

# Il livello fisico

## Parte IV

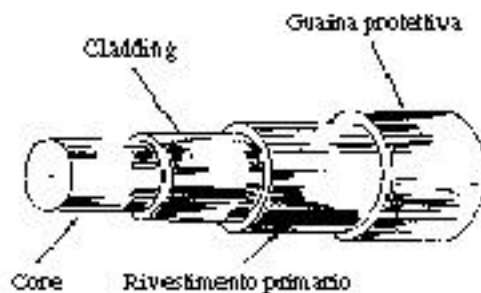
<i>Fibre ottiche</i> .....	1
Fisica delle fibre ottiche .....	1
Riflessione totale dell'energia nel core .....	3
Fibre multimodali e problema della "dispersione modale" .....	5
Fibre monomodali.....	8
Problema della "dispersione cromatica" .....	8
Problemi nella "connettorizzazione" .....	9
Attenuazione.....	10
Caratteristiche costruttive dei cavi in fibra ottica.....	12
Schema generale di un sistema di trasmissione su fibra ottica.....	15

## Fibre ottiche

Per quanto concerne lo sfruttamento delle **fibre ottiche**, i primi cavi sono diventati operativi tra il 1973 e il 1976. La fine degli anni ottanta ha però segnato la vera maturità delle fibre ottiche e a partire dall'inizio degli anni novanta esse sono state impiegate anche per le reti locali.

## Fisica delle fibre ottiche

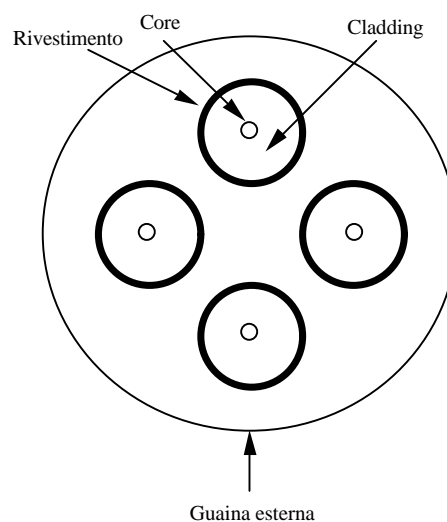
Il **vetro**, se "stirato" a dimensioni micrometriche, perde la sua caratteristica di fragilità e diventa un filo flessibile e robusto. *Una fibra ottica si presenta proprio come un sottilissimo filo di materiale vetroso costituito da due parti:*



*Fibra ottica*

La parte più interna prende il nome di **nucleo (core)**, mentre quella esterna è il cosiddetto **mantello (cladding)**. Il core ed il cladding sono entrambi di vetro, ma hanno **indici di rifrazione** diversi: in particolare, l'indice di rifrazione del core è maggiore (si dice perciò che il mantello è più *denso*). Questa differenza negli indici di rifrazione determina la possibilità di mantenere la luce totalmente confinata all'interno del core.

Generalmente, per motivi analoghi a quelli citati per i doppini (ma non solo), più fibre vengono poste insieme all'interno di un'unica **guaina protettiva**, ottenendo perciò una struttura la cui sezione trasversale è del tipo schematizzato nella figura seguente:



**Sezione di un cavo contenente 4 fibre ottiche**

Il diametro del core va da un massimo di 120  $\mu\text{m}$  fino ad un minimo di 8  $\mu\text{m}$ .

Le guaine protettive possono essere di due tipi: **tight** e **loose**, l'una aderente e solidale con la fibra, l'altra lasca, praticamente un tubicino di plastica in cui è inserita la fibra.

Il grande successo delle fibre ottiche è dovuto a diversi fattori, tra cui citiamo i seguenti:

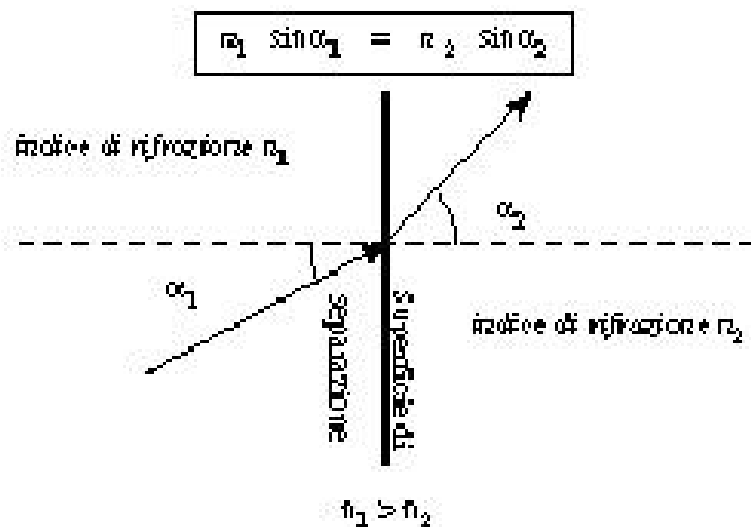
- dato che non impiegano materiali conduttori e trasportano particelle luminose (i cosiddetti **fotoni**) elettricamente neutre, le fibre hanno totale immunità da disturbi elettromagnetici;
- alta capacità trasmissiva: sono operative fibre ottiche a 2 Gbps;
- bassa attenuazione, dell'ordine di alcuni decimi di dB/Km;
- dimensioni ridottissime e costi contenuti.

Da notare una cosa: con le correnti tecnologie realizzative delle fibre ottiche, sarebbe possibile raggiungibile una velocità di trasmissione di **50.000 Gbps** (50 Tbps) con un bassissimo tasso d'errore; al contrario, la pratica attuale di usare velocità dell'ordine dei Gbps dipende dall'incapacità di convertire più velocemente i segnali elettrici contenenti le informazioni nei segnali luminosi che si propagano nelle fibre.

A fronte di questi pregi, le fibre ottiche sono unicamente adatte a collegamenti punto-punto, non essendo possibile prelevare o inserire il segnale in un punto intermedio, cosa invece possibile con mezzi trasmissivi elettrici. Non solo, ma su una fibra il segnale può transitare in una sola direzione per volta, per cui sono mezzi cosiddetti **monodirezionali**: questo comporta, evidentemente, che un eventuale collegamento punto-punto bidirezionale tra due stazioni dovrà impiegare necessariamente due fibre, una per ciascuna direzione.

### **Riflessione totale dell'energia nel core**

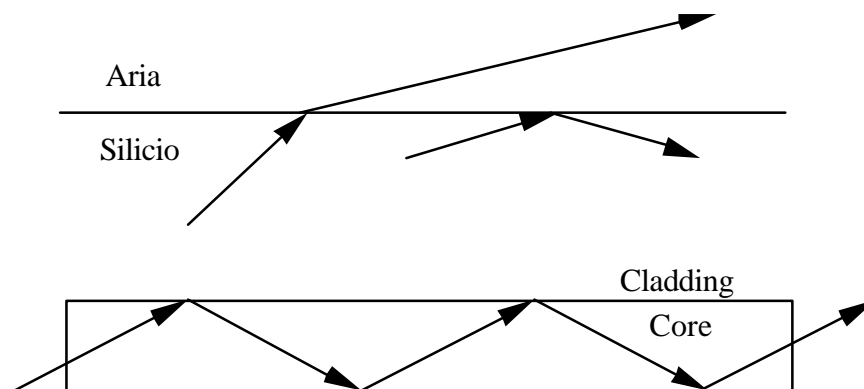
Le proprietà e i *modi di propagazione* dell'energia luminosa in una fibra ottica possono essere studiati rigorosamente mediante la **teoria delle guide d'onda**. Tuttavia, un'analisi semplificata, ma precisa sino a quando le dimensioni della fibra sono molto maggiori di quelle della lunghezza d'onda, può essere effettuata applicando le leggi dell'**ottica geometrica**. La **legge di Snell**, in particolare, definisce la *riflessione* e la *rifrazione* di un **raggio luminoso** incidente sulla superficie di separazione di due materiali:



**Legge di Snell**

Un generico **raggio** rettilineo, rappresentativo di un'onda elettromagnetica ad alta frequenza (siamo nel campo delle *frequenze visibili*, dell'ordine  $10^{14}$  Hz), incide sulla superficie di separazione tra due mezzi, secondo un determinato **angolo di incidenza**  $\alpha_1$ , misurato rispetto alla normale alla superficie. A questa incidenza seguono un fenomeno di **riflessione**, per cui parte dell'energia incidente sostanzialmente rimane nello stesso mezzo da cui proviene, ed uno di **rifrazione** (o *trasmissione*), per cui la rimanente parte di energia passa nel secondo mezzo. L'angolo con cui il raggio incidente viene riflesso (**angolo di riflessione**) è sempre uguale all'angolo di incidenza, mentre invece l'angolo di rifrazione  $\alpha_2$  è regolato dalla predetta **legge di Snell**.

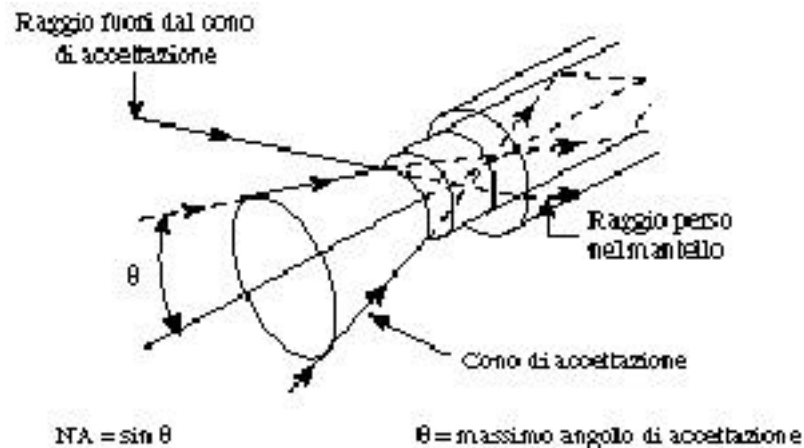
Quest'ultima afferma in particolare quanto segue: per valori dell'angolo di incidenza superiori al cosiddetto **angolo critico**, dato da  $\alpha_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ , si ha la cosiddetta **riflessione totale**. In pratica, quindi, tutta l'energia incidente viene riflessa, ossia rimane confinata nel mezzo di provenienza senza andare all'esterno.



**Deviazione del raggio luminoso nel caso di discontinuità aria-silicio (figura superiore) e cladding-core (figura inferiore)**

Nelle fibre ottiche di comune utilizzo, valori tipici per gli indici di rifrazione sono  $n_2=1.475$  per il cladding e  $n_1=1.5$  per il core. Con questi valori, si trova un angolo critico  $\alpha_c = 79.5$  gradi.

Affinché il generico raggio incida sempre, sulla discontinuità tra core e mantello, con angolo superiore al valore critico, è necessario che esso venga introdotto ad una estremità ottica entro un certo **angolo di accettazione** della fibra:



### **Cono di accettazione**

Un eventuale raggio iniettato nella fibra al di fuori del **cono di accettazione** andrà a incidere sulla superazione core-mantello con angolo inferiore al valore critico e quindi si perderà nel mantello a seguito della rifrazione.

Di conseguenza, tanto maggiore è l'angolo di accettazione tanto più alta è la cosiddetta **apertura numerica** (NA) della fibra, cioè la quantità di luce che si riesce ad introdurre e mantenere confinata nel core.

### **Fibre multimodali e problema della “dispersione modale”**

Oltre quelli precedentemente descritti, esistono anche altri aspetti che regolano la propagazione della luce nella fibra ottica e che rendono necessario prendere in considerazione anche altri fattori, specificati meglio nelle **equazioni di Maxwell** <sup>(1)</sup>.

Dalla soluzione di queste equazioni si ricava che l'energia si propaga nella fibra in un numero discreto di configurazioni, dette **modi**. Ogni singolo modo ha sue caratteristiche di propagazione, come ad esempio l'angolo di incidenza.

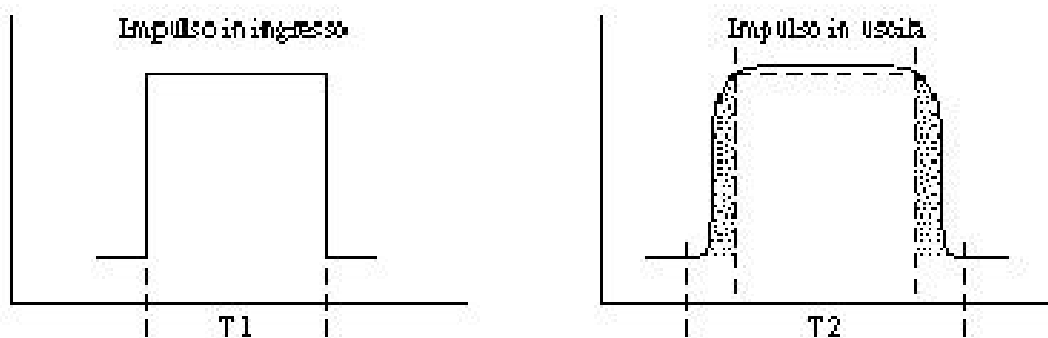
Le fibre ottiche che ammettono più modi di propagazione vengono dette **multimodali**. La fibra ottica multimodale più diffusa è la **62.5/125**: il primo numero indica il diametro del core in  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  m), il secondo quello del cladding (sempre in  $\mu\text{m}$ ).

Nelle fibre ottiche multimodali, i raggi che si propagano secondo i diversi modi percorrono cammini di lunghezza diversa, cui corrispondono tempi di propagazione diversi. Questo significa che, partendo insieme ad una estremità della fibra,

<sup>1</sup> Sottolineiamo che i *raggi luminosi* (sui quali si basa l'**ottica fisica**, che è una restrizione dell'ottica geometrica al caso delle radiazioni visibili) sono solo una soluzione approssimata delle equazioni di Maxwell, tanto migliore quanto maggiore è la frequenza di lavoro.

giungono all'altra estremità in tempi diversi. Questo fenomeno si chiama **dispersione modale** e pone un limite inferiore alla durata minima di un impulso luminoso, limitando quindi la velocità di trasmissione.

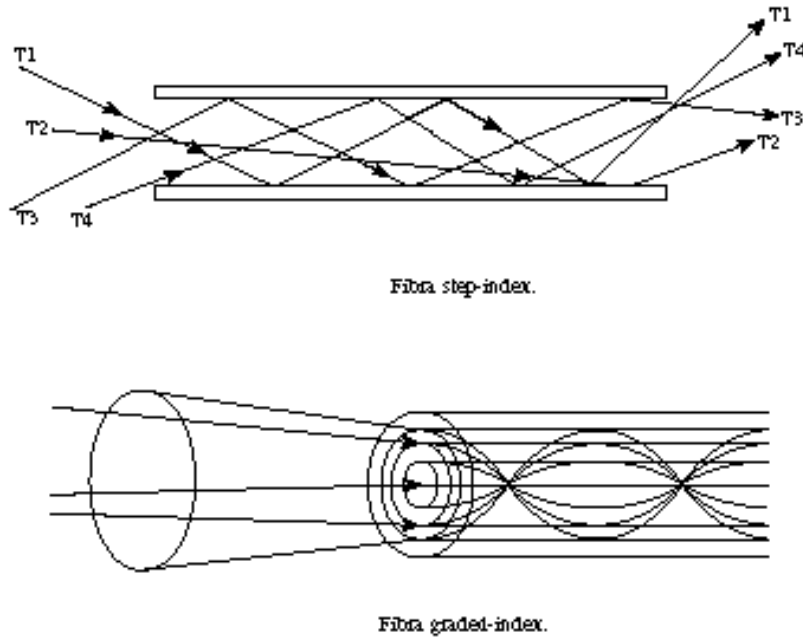
Per comprendere a pieno quest'ultimo concetto, immaginiamo di alimentare la fibra ottica con un impulso luminoso molto breve (durata  $T_1$ ); la dispersione modale fa sì che l'impulso, al suo arrivo all'altra estremità, si presenti deformato e di durata  $T_2 \neq T_1$ , come evidenziato nella figura seguente:



### *Dispersione modale*

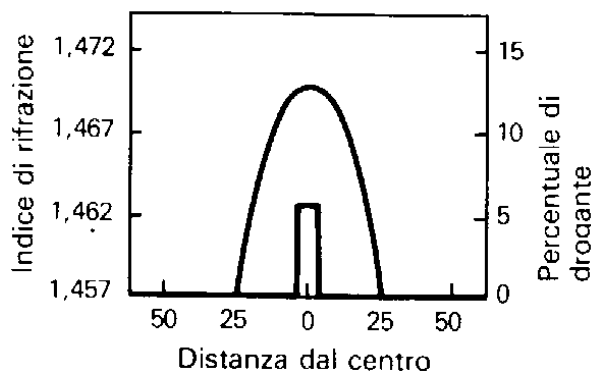
Un modo per contenere questo fenomeno di dispersione è evidentemente quello di aumentare la distanza temporale tra un impulso e l'altro, ma, considerando che, in generale, ogni impulso corrisponde ad un certo numero di bit (al minimo uno), questo equivale a ridurre la velocità di trasmissione. Si è allora scoperto che, dando una speciale forma agli impulsi (inversamente proporzionale a quella del coseno iperbolico), la maggior parte degli effetti della dispersione si cancellano, per cui è possibile inviare impulsi per migliaia di chilometri senza apprezzabili distorsioni di forma. Questi particolari impulsi vengono detti **solitoni**.

Le fibre multimodali si dividono, a seconda del profilo radiale dell'indice di rifrazione (che a sua volta dipende dal profilo di drogaggio realizzato), in fibre **step-index** e fibre **graded-index**:



Le fibre **step-index** sono caratterizzate da un indice di rifrazione costante fra il centro e la periferia del core. L'indice di rifrazione decresce bruscamente con un gradino (**step**) entrando nel cladding.

Nelle fibre **graded-index**, invece, il profilo d'indice di rifrazione varia gradualmente lungo il diametro della fibra, passando da un valore massimo al centro del core e decrescendo gradualmente sino ad assumere un valore minimo al confine fra core e cladding:



**Fibra graded-index: profilo di drogaggio e di indice di rifrazione in funzione della distanza dal centro**

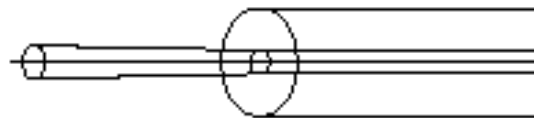
Il fenomeno della dispersione modale è molto più accentuato nelle fibre step-index rispetto alle fibre graded-index: infatti, nelle prime i raggi luminosi hanno un andamento tipicamente a zig-zag e compiono perciò, a velocità costante, percorsi di lunghezza anche molto diversa; nelle fibre graded-index, invece, si sfrutta il fenomeno per cui la velocità di propagazione della luce è inversamente

proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo; regolando quindi opportunamente il profilo radiale dell'indice di rifrazione, si fa in modo da diminuire la velocità dei raggi che hanno cammino più breve (quelli centrali), il che evidentemente uniforma maggiormente i tempi di propagazione e quindi riduce la dispersione modale.

Valori tipici di banda passante delle fibre multimodali sono  $22 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$  per le fibre step-index e  $1 \text{ GHz} \cdot \text{Km}$  per quelle graded-index.

### **Fibre monomodali**

Una soluzione sempre e comunque efficace al problema della dispersione modale è quella di ridurre fortemente (fino a  $8\text{-}10 \mu\text{m}$ ) il diametro del core, per consentire la propagazione dei raggi di un solo modo:



Fibra monomodale.

Si ottengono in tal modo fibre con cono di accettazione molto ridotto, dette **monomodali** in quanto consentono la propagazione di un unico modo <sup>(2)</sup>: la luce avanza in modo praticamente rettilineo, senza quasi rimbalzare.

La riduzione del diametro del core ha però anche un grosso svantaggio: quanto minore è tale diametro, tanto più difficile è l'iniezione della potenza ottica. Si pone cioè il problema dell'**efficienza di iniezione**, intesa come rapporto tra la potenza effettivamente convogliata nel nucleo e quella totale prodotta: dato che non tutta la potenza prodotta viene inviata nel nucleo, ma una sua quota parte si perde nel mantello, questa efficienza non può che essere minore di 1 (ovviamente  $>0$ ).

### **Problema della “dispersione cromatica”**

Un altro fenomeno da tener presente è la cosiddetta **dispersione cromatica**, dovuta alla presenza di raggi a diversa lunghezza d'onda (e quindi di diversi colori, trattandosi di luce). Questo fenomeno impone di utilizzare sorgenti diverse per alimentare le fibre: sulle fibre multimodali si può trasmettere mediante normali **LED**, che sono sorgenti luminose ad ampio spettro di emissione; al contrario, nelle

---

<sup>2</sup> Si tratta sostanzialmente di guide d'onda, che supportano notoriamente un unico modo di propagazione dominante.

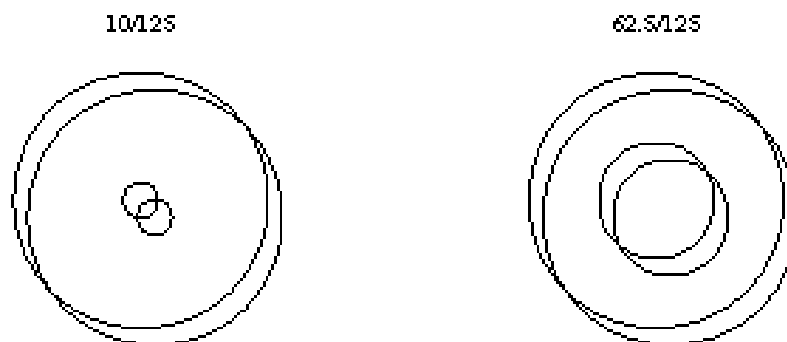


fibre monomodali occorre utilizzare dei **laser**, più sofisticati e costosi ma anche più precisi, in quanto emettono luce monocromatica e coerente.

Minimizzando la dispersione modale e quella cromatica, si può trasmettere a velocità superiori e su distanze più lunghe.

### **Problemi nella “connettorizzazione”**

Le fibre ottiche sono difficili da *giuntare* e da *connettorizzare* a causa delle loro esigue dimensioni, che impongono precisioni notevoli. Tale difficoltà aumenta al diminuire delle dimensioni e quindi è più sentita nelle fibre ottiche monomodali:



**Interconnessione di due fibre ottiche**

In generale, le fibre possono essere connesse in tre modi diversi:

- nel modo più semplice, i loro estremi vengono terminati in **connettori** e questi vengono inseriti in apposite **prese per fibre**; i connettori determinano una perdita di circa il 10-20% della luce ma semplificano molto la riconfigurazione del sistema qualora ce ne sia la necessità;
- in alternativa, le fibre possono essere unite meccanicamente: le **giunzioni meccaniche** consistono nel poggiare le due estremità una vicina all'altra in una manica speciale e nello stringerle insieme. Facendo passare la luce attraverso la giunzione e eseguendo piccoli aggiustamenti dell'allineamento, si ottengono perdite di luce abbastanza ridotte;
- infine, è possibile *fondere* due pezzi di fibra per formare un'unica connessione solida. In questo caso, le prestazioni risultano molto buone (anche se una minima attenuazione è inevitabile) solo quando il percorso della fibra è rettilineo.

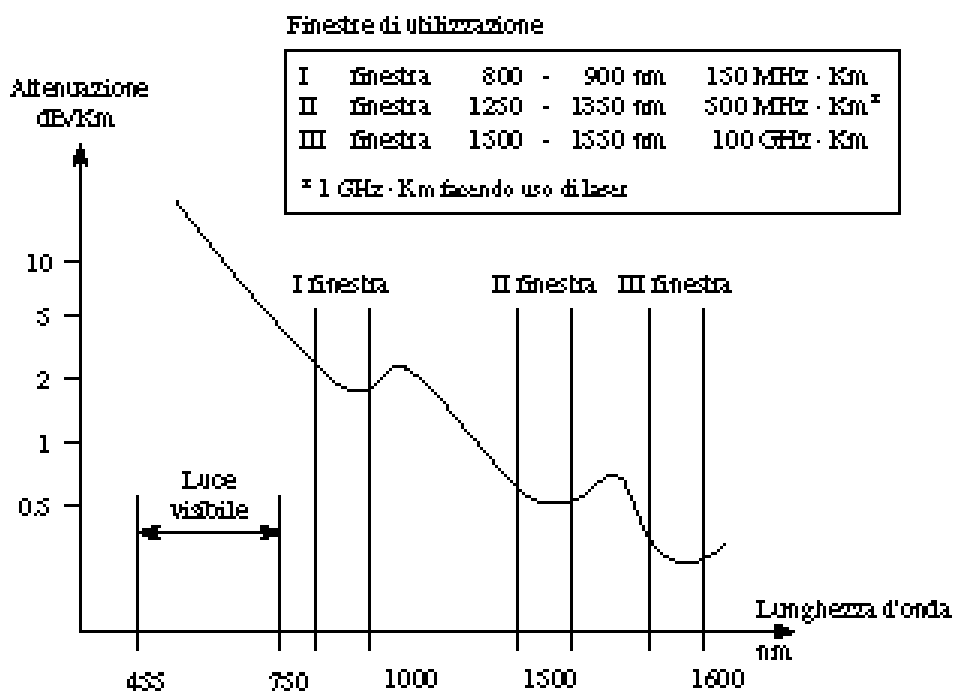
All'atto pratico, è più difficile connettere le fibre che giuntarle, per cui molto spesso la connettorizzazione viene effettuata esclusivamente in laboratorio, mentre invece in campo ci si limita ad effettuare giunture con apposite macchine giuntatrici.

Data la difficoltà di effettuare giunzioni e connettorizzazioni tra fibre, nelle reti locali si privilegia l'adozione di fibre multimodali, più semplici da posare in opera. D'altra parte, le ridotte distanze da coprire rendono meno rilevanti i vantaggi delle fibre monomodali rispetto alle multimodali.

L'alto costo di connettorizzazione limita inoltre l'impiego delle fibre ottiche alla realizzazione di **dorsali di rete**, mentre per collegare il singolo posto di lavoro il doppino di rame ha un miglior rapporto prestazione/prezzo. Per superare tali limiti, sono allo studio **fibre plastiche** con diametro di 1 mm, che dovrebbero avere un basso costo di connettorizzazione e risultare competitive con i cavi in rame per il cablaggio dei posti di lavoro.

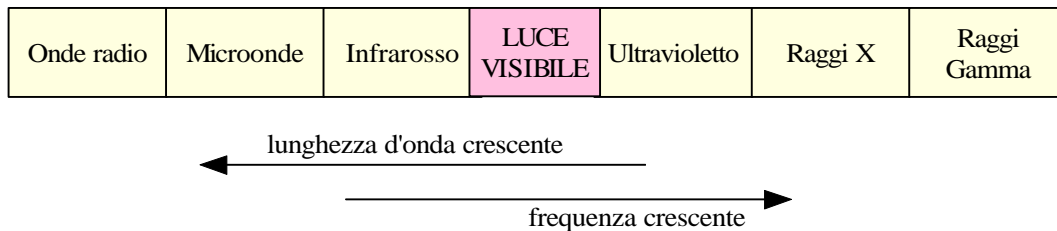
## Attenuazione

Un altro parametro delle fibre ottiche estremamente importante è l'**attenuazione**. Essa dipende fortemente dalla lunghezza d'onda e può essere perciò diagrammata appunto in funzione di  $\lambda$  ottenendo un grafico simile a quello di figura seguente:



In questo diagramma si individuano tre minimi di attenuazione in corrispondenza di tre intervalli di lunghezza d'onda, detti **finestre**. Le finestre corrispondono a tre tipi di utilizzazioni diverse: per la prima si usano solo LED comuni, per la seconda LED comuni e laser, per la terza solo laser.

Le lunghezze d'onda che interessano le **comunicazioni ottiche** sono quelle comprese tra i 750 nm ed i 1600 nm, cioè nel *vicino infrarosso*, in quanto le radiazioni visibili all'occhio umano vanno dai 455 nm (*violetto*) ai 750 nm (*rosso*):



La **prima finestra** è collocata intorno agli **850 nm** ed è stata la prima ad essere usata per la realizzazione di sistemi di trasmissione su fibra ottica. Essa è presente solo nella fibra multimodale.

La **seconda finestra** è posta a **1300 nm** e, essendo caratterizzata da una attenuazione inferiore, è quella attualmente utilizzata per esigenze di bande passanti medie o alte. Essa è presente sia nella fibra multimodale sia in quella monomodale. La banda passante varia in funzione del tipo di fibra e del tipo di emettitore/ricevitore utilizzato e può essere di:

- 500 MHz · Km, se si usano i LED su fibra multimodale;
- 1 GHz · Km, se si usano i laser su fibra multimodale;
- da decine a centinaia di GHz · Km su fibra monomodale, a seconda del laser utilizzato.

La **terza finestra** si colloca a **1550 nm**, dove l'attenuazione è ancora inferiore e rappresenta una promessa per l'immediato futuro. Essa è presente solo nella fibra monomodale.

Le attenuazioni delle fibre ottiche variano in funzione del tipo di fibra e della finestra in cui lavorano:

- le fibre multimodali (50/125, 62.5/125), se lavorano in prima finestra hanno attenuazioni inferiori a 3.5 dB/Km, mentre se lavorano in seconda finestra hanno attenuazioni inferiori a 1 dB/Km;
- le fibre monomodali, se lavorano in seconda finestra hanno attenuazioni inferiori a 0.5 dB/Km, mentre se lavorano in terza finestra hanno attenuazioni inferiori a 0.2 dB/Km.

L'attenuazione introdotta da **connettori** e **giunzioni** deve essere paragonabile a quella molto bassa delle fibre ottiche: da 0.4 a 4 dB/Km. Un connettore installato correttamente introduce una attenuazione compresa tra 0.3 dB e 0.7 dB. Valori simili valgono per una giunzione (da 0.1 a 0.3 dB).

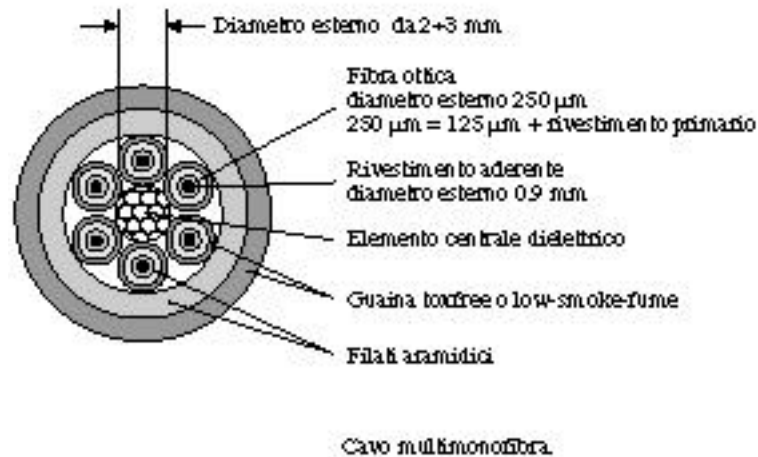
Le apparecchiature hanno un **optical power budget**, ossia un valore che indica l'attenuazione massima ammessa tra due apparati attivi, compreso tra 10 e 22 dB. Consentono normalmente di percorrere distanze di 1-2 Km con fibre multimodali e di 40-100 Km con fibre monomodali. Questo significa che nelle reti di telecomunicazioni le fibre ottiche devono avere **ripetitori** ogni 40-100 Km invece dei 2 Km tipici per i vecchi cavi coassiali in rame.

## **Caratteristiche costruttive dei cavi in fibra ottica**

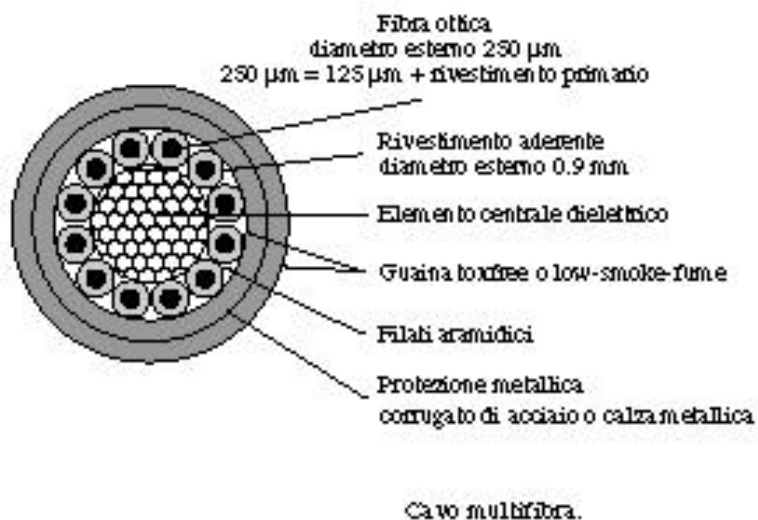
I cavi in fibra ottica vengono realizzati con tecniche diverse che variano in base al numero di fibre presenti ed al luogo in cui devono essere installati. A seconda della metodologia costruttiva si identificano tre principali **famiglie** di cavi in fibra ottica, di cui diamo una rapida descrizione.

I cavi di tipo **tight** sono usati principalmente per installazioni in luoghi interni; essi hanno le guaine protettive aderenti alla fibra e possono essere direttamente terminati con diversi tipi di connettori. Si suddividono ulteriormente in due famiglie:

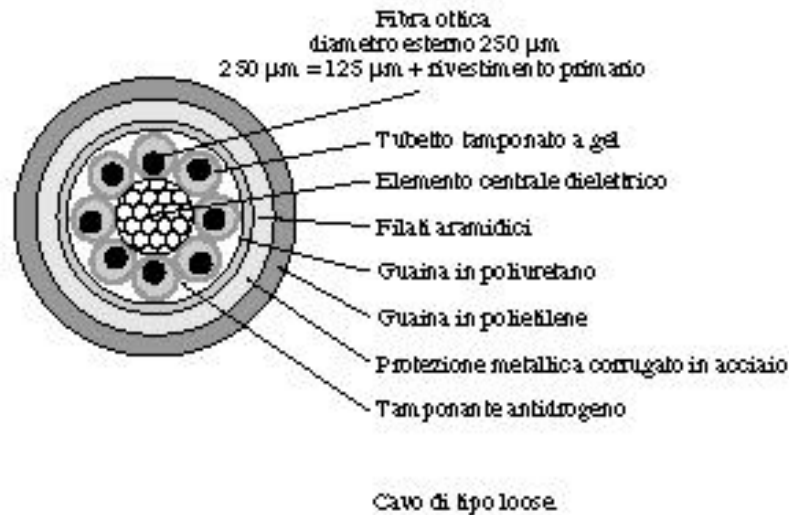
- i **cavi multimonofibra** sono particolarmente robusti in quanto il rivestimento sulla singola fibra può arrivare fino a 2 , 3 mm di diametro:



- i **cavi multifibra** sono meno robusti dei precedenti poiché il rivestimento della singola fibra porta il diametro globale a 0.9 mm, ma sono più adatti come cavi di dorsale poiché la ridotta dimensione di ogni singola fibra permette una maggiore densità di fibre ottiche.



La seconda famiglia è quella dei cavi tipo **loose**, usati principalmente per installazioni in luoghi esterni; essi sono costituiti da un certo numero di tubetti, cordati attorno ad un elemento centrale, entro cui vengono riposte le fibre nude (diametro 250 mm):



Questi cavi non possono essere direttamente innestati sui connettori, ma devono essere giuntati, tramite opportune tecniche, a cavetti monofibra di tipo *tight*. I cavi *loose* non sono molto facili da posare in modo verticale, perché la fibra all'interno della guaina si può disporre in modo anomalo. Inoltre, poiché la fibra ottica è molto sensibile all'umidità, si usano **gel protettivi** per tamponare il cavo.

La terza ed ultima famiglia è quella dei cavi di tipo **slotted core**, usati principalmente per installazioni in luoghi esterni; essi sono costituiti da un elemento centrale scanalato entro le cui cavità vengono riposte le fibre nude.



Anche questi cavi non possono essere direttamente innestati sui connettori, ma devono essere giuntati a cavetti monofibra di tipo *tight*.

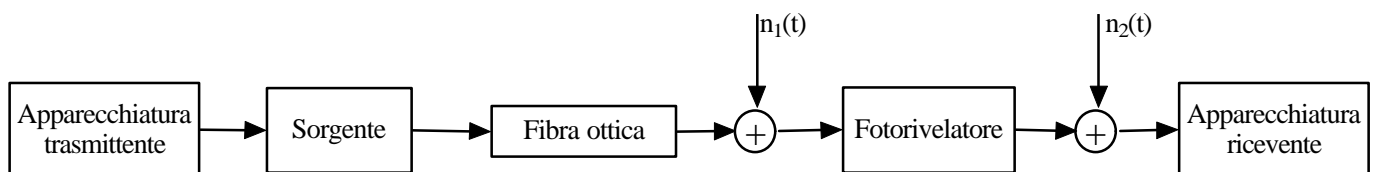
Il cavo è normalmente protetto da una corazza di acciaio corrugato termosaldato che può migliorare la robustezza meccanica e la resistenza all'acqua e serve anche come protezione antiroditore.

## Schema generale di un sistema di trasmissione su fibra ottica

Un sistema di trasmissione ottica ha tre componenti :

- **sorgente luminosa**: può essere un LED o un laser. Converte un segnale elettrico in impulsi luminosi;
- **mezzo di trasmissione**: è la fibra ottica vera e propria;
- **fotorivelatore**: converte gli impulsi luminosi in segnali elettrici. Il tipico tempo di risposta di un fotorivelatore è 1 ns, da cui il limite di 1 Gbps.

La bassissima attenuazione della fibra consente, negli attuali sistemi commerciali di tipo numerico binario, l'adozione di una struttura molto semplice, detta a **rivelazione diretta incoerente**, del tipo indicato in figura:



In questa struttura, i componenti ottici fondamentali sono la **sorgente luminosa** ed il **fotorivelatore**.

Le sorgenti usate sono di due tipi: **diodi LED** (LED sta per *Light Emitting Diode*) e **diodi laser**. Entrambi questi dispositivi funzionano generalmente secondo una modulazione del tipo OOK (*On Off Keying*, ossia “o tutto o niente”): questo significa che vengono pilotati in modo da trasmettere una certa potenza ottica  $P_T$  quando deve essere trasmesso un 1 e niente (o quasi niente, per motivi tecnologici) quando deve essere trasmesso uno 0.

I diodi LED sono di più semplice impiego e di costo ridotto. Tuttavia, essi hanno diverse limitazioni, dovute all'**incoerenza** della luce emessa, alla notevole larghezza di riga (50 ÷ 100 nm) ed alla limitazione di banda dovuta all'eccessivo tempo di spegnimento.

I diodi laser (**LD**), invece, hanno, oltre alla *coerenza spaziale* e alla radiazione direzionale (il che permette di iniettare più potenza nella fibra, aumentando così l'efficienza di iniezione), una purezza spettrale migliore (circa uguale a 2 nm).

L'eventuale potenza ottica trasmessa dalla sorgente viene iniettata nella fibra e si propaga lungo essa, giungendo, inevitabilmente attenuata, al terminale ricevente. Qui è necessario disporre di un dispositivo che sia in grado di rivelare la potenza ottica in arrivo e di trasformarla in un segnale elettrico: questo dispositivo sarà dunque un **fotorivelatore**. All'uscita del fotorivelatore abbiamo perciò un segnale elettrico che può essere trattato con il classico sistema filtro-campionatore-decisore tipico dei ricevitori numerici.

Un aspetto importante dello schema prima disegnato riguarda il **rumore**. Il primo contributo di rumore teoricamente da aggiungere è senz'altro il **rumore termico**  $n_1(t)$  generato dal mezzo trasmissivo. Tuttavia, questo è un rumore termico sovrapposto ad una *portante ottica* (cioè ad una portante sinusoidale a frequenza ottica, dell'ordine di  $10^{14}$  Hz) ed è noto che, a frequenze così alte, tale rumore risulta del tutto trascurabile

Fino, quindi, all'uscita del fotorivelatore, non è presente alcuna sorgente di rumore; al contrario, all'uscita del fotorivelatore il segnale viene convertito in un segnale elettrico da poter successivamente elaborare, per cui eventuali sorgenti di rumore termico vanno incluse in questa parte della catena.

Autore: **Sandro Petrizzelli**

e-mail: [sandry@iol.it](mailto:sandry@iol.it)

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>