

Octubre 22, 23 y 24

Santiago de Querétaro, Qro., México

Diseminando la cultura de la medición en México

USO DE EIGENMODOS DE POLARIZACIÓN PARA CARACTERIZAR LA BIRREFRINGENCIA DE UNA FIBRA ÓPTICA MONOMODO

- Diana Tentori, Fernando Treviño
Martínez y César Ayala Díaz



CICESE: Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

Contenido

- **Antecedentes**
 - Birrefringencia inducida: control de la polarización en EDFAs
- **Modelo teórico**
 - Birrefringencia residual
- **Resultados experimentales**
 - Birrefringencia residual
 - Birrefringencia inducida por torsión
- **Conclusiones**

Polarización en EDFAs

- La ganancia de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) se consideraba independiente de la polarización
- 1993: M.G. Taylor indica que en un enlace de 3100 km con 69 EDFAs, se observó que el funcionamiento depende del estado de polarización de la señal
- Los EDFAs se construyen con más de 10 m de fibra dopada con erbio, por lo que ésta está enrollada.
- Al enrollarla se induce birrefringencia

Bobinado helicoidal

- curvatura

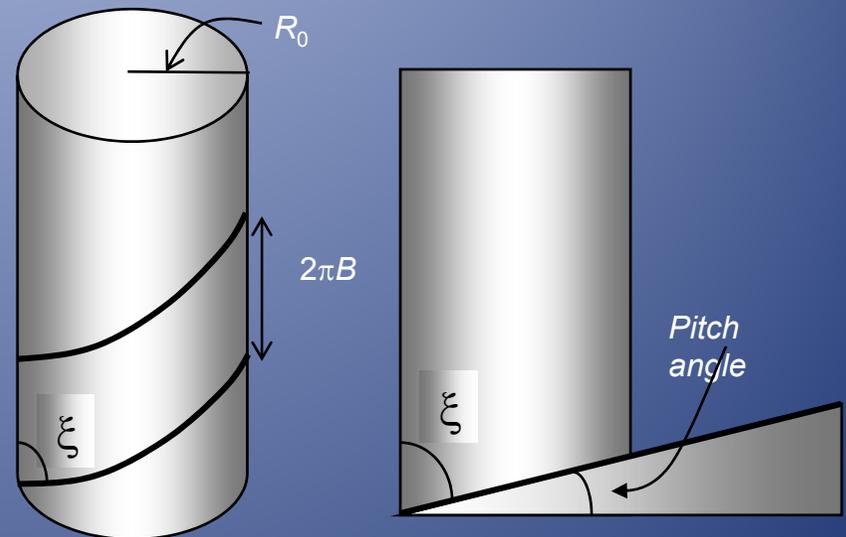
$$\kappa = R_0 / (R_0^2 + B^2)$$

- torsión

$$\tau = B / (R_0^2 + B^2)$$

- matriz diferencial

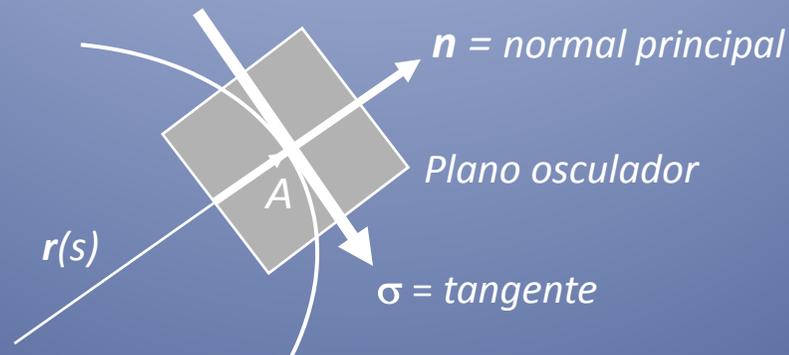
$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} (\beta/2 - k)i & \tau \\ -\tau & -(\beta/2 - k)i \end{pmatrix}$$



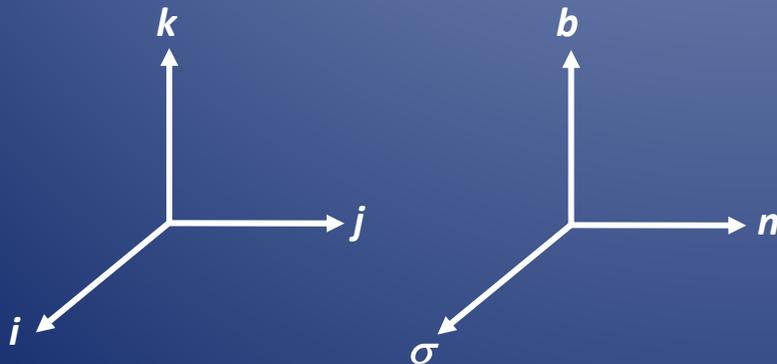
$$\beta = \beta_0 (r\kappa)^2$$

Plano osculador, Binormal y Torsión

Al plano que contiene la tangente y la normal principal a una curva dada en un punto A se llama plano osculador en este punto A

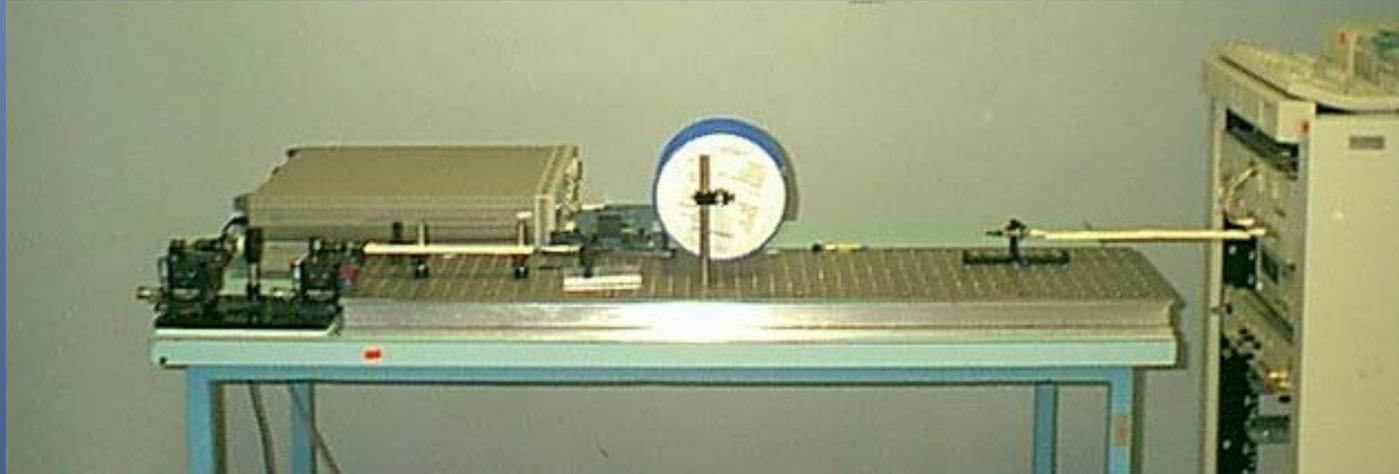


La normal a la curva, perpendicular al plano osculador, se llama *binormal*



Los vectores σ , n y b forman un triédro con la misma orientación que los vectores unitarios i , j y k de los ejes de coordenadas

Evaluación de la Birefringencia

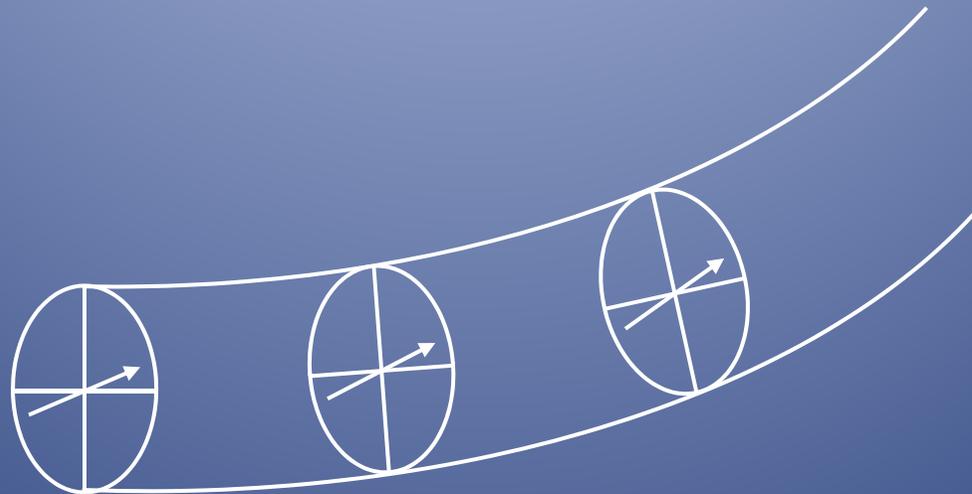


$$\mathbf{M}_e = \begin{pmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \omega + e^{-i\delta} \sin^2 \omega & \sin 2\omega \sin \delta \\ -\sin 2\omega \sin \delta & e^{-i\delta} \cos^2 \omega + e^{i\delta} \sin^2 \omega \end{pmatrix}$$

- δ es el retardo total y $\tan \omega$ es la elipticidad del retardador elíptico

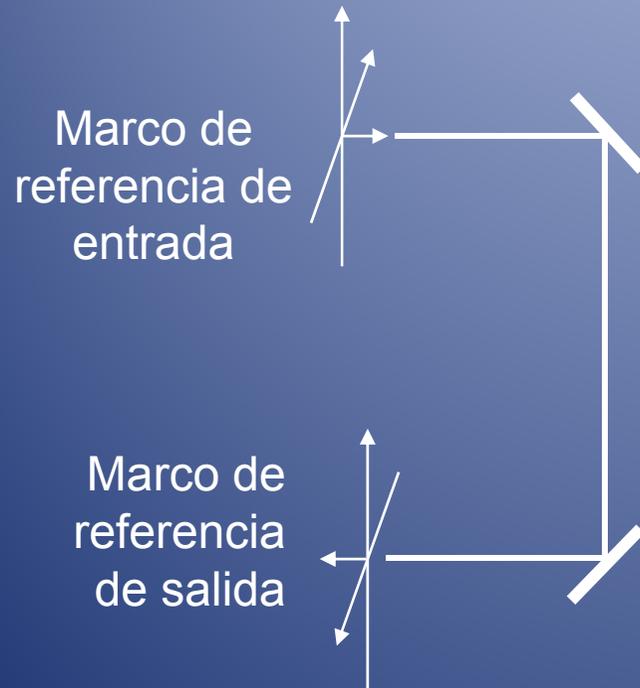
Torsión → birrefringencia circular

si consideramos rebanadas delgadas de este retardador lineal, a causa de la torsión de la hélice, se tiene un diferente ángulo azimutal,



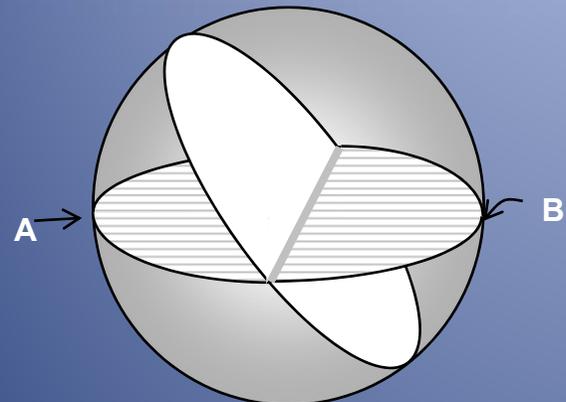
Esta falta de alineación entre las orientaciones azimutales de un retardador lineal delgado y el siguiente, introduce un retardo circular.

Transporte paralelo en un plano

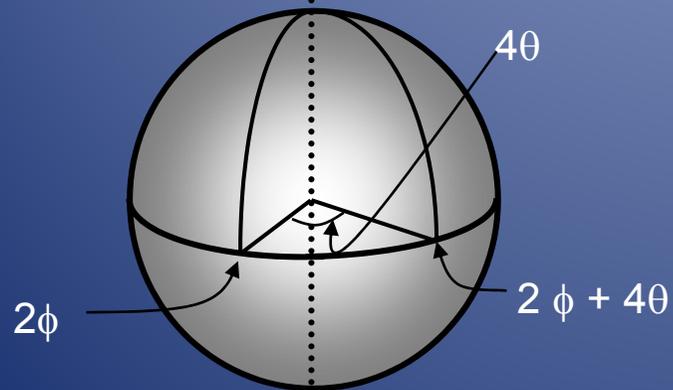


- En este caso se satisface nuestra noción común de paralelismo

Estado de polarización de salida



Retardo lineal módulo π



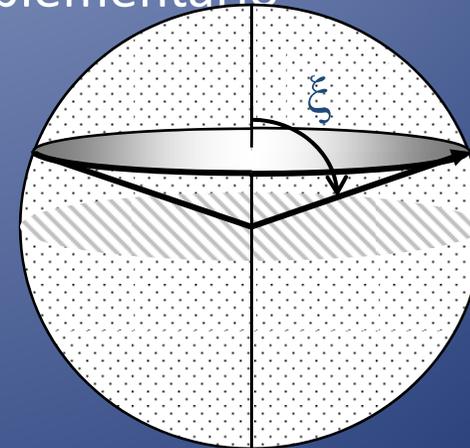
Retardo circular módulo π

- Rotación topológica

$$\Omega = n2\pi(1 - \cos \xi)$$

n número de vueltas

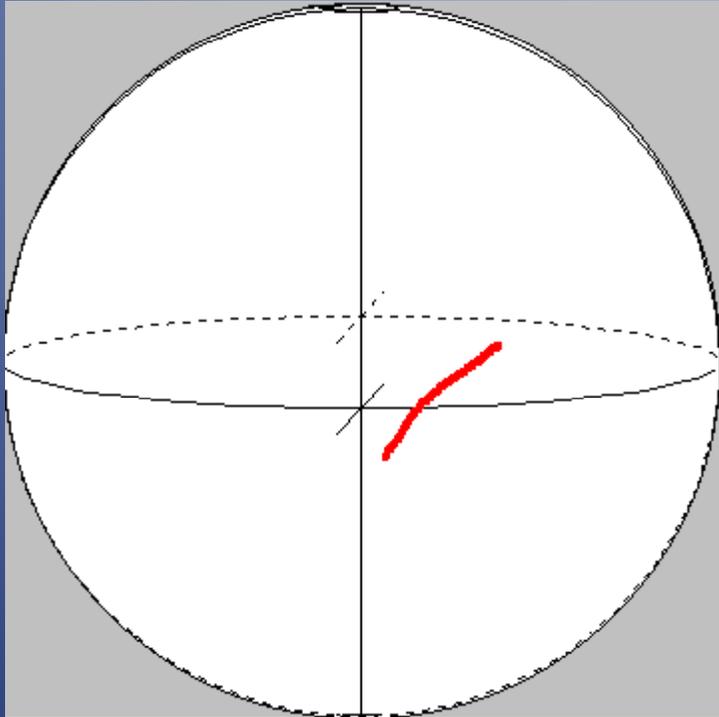
ξ Ángulo de paso
complementario



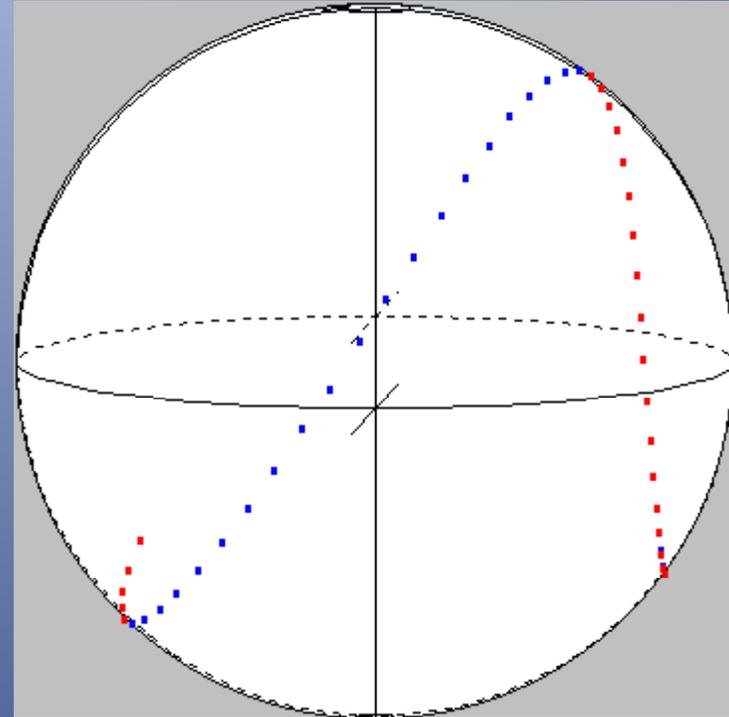
Redireccionamiento del espín

Barrido espectral

D. Tentori, F. Treviño, C. Ayala, F.J. Mendieta Proc. SPIE 4532, 467-476, 2001



*Fibra monomodo estándar
rango espectral: 1535 a
1575 nm (paso=0.5 nm)*

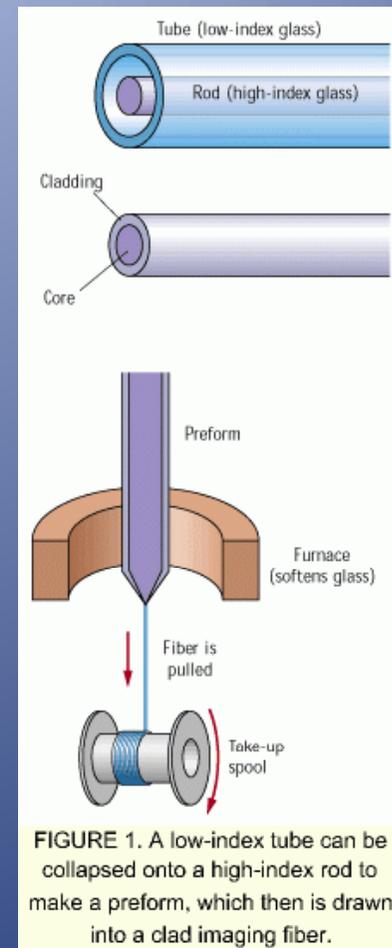


*Fibra dopada con erbio
rango espectral: 1560 a
1583nm (paso=0.5 nm)*

Birrefringencia residual

- La birrefringencia residual se introduce durante el proceso de fabricación
- Como consecuencia, las fibras no son perfectas

y las imperfecciones introducidas varían a lo largo de la longitud de la fibra



Para evaluar la birrefringencia...

se estudia cuál es el cambio en el estado de polarización inducido por el medio anisótropo

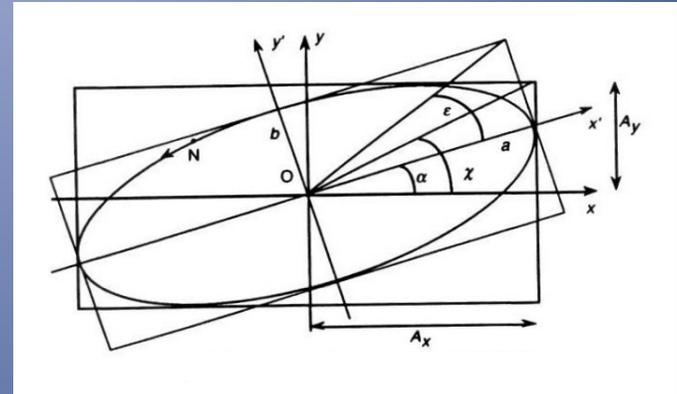
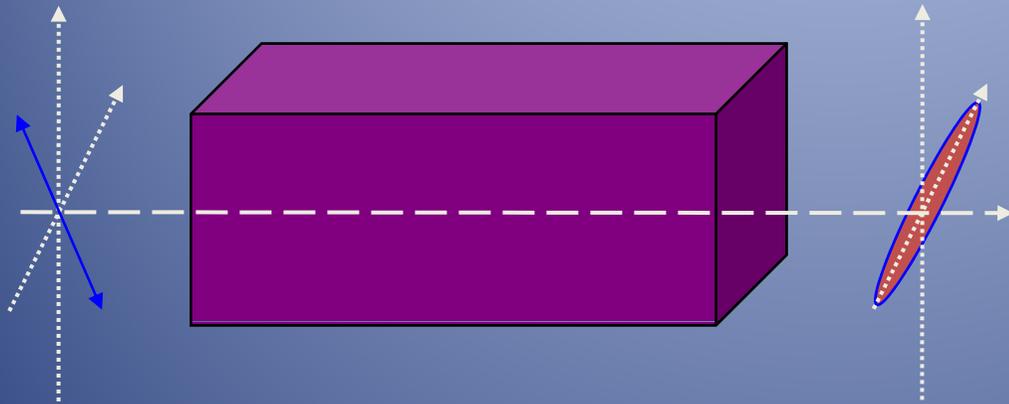
$$E_{\text{out}} = M E_{\text{in}}$$



estado de polarización de
entrada lineal

se mide el estado de
polarización de salida

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{M}\mathbf{E}_{\text{in}}$$



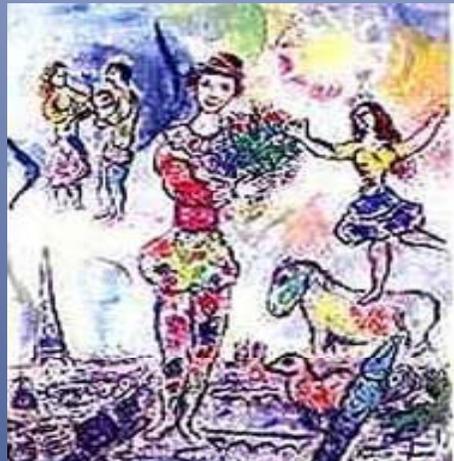
- La caracterización del estado de polarización de salida nos dice cuál es el cambio, con respecto al estado inicial, en:
 - el ángulo azimutal
 - el ángulo de elipticidad
- NO INDICA CUAL ES LA BIRREFRINGENCIA DE LA MUESTRA

Birrefringencia residual



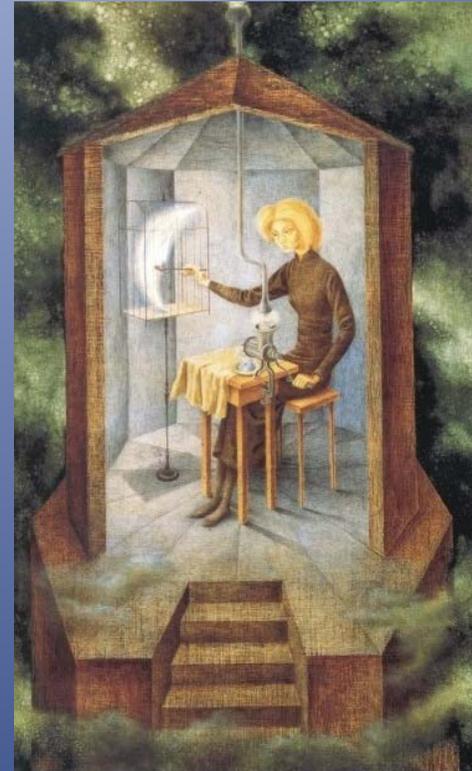
Birefringencia
lineal

+



Birefringencia circular

+



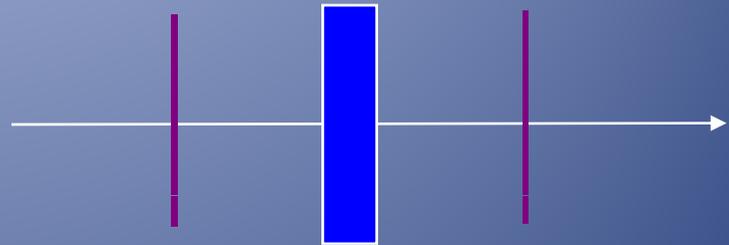
Rotación del eje rápido
de birrefringencia



**OPTICA DE
POLARIZACIÓN
CLÁSICA**

Matrices \mathbf{M} de Jones

El efecto de un elemento óptico birrefringente sobre la luz puede describirse a través de un operador lineal que actúa sobre el vector de campo eléctrico de la onda de luz (matriz 2×2 , llamada matriz \mathbf{M})

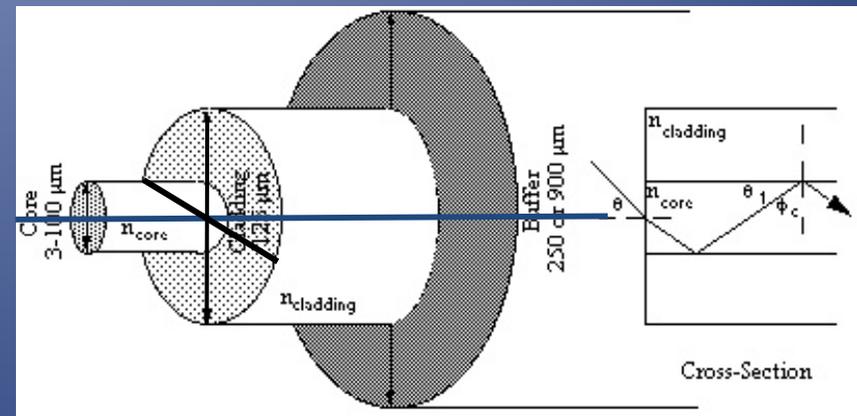


$$\mathbf{E}_s = \mathbf{M}\mathbf{E}_e$$

Para una fibra monomodo

Se supone que:

- el frente de onda del haz de luz que viaja en la dirección del eje de la fibra es plano
- Los ejes rápido y lento de birrefringencia lineal son ortogonales al eje de la fibra



Retardadores homogéneos

Retardo lineal

$$\Delta n = n_y - n_x$$

$$G \equiv \begin{pmatrix} e^{i\gamma} & 0 \\ 0 & e^{-i\gamma} \end{pmatrix}$$

Retardo circular

$$\Delta n = n_R - n_L$$

$$S(\omega) \equiv \begin{pmatrix} \cos \omega & \pm \operatorname{sen} \omega \\ \mp \operatorname{sen} \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

$$\Delta n = n_S - n_F$$

Retardo elíptico

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos \delta \mp i \sin \sigma \sin \delta & \mp \cos \sigma \sin \delta \\ \pm \cos \sigma \sin \delta & \cos \delta \mp i \sin \sigma \sin \delta \end{pmatrix}$$

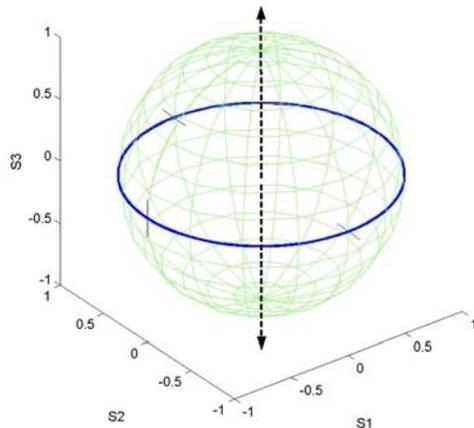
Uso de un SOP lineal de entrada

- Cuando la evaluación se realiza sobre una banda espectral resulta más sencillo y preciso generar estados de polarización lineales
- Ya que la orientación del eje del polarizador lineal puede usarse para definir el ángulo azimutal de la señal de entrada para cualquier longitud de onda en su rango de operación (350 to 2500 nm para un prisma polarizador de calcita)

Retardo homogéneo

$$\mathbf{M}_l = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \text{sen } \delta \\ 0 & 0 & -\text{sen } \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad \mathbf{S}_l = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi \\ \cos \delta \text{sen } 2\varphi \\ -\text{sen } \delta \text{sen } 2\varphi \end{pmatrix}$$

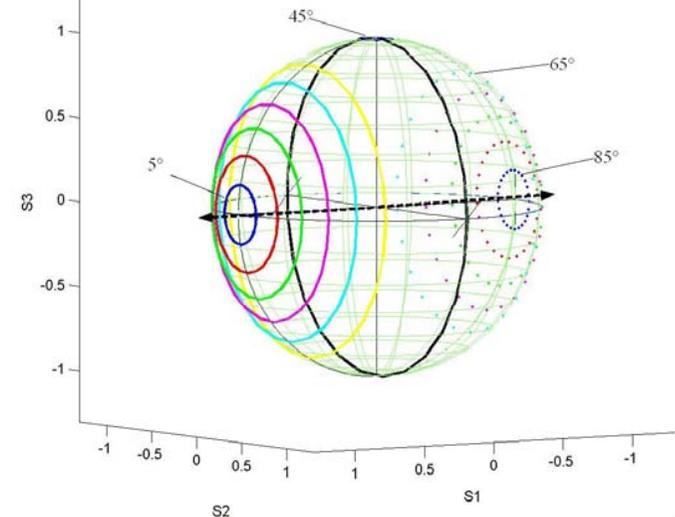
Birrefringencia circular



$$\mathbf{M}_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \pm \text{sen } \delta & 0 \\ 0 & \mp \text{sen } \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

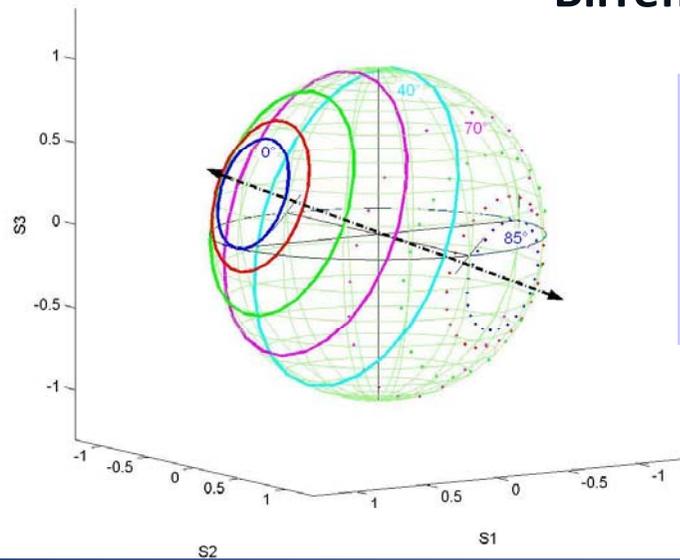
$$\mathbf{S}_c = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(2\varphi \mp \delta) \\ \text{sen}(2\varphi \mp \delta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Birrefringencia lineal



Retardo homogéneo

Birrefringencia elíptica



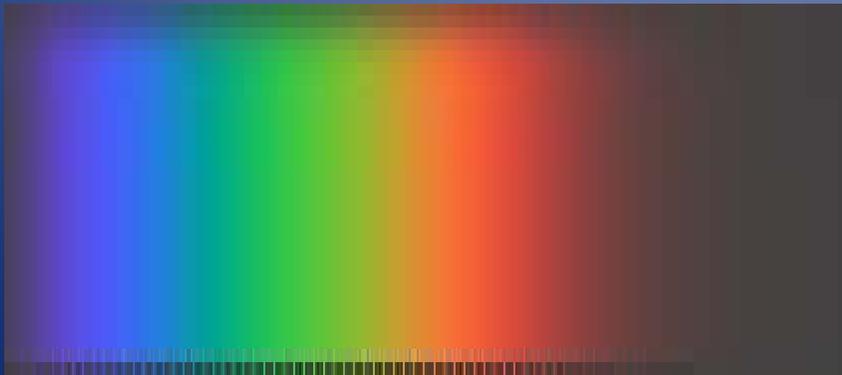
$$\mathbf{S}_{out} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi(1 - 2 \operatorname{sen}^2 2\omega \operatorname{sen}^2 \delta) + \operatorname{sen} 2\varphi \operatorname{sen} 2\omega \operatorname{sen} 2\delta \\ -\cos 2\varphi \operatorname{sen} 2\omega \operatorname{sen} 2\delta + \operatorname{sen} 2\varphi \cos 2\delta \\ -\cos 2\varphi \operatorname{sen} 4\omega \operatorname{sen}^2 \delta - \operatorname{sen} 2\varphi \cos 2\omega \operatorname{sen} 2\delta \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M}_e = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2 \operatorname{sen}^2 2\omega \operatorname{sen}^2 \delta & \operatorname{sen} 2\omega \operatorname{sen} 2\delta & -\operatorname{sen} 4\omega \operatorname{sen}^2 \delta \\ 0 & -\operatorname{sen} 2\omega \operatorname{sen} 2\delta & \cos 2\delta & \cos 2\omega \operatorname{sen} 2\delta \\ 0 & -\operatorname{sen} 4\omega \operatorname{sen}^2 \delta & -\cos 2\omega \operatorname{sen} 2\delta & 1 - 2 \cos^2 2\omega \operatorname{sen}^2 \delta \end{pmatrix}$$

¿Recorte o barrido espectral?

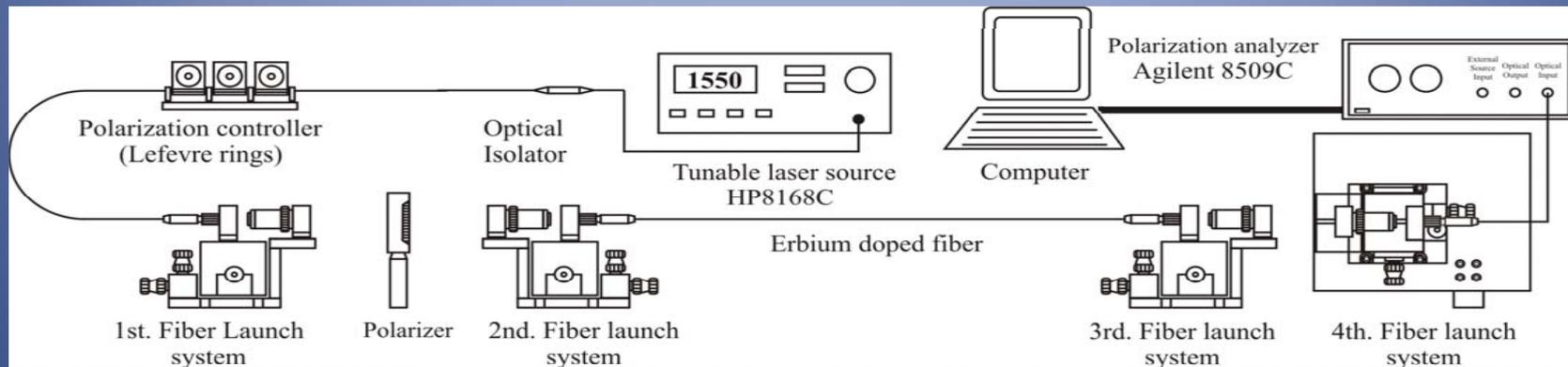
$$\Phi = \frac{2\pi s}{\lambda} \Delta n$$

- El método de recorte es una técnica DESTRUCTIVA



- El barrido espectral es una técnica NO DESTRUCTIVA

experimento

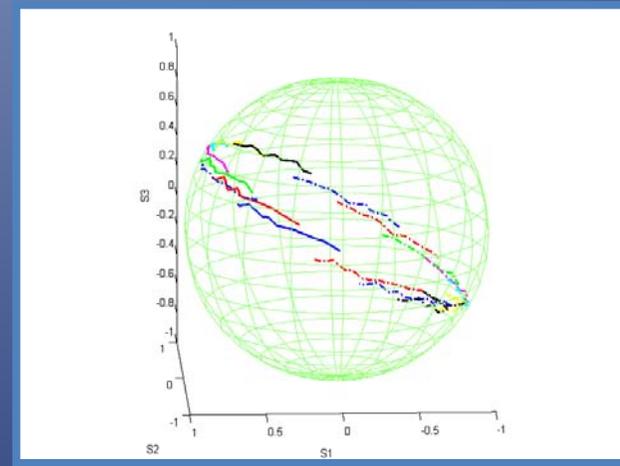
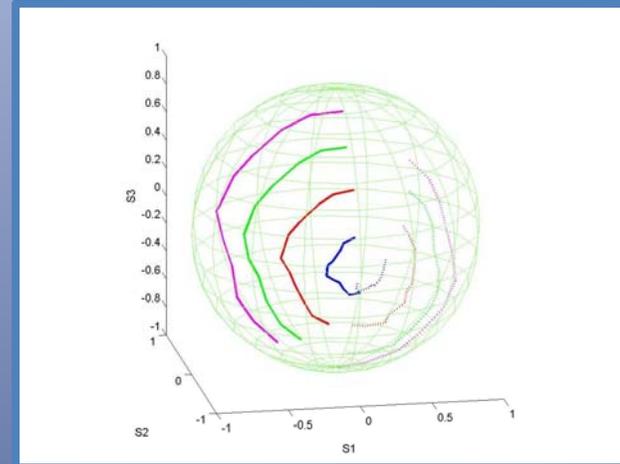


- Estado de polarización lineal de entrada
- Barrido espectral de 1551 a 1571 nm (paso, 6 nm)
- Muestras:
 - Photonetics EDOS 103 (longitud, 1.63 m)
 - INO-NOI 402K5 (longitud, 1.61 m)

Concentración
< 80 ppm-peso
~960 ppm-peso

La evidencia experimental

- indica que dos de las muestras se comportan como retardadores elípticos
- INO NOI 402 K5
- Photonetics EDOS-1560





Octubre 22, 23 y 24

Santiago de Querétaro, Qro., México

Diseminando la cultura de la medición en México

TEORÍA

Birefringence assessment of single-mode optical fibers

F. Treviño-Martínez,

D. Tentori, C. Ayala-Díaz,

F.J. Mendieta-Jiménez

Opt. Express, 13, 2556 (2005)

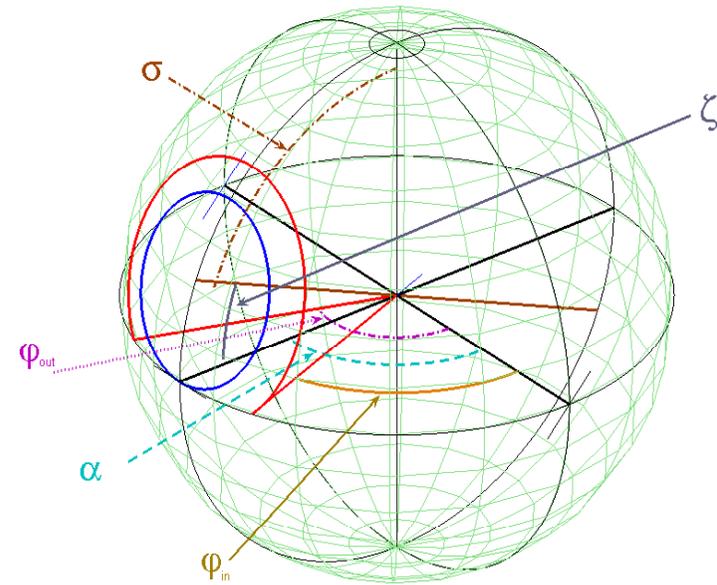
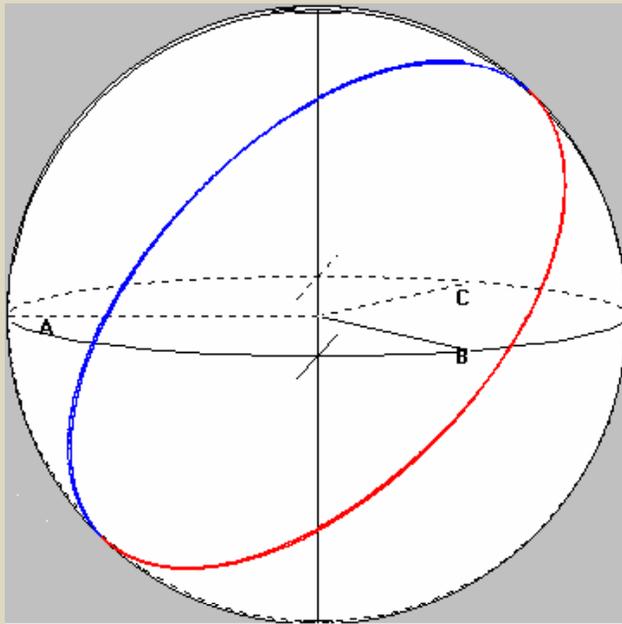
Dispersión de la birrefringencia

el valor de Δn depende de la longitud de onda de la luz

$$\Phi = \frac{2\pi s}{\lambda} \Delta n$$

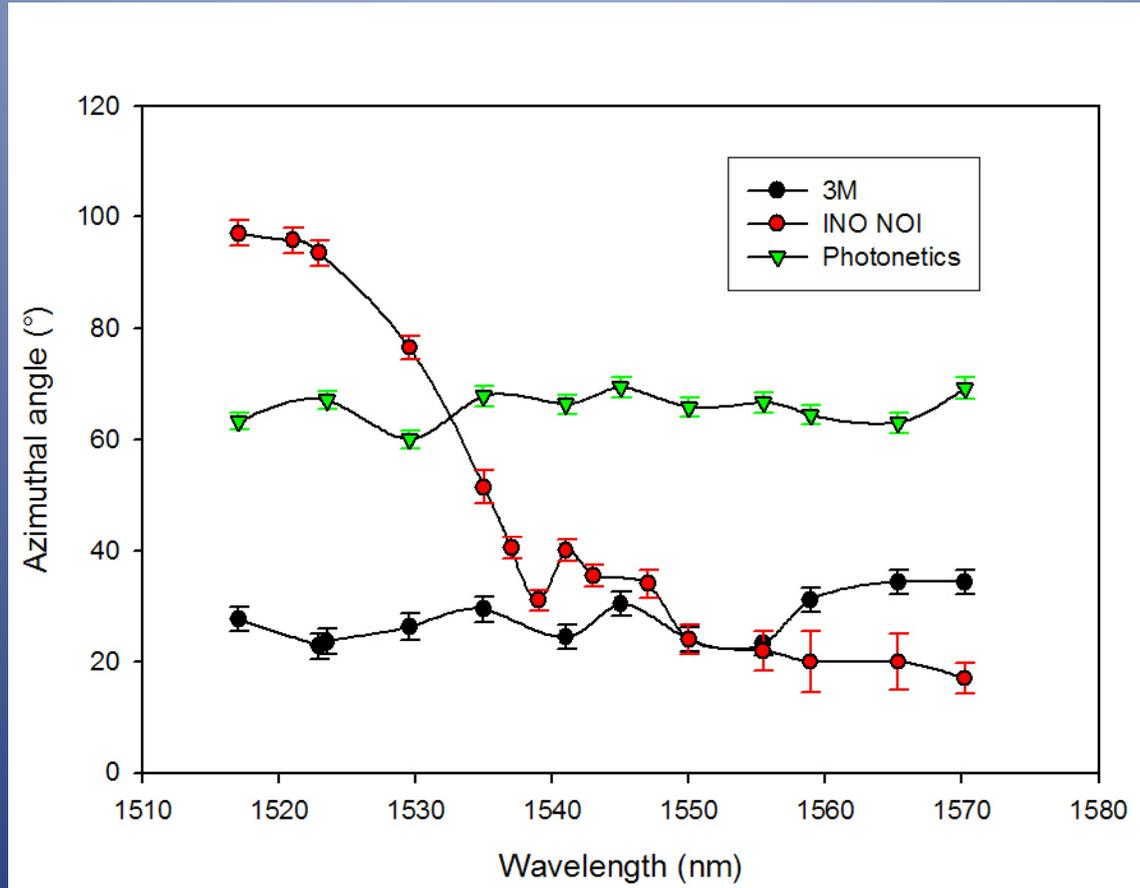
Eigenestados de polarización

- El SOP describe un círculo alrededor de un eje de simetría
- Angulo azimutal α : los estados de polarización de entrada y salida (ϕ_{in} , ϕ_{out}) son lineales



Angulo de elipticidad $\zeta/2$

Resultados para el ángulo azimutal



Angulo de elipticidad

$$\mathbf{S}_{out} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi(1 - 2\cos^2 \sigma \sin^2 \delta) - \sin 2\varphi \cos \sigma \sin 2\delta \\ \cos 2\varphi \cos \sigma \sin 2\delta + \sin 2\varphi \cos 2\delta \\ -\cos 2\varphi \sin 2\sigma \sin^2 \delta - \sin 2\varphi \sin \sigma \sin 2\delta \end{pmatrix}$$

- cuando $\varphi = 0$

$$\tan \sigma = s_3 / (s_1 - 1)$$

- Por lo que usando un estado de polarización con ángulo azimutal

$$\alpha = (\varphi_{out} - \varphi_{in})/2 + \varphi_{in}$$

- Se obtiene el vector de Stokes \mathbf{S}_α ;

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{R}(-\alpha)\mathbf{S}_\alpha$$

Retardo total, δ

- Puede demostrarse que:

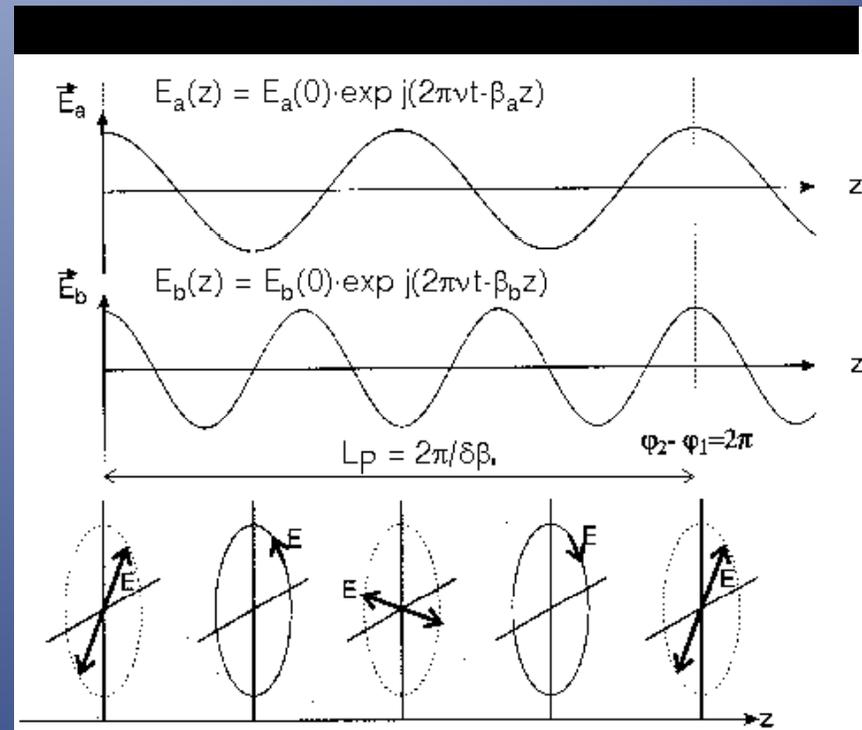
$$\tan \delta = -\tan 2\varphi / \cos \sigma$$

- El valor que se calcula es **δ módulo π**
a menos que $\delta < \pi$
- Para evaluar el retardo total, se mide la longitud de batimiento de la polarización

Longitud de batimiento

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_1 - \beta_2|}$$

- Los modos propios se propagan a velocidades distintas
- Cuando el retraso de fase entre ellos es igual a 2π , se restaura el estado de polarización inicial



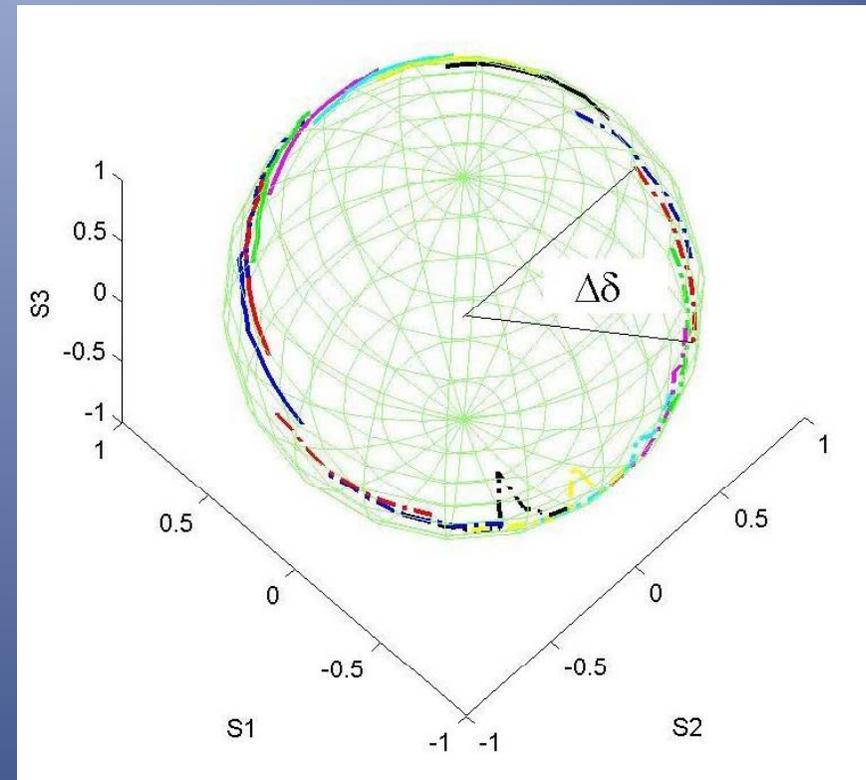
Longitud de batimiento, L_B

$$\delta = (2\pi s/\lambda)\Delta n$$

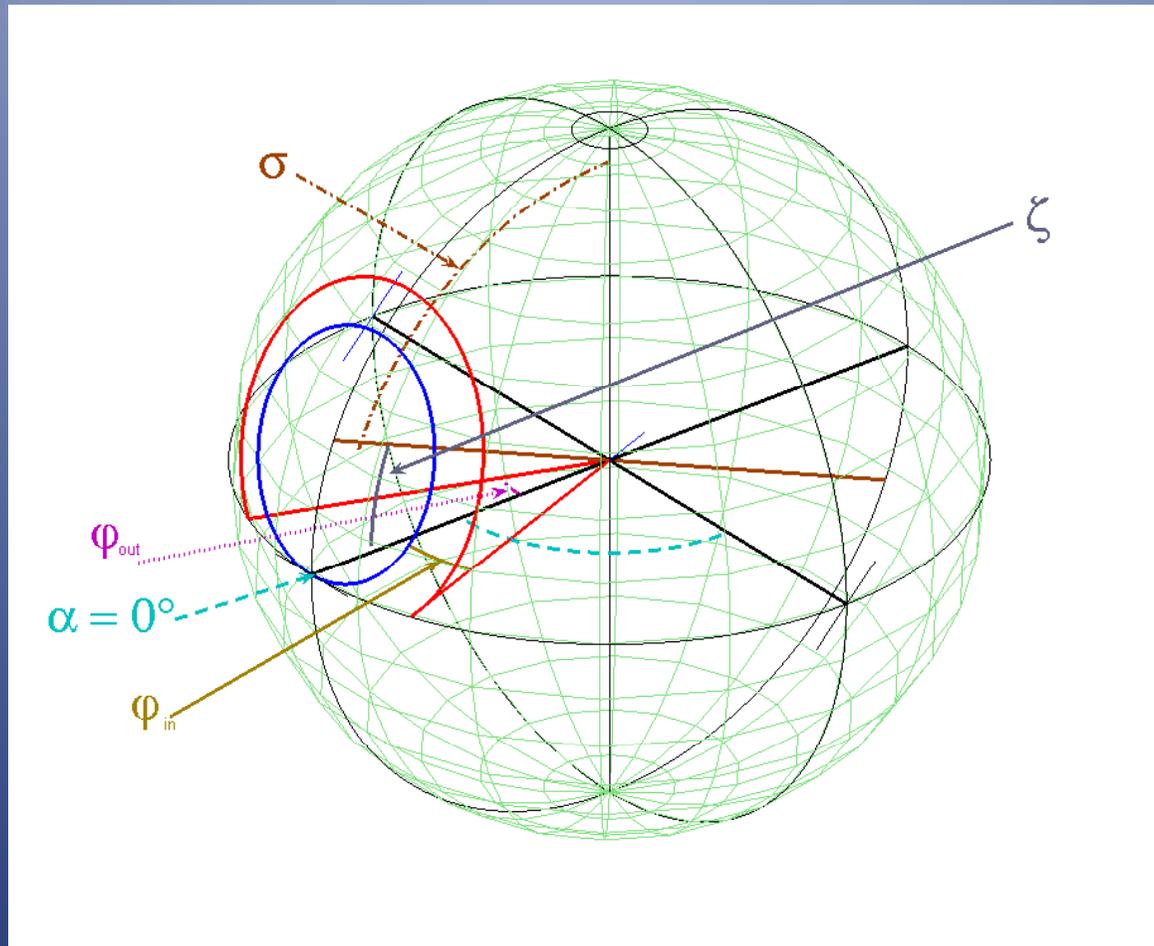
$$L_B(\lambda) = \frac{4s\lambda}{\Delta\delta} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

donde

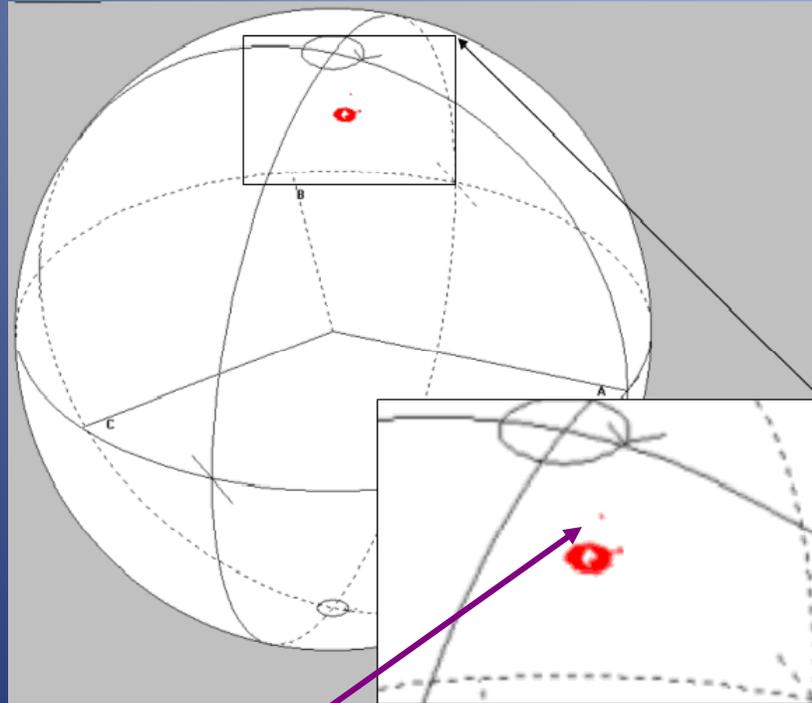
$$\Delta\delta = \delta(\lambda_2) - \delta(\lambda_1)$$



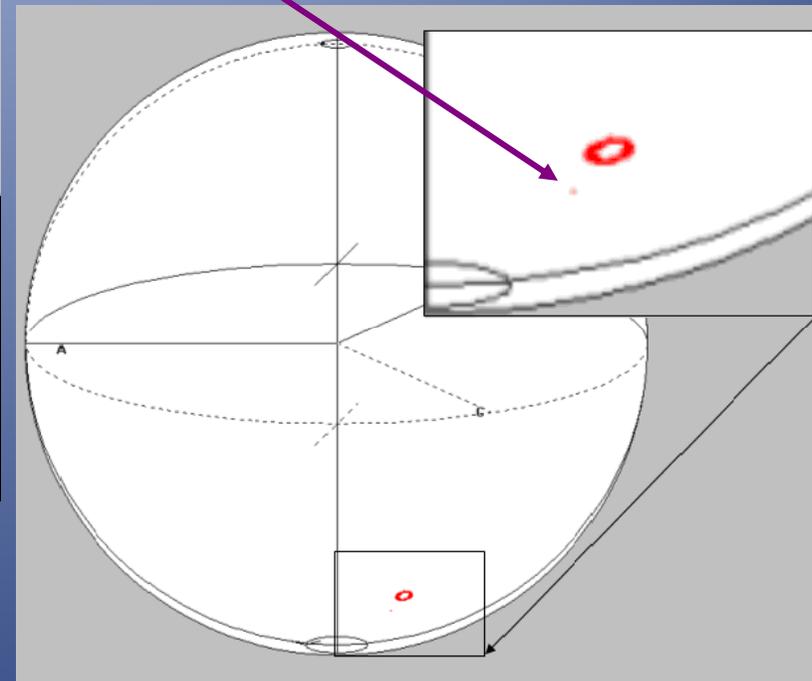
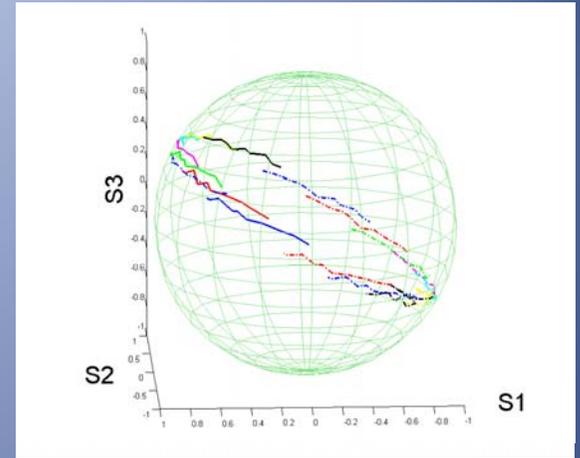
Eigenmodos medidos



verificación de resultados

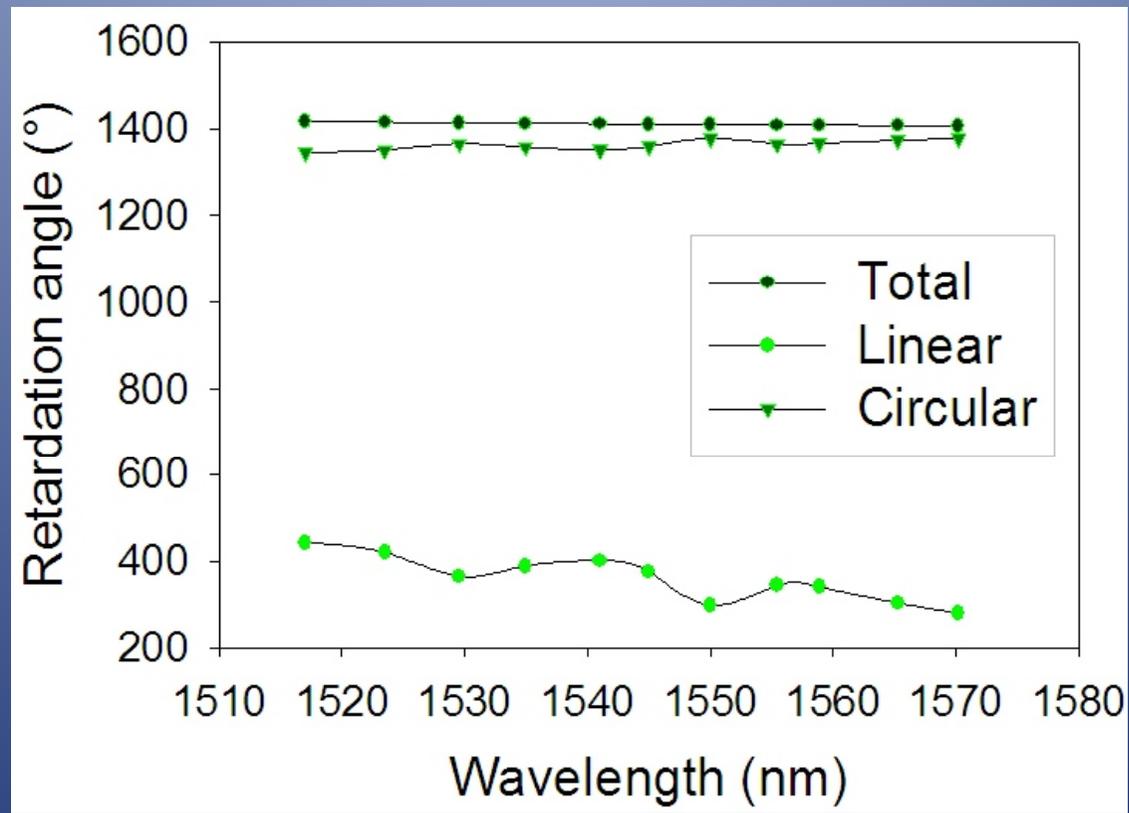


$\lambda = 1523.5$ nm

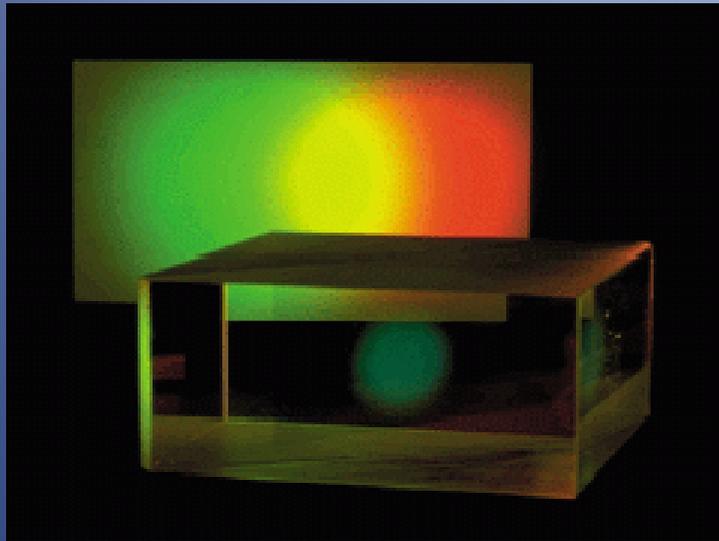


Dispersión de la birrefringencia

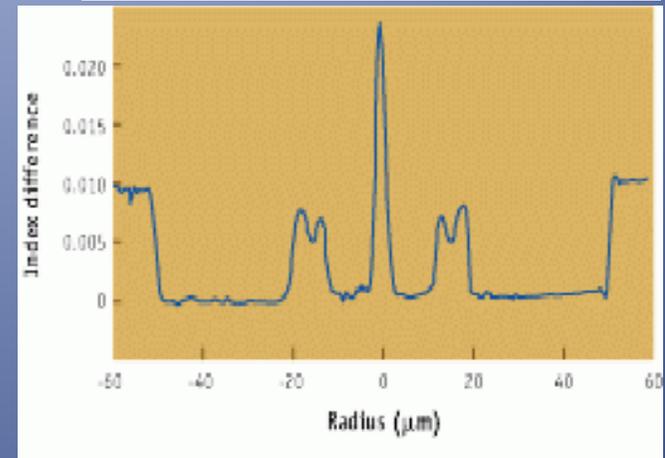
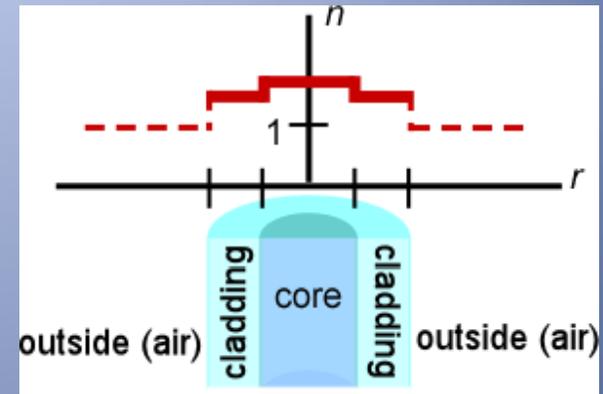
(fibra Photonetics)



Dispersión de una fibra óptica



- **Dispersión del material**
el índice de refracción varía con la longitud de onda
- Puede modificarse ligeramente añadiendo dopantes



- **Dispersión de la guía de onda**
producida por la distribución de luz dentro del núcleo y la cubierta
- Se modifica fácilmente cambiando el perfil de índice de refracción de la guía

Dispersión anómala

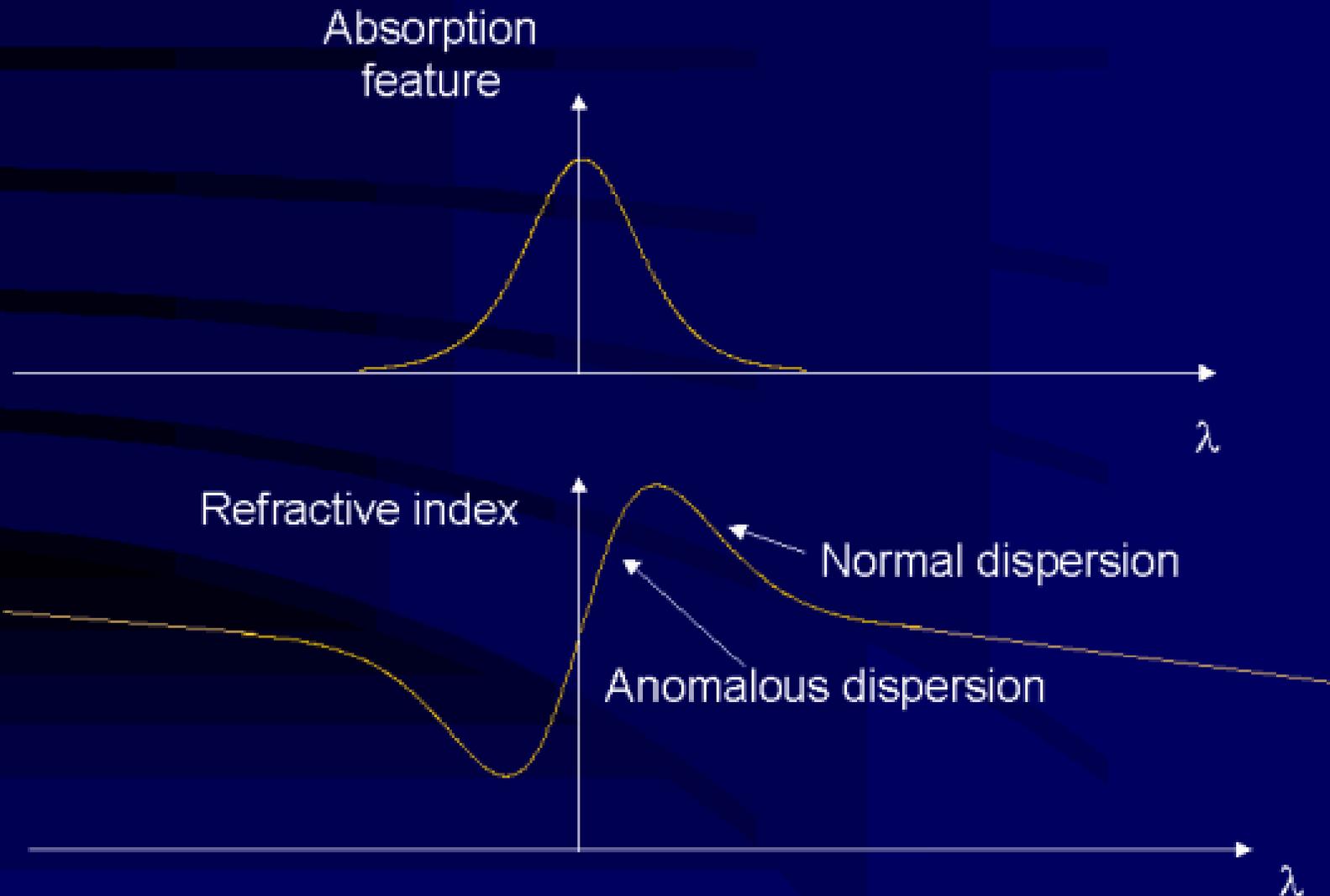
- La dispersión y la absorción están íntimamente relacionadas
- La relación entre el coeficiente de absorción y el índice de refracción se describe a través de las partes real e imaginaria de la susceptibilidad
- Estas relaciones nos permiten determinar una componente si se conoce la otra

conocidas como las relaciones de Kramers-Krönig

$$\chi'(\nu) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{s\chi''(s)}{s^2 - \nu^2} ds$$

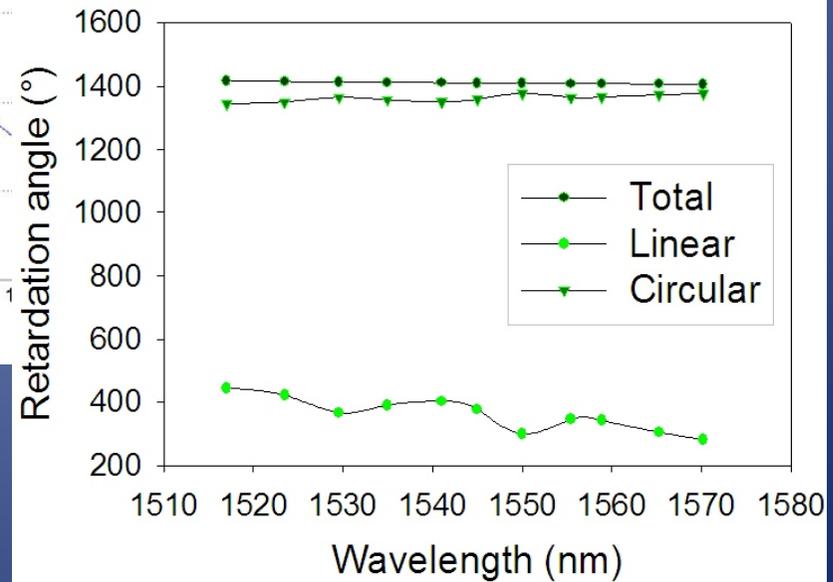
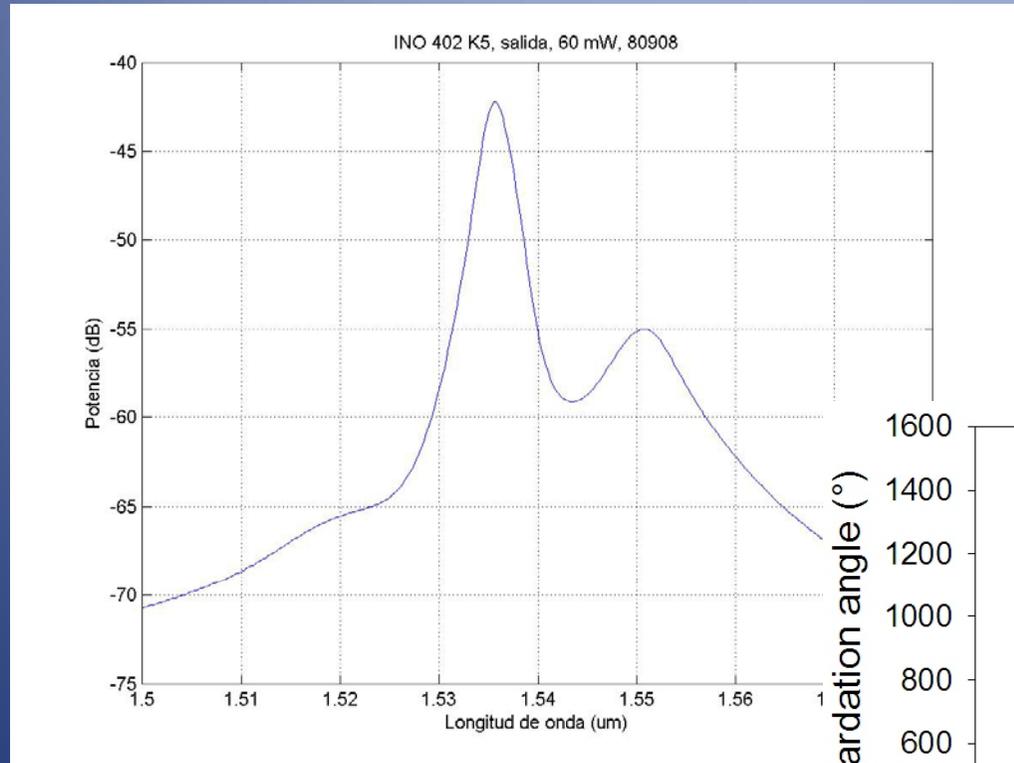
$$\chi''(\nu) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\nu\chi'(s)}{\nu^2 - s^2} ds$$

Anomalous dispersion

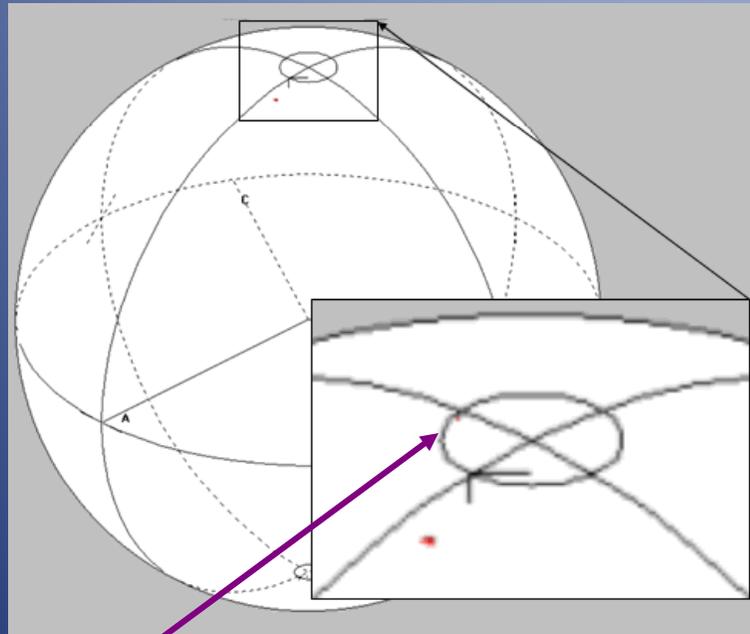
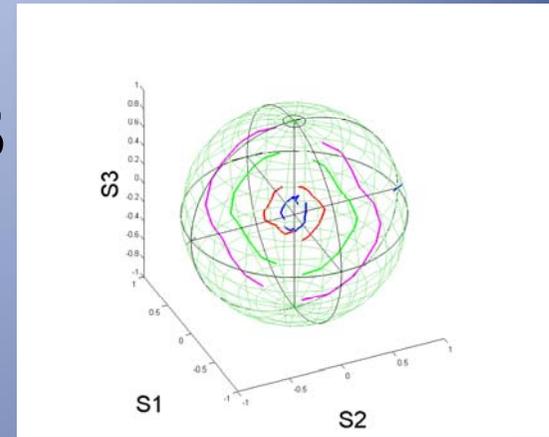


Dispersión de la birrefringencia

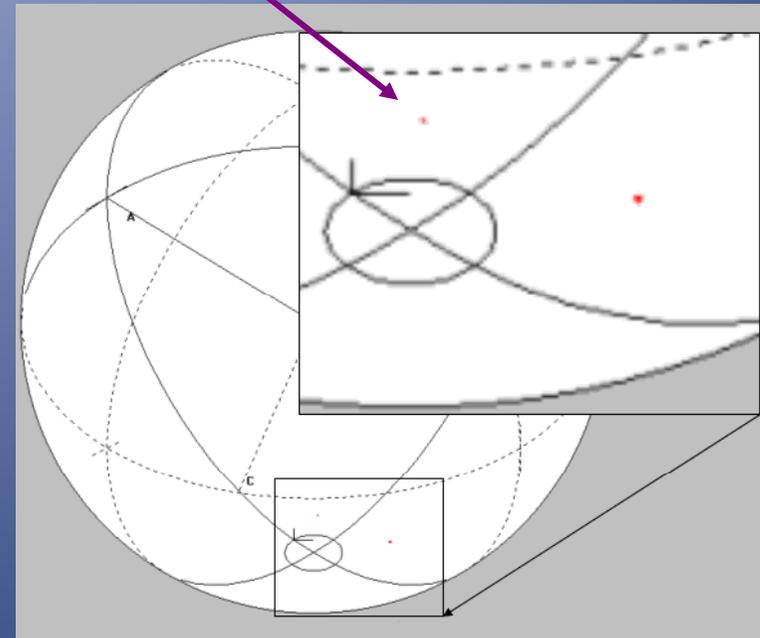
(fibra Photonetics)



verificación de resultados

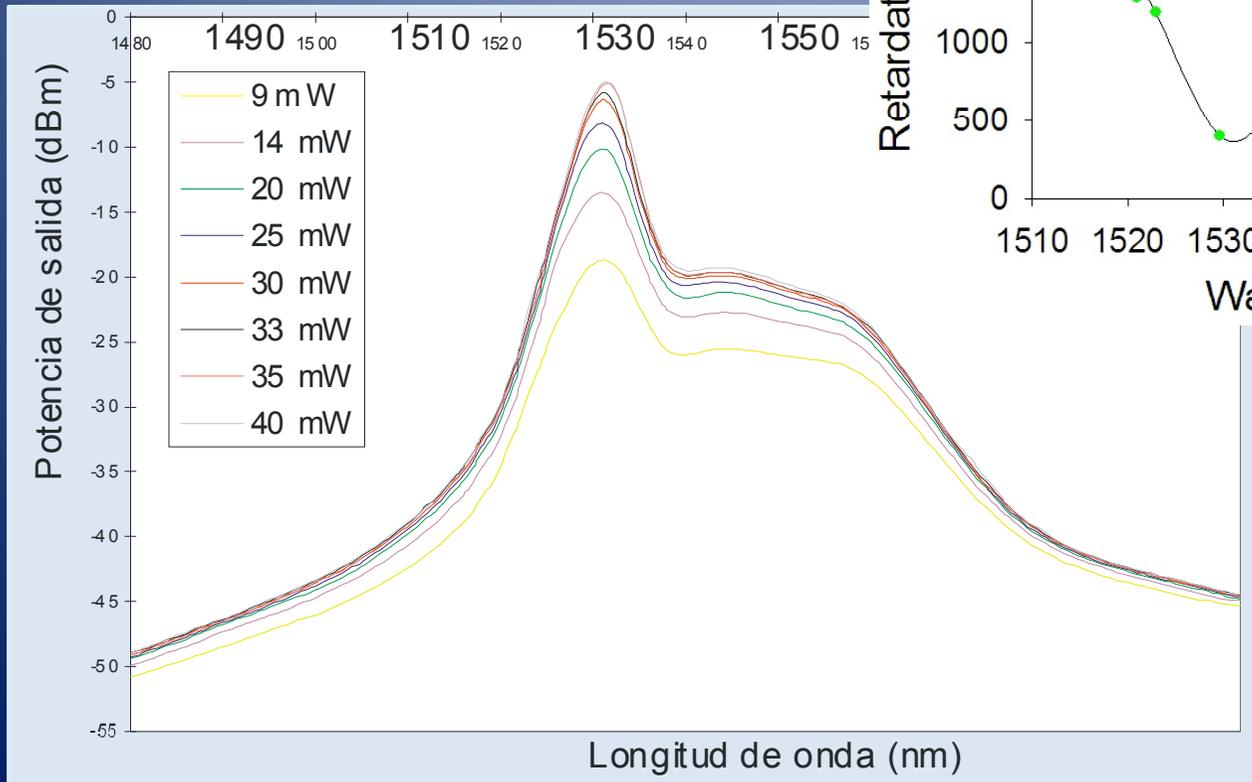
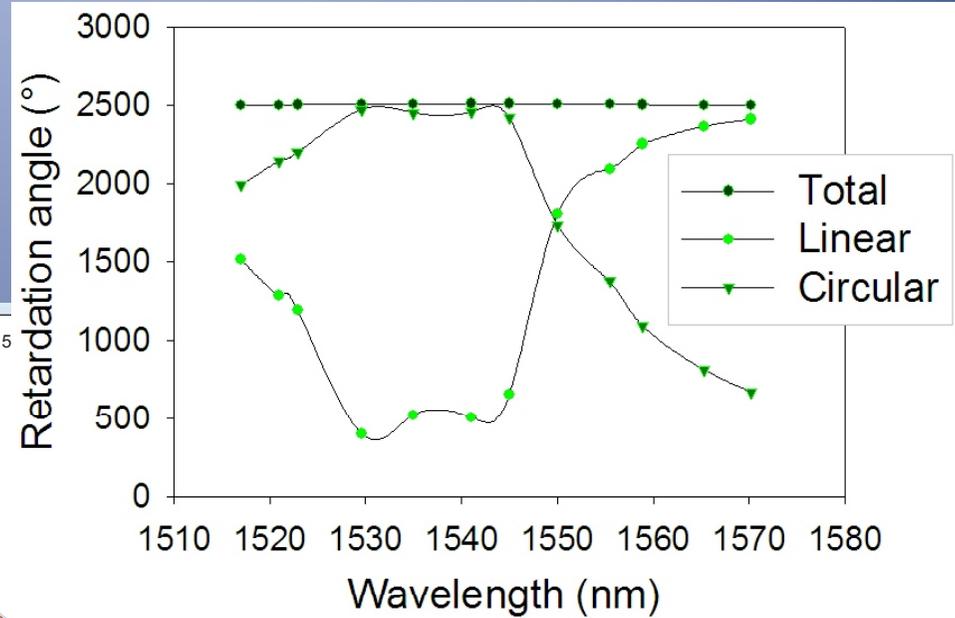


$\lambda = 1535 \text{ nm}$



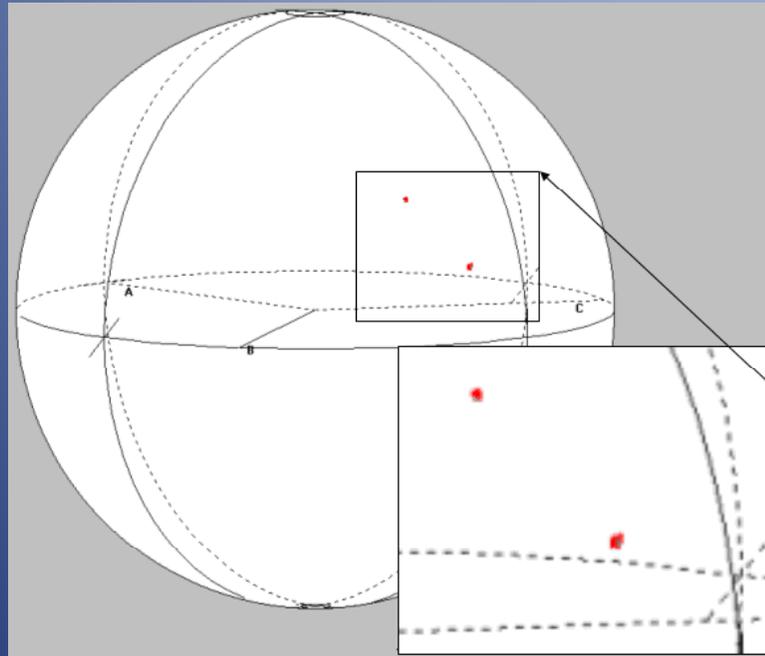
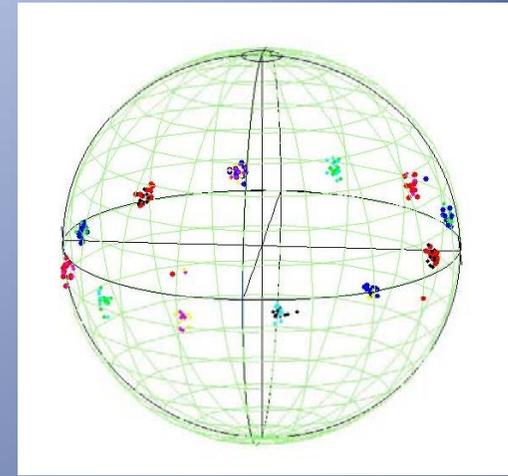
Dispersión de la birrefringencia

fibra INO NOI



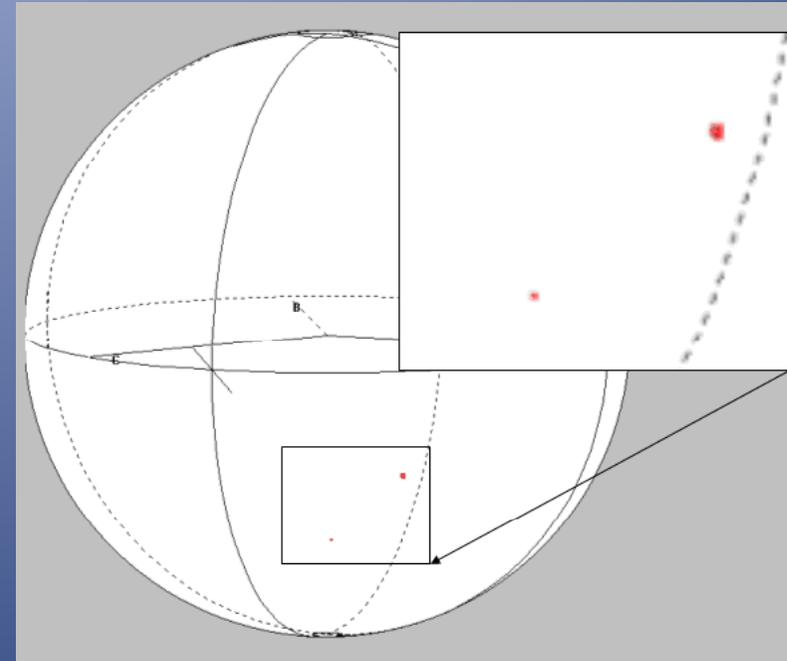
verificación de resultados

3M FS-ER-7A28

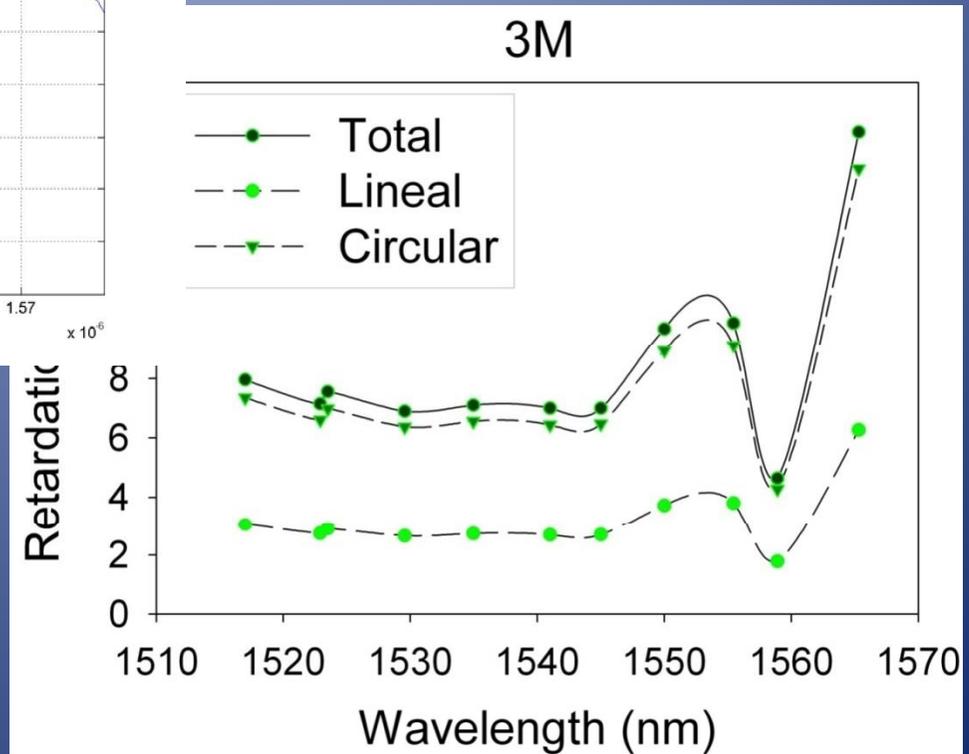
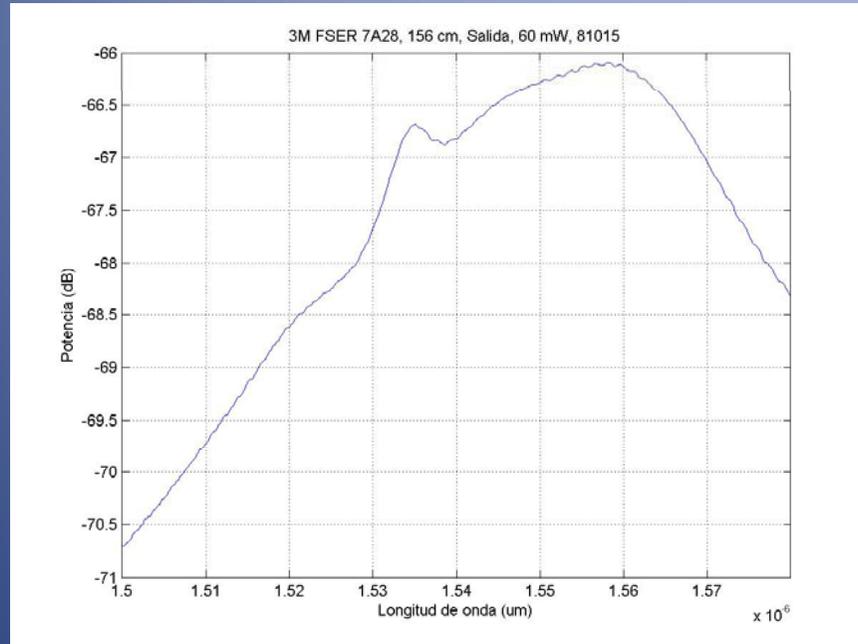


$\lambda = 1570 \text{ nm}$

(DOP 90%)



Dispersión de la birrefringencia



Evaluation of the residual birefringence of single-mode erbium-doped silica fibers

D. Tentori , C. Ayala-Díaz, F. Treviño-Martínez,
F. J. Mendieta-Jiménez

Opt. Commun. **271**, 73-80 (2007)

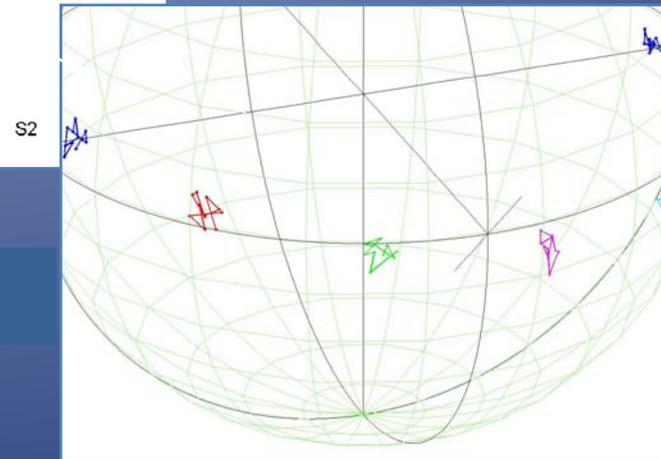
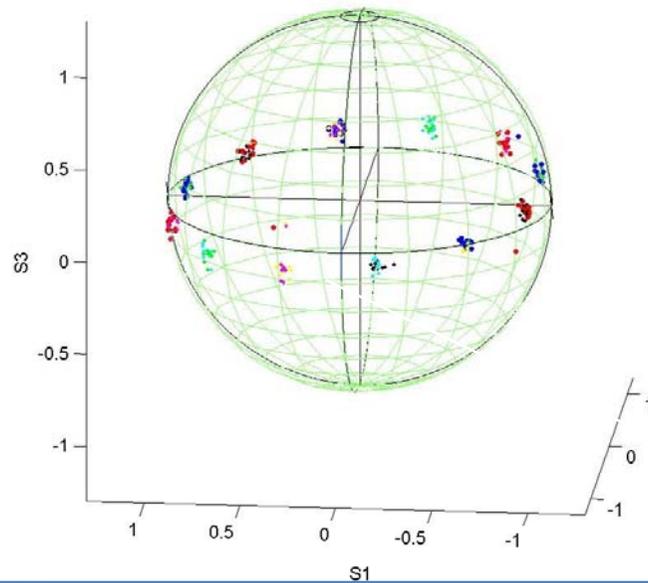


Octubre 22, 23 y 24

Santiago de Querétaro, Qro., México

Diseminando la cultura de la medición en México

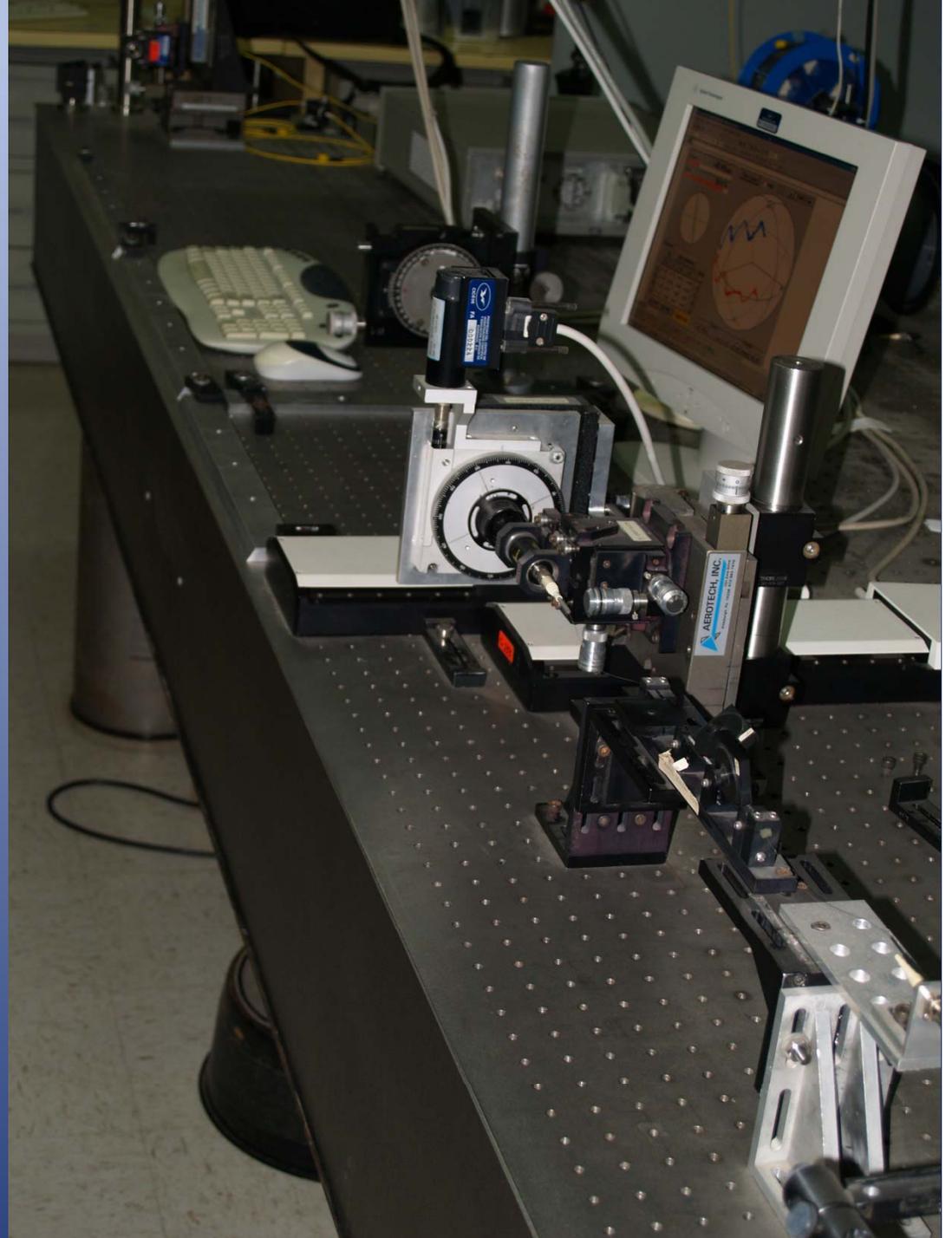
Fibra 3M FS-ER-7A28

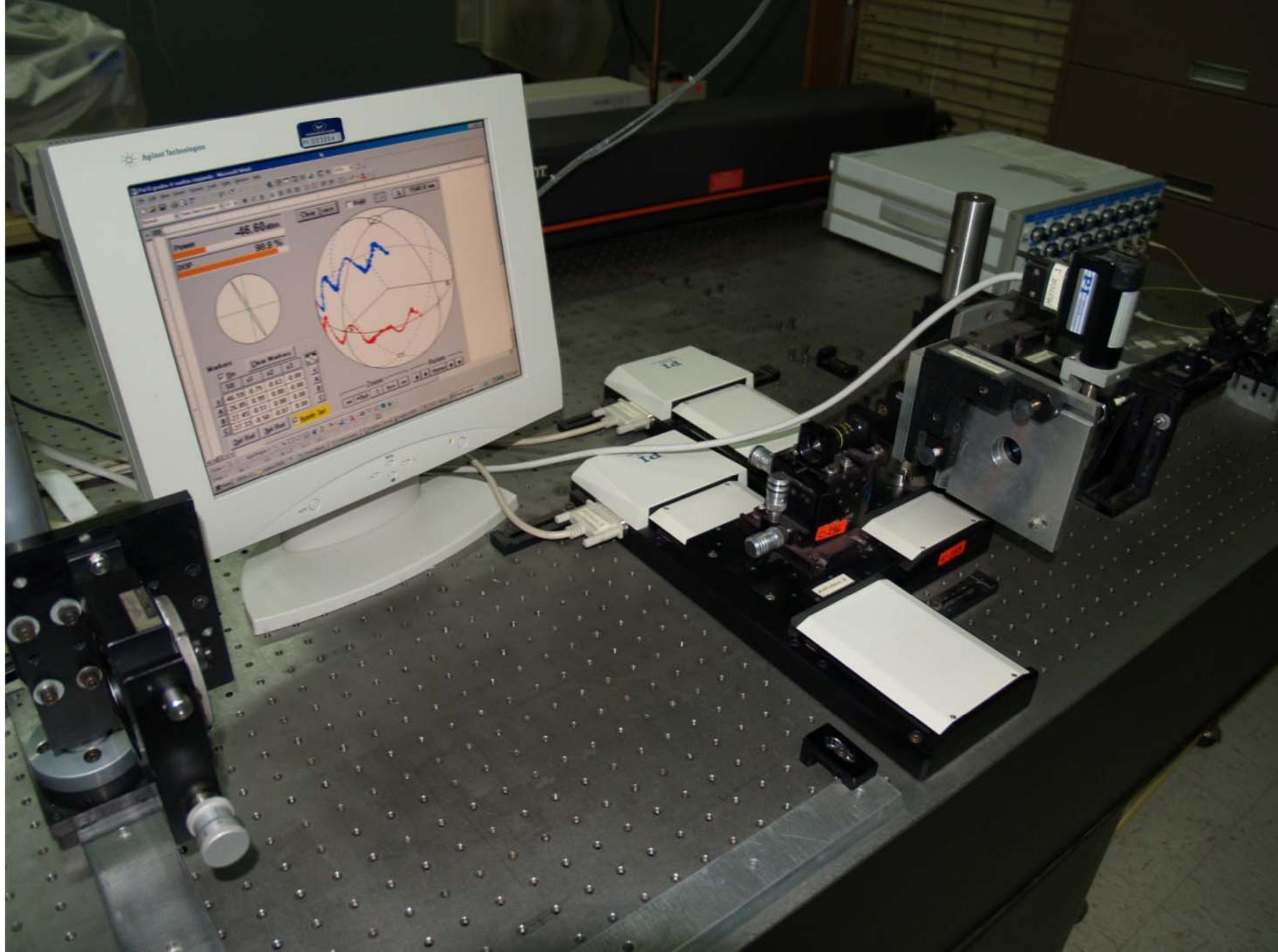


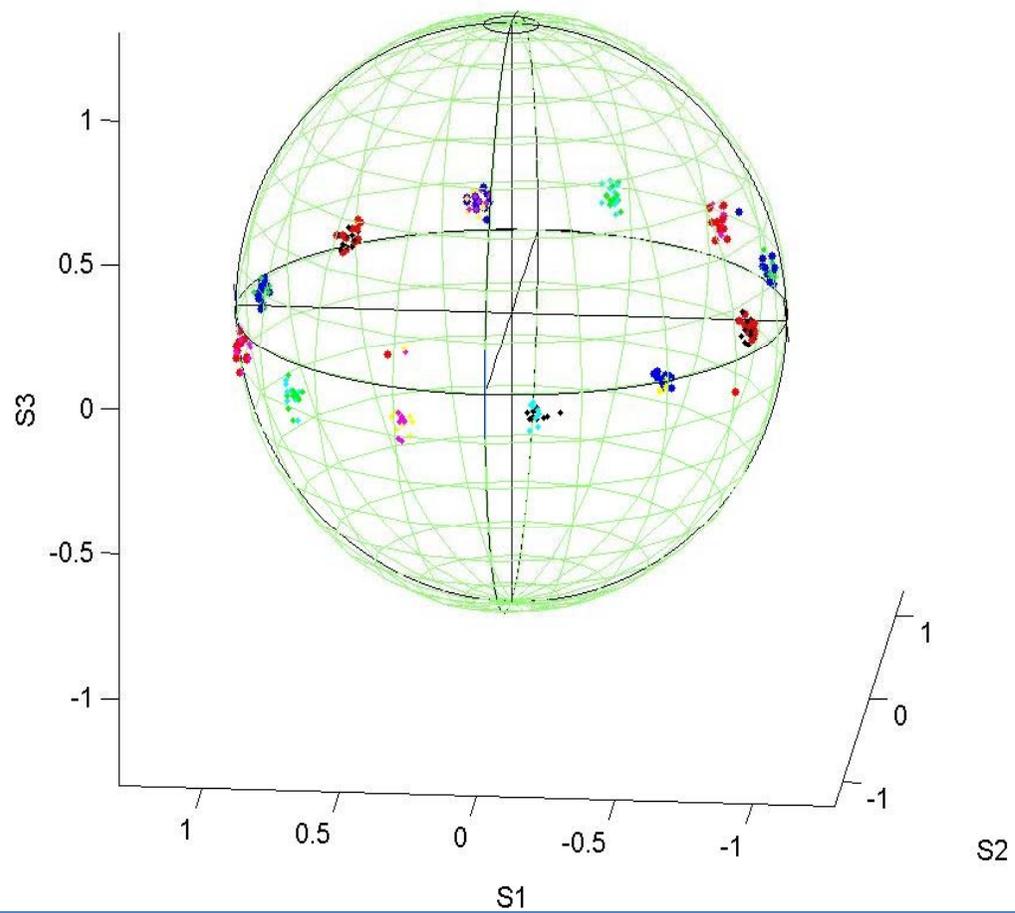
Al amplificar una región →

Automatic
birefringence
characterization of
single-mode erbium-
doped fibers within
the amplification band

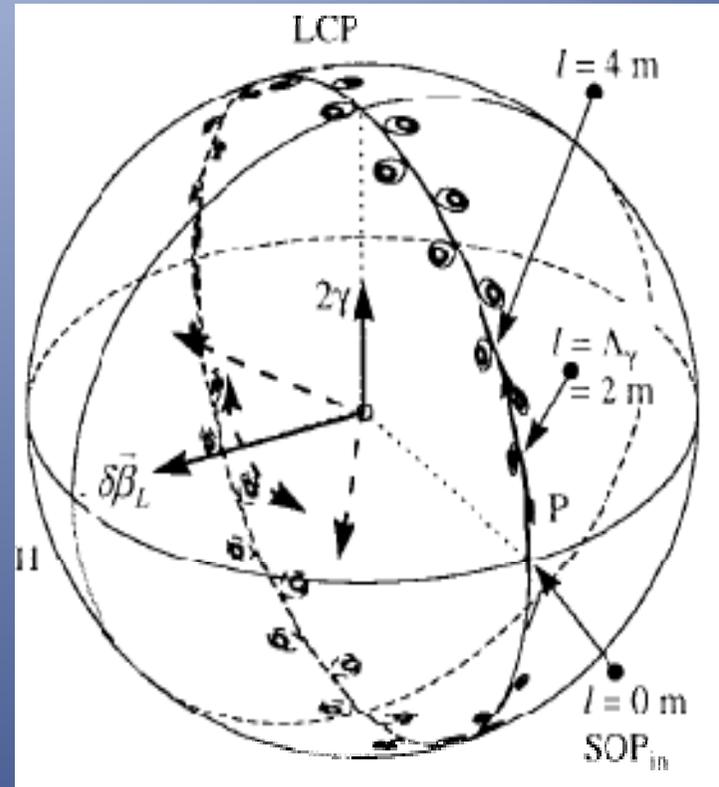
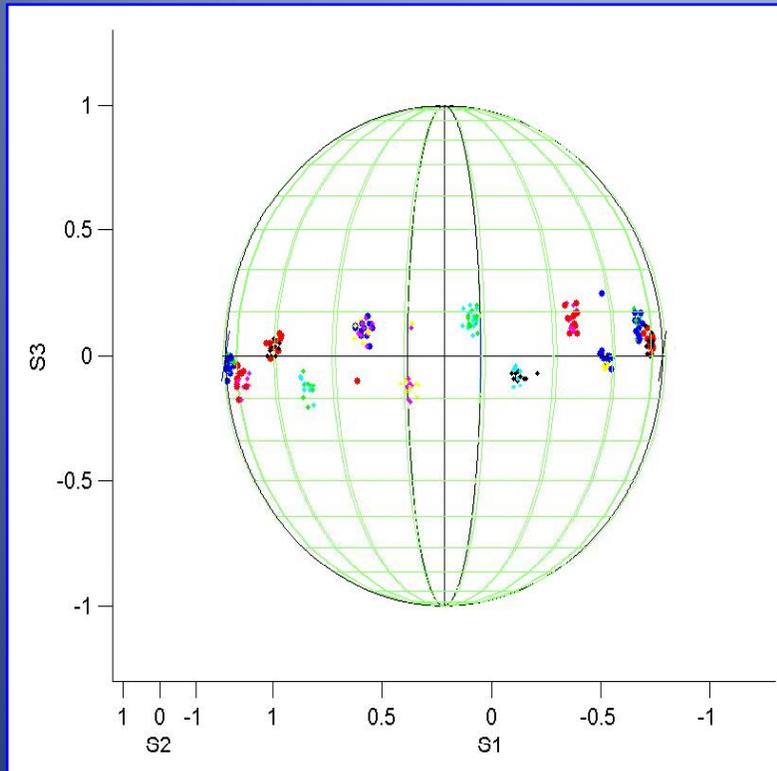
A. Gutiérrez-Beltrán y
D. Tentori
Proc. SPIE 6288 (2006)







Spun fiber, zero external twist



sinusoidal spin ~ 4.4 turns/m

Schuh *et al.*, J. Lightwave Technol. **16**, 1583 (1998)

Birrefringencia residual de fibras *monomodo*

- Las fibras perfectas no existen \Rightarrow las fibras monomodo son birrefringentes
- Ya que la anisotropía residual se induce durante el proceso de fabricación, los modos de polarización pueden variar a lo largo de la fibra
- Para tramos cortos de fibra puede suponerse que la birrefringencia residual es uniforme
- En este caso los eigenmodos de polarización pueden ser lineales, circulares o elípticos; que corresponden a una fibra con birrefringencia lineal, circular o elíptica

El retardo de las
fibras monomodo
es homogéneo



Matriz de un retardador elíptico

- Con ángulo azimutal cero

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos \delta \mp i \sin \sigma \sin \delta & \mp \cos \sigma \sin \delta \\ \pm \cos \sigma \sin \delta & \cos \delta \mp i \sin \sigma \sin \delta \end{pmatrix}$$

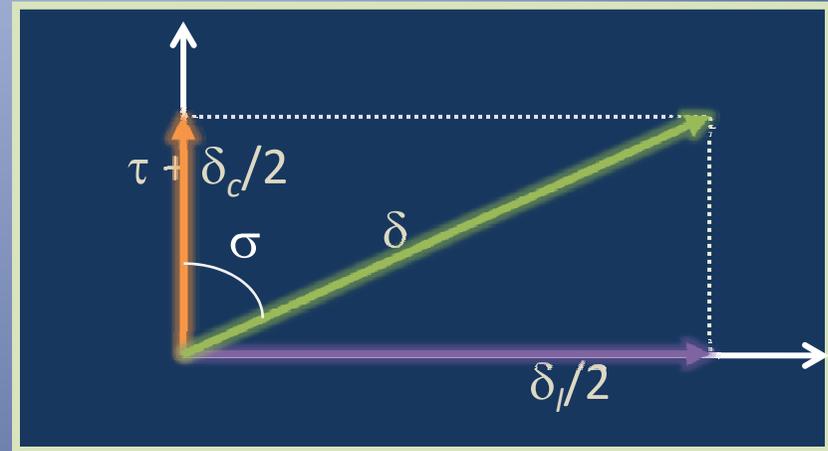
- En términos del retardo lineal ($\delta_l/2$) y el circular ($\tau + \delta_c/2$) el retardo total es:

$$\delta = \sqrt{(\delta_l/2)^2 + (\tau + \delta_c/2)^2}$$

Razón

birrefringencia lineal/birrefringencia circular

- $\delta_l/2$ = retardo lineal
- $\delta_c/2$ = retardo circular
- τ = torsión del eje rápido
- δ = retardo total



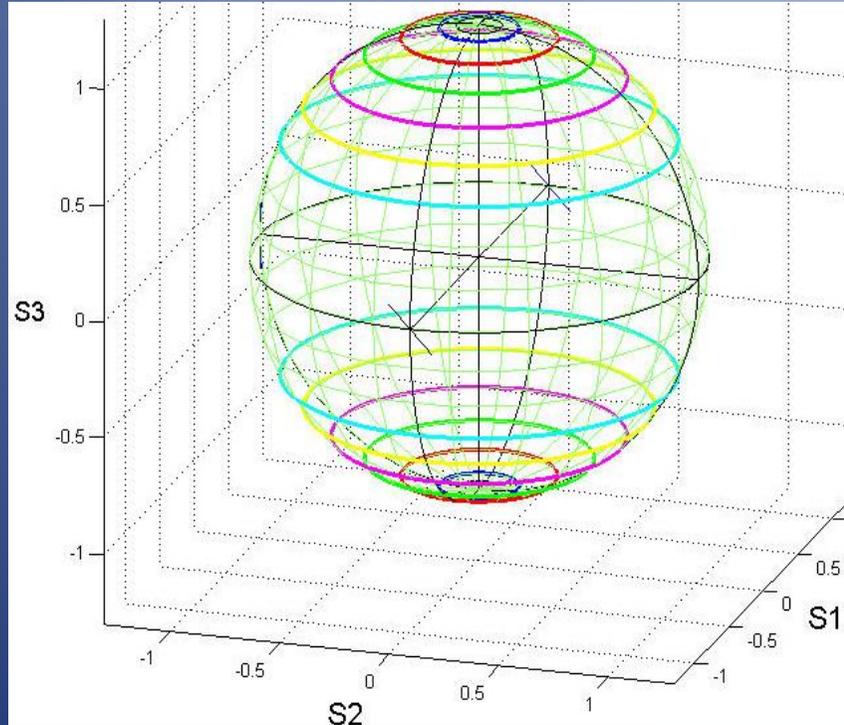
$$\delta = \sqrt{(\delta_l/2)^2 + (\tau + \delta_c/2)^2}$$

$$\sin \sigma = \delta_l / 2\delta$$

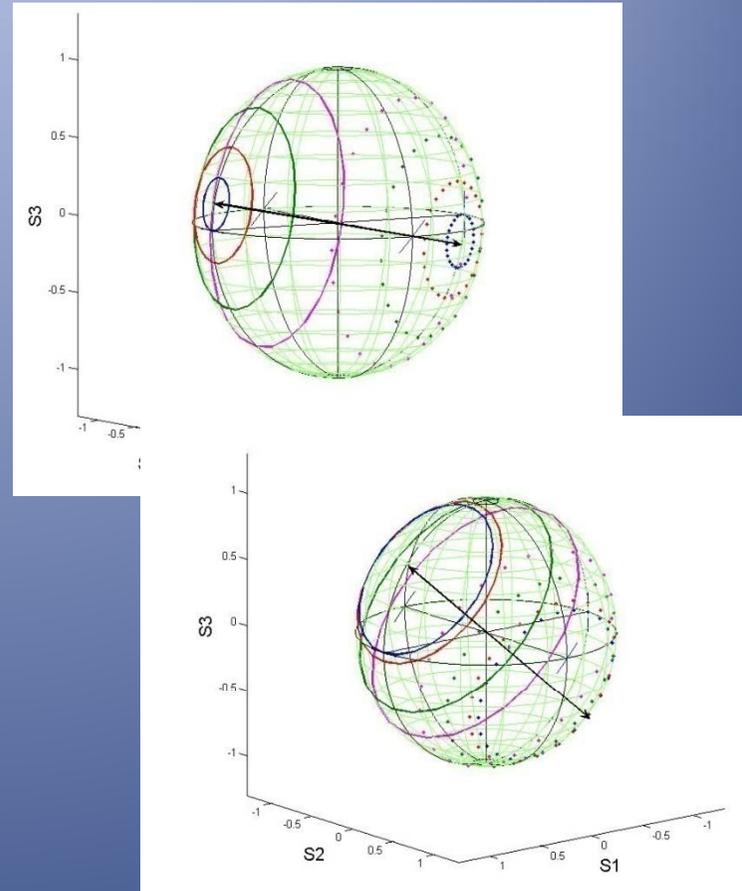
$$\cos \sigma = (\delta_c/2 + \tau) / \delta$$

$$\tan \sigma = \delta_l / (\delta_c + 2\tau)$$

Evolución de la polarización al torcer la fibra



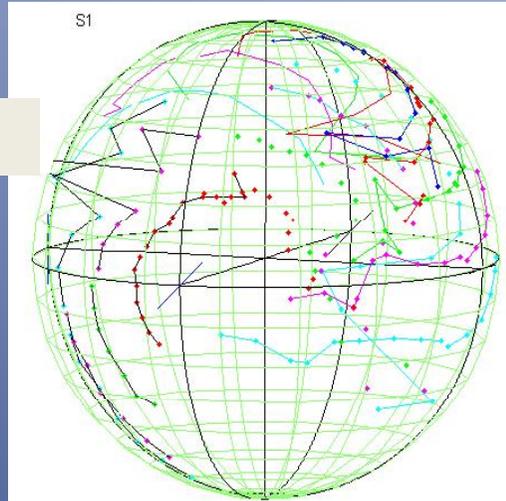
- retardador circular



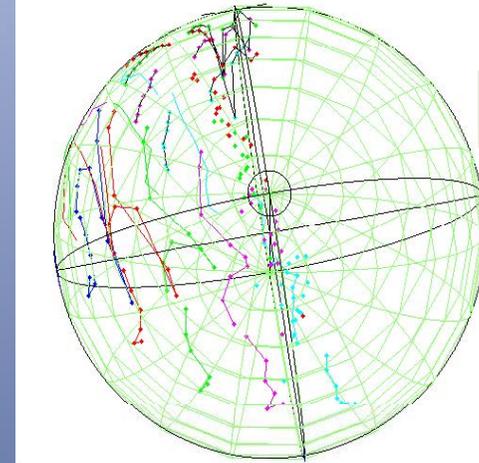
- retardador elíptico

fiber INO-402 K5: birrefringencia inducida por torsión

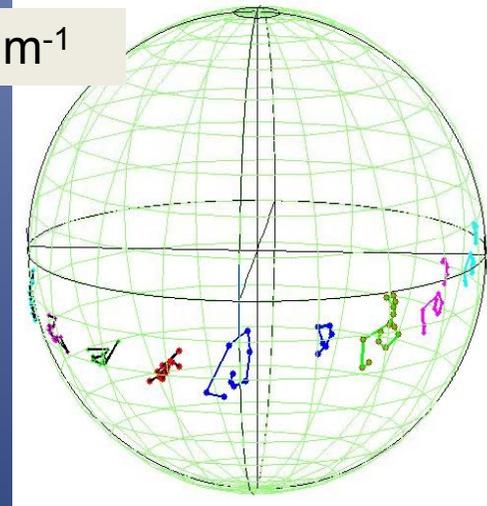
0.62 m⁻¹



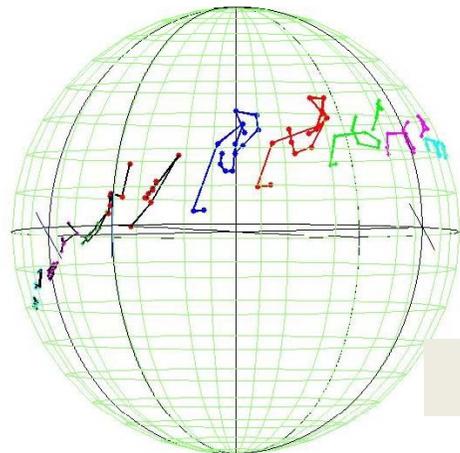
3.1 m⁻¹



9.3 m⁻¹



6.2 m⁻¹



Matrix model for a twisted medium: Liquid crystal cell

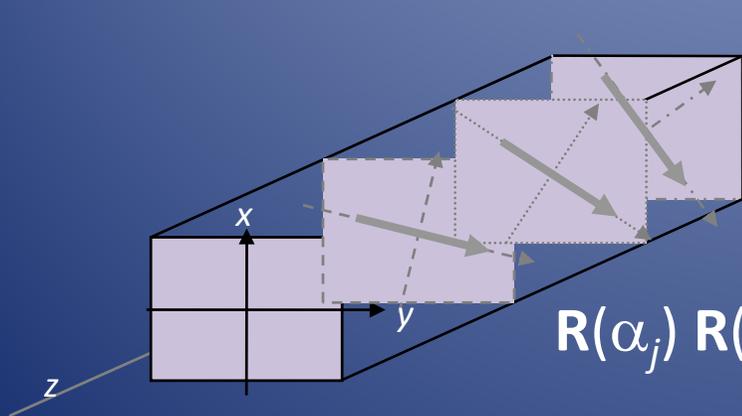
D. Tentori*^a, C. Ayala-Díaz^b, E. Ledezma-Sillas^a

^a Física Aplicada-CICESE, km 107 carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada BC, México 22860

^b Facultad de Ingeniería-UABC, km 103 carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada BC, México 22860

Liquid Crystals XII, edited by lam Choon Khoo, Proc. of SPIE Vol. 7050, 705016, (2008)
0277-786X/08/\$18 · doi: 10.1117/12.795282

Proc. of SPIE Vol. 7050 705016-1



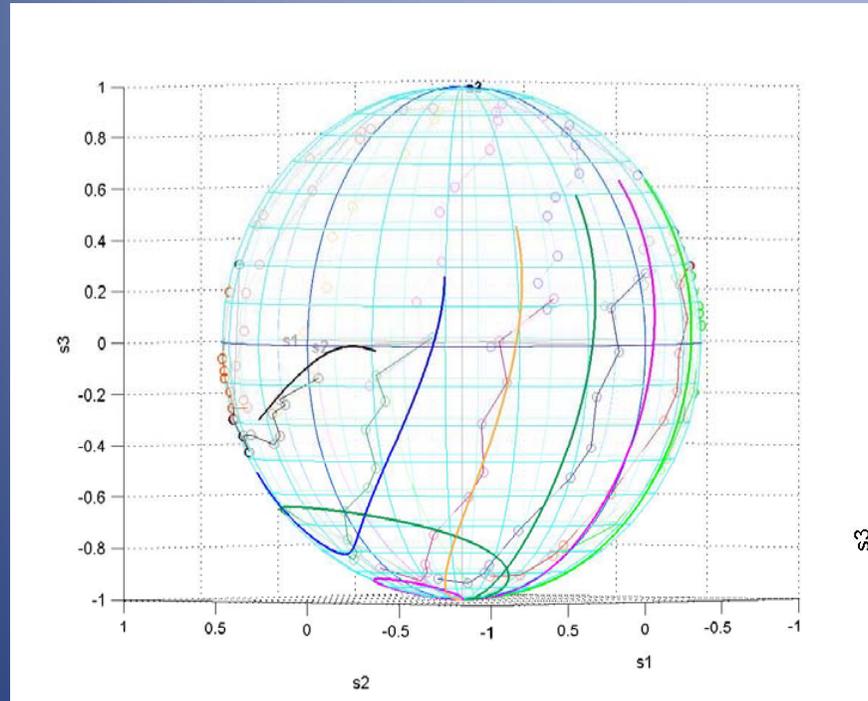
$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_N \cdot \mathbf{M}_{N-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_j \cdot \mathbf{M}_{j-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_1$$

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{R}(\alpha_j) \mathbf{M}(\Delta\phi) \mathbf{R}(-\alpha_j)$$

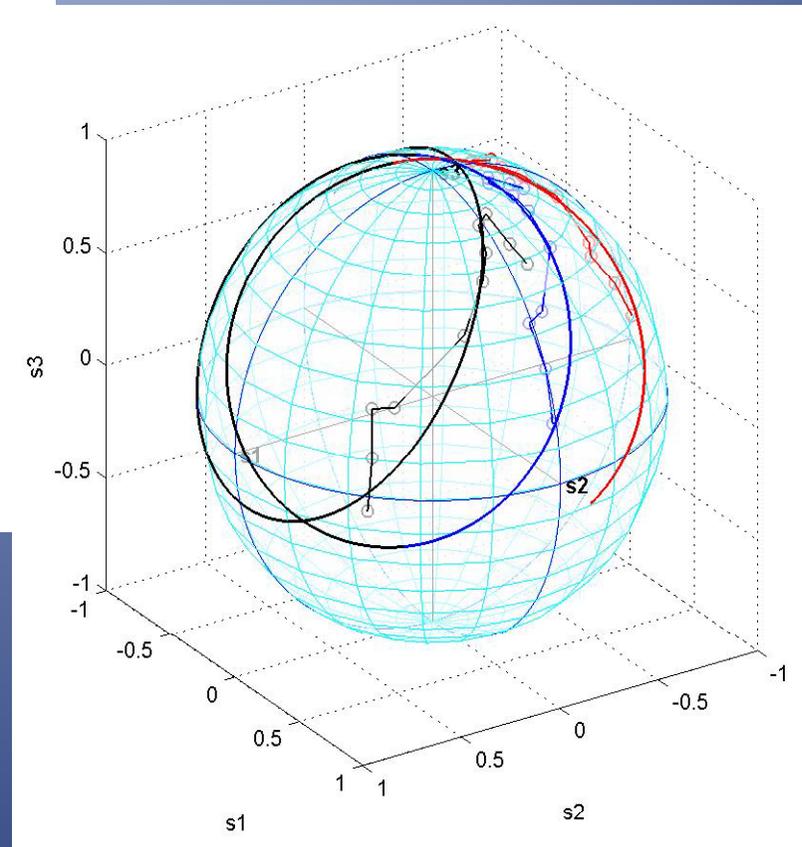
$$\mathbf{R}(\alpha_j) \mathbf{R}(-\alpha_{j-1}) = \mathbf{R}(\alpha_j) \mathbf{R}(-\alpha_j) \mathbf{R}(\Delta\alpha) = \mathbf{R}(\Delta\alpha) = \mathbf{1}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}(\alpha_d) \cdot \mathbf{M}(\phi_d)$$

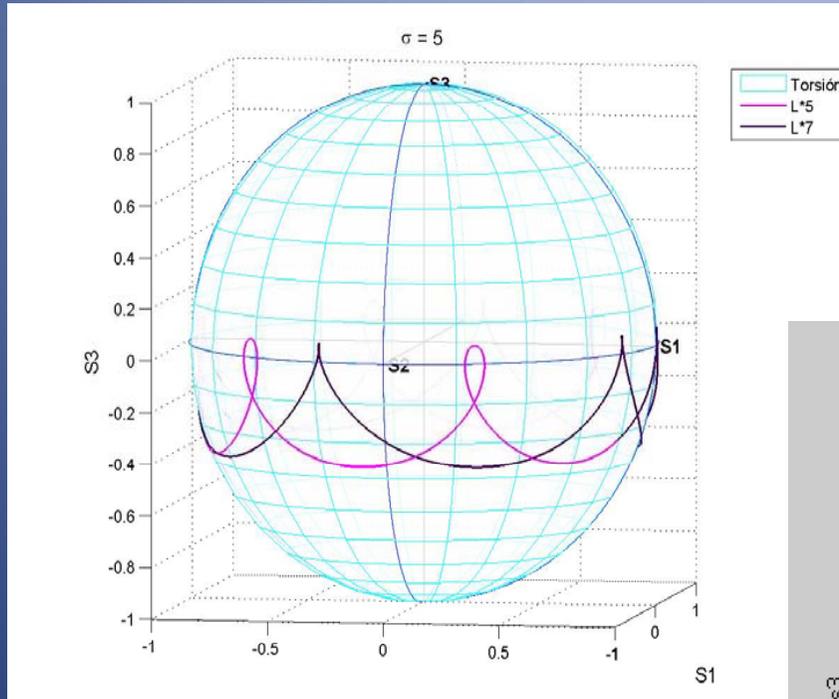
Teoría-experimento (3.9 rad/m)



fibra INO NOI

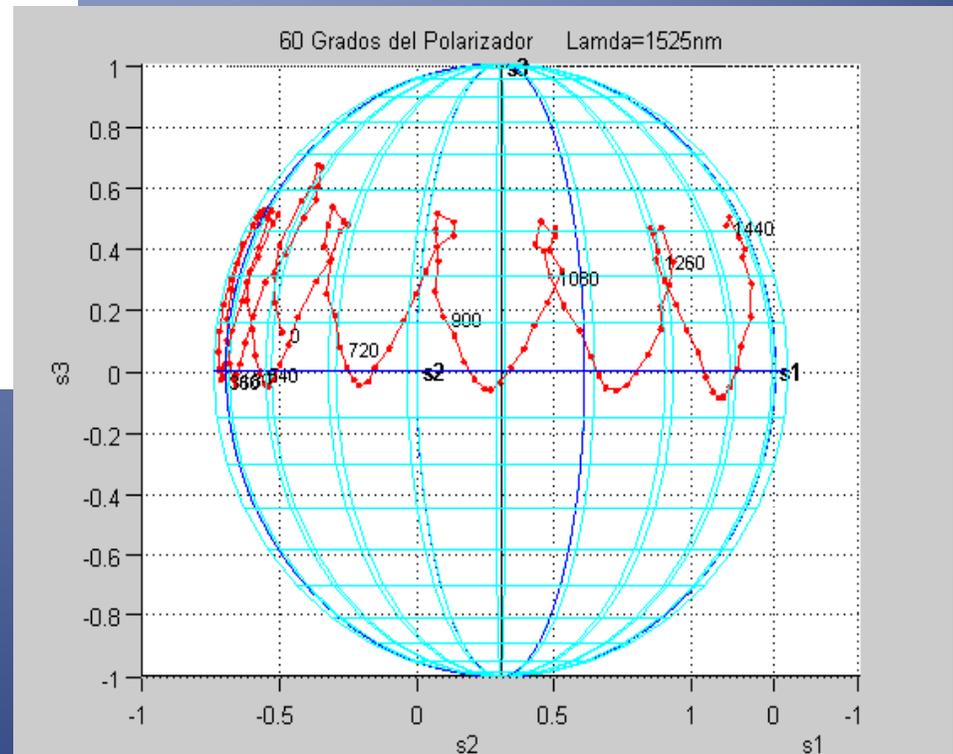


Retardo heterogéneo



- $M = R(\alpha_d) \cdot M(\phi_d)$

SMF-28 (51 cm)
 $\lambda = 1525 \text{ nm}$



El retardo de las
fibras monomodo
es lineal;
si están torcidas es
circular



CONCLUSIONES

- La elipticidad y la orientación del eje principal de los eigenmodos de polarización están determinadas por la anisotropía de la fibra, por lo que permiten caracterizar su birrefringencia.

CONCLUSIONES

- Estos modos propios son estados de polarización que permanecen invariantes al propagarse a lo largo de la fibra, por lo que una vez determinados es posible verificar la calidad de la evaluación realizada haciendo uso de dicha propiedad.

CONCLUSIONES

- Se demuestra experimentalmente que una fibra torcida es un elemento polarizador que se comporta como un **retardador heterogéneo**.

¡gracias!



Octubre 22, 23 y 24

Santiago de Querétaro, Qro., México

Diseminando la cultura de la medición en México