



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es



“Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos”

Módulo 2. Propagación en Fibras Ópticas

Autor: Carmen Vázquez García

Revisado: Pedro Contreras Lallana

Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF)

Dpto. de Tecnología Electrónica

Universidad CARLOS III de Madrid





- **M2. Propagación en Fibras Ópticas**
 - Introducción
 - Atenuación
 - Dispersión y Ensanchamiento del Pulso



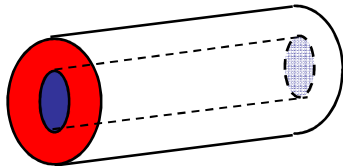
■ Ventajas

- ☺ Insensibilidad interferencias electromagnéticas
- ☺ Ligeras, robustas, flexibles, reducido tamaño
- ☺ Biocompatibles, seguras (no descargas eléctricas)
- ☺ Bajas pérdidas (según longitud de onda).
- ☺ Gran ancho de banda
- ☺ Compatibilidad sistemas de telemetría basados FO:
Monitorización remota directa y continua.

■ Inconvenientes

- ☹ Coste componentes asociados
- ☹ Manejo y conectorización

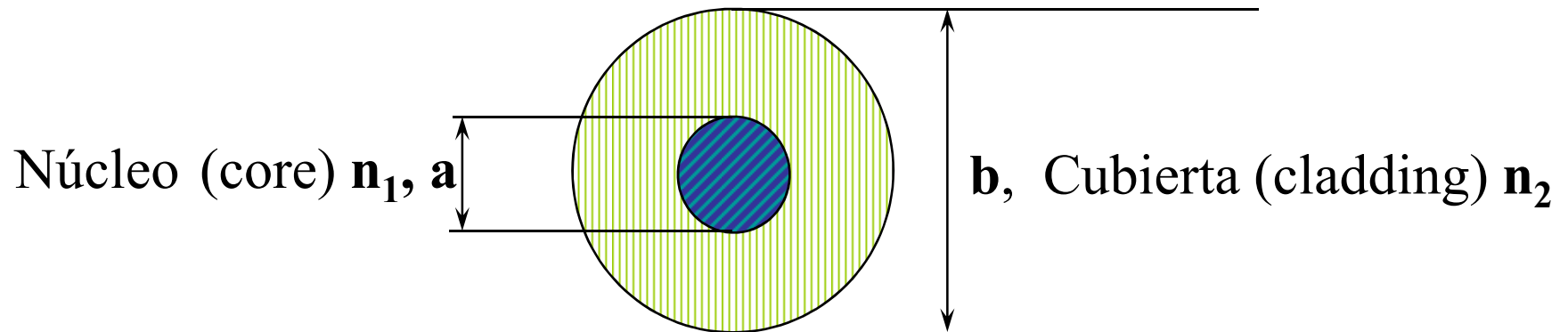
- Índice refracción medio: $n(\lambda)=c/v$
- 2 materiales



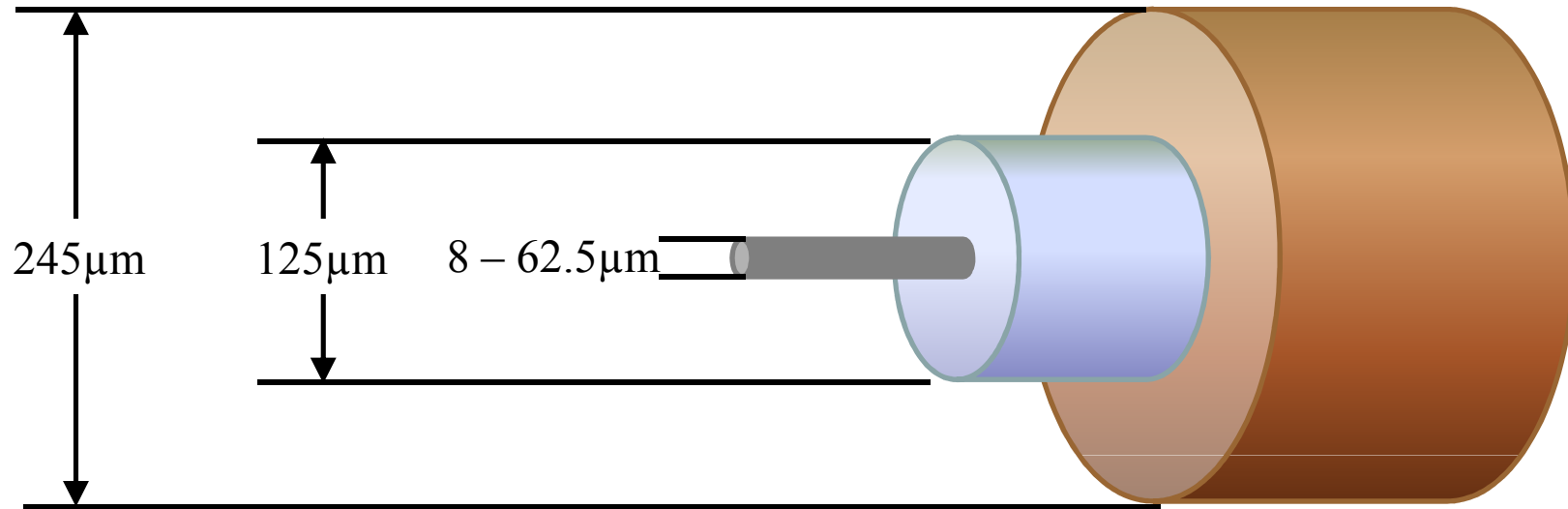
Índices
refracción distintos

$$n_{\text{núcleo}} > n_{\text{cubierta}}$$

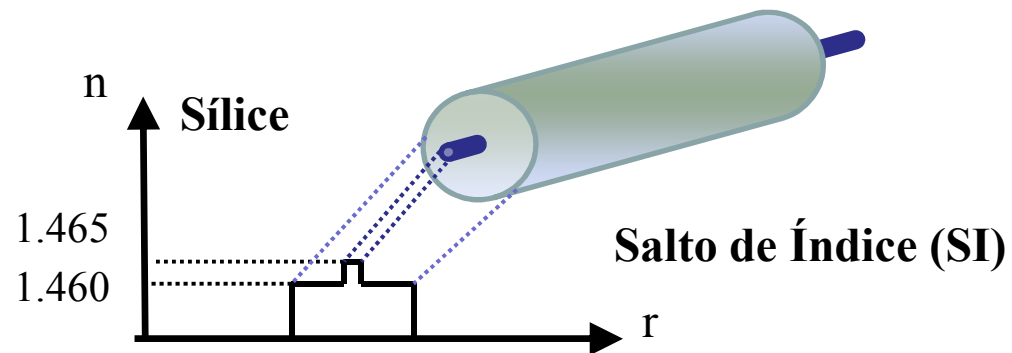
Sección transversal



M2. Introducción: Estructura física de una fibra óptica



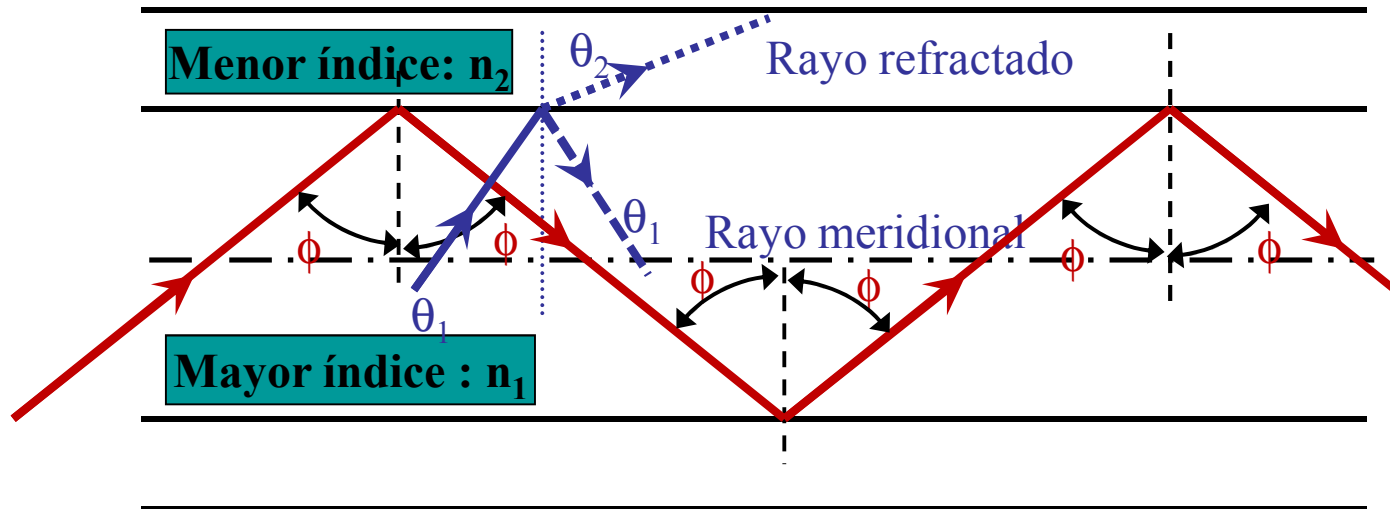
Diferencia índices pequeña



- ¿Cuál es su principio de funcionamiento?

Guiado de la luz en el núcleo.

- ✓ Descripción: **Teoría de rayos**. *Ley Snell*: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.
 $n_1 > n_2$ luego $\theta_2 > \theta_1$, si $\theta_2 = 90^\circ$, ángulo crítico: TODA LA LUZ
CONFINADA FIBRA. $\theta_c = \arcsen(n_2/n_1)$. Reflexión total interna
todo $\theta_1 > \theta_c$. SI. Multimodo.



- **Teoría de rayos.** ¿Qué luz se acopla a la entrada y da lugar a un modo guiado?

Ley de Snell: $n_0 \cdot \sin \Phi_m = n_1 \cdot \sin \Phi_1 = n_1 \cdot \cos \theta_1 = n_1 (1 - \sin^2 \theta_1)^{1/2}$

Si reflexión total núcleo-cubierta: $\sin \theta_1 = n_2/n_1$

luego:
$$\sin^2 \Phi_a = \frac{n_1^2}{n_0^2} \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \right)$$

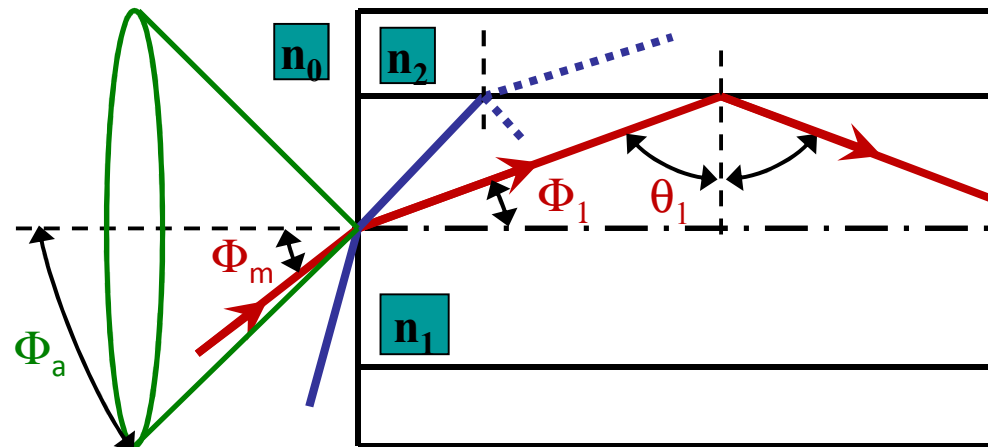
- **CONO ACEPTANCIA:** $2 \Phi_a$ (MÁXIMO). $\Phi_a > \Phi_m > 0$ (modo guiado).
- **APERTURA NUMÉRICA:**

$$AN = n_0 \sin \Phi_a = \sin \Phi_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2}$$

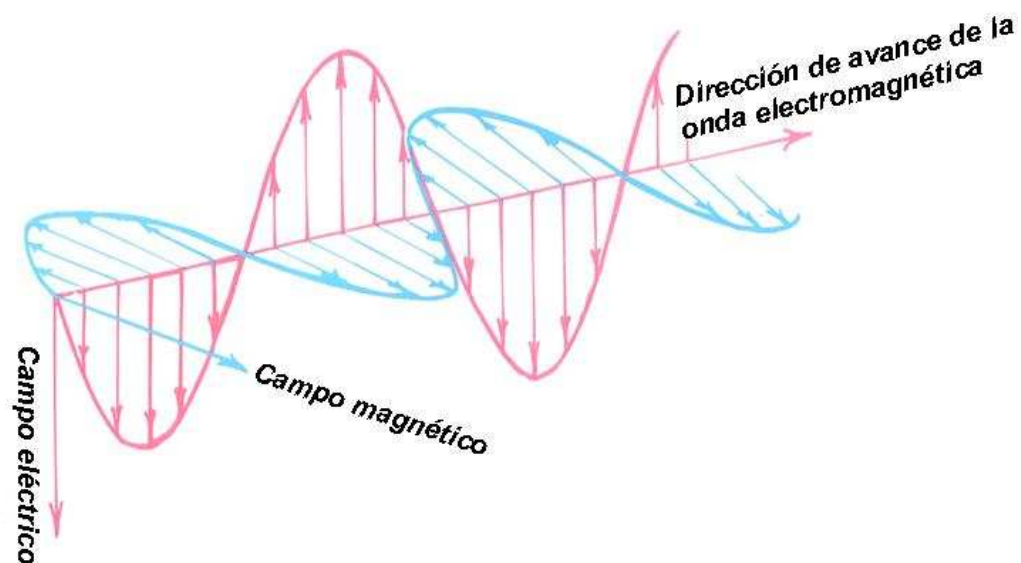
$$P = P_0 (AN)^2$$

$$BL < Cte / (AN)^2$$

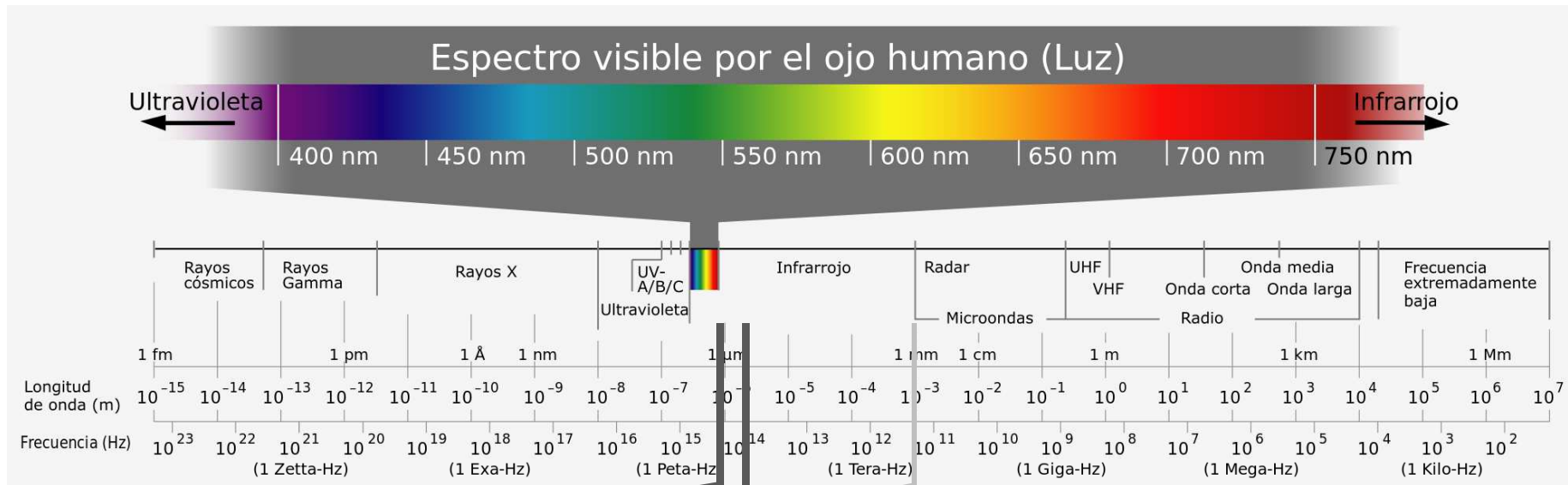
$$Tb = 1/B$$



- ¿Cuál es su principio de funcionamiento? *Guiado de la luz en el núcleo.*
- ✓ Descripción: **Teoría Electromagnética**. Modos guiados: “Tienen su energía confinada mayoritariamente en el núcleo de la fibra. La energía transportada en la cubierta es una función evanescente o fuertemente decreciente con la distancia al núcleo”.
- ✓ **Distribución campo:** resolución de las ecuaciones de Maxwell (coordenadas cilíndricas). Sol: *modos híbridos* HE_{lm} , EH_{ml} ; l =índice modal.



M2. Introducción: Espectro electromagnético



Nomenclatura	Comunicaciones	Milimé	SHF	UHF	VHF	HF	MF	LF	VLF	Au-
Nomenclatura	Ópticas	-tricas								dio
Medios de Transmisión	Fibras Ópticas	Guiaondas		Cable Coaxial			Par Trenzado			
Servicios	Telefonía Datos Video Enlaces Submarinos	Navegación Com. Satélite-Satélite Enlaces Microondas	Radar Tv UHF, Móviles Móviles, Aeronáutica FM, TV VHF Radio Móvil Negocios Radioafición Banda Civil	Aeronáutica Cables Submarinos Cables Submarinos Navegación Radio Transoceánica Telefonía, Telegrafía						

$$\lambda \cdot \nu = c = 299792,458 \text{m/s} \approx 30 \text{cm/ns} \text{ (1ft/ns)}$$

Dirección de avance de la onda electromagnética

z

Campo eléctrico

Campo magnético

λ

$$\nabla^2 E = n^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$E = E(r) \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z)}$$

Campo transversal estacionario

Propagación

Describe la luz: λ (longitud de onda), ν (frecuencia)

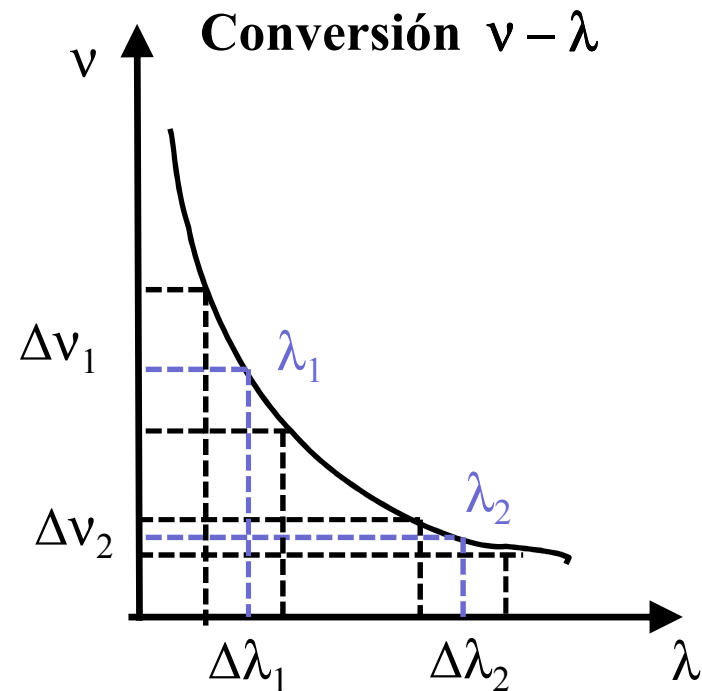
Ejemplo: 1550nm 200THz

Relación $\Delta\lambda$ (anchura espectral en longitud de onda) y $\Delta\nu$ (ancho banda en frecuencia óptica)

$$c = \lambda \nu;$$

$$\Delta\nu = -c / \lambda^2 \Delta\lambda = -\lambda^2 / c \Delta\nu$$

Una misma anchura espectral se corresponde con distintos anchos de banda en frecuencia Según la longitud de onda de la fuente de luz

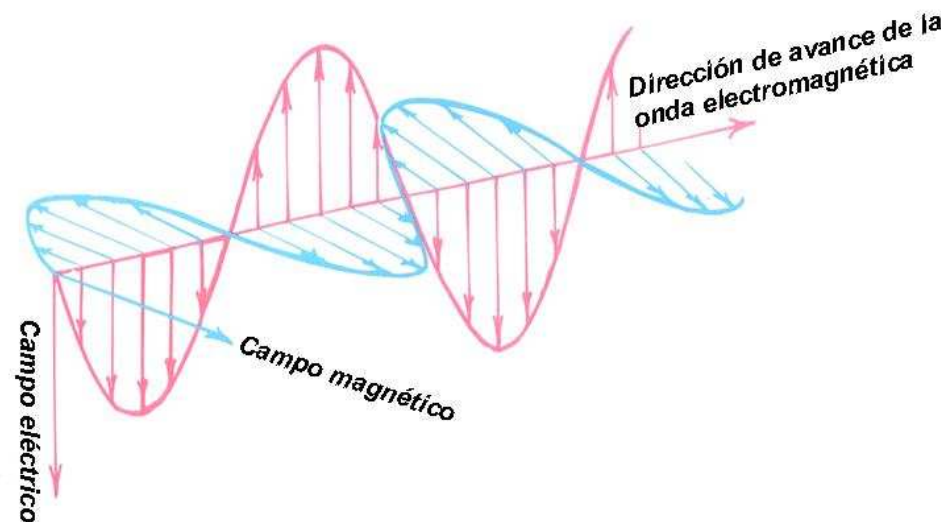


$$\nabla^2 E = n^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$E = E(r) \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z)}$$

Campo transversal
estacionario

Propagación



$\beta = 2\pi/\lambda$ (vacío), $\beta = 2\pi n(\lambda)/\lambda$ (medio índice refracción n)

β Constante de propagación,

b constante propagación normalizada (según los índices de refracción)

Las soluciones de la Eq. (1) que cumplen las condiciones de contorno de la FO son los modos guiados que se propagan en la fibra:

- se propaga sólo 1 modo, **FIBRA MONOMODO (SM)**,
- se propagan más modos, **FIBRA MULTIMODO (MM)**

FO guiondas dieléctricas

$$\nabla^2 E = n^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$E = E(r) \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z)}$$

Campo transversal
estacionario

Propagación

$$\lambda_1 > 2 \cdot d_{\text{núcleo}}$$

$$\lambda_2 > d_{\text{núcleo}}$$

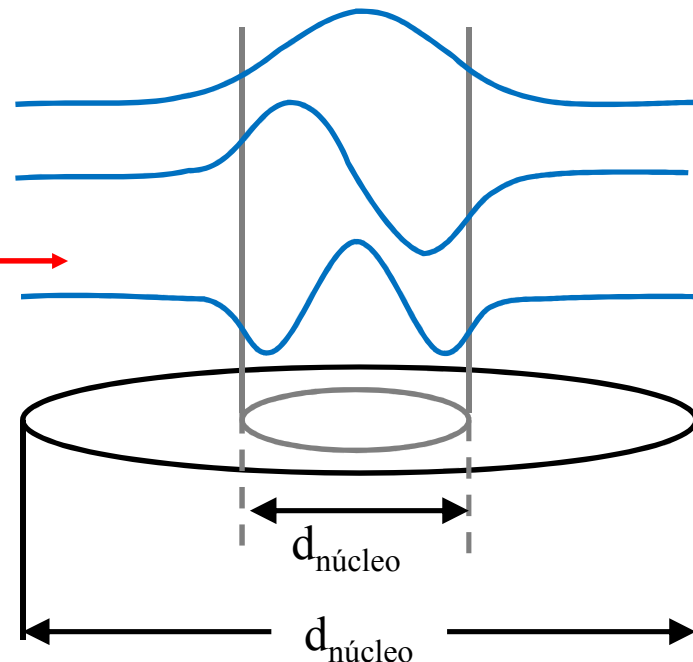
$$\lambda_1 > 2 \cdot d_{\text{núcleo}} / 3$$

Condiciones de contorno:
decaimiento suave de E (soluciones de 1)
en las interfaces

Longitud de onda de corte: acota las longitudes de onda para que la fibra sea **MONOMODO**, $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$.

Ejemplo: $\lambda_1 = 1.55 \mu\text{m}$ $d_{\text{núcleo}} \sim 10 \mu\text{m}$

Formalmente parámetro V



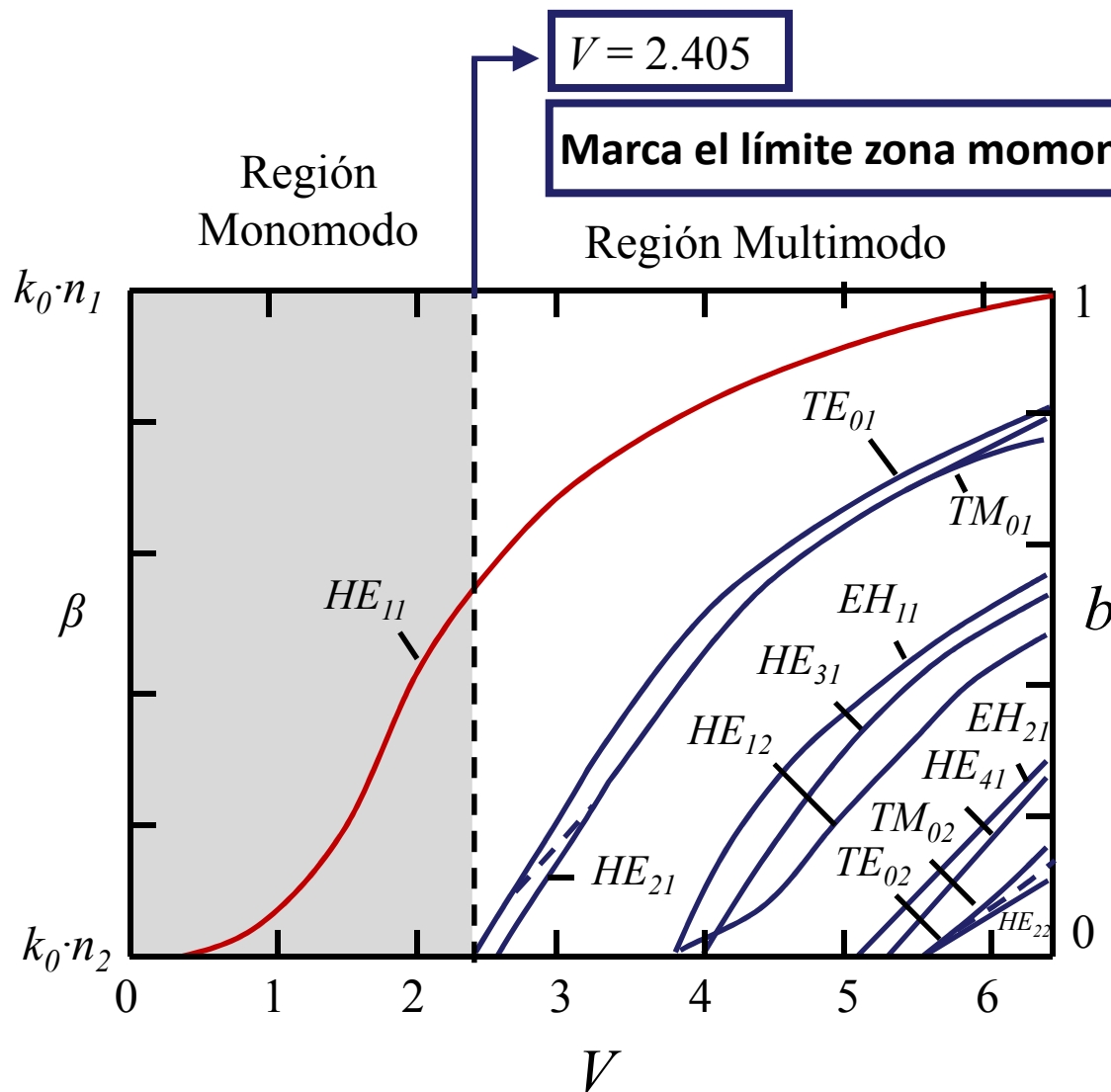


■ ¿Cuál es su principio de funcionamiento?

Guiado de la luz en el núcleo.

- ✓ Descripción: **Teoría Electromagnética**. Modos guiados: “Tienen su energía confinada mayoritariamente en el núcleo de la fibra. La energía transportada en la cubierta es una función evanescente o fuertemente decreciente con la distancia al núcleo”.
- ✓ **Distribución campo**: resolución de las ecuaciones de Maxwell (coordenadas cilíndricas), campos monocromáticos. Sol: **modos híbridos** HE_{lm} , EH_{ml} ; l =índice modal.
- ✓ **Parámetros de interés a partir de la resolución de las ecuaciones: V , b .**
 $V=f(\lambda, \text{geometría})$. FRECUENCIA NORMALIZADA o número V , adimensional.
- ✓ “Establece el valor de frecuencia ó λ que se debe alcanzar para que un cierto modo se propage, es decir, deje de estar al **corte**”.
- ✓ “Cerca de la condición de corte, la mayor parte de la energía se propaga por la cubierta, se habla de modos poco **confinados**”.
- ✓ **b** , cada modo tiene una constante de propagación determinada β_{lm} . b es la **CONSTANTE DE PROPAGACIÓN NORMALIZADA**.

Curva de b frente a V para los modos que se propagan fibra SI.



$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$b = \frac{(\beta / k_0) - n_2}{n_1 - n_2}$$

Ejemplo:

Fibra

$a = 5 \mu\text{m}$ (radio core)

$n_1 = 1.448$,

$n_2 = 1.445$

Monomodo para $\lambda > 1.22 \mu\text{m}$

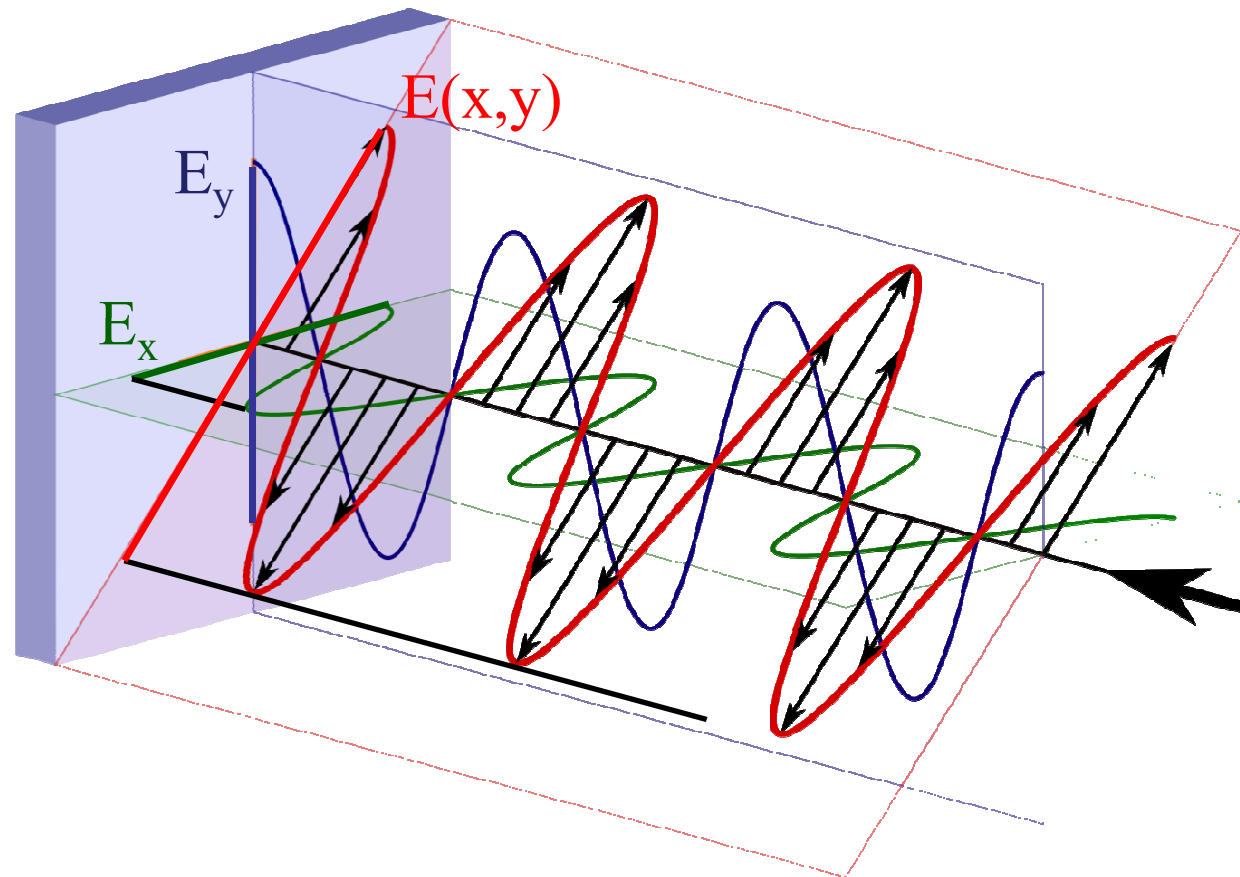


- **Índice refracción en el núcleo varía:**

$$n(r) = \begin{cases} n_1[1-2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2} \approx n_1[1-\Delta(r/a)^\alpha] & r < a \\ n_1[1-2\Delta]^{1/2} \approx n_1[1-\Delta] = n_2 & r \geq a \end{cases}$$

- **Mejora ancho de banda**, óptimas: $\alpha \approx 2$. Tipo parabólico. (triangular).
- **M** $\approx (\alpha/2 + \alpha)V^2/2 = V^2/4$ con $\alpha=2$. Estimación nº modos
- **Vc** $= 2.405(1+2/\alpha)^{1/2} = 3.4012$ con $\alpha=2$. Carácter monomodo

El campo eléctrico es la suma de sus dos componentes



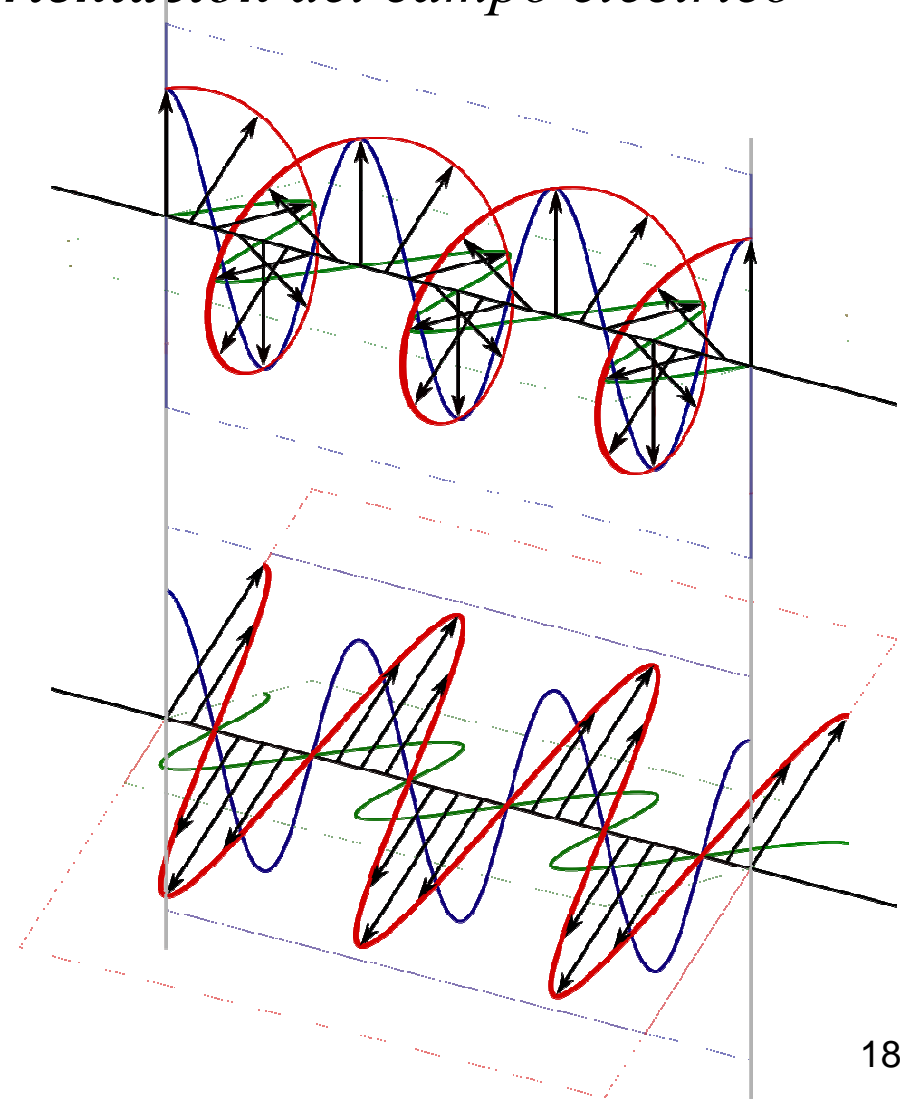
Polarización describe la orientación del campo eléctrico

Polarización circular.

La proyección E es una circunferencia

Polarización lineal.

La proyección del campo es una recta





- Las fibras monomodo convencionales **soportan dos modos simultáneamente** que se corresponden a las dos polarizaciones ortogonales del mismo modo.
- En una fibra ideal las dos polarizaciones se propagarían a la misma velocidad de fase pero en la realidad cualquier asimetría, curvatura o torsión hace que las dos polarizaciones se propaguen a diferente velocidad.
- La capacidad de una fibra para mantener la polarización se mide en términos de la longitud de pulsación **L_p** que se define:

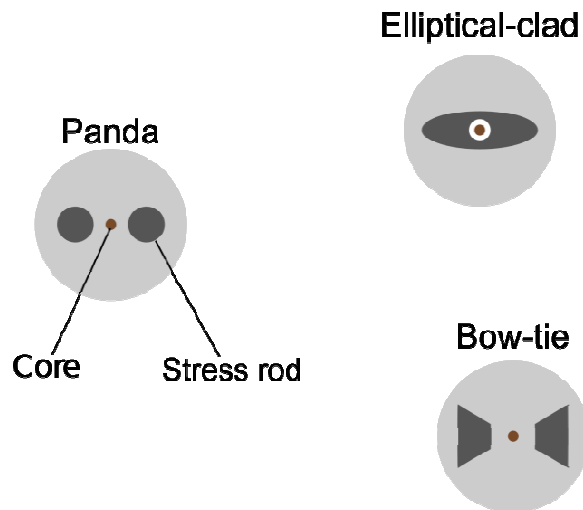
$$L_p = \frac{2\pi}{\beta_x - \beta_y} = \frac{\lambda}{B}, \quad \text{con } B = |n_x - n_y|$$

- **B** birrefringencia de la fibra
- Físicamente, **L_p** representa la distancia durante la cual la diferencia de fase de los dos modos se hace 2π . Esto significa que el estado de polarización **se repetirá** cada L_p .

■ Fibras alta birrefringencia:

Si la luz se acopla a uno de los modos de polarización **únicamente**, la luz se propaga y se mantiene en ese estado de polarización a lo largo de la fibra.

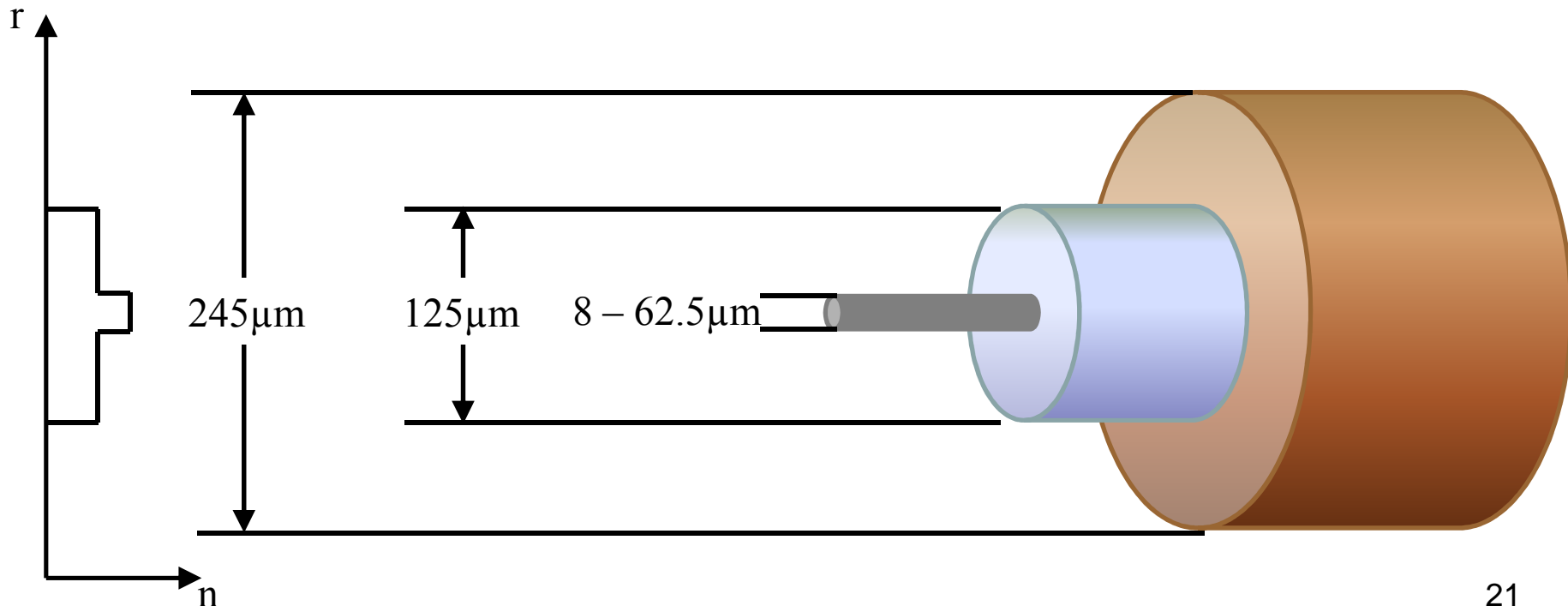
Tipo **PANDA**: se introducen zonas alto dopaje (afecta al índice de refracción a ambos lados del núcleo)



Tipo	Birrefringencia ($\times 10^{-4}$)	Pérdidas (dB/km)	Long. Onda (μm)
Núcleo Elíptico	4.0	2.5	1.3
Bow Tie	4.8	<1	1.55
Panda	3.15	0.22	1.55

Parámetros geométricos fibras ópticas

- Dimensiones de los cilindros concéntricos del núcleo y la cubierta según los materiales, λ operación: N° modos propagan
- Multimodo: 50 μm a 1mm- Monomodo: 4 a 9 μm (núcleo).
- Nomenclatura: 62.5/125 μm ; diámetro núcleo/cubierta

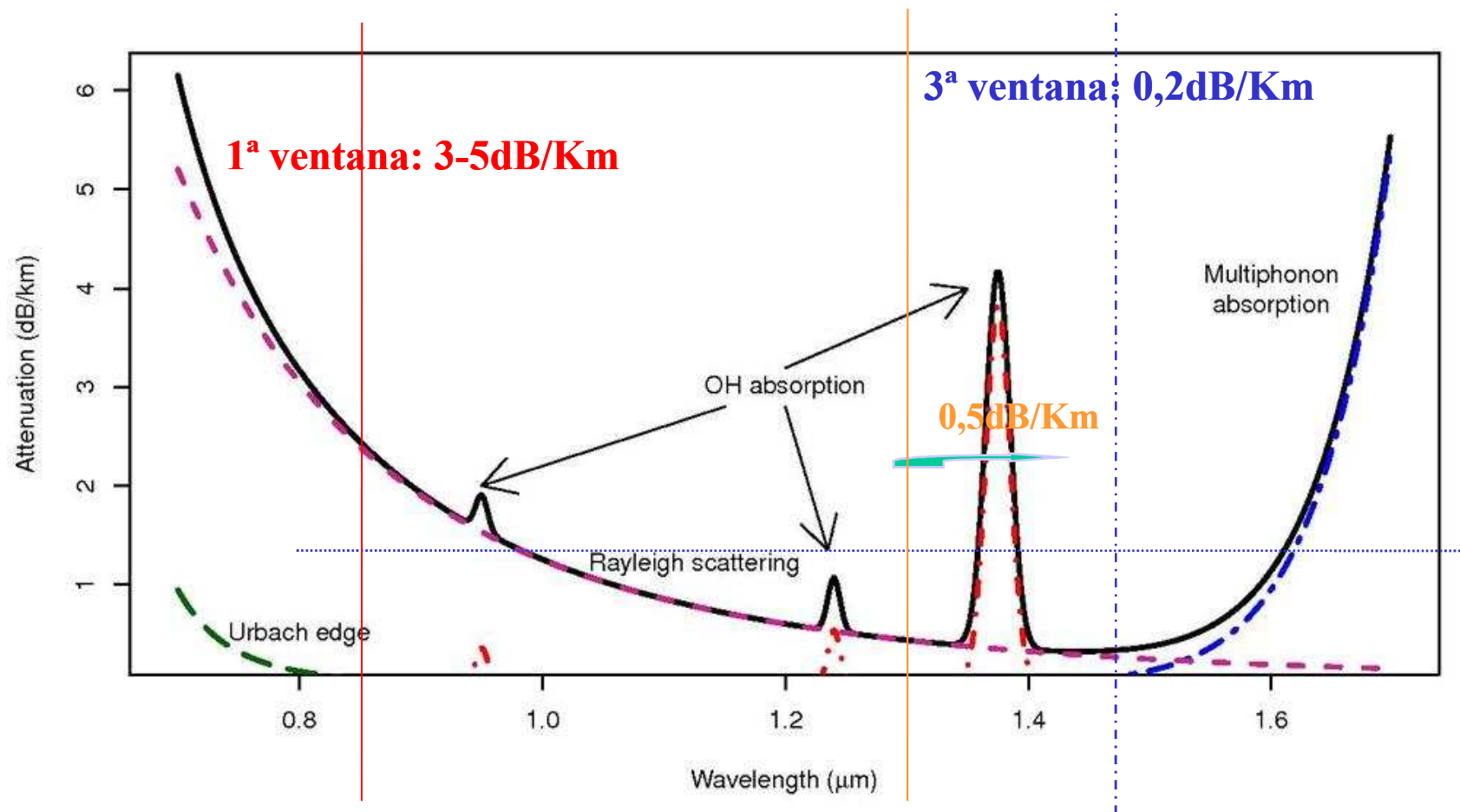




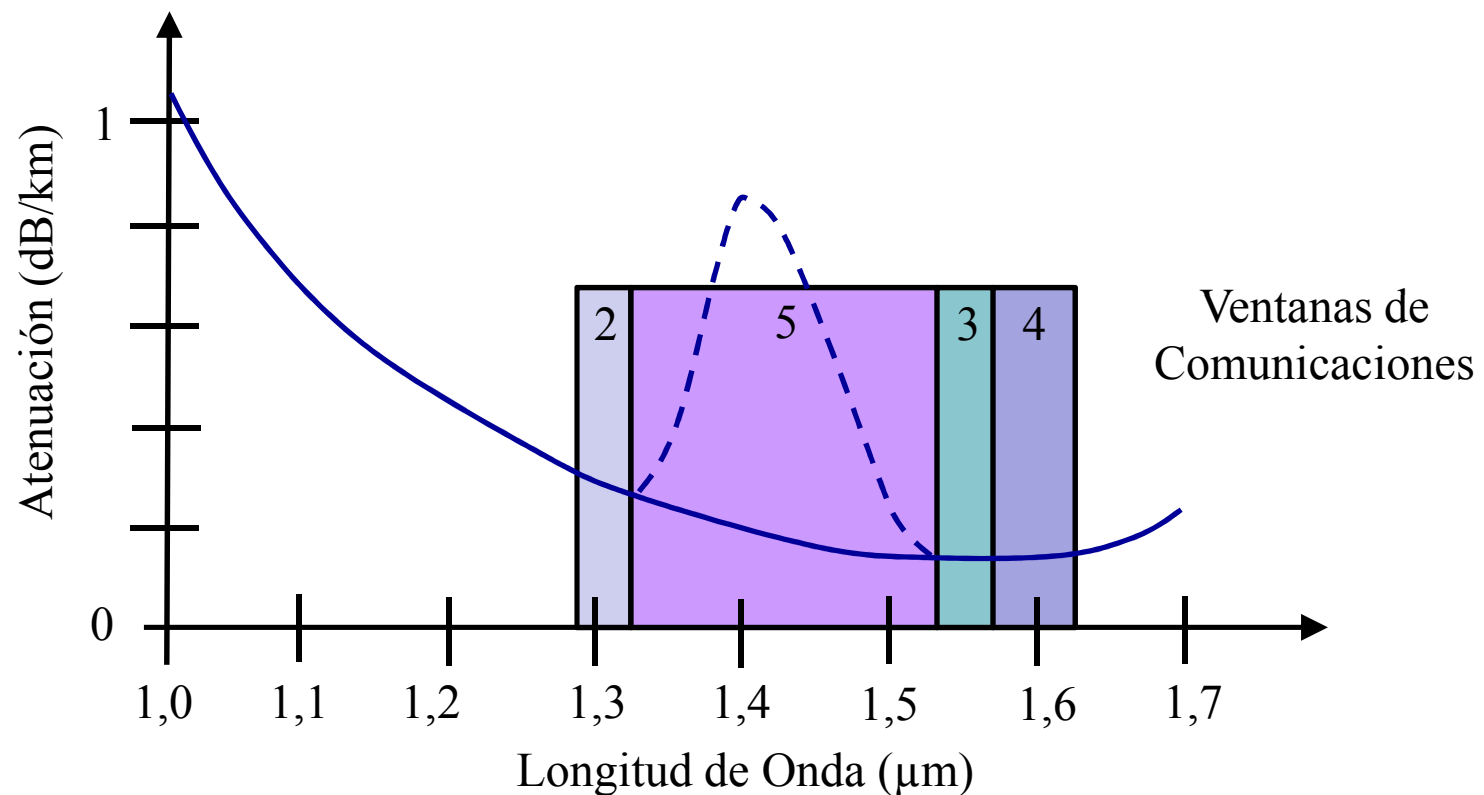
- **Parámetros como medio transmisión**
- **Atenuación.** $A = -10 \log(P_{out}/P_{in})$. dB/Km ó dB/m
 - Depende de λ , materiales.
Da nombre a las ventanas comunicaciones
- **Distorsión.** Ensanchamiento temporal experimentado pulso
 - Depende λ , materiales, distancia, fuente de luz.
 - Unidades: MHz x Km, GHz x Km x nm, otros



- “La atenuación es el mecanismo responsable de la **pérdida de potencia** de la señal óptica al propagarse por la fibra óptica”.
- Se trabaja **PERDIDAS TOTALES**, que se obtienen al comparar el nivel de potencia óptica en 2 puntos de la FO. Medible enlace comunicaciones.
- Unidades: **α (dB/Km) = $-10/L(\log_{10}(P_s/P_e))$**
- Ejemplo: $L=8$ Km, $P_e=120\mu W$, $P_s=3\mu W$ ¿ α ?
Atenuación: $-10 \log_{10}(P_s/P_e) = 16$ dB
 α (dB/Km) = $16\text{dB}/8\text{Km} = 0.2\text{dB/Km}$



fibra: AllWave™ (LUCENT Technologies) se ha eliminado el pico de absorción debido al radical -OH a 1385nm. 500 nuevos canales equiespaciados 100GHz (MAN)

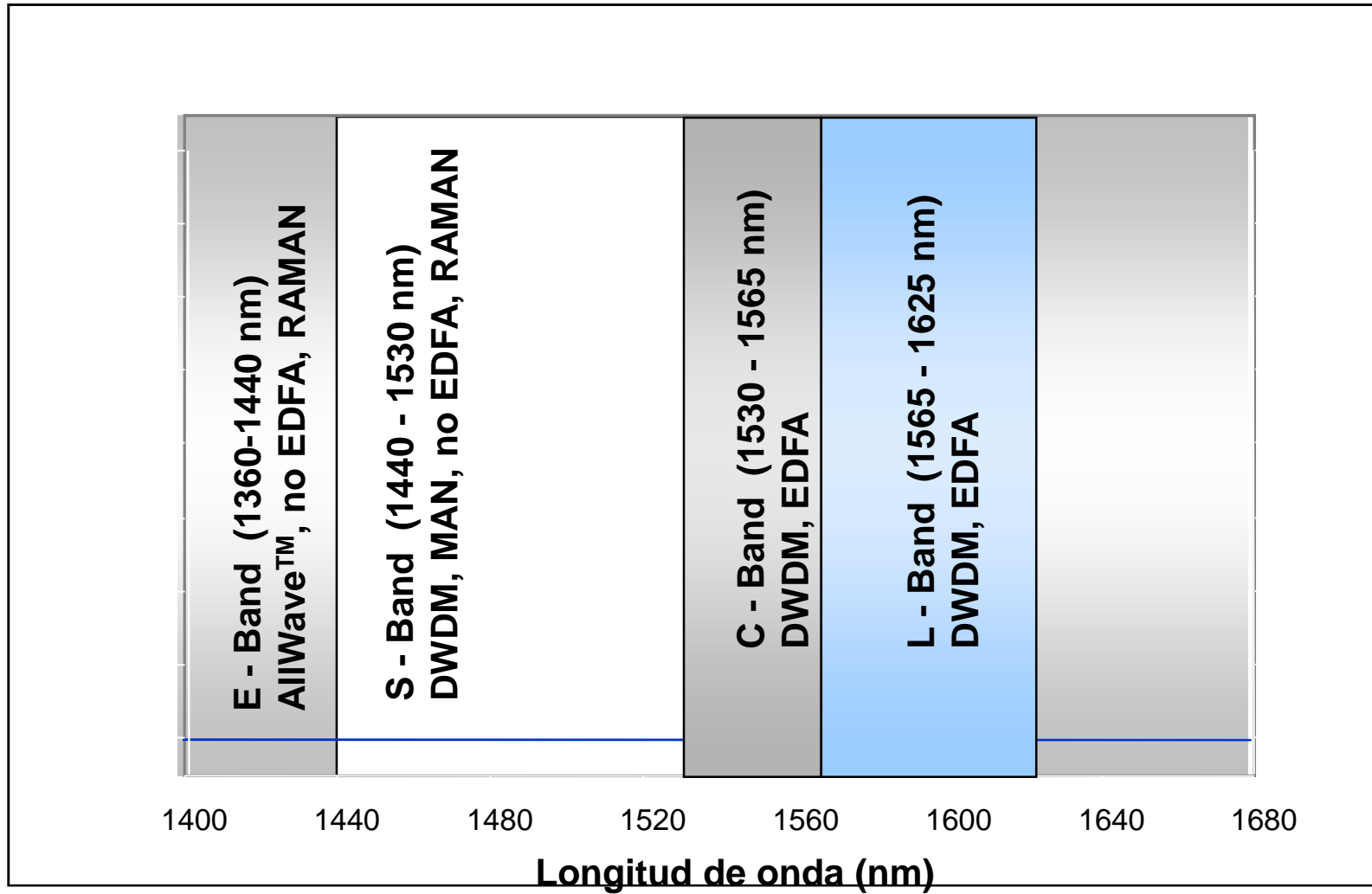




ITU-T G.652 : $\alpha < 0.5 \text{ dB/Km}$ @1300nm, $< 0.4 \text{ dB/Km}$ @1500nm

Banda	Descriptor	Rango (nm)
O	Original	1.260 - 1360
E	Extended	1.360 – 1.460
S	Short Wavelength	1.460 – 1.530
C	Conventional	1.530 – 1.565
L	Long Wavelength	1.565 – 1.625
U	Ultra-long Wavelength	1.625 – 1.675

Cristal ordinario: 1 dB/cm (grosor)



Intrínsecos (Naturaleza del material inevitables)

- **Absorción ultravioleta.** Despreciables por encima 1 μm

- **Absorción infrarroja,** crecen con λ .

- **Scattering Rayleigh. En todas direcciones. (OTDR).**

Transferencia de potencia de un modo guiado a otro, generalmente radiado.
Disminuyen con λ . Efecto que domina en las ventanas de comunicaciones.

$\gamma_R(\lambda) = A/\lambda^4$, $\alpha_R = 10 \log(\exp(\gamma_R L))$, fibra sílice: 0.3dB/Km @1.3 μm

Scattering Brioullin estimulado (SBS). No lineal, presente a $P > P_{lim}$:

$P_B = 4,4 \cdot 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} \nu$ (**w**); d diámetro FO λ (μ); ν BW láser (GHz).

Ej: FO M @ 1.3 μ ; $\alpha = 0.5$ dB/Km, d=6 μm , $\nu = 600$ MHz \Rightarrow **80.3 mw**.

- **Scattering Raman estimulado (SRS).** No lineal, presente a P altas:

$P_R = 5,9 \cdot 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB}$; Ej: **1.38 w**



Extrínsecos (Aspectos externos controlables)

- Presencia de impurezas.

- **Pérdidas por curvaturas:**

- microscópicas (radio curvatura, R, orden del diámetro fibra, d, reducen adecuado revestimiento fibra)

- macroscópicas (R mucho mayor que d):

- Radio Crítico: **MM límite:**
$$R_c|_{MM} (\mu m) \approx \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda (\mu m)}{4 \cdot \pi \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

Ej: $n_1=1.5$ $\Delta=3\%$ $\lambda=0.82\mu m \Rightarrow R=9\mu m$.

- SM límite:**

$$R_c|_{SM} (\mu m) \approx 20 \cdot \lambda (\mu m) \cdot \frac{\left(2.748 - 0.996 \cdot \frac{\lambda (\mu m)}{\lambda_c (\mu m)}\right)^{-3}}{(n_1 - n_2)^{3/2}}$$

Ej: $d=8\mu m$, $n_1=1.5$ $\Delta=3\%$ $\lambda=1.55\mu m \Rightarrow R=34 \text{ mm}$

grandes pérdidas si $R < R_c$. R_c menor λ cortas y Δ grande.

“Evitar instalación radios curvatura próximos a R_c o menores”



- **Independencia de la atenuación con la frecuencia.**

¿Antes?

Referencia a la **frecuencia de la señal eléctrica** que modula a la portadora óptica. Ej: $\lambda=1.55\mu\text{m}$, ancho banda de información de $20\text{GHz}=0.16\text{nm}$, punto gráfica anterior.

- **Comparación con otros medios de transmisión metálicos en lo que respecta a atenuación:**

“Tanto en pares trenzados como en cables coaxiales hay una dependencia de las pérdidas con la frecuencia”.



Método diferencial o cut-back=RTM, Reference Test Method (propuesto EIA , CCITT).

¿En qué consiste?. Medida de la Potencia a la salida FO para distintas longitudes manteniendo las **mismas condiciones de inyección de luz**.

“MM depende fuertemente condiciones inyección, evitarlo uso MODE SCRAMBLING permita obtener perfil modal estable, al eliminar los modos no guiados”.

$$L_1 \Rightarrow P_{s1}, \text{ luego } P_{s1} = e^{-\alpha L_1} P_e; L_2 \Rightarrow P_{s2}; P_{s2} = e^{-\alpha L_2} P_e.$$

Luego:

$$\alpha_{dB} = 10 / (L_1 - L_2) * \log_{10} P_{s2} / P_{s1}$$

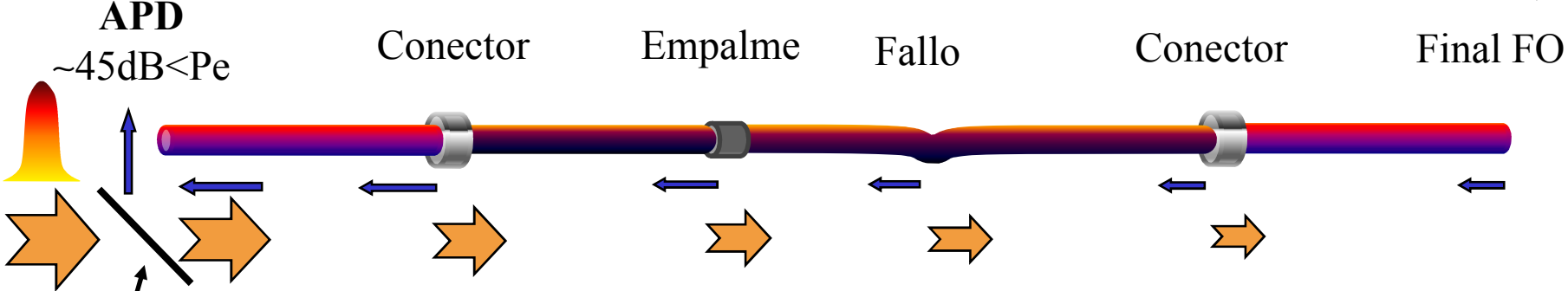
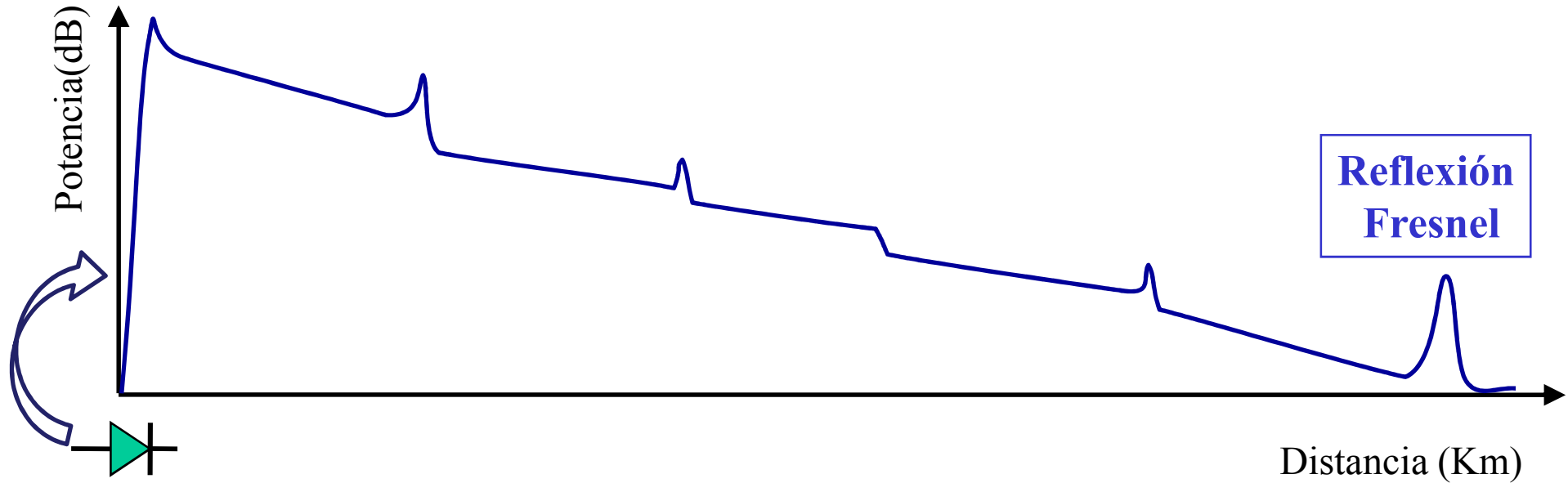
Se trata de un **método destructivo**.

OTDR=Optical Time Domain Reflectometry.

No medida de la α promedio

detecta fallos en la línea

no destructivo



Procedimiento: Pulso luz inyecta FO

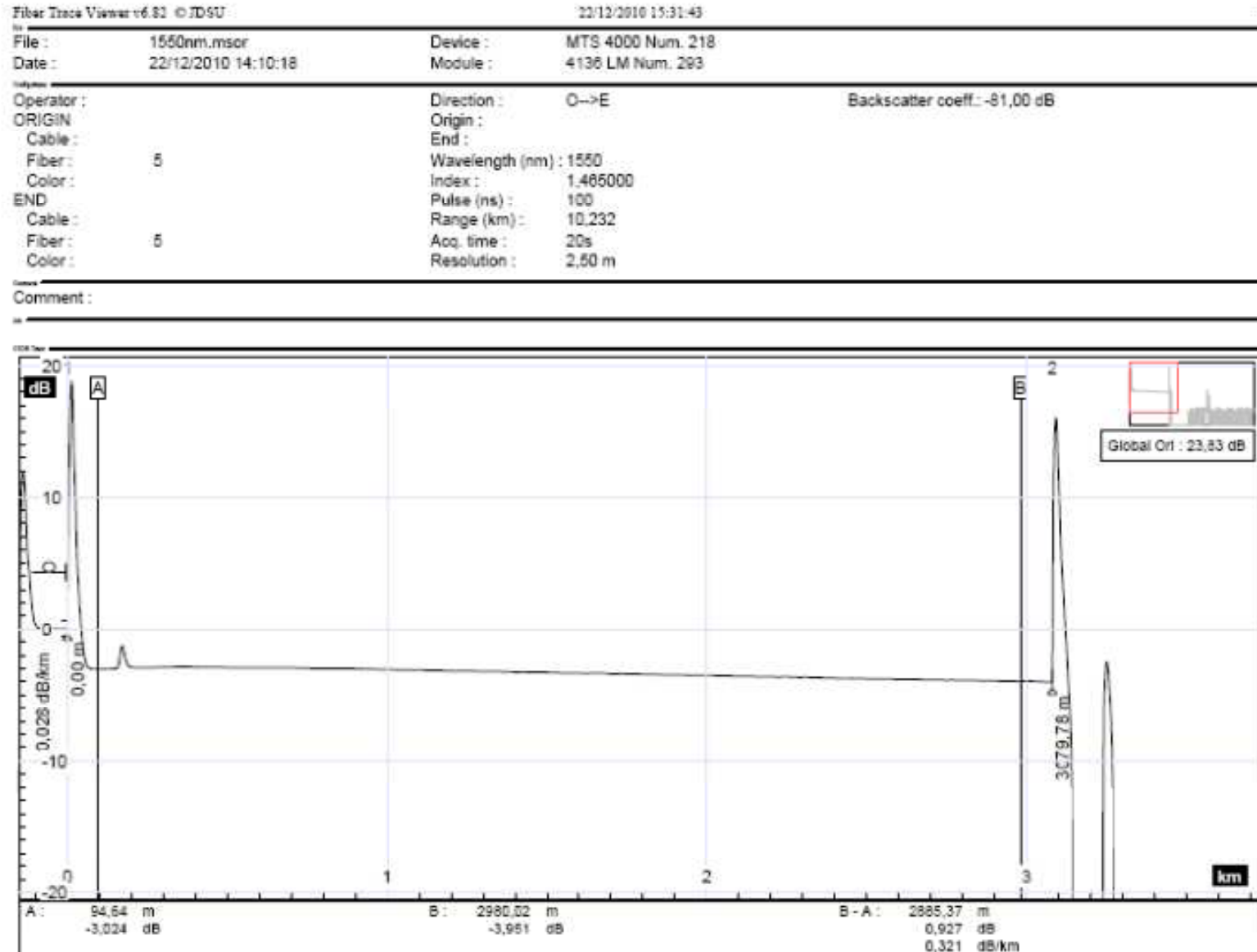
Comerciales: pulsos cortos 10-100 ns

P de 100 a 500 mw, osciloscopio, @850nm

También: 1550, 1300, hasta 150 Km \pm 1m, SM.



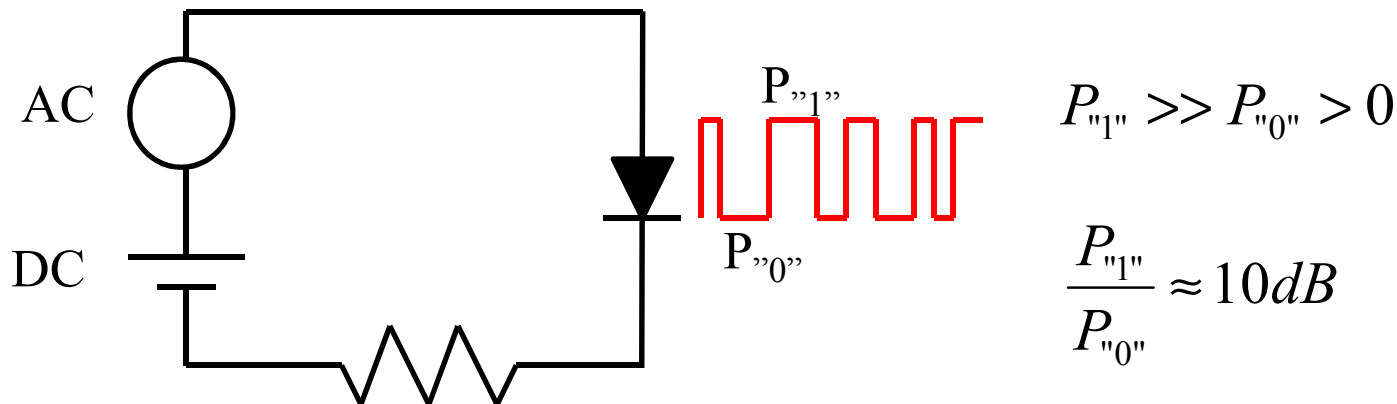
M2. Medida de la Atenuación FO: OTDR





- **Parámetros como medio de transmisión**
 - **Atenuación.** $A = -10 \log(P_{out}/P_{in})$. dB/Km ó dB/m
Depende de λ , materiales.
Da nombre a las ventanas comunicaciones
 - **Distorsión.** Ensanchamiento temporal experimentado
Depende λ , materiales, distancia, fuente de luz.
Unidades: MHz x Km, GHz x Km x nm, otros

La fuente de luz se modula por la información a transmitir:



¿Qué efecto lleva asociado que la fibra tenga dispersión?

Ensanchamiento temporal de los pulsos. ISI comunicaciones digitales. “Impone un **límite en la velocidad de transmisión**”



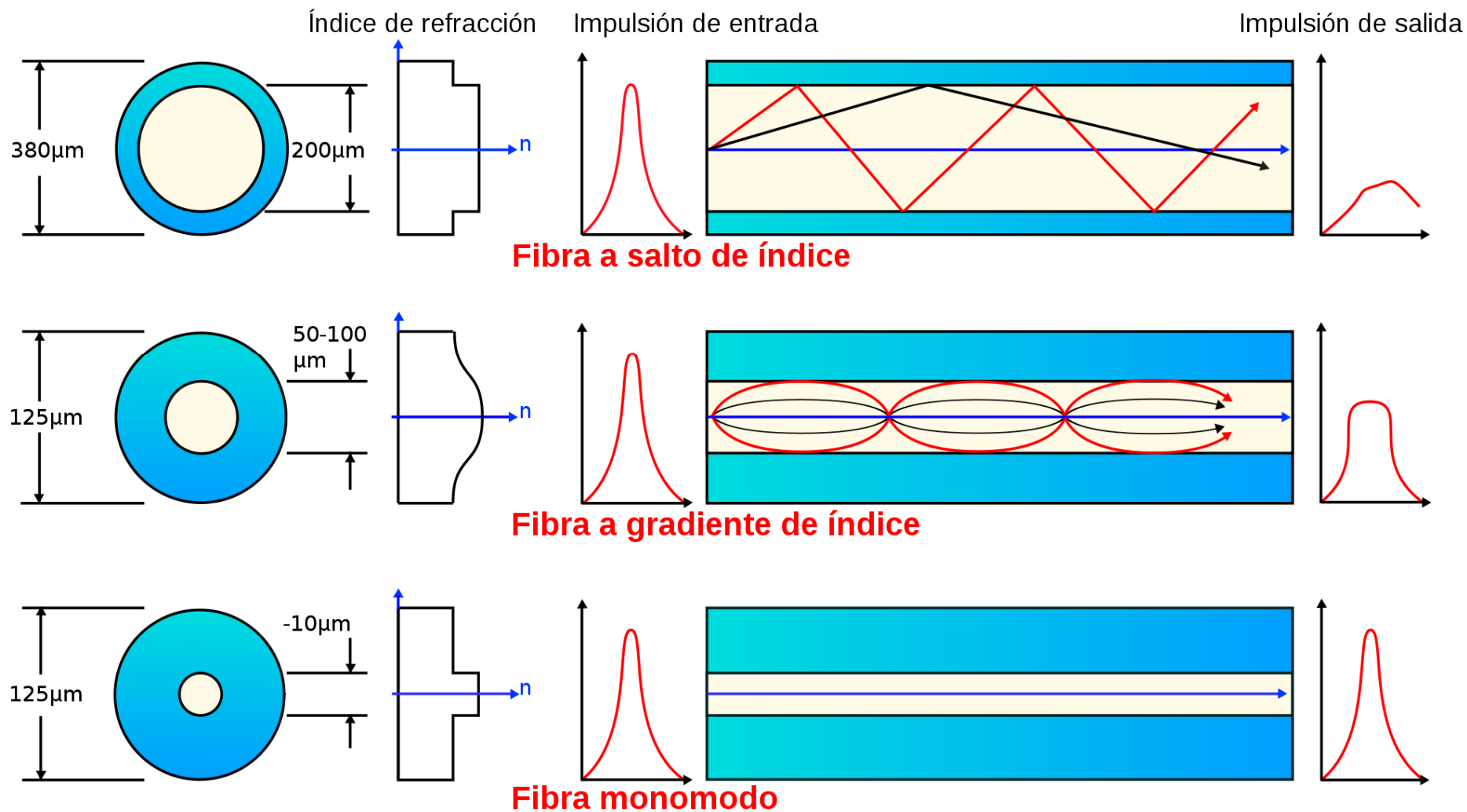
¿Qué vamos a analizar y discutir?

**Tipos de dispersión en fibras multimodo y monomodo.
Dispersión total**

Significado físico y ecuaciones que la rigen

**Límites máximos permitidos según la velocidad de
transmisión**

Ejemplos en fibras comerciales





¿Origen?. Teoría de rayos: caminos recorridos rayos (\approx modo) distintos. Retardos distintos en recorrer cierta longitud fibra.

¿Cuantificación? SI MM $\Delta \ll 1$. L (longitud fibra)

$$\sigma_s (rms) = \frac{L \cdot n_1 \cdot \Delta}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot c}$$

ensanchamiento (σ_s)
respuesta impulsiva (rms)

¿Efecto? Limita velocidad máxima transmisión.

Ejemplo: FOP 0.9/1mm \sim 5Mbs x Km

Unidades: $\sigma_{intermodal} = \sigma_s / L$ (ns / Km)

“Ensanchamiento pulso por unidad de longitud”

Se ensancha más a medida que recorre más distancia

!!No afecta fibras monomodo!!



M2. Dispersión

Evolución de las fuentes

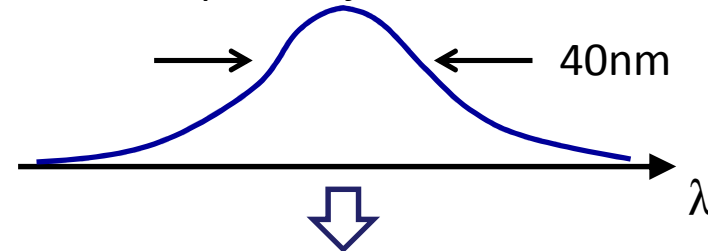


Anchura espectral

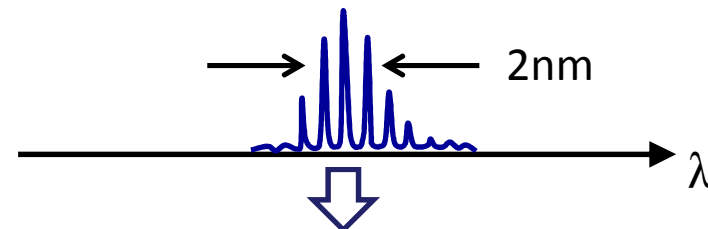
FWHM,

$P_o * 0.5$

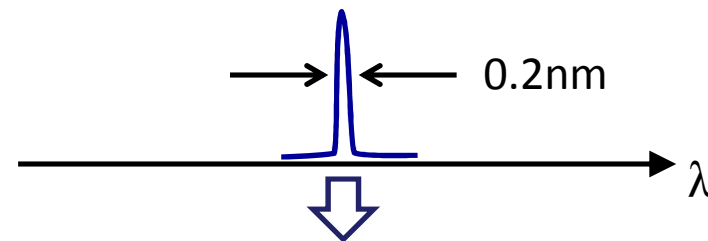
LED para baja velocidad



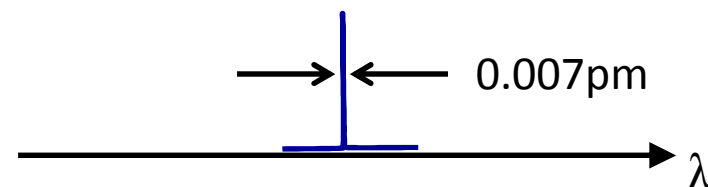
Diodo Láser Fabry Perot para velocidades bajas y medias



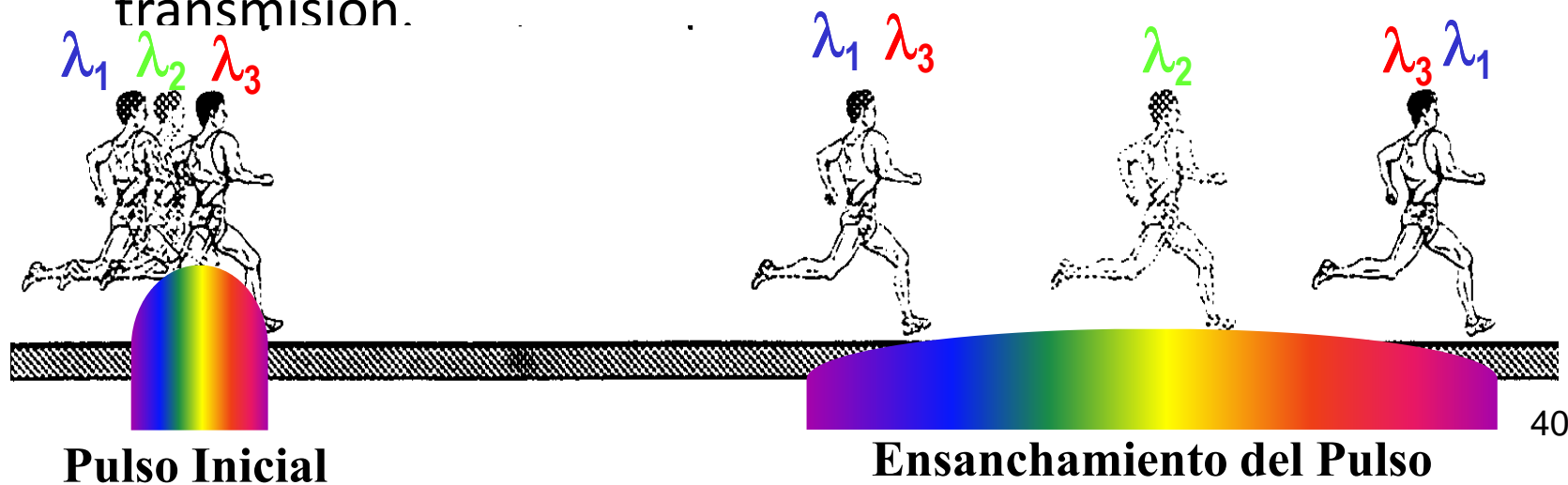
Diodo Láser DFB para altas velocidades



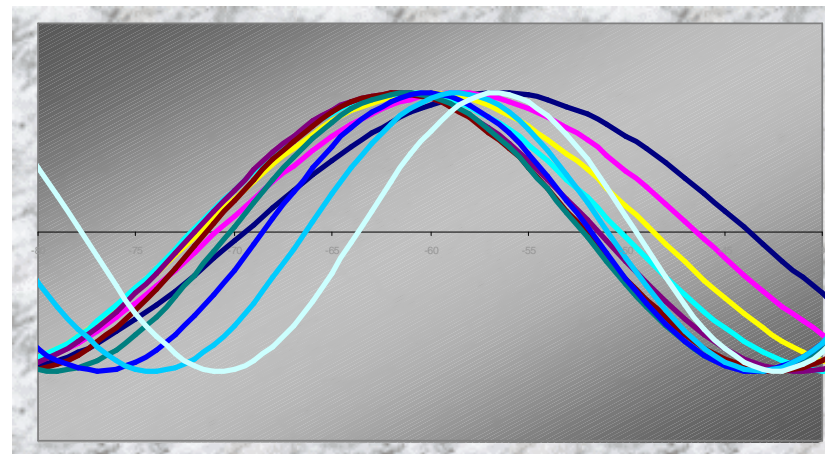
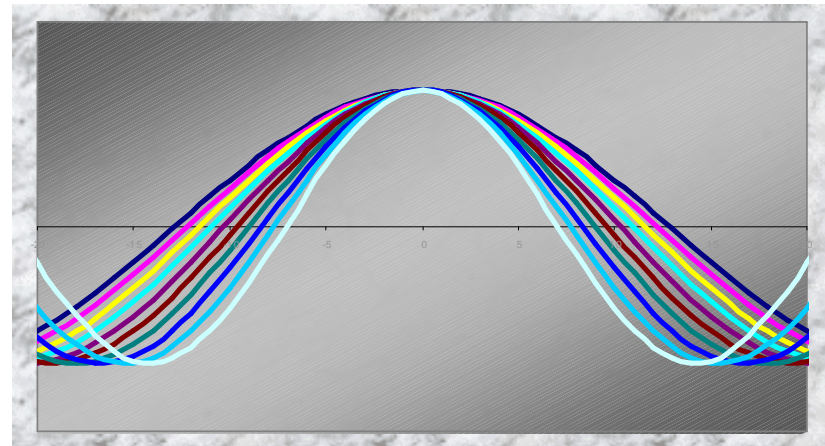
Diodo Láser DFB para detección Heterodina



- Fuentes de luz, la potencia varía en función de la longitud de onda
- Longitudes de onda. Fuente = no se propagan a la misma velocidad (velocidad de grupo) Ven diferentes índices de refracción y por lo tanto llegan en diferentes tiempos
- Un pulso transmitido por estos medios sufre un ensanchamiento, dispersión, limitando el ancho de banda de transmisión.



- Cada frecuencia óptica viaja a diferente velocidad
- A la salida, cada onda cambia su fase relativa
- Aumenta la envolvente de grupo
- Los pulsos dispersivos son generados cuando el grupo de longitudes de onda formadas tienen diferentes velocidades de fase.





Velocidad de fase

$$E(t,z) = E_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \text{ (onda monocromática)}$$

Velocidad de un observador que mantiene constante la fase = v_ϕ

$$\omega t - \beta z = \text{Cte}; z = v_\phi t, \text{ luego } v_\phi = \omega / \beta$$

$$\text{con } \beta = nk, \omega = 2\pi c / \lambda, k = \omega / c$$

Velocidad de grupo

Una señal óptica modulada tiene componentes que viajan a distinta velocidad de fase, en este caso se define la velocidad de un observador que mantiene constante la fase de la envolvente del grupo de ondas: $\omega t - \Delta\beta z = \text{Cte}; z = v_g t$, luego $v_g = \omega / \Delta\beta = \delta\omega / \delta\beta$



Retraso de Grupo

Velocidad de grupo $v_g = (d\beta/d\omega)^{-1}$

Retraso de grupo $L \cdot d\beta/d\omega = \tau_g$

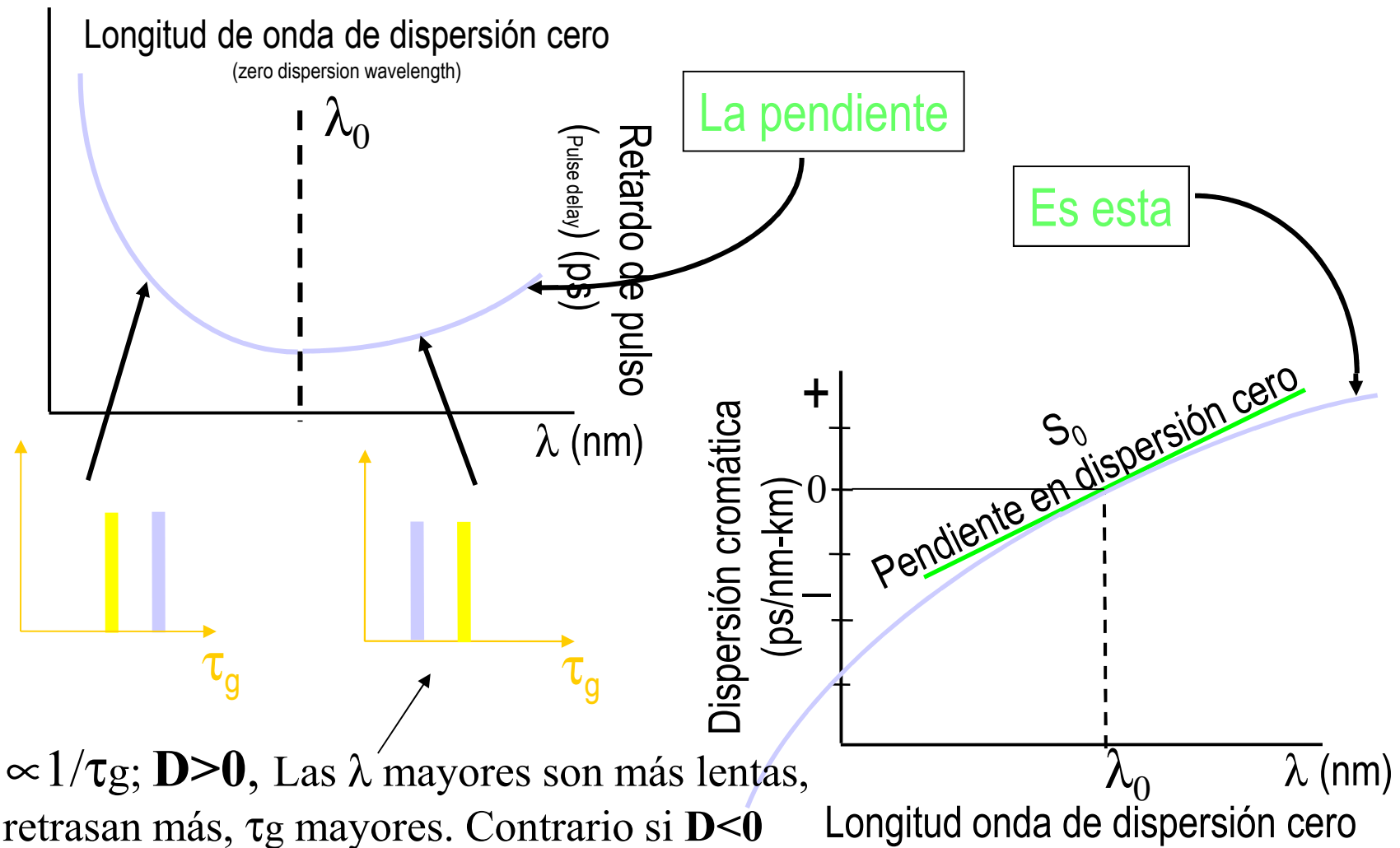
$\tau_g = L/v_g$ (Tiempo tarda grupo ondas recorrer L)

With Wavenumber $\beta = nk$, $\omega = 2\pi c/\lambda$, $k = \omega/c$

Variación del retraso de grupo frente a λ

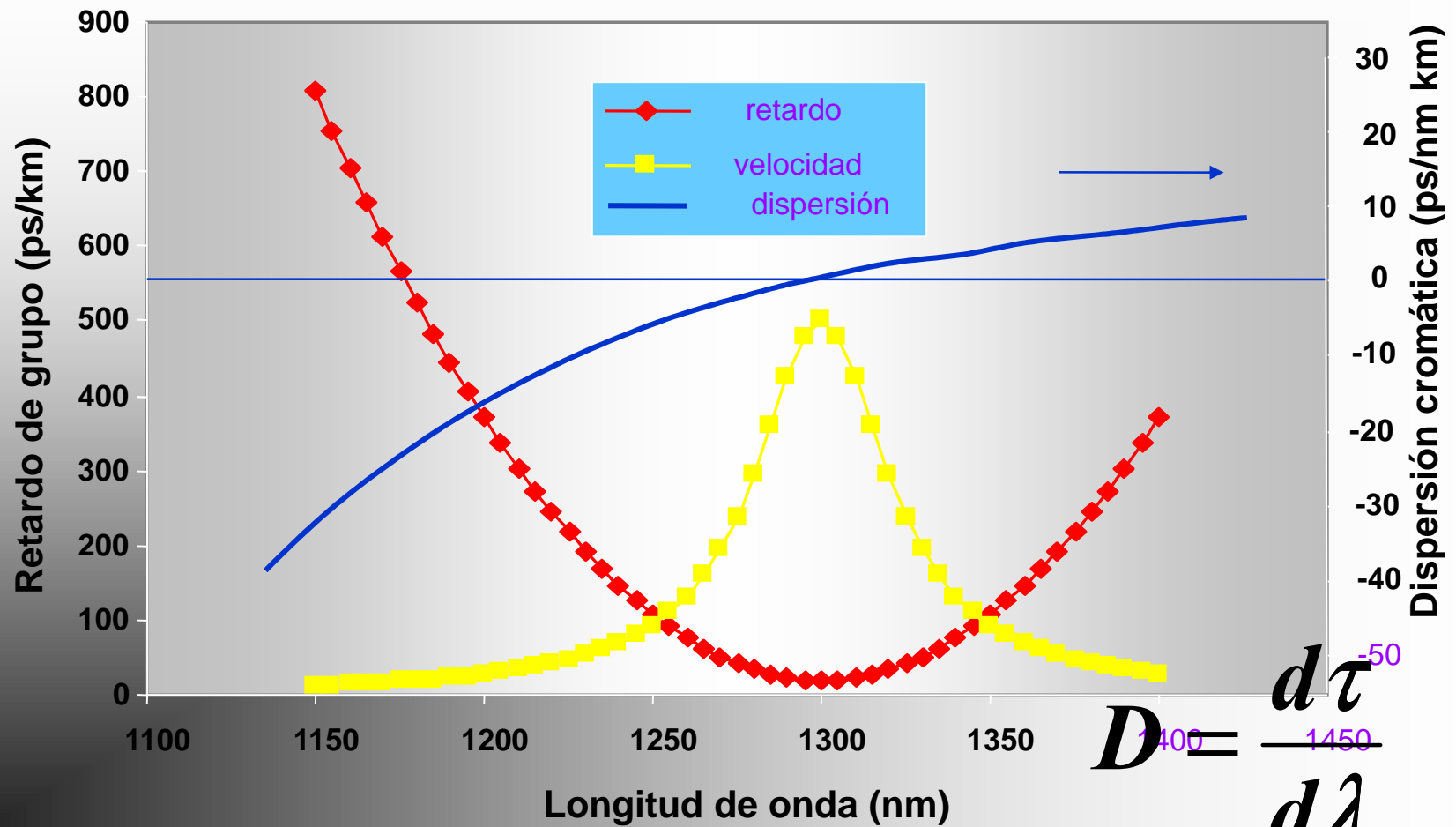
Dispersión $D = -(\omega/\lambda)(d\tau_g/d\omega) = -(2\pi c/\lambda^2)(d^2\beta/d\omega^2)$

$D = (1/L) d\tau_g/d\lambda$ (CDC: chromatic dispersion coefficient)





M2. Dispersión Cromática: Fibra de sílice



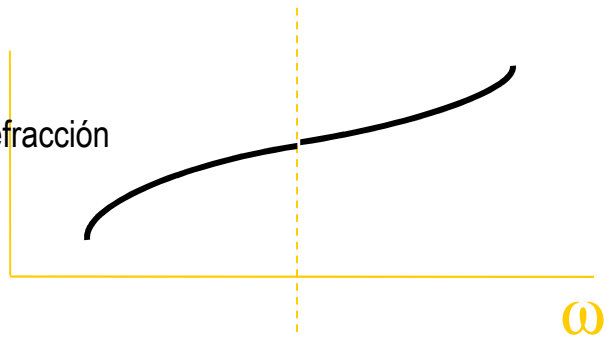


M2. Dispersión Cromática: El modelo



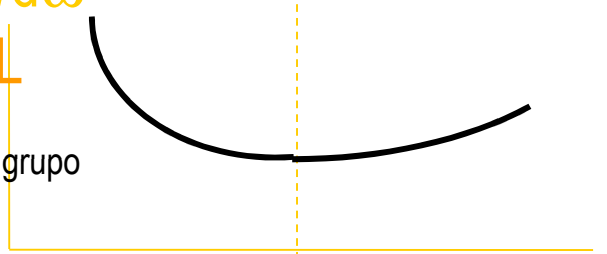
$$\beta = nk$$

Índice de refracción



$$\beta_1 = d\beta/d\omega$$
$$= \tau_g/L$$

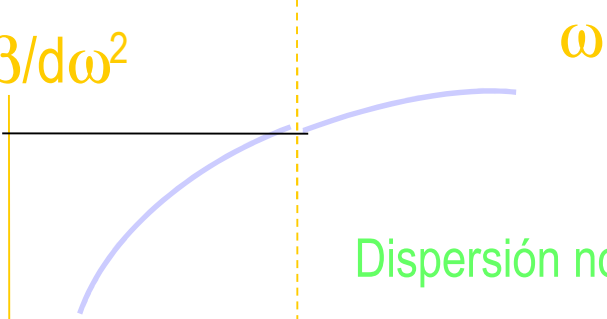
Retardo de grupo



$$\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$$

$$\propto D$$

Dispersión



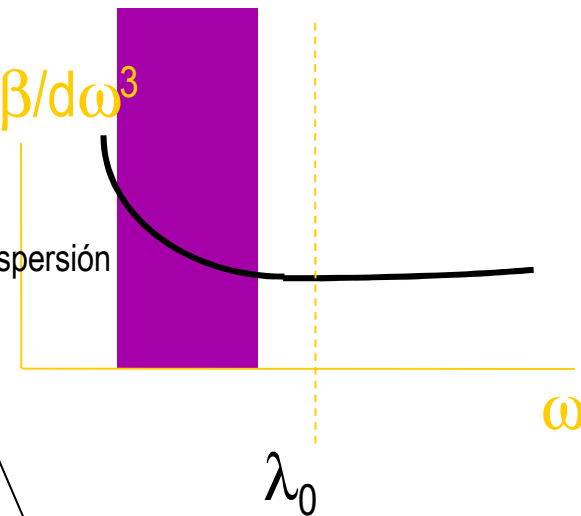
Dispersión anómala

Dispersión normal

$\approx -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ at 1550 nm λ_0

$$\beta_3 = d^3\beta/d\omega^3$$
$$\propto S$$

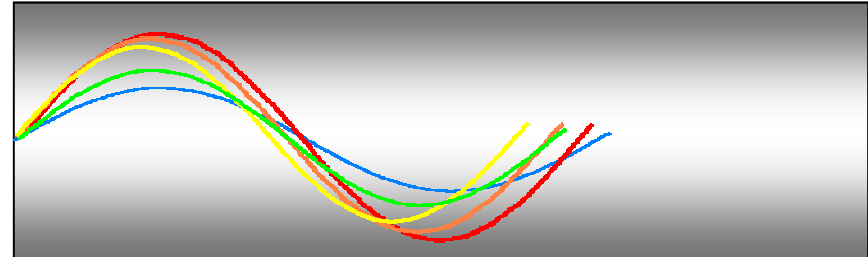
Pendiente de dispersión



**Nuevo problema sistemas
WDM, amplio margen λ**

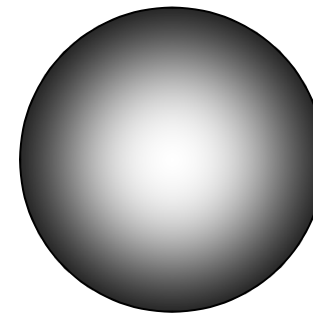
1. Dispersión Material:

Índice de Refracción:
 n varía con λ (ϵ permitividad medio)
Velocidad = c / n varía con λ

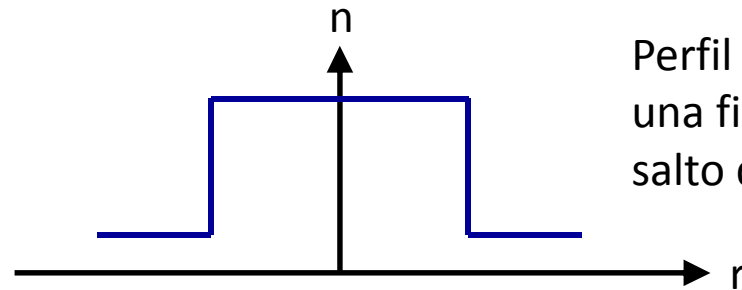


2. Dispersión de Guía de onda:

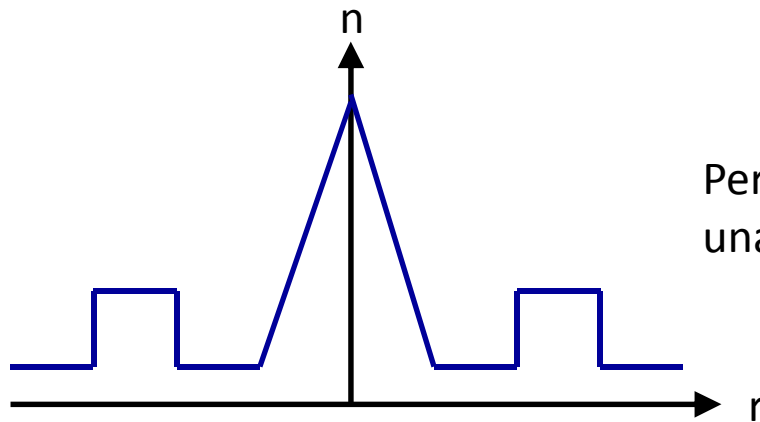
RIP (Refractive Index Profile)
 $n(x,y)$ varía entre el núcleo y el revestimiento,
distintas condiciones de contorno según λ ,
distintas soluciones de la ec.ondas
Dependencia no lineal de β con λ , β''



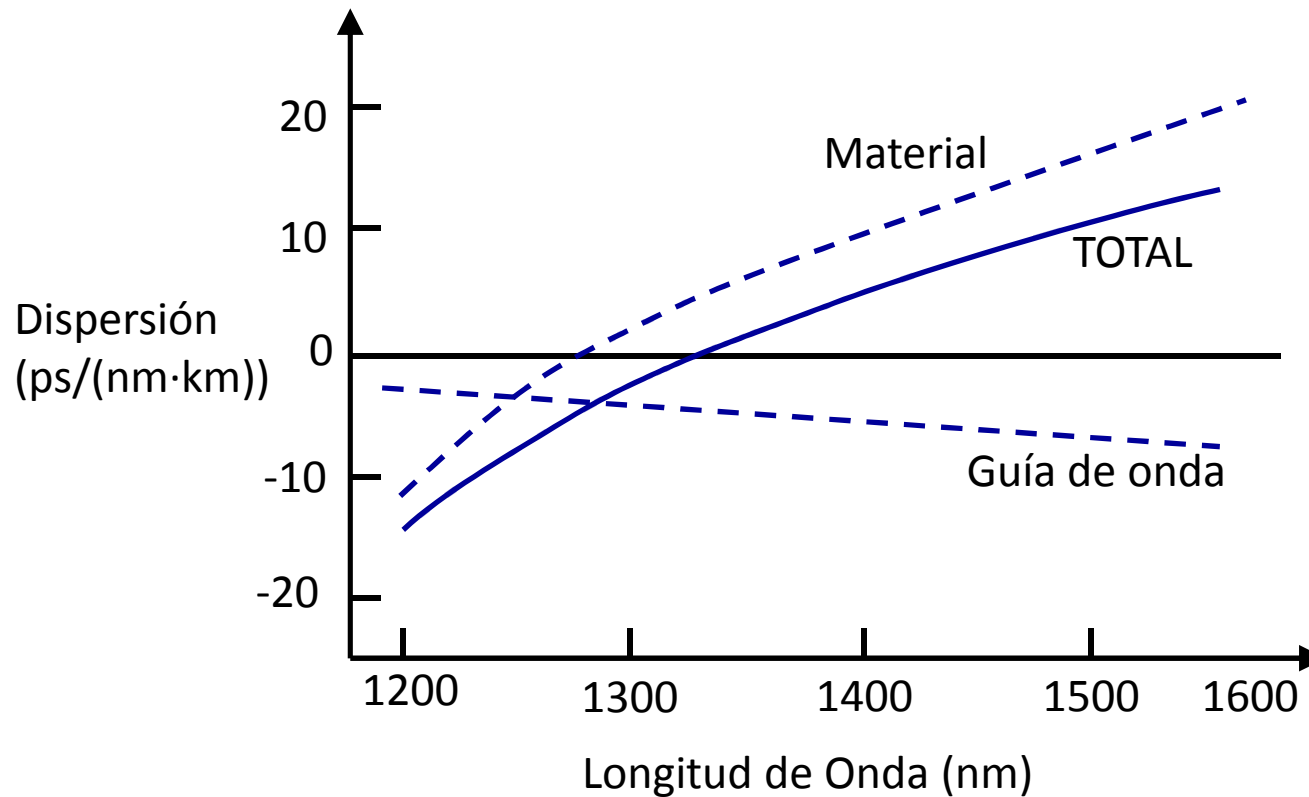
!Distinto signo ambas!



Perfil del índice de refracción de una fibra óptica monomodo de salto de índice

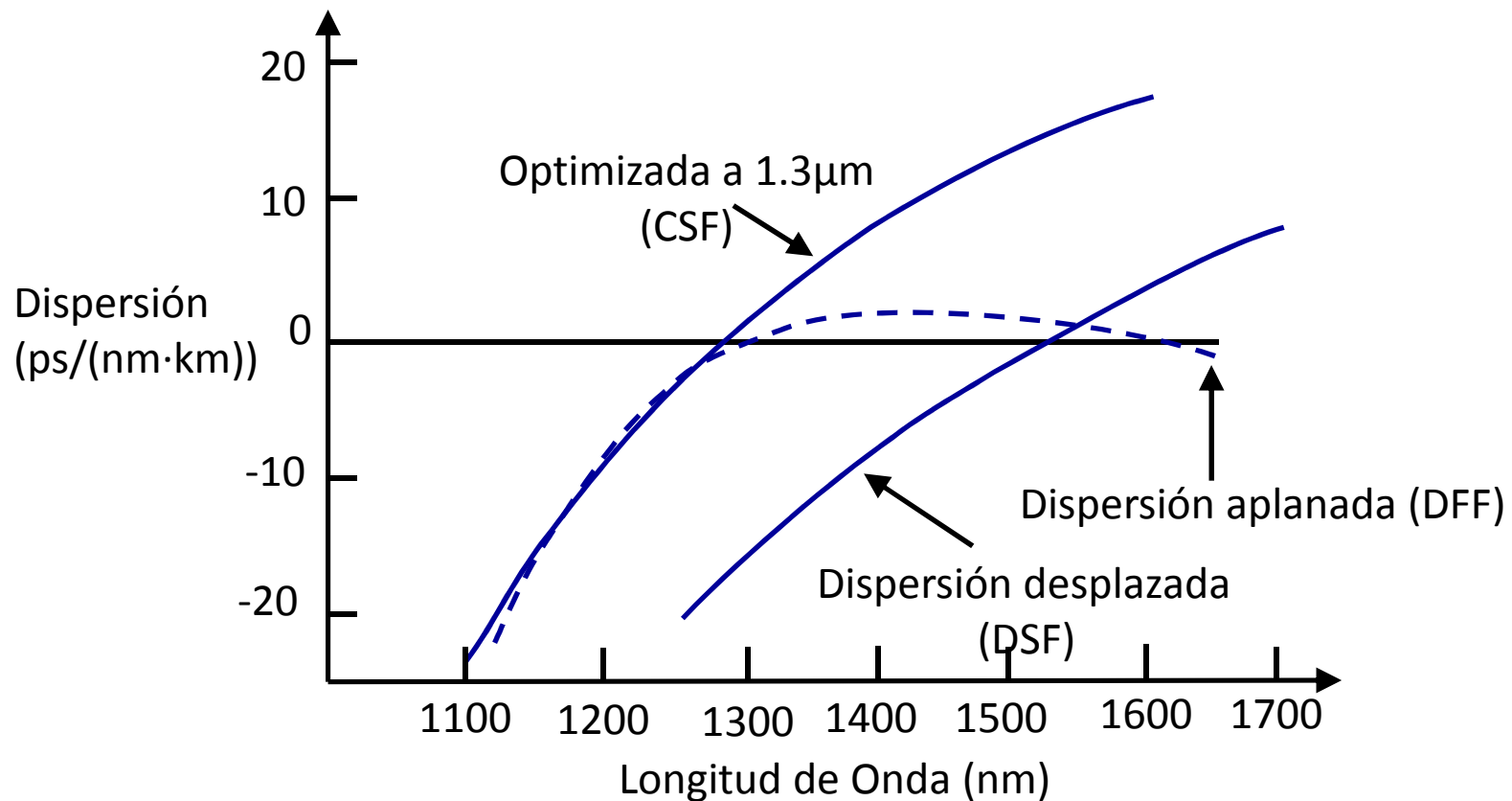


Perfil del índice de refracción de una fibra de dispersión desplazada



$\Delta\tau(\text{cromática total}) = \Delta\tau(\text{material}) + \Delta\tau(\text{guíaonda})$ Se utiliza para fabricar fibras
Con distintos perfiles de dispersión frente a λ

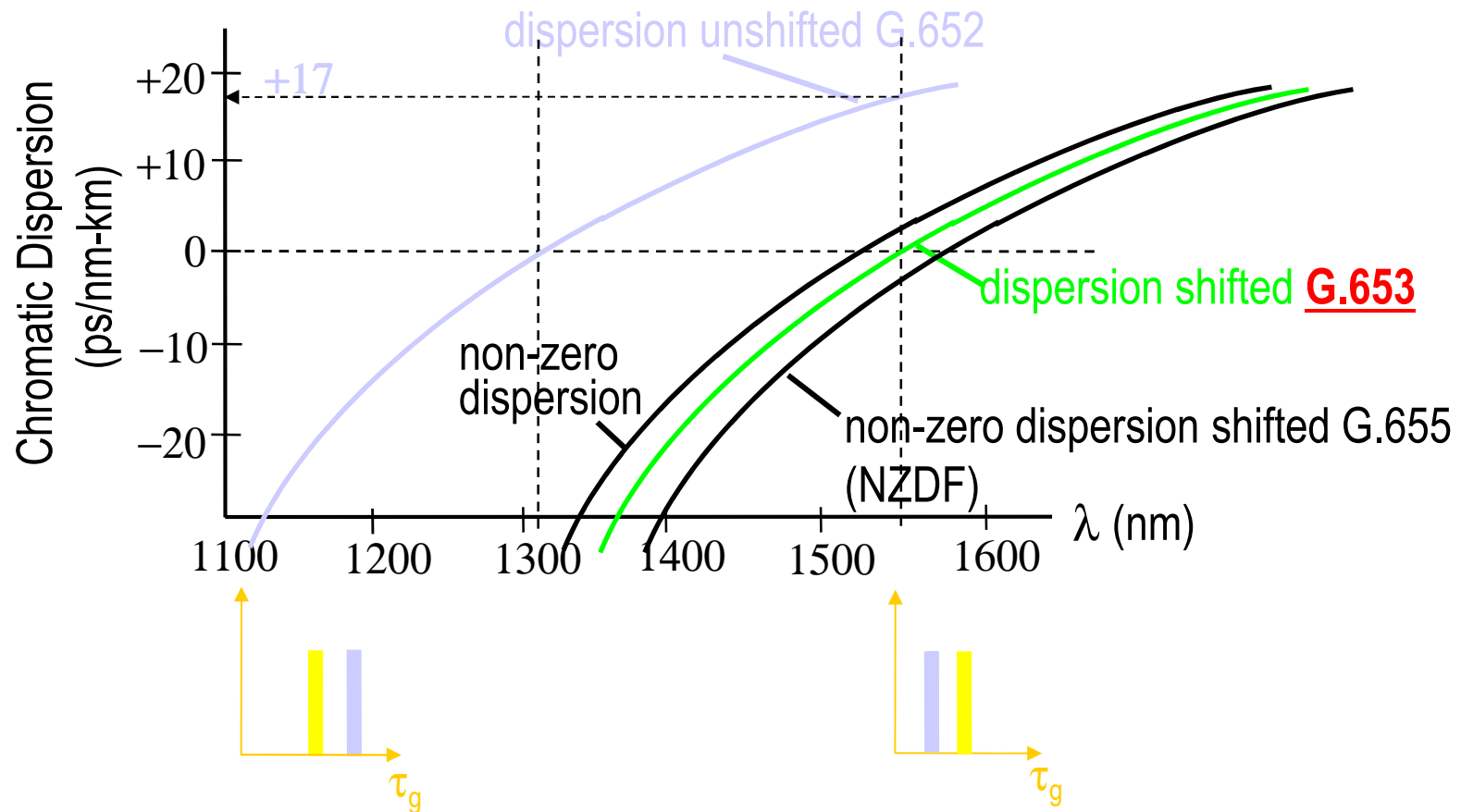
CSF: Conventional Single Mode Fiber, G. 652 (1983)

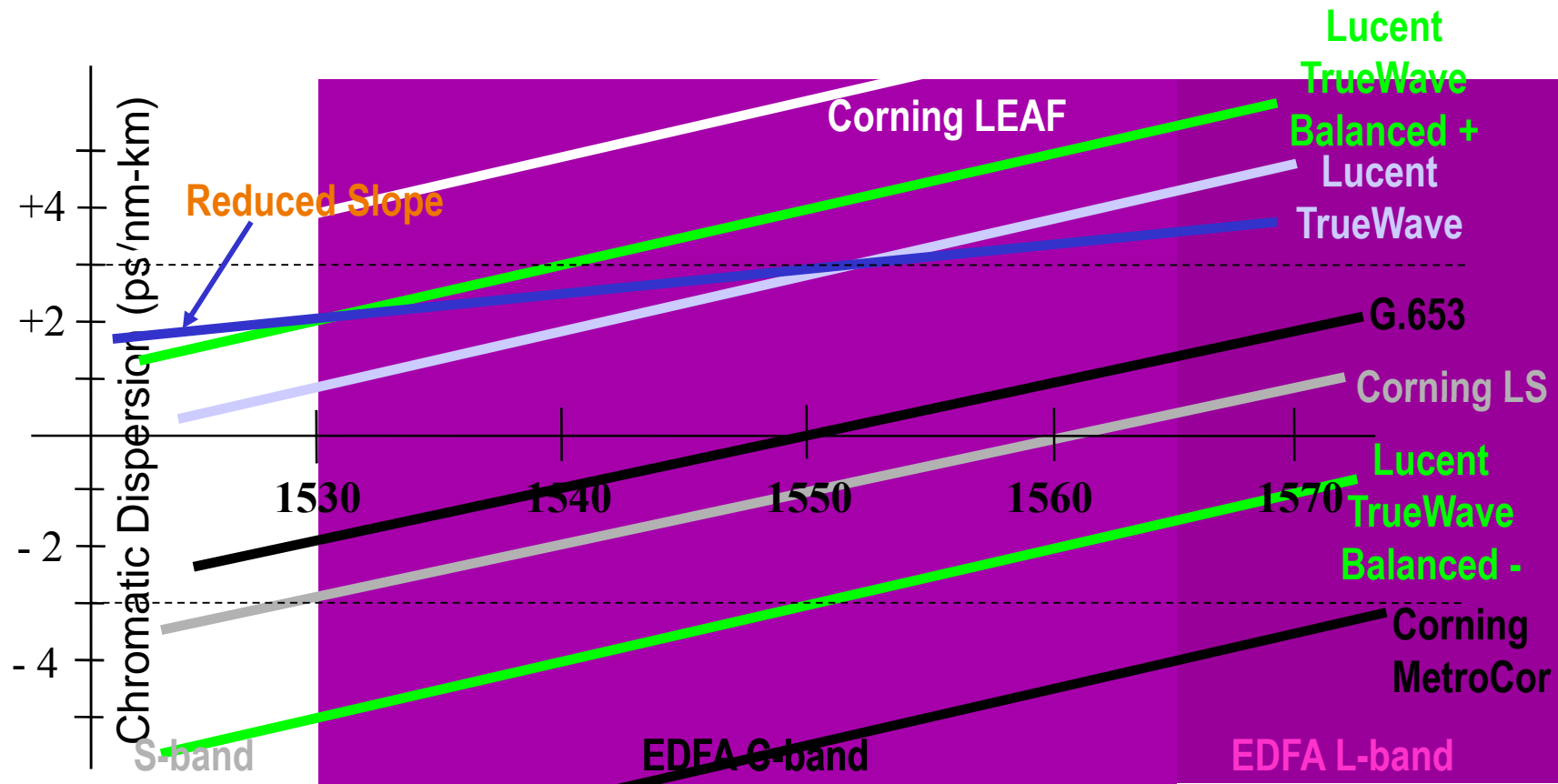


DSF. G. 653 (1985)

Dispersión modificada cambiando los perfiles índice refracción.

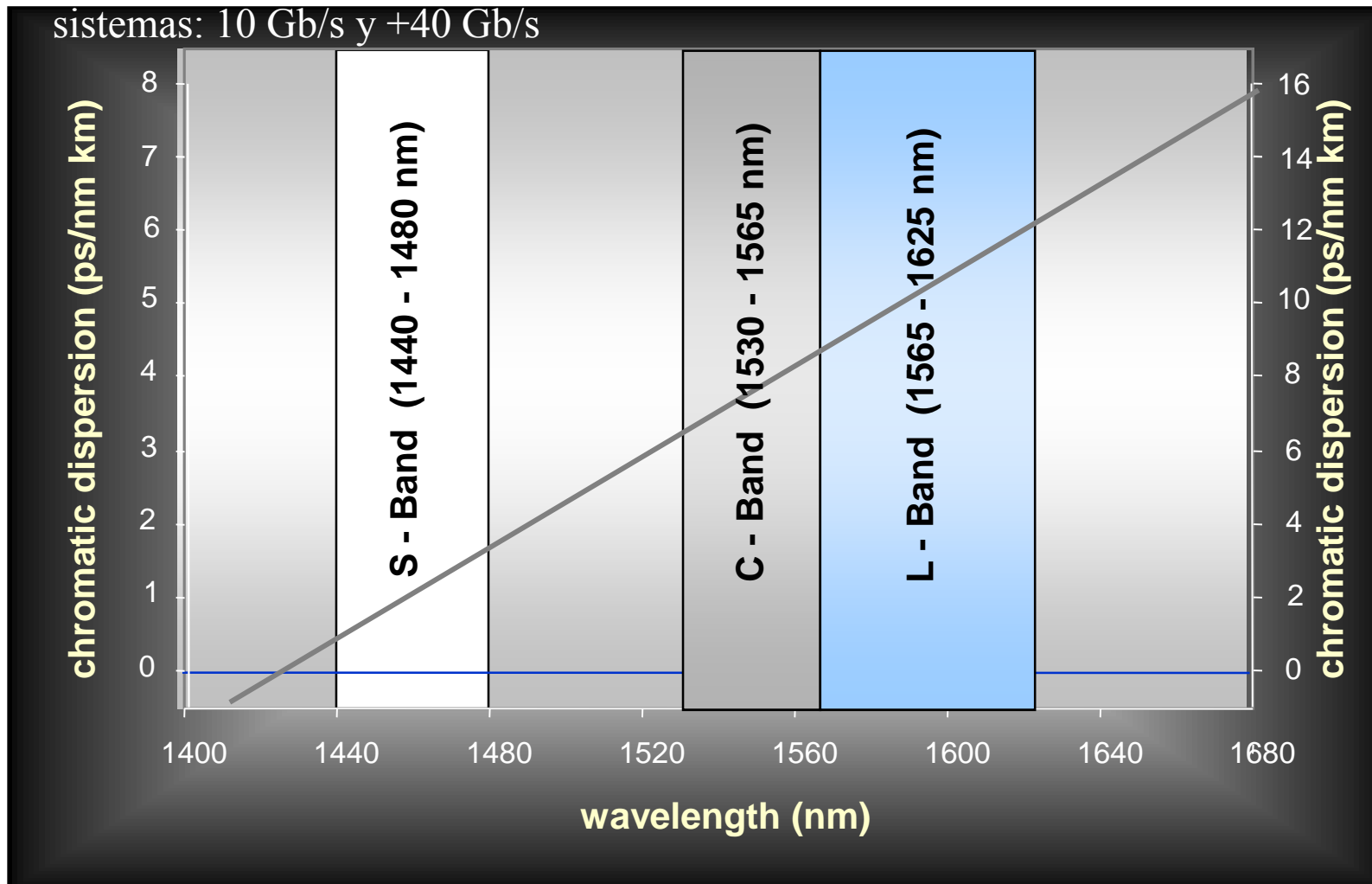
M2. Dispersión en Fibras tipo (ITU)





Corning LEAF: gran área efectiva

NZ-DSF. Enlaces de larga distancia y gran capacidad-optimizada para sistemas: 10 Gb/s y +40 Gb/s





- **Parámetro dispersión cromática: $D=d\tau_m/d\lambda$**
- **Unidades: ps nm⁻¹ Km⁻¹**

ensanchamiento total = $D \times L \times$ anchura espectral fuente (*) (nm)

$\sigma(\text{cromática})=D \times \Delta\lambda$ (ps/Km) (por unidad de longitud)

Ej: Fibra con dispersión material 98.1 ps nm⁻¹ Km⁻¹ a 850nm, transmisor LED anchura espectral de línea 20nm. ¿ensanchamiento/Km?

$\sigma/1\text{Km} \approx \Delta\lambda L(1\text{Km}) D = 20\text{nm} \times 1\text{Km} \times 98,1 \text{ ps} = 1,96 \text{ ns} \Rightarrow 1,96 \text{ ns Km}^{-1}$

(*) Si la fuente es muy monocromática, y es mayor el ensanchamiento por modulación se considera este último, p.e. láseres DFB y altas velocidades de transmisión



Límites CDC, D(λ)

- G. 652 (límites CDC fibras SM, 1260nm-1360nm)

$$D(\lambda) = \frac{S_{0m\acute{a}x}}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]$$

Somáx=-0.093ps/(nm²·Km)
So: pendiente dispersión en D=0
 λ_0 : y longitud de onda en D=0

- G. 653 (límites CDC fibras DSF rango 1525nm-1575nm, con $\lambda_0=1550$ nm D<3.5ps/nm Km) @1550nm

$$D(\lambda) = (S_0)[\lambda - \lambda_0]; \text{ valores típicos } S_0 = 0.085 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{Km}$$

- G. 655 (límites CDC fibras NZDSF, para rango 1530 a 1565nm,

$$0.1 \text{ ps/(nm Km)} < D < 3 \text{ ps/(nm Km)}$$

Cálculos se supone una dependencia lineal con la longitud



$$\sigma(\text{total}) = [(\sigma^2(\text{cromática}) + \sigma^2(\text{intermodal}))^{1/2}]$$

(por unidad de longitud)

Unidades: ps Km⁻¹

MM SI: domina la dispersión intermodal

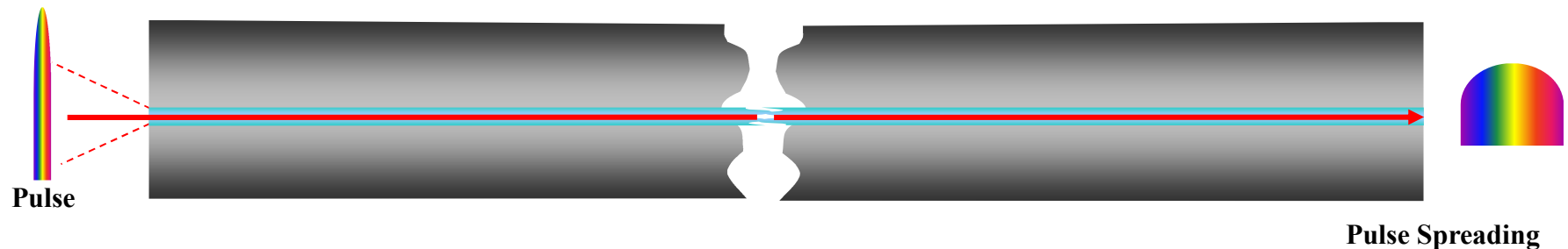
MM GI: ambos términos deben considerarse

SM no existe intermodal y hay un término adicional por PMD que se verá más adelante

Ejemplos y ejercicios hojas de catálogo

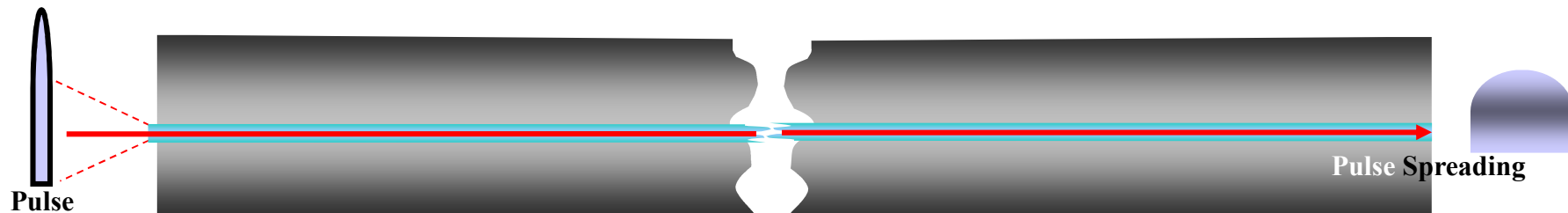
■ Dispersión Cromática (SM)

Diferentes longitudes de onda viajan a diferentes velocidades



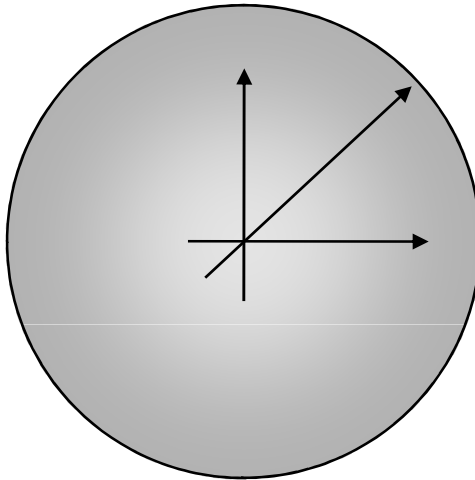
■ Dispersión por el modo de polarización (birrefringencia)

Dos modos de polarización viajan a diferentes velocidades

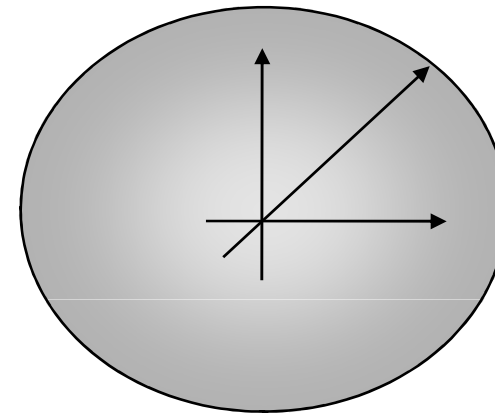




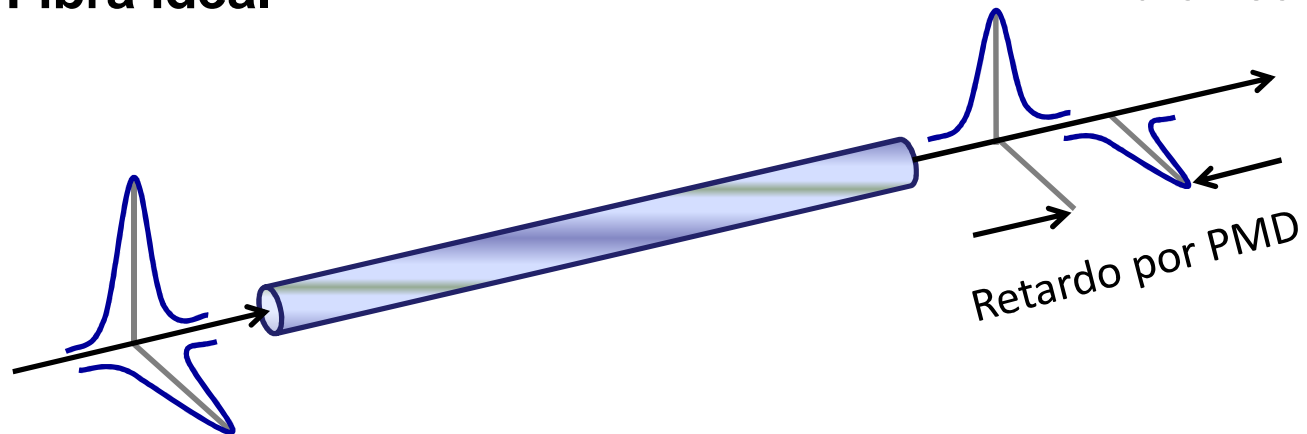
M2. Polarisation Mode Dispersion (PMD)



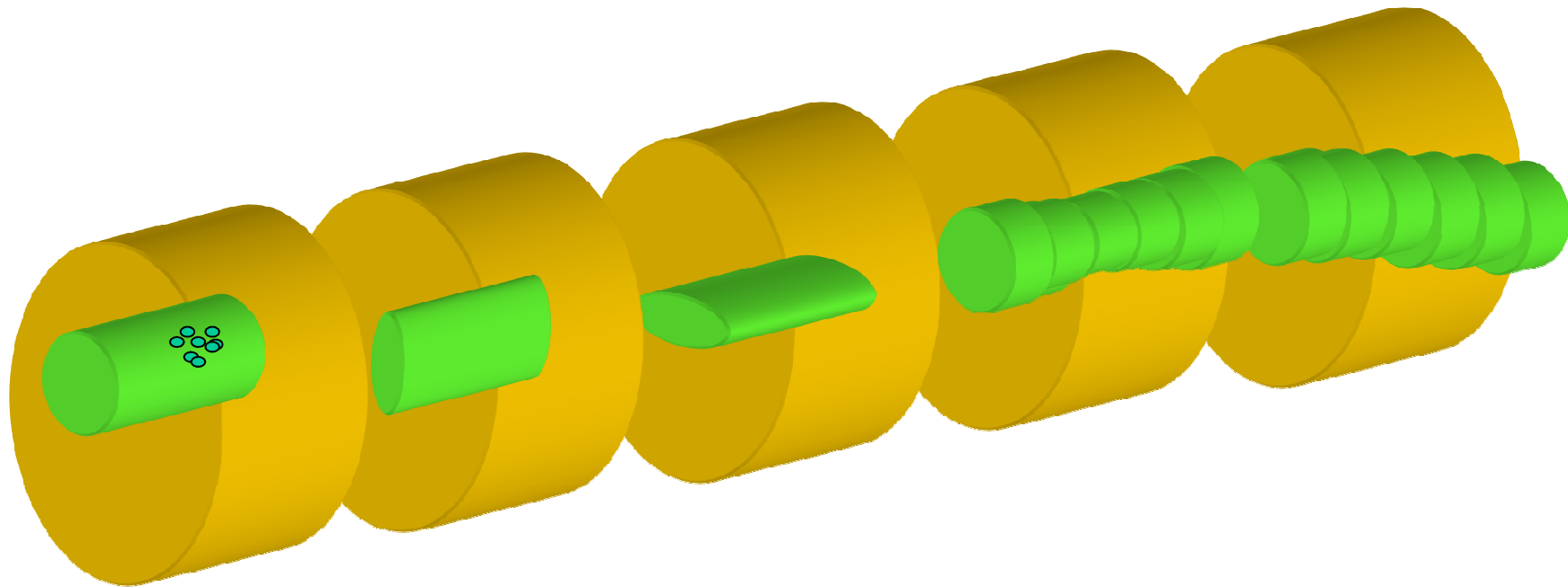
Fibra ideal

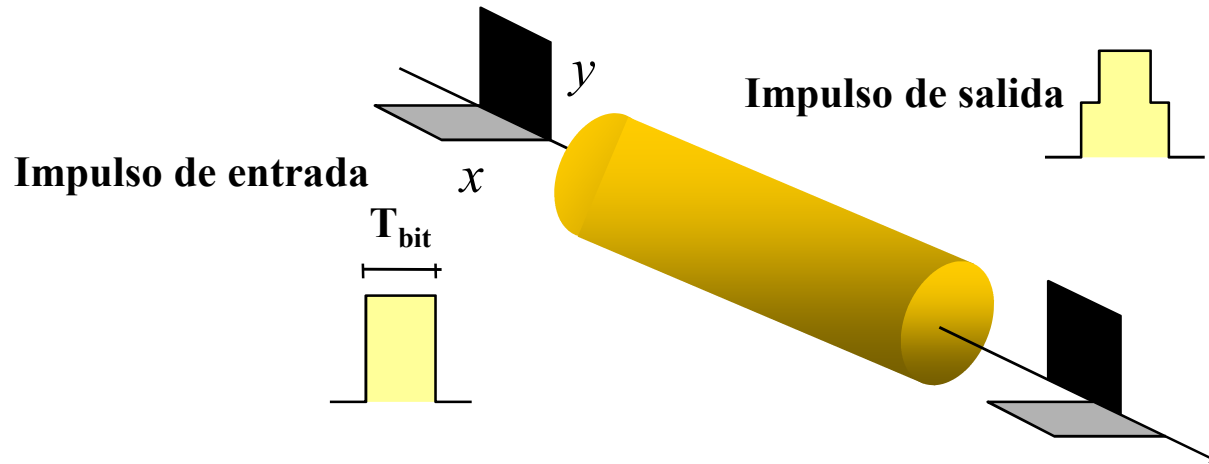


Fibra real



- Asimetrías en la geometría de los núcleos en la fibra y/o stress en la distribución creada por la birefringencia local de la fibra.
- Una fibra "real" es una distribución aleatoria además de porciones locales de birrefringencia.





$\langle \Delta\tau \rangle$ crece con la distancia como \sqrt{L} .

- **PMD se mide en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$,**
- **Valor típico $0.1 \div 0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$**
- **PMD se considera alta cuando $> 0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$**

$$\Delta\tau(\text{polarización}) = \text{PMD} (\text{ps}/\text{Km}^{1/2}) \times (\text{distancia enlace (Km)})^{1/2}$$



$$\sigma(\text{total}) = [(\sigma(\text{cromática}) * L)^2 + (\sigma(\text{polarización}) * L^{1/2})^2]^{1/2}$$

Unidades: ps.

Normalmente domina la dispersión cromática

En fibras de dispersión cero, la dispersión cromática de segundo orden (S)

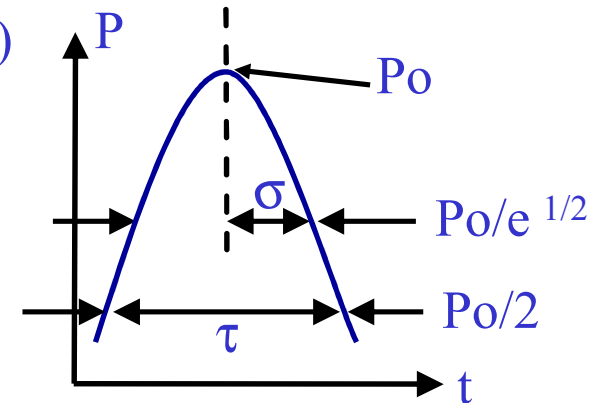
PMD afecta en los enlaces de alta capacidad >2,5Gb/s, no especificado en las fibras antiguas

- Suponiendo respuesta gaussiana fibra óptica

$$h(t) = 1/\sqrt{2\pi\sigma^2} (e^{-t^2/2\sigma^2}) \rightarrow H(\omega) = \sigma/\sqrt{2\pi} (e^{-\sigma^2 \omega^2/2})$$

- Bw óptico: $H(\omega_{3dB}) = 0.5H(\omega=0)$.
[Ancho de banda a partir del ensanchamiento espectral del pulso]

$$\text{Bw óptico (GHz)} = 0,187 / \sigma(\text{ns})$$



A) Multimodo: σ (ns) = (ns Km⁻¹ * L (Km))

$$\text{BW (MHz) x L (Km)} = 187 / \sigma * (\text{ns Km}^{-1})$$

Orden magnitud: 20 MHz x Km SI 1GHz x Km GI

B) Monomodo: $\sigma = D * L * \Delta\lambda$ (sin PMD)

$$\text{BW} = 0,187 / (D * L * \Delta\lambda); \text{ BW} * L * \Delta\lambda = 0,187 / D$$

cálculo D según normativa rango λ ;

$$\text{BW (MHz) * L (Km) * } \Delta\lambda \text{ (nm)} = 187 / D \text{ (ps nm}^{-1} \text{ Km}^{-1})$$



Cuadro 1. Tipos de Fibras Ópticas

Tipo FO NA	Atenuación	BWxDistancia	Tipo	
1 mm Plástico	0.5	0.2 dB/m @ 660nm	4 MHz x Km	SI-M (1)
100/140 (2)	0.2-0.3	5 dB/Km @ 850nm	20 MHz x Km	SI -M
62.5/125 (3)	0.27	0.7 dB/Km @ 1.3μm	500-1200 MHxKm	GI-M
50/125 (4)	0.21	0.5 dB/Km @ 1.3μm	500-1500 MHxKm	GI-M
9/125 SI/SM (5)	0.1	0.35 dB/Km @ 1.3μm 0.25dB/Km @ 1.5μm	125 GHz x Km x nm 25 GHz x Km x nm	SI-SM

(1) Step-Index Multimode

(2) Cristal

(3-4) Silice/(5) Step-Index/Single Mode



M2. Efectos de la dispersión: Limitación velocidad y distancia de transmisión



Modulación

Compleja y con un alto ensanchamiento

Potencia

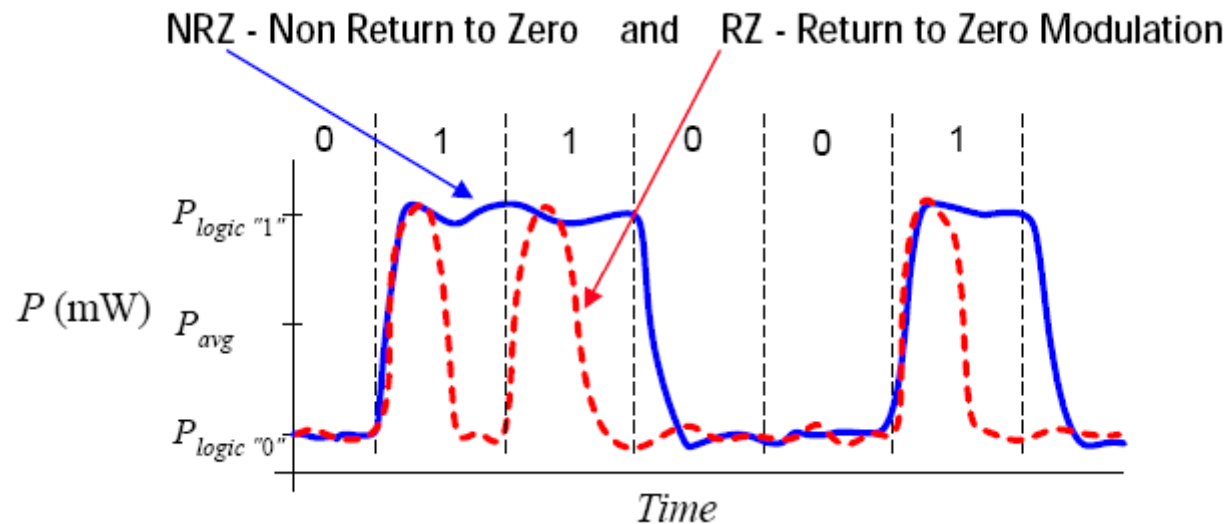
Aumentar la potencia del pico \longrightarrow Efectos no lineales?

Fase

– **Dispersión**

- **Efecto CD = 16x veces mayor a 10Gbits que a 2.5 Gbit/s**
- **CD Slope = Problema con WDM (múltiples λ)**
- **PMD = factor límite por la distancia**

Secuencia datos transmisión digital FO. Tipos modulación



Notación: B_T =bit rate (bs/s); tasa de transferencia.

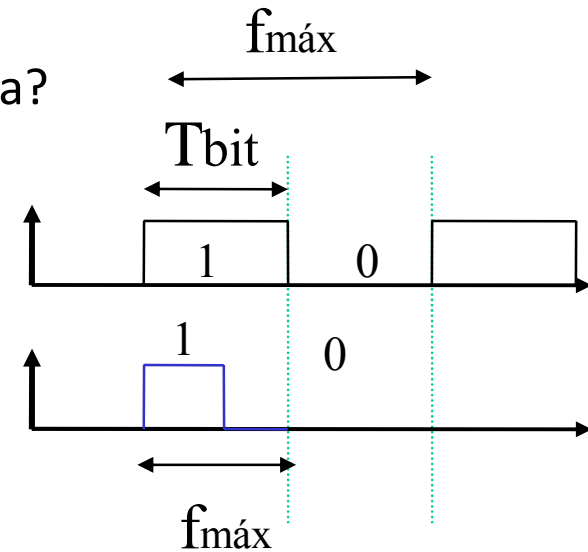
Datos serie, $B_T = 1/T_{bit}$, T_{bit} =duración 1 bit

¿Dispersión? Ensanchamiento temporal de los pulsos. ISI comunicaciones digitales. “Impone un **límite en la velocidad de transmisión**”:

❑ ¿Relación velocidad de transmisión-ancho de banda?

❑ código NRZ. $BW=f_{\text{máx}}=1/\text{periodo}=\mathbf{1/2T_{\text{bit}}}=(B_T)/2$

❑ código RZ. $BW=f_{\text{máx}}=1/\text{periodo}=\mathbf{1/T_{\text{bit}}}=B_T$



❑ ¿Qué ensanchamiento máximo se permite para que la penalización sea aceptable?

❑ $B_{T,\text{máx}}= \mathbf{1/(K\sigma)}$; **K una constante típicamente 4**



M2. Dispersión: limitación distancia

Modulación directa:

$$K_o T_{bit} \geq D \cdot \Delta \lambda \cdot L$$

Modulación externa:



Ancho del espectro de emisión $\approx B$ (Bit rate)

En 3ª ventana $\approx \Delta 1\text{nm}$ $\Delta 125\text{GHz}$

D=Coeficiente Dispersión ps/(nm.Km)

B=Velocidad de transmisión(Bit rate) en
Gbit/s

Ko=% del tiempo de bit

L=Km



M2. Tolerancia de la CD Según la velocidad de transmisión



Velocidad transmisión	Ensanchamiento permitido
2.5Gb/s	16 000 ps/nm
10 Gb/s	1 000 ps/nm
40 Gb/s	60 ps/nm

4 veces más rápido

- 4 veces menos espacio entre pulsos
- 4 veces **más ensanchamiento del láser** debido a la modulación

(*) Señales NRZ, láser con modulación externa, sin chirp, penalización 1dB



Bit Rate (Gb/s)	Max PMD (ps)	Coeficiente de PMD por 400 km (ps/km ^{1/2}) (*)
2.5	40	≤ 2.0
10	10	≤ 0.5
40	2.5	≤ 0.125

(o 25 km con 0.5 ps/kM2/2)

99.99% de probabilidad de potencia cae 1 dB para 0.1 del periodo de un bit, 30 ' año.

(*) Para una degradación < 1dB

$$\Delta\tau_{\max} \leq T_{\text{bit}} / 10$$

Tbit=1/B: