

Práctica 3: Óptica electromagnética

Ruiz Muñoz, Miguel Ángel Caballero Almagro, Alejandro

Óptica I - Curso 2022/2023



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

I. Introducci3n

Antes de pasar a usar el programa debemos entender cuales son los criterios que se usan en 3l: criterio de signos para la polarizaci3n, signos de los par3metros de Stokes y orientaci3n de los campos para deducir las ecuaciones de Fresnel.

1. Deducir el criterio de signos para polarizaci3n dextr3gira y lev3gira.

El criterio que seguíamos en clase era,

$$\begin{aligned}\vec{E}_x &= \hat{i}E_{ox} \cos(kz - wt) \\ \vec{E}_y &= \hat{j}E_{oy} \cos(kz - wt + \delta)\end{aligned}$$

con el cual podíamos deducir que si $-\pi < \delta < 0$ la luz era dextr3gira y si $0 < \delta < \pi$ la luz era lev3gira. Sin embargo, el programa no sigue este criterio sino,

$$\vec{E}_p = \hat{i}A_p \cos(wt - kz) \quad (1)$$

$$\vec{E}_s = \hat{j}A_s \cos(wt - kz + \delta) \quad (2)$$

Veamos entonces ahora para qu3 valores de δ es dextr3gira y lev3gira. Para ello lo que vamos a hacer es fijar un plano, $z = 0$ por simplificar, y variar el tiempo. Si el campo se mueve en sentido antihorario ser3 lev3gira y si lo hace en sentido horario ser3 dextr3gira.

Entonces si sustituimos $z = 0$ en las ecuaciones (1) y (2) partimos de,

$$\vec{E}_p = \hat{i}A_p \cos(wt) \quad (3)$$

$$\vec{E}_s = \hat{j}A_s \cos(wt + \delta) = \hat{j}A_s [\cos(wt) \cos(\delta) - \sin(wt) \sin(\delta)] \quad (4)$$

Lo que vamos a hacer ahora es evaluar las expresiones (3) y (4) en dos tiempos diferentes ($t = 0$ y $t = T/4$, por ejemplo) y observaremos en qu3 sentido rota. Para $t = 0$,

$$\vec{E}_p = \hat{i}A_p \quad (5)$$

$$\vec{E}_s = \hat{j}A_s \cos(\delta) \quad (6)$$

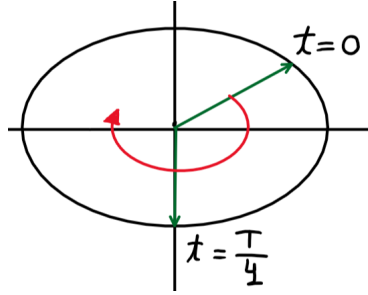
Para $t = T/4$, como sabemos que $w = \frac{2\pi}{T}$ tenemos que $wt = \frac{2\pi}{T} \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}$. Entonces vamos a evaluar ahora en $t = T/4$,

$$\vec{E}_p = 0 \quad (7)$$

$$\vec{E}_s = -\hat{j}A_s \sin(\delta) \quad (8)$$

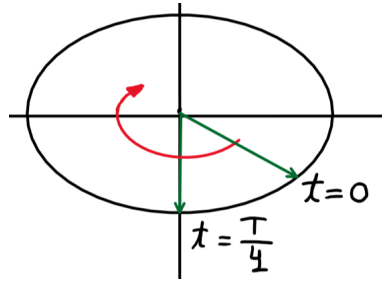
Vamos a separar en casos seg3n el valor de δ de forma que el signo del seno y coseno sea 3nico en cada caso:

- Para $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$: En este caso vemos que tanto el seno como el coseno toman valores positivos, por lo que el campo rotará como muestra la figura 1,

Figura 1: Rotación del campo para $0 < \delta < \pi$

Vemos que en este caso la luz es dextrógira.

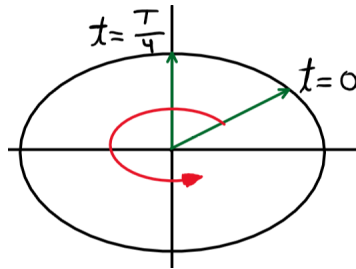
- Para $\frac{\pi}{2} < \delta < \pi$: En este caso vemos que el coseno toma valores negativos y el seno valores positivos, por lo que el campo rotará como muestra la figura 2,

Figura 2: Rotación del campo para $\frac{\pi}{2} < \delta < \pi$

Vemos que en este caso la luz es dextrógira.

- Para $-\frac{\pi}{2} < \delta < 0$:

En este caso vemos que el coseno toma valores positivos y el seno negativos, por lo que el campo rotará como muestra la figura 3,

Figura 3: Rotación del campo para $-\frac{\pi}{2} < \delta < 0$

Vemos que en este caso la luz es levógira.

- Para $-\pi < \delta < -\frac{\pi}{2}$:

En este caso vemos que tanto el seno como el coseno toman valores positivos, por lo que el campo rotará como muestra la figura 4,

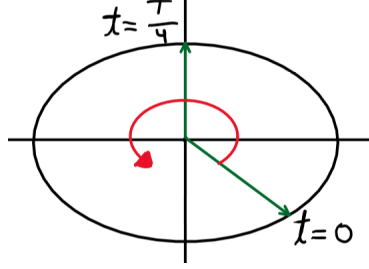


Figura 4: Rotación del campo para $-\pi < \delta < -\frac{\pi}{2}$

Vemos que en este caso la luz es levógira.

Por lo tanto, vemos que con este criterio, la luz es dextrógira cuando $0 < \delta < \pi$ y es levógira cuando $-\pi < \delta < 0$

2. Justificar los signos de los parámetros de Stokes.

Según el criterio visto en clase, obteníamos los siguientes parámetros de Stokes,

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{E_{ox}^2 + E_{oy}^2} \begin{pmatrix} E_{ox}^2 + E_{oy}^2 \\ E_{ox}^2 - E_{oy}^2 \\ 2E_{ox}E_{oy} \cos \delta \\ -2E_{ox}E_{oy} \sin \delta \end{pmatrix}$$

Sin embargo, para los criterios usados por el programa tenemos los siguientes parámetros,

$$S = \begin{pmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{pmatrix} = \frac{1}{A_p^2 + A_s^2} \begin{pmatrix} A_p^2 + A_s^2 \\ A_p^2 - A_s^2 \\ 2A_pA_s \cos \delta \\ 2A_pA_s \sin \delta \end{pmatrix}$$

Si comparamos ambos criterios vemos que los signos de los tres primeros parámetros no cambian. Sin embargo, el signo del cuarto parámetro ($S_3 = S$) sí que cambia, como consecuencia del cambio de criterio para la polarización dextrógira y levógira. Como hemos visto en el apartado anterior, la diferencia entre los criterios de polarización es que cuando con un criterio la luz es dextrógira con el otro es levógira y viceversa. Si nos fijamos, vemos que en el tercer parámetro ($S_2 = C$) no afecta esto ya que el coseno es una función con simetría par, por lo que el cambio de signo no altera el resultado. Sin embargo, en el cuarto parámetro ($S = S_3$) como el seno tiene simetría impar, es necesario el signo menos para que ambos criterios sean compatibles.

3. Deducir el coeficiente r_p e interpretar los signos en las ecuaciones de Fresnel.

A la hora de deducir los coeficientes de Fresnel, es importante establecer unos criterios iniciales y ser coherente con ellos. Según vimos en clase para deducir las ecuaciones de Fresnel partimos de las condiciones que vemos en la figura 5

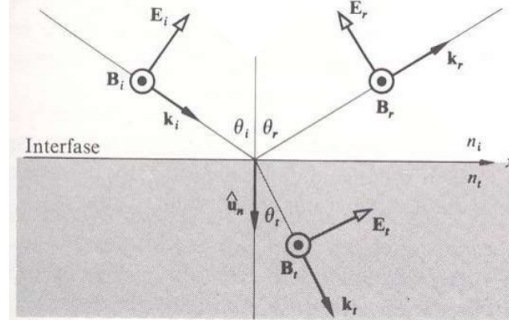


Figura 5: Criterio visto en clase

Con este criterio las condiciones de frontera para obtener r_p serían

$$E_i \cos \theta_i - E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t$$

$$B_i + B_r = B_t$$

Sin embargo, el criterio usado por el programa se basa en las condiciones vistas en la figura 6

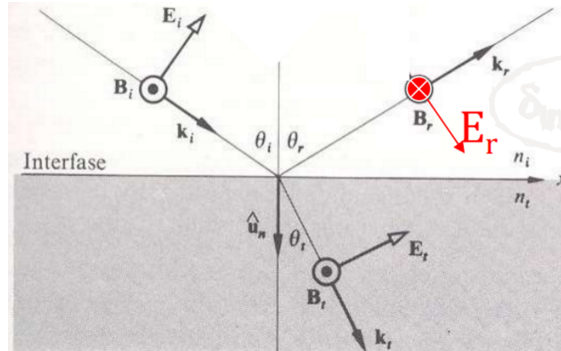


Figura 6: Criterio usado por el programa

Las condiciones de frontera en este caso son,

$$E_i \cos \theta_i + E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t \quad (9)$$

$$B_i - B_r = B_t \quad (10)$$

Sustituyamos en la ecuación (10) la expresión $B = \frac{nE}{c}$ y desarrollémosla,

$$n_i E_i - n_i E_r = n_t E_t$$

$$n_i [E_i - E_r] = n_t E_t$$

$$\frac{n_i}{n_t} [E_i - E_r] = E_t$$

Sustituyendo esta expresión en (9) y sabiendo que $\theta_i = \theta_r$ podemos desarrollar y obtener la ecuación de r_p ,

$$E_i \cos \theta_i + E_r \cos \theta_i = \frac{n_i}{n_t} [E_i - E_r] \cos \theta_t$$

$$n_t [E_i \cos \theta_i + E_r \cos \theta_i] = n_i [E_i - E_r] \cos \theta_t$$

$$n_t E_i \cos \theta_i - n_i E_i \cos \theta_t = -n_t E_r \cos \theta_i - n_i E_r \cos \theta_t$$

$$E_i [n_i \cos \theta_t - n_t \cos \theta_i] = E_r [n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t]$$

El coeficiente r_p realmente es una proporción entre la amplitud del campo reflejado y el incidente por lo que ,

$$r_p = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_i \cos \theta_t - n_t \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} = -\frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$

Nos damos cuenta de que el signo de este coeficiente es opuesto al obtenido con el criterio de clase,

$$r_{||} = -\frac{n_i \cos \theta_t - n_t \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t}$$

$$r_{||} = -r_p$$

Podemos justificar este cambio de signo en este coeficiente debido al desfase inicial que hemos elegido al inicio de π . En cuanto al resto de coeficientes coinciden los signos en ambos criterios.

II. Polarización

1. Simular diferentes estados de polarización y para cada caso explicar los parámetros elegidos para conseguirlos (*amplitudes y desfases*), interpretar la información que dan los valores de los parámetros de Stokes y justificar en valor del desfase mediante la gráfica inferior correspondiente a la representación de la vibración de ondas.

- Luz linealmente polarizada a $\alpha = 60^\circ$.

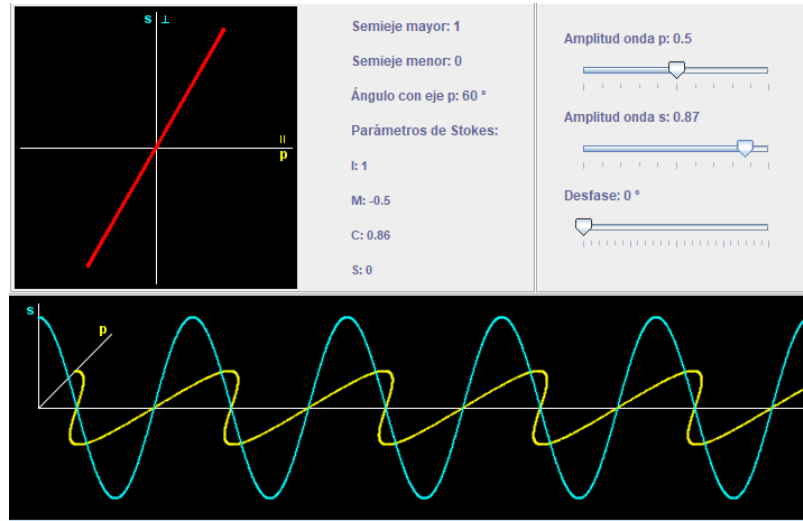


Figura 7: Captura del programa para la luz linealmente polarizada con $\alpha = 60^\circ$.

Como $\tan(\alpha) = \frac{A_s}{A_p}$, hemos tomado de referencia $A_p = 0,5$ entonces sabiendo que queremos que $\alpha = 60^\circ$ despejamos A_s de la siguiente manera: $A_s = \tan(60^\circ) \cdot 0,5 = 0,866 \simeq 0,87$.

Para el desfase hemos tenido en cuenta que para la luz linealmente polarizada, $\delta = \pm m\pi(\text{rad})$; $m = 0, 1, 2, \dots$ de esta expresión es sencillo deducir que si $m = 0$ o m par, entonces la pendiente de la luz polarizada es positiva y si m es impar la pendiente es negativa, entonces como a 60° la pendiente debe ser positiva, $\delta = \pm m\pi$; m par por lo que si tomamos $m = 0$ tenemos que el desfase será $\delta = 0$.

De los parámetros de Stokes sacamos que, como $M = -0,5$, nuestra luz está mas cerca de ser vertical que horizontal y como $C = 0,86$ está mas cerca de tener una pendiente de $+45^\circ$ que de tenerla a -45° . También al tener que $S = 0$, sabemos que no es ni dextrógira ni levógira.

Por último, fijándonos en la gráfica inferior podemos ver que el desfase es 0 porque los máximos de p coinciden con los máximos de s al igual que los mínimos y los nodos.

En esta sección usaremos exactamente este método para explicar porqué hemos usado los parámetros y para explicar los resultados del programa por lo que en los siguientes apartados, a modo de no caer en la redundancia iremos mas al grano poniendo lo justo para que quede claro.

- Luz linealmente polarizada a $\alpha = -30^\circ$.

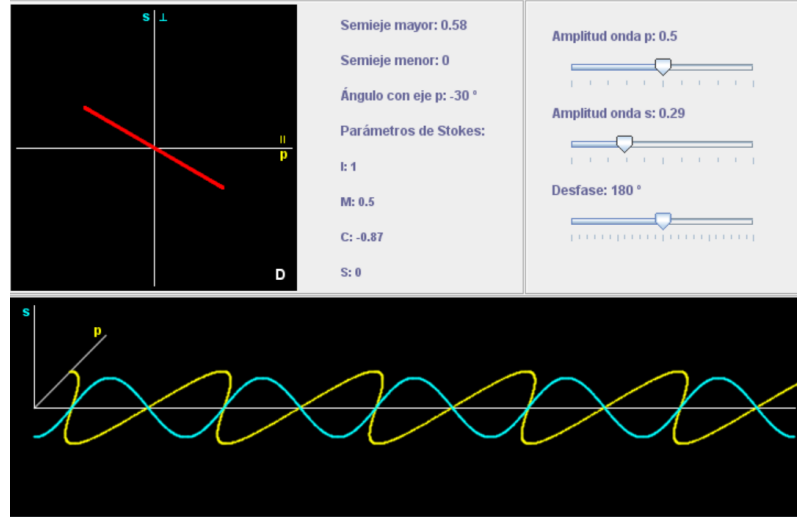


Figura 8: Captura del programa para la luz linealmente polarizada con $\alpha = -30^\circ$.

$$\tan(\alpha) = \frac{A_s}{A_p}; \{A_p = 0,5; \alpha = 30^\circ\} \rightarrow A_s = \tan(30^\circ) \cdot 0,5 = \frac{\sqrt{3}}{6} \simeq 0,29.$$

Si $\delta = \pm m\pi$; m impar la pendiente será negativa, por lo que para obtener $\alpha = -30^\circ \rightarrow \delta = \pi(\text{rad}) = 180^\circ$.

Por los coeficientes M y C sabemos que está mas cerca de ser horizontal (M mas cerca de 1 que de -1) y que está mas cerca de tener una pendiente de -45° que de $+45^\circ$ (C mas cerca de -1 que de 1) mientras que al tener $S = 0$ sabemos que la luz no es ni dextrógira ni levógira.

Para concluir, viendo la gráfica podemos apreciar que va en contrafase, los máximos de p coinciden con los mínimos de s y viceversa mientras que los nodos coinciden siempre, lo que indica que el desfase es de -180° .

- Luz circular dextrógira.

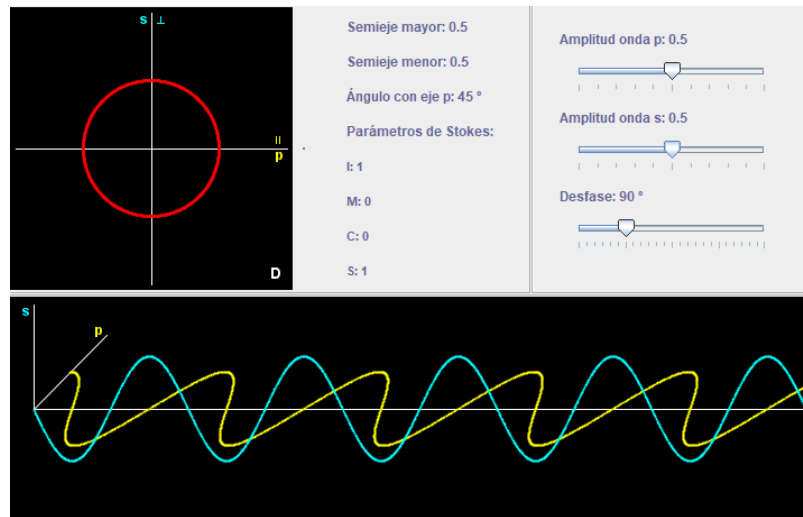


Figura 9: Captura del programa para la luz circular dextrógira.

Para la luz circularmente polarizada tenemos que: $A_s = A_p$ y hemos tomado que ambas sean 0,5.

En cuanto al desfase tenemos que si $\delta = \frac{\pi}{2} + 2m\pi$; $m = 0, 1, -1, 2, -2, \dots$ la polarización es dextrógira por lo que al tomar $m = 0 \rightarrow \delta = \frac{\pi}{2}(\text{rad}) = 90^\circ$.

En los parámetros de Stokes vemos que como $M = 0$ y $C = 0$ no es ni horizontal ni vertical ni esta inclinada. Y como $S = 1$ la polarización es dextrógira.

Por último en la gráfica apreciamos que los máximos y mínimos de p coinciden con los nodos de s y viceversa, y al seguir el orden tenemos: $\text{maximo}(p) \rightarrow \text{mínimo}(s) \rightarrow \text{mínimo}(p) \rightarrow \text{máximo}(s)$ vemos que s vá retrasado 90° por lo que el desfase es de 90° .

- Luz elípticamente polarizada, dextrógira con semieje mayor horizontal.

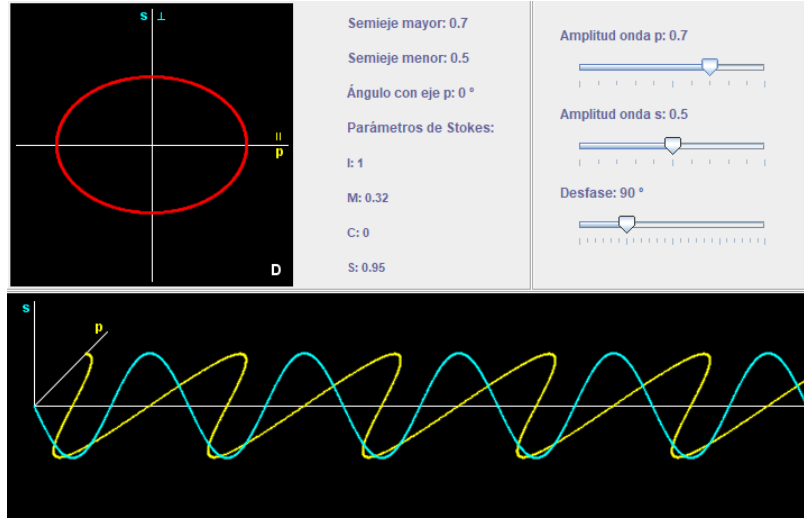


Figura 10: Captura del programa para la luz elípticamente polarizada, dextrógira con semieje mayor horizontal.

Para que sea elípticamente polarizada, $A_s \neq A_p$ y para que el semieje mayor sea horizontal $A_p > A_s$, por ejemplo $A_p = 0,7$; $A_s = 0,5$.

Para que sea dextrógira, como hemos visto antes $\delta = 90^\circ$.

Los coeficientes nos dicen que, como $M > 0$ es más horizontal que vertical, como $C = 0$ no está inclinada y como $S > 0$ la luz es dextrógira.

En la gráfica del desfase apreciamos lo mismo que en el círculo por lo que el desfase es de 90° .

- Luz elípticamente polarizada, levógira con semieje mayor vertical.

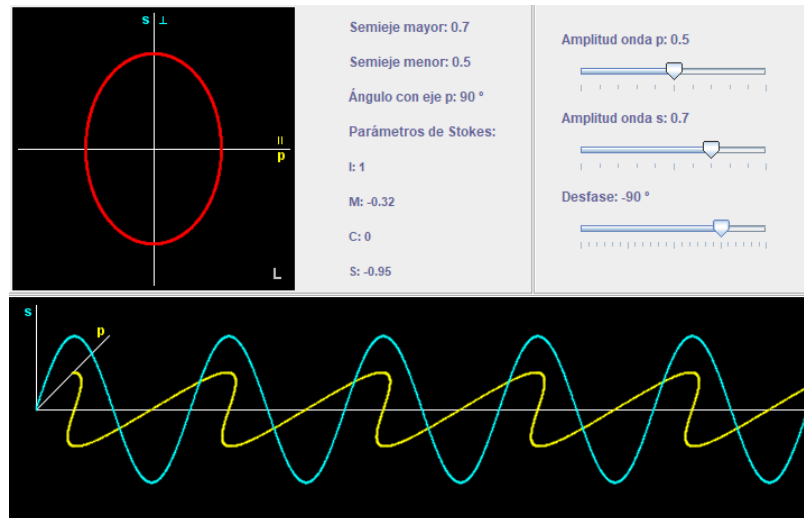


Figura 11: Captura del programa para la luz elípticamente polarizada, levógira con semieje mayor vertical.

Elípticamente polarizada $\rightarrow A_s \neq A_p$, semieje mayor vertical $\rightarrow A_p > A_s$, por ejemplo $A_s = 0,7$; $A_p = 0,5$. Para que sea levógira, tenemos que el desfase tiene que ser: $\delta = -\frac{\pi}{2} + 2m\pi$; $m = 0, 1, -1, 2, -2, \dots$, por lo que tomando $m = 0$, tenemos que el desfase para que sea levógira es de $\delta = -90^\circ$. En cuanto a los parámetros de Stokes tenemos algo parecido al caso anterior, como $M < 0$ es más vertical que horizontal, como $C = 0$ no está inclinada y como $S > 0$ la luz es dextrógira.

- Luz elípticamente polarizada dextrógira con inclinación $\psi = 30^\circ$.

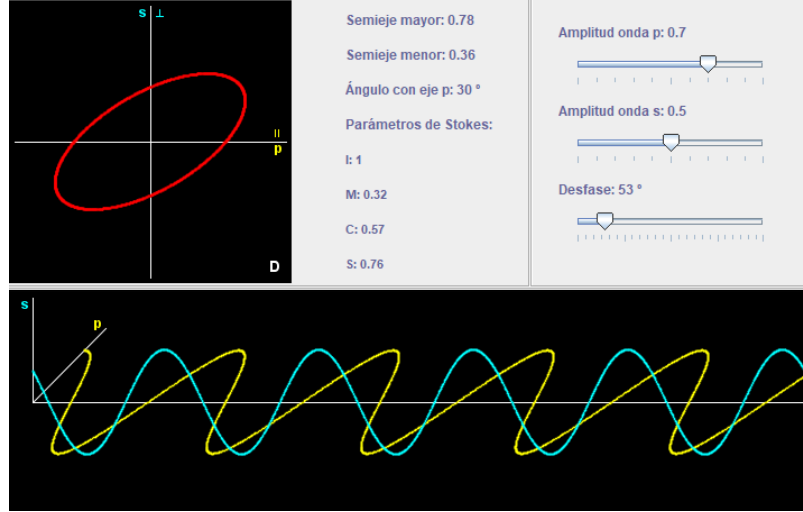


Figura 12: Captura del programa para la luz elípticamente polarizada dextrógira con inclinación $\psi = 30^\circ$.

Elípticamente polarizada $\rightarrow A_s \neq A_p$, para que sea dextrógira $\delta \in (0^\circ, 180^\circ)$ y para que $\psi = 30$ se tiene que cumplir que:

$$\tan(2\psi) = \tan(60) = \frac{2A_s A_p \cos(\delta)}{A_s^2 + A_p^2}$$

Así que si tomamos $A_p = 0,7$; $A_s = 0,5$, para que se cumpla la igualdad anterior tenemos que poner un desfase de 53° para obtener lo que nos pide el enunciado. Cabe destacar que esta no es la única configuración posible para lograrlo.

Los parámetros de Stokes nos dicen que, como $M > 0$ nuestra elipse es mas horizontal que vertical, $C > 0$ indica que la pendiente de la inclinación es positiva lo cual concuerda porque esta es de 30° , por último, como $S > 0$ la luz es dextrógira.

En la gráfica observamos un desfase sin ninguna correlación aparente por lo que podemos decir que no es ni de $\pm 90^\circ$ ni de $\pm 180^\circ$ ni de 0° , no podemos asegurar tampoco que sea $\delta = 53^\circ$ solamente mirando la gráfica pero sabemos que es posible que lo sea.

III. Dieléctricos

En esta sección consideraremos todo el rato que la luz incidente en nuestra interfase va a ser luz elípticamente polarizada, dextrógira con semieje mayor horizontal, para ello tomaremos concretamente los valores: $A_p = 0,83$; $A_s = 0,5$; $\delta = 90^\circ$.

Algunas fórmulas que vamos a usar en esta sección para calcular desfases y amplitudes son,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} \quad (11)$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} \quad (12)$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} \quad (13)$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} \quad (14)$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) \quad (15)$$

$$\delta_{ttotal} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) \quad (16)$$

De donde sabemos que,

$$A_{pi} = 0,83 \quad A_{si} = 0,5 \quad \delta_i = \frac{\pi}{2}$$

1. Reflexión Externa

Primero simularemos una interfase dada por $n_i = 1$; $n_t = 1,7$, ahora iremos variando los ángulos de incidencia explicando en cada caso lo que sucede, concretamente comentaremos lo que sucede con la luz reflejada (semiejes de la elipse de polarización, sentido de giro, amplitudes reflejadas A_{pr} y A_{sr} y el desfase total producido) y de la luz transmitida (semiejes de la elipse de polarización, sentido de giro, amplitudes reflejadas A_{pt} y A_{st} y el desfase total producido).

- Ángulo de incidencia menor que el ángulo de Brewster.

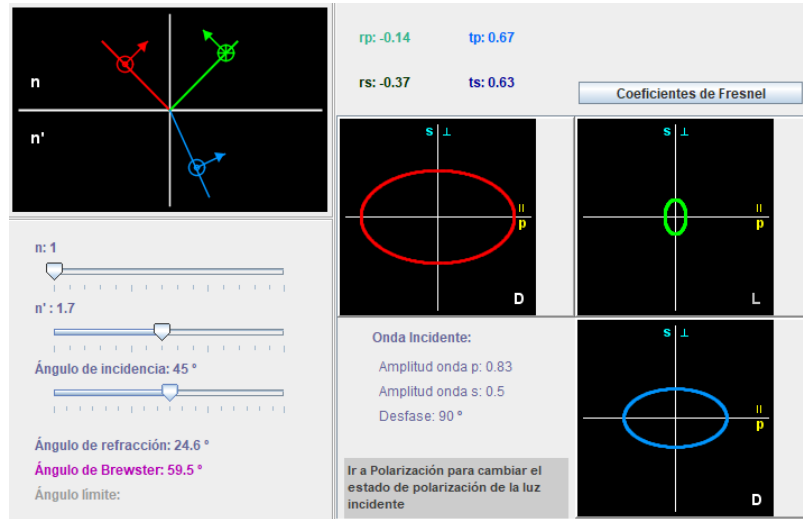


Figura 13: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 45^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} = 0,14 \cdot 0,83 = 0,116$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} = 0,67 \cdot 0,83 = 0,556$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} = 0,37 \cdot 0,5 = 0,185$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} = 0,63 \cdot 0,5 = 0,315$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (\pi - 0) = \frac{3\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}$$

$$\delta_{ttotal} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

Viendo que el desfase reflejado es negativo podemos deducir que la luz es levógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{sr} > A_{pr}$ por lo que la elipse formada por la onda reflejada tiene semieje mayor sobre el eje OY (dirección perpendicular). Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando ambos campos (reflejado y transmitido) con el incidente vemos que la elipse formada por la onda incidente tiene semiejes mayores debido a que todos los coeficientes de Fresnel están entre 0 y 1 (en valor absoluto). Una última cosa interesante a comentar es que como estamos en un ángulo menor que el de Brewster, el ángulo que hay entre la onda reflejada y la transmitida es mayor a 90° .

- Ángulo de incidencia igual que el ángulo de Brewster.

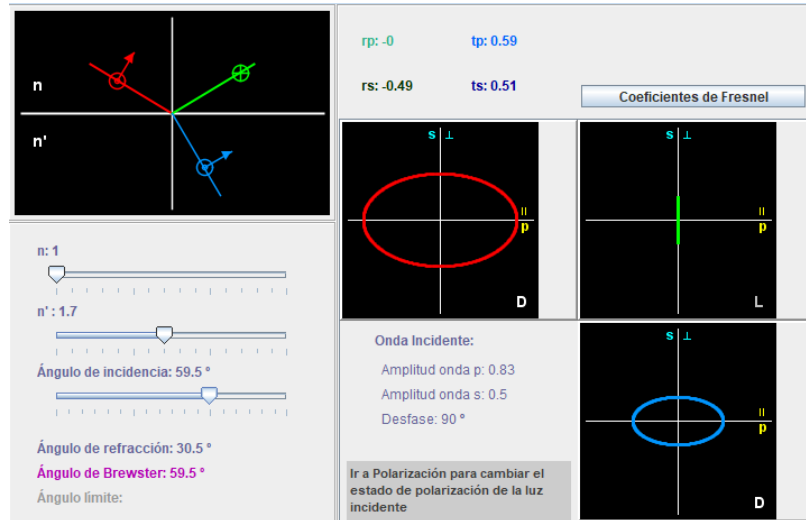


Figura 14: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 59,5^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} = 0 \cdot 0,83 = 0$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} = 0,59 \cdot 0,83 = 0,489$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} = 0,49 \cdot 0,5 = 0,245$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} = 0,51 \cdot 0,5 = 0,255$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (\pi - 0) = \frac{3\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}$$

$$\delta_{total} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

Viendo que el desfase es negativo podemos deducir que la luz es levógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{pr} = 0$ por lo que la onda reflejada está polarizada en la dirección perpendicular, lo cual tiene sentido ya que estamos en el ángulo de Brewster. Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando el campo transmitido con el incidente vemos que la elipse formada por la onda incidente tiene semiejes mayores debido a que todos los coeficientes de Fresnel están entre 0 y 1 (en valor absoluto). Una última cosa interesante a comentar es que como estamos en el ángulo de Brewster, el ángulo que hay entre la onda reflejada y la transmitida es 90° .

- Ángulo de incidencia mayor que el ángulo de Brewster.

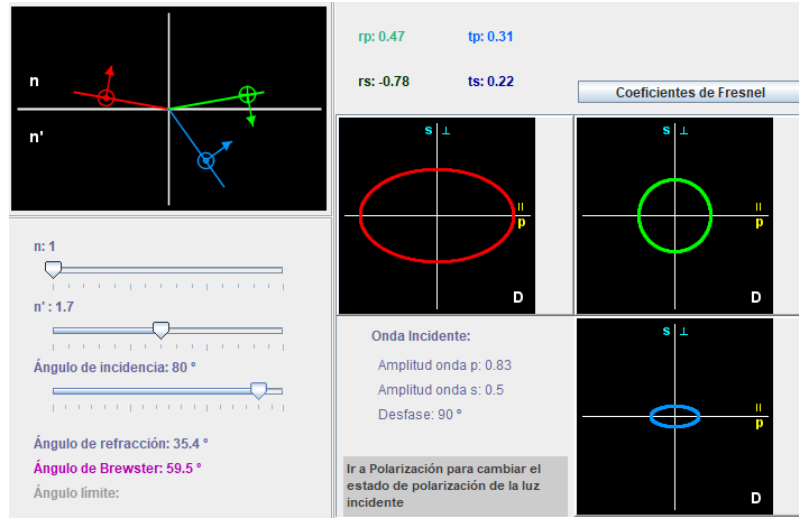


Figura 15: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 90^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} = 0,47 \cdot 0,83 = 0,39$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} = 0,31 \cdot 0,83 = 0,257$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} = 0,78 \cdot 0,5 = 0,39$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} = 0,22 \cdot 0,5 = 0,11$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (\pi - \pi) = \frac{\pi}{2}$$

$$\delta_{ttotal} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

Viendo que el desfase es positivo podemos deducir que la luz es dextrógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{sr} = A_{pr}$ por lo que la onda reflejada es circular. Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando ambos campos (reflejado y transmitido) con el incidente vemos que la elipse formada por la onda incidente tiene semiejes mayores debido a que todos los coeficientes de Fresnel están entre 0 y 1 (en valor absoluto). Una última cosa interesante a comentar es que como estamos en un ángulo mayor que el de Brewster, el ángulo que hay entre la onda reflejada y la transmitida es menor a 90° .

2. Reflexión Interna

Por último simularemos otra interfase pero esta vez dada por $n_i = 1,7$; $n_t = 1$, en este apartado iremos variando también los ángulos de incidencia explicando lo que va sucediendo tal y como hemos hecho en el apartado anterior, mencionando los mismos conceptos.

- Ángulo de incidencia menor que el ángulo de Brewster

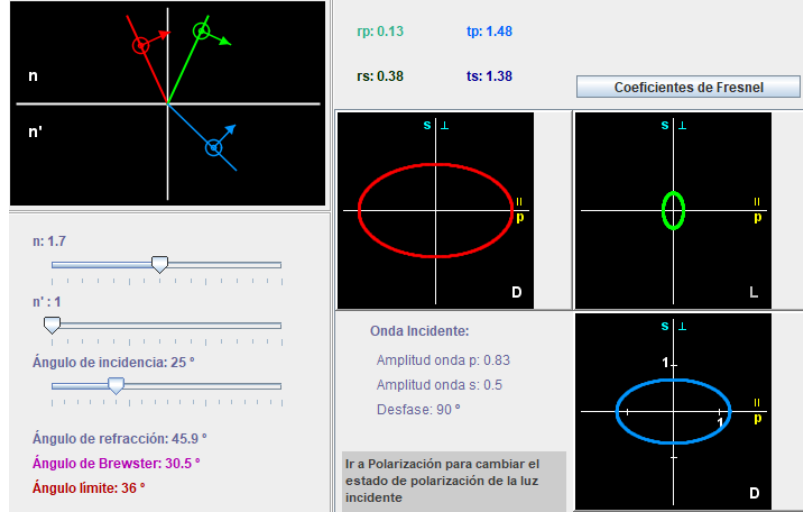


Figura 16: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 25^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} = 0,13 \cdot 0,83 = 0,108$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} = 1,48 \cdot 0,83 = 1,228$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} = 0,38 \cdot 0,5 = 0,19$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} = 1,38 \cdot 0,5 = 0,69$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (0 - \pi) = -\frac{\pi}{2}$$

$$\delta_{ttotal} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

Viendo que el desfase es negativo podemos deducir que la luz es levógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{sr} > A_{pr}$ por lo que la elipse formada por la onda reflejada tiene semieje mayor sobre el eje OY (dirección perpendicular). Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando ambos campos (reflejado y transmitido) con el incidente vemos que la elipse formada por la onda incidente tiene semiejes mayores que los de la elipse reflejada ya que los coeficientes $|r_p|$ y $|r_s|$ están entre 0 y 1, mientras que la elipse transmitida tiene semiejes mayores ya que los coeficientes t_p y t_s son mayores que 1 (visualmente no se nota ya que la elipse transmitida está a una escala diferente si nos fijamos). Una última cosa interesante a comentar es que como estamos en un ángulo menor que el de Brewster, el ángulo que hay entre la onda reflejada y la transmitida es mayor a 90° .

- Ángulo de incidencia igual que el ángulo de Brewster

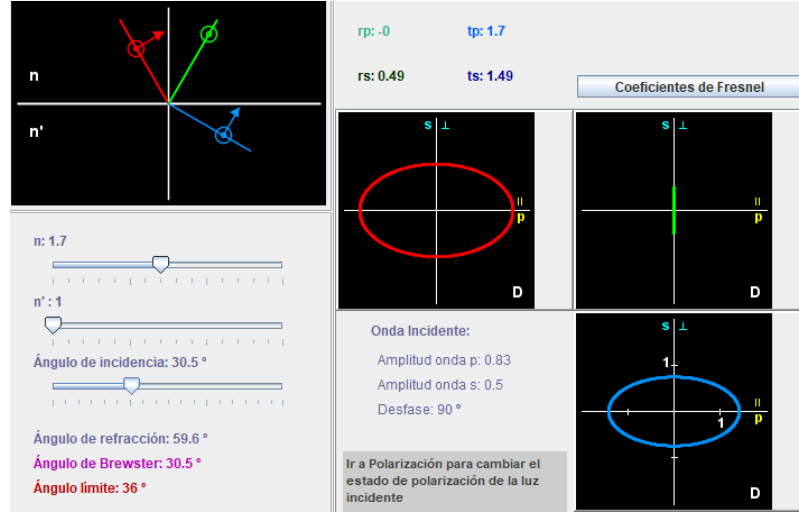


Figura 17: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 30,5^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$\begin{aligned}
 A_{pr} &= |r_p|A_{pi} = 0 \cdot 0,83 = 0 \\
 A_{pt} &= |t_p|A_{pi} = 1,7 \cdot 0,83 = 1,41 \\
 A_{sr} &= |r_s|A_{si} = 0,49 \cdot 0,5 = 0,245 \\
 A_{st} &= |t_s|A_{si} = 1,49 \cdot 0,5 = 0,745 \\
 \delta_{rtotal} &= \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2} \\
 \delta_{ttotal} &= \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}
 \end{aligned}$$

Viendo que el desfase es positivo podemos deducir que la luz es dextrógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{pr} = 0$ por lo que la luz reflejada está polarizada en la dirección perpendicular, lo cual es coherente con que estemos en el ángulo de Brewster. Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando el campo transmitido con el incidente vemos que la elipse de la luz transmitida tiene semiejes mayores ya que los coeficientes de Fresnel t_p y t_s son mayores que 1. Una última cosa interesante a comentar es que como estamos en el ángulo de Brewster, el ángulo que hay entre la onda reflejada y la transmitida es 90° .

- Ángulo de incidencia mayor que el ángulo de Brewster

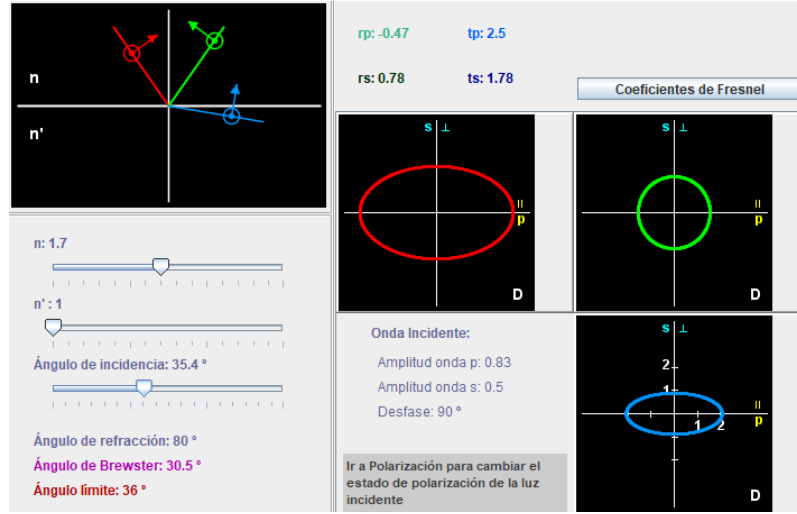


Figura 18: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 35,4^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} = 0,47 \cdot 0,83 = 0,39$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} = 2,5 \cdot 0,83 = 2,075$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} = 0,78 \cdot 0,5 = 0,39$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} = 1,78 \cdot 0,5 = 0,89$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

$$\delta_{ttotal} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

Viendo que el desfase es positivo podemos deducir que la luz es dextrógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{sr} = A_{pr}$ por lo que la onda reflejada es circular. Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando ambos campos (reflejado y transmitido) con el incidente vemos que la elipse formada por la onda incidente tiene semiejes mayores que los de la circunferencia reflejada ya que los coeficientes $|r_p|$ y $|r_s|$ están entre 0 y 1, mientras que la elipse transmitida tiene semiejes mayores ya que los coeficientes t_p y t_s son mayores que 1 (visualmente no se nota ya que la elipse transmitida está a una escala diferente si nos fijamos). Una última cosa interesante a comentar es que como estamos en un ángulo mayor que el de Brewster, el ángulo que hay entre la onda reflejada y la transmitida es menor a 90° .

- Ángulo de incidencia menor que el ángulo crítico

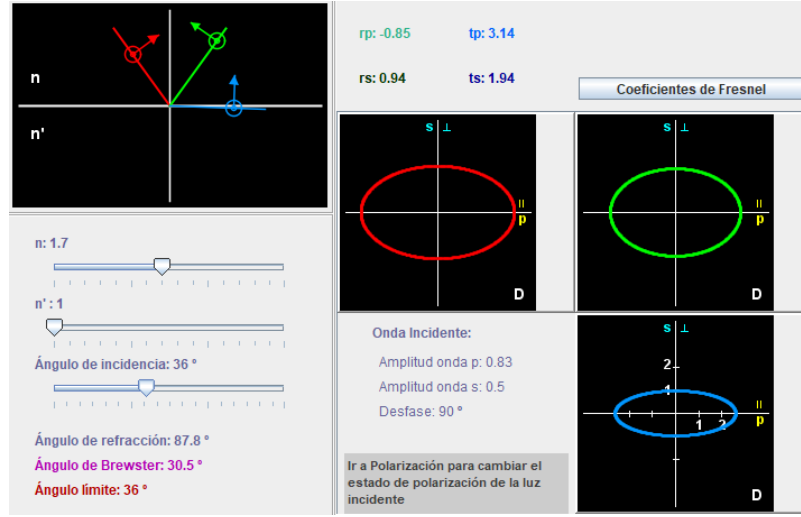


Figura 19: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 36^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$A_{pr} = |r_p|A_{pi} = 0,85 \cdot 0,83 = 0,705$$

$$A_{pt} = |t_p|A_{pi} = 3,14 \cdot 0,83 = 2,61$$

$$A_{sr} = |r_s|A_{si} = 0,94 \cdot 0,5 = 0,47$$

$$A_{st} = |t_s|A_{si} = 1,94 \cdot 0,5 = 0,97$$

$$\delta_{rtotal} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}$$

Viendo que el desfase es positivo podemos deducir que la luz es dextrógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. Además, vemos que $A_{pr} > A_{sr}$ por lo que la elipse formada por la onda reflejada tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Por otro lado, $A_{pt} > A_{st}$ por lo que la elipse formada por la onda transmitida tiene semieje mayor sobre el eje OX (dirección paralela). Comparando ambos campos (reflejado y transmitido) con el incidente vemos que la elipse formada por la onda incidente tiene semiejes mayores que los de la elipse reflejada ya que los coeficientes $|r_p|$ y $|r_s|$ están entre 0 y 1, mientras que la elipse transmitida tiene semiejes mayores ya que los coeficientes t_p y t_s son mayores que 1 (visualmente no se nota ya que la elipse transmitida está a una escala diferente si nos fijamos).

- Ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico

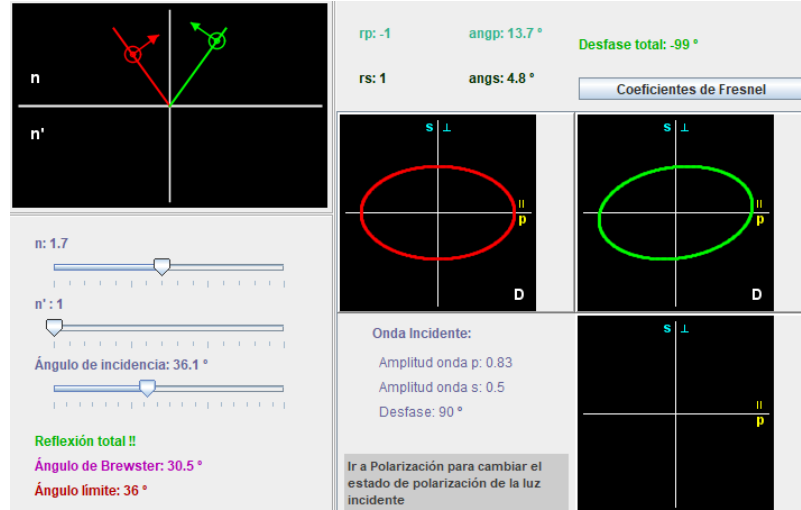


Figura 20: Captura del programa para luz con ángulo de incidencia $\theta_i = 36,1^\circ$.

Calculamos las amplitudes y el desfase,

$$\begin{aligned}
 A_{pr} &= |r_p|A_{pi} = 1 \cdot 0,83 = 0,83 \\
 A_{pt} &= |t_p|A_{pi} = 0 \cdot 0,83 = 0 \\
 A_{sr} &= |r_s|A_{si} = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \\
 A_{st} &= |t_s|A_{si} = 0 \cdot 0,5 = 0 \\
 \delta_{rtotal} &= \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) = \frac{\pi}{2} + (0 - 0) = \frac{\pi}{2}
 \end{aligned}$$

Viendo que el desfase es positivo podemos deducir que la luz es dextrógira. Como el desfase transmitido es positivo la luz transmitida es dextrógira. En este caso, como estamos por encima del ángulo crítico, no tenemos onda transmitida ya que no existe y los coeficientes r_p y r_s son complejos. Además, este es un ejemplo de cómo a partir de luz elípticamente polarizada con el semieje mayor sobre el eje horizontal podemos obtener luz elípticamente polarizada con el semieje fuera de la horizontal.

Para terminar calcularemos el ángulo crítico y explicaremos lo que sucede en las figuras 19 y 20.

$$n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t) \rightarrow \theta_i = \arcsin\left(\frac{n_t \sin(\theta_t)}{n_i}\right)$$

Para considerar el caso de ángulo límite, tenemos que considerar que el ángulo del rayo de luz transmitido es 90 grados ($\theta_t = 90^\circ$).

$$\theta_L \equiv \theta_i = \arcsin\left(\frac{n_t}{n_i}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,7}\right) = 36,03^\circ$$

Como podemos apreciar, el ángulo límite está entre 36° y $36,1^\circ$ aunque el programa nos diga que $\theta_L = 36^\circ$, ya que el programa nos está dando una solución aproximada (redondeando al primer entero), entonces lo que sucede en las figuras anteriormente mencionadas es que el programa no nos ofrece la sensibilidad suficiente para tomar un ángulo de incidencia igual al ángulo límite real (sin redondear).