



Antes de Einstein: relatividad, luz y gravitación

JEAN EISENSTAEDT



JEAN EISENSTAEDT

es investigador en el Observatorio
Astronómico de París y director emérito
del Centro Nacional de Investigación Científica
(CNRS) de Francia. Se dedica a la filosofía
e historia de la ciencia, y por su labor
de divulgación fue merecedor en 2002 del
Premio Jean Rostand, otorgado por el Atelier
des Écrivains Scientifiques.

SECCIÓN DE OBRAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ANTES DE EINSTEIN:
RELATIVIDAD, LUZ Y GRAVITACIÓN

Comité de selección de obras

Dr. Antonio Alonso
Dr. Francisco Bolívar Zapata
Dr. Javier Bracho
Dr. Juan Luis Cifuentes
Dra. Rosalinda Contreras
Dra. Julieta Fierro
Dr. Jorge Flores Valdés
Dr. Juan Ramón de la Fuente
Dr. Leopoldo García-Colín Scherer †
Dr. Adolfo Guzmán Arenas
Dr. Gonzalo Halffter
Dr. Jaime Martuscelli
Dra. Isaura Meza
Dr. José Luis Morán López
Dr. Héctor Nava Jaimes
Dr. Manuel Peimbert
Dr. José Antonio de la Peña
Dr. Ruy Pérez Tamayo
Dr. Julio Rubio Oca
Dr. José Sarukhán
Dr. Guillermo Soberón
Dr. Elías Trabulse

JEAN EISENSTAEDT

Antes de Einstein: relatividad, luz y gravitación

Traducción
Martín Manrique Mansour

Revisión de la traducción
Juan José Utrilla



FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Primera edición en francés, 2005
Primera edición en español, 2015
Primera edición electrónica, 2015

Diseño de portada: Paola Álvarez Baldit

Título original: *Avant Einstein. Relativité, lumière, gravitation*
© Éditions du Seuil, 2005

D. R. © 2015, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 México, D. F.
Empresa certificada ISO 9001:2008

Comentarios:
editorial@fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55) 5227-4672



www.fondodeculturaeconomica.com

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio. Todos los contenidos que se incluyen tales como características tipográficas y de diagramación, textos, gráficos, logotipos, iconos, imágenes, etc., son propiedad exclusiva del Fondo de Cultura Económica y están protegidos por las leyes mexicanas e internacionales del copyright o derecho de autor.

ISBN 978-607-16-3392-7 (mobi)

Hecho en México - *Made in Mexico*

SUMARIO

Agradecimientos

- I. Antes de Einstein...
- II. La relatividad: de Galileo a Newton
- III. La luz: de Galileo a Rømer
- IV. La luz en los *Principia*
- V. Bradley y la aberración
- VI. El color de la luz
- VII. Michell y las estrellas
- VIII. Michell y la luz
- IX. Blair: la cinemática clásica de la luz
- X. El experimento de Arago
- XI. La teoría de las ondulaciones de Fresnel
- XII. La velocidad de la luz
- XIII. 1850-1900
- XIV. La nueva cinemática
- XV. De Newton a Einstein
- XVI. ¿Hay que olvidar la historia?

Apéndice

Bibliografía

Índice onomástico

Índice general

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias a Jean-Marc Lévy-Leblond, quien acogió con gran interés este libro en Seuil y me sugirió numerosas mejoras. Doy también gracias calurosamente a Michel Combes, lector atento y crítico exigente de las primeras versiones del libro, de quien he aprendido mucho, en particular sobre cuestiones de óptica. Estoy agradecido con Bernard Pire, quien me sugirió modificaciones a una parte del manuscrito. Vaya también mi gratitud a François Rigaud, diseñador de algunas figuras. Asimismo, expreso mi reconocimiento a Silvio Bergia, Christian Bizouard, Suzanne Débarbat, Bernard Maitte, Jean-Claude Houard, Gilles Exposito-Farèse, Anne Kox, Dominique Pignon y Jürgen Renn, cuya ayuda y cuyas recomendaciones me resultaron esenciales.

Me gustaría también dar las gracias a mis colegas de la biblioteca del Observatorio de París y de París VI, donde pude encontrar muchos de los artículos en los que se basa el libro. No puedo mencionar todas las bibliotecas por las que hube de pasar para recabar los textos necesarios, pero no puedo olvidar la British Library, donde descubrí hace unos 12 años el manuscrito de Blair, sin comprender al principio toda su importancia.

No pasaré por alto, respecto a Éditions du Seuil, a Paul Chemla, Marion Guillemet, Marie-Hélène Le Maire, Sophie Lhuillier, Jean-Luc Simonin, por el esmero que su editorial puso en esta obra, particularmente en las figuras e ilustraciones.

Es muy difícil librarse de las ideas preconcebidas. De ello es testimonio este libro, pues en el contexto de la relatividad clásica y de la teoría de Newton vuelve a plantear la cuestión de la imposible pero necesaria constancia de la velocidad de la luz. Es muy probable que dicha dificultad haya dejado su huella: algunas imprecisiones, algunos errores, que desde luego son míos.

JEAN EISENSTAEDT
París, octubre de 2004

I. ANTES DE EINSTEIN...

ANTES de Einstein... ¿“La” relatividad antes de Einstein? Pero, ¿hay una relatividad antes de Einstein?

El concepto de relatividad no surgió de la cabeza de Einstein, cual Atenea de la de Zeus... Aún menos del muslo de Poincaré, aunque les pese a algunos, pero ésa es otra historia. Hablemos en serio. Clásicamente, el *principio* de la relatividad se debe a Galileo y después a Newton. Se aplica entonces y durante mucho tiempo, hasta Einstein, a las partículas materiales y a los objetos móviles: las velocidades “se suman”, como el viajero que camina dentro de un tren en marcha y la persona que lo ve desde el andén. Pero, ¿y si el viajero tiene una linterna en la mano?

Luz y relatividad: éste es precisamente el tema del libro. El principio de la relatividad plantea un problema para la luz. Tal fue la gran cuestión de la óptica de los cuerpos en movimiento; a lo largo del siglo XIX, algunos de los más grandes sabios interesados en ella fueron Fresnel, Maxwell, Lorentz, Poincaré, Michelson y Morley. Resulta que las velocidades ya no se suman, pues a ello se opone la “aberración”. En la facultad todos repetimos, sin entender mucho: “La velocidad de la luz es independiente de la velocidad de su fuente”. Derrumbado el principio de la relatividad, entra en escena el éter, término rebuscado que nunca se ha sabido bien a bien qué recubre: ¡un desastre!

Por extraño que parezca, nadie se ha preocupado realmente por lo que se pensaba “antes”: antes de Einstein, antes de Poincaré, antes de Maxwell. Sin embargo, algunos sabios austeros e ignorados, como John Michell, Robert Blair y algunos otros, se interesaron profundamente en la cuestión. Ingenuamente, sin duda, pero la ingenuidad con frecuencia resulta provechosa... aunque sólo sea para poner en perspectiva lo que siempre hemos temido (no) comprender.

Newtonianos recalcitrantes, dichos “filósofos de la naturaleza” trataron la luz simplemente como si estuviera compuesta por vulgares partículas materiales: los “corpúsculos luminosos”. Se trataba de gente seria, que se basó en sus clásicos: Galileo, Newton y sus *Principia*, donde ya se encuentran ideas interesantes. Hacia finales del siglo XVIII, el Siglo de las Luces (que no podría tener mejor nombre para la ocasión), en Inglaterra, Escocia, Prusia e incluso en París, una verdadera balística de la luz subyace silenciosamente en la teoría de la emisión, avatar de la teoría corpuscular de la luz de Newton. Vistos desde la perspectiva de las teorías aceptadas hoy, los resultados obtenidos no son desdeñables: ¡toda una prehistoria! Una física de las relaciones, menos complejas de lo que se dice, pues quedan aclaradas aquí, entre la luz, la relatividad, la gravitación... Puede encontrarse una gran cantidad de pruebas, experimentos y efectos bien conocidos hoy día y sin hacer decir a los textos más de lo que en ellos aparece. Se trata nada menos que de una cinemática clásica (galileo-newtoniana) de la luz, coherente con el principio de la relatividad y por tanto comparable a la cinemática de Einstein.

Es verdad que falta (y no es poca cosa) la extraña ley de composición de velocidades (que ya no se suman tan sencillamente) de Lorentz y la interpretación posterior de Minkowski, que al propio Einstein le costó aceptar. No obstante, aparecen el efecto Doppler-Fizeau, descubierto junto con todas sus consecuencias sesenta años antes de la publicación del artículo de su supuesto inventor; los cuerpos oscuros, antepasados de los agujeros negros; la desviación de los rayos luminosos sometidos a la gravedad de una estrella y, por si fuera poco, el efecto “Einstein” de corrimiento del espectro en un campo de gravitación... Y todavía hay que ver con cuidado, escoger entre una gran cantidad de artículos incomprendidos y de experimentos olvidados, incluyendo un manuscrito simple y sencillamente fantástico pero nunca publicado, el de Blair, sabio desconocido que jamás ha tenido el honor de aparecer en alguna publicación importante.

Las “relatividades” de Einstein, su cinemática y la teoría de la gravitación tienen la triste reputación de ser difíciles... ¿No refutan acaso conceptos familiares? Tanto más necesaria es su “refundición”. Este estudio de su prehistoria constituye un aspecto nuevo: ofrece otro camino, más sencillo, hacia dichas teorías delicadas. Pero tal camino, por largo que sea, es un atajo que, 100 años después de “la” relatividad de Einstein, estamos a tiempo de descubrir y de explorar.

II. LA RELATIVIDAD: DE GALILEO A NEWTON

A PROPÓSITO DE LA “RELATIVIDAD”

Antes de hablar de relatividad debemos precisar nuestros instrumentos. Pues “la” relatividad no se refiere solamente a las teorías de Einstein llamadas “relativistas”. La relatividad es uno de los conceptos físicos más importantes y concierne primeramente a la física clásica, aunque hoy día pueda parecer prisionera de su imagen moderna. Relatividad... Es una palabra que se ha empleado en exceso. Mucho y bastante mal. Es necesario limpiar nuestro diccionario y nuestra mente. Tanto en el sentido banal, cotidiano, como en el filosófico; tanto en el sentido físico como en el geométrico. Para empezar, debe decirse y repetirse que la relatividad filosófica y la relatividad física no solamente tienen significados distintos, sino que se oponen. Si, por ejemplo, abro el muy serio *Vocabulario técnico y crítico de la filosofía* de Lalande, leo allí que “relativo” se opone a “absoluto”. Después nos viene a la mente, como un estribillo, la cantinela “todo es relativo”. Sin ningún matiz. Pero realmente no es así, de ninguna manera. De hecho, parece que algunos filósofos colocan lo relativo en primer plano, antes de aceptar que lo absoluto (¡La Verdad!) sea inaccesible. Mientras que el científico puede permitirse considerar, aunque sea sólo conceptualmente, simbólicamente, ese “absoluto” de que dependerá lo “relativo”, que a veces será una representación, a veces una aproximación, para invocar la palabra clave de la física.

Para empezar, en lo que nos ocupa, la “relatividad” tiene que ver con la geometría. Un lugar es descrito por relación con otro lugar. Un objeto, con otro objeto. Y para describirlo no hemos encontrado, desde Descartes, nada mejor que establecer un punto de referencia en un sistema de coordenadas. Precisamos así el objeto, o mejor dicho su lugar, con relación a dicho punto de referencia, así como la posición de un punto en un cuarto (que es un sólido, generalmente un paralelepípedo) queda definida por su distancia del piso y de las paredes. Su posición es relativa a dicho punto de referencia particular. Sin embargo, es evidente que dicho punto de referencia no es único y que podemos situar su localización respecto a (*relativamente a*) otro punto de referencia, y encontrar una manera de pasar de un sistema de coordenadas al otro. Tal es el ABC de la geometría analítica. Así, en un plano, la longitud de un segmento es absoluta, pero la posición de sus extremos en relación con los ejes coordenados dependerá de su situación. Las coordenadas de un punto o de un segmento (es decir, la posición de sus extremos) son entonces relativas al punto de referencia elegido. El objeto en sí es absoluto, en particular su longitud; sus representaciones son relativas... Relativas al método de representación.

De la misma manera, un acontecimiento es absoluto: ha sucedido; pero su posición, tanto en el espacio (sobre la Tierra: latitud y longitud) como en el tiempo, es relativa, relativa al sistema de representación escogido y al calendario utilizado: árabe, cristiano o

hebreo... Así, en geometría proyectiva el objeto representado es lo absoluto (el objeto en sí) y su proyección sobre el escritorio (o la computadora), lo que se llama “geométral”, no es sino una representación “relativa” del objeto en cuestión: el plano, el corte y la elevación de los croquis de los arquitectos permiten representar el edificio proyectado. En física, los cálculos vectorial y tensorial son las técnicas que permiten pasar de un sistema de referencia a otro, cambiar de punto de vista. Nada más. De modo que lo absoluto es el objeto considerado, como por ejemplo una partícula, y su descripción en el sistema de representación que se quiera es relativa. Entonces el concepto de relatividad remite a la cuestión de la representación, que siempre pone en escena a un representado (el objeto, inmóvil o en movimiento), que es absoluto, y una representación, que es relativa.

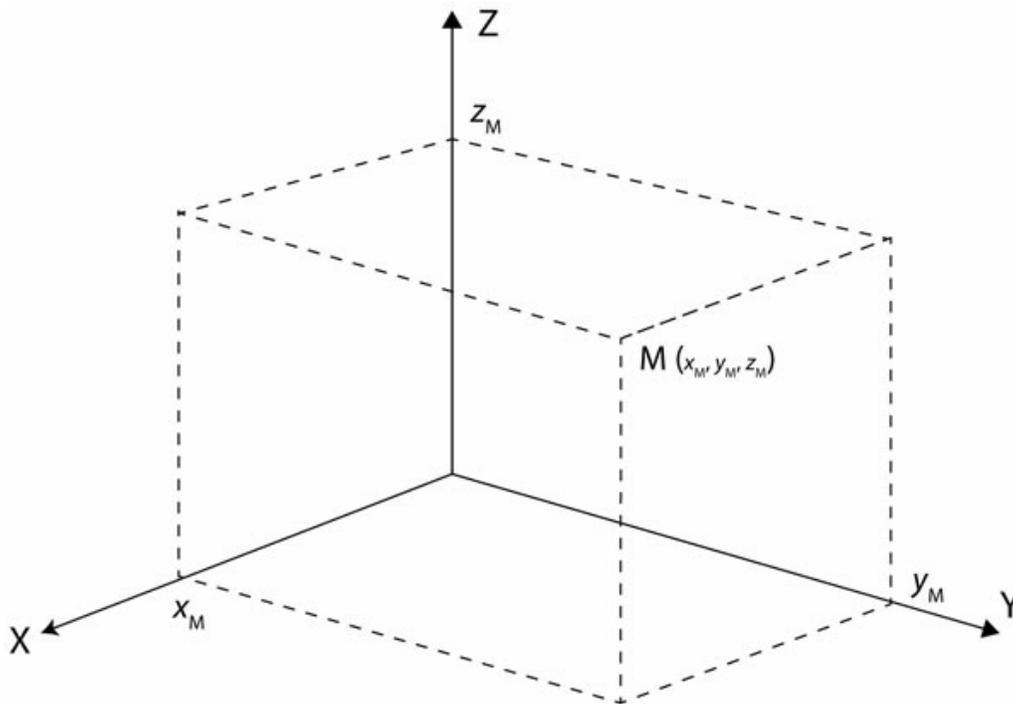


FIGURA II.1. Sistema de coordenadas.

El sistema de coordenadas X, Y, Z permite distinguir cada punto del espacio: x_M , y_M , z_M son las coordenadas de M.

De la geometría a la cinemática (la descripción del movimiento) no hay más que un paso: el tiempo. El objeto se mueve. Así como el viajero caminando en el tren en movimiento, tan caro a Einstein: camina sobre el tren que avanza respecto a la vía, la estación, la Tierra, que se mueve respecto al Sol, que se desplaza en la galaxia, que... ¿Dónde detenerse? El espacio absoluto está en el horizonte, cuando menos idealmente. La linterna en la mano del viajero comparte su movimiento, como el corpúsculo luminoso que escapa, pero ¿cuál es su movimiento respecto al viajero, al tren, al jefe de la estación, al espacio absoluto? Tal es el tema de la relatividad física, en cuanto que ésta incluye la cinemática de las partículas materiales y la de los corpúsculos luminosos. En la base de toda relatividad física, sea newtoniana o de Einstein, los marcos de referencia

inerciales desempeñan un papel particular, preferencial. En dichos marcos de referencia, una partícula material que no esté sometida a ninguna fuerza sigue un movimiento uniforme: su dirección no cambia y su velocidad es constante. Es la ley de la inercia. Entonces el concepto de fuerza es esencial, pues aunque no es la causa del movimiento, sí lo es de su variación; sin fuerza, el movimiento rectilíneo uniforme perdura y define un marco de referencia inercial. Si se conoce un marco de referencia inercial, puede definirse otro: basta que el segundo esté en movimiento uniforme (velocidad y dirección constantes) respecto al primero. Tenemos entonces tantos como queramos, una infinidad. Y, en cierta manera, el espacio absoluto es la clase de todos los marcos de referencia inerciales; en la medida en que todos son equivalentes, no importa cuál represente a todos los demás.

La física moderna se apoya en el llamado “principio de la relatividad”. Dicho principio estipula que, en un marco de referencia inercial, los fenómenos que rigen la física toman siempre la misma forma: si el movimiento de una partícula es uniforme en un sistema inercial, también lo será en otro. El principio de la relatividad tiene que ver con toda la física moderna y contemporánea, o sea, se aplica tanto a la cinemática clásica (relatividad galileo-newtoniana) como a la “relativista” (relatividad de Einstein). Es uno de los pocos principios estables en física. Su estructura no ha variado y sigue apoyándose en los marcos de referencia inerciales, que con frecuencia se llaman sistemas galileicos. Sin embargo, de manera más general, como escribe Einstein en un librito dedicado al tema: “Si K' es un sistema de coordenadas que efectúa un movimiento uniforme sin rotación respecto a K , los fenómenos de la naturaleza responden, en relación con K' , a las mismas leyes generales que en relación con K ”.¹

Las leyes de la naturaleza se enuncian de la misma manera en todos los sistemas inerciales. La ley de la inercia es la base del principio de la relatividad. Veamos entonces cómo fue introducido históricamente el principio de la relatividad, ese concepto fundamental de la mecánica.

DESCARTES, GALILEO: SISTEMAS INERCIALES Y PRINCIPIO DE LA RELATIVIDAD

El principio de la relatividad del movimiento nació con Giordano Bruno y se fue depurando con Galileo, Descartes y, finalmente, Newton, quien lo enunciará de la manera clásica. Es natural que Galileo nos conduzca a las cuestiones de la relatividad del movimiento. Comencemos con *Los principios de la filosofía* de Descartes,² que Newton leerá, trabajará y rebasará en sus *Principia*,³ su gran obra, que no casualmente lleva el mismo título que el libro de Descartes. La física de este último es ante todo una física de los choques, y el movimiento inercial es para él un concepto esencial:

¿Por qué un cuerpo empujado con la mano sigue moviéndose cuando ya no está en contacto con ella? [...] Pues no hay otra razón por la que continúe moviéndose una vez separado de la mano que lo empujó, excepto que, de acuerdo con las leyes de la naturaleza, todo cuerpo que se mueve continúa moviéndose hasta que su

movimiento sea detenido por otros cuerpos.⁴

Además, precisa: “La primera ley de la naturaleza: cualquier objeto permanece en el estado en que está hasta que algo lo modifique”, de donde deduce fríamente que “si un cuerpo ha empezado a moverse, debemos concluir que continuará moviéndose y que jamás se detendrá por sí mismo”.⁵

Lo anterior es exacto pero insuficiente, pues ¿de qué movimiento se trata? ¿Es cierto de cualquier movimiento? También puede lamentarse que no se proponga ningún experimento que apoye la hipótesis. Descartes va “directo al grano” sin discutir los problemas delicados que surgen y que reencontraremos una y otra vez. Se trata de problemas a los que Galileo había hecho frente ya unos 10 años antes. En su *Diálogo*⁶ nos propone una gran cantidad de experimentos diversos, tan sugerentes unos como otros. Nada más alejado de Descartes. Cuanto más rápido, seco y poco relacionado con el mundo físico real es Descartes, tanto más prolijo y concreto es Galileo. Se preocupa por convencer y, en su *Diálogo*, analiza la cuestión con todo detalle. Notemos que esta manera de tratar los problemas, la física cotidiana y los diálogos que ella permite será retomada por Einstein en un texto de divulgación escrito para defender su “relatividad”.⁷ En la “Segunda jornada” del *Diálogo*, Galileo remite muchas veces a experimentos cotidianos relacionados con “el principio de la relatividad del movimiento”. Desde luego, Galileo se expresa por boca de Salviati. Allí se contempla con placer, en el viaje costero de Venecia a Alepo, la calma del cargamento a pesar del furor de los elementos:

Las mercancías transportadas por un navío se mueven en tanto, partiendo de Venecia, pasan por Corfú, Candía y Chipre, hasta llegar a Alepo: Venecia, Corfú, Candía y Chipre permanecen y no se mueven con el barco; sin embargo, en lo que respecta a las pacas de mercancía, las cajas y en general toda la carga, en relación con el navío mismo, su avance de Venecia a Siria es como nulo, pues su posición respecto al navío no se modifica, su movimiento es común. Si entre los objetos transportados por la nave una paca se aleja un dedo de una caja, dicho dedo por sí solo será un movimiento más importante para la paca en relación con la caja que el viaje de 3 000 kilómetros que realizan juntas.⁸

De tal manera, según hará notar al margen: “Para cosas que se mueven de la misma manera, es como si no hubiera tal movimiento”. Puede reconocerse la idea, ya entrevista asimismo en Descartes, de que el movimiento inercial es un estado. Sin embargo, Galileo es más preciso, pues se trata de un estado particular por el cual *el movimiento es como nada*, donde puede considerarse que desde el punto de vista físico no pasa nada. Un movimiento (relativo), en efecto, pero, ¿qué movimiento? En la “Segunda jornada” del *Diálogo*, sin duda por la tarde (Simplicio debe empezar a cansarse, pues las discusiones son interminables), Galileo vuelve a la carga y propone un experimento que, como el precedente, tiene lugar “en el camarote más grande bajo la cubierta de un gran navío”. Simplicio debe tener consigo “moscas, mariposas y otros animales voladores pequeños; [...] un gran recipiente lleno de agua con pececitos; [...] un vaso de donde el agua escurre gota a gota hacia otro balde situado debajo a través de una pequeña abertura”. Simplicio ha de observar el comportamiento de todo esto y cómo “deben suceder las

cosas [...] cuando el navío está inmóvil”; después deberá hacer que “el navío vaya a la velocidad que se quiera, siempre que ésta sea uniforme y sin que se balancee en ningún sentido”; y observar que no habrá “el menor cambio en los efectos que acaban de describirse, nada que permita saber si el navío está detenido o en movimiento”.⁹

Así, el movimiento es “como nada”. Sin embargo, este movimiento está definido de manera precisa: se trata de un movimiento (implícitamente) rectilíneo y uniforme. De esta manera, el movimiento rectilíneo uniforme, del cual el reposo es un caso particular, es como nada. Dicho lo anterior, no sin razón nos resistimos a atribuir totalmente el principio de la relatividad a Galileo. Veamos el porqué, y las limitaciones de su posición, observando un experimento bien conocido. En la “Primera jornada” del *Diálogo*, Galileo coloca una canica sobre un plano cuya inclinación puede regularse a voluntad:

Puede así dársele a un plano una inclinación tan pequeña que, para alcanzar una velocidad determinada, el móvil debería recorrer una distancia muy grande en un tiempo muy largo. En un plano horizontal, jamás llegará naturalmente a velocidad alguna, pues jamás empezará a moverse, ya que el movimiento sobre una horizontal que no sube ni baja es un movimiento circular alrededor del centro: así, no se llegará naturalmente al movimiento circular sin un movimiento rectilíneo previo, pero, una vez adquirido éste, se perpetuará con una velocidad uniforme.¹⁰

Este experimento mezcla (como sucede en la realidad, y en particular sobre la Tierra) la caída de los cuerpos y la ley de la inercia. La canica avanza sobre el plano inclinado al tiempo que cae. No se trata de un experimento suficientemente depurado, por lo que no es fácil de interpretar, pues no resulta sencillo distinguir claramente entre el movimiento inercial y la caída, separar la cinemática de la dinámica y dejar de lado la gravitación. Éste es el meollo de las dificultades de Galileo, cuya física trata antes que nada de la caída de los cuerpos. Como lo afirma Alexandre Koyré, uno de los mejores especialistas en Galileo, éste nunca llegará al principio de la inercia, jamás enunciará la conservación eterna del movimiento rectilíneo.¹¹ De hecho, tiene otro problema: está bien consciente de la existencia de dos tipos de movimiento inercial perpetuo, el movimiento rectilíneo uniforme y el movimiento circular uniforme, que para él no es sólo un estado de movimiento sino *el* estado de movimiento fundamental. Se trata de una dificultad perfectamente honorable, una dificultad que, entre otras cuestiones, conducirá a Einstein a la relatividad general. La relatividad general, como su nombre lo indica, convertirá *todo* movimiento libre en un movimiento inercial, generalizando así el principio clásico de la relatividad.

NEWTON: ESPACIO, TIEMPO, LAS DEFINICIONES

Es esencialmente Newton quien, en sus *Principia*, dará una definición precisa de la relatividad del movimiento que atañe a la cinemática clásica. Los *Principia*, publicados en 1687, plantean una teoría del movimiento de los cuerpos materiales. De manera más precisa, se trata por una parte de una descripción del movimiento, independientemente de

las fuerzas que lo producen: es la cinemática; por otra parte, y es ésta la parte más importante de los *Principia*, es una teoría de las fuerzas, conocida como dinámica. La dinámica permite establecer, apoyándose en un aparato matemático (geométrico hasta principios del siglo XVIII y después algebraico), el efecto de una fuerza aplicada a un cuerpo, un sistema de cuerpos sólidos, un líquido o incluso un gas. A partir de Newton y hasta nuestros días, toda la mecánica, tanto de sólidos como de fluidos, parte de los *Principia*. Gran cantidad de trabajos han permitido desde entonces reformular y extender la dinámica newtoniana, pero ésta sigue siendo válida en su dominio. Las teorías de la relatividad, la “especial” (que es una nueva cinemática) y la general (que es una nueva teoría de la gravitación), cuestionarán los logros newtonianos: la cinemática clásica y la teoría de la gravitación universal; además, plantean una teoría del espacio-tiempo. Falta aún mencionar la deuda que las teorías del siglo XX, la mecánica cuántica y las teorías de la relatividad, tienen con la teoría de Newton.

En la base de la mecánica newtoniana hay cuatro conceptos clave: tiempo, espacio, masa y fuerza. Según la fuerza estudiada, la dinámica newtoniana se dividirá en aplicaciones diversas, en teorías distintas: la dinámica se vuelve específica de acuerdo con los fenómenos físicos de que se trate, es decir, de acuerdo con las fuerzas en las que uno esté interesado: fuerza de gravedad, refracción, capilaridad... Ninguna otra de las numerosas aplicaciones de la dinámica newtoniana ha tenido jamás tanta importancia como la teoría de la gravitación de Newton, que debido a esto será llamada “universal”. Newton asigna a la fuerza de gravedad, con el éxito que conocemos, la forma “ $1/r^2$ ”, afirmando que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los cuerpos que interactúan. Dicha visión permitió durante mucho tiempo tratar de manera casi perfecta todos los problemas relacionados con la gravitación, en particular el movimiento de los planetas que, en el caso más sencillo, considerando sólo dos cuerpos, puede expresarse según las leyes de Kepler. Las limitaciones de la teoría de la gravitación de Newton se dejarán ver hacia la segunda mitad del siglo XIX y, a partir de principios del siglo XX, dicha teoría irá poco a poco dejando su lugar a la de Einstein, la “relatividad general”, que será de interés primordial en este texto.¹²

Otra aplicación de la dinámica newtoniana tendrá que ver con la óptica y la luz. La teoría corpuscular de la luz, que será llamada también (particularmente en Francia) “teoría de la emisión”, estudiará la acción de la llamada fuerza refringente observando la acción del vidrio y otros cristales sobre la luz. En el marco newtoniano, no sorprende que se trate efectivamente de una balística de la luz, según veremos con detalle en el capítulo IV. De esta forma, la cinemática clásica, el estudio del movimiento de los corpúsculos, no es más que una parte pequeña, si bien esencial, de los *Principia*. Allí toma su forma moderna y constituirá durante más de dos siglos la base de la física clásica. Llegará a sus límites en el siglo XIX en cuanto a su aplicación a la luz (insistiremos acerca de eso en el capítulo X) y será finalmente rebasada por la cinemática relativista, base de la física contemporánea. Newton hubo de fijar de antemano el marco en el que se inscriben la cinemática y la dinámica: el espacio y el tiempo. Toda la estructura de los *Principia* (y la

estructura de la cinemática y la dinámica, sin duda alguna) tiene como fundamento las ideas de un espacio absoluto y un tiempo no menos absoluto. A partir de estos conceptos esenciales, estas “definiciones”, en palabras de Newton, echaremos una ojeada a la inmensa obra mencionada.

De acuerdo con Newton, “el tiempo absoluto, verdadero y matemático, sin relación con nada externo, transcurre uniformemente, y es llamado duración”. Esto implica un tiempo absoluto, igual para todos los cuerpos, para todos los observadores, para todos los movimientos. Se trata de un tiempo abstracto, matemático, que dominará la mecánica y toda la física durante más de dos siglos sin presentar problemas. Sin embargo, Newton hace notar que “es muy posible que no haya un movimiento perfectamente uniforme, que pudiese servir de medida exacta del tiempo, pues todos los movimientos pueden ser acelerados o retardados, pero el tiempo absoluto transcurre siempre de la misma manera”.¹³ Vemos que Newton está bien consciente de que no será fácil encontrar de manera concreta dicho tiempo absoluto en la naturaleza. Por otra parte, hoy sabemos que la rotación de la Tierra, que se utilizó durante mucho tiempo para definir el tiempo físico, está lejos de ser uniforme. Dicha precisión no tiene nada que ver con la cuestión de la definición de simultaneidad que Einstein criticará a principios del siglo XX: para Newton, como para cualquiera en su época, la simultaneidad “absoluta” es una evidencia. Dicha noción se utilizaba también, según veremos en el capítulo III, para la medida de longitudes. En relación con ese punto se expresa Newton de la siguiente manera: “El orden de las partes del espacio es tan inmutable como el de las partes del tiempo [...] Todo está en el tiempo en lo que se refiere al orden de la sucesión; todo está en el espacio en lo que se refiere al orden de la situación”.¹⁴



FIGURA II.2. *Woolsthorpe Manor House.*

La casa familiar de Newton alrededor de 1800. Imagen de Thinkstock.com/Photos.com.

La simultaneidad absoluta no causa más dificultades que el espacio absoluto. Pero, ¿qué es el espacio absoluto? No se trata de un espacio físico real. Como el tiempo absoluto, es una construcción abstracta, matemática, que permite establecer la existencia de “posiciones relativas” que servirán para determinar el movimiento de los cuerpos:

Como las partes del espacio no pueden ser vistas ni distinguidas por nuestros sentidos, las suplimos con medidas que sí podemos captar. De esta forma, determinamos los lugares de acuerdo con sus posiciones y distancias respecto a un cuerpo que consideramos inmóvil, y medimos los movimientos de otros cuerpos respecto a los lugares así determinados: nos servimos entonces de dichos lugares, de movimientos relativos a ellos y de movimientos absolutos, lo cual es apropiado para la vida civil; sin embargo, en cuestiones filosóficas es necesario hacer abstracción de los sentidos, ya que es posible que no haya ningún cuerpo verdaderamente en reposo, respecto al cual se pudieran determinar las posiciones y los movimientos.¹⁵

De tal manera, como el espacio absoluto no es accesible directamente, podemos

utilizar dichos “lugares relativos”, de los cuales el espacio absoluto es en cierta forma el representante simbólico. Espacio absoluto y lugares relativos no son más que uno; lo relativo remite a lo absoluto. Más adelante, pero aún en las “Definiciones” de los *Principia*, Newton trata la cuestión de la relatividad del movimiento, ya que el espacio absoluto permite distinguir entre movimiento verdadero y movimiento relativo:

El movimiento completo y absoluto de un cuerpo está compuesto por el movimiento de dicho cuerpo respecto al lugar en donde se le considere, del movimiento de dicho lugar respecto al lugar en que él mismo está situado, y así sucesivamente hasta llegar a un lugar inmóvil, como en el ejemplo del timonel del que se habló antes.¹⁶

Esa nave y su timonel son una imagen que remite indudablemente a los experimentos de Galileo en el Mediterráneo. Hoy día escogeríamos una nave espacial... Antes de regresar al principio de relatividad debemos enfocar, siempre acompañados de Newton, la ley, o principio, de la inercia. Se trata de un concepto esencial sobre el que se asienta el principio de la relatividad. Tanto en la cinemática newtoniana como en la cinemática de Einstein (relatividad especial) se supone (y puede verificarse experimentalmente con cierta precisión) la existencia de “marcos de referencia inerciales”, gracias a los cuales puede definirse el principio de la relatividad. Como lo pudimos experimentar en el navío de Galileo, si un cuerpo está libre, no sujeto a fuerzas externas (de empuje, gravitación, etc.), su movimiento es libre y tiene una velocidad constante tanto en magnitud como en dirección. Newton considera este punto esencial en numerosas ocasiones, la primera vez al definir la fuerza: “La fuerza que se aplica a un cuerpo es la acción mediante la cual el estado del cuerpo es modificado, sea dicho estado el reposo o el movimiento uniforme en línea recta”.¹⁷ Entonces la fuerza marca la diferencia entre cinemática y dinámica, lo que Galileo no pudo hacer. Puede entonces enunciarse la “primera ley del movimiento”, la afirmación fundamental de la mecánica clásica: “Todo cuerpo continúa en el estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta en que se encuentre, a menos que una fuerza actúe sobre él y lo haga cambiar de estado”.¹⁸

Así puede precisar Newton esa categoría tan particular de lugares relativos: los marcos de referencia inerciales, respecto a los cuales un cuerpo libre y en reposo en un momento dado permanecerá libre y en reposo.¹⁹ Puede entonces considerarse el movimiento de un cuerpo libre de toda fuerza en relación con un marco de referencia inercial; respecto a dicho marco de referencia el cuerpo estará en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme. Se da por hecho la existencia de una infinidad de marcos de referencia inerciales respecto a los cuales se cumple lo anterior; concretamente, todos los marcos de referencia donde el movimiento sea constante en magnitud y en dirección en relación con un primer marco de referencia inercial. Por lo tanto, todos ellos son equivalentes, y en conjunto definen el espacio absoluto; la ley fundamental de la mecánica es válida en espacios absolutos y es la misma en todos los marcos de referencia inerciales. En cierta forma, no se trata del pretendido marco de referencia inmóvil fundamental; dicha suposición ya no es indispensable, sino que basta con tomar juntos

todos los marcos de referencia inerciales. Curiosamente, en los *Principia* no se define la velocidad ni, *a fortiori*, la composición de velocidades. La cinemática de las partículas materiales resulta tan implícita para Newton, tan evidente, que toda la obra supone que se dominan perfectamente dichos conceptos. Tales definiciones aparecen en los *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*,²⁰ de Galileo, pero expresadas de una manera geométrica pesada y confusa. La gran cantidad de páginas que les hubo de dedicar son muestra de que dichas nociones estaban lejos de ser evidentes.²¹

En la *Enciclopedia*, la ley de la inercia y la composición de movimientos son definidos rápidamente por la pluma de D'Alembert:²²

En primer lugar, vemos con toda claridad que un cuerpo no puede proporcionarse movimiento a sí mismo. Entonces no puede salir del reposo sino por la acción de una causa externa. Pero, ¿continúa moviéndose por sí solo o necesita la acción repetida de la causa para moverse? [...] la ley más sencilla que un móvil pudiera observar en su movimiento es la ley de la uniformidad, y por consecuencia es la que debe aceptarse. Así, el movimiento es uniforme por naturaleza, aunque reconozco que las pruebas que se han dado hasta la fecha tal vez no sean las más convincentes. [...] En este caso, el principio de la fuerza de inercia afirma que el móvil tenderá a describir una línea recta y a describirla uniformemente, pero no nos permite conocer ni su velocidad ni su dirección. Nos vemos, entonces, obligados a considerar otro principio, conocido como *composición de los movimientos*, que permite determinar el movimiento único de un cuerpo que se mueve siguiendo al mismo tiempo diferentes direcciones con sus respectivas velocidades.²³

De hecho, la cinemática clásica comprende a la vez el principio de la relatividad y el principio de composición de las velocidades de acuerdo con la “regla del paralelogramo”. La velocidad de un cuerpo medida respecto a un marco de referencia dado será diferente en relación con un segundo marco de referencia, también inercial; su velocidad en este segundo marco será la que tiene en el primero compuesta con la velocidad del primer marco respecto al segundo.

RECUADRO II.1. *Un tren...*

Un breve viaje en tren nos permitirá mostrar que el teorema de composición de velocidades se demuestra a partir de conceptos newtonianos, sin ninguna hipótesis adicional. Un viajero se sube en la parte de atrás de un tren que mide 400 metros de largo y desciende por la parte delantera en la siguiente estación, a seis kilómetros de distancia. El tren recorre esos seis kilómetros en seis minutos, a una velocidad de 60 km/h. El viajero recorre los 400 metros del tren a una velocidad de 4 km/h. Así, en seis minutos el viajero recorre seis kilómetros y 400 metros, mientras que el conductor del tren sólo recorre seis kilómetros. Entonces, la velocidad del viajero es de 64 km/h, su velocidad respecto al tren sumada a la velocidad del tren respecto a la Tierra, mientras que la velocidad del conductor sólo es de 60 km/h. En pocas palabras, todo se reduce a una suma: $64 = 60 + 4$. Es claro que velocidades en la misma dirección pueden sumarse. De esta manera, en un marco galileo-newtoniano la composición de velocidades (en este caso, una suma) es simplemente consecuencia del principio de la relatividad. Todo el cuerpo de la cinemática clásica descansa en este sencillo razonamiento. Si, como lo demostraron los experimentos de Michelson, ese teorema de adición de

velocidades no es válido siempre, en particular para la luz, significa que alguna de nuestras hipótesis es falsa: ¿Será la definición de velocidad? ¿O la de espacio absoluto? ¿O la de tiempo absoluto? Pero, ¿dónde está el error? Necesariamente en los conceptos y las definiciones físicas, ¡pues lo demás no es más que matemática!

EL PRINCIPIO DE LA RELATIVIDAD

El principio de la relatividad, tanto en la teoría newtoniana como en la de Einstein, es simplemente la certeza de que existen marcos de referencia inerciales, llamados también galileicos, respecto a los cuales es aplicable la ley fundamental de la dinámica. Constituye la base de la mecánica newtoniana. Sin embargo, poco a poco se hará patente que la cinemática clásica, donde el principio de la relatividad no se distingue claramente de la regla para sumar velocidades, no se aplica a los cuerpos luminosos, a la óptica ni a la electrodinámica. A lo largo del siglo XIX se irá tomando conciencia de que la mecánica newtoniana sólo funciona para partículas materiales. La óptica, y de manera más general la electrodinámica, están regidas por la teoría ondulatoria que se libra, según se cree, del principio de la relatividad. Durante el siglo XIX la física se encuentra dividida. La relatividad especial regresará el principio de la relatividad al corazón de la física, haciendo simplemente evolucionar la regla para componer velocidades. Grandeza, decadencia y retorno del principio de la relatividad...

Einstein afirmará que *todas* las leyes de la naturaleza son siempre idénticas en los marcos de referencia inerciales: las leyes de la mecánica, por supuesto, pero también las de la óptica y el electromagnetismo. Como dirá en una conferencia, el principio de la relatividad consiste simplemente en que “las leyes de la naturaleza concuerdan para todos los marcos de referencia inerciales”. Así, el principio de la relatividad será la base de la cinemática de Einstein, válida tanto para las partículas materiales como para los cuerpos luminosos. De ahí el nombre “relatividad especial”. El término está muy mal escogido por dos razones: por un lado, ya existe una “relatividad clásica”; por otro, el carácter relativo se refiere sólo a que la gran cantidad de descripciones posibles de un fenómeno dado, que dependen del sistema de coordenadas, no deben esconder el carácter intrínseco del fenómeno, que impone la coherencia entre dichas descripciones. En los primeros artículos sobre el tema, Einstein habla del “principio de la relatividad” y utiliza también la expresión “la pretendida teoría de la relatividad”. Hasta 1911, preferirá evitar la expresión, cuando menos en el título de los artículos. Max Planck utilizará el término “teoría relativa”, pero será el físico alemán Alfred Bucherer el primero en hablar de *Relativitätstheorie*, “teoría de la relatividad”. El matemático Felix Klein sugerirá con justa razón el término *Invariantentheorie*, “teoría de los invariantes”, que Einstein también utilizará en su correspondencia. En 1921, este último le escribe a un corresponsal inquieto por la desviación semántica: “En cuanto al término ‘teoría de la relatividad’, entiendo que es poco afortunado y que ha sido causa de malentendidos filosóficos [...], pero creo que produciría confusión cambiar después de tanto tiempo el

nombre aceptado generalmente”.²⁴ En 1915 Einstein publica su teoría de la gravitación, que implica una generalización del principio de la relatividad a sistemas acelerados (es decir, no inerciales). Para distinguir entre ambas teorías, llama a la primera *Spezielle Relativitätstheorie* (teoría especial de la relatividad) y a la segunda *Allgemeine Relativitätstheorie* (teoría general de la relatividad), de donde se derivan los nombres comúnmente utilizados en español: “relatividad especial” y “relatividad general”. El término “relatividad general” no está mejor escogido que el de “relatividad especial”. Se habla con frecuencia de “teoría relativista de la gravitación”, y aquí haría falta precisar que hay más de una teoría relativista de la gravitación, pero que la de Einstein es la más aceptada y la que ostenta el título.

Un paréntesis a propósito de la “cuarta dimensión”. Una idea equivocada de la que debe uno liberarse es la famosa “cuarta” dimensión definida por la teoría de la relatividad, tema que muchos autores han utilizado para abusar de la ingenuidad de los lectores. No se trata de nada extraordinario, ni siquiera novedoso. La posición de todo fenómeno en el espacio está descrita perfectamente con tres coordenadas en un sistema cartesiano. En cada oficina, el lugar de cada objeto está perfectamente bien definido con tres coordenadas. Sobre la Tierra bastan dos coordenadas, pues se trata de una superficie (casi esférica); la localización de un pueblo queda determinada por su longitud y su latitud. Sin embargo, si la posición puede definirse así, otro tanto debe suceder con el momento en que sucede un fenómeno: Fulano nació en el lugar tal y en el momento tal. Ésas son las cuatro “dimensiones” independientes, tres espaciales y una temporal: las cuatro coordenadas de cualquier fenómeno en el universo. Aun así, la consideración del tiempo como una cuarta dimensión no fue tomada en serio sino hasta principios del siglo XX, como lo hace notar d’Alembert en la *Enciclopedia*:

He dicho antes que no era posible concebir más de tres dimensiones. Un hombre de ingenio que yo conozco cree que podría considerarse la duración como una cuarta dimensión, y que el producto del tiempo por el volumen sería en cierta manera un producto de cuatro dimensiones. Esta idea puede ser rebatida, pero me parece que tiene algún mérito, cuando menos el de la novedad.²⁵

III. LA LUZ: DE GALILEO A RØMER

EN EL Renacimiento, después de la época de los grandes descubrimientos, empieza la de los viajes largos, con lo que se vuelve indispensable establecer cartas marinas precisas y, sobre todo, determinar la longitud. Para medir la diferencia entre las longitudes de dos lugares basta determinar la diferencia de tiempo en que una estrella dada pasa sobre el meridiano de cada uno de esos lugares. Gemma Frisius fue uno de los primeros en proponer que se midieran las longitudes utilizando la diferencia entre los tiempos locales. El problema era determinar que ambas mediciones se realizaran en el *mismo* instante,¹ pues los relojes de la época no eran lo bastante precisos. Será sólo en 1656 cuando Huygens invente el reloj de péndulo, con una imprecisión de sólo un segundo diario. Sin embargo, no funcionaba bien en los viajes marítimos, y habría que esperar hasta la segunda mitad del siglo XVIII para que se inventara el cronómetro de Harrison.

A falta de reloj, Galileo tuvo la idea de aprovechar los satélites de Júpiter. El 7 de enero de 1610 había observado con su telescopio tres pequeñas “estrellas” muy próximas a Júpiter, una al occidente del planeta y las otras dos al oriente, formando una línea recta. A la noche siguiente, las tres estaban al occidente de Júpiter. El día 10, Galileo continúa con sus observaciones y se le ocurre que dichas “estrellas” están en órbita alrededor de Júpiter. Detengámonos un instante en ese momento, excepcionalmente emotivo (como pocos en la historia de la ciencia), en que Galileo *ve* con sus propios ojos la *comprobación* de la hipótesis de Copérnico. Los satélites giran alrededor de Júpiter como la Tierra gira alrededor del Sol... ¿hay argumento más convincente? En marzo de 1610, Galileo publica *El mensajero de las estrellas*,² su primer testimonio impreso en favor de Copérnico, donde compara los “satélites” de Júpiter (expresión que se debe a Kepler) con Venus y Mercurio en órbita alrededor del Sol. Poco después, Galileo determina los periodos de los satélites de Júpiter con una precisión excelente, y publica los elementos de dichos cálculos en 1612. Los recurrentes eclipses de los satélites de Júpiter podrían permitir hacer mediciones simultáneas de tiempos locales en lugares alejados entre sí, como el cálculo de los ángulos horarios de una estrella dada.³ Así, dicha técnica hacía posible determinar de manera precisa la diferencia de longitud entre dos lugares.⁴ En septiembre de 1612 Galileo hace una proposición en ese sentido al rey de España, pero las negociaciones no llegan a buen fin; acude entonces a Holanda, cuyo gobierno ofrecía un precio de 25 000 florines a quien indicara un método aplicable a la navegación. Durante mucho tiempo ésta será la base de la cartografía.

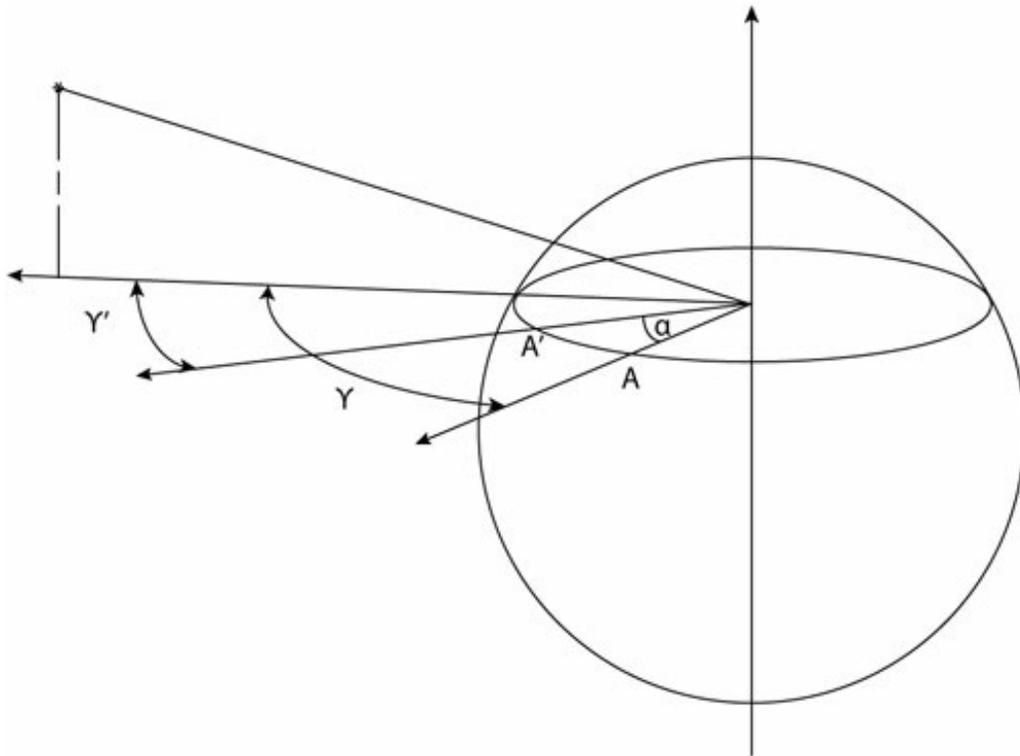


FIGURA III.1. Medición de la longitud. La diferencia de longitud α entre dos lugares, A y A' , es igual a la diferencia entre los ángulos horarios, γ y γ' , de la misma estrella en un momento dado.

GALILEO Y EL MOVIMIENTO SUCESIVO

Surgen muchos elementos que constituirán la física moderna, como la finitud de la velocidad de la luz, el principio de la inercia y el principio de la relatividad. Dichos conceptos aún no son claros en Galileo; se trata de preguntas abiertas. En particular aquella, esencial para la relatividad, de la velocidad de la luz. ¿Se transmite instantáneamente o su movimiento es “sucesivo”? Esta pregunta fue objeto de muchos debates desde la Antigüedad. Herón de Alejandría creyó que la luz era una emisión del ojo y que su propagación era instantánea; Avicena y Francis Bacon no concordaron con él. Kepler, autor de dos tratados de óptica, pensaba que la luz se transmitía instantáneamente de un punto a otro. La opinión de Galileo, que llevará a cabo el primer experimento relacionado con el tema, es más sutil. En la “Primera jornada” de *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias* expondrá sus ideas sobre la cuestión.⁵ Son bien conocidos los enfrentamientos donde Galileo-Salviati responde a las preguntas de Simplicio, el aristotélico ingenuo. Salviati abre el fuego diciendo que no comprende “de manera alguna cómo la acción de la luz, a pesar de su gran pureza, podría estar exenta de movimiento, por rápido que éste fuera”.⁶ Sagredo, que representa el sentido común, pide que se precise la cuestión: “Pero, ¿qué naturaleza y qué orden de magnitud debemos otorgar a la velocidad de la luz? ¿Es instantánea o, como los otros tipos de movimiento, requiere

cierto tiempo? ¿Es posible averiguar esto mediante la experimentación?”⁷ Mientras que Simplicio vuelve a la carga con un buen argumento, evidentemente un poco ingenuo, según lo pide su papel: “La experiencia cotidiana nos muestra que la propagación de la luz es instantánea. Si observamos una pieza de artillería disparar desde lejos, el brillo de la llama llega a nuestros ojos sin ningún retraso, mientras que el sonido no golpea el oído sino después de un intervalo de tiempo muy notorio”.⁸

Sagredo limita el peso de tal observación, haciendo notar que “ese fenómeno tan conocido [...] no me permite saber si el movimiento de la luz es instantáneo o si, aunque muy rápido, requiere cierto tiempo”.⁹ Entonces Salviati propone otro experimento “para establecer con toda certeza si la iluminación, es decir, la propagación de la luz, es verdaderamente instantánea, pues el movimiento del sonido, que ya es muy rápido, nos afirma que la velocidad de la luz no puede ser sino enorme”. Se trata del experimento de las dos linternas: “Dos personas toman una vela cada una y la ponen en un candelero [...] de manera que puedan interponer la mano a voluntad entre la llama y la vista de la otra persona”.¹⁰

El experimento se realiza de una manera totalmente teatral. Las dos personas llevan a cabo “ensayos por turnos” de manera que “al gesto de una descubriendo su luz corresponda inmediatamente, sin tardanza sensible, un gesto idéntico de la otra, y al momento en que la primera descubre su llama ve aparecer la luz de la segunda persona”. Después “se separarán tres o cuatro kilómetros con dos candelabros similares y, realizando de noche el mismo experimento, observarán con atención si las cosas suceden de igual manera que cuando estaban cerca”.¹¹ De acuerdo con Salviati, “a una distancia de cuatro kilómetros, que realmente son ocho, si consideramos el trayecto de la luz de cada fuente, el retraso debería poder observarse perfectamente”.¹² El experimento se llevó a cabo con distancias pequeñas en la Accademia del Cimento [Academia de los Experimentos], en Florencia, sin que fuese posible percibir retraso alguno de transmisión. No resultó concluyente para Salviati, quien no “pudo decidir si la aparición de la luz en el lado opuesto es instantánea; sin embargo, de no serlo, es cuando menos extremadamente rápida, casi inmediata”. Recurrió entonces al movimiento del rayo, del cual “distinguimos el principio [...] en un lugar determinado entre las nubes, antes de que se propague inmediatamente por los alrededores”, de donde deduce “que su movimiento ocupa cierto tiempo, pues si la iluminación fuera instantánea y no progresiva, dudo que se pudiera distinguir entre el origen [...] y los puntos extremos de su expansión”.¹³ Galileo-Salviati parece entonces apoyar una propagación sucesiva de la luz. También es importante notar que su ambición con este experimento es sólo cualitativa, limitada a decidir si la transmisión es instantánea o no, sin afán de evaluar la velocidad de la luz.

DESCARTES Y HUYGENS

En 1667, en su *Dióptrica*, Descartes tuvo buen cuidado, debido a la condenación de

Galileo, de hacer explícita su concepción sobre la naturaleza de la luz: “No es necesario que me encargue de decir cuál es su naturaleza real [...] bastará utilizar dos o tres comparaciones que ayuden a concebirla de la manera que considero más cómoda...”¹⁴ En todo momento, la aparente propagación rectilínea de la luz ha sido un argumento muy fuerte en favor de los partidarios de un punto de vista corpuscular. Sin embargo, el comportamiento de la luz presenta problemas difíciles que han dejado pasmados a muchos sabios. A mediados del siglo XVII, la teoría de Grimaldi, parecida a la de Hooke, se apoyó precisamente en esta cuestión. Perforó una pantalla, lo que le permitió iluminar un cabello con un rayo de luz; la dirección de propagación cambió y aparecieron franjas coloreadas; acuñó entonces un término para dicho fenómeno: difracción.¹⁵

Huygens adoptó un punto de vista cercano al de Descartes, quien fue su maestro y le tuvo “un afecto muy ardiente”.¹⁶ La muestra de que la luz no se propaga en forma rectilínea justifica el rechazo de una teoría corpuscular, pues ésta implicaría que los “granos de materia” jamás chocaran entre sí. Para Huygens, el movimiento de la luz no implica transporte de materia: se debe a ondas. Un medio, el éter, está formado por esferas muy duras que transmiten las ondas luminosas al chocar unas con otras. Defiende una concepción ondulatoria de la luz, una teoría de las vibraciones. Consigue, gracias a un análisis notable, explicar la cuestión de la propagación rectilínea, como también la ley de la refracción de Descartes y de los fenómenos de birrefringencia de la calcita, la doble refracción.¹⁷ Tanto la velocidad de la luz como la propagación rectilínea son tratadas en la *Dióptrica* de Descartes; sin embargo, como lo hace notar Huygens en su *Tratado sobre la luz* publicado en 1690, “siempre me ha parecido que aun M. Des Cartes, cuyo propósito ha sido siempre tratar todos los temas de la física de una manera inteligible, y quien con certeza lo ha logrado mejor que nadie antes que él, nada ha dicho que no esté lleno de dificultades, o incluso que no sea inconcebible, en lo que se refiere a la luz y sus propiedades”.¹⁸

Así, Huygens se aparta del punto de vista de su maestro, y con toda razón. El discurso de Descartes sobre la luz es ambiguo, si no hasta contradictorio. Principalmente en lo que se refiere a la velocidad de la luz: por un lado, pretende que “la luz puede extender sus rayos en un instante desde el Sol hasta nosotros”;¹⁹ “en un instante”, en el *mismo* instante, significa en un tiempo nulo, con una velocidad infinita. Sin embargo, en el mismo texto, para establecer su ley de la refracción (la famosa ley de los senos), hace variar la velocidad de la luz. ¿Cómo hacer variar algo que es infinito? Esta cuestión no parece preocuparle en lo más mínimo. Para justificar la propagación inmediata de la luz, Descartes recurre a la imagen del bastón de un ciego: “Pues es sabido que la acción de apoyar un extremo del bastón se transmite instantáneamente al otro extremo, y que debe ser de la misma manera, aunque la distancia sea mucho mayor, de la tierra al cielo”.²⁰ La supuesta rigidez absoluta del bastón permite que la información (en forma de una resistencia) se transmita inmediatamente de un extremo al otro: ¿no sabe acaso el ciego instantáneamente que hay una piedra en su camino? Para la ciencia clásica, se trata de un punto de vista perfectamente aceptable.²¹ Prudentemente, Descartes prefiere no asociar

un transporte de materia a dicha velocidad infinita: “No es necesario suponer que algún tipo de materia vaya de los objetos a nuestros ojos para que podamos ver los colores y la luz”.²² Esta concepción no es tan diferente de la de Huygens, para quien hay movimiento de materia sin transporte de materia, pero este último puede recurrir a la analogía con el sonido, por lo que defenderá un punto de vista ondulatorio, como escribirá en *El mundo, o el tratado de la luz*:

Por lo tanto, si la luz necesita tiempo para ir de un lugar a otro, se sigue que ese movimiento es sucesivo y que, por consecuencia, se extiende por las superficies en ondas esféricas, como el sonido: las llamo ondas por su parecido con las que se forman en el agua si tiramos una piedra.²³

Para asentar la ley de los senos, Descartes se apoya en la analogía de la “bola”, imagen totalmente corpuscular que le permite explicar con facilidad el movimiento rectilíneo de la luz, lo que no será tan fácil en el marco ondulatorio defendido por Huygens:

Por otra parte, dichos rayos deben imaginarse siempre exactamente rectos, mientras pasen por un cuerpo transparente, que es en todas partes igual a sí mismo [...]. Pues resulta bien creíble que la acción o inclinación a moverse, a la que como dije debe estar sometida la luz, haya de seguir en esto las mismas leyes que el movimiento.²⁴

Descartes utiliza aquí un principio de simetría: no hay razón para que los rayos dejen de ser “rectos” porque el cuerpo es “en todas partes igual a sí mismo”, lo que hoy día llamaríamos “homogéneo”; si el medio es igual en todos lados, el movimiento continuará sin modificarse. De hecho, se trata de un razonamiento por reducción al absurdo: si los rayos no fueran rectos, ¿en qué dirección se inclinarían, siendo el vidrio homogéneo? Por lo tanto, son rectos. Tal es claramente el razonamiento del geómetra Descartes. Además, se trata de un razonamiento (relacionado con el principio de la inercia, del que hablaremos en el capítulo siguiente) que también se aplica a los cuerpos materiales, y también es la razón de que la luz deba seguir “las mismas leyes que el movimiento”. En pocas palabras, para Descartes el movimiento de la luz depende exactamente de las mismas leyes que el de los cuerpos materiales; es como el movimiento de una pelota sometida a las leyes del choque, de un “glóbulo”, de un “corpúsculo luminoso”. Más precisamente, se trata de hacer “depender la refracción de la luz de los mismos principios de los que depende la refracción de los cuerpos sólidos que atraviesan un fluido”,²⁵ fenómenos que “no concuerdan de manera ninguna”, protestará Clairaut.²⁶

Así, será más fácil para Descartes explicar la reflexión que la refracción. En efecto, la analogía con el rebote de una pelota lanzada contra un piso duro permite concebir que la velocidad de la pelota se conserva y que, en el plano de incidencia, el ángulo de refracción es simétrico respecto a la recta normal al plano de reflexión. Sin embargo, en lo que se refiere a la refracción, el discurso es más complejo, si no es que oscuro. Para llegar a la ley de la refracción, Descartes tendrá que utilizar la velocidad como parámetro de la refracción y suponer que la velocidad del glóbulo luminoso aumenta al pasar del

aire al vidrio de manera constante. Obtendrá así la ley conocida en Francia como “de Descartes”, pero que también se atribuye al físico neerlandés Willebrord Snel (Snellius, en latín). Si bien la cuestión está resuelta por Descartes, no ha dado una *razón* de que la velocidad de la luz aumente al pasar al vidrio. En suma, no hay un argumento en la física, en la dinámica, que respalde su hipótesis. Newton pondrá las cosas en orden al incluir la óptica corpuscular en su dinámica de los *Principia* y dar una razón de que haya refracción: una fuerza que será llamada “refringente”, es decir, que produce refracción.

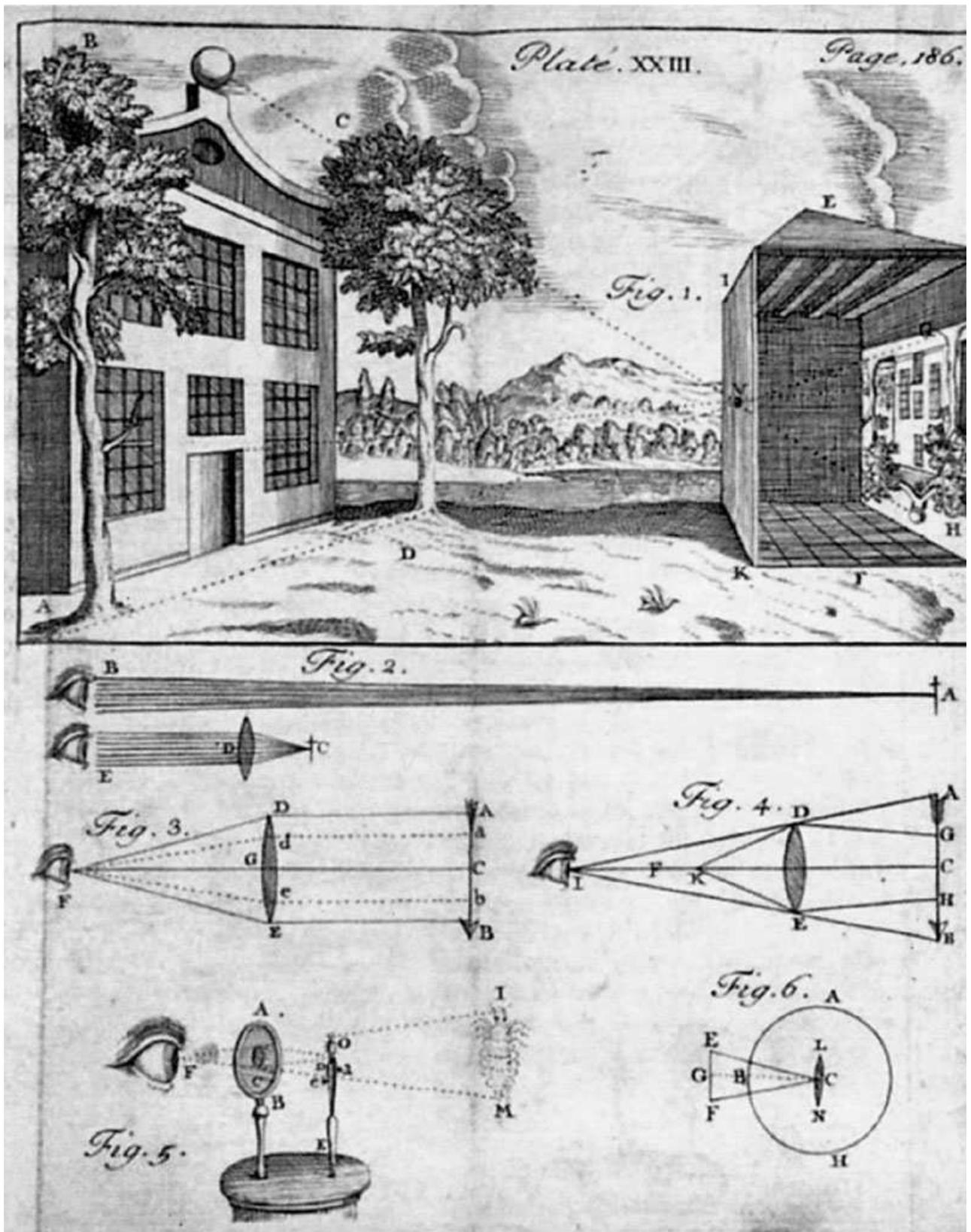


FIGURA III.2. El "sistema de la óptica" en el siglo XVIII. Imagen: Colección particular; Benjamin Martin, 1740.

Durante mucho tiempo los físicos se preguntaron cómo y por qué la velocidad de la luz era mayor en un medio más denso que en uno menos denso... la cuestión perdurará, pues la teoría corpuscular de la luz de Newton, que en cierta manera retoma la lógica de Descartes, llegará a la misma conclusión, según veremos después. Por el contrario, la óptica ondulatoria, defendida principalmente por Huygens, implicará que la velocidad de la luz es menor en el agua que en el aire. Surge entonces el deseo de comparar con precisión la velocidad de la luz en el aire y en el agua, punto crucial que permitirá decidir entre las dos grandes teorías de la luz, y que no se resolverá sino hasta 1850 gracias al experimento de Foucault. Se comprende entonces que Huygens se distancie de Descartes, cuya manera de tratar la luz no es muy convincente: no sólo porque su velocidad es mayor en un medio más denso, sino también porque no propone un mecanismo, una razón, para explicar la refracción.

En cuanto a la velocidad de la luz “en el aire”, hay un experimento primordial conocido desde la infancia que muestra que es, cuando menos, mucho mayor que la del sonido: la tormenta; el fenómeno permite además calcular con buena precisión la velocidad de propagación del sonido, ignorando el tiempo de propagación de la luz, un millón de veces menor. Para evaluar la velocidad de la luz, Descartes propone un experimento más preciso que el de los candeleros de Galileo. Durante un eclipse de Luna se alinean el Sol, la Tierra y la Luna. Si la luz tomara tiempo en ir de la Tierra a la Luna (y de regreso), el observador terrestre debería poder comprobar que el Sol, la Tierra y la Luna no están ya alineados en el momento preciso de la observación del eclipse, posterior al momento en que el eclipse tiene lugar, pues la configuración evoluciona en ese lapso. La idea no es mala, pero el ángulo es en realidad demasiado pequeño para que por entonces se pudiera sacar algo en limpio, sobre todo por la imprecisión que acompaña a ese tipo de mediciones (sombra, penumbra, bordes de la Tierra y de la Luna...). Lo anterior no impide que Descartes critique agriamente a Galileo en una carta a Mersenne: “Su experimento para saber si la luz se transmite en un instante es inútil, pues los eclipses de Luna [...] lo prueban de una manera incomparablemente mejor que cualquier experimento realizado sobre la Tierra”.²⁷

Mersenne, por su parte, afirma con toda claridad que “la luz se extiende en toda la esfera de su actividad en un instante o, si requiere cierto tiempo, es tan poco que no podemos notarlo”.²⁸ Tal es, en efecto, la opinión que tienen los mejores autores de entonces, y en particular Huygens, quien después de meditar sobre los argumentos de Descartes habla de “la extraña velocidad, 100 000 veces mayor que la del sonido”, que podemos suponer para la luz, “pues no se trata del transporte de un cuerpo con esa velocidad, sino de un movimiento sucesivo que pasa de unos a otros”.²⁹

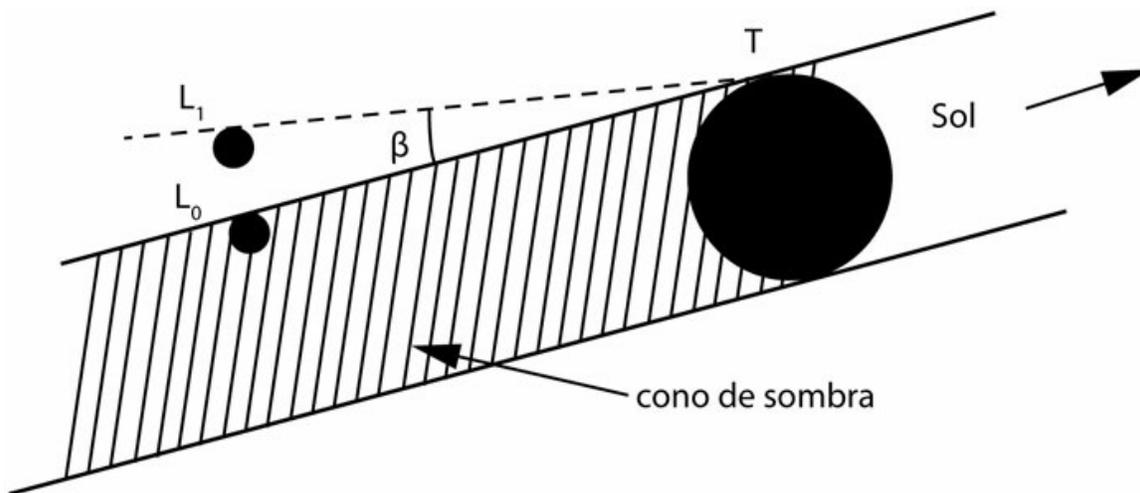


FIGURA III.3. Medición de la velocidad de la luz según Descartes. Cuando el observador terrestre T ve salir la Luna del cono de sombra, su borde ya no está alineado con los de la Tierra y el Sol. Cree ver la Luna en L_0 cuando ya está en L_1 $\beta = L_0L_1/L_0T = v/c$, donde v es la velocidad de la Luna y c la de la luz.

LA VELOCIDAD DE LA LUZ: DE CASSINI A RØMER

En poco tiempo, la determinación de longitudes con el método de los satélites de Júpiter se volvió común e indispensable para establecer cartas náuticas, cuyo uso se difundió rápidamente. En 1652 Cassini, por entonces profesor de matemáticas en la Universidad de Bolonia, comenzó una larga serie de observaciones de los satélites de Júpiter. Apoyándose en los trabajos de Galileo y de Gassendi, utilizando una copia del telescopio de Torricelli, calculó las tablas del movimiento medio de dichos satélites. Debido a su excelente precisión, las tablas llegaron a Inglaterra y Francia el mismo año de su publicación y dieron gran fama a su autor, quien fue invitado por Colbert a Francia para que formara parte de la recién formada Academia de Ciencias, cuando el Observatorio de París estaba en plena construcción. Fue así como Cassini se unió al grupo de los astrónomos parisienses, del que destacan Jean Picard, Adrien Auzout y Christiaan Huygens. Algunos años después se instalaría también en París un joven astrónomo danés, Ole Christensen Rømer, que había estudiado en Copenhague las observaciones dejadas por Tycho Brahe.

Pronto pudo verse que había divergencias importantes, incluso de varios minutos, entre las predicciones de las tablas de Cassini y las observaciones, lo que parecía incomprensible debido a la precisión de las mediciones. Ya Cassini había notado que los satélites tercero y cuarto estaban sujetos a “imprecisiones”, y había tratado de explicarlas utilizando la hipótesis del movimiento sucesivo de la luz, que implica una velocidad finita de la luz. ¿Cómo puede la hipótesis de una velocidad finita de la luz explicar tales imprecisiones? Como Júpiter y la Tierra están en órbita alrededor del Sol, su distancia relativa varía de manera cíclica en función de su posición relativa respecto al Sol, a veces en oposición y a veces en conjunción; entonces el tiempo que tarda la luz en llegar de

Júpiter a la Tierra es variable. Por lo tanto, cualquier acontecimiento que tenga lugar en Júpiter será visto en la Tierra cierto tiempo después, cuando la luz haya recorrido el trayecto para transmitir la noticia.

Por la tercera ley de Kepler sabemos que el movimiento de un satélite en órbita alrededor de Júpiter es periódico, si ignoramos las imprecisiones debidas a la presencia de los otros satélites. Tomemos como ejemplo el primer satélite, Ío, que desaparece tras Júpiter y vuelve a aparecer. Los momentos de desaparición en el cono de sombra y de reaparición son periódicos, cuando menos vistos desde Júpiter. Sin embargo, visto desde la Tierra el fenómeno no es regular: está desfasado en función del tiempo que necesita el recorrido de la luz, que a su vez depende de la posición relativa de la Tierra y de Júpiter. Según si Júpiter está más cerca o más lejos de la Tierra (y su distancia relativa puede variar hasta el doble de la distancia Tierra-Sol), veremos el movimiento del satélite acelerado o en cámara lenta. Y esto afecta las predicciones de las tablas del movimiento de los satélites de Júpiter. No obstante, Cassini rechazó pronto la idea. Le pareció que el movimiento sucesivo de la luz no le permitiría explicar con sencillez las imprecisiones observadas en los otros tres satélites de Júpiter conocidos por entonces, y además “no puede asegurarse que dicha imprecisión en el tiempo no se produzca por la excentricidad del satélite, por la irregularidad de su movimiento o por cualquier otra causa hasta ahora desconocida y que se aclarará con el tiempo”,³⁰ escribiría después.

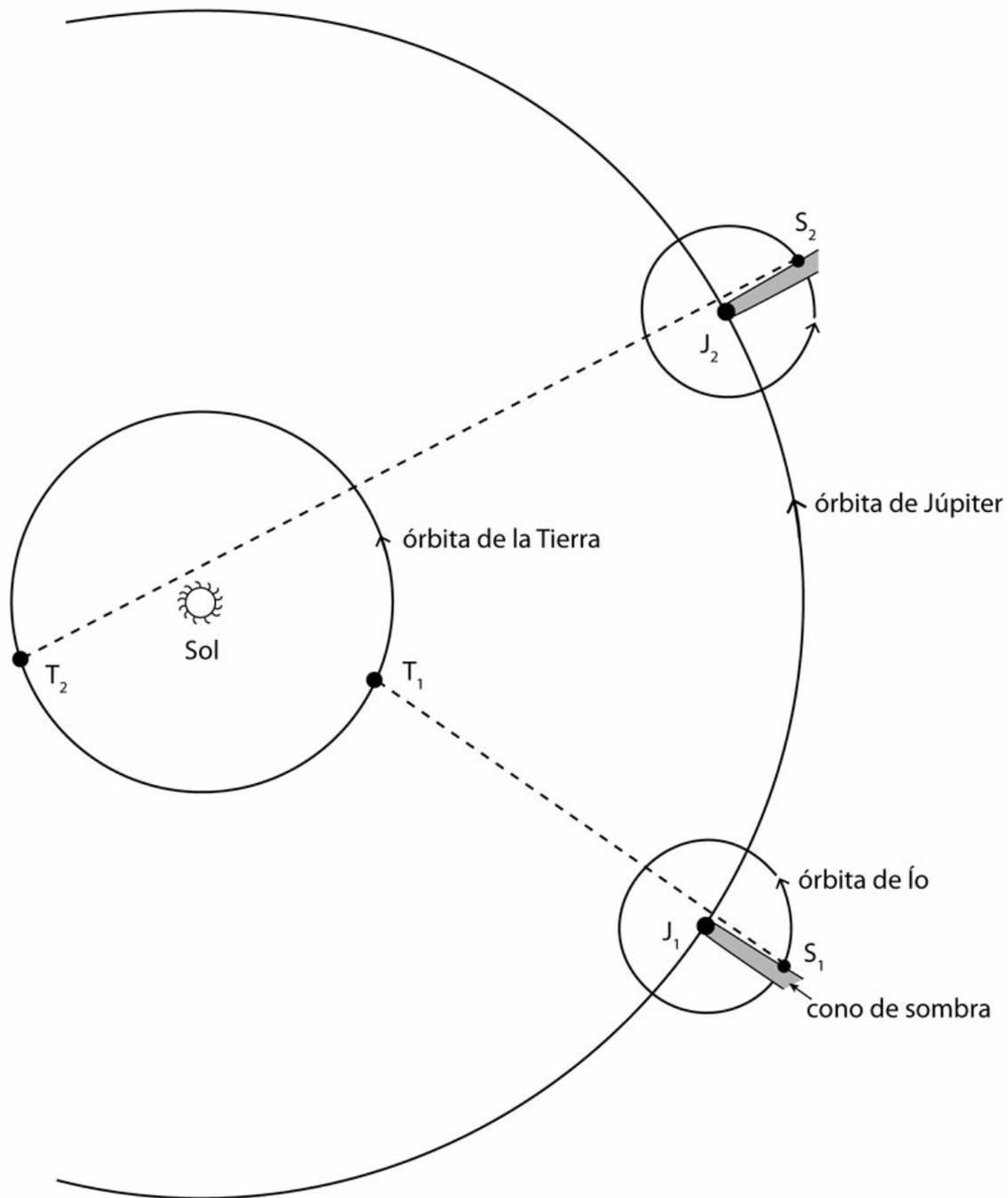


FIGURA III.4. *Medida de la velocidad de la luz según Rømer. La Tierra está más lejos del satélite de Júpiter en el segundo eclipse (S_2-T_2) que en el primero (S_1-T_1). El tiempo que tarda la luz en recorrer el trayecto será mayor; lo que afectará las predicciones de la tabla de eclipses.*

En septiembre de 1676 Rømer, quien se había apropiado de la idea de Cassini, predijo ante la Academia que “si su suposición [de que la velocidad de la luz es finita] era correcta, una emersión³¹ del primer satélite de Júpiter [...] tendría lugar diez minutos después de lo predicho mediante el cálculo ordinario”.³² El 9 de noviembre de 1676 la

emersión en cuestión fue observada por Picard a las cinco horas con 37 minutos y 49 segundos, con un poco más de 10 minutos de retraso.³³ No se aceptó el descubrimiento de Rømer sin cierta dificultad, pues se trataba de una cuestión muy antigua que no dejaba indiferentes a los filósofos. A finales del siglo XVII, en particular después de que Cassini publicara, rechazando la interpretación de Rømer, sus tablas corregidas,³⁴ la cuestión de la longitud quedó resuelta en lo que se refiere a lugares sobre la Tierra, en el sentido de que una sola observación de un eclipse del primer satélite de Júpiter, combinada con la observación del paso de una estrella por el meridiano, bastaba para encontrar la longitud de un lugar determinado con una precisión de 15' de arco, o sea, unos 20 kilómetros en promedio. Además, una serie de observaciones correlacionadas, realizadas al mismo tiempo y remitidas a un observatorio central, daban resultados mucho mejores. A partir de 1668, Francia había puesto en marcha un programa de determinación de longitudes alrededor del mundo (en Cayena, Egipto y las Antillas, por ejemplo), pero principalmente a lo largo de la costa francesa.

IV. LA LUZ EN LOS *PRINCIPIA*

LA ÓPTICA DE NEWTON ANTES DE LOS *PRINCIPIA*

Los años 1665 y 1666, que podríamos llamar “maravillosos”, si no para Newton, cuando menos para las ideas que hará triunfar, comenzaron de hecho muy mal a causa de la peste que se abatía sobre Inglaterra desde el verano de 1665 y que obligó a Newton y a sus condiscípulos a dejar el Trinity College durante dos años; dos años que pasaría Newton en Woolsthorpe, bajo la protección del palio materno, mientras la peste hacía estragos en el exterior.¹ Tenía entonces 24 años. Es un periodo en que el genio no lo abandona ni un instante, como escribiría 50 años después:

A principios de 1665 encontré el método de aproximación por series y la regla para reducir cualquier orden de cualquier binomio en tales series. En mayo encontré el método de las tangentes de Gregor y Slusius, y en noviembre tenía el método directo de fluxiones; en enero del año siguiente tenía la teoría de los colores, y en mayo, el método inverso de las fluxiones. Ese mismo año empecé a pensar en una extensión de la gravedad a la órbita de la Luna y [...] a partir de las leyes de Kepler sobre el periodo de revolución de los planetas que se encuentran en proporción sesquiáltera de sus distancias al centro de sus órbitas, deduje que las fuerzas que mantienen a los planetas en sus órbitas deben ser como el inverso de los cuadrados de sus distancias al punto alrededor del cual giran. También comparé la fuerza requerida para mantener la Luna en su órbita con la fuerza de gravedad que hay en la superficie terrestre, y descubrí que se corresponden casi perfectamente. Todo esto sucedió durante las dos pestes de 1665-1666, pues en dicha época estaba en la flor de la edad de la invención, y pensaba más en matemáticas y filosofía que en ningún otro momento de mi vida.²

Newton aportó los fundamentos de los temas en que más destacaba ya: matemáticas, mecánica, óptica. Es entonces cuando sucede el mítico episodio de la manzana, cuya caída (¡en el jardín de su madre!) lo convence de que la Luna cae también hacia la Tierra, pero sin alcanzarla jamás:

En el año de 1666 dejó Cambridge [...] para irse con su madre a Lincolnshire, y un día cuando meditaba en el jardín se le ocurrió que el poder de la gravedad (que llevaba una manzana del árbol al suelo) no se limitaba a una cierta distancia de la Tierra sino que debía extenderse mucho más allá de lo que se creía ordinariamente. ¿Por qué no hasta la Luna? —se preguntó—, y en caso afirmativo eso debería influir en su movimiento y tal vez retenerla en su órbita...³

En Cambridge, Newton se interesa por el movimiento de los planetas, el método de fluxiones y la óptica. Sobre este último tema lee a Descartes y a Boyle, para quien el prisma constituía el instrumento más útil en el estudio de los colores. Entonces consigue un prisma de vidrio para realizar experimentos, que lo conducirán a dudar de Descartes y de Hooke:

En agosto de 1665, Sir I[saac], que no contaba todavía 24 años, compró en la feria de Sturbridge un prisma para realizar experimentos a partir del libro de Descartes sobre los colores y, al regresar a su casa, realizó un agujero en los postigos de las ventanas y los cerró, y colocó su prisma entre el orificio y el muro.⁴

No es exacto que esa compra haya tenido lugar en la feria de Sturbridge, suspendida en 1665 a causa de la peste, pero es muy probable que haya comprado un segundo prisma en Cambridge en 1666 para continuar con sus experimentos: coloca su primer prisma en una pequeña abertura en el postigo de una ventana, sin duda en el Trinity College, donde está de regreso, y observa el espectro coloreado de la luz solar.⁵ Su segundo prisma se encuentra en el trayecto de un rayo monocromático (de un solo color) que brota del primer prisma. Dicho rayo es desviado por el segundo prisma, pero no se dispersa nuevamente.

De esta forma, gracias a una serie de bellos experimentos que a partir de entonces se volverán clásicos, Newton se convence de que, contrariamente a las creencias de la época y en particular a las de Hooke, cuya recién publicada *Micrographia*⁶ lee, la luz blanca, lejos de ser pura, es una mezcla de luces de colores diferentes.

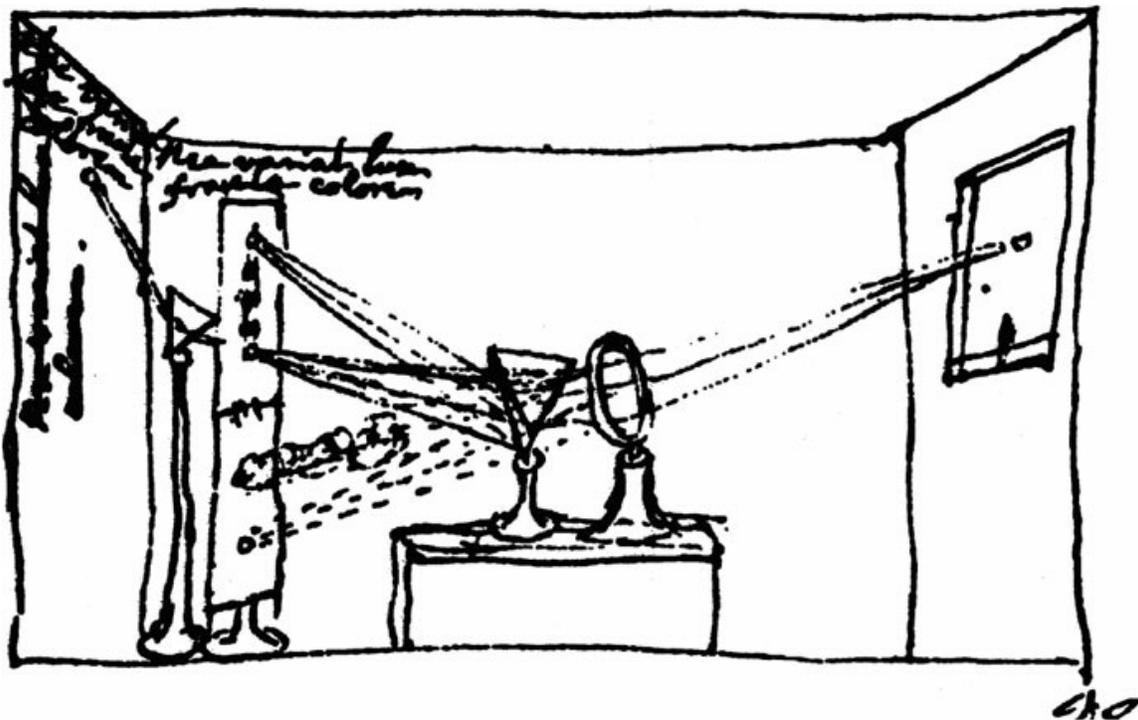


FIGURA IV.1. Experimento de los colores. Dibujo de Newton. El primer prisma (al centro) descompone la luz; el segundo (a la izquierda) no descompone el rayo monocromático, seleccionado por el diafragma, que recibe.

Imagen de Archives Seuil.

A finales de la década de los sesenta, Newton es nombrado Lucasian Professor en Cambridge, una cátedra con pocas obligaciones, que le deja tiempo para trabajar en su obra. Muy pocos estudiantes siguen los cursos que consagra a la óptica. Utilizando sus

prismas, lleva a cabo muchos experimentos cuyos resultados apoyan sus ideas, aunque éstas no tengan todavía la solidez que él quisiera. Pues debemos decir que, por muy brillante que podamos considerar la obra de Newton sobre óptica, no llegó ni llegaría jamás (según sus propios criterios) a una solución verdaderamente satisfactoria. Como ejemplo, citemos la cuestión de la aberración cromática, una dificultad grave con que se enfrentaban los astrónomos y los ópticos que construían telescopios *de refracción*. Consiste en que la distancia focal de las lentes sencillas utilizadas entonces depende del color de la radiación. Cada punto se convierte en un círculo de difusión multicolor irisado, y la imagen obtenida carece de nitidez. A esto se le llama aberración cromática, que se trató de corregir. Newton se convence de que no es posible construir un antejo acromático. Su autoridad es tal que convencerá a varias generaciones de físicos. Para resolver el problema sugerirá el uso de un telescopio *de reflexión*, que no necesita lentes, así que no sufre los efectos de la aberración cromática. Sin embargo, a mediados del siglo XVIII un gran estudioso de la óptica de nombre Dollond estará entre los primeros en proponer un telescopio acromático, cuyo objetivo está constituido por dos lentes hechas de vidrios con índices diferentes: uno convergente, en *crown*, y el otro divergente, en *flint*.⁷ De esta manera, muestra que es posible corregir la aberración cromática mucho antes de que los teóricos puedan justificarlo...

Newton rechaza la concepción de Hooke según la cual la luz consiste en un fluido material cuyas vibraciones estimulan la sensación de color.⁸ Pues, ¿cómo explicar los fenómenos de la sombra y de la propagación rectilínea de la luz en el marco de una teoría basada en las vibraciones? El experimento del prisma le permite afirmar que a colores diferentes les corresponden ángulos de refracción diferentes. Muestra que los colores forman parte de la luz solar (no son un efecto de las superficies atravesadas, como creía Descartes) y que el prisma produce una dispersión de colores en forma del espectro solar. La luz blanca del Sol está, entonces, compuesta por colores elementales a los que corresponden, en un medio dado, índices de refracción propios. De esta manera, cada color es individualizado, distinto, lo que permite a Newton concebir la luz como una colección de corpúsculos pequeños, cada uno de color diferente. Se convence entonces del carácter corpuscular de la luz y, como muchos de sus contemporáneos, la concibe como un flujo de corpúsculos, de “granos” de luz cuya masa es muy sutil.

Pero, ¿en qué consisten los colores? ¿Cómo, por qué medio, distinguir los colores uno de otro? ¿Cómo explicar que la refracción sufrida por un rayo rojo sea menor que la que sufre un rayo verde? ¿Cuál es, en suma, el parámetro físico del color y, por lo tanto, de las distintas refringencias de los colores, de la dispersión cromática? Newton había intentado ya, durante los años 1664-1665, construir un modelo mecánico de la refracción, donde el color de los corpúsculos luminosos estuviera relacionado con las leyes de la colisión. En su cuaderno de notas escribió por entonces “que los rayos que avanzan más lentamente son más refractados que los que se mueven con más rapidez”.⁹ Sin duda estaba influido por la idea de que la escala de los colores era también una escala de fuerza: el rojo, brillante, se suponía mucho más rápido que el azul, apagado. En suma, Newton plantea los fundamentos de una óptica dinámica y no puede escapar de las

soluciones que se presentan de manera natural en ese marco, soluciones necesariamente ligadas a las dos magnitudes que caracterizan la dinámica de los corpúsculos: la masa y la velocidad. Así, intentará desarrollar alternativamente dos teorías corpusculares diferentes: en una el color estará relacionado con la masa, y en la otra con la velocidad. Sin duda con la esperanza de que fuerzas de atracción (no necesariamente la fuerza de gravitación) pudieran explicar los fenómenos luminosos, Newton tratará de someter la óptica a las leyes y a los conceptos de la dinámica.

En 1675, un año antes de la publicación del artículo de Rømer, cree Newton “posible que una hora o dos, si no es que más, requiera la luz para llegar del Sol a nuestros ojos”.¹⁰ La idea del “retraso de la luz”, según la cual la velocidad de la luz tiene un límite, estaba ya en el aire, aunque todavía lejos de ser aceptada. Por eso no sorprende que en los *Principia*, publicados en 1687, Newton reconozca el trabajo de Rømer, aunque no lo cite, sin duda para no intervenir en la polémica entre éste y Cassini: “Pues es un hecho, según el descubrimiento de fenómenos en los satélites de Júpiter, confirmado por observaciones de muchos astrónomos, que la propagación de la luz es sucesiva y que llega del Sol a la Tierra en siete u ocho minutos”.¹¹

LOS *PRINCIPIA*

Han pasado 10 años desde los experimentos de Woolsthorpe. Durante ese tiempo, Newton se aleja de la filosofía natural y se consagra a la alquimia. Hooke, que publicara algunos años antes su *Tentativa de demostrar el movimiento de la Tierra a través de observaciones*,¹² le escribe en 1679 para preguntarle su opinión acerca de un texto con ideas interesantes sobre el movimiento de los planetas: ¿no acusará a Newton de plagio después de la publicación de los *Principia*?¹³ Aunque Newton no está impaciente por recomenzar la correspondencia con su rival, el tema lo toca tan de cerca... El intercambio postal con Hooke le da un motivo para sumergirse nuevamente en sus investigaciones. Relee la *Geometría* de Descartes, fundador de la geometría analítica, cuya importancia cuestiona Newton. Los *Principia* serán escritos contra Descartes y en términos geométricos. Y luego, ¿ese cometa avistado en noviembre de 1680 que después desaparece detrás del Sol, mientras que al poco tiempo puede verse otro cometa alejándose del Sol! Flamsteed, el astrónomo de la corte, cree que ambos cometas no son sino el mismo. Pero, ¿cómo ha podido invertir su dirección al pasar cerca del Sol? Por entonces se creía que los cometas, irregulares y efímeros, seguían trayectorias rectilíneas. Flamsteed se pone en contacto con Newton, quien también se interesa por ese objeto extraño y lo sigue con atención por el cielo de Cambridge, hasta su desaparición en marzo de 1681. Reticente a las ideas de Flamsteed en la primavera de 1681, Newton aplicará a los cometas su dinámica de los planetas a partir de 1682, cuando el cometa conocido ahora como Halley atraviesa el cielo.

La cuestión de la demostración de los movimientos celestes de acuerdo con principios filosóficos era el pan de cada día. Hooke pretendía tener una al suponer que la fuerza de

atracción era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. En agosto de 1684 Halley fue a Cambridge y le preguntó a Newton su opinión al respecto: ¿qué curva describirían los planetas suponiendo que la fuerza de atracción hacia el Sol fuera recíproca al cuadrado de su distancia a él?¹⁴ Una elipse, respondió Newton, que conocía la respuesta; sin embargo, al no encontrar la demostración en su biblioteca, redactó rápidamente un pequeño tratado revolucionario, de nueve páginas, el *De motu*, en el que aparecen, además de la demostración pedida por Halley, las de las otras dos leyes de Kepler. El problema se ha apoderado de Newton y no lo dejará. Del verano de 1684 al otoño de 1686, toda su existencia se aboca a los *Principia*, que publica en 1687.

Los *Principia* son con certeza el advenimiento de la teoría de la gravitación universal, de la primera gran teoría física, pero son también, y antes que nada, la obra donde Newton plantea los fundamentos de la dinámica, sin la cual no habría teoría de la gravitación. Además, no se limita a esbozar las consecuencias de sus principios en lo que concierne a la gravedad, sino que demuestra docenas de teoremas y proposiciones que pueden aplicarse a fuerzas distintas, de atracción o de repulsión. Más allá de la gravitación, Newton vislumbra el conjunto de las fuerzas de la naturaleza. Como muestra, tenemos el borrador que escribe para el prefacio de los *Principia* en la primavera de 1687, donde afirma, en un pequeño párrafo sibilino, tener la esperanza de que su dinámica pueda aplicarse a (casi) todas las fuerzas de la naturaleza:

Pues sospecho que todas esas cosas dependen de ciertas fuerzas mediante las cuales las partículas de los cuerpos, respondiendo a causas aún desconocidas, se ven ya sea atraídas unas a otras y se agregan, ya sea repelidas unas de otras y se dispersan [...] Conforman cuerpos que, dependiendo de las fuerzas y de la manera que tienen las partículas de ensamblarse y agregarse, son duros, blandos, fluidos, elásticos, maleables, densos, diáfanos, volátiles, inmutables; [capaces] de emitir, refractar, reflejar o detener la luz.¹⁵

Y, después de desarrollar rápidamente esos argumentos, expresa la certidumbre de que hay una unidad entre los fenómenos gravitatorios, ópticos y magnéticos: “Es evidente [...] que las partículas de todos los cuerpos son atraídas hacia la Tierra por la fuerza de gravedad, precisamente como los cuerpos más ligeros son atraídos hacia el vidrio y el ámbar por la fuerza eléctrica”.¹⁶

Acontece que Newton es, antes que nada, un filósofo mecanicista; para él, el último agente de la naturaleza es una fuerza que actúa entre las partículas materiales. Sin embargo, aun creyendo en dicha unidad de la física y manteniendo en sí esa esperanza, no deja de ser un físico bien consciente de los límites de su arte, y no vacilará, cuando aparezcan dificultades, en poner en duda su programa de trabajo y sus certidumbres. Tal vez sea ésta la razón de que la expresión de sus ideas sea más cautelosa en la edición final del prefacio de los *Principia*:

Sería deseable que los otros fenómenos que nos presenta la naturaleza pudieran derivarse también de principios mecánicos: pues muchas razones me llevan a sospechar que dependen todos de ciertas fuerzas cuyas causas son desconocidas, por las cuales las partículas de los cuerpos son atraídas unas hacia otras y se unen formando figuras regulares, o bien se repelen y se alejan entre sí, y que es la ignorancia que hasta

ahora se tiene de dichas fuerzas lo que ha impedido a los filósofos encontrar la explicación de la naturaleza.¹⁷

Tal es la esperanza que esboza Newton y que apenas aparece en la redacción de su gran obra. Una esperanza que podemos comprender: el enorme éxito de su teoría de la gravitación le permite creer que tal vez (todos) los fenómenos físicos puedan “derivarse” de su dinámica. Se trata, entonces, del primer bosquejo de una teoría unificada de los fenómenos físicos; éste es un punto esencial en el programa que Newton, y más aún sus seguidores (Clairaut, Laplace y los miembros de la Société d’Arcueil),¹⁸ intentarán poner en acción a lo largo del siglo XVIII. Se tratará principalmente de la óptica, pues se cree que es la parte de la física más fácilmente matematizable, ya que está geometrizada, en parte, desde Descartes... pues la óptica de la época es todavía la óptica geométrica, cuya sola existencia permite concebir la posibilidad de una teoría escondida tras la cortina de rayos luminosos.

Detengámonos un instante en la óptica geométrica, un arte que está de dos maneras muy cercano a la geometría. La primera, evidente, es de utilidad: la geometría euclidiana sirve a la óptica. Pero, ¿la geometría misma no se sirve de la óptica? ¿No se refiere la definición de una línea recta, desde antes de Euclides, al trayecto de un rayo luminoso? No es fortuito que Euclides haya escrito un tratado sobre “la óptica catóptrica”. De hecho, los lazos entre óptica y geometría son estructurales; la posibilidad misma de la geometría está relacionada con la visión y por tanto con la óptica. Es algo común. El “bicho ciego [que] se arrastra por la superficie de una esfera”, que Einstein tomará como ejemplo para explicarle el punto a su hijo, no construirá la misma geometría que una mosca. La línea recta es un rayo de luz, un concepto tomado de la óptica; es a fin de cuentas la regla que utilizamos en geometría y cuya rectitud verifica el constructor cerrando un ojo para asegurarse de que todos sus puntos están sobre el mismo rayo luminoso. La geometría se deriva entonces, en gran parte, históricamente de la óptica: de ella procede y, a pesar de los esfuerzos de los matemáticos por formalizarla, no puede abstraerse de ella por completo. A principios del siglo XX, la relatividad general mostrará claramente la relación entre geometría y óptica.¹⁹ En suma, podemos decir que la óptica, geométrica desde antes de Descartes, permite pensar que es, si no de orden matemático, cuando menos fácilmente matematizable. Debe haber una razón subyacente en los lazos óptica-geometría. De tal manera, la óptica corpuscular parecía poderse integrar fácilmente al programa de Newton.

DE NEWTON A CLAIRAUT, LA ÓPTICA DE LOS *PRINCIPIA*

Pero, ¿qué hay de la luz en los *Principia*?²⁰ En esencia, se encuentra ausente; la luz no es tratada como tal, sino de manera extremadamente discreta. En la sección XIV del libro I de los *Principia*, aparece lo que podríamos llamar un ensayo sobre óptica corpuscular que, desarrollado tardíamente, será llamado con frecuencia *óptica corpuscular newtoniana*, aunque en la Francia del siglo XVIII se prefiera el término *teoría de la*

emisión. No sorprende entonces que esa parte de los *Principia* sea extremadamente breve: ocho páginas de las 600 con que cuenta la edición moderna. La idea central es que un corpúsculo luminoso se comporta como un corpúsculo material. Pero, ¡ay!, la óptica no se plegará a la dinámica newtoniana con tanta sencillez como la mecánica de los cuerpos materiales. Con todo, las cosas no cambiarán verdaderamente hasta principios del siglo XIX, con Thomas Young y Augustin Fresnel. Mientras tanto, esa muy clásica visión permitirá explicar los hechos tan bien, si no es que mejor, que la teoría ondulatoria defendida por Leonhard Euler y Christiaan Huygens.

Sin embargo, Newton trabajará mucho en la óptica, a la que regresará constantemente, en particular después de los *Principia*, y a la que hará progresar mucho. Pero sus trabajos de óptica no tendrán ni la amplitud ni la universalidad de su mecánica. Su óptica está infinitamente menos lograda que su mecánica; nos muestra a un Newton extraordinariamente móvil, flexible, pronto a seguir cualquier idea y a abandonarla después si le parece estar en contradicción con algún fenómeno. Además, no puede hablarse de *una* óptica newtoniana, pues construirá muchas teorías o modelos teóricos, intentando explicar los fenómenos ópticos: teoría corpuscular, teoría de las vibraciones, teoría de los accesos. Aquí sólo nos interesará su óptica corpuscular, en la que, debe decirse, no trabajó mucho. Empero, de la segunda mitad del siglo XVIII al principio del siglo XIX, y de cierta manera a pesar de Newton, la teoría corpuscular de la luz dominará el mundo académico. Para esos filósofos de la naturaleza, esos físicos, esos astrónomos, esos ópticos, la luz está formada por corpúsculos (de masa no nula), por *granos de luz*, cuya velocidad, finita, no es necesariamente constante.

Newton no se interesó demasiado en esa aplicación de su dinámica de los *Principia*; ni siquiera tomó posición en cuanto a la naturaleza de los rayos, “si son materiales o no”.²¹ La perspectiva de su teoría corpuscular de la luz no es más que la de una teoría de la refracción; regula la acción que tienen sobre la luz prismas, lentes y otros instrumentos ópticos. No obstante, Newton la utilizará secretamente para los cálculos de su tabla de refracción astronómica; retomará los resultados esenciales en su *Opticks*,²² obra que consagra explícitamente a la luz y que aparecerá en 1704. En la sección XVI del libro I de los *Principia*, Newton demuestra un teorema relativo al “movimiento de los corpúsculos atraídos por un cuerpo cualquiera”.²³ Hace falta buena voluntad para reconocer en ese teorema tan general y tan geométrico una teoría de la refracción. El corpúsculo parece material, el cuerpo es cualquiera y la fuerza aplicada no está bien definida. Pero nada impide que el corpúsculo sea luminoso y que el cuerpo sea una laminilla de vidrio... Al acercarse a la laminilla, el corpúsculo luminoso es sometido a una fuerza de atracción constante que lo desvía, lo refracta. La ley de los senos, la ley de Snell-Descartes, es el resultado más notorio. Entonces Newton proporciona un fundamento físico a dicha ley, donde Descartes no había visto más que geometría: “Pueden aplicarse estas investigaciones sobre la atracción a la reflexión de la luz y a su refracción, que se lleva a cabo, como lo descubrió Snellius, en razón de sus secantes, y por consecuencia en razón de sus senos, según lo hizo ver Descartes”.²⁴

Dicha teoría corpuscular de la luz casi no será retomada en los 50 años siguientes, pero después se la tratará de una manera mucho más detallada y mucho más clara, en particular por Alexis-Claude Clairaut, y será utilizada por muchos astrónomos ingleses, como John Michell, Robert Blair y John Robison. A principios del siglo XIX será defendida por la escuela francesa, en particular por Pierre Simon Laplace, Jean-Baptiste Biot y François Arago, por no citar más que a los principales actores de la historia.

Muy distinta es la física de la luz que defienden primero Huygens y después Euler, una visión ondulatoria que finalmente prevalecerá, renovada, después de 1820, teorizada por los trabajos de Fresnel en paralelo con los experimentos de Young. Euler, en sus *Cartas a una princesa de Alemania*,²⁵ explica la manera en que se propaga la luz por el éter, haciendo una analogía con el sonido:

En lo que se refiere a la propagación de la luz por el éter, lo hace de una manera parecida a la propagación del sonido en el aire: así como un estremecimiento producido en las partículas de aire constituye el sonido, también un estremecimiento producido en las partículas de éter constituye la luz o los rayos de luz, de manera que *la luz no es más que una agitación o estremecimiento que se produce en las partículas de éter*, y que se encuentra por todos lados debido a la extremada sutileza con que penetra todos los cuerpos.²⁶

Partidario absoluto de la teoría ondulatoria, Euler está “indignado” por la teoría corpuscular, y señala sobre todo la pérdida de masa solar que implica:

El sentimiento que comparte la gran mayoría de los filósofos de hoy, particularmente en Inglaterra, es llamado *sistema de emanación*, pues supone que los rayos emanan realmente del Sol y de otros cuerpos luminosos, así como el agua emana de una fuente [...] Podemos imaginar que las partículas que conforman los rayos luminosos son tan sutiles como queramos. No ganaremos nada: el sistema es igualmente indignante.²⁷

UNA ÓPTICA BALÍSTICA

En 1741 Clairaut publica un artículo importante sobre las “explicaciones cartesiana y newtoniana de la refracción”.²⁸ Al exponer la óptica corpuscular de Newton de una manera detallada, Clairaut es el primero en tomarla verdaderamente en serio, y contribuye a hacer explícitos los resultados; es el primero después de Newton, cuya exposición en los *Principia* es muy compacta²⁹ y que se reservó las razones de no haber seguido ahondando en el tema. Al principio de su artículo, Clairaut hace notar, con justa razón, que Newton se “extendió tan poco en ese tema” que “cree deber comenzar por una explicación que se parece mucho a la suya”.³⁰ Para Clairaut, no se trata de admitir, como lo hizo Descartes, que es la resistencia misma del medio la causa de la refracción; dicha causa reside en la acción de una fuerza de refracción, la “fuerza refringente”, que se ejerce en la “atmosferita” que rodea al cristal. Gracias a la atracción, omnipresente, Clairaut quiere explicar tanto “la ascensión de líquidos en los tejidos capilares como la inflexión de los rayos de luz en la hoja del cuchillo”: capilaridad y difracción; dichos

fenómenos muestran que “los corpúsculos extremadamente sutiles son atraídos hacia la superficie de los cuerpos muy cercanos a ellos”.³¹ Clairaut, newtoniano si los hay, defiende el concepto de atracción que “debe combatir la repugnancia de muchos físicos”, pues “la sola palabra *atracción*, que nos vemos obligados a utilizar, indigna”. Pretende “hacer ver cuál es el uso que M. Newton hace de la atracción, cuando intenta explicar la refracción”, y cree “que se puede sustituir la atracción por su causa mecánica”.³² “Imaginaremos entonces que todos los cuerpos están rodeados de una atmósfera muy tenue que empuja a los corpúsculos vecinos hacia la superficie de los cuerpos, de la misma forma en que la materia sutil, según Descartes, hace caer las cosas a la Tierra”.³³

Ya que “los cuerpos más densos tienen una atmósfera más fuerte”, los corpúsculos serán más “empujados” hacia el medio circundante cuanto más denso sea éste y, recíprocamente, conforme el medio circundante “sea [más] diáfano, más fuerte será la pesadez hacia el medio denso”.³⁴ Cuando un corpúsculo luminoso se acerca al vidrio, se ve sometido durante su travesía por esa “atmosferita” a una fuerza orientada hacia el medio más denso, a una “pesadez”, de la misma forma en que el campo de pesadez de la Tierra se ejerce sobre las partículas cuando atraviesan la atmósfera. Hay que hacer notar que Clairaut no convence en este punto, evitando la atracción para plantear una analogía con la pesadez... La etimología (del griego ἀτμός, atmós, “vapor”, y σφαῖρα, sphaira, “esfera”) deja entender que el término de “atmosferita” procede de los modelos de refracción atmosférica que encontramos en Kepler y también, como veremos después, en Newton. En suma, en las inmediaciones de la laminilla de vidrio, la fuerza refringente (que expresa la refracción) actúa sobre el corpúsculo luminoso de la misma manera en que, cerca de la Tierra, la fuerza de gravitación actúa sobre la trayectoria de una piedra. Al llegar a la laminilla de vidrio, el “glóbulo” luminoso es acelerado y curvado por la atmósfera del medio más denso al que pasa y, “como una piedra lanzada de manera oblicua, describe una parábola cóncava hacia la tierra”.³⁵ Después de haber atravesado la laminilla en línea recta, por simetría, será frenado y “se curvará un poco en sentido opuesto [...] como un proyectil lanzado al aire”.³⁶ Se trata en efecto de una balística.



FIGURA IV.2. Alexis-Claude Clairaut.
Imagen de la Biblioteca de la Universidad de Leipzig.

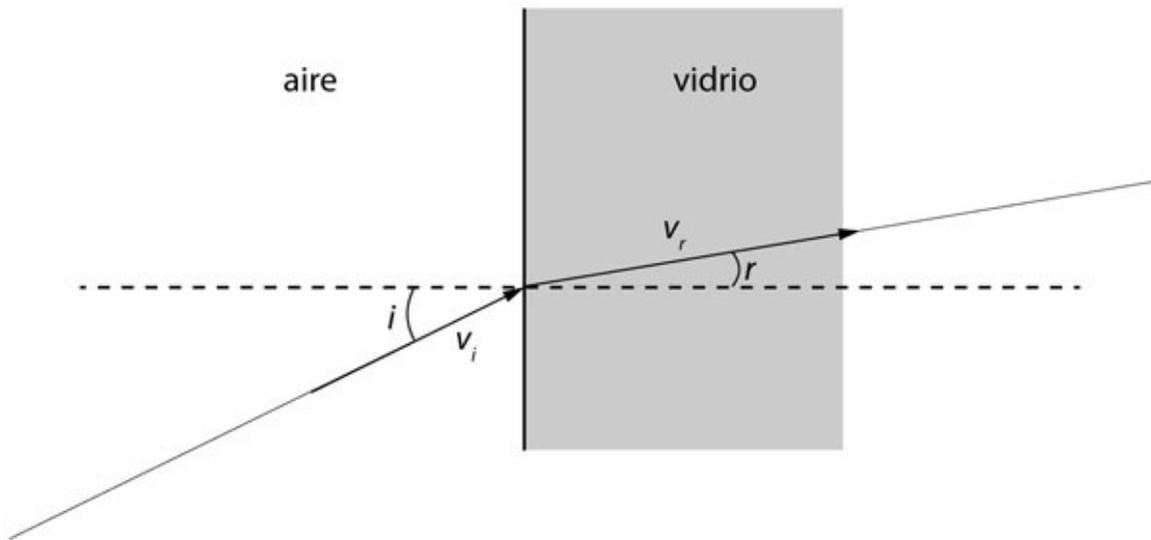


FIGURA IV.3. Ley de Snell-Descartes. El ángulo de refracción r depende del ángulo de incidencia i y de la velocidad de la luz incidente v_i . Para Descartes y Newton, la velocidad de la luz refractada v_r es mayor que la velocidad de la luz incidente, v_i : $v_i \text{sen} i = v_r \text{sen} r$.

En una segunda parte de su artículo, Clairaut deducirá “esa tan bella ley de la refracción” sin “apilar hipótesis sobre hipótesis”, sino contentándose con “atribuir en general a nuestras atmosferitas la propiedad de empujar los corpúsculos de luz sin necesidad de hacerlos actuar según alguna ley arbitraria”.³⁷ Los cálculos proporcionados por Clairaut siguen siempre la línea de los *Principia*, cuyas proposiciones desarrolla y aclara. Sin embargo, mientras que los cálculos de Newton son geométricos, los de Clairaut son esencialmente algebraicos. Por una parte, demuestra la ley de Descartes: la razón entre los senos de los ángulos de incidencia i y de refracción r es inversamente proporcional a la razón de las velocidades de incidencia v_i y de refracción v_r ; dicha relación es una constante n , el índice de refracción del vidrio. Por otra parte, demuestra que la diferencia entre los cuadrados de las velocidades de refracción y de incidencia es también una constante, relacionada con la fuerza refringente. Como lo expresa Joseph Priestley, teólogo, predicador y físico brillante, bien conocido por su oposición a Lavoisier y autor de una *Historia de la óptica*,³⁸ trabajo muy documentado que aparece en 1772:

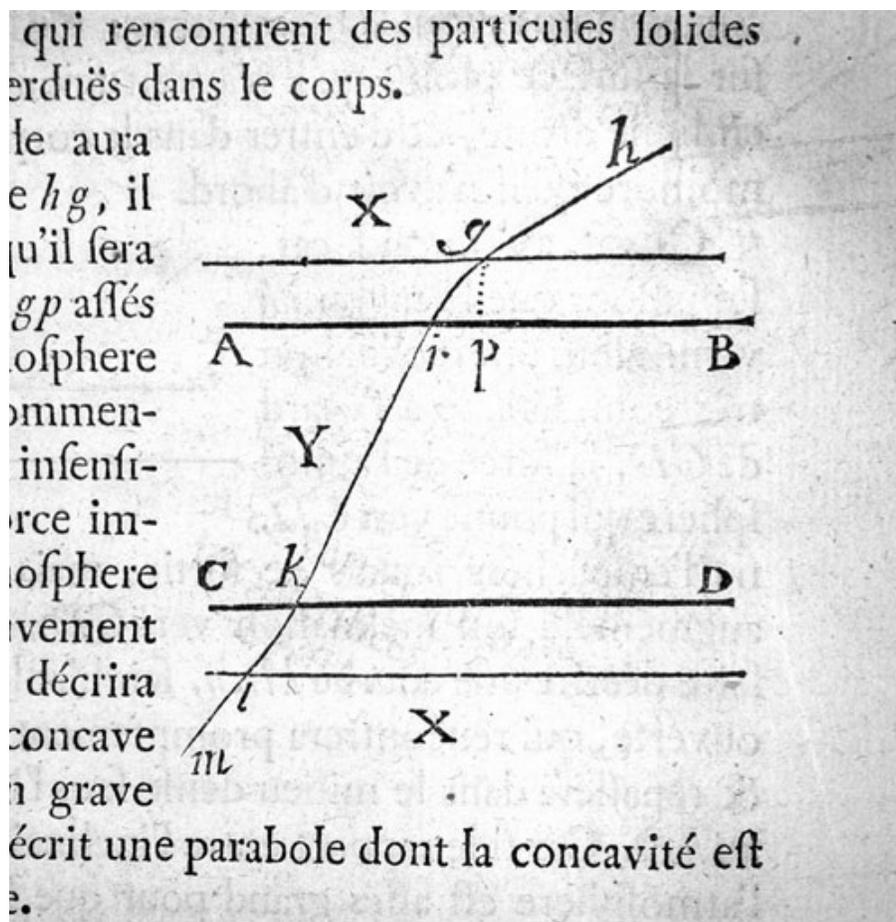


FIGURA IV.4. Travesía de una laminilla según Clairaut.

La fuerza actúa en "la atmosferita del cristal". Imagen: © Observatorio de París.

Si la causa de la refracción es la atracción que ejerce el medio refractante, la velocidad de la luz antes de su incidencia será a su velocidad subsecuente como el seno del ángulo de refracción es al seno del ángulo de incidencia; de esta manera, la luz recibirá un aumento de velocidad al pasar de un medio enrarecido a uno más denso.³⁹

El glóbulo de luz que llega a la atmósfera de un cristal con una velocidad de incidencia dada es, entonces, análogo a una bala de mosquete sometida a la pesadez terrestre. En particular, el glóbulo será más refractado cuanto menor sea su velocidad de incidencia, y la refracción aumentará en proporción a la acción de la fuerza refringente, del mismo modo en que una bala es más desviada cuanto menor sea su velocidad y la desviación aumenta en relación con el tiempo de acción de la fuerza de pesadez. Cuanto mayor sea el tiempo durante el cual se sufra la acción de la fuerza refringente, menor será la velocidad y mayor será el ángulo de refracción; recíprocamente, cuanto menor sea el tiempo durante el cual se sufre la fuerza refringente, menor será el ángulo de refracción. Así como el ángulo de desviación es una medida de la velocidad inicial de la bala, el ángulo de refracción es una medida de la velocidad de la luz incidente.

Estos resultados, que aparecen en el trabajo de Clairaut en forma de ecuaciones precisas, permitirán calcular la variación del ángulo de refracción en función de la velocidad de un corpúsculo luminoso incidente. De esta manera, tanto en la teoría de Descartes como en la de Newton, la velocidad de un corpúsculo luminoso es mayor en un medio más denso. Tal es, expuesto con detalle por Clairaut en 1741, el modelo balístico inventado por Newton para explicar la refracción. No obstante, si bien Clairaut hace accesible la óptica balística de los *Principia* al explicarla de forma detallada, parece estar muy lejos de las conclusiones de Newton, obtenidas a partir de 1691 al observar los satélites de Júpiter. En 1741 Clairaut no llega hasta las últimas consecuencias de la teoría corpuscular de la luz, y más bien propone una interpretación reducida que será llamada “teoría de la emisión”. Deja en la oscuridad el tema donde radica el interés (y que constituye su debilidad): el de ofrecer una interpretación natural de la dispersión de los colores, del espectro surgido del famoso prisma de Newton.⁴⁰

NEWTON Y LA REFRACCIÓN ASTRONÓMICA

Un buen conocimiento de la refracción astronómica es esencial para la astronomía de posición. Un rayo luminoso procedente del espacio que es observado desde la Tierra, ya sea por el ojo de Tycho Brahe, por el telescopio de reflexión de Newton o por un telescopio de refracción de Dollond, no describe una línea recta entre la estrella en cuestión y los ojos del observador. El rayo luminoso sigue un camino más complicado a causa de la refracción atmosférica: poco a poco es desviado por la atmósfera terrestre, que actúa como una gran cantidad de laminillas apiladas, cuyo índice de refracción varía en función de la altitud. Cada rayo luminoso que penetra en la atmósfera describe una curva cuya forma depende de su dirección inicial y del índice de refracción de las capas de aire que haya atravesado. El observador ve el astro en la dirección de llegada del rayo, que no es la dirección original. Así, debe corregirse la refracción astronómica en la posición aparente de las estrellas para conocer su localización real. Pero, ¿cómo calcular tal corrección? Se tiene que esquematizar la atmósfera terrestre en función de datos meteorológicos, pues el índice de refracción depende de la densidad de las capas de aire atravesadas, relacionada a su vez con la presión y la temperatura, determinadas por la altitud. Además, se necesita un método analítico lo bastante poderoso como para calcular la refracción total hasta la superficie terrestre a partir de dichos parámetros.

Mientras que a finales del verano de 1694, en la soledad de Cambridge, Newton trabaja en la teoría de la Luna, además de poner en pie el muy cartesiano modelo de la refracción a través de una pínula que ya hemos descrito, Flamsteed se enfrenta al modelo kepleriano de la refracción astronómica. Ese modelo, que data de principios del siglo XVII y es base de las tablas utilizadas entonces por la mayoría de los astrónomos, se vale de una sola y única inflexión del rayo luminoso para explicar el fenómeno. Newton está saliendo de un periodo muy difícil, de una depresión seria, del “año negro” que para él fue 1693. El insomnio y el delirio se lo disputan; atraviesa una crisis de aspectos

paranoides. Las causas deben buscarse particularmente en el periodo de abatimiento que siguió a la publicación de los *Principia*, aunque también se ha hablado (sin que esté confirmado) de un incendio que destruyó su laboratorio y ciertos documentos; por supuesto, una hipótesis no excluye a la otra. Según Huygens, que propaga la noticia por el mundo académico europeo, “Newton se ha perdido para la ciencia”. No será el caso, pero sin duda se trata de un giro en su carrera que habrá de conducirlo pronto a Londres, donde dirigirá el Mint: la ceca o casa de moneda.

Las relaciones con Flamsteed, el astrónomo real, se resenten de ese episodio doloroso. Newton se muestra irritable y Flamsteed no es ligero. Se trata de un hombre “molesto”, “moralizador”, un “impenetrable muro de virtud”.⁴¹ Quiere que Newton lo considere su igual y espera su aprobación; pero Newton, imperioso, percibe una gran distancia entre las aspiraciones de Flamsteed como teórico y sus capacidades verdaderas: sólo se interesa en él como observador. El 1º de septiembre de 1694, Newton le hace a Flamsteed⁴² el insigne honor de una visita en su observatorio de Greenwich. Su interés principal es obtener datos sobre el movimiento de la Luna, cuya teoría retomaba por entonces. Flamsteed estaba aún inseguro de sus observaciones y se quejó ante Newton de la incoherencia de las tablas de refracción, en particular de las francesas. Sin embargo, carecía de la competencia matemática indispensable para enfrentar un problema tan difícil. En cuanto a Newton, tenía más de una razón para ponerse a trabajar. No para satisfacer a Flamsteed, con certeza, pero ¿qué habría más estimulante que crear una nueva teoría de la refracción que rebasara la de Kepler? Sobre todo, teniendo a su disposición métodos nuevos e ideas excelentes, en particular gracias a su teoría balística de los *Principia*.

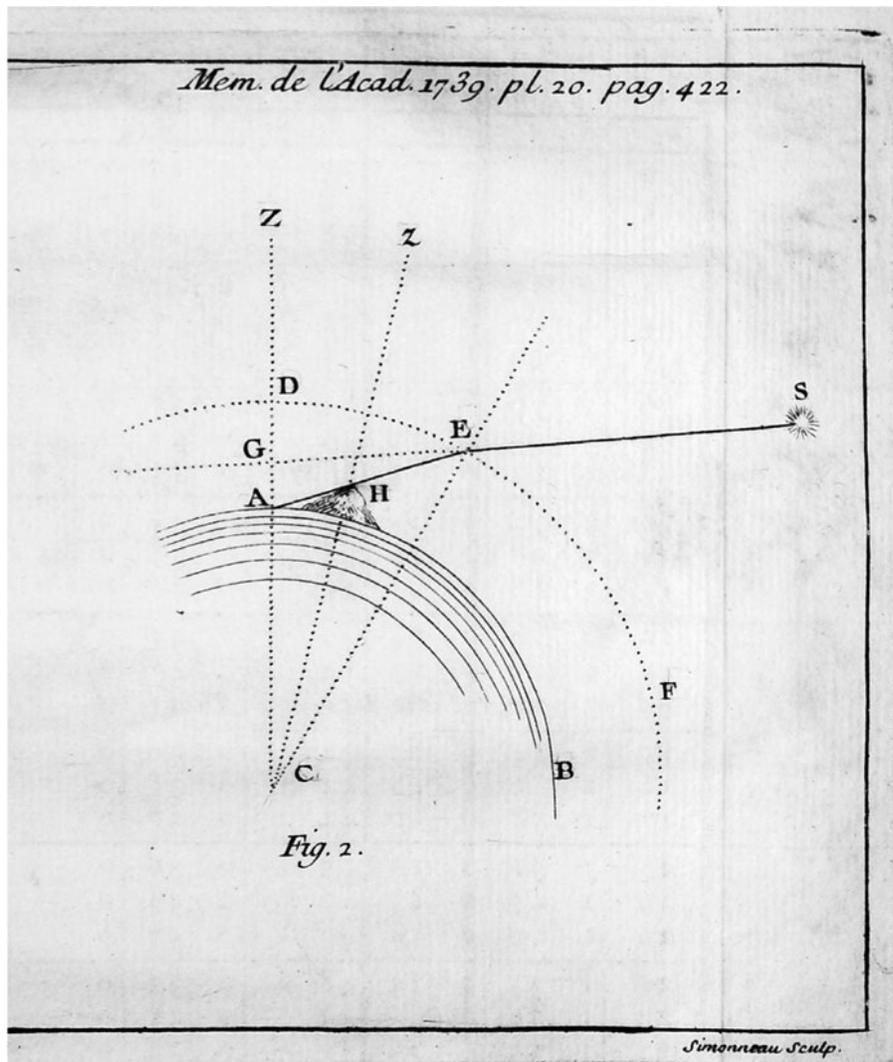


FIGURA IV.5. Refracción astronómica.

Sin refracción, la estrella S no podría verse. Imagen: © Observatorio de París.

Newton había notado que la refracción era menor cuanto mayor fuera la temperatura, pues la densidad atmosférica disminuía. Desde el 24 de octubre de 1694, en una carta dirigida a Flamsteed, menciona que las diferencias en las refracciones (cerca del horizonte y para una misma altura) se deben “al calor desigual del aire en las regiones bajas de la atmósfera; pues el aire refracta menos cuando es enrarecido por el calor, y refracta más cuando es condensado por el frío”.⁴³ En la misma carta, Newton le pide a Flamsteed “que, en las observaciones en que deba considerarse la refracción, tome usted nota del peso indicado por el baroscopio y de la temperatura del aire, de manera que pueda calcularse en un futuro la variación de la refracción debida a esas dos causas, pues conoceremos la proporción de acuerdo con la cual resulta”.⁴⁴ El 17 de noviembre le envía una primera tabla de refracción que obtuvo “al aplicar cierto teorema a sus observaciones”; tabla que, evidentemente, supone que Flamsteed debe comprobar. La tabla está dividida en tres columnas, donde se da la refracción en diferentes altitudes: la

primera columna corresponde “a la mitad del invierno, con un frío moderado”; la segunda, “a un grado medio de calor”, y la tercera, “al calor ordinario de julio”. Cada columna concuerda con las observaciones hechas por Flamsteed en condiciones parecidas.

Flamsteed deseaba vivamente saber cómo se había fabricado la tabla, deseo que a Newton lo tenía sin cuidado. Trató de averiguarlo dándole vueltas a la teoría de Kepler e inspirándose en los trabajos de Cassini. Sin embargo, estaba lejos de la explicación y perdía el tiempo. Al leer esas hipótesis, que no pudieron parecerle sino simplistas comparadas con las suyas (que tampoco lo tenían completamente satisfecho), Newton debió de sonreír; esperaba con impaciencia las observaciones lunares de Flamsteed, y le propuso, con mucha malicia, “gratificarlo a su satisfacción” por ellas, lo que Flamsteed tomó muy mal... Para calmarlo un poco, pero también mostrarle sus errores, Newton envió con sequedad algunos elementos de su modelo, que realmente no permitían comprender las bases sobre las cuales había sido construida la tabla. En una carta dirigida a Flamsteed el 20 de diciembre de 1694, supone Newton que el rayo luminoso que atraviesa la atmósfera es desviado poco a poco por la fuerza refringente, relacionada con la variación de la densidad atmosférica y que va desde la superficie terrestre hasta el límite de la atmósfera, donde se anula. En suma, crea un “modelo planetario” del movimiento de la luz sirviéndose de los materiales de que dispone, en particular la óptica balística de los *Principia*, en la que indudablemente no cree desde hace tiempo como teoría de la óptica, pero que basta para explicar el fenómeno.⁴⁵ Se trata de un modelo de lo más concreto.

Newton calcula su primera tabla suponiendo una fuerza refringente constante,⁴⁶ y la envía a Flamsteed, quien no podía imaginar cuánto más elaborados eran los cálculos de Newton que los de Kepler.⁴⁷ Por si fuera poco, las penas de Flamsteed no habían terminado: la hipótesis de una fuerza refringente constante no satisface a Newton, que continúa trabajando. En la carta que envía a Flamsteed el 16 de febrero de 1695, ya supone que “la atmósfera es de una constitución tal como la descrita en la proposición 22 del segundo libro [de los *Principia*]” y, no sin desdén, añade: “Cuando haya terminado la [nueva] tabla de refracciones, me esforzaré por hacerle comprender a usted las bases que me han permitido calcularla. Sin embargo, las demostraciones son realmente muy complejas y no he podido terminar de escribirlas”.⁴⁸

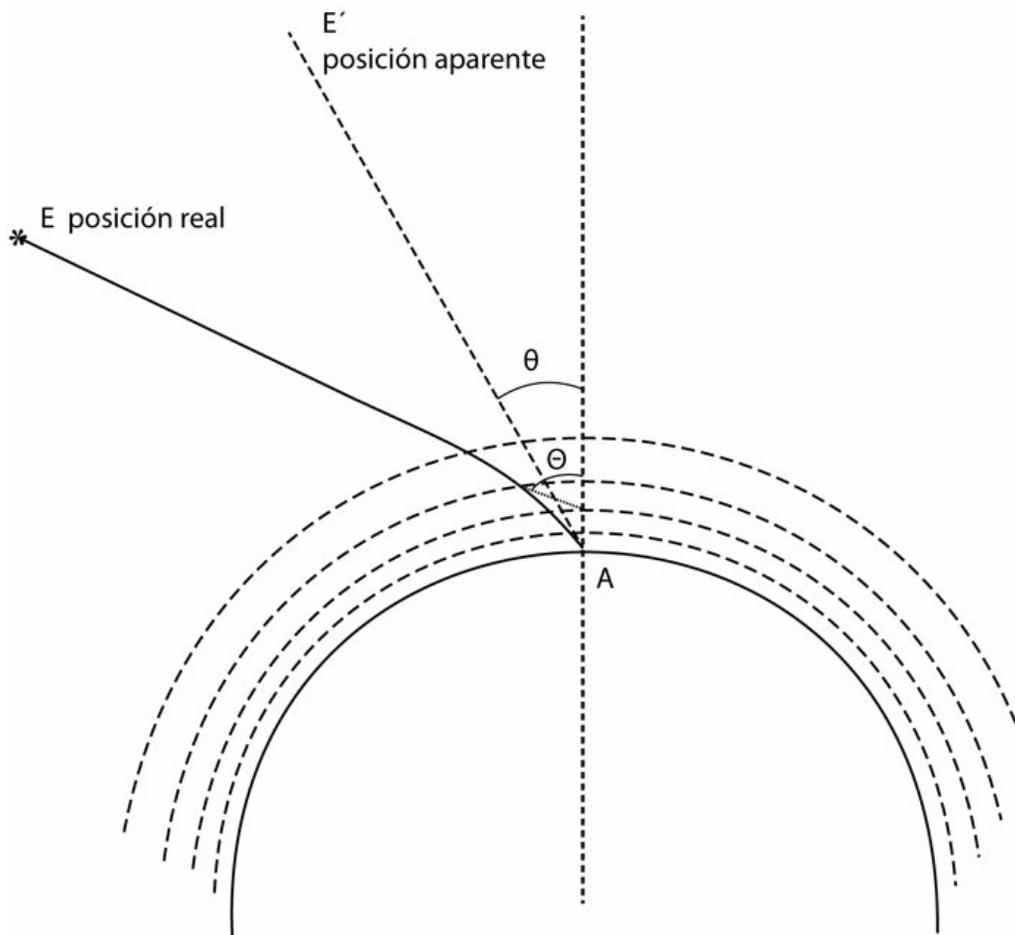


FIGURA IV.6. Modelo newtoniano de la refracción astronómica.

La atmósfera rodea a la Tierra y tiene un espesor de “dos leguas y media”. El rayo luminoso que procede de la estrella E atraviesa las capas de atmósfera, que lo refractan poco a poco, y llega al observador situado en A, que ve la estrella en E'. Entonces la altura aparente de la estrella, θ , es diferente de su altura real, Θ , y el ángulo de refracción astronómica es $\Theta - \theta$.

Flamsteed le respondió en seguida “que no había leído [el] segundo libro” [de los *Principia*], pero que “aunque la proposición 22 le parecía un fundamento propio para una tabla de refracciones, [...] no podía comprender cómo [podría Newton] basar un cálculo en eso sin muchas otras consideraciones; consideraciones que por el momento no tenía tiempo de hacer”.⁴⁹ Pobre Flamsteed, quien, según sus biógrafos, era absolutamente incapaz de seguir los hermosos razonamientos, para los cuales no tenía elementos. En pocas palabras, estaba sin duda perdido en las consideraciones teóricas de Newton, lo que por otra parte no es extraño ni escandaloso tratándose de un observador, como podría pensarse en primera instancia.⁵⁰ Regresemos a Newton: se apoya entonces en su “proposición 22”, que entre otras cosas supone “que la densidad de un fluido cualquiera [es] proporcional a su compresión...”⁵¹ Newton jamás satisfizo el deseo de Flamsteed de conocer “su manera de calcular”, pero el 21 de marzo de 1695 le envió una

copia de su nueva *Tabula refractionis*, construida a partir de ese modelo tan elaborado. De hecho, Newton jamás hizo públicos ni sus cálculos ni su tabla, pero en 1721 Halley publicó una tabla de refracción tal y como la recibiera “hace mucho tiempo de su Gran Autor”.⁵²

La historia de la teoría de la refracción astronómica no hacía sino comenzar. Leonhard Euler publicó en 1756, en las “Memorias de 1754” de la *Historia de la Real Academia de Ciencias y Bellas Letras de Berlín*, un artículo intitulado “De la refracción de la luz al pasar por la atmósfera, según los diversos grados de calor y elasticidad del aire”.⁵³ Por primera vez se tenía en cuenta la influencia de la temperatura directamente en el cálculo teórico. En 1805, Laplace publicó en el tomo IV de su *Tratado de mecánica celeste*⁵⁴ un capítulo intitulado “De las refracciones astronómicas”, llevando el tema a un alto grado de refinamiento. Sin embargo, el trabajo de Newton se mantuvo totalmente ignorado hasta que Biot, quien acababa de publicar un artículo al respecto, lo redescubrió en 1836 entre los artículos en los cuales se han basado los historiadores de la cuestión.⁵⁵

V. BRADLEY Y LA ABERRACIÓN

Es lo que llamamos aberración de las cosas fijas, pues parecen desviarse hacia uno y otro lado.

FONTENELLE¹

BRADLEY Y LOS SATÉLITES DE JÚPITER

A principios del siglo XVIII, la opinión inglesa era en su mayoría favorable a la hipótesis del movimiento progresivo de la luz de Rømer. William Derham, un amigo de Flamsteed, afirma en su *Physico-Theology* (un texto compuesto de sermones que combaten el ateísmo) que la luz “atraviesa los espacios celestes con una rapidez prodigiosa, y necesita sólo unos siete u ocho minutos para llegar del Sol a nuestros ojos [...] y en esa forma recibimos las influencias y las acciones de esa creación divina, tan noble y útil”.² Edmund Halley, quien sucedió a Flamsteed en 1720 como astrónomo real, se había consagrado a la tarea de publicar las tablas de Cassini y deseaba mostrar “que la hipótesis del movimiento progresivo de la luz debe observarse necesariamente en los satélites de Júpiter”.³ James Bradley, quien sucedió a su vez a Halley, dedicó gran parte de sus trabajos a dichos satélites; introdujo la “ecuación de la luz” (el hecho de que la velocidad de la luz es finita) en las tablas que describían el movimiento de los satélites. Al analizar el periodo de desfases inexplicables en el movimiento de los satélites, mostró que se debían a la atracción gravitatoria entre ellos, confirmando de este modo el descubrimiento de Rømer.

Sin embargo, no fue este análisis detallado del movimiento de los satélites de Júpiter lo que condujo a la completa adopción de la hipótesis de Rømer, sino un descubrimiento independiente que hizo Bradley,⁴ el de la “aberración”, cuando intentaba observar otro efecto, buscado desde tiempo atrás, el “paralaje”. Como lo expresaría después Fontenelle, secretario de la Real Academia, “sería mejor para el sistema [de Copérnico] que se pudiera descubrir alguna variación en las estrellas fijas”.⁵ La observación del paralaje anual era, en efecto, indispensable para mostrar de manera irrefutable el movimiento de la Tierra alrededor del Sol; por ello, los astrónomos lo buscaron desde muy temprano, aunque mucho tiempo sin éxito por la lejanía de las estrellas más próximas. De hecho, se medirá por primera vez un paralaje en 1838, por Friedrich Wilhelm Bessel, director del Observatorio de Königsberg: el de 61 Cygni, una estrella que se encuentra a seis años luz, 400 000 veces más lejana que el Sol, y cuyo paralaje mide menos de medio segundo de arco.⁶

DEL PARALAJE A LA ABERRACIÓN

En efecto, después del *De revolutionibus...* de Copérnico,⁷ todos aquellos que se negaban a creer en el movimiento de la Tierra tenían un argumento fuerte: la imposibilidad de mostrar el paralaje anual, el cambio de la posición aparente de una estrella debido al desplazamiento del observador, transportado por la Tierra alrededor del Sol. Se trata simplemente de un efecto de perspectiva (véase el recuadro V.1).

Mucho antes que Bradley, varios astrónomos habían observado un movimiento aparente que no podían explicar. En 1669 Robert Hooke, con el único fin de detectar el paralaje de una estrella, había construido un nuevo telescopio que permitiría, con una precisión desconocida hasta entonces, mostrar el paralaje de la estrella γ Draconis. La estrella no fue elegida al azar: el telescopio de Hooke, cercano a Londres, había sido construido para permitir ver el paso de γ Draconis por el meridiano, casi en el cenit del lugar de observación; así se evitaban los efectos de la refracción astronómica, que con justa razón preocupaban a Hooke. Sus observaciones mostraron, en efecto, variaciones en la posición de la estrella estudiada, las cuales atribuyó al paralaje anual. En 1671, el abate Jean Picard, del Observatorio de París, fue a Dinamarca para tomar nota de las observaciones realizadas un siglo antes por Tycho Brahe. Para utilizarlas, era indispensable reducirlas al meridiano de París, para lo cual hacía falta conocer la diferencia entre las longitudes de ambos observatorios. Al intentar hacerlo, Picard notó “un obstáculo por parte de la estrella polar, que de una estación a otra tiene ciertas variaciones que Tycho no anotó, y que yo observo desde hace unos 10 años. La estrella polar se aproxima cada año al polo unos 20" [...] pero hacia el fin del año todo se compensa y la estrella polar aparece unos 20" más cercana al polo”. Y añade que, “para decir la verdad, no he podido imaginarme nada que me satisfaga, en particular porque en algunos años las variaciones son menos sensibles que en otros”.⁸

RECUADRO V.1. *El paralaje, un efecto de perspectiva*

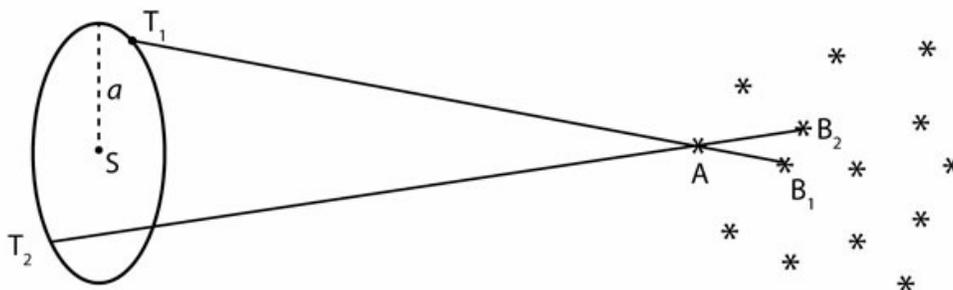


FIGURA V.1. *Paralaje anual.*

Las estrellas más cercanas parecen desplazarse respecto a las más lejanas cuando el observador, transportado por la Tierra, se desplaza. Se trata simplemente de un efecto de perspectiva como los que

observamos cotidianamente: dos árboles de nuestro jardín están alineados, pero si movemos de lugar nuestra silla, ya no lo están; desde el tren en marcha, los postes de telégrafo parecen moverse continuamente respecto al paisaje más lejano.

Si en un tiempo dado t_1 , la Tierra, entonces situada en T_1 , se alinea con las estrellas A y B_1 , no será así en un tiempo t_2 , cuando la Tierra se haya desplazado a T_2 . Ya no estarán alineados los puntos T_1 , A y B_1 sino los puntos T_2 , A y B_2 .

El ángulo de paralaje anual es del orden del cociente entre el radio de la órbita terrestre a y la distancia d de la estrella considerada. Así, el tamaño del paralaje es un efecto cuya importancia depende de la distancia a la estrella en cuestión, y que será el máximo para las estrellas más cercanas.

- bout de l'axe avec point pour le fil à plomb
- a. Y sur lequel il repose
- c. vis pour régler la vis à plomb
- b.b. vis d'ajustage
- d.d. états en fer
- i.k. états en laiton
- e. vis et support pour fixer la garde en bois aux états en laiton i.k.
- f. vis du micromètre
- g. vis pour retirer la pression de la lunette de la vis du micromètre quand elle ne sert pas

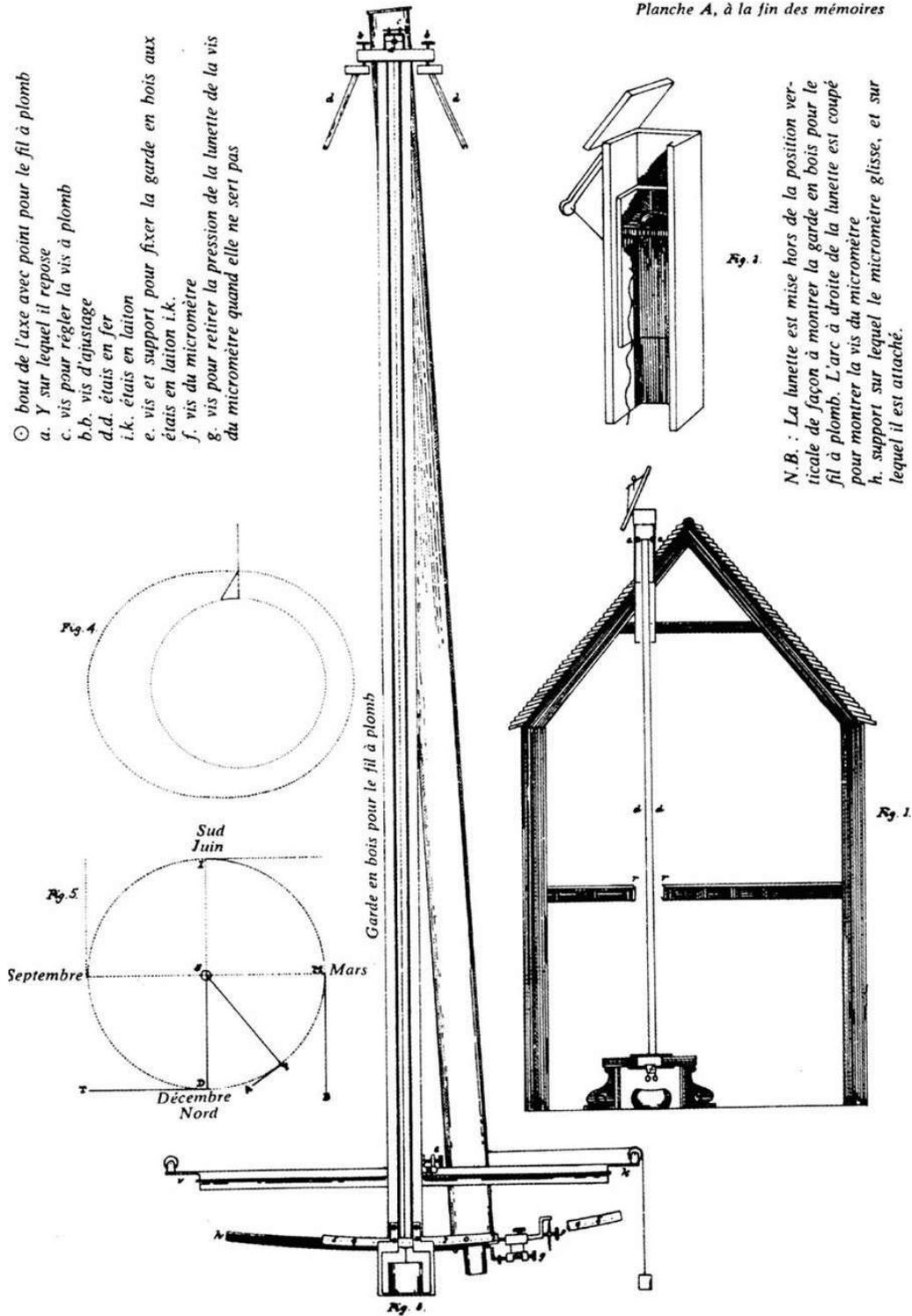


FIGURA V2. Telescopio de Bradley.

Imagen: colección particular; Charles Kittel et al., Cours de physique de Berkeley, t. I: Mécanique, Armand Colin, Paris, 1972, lámina A.

Los trabajos de Hooke no resultaron muy convincentes, y fueron retomados a finales

de 1725 por un astrónomo inglés, Samuel Molyneux. La curiosidad llevó rápidamente a Bradley a confirmar las observaciones, lo que consiguió. El fenómeno no sólo afectaba a las estrellas cercanas: las estrellas “fijas” describían una pequeña elipse alrededor de su posición media; lo que más lo sorprendió “fue que dicha alteración se daba en el sentido contrario que si se debiera al paralaje anual de la estrella”.⁹ Bradley se preguntó si el movimiento aparente de γ Draconis no se debería al material de observación. Se dedicó entonces a “examinar minuciosamente” el movimiento de la estrella: en marzo de 1726, γ Draconis estaba definitivamente 20” más al sur que en diciembre. Bradley se convenció de que dicho fenómeno no podía ser consecuencia de una variación del eje terrestre, la nutación, cuya existencia confirmaría 20 años después. Pero, ¿afectaba el fenómeno a otras estrellas? Para responder dicha pregunta, Bradley hubo de construir un nuevo instrumento, pues el de Molyneux, fabricado para observar γ Draconis, sólo servía para estrellas que pasaran por el cenit en Kew, donde se hallaba situado el instrumento.

En agosto de 1727 el telescopio estaba a disposición de Bradley en Wansted, y permitía la observación de una mayor cantidad de estrellas porque su campo era de “seis grados y cuarto de cada lado de su cenit”, mientras que el de Molyneux era sólo “de siete u ocho minutos de grado”. Así, Bradley pudo convencerse de que el efecto era general, aunque “la mayor alteración en la declinación de dichas estrellas era como el seno de [su] latitud”.¹⁰ Dedicó entonces sus esfuerzos a encontrar la causa del fenómeno: ¿podría deberse a una alteración en la dirección de la plomada o a la refracción? Ninguna de esas razones lo convenció, y planteó la hipótesis de que el fenómeno se debía al movimiento progresivo de la luz combinado con el movimiento anual de la Tierra en su órbita. La explicación que dio, hoy clásica, descansa, en efecto, sobre la composición de las velocidades de la luz y del observador. Escuchemos de qué manera, según un historiador de principios del siglo XIX, se le ocurrió a Bradley la idea:

Finalmente, cuando ya desesperaba de explicar el fenómeno que había observado, se le ocurrió de golpe una idea cuando no la estaba buscando. Se paseaba en barco con un grupo sobre el río Támesis. El barco tenía un mástil con un banderín. Soplaban un viento moderado y el grupo navegó un rato, río arriba y río abajo. El doctor Bradley notó que, cada vez que el barco viraba, el banderín en la punta del mástil se desplazaba un poco, como si la dirección del viento hubiera cambiado ligeramente. Observó esto tres o cuatro veces sin decir nada; finalmente les expresó a los marineros su sorpresa de ver cambiar el viento de dirección cada vez que el barco daba la vuelta. Los marineros le dijeron que el viento no había cambiado, y que el aparente cambio se debía al cambio de dirección del barco, y aseguraron que ese efecto se producía invariablemente en todos los casos. Esa observación accidental permitió a Bradley concluir que el fenómeno que durante tanto tiempo le preocupaba se debía al movimiento combinado de la luz y de la Tierra.¹¹

En un artículo intitulado “De la aberración aparente de las estrellas causada por el movimiento progresivo de la luz”,¹² Clairaut explica lo esencial del fenómeno de aberración, haciendo una analogía con la lluvia:

Supongamos que una infinidad de cuerpos, como por ejemplo las gotas G de una lluvia muy rápida, caen

paralelos entre sí siguiendo la dirección GA sobre una superficie AB, y que queremos colocar tubos de manera que sean atravesados en toda su longitud por los cuerpos que caen, sin que sean tocadas sus paredes. Es evidente que, si los tubos están en reposo, es necesario que se encuentren en la dirección GA, pero, si los tubos son transportados de B a D sin que cambie su dirección, sus paredes serán tocadas. Para que no sea así, debe dárseles una dirección GC que sea corregida, por así decirlo, por el movimiento del tubo.¹³

O, como dice d'Alembert, el “glóbulo [...] debe atravesar o *enfilarse* el tubo en línea recta durante su movimiento sin chocar con sus paredes”.¹⁴

En cuanto al paralaje que no había podido observar, Bradley comenta al final de su artículo:

Es mi parecer que, si [el paralaje] fuera de 1", lo habría visto, en particular por la gran cantidad de observaciones que he realizado de γ Draconis [...] parece muy probable que su paralaje no llegue a un solo segundo y, en consecuencia, esté 400 000 veces más lejos de nosotros que el Sol.¹⁵

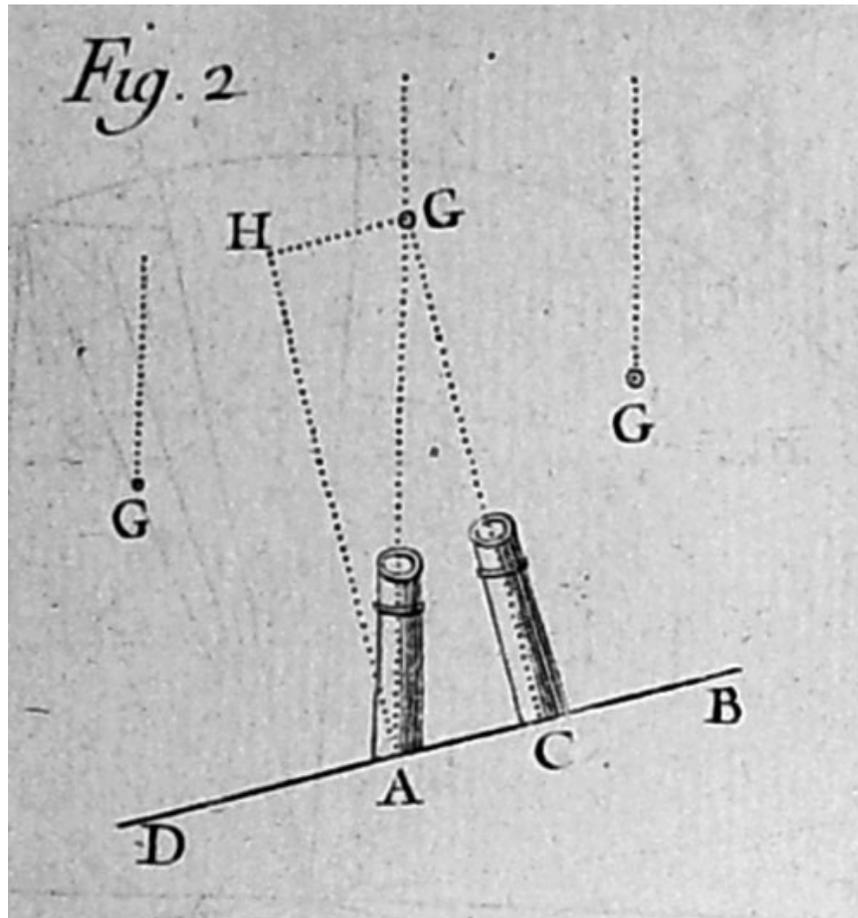


FIGURA V3. La aberración según Clairaut.

Imagen: © Observatorio de París.

De hecho, el paralaje de Proxima Centauri, la estrella más cercana a nosotros, es de 0.76" de arco.

Las observaciones de Bradley no sólo “constituyen una de las demostraciones más convincentes del descubrimiento de M. Rømer”, como escribirá Clairaut,¹⁶ sino que apoyan fuertemente la hipótesis de Copérnico. ¿Acaso no se veía a las estrellas fijas dibujar la elipse terrestre? No obstante, Bradley menciona al fin de su artículo que el hecho de no haber notado el paralaje de ninguna estrella fija permitía a los detractores de Copérnico dudar aún del movimiento terrestre, siempre y cuando dudaran también del movimiento de la luz. Por otra parte, la constancia del fenómeno de aberración mostraba que la velocidad de la luz procedente de todas las estrellas era prácticamente la misma. Incluso Bradley precisó que “la luz se propaga (en un *medio* dado) con la misma velocidad, después de haber sido reflejada, que la luz de las *estrellas fijas*”.¹⁷

RECUADRO V.2. *La aberración*

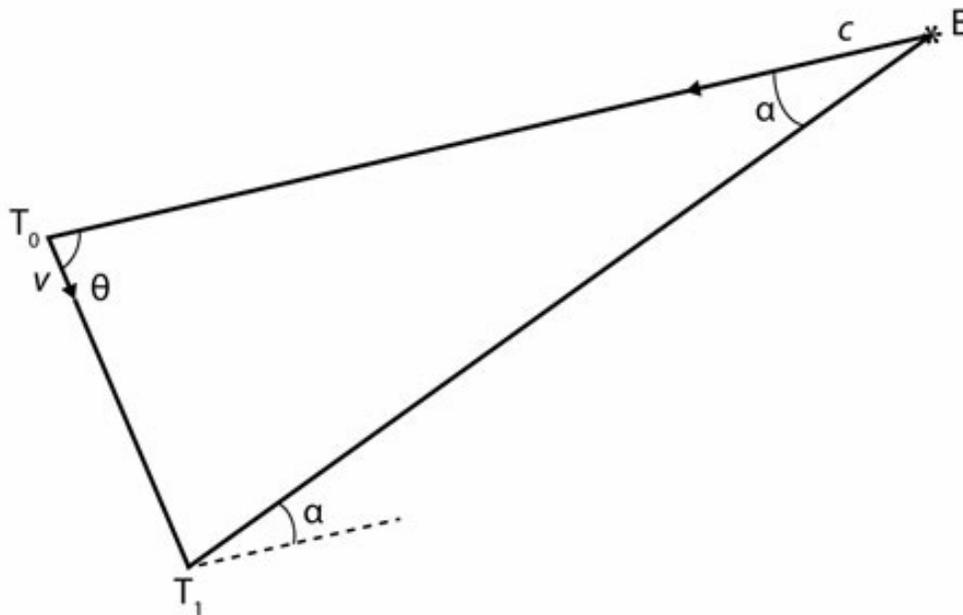


FIGURA V.4. *La aberración anual.*

Como el cazador de Maupertuis que apunta a un ave en vuelo, así la estrella sigue a la Tierra en su movimiento anual alrededor del Sol. Si la velocidad de la luz fuera infinita, la Tierra recibiría al corpúsculo luminoso en ET_0 , y lo mismo sucedería si estuviera en reposo. Sin embargo, dado que la Tierra se desplaza y que la luz necesita cierto tiempo para llegar, la estrella (¡el cazador!) debe tomar en cuenta su movimiento, y es el corpúsculo con velocidad $c + v$ emitido en dirección ET_1 quien la tocará. El ángulo de aberración es entonces el ángulo entre la posición que el observador terrestre habría observado si la velocidad de la luz fuera infinita (ET_0) y la que observa realmente (ET_1). Entonces la posición de la estrella parecerá desviada un ángulo $\alpha = \angle T_0ET_1$ respecto a su posición real. Para conocer la ley de desplazamiento aparente, basta reducir el triángulo T_0ET_1 . Si θ es el ángulo entre la dirección del movimiento terrestre y la posición de la estrella (ET_0T_1), y considerando que α es muy pequeño, tenemos: $\alpha = v/c \operatorname{sen}\theta$. Entonces la aberración es un efecto cuya amplitud máxima, igual para todas las estrellas, es v/c .

Como la velocidad de la luz es finita, nunca vemos los objetos donde están. Siempre están ya en otro lugar; no importa si ellos se desplazan o nosotros nos desplazamos. El Sol sale por el horizonte, pero su imagen no aparece sino ocho minutos después, el tiempo que tarda en llegar la luz; la posición aparente del Sol es entonces la que tenía ocho minutos atrás; está “retrasada”: tal es el efecto de Rømer, el “retraso de la luz”. Así, recibimos imágenes antiguas; la posición de un satélite de Júpiter está desfasada, y el desfase está en función del tiempo que tarda la luz en llegar hasta nosotros. Por ello, el movimiento del primer satélite de Júpiter pareciera no ser regular ni seguir las leyes de Kepler. También es necesario reconstruir las trayectorias. La posición que se desea conocer, y la que permite trabajar desde el punto de vista de la mecánica celeste, es la posición “instantánea”, la que el cuerpo ocupa *ahora*. De igual manera, si el observador se desplaza, recibe una imagen diferente que si se hubiera quedado inmóvil. Entonces todas nuestras mediciones se ven afectadas por un desfase que depende del ángulo entre la velocidad del observador y la del rayo luminoso. Si el observador se desplaza hacia el objeto observado, las imágenes sucesivas se sobrepondrán. Si se desplaza tangencialmente de manera uniforme, las imágenes sucesivas estarán siempre desfasadas en el mismo ángulo, y el efecto no será observable.¹⁸ El ángulo de aberración sólo es observable si varía. Si el observador se desplaza de una manera no uniforme, el ángulo de desfase entre la dirección verdadera y la dirección aparente seguirá y reproducirá el movimiento particular del observador. Como el observador terrestre describe una elipse alrededor del Sol, una estrella observada parecerá describirla ella misma; tal es la llamada aberración anual, pues depende del movimiento de la Tierra alrededor del Sol.¹⁹

La imagen de una estrella (de cualquier estrella) vista por un observador terrestre describe entonces una elipse²⁰ alrededor de su posición verdadera, debida al movimiento de la Tierra alrededor del Sol: es la imagen, proyectada en el cielo, del movimiento anual de la Tierra alrededor del Sol. Este efecto, aunque 30 veces mayor que el mayor de los paralajes, es débil. Su elongación angular máxima, v/c (el ángulo bajo el cual vemos el eje mayor de la elipse que recorre la imagen de la estrella en cuestión),²¹ es de 40" de arco. Toda estrella se ve sujeta a este efecto, independientemente de su lejanía. Sin embargo, la elipse de aberración es más o menos oblonga en función de la posición de la estrella en el cielo terrestre: si la estrella está sobre el plano de la eclíptica, la elipse de aberración está completamente aplanada, reducida a un segmento. Entonces la aberración depende de tres factores: la velocidad de la luz, c , que se compone con la de la Tierra, v , y también la dirección de la estrella respecto a la dirección del movimiento terrestre, θ . Tenemos entonces un efecto “en $v/c \times \text{sen}\theta$ ”, cuya amplitud v/c corresponde a la elongación máxima de la aberración (véase el recuadro v.2).

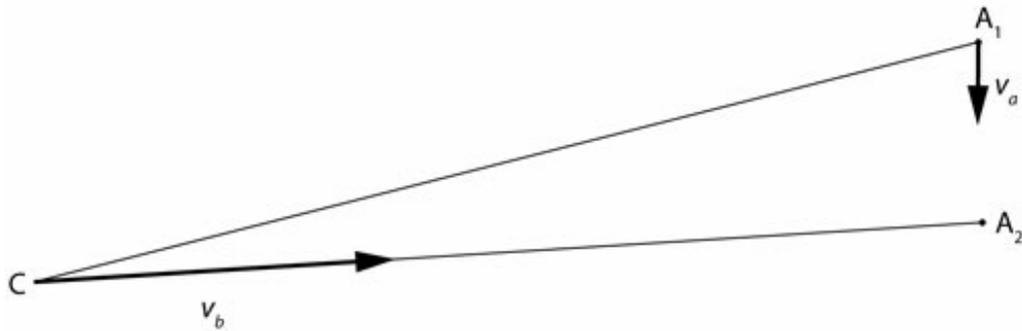


FIGURA V.5. El cazador de Maupertuis.

Si el cazador C dispara en la dirección A_1 (donde se encuentra el ave), yerra el tiro. Debe tirar más adelante, en la dirección A_2 . El ángulo A_1CA_2 es proporcional a la velocidad del ave v_a , e inversamente proporcional a la velocidad de la bala v_b .

La aberración es un efecto difícil de comprender. Hay otro efecto mejor conocido, más común, que nos ayudará a visualizarla: el disparo de un cazador. Un cazador al acecho divisa un ave en vuelo. Si dispara al lugar en que la está viendo, fallará el tiro, pues en el tiempo que requiere la bala para llegar, el ave recorre un par de metros. Por lo tanto, apuntará delante del ave. Tan ingeniosa comparación se debe a Maupertuis: “Es comparable a la dirección que hace falta dar al fusil para que la bala alcance al ave que vuela: en lugar de apuntar directamente al ave, el cazador dispara un poco adelante, y tira más adelante cuanto más rápido sea el vuelo del ave en comparación con la rapidez de la bala”.²² En esta analogía, retomada en la *Enciclopedia* por d’Alembert, “el ave representa la Tierra y la bala representa la luz de la estrella que la alcanza”. D’Alembert hace notar que “esta comparación puede servir para dar a entender el principio de la aberración a aquellos de nuestros lectores que no tienen siquiera un barniz de geometría”. Yo añadiré que también ayuda a quienes, como yo, aun teniendo un “barniz de geometría”, prefieren visualizar los fenómenos de la física.

LAS CONSECUENCIAS DEL DESCUBRIMIENTO DE LA ABERRACIÓN

El descubrimiento de la aberración trajo consigo dos satisfacciones importantes. Por una parte, confirma que la velocidad de la luz (de la cual depende la explicación del fenómeno) es definitivamente finita. Por otra parte, la observación de la elipse de aberración apoya el punto de vista copernicano: puede *verse* el movimiento de la Tierra proyectado en el cielo. Sin embargo, como ya se dijo, los astrónomos más reticentes a la visión de Copérnico esperaron a que se observara un paralaje para convencerse. No solamente queda confirmada la hipótesis de Rømer, sino que se tiene una medida muy precisa de la velocidad de la luz, como pronto lo nota Bradley. Dado que el ángulo de aberración es de $20''$, explica, la razón de la velocidad de la luz respecto a la de la Tierra sobre su órbita es de 10 210 a 1, de donde se sigue que la luz tarda ocho minutos

y 12 segundos en llegar desde el Sol, lo que representa una mejoría sustancial en ese dato. A partir de lo anterior, como el ángulo de aberración máximo, el ángulo desde el cual se ve la elipse de aberración es constante (tanto que se le llama “constante de aberración”), tenemos también que la velocidad de la luz es constante, salvo errores de observación.²³ Así, el hecho de que el ángulo de aberración sea constante es para muchos astrónomos la mejor razón para afirmar que la velocidad de la luz (procedente de estrellas distintas situadas a distancias distintas) es constante. En 1747, 's Gravesande notaba en sus *Elementos matemáticos de la física, confirmados por experimentos, o introducción a la filosofía de Newton*:

La luz viene de todas las estrellas con esa misma velocidad, pues el ángulo [de aberración] es el mismo para todas: de donde se sigue (si suponemos que no todas las estrellas están a la misma distancia de nosotros, como lo indican muchos argumentos) que el movimiento de la luz es uniforme mientras se acerca a nuestra atmósfera a través de esos espacios inmensos. Pero debe notarse que no podemos percibir las diferencias muy pequeñas, y todo el mundo convendrá en que al medir un ángulo pequeño es fácil equivocarse en un segundo, comoquiera que se haga.²⁴

Y Clairaut escribe en 1741:

Las observaciones de M. Bradley prueban que la velocidad de la luz de las estrellas que ha observado es la misma; tenemos entonces derecho a concluir que la luz de todas las otras estrellas también es igual, pues si no, tendríamos que imaginar que por una gigantesca coincidencia M. Bradley no hubiera encontrado en su sector ninguna con velocidad distinta.²⁵

En cuanto a Delambre, al examinar el experimento de Arago, hará notar en 1809:

El fenómeno de aberración, tan feliz e ingeniosamente explicado por Bradley, muestra que la velocidad de la luz de las estrellas es la misma que la de la del Sol cuando nos llega reflejada por los satélites de Júpiter. Se trató de un gran hallazgo en favor de la opinión que suponía que la luz del Sol tenía la misma velocidad que la de las estrellas, y que no había diferencia alguna a ese respecto entre la luz directa y la luz reflejada.²⁶

Se trataba de un acuerdo notable entre dos métodos muy diferentes, lo que mostraba la uniformidad de la velocidad de la luz en el campo solar.²⁷ No obstante, la medida de la velocidad de la luz no era suficientemente precisa. El método de Rømer resultaba problemático, por una parte a causa de las desviaciones en los movimientos de los satélites de Júpiter, sometidos a perturbaciones, pero también debido a la incertidumbre sobre el momento de los eclipses, evaluado por Delambre con una precisión mayor de medio minuto. Utilizando las observaciones de un millar de eclipses durante 140 años, en particular las realizadas por Bradley durante el siglo XVIII, Delambre concluyó a partir de ese análisis y de sus propios cálculos que la luz tarda ocho minutos y 13 segundos en recorrer el radio de la órbita terrestre, estableciendo así el valor de la aberración en 20" 25.²⁸

Que la luz procedente de todas las estrellas tenga una velocidad constante es un resultado que, curiosamente, no suele presentar problemas para los defensores de la

teoría de la emisión, aunque sí debería... Pues, ¿cuál es la velocidad de un corpúsculo luminoso recibido por un observador terrestre? Si creemos en la cinemática newtoniana (y si no, ¿en qué creer?) y suponemos que los movimientos de la fuente y del observador están alineados (o bien, si se quiere precisión, las componentes radiales de las velocidades implicadas), la velocidad de ese corpúsculo es la velocidad de emisión del corpúsculo luminoso por la estrella (que se supone *siempre* constante), más la (componente radial de la) velocidad de la fuente, más la (componente radial de la) velocidad del observador. Sin embargo, si la velocidad del corpúsculo luminoso es constante, lo anterior implicaría que la velocidad de la luz es independiente, no sólo de la velocidad de la fuente, sino también de la velocidad de la Tierra.²⁹ Este punto sólo muy rara vez se trata explícitamente en el marco de la teoría de la emisión, y muestra que el principio de la relatividad (la suma de velocidades) se ha dejado a un lado, olvidado.³⁰ De esta forma, la física está dividida: por un lado, la física de las partículas materiales obedece a la cinemática newtoniana, pero por el otro, sin que se insista demasiado en la cuestión, la óptica obedece a una cinemática limitada al observador, cualquiera que sea... ¿Es acaso una cinemática coherente?

Las explicaciones de la aberración que hemos dado se apoyan en una visión corpuscular de la luz que permite componer el movimiento de la luz con el de la Tierra. En el marco de la óptica ondulatoria, la situación no será más sencilla, pues resultará extremadamente difícil explicar la aberración. Como bien lo nota un historiador de la astronomía a finales del siglo XIX:

Pero los físicos de hoy han abandonado por completo la teoría corpuscular y consideran la luz como una forma particular de movimiento ondulatorio, transmitido a través del éter. Desde ese punto de vista, las explicaciones de Bradley y las ilustraciones físicas dadas hasta ahora son mucho menos convincentes; la cuestión [de la aberración] resulta ser de una dificultad considerable, y las investigaciones actuales más precisas y más elaboradas están lejos de dejarnos satisfechos. Curiosamente, podemos decir que si las concepciones modernas, más acertadas, hubieran prevalecido en tiempos de Bradley, habría sido mucho más difícil, si no es que absolutamente imposible, que encontrara la explicación de los movimientos estelares que estudiaba, y así una teoría errónea condujo a un descubrimiento importante.³¹

VI. EL COLOR DE LA LUZ

NEWTON, CLAIRAUT Y EL COLOR DE LOS SATÉLITES DE JÚPITER

A principios de la década de 1660,¹ Newton consigue mostrar, gracias a sus famosos experimentos de descomposición de la luz con un prisma, que la luz blanca está compuesta por luces de colores: se trata de la dispersión. Se imagina que la luz se compone de corpúsculos de diferentes colores. Pero, ¿por qué no suponer, en el marco de la teoría corpuscular, que la velocidad es parámetro del color? A cada color corresponderían corpúsculos con distinta velocidad. Se tiene entonces una teoría del color, el “modelo-velocidad”. Dado que el ángulo de refracción es función de la velocidad, y que el color está relacionado con el ángulo de refracción, es lógico suponer que el color depende de la velocidad. Newton espera explicar así tanto la ley de Descartes (que constituye, como se vio en el capítulo IV, la base de su teoría de la refracción que aparece en los *Principia*) como la dispersión de los colores. En pocas palabras, si la luz blanca está compuesta por corpúsculos de diversos colores, parece natural asociar colores y velocidades, y hacer de la velocidad el parámetro del color. Detengámonos un instante a observar la dispersión causada por un prisma: un rayo de luz blanca se dispersará en un espectro tal que el azul esté más desviado que el rojo. Según el análisis precedente, el corpúsculo azul es más refractado porque la fuerza refringente actúa con más intensidad en él que en los corpúsculos de otros colores, así que debe ser el más lento, de acuerdo con el punto de vista balístico. De esta forma, en el marco de la teoría balística de los *Principia*, Newton debió suponer que los corpúsculos rojos eran los más rápidos y los azules eran los más lentos...

A principios de la década de los noventa, cuando trabajaba en la redacción de su *Opticks*, Newton pensó en una prueba sencilla, una consecuencia fácilmente observable de la hipótesis según la cual los colores se deben a la velocidad de los corpúsculos luminosos. Desde hacía casi un siglo podían observarse Júpiter y sus satélites. En particular, para determinar longitudes con mayor precisión, se observaban con mucha atención los eclipses de dichos satélites. Si, como suponía Newton, la luz estaba constituida por corpúsculos de diferentes velocidades, los últimos rayos en alcanzar al observador durante la inmersión de un satélite (su entrada en el cono de sombra de Júpiter) serían los más lentos, los azules; de la misma manera, durante su emersión (su salida del cono de sombra) serían los rayos rojos, los más rápidos, los primeros en llegar. Entonces, a partir del modelo de la refracción de los *Principia*, un satélite debería verse azul al momento de su inmersión y rojo durante su emersión.

El 10 de agosto de 1691, Newton le escribe a Flamsteed con el fin de presionarlo para que publique su catálogo de estrellas fijas. Termina su carta preguntándole si en sus

observaciones de los eclipses de los satélites de Júpiter, “la luz tiende al rojo o al azul en el instante que precede a la desaparición del satélite, o si la luz se vuelve entonces más rojiza o más pálida”.² Una primera respuesta, indirecta, llega rápidamente a través de David Gregory, quien el día 27 le escribe a Newton:

Señor:

La semana pasada le hice una visita a Mr. Flamsteed en Greenwich. Me pidió que le enviara saludos y le comunicara lo siguiente: entre otras cosas, dijo que jamás ha observado ningún cambio en el color de la luz de los satélites de Júpiter durante la emersión o la inmersión, pero que se lo hará saber en seguida si llega a suceder algo así.³

La historia continúa con una nueva carta de Gregory que lleva noticias de París; el 7 de noviembre de 1691 le hace saber a Newton que Cassini había visto los satélites rojos durante la inmersión, en oposición a la predicción de Newton:

M. Cassini ha convencido a un gentilhomme de mi conocimiento de que, antes de la inmersión, los satélites parecían rojos, y que sucedió lo contrario durante la emersión. Me gustaría saber si esto concuerda con las otras cosas que sabemos sobre los colores, pero me disgusta creer que el rojo sea el color más lento.⁴

Así como había aceptado las observaciones de Flamsteed, Newton aceptó las consecuencias del resultado de Cassini y modificó su posición. Pero la cosa no había terminado, pues una carta de Flamsteed fechada el 24 de febrero de 1692 confirmó la primera misiva de Gregory. La carta trata extensamente las razones por las que retarda la publicación de su catálogo de estrellas, para después llegar a la cuestión de los matices del color que podrían presentar los satélites de Júpiter durante la inmersión:

Cuando los observo, mi atención se fija de tal manera en los instantes de la desaparición que raramente me perco de particularidades como las que usted menciona. Todo lo que puedo decir es que empiezan a perder su luz dos o tres minutos antes de desaparecer, y su brillo se vuelve cada vez más débil hasta que se reducen a un punto. No puedo decir que jamás los haya visto cambiar al azul o al rojo, solamente al pardo, cuando los observo con un telescopio de 27 pies.⁵

Como podemos notar, la respuesta de Flamsteed no es más favorable que la de Cassini para el “modelo-velocidad”, que predice que los corpúsculos luminosos durante la inmersión deberían verse azules. Hace falta decir que la cuestión de observar el color de los satélites de Júpiter no era sencilla, pues resultaba difícil determinar con certeza el color de un satélite en inmersión con aparatos cuya calidad no era excelente... De cualquier manera, Newton no volverá a hablar de su óptica corpuscular después de la publicación de los *Principia*. En su *Opticks* tratará de construir una teoría compuesta para explicar varios fenómenos ópticos de índole diversa: hace trabajo de físico... Sin embargo, la cuestión del color de los satélites de Júpiter y de la velocidad de los diferentes colores reaparecerá a mediados del siglo XVIII, sin relación alguna con los trabajos de Newton.

En 1740, en la “Tercera parte de las investigaciones fisicomatemáticas sobre la reflexión de los cuerpos”,⁶ Jean-Jacques d’Ortous de Mairan, filósofo cartesiano, expuso sus puntos de vista sobre el color de la luz. Su explicación de la refracción se apoya esencialmente en el concepto de colisión. En la sección intitulada “De las velocidades de la luz y sus colores” presenta una primera idea de las respuestas que aporta a la dispersión:

Pues no puede ponerse en duda que las sensaciones que designamos con el nombre de *colores*, y que por prejuicio o ilusión de la infancia atribuimos a los objetos que los hacen nacer, resultan de los diferentes choques de la luz con el órgano de la vista; y [...] que la diferencia de dichos choques, en cuanto que se manifiesta por los diferentes grados de refringencia, no puede tener otra causa inmediata que la diferencia en las velocidades.⁷

Después de un preámbulo tan cartesiano, De Mairan pasa a una pregunta interesante: ¿cómo es que el color de un rayo de luz se conserva al atravesar medios transparentes sucesivos, aunque su velocidad varíe? Para empezar, hace notar que la mayor parte de los experimentos implican dos refracciones (generalmente del aire al vidrio y después otra vez al aire), de manera que la velocidad que tiene un glóbulo de luz que entra en un medio será igual a la que recobre al salir de él. Después se pregunta: “El experimento de un prisma de aire colocado en el agua, ¿no nos dará un espectro de naturaleza y orden diferentes al abanico de colores que nos da el experimento del prisma de agua o de vidrio colocado en el aire?”⁸ De esta manera, estima, “deberíamos ver en el agua, y a través del agua, siempre que el ojo esté sumergido, los objetos conocidos coloreados de manera distinta que como nos parecen en el aire”.⁹ Resulta, continúa De Mairan, que un cierto M. Cramer, “profesor de matemáticas y de filosofía en Ginebra [...] después de leer lo que yo había escrito sobre las velocidades de la luz [...] me sugirió un experimento exacto, y al mismo tiempo la solución de todas las dificultades que podrían surgir. Tomó una botella de vidrio bien llena de agua y, aplicando un ojo al pico, directamente contra el agua, y manteniendo el otro en el aire, observó en repetidas ocasiones el color de los objetos que tenía enfrente con ambos ojos, y no encontró diferencia sensible. Yo repetí el experimento, con el mismo resultado. Lo anterior, reforzado por el testimonio constante de los buzos, no deja duda alguna sobre este hecho”.¹⁰

En efecto, se trata de un experimento que permite ver que el color (y por lo tanto, en el contexto de la teoría corpuscular, la velocidad) de un glóbulo de luz no varía en función del medio que atraviesa; esto causó revuelo, pues el corpúsculo, acelerado al entrar al agua, debería cambiar de color, enrojecerse, para después frenarse al emerger con la velocidad y el color originales. Pero, ¿por qué no se ven distintos los colores en el agua y en el aire, si las velocidades son diferentes en ambos medios? “¿Qué pasa, entonces, con la analogía entre los colores y las velocidades de la luz?”, se interroga De Mairan, y concluye con una respuesta “corta pero tajante”: “Lo que pasa es que siempre

recibimos las impresiones de la luz y sus colores a través de un medio único, inseparablemente unido al órgano inmediato de la visión”.¹¹ Se trata del “humor acuoso, cristalino o vítreo”, interpretación que aceptarán muchos físicos, entre ellos Melvill:

*Pues la retina no está ni en el aire ni en el agua, sino aplicada inmediatamente contra el humor vítreo. Entonces recibimos la impresión de los rayos cuando salen de ese humor, y cada rayo tiene la velocidad correspondiente a su color. Así, un rayo de luz que parte del Sol con una velocidad dada tendrá en el humor vítreo una velocidad determinada, independientemente de los medios que haya atravesado para llegar. Por eso, el color de cada rayo es inmutable, aunque el color dependa de la velocidad y ésta cambie, ya que las modificaciones que pueda sufrir por la refracción se rectifican necesariamente al pasar por los humores del ojo, donde las velocidades de los mismos rayos son siempre las mismas, dado que los humores no cambian.*¹²

Resulta entonces que, cualesquiera que sean los medios atravesados, un glóbulo de luz tendrá en cada medio (y en particular en el ojo) una velocidad fija que recobrará siempre que llegue a él. La velocidad de la luz será en cierta forma constante en cada medio. Y, curiosamente, De Mairan no cree tener muchas más dificultades con la hipótesis de la emisión que con la hipótesis cartesiana de las presiones. Esta cuestión (y con mucha frecuencia esta explicación) de la permanencia del color de la luz después de refracciones repetidas reaparecerá constantemente en la historia de la teoría de la emisión, y en particular en Arago (capítulo X). En este momento de su exposición De Mairan aborda la cuestión de los satélites de Júpiter, cuyo crédito no atribuye a Newton, que no publicó nada al respecto, sino a un “oyente bien informado”. Imaginémos por un momento en un salón de París en 1738-1739; De Mairan se dirige a un público relativamente numeroso, pero muy distinguido, que cuenta con algunos filósofos y varios marqueses; sin duda están allí Clairaut y uno de sus discípulos, quien trabajará precisamente en esa cuestión, el marqués de Courtivron:

Se me ha hecho notar en la última lectura una dificultad de la misma índole, pero que me interesará más porque se relaciona con la observación, y a la que por consecuencia debo responder. Si los diferentes colores de la luz se deben a sus velocidades, al percibir una luz que nace súbitamente, como la emersión de un satélite de Júpiter, deberíamos ver en un principio un rojo puro, después un rojo mezclado con amarillo, luego eso mezclado con verde, hasta llegar cuando menos al azul, cuya combinación es necesaria para la composición del blanco, o de la luz propiamente dicha.

Y continúa:

Ya que si la luz requiere de siete a ocho minutos para recorrer el radio de la órbita terrestre, requerirá 35 o 40, alrededor de cinco veces más, en llegar de Júpiter a nosotros; eso sería más que suficiente para percibir un intervalo de tiempo entre la luz roja y la luz blanca, o compuesta, que llega del satélite. Pues la velocidad de la luz roja, al ser inversamente proporcional a su refringencia, es 1/386 mayor que la del amarillo, y 1/155 mayor que la del azul. Si calculamos el tiempo con estos datos, encontraremos de cinco a seis segundos de intervalo entre el rojo y el amarillo, y de 13 a 15 segundos entre el rojo y el azul.¹³

Razonamiento y cálculos de gran sencillez: el retardo de un corpúsculo de un color determinado respecto a uno de otro color es inversamente proporcional a su refringencia, y, como la luz requiere entre 35 y 40 minutos para llegar desde Júpiter, una simple regla de tres basta para concluir que el retardo será de 5 a 15 segundos, según el color.¹⁴ Sin embargo, concluye De Mairan: “La observación no nos permite ver dicha sucesión de colores y matices, y al salir el satélite de la sombra nos parece tan blanco como varios minutos después; entonces las distintas refringencias de la luz y sus colores se deben a otra causa, y no a la diferencia en las velocidades de las partes que la componen”.¹⁵

Sucede que De Mairan, al igual que Newton, interrogó a un astrónomo sobre el particular y recibió una respuesta claramente negativa.

En 1754 un joven y brillante físico de Ginebra, Thomas Melvill, regresará a la cuestión del color de los satélites de Júpiter y a los cálculos de De Mairan, concluyendo que “si tal fenómeno fuera percibido por los astrónomos, tendríamos una prueba directa de las distintas velocidades de los rayos con colores diferentes, pues no hay otra causa a la que tal observación pudiera atribuirse razonablemente. Si no es así, podemos concluir que los rayos de todos los colores son emitidos por los cuerpos luminosos con una misma velocidad”.¹⁶ La “prueba” no está lejos, pues al artículo de Melvill sigue un informe de James Short, célebre óptico y rival de John Dollond.¹⁷ Short escribe que después de haber observado con atención “las emersiones del primer satélite de Júpiter con un telescopio de cuatro pies de distancia focal y un poder de aumento apropiado [...] no he percibido la menor alteración en el color de la luz reflejada por el satélite, salvo por su cantidad”.¹⁸

Parece entonces que estas observaciones de Short han terminado definitivamente con una interpretación de la dispersión parametrizada por la velocidad. Sin embargo, aunque la velocidad no parece poder ser el parámetro del color, nada le impide seguir siéndolo de la refracción. Se llega así a una interpretación reducida, monocromática, de la teoría corpuscular de la luz de Newton: la teoría de la emisión.

MELVILL Y LA ABERRACIÓN

En ese mismo artículo, publicado en forma de carta abierta a Bradley y leído en marzo de 1753 en la Real Sociedad de Londres, Melvill le plantea al inventor de la aberración algunas cuestiones embarazosas referentes a ella: “Gracias a la hermosa teoría de la aberración de la luz del doctor Bradley, las estrellas parecen estar desplazadas una cierta distancia en función de la proporción entre la velocidad de la Tierra y la velocidad de la luz”.¹⁹ Deduce que una estrella “debe tener un lugar aparente distinto para cada color, es decir, su disco aparente debe estar alargado por la aberración de manera longitudinal, como el espectro de un prisma, con el extremo rojo más cercano a la localización real”.²⁰

En efecto, como la aberración de la luz es esencialmente un efecto de desplazamiento aparente en v/c , donde v es la componente transversal de la velocidad del observador y c

es la velocidad de la partícula luminosa, si dicha velocidad varía, por la razón que sea, por ejemplo en función del color de la radiación incidente, el ángulo de aberración debe variar. De hecho, muchos físicos retomarán o reinventarán este esquema (o un esquema parecido) con mayor o menor éxito durante la segunda mitad del siglo XVIII. De esta manera, en el marco del modelo-velocidad de la teoría corpuscular extendido al color, debe tenerse un ángulo de aberración que dependerá del color de las partículas luminosas. Sin embargo, para Melvill la solución de dicha cuestión es sencilla: el efecto es inapreciable y no hay “ninguna posibilidad de descubrir si nuestro sistema es verdadero o falso”.

Instalado en el hotel Trois Rois de Ginebra, Melvill se inquieta por no recibir respuesta de Bradley. Le escribe el 2 de junio, sometiendo a su consideración nuevas ideas: “Estaba tan avergonzado, y con razón, del contenido de mi primera carta que, desde que pensé someterla a vuestro examen [...] resolví ocultarme bajo un seudónimo”.²¹

Se comprenden las razones de su embarazo, debido a la irritación que debió de sentir Bradley ante el anuncio de un efecto que Melvill esperaba esclarecer: un fenómeno cuya consecuencia sería volver mucho más compleja la aberración. En esta segunda carta a Bradley, y a pesar de su vergüenza, Melvill intenta dar un segundo golpe a la teoría de la emisión gracias a un efecto nuevo que básicamente retoma los ingredientes de su artículo de enero: la aberración y la teoría corpuscular de Newton. Cree haber encontrado una forma de determinar la velocidad de la luz en medios distintos del aire. En sustancia, piensa que la aberración determina la relación entre la velocidad del observador y la de la luz, que no debe medirse en el tubo del telescopio, sino en el ojo del observador. La idea (la misma que tuvo De Mairan) es seductora, pues también explica que no haya cambios en un telescopio lleno de agua. Pues *si* la aberración es función de la velocidad de la Tierra en el momento de la observación, también debe considerarse la velocidad de la luz en el momento de la observación en el medio en que se encuentra, es decir, la velocidad de la luz en los humores del ojo. De aquí, deduce Melvill que “si la velocidad de la luz en el ojo está en proporción un poco mayor que cuatro a tres respecto a la velocidad de la luz en los cielos, como se sigue de la teoría de la refracción, la aberración de la luz de las estrellas fijas debe ser menor en la misma proporción que la que corresponde a la ecuación de los eclipses de los satélites de Júpiter”.²² En suma, dado que la velocidad de la luz es (según la teoría corpuscular) una cuarta parte mayor en el ojo que en el aire, entonces la aberración, medida en los humores del ojo, debería ser una cuarta parte más débil que la medida y teorizada por Bradley. Más aún, la aberración dependería de cada observador, determinada por el índice de refracción del “humor” de *su* ojo, y el efecto de aberración sería distinto para cada persona. Poco después, pero sin lugar a dudas de manera independiente, un jesuita de Dubrovnik instalado en París, de nombre Ruder Bošković, tuvo precisamente la misma idea, prolongando el debate sobre ese telescopio lleno de agua, que tanta tinta haría derramar.²³

En su artículo de 1728 Bradley había dejado claro cuán precisas eran sus observaciones, estimando que su error sobre la aberración no podía “diferir en más de 1”

de arco de la verdad” y que la precisión del tiempo de recorrido de la luz entre el Sol y la Tierra era de entre 5 y 10 segundos.²⁴ De esta manera, la precisión que Bradley afirma tener es cercana al 2%,²⁵ absolutamente incompatible con el efecto propuesto por Melvill, del orden del 25%. En resumen, Melvill da a entender que la concordancia entre la medida de la velocidad de la luz según el método de Rømer y según el efecto de aberración, que satisfacía a todo el mundo, y principalmente a Bradley, es mera ilusión. Melvill da a entender aún más: que la teoría propuesta por Bradley es insuficiente; básicamente, para que el análisis de este último fuera válido habría que renunciar a la teoría corpuscular de la luz. Bradley se vio así ante una disyuntiva muy delicada, pues hay que decir que ninguna de las opciones era muy tentadora: tenía que renunciar a su propia teoría de la aberración o abandonar la teoría de la luz más aceptada por entonces. Así, puede comprenderse que haya experimentado un “disgusto muy vivo” al leer esa carta,²⁶ disgusto que si bien no lo condujo a tirarla a la basura, seguramente no le produjo el deseo de responderla, a pesar de la insistencia de Melvill, pues a menos que refutara sus argumentos, para lo que probablemente carecía de tiempo y de medios, Bradley tenía que escoger entre dos males de los cuales ninguno era menor...

Esa segunda carta de Melvill a Bradley, fechada el 2 de junio de 1753 en Ginebra, no será publicada hasta 1832, pero sin duda circuló en los medios científicos bien informados, pues desde antes de 1772 fue conocida por Priestley, quien parafrasea varias partes en su *Historia de la óptica*.²⁷ En particular, se pregunta junto con Melvill por qué “el color de los rayos homogéneos no se altera al pasar a través de diferentes medios, aunque su velocidad aumente o disminuya”. Sucede que “como cada rayo debe siempre pasar al final a través de los humores del ojo, llega a la retina con una velocidad dada, independientemente de la cantidad de refracciones a las que haya estado sometido; pues la velocidad de todo rayo en un medio dado está en una proporción constante e invariable con su velocidad en otro medio dado”. En esencia es la respuesta, ya entonces clásica, de De Mairan. Poco después de esa correspondencia, en diciembre de 1753, Melvill murió en Ginebra a la edad de 27 años, dejando a sus colegas escoceses el recuerdo de un naturalista extremadamente brillante. Tres años después se publicaron en Edimburgo sus *Ensayos y observaciones*, un volumen de obras escogidas que, como hace notar el panegírico que sirve de prefacio, muestra “el genio fuera de lo común de [su] autor”.

EL SISTEMA DE LA EMISIÓN

Sin duda Newton jamás “creyó” realmente en su modelo-velocidad; esencialmente porque esa interpretación ampliada de la teoría balística no puede explicar la cuestión del color, lo que para Newton, ocupado en la redacción de su *Opticks*, resultaba insoportable. Pero era pragmático y a pesar de todo se sirvió de la interpretación *reducida*, monocromática, de su modelo, tanto para sus cálculos de refracción astronómica como para la exposición sobre refracción que escribe para la *Opticks*. La

posición de Newton, muy reservada en comparación con su óptica corpuscular de los *Principia*, se opone a la concepción institucionalizada de la teoría que prevalecerá durante el siglo XVIII. La óptica corpuscular se constituyó entonces en un sistema ampliamente enseñado y divulgado, de manera dogmática y un tanto superficial. Sin embargo, antes de 1740 casi no hubo investigaciones ni experimentos nuevos: se retomaban los análisis, las discusiones y a veces los experimentos clásicos de Newton, sin dar muestras de gran originalidad. En Francia, en el continente, la polémica entre cartesianos y newtonianos se coloca claramente en primer plano, tanto que será retratada por Voltaire. No obstante, al igual que en Inglaterra, durante la primera mitad del siglo XVIII parece tratarse de una literatura de vulgarización, de salón, donde las investigaciones teórica y empírica quedan casi siempre excluidas. Naturalmente, la mecánica celeste gana importancia a expensas de la óptica.

Después de la publicación del artículo de 1741 de Clairaut, que constituye la primera exposición seria del tema, la óptica corpuscular de los *Principia* en versión simplificada vuelve a ponerse de moda. Bajo el nombre de “sistema de la emisión”, dominará la segunda mitad del siglo XVIII y la primera parte del siglo XIX. Es una óptica monocromática, pues al no poder explicar la cuestión del color (que era el objetivo primario del modelo-velocidad), se preferirá dejarla para después. De esta manera, en la Francia de principios del siglo XIX, un grupo de sabios conocido como la Société d’Arcueil que se reunía en torno a Laplace y a Berthollet, Biot, Malus, Arago, defenderá tal óptica dinámica y trabajará en ella. Intentará construir uno de los pilares de una física unitaria newtoniana que habría de poner punto final a la física... En un marco similar trabajarán en Inglaterra y en Escocia John Michell, Robert Blair y John Robison.

VII. MICHELL Y LAS ESTRELLAS

JOHN MICHELL

En la historia de la física clásica John Michell ocupa un lugar importante, aunque prácticamente ignorado hasta en Inglaterra. Fue un naturalista, un astrónomo y un físico excelente, uno de los mejores expertos de la época en la teoría de Newton. Físico muy inspirado, llegará hasta el fin de la lógica de los *Principia*; la teoría de la gravitación para él es el ejemplo de una ciencia exacta. Cree en un mundo newtoniano unitario. En particular, intentará igualar corpúsculos materiales y luminosos, con la idea de mostrar la unidad de la física newtoniana.

Como era común por entonces, Michell fue un ministro del culto. Realizó sus estudios en el Queen's College de Cambridge, donde entró en 1742 y al que se mantuvo asociado durante más de 20 años. Sin duda habrá encontrado allí a Henry Cavendish, quien estudió en el Saint Peter College. En el Queen's Michell enseñará aritmética, teología, geometría, geología, griego y después hebreo, así como filosofía. "Bachelor of Divinity" en 1761, poco después será nombrado rector de Saint Botolph, en Cambridge. Tiene entonces 43 años y es viudo. Un cronista de entonces lo describe como un hombre bajo y gordo de tez pálida; se dice que es ingenioso y un filósofo hábil. En 1764 se casa con una joven de gran fortuna que le dejará una hija y que morirá al poco tiempo. En 1767, cuando aparece publicado su primer trabajo sobre astronomía, se instala definitivamente en Thornhill, en Yorkshire, parroquia de la que acaba de ser nombrado rector; volverá a casarse poco después. Podemos tratar de imaginar la vida de ese personaje curioso, profundo, encerrado, secreto y sin duda un poco misántropo, que raras veces saldrá de Thornhill. Toda su energía está consagrada a su ministerio y a la filosofía natural de Newton; es esencialmente un hombre de deber, un pastor anglicano con un fuerte sentido moral. Parece haber sido un excelente pastor; su lápida, en la iglesia de Thornhill, donde está enterrado, dice lo siguiente:

En el coro de esta iglesia yacen los restos del reverendo Jn. Michell, B.D., F.R.S., y durante 26 años rector de esta parroquia. Eminente como filósofo y erudito, poseía una justa exigencia de carácter del verdadero cristiano, tanto en la vida familiar como en los deberes sociales. El esposo tierno, el padre indulgente, el hermano cariñoso y el amigo sincero son los rasgos sobresalientes de un carácter lisa y llanamente amable. Su caridad no se debía a ostentación sino a sentimientos piadosos. El cumplimiento estricto de sus obligaciones profesionales era por principio y no por forma. Así vivió en la estima de sus feligreses y así se ha llevado a la tumba los lamentos de ellos. Murió el 21 de abril de 1793, en el sexagésimo noveno año de su vida.¹

Evidentemente, hay que leer entre líneas. Un rector no puede aparecer sino como el hombre moralmente exigente así retratado. Sin embargo, la descripción de Michell como

“amable”, esposo tierno y hermano cariñoso, permite sospechar que sus cualidades afectivas se expresaban más fácilmente en la práctica de su ministerio que en el mundo académico. Las relaciones con sus colegas no siempre fueron excelentes y no favorecieron su carrera: por ejemplo, parece haber querido suceder a Bradley como astrónomo real, sin conseguirlo. No obstante, Michell es un sabio extremadamente original, serio, ambicioso y muy inventivo. Whittaker es severo con ese periodo de la historia de Cambridge. “El siglo que va de la muerte de Newton a los trabajos científicos de Green es el más sombrío en la historia de la universidad”, escribe, haciendo notar que Cavendish y Young sólo pasaron por allí y se instalaron en Londres después de pocos años, pero distingue a Michell de la mediocridad de los universitarios de entonces, y hace responsables a sus colegas y sucesores de Cambridge del olvido en que cayó su nombre.² Michell fue uno de los amigos más cercanos de Henry Cavendish, bien conocido por sus trabajos sobre química, electricidad y medición de la densidad de la Tierra. Ambos son nombrados miembros de la Real Sociedad en 1760. Se parecen en varios aspectos. Cavendish también es un hombre solitario, taciturno; vive con su padre en Londres y su fortuna le permite concentrarse totalmente en el quehacer científico.

Sin lugar a dudas, Michell tiene un taller en Thornhill, al igual que en Cambridge, pues es un hábil experimentador. No sólo construye un telescopio, sino la “balanza para pesar la tierra” que, después de su muerte, le servirá a Cavendish. Su departamento en Queen’s, a decir de un cronista de la época, estaba atiborrado de materiales diversos y máquinas extrañas. A veces, en Thornhill, Michell organizaba veladas. Se formaba una orquesta de cámara donde él tocaba el violín junto con William Herschel; acaso cantara allí Caroline Herschel, astrónoma ella también y asistente de su hermano William. Éste, nacido en Hannover, emigró muy joven a Inglaterra. Era un músico consumado, y, a partir de 1766, organista titular de la Octagon Chapel de Bath; además, era un apasionado de la astronomía. A principios de la década de los sesenta, Michell y Herschel fueron vecinos, y sus intereses comunes eran la astronomía y la música. Por un momento se pensó que William Herschel había sacado provecho de los conocimientos prácticos de Michell, mas parece haber aprendido a pulir los espejos de sus telescopios leyendo la obra de Robert Smith,³ profesor de astronomía y filosofía experimental en Cambridge, donde era el encargado de enseñar dichas técnicas. A finales de 1773 Herschel construye el primer telescopio cuyo espejo ha sido pulido por él mismo, evitando así los grandes problemas (aberraciones cromática y esférica) de los telescopios de refracción. En poco tiempo posee los mejores instrumentos de la época, y descubre en 1781 el planeta Urano, al que propone llamar “Georgium Sidus” en honor al rey Jorge III. Tal descubrimiento lo vuelve famoso, y se le asigna una pensión. Consagra su vida (y la de su hermana Caroline) a la astronomía.

Así, el sur de Inglaterra reúne en la década de los ochenta a cuatro de los más grandes físicos y astrónomos ingleses de la época: John Michell, el más viejo, radica en Thornhill; Joseph Priestley, quien habita en Leeds, lo consulta con frecuencia sobre cuestiones de óptica; William Herschel, el más joven, se instala en Slough, cerca del castillo de Windsor, donde vive con su hermana Caroline, descubridora de numerosos

cometas; en cuanto a Henry Cavendish, el amigo de Michell, tiene su residencia en Londres. De vez en cuando, Michell hace un viaje a Londres, donde encuentra a Cavendish en su morada de Clasham. Participan en las reuniones de la Real Sociedad, donde la elección de Michell sigue inmediatamente a la de Cavendish; éste es también miembro del “Royal Society Club”, asociación científica privada que se reúne semanalmente para una cena a la que Michell es invitado con frecuencia; además, se encuentran en el cabaret Cat & Bagpipes, donde tienen lugar las reuniones de otro club científico; pasan allí las noches hablando de filosofía natural, intercambiando noticias científicas, discutiendo sobre sus trabajos y sus proyectos. Ciertamente Michell ha encontrado al mundo científico y filosófico londinense de finales del siglo XVIII.

En 1750, al principio de su carrera, Michell publica un tratado sobre imanes artificiales donde expresa por primera vez las propiedades matemáticas de la fuerza magnética, la ley de proporción $1/r^2$. Después del terremoto de Lisboa, en el año de 1755, se interesa por la geología y publica en 1760 un artículo muy notable sobre el tema. En 1767 expone un trabajo muy detallado acerca del “paralaje probable y la magnitud de las estrellas fijas” y, gracias a un estudio estadístico de la localización de las estrellas, postula la existencia de estrellas dobles reales en interacción gravitatoria,⁴ idea que utilizará, ya veremos cómo, en su artículo de 1784. Sin desdeñar la proposición de experimentos, las observaciones ni la construcción de instrumentos, Michell es antes que nada un físico newtoniano interesado por cuestiones teóricas. El principio unitario del mundo newtoniano supone que todos los cuerpos deben estar sujetos a la gravedad. Sin embargo, en el siglo XVIII la acción gravitatoria no había sido observada en tres dominios límites: la gravedad de las estrellas “fijas”, la atracción mutua de los cuerpos en la Tierra y la acción de la gravedad sobre la luz. Michell hará aportaciones en los tres temas.

LA DISTANCIA DE LAS ESTRELLAS

En la primera mitad de los años sesenta, Michell publica en la revista *Philosophical Transactions* tres artículos menores sobre astronomía. En 1765 es, junto con John Bird (fabricante de instrumentos matemáticos y astronómicos), uno de los dos miembros “calificados en mecánica” del comité encargado por el Board of Longitude [Consejo de Longitud Geográfica] para examinar los cronómetros de John Harrison, que significarán un progreso en cuanto a la determinación de la longitud en el mar. Así, Michell se interesa en la astronomía desde mucho antes de su llegada a Thornhill. Construye por entonces un telescopio de 10 pies, instrumento muy grande para la época, cuyo espejo parece haber fundido y pulido él mismo. Casi 30 años después, a la muerte de Michell, dicho telescopio pasará a Herschel, experto en la materia como ninguno y quien, según se dice, apreciará sus cualidades.⁵

Sin embargo, uno de los principales intereses de Michell es la teoría de la gravitación universal de Newton, que presentaba dos problemas esenciales a la astronomía del siglo XVIII: el primero consistía en la razón de que las estrellas no se precipitaran unas sobre

otras debido a su atracción mutua; el segundo, relacionado con el anterior, consistía en determinar su distribución en el espacio. Cada vez menos explicaciones están fundadas en el designio del Creador. Se sabe ya que las estrellas no reflejan la luz, sino que brillan por sí mismas, y que su luz y la del Sol son de la misma naturaleza.⁶ También se sabe que las estrellas están inmensamente alejadas de nosotros y entre sí, razón por la cual no podemos distinguir los planetas que pudieran tener. La hipótesis de Copérnico, la traslación de la Tierra alrededor del Sol, debía implicar un efecto de paralaje, de perspectiva (véase el recuadro v.1), debido al cambio de posición del observador con el transcurso de las estaciones, que a su vez daría una idea de la distancia. Ése fue un desafío para los copernicanos, no superado hasta principios del siglo XIX debido a la enorme lejanía de las estrellas: el paralaje de las estrellas fijas es extremadamente débil (menos de 1" para Proxima Centauri,⁷ la estrella más cercana al Sol). Si bien la idea del paralaje anual era clara, las pretendidas mediciones de paralajes eran aún muy discutidas. A principios del siglo XVIII, Bradley hace notar que si el paralaje de γ Draconis fuera de 1" de arco, él lo habría detectado.⁸

A falta del paralaje anual, se utilizaron otros métodos⁹ para estimar las distancias estelares. Newton, Huygens, Cassini y Euler aplicarán métodos fotométricos para encontrar la distancia de Sirio, la más brillante y probablemente la más cercana de las estrellas fijas, que se creía similar al Sol. Desde 1668, James Gregory planteó la hipótesis de que la debilidad aparente del brillo de las estrellas fijas, a las que suponía iguales al Sol, se debía a su distancia. Pero, ¿cómo comparar sus luminosidades? Hace notar que la luz de las estrellas más brillantes es cercana a la de algunos planetas, como Saturno; entonces basta comparar la luz recibida directamente del Sol con la fracción que refleja Saturno, teniendo en cuenta el coeficiente de reflexión.¹⁰ Newton, en su *Sistema del mundo*, publicado en 1728, afirma para empezar que, “en cuanto a las estrellas fijas, la pequeñez de su paralaje anual muestra que se encuentran a distancias inmensas del sistema de los planetas”, añadiendo que con toda certeza “dicho paralaje es menor de un minuto”.¹¹ A continuación, retomando el cálculo de Gregory y suponiendo que Saturno refleja una cuarta parte de la luz que recibe del Sol, muestra que “si el Sol estuviera [...] 60 000 veces más lejos que Saturno, se vería tan luminoso como él, es decir, un poco más brillante que una estrella fija de primera magnitud”,¹² como Sirio.¹³ No obstante, los especialistas están entonces preocupados por otras cuestiones: las razones de las variaciones en las estrellas, su constitución, su distribución, su gravedad y la naturaleza de las nebulosas. Interesan en particular las variaciones en el brillo, las explosiones, los decrecimientos, las fluctuaciones e incluso la desaparición de determinadas estrellas. La explicación por entonces más común de las variaciones del brillo se basaba en la hipótesis de manchas oscuras que, parecidas a las del Sol, oscurecían la estrella; se creía también que dichas variaciones podían deberse a fluctuaciones en la atmósfera de la estrella.

LAS ESTRELLAS DOBLES:

Michell publica en 1767 su primer gran artículo de astronomía,¹⁴ donde se encuentra el primer argumento probabilístico verdadero referente a los agrupamientos de estrellas, mucho antes de que Herschel¹⁵ llegara a la misma conclusión mediante la observación.¹⁶ El artículo trata sobre la distancia de las estrellas: una especie de revisión de todos los argumentos astronómicos de la época sobre la cuestión. También desarrolla sus propios argumentos, sus propias ideas; la meta es obtener información, lo que hoy llamaríamos “datos”, a partir de sistemas de estrellas dobles, cuya existencia probable establece:

Lo que quiero decir es que, por la situación aparente de las estrellas en el cielo, hay una probabilidad grande, ya sea por el acto original del Creador, ya sea como consecuencia de alguna ley general (como la gravedad, por ejemplo), de que se encuentren agrupadas en gran número en algunos lugares del espacio, mientras que en otros haya pocas o ninguna.

En suma: ¿están agrupadas físicamente (¿gravitatoriamente?) las estrellas que vemos juntas en el cielo, o sólo se trata de un efecto fortuito debido a la perspectiva? Y, si realmente están agrupadas, ¿se trata de un hecho estadísticamente banal o es algo excepcional, que requiere explicación? Michell mostrará que con frecuencia se trata de parejas físicas y no ópticas.¹⁷ Evidentemente, Michell tiene su propia idea: cree que se trata de estrellas que tienen una buena razón para estar agrupadas, y cree que tal razón es la gravedad. Sin embargo, empieza aplicando un razonamiento probabilístico a la distribución de las estrellas: la probabilidad de que una estrella particular esté situada a menos de un grado de cualquier otra es casi igual a la razón entre el área de un círculo cuyo radio sea el arco subtendido por un grado y el área de toda la esfera celeste; dicha probabilidad resulta ser de $13\ 130/13\ 131$. Las cosas se complican pronto, pues Michell calcula la probabilidad de que, dadas n estrellas, haya al menos dos que se encuentren a menos de un grado de distancia. No comentaremos aquí los errores de Michell; no tienen nada de sorprendente, pues estas cuestiones son muy sutiles y la teoría de la probabilidad está en pañales.

Michell aplica su método a dos estrellas particularmente brillantes de Capricornio, a menos de $3' \frac{1}{2}$ una de la otra; de acuerdo con Michell, en todo el cielo no hay más que 230 estrellas así de brillantes. El cálculo muestra que hay una probabilidad enorme de que no haya dos estrellas tan brillantes tan cercanas. Después trata el caso de las seis estrellas más brillantes de las Pléyades; sólo hay 1 500 estrellas con un brillo igual o mayor que el suyo. Deduce que hay una probabilidad de $1/500\ 000$ de que seis estrellas entre esas 1500, suponiéndolas distribuidas al azar, estén a una distancia angular tan pequeña. Por lo tanto, es muy probable que dichas estrellas estén próximas físicamente (y no sólo angularmente), y debe haber una razón para dicha cercanía:

Podemos entonces concluir con la mayor probabilidad [...] que las estrellas están agrupadas en nubarrones, en ciertos lugares donde forman una especie de sistemas, mientras que en otros lugares son poco numerosas o inexistentes [...]. Y se sigue la conclusión de que es sumamente probable en este caso particular, y casi

seguro en general, que tales estrellas dobles, [...] que parecen estar formadas por dos o más estrellas muy cercanas entre sí, consistan realmente en estrellas muy cercanas entre sí...¹⁸

LAS ESTRELLAS DOBLES: LA OBSERVACIÓN

En esa época, Herschel no quiere creer en el razonamiento de Michell. Ha observado ya una gran cantidad de estrellas dobles, y su primer catálogo de ellas, publicado en 1782, acaba de ser presentado a la Real Sociedad. Sin embargo, él considera que tales estrellas no son vecinas, sino que casualmente resultan estar casi alineadas respecto a la Tierra. Esta opinión tiene una razón de ser: está apegada a sus “dobles ópticas”, una cercana y otra alejada, que son un buen medio para detectar el paralaje, pues la estrella más alejada, relativamente fija, serviría de referencia para detectar el movimiento de la estrella más cercana. La idea procede de Galileo:

No creo (nos dice Salviati en la “Tercera jornada” del *Diálogo*) que las estrellas estén diseminadas sobre una sola superficie esférica, a una misma distancia del centro; pienso que sus distancias respecto a nosotros varían mucho; algunas pueden estar dos o tres veces más alejadas que otras. Entonces, si encontráramos con ayuda del telescopio una estrella pequeña, y por lo tanto muy alta, muy cercana a una de las estrellas más grandes, podría suceder que hubiera un cambio perceptible en su movimiento, como el que se produce en los planetas superiores.¹⁹

Así, el método en cuestión permitirá detectar movimientos aparentes que reflejen el del Sistema Solar, como lo explica Bradley en 1749:

Si concebimos que nuestro propio Sistema Solar puede cambiar de lugar respecto al espacio absoluto, podría darse, con el paso del tiempo, un cambio aparente en la distancia angular de las estrellas fijas; en ese caso, las estrellas más cercanas serían más afectadas que las lejanas, y sus posiciones relativas podrían modificarse.²⁰

En suma, se trata de un efecto de perspectiva, un paralaje limitado a esas dos estrellas: como el observador está sujeto al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, la posición de la estrella más cercana cambia más a lo largo del año que la posición de la estrella lejana, menos afectada por la perspectiva, así que la primera parece circundar a la segunda. Tal es una técnica muy precisa para detectar movimientos propios de las estrellas y es la razón de que Herschel, que necesita a las dobles ópticas, no quiera que sean dobles físicas; no creará en la hipótesis de Michell durante 20 años. Sin embargo, en 1803, 20 años después de la publicación de su primer catálogo, Herschel se pronuncia en favor de Michell²¹ y publica una serie de observaciones de Cástor que muestran un cambio en la posición de ambas componentes de dicho sistema doble, el cual no deja lugar a dudas: es claro que ambas estrellas orbitan una alrededor de la otra. Herschel es incluso capaz de deducir el periodo de revolución, pero no tiene suficientes datos para determinar las órbitas. No obstante, es claro que se trata de dos estrellas sometidas a su atracción mutua y cuyas trayectorias deben, como las de los planetas alrededor del Sol, seguir las leyes de Kepler. Por primera vez la ley de la gravitación de Newton encuentra

una aplicación más allá del Sistema Solar. Así, al final de la década de 1820, Friedrich Struve, entonces director del observatorio ruso de Dorpat [Tartu, actualmente en Estonia], corrigió y amplió las observaciones de Herschel relativas a las estrellas dobles.²² Finalmente, en 1827 Félix Savary consiguió determinar la trayectoria relativa de las dos componentes de ξ -Ursae: claramente una elipse kepleriana.

Herschel, quien según sus propias palabras había “llevado la mirada más lejos en el espacio que ningún ser humano antes [que él]”, plantea a principios del siglo XIX la cuestión de una visión espacio-temporal del espacio, revolucionando la concepción que se tenía del universo: “Cuando vemos un objeto [...], una de esas nebulosas muy lejanas [...], los rayos luminosos que conducen su imagen al ojo han estado en camino durante [...] casi dos millones de años y así, en consecuencia, dicho objeto debía existir en el cielo en ese entonces, para poder emitir los rayos que percibimos hoy día”.²³ Ya Euler le escribía en 1768 a una “princesa de Alemania” que “al ver de noche una estrella fija, incluso la más brillante, que probablemente sea la más cercana, los rayos que entran al ojo de V[uestra] A[lteza] para representar dicha estrella han partido de ella desde hace seis años, pues ese tiempo les ha tomado llegar hasta nosotros”.²⁴

PESAR EL MUNDO

El 27 de mayo de 1783, Cavendish le escribe a Michell a propósito de su artículo sobre la distancia de las estrellas. Después de preguntar por la salud de su amigo, Cavendish aborda el tema de sus progresos en la construcción de su telescopio: “Si debido a su salud no puede usted continuar, espero que ésta le permita cuando menos la tarea más sencilla, menos laboriosa, de pesar el mundo, y, por mi parte, yo no sé si preferiría tal vez que hubiera usted avanzado en dicho experimento, más que escuchar que ha terminado su gran telescopio”.²⁵ Se trata de la balanza de torsión,²⁶ concebida para medir las fuerzas de gravitación y que Cavendish mejorará, llevando finalmente a cabo el experimento que proyectara Michell. En el artículo dedicado a ese tema que publicó Cavendish en 1798, hacía notar:

Hace muchos años, el difunto reverendo John Michell [...] inventó un método para determinar la densidad de la Tierra, midiendo la atracción de pequeñas cantidades de materia; sin embargo, como estaba dedicado a otras investigaciones, no terminó de construir el aparato sino poco antes de su muerte, y no vivió lo suficiente para llevar a cabo experimento alguno.²⁷

Cavendish no sólo recuperó el aparato después de la muerte de Michell, sino que, retomando su método y mejorando considerablemente la balanza, realizó una larga serie de experimentos delicados, muy precisos para la época. El aparato en cuestión permitía medir la fuerza de atracción ejercida por grandes esferas de plomo (de ocho pulgadas de diámetro y 350 libras de peso) sobre esferas menores con un diámetro de sólo dos pulgadas. Las esferas pequeñas estaban suspendidas, por un hilo muy delgado, del astil de una balanza de torsión. Se trataba de medir la amplitud de las vibraciones provocadas

y después sostenidas por la fuerza de gravedad que ejercían las esferas grandes sobre las pequeñas. Según lo explica Cavendish en su artículo, “como la fuerza con que las bolitas son atraídas hacia las esferas grandes es muy débil, no mayor que 1/50 000 000 de su peso, es claro que una pequeña fuerza perturbadora bastará para anular el éxito del experimento”.²⁸ También está consciente de que es indispensable prevenirse contra las variaciones en la temperatura: “Convencido de la necesidad de evitar esa fuente de error, decidí colocar el aparato en una cámara constantemente cerrada, observar desde afuera el movimiento del astil por medio de un telescopio y colocar el peso de plomo de manera que pudiera moverlo sin entrar en la cámara”.²⁹

Cavendish lleva a cabo sus experimentos en 1797 y publica su artículo al año siguiente. Estima “muy probable que la densidad de la Tierra no difiera de 5.48 en más de una parte en 14”.³⁰ Notemos de paso que, contrariamente a lo que suele afirmarse, Cavendish no determina el valor de G , la constante de gravitación, aunque fuera muy sencillo obtenerlo a partir de su cálculo de la densidad de la Tierra; no era su manera de ver las cosas. Termina su artículo con una referencia a los experimentos de desviación de una plomada debida a la atracción de la montaña Schiehallion [Sídih Chailleann], realizados por Nevil Maskelyne en 1775, según los cuales “la densidad de la Tierra sería cuatro veces y media la del agua”. Finalmente, se preocupa por saber si “la fuerza de gravedad sigue exactamente la misma ley que a grandes distancias”. No observa que la fuerza varíe en razón inversa al cuadrado de la distancia, pues hace variar ésta “sin que el resultado se vea afectado”.³¹

VIII. MICHELL Y LA LUZ

LA ÓPTICA DE LOS CUERPOS EN MOVIMIENTO EN UN CONTEXTO CORPUSCULAR

Parafraseando a una persona que será esencial durante el siglo XIX, los trabajos publicados en el siglo anterior sobre la luz y su movimiento, es decir, sobre la óptica de los cuerpos en movimiento desde un contexto corpuscular, son poco numerosos. Los artículos teóricos se consagran principalmente a la refracción, cuyo armazón está constituido por la “teoría de la emisión”, versión “reducida”, monocromática, de la teoría corpuscular de Newton.¹ Se trata de una balística de la luz, de una aplicación de la dinámica de los *Principia*. Dichos trabajos suponen que la velocidad de la luz varía. No solamente puede variar desde un punto de vista teórico, sino que *debe* variar: no hay razón para que sea constante, no puede serlo. Sin embargo, las observaciones de Rømer, de Bradley y, más tarde, de Delambre dan a entender que la velocidad de la luz es constante, a reserva de la precisión de los instrumentos, a pesar de todo lo que debería hacerla variar: movimiento de la fuente, movimiento del observador, acción de la gravedad.² Hay entonces una contradicción entre la teoría y la observación, pero no se hace hincapié en ella: ningún artículo se preocupa por dicha cuestión, casi nadie se interesa por la cinemática de la luz.

John Michell es el primer físico en comprender que, mediante el ángulo de refracción, el prisma es una herramienta para medir, si bien no la velocidad de la luz, cuando menos su variación. Sin embargo, no parece plantearse la cuestión de la cinemática de la luz. No hace sino utilizar lo que llamará su “método”, que de hecho se anticipa al efecto Doppler-Fizeau. Serán Robert Blair y François Arago, de cuyos trabajos trataremos en los capítulos siguientes,³ quienes abran la puerta a la cinemática clásica de la luz, a la óptica de los cuerpos en movimiento en el marco de los *Principia*. Si se lo compara con la amplitud de las obras de la época que tratan el fenómeno desde un punto de vista ondulatorio, el conjunto de los trabajos fundamentales dedicados a la óptica de los cuerpos en movimiento en un contexto newtoniano no es más que un pequeño acervo: en el siglo XIX se publicarán una gran cantidad de artículos al respecto.⁴ En lo que respecta a la obra de Newton, ésta caerá en el olvido más completo después del advenimiento de la teoría ondulatoria; hasta la fecha sigue siendo prácticamente desconocida tanto por los físicos como por los historiadores. Los trabajos de Michell no tuvieron resonancia sino en astronomía, y los de Blair fueron simplemente incomprensidos, olvidados, despreciados. Solamente los de Arago, mal interpretados, tuvieron una influencia verdadera, principalmente por haber abierto la puerta a los de Fresnel; incluso el artículo fundamental de Arago sobre el tema no fue publicado por primera vez hasta 50 años después de escrito. Se trata entonces de un conjunto de obras

desechado, de un tema ignorado y que aquí exploraremos: la óptica (clásica) de los cuerpos en movimiento. No obstante, es el mismo tema que, en otro contexto, conducirá a Einstein a la relatividad especial.

Se trata de un conjunto de trabajos extremadamente bien argumentados, coherentes, que descansan sobre bases sólidas. Aún más, se trata de trabajos de una calidad especial: no se encuentra ningún error conceptual ni de cálculo; son obras simplemente espléndidas en el contexto al que pertenecen. Todos sus autores imaginaron, y en ocasiones realizaron, experimentos no sólo interesantes, sino con frecuencia impresionantes; si bien los resultados fueron negativos, esto se debió siempre a razones técnicas, pues estaban adelantados a su época. Experimentos parecidos se han llevado a cabo en épocas recientes en otro marco de referencia, como veremos al final del libro (capítulo XV). Unas pocas palabras bastarán para formarse un juicio: desde 1772, Michell aplica a la luz la teoría de la gravitación de Newton y, entre otras consecuencias, planteará en 1784 las bases de la idea de “cuerpo oscuro”, los modernos “agujeros negros”. Hace notar que, según la teoría corpuscular de la luz de Newton, el prisma permite medir la variación de la velocidad de la luz. Propone medir la diferencia entre la velocidad de la luz procedente de las dos componentes de una estrella doble, con el fin de estimar la distancia y la masa de dichas estrellas. El artículo de Michell será el origen del trabajo de Blair, quien en un manuscrito de 1786 que nunca será publicado comprende el interés de dicho “método”, con el cual debería poderse calcular la velocidad radial de los planetas, el Sol y las estrellas, así como su velocidad de rotación: lo que hoy llamamos efecto Doppler-Fizeau. Además, en el mismo trabajo observa que la óptica ondulatoria implica la posibilidad de medir la velocidad de la Tierra en un cuarto cerrado, planteando así las bases del experimento de Michelson. Explicita, y será el único en hacerlo, la cinemática clásica de la luz, calcada de la cinemática de las partículas materiales. Arago llevará a cabo el experimento cuyas bases propone Blair, aunque interpretará los resultados de manera insuficiente. Esto dará pie a los trabajos de Fresnel. Podemos incluso añadir a dicho conjunto de obras el artículo de Johann Georg von Soldner de 1801, quien a partir de la teoría de Michell sobre la acción de la gravitación sobre la luz calculará la desviación de ésta al pasar cerca de un cuerpo celeste (en un marco newtoniano): efecto crucial en la relatividad general de Einstein. Podemos entonces vislumbrar las relaciones entre esta física newtoniana de la luz, que desaparece al final del siglo XVIII, y la física relativista de Einstein, que aparecerá a principios del siglo XX.

LUZ Y GRAVITACIÓN

Joseph Priestley (1733-1804) es un curioso personaje que, como muchos de sus contemporáneos, reparte su tiempo entre la teología y la ciencia. Desde su adolescencia rechaza la religión calvinista familiar y se adhiere a la iglesia presbiteriana. Es un predicador extremadamente activo; abre una escuela disidente donde enseña tanto letras

como ciencias. Habita en Leeds, en el corazón de una región ya por entonces muy industrializada, a pocas leguas de Thornhill, donde Michell es rector, y lo visita en calidad de vecino. Teólogo, filósofo y físico, muy conocido por haberse opuesto a la química de Lavoisier, Priestley pertenece a la “Lunar Society”,⁵ sociedad informal de intelectuales provincianos, compuesta por científicos e industriales, uno de los cuales es James Watt. Se casa en 1762 con Mary Wilkinson, hija y hermana de los grandes señores de las fundiciones inglesas del siglo XVIII. Científicamente cercano a John Michell, publicará en 1772 una *Historia de la óptica*, síntesis muy bien documentada sobre el estado de la disciplina. Tres años después publicará una revisión de la misma amplitud sobre la electricidad. Ingresa en la Real Sociedad en 1766, poco después de John Michell, quien es nueve años mayor que él.

En su obra sobre la historia de la óptica, a la que contribuirá Michell, aborda Priestley la cuestión de la emisión, “de la fuerza por la cual la luz es emitida por los cuerpos luminosos”,⁶ a partir de cálculos “sobre estos temas tan curiosos [que le] fueron comunicados por Mr. Michell”, quien “tiene el proyecto de hacer una suerte de comparación entre esa fuerza [de gravedad en la superficie del Sol] y aquella por la cual la luz es emitida, reflejada, refractada, etc.”⁷ En esencia, se trata de comparar las dos fuerzas que Newton ha situado en la base de su física: la fuerza de gravitación y la fuerza *refringente*, responsable de los fenómenos de emisión, refracción y reflexión. Michell deduce que la relación entre ambas fuerzas es “casi exactamente como 19 000 000 000 000 000 000 a 1”, es decir, del orden⁸ de 1.9×10^{19} . De esta forma, la fuerza de emisión, mediante la cual “la luz es expulsada de los cuerpos”, es una fuerza “sorprendente” que constituye también la causa de la resistencia que la luz encuentra en la superficie de ellos, “lo que generalmente llamamos impenetrabilidad de los cuerpos”, ya que, “cualquiera que sea la fuerza necesaria para producir tal velocidad, se requerirá la misma fuerza para detenerla”.⁹ En cuanto a la fuerza refringente, “por la cual los rayos de luz son refractados al pasar de un medio enrarecido a otro más denso”, debe ser aún mucho mayor, pues es ejercida sobre una extensión tan delgada como “la 70 000^a u 80 000^a parte de una pulgada”.¹⁰ Doce años después publica Michell un artículo de una riqueza y un ingenio impresionantes. Describe dos efectos nuevos, fundamentales: la acción de la gravitación sobre la luz y el efecto de la velocidad sobre la refracción, antecedente del efecto Doppler-Fizeau; propone además un experimento espléndido que depende de ambos efectos. El objetivo de Michell es adquirir un conocimiento más preciso sobre algunas estrellas fijas: su distancia, su magnitud y su masa, como lo nota en la carta dirigida a Henry Cavendish que sirve de introducción a su artículo, leída el 27 de noviembre de 1783 ante la Real Sociedad y publicada al año siguiente.

En la *Opticks* que Newton publica en 1704 en inglés,¹¹ y más precisamente en las famosas “Preguntas que sirven de conclusión a toda la obra”, aparece un texto misterioso, frecuentemente citado como el origen de las especulaciones y los estudios referentes a la acción de la gravedad sobre la luz en un contexto newtoniano: “¿Acaso los cuerpos no actúan a cierta distancia sobre la luz? ¿Y acaso no desvían los rayos de luz

mediante su acción? ¿Y acaso no es dicha acción más fuerte cuanto menor es la distancia, si los demás parámetros no varían?”¹² Lo anterior implica claramente un efecto de desviación de la luz, pero se refiere a la acción a corta distancia de la gravedad sobre la luz, a la fuerza refringente, y no a la fuerza de gravitación. Más que dicho extracto del *Opticks*, que por otra parte no cita, sin duda es la universalidad de la fuerza de gravitación el origen del interés de Michell en su artículo de 1784. Para Michell, no hay razón de que los corpúsculos luminosos no estén, como los corpúsculos materiales, sometidos a la gravitación, y reivindica la paternidad de la idea haciendo referencia a la *Historia de la óptica*:

El método que le indiqué —menciona en la carta a Cavendish que sirve de introducción a su artículo— la última vez que estuve en Londres, mediante el cual sería posible encontrar la distancia, la magnitud y la masa de algunas estrellas fijas a partir de la disminución de la velocidad de la luz, se me ocurrió justo después de haber escrito lo que menciona el doctor Priestley en su *Historia de la óptica* respecto a la atracción solar.¹³

La disminución de la velocidad de la luz que implica la acción de la gravitación puede proporcionar un elemento suplementario para tratar de determinar la distancia de ciertas estrellas, una aplicación en la que ya había pensado él, dice, pero que no había seguido a causa de “la extremada dificultad”, si no es que incluso “la imposibilidad”, de obtener por entonces los otros datos necesarios.

Como los *Principia* de Newton, a los que por supuesto hace referencia desde las primeras páginas del artículo, los argumentos de Michell están estructurados en proposiciones y corolarios, expresados de manera geométrica. Michell “supone que las partículas de luz son atraídas del mismo modo que los otros cuerpos”.¹⁴ Tal es una hipótesis natural, muy razonable en el marco de la teoría newtoniana de la gravitación, aunque la mayoría de los físicos no la comparta. La teoría de Newton es ambigua al respecto, y permite que la luz sea o no sea sujeta a la gravitación. Sucede que no es necesario conocer la masa de un corpúsculo (siempre y cuando sea lo bastante pequeña para no perturbar el campo gravitatorio al que está sometida) para determinar su movimiento. El trabajo de Michell consiste en varias proposiciones encaminadas a determinar los efectos que podrían producirse si existieran los “cuerpos oscuros”, en particular la disminución de la velocidad de emisión de la luz debido a la fuerza de gravedad.

LOS CUERPOS OSCUROS

En efecto, es Michell quien, en ese mismo artículo, pensó y teorizó sobre los “cuerpos oscuros”, y no Laplace, quien se abstuvo de citar a su inventor, cuyo trabajo probablemente conocía, pero tuvo, sin embargo, la buena idea de darles un nombre en las primeras ediciones de la *Exposición del sistema del mundo*:

Así, en los espacios celestes existen cuerpos oscuros tan considerables, y posiblemente en tan grande

número, como las estrellas.

Un astro luminoso de la misma densidad que la Tierra y con un diámetro 250 veces mayor que el del Sol tendría una fuerza de atracción gravitatoria tan grande que no permitiría que ningún rayo luminoso llegara hasta nosotros; entonces es posible que los mayores cuerpos luminosos del universo sean invisibles para nosotros.

Una estrella que, sin llegar a tal tamaño, sobrepasara considerablemente al del Sol debilitaría sensiblemente la velocidad de la luz, aumentando así la extensión de su aberración.¹⁵

Tres años después, precisamente en 1799, Laplace, en un artículo publicado en alemán, retomará dicho cálculo, no de manera geométrica, como Michell, a quien no cita, sino de forma algebraica. En efecto, en su artículo de 1784 y en el marco de la acción de la gravedad sobre la luz, Michell hace notar, no sin haber calculado antes todas las cifras con gran precisión, que “si el radio de una esfera con la misma densidad que el Sol fuera 500 veces mayor que el de éste, un cuerpo que cayera desde una altura infinita hacia él habría adquirido en la superficie una velocidad mayor que la de la luz, de manera que, si suponemos que la luz es atraída por la misma fuerza [...] como los otros cuerpos, toda la luz emitida por tal cuerpo regresaría a él, debido a su propia gravedad”.¹⁶ Y añade que “si el diámetro de dicho cuerpo no fuera inferior a 500 veces el del Sol, su luz [...] no podría alcanzarnos jamás”. He ahí una afirmación realmente sorprendente, y por lo tanto citada con mucha frecuencia, que muestra que Michell es claramente el fundador del concepto de “cuerpo oscuro”, muy similar a los objetos que hoy día llamamos, en el marco de la relatividad general, “agujeros negros”.

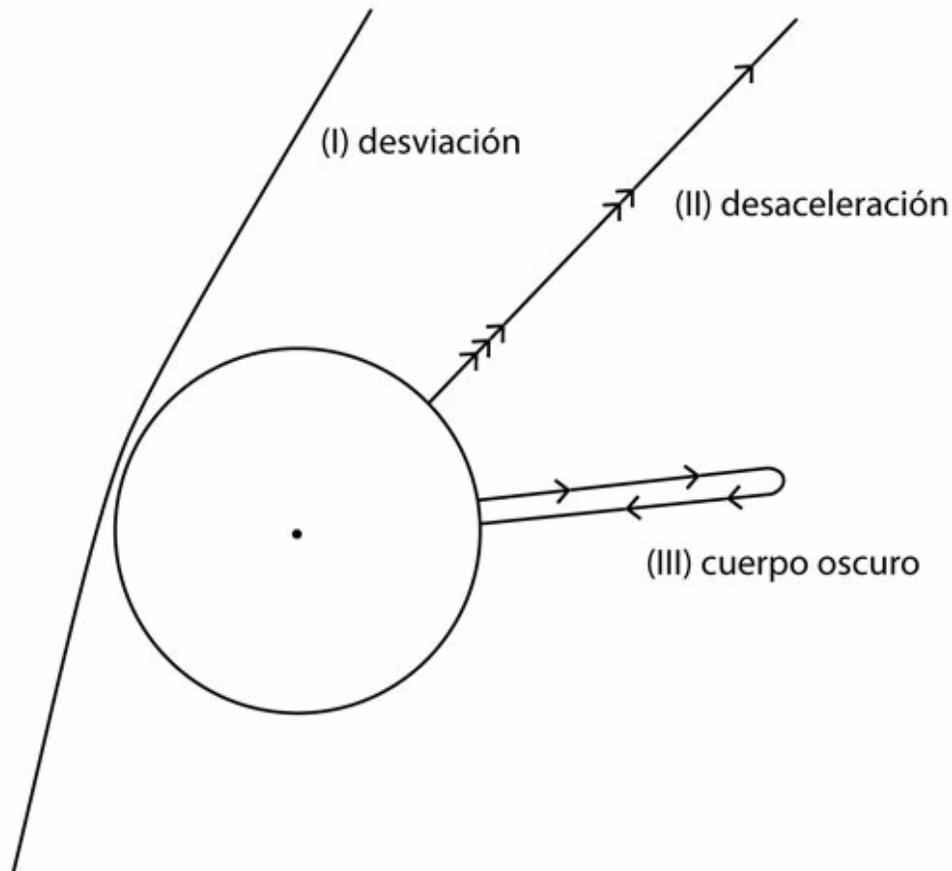


FIGURA VIII.1. Luz y gravitación en el siglo XVIII.

El corpúsculo luminoso sujeto a la gravitación. Un corpúsculo luminoso es desviado al pasar cerca de un cuerpo masivo (I); la velocidad del corpúsculo luminoso emitido por un astro se ve disminuida (II); puede incluso ser detenido y, finalmente, regresar a la estrella (III).

El propio efecto físico en sí es muy fácil de comprender, pues se trata de balística gravitatoria: el corpúsculo luminoso se comporta de la misma manera que una piedra lanzada al aire, cuya velocidad disminuye poco a poco hasta que la piedra se detiene y cae nuevamente hacia el cuerpo central desde el que fue lanzada. Es la idea de un “cuerpo oscuro”. Basta que la fuerza de gravedad sea lo suficientemente fuerte para detener a la luz. Los cálculos de Michell son perfectamente claros: dada la velocidad de emisión de la luz, bastaría que la masa del Sol fuera lo suficientemente grande (¡de hecho, inmensa!). Su formulación, muy expresiva, es consecuencia de desarrollos precisos y correctos. En esencia, muestra que una estrella considerablemente más masiva que el Sol (de un radio 497 veces mayor, es decir, una masa $497^3 = 122\,763\,473$ mayor) haría que sus rayos de luz regresaran a ella. Sin embargo, Michell no se limita a esta apreciación de su efecto, sino que hace explícito un rasgo esencial de los cuerpos oscuros que se convertirá en una característica fundamental de los agujeros negros: los cuerpos oscuros son invisibles, pero no son indetectables, pues su impresionante campo gravitatorio no puede ser ignorado por sus eventuales vecinos. El texto de Michell es

simplemente espléndido:

Si existieran realmente en la naturaleza cuerpos cuya densidad no fuera menor que la del Sol y cuyo diámetro fuera cuando menos 500 veces el del Sol, su luz no podría alcanzarnos; lo mismo sucedería si existieran otros cuerpos de talla ligeramente inferior, que no emitieran luz propia; de la existencia de cuerpos con alguna de esas dos características no podríamos tener información visible; sin embargo, si sucediera que algún otro cuerpo luminoso girara alrededor de uno de ellos, sus movimientos nos permitirían tal vez deducir la existencia del cuerpo central con cierto grado de probabilidad; eso también podría ser la causa de algunas irregularidades en la traslación de ciertos cuerpos, que no pueden explicarse fácilmente mediante otras hipótesis; sin embargo, como las consecuencias de tal suposición son evidentes y sus consideraciones se desvían un poco de mi meta actual, no continuaré tratando el tema.¹⁷

Debe insistirse en la extraordinaria modernidad de este texto, donde, gracias a una confianza absoluta en la teoría de Newton, Michell propone que un cuerpo oscuro podría esclarecer las irregularidades de planetas cuyas perturbaciones fueran inexplicables. Empero, no parece que dicha idea haya sido retomada jamás en un marco clásico, ni en lo que concierne a las irregularidades de Urano resueltas con el descubrimiento de Neptuno en 1846, ni en lo referente a las irregularidades de Mercurio justificadas en 1915 al reemplazar la teoría newtoniana por la teoría de la gravitación de Einstein. De hecho, tal visión es aún más sutil que la de Le Verrier y Adams, pues el astro en cuestión, responsable de la perturbación, permanece indetectable. Sin duda es por el abandono de la teoría newtoniana de la luz a principios del siglo XIX, necesaria para la idea de la desaceleración gravitatoria de la luz propuesta por Michell, por lo que dicha hipótesis no fue retomada ni para Urano ni para Mercurio. Sin embargo, actualmente la utilizan en forma cotidiana los astrónomos, que inventan agujeros negros a discreción para explicar la masa que falta en algún cúmulo o incluso en el universo.

Los cuerpos oscuros son modestos en comparación con los “agujeros negros”, sus primos relativistas, si recordamos lo difícil que ha sido pensar dichos objetos extraños en el marco de la relatividad general.¹⁸ Es verdad que los cuerpos oscuros no permiten pensar en los agujeros negros de manera geométrica (pues se requiere un espacio curvo, riemanniano), pero en cambio dan pie a comprender de manera sencilla la física a la que están sujetos, lo que no sucede con la relatividad general... La idea física es la misma en el fondo: la luz está formada por corpúsculos sujetos a la fuerza gravitatoria. Los cuerpos oscuros son la expresión clásica de esa física relativista de los agujeros negros, poco menos que extraordinaria. No obstante, con cierta saña podría uno preguntarse si los objetos de los que hablan primero Michell y luego Laplace son realmente los “mismos” objetos tratados por Penrose, Wheeler, Hawking... Los puristas apuntarán con razón que se trata de conceptos pertenecientes a dos teorías distintas, cuyos principios tienen poco en común, de manera que son, como estructuras teóricas, “inconmensurables”. Sin embargo, si dichos cuerpos oscuros hubieran sido (indirectamente) “observados” antes del nacimiento de la relatividad general, se habría pensado con toda razón que Michell había predicho su existencia... Y no con menos razón se habría creído, al llegar la teoría de Einstein, que ésta daba al fenómeno una mejor explicación que la teoría newtoniana.

Sin duda, eso habría acelerado la comprensión del concepto de agujero negro en el marco teórico de la relatividad general...¹⁹

¿CÓMO MEDIR UNA DIFERENCIA EN LA VELOCIDAD DE LA LUZ?

Regresemos a Michell y su artículo de 1784, en el cual menciona brevemente el tema de los cuerpos oscuros. Su propósito es más preciso, pues considera el caso de una estrella cuya masa es insuficiente para retener toda la luz que emite, de manera que sólo reduce su velocidad: “Pero si el radio de una esfera con la misma densidad que el Sol fuera menor de 497 veces el del Sol, aunque la luz emitida por tal cuerpo no pudiera ser detenida por completo, su velocidad no dejaría de sufrir cierta disminución, mayor o menor según el tamaño de la esfera en cuestión”.²⁰ Aunque sólo proporcione (como era frecuente en la época) datos concretos, y a pesar de su estilo un tanto pomposo, es claro que Michell tiene la fórmula exacta, expresada en forma geométrica, para calcular la disminución en la velocidad de la luz debida a la atracción gravitatoria, fórmula que aplica también al Sol: “De tal manera, la disminución en la velocidad de la luz emitida por el Sol, producida por la atracción gravitatoria de dicho cuerpo, será un poco menor de 1/494 000 de la velocidad que tendría si tal disminución no existiera”.²¹

Pero esto no es más que la entrada. Michell utiliza entonces su otro efecto, el efecto “velocidad-refracción”, para medir la disminución en la velocidad de la luz debida al campo gravitatorio de una estrella, con la esperanza de averiguar la masa y, sobre todo, la distancia de dicha estrella, lo que es su verdadero proyecto. Como se vio en el capítulo IV, la ley de la refracción (la ley de los senos) implica, según la teoría corpuscular de Newton, que la velocidad de la luz incidente en un cristal es el parámetro de la refracción. Cuanto mayor sea la velocidad incidente, menor será el ángulo de refracción, y viceversa. Mejor aún: dos ecuaciones, la mencionada ley de los senos y una ley de fuerza aplicada al corpúsculo luminoso, permiten calcular la variación del ángulo de refracción en función de la velocidad de la luz incidente. Hasta entonces nadie, ni Newton ni Clairaut, había reparado en ese efecto fundamental. Al ser la velocidad de la luz el parámetro de la refracción, Michell hace notar que un “prisma con un ángulo de refracción pequeño podría no ser un mal instrumento para ese fin”.²² Sin embargo, no descarta la idea de un instrumento con “un ángulo refringente mucho mayor”, que permitiría medir desviaciones más sutiles, en particular si estuviera construido “de forma acromática, según los principios del señor Dollond”. El acromatismo será, según veremos después, uno de los puntos problemáticos en cuanto a la medición de dicho efecto. En suma, Michell se dio cuenta de que el prisma es buen instrumento para medir las diferencias en la velocidad de la luz. Tal es el efecto cuya existencia propone y que no es otro, como veremos en el próximo capítulo con Blair, que el efecto Doppler-Fizeau considerado en el marco de la teoría corpuscular de Newton. Blair, retomando las ideas de Michell, desarrollará todas las consecuencias posibles en cuanto a cinemática y descubrirá, más de 60 años antes que Fizeau, la manera de medir la velocidad radial del

Sol, de los planetas, de las estrellas. Es en este momento, antes de que Arago retome las ideas de Blair a principios del siglo XIX, cuando el prisma comienza la larga carrera que lo llevará a convertirse en el espectroscopio, la herramienta esencial del astrónomo moderno.

Michell no se equivocará: ese efecto, ese “principio”, es un descubrimiento de tal importancia que prefiere mantenerlo secreto por un momento. El 26 de mayo de 1783, el manuscrito de su artículo está en manos de Cavendish, quien le responde al día siguiente:

Sin embargo, me causa pesar que usted desee mantener el principio en secreto. La mejor manera de garantizar el mérito de la autoría es hacerlo conocer tan pronto como sea posible, y quienes actúan de manera distinta son con frecuencia rebasados por otros. Además, en el caso presente no puedo comprender la razón de que usted desee conservar el principio como un secreto, pues el otro día, cuando fue usted a la ciudad, no conservó el principio en secreto alguno, sino que lo mencionó abiertamente en nuestras reuniones de los martes y, si no me equivoco, en otros lugares; desde entonces, he oído hablar de él con frecuencia.²³

Un mes después, Michell aceptó las objeciones de Cavendish: “Creo que tiene usted razón [...] cuanta más gente lo vea, es mejor”. Y continúa con la historia detallada de sus ideas, sus dudas y sus miedos. Durante su estancia en Londres (donde cada año pasaba una temporada) oyó hablar “del descubrimiento de gran cantidad de estrellas dobles hecho por Herschel” y tuvo la idea de que “la disminución en la velocidad de la luz podría ser la razón de ciertas observaciones”. Sin embargo, “ciertamente no mencionó el esquema del prisma”. Sucede que Michell no es un sabio extrovertido: es desconfiado, solitario, poco sociable. A principios de agosto, Cavendish le agradece su carta y le informa que “les he mostrado su artículo a algunos de nuestros amigos, en particular al doctor Maskelyne”. De esta manera, el “método” de Michell fue discutido en un pequeño círculo donde encontramos, por supuesto, a Cavendish, pero también a Herschel, Maskelyne (entonces astrónomo real) y Priestley. Sin duda, el círculo se amplió pronto, pues Robert Blair oyó también hablar de él, y le dio un uso excelente.

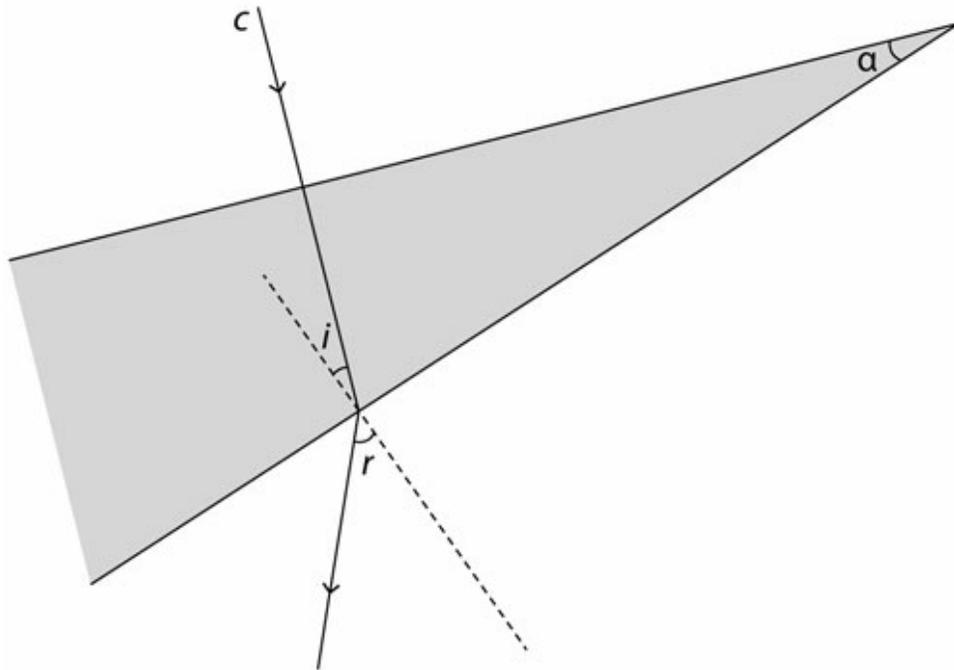


FIGURA VIII.2. El “método” de Michell. El haz de luz llega de modo perpendicular a la primera cara del prisma. El ángulo de incidencia, i , es constante e igual al ángulo del prisma, α . Toda variación en la velocidad de la luz incidente, c , implica una variación en el ángulo de refracción, r .

Así, Michell dispone de dos efectos relacionados con la velocidad de la luz. Por una parte, si la luz está sujeta a la gravedad, la velocidad de la luz emitida por una estrella se ve alterada. Por otra parte, la variación en la velocidad de la luz implica una variación en el ángulo de refracción. De esta manera, la variación de la refracción, debida a la variación en la velocidad de la luz, se relaciona mediante la gravitación con la masa de la estrella emisora. Entonces la medida de la refracción permite conocer la masa de la estrella. He aquí la esencia del proyecto de Michell: su interés por la velocidad de la luz no es más que un puente entre lo que puede medir, la refracción, y lo que quiere saber, la masa y, sobre todo, la lejanía de una estrella dada. Podría uno admirarse de que Michell haya creído en la posible variación de la velocidad de la luz a pesar de la casi certidumbre que se tenía por entonces de que era constante (debido a que el ángulo de aberración máximo es también constante),²⁴ certidumbre compartida por la gran mayoría de sus colegas y que podría explicar la falta de interés que mostraron por su trabajo. La velocidad de la luz como tema de investigación no estaba de moda por entonces. Sin embargo, ante un escenario donde la precisión en las observaciones de la aberración es todavía dudosa, Michell apela a la autoridad de Newton, cuya dinámica implica que la velocidad de la luz varía. A menos que se dudara de los *Principia*, era probable que la velocidad de la luz no fuera constante, pero había que ser endiabladamente newtoniano para creer en esa hipótesis y, sobre todo, para trabajar con ella. También debe mencionarse que nada más alejado de la tradición británica, cuya física, esencialmente experimental, optaba entonces por la teoría del éter.²⁵

Desde el principio de su artículo, Michell hace referencia a su trabajo de 1767 y al catálogo que Herschel acaba de publicar. Expresa con mucha convicción la certidumbre de que hay una gran cantidad de sistemas de estrellas, en particular las estrellas dobles físicas, que “no pueden dejar duda a quien esté al corriente de la fuerza de estos argumentos”.²⁶

En una gran mayoría, si no es que en todos los casos, se trata de sistemas de estrellas tan próximas entre sí que probablemente se vean afectadas de manera apreciable por la gravedad que ejercen una sobre otra; no es improbable, pues, que los periodos de revolución de algunas de ellas [...] lleguen a ser descubiertos.²⁷

Para mostrar la acción de la gravedad sobre la luz, Michell tiene la idea realmente notable (y moderna) de recurrir a un sistema doble cuyas componentes, de masas muy distintas, ejercerían una influencia también distinta sobre la velocidad de los corpúsculos luminosos que emiten. Se trata de un sistema aún hipotético, pues nada parecido se ha visto hasta entonces. Michell supone que observa con un telescopio de refracción un sistema con dichas características, y que puede distinguir entre los dos haces luminosos, uno procedente de la estrella central y el otro de la estrella satélite. Supone que la estrella central tiene la misma densidad que el Sol y un radio 155 veces mayor. Entonces la masa de la componente central es varios millones de veces ($155^3 = 3\,723\,875$ veces) mayor que la masa de la otra componente, que se supone comparable a la del Sol.

Se trata de un caso ideal: las condiciones fueron elegidas de manera que la velocidad de la luz emitida por la estrella central fuera un vigésimo (un 5%) menor que la de la estrella satélite. Pero, ¿es medible tal efecto? ¿Y cómo? Basta añadir al telescopio un prisma, esa herramienta que Michell ha encontrado útil para medir la variación en la velocidad de la luz. Utilizando un prisma con un ángulo de un minuto,²⁸ espera poder medir la diferencia de refracción entre los dos haces. De ahí deducirá la diferencia en la velocidad de los corpúsculos de ambos haces y la diferencia de masa entre las componentes del sistema doble. A partir de estos datos, Michell calcula con gran precisión, gracias a las fórmulas de refracción que maneja perfectamente, la variación del ángulo de refracción entre las imágenes de ambas estrellas: $2''53''$ de arco. Entonces, se entusiasma Michell, “no sólo sería perceptible una disminución de una parte en 20, sino que probablemente podríamos descubrir disminuciones en la velocidad de la luz considerablemente más débiles, como tal vez una parte en 100, en 200, en 500 o incluso en 1000”.²⁹ Para dar credibilidad a su esperanza, menciona que tales disminuciones podrían ser producidas por estrellas con la misma densidad que el Sol y un diámetro, respectivamente, de 70, 50, 30 y 22 veces el del Sol. Para Michell, creador de “su método”, es un momento esencial, pues por primera vez en la historia de la luz hay un experimento realizable que permite determinar directamente, si bien no la velocidad de la luz, cuando menos su variación. Es uno de los puntos más notables de su artículo.

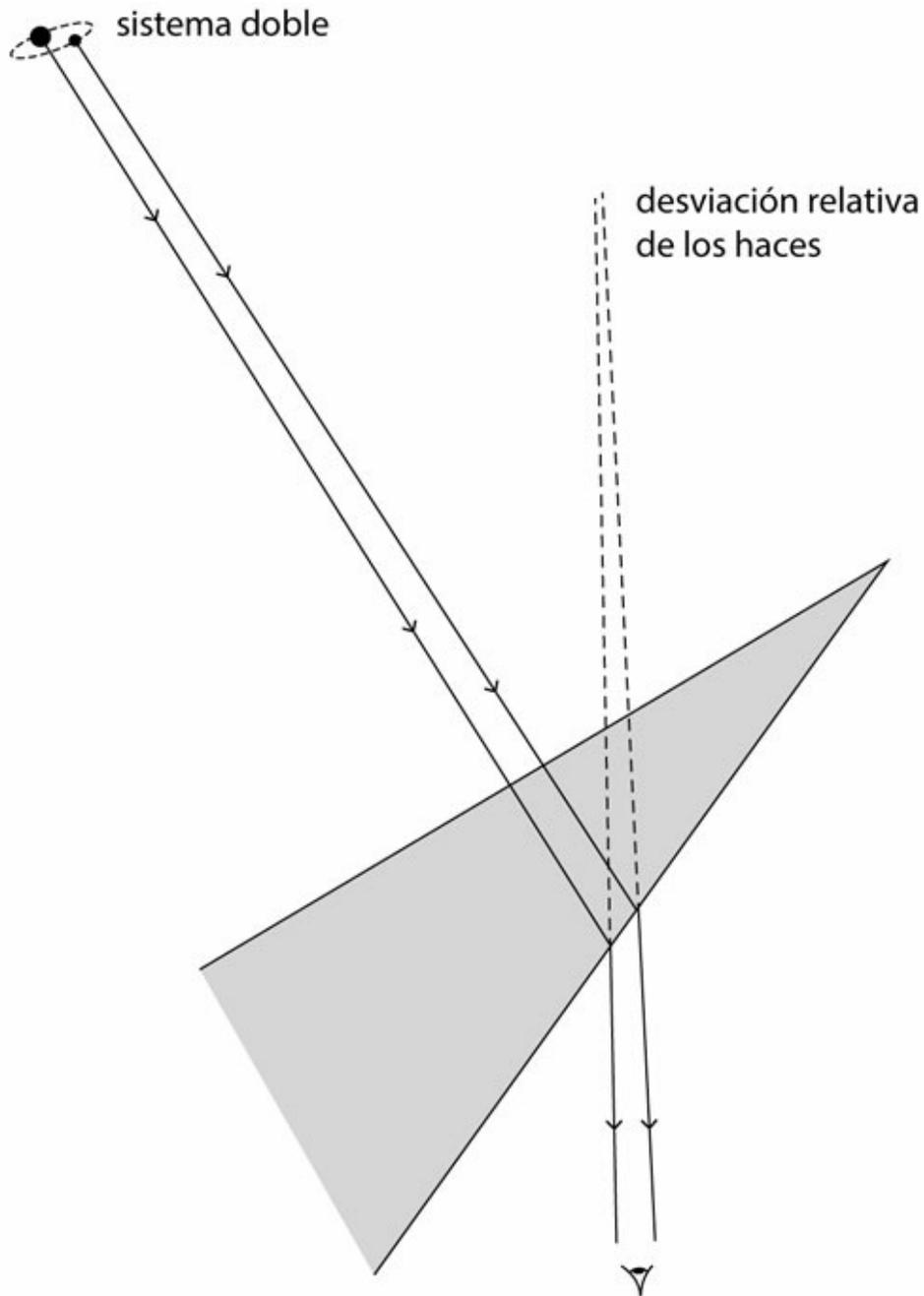


FIGURA VIII.3. El experimento de Michell.

La velocidad de la luz emitida por la estrella central, muy masiva, es menor que la velocidad de la luz procedente de la estrella satélite y, por tanto, queda más desviada por el prisma.

Supongamos, con Michell, que hemos podido medir la diferencia de refracción entre ambos haces. La estrella satélite, cuya masa se supone como la del Sol, tendrá un efecto nimio sobre la velocidad de la luz que emite, pero la masiva estrella central tendrá un efecto notable, proporcional a su masa e inversamente proporcional a su radio (M_e / r_e). Esta disminución en la velocidad de la luz implica un aumento del ángulo de refracción en el haz al pasar por el prisma, mientras que el haz procedente de la estrella satélite

prácticamente no sufrirá cambio alguno.³⁰ Entonces el ángulo entre ambos haces debe proporcionarle, mediante los cálculos requeridos, la razón de la masa de la estrella central y su radio. Sin embargo, hacen falta varios datos para medir la distancia del sistema doble, datos difíciles de conseguir y que constituyen otro obstáculo para su proyecto. Lo explicaremos a grandes rasgos: una vez calculada la razón entre la masa y el radio de su estrella gigantesca, Michell supone que tiene la misma densidad que el Sol, lo que le permite determinar su masa, M_e , y su radio, r_e . Pero, ¿cómo determinar la distancia del sistema? No sólo supone que es posible observar dicho sistema doble, sino “que podrían tal vez obtenerse” las características de su órbita, su periodo y su paralaje (es decir, el ángulo desde el cual vemos desde la Tierra la órbita del sistema doble). Como el sistema está sometido a la tercera ley de Kepler, la ley de las áreas, el periodo de la estrella satélite y la masa de la estrella central permitirían deducir el eje mayor del sistema. El paralaje y el eje mayor permitirían entonces calcular su distancia. En conclusión, hay muchas hipótesis y sólo se trata (Michell lo sabe bien) de especulaciones, que no por ello dejan de ser perfectamente coherentes.

LAS TENTATIVAS DE OBSERVACIÓN

Durante el verano de 1783, el artículo de Michell suscita gran interés y pronto Cavendish, Maskelyne y Herschel se preocupan por las consecuencias observables del efecto. ¿Acaso no será mejor herramienta un telescopio de refracción que un prisma? Mediante un cálculo, Cavendish muestra que tal efecto implicaría una modificación en la longitud focal efectivamente detectable.³¹ En un principio, Michell no duda de la existencia de sistemas dobles, en particular en las Pléyades: “He mostrado en mis investigaciones [de 1767] la probabilidad extremadamente grande de que muchas estrellas fijas estén reunidas en grupos, y de que las Pléyades constituyan en particular uno de esos grupos”.³² Se esfuerza por evaluar la probabilidad de detectar su efecto, y a este respecto sabe de lo que está hablando: “Entre las estrellas así reunidas, es sumamente probable que ni siquiera una de cada 100 no pertenezca al grupo”. Y subraya los diferentes factores de los que depende el éxito de la empresa y las consecuencias que cabría esperar. Lo primero es conocer mejor los sistemas de estrellas dobles observados por Herschel que, espera firmemente, mostrarán que se trata en efecto de sistemas físicos gravitatorios. Sin embargo, ese tipo de observaciones presenta ciertos problemas... y requiere personal calificado:

A pesar de eso, no es improbable —notemos hasta qué punto le gustan las lótopes a Michell— que en los próximos años corroboremos que, entre la gran cantidad de estrellas dobles, triples, etc., que han sido observadas por M. Herschel, ciertas estrellas constituyen sistemas de cuerpos que giran unos en torno a otros, en particular si algunos otros observadores tan ingeniosos y hábiles como él pudieran encontrarse para secundarlo en su trabajo.³³

Dichas observaciones requerirían paciencia a causa del enorme periodo de traslación

de las estrellas secundarias, ya que, prosigue, “la gran distancia a la que no es improbable que muchas de esas estrellas secundarias estén de sus estrellas principales, y los enormes periodos de traslación que de ello deben resultar, dejan poca oportunidad a algún progreso sustancial antes de algunos años o, tal vez, de mucho tiempo”.³⁴ Así, Michell defiende un proyecto a largo plazo, un proyecto que no sólo plantea la cuestión de la observación de su efecto, sino también, y en primer lugar, la de la observación de los movimientos estelares. Además, el proyecto apela claramente a las hipótesis esenciales, a saber: “que las partículas de luz están sujetas a la misma ley de gravitación que los otros cuerpos” y que “algunas de tales estrellas son lo bastante grandes como para disminuir sensiblemente la velocidad de la luz que emiten”.³⁵ Michell tiene grandes esperanzas de que los resultados obtenidos sean “un aliciente para quienes tienen la posibilidad de hacer tales observaciones, cuando menos para beneficio de las generaciones futuras, por pequeña que sea la ventaja que nosotros podamos esperar para nosotros mismos”.³⁶

Durante el verano de 1783, tanto Maskelyne como Herschel realizaron observaciones en “una buena cantidad de estrellas”³⁷ de la constelación de las Pléyades, pero sin éxito. Herschel incluso pulió un prisma especialmente para la ocasión. Cavendish concluirá la carta que le escribe el 12 de agosto a Michell, quien estaba en Thornhill, notando “que había pocas oportunidades de encontrar alguna estrella cuya luz fuera sensiblemente disminuida”.³⁸ Tanto para Cavendish como para Michell, el fracaso de esos intentos de observación no pone necesariamente en entredicho la realidad del efecto. En una carta que le escribe a Cavendish el 20 de abril de 1784, Michell explica su punto de vista: “Sin embargo, aunque me habría resultado muy agradable que se pudiera realizar algún descubrimiento por ese medio, jamás tuve una esperanza tan grande en su éxito como para verme fuertemente desilusionado en caso de que nada se encontrara”.³⁹

En la misma carta menciona dos hipótesis que podrían explicar la falla. La primera es “que no existe una estrella lo suficientemente grande como para producir algún efecto apreciable”.⁴⁰ La segunda, no obstante, duda de la acción de la gravedad sobre la luz:

También es posible que sencillamente la luz (y tal vez también el fluido eléctrico, que parece estar relacionado con ella hasta cierto punto, etc.) no sea afectada por la gravedad en proporción de su *vis inertia*, como los otros cuerpos; aunque yo me vea inclinado a creer que no es así, las propiedades singulares que poseen dichas sustancias parecen dejar a este respecto un poco más de duda que en otros casos, de materiales más comunes.⁴¹

De ninguna manera duda de su (segundo) efecto, la relación entre la velocidad de la luz y la refracción, pues eso implicaría dudar de la teoría corpuscular de Newton. Es decir, Michell no llevará hasta sus últimas consecuencias su “método” para medir la variación en la velocidad de la luz. Sólo lo utilizará en el marco de su experimento, sin buscar otras aplicaciones. ¿Habría visto toda su importancia, en particular para la cinemática? Probablemente esté obsesionado por la medición de la distancia de las estrellas, y todo lo que se aleje de ese tema no sea realmente digno de interés para él.

Esta pequeña historia, tan significativa para las premisas de la relatividad general, no había terminado por completo. Johann Georg von Soldner, asistente de Johann Elert Bode, astrónomo real de Prusia y editor del *Astronomisches Jahrbuch* [Anuario de astronomía], se interesa en 1801 por la propagación de los rayos luminosos al pasar cerca de una estrella, y publica un artículo intitulado “Sobre la desviación respecto a la línea recta que experimenta un rayo luminoso a causa de la atracción de un cuerpo celeste cerca del cual pasa”, texto bien conocido a partir de entonces.⁴² El artículo constituye el desarrollo natural de la teoría de Michell en cuanto a la acción de la gravedad sobre la luz, teoría que Soldner conoce sin duda a partir del trabajo que acaba de publicar Laplace⁴³ en Weimar. Este último retoma desde un punto de vista algebraico, en lugar de geométrico, las ideas y los cálculos de Michell relativos a los cuerpos oscuros. Además, aparecen comentarios sobre los cálculos de Laplace en un trabajo publicado poco antes por Soldner:

M. la Place ha buscado demostrar aquí que pueden existir cuerpos materiales que, a causa de su gran tamaño y de la fuerte atracción gravitatoria que por ello ejercen, no dejen escapar ningún tipo de luz, o cuando menos no permitan que la luz se aleje más que una distancia determinada; de allí se sigue directamente que los cuerpos más grandes de nuestro universo han de permanecer invisibles.⁴⁴

Sin embargo, después de esta breve mención de los resultados esenciales de (Michell-)Laplace, Soldner da su propia apreciación de dichas hipótesis. Si en efecto no hay “en lo que concierne a las matemáticas nada que objetar” en el cálculo de Laplace, cree que no se lo puede admitir “desde el punto de vista de la metafísica, sobre la cual todas las investigaciones de la mecánica están fundamentalmente basadas”. Soldner pone en duda la hipótesis aceptada por Laplace de que la velocidad de la luz al ser emitida es constante, punto rara vez discutido por los astrónomos y que está en la base del razonamiento de Laplace. En efecto, éste supone que “la luz tiene *en cuanto luz* una velocidad que es constante e igual a la de nuestra luz solar”,⁴⁵ mientras que Soldner se pregunta si “la luz no parte con velocidades diferentes desde estrellas diferentes y [si] no tiene por consecuencia aberraciones también distintas”. Se trata justamente de lo que entendemos por “variación en la velocidad de la luz”. Calcula la variación de la aberración en el caso de que la velocidad de la luz de una estrella se viera reducida en uno, dos o incluso tres décimos; la aberración, que es inversamente proporcional a la velocidad de la luz de cada estrella,⁴⁶ será aumentada en la misma proporción. Esto había sido mencionado por Laplace en su *Exposición del sistema del mundo*.⁴⁷ La aberración sería entonces función de la masa de cada estrella y, por lo tanto, variable de una a otra. Sin embargo, como la aberración se manifiesta por un desplazamiento en la posición aparente de las estrellas, haría falta conocer la masa de una estrella para poder determinar su posición precisa, cuando menos en un momento dado. Soldner se pregunta lo que en tal caso le sucedería a la astronomía de posición: “Esto es, a decir verdad, un hecho triste para los astrónomos

y, si llega a verificarse, como prácticamente no dudo que sucederá, la observación precisa de las estrellas fijas [...] se hundirá en dificultades sin fin”.⁴⁸



FIGURA VIII.4. *Johann G. von Soldner.*

Soldner concluye su artículo esperando que un mejor conocimiento de la naturaleza de la luz vendrá, gracias a la química, en ayuda de la astronomía: una anticipación profética del papel que desempeñará la espectroscopía. De esta manera, al tiempo que se interesaba por la cuestión de la variación en la velocidad de la luz al ser emitida, Soldner tomaba muy en serio la hipótesis de Michell-Laplace. Así, no es de sorprender que un año después lleve a cabo el cálculo de la desviación de un rayo luminoso, trabajo que evidentemente descansa también en la hipótesis de la acción de la gravedad sobre la propagación de la luz. Al final de este segundo artículo justifica dicha hipótesis esencial:

Es de esperarse que nadie encuentre objeción a mi consideración de un rayo luminoso como si fuera un cuerpo masivo. Podemos ver que los rayos de luz poseen todas las propiedades básicas de la materia gracias al fenómeno de la aberración, que sólo es posible si los rayos luminosos son realmente materiales. Y, por si fuera poco, no puede pensarse en una cosa que exista y actúe sobre nuestros sentidos sin poseer las propiedades de la materia.⁴⁹

Notemos que, si Soldner debe justificar la hipótesis de la acción de la gravedad sobre la propagación de la luz, es porque tal efecto estaba lejos de ser aceptado. Sin embargo, él defiende la teoría corpuscular de la luz y su explicación de la aberración. Es la ocasión de lanzar una piedra al jardín de los partidarios de la teoría ondulatoria, al insistir en los penosos artificios a los que tendrán que recurrir para explicar la aberración. Son las cuestiones que pronto agitarán el nacimiento de la óptica ondulatoria. No es sencillo tratar ese problema con ondas, y conseguirlo será uno de los méritos de Fresnel. Dicho esto, los cálculos de Soldner están desarrollados de manera muy precisa. Apuntan a determinar la trayectoria de un corpúsculo dotado de una velocidad enorme, la de un rayo luminoso, al pasar cerca de un cuerpo masivo. Como los cálculos de Michell, que probablemente no conoce, y los de Laplace, en los que se apoya, están realizados perfectamente. Soldner determina en forma correcta la fórmula de desviación de un corpúsculo luminoso al pasar cerca de una estrella. Se apoya en el tratado de mecánica de Laplace y trata la luz como si fuera un corpúsculo material cuya velocidad inicial es justamente la de la luz. El efecto de desviación es, entonces, función de la distancia entre la estrella y el corpúsculo luminoso: cuanto más cercanos, mayor es la fuerza de gravedad y mayor es la desviación. El efecto es máximo cuando el rayo luminoso pasa rozando la estrella. Así, basta determinar los elementos de la órbita de una partícula emitida con la velocidad de la luz y una trayectoria tangente a la superficie de la estrella.

Soldner deduce que se trata, como siempre en un problema kepleriano, de una cónica: una parábola, una elipse o una hipérbola, en función del valor de la razón $2M / GRc^2$, donde M es la masa de la estrella, R es su radio, G es la constante de gravitación y c es la velocidad de la luz en el punto de tangencia. No puede tratarse ni de una elipse ni de una parábola, nota Soldner, pues “no conocemos cuerpo celeste alguno cuya masa pueda ser tan grande como para producir en su superficie tal aceleración gravitatoria”,⁵⁰ insiste. “Sin embargo, como para todos los cuerpos celestes que nos son conocidos — prosigue— $2M / GR$ es menor que c^2 ”, se trata siempre “en el mundo que conocemos” de una hipérbola que corresponde a los valores de la razón $2M / GRc^2$. Evidentemente, Soldner evita aquí hablar de los cuerpos oscuros. En efecto, si $2M / GR$ es mayor que c^2 , todos los rayos luminosos que pasen cerca de la estrella serán captados por su fuerza gravitatoria. De esta manera, Soldner precede a los relativistas de la primera mitad del siglo XX, quienes serán tan poco temerarios como él y partirán de la misma hipótesis, pero en el marco de la relatividad general: ninguna estrella es lo bastante masiva como para presentar tal fenómeno. Ésta es una de las razones por las que el concepto de agujero negro no pudo ser imaginado en el marco de la relatividad general sino hasta los años sesenta.⁵¹

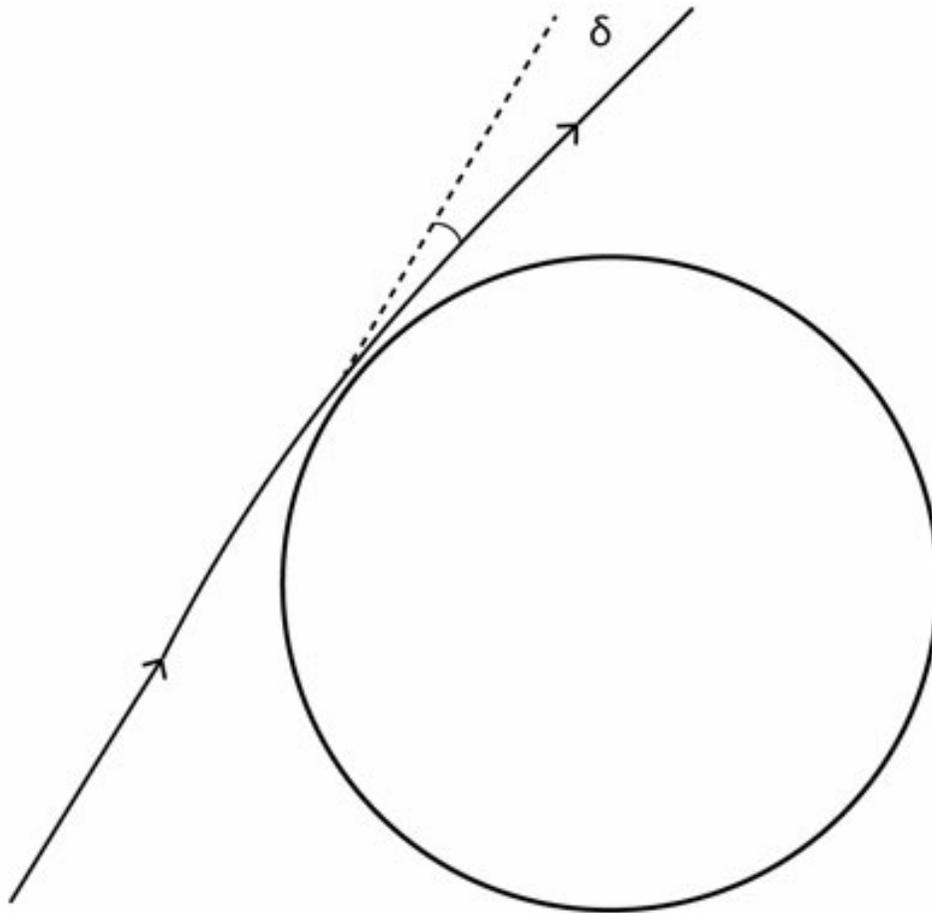


FIGURA VIII.5. *Desviación de un rayo luminoso al pasar cerca de una estrella. Un rayo luminoso que pasa cerca de una estrella es desviado en un ángulo δ .*

De esta manera, Soldner ha mostrado que “cuando un rayo luminoso pasa cerca de un cuerpo celeste, en lugar de continuar en línea recta, se ve obligado por su atracción a describir una hipérbola”.⁵² Determina entonces el ángulo máximo de desviación en el caso de un rayo luminoso que pase rozando la Tierra: el ángulo es de 0.002” de arco, así que no se lo puede observar, según nota. A continuación hace el cálculo para la Luna, lo que evidentemente lo hace obtener un valor aún menor. Por último, determina el ángulo correspondiente al Sol, de 0.84” de arco. No obstante, afirma muy sensatamente que “si pudiéramos observar las estrellas fijas muy cerca del Sol, deberíamos tomar esto en cuenta, pero como eso no sucede jamás, la perturbación producida por el Sol puede ser ignorada”.⁵³ Su conclusión tampoco carece de sentido común: “Resulta claro, entonces, que nada hace necesario —cuando menos en el estado actual de la astronomía práctica— que se tome en cuenta la perturbación de los rayos luminosos debida a la atracción gravitatoria de los cuerpos celestes”.⁵⁴ Debe notarse que dichos resultados son absolutamente idénticos en el fondo (aunque no en la forma de calcular) a los que Einstein desarrollará en 1911.⁵⁵ es perfectamente claro que Soldner se anticipa al primer

cálculo de Einstein sobre la cuestión.

LAPLACE: LA AMBICIÓN UNITARIA

En 1784, cuando Michell publica su último artículo, Laplace plantea, en un librito de “astronomía física”,⁵⁶ la cuestión de la universalidad de la teoría de la gravitación de Newton, muy natural en el siglo XVIII cuando, según el principio de la unidad del mundo newtoniano, todos los cuerpos deben estar sujetos a la gravitación. No obstante, Laplace apunta al mundo “molecular”: “La solidez de los cuerpos, su cristalización, la refracción y la difracción de la luz, el ascenso y el descenso de los líquidos en tubos capilares y, generalmente, las combinaciones químicas son resultado de fuerzas de atracción cuyas leyes aún no han sido determinadas con precisión”.⁵⁷ La lista, clásica del siglo XVIII, procede de la *Opticks* de Newton. Es allí donde debería aplicarse una dinámica universal, desde la química hasta la astronomía: “Su conocimiento es el objeto principal de la química, y sólo cuando hayan sido lo suficientemente observadas como para aplicar el análisis, llegará dicha ciencia al grado de perfección alcanzado por la astronomía con el descubrimiento de la gravitación universal”.⁵⁸

Laplace no se contenta con plantear el objeto de la ciencia futura, sino que también delinea los medios: se trata de estudiar “el equilibrio entre la afinidad de los cuerpos y la fuerza repulsiva del calor”, es decir, de continuar los experimentos sobre el calor que llevó a cabo con Lavoisier en el Arsenal entre 1777 y la mitad de la década de los ochenta.⁵⁹ Algunos años después, refugiado en Melun durante el Terror, Laplace redacta la *Exposición del sistema del mundo*,⁶⁰ donde precisa sus ideas en cuanto a la línea que deben seguir la óptica, la capilaridad, la química...: la misma que la astronomía. La óptica será “la piedra angular de la física laplaciana”, en forma de la teoría de la emisión, cuyos últimos progresos realizará cuando tengan lugar los primeros triunfos de la óptica ondulatoria.⁶¹ De hecho, la interpretación de la teoría de la emisión se verá reducida a una luz monocromática que simplemente ignora el color. Laplace se interesará mucho en ella, tanto que constituirá la piedra angular de su programa.

Por otra parte, el texto es cercano a uno de Buffon, tanto que sería sorprendente que Laplace no se hubiera inspirado en él. Se trata del principio del tomo XIII de la *Historia natural*,⁶² donde Buffon muestra ser severamente newtoniano al expresar una reivindicación unitaria que va de la química a la astronomía. Para Buffon, las leyes de la afinidad química proceden de “la ley general por la cual los cuerpos celestes actúan unos sobre otros”⁶³ y, si la humanidad no ha sido hasta entonces consciente de ello, “es por no haberlos conocido bien, comprendido bien, es por no haber considerado ese objeto en toda su extensión”.⁶⁴ Lo que sucede es que debe tenerse en cuenta “la figura”, la forma de los cuerpos, expresión que también encontramos relacionada con los trabajos (y las polémicas) sobre la figura de la Tierra. Pues si bien en gran escala la figura de los cuerpos no importa, tal no es el caso en pequeña escala, donde, “por lo contrario,

significa casi todo...” En pocas palabras, para explicar las afinidades químicas basta aplicar la ley de Newton a las “partes elementales” (es difícil no leer hoy día “partículas elementales”), de las que se supone que tienen una forma particular:

Ignoramos la forma de las partes constituyentes de los cuerpos: el agua, el aire, la tierra, los metales, todas las materias homogéneas están ciertamente compuestas por partes elementales iguales entre sí, pero cuya forma desconocemos; nuestros sucesores podrán, con ayuda del cálculo, abrir ese nuevo campo del conocimiento y saber con precisión suficiente las figuras de los elementos de los cuerpos; partirán del principio que acabamos de establecer, lo tomarán como base.⁶⁵

Utilizando exclusivamente la fuerza de gravedad y suponiendo una distribución particular de la materia, con moléculas de formas extrañas y formidablemente densas, deberíamos poder explicar todos los fenómenos moleculares. Se trata de una visión astronómica de la química, que Laplace esboza en pocas líneas en la *Exposición...*:

Debemos suponer mucha mayor cantidad de espacio vacío que de espacio lleno, [de manera que] la razón entre los intervalos que separan dichas moléculas y sus dimensiones respectivas sea del mismo orden que la correspondiente a las estrellas que forman una nebulosa, que desde ese punto de vista podríamos considerar como un gran cuerpo luminoso.⁶⁶

Además, ese modelo explicaba bien “la extremada facilidad con la cual la luz atraviesa en todos los sentidos a los cuerpos diáfanos”,⁶⁷ evidencia que por entonces parecía incompatible con una óptica de las vibraciones.

Entonces, es muy probable que Laplace haya tomado prestada de Buffon la idea física fundamental planteada en dicho texto: reducir la óptica no sólo a una balística (la hipótesis de la teoría de la emisión), sino a una balística gravitatoria. Quiere explicar la refracción y, en suma, todos los fenómenos físicos en el marco de la teoría de la *gravitación* de Newton. Como testimonio citamos el cálculo que sigue: la densidad que debería tener una molécula para desviar la luz en su superficie; en ese cálculo tan sencillo, tan físico, de orden de magnitud, Laplace evalúa la densidad necesaria para que una “molécula esférica cuyo diámetro sea de un cienmilésimo de pie” ejerza en su superficie “una atracción igual al peso terrestre”, y concluye que la densidad debe ser “cuando menos 10 billones de veces mayor que la densidad media de la Tierra”, “un orden de magnitud ante el cual la imaginación se horroriza...” No obstante esto, es insuficiente para explicar la fuerza refringente, pues la fuerza de atracción en la superficie terrestre no desvía la luz. Es probable (casi seguro, aunque según su costumbre no lo cite) que Laplace acabe de leer el cálculo de Michell publicado por Priestley al final de su *Historia de la óptica*, que trata sobre la relación entre la fuerza de emisión de la luz y la fuerza gravitatoria sobre la Tierra.⁶⁸ Laplace no conducirá su análisis más allá del cálculo rápido del orden de magnitud. Es una idea en la que por el momento no se puede avanzar, pero en la cual se apoya en todas las ediciones de la *Exposición del sistema del mundo* para justificar su esperanza de una física unificada: “Las afinidades dependerán entonces de la forma de las moléculas integrantes, y será posible, por la variedad de las

formas, explicar toda la gama de fuerzas de atracción, para llegar a una sola ley general que dé cuenta de todos los fenómenos de la física y de la astronomía”.⁶⁹ ¡Reunir en una sola ley general todos los fenómenos de la física y de la astronomía! Con cuánta fuerza, con cuánto énfasis se expresa aquí el programa de la Société d’Arcueil. Laplace está consciente de la dificultad de la tarea y discute de paso los “nuevos términos” que “algunos geómetras, para dar razón de las afinidades, han añadido a la ley de la atracción inversa al cuadrado de la distancia”, términos que “sólo complican la explicación de los fenómenos”. Pero no se hace ilusiones; estamos aún lejos de ello, pues “la imposibilidad de conocer las figuras de las moléculas hace inútiles estas investigaciones para el avance de las ciencias”. En esa materia, no es aún el tiempo de los teóricos; debe experimentarse primero: “Rodeados de esta incertidumbre, lo más sabio es dedicarse a determinar mediante una gran cantidad de experimentos las leyes de las afinidades; para conseguirlo, el medio que parece más sencillo es comparar dichas fuerzas con la fuerza repulsiva del calor, que a su vez puede compararse con la gravedad”.⁷⁰

En la conclusión que cierra el libro IV de la primera edición de la *Exposición del sistema del mundo*, menciona los experimentos que llevara a cabo años antes con Lavoisier en el jardín del Arsenal: “Algunos experimentos ya realizados de esa manera permiten esperar que algún día dichas leyes sean conocidas en su totalidad: entonces, aplicando el cálculo, podrá elevarse la física de los cuerpos terrestres al grado de perfección que el descubrimiento de la gravitación universal ha proporcionado a la física celeste”.⁷¹

A lo largo de su carrera, Laplace persistió obstinadamente en su programa de unificación. Newtoniano intransigente, dedicó gran esfuerzo a abrir el mundo al sistema de Newton, pero no parece jamás haber podido aceptar ni mucho menos inventar otra cosmovisión, otra *Weltanschauung*. Esperó pacientemente el éxito total y global de la teoría a la que consagró su vida y su obra: la teoría de la gravitación universal de Newton. Vivió esperando el día en que la experiencia, apoyada por el análisis, diera la razón a Newton, de la química a la astronomía...

IX. BLAIR: LA CINEMÁTICA CLÁSICA DE LA LUZ

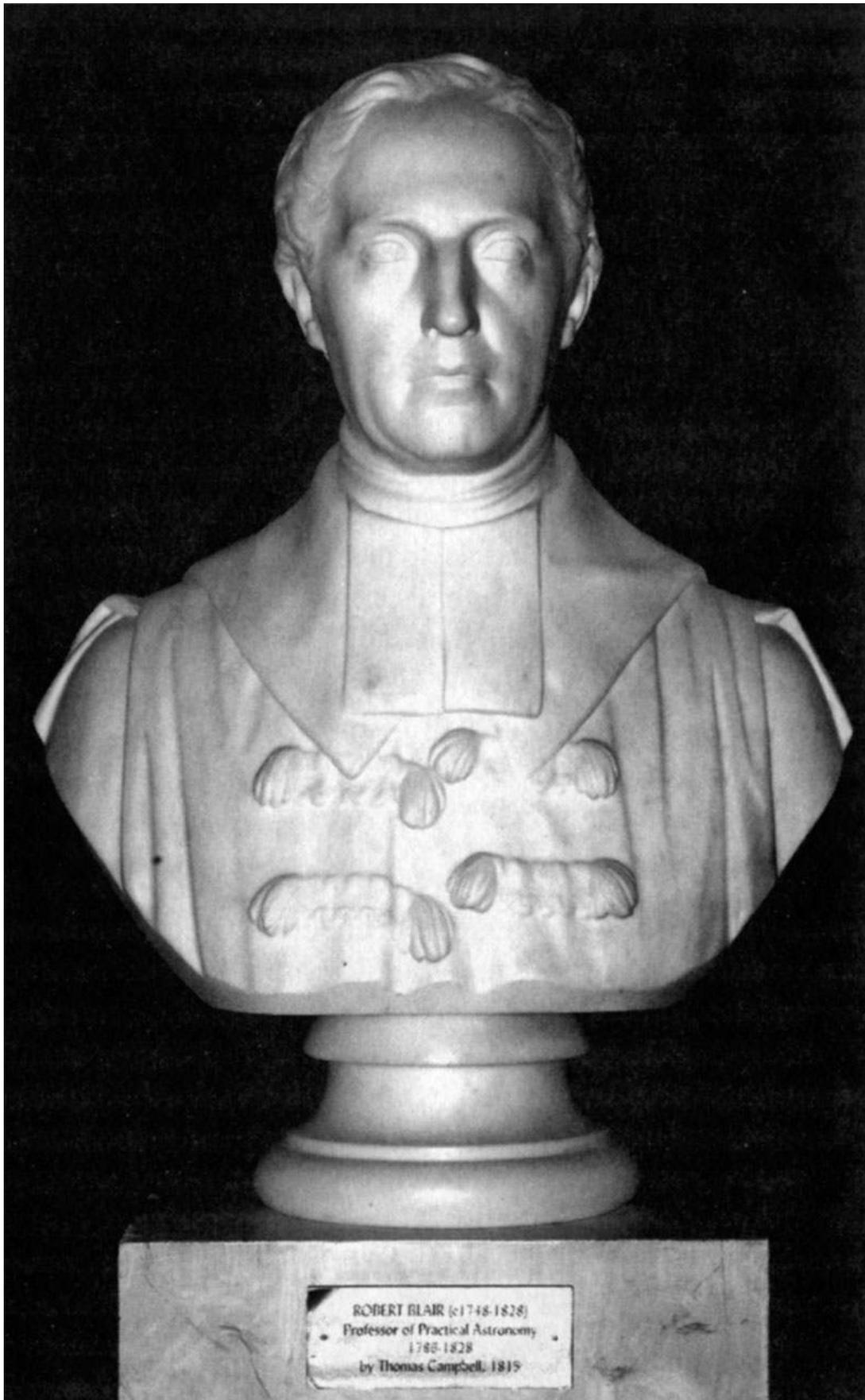
EL 6 DE ABRIL de 1786 se leyó ante la Real Sociedad el trabajo de un astrónomo muy poco conocido: Robert Blair, primer profesor de astronomía práctica en la Universidad de Edimburgo. El artículo¹ consistía en una “proposición para asegurarse mediante experimentos de que la velocidad de la luz es afectada por el movimiento de los cuerpos que la emiten o la reflejan, etcétera”. Jamás fue publicado, pero el manuscrito sí circuló en el medio científico. El texto de Blair fue leído por Alexandre Aubert, *fellow* de la Real Sociedad desde 1772, astrónomo aficionado inspirado y perspicaz, relacionado estrechamente con Cavendish. Muy rico, Aubert era director de la London Assurance Company desde 1787. Su observatorio privado cuenta con los mejores instrumentos, y Herschel recurre a él para confirmar sus propias observaciones. En 1778, cuando John Pringle se retira de la presidencia de la Real Sociedad, el Consejo considera a dos posibles sustitutos: Aubert y Joseph Banks, quien será elegido. Esto da una idea de hasta qué punto era bien visto Aubert por sus colegas.

Aún más que Michell, Blair es un científico desconocido, que dejó pocas huellas, a excepción de un recuerdo desagradable en Edimburgo. No tenía gran reputación como astrónomo, y esto es lo menos que se puede decir. No obstante, desde entonces debería haber sido evidente que ese científico repudiado alcanzaría una buena posición en la historia de la física. Dejó un manuscrito apasionante que analizaremos con detalle en este capítulo. También es interesante tratar de comprender cómo un trabajo de tal calidad pudo ser tan poco conocido, y cómo su autor pudo ser tan menospreciado. Robert Blair (1748-1828) estudia medicina en la Universidad de Edimburgo y pasa 10 años en la India como cirujano de la armada antes de regresar a Inglaterra a principios de la década de 1780. Se interesa por la navegación y por la determinación de la longitud en el mar. En 1785 propone una mejoría del “cuadrante”, antecesor de nuestro sextante, que le vale un premio y la recién creada cátedra de astronomía práctica en la Universidad de Edimburgo. Entonces intenta mejorar los prismas acromáticos, inventados por Dollond, reemplazando el *flint*, una de las lentes que lo componen, por un fluido de propiedades parecidas, de acuerdo con una idea de Euler. También investiga los índices de refracción y la dispersión de varios fluidos, y publica en 1794 un artículo en los anales de la Real Sociedad de Edimburgo.² Como las *doublets* o *triplets* acromáticas, compuestas por varias lentes diferentes, *crowns* y *flints*, reducían la aberración cromática pero producían un espectro secundario molesto para la observación, Blair construye aparatos compuestos, “aplanéticos” (término que acuña él mismo en su artículo de 1794), que corrigen las aberraciones cromática y esférica; después mejorará dichos aparatos con su hijo Archibald. En 1793 Blair regresa al mar, donde se le encarga la salud de marinos y prisioneros de guerra.

Pude encontrar esos datos en un libro sobre la historia de la astronomía en

Edimburgo,³ donde se consagran cuatro páginas a nuestro héroe. Es todo lo que le concede H. A. Brück, su solo y único biógrafo, quien nota: “Por interesantes que puedan ser, sus experimentos de óptica constituyen su única aportación científica”. Parece que sólo *sir* David Brewster, gran especialista de la óptica experimental, rendirá homenaje al trabajo de Blair sobre la aberración cromática. Brück prosigue su análisis de los trabajos de éste precisando que “los esfuerzos de Blair, científicos a medias, se limitan a especulaciones filosóficas”. El manuscrito de 1786 que aquí nos interesa no se menciona; con seguridad no se trata de un olvido, sino de un desconocimiento total de dicha obra, que sin duda habrá sido apenas leída desde finales del siglo XVIII. Además, el recuerdo que dejó Blair en Edimburgo es problemático, y esto tampoco es culpa del biógrafo, quien escribe lo siguiente:

Desde el punto de vista de la Universidad de Edimburgo, el nombramiento de Blair como profesor de astronomía fue un fracaso total. Blair se negó a dar curso alguno, con el pretexto de que carecía de observatorio e instrumentos. Libre de sus deberes docentes, Blair permaneció también indiferente a todo trabajo universitario. [...] No asistía a las reuniones de la dirección de la universidad [*University Senatus*], y a decir verdad consideró pura y simplemente su puesto como una sinecura.⁴



ROBERT BLAIR (c1748-1828)
Professor of Practical Astronomy
1780-1828
by Thomas Campbell, 1819

FIGURA IX.1. *Robert Blair*.

A causa de esto, la cátedra de astronomía estuvo a punto de ser suprimida, pero finalmente Thomas Henderson sucedió a Blair, accediendo al puesto de primer astrónomo real de Escocia. Henderson medirá el paralaje de Alpha Centauri dos meses después de que Bessel mida el de 61 Cygni. Blair, no hay que decirlo, no alcanza un artículo ni una nota, ni siquiera es citado, en el prestigioso *Dictionary of Scientific Biography*; empero, se le dedica un texto breve en la extremadamente completa biografía de Poggendorf.

London 13th May 1789

Sir

I enclose I send you a Bill on Doctor Robertson for what remains of the University fund. The Edinburgh Waggon sets out every Friday, from the White Horse, Cripple gate, at noon. If you should be able to send the Telescope on Friday seven night, it will be unnecessary for you to take the trouble of sending a letter of advice, as I shall be looking out for it at the time of the Waggon arrival, which is in eleven days after it leaves London. You may be so good as direct it to me at Merchiston near Edinburgh. I remain, with great regard, Sir,

Your most obedient and most humble servant

Robert Blair

FIGURA IX.2. Carta de Robert Blair a William Herschel, 13 de mayo de 1789.

UN TRABAJO BISAGRA

Consideremos ahora el trabajo que Blair lleva a cabo entre junio de 1783, precisamente cuando Michell realizaba su experimento, y finales de 1785, un año después de la publicación del artículo de Michell. Se trata de una obra asombrosa, que propone varios

avances espectaculares. Aunque encontré el manuscrito en Londres hace más de 10 años, durante mucho tiempo no lo tomé en serio. Yo conocía vagamente el nombre de Blair por haber leído su artículo sobre la refringencia de la luz. Si busqué el nombre en el catálogo de manuscritos de la Real Sociedad fue porque trabajaba entonces en el conocido artículo que Arago dedicó a la velocidad de la luz (veáse el capítulo X), donde cita a Blair y a varios especialistas en la materia, como John Michell. Así, poco a poco me fui sumergiendo en el manuscrito de Blair, y pronto me di cuenta de que era el origen del artículo de Arago, aunque probablemente este último nunca lo haya tenido en las manos. Caí entonces en la cuenta de su carácter fundamental, así como de la incompreensión ante esa manera de ver las cosas.

Siguiendo la línea de Michell, en quien se apoya explícitamente, Blair considera que la *cinemática* de la luz no tiene por qué ser diferente de la de los corpúsculos materiales, y deduce todas las consecuencias... Nadie, hasta donde sé, había desarrollado ese punto ni había investigado hasta dónde podría conducir esa lógica. Al leer su texto comprendí (para mi gran sorpresa) que nadie había llegado *jamás* hasta el fin de la cinemática clásica de la luz, a pensar realmente en los corpúsculos luminosos como en corpúsculos materiales y aplicarles los principios de la relatividad y de la suma de velocidades. Como se verá en este capítulo, ni Newton, ni Clairaut, ni el gran Euler, ni Michell, ni siquiera Arago (quien llevará a cabo el experimento pero no deducirá todas las consecuencias) llegaron tan lejos en ese sentido. En sus cálculos, Michell no se interesa por la cinemática de la luz; no considera la velocidad relativa de los dos componentes de su sistema, de manera que no observa las premisas del efecto Doppler-Fizeau, que sin embargo conoce.⁵ De hecho, sólo se interesa por la dinámica gravitatoria de la luz, dejando de lado los aspectos cinemáticos.

Blair conduce la cinemática clásica de la luz más lejos que nadie, inaugurando una temática esencial para la física, que después de él ilustrarán Doppler, Fizeau, Michelson, Heaviside: la del efecto Doppler-Fizeau. Blair innova. Mejor que Arago, mejor que los miembros de la Société d'Arcueil, que intentarán a toda costa desarrollar en Francia la "teoría de la emisión", último avatar de la teoría corpuscular de la luz, Blair es el campeón defensor de dicho sistema. Una visión clásica en todos los sentidos de la palabra: newtoniana, corpuscular, relativista (¡clásica!) de la luz. Su desdicha es que tal visión corpuscular esté muriendo; que emita sus últimos chispazos. Young publicará pronto sus primeros trabajos acerca de la interferencia, fenómeno sobre el que la teoría de la emisión no podrá decir nada... Otro problema fue que no pudo hacerse entender por sus colegas. Como sucedió con Michell, sus ideas llegaron demasiado temprano, en un medio que no estaba preparado para recibirlas. Blair se interesa por una visión corpuscular, pero sobre todo relativista, de la óptica, visión que la teoría ondulatoria (y en particular el éter) estaba a punto de enterrar.

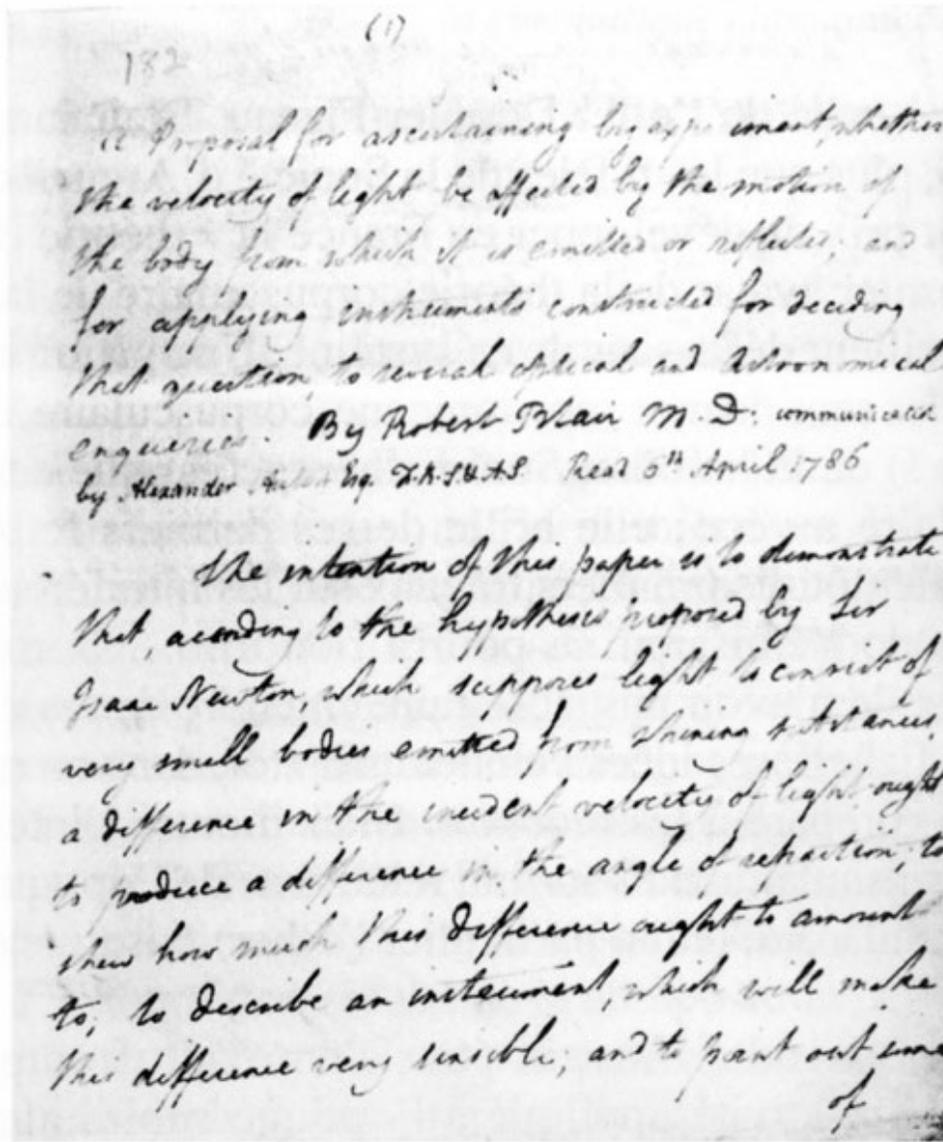


FIGURA IX.3. La primera página del manuscrito de Blair, 1786.

Habrà que esperar a Einstein para regresar a ella, pues el principio de la relatividad aplicado a la óptica sufrirá un eclipse en el siglo XIX. Blair es el único que desarrolla una cinemática *relativista* de la luz, relativista en el sentido de Newton y de Galileo, por supuesto; he aquí la diferencia (que es grande) con Einstein, cuya cinemática será la de Lorentz. Tanto antes como después de él, está prohibido tomar ese camino, y no sin razón: el problema de la aberración. No se trata de un obstáculo insalvable, pues al modificar las transformaciones de coordenadas (de las de Galileo a las de Lorentz) llegamos sencillamente a la relatividad especial. Muy sencillamente, ¡pero a qué precio! Habrá que renunciar a la simultaneidad, al carácter absoluto del espacio y del tiempo, lo que en el siglo XVIII era impensable, como puede comprenderse. Echando mano del éter, era más fácil renunciar al principio de la relatividad mismo, cuyo abandono dominará

todo el siglo XIX. No es que haya que convertir a Blair en un nuevo Einstein... aunque su trabajo sea uno de los más cercanos al famoso artículo de 1905. Blair habría podido intitular su artículo “Sobre la óptica de los cuerpos en movimiento”.⁶

UNA CINEMÁTICA DE LA LUZ AMBIGUA

Antes de abordar con detalle el trabajo de Blair, veamos el estado de la cinemática de la luz a finales del siglo XVIII, un problema que Michell *no* trató, y no sin razones... Desde Rømer se sabía (capítulo III) que la velocidad de la luz es finita, y las observaciones de Bradley relativas a la aberración habían permitido precisar el punto. La elipse de aberración corresponde a la proyección del movimiento de la Tierra en el espacio: describe una elipse alrededor de la posición media de la estrella. Como vimos en el capítulo V, la aberración resulta de la composición de las velocidades de la luz y de la Tierra. Dicha composición es infinitamente más fácil de entender en el marco de la teoría corpuscular de Newton que en el de la teoría ondulatoria, pero no deja de plantear un problema serio. El ángulo de aberración (en v/c) depende de la velocidad de la luz, c ; dado que v , la velocidad media de la Tierra, es constante, el hecho de que la medida del ángulo máximo de aberración sea también constante implica que c es constante. No obstante, ¡en el marco de la teoría corpuscular no hay razón para que la velocidad de la luz sea finita, menos aún para que sea constante! Naturalmente, debe depender de la velocidad de la fuente, como lo expresa Blair claramente en su manuscrito: “Parece sumamente probable que la velocidad con la cual las partículas de luz son emitidas o reflejadas por los cuerpos deba ser afectada por el movimiento absoluto de los cuerpos que la emiten o la reflejan”.⁷

Siempre por parte de la fuente, habría que considerar la posible variación en la velocidad de emisión, ligada al efecto Michell: a saber, la acción del campo gravitatorio de la estrella sobre la luz que emite (punto por el que Blair no dejará de interesarse). Entonces, ¿cómo puede ser igual el ángulo máximo de aberración para todas las estrellas? Por supuesto que las observaciones de Bradley, y las subsiguientes, podrían no ser lo bastante precisas y encubrir una posible variación en la velocidad de la luz. Tan sólo Arago, 20 años después, tratará el tema. En cuanto a Blair, sólo puede desarrollar la cinemática relativista clásica de la luz negando el hecho y, por si fuera poco, lo hace sin dar explicación alguna. Aquí radican tanto el interés como la flaqueza de su trabajo.

De hecho, la explicación más aceptada de la aberración se apoyaba *al mismo tiempo* en la teoría ondulatoria y en la teoría corpuscular. En lo que respecta a la fuente, para explicar los resultados de Bradley se requería que la velocidad de emisión de la luz no dependiera de la velocidad de la fuente, y la teoría ondulatoria permitía este fenómeno con sencillez, considerando un medio (el éter) que mantenía constante la velocidad de emisión independientemente de la velocidad de la fuente o de una acción, desde entonces considerada improbable,⁸ de la fuerza gravitatoria. No obstante, para el observador hacía falta que la velocidad aparente de la luz dependiera de la velocidad de la Tierra, si quería

explicarse la elipse de aberración, y en este caso la teoría corpuscular permitía concebir el fenómeno de mejor manera y calcular su efecto. A fin de cuentas, la explicación resultaba ambigua, pues tomaba de cada teoría lo que le acomodaba.

Euler fue el único que planteó realmente la cuestión de la aberración en el contexto de la cinemática clásica de la luz. El análisis que propone en 1739 es un buen ejemplo de esa postura un tanto esquizofrénica: “La velocidad de la luz depende tan sólo de la elasticidad del éter y es independiente de la velocidad del movimiento del cuerpo que la emite”, como lo hace notar. En sus cálculos, Euler trata todos los casos de manera simétrica, de acuerdo con el principio de la relatividad clásico: cuando tanto la estrella como el observador están en reposo, cuando sólo la estrella está en reposo, cuando sólo el observador está en reposo y cuando tanto la estrella como el observador están en movimiento. Después calcula la aberración tanto en el contexto de la teoría ondulatoria como en el de la teoría corpuscular. Añade, no sin cierto pesar: “Aunque dicha hipótesis sea menos probable que la otra, según la cual la luz se propaga como el sonido, se adapta mejor a nuestra empresa y permite una composición del movimiento, lo que no es posible con la otra hipótesis”.⁹ Por otra parte, en la teoría ondulatoria no interviene la velocidad de la fuente, mientras que en la teoría corpuscular sí, de manera que Euler llega necesariamente a dos fórmulas distintas... Lo que parece, por otra parte, abrir la puerta a un experimento que permitiría averiguar qué teoría es “la buena”.¹⁰ Que yo sepa, nadie planteará tan delicadas cuestiones antes que Arago. Tanto Blair como el mismo Michell eluden el punto.

Para resumir la situación a finales del siglo XVIII, ninguna de las dos teorías rivales de la luz era capaz de ofrecer una explicación coherente de la aberración. Si bien la teoría ondulatoria permitía lidiar con el ángulo de aberración constante, sólo la teoría corpuscular explicaba de manera sencilla y relativamente convincente la elipse de aberración, mediante la composición de las velocidades de la Tierra y de la luz. Sin embargo, el interés del trabajo de Blair está relacionado con dicha ambigüedad, que le da la libertad de ver hasta dónde puede conducir una cinemática relativista (clásica, por supuesto) de la luz, sin preocuparse por las dificultades que presentaba la aberración.

BLAIR Y EL “MÉTODO” DE MICHELL

Blair había oído hablar (fortuitamente, precisa en su manuscrito) del “método” de Michell (capítulo VIII), probablemente a Aubert, si no es que a Cavendish. Pronto tuvo acceso al artículo de Michell y lo discutió con John Dollond, el excelente óptico londinense que había aconsejado a Michell. El “método” de Michell, como recordaremos, se apoya en el hecho de que, en el marco de la teoría corpuscular, la velocidad de la luz incidente¹¹ en un cristal es el parámetro de la refracción; se trata del efecto velocidad/refracción, de hecho ya, según veremos después, el efecto Doppler-Fizeau. Blair comprendió bien el interés de dicho efecto, pero consideró, con toda razón, que antes de utilizarlo en astronomía era necesario verificar su precisión. Esto significaba

asegurarse de que una diferencia de velocidad entre dos haces luminosos implicaba una diferencia en su refracción. Además, hacía falta averiguar a qué podría deberse tal diferencia de velocidades entre dos corpúsculos luminosos:

Hago notar que la diferencia de refracción debida a la diferencia entre la velocidad de la luz incidente será precisamente la misma si la diferencia de la velocidad incidente es real o relativa. En otros términos, es indiferente si la luz avanza con una gran velocidad hacia el cuerpo refractante que se supone en reposo o si la velocidad de la luz se mantiene constante y el cuerpo refractante avanza directamente hacia la fuente de emisión. La misma velocidad relativa entre el cuerpo refractante y la luz producirá la misma refracción, aun en el caso extremo de suponer que el cuerpo refractante se mueve y las partículas de luz permanecen en reposo.

Y, añade, “esto puede mostrarse a partir de las leyes del movimiento”.¹²

Éste es el meollo de la posición de Blair: una visión totalmente relativista (en el sentido galileo-newtoniano, sin duda) de la luz. Es el primero en aplicar el principio de la relatividad a la luz; el análisis de Blair es coherente con la relatividad de los tres movimientos en cuestión: el de la fuente, el del observador y el de las partículas de luz. “Pues parece muy probable que cuando la luz es emitida por un cuerpo en movimiento, la velocidad de las partículas proyectadas en la dirección del movimiento será mayor que la velocidad de aquellas proyectadas en dirección opuesta...”¹³ Más adelante retoma el punto, considerando el ejemplo de las partículas materiales: “Pues esto concuerda con las leyes del movimiento y con lo que observamos en cuanto al movimiento de los cuerpos materiales: una bala que sale de un cañón está sometida a los movimientos diurno y anual de la Tierra, y para encontrar su movimiento absoluto éstos deben tomarse en cuenta, además del movimiento debido a la explosión”.¹⁴

DEL “MÉTODO” DE MICHELL AL EFECTO DOPPLER-FIZEAU

Blair no solamente había comprendido y aceptado el “método” de Michell, sino que quería comprobarlo. Como escribe con toda razón, “eso abría un campo de gran importancia práctica y me impulsó a emprender la construcción de un instrumento capaz de medir diferencias muy sutiles en la refracción de la luz”.¹⁵ Blair no dudaba en absoluto de la validez del “método” de Michell, que se apoyaba en la teoría corpuscular de Newton. Sin embargo, siendo un físico escrupuloso, deseaba “verificar el efecto”, lo que Michell no había hecho. De esa forma, Blair planea medir la refracción de los rayos luminosos procedentes de dos estrellas diferentes, G y K, utilizando dos prismas similares, A y B.



FIGURA IX.4. Efecto Blair-Michell.

La Tierra se aleja de la estrella G pero se acerca a la estrella K; los ángulos de refracción (α y β) son diferentes.

Un rayo luminoso incidente en un prisma A es emitido por una estrella G de la cual se aleja la Tierra; un segundo rayo luminoso incide en un prisma B, emitido por una estrella K a la cual se acerca la Tierra. Como consecuencia de la cinemática de la luz, la diferencia entre las velocidades de ambos rayos es igual al doble de la velocidad de la Tierra en su órbita. En esta presentación de su método, Blair no toma en cuenta (según menciona de paso) las “causas secundarias” relacionadas con la velocidad propia de la estrella y con la acción de la gravedad sobre la luz. Más tarde aclarará dichos puntos. Por el momento, sólo le interesa el efecto velocidad/refracción, como consecuencia del cual se tiene una diferencia en la refracción debida a la diferencia entre las velocidades de los haces luminosos. Como esa diferencia es el doble de la velocidad de la Tierra en su órbita, Blair espera un efecto de 5” entre las caras de sus prismas. Sin embargo, teme que un solo prisma no baste para hacer patente una diferencia tan pequeña. Por esa razón, construirá un instrumento muy sofisticado que hace pasar al rayo de luz por 12 prismas consecutivos, con el fin de amplificar el efecto.

No obstante, antes de medir la velocidad de la Tierra respecto a las estrellas “fijas”, trata de verificar el efecto utilizando la velocidad relativa de la Tierra y un planeta: “La veracidad de esta hipótesis será sometida a una prueba real: ¿la variación en la refracción es consecuencia de la variación en la velocidad relativa?”¹⁶ Para llevar a cabo dicha prueba, escoge un planeta muy luminoso cuyo movimiento es conocido: Júpiter. El procedimiento experimental consiste en comparar la refracción (utilizando su instrumento) en dos situaciones distintas: para empezar, cuando “la Tierra se acerca directamente” al planeta, y después cuando se aleja de éste. Blair espera observar una variación en el ángulo de refracción debido al cambio de la velocidad relativa en ambas situaciones, y así demostrar que existe el efecto que relaciona ambos fenómenos. Tal experimento no es distinto, hay que mencionarlo, de los que hoy se realizan para medir un efecto Doppler-Fizeau. Se trata simplemente de comparar dos espectros para medir el desfase entre los rayos debido a la velocidad relativa. Por supuesto, la teoría que explica el fenómeno es diferente de la que utilizarán Doppler y Fizeau. Sin embargo, las observaciones son las mismas (se trata de medir un desplazamiento espectral) y las fórmulas¹⁷ que permiten hacerlo son paralelas. Blair, después de describir el efecto (que en lo sucesivo llamaremos “Blair-Michell”) y de suponer que ha sido verificado, antes de utilizarlo para medir velocidades estelares, quiere asegurarse de que existe la acción de la gravedad sobre la luz, pues es un efecto secundario que puede perturbar las mediciones y verificar su magnitud:

M. Michel [*sic*], en su artículo [de 1784] antes mencionado, ha subrayado que otra causa podría afectar la velocidad de la luz. Sería deseable poder imaginar un experimento que exhibiera el efecto de la gravedad sobre la luz sin el peligro de confundirlo con el efecto debido a las causas ya elucidadas. No veo mejor método de conseguir esto que comparar la velocidad de la luz emitida por el Sol con la velocidad de la luz emitida por un objeto terrestre. La luz emitida por una vela no puede ser afectada sensiblemente por la gravedad, y, como se ha postulado en todo este razonamiento que la velocidad con la cual es emitida la luz no varía, a menos que se vea afectada por alguna circunstancia secundaria, parecería que dicho punto podría esclarecerse si la diferencia entre las velocidades de la luz del Sol y la luz de la vela pudiera comprobarse. Lo anterior, hay que reconocerlo, sólo puede lograrse con un experimento muy delicado. M. Michel ha calculado la mayor disminución que la velocidad de la luz procedente del Sol puede sufrir a causa de la gravedad: 1/494 000 de su velocidad original. Por consiguiente, la diferencia de refracción [...] en el instrumento antes descrito no puede ser mayor de unos pocos segundos. No obstante, hay una circunstancia favorable en el hecho de que, si ambos objetos son lo suficientemente luminosos, el experimento podría llevarse hasta la mejor de las posibilidades.¹⁸

Sin embargo, si todo es tan sencillo, ¿por qué ni Blair ni Arago observaron jamás desfase alguno del tipo Doppler-Fizeau? En lo que respecta a Blair, la razón es evidente: no pudo llevar a cabo ninguna observación, como comprenderemos después de describir su instrumento, que resultó demasiado complejo. En cuanto a Arago, utilizará un instrumento mejor adaptado y más sencillo, dotado de un solo prisma, pero no podrá detectar ningún efecto. La razón es clara: al igual que Blair, utiliza prismas acromáticos, contruidos de manera que la luz se disperse tan poco como sea posible, así que la sensibilidad de su aparato es insuficiente.¹⁹

UN “FENÓMENO MUY CURIOSO”

Aunque crea firmemente en la teoría de la emisión, Blair no es dogmático: a fin de cuentas, no es imposible que la teoría ondulatoria sea la buena y que la velocidad de la luz no dependa de la velocidad de la fuente, como sugiere: recordemos, aunque Blair no lo haga explícitamente, el fenómeno de la aberración. “Y en ese caso —prosigue— creo que podría observarse un fenómeno muy curioso.”²⁰ “La luz del Sol no está exenta de objeciones, y no podremos confiar en ella más que en la de los objetos terrestres hasta que la teoría de la luz sea mejor comprendida. Pues a pesar de lo que se ha dicho sobre su improbabilidad, [no es imposible] que la luz sea emitida con la misma velocidad, esté la fuente en reposo o en movimiento.”²¹

La velocidad de la luz emitida por un astro, ¿podría ser independiente del movimiento de la fuente emisora, sea ésta una estrella o el Sol? Entonces, “la misma diferencia de refracción debe experimentarse como consecuencia del movimiento de la Tierra, ya sea bajo la luz de una vela o la de una estrella fija, y en ese caso sería posible determinar en un cuarto cerrado la velocidad y la dirección del movimiento de la Tierra, e incluso del Sistema Solar, en cuanto pudiéramos fiarnos del instrumento utilizado”.²²

A continuación, Blair precisa la lógica inapelable de dicho “fenómeno muy curioso”:

Esto puede parecer una proposición oscura, pero su veracidad será patente al considerar que el rayo luminoso de la vela se encuentra en el mismo estado relativo al prisma que un rayo luminoso procedente de una estrella fija cuya posición sea similar respecto a la Tierra, y en consecuencia la refracción debería ser la misma. De tal manera, al observar con el instrumento un punto iluminado por la vela *en todas direcciones*, la separación y la distancia de las imágenes directa y reflejada permitirán determinar el movimiento absoluto y la dirección de la vela y, por consiguiente, de la Tierra.²³

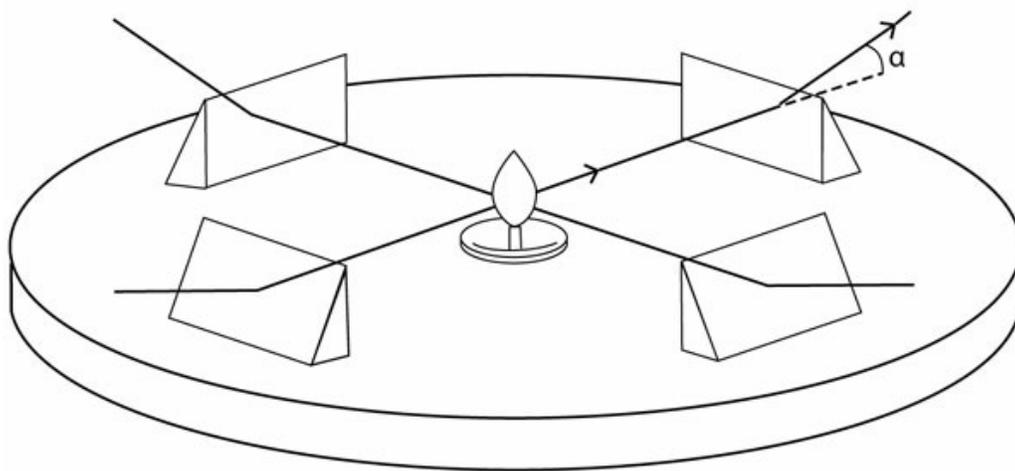


FIGURA IX.5. Un “fenómeno muy curioso”.

Al variar la posición del prisma respecto a la vela, también variará la velocidad de la luz incidente, y con ella el ángulo de refracción, α .

Aquí Blair razona en el contexto de la teoría ondulatoria, del éter: la velocidad de la luz no depende de la fuente, pero sí del observador. En tal caso, la luz de una vela y la de una estrella son independientes de los movimientos de éstas. La luz de la vela llega al prisma en el mismo estado que la luz de una estrella, y el efecto de refracción debería ser el mismo en ambos casos. La velocidad de la luz de la vela, atrapada en el éter, no depende de su propia velocidad, pero, al ser recibida por el prisma, dependerá de la velocidad del instrumento, es decir, de la Tierra. Puede tratarse de la velocidad de rotación de la Tierra, de la velocidad de traslación de la Tierra alrededor del Sol o incluso de la velocidad del Sistema Solar. De esta manera, al medir el ángulo de refracción de la luz de la vela en diferentes direcciones a puerta cerrada, las mediciones variarán de acuerdo con la velocidad absoluta de la Tierra respecto al éter, palabra que Blair no utiliza. No se trata sino del principio de experimento de Michelson y Moreley con un siglo de anticipación: utilizar la óptica para hacer evidente el movimiento absoluto de la Tierra en relación con el éter. El principio, pero no el montaje ni la precisión; hay que insistir en esto, pues las interferencias no han sido aún observadas ni comprendidas...

Dicho lo anterior, Blair no cree de manera alguna en el éxito de tal experimento, pues está persuadido de la validez de la teoría de la emisión o, más precisamente, del principio de la relatividad aplicado a la luz que dicha teoría implica: “[...] ya que la hipótesis más

probable es que la velocidad de la luz sea afectada por el movimiento de los cuerpos que la emiten o la reflejan”.²⁴ Por sorprendente que resulte, Blair es relativista *a priori*, relativista clásico, galileo-newtoniano. Se apoya en el principio de la relatividad y considera que la adición de velocidades se aplica también a la luz. La palabra “relativo” aparece con mucha frecuencia en su texto. Por esta razón se niega a aceptar la proposición que acaba de enunciar; se trata de una “proposición oscura”, “un fenómeno muy curioso”: no cree que pueda llegar a ser observado. Y no se equivoca realmente...

EL INSTRUMENTO DE BLAIR

Nos corresponde ahora describir el instrumento de Blair y mencionar sus limitaciones. Blair discutió su construcción con Dollond, y estaba consciente de que, con muchos prismas en serie, la absorción progresiva de la luz constituía el problema más delicado: “La finalidad de este instrumento —escribe— es obtener la mayor refracción posible con la mínima pérdida de luz”.²⁵ Sin embargo, en vez de limitar la pérdida de luz utilizando los prismas más sencillos que fuera posible, Blair se decidió finalmente por prismas compuestos por tres prismas simples: dos en *crown* y el otro en *flint*, unidos con un tipo de gelatina cuyo índice de refracción era cercano al de los cristales. También determinó el ángulo de refracción más propicio para evitar la pérdida de luz.

La figura IX.7 muestra la manera en que fue concebido el instrumento de Blair. Consistía en un telescopio de refracción T y 12 prismas acromáticos B, C, D, ..., N y A, engarzados en una montura circular de madera W. Pueden verse dos rayos luminosos S y G procedentes de la misma estrella. El primero entra directamente en el telescopio, mientras que el segundo pasa por los prismas B, C, D, ..., N y A, así que es refractado 24 veces (en cada cara de cada prisma) antes de llegar al lente. Cada prisma está inclinado 30° para que el rayo incidente pueda dar toda la vuelta al instrumento ($12 \times 30^\circ = 360^\circ$). La refracción diferencial, débil, se compensa con la posición del último prisma, A.

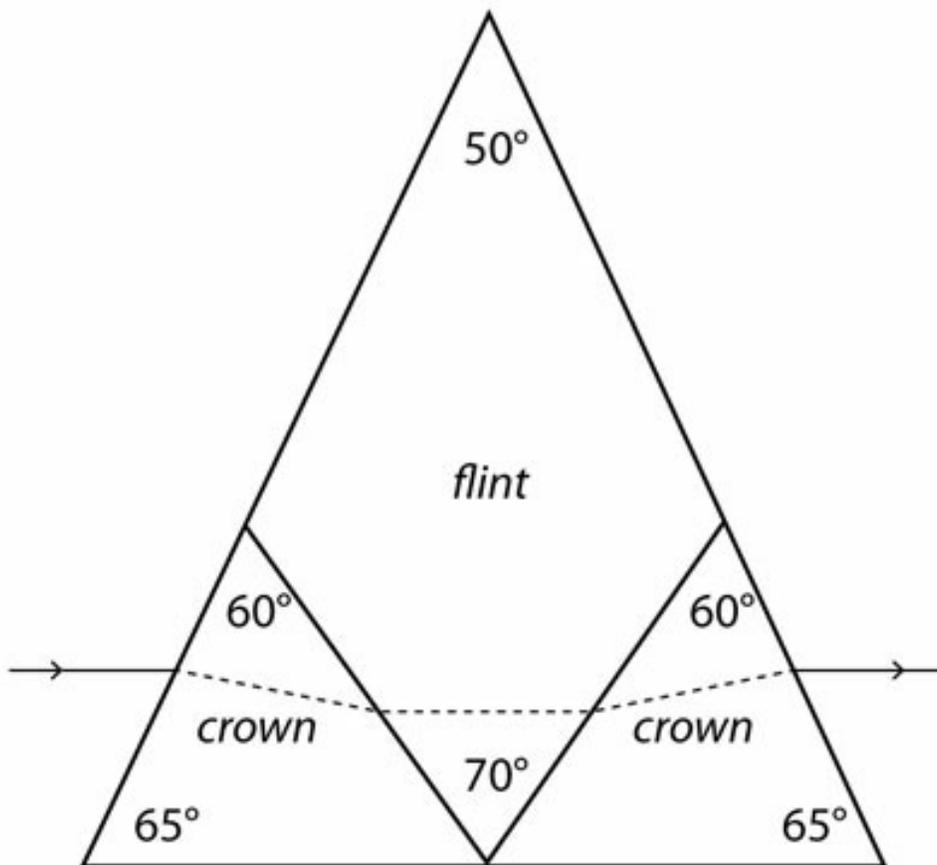


FIGURA IX.6. Geometría de los prismas en el instrumento de Blair.

Blair acomoda el instrumento de manera que las dos imágenes (S y G, procedentes de la misma estrella) coincidan en el centro del campo del telescopio, por ejemplo, si el instrumento está dirigido hacia una estrella de la cual se aleja la Tierra. Sin cambiar los parámetros del instrumento, lo dirige después hacia una estrella hacia la cual se acerca la Tierra. La velocidad del observador respecto a la segunda estrella difiere²⁶ de la velocidad del observador respecto a la primera. A consecuencia del efecto Blair-Michell, los dos haces de luz ya no serán paralelos. El ángulo de refracción observado, producido por los 12 prismas, será 24 veces mayor que el ángulo de refracción debido a cada cara. Como puede comprenderse, Blair se interesa por el valor del efecto esperado. Aunque no los muestra explícitamente, por sus comentarios es claro que ha realizado cálculos precisos a partir de las fórmulas de la refracción correspondientes a la teoría corpuscular de Newton. Así, la variación del ángulo de refracción en cada cara, debida al movimiento de la Tierra, sería de $5.4''$, de modo que la variación total sería un poco mayor de $2'9''$.²⁷ De ese cálculo teórico perfectamente realizado, Blair deduce un efecto de más de $4'$ de arco (duplicado por el hecho de comparar la refracción cuando la Tierra se acerca a la estrella y cuando se aleja de ella), “una cantidad lo bastante grande como para ser apreciada a simple vista, sin requerir ampliación”.²⁸

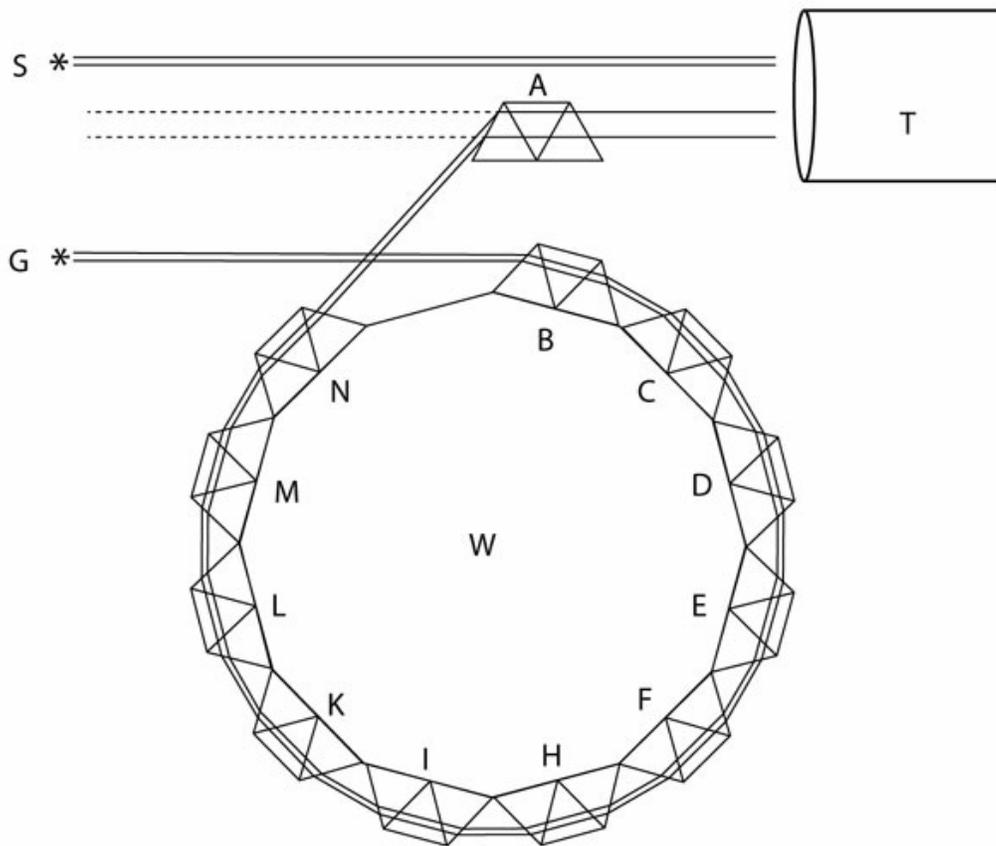


FIGURA IX.7. *El instrumento de Robert Blair.*

UN PROGRAMA DE OBSERVACIÓN DE LAS VELOCIDADES RADIALES

Entonces Blair dispone de un método para medir la velocidad de la Tierra respecto a cualquier cuerpo celeste: el efecto Blair-Michell, y cuenta también con una herramienta: el prisma.²⁹ Hace falta utilizarlos, y con mano maestra propondrá lo que no es sino un programa para medir las velocidades radiales de todas las fuentes luminosas celestes posibles:

Si, gracias a dicha serie de experimentos, se encuentra que la velocidad de la luz depende del movimiento de los cuerpos por los cuales es emitida o reflejada, entonces el instrumento promete determinar el movimiento absoluto con el que cualquier planeta, cometa o estrella fija se aproxima o se aleja del observador, información cuyas ventajas no hace falta ilustrar.³⁰

A partir de tan elaborado programa, Blair espera poder determinar también el movimiento del Sol y resolver “la famosa cuestión, discutida desde hace tiempo”,³¹ de saber si el Sistema Solar está en reposo o en movimiento y, en el segundo caso, determinar la “dirección y la magnitud de su movimiento”. Para ello, basta medir la refracción de la luz procedente de una estrella fija en la dirección del movimiento de la

Tierra y compararla con la refracción de la luz procedente de una vela encendida en un cuarto cerrado. Blair no se limitará a la determinación de las velocidades radiales: ve en su método una manera de medir las velocidades de rotación de objetos estelares cuando la falta de manchas impide determinarlas por observación:

Hay también en tal caso otro uso posible, que consiste en determinar si dichos planetas, cuando no presentan manchas en la superficie, giran o no alrededor de sus ejes, así como determinar la posición de su ecuador y la dirección de su movimiento de rotación [...] Pues la hipótesis que hemos planteado no concierne al cuerpo entero sino al entorno físico en sí donde la luz es emitida o reflejada.³²

Si un planeta gira de oriente a occidente, la velocidad de la luz emitida en el oriente sobre el ecuador estará dirigida hacia la Tierra, mientras que la que es emitida en el occidente se alejará de ella. Desde el punto de vista cinemático, hay una diferencia en las velocidades de ambos haces igual al doble de la velocidad de rotación del planeta, lo que implica una diferencia en la refracción que con el tiempo sería medible.

Entonces Blair enuncia una afirmación fundamental: se obtendrá la información independientemente de la distancia. “Sin embargo hay, según hemos notado, una propiedad particular y singular de la información que este instrumento promete transmitir al ojo: que no se ve disminuida ni viciada de manera alguna por la distancia.”³³ Observemos de paso lo moderno de su concepción: la luz aporta una “información” y ya no solamente una “imagen”, lo que resulta muy notable. Sin duda, Blair se deja llevar un poco por el optimismo, pero el asunto es trivial, como vimos con Michell: “Si una estrella fija gira alrededor de su eje con cierta velocidad, la velocidad en la zona ecuatorial y la posición del ecuador estarán determinadas con la misma precisión que las del planeta más próximo”.³⁴ De esta forma, su instrumento debería ser capaz de medir la diferencia de velocidad entre las distintas partes de los planetas, e incluso de las estrellas: la velocidad de una mancha situada cerca del polo de un planeta es diferente de la que tiene una mancha cercana al ecuador. Esta diferencia de velocidades (lineal, pues la velocidad de rotación es la misma) inducirá una distorsión de la imagen, que Blair espera poder estudiar... Así, su método aportará una gran cantidad de información y él está consciente de eso, más que Doppler y tanto como Fizeau. No obstante, su instrumento no estará a la altura de sus ambiciones, como ya se ha dado a entender:

Numerosas dificultades se derivan de la imperfección en la hechura de los prismas y en los materiales que los componen. La aberración [cromática] más insignificante de los rayos luminosos, ocasionada por dichos defectos, disminuye sensiblemente su nitidez [...] Júpiter, observado a través de un telescopio que agranda unas 30 veces la imagen y colocando sólo dos prismas acromáticos como los antes descritos, aparece demasiado borroso para llegar a alguna conclusión [...] Para realizar el experimento se requieren prismas que tengan muchas menos imperfecciones que aquellos de los que dispuse.³⁵

Así que no observa nada... Lo cual explica él por la absorción debida al gran número de prismas utilizados: “Desde que me interesé por el tema, mis aprensiones en cuanto a la falta de luz me hicieron dudar: ¿no sería mejor utilizar sólo pocos prismas?”³⁶

Entonces planea simplificar su instrumento: “Encontré que era posible emplear ese método fijando uno de los prismas en un cuadrante de Halley, de manera que al maniobrar el índice pudiera ponerse la imagen directa de la vela en contacto con la que había sido primero reflejada y después refractada. Sin embargo, no utilicé dicho método”.³⁷ Se trata, como veremos en el capítulo X, del método que empleará Arago. En una posdata a su manuscrito, Blair expresará su temor “de no poder por lo pronto terminar los experimentos propuestos” y su esperanza de “que un aparato de este tipo, bien construido, pueda aplicarse con éxito a varios de los casos ya mencionados en este artículo, si la imperfección de los cristales y su maestría lo hicieran posible”, deseando finalmente “que el tema sea retomado por alguien más competente”.³⁸

DE BLAIR A ARAGO

El manuscrito de Blair circuló en el medio científico y fue leído en la primavera de 1786 ante la Real Sociedad. Sin embargo, parece haber despertado poco interés. En los trabajos de John Robison, un especialista en óptica y profesor de filosofía natural en la Universidad de Edimburgo, donde Blair era tan poco apreciado, se retoman las ideas del manuscrito, con el que su autor cuenta claramente. El primer artículo de Robison sobre el tema, “Sobre el movimiento de la luz, en cuanto es afectado por las sustancias refractantes y reflejantes que están en movimiento”,³⁹ trata de la óptica de los cuerpos en movimiento, como puede verse. Más precisamente, y siguiendo a Bošković, el interés de Robison radica en el problema de la aberración medida con un telescopio lleno de agua, cuestión que tomará gran importancia en el siglo XIX con George Airy, y que depende tanto del valor de la velocidad de la luz en el agua como de la manera en que debe calcularse la aberración.⁴⁰ Encontramos en el artículo de Robison una presentación de óptica corpuscular, sin duda la más detallada desde Clairaut, a quien no se cita. Expone claramente, y apoyándose en cálculos, la teoría de la refracción, de acuerdo con los *Principia* de Newton. Robison ve en el trabajo de Blair “un método de investigación extremadamente ingenioso y que parece destinado al éxito”, además de “una oportunidad para determinar cuál de dichas hipótesis [teorías corpuscular u ondulatoria] debe tomarse como verdadera”.⁴¹ Retoma la idea de Blair según la cual podría medirse el periodo de rotación de Júpiter alrededor de su eje.

En 1797 Robison publica en la *Encyclopædia Britannica* un artículo sobre óptica que será comentado por Young. En él expone un análisis detallado de las controversias entre la teoría de las ondulaciones sostenida por Euler y la teoría corpuscular de los *Principia*: “No debemos desesperar de ser capaces de decidir, por medio de experimentos, cuál de dichas opiniones es la más cercana a la verdad, pues hay fenómenos cuyo resultado debe ser sensiblemente diferente de acuerdo con cada hipótesis”.⁴² En ese largo estudio sobre el tema, Robison menciona la cuestión del color de los satélites de Júpiter al surgir, una consecuencia de la hipótesis de Newton-De

Mairan que, nos recuerda, no fue observada. Sin embargo, es claro que ha entendido bien el interés del efecto Blair-Michell, según muestra el subtítulo “La refracción de una estrella, mayor en la noche que en la mañana”. En el texto explica:

[...] la refracción de una estrella que pasa por nuestro meridiano a las seis de la tarde debería ser mayor que la de una estrella que pasa a las seis de la mañana, pues nos alejamos de la primera y nos acercamos a la segunda. Sin embargo, la diferencia es de sólo $1/5\ 000$ del total y no hay manera de observarla hoy día con suficiente precisión. Una observación de ese tipo ha sido propuesta por el doctor Blair, profesor de astronomía práctica en la Universidad de Edimburgo, que permite esperar una diferencia muy apreciable en la refracción [...] Dicho experimento es uno de los más interesantes de la ciencia óptica, pues su resultado será una piedra de toque severa para las teorías que han tratado de explicar el fenómeno de acuerdo a principios mecánicos.⁴³

Insiste en la idea, que procede de Blair, de que la luz reflejada por la cola de un cometa debe sufrir una refringencia y una aberración mayores, a causa de la velocidad respecto al Sol de las partículas que la emiten.

Robison habla en seguida de la constancia en las mediciones de la velocidad de la luz, lo que le da un argumento serio en contra del sistema de la emisión y hace que se incline hacia el éter: “Es ante todo sorprendente que la velocidad de su luz [de las estrellas] sea la misma que la velocidad de la luz del Sol”.⁴⁴ Percibe “cierta relación entre el Sistema Solar y el resto del universo”.⁴⁵ Y hace notar con mucha razón:

Si se concibe la luz como partículas pequeñas de materia emitidas por la acción de fuerzas de aceleración de cierto tipo, la gran diversidad que observamos en la constitución de los cuerpos sublunares nos llevaría a esperar diferencias en este caso particular. No obstante, resulta que la luz de una vela, de una luciérnaga, etc., sufre la misma refracción y está compuesta por los mismos colores. Tal estado de la situación debe aportar un argumento en contra de la teoría de la emisión. Parece más probable que la constancia en la velocidad se deba a la naturaleza del medio, que determina la frecuencia de sus ondulaciones y la velocidad de su propagación.⁴⁶

En la primavera de 1804, algunos meses antes de su muerte, Robison le escribió a Herschel, suplicándole que hiciera “una observación de las más importantes, decisiva en mi opinión, sobre la cuestión de saber si la luz es una emisión de materia o una ondulación elástica”. Se trata de una proposición que aparece explícitamente en el manuscrito de Blair, y que consiste en verificar si la refracción es diferente en puntos opuestos de los anillos de Saturno; la elección de éstos se debe a que se trata de un cuerpo mayor que el planeta mismo y a que su elevada velocidad de rotación debería resultar en un valor significativo del efecto Blair: “Si la luz es una emisión de materia por los cuerpos luminosos y obedece a las grandes leyes del movimiento, parece seguirse que la luz reflejada por el extremo oriental del anillo de Saturno viene hacia nosotros con una velocidad $1/2\ 500$ mayor que la luz reflejada por el extremo occidental. Si en efecto es así, ambos haces serán refractados de manera diferente”.⁴⁷

En un “Memorándum de experimentos por realizar relativos al poder de las

atracciones y las repulsiones”, encontramos en Herschel ideas parecidas a las de Blair; se trata de notas personales escritas de manera muy esquemática, de cuestiones cercanas al efecto Blair-Michell. En una primera nota sobre el tema, Herschel plantea la hipótesis general de que “la luz de las estrellas probablemente no tiene una misma velocidad, a causa del movimiento propio de ellas”.⁴⁸ Explora la idea preguntándose si “una estrella que tenga un movimiento propio significativo alejándose del ojo no presentará una separación mayor en sus colores, al pasar por un prisma, que una estrella cuyo movimiento propio se dirija hacia [el ojo]”.⁴⁹ Finalmente, en una tercera nota plantea la siguiente cuestión: “Los intervalos prismáticos de la luz de una estrella sobre la eclíptica ¿son diferentes cuando la velocidad del movimiento de la Tierra viene de la estrella o va hacia ella?”⁵⁰ Es muy notable que Herschel hable de diferencias en el “intervalo de los colores” relacionadas con la velocidad de la fuente y de “intervalos prismáticos del color”. Es difícil dejar de ver una ampliación del espectro entre los colores, ampliación que él asocia con el movimiento, lo que significa que esperaba observar un espectro más desplazado.⁵¹ Como la fecha del manuscrito es incierta, resulta difícil saber si dichas cuestiones fueron suscitadas por el interés de Robison o si son anteriores, pues Herschel conocía bien el trabajo de Michell, según hemos mencionado en varias ocasiones. Entonces parece que, de manera extremadamente discreta, W. Herschel apoya las ideas de Blair, e incluso va un poco más allá.

Dichas ideas pasaron a Arago a través de Robison. Se trata del único vector de tan originales ideas, que aparentemente jamás llegarán a Doppler ni a Fizeau, ni mucho menos a Michelson. La teoría de la emisión está en su ocaso y los esfuerzos de la escuela francesa, la Société d’Arcueil dominada por Laplace y Biot, no podrán hacer gran cosa. Pues, ¿cómo comprender las interferencias en ese marco? El principio del siglo XIX verá, con Thomas Young y Augustin Fresnel, el verdadero advenimiento de la teoría ondulatoria de la luz, y es a través de sus trabajos sobre la velocidad de la luz, y gracias a su interpretación por parte de Fresnel, como Arago se convencerá de tal necesidad.

X. EL EXPERIMENTO DE ARAGO

DE MICHELL A ARAGO

Recordamos el interés de Laplace por lo que llamó “cuerpos oscuros” (capítulo VIII). No hay duda de que toma de Michell sus consideraciones al respecto. Aunque se interese por la física, y en particular por la óptica, Laplace es ante todo un especialista en mecánica celeste. En cuanto a la luz, se interesará esencialmente en su dinámica y poco en su cinemática, como muchos de sus contemporáneos. Aceptando entonces temporalmente, de acuerdo con Michell, la disminución en la velocidad de la luz debida a la acción de la gravedad, Arago hace notar en las primeras ediciones de la *Exposición del sistema del mundo* de Laplace, justo después de hablar de los cuerpos oscuros, que una estrella que “sobrepasara considerablemente al Sol disminuiría sensiblemente la velocidad de la luz, de manera que aumentaría la extensión de su aberración”.¹ Para el autor “esta diferencia en la aberración de las estrellas” es uno de los “principales objetos de la astronomía futura”. En 1808, en la tercera edición de su *Exposición...*, que ha retocado cuidadosamente, Laplace retoma la cuestión de la aberración de las estrellas: “La aberración de las estrellas depende, como vimos en el libro segundo, de la velocidad de su luz combinada con la velocidad de la Tierra en su órbita. No será entonces la misma para todos los astros *que se suponen en posición parecida* si sus rayos nos alcanzan con velocidades diferentes”.² Así, según Laplace y siguiendo la lógica de la cinemática clásica, la aberración dependería de la velocidad de la fuente. De cualquier forma, la pequeñez de la aberración hacía difícil evidenciar dicha relación. Sin embargo, Laplace por entonces está consciente no sólo de la acción gravitatoria de la fuente sobre la velocidad de la luz, sino también del efecto Blair-Michell: “[...] la enorme influencia que tiene la velocidad de la luz sobre su refracción cuando pasa a través de un medio diáfano constituye un método muy preciso para determinar las velocidades respectivas de los rayos que [las estrellas] *nos envían*: basta fijar un prisma de cristal frente al objetivo de un telescopio y medir la desviación que resulta en la posición aparente de los astros”.³ También habla de los resultados de los primeros experimentos hechos en el Observatorio de París por Arago:

De esta manera, se ha comprobado que la velocidad de la luz directa y reflejada, procedente de todos los objetos celestes y terrestres, es exactamente la misma. Los experimentos que Arrago [*sic*] ha tenido a bien realizar a petición mía no dejan lugar a duda sobre tal punto de la física, importante en astronomía, en cuanto a que demuestra la exactitud de las fórmulas de la aberración de los astros.⁴

“A petición mía...”, una reivindicación que Arago nunca admitirá.

En 1813, en la cuarta edición de la misma obra, Laplace continúa con su propósito, el

cual precisa:

La velocidad de la luz de las estrellas no es igual si se mide en distintos puntos del orbe terrestre. Es mayor cuando su movimiento es contrario al de la Tierra, y menor cuando ambos movimientos coinciden. Aunque la diferencia que resulta en la velocidad relativa de un rayo luminoso no sea mayor de $1/5\ 000$ de la velocidad total, puede producir variaciones sensibles en la desviación de la luz que atraviesa un prisma.⁵

Entonces también Laplace sostiene claramente que la cinemática de la luz es idéntica a la de las partículas materiales: la velocidad de la luz depende, lógicamente, de la velocidad de la fuente y de la del observador terrestre, de acuerdo con el principio de la relatividad clásico. Pero, ¿cómo hacer concordar esto con el hecho de que la velocidad de la luz sea siempre constante? Laplace no pronuncia una palabra al respecto. De hecho, estos textos de Laplace son los primeros comentarios publicados sobre los experimentos llevados a cabo por Arago sobre la velocidad de la luz, entre 1806 y 1810. Antes de hablar sobre dichos trabajos, veamos sus pininos en astronomía.

ARAGO: UNA CARRERA RELÁMPAGO

Nacido el año de 1786 en Estagel, cerca de Perpiñán, François Arago ingresa en la École Polytechnique en 1803, a la edad de 17 años. Graduado el sexto de su generación, y no el primero como dice la leyenda, tiene como profesor a Gaspard Monge, encuentra pronto a Siméon-Denis Poisson y es distinguido por Laplace, quien lo hace nombrar secretario bibliotecario en el Observatorio de París en 1805, cuando tiene 19 años. Conoce a Alexis Bouvard, un astrónomo que lo asocia a sus trabajos sobre cometas, por lo que su nombre aparece desde finales de 1805 en los anales de la Academia.⁶

Recién llegado al Observatorio de París, Arago colabora con Jean-Baptiste Biot, quien le encarga “ocuparse” de sus experimentos sobre la refracción de los gases. Utilizando un prisma hueco del que se había servido Borda, ambos realizan mediciones sobre las fuerzas refringentes de diversos gases encerrados en el prisma. Es claro que su referencia es la teoría corpuscular de Newton. Su idea es que el corpúsculo luminoso es acelerado de pronto por la fuerza refringente, lo que produce el fenómeno de refracción. Así, se maravillan de “la intensidad casi inconcebible de la acción de los cuerpos sobre la luz, intensidad que en ocasiones llega a duplicar en un instante infinitamente pequeño la velocidad que tiene en el espacio”. Esto los sorprende tanto que poco después precisan el punto:

Entonces en el diamante, donde dicha razón es mayor de 2, la velocidad de la luz se vuelve dos veces mayor; esto significa que se acrecienta en más de 70 000 leguas por segundo. Dicho aumento, que no subsiste más que por un instante indivisible, es adquirido y perdido en un intervalo de tiempo infinitamente pequeño, ya que el efecto de la refracción se produce solamente cerca de la superficie, en una capa cuyo espesor es imperceptible.⁷

Sin embargo, hace falta explicar el hecho de que la velocidad de la luz al salir del

prisma retome el valor que tenía al entrar: “En cuanto la luz penetra en el cuerpo, la acción de las capas que se encuentran delante de ella y la impulsan se equilibra y anula con la acción de las capas que ha atravesado y la retienen con una fuerza igual. Esto produce la uniformidad de su movimiento, uniformidad que sólo es afectada cuando la luz entra y sale del cuerpo”.⁸

Se trata de una línea de investigación que interesará después a Biot y a Laplace, quienes demostrarán en diversos casos que la velocidad de la luz es siempre la misma en un mismo medio que, hay que subrayarlo, no esté en movimiento.⁹ Dicho trabajo será la causa del primer conflicto entre Arago y Biot, quien habría querido que el artículo apareciera solamente con su nombre.¹⁰ De esta manera, antes de haber cumplido 20 años, Arago colabora ya con dos académicos, Biot y Bouvard, y es apoyado por un tercero, que no es otro que Laplace, aunque con cierta reticencia.

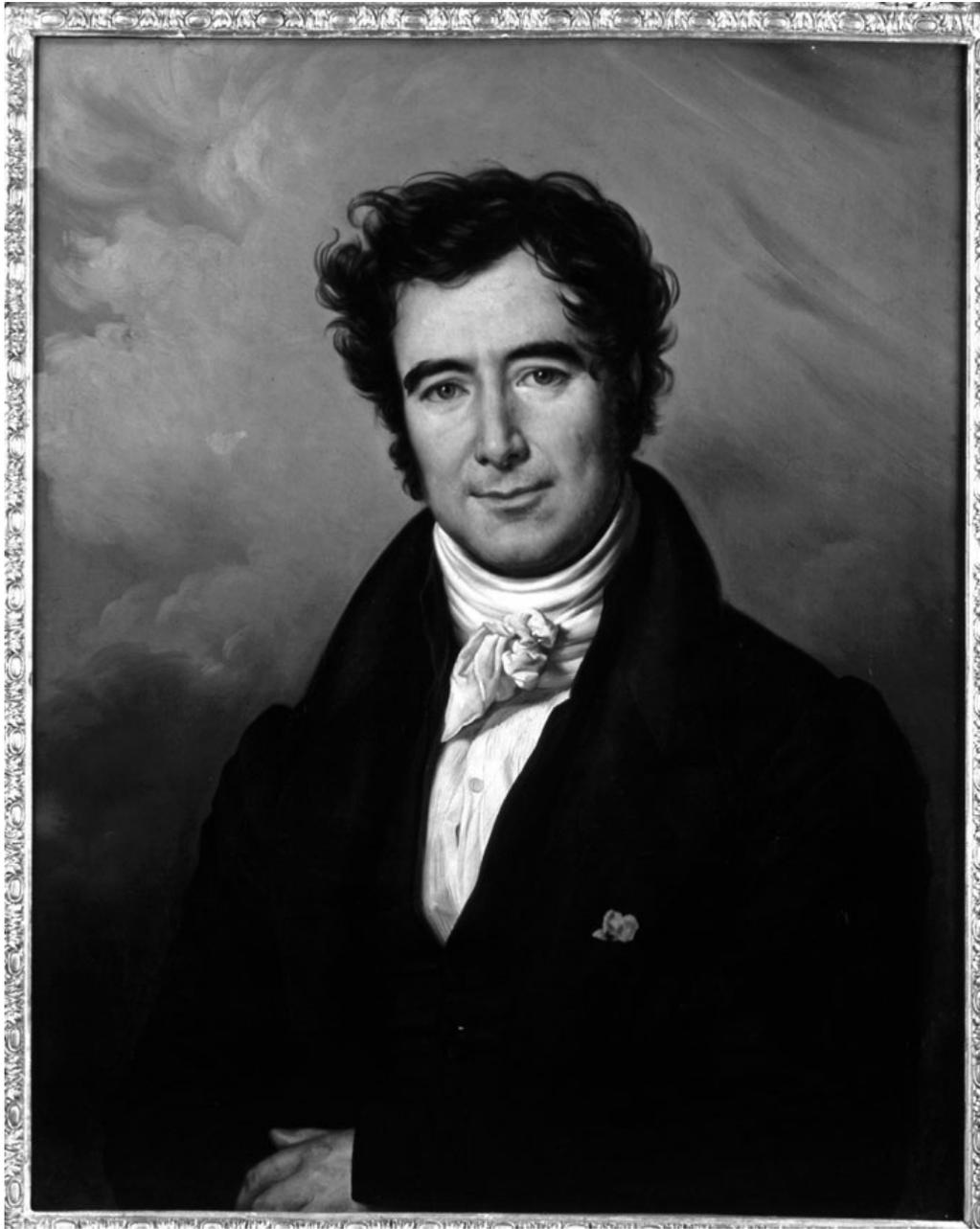


FIGURA X.1. *François Arago retratado por Charles Steuben, 1832.*

Imagen: © Observatorio de París.

En septiembre de 1806 Arago comienza a realizar sus experimentos “concernientes a la velocidad de la luz”, pero debe interrumpirlos y acompañar a Biot a España para realizar operaciones geodésicas: se trata de prolongar por las Baleares el meridiano Dunkerque-Perpiñán, la columna vertebral de lo que hoy llamamos mapas de Cassini, antepasados de los mapas del Estado Mayor franceses; es una operación célebre ya, dirigida por Pierre Méchain de Perpiñán a Barcelona, en la última década del siglo anterior. Arago tardará tres años en regresar. Junto con Biot, escala las montañas españolas para realizar operaciones de triangulación, el Desierto de las Palmas, desde

donde pueden verse Mallorca e Ibiza, y que Méchain escogió como base para sus mediciones. Después desembarcan en Ibiza, regresan al Desierto, a Valencia, a Formentera. Arago lleva consigo el *Opticks* de Newton y lo lee de manera romántica en las cimas de las montañas españolas. A principios de 1808 Biot regresa a Francia, pero Arago debe continuar las mediciones solo y se embarca para Mallorca. El ejército de Napoleón está en España y Arago debe esconderse de los españoles sublevados; intenta escapar a Argel, regresa a España, es en algún momento prisionero de piratas españoles,¹¹ parte para Bugía y se encuentra a finales de 1808 en Argel, donde se libra por poco de ser apresado y es finalmente acogido por el cónsul francés. Esas peripecias podrían haber terminado fácilmente en tragedia. Además, se le creía muerto y la noticia llegó incluso a Francia. No estará de regreso en Marsella sino hasta julio de 1809. Al desembarcar de Argel, acababa de ser nombrado adjunto de la Oficina de Longitudes Geográficas, que depende por entonces del Observatorio de París. Se habla de otorgarle cierto galardón, que finalmente se le entrega a otro astrónomo del Observatorio de París.

En la Academia, su trabajo se ha seguido con cuidado. El 1° de septiembre de 1806, antes de su partida a España, Arago había podido leer un primer artículo sobre la velocidad de la luz. A su regreso, en la sesión del 4 de septiembre de 1809, lee un trabajo sobre la prolongación del meridiano, mientras que Delambre, regocijándose del “regreso casi inesperado de M. Arago”, leerá una larga crítica extremadamente elogiosa, refrendada por Laplace, de su artículo sobre la velocidad de la luz de 1806. Gracias al rebullicio que se hizo por su regreso y por sus trabajos, se habla ya de asignarle una plaza de académico en la cátedra de Jérôme Lalande, en la primera clase del instituto; tiene sólo 23 años. La discusión es viva. Laplace, deseando la nominación de Poisson, sugiere que Arago se pliegue a su voluntad, pero éste no está “de humor para aceptar tal curso de acción”.¹² Laplace se dejará convencer, y el 18 de septiembre de 1809 Arago es elegido por 47 votos entre 52 votantes.

El 10 de diciembre de 1810 leerá un nuevo artículo sobre la velocidad de la luz, que probablemente sea el definitivo, según lo que dice Delambre:

El autor quiso dar continuidad a ese trabajo importante. En consecuencia, leyó hace pocos días en la Clase un nuevo artículo, en el que aparece la afirmación plena y completa de lo que ya había anunciado, junto con otros hechos no menos curiosos y experimentos aún más concluyentes [...] Espera el buen tiempo para intentar demostraciones nuevas y llegar a conclusiones de las que cree haberse asegurado, pero para las que quiere proporcionar pruebas irrefutables. No entraremos más en detalles el día de hoy, en particular porque no se nos ha podido enviar el artículo, y esperaremos a que termine por completo el proyecto que se ha planteado.¹³

Dicho lo anterior, sorprende que Arago, que tenía sólo 24 años, no se tomara el tiempo de publicar un manuscrito que sin duda tenía ya redactado. Tal publicación no podía sino servir a su carrera. Sin duda se debió en parte a que aún quería precisar ciertos puntos, realizar ciertos experimentos. Pero se debe también a que no lo considera un trabajo muy valioso. Por ejemplo, en su libro *Historia de mi juventud* no le dedica más que cuatro renglones, en una página que trata sobre los trabajos realizados antes de

1810 y con el fin de justificar su admisión en la academia: “Un trabajo sobre la velocidad de la luz, realizado con un prisma situado ante el objetivo del telescopio de un círculo mural, había demostrado que las mismas tablas de refracción sirven para el Sol y para todas las estrellas”.¹⁴ En todo caso, es una negligencia lamentable, pues se trata de una cuestión en la cual el interés irá aumentando.

EL EXPERIMENTO DE ARAGO

Así, el artículo sobre la velocidad de la luz de Arago no fue publicado hasta 1853, de manera que no hay razón para dudar del recuerdo que Arago evoca en una nota al pie de dicha publicación:

Recién llegado de África, en 1809, me consagré siendo muy joven, pues tenía sólo 23 años, a realizar diversos experimentos relativos a la influencia que ejerce la velocidad de la luz sobre la refracción. El resultado de mi trabajo fue comunicado a la Primera Clase del Instituto el 10 de diciembre de 1810. Dicho resultado, aunque totalmente distinto del que yo esperaba, suscitó cierto interés. M. Laplace me hizo el honor de mencionarlo en una de las ediciones de la *Exposición del sistema del mundo*. Nuestro ilustre decano, M. Biot, tuvo a bien citarlo en la segunda edición de su *Tratado elemental de astronomía física*. Desde entonces, consideré que podría excusarme de publicar mi artículo. A partir de esa época, debido a que dicho trabajo ha dado pie a investigaciones experimentales y teóricas que se han realizado y proyectado en varios países, relativas al estado en el que se encuentra el éter en los cuerpos sólidos, he sido invitado en numerosas ocasiones a publicarlo; sin embargo, el texto estaba extraviado. Hace pocos días, al acomodar mis papeles por temas, se reencontró el artículo original de 1810. Recordé entonces el deseo expresado por los físicos...¹⁵

Su artículo empieza con una detallada introducción histórica sobre la determinación de la velocidad de la luz, donde son citados Galileo, Descartes, Rømer y Bradley, pero también el trabajo de Michell de 1784, a partir del cual Arago comenta ampliamente la acción de la gravedad sobre la luz, y cuya única referencia explícita en Francia será este artículo. Sólo después de que sus primeros experimentos estuvieran “casi completados” tendría conocimiento de las obras de Robisson (*sic*), Bošković, Michell y Blair.¹⁶ Entonces, Arago habría diseñado su experimento independientemente de Blair y Michell. El parecido, por no decir la identidad, de su montaje experimental y el propuesto por Blair podría suscitar alguna duda, pero parece difícil que Arago poseyera una copia del manuscrito de Blair. De cualquier manera, una vez comprendido el “método” de Michell, se imponía ese tipo de diseño experimental. Arago retoma la idea y realiza experimentos idénticos a los que Blair tuvo en mente pero no pudo llevar a cabo.

Como Bradley, Arago plantea que la aberración depende “del movimiento combinado de la luz y del observador”,¹⁷ lo que permite explicar la elipse de aberración. Sin embargo, para Arago la cuestión central surge de la constancia del ángulo máximo de aberración, que implica la constancia de la velocidad de la luz, pues el ángulo depende de ella (véase el capítulo V). Se apoya, como Blair, en las observaciones de Bradley:

Por otra parte, parece muy natural suponer que las estrellas de diversas magnitudes se encuentren a distancias diferentes, y dado que sus aberraciones absolutas, calculadas a partir de observaciones directas, son aparentemente las mismas, Bradley concluyó que el movimiento de la luz es uniforme a cualquier distancia y que la aberración de todos los cuerpos celestes puede calcularse con la misma constante.¹⁸

No obstante, prosigue Arago, “algunos astrónomos [...] suponen que las estrellas de diversas magnitudes pueden emitir luz a velocidades diferentes, y debemos convenir en que dicha idea es a un tiempo probable y natural, sobre todo en el sistema de la emisión”.¹⁹ Así, Arago considera que la constancia de la velocidad de la luz es muy improbable desde el punto de vista teórico. Subraya claramente que las mediciones de la aberración no son lo bastante precisas como para dirimir el punto: “La observación directa de la aberración es poco adecuada para resolver tal cuestión de manera decisiva, ya que una diferencia en la velocidad de la luz igual a 1/20 de la velocidad total debe producir en la aberración una diferencia de sólo 1”, precisión que por ahora no podemos pretender sobrepasar, ni siquiera utilizando los mejores instrumentos”.²⁰

En ese sentido, sorprende que de Bradley a Arago se haya sacrificado tan fácilmente la cinemática de la luz en el altar de la aberración. Las medidas de la aberración no eran lo suficientemente precisas para implicar la constancia de la velocidad de la luz. Ésa será la conclusión a la que Arago llegue con sus experimentos. No hay duda de que la velocidad de la luz es siempre la misma en un mismo medio, siempre que el medio esté en reposo, punto que precisaron Laplace y Biot. Pero, ¿qué pasa si el medio “diáfano” está en movimiento? En la Tierra, nada, pues las velocidades son muy bajas; entonces hay que considerar movimientos rápidos, como los de los planetas:

No obstante, cabe notar que si los cuerpos refringentes están en movimiento, la refracción que experimenta un rayo de luz no debe calcularse respecto a su velocidad absoluta, sino respecto a esa velocidad aumentada o disminuida por la del cuerpo, es decir, respecto a la velocidad relativa del rayo. Los movimientos que podemos imprimir a los cuerpos sobre la Tierra son demasiado lentos para influir sensiblemente sobre la refracción de la luz, de manera que deben buscarse en los movimientos de los planetas, mucho más rápidos, circunstancias más propicias para evidenciar tales variaciones en la refracción.²¹

De esta manera, siguiendo a Blair, Arago plantea claramente la óptica de los cuerpos en movimiento de acuerdo con el principio de la relatividad y con la adición de velocidades. En su artículo presenta varias razones, además del movimiento de la Tierra tomado en cuenta por la aberración, por las cuales la velocidad de la luz no puede ser constante, como los movimientos de las estrellas y la acción de la gravedad planteada por Michell:

Por otra parte, algunas estrellas deben moverse en el espacio con velocidades muy considerables, pues, a pesar de la pequeñez de su paralaje, se desplazan anualmente de manera muy sensible. La velocidad de los rayos luminosos que nos envían debe entonces ser la resultante de su velocidad primitiva de emisión combinada con la velocidad de la estrella misma, y por consecuencia variar de acuerdo con la magnitud y la dirección del movimiento de los astros.²²

Y es el momento de decir algunas palabras sobre los astros oscuros:

[...] pero una de las causas más poderosas de los cambios en la velocidad de la luz parece ser la diferencia en el tamaño de los diámetros de las estrellas. En efecto, de los cálculos se concluye que una estrella con la misma densidad que el Sol y cuyo diámetro sea unas centenas de veces mayor anulará por completo con su atracción la velocidad de los rayos luminosos, que por lo tanto jamás nos alcanzarían.²³

De esta manera, Arago cuenta con todas las razones por las cuales la velocidad de la luz no puede ser constante. Hace falta encontrar un método, que por supuesto será el de Michell, como fuera repensado por Blair:

Si recordamos que la desviación que experimentan los rayos luminosos al penetrar de manera oblicua en un cuerpo diáfano es función de su velocidad primitiva, será claro que la observación de la desviación total que resulta de atravesar el prisma constituye una medida natural de su velocidad. Además, el método es propicio para mostrar diferencias pequeñas, pues es fácil demostrar que una diferencia de velocidades igual a $1/20$ produce en las desviaciones una diferencia de $2'$, siempre que se utilice un prisma cuyo ángulo no sobrepase $45'$.²⁴

Mientras que una diferencia en la velocidad de la luz igual a $1/20$ induce una diferencia de sólo $1''$ en la aberración, en la desviación por un prisma produce una diferencia de $2'$, más de 100 veces mayor. Es un punto extremadamente importante para una medida tan delicada. Entonces empieza a tomarse conciencia del valor del prisma. Así, Arago busca encontrar una diferencia en la velocidad de la luz utilizando, no la aberración, donde permanece escondida debido a la falta de precisión en las observaciones astronómicas, sino directamente gracias al efecto Blair-Michell. Es probable que haya tomado la idea de Michell, más que de Blair (véase el capítulo IX).

LAS OBSERVACIONES DE ARAGO

Se trata, entonces, de hacer evidentes variaciones en el ángulo de refracción tan pequeñas como sea posible. Para lograrlo, al igual que Blair, Arago emplea un prisma acromático que fija a la cubierta exterior del telescopio del “mural”: antepasado del telescopio meridional, fijo a un muro y destinado a observar el paso de las estrellas por el plano del meridiano. Para poder detectar el efecto, Blair pensó en la multiplicación de los prismas; Arago utiliza uno solo, pero la precisión del mural le permitirá realizar mediciones mucho mejores. El mural de Arago, sin duda uno de los que aún se encuentran en el Observatorio de París, es un instrumento realizado con esmero por Bird: un aparato de grandes dimensiones que permite medir ángulos con gran precisión. “Las cosas así dispuestas, medí en una misma noche, y en épocas distintas, las distancias al cenit de una gran cantidad de estrellas. Dichas distancias, comparadas con las que se observan a simple vista, permiten conocer la desviación que el prisma produjo en los rayos luminosos.”²⁵

En una segunda serie de experimentos Arago fija otro prisma, acromático también

pero cuádruple, al telescopio de un círculo repetidor que permite, al repetir la observación antes y después del pasaje por el meridiano, mejorar su precisión. Sólo la mitad del objetivo está cubierta por el prisma, lo que permite medir directamente la desviación sin que sea necesario, como en el método precedente, medir la posición absoluta del astro observado. Arago mide la velocidad de la luz procedente de estrellas que pasan por el meridiano en diversos momentos, para considerar la dirección del movimiento de la Tierra respecto al de la estrella (es decir, la composición de las velocidades de la luz y de la Tierra):

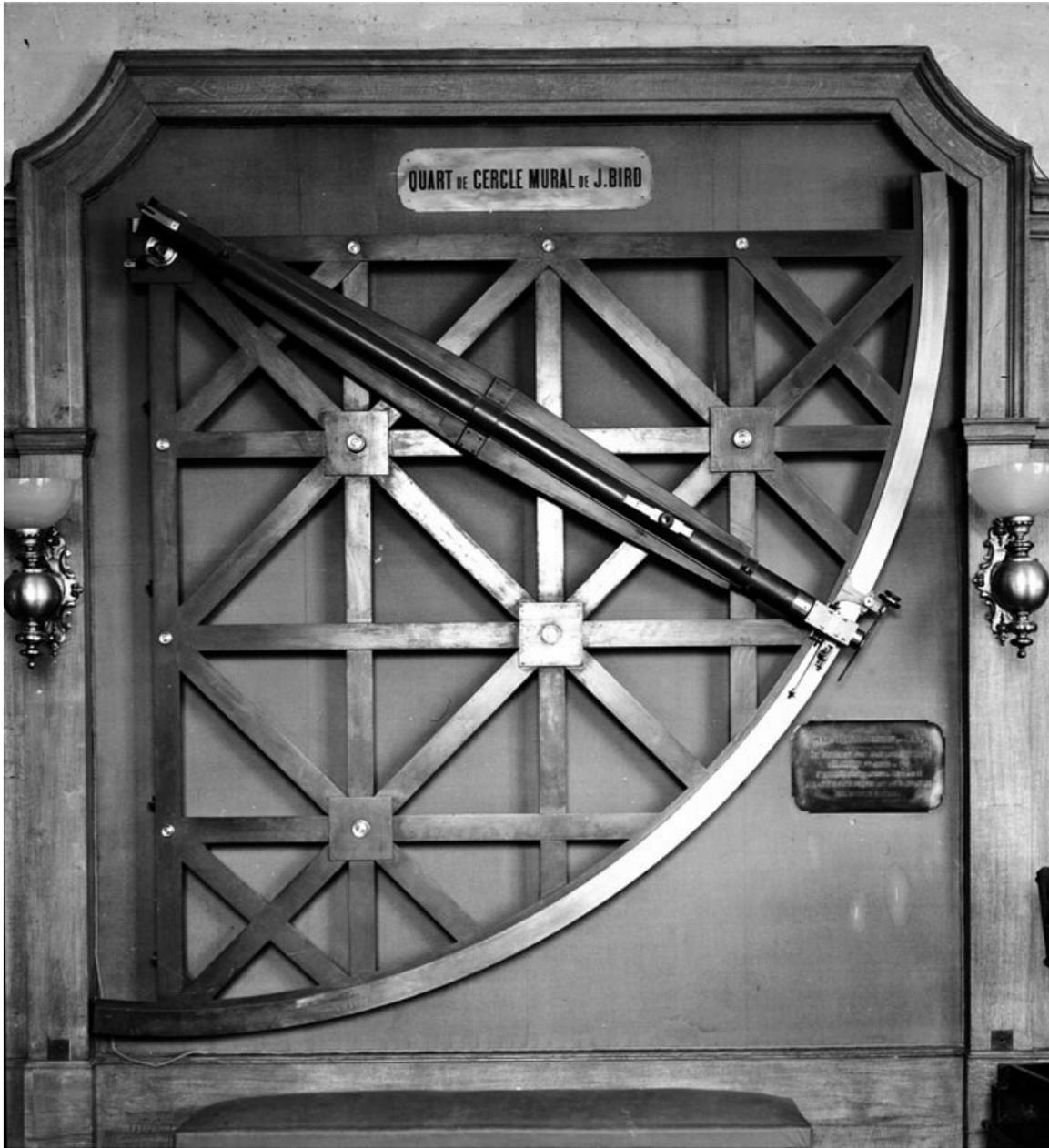


FIGURA X.2. *El cuarto de círculo mural de J. Bird.*

Imagen: © Observatorio de París.

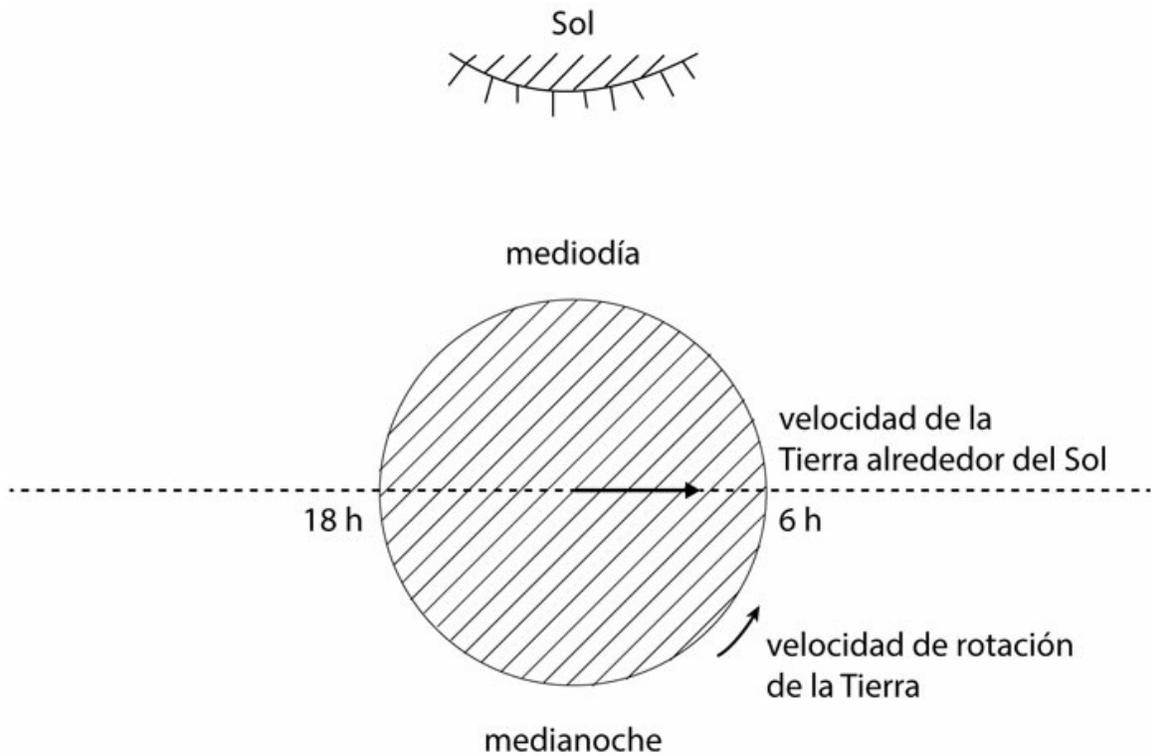


FIGURA X.3. *El experimento de Arago.*

La Tierra se acerca a las estrellas que pasan por el meridiano a las seis de la mañana y se aleja de las que pasan a las seis de la tarde. La velocidad de la luz de las estrellas respecto a la Tierra debería ser diferente de acuerdo con la hora; el ángulo de refracción sobre un prisma debe variar.

Sabemos además que [el movimiento de traslación de la Tierra] se dirige hacia las estrellas que pasan por el meridiano a las seis de la mañana y se mueve en sentido contrario de las que pasan a las seis de la tarde, de manera que se acerca a las primeras y se aleja de las segundas. Así, en el primer caso, la desviación debe corresponder a la velocidad de emisión aumentada en $1/10\ 000$, y en el segundo, a esa misma velocidad disminuida en $1/10\ 000$. Entonces los rayos de una estrella que pasa por el meridiano a las seis de la mañana deben ser menos desviados que los de una estrella que pasa a las seis de la tarde, en una cantidad igual a la ocasionada por $1/5\ 000$ de cambio en la velocidad total.²⁶

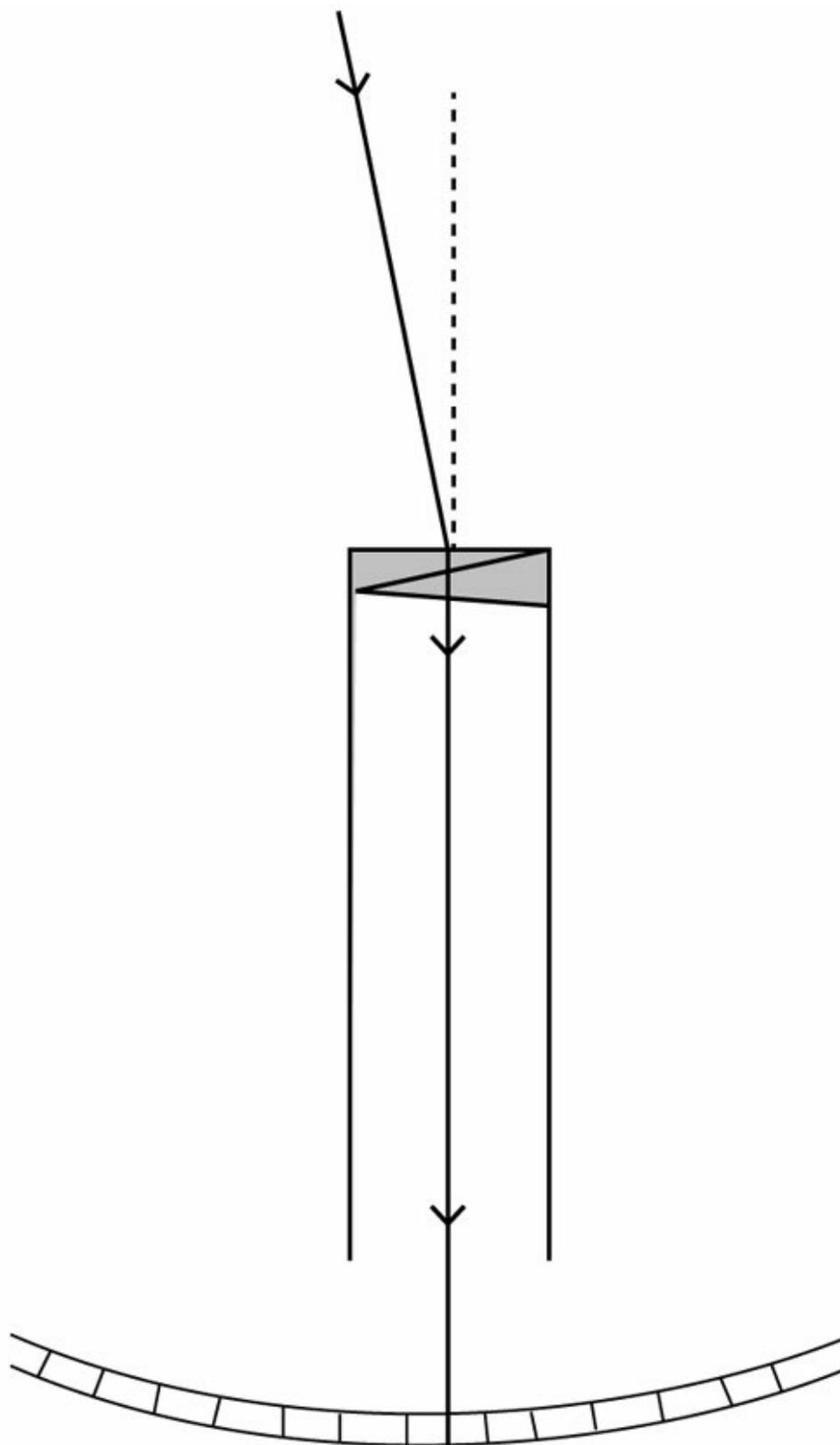


FIGURA X.4. *El dispositivo de Arago.*

El cuaderno correspondiente a su segunda serie de mediciones se encuentra en el

Observatorio de París y registra observaciones de decenas de estrellas diferentes, como Sirio, Aldebarán, Cástor y Proción... realizadas en fechas diversas, entre noviembre de 1809 y noviembre de 1810. Mide también la desviación de la luz reflejada por la Luna, y la desviación de un rayo luminoso procedente de un farol, cuya velocidad relativa al prisma es claramente nula. De esta manera, escogiendo varias estrellas en momentos distintos, piensa tener una amplia gama de rayos luminosos, constituidos por corpúsculos con velocidades diferentes.

En su artículo, Arago publicará tres tablas con las desviaciones que el prisma provoca en los rayos luminosos procedentes de estrellas diferentes en momentos distintos. Esperaba desviaciones diversas correspondientes a valores diversos en la velocidad de la luz... pero los desfases observados son muy pequeños, no mayores que la incertidumbre de las mediciones, según hace notar: “Para empezar, puede verse que las diferencias en las desviaciones son en general muy pequeñas y del mismo orden que las que se presentan en las observaciones hechas sin prisma: por tal razón, pueden atribuirse a errores de observación”.²⁷ Tal es un resultado sorprendente e inesperado para Arago. Para convencerse, calcula “la fórmula analítica que expresa la desviación de los rayos luminosos en función de los ángulos de los prismas y de sus fuerzas refringentes”²⁸ y, utilizando el cálculo diferencial, obtiene la fórmula que muestra cómo varía el ángulo de refracción de acuerdo con la variación en la velocidad de la luz y las características del prisma utilizado. En el caso de que el efecto se deba a la velocidad de traslación de la Tierra, la velocidad de la luz variaría en $1/10\ 186$. Gracias a las características de los prismas empleados, sus índices de refracción y el ángulo de incidencia, Arago puede entonces calcular el cambio en la desviación esperado en cada uno de sus experimentos:

Observes faites au Mural 70

le Jeudi 21 Décembre 1809

Le plan de l'angle réfringent du prisme, est à peu près perpendiculaire au plan du Mural.

Bigel

<u>avec le Prisme</u>	<u>avec le Prisme (en air)</u>	$\text{Est air} = 0,5 = 4,4$ $\text{est } \alpha = 29,1$ $\beta = 0,76086$
$57^{\circ} 30$ $61 \cdot 8 \cdot 0,175 = 57^{\circ} 39' 40''$ $57 \cdot 39 \cdot 40,0$ $57 \cdot 13 \cdot 49,9$ $25' 50,1$ $51,8$ $24' 58,8 = \text{Dev}$	$57 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 27,5 = 57 \cdot 13 \cdot 52,7$ $61 \cdot 0 \cdot 3 \cdot 1,0 = 57 \cdot 13 \cdot 49,9$	

Il paraît qu'il y a erreur d'un tour sur un lecture.

γ d'Orion

<u>avec le Prisme</u>	<u>avec le Prisme</u>
$43 \cdot 0$ $45 \cdot 15 \cdot 0 \cdot 24,5 = 43^{\circ} 4' 23''$ $43^{\circ} 4' 23''$ $47 \cdot 39 \cdot 24,5$ $24' 59,1 = \text{Déviation}$	$42 \cdot 35 \cdot 4 \cdot 8,0 = 42 \cdot 39 \cdot 24,5$ $45 \cdot 8 \cdot 0 \cdot 2,0 = 42 \cdot 39 \cdot 24,5$



δ d'Orion

<u>avec le Prisme</u>	<u>avec le Prisme</u>
$49^{\circ} 40' 1 \cdot 26,0 = 49^{\circ} 40' 17''$ $52 \cdot 15$ $49^{\circ} 41' 17''$ $49 \cdot 16 \cdot 15,8$ $25' 1,5 = \text{Déviation}$	$49 \cdot 15 \cdot 1 \cdot 24,5 = 49 \cdot 16 \cdot 15,8$ $52 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 29,0 = 49 \cdot 16 \cdot 10,4$

FIGURA X.5. Arago, observaciones, 21 de diciembre de 1809. Imagen: © Observatorio de Paris.

Se encuentra mediante dicho cálculo [...] que 1/10 186 de variación en la velocidad de la luz debería producir, en mi primer prisma, una diferencia de desviación igual a 6", y tal diferencia llegaría casi a 14" en el prisma acromático cuádruple que apliqué al telescopio del círculo repetidor. Ésa es, entonces, la variación que debí haber encontrado, considerando una diferencia en la velocidad de los rayos luminosos de 1/10 000.²⁹

Arago no proporciona los detalles de sus cálculos, que son iguales a los que Blair debe haber realizado para su propio experimento, pero parecen correctos. Al revisarlos con cuidado, resultan de utilizar un prisma de índice medio 1.375, como en efecto fue el caso. Los experimentos están organizados con observaciones en distintos horarios, para obtener en función de la dirección de la Tierra desviaciones "de 12" en las observaciones hechas en el mural, y de 28" en aquellas realizadas en el círculo repetidor. La desviación de las estrellas que pasan a medianoche debería ser la mitad en cada caso".³⁰

No obstante —continúa Arago—, al examinar con cuidado las tablas precedentes, encontramos que los rayos de todas las estrellas están sujetos a las mismas desviaciones, sin que las pequeñas diferencias que llegan a notarse sigan ningún patrón. El resultado parece ser, en primera instancia, una contradicción manifiesta con la teoría newtoniana de la refracción, pues una desigualdad *real* en la velocidad de los rayos no produce ninguna variación en la desviación que experimentan.³¹

Le falta entender qué pasa... o, más bien, qué no pasa, y ésta no es una tarea fácil. ¿Hay que dudar de la teoría newtoniana? Antes de hablar de las explicaciones que propone Arago, debemos notar que no sólo dejó de obtener las desviaciones esperadas en su cálculo, sino que éstas no son sino desviaciones pequeñas debidas al movimiento de la Tierra alrededor del Sol: él esperaba que el movimiento propio del Sistema Solar, el de las estrellas y la acción de la gravedad sobre la luz contribuyeran también a la desviación. Arago está convencido de que la gravedad actúa realmente sobre la luz, aunque el fenómeno no sea observado. Por lo tanto, afirma que, a falta de otra razón, "no podrían explicarse [sus] experimentos sino disminuyendo la densidad o el diámetro de las estrellas. Llegaríamos entonces al resultado singular de que, en la cantidad infinita de estrellas que hay en la bóveda celeste, ninguna tiene la densidad de la Tierra y el diámetro del Sol".³²

Arago no llega a tal extremo sino para convencer de que las hipótesis que va a proponer son necesarias:

Parece que sólo puede explicarse suponiendo que los cuerpos luminosos emiten rayos con una amplia gama de velocidades, y que dichos rayos no son visibles salvo cuando sus velocidades se encuentran entre ciertos límites. En efecto, según dicha hipótesis, la visibilidad de los rayos dependerá de sus velocidades relativas, y como esas mismas velocidades determinan la cantidad de la refracción, los rayos visibles serán siempre refractados de la misma manera.³³

Arago apela a una teoría del ojo. Sólo seríamos sensibles a ciertas longitudes de onda (frecuencias), a ciertas velocidades de la luz. Es una idea que sin duda procede de De Mairan (capítulo VI), y que tuvo cierto éxito a finales del siglo XVIII. Arago supone que el

espectro visible es limitado y que basta un ligero aumento de la desviación para que el “rayo” entre o salga del espectro observable. Se apoya en las observaciones de Herschel, quien había “encontrado, como sabemos, que más allá del espectro prismático y junto al rojo hay rayos invisibles que calientan más que los rayos visibles”, mientras que Wollaston³⁴ y Ritter habían observado “que junto al violeta hay rayos invisibles y sin calor, pero cuya acción química [...] es muy sensible”.³⁵

Déviation avec le Déclinaison moyenne 85

<i>Rigel</i> 1 ^{re} Déviation = 10° 4' 18", 86	2 ^{me} Déviation = 10° 4' 26", 16	3 ^{me} Déviation = 10° 4' 21", 5
<i>α Orion</i> 10° 4' 22", 0	2 ^{me} Déviation = 10° 4' 25", 5	10° 4' 23", 75
<i>Sirius</i>		
<i>Castor</i> 10° 4' 23", 6	2 ^{me} Déviation = 10° 4' 24", 6	10° 4' 24", 1
<i>Procyon</i> 10° 4' 19", 6	10° 4' 24", 9	10° 4' 22", 3
<i>β Orion</i> 10° 4' 25", 4	10° 4' 22", 3	10° 4' 27", 2
<i>α Lyrae</i> 10° 4' 19", 2	10° 4' 22", 6	10° 4' 20", 9
<i>Regulus</i> 10° 4' 21", 5	10° 4' 25", 2	10° 4' 23", 3
<i>β Du Lion</i> 10° 4' 16", 0	10° 4' 20", 2	10° 4' 18", 1
<i>Epi de la Lyre</i> 10° 4' 19", 7	10° 4' 21", 4	10° 4' 18", 5
<i>Arcturus</i> 10° 4' 15", 3	10° 4' 16", 0	10° 4' 15", 7
<i>α Coronae</i> 10° 4' 20", 9	10° 4' 22", 8	10° 4' 21", 9
<i>α Ursae</i> 10° 4' 18", 1	10° 4' 22", 3	10° 4' 20", 2
<i>Antares</i> 10° 4' 17", 5	10° 4' 22", 5	
<i>β Ursae</i> 10° 4' 19", 0	10° 4' 24", 00	

OBSERVATOIRE DE PARIS

FIGURA X.6. Arago, tabla de desviaciones, 1809.

Imagen: © Observatorio de París.

¿No formarán esos últimos rayos la clase de aquellos a los que les falta un poco de velocidad para ser visibles, y los rayos caloríficos no serán los que por su gran velocidad han perdido el poder de alumbrar? Tal suposición, por probable que pueda parecer en un principio, no queda establecida rigurosamente por mis experimentos, de los que sólo se permite concluir que los rayos invisibles por *exceso* y por *falta* de velocidad ocupan respectivamente en el espectro los lugares de los rayos *caloríficos* y *químicos*.³⁶

Durante un largo periodo, esas explicaciones claramente *ad hoc* de Arago no convencieron a muchos, ni siquiera a él mismo. La excepción es Laplace, quien en 1813,

en la cuarta edición de su *Exposición del sistema del mundo*, está evidentemente encantado de aceptar las conclusiones que “salvan” la teoría de la emisión:

De experimentos muy precisos realizados por Arago [...] se debe [...] concluir que la velocidad relativa de un rayo luminoso homogéneo es siempre la misma, y que probablemente esté determinada por la naturaleza del fluido que hace moverse en nuestros órganos para producir la sensación de luz. Dicha consecuencia parece seguirse también de la constancia en la velocidad de la luz que emana de los astros y de los objetos terrestres, constancia que de otra forma sería inexplicable. ¿Es improbable suponer que los cuerpos luminosos emiten una infinidad de rayos dotados de velocidades diferentes, y que sólo los rayos cuya velocidad está comprendida entre ciertos límites tienen la propiedad de excitar la sensación de luz, mientras que los otros no producen más que un calor oscuro? ¿No es así que los cuerpos calientes se vuelven luminosos al aumentar el calor, y los bellos experimentos de Herschel sobre el calor del espectro solar no demuestran acaso que el Sol emite rayos calientes invisibles, que al ser menos refringentes que los mismos rayos rojos parecen estar dotados de una velocidad mayor? Los fenómenos de la doble refracción y de la aberración de las estrellas proporcionan al sistema de la emisión de la luz, a mi parecer, si no una certidumbre completa, cuando menos una gran probabilidad. Tales fenómenos son inexplicables en el marco de la hipótesis de las ondulaciones de un fluido etéreo.³⁷

Debemos notar aquí que Laplace no sólo acepta la cinemática galileo-newtoniana, sino que considera que todo resultado opuesto “sería inexplicable”. Biot, quien es un excelente especialista en óptica newtoniana, retoma la explicación de Arago en 1811, en su *Tratado elemental de astronomía física*, precisando que “los cuerpos luminosos lanzan hacia todas direcciones moléculas de luz dotadas de una infinidad de velocidades diferentes, entre las cuales sólo una conviene a nuestros órganos y es capaz de producir la sensación de luz”.³⁸

Algunos años después, dichas explicaciones no convencerán a Fresnel, quien, deseoso de presentar dificultades a la teoría de la emisión, trata el tema en una carta dirigida a Arago:

No puede explicarse un resultado tan notable en el sistema de la emisión, como usted hizo notar, sino suponiendo que los cuerpos luminosos imprimen a las moléculas de luz una infinidad de velocidades diferentes, y que dichas moléculas sólo afectan el órgano de la vista si tienen una velocidad determinada o, cuando menos, velocidades que se encuentran entre límites muy estrechos, tales que un diezmilésimo de aumento o disminución en la velocidad es suficiente para impedir la sensación. La necesidad de dicha hipótesis no es una de las dificultades menores del sistema de la emisión, pues, ¿a qué se debe la visión? ¿Al choque de las moléculas luminosas contra el nervio óptico? Pero tal choque no dejaría de percibirse por un aumento de la velocidad. ¿A la manera en que se refractan esas moléculas en la pupila? Pero las moléculas rojas, por ejemplo, cuya velocidad habría disminuido hasta en un quincuagésimo, se refractarían aún menos que los rayos violetas y no saldrían del espectro que queda dentro de los límites de la visión.³⁹

Arago retomará el punto 20 años después, precisamente en un homenaje a Fresnel que publica con motivo de su fallecimiento. Está entonces de acuerdo con la teoría ondulatoria y admite fácilmente la fragilidad de su hipótesis:

[...] la falta de concordancia entre la teoría y los experimentos no podía ser más manifiesta, y desde ese momento el sistema de la emisión parecía resquebrajado por completo; se consiguió, sin embargo, retrasar su caída definitiva con una suposición [que] consiste en admitir que los cuerpos incandescentes lanzan rayos con todo tipo de velocidades, pero que se requiere una velocidad especial y determinada para que sean de luz [...] [pero] tal hipótesis, habremos de convenir, le quitaría al sistema de la emisión la gran sencillez que constituía su mérito principal.⁴⁰

Arago termina su artículo de 1810 llegando a una conclusión que está lejos de ser novedosa: “[...] que las aberraciones de todos los cuerpos celestes, ya sea que nos envíen luz propia o luz reflejada, deben calcularse con la misma constante, sin que haya a este respecto diferencia ninguna”.⁴¹ Se trata de una comprobación que, dejando de lado los problemas de fondo, sólo tiene interés para los astrónomos: una conclusión muy pequeña para un experimento tan importante.

LOS INCONVENIENTES DE UNA NOVEDAD

Hasta mediados del siglo XVIII, las ópticas de los telescopios fueron defectuosas, pues la aberración cromática producía imágenes iridiscentes y borrosas. Dollond inventó en 1753 unas ópticas acromáticas, lentes (u objetivos) y prismas que, combinando *flints* y *crowns*, permitían tener imágenes mucho mejores, al suprimir la aberración cromática. El empleo de ópticas acromáticas se volvió sistemático. Esto le permitiría a Arago utilizar prismas con ángulos grandes, aumentando así el ángulo de refracción y la desviación, sin obtener una imagen difusa ni demasiado borrosa:

Si se observa un objeto a través de un prisma, las diferencias de desviación producidas por los cambios de velocidad de los rayos luminosos deben ser más considerables cuanto mayor sea el ángulo del prisma. Pero cuando se utilizan prismas simples, constituidos por una sola sustancia, hay un límite que no puede rebasarse, pues si el ángulo del prisma es mayor de 4° o 5° , los bordes del espectro se vuelven difusos, y como el paso de un color prismático al siguiente se da mediante una degradación insensible, no puede tenerse la certidumbre de apuntar a partes correspondientes del espectro en todas las observaciones. Los prismas acromáticos, cuyo ángulo puede aumentarse a voluntad, eran mucho más apropiados para el objetivo que yo tenía en mente.⁴²

Los esfuerzos de Arago tienden a tener “la imagen más nítida”,⁴³ para lograr la medición más precisa posible, como lo confirman los resultados presentados en las tablas, con una precisión de un centésimo de segundo de arco, aunque la precisión media esperada fuese de algunos segundos.

Como vimos en el capítulo VI, ni Arago, ni Blair, ni Michell tienen a su disposición más que la teoría de la emisión, que a fin de cuentas es una teoría de la luz monocromática. Así, todo sucede (todo parece suceder) como si, gracias al prisma acromático, trabajaran con un rayo de luz monocromática. De esta manera, no obtienen un espectro, sino una sola imagen del rayo incidente combinando todos los colores,

apilados unos sobre otros tanto como sea posible. De hecho, el uso de un prisma acromático es contraproducente: por el contrario, habría hecho falta (hará falta) utilizar prismas que dispersen los rayos luminosos en lugar de agruparlos, que hagan aparecer los colores y, sobre todo, las franjas sobre las cuales puedan apoyarse las mediciones del efecto Blair-Michell.

Sin embargo, al no conocer la estructura de un espectro,⁴⁴ al no comprender el interés de las franjas de emisión y de absorción, al carecer de una teoría del color,⁴⁵ no tenía sentido por entonces utilizar ópticas no acromáticas, cuya dispersión parecía suscitar sólo inconvenientes. Eso explica la desventaja de dichas tentativas, como lo expresa Hearnshaw, un especialista en historia de la espectroscopía: “La dispersión es un parámetro esencial. Una dispersión grande amplía al máximo las diferentes longitudes de onda”.⁴⁶

Unos 80 años después de Blair (pero, desde luego, sin mencionarlo, pues probablemente no conociera su manuscrito), James Clerk Maxwell, el fundador de la teoría ondulatoria moderna del electromagnetismo y de la luz, da la siguiente explicación de los resultados negativos del experimento de Arago:

Para observar tales diferencias en la luz de las estrellas, es indispensable un espectroscopio, es decir, un instrumento que separa las franjas de diferentes periodos [...] Si, en lugar de un espectroscopio, se utiliza un prisma acromático, que produce la misma desviación en franjas de diferentes periodos, no podrá detectarse diferencia alguna entre la luz de estrellas distintas.⁴⁷

En 1872 Éleuthère Mascart, uno de los grandes ópticos de finales del siglo XIX, quien no conoce el experimento de Arago sino a través de su reseña sobre Fresnel (y por lo que ha escrito Fizeau), lleva a cabo el mismo análisis que Maxwell:

Parece extremadamente difícil poder apreciar cambios sutiles con la única ayuda de un prisma acromático. A pesar de todos los recursos que hoy nos proporciona el análisis espectral, dichos cambios se encuentran aún en el límite de la precisión de los experimentos cuando se trata de luz estelar. No creo que la observación de Arago se haya podido hacer en condiciones suficientemente rigurosas como para darle fuerza demostrativa, y el favor de que ha gozado en la ciencia me parece sobre todo consecuencia de la demostración debida a Fresnel.⁴⁸

Arago no estaba profundamente convencido de su hipótesis sobre la percepción luminosa. Se trataba más bien de una hipótesis que proponía a falta de algo mejor. Además, sus conclusiones *a minima* sobre la constancia de la aberración (que no diferían de lo que se pensaba por entonces) muestran que no profundizó demasiado. Notemos que, aparte de poner en duda la óptica newtoniana, no había mucho margen para maniobrar. *Tenía que* haber un efecto, de eso no cabía ninguna duda, pero era imposible observarlo. De acuerdo con su carácter, Arago no insistirá, y aceptará la interpretación de su experimento propuesta por Fresnel: se trata de un “experimento negativo”; esta interpretación es errónea, pero sigue siendo la generalmente aceptada. Y, cuando sea medido el efecto Doppler-Fizeau, pocos físicos verán en él un avatar del efecto Blair-

Arago. La mayoría de los historiadores tampoco han relacionado dichos puntos en sus análisis de la óptica del siglo XIX.

XI. LA TEORÍA DE LAS ONDULACIONES DE FRESNEL

COMO Arago, como Malus, Augustin Fresnel es egresado de la École Polytechnique; formará parte del cuerpo de Caminos y Puentes. Educado en un catolicismo integrista, monárquico, ve en el retorno de Napoleón de la isla de Elba “un ataque contra la civilización”. Sus dificultades con la policía imperial dan lugar a ratos de ocio forzados, que dedicará a la óptica. En abril de 1815, al comenzar los Cien Días, es suspendido de sus funciones y mantenido bajo vigilancia en Nyons como medida “de alto mando policiaco” por haberse adherido como voluntario al pequeño ejército que, bajo las órdenes del duque de Angulema, intentó por un instante resistir en el sur a Napoleón, que volvía.¹ Desde su graduación se interesa por la óptica, incluso ya por las cuestiones de que se ocupan los especialistas. Conoce la teoría de la emisión de Newton y no la acepta; se inquieta por la interpretación de la aberración. Lee el *Tratado elemental de astronomía física* de Biot y, desde Normandía, le pide consejo a Arago, quien le recomienda la lectura del *Opticks* de Newton y de los artículos que Young ha publicado en la revista *Philosophical Transactions*. Fresnel lo agradece de inmediato:

Habría podido pedirle a mi tío² que me los enviara, pero su número me asustó y, no sabiendo cuál preferir, no le pedí ninguno. Las *Philosophical Transactions* son, según creo, una publicación periódica que sólo podría consultar en París. En cuanto a la obra de Young, de la cual usted me había hablado mucho, tenía gran interés en leerla; sin embargo, como no sé inglés, sólo podía entenderla con ayuda de mi hermano y, en cuanto dejaba su compañía, el libro volvía a ser ininteligible para mí.³

Sin embargo, en el otoño de 1815 presenta a la Academia un primer artículo sobre la difracción de la luz. Apoyándose en una serie de experimentos nuevos, sostiene una “teoría de las vibraciones”, que también llama “de las ondulaciones”. Se opone ya a Newton, lo que no era tan común por entonces: “Llego con esta teoría a una conclusión absolutamente opuesta a la de Newton: que el movimiento de la luz es más lento en el vidrio que en el aire, de acuerdo con la razón entre el seno [del ángulo] de refracción y el de incidencia”.⁴

Arago, encargado de revisar su artículo, le escribe entonces:

[...] encontré allí una gran cantidad de experimentos interesantes, algunos de los cuales habían sido ya realizados por el doctor Thomas Young, quien, en general, tiene una visión muy parecida a la que usted ha adoptado [...] Los resultados que usted ha obtenido en ese sentido me parecen muy importantes; posiblemente puedan servir para demostrar la verdad del sistema de las ondulaciones, tan frecuente y débilmente combatido por físicos que no se han tomado el trabajo de entenderlo. Puede usted contar con el afán con que trataré de hacer valer su experimento, pero la conclusión que de él se deduce es opuesta al sistema *de moda* y se me harán muchas objeciones. Debe usted ayudarme a responderlas.⁵

Después Arago le pide que haga más mediciones sobre la difracción antes de dedicarse, como es ya su ambición, a la polarización. Desde entonces Fresnel defiende vigorosamente “el sistema de las ondulaciones”, como escribe en 1816:

El sistema según el cual la luz consiste en vibraciones de un fluido infinitamente sutil que llena el espacio conduce a explicaciones satisfactorias de las leyes de la reflexión, de la refracción, del fenómeno de los anillos coloreados [...] de los cuales la teoría newtoniana jamás pudo dar razón. A decir verdad, ni la doble refracción ni la polarización han sido aún explicadas con el sistema de las ondulaciones, pero, ¿acaso lo han sido con el sistema de Newton?⁶

Sus trabajos le valen ya una mirada oblicua de Young, a quien “no tiene la intención de [...] robar [sus experimentos]”, según le escribe a Arago.⁷ Está impaciente por publicar su artículo sobre la difracción: “Es con descubrimientos nuevos como debo responder a las acusaciones de plagio”, prosigue.

Young “era de naturaleza curiosa y escéptica”. Decepcionado de la medicina, se consagra al estudio de los jeroglifos, de las matemáticas, de la óptica; se dispersa. Razona por analogía, una piedra que cae al agua, el sonido, una cuerda y los movimientos vibratorios le permiten comprender ciertos fenómenos luminosos y pronosticar otros. Recordemos su famoso experimento de la pantalla con dos pequeñas ranuras, detrás de la cual se coloca una fuente de luz. Los haces luminosos se cruzan y se componen, produciendo franjas, “interferencias”. Las interferencias: un fenómeno esencial que Young es el primero en entender, una palabra que es el primero en utilizar. La geometría de las franjas se relaciona con la diferencia entre la distancia recorrida por las ondas (idénticas) que proceden de cada ranura, su “diferencia de recorrido”. Si la diferencia de recorrido es igual a una longitud de onda, las ondas se suman y alumbran más; pero si la diferencia es de media longitud de onda, éstas se anulan por completo. Así, Young puede medir la longitud de onda de la luz utilizada. Se interesa, como Newton y muchos otros, por las pompas de jabón, por membranas delgadas entre las cuales hay aire o agua, y observa sus anillos coloreados. Un anillo corresponde a un retraso entre ondas luminosas, que entonces interfieren entre sí. Los anillos se estrechan si se coloca agua entre las membranas: entonces la velocidad de la luz es allí menor que en el aire.



FIGURA XI.1. *Augustin Fresnel.*
Imagen: © Observatorio de París.

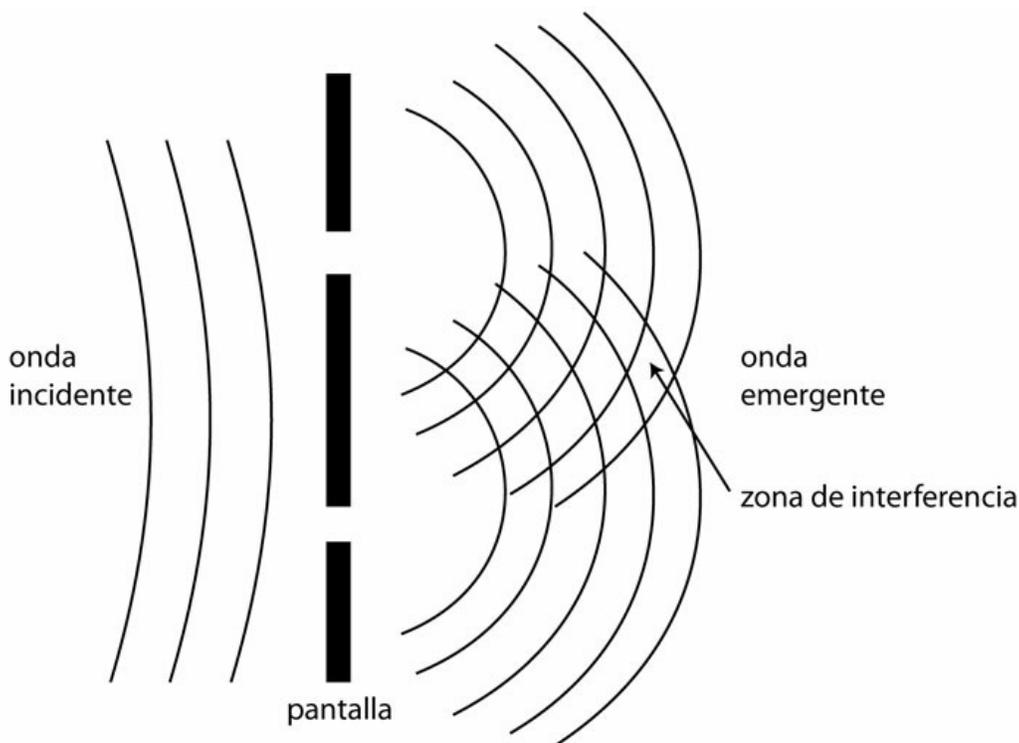


FIGURA XI.2. *Las interferencias de Young.*

Young publica sus trabajos más importantes en los primeros años del siglo XIX. Es atacado violentamente, incluso insultado; se desanima y se defiende mal. La relación entre los trabajos de Fresnel y los de Young ha hecho correr mucha tinta. De hecho, resultan complementarios: Fresnel conceptualizó y matematizó las ideas de Young, quien sentía haber plantado el árbol cuyos frutos recogía Fresnel. En la primavera de 1818, Fresnel vive en París y está bien integrado en el medio científico. Discute con Biot y pronto es invitado a Arcueil por Laplace, en quien intenta vanamente aminorar un poco el “apego al sistema de la emisión”.⁸ Persuadidos de que un estudio más profundo de los fenómenos de difracción e interferencia será un éxito para la doctrina de la emisión, Laplace y Biot presentan dicho proyecto a la Academia para el gran premio de ciencias matemáticas de 1819. En el artículo que Fresnel publica para la ocasión, justifica claramente con la teoría ondulatoria el concepto de propagación rectilínea de la luz, una de las mejores cartas de la teoría de la emisión. Fresnel le escribe entonces a su hermano: “Hay aquí algo más interesante que un premio, se trata de hacer una revolución en la ciencia”.⁹ La revolución estaba consumada, pero aún presentaba algunos problemas...

La teoría de la difracción de Fresnel haría historia. Como escribirá Émile Verdet en su introducción a las *Obras completas* de Fresnel, “la concordancia entre la experiencia y la teoría se mantiene, y podemos decir sin exageración que la teoría de las ondulaciones predice los fenómenos de difracción con la misma exactitud que la teoría de la gravitación predice los movimientos de los cuerpos celestes”.¹⁰

A petición de Arago, retoma Fresnel la cuestión de la aberración y los resultados de los experimentos relativos a la velocidad de la luz¹¹ que el primero realizara de 1806 a 1810, considerados durante todo el siglo XIX “la piedra de toque de una buena teoría sobre la luz”.¹² En septiembre de 1818 aparece en los *Annales de chimie et de physique* una carta de Fresnel a Arago. Es una manera de presentar su programa de investigaciones de acuerdo con su “maestro”, un hábito común en el siglo XVIII. La carta trata sobre “la influencia del movimiento terrestre en algunos fenómenos de óptica”, y en ella Fresnel va más lejos que Arago, quien no llegó a conclusiones definitivas, según recordaremos. Toma el resultado negativo de Arago como un descubrimiento: “Mediante sus experimentos con la luz de las estrellas, queda demostrado que el movimiento del globo terrestre no tiene influencia sensible sobre la refracción de los rayos que emanan de dichos astros”.¹³

Ninguna influencia “sensible”; pronto, se tratará simplemente de un experimento “negativo”, y ese deslizamiento no dejará de tener consecuencias sobre la teoría de Fresnel. En efecto, los experimentos de Arago no “demuestran” que el movimiento de la Tierra no tenga influencia en la refracción y, como vimos, Arago no llegó a esa conclusión. La demostración es sencillamente falsa, y además, Arago no observó diferencias por la falta de precisión de sus aparatos, debida, en particular, al carácter acromático de los prismas utilizados. Así, Fresnel trabajará a partir de una interpretación errónea. Una interpretación errónea que lo conducirá a hipótesis muy útiles...

RECUADRO XI.1. *Algunas magnitudes para definir los fenómenos luminosos*

En el sistema de las ondulaciones (y en todas las teorías ondulatorias), la velocidad de propagación de una onda luminosa, en el vacío y en reposo, es siempre c_0 , en cualquier dirección y sin importar la longitud de onda. En un medio de índice n , la velocidad de la luz, c , es igual a c_0/n . Como el índice es siempre mayor de 1, la velocidad de la luz es *menor* en un medio más refringente, al contrario de lo que sucede en la teoría de la emisión, donde la luz se acelera al llegar a un medio más refringente.

Para definir los fenómenos ondulatorios se utilizaban en el siglo XIX tanto la longitud de onda, λ , de una vibración como su periodo, T , que es el intervalo de tiempo que le toma a la luz recorrer una longitud de onda: $T = \lambda/c$. La longitud de onda depende del índice del medio atravesado: $\lambda = \lambda_0/n$, donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío. Actualmente se prefiere utilizar la frecuencia, ν , definida como el inverso del periodo: $\nu = c/\lambda$. Como el periodo, la frecuencia no depende del medio. Entonces una radiación particular queda definida por “una cantidad de vibraciones por segundo”, una frecuencia determinada.

Como vimos en el capítulo X, Fresnel no sólo duda de la hipótesis de Arago, sino de cualquier tentativa de explicar “ese notable resultado en el marco del sistema de la emisión”.¹⁴ Entonces pronuncia, si no la oración fúnebre de la teoría de la emisión,

cuando menos un diagnóstico fatal de su dolencia. Como veremos, Fresnel sigue así el buen camino, el de la óptica ondulatoria, el “sistema de las ondulaciones”, como lo llama por entonces. Arago también busca otra explicación a sus resultados; le ha “encargado [a Fresnel] que examine si el resultado de sus observaciones podría conciliarse con más facilidad con el sistema según el cual la luz consiste en vibraciones de un fluido universal”.¹⁵ No sin razones, que son las mismas de Fresnel, pues muchas cuestiones y muchos resultados experimentales no tienen explicación en el contexto de la teoría de la emisión, en particular los que surgen de la observación de las interferencias, de la difracción, de la polarización.¹⁶ Fresnel ha trabajado ya mucho en estos problemas, y presiente la enorme importancia del sistema de las ondulaciones.

EL ÉTER PARCIALMENTE PERTURBADO...

Para empezar, veamos cómo comprende Fresnel el sistema de las ondulaciones, cuyo concepto clave es el éter, ese medio hipotético que transporta las ondas luminosas. Esencialmente, el éter es inmóvil. Se trata de un espacio absoluto, *físicamente* absoluto, en el que las ondas luminosas están congeladas: el movimiento luminoso es una vibración del éter. Se explica así fácilmente una consecuencia esencial de las observaciones relacionadas con la aberración, a saber, que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente. Pero el éter es también toda la maquinaria que sostiene al sistema de las ondulaciones, para empezar las ondas, que implican los conceptos de longitud de onda, de frecuencia, y que permitirán entender las interferencias y muchos otros fenómenos. Sin embargo, resta saber qué pasa con los cuerpos en movimiento, como la Tierra. ¿El éter se ve perturbado por los cuerpos que atraviesa y que lo atraviesan? La respuesta variará según los físicos, cuyas diversas soluciones implicarán cuestiones no menos diversas, más o menos fáciles de resolver.

De hecho, con el éter se abren muchas posibilidades: es una manera disimulada de cambiar el estatuto del espacio, pero sin decirlo, incluso sin verlo claramente; un espacio absoluto que acompaña a las fuentes y conduce la luz, en lugar de un espacio más o menos limitado, más o menos vagamente relativo. Se lleva así a cabo, implícitamente, el funeral del principio de la relatividad. Se trata de un punto esencial, punto que separa desde entonces y durante un siglo a la física en dos bloques: las partículas materiales por una parte, que siguen siendo regidas por la cinemática clásica, congruente con el principio de la relatividad, y la luz por otra parte, exclusivamente ondulatoria, a la que no puede asociársele una cinemática verdaderamente clara. Surgen muchas otras preguntas referentes al éter: su naturaleza, su consistencia, su rigidez e incluso su existencia; ¿cómo se manifiesta objetivamente?

Como consecuencia de las observaciones de Bradley (y de las que le siguieron), “la velocidad con la que se propagan las ondas es independiente del movimiento del cuerpo del cual emanan”.¹⁷ Es una exigencia a la que el éter responde muy bien. Así como el sonido es una vibración del aire, la luz es considerada una vibración del éter; dado que la

velocidad del sonido no depende más que del medio en el que se propaga, la velocidad de la luz sólo depende de las características del éter, y no de la velocidad de la fuente luminosa. Sin embargo, por otra parte, los experimentos de Arago indican (y ésa será durante mucho tiempo la *doxa*) que “un mismo prisma refracta siempre la luz de la misma forma, cualquiera que sea el lado por el que entre”,¹⁸ es decir, independientemente de su velocidad respecto a la Tierra... Es un resultado que podríamos concebir con facilidad, afirma Fresnel, “si se admite que nuestro globo imprime su movimiento al éter que lo envuelve”.¹⁹

Pero —prosigue— parece imposible explicar la aberración de las estrellas con esta hipótesis: cuando menos, hasta ahora sólo he podido concebir claramente dicho fenómeno suponiendo que el éter pasa con libertad a través del globo, y que la velocidad comunicada a ese fluido sutil no es sino una parte pequeña de la velocidad de la Tierra, no mayor que un centésimo.²⁰

En efecto, si la Tierra perturba al éter y, con él, a la luz, la velocidad de la luz procedente de una estrella es constante en magnitud y dirección respecto a la Tierra. Entonces, ¿cómo explicar la elipse de aberración, que el movimiento de la Tierra evidentemente implica? Resulta que, para el observador, el éter debe ser perturbado por el prisma para explicar el resultado negativo del experimento de Arago, y no serlo para explicar la aberración. Se trata de exigencias contradictorias que llevan a Fresnel a la hipótesis según la cual ni la Tierra ni los cuerpos opacos perturban de manera sensible el éter que atraviesan, pero los cuerpos transparentes sí lo perturban, comunicándole una fracción de su velocidad, que depende de su índice de refracción. Así, aunque la Tierra y el prisma estén en reposo uno respecto del otro, no están en el mismo estado de movimiento respecto al éter. El éter es perturbado *parcialmente*. Tan extraña hipótesis, muy *ad hoc*, le permite a Fresnel explicar tanto la aberración como el experimento de Arago. No profundizaremos aquí en los cálculos ni en los detalles de las explicaciones de Fresnel, que conducen a un coeficiente de perturbación del éter que es función del índice del medio perturbado.²¹

Fresnel hará mucho más que dar una respuesta a las preguntas de Arago. Creará la óptica ondulatoria. Se trata de un trabajo tanto experimental como teórico. Fresnel aporta una síntesis, crea una disciplina. Después de él, los principios del “sistema de las ondulaciones” estarán en la base de la óptica de los cuerpos en movimiento, constituirán la teoría ondulatoria de la luz y permitirán explicar la difracción, la polarización y, de forma más o menos convincente, la aberración, el experimento de Arago y el efecto Doppler-Fizeau.²² Hacia finales del siglo XIX la teoría ondulatoria de la luz será interpretada de otra manera, debido en particular al advenimiento de la teoría de Maxwell y a la unificación que produjo: la interpretación de la luz como un fenómeno electromagnético.²³

Se comprende que la extraña hipótesis de Fresnel haya suscitado muchas preguntas a lo largo de todo el siglo XIX. Tenemos así que Mascart, uno de los grandes ópticos franceses de finales del siglo XIX, critica el razonamiento que condujo a Fresnel a su fórmula de perturbación de las ondas por el movimiento de los cuerpos: “Las consideraciones que guiaron a Fresnel son entonces insuficientes; la fórmula a la que llegó por una feliz intuición no tiene más que un carácter empírico”.²⁴ Y Banesh Hoffmann, en su libro sobre la relatividad y sus raíces, analiza con severidad, 100 años después, “la idea” de Fresnel:

Era una idea extraña, pero realmente aportaba una fórmula nueva para la velocidad de la luz en el vidrio en movimiento, así como en otros medios, además de explicar el resultado nulo del experimento de Arago. Por si fuera poco, Fizeau verificó en 1851 la fórmula de Fresnel directamente [...] midiendo la velocidad de la luz en el agua en movimiento.²⁵

Y Hoffmann, quien fuera colaborador de Einstein, continúa considerando la cuestión como teórico de la física del siglo XX: “A primera vista, la idea de Fresnel parece forzada, improbable. Sin embargo, si consideramos sus triunfos, nos vemos inclinados a acogerla. De cualquier forma, aceptémosla por las buenas razones”.²⁶ Hoffmann hace notar entonces, siguiendo a Veltmann y a Mascart,²⁷ que la fórmula de Fresnel depende del índice, es decir, del color, lo que es inadmisibles para la luz blanca que integra el conjunto del espectro.²⁸

Vemos que la idea de Fresnel es totalmente insostenible. ¿Qué debemos hacer? ¿Reír? Resulta fácil, pues tal sería una interpretación falsa en cuanto a la naturaleza de la ciencia. Fresnel se enfrentaba a problemas que no tenían solución posible en un contexto newtoniano y, en ese contexto, la incoherencia era casi inevitable. Admiraremos cuando menos a Fresnel por la intuición que dirigió sus pasos hacia la solución de un problema que no pudo ser resuelto sino con el advenimiento de la relatividad.²⁹

No podríamos decir nada mejor. Lo más que Fresnel podía hacer era inventar una solución para salir del problema. Solución extraña, sin duda, pero magistral.

UN PUNTO DE VISTA RETROSPECTIVO

Es el momento de echar una ojeada al problema que Fresnel “debe” resolver, y que dominará todo el siglo, analizándolo desde un punto de vista retrospectivo, como nos es revelado *a posteriori* por los experimentos y las teorías de finales del siglo XIX y principios del XX. Se trata (digámoslo con toda ingenuidad) de la cuestión de la constancia de la velocidad de la luz en todos los marcos de referencia inerciales, o de la cuestión de la adición de velocidades cuando interviene la luz. Hará falta tomar conciencia de que la luz tiene voz y voto en la cinemática. No será sencillo, y es un punto de vista que la mentalidad de la época no puede adoptar, pues le resulta absolutamente incomprensible, in-con-ce-bi-ble. Simplemente porque es adverso a la

cinemática newtoniana, tal vez incluso a la experiencia cotidiana... Resulta impensable dudar de la cinemática newtoniana, aunque sea sólo porque se demuestra a partir de muy pocas hipótesis físicas, cuya naturaleza permanece implícita (véase el recuadro II.1, sobre la adición de velocidades).

Pero, ¿cómo resolver la dificultad o, cuando menos, disimular el problema que no puede resolverse? La única solución es endilgárselo a la óptica, al comportamiento de la luz, o rehacer toda la física... En pocas palabras, con la evidencia disponible, la única alternativa *por entonces* era inventar soluciones poco convincentes. Si partimos, como Hoffmann y la mayoría de los físicos, de que la cinemática de Einstein³⁰ era necesaria, claramente hacía falta una pasarela que explicara los fenómenos, a la espera de 1905. Tal pasarela es la que construye Fresnel, como Dios le da a entender, demasiado estrecha para pasar de una orilla a la otra, pero que cuando menos permite echar una ojeada a la otra ribera...³¹

Como ya lo he dicho, la intención aquí no es simplemente hacer un libro de historia, sino utilizar la historia para comprender mejor “la relatividad”. De esta forma, situándonos a principios del siglo XX y admitiendo que la solución de Einstein era la única³² posible, podemos comprender el callejón sin salida en el que se encontraron los ópticos y los físicos del siglo XIX, empezando por Fresnel. Por otra parte, ¿es posible entender la historia, en particular en el caso de las ciencias, sin una ojeada retrospectiva? Ese punto de vista recurrente permite aprehender mejor, a la luz de problemas nuevos que algunas veces han sido resueltos, las dificultades que debían vencerse. Hoffmann nos ha hecho entender que el siglo XIX no dejaría una historia sencilla... Pronto veremos esto en el capítulo siguiente, y no profundizaremos, por dos razones: por un lado, porque ya se han escrito muchos libros sobre el tema, pero sobre todo porque quiero, en este libro, trazar otro camino hacia la nueva cinemática de Einstein y, deseando seguir otra ruta, prefiero que no nos retrasemos demasiado en los rodeos (sin duda inevitables) de tan compleja historia.

Tal decisión se debe a que la óptica del siglo XIX es (relativamente) incomprensible, y pedagógicamente prepara mal el acceso a la relatividad de Einstein. Por el contrario, en cierta forma se le opone, pues las teorías del éter no son compatibles con el principio de la relatividad, así que no nos ayudan en forma alguna a comprender mejor la relatividad. Como tuvo que negociar con la lógica, con la coherencia, la teoría ondulatoria clásica está muy lejos de la relatividad de Einstein. Y, como a principios del siglo XX se debió pasar a la cinemática relativista partiendo de nociones aprendidas en el contexto de la óptica ondulatoria de Fresnel y de Lorentz, no sorprende que hayan surgido dificultades pedagógicas (lo que es un eufemismo), no sólo entre los estudiantes, sino entre los mismos físicos, ¡incluido Einstein! Uno no cambia en unas pocas semanas (¡el tiempo que le tomó escribir su famoso artículo de 1905!) su manera de ver el mundo. De hecho, tal cambio está lejos de haberse realizado hoy. La revolución de Einstein tiene 100 años, pero no ha entrado realmente ni en las mentes ni en los libros.

XII. LA VELOCIDAD DE LA LUZ

LOS EXPERIMENTOS SOBRE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Muchos experimentos relativos a la velocidad de la luz serán proyectados o realizados, en particular alrededor de 1850, y con frecuencia por iniciativa de Arago. Por una parte, se trata de medir la velocidad de la luz, cuya precisión se vuelve cada día más importante, pues es una de las constantes fundamentales de la teoría de las ondulaciones. Sin embargo, también se quiere comparar la velocidad de la luz en el aire y en un medio transparente más denso. La teoría de la emisión y la de las ondulaciones se oponen a ese respecto. La primera implica que la luz se acelera al pasar a un medio más denso, mientras que a partir de Huygens se sabe que las teorías ondulatorias llevan a conclusiones contrarias. Es el tipo perfecto de experimento “crucial”.

En 1938 Arago publica una nota en la que se propone mostrar “cómo es posible decidir, sin lugar a dudas, si la luz se compone de partículas pequeñas que emanan de los cuerpos luminosos, según proponía *Newton*, según admiten la mayoría de los geómetras modernos, o si es simplemente el resultado de *ondulaciones* de un medio muy enrarecido y elástico que los físicos han convenido en llamar *Éter*”. Y prosigue: “El sistema de experimentación que describiré no permitirá, a mi parecer, dudar entre las dos teorías rivales. Aclarará el punto *matemáticamente* [...] una de las cuestiones más importantes y más debatidas de la filosofía natural”.¹

Arago se apoyaba en el método del espejo giratorio, que tomara prestado de Wheatstone,² quien acababa de determinar “la velocidad de la electricidad”. Se trataba entonces de que la luz procedente de un chispazo eléctrico recorriera distancias iguales en el aire y en el agua. Los tubos, de 1 500 metros de longitud, debían estar bajo tierra para preservarlos de las variaciones de temperatura. Al reflejarse las dos imágenes paralelas del chispazo en un espejo giratorio, sólo seguirán siendo paralelas si llegan en el mismo instante. Si una de ellas llega un poco después, divergen, lo que sucederá si uno de los rayos pasa por un tubo de agua.

El esquema de Arago, muy detallado, proponía el uso de varios espejos que giraran a 1 000 revoluciones por segundo, y Arago le encarga su realización a Bréguet. El experimento llegará a instalarse en una columna de piedra en la sala del meridiano del Observatorio de París, pero Arago no podrá realizarlo a causa de su mala vista. Con la ayuda de Bréguet, Foucault retomará el método Wheatstone-Arago en 1850. Se valdrá de un tubo de tres metros de largo y un espejo que giraba gracias a un pequeño motor de vapor, que le daba una velocidad de entre 30 y 800 revoluciones por segundo, controlable gracias al “sonido de eje” generado por la rotación. Concentrándose en apreciar la velocidad de rotación, y sin hacer medidas absolutas de las velocidades de la luz, Foucault comprobó que la desviación de la imagen que había viajado por el aire era

menor que la correspondiente a la imagen que había recorrido el camino por agua. Foucault concluyó: “Dichos resultados muestran que la velocidad de la luz es menor en el agua que en el aire, y confirman plenamente, de acuerdo con M. Arago, los principios de la teoría de las ondulaciones”.³ Foucault declara así la victoria (definitiva) de la teoría de las ondulaciones sobre la teoría de la emisión, que queda relegada a la historia.

Un año antes, en 1849, Fizeau había determinado experimentalmente la velocidad de la luz en el aire. Se coloca una rueda dentada frente a una fuente luminosa. La velocidad de rotación es tal que la luz, reflejada en un espejo, pueda ser ocultada o no por un diente de la rueda. Con un telescopio, podía observarse el fenómeno a más de ocho kilómetros, entre el jardín de una casa de Suresnes y las alturas de Montmartre. Numerosas incertidumbres impiden que Fizeau determine la precisión de sus medidas, apenas mejores⁴ que las observaciones astronómicas previas. En 1850 Foucault utilizará su método, mucho mejor que el de Fizeau,⁵ para realizar él también dicha medición.

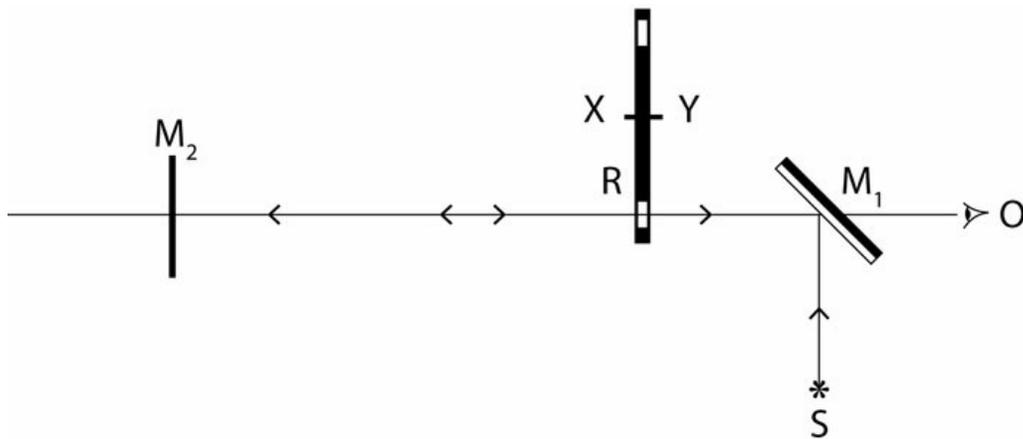


FIGURA XII.1. El experimento de Fizeau de 1849.

La luz emitida por S se refleja en el espejo semitransparente M_1 y pasa luego por la rueda dentada que gira alrededor del eje X-Y. Después llega al espejo M_2 y regresa al observador O a través de R y M_1 .

En 1851 Fizeau verificó la fórmula de perturbación del éter de Fresnel con una precisión de 1/100, midiendo la velocidad de la luz en agua en movimiento. Utilizó un método de interferencias desarrollado por Fresnel y Arago. Las observaciones no fueron muy claras. Según si el agua está (o no) en movimiento en uno u otro sentido, las franjas se desplazan (o no) hacia la derecha o hacia la izquierda, en una medida que, “de acuerdo con la hipótesis de que el éter es perturbado parcialmente, siguiendo la teoría de Fresnel, [es] muy cercana a lo que se ha encontrado por observación”. En contraste con lo que sucedía en el agua, el movimiento del aire no producía “ningún desplazamiento sensible en las franjas”.⁶ Así, dichos resultados concordaban con la teoría de las ondulaciones de Fresnel, que podía entonces pretender dominar la óptica.⁷ Sin embargo, Fizeau mostró prudencia en cuanto a “la adopción de la hipótesis de Fresnel”.

Se hicieron diversas mejoras en la segunda mitad del siglo XIX, tanto al método de la

rueda dentada como al del espejo giratorio. Veinticinco años después de Fizeau, el físico francés Alfred Cornu, especialista en óptica experimental, determinó la velocidad de la luz en el aire entre la École Polytechnique, donde era profesor, y el Mont Valérien (una distancia de más de 10 kilómetros), con una precisión de 1/300; dos años después lo hizo entre el Observatorio de París y la torre de Montlhéry, con una precisión tres veces mayor. Algunos años después, el mismo método fue utilizado por Young y Forbes, y después por Perrotin, quien obtuvo un valor de 299 880 km/s con una incertidumbre de 50 km/s. En 1879, y después en 1885, Michelson retomó el dispositivo de Foucault, obteniendo un resultado de 299 853 km/s con una incertidumbre de 60 km/s. Pronto se realizaron muchas otras mediciones utilizando el mismo método, como las debidas a Newcomb, Wolf y otros. Michelson llevó a cabo mediciones de la velocidad de la luz en el agua destilada, y verificó que es invariable en el vacío sin importar el color, pero que depende del color si se la mide en cualquier medio material: vidrio, agua, sulfuro de carbono.⁸

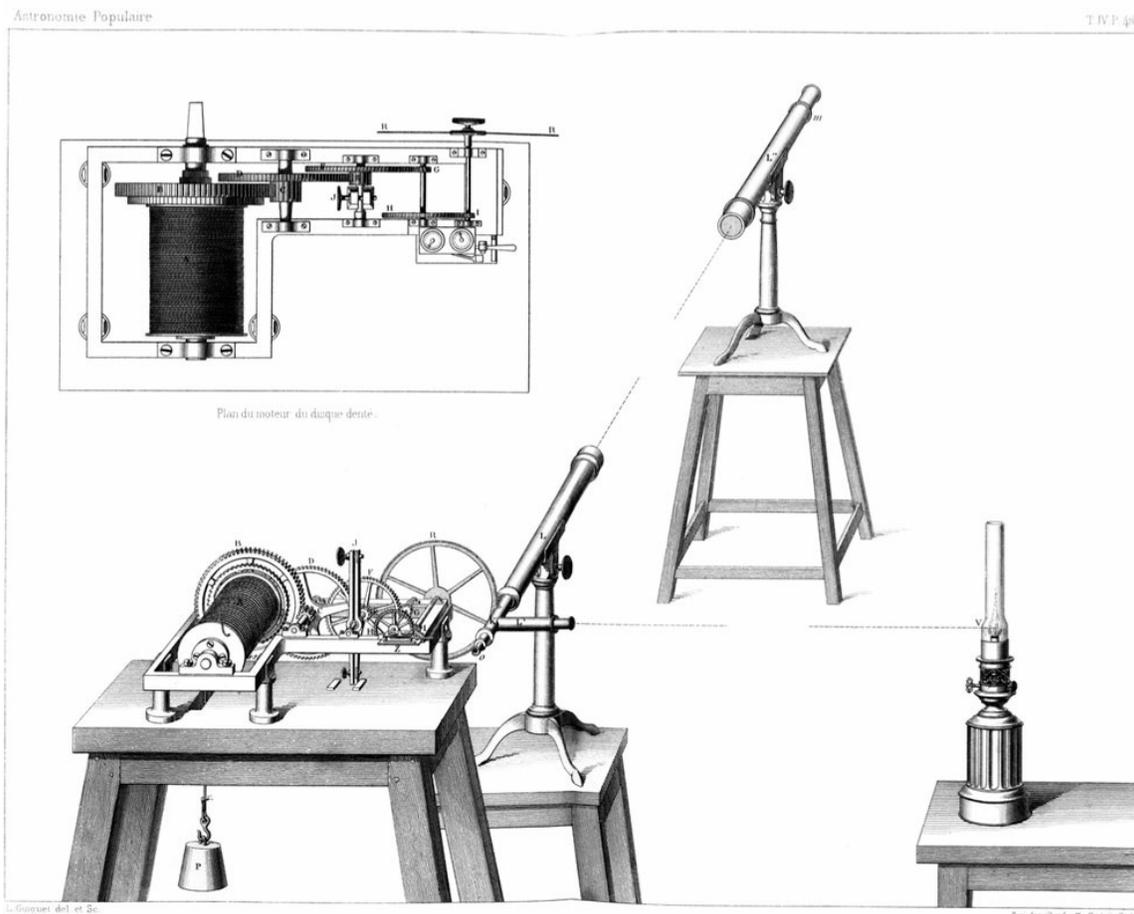


FIGURA XII.2. *El experimento de Fizeau.*

Imagen: © Observatorio de París.

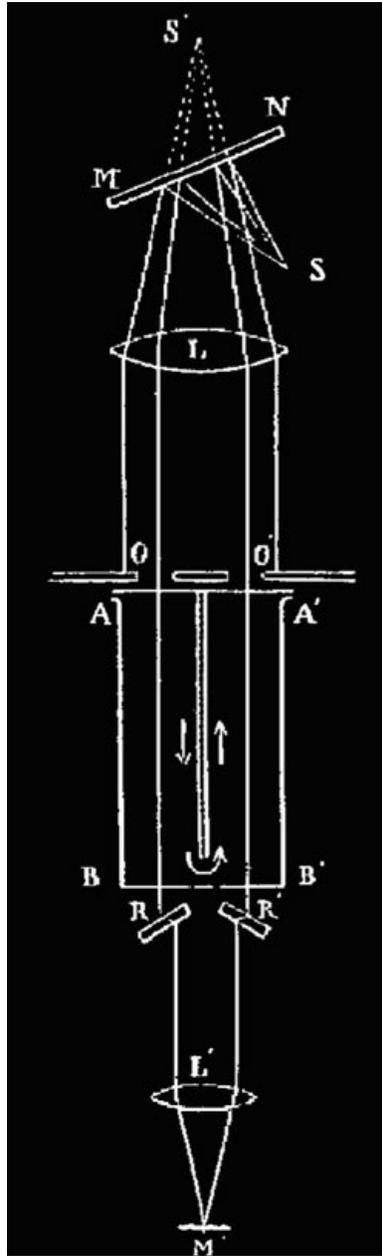


FIGURA XII.3. *El experimento de Fizeau de 1851. Los rayos emitidos por S pasan por los tubos AB y A 'B', que tienen agua circulando en sentido inverso. Al encontrarse, los rayos producen interferencias en S'. (Imagen tomada de É. Verdet, Conférences de physique..., op. cit.).*

EL EFECTO LLAMADO DOPPLER...

Los conceptos de longitud de onda y de periodo⁹ (hoy hablaríamos más bien de frecuencia) son esenciales para las teorías ondulatorias, y en particular permiten explicar la refracción y la dispersión independientemente de la noción de velocidad. A partir de entonces, el índice depende de la longitud de onda (o de la frecuencia) de la radiación

incidente. Dichos conceptos permiten establecer parámetros para el color. La idea no era nueva, pues la encontramos expresada de maneras diversas en Malebranche, en Jean Bernoulli II y, con más claridad, en Euler¹⁰ y Young, antes de que apareciera en los escritos de Fresnel. Vimos que en algunas de sus investigaciones Newton trató de utilizar la velocidad de la luz para explicar el color (capítulo VI), pero que la observación de los satélites de Júpiter durante un eclipse lo hizo abandonar la idea. Dicho lo anterior, debemos mencionar que la *luz* de una radiación particular no es en sí ni azul ni roja: es el *cuerpo* que la recibe el que proporciona el color. “Los colores residen en los cuerpos mismos”,¹¹ nota Euler, quien en sus *Cartas a una princesa de Alemania* expuso el tema de manera muy viva y muy pedagógica:

Cada color simple (para distinguirlos de los colores compuestos) corresponde a una cierta cantidad de vibraciones en un tiempo determinado; así, un número dado de vibraciones por segundo determina el color rojo, otro determina el amarillo, otro el verde, otro el azul y otro el violeta, que son los colores simples, como los presenta el arcoíris. De esta forma, si las partículas de la superficie de algún cuerpo están dispuestas de manera que, al ser agitadas, vibran en un segundo la cantidad de veces que corresponde al color rojo, llamo rojo a ese cuerpo, como cualquier hijo de vecino, y no veo razón para evitar la manera común de hablar. Entonces los rayos que vibran esa cantidad de veces por segundo tienen el mismo derecho a ser llamados rojos. Finalmente, los nervios del fondo del ojo son afectados por esos mismos rayos, y al ser golpeados ese número de veces por segundo producen la sensación de color rojo. Todo está claro y no hay necesidad de utilizar frases oscuras ni misteriosas, que en el fondo no conducen a nada.¹²

Fresnel no se preocupó por la influencia del movimiento sobre el periodo de las vibraciones. Además, su interpretación negativa del experimento de Arago no lo llevaba en esa dirección. La idea surge de Doppler. Profesor de matemáticas en Praga, Doppler tenía un conocimiento limitado de la física de la luz y de la teoría de las ondulaciones. En 1842 publicó en los *Anales de la Real Sociedad de Ciencias de Bohemia* un texto intitulado “Sobre el color de la luz de las estrellas dobles...” Dicho artículo, aunque muy desigual, haría historia. Doppler describe concienzudamente, por primera vez en un artículo *publicado*,¹³ el efecto que lleva su nombre. Sin embargo, llega a muchas conclusiones erróneas. Doppler, según lo afirma la tradición ondulatoria, parte de la analogía de las ondas luminosas con el sonido y con las olas. En la introducción a su texto, presenta una imagen de la que sin duda se sirvió para asentar su razonamiento: “Nada me parece más sencillo de comprender: la distancia y el intervalo de tiempo entre dos olas sucesivas deben ser menores para un observador que se precipita hacia la ola que viene, y mayores si se aleja de ella”.¹⁴ Establece, para el caso del sonido, fórmulas que proporcionan la variación de la longitud de onda en función de las velocidades del observador y de la fuente, medidas en un medio determinado. Muestra que, para un observador inmóvil al cual se acerca una fuente, la longitud de onda de recepción es menor que la longitud de onda de emisión. Esto sucede también si el receptor se acerca a una fuente inmóvil. La longitud de onda aumenta si el receptor se aleja de la fuente, o si la fuente se aleja del receptor.

Pronto se quiso verificar este efecto en el sonido. En 1845 Christophorus Buys-Ballot utilizó un vagón tirado por una locomotora para transportar trompetas (la fuente) o músicos con el oído entrenado (los observadores). Cuando unos estaban en el vagón, los otros estaban en tierra. A pesar del ruido de la locomotora, pudo verificarse el efecto. Pronto se llevaron a cabo experimentos idénticos en Inglaterra y después en Alemania.¹⁵ “M. Babinet —notará Fizeau en su artículo de 1848—¹⁶ ha tenido ocasión de observar que el silbido de las balas es mucho más agudo cuando se aproximan al observador que cuando se alejan de él.”¹⁷ Empero, regresemos a la luz y a la interpretación de Doppler, que sólo tiene un conocimiento superficial de astronomía. Sin duda comprendió que su efecto tenía una influencia en la longitud de onda de las vibraciones, y por lo tanto en el color. ¡Ay!, le atribuye excesiva importancia. Subyugado por su efecto, cree que el color de las estrellas depende *exclusivamente* de él. Supone que su color aparente se explica esencialmente por su movimiento respecto al observador. Imagina que la mayoría de las estrellas son intrínsecamente blancas o ligeramente amarillas, de manera que la misma existencia de estrellas de colores diversos es un argumento en favor de su teoría. En 1867, en su obra sobre el sonido, después de describir el efecto Doppler, Tyndall enuncia simplemente esta explicación aventurada del color de las estrellas, y puntualiza su escepticismo: “[Doppler] cree que todas las estrellas son blancas, pero que algunas se alejan rápidamente de nosotros, lo que alarga sus ondas luminosas y las hace parecer rojas, mientras que otras se acercan rápidamente a nosotros, así que sus ondas se acortan y nos parecen azules. Esta teoría es extremadamente ingeniosa, pero su exactitud es muy dudosa”.¹⁸

Una hipótesis tan extrema (e ingenuamente audaz) le permite entonces a Doppler determinar, por su color, la velocidad radial (respecto a la línea de visión) de las estrellas. Esto lo conduce a asignarles velocidades de varias decenas de miles de kilómetros por segundo, sobrepasando incluso 100 000 km/s, velocidades que en realidad son casi 1 000 veces menores. Llevará su teoría del color incluso más lejos: las estrellas intrínsecamente blancas pueden volverse invisibles si se alejan a más de 100 000 km/s, pues entonces el desfase sería tal que sus emisiones saldrían del espectro visible. Mientras que una velocidad de 200 km/s basta para proporcionar una coloración ligeramente anaranjada, el cambio de color se acelera enormemente a partir de los 1 000 km/s. Doppler supone que la radiación que emana de las estrellas está esencialmente confinada a la región visible del espectro: no está al corriente de los descubrimientos, a principios de siglo, de la parte infrarroja del espectro por Herschel y de la parte ultravioleta por Ritter.¹⁹



Christian Doppler

FIGURA XII.4. *Christian Doppler.*

Imagen: Frontispicio de la edición de F. J. Studinčka del artículo de Doppler "Über das farbige Licht der Doppelsterne", Praga, 1903.

Doppler habría podido plantearse perfectamente la pregunta sobre la exactitud de su teoría, y por lo tanto refutarla, llevando a cabo un análisis estadístico como el que condujo a Michell a pronosticar la existencia de las estrellas dobles "físicas". En efecto, si su teoría del color de las estrellas era cierta, la distribución estadística de las estrellas de acuerdo con su color dependería de la dirección de su velocidad. Y, en vista de que

habría (¡sin expansión del universo!) estadísticamente tantas estrellas alejándose del observador (y entonces tendiendo al rojo) como estrellas acercándose (y entonces tendiendo al azul), la distribución sería simétrica. Pero Doppler no es astrónomo y no se plantea ese tipo de cuestiones. En el mismo artículo desarrolla una teoría de las estrellas dobles según la cual el color de las componentes debería variar en función de la dirección de su velocidad, hipótesis que Buys-Ballot toma en 1844 como tema de tesis,²⁰ y cuyas conclusiones critica con mucha razón: “La teoría de Doppler [...] no basta para explicar el color de las estrellas dobles”, afirma.²¹

En pocas palabras, el trabajo de Doppler será criticado sin cesar, con buenos argumentos. Cincuenta años después, Cornu consagra un artículo al “método de Doppler-Fizeau” y nota que, “desde el punto de vista de las ondas sonoras, las conclusiones de Doppler eran inatacables”, pero continúa retomando la opinión de Buys-Ballot, quien “demuestra con facilidad que la explicación de los colores de las estrellas [...] no pasa el examen”, e insiste enseguida en “la pobreza” de la argumentación, la “vaguedad y la confusión que reinaban por entonces, incluso en la mente del autor...”²²

A pesar de su prudencia característica, Lorentz afirma en 1907: “Al considerar la importancia de su principio y su gran utilidad, debemos contar a Doppler entre los grandes hombres de ciencia. Sin embargo, me parece que sus otros trabajos, la manera como defendió su teoría contra diversas objeciones y la forma en que la aplicó al color de las estrellas no le otorgan ningún derecho a tal título honorífico”.²³ Uno de sus biógrafos será aún más crudo: “Verdaderamente, puede considerarse que tuvo la suerte de que la posteridad lo recordara”.²⁴ En efecto, ni la calidad de su trabajo ni la pertinencia de sus ideas pueden compararse con los de Michell, Blair o Fizeau, como veremos a continuación. La historia puede ser tan injusta como ingrata.

EL EFECTO DOPPLER REVISADO POR FIZEAU

Seis años después que Doppler, pero más de 60 años después que Blair, Fizeau retoma de manera independiente y con mucho más tino el efecto que lleva (en Francia) ambos nombres. El 23 de diciembre de 1848 lee ante la Sociedad Filomática de París un artículo intitulado “Acústica y óptica”; sin embargo, sólo publica una versión reducida, y el artículo no aparecerá *in extenso* sino hasta 1870. Parte del mismo punto que Doppler, el efecto de la velocidad sobre el sonido, que verifica experimentalmente. Su trabajo es por completo independiente del de Doppler, a quien no cita ni en 1848 ni en 1870. Comoquiera que sea, se trata de un artículo de una calidad muy distinta. Cornu no se equivoca al afirmar lo siguiente: “Tenemos aquí el punto capital donde se da el gran paso que separa la asociación vaga de la luz con el sonido y la indicación precisa del fenómeno al que corresponde el movimiento de la fuente”.²⁵

Las fórmulas que establece Fizeau son congruentes con la teoría de las ondulaciones de Fresnel, y son válidas para el sonido. No obstante, como en el caso de Doppler,

consideran las velocidades *absolutas* respecto al éter y no las velocidades *relativas* fuente/observador.²⁶ Las fórmulas de Fizeau no son las mismas cuando la que se mueve es la fuente y cuando se mueve el observador. Sólo son equivalentes en el “primer orden de v/c ”, cuando las velocidades no son muy grandes. Esto sucede porque la teoría de las ondulaciones no obedece el principio de la relatividad. El éter es el medio respecto al cual todo debe referirse y calcularse; impone un espacio concebido como absoluto físicamente, en cierta forma “más absoluto” aún que el espacio absoluto de Newton, pues se trata de un espacio *real*, existente: un marco de referencia fundamental, un “espacio físico”, dirá Drude.²⁷ Habrá que esperar al año de 1905, después de que Einstein abandone el éter y establezca el principio de la relatividad en el núcleo de la teoría ondulatoria de la luz y el electromagnetismo, para obtener las fórmulas correctas, relativistas, del efecto Doppler-Fizeau para la luz.

Así, en el siglo XIX se requieren dos tipos de espacio muy distintos como sostén del edificio de la física. La física de los cuerpos materiales se basa en el espacio absoluto de Newton, pero la teoría de las ondas luminosas (y pronto las electromagnéticas) utiliza el éter. En cuanto al principio de la relatividad, no está en el núcleo, “en la base”, de la física, pues no se aplica a la luz. La velocidad de la luz es independiente de la velocidad de la fuente, las velocidades no se suman... ¿Cómo podría funcionar el principio de la relatividad en corpúsculos que no son sensibles a la velocidad de la fuente que los emite? Entonces el siglo XIX es no relativista, lo que a mi parecer es una de las razones de la dificultad para aceptar la relatividad en el siglo XX, pues los profesores habían sido educados en el éter...

Pero regresemos a Fizeau, quien por entonces tiene una buena imagen de la constitución de la luz:

La luz, considerada en sus elementos, tal y como son separados por la refracción en un espectro, está compuesta por una infinidad de rayos, con longitudes de ondulación diferentes, mayores para los rayos rojos y menores para los rayos violetas [...] pero, en general, el espectro presenta una particularidad importante: que no es continuo de un extremo al otro, sino que está interrumpido por franjas brillantes u oscuras.²⁸

Además, ha entendido bien el fenómeno, infinitamente mejor que Doppler: “Si suponemos un cuerpo luminoso dotado de un movimiento de traslación lo bastante rápido para que su velocidad sea comparable a la de la propagación de la luz, la longitud de ondulación de los rayos elementales se modificará, disminuyendo o aumentando según si la luz se recibe en la dirección del movimiento o en la dirección contraria”.²⁹

En la continuación de su artículo, Fizeau atribuye una gran importancia a la “visibilidad de las franjas”; se plantea la dificultad “de conseguir prismas grandes y muy homogéneos”, y precisa que, “sin esa condición, los rayos no se separan bien y las franjas no se distinguen con claridad”.³⁰ Ahora no se trata de un prisma acromático, sino altamente dispersivo, en *flint*. Fizeau, como Blair, piensa que el efecto se aplica a los planetas, por ejemplo a Venus, y a las estrellas:

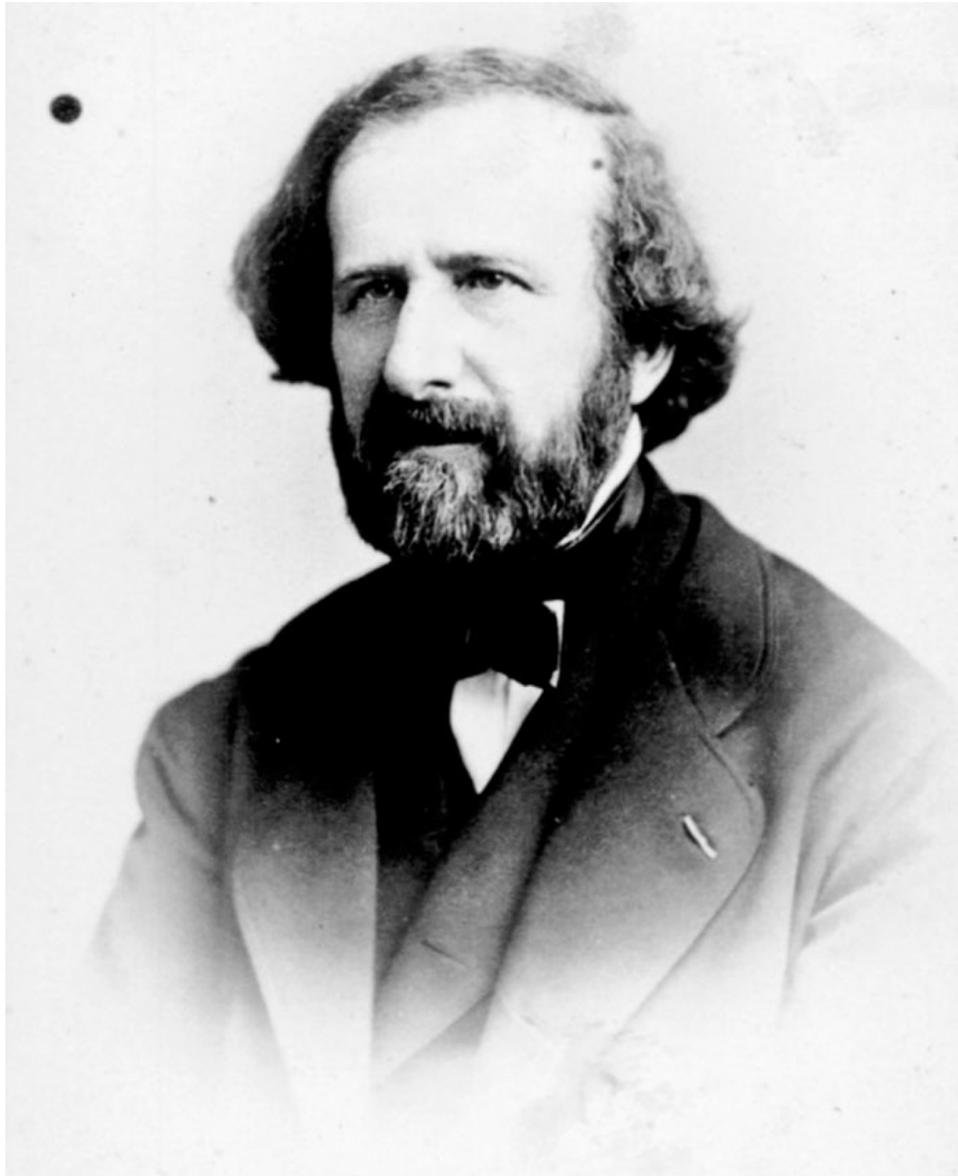


FIGURA XII.5. *Armand Fizeau.*

Fotografía de Charles Reutlinger, Smithsonian Institution.

Como la velocidad de la luz es enorme, tal efecto sólo puede apreciarse en el caso de velocidades muy considerables, como las de los planetas en sus órbitas. Aun en dichas circunstancias, el efecto debe de ser muy pequeño. Sin embargo, es probable que haya estrellas dotadas de movimientos más rápidos que aquellos correspondientes a los planetas, así que podemos esperar circunstancias más favorables para la observación.³¹

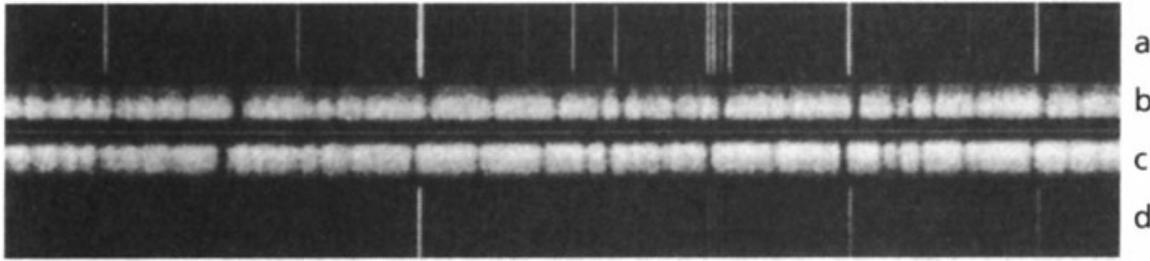


FIGURA XII.6. *Espectros de estrellas en movimiento.*

a) *Espectro de referencia del laboratorio; b) estrella que se acerca; c) estrella que se aleja, y d) espectro de referencia del laboratorio.*

RECUADRO XII.1. *El efecto Doppler-Fizeau*

Una fuente en movimiento radial emite un haz luminoso que llega a un prisma, muy dispersivo para que las franjas sean bien visibles, nítidas. Apuntando a una fuente conocida, en reposo respecto al observador, se registra otro espectro, llamado “de comparación”. Dicho espectro muestra la posición de las franjas de la fuente en reposo, que sirve de punto de referencia. Al comparar las posiciones respectivas de las mismas franjas, se mide el desplazamiento del espectro. La teoría permite relacionar dicho desplazamiento con la velocidad de la fuente relativa al observador.

Hace notar, también como Blair, que “el resultado sólo depende de la velocidad del cuerpo luminoso y no de su distancia”, añadiendo por supuesto que “observaciones parecidas podrían conducir a datos sobre las velocidades propias de los astros más alejados y, en ciertos casos, sobre sus distancias; por ejemplo, para algunas estrellas dobles cuyos elementos y periodo de revolución son conocidos, bastaría saber sus velocidades propias para determinar sus distancias”.³²

Esas ideas, bien conocidas hoy día, no requieren comentario, como no sea el debido a Cornu en 1891:

He aquí el nuevo método constituido: nada ha cambiado desde entonces. En lugar de las variaciones de intensidad o de color invocadas por Doppler, inadmisibles desde cualquier punto de vista, se trata de un cambio patente de refringencia, un desplazamiento de franjas en el espectro, fenómeno real y measurable con gran precisión. Y dicho desplazamiento está lejos de ser insignificante; los astrónomos miden actualmente algunos mucho menores.³³

En lo que respecta al sonido, sin duda debemos atribuir a Doppler la fórmula que lleva su nombre, así como la interpretación del efecto. No es así en el caso de la luz. Es con el trabajo de Blair, y no con el de Doppler, con el que debe compararse la obra de Fizeau. Este último no tenía conocimiento del manuscrito de Blair; si finalmente pudo leer su nombre en el artículo de Arago, entonces fue aún en forma manuscrita también, pues no fue publicado hasta 1853, y tal no parece haber sido el caso. De cualquier modo,

no hay que ver en Doppler al precursor de Fizeau, sino en Blair, quien, más imaginativo aún que Fizeau, había desarrollado todas las consecuencias a las que podía llegarse con el efecto (capítulo IX), como la posible medición de la velocidad de rotación de los planetas.

DE MICHELL A FIZEAU, PASANDO POR BLAIR Y DOPPLER

Es el momento de revisar la expresión del efecto (llamado) Doppler en ambas teorías. En el marco de la teoría de la emisión el efecto se expresa mediante el “método” de Michell desarrollado por Blair, y en la teoría de las ondulaciones se expresa con el efecto Doppler repensado por Fizeau. Para evitar toda ambigüedad, utilizaremos aquí la terminología contemporánea.

En el marco de la teoría de las ondulaciones (y de todas las teorías ondulatorias de la luz en el siglo XIX), el efecto Doppler-Fizeau implica que las frecuencias emitidas por una fuente en movimiento y medidas por un observador fijo (o emitidas por una fuente fija y medidas por un observador en movimiento) no corresponden a las frecuencias emitidas realmente. La teoría predice la observación de frecuencias desplazadas, desplazamiento relacionado con la velocidad de la fuente respecto al éter o con la velocidad del observador respecto al éter. Una radiación de frecuencia determinada, emitida por una fuente en movimiento, es recibida con una frecuencia desplazada ($\nu_0 \rightarrow \nu_1$) debida al efecto Doppler-Fizeau. No obstante, como el índice de refracción del prisma utilizado depende de la frecuencia, el haz que ha sufrido un desplazamiento de frecuencia sufrirá *también*, con incidencia constante, una variación en el ángulo de refracción ($r_0 \rightarrow r_1$) de cada una de sus franjas. Notemos que si el haz es policromático, se observará un desplazamiento de todo el espectro; sin embargo, no hay cambio de color del espectro continuo: el desplazamiento de frecuencia sólo puede leerse gracias a la intensidad de las franjas, a la forma del espectro. De esta forma, una variación en la velocidad radial implica una variación en la frecuencia, que induce una variación en el índice de refracción y, por lo tanto, en el ángulo de refracción (véase el recuadro XII.2).

En el marco de la teoría de la emisión, se trata sólo de un haz monocromático. El ángulo de refracción depende del índice de refracción, que a su vez depende de la velocidad de los corpúsculos del haz incidente. El efecto Blair-Michell implica (sobre un prisma y con incidencia constante) una variación del ángulo de refracción del haz, en función de la velocidad *relativa* de la fuente respecto al observador. Diremos simplemente que una diferencia de velocidad ($0 \rightarrow v$) induce, con incidencia constante, una variación del ángulo de refracción ($r_0 \rightarrow r_1$). Al utilizar un prisma acromático, se observará un solo rayo en el que se mezclan todos los componentes de la luz. En efecto, sin una teoría del color, sin una comprensión de los espectros, sin un conocimiento preciso de las franjas, el efecto sólo tiene sentido desde un punto de vista monocromático. Como vimos en el capítulo X, ése es uno de los principales problemas de Arago.

Entonces el efecto Doppler-Fizeau³⁴ se expresa bien, aunque de manera diferente, en

ambas teorías; las fórmulas son equivalentes, paralelas: en los dos casos, las velocidades radiales de la fuente y del observador inducen una variación en el ángulo de refracción, pero en la teoría de la emisión se hace el hicapié en la variación de la refracción del rayo luminoso, necesariamente monocromático, mientras que en las teorías ondulatorias el interés está en la modificación de las frecuencias.³⁵ El desarrollo teórico y la comprensión del efecto en lo que respecta a la luz le pertenecen entonces de manera independiente a Blair, en el marco de la teoría de la emisión, y a Fizeau, en el de la teoría de las ondulaciones. Sin embargo, Blair fue el primero.

Fizeau parece ser el único, y durante mucho tiempo, que entendió bien el fenómeno doble: *tanto* de desplazamiento *como* de modificación del ángulo de refracción, debido a la velocidad. En su análisis detallado del experimento de Arago, “un prisma en *flint* [¡ya no un prisma acromático!] se supone colocado frente al telescopio de un aparato propio para medir ángulos”.³⁶ Escogiendo “dos franjas vecinas, situadas en la región más brillante del espectro”, calcula el desplazamiento debido al movimiento de los cuerpos luminosos y el que corresponde al movimiento del observador (ya vimos que había dos fórmulas, diferentes en el segundo orden de aproximación). Puede, entonces, calcular que la variación angular de desplazamiento para una velocidad igual a la del planeta Venus es de 2"65, resultado que corrige utilizando la fórmula del desplazamiento causado por el movimiento de la Tierra, que induce una desviación de 2"25. Dicha desviación se duplica al pasar por el prisma de 180° y, “como en el experimento de M. Arago”,³⁷ se duplicará nuevamente al realizar la observación seis meses después, lo que proporcionará una desviación angular de 9" de arco.³⁸ Se trata de la incidencia de los experimentos de Blair y Arago relativos a la refracción. Fizeau concluye que es posible medir tal efecto: “Dichas cantidades son pequeñas, no cabe duda, pero los astrónomos miden algunas aún menores y, si suponemos velocidades mayores, como las que algunas estrellas parecen poseer, [...] el fenómeno podría ser aún más fácil de apreciar”.³⁹ De esta manera, tanto para Fizeau como para Blair y Arago, el movimiento de la fuente o de la Tierra induce tanto un desplazamiento del espectro como una variación en el ángulo de refracción, como en efecto sucede.⁴⁰

Además, el efecto queda en parte oculto porque todo el espectro continuo está desplazado. No obstante, no hay variación en el color del espectro observado, pues los colores dependen directamente de la frecuencia. Por ejemplo, dado un movimiento relativo de la fuente que se aleja del observador, el amarillo se desplaza hacia el rojo, que se desplaza hacia el infrarrojo, pero todo el espectro está desplazado en frecuencia, tanto las franjas de emisión y absorción como el *continuum*. Fizeau vio claramente ese punto, opuesto a las conclusiones de Doppler:

Considerada en el espectro, dicha modificación se traducirá en el siguiente fenómeno: cada rayo, en virtud de su nueva longitud de ondulación, cambiará de desviación y tomará el lugar del rayo que tenía esa longitud de ondulación cuando el cuerpo luminoso estaba en reposo; de esta manera, los rayos se reemplazarán unos a otros, de manera que un mismo rayo no estará en el mismo lugar, sino que todos serán transportados hacia el

rojo o hacia el violeta, de acuerdo con el sentido del movimiento del cuerpo luminoso. Los colores, por el contrario, que no parecen depender sino de la longitud de onda, no experimentan ningún desplazamiento.⁴¹

Es claro que ambas teorías, de la emisión y de las ondulaciones, son “inconmensurables”. Eso no significa que no tengan puntos en común: es claro que deben explicarse las observaciones pasadas. Siempre es así en una revolución científica. Supongamos que el efecto hubiera sido observado por Arago (y es precisamente lo que buscaba); entonces la teoría del efecto, que aparece en su artículo de 1810-1853, habría llevado lógicamente los nombres de Blair y Arago, si no es que el de Michell... Más tarde, alguna teoría ondulatoria (sin duda ya distinta de la de Fresnel) habría aportado una concepción nueva, “cromática”, del efecto, digamos el efecto Doppler-Fizeau. Este último sería entonces una extensión del efecto teorizado por Blair y observado por Arago. Así, en el efecto imaginado por Michell, construido por Blair y que intenta observar Arago, está lo esencial de las premisas del efecto Doppler-Fizeau. El efecto Blair-Michell no es más que el efecto Doppler-Fizeau monocromático, visto en el marco de la teoría de la emisión.

EL EXPERIMENTO INCOMPENDIDO DE ARAGO

La forma en que Arago interpreta su experimento⁴² en 1810 no supone que la refracción pueda ser insensible al movimiento de la Tierra. La teoría de la emisión no habría permitido pensarlo. Muy diferente es la interpretación del experimento debida a Fresnel (capítulo XI), quien en esencia plantea que el experimento es “negativo”; dicho resultado es el que explica en su teoría de las ondulaciones, gracias a su fórmula de perturbación. A lo largo del siglo XIX, la opinión común será que debe explicarse “el resultado negativo del experimento de Arago”. Tal es, por ejemplo, el título de un subcapítulo del *Tratado de óptica física* publicado en 1858-1859 por Félix Billet. Mascart, quien fuera, antes de Michelson, uno de los más obstinados en hacer evidente el efecto del movimiento de la Tierra sobre la luz, nota en su rápida introducción histórica de 1872: “Arago intentó verificar esta consecuencia observando estrellas situadas en puntos diferentes de la eclíptica, de las que la Tierra se aleja o a las que se acerca por su movimiento de traslación. Llegó a la conclusión de que la desviación producida por un prisma a la luz procedente de una estrella no sufre ninguna modificación entre una estrella y otra”.⁴³ Que la refracción no sea sensible a la velocidad de la Tierra puede parecer curioso, en particular después de haber observado el efecto Doppler-Fizeau. Sucede, como hemos visto antes, que el efecto “Doppler-para-la-luz” se interpreta en adelante como una modificación de la longitud de ondulación (es decir, de la frecuencia) y no en términos de variación de la refracción (véase el recuadro XII.2).

RECUADRO XII.2. *El efecto Doppler-Fizeau, un fenómeno doble: desplazamiento y refracción*

El desplazamiento de las franjas es consecuencia de una variación en la frecuencia, y modifica el color de la luz. La variación del ángulo de refracción resultante se relaciona con el índice de refracción, que depende de la frecuencia; afecta a todas las franjas. De esta manera, a todo desplazamiento de franja se asocia una variación del ángulo de refracción, que depende de la franja. Podemos convencernos de eso gracias al experimento siguiente:

Se coloca una fuente de láser (que es monocromático) de frecuencia ν_0 en un satélite, que está en movimiento respecto a la Tierra. Se mide el ángulo de refracción del haz sobre un prisma en dos casos:

1. Cuando la velocidad radial del satélite es nula: la trayectoria del satélite es ortogonal a la dirección de la Tierra.

2. Cuando el satélite se dirige hacia la Tierra.

Tendremos entonces un efecto Doppler-Fizeau que yo llamaría puro, pues permite observar el efecto de la velocidad de la fuente en un haz monocromático.

El primer haz es refractado en un ángulo r_0 , sin que varíen su frecuencia ν_0 ni su color.

El segundo haz se refracta en un ángulo r_1 , cuya frecuencia ν_1 , un poco mayor que en la primera observación, se desplaza al azul (aquí la fuente se acerca al observador).

De esta manera, en el mismo haz, de un experimento al otro se tiene a la vez:

– una variación de frecuencia;

– una variación del ángulo de refracción del haz sobre el prisma ($r_0 \rightarrow r_1$).

Es también un efecto Blair-Michell.

Fizeau, muy competente en la cuestión, precisamente por haber explicado el efecto Doppler-Fizeau, no aceptará sin más el resultado supuestamente “negativo” del experimento de Arago: “Hay observaciones debidas a M. Arago que muestran que tal influencia es nula o *insignificante*”, nota prudentemente.⁴⁴ Entonces la velocidad de la fuente, que desapareciera por el portón del éter, reaparece silenciosamente por la puerta trasera del efecto Doppler-Fizeau. Así, el experimento de Arago es un experimento del tipo Doppler-Fizeau. Curiosamente, dicho experimento, “una de las piedras en el zapato” del tema, no será comprendido correctamente hasta muy tarde. La interpretación de Fresnel (un experimento “negativo”) lo condujo a construir su teoría de manera que el efecto sucediera “en frecuencia” pero no “en refracción”.⁴⁵ En el siglo XIX no se esperaba un efecto de variación de la refracción debido al movimiento de la fuente o del prisma. Se creía que el efecto Doppler-Fizeau sólo tenía lugar en frecuencia. Al nivel experimental, gran cantidad de razones (que el prisma fuera acromático, desconocimiento de los espectros, dificultad para localizar las franjas, etc.) no permitían obtener el resultado positivo que hoy observamos. Muy pocos teóricos, físicos o espectroscopistas entenderán que tal efecto existe. Así, sorprendentemente, el efecto Doppler-Fizeau se mantendrá fuera de la gama de los experimentos de óptica que interesan a los teóricos a finales del siglo XIX. Retomaremos este punto en el capítulo siguiente.

La interpretación del experimento de Arago nos bastará: no entraremos en los verdaderos trucos de prestidigitador que tuvieron que aplicar los teóricos para que el efecto no apareciese en términos de refracción. De Fresnel a Lorentz, interpretar tal

experimento será problemático; a veces en Mascart, menos en Fizeau, en Lorentz... Esta dificultad mayor se mantendrá implícita hasta ser resuelta en 1905... Dicho lo anterior, si Fresnel hubiera leído mejor a Arago, si hubiera sido más prudente y hubiera pensado en la posible existencia de un efecto, disfrazado por la falta de precisión en las mediciones, indudablemente no habría producido la misma teoría, sino una teoría del éter en reposo que explicara a la vez la aberración y el experimento de Arago, del cual hubo que esperar un siglo para tener una respuesta que pudiera llamarse satisfactoria. Por supuesto que eso no habría resuelto todo, de ninguna manera. Y, comoquiera que sea, no se reescribe la historia...

XIII. 1850-1900

LAS TEORÍAS DE LA LUZ EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XIX

Dos experimentos marcaron profundamente el tema a mediados del siglo XIX. Para empezar, el experimento *crucial* de Foucault en 1850: la teoría de la emisión pierde mucho terreno en favor de la teoría de las ondulaciones. Un año después, el experimento de Fizeau, cuyos resultados concuerdan completamente con el valor del coeficiente de perturbación del éter, aporta un sostén esencial a la teoría de las ondulaciones, que a partir de entonces domina totalmente. Tanto Foucault como Fizeau son discípulos y colaboradores de Arago, quien morirá pronto y al que le rendirán homenaje en sus artículos. El éter perturbado de Fresnel aún presentaba muchos problemas, como lo vimos en particular en el capítulo XI, pero cabía concebir otras hipótesis en el marco, finalmente flexible, de la teoría de las ondulaciones. En la introducción de su artículo de 1851, Fizeau habla de dichas dificultades: “Ninguna de las teorías propuestas parece contar con la aceptación completa de los físicos. En efecto, ante la falta de nociones exactas sobre las propiedades del éter luminoso y sobre su relación con la materia ponderable, ha sido necesario proponer hipótesis, y entre las que se han planteado, algunas son más o menos probables, pero ninguna puede considerarse demostrada”.¹

Básicamente hay tres hipótesis relativas al éter. Puede ser perturbado siempre, puede ser inmóvil o puede haber un juego más sutil (y difícil de entender) entre materia y cuerpos transparentes: tal es la hipótesis de Fresnel, la perturbación parcial. Si el éter es perturbado, “adherente y como fijo a las moléculas del cuerpo”,² “comparte, por consecuencia, los movimientos que puedan imprimirse a dicho cuerpo”³ y “a la velocidad de la luz deberá sumarse la velocidad del cuerpo”.⁴ Pero, ¿cómo explicar entonces la aberración? Si el éter “no se ve perturbado por el cuerpo ni por sus movimientos [...] la velocidad de la luz no se verá alterada de manera ninguna”.⁵ Existe la posibilidad, prosigue Fizeau, de que, “según una tercera hipótesis, que tiene un poco de las dos anteriores, sólo una parte del éter sea libre y otra parte esté fija a las moléculas del cuerpo y comparta sus movimientos”;⁶ en pocas palabras, si el éter se ve perturbado parcialmente, “la velocidad de la luz aumentará, pero sólo en una fracción de la velocidad del cuerpo, y no en toda ella como en la primera hipótesis”.⁷ Esta tercera opción “no es tan evidente como las anteriores”, nota Fizeau, aunque “Fresnel haya hecho ver que puede apoyarse en consideraciones mecánicas muy probables”.⁸

En vista de los resultados del experimento que acaba de realizar, Fizeau no puede dejar de adoptar el “coeficiente de Fresnel”, pero es claro que muestra reticencia en cuanto a la “concepción” profunda de la hipótesis de la perturbación parcial, como lo

dice en su conclusión:

Me parece que el éxito de este experimento obliga a adoptar la hipótesis de Fresnel, o cuando menos la ley que encontró para expresar el cambio en la velocidad de la luz debido al movimiento de los cuerpos. Sin embargo, aunque el hecho de ser cierta la ley sea una prueba muy fuerte en favor de la hipótesis de la que no es sino una consecuencia, tal vez la concepción de Fresnel parezca tan extraordinaria y, en ciertos aspectos, tan difícil de admitir que deban exigirse otras pruebas aún, y un examen profundo por parte de los geómetras para adoptarla como la expresión de la realidad de las cosas.⁹

En pocas palabras, observa claramente que la “ley” se aplica, pero, como muchos de sus colegas, no está realmente convencido por la teoría misma, así como no entiende ni apoya los elementos en los que se basa. De hecho, en el siglo XIX se hará hasta lo imposible para no tocar la esencia del dispositivo de Fresnel, el “coeficiente de perturbación de Fresnel”. La teoría de las ondulaciones explica bien las observaciones y sugiere algunas nuevas, pero su falta de coherencia es evidente. Como notamos antes con Hoffmann, una de las principales objeciones contra la teoría surge de que Fresnel debe distinguir entre dos tipos de éter: uno no es afectado por la materia, mientras que el otro es privativo de los medios transparentes, que lo perturban.¹⁰ A principios de la década de los setenta, Veltmann mostró que, como la fórmula de Fresnel dependía del índice de refracción y el índice dependía del color, los medios transparentes debían perturbar el éter de otra manera en función del color de la luz, de modo que la materia debía tener una distinta velocidad de perturbación para cada color. En el caso de la doble refracción, Mascart establece que dicho razonamiento se extiende a los dos estados de polarización de la luz.¹¹ El escepticismo iba en aumento... A pesar del innegable éxito del coeficiente de Fresnel para explicar los fenómenos observados, el mecanismo físico en el que se basaba el efecto no resultaba claro para nadie. Como hizo notar con razón Whittaker, muy informado en esas cuestiones: “[El] método [de Fresnel] consistía en trabajar a la inversa, partiendo de cualidades conocidas de la luz y esperando llegar a un resultado al que se le pudieran atribuir. Consiguió explicar los fenómenos en función de algunos principios sencillos, pero no fue capaz de definir un éter que a su vez permitiera explicar dichos principios”.¹²

De cualquier forma, no debemos subestimar el éxito de la teoría de las ondulaciones, núcleo de las teorías ondulatorias del siglo XIX. Van de la polarización a las interferencias, pasando por la difracción...¹³ En suma, la teoría de Fresnel acumulaba éxitos, pero sin poder encontrar un asiento teórico convincente. Además, los problemas (cinemáticos) planteados a principios de siglo, relacionados con la aberración y con los resultados del experimento de Arago, quedaban lejos de ser resueltos de manera decisiva. Compartiremos la admiración de Stokes ante la simplicidad de la explicación de la aberración (capítulo V) debida a Bradley: “La explicación general del fenómeno de aberración es tan sencilla, y la coincidencia entre el valor de la velocidad de la luz que se deduce y el que resulta de las observaciones de los eclipses de los satélites de Júpiter es tan notable, que no hay duda alguna en cuanto a la verdad de dicha explicación”.¹⁴ Sin

embargo, Stokes tampoco está convencido de la hipótesis de la perturbación parcial, y no podemos dejar de concordar con su crítica de la explicación que da Fresnel de la aberración:

No obstante, al examinar la causa del fenómeno con más cuidado, está lejos de tener la simplicidad que aparenta a primera vista. En cuanto a la teoría de las emisiones, realmente hay poca dificultad; [...] pero no es así con la teoría de las ondulaciones, a menos que se acepte la sorprendente hipótesis de que el éter luminífero pasa libremente a través de las caras del telescopio y a través de la Tierra misma.¹⁵

En efecto, la explicación de Bradley contrasta por su simplicidad con la de Fresnel, además de que esta última no forma parte del cuerpo central de la teoría, sino que es una añadidura: “Sin embargo, la teoría ondulatoria de la luz explica con tanta simplicidad y de una manera tan bella el fenómeno más complicado que resulta natural considerar la aberración como un fenómeno que no explica, sin que tampoco sea incompatible con ella”.¹⁶

En pocas palabras, la teoría tiene flaquezas que Stokes no puede soportar, así que conserva la teoría de las ondulaciones, pero rechaza el coeficiente de perturbación. Retomando la hipótesis de Cauchy,¹⁷ se convertirá en el defensor de un éter totalmente perturbado, y se concentra en un punto de vista hidrodinámico, su área de especialidad, proponiendo una explicación de la aberración que no es más convincente que la tan criticada por él...¹⁸

LA INFLUENCIA DEL MOVIMIENTO DE LA TIERRA EN LOS EXPERIMENTOS DE ÓPTICA

Muchos experimentos (empezando por el de Arago, pero también los de Babinet, que utiliza la técnica de las interferencias) parecen mostrar claramente que el movimiento del observador no tiene influencia sobre la refracción:

He comprobado —observa Babinet en 1839— que el movimiento de la Tierra no influye en nada sobre la velocidad de los rayos que atraviesan un medio refringente perturbado por la Tierra, o cuando menos que dos rayos que interfieren entre sí, al atravesar dos piezas iguales de vidrio en sentido contrario a la dirección de dichos rayos, producen las mismas franjas, en el mismo lugar, que si la Tierra estuviera inmóvil.¹⁹

Después de realizar más experimentos, Babinet regresará a la cuestión en 1862, precisando los resultados: “En ninguno de los tres casos de propagación de ondas luminosas (propagación directa, por reflexión y por refracción) se ha podido observar efecto alguno producido por la velocidad de la Tierra alrededor del Sol”.²⁰

A partir de dichos trabajos, la cuestión central es la influencia de la velocidad de la Tierra en los fenómenos ópticos. Hay que llevar a cabo experimentos nuevos para tener la conciencia tranquila: ¿Stokes o Fresnel? El éter, ¿es perturbado total o parcialmente? Fizeau no está convencido de la validez del experimento de Babinet, y sin duda es ésa una de las razones por las que propone a la Academia un premio al respecto. Se trata de

“investigar experimentalmente las modificaciones que sufre la luz en su modo de propagación y en sus propiedades, como consecuencia del movimiento de la fuente luminosa y del movimiento del observador”.²¹

Es esencial una distinción muy sencilla en tales experimentos, que se componen siempre de tres elementos: la fuente luminosa, el detector y un aparato óptico que opera sobre el haz luminoso. Hay una clasificación de ellos en dos grupos, propuesta por Newburgh:²² los de “tipo I”, donde algunos de esos tres elementos se mueven unos respecto a otros, y los de “tipo II”, en los que todos están en reposo relativo. Así, el experimento de Arago, el primer experimento de Blair y los experimentos relacionados con la aberración son de “tipo I”. El segundo experimento sugerido por Blair, que será realizado por Michelson, es de “tipo II”. Será evidente en el marco de la relatividad, por supuesto *a posteriori*, que los experimentos de tipo II sólo pueden tener resultados negativos.

De hecho, la mayoría de esos experimentos (de los que habrá muchos entre 1870 y el final del siglo), y en particular los realizados por Mascart a principios de la década de los setenta, se limitan a la cuestión de la influencia de la velocidad de la Tierra en los fenómenos ópticos. Se utilizan poco las fuentes astronómicas, por dos razones esenciales: por una parte, las fuentes terrestres son más fácilmente manejables, se trate de una vela, un farol o un mechero de Bunsen; por otra parte, se sabe por las mediciones de la aberración que la luz tiene una misma velocidad si procede de fuentes astronómicas, sean estrellas, cometas o planetas, o de fuentes terrestres. Además, según la teoría de las ondulaciones, la velocidad de la luz de una estrella, vista desde la Tierra, no difiere de la velocidad de la luz de una fuente terrestre: la velocidad de la luz no depende de la velocidad de la fuente, a causa del éter. Todas las ondas luminosas llegan a un prisma dado con la misma velocidad, y sólo la velocidad debida al prisma puede tener algún efecto. En pocas palabras, es inútil considerar una fuente externa, pues carece de interés; dejando aparte la aberración, sólo la velocidad de la Tierra puede tener algún efecto en los experimentos de óptica. Así, los investigadores se limitarán a experimentos “de tipo II”. Es lo que Blair había comprendido desde 1786 (veáse el capítulo IX). Su proposición se apoya en la estructura lógica de los experimentos “de tipo II”.²³ En cuanto al experimento de Arago (capítulo X), se cree según Fresnel que su resultado es negativo. En suma, el efecto Doppler-Fizeau “en frecuencia” lo ha reemplazado ventajosamente... Y no es menos “de tipo I”.

Mascart resultará ser uno de los mejores experimentadores en esta vertiente, y sus conclusiones, consecuencia de una gran cantidad de experimentos, se exponen en un primer artículo publicado en 1872: “Los fenómenos de reflexión de la luz, de difracción, de doble refracción rectilínea y de doble refracción circular, son igualmente ineficientes para mostrar el movimiento de traslación de la Tierra cuando se opera con luz solar o con luz procedente de una fuente terrestre”.²⁴ En un segundo artículo aparecido dos años después, Mascart revisa los experimentos en los que la luz atraviesa un medio refringente: los anillos de reflexión, los anillos de transmisión, los anillos de membranas

delgadas; repitió el experimento de Hoek (ya una repetición del de Fizeau) y llegó al de la doble refracción. La conclusión general de este nuevo artículo no es diferente de la del primero, a saber, “que el movimiento de traslación de la Tierra no tiene influencia apreciable sobre los fenómenos de óptica producidos por una fuente terrestre o por la luz solar, que dichos fenómenos no nos permiten apreciar el movimiento *absoluto* de un cuerpo y que sólo tenemos esperanza de observar los movimientos *relativos*”.²⁵ Lo que Mascart llama “el movimiento absoluto de un cuerpo” es su movimiento respecto al éter; en cuanto a los “movimientos relativos”, se trata de una referencia al efecto Doppler-Fizeau, única influencia de la velocidad relativa sobre los fenómenos ópticos, aunque aún no había sido observado. Es lo que se conservará de su artículo final y lo que lo hará obtener el premio de la Academia.

Mascart habla también en este segundo artículo sobre la refracción ordinaria debida a un prisma, es decir, el experimento de Arago. Sin embargo, se limitará a la influencia del movimiento de la Tierra, considerando que nada diferente sucedería utilizando fuentes externas: “Fue así como me planteé la cuestión, y he buscado por diferentes medios hacer evidente el movimiento de la Tierra mediante la observación de fuentes luminosas terrestres”.²⁶ El experimento (de tipo II) tiene una estructura lógica parecida a la del descrito por Blair (capítulo IX), pero es infinitamente más preciso, en cuanto a concepción, que el realizado por Arago 60 años antes. Un “prisma refringente” se coloca sobre “una mesa que gira en torno a un eje vertical y permite dirigir la luz alternativamente hacia oriente u occidente”. Como fuente terrestre, “una chispa producida por alambres de magnesio” llega al prisma, dando lugar a un espectro en el que Mascart nota “franjas oscuras sobre un fondo brillante”.²⁷

Se realizan entonces muchos otros experimentos tomando grandes precauciones, en particular referentes a las variaciones de temperatura. Sin embargo, la conclusión esperada por Mascart es definitiva: “El movimiento de traslación de la Tierra no tiene influencia alguna sobre la refracción aparente de la luz que procede de una fuente terrestre”.²⁸ Según él, “la demostración de Fresnel sigue siendo válida, sólo que se aplica únicamente a los experimentos realizados con fuentes luminosas artificiales, y no a las observaciones de Arago”.²⁹ Se trata claramente de un experimento de tipo II (todos los elementos están en reposo relativo), y Mascart está consciente de que convendría llevar a cabo nuevamente el experimento de Arago (de tipo I, donde la fuente no está en reposo relativo):

Para que dicha conclusión estuviera al abrigo de toda crítica, valdría la pena retomar el experimento de Arago y hacer evidente el cambio de refracción que implica. Las circunstancias no me han permitido aún realizar dicha tentativa, que presenta las mayores dificultades. Un cambio de refracción correspondiente a la décima parte de la distancia entre los dos rayos D está ya cerca del límite de precisión que podemos esperar de los procedimientos espectroscópicos ordinarios con las fuentes luminosas terrestres: la necesidad de utilizar luz estelar está lejos de simplificar el problema.³⁰

En sus comentarios sobre el trabajo de Mascart, recordará Fizeau:

[...] las numerosas tentativas llevadas a cabo por gran cantidad de físicos para manifestar mediante fenómenos ópticos, observados con telescopios terrestres, la dirección del movimiento de la Tierra en el espacio, utilizando para este fin diversos fenómenos de interferencia, retículas, aberración, refracción y polarización, tentativas que el principio de Fresnel califica casi siempre como necesariamente infructuosas, pues cada fenómeno de ese tipo, que en un principio pareciera deber producir un resultado positivo, encuentra *causas de compensación* que lo anulan. En efecto [...] todos los experimentos de ese tipo han llegado a resultados completamente negativos, como si una ley general de la naturaleza se opusiera siempre a su éxito.³¹

A pesar de esos “resultados negativos”, y de un desacuerdo con Fizeau respecto a la interpretación del experimento de Arago, Mascart obtendrá el Gran Premio de Ciencias Matemáticas (otorgado por la Academia de Ciencias francesa) en 1872, postulado por Fizeau: “A pesar de que el autor no haya obtenido todo lo que buscaba, es decir, la manifestación del movimiento de la Tierra en el espacio, y de que los resultados hasta ahora hayan sido constantemente negativos, como lo establece limpiamente la concordancia entre dichos resultados y el principio de Fresnel...”³²

A principios de la década de los setenta, Veltmann mostró también que ningún experimento con una fuente luminosa terrestre podía detectar, en primer orden, el movimiento a través del éter. Con tal grado de precisión, la teoría de las ondulaciones de Fresnel podía considerarse suficiente desde un punto de vista fenomenológico, es decir, que permitía explicar los fenómenos aparentes. De esta manera, los especialistas tienen dudas respecto a la interpretación del experimento de Arago y su relación con el efecto Blair-Doppler-Fizeau. Se admiran de no observar efecto alguno en refracción, pero los físicos más conscientes (¡Fizeau!) esperan que se observe en términos de frecuencia en el marco de la espectroscopía, en desarrollo desde principios del siglo XIX.

EL NACIMIENTO DE LA ESPECTROSCOPIA

Antes que nada, debemos recordar el interés de Newton por el color de la luz y los trabajos de Melvill. En 1802 Wollaston nota la existencia de franjas oscuras en el espectro del Sol. En 1804 Fraunhofer funda una empresa que produce instrumentos militares y geodésicos, necesarios en particular para los levantamientos topográficos. La empresa prospera, y en ella se fabrican en particular lentes ópticos de calidad, *crowns* y *flints* sin mácula.³³ Desde 1814-1815, Fraunhofer logra observar los espectros de Venus y de varias de las estrellas más brillantes, Sirio entre ellas. En 1817 redescubre, después de Wollaston, que el espectro solar presenta varias franjas oscuras y se convence de que, desde ese punto de vista, la luz de Venus es “de la misma naturaleza que [la] del Sol”.³⁴ Para producir sus espectros utiliza prismas dispersivos, y después retículas de difracción. En 1834 Talbot nota que “cuando en el espectro de una llama aparecen ciertas franjas determinadas, dichas franjas son características del metal contenido en la llama”.³⁵ En 1859 los trabajos de Kirchhoff sobre espectroscopía dan un ímpetu decisivo a dichas

investigaciones, pues muestran que un cuerpo luminoso emite luz en todas las longitudes de onda y presenta un espectro continuo, el *continuum*. Un gas incandescente, como una lámpara de vapor de sodio, tiene un espectro de emisión formado por franjas brillantes. Sin embargo, si la luz blanca de una fuente atraviesa un gas frío, éste puede opacar ciertas franjas del *continuum*, lo que produce un espectro de absorción. Tales fenómenos, relacionados con la estructura del átomo, serán comprendidos a principios del siglo XX. Cuando un átomo emite o absorbe radiación luminosa, salta de un estado a otro emitiendo o absorbiendo un “fotón”, cuya frecuencia se relaciona con la diferencia de energía entre ambos estados.

En su artículo de 1840 Doppler no hace referencia alguna a la espectroscopía estelar. Por el contrario, en el artículo de 1848, donde propone nuevamente el efecto Doppler para la luz, Fizeau cita a Fraunhofer, “quien ha observado los espectros de muchas estrellas y descubierto sus franjas”.³⁶ Fizeau comprende perfectamente el interés del efecto y las aplicaciones que puede tener. Además, Ernst Mach llegará a las mismas conclusiones en 1860. Las observaciones visuales de los espectros no eran sencillas en esa época; ¿qué decir entonces del efecto Doppler-Fizeau, que requería la comparación de dos espectros? Por una parte, había que disponer de fuentes con velocidades lo bastante grandes como para poder observar el efecto, un desplazamiento de franjas. Pero también se necesitaba que fuera posible examinar a la vez el espectro de la fuente móvil y el espectro “de comparación” de una fuente fija, para cotejar directamente las posiciones de las franjas correspondientes, lo que suponía una identificación de las franjas y la posibilidad de distinguir las franjas desplazadas de las que no lo estaban.³⁷

En 1868 William Huggins en Londres y Pietro Secchi en Roma intentaron determinar las velocidades radiales estelares utilizando el efecto Doppler-Fizeau. En particular, trataron de comparar visualmente la posición de la franja H_{β} de Sirio, una franja de emisión del hidrógeno. Secchi no encontró desplazamiento alguno, mientras que Huggins creyó erróneamente ver que la estrella se alejaba con una velocidad de 50 km/s.³⁸ Tales observaciones directas eran muy inciertas, y prácticamente no pudo avanzarse hasta que se logró aplicar la fotografía a los espectros. Hermann Vogel, del Observatorio Astrofísico de Potsdam, se consagró con éxito al desarrollo de dicha técnica.³⁹ “La observación de los desplazamientos de franjas en los espectros estelares es una de las mediciones astronómicas más difíciles”,⁴⁰ observa. Joseph Lockyer realizará en 1869 la primera observación de dicho fenómeno. Consigue registrar el desplazamiento de las franjas H_{α} y H_{β} del espectro solar,⁴¹ a las que considera correctamente franjas de emisión de la cromosfera, donde tienen lugar movimientos muy violentos.⁴² En 1870 Secchi trata de medir la velocidad de rotación del Sol⁴³ comparando los espectros de bordes opuestos; obtiene un resultado positivo que será confirmado por Vogel en 1871. La técnica se utilizará mucho en la década de los setenta, en particular por Cornu, cuyos trabajos fueron citados antes.⁴⁴

Entonces uno de los triunfos más grandes de la espectroscopía estelar fotográfica fue

su aplicación a las estrellas binarias. Si dos estrellas están en órbita una alrededor de la otra, y suponiendo que se pudiera observar la misma franja espectral en ambas, debería notarse una variación en la posición de una franja respecto a la otra, un desplazamiento en función del movimiento de las dos estrellas: al estar ambos espectros sobrepuestos casi por completo, la franja puede aparecer doble o no de acuerdo con el movimiento relativo de las componentes. Hoy día se llama “dobles espectroscópicas” a las estrellas dobles físicas cuyo desdoblamiento no puede observarse a simple vista. En 1890 Pickering registra dicho fenómeno en ζ Ursae Majoris, que aparecía entonces como una binaria con un periodo de sólo 104 días. En 1889 Vogel muestra que Algol, una estrella doble que presenta eclipses, tiene variaciones en su velocidad radial.⁴⁵ De hecho, Algol les preocupaba a los astrónomos desde el siglo XVIII, en particular a John Michell, quien trató de desarrollar una explicación de las variaciones en la luminosidad de dicha estrella a partir de su teoría acerca de la influencia de la gravedad sobre la luz. En su manuscrito, retomando seguramente la pregunta de Michell, Blair propuso aplicar su efecto a Algol para determinar si sus variaciones de luminosidad se debían a manchas oscuras en su superficie o a un planeta enorme que la eclipsaba siguiendo su movimiento de traslación.⁴⁶

A finales del siglo XIX se habían observado ya varios desplazamientos de franjas debidos al movimiento de fuentes luminosas respecto a la Tierra, y sus magnitudes se habían confirmado. Los métodos de Vogel se utilizaban en una media docena de observatorios. La espectroscopía se convertía en una herramienta esencial para la medición de las velocidades radiales.

EL EFECTO BLAIR-MICHELL REENCONTRADO SIN CESAR

Sólo después de la década de los setenta tienen lugar las primeras observaciones creíbles del efecto Doppler-Fizeau, que por entonces no es muy conocido, ni siquiera por los grandes especialistas. Así, Huggins mide en 1868 un desplazamiento de franjas, de manera más o menos correcta. Si bien ha leído el artículo de Doppler, que critica como muchos antes que él, desconoce el de Fizeau. En 1864 James Clerk Maxwell, quien acaba de identificar la luz con las ondas electromagnéticas, idea y realiza un experimento para detectar el efecto de refracción debido al movimiento de la Tierra a través del éter.⁴⁷ Stokes, a quien envía el texto, lo informa del experimento de Arago; Maxwell retira su artículo. Sin conocer tampoco el artículo de Fizeau, retoma lo esencial y se lo comunica a Huggins, quien publica la carta.⁴⁸ Otra vez tenemos el efecto Doppler-Fizeau de manera explícita, explicado con gran claridad en sus dos expresiones: en refracción y en frecuencia. Además, siguiendo a Blair, aparece también la estructura de lo que será el experimento de Michelson:

Para observar estas diferencias en la luz de las estrellas se requiere un espectroscopio, es decir, un instrumento que separa franjas de periodos diferentes [...] Si en lugar de un espectroscopio se utiliza un

plasma acromático, no puede detectarse diferencia alguna entre la luz de estrellas distintas, pues la única diferencia que puede existir es la de su periodo. Si el movimiento del medio luminoso utilizado en el experimento es distinto al de la Tierra, cabe esperar una diferencia en la desviación en función de la dirección del rayo respecto al prisma, y esta diferencia será precisamente la misma para cualquier fuente luminosa [...] Entonces hay dos objetos de investigación experimental, independientes y distintos. Uno es la alteración del periodo de vibración de la luz debido al movimiento relativo de las estrellas y la Tierra [...] El otro objeto de investigación experimental es la relación entre el índice de refracción del rayo y la dirección con la que atraviesa el prisma.⁴⁹

En dicha carta,⁵⁰ Maxwell muestra también que en la teoría de Fresnel el efecto (en refracción) está escondido y sólo aparece en el segundo orden de v/c , es decir, en $(v/c)^2$, el cuadrado del orden de magnitud de la aberración. Es precisamente este cálculo⁵¹ lo que llevará a Michelson a intentar experimentos más precisos para detectar el efecto debido al movimiento de la Tierra respecto al éter.

En 1869, con motivo de un “Informe verbal de M. Faye [...] sobre el desplazamiento de las franjas del espectro debido al movimiento del cuerpo luminoso o del observador”, Fizeau tendrá que recordar nuevamente la existencia de su artículo de 1848. Faye se disculpa por su olvido, explicándolo “por la circunstancia de que los argumentos de M. Fizeau, habiendo llegado en cierta manera demasiado pronto, carecían de aplicaciones”.⁵² Sin duda por eso publica Fizeau otra vez su artículo en los *Annales de chimie et de physique*, en 1870. Un año después volverá a mencionar su efecto ante la Academia,⁵³ estableciendo la relación con las mediciones de la velocidad de rotación del Sol que acaba de proponer Secchi, idea a la que él no había llegado en 1848 pero que aparece en el manuscrito de Blair.⁵⁴ Como lo dijo Maxwell en toda claridad, el efecto Doppler-Fizeau se expresa de manera doble: en refracción y en frecuencia. El efecto en refracción no es sino el efecto Blair-Michell, que Arago quiso mostrar y que fuera en cierta forma negado por Fresnel y la teoría de las ondulaciones. No había por entonces razón para inquietarse. En cuanto al efecto Doppler-Fizeau en frecuencia, era en esa época mal conocido y tuvo que aparecer a través de las observaciones para que los físicos quisieran recordar el trabajo de Fizeau y rehacer la teoría. En pocas palabras, Fizeau no tuvo mejor fortuna que Blair en la interpretación de lo que se conoce (equivocadamente) como efecto Doppler...

¿FRESNEL O STOKES?

Durante la década de los ochenta, la situación es relativamente tranquila sin ser realmente satisfactoria. Muchos resultados “negativos” abogan en favor de un éter totalmente perturbado, es decir, de la teoría de Stokes; sin embargo, la teoría de Fresnel también puede explicarlos, cuando menos en primer orden, como asimismo sucede con el experimento de Arago, en el que se apoya el primer experimento de Michelson (1881). No obstante, varios otros resultados experimentales apoyan la teoría de Fresnel, en

particular el experimento de Fizeau (1851), repensado en 1886 por Michelson y Morley, gracias a una técnica de interferencias. Stokes tendrá que modificar su teoría para incluir el coeficiente de Fresnel.⁵⁵ En cuanto a la aberración, ninguna de dichas teorías la explica de manera satisfactoria. Los especialistas tienen razón en estar perplejos... Poco después de los experimentos de Mascart se hace evidente que, en la primera aproximación, son iguales las leyes de la óptica en movimiento de traslación rectilínea uniforme (en un marco de referencia inercial) y las leyes de la óptica en reposo. El “principio de la relatividad óptico”, un principio de la relatividad limitado al observador, será entonces verdadero en la primera aproximación. Pero, ¿no hacía falta distinguir entre la teoría de Stokes, que suponía un éter perturbado, y la de Fresnel, que sólo admitía una perturbación parcial? De hecho, en el primer orden de v/c (véase el recuadro XIII.1), y con ciertas hipótesis adicionales, ambas teorías podían explicar todas las observaciones con más o menos acierto. Según lo mostró Maxwell, el desacuerdo sólo existía en los efectos de segundo orden: efectos inexistentes en la teoría de Stokes pero esperados por los partidarios de la teoría de Fresnel. El problema es entonces construir una teoría convincente conservando, o retomando de una u otra forma, el coeficiente de Fresnel.⁵⁶ Muy pronto, después de los experimentos de Michelson y de los trabajos de Lorentz, la situación se presentaría de manera bien distinta.

En 1886 Lorentz publica un artículo, “Acerca de la influencia del movimiento de la Tierra sobre los fenómenos luminosos”, donde propone una variante de la teoría de Fresnel que incluye algunos elementos de la de Stokes, a la que critica severamente. Con ese marco teórico trata de resolver con todo rigor las cuestiones de la aberración y del experimento de Arago. Desarrolla una explicación un tanto abrumadora de la aberración, con un nivel de tecnicismo que nada les pide ni a Fresnel ni a Stokes. Decididamente la aberración es un fenómeno que causa grandes problemas a las teorías ondulatorias, y Lorentz está consciente de ello, pues comienza su artículo declarando que “la aberración de la luz, que según la teoría de la emisión resulta directamente de la composición de dos movimientos rectilíneos, es mucho menos sencilla de explicar en la teoría de las ondulaciones”.⁵⁷

En cuanto a las explicaciones de Lorentz sobre el experimento de Arago, son simplemente decepcionantes. Tampoco comprende que se trata de un efecto Blair-Doppler-Fizeau. En pocas palabras, la pesadez de sus argumentaciones para explicar estos dos fenómenos y los problemas que en ellas hace falta resolver o circundar hacen pensar que ni la teoría de Fresnel ni sus variantes son convincentes, en particular para Lorentz mismo, quien busca alternativas. Para resolver las dificultades que se presentan, Lorentz utilizará dos métodos... Para empezar, en 1890 supone una perturbación total del éter en una vecindad de la Tierra. Un tiempo después propondrá una teoría nueva (y final): se basa en un éter inmóvil, y tendrá mucho éxito.

Sin cesar reencontramos, en una forma u otra, la cuestión de la precisión en las observaciones. No hay de qué admirarse, así es la física... Sin embargo, en el marco de la óptica de los cuerpos en movimiento, de la relatividad especial, hay un término que aparece una y otra vez: la razón v/c entre la velocidad del observador, que es la de la Tierra, y la velocidad de la luz. El término apareció en el capítulo v, al hablar de la aberración, cuyo ángulo máximo es precisamente de ese orden y vale (*grosso modo*) $20''$ de arco, es decir, 10^{-4} radianes. De hecho, la velocidad media de la Tierra alrededor del Sol es cercana a 30 km/s, y la velocidad de la luz es casi 10 000 veces mayor, así que v/c vale aproximadamente $1/10\ 000$.

Dicho valor es típico de los experimentos de óptica antes de 1880; la aberración anual es de dicho orden de magnitud, pero también el efecto Doppler-Fizeau, cuando menos en los experimentos de tipo I, que involucran la relación entre la velocidad de la Tierra y la velocidad de las estrellas. Es un término pequeño, pero que los astrónomos miden con gran facilidad. Aparece con tanta frecuencia la expresión que se le ha dado un sobrenombre, “ β ” ($\beta = v/c$).

Se hará entonces referencia a este término, “ β ”, al hablar de efectos “de primer orden” (llamados también con cierto éxito “de primera aproximación”, sobreentendiendo “en v/c ”), lo que significa que se ignoran los términos “de segundo orden”, en β^2 , 10 000 veces menores aún.

Como pronto se despertará el interés por las partículas rápidas, cuya velocidad no es insignificante respecto a la de la luz, el término será cada vez más común en las teorías, y no sólo en el primer orden, sino también en el segundo... Nos interesarán justamente los términos en β^2 , pues constituyen el objeto de los experimentos de Michelson.

LOS EXPERIMENTOS DE MICHELSON

Leyendo a Maxwell,⁵⁸ se convencerá Michelson del interés de realizar experimentos más precisos que permitan observar la influencia de la velocidad de la Tierra sobre los fenómenos luminosos. No se trata ya de experimentos “de primer orden”, cuyo encanto ha sido agotado, sino de mostrar los efectos “de segundo orden”, en β^2 . ¿Cómo proceder? Las técnicas de interferometría tienen ya una historia larga, utilizadas por Fizeau, Mascart y Cornu. Jules Jamin construyó en 1856 un “refractómetro interferencial” que parece ser el precursor del de Michelson. Se trata de hacer que interfieran dos haces luminosos que no hayan seguido la misma ruta. Hasta entonces sólo se habían producido interferencias entre haces paralelos, que tenían ambos la velocidad de la Tierra, independientemente de la posición del dispositivo experimental.⁵⁹

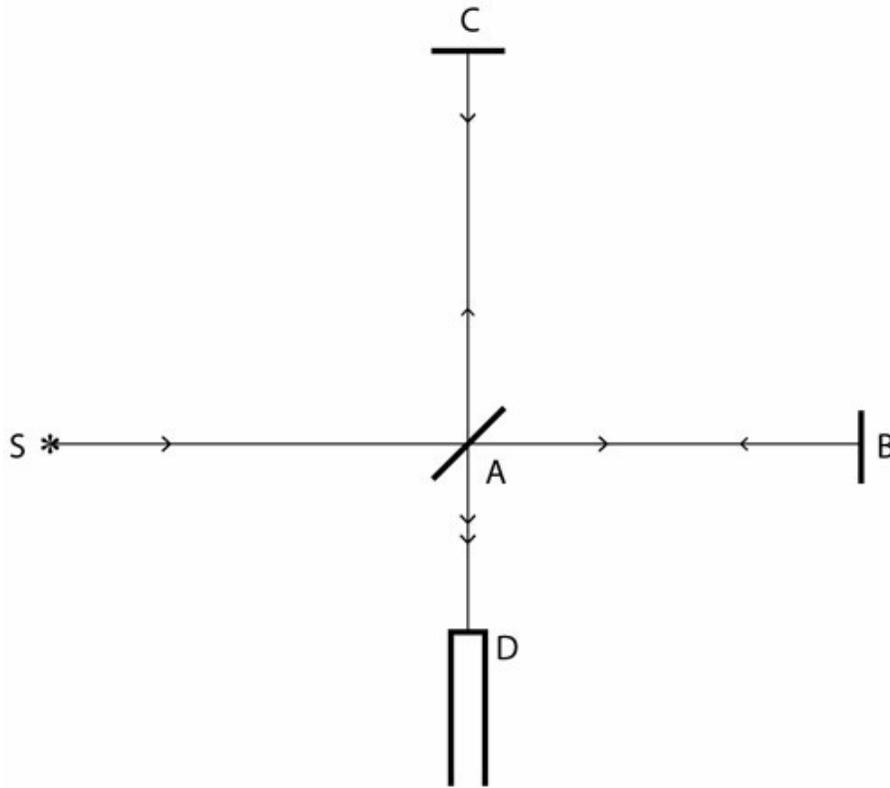


FIGURA XIII.1. *El experimento de Michelson.*

Se compone de una fuente luminosa S , un espejo semitransparente A situado a la misma distancia de los espejos B y C , y un lente de detección D . De esta manera, un primer haz es reflejado por el espejo semitransparente A y recorre la trayectoria $SABAD$, mientras que el otro es transmitido directamente y sigue el camino $SACAD$. Se espera que cambie la figura de interferencia dependiendo de la orientación del aparato respecto a la velocidad de la Tierra. Si suponemos que la velocidad de la luz se compone con la de la Tierra de una u otra forma, el tiempo que toma a la luz recorrer ABA será distinto del que necesite para recorrer ACA .

El primer experimento de Michelson se llevó a cabo en 1881 en el sótano del Observatorio Astrofísico de Potsdam, en Alemania. Michelson esperaba un desplazamiento de las franjas de interferencia cercano a $1/10$.⁶⁰ El resultado, negativo a pesar de algunos desplazamientos de franjas, será considerado por Lorentz poco concluyente al nivel global. El experimento se retomará seis años después en colaboración con Edward William Morley y tomando una infinidad de precauciones (considerando la sensibilidad a las vibraciones del suelo, las deformaciones ligadas al movimiento alrededor del eje, etc.). En 1886, utilizando una técnica muy parecida, Michelson y Morley realizaron otra vez el experimento que hiciera Fizeau en 1851; sin embargo, la precisión era mucho mejor y pudo verificarse muy precisamente la fórmula de Fresnel. Tal resultado se oponía a los que obtuvieron en 1881 y que habrían de confirmar un año después. En julio de 1887 Michelson y Morley realizaron de nuevo dichas observaciones, y los resultados negativos obtenidos los contrariaron vivamente. En adelante, sería imposible creer que un resultado positivo se escondiera en los errores

de observación. Decididamente, sus experimentos no permitían determinar el movimiento de la Tierra a través del espacio.

XIV. LA NUEVA CINEMÁTICA

ÓPTICA Y ELECTROMAGNETISMO

Después de que Maxwell unificó los fenómenos luminoso y electromagnético, Hertz consigue generar ondas electromagnéticas a finales de la década de 1870: la óptica se convierte entonces en una rama de la electrodinámica, y el éter es el soporte de los campos eléctricos y magnéticos. La cuestión de la óptica en un medio en movimiento se vuelve entonces parte de la *electrodinámica de los cuerpos en movimiento*. No obstante, esto no simplifica mucho el problema; lejos de eso... Resultará extremadamente difícil introducir la perturbación del éter en la teoría de Maxwell, explicando también la aberración y el efecto Doppler-Fizeau.¹ Muchos teóricos tratarán de resolver la cuestión, pero dos personalidades dominan el campo, Lorentz y Henri Poincaré, hasta que en 1905 un joven desconocido, Albert Einstein, interviene y la resuelve de manera asombrosa. De dichos personajes tan diferentes entre sí, Lorentz y Poincaré, hablaremos principalmente en este análisis fugaz sobre el nacimiento de la relatividad especial; nos interesan por ser, junto con Einstein, los actores esenciales de dicho periodo, pero también porque muchas veces se ha planteado la cuestión de la participación que tuvieron en la invención de la nueva cinemática.

Entre 1886 y 1904, Lorentz publicará una veintena de artículos teóricos largos y pesados. En el capítulo XIII recordé su teoría de 1886, que trata de reconciliar las de Fresnel y Stokes. Entre 1892 y 1895 arma otra teoría,² en la cual el campo electromagnético, descrito por las ecuaciones de Maxwell, se considera un *estado* del éter, supuestamente fijo e indeformable. Esto permite que dichas ecuaciones sean idénticas, cuando menos en primer orden, en dos marcos de referencia en movimiento uniforme entre sí, respetando además el principio de la relatividad óptica (limitado al observador). Con este fin, Lorentz introduce un tiempo local, formal, un “inocente artificio de cálculo”, una “ficción”;³ relacionado con el tiempo absoluto, éste le permite fácilmente recuperar el coeficiente de Fresnel. Sin embargo, el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley, que no puede explicarse con un éter inmóvil, lo obliga a formular otras hipótesis. La luz parecía necesitar más tiempo para recorrer uno de los dos brazos del interferómetro. Para compensar el desfase, Lorentz propuso una “contracción” de los cuerpos en la dirección de su movimiento. Como le escribió a un colega en agosto de 1892:

La hipótesis de Fresnel, tomada con su fórmula $1-1/n^2$ para el coeficiente de perturbación parcial del éter, explica admirablemente bien los fenómenos ópticos observados, excepto el resultado del experimento de Michelson [...] que parece contradecir la propuesta de Fresnel. Me siento absolutamente incapaz de esclarecer dicha contradicción y, sin embargo, estimo que si abandonamos la teoría de Fresnel no tendremos

con qué reemplazarla [...] Sólo he encontrado una manera de reconciliar esos resultados negativos con la teoría de Fresnel. Consiste en suponer que la recta que une dos puntos de un cuerpo sólido tiene una longitud diferente si es paralela o perpendicular al movimiento de la Tierra.⁴

Por entonces, tal parece la única manera de reconciliar la teoría de Fresnel y los resultados de Michelson: un método poco satisfactorio, una hipótesis *ad hoc*, una “física de la desesperación” según palabras de Miller.⁵ Algunos años después, en el curso que impartía en la Sorbona, Poincaré criticaba con severidad esa hipótesis de contracción:

Tan extraña propiedad parecería un verdadero “empujón” por parte de la naturaleza para evitar que el movimiento absoluto de la Tierra pudiera percibirse en los fenómenos ópticos. Eso no me satisface y creo deber decir aquí mi sentimiento: me parece muy probable que los fenómenos ópticos no dependan más que de los movimientos relativos de los cuerpos materiales que intervienen, ya sean fuentes luminosas o aparatos ópticos, y *no para cantidades del orden del cuadrado o del cubo de la aberración, sino con todo rigor*. A medida que los experimentos sean más exactos, tal principio se verificará con mayor precisión.⁶

Poincaré prosigue hablando de un *principio*... que finalmente es el principio de la relatividad aplicado a la óptica y que una “teoría bien hecha debería permitir demostrar [...] de una sola vez y con todo rigor”, logro no conseguido aún por la teoría de Lorentz, aunque esté “cercana a [...] hacerlo”. Sin dicho principio, “¿hará falta otro *empujón*, una hipótesis nueva, para cada aproximación?”⁷ Se percibe en dicho texto el deseo de terminar con una física fenomenológica, que descansa en hipótesis *ad hoc*, para pasar a una física guiada por principios. Sin embargo, Poincaré no dará nunca el paso. Como escribe en la conclusión de ese capítulo de su curso, espera lograr que la teoría de Lorentz sea “perfectamente satisfactoria [...] sin modificarla profundamente”.⁸

En 1904, un año antes de la publicación del artículo de Einstein, aparece un último e importante estudio de Lorentz, que descansa en “premisas fundamentales”.⁹ Ahí aparecen las aún hoy conocidas como “transformaciones de Lorentz” entre dos marcos de referencia inerciales; se obtienen combinando las transformaciones de Galileo con la dilatación de la coordenada longitudinal y el paso al tiempo “local”. Dichas transformaciones no difieren formalmente de las de la cinemática relativista de Einstein. No obstante, la interpretación que les da Lorentz es estrictamente técnica.¹⁰ Como insiste Holton con toda razón, dicha interpretación de Lorentz se apoya en diversas convenciones. Veamos la complejidad del tema:

El importante estudio de H. A. Lorentz, publicado un año antes del artículo de Einstein, espécimen de lo mejor que se hacía en física por la época [...] procedía realmente de 11 convenciones *ad hoc*: limitaba a escaso valor la relación entre las velocidades v y la velocidad de la luz; se postulaban *a priori* las ecuaciones de la transformación (en lugar de derivarlas de otros postulados); admitía la existencia de un éter inmóvil; un electrón en reposo tiene forma esférica; la carga del electrón se reparte de manera uniforme en la esfera; toda materia es de naturaleza electromagnética; un electrón en movimiento se deforma en una dimensión, contrayéndose precisamente según la razón $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$; las fuerzas entre partículas con carga nula, y entre una partícula cargada y otra sin carga, son iguales para la transformación que las fuerzas electrostáticas en

un sistema de cargas en reposo; toda la carga del átomo está en cierta cantidad de “electrones” definidos; cada uno de tales electrones sólo puede ser influido por otros electrones del mismo átomo; un átomo en movimiento sufre una deformación en conjunto homóloga a la que experimenta el electrón.¹¹

Holton concluye su análisis comparando la obra de Lorentz con la de Einstein:

La obra de Lorentz hace pensar en la empresa de un capitán valiente, un hombre excepcional intentando salvar un carcamán, un viejo lanchón remendado por todos lados, que peligra ante el arrecife de la experiencia; la obra de Einstein, lejos de presentarse como una respuesta teórica a resultados inesperados, surge como el impulso creador, rechazando incluso esa forma de locomoción, abandonándola por un vehículo de concepción bien distinta.¹²

Poincaré lo expresa sin rodeos en la conferencia que imparte en San Luis, Misuri, el año de 1904: “Si Lorentz ha conseguido algo, ha sido mediante la acumulación de hipótesis”.¹³ Resulta claro que no le agrada esa forma de ver las cosas; Poincaré espera que dichas hipótesis se basen en alguna teoría más sencilla, más coherente. En ese mismo texto plantea cuestiones esenciales para la teoría que se está gestando; se interesa en el intercambio de señales para regir los relojes mediante impulsos ópticos e insiste en el principio de la relatividad... No es la primera vez que Poincaré se preocupa por los fundamentos. Por ejemplo, dos años antes notaba, en su obra *Ciencia e hipótesis*, que leyó Einstein:

1. No hay un espacio absoluto, y sólo concebimos movimientos relativos; sin embargo, suelen enunciarse los hechos mecánicos como si hubiera un espacio absoluto respecto al cual medirlos;
2. No hay un tiempo absoluto; decir que dos duraciones son iguales no tiene sentido en sí mismo, y no puede adquirirlo sino por convención;
3. No sólo carecemos de la intuición directa de la igualdad de dos duraciones, ni siquiera tenemos la intuición de la simultaneidad de dos acontecimientos que tienen lugar en escenarios diferentes; [...]
4. Finalmente, nuestra geometría euclidiana no es más que una especie de convención del lenguaje. Podríamos enunciar los hechos mecánicos respecto a un espacio no euclidiano, que sería un marco menos cómodo, pero tan legítimo como nuestro espacio ordinario; la enunciación sería mucho más complicada, pero posible.¹⁴



FIGURA XIV.1. *Henri Poincaré. Fotografía: Laboratoire d'Histoire des Sciences et Philosophie – Archives Henri Poincaré, UMR 7117 CNRS/Université de Lorraine, Nancy (Francia).*

No sólo son esenciales dichas cuestiones en el contexto del descubrimiento de la nueva cinemática, la relatividad “especial” (e incluso de la relatividad “general”, la teoría de la gravitación de Einstein, pues trata sobre el espacio no euclidiano), sino que pueden notarse aquí en Poincaré expresiones de Einstein, *a priori*... En particular, se trata de una cuestión de principios, característica mayor de la forma en que Einstein construirá su física; además, el carácter crítico del análisis de Poincaré (en cuanto al espacio, el tiempo, la simultaneidad) será también compartido por Einstein. Varios puntos de dicho análisis sorprenden por su proximidad con el de Einstein, además de la insistencia de Poincaré en el principio de la relatividad, en particular en una presentación¹⁵ por la que se lo ha querido ver como el padre del “principio de la relatividad, si no es que de la teoría de la relatividad”.

Tal conferencia, impartida en 1904 en San Luis, Misuri, en los Estados Unidos, ilustra “el estado actual y el futuro de la física matemática”. Poincaré vislumbra tres “fases”. La primera tiene como forma ideal la mecánica celeste, en particular la ley de la gravitación de Newton. Llegó después el día en que, renunciando “a penetrar en el detalle de la estructura del universo, [...] nos contentamos con tomar como guía ciertos principios generales”.¹⁶ Es entonces cuando Poincaré insiste particularmente sobre el principio de la relatividad, “según el cual las leyes de los fenómenos físicos deben ser las mismas para un observador fijo que para un observador en movimiento de traslación uniforme, de manera que no tenemos, ni podemos tener, medio alguno de discernir si estamos sujetos o no a un movimiento de ese tipo”.¹⁷

En una tercera y última fase, Poincaré se aboca a “reedificar nuevamente”,¹⁸ a vislumbrar de manera profética, “una mecánica nueva [...] donde, al aumentar la inercia con la velocidad, la velocidad de la luz se convertiría en un límite infranqueable”.¹⁹ No obstante, lo carcome la inquietud y se pregunta si “los principios sobre los que hemos construido todo [no se] desplomarán a su vez”,²⁰ esos principios que no habrá que “deplorar haber creído”, inquiriendo si “saldrán [...] de la lucha victoriosos e intactos”.²¹ Las dudas de Poincaré se oponen a la seguridad de Einstein, que confía en la importancia de los principios que toma como base para su relatividad “especial”. ¿Cómo dejar de notar la ambigüedad de Poincaré, un visionario que no podrá darles impulso a sus puntos de vista? En un artículo escrito al mismo tiempo que el trabajo fundador de Einstein, Poincaré retoma de golpe la cuestión del principio de la relatividad, resumiendo bien el asunto:

En un principio parece que la aberración de la luz, así como los fenómenos ópticos y eléctricos relacionados, habrán de proporcionar un medio para determinar el movimiento absoluto de la Tierra o, cuando menos, su movimiento respecto al éter y no respecto a otros astros. Fresnel lo intentó, pero pronto reconoció que el movimiento de la Tierra no altera las leyes de la refracción ni de la reflexión. Experimentos análogos, como el del telescopio lleno de agua y todos aquellos donde sólo se consideran los términos de primer orden respecto a la aberración, dan siempre resultados negativos; poco después se descubrió la explicación; sin embargo, Michelson ideó un experimento donde los términos dependientes del cuadrado de la aberración deberían

percibirse, y éste falló también. Parece que la imposibilidad de mostrar experimentalmente el movimiento absoluto de la Tierra es una ley general de la naturaleza; nos vemos inclinados evidentemente a admitir dicha ley, que llamaremos *Postulado de la relatividad*, y a admitirla sin restricción. Aunque dicho postulado, que hasta ahora concuerda con la experiencia, deba ser confirmado o desechado mediante experimentos más precisos, es de cualquier forma interesante estudiar sus consecuencias.²²

¡El “postulado” de la relatividad, “una ley general de la naturaleza”! Parecería que Poincaré está cerca de la meta. Presiente que tras dichas observaciones se esconde una verdad que no consigue formular. Dicho “principio” de la relatividad, dicho “postulado”, no es sino el de Galileo, el de Newton, pero Poincaré no es el primero en querer aplicarlo a la óptica, si recordamos los trabajos de Blair y de Arago (capítulos IX y X). Era una idea natural, casi evidente... pero aún había que encontrar la manera de *integrarla* a una cinemática de la luz que explicara todos los resultados experimentales. Tal no hará Poincaré, tal no hará nadie antes que Einstein. Como afirma Holton con razón en su artículo sobre los orígenes de la relatividad especial, vemos a Poincaré “dar largas, incluso retroceder, cuando se trata de aprehender plenamente la gran renovación que sólo esperaba el momento de surgir de su obra”.²³

Nov. 1911

Mon cher collègue.

M. Einstein est un des esprits les plus originaux que j'aie connus; malgré sa jeunesse, il a déjà pris un rang très honorable parmi les premiers savants de son temps. Ce que nous devons surtout admirer en lui, c'est la facilité avec laquelle il s'adapte aux conceptions nouvelles et suit en tirant toutes les conséquences. Il ne reste pas attaché aux principes classiques, et, en présence d'un problème de physique, est prompt à envisager toutes les possibilités. Cela se traduit immédiatement dans son esprit par la prévision de phénomènes nouveaux, susceptibles d'être un jour vérifiés par l'expérience. Je ne veux pas dire que toutes ces prévisions résisteront au contrôle de l'expérience le jour où ce contrôle deviendra possible. Comme il cherche dans toutes les directions, on doit au contraire s'attendre à ce que la plupart des voies dans lesquelles il s'engage soient des impasses; mais on doit en même temps espérer que l'une des directions qu'il a indiquées soit la bonne; et cela suffit. C'est bien ainsi qu'on doit procéder. Le rôle de la physique mathématique est de bien poser les questions, ce n'est que l'expérience qui peut les résoudre.

L'avenir montrera de plus en plus quelle est la valeur de M. Einstein, et l'Université qui saura s'attacher ce jeune maître est assurée d'en retirer beaucoup d'honneur.

Je vous remercie beaucoup de l'envoi des œuvres de Hitz; c'est là aussi un homme qui a beaucoup fait pour la Science et dont on aurait pu attendre beaucoup plus encore si la mort ne l'avait si prématurément enlevé.

Votre bien dévoué collègue

Poincaré.

FIGURA XIV.2. De Henri Poincaré a Pierre Weiss, noviembre de 1911. Copia mecanografiada de la carta de recomendación para Albert Einstein.

Imagen: Laboratoire d'Histoire des Sciences et Philosophie – Archives Henri Poincaré, CNRS/Université de Lorraine, Nancy (Francia).

Sólo raramente llega Poincaré hasta las últimas consecuencias de sus planteamientos. Insiste en el principio de la relatividad sin encontrar el medio de integrarlo en una cinemática, rechaza la “intuición” de la simultaneidad (que Lorentz considera un concepto primario) sin analizar sus límites; critica el espacio absoluto, pero atribuye al

éter una importancia privilegiada... En pocas palabras, está en el meollo del asunto, plantea cuestiones excelentes, pero sin llegar a todas sus implicaciones e incluso sin buscar realmente profundizar en ellas desde el punto de vista técnico, permaneciendo en una especie de *credo* fuertemente cualitativo. Como afirma Holton, “Poincaré fue el conservador brillante de su tiempo”,²⁴ cuando menos en lo que se refiere a la física matemática, pues no es el caso en matemáticas puras, pero ésa es otra historia. De hecho, precisamente desde el punto de vista matemático, Poincaré aporta un resultado esencial en el tema que nos ocupa. Después de que Lorentz propone en 1904 las transformaciones que llevan su nombre, Poincaré muestra que forman un “grupo” en sentido matemático, lo que implica que pueden componerse transformaciones de Lorentz de manera sucesiva y resultará siempre una transformación de Lorentz.²⁵ Se trata sin duda de una contribución importante a la teoría: la estructura matemática de un grupo expresa la equivalencia profunda entre marcos de referencia relacionados mediante las transformaciones de Lorentz. Es la forma abstracta del principio de la relatividad.

Así, el interés que han despertado las contribuciones de Poincaré a la historia de la relatividad especial está ampliamente justificado. Es indudable la influencia ejercida por Poincaré sobre Einstein, quien leía *Ciencia e hipótesis*²⁶ con sus amigos Conrad Habicht y Maurice Solovine, probablemente desde su aparición; como nota Solovine en la introducción a su correspondencia con Einstein, “un libro que nos impresionó profundamente y nos tuvo sin aliento durante varias semanas”.²⁷ En cuanto a convertir la relatividad especial en “la teoría de Poincaré y Lorentz”,²⁸ tal es una controversia ya superada, a la que Holton²⁹ hizo justicia desde hace tiempo. Varios autores, como Leveugle, Auffray, Hladik,³⁰ han regresado a dicha polémica con una superficialidad asombrosa, sin tomarse la molestia de analizar los argumentos fundamentales de Holton, a quien parecerían no haber leído. Dicho lo anterior, como lo expresa Holton, “de todos los hombres de ciencia del mundo, Poincaré era sin duda el que mejor podía aprehender los trabajos de Einstein desde el punto de vista técnico, y apreciar su valor. Sin embargo, hasta su muerte en 1912, ninguno de sus escritos destinados a la imprenta menciona la teoría de la relatividad de Einstein”.³¹ El silencio de Poincaré dice mucho; una actitud que deja ver, nota Holton, “ese sentimiento tan común de encontrarse ante una paradoja, incluso un escándalo”.³² La relatividad “escandalosa”, revolucionaria. Veamos en qué consiste el escándalo...

EINSTEIN, LUZ Y RELATIVIDAD

La luz le preocupa a Albert Einstein desde hace mucho tiempo. Ya en su primer ensayo científico (a la edad de 16 años) se interesa por la propagación de la luz en el éter; imagina seguir “una onda luminosa con la velocidad de la luz”. Poco después estudia los tratados clásicos. Desde 1901 menciona, en las cartas a su futura esposa, Mileva, “nuestro trabajo sobre el movimiento relativo”. Estudia a Lorentz. A finales de ese año

trabaja en “un artículo capital” que trata ya de “la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, justamente el título del artículo de 1905 donde funda la relatividad especial. Después hablará del “estado de tensión psíquica” al que lo llevarán sus investigaciones. Una vez con las ideas claras, “cinco o seis semanas” le bastaron para darle forma al artículo “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, recibido por *Annalen der Physik*, la revista donde será publicado, a finales de junio de 1905.³³

Durante ese año “milagroso” en el que aún trabaja en la oficina de patentes en Berna, Einstein no sólo publica el artículo fundador de su nueva cinemática, sino también otros dos que harán historia, uno sobre el movimiento browniano y otro sobre la hipótesis de los cuantos de luz... En 1905, además de su tesis, publica cuando menos 10 artículos en *Annalen der Physik* y 21 notas de conferencias en el suplemento de la misma revista, *Beiblätter zu den Annalen der Physik*. Sin duda alguna, eso le permite mantenerse al corriente de lo que por entonces se hace en física. Veinte años después dirá cómo se resolvió el dilema que lo condujo a esa nueva cinemática:

Después de siete años de vanas reflexiones (1898-1905), de repente encontré la solución gracias a la idea de que los conceptos y las leyes del espacio y del tiempo sólo tienen validez si están en una relación clara con nuestra experiencia, y la experiencia misma podría conducir a la alteración de dichos conceptos y leyes. Mediante una revisión del concepto de simultaneidad de una manera más maleable, llegué a la teoría de la relatividad especial.³⁴

Sin embargo, Einstein considera que si bien el experimento de Fizeau y la aberración tuvieron un papel importante, fue una incongruencia, una *asimetría* en la interpretación de la ley de inducción de Faraday, lo que tuvo el papel protagónico, y no el experimento de Michelson, que hoy en día se cree que no conocía... Es justamente con la exposición de dicha asimetría como empieza su famoso artículo. Después Einstein explicará con claridad qué tenía para él de “intolerable” dicha asimetría:

En la construcción de la relatividad especial, la siguiente idea, [...] relacionada con el experimento de Faraday sobre la inducción electromagnética, desempeñó para mí un papel fundamental. De acuerdo con Faraday, si un imán se mueve respecto a un circuito conductor, se induce una corriente eléctrica en este último. No importa si es el imán o el conductor el que está en movimiento; de acuerdo con la teoría de Maxwell-Lorentz, sólo cuenta el movimiento relativo. No obstante, la interpretación teórica del fenómeno no es idéntica en ambos casos [...] La idea de que se trataba de dos casos de naturaleza diferente me resultaba intolerable. La diferencia entre ellos sólo podía ser, estaba yo persuadido, una diferencia en el punto de vista y no una diferencia real.³⁵

“Poco importa si es el imán o el conductor el que está en movimiento”: la primacía corresponde claramente al “movimiento relativo” y la teoría debe partir de ahí. Einstein colocó el principio de la relatividad en primer lugar. Apoyándose luego en “las vanas tentativas de hacer evidente un movimiento de la Tierra respecto al ‘medio luminoso’”,³⁶ Einstein no solamente “eleva el ‘principio de la relatividad’ al rango de postulado”,³⁷ sino también el principio “según el cual la luz se propaga en el espacio vacío siempre con una

velocidad V [hoy c] bien determinada, independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor”, y esto a pesar de que el segundo postulado sea “aparentemente incompatible con el anterior”. Incompatible en el sentido de que el principio de la relatividad, expresado mediante las transformaciones de Galileo, implica la adición de velocidades, así que la velocidad de la luz debe depender de la velocidad de la fuente. Evidentemente, son las fórmulas de transformación las que deben modificarse; hay que cambiar las de Galileo por las de Lorentz. En 1922, en una conferencia impartida en Kioto cuyas notas se han conservado, toca Einstein el punto:

¿Por qué eran incoherentes ambos principios entre sí? Yo sospechaba que las ideas de Lorentz debían ser modificadas de una u otra manera, pero pasé casi un año desarrollando ideas estériles. Sentía que se trataba de un rompecabezas que no sería sencillo resolver. Sin embargo, un amigo mío que vivía en Berna me ayudó por casualidad. Un día fui a verlo y le dije: “Actualmente tengo un problema que no he podido resolver. Hoy estoy de lleno en dicha ‘batalla’ ” Tuvimos entonces largas discusiones y, de súbito, vislumbré la solución. Al día siguiente fui otra vez a su casa y le dije: “Gracias a ti resolví el problema por completo”. De hecho, mi solución tenía que ver con el concepto de tiempo. Precisamente, el tiempo no puede definirse en sí mismo de una manera absoluta; hay una relación indisoluble entre el tiempo y la velocidad de la señal. Utilizando esta idea pude resolver la gran dificultad que había encontrado. Después de tener tal inspiración, me hicieron falta aún cinco semanas para terminar con lo que hoy se llama “relatividad especial”.³⁸

De esta manera, Einstein funda su nueva cinemática sobre dos principios: el “principio de la relatividad” y el principio según el cual la velocidad de la luz es independiente de la velocidad de su fuente. Debe notarse que la velocidad de la luz no se plantea *a priori* como constante. La constancia de la velocidad de la luz es consecuencia de esos dos principios, como también el hecho de que sea independiente de la velocidad del observador, lo que nunca se había examinado claramente. En cuanto al principio de la relatividad, por supuesto que se trata del de Galileo y Newton, pero que debe aplicarse también a la óptica. En 1912, en una carta a un amigo, hace notar Einstein:

Tales consideraciones me resultaban bien familiares gracias al periodo prerrelativista. Yo sabía que el principio de la constancia de la velocidad de la luz era independiente del postulado de la relatividad y consideré qué sería más probable: el principio de la constancia de c , como lo exigían las ecuaciones de Maxwell, o la constancia de c solamente para un observador en reposo respecto a la fuente luminosa. Opté por el primero, pues estaba convencido de que toda luz está completamente definida por su frecuencia y su intensidad, no importa si procede de una fuente luminosa en movimiento o en reposo... Todo lo que puede decirse en favor de la hipótesis de la independencia de la velocidad de la luz respecto al estado de movimiento de la fuente luminosa es su simplicidad y su practicidad.³⁹

En una primera parte de su artículo, que aparece en septiembre de 1905, Einstein critica con extrema fineza el concepto de simultaneidad. Tal crítica jamás había sido llevada a sus últimas consecuencias, sino sólo sugerida, en particular por Poincaré. Hasta entonces, la posibilidad de definir de manera absoluta la simultaneidad de dos acontecimientos distantes, en sistemas de referencia en movimiento entre sí, no parecía plantear ningún problema. Sin embargo, imponía la definición del tiempo, de las

velocidades, su adición y, con el principio de la relatividad, terminaba imponiendo la cinemática clásica (veáse el recuadro II.1). Hasta entonces, no era posible concebir otra cinemática. Al principio del artículo,⁴⁰ Einstein plantea la cuestión de la simultaneidad de la manera más ingenua posible. Si bien el paso del minuterero de mi reloj por el número 7 y la llegada del tren son acontecimientos simultáneos, es porque todo sucede en el mismo lugar, en un mismo sistema de referencia. No obstante, el asunto es muy distinto si se trata de la simultaneidad de dos acontecimientos distantes. ¿Cómo estar seguros de que se trata del mismo momento? Einstein imagina que en dos puntos A y B del espacio se colocan, en reposo, dos relojes “de la misma fabricación”. El observador en A puede, gracias a su reloj, atribuir fácilmente un valor al tiempo en que se produce un acontecimiento en su vecindad inmediata. El observador en B puede hacer lo mismo con su reloj para otro acontecimiento que se produzca cerca de él. Pero, ¿cómo definir un “tiempo” común a los dos acontecimientos? Einstein admite que, “*por definición*, el ‘tiempo’ necesario para que la luz vaya de A a B es el mismo que el ‘tiempo’ [...] requerido para que vaya de B a A”.



FIGURA XIV.3. *Albert Einstein, Princeton, Nueva Jersey, alrededor de 1950.*

Consideremos un rayo luminoso que parte de A hacia B en el instante t_A del “tiempo A” y es reflejado en B hacia A en el instante t_B del “tiempo B”, llegando a A en el instante t'_A del “tiempo A”. Por definición, ambos relojes están sincronizados si $t_B - t_A = t'_A - t_B$.⁴¹

En seguida muestra que dicha sincronía no es contradictoria: si el reloj B está sincronizado con el reloj A, entonces el reloj A está sincronizado con el reloj B, y si el reloj A está sincronizado con el reloj B y el C, entonces el reloj B está sincronizado con el reloj C. Concluye a continuación, “en conformidad con la experiencia”, que la magnitud $2AB / (t'_A - t_A)$ es “una constante universal”,⁴² la velocidad de la luz en el vacío.

Después, en el capítulo intitulado “Sobre la relatividad de las longitudes y los tiempos”, Einstein muestra que la longitud de una barra en reposo, en un marco de referencia dado, es diferente de la longitud de la misma barra en movimiento en el mismo marco de referencia; lo que Lorentz nombrara “contracción de longitudes”. Sucede lo mismo con los lapsos de tiempo, cuya medición proporcionará resultados diferentes si se hace en un marco de referencia en reposo o en movimiento: la “dilatación del tiempo”, mejor conocida como “paradoja de los relojes”, a partir de la cual Langevin creará la “paradoja de los gemelos”. Algunos años después, este análisis conducirá a Minkowski al concepto, desde entonces esencial, de “tiempo propio”, y a cuestionar nuevamente las nociones de rigidez y distancia. De esta manera, Einstein muestra que la “contracción de longitudes” y la “dilatación del tiempo”⁴³ se relacionan con la imposibilidad de atribuir un significado absoluto al concepto de simultaneidad: “Dos acontecimientos que sean simultáneos desde el punto de vista de un sistema de coordenadas no pueden considerarse simultáneos si se ven desde otro sistema de coordenadas en movimiento respecto al primero”.⁴⁴

La crítica de la simultaneidad es, en cierta manera, la clave que le permite a Einstein resolver el dilema y construir explícitamente una cinemática nueva que sea coherente con el principio de la relatividad y a la vez con la exigencia de que la velocidad de la luz sea constante. Las transformaciones que permiten pasar de un sistema de referencia inercial a otro, en movimiento respecto a él, no son otras que las transformaciones de Lorentz, que reemplazarán a las transformaciones de Galileo en la nueva cinemática. Einstein deduce la ley de composición (ya no de simple adición) de velocidades, no sin notar que dichas transformaciones “forman un grupo, cual debe ser”.⁴⁵ También menciona que “para velocidades superiores a la de la luz, los razonamientos precedentes no tienen sentido; [...] la velocidad de la luz desempeña en la física el papel de las velocidades infinitamente grandes”.⁴⁶ La antigua cinemática galileo-newtoniana es en cierta forma (y necesariamente) una restricción de la nueva. Con mayor precisión, la cinemática de Galileo es un caso “degenerado” de la nueva. Basta que la velocidad de la luz sea infinita en las transformaciones de Lorentz para obtener las de Galileo. Desde el punto de vista físico, si la velocidad relativa v entre dos sistemas inerciales es muy pequeña respecto a

la velocidad de la luz c , la cinemática de Galileo es una buena aproximación a la cinemática de Einstein, válida en el primer orden de $\beta = v/c$.

RECUADRO XIV.1. *La composición de velocidades*

Examinaremos el caso más sencillo, cuando las velocidades son todas paralelas y tienen el mismo sentido.

Sean v_1 la velocidad del tren respecto al andén y v_2 la velocidad de la canica sobre el piso del tren. ¿Cuál es la velocidad v de la canica respecto al andén?

v es la suma de v_1 y v_2 :

$$v = v_1 + v_2$$

Sin embargo, esto sólo es válido en cinemática clásica y resulta falso en cinemática relativista; se muestra que interviene c y que:

$$v = (v_1 + v_2) / (1 + v_1 v_2 / c^2)$$

Las velocidades no se suman en el sentido clásico del término, sino que se “componen”.

Evidentemente, si se trata sólo de trenes y canicas, de manera que v_1 / c y v_2 / c son mucho menores de 1 (la velocidad del TGV francés es infinitamente menor que la de la luz, sin hablar de la velocidad de una canica), puede ignorarse el término $v_1 v_2 / c^2$ y basta la precisión de la fórmula de adición clásica. En cambio, si se trata de partículas que circulan en un acelerador, la cinemática relativista es indispensable.

Notemos que esta fórmula permite mostrar que c es una velocidad límite: si el viajero de nuestro tren tiene una linterna en la mano, la velocidad del fotón emitido por ella es $v_2 = c$. No obstante, la velocidad de dicho “fotón” respecto al andén sigue siendo c :

$$v = (v_1 + c) / (1 + v_1 c / c^2) = c$$

No hay paradoja alguna. Simplemente, las velocidades no están sujetas a una ley de adición clásica, sino a una ley un poco más compleja, una ley “de composición”.

Debe notarse que, aunque las transformaciones llamadas “de Lorentz” se conocieran desde tiempo atrás, nunca habían sido deducidas a partir de principios planteados en el marco de una cinemática nueva. Así, Einstein retomó muchos elementos del rompecabezas: conceptos, críticas, demostraciones y resultados que ya hemos encontrado en la bibliografía, esencialmente: el principio de la relatividad, la velocidad de la luz, la simultaneidad, la contracción del espacio, la dilatación del tiempo, la velocidad de la luz como límite, la estructura de grupo... Muchos teóricos contribuyeron, en una u otra forma; Lorentz y Poincaré, para empezar, pero también otros menos conocidos. No cabe duda de que Einstein conocía muchos de esos puntos, pero no todos.⁴⁷ Y, comoquiera que sea, no se comprendía la estructura del rompecabezas, su lógica; no se sabía qué imagen formar con las piezas...

Es simplemente porque Einstein *construye* una cinemática nueva por lo que se le atribuye su paternidad. La diseña con sencillez y rigor al proponer dos principios y redefinir la simultaneidad. Todos los elementos del rompecabezas, hasta entonces dispersos, ocupan su lugar en una teoría nueva al fin unifica da, coherente y justificada.

Dicha cinemática se aplicará no sólo a la luz, resolviendo las incoherencias que perturbaban a los teóricos desde un siglo atrás, desde el experimento de Arago, sino también a la electrodinámica y, evidentemente, a las partículas materiales. La física está reunificada... ¡casi por completo! Pues, aunque la electrodinámica dependa en adelante de la cinemática de Einstein, que por otra parte la implica, la teoría gravitatoria de Newton sigue aún bajo el yugo de la cinemática de Galileo.⁴⁸ Regresemos rápidamente al artículo de 1905 que Einstein termina con una “sección electrodinámica”. Para empezar, muestra que las ecuaciones de Lorentz-Maxwell no cambian al ser sometidas a una transformación de Lorentz, notando de paso que “la asimetría mencionada en la introducción, respecto a la corriente generada por el movimiento relativo de un imán y un conductor, desaparece por sí misma”.⁴⁹ Finalmente, en el marco de su nueva cinemática, no sólo retoma y resuelve las dos grandes cuestiones que tantos problemas plantearan a los teóricos desde un siglo atrás, “la teoría del principio de Doppler y la aberración”, sino que, además, como lo expresa con ingenuidad, “con el modelo del método utilizado aquí pueden resolverse todos los problemas de óptica de los cuerpos en movimiento”.⁵⁰ No hay más que decir.

LA INERCIA DE LA ENERGÍA

En otoño de 1905, Einstein le escribe a su amigo Habicht: “El principio de la relatividad, asociado a las ecuaciones fundamentales de Maxwell, tiene por consecuencia que la masa es una medida de la energía contenida en un cuerpo; la luz transporta masa. Debería producirse una disminución sensible de la masa en el caso del radio. Es placentero y seductor considerar el asunto, pero ¿no se reirá Dios de mí haciéndome seguir una pista falsa? No puedo saberlo...”⁵¹

Muestra Einstein en 1905 que la energía cinética de un cuerpo decrece al emitir luz, y que depende de la velocidad al igual que la energía cinética de un electrón, así que “la masa de un cuerpo es una medida de su cantidad de energía”.⁵² En 1906 da una demostración diferente.⁵³ En 1907, en su artículo intitulado “Sobre el principio de la relatividad y las consecuencias que de él se derivan”, nota que “en la desintegración radiactiva de una sustancia se liberan cantidades enormes de energía”,⁵⁴ citando a Planck, quien afirmaba que el radio liberaba 30 240 cal/g por hora, lo que correspondía a una disminución en su masa de 1.41×10^{-6} mg. Después de muchos años, esa idea estaba otra vez en el aire. Parece ser que sólo en 1946, en “una demostración elemental de la equivalencia entre masa y energía”,⁵⁵ proporciona Einstein *explícitamente* la fórmula (demasiado) famosa $E = mc^2$.

A partir de dichos elementos, Jean-Marc Lévy-Leblond consideró recientemente la posibilidad de otro camino que condujera a la relatividad de Einstein, lo que dio lugar a una ficción, a “un experimento mental en historia de la ciencia”.⁵⁶ Preguntándose “lo que habría sucedido si no hubiera sido por Einstein”, muestra que el camino hacia la

relatividad de Einstein “no era el único posible”,⁵⁷ que habría podido tomarse otro. Espero que el lector se haya convencido de eso al leer sobre Blair... Precisamente, Lévy-Leblond parte de la historia (auténtica) de la ecuación de la inercia de la energía, la que explica con detalle, y situándose en 1905 supone que el artículo que Einstein envía a la revista *Annalen der Physik* es rechazado. Motivos no faltan... ¿Cómo se habría llegado entonces a la nueva cinemática? En 1881, en el marco de una visión universal de la teoría electromagnética, Thomson había mostrado que la inercia de una esfera conductora debía depender de su carga. A partir de entonces, la energía cinética total de una partícula no podía ser simplemente proporcional al cuadrado de su velocidad. En los albores del siglo XX, los experimentos de Kaufmann habían confirmado la realidad de la variación de la masa con la velocidad. Resulta que la puerta se abre por el lado de la dinámica. Dichos resultados requerían una modificación de la cinemática que, en la ficción propuesta por Lévy-Leblond, no se le permite a Einstein aportar. Lorentz había mostrado que las ecuaciones de Maxwell son invariantes bajo las transformaciones que llevan su nombre; Poincaré, bien consciente de esas posibilidades, había insistido en la estructura de grupo que tenían dichas transformaciones. Durante la segunda década del siglo, varios teóricos mostrarían que, según hipótesis muy generales (homogeneidad e isotropía del espacio, relaciones causales), las transformaciones de Lorentz eran las únicas posibles; la velocidad de la luz resultaría ser la última clave del enigma. Se implementaría entonces una “cronogeometría de Minkowski”, distinta de la “cronogeometría galileica”.⁵⁸ De esta manera, se llegaría al mismo punto evitando las confusiones sobre “la relatividad”. Este camino no otorga una importancia primordial al principio de la relatividad; es contrario al que Blair nos invita a seguir. En pocas palabras, si el famoso artículo de 1905 hubiera sido rechazado (¡lo asombroso es que haya sido aceptado tan fácilmente!), se habría llegado a las mismas estructuras de la cinemática y del espacio-tiempo, pero la historia habría sido diferente... Si bien no puede reescribirse la historia, ¿acaso no es válido imaginarse historias?

Otros caminos habrían podido conducir al espacio-tiempo. Yo abogo, por mi parte, en favor del de Blair, que tiene la gran ventaja de ofrecer un atajo, un preámbulo, un escalón confortable de la cinemática de Galileo a la cinemática de Einstein. Habría bastado que Lorentz viera todo el interés que tenía el principio de la relatividad, que Poincaré, tan cercano a la meta... Habría bastado que se liberaran un poco más de su conocimiento, que fueran un poco más jóvenes. La libertad es una expresión que se encuentra con mucha frecuencia en los textos de Einstein; ¿será su cualidad esencial?

¿REVOLUCIONARIO?

Apenas empezaba la historia de la relatividad de Einstein; siguieron los resultados teóricos, experimentales y, posteriormente, industriales y militares. El artículo de Einstein es bien acogido. Publicado en la prestigiosa revista *Annalen der Physik*, pronto empieza a citarse. Se corresponde con Max Planck desde 1906 y, a partir de 1907, tiene relación

con Max von Laue, Hermann Minkowski, Wilhelm Roentgen y Wilhelm Wien. Arnold Sommerfeld, muy impresionado, prepara un coloquio sobre la nueva teoría. En 1907 publican un artículo sobre el tema Max von Laue, asistente de Planck, y Kurd von Mosengeil, uno de sus discípulos; Johannes Stark, director del *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, le pide el mismo año a Einstein un artículo de divulgación sobre su teoría. Lorentz, con quien Einstein mantendrá una relación cálida y respetuosa, notará en 1915 que “la teoría de Einstein [...] consigue una simplicidad que yo nunca pude alcanzar”. Sin embargo, Poincaré permanece mudo...

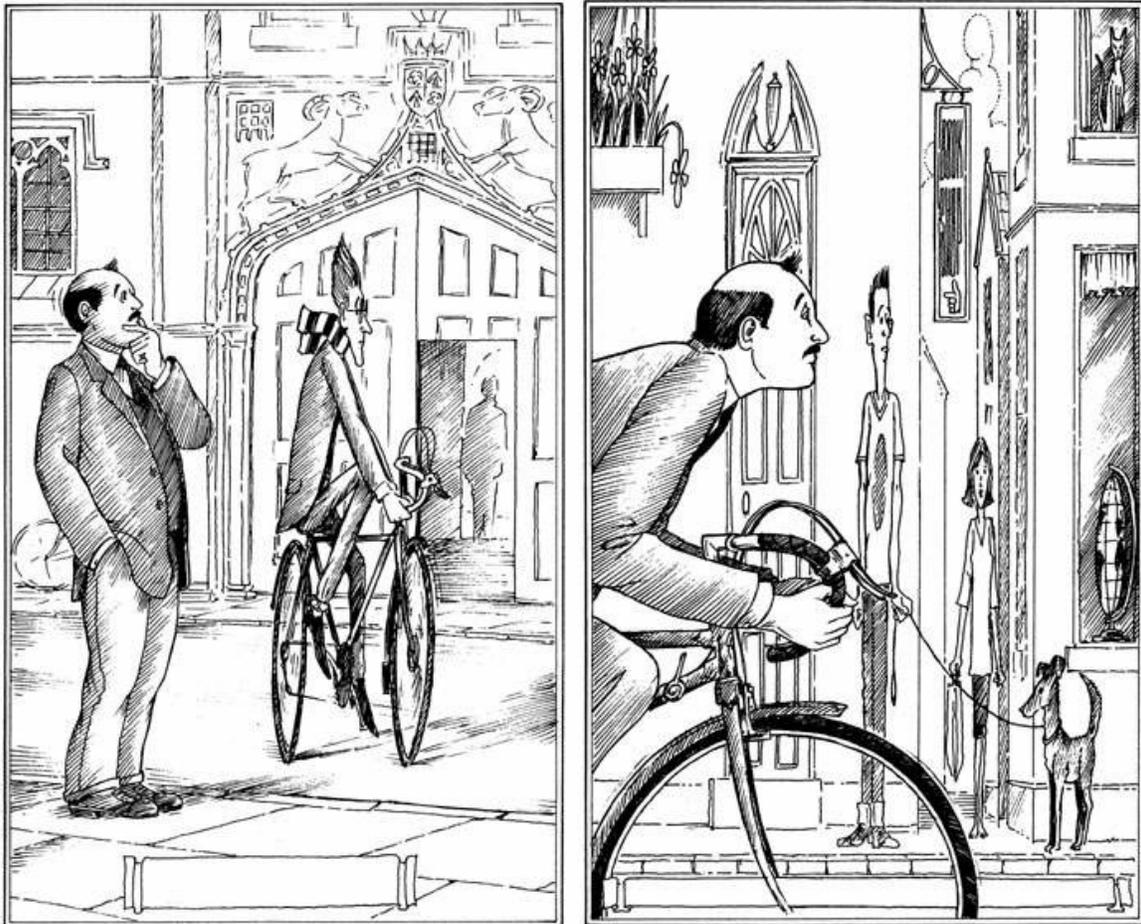


FIGURA XIV.4. *La relatividad, cuestión de perspectiva.*

Imágenes tomadas del libro de G. Gamow, El nuevo breviario del señor Tompkins, publicado por el FCE.

Resulta trivial hoy hablar del carácter revolucionario de la nueva cinemática, pero en su momento no resultó tan claro. Para empezar, según lo reporta Holton, Einstein no lo veía de esa manera: “En lo que respecta a la teoría de la relatividad, de ninguna manera se trata de un acto revolucionario, sino del desarrollo natural de una línea que puede seguirse a través de los siglos”.⁵⁹

Dicha línea, que por supuesto es la del *principio* de la relatividad, viene desde Galileo y Newton, como vimos en el capítulo II. En el siglo XVIII muy pocos físicos se

permitieron aplicar expresamente el principio de la relatividad a la luz, sin duda porque la aberración presentaba un problema que parecía irresoluble. El éter, que domina el siglo XIX, es una negación del principio de la relatividad en la luz, de la que el experimento de Michelson es una manifestación impresionante. Einstein retoma en 1905 el principio de la relatividad, abandonado durante casi un siglo, rechazado por algunos; un principio de la relatividad absolutamente general: partículas materiales y luz, mecánica y óptica. Es alto el precio de ese retorno a un principio tan clásico, lo que no es evidente en el artículo de Einstein, sino hasta unos años después en uno de Minkowski. Resulta que las consecuencias más revolucionarias de la teoría de Einstein están implícitas en el texto de 1905: la nueva cinemática *impondrá* una transformación profunda del mismo espaciotiempo. Habrá que pasar de un espacio newtoniano, cartesiano, a un espacio minkowskiano, y esto plantea preguntas, exige soluciones, genera problemas que no tienen nada de “clásicos”, que son absoluta y totalmente revolucionarios. Einstein no lo quiso así, sin duda ni siquiera imaginó las consecuencias de su artículo. La revolución fue mucho más allá de lo que él hubiera podido concebir.

En primer lugar, la finitud de la velocidad de la luz tiene una consecuencia evidente: que a partir de un punto dado del espacio-tiempo (un lugar y un momento, de hecho un “acontecimiento” del espacio-tiempo), no puede alcanzarse todo el espacio. Así, los acontecimientos muy lejanos (en distancia) no pueden alcanzarse en poco tiempo.⁶⁰ Esto no tiene nada de complicado: si sólo tengo una bicicleta, no puedo llegar de París a la Costa Azul en una mañana, y si tengo un avión, puedo llegar en una hora, pero no en dos minutos. Si hay un límite absoluto para la velocidad, habrá límites absolutos para el espacio accesible. Entonces el espacio-tiempo está dividido. Hay ciertas partes del espacio-tiempo que no podemos alcanzar y, recíprocamente, que no pueden influir sobre otras. Lo anterior tiene consecuencias en cuanto a causalidad: se cimbran los fundamentos mismos de la física. Debe abandonarse la noción de tiempo absoluto y, lo que resulta mucho más grave para nuestra representación del mundo, deben cambiarse las nociones tan comunes de duración y distancia por la de tiempo propio... Einstein no pudo haber previsto eso: aceptará a regañadientes la interpretación propuesta por Minkowski.

En efecto, Minkowski (cuyas relaciones con Einstein, quien fuera su alumno en el politécnico de Zúrich, no habían sido especialmente buenas)⁶¹ se interesa en la nueva cinemática, de la que ya se habla mucho. En una conferencia que imparte en 1908, nota con toda razón que “ni Einstein, ni Lorentz [...] modificaron la noción de espacio”, y afirma después que “pasar [...] por encima del concepto de espacio sólo podía lograrse mediante una matemática audaz”.⁶² Y es eso lo que propone. Verifica, de una manera al mismo tiempo muy ingenua y profunda, que “los objetos de nuestra percepción implican invariablemente un lugar y un tiempo asociados”, añadiendo que “nadie ha visto un lugar sino en un tiempo [dado], ni un instante sino en un lugar [dado]”.⁶³ Volverá a decirlo poco después, insistiendo en el carácter “radical” de la comprobación: “A partir de ahora, el espacio independiente del tiempo y el tiempo independiente del espacio no son más

que sombras vanas; en adelante habrá de considerarse una especie de unión entre ambos”.⁶⁴ Así, Minkowski estructura de otra manera el espacio de la teoría, proponiendo un universo con cuatro dimensiones: tres espaciales y una temporal, de manera que cada conjunto ordenado de cuatro valores representa un punto del universo, un acontecimiento; la trayectoria de cualquier corpúsculo se representa mediante una “línea de universo”, y el universo en sí es “el conjunto de todos los valores imaginables de x , y , z , t ”.⁶⁵ Después introduce el grupo de transformaciones de Lorentz, del cual el grupo de transformaciones de Galileo es un caso particular (degenerado), sin citar por lo demás el trabajo de Poincaré.⁶⁶ A continuación, acuña el concepto, absolutamente fundamental para la relatividad, de “tiempo propio”: una magnitud física invariante, lo que ya no son ni el tiempo (a partir de entonces “tiempo coordenado”) ni la distancia (también “distancia coordenada”) entre dos acontecimientos del espacio-tiempo. Entonces deben cuestionarse el tiempo absoluto, la distancia ordinaria, el espacio físico de tres dimensiones: esos marcos de referencia cotidianos de la física clásica. Se trata de la gran revolución que sin duda Einstein no vio realmente en 1905...

La relatividad seguirá su camino, aportando una gran cantidad de resultados sorprendentes, convirtiéndose pronto en la herramienta de la física nueva, no solamente de la luz y la electrodinámica, sino de todas las fuerzas de la naturaleza. No satisfecho con la incompatibilidad entre la teoría de la gravitación de Newton y la nueva cinemática, Einstein se abocará a la tarea de construir, no sin dificultades, una teoría relativista de la gravitación. Es entonces, según mi punto de vista, en el marco de la relatividad “general”, donde se comprenderán muchas de las particularidades de la relatividad “especial”...

XV. DE NEWTON A EINSTEIN

DESDE principios del siglo XX se ha insistido mucho, y con toda razón, sobre el carácter revolucionario de los conceptos aportados por la relatividad de Einstein. Las dos grandes teorías físicas del espacio-tiempo, cinemática y dinámica de Newton y de Einstein, son distintas estructuralmente, “incomensurables” a decir de los epistemólogos, cuyo único campo de interpretación es la experiencia. Las teorías de Einstein sólo se aproximan a las de Newton si las velocidades que intervienen son muy pequeñas respecto a la velocidad de la luz. La cinemática de Einstein toma entonces “en primer orden” la forma de la cinemática clásica, y las transformaciones de Lorentz degeneran en las de Galileo. De la misma manera, si el campo gravitatorio es débil, se llega a la teoría de la gravitación de Newton a partir de la relatividad general. Es evidente que debe asegurarse la continuidad de la explicación de los hechos físicos. Es una necesidad primaria. Por el contrario, es mucho menos fácil imaginar el espacio de Minkowski, donde la relatividad de Einstein adquiere un sentido completo, a partir del espacio de Newton, y es aún más difícil pasar de un espacio y un tiempo absolutos al espacio-tiempo riemanniano (curvo). En pocas palabras, la revolución tiene lugar esencialmente en los conceptos, pero los experimentos presentan una continuidad clara.

Espacio, tiempo, velocidad, luz, gravitación: de eso tratan los *Principia* de Newton. Son también los temas de Michell, de Blair, de Arago, de Soldner, y los que llevarán a Einstein primero a la relatividad “especial” y después a la relatividad “general”. Así, no hay que sorprenderse de los nexos que hemos mostrado entre los trabajos del siglo XVIII y las teorías del XX. Dichos nexos, además de históricos, son principalmente físicos. Sucede que, en física, un tema dado genera casi necesariamente objetos cercanos, análisis más o menos convergentes. La realidad física subyacente resiste, y obliga a los físicos a tomar ciertos caminos. La elección es limitada, hay poca libertad... ¡o poca imaginación! Con frecuencia se regresa a análisis antiguos, a conceptos clásicos, que son repensados y modificados.

Sin embargo, nadie, ni siquiera Einstein, se interesó jamás directamente por ese *corpus* del siglo XVIII. La mayoría de esos textos, en particular el artículo de Michell y el manuscrito de Blair, fueron víctimas del olvido al que los relegó la teoría de las ondulaciones. La revolución ondulatoria ha hecho su obra y no retoma casi nada de la obra de Newton, en particular de la teoría de la emisión.

Sólo ocasionalmente, por alguna inquietud histórica o ideológica, algún erudito los resucitará, como se tiene un triste ejemplo en Lenard. Ni siquiera forman parte de la historia de la física. Tampoco tuvieron influencia alguna en el contexto del descubrimiento de la relatividad, en el camino que conduce de las teorías de Newton a las de Einstein. Únicamente a través del experimento de Arago, un experimento *negativo*, tuvieron dichos artículos alguna influencia en los trabajos de los siglos posteriores.

Entonces estas raíces de la relatividad son mucho más raíces estructurales, raíces propiamente físicas, que raíces históricas.

Por otra parte, la física de la emisión no fue olvidada, cuando menos en cuanto a sus rasgos principales, en particular debido al retorno al carácter corpuscular de la luz a principios del siglo XX. La dualidad de la luz, corpuscular y ondulatoria, evidentemente tuvo una razón, pues permite pensar una cinemática relativista que es finalmente de tipo corpuscular. Así, el interés de Einstein por la teoría de la emisión es patente. En 1903 y 1904 trató de reemplazar la versión de Lorentz de la teoría de Maxwell por una teoría de emisión de la luz, porque concordaba con sus investigaciones sobre la naturaleza cuántica de la luz¹ y, por supuesto, porque una teoría de la emisión era perfectamente compatible con el principio de la relatividad. Las dificultades que presentaba una explicación convincente de la aberración en el contexto de la teoría ondulatoria, ¿no se resolvían acaso regresando al principio de la relatividad? Como conclusión retomaremos dichos puntos, desde una lógica no histórica, sino física. Empecemos con la cinemática.

LA CINEMÁTICA: DE BLAIR A EINSTEIN

Newton se interesa muy poco por la luz en el contexto de sus *Principia*. La cinemática de la luz permanece implícita. La luz se considera como un flujo de corpúsculos a los que se aplica la dinámica de los corpúsculos materiales. El descubrimiento de la aberración, poco después de la muerte de Newton, no permite que se exprese claramente la cinemática clásica de la luz permaneciendo compatible con el principio de la relatividad e implicando, al igual que para los corpúsculos materiales, la adición de las velocidades de la fuente, del observador y de emisión de la luz. Sólo Blair, tan valiente como ingenuamente, llevará dicha cinemática clásica hasta sus últimas consecuencias. Esto le permite, siguiendo a Michell, desarrollar en el contexto de la teoría de la emisión el efecto Blair-Michell y llegar a las mismas conclusiones que Fizeau. También le permite, desde la lógica de la teoría ondulatoria de Euler, imaginar “ese fenómeno tan curioso” que constituirá la esencia del experimento de Michelson.

Dicha visión de la cinemática clásica de la luz tiene otro interés, en este caso pedagógico: evitar el éter, permanecer en el marco del principio de la relatividad. De repente, el resultado del experimento de Michelson aparece (un poco demasiado) límpido, hasta el punto de que los físicos se admiran de que se haya planteado tal pregunta... Además, tratar los corpúsculos luminosos como si fueran partículas materiales es un buen ejercicio si se quiere entender algo de la relatividad general. Por lo tanto, los lazos que hay entre los trabajos de Michell y Soldner, por un lado, y la teoría de la gravitación de Einstein, por el otro, son más visibles, si no es que más fuertes, pues implican experimentos, que los lazos existentes entre las cinemáticas de Newton y de Einstein.

HACIA UNA TEORÍA RELATIVISTA DE LA GRAVITACIÓN

Desde 1907, dos años después de haber publicado su nueva cinemática (capítulo XIV), Einstein considera que es indispensable construir una teoría relativista de la gravitación. A partir de 1905 la física se encuentra dividida: la electrodinámica, y con ella la luz, están sujetas a la cinemática relativista, mientras que la gravitación depende aún de la cinemática clásica, la de Galileo y Newton. Esto resulta insoportable. Einstein toma entonces conciencia de que la luz debe ser sensible a la gravedad, de dos maneras diferentes. Por una parte, los rayos luminosos que pasan por un campo gravitatorio deben ser desviados. Por otra parte, las frecuencias observadas de franjas espectrales deben ser afectadas por el campo gravitatorio: se trata del efecto Einstein, un efecto Doppler gravitatorio. La desviación de los rayos luminosos al pasar cerca del Sol será observada en 1919. En cuanto al desplazamiento espectral de las franjas de un átomo sometido a un campo gravitatorio, harán falta muchos más años para persuadirse de su realidad. La cuestión de la observación de tal fenómeno se planteará, al principio en relación con el Sol, a finales de la segunda década del siglo; después en otras circunstancias, en particular gracias a las observaciones de Adams. Sin embargo, los expertos no se convencerán del efecto sino hasta 1960, mediante los experimentos *terrestres* de Pound y Rebka.²

Esas dos comprobaciones de la relatividad general fueron de hecho pensadas desde el siglo XVIII: la acción de la gravitación sobre la velocidad de la luz, que no es diferente del efecto Doppler gravitatorio, y la desviación de la luz en un campo gravitatorio. Sin olvidar la invención de los cuerpos oscuros por Michell en 1784, que precede a los agujeros negros en más de 150 años. Sólo se les escapa a esos precursores la prueba estándar de la relatividad general, el avance secular del perihelio de los planetas, un problema que no ha podido resolverse en el marco de la teoría de la gravitación de Newton. Einstein, consciente del interés de dicha prueba desde 1907, lo explicará de manera espectacular en 1915, al publicar sus ecuaciones del campo gravitatorio.

EL EXPERIMENTO DE MICHELL Y EL EFECTO EINSTEIN

En su experimento del verano de 1783 (según vimos en el capítulo VIII), Michell pensaba utilizar su efecto de disminución de la velocidad de la luz debido a la gravitación para observar los haces luminosos procedentes de las dos componentes de una estrella doble. La velocidad de emisión de los corpúsculos luminosos procedentes de la estrella central, muy masiva, disminuiría mucho, mientras que los corpúsculos emitidos por la estrella satélite, de masa solar, sufrirían un cambio minúsculo. El prisma colocado en el telescopio debería permitir, gracias a su “método” (el efecto Blair-Michell), medir la diferencia de refracción entre ambos haces. Tenemos aquí un efecto análogo al efecto Einstein, pero en el marco de la teoría de la emisión: un efecto Doppler gravitatorio. Al igual que en el efecto Doppler-Fizeau, son las frecuencias las que se ven desplazadas (por la gravedad). Sin embargo, al igual que en el efecto Blair-Michell, esto implica *también* una variación en el ángulo de refracción entre ambos haces.³

Según esta interpretación, el experimento de Michell es idéntico a las observaciones actuales de ciertas estrellas dobles físicas: las dobles espectroscópicas. Utilizando un telescopio dotado de un espectroscopio, se comparan ambos espectros y se observa un desplazamiento de las franjas que debería permitir medir el efecto de la disminución de la velocidad debido a la gravitación. En 1925, y por lo tanto ya en el marco de la teoría gravitatoria de Einstein, Adams realizó una observación absolutamente idéntica. Fotografió los espectros de Sirio y de su compañera, mostrando un desplazamiento de las franjas de una estrella respecto a la otra. Disponía de los datos de la órbita (lo que Michell no podía sino suponer), lo que le permitió confirmar que se trataba de una enana blanca, una estrella extremadamente densa.⁴ Eddington cantó victoria inmediatamente en su obra *La constitución interna de las estrellas*: “El profesor Adams mató dos pájaros de un tiro: exhibió una prueba novedosa de la teoría de la relatividad general de Einstein y confirmó nuestra conjetura de que la materia 2 000 veces más densa que el platino no es sólo una hipótesis, sino que realmente está presente en el universo”.⁵ Poco importa que Michell se haya adelantado a su tiempo y que los resultados de Adams hayan estado equivocados: la lógica de ambos experimentos es estrictamente paralela.

LA DESVIACIÓN DE LOS RAYOS LUMINOSOS

De hecho, Einstein estaba vagamente al corriente del efecto de desviación de los rayos luminosos en un contexto newtoniano. En efecto, en una carta fechada en el verano de 1913, después de agradecerle a Finlay-Freundlich el haberse dedicado a buscar una observación de dicho efecto, nota: “Que la idea de la curvatura de los rayos luminosos aparezca con la teoría de la emisión es algo totalmente natural, y que el resultado numérico exacto concuerde con la hipótesis de la equivalencia, lo es otro tanto”.⁶

No es imposible que Einstein obtuviera dicha información de un libro de divulgación leído en su juventud,⁷ como lo afirma en su autobiografía.⁸ De hecho, el efecto clásico de desviación de los rayos luminosos está explícito tanto en esa obra como en la de Rosenberger.⁹ Entonces quedaban, cuando menos en la literatura de divulgación de tradición germánica, huellas del trabajo de Soldner. Sin embargo, es claro que el camino que llevó a Einstein a su relatividad general no pasó por ahí. De hecho, Einstein tiene conciencia desde 1907 de que “los rayos luminosos [...] se desvían ante un campo gravitatorio”.¹⁰ En 1911, cuando la relatividad general apenas se esboza, calcula la curvatura de los rayos luminosos en los bordes de una estrella, en un contexto newtoniano pero con métodos distintos de los usados por Soldner: óptica ondulatoria en vez de corpuscular. Su resultado no difiere un ápice del de Soldner¹¹ (capítulo VIII), quien predijera y calculara la curvatura de los rayos luminosos en los bordes de un astro, en el marco de la teoría de la gravitación de Newton y de la teoría de la emisión.

A principios de los años veinte, el artículo de Soldner servirá de pretexto a una turbia campaña “antirrelativista” emprendida por Philipp Lenard, antisemita inveterado que

publicará nuevamente el artículo de Soldner en *Annalen der Physik*¹² para desacreditar a Einstein, dando a entender que le había robado las ideas. La cuestión no merece siquiera ser discutida,¹³ por la enorme distancia conceptual entre ambos campos y porque la lógica que condujo a Einstein a la relatividad general es profunda e independiente de la lógica de la física newtoniana. Soldner no es, como tampoco Michell, un precursor de la relatividad general. Simplemente la “teoría” de Michell respecto a la acción de la gravedad sobre la luz anticipa muchos resultados de la teoría de la gravitación de Einstein. De la misma manera, son fuertes los lazos entre la cinemática clásica de la luz según Blair y la cinemática de Einstein. No hay de qué sorprenderse. Así es la física.

XVI. ¿HAY QUE OLVIDAR LA HISTORIA?

EN LA presente obra se trata la historia de una manera que, puesta en cierta forma al servicio de la pedagogía de la física, sin duda disgustará a más de uno. Los inconformes deberán aceptar, sin embargo, que dicha historia no está tan mal abordada. Todas esas obras habían permanecido olvidadas hasta ahora. Olvidados Michell y sus cuerpos oscuros, olvidados sus trabajos acerca de la acción de la gravedad sobre la velocidad de la luz, totalmente incomprendida su invención del efecto Doppler gravitatorio; lo mismo pasó con el manuscrito de Blair, que durmió durante casi 200 años en un cajón de la Real Sociedad sin ser jamás motivo de algún trabajo histórico; sin mencionar el experimento de Arago, también incomprendido en su esencia. En pocas palabras, se ha actualizado un bloque entero de la historia de la física. Eso no sucede todos los días.

Que la historia de la relatividad de Einstein se sumerge en el siglo XIX es evidente. Cierto es que sus fuentes fueron apenas mencionadas. Esto tiene sus razones: por una parte, porque han sido ya tratadas de manera extremadamente precisa por los especialistas,¹ pero también porque la historia que se cuenta aquí no conduce de manera sencilla a la cinemática de Einstein, lo que es un eufemismo. Que el principio de la relatividad sea, sin duda por buenas razones, dejado de lado durante el siglo XIX hace difícil el camino a la cinemática relativista. El mejor ejemplo es el experimento de Michelson, que parece absurdo en un contexto “relativista”. Y es que, en el marco de las teorías de Einstein, el éter debe olvidarse, como toda forma de pensar relacionada con él. Además, el punto de vista ondulatorio de la luz no se adapta tan bien como la visión corpuscular a la comprensión y aplicación de las teorías relativistas. Tanto la cinemática de Einstein como la teoría de la gravitación de Einstein se comprenden más fácilmente si se “ve” la luz como un fenómeno corpuscular. Muestra de ello es que la mayoría de los problemas se tratan de esa manera; por ejemplo, uno de los conceptos más pertinentes, el de trayectoria, el de geodésica, se aplica a una partícula, a un corpúsculo, y no a una onda. Además, el concepto *esencial* tanto en relatividad especial como en relatividad general, el de “tiempo propio”, también se aplica a una partícula. De hecho, las ondas casi no aparecen en los trabajos sobre relatividad, aunque se las tenga que utilizar para tratar ciertos problemas.

La dualidad “onda-corpúsculo”, a la que se encuentra sometida la luz, pesa mucho. El dominio de la visión ondulatoria, debido a su éxito, trajo consigo el olvido de las fuentes corpusculares. Nada más natural. Durante sus “revoluciones”,² todas las ciencias realizan una refundición de sus conceptos, lo que implica una selección (ideológica, propiamente hablando) de sus fuentes históricas. Sin embargo, la prehistoria de las teorías “relativistas” no ha sido tratada realmente; las investigaciones se han limitado a los problemas que el punto de vista ondulatorio planteaba a la cinemática, sin preocuparnos por la manera en que antes se había tratado la cuestión. Con todo, el

trámite de los sabios newtonianos era natural, evidente, y de hecho estaba implícito en muchos trabajos. Era indispensable. El olvido hizo el resto. No obstante, no es tanto un olvido cuanto la negativa a pensar de manera diferente. Pues este camino, este atajo que hemos encontrado, habría podido ser retomado un siglo después y plasmado en un pizarrón con unos cuantos trazos.

De hecho, la dualidad de la luz implica una dualidad de perspectivas. Hay dos prehistorias de la física de la luz: la de la visión ondulatoria y la de la visión relativista, ligada a la visión corpuscular. La primera, bien conocida y más o menos continua, pasa por Huygens, Young, Fresnel, Lorentz, Maxwell, evita a Einstein, que casi no hizo contribuciones en ese sentido, y continúa en el siglo XX. La segunda pasa naturalmente por Galileo, Newton, Michell, Blair, Arago, y se salta alegremente el siglo XIX y el éter para llegar a Einstein... El experimento de Michelson no existe, después de las observaciones de Bradley, sino para verificar que la velocidad de la luz es constante.

Es esta prehistoria la que hace falta reintegrar a los intelectos y a los manuales, para que tenga lugar una refundición indispensable de la epistemología, de la pedagogía de las teorías de Einstein.

APÉNDICE

EL EFECTO DOPPLER-FIZEAU EN LA TEORÍA ONDULATORIA CLÁSICA

Escribiremos las fórmulas de Doppler-Fizeau en términos de frecuencia (y no de longitud de onda) para compararlas fácilmente con las fórmulas modernas; recordemos que $\lambda = c/v$.

En el caso de un movimiento radial de la fuente respecto al observador:

$$v_r = v_e / (1 - v_s / c)$$

donde v_e es la frecuencia de la luz (o del sonido) durante la emisión; v_r es la frecuencia de la luz (o del sonido) durante la recepción; c es la velocidad de la luz (o del sonido), y v_s es la velocidad de la fuente (positiva si el avance es hacia el observador). Según Doppler y Fizeau, estas fórmulas son válidas tanto para el sonido como para la luz; basta reemplazar la velocidad de la luz, c , por la velocidad del sonido, V . En el caso de un movimiento radial del observador respecto a la fuente (en reposo en el éter):

$$v_r = v_e (1 + v_o / c)$$

donde v_o es la velocidad radial del observador (positiva si se trata de un movimiento hacia la fuente).

Insistamos en el hecho de que ambas fórmulas son distintas. La teoría no es congruente con el principio de la relatividad; de serlo, habría una sola fórmula que considerara la velocidad relativa fuente/observador.

EL EFECTO DOPPLER-FIZEAU EN LA RELATIVIDAD ESPECIAL

La fórmula que Einstein plantea en 1905 sólo hace intervenir la velocidad relativa fuente/observador, v (positiva cuando se aproximan). Si el movimiento es radial:

$$v_r = v_e [(1 + v/c) / (1 - v/c)]^{1/2}$$

En el primer orden de aproximación:

$$v_r \approx v_e (1 + v/c)$$

La fórmula de Einstein es entonces equivalente a las fórmulas de Doppler-Fizeau en

un primer orden de aproximación:

- movimiento radial de la fuente respecto al observador: $v_r \approx v_e (1 + v_s / c)$
- movimiento radial del observador respecto a la fuente: $v_r \approx v_e (1 + v_o / c)$

BIBLIOGRAFÍA

- Acloque, Paul, *L'aberration stellaire: un mirage qui a destitué l'éther*, Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques, Paris, 1991.
- Andrade, Edward Neville da Costa, "Doppler and the Doppler Effect", *Endeavour*, 18 (69): 14-19, 1959.
- Arago, Dominique François Jean, *Observations de distances zénithales, faites au cercle mural, d'abord en plaçant un prisme devant l'objectif de la lunette, puis sans prisme*, ms. AE3-8, Archives et manuscrits de l'Observatoire de Paris, 1809-1810.
- , "Sur un système d'expériences à l'aide duquel la théorie de l'émission et celle des ondes sont soumises à des épreuves décisives", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 7 (23): 954-965, 1838.
- , "Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la Première Classe de l'Institut le 10 décembre 1810", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 36 (2): 38-49, 1853.
- , *Astronomie populaire*, 4 vols., Legrand, Pomey et Crouzet, Paris, 1786-1853; reimpr. Gide et J. Baudry, Paris, 1854-1857.
- , *Œuvres complètes*, 17 vols., Gide et J. Baudry, Paris, 1854-1858.
- , *Histoire de ma jeunesse*, seguida de *La Vie de François Arago*, prefacio de Jean-Christophe Bailly, introd. de Alexander von Humboldt, C. Bourgois, Paris, 1985.
- Auffray, Jean-Paul, *Einstein et Poincaré. Sur les traces de la relativité*, Le Pommier, Paris, 1999.
- Babinet, Jacques, "Sur l'aberration de la lumière", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9 (21): 774-775, 1839.
- , "De l'influence du mouvement de la Terre dans les phénomènes optiques", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 55 (14): 561-564, 1862.
- Bechler, Zev, "Newton's Search for a Mechanistic Model of Colour Dispersion: A Suggested Interpretation", *Archive for History of Exact Sciences*, 11: 1-37, 1973.
- , "Newton's Law of Forces Which Are Inversely as the Mass: A Suggested Interpretation of His Later Efforts to Normalise a Mechanistic Model of Optical Dispersion", *Centaurus*, 18 (3): 184-222, 1974.
- Bernstein, Aaron, *Naturwissenschaftliche Volksbücher*, 3^a ed., vol. 18, reimpr., Franz Duncker, Berlín, 1870.
- Berry, Arthur, *A Short History of Astronomy*, John Murray, Londres, 1898; reimpr. Dover Books, Nueva York, 1961.
- Billet, Félix, *Traité d'optique physique*, Mallet-Bachelier, Paris, 1858-1859.
- Biot, Jean-Baptiste, *Traité élémentaire d'astronomie physique*, 2^a ed., Klostermann,

- Paris, 1811.
- , “An Account of the Rev. John Flamsteed...”, *Journal des Savants*: 156-166, 205-223, 641-754, 1836.
- , “Analyse des tables de réfraction construites par Newton, avec l’indication des procédés numériques par lesquels il a pu les calculer”, *Journal des Savants*: 735-754, 1836.
- , y Dominique François Jean Arago, “Mémoire sur les affinités des corps pour la lumière, et particulièrement sur les forces réfringentes des différents gaz”, *Mémoires de l’Institut National des Sciences et Arts*, 7: 301-387, 1806.
- Blair, Robert, “A Proposal for Ascertaining by Experiments whether the Velocity of Light be Affected by the Motion of the Body from which It Is Emitted or Reflected; and for Applying Instruments for Deciding the Question to Several Optical and Astronomical Enquiries”, Real Sociedad de Londres, ms. L & P, vol. VIII, 1786.
- , “Experiments and Observations on the Unequal Refrangibility of Light”, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 3 (2): 3-76, 1794.
- Blay, Michel, *La science du mouvement. De Galilée à Lagrange*, Belin, Paris, 2002.
- Bošković, Ruder Josip, *Opera pertinentia ad opticam et astronomiam, maxima ex parte nova & omnia hucusque inedita, in v tomos distributa*, Remondini, Venecia, 1785.
- Bouguer, Pierre, “Sur les réfractions astronomiques dans la zone torride”, *Histoire de l’Académie Royale de Sciences, Année 1739, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, Paris, 1741, pp. 407-422.
- Bradley, James, “A letter from the Reverend Mr. James Bradley [...] to Dr. Edmund Halley [...] Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix’d Stars”, *Philosophical Transactions*, 35: 637-661, 1728.
- , “A Letter to the Right Honourable George Earl of Macclesfield Concerning An Apparent Motion Observed in Some of the Fixed Stars”, *Philosophical Transactions*, 45: 1-43, 1748.
- Brück, Hermann Alexander, *The Story of Astronomy in Edinburgh from Its Beginnings until 1975*, Edinburgh University Press, Edimburgo, 1983.
- Buchwald, Jed Z., *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*, The University of Chicago Press, Chicago, 1989.
- Buffon, Georges-Louis Leclerc, conde de, *Histoire naturelle générale et particulière*, t. XIII, Imprimerie Royale, Paris, 1769-1770.
- Buys-Ballot, Christophorus Henricus Dedericus, “Akustische Versuche auf der Niederländischen Eisenbahn nebst gelegentlichen Bemerkungen zur Theorie des Hrn. Prof. Doppler”, *Poggendorf Annalen*, 66: 321-351, 1845 (*Annalen der Physik und Chemie*, 142).
- Cantor, Geoffrey N., *Optics after Newton. Theories of Light in Britain and Ireland, 1704-1840*, Manchester University Press, Manchester, 1983.
- Cassini, Giovanni Domenico, “De l’origine et du progrès de l’Astronomie, et de son

- usage dans la Géographie et dans la Navigation”, *Anciens mémoires de l’Académie Royale des Sciences*, 7: 48-52, 1693.
- Cavendish, Henri, “Experiments to Determine the Density of the Earth”, *Philosophical Transactions*, 88: 469-526, 1798.
- Chappert, André, *Étienne Louis Malus (1775-1812) et la théorie corpusculaire de la lumière*, Vrin, Paris, 1977.
- Cheyne, George, *Philosophical Principles of Natural Religion: Containing the Elements of Natural Philosophy and the Proofs for Natural Religion, Arising from Them*, George Straham, Londres, 1705.
- Clairaut, Alexis-Claude, “De l’aberration apparente des étoiles causée par le mouvement progressif de la lumière”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences, Année 1737, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, Paris, 1740, pp. 205-227.
- , “Sur les explications cartésienne et newtonienne de la réfraction de la lumière”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences, Année 1739, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, Paris, 1741, pp. 259-275.
- , “Sur la manière la plus simple d’examiner si les Étoiles ont une Parallaxe et de la déterminer exactement”, *Histoire des l’Académie Royale de Sciences, Année 1739, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, Paris, 1741, pp. 358-369.
- Cohen, I. Bernard, “Roemer and the First Determination of the Velocity of Light”, *Isis*, 31 (2): 327-379, 1940.
- Copérnico, Nicolás, *De revolutionibus orbium coelestium*, Nüremberg, 1543.
- Cornu, Alfred, *Sur la détermination de la vitesse de la lumière*, Gauthier-Villars, Paris, 1876.
- , “Sur la méthode Doppler-Fizeau permettant la détermination par l’analyse spectrale de la vitesse des astres dans la direction du rayon visuel”, *Annuaire pour l’An 1891, publié par le Bureau des Longitudes*, D1- D40, 1891.
- Costabel, Pierre, “La propagation de la lumière sans transport de matière de Descartes à Huygens”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, Paris, 1978, pp. 83-91.
- Darrigol, Olivier, *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- Daumas, Maurice, *Arago. La jeunesse de la science*, Gallimard, Paris, 1943; 2^a ed., Belin, Paris, 1987.
- Débarbat, Suzanne, “La qualité des données d’observations traitées par Roemer”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, Paris, 1978, pp. 143-157.
- , y Wilson Curtis, “The Galilean Satellites of Jupiter from Galileo to Cassini, Römer and Bradley”, en R. Taton y C. Wilson (comps.), *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics*, Cambridge University Press,

- Cambridge, 1989, pp. 144-157.
- Delambre, Jean-Baptiste Joseph, “Procès-verbal de la séance et rapport de Delambre à la classe des sciences. Séance du lundi 4 septembre 1809”, *Académie des Sciences. Procès-verbaux*, 4: 243-252, 1809.
- , “Analyse des travaux de la classe des sciences mathématiques et physiques pour l’année 1810”, *Mémoires de l’Académie Royale des Sciences de l’Institut de France*, París, 1810, pp. I-XXI.
- , *Tables écliptiques des satellites de Jupiter d’après la théorie de M. le Marquis de Laplace, et la totalité des observations faites depuis 1662 jusqu’à l’an 1802*, Courcier, París, 1817.
- Descartes, René, *La Dioptrique*, Jean Maire, Leiden, 1637 (reed. Gallimard, París, 1958; y *Œuvres*, t. VI, Vrin, París, 1996). [Versión en español: *Discurso del método. Dióptrica, meteoros y geometría*, trad. de Guillermo Quintás Alonso, Alfaguara, Madrid, 1981.]
- , *Principia philosophiæ*, Ludovicum Elzevirium, Ámsterdam, 1644 (versión en francés: *Œuvres et lettres*, Gallimard, París, 1958, y *Œuvres*, 12 vols., t. IX, Vrin, París, 1996). [Versión en español: *Los principios de la filosofía*, trad. de Guillermo Quintás Alonso, Alianza, Madrid, 1995.]
- Descartes, René, *Œuvres et lettres*, ed. de André Bridoux, col. Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, París, 1958. [Existe una selección en español de las obras de Descartes: *Obras*, estudio introductorio de Cirilo Flórez Miguel, Gredos, Madrid, 2011.]
- , *Œuvres*, 12 vols., ed. de Charles Adam y Paul Tannery, Vrin, París, 1996.
- Diderot, Denis (dir.), *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Briasson/David/Le Breton/Durand, París, 1751-1780.
- Doppler, Christian, “Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels”, *Abhandlungen der Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften*, 5 (2): 465-482, 1842.
- Dreyer, John L. E. (comp.), *The Scientific Papers of Sir William Herschel*, Royal Society of London/Royal Astronomical Society, Londres, 1912.
- Eddington, Arthur S., *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge University Press, Cambridge, 1926.
- Einstein, Albert, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, 17: 891-921, 1905 (versión en francés: “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, en *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil, París, 1993, pp. 31-58).
- , “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?”, *Annalen der Physik*, 18: 639-641, 1905 (versión en francés: “L’inertie d’un corps dépend-elle de son contenu en énergie?”, en *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil, París, 1993, pp. 60-63).
- , “Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie”, *Annalen der Physik*, 20: 627-633, 1906 (versión en francés: “Le principe de conservation du mouvement du centre de gravité et l’inertie de

- l'énergie", en *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, pp. 63-68).
- , "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4: 411-462, y 5: 98-99, 1907 (versión en francés: "Sur le principe de relativité et les conséquences qui en découlent", en *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, pp. 84-124).
- , "Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes", *Annalen der Physik*, 35: 898-908, 1911 (versión en francés: *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, pp. 134-142).
- Einstein, Albert, *La Théorie de la relativité restreinte et générale*, trad. de Maurice Solovine, Bordas, Paris, 1976. [Versión original en alemán: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Vieweg, Brunswick, 1916. Versión en español: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, 2ª ed., trad. de Miguel Paredes Larrucea, Alianza, Madrid, 2008.]
- Einstein, Albert, "Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie", *Die Naturwissenschaften*, 6: 697-702, 1918 (versión en francés: "Dialogue sur les objections opposées à la théorie de la relativité", en *Œuvres choisies*, t. V, *Science, éthique, philosophie*, Seuil, Paris, 1991, pp. 61-70).
- , "Elementary Derivation of the Equivalence of Mass and Energy", *Technion Journal*, 5: 16-17, 1946 (versión en francés: "Une démonstration élémentaire de l'équivalence entre masse et énergie", en *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil, Paris, 1993, pp. 69-71).
- , "Autobiographical Notes", en Paul Arthur Schilpp (comp.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, t. I., Northwestern University Press, Evanston, Illinois, 1949, pp. 1-95.
- , *Lettre à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, Paris, 1956.
- , *The Collected Papers of Albert Einstein*, 8 vols., comp. de J. Stachel et al., Princeton University Press, Princeton, 1987-1998.
- , *Œuvres choisies*, 5 vols., comp. de Françoise Balibar, Seuil, Paris, 1989-1993.
- , *Œuvres choisies*, t. II, *Relativités I*, Seuil / CNRS Éditions, Paris, 1993.
- , *Œuvres choisies*, t. III, *Relativités II*, Seuil / CNRS Éditions, Paris, 1993.
- Einstein, A., H. Lorentz, H. Weyl y H. Minkowski, *The Principle of Relativity: A Collection of Original Papers on the Special and General Theory of Relativity*, Methuen and Company, Londres, 1923 (reimpr. Dover Publications, Nueva York, 1952).
- Eisenstaedt, Jean, "Histoire et singularités de la solution de Schwarzschild (1915-1923)", *Archive for History of Exact Sciences*, 27: 157-198, 1982.
- , "La relativité générale à l'étiage: 1925-1955", *Archive for History of Exact Sciences*, 35 (2): 115-185, 1986.
- , "Trajectoires et impasses de la solution de Schwarzschild", *Archive for History of Exact Sciences*, 37: 275-357, 1987.
- , "De l'influence de la gravitation sur la propagation de la lumière en théorie

- newtonienne. L'archéologie des trous noirs", *Archive for History of Exact Sciences*, 42 (4): 315-386, 1991.
- , "L'optique balistique newtonienne à l'épreuve des satellites de Jupiter", *Archive for History of Exact Sciences*, 50 (2): 117-156, 1996.
- Eisenstaedt, Jean, "Laplace: l'ambition unitaire ou les lumières de l'astronomie", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 324 (9): 565-574, 1997.
- , *Einstein et la relativité générale. Les chemins de l'espace-temps*, Éditions du CNRS, Paris, 2002.
- , "Light and Relativity, a Previously Unknown 18th Century Manuscript by Robert Blair (1748-1828)", *Annals of Science*, 62 (3): 347-376, 2005.
- Encyclopédie méthodique*, vol. II, Panckoucke, Paris, 1789.
- Euler, Leonhard, "Explicatio phaenomenorum quae a motu successivo lucis oriuntur", *Commentarii Academia Scientiarum Petropolitanae*, 11: 150-193, 1739.
- , "De la réfraction de la lumière en passant par l'atmosphère, selon les divers degrés de la chaleur et de l'élasticité de l'air", *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin. Mémoires 1754*, t. X, 1757, pp. 131-172.
- , *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*, t. I, Academia Imperial de Ciencias, San Petersburgo, 1768 (reimpr. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2003.) [Version en español: *Cartas a una princesa de Alemania*, ed. de Carlos Mínguez Pérez, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1990.]
- Fizeau, Armand-Hippolyte, "Acoustique et optique", sesión del 23 de diciembre de 1848, *Mémoires de la Société Philomathique*, publicadas por la Société Philomathique con motivo del centenario de su fundación (1788-1888). [Véase también: *Extraits des procès-verbaux des séances pendant l'année 1848*, Société Philomathique de Paris, Imprimerie de Cosson, Paris, 1848, pp. 81-83. Disponible en philomathique.org.]
- , "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 33: 349-355, 1851.
- , "Remarques à l'occasion d'un passage du rapport verbal de M. Faye, du 20 septembre dernier, au déplacement des raies du spectre par le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 69: 743, 1869.
- , "Des effets du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière", *Annales de chimie et de physique*, 19: 211-221, 1870.
- , "Nouvelles remarques concernant le déplacement des raies spectrales par le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 70: 1062-1066, 1870.
- Fizeau, Armand-Hippolyte, "Grand prix des sciences mathématiques", *Les Comptes*

- Rendus de l'Académie des Sciences*, 79: 1531-1534, 1874.
- Fontenelle, Bernard Le Bouyer de, "Histoire de l'Académie Royale des Sciences depuis son établissement en 1666 jusqu'à 1686", *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, vol. 1, G. Martin/J.-B. Coignard hijo/H.-L. Guerin, París, 1733, pp. 212-216.
- , "Sur une aberration apparente des fixes", *Académie des Sciences: histoire pour 1738*, Imprimerie Royale, París, 1740, pp. 76-83.
- Foucault, Léon, "Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau. Projet d'expérience sur la vitesse de propagation du calorique rayonnant", *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 30: 551-560, 1850.
- Frankel, Eugene, "Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light: The Science and Politics in Physics", *Social Studies of Science*, 2 (6): 141-184, 1976.
- Fresnel, Augustin, "Lettre de M. Fresnel à M. Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique", *Annales de chimie et de physique*, 9: 57-66, 1818.
- , *Œuvres complètes*, 3 vols., comp. de Henri de Sénarmont, Émile Verdet y Léonor Fresnel, Imprimerie Impériale, París, 1866-1870.
- Galilei, Galileo, *Sidereus Nuncius*, Thomas Baglioni, Venecia, 1610 (versión en francés: *Le Messager des étoiles*, trad. de Fernand Hallyn, Seuil, París, 1992). [Versión en español: Galileo Galilei / Johannes Kepler, *La gaceta sideral / Conversación con el mensajero sideral*, ed. de Carlos Solís Santos, Alianza, Madrid, 2007.]
- , *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. de René Fréreau y François de Gandt, Seuil, París, 1992. [Versión original: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Giovan Battista Landini, Florencia, 1632. Versión en español: *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano*, ed. de Antonio Beltrán Marí, Alianza, Madrid, 1994.]
- , *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, trad. de Maurice Clavelin, puf, París, 1995. [Versión original: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e ai moti locali*, Lodewijk Elsevier, Lovaina, 1638. Versión en español: *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, trad. de José San Román Villasante, Losada, Buenos Aires, 1945.]
- Gamow, George, *Mr. Tompkins in Wonderland*, Cambridge University Press, Cambridge, 1939 (versión en francés: *M. Tompkins au pays des merveilles*, trad. de Geneviève Guéron, Dunod, París, 1953.) [Versión en español: *El nuevo breviario del señor Tompkins*, revisado y actualizado por Russell Stannard, trad. de Francisco Rebolledo, FCE, México, 2009.]
- Geikie, Archibald, *Memoir of John Michell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1918.
- Gibbons, Garry, "Black Holes Are Hot", *New Scientist*, 69 (982): 54-56, 1976.
- Gillispie, Charles Coulston (dir.), *Dictionary of Scientific Biography*, 16 vols., Charles

- Scribner's Son, Nueva York, 1970-1980.
- Gillmor, C. Stewart, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*, Princeton University Press, Princeton, 1971.
- Goupil, Michelle, *Du flou au clair? Histoire de l'affinité chimique*, Les éditions du CTHS, Paris, 1991.
- , *Lavoisier et la révolution chimique*, Sabix-École Polytechnique, Paris, 1992.
- Grant, Robert, *History of Physical Astronomy*, Baldwin, Londres, 1852.
- Guerlac, Henry, "Chemistry as a Branch of Physics: Laplace's Collaboration with Lavoisier", *Historical Studies in Physical Sciences*, 7: 193-276, 1976.
- Hall, Alfred Rupert, "Le problème de la vitesse de la lumière dans l'œuvre de Newton", en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, Paris, 1978, pp. 179-194.
- , *All Was Light: An Introduction to Newton's "Opticks"*, Clarendon Press, Oxford, 1993.
- Halley, Edmund, "Some Remarks on the Allowances to Be Made in Astronomical Observations for the Refraction of the Air", *Philosophical Transactions*, 31: 169-172, 1721.
- Harrison, Edward R., *Le Noir de la nuit*, Seuil, Paris, 1990.
- Hearnshaw, John B., *The Analysis of Starlight: One Hundred and Fifty Years of Astronomical Spectroscopy*, Cambridge University Press, Cambridge / Nueva York, 1986.
- , "Doppler and Vogel. Two Notable Anniversaries in Stellar Astronomy", *Vistas in Astronomy*, 35: 157-177, 1992.
- Herschel, William, "Observation on Dr. Priestley's Optical Desideratum — What Becomes Light?", 1780, en J. L. E. Dreyer (comp.), *The Scientific Papers of Sir William Herschel*, Dreyer, Londres, 1912 (The Royal Society, pp. LXVIII-LXXVIII. *Royal Astronomical Society*, Ms. Real 23, 6/9).
- , "Catalogue of Double Stars", *Philosophical Transactions*, 72: 112-162, 1782.
- Herschel, William, "Experiments on the Solar, and on the Terrestrial Rays that Occasion Heat; with A Comparative View of the Laws to Which Light and Heat, or Rather the Rays Which Occasion Them, Are Subject, in Order to Determine Whether They Are the Same, or Different", *Philosophical Transactions*, 90: 293-326, 1800.
- , "Catalogue of 500 New Nebulae, Nebulous Stars, Planetary Nebulae, and Clusters of Stars; with Remarks on the Heavens", *Philosophical Transactions*, 92: 477-528, 1802.
- Hirosige, Tetu, "The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7: 3-82, 1976.
- Hladik, Jean, *Comment le jeune et ambitieux Einstein s'est approprié la relativité restreinte de Poincaré*, Ellipses, Paris, 2004.
- Hoffmann, Banesh, *Relativity and Its Roots*, Scientific American Books, Nueva York,

- 1983.
- Holton, Gerald, *L'Imagination scientifique*, trad. de J. F. Roberts, Gallimard, París, 1981. [Versión original en inglés: *The Scientific Imagination: Case Studies*, Cambridge University Press, Cambridge, 1978. Versión en español: *La imaginación científica*, trad. de Juan José Utrilla, FCE, México, 1985.]
- , “Introduction. Einstein and the Shaping of Our Imagination”, en Gerald Holton y Yehuda Elkana (comps.) *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives. The Centennial Symposium in Jerusalem*, Princeton University Press, Princeton, 1982, pp. VII-XXXII.
- , y Yehuda Elkana (comps.), *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives. The Centennial Symposium in Jerusalem*, Princeton University Press, Princeton, 1982.
- Homet, Jean-Marie, *Astronomie et astronomes en Provence, 1680-1730*, Édisud, Aix-en-Provence, 1982.
- Hooke, Robert, *Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses, with Observations and Inquiries Thereupon*, J. Martyn and J. Allestry, Londres, 1665 (reimpr. Dover Publications, Nueva York, 1961; Science Heritage Ltd, Lincolnwood, 1987).
- Hooke, Robert, *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observations*, John Martyn, Londres, 1674.
- Hoskin, Michael A., *William Herschel and the Construction of the Heavens*, Oldbourne Press, Londres, 1963.
- Huggins, William, “Further Observations on the Spectra of Some of the Stars and Nebulae, with an Attempt to Determine Therefrom Whether These Bodies Are Moving towards or from the Earth, Also Observations on the Spectra of the Sun and of Comets II”, *Philosophical Transactions*, 158: 529-564, 1868.
- Huygens, Christiaan, *Traité de la lumière avec un discours de la cause de la pesanteur*, Gressner & Schramm, Leipzig, 1690 (reed. Gauthier-Villars, París, 1920; Dunod, París, 1992).
- Jaki, Stanley L., “Johann Georg von Soldner and the Gravitational Bending of Light, with an English Translation of His Essay on It Published in 1801”, *Foundations of Physics*, 8 (11-12): 927-950, 1978.
- Janssen, Michel, y John Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, en Sandro Petruccioli (comp.), *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2004.
- Jungnickel, Christa, y Russell McCormmach, *Cavendish: The Experimental Life*, Bucknell, Cranbury, Nueva Jersey, 1999.
- Kittel, Charles, Walter D. Knight y Malvin A. Ruderman, *Mechanics, Berkeley Physics Course*, McGraw-Hill, Nueva York, 1965 (versión en francés: *Cours de physique de Berkeley*, t. I: *Mécanique*, trad. de Pierre Lallemand, Armand Colin, París, 1972.)
- Kottler, Friedrich, “Considérations de critique historique sur la théorie de la relativité. 1.

- De Fresnel à Lorentz. 2. Henri Poincaré et Albert Einstein”, *Scientia*, 18: 231-242, 301-316, 1924.
- Koyré, Alexandre, *Études galiléennes*, vol. III: *Galilée et la loi d’inertie*, Hermann, París, 1939. [Versión en español: *Estudios galileanos*, Siglo XXI, México, 1980.]
- Kuhn, Thomas S., *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, París, 1972. [Versión original en inglés: *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1962. Versión en español: *La estructura de las revoluciones científicas*, 4ª ed., trad. de Carlos Solís, FCE, México, 2013.]
- La Cotardière, Philippe de, *Dictionnaire de l’astronomie*. Larousse, París, 1987.
- Lalande, André, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, 8ª ed., puf, París, 1960. [Versión en español: *Vocabulario técnico y crítico de la filosofía*, 2ª ed., El Ateneo, Buenos Aires, 1967.]
- Landáu, Lev, y Evgueni Lifshitz, *Physique théorique*, vol. I: *Mécanique*, Ediciones en Lenguas Extranjeras [Editorial Mir], Moscú, 1960. [Versión en español: *Física teórica*, vol. I: *Mecánica*, Reverté, Barcelona, 1970.]
- Laplace, Pierre-Simon, *Théories du mouvement et de la figure elliptique des planètes*, P. D. Pierres, París, 1784.
- Laplace, Pierre-Simon, *Exposition du système du monde*, 2 vols., Imprimerie du Cercle-Social, París, 1796.
- , “Beweis des Satzes, dass die anziehende Kraft bey einem Weltkörper so gross seyn könne, dass das Licht davon nicht ausströmen kann”, *Allgemeine Geographische Ephemeriden*, 4: 1-6, 1799.
- , *Traité de mécanique céleste*, t. IV, Courcier, París, 1805.
- , *Exposition du système du monde*, 3ª ed., Courcier, París, 1808.
- , *Exposition du système du monde*, 4ª ed., Mme. Ve. Courcier, París, 1813. [Versión en español: *Exposición del sistema del mundo*, edición de Javier Ordóñez y Ana Rioja, Crítica, Barcelona, 2006.]
- , *Théorie analytique des probabilités*, 2ª ed., Mme. Ve. Courcier, París, 1814.
- Lavoisier, Antoine Laurent, y Pierre-Simon Laplace, “Sur le principe de la chaleur et sur les moyens d’en mesurer les effets”, *Mémoires de physique et de chimie*, 1: 29-120, 1784, y “Mémoire sur la chaleur”, en *Histoire de l’Académie Royale de Sciences, année 1780, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, París, 1784, pp. 355- 408.
- Lenard, Philipp, “Über die Ablenkung eines Lichtstrals von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht; von J. Soldner, 1801”, *Annalen der Physik*, 65: 593-604, 1921.
- Leveugle, Jules, “Poincaré et la relativité”, *La Jaune et la Rouge*, 494: 31-51, 1994.
- , *La Relativité. Poincaré et Einstein, Planck, Hilbert. Histoire véridique de la théorie de la relativité*, L’Harmattan, París, 2004.
- Lévy-Leblond, Jean-Marc, “De la relativité à la chronogéométrie, ou pour en finir avec

- le ‘second postulat’ et autres fossiles”, conferencia, Coloquio de Cargèse, “Le temps”, enero de 2001.
- , “What if Einstein Had not Been There? A Gedankenexperiment in Science History”, en J. P. Gazeau, R. Kerner, J. P. Antoine, S. Métens y J. Y. Thibon (comps.), *Group 24: Physical and Mathematical Aspects of Symmetries. Proceedings of the 24th International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics, Paris, 15-20 July 2002*, Institute of Physics Publishing, Londres, 2003, pp. 173-182.
- Lorentz, Hendrik Antoon, “De l’influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux”, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 21 (6): 103-176, 1887.
- , *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, E. J. Brill, Leiden, 1895 (versión en inglés: “Michelson’s Interference Experiment”, en A. Einstein, H. Lorentz, H. Weyl y H. Minkowski, *The Principle of Relativity: A Collection of Original Papers on the Special and General Theory of Relativity*, Methuen and Company, Londres, 1923, pp. 1-7).
- Lorentz, Hendrik Antoon, “Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Smaller than that of Light”, *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Proceedings of the Section of Sciences*, 6 (2): 809-831, 1904 (reimpr. parcial en A. Einstein, H. Lorentz, H. Weyl y H. Minkowski, *The Principle of Relativity: A Collection of Original Papers on the Special and General Theory of Relativity*, Methuen and Company, Londres, 1923, pp. 9-34).
- , *Abhandlungen über theoretische Physik*, B. G. Teubner, Leipzig/Berlín, 1907.
- Mairan, Jean-Jacques d’Ortous de, “Troisième partie des recherches physicomathématiques sur la réflexion des corps”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences, année 1738, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, París, 1740, pp. 1-65.
- Maitte, Bernard, *La Lumière*, Seuil, París, 1981.
- Maltese, Giulio, “On the Relativity of Motion in Leonhard Euler’s Science”, *Archive for History of Exact Sciences*, 54: 319-348, 2000.
- Martin, Benjamin, *A New and Compendious System of Optics*, J. Hodges, Londres, 1740.
- Mascart, Éleuthère, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l’observateur”, *Annales Scientifiques de l’École Normale Supérieure*, 1: 157-214, 1872.
- , “Sur les modifications qu’éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l’observateur (II)”, *Annales Scientifiques de l’École Normale Supérieure*, 3: 363-420, 1874.
- , *Traité d’optique*, vol. III, Gauthier-Villars et Fils, París, 1893.
- Mayrargue, Arnaud, *L’Aberration des étoiles et l’Éther de Fresnel (1729-1851)*, tesis doctoral, Universidad de París VII, París, 1991.

- McCormmach, Russell, “John Michell and Henry Cavendish: Weighing the Stars”, *The British Journal for the History of Science*, 4 (2): 126-155, 1968.
- Melvill, Thomas, “A Letter from Mr. T. Melvil to the Rev. James Bradley with a Discourse Concerning the Cause of the Different Refrangibility of the Rays of Light”, *Philosophical Transactions*, 48: 262-268, 1754.
- , “Observations on Light and Colours”, en *Essays and Observations, Physical and Literary Essays*, vol. II, G. Hamilton y J. Balfour, Edimburgo, 1756, pp. 12-90
- Michell, John, “An Inquiry into the Probable Parallax and Magnitude of the Fixed Stars, from the Quantity of Light which They Afford Us, and the Particular Circumstances of Their Situation. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S.”, *Philosophical Transactions*, 57: 234-264, 1767.
- , “On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of their Light, in Case Such a Diminution Should Be Found to Take Place in Any of Them, and Such other Data Should Be Procured from Observations, as Would Be Farther Necessary for that Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.”, *Philosophical Transactions*, 74: 35-57, 1784.
- Miller, Arthur I., *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading, 1981.
- Minkowski, Hermann, “Raum und Zeit”, en *Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, B. G. Teubner, Leipzig, 1909, pp. 75-88 (conferencia presentada durante el 80º Congreso de Naturalistas, Colonia, 21 de septiembre de 1908). Versión en inglés: “Space and Time”, en A. Einstein, H. Lorentz, H. Weyl y H. Minkowski, *The Principle of Relativity: A Collection of Original Papers on the Special and General Theory of Relativity*, Methuen and Company, Londres, 1923, pp. 73-91.
- Newburgh, Ronald G., “Fresnel Drag and the Principle of Relativity”, *Isis*, 65 (3): 379-386, 1974.
- Newton, Isaac, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londres, 1687. [Versión en español: *Principios matemáticos de la filosofía natural*, trad. de Eloy Rada García, Alianza, Madrid, 2011.]
- , *Opticks*, Londres, 1704.
- , *Traité d'optique sur les réflexions, réfractions, inflexions, et les couleurs de la lumière*, Chez Montalant, París, 1722 (versión en francés del Sr. Coste a partir de la 2ª ed., aumentada por el autor; reimpr. Gauthier-Villars, París, 1955).
- , *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy & His System of the World*, trad. de Andrew Motte, B. Motte, Londres, 1729 (reimpr. University of California Press, Berkeley, 1962).
- , *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 2ª ed., trad. de Émilie du Châtelet, comentarios de A.-C. Clairaut, Desaint et Saillant, Lambert, París, 1759 (reimpr. facs. Éditions Jacques Gabay, París, 1990).

- , *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton: A Selection from the Portsmouth Collection in the University Library, Cambridge*, comp. y trad. de A. Rupert Hall y Marie Boas Hall, Cambridge University Press, Cambridge, 1962.
- North, John D., *The Universal Frame*, The Hambledon Press, Londres, 1989.
- Pedersen, Kurt Møller, “Roger Joseph Boscovich and John Robison on Terrestrial Aberration”, *Centaurus: International Magazine of the History of Mathematics, Science and Technology*, 24: 335-345, 1980.
- , “Une mission astronomique de Jean Picard: Le voyage d’Uraniborg”, en Guy Picolet (comp.), *Jean Picard et les débuts de l’astronomie de précision au XVII^e siècle*, Éditions du CNRS, París, 1987, pp. 175-203.
- , “Water-Filled Telescopes and the Pre-History of Fresnel’s Ether Dragging”, *Archive for History of Exact Sciences*, 54 (6): 499-564, 2000.
- Picard, Jean, *Voyage d’Uraniborg, ou observations astronomiques faites en Dannemarck*, Imprimerie Royale, París, 1680 (también en *Mémoires de l’Académie Royale des Sciences*, t. VII, parte I, 1729, pp. 193-230).
- Pietrocola Pinto de Oliveira, Maurício, *Élie Mascart et l’optique des corps en mouvement*, tesis doctoral, Universidad de París VII, París, 1992.
- Poincaré, Henri, *Électricité et optique: la lumière et les théories électrodynamiques. Leçons professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899*, 2^a ed. rev. y aum., G. Carré y C. Naud, París, 1901.
- , *La Science et l’Hypothèse*, Flammarion, París, 1902. [Versión en español: *Ciencia e hipótesis*, trad. de Alfredo B. Besio y José Banfi, Espasa Calpe, Madrid, 2002.]
- , “L’état actuel et l’avenir de la physique mathématique”, *Bulletin des sciences mathématiques*, 28: 302-324, 1904.
- , “Sur la dynamique de l’électron”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 140: 1504-1508, 1905.
- , “Sur la dynamique de l’ électron”, *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, 21: 129-176, 1906.
- Potier, Alfred, “Conséquences de la formule de Fresnel relative à l’entraînement de l’éther par les milieux transparents”, *Journal de physique théorique et appliquée*, 3: 201-204, 1874.
- Prat, Roland, *L’Optique*, Seuil, París, 1962.
- Priestley, Joseph, *The History and Present State of Discoveries Relating to Vision, Light and Colour*, 2 vols., J. Johnson, Londres, 1772 (reimpr., Kraus Reprint Co., Millwood, Nueva York, 1978).
- Rigaud, Stephen Peter, *Miscellaneous Works and Correspondence of the Rev. James Bradley*, Oxford University Press, Oxford, 1832 (reimpr. Johnson Reprint Corporation, Nueva York, 1972).
- Ritter, Johann Wilhelm, “4. Von Hern J. W. Ritter in Jena”, *Annalen der Physik*, 7 (3): 373-379, 1801.
- , “6. Von den Herren Ritter und Böckmann”, *Annalen der Physik*, 7 (4):527,

- 1801.
- Robison, John, “On the Motion of Light, as Affected By Refracting and Reflecting Substances, which Are also in Motion”, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2 (2): 83-111, 1790.
- , “Optics”, *Encyclopædia Britannica*, 3^a ed., t. XIII, Edimburgo, 1797, pp. 231-364.
- Rømer, Ole Christensen, “Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l’Académie royale des sciences”, *Journal des Sçavans*, 7: 223-236, 1676.
- Rosenberger, Ferdinand, *Isaac Newton und seine physikalischen Principien*, Barth, Leipzig, 1895.
- Rosmorduc, Jean, “Les mesures optiques de la lumière au XIX^e siècle”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978, pp. 247-263.
- , Vinca Rosmorduc y Françoise Dutour, *Les Révolutions de l’optique et l’Œuvre de Fresnel*, Vuibert, París, 2004.
- Schaffer, Simon, “John Michell and Black Holes”, *Journal for History of Astronomy*, 10: 42-43, 1979.
- Schofield, Robert Edwin, *The Lunar Society of Birmingham*, Oxford University Press, Oxford, 1963.
- “Séance du lundi 4 septembre 1809”, *Procès-verbaux des séances de l’Académie des sciences*, IV: *An 1808-1811*, Imprimerie de l’Observatoire d’Abbadia, Hendaya, 1913, pp. 243-252.
- Sesmat, Augustin, *L’optique des corps au repos*, Hermann, París, 1937 (reimpr. en *Le système absolu classique et les mouvements réels*, Hermann, París, 1937, pp. 365-484).
- , *L’optique des corps en mouvement*, Hermann, París, 1937 (reimpr. en *Lesystème absolu classique et les mouvements réels*, Hermann, París, 1937, pp. 485-613).
- ’s Gravesande, Willem Jacob, *Mathematical Elements of Natural Philosophy, confirmed by Experiments; or an Introduction to Sir Is. Newton’s Philosophy*, 2 vols., 6^a ed., trad. de J. T. Desaguliers, W. Innys, T. Longman y T. Shewell, Londres, 1747. [Versión original: *Physices elementa mathematica, experimentis confirmata, sive introductio ad philosophiam Newtonianam*, Leiden, 1720.]
- Shapiro, Alan E., “Beyond the Dating Game: Watermark Clusters and the Composition of Newton’s *Opticks*”, en P. M. Harman, A. E. Shapiro y D. T. Whiteside, *The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the History of the Exact Sciences in Honour of D. T. Whiteside*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992, pp. 181-227.
- , *Fits, Passions, and Paroxysms: Physics, Method, and Chemistry and Newton’s Theories of Colored Bodies and Fits of Easy Reflection*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

- Short, James, nota al texto de T. Melvill, “A Letter from Mr. T. Melvill to the Rev. James Bradley with a Discourse Concerning the Cause of the Different Refrangibility of the Rays of Light”, *Philosophical Transactions*, 48: 268-270, 1754.
- Smith, Robert, *A Compleat System of Opticks, in four Books, viz a Popular, a Mathematical, a Mechanical and a Philosophical Treatise*, Cornelius Crownfield, Cambridge, 1738.
- , *Cours complet d’optique*, 2 vols., trad. de L. P. Pézenas, C. A. Jombert/C. Saillant, París, 1767.
- , *Traité d’optique*, 2 vols., trad. de Duval Leroy, R. Malassis, Brest / Durand, París, 1767.
- Soldner, Johann G. von, “Etwas über die relative Bewegung der Fixsterne; nebst einem Anhang über die Aberration derselben”, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1803*, G. A. Lange, Berlín, 1800, pp. 185-194.
- , “Ueber die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbei geht”, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1804*, G. A. Lange, Berlín, 1801, pp. 161-172; reimpr. como “Über die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht; mit einer Vorbemerkung von P. Lenard”, *Annalen der Physik*, 370 (15): 593-604, 1921.
- Speiser, David, “Œuvre d’Euler en optique physique”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978, pp. 207-224.
- Speziali, Pierre (comp.), *Albert Einstein-Michele Besso. Correspondance 1903-1955*, Hermann, París, 1972.
- Stachel, John, “History of Relativity”, en Laurie M. Brown, Abraham Pais y sir Brian Pippard (comps.), *Twentieth Century Physics*, t. 1., Institute of Physics Publishing/American Institute of Physics Press, Bristol y Filadelfia / Nueva York, 1995, pp. 249-356.
- Stachel, John, *Einstein from B to Z*, Birkhäuser, Boston, 2002.
- Steffens, Henry John, *The Development of Newtonian Optics in England*, Science History Publication, Nueva York, 1977.
- Stokes, George Gabriel, “On Fresnel’s Theory of Aberration of Light”, *Philosophical Magazine*, 28 (185): 76-81, 1846.
- “Sur une aberration apparente des fixes”, en *Histoire de l’Académie Royale de Sciences, année 1737, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, París, 1740, pp. 76-83.
- Swenson, Loyd S., *The Ethereal Aether. A Descriptive History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930*, University of Texas Press, Austin, 1972.
- Taton, René (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978.
- , “Arago et l’Académie des sciences”, en Jean Sagnes (comp.), *François*

- Arago. *Actes du colloque national des 20, 21 et 22 octobre 1986*, Universidad de Perpiñán, Perpiñán, 1987, pp. 23-41.
- Thomson, Thomas, *History of the Royal Society from the Institution to the End of the Eighteenth Century*, Robert Baldwin, Londres, 1812.
- Turnbull, Herbert Westren, *The Correspondence of Isaac Newton*, Cambridge University Press, Cambridge, 1959-1977.
- Verdet, Émile, *Conférences de physique faites à l'École normale par É. Verdet*, comp. de M. D. Gernez, Imprimerie Nationale, París, 1872.
- Verdet, Jean-Pierre, "Huygens et la découverte de Roemer", en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978, pp. 169-178.
- Vignolles, Hélène, "La distance des étoiles au XVIII^e siècle: l'échelle des magnitudes de John Michell", *Archive for History of Exact Sciences*, 55: 77-101, 2000.
- Voigt, Woldemar, "Ueber das Doppler'sche Princip", en *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg August Universität zu Göttingen*, Dieterische Verlags-Buchhandlung, Gotinga, 1887, pp. 41-51.
- Westfall, Richard S., *Newton, 1642-1727*, trad. de Marie-Anne Lescouret, Flammarion, París, 1994 (versión original en inglés: *Never at Rest*, Cambridge University Press, Cambridge, 1980).
- Wheatstone, Charles, "An Account of Some Experiments to Measure the Velocity of Electricity and the Duration of Electric Light", *Philosophical Transactions*, 124: 583-591, 1834.
- Whiteside, Derek Thomas, "Kepler, Newton and Flamsteed on Refraction through a 'Regular Aire': The Mathematical and the Practical", *Centaurus*, 24: 288-315, 1980.
- Whittaker, Edmund T., *A History of the Theories of Aether and Electricity*, 2 vols., Thomas Nelson, Edimburgo, 1951-1953 (2^a ed. de *A History of the Theories of Aether and Electricity from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century*, Longmans, Green and Co., Londres, 1910).
- Wollaston, William Hyde, "A Method of Examining Refractive and Dispersive Powers by Prismatic Reflection", *Philosophical Transactions*, 92: 365-380, 1802.
- "1676. Mathématique. Astronomie", en *Histoire de l'Académie Royale des Sciences depuis son établissement en 1666 jusqu'à 1686*, Académie Royale des Sciences, G. Martin / J. B. Goignard hijo / H.-L. Guerin, París, 1733, pp. 212-216. [Disponible en catalog.hathitrust.org.]

ÍNDICE ONOMÁSTICO

- Adams, Walter Sydney (1876-1956), astrofísico estadounidense: 105, 112n, 246-247
- Airy, George Biddell (1801-1892), astrónomo inglés: 144
- Alembert, Jean Le Rond d' (1717-1783), matemático y filósofo francés: 24, 27, 68, 72
- Arago, François Dominique (1786-1853), astrónomo, físico y político francés: 50, 74, 81, 85n-86, 98-100, 108, 129, 132-133, 137, 143-144, 147-171, 174-176n, 177-178, 182-184, 187, 195-202, 204-209, 212, 214-215, 225, 236, 243-244, 249-250
- Auzout, Adrien (1622-1691), astrónomo francés: 38
- Babinet, Jacques (1794-1872), físico francés: 188, 205-206
- Bernoulli, Jean II (1710-1790), matemático suizo: 186
- Bessel, Friedrich Wilhelm (1784-1846), astrónomo alemán: 64, 128
- Besso, Michele Angelo (1873-1955), experto suizo, amigo de Einstein: 227n-228n
- Biot, Jean-Baptiste (1774-1862), físico francés: 50, 58n-59n, 62, 77n-78n, 86, 147, 150, 152, 154-155, 165-166n, 170, 173
- Bird, John (1709-1776), fabricante de instrumentos inglés: 90, 157-158
- Blair, Robert (1748-1828), astrónomo escocés: 11-12, 50, 86, 98-100, 107-108, 125-148, 154-157, 162, 167-169, 187n, 191, 193-199, 206-209, 211n-215, 225, 237-238, 243-246, 248-250
- Bode, Johann Elert (1747-1826), astrónomo alemán: 115
- Borda, Jean-Charles (1733-1799), físico francés: 150
- Bošković, Ruder Josip (1711-1787), filósofo natural dalmata: 84, 123n, 144, 154
- Bouvard, Alexis (1767-1843), astrónomo francés: 150, 152
- Bradley, James (1693-1762), astrónomo inglés: 63-64, 66-69, 70n, 73-75, 82-85, 88, 91, 94, 98, 131-132, 154-155, 176, 204-205, 250
- Brahe, Tycho (1546-1601), astrónomo danés: 38, 56, 64-65
- Bréguet, Louis (1804-1883), constructor de instrumentos científicos francés: 183
- Brewster, David (1781-1868), óptico escocés: 126
- Bucherer, Alfred Heinrich (1863-1927), físico alemán: 26
- Buffon, Georges Louis Leclerc, conde de (1707-1788), físico francés: 121-122
- Byss-Ballot, Christophorus Henricus Dedericus (1817-1890), meteorólogo neerlandés: 188, 190
- Cassini, Jean-Dominique (1625-1712), astrónomo de origen italiano: 37-38, 40, 45, 59, 63, 77-78, 91, 152
- Cauchy, Augustin Louis (1789-1857), matemático francés: 205
- Cavendish, Henry (1731-1810), físico y químico inglés: 87-89, 96-97, 101-102, 108, 113-114, 125, 133
- Clairaut, Alexis (1713-1765), matemático francés: 34, 48-56, 68-69, 74, 76, 81, 86, 107, 129, 144
- Copérnico, Nicolás (1473-1543), astrónomo polaco: 28, 64, 69, 73, 91
- Cornu, Marie Alfred (1841-1902), físico francés: 184, 188n, 190-191, 194-195n, 211, 213n, 217
- Coulomb, Charles de (1736-1806), físico francés: 97n
- Courtivron, Gaspard Le Compasseur de Créqui-Montfort, marqués de (1715-1785), físico francés: 81
- Cramer, Gabriel (1704-1752), matemático suizo: 79

Delambre, Jean-Baptiste (1749-1822), astrónomo francés: 74, 98, 153

Descartes, René (1596-1650), filósofo, matemático y físico francés: 13, 16-17, 31-34, 36-37, 42, 44, 46, 48, 50-52, 54, 56, 76, 154

Dollond, John (1706-1761), óptico inglés: 44, 56, 82, 107, 126, 133, 139, 167

Doppler, Christian (1803-1853), físico austriaco: 12, 98, 100-101, 107, 129, 133-134, 136-137, 139, 143, 147, 169, 178, 186-192, 194-196, 198-200, 207, 209-216, 219, 236, 245-246, 249, 251-252

Drude, Paul Karl Ludwig (1863-1906), físico alemán: 192

Eddington, Arthur Stanley (1882-1944), astrónomo inglés: 247

Ehrenfest, Paul (1880-1933), físico teórico neerlandés: 231n

Einstein, Albert (1879-1955), físico de origen alemán: 11-13, 15, 17, 19-21, 25-26, 100, 105-106, 112n, 120, 130-131, 179-181, 186n, 192, 196n, 219, 221-222, 224-241, 243-250, 252

Euler, Leonhard (1707-1783), matemático, físico y astrónomo suizo: 49-51, 61, 91, 95-96n, 99n, 126, 129, 132-133n, 144, 186, 245

Faraday, Michael (1791-1867), químico y físico inglés: 229

Fizeau, Armand Hippolyte Louis (1819-1896), físico francés: 12, 98, 100-101, 107-108, 129, 133-134, 136-137, 143, 147, 168-169, 178, 183-186, 187n-188, 190-200, 202-203, 206-207, 209-219, 229, 245-246, 251-252

Flamsteed, John (1646-1719), astrónomo inglés: 46, 57-61, 63, 77-78

Fontenelle, Bernard le Bovier de (1657-1757), filósofo francés: 40n, 63-64

Foucault, Jean Bernard Léon (1819-1868), físico experimental francés: 36, 183-185, 202

Fraunhofer, Joseph von (1787-1826), óptico alemán: 91n, 210

Fresnel, Augustin Jean (1788-1827), físico francés: 11, 49-50, 99-100, 118, 147, 166, 168-181, 184, 186-187, 191, 198, 200, 202-209, 213-215, 218-220, 225, 250

Freundlich, Erwin Finlay (1885-1964), astrónomo alemán: 247

Galileo [Galileo Galilei] (1564-1642), astrónomo y físico italiano: 11, 16-19, 23-24, 28-31, 36-37, 94, 131, 154, 178n, 221, 225, 230-231, 234, 236, 238, 240-241, 243, 245, 250

Gassendi [Pierre Gassend] (1592-1655), filósofo y astrónomo francés: 37

Gemma Frisius (1508-1555), matemático y geógrafo belga: 28

Gregory, David (1659-1708), matemático y astrónomo escocés: 77-78

Gregory, James (1638-1675), matemático y astrónomo escocés: 91-92

Habicht, Johann Conrad (1876-1958), profesor de física suizo, amigo de Einstein: 227, 236-237n

Halley, Edmond (1656-1742), astrónomo inglés: 46, 61, 63, 143

Harrison, John (1693-1776), relojero inglés: 28, 90

Heaviside, Oliver (1824-1910), matemático y físico inglés: 129

Herschel, Caroline (1750-1848), astrónoma inglesa, hermana de William Herschel: 88-89

Herschel, William (1738-1822), astrónomo inglés: 88-90, 92, 94-95, 108, 110, 113-114, 123n, 125, 128, 146-147, 163, 165, 190

Hertz, Heinrich (1857-1894), físico alemán: 219

Hoek, Martinus (1834-1873), astrónomo neerlandés: 207

Hoffmann, Banesh (1906-), físico teórico estadounidense: 178-180, 203

Hooke, Robert (1635-1703), astrónomo y matemático inglés: 32, 42-46, 64, 67

Huggins, William (1824-1910), astrofísico inglés: 168n, 211-213n

Huygens, Christiaan (1629-1695), físico, matemático y astrónomo neerlandés: 28, 31-33, 36-38, 49-50, 57, 91, 182, 250

Jamin, Jules (1818-1886), físico francés: 217

Kepler, Johannes (1571-1630), astrónomo alemán: 20, 28, 30, 38, 41, 46, 52, 58-60, 71, 95, 112

Klein, Christian Felix (1849-1925), matemático alemán: 26

Laplace, Pierre Simon; marqués de (1749-1827), astrónomo, matemático y físico francés: 48, 50, 62, 86, 92n, 103, 106, 115-118, 120-124, 147-150, 152-155, 165, 173

Larmor, Joseph (1857-1942), físico teórico irlandés: 221n

Laue, Max von (1879-1960), físico teórico alemán: 239

Lavoisier, Antoine-Laurent (1743-1794), químico francés: 54, 100, 121, 123

Lenard, Philipp (1862-1947), físico alemán: 244, 248

Le Verrier, Urbain (1811-1877), astrónomo francés: 105

Lockyer, sir Joseph Norman (1836-1920), astrofísico inglés: 211

Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928), físico neerlandés: 11-12, 131, 181, 190-191n, 200, 215, 218-222, 227-228, 230, 233-236, 238-239, 241, 243-244, 250

Mach, Ernst (1838-1916), físico y filósofo alemán: 210

Mairan, Jean-Jacques d'Ortous de (1678-1771), astrónomo francés: 79-82, 84-85, 145, 163

Malebranche, Nicolas (1638-1715), filósofo francés: 186

Malus, Étienne Louis (1775-1812), físico francés: 86, 165n, 170, 175n

Mascart, Éleuthère Élie Nicolas (1837-1908), físico francés: 168-169n, 178-179, 199-200, 204, 206-209, 214-215n, 217

Maskelyne, Nevil (1732-1811), astrónomo inglés: 97, 108, 113-114

Maupertuis, Pierre Louis Moreau de (1698-1759), matemático y físico francés: 70, 72

Maxwell, James Clerk (1831-1879), físico escocés: 11, 168, 178, 212-216, 219, 229, 231, 236, 238, 244, 250

Méchain, Pierre (1744-1804), astrónomo francés: 152

Melville, Thomas (1726-1753), astrónomo escocés: 80, 82-85, 210

Michell, John (1724-1793), astrónomo inglés: 11, 50, 86-90, 92-96, 97n-118, 120, 123, 125, 129-136, 140-141, 143, 145-148, 154, 156-157, 167-168, 190-191, 195-196, 198-199, 212, 214, 243-250

Michelson, Albert Abraham (1852-1931), físico estadounidense: 11, 25, 100, 129, 138, 147, 185, 199, 206-207n, 213-218, 220, 225, 229, 240, 245, 249-250

Minkowski, Hermann (1864-1909), matemático alemán: 12, 233, 238-241, 243

Molyneux, Samuel (1689-1728), astrónomo inglés: 67

Monge, Gaspard (1746-1818), matemático francés: 150

Morley, Edward Williams (1838-1923), químico y físico estadounidense: 11, 138, 214, 218, 220

Mosengeil, Kurd von (1884-1904), físico alemán: 239

Newton, sir Isaac (1642-1727), físico y matemático inglés: 11-12, 16, 19-24, 34, 36, 41-52, 54, 56-62, 76-78, 81-83, 85-88, 90-91, 92n, 95, 98-103, 105, 107-109, 115, 120-122, 124, 129-131, 135, 140, 144-145, 150, 152, 168n, 170-172, 182, 186, 192, 210, 224-225, 231, 236, 240, 242-246, 248, 250

Picard, Jean (1620-1682), astrónomo francés: 38, 40, 64-65n
 Pickering, Edward (1846-1919), astrónomo estadounidense: 212
 Planck, Max (1858-1947), físico alemán: 26, 237, 239
 Poincaré, Jules Henri (1854-1912), matemático francés: 11, 219-228, 231, 234n-235, 238-239, 241
 Poisson, Siméon Denis (1781-1840), matemático francés: 150, 153
 Priestley, Joseph (1733-1804), químico, físico y teólogo inglés: 54, 85, 89, 100-102, 108, 123

 Ritter, Johann Wilhelm (1776-1810), físico y fisiólogo alemán: 164, 190
 Robison, John (1739-1805), físico escocés: 50, 86, 144-147, 154
 Rømer, Ole Christensen (1644-1710), astrónomo danés: 37-40, 45, 63, 69, 71, 73-74, 84, 98, 131, 154

 Secchi, Pietro Angelo (1818-1878), astrónomo italiano: 211, 214
 's Gravesande, Willem Jacob (1688-1742), físico neerlandés: 73
 Short, James (1710-1768), óptico inglés: 82, 168n
 Smith, Robert (1689-1768), físico inglés: 89
 Snell van Royen, Willebrord, llamado Snellius (1580-1626), astrónomo neerlandés: 34, 50, 54
 Soldner, Johann Georg von (1776-1833), astrónomo alemán: 100, 115-120, 243, 245, 247-248
 Solovine, Moritz (1875-1958), editor científico, amigo de Einstein: 227
 Sommerfeld, Arnold (1868-1951), físico teórico alemán: 239
 Stark, Johannes (1874-1957), físico alemán: 239
 Stokes, sir George Gabriel (1819-1903), matemático y físico irlandés: 204-206, 212, 214-215, 219
 Struve, Friedrich Georg Wilhelm von (1793-1864), astrónomo ruso: 95

 Talbot, William Henry Fox (1800-1877), químico inglés: 210
 Torricelli, Evangelista (1608-1647), físico italiano: 37
 Tyndall, John (1820-1893), físico irlandés: 188

 Veltmann, Wilhelm (1832-1902), físico alemán: 179, 203, 209
 Verdet, Marcel Émile (1824-1866), físico francés: 33n, 170n, 174, 183n-184n, 186
 Vogel, Hermann Karl (1841-1907), astrónomo alemán: 211-212
 Voigt, Woldemar (1850-1919), físico alemán: 221n

 Watt, James (1736-1819), ingeniero escocés: 100
 Wheatstone, sir Charles (1802-1875), físico inglés: 182-183
 Whittaker, sir Edmund T. (1873-1956), físico inglés: 88, 204, 228n
 Wollaston, William Hyde (1766-1828), físico y químico inglés: 164, 210

 Young, Thomas (1773-1829), físico inglés: 49-50, 88, 130, 144, 147, 170-173, 185-186, 250

- ¹ A. Einstein, *La Théorie de la relativité restreinte et générale*, Bordas, París, 1976, p. 15.
- ² R. Descartes, *Principia philosophiæ*, Ludovicum Elzevirium, Ámsterdam, 1644 (versión en francés: *Œuvres et lettres*, Gallimard, París, 1958, y *Œuvres*, t. IX, Vrin, París, 1996). En lo que se refiere a las obras de Descartes, seguí la edición de 1958. Puede consultarse la reedición comentada de C. Adam y P. Tannery: René Descartes, *Œuvres*, 12 vols., Vrin, París, 1996.
- ³ I. Newton, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londres, 1687.
- ⁴ R. Descartes, *Œuvres et lettres*, *op. cit.*, p. 634; *Œuvres*, *op. cit.*, t. IX, p. 85.
- ⁵ R. Descartes, *Œuvres et lettres*, *op. cit.*, p. 633; *Œuvres*, *op. cit.*, t. IX, p. 84.
- ⁶ G. Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. del orig. italiano de René Fréreau y François de Gandt, Seuil, París, 1992.
- ⁷ A. Einstein, “Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie”, *Die Naturwissenschaften*, 6: 697-702, 1918.
- ⁸ G. Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes...*, *op. cit.*, p. 141.
- ⁹ *Ibid.*, pp. 204-205.
- ¹⁰ *Ibid.*, pp. 63-64.
- ¹¹ A. Koyré, *Études galiléennes*, t. III: *Galilée et la loi d’inertie*, Hermann, París, 1939, p. 248.
- ¹² A este respecto, véase J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale. Les chemins de l’espace-temps*, Éditions du CNRS, París, 2002.
- ¹³ I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 2^a ed., trad. de Émilie du Châtelet, comentarios de A. C. Clairaut, Desaint & Saillant y Lambert, París, 1759 (ed. facs. de Blanchard, París, 1966), p. 10.
- ¹⁴ *Id.*
- ¹⁵ *Ibid.*, pp. 10-11.
- ¹⁶ *Ibid.*, p. 12.
- ¹⁷ *Ibid.*, p. 3.
- ¹⁸ *Ibid.*, p. 17.
- ¹⁹ L. Landáu y E. Lifshitz, *Physique théorique*, t. I: *Mécanique*, Ediciones en Langues Extranjeras [Editorial Mir], Moscú, 1960, p. 12.
- ²⁰ G. Galilei, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, trad. de Maurice Clavelin, PUF, París, 1995.
- ²¹ A este respecto, véase M. Blay, *La science du mouvement. De Galilée à Lagrange*, Belin, París, 2002.
- ²² D. Diderot (dir.), *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Briasson / David / Le Breton / Durand, París, 1751-1780.
- ²³ *Ibid.*, p. 308.

²⁴ G. Holton, “Introduction. Einstein and the Shaping of Our Imagination”, en G. Holton y Y. Elkana (comps.) *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives. The Centennial Symposium in Jerusalem*, Princeton University Press, Princeton, 1982, p. xv.

²⁵ D. Diderot (dir.), *Encyclopédie, op. cit.*, vol. iv, p. 1010.

¹ Notemos que la posibilidad teórica de la simultaneidad es aquí evidente y representa un progreso. Esto será cuestionado a principios del siglo XX, en particular en el análisis hecho por Einstein (véase *infra*, capítulo XIV).

² G. Galilei, *Sidereus nuncius*, Thomas Baglioni, Venecia, 1610 (versión en francés: *Le Messager des étoiles*, trad. de Fernand Hallyn, Seuil, París, 1992).

³ J.-M. Homet, *Astronomie et astronomes en Provence, 1680-1730*, Édisud, Aix-en-Provence, 1982, p. 156.

⁴ J. D. North, *The Universal Frame*, The Hambledon Press, Londres, 1989, p. 201; S. Débarbat y C. Wilson, “The Galilean Satellites of Jupiter from Galileo to Cassini, Römer and Bradley”, en R. Taton y C. Wilson (comps.), *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989, p. 147.

⁵ G. Galilei, *Discours et démonstrations mathématiques...*, *op. cit.*, pp. 38-39.

⁶ *Ibid.*, p. 38.

⁷ *Id.*

⁸ *Id.*

⁹ *Id.*

¹⁰ *Id.*

¹¹ *Ibid.*, p. 39.

¹² *Id.*

¹³ *Id.*

¹⁴ R. Descartes, *La Dioptrique*, Jean Maire, Leyden, 1637 (otra versión: Gallimard, París, 1958, p. 181; también *Œuvres*, t. VI: *Discours de la méthode et essais*, Vrin, París, 1996, p. 83).

¹⁵ A este respecto, véase B. Maitte, *La Lumière*, Seuil, París, 1981, pp. 88-95.

¹⁶ A este respecto, véase *ibid.*, p. 156.

¹⁷ Véase por ejemplo *ibid.*, p. 155.

¹⁸ C. Huygens, *Traité de la lumière avec un discours de la cause de la pesanteur*, Gressner & Schramm, Leipzig, 1690 (reed., Gauthier-Villars, París, 1920; Dunod, París, 1992, p. 56).

¹⁹ R. Descartes, *La Dioptrique*, *op. cit.*, p. 182 (Gallimard); p. 84 (Vrin).

²⁰ *Id.*

²¹ No obstante, son esas mismas razones las que impedirán que el concepto de rigidez tenga derecho de ciudadanía en la relatividad. Es contradictoria con los principios fundamentales de la relatividad especial precisamente porque la rigidez requiere una velocidad infinita a lo largo del bastón: la velocidad de la luz es una velocidad límite, la máxima velocidad que puede alcanzarse.

²² R. Descartes, *La Dioptrique*, *op. cit.*, p. 183 (Gallimard); p. 85 (Vrin).

²³ C. Huygens, *Traité de la lumière*, *op. cit.*, p. 6, *apud* J.-P. Verdet, “Huygens et la découverte de Roemer”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, París, 1978, p. 171.

²⁴ R. Descartes, *La Dioptrique*, *op. cit.*, p. 185 (Gallimard); p. 89 (Vrin).

²⁵ A.-C. Clairaut, “Sur les explications cartésienne et newtonienne de la réfraction de la lumière”, *Histoire de l’Académie Royale de Sciences, Année 1739, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même Année*, Imprimerie Royale, Paris, 1741, p. 259.

²⁶ *Id.*

²⁷ *Apud* P. Costabel, “La propagation de la lumière sans transport de matière de Descartes à Huygens”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, Vrin, Paris, 1978, p. 87.

²⁸ *Ibid.*, p. 86.

²⁹ *Ibid.*, p. 84.

³⁰ G. D. Cassini, “De l’origine et du progrès de l’Astronomie, et de son usage dans la Géographie et dans la Navigation”, *Anciens mémoires de l’Académie Royale des Sciences*, 7: 48-52, 1693; especialmente p. 47.

³¹ La emersión es la salida de un satélite de la sombra.

³² B. L. B. Fontenelle, “Histoire de l’Académie royale des sciences depuis son établissement en 1666 jusqu’ à 1686”, *Mémoires*, vol. I, Académie Royale des Sciences, G. Martin / J.-B. Coignard hijo / H.-L. Guerin, Paris, 1733, p. 214, *apud* S. Débarbat, “La qualité des données d’observations traitées par Roemer”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, *op. cit.*, p. 146. El artículo de Rømer aparece en el mismo año de 1733 en el *Journal des sçavans*.

³³ A este respecto, véase S. Débarbat, “La qualité des données d’observations...”, *op. cit.*, p. 143.

³⁴ A este respecto, véase S. Débarbat y C. Wilson, “The Galilean Satellites of Jupiter...”, *op. cit.*, p. 154.

¹ R. S. Westfall, *Newton, 1642-1727*, trad. de Marie-Anne Lescouret, Flammarion, París, 1994, pp. 178-181.

² *Ibid.*, p. 180.

³ John Conduitt, *apud* R. S. Westfall, *Newton, 1642-1727, op. cit.*, p. 193.

⁴ John Conduitt, *apud* R. S. Westfall, *ibid.*, p. 196.

⁵ Un rayo de luz solar refractado se irisa sobre sus bordes desde que sale del prisma; desde lejos forma sobre una pantalla una banda de colores, el espectro, donde el color pasa de manera continua del rojo (el menos desviado) al amarillo, al verde, al azul y al morado. Las luces de colores así dispersadas están de alguna manera sobrepuestas en el rayo incidente, obediendo cada una por su cuenta la ley de los senos. Una nueva refracción no las dispersa más: se trata de luces “simples”, monocromáticas.

⁶ R. Hooke, *Micrographia*, J. Martyn y J. Allestry, Londres, 1665.

⁷ La aberración cromática puede corregirse aún más eficazmente con un sistema de tres lentes. Sucede lo mismo con el prisma.

⁸ La concepción de Hooke es parecida a la teoría de Grimaldi, quien descubrió la difracción: si la luz pasa por un orificio pequeño, su dirección de propagación cambia y aparecen franjas de colores. A este respecto, véase B. Maitte, *La Lumière, op. cit.*, pp. 88-95.

⁹ *Apud* A. R. Hall, “Le problème de la vitesse de la lumière dans l’œuvre de Newton”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière, op. cit.*, p. 182.

¹⁰ Carta de Isaac Newton a Henry Oldenburg, 7 de diciembre de 1675, *apud* A. R. Hall, “Le problème de la vitesse...”, *op. cit.*, p. 184.

¹¹ I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle, op. cit.*, p. 238.

¹² R. Hooke, *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observations*, John Martyn, Londres, 1674.

¹³ R. S. Westfall, *Newton, 1642-1727, op. cit.*, pp. 413-422.

¹⁴ *Ibid.*, p. 418.

¹⁵ I. Newton, *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton: A Selection from the Portsmouth Collection in the University Library, Cambridge*, comp. y trad. de A. Rupert Hall y Marie Boas Hall, Cambridge University Press, Cambridge, 1962, pp. 305-306.

¹⁶ *Ibid.*, p. 307.

¹⁷ I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle, op. cit.*, p. XVIII.

¹⁸ Un grupo de sabios que, a principios del siglo XIX, se reunirá de manera informal en Arcueil alrededor de Berthollet y Laplace.

¹⁹ De esta manera, en el contexto de la relatividad general, una geodésica isótropa, trayectoria de un rayo luminoso, generalizará el concepto de línea recta.

²⁰ Los capítulos IV a VI retoman elementos desarrollados en J. Eisenstaedt, “L’optique balistique newtonienne à l’épreuve des satellites de Jupiter”, *Archive for History of Exact Sciences*, 50 (2): 117-156, 1996.

²¹ I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle, op. cit.*, p. 239.

- ²² I. Newton, *Opticks*, Londres, 1704.
- ²³ I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, *op. cit.*, p. XIV.
- ²⁴ *Ibid.*, p. 238.
- ²⁵ L. Euler, *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*, t. I, Academia Imperial de Ciencias, San Petersburgo, 1768.
- ²⁶ *Ibid.*, pp. 37-38.
- ²⁷ *Ibid.*, pp. 32-33.
- ²⁸ A.-C. Clairaut, “Sur les explications cartésienne et newtonienne...”, *op. cit.* Para un análisis de su obra, véase J. Eisenstaedt, “L’optique balistique newtonienne...”, *op. cit.*
- ²⁹ Además, mientras que la exposición de Newton está escrita en términos geométricos, la de Clairaut lo está en términos algebraicos.
- ³⁰ A.-C. Clairaut, “Sur les explications cartésienne et newtonienne...”, *op. cit.*, p. 263.
- ³¹ *Id.*
- ³² *Id.*
- ³³ *Ibid.*, pp. 263-264.
- ³⁴ *Ibid.*, p. 264.
- ³⁵ *Id.*
- ³⁶ *Ibid.*, p. 265.
- ³⁷ *Ibid.*, p. 267.
- ³⁸ J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries Relating to Vision, Light and Colour*, 2 vols., J. Johnson, Londres, 1772.
- ³⁹ *Ibid.*, p. 331.
- ⁴⁰ De eso tratará el capítulo VI.
- ⁴¹ R. S. Westfall, *Newton, 1642-1727*, *op. cit.*, p. 578 (trad. modificada).
- ⁴² *Ibid.*, pp. 577-589.
- ⁴³ Carta de Newton a Flamsteed, 24 de octubre de 1694, *apud* J.-B. Biot, “An Account of the Rev. John Flamsteed...”, *Journal des Savants*: 156-166, 205-223, 641-754, 1836, en específico pp. 645-646, y *apud* D. T. Whiteside, “Kepler, Newton and Flamsteed on Refraction Through a ‘Regular Aire’: The Mathematical and the Practical”, *Centaurus*, 24: 288-315, 1980, en específico p. 295.
- ⁴⁴ *Id.* Evidentemente, el baroscopio es un barómetro.
- ⁴⁵ Z. Bechler, “Newton’s Search for a Mechanistic Model of Color Dispersion: A Suggested Interpretation”, *Archive for History of Exact Sciences*, 11: 1-37, 1973, en específico p. 23.
- ⁴⁶ *Ibid.*, p. 26; J.-B. Biot, “Analyse des Tables de réfraction construites par Newton, avec l’indication des procédés numériques par lesquels il a pu les calculer”, *Journal des Savants*: 735-754, 1836, en específico p. 738.

⁴⁷ D. T. Whiteside, “Kepler, Newton and Flamsteed...”, *op. cit.*, p. 303.

⁴⁸ *Id.*

⁴⁹ *Ibid.*, p. 304.

⁵⁰ Ese tipo de cosas era frecuente entonces y, me parece, lo es también ahora. ¿Cuántos físicos experimentales no son capaces de seguir con detalle las teorías que verifican, y cuántos físicos teóricos no tienen la menor idea de las técnicas que permiten verificar las teorías en las que trabajan? Esto no es ni un misterio ni un escándalo para nadie, aunque sea un punto que suele dejarse púdicamente a un lado. La oscuridad generada por la ciencia no está reservada al común de los mortales: alcanza también al científico mismo en cuanto sale del rincón de su campo de trabajo.

⁵¹ Newton supone básicamente que el gradiente del logaritmo de la densidad es proporcional a $1/r^2$, lo que equivale a suponer que la fuerza refringente se comporta como una función exponencial. Cabe mencionar la sutileza de dicho cálculo en un momento en que la función exponencial aún no ha sido definida.

⁵² E. Halley, “Some Remarks on the Allowances to Be Made in Astronomical Observations for the Refraction of the Air”, *Philosophical Transactions*, 31: 169-172, 1721.

⁵³ L. Euler, “De la réfraction de la lumière en passant par l’atmosphère, selon les divers degrés de la chaleur et de l’élasticité de l’air”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin. Mémoires 1754*, t. x: 131-172, 1756.

⁵⁴ P. S. Laplace, *Traité de mécanique céleste*, t. IV, Courcier, París, 1805.

⁵⁵ J.-B. Biot, “An Account of the Rev. John Flamsteed...”, *op. cit.*; y “Analyse des Tables de réfraction...”, *op. cit.*

¹ “Sur une aberration apparente des fixes”, *Académie des Sciences: histoire pour 1738*, Imprimerie Royale, Paris, 1740, p. 77.

² *Apud* A. R. Hall, “Le problème de la vitesse...”, *op. cit.*, p. 165.

³ *Apud* S. Débarbat y C. Wilson, “The Galilean Satellites of Jupiter...”, *op. cit.*, p. 155.

⁴ J. Bradley, “A Letter from the Reverend Mr. James Bradley [...] to Dr. Edmund Halley [...] Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix’d Stars”, *Philosophical Transactions*, 35: 637-661, 1727.

⁵ Fontenelle, “Sur une aberration...”, *op. cit.*, p. 76.

⁶ A este respecto, véase A. Berry, *A Short History of Astronomy*, John Murray, Londres, 1898, p. 360.

⁷ N. Copérnico, *De revolutionibus orbium coelestium*, Núremberg, 1543.

⁸ J. Picard, *Voyage d’Uranibourg, ou observations astronomiques faites en Dannemarck*, Imprimerie Royale, Paris, 1680, p. 18. A este respecto, véase K. M. Pedersen, “Une mission astronomique de Jean Picard: Le voyage d’Uranibourg”, en Guy Picolet (comp.), *Jean Picard et les débuts de l’astronomie de précision au XVII^e siècle*, Éditions du CNRS, Paris, 1987, pp. 175-203.

⁹ J. Bradley, “A Letter from the Reverend Mr. James Bradley...”, *op. cit.*, p. 639.

¹⁰ *Ibid.*, p. 645.

¹¹ S. P. Rigaud, *Miscellaneous Works and Correspondence of the Rev. James Bradley*, Oxford University Press, Oxford, 1832, pp. xxx-xxxii (versión en francés en C. Kittel *et al.*, *Cours de physique de Berkeley*, t. 1: *op. cit.*, p. 314).

¹² A.-C. Clairaut, “De l’aberration apparente des étoiles causée par le mouvement progressif de la lumière”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences, Année 1737, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*: 205-227, 1740.

¹³ *Ibid.*, p. 207.

¹⁴ D. Diderot (dir.), *Encyclopédie*, *op. cit.*, vol. 1, s. v. “Aberration”, pp. 25-26.

¹⁵ J. Bradley, “A Letter from the Reverend Mr. James Bradley...”, *op. cit.*, p. 660.

¹⁶ A.-C. Clairaut, “De l’aberration apparente des étoiles...”, *op. cit.*, p. 205.

¹⁷ J. Bradley, “A Letter from the Reverend Mr. James Bradley...”, *op. cit.*, p. 653.

¹⁸ Por ello, no observamos la aberración secular debida al desplazamiento (uniforme) del Sol.

¹⁹ Hay otros tipos de aberración: por ejemplo, la aberración diurna se debe a la rotación del observador junto con la Tierra.

²⁰ Cabe notar que la elipse de aberración es recorrida en el mismo sentido que la elipse terrestre, mientras que la elipse del paralaje se recorre en sentido contrario.

²¹ En el marco de esta obra, la velocidad de la luz se considera variable *a priori*. Se denota con la letra c y puede depender de diferentes factores según el contexto (velocidad de la fuente, del observador, gravitación, fuerza refringente). En ocasiones se utilizará c_0 para denotar la velocidad de emisión de la luz en el vacío, que se supone constante.

²² D. Diderot (dir.), *Encyclopédie*, *op. cit.*, vol. 1, pp. 25-26.

²³ El ángulo máximo de aberración, constante, se tiene en v/c (véase *supra* la figura v.4). Como v (la velocidad media de la Tierra) es constante, de allí se sigue que c (la velocidad de la luz) es también constante, con el margen de error de los aparatos de medición.

²⁴ W. J. 's Gravesande, *Mathematical Elements of Natural Philosophy, confirmed by Experiments; or an Introduction to Sir Is. Newton's Philosophy*, trad. de J. T. Desaguliers, 2 vols., 6ª ed., W. Innys, T. Longman y T. Shewell, Londres, 1747, p. 112.

²⁵ A.-C. Clairaut, "Sur les explications cartésienne et newtonienne...", *op. cit.*, p. 359.

²⁶ "Séance du lundi 4 septembre 1809", *Procès-verbaux des séances de l'Académie des sciences*, vol. 4: *An 1808-1811*, Imprimerie de l'Observatoire d'Abbadia, Hendaya, 1913, pp. 243-252, en específico p. 245.

²⁷ A este respecto, véase R. Grant, *History of Physical Astronomy*, Baldwin, Londres, 1852, p. 96.

²⁸ J.-B. J. Delambre, *Tables écliptiques des satellites de Jupiter d'après la théorie de M. le Marquis de Laplace, et la totalité des observations faites depuis 1662 jusqu'à l'an 1802*, Courcier, París, 1817; R. Grant, *History of Physical Astronomy*, *op. cit.*, p. 96.

²⁹ Lo que no impide que la velocidad tangencial de la Tierra intervenga en el numerador para obtener la famosa eclipse.

³⁰ No obstante, se hará explícito (gracias al éter) en el contexto de las teorías ondulatorias del siglo XIX.

³¹ A. Berry, *A Short History of Astronomy*, *op. cit.*, p. 265.

¹ Para mayores detalles, pueden consultarse: Z. Bechler, “Newton’s Search...”, *op. cit.*, y “Newton’s law of forces which are inversely as the mass: a suggested interpretation of his later efforts to normalise a mechanistic model of optical dispersion”, *Centaurus*, 18 (3): 184-222, 1974; A. E. Shapiro, *Fits, Passions, and Paroxysms: Physics, Method, and Chemistry and Newton’s Theories of Colored Bodies and Fits of Easy Reflection*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993; J. Eisenstaedt, “L’optique balistique newtonienne...”, *op. cit.*

² De Isaac Newton a John Flamsteed, 10 de agosto de 1691, *apud* J.-B. Biot, “An Account of the Rev. John Flamsteed...”, *op. cit.*, p. 212.

³ De David Gregory a Isaac Newton, 27 de agosto de 1691, *apud* H. W. Turnbull, *The Correspondence of Isaac Newton*, t. III, Cambridge University Press, Cambridge, 1959-1977, p. 165.

⁴ De David Gregory a Isaac Newton, 7 de noviembre de 1691, *apud ibid.*, t. III, p. 202, y *apud* A. E. Shapiro, “Beyond the Dating Game: Watermark Clusters and the Composition of Newton’s *Opticks*”, en P. M. Harman *et al.*, *The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the History of the Exact Sciences in Honour of D. T. Whiteside*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992, p. 218. A este respecto, véase también A. E. Shapiro, *Fits, Passions, and Paroxysms...*, *op. cit.*

⁵ De John Flamsteed a Isaac Newton, 24 de febrero de 1692, *apud* H. W. Turnbull, *The Correspondence of Isaac Newton*, *op. cit.*, t. III, p. 202; versión en francés *apud* J.-B. Biot, “An Account of the Rev. John Flamsteed...”, *op. cit.*, p. 211.

⁶ J.-J. d’O. de Mairan, “Troisième partie des recherches physico-mathématiques sur la réflexion des corps”, en *Histoire de l’Académie Royale des Sciences, année 1738, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique, pour la même année*, Imprimerie Royale, Paris, 1740, pp. 1-65.

⁷ *Ibid.*, pp. 26-27.

⁸ *Ibid.*, p. 31.

⁹ *Id.*

¹⁰ *Id.*

¹¹ *Id.*

¹² *Ibid.*, p. 32; las cursivas son de De Mairan.

¹³ *Ibid.*, p. 34.

¹⁴ La refringencia es básicamente el índice de refracción, que depende del color. Se tiene la siguiente: $(35 \times 60) / 386 \approx 5$ y $(40 \times 60) / 386 \approx 6$; $(35 \times 60) / 155 \approx 13$ y $(40 \times 60) / 155 \approx 15$. Para más detalles, véase J. Eisenstaedt, “L’optique balistique newtonienne...”, *op. cit.*, p. 135.

¹⁵ *Id.*

¹⁶ T. Melvill, “A Letter from Mr. T. Melvil to the Rev. James Bradley with a Discourse Concerning the Cause of the Different Refrangibility of the Rays of Light”, *Philosophical Transactions*, 48: 262-268, 1754, en específico p. 268.

¹⁷ J. Short, nota al texto de T. Melvill, “A Letter from Mr. T. Melvil to the Rev. James Bradley, D. D. F. R. S. with a Discourse concerning the Cause of the Different Refrangibility of the Rays of Light”, *Philosophical Transactions*, 48: 261-270, 1753.

¹⁸ *Ibid.*, p. 268.

¹⁹ T. Melvill, “A Letter from Mr. T. Melvil to the Rev. James Bradley...”, *op. cit.*, p. 266.

²⁰ T. Melvill, “Observations on Light and Colours”, *Essays and Observations, Physical and Literary Essays*, vol. II, G. Hamilton y J. Balfour, Edimburgo, 1756, pp. 51-52; “A Letter from Mr. T. Melvil to the Rev. James Bradley...”, *op. cit.*, pp. 266-267.

²¹ S. P. Rigaud, *Miscellaneous Works and Correspondence of the Rev. James Bradley*, *op. cit.*, p. 486.

²² De Melvill a Bradley, 2 de junio de 1753, *apud* S. P. Rigaud, *Miscellaneous Works and Correspondence of the Rev. James Bradley*, *op. cit.*, p. 485.

²³ A este respecto, consúltese K. M. Pedersen, “Water-Filled Telescopes and the Pre-History of Fresnel’s Ether Dragging”, *Archive for History of Exact Sciences*, 54 (6): 499-564, 2000.

²⁴ J. Bradley, “A Letter from the Reverend Mr. James Bradley...”, *op. cit.*, p. 655.

²⁵ 1” en 40.2” de arco, o 10 segundos en 8 minutos y 30 segundos de recorrido. Cifras publicadas por Bradley.

²⁶ F. Arago, *Astronomie populaire*, t. IV, Gide et J. Baudry, París, 1854-1857, pp. 412-413, *apud* P. Acloque, *L’aberration stellaire: un mirage qui a destitué l’éther*, Société Française d’Histoire des Sciences et des Techniques, París, 1991, p. 40.

²⁷ J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries...*, *op. cit.*, pp. 402-404, 802-803.

¹ A. Geikie, *Memoir of John Michell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1918, p. 23.

² E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, t. I, Thomas Nelson, Edimburgo, 1951, p. 153.

³ R. Smith, *A Compleat System of Opticks, in four Books, viz a Popular, a Mathematical, a Mechanical and a Philosophical Treatise*, Cornelius Crownfield, Cambridge, 1738.

⁴ Se trata de dos estrellas que giran una en torno a la otra, como la Luna alrededor de la Tierra.

⁵ A. Geikie, *Memoir of John Michell*, *op. cit.*, p. 94.

⁶ A este respecto, véase R. McCormach, “John Michell and Henry Cavendish: Weighing the Stars”, *The British Journal for the History of Science*, 4 (2): 126-155, 1968, en específico p. 131.

⁷ El paralaje es también una medida de distancia, relacionada con el efecto del mismo nombre; es el ángulo que presentaría el eje mayor de la órbita terrestre visto desde la estrella. Es igual al efecto de paralaje.

⁸ En la década de 1820, gracias a los trabajos de Fraunhofer, será posible medir por primera vez paralajes anuales mucho menores; por ejemplo, 0.12" para a Lyrae: S. L. Jaki, “Johann Georg von Soldner and the Gravitational Bending of Light, with an English Translation of His Essay on It Published in 1801”, *Foundations of Physics*, 8 (11-12): 927-950, 1978, en específico p. 935.

⁹ Sobre este tema, consúltese en particular H. Vignolles, “La distance des étoiles au XVIII^e siècle: l'échelle des magnitudes de John Michell”, *Archive for History of Exact Sciences*, 55: 77-101, 2000.

¹⁰ La idea es sencilla: se supone que una estrella fija es análoga al Sol desde un punto de vista fotométrico. Su distancia es aquella a la que tendríamos que poner al Sol para que tuviera la luminosidad de la estrella en cuestión. Dado que la luminosidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, basta obtener la razón entre el brillo del Sol y el de la estrella para conocer su distancia teórica. Sin embargo, en la práctica es muy difícil comparar directamente la luminosidad del Sol con la de una estrella lejana, que es muy débil. Por eso se utiliza Saturno como referencia intermedia.

¹¹ I. Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy & His System of the World*, trad. de Andrew Motte, B. Motte, Londres, 1729 (reimpr., University of California Press, Berkeley, 1962), p. 596.

¹² *Id.*

¹³ Sirio, cuya magnitud es parecida a la del Sol, está en efecto cerca de 60 000 veces más lejano del Sol que Saturno.

¹⁴ J. Michell, “An Inquiry into the Probable Parallax and Magnitude of the Fixed Stars, from the Quantity of Light which They Afford Us, and the Particular Circumstances of Their Situation. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S.”, *Philosophical Transactions*, 57: 234-264, 1767.

¹⁵ El catálogo de estrellas dobles de Herschel, publicado en 1782, será citado por Michell en su artículo de 1784.

¹⁶ En 1814, en la introducción a la segunda edición de su obra intitulada *Teoría analítica de las probabilidades*, Laplace retomará ese argumento, citando explícitamente a Michell.

¹⁷ Las estrellas dobles son parejas que aparecen extremadamente cercanas en el cielo. Esto resulta a veces de un simple efecto de perspectiva, y sus componentes se encuentran a distancias muy diferentes de la Tierra:

hablamos entonces de “dobles ópticas”. Sin embargo, también puede deberse a que dos estrellas estén muy cercanas entre sí y se atraigan mutuamente, girando ambas alrededor del centro de gravedad del sistema; hablamos entonces de estrellas “dobles físicas” o “binarias”.

¹⁸ J. Michell, “An Inquiry into the Probable Parallax...”, *op. cit.*, pp. 249-250.

¹⁹ G. Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes...*, *op. cit.*, p. 376.

²⁰ J. Bradley, “A Letter to the Right Honourable George Earl of Macclesfield Concerning an Apparent Motion Observed in some of the Fixed Stars”, *Philosophical Transactions*, 45: 1-43, 1748, en específico p. 40, *apud* M. A. Hoskin, *William Herschel and the Construction of the Heavens*, Oldbourne Press, Londres, 1963, p. 41.

²¹ A. Berry, *A Short History of Astronomy*, *op. cit.*, p. 343.

²² *Ibid.*, p. 399.

²³ W. Herschel, “Catalogue of 500 New Nebulae. Nebulous Stars, Planetary Nebulae, and Clusters of Stars; with Remarks on the Heavens”, *Philosophical Transactions*, 92: 477-528, 1802, en específico pp. 498-499; *apud* E. R. Harrison, *Le Noir de la nuit*, Seuil, París, 1990, p. 167.

²⁴ L. Euler, *Lettres à une princesse d'Allemagne...*, *op. cit.*, p. 39.

²⁵ De Cavendish a Michell, 27 de mayo de 1783, *apud* C. Jungnickel y R. McCormmach, *Cavendish: The Experimental Life*, Bucknell, Cranbury, Nueva Jersey, 1999, p. 567.

²⁶ C. Jungnickel y R. McCormmach, *Cavendish...*, *op. cit.* Véase también C. S. Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*, Princeton University Press, Princeton, 1971, pp. 163-165.

²⁷ H. Cavendish, “Experiments to Determine the Density of the Earth”, *Philosophical Transactions*, 88: 469-526, 1798. A este respecto, véase C. Jungnickel y R. McCormmach, *Cavendish...*, *op. cit.*, pp. 440-460.

²⁸ H. Cavendish, “Experiments to Determine the Density of the Earth”, *op. cit.*, pp. 470-471.

²⁹ *Id.*

³⁰ La idea de una balanza de torsión no era nueva. En efecto, Coulomb había utilizado una balanza basada en el mismo principio para establecer que la fuerza eléctrica varía proporcionalmente a $1/r^2$, la “ley de Coulomb”. Sin embargo, como lo hace notar Cavendish, la idea de Michell era independiente de la de Coulomb, pues ya se la había comentado antes de que este último publicara su artículo en 1785.

³¹ H. Cavendish, “Experiments to Determine...”, *op. cit.*, p. 522.

¹ Este capítulo se apoya particularmente en J. Eisenstaedt, “De l’influence de la gravitation sur la propagation de la lumière en théorie newtonienne. L’archéologie des trous noirs”, *Archive for History of Exact Sciences*, 42 (4): 315-386, 1991, y “Laplace: l’ambition unitaire ou les lumières de l’astronomie”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 324 (9): 565-574, 1997.

² A propósito de la velocidad variable de un corpúsculo material o luminoso, es importante distinguir la variación “verdadera”, relacionada con una fuerza de aceleración, ya sea debida a la gravedad o a alguna otra causa (fuerza refringente para la óptica de la época), y la variación “relativa” de la velocidad del corpúsculo debida al medio, que no implica fuerza alguna. En el primer caso, la variación tiene que ver con la dinámica (pues se aplica una fuerza), mientras que en el segundo sólo es relativa, de orden cinemático.

³ Euler se planteará también la cuestión, pero sin llegar a una solución que lo deje satisfecho (véase *infra*, capítulos IX y X).

⁴ En el caso de los cuerpos oscuros, tal olvido no es total; la moda de los agujeros negros los volvió a hacer atractivos a partir de G. Gibbons (“Black Holes Are Hot”, *New Scientist*, 69 (928): 54-56, 1976) y S. Schaffer (“John Michell and Black Holes”, *Journal for History of Astronomy*, 10: 42-43, 1979). McCormach realizó en 1968 un análisis interesante pero incompleto de los trabajos de Michell sobre la luz. Para una bibliografía y un análisis detallados, puede consultarse su artículo, como también J. Eisenstaedt, “De l’influence de la gravitation...”, *op. cit.*, y “L’optique balistique newtonienne...”, *op. cit.*

⁵ R. E. Schofield, *The Lunar Society of Birmingham*, Oxford University Press, Londres, 1963.

⁶ J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries...*, *op. cit.*, t. II, pp. 786-791. Para mayores detalles sobre esos temas, véase J. Eisenstaedt, “De l’influence de la gravitation...”, *op. cit.*, y “Laplace...”, *op. cit.*

⁷ J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries...*, *op. cit.*, t. II, pp. 786-791.

⁸ A este respecto, véase J. Eisenstaedt, “De l’influence de la gravitation...”, *op. cit.*, pp. 326-327.

⁹ J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries...*, *op. cit.*, t. II, p. 790.

¹⁰ *Ibid.*, p. 791.

¹¹ I. Newton, *Opticks*, *op. cit.*

¹² I. Newton, *Traité d’optique sur les réflexions, réfractions, inflexions, et les couleurs de la lumière*, Gauthier-Villars, París, 1955, pp. 403-404.

¹³ J. Michell, “On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars...”, *Philosophical Transactions*, 74: 35-57, 1784, en específico p. 35.

¹⁴ *Ibid.*, p. 37.

¹⁵ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, t. II, Imprimerie du Cercle-Social, París, 1796, pp. 304-306.

¹⁶ J. Michell, “On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars...”, *op. cit.*, p. 42.

¹⁷ *Ibid.*, p. 50.

¹⁸ A este respecto, véase J. Eisenstaedt, “Histoire et singularités de la solution de Schwarzschild (1915-1923)”, *Archive for History of Exact Sciences*, 27: 157-198, 1982; “La relativité générale à l’étiage: 1925-1955”, *Archive for History of Exact Sciences*, 35 (2): 115-185, 1986; *Einstein et la relativité générale*, *op. cit.*

¹⁹ J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale*, *op. cit.*, capítulo 10.

²⁰ J. Michell, “On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars...”, *op. cit.*, p. 42.

²¹ *Id.*

²² *Ibid.*, p. 52.

²³ De Cavendish a Michell, 27 de mayo de 1783, *apud* C. Jungnickel y R. McCormmach, *Cavendish...*, *op. cit.*, p. 567.

²⁴ Véase *supra*, capítulo v.

²⁵ R. McCormmach, “John Michell and Henry Cavendish...”, *op. cit.*, p. 130.

²⁶ J. Michell, “On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars...”, *op. cit.*, p. 36.

²⁷ *Id.*

²⁸ Michell opta por un prisma acromático para distinguir con facilidad entre ambos haces: cada uno es un solo rayo donde todos los colores están mezclados. Esto representa una desventaja grande en el dispositivo, como lo veremos después.

²⁹ J. Michell, “On the Means of Discovering...”, *op. cit.*, p. 53.

³⁰ Se trata del antecesor de lo que se llama “efecto Einstein”, formulado hoy día en términos de variación de frecuencia y verificado con éxito. El experimento de Michell es muy parecido al realizado por Adams en 1925 con un sistema doble. Véase *infra*, capítulo xv.

³¹ R. McCormmach, “John Michell and Henry Cavendish...”, *op. cit.*, p. 148.

³² J. Michell, “On the Means of Discovering...”, *op. cit.*, p. 54.

³³ *Id.*

³⁴ *Id.*

³⁵ *Id.*

³⁶ *Id.*

³⁷ *Ibid.*, pp. 54-55.

³⁸ *Apud* R. McCormmach, “John Michell and Henry Cavendish...”, *op. cit.*, p. 149.

³⁹ *Id.*

⁴⁰ *Id.*

⁴¹ *Id.*

⁴² J. G. Soldner, “Ueber die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die

Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbei geht”, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1804*, G. A. Lange, Berlín, 1801, pp. 161-172; traducido y comentado por S. L. Jaki, “Johann Georg von Soldner...”, *op. cit.*

⁴³ P. S. Laplace, “Beweis des Satzes, dass die anziehende Kraft bey einem Weltkörper so gross seyn könne, dass das Licht davon nicht ausströmen kann”, *Allgemeine Geographische Ephemeriden*, 4: 1-6, 1799.

⁴⁴ J. G. Soldner, “Etwas über die relative Bewegung der Fixsterne; nebst einem Anhang über die Aberration derselben”, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1803*, G. A. Lange, Berlín, 1800, p. 191.

⁴⁵ *Id.*

⁴⁶ *Ibid.*, p. 192.

⁴⁷ Como vimos al principio de este capítulo.

⁴⁸ J. G. Soldner, “Etwas über die relative Bewegung der Fixsterne...”, *op. cit.*, p. 193. Sin embargo, según me hizo observar Michel Combes, la posición real de la estrella estaría siempre en el centro de la elipse y, por lo tanto, perfectamente determinada. Además, el ángulo bajo el que vemos la elipse de aberración sería mayor (lo que nota Soldner), y su medida permitiría conocer la disminución en la velocidad de la luz debida a la masa de la estrella, y por consiguiente, la razón entre la masa y el radio. Así que el “hecho triste” no es tan triste...

⁴⁹ J. G. Soldner, “Ueber die Ablenkung eines Lichtstrahls...”, *op. cit.*, p. 171.

⁵⁰ *Ibid.*, p. 167.

⁵¹ A este respecto, véase J. Eisenstaedt, “La relativité générale à l’étiage: 1925-1955”, *op. cit.*; “Trajectoires et impasses de la solution de Schwarzschild”, *Archive for History of Exact Sciences*, 37: 275-357, 1987; *Einstein et la relativité générale*, *op. cit.*, capítulo 10.

⁵² J. G. Soldner, “Ueber die Ablenkung eines Lichtstrahls...”, *op. cit.*, p. 167.

⁵³ *Id.*

⁵⁴ *Ibid.*, p. 171.

⁵⁵ A. Einstein, “Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes”, *Annalen der Physik*, 35: 898-908, 1911 (versión en francés: A. Einstein, *Œuvres choisies*, vol. II, *Relativités I*, Seuil, París, 1993, pp. 134-142).

⁵⁶ P. S. Laplace, *Théories du mouvement et de la figure elliptique des planètes*, P. D. Pierres, París, 1784. A este respecto, véase la nota sobre Laplace en C. C. Gillispie (dir.), *Dictionary of Scientific Biography*, t. XV, Charles Scribner’s Son, Nueva York, 1970-1980, pp. 273-403.

⁵⁷ P. S. Laplace, *Théories du mouvement et de la figure...*, *op. cit.*, pp. XII-XIII.

⁵⁸ *Id.*

⁵⁹ Laplace acababa de publicar junto con Lavoisier “Mémoire sur la chaleur”; acerca de esto, véase H. Guerlac, “Chemistry as a Branch of Physics: Laplace’s Collaboration with Lavoisier”, *Historical Studies in Physical Sciences*, 7: 193-276, 1976; también M. Goupil, *Du flou au clair? Histoire de l’affinité chimique*, Les éditions du cths, París, 1991, y *Lavoisier et la révolution chimique*, Sabix-École Polytechnique, París, 1992.

⁶⁰ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.* Habrá una gran cantidad de ediciones, muy distintas

entre sí.

⁶¹ E. Frankel, "Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light: the Science and Politics in Physics", *Social Studies of Science*, 2 (6): 141-184, 1976, en específico p. 144.

⁶² Buffon, *Histoire naturelle générale et particulière*, t. XIII, Imprimerie Royale, París, 1767-1770.

⁶³ Apud M. Goupil, *Du flou au clair? ...*, *op. cit.*, p. 115.

⁶⁴ *Id.*

⁶⁵ *Id.*

⁶⁶ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.*, t. II, p. 196.

⁶⁷ *Ibid.*, p. 198.

⁶⁸ J. Priestley, *The History and Present State of Discoveries...*, *op. cit.*, t. II, p. 790.

⁶⁹ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.*, p. 197. Es un programa cercano al que defiende Bošković en 1785 y en el que también pensó Herschel (publicado por J. L. H. Dreyer, *The Scientific Papers of Sir William Herschel*, Royal Society of London/Royal Astronomical Society, Londres, 1912, pp. LXVIII-LXXII).

⁷⁰ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.*, t. II, p. 198. A este respecto, véase M. Goupil, *Du flou au clair? ...*, *op. cit.*; y Lavoisier et la révolution chimique, *op. cit.*

⁷¹ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.*, t. II, p. 198.

¹ Este capítulo se apoya particularmente en J. Eisenstaedt, “Light and Relativity, a Previously Unknown 18th Century Manuscript by Robert Blair (1748-1828)”, *Annals of Science*, 62 (3): 347-376, 2005.

² R. Blair, “Experiments and Observations on the Unequal Refrangibility of Light”, *Royal Society of Edinburgh Transactions*, 3 (2): 3-76, 1794.

³ H. A. Brück, *The Story of Astronomy in Edinburgh from Its Beginnings until 1975*, Edinburgh University Press, Edimburgo, 1983.

⁴ *Id.*

⁵ Pues, como veremos más adelante, el efecto “velocidad-refracción” de Michell, que Blair utiliza, no es otro que el efecto Doppler-Fizeau pensado en el marco de la teoría corpuscular de la luz.

⁶ Parafraseando el título de Einstein, “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”.

⁷ R. Blair, “A Proposal for Ascertaining by Experiments Whether the Velocity of Light Be Affected by the Motion of the Body from Which It Is Emitted or Reflected; and for Applying Instruments for Deciding the Question to Several Optical and Astronomical Enquiries”, *Real Sociedad de Londres*, manuscrito L & P, vol. VIII, 1786, p. 13.

⁸ Improbable porque no era sencillo pensar en la acción de la gravedad sobre una onda. Tal efecto no reaparecerá sino con la relatividad general. Aún hoy es, con mayor frecuencia, pensado de manera corpuscular: lo interesante de una visión dualista de la luz...

⁹ L. Euler, “Explicatio phaenomenorum quae a motu successivo lucis oriuntur”, *Commentarii Academia Scientiarum Petropolitanae*, 11: 150-193, 1739, en específico p. 56, *apud* D. Speiser, “Œuvre d’Euler en optique physique”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, *op. cit.*, p. 222.

¹⁰ A este respecto, véase G. Maltese, “On the Relativity of Motion in Leonhard Euler’s Science”, *Archive for History of Exact Sciences*, 54: 319-348, 2000, y D. Speiser, “Œuvre d’Euler en optique physique”, *op. cit.*

¹¹ La velocidad de la luz incidente depende, según vimos, de las velocidades relativas de la fuente y del observador.

¹² R. Blair, “A Proposal for Ascertaining by Experiments...”, *op. cit.*, pp. 3-4.

¹³ *Ibid.*, p. 13.

¹⁴ *Ibid.*, pp. 13-14.

¹⁵ *Id.*

¹⁶ *Ibid.*, p. 23.

¹⁷ Véase *infra*, capítulo XII, el efecto Doppler-Fizeau, y en el apéndice las fórmulas correspondientes. Hay un análisis detallado del manuscrito de Blair y de este punto en J. Eisenstaedt, “Light and Relativity...”, *op. cit.*

¹⁸ R. Blair, “A Proposal for Ascertaining by Experiments...”, *op. cit.*, pp. 30-31.

¹⁹ Analizaremos con detalle su experimento y dicho punto esencial *infra*, capítulo X.

²⁰ R. Blair, “A Proposal for Ascertaining by Experiments...”, *op. cit.*, p. 25.

²¹ *Id.*

- ²² *Ibid.*, p. 26.
- ²³ *Id.* Las cursivas son mías.
- ²⁴ *Id.*
- ²⁵ *Ibid.*, p. 16.
- ²⁶ En el doble de la velocidad de traslación de la Tierra en su órbita. La velocidad de rotación de la Tierra se considera insignificante.
- ²⁷ 5.4" por 24 caras.
- ²⁸ R. Blair, "A Proposal for Ascertaining by Experiments...", *op. cit.*, p. 16.
- ²⁹ Cabe notar que el prisma es sólo una de varias herramientas posibles: el efecto Blair-Michell se funda en las fórmulas de la refracción derivadas de la teoría de la emisión; a este respecto, véase J. Eisenstaedt, "L'optique balistique newtonienne...", *op. cit.* Hemos visto que la medida de la distancia focal de un telescopio, método que le fue propuesto a Michell, está basada en el mismo efecto.
- ³⁰ R. Blair, "A Proposal for Ascertaining by Experiments...", *op. cit.*, p. 33.
- ³¹ *Ibid.*, p. 9.
- ³² *Ibid.*, pp. 33-34.
- ³³ *Ibid.*, p. 38.
- ³⁴ *Id.*
- ³⁵ *Ibid.*, pp. 41-42.
- ³⁶ *Ibid.*, pp. 42-43.
- ³⁷ *Id.*
- ³⁸ *Ibid.*, p. 45.
- ³⁹ J. Robison, "On the Motion of Light, as Affected By Refracting and Reflecting Substances, which Are also in Motion", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2 (2): 83-111, 1790.
- ⁴⁰ A este respecto, véase K. M. Pedersen, "Roger Joseph Boscovich and John Robison on Terrestrial Aberration", *Centaurus: International Magazine of the History of Mathematics, Science and Technology*, 24: 335-345, 1980; y "Water-Filled Telescopes...", *op. cit.*
- ⁴¹ J. Robison, "On the Motion of Light...", *op. cit.*, p. 98.
- ⁴² J. Robison, "Optics", *Encyclopædia Britannica*, 3^a ed., t. XIII, Edimburgo, 1797, p. 278.
- ⁴³ *Ibid.*, p. 284.
- ⁴⁴ *Id.*
- ⁴⁵ *Id.*
- ⁴⁶ *Id.*
- ⁴⁷ De Robison a Herschel, 14 de abril de 1804, *apud* G. N. Cantor, *Optics after Newton. Theories of Light in Britain and Ireland, 1704-1840*, Manchester University Press, Mánchester, 1983, p. 88.

⁴⁸ W. Herschel, “Observation on Dr. Priestley’s Optical Desideratum — What Becomes Light?”, en J. L. E. Dreyer, *The Scientific Papers of Sir William Herschel*, *op. cit.*, p. 70.

⁴⁹ *Ibid.*, p. 71.

⁵⁰ *Ibid.*, p. 72.

⁵¹ Pero no un desplazamiento espectral entre las zonas de emisión y de absorción, que no menciona. En efecto, si se toma como fuente una rendija iluminada súbitamente y perpendicular al plano de simetría del aparato empleado, en este caso un prisma simple, el espectro de la fuente en el espectro visible, entre el infrarrojo y el ultravioleta, se compone de un espectro continuo, el *continuum*, con zonas bien definidas por ciertas longitudes de onda, que pueden ser muy intensas (de emisión) o sombrías (de absorción). Véase también *infra*, capítulo XIII, y R. Prat, *L’Optique*, Seuil, París, 1962.

- ¹ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.*, t. II, pp. 304-306.
- ² P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, t. II, 3^a ed., Courcier, Paris, 1808, pp. 298-299.
- ³ *Id.*
- ⁴ *Id.*
- ⁵ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, 4^a ed., Mme. Vè. Courcier, Paris, 1813, pp. 326-327.
- ⁶ R. Taton, “Arago et l’Académie des sciences”, en Jean Sagnes (comp.), *François Arago. Actes du colloque national des 20, 21 et 22 octobre 1986*, Universidad de Perpiñán, Perpiñán, 1987, p. 24.
- ⁷ J. B. Biot y F. Arago, “Mémoire sur les affinités des corps pour la lumière, et particulièrement sur les forces réfringentes des différents gaz”, *Mémoires de l’Institut National des Sciences et Arts*, 7: 301-387, 1806, en específico pp. 327-328.
- ⁸ *ibid.*, p. 328.
- ⁹ A este respecto, véase J. Eisenstaedt, “Laplace...”, *op. cit.*, p. 572.
- ¹⁰ R. Taton, “Arago et l’Académie des sciences”, *op. cit.*, p. 25.
- ¹¹ F. Arago, *Histoire de ma jeunesse, suivi de La Vie de François Arago*; prefacio de Jean-Christophe Bailly; introducción de Alexander von Humboldt, C. Bourgois, Paris, 1985; y *Astronomie populaire*, *op. cit.*, t. I, p. 48.
- ¹² M. Daumas, *Arago. La jeunesse de la science*, Gallimard, Paris, 1943, p. 65.
- ¹³ J.-B. J. Delambre, “Analyse des travaux de la classe des sciences mathématiques et physiques pour l’année 1810”, en *Mémoires de l’Académie Royale des Sciences de l’Institut de France*, Paris, 1810, p. xv.
- ¹⁴ F. Arago, *Astronomie populaire*, *op. cit.*, t. I, p. 94.
- ¹⁵ F. Arago, “Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première Classe de l’Institut le 10 décembre 1810”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 36 (2): 38-49, 1853, en especial p. 38.
- ¹⁶ *Ibid.*, p. 41.
- ¹⁷ *Ibid.*, p. 39.
- ¹⁸ *Ibid.*, p. 40.
- ¹⁹ *Id.*
- ²⁰ *Id.*
- ²¹ *Ibid.*, p. 42.
- ²² *Ibid.*, p. 47.
- ²³ *Id.*
- ²⁴ *Ibid.*, p. 40.
- ²⁵ *Ibid.*, p. 43.
- ²⁶ *Ibid.*, p. 46.
- ²⁷ *Ibid.*, p. 45.

- ²⁸ *Id.*
- ²⁹ *Ibid.*, pp. 45-46.
- ³⁰ *Ibid.*, p. 46.
- ³¹ *Id.* Las cursivas son mías.
- ³² *Id.* Además, habla del tema con más detalle en una sección posterior del texto.
- ³³ *Id.*
- ³⁴ W. H. Wollaston, “A Method of Examining Refractive and Dispersive Powers by Prismatic Reflection”, *Philosophical Transactions*, 92: 365-380, 1802.
- ³⁵ F. Arago, “Mémoire sur la vitesse de la lumière...”, *op. cit.*, p. 48.
- ³⁶ *Id.*
- ³⁷ P. S. Laplace, *Exposition du système du monde*, *op. cit.*, 4^a ed., pp. 326-327. Laplace hace aquí alusión a los trabajos de Malus sobre la doble refracción. A este respecto, veáse A. Chappert, *Étienne Louis Malus (1775-1812) et la théorie corpusculaire de la lumière*, Vrin, París, 1977.
- ³⁸ J. B. Biot, *Traité élémentaire d’astronomie physique*, 2^a ed., Klostermann, París, 1811, p. 142.
- ³⁹ A. Fresnel, “Lettre de M. Fresnel à M. Arago, sur l’influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d’optique”, *Annales de chimie et de physique*, 9: 57-66, 1818, en específico p. 57.
- ⁴⁰ F. Arago, *Astronomie populaire*, *op. cit.*, t. I, p. 157.
- ⁴¹ F. Arago, “Mémoire sur la vitesse...”, *op. cit.*, p. 49.
- ⁴² *Ibid.*, p. 43.
- ⁴³ *Ibid.*, p. 44.
- ⁴⁴ Veáse *supra*, capítulo IX, n. 51, e *infra*, capítulo XIII.
- ⁴⁵ Recordemos que la teoría del color de Newton fue refutada por las observaciones de Short (veáse *supra*, capítulo VI).
- ⁴⁶ J. B. Hearnshaw, *The Analysis of Star Light: One Hundred and Fifty Years of Astronomical Spectroscopy*, Cambridge University Press, Cambridge/ Nueva York, 1986, p. 4.
- ⁴⁷ De Maxwell a Huggins, 12 de junio de 1867, “On the Influence of the Motions of the Heavenly Bodies on the Index of Refraction of Light”, *apud* W. Huggins, “Further Observations on the Spectra of Some of the Stars and Nebulae...”, *Philosophical Transactions*, 158: 529-564, 1868, en específico p. 532.
- ⁴⁸ É. Mascart, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l’observateur”, *Annales Scientifiques de l’École Normale Supérieure*, 1: 157-214, 1872, en específico pp. 158-159.

¹ É. Verdet, *apud* A. Fresnel, *Œuvres complètes*, t. I, comp. de Henri de Sénarmont, Émile Verdet y Léonor Fresnel, Imprimerie Impériale, París, 1866-1870, p. xxx.

² Se trata de Léonor Mérimée, padre de Prosper Mérimée.

³ De Fresnel a Arago, 23 de septiembre de 1815, *apud* A. Fresnel, *Œuvres complètes*, *op. cit.*, t. I, p. 7.

⁴ A. Fresnel, *Œuvres complètes*, *op. cit.*, t. I, p. 31.

⁵ De Arago a Fresnel, 8 de noviembre de 1815, *apud ibid.*, pp. 38-39.

⁶ *Ibid.*, p. 121, y *apud* B. Maitte, *La Lumière*, *op. cit.*, p. 225.

⁷ De Fresnel a Arago, 14 de diciembre de 1816, *apud* A. Fresnel, *Œuvres complètes*, *op. cit.*, t. I.

⁸ De Fresnel a su hermano, 5 de septiembre de 1818, *apud ibid.*, p. 849.

⁹ *Id.*

¹⁰ É. Verdet *apud ibid.*, p. XLIII.

¹¹ F. Arago, “Mémoire sur la vitesse...”, *op. cit.*

¹² T. Hirosgie, “The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7: 3-82, 1976, en específico p. 12.

¹³ A. Fresnel, “Lettre de M. Fresnel à M. Arago...”, *op. cit.*, p. 57.

¹⁴ *Id.*

¹⁵ *Id.*

¹⁶ No obstante, debemos mencionar los artículos de Malus sobre la polarización por refracción, sin duda los últimos trabajos importantes basados en la teoría de la emisión. A este respecto, véase B. Maitte, *La Lumière*, *op. cit.*, y A. Chappert, *Étienne Louis...*, *op. cit.*

¹⁷ A. Fresnel, “Lettre de M. Fresnel à M. Arago...”, *op. cit.*, p. 58.

¹⁸ *Id.*

¹⁹ *Id.*

²⁰ *Id.*

²¹ Para explicar la razón de que el movimiento de la Tierra no tenga influencia sobre la refracción, Fresnel supone que las ondas luminosas son parcialmente perturbadas en un medio óptico. En tal medio, de índice n y que está en reposo respecto al éter, la luz tiene una velocidad $c' = c/n$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Cuando el medio refringente se desplaza a una velocidad v respecto al éter (en la misma dirección que la luz), Fresnel plantea que la velocidad del rayo luminoso respecto al éter es $c' + (1 - 1/n^2)v$, y el término $(1 - 1/n^2)$ ha tomado el nombre de “coeficiente de perturbación de Fresnel”. Para mantener la congruencia con la ley de adición de velocidades de Galileo, debe suponerse que, en un medio en movimiento, la luz se desplaza con una velocidad $c' - v/n^2$.

²² Véase *infra*, capítulos XII y XIII.

²³ A este respecto, véase A. Sesmat, *L'optique des corps au repos*, Hermann, París, 1937, p. 409.

²⁴ É. Mascart, *Traité d'optique*, vol. III, Gauthier-Villars et Fils, París, 1893, p. 99.

²⁵ B. Hoffmann, *Relativity and Its Roots*, Scientific American Books, Nueva York, 1983, p. 61.

²⁶ *Ibid.*, p. 62.

²⁷ Véase *infra*, capítulo XIII.

²⁸ Véase *supra*, nota 21, sobre el coeficiente de Fresnel.

²⁹ B. Hoffmann, *Relativity and Its Roots*, *op. cit.*, p. 62.

³⁰ Si no escribo “relativista” (aunque terminaré haciéndolo, pues es el término absolutamente consagrado hoy) es porque genera controversia: la cinemática newtoniana es también “relativista”, como he insistido, pues en el sentido clásico está sometida al principio de la relatividad; vemos así hasta qué punto está mal escogido el término para referirse a la cinemática de Einstein. Sin embargo, el nombre se debe probablemente a la sorpresa de ver reaparecer el principio de la relatividad...

³¹ Se ha demostrado, en el marco de una interpretación más elaborada, que el principio de la relatividad está incluido en cierta manera, escondido, en la ley de la perturbación de Fresnel (R. G. Newburgh, “Fresnel Drag and the Principle of Relativity”, *Isis*, 65 (3): 379-386, 1974, en específico p. 386). Sin que Fresnel lo haya querido, sin que jamás haya llegado a saberlo. La necesidad tiene cara de hereje...

³² Un punto de vista simplificador, pero útil... Aún hoy, debemos decirlo, no existe otra solución a dichas cuestiones... tan felizmente estructuradas.

¹ F. Arago, “Sur un système d’expériences à l’aide duquel la théorie de l’émission et celle des ondes sont soumises à des épreuves décisives”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 7 (23): 954-965, 1838, en específico p. 954.

² En el experimento de Wheatstone las chispas se producían con una sola descarga en tres electrodos, conectados entre sí mediante un circuito de cobre de un cuarto de milla de longitud. El espejo giratorio servía para medir los intervalos entre los chispazos. Resulta divertido que Wheatstone, quien es incapaz de calcular la incertidumbre de sus mediciones, concluya que “la velocidad de la electricidad a través de un cable de cobre es mayor que la velocidad de la luz en el espacio planetario” (C. Wheatstone, “An Account of Some Experiments to Measure the Velocity of Electricity and the Duration of Electric Light”, *Philosophical Transactions*, 124: 583-591, 1834, en específico p. 591).

³ L. Foucault, “Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l’air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l’air et dans l’eau. Projet d’expérience sur la vitesse de propagation du calorique rayonnant”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 30: 551-560, 1850, en específico p. 556.

⁴ É. Verdet, *Conférences de physique faites à l’École normale par É. Verdet*, comp. de M. D. Gernez, Imprimerie Nationale, París, 1872, p. 663; J. Rosmorduc, “Les mesures optiques de la lumière au XIX^e siècle”, en René Taton (comp.), *Roemer et la vitesse de la lumière*, *op. cit.*, p. 245.

⁵ L. Foucault, “Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière...”, *op. cit.*; É. Verdet, *Conférences de physique...*, *op. cit.*, p. 663.

⁶ A.-H. Fizeau, “Sur les hypothèses relatives à l’éther lumineux...”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 33: 349-355, 1851, en específico p. 353.

⁷ A. Sesmat, *L’optique des corps en mouvement*, Hermann, París, 1937, p. 529.

⁸ A este respecto, véase J. Rosmorduc, “Les mesures optiques de la lumière au XIX^e siècle”, *op. cit.*, pp. 247-263.

⁹ O incluso “longitud de ondulación”, por ejemplo en Fresnel. Como Doppler, Fizeau utiliza la longitud de onda o el periodo, y así se hará durante todo el siglo XIX. En su artículo de 1905 Einstein empleará el concepto de frecuencia. Véase la definición de dichos conceptos en el recuadro XI.1: “Algunas magnitudes para definir los fenómenos luminosos”.

¹⁰ A este respecto, véase D. Speiser, “Œuvre d’Euler en optique physique”, *op. cit.*, p. 216.

¹¹ L. Euler, *Lettres à une princesse d’Allemagne...*, *op. cit.*, p. 53.

¹² *Ibid.*, pp. 53-54.

¹³ Pues, como vimos, Blair hizo un trabajo mucho mejor, muy parecido al que realizará Fizeau seis años después que Doppler.

¹⁴ C. Doppler, “Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels”, *Abhandlungen der Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften*, 5 (2): 465-482, 1842, en específico p. 465.

¹⁵ E. N. Andrade, “Doppler and the Doppler Effect”, *Endeavour*, 18 (69): 14-19, 1959, en específico p. 16; A. Cornu, “Sur la méthode Doppler-Fizeau permettant la détermination par l’analyse spectrale de la vitesse des astres dans la direction du rayon visuel”, *Annuaire pour l’An 1891, publié par le Bureau des Longitudes*, D1-

D40, 1891, en específico p. 9.

¹⁶ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d’onde des rayons de lumière”, *Annales de chimie et de physique*, 19: 211-221, 1870, en específico p. 212. El artículo de Fizeau, escrito en 1848, no se publicó hasta 1870.

¹⁷ Babinet era también un físico muy activo en la cuestión de la luz.

¹⁸ E. N. Andrade, “Doppler and the Doppler Effect”, *op. cit.*, p. 16.

¹⁹ W. Herschel, “Experiments on the Solar, and on the Terrestrial Rays that Occasion Heat...”, *Philosophical Transactions*, 90: 293-326, 1800; J. W. Ritter, “4. Von Herr J. W. Ritter in Jena”, *Annalen der Physik*, 7 (3): 373-379, 1801; y “6. Von den Herren Ritter und Bückmann”, *Annalen der Physik*, 7 (4): 527, 1801.

²⁰ C. Buys-Ballot, “Akustische Versuche auf der Niederlandischen Eisenbahn nebst gelegentlichen Bemerkungen zur Theorie des Hrn. Prof. Doppler”, *Poggendorf Annalen*, 66: 321-351, 1845.

²¹ A. Cornu, “Sur la méthode Doppler-Fizeau...”, *op. cit.*, p. 8.

²² *Ibid.*, pp. 9-11.

²³ H. A. Lorentz, *Abhandlungen über theoretische Physik*, B. G. Teubner, Leipzig/Berlín, 1907, y *apud* J. B. Hearnshaw, “Doppler and Vogel. Two Notable Anniversaries in Stellar Astronomy”, *Vistas in Astronomy*, 35: 157-177, 1992, en específico p. 162.

²⁴ *Ibid.*, p. 158.

²⁵ A. Cornu, “Sur la méthode Doppler-Fizeau...”, *op. cit.*, p. 14.

²⁶ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, p. 219. Véase *infra* el apéndice “El efecto Doppler-Fizeau en teoría ondulatoria clásica”. Esas fórmulas son exactas para el sonido pero no para la luz: si se realizaran mediciones suficientemente precisas, seríamos capaces de concluir por los resultados quién está en movimiento, el emisor o el receptor.

²⁷ *Apud* A. Sersat, *L’optique des corps en mouvement*, *op. cit.*, p. 587.

²⁸ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, p. 217.

²⁹ *Ibid.*, pp. 217-218.

³⁰ *Ibid.*, p. 220.

³¹ *Ibid.*, p. 218.

³² *Ibid.*, p. 220.

³³ A. Cornu, “Sur la méthode Doppler-Fizeau...”, *op. cit.*, p. 15.

³⁴ Michell planteó las premisas, pero no subrayó el efecto cinemático. Sin embargo, según vimos en el capítulo VIII, es el inventor del efecto Einstein, llamado también en ocasiones “efecto Doppler gravitatorio”, que también implica un desplazamiento de franjas, debido a la acción de la gravedad sobre la luz (véase *infra*, capítulo XV).

³⁵ Las fórmulas son paralelas: J. Eisenstaedt, “Light and Relativity...”, *op. cit.*

³⁶ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, p. 218.

³⁷ *Ibid.*, p. 219.

³⁸ Se trata del mismo cálculo (en variación de la refracción y no solamente en frecuencia) que realizara Blair, cuyas predicciones numéricas, notémoslo de paso, son comparables en todo, lo que muestra lo bien fundados que estaban los cálculos de Blair: véase *supra*, capítulo IX. Dichos cálculos aparecen en J. Eisenstaedt, “Light and Relativity...”, *op. cit.*

³⁹ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, p. 220.

⁴⁰ En el marco de la teoría de las ondulaciones, la velocidad de la luz es independiente de la fuente que la emite y no *parece* implicar una variación de la refracción relacionada con su movimiento, cuando menos directamente. La teoría de las ondulaciones (como todas las teorías ondulatorias desde entonces) utiliza como intermediario la modificación de la frecuencia para explicar el efecto, sin preocuparse de que el índice de refracción, que depende de dicha frecuencia, induzca *también* una variación en la refracción, mucho más difícil de detectar que un desplazamiento de frecuencia, medible con sencillez gracias al interferómetro.

⁴¹ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, pp. 217-218.

⁴² Recordemos que su texto no se publicó hasta 1853.

⁴³ É. Mascart, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière...”, *op. cit.*, pp. 158-159.

⁴⁴ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, p. 218. Las cursivas son mías.

⁴⁵ A este respecto, véase É. Mascart, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l’observateur (II)”, *Annales Scientifiques de l’École Normale Supérieure*, 3: 363-420, 1874, en específico pp. 368-374.

- ¹ A.-H. Fizeau, “Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux...”, *op. cit.*, p. 349.
- ² *Id.*
- ³ *Id.*
- ⁴ *Id.*
- ⁵ *Id.*
- ⁶ *Id.*
- ⁷ *Id.*
- ⁸ *Ibid.*, pp. 349-350.
- ⁹ *Ibid.*, p. 355.
- ¹⁰ M. Janssen y J. Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, en Sandro Petruccioli (comp.), *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2004, p. 18.
- ¹¹ *Ibid.*, pp. 18-19.
- ¹² *Ibid.*, p. 18; E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, *op. cit.*, p. 125.
- ¹³ A este respecto, véase J. Z. Buchwald, *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*, The University of Chicago Press, Chicago, 1989, y H. J. Steffens, *The Development of Newtonian Optics in England*, Science History Publication, Nueva York, 1977.
- ¹⁴ G. G. Stokes, “On Fresnel's Theory of Aberration of Light”, *Philosophical Magazine*, 28 (185): 76-81, 1846, en específico p. 76.
- ¹⁵ *Id.*
- ¹⁶ *Id.*
- ¹⁷ Sobre esta cuestión, véase M. Janssen y J. Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, *op. cit.*, p. 11.
- ¹⁸ A este respecto, véase J. Stachel, “History of Relativity”, en Laurie M. Brown, Abraham Pais y sir Brian Pippard (comps.), *Twentieth Century Physics*, t. I., Institute of Physics Publishing/American Institute of Physics Press, Bristol y Filadelfia/Nueva York, 1995, pp. 249-356.; M. Janssen y J. Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, *op. cit.*, p. 11.
- ¹⁹ J. Babinet, “Sur l'aberration de la lumière”, *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9 (21): 774-775, 1839, en específico p. 775; y *apud* É. Mascart, “Sur les modifications qu'éprouve la lumière...”, *op. cit.*, p. 161.
- ²⁰ J. Babinet, “De l'influence du mouvement de la Terre dans les phénomènes optiques”, *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 55 (14): 561-564, 1862, en específico p. 561.
- ²¹ A.-H. Fizeau, “Nouvelles remarques concernant le déplacement des raies spectrales par le mouvement du corps lumineux ou de l'observateur”, *Les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 70: 1062-1066, 1870.
- ²² R. G. Newburgh, “Fresnel Drag...”, *op. cit.*
- ²³ Notemos de paso que desde el punto de vista del principio de la relatividad (que por entonces no está

integrado a las teorías de la luz) esto parece perfectamente absurdo; es la razón de que actualmente no sea tan sencillo entender el interés del experimento de Michelson.

²⁴ É. Mascart, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière...”, *op. cit.*, p. 180.

²⁵ É. Mascart, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière... (II)”, *op. cit.*, p. 420.

²⁶ *Ibid.*, p. 376.

²⁷ *Ibid.*, pp. 377-388.

²⁸ *Ibid.*, p. 388.

²⁹ *Ibid.*, p. 390.

³⁰ Como lo explica Mascart previamente, se trata del cambio en la longitud de onda de dos fuentes luminosas idénticas, “una sobre la Tierra, una llama de alcohol salado, por ejemplo, y la otra sobre una estrella fija, producida por sodio en vapores incandescentes”. Los rayos D son los del sodio: *Ibid.*, pp. 364, 376, 390.

³¹ A.-H. Fizeau, “Grand prix des sciences mathématiques”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 79: 1531-1534, 1874, en específico p. 1533. Las cursivas son mías.

³² *Ibid.*, p. 1534.

³³ J. B. Hearnshaw, *The Analysis of Star Light...*, *op. cit.*, p. 30.

³⁴ A. Sesmat, *L’optique des corps en mouvement*, *op. cit.*, p. 536.

³⁵ *Apud ibid.*, p. 536.

³⁶ A.-H. Fizeau, “Des effets du mouvement...”, *op. cit.*, p. 221.

³⁷ A. Sesmat, *L’optique des corps en mouvement*, *op. cit.*, p. 538.

³⁸ J. B. Hearnshaw, “Doppler and Vogel...”, *op. cit.*, p. 164. A. Berry, *A Short History of Astronomy*, *op. cit.*, p. 402.

³⁹ J. B. Hearnshaw, “Doppler and Vogel...”, *op. cit.*, p. 169.

⁴⁰ *Ibid.*, p. 170.

⁴¹ Se trata de franjas características del hidrógeno, llamadas también “de Balmer”.

⁴² J. B. Hearnshaw, “Doppler and Vogel...”, *op. cit.*, p. 163.

⁴³ Recordemos que Blair considera esta posibilidad desde 1786: véase *supra*, capítulo IX.

⁴⁴ J. B. Hearnshaw, “Doppler and Vogel...”, *op. cit.*, p. 164.

⁴⁵ J. B. Hearnshaw, *The Analysis of Star Light...*, *op. cit.*, p. 89, y “Doppler and Vogler...”, *op. cit.*, p. 171.

⁴⁶ R. Blair, “A Proposal for Ascertaining by Experiments...”, *op. cit.*, p. 40.

⁴⁷ M. Janssen y J. Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, *op. cit.*, p. 20.

⁴⁸ De Maxwell a Huggins, 12 de junio de 1867, *apud* W. Huggins, “Further Observations...”, *op. cit.*, p. 532.

⁴⁹ *Id.* A este respecto, véase A. Cornu, “Sur la méthode Doppler-Fizeau...”, *op. cit.*, p. 22; A. Sesmat, *L’optique des corps en mouvement*, *op. cit.*, p. 538; L. S. Swenson, *The Ethereal Aether. A Descriptive History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930*, University of Texas Press, Austin, 1972,

p. 57.

⁵⁰ Maxwell, *apud* W. Huggins, “Further Observations...”, *op. cit.*, p. 534.

⁵¹ El cual formalizará Potier en 1874; a este respecto, véase A. Sesmat, *L’optique des corps en mouvement*, *op. cit.*, p. 510.

⁵² H. Faye *apud* A.-H. Fizeau, “Remarques à l’occasion d’un passage du rapport verbal de M. Faye, du 20 septembre dernier, au déplacement des raies du spectre par le mouvement du corps lumineux ou de l’observateur”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 69: 743, 1869.

⁵³ A.-H. Fizeau, “Nouvelles remarques concernant le déplacement des raies spectrales...”, *op. cit.*, p. 1063.

⁵⁴ Véase *supra*, capítulo IX.

⁵⁵ M. Janssen y J. Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, *op. cit.*, p. 17.

⁵⁶ *Ibid.*, p. 19. A este respecto, véase É. Mascart, “Sur les modifications qu’éprouve la lumière... (II)”, *op. cit.*, p. 420.

⁵⁷ H. A. Lorentz, “De l’influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux”, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 21 (6): 103-176, 1887, en específico p. 103.

⁵⁸ Probablemente después de 1875, según L. S. Swenson, *The Ethereal Aether*; *op. cit.*, p. 67.

⁵⁹ A. Sesmat, *L’optique des corps en mouvement*, *op. cit.*, p. 562.

⁶⁰ A este respecto, véase B. Maitte, *La Lumière*, *op. cit.*, pp. 273-277.

- ¹ M. Janssen y J. Stachel, “The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies”, *op. cit.*, p. 27.
- ² H. A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, E. J. Brill, Leiden, 1895.
- ³ Según las expresiones utilizadas por F. Kottler, “Considérations de critique historique sur la théorie de la relativité. 1. De Fresnel à Lorentz. 2. Henri Poincaré et Albert Einstein”, *Scientia*, 18: 231-242, 301-316, 1924, en específico pp. 241-242.
- ⁴ De Lorentz a Rayleigh, 18 de agosto de 1892; *apud* J.-P. Auffray, *Einstein et Poincaré. Sur les traces de la relativité*, Le Pommier, París, 1999, p. 60.
- ⁵ A. I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading, 1981, p. 30.
- ⁶ H. Poincaré, *Électricité et optique: la lumière et les théories électrodynamiques. Leçons professées à la Sorbonne en 1888, 1890 et 1899*, 2^a ed. rev. y aum., G. Carré y C. Naud, París, 1901, p. 536.
- ⁷ *Id.*
- ⁸ *Id.*
- ⁹ H. A. Lorentz, “Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Smaller than that of Light”, *Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam. Proceedings of the Section of Sciences*, 6 (2): 809-831, 1904, *apud* G. Holton, *L'Imagination scientifique*, trad. de J. F. Roberts, Gallimard, París, 1981, p. 150. 10 Varios autores habían proporcionado ya dichas transformaciones: Voigt en 1887, Larmor en 1900 y Poincaré en 1904. A este respecto, véanse las notas de O. Darrigol en A. Einstein, *Œuvres choisies, op. cit.*, t. II, p. 40.
- ¹¹ G. Holton, *L'Imagination scientifique, op. cit.*, p. 136.
- ¹² *Ibid.*, p. 147.
- ¹³ H. Poincaré, “L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique”, *Bulletin des sciences mathématiques*, 28: 302-324, 1904, en específico p. 311.
- ¹⁴ H. Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, Flammarion, París, 1902, pp. 111-112.
- ¹⁵ H. Poincaré, “L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique”, *op. cit.*, p. 306.
- ¹⁶ *Ibid.*, p. 305.
- ¹⁷ *Ibid.*, p. 306.
- ¹⁸ *Ibid.*, p. 323.
- ¹⁹ *Ibid.*, p. 324.
- ²⁰ *Ibid.*, p. 307.
- ²¹ *Ibid.*, p. 324.
- ²² H. Poincaré, “Sur la dynamique de l'électron”, *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, 21: 129-176, 1906, en específico p. 129.
- ²³ G. Holton, *L'Imagination scientifique, op. cit.*, p. 149.

- ²⁴ *Ibid.*, p. 154.
- ²⁵ H. Poincaré, “Sur la dynamique de l’électron”, *Les Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 140: 1504-1508, 1905.
- ²⁶ H. Poincaré, *La Science et l’Hypothèse*, *op. cit.*
- ²⁷ A. Einstein, *Lettre à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, París, 1956, p. VIII; y de Einstein a Besso, 6 de marzo de 1952, *apud* P. Speziali (comp.), *Albert Einstein-Michele Besso. Correspondance 1903-1955*, Hermann, París, 1972, p. 272.
- ²⁸ En su historia de las teorías del éter y la electricidad, Whittaker cita casi incidentalmente el artículo: “Einstein publicó un artículo explicitando la teoría de Poincaré y Lorentz, desarrollándola en algunos puntos, y que despertó gran atención” (E. T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, *op. cit.*, t. II, p. 40). A este respecto veáse Gerald Holton, *L’Imagination scientifique*, *op. cit.*, pp. 130-184.
- ²⁹ G. Holton, *L’Imagination scientifique*, *op. cit.*, pp. 130-157.
- ³⁰ J. Leveugle, “Poincaré et la relativité”, *La Jaune et la Rouge*, 494: 31-51, 1994; J. Leveugle, *La Relativité. Poincaré et Einstein, Planck, Hilbert. Histoire véridique de la théorie de la relativité*, L’Harmattan, París, 2004; J.-P. Auffray, *Einstein et Poincaré*, *op. cit.*; J. Hladik, *Comment le jeune et ambitieux Einstein s’est approprié la relativité restreinte de Poincaré*, Ellipses, París, 2004, cuyo título es una afirmación simplemente falsa: “De cómo el joven y ambicioso Einstein se apropió de la relatividad especial de Poincaré”.
- ³¹ G. Holton, *L’Imagination scientifique*, *op. cit.*, p. 148.
- ³² *Ibid.*, p. 157.
- ³³ A. Einstein, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, 17: 891-921, 1905 (versión en francés: “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, en A. Einstein, *Œuvres choisies*, *op. cit.*, t. II, pp. 31-58).
- ³⁴ A. Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein*, t. II, comp. de J. Stachel *et al.*, Princeton University Press, Princeton, 1987-1998, p. 264.
- ³⁵ *Apud* A. Einstein, *Œuvres choisies*, *op. cit.*, t. II, p. 30, n. 6.
- ³⁶ A. Einstein, “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, *op. cit.*, p. 31.
- ³⁷ *Id.*
- ³⁸ *Apud* J. Stachel, *Einstein from B to Z*, Birkhauser, Boston, 2002, p. 185.
- ³⁹ De Einstein a Ehrenfest, 20 de junio de 1912, parcialmente citado en A. Einstein, *Œuvres choisies*, *op. cit.*, t. II, p. 24, y A. Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein*, *op. cit.*, t. V, p. 485.
- ⁴⁰ A. Einstein, “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, *op. cit.*, p. 33.
- ⁴¹ *Id.*
- ⁴² *Ibid.*, p. 34.
- ⁴³ Las expresiones “contracción del espacio” y “dilatación del tiempo” son completamente inadecuadas: están ligadas a los conceptos (newtonianos) de distancia y tiempo absolutos que, en el marco de la relatividad de Einstein, deben evitarse en cualquier razonamiento. Toda paradoja desaparece si se utiliza el tiempo propio.

- ⁴⁴ A. Einstein, “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, *op. cit.*, p. 35.
- ⁴⁵ Albert Einstein, “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieenthalt abhängig?”, *Annalen der Physik*, 18: 639-641, 1905 (versión en francés, “L’inertie d’un corps dépend-elle de son contenu en énergie?”, en A. Einstein, *Œuvres choisies, op. cit.*, t. II, pp. 60-63); “Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie”, *Annalen der Physik*, 20: 627-633, 1906 (versión en francés: “Le principe de conservation du mouvement du centre de gravité et l’inertie de l’énergie”, en A. Einstein, *Œuvres choisies, op. cit.*, t. II, pp. 63-68). Poincaré demuestra esto de manera paralela: H. Poincaré, “Sur la dynamique de l’électron”, *op. cit.* (1905 y 1906). Además, Einstein plantea la hipótesis de que dichas transformaciones son lineales. De hecho, esa hipótesis no es realmente útil. El punto esencial, que Einstein nota, y esto debe subrayarse, es la estructura de grupo. A este respecto, véase J.-M. Lévy-Leblond, “De la relativité à la chronogéométrie, ou pour en finir avec le ‘second postulat’ et autres fossiles”, conferencia, Coloquio de Cargèse, “Le temps”, enero de 2001.
- ⁴⁶ A. Einstein, “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, *op. cit.*, p. 41.
- ⁴⁷ A este respecto, véase G. Holton, *L’Imagination scientifique, op. cit.*, pp. 130-184.
- ⁴⁸ Véanse el capítulo XV y J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale, op. cit.*
- ⁴⁹ A. Einstein, “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, *op. cit.*, p. 48.
- ⁵⁰ *Ibid.*, p. 53.
- ⁵¹ De Einstein a Habicht, citado en A. Einstein, *Œuvres choisies, op. cit.*, t. II, p. 59.
- ⁵² A. Einstein, “L’inertie d’un corps dépend-elle de son contenu en énergie?”, *op. cit.*, p. 62.
- ⁵³ A. Einstein, “Le principe de conservation du mouvement...”, *op. cit.*, p. 63.
- ⁵⁴ A. Einstein, “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen”, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4: 411-462, y 5: 98-99, 1907 (versión en francés, “Sur le principe de relativité et les conséquences qui en découlent”, en *Œuvres choisies, op. cit.*, t. II, *Relativités I*, 1993, pp. 84-124 [en específico p. 109]).
- ⁵⁵ A. Einstein, “Elementary Derivation of the Equivalence of Mass and Energy”, *Technion Journal*, 5: 16-17, 1946 (versión en francés: “Une démonstration élémentaire de l’équivalence entre masse et énergie”, en *Œuvres choisies, op. cit.*, t. II, *Relativités I*, Seuil, París, 1993, pp. 69-71).
- ⁵⁶ J. M. Lévy-Leblond, “What if Einstein Had not Been There? A Gedankenexperiment in Science History”, en J. P. Gazeau *et al.* (comps.), *Group 24: Physical and Mathematical Aspects of Symmetries*, Institute of Physics Publishing, Londres, 2003, pp. 173-182 (en específico p. 179).
- ⁵⁷ *Ibid.*, p. 180.
- ⁵⁸ *Ibid.*, p. 178.
- ⁵⁹ Einstein hacia 1905, *apud* G. Holton, *L’Imagination scientifique, op. cit.*, p. 141.
- ⁶⁰ A este respecto, véase J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale, op. cit.*
- ⁶¹ Einstein no apreció mucho los cursos de Minkowski, quien a su vez lo consideraba un “holgazán”. A este respecto, véase J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale, op. cit.*

⁶² H. Minkowski, “Raum und Zeit” (conferencia presentada durante el 80° Congreso de Naturalistas, Colonia, 21 de septiembre de 1908). Versión en inglés: “Space and Time”, en A. Einstein *et al.*, *The Principle of Relativity*, Methuen and Company, Londres, 1923, pp. 73-91, en específico p. 83.

⁶³ *Id.*

⁶⁴ *Ibid.*, p. 80.

⁶⁵ *Ibid.*, p. 76.

⁶⁶H. Poincaré, “Sur la dynamique de l’électron”, *op. cit.* (1906), pp. 168-169.

¹ J. Stachel, *Einstein from B to Z*, *op. cit.*, p. 165.

² Sobre la relatividad general se puede consultar mi obra *Einstein et la relativité générale*, *op. cit.*, donde se analizan con detalle esos puntos.

³ Este efecto Doppler gravitatorio es, por supuesto, independiente del efecto Doppler-Fizeau cinemático.

⁴ Pues si bien su masa es cercana a la del Sol, su radio es muy pequeño.

⁵ A. S. Eddington, *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge University Press, Cambridge, 1926, p. 273.

⁶ De Einstein a Freundlich, agosto de 1913, *apud* A. Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein*, *op. cit.*, t. v, p. 550; *apud* J. Eisenstaedt, “De l’influence de la gravitation...”, *op. cit.*

⁷ A. Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher*, 3ª ed., vol. 18, reimpr. Franz Duncker, Berlín, 1870, pp. 37-38.

⁸ A. Einstein, “Autobiographical Notes”, en Paul Arthur Schilpp (comp.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, t. I, Northwestern University Press, Evanston, 1949, pp. 1-95, en específico p. 14.

⁹ F. Rosenberger, *Isaac Newton und seine physikalischen Principien*, Barth, Leipzig, 1895, pp. 315-316.

¹⁰ A. Einstein, “Über das Relativitätsprinzip...”, *op. cit.*, p. 483.

¹¹ Durante mucho tiempo se creyó que había un error en el cálculo de Soldner. En realidad se trata simplemente de una definición distinta de la constante de gravitación. Las predicciones newtonianas de Soldner son absolutamente idénticas a las de Einstein.

¹² J. Soldner, “Über die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht; mit einer Vorbemerkung von P. Lenard”, *Annalen der Physik*, 370 (15): 593-604, 1921.

¹³ A este respecto, véase S. L. Jaki, “Johann Georg von Soldner...”, *op. cit.*

¹ Por ejemplo, O. Darrigol, *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 2000; G. Holton, *L'Imagination scientifique*, *op. cit.*; A. I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity...*, *op. cit.*; J. Stachel, "History of Relativity", *op. cit.*, y J. Stachel, *Einstein from B to Z*, *op. cit.*

² T. S. Kuhn, *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, París, 1972.

ÍNDICE GENERAL

Sumario

Agradecimientos

I. *Antes de Einstein...*

II. *La relatividad: de Galileo a Newton*

A propósito de la “relatividad”

Descartes, Galileo: sistemas inerciales y principio de la relatividad

Newton: espacio, tiempo, las definiciones

El principio de la relatividad

III. *La luz: de Galileo a Rømer*

Galileo y el movimiento sucesivo

Descartes y Huygens

La velocidad de la luz: de Cassini a Rømer

IV. *La luz en los Principia*

La óptica de Newton antes de los *Principia*

Los *Principia*

De Newton a Clairaut, la óptica de los *Principia*

Una óptica balística

Newton y la refracción astronómica

V. *Bradley y la aberración*

Bradley y los satélites de Júpiter

Del paralaje a la aberración

Las consecuencias del descubrimiento de la aberración

VI. *El color de la luz*

Newton, Clairaut y el color de los satélites de Júpiter

De Mairan

Melvill y la aberración

El sistema de la emisión

VII. *Michell y las estrellas*

John Michell

La distancia de las estrellas

Las estrellas dobles: la predicción
Las estrellas dobles: la observación
Pesar el mundo

VIII. *Michell y la luz*

La óptica de los cuerpos en movimiento en un contexto corpuscular
Luz y gravitación
Los cuerpos oscuros
¿Cómo medir una diferencia en la velocidad de la luz?
La estructura del experimento de Michell
Las tentativas de observación
Soldner y la desviación de los rayos luminosos
Laplace: la ambición unitaria

IX. *Blair: la cinemática clásica de la luz*

Un trabajo bisagra
Una cinemática de la luz ambigua
Blair y el “método” de Michell
Del “método” de Michell al efecto Doppler-Fizeau
Un “fenómeno muy curioso”
El instrumento de Blair
Un programa de observación de las velocidades radiales
De Blair a Arago

X. *El experimento de Arago*

De Michell a Arago
Arago: una carrera relámpago
El experimento de Arago
Las observaciones de Arago
Los inconvenientes de una novedad

XI. *La teoría de las ondulaciones de Fresnel*

Fresnel y el experimento de Arago
El éter parcialmente perturbado...
Una teoría inventada
Un punto de vista retrospectivo

XII. *La velocidad de la luz*

Los experimentos sobre la velocidad de la luz
El efecto llamado Doppler...
La interpretación de Doppler
El efecto Doppler revisado por Fizeau
De Michell a Fizeau, pasando por Blair y Doppler

El experimento incomprensido de Arago

XIII. *1850-1900*

Las teorías de la luz en la segunda mitad del siglo XIX

La influencia del movimiento de la Tierra en los experimentos de óptica

El nacimiento de la espectroscopía

El efecto Blair-Michell reencontrado sin cesar

¿Fresnel o Stokes?

Los experimentos de Michelson

XIV. *La nueva cinemática*

Óptica y electromagnetismo

Einstein, luz y relatividad

La inercia de la energía

¿Revolucionario?

XV. *De Newton a Einstein*

La cinemática: de Blair a Einstein

Hacia una teoría relativista de la gravitación

El experimento de Michell y el efecto Einstein

La desviación de los rayos luminosos

XVI. *¿Hay que olvidar la historia?*

Apéndice

El efecto Doppler-Fizeau en la teoría ondulatoria clásica

El efecto Doppler-Fizeau en la relatividad especial

Bibliografía

Índice onomástico

Einstein dio a conocer su teoría de la relatividad a comienzos del siglo xx a través de una serie de artículos que transformaron el paradigma de la ciencia. La importancia de esta y otras ideas lo sitúan como un punto de quiebre en la historia de la física; sin embargo, se sabe poco del origen de esta revolución del pensamiento. Jean Eisenstaedt se propone en esta obra indagar en el pasado de esas investigaciones y reconstruir la historia de los conceptos de relatividad, luz y gravitación antes de Einstein, y lo hace de manera casi arqueológica: desempolva artículos olvidados en antiguas revistas científicas y memorias de academias, trae a la luz personajes marginados como Robert Blair o John Michell y recuerda además fértiles fracasos científicos como los de Newton y Doppler. Actualiza, en pocas palabras, más de doscientos años de historia de la física.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA



FONDO
DE CULTURA
ECONÓMICA

Índice

Sumario	8
Agradecimientos	9
I. Antes de Einstein...	10
II. La relatividad: de Galileo a Newton	12
A propósito de la “relatividad”	12
Descartes, Galileo: sistemas inerciales y principio de la relatividad	14
Newton: espacio, tiempo, las definiciones	16
El principio de la relatividad	22
III. La luz: de Galileo a Rømer	24
Galileo y el movimiento sucesivo	25
Descartes y Huygens	26
La velocidad de la luz: de Cassini a Rømer	32
IV. La luz en los Principia	36
La óptica de Newton antes de los Principia	36
Los Principia	39
De Newton a Clairaut, la óptica de los Principia	41
Una óptica balística	43
Newton y la refracción astronómica	48
V. Bradley y la aberración	54
Bradley y los satélites de Júpiter	54
Del paralaje a la aberración	55
Las consecuencias del descubrimiento de la aberración	62
VI. El color de la luz	65
Newton, Clairaut y el color de los satélites de Júpiter	65
De Mairan	67
Melvill y la aberración	69
El sistema de la emisión	71
VII. Michell y las estrellas	73
John Michell	73
La distancia de las estrellas	75
Las estrellas dobles: la predicción	76

Las estrellas dobles: la observación	78
Pesar el mundo	79
VIII. Michell y la luz	81
La óptica de los cuerpos en movimiento en un contexto corpuscular	81
Luz y gravitación	82
Los cuerpos oscuros	84
¿Cómo medir una diferencia en la velocidad de la luz?	88
La estructura del experimento de Michell	91
Las tentativas de observación	93
Soldner y la desviación de los rayos luminosos	95
Laplace: la ambición unitaria	99
IX. Blair: la cinemática clásica de la luz	102
Un trabajo bisagra	106
Una cinemática de la luz ambigua	109
Blair y el “método” de Michell	110
Del “método” de Michell al efecto Doppler-Fizeau	111
Un “fenómeno muy curioso”	113
El instrumento de Blair	115
Un programa de observación de las velocidades radiales	117
De Blair a Arago	119
X. El experimento de Arago	122
De Michell a Arago	122
Arago: una carrera relámpago	123
El experimento de Arago	127
Las observaciones de Arago	129
Los inconvenientes de una novedad	138
XI. La teoría de las ondulaciones de Fresnel	141
Fresnel y el experimento de Arago	145
El éter parcialmente perturbado...	146
Una teoría inventada	147
Un punto de vista retrospectivo	148
XII. La velocidad de la luz	151
Los experimentos sobre la velocidad de la luz	151
El efecto llamado Doppler...	154

La interpretación de Doppler	156
El efecto Doppler revisado por Fizeau	158
De Michell a Fizeau, pasando por Blair y Doppler	162
El experimento incomprendido de Arago	164
XIII. 1850-1900	167
Las teorías de la luz en la segunda mitad del siglo XIX	167
La influencia del movimiento de la Tierra en los experimentos de óptica	169
El nacimiento de la espectroscopía	172
El efecto Blair-Michell reencontrado sin cesar	174
¿Fresnel o Stokes?	175
Los experimentos de Michelson	177
XIV. La nueva cinemática	180
Óptica y electromagnetismo	180
Einstein, luz y relatividad	187
La inercia de la energía	193
¿Revolucionario?	194
XV. De Newton a Einstein	198
La cinemática: de Blair a Einstein	199
Hacia una teoría relativista de la gravitación	199
El experimento de Michell y el efecto Einstein	200
La desviación de los rayos luminosos	201
XVI. ¿Hay que olvidar la historia?	203
Apéndice	205
El efecto Doppler-Fizeau en la teoría ondulatoria clásica	205
El efecto Doppler-Fizeau en la relatividad especial	205
Bibliografía	207
Índice onomástico	223