



# Architetture e sistemi per le reti ottiche di trasporto

Andrea Baiocchi

Dipartimento INFOCOM

Università di Roma "La Sapienza"

[andrea.baiocchi@uniroma1.it](mailto:andrea.baiocchi@uniroma1.it)



# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- Apparati e reti ottiche
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



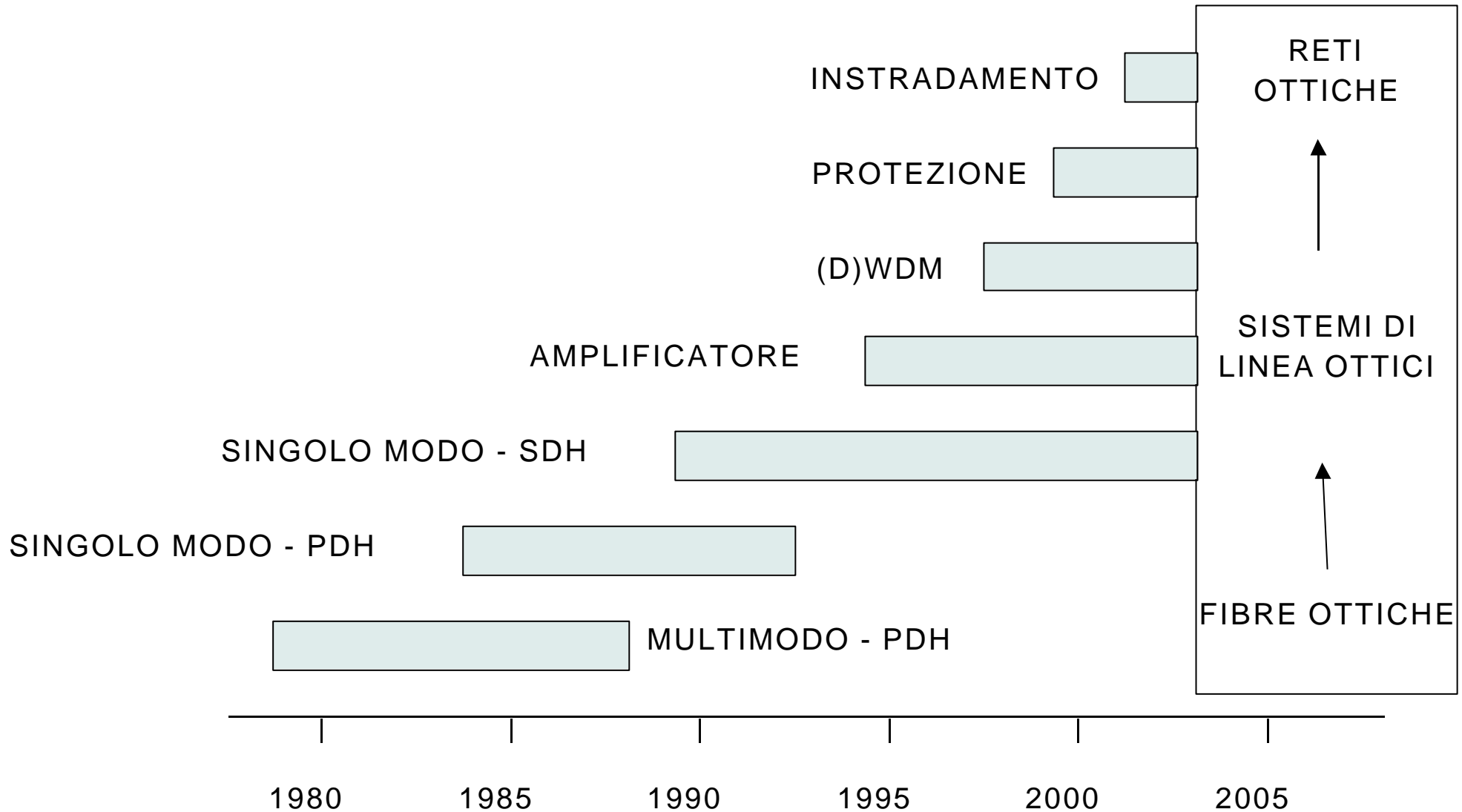
# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- Apparati e reti ottiche
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



# Tecnologie ottiche in rete





# Optical Transport Network (OTN)

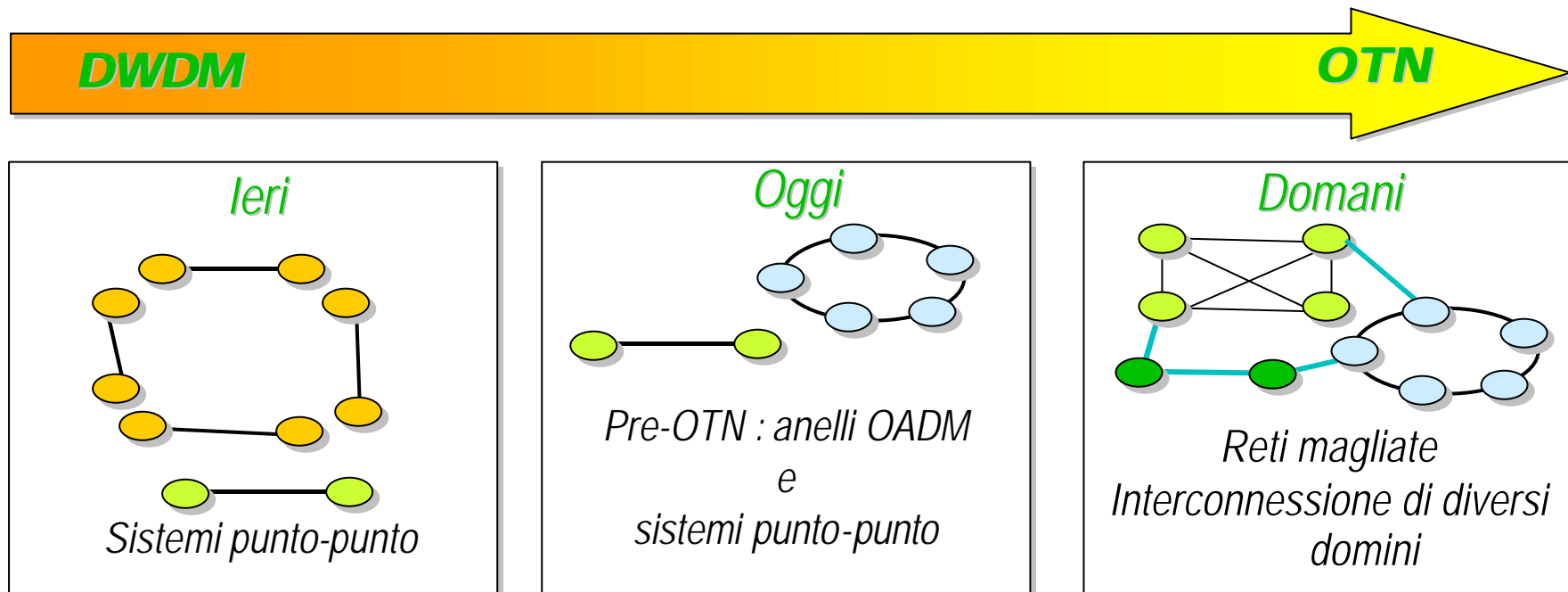
- OTN: risposta all'evoluzione del traffico e conseguenza dell'evoluzione delle capacità tecnologiche



- **PROBLEMATICHE RELATIVE ALL'INFRASTRUTTURA DI RETE**
- **PROBLEMATICHE RELATIVE ALLE TECNICHE DI TRASMISSIONE**



# Percorso evolutivo





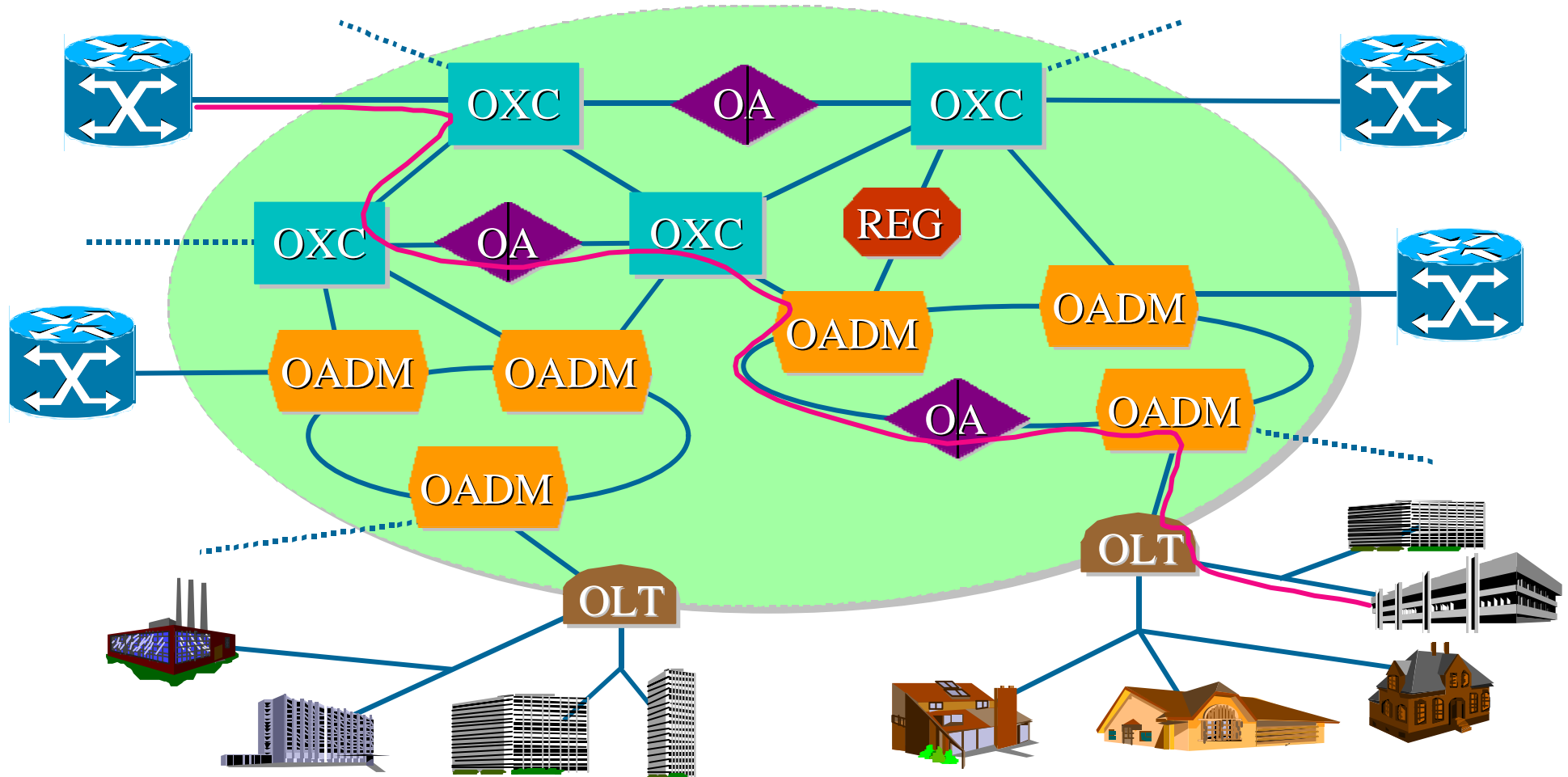
# Funzioni di una OTN

---

- Trasporto
  - Trasmissione ottica
  - **Multiplicazione** a livello ottico (OADM)
  - **Permutazione e instradamento** ottico (OXC)
  
- Gestione
  - Configurazione di rete (multiplicazione e instradamento) in risposta alle esigenze di traffico
  - Monitoraggio della qualità di servizio (QoS)
  - Gestione degli apparati ottici e della rete
  - Supervisione degli allarmi e protezione di rete a livello ottico



# OTN: architettura fisica







# Elementi costitutivi di una OTN (1/2)

OLT

terminale di linea (optical line termination)

- controllo di  $\lambda$  e potenza (“transponder”) dei segnali clienti
- amplificazione ottica lato Tx e/o Rx
- moltiplicazione e demoltiplicazione ottiche
- aggiunta di informazioni per la supervisione e la gestione

OA

amplificatore ottico (optical amplifier)

- trasparenza ai diversi segnali
- guadagno uniforme in frequenza
- indipendente dall’add/drop di canali ottici

REG

rigeneratore elettronico (regenerator)

- hardware specifico per il tipo di segnale (niente trasparenza)



## Elementi costitutivi di una OTN (2/2)

### OADM

multiplatore add-drop (optical add-drop multiplexer)

- inserzione / estrazione di uno o più canali
- possibilità di includere amplificatori ottici e trasponder
- possibilità di configurare le lunghezze d'onda inserite ed estratte
- uso in reti con topologia ad anello
- disponibilità commerciale

### OXC

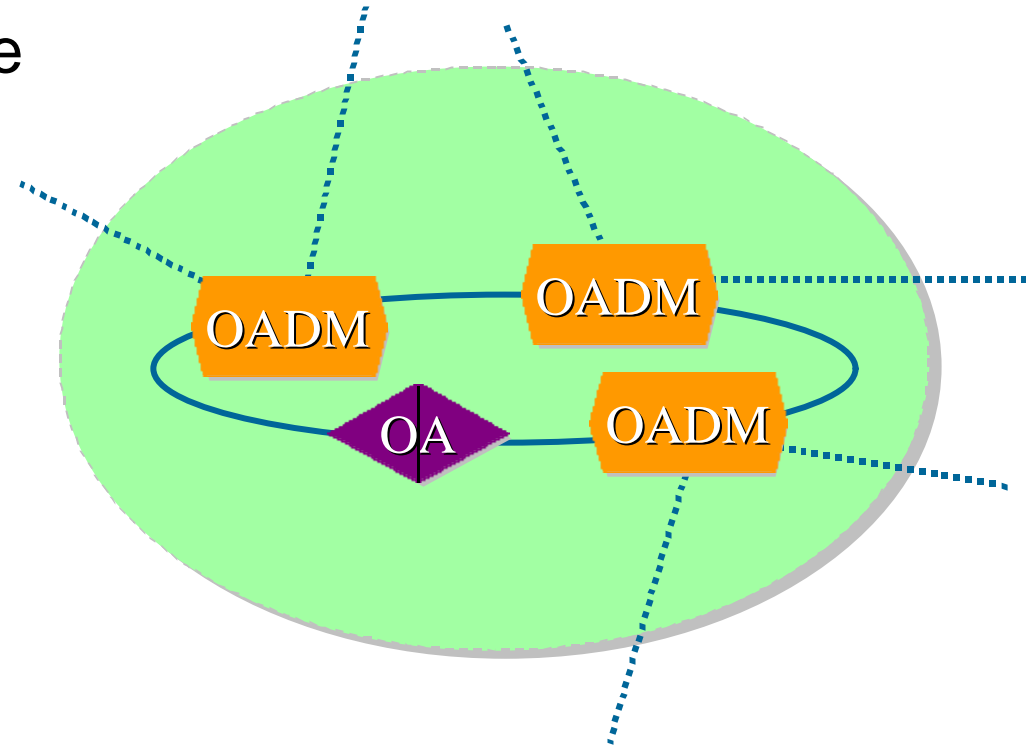
permutatore ottico (optical cross-connect)

- cross-connessione di canali ottici
- possibilità di includere amplificatori ottici e trasponder
- possibile di conversione di lunghezza d'onda
- uso in reti con topologia magliata
- disponibilità di versioni da laboratorio



# Topologia ad anello

- Adatta per la parte regionale e metropolitana della rete
- Basata su OADM
- Due porte di linea per nodo
  - Solo due cammini disponibili tra una coppia di nodi
- Protezione
  - Realizzabile automaticamente
  - Non efficiente in termini di risorse di rete impiegate

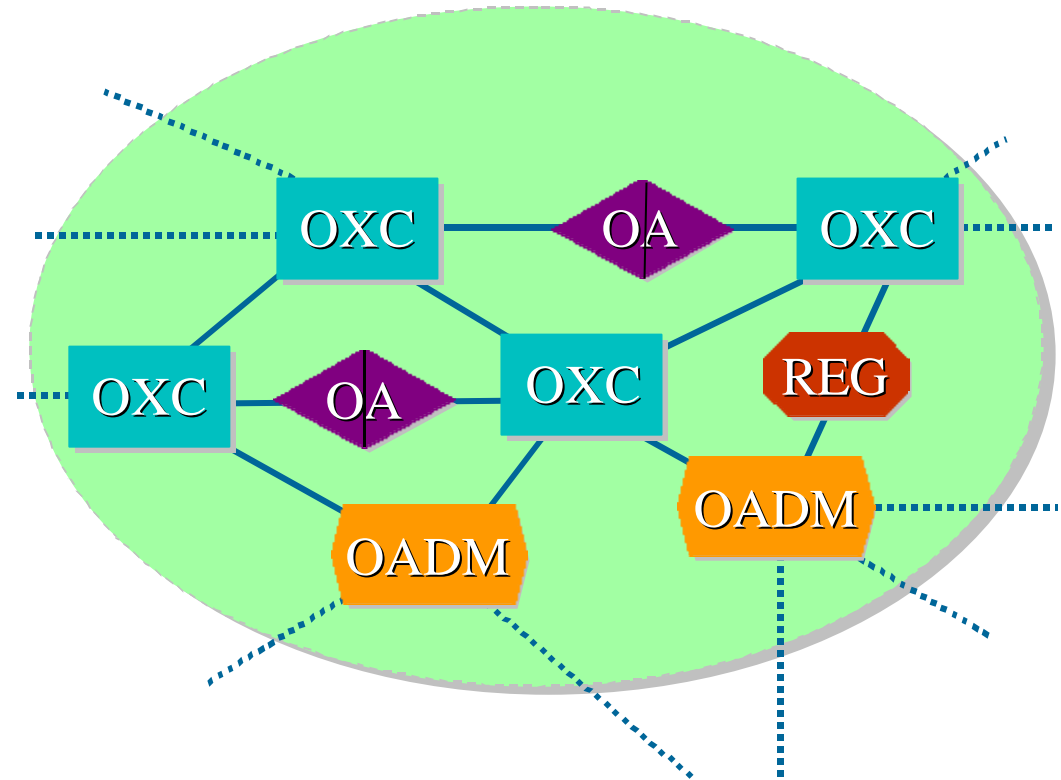


- ⇒ Applicazioni in piccole aree
- ⇒ Limite al numero di nodi



# Topologia a maglia

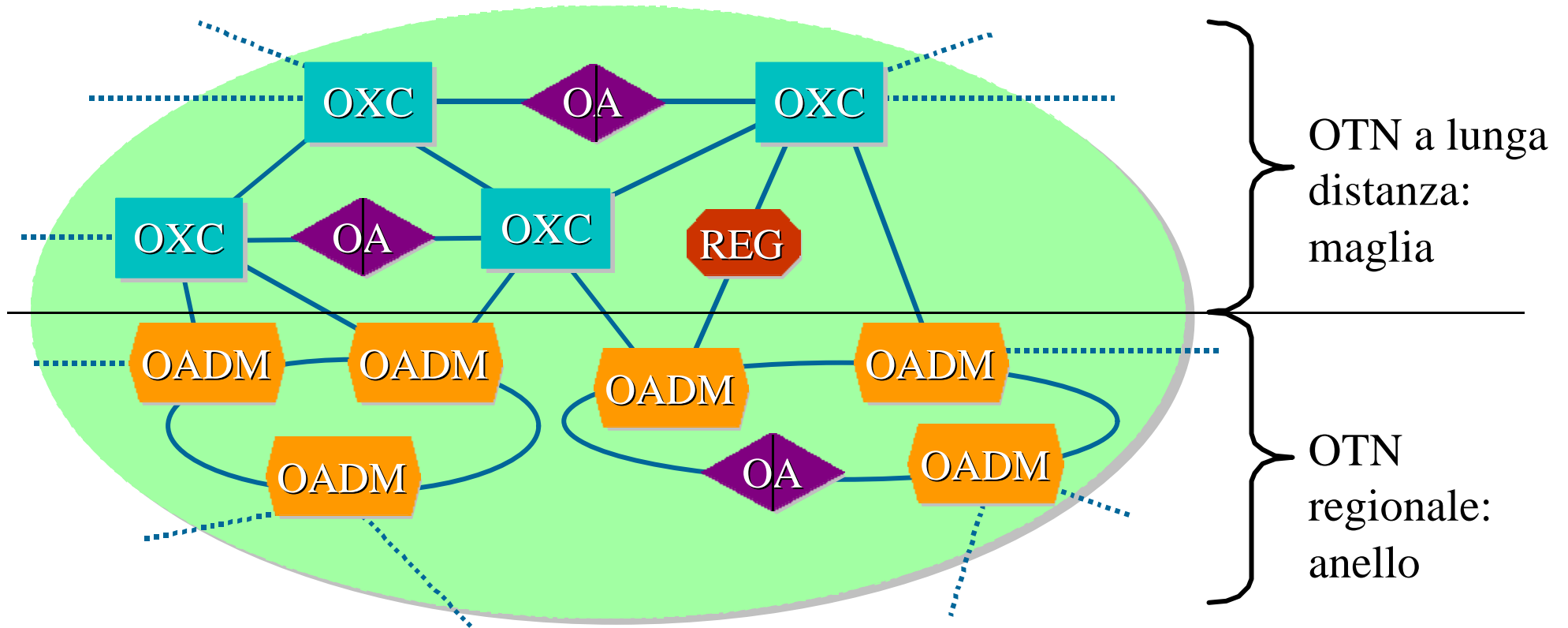
- Adatta per la rete dorsale
- Basata su OXC
- Due o più porte di linea per nodo
  - Due o più cammini disponibili tra una coppia di nodi
  - Maggiore flessibilità rispetto alla soluzione ad anello
- Protezione per re-instradamento
  - Più complessa da gestire della protezione per anello
  - Miglior utilizzo delle risorse di rete



- ⇒ Reti su aree estese
- ⇒ Elevato numero di nodi



# Topologia mista





# Cosa serve per una OTN?

---

- Tramissione
  - Fibre ottiche, componenti
- Multiplazione/demultiplazione
  - Uno schema di accesso multiplo (TDM,FDM,...)
  - Componenti e apparati che lo supportino
- Permutazione e instradamento
  - Apparati di permutazione/commutazione
  - Piano di gestione/controllo



## **Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)**



# Ruolo e potenzialità del DWDM

---

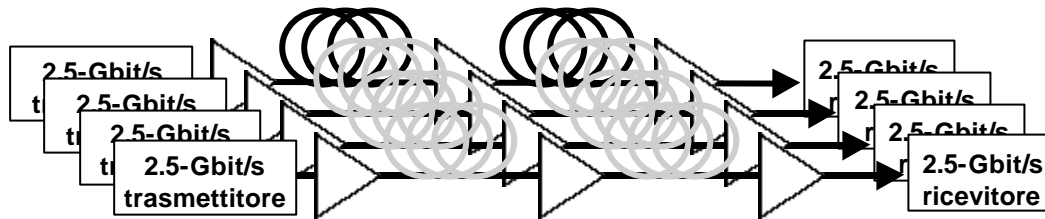
- Incremento della capacità dei rami della rete (> 1Tbit/s)
  - Flussi multiplati che usano a pieno la banda della fibra
- Ottimizzazione dell'uso dell'amplificazione ottica
  - Amplificazione simultanea di diversi canali
- Instradamento in lunghezza d'onda ( $\lambda$ -routing)
- Cross-connessione ottica (OXC) e add/drop locale di canali ottici (OADM) di flussi ad alta velocità (multi Gbit/s)
- Tecniche ottiche per la protezione di rete e il re-instradamento dei grossi flussi di traffico



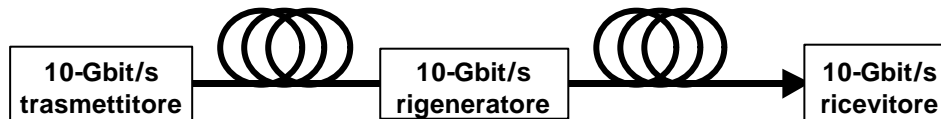
# Aumento del prodotto capacità-distanza

## Capacità di 10-Gbit/s su oltre 100 km di fibra G.652

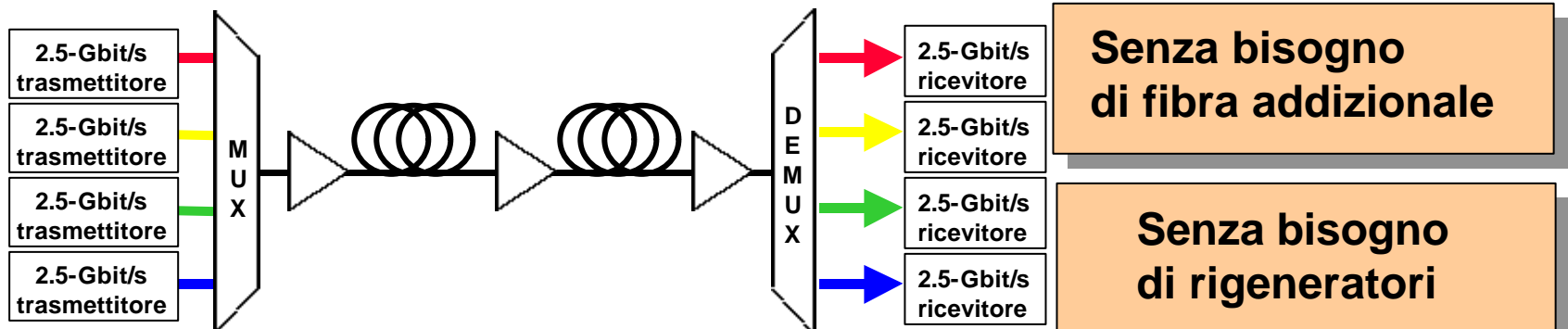
**SDM :**  
(Space  
Division  
Multiplexing)



**TDM :**  
(Time  
Division  
Multiplexing)



**WDM :**  
(Wavelength  
Division  
Multiplexing)

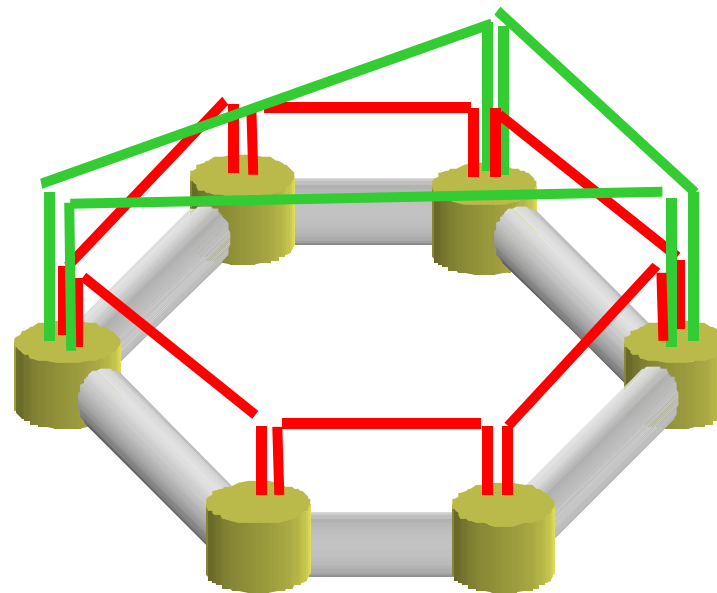






# Topologia flessibile

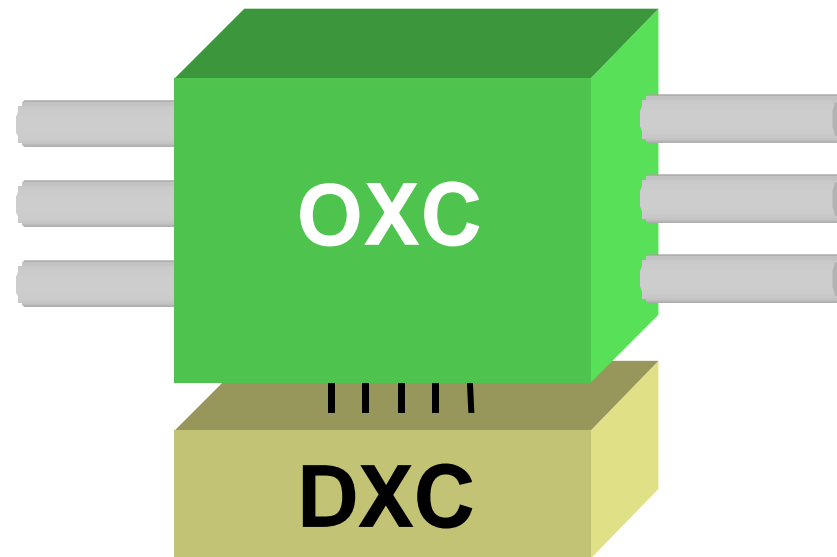
- Si creano “condotti virtuali” sulle fibre esistenti:
  - Incremento di capacità/connettività con il minimo costo incrementale
  - (ri)configura la connettività su una topologia fisica fissata
  - crea percorsi alternativi per protezione/re-instradamento
  - introduce canali di servizio per supervisione/controllo





# Permutazione e protezione efficienti

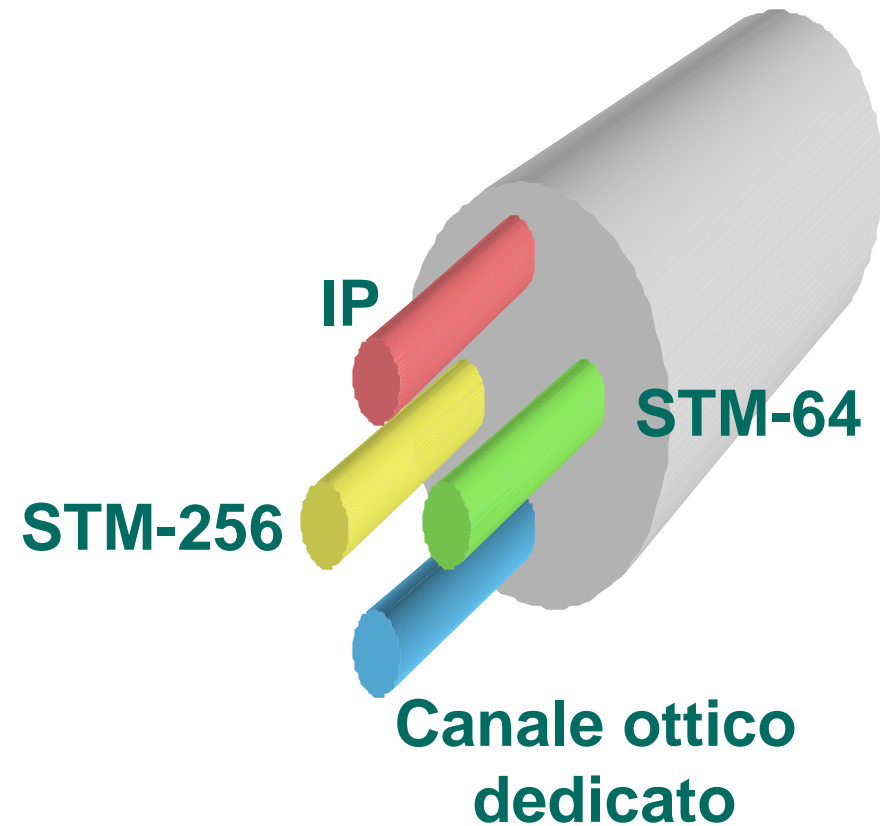
- Realizza l'instradamento in spazio/lunghezza d'onda per il traffico diretto
  - evita l'esplosione nelle dimensioni e nei costi dei DXC
  - alleggerisce il carico di lavoro dei sistemi di gestione
  - consente meccanismi di protezione/reinstradamento veloci





# Trasparenza

- Fornisce collegamenti *trasparenti* alla velocità e al formato
  - evita la moltiplicazione dell'hardware necessario ad accettare diversi formati e velocità
  - evita di dover sostituire l'hardware nel caso di aggiornamento rete





# L'ottica è analogica!

---

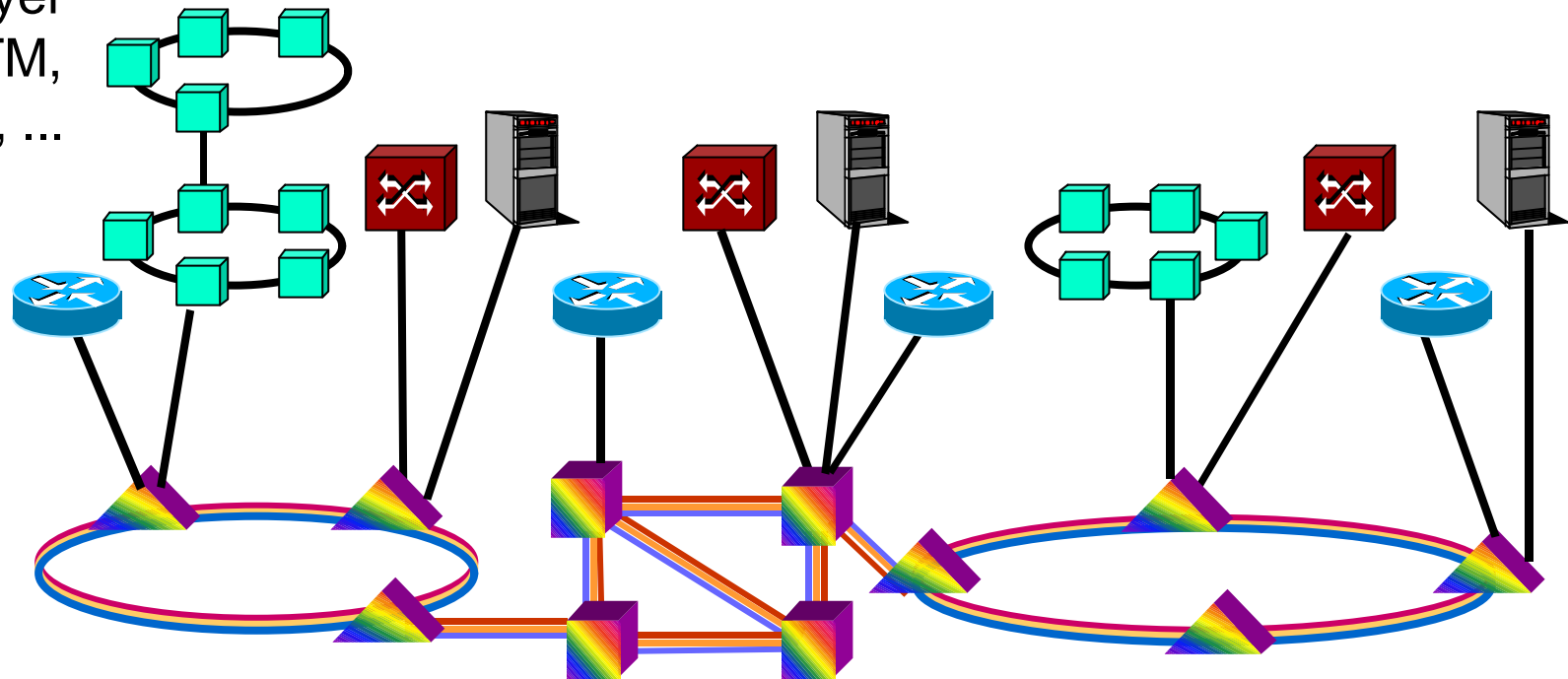
- La rete ottica è per sua natura analogica
- La degradazione del segnale si propaga e si accumula da estremo a estremo
- Un nodo ottico produce ulteriore degradazione del segnale (interferenza, limitazione di banda, perdite differenziali ...)
- La rete deve essere progettata per l'applicazione più critica
  - La trasparenza da estremo a estremo limita la massima estensione della rete
  - Può essere richiesta la rigenerazione elettronica
  - Il progetto della rete richiede una conoscenza accurata dell'impianto in fibra e strumenti dedicati di progetto e simulazione



# Trsparenza della OTN

Client Layer  
IP, ATM,  
SDH, GbE, ...

Optical  
Server  
Layer



 IP

 ATM

 GbE, ...

SDH 

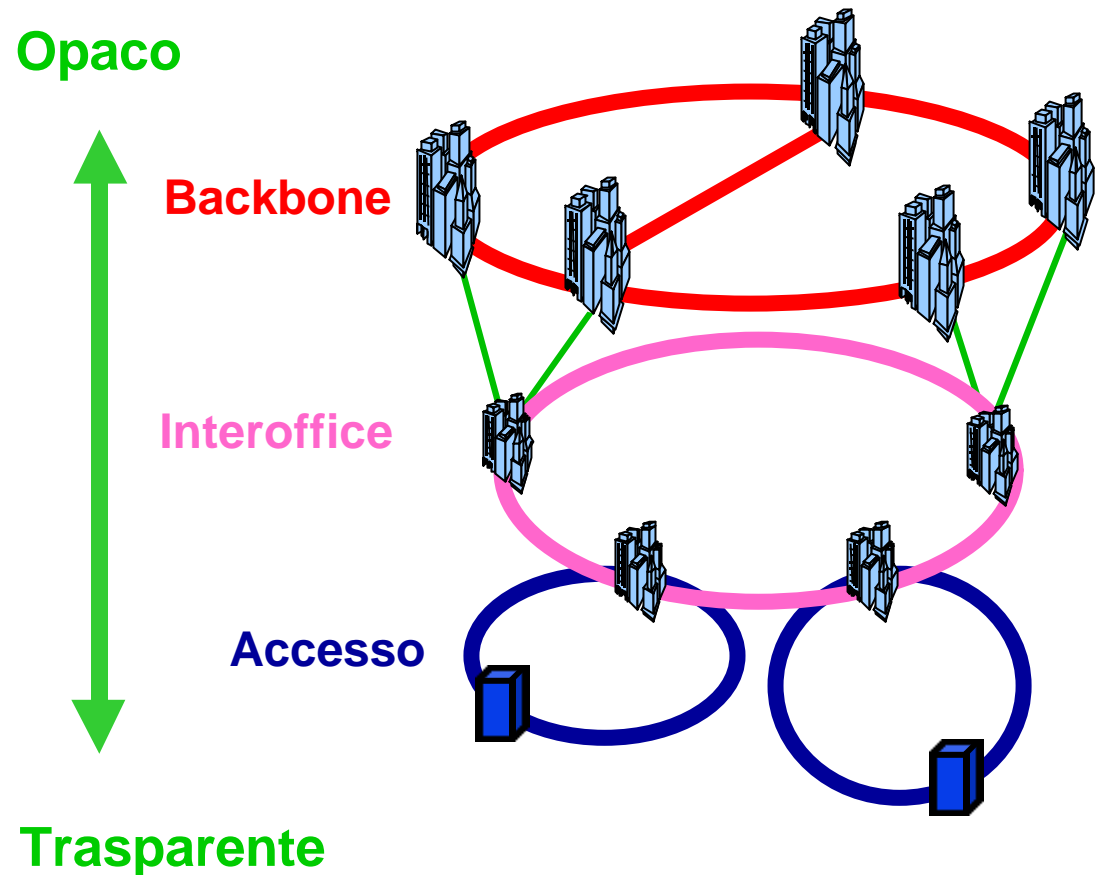
OADM 

OXC 



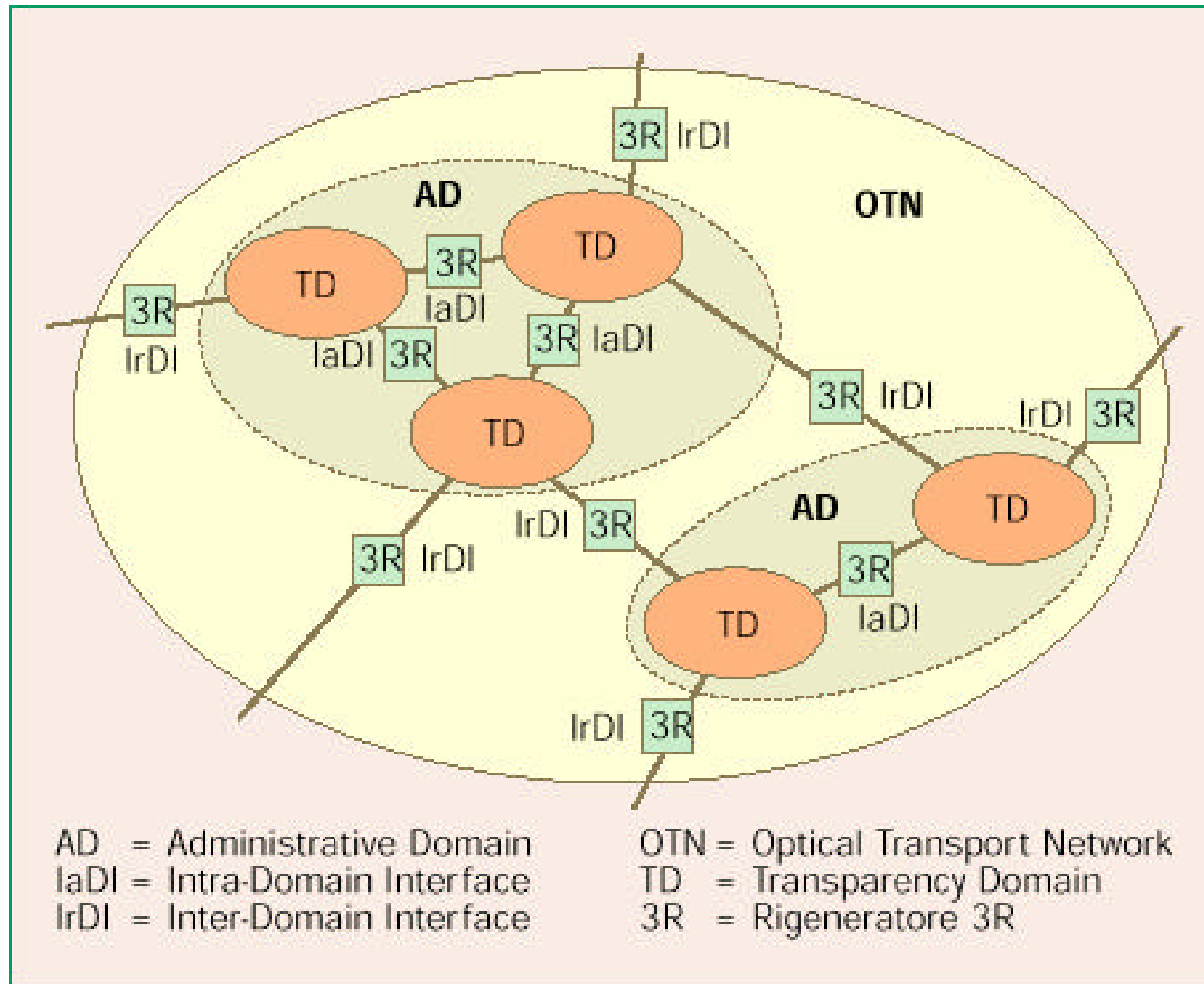
# Trasparente o opaco?

- Il dilemma della trasparenza:
  - è richiesta nell'accesso
  - troppo inefficiente per la dorsale
- Possibili soluzioni:
  - “isole” di trasparenza
  - trasparenza ristretta (solo segnali numerici)
  - rigenerazione di tipo 2R





# Domini di trasparenza e amministrativi





# Sommario

---

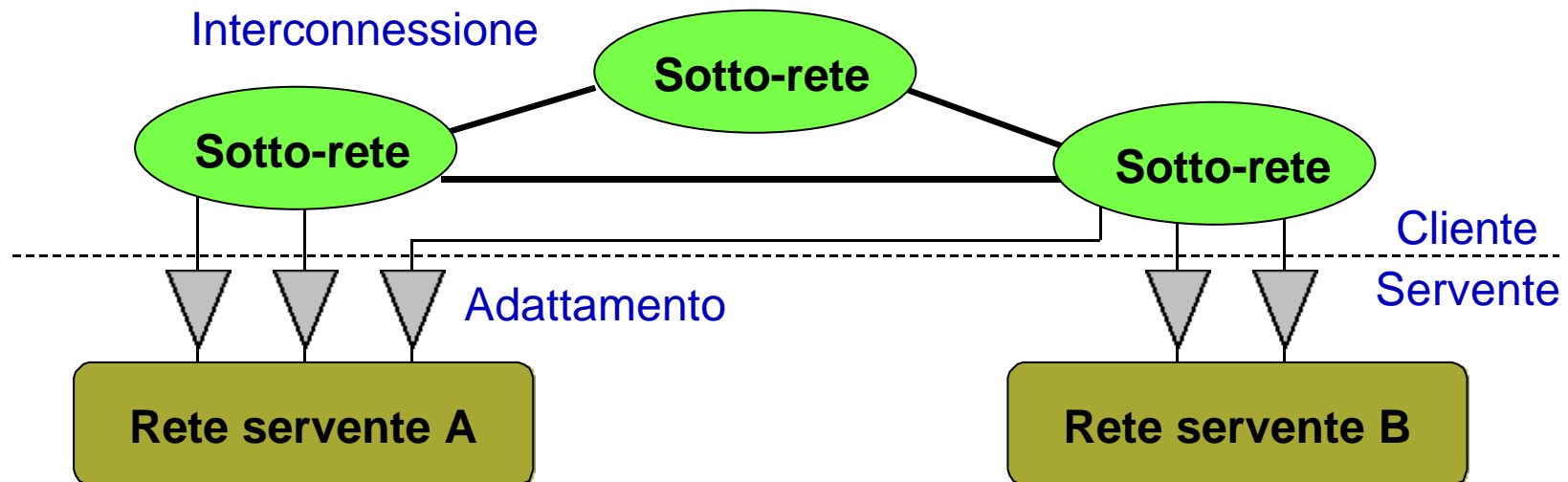
- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- Apparati e reti ottiche
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione





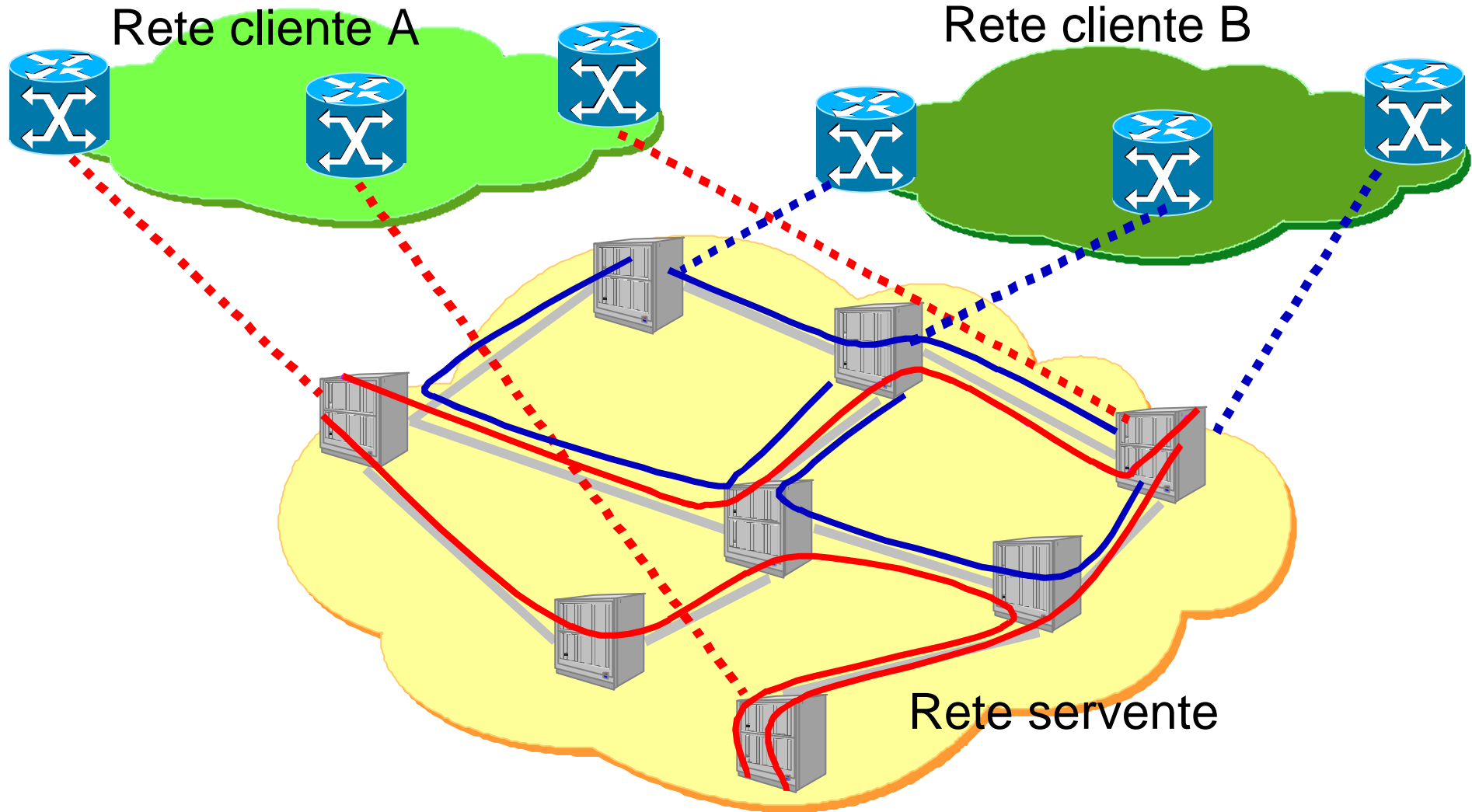
# Architetture di reti

- I principi che permettono la decomposizione del progetto, analisi, gestione delle reti sono la **stratificazione architetturale** e le **interfacce standard**
- Concetti essenziali
  - **reti stratificate** (rete cliente e rete servente)
  - **partizione** di una rete di strato





# Reti cliente e rete servente





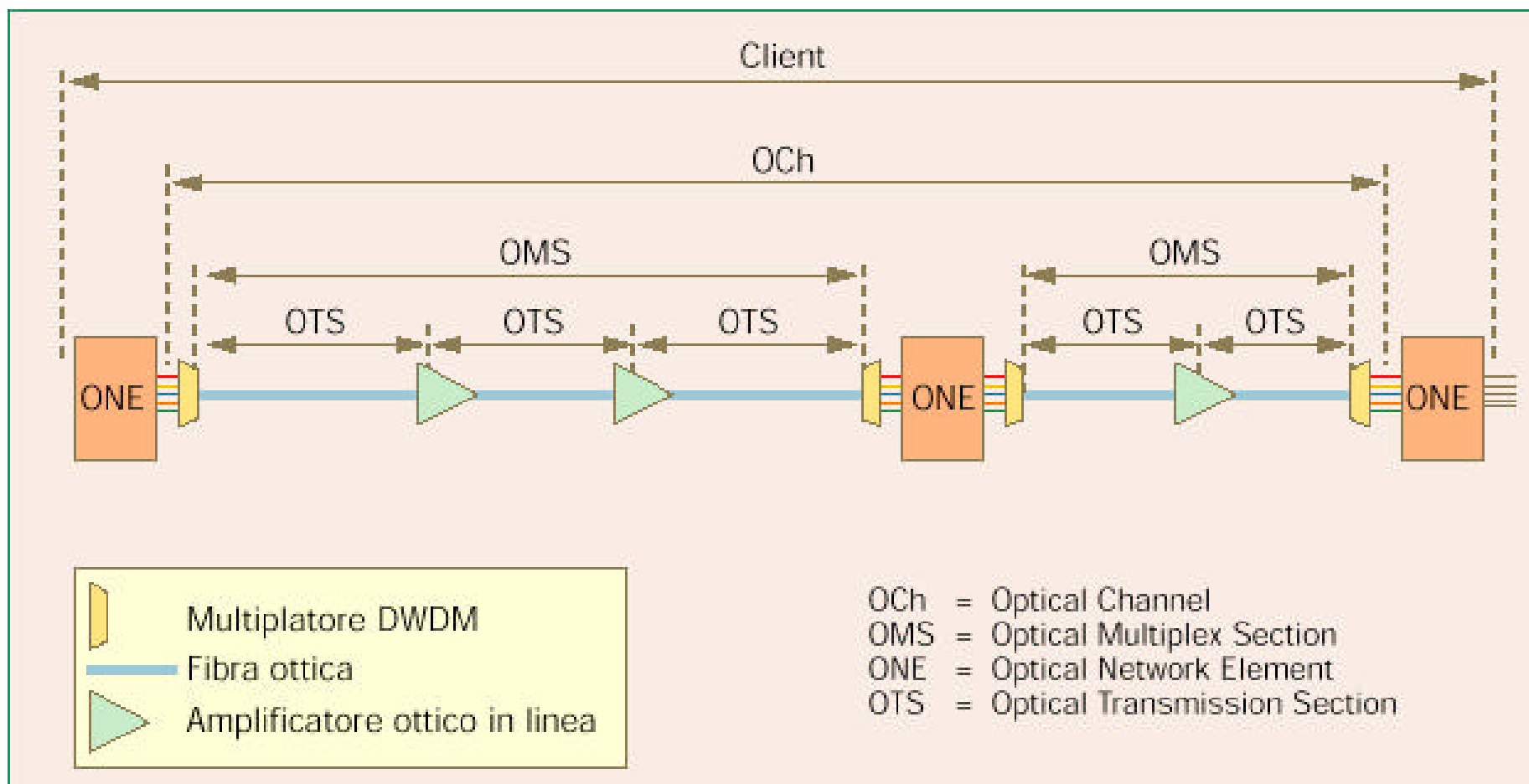
# Architettura della OTN: gli strati

- E' specificata nella Racc. ITU-T G.872
- **Optical channel network layer OCh**- “provides end-to-end networking of optical channels for transparently conveying client information of varying format (e.g. SDH STM-N, PDH 565 Mbit/s, IP, ATM, etc.)”
- **Optical multiplex section network layer OMS** - “provides functionality for networking of multi-wavelength optical signal.”
- **Optical transmission section network layer OTS** - “provides functionality for transmission of optical signals on optical media of various types (e.g. G.652, G.653 and G.655 fibre.)”
- **Physical media layer network** - “is a defined optical fibre type”.

**A ogni livello è associato un overhead, trasportato nel canale ottico di supervisione (OSC) o inserito nel formato numerico di trama**

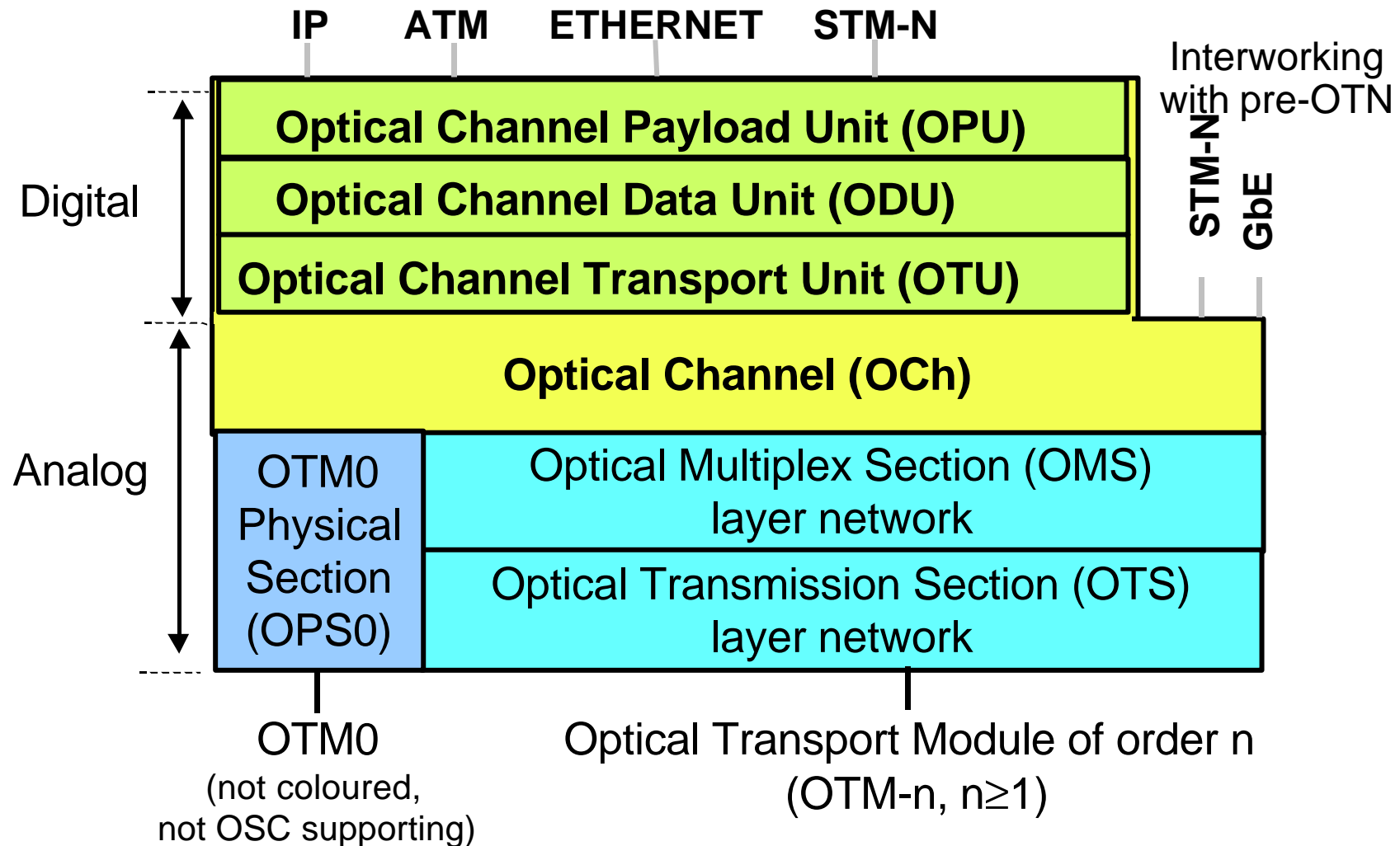


# Architettura della OTN: relazione tra strati



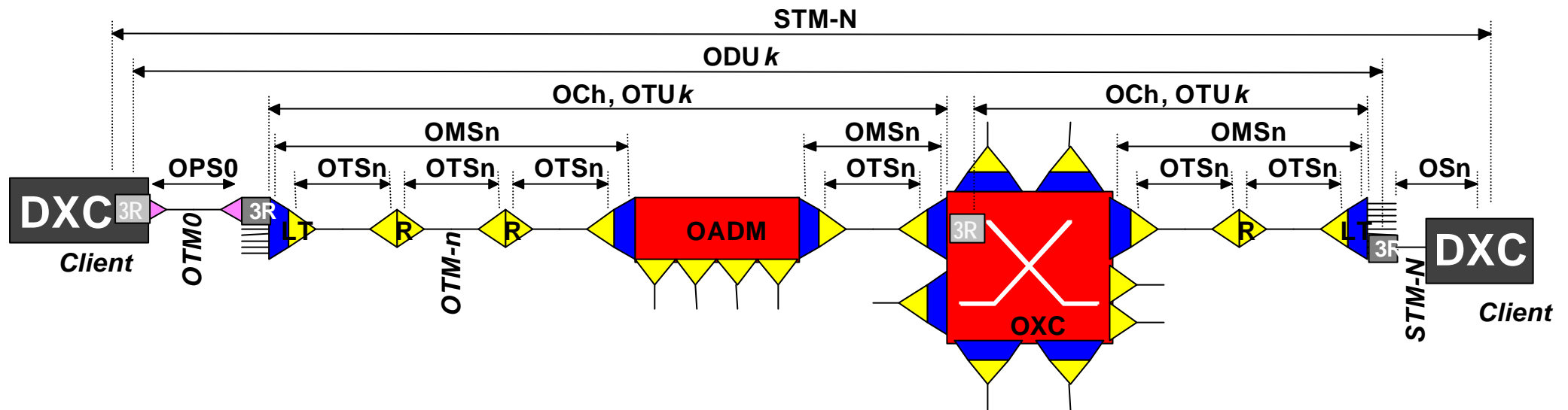


# Architettura della OTN: le unità di dati





# Esempio di percorsi stratificati



**I segnali SDH STM-N sono inseriti nella trama numerica ODU, che è trasportato trasparentemente attraverso la OTN.**

Per ogni trail di rete (OCh, OMS, OTS, ODU, OTU) è possibile definire i requisiti generali per la gestione dei guasti, della configurazione e delle prestazioni dei canali ottici da estremo a estremo, sia entro sia tra i confini amministrativi.



# Monitoraggio delle connessioni

**Continuity supervision** - il fuori servizio di un collegamento di una connessione nello strato servente attiva notifiche verso lo strato cliente

**Connectivity supervision** - controlla l'integrità dell'instradamento delle connessioni; usa una traccia identificativa del trail (OCh, ODU, OTU e OTS)

**Maintenance indication** - insieme di segnalazioni (FDI, BDI, AIS) per indicare "difetti" downstream e upstream in una connessione, parte di un trail bi-direzionale.

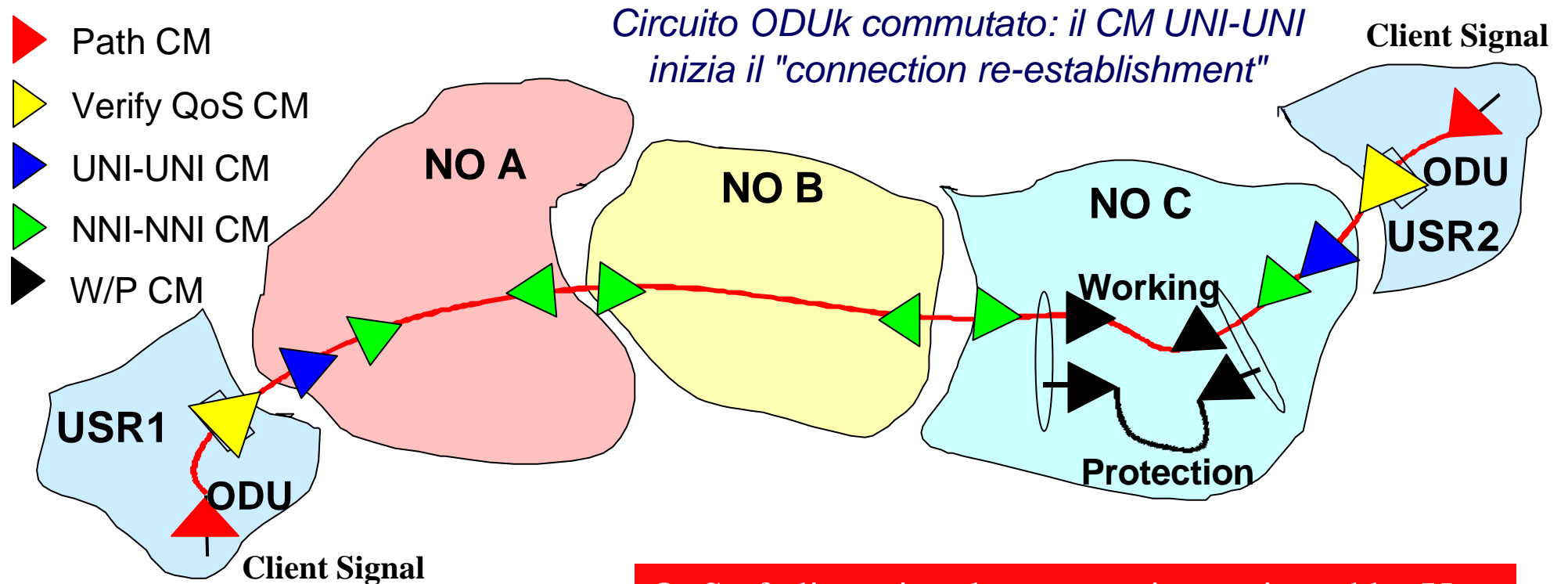
**Signal quality supervision** - monitorizza le prestazioni di una connessione.

**Management communications** - si riferisce ai canali di comunicazione a pacchetto per la rete di gestione.

**Il monitoraggio delle connessioni può essere usato per attivare la protezione e il re-instradamento dei cammini da estremo a estremo.**



# Esempio di supervisione di un OCh



QoS of client signal transport is monitored by User

QoS provided by leased circuit is monitored by User

QoS of provided leased circuit is monitored by Network Operator

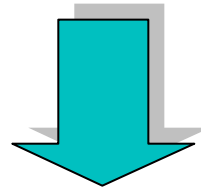
QoS of provided leased circuit is monitored by Service Provider





# Interconnessione di domini OTN

Elementi di rete ottica (OLT, OADM, OXC) sono stati introdotti dagli Operatori prima che gli organismi di standardizzazione avessero definito interfacce ottiche standard come avvenuto per l'SDH



Ogni Operatore di Rete (NO) ha realizzato isole ottiche (porzioni di OTN), ma l'interconnessione di isole di NO diversi è possibile solo con l'interruzione della continuità del canale ottico OCh (l'interconnessione si può realizzare a livello del segnale cliente).



# Interfacce di rete OTN

---

Per mantenere compatibilità verso il passato e permettere allo stesso tempo l'interconnessione di isole di OTN pre-esistenti con continuità degli OCh, la Racc. G.872 definisce due tipi di interfacce Nodo-Rete (Network-Node Interface, NNI)

**IaDI - intra-domain interface** - usata all'interno di un dominio amministrativo di un Operatore; le caratteristiche di questa interfaccia dipendono dalla specifica realizzazione del "vendor" con il requisito del trasporto trasparente della ODU e il supporto dei segnali di gestione definiti nella Racc. G.709.

**IrDI - inter-domain interface** - usata per l'interconnessione di isole di OTN appartenenti a domini amministrativi di due Operatori diversi; l'interfaccia è specificata nelle Racc. G.709 e G.959.1.



# Sommario

---

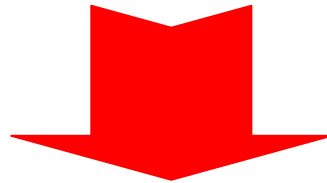
- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- Apparati e reti ottiche
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



## Nuovi requisiti per la OTN

---

- Fornitura di trasporto da estremo a estremo rapida e automatica: Instaurazione dinamica delle connessioni
- Re-instradamento rapido e efficiente
- Supporto di reti private virtuali ottiche (OVPN)
- Differenziazione della qualità di servizio
- Ottimizzazione del trasporto di clienti IP



**Automatically Switched Optical Network (ASON)**  
**(Automatically Switched Transport Network, ASTN)**



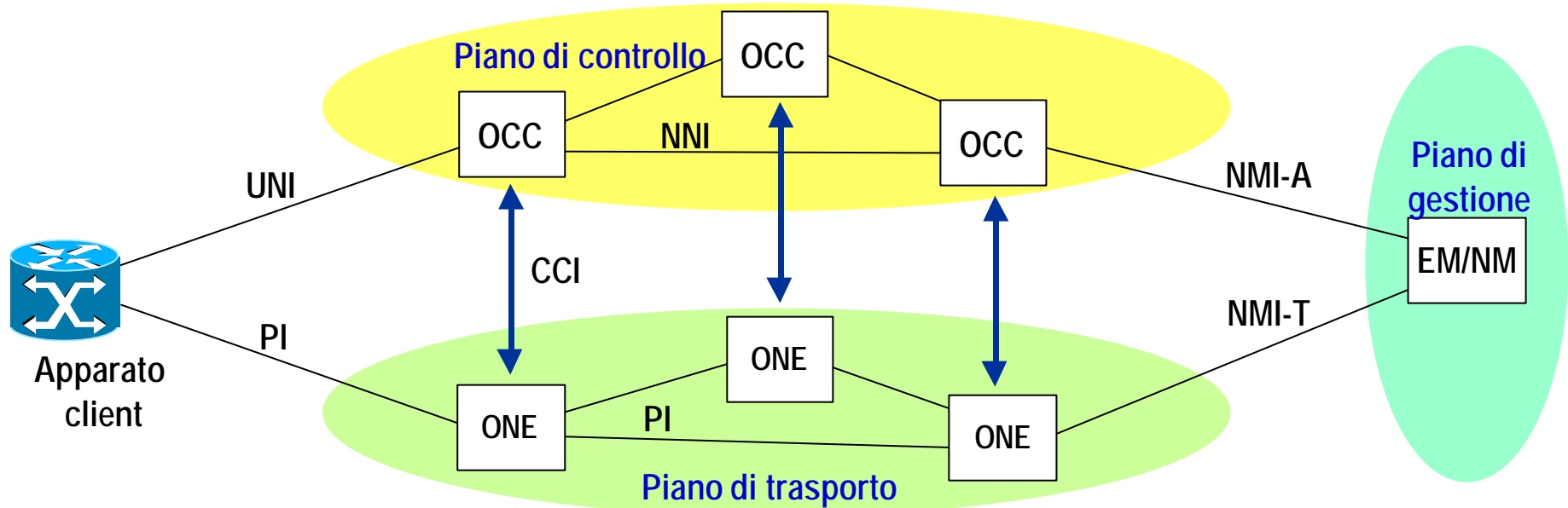
# Approcci diversi verso la ASON

---

- **Modello Client-server (overlay):** la rete client (IP, ATM) richiede risorse (connessioni) alla rete trasmissiva (OTN), ma non ha alcuna conoscenza della sua struttura interna
  - ITU-T G.ason “Automatically Switched Optical Networks”
  - Optical Internetworking Forum (OIF), Optical Domain Service Interconnect (ODSI): UNI
- **Modello Peer-to-peer:** la rete client è solo IP e il piano di controllo della rete trasmissiva (OTN) è integrato con il piano di controllo della rete IP
  - IETF: Generalised Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)



# Modello funzionale di ASON



**CCI: Connection Control Interface**

**NMI-A: Network Management Interface for the ASON Control Plane**

**NMI-T: Network Management Interface for the Transport Network**

**NNI: Network to Network Interface**

**ONE: Optical Network Element**

**OCC: Optical Connection Controller**

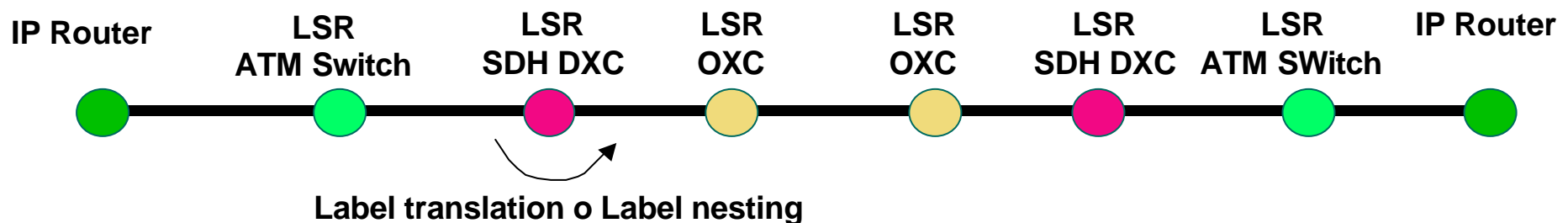
**PI: Physical Interface**

**UNI: User Network Interface**



# Generalized Multi-Protocol Label Switching

- Estende la segnalazione MPLS per il supporto di nodi di commutazione basati su tecnologie diverse
- Un Label Switching Router (LSR) può avere le porte seguenti:
  - Packet-Switch Capable (PSC): commuta pacchetti IP o celle ATM
  - Time-Division Capable (TDC): commuta time-slots (per esempio un ADM o un DXC SDH)
  - Lambda-Switch capable (LSC): commuta canali ottici (per esempio un OADM o un OXC)
  - Fiber-Switch capable (FSC): commuta sezioni ottiche multiplate (per esempio un fiber-OXC)





# Tipi di connessione

---

**Permanent:** è attivata attraverso una rete di trasporto tradizionale: i comandi verso gli ONE sono impartiti dal sistema di gestione centralizzato al quale è pervenuta una richiesta attraverso un sistema automatico o manuale.

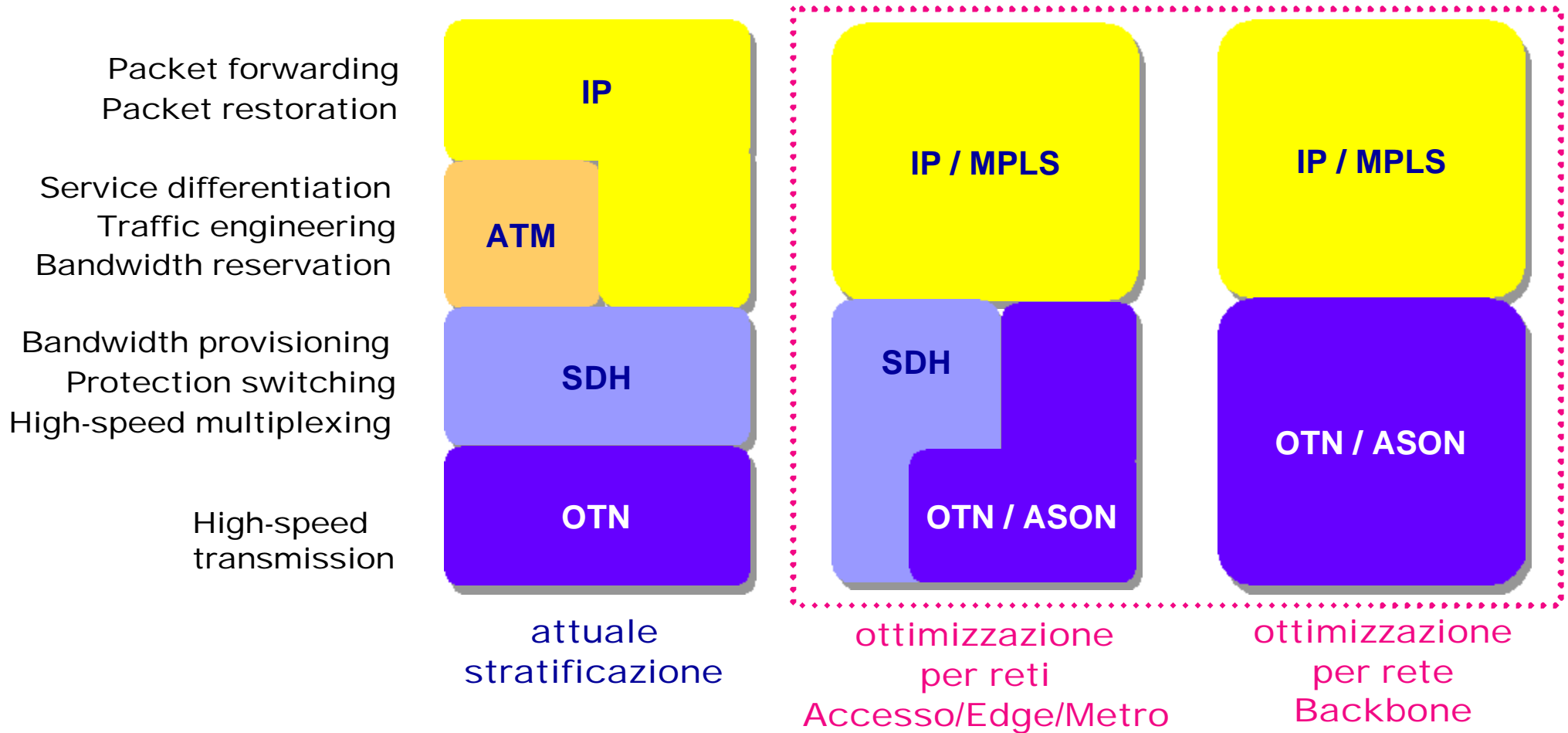
**Soft-permanent:** è attivata dal sistema di gestione centralizzato che in questo caso invia la richiesta direttamente al piano di controllo che ha poi il compito di inviare i comandi verso gli ONE. Questo approccio riduce fortemente il carico elaborativo sul sistema di gestione centralizzato necessario per identificare l'instradamento ed evita anche di dover mantenere aggiornato in tempo reale un data-base di tutte le connessioni attive e le risorse di rete in quanto la stessa informazione è distribuita all'interno del piano di controllo.

**Switched:** è attivata direttamente dagli apparati client mediante lo scambio di messaggi attraverso l'interfaccia utente-rete (UNI); la connessione è attivata dal piano di controllo che provvede a identificare l'instradamento, a inviare i comandi agli ONE e inoltre ad attivare, quando richieste, eventuali protezioni e a verificare i diritti di accesso ed il rispetto dei vincoli dettati dallo *SLA (Service Level Agreement)*.





# Interconnessione in rete





# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- **Trasmissione DWDM**
  - **Trasmissione multicanale in fibra ottica**
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- Apparati e reti ottiche
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



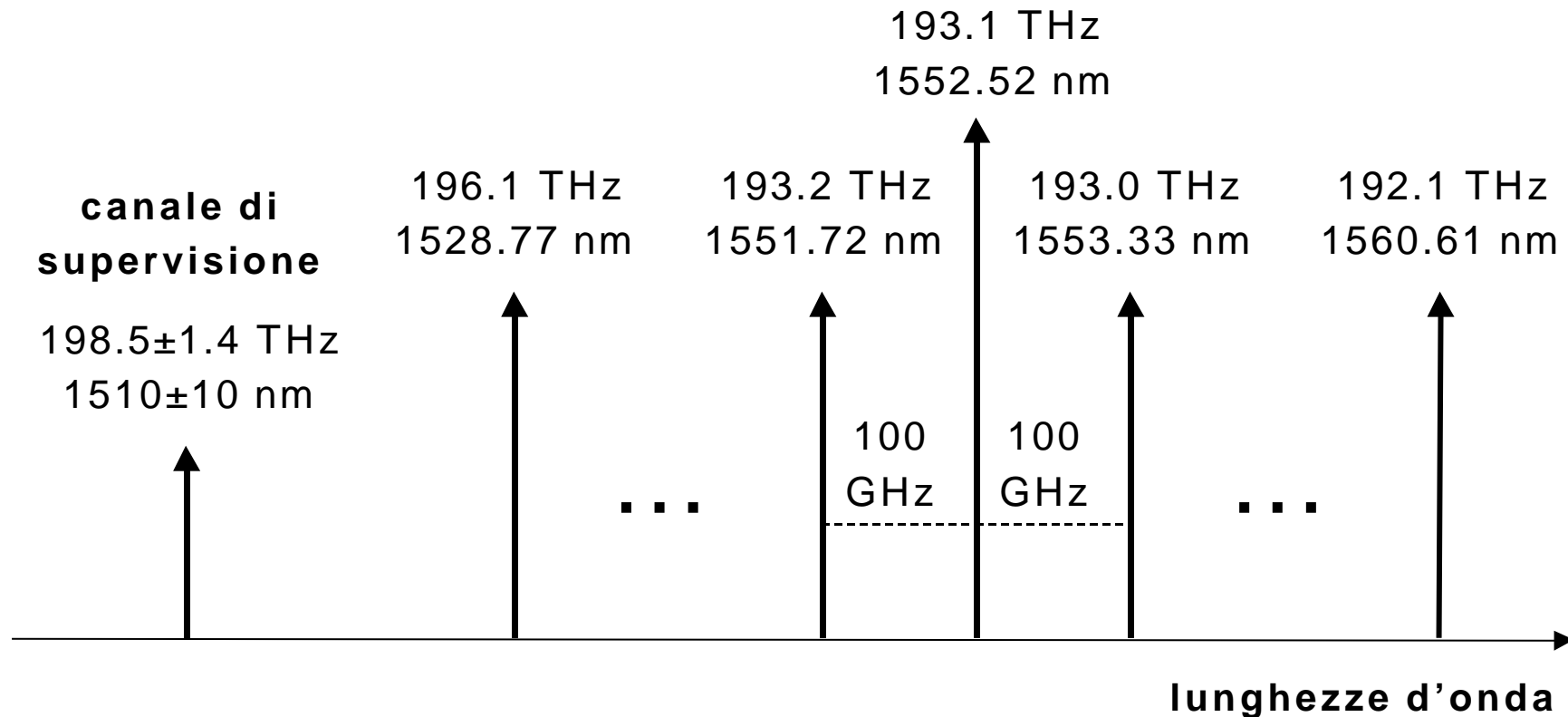
# Trasmissione monocanale su fibre ottiche

---

- Le fibre ottiche sono utilizzate per scopi di telecomunicazioni nelle bande attorno a:
  - 1300 nm (II finestra)
  - 1550 nm (III finestra, minimo assoluto dell'attenuazione)
- La banda trasmissiva nelle due finestre è circa 25000 GHz
- La banda delle fibre ottiche è stata fino ad ora condivisa dai flussi numerici mediante l'uso predominante di moltiplicazione a divisione di tempo nel dominio elettronico (Electric Time Division Multiplexing, ETDM)



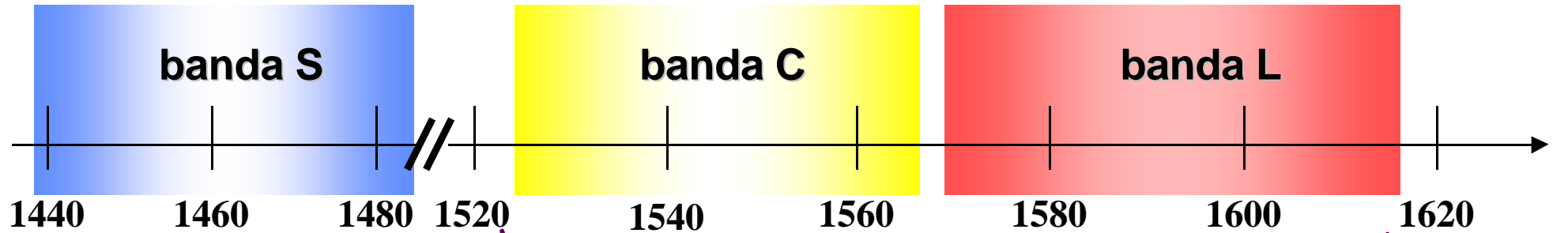
# Allocazione delle portanti nel DWDM



**Griglia di riferimento ITU-T G.692 per l'allocazione delle frequenze portanti nei sistemi WDM**

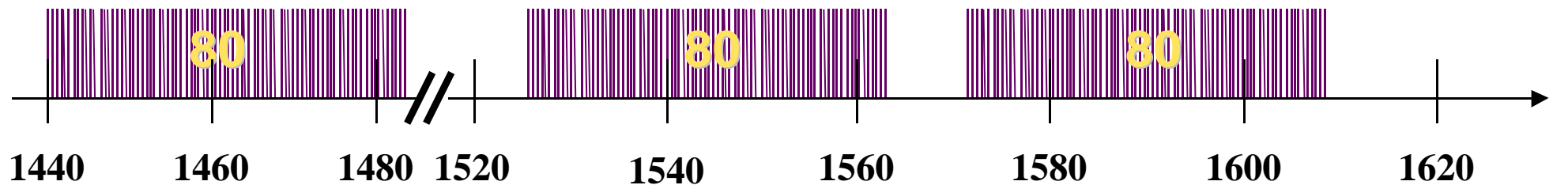
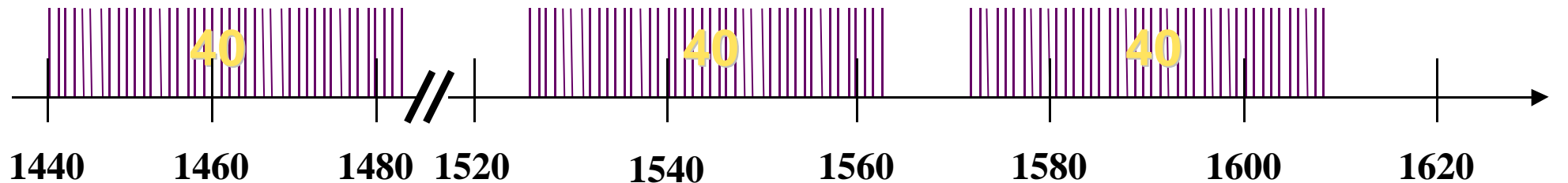


# Estensione delle finestre di tx



AO Erbio:Silice

**$D_n = 100$  GHz**



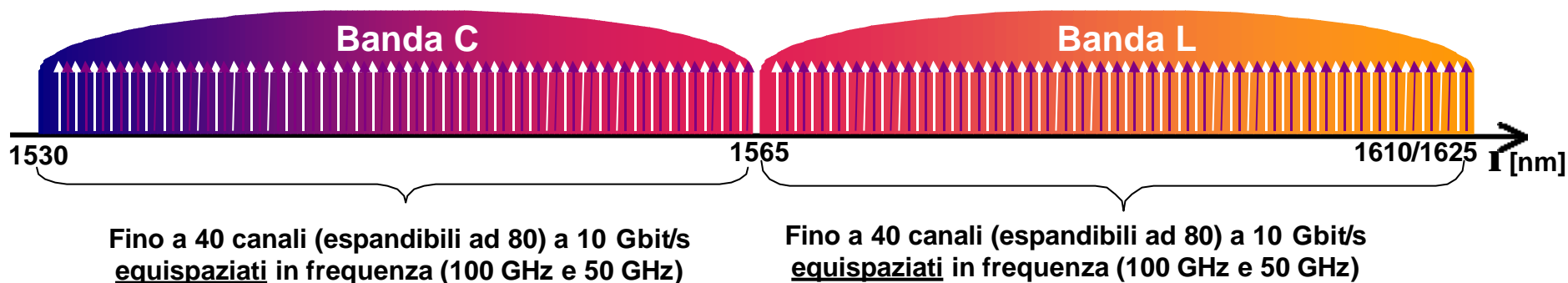
**$D_n = 50$  GHz**



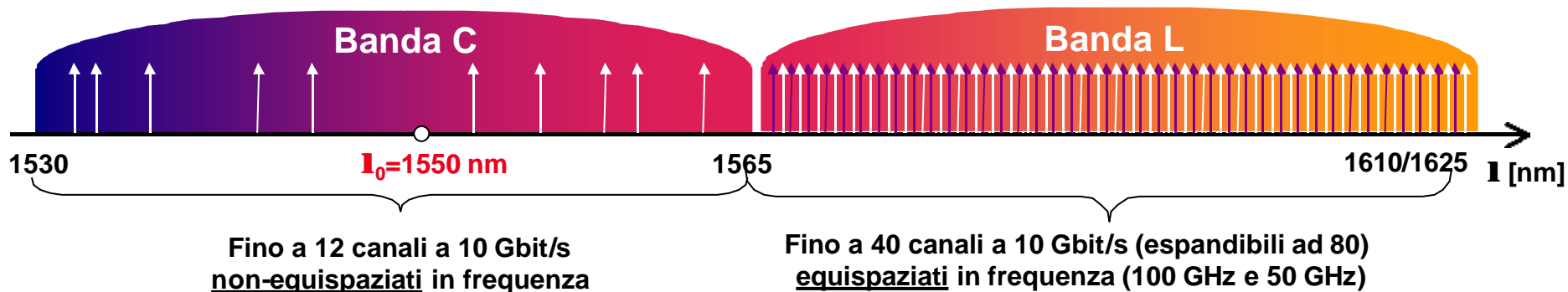
# Stato dell'arte commerciale

## Lo stato dell'arte della tecnologia

### Fibra G.652 / G.655



### Fibra G.653





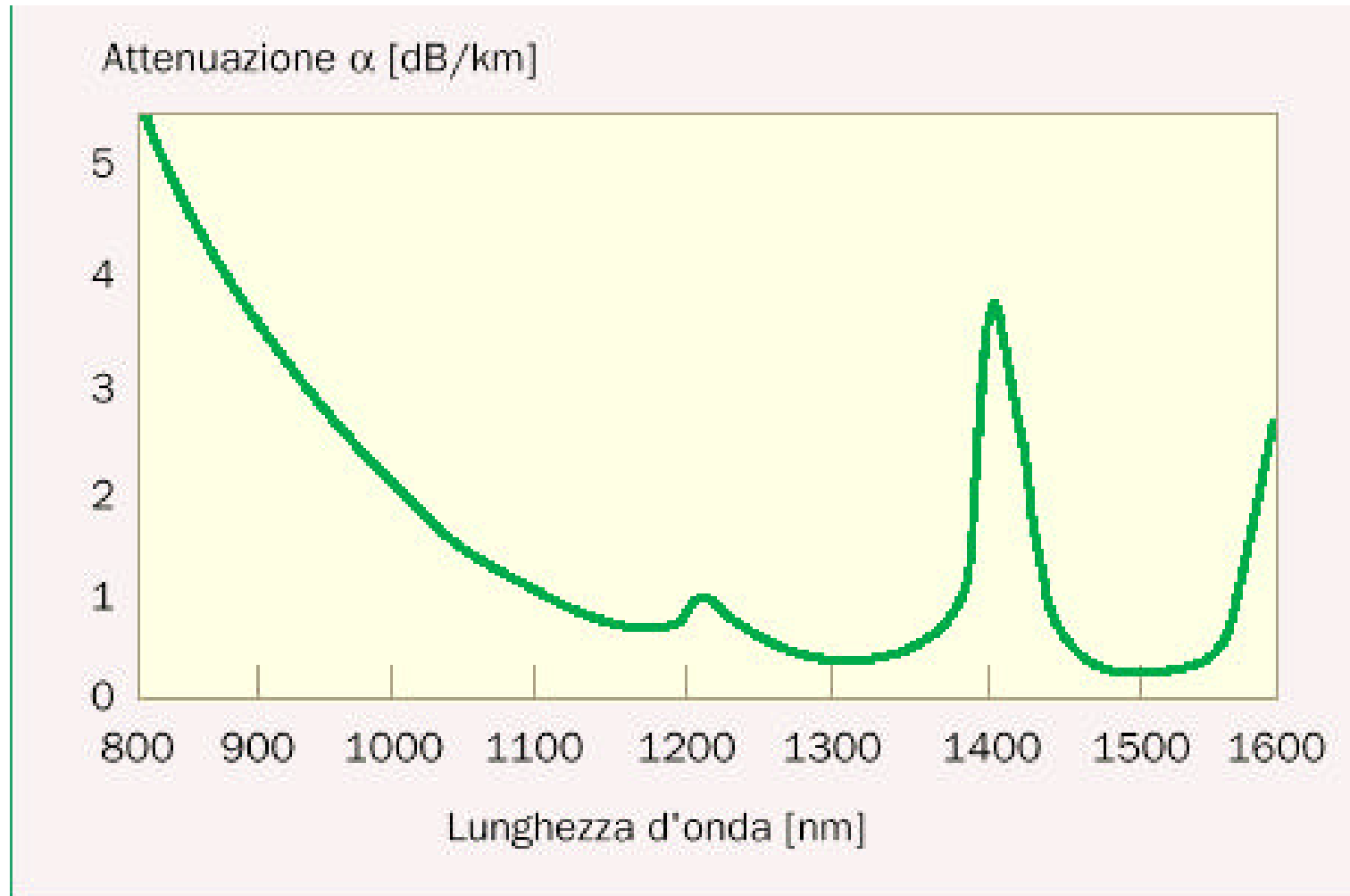
# Problemi trasmissivi delle fibre ottiche

---

- Attenuazione
- Dispersione: cromatica (guida + materiale), di polarizzazione (PMD)
- Effetti non lineari: effetti Brillouin, Raman, Kerr (Self-Phase Modulation (SPM), Cross-Phase Modulation (CPM), Four Wave Mixing (FWM))
  - Una potenza di 20 mW (13 dBm) concentrata sulla sezione trasversale di una fibra monomodale (sezione di  $50 \mu\text{m}^2$ ) produce un'intensità di  $40 \text{ kW/cm}^2$ .
- Diafonia nei sistemi WDM
- Rumore ottico negli amplificatori ottici (ASE)
- Rumore di fase nei laser trasmettitori



# Attenuazione

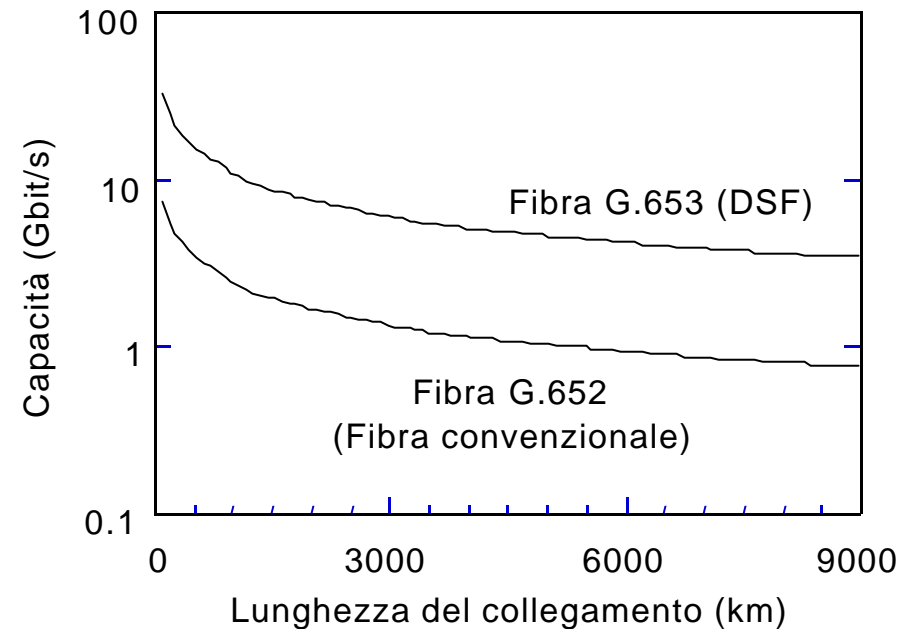






# Dispersione nelle fibre ottiche

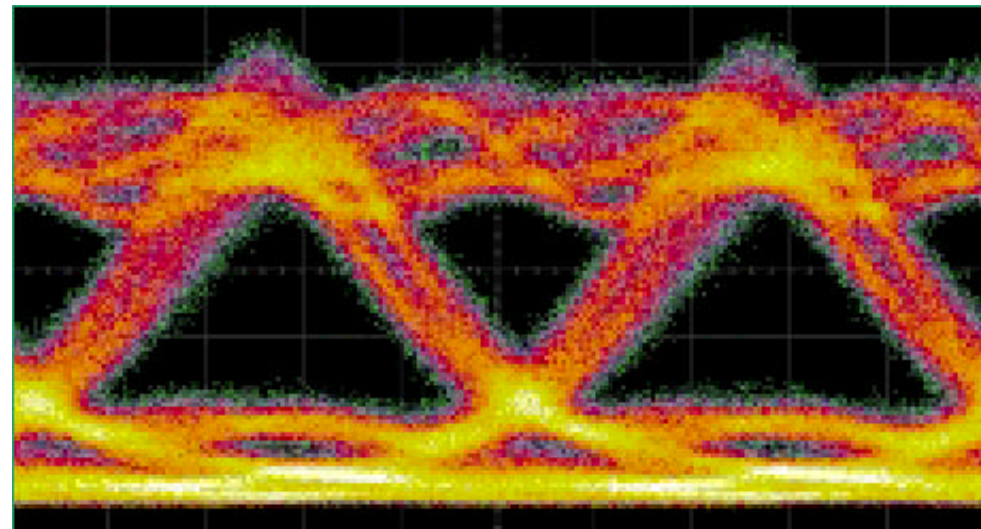
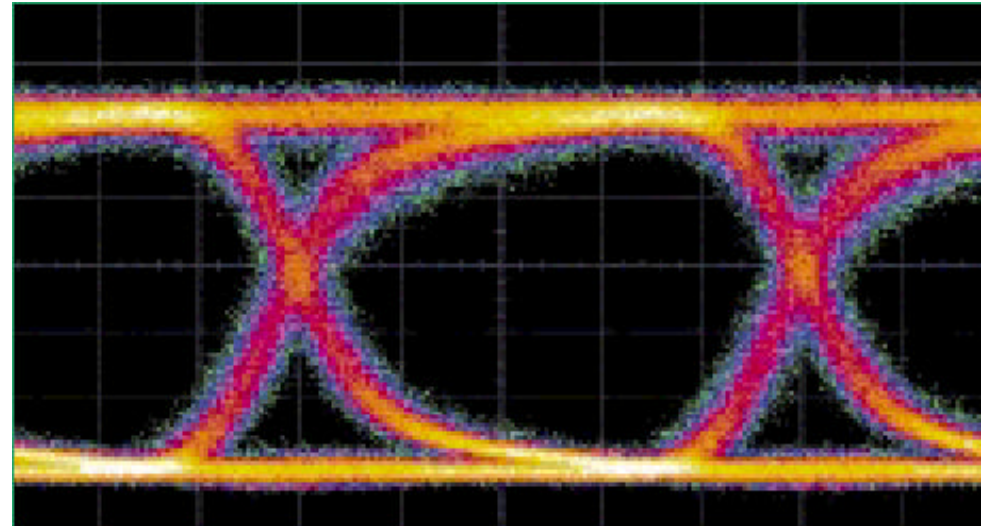
- La dispersione può essere di
  - **materiale:** dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione del nucleo della fibra con la frequenza (ps/nm/km)
  - **guida:** dovuta alla dipendenza della costante di propagazione del campo e.m. dalla frequenza (ps/nm/km)
  - **polarizzazione,** dovuta alla diversa velocità di propagazione di modi del campo e.m. con polarizzazione diversa (ps/" km)





# Diagrammi ad occhio

- Segnale a 10 Gbit/s in assenza di dispersione cromatica
- Segnale a 10 Gbit/s in presenza di dispersione cromatica





# Incidenza degli effetti non lineari

- L'allargamento dello spettro del segnale prodotto dalla SPM in combinazione con la CD conduce ad una distorsione del segnale durante la propagazione
- L'effetto finale dipende dalla potenza di lancio e dal segno della CD:
  - se:  $CD < 0$  (regime di dispersione normale)

**l'effetto della SPM rafforza quello della dispersione**

– degrado più marcato della sequenza di dati

- se:  $CD > 0$  (regime di dispersione anomala)

**SPM e CD possono compensarsi vicendevolmente**

- interazione molto complessa e sensibile ai valori della CD e della potenza di lancio degli impulsi ottici
- possono verificarsi miglioramenti marcati delle prestazioni



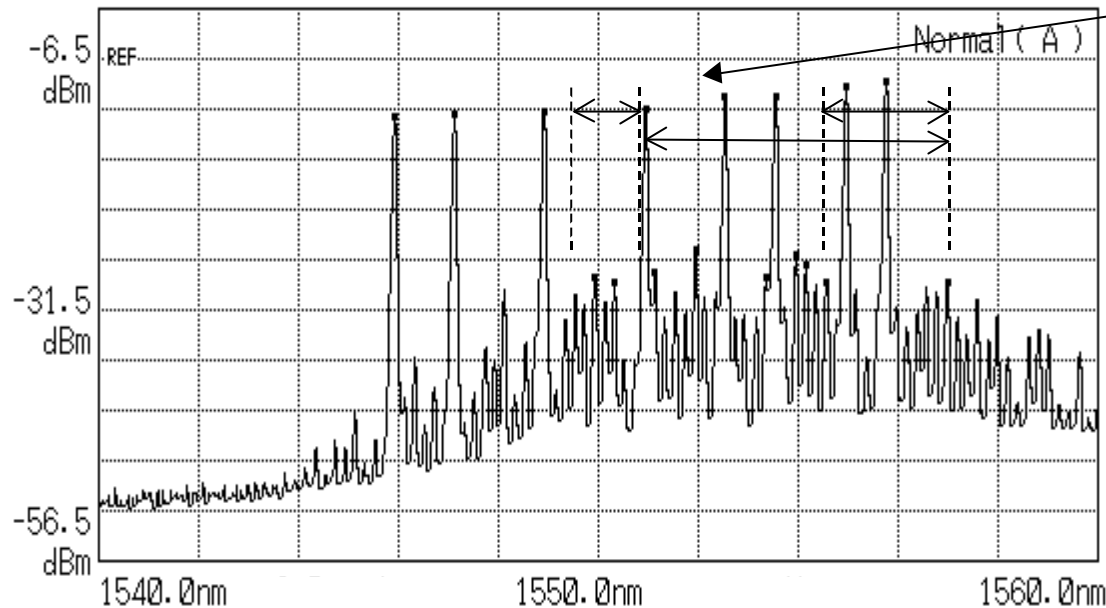
# Four Wave Mixing

- In un mezzo non lineare non vale il principio di sovrapposizione
  - onde co-propaganti interagiscono scambiandosi energia e generando prodotti ottici di intermodulazione
- La massima efficienza del FWM si ha in regime di bassa CD
- L'FWM è molto dannoso per i sistemi multicanale (DWDM) con amplificazione ottica, in particolare quando i canali sono equispaziati in frequenza





# Limitazione degli effetti del FWM



Se la separazione in frequenza tra due segnali comunque scelti nel pettine DWDM è diversa da quella di qualunque altra coppia di segnali, allora tutti i prodotti di intermodulazione avranno frequenze diverse da quelle dei segnali e non daranno luogo a interferenza.

Spettro di un segnale DWDM 8 x10 Gbit/s con spaziatura UCS dopo 50 km di fibra ottica G.653 (2 mW/canale).

La distribuzione disuniforme dei canali ottici (**Unequal Channel Spacing (UCS)**) porta ad una bassa efficienza spettrale: possono essere utilizzati solo alcuni dei canali della griglia



# Le fibre ottiche standard

- Le fibre più utilizzate sono
  - Fibra standard ITU-T G.652 (ottimizzata per l'uso in II finestra)
  - Fibra standard ITU-T G.653 (Dispersion Shifted, ottimizzata per l'uso in III finestra)
  - Fibra a dispersione non nulla ITU-T G.655 (Non Zero Dispersion, ottimizzata per DWDM in III finestra)

| Caratteristica                                      | Fibra convenzionale G.652 | Fibra a dispersione spostata G.653 |
|---|---------------------------|------------------------------------|
| Valore tipico della dispersione cromatica a 1.3 nm  | < 3 ps/km/nm              | ~ -17 ps/km/nm                     |
| Valore tipico della dispersione cromatica a 1.55 nm | ~ 17 ps/km/nm             | < 3 ps/km/nm                       |
| Valore tipico dell'attenuazione a 1.3 nm            | ~ 0.35 dB/km              | ~ 0.40 dB/km                       |
| Valore tipico dell'attenuazione a 1.55 nm           | ~ 0.22 dB/km              | ~ 0.25 dB/km                       |
| Coefficiente di dispersione di polarizzazione       | 0.1-0.2 ps/" km           | 0.3-0.5 ps/" km                    |



# Ruolo e limiti dell'amplificatore ottico

---

- Tecnologia chiave per la realizzazione dei sistemi ottici di trasmissione (TDM o WDM)
  - Amplificatore Ottico (AO) [p. es. a fibra attiva drogata con Er (EDFA)]
- Gli AO compensano l'attenuazione della fibra ottica . . . ma
  - comportano l'accumulo degli effetti dispersivi (dispersione cromatica, CD, e di polarizzazione, PMD )
  - causano l'insorgenza di effetti ottici non lineari nella fibra ottica
  - possono operare solo in intervalli di lunghezza d'onda limitati [per esempio, gli EDFA operano tra 1530 e 1565 nm ]



# Trasmissione DWDM: pregi e difetti

---

- Nel caso di fibra G.652, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dalla dispersione cromatica e di polarizzazione
- Nel caso di fibra G.653, i sistemi WDM Nx2.5-Gbit/s sono limitati dal FWM
- Possibili fattori limitanti del WDM:
  - amplificazione ottica a larga banda ed elevata potenza di uscita
  - effetti non lineari
- Prospettive:
  - utilizzo di un nuovo tipo di fibra (NZ-DSF / G.655)
  - valori migliori di PMD per le fibre nuove e compensazione della PMD
  - trasmissione a " 40 Gbit/s per canale





# Sommario

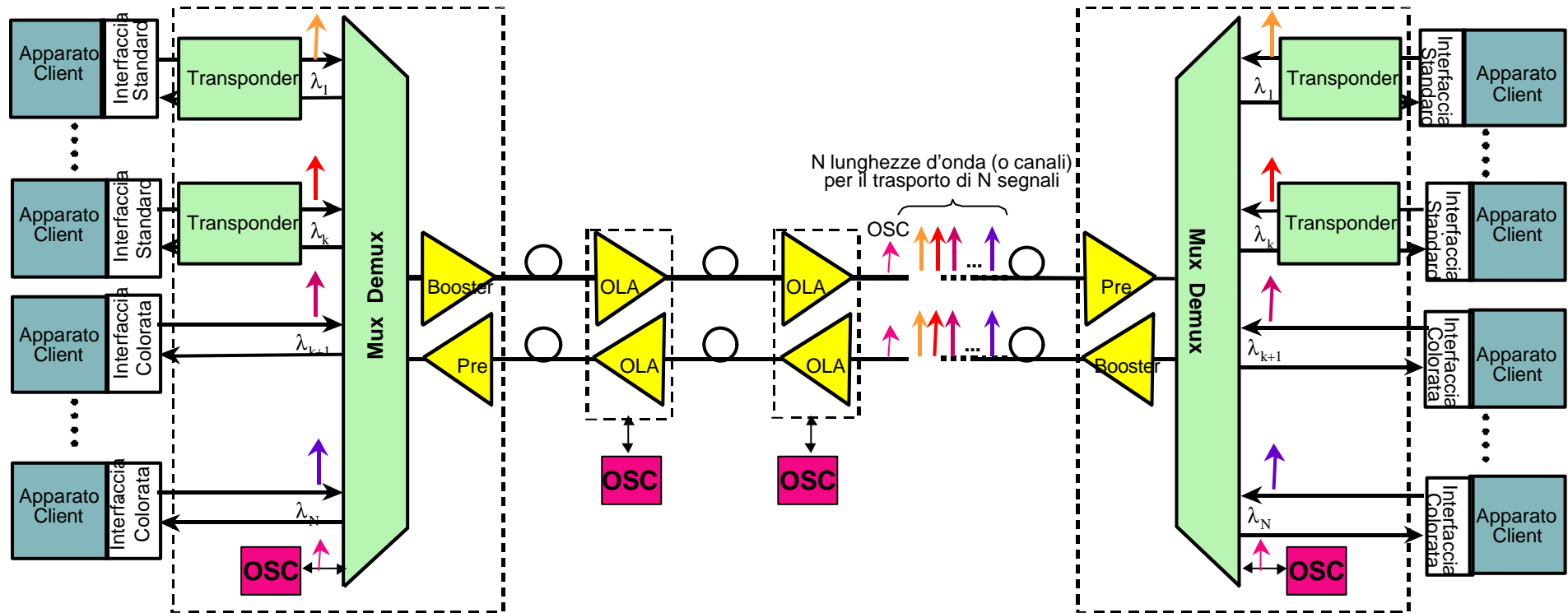
---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- **Trasmissione DWDM**
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - **Sistemi trasmissivi DWDM**
- Apparati e reti ottiche
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



# Sistema di trasmissione DWDM

## Schema generale di un sistema DWDM misto



OLA Optical Line Amplifiers

OSC Optical Supervisory Channel (tipicamente un segnale a 2 Mbit/s)

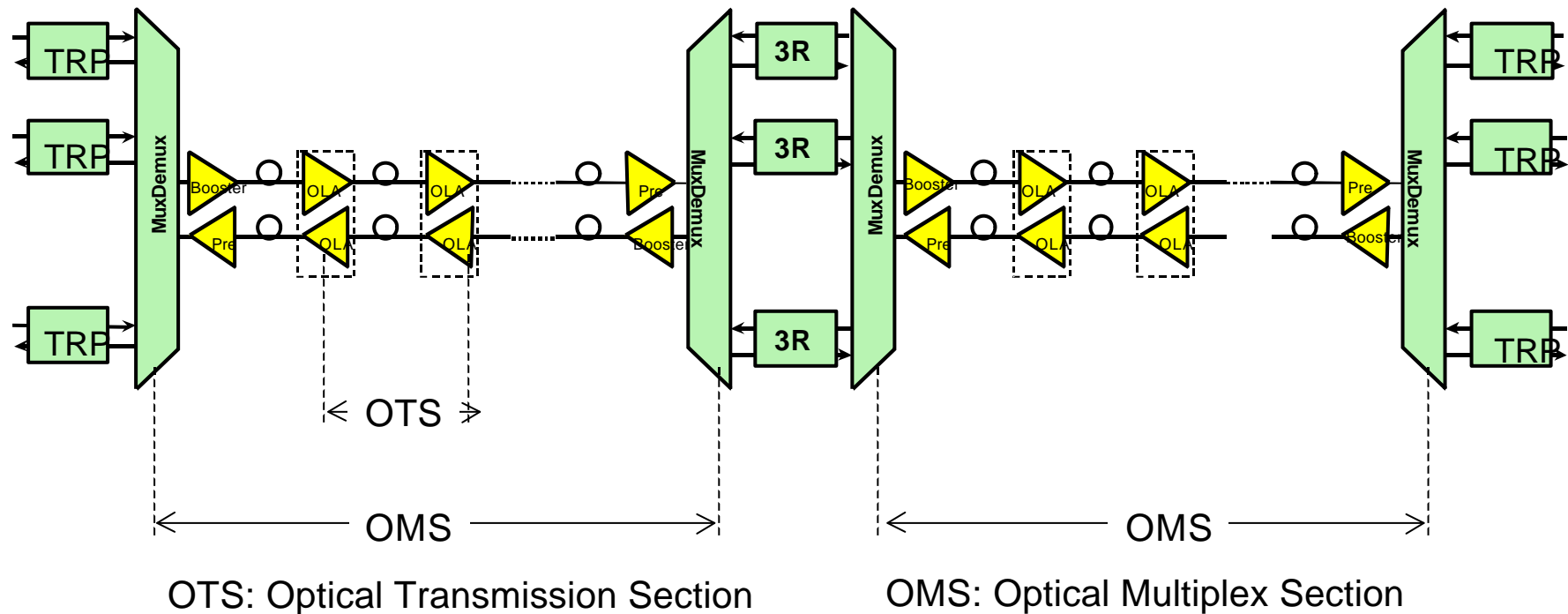
Pre Pre amplificatore

Booster amplificatore di lancio



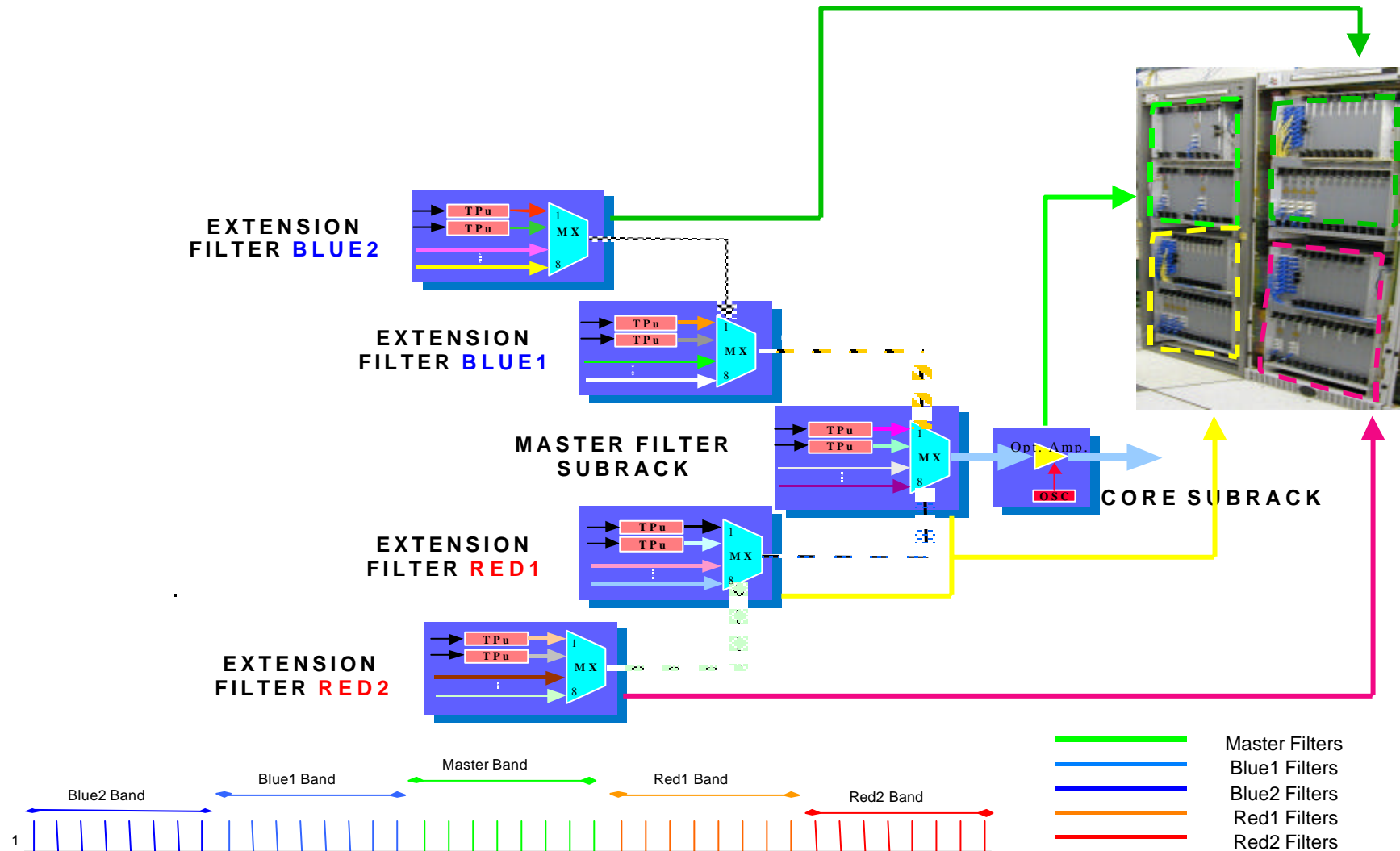
# Collegamento DWDM

A causa dell'accumulo del rumore ottico, della dispersione (cromatica e di polarizzazione) e degli effetti non lineari è spesso necessario effettuare una rigenerazione completa di ciascuno dei segnali numerici.





# Esempio di terminale di linea





# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- **Apparati e reti ottiche**
  - **Componenti per il DWDM**
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



## Componenti (1/2)

- Per un sistema trasmissivo in f.o. monocanale servono
  - la tratta in f.o. (con pezzature di circa 2-3 km giuntate a fusione)
  - Trasmettitori (transmitters): Laser, LED
  - Rivelatori (detectors)
- Per estendere la tratta occorrono
  - Amplificatori ottici (optical amplifiers)
    - In fibra drogata (Er, Pd, Te) - usati in linea
    - Semiconductor Optical Amplifier (SOA) - usati negli apparati
  - Transponder (rigeneratori elettrici 3R)
- Altri componenti utili sono
  - Accoppiatori (couplers)
  - Isolatori e circolatori (isolators and circulators)



## Componenti (2/2)

- Per realizzare un sistema di linea multicanale, oltre ai precedenti dispositivi, occorrono anche
  - Multiplatori e filtri (multiplexers and filters)
    - Reticoli (gratings): di Bragg, in fibra, in schiere di guida ottica
    - Filtri Fabry-Perot
    - Filtri a film sottile multistrato dielettrico
    - Interferometri di Mach-Zehnder
    - Filtri accordabili acusto-ottici
- Per realizzare gli apparati nodali di una OTN basata sul DWDM occorrono
  - Commutatori (switches)
  - Convertitori di lunghezza d'onda (wavelength converters)
    - Optoelettronici
    - XGM, XPM, wave mixing



# Amplificatori ottici (1/3)

---

- L'amplificazione ottica usa il principio dell'emissione stimolata
- Le prestazioni di un amplificatore ottico sono caratterizzate da
  - il guadagno dalla fibra di ingresso a quella di uscita
  - la banda associata al processo di guadagno
  - il rumore generato dal processo di amplificazione (Amplified Spontaneous Emission, ASE)
  - la sensibilità del guadagno alle variazioni della potenza in ingresso e della polarizzazione del segnale incidente
  - la potenza di saturazione





## Amplificatori ottici (2/3)

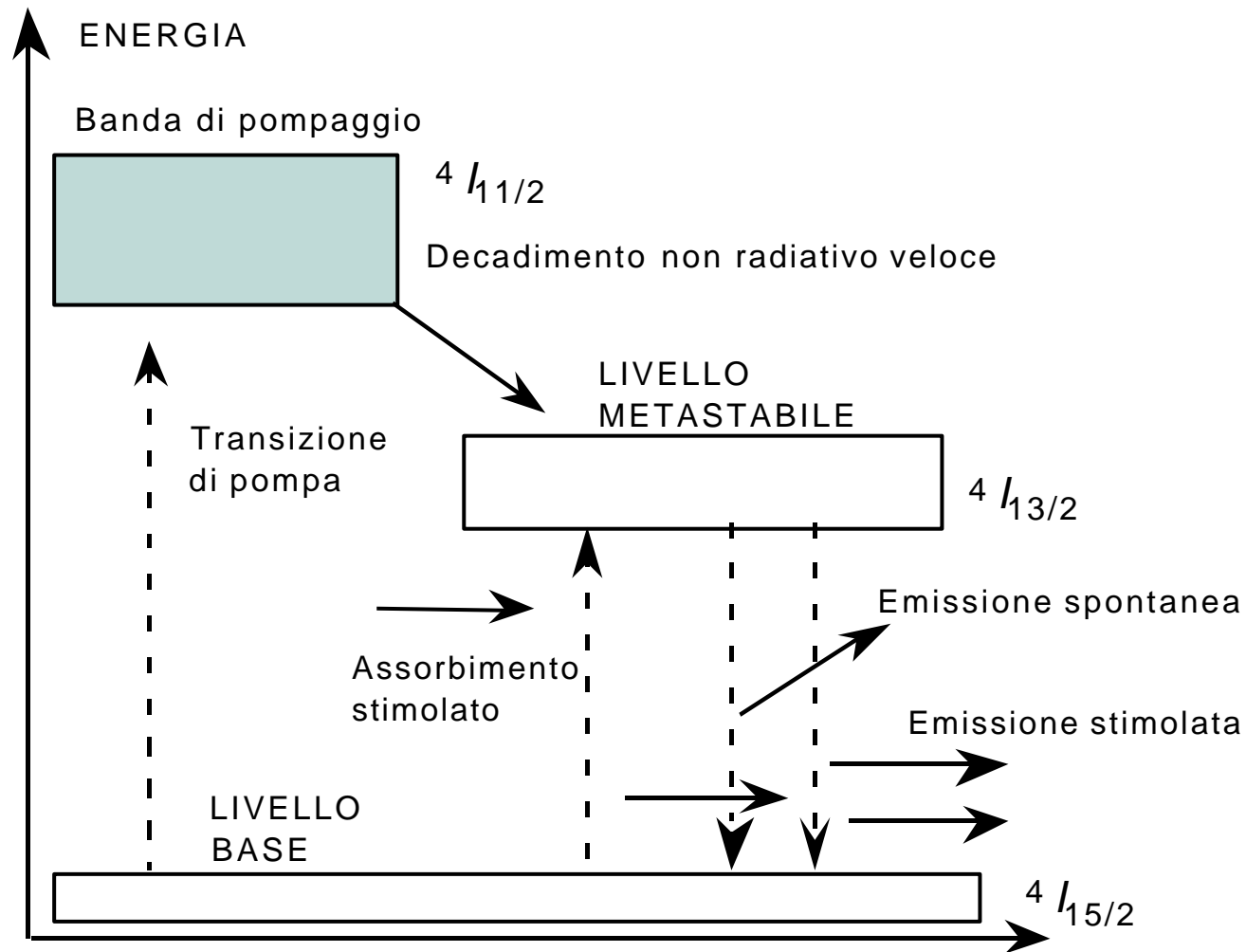
- I due tipi fondamentali di amplificatori ottici sono:
  - gli amplificatori laser a semiconduttore (SOA: Semiconductor Optical Amplifier)
  - gli amplificatori a fibra drogata con terre rare, il più diffuso dei quali è l'EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

### Caratteristiche degli amplificatori ottici

| Tipo di amplificatore | Regione di guadagno | Banda di guadagno | Guadagno |
|-----------------------|---------------------|-------------------|----------|
| Semiconduttore        | Qualunque           | 40 nm             | 25 dB    |
| EDFA                  | 1525-1560 nm        | 35 nm             | 25-51 dB |
| PDFFA                 | 1280-1330 nm        | 50 nm             | 20-40 dB |

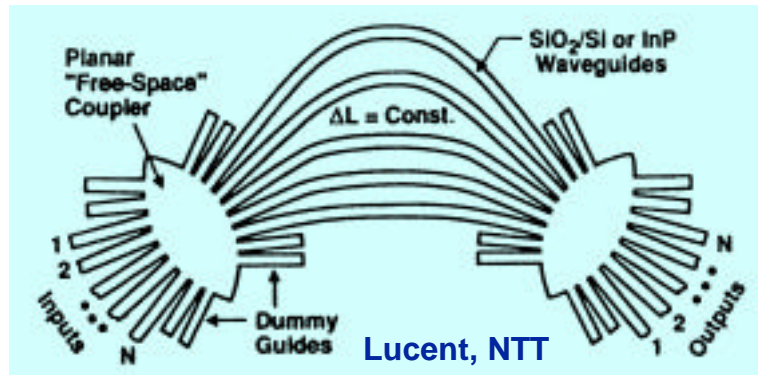


# Amplificatori ottici (3/3)

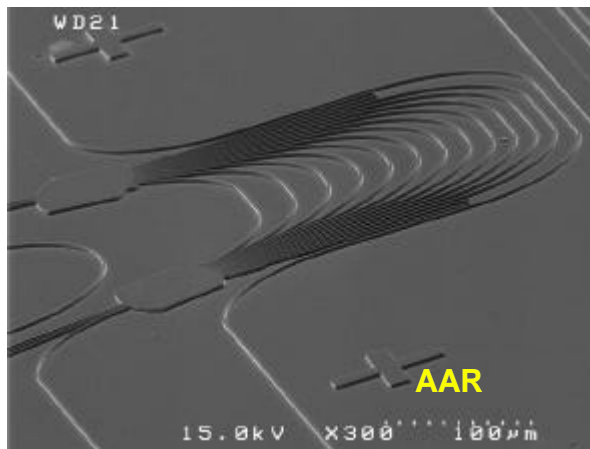




# Mux/Demux e filtri per sistemi DWDM

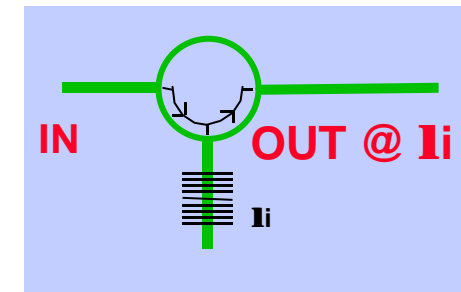
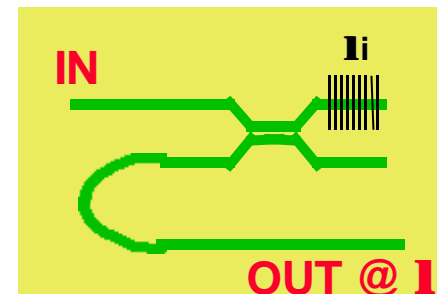
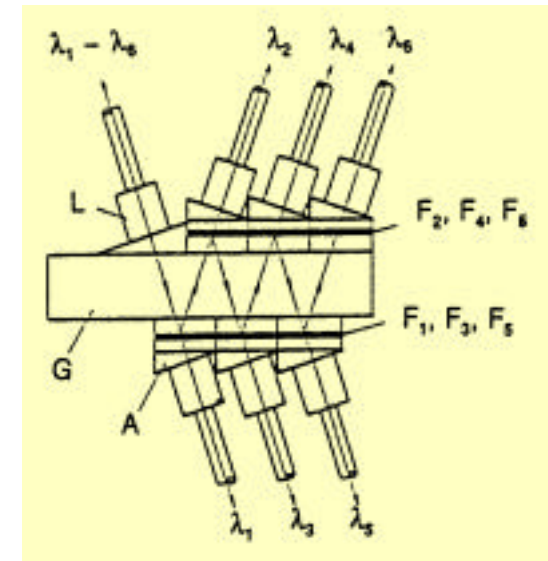


Arrayed Waveguide Grating  $\text{SiO}_2/\text{Si}$



InP AWG

Filtri  
interferenziali

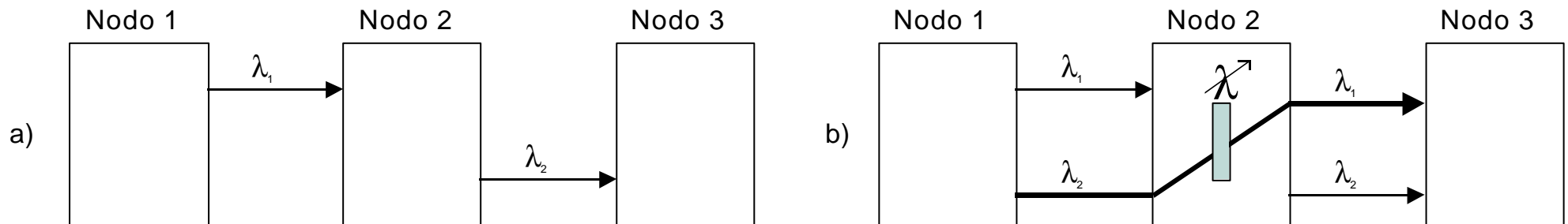


Reticoli in fibra



# Conversione di lunghezza d'onda

- Le tecniche di conversione di lunghezza d'onda possono essere classificate in
  - conversione di lunghezza d'onda optoelettronica
  - conversione di lunghezza d'onda interamente ottica
    - tecniche che impiegano il FWM
    - tecniche che impiegano la modulazione di guadagno o di fase incrociata.





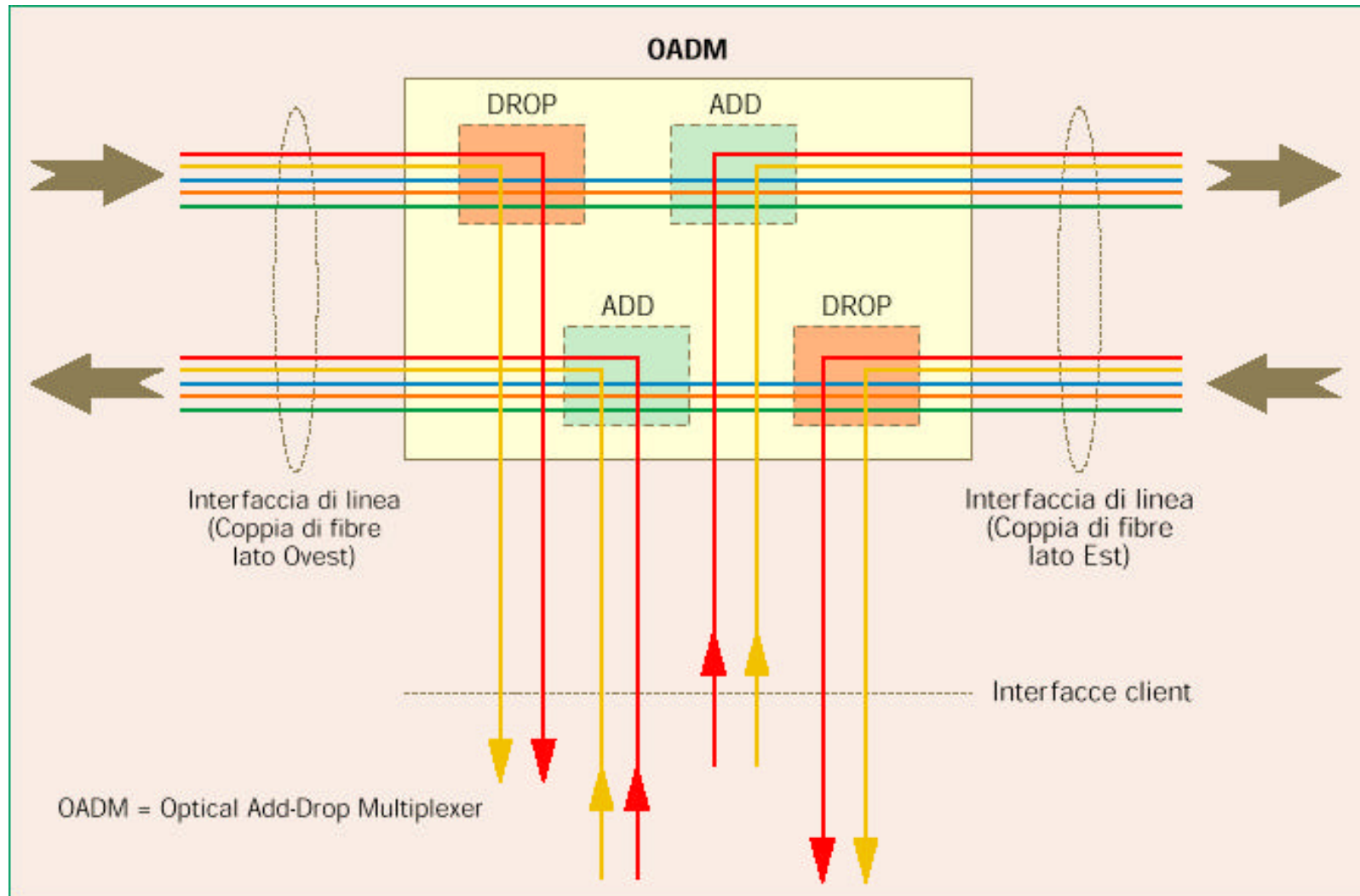
# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- **Apparati e reti ottiche**
  - Componenti per il DWDM
  - **Apparati ottici (OADM, OXC)**
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - Gestione e protezione



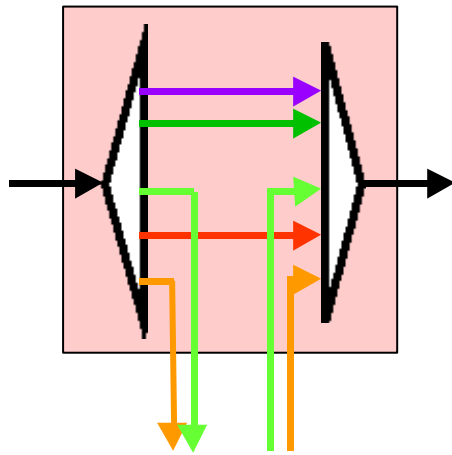
# Principio di funzionamento dell'OADM





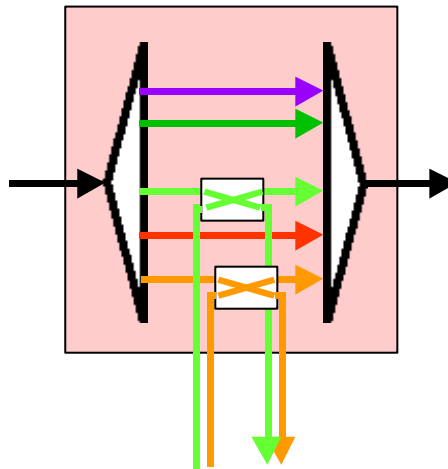
# Tipi di OADM

**FISSO**



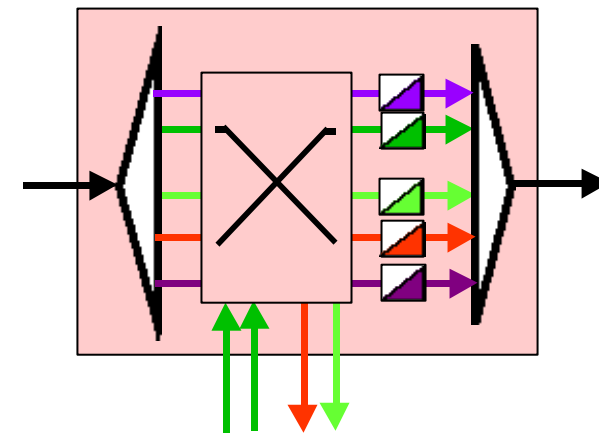
**add/drop  
1 (fisso)**

**SEMI-RICONFIGURABILE**



**add/drop/pass-through  
1 (fisso)**

**RICONFIGURABILE**

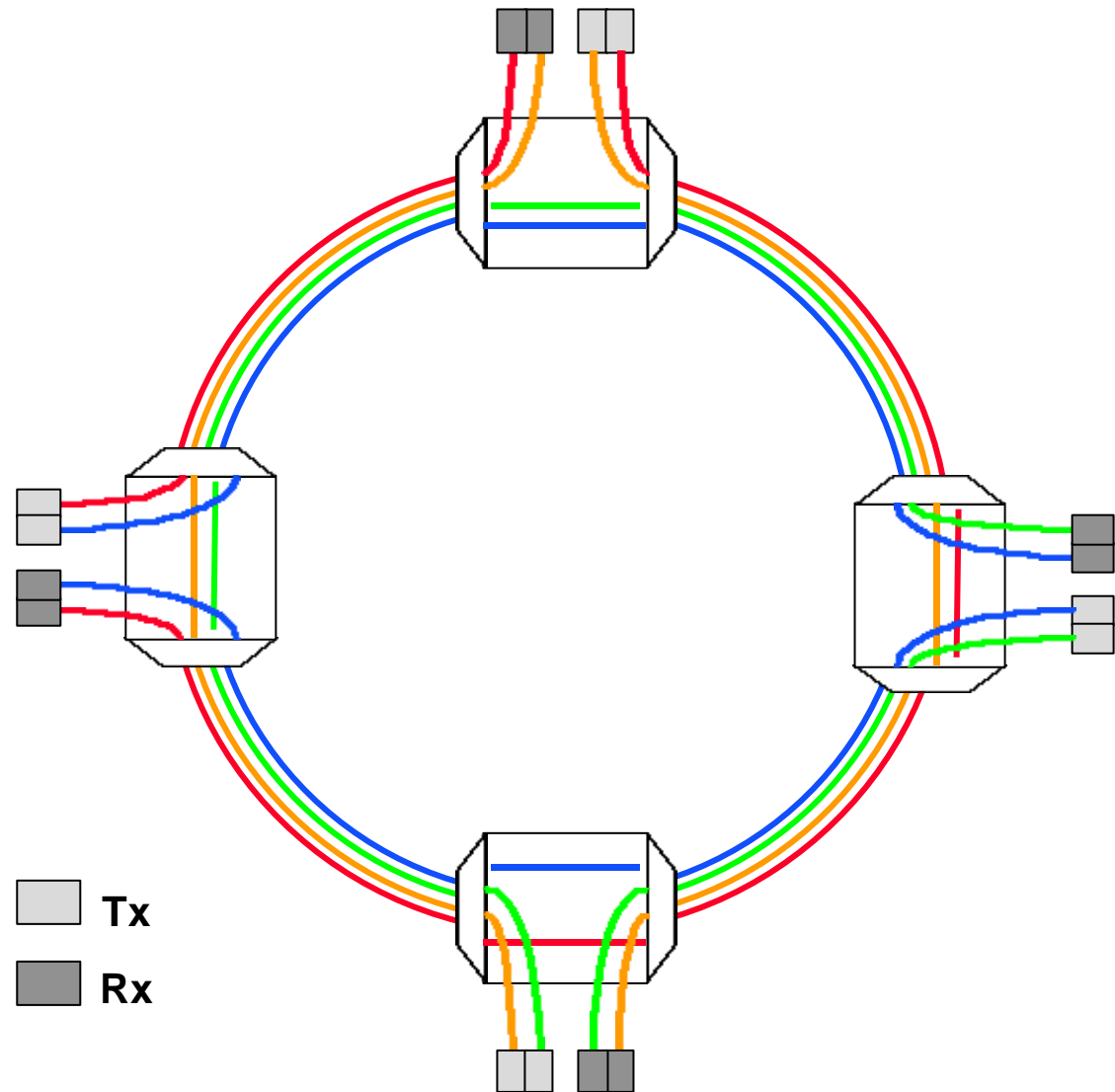


**add/drop/pass-through  
1 selezionabili**



# Anelli WDM con OADM

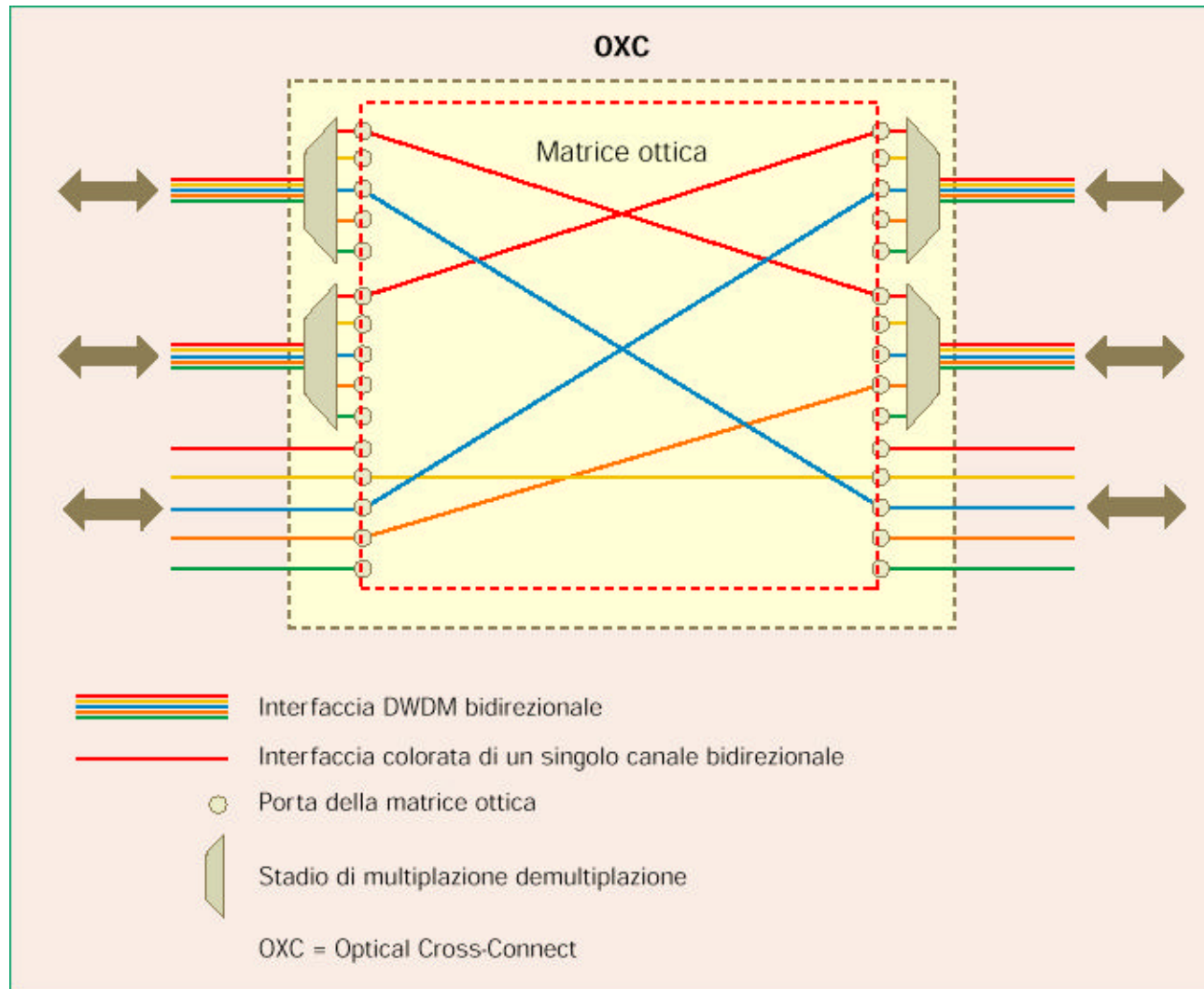
- Il traffico non destinato ad un nodo lo attraversa trasparentemente
- Occorrono complessivamente meno Tx/Rx rispetto ad un anello SDH di capacità equivalente





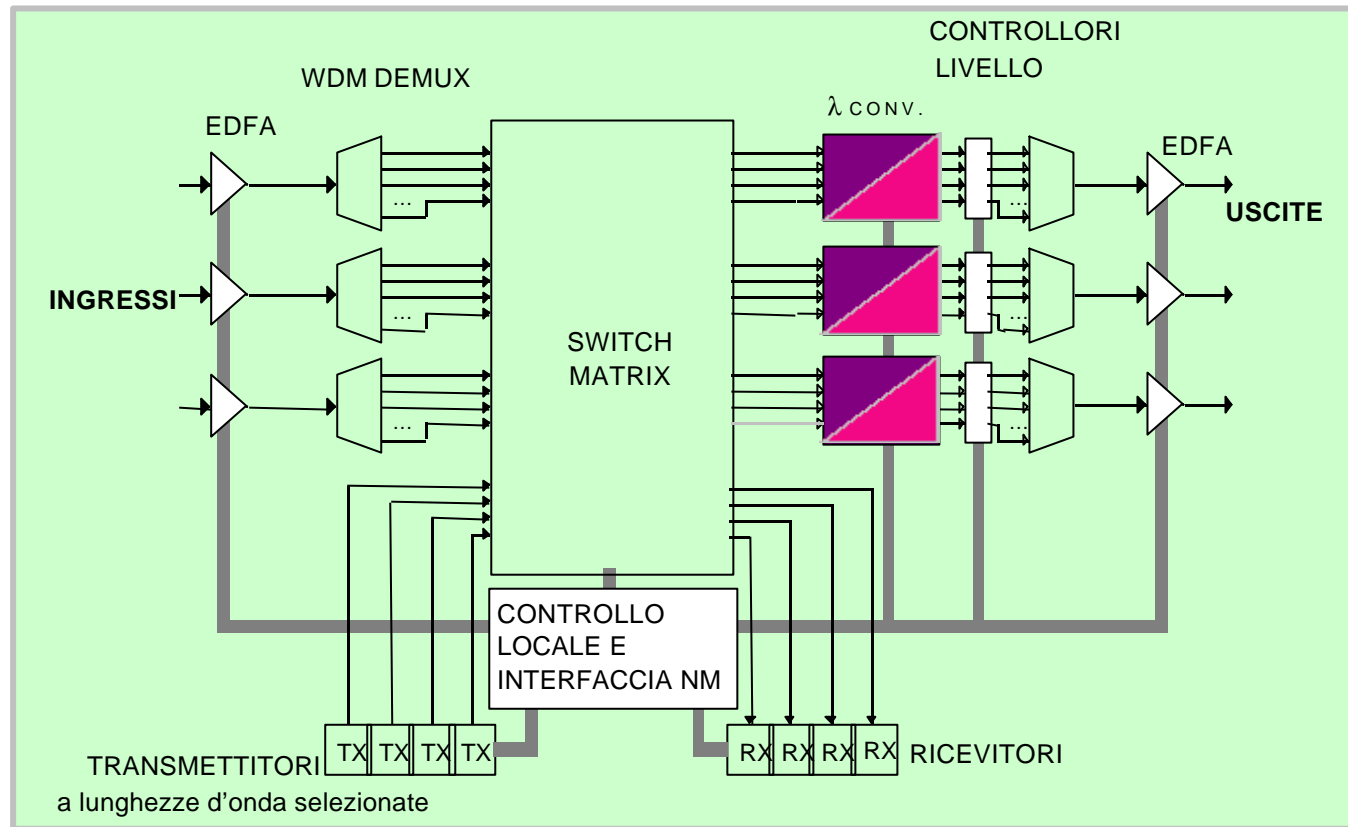


# Principio di funzionamento dell'OXC





# Schema di principio di un OXC

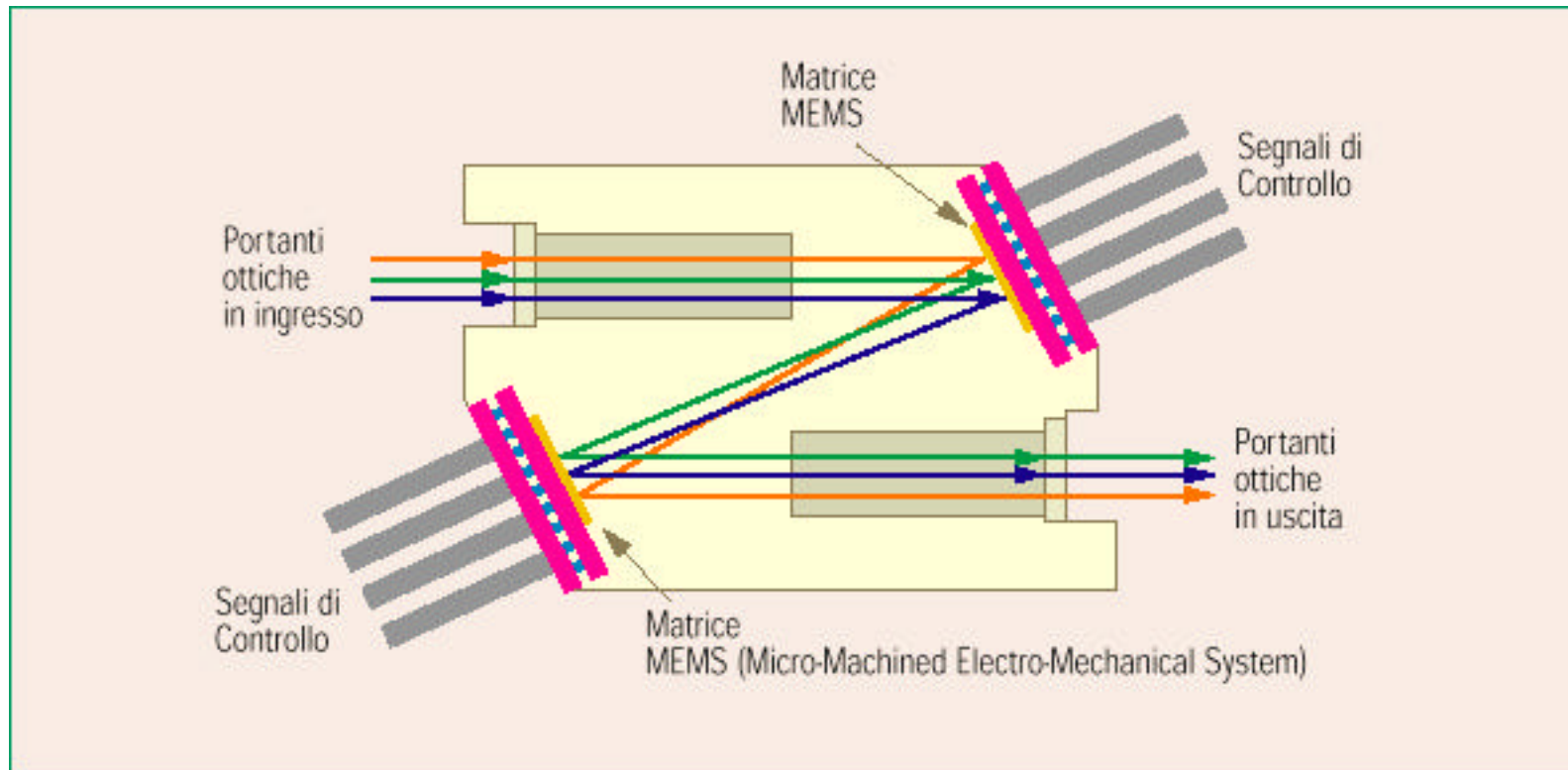


## Componenti chiave:

- Mux/demux
- Attenuatori
- Amplificatori ottici
- Matrici di connessione
- Convertitori di lunghezza d'onda
- Laser a lunghezza d'onda selezionata

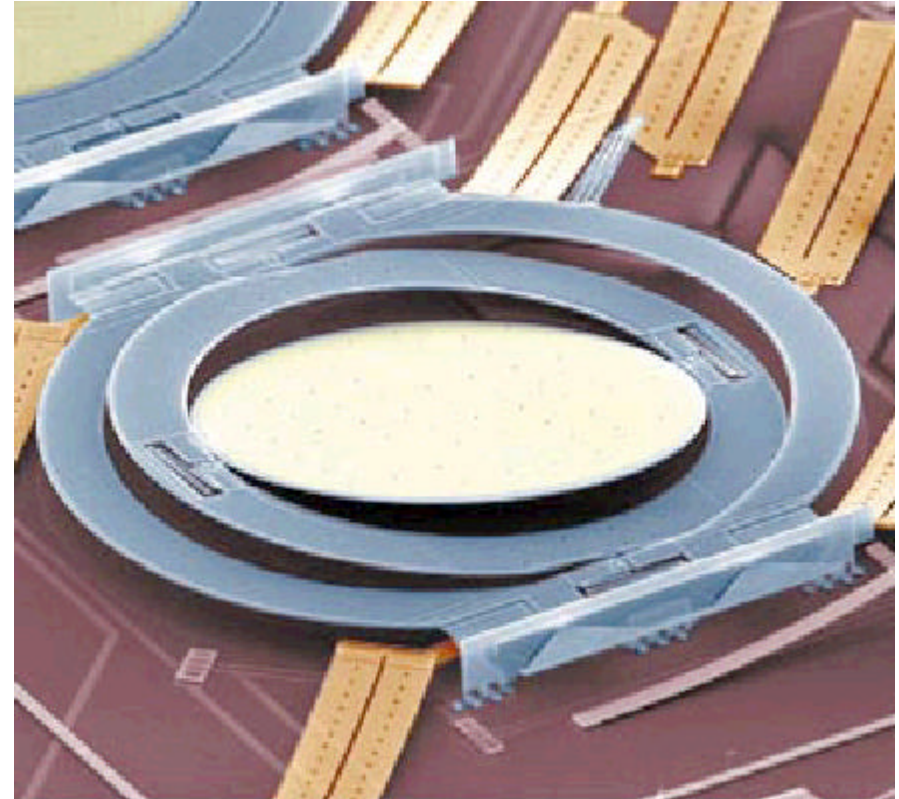
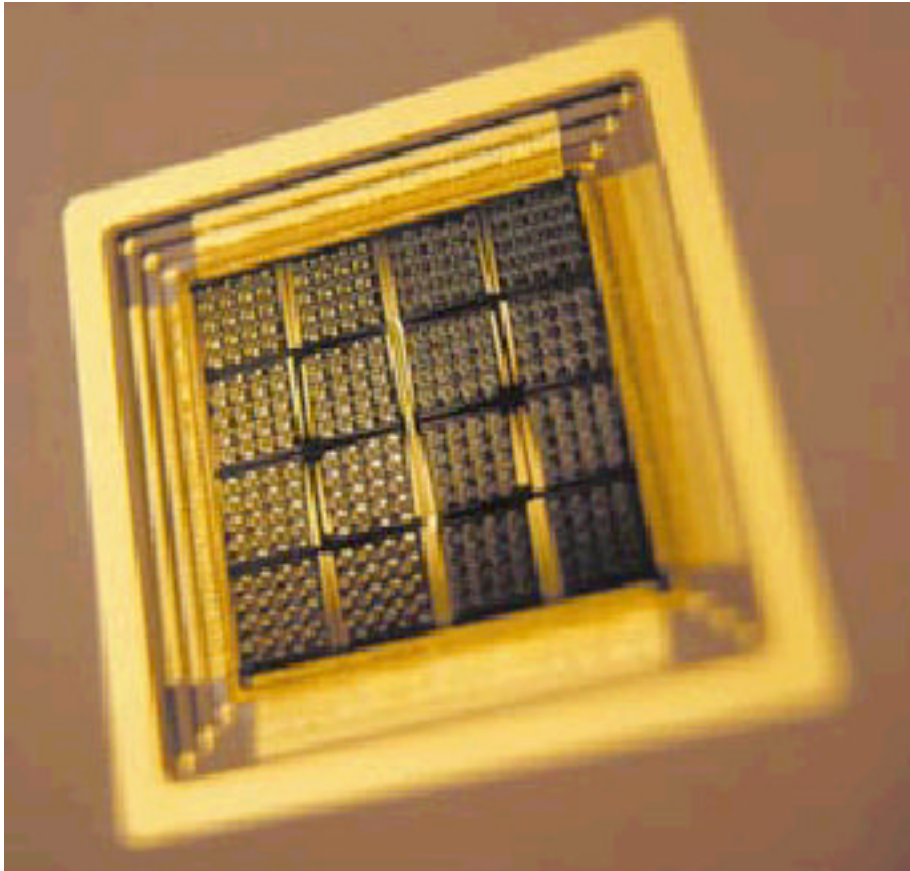


# OXC con controllo elettro-meccanico (1/2)



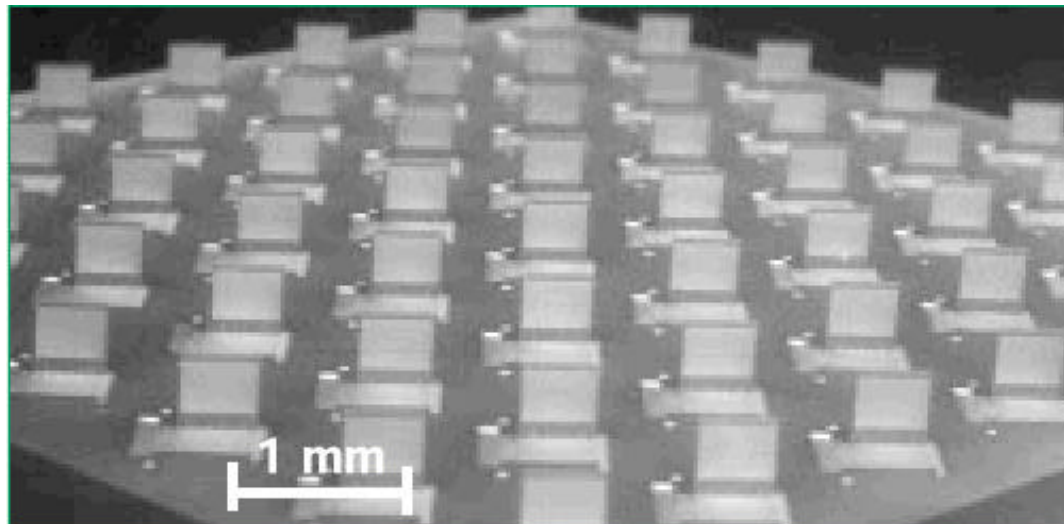
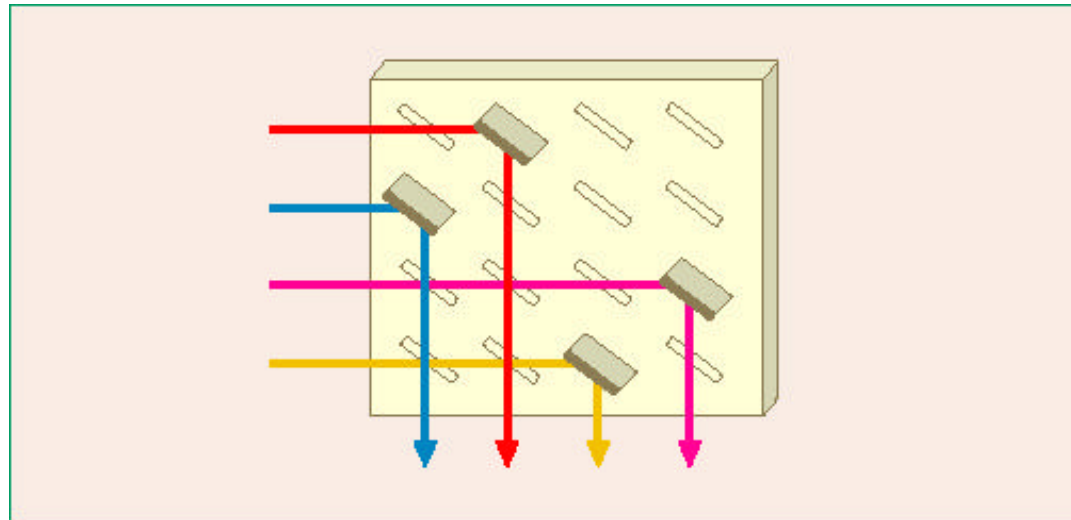


# Esempio





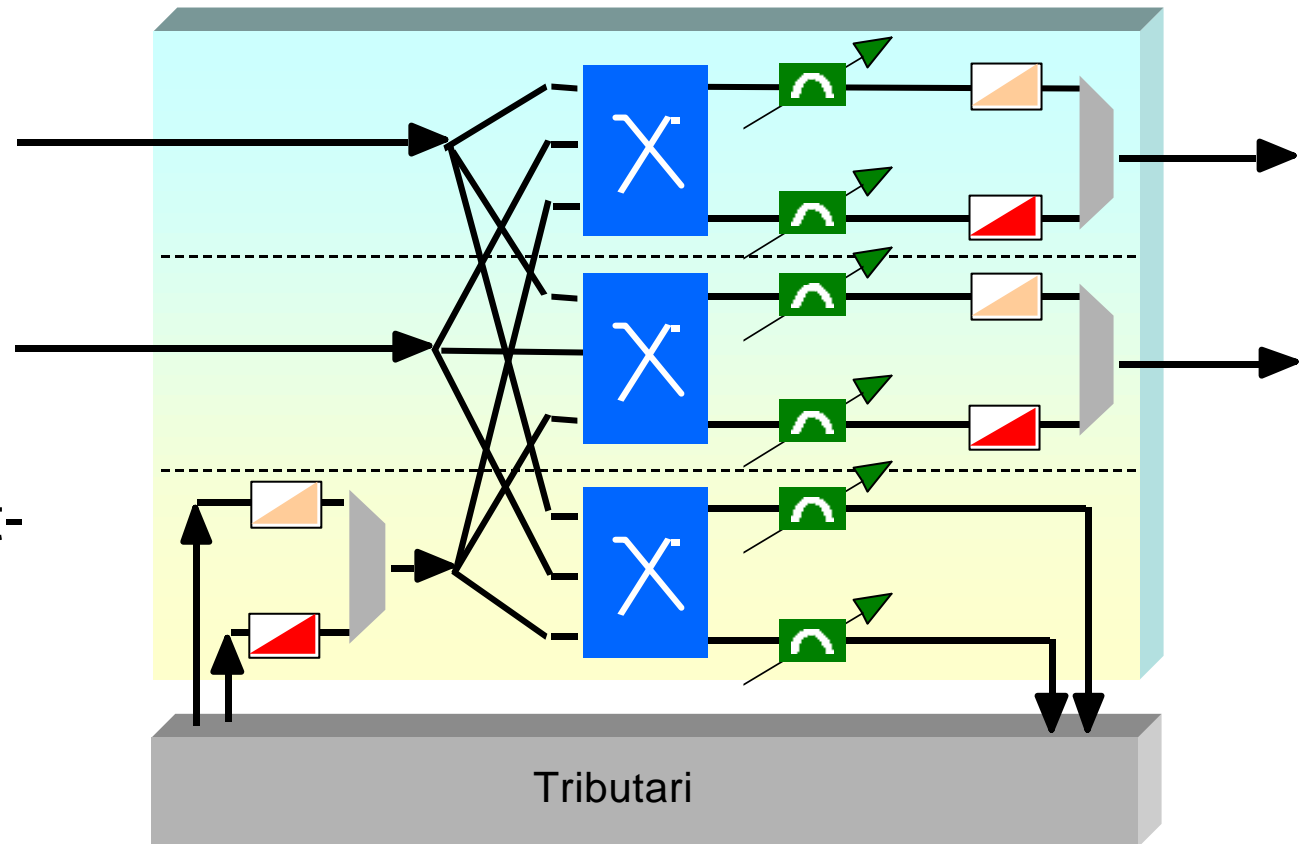
# OXC con controllo elettro-meccanico (2/2)





# OXC con conversione di lunghezza d'onda

- Completamente riconfigurabile (da ogni  $\lambda_{in}$  a ogni  $\lambda_{out}$ )
- Strettamente non bloccante
- Multicast (Broadcast-and-select)





# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- **Apparati e reti ottiche**
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - **Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)**
  - Gestione e protezione



# Allocazione delle lunghezze d'onda (1/3)

---

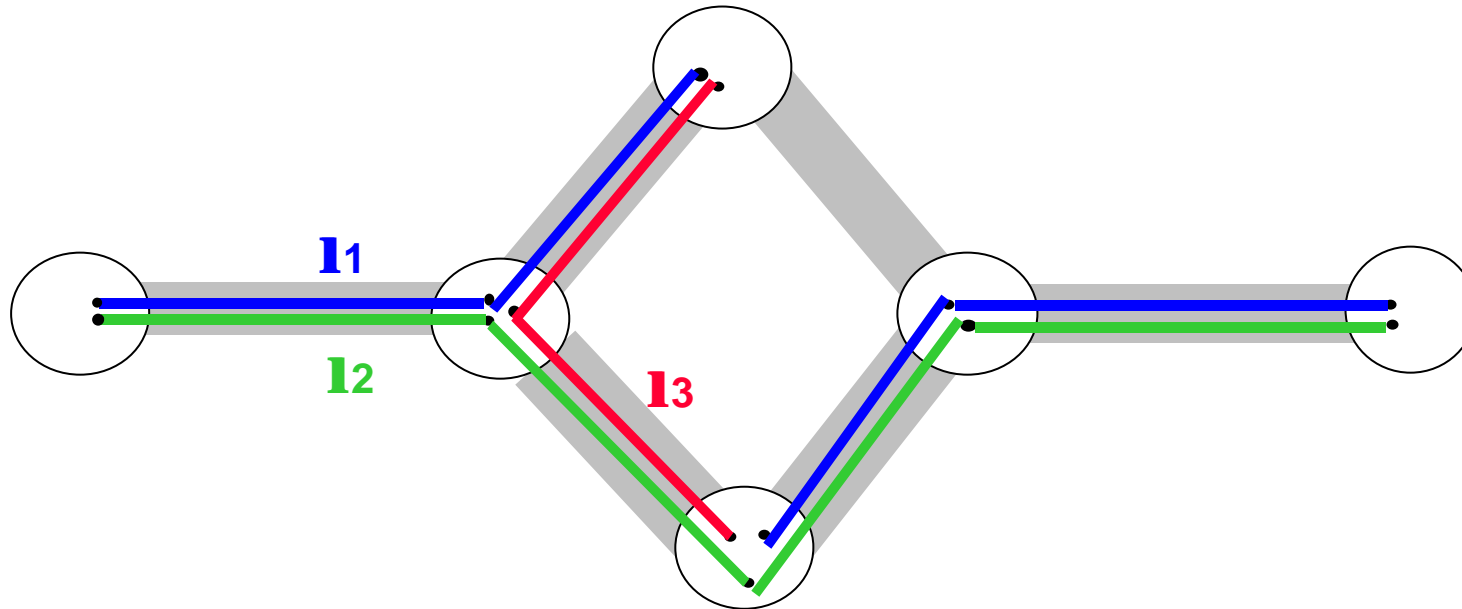
- Un'instradamento di flussi di dati multiplati secondo il WDM e selettivo rispetto alla frequenza portante può essere realizzato con le tecniche
  - **Wavelength Path (WP)**
    - ogni flusso di dati è instradato attraverso la rete in base alla sua lunghezza d'onda senza che essa sia mai cambiata
  - **Virtual Wavelength Path (VWP)**
    - il cammino percorso in rete da ogni flusso di dati è caratterizzato non da una singola lunghezza d'onda ma da un vettore di lunghezze d'onda, una per ogni ramo di rete attraversato (conversione di lunghezza d'onda)





## Allocazione di lunghezza d'onda (2/3)

- Rete a instradamento di lunghezza d'onda:

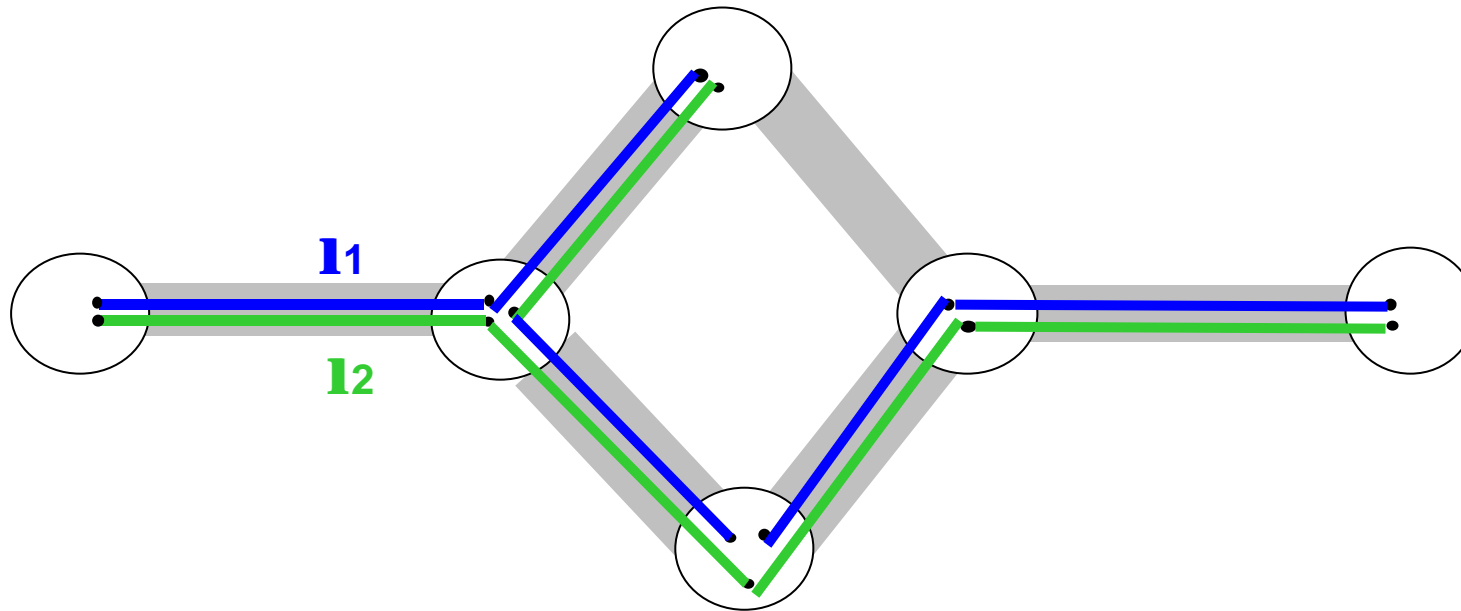


- ogni percorso ha lunghezza d'onda assegnata da estremo a estremo
- riuso di lunghezza d'onda su percorsi completamente distinti
- i problemi dell'instradamento e assegnazione di lunghezza d'onda devono essere risolti congiuntamente



## Allocazione di lunghezza d'onda (3/3)

- Rete a conversione di lunghezza d'onda :



- la lunghezza d'onda è assegnata e riusata sezione per sezione
- a ogni percorso ottico si assegna una concatenazione di lunghezze d'onda (una per sezione di moltiplicazione ottica attraversata)
- esigenza di conversione di lunghezza d'onda



# Routing and Wavelength Assignment (RWA)

---

- La rete è modellata con un grafo non direttivo; i cammini ottici (lightpath) sono non orientati
  - Questo corrisponde a una rete fisica con coppie di collegamenti unidirezionali per ogni ramo e a cammini full-duplex
- Nel sotto-problema WA esistono i vincoli seguenti
  - due lightpath non possono usare la medesima lunghezza d'onda su un dato collegamento
  - in assenza di conversione, una stessa lunghezza d'onda deve essere assegnata ad un lightpath sull'intero instradamento corrispondente
- Il sotto-problema WA per una rete modellata dal grafo  $G$  corrisponde al problema di colorazione del grafo dei percorsi di  $G$ ,  $P(G)$ . Questo argomento è usato per provare che WA è un problema NP-completo



# Conversione di lunghezza d'onda

---

- Con convertitori
  - hardware più complesso, ma è possibile un risparmio del 10-40% su fibre e numero di porte degli OXC
  - software di controllo e progetto/pianificazione di rete più semplice (instradamento indipendente da assegnazione delle lunghezze d'onda)
  
- E' soprattutto utile:
  - in reti estese
  - in reti con limitata connettività
  - al crescere del numero di lunghezze d'onda
  - in presenza di condizioni di carico elevato e variabile



# Sommario

---

- Architettura delle reti di trasporto
  - Ruolo della rete ottica di trasporto (OTN) e del DWDM
  - Architettura della OTN
  - Automatically Switched Optical Network (ASON)
- Trasmissione DWDM
  - Trasmissione multicanale in fibra ottica
  - Sistemi trasmissivi DWDM
- **Apparati e reti ottiche**
  - Componenti per il DWDM
  - Apparati ottici (OADM, OXC)
  - Dimensionamento dello strato di cammino ottico (RWA)
  - **Gestione e protezione**



# Funzioni di gestione

---

- Configurazione di rete
- Instaurazione della connessione di rete
- Rivelazione ed isolamento di guasti
- Verifica e controllo della QoS
  - indicazione di prestazione degradata
  - attivazione manutenzione
- Abilitazione ai processi di protezione o re-instradamento
  - Interlavoro con i livelli client (SDH, MPLS/IP)



# Protezione dai guasti

---

- La funzione di protezione consiste in due aspetti
  - introduzione di ridondanze dei mezzi trasmissivi e delle risorse dello strato di cammino (es. elementi di permutazione, multiplatori)
  - algoritmi di riconfigurazione della corrispondenza tra topologia logica definita nello strato di cammino e topologia fisica disponibile
- Possibili strategie di protezione della rete di trasporto nello strato di cammino ottico sono:
  - tecnica a minimo numero di lunghezze d'onda (Minimal Wavelength, MW);
  - tecnica del cammino disgiunto (Disjoint Path, DP);
  - tecnica di ripristino sulla base del singolo collegamento (Single Link Based, SLB)



# Strategie di protezione

## Caratteristiche positive e negative delle tre strategie di protezione

| Tecnica di protezione | Estensione della riconfigurazione                             | Quantità di informazioni del sistema di gestione  | Entità delle ridondanze per guasto singolo           |
|-----------------------|---|---|--|
| Minimal Wavelength    | massima (anche intera rete di trasporto)                      | massima (un cammino di protezione per ogni cammino attivo per ogni guasto in tutta la rete)                 | minima   |
| Disjoint Path         | minima (solo cammini che attraversano il collegamento guasto) | minima (un cammino di protezione per ogni cammino attivo, indipendentemente dal guasto)                     | massima (nell'ambito delle tre tecniche considerate) |
| Single Link Based     | minima (solo cammini che attraversano il collegamento guasto) | intermedia (un cammino di protezione per ogni cammino attivo per ogni guasto di un ramo del cammino stesso) | intermedia   |





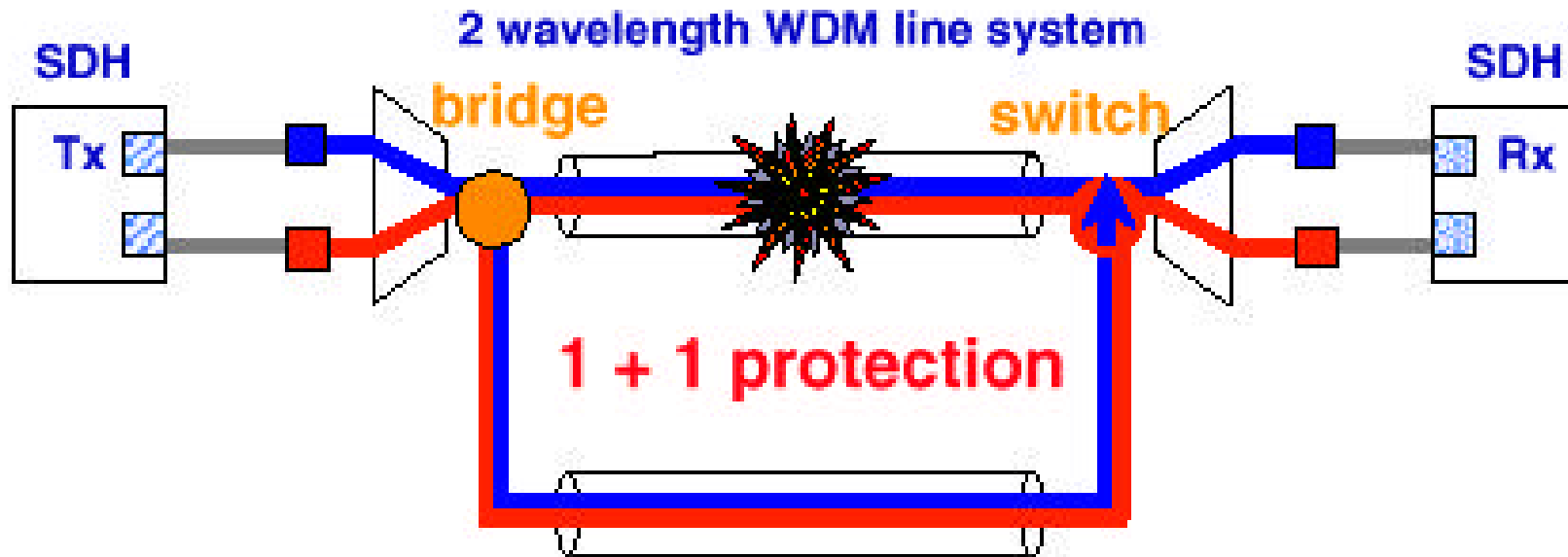
# Sopravvivenza dello strato ottico

---

- Protezione apparati (transponder ridondanti, commutatori ridondanti, ...)
- Architetture di protezione lineare : 1+1 e 1:1
- Protezione ad anello:
  - OCH-DPring (Dedicated Protection Ring a livello di canale ottico)
  - OMS-DPring (Dedicated Protection Ring a livello di sezione ottica - unidirezionale)
  - OMS-SPRing (Shared Protection Ring a livello di sezione ottica - bidirezionale)
- Ripristino ottico (restoration)
  - Ripristino a livello di cammino ottico



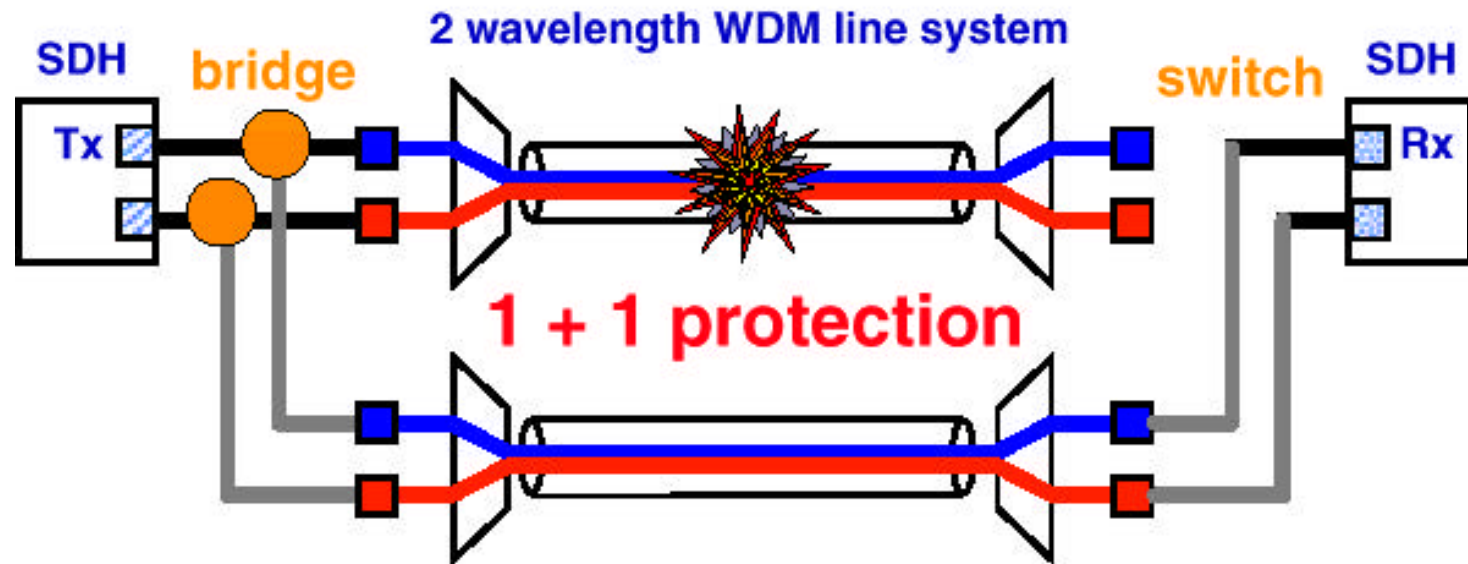
# Protezione lineare - 1+1 APS (ottica)



- protezione veloce
- non richiede segnalazione tra estremi
- costi elevati (duplicazione di sistemi di linea WDM)



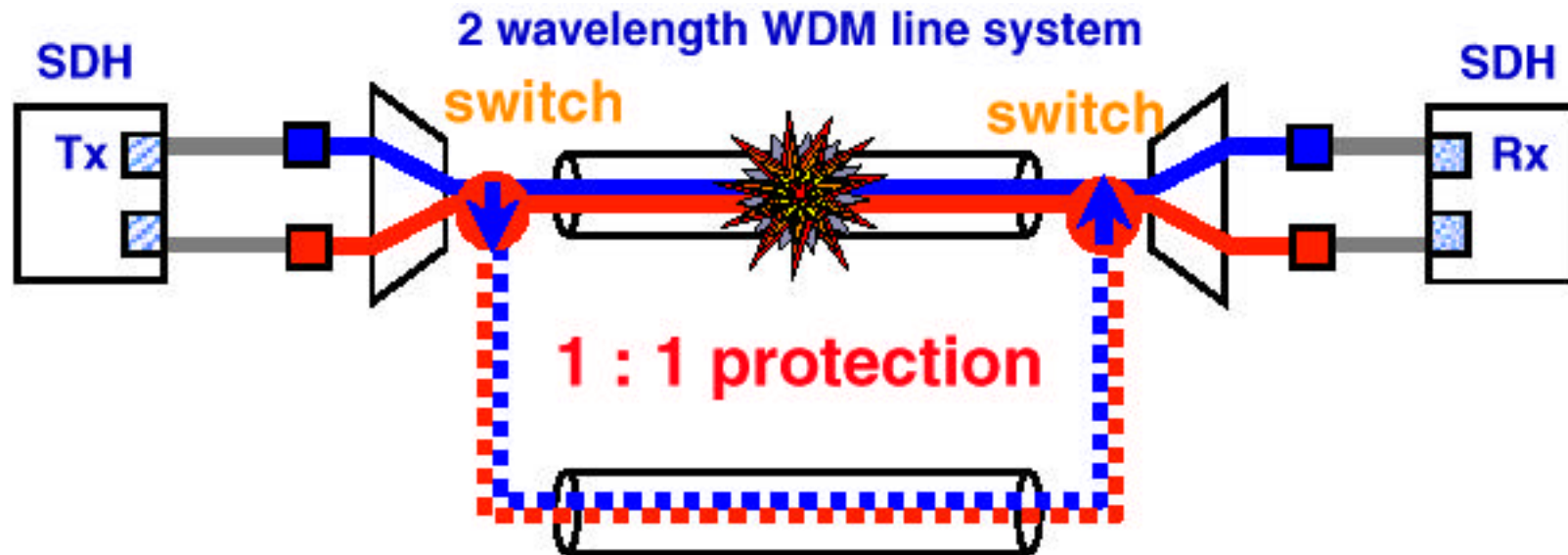
# Protezione lineare - 1+1 APS (elettrica)



- protezione veloce
- non richiede segnalazione tra gli estremi
- costi elevati (duplicazione di sistemi di linea WDM)



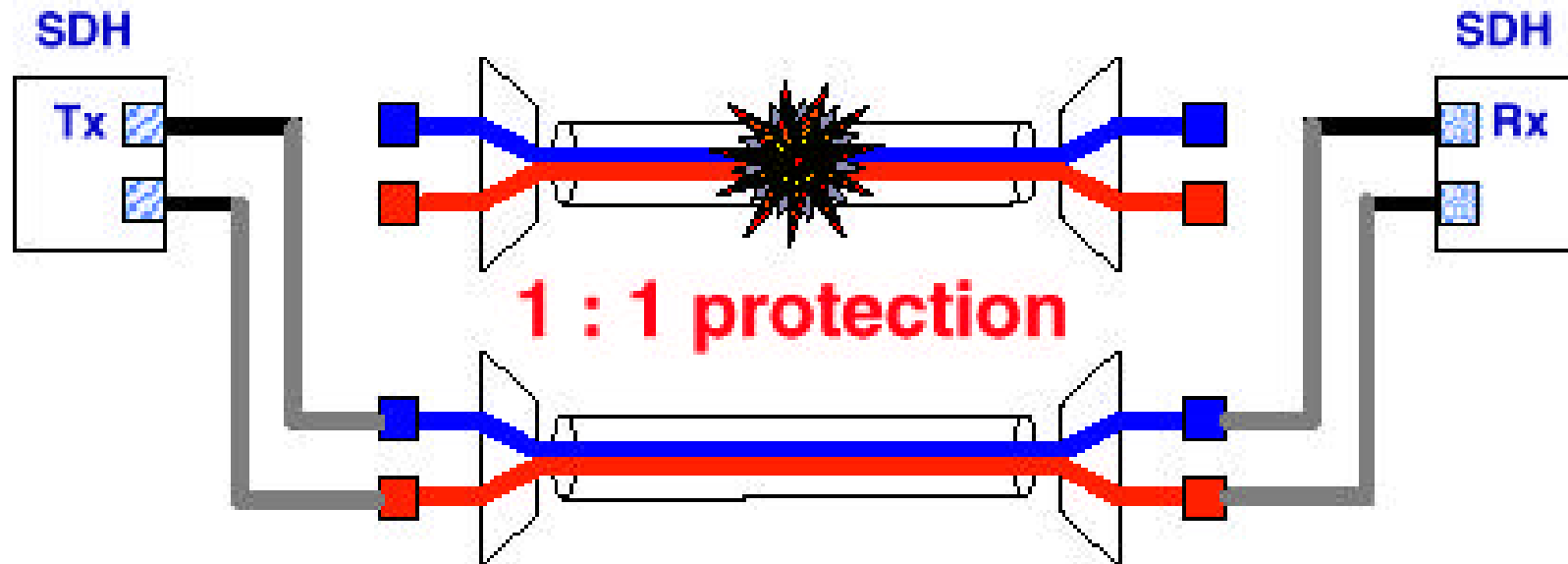
## Protezione lineare - 1:1 APS (ottica)



- protezione veloce (ma più lenta che in 1+1)
- richiede segnalazione tra estremi
- costi elevati (duplicazione di sistemi di linea) MA  
*rende possibile traffico a bassa priorità interrompibile*



# Protezione lineare - 1:1 APS (elettrica)

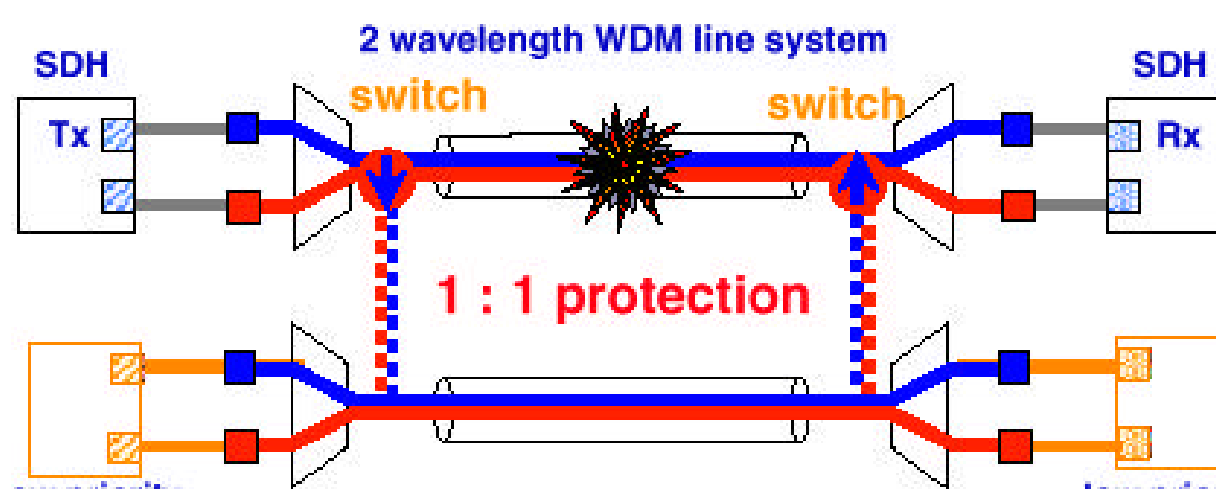


- protezione veloce (ma più lenta che in 1 + 1)
- richiede segnalazione tra estremi
- costi elevati (duplicazione di sistemi di linea) MA  
*rende possibile traffico a bassa priorità interrompibile*

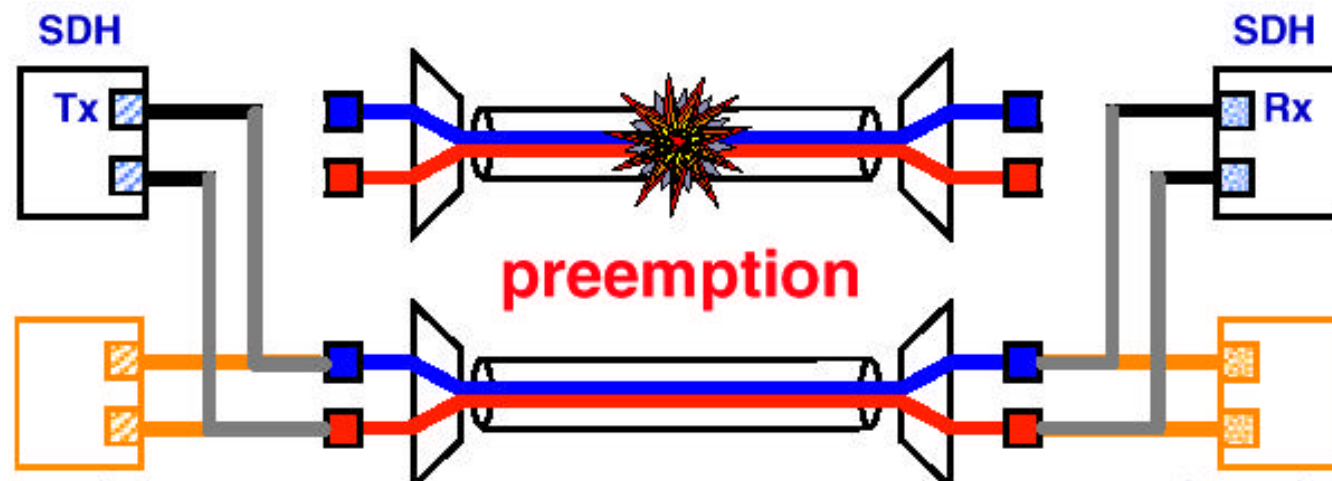


# Extra traffico interrrompibile

low priority traffic

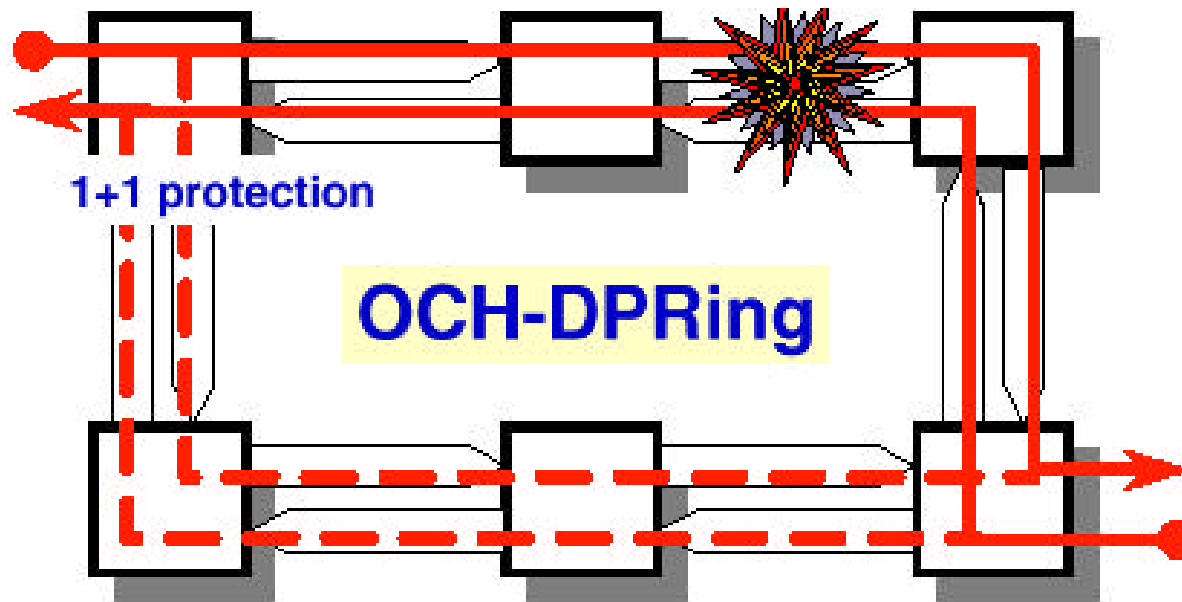


low priority traffic





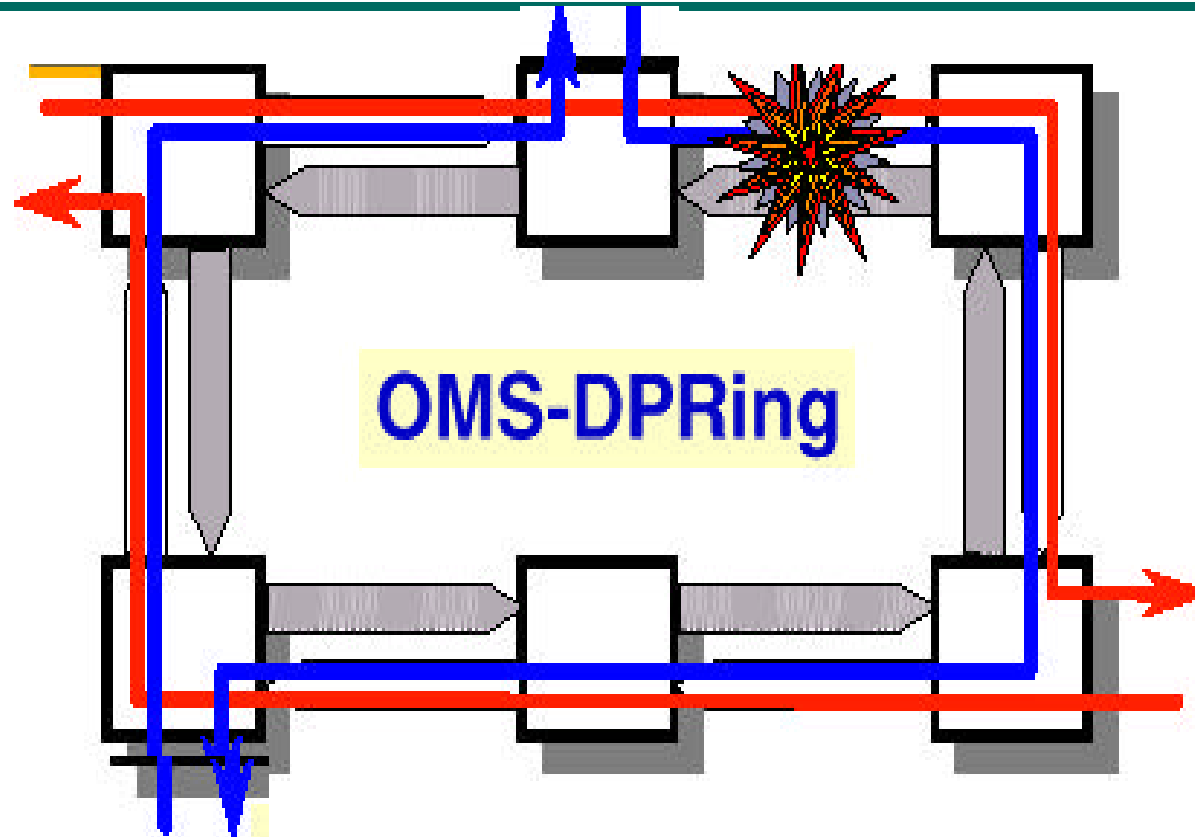
# Protezione di anello a livello ottico (1/5)



- possibile la stessa lambda per le due direzioni
- impossibile riusare lambda lungo l'anello
- capacità protezione dedicata per capacità di lavoro



## Protezione di anello a livello ottico (2/5)

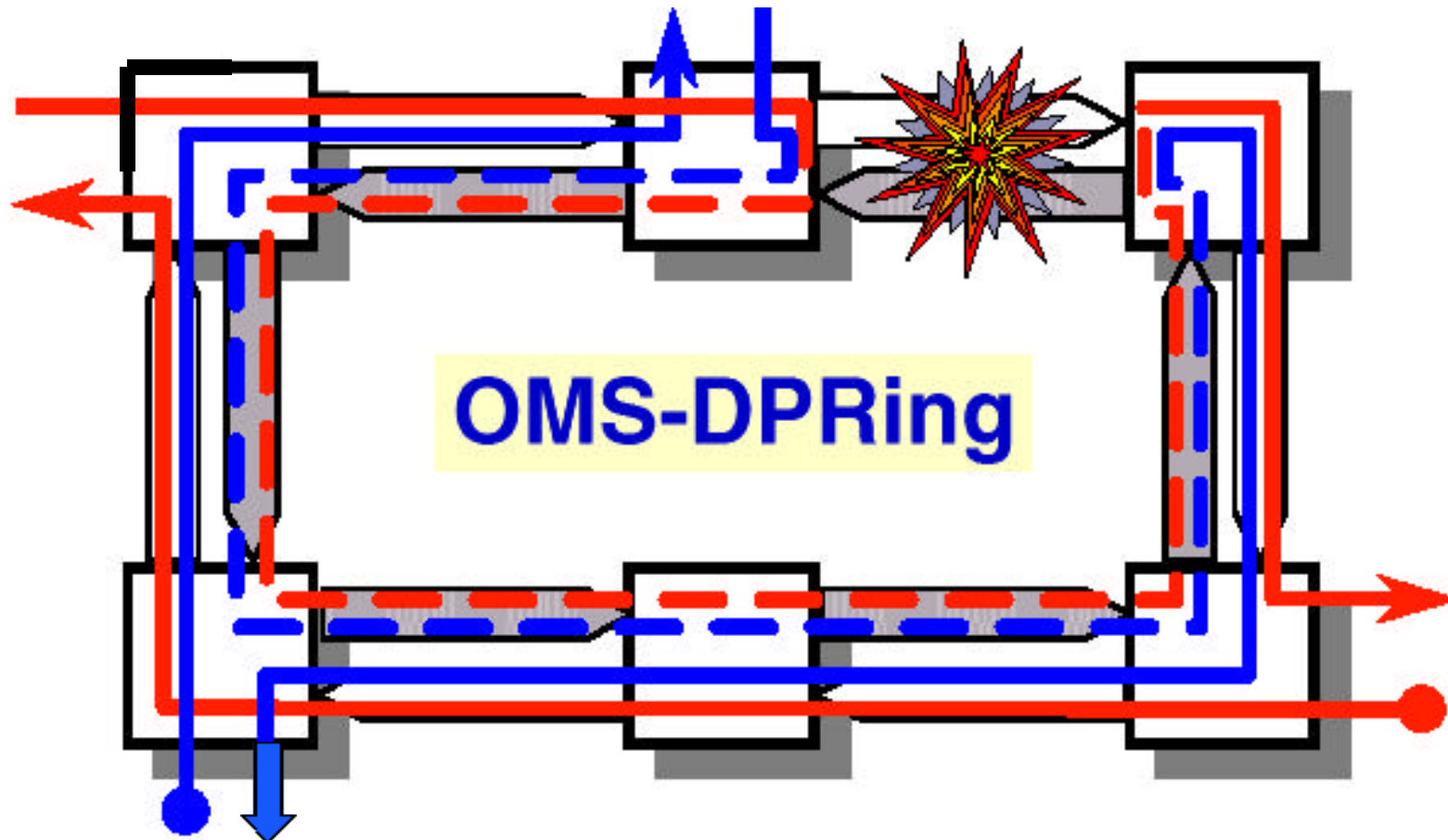


- anello unidirezionale
- impossibile riusare lambda lungo l'anello
- capacità protezione dedicata per capacità di lavoro



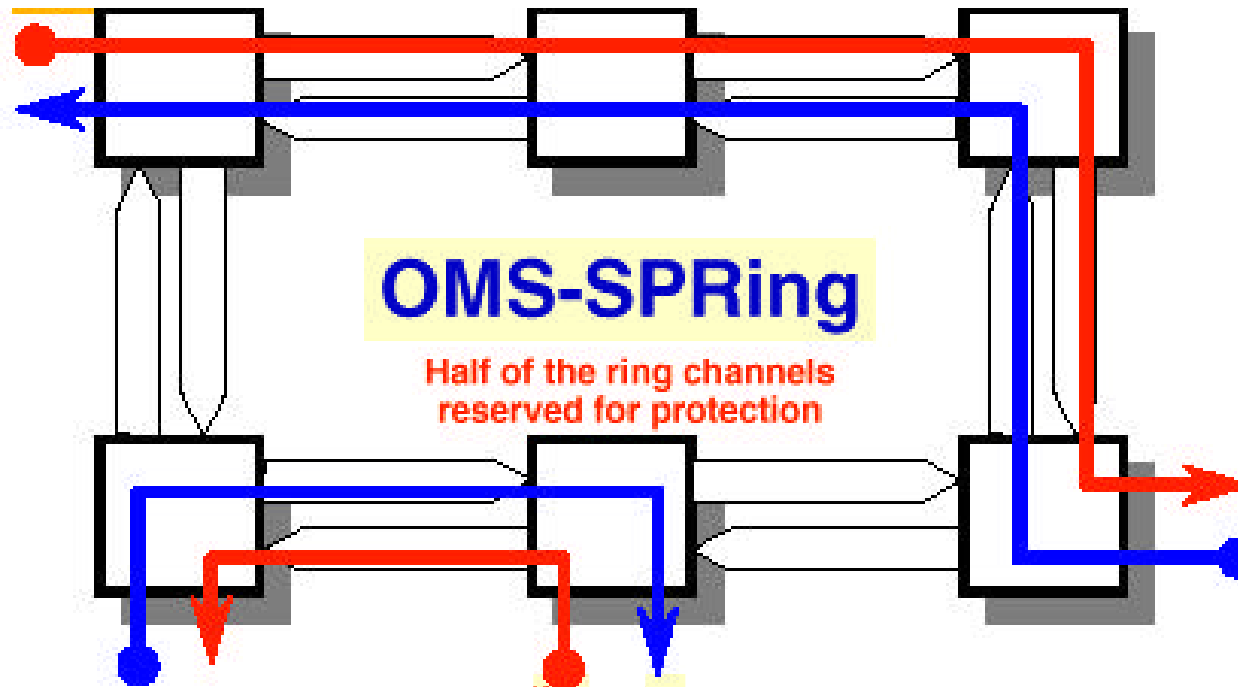


## Protezione di anello a livello ottico (3/5)





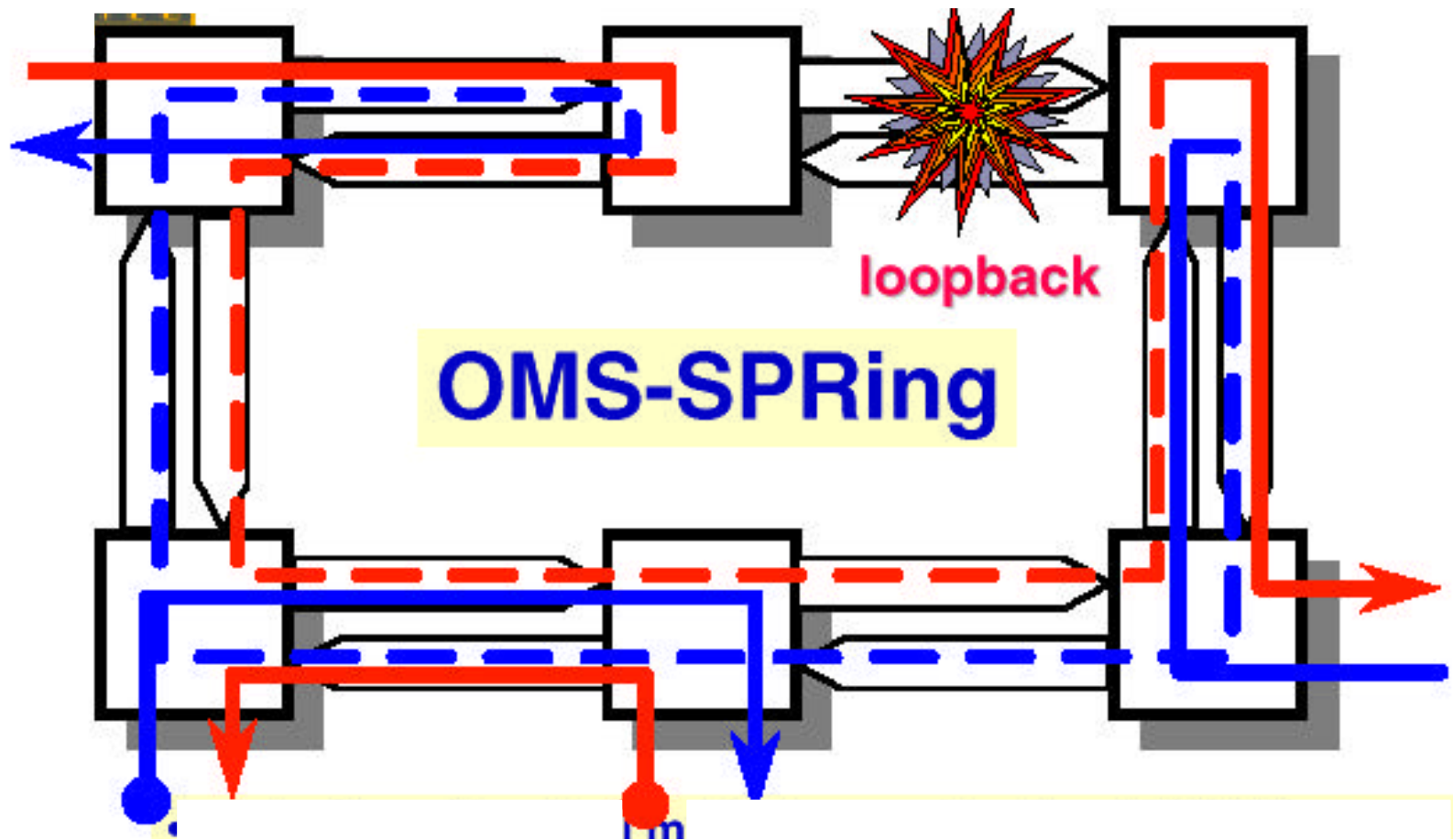
## Protezione di anello a livello ottico (4/5)



- **differenti** lambda nelle due direzioni
- possibile riusare lambda lungo l'anello
- capacità protezione condivisa da canali di lavoro differenti

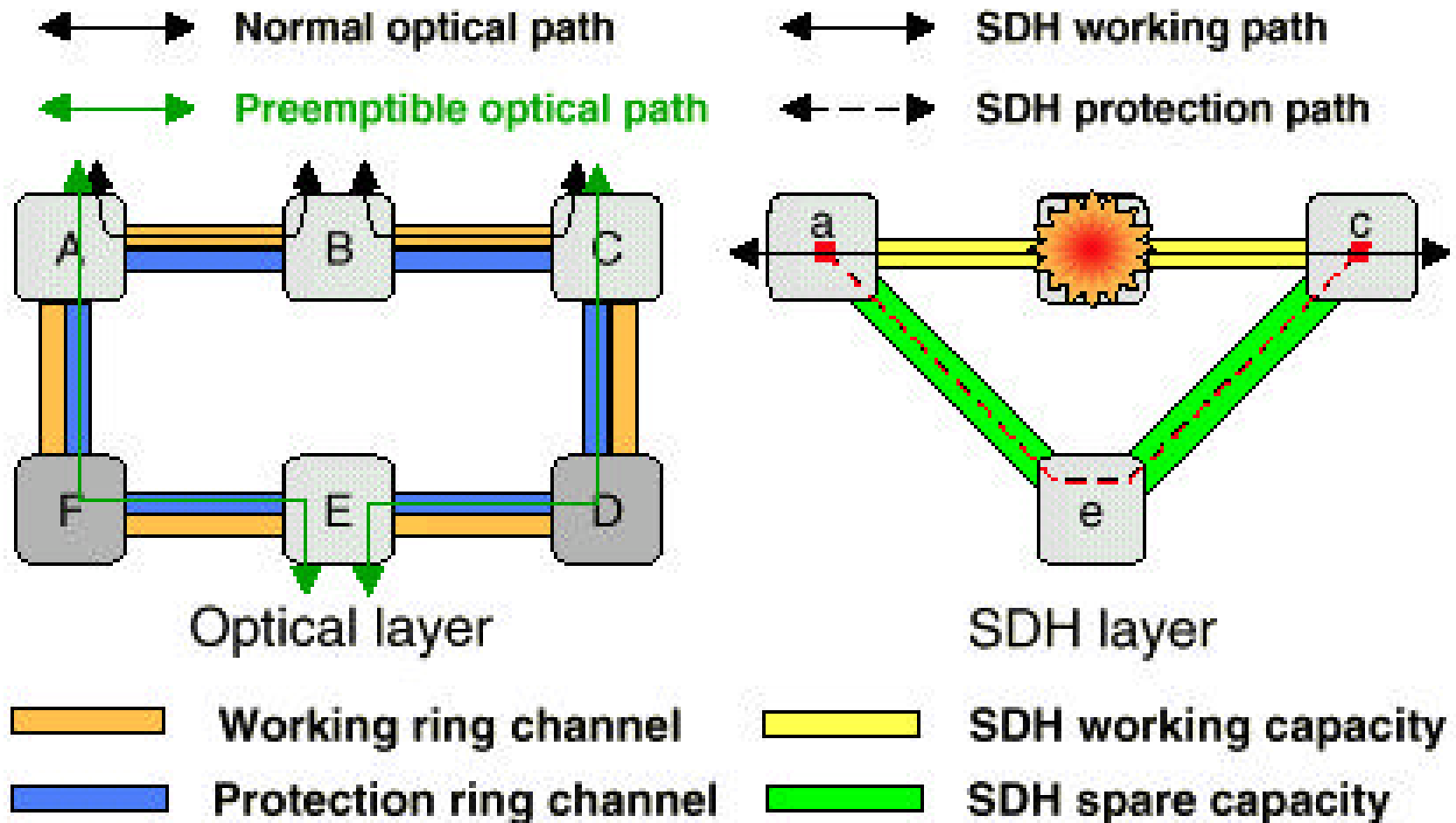


# Protezione di anello a livello ottico (5/5)



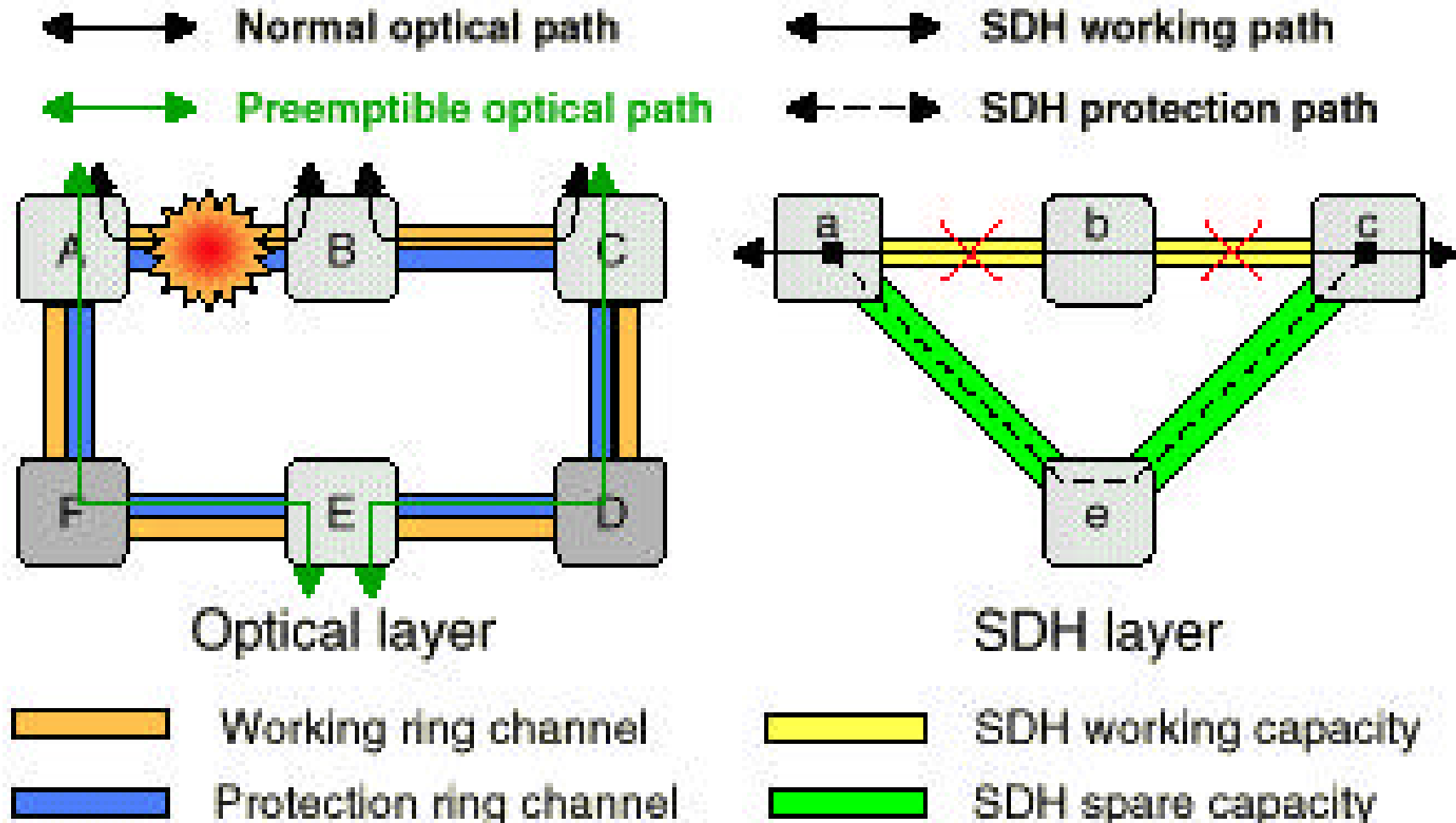


# Common pool - guasto nello strato SDH



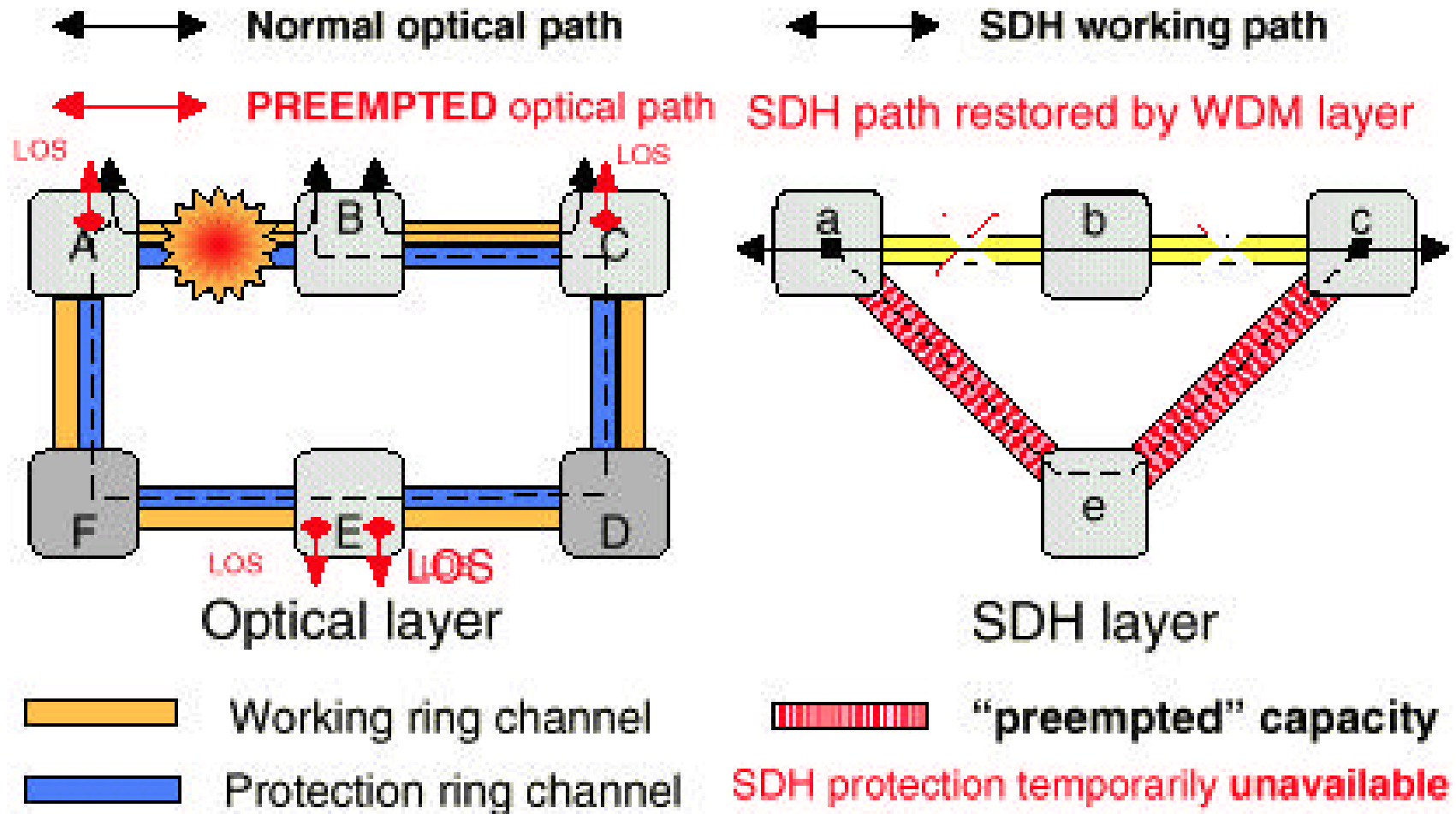


# Common pool - guasto fisico





# Common pool - guasto fisico





## Riferimenti bibliografici

---

- + R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, Optical Networks: A Practical Perspective, Morgan Kaufman, 2nd edition, 2002
- Architecture of optical transport network. Raccomandazione ITU-T G.872.
- Generic functional architecture of transport network. Raccomandazione ITU-T G.805.
- Interfaces for the optical transport network. Raccomandazione ITU-T G.709.
- Requirements for the Automatic Switched Transport Network. Raccomandazione ITU-T G.807 Draft V1.0
- Awduche, D. et alii: draft-many-ip-optical-framework-03.txt. IETF Internet Draft.
- <http://net.infocom.uniroma1.it/corsi/index.htm>