

**LEYES FISICAS VERSUS LEYES
EXPERIMENTALES: EL INTERCAMBIO DE
INFORMACION ENTRE BREWSTER Y BIOT
ACERCA DE LA RELACION ENTRE LAS LEYES
DE DOBLE REFRACCION Y LAS DE
POLARIZACION (1813-1819)**

MARIANO COLUBI LOPEZ
Universidad Autónoma de Madrid

RESUMEN

El flujo de información acerca de la explicación de los fenómenos luminosos de polarización y doble refracción, entre 1800 y 1820, no se desplazó exclusivamente de las Islas Británicas a Francia, como se puede defender si se sigue la consolidación de la explicación ondulatoria en ese período desde Young hasta Fresnel. Si se atiende, por el contrario, a la explicación rival de dichos fenómenos, la emisionista, se descubre un ágil intercambio de información entre Brewster y Biot, lo que permite reivindicar la existencia en Gran Bretaña entonces de un polo receptor de ideas en óptica física de indudable importancia. Brewster y Biot, cuyas obras, sobre todo en el caso del primero, son de carácter básicamente experimental, creen, no obstante, que por encima del logro de una ley experimental está el logro de una ley física, deducible de los principios de la mecánica.

ABSTRACT

The exchange of ideas, between 1800 and 1820, on the explanation of polarization and double-refraction phenomena, did not happen just in the sense from the British Isles to France, as can be thought if the consolidation of the ondulatory explanation of those groups of phenomena from Young to Fresnel is remarked. If, besides, we look at the development of the rival explanation, the emissionist theory, a lively exchange of information between Brewster and Biot is to be discovered. This fact allows us to speak of an important receptor of ideas on physical optics then in Great Britain. Both authors, whose works are mainly of experimental character, believe nevertheless in the difference between an experimental and a physical law; the latter, somehow deducted from the principles of mechanics, is to be preferred to the former.

La presencia de esta idea, que no sorprende a los historiadores en el pensamiento de Biot, debido a su adscripción al patrón explicativo de la física laplaciana, sí lo hace en el caso de Brewster, al predominar en el estudio de los fenómenos físicos en la Gran Bretaña de aquel momento un enfoque puramente observacional.

It is easier to explain this idea in Biot's case, because of his inclusion in the Laplacian program of explanation of physical phenomena, than in Brewster's, since British physics in that time was predominantly observational.

Palabras clave: Siglo XIX, Óptica, Física, Gran Bretaña, Francia, Transmisión de la Ciencia.

Los historiadores de la ciencia han venido narrando el desarrollo de los conceptos principales de la óptica física durante las dos primeras décadas del siglo diecinueve de modo unitario y sesgado. El surgimiento de una propuesta ondulatoria para explicar la naturaleza de la luz es el principal protagonista de esa historia¹, y, dentro de ella, se hace hincapié en la importancia que tuvo, para el desarrollo de las ideas de Augustin Jean Fresnel (1788-1827) sobre el principio de interferencia entre 1816 y 1821, las aportaciones previas de Thomas Young (1773-1829) acerca de éste, expuestas entre 1801 y 1814.

Visto desde esta perspectiva, el flujo de información de ideas en óptica procedió principalmente desde las Islas Británicas a Francia², y se obtiene como conclusión que, dado el pobre rendimiento de las ciencias físicas en Gran Bretaña en aquel tiempo, y el correspondiente apogeo que éstas disfrutaban en la Francia dominada por el programa laplaciano en física, era natural que una idea aislada ofrecida por un inglés fuese generalizada y aplicada de manera sistemática por un físico francés.

Esta visión, sin ser falsa, debe ser, no obstante, completada y matizada. Si en vez de fijarnos en la constitución de la explicación ondulatoria de los fenómenos luminosos, nos fijamos en su contrincante en aquellos tiempos, a saber, la explicación emisionista o corpuscularista, entonces veremos cómo se dio un diálogo fértil entre ambas naciones en el ámbito de la óptica física, con la existencia de un polo receptor de ideas en Gran Bretaña de notable importancia.

El intercambio de ideas entre David Brewster (1781-1868) y Jean-Baptiste Biot (1774-1862) en el campo de los fenómenos de polarización y doble refracción entre los años 1813 y 1819 da fe de lo que aquí pretendemos afirmar. La utilización por Brewster de resultados de Biot para llegar a

explicaciones generales de dichos grupos de fenómenos y enlazarlas entre sí prueba que el estado de la óptica física en Gran Bretaña no era tan deplorable como se podía suponer. La capacidad observacional y experimental de Brewster no era inferior a la de Biot, quien en aquel momento era el representante en óptica del fastuoso programa laplaciano de explicación de fenómenos físicos.

La tradición newtoniana en óptica no se había perdido a comienzos del siglo diecinueve en Gran Bretaña. Los fenómenos de polarización resultaban difícilmente explicables por la opción ondulatoria hasta que no se generalizase el uso de vibraciones transversales al sentido de propagación de las ondas. Esto ocurrió entre 1819 y 1821 por medio de Fresnel. Durante el intervalo que va desde el descubrimiento de la polarización de la luz por reflexión por Étienne-Louis Malus (1775-1812) en 1808 hasta la utilización combinada de los principios de Christiaan Huygens (1629-95) y de interferencia por Fresnel para explicar de un modo simple ese fenómeno nuevo en 1821, la opción emisionista tuvo su oportunidad e intentó aprovecharla.

Como veremos, los trabajos de Brewster permiten acercarse a esta solución global de los fenómenos de polarización por doble refracción, ofrecida por Fresnel, de un modo más claro que los de Biot. Y eso a pesar de que Brewster, como Biot, no era partidario de la explicación ondulatoria, sino de la corpuscularista. Ambos eran grandes experimentalistas, pero el débito de Biot hacia la explicación de los fenómenos en términos de física laplaciana le impidió dar la importancia debida al estudio de determinados grupos de fenómenos que Brewster, con menos prejuicios teóricos, sí analizó en detalle. Veremos cómo se produce ese intercambio de información entre Brewster y Biot, que ayudará a equilibrar la visión habitual de la constitución de la óptica física durante las dos primeras décadas del siglo diecinueve³.

El estudio de este diálogo nos ayudará a elaborar un pequeño catálogo de conclusiones acerca de lo que nuestros autores entendían por ley física, frente a la idea de ley fundada sobre la realización de experimentos. Las discusiones entre Brewster y Biot sobre este aspecto mostrarán que, independientemente del carácter experimental de sus trabajos, ambos defendían la existencia de tal diferencia entre ambos tipos de leyes, y que, además, ninguno de los dos se conformaba con la formulación de una ley experimental; ésta era vista como más débil e incierta que una ley rigurosamente física, esto es, deducible, de un modo u otro, de los principios de la mecánica. Este celo puede entenderse como una pervivencia, a comienzos del siglo diecinueve, de un sentido dieciochesco en la defensa del prestigio de la visión mecánica de la naturaleza.

1. Presentación de los contendientes

Conviene, antes de seguir adelante, hacer una breve presentación de los autores estudiados⁴. Brewster fue un personaje influyente en la Escocia de su tiempo. Fue editor de diferentes publicaciones a lo largo de su vida, tanto de carácter científico como no científico; entre estas últimas destaca la *Edinburgh Encyclopaedia*. Figura entre la lista de fundadores de la Asociación Británica para el Progreso de las Ciencias, y fue un político liberal con amistades influyentes, entre ellas la de Henry Brougham (1778-1868), con quien, además, compartía el interés por los fenómenos luminosos: de hecho, Brougham llegó a publicar artículos de óptica en las *Philosophical Transactions* de Londres⁵.

La atención prestada por Brewster a los fenómenos ópticos viene motivada por su dedicación a la observación astronómica; sus preocupaciones por la mejora de los instrumentos y de las técnicas de medición se ven reflejadas en su obra *A Treatise on New Philosophical Instruments* (1813). Además de los estudios de los fenómenos de doble refracción y de polarización, que seguiremos en detalle en este artículo, Brewster se ocupó con brillantez y dedicación de grupos de fenómenos ópticos como los referentes a la reflexión metálica, fotoelasticidad y espectroscopía.

La figura de Biot es mucho más conocida que la de Brewster por los historiadores, pero no por ello vamos a dejar de contextualizar su estudio de los fenómenos ópticos aquí analizados con unas notas acerca de sus más amplios intereses científicos. Antes de consagrarse al estudio de los fenómenos físicos, Biot comenzó distinguiéndose como astrónomo. Biot estudió y enseñó en la *École Polytechnique*, y bajo la influencia de Laplace dedicó buena parte de su actividad al seguimiento, tanto matemático como experimental, de una variada gama de fenómenos naturales, como la caída de meteoritos, la variación del magnetismo terrestre con la altitud, galvanismo, magnetismo o composición química y constitución molecular de sustancias cristalinas. Como es sabido, se encargó también, entre 1806 y 1807, de la medición del grado de meridiano terrestre entre Barcelona y las Islas Baleares.

Dentro del más reducido campo de los fenómenos luminosos, y además de los aquí tratados, Biot destacó ante todo por el descubrimiento, en 1812, de la ley de dispersión rotatoria que hoy lleva su nombre. Según ella, la rotación de luz polarizada depende inversamente del cuadrado de la longitud de onda (en términos del propio Biot, del cuadrado de los *fits* newtonianos). Más tarde descubre que esta ley se cumple independientemente de la sustancia que polarice el haz de luz, sea dicha sustancia sólida, líquida o gaseosa.

Brewster publica una serie de trece memorias en los volúmenes de las *Philosophical Transactions* de la Royal Society de Londres entre los años 1813 y 1819 sobre los fenómenos de doble refracción y de polarización, en las que intenta establecer una relación entre ambos. Entre ellas, sobresale por su carácter de compendio de todo su trabajo en ese tema la memoria de 1818 titulada *Sobre las leyes de polarización y doble refracción en cuerpos cristalizados regularmente* [BREWSTER, 1818, pp. 199-273]. Biot, por su parte, trabaja en la explicación de esos fenómenos entre 1812 y 1819, y publica, además de su *Traité de physique expérimentale et mathématique* de 1816, nueve memorias en los *Annales de Chimie et de Physique* entre 1815 y 1821, y cuatro memorias importantes en los volúmenes de las *Mémoires de l'Institut de France* para 1811 y en los de las *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France* para los años 1816, 1817 y 1818 respectivamente.

Esta última memoria de 1818, titulada del mismo modo que la de Brewster, pero invirtiendo el orden de los términos *doble refracción y polarización*, pretende ser una contestación punto por punto a la memoria de éste [BIOT, 1818, pp. 177-384]. Analizaremos el diálogo entre ambos para probar la fertilidad del intercambio de ideas entre los dos autores, que eran las mayores autoridades sobre el tema en aquel momento. Ambas memorias son consideradas por los autores como las expresiones más acabadas de sus trabajos y reflexiones acerca de ambos tipos de fenómenos.

2. Introducción histórica al problema

Antes de entrar a analizar los contenidos de las dos memorias, conviene recordar por qué dichos fenómenos ópticos constituían un problema para los estudiosos. En 1690, Huygens publicaba su *Traité de la lumière*, en el que se hacía eco de las investigaciones de Erasmus Bartholin (1625-98)⁶ sobre la extraña propiedad de los cristales romboédricos de espato de Islandia de dividir la luz natural incidente sobre el cristal en dos rayos, de los cuales uno seguía las leyes ordinarias de la refracción y el otro se hallaba afectado por una refracción extraordinaria. El cristal ofrecía, por tanto, una doble imagen del objeto que se hallara tras él [HUYGENS, 1690, cap. V, § 6, pp. 50-51]. Por aquel entonces se consideraba que esta propiedad era única de esta clase de cristal.

Para explicar esta doble refracción Huygens aplica su principio de transmisión de ondas luminosas en medios diáfanos, con la especificidad de que, mientras que para el rayo ordinario (O) las ondas que formaban el frente eran esféricas, para el extraordinario (E) la inclinación que éste toma con

respecto al rayo incidente debía ser explicada recurriendo a ondas no esféricas, sino elipsoidales. La variación de velocidad de los rayos en el espato era expresada por las diferencias entre los semiejes de revolución y mayor del elipsoide que representaba la difusión del rayo E en el cristal [HUYGENS, 1690, cap. V, § 19, p. 58]. Este enunciado constituye la conocida por nuestros protagonistas como ley de Huygens. El semieje de revolución del elipsoide coincidía con el diámetro de la esfera que representaba la propagación del rayo O.

En esta obra Huygens ofrece definiciones rigurosas de nociones tales como eje de un cristal y sección principal de éste. Para Huygens, el eje es la línea cuya inclinación es la misma con respecto a las tres aristas que concurren en uno de los dos ángulos sólidos obtusos del prisma [HUYGENS, 1690, cap. V, § 25, p. 62]⁷. La sección principal del cristal pasa por su eje y por la arista vertical que converge en ese mismo ángulo [HUYGENS, 1690, cap. V, § 8, pp. 51-52]⁸.

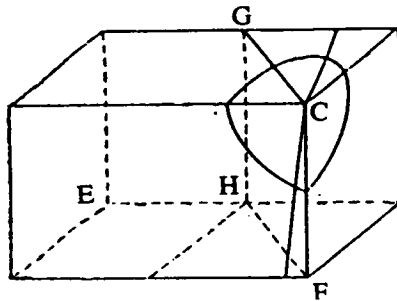
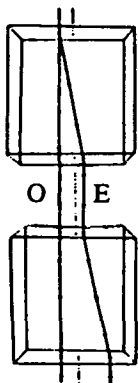


FIGURA 1. *CE es, para Huygens, el eje del prisma CE con respecto a la arista CF y a la sección principal CGHF*

El fenómeno que Huygens no podía explicar por medio de su principio, asociado como vemos a una teoría ondulatoria, era que, si se superponían dos cristales de espato de Islandia, estuviesen dispuestos uno junto a otro o separados, y dependiendo de la disposición de las secciones principales de ambos cristales, los rayos O y E salidos del primer cristal podían refractarse de nuevo en otros dos en el segundo cristal, como debía esperarse, o podían no dividirse. En este caso, se daba la particularidad añadida de que el rayo O se refractaba extraordinariamente, y el E, de manera ordinaria [HUYGENS, 1690, cap. V, § 40, pp. 89-91]. Esta circunstancia ocurre cuando las secciones principales de los cristales son perpendiculares entre sí.

PARALELAS



PERPENDICULARES

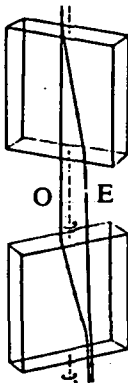


FIGURA 2. Representación del fenómeno inexplicado por Huygens

Este problema fue legado a la posteridad, hasta que Malus, en 1808, logra resolverlo de un modo indirecto. Malus logró que luz natural reflejada a un ángulo de incidencia determinado mostrase el mismo comportamiento, al pasar a través de un cristal de cal carbonatada, que Huygens no había podido explicar [MALUS, 1811]. Con este descubrimiento por parte de Malus se pone de manifiesto que dicho fenómeno no se debe a la acción peculiar de un tipo de cristal sobre la luz, sino que se debe a una propiedad que es adquirida por ella misma en diferentes circunstancias⁹. En ese tiempo ya se había descubierto que no sólo el espato de Islandia ofrecía el fenómeno de doble refracción, sino que gran cantidad de sustancias cristalinas la poseían, aunque en la sustancia mencionada esa propiedad resultaba especialmente evidente.

A partir de Malus se identifica el eje de un cristal con su eje de doble refracción, esto es, la dirección en la cual la fuerza doblerefringente es nula, con lo que las imágenes de los rayos O y E coinciden¹⁰; es, por lo tanto, en la sección principal del cristal en la que no se da un desplazamiento del rayo E con respecto al plano del rayo incidente.

El hecho de que fuese sólo el rayo O o el E el refractado, dependiendo de que la sección principal del cristal fuese paralela o perpendicular al plano de reflexión del rayo incidente, hacía pensar a los investigadores que el fenómeno se producía debido a la orientación del eje de las partículas luminosas en uno u otro plano. Esta visión corpuscular de la luz corresponde a un planteamiento emisionista, y Malus llamó a dicha orientación polarización¹¹.

La filiación newtoniana de esta tradición es evidente, y no sólo por defender la materialidad de la luz, sino por el hecho de que la polarización de las partículas luminosas, que engendran en su movimiento el rayo de luz, recuerda a los cuatro lados o caras de los rayos luminosos que Sir Isaac Newton (1643-1727) había postulado en su *Opticks* [NEWTON, 1704, Libro III, Parte I, *Query*, 26, p. 311]. Estos lados o caras explicaban la aparición de los accesos de fácil transmisión y reflexión que adquirirían las partículas luminosas alternativamente, los cuales provocaban, a su vez, los anillos cromáticos característicos al atravesar dos delgadas placas adyacentes de cristal [NEWTON, 1704, Libro II, Parte III, Propositiones XII y XIII, pp. 244-48].

De hecho, tanto Brewster como Biot comparan la formación de los anillos de Newton con la de otro efecto cromático descubierto por François Arago (1786-1853) en 1811. Éste consiste en que, cuando se transmite luz polarizada blanca a través de placas delgadas de cal sulfatada y de mica, ésta se resuelve en dos haces de colores complementarios, pudiendo separarse éstos al analizar el fenómeno a través de un cristal dotado de la propiedad de la doble refracción [BREWSTER, 1818, pp. 202-03 & BIOT, 1818, p. 181]. Brewster y Biot consideraban que el cálculo de las intensidades luminosas —o de los colores, en el caso de que la luz no fuese homogénea— podía realizarse en ambos fenómenos según las mismas reglas.

Es precisamente por medio del estudio de estos fenómenos cromáticos debidos al paso de luz polarizada a través de cristales doblerefringentes como avanzará la explicación del fenómeno de la polarización en el ámbito de la teoría corpuscular de la luz. Tanto Brewster como Biot estudiarán con profusión y detalle esas manifestaciones de color para determinar cómo se podría calcular el carácter de las tonalidades en cualquier punto del cristal de que se trate, si estos fenómenos tienen alguna relación con la propiedad de la doble refracción, y, más en concreto, si las velocidades respectivas de los rayos O y E en el cristal y la formación de esas imágenes de colores complementarios que había descubierto Arago son fenómenos interdependientes.

3. Contenido de la Memoria de Brewster

Tras esta introducción al problema, podemos pasar a analizar el contenido de las dos memorias de Brewster y de Biot. Comenzaremos por la del primero, ya que es anterior en el tiempo; la memoria de Brewster se leyó ante la Royal Society el día 15 de enero de 1818, y la de Biot ante la Academia de Ciencias de París, el 29 de marzo de 1819. Por lo demás, la segunda, como queda señalado, es concebida como una contestación a la primera.

Brewster comienza haciendo una breve referencia a los logros que hasta su momento se han logrado en la determinación de las leyes de doble refracción. Dice Brewster que Young fue el primero en señalar la concordancia entre la teoría de Huygens y la doble refracción del espato calcáreo. Los experimentos de William Hyde Wollaston (1766-1828) confirmaron y llevaron más allá tal concordancia, y las observaciones de Malus llevaron la ley de Huygens a su mayor generalidad [BREWSTER, 1818, p. 200].

En 1809, continúa Brewster, Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) intentó relacionar la desviación del rayo E con la acción de fuerzas atractivas y repulsivas, mediante las cuales los fenómenos de reflexión y refracción de la luz eran también explicados¹². Según Laplace, la refracción extraordinaria se explica por medio de una fuerza repulsiva que emana del eje del cristal [LAPLACE, 1809, p. 309], y que Brewster asimila con el eje de refracción extraordinaria, o sea, con la dirección del rayo E en el cristal. Laplace muestra, por procedimientos analíticos, que la diferencia entre los cuadrados de las velocidades de los rayos O y E es proporcional al cuadrado del seno del ángulo que el rayo E forma con el eje [LAPLACE, 1809, pp. 305-07, p. 306]¹³. Laplace demuestra cómo el principio de Fermat o el de mínima acción tienen como consecuencia la ley de Huygens, según que el radio del elipsoide de Huygens represente la velocidad o el tiempo respectivamente [LAPLACE, 1809, p. 309].

La brillantez de esta teoría de Laplace es indudable, continúa Brewster, pero debemos asegurarnos de que la ley de Huygens sea en efecto la ley universal de la doble refracción, y no una expresión correcta y elegante del fenómeno tal como ocurre en un solo cristal, como es el espato calcáreo. Brewster se queja de la generalización apresurada de que ha sido objeto la ley de Huygens, y considera que el análisis observacional de un gran número de cristales debe ser realizado antes de que se pueda concluir la universalidad de la ley [BREWSTER, 1818, p. 201].

En este sentido, continúa Brewster, Malus ha examinado las propiedades del cuarzo, la aragonita y el sulfato de barita, y ha demostrado la identidad de su acción con la del espato calcáreo, con lo cual, se podría suponer que la extensión de la ley de Huygens no ofrece grandes problemas. Pero Brewster señala que los experimentos de Malus son erróneos, ya que dos de las cuatro sustancias cristalinas analizadas, concretamente la aragonita y el sulfato de barita, poseen no un eje de doble refracción, como los otros dos cristales, sino dos, con lo que la acción entre todos ellos no puede ser idéntica, ni la refracción del rayo E puede ser explicada por medio de un único elipsoide [BREWSTER, 1818, p. 201]. Estos experimentos defectuosos de Malus ponen en riesgo toda la labor matemática y experimental que hacía de la ley de

Huygens, mediante los trabajos de Laplace, una ley rigurosamente física, deducible de los principios de la mecánica [BREWSTER, 1818, p. 202].

Brewster propone mejorar el método de realización de observaciones para determinar la ley de refracción extraordinaria. Esto se puede realizar, según Brewster, de dos maneras: o bien midiendo directamente y con gran exactitud la desviación del rayo E, cuando la luz pasa cerca del eje del cristal, o bien, lo que para Brewster es más realizable y correcto, examinando los fenómenos cromáticos que aparecen si transmitimos luz polarizada a lo largo de los ejes de doble refracción [BREWSTER, 1818, p. 202].

Brewster reconoce que estos fenómenos fueron percibidos y estudiados por primera vez por Arago en 1811, y dice que él lo hizo un año después de modo independiente. Aun así, el observar esos fenómenos a lo largo de los ejes de doble refracción es propio de Brewster, y no de Arago; Biot, dice Brewster, siguió el método de observación de Arago, y no el suyo propio [BREWSTER, 1818, p. 203]¹⁴. Brewster elogia la capacidad experimental de Biot, pero señala que de los doce tipos de cristales analizados por Biot, sólo uno de ellos tenía para éste dos ejes de doble refracción, mientras que para Brewster eran siete de ellos los que presentan más de un eje de este tipo [BREWSTER, 1818, p. 203-04].

También critica Brewster que Biot divida los cristales en dos tipos, repulsivos o atractivos, según que la fuerza que emana de su eje produzca que el rayo E se refracte al exterior o al interior, respectivamente, del rayo O. Brewster prefiere hablar de fuerzas positivas y negativas, de modo que se denote simplemente la oposición existente entre las fuerzas de polarización, y no su naturaleza [BREWSTER, 1818, pp. 218-19 y 233]. Por lo demás, Brewster demuestra matemáticamente cómo la acción de cualquier eje puede ser transformada en la de dos ejes ortogonales de sentido contrario, o en general en una combinación cualquiera de un número indeterminado de ejes [BREWSTER, 1818, pp. 245-53].

Asimismo, en el caso del cristal que Biot reconoce que tiene más de un eje de doble refracción, Brewster le achaca que dé cuenta de la acción del segundo de los ejes de un modo completamente hipotético, suponiendo la acción de fuerzas secundarias arbitrarias, y representando el fenómeno por medio de fórmulas empíricas [BREWSTER, 1818, p. 252]. Brewster asegura que esas supuestas irregularidades en la cal sulfatada [*sulfate of lime*] son los resultados legítimos y calculables de la acción de dos ejes de doble refracción ortogonales entre sí [BREWSTER, 1818, p. 204].

De todas estas circunstancias, Brewster induce que se ha pretendido generalizar los resultados obtenidos con excesiva facilidad, sin disponer de la

suficiente base experimental para ello. Brewster pretende subsanar tal deficiencia, y para ello analiza 165 especies de cristales poseedoras de la propiedad de la doble refracción. De ellos, en 100 Brewster pudo determinar el número de ejes de doble refracción que poseían. Así, sigue Brewster, examinando y midiendo las amplitudes de las tonalidades que los cristales exhiben a diferentes distancias angulares de los ejes de donde las fuerzas emanan, Brewster logra formular un principio general que explica el desarrollo en los cristales de las fuerzas de polarización.

Brewster señala que su principio constituye una ley rigurosamente física; esto es, no se trata de una expresión de procedencia empírica, sino que se halla fundada en los principios de la mecánica [BREWSTER, 1818, p. 205]. Como veremos, esta pretensión de Brewster es injustificada. Esa ley permite calcular las tonalidades de los anillos de color, así como todos los fenómenos de doble refracción, con la misma exactitud, dice Brewster, con la que calculamos los movimientos y posiciones de los cuerpos celestes.

Tras esta introducción, Brewster ofrece como primer resultado interesante el que, en los veintitrés cristales que muestran un único eje de doble refracción, éste coincide en todos los casos con lo que Brewster llama eje de polarización, o diámetro de no polarización [BREWSTER, 1818, p. 211]. Este eje es la línea perpendicular al plano en el que se forman los anillos concéntricos de color y que pasa por el centro de la formación cromática. La incidencia de la luz polarizada es perpendicular al cristal, y Brewster habla de diámetro porque da forma esférica al cristal, de modo que no haya que tener en cuenta ni el índice de refracción del cristal ni las variaciones en su espesor respectivamente [BREWSTER, 1818, p. 214].

Esta coincidencia de ejes la descubre Brewster al transmitir, primero, luz polarizada a través del eje del cristal, y analizar la luz emergente mediante un prisma de espató calcáreo, de modo que se observa entonces una serie de círculos concéntricos nítidos; y, segundo, luz natural también en un plano paralelo al eje del cristal, y observar que las imágenes producidas por los dos rayos O y E se funden en una sola. Si el plano de transmisión del rayo no fuese paralelo, sino perpendicular al eje del cristal, no habría imagen de ningún tipo en el primer caso, y las imágenes producidas por los rayos O y E estarían separadas por una distancia máxima, en el segundo [BREWSTER, 1818, p. 210-11]. Así, para Brewster, en el caso estudiado, eje del cristal, eje de doble refracción y eje de polarización coinciden.

Seguidamente, Brewster afirma que los cuadrados de los diámetros de los anillos de color son proporcionales a los números que representan las tonalidades correspondientes en la tabla de Newton, y que los cuadrados de los

diámetros de anillos semejantes, producidos por placas de diferentes espesores, son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de esos espesores [BREWSTER, 1818, p. 213]. Estos dos resultados, dice Brewster, fueron obtenidos por primera vez por Biot, y llevan a la conclusión general de que las tonalidades producidas a diferentes ángulos con respecto al eje del cristal son entre sí como el cuadrado del seno del ángulo que el plano del rayo polarizado forma con ese eje.

Brewster cree que esta ley es aplicable a todos los cristales de su tabla, y puede ser considerada, por tanto, como una ley general, utilizable con total confianza en adelante. Aun así, Brewster critica a Biot porque en los casos en los que éste dice haberse basado para obtener experimentalmente tal relación, ésta no se da, o al menos se desvía mucho para grandes ángulos de refracción [BREWSTER, 1818, p. 213].

Brewster pasa a estudiar la forma de los fenómenos cromáticos cuando la sustancia cristalina doblemente refringente tiene dos o más ejes de polarización. Existen, por tanto, en esos cristales dos líneas a lo largo de las cuales no se da en la luz incidente cambio alguno en su plano de polarización. El arco que une sobre la superficie de la esfera cristalina los polos de no polarización, que son los extremos de los ejes a su salida de la esfera por ambos lados, no excede nunca del ángulo recto. Brewster descubre que las diferentes medidas de ese arco en todos los cristales se reparten regularmente por todo el cuadrante¹⁵.

La forma de los anillos no es ya esférica, sino elíptica, pero se reparten simétricamente alrededor de los polos, como sucedía en los cristales de un solo eje; esos anillos están atravesados por grandes bandas negras que cambian de forma según se orienten las secciones principales de los cristales entre sí [BREWSTER, 1818, pp. 226-29].

En este apartado Brewster recoge las investigaciones de Biot por las que éste considera que la mica posee dos ejes repulsivos y perpendiculares entre sí, uno de los cuales se halla paralelo al plano de la lámina analizada, y cuyas intensidades son como 100 a 677. Brewster responde que esa conclusión se basa en observaciones de tonalidades realizadas exclusivamente en las dos direcciones de los ejes, y que las tonalidades observadas en la mica en otras direcciones pueden resultar incompatibles con esa disposición de los ejes. Tras haber observado Brewster las tonalidades desde prácticamente todos los ángulos en los cuatro cuadrantes, éste concluye que, a partir de la ley general de polarización que ha descubierto, los fenómenos no parecen apoyar la existencia de ningún sistema de fuerzas en particular [BREWSTER, 1818, p. 231].

Concretamente, Brewster ofrece dos construcciones de dos ejes rectangulares y otras dos de ejes oblicuos que darían como resultado las

mismas tonalidades que la defendida por Biot [BREWSTER, 1818, p. 232]. Según Brewster, no hay modo de saber cómo se compone la fuerza resultante a partir de las fuerzas particulares, ya que se desconocen el número y posición de éstas [BREWSTER, 1818, p. 232], aunque, atendiendo a las circunstancias específicas de cada caso, alguna de las configuraciones de ejes puede ser preferible a las otras [BREWSTER, 1818, pp. 232-33].

Llega Brewster entonces a exponer su ley general de las tonalidades para cualquier cristal con un número cualquiera de ejes. Parte de la certeza de la ley experimental ya mencionada por la que la tinta en un punto de la esfera cristalina es proporcional al cuadrado del seno del ángulo que forman los radios de la esfera al ecuador y al punto en cuestión ($\text{sen}^2 a$) [BREWSTER, 1818, p. 234]. Brewster hace variar entre sí los sentidos positivo y negativo de los ejes, siendo esos ejes meridianos en la esfera y limitando en su superficie un triángulo esférico cuyo tercer lado es el ecuador de ésta [BREWSTER, 1818, p. 237].

Así, por medio de una serie de transformaciones de expresiones de trigonometría esférica [BREWSTER, 1818, pp. 238-39], Brewster enuncia su ley: la tinta producida en cualquier punto de la esfera por la acción conjunta de dos ejes es igual a la diagonal de un paralelogramo cuyos lados representan las tonalidades producidas por cada eje separadamente y cuyo ángulo es el doble del formado por los dos planos que pasan a través de ese punto de la esfera y los ejes respectivos [BREWSTER, 1818, pp. 239-40]. Brewster compara los resultados obtenidos por la aplicación de la fórmula a los obtenidos por Biot en sus experimentos con la cal sulfatada, que Brewster toma de su *Traité* de 1816, y concuerdan unos con otros dentro de límites aceptables [BREWSTER, 1818, p. 240]¹⁶.

En la siguiente sección de la memoria, Brewster reniega de la conclusión de Biot y Laplace de que si la ley de Huygens es admitida, entonces la refracción extraordinaria es necesariamente producida por una fuerza repulsiva [BREWSTER, 1818, p. 245]. Brewster no está de acuerdo en que esa fuerza tenga que ser repulsiva, e insiste en que los fenómenos de polarización y de doble refracción no resultan tan fácilmente asimilables a la acción de fuerzas determinadas atractivas o repulsivas como los de reflexión y refracción simple. Sería absurdo para Brewster, desde un punto de vista físico, que la refracción, por ejemplo, se explicase mediante una fuerza repulsiva del medio externo sobre la luz; en los casos de los fenómenos de polarización y de doble refracción, por el contrario, no sería así [BREWSTER, 1818, p. 246].

Ante las clases de cristales que, como la leucita, no ofrecen ni doble refracción ni fenómenos cromáticos debidos al paso de la luz polarizada, Biot

reacciona hablando de que, entre el elipsoide achatado que explica según Huygens el comportamiento de los cristales repulsivos, y el alargado, de los atractivos, existe el estadio neutral de la esfera, que provoca, por tanto, la ausencia de doble refracción [BREWSTER, 1818, p. 255]. Brewster repone que esa observación no explica el hecho de que los cristales con forma primitiva cúbica u octoédrica no ofrezcan doble refracción; simplemente es un modo diferente de describir el hecho [BREWSTER, 1818, p. 256].

Finalmente, Brewster vuelve al tema con el que había comenzado la redacción de la memoria, esto es, al establecimiento de las leyes de la doble refracción en cristales con un número cualquiera de ejes. Comienza diciendo que a partir de la coincidencia, en los cristales de un eje, de los ejes de polarización y doble refracción, puede asegurarse que la ley de Huygens representa adecuadamente todos los fenómenos de los cristales de ese tipo, y no sólo los del espato calcáreo [BREWSTER, 1818, p. 267].

Pero, ya que la mayoría de cristales goza de más de un eje de polarización, dice Brewster que es interesante saber si existen cristales con dos ejes de refracción extraordinaria; y si la respuesta es afirmativa, buscar sus leyes. Las dificultades técnicas para responder a estas preguntas son, según Brewster, enormes [BREWSTER, 1818, p. 267], pero logra subsanarlas en parte construyendo un prisma dotado de un gran ángulo de refracción [BREWSTER, 1818, p. 268].

Sobre él Brewster observa que las fuerzas de polarización y de doble refracción varían proporcionalmente, midiendo las desviaciones del rayo E con respecto a los polos de no polarización. Brewster concluye de estas experiencias que los fenómenos de doble refracción pueden ser calculados por medio de la misma ley que ya había establecido para los fenómenos de polarización, sea cual sea el número de ejes de doble refracción por el que dichos fenómenos son producidos [BREWSTER, 1818, pp. 268-69].

Sin explicar cómo llegó a tal resultado por vía experimental, Brewster se arma del factor $\text{sen}^2 a$, que es proporcional al incremento del cuadrado de la velocidad del rayo E, y de la ley de Huygens, para obtener la siguiente expresión: el incremento del cuadrado de la velocidad del rayo E, producido por la acción de dos ejes de doble refracción, es igual a la diagonal de un paralelogramo cuyos lados son los incrementos de los cuadrados de las velocidades producidos por cada eje separadamente, siendo dichas velocidades calculadas por la ley de Huygens; el ángulo entre ambos lados es el doble del formado por los planos que pasan por el rayo y los ejes respectivos [BREWSTER, 1818, p. 270]. Cuando los dos ejes se superponen, entonces el

caso se reduce al de los cristales de un único eje, para los cuales ya queda establecido que se cumple la ley de Huygens.

Finaliza Brewster su memoria señalando que los fenómenos de doble refracción no pueden ser referidos a la acción ordinaria de fuerzas atractivas y repulsivas. Si un rayo de luz es expuesto a la acción de dos ejes atractivos o repulsivos, en ningún punto de incidencia la resultante de esas fuerzas será cero, con lo que no se darían ejes de doble refracción. Si uno es atractivo y otro repulsivo, las combinaciones resultantes no son compatibles con los fenómenos observados [BREWSTER, 1818, p. 271].

4. Análisis crítico de la Memoria

Como vemos, y en resumen, se puede decir que la obra de Brewster está caracterizada por su aproximación observacional y experimental al problema. En este sentido Brewster es reflejo del empirismo del que los investigadores newtonianos en óptica hicieron gala durante todo el siglo dieciocho. En otro sentido, sin embargo, no es newtoniano, sobre todo si como tal entendemos el proyecto de explicar todo el mundo natural por medio de fuerzas atractivas y repulsivas de corto alcance entre partículas de materia; este principio, que resume la herencia newtoniana tal como fue recogida por la física laplaciana¹⁷, fue constantemente combatido por Brewster, como hemos visto.

La pretensión de haber derivado su ley de tonalidades de los principios de la mecánica habría hecho de él, si dicha pretensión hubiese sido justificable, un laplaciano *malgré lui*. Aun así, su base teórica emisionista es indudable, basada en la materialidad newtoniana de la luz, e incluso acepta el recurso a las fuerzas como base de explicación de los fenómenos luminosos.

Desde el punto de vista del contenido de la memoria, destaca el cuidado con que Brewster va vinculando sucesivamente en cristales con uno o varios ejes los fenómenos de polarización con los de doble refracción. La construcción de la línea argumental de la memoria de Brewster es, sin duda, brillante. La relación entre las leyes de ambos fenómenos se establece a través de una analogía formal, a saber, la establecida por la validez en ambos contextos de la proporcionalidad del factor $\sin^2 a$, a pesar de que la base de la ley de los fenómenos de polarización sea empírica.

La dedicación de Brewster a los fenómenos cromáticos de polarización por doble refracción se salda con el descubrimiento, primero, de la pluralidad, y luego, de la superposición de los ejes de polarización y doble refracción.

Considera que el establecimiento de una relación entre ambos tipos de fenómenos es fértil y provechosa.

Aun así, es el análisis de los fenómenos cromáticos de polarización el que le lleva a considerar los de doble refracción, y no viceversa. En ese sentido, su deducción de las expresiones de las velocidades de los rayos O y E a partir de la ley de tonalidades no está suficientemente respaldada por una determinación experimental de aquéllas. Por ello, el hecho de que las dos leyes estén formuladas en los mismos términos se debe más a la voluntad que al acierto de Brewster. Su verdadero objeto de preocupación lo constituye polarización, aunque comience el planteamiento del problema basándose en una breve historia reciente acerca de los pasos dados hacia el establecimiento de las leyes de doble refracción.

En realidad, cuando Brewster comenzó a comunicar sus resultados acerca de estos grupos de fenómenos, existía un razonable consenso acerca de los valores de las velocidades de los rayos O y E, como muestran las memorias de Malus y Laplace de 1808 y 1809. Se trataba de una cuestión de grado, de precisión en las mediciones. Esta cuestión reclamará, como veremos, los intereses de Biot.

Lo que sí era, en aquel momento, una verdadera incógnita era el significado del hecho de que los rayos O y E se hallasen polarizados en planos ortogonales entre sí, así como las posibles consecuencias empíricas de este hecho. Este problema, que vincula directamente la explicación de los fenómenos de polarización y de doble refracción, fue abordado por Brewster, aunque no pudo resolverlo. Para ello había que esperar a Fresnel, quien explicó la formación de los fenómenos cromáticos aplicando un principio de interferencia refinado a la interacción que pudiera darse entre los rayos O y E¹⁸. Pasemos ahora al análisis de la contestación de Biot a Brewster.

5. Contenido de la Memoria de Biot

La extensa memoria de Biot consta de dos partes, de las cuales la primera contiene la exposición general de su teoría [BIOT, 1818, pp. 177-239], y la segunda la comparación de ésta con las observaciones [BIOT, 1818, pp. 239-384]. Vamos a llevar a cabo en estas páginas un análisis detallado de la primera parte, sobre todo en lo que se refiere a la contestación que Biot da a Brewster acerca de los aspectos que éste criticó de aquél en la memoria que acabamos de estudiar.

Biot comienza con un exordio en el que expone de modo general el método y sentido de la actividad que investiga el funcionamiento de la

naturaleza. Recoge la opinión de Newton por la cual toda la filosofía natural consiste en la concatenación de tres elementos: hallar y determinar los fenómenos, sus leyes experimentales, y finalmente las fuerzas que los producen [BIOT, 1818, p. 178]. Una vez estas fuerzas sean conocidas, todos los detalles de los fenómenos no son más que consecuencias determinables por el cálculo. Esta división tajante entre leyes experimentales y leyes derivadas de los principios de la mecánica resulta muy característica de la física laplaciana en particular y de la visión mecánica de la naturaleza en general, y constituye tanto las bases de su grandeza como uno de los principales motivos de su fracaso.

Biot dice que, con respecto a las leyes de doble refracción y polarización, la investigación se halla en el segundo de los niveles, esto es, en el de la determinación de sus leyes empíricas [BIOT, 1818, p. 178], sin que ninguno de los dos sistemas que aspiran a explicar la naturaleza de la luz, el emisionista y el ondulatorio, haya recibido confirmación definitiva.

Comienza Biot su memoria diciendo que Brewster no aporta nada nuevo con respecto a las propias leyes de la polarización, pero que en cuanto a la doble refracción, y a los fenómenos cromáticos que son la consecuencia de esa doble refracción, Brewster los ha examinado de modo infatigable en un gran número de cuerpos cristalizados [BIOT, 1818, p. 181]. No se entiende por qué Biot atribuye a la doble refracción los fenómenos cromáticos, cuando éstos sólo surgen como reacción del cristal al paso a su través de luz polarizada. Si Brewster no aporta nada nuevo con respecto a las leyes de la polarización, sí lo hace en cambio con respecto a una de las consecuencias más importantes de la existencia de luz polarizada, como son los propios fenómenos cromáticos en cristales afectados por la propiedad de la doble refracción.

Biot continúa asegurando que la ley de las tonalidades que Brewster ha obtenido es empírica por el modo de obtención de sus elementos, pero que éste la presenta como una construcción geométrica excesivamente compleja que oscurece la precisión de la propia ley. En concreto, Biot no entiende la idea de la transformación de los ejes que Brewster propone [BIOT, 1818, p. 181], ya que considera que no es una generalización útil, esto es, que lleve a explicar de un modo más simple los fenómenos. En este sentido, no le falta razón a Biot.

Sigue Biot criticando la exposición que Brewster hace de los recientes intentos por explicar la doble refracción. Biot dice que Laplace no da cuenta de la refracción del rayo E por una fuerza repulsiva que emana del eje del cristal, como Brewster la ha representado, sino que Laplace no hace ninguna suposición sobre la naturaleza de las fuerzas, excepto que éstas deben ser atractivas o repulsivas y que no poseen acción sensible más que a distancias

muy pequeñas [BIOT, 1818, p. 182], esto es, que sean de corto alcance. No parece que Brewster vaya más allá en sus suposiciones de lo que Biot le permitiría.

Biot continúa rechazando las afirmaciones de Brewster de que las experiencias de Malus de la doble refracción son erróneas, y de que, por tanto, éstas no aseguran la verdad de la ley de Huygens más que como la expresión individual de los fenómenos del espató de Islandia¹⁹. Biot dice que el error de Malus no se debe a una deficiencia en la concepción del método de observación, sino a la aplicación incompleta de ese método [BIOT, 1818, p. 186], lo que sin duda Brewster le concedería. Biot acusa a Brewster de no ser indulgente con Malus ni con él mismo.

Con respecto a la validez de la ley de Huygens, hemos visto cómo la duda de Brewster era metódica, ya que según fue discurriendo la memoria Brewster fue aceptando sobre bases experimentales la generalidad de la ley, para acabar siendo utilizada directamente en su formulación de la ley de la doble refracción para un número cualquiera de ejes.

Biot, en un inciso, afirma haber reconocido en 1813 la existencia de dos ejes de polarización en los fenómenos cromáticos de ciertas placas de mica, y que había dado una expresión analítica que los representaba, aunque esa expresión no se refería a las líneas que representaban los verdaderos ejes [BIOT, 1818, p. 185]. Biot continúa afirmando que sospechaba haber incurrido en ese error porque la expresión mencionada difería de las fórmulas que los cristales sometidos a la ley de Huygens ofrecían [BIOT, 1818, p. 186]. Este extremo prueba que Biot reconoce toda la novedad del hallazgo experimental de Brewster de la pluralidad de los ejes de polarización y doble refracción en los cristales. No obstante, Biot afirma que no existen cristales de más de dos ejes de polarización, cuando Brewster, en la memoria analizada, da referencias de cristales dotados de tres ejes.

Biot critica la alternativa que Brewster presenta para llegar a una ley precisa de la refracción extraordinaria. Biot considera que el método de la observación de los fenómenos cromáticos que Brewster sigue no es el más adecuado, y que el primero al que se refiere Brewster en su alternativa, a saber, la apreciación directa de la desviación del rayo E, no debe ser limitado al caso de que la luz atraviese el cristal en una dirección poco inclinada con respecto al eje, ya que, cuanto más apartada esté esa dirección del eje, más sensible será la magnitud de la fuerza de doble refracción [BIOT, 1818, p. 188].

Aun así, Biot se dispone a valorar los méritos del método seguido por Brewster. Biot asegura que, un año después de Arago, él mismo también

estudió los fenómenos cromáticos de polarización sobre placas de diferentes espesores, y vio que para una misma incidencia y el tallado de las placas en una misma dirección los colores resultantes eran idénticos a los de los anillos de Newton. Hasta entonces sus investigaciones se habían restringido a la incidencia perpendicular, que es el caso que ofrece las leyes más simples [BIOT, 1818, p. 189].

Estudiando el comportamiento de los rayos polarizados a incidencias oblicuas, Biot concluyó que en los cristales de un solo eje la aparición de cada color se determina en general por medio de dos factores: uno, la longitud del trayecto realizado por la luz en el cristal, y el otro, el conocido factor de proporcionalidad sen^2 a [BIOT, 1818, p. 189-90]. El producto de estos dos elementos coincide con su valor en la tabla de espesores de Newton, dice Biot [BIOT, 1818, p. 190].

En el caso de incidencias muy oblicuas, se despliegan nuevas series de tonalidades, que Biot atribuyó a la constitución laminar de la cal sulfatada con que experimentaba. Biot reconoce que fue Brewster el primero que descubrió que esos fenómenos cromáticos adicionales eran debidos a la presencia de dos ejes en el cristal, y no de uno solo [BIOT, 1818, p. 191]. Biot se defiende ante Brewster como antes había defendido a Malus, o sea, reconociendo que el error se debe a la aplicación incompleta del método observacional, más que a los defectos del propio método. En contra de lo que dice Brewster, indica Biot, éste nunca pretendió atribuir generalidad a las leyes de doble refracción para cristales con un solo eje [BIOT, 1818, p. 192].

Biot rechaza el uso de que Brewster hace gala de los términos positivo y negativo para referirse a los sentidos en que el rayo E se refracta con respecto al eje [BIOT, 1818, p. 193]. Como sabemos, Biot había utilizado con esa función los términos atractivo y repulsivo, más cargados de significación física. Además, continúa Biot, se pueden considerar las fuerzas atractivas y repulsivas *como si* emanasen del eje, con el único fin de explicar los fenómenos [BIOT, 1818, p. 194].

Sin embargo, cuando Biot pretende rebatir la opinión de Brewster por la cual la división entre cristales doblerefringentes atractivos y repulsivos es totalmente hipotética, dice que Brewster consigue evitar su uso resolviendo los ejes reales de los cristales en ejes imaginados, desprovistos de sentido físico [BIOT, 1818, p. 194-95]. En este sentido, es preciso señalar que Brewster habla siempre de ejes aparentes de los cristales. Reduciendo el principio de ejes generalizados de Brewster por medio del cálculo, dice Biot, se obtiene como resultado la propia ley de Huygens [BIOT, 1818, p. 195]. Biot preferiría

habérselas directamente con ésta que con la compleja y arbitraria construcción de Brewster.

Sigue Biot señalando los logros y virtudes del método de Brewster. Asegura que todos los fenómenos de doble refracción y de polarización producidos por cristales de un solo eje son simétricos alrededor de una única recta, que es el eje del cristal. La forma de los fenómenos cromáticos en los cristales de dos ejes es más compleja, tal como estudió Brewster, y de los cuales éste extrajo una regla empírica pero fiel para prever toda la variedad de esas formas [BIOT, 1818, p. 196].

Dice Biot que, al suponer Brewster que los fenómenos en cristales de más de un eje están determinados por los mismos elementos que en los de un solo eje, esto es, longitud del recorrido e incremento del cuadrado de la velocidad del rayo E, concluyó de la expresión empírica de las tonalidades la de la propia velocidad del rayo E. Éste es, dice Biot, el fundamento del método que Brewster propone para determinar la ley de doble refracción en todas las sustancias cristalinas [BIOT, 1818, p. 197].

Biot contesta que este método tiene el inconveniente de que, como los fenómenos de color se observan muy cerca de las líneas de los ejes, entonces a ángulos tan pequeños sobre estos ejes la doble refracción producida es de una magnitud mínima. Así pues, argumenta Biot, difícilmente podrá obtenerse con rigor la ley que la refracción extraordinaria sigue a una distancia cualquiera de los ejes [BIOT, 1818, p. 197]. Cualquier alteración o imperfección en la constitución del cristal o en la disposición o espesor de las placas utilizadas puede provocar efectos cuya magnitud interfiera decisivamente en la manifestación de dichos fenómenos [BIOT, 1818, pp. 197-98].

En cualquier caso, continúa Biot, a través de la observación de los anillos de color, los dos sentidos de desviación que el rayo E sufre, no sólo por relación a los ejes del cristal, sino también al plano de incidencia del rayo en el cristal, no pueden ser analizados con precisión por el método de Brewster [BIOT, 1818, pp. 198-99]. Para determinar este desplazamiento Biot construye un dispositivo experimental que mide la distancia existente entre las imágenes de los rayos O y E a través de un prisma doblerefringente, así como el desplazamiento lateral del plano en el que se realizan las refracciones de ambos rayos para incidencias oblicuas [BIOT, 1818, pp. 200-04].

Biot cifra las ventajas de su método de medición de las desviaciones de los rayos O y E entre sí, llamado de las coincidencias, en la exactitud de la medida del espacio entre las imágenes de ambos, recogidas sobre un mástil reglado de marfil [BIOT, 1818, p. 206]. La desviación del rayo E se calcula sobre la

observación de la trayectoria del rayo O. Biot aplica el método sucesivamente a cristales de uno y dos ejes [BIOT, 1818, p. 207]. En las dos refracciones, recuerda Biot, se cumple la proporcionalidad entre $\sin i$ y $\sin r$, pero el coeficiente de dicha proporción es diferente en ambas.

Biot encuentra una notable concordancia entre las observaciones en cristales de un eje y la ley de Huygens [BIOT, 1818, p. 208]. En los cristales que Biot llama repulsivos la velocidad del rayo O es menor que la del E, y viceversa en los atractivos, al menos desde el punto de vista de una teoría emisionista. Como se sabe, la mayor o menor velocidad de un rayo de luz en medios más o menos densos venía siendo un punto de disensión, desde Newton, entre emisionistas y partidarios de la teoría ondulatoria.

Biot recoge asimismo un método de Arago y Fresnel para medir refracciones, el cual está basado en los fenómenos de difracción de la luz y que recurre al cada vez más sólidamente establecido principio, según Biot, de interferencia [BIOT, 1818, pp. 212-13]. Aun así, continúa Biot, a los autores no les ha dado tiempo a perfeccionarlo ni a aplicarlo sistemáticamente al problema que le ocupa. En cualquier caso, las variaciones de las mediciones realizadas con este método difieren muy poco de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la ley de Huygens. En los cristales de dos ejes, como el berilo, la ley de Huygens también se cumple según el método de las coincidencias de Biot, aunque en este caso con un mayor número de restricciones en la realización de la medición [BIOT, 1818, pp. 213-16].

Dado el cumplimiento general de la ley de Huygens, Biot propone que se evite recurrir a más de dos ejes para explicar los fenómenos de doble refracción [BIOT, 1818, p. 216], tal como Brewster hace. Biot anuncia que probará por teoría y por experiencia que todas las direcciones arbitrarias de ejes que Brewster ha imaginado pueden reducirse a dos únicas, determinadas para cada cristal [BIOT, 1818, pp. 216-17]. La diferencia entre éstos y los de un solo eje, es que, en éstos, el incremento del cuadrado de la velocidad es proporcional a $\sin^2 a$, mientras que en aquéllos, este factor se convierte en $(\sin a \sin b)$, siendo a y b los ángulos que el rayo E forme con los ejes. La existencia de esta analogía, dice Biot, entre unos u otros, nos dará las leyes de la polarización en cristales de un número de ejes cualesquiera, leyes que, repite Biot [BIOT, 1818, p. 217], Brewster no ha considerado en su memoria.

Biot continúa diciendo que, antes de exponer los principios matemáticos que le permitieron descubrir la relación entre los cristales de un eje y los de dos, quiere comentar los resultados de Brewster para cristales de dos ejes. La prueba para Biot de que el enunciado de la ley de polarización de Brewster para esos cristales es empírica radica en que éste haya hecho figurar en él la

referencia a un ángulo doble que el que se da entre los planos y el punto de la esfera sobre el que se halla la tinta que queremos calcular [BIOT, 1818, p. 220].

Como dice Biot, las fuerzas en mecánica se componen o resuelven por medio de la regla del paralelogramo, con el ángulo simple, no doble, entre los vectores que las representan. Si Brewster habla del ángulo doble, esto se debe a que empíricamente las cuentas le salían de ese modo, pero esta circunstancia impide aceptar, sigue Biot, que Brewster, acto seguido, concluya que su regla no es empírica [BIOT, 1818, p. 219], y sí que está basada en los principios que regulan la composición del resto de fuerzas mecánicas [BIOT, 1818, p. 220]. Biot afirma, con razón, que los geómetras no estarían de acuerdo con Brewster en este punto.

Para Biot, la regla del ángulo doble es hipotética, esto es, empírica, como también lo es el que las fuerzas emanen *realmente* de ejes rectilíneos con una intensidad proporcional a sen^2 a [BIOT, 1818, p. 220], como supone Brewster. Sin embargo, Biot también utiliza esta regla, y resulta más sospechoso de realismo en cuestión de teorías, como buen discípulo de Laplace, que el propio Brewster. Así, para Biot, la ley de Brewster es experimental, y que tenga éxito en la práctica no oculta la percepción de su modesto origen frente a las leyes que pueden ser deducidas de los principios de la mecánica.

Biot se queja de la parquedad de comprobaciones experimentales de tonalidades que Brewster ofrece en su memoria [BIOT, 1818, pp. 220-21]. Critica que Brewster reduzca sus resultados observacionales al caso de un espesor de placa constante, lo que hace que la ley de espesores concuerde con las tonalidades observadas; si no lo hubiese hecho así, esta concordancia habría sido más difícil de obtener [BIOT, 1818, p. 201], dice Biot.

Biot recopila algunas de las opiniones ya formuladas acerca de la memoria de Brewster y recuerda cómo éste aplica la analogía entre sen^2 a y el incremento del cuadrado de la velocidad del rayo E, obtenida en los cristales de un solo eje, al caso de los de más de un eje [BIOT, 1818, p. 222]. De aquí Brewster obtiene la expresión de la velocidad del rayo E a partir de la ley empírica de las tonalidades.

Biot señala que la eliminación del elemento empírico del doble ángulo en esa fórmula sólo puede ser lograda tras arduas transformaciones analíticas, y, continúa Biot, esta dificultad es la causa de que Brewster no haya sometido la ley de la velocidad del rayo E a verificaciones rigurosas y múltiples, estudiando por medio de mediciones precisas la ley de refracción resultante [BIOT, 1818, p. 222]. Aunque Brewster habla de medidas de desviación del

rayo E, por ejemplo, lo cierto es que no las facilita, ni muestra el método para lograrlas; la situación experimental que describe es, además, bastante confusa. Estamos de acuerdo con estas apreciaciones de Biot.

En concreto, Biot no puede comprender cómo Brewster ha logrado asegurar de forma numérica la proporcionalidad entre las fuerzas de doble refracción y las de polarización [BIOT, 1818, pp. 224-25]. Toda especificación o aclaración acerca de cómo conseguir la medición de la separación entre las imágenes de los rayos O y E brilla por su ausencia en la obra de Brewster. La situación experimental por éste descrita incluye elementos que garantizan el carácter burdo de las operaciones de medida, si es que éstas fueron alguna vez realizadas, dice Biot.

Después de este comentario de Biot sobre la ley de polarización de Brewster, aquél pasa a exponer sus propias conclusiones sobre la ley de doble refracción. Dice que, aplicando a la trayectoria de la luz en un cristal el principio de la mínima acción, tal como hizo Laplace, sólo queda por descubrir la ley de la velocidad para conocer las trayectorias exactas de los rayos O y E [BIOT, 1818, p. 226]. Para cristales de un eje de doble refracción, recoge Biot, Laplace encontró que el cuadrado de la velocidad del rayo E es igual al cuadrado de la velocidad del rayo O, más un término proporcional a sen^2 a [BIOT, 1818, p. 227].

Como queda dicho, Biot obtiene, por medio de una aplicación elemental del binomio de Newton, que en el caso de los cristales de dos ejes ese término sería proporcional a $(\text{sen} a \text{ sen} b)$ [BIOT, 1818, p. 228]. Biot asegura que basta con combinar este resultado con el principio de mínima acción para hacer de las leyes de la doble refracción una ley rigurosa, y no simplemente experimental.

La expresión resultante de esa combinación concuerda admirablemente con las observaciones publicadas por el propio Biot en su *Traité de physique* de 1816 acerca de la mica de Siberia [BIOT, 1818, p. 232]. Este acuerdo hizo ver a Biot que la ley de doble refracción a que había llegado era una ley de la naturaleza, y entonces Biot pretende deducir análogamente la ley de polarización para cristales de dos ejes.

En las observaciones de Malus sobre cristales de un eje, los planos de polarización de los rayos O y E son perpendiculares entre sí. Biot descubre que, para los de más de un eje, resulta una construcción análoga. Y dice Biot que en todas las observaciones que él ha realizado sobre la doble refracción del topacio, el plano de la polarización de los rayos O y E se encuentra siempre conforme a la ley [BIOT, 1818, p. 233]. No sabemos a qué ley se refiere aquí Biot.

Esto se refiere a la polarización que Biot llamó fija. Este término se define por oposición a la polarización que él mismo llamó móvil²⁰. Para Biot, las placas de cristal debían actuar de modo diferente sobre la luz polarizada que los prismas de espesor mayor. Según la teoría de la polarización móvil, la luz polarizada, al entrar en un cristal, tardaba un cierto tiempo en adquirir un plano de polarización fijo; ese tiempo, en el caso del cuarzo, era el que necesitaba la luz para recorrer cuatro milímetros.

Si el cristal no llegaba a poseer ese espesor mínimo, entonces el plano de polarización de las partículas luminosas en su interior oscilaba entre dos planos perpendiculares entre sí, hasta que la luz saliese de la placa, lo que provocaba la transformación de esa polarización móvil en una fija, correspondiente a uno de los dos planos entre los que se efectuaba la oscilación. Cada una de éstas requería un espesor doble del que había empleado la partícula para comenzar a oscilar en el seno del cristal. Las consecuencias empíricas de esta teoría fueron refutadas por Fresnel en 1816.

Biot creía en la materialidad de la luz, lo que hacía fácil pensar que las partículas, al cambiar de medio, no cambiaban de propiedades de modo inmediato. Además, también pensaba en la analogía entre la polarización móvil y los accesos de fácil transmisión y reflexión de Newton en placas de vidrio. Por lo tanto, se entiende que Biot se viese así impelido a construir una teoría que carecía de base empírica suficiente sobre la que asentarse.

En definitiva, y después de este inciso, es claro que la ley única del producto de los senos que se observa en cada cristal alrededor de sus dos ejes reales hace que las expresiones de todos los fenómenos de polarización y de doble refracción, sentencia Biot, se vuelvan simétricas y simples [BIOT, 1818, pp. 237-38]. La transformación de los ejes llevada a cabo por Brewster dificulta el acceso, según Biot, a la explicación simple y unificada de ambos tipos de fenómenos [BIOT, 1818, p. 237].

6. Análisis crítico conjunto de ambas memorias

Vemos, por tanto, cómo Biot se basa en los trabajos de Laplace para fundamentar mecánicamente su ley de doble refracción, que ha constituido el verdadero objeto de la memoria. Para los laplacianos, el mero hecho de que la ley de Huygens se pueda derivar del principio de Fermat, con la restricción impuesta por la hipótesis adicional de que la velocidad de la luz en el cristal no dependa más que del ángulo entre el plano del eje y el del rayo refractado, indica que todos los fenómenos de doble refracción se deben al ejercicio de fuerzas atractivas o repulsivas de corto alcance desde los ejes del cristal²¹.

La pretensión de unificar las leyes de doble refracción y polarización resulta injustificable en el caso de Biot, ya que ésta última se basa para Biot en la concordancia de los planos de polarización de los rayos O y E a su paso a través de los diferentes tipos de cristales. Ahora bien, el hecho de seguir a Malus al afirmar la perpendicularidad de los planos de polarización de ambos rayos, no nos permite avanzar en la comprensión de los fenómenos de polarización.

La analogía formal que Brewster logró establecer entre ambas leyes se desvanece en Biot; éste tendría que haber deducido de los principios de la mecánica la ley de tonalidades de Brewster para lograr el objetivo que se había marcado. El objetivo de Brewster era más modesto, y se puede decir que fue conseguido; el de Biot, imponente, pero errado.

Cuando, en 1821, Fresnel explique la formación de tonalidades —o intensidades de luz homogénea— a partir de la interferencia entre los dos rayos O y E, entonces la explicación de los fenómenos de polarización por doble refracción será completa. El factor que hizo posible tal explicación fue una nueva concepción del principio de interferencia [BUCHWALD, 1989, pp. 222-33], la cual reveló, a su vez, una importante transformación de la noción de polarización por parte de Fresnel, al eliminar toda referencia a la vibración longitudinal en su teoría y hacer recaer todo el peso de la explicación en la idea de vibración transversal al plano de propagación.

Para Fresnel, las tonalidades son debidas a la interferencia entre los rayos O y E que están polarizados en el mismo plano, tras haberse producido la segunda doble refracción en el dispositivo experimental. Como Fresnel y Arago ya sabían desde 1816, los rayos polarizados en planos perpendiculares entre sí no producen fenómeno alguno de interferencia [ARAGO & FRESNEL, 1819]²². Además, llevó más lejos que sus colegas el vínculo entre los dos grupos de fenómenos al descubrir, en 1821, que ningún rayo sigue la refracción ordinaria en un cristal de dos ejes, esto es, que en esos cristales ningún rayo posee una velocidad cuya magnitud sea independiente de su dirección [BUCHWALD, 1989, pp. 260-67].

El hecho de que Biot defendiese que la desviación del rayo E debía ser calculada de acuerdo a la magnitud de su trayecto por los cristales le habría permitido al propio Biot percibir la pujanza de la teoría ondulatoria de la luz, ya que Fresnel basa su explicación de la relación entre ambos tipos de fenómenos precisamente en ese único principio²³. No obstante, el carácter abstracto y matemático del trabajo de Fresnel aterraba tanto a Biot como el análisis de la transformación de ejes de Brewster.

Brewster y Biot son ambos emisionistas; pero su creencia de que las leyes experimentales son indubitables, aunque de alcance limitado, les lleva a pensar que éstas están más allá de la posible acusación de falsedad. Este aspecto redundante en que valoren sin amargura las ventajas del sistema rival, el ondulatorio, en la explicación de determinados fenómenos ópticos. La prueba de ello está en que no dudan en prodigar elogios a Huygens, Young, Arago o Fresnel, y no sólo desde el punto de vista de las capacidades experimentales de éstos. Por lo tanto, el positivismo de nuestros protagonistas fundamenta, a pesar del vigor de sus creencias, cierto instrumentalismo teórico.

Como hemos visto, Brewster llega a la doble refracción de la mano de la polarización, y Biot, viceversa. La llegada de éste a su destino es forzada; la de aquél, aventurada. Ambos buscaban el establecimiento de una relación entre ambos grupos de fenómenos. El resultado ofrecido por Brewster no es sólido, pero sí sutil; el de Biot, inexistente. Mientras que Brewster analiza empíricamente unas tonalidades, los laplacianos requerían la adopción de hipótesis arbitrarias que adaptasen la generalidad de los principios de la mecánica al fenómeno físico tratado²⁴.

7. Conclusión

Confiamos en haber mostrado suficientemente la importancia del diálogo entre nuestros emisionistas Brewster y Biot, así como la de los problemas que trataron. De este modo, la importancia de la contribución británica al estudio de los fenómenos ópticos de polarización y doble refracción, representada en estas páginas por Brewster, queda patente. Asimismo, tal conclusión prueba la inexactitud de la postura según la cual el flujo de información de ideas en óptica entre Gran Bretaña y Francia durante las dos primeras décadas del siglo diecinueve es unidireccional, de un único sentido. Prestar atención a los perdedores en un momento crucial de la historia de la física puede arrojar nueva luz acerca de la magnitud y carácter de los problemas que todos los protagonistas, vencedores y vencidos, afrontan.

Finalmente, esperamos que resulte de alguna utilidad la representación del trasfondo de la discusión entre Brewster y Biot, con los objetivos de la obra de Laplace fijados en ambos, acerca del estatuto de las leyes de los fenómenos ópticos de polarización y doble refracción. A pesar de las declaraciones e intenciones de estos tres hombres de ciencia, lo cierto es que dichas leyes no dejaron de ser experimentales, habida cuenta de las irregularidades cometidas por éstos en el intento de deducir éstas de los principios de la mecánica [FRANKEL, 1974, pp. 240-43].

NOTAS

1 Véase, por ejemplo, RONCHI [1956, p. 236]; CHAPPERT [1977, pp. 13, 16 y 45-46], parece reconocer implícitamente la conveniencia de tal perspectiva, a pesar de que su obra se dedique a la actividad científica de Malus.

2 Una notable excepción a esta tendencia la constituye el artículo de Crosland & Smith [1979].

3 Todos los estudios que conocemos de la obra de Brewster se refieren a sus experimentos e ideas en óptica a partir de 1830. Véanse, por ejemplo, CANTOR [1975], o el propio BUCHWALD [1989]. Ésta es, por tanto, una inmejorable oportunidad para seguir el análisis de sus preocupaciones en una época anterior.

4 Esta presentación biográfica está basada en las entradas correspondientes a los autores de C.C. Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography*. Nueva York, 1970-80, 16 vols.; vol. II, pp. 133-40 y 451-54.

5 Véase a este respecto el artículo titulado "Experiments & Observations on the Inflection, Reflection, and Colours of Light". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1796), Part I, 227-77.

6 Sobre Bartholin, véase la edición de LOHNE [1977] de sus *Nova Experimenta Crystalli Islandici Disdiaclastici* (1690).

7 Como señala BIOT [1817, vol. II, p. 182], si el cristal es lo suficientemente perfecto por lo que respecta a su forma, el eje será la misma línea para ambos ángulos sólidos obtusos, con lo que sus vértices estarán unidos por él.

8 Véase también BIOT [1817, vol. II, p. 406n].

9 Sobre la importancia de este punto insisten CROSLAND [1967 y 1970-80, pp. 346 y 137 respectivamente], FRANKEL [1974, p. 237] y CHAPPERT [1977, p. 60].

10 Así lo asegura BIOT [1818, p. 195]; véanse también a este respecto BREWSTER [1818, p. 211] y BIOT [1821, p. 227].

11 Malus utiliza por primera vez esa denominación en (1810), p. 106; véase CHAPPERT [1977, p. 78].

12 Brewster se refiere a la memoria de LAPLACE [1809, pp. 300-42]. Con esta memoria Laplace compitió, quizá de manera poco digna, con la de su protegido Malus. Para este aspecto, véase FRANKEL [1974, p. 238]. El contenido de esta memoria de Laplace es singular dentro del contexto de la obra de éste; a través de ella su autor refleja, por primera y única vez, la importancia que para él poseían los principios de la mecánica como fundamento de las leyes físicas.

13 En realidad, a pesar de las palabras de Brewster, Laplace no demuestra, sino que asume arbitrariamente dicha proposición como condición necesaria para el establecimiento de una ley física de la doble refracción. Véase FRANKEL [1974, p. 236]. La escasa comprensión de la obra de Laplace que se induce de la interpretación de la misma por Brewster no impide valorar en su justa medida la familiarización de éste con ciertos aspectos y conclusiones de la óptica laplaciana. Esta proximidad pudo haberse producido a partir de las críticas de Young a la memoria, aquí estudiada, de Laplace, aparecidas en el *Quarterly Review* de 1809. Véase FRANKEL [1974, pp. 241-3].

14 Brewster se refiere a J.-B. Biot, *Traité de physique expérimentale et mathématique*. París, 1816, 4 vols.; vol. IV, p. 377.

15 Véase la lista de mediciones de dichos ángulos para un buen número de sustancias en BREWSTER [1818, p. 230].

16 Compárense las tablas de BREWSTER [1818, pp. 241 (Biot) y 243 y 244 (Brewster)].

17 Para obtener una caracterización general aceptable de los objetivos de Laplace y sus secuaces, véase el artículo clásico de FOX [1974].

18 Véanse SILLIMAN [1974] y BUCHWALD [1989, pp. 222-33], *passim*.

19 BIOT [1818, pp. 183-85] cita extensamente a Brewster [1818].

20 Se puede obtener una idea muy ajustada de la teoría de Biot de la polarización móvil en ARAGO [1821a] y [1821b] y BIOT [1821], además de en los capítulos correspondientes al tema en BIOT [1817].

21 La falta de rigor en la obtención de esta conclusión es puesta de manifiesto por FRANKEL [1974, pp. 240-43]. Si las fuerzas a las que recurren los laplacianos son de corto alcance, entonces, por definición, no son centrales. Ahora bien, sólo a fuerzas exclusivamente proporcionales a la masa y a la distancia entre las partículas que las ejercen es susceptible de ser aplicado el principio de mínima acción; como es sabido, las fuerzas centrales cumplen ese requisito. Acabamos de ver cómo Biot pretende fundamentar sobre este principio las fuerzas que supuestamente regulan los fenómenos ópticos tratados por este autor.

22 Véase también BUCHWALD [1989, p. 205].

23 Este aspecto de la obra de Fresnel se percibe ya en FRESNEL [1816].

24 Como dice FRANKEL [1974, p. 242], el corto alcance de las fuerzas supuestas por los laplacianos hacía que la integral que representaba la suma de actividades era prácticamente constante, de modo que esa acción total era así independiente de la potencia de la distancia con la que variasen inversamente esas fuerzas.

BIBLIOGRAFIA

Fuentes

ARAGO, F. (1821a) "Rapport fait à l'Académie des Sciences, le lundi 4 juin 1821, sur un Mémoire de M. Fresnel relatif aux couleurs des lames cristallisées douées de la double réfraction". *Annales de Chimie et de Physique [ACP]*, 17, 80-102 [El informe fue firmado también por Ampère, aunque fue Arago quien lo redactó].

ARAGO, F. (1821b) "Examen des remarques de M. Biot". *ACP*, 17, 258-272.

ARAGO, F. & FRESNEL, A.J. (1819) "Mémoire sur l'action que les rayons de lumière polarisés exercent les uns sur les autres". *ACP*, 10, 288-305.

BIOT, J.-B. (1817) *Précis élémentaire de physique expérimentale*. París, 2 vols.

BIOT, J.-B. (1818) "Mémoire sur les lois générales de la double réfraction et de la polarisation, dans les corps régulièrement cristallisés". *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 3, 177-384.

BIOT, J.-B. (1821) "Remarques sur un Rapport lu, le 4 juin 1821, à l'Académie des Sciences, par Arago et Ampère". *ACP*, 17, 225-258.

BREWSTER, D. (1818) "On the laws of polarization and double refraction in regularly crystallized bodies". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Parte I, 199-273.

FRESNEL, A.J. (1816) "Mémoire sur la Diffraction de la lumière, où l'on examine particulièrement le phénomène des franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux". *ACP*, 1, 239-281.

HUYGENS, C. (1690) *Traité de la lumière*. Paris.

LAPLACE, P.-S. de (1809) "Mémoire sur les mouvemens de la lumière dans les milieux diaphanes". *Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut impérial de France*, X, 300-342.

MALUS, É.L. (1810) "Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique". *Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut impérial de France*, XI, 2^a Parte, 105-111.

MALUS, É.L. (1811) "Théorie de la double refraction". *Mémoires présentés à l'Institut des Sciences, Lettres et Arts par divers Savants*, II, 303-508.

NEWTON, I. (1704) *Opticks*. Londres. Citada por la edición castellana; Madrid, 1977.

Bibliografía Secundaria

BUCHWALD, J.Z. (1989) *The Rise of the Wave Theory of Light. Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*. Chicago.

CANTOR, G.N. (1975) "The reception of the wave theory of light in Britain: A case study illustrating the role of methodology in scientific debate". *Historical Studies in the Physical Sciences [HSPS]*, 6, 109-32.

CHAPPERT, A. (1977) *Étienne Louis Malus (1775-1812) et la théorie corpusculaire de la matière*. Paris.

CROSLAND, M. (1967) *The Society of Arcueil. A view of French Science at the Time of Napoleon I*. Londres.

CROSLAND, M. (1970-80) "Biot". En: C.C. Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography*. Nueva York, 133-140, vol. II.

CROSLAND, M. & SMITH, C. (1978) "The transmission of Physics from France to Britain: 1800-1840". *HSPS*, 9, 1-61.

FOX, R. (1974) "The Rise and Fall of Laplacian Physics". *HSPS*, 4, 81-136.

FRANKEL, E. (1974) "The Search of a Corpuscular Theory of Double Refraction: Malus, Laplace and the Price Competition of 1808". *Centaurus*, 18, 223-245.

LOHNE, J.A. (1977) "Nova Experimenta Crystalli Islandici Disdiacastici". *Centaurus*, 21, 106-148.

RONCHI, V. (1956) *Histoire de la lumière*. Paris.

SILLIMAN, R.H. (1974) "Fresnel and the Emergence of Physics as a Discipline". *HSPS*, 4, 137-162.