



Universidad de Alicante

# **Polarización y Leyes de Fresnel**

## **(Práctica 3)**

Estudiantes:

Víctor Mira Ramírez  
Rocío Ponsoda Orgilés

Profesora:

Rosa María Fuentes Rosillo

Universidad de Alicante  
Facultad de Ciencias: Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía  
Óptica I

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción Teórica</b>	<b>2</b>
1.1	Deducción del criterio de signos para la polarización dextrógira y levógira	2
1.2	Justificación de los signos en la definición de los parámetros de Stokes	4
1.3	Deducción del coeficiente $r_p$ e interpretación de las ecuaciones de Fresnel	5
<b>2</b>	<b>Polarización</b>	<b>7</b>
2.1	Luz linealmente polarizada a $\alpha = 60^\circ$	7
2.2	Luz linealmente polarizada a $\alpha = -30^\circ$	7
2.3	Luz circular dextrógira	8
2.4	Luz elípticamente polarizada, dextrógira con semieje mayor horizontal	8
2.5	Luz elípticamente polarizada, levógira con semieje mayor vertical	8
2.6	Luz elípticamente polarizada dextrógira con inclinación $\psi = 30^\circ$	9
<b>3</b>	<b>Dieléctricos</b>	<b>10</b>
3.1	Reflexión Externa	10
3.1.1	Ángulo de incidencia menor al ángulo de Brewster	10
3.1.2	Ángulo de incidencia igual al ángulo de Brewster	11
3.1.3	Ángulo de incidencia mayor al ángulo de Brewster	11
3.1.4	Tabla de datos	12
3.2	Reflexión Interna	12
3.2.1	Ángulo de incidencia menor al ángulo de Brewster	12
3.2.2	Ángulo de incidencia igual al ángulo de Brewster	13
3.2.3	Ángulo de incidencia mayor al ángulo de Brewster	13
3.2.4	Cálculo del Ángulo Crítico	14
3.2.5	Ángulo de incidencia menor al ángulo crítico	14
3.2.6	Ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico	15
3.2.7	Tabla de datos	15

# 1. Introducción Teórica

En esta sección, y como repaso a la teoría que vamos a emplear en las cuestiones propuestas, vamos a profundizar en algunas de las expresiones que estamos aplicando. En concreto analizaremos intentaremos justificar las diferencias que se observan entre las ecuaciones teóricas y las que el programa *JavaOptics* utiliza.

## 1.1. Deducción del criterio de signos para la polarización dextrógira y levógira

En primer lugar vamos a observar qué ocurre con los signos cuando hablamos de polarización dextrógira y levógira. Teniendo en cuenta que el desfase siempre se lo añadimos a la componente vertical de la onda, las ecuaciones de onda para el campo electromagnético tal y como las hemos visto en teoría vienen dadas de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \vec{E}_x = \hat{i}E_{ox}\cos(kz - wt) \\ \vec{E}_y = \hat{j}E_{oy}\cos(kz - wt + \delta) \end{cases} \quad (1)$$

¿Cómo derivamos a partir de estas ecuaciones un criterio que nos permita determinar si la luz se polariza de forma dextrógira o levógira? Vamos a tomar un plano  $z = 0$  perpendicular a la dirección de propagación y estudiemos el giro del vector  $\vec{E}$  respecto al tiempo. Ahora las ecuaciones quedan:

$$\begin{cases} \vec{E}_x = \hat{i}E_{ox}\cos(wt) \\ \vec{E}_y = \hat{j}E_{oy}\cos(wt + \delta) = \hat{j}E_{oy}[\cos(wt)\cos(\delta) - \sin(wt)\sin(\delta)] \end{cases}$$

Ahora vamos a tomar dos instantes de tiempo  $t_1 = 0$  y  $t_2 = T/4$ , donde  $T = 2\pi/w$  es el periodo, para ver hacia qué lado gira la onda cuando evoluciona con el tiempo.

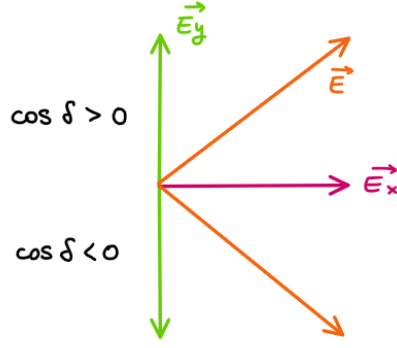
$$\underline{t = 0}$$

$$\begin{cases} \vec{E}_x = \hat{i}E_{ox}\cos(0) = \hat{i}E_{ox} \\ \vec{E}_y = \hat{j}E_{oy}\cos(\delta) \end{cases}$$

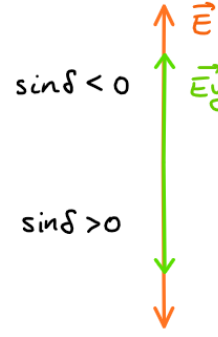
$$\underline{t = T/4}$$

$$\begin{cases} \vec{E}_x = \hat{i}E_{ox}\cos\left(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{4}\right) = \hat{i}E_{ox}\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \\ \vec{E}_y = \hat{j}E_{oy}\left[\cos\left(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{4}\right)\cos(\delta) - \sin\left(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{4}\right)\sin(\delta)\right] = -\hat{j}E_{oy}\sin(\delta) \end{cases}$$

Vamos a ver con unos sencillos esquemas la representación visual de estas ecuaciones para ver cómo se transmite la onda respecto al signo de  $\delta$ . A partir de ellos deduciremos hacia qué lado se propaga la onda según qué signo tenga nuestro desfase.



(a) Propagación en  $t = 0$



(b) Propagación en  $t = T/4$

A partir de las ecuaciones y de estos esquemas hemos tomado el siguiente como criterio de signos:

Criterio de signos respecto a las ecuaciones de onda vistas en teoría

- Polarización dextrógira:  $-\pi < \delta < 0$
- Polarización levógira:  $0 < \delta < \pi$

Cuando nos disponemos a trabajar con el programa, vemos que las ecuaciones que describen las ondas de campo electromagnético son las siguientes:

$$\begin{cases} \vec{E}_p = \hat{i}A_p \cos(\omega t - kz) \\ \vec{E}_s = \hat{j}A_s \cos(\omega t - kz + \delta) \end{cases} \quad (2)$$

Si comparamos este par de ecuaciones con las que se muestran en 1.1, vemos que la diferencia más importante es que en lo que respecta a la variable contenida en el coseno, ahora la parte que queda positiva es la temporal -  $\omega t$  - mientras que antes la parte positiva era la espacial -  $kz$ . ¿Cómo afecta esto al criterio de signos para la polarización dextrógira y levógira?

Vamos a llamar  $\delta'$  al desfase tomando la ecuación de onda tal y como lo hace el programa. Nuestro objetivo es buscar la relación que tiene con  $\delta$ , que corresponde al desfase que hemos visto en la teoría y basado en el cual ya tenemos un criterio de signos sólido. Para ello, hemos de tener en cuenta una propiedad muy importante del coseno: es una función par, es decir,  $\cos(x) = \cos(-x)$ . A fin de comparar ambas expresiones para las ondas electromagnéticas, vamos a reescribir 1.1 de forma que dentro del coseno la parte positiva sea la espacial (de forma análoga a 1.1).

$$\begin{cases} \vec{E}_p = \hat{i}A_p \cos(\omega t - kz) \\ \vec{E}_s = \hat{j}A_s \cos(\omega t - kz + \delta') \end{cases} \xrightarrow{\cos(-x)=\cos(x)} \begin{cases} \vec{E}_p = \hat{i}A_p \cos(kz - \omega t) \\ \vec{E}_s = \hat{j}A_s \cos(kz - \omega t - \delta') \end{cases}$$

Igualando una a una las ecuaciones encontramos la siguiente relación:

$$\cos(kz - \omega t - \delta') = \cos(\omega t - kz + \delta) \implies kz - \omega t - \delta' = \omega t - kz + \delta \implies \delta' = -\delta \quad (3)$$

Ahora que hemos relacionado el desfase obtenido partiendo de ambos planteamientos, y sabiendo que nuestro criterio hasta el momento ha sido 1.1, podemos establecer este nuevo criterio de signos

para el programa empleado:

Criterio de signos respecto a las ecuaciones de onda que usa el programa

- **Polarización dextrógira:**  $0 < \delta < \pi$
- **Polarización levógira:**  $-\pi < \delta < 0$

## 1.2. Justificación de los signos en la definición de los parámetros de Stokes

Recordamos, por lo visto en la parte teórica de la asignatura, que los parámetros de Stokes son un conjunto de valores que nos describen y ayudan a comprender el estado de polarización de las ondas electromagnéticas. En forma matricial y normalizados (puesto que el primero de sus coeficientes toma valor  $S_0 = 1$ ) se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{E_{ox}^2 + E_{oy}^2} \begin{pmatrix} E_{ox}^2 + E_{oy}^2 \\ E_{ox}^2 - E_{oy}^2 \\ 2E_{ox}E_{oy}\cos(\delta) \\ -2E_{ox}E_{oy}\sin(\delta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

En relación con estos parámetros hemos establecido un nuevo criterio de signos para determinar el tipo de polarización con el que trabajamos.

Criterio de signos respecto a los parámetros de Stokes

- **Polarización dextrógira:**  $S_3 > 0$
- **Polarización levógira:**  $S_3 < 0$

En el programa los parámetros, además de tener otra nomenclatura relacionada con el significado físico de cada uno de ellos, se definen de forma distinta:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{pmatrix} = \frac{1}{A_p^2 + A_s^2} \begin{pmatrix} A_p^2 + A_s^2 \\ A_p^2 - A_s^2 \\ 2A_pA_s\cos(\delta') \\ 2A_pA_s\sin(\delta') \end{pmatrix} \quad (5)$$

Puesto que el parámetro que rige el criterio de signos ahora está en positivo, intuitivamente podríamos pensar que dicho criterio queda alterado. Sin embargo, al analizar bien las ecuaciones vemos que no cambia en absoluto: su valor positivo corresponde a una polarización dextrógira, y el negativo, a la levógira. ¿Cómo es esto posible?

Llegados a este punto vamos a trabajar únicamente con el cuarto parámetro de Stokes, que en la teoría hemos llamado  $S_3$  y en el programa,  $S$ . Para justificar la definición de  $S$  con un signo negativo, hemos de tener en cuenta una de las propiedades clave de la función seno: es una función impar, lo cual implica que  $\sin(-x) = -\sin(x)$ . Partiendo de las expresiones de  $S$  y  $S_3$  y recordando que para el programa el desfase es  $\delta' = -\delta$ :

$$\begin{aligned} A_pA_s\sin(\delta') &= -2E_{ox}E_{oy}\sin(\delta) \implies \sin(\delta') = -\sin(\delta) \implies \\ \xrightarrow{\delta'=-\delta} \sin(-\delta) &= -\sin(\delta) \xrightarrow{\sin(-x)=-\sin(x)} -\sin(\delta) = -\sin(\delta) \end{aligned} \quad (6)$$

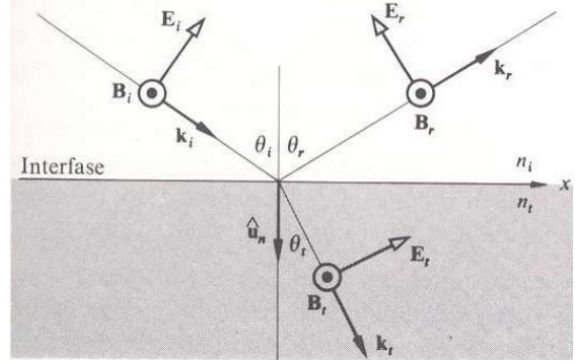
Hemos llegado a que ambos coeficientes son iguales, y con ello hemos justificado la definición con un signo + del parámetro  $S$  así como la no incongruencia en el criterio de signos 1.2.

### 1.3. Deducción del coeficiente $r_p$ e interpretación de las ecuaciones de Fresnel

Las ecuaciones de Fresnel son un conjunto de expresiones que nos ayudan a comprender la relación entre la amplitud de una onda que incide en un material respecto a la amplitud de la onda que se refleja o se transmite en la interfase. Ahora  $\delta$  será la diferencia de fase entre la onda reflejada y la transmitida.

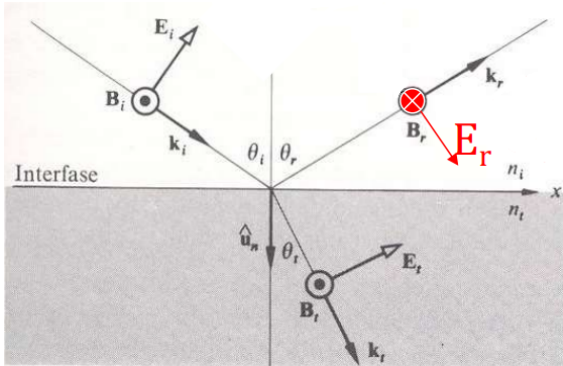
Estos coeficientes se dividen según si se refieren a la parte de la onda que es paralela o perpendicular al plano de incidencia. De la misma forma, tenemos un par de coeficientes para la onda que se refleja - los coeficientes de reflexión  $r_{\perp}$  y  $r_{\parallel}$  - y otro par para la onda transmitida - los coeficientes de transmisión  $t_{\perp}$  y  $t_{\parallel}$ . En este apartado vamos a centrarnos únicamente en el coeficiente de la onda reflejada paralelamente al plano de incidencia,  $r_{\parallel} \equiv r_p$ .

En este primer esquema - tomado, al igual que el siguiente, del material introductorio de la práctica - se refleja cómo hemos tomado nuestro criterio en la parte teórica de la asignatura. Vemos que el campo eléctrico reflejado y transmitido se toman en la misma orientación.



Si desarrollamos teniendo en cuenta que estamos en un dieléctrico queda lo siguiente:

$$r_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \Rightarrow \begin{cases} r_{\parallel} > 0 \Rightarrow \delta = 0 \\ r_{\parallel} < 0 \Rightarrow \delta = \pi \end{cases} \quad (7)$$



Ahora comparemos este caso con el planteamiento que propone el programa *JavaOptics*.

En esta imagen, análoga a la anterior, se ha marcado en rojo la diferencia principal entre ambos planteamientos. En este caso la parte de la onda correspondiente al campo eléctrico reflejado apunta hacia abajo, por lo que hemos de contar con una diferencia de fase  $\delta_{inicial} = \pi$ .

¿Cómo deducimos ahora  $r_p$ ? En primer lugar, hemos de considerar el ángulo de incidencia y de reflexión iguales:  $\theta_i = \theta_t$ . Ahora aplicamos la condición de interfase (únicamente para el campo eléctrico):

$$E_{ix} + E_{rx} = E_{tx} \Rightarrow E_i \cos(\theta_i) + E_r \cos(\theta_r) = (E_i + E_r) \cos(\theta_i) = E_t \cos(\theta_t)$$

A partir de aquí despejamos el campo eléctrico transmitido:

$$E_t = (E_i + E_r) \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_t)} \quad (8)$$

Dejamos esto por aquí y nos preguntamos cuál es la expresión que define cada componente del campo eléctrico. Vamos a escribir la expresión general y luego tendremos en cuenta que se han de cumplir para todo punto del espacio y para todo instante del tiempo.

$$\begin{cases} E_i = E_{oi} \cos(w_i t - k_{ix} x) \\ E_r = E_{or} \cos(w_r t - k_{rx} x - k_{rz} z) \\ E_t = E_{ot} \cos(w_t t - k_{tx} x - k_{tz} z) \end{cases} \implies \begin{cases} E_i = E_{oi} \\ E_r = E_{or} \\ E_t = E_{ot} \end{cases}$$

Aplicando esto en la condición obtenida en 1.3:

$$E_{ot} = (E_{oi} + E_{or}) \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_t)} \quad (9)$$

Para seguir desarrollando nuestras expresiones y llegar hasta  $r_p$ , hemos de remitirnos a la condición de frontera para el campo magnético y tener en cuenta que  $B = \frac{n}{c} E$ .

$$\frac{B_i}{\mu_i} - \frac{B_r}{\mu_r} = \frac{B_t}{\mu_t} \implies \frac{n_i}{c\mu_i} E_{oi} - \frac{n_r}{c\mu_r} E_{or} = \frac{n_t}{c\mu_t} E_{ot} = (E_{oi} + E_{or}) \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_t)} \frac{n_t}{c\mu_t} \quad (10)$$

Aplicando la condición para las amplitudes del campo y reorganizando los términos nos quedará lo siguiente:

$$-E_{or} \left( \frac{n_i}{\mu_i} \cos(\theta_t) + \frac{n_t}{\mu_t} \cos(\theta_i) \right) = E_{oi} \left( \frac{n_t}{\mu_t} \cos(\theta_i) + \frac{n_i}{\mu_i} \cos(\theta_t) \right) \quad (11)$$

Finalmente tendremos en cuenta que trabajamos en un dieléctrico, y por tanto  $\mu_0 = \mu_i = \mu_t$  y que por definición  $r_p = \frac{E_{or}}{E_{oi}}$ :

$$r_p = - \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = -r_{\parallel} \quad (12)$$

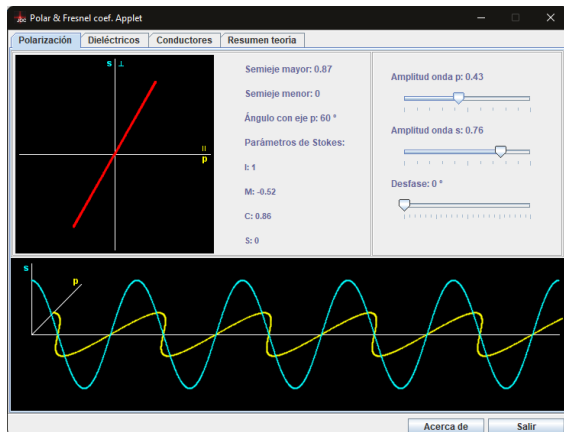
¿Cómo queda el criterio de signos en este caso? Solo hemos de tener en cuenta el cambio de signos respecto a la ecuación teórica.

$$\begin{cases} r_p > 0 \implies \delta = \pi \\ r_p < 0 \implies \delta = 2\pi = 0 \end{cases} \quad (13)$$

## 2. Polarización

En esta segunda sección vamos a estudiar distintos estados de polarización, en concreto los parámetros de amplitud y desfase elegidos para obtener cada caso. También explicaremos la información que nos aportarán los parámetros de Stokes y deduciremos gráficamente el valor del desfase.

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



Se trata de una luz lineal con pendiente positiva, por lo que el desfase que hemos de tomar es  $\delta = 0^\circ$ . En lo que respecta a la amplitud, hemos tomado  $A_s > A_p$  porque la pendiente es mayor a  $45^\circ$ .

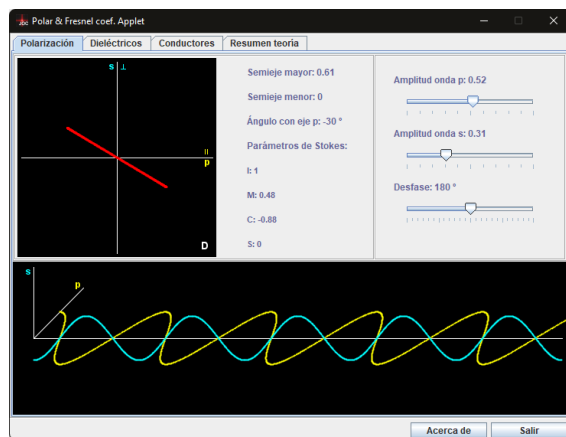
Es precisamente esta desigualdad la que causa  $M < 0$  (para comprobarlo solo hace falta ver cómo lo hemos definido en 1.2). En lo que respecta al resto de parámetros de Stokes, es notable que  $S = 0$  porque la luz está polarizada de forma lineal y por ello no puede ser levógira ni dextrógira.

Al fijarnos en la gráfica - donde  $\vec{E}_{\parallel}$  viene representado en amarillo y  $\vec{E}_{\perp}$ , en azul - vemos que sus máximos coinciden en el mismo punto. Esto coincide con el valor nulo del desfase tal y como ya lo habíamos comentado.

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

Esta luz sigue estando linealmente polarizada, pero ahora  $\alpha = -30^\circ$ . Es precisamente por este valor del ángulo negativo pero mayor a  $-45^\circ$  por lo que ahora  $A_p > A_s$ . Por la propia definición de  $M$ , ahora tomará un valor positivo.

En cuanto al parámetro  $S$ , sigue tomando valores nulos por la misma razón que antes. Sin embargo, otra de las magnitudes que cambia es el desfase, puesto que ahora  $\delta = 180^\circ$ . Esto se corrobora en el dibujo: cuando la onda perpendicular llega a su máximo, la paralela se encuentra en su mínimo.

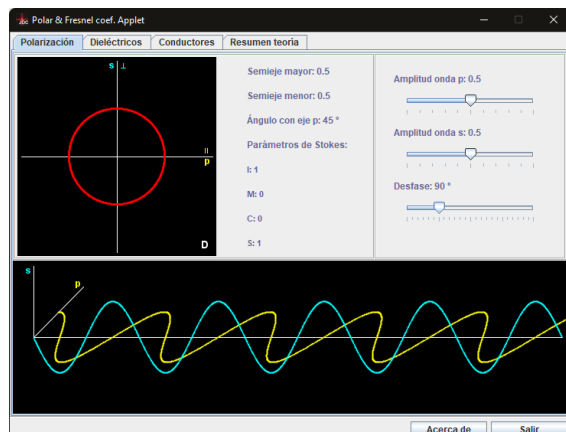




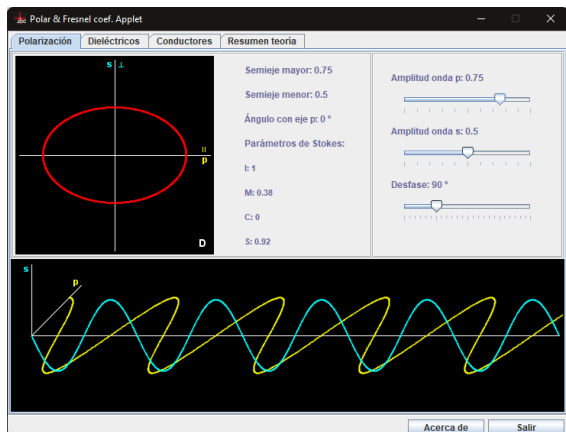
## 2.3. Luz circular dextrógira

Ahora ya no tenemos una luz linealmente polarizada, sino que es circular: es por ello que hemos tomado las amplitudes iguales,  $A_s = A_p$ . Si no fueran iguales, la luz sería elíptica. El desfase ahora es  $\delta = \frac{\pi}{4}$  porque es luz dextrógira - esto se comprueba en la gráfica puesto que cuando una de las dos componentes del campo eléctrico alcanza un extremo relativo, la otra se anula.

Al remitirnos a los parámetros de Stokes, vemos que por su definición tanto  $M$  como  $C$  son nulos. Como la luz está polarizada de forma dextrógira, vemos que  $S = 1 > 0$ , lo cual coincide con lo que hemos desarrollado en la teoría.



## 2.4. Luz elípticamente polarizada, dextrógira con semieje mayor horizontal

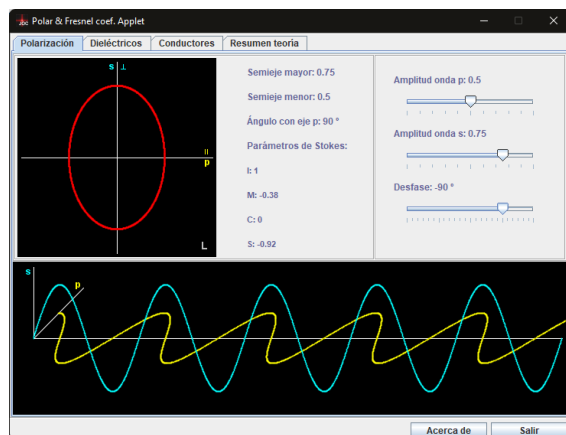


La luz en este caso está polarizada elípticamente con semieje mayor horizontal, por lo que la amplitud de onda paralela ha de ser mayor a la amplitud de onda perpendicular ( $A_p > A_s$ ). Por ser dextrógira, la justificación tanto de los parámetros de Stokes como del desfase es análoga a la del apartado anterior.

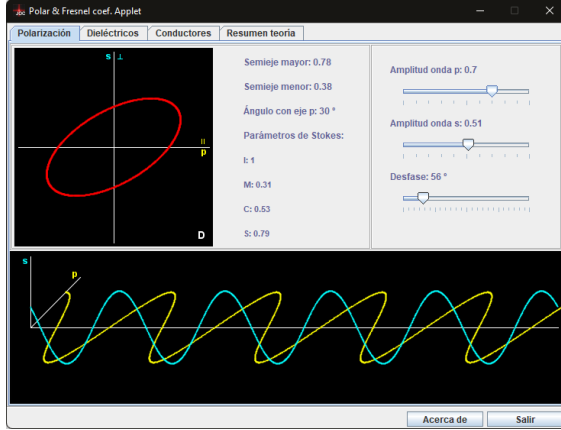
## 2.5. Luz elípticamente polarizada, levógira con semieje mayor vertical

Este caso es muy similar al anterior, pero como ahora el semieje mayor es el vertical, la amplitud mayor será la perpendicular,  $A_s > A_p$ . Ahora la onda está polarizada de forma levógira, por lo que  $\delta = -\frac{\pi}{4}$ : a nivel gráfico, vemos lo mismo que en los dos casos anteriores.

En lo respectivo a los parámetros de Stokes, vemos que por definición  $M < 0$ ,  $C = 0$  y por ser luz levógira se comprueba, tal y como hemos deducido en la teoría, que  $S < 0$ .



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



¿Cómo conseguimos una elipse inclinada? Vamos a relacionarlo con el parámetro asociado a la inclinación mediante la siguiente expresión:

$$\tan(2\psi) = \frac{2A_p A_s \cos(\delta)}{A_p^2 - A_s^2} \quad (14)$$

$$\Rightarrow \delta = \arccos\left(\frac{(A_p^2 - A_s^2) \tan(60^\circ)}{2A_p A_s}\right)$$

Si sustituimos en esta expresión los valores de las amplitudes nos queda  $\delta = 53,56^\circ$ .

En lo que respecta a los parámetros de Stokes,  $M > 0$  por ser la amplitud de la onda paralela mayor a la perpendicular, y  $S > 0$  por ser luz dextrógira.

### 3. Dieléctricos

Consideramos que la luz incidente en la interfase es elípticamente polarizada, dextrógira y con semieje mayor en el eje horizontal. Para ello, tomamos los valores dados del guión:  $A_p = 0,83$ ,  $A_s = 0,5$  y  $\delta = 90^\circ$

Para el cálculo de las tablas hemos utilizado las siguientes fórmulas para desfases y amplitudes:

$$Ap_r = |r_p| Ap_i \quad Ap_t = |t_p| Ap_i \quad As_r = |r_s| As_i \quad As_t = |t_s| As_i$$

$$\delta_{r \text{ total}} = \delta_i + (\delta_{sr} - \delta_{pr}) \quad \delta_{t \text{ total}} = \delta_i + (\delta_{st} - \delta_{pt})$$

Y por tanto

$$Ap_i = 0,83 \quad As_i = 0,5 \quad \delta_i = \pi/2$$

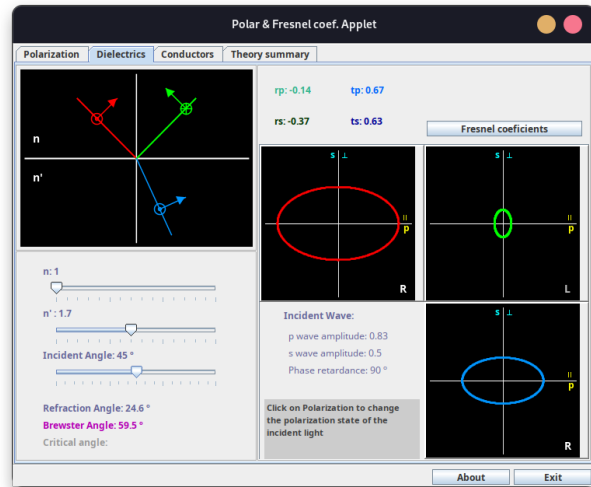
#### 3.1. Reflexión Externa

En esta sección vamos a simular una interfase dada por  $n_i = 1$  y  $n_t = 1,7$  para diferentes ángulos de incidencia, comentando lo que sucede para cada ángulo.

##### 3.1.1.   ngulo de incidencia menor al ángulo de Brewster

En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 45^\circ$ .

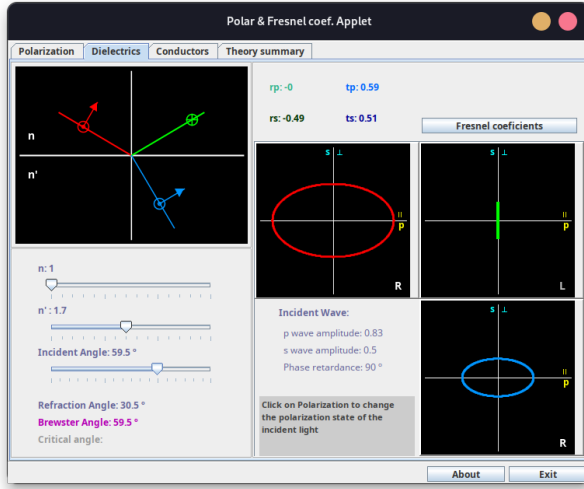
Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase negativo indica que la luz incidente es levógira, y uno positivo indica que la transmitida es dextrógira. El semieje mayor de la elipse incidente lo encontramos en el eje de ordenadas ya que  $As_r > Ap_r$ . El semieje mayor de la elipse reflejada la encontramos en el eje de abscisas ya que  $Ap_t > As_t$ .



La onda reflejada y transmitida forman un ángulo mayor a  $\pi/2$  ya que no hemos llegado al ángulo de Brewster.

Como los coeficientes de Fresnel están entre 0 y 1 podemos observar que las elipses de la luz reflejada y transmitida tienen un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente.

### 3.1.2. Ángulo de incidencia igual al ángulo de Brewster



En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 59,5^\circ$ .

Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase negativo indica que la luz incidente es levógira, y uno positivo indica que la transmitida es dextrógira. La onda reflejada está polarizada en la dirección perpendicular ya que  $59,5^\circ$  es el ángulo de Brewster. El semieje mayor de la elipse reflejada la encontramos en el eje de abscisas ya que  $Ap_t > As_t$ .

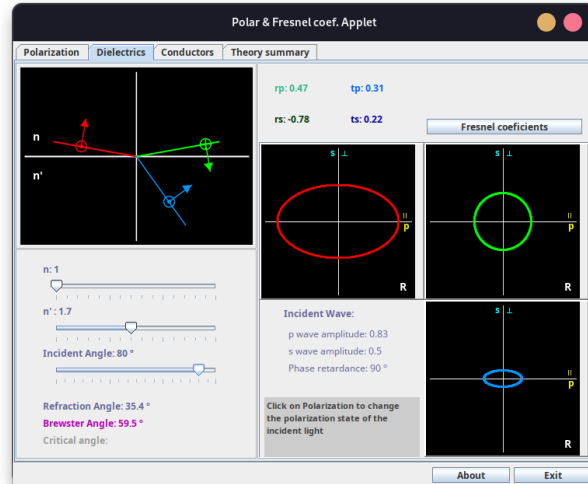
La onda reflejada y transmitida son perpendiculares ya que estamos en el ángulo de Brewster.

Como los coeficientes de Fresnel están entre 0 y 1 podemos observar que las elipses de la luz reflejada y transmitida tienen un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente.

### 3.1.3. Ángulo de incidencia mayor al ángulo de Brewster

En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 80^\circ$ .

Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase positivo indica que la luz incidente y transmitida es dextrógira. La onda reflejada es circular ya que  $As_r = Ap_r$ . El semieje mayor de la elipse reflejada la encontramos en el eje de abscisas ya que  $Ap_t > As_t$ .



La onda reflejada y transmitida forman un ángulo menor a  $\pi/2$  ya que hemos pasado el ángulo de Brewster.

Como los coeficientes de Fresnel están entre 0 y 1 podemos observar que las elipses de la luz reflejada y transmitida tienen un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente.

### 3.1.4. Tabla de datos

REFLEXIÓN EXTERNA				
$\theta_i$	$Ap_r =  r_p  Ap_i$	$As_r =  r_s  As_i$	$\delta_r \text{ total}$	Tipo de luz reflejada
$45^\circ$	0,116	0,185	$-\pi/2$	Levógira
$59,5^\circ$	0	0,245	$\pi/2$	Levógira
$80^\circ$	0,39	0,39	$\pi/2$	Dextrógira
$\theta_i$	$Ap_t =  t_p  Ap_i$	$As_t =  t_s  As_i$	$\delta_t \text{ total}$	Tipo de luz transmitida
$45^\circ$	0,556	0,315	$\pi/2$	Dextrógira
$59,5^\circ$	0,489	2,555	$\pi/2$	Dextrógira
$80^\circ$	0,257	0,11	$\pi/2$	Dextrógira

Cuadro 1: Reflexión externa

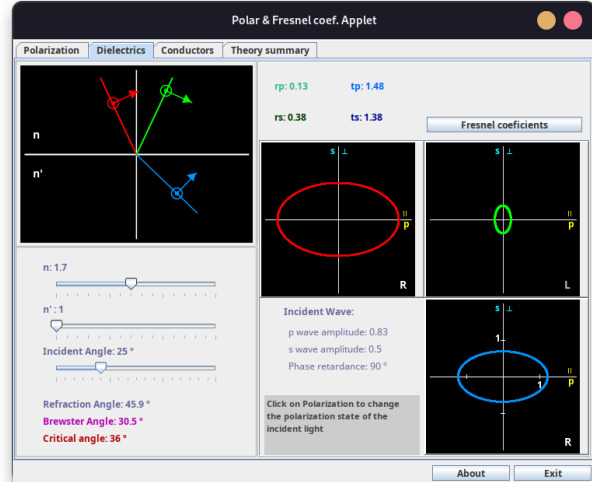
## 3.2. Reflexión Interna

En esta sección vamos a simular una interfase dada contrariamente a la anterior por  $n_i = 1,7$  y  $n_t = 1$  para diferentes ángulos de incidencia, comentando lo que sucede para cada ángulo.

### 3.2.1. Ángulo de incidencia menor al ángulo de Brewster

En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 25^\circ$ .

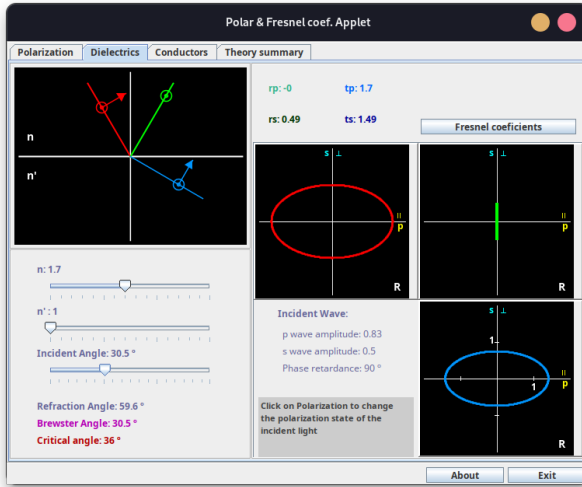
Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase negativo indica que la luz incidente es levógira, y uno positivo indica que la transmitida es dextrógira. El semieje mayor de la elipse incidente lo encontramos en el eje de ordenadas ya que  $As_r > Ap_r$ . El semieje mayor de la elipse reflejada la encontramos en el eje de abscisas ya que  $Ap_t > As_t$ .



La onda reflejada y transmitida forman un ángulo mayor a  $\pi/2$  ya que no hemos llegado al ángulo de Brewster.

Como los coeficientes  $r_p$  y  $r_s$  están entre 0 y 1 podemos observar que la elipse de la luz reflejada tiene un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente. Análogamente como los coeficientes  $t_p$  y  $t_s$  son mayores a 1 podemos observar que la elipse de la luz transmitida tiene un semieje mayor mayor al de la elipse de la luz incidente.

### 3.2.2. Ángulo de incidencia igual al ángulo de Brewster



En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 30,5^\circ$ .

Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase positivo indica que la luz incidente y transmitida es dextrógira. La onda reflejada está polarizada en la dirección perpendicular ya que  $30,5^\circ$  es el ángulo de Brewster. El semi-eje mayor de la elipse reflejada la encontramos en el eje de abscisas ya que  $A_{pt} > A_{st}$ .

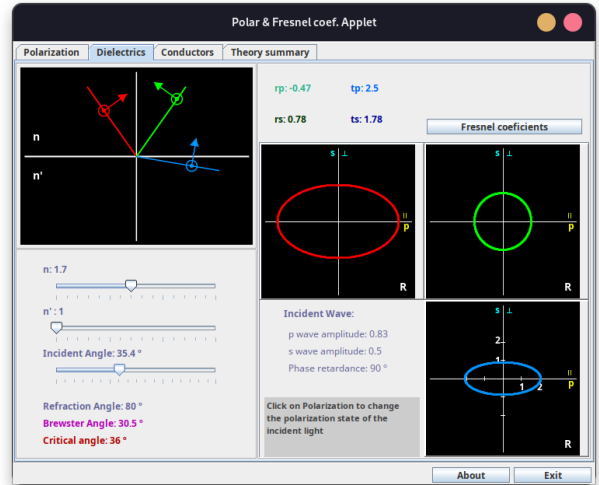
La onda reflejada y transmitida son perpendiculares ya que estamos en el ángulo de Brewster.

Como los coeficientes  $r_p$  y  $r_s$  están entre 0 y 1 podemos observar que la elipse de la luz reflejada tiene un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente. Análogamente como los coeficientes  $t_p$  y  $t_s$  son mayores a 1 podemos observar que la elipse de la luz transmitida tiene un semieje mayor mayor al de la elipse de la luz incidente.

### 3.2.3. Ángulo de incidencia mayor al ángulo de Brewster

En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 35,4^\circ$ .

Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase positivo indica que la luz incidente y transmitida es dextrógira. La onda reflejada es circular ya que  $A_{sr} = A_{pr}$ . El semieje mayor de la elipse reflejada la encontramos en el eje de abscisas ya que  $A_{pt} > A_{st}$ .



La onda reflejada y transmitida forman un ángulo menor a  $\pi/2$  ya que hemos pasado el ángulo de Brewster.

Como los coeficientes  $r_p$  y  $r_s$  están entre 0 y 1 podemos observar que la elipse de la luz reflejada tiene un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente. Análogamente como los coeficientes  $t_p$  y  $t_s$  son mayores a 1 podemos observar que la elipse de la luz transmitida tiene un semieje mayor mayor al de la elipse de la luz incidente.

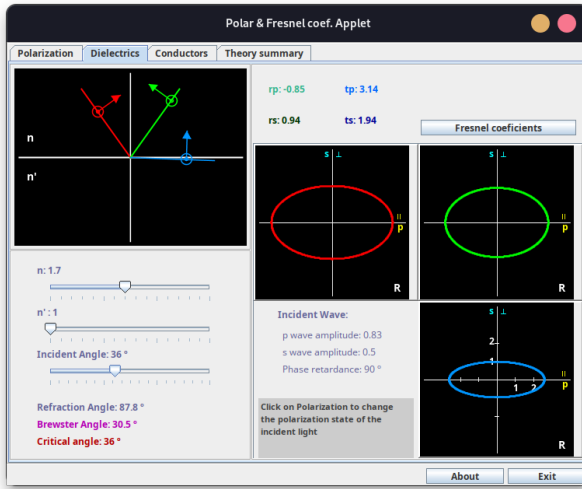
### 3.2.4. Cálculo del Ángulo Crítico

Vamos a calcular el ángulo crítico antes de realizar los cálculos y el análisis de resultados que nos da el programa. Usando la Ley de Snell:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \iff \theta_i = \arcsin \left( \frac{n_t \sin \theta_t}{n_i} \right) \xrightarrow{\theta_t = \pi/2} \theta_i = 30,03^\circ$$

Como podemos observar, el ángulo crítico se halla entre  $30^\circ$  y  $30,1^\circ$ , lo cual puede generar algún error numérico en el programa a causa de la resolución del mismo de 0,1. Aunque introduzcamos  $30^\circ$  como ángulo crítico, no obtendremos reflexión total en el programa hasta introducir  $30,1^\circ$ , que supera al ángulo crítico ( $30,1 > 30,03$  pero  $30,0 < 30,03$ ).

### 3.2.5. Ángulo de incidencia menor al ángulo crítico



En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 36^\circ$ . Redondeando es el ángulo crítico, pero como no lo superamos todavía, encontramos que sí que hay una onda transmitida.

Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase positivo indica que la luz incidente y transmitida es dextrógira. El semieje mayor de la elipse incidente lo encontramos en el eje de abscisas ya que  $Ap_r > As_r$ . El semieje mayor de la elipse reflejada también la encontramos en el eje de abscisas ya que  $Ap_t > As_t$ .

La onda reflejada y transmitida forman un ángulo menor a  $\pi/2$  ya que hemos pasado el ángulo de Brewster.

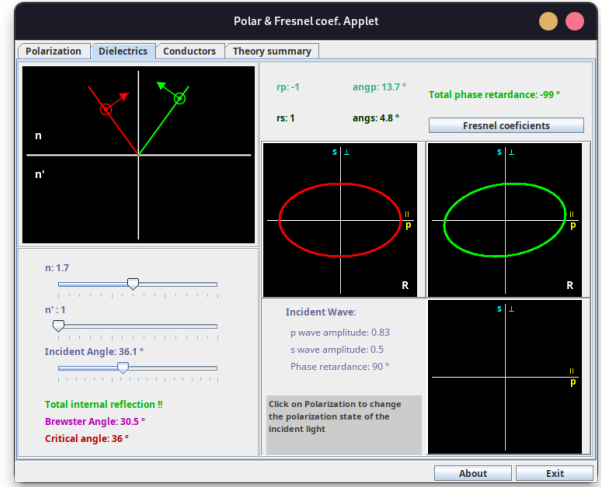
Como los coeficientes  $r_p$  y  $r_s$  están entre 0 y 1 podemos observar que la elipse de la luz reflejada tiene un semieje mayor menor al de la elipse de la luz incidente. Análogamente como los coeficientes  $t_p$  y  $t_s$  son mayores a 1 podemos observar que la elipse de la luz transmitida tiene un semieje mayor mayor al de la elipse de la luz incidente.

### 3.2.6. Ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico

En esta figura vemos una captura del programa para luz con ángulo de incidencia a  $\theta_i = 36,1^\circ$ . Ahora sí superamos el ángulo crítico por lo que tenemos reflexión interna total.

Calculamos el desfase y las amplitudes usando las fórmulas que hemos comentado y las escribimos en la tabla al final de esta sección. Un desfase positivo indica que la luz incidente y transmitida es dextrógira.

Como los coeficientes estamos por encima del ángulo crítico, los coeficientes  $r_p$  y  $r_s$  son complejos, lo cual nos indica que no tenemos onda transmitida como cabía esperar.



### 3.2.7. Tabla de datos

REFLEXIÓN INTERNA				
$\theta_i$	$Ap_r =  r_p  Ap_i$	$As_r =  r_s  As_i$	$\delta_r \text{ total}$	Tipo de luz reflejada
25°	0,108	0,19	$-\pi/2$	Levógira
30,5°	0	0,245	$\pi/2$	Dextrógira
35,4°	0,39	0,39	$\pi/2$	Dextrógira
36°	0,705	0,47	$\pi/2$	Dextrógira
36,1°	0,83	0,5	$\pi/2$	Dextrógira
$\theta_i$	$Ap_t =  t_p  Ap_i$	$As_t =  t_s  As_i$	$\delta_t \text{ total}$	Tipo de luz transmitida
25°	1,228	0,69	$\pi/2$	Dextrógira
30,5°	1,41	0,745	$\pi/2$	Dextrógira
35,4°	2,075	0,89	$\pi/2$	Dextrógira
36°	2,61	0,97	$\pi/2$	Dextrógira
36,1°	0	0	-	-

**Cuadro 2:** Reflexión interna