



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria de Telecomunicació de
Barcelona**

**Departament de Teoria del Senyal i
Comunicacions**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA**

COMUNICACIONS ÒPTIQUES

GRUP DE COMUNICACIONS ÒPTIQUES

Joan M. Gené Bernaus

TEMARI

1. INTRODUCCIÓ
- ➔ 2. FIBRA ÒPTICA
3. FONTS ÒPTIQUES
4. RECEPTORS ÒPTICS
5. AMPLIFICADORS ÒPTICS
6. SISTEMES DE TX PER F.O.

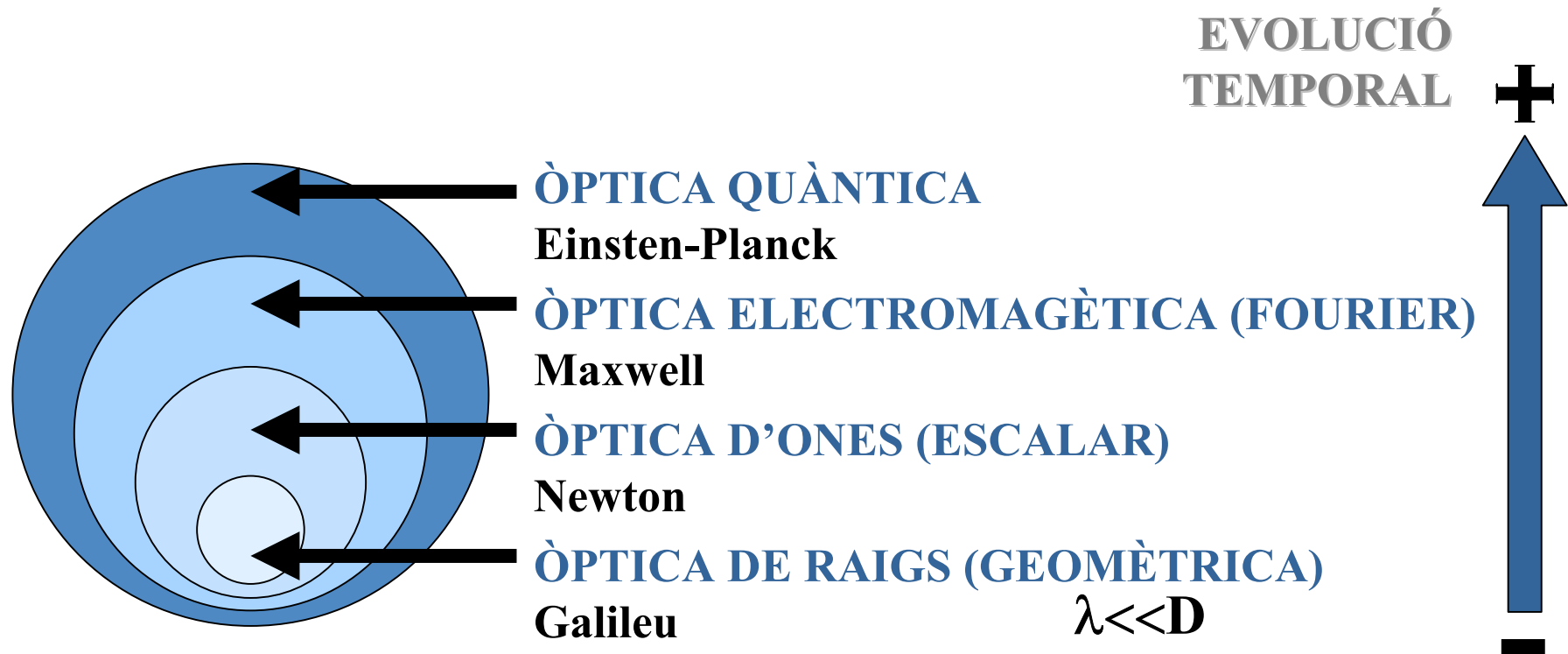
2. FIBRA ÒPTICA

- **NATURALES A DE LA LLUM**
 - **ÒPTICA GEOMÈTRICA**
 - **REFLEXIÓ I REFRACCIÓ**
 - **RELACIÓ $\Delta\lambda$ - Δf**
- **TIPUS DE FIBRES**
 - **DEFINICIÓ I TIPUS**
 - **PARÀMETRES CARACTERÍSTICS**
 - **ESTANDARITZACIÓ**

- **PROPAGACIÓ EN F.O.**
 - **REFLEXIÓ TOTAL**
 - **EQUACIÓ D'ONA**
- **ATENUACIÓ EN F.O.**
- **DISPERSIÓ EN F.O.**
 - **FIBRES MULTI-MODE**
 - **FIBRES MONO-MODE**
- **AMPLE DE BANDA**
 - **COMPORTAMENT GAUSSIÀ**
 - **AMPLE DE BANDA PRÀCTIC**
 - **BW ÒPTIC vs BW ELÈCTRIC**

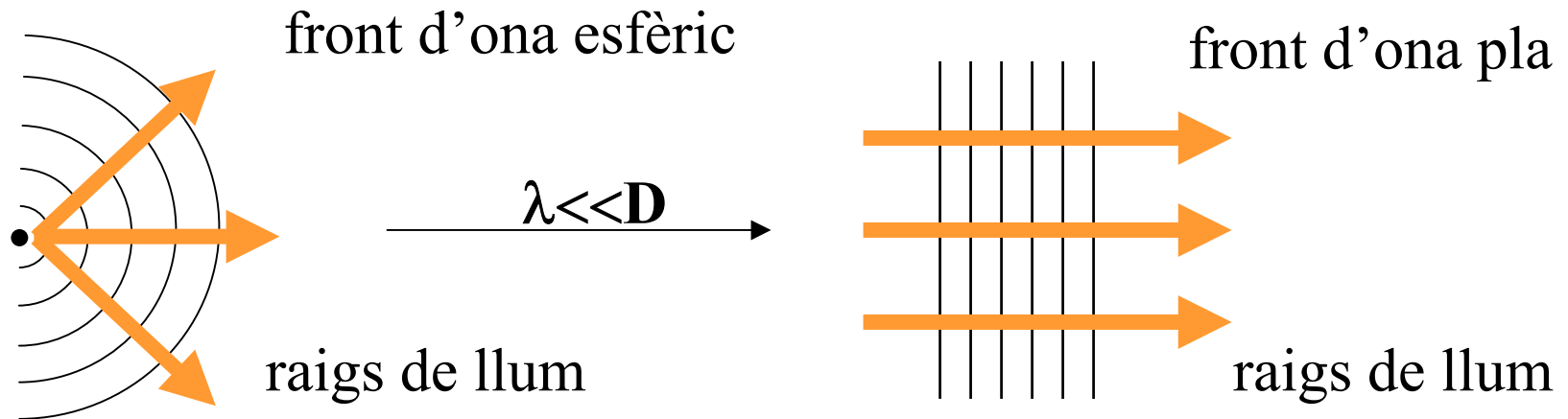
NATURALESIA DE LA LLUM

“La llum és un fenomen corresponent a una ona electromagnètica descrit pels mateixos principis teòrics que governen tota forma de radiació d'aquest tipus”



ÒPTICA GEOMÈTRICA: POSTULATS (I)

1. La llum viatja en forma de raigs

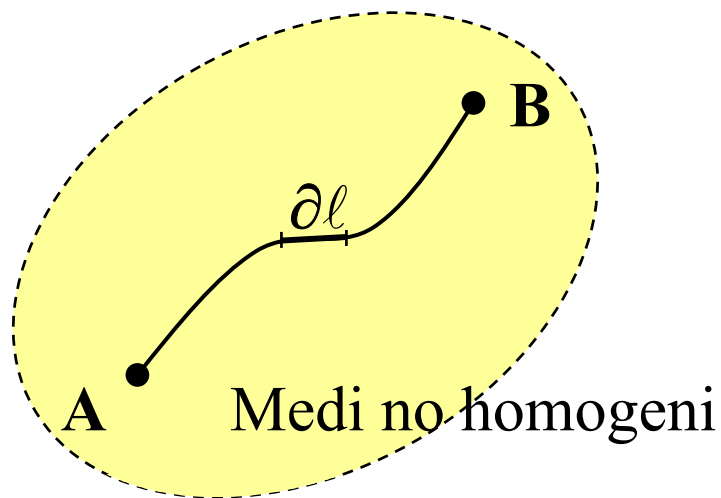


2. Un medi òptic ve caracteritzat pel seu **índex de refracció** ($n \geq 1$) que és el quocient entre la velocitat de propagació de la llum en el buit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) i en el medi en qüestió (v)

$$n \equiv \frac{c}{v} \geq 1 \quad \rightarrow \quad t = \frac{d}{v} = \frac{nd}{c} \quad nd \equiv \text{camí òptic}$$

ÒPTICA GEOMÈTRICA: POSTULATS (II)

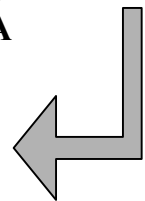
3. En un **medi no homogeni** l'índex de refracció és funció de la posició ($n=f(x,y,z)$)
4. La llum sempre segueix el camí més ràpid (**Principi de Fermat**)



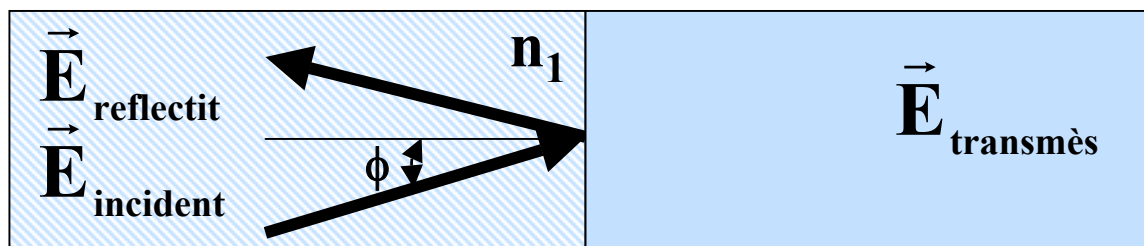
Longitud camí òptic

$$\int_A^B \mathbf{n}(\vec{\mathbf{r}}) \partial \ell \rightarrow \mathbf{t} = \frac{1}{c} \int_A^B \mathbf{n}(\vec{\mathbf{r}}) \partial \ell$$

$$\frac{\delta}{\delta \vec{\mathbf{r}}} \left[\int_A^B \mathbf{n}(\vec{\mathbf{r}}) \partial \ell \right] = \mathbf{0}$$



REFLEXIÓ I REFRACCIÓ (I)



Coefficient de reflexió $\Rightarrow \rho = \frac{\vec{E}_{\text{reflectit}}}{\vec{E}_{\text{incident}}}$

Reflectivitat $\Rightarrow R = \frac{P_{\text{reflectada}}}{P_{\text{incident}}} = |\rho|^2 \xrightarrow{\text{incidència normal}} R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$

Coefficient de transmissió $\Rightarrow t = \frac{\vec{E}_{\text{transmès}}}{\vec{E}_{\text{incident}}}$

Transmitivitat $\Rightarrow T = \frac{P_{\text{transmesa}}}{P_{\text{incident}}} = \frac{n_2 \cos \phi_2}{n_1 \cos \phi_1} |t|^2 = 1 - |\rho|^2 = 1 - R$

REFLEXIÓ I REFRACCIÓ (II)

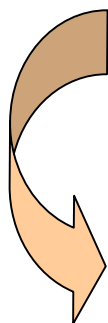
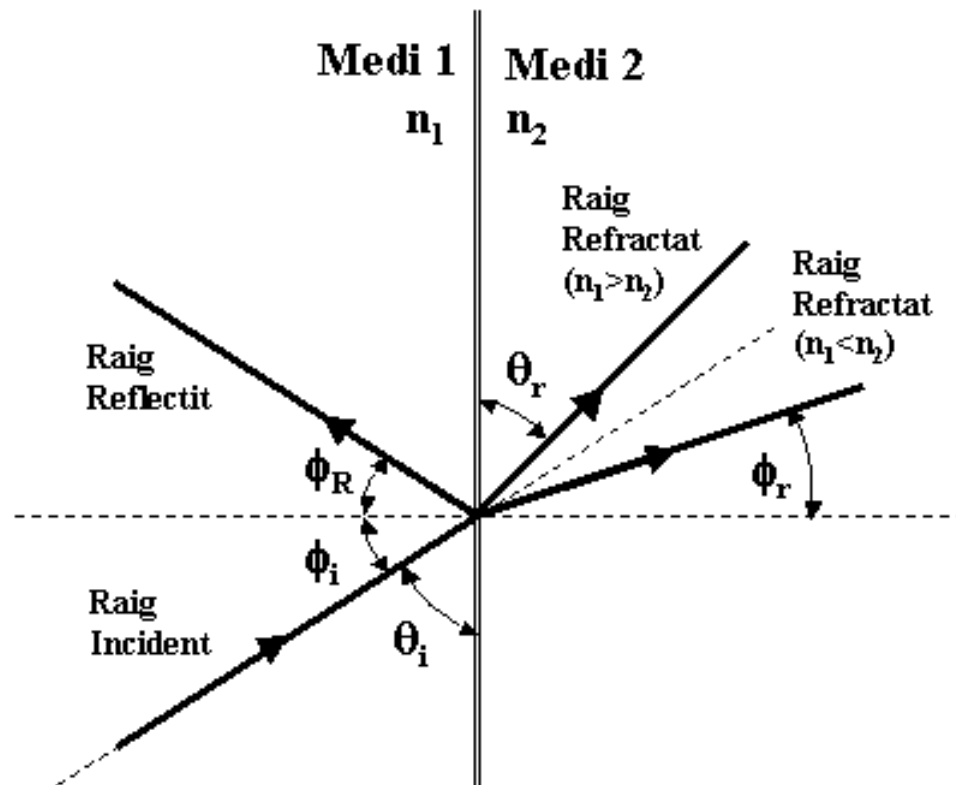
Llei de Reflexió

$$\phi_R = \phi_i$$

Llei de Snell

$$n_1 \cdot \sin(\phi_i) = n_2 \cdot \sin(\phi_r)$$

$$n_1 \cdot \cos(\theta_i) = n_2 \cdot \cos(\theta_r)$$



Refracció interna ($n_1 > n_2$)



$$\phi_r > \phi_i$$

Refracció externa ($n_1 < n_2$)



$$\phi_r < \phi_i$$

REFLEXIÓ I REFRACCIÓ (III)

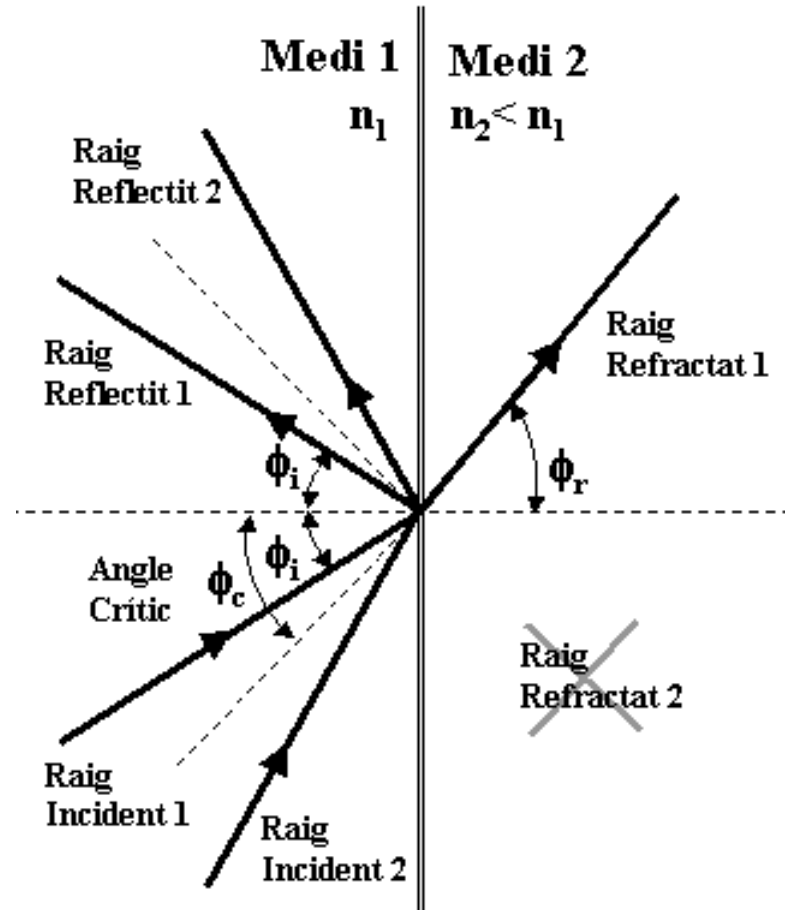
Reflexió Total

$$n_1 \cdot \sin(\phi_i) = n_2 \cdot \sin(\phi_r)$$

$$\sin(\phi_r) = \frac{n_1}{n_2} \sin(\phi_i)$$

↓ $(n_1 > n_2)$

{	$\sin(\phi_i) \in \left[0, \frac{n_2}{n_1} \right] \rightarrow \sin(\phi_r) < 1$	
	$\sin(\phi_i) = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \sin(\phi_r) = 1 (P_r = 0)$	
	$\sin(\phi_i) \in \left[\frac{n_2}{n_1}, 1 \right] \rightarrow \sin(\phi_r) > 1$	<p>→ Tota la llum es queda en el medi n_1</p>



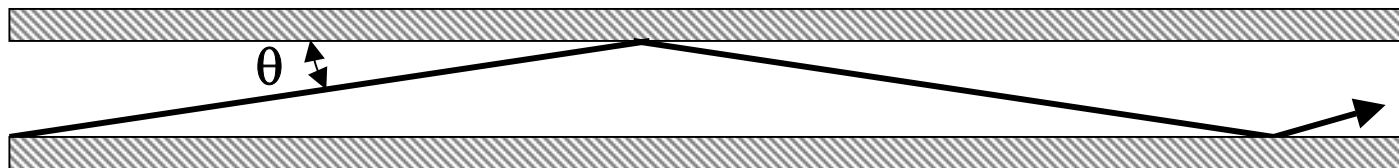
REFLEXIÓ I REFRACCIÓ (IV)

Angle crític $\longrightarrow \sin(\phi_c) = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \phi_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

Índex de refracció relatiu $\longrightarrow \Delta \equiv \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

Òptica Paraxial

Angles de propagació petits $\longrightarrow \sin \theta \approx \theta$



RELACIÓ $\Delta\lambda - \Delta f$

$$\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow \partial\lambda = -\frac{c}{f^2} \partial f \rightarrow \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \partial\lambda = -\int_{f_1}^{f_2} \frac{c}{f^2} \partial f$$

$$(\lambda_2 - \lambda_1) = c \cdot \frac{1}{f} \Big|_{f_1}^{f_2} = c \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right) = \frac{f_1 - f_2}{f_1 \cdot f_2} \cdot c$$

$$\Delta\lambda = c \cdot \frac{\Delta f}{f_1 \cdot f_2} = c \cdot \frac{\Delta f}{\left(f_p + \frac{\Delta f}{2} \right) \left(f_p - \frac{\Delta f}{2} \right)}$$



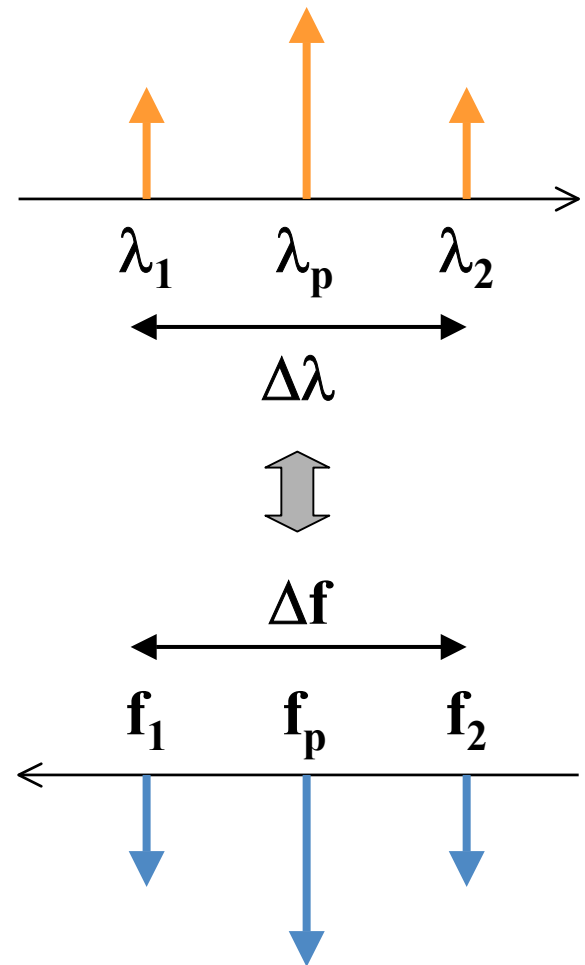
$$\Delta\lambda = c \cdot \frac{\Delta f}{f_p^2 - \left(\frac{\Delta f}{2} \right)^2}$$

$$\begin{matrix} \xrightarrow{\Delta f \ll f_p} \\ \Delta\lambda \ll \lambda_p \end{matrix}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_p} \approx \frac{\Delta f}{f_p}$$

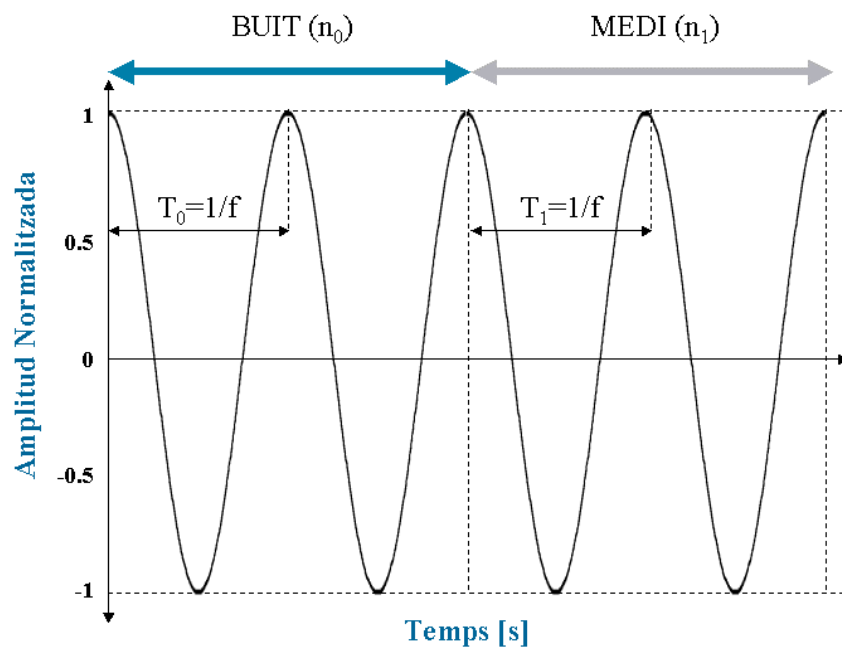
0.8nm \approx 100GHz

Espaiat WDM (ITU)



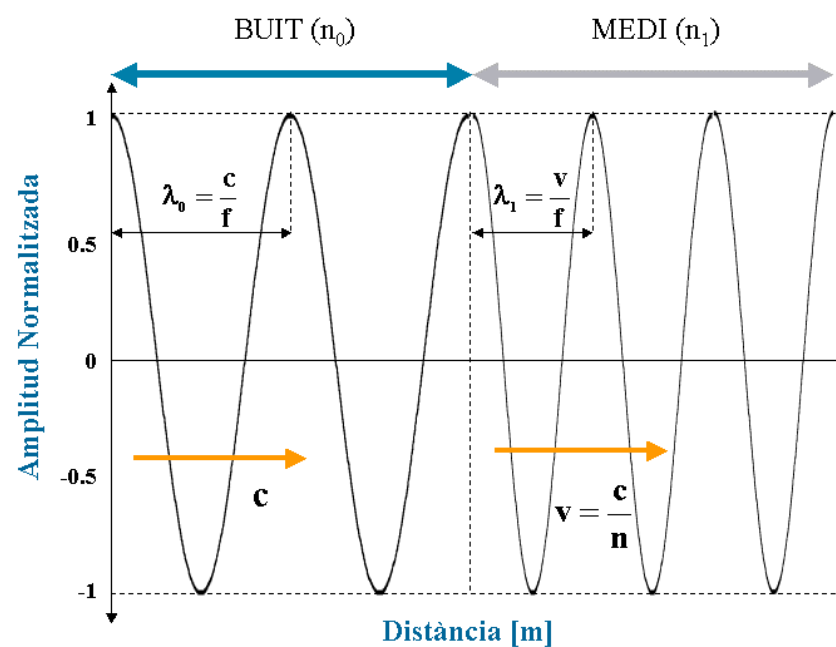
Freqüència

Evolució del camp
en un punt fixat



Longitud d'ona

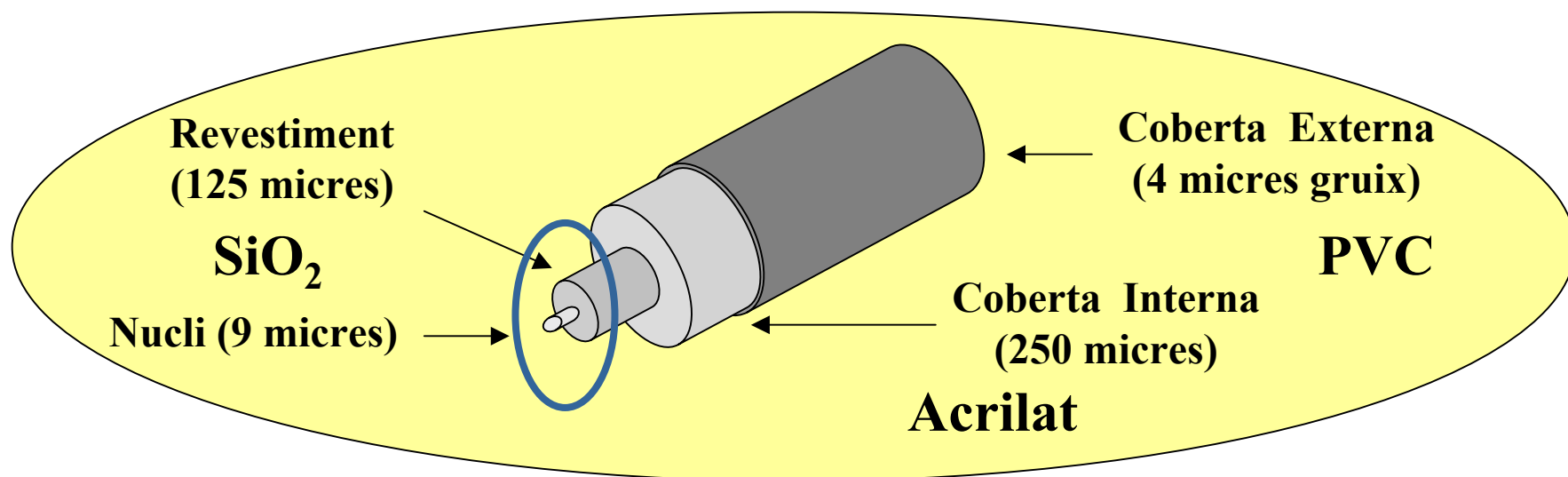
Evolució del camp
en un temps fixat



TIPUS DE FIBRES

Definició

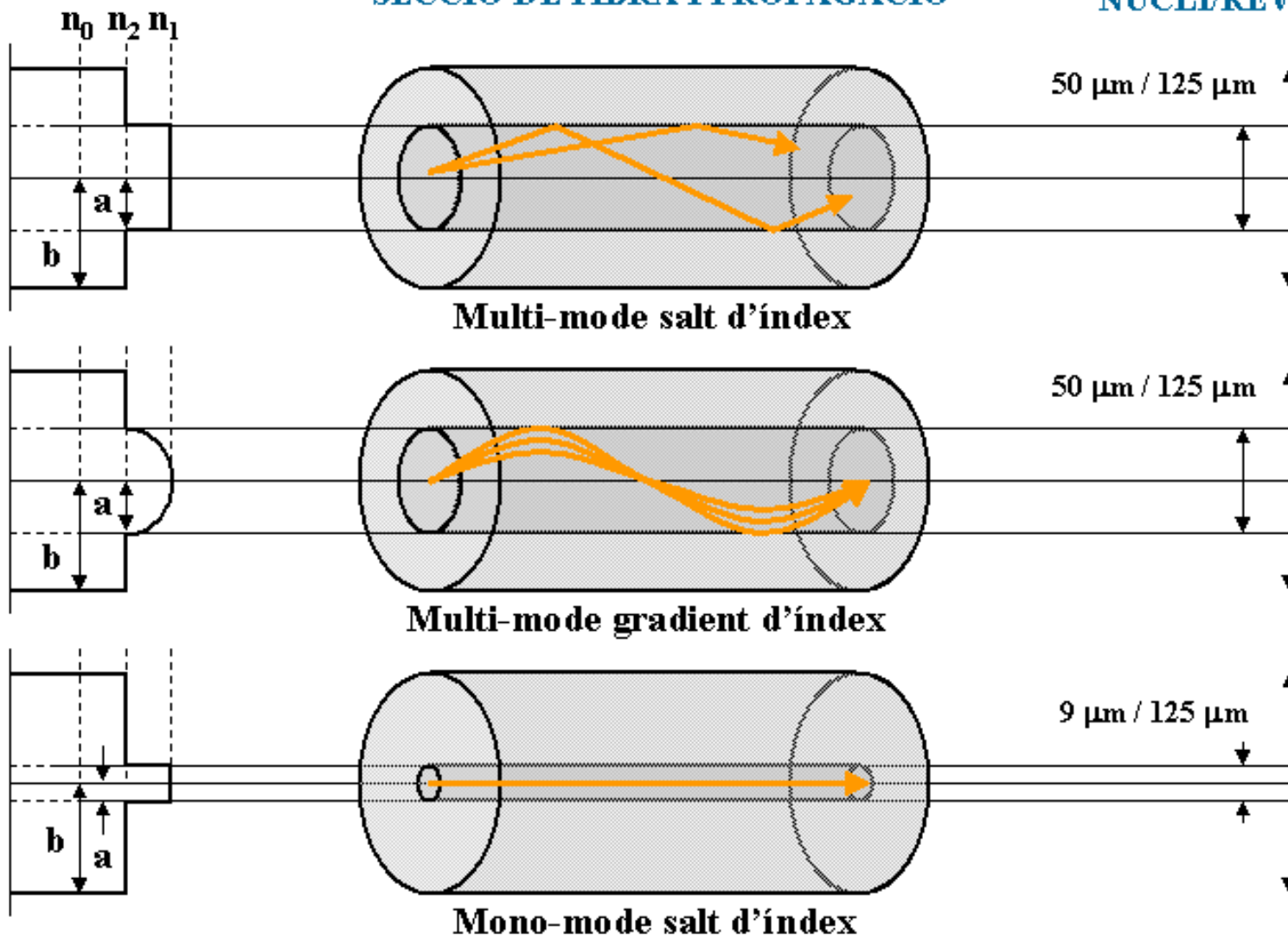
“Una fibra òptica és un medi dielèctric i cilíndric capaç de guiar la llum, a certes freqüències, amb baixa atenuació i gran ample de banda”



PERFIL D'ÍNDEX

SECCIÓ DE FIBRA I PROPAGACIÓ

VALORS TÍPICS
NUCLI/REV

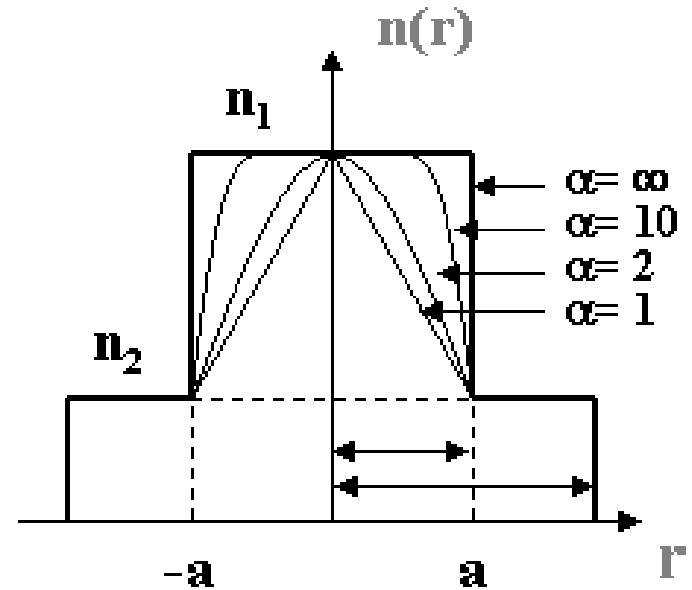


Perfil d'índex gradual (I)

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left(1 - \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} (r/a)^\alpha \right)^{\frac{1}{2}} & r < a \\ n_1 \left(1 - \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} = n_2 & r \geq a \end{cases}$$

α : paràmetre de perfil

- $\alpha = \infty \Rightarrow$ Salt d'índex
- $\alpha = 2 \Rightarrow$ Índex parabòlic
- $\alpha = 1 \Rightarrow$ Índex triangular



r : distància radial

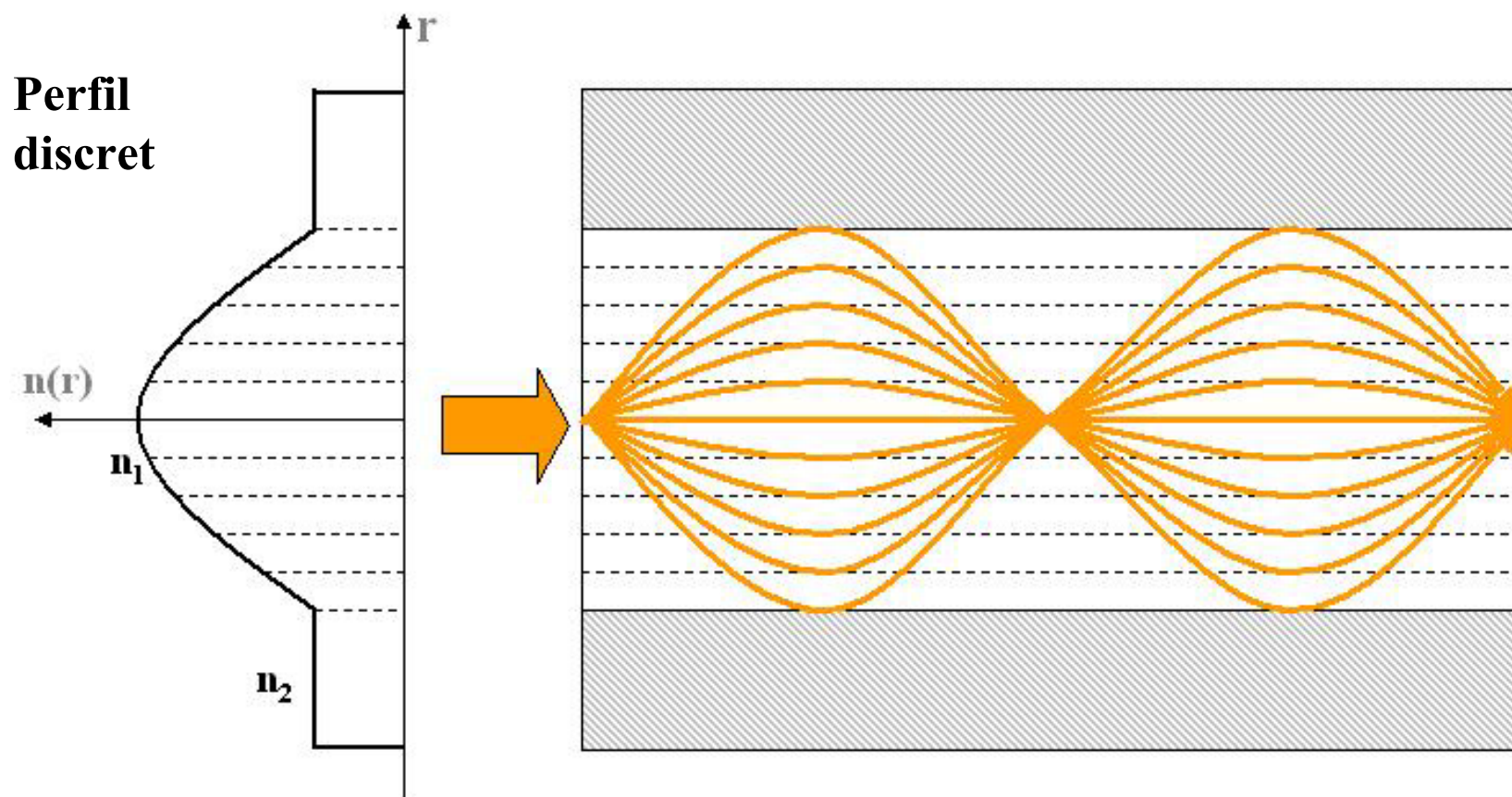
$$\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \approx 2 \frac{n_1 - n_2}{n_1} \equiv 2\Delta \quad \Rightarrow \quad n(r) \approx \begin{cases} n_1 \left(1 - 2\Delta (r/a)^\alpha \right)^{\frac{1}{2}} & r < a \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_2 & r \geq a \end{cases}$$

O. Paraxial ($n_1 \approx n_2$)

Δ : índex de refracció relatiu

Perfil d'índex gradual (II)

El retard sofert per qualsevol raig és el mateix independentment de l'angle d'entrada al nucli de la fibra (mateix camí òptic)



PARÀMETRES CARACTERÍSTICS

Paràmetres estàtics Són aquells que no depenen de la distància



Paràmetres dinàmics Són aquells que depenen de la distància

Atenuació Decaïment de la potència lluminosa per unitat de longitud

Dispersió (Ample de Banda) Eixamplament del polsos de llum per unitat de longitud

ESTANDARITZACIÓ

Fibres Multimode

FIBRA MULTIMODE 62,5/125	ISO/IEC 793	FIBRA MULTIMODE 50/125	ITU-T G.651
Obertura Numèrica	NA = 0,275 (+/- 0,015)	Obertura Numèrica	NA= 0,18 a 0,24 (+/- 10%)
Perfil d'índex de refracció	Step index	Perfil d'índex de refracció	Graded index
Relació d'índexs de refracció	1,90%	Índex de refracció mitjà	1,43
Diàmetre del nucli	62,5 µm (+/- 3 µm)	Diàmetre del nucli	50 µm (+/- 3 µm)
Diàmetre del revestiment (Cladding)	125 µm (+/- 1 µm)	Diàmetre del revestiment (Cladding)	125 µm (+/- 3 µm)
Recobriments de silicona (Coating)	245 µm (+/- 10 µm)	Recobriments de silicona (Coating)	245 µm (+/- 10 µm)
Longitud de onda d'aplicació	850 i 1300 nm	Error de concentricitat	6%
Atenuació a 850 nm	Entre 3 i 3,2 dB/km	Error de circularitat del nucli	6%
Atenuació a 1300 nm	Entre 0,7 i 0,8 dB/km	Error de circularitat del revestiment	2%
Ample de Banda a 850 nm	Entre 200 i 300 MHz	Atenuació a 850 nm	Entre 2,7 i 3 dB/km
Ample de Banda a 1300 nm	Entre 400 i 600 MHz	Atenuació a 1300 nm	Entre 0,7 i 0,8 2 dB/km
		Ample de Banda a 850 nm	Entre 300 i 500 MHz
		Ample de Banda a 1300 nm	Entre 500 i 1000 MHz

Fibres Monomode

FIBRA MONOMODE ESTÀNDARD	ITU-T G.652
Longitud d'ona de tall	1,18 a 1,27 μm
Diàmetre del camp modal	9,3 (8 a 10) μm (+/- 10%)
Diàmetre del revestiment (Cladding)	125 μm (+/- 3 μm)
Recobriments de silicó (Coating)	245 μm (+/- 10 μm). Acrilato curado con UV.
Error de circularitat del revestiment	2%
Error de concentricitat del camp modal	1 μm
Atenuació a 1300 nm	de 0,4 a 1 dB/km
Atenuació a 1550 nm	de 0,25 a 0,5 dB/km
Dispersió Cromàtica de 1285-1330 nm	3,5 ps/km.nm
Dispersió Cromàtica de 1270-1340 nm	6 ps/km.nm
Dispersió Cromàtica a 1550 nm	20 ps/km.nm

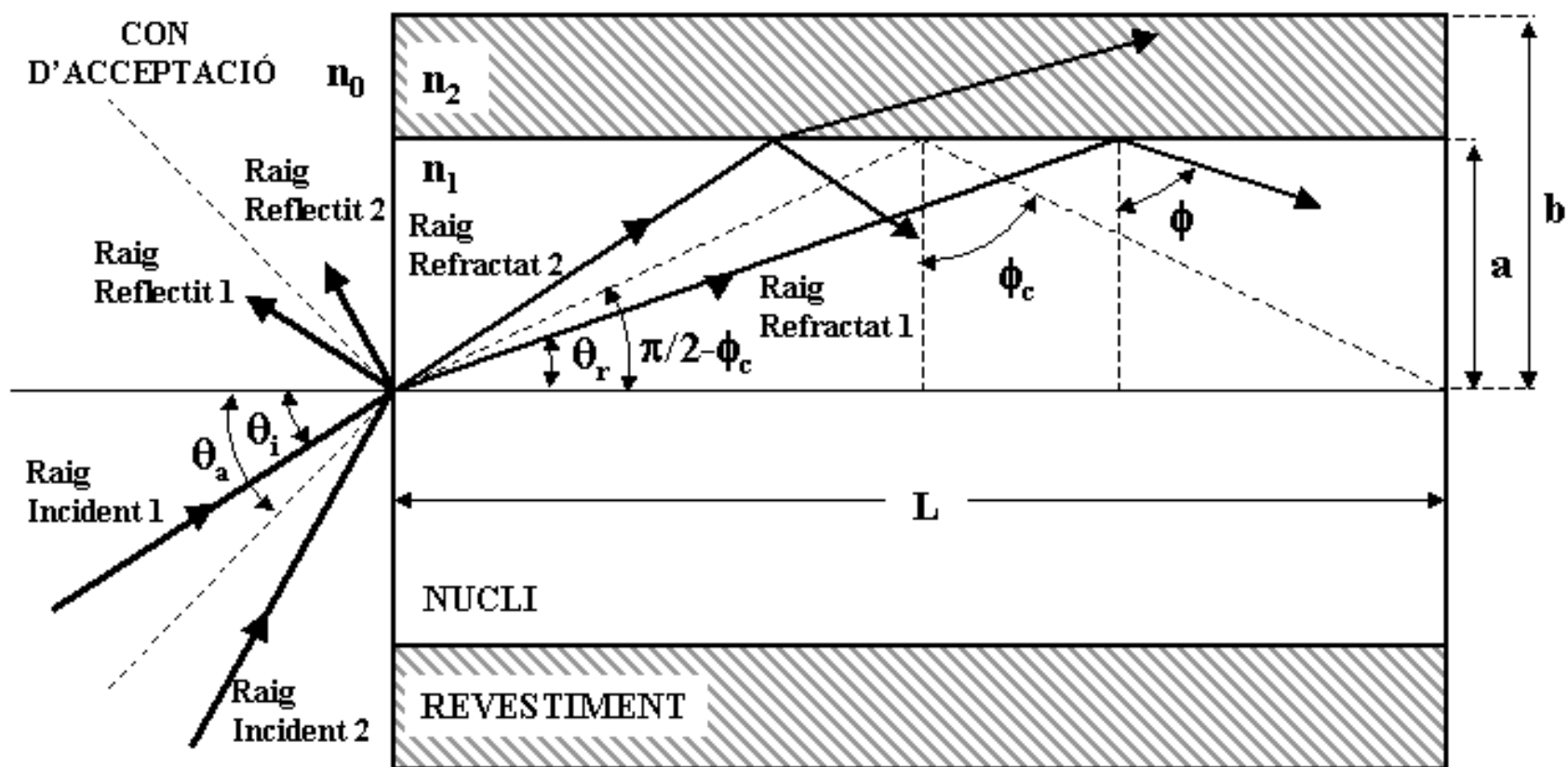
FIBRA MONOMODE DE MINIMA ATENUACIÓ	ITU-T G.654
Diàmetre del revestiment (Cladding)	125 μm (+/- 3 μm)
Error de circularitat del revestiment	2%
Error de concentricitat del camp modal	1 μm
Recobriments de silicó (Coating)	245 μm (+/- 10 μm)
Atenuació inferior a	0,15 a 0,25 dB/Km a 1550 nm
Dispersió Cromàtica	20 ps/km.nm a 1550 nm

FIBRA MONOMODE DE DISPERSIÓ DESPLAÇADA	ITU-T G.653
Longitud d'ona de tall	1,05 a 1,15 μm
Diàmetre del camp modal	8 (7 a 8,3) μm (+/- 10%)
Diàmetre del revestiment (Cladding)	125 μm (+/- 3 μm)
Recobriments de silicó (Coating)	245 μm (+/- 10 μm)
Error de circularitat del revestiment	2%
Error de concentricitat del camp modal	1 μm
Atenuació a 1550 nm	inferior a 0,25 a 0,5 dB/Km
Atenuació a 1300 nm	inferior a 1 dB/Km
Dispersió Cromàtica	3,5 ps/km.nm entre 1525-1575 nm

FIBRA MONOMODE DE DISPERSIÓ DESPLAÇADA NO NUL·LA	ITU-T G.655
Diàmetre del camp modal	8,4 μm (+/- 0,6 μm). Diàmetre nucli 6 μm .
Diàmetre del revestiment (Cladding)	125 μm (+/- 1 μm)
Longitud d'ona de tall	1260 nm
Atenuació	Desde 0,22 a 0,30 dB/Km a 1550 nm
Dispersió Cromàtica	4,6 ps/km.nm a 1550 nm
Zona de dispersió no nul·la	Desde 1540 a 1560 nm

PROPAGACIÓ EN F.O.

Reflexió Total



REFLEXIÓ TOTAL

$$n_0 < n_2 < n_1$$

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \xrightarrow{n_0=1} \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad \longleftarrow \text{Entrada fibra}$$

$$n_1 \sin \phi_i = n_2 \sin \phi_r \rightarrow \sin \phi_r = \frac{n_1}{n_2} \sin \phi_i \quad \longleftarrow \text{Revestiment}$$

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \longleftarrow \text{Angle Crític}$$

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} - \phi_i \rightarrow \sin \theta_r = \cos \phi_i \xrightarrow{\phi_i=\phi_c} \sin \theta_c = \left(1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r = n_1 \cos \phi_i \xrightarrow{\phi_i=\phi_c} \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \longleftarrow \text{Angle d'Acceptació}$$

$$\text{Obertura Numèrica} \rightarrow \text{NA} \equiv (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

$$\Delta \equiv \frac{n_1 - n_2}{n_1} \rightarrow \text{NA} \approx n_1 (2\Delta)^{1/2}$$

O. Paraxial

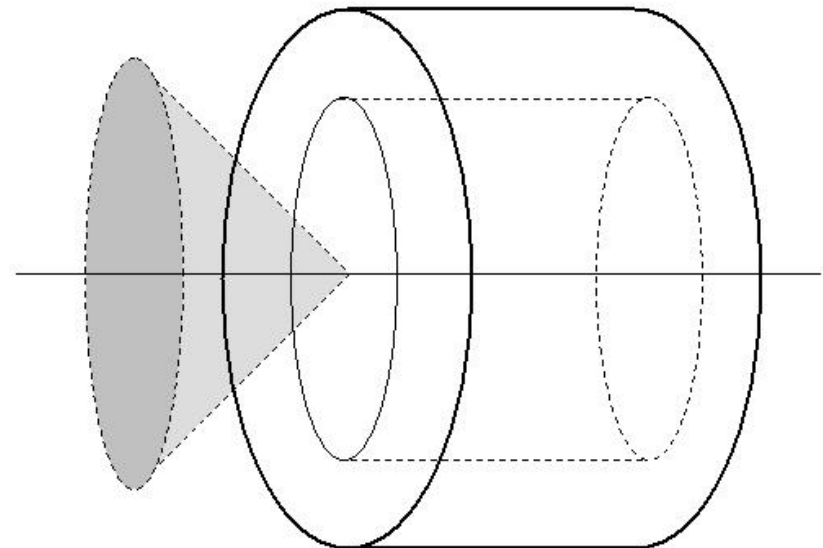
L'Obertura Numèrica fa referència a l'habilitat que té la fibra òptica per captar la llum que prové de l'exterior. En aquest sentit ens interessa que sigui gran.

Angle Sòlid d'Acceptació

$$\begin{aligned}\Omega_c &= \iint_{\theta_a} \partial\Omega \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_a} \sin \theta \cdot \partial\theta \cdot \partial\phi \\ &= 2\pi(1 - \cos \theta_a) \\ &= 4\pi \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta_a}{2} \right) \approx \pi \cdot \theta_a^2\end{aligned}$$

O. Paraxial

Con d'Acceptació



Eficiència d'acoblament font-fibra

$$\eta_c \equiv \frac{P_{IN}}{P_{Total}} \rightarrow L_{dB} \equiv -10 \cdot \log[\eta_c] \quad \text{Pèrdues d'Acoblament}$$

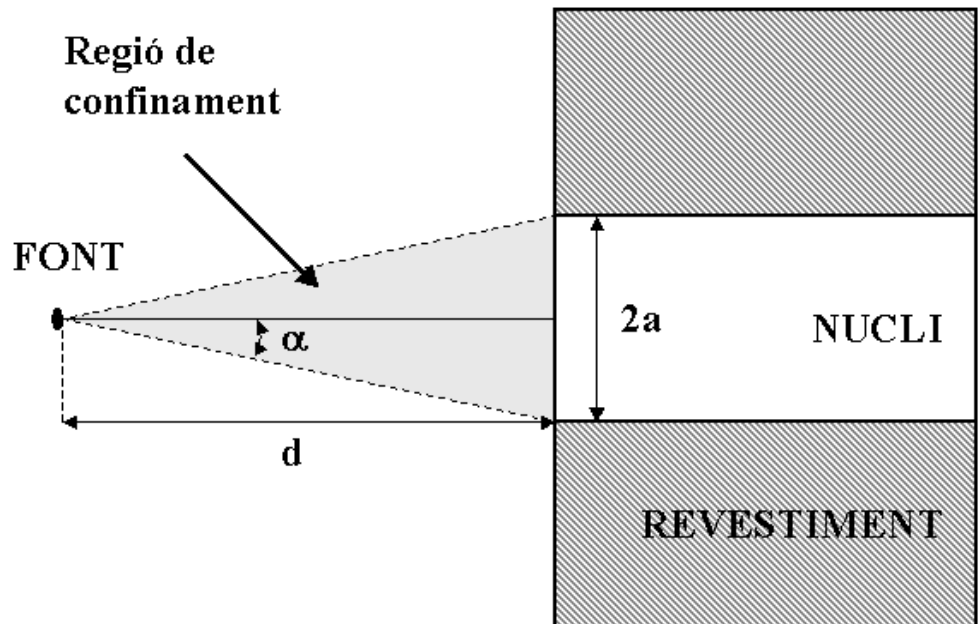
$$P_{IN} = \iint_{\theta} (1 - R)P(\theta) \cdot \partial\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} (1 - R)P(\theta) \sin \theta \cdot \partial\theta \cdot \partial\phi$$

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{a}{d}$$

$$\alpha > \theta_a \rightarrow \theta = \theta_a \quad \text{Limita NA}$$

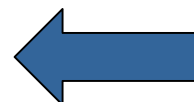
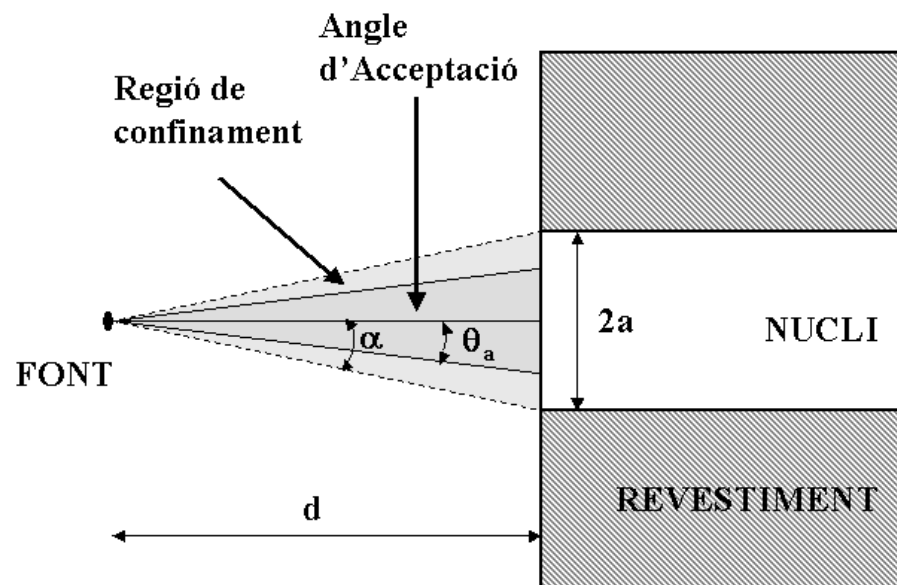
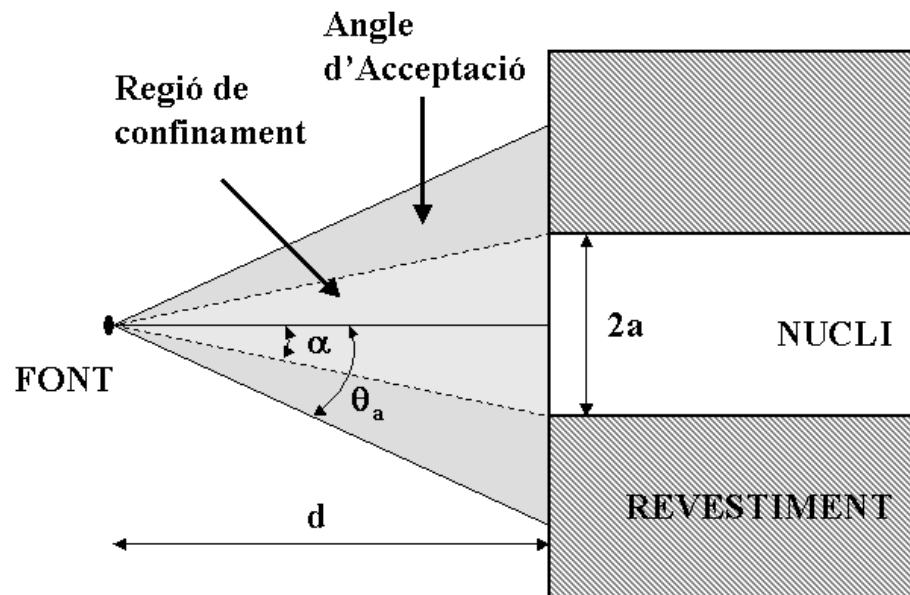
$$\alpha < \theta_a \rightarrow \theta = \alpha \quad \text{Limita d}$$



Limita d



$$\alpha < \theta_a \rightarrow \theta = \alpha$$



Limita NA

$$\alpha > \theta_a \rightarrow \theta = \theta_a$$