

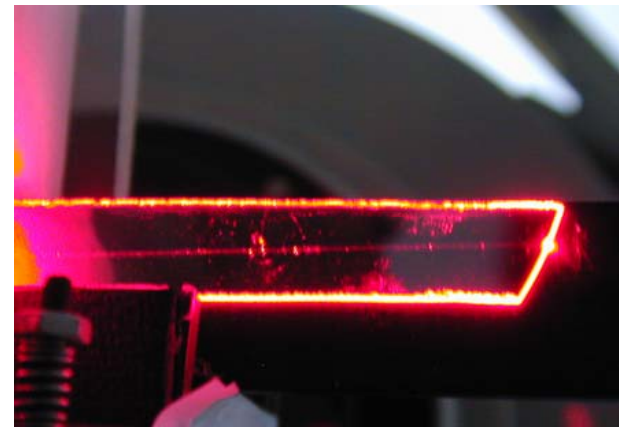
Introduzione alle guide dielettriche

Carlo Giacomo Somena
Filippo Pigozzo



Introduzione

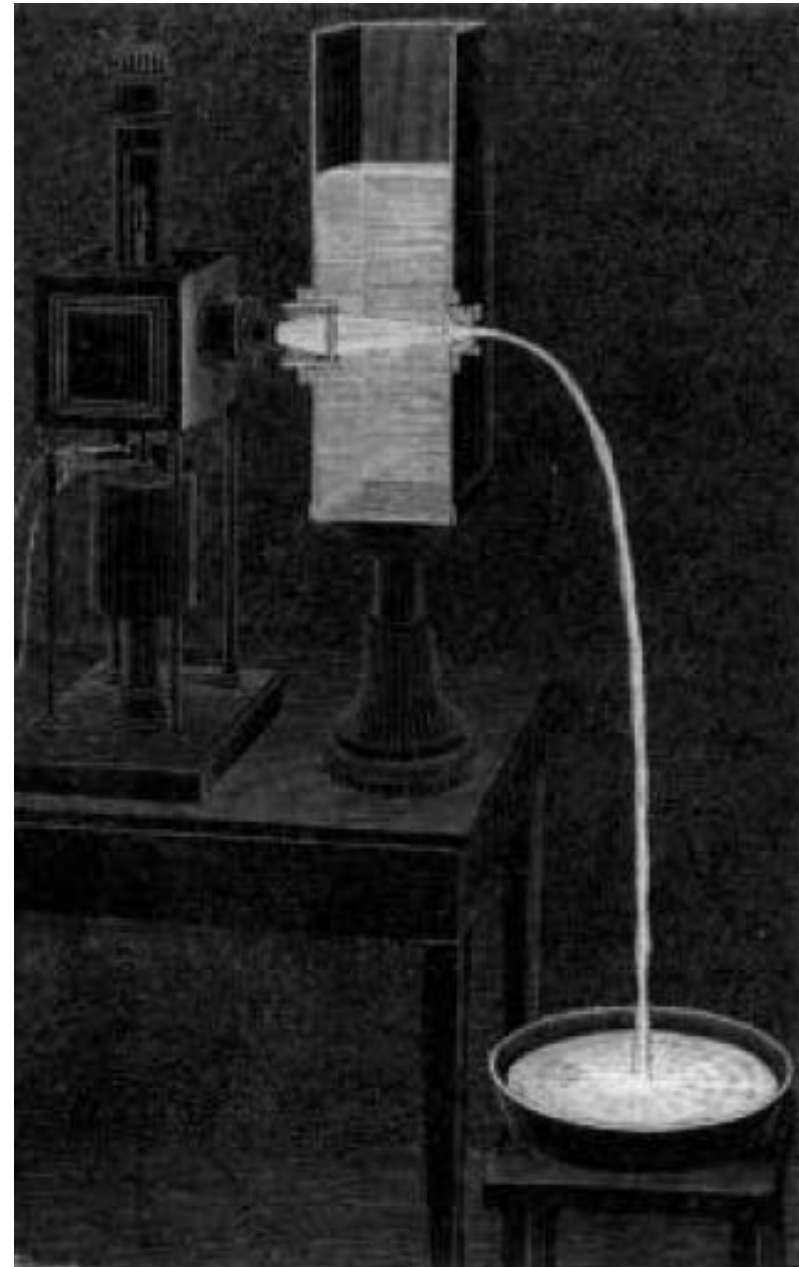
- Le fibre ottiche e le strutture dielettriche guidanti in generale funzionano in base al fenomeno fisico della riflessione totale:
- Se una radiazione elettromagnetica si propaga in un mezzo avente indice di rifrazione maggiore di quello che lo circonda, essa vi può restare intrappolata, anche per chilometri.





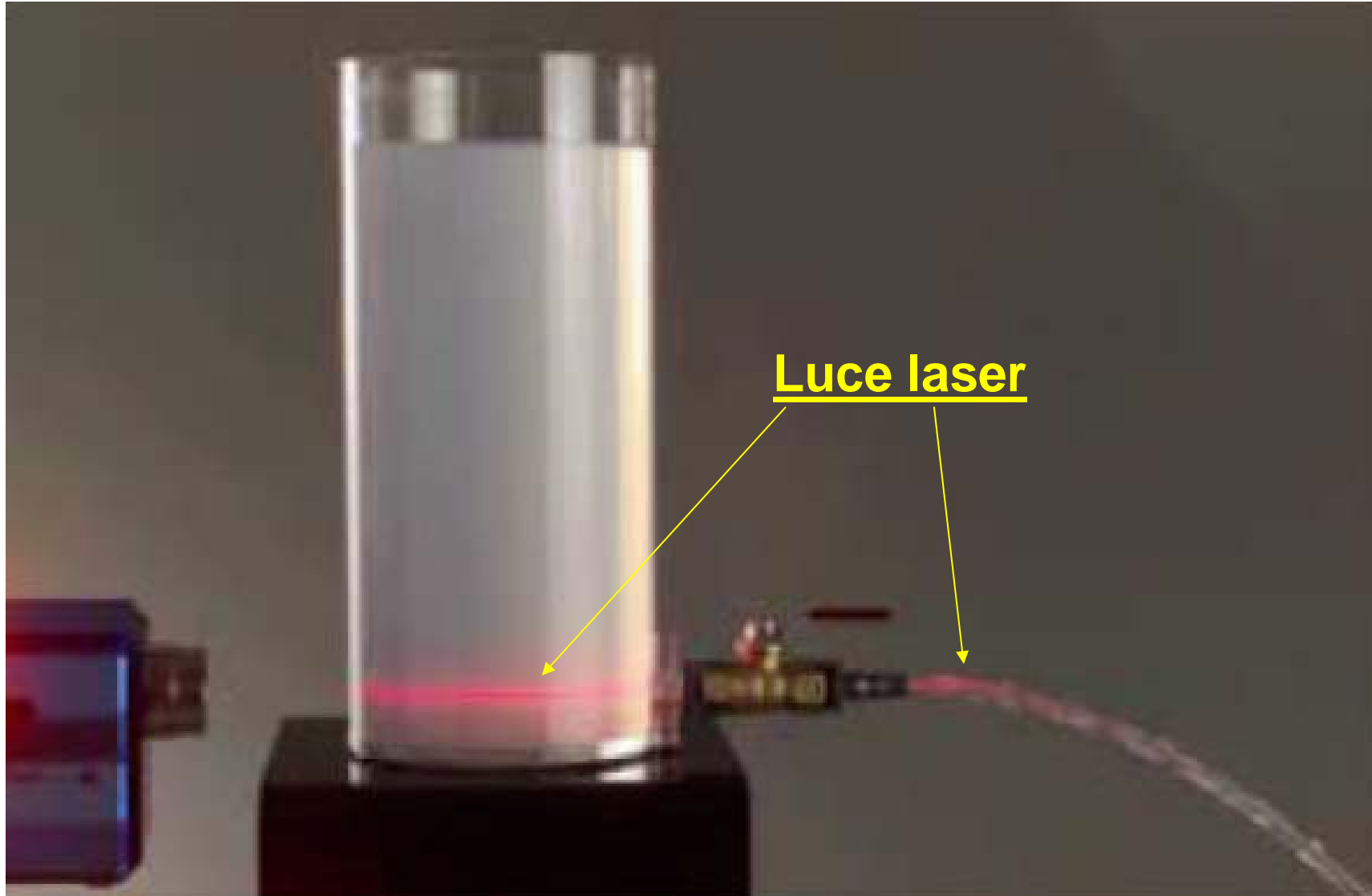
Un po' di storia (1/5)

- L'idea di sfruttare la riflessione totale per guidare la luce fu formulata da John Tyndall verso il 1870.
- Non c'erano le fibre ottiche e la "guida d'onda" era uno zampillo d'acqua





Un po' di storia (2/5)





Un po' di storia (3/5)

- Le prime fibre ottiche in vetro (SiO_2 amorfa) furono realizzate attorno agli anni '20 (del 1900) e la loro attenuazione tipica era di 1000 dB/km. (La potenza in uscita dopo 1 km era $1/10^{100}$ di quella in ingresso). Gli scarsi risultati fecero pensare che esse non fossero utilizzabili per trasmettere informazione a distanza.
- Nel 1960 Maiman realizza il primo laser.
- Poiché le frequenze ottiche sono dell'ordine di 500 THz, (THz = 10^{12} Hz), in linea di principio l'ottica consente una capacità trasmissiva di 5 ordini di grandezza superiore a quella dei sistemi a microonde (frequenze del GHz = 10^9 Hz).
- I primi tentativi di sfruttare questa potenziale capacità trasmissiva furono fatti in collegamenti ottici non guidati (in atmosfera) ma con scarsi risultati.



Un po' di storia (4/5)

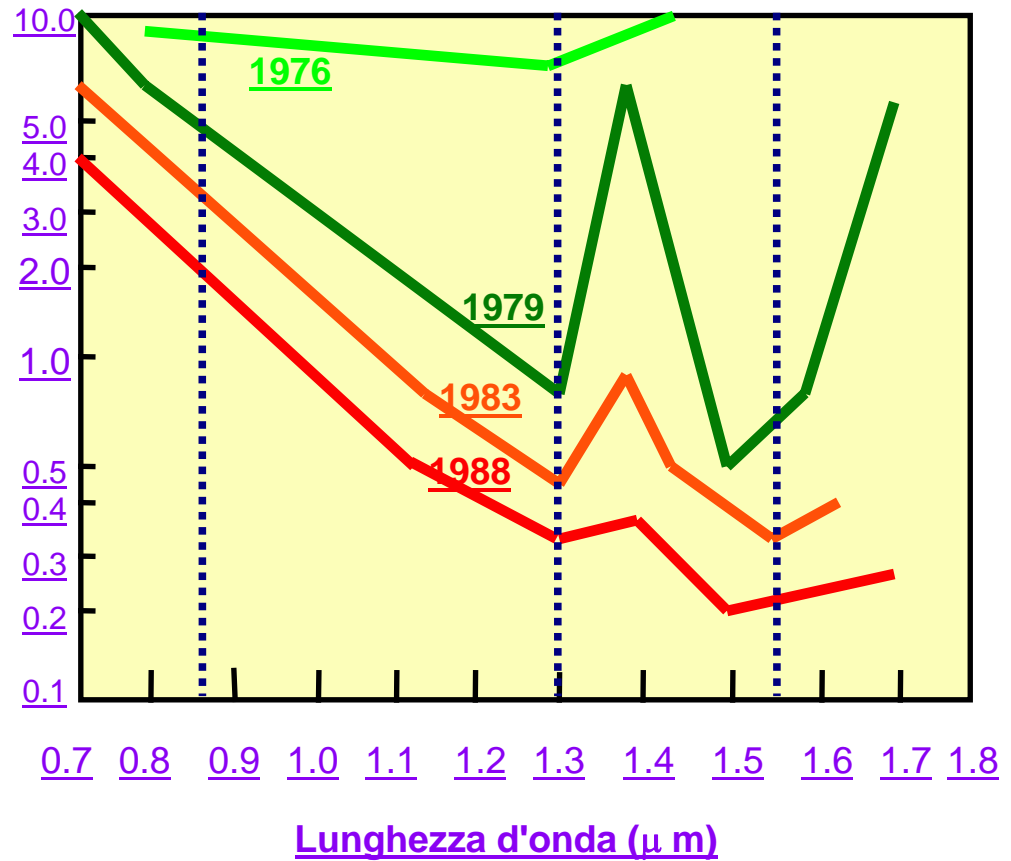
- Per compiere brevi tratte è comunque ancora oggi usata e conveniente la propagazione non guidata.
- Nel 1966 Kao e Hokham osservarono che le perdite elevate delle f.o. erano dovute a imperfezioni realizzative.
- Nel 1970 Kapron, Keck e Maurer della Corning Glass Work fabbricarono la prima fibra a basse perdite (20 dB/km, ovvero dopo 1 km si aveva in uscita 1/100 della potenza in ingresso) grazie all'introduzione della tecnica di deposizione chimica in fase di vapore.
- Negli anni seguenti si riuscì a ridurre le perdite di una fibra fino a 0.16 dB/km alla lunghezza d'onda di 1550nm (limite inferiore teorico 0.14 dB/km).



Un po' di storia (5/5)

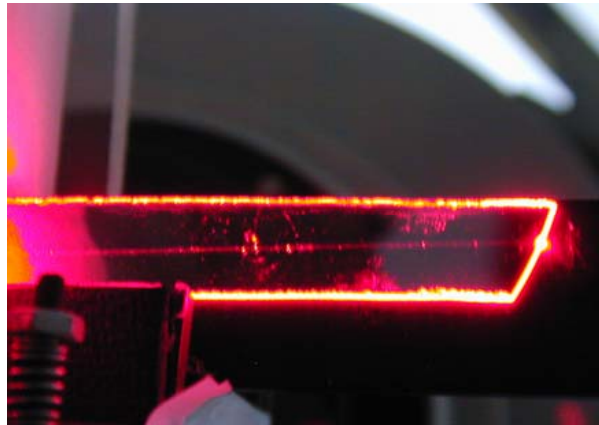
Curve spettrali
dell'attenuazione
delle f.o.in SiO₂
al passare degli
anni.

Attenuazione
(dB/km)



Le strutture guidanti: cenni generali

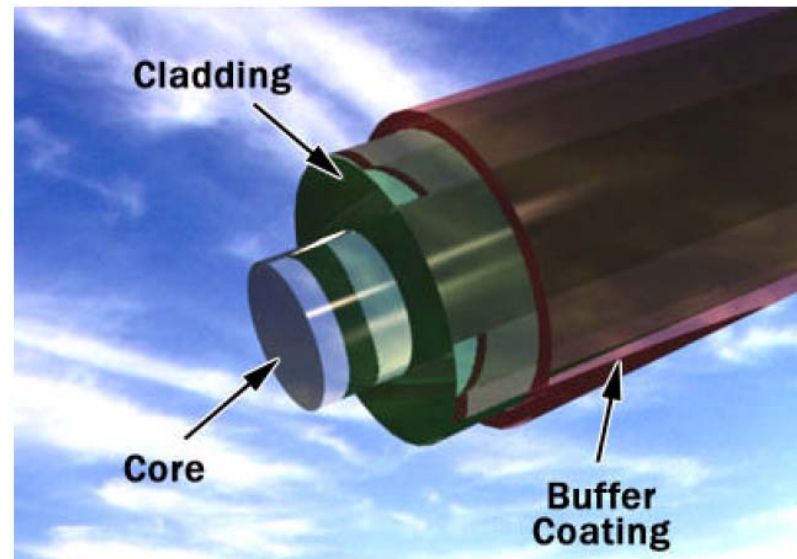
- Ogni guida d'onda è costituita da un elemento centrale (*core*), in cui viene guidata la luce, immerso in un mantello esterno (*cladding*) ad indice di rifrazione inferiore.
- Questa è una caratteristica comune a tutte le strutture guidanti dielettriche.





La fibra ottica (1/6)

- Una fibra ottica è una guida d'onda cilindrica fatta di materiale dielettrico a basse perdite come il vetro di silice o recentemente la plastica (fibre POF).
- E' costituita anch'essa da un nucleo centrale (*core*), in cui viene guidata la luce, immerso in un mantello esterno (*cladding*) ad indice di rifrazione *leggermente inferiore*.
- Esiste poi un rivestimento esterno che dà resistenza meccanica alla fibra.





La fibra ottica (2/6)

- Sono numerosi i vantaggi introdotti dalle fibre ottiche:
 - Elevata banda di trasmissione: data la lunghezza d'onda della luce è possibile trasmettere un segnale che contiene molte più informazioni di quello che è possibile fare con un conduttore metallico (anche del cavo coassiale).
 - Isolamento elettrico: le fibre ottiche non richiedono un cavo di terra. Trasmettitore e ricevitore sono isolati tra loro e sono quindi liberi da problemi circuitali (pila geologica). Non ci sono inoltre problemi di scariche e shock elettrici.
 - Immunità alle interferenze elettromagnetiche: non emettono nè ricevono interferenze elettromagnetiche.
 - Basse perdite: si può trasmettere per molti chilometri utilizzando meno ripetitori e amplificatori.



La fibra ottica (3/6)

- Sono numerosi i vantaggi introdotti dalle fibre ottiche (continua):
 - Leggerezza e compattezza: la fibra è leggera e un cavo di fibra ottica occupa meno spazio di uno metallico a parità di capacità di trasmettere i segnali.
 - Sono facili da installare e le trincee per la posa sono più piccole.



La fibra ottica (4/6)

- Alcune delle aree di applicazione più comuni per le fibre ottiche sono:
 - Telecomunicazioni: voce, dati e video sono le informazioni che più vengono trasmesse tramite fibra ottica.
 - Sensoristica: è possibile trasmettere la luce ad un sensore che misura pressione, temperatura o lo spettro.
 - Trasduttore: la fibra può essere impiegata direttamente come sensore per misurare variabili ambientali quali sforzi, pressione, temperature, pH.
 - Trasmissione di potenza: le fibre possono convogliare rilevanti quantità di potenza per le applicazioni di taglio, saldatura, marchio e foratura.



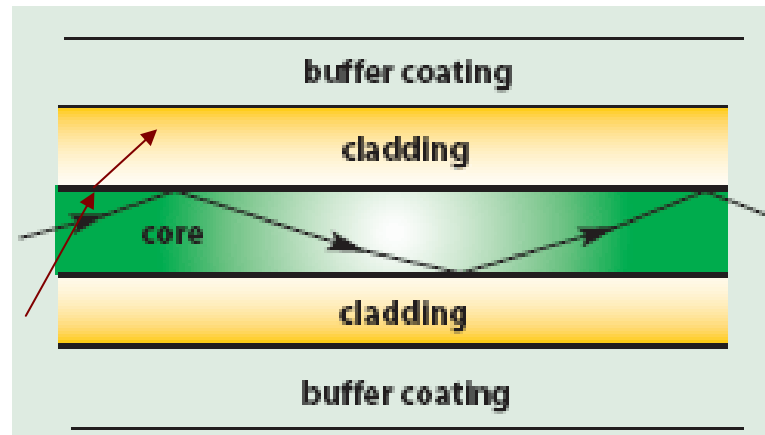
La fibra ottica (5/6)

- Alcune delle aree di applicazione più comuni per le fibre ottiche sono (continua):
 - Illuminazione: una treccia di fibre con una sorgente da una parte può illuminare aree difficili da raggiungere, per esempio dentro un corpo umano per essere usate con un endoscopio.
 - Decorazione: per esempio negli alberi di Natale.



La fibra ottica (6/6)

- Nella fibra ottica i raggi di luce che incidono all'interfaccia nucleo mantello con angoli maggiori dell'angolo critico subiscono riflessione totale e sono guidati nel nucleo senza rifrazione.
- Raggi con inclinazione inferiore vengono in parte rifratti e perdono potenza nel mantello ad ogni riflessione e non sono quindi guidati su distanze significative.





Come si studia la propagazione guidata (1/7)

- Ci sono due metodi per descrivere la propagazione della luce in una guida di luce:
 - il primo approccio usa l'ottica geometrica e i concetti di riflessione e rifrazione; esso fornisce una visione semplice e intuitiva del meccanismo di propagazione.
 - il secondo, rigoroso e matematicamente più impegnativo, consiste nel risolvere le equazioni di Maxwell con le appropriate *condizioni al contorno*. Sono queste ultime che fanno la differenza (basilare) rispetto alle guide a pareti conduttrici.
- Inizialmente verrà impiegato il primo approccio per la sua semplicità e per l'immediatezza dei risultati. In seguito si illustrerà schematicamente il secondo.



Come si studia la propagazione guidata (2/7)

- Definizione dell'indice di rifrazione:
- Nel vuoto la luce viaggia alla velocità $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.
- La velocità della luce è legata alla frequenza e alla lunghezza d'onda dalla relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- In un mezzo dielettrico la luce viaggia alla velocità v , caratteristica del materiale ed inferiore a c .
- Il rapporto fra la velocità nel vuoto e nel materiale definisce l'indice di rifrazione n del mezzo:

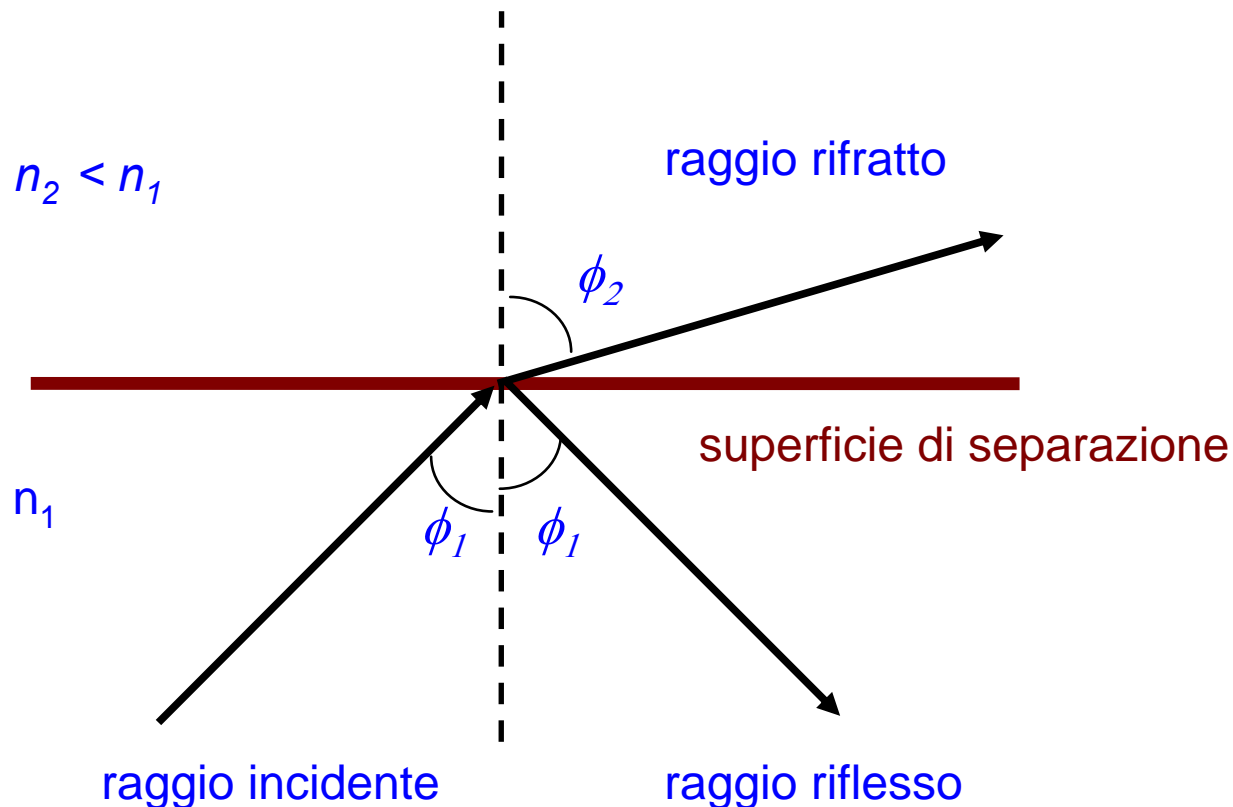
$$n = \frac{c_0}{c}$$

- Per esempio $n=1.33$ per l'acqua e $n=1.5$ per il vetro.



Come si studia la propagazione guidata (riflessione e rifrazione) (3/7)

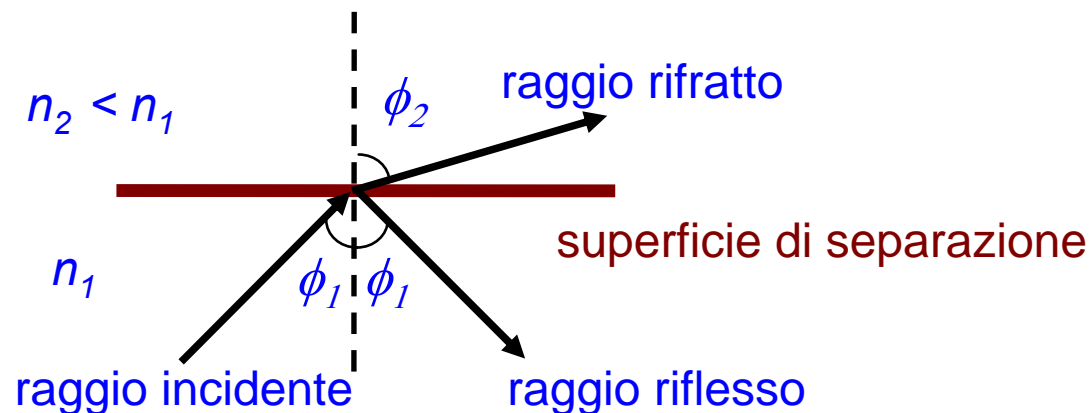
- Quando un raggio luminoso incontra la superficie di separazione fra due dielettrici diversi, parte del raggio viene riflessa e parte trasmessa (o rifratta) nell'altro dielettrico.





Come si studia la propagazione guidata (riflessione e rifrazione) (4/7)

- Per effetto della diversa velocità della luce nei due mezzi (con diverso indice di rifrazione), si ha che l'angolo di trasmissione ϕ_2 è diverso da quello di incidenza ϕ_1 .
- L'angolo con cui la radiazione ritorna all'interno del mezzo di provenienza è uguale a quello di incidenza.
- Se la superficie di separazione tra i due mezzi è piana, i tre raggi, incidente, riflesso e rifratto, appartengono allo stesso piano





Come si studia la propagazione guidata (riflessione e rifrazione) (5/7)

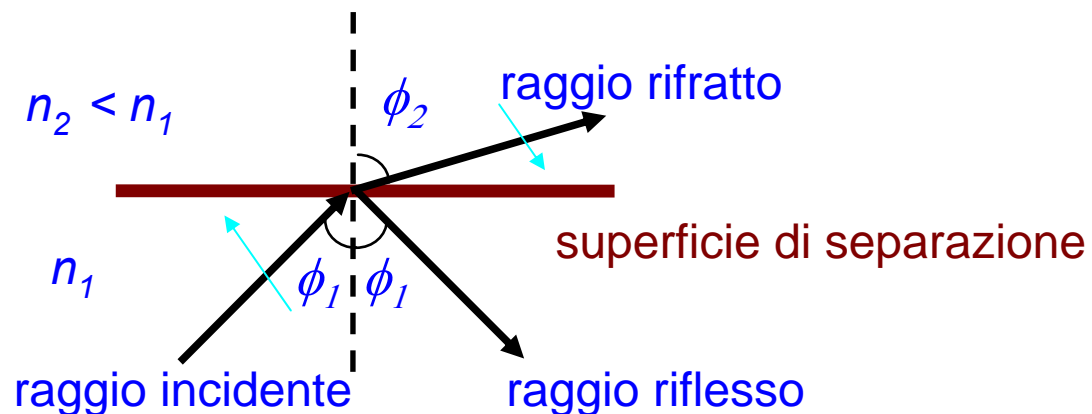
- La relazione fra tali angoli è fornita dalla legge di Snell:

$$n_1 \sin(\phi_1) = n_2 \sin(\phi_2)$$

- Quando la luce, provenendo da un mezzo *più denso* (indice di rifrazione maggiore), incide sulla superficie di separazione di un mezzo *meno denso*, si ha

$$\phi_2 > \phi_1$$

- All'aumentare di ϕ_1 si raggiunge quindi una situazione in cui ϕ_2 raggiunge i 90 gradi (mentre $\phi_1 < 90^\circ$).

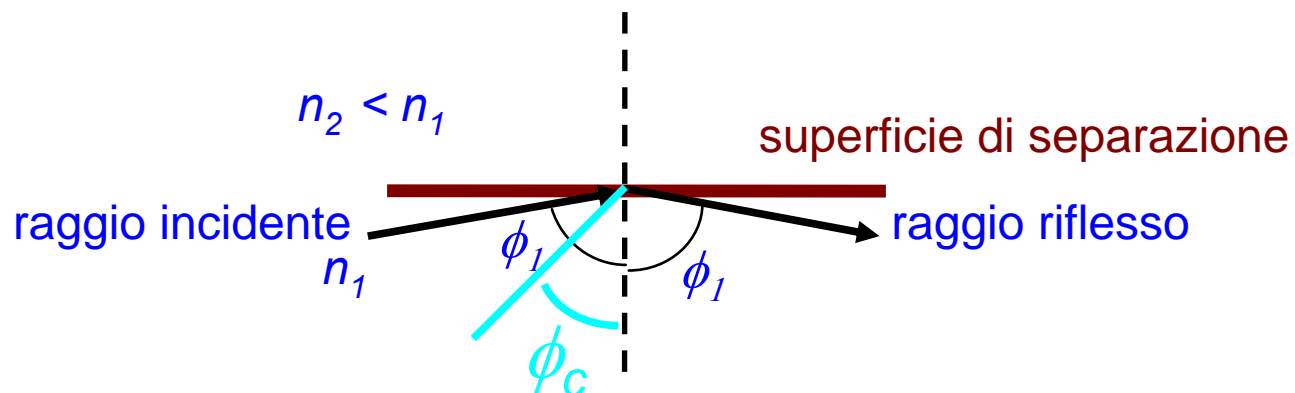




Come si studia la propagazione guidata (riflessione totale) (6/7)

- Quest'angolo a cui $\phi_1 = \phi_c$ prende il nome di angolo critico.
- Se $\phi_1 \geq \phi_c$ non si ha più raggio rifratto e tutta la radiazione ritorna indietro.
- L'angolo critico al di sopra del quale si verifica questo fenomeno può essere determinato dalla legge di Snell e risulta:

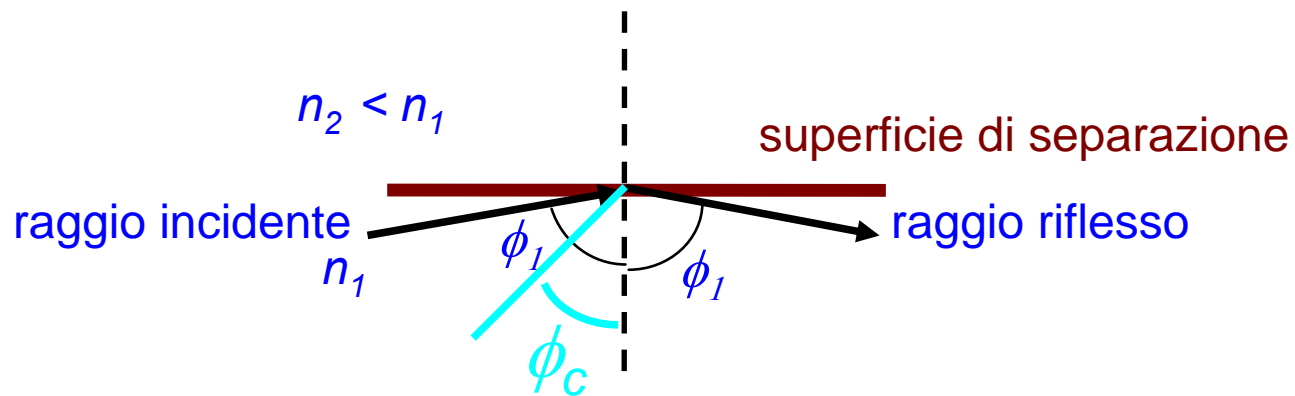
$$\phi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$





Come si studia la propagazione guidata (riflessione totale) (7/7)

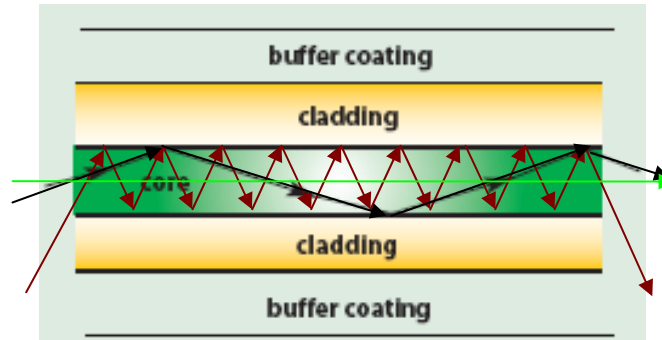
- Ad esempio luce che proviene da uno strato di vetro ($n=1.5$) e incontra uno strato d'aria, presenta riflessione totale se $\phi_1 > 41.8$ gradi.
- Quando si verifica la riflessione totale, si ha anche un cambiamento di fase fra l'onda incidente e l'onda riflessa, esso dipende dall'angolo di incidenza.





La fibra ottica (7/11)

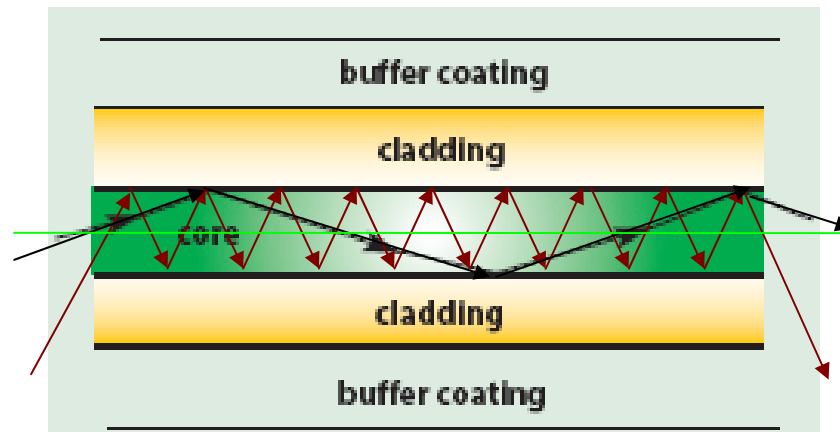
- Quando la luce è guidata dentro una fibra ci sono dei cambiamenti di fase ad ogni riflessione sul bordo.
- Verrà dimostrato che c'è un numero finito e discreto di cammini (in corrispondenza biunivoca con le soluzioni delle eq. di Maxwell, chiamate modi guidati) all'interno della fibra ottica che producono tra loro interferenza costruttiva (cioè in fase e quindi additiva) che sostengono la trasmissione della potenza.
- Poiché ognuno di questi modi si riflette con differenti angoli rispetto all'asse, ognuno di questi percorre una distanza diversa all'interno per portarsi dall'inizio alla fine della fibra.





La fibra ottica (8/11)

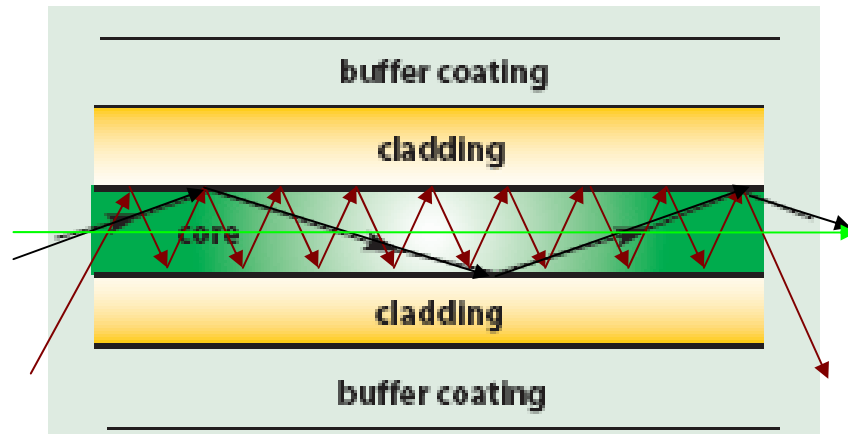
- Un modo, che viene chiamato di ordine zero, corrisponde a raggi che attraversano la fibra quasi senza riflessioni ai bordi ed è il primo che arriva alla fine della fibra.
- Il numero di modi che si propagano in una fibra è determinato da:
 - La lunghezza d'onda della radiazione.
 - Il diametro del core.
 - Gli indici di rifrazione di core e cladding.



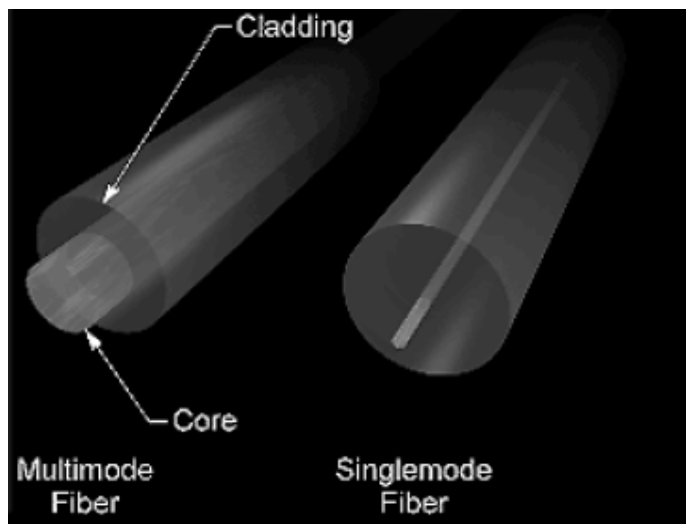


La fibra ottica (9/11)

- Le fibre si dividono in:
 - Monomodo (SMF): se viene guidato un singolo modo.
 - Multimodo (MMF): se vengono guidati più modi (tipicamente centinaia).
- Questa definizione deve essere sempre riferita ad una lunghezza d'onda, infatti una fibra ottica monomodale a 1550 nm se illuminata con un laser a 1000nm è bimodale.



La fibra ottica (dimensioni) (10/11)



Diametro nucleo	Diametro mantello
[μm]	[μm]
50	125
62,5	125
50	125
100	140

FIBRE MULTIMODO PLASTICA

Diametro nucleo	Diametro mantello
[μm]	[μm]
980	1000

FIBRE MONOMODO SiO_2	
Diametro nucleo	Diametro mantello
[μm]	[μm]
9	125

- Il core delle fibre multimodo è molto più grande di quelle monomodo.
- Esistono fibre di diametro diverso in commercio



La fibra ottica (11/11)

- A seconda delle applicazioni le fibre mono o multimodo offrono diversi vantaggi.
- I vantaggi delle multimodo sono:
 - E' più facile accoppiare potenza.
 - Possono trasportare molta potenza.
- I vantaggi delle monomodo sono:
 - non soffrono il problema della dispersione intermodale che limita la banda trasmissiva delle fibre multimodali.
 - Permettono di trasmettere ad elevati bit-rate a distanze più lontane.