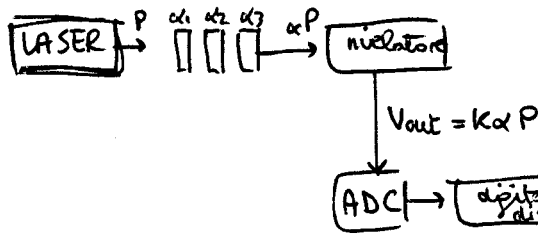


STRUMENTAZIONE PER MISURE OTTICHE

MISURE di POTENZA OTTICA



$$\text{Intensità } I = \frac{EE^*}{\eta_0} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \left(\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \right)$$

$$\text{Potenza} = P = \int I dS$$

$$R = \frac{\eta e R_f}{h\nu} \times (\text{fotodiodo}) \rightarrow \text{transimpedenza}$$

Power Meter (risoluzione $10^{-2} \div 10^{-3}$) (sensibilità)

(filtra spaziale + attenuatore)
 ↳ pino del detector

rivelatore può essere termico (responsivity piatta) ($\eta_{\text{abs Pot}} = P_{\text{therm}} = K(T - T_{\text{amb}})$)
 o semiconduttore

- sensore termico: TERMOPILA: termocoppie in Zn elettricamente (sfruttano effetto Seebeck) (XT sensibilità)
- semiconduttori:
 - Ge (IR)
 - Si fino a 1100 nm (VIS)
 - InGaAs 800-1650 nm (IR)
 (11 ordini di grandezza tra P_{min} e P_{max})

- CCD
 - scorrimento e raccolta delle cariche fotogenerate
 - ricostruzione immagine su matrice di punti (display raster)
 - importante densità singoli pixel

MISURE PROFILO SPAZIALE

[analisi del piano xy durante propagazione lungo z]

Misure di una macchia: $w = w_0 \left[1 + \left(\frac{z \lambda}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}$

Campo lontano misure divergenza: $\mathcal{D} = \frac{\Delta w}{\Delta z}$

Astigmatismo $w_{0x} \neq w_{0y}$
 $\mathcal{D}_x \neq \mathcal{D}_y$

Misure di $M^2 = \frac{\mathcal{D}_{\text{mis}}}{\mathcal{D}_{\text{diffraction limited}}} = \frac{\mathcal{D}_{\text{mis}}}{\lambda / \pi w_0} \quad (M_x^2 \text{ e } M_y^2)$

• WAVE METER (è interferometro ultraaccurato)

$$u(\lambda) = 300 \text{ fm}$$

$$\Delta\lambda = 1 \div 0,1 \text{ pm}$$

sfrutto $u(\lambda_R)_{\text{He-Ne}} = 2,3 \cdot 10^{-11}$

(viaggiano sullo stesso cammino)

→ Ho due fasci; uno di riferimento (He-Ne) e uno di misura (λ_x): su un fotodiodo conto un numero intero di frange per λ_x , sull'altro ~~contatore~~ (λ_R) conto numero intero + ε ! ($0 < \varepsilon < 1$)

(NR) (NX)

incertezza relativa: $\left| \frac{\Delta\lambda_x}{\lambda_x} \right| = \left| \frac{\Delta\lambda_R}{\lambda_R} \right| = 10^{-10}$

$$\lambda_x = \frac{NR + \varepsilon}{NX} \lambda_R \approx \frac{NR}{NX} \lambda_R = K \lambda_R$$

(NB) Altri fattori di errore: $n(\lambda)$
(i cammini ottici \neq)

• SPETTROMETRO E MONOCROMATORE

POTERE DISPERSIVO: $\Delta\theta = K_d \Delta\lambda$, ($K_d = \frac{d\theta}{d\lambda}$)

$$u(\lambda) = 10 \text{ pm}$$

MONOCROMATORE
ACCORDATO

potere risolutivo (spettroale): $r = \left| \frac{\Delta\lambda_{\text{min}}}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta\nu_{\text{min}}}{\nu} \right|$

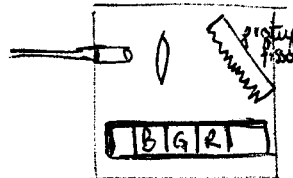
(+ stretto fascio il filtro, + tempo ci mette a guardare tutto lo spettro)

• OSA tradizionale (monocromatore a prisma/grating rotante)

• OSA a banda stretta ma shock-resistant (grating fisso e array CCD)

• OSA ultracompatto

(analizzatore di spettro ottico)
per righe laser o segnali DWDM



2048 pixel

$$\Delta\lambda_{\text{res}} = 0,3 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{\text{span}} = 600 \text{ nm}$$

OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (OTDR)

- Tecnica x la misura indiretta di perdite locali o attenuazioni distribuite lungo un cavo in fibra ottica.
- la lettura del segnale ottico avviene in riflessione, grazie al back-scattering
- Scattering $\propto \frac{P_{ottica}}{\lambda^4}$
- Inietto con laser impulsato impulsi (ns) di luce in fibra.

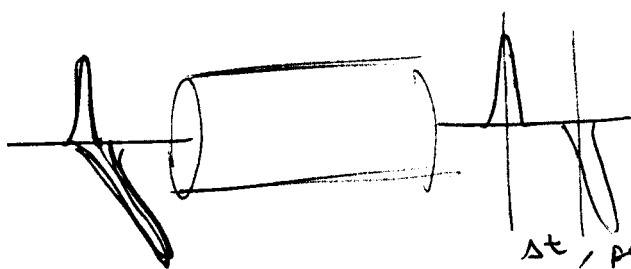
$$P_{bs} = \left[\frac{1}{2} \alpha(s) \left(\frac{V_g}{A} \right)^2 \right] P_{opt} \left(\frac{t}{2} \right), \quad t = \frac{2L}{c/n}$$

$$P_{opt}(z) = P_{opt}(0) e^{-\alpha z}$$

(vedi esempi di segnale OTDR: slides 18 e 19)

MISURE di INSERTION LOSS (fibre ottiche)

MISURE DI POLARIZATION MODE DISPERSION (PMD)



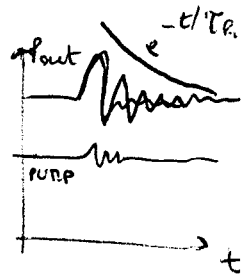
↓
 è parametro statistico, interessa valor medio
 e Dev. St. del Differential Group Delay.

Δt , perché $n_x \neq n_y$ (misura su λ , o in SEQ o in PAR)

MISURE di BER (stimata dall'apertura $\left(\frac{S}{N}\right)$ del diagramma a occhio)

MISURE di STABILITÀ e STABILIZZAZIONE ATTIVA di OSCILLATORE LASER

• STABILITÀ di AMPIEZZA



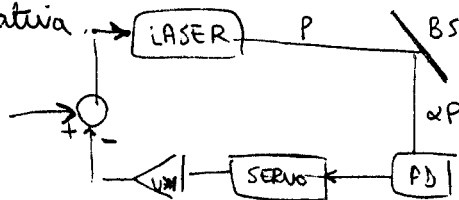
$$E(t) = E_0 (1 + \alpha(t)) e^{-j2\pi f_0 t} \quad (|\alpha(t)| \ll 1)$$

con analisi perturbativa \rightarrow oscillazioni di relax $\left\{ \begin{array}{l} f_{RIN} = \left(\frac{x-1}{\tau_c \tau_{sp}} \right)^{1/2} \\ \tau_{RIN} = \frac{2\tau_{sp}}{x} \end{array} \right. \quad (x = P/P_{thr})$

[necessità di sistemi di stabilizzazione]

$$RIN \text{ (relative intensity noise)} \approx \frac{\Delta P_{rms}}{P_{ave}} = \frac{i^2(f) \times 1 \text{ Hz}}{I_{DC}^2} \quad \left[\begin{array}{l} \text{non conta} \\ \text{la deriva} \end{array} \right]$$

Soppressione del RIN: reazione negativa (attiva)



$\tau_c \text{ diodo} \ll \tau_c \text{ solido}$
 $f_{RIN} \text{ diodo} \gg f_{RIN} \text{ stato solido}$
 (100 KHz)

Come misurare il RIN?
 leggo corrente i misurata
 da fotodiode

• STABILITÀ in FREQUENZA

$$E(t) = E_0 e^{-j[2\pi\nu_0 t - \phi(t)]} \quad \left(\text{con } \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} \ll \nu_0 \right)$$

$$\nu_{\text{int}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_{TOT}}{dt} = \nu_0 - \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \nu_0 + \Delta\nu(t)$$

espressione autofreq. $\nu = \omega \cdot \frac{c}{2L} \Rightarrow \Delta\nu = \omega \cdot \frac{c}{2L^2} (-\Delta L) \Rightarrow \frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta L}{L} \Rightarrow$ molto sensibile alle variaz. lunghezza!

Altro problema: coeff. dilataz. termica: $\left(\alpha = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{1}{\Delta T} \right)$

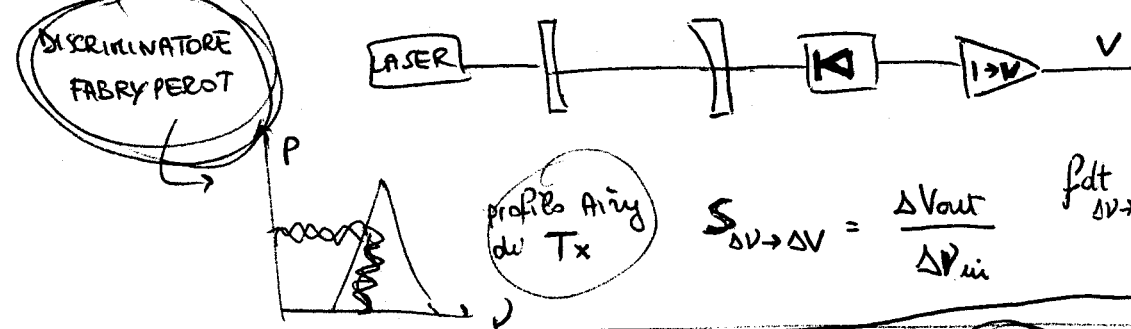
LASER INTRINSECAMENTE STABILI: Laser monolitici

- cella Peltier controllo temperatura (controllo termico lento ma grosso)
- PZT: controllo veloce e fine

(Non Planar Ring Oscillator: i + stabili in ampiezza e frequenza)
 (pompa a diodo)

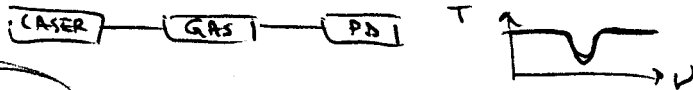
CARATTERIZZAZIONE RUOTORE di FREQUENZA

① Fluttuaz. freq. ottica \rightarrow fluttuaz. potenza \rightarrow fluttuaz. tensione



$$S_{\Delta V \rightarrow \Delta V} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \quad f_{dt \Delta V \rightarrow \Delta V} = f_{dt \Delta V \rightarrow \Delta P} \times f_{dt \Delta P \rightarrow \Delta I} \times f_{dt \Delta I \rightarrow \Delta V}$$

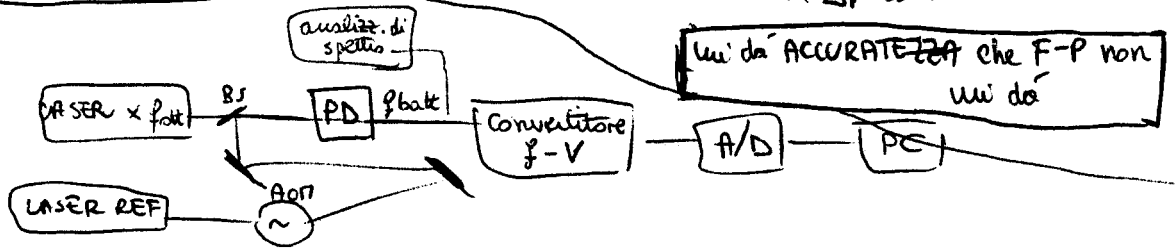
② Posso studiare/caratterizzare frequenza anche studiando (figa sbg) di una molecola



VANTAGGIO: so anche la ν_0 e non solo la $\Delta \nu$ come F-P.

③ Battimenti

Non serve x non avere battimenti in continua x $f_{ott} = f_{ref}$



$$f_{batt} = f_{AOM} + \Delta f_{ref-ott} \xrightarrow{f_{ref} = f_{ott}} f_{batt} = f_{AOM} + \Delta f_{ott}$$

$$\begin{aligned} & \text{se } \sqrt{\langle \Delta f_{ref}^2 \rangle} \ll \sqrt{\langle \Delta f_{ott}^2 \rangle} \Rightarrow \sqrt{\langle \Delta (f_{ref} - f_{ott})^2 \rangle} \approx \sqrt{\langle \Delta f_{ott}^2 \rangle} \\ & \text{se } \sqrt{\langle \Delta f_{ref}^2 \rangle} \approx \sqrt{\langle \Delta f_{ott}^2 \rangle} \Rightarrow \sqrt{\langle \Delta (f_{ref} - f_{ott})^2 \rangle} \approx \sqrt{2} \sqrt{\langle \Delta f_{ott}^2 \rangle} \end{aligned}$$

VARIANZA di ALLAN: misura x caratterizzaz. stabilita' in freq. di un oscillatore nel dominio del tempo

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2f^2} \langle (f_{batt,j+1} - f_{batt,j})^2 \rangle \quad \left(\begin{array}{l} \text{fluttuaz. di freq.} \\ \text{relativa} \end{array} \right)$$

SPETTROSCOPIA

- Righe di abs. di atomi e molecole: $\Delta E = E_2 - E_1 = h(\nu_2 - \nu_1) = hc \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$

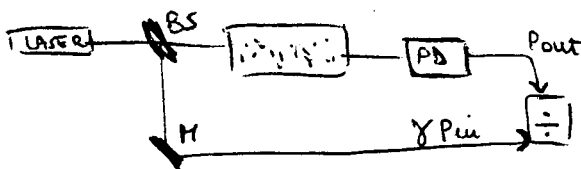
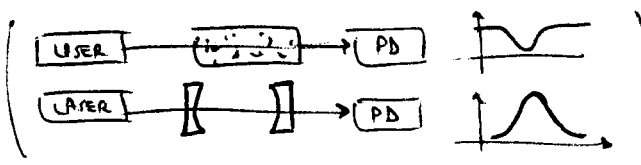
cause e tipi di allargamento:

Il
lo spettro di abs. è riga
allargata con valore centrale
 λ_0 e larghezza $\Delta \lambda_0$, FWHM
(Vigt)

- campi di forza esterni \Rightarrow allargamento orno (Lorentziana)
- collisionale (Lorentziana) ($\Delta \nu \propto$ Pressione)
- allargamento Doppler (Gaussiana) ($\Delta \nu \propto \sqrt{f_0 kT/m}$) (FWHM: $2\sigma\sqrt{2\ln 2}$)
- allargamento naturale (Lorentziana) ($\Delta \nu \propto 1/\tau_{sp}$)

SPETTROSCOPIA LINEARE

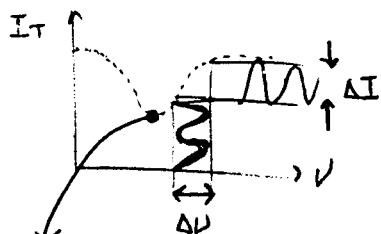
Conviene normalizzare la
potenza trasmessa dalla cella
alla potenza emessa dal laser
(che non è così stabile!!)



Poi eseguo scansione lineare
(rampa) della frequenza ν
del laser e si misura
 $T(\nu)$

SPETTROSCOPIA FM

modulo laser in fase/freq., sinusoidalmente (modulaz. FM).



punto critico: insensibilità

molto + sensibile a quella lineare/diretta

molto + semplice da leggere nel grafico

tramite rivelaz. coerente (LOCK IN)

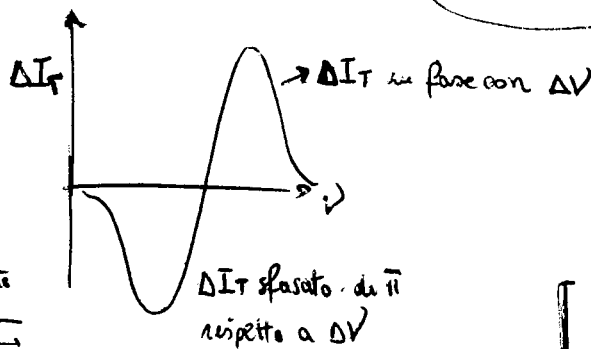
posso estrarre anche segnali molto

picchi numerosi nel rumore

(vedi schema
realizzativo)

La modulaz. FM, attraversando il profilo di trasmissione, si trasforma in
modulaz. AM. - L'ampiezza dell'AM dipende dalla PENDENZA PRO LA VITA

\Rightarrow si ottiene PROFILO DI DISPERSIONE o la "DERIVATA PRIMA"



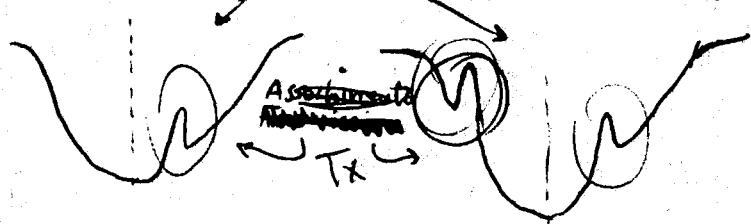
Poi la curva
 $T(\nu)$ si ottiene
integrando la
curva o
derivata prima

EFFETTO DOPPLER NELLA SPETTROSCOPIA

→ l'interaz. fra atomi e fascio laser
 avviene a una frequenza \neq ,
 spostata da quella centrale della
 transizione

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{v}{c}$$

single fascio o doppio fascio (contropropagante)



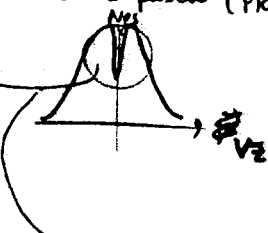
■ Per eliminare il collisionale, posso ↓ Pressione

■ Per eliminare il Doppler (senza abbassare T) come faccio? ⇒ spettroscopia saturata

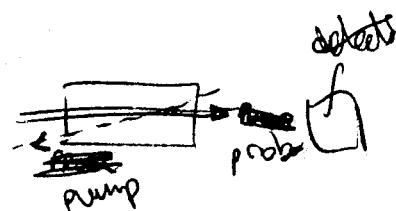
Pump & probe: RNP: satura la riga di assorbimento ($\nu_L = \nu_0$)

e un secondo fascio (PROBE) misura la riga saturata

questa riga
non subisce
allargamento
Doppler



la doppia interazione
con le stesse molecole
($\nu_L = \nu_0$) ELIMINA
L'ALLARGAM. DOPPLER



Ⓢ Per fare ancora meglio, posso
modulare il probe a FTR ⇒ LOCK-IN.

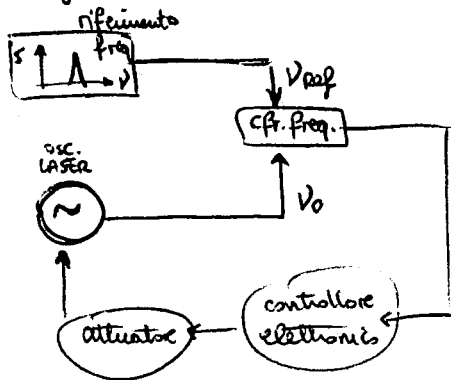
riga saturata molto
stretta

STABILIZZAZIONE IN FREQUENZA

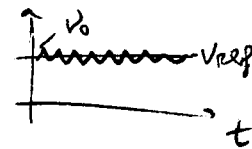
FRINGE-SIDE LOCKING ①

POUND DREVER ②

schema generale:



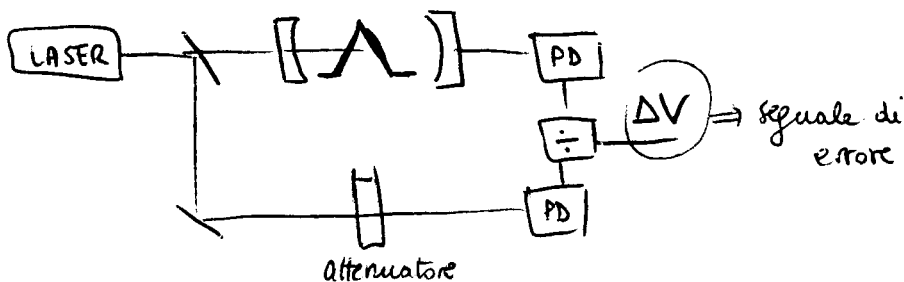
in questo modo la mia ν_0 balla intorno a ν_{ref}
 ma non fa deriva



① FRINGE SIDE LOCKING

Retto F-P e reazione negativa
 che agisce su attuatore di freq.

(il modo da mantenere T costante)



$$\Delta \bar{\nu} = \text{avv. chiuso} = \frac{\Delta V}{P_{dt \rightarrow \Delta V} \times [1 + G_{loop}]} \propto \Delta f = \nu - \nu^*$$

VELOCIMETRI OTTICI

Effetto Doppler sui fasci laser

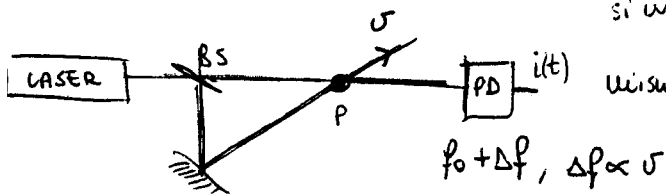
LASER
 $v = c/\lambda$

$$v_{obs} = \left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot v \quad \left(\begin{array}{l} \text{la frequenza ottica osservata è minore se l'oggetto} \\ \text{si allontana.} \end{array}\right)$$

Poiché $v \ll c$, lo spostamento Doppler: $\left[\Delta v = (v - v_{obs}) = \frac{v}{c} v \ll v \right]$
risulta molto piccolo
rispetto alla freq. ottica

Metodo Eterodina per velocimetria

Per rivelare Δf di qualche MHz sul fascio ottico a $\approx 500 \text{ THz}$ non si usa un monocromatore o un OSA, ma è molto meglio misurare il BATTIMENTO ETERODINA con fascio di riferimento



LASER DOPPLER VELOCIMETRY (LDV)

(LDV): a rivelare senza contatto una ampia dinamica di velocità in fluidi in movimento, in particolare usata a misure di velocità di fluidi

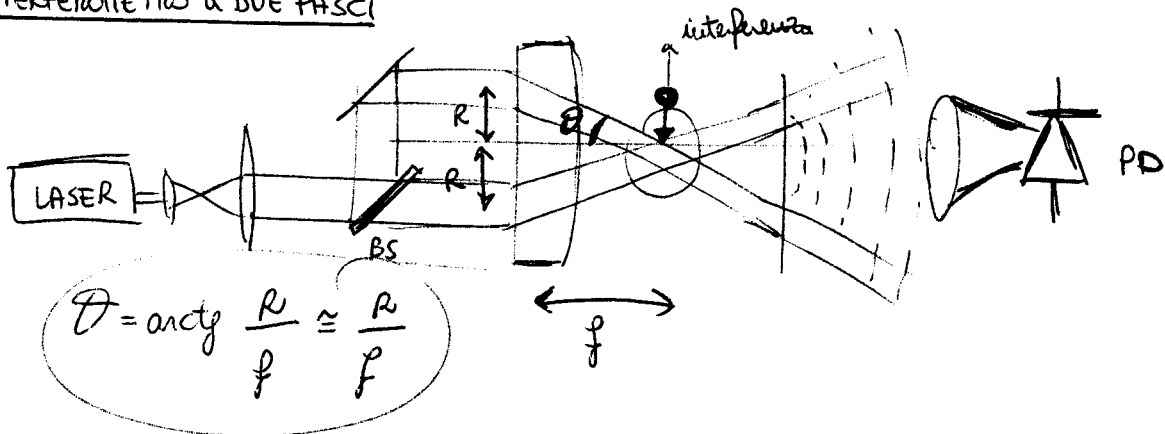
• scattering:

Rayleigh: ($r \ll \lambda$) ($\alpha \propto r/\lambda^4$) ($p(\theta) \cos^2$) (liquidi/gas) che trasportano particelle diffondenti.

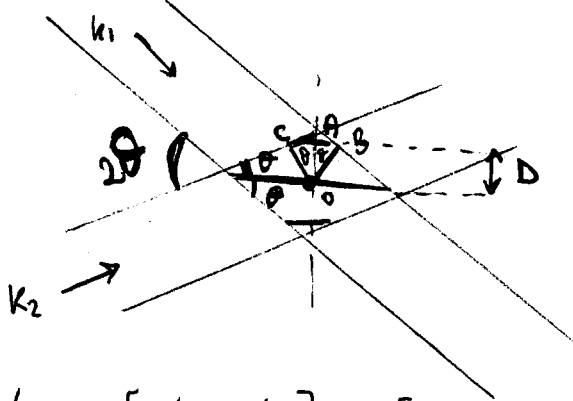
Mie ($r \gg \lambda$) ($\alpha \propto \cos^2$) ($p(\theta)$ ha max per $\theta = 0$)

• segnale di misura interpretato come: attraversamento di frange

Set-up: INTERFEROMETRO A DUE FASCI



LDV: frange interferenza



fasci collimati \rightarrow fronti d'onda circa piani con larghezza $\pm w_0$

zona interazione e larga circa: $\Delta x = \pm 2w_0 \cos \theta$

$\Delta y = \pm 2w_0 \sin \theta$

$$\Delta \phi_{0 \rightarrow A} = [\phi_2 - \phi_1]_0 - [\phi_2 - \phi_1]_A = 2\pi \quad (0 \text{ e } A \text{ spaziali di } 2\pi = D)$$

$$\text{Da } 0 \text{ a } A: \Delta \phi_2 = \phi_2(0 \rightarrow C) + \phi_2(C \rightarrow A) = (0 + k_2 CA) = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta$$

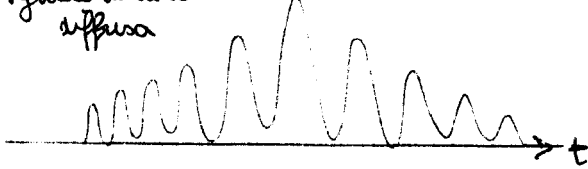
$$\Delta \phi_1 = \phi_1(0 \rightarrow B) + \phi_1(B \rightarrow A) = (0 - k_1 BA) = -\frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta$$

$$\Delta \phi_{0 \rightarrow A} = \frac{4\pi}{\lambda} D \sin \theta = 2\pi \Rightarrow D = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

LDV: legame velocità \rightarrow frequenza

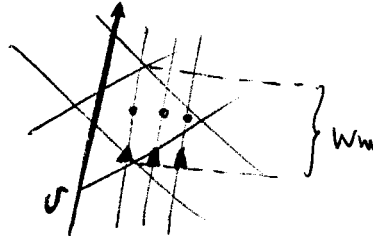
periodo del
segnale di luce
diffusa

$$T_D = D/v$$



$$f_D = \frac{1}{T_D} = \frac{v}{D} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} v \propto v$$

su un asse dei tempi la distanza tra i picchi di luce
dipende da v .



SENSIBILITÀ: $S = \frac{\Delta f}{f \Delta v} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda}$

- MISURA di f_D :
- 1) CONTATORE
 - 2) AS o FFT
 - 3) CORRELAZIONE

LDV: schemi \rightarrow single scattering
 \rightarrow back scattering

LDV: esempio

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 532 \text{ nm} \\ \theta_1 = 3^\circ \\ \theta_2 = 25^\circ \end{array} \right\} \Rightarrow S_{1, \sigma \rightarrow p} = \frac{\Delta f}{\Delta \nu} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \begin{array}{l} 250 \frac{\text{kHz}}{\text{m/s}} \\ 13 \frac{\text{MHz}}{\text{m/s}} \end{array}$$

$$\text{se } \sigma = 500 \text{ m/s} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} f_1 = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \sigma = 100 \text{ MHz} \\ f_2 = 650 \text{ MHz} \end{array} \right.$$

⇒ Misura critica per velocità alte del fluido ($v > 100 \text{ m/s}$), mentre risulta agevole e molto sensibile a misure di basse velocità.

LDV: prestazioni

→ Sensibilità: $S_{v \rightarrow f} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \approx \frac{2\theta}{\lambda}$ per $\theta \ll 1$

\rightarrow incertezza relativa: $\frac{\Delta(S)}{S} = \sqrt{\frac{u^2(\theta)}{\theta^2} + \frac{u^2(\lambda)}{\lambda^2}}$

\downarrow

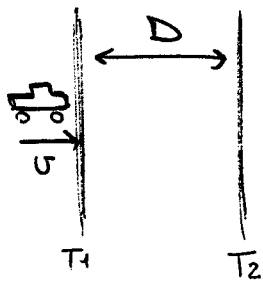
Pertanto, limite di accuratezza
 su sensibilità, e quindi su minima
 velocità, è dell'ordine di 10^{-3} .

$\left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow \frac{u(\lambda)}{\lambda} < 10^{-4}: \text{non è un problema} \\ \Rightarrow \text{invece, poiché } \theta = \arctg \frac{r}{Df} \rightarrow \text{incertezza } 10^{-3} \end{array} \right.$

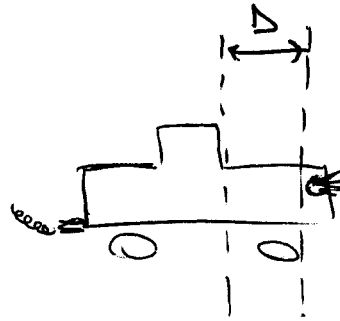
→ Misura di f_D con incertezza $< 10^{-6}$.

PIV La misura della velocità delle particelle presenti nel fluido avviene "illuminando" la zona di indagine. Si rivelano con CCD veloce le IMMAGINI DELLE PARTICELLE in varie del tempo, da cui è possibile ricavare il campo di velocità $U_i = \Delta l_i / \Delta t$

AUTOVELOX A BARRIERA OTTICA



$$V = \frac{D}{(T_2 - T_1)}$$



(vedi slide 16)

- Si rilevano i segnali retrodiffusi dal bersaglio colpito dal laser
- Misura insensibile al profilo del veicolo
- Doppia rivelazione ($V_{21,IN} \approx V_{21,OFF}$ entro 1 Km/h) permette di eliminare false letture e errori di misura

IMPORTANTE: COPPLANARITÀ ($\theta = 0$) della barriera ottica con la strada.

• strumento orizzontale misura: $V = \frac{D}{T_2 - T_1} = \left(\frac{D}{\tau_{21}} \right)$

• strumento inclinato di θ misura $V^* = \left(\frac{D}{\tau_{21}^*} \right)$, con $\tau_{21}^* = (t_2 - t_1) = \frac{d}{V} < \tau_{21}$
 (quello inclinato vuole vedere D , vede $d = D \cos \theta < D$)
 \downarrow
 (spazio + piccolo \Rightarrow velocità maggiore)

(se ben allineato e tarato, lo strumento raggiunge accuratezza $< 1\%$.)

TELELASER (TELEMETRO TOF)

$$V = \frac{(L_2 - L_1)}{T_{rep}} = \frac{c}{2} \frac{(T_2 - T_1)}{T_{rep}}$$

$$T_{rep} = T_{VA} = \frac{2 L_{MAX}}{c} \approx 8 \mu s, \text{ con } L_{MAX} \approx L_{NA} = 1200 \text{ m}$$

$\Rightarrow f_{rep} = 125 \text{ kHz}$: poiché valore elevato, è possibile fare misure di velocità ripetute e poi ricavare la media, eliminando errori misura e riducendo incertezza.