
“Misure Ottiche”

Corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria
Elettronica e delle Telecom. e Fisica



Strumentazione per Misure Ottiche

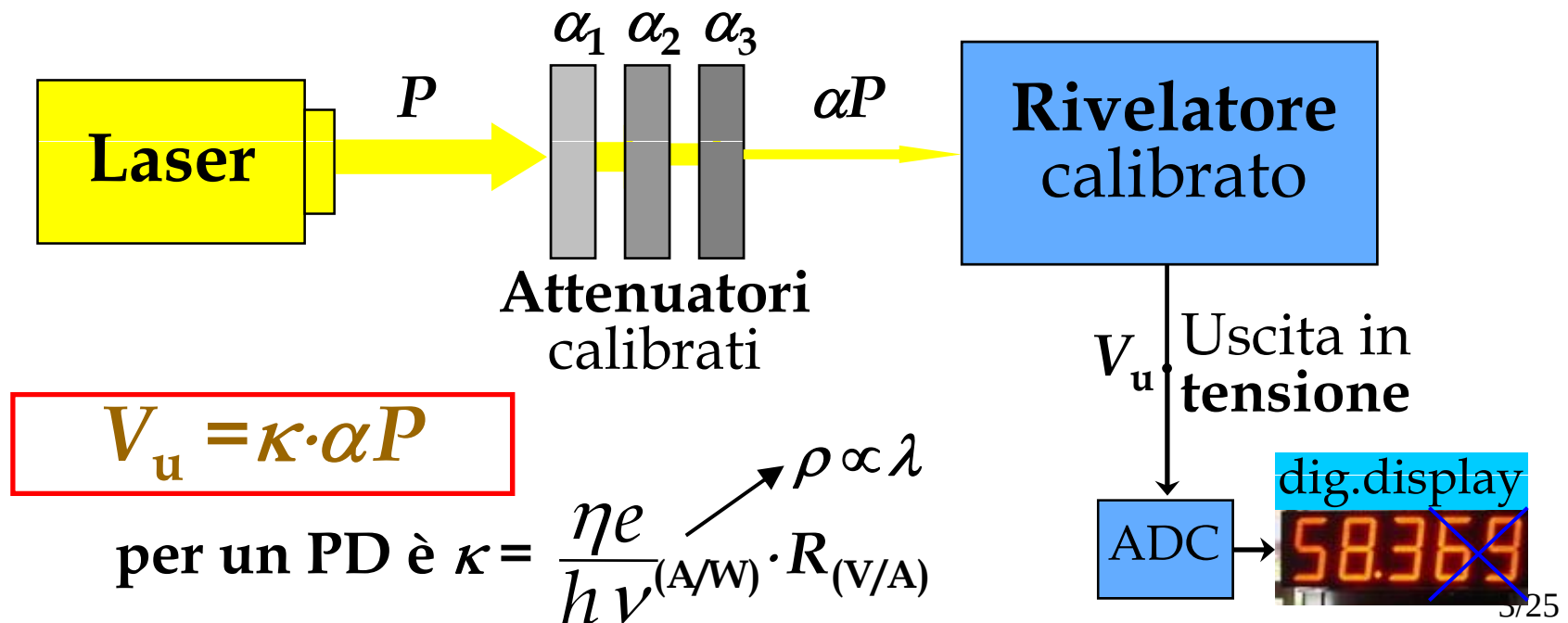
Cesare Svelto
Politecnico di Milano

Sommario

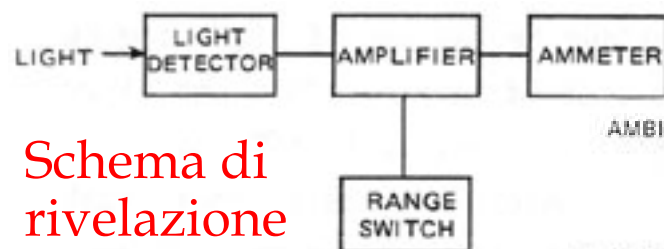
- *Power Meter*
- Rivelatori *Charge Coupled Device* (CCD)
e misure del profilo spaziale di un fascio laser
- *Wave-Meter* e Spettrometro
- *Optical Spectrum Analyzer* (OSA)
- *Optical Time Domain Reflectometry* (OTDR)
- Misure di *Insertion Loss*
- Misure di *Polarization Mode Dispersion* (PMD)
- Misure di *Bit Error Rate* (BER)

Misure di potenza ottica (DEFINIZIONI e METODI)

- E Campo elettrico [V/m]
- $I = \frac{EE^*}{\eta_0}$ Intensità [W/m²]
 $\eta_0 = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} = 377 \, \Omega$
 impedenza caratteristica del vuoto
- $P = \int I dS$ Potenza [W]



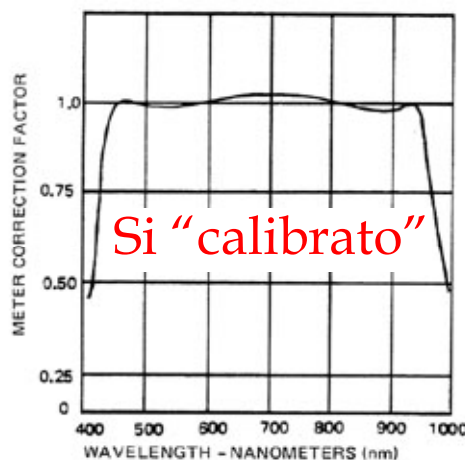
Power Meter (struttura)



Schema di rivelazione

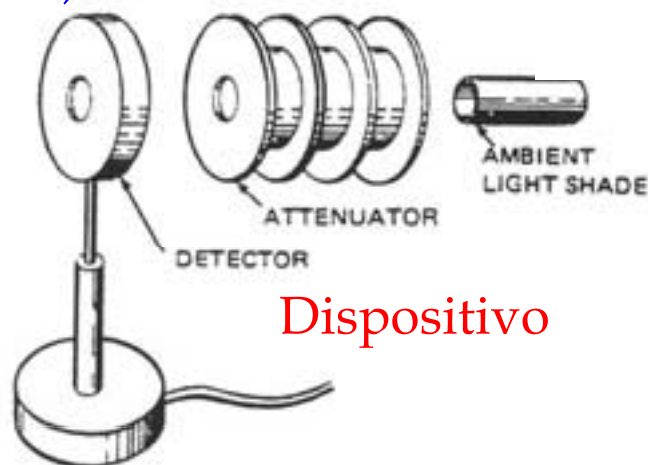
Il rivelatore può essere TERMICO o a SEMICONDUCTORE (un riv. termico ha teor. resp. "piatta")

$$\eta_{\text{abs}} P_{\text{opt}} = P_{\text{therm}} = K \Delta T = K(T - T_{\text{amb}})$$

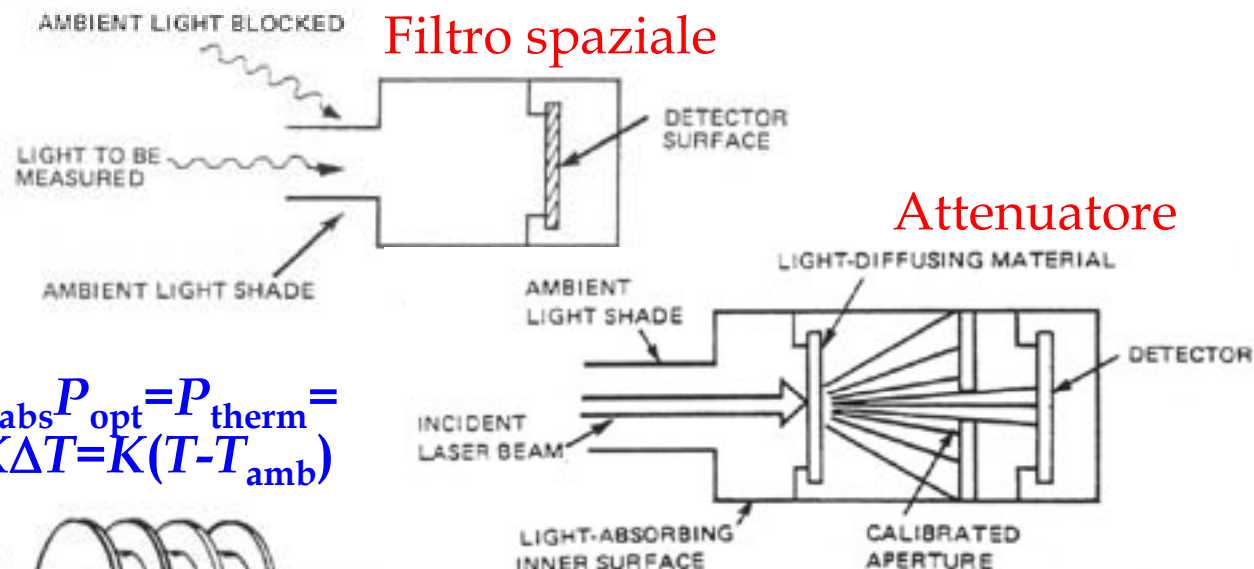


Si "calibrato"

Calibrazione



Dispositivo

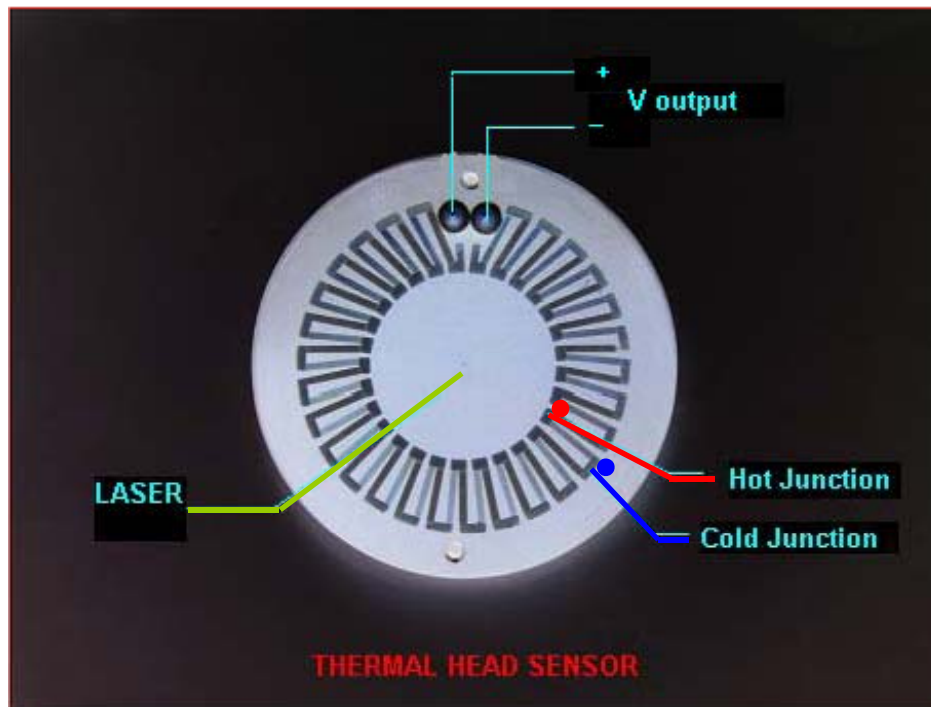


Dispositivo commerciale

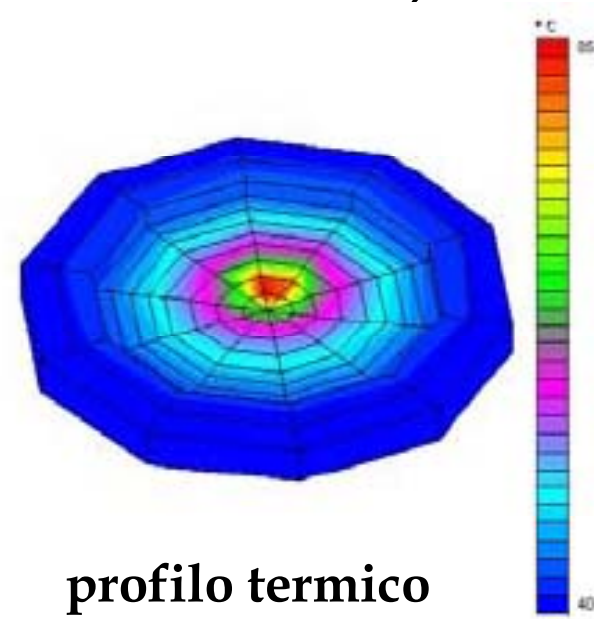
$$\begin{aligned} 0.1 \text{ dB} &= 2.3 \times 10^{-2} \\ 0.01 \text{ dB} &= 2.3 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Power Meter (sensore termico)

Rivelatore a TERMOPILA



Il campo termico ha un gradiente in direzione radiale: dalla zona centrale verso la periferia "fredda"



profilo termico

10W-Sensor Disk



Power Meter (specifiche semiconduttori)

System Specifications

TESTA DI LETTURA

The 2832-C is compatible with Newport's **Ge, Si and InGaAs detectors**, allowing both free space and fiber pigtailed measurements in the **190-1800 nm** range. When using one of these detectors with the 2832-C a calibration module needs to be attached to the detector, assuring the correct reading at any pre-selected wavelength.

Detector Model	818-UV/CM	818-SL/CM	818-F-SL	818-ST/CM	818-IR/CM 818-F-IR	818-IG/CM	818-IS-1
Detector Material	Si	Si	Si	Si	Ge	InGaAs	InGaAs/Si
Diameter [cm]	1.13	1.13	0.3	1x1	0.3	0.3	--
Wavelength Range [nm]	190-1100	400-1100	400-1100	400-1100	780-1800	800-1650	400-1650
Power Range [dBm]	-83 to +23	-90 to +33	-90 to +3	-70 to +33	-70 to +21.5(2)	-90 to +21.5	-70 to +23
Display Resolution [dB or dBm]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Display Resolution [pW]	0.1	0.1	0.1	0.1	10	0.1	0.1
Accuracy ¹ [%]	±2	±2	±2	±2	±3	±2	±2.5
(applicable wavelength range)	200-1100 nm	400-1100 nm	400-1100 nm	400-1100 nm	780-1700 nm	800-1650 nm	400-1650 nm
Linearity [%]	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5
NEP @ 5 Hz and 1 A/W	50 fW/√Hz	50 fW/√Hz	50 fW/√Hz	3 pW/√Hz	4 pW/√Hz	30 fW/√Hz	3 pW/√Hz(3)

Notes:

- 1) At calibration temperature, no optical attenuator
- 2) -70 to +3 dBm for 818-F-IR
- 3) 0.01 A/W for the 818-IS-1

$P_{\min} = -90 \text{ dBm} = 1 \text{ pW}$
 $P_{\max} = +21.5 \text{ dBm} = 140 \text{ mW}$
circa 11 ordini di grandezza!!!

Instrument Specifications

CORPO DI LETTURA

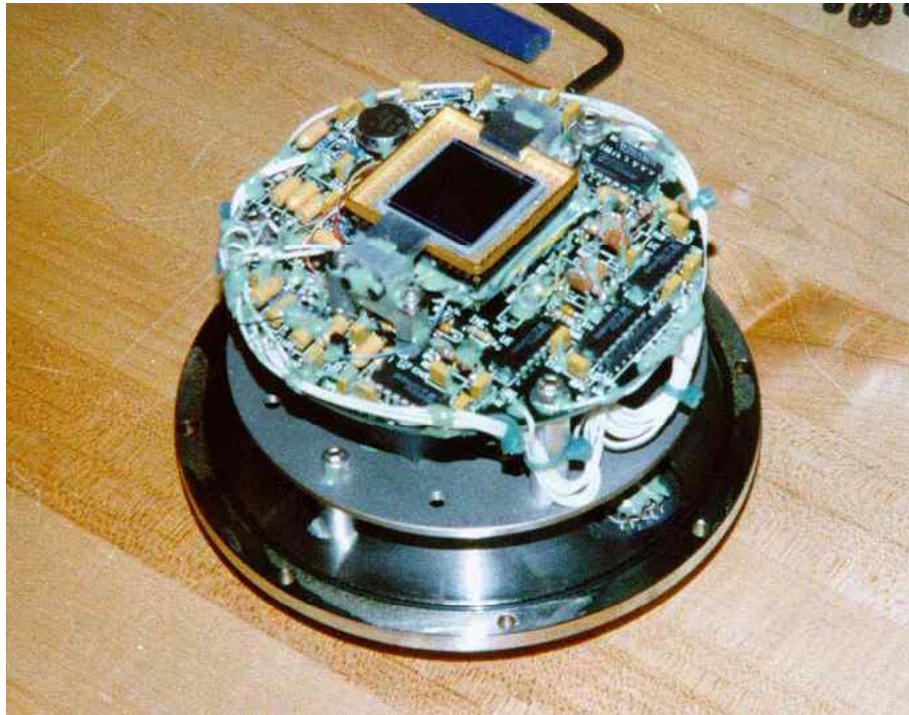
Display	6-digit vacuum fluorescent
Sampling Resolution	20,000 count ≤ 25 Hz, 4096 count ≤ 1 kHz
Gain Ranges	Up to 7 decades
Current Sensitivity (full scale)	2.5 nA to 2.5 mA
Resolution	100 fA
Sampling Rate	Up to 1 kHz single channel, Up to 500 Hz dual-channel
Bandwidth (-3 dB)	DC to 47 kHz ¹
Analog Output	0 to 2.5 V into 50 Ω
DC Accuracy	≤ ±0.1% typical
Power	90 to 240 VAC
Weight	2.5 lb. (1.1 kg)
Dimensions (W x H x D)	8.5 x 4 x 14 in. (216 x 102 x 356 mm)
Operating Environment	10°C to 40°C, <80% RH
Storage Environment	-25°C to 60°C, <90% RH

Notes:

- 1) Gain and detector dependent

è un buon voltmetro digitale!

Rivelatori CCD



A 1024x1024 CCD camera for UV spectrometer

- Scorrimento e raccolta delle cariche fotogenerate
- Ricostruzione immagine su **matrice di punti** (visualizzazione su *display raster*)
- Importante **dimensione singolo pixel**

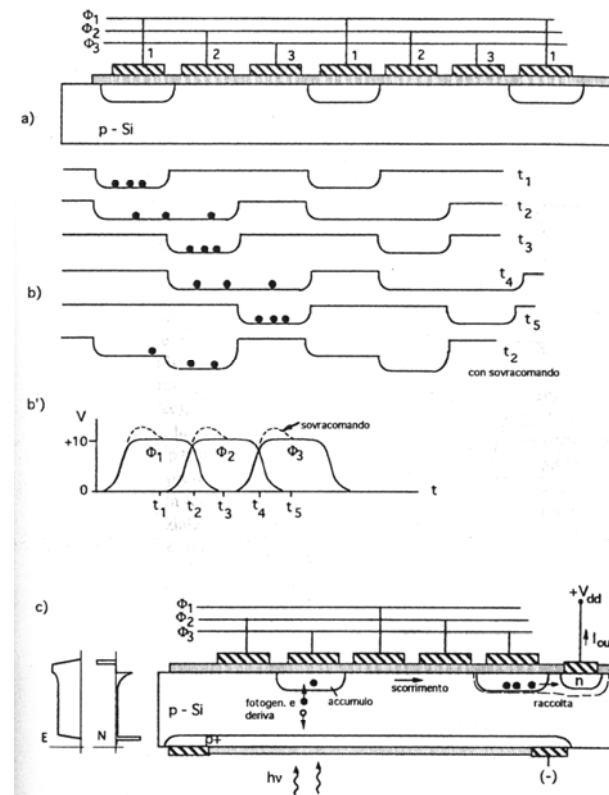
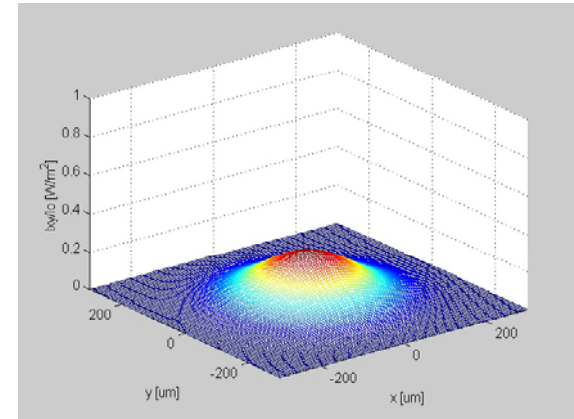
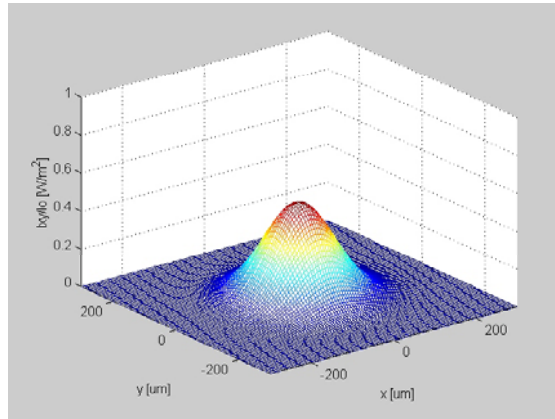
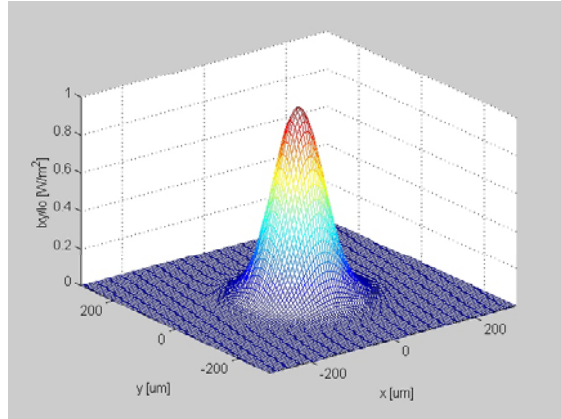


Fig.4.2.2 a): Struttura base del CCD; b) sequenza temporale delle buche di potenziale per lo scorrimento della carica quando le fasi sono comandate con i segnali indicati in b'); c) struttura che mostra la fotogenerazione nella regione p, lo scorrimento e la raccolta al pozzo; è indicato l'andamento in profondità della densità di carica e del campo

Misure del profilo spaziale

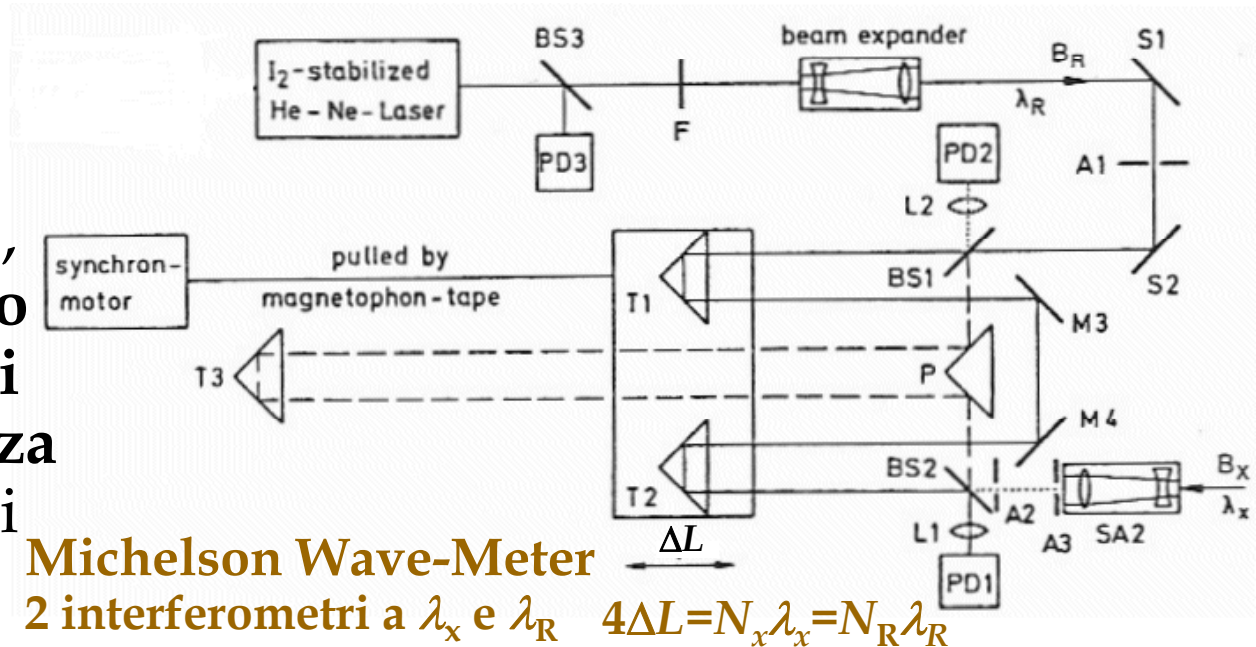
(Analisi nel piano xy durante la propagazione z)



- Misure della **dimensione di macchia** $w = w_0 \left[1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}$
- Campo lontano ($z \gg z_R$): misure di **divergenza** $\theta = \frac{\Delta w}{\Delta z}$
- Misure di **astigmatismo** $w_{0x} \neq w_{0y}$ $\theta_x \neq \theta_y$
- Misure di $M^2 = \frac{\theta_{\text{mis}}}{\theta_{\text{d.l.}}} = \frac{\theta_{\text{mis}}}{\lambda / \pi w_0}$ $\left(\begin{matrix} M_x^2 & e & M_y^2 \end{matrix} \right)$

Wave-Meter da laboratorio (è un interferometro ultra-accurato!)

La radiazione sotto misura (λ_x) e una di riferimento (λ_R) viaggiano, nel vuoto, sullo stesso cammino contato in termini di frange di interferenza sui due fotorivelatori PD1 e PD2



PD2 conta N_x frange per λ_x

PD1 conta $(N_R + \varepsilon)$ frange per λ_R

$$\Rightarrow \lambda_x = \frac{N_R + \varepsilon}{N_x} \lambda_R \approx \frac{N_R}{N_x} \lambda_R = \kappa \lambda_R$$

Incertezza relativa $\left| \frac{\Delta \lambda_x}{\lambda_x} \right| \approx \left| \frac{\Delta \lambda_R}{\lambda_R} \right| = 10^{-10}$ grazie a **He-Ne/I₂**
 $u_r(\lambda_R) = 2.5 \times 10^{-11}$

$$\Delta \lambda \cdot \lambda \rightarrow \lambda \cdot \mu \Delta \lambda \cdot x \cdot \dots$$

$$\nu \cong \Delta \nu \cong \dots \approx \dots$$

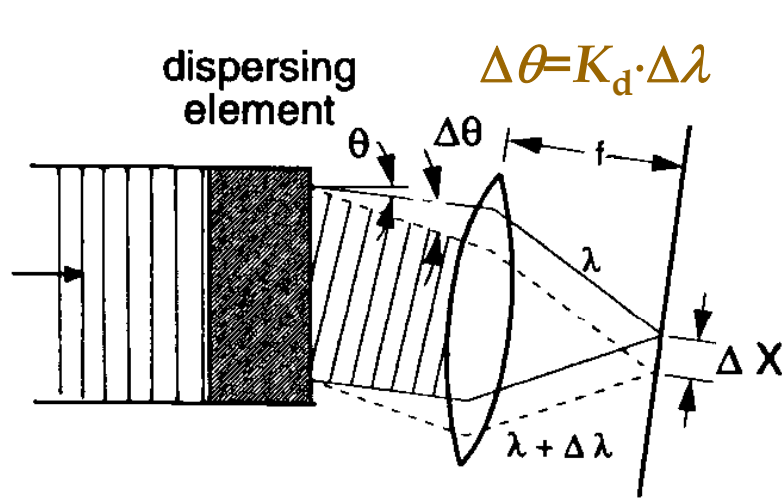
Per $\lambda_R = 633 \text{ nm}$ e $\Delta L = 30 \text{ cm}$ si ha $N_R \approx 1.9 \times 10^6$
e con $\lambda_x = 1550 \text{ nm}$ si ha $N_x \approx 7.7 \times 10^5$

Wave-Meter per sistemi DWDM

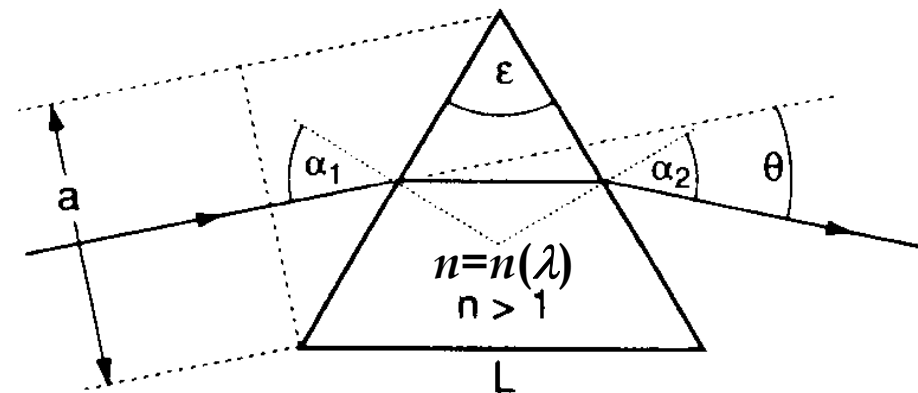


- Misura simultanea fino a **256 canali ottici**
- $u(\lambda)=0.3$ pm (300fm!) e $\Delta\lambda=1\div0.1$ pm
- Misure di **potenza dei picchi e totale**
- Misura automatica di **SNR e distanze $\Delta\lambda$**
- *Waterfall* di $\lambda(t)$ e $P(t)$

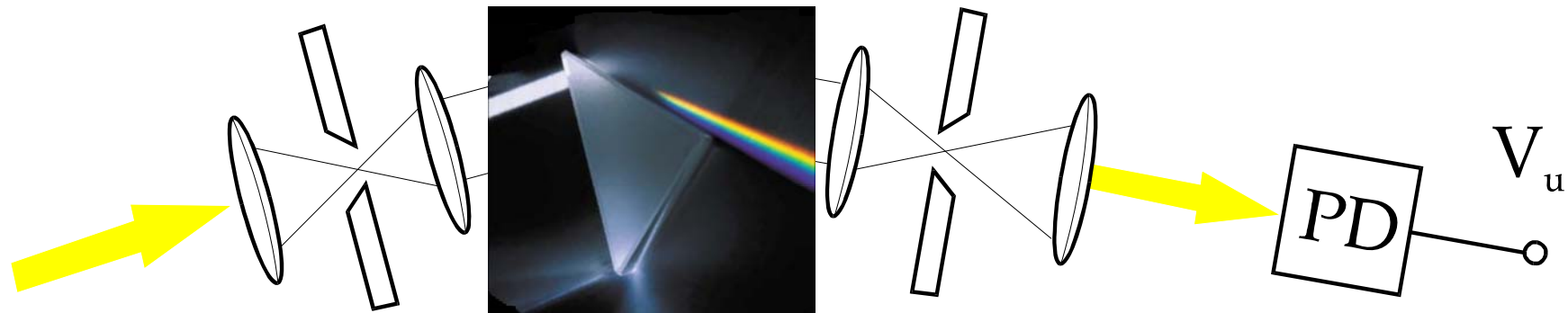
Spettrometro e monocromatore



$K_d = (d\theta/d\lambda)$
potere dispersivo



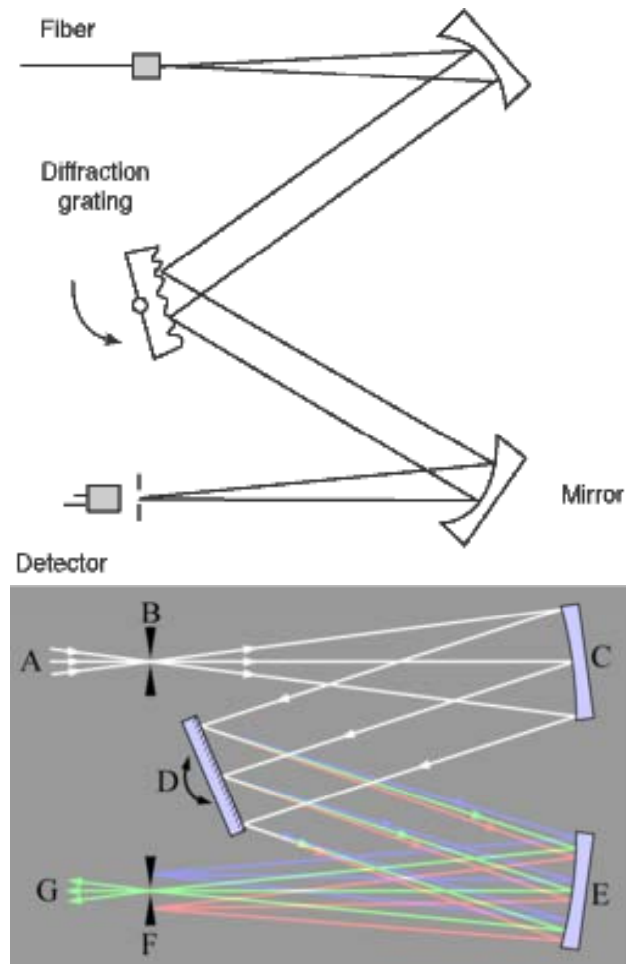
- **Monocromatore accordato**



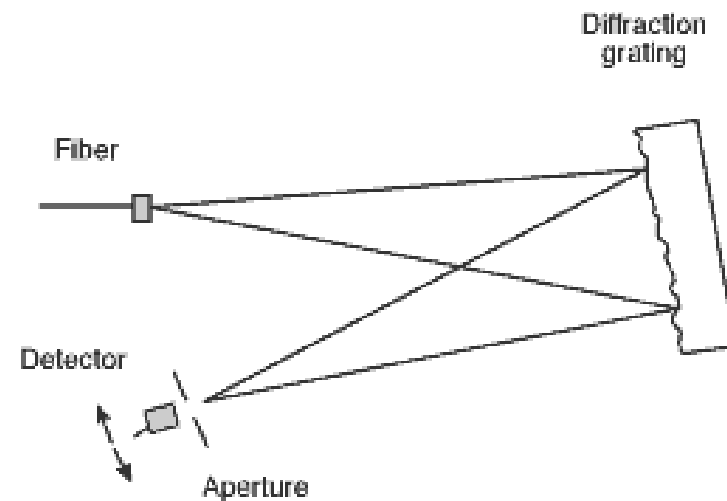
Potere risolutivo (spettrale) $r = | \Delta\lambda_{\min} / \lambda | = | \Delta\nu_{\min} / \nu |$
 ris. spettrale ($\propto$ ris. angolare) $\Delta\lambda_{typ} \approx 0.01 \text{ nm}$ ($10 \text{ pm} \gg 0.1\text{-}100 \text{ fm} = R_{W-M}$)

OSA: schemi funzionali

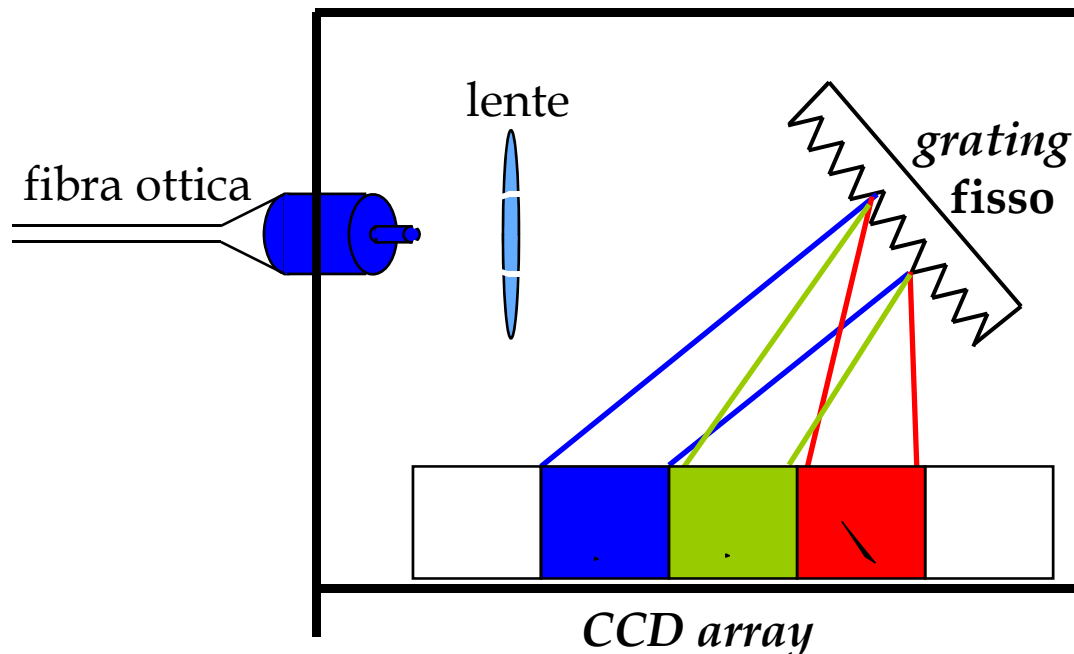
- OSA tradizionale
(monocromatore a
prisma/*grating* rotante)



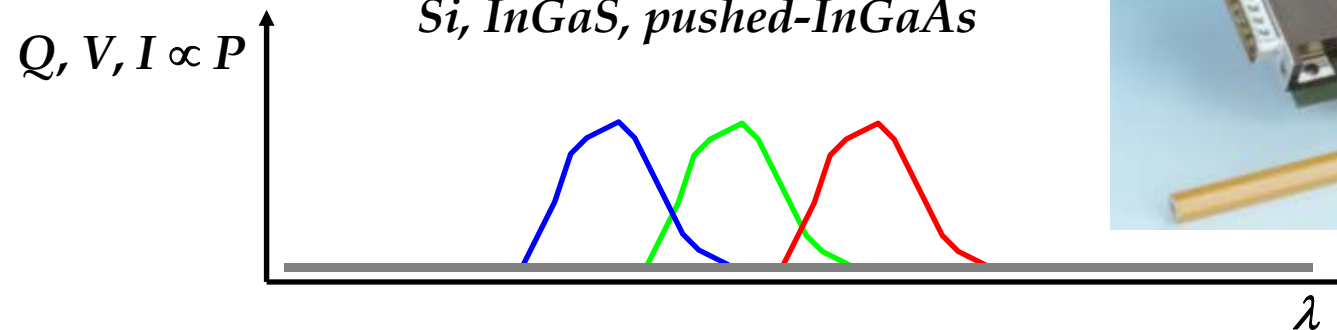
- OSA a banda stretta ma
shock-resistant [da campo]
(*grating* fisso e
rivelatore scorrevole
o meglio *array CCD*)



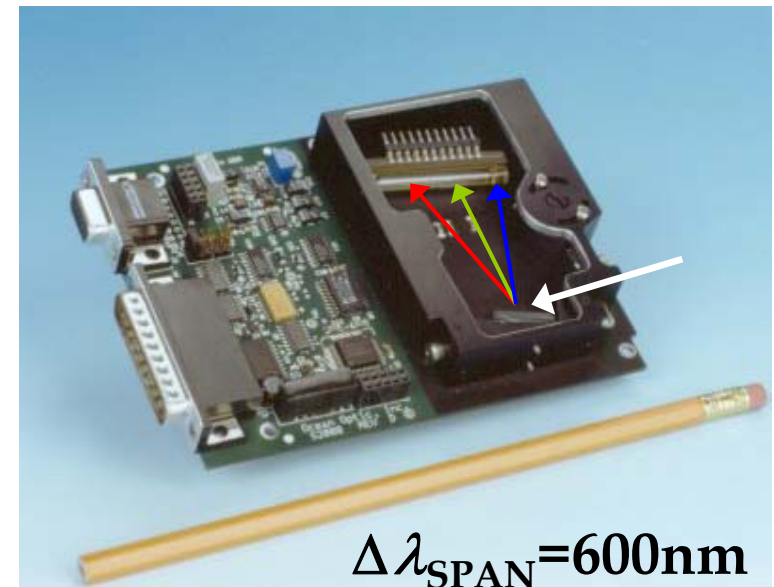
OSA ultracompatto (PC board)



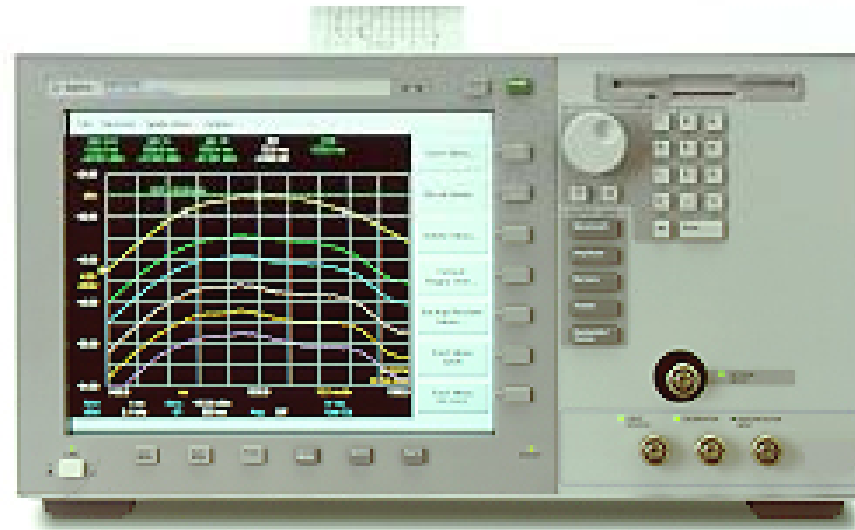
CCD array
Si, InGaS, pushed-InGaAs



2048 *pixel*
(12.5 μm $\times$ 200 μm)
 $L=25.6\text{mm}$
 $\Delta\lambda_{\text{res}}=0.3\text{nm}$



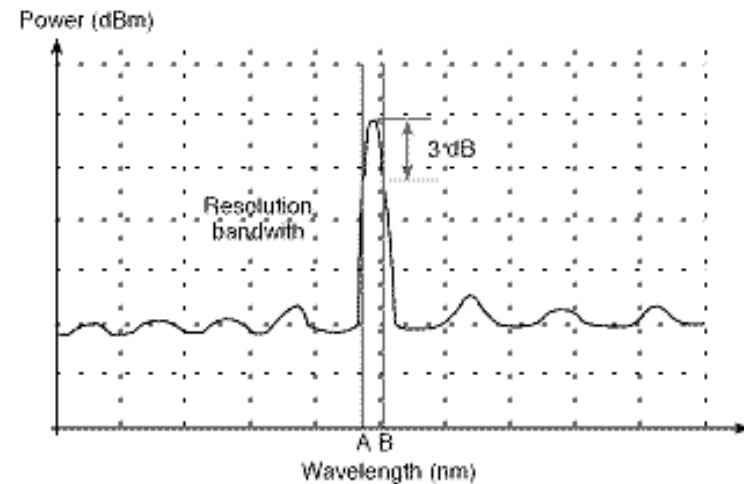
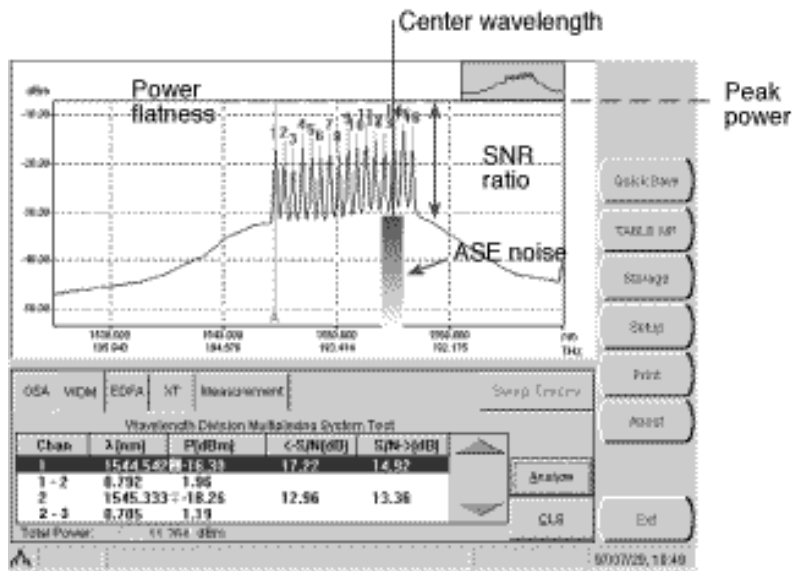
OSA da laboratorio



- Misura dello **spettro continuo** (righe+ASE)
- $u(\lambda)=10$ pm e $\Delta\lambda=2$ pm
- Misure di **potenza**: dei picchi e totale
- Misura automatica di SNR e $\Delta\lambda$ e ΔP (*markers*)
- Rappresentazione grafica quantitativa

Misure dello spettro ottico per righe laser o segnali D-WDM

Analizzatore di spettro ottico (OSA)



Parametri da Misurare (sul segnale ottico WDM):

- **potenza di canale [dBm]**
- **lunghezza d'onda centrale [nm]**
- **spaziatura tra i canali [nm, GHz]**
- **ASE noise floor [dBm/nm]**
- **rapporto S/N [dB/nm]**
- **crosstalk tra canali adiacenti [dB]**
- **potenza ottica complessiva [dBm]**

Parametri di Misura dell'OSA:

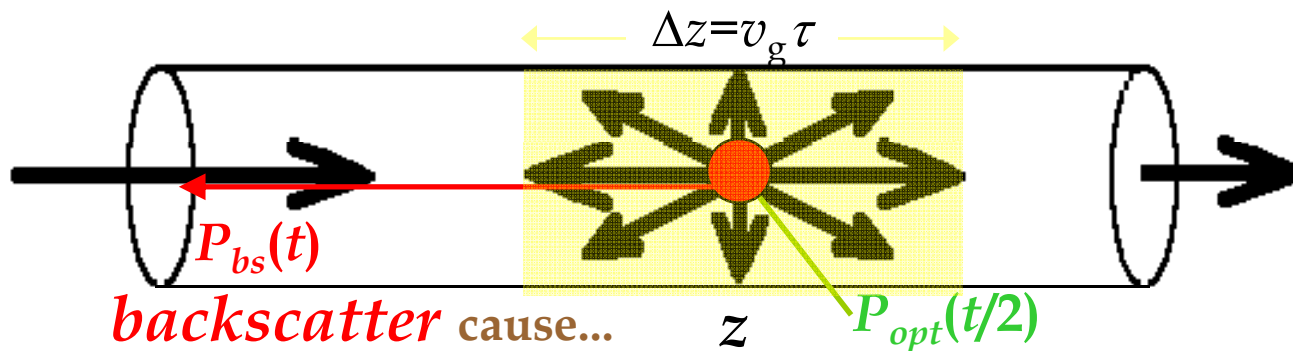
- **center wavelength [nm]** λ_{START} [nm]
- **wavelength span [nm]** λ_{STOP} [nm]
- **resolution bandwidth (FWHM) [nm]**
- **wavelength accuracy [nm]**
- **saturation power [dBm]**
- **"sensitivity" [dBm]**
- **dynamic range [dB]**
- **power accuracy [dB]**

Optical Time Domain Reflectometry

E' una tecnica per la **misura indiretta di perdite (locali) e attenuazioni (distribuite)** lungo un cavo in fibra ottica.

La **lettura** del segnale ottico avviene **in riflessione** grazie al fenomeno del *backscattering*.

Lo *scattering* (diffusione) è in ogni punto proporzionale al livello di potenza ottica presente e dipende inversamente dalla lunghezza d'onda considerata.



	α_s [dB/km]	R_s [dB]
MM 850nm	1.9	-50
SM 1300nm	0.35	-63
SM 1550nm	0.175	-66

backscatter cause...

$$P_{bs}(t) = \left[\frac{1}{2} \alpha_s \cdot v_g \tau \right] P_{opt}\left(\frac{t}{2}\right) \quad \text{con} \quad t = \frac{2L}{c/n} = \frac{2z}{c/n} \quad \text{e} \quad \alpha_s \propto \frac{1}{\lambda^4} [\text{cm}^{-1}]$$

coeff. scattering per unità di lunghezza

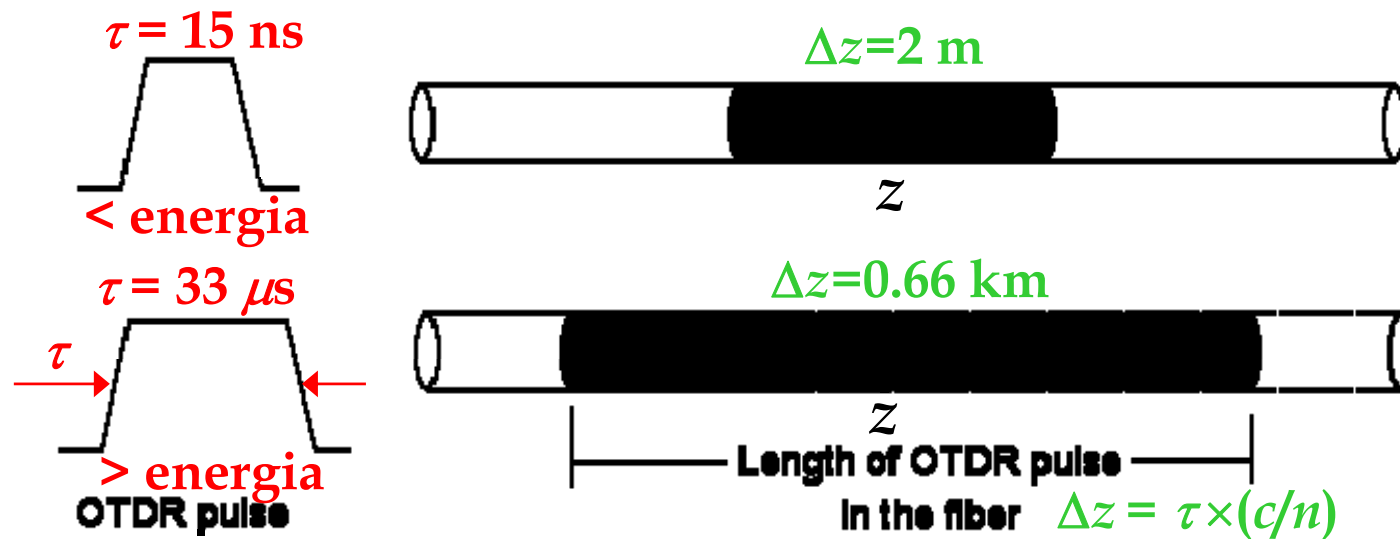
R_s

estensione spaziale Δz della "zona illuminata" che dà il backscattering (con coefficiente α_s per unità di lunghezza)

OTDR Pulse length and resolution

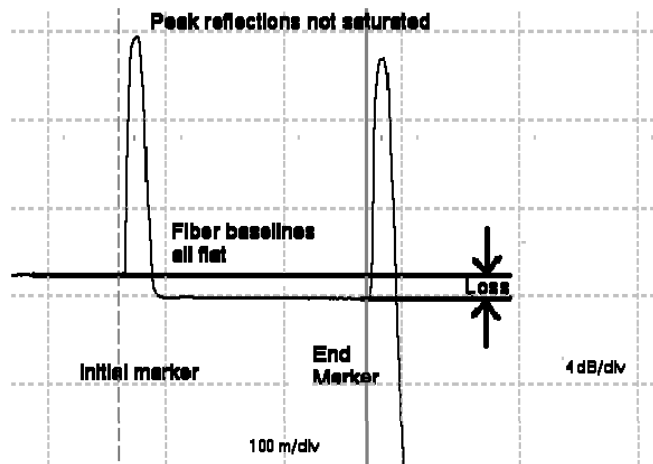
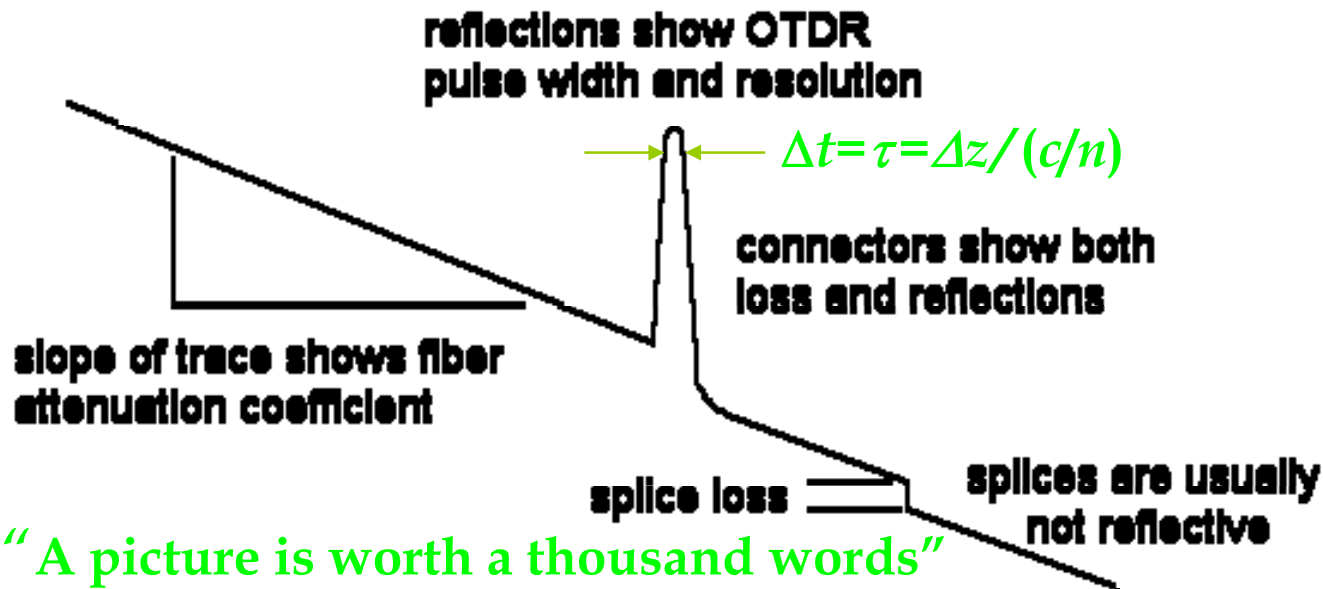
Con un **laser impulsato** si iniettano brevi (ns) impulsi di luce nella fibra (cavo) e si osserva l'andamento delle retroriflessioni in funzione del tempo: il tempo indica la distanza del tratto di fibra che le ha generate

$$P_{opt}(z) = P_{opt}(0) \exp[-\alpha z] \quad \text{attenuazione}$$

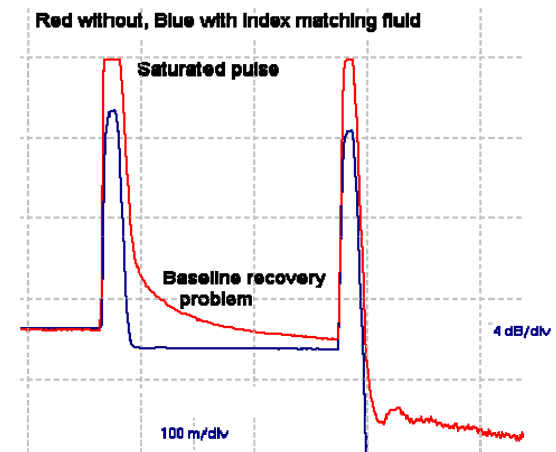


La **risoluzione spaziale** Δz è più scadente quando l'impulso laser lanciato è più lungo ma migliora SNR

Informazioni nella traccia OTDR



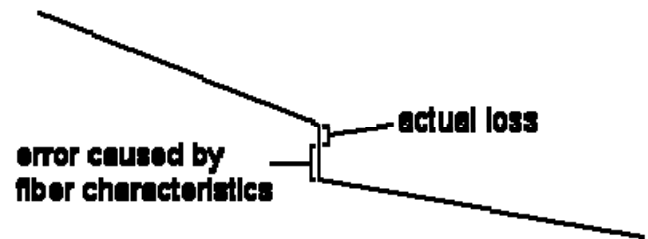
Pb. saturazione e ripristino della linea di base



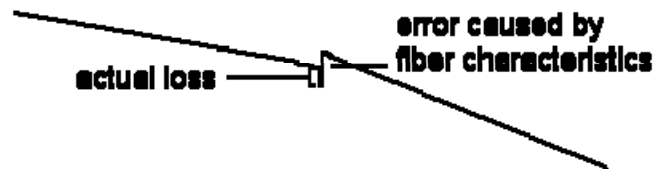
Accorgimenti nella misura OTDR

giunti tra fibre
differenti

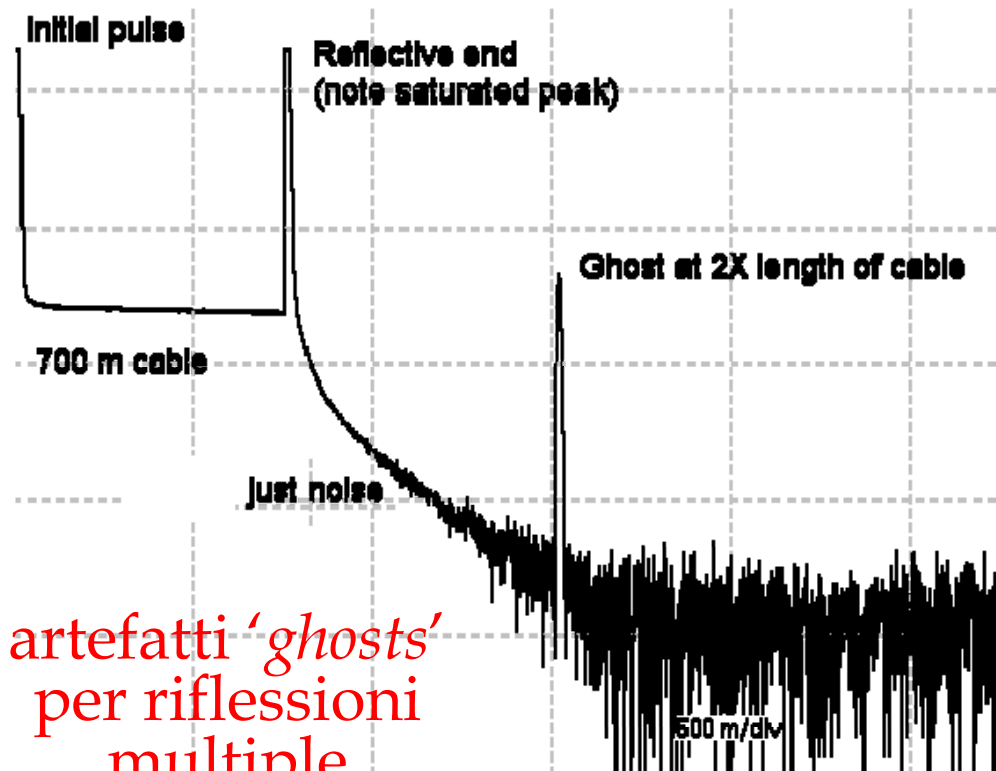
a. same fiber spliced



b. high loss fiber spliced to low loss fiber



c. low loss fiber spliced to high loss fiber
can cause an apparent gain at a splice

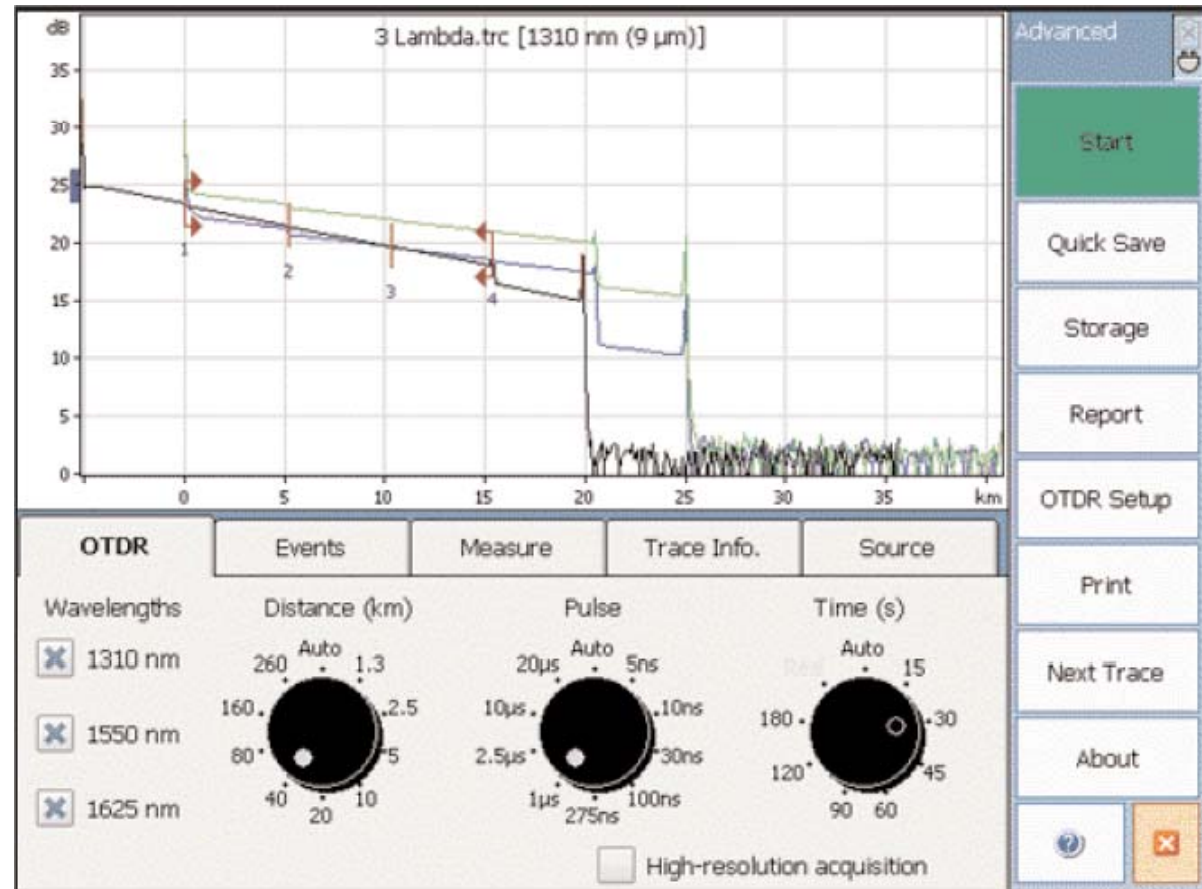


artefatti 'ghosts'
per riflessioni
multiple

Esempi di misura *OTDR*



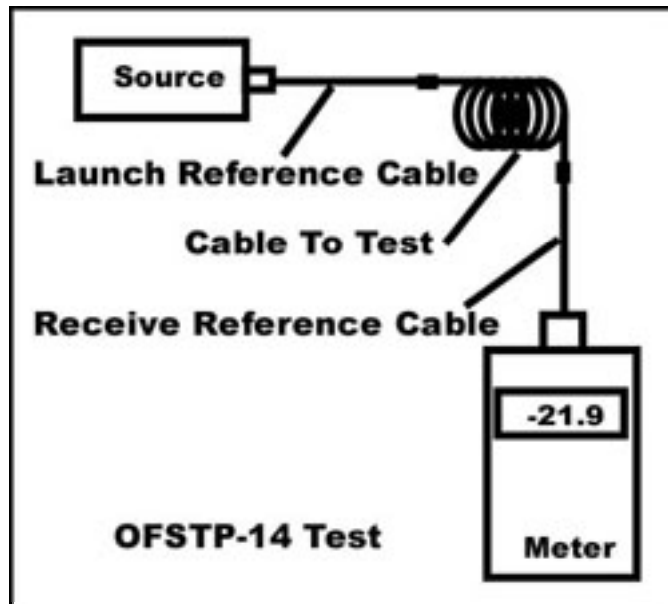
OTR portatile
per misure
"sul campo"



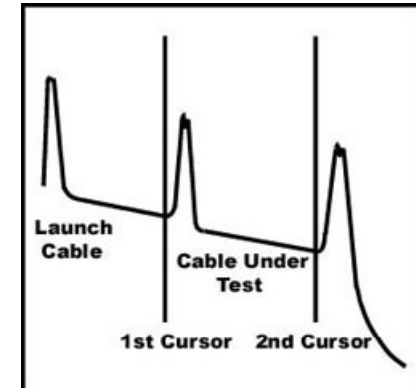
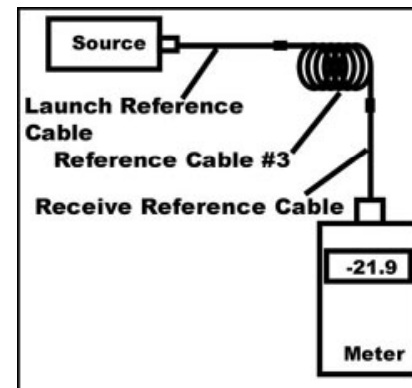
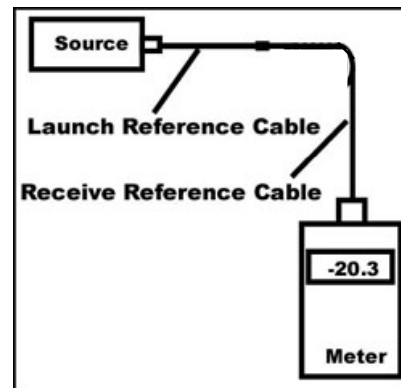
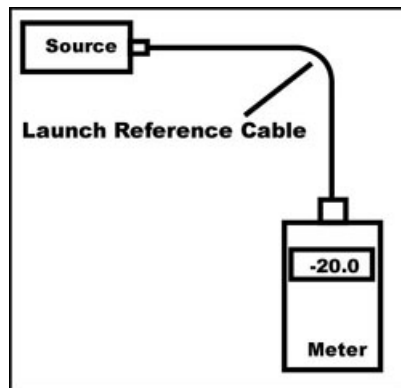
pannello di misura di un OTDR

Misure di *Insertion Loss* (fibre ottiche)

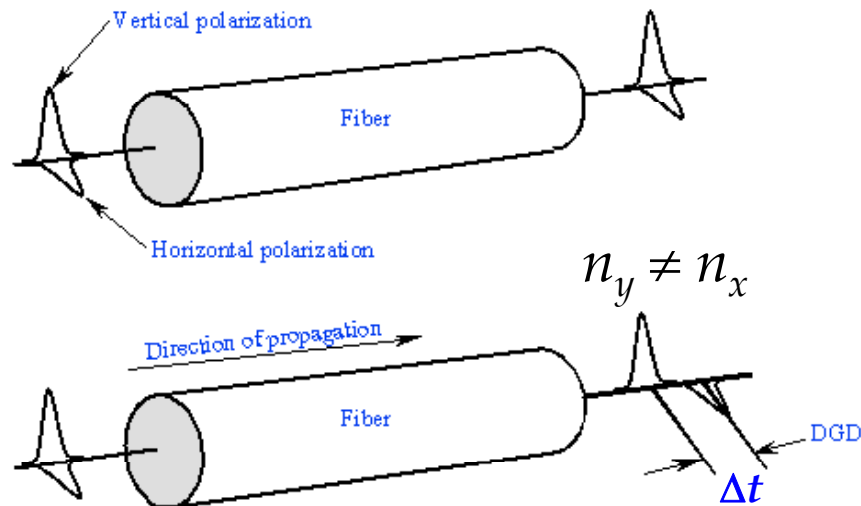
Esistono 4 metodi, tutti standardizzati!!!



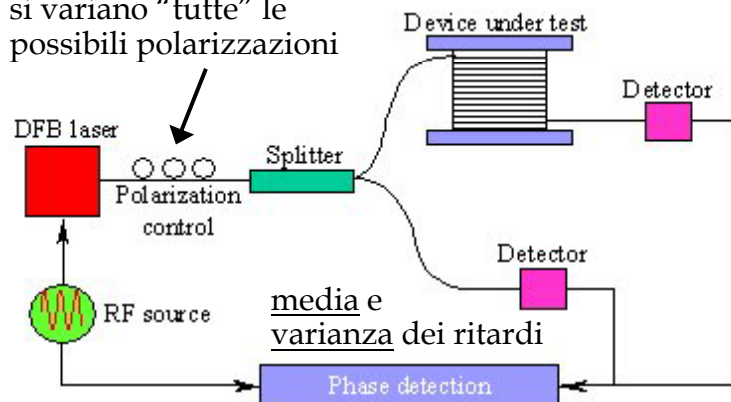
Risultati di differenti misure
a 850 nm su un cavo da 520 m



Misure di PMD (*Polarization Mode Dispersion*)



si variano "tutte" le possibili polarizzazioni



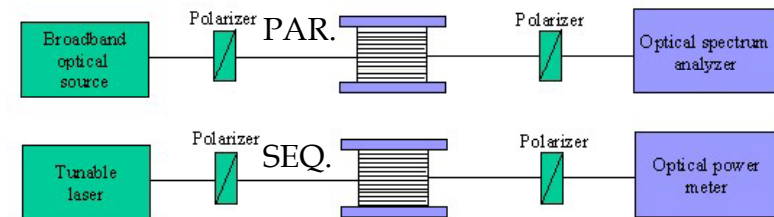
misura con una singola λ

Com. ottiche a >10 Gb/s
Pb.: dispersione polarizz.

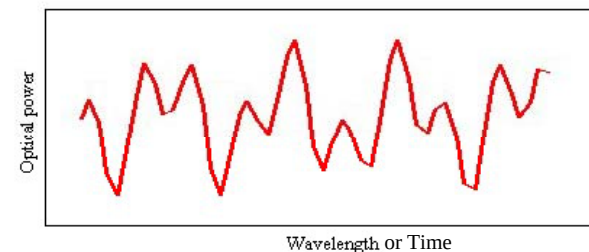
PMD: parametro STATISTICO
Interessa Valor Medio e Dev. St. del DGD (*Differential Group Delay*)

Si misura la varianza per unità di lunghezza (nel tempo o in funzione di SOP o λ): dunque σ^2 in [ps²/km] e poi $\text{PMD} = \sigma_{\text{DGD}}$

Valori tipici PMD ~ 0.2 ps/(km)^{1/2}
range variabilità 0.1÷1 ps/(km)^{1/2}

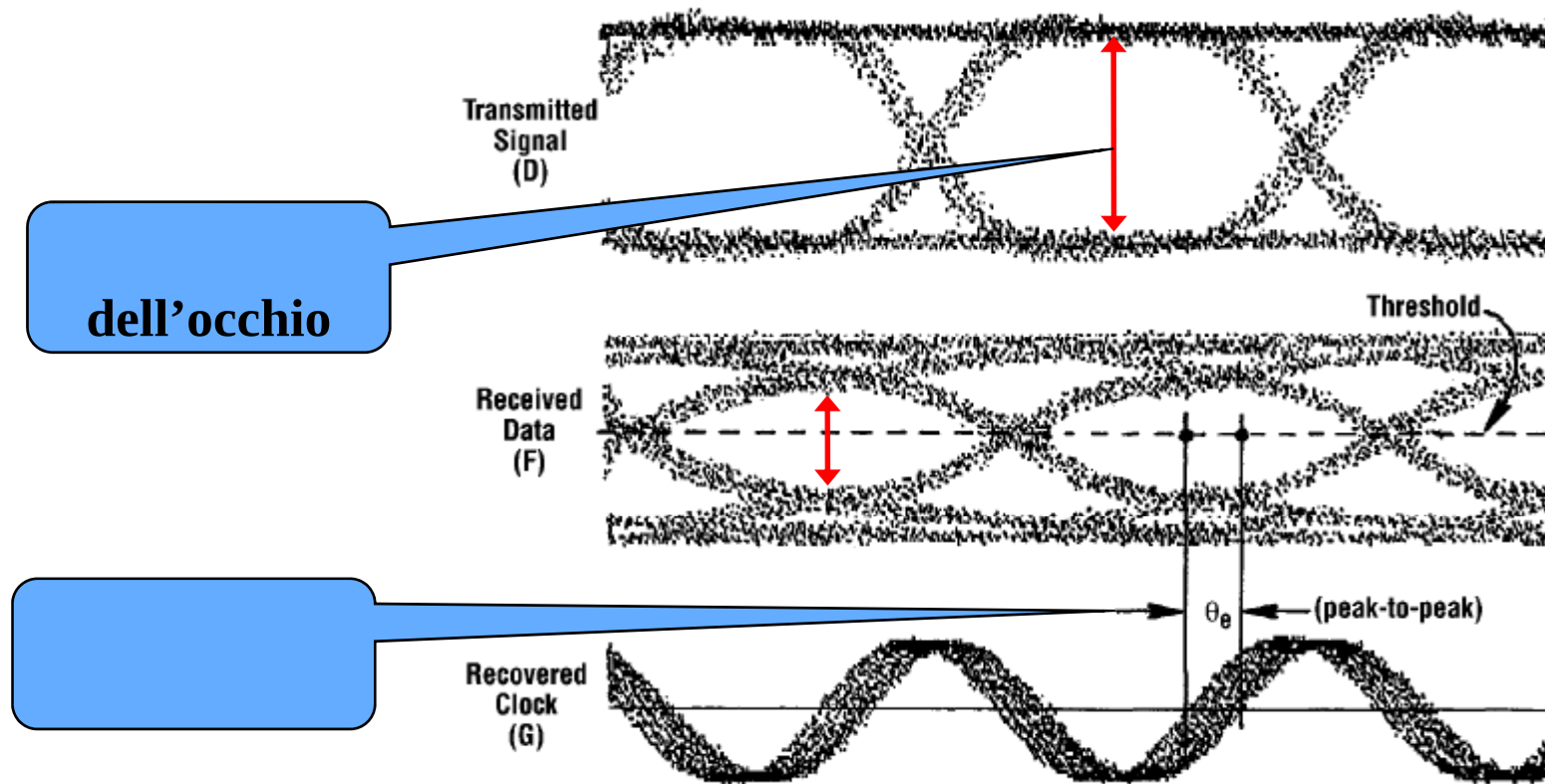


misura con diverse λ



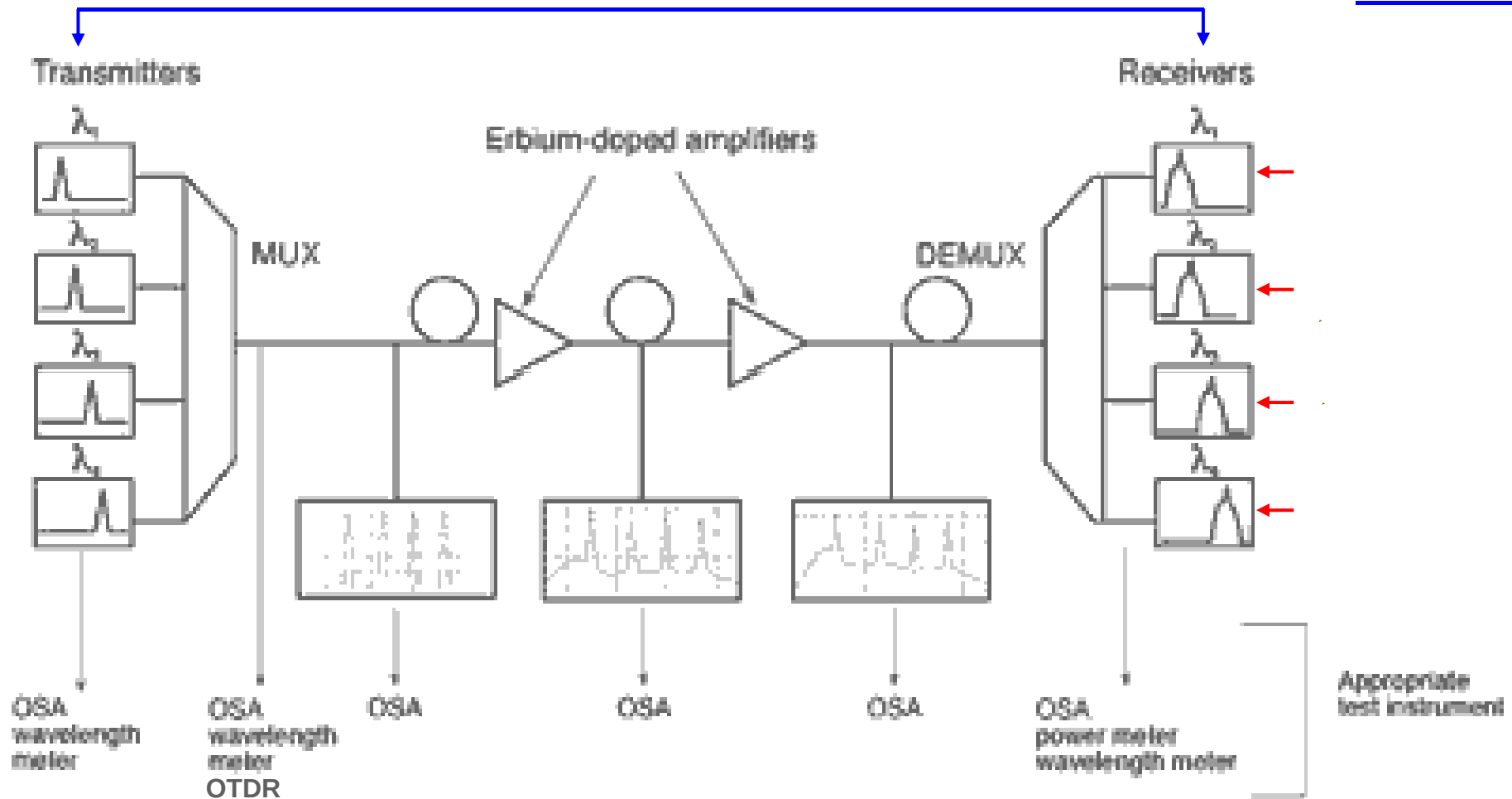
Misure di BER e diagrammi a occhio

Per $BER < 10^{-12}$ occorrono tempi lunghi ($\gg 20$ min a 1 GSa/s)...



si stima il BER dall'apertura (S/N) del diagramma a occhio

Monitoraggio di un sistema D-WDM



Riferimenti bibliografici

- S. Donati, *Photodetectors: Devices, Circuits and Applications*, Prentice Hall, New York, 2000
- W. Demtröder, *Laser Spectroscopy*, Springer, Berlin, 1996
- Application Note 1550-4, *Optical Spectrum Analysis - Basics*, Hewlett Packard, U.S.A., 1996
- http://www.iec.org/tutorials/dwdm_test