

Sobre vikingos, abejas, cristales y la navegación mediante luz celestial polarizada. Parte I: Navegación vikinga y la piedra solar

Oscar E. Piro¹, Alejandra Piro²

¹ *Departamento de Física e Instituto IFLP (CONICET), FCE, UNLP, CC 67, (1900) La Plata (BA), Argentina*

² *Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP; Sección Ornitología, División Zoología Vertebrados, Museo de La Plata, Paseo del Bosque S/N, (1900) La Plata (BA), Argentina*

Se non é vero, é molto ben trovato, antiguo dicho italiano (empleado por filósofos naturales como Giordano Bruno y Galileo Galilei)

Resumen

Los vikingos fueron grandes navegantes que dominaron el mar Atlántico del Norte durante tres siglos alrededor del primer milenio AD. Navegaron miles de kilómetros en mar abierto sin contar con brújulas magnéticas y valiéndose de compases solares para controlar la latitud. Por esas latitudes (61° N), el Sol presenta poca elevación respecto del horizonte y frecuentemente se encuentra cubierto por nubes o algo por debajo de la línea del horizonte (amanecer y atardecer). Privados de una observación directa del Sol, cabe entonces preguntarse ¿cómo se orientaban aquellos navegantes en tales condiciones desfavorables? Basado en antiguas sagas nórdicas que hablan de una “piedra solar”, el arqueólogo T. Ramskou propone en 1967 una conjetura sorprendente: los navegantes vikingos podrían haber superado dichas dificultades de orientación ‘leyendo’ la polarización de la luz solar dispersada por la atmósfera terrestre mediante cristales para inferir la posición del oculto Sol en el cielo y de esta manera determinar el curso de navegación. La racionalización de esta conjetura se basa en el conocimiento adquirido al cabo de unos mil años y se describe sucintamente en el presente ensayo.

Navegación vikinga

El apogeo de los vikingos se sitúa entre 900 y 1200 AD, en plena Edad Media europea (476-1492 AD). Fueron grandes navegantes que dominaron el mar Atlántico del Norte durante tres siglos. De origen escandinavo, su influencia abarcó extensas regiones, incluyendo Europa del norte, central, oriental y occidental, durante la llamada *Era Vikinga*. Este período de expansión Nórdica militar, mercantil y demográfica constituye una parte importante de la historia medieval temprana de Escandinavia, Islas Británicas (especialmente el este), Francia, Rusia y Sicilia. Favorecidos por sus avanzadas habilidades en navegación, los vikingos llegaron a extender sus actividades por el litoral Mediterráneo, Norte de África, Medio Oriente y Asia Central (ver Figura 1).

Figura 2. Recreación artística de la expedición del vikingo Erik ‘el Rojo’ arribando a Groenlandia.

Sin embargo, los cielos del Atlántico Norte distan mucho de ser despejados y frecuentemente se encuentran cubiertos de nubes y niebla que entorpece la localización visual directa del Sol y por tanto la navegación (sin hablar de la más difícil navegación nocturna). Cabe entonces preguntarse ¿cómo se orientaban aquellos navegantes vikingos en tales condiciones climáticas desfavorables? Antiguas sagas nórdicas hablan de una “piedra mágica” o “piedra solar” (‘sunstone’) que habría asistido a los navegantes a orientarse cuando el sol se encuentra oculto por nubes o niebla o algo por debajo de la línea del horizonte (amanecer y atardecer).



Figura 3. Adaptada de la tira cómica *Olaf, el vikingo* (*Hagar, the Horrible*, creada por Dik Browne en 1973)

En la *Saga Separada de San Olaf*, se relata un episodio de la vida de Olaf Haraldsson II, el Santo (995-1030), rey de Noruega (1015-1028), en ocasión de una visita a la familia de un hacendado rico y sabio llamado Rauðúlfur: “El rey Olaf pregunta a uno de sus hijos, llamado Sigurður, acerca de sus habilidades cognitivas y decide realizar un test para confirmarlas. El cielo estaba cubierto y nevaba, tal como Sigurður había predicho. Entonces el rey convocó a Sigurður y Dagur (otro de los hijos de Rauðúlfur) y les pidió a todos que miraran y notaran que no se veía cielo despejado. Entonces el rey preguntó a Sigurður donde estaba el Sol en ese momento. El dio una precisa indicación al respecto. Entonces el rey les pidió que tomaran la piedra solar y la mantuvieran en lo alto para observar de donde venía la luz radiada por la piedra y así verificó directamente la predicción de Sigurður” [1].

Un milenio después, una propuesta fascinante

En 1967 el arqueólogo Danés Thorkild Ramskou [2-4] propone una hipótesis sorprendente, inspirada en la observación de un niño de 10 años cuyo padre era piloto de la Aerolínea

Escandinava (fundada en 1946). Esta aerolínea sobrevolaba regiones polares (a partir de 1952) donde los compases magnéticos y giróscopos pueden resultar imprecisos [5]. Aquí debemos puntualizar que el ‘Global Positional System’ (GPS) satelital tendría sus inicios recién a mediados de los 1960’s (1964-1967), con el advenimiento de la llamada *Era Espacial*, y sería perfeccionado a una ‘capacidad operacional inicial’ en 1993 y ‘total’ en 1995. El Sistema de Navegación Inercial, que emplea giróscopos y acelerómetros, comenzó a utilizarse en vuelos comerciales recién a inicios de los 1970’s y actualmente se lo emplea en combinación con el GPS.

El niño llamó la atención a Ramskou sobre una conexión entre antiguas historias nórdicas acerca de ‘piedras solares’ (‘sun stones’) y un instrumento llamado *compás crepuscular* (‘twilight compass’) [6] con el cual pilotos como su padre localizaban el Sol aún cuando el astro estuviera oculto por nubes o algo por debajo del horizonte. De acuerdo a la hipótesis de Ramskou, los navegantes vikingos afectados por las mismas dificultades de orientación las superaban ‘leyendo’ la polarización de la luz solar dispersada por la atmósfera terrestre para inferir la posición del oculto Sol en el cielo y de esta manera determinar el curso de navegación. Privados de la capacidad visual superior que la evolución confirió a abejas, hormigas del desierto [7-9] y otros animales para detectar el patrón de polarización de la luz celestial y así la orientación del Sol que guía sus excusiones de forrajeo cuando el astro está oculto, los vikingos se valieron de la observación del cielo mediante cristales (tales como el espato de Islandia: calcita, cordierita, turmalina y andalucita, cuyos depósitos minerales existen en Escandinavia).

Sin embargo, la credibilidad de la hipótesis se vio cuestionada por la ausencia de tales cristales en restos arqueológicos de asentamientos vikingos. Hasta que en 2013 un equipo de buceadores encontró un cristal de espato de Islandia (ver Figura 4a) en los restos de un navío de guerra inglés (un barco auxiliar de unos 27 m de eslora, que se cree llamado ‘Makeshift’) de la época Isabelina (1558-1603), hundido en 1592 a unos 800 m de la costa de la Isla Alderney (Británica), al oeste del Canal de la Mancha. La piedra fue encontrada a menos de un metro de un par de compases de navegación, sugiriendo que el cristal pudo haber sido usado con otros instrumentos de navegación del buque. Es posible que bajo cielos parcialmente cubiertos, las medidas de polarización complementarían las obtenidas mediante brújulas, basadas en la interacción con el débil campo magnético terrestre que, además de mostrar considerables anomalías locales, presenta una pequeña proyección en la dirección horizontal para altas latitudes de navegación. A esto se suma que podrían ser perturbadas por el material ferro-magnético de los cañones del buque (al menos tres de 2,135 m de largo, boca de 7,62 cm de diámetro, peso de 478 Kg de hierro fundido).

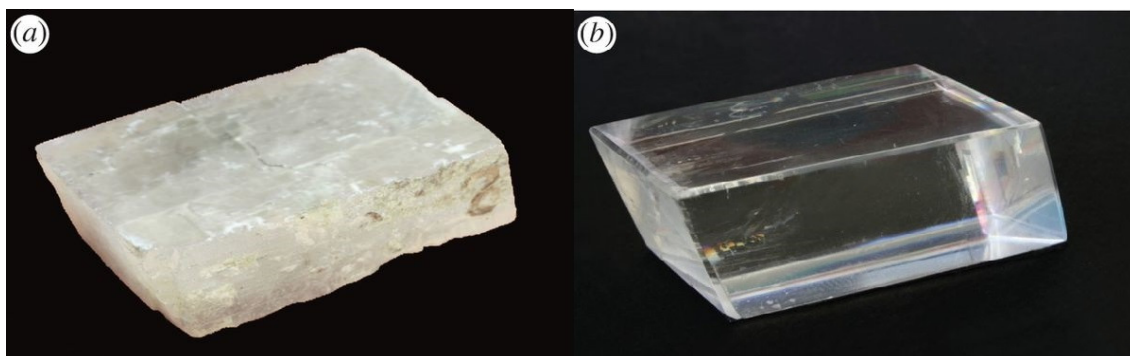


Figura 4. (a) Cristal de calcita (dimensiones en cm: 5 x 3 x 2,3) rescatado de un buque de guerra británico hundido cerca de la Isla de Alderney, al oeste del Canal de la Mancha. Luego de permanecer inmerso más de 400 años en el mar del Canal, el cristal no muestra cambios en la geometría romboédrica original, pero su transparencia se redujo notablemente. (b) Cristal de calcita de origen Brasileiro (5 x 3 x 2,5); este cristal, similar al de Alderney, muestra una transparencia casi perfecta.

Los antiguos nórdicos podrían haber contado con cristales bastante más grandes como el mostrado en la Figura 5 y así tener mayor precisión en determinar indirectamente la orientación del Sol.



Figura 5. Cristal de espato de Islandia (calcita) de 10 x 10 x 6,7 (en cm). Notar las imágenes dobles de la mano que lo sostiene, formadas por los rayos ordinario y extraordinario. Con este cristal se puede alcanzar un desplazamiento paralelo de dichos rayos de 7,7 mm entre sí.

La racionalización del posible uso empírico por parte de los vikingos de la luz polarizada celestial mediante la piedra solar para orientarse en sus extensas excursiones por el Mar del Norte se basa en el conocimiento adquirido al cabo de un milenio, principalmente mediante investigaciones a partir del siglo XVII. Podemos sintetizar los hitos principales de este desarrollo histórico del conocimiento mediante la línea de tiempo que se detalla en el Apéndice.

Conceptos básicos de Óptica

La luz es una onda electromagnética (EM) transversal, como las de una cuerda de guitarra, por lo que puede oscilar en dos direcciones perpendiculares entre si y a la dirección de propagación (luz polarizada), tal como se muestra en la Figura 6:

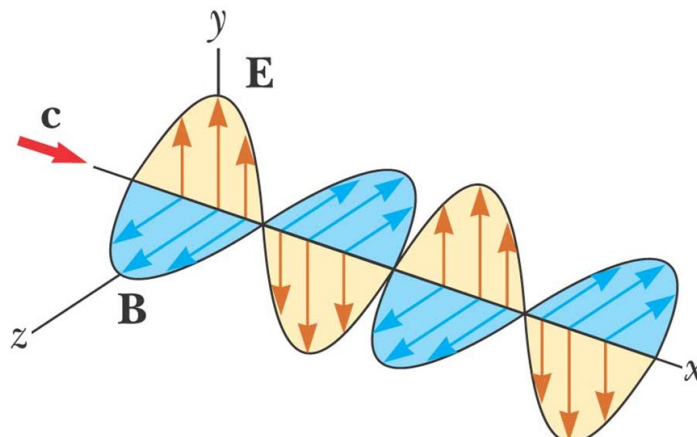


Figura 6. Onda plana linealmente polarizada EM de luz, correspondiente a una sola frecuencia (monocromática). La polarización se define por la orientación del campo eléctrico E que en medios materiales puede inducir el movimiento oscilatorio de cargas eléctricas. Los efectos del campo magnético B asociado son generalmente mucho más débiles.

A pesar que una elegante descripción cuantitativa de la luz y su interacción con la materia puede realizarse en el marco de las ecuaciones de Maxwell [10], los fenómenos de propagación, refracción, reflexión y difracción de la luz pueden entenderse cualitativamente mediante el Principio de Huygens (1678). El mismo establece que cada punto alcanzado en un dado momento por un frente de onda puede considerarse como una fuente de ondas secundarias esféricas. La superficie tangente a estas ondas constituye un estado avanzado en el tiempo de dicho frente de onda primario. La Figura 7 muestra la aplicación de dicho principio en la propagación de ondas planas, ondas esféricas y la reflexión y refracción de ondas planas en la interface (plana) entre dos medios.

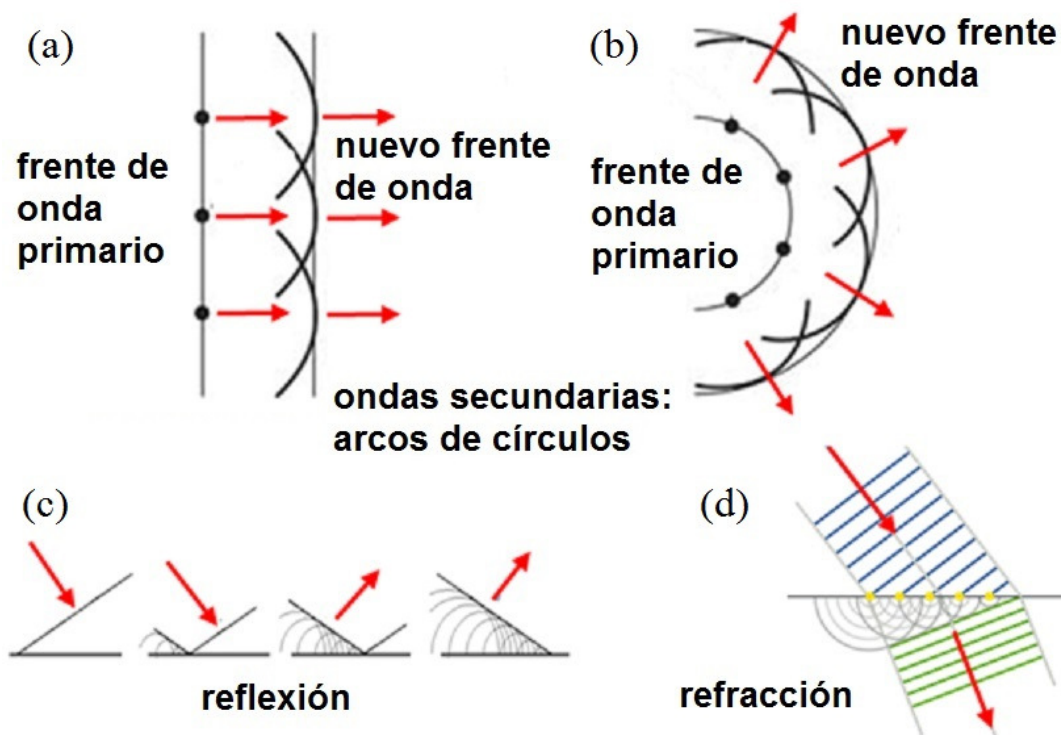


Figura 7. Construcción de Huygens describiendo la propagación de una onda de luz: (a) onda plana; (b) Onda esférica; (c) onda plana reflejada; (d) onda plana refractada.

Elementos de óptica cristalina

En sólidos transparentes (dióptricos) la luz polariza el medio a su paso cuando el campo eléctrico E fuerza los livianos electrones (-) moleculares a desplazarse respecto del marco más pesado de los núcleos atómicos (+) y de esta manera genera un momento dipolar oscilante. Cuanto más intensa es esta polarización, tanto más lento se mueve la luz (velocidad v) en el sólido. El cociente $c/v = n$ (c : velocidad de la luz en el vacío) se llama 'índice de refracción' del medio y es, en general, algo mayor que uno. Como es de esperar, en cuerpos isótropos (cristales cúbicos, como la sal de mesa, y dióptricos amorfos, como el vidrio) esta interacción es

independiente de la dirección de movimiento y polarización de la luz y la propagación de la misma en el medio se caracteriza por un único índice de refracción (n).

Los cristales cúbicos pertenecen a uno de los siete sistemas cristalográficos en que se pueden ordenar espacialmente los átomos, iones y moléculas que constituyen un sólido y que incluyen, además del cúbico, a los sistemas hexagonal, tetragonal, trigonal, ortorrómbico, monoclinico y triclinico, con simetrías progresivamente menores. Los sólidos de estos sistemas presentan una respuesta anisotrópica al paso de la luz, fenómeno llamado ‘birrefringencia’. Así, los cristales pertenecientes a los sistemas de baja simetría triclinicos, monoclinicos y ortorrómbicos exhiben tres índices de refracción, correspondientes a otras tantas direcciones en el sólido, mutuamente perpendiculares entre sí. Los mismos se llaman ‘ópticamente biaxiales’. En el resto de los cristales de mayor simetría, pertenecientes a los sistemas trigonal, tetragonal y hexagonal, dos de los tres índices de refracción son iguales entre sí (n_O), corresponden a direcciones perpendiculares a los respectivos ejes cristalográficos de mayor simetría del sistema (triple para el trigonal, cuádruple para el tetragonal y séxtuple para el hexagonal) y gobiernan la propagación del ‘rayo ordinario’ que se comporta como en los dióptricos isótropos. En estos sistemas, el tercer índice (n_E) describe la polarización del sólido a lo largo de dichos ejes (coincidentes con los ‘ejes ópticos’) y determina la propagación del ‘rayo extraordinario’ cuya velocidad depende del ángulo que forma dicho rayo con el eje óptico. Tales cristales se llaman ‘uniaxiales’, positivos (+) cuando $n_E > n_O$ y negativos (-) en caso contrario. El llamado ‘grado de birrefringencia’ se define como la diferencia entre dichos índices: $n_E - n_O$.

De acuerdo a una interpretación avanzada por Huygens, una fuente de luz puntual en el interior de un cristal birrefringente uniaxial origina dos frentes de onda, uno esférico (onda ordinaria) con velocidad de propagación v_O independiente de la dirección y el otro elipsoidal (onda extraordinaria) con velocidad variando entre v_O y v_E , dependiendo de la dirección de propagación (ver Figura 8)

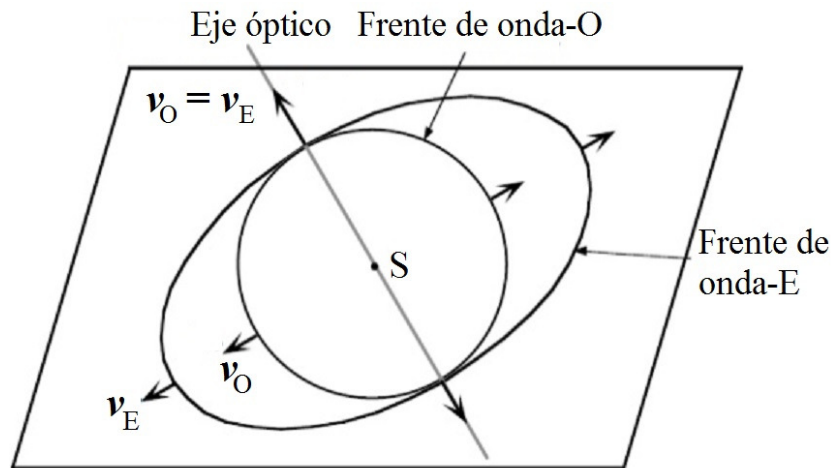


Figura 8. Frentes de onda ordinaria (O) y extraordinaria (E) de luz emitida simultáneamente por una fuente puntual (S) dentro de un cristal uniaxial (-). La curvas corresponden a las trazas en el plano de una superficie esférica (O) y una elipsoidal de revolución alrededor del eje óptico del cristal (E). Dicho eje pasa por los dos puntos de tangencia de las superficies, indicando la dirección en que las ondas O y E poseen la misma velocidad de propagación. Dichas ondas están polarizadas perpendicularmente entre sí: la O perpendicular al plano, la E en el plano. La figura representa aproximadamente el caso de un cristal natural de calcita; por claridad, se ha exagerado la diferencia entre los frentes de onda O y E (v_E es sólo un 12% mayor que v_O).

El cristal de calcita (carbonato de calcio), $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, es un mineral trigonal y por lo tanto uniaxial. La experiencia muestra que es uniaxial negativo (-), esto es $n_E=1,486 < n_O=1,658$, y su grado de birrefringencia es relativamente grande (0,172) comparado con otros minerales tales como la cordierita (0,051), turmalina (0,04) y andalucita (0,01). ¿Porqué es esto así? Una respuesta cualitativa puede inferirse a partir de la estructura cristalina y molecular de $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ (determinada mediante difracción de rayos-X) que se muestra en la Figura 9.

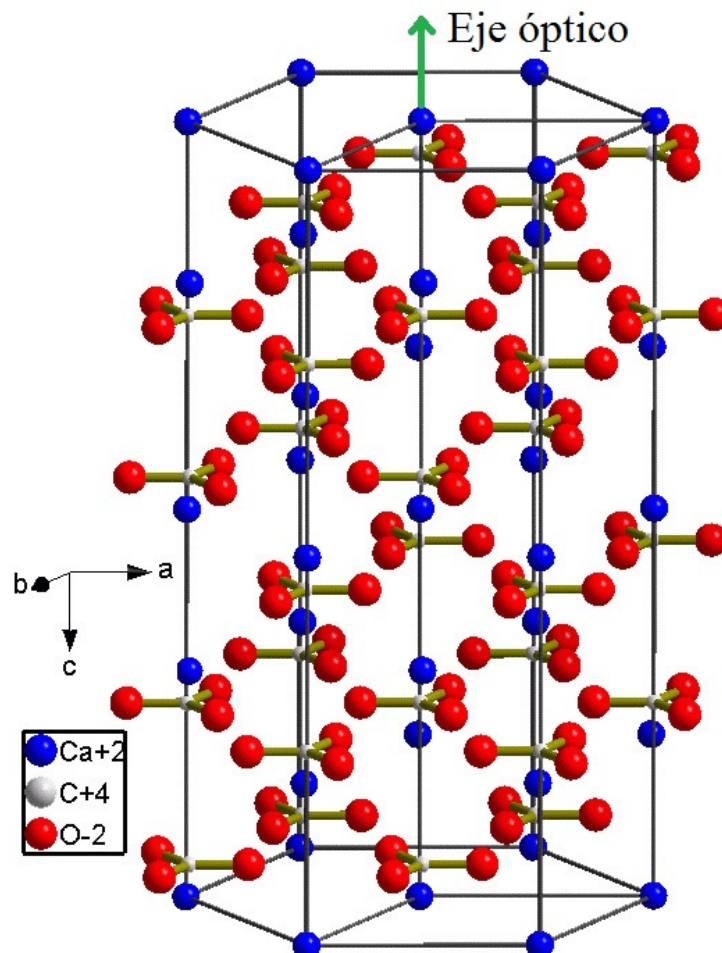


Figura 9. Dibujo mostrando el empaquetamiento cristalino del carbonato de calcio (calcita), $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, en una base hexagonal.

Puede observarse que $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ consta, además de los relativamente rígidos iones Ca^{2+} (poco polarizable), de moléculas triangulares $(\text{CO}_3)^{2-}$ cuyo plano molecular está orientado perpendicular al eje óptico (eje *c*). Estas moléculas presentan un grado de polarizabilidad en el plano considerablemente mayor que perpendicular al mismo, dando lugar al índice ordinario n_O mayor que el extraordinario n_E observado para este mineral.

La doble refracción de la luz en una placa de calcita puede interpretarse cualitativamente en términos del principio de Huygens, tal como muestra la Figura 10.

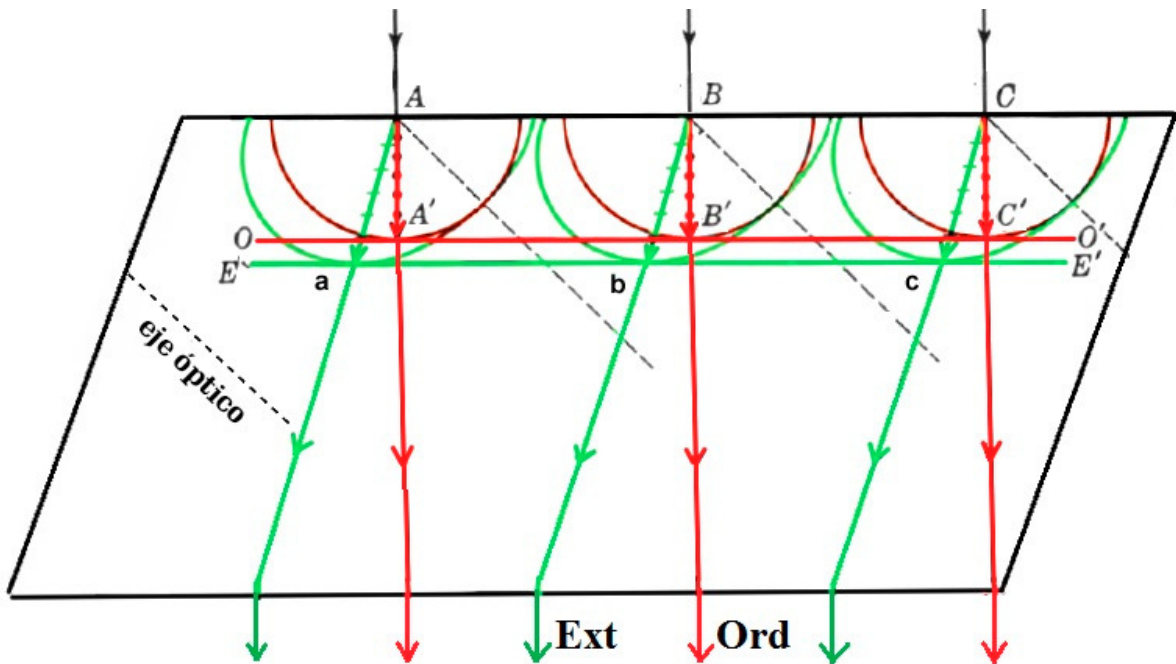


Figura 10. Construcción de Huygens de la doble refracción de una onda plana incidiendo normalmente sobre un cristal de calcita. Rayo ordinario (rojo, frente de onda OO') polarizado perpendicular al plano y extraordinario (verde, frente de onda EE') en el plano. La separación lateral de los rayos E y O emergentes es proporcional al espesor del cristal y crece con el grado de birrefringencia $n_E - n_O$. Para calcita, es de 1 mm por cada 10 mm de espesor. Por simplicidad la figura no incluye las mucho menos intensas ondas reflejadas en las interfaces (reflectancia de unos pocos porcientos).

Localizando el Sol oculto mediante un cristal

Las bases físicas del procedimiento se pueden resumir en los siguientes aspectos:

- 1) La atmosfera terrestre dispersa la luz solar en direcciones diferente de la de incidencia. En particular, el hecho que esta dispersión es más intensa en la región azul-violeta del espectro visible, origina el color celeste del cielo cenital y el rojizo de los amaneceres y atardeceres.
- 2) La luz solar incidente está totalmente depolarizada. Por la naturaleza física de su interacción con las moléculas del aire atmosférico, la radiación dispersada esta parcial o totalmente polarizada en una medida que depende de la posición del Sol, del observador y de la porción del cielo examinado (Figura 11).

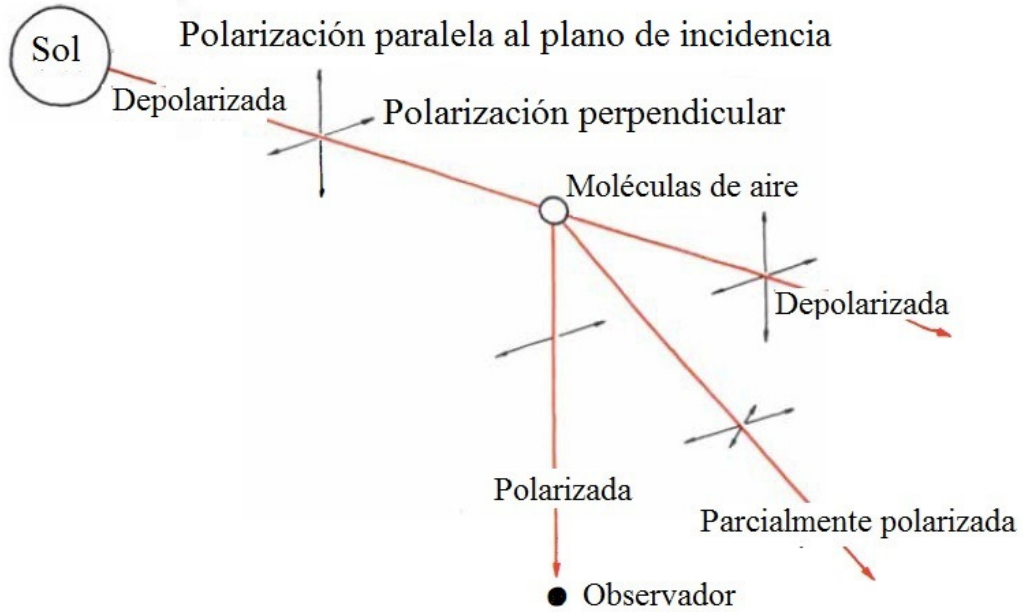


Figura 11. Estado de polarización de la luz solar dispersada por la atmosfera. Plano de incidencia determinado por las posiciones del Sol, la porción del cielo observado y el observador. La luz dispersada a 90° con respecto a la luz incidente que llega al observador está totalmente polarizada linealmente.

3) La polarización de la luz dispersada por una porción de cielo despejado puede determinarse mediante el fenómeno de doble refracción en un cristal cuando el mismo es empleado para observar dicha región de la atmosfera, teniendo en cuenta que los haces refractados están polarizados linealmente en direcciones perpendiculares entre sí. Esto se esquematiza en la Figura 12 y se detalla en la leyenda de la misma.

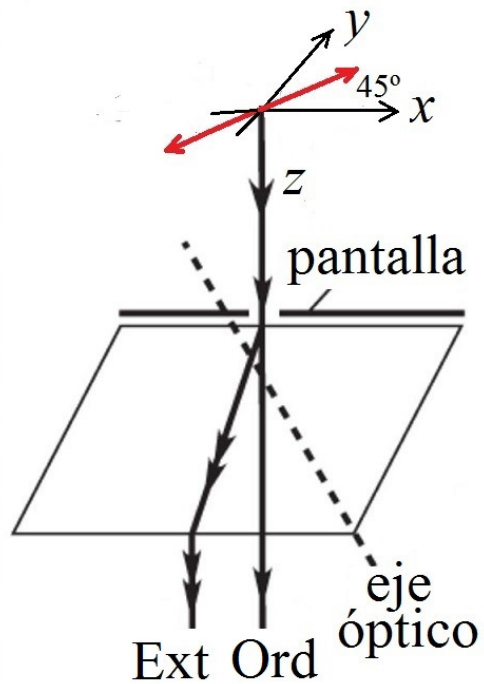
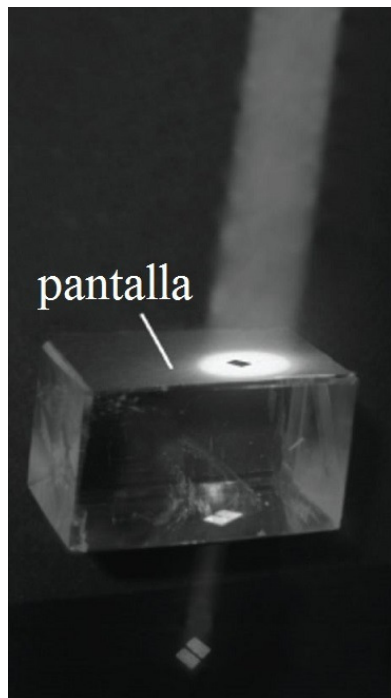


Figura 12. Doble refracción en un cristal de calcita. Cuando la luz incidente está polarizada a 45° con el plano de incidencia (indicada por la doble flecha roja), determinado por el eje óptico y la normal a la cara frontal del cristal, las imágenes ordinaria (polarizada perpendicular al plano de incidencia) y extraordinaria (polarizada en el plano) son de la misma intensidad.

La Figura 13 muestra resultados experimentales obtenidos por los autores empleando un cristal de calcita. La doble imagen de un disco negro estampado sobre la cara del cristal enfrentando al cenit se obtuvo al observar esa porción del cielo despejado mientras el Sol estaba posicionado cerca del horizonte. Las imágenes están polarizadas: la imagen ordinaria (Ord), perpendicular al plano definido por el eje óptico y la normal a la superficie del cristal; la extraordinaria (Ext), a lo largo del plano. La luz solar dispersada por la atmosfera que incide sobre la cara del cristal con el disco está linealmente polarizada. El cristal ha sido rotado alrededor de la dirección de visión tal que dicha polarización forma un ángulo de 45° con el plano anterior. Para esta orientación del cristal, ambas imágenes lucen de la misma intensidad. Dicha orientación puede determinarse con una precisión de unos pocos grados dado que el ojo humano es muy sensible comparando intensidades. Recíprocamente, la observación de esta condición permite determinar la dirección de polarización de la luz celestial y así la del Sol, tal como es indicada por una arista del cristal, aún cuando el astro esté oculto.

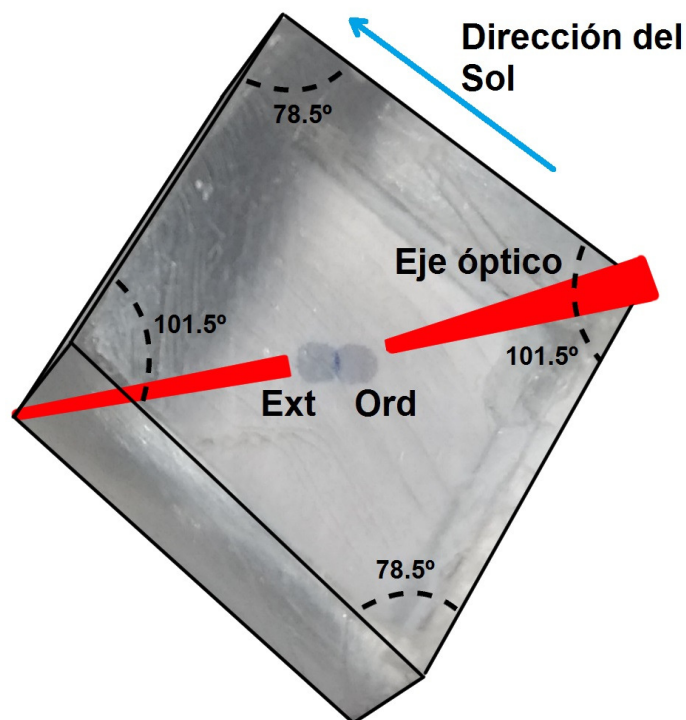


Figura 13. La forma romboédrica del cristal de calcita empleado en las observaciones corresponde a las caras de clivaje natural del mineral. El eje óptico (en rojo) está aproximadamente a lo largo de una diagonal del cuerpo del sólido. La luz cenital polarizada incidió sobre la cara de abajo del cristal, donde se imprimió un disco negro. Cristal de calcita para demostración; dimensiones (en cm): 1,8 x 1,5 x 1,3. Separación observada entre rayos emergentes ordinario y extraordinario: 1.5 mm.

4) A partir de la discusión precedente, podemos concluir un posible procedimiento práctico mediante el cual los vikingos podrían haberse orientado en mar abierto mediante la ubicación

indirecta del Sol cuando el astro se encontrara cubierto por nubes o bancos de niebla o algo por debajo del horizonte (poco antes del amanecer y poco después del atardecer). Podrían haberlo hecho leyendo la polarización de la luz celestial mediante un cristal como la calcita, tal como se esquematiza en la Figura 14.

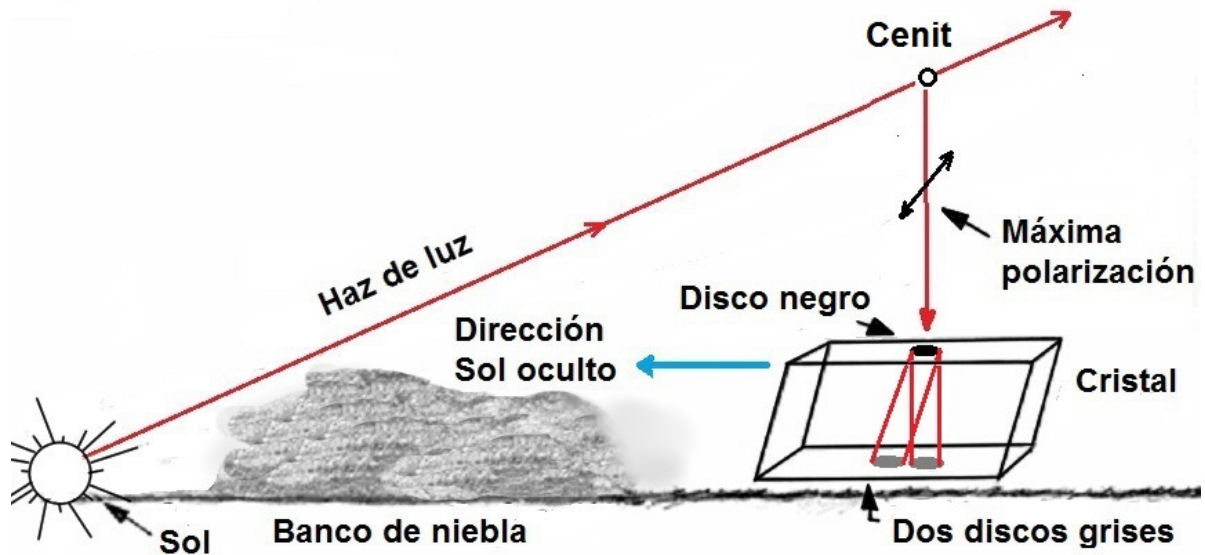


Figura 14. Localizando la orientación del Sol oculto mediante un cristal. La porción de cielo cenital es observada a través de un cristal de calcita. El cristal se rota alrededor de la dirección de visión hasta que las dos imágenes birrefringentes del disco marcado sobre la cara frontal lucen de la misma intensidad. Entonces, la dirección del Sol oculto es la indicada por una arista del cristal.

Apéndice: Breve historia sobre la luz polarizada y la óptica cristalina

- La historia sobre la luz polarizada comienza con un físico, médico y matemático Danés, Erasmus Bartholinus (1625-1698), quien en 1669 descubre el fenómeno de doble refracción en espato de Islandia (una variedad de la calcita) sin reparar por aquella época en el fenómeno asociado de polarización.
- Christian Huygens (físico y astrónomo Holandés, 1629-1695) interpreta la doble refracción suponiendo que en el cristal, además de una onda primaria esférica, se propaga una onda secundaria elipsoidal. En el curso de esta investigación, Huygens realiza en 1690 un descubrimiento fundamental sobre la polarización: cada uno de los dos rayos que surgen en la refracción por calcita puede extinguirse haciéndolo pasar por un segundo cristal del mismo material, si este último es rotado alrededor de la dirección del rayo [11]. Isaac Newton (físico, astrónomo y matemático Inglés, 1642-1727) propuso una explicación de este fenómeno suponiendo que los rayos son ‘transversales’. Basado en esta idea, Newton (creador de la teoría corpuscular de la luz) rechaza la teoría ondulatoria de la luz (propuesta por Robert Hooke, físico y químico Inglés, 1635-1703, y mejorada y extendida más tarde por Huygens), debido a que por aquél tiempo los científicos estaban familiarizados sólo con ondas longitudinales, tales como en la propagación del sonido.
- Étienne L. Malus (ingeniero Francés, 1775-1812) descubre la polarización de la luz por reflexión [12], observando en 1808 mediante un cristal de calcita el reflejo de la luz directa del sol en el vidrio de una ventana. Encuentra que las dos imágenes obtenidas por doble refracción variaban en intensidad relativa cuando el cristal era rotado alrededor de la línea de visión. N.A: Posiblemente Malus observó la doble imagen de una marca sobre la cara del cristal de calcita que enfrentaba la ventana y era iluminada por la reflexión en la misma; en efecto, la separación entre las imágenes por doble refracción en un cristal de calcita es de sólo 1mm por cada 10 mm de espesor, por lo que objetos distantes no se perciben como imágenes dobles separadas cuando vistos a través del cristal. Sin embargo, Malus no intentó la interpretación del fenómeno, formulando en cambio la ley que lleva su nombre. La misma establece que la intensidad de la luz transmitida por el polarizador es proporcional al cuadrado del coseno del ángulo que subtiende la dirección de polarización de la luz con el eje de transmisión. A pesar de ser el primero en mencionar el término ‘polarización’, sin embargo su explicación del fenómeno en términos de la teoría corpuscular prevaleciente por aquél entonces resultó equivocada.
- En 1809 Dominique F. J. Arago (físico y astrónomo Francés, 1786-1853) descubre que la luz solar dispersada por un cielo azul claro está polarizada [13]. Más tarde establece que dicha polarización celestial es máxima cuando el ángulo Sol-punto del cielo observado-observador es 90°.
- En 1815 Jean B. Biot (físico Francés, 1774-1862) descubre el fuerte dicroísmo presente en cristales de turmalina. Ese mismo año, David Brewster (físico Escocés, 1781-1868) establece la ley relacionando el índice de refracción de un medio con el ángulo de incidencia de la luz sobre el mismo que produce un haz reflejado totalmente polarizado linealmente. Previamente,

sin embargo, Malus fue el primero en reconocer en 1810 la existencia de ese ángulo (ahora llamado ‘de Brewster’) en la reflexión de luz sobre la superficie del agua.

- Junto con Arago, Augustin J. Fresnel (físico e ingeniero Francés, 1788-1827) investigó la interferencia de rayos de luz polarizada para encontrar en 1816 que dos rayos polarizados en direcciones perpendiculares nunca interfieren entre sí [14]. Esta observación es irreconciliable con la hipótesis de ondas de luz longitudinales que hasta ese entonces era generalmente aceptada por la comunidad científica. Thomas Young (físico y médico Inglés, 1773-1829), enterado de los resultados de Arago, encuentra en 1817 la solución al problema descubriendo una propiedad clave: las vibraciones de la luz son transversales.

- En 1828 William Nicol (físico Escocés, 1768-1851) inventa el prisma que lleva su nombre. Inicialmente construido de calcita, fue el primer filtro polarizador de uso práctico y facilitó el avance de las investigaciones con luz polarizada.

- Empleando la hipótesis incorrecta del éter como sustrato de vibraciones de ondas de luz [15], en 1832 y durante el período 1866-1870, Fresnel deduce las leyes que llevan su nombre y gobiernan la intensidad y polarización de la luz reflejada y refractada en medios ópticos.

- En 1844 Wilhelm K. von Haidinger (físico, geólogo y mineralogo, 1795-1871) descubre que el ojo humano posee una capacidad marginal de percibir la dirección de oscilación de luz polarizada linealmente (‘pinceles de Haidinger’) [16].

- En 1845 Michael Faraday (físico y químico Inglés, 1791-1867) descubre la rotación del plano de polarización de la luz en presencia de un campo magnético, indicando de este modo la existencia de una estrecha relación entre los fenómenos ópticos y electromagnéticos, disciplinas de la Física que históricamente venían desarrollándose separadamente.

- En 1852 Williams B. Herapath (químico y médico Inglés, 1820-1868) prepara cristales sintéticos (una combinación de iodo y quinina) que presentan fuerte dicroísmo y propiedades ópticas similares a la turmalina. Más tarde, este logro fue la base de la manufactura de láminas polarizadoras cuya facilidad de uso y bajo costo favoreció enormemente el estudio y empleo de luz polarizada. En el mismo año George Gabriel Stokes (físico Irlandés, 1819-1903) introduce los cuatro parámetros (de Stokes) que caracterizan completamente un estado de polarización arbitraria de la luz [17].

- En 1869 John Tyndall (físico Irlandés, 1820-1893) establece el hecho que la polarización de la luz dispersada por partículas cambia fuertemente con las dimensiones de las mismas, explicando de esa manera observaciones previas en partículas de humo.

- En 1871 John W. Strutt, alias Lord Rayleigh (físico Inglés, 1842-1919) explica teóricamente la polarización de la luz celestial dispersada [18].

- En 1873, de acuerdo a consideraciones teóricas basadas en las ahora llamadas ‘Ecuaciones de Maxwell’ (que completan la unificación de los fenómenos eléctricos y magnéticos

estudiados durante 25 siglos), James C. Maxwell (físico Escocés, 1831-1879) propone que la luz es una onda electromagnética [19]. Esta unificación de la Óptica y el Electromagnetismo constituye uno de los mayores triunfos de la Física en el entendimiento de la Naturaleza.

- En 1875 John Kerr (físico Escocés, 1824-1907) descubre la inducción de birrefringencia en medios ópticos isotrópicos cuando son sometidos a la acción de campos eléctricos (‘efecto Kerr’). Más tarde, observa cambios en la reflexión metálica de luz polarizada en presencia de campos magnéticos (‘efecto Kerr magneto-óptico’).

- En 1888 Heinrich Hertz (físico Alemán, 1857-1894) verifica mediante experimentos directos que la luz es, en efecto, una onda electromagnética [20].

- Durante el período 1908-1915, Gustav Mie (físico Alemán, 1868-1957), Peter Debye (físicoquímico Holandés-Estadounidense, 1884-1966) y Ricardo M. Gans (físico Alemán-Argentino, 1880-1954) desarrollaron independientemente la teoría de dispersión de la luz por partículas de forma y tamaño arbitrario.

- En 1912, inspirado por una conversación con Paul P. Ewald (físico Alemán, 1888-1985) sobre óptica cristalina, Max von Laue (físico Alemán, 1879-1960) concibe la idea que un cristal podría actuar como una red de difracción 3D de rayos-X. Laue pone a prueba exitosamente esta idea con la ayuda experimental de Walter Friedrich (físico Alemán, 1883-1968) y Paul Knipping (físico Alemán, 1883-1935) originando una nueva rama de la Física [21]. Los resultados resolvieron dos cuestiones fundamentales de la época, esto es, ¿son los rayos-X radiación electromagnética (luz) de longitud de onda extremadamente corta? Y también, ¿son los cristales arreglos espaciales periódicos? La respuesta afirmativa a ambas cuestiones fue inmediatamente seguida en 1913 por la instrumentación y re-interpretación del fenómeno por William H. Bragg (físico Inglés, 1862-1942) y su hijo William L. Bragg (físico Inglés, 1890-1971), quienes iniciaron el desarrollo de la cristalografía estructural [22,23]. Esta metodología no sólo identifica la característica de birrefringencia óptica de los cristales (uniaxial, biaxial) a través de la determinación del sistema cristalográfico sino que además, al proveer la estructura molecular detallada del sólido, permite racionalizar la propagación de la luz por su interior.

- En 1928 Edwin H. Land (físico Estadounidense, 1909-1991) construye su primera lámina de polarizador lineal dicróico [24].

- En 1939 los físicos alemanes Y. LeGrand French y K. Kalle reportan independientemente que la luz dispersada bajo el agua está polarizada linealmente [25].

- En 1949 Karl von Frisch (zoólogo Austríaco, 1886-1982) descubre la capacidad de las abejas para detectar luz polarizada [26].

- En 1950 Subrahmanyan Chandrasekhar (físico y astrónomo Indio-Estadounidense, 1910-1995) provee una solución a la transferencia radiante en un modelo plano-paralelo de atmosfera iluminada por el Sol, empleando la dispersión Rayleigh [27]. En 1960 los cálculos

basados en la solución fueron convenientemente tabulados por K. L. Coulson, J. V. Dave y Z. Sekera [28].

- En 1955 William A. Shurcliff (físico Estadounidense, 1909-2006) descubre que el ojo humano también posee una capacidad marginal de percibir luz circularmente polarizada (‘pinceles de Shurcliff’) [29].
- En 1988 Kinsell L. Coulson (meteorólogo Estadounidense, 1916-1999) publica una completa monografía sobre polarización e intensidad de la luz dispersada por la atmosfera [30].

Agradecimientos. Al personal del Laboratorio de Enseñanza de la Física y del Museo de Física (DF, FCE, UNLP) por el préstamo de cristales y polarizadores de demostración.

Referencias

- [1] Vilhjalmsson T (1997), Time and Travel in Old Norse Society, *Disputatio*, II, 89-114.
- [2] Ramskou T (1967), Solstenen, *Skalk*, No. 2, 16-17.
- [3] Ramskou T (1969), Solstenen: Primitiv Navigation i Norden før Kontpasset. Rhodos, Copenhagen, p. 96.
- [4] Gelsinger BE (1970), Solstenen: Primitiv Navigation i Norden før Kontpasset (a review), *Scandinavian Studies*, 42(3), 362-363
- [5] Walker J (1978), The Amateur Scientist: More about polarizers and how to use them, particularly for studying polarized sky light, *Sci. Am.* **238**(1), 132-136.
- [6] Moody AB (1950), The Pfund Sky Compass. *Navigation*, 2(7), 234-239.
- [7] Frisch K von (1967), The Dance Language and Orientation of Bees, the Belknap Press of Harvard University Press.
- [8] Frisch K von (1973), Nobel Lecture.
- [9] Wehner R (1976), Polarized-Light Navigation by Insects, *Sci. Am.* **235**(1), 106-115.
- [10] Landau L, Lifshitz EM (1981), *Electrodinámica de los Medios Continuos*, Ed. Reverté, Buenos Aires.
- [11] Huygens C (1690), *Traité de la lumière*. Leyden (completada en 1678, publicada en 1690)
- [12] Malus ÉL (1809), Sur une propriété de la lumière réfléctie par les corps diaphanes. *Nouveau Bull d Sci, par la Soc Philomatique* (Paris) 1, 266-269; *Mém de la Soc d'Arcueil* 2.
- [13] Barral MJA (1858), *Oeuvres de Francois Arago I-V.*, Gide - Paris, Weigel - Leipzig
- [14] Fresnel AJ (1866-1870), *Oeuvres Complètes d'Augustin Fresnel* (Paris) 1, p. 767.
- [15] René Descartes (científico Francés, 1596-1650) consideraba que la luz era esencialmente una presión transmitida a través de un medio sólido elástico perfecto, llamado ‘éter’ que llenaba todo el espacio. Por aquél tiempo, los científicos trataban de

explicar todos los fenómenos naturales mediante leyes mecánicas: la luz era considerada como rápidas vibraciones de partículas etéreas. A pesar de enfrentar muchas dificultades, la teoría del éter persistió por largo tiempo y la mayor parte de los grandes físicos del siglo XIX contribuyeron a su desarrollo.

- [16] Haidinger W (1844), Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts und der Lage der Polarisationsebene. *Annal Phys* (Leipzig) 63, 29-39.
- [17] Stokes GG (1852), On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources. *Trans Cambr Phil Soc* 9, 233-258.
- [18] Strutt JW (Lord Rayleigh) (1871), On the light from the sky, its polarisation and colour. *Phil Magaz* 41, 107-120, 274-279.
- [19] Maxwell JC (1873), A treatise on electricity and magnetism. Oxford, 2 vols. (1974), 781-793.
- [20] Hertz H (1888), *Wiedem Ann* 34, p. 551 (Traducido al inglés en su *Electric Waves*, 1893, Macmillan, London, p. 107).
- [21] Friedrich W, Knipping P, Laue M von (1912), Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen. *Sitzungsber. K. Bayer. Akad. Wiss.* 303-322.
- [22] Bragg WL (1913), The Structure of Some Crystals as Indicated by Their Diffraction of X-rays. *Proc. Roy. Soc.* A89, 248-277.
- [23] Bragg WH (1914), The X-ray spectrometer. *Nature* 94, Issue 2347, 199-200.
- [24] Land EH (1951), Some aspects of the development of sheet polarizers. *J Opt Soc Am* 41, 957-963.
- [25] LeGrand Y (1939), *Ann Inst Océanolog Monaco* 19, p. 393; Kalle K (1939), Die Farbe des Meeres. *Rapports et procès-verbaux des Reunions. Conseil permanent international pour exploration de la mer* 109(3), 98-105 [Referido por Waterman TH (1954), Polarization patterns in submarine illumination. *Science* 120, 927-932].
- [26] Frisch K von (1949), Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen. *Experientia* 5, 142-148.
- [27] Chandrasekhar S (1950), *Radiative transfer*. Clarendon Press, Oxford
- [28] Coulson KL, Dave JV, Sekera Z (1960), *Tables related to radiation emerging from a planetary atmosphere with Rayleigh scattering*. Univ. California Press, Berkeley Los Angeles.
- [29] Shurcliff WA (1955), Haidinger's brushes and circularly polarized light. *J Opt Soc Am* 45, 399.
- [30] Coulson KL (1988), *Polarization and intensity of light in the atmosphere*. A Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA.