producir una creencia que sea resistente a experiencia recalcitrante.² Tal proceso de ajuste se da a través de una serie de iteraciones en donde

¹Respecto a la distinción de los conceptos de ‘cambio’, ‘desarrollo’, ‘progreso’, y ‘crecimiento’, véase la introducción general, sección 1.2.

²Por ‘experiencia recalcitrante’ se entiende aquí lo que Charles S. Peirce tomaba como «cualquier cosa que nos impele, nos sorprende, y se impone sobre nosotros». Notemos que esto va más allá de la simple percepción, pues se extiende a todas aquellas «operaciones sobre diagramas, ya sean externas o imaginadas,

se presenta la detección y corrección del error a través del control de las condiciones de observación y las inferencias, se mejoran las herramientas cognitivas, y finalmente se da una estabilización de las creencias relacionadas con la práctica.³ A continuación se presentará cómo es que podemos construir este esquema a partir del análisis de la práctica científica.

4.1. Esquema del crecimiento cognitivo

Podemos ejemplificar el crecimiento cognitivo de la medición de UA con el diagrama de flujo de la figura 4.1. En este tenemos primeramente un estado inicial de la medición. En nuestro caso este estado está representado por la medición de Aristarco de 2'59" de paralaje solar, la cual perduró por casi diecinueve siglos. Tal creencia no necesitó de revisión hasta que Kepler analizó los datos de Tycho Brahe, y fue entonces que descubrió que estos datos no apoyaban la paralaje propuesta por Aristarco. Así pues, tal como lo muestra el primer rectángulo del esquema, el error fue descubierto. Esto provocó que la creencia se encontrara con experiencia recalcitrante, haciendo necesario la fijación de una nueva creencia que fuese resistente a esta. Así pues, el proceso de indagación se detiene no cuando nos encontremos en un estado de certeza sobre la verdad, sino cuando la creencia (y las expectativas y hábitos que implica) es resistente.⁴

El segundo rectángulo verde representa la introducción de un proceso muy importante

que toman el lugar de los experimentos sobre cosas reales que uno realiza [*v.g.*] en la investigación química y física» (C. S. Peirce, 1958, CP 4. 530).

³Tal noción de crecimiento cognitivo se ha basado en discusiones privadas sostenidas con Godfrey Guillaumin y también en su concepto de 'expansión de la experiencia' (Guillaumin, 2019). Del mismo modo se retoma el concepto de 'iteración epistémica' de Hasok Chang (2007 y 2004).

⁴Aquí es importante explicitar que al analizar estas prácticas de medición uno se encuentra con una noción de 'verdad' distinta a la de la epistemología tradicional, la cual asume que ésta es una correspondencia exacta entre una idea y un referente externo al agente. En contraste, en este caso la verdad no es una copia literal de nada. La noción implícita es, más bien, algo falible. Aquí podemos pensar en su lugar en el concepto de *verosimilitud*, pues este nos puede ayudar a entender el acercamiento y convergencia progresiva de los métodos de medición. Por «verosímil» se entiende aquí una medición o explicación que, en el momento presente, da cuenta de los hechos de manera exitosa, pero que también puede ser mejorada o abandonada en el futuro. Por «éxito» se refiere aquí al cumplimiento de un fin o propósito a la vista. Asimismo, la verosimilitud implica un margen de error aceptable, o una tolerancia de error. Nótese que, a partir de esta noción, uno no puede tomar alguna medición o hipótesis simplemente como verdadera o falsa, sino que el concepto relevante aquí es el *grado de error* de la medición. En esto, se sigue la noción de verosimilitud de Peirce, la cual representa otra medición de la incertidumbre en contraste con la noción de probabilidad. Véase *Notes on the doctrine of chances* de Peirce (1995) y Burch (2010). Agradezco al Dr. Ricardo por señalarme la importancia de explicitar este punto.

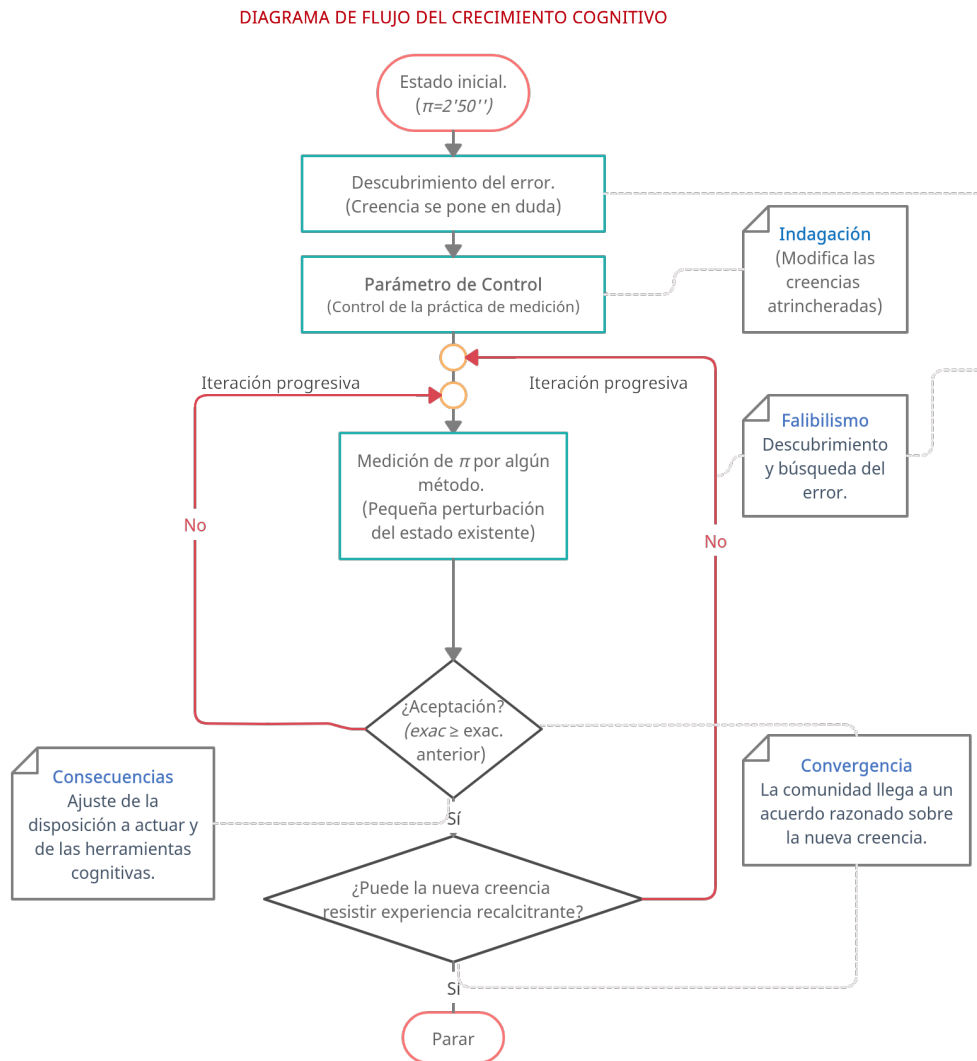


Figura 4.1: Este diagrama muestra el proceso de crecimiento cognitivo de la práctica de medición de UA. Como se puede observar, los conceptos clave mencionados en la sección anterior juegan un papel muy importante en este proceso de crecimiento. La indagación comienza una vez que el error ha sido descubierto y se detiene hasta que la creencia logra resistir experiencia recalcitrante. El falibilismo hace necesarias las iteraciones epistémicas, ya que una vez que se ha descubierto el error, éstas se encargan de mejorar la medición de un mismo parámetro. Las consecuencias se hacen presentes después de tomar una decisión en cada rombo. Finalmente, la convergencia es algo que también está presente una vez que el proceso de crecimiento para, ya que esto indica que el riesgo de sorpresa ha sido minimizado. Este proceso de crecimiento se puede ver como uno de adaptación de la creencia a la experiencia astronómica disponible.

para fijar una nueva creencia, a saber, la *indagación* sobre cuál era la verdadera distancia Tierra-Sol. Esto funcionó como un proceso de control de las condiciones de observación e

inferencias. Analizando el caso de la medición de UA, podemos ver que todo este proceso implica una serie de iteraciones de mejoramiento de la medición hasta fijar una creencia lo suficientemente resistente a experiencia recalcitrante, que es en donde el proceso se detiene. En muchos casos de medición, la indagación es en realidad un proceso de iteración epistémica que toma siglos hasta que la creencia se estabiliza y converge. Tal como Chang lo caracteriza, este proceso es uno en el cual «etapas sucesivas de conocimiento son creadas, cada una construyendo sobre la precedente, para así mejorar la realización de ciertas metas epistémicas» (Chang, 2007, p. 18). Este es un proceso de reajuste (de herramientas cognitivas y de creencias), lo cual implica que no es necesario que cada etapa será mejor que la anterior, pues en ocasiones puede haber un retroceso, no obstante, el proceso iterativo garantizará a largo plazo que sea más probable construir etapas cada vez más adecuadas. Por otro lado, al principio del proceso, los estados construidos serán menos adecuados y con mayor probabilidad de error. «Lo que tenemos es un proceso en el cual lanzamos juntos ingredientes muy imperfectos para fabricar algo que sea un poco menos imperfecto» (2007, *ibid.*). Al final del día, lo que resulta es un proceso de iteración progresiva que poco a poco perfecciona las creencias y la práctica de medición. Tal proceso iterativo está representada por las flechas rojas en la fig. 4.1.

Por ejemplo, para la observación de los tránsitos de Mercurio o de Venus, Kepler recomendaba usar una cámara oscura. No obstante, a partir de la medición de Gassendi y de algunas correcciones, Horrocks decidió agregar un telescopio a la idea de la cámara oscura. Este arreglo instrumental representó, sí, la medición del mismo objeto celeste, pero observado con mayor tamaño y nitidez. Del mismo modo, Cassini y Richer realizaron la misma medición que Tycho Brahe, pero agregando instrumentos con miras telescópicas, un reloj de péndulo, y las tablas de las efemérides de Júpiter. Todo ello representó un mejoramiento en la observación que, sin embargo, dependió del desarrollo de ciertos instrumentos en una etapa anterior a Cassini, y posterior a Tycho. Más aún, para hacer una medición como la de Foucault, se requirió de la observación de Rømer (la cual se basó en las tablas de Cassini), necesitó de la medición de Bradley (la cual se basó a su vez en la de Rømer), pero también requirió de aproximaciones previas (y más imperfectas) a la paralaje solar, para así tener un parámetro de comparación.⁵

En este sentido notemos que el caso de la historia de la medición de UA muestra

⁵Por supuesto, a todo esto podemos agregar las etapas instrumentales previas para medir c , las cuales incluían el desarrollo del heliostato, del microscopio, del micrómetro, del perfeccionamiento de la fabricación de espejos, y, entre otras cosas, de la habilidad de hacer rotar un espejo de manera precisa a determinadas revoluciones por segundo. La construcción de este instrumento se basó en el desarrollo y mejoramiento iterativo de sus componentes y del desarrollo de las habilidades requeridas para su manipulación.

que cada etapa se trató de un pequeño cambio y ajuste en algún instrumento, supuesto o habilidad, con el fin de tener una medición «menos imperfecta» que la anterior. Vemos no solo que cada etapa fue preparativa para un mejoramiento posterior, sino que a partir de pequeños cambios en cada iteración, a lo largo de tres siglos, se logró la estabilización de la creencia. Así pues, también se puede ver que este proceso de indagación implicó dos cosas importantes: la detección del error y un proceso de corrección de este. Estas dos características son parte de la doctrina del falibilismo, la cual se discutirá de mejor manera en el último capítulo, ya que se encuentra presente en el crecimiento cognitivo.

El primer rombo del esquema 4.1 muestra que debe haber una decisión (de aceptación o rechazo) después de cada medición (o iteración) nueva. Por ejemplo, Horrocks aceptó su medición ya que esta se encontraba bajo el rango propuesto por Kepler, pero también porque se aseguraba que era más precisa debido al mejoramiento en las condiciones de observación. Así pues, al obtener una medición más exacta, el siguiente paso es ver si ésta puede resistir experiencia recalcitrante futura (último rombo). En este caso, la medición de Horrocks no pasó la prueba, lo cual hacía necesario repetir (por el mismo o algún otro método) la medición. Esta iteración está representada por la flecha roja de la derecha en la fig. 4.1. En otros casos ni siquiera hubo una aceptación de la medición (flecha roja de la izquierda en Fig. 4.1). Por ejemplo, Halley (1678) midió el tránsito de Mercurio y obtuvo una $\pi_{\odot} = 45''$, sin embargo, él mismo rechazó tal número y exhortó sobre la necesidad de repetir la medición a partir del siguiente tránsito de Venus en 1761 (Van Helden, 1985). En este caso se aceptó que la nueva medición no era más exacta que la de Cassini y una nueva iteración tuvo que ser realizada. Finalmente, hubo instancias en las que se aceptaron números que ni siquiera eran más exactos que el anterior. Por ejemplo, el caso de Hevelius, quien propuso una $\pi_{\odot} = 40''$ simplemente porque le parecía que el número de Horrocks era muy pequeño. Tal aceptación de $40''$ parecería un retroceso, no obstante, la poca adecuación que esta creencia tenía a la experiencia astronómica disponible hacían menester una nueva iteración, lo cual en realidad representa una etapa necesaria para detectar algún error. Así pues, ambas flechas rojas en la fig. 4.1 representan la necesidad de mejorar la medición a partir de una nueva iteración epistémica, debido a que la creencia no es lo suficientemente resistente.⁶

⁶Detrás de la cuestión de la aceptación de la medición (primer rombo del diagrama) se encuentra el problema de la justificación epistémica. Como ya se ha sugerido, aquí no se ha asumido una noción de conocimiento como «creencia verdadera justificada», ni de verdad como correspondencia. De igual modo, la noción de justificación cambia. Me parece que lo que está detrás de las prácticas de medición es lo que Chang (2007) ha llamado ‘coherentismo progresivo’, el cual intenta superar la dicotomía entre fundacionismo y coherentismo. Es decir, lo que tenemos no es una justificación de algún fundamento firme, sino una

Este largo proceso iterativo se puede entender como uno de auto-corrección de errores, en el cual obtenemos poco a poco como resultado una «expansión de la experiencia» astronómica.⁷ En este sentido, pues, la experiencia a la que cada etapa se enfrentó no fue la misma a la que se enfrentaron etapas anteriores o posteriores. Así pues, el crecimiento cognitivo es el proceso a través del cual la experiencia se expande. Aquí vale la pena señalar qué es lo que se entiende por experiencia.

Por ‘experiencia’, en general, se entiende el proceso de aprendizaje y crecimiento que tiene una estructura iterativa de corrección de errores y ajuste de las creencias para poder responder mejor a la información disponible. Podemos retomar la siguiente aclaración de Brandon (2011):

[La experiencia] no es un *input* al proceso de aprendizaje. *Es*, más bien, el aprendizaje mismo: el proceso de percepción y ejecución [*performance*], seguido de la percepción y evaluación de los resultados de la ejecución, y después más ejecución, exhibiendo la estructura iterativa, adaptativa, y de ramificación condicional de un bucle [*loop*] de prueba-operación-prueba-salida. El resultado de la experiencia no debe ser entendido como la posesión de ítems de *conocimiento*, sino como un tipo de *entendimiento* práctico, un tipo de ajuste adaptativo al ambiente, el desarrollo de hábitos aptos para lidiar exitosamente con contingencias. Es un conocer cómo más que un conocer que.⁸ (2011, p. 7)

Así pues, una expansión de la experiencia, en cuanto a las prácticas de medición se refieren, es a una modificación a nuestro mismo modo de enfrentar, entender, medir y

aceptación de un conjunto de conocimientos sobre el cual etapas posteriores serán construidas. Así pues, sobre esta base, «etapas posteriores comunmente corrigen y refinan los resultados de etapas anteriores» a través de *iteraciones epistémicas* (2007, p. 18). Lo que tenemos de fondo, pues, no es una *justificación* en el sentido tradicional, sino una *aceptación epistémica*, lo cual implica una aceptación provisional no solo de un conjunto de conocimientos, sino de los mismos medios para generar dicho conjunto. Podemos encontrar esta idea en los pragmatismos de Peirce y de Dewey. Agradezco tanto al Dr. Godfrey Guillaumin como al Dr. Ricardo Vázquez por hacerme ver este punto con sus comentarios.

⁷Guillaumin (2019) se refiere a este concepto de «expansión de la experiencia» como la generación de nuevas condiciones para corregir, modificar y abandonar creencias e inferencias. Tal generación es producto de modificaciones previas de las condiciones que una práctica tiene de aceptación y rechazo de dichas creencias e inferencias. Por ejemplo, los instrumentos usados por Tycho pusieron las condiciones tanto para rechazar una paralaje solar de 2’50” como para aceptar una menor a 1’. Más adelante se señalará (sec. 5.1) que aquí ‘creencia’ no se refiere a una mera proposición, sino principalmente a una regla de acción.

⁸Este proceso iterativo, o *loop*, puede ser apreciado en el esquema del crecimiento cognitivo de la fig. 4.1.

conocer un parámetro de la naturaleza que nos resulta relevante, teniendo en cuenta que este proceso es un bucle, o *loop*, cuyo *output* es precisamente una experiencia diferente.

Algo que me gustaría enfatizar es que en cada iteración no solo hay un ajuste controlado de las herramientas cognitivas, sino incluso de las acciones relacionadas con tales herramientas. El punto es que tal control implicó cambios en la práctica de medición, *i.e.*, en el conjunto de acciones sistemáticas y coordinadas para realizar la medición. Es claro que las acciones, habilidades e información requerida para manipular un sextante o un cuadrante (instrumentos usados por Tycho) son distintas a las requeridas para manipular correctamente un telescopio, un reloj de péndulo, un micrómetro, o el arreglo instrumental de Foucault. En este sentido, estos ajustes en los instrumentos no solo fueron una «extensión» del sentido de la vista, sino una *sustitución* de esta, en la cual ciertas habilidades debían ser desarrolladas y otras desechadas.⁹ Así pues, podemos pensar que lo que pasó en cada uno de estos cambios controlados fue un ajuste tanto de las prácticas de medición como de las creencias implicadas con el fin de resistir la experiencia recalcitrante que en principio produjo la necesidad de modificación. A esta característica de ajuste controlado tanto de las herramientas como de las acciones le podemos llamar *consecuencia pragmática*.¹⁰

Del mismo modo, podemos decir que el crecimiento cognitivo es el proceso a través del cual la experiencia se expande de manera controlada, puesto que cada ajuste de las herramientas cognitivas y de las creencias se hace en virtud de asegurar de mejor manera un fin. Tal crecimiento, pues, implica el progreso de la práctica en tanto el fin a la vista queda mejor satisfecho. En las prácticas de medición, este progreso tiene como efecto una *convergencia* de los métodos de medición, ya que si no fuese así, lo que tendríamos es sorpresa, lo cual es lo que se ha intentado eliminar a lo largo del proceso. Tal como la fig. 4.1 muestra (asentimiento al segundo rombo), este es el punto en el que la creencia es resistente a experiencia recalcitrante y, entonces, el proceso de indagación debe parar. En el caso de la medición de UA esta convergencia puede ser apreciada en las gráficas 3.9 y 3.10 del capítulo anterior.

Ahora bien, a pesar de que se presente una convergencia de la creencia, debemos notar que nada garantiza que la estabilización a la que lleguemos en cierto punto sea perenne,

⁹Ofer Gal y Raz Chen-Morris (2010) han señalado interesantemente cómo es que desde el siglo XVII, con Kepler y Galileo, el ojo humano dejó de ser concebido como «la ventana al mundo», y se convirtió en un instrumento más, uno muy deficiente para la observación astronómica, de hecho. En este sentido, los instrumentos como el telescopio y el microscopio, vinieron a *reemplazar* el sentido de la vista, «relegando a los ojos en favor de un instrumento» (Gal & Chen-Morris, 2010, p. 139). Ya no se trata de un empirismo de los sentidos, sino uno en donde los instrumentos sustituyen a los sentidos.

¹⁰Este término se retoma del pragmatismo de Peirce y básicamente se refiere a los cambios y ajustes prácticos que se derivan de una hipótesis.

sino que tal creencia puede ser puesta a revisión en un futuro y así iniciar el proceso de crecimiento otra vez. Es decir, el proceso de crecimiento cognitivo está siempre sometido al falibilismo. No obstante, el error al que está sometido es cada vez más pequeño.

Por último, me gustaría señalar que, en lugar de ver al crecimiento cognitivo como un proceso en el que descubrimos cada vez más oraciones que *corresponden* a su referente (algo común en las aproximaciones tradicionales al progreso), podemos verle como un proceso iterativo de constante ajuste de las herramientas cognitivas. En este sentido, notemos que si asumimos la primera aproximación, el progreso científico se ve amenazado por el problema de la meta-inducción pesimista, ya que la historia nos enseña que proposiciones y teorías que considerábamos verdaderas, resultaron falsas. Por otro lado, la segunda noción de crecimiento no amenaza el progreso, ya que este se mide en tanto se construyan herramientas cognitivas que nos ayuden a fijar creencias cada vez más resistentes a experiencia recalcitrante, y aunque estas se vean amenazadas de vez en cuando, su resistencia a la experiencia que las produjo no es socavada. Por lo tanto, su progreso depende del ajuste de la práctica para tener un crecimiento cognitivo.

A lo largo de este análisis del crecimiento cognitivo de la medición de UA, han surgido cuatro conceptos clave que nos ayudan a entender el avance de la medición: a saber, indagación, falibilismo, consecuencia y convergencia. Todos estos son conceptos del pragmatismo que me parece están implicados en los procesos de medición. Lo que el esquema 4.1 muestra es cómo es que están implicados en estos procesos y la relación que hay entre estos cuatro, no obstante, hace falta hacerlos explícitos. Así pues, como capítulo final, y a manera de conclusión, me gustaría simplemente aclararles mejor y extraer algunas conclusiones generales sobre el crecimiento cognitivo de las prácticas de medición.

5

Conclusión. Cuatro conceptos clave

A lo largo de los capítulos anteriores he presentado dos maneras de tratar el progreso científico, a saber, a través de un análisis de las proposiciones y teorías que la comunidad científica acepta y, por otro lado, de un análisis de la práctica de medición. He sugerido también que la primer aproximación no es suficiente para entender la dinámica de las ciencias y su progreso, ya que señalar un cambio de teoría o de proposiciones no nos dice mucho sobre las herramientas cognitivas usadas para el desarrollo de nuevas etapas progresivas. Es necesario, pienso, poner el enfoque en el desarrollo de la misma práctica del científico. Es por ello que se ha presentado el capítulo 3, reconstruyendo la práctica de medición de UA, y también un análisis de las enseñanzas filosóficas que tal reconstrucción puede darnos (cap. 4).

Fue en el capítulo anterior en el cual se ha aclarado el concepto de ‘crecimiento cognitivo’, ya que el progreso científico puede ser entendido desde este concepto más amplio, respondiendo así a la cuestión de en qué sentido las prácticas de medición contribuyen al progreso de la ciencia. No obstante, hemos visto que de tal análisis surgieron cuatro conceptos importantes para entender dicho crecimiento. En el capítulo presente, pues, se aclarará a manera de conclusión tales conceptos extraídos del pragmatismo, y se señalará también cómo es que están presentes, si es que lo están, en ambas aproximaciones al progreso mencionadas (marcando así una distinción entre ambas). El fin de esta aclaración

y contraste será extraer algunas conclusiones que podemos extraer sobre el crecimiento cognitivo de las prácticas de medición científica.

5.1. Características del progreso de la práctica de medición

Como ya se mencionó, los conceptos que están implícitos en las prácticas de medición son: indagación, falibilismo, consecuencia y convergencia. Estos marcan características importantes para entender el progreso científico, y entre todos ellos tejen una noción de crecimiento cognitivo.

Indagación

El proceso de medición de UA presentado en el capítulo 3 representa un periodo de indagación de poco más de tres siglos. De hecho, este proceso puede ser descrito como el desarrollo de pequeñas indagaciones, cada una de las cuales no solo fue preparativa para la siguiente, sino que también representó una iteración progresiva en todo el proceso. Es decir, lo que cada astrónomo midió fue de hecho un parámetro que ya había sido medido diecinueve siglos atrás, no obstante, las herramientas usadas no solo fueron distintas y mejores, sino que éstas intentaban responder a una experiencia distinta a la que Aristarco tenía, la cual estaba constituida por creencias, hábitos y prácticas distintas. En general, el resultado de cada medición fue una creencia cada vez más estable, cada una de las cuales fue preparativa para el desarrollo posterior, hasta que se logró resistir experiencia recalcitrante futura. En cada paso de estas iteraciones lo que cambia, por supuesto, no solo es una creencia, sino la práctica de medición, *i.e.*, hay también una *expansión de la experiencia*, la cual, al ir cambiando, vuelve necesaria también la modificación de las herramientas cognitivas.

El repetir la medición de un mismo parámetro, pero de mejor manera (mejoramiento iterativo), es lo que de hecho nos muestra el progreso de este proceso, pues poco a poco se van produciendo estados mejor ajustados o resistentes que los anteriores.¹ Podemos señalar, pues, la siguiente conclusión:

C1 *La historia de la práctica de medición nos muestra un largo proceso de indagación que exhibe una estructura iterativa de progreso y crecimiento cognitivo a través del ajuste*

¹Esto no quiere decir que necesariamente un estado posterior sea mejor que su estado inmediatamente anterior, pero sí que, a largo plazo, el proceso iterativo va produciendo y aceptando estados más adecuados.

controlado de instrumentos y otras herramientas, para poder establecer una creencia duradera sobre el parámetro en cuestión.

Este tipo de mejoramiento es algo que enfatiza el enfoque del desarrollo de las prácticas científicas, y que, por otro lado, el enfoque en la comparación de teorías o enunciados es algo que pierde de vista, ya que dichos enfoques no muestran el desarrollo de iteraciones progresivas, sino la mera sustitución de conjuntos de proposiciones. Recordemos que una característica que tienen las teorías tradicionales sobre progreso es que comparan conjuntos de proposiciones, los cuales en muchas ocasiones se entienden como sistemas acabados. El fin, por supuesto, es identificar qué conjunto o qué proposición es *mejor* (más progresiva) que otra, en donde ‘mejor’ puede significar «mayor contenido testable», «mayor poder explicativo», «más eficacia en resolver problemas», etc., dependiendo de la teoría de progreso que adoptemos. Así pues, de acuerdo con dicha aproximación, los elementos necesarios para señalar fases progresivas es tener un criterio de comparación definido y un conjunto de proposiciones.

El problema, sin embargo, radica en que casi todas las teorías tradicionales de progreso retoman conjuntos de proposiciones que son *el resultado de algún proceso de indagación* sin que se haga un análisis de éste, ya que su criterio de comparación no hace necesario revisarlo. La proposición, sin embargo, es solamente el resultado del mismo progreso científico, y como tal no nos da elementos suficientes para entender tal avance, sino que para ello es necesario revisar el proceso de *indagación*.

Por ‘indagación’ (*inquiry*) se entiende aquí un proceso de control de la práctica misma, el cual es desatado por experiencia recalcitrante, y que tiene como fin fijar una nueva creencia que sea capaz de resistir dicha experiencia.² Debemos aclarar algunas cosas aquí para entender cómo es que el proceso de medición señalado arriba es una indagación en este sentido.

Tomemos en cuenta primero la distinción pragmática *creencia/duda*, en donde la primera se refiere a una *regla para la acción*, en tanto nos dice qué esperar y cómo actuar bajo situaciones determinadas; por otro lado, la segunda es precisamente la falta de dicha regla. Así pues, mientras uno sostenga una creencia como regla de acción, no es necesario determinar cómo actuar bajo las circunstancias a las cuales la creencia se refiere. No obstante, podemos encontrarnos con experiencia recalcitrante que ponga en duda nuestras creencias y, en tal caso, uno debe redeterminar o reajustar la creencia en cuestión. Es importante subrayar aquí que el concepto pragmático de ‘creencia’ no es equiparable al de

²Tal definición está basada en lo que el mismo Peirce entendía por ‘indagación’. Véase Peirce (2012, 177ss).

‘proposición’, ya que en este caso la creencia no solamente se traduce en un enunciado, sino principalmente en una disposición para la acción.³

Ahora bien, si uno establece una creencia que es capaz de resistir experiencia recalitrante, entonces el proceso de indagación es detenido. No obstante, para lograr esto, uno debe lograr controlar y coordinar un conjunto de acciones que incluso al principio no se sabe que deben ser coordinadas, en donde tal coordinación y control están en función de la obtención de un fin epistémico. La medición de Foucault ejemplifica muy bien esto, pues en este caso fue necesario combinar y coordinar diferentes creencias, tales como asumir que la luz viaja en el espacio interplanetario con la misma velocidad (finita) que en el vacío; establecer una relación entre dicha velocidad (c) y la constante de aberración (α) (Young, 1889, p. 401). Por otro lado, para medir la constante de aberración se requirió del desarrollo de instrumentos y habilidades específicas para su manipulación adecuada, de tal modo que se tuviese seguridad de la relación que hay entre c y α . Por último, la misma medición de c requirió de un control tecnológico que simplemente no estaba disponible en el siglo XVII; para el tiempo de Foucault, en cambio, ya era posible hacer girar con gran precisión una rueda o un espejo a cientos de revoluciones por segundo. Más aún, los instrumentos empleados—espejos cóncavos, lentes acromáticas, retículas milimétricas bien calibradas, el heliostato, el micrómetro—no solo eran más desarrollados, sino que también requerían de una mejor coordinación para medir el parámetro deseado.⁴ Todo ello constituyó el control de la práctica de medición para poder determinar de mejor manera la paralaje solar.

Por «control», pues, se entiende «el desarrollo de habilidades para coordinar y manipular las herramientas cognitivas a la mano para poder cumplir con un fin epistémico». Notemos que el control de alguna herramienta comienza desde la correcta manipulación del propio cuerpo hasta incluso el almacén de datos de manera digital por algunos dispositivos. Por ejemplo, cuando recién se introdujo el telescopio para la observación celeste, el manejo manual de este y las lentes deficientes usadas eran aspectos que limitaban su manipulación

³En este sentido, sostiene Peirce, «el sentimiento de creer es una indicación más o menos segura de que se ha establecido en nuestra naturaleza algún hábito que determinará nuestras acciones» (C. S. Peirce, 2012, p.161). En vista de la diferencia que hay entre el concepto tradicional de creencia y el concepto pragmático de la misma, autoras como Misak (2004) proponen entenderle como ‘creencia-hábito’, en tanto se trata de una manifestación en sí misma de una expectativa: «si creemos H , entonces habitualmente esperamos que las consecuencias o predicciones que derivamos de H se den cuando la ocasión apropiada se presente» (2004, p. 48). De aquí en adelante, cuando se hable de ‘creencia’, se referirá a ‘creencia-hábito’.

⁴En contraste con la medición de Horrocks, *v.g.*, la cual requería, *inter alia*, seguir la trayectoria del sol con el telescopio y que la imagen proyectada por éste empatara exactamente con un diagrama en una pantalla, la medición de Foucault requirió de una coordinación mucho más compleja entre todos los aparatos empleados. La figura 3.8 del capítulo anterior nos muestra el arreglo instrumental de Foucault.

adecuada, además de que no se entendían los principios ópticos implicados. Al final del día, la fiabilidad de la observación recaía en gran medida tanto en la visión del observador como en sus capacidades para dibujar lo que veía.⁵ No obstante, poco a poco el rol de observador y constructor de telescopios se fue separando, de tal modo que, para el tiempo de Cassini, la manufactura del aparato se convirtió en un oficio especializado. Eventualmente, la visión dejó de emplearse como sensor de la luz de objetos lejanos, usándose en su lugar placas fotográficas. Finalmente, se llegaron a ocupar dispositivos de carga acoplada para captar dicha luz, los cuales son instrumentos infinitamente más sensibles que pueden guardar y mostrar a voluntad las imágenes tomadas. En otras palabras, el control dejó de recaer poco a poco en las habilidades de visión y corporales del observador y, con el desarrollo de la práctica, se introdujeron nuevas herramientas para mejorar la manipulación, así como también la creación de instrumentos nuevos. Por tanto, a lo largo de la historia de UA, el control se refiere al desarrollo de las habilidades requeridas para manipular desde un telescopio con una cámara obscura (Horrocks), hasta la lectura correcta de un radar de pulsación. Nótese que el control es un ‘desarrollo’ regulado por un fin, *i.e.*, etapas de control posteriores dependen y están condicionadas por las etapas de control anteriores, así pues, la manipulación y coordinación en la medición es un proceso de perfeccionamiento de esta a partir de mediciones disponibles.

Por último, por «práctica de medición» se entiende un «conjunto de acciones e instrumentos coordinados y controlados para cumplir con un fin epistémico, *i.e.*, la determinación de alguna magnitud». Por supuesto, entre mejor control se tenga de las acciones e instrumentos, mejor se asegurará el fin buscado; y en tanto esto ocurra, la práctica de medición implicará un crecimiento cognitivo.

Bajo esta perspectiva, pues, la indagación científica es el mejor medio que se ha desarrollado para dicho control, y si bien es cierto que las herramientas usadas por dicha empresa no representan un medio infalible para establecer creencias eternamente resistentes, es un hecho, por otro lado, que la indagación científica ha desarrollado cada vez mejores herramientas para este fin. Consecuentemente, podemos ahora reconocer que hay un tipo de progreso científico que no puede caracterizarse del todo en términos proposicionales, sino que para ello es necesario tomar en cuenta el proceso de indagación que desarrolló herramientas cognitivas cada vez mejores para establecer creencias resistentes.⁶ Por último,

⁵Véase, por ejemplo, van Helden (1994).

⁶Agradezco al Dr. Sergio Martínez por recordarme y señalarme que hay un error en generalizar el tipo de progreso que caracterizo como «crecimiento cognitivo» a todo progreso científico. La inferencia de que todo tipo de progreso científico debería tener estas características es una generalización no justificada. Por otro lado, lo que se ha intentado hacer en este trabajo es solamente señalar el tipo de progreso presente

como ya se mencionó en el capítulo anterior, el resultado de la indagación es la *expansión de la experiencia*.

Falibilismo

Algunas de las cosas que se muestran en la reconstrucción de la práctica de medición de UA es (1) el proceso por el cual los astrónomos se dieron cuenta de algún error, (2) el proceso iterativo por el cual la práctica de medición tuvo que ser ajustada, y (3) cómo es que tales ajustes resultaron en una práctica con mayor adecuación a la experiencia astronómica. Los casos presentados en la medición de UA pueden ser entendidos como instancias de detección y corrección del error, en los cuales ocurre que, si esto no hubiese tenido lugar, el crecimiento cognitivo simplemente no habría ocurrido, ya que el progreso radicó principalmente en el mejoramiento de las herramientas cognitivas con el fin de producir creencias más estables.

Lo que debe notarse aquí es que este desarrollo se dio a partir de corregir poco a poco errores, algunos de los cuales no podían surgir ni detectarse en etapas anteriores. Tales correcciones representaron pequeños cambios, cuyo resultado fue el mejoramiento cognitivo. Para mejorar la medición que Tycho había intentado, se requirió de la introducción de las tablas de Júpiter. Gracias a estas tablas, se descubrió el supuesto erróneo sobre la velocidad de la luz. La detección y cálculo de la aberración estelar dependió a su vez de la eliminación de tal supuesto. Eventualmente, Foucault utilizó el ángulo de aberración, junto con la medición que hizo de c , para poder mejorar la medición de la paralaje solar. Fue así, a través de pequeñas correcciones y pequeños cambios a lo largo de tres siglos de medición, que finalmente la creencia respecto a UA se estabilizó. Este proceso, pues, no corrigió todos los errores en una sola revisión, sino que cada iteración en la que se discernía y corregía algún error dependió de la anterior.

Lo que podemos ver detrás de estos procesos es la importancia epistémica que la detección del error tiene para el desarrollo y progreso de la indagación. Así pues, mientras que en aproximaciones epistemológicas tradicionales se considera el error como un obstáculo o una desviación, aquí el error es una condición necesaria para el crecimiento cognitivo. Podemos pensar en la siguiente cita kantiana:

Para evitar errores uno debe buscar develar y explicar su fuente, la ilusión. Sin embargo, pocos filósofos han hecho eso. Solo han buscado refutar los errores ellos mismos, sin indicar la ilusión de la cual surgen. No obstante, este develar y disolución de la ilusión es un mayor servicio a la verdad que la refutación de errores. (Kant, 1800/1992, p. 562)

en las prácticas de medición.

Lo que han señalado precisamente las teorías tradicionales del progreso es la “refutación” de algún error, y por ello una teoría o proposición debe sustituir a la que está errada. No obstante, el proceso más relevante para el progreso no es dicha “refutación”, sino el *cómo* se detectó y *cómo* se corrigió. Es esta parte de la doctrina del falibilismo la que nos muestra más el crecimiento cognitivo de las prácticas de medición y que, por otro lado, no está presente en las aproximaciones tradicionales. Así pues, podemos concluir que:

C2 *La historia de las prácticas de medición muestra un proceso iterativo de detección y corrección de errores que propiciaron el mejoramiento gradual de la medición, en donde las herramientas cognitivas a la mano fueron esenciales para llevar a cabo tal proceso.*

Notemos, sin embargo, que de los cuatro conceptos clave, es este el que podemos ver más comúnmente en las aproximaciones tradicionales al progreso científico, pues al asumir una sustitución de teorías, se implica que nuestras creencias son falibles. Recordemos que otra parte de la doctrina del falibilismo afirma que todas nuestras creencias son revisables y corregibles, ya que no podemos tener certeza de que no se encontrarán con experiencia recalcitrante que las ponga en duda (C. S. Peirce, 1958, CP 5.264-65).

En concordancia, por ejemplo, la noción de ‘verosimilitud’ de Popper está directamente influenciada por el concepto de ‘falibilismo’ peirceano. De hecho, en su introducción a *Realism and the aim of science*, él mismo menciona que «el eje real de mi pensamiento sobre el conocimiento humano es el falibilismo y la aproximación crítica» (Popper, 2013, p. xxv). Del mismo modo, Lakatos y Laudan hacen uso del término en sus teorías de progreso, de tal modo que, *v.g.*, no solo se acepta que nuestras creencias son corregibles, sino que también es posible que el desarrollo científico tenga etapas degenerativas. De igual manera, el ‘refinamiento’ conceptual y el mejoramiento de los ‘esquemas explicativos’ (que Kitcher toma en cuenta) asumen que nuestras creencias son corregibles.

En realidad es muy difícil no asumir un falibilismo cuando tratamos temas de carácter epistemológico. No obstante, se debe subrayar que tal doctrina no solo defiende que nuestras creencias son revisables, sino también sostiene que la indagación es *auto-correctiva*, es decir, «que es posible y probable que, para cualquier creencia errada, una comunidad de indagadores puedan, en un intervalo pertinentemente finito de tiempo, *discernir sus propios errores* y progresar hacia el descubrimiento del verdadero estado de la cuestión» (Margolis, 1998, 537, énfasis añadido). En este sentido, de nuevo, debe señalarse que las aproximaciones tradicionales ocultan la verdadera importancia que el falibilismo tiene para el progreso, ya que ésta se aprecia al notar *cómo* se detectó y *cómo* se corrigió el error, puesto que es este ‘cómo’ el que se refiere al proceso mediante el cual se mejoró una

creencia. Señalar que una teoría, T_2 , sustituye a otra, T_1 , porque cumple con cierto criterio de mejoramiento, no nos dice mucho sobre por qué y cómo es que T_2 es más progresiva, ya que lo que se indica es que el resultado de un proceso de indagación sustituye al resultado de otro proceso anterior.

Consecuencia

Como ya se mencionó, el crecimiento cognitivo implica un proceso de ajuste controlado de la creencia. John Dewey señaló que, en astronomía, esto se logró gracias a otro tipo de control, a saber: «podemos deliberadamente alterar las condiciones bajo las cuales observamos [los objetos celestes]» (Dewey, 1929, p. 84). Tales condiciones no se refieren, obviamente, a que podamos alterar los fenómenos u objetos a observar, o a condiciones climáticas, sino al tipo y calidad de observación que podamos hacer de tales objetos. Esto, por supuesto, depende de los instrumentos de observación a la mano, los cuales pueden ser desde el ojo desnudo hasta radares de pulsación. Este control tiene como resultado que podamos hacer ciertas inferencias, y eliminar otras. En este sentido, por ejemplo, las herramientas cognitivas y mediciones del siglo XVII no permitían inferir una π_{\odot} mayor a 20"; por otro lado, a partir del siglo XVIII, había un acuerdo general sobre que las inferencias aceptadas debían estar entre 8".5 y 15" de paralaje solar (Hughes, 2001, p. 21). Notemos también que no solo se “prohibieron” ciertas inferencias con los ajustes realizados, sino también se permitieron otras. Tal es el caso de la medición de la paralaje estelar, la cual descansa profundamente en un conocimiento preciso sobre la unidad astronómica. Así pues, el control de las condiciones de observación se refiere a los cambios y mejoramiento en la precisión de las herramientas cognitivas para medir con exactitud el parámetro en cuestión. Por lo tanto, podemos derivar la siguiente conclusión:

C3 *La historia de las prácticas de medición nos muestra una serie de ajustes controlados de la misma práctica con el fin de estabilizar una creencia.*

En otras palabras, las consecuencias de una hipótesis (o concepto) son los efectos y cambios que esta tiene en nuestra disposición a actuar en la práctica, lo cual implica cambios tanto en los instrumentos usados como en el conjunto de inferencias permitidas a partir de estos. En este caso, tales cambios no son incontrolados, sino que se hacen en virtud del cumplimiento de un fin.⁷

⁷Esta noción de ‘consecuencia’ se deriva del célebre dictum peirceano que afirma que toda noción o conceptos que constituyan a otro concepto o a una hipótesis deben tener un efecto práctico, *i.e.*, deben reflejarse en una «acción con un propósito [*purposive action*]» (C. S. Peirce, 1958, CP 5.212).

Así pues, el proceso de ajuste de la práctica de medición—en otras palabras, las consecuencias prácticas—nos muestra no solo que hubo un progreso en la historia de la medición, sino en qué sentido una etapa era *mejor* que la otra, a saber, una etapa más progresiva se refiere a una práctica que mejor responde a la experiencia recalcitrante que la produjo.

Tales consecuencias prácticas son un elemento oculto en las teorías de progreso tradicionales, puesto que simplemente la práctica científica ha sido algo relegado y secundario en el análisis de proposiciones y teorías.⁸ Por otro lado, el enfoque en la práctica de medición presentado en el capítulo 3 muestra no solo que dicha práctica mejoró, sino cómo es que se ajustó la experiencia e información disponible.

Convergencia

En el proceso de medición de UA, la convergencia se presenta como un resultado de la indagación a largo plazo. Es decir, se da una estabilización de la creencia ante casi cualquier experiencia futura. Se puede decir también que el proceso de convergencia fue racional, ya que no fue coincidencia que tanto métodos distintos de medición del mismo parámetro como procesos de medición de otros parámetros relacionados dieran resultados concordantes. La razón por la cual se dice que el proceso es racional es que cada ajuste de los instrumentos fue controlado para que la medición fuese más adecuada con la experiencia astronómica disponible. Es decir, cuando Horrocks decidió utilizar un telescopio para su medición (y no solamente una cámara oscura), lo que hizo fue controlar los medios de observación para poder inferir de manera adecuada las proporciones diametrales entre Venus y el Sol. Del mismo modo, cuando Foucault hizo rotar el pequeño espejo exactamente a 400 revoluciones por segundo, lo que hizo fue encontrar y controlar las condiciones bajo las cuales se detectarían una diferencia angular en el reflejo de la luz, lo cual permitía calcular su velocidad. Tales acciones no representaron un ensayo aleatorio para ver si así se cumplía el propósito buscado (responder cuál es la medida de UA), más bien, lo que tenemos es un conjunto de acciones sistemáticas controladas y dirigidas a cumplir el fin a la vista. Podemos ver que no se trata de un mero consenso social sobre la medida de UA, sino de un proceso de ajuste a la experiencia recalcitrante, *i.e.*, de un proceso racional.⁹ Podemos extraer, pues,

⁸En contraste, debe notarse que Kitcher sí tiene un enfoque en la práctica científica al reflexionar sobre el progreso científico. No obstante, para él, las prácticas mejoran en tanto los conceptos empleados por éstas son refinados y los esquemas explicativos corregidos. En cierto modo, sin embargo, esto también asume que, debido a las modificaciones, las expectativas de los científicos son más resistentes a experiencia recalcitrante. Así pues, debe también notarse que hace falta señalar *cómo* se ha logrado dicha resistencia.

⁹Raynaud (2013) nos presenta un interesante artículo sobre la determinación de la velocidad de la luz entre 1676 y 1983. Lo que el autor defiende es que, más que haberse construido y deconstruido a modo—

la siguiente conclusión:

C4 *El progreso de las prácticas de medición desemboca usualmente en una convergencia tanto de mediciones del mismo parámetro como de mediciones relacionadas.*

Teniendo en cuenta el caso de la medición de UA, se puede decir que una condición de posibilidad de la indagación es asumir que para cualquier cuestión sobre la cual se investigue, hay una respuesta. De otro modo, tal proceso queda bloqueado o cancelado. Por supuesto, uno puede asumir que la respuesta que se encontrará tal vez no sea la misma que la que otro indagador sostenga, y que de algún modo respuestas diferentes pueden coexistir (y en cierto modo esto sucedió en una parte de la historia de UA). No obstante, no es necesario que tal disenso sea permanente. En este sentido, la convergencia se refiere al hecho de que, para algunas preguntas, habrá una creencia que será racionalmente consensuada si la indagación se persigue lo suficiente por una comunidad de investigadores. Y esto se da gracias a que han pasado dos cosas: se ha (1) maximizado las expectativas derivables de nuestras creencias y (2) minimizado el riesgo de sorpresas.¹⁰ Tal proceso es relevante para el progreso, puesto que a través de este podemos ver si la convergencia es una mera coincidencia de creencias o es un proceso que tiene lugar a partir de métodos controlados.

En este sentido, notemos que una serie de sustitución de teorías o proposiciones no implica que exista o no una convergencia hacia alguna de estas; simplemente no hay un énfasis en esta. Más aún, el proceso racional para que haya convergencia no se trata simplemente de encontrar teorías que impliquen lógicamente las observaciones disponibles, sino principalmente del control de las condiciones de observación y medición a través del ajuste de los instrumentos y del control inferencial.

5.2. Relación de las conclusiones

Lo que podemos establecer a partir del análisis de las prácticas de medición es **C1-C4**:

tal como la sociología de la ciencia del *programa fuerte*, Karin Cetina-Knorr (1995), o John Law (1975) defenderían—, la determinación de los valores de c parece haber tomado una tendencia unidireccional e irreversible, pues en este tiempo podemos ver cómo la precisión aumentó y la incertidumbre fue menor. No obstante, Raynaud solo menciona los métodos empleados y las tablas que muestran la convergencia, mas no el proceso por el cual tal convergencia no fue una mera construcción. Me parece que entender la determinación de c como un proceso de ajuste a la experiencia recalcitrante nos ayudaría a mostrar de mejor manera que el proceso no podía ser un mero acuerdo social, sino que tenía que responder a algo independiente de nuestras creencias que produjo la indagación.

¹⁰Tal concepto de convergencia se basa en la reflexión de Peirce sobre la verdad y la indagación.

- C1** *La historia de la práctica de medición nos muestra un largo proceso de indagación que exhibe una estructura iterativa de progreso y crecimiento cognitivo a través del ajuste controlado de instrumentos y otras herramientas, para poder establecer una creencia duradera sobre el parámetro en cuestión.*
- C2** *La historia de las prácticas de medición muestra un proceso iterativo de detección y corrección de errores que propiciaron el mejoramiento gradual de la medición, en donde las herramientas cognitivas a la mano fueron esenciales para llevar a cabo tal proceso.*
- C3** *La historia de las prácticas de medición nos muestra una serie de ajustes controlados de la misma práctica con el fin de estabilizar una creencia.*
- C4** *El progreso de las prácticas de medición desemboca usualmente en una convergencia tanto de mediciones del mismo parámetro como de mediciones relacionadas.*

La proposición más general es **C1**, ya que esta habla de todo el proceso de indagación que depende en realidad de las características señaladas por las siguientes proposiciones. **C2** señala dos características del progreso de las prácticas de medición: primero, que hay un proceso de detección de errores en mediciones anteriores, y segundo, que hay un proceso de corrección del error, y por tanto de la medición. No obstante, esta segunda característica depende en realidad de **C3**, *i.e.*, de realizar ajustes controlados para cumplir el fin buscado. Una vez realizados los ajustes, se puede decir que nos encontramos en una nueva fase en la cual seguramente comenzará otra iteración. En otras palabras, la detección del error tiene como consecuencia realizar ajustes en las herramientas cognitivas y esto desemboca en la corrección del error, lo cual a su vez permitirá la detección de errores futuros, y así sucesivamente en una serie de iteraciones.

Las iteraciones de sucesivas mediciones que se dan entre **C2** y **C3** desembocan finalmente en una convergencia de resultados (**C3**). Es decir, la interacción que hay entre las características señaladas por **C2** y **C3** tiene como efecto la característica señalada por **C4**. Y finalmente, **C1** es la característica de las prácticas de medición que abarca a todas las demás: a saber, que la indagación métrica es un proceso controlado de progreso y crecimiento cognitivo. Tal interacción entre cada concepto se muestra en el diagrama 4.1 de la siguiente sección.

Ahora bien, como se mencionó en la sección anterior, el resultado de la indagación en general es la modificación o expansión de la experiencia astronómica, en donde ‘experiencia’ significa el mismo proceso de aprendizaje y crecimiento. Por otro lado, se ha señalado

constantemente que dicha expansión se hace a través del control y mejoramiento de instrumentos y otras herramientas cognitivas. Así pues, teniendo en cuenta esto, podemos responder a nuestra pregunta de investigación de la siguiente manera:¹¹

- Lo que las prácticas de medición nos enseñan es que la medición es uno de los recursos más efectivos para el control y crecimiento de la experiencia, lo cual implica el crecimiento y progreso del conocimiento científico.

Por último, aunque ya se mencionó, me gustaría subrayar que el tipo de progreso del que se ha hablado desde el capítulo 3 es el crecimiento cognitivo. Se ha defendido que el progreso que señalan las aproximaciones filosóficas (cap. 2) no logra comprender la dinámica de la práctica científica ni su avance, es por ello que se ha optado por analizar la práctica de medición para saber qué es lo que ésta misma nos enseña sobre el progreso científico. No obstante, es importante señalar que lo que podemos afirmar a partir de este análisis es que hay un tipo de progreso científico, el crecimiento cognitivo, que logra capturar de mejor manera el avance de algunas prácticas de medición, tales como la determinación de la paralaje solar, la de la paralaje estelar, la determinación de la velocidad de la luz, etc. No obstante, de aquí no podemos decir que *todo* tipo de progreso científico cumpla con las características señaladas por el crecimiento cognitivo, pero sí que este último es una mejor manera de entender el avance de muchas prácticas de medición. Como ya se mencionó en la introducción general (sec. 1.2), el tipo de mediciones que mejor describe el crecimiento cognitivo son las pertenecientes a la categoría dos de Hughes (2001), es decir, aquellos parámetros fundamentales de la naturaleza cuya medición exacta requirió del mejoramiento, abandono y creación de nuevas herramientas cognitivas; usualmente la determinación de estas mediciones toma siglos para al fin poder lograr una convergencia en su valor.

¹¹Conclusión que el propio John Dewey ya tenía en cuenta.

Bibliografía

- Aczel, A. (2003). *Pendulum: Leon Foucault and the triumph of science*. Atria, New York.
- Applebaum, W. (1970). *Kepler in England: The reception of Keplerian Astronomy in England, 1599–1687* (Tesis doctoral, State University of New York at Buffalo).
- Aughton, P. (2004). *The transit of Venus: the brief, brilliant life of Jeremiah Horrocks, father of British astronomy*. Carnegie.
- Baker, G. L. & Blackburn, J. A. (2005). *The pendulum: a case study in physics*. Oxford University Press.
- Bird, A. (2007). What is scientific progress? *Noûs*, 41(1), 64-89.
- Birge, R. T. (1919). The most probable value of the Planck constant h . *Physical Review*, 14(4), 361.
- Bradley, J. (1729). IV. A letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and FRS to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. giving an account of a new discovered motion of the fix'd stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 35(406), 637-661.
- Brandon, R. N. (2011). *Perspectives on Pragmatism: Classical, Recent, and Contemporary*. Harvard University Press.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. (2021). Micrometer. En *Encyclopedia Britannica*.
- Brooks, R. C. (1991). The Development of Micrometers in the Seventeenth, Eighteenth and Nineteenth Centuries. *Journal for the History of Astronomy*, 22(2), 127-173.
- Burch, R. W. (2010). If Universes Were as Plenty as Blackberries: Peirce on Induction and Verisimilitude. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, 46(3), 423-452.
- Canales, J. (2002). Photogenic Venus: The “Cinematographic Turn” and Its Alternatives in Nineteenth-Century France. *Isis*, 93(4), 585-613.
- Cetina-Knorr, K. (1995). Laboratory studies: The cultural approach to the study of science. En S. J. Et. al. (Ed.), *Handbook of science and technology studies* (pp. 140-167). Sage London.

- Chang, H. (2004). *Inventing temperature: Measurement and scientific progress*. Oxford University Press.
- Chang, H. (2007). Scientific progress: Beyond foundationalism and coherentism. *Royal Institute of Philosophy Supplement*, 82(61), 1.
- Chang, H. (2016). Pragmatic realism. *Revista de Humanidades de Valparaíso*, (8), 107-122.
- Chapman, A. (2004). Jeremiah Horrocks, William Crabtree, and the Lancashire observations of the transit of Venus of 1639. *Proceedings of the International Astronomical Union, 2004* (IAUC196), 3-26.
- Clerke, A. M. (1908). *A popular history of astronomy during the nineteenth century*. A. y C. Black.
- Dellsén, F. (2016). Scientific progress: Knowledge versus understanding. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 56, 72-83.
- Dellsén, F. (2018). Scientific progress, understanding, and knowledge: Reply to Park. *Journal for General Philosophy of Science*, 49(3), 451-459.
- Dewey, J. (1929). *The quest for certainty*. Minton, Balch.
- Dilworth, C. (2007). *Scientific progress: a study concerning the nature of the relation between successive scientific theories*. Springer Science & Business Media.
- Fernie, J. D. (1996). The extraordinary and short-lived career of Jeremiah Horrocks. *American Scientist*, 84(2), 114.
- Foucault, L. (1969). Determination expérimentale de la vitesse de la lumière: parallaxe du Soleil. En W. F. Magie (Ed.), *A Source Book in Physics* (pp. 343-344). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Gal, O. & Chen-Morris, R. (2010). Empiricism without the senses: How the instrument replaced the eye. En *The body as object and instrument of knowledge* (pp. 121-147). Springer.
- Gefen, D. (2019). The Philosopher's Corner: A Post-Positivist Answering Back. Part 1: Good for You, Karl Popper! *ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems*, 50(2), 9-17.
- Gernsheim, A., Helmut & Gernsheim. (1969). *The history of photography: From the camera obscura to the beginning of the modern era*. London: Thames y Hudson.
- González Sierra, C. A. (2015). *Midiendo el movimiento de los cuerpos celestes, conociendo la luz: Aspectos epistémicos y cognitivos de la medición científica* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México).
- Guillaumin, G. (2016). *Génesis de la medición celeste. Una historia cognitiva del crecimiento de la medición científica*. Tirant Humanidades.

- Guillaumin, G. (2017). Scientific Measurement as Cognitive Integration: The Role of Cognitive Integration in the Growth of Scientific Knowledge. En *Reasoning in Measurement* (pp. 189-202). Routledge.
- Guillaumin, G. (2018). Sergio F. Martínez y Xiang Huang, Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas. *Crítica (México, DF)*, 50(148), 115-131.
- Guillaumin, G. (2019). *La Revolución Silenciosa*. Manuscrito.
- Guillispie C., C. (Ed.). (2008). *New dictionary of scientific biography*.
- Hacking, I. (2000). How inevitable are the results of successful science? *Philosophy of Science*, 67, S58-S71.
- Halley, E. (1716). IV. Methodus singularis quâ solis parallaxis sive distantia à terra, ope veneris intra solem conspiciendæ, tuto determinari poterit: proposita coram Regia Societate ab Edm. Halleio JUD ejusdem Societatis Secretario. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 29(348), 454-464.
- Harkness, W. (1881). On the relative accuracy of different methods of determining the solar parallax. *American Journal of Science*, s3-22(131), 375-394.
- Horrocks, J. (2012). *Venus Seen on the Sun: The First Observation of a Transit of Venus by Jeremiah Horrocks* (W. Applebaum, Ed.). Brill.
- Hughes, D. W. (2001). Six stages in the history of the astronomical unit. *Journal of Astronomical History and heritage*, 4, 15-28.
- Jardine, N. (2000). *The scenes of inquiry: On the reality of questions in the sciences*. Oxford University Press.
- JJMO. (2003). The JJMO Mars Parallax Project. *mccarthyobservatory.org*, [Online; visto 17-Enero-2021].
- Kant, I. (1800/1992). *Lectures on logic* (J. M. Young, Trad.). Cambridge University Press.
- Kitcher, P. (1993). *The advancement of science: Science without legend, objectivity without illusions*. Oxford University Press.
- Kuhn, T. S. (1961). The function of measurement in modern physical science. *Isis*, 52(2), 161-193.
- Kuhn, T. S. (1962/2006). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de cultura económica.
- Lakatos, I. (1970). Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. En I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* [Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science,], 1965 (pp. 91-195). London. London: Cambridge University Press.
- Laudan, L. (1978). *Progress and its problems: Towards a theory of scientific growth*. University of California Press.

- Law, J. (1975). Is epistemology redundant? A sociological view. *Philosophy of the Social Sciences*, 5(3), 317-337.
- Lenzen, V. F. (1965). The contributions of Charles S. Peirce to metrology. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 109(1), 29-46.
- Losee, J. (2004). *Theories of scientific progress: An introduction*. Routledge.
- Mahan, A. (1962). Astronomical refraction—some history and theories. *Applied Optics*, 1(4), 497-511.
- Margolis, J. (1998). Peirce's fallibilism. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, 34(3), 535-569.
- Martínez, X., Sergio & Huang. (2015). *Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas*. México: Bonilla Artigas Editores.
- Misak, C. (2004). *Truth and the End of Inquiry: Expanded Paperback Edition*. Oxford: Clarendon Press.
- Mitton, J. (2007). *Cambridge illustrated dictionary of astronomy*. Cambridge university press.
- Musgrave, A. (1979). Problems with Progress. *Synthese*, 42(3), 443-464.
- Nersessian, N. J. (1995). Opening the black box: cognitive science and history of science. *Osiris*, 10, 194-211.
- Niiniluoto, I. (1980). Scientific progress. *Synthese*, 45(3), 427-462.
- Niiniluoto, I. (2019). Scientific Progress. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2019). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Oldenburg, H. (1975). *The Correspondence of Henry Oldenburg: June 1673-April 1674. Letters 2241-2489* (A. R. Hall & M. B. Hall, Eds.).
- Olmsted, J. W. (1942). The scientific expedition of Jean Richer to Cayenne (1672-1673). *Isis*, 34(2), 117-128.
- Pasachoff, J. M., Schneider, G. & Golub, L. (2004). The black-drop effect explained. *Proceedings of the International Astronomical Union, 2004* (IAUC196), 242-253.
- Peirce, C. (1995). *Philosophical Writings of Peirce* (J. Buchler, Ed.). Dover Publication.
- Peirce, C. S. (1958). *Collected Papers: Science and philosophy and Reviews, correspondence, and bibliography*. Belknap Press of Harvard University Press.
- Peirce, C. S. (2012). *Obra Filosófica Reunida (1867-1893)*. Fondo de Cultura Económica.
- Petley, B. W. (1985). *The fundamental physical constants and the frontier of measurement*. Hilger.
- Planck, M. (1922). *The origin and development of the quantum theory*. Clarendon Press.
- Pledge, H. T. (1939). *Science since 1500: a short history of mathematics, physics, chemistry, biology*. United Kingdom. Her Majesty's Stationery Office.

- Popper, K. (1966). Some comments on truth and the growth of knowledge. En *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics* (Vol. 44, pp. 285-292). Elsevier.
- Popper, K. (2013). *Realism and the aim of science: From the postscript to the logic of scientific discovery*. Routledge.
- Popper, K. (1935/2005). *The logic of scientific discovery*. Routledge.
- Putnam, H. (1987). *The Many Faces of Realism*. Open Court.
- Raynaud, D. (2013). Determining the Speed of Light (1676-1983): An Internalist Study in the Sociology of Science. *L'Année sociologique*, 63(2), 359-398.
- Rogers, E. M. (2011). *Physics for the inquiring mind: the methods, nature, and philosophy of physical science*. Princeton University Press.
- Rømer, O. (1666). A Demonstration concerning the Motion of Light. En W. F. Magie (Ed.), *A Source Book in Physics* (pp. 335-337). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Ross, D., Ladyman, J. & Spurrett, D. (2007). In defence of scientism. *Every thing must go: Metaphysics naturalized*, 1-65.
- royale des sciences (France), A. (1729). *Mémoires de l'Académie royale des sciences (Paris)*. <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/4000> — Formerly: Histoire de l'Académie Royale des Sciences (Paris) — Continued as: Histoire de l'Académie Royale des Sciences, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique. Recuperado desde <https://www.biodiversitylibrary.org/item/81362>
- royale des sciences (France), A. (1730). *Mémoires de l'Académie royale des sciences (Paris)*. <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/4000> — Formerly: Histoire de l'Académie Royale des Sciences (Paris) — Continued as: Histoire de l'Académie Royale des Sciences, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique. Recuperado desde <https://www.biodiversitylibrary.org/item/80969>
- Steiner, R. (2012). History and progress on accurate measurements of the Planck constant. *Reports on Progress in Physics*, 76(1), 016101.
- Tal, E. (2012). *The epistemology of measurement: A model-based account*. University of Toronto (Canada).
- Tal, E. (2013). Old and new problems in philosophy of measurement. *Philosophy Compass*, 8(12), 1159-1173.
- Tal, E. (2020). Measurement in Science. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Thomas, M. E. & Joseph, R. I. (1996). Astronomical refraction. *Johns Hopkins apl technical digest*, 17(3), 279.

- 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.
- Torretti, R. (1996). REALISMO CIENTIFICO Y CIENCIA REAL/Scientific Realism and Scientific Practice. *Theoria: An International Journal for Theory, History and Foundations of Science*, 29-43.
- Van Helden, A. (1974). The telescope in the seventeenth century. *Isis*, 65(1), 38-58.
- Van Helden, A. (1985). *Measuring the universe: Cosmic dimensions from Aristarchus to Halley*. University of Chicago Press.
- Van Helden, A. (1994). Telescopes and authority from Galileo to Cassini. *Osiris*, 9, 8-29.
- Whiting, A. B. (2012). Problems in the Science and Mathematics of ‘The Logic of Scientific Discovery’. *Quanta*, 1(1), 13-18.
- Wootton, D. (2015). *The invention of science: A new history of the scientific revolution*. Penguin UK.
- Young, C. A. (1889). *A Text-book of General Astronomy: For Colleges and Scientific Schools*. GINN & COMPANY.