
“Misure Ottiche”

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



Velocimetri Ottici

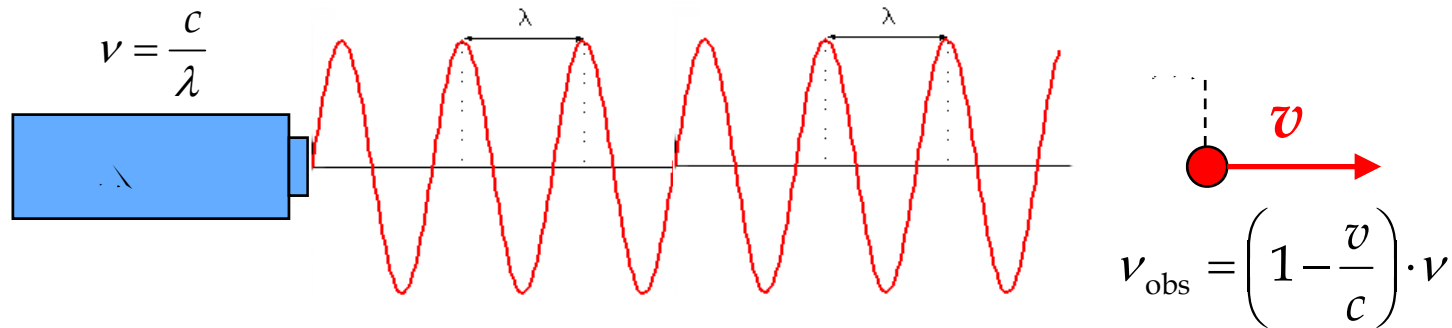
Cesare Svelto
Politecnico di Milano

Sommario

- **Principi di misura e applicazioni**
Effetto Doppler (su fasci laser)
Metodo eterodina per velocimetria (laser Doppler)
- **Misure di velocità di fluidi**
LDV (Laser Doppler Velocimetry)
PIV (Particle Image Velocimetry)
- **Autovelox**
 - a barriera ottica
 - telelaser (tempo di volo)

- *LIDAR (Light Detection And Ranging)*

Effetto Doppler (su fasci laser)



La frequenza ottica osservata (ν_{obs}) è minore di quella emessa dal laser (ν) se l'oggetto si allontana (maggiore se si avvicina)

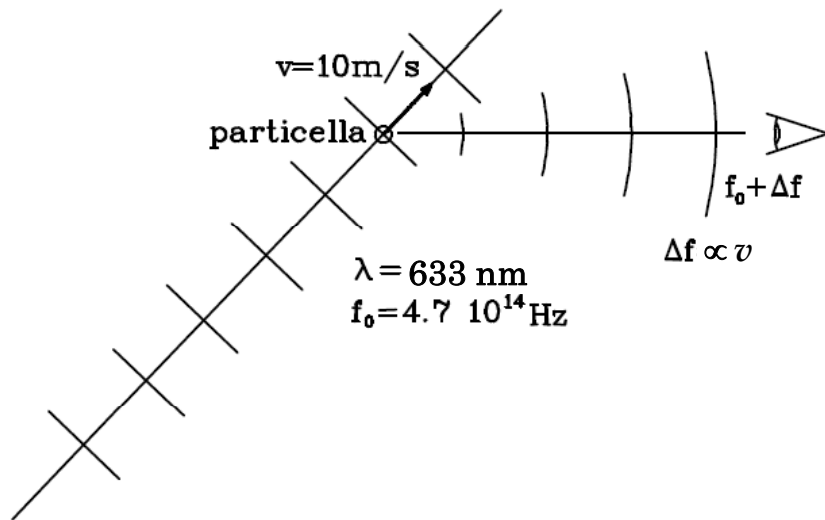
Considerando velocità $v \ll c$, lo **spostamento Doppler**

$$\Delta \nu = (\nu - \nu_{\text{obs}}) = (v/c) \cdot \nu \ll \nu$$

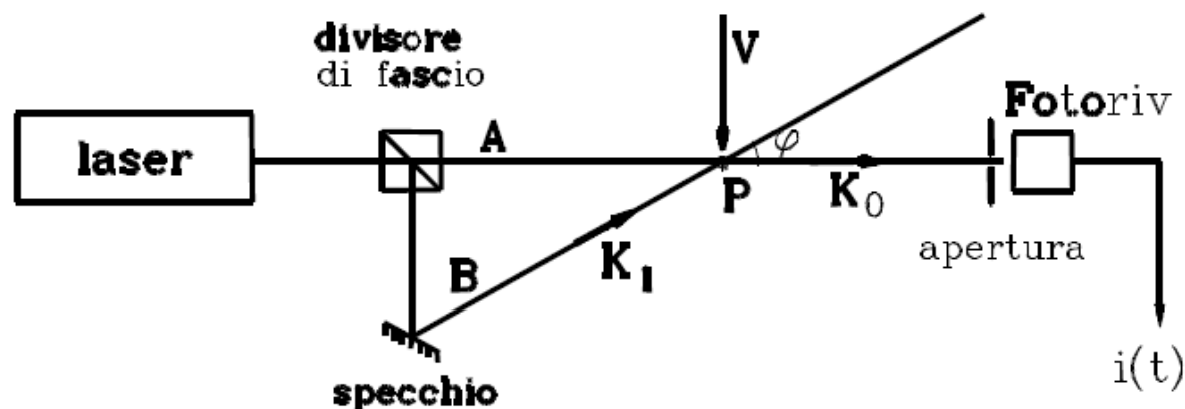
risulta molto piccolo rispetto alla frequenza ottica

[per $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ ($\nu = 500 \text{ THz}$) e $v = 1 \text{ m/s}$ $\Delta \nu \cong 1.7 \text{ MHz}$ e $\Delta \nu / \nu \cong 3.3 \times 10^{-9} \approx 3 \text{ ppb!}$]

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 assai meglio (essendo $\Delta f/f_0 = \Delta v/v \ll 1$) misurare il battimento "eterodina" con un fascio laser di riferimento

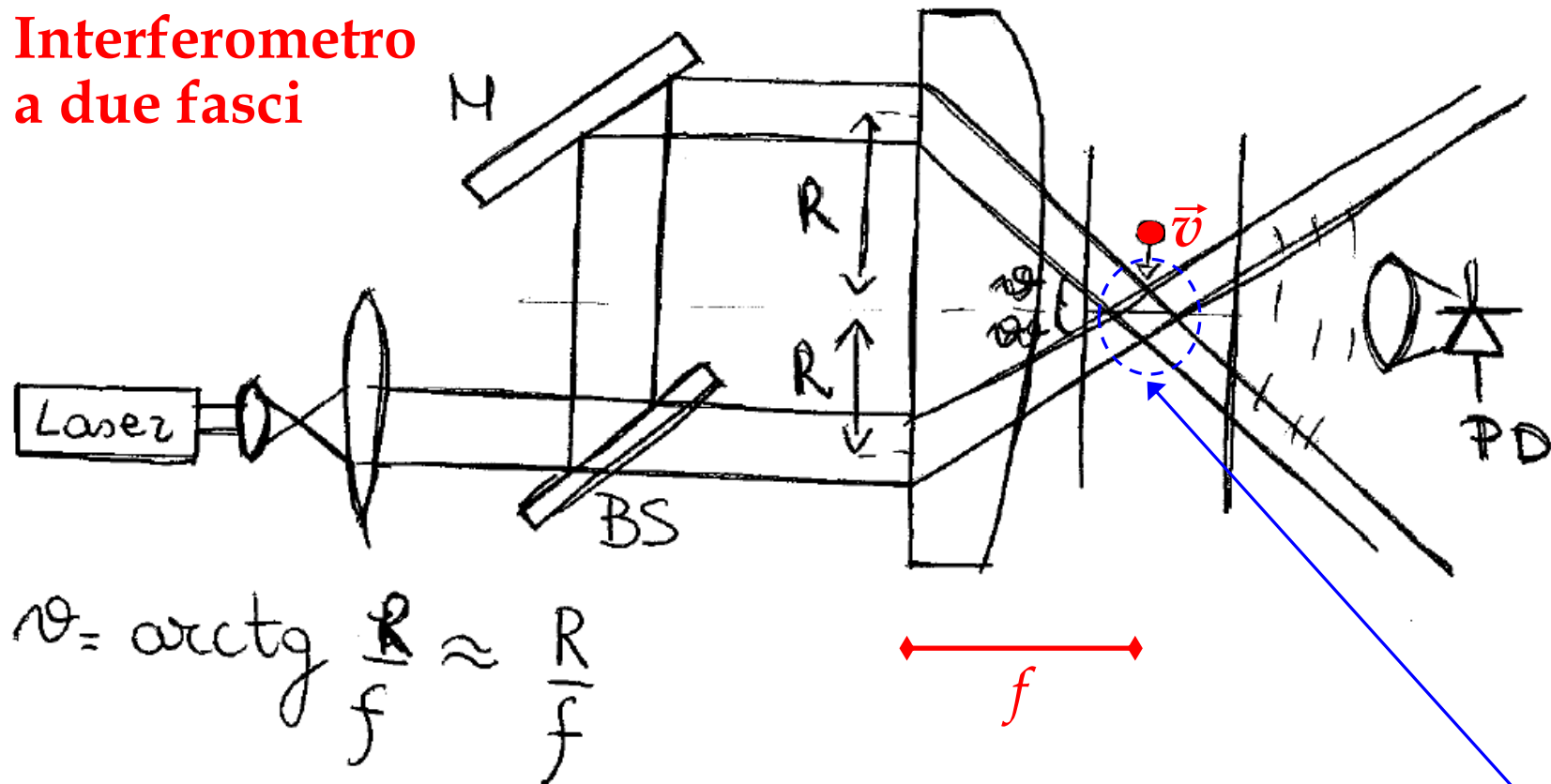


Laser Doppler Velocimetry (LDV)

- **LDV fu inventata nel 1964** ed è ancora oggi un grande successo delle misure ottiche, per rivelare senza contatto una **ampia dinamica di velocità in fluidi in movimento**
Le **tecniche LDV** sono impiegate **per misure di velocità di fluidi** (liquidi / gas) **che trasportano particelle diffondenti**, naturalmente presenti nel fluido o artificialmente "inseminate"
- La diffusione, o *scattering*, dovuta all'interazione tra il campo e.m. e le particelle può essere di due tipi:
 - **Raileigh** ($r \ll \lambda$) $\alpha_s \propto r/\lambda^4 f(\theta)$ circa costante con l'angolo
 - **Mie** ($r \approx \lambda$) $\alpha_s \approx \text{cost.}$ $f(\theta)$ max. per $\theta=0$ (*forward scatt.*)
- Il **segnale di misura** può essere interpretato come:
 - attraversamento di **frange** ←
 - effetto **Doppler**
 - sfasamento **interferometrico**

LDV: *set-up* di misura

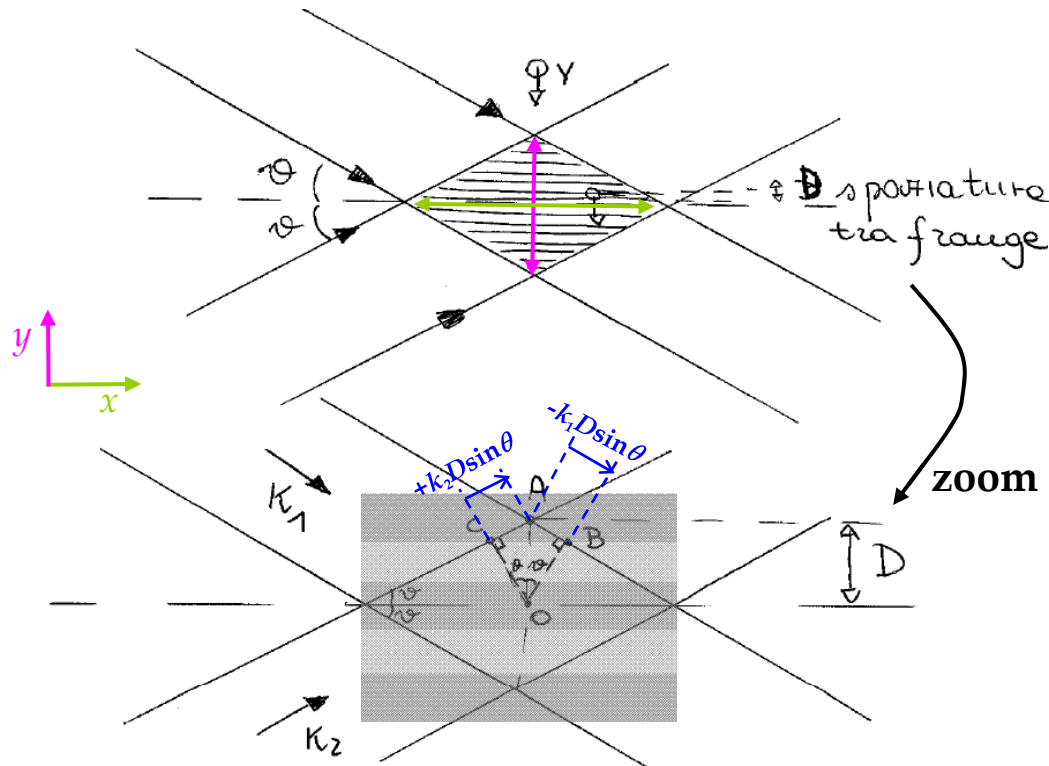
Interferometro a due fasci



$$\theta = \arctg \frac{R}{f} \approx \frac{R}{f}$$

I due fasci collimati incidono fuori-asse sulla lente e vengono focalizzati a distanza f dalla lente in una **regione di interferenza**
esempio: $R=0.5\text{cm}$ e $f=250\text{mm} \rightarrow \theta \approx 20\text{mrad} = 1.15^\circ \approx 1\text{deg}$

LDV: frange di interferenza



fasci collimati
 → fronti d'onda
 circa piani con
 largh. std. $\pm w_0$

la zona di
 interazione
 è larga circa

$$\Delta X = \pm 2w_0 \cdot \cos \theta$$

$$\Delta Y = \pm 2w_0 \cdot \sin \theta$$

$$\Delta \Phi_{(O \rightarrow A)} = [\Phi_2 - \Phi_1]_{(O)} - [\Phi_2 - \Phi_1]_{(A)} = 2\pi \quad \text{spaziatura } D \text{ tra frange luce/buio}$$

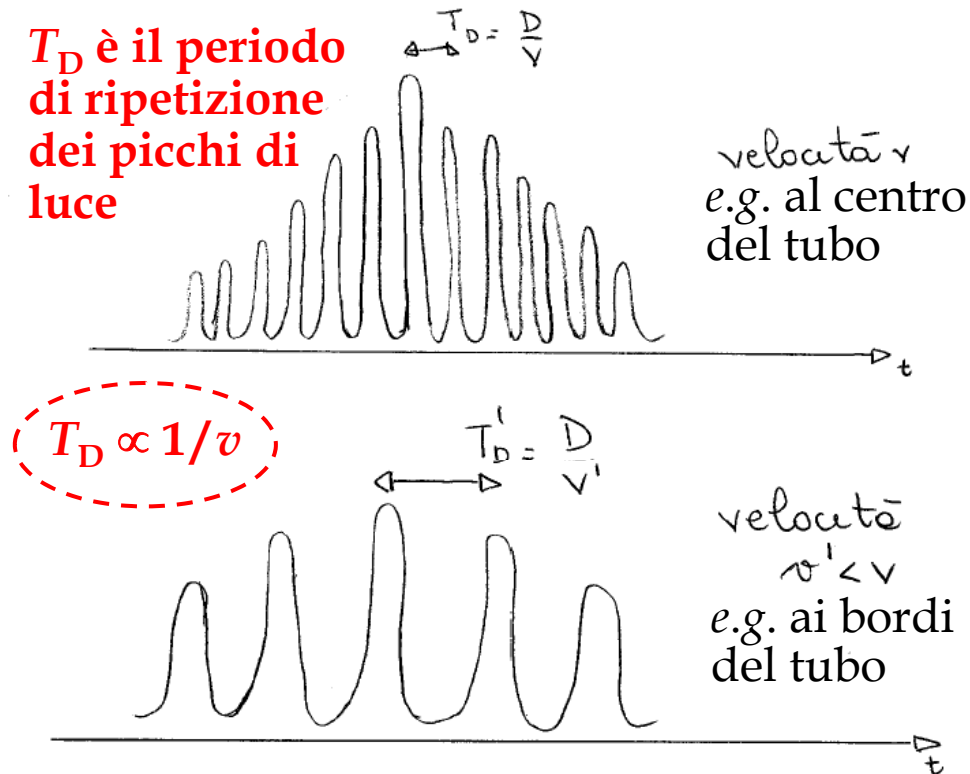
$$\text{Da } O \text{ ad } A: \Delta \Phi_2 = \Phi_{2(O \rightarrow C)} + \Phi_{2(C \rightarrow A)} \quad \text{e} \quad \Delta \Phi_1 = \Phi_{1(O \rightarrow B)} + \Phi_{1(B \rightarrow A)}$$

$$\Delta \Phi_2 = (0 + k_2 \underline{CA}) = +(2\pi/\lambda) D \sin \theta \quad \text{e} \quad \Delta \Phi_1 = (0 - k_1 \underline{BA}) = -(2\pi/\lambda) D \sin \theta$$

$$\Delta \Phi_{(O \rightarrow A)} = \Delta \Phi_2 - \Delta \Phi_1 = 2 \cdot (2\pi/\lambda) D \sin \theta = 2\pi \quad \Rightarrow$$

$$D = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

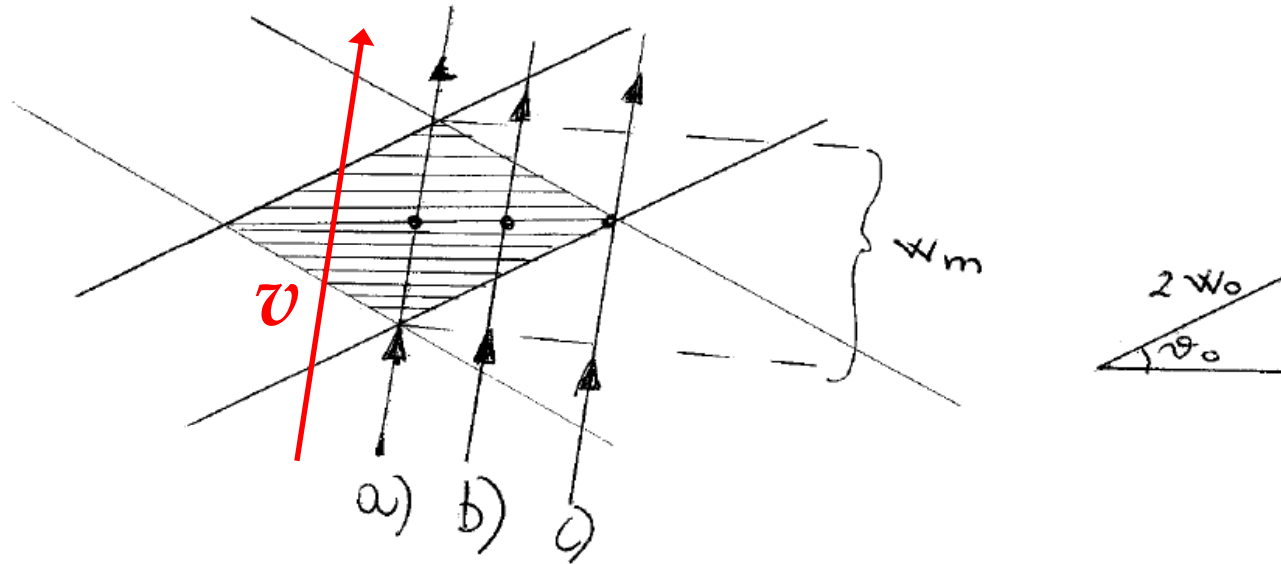
LDV: legame velocità \rightarrow frequenza



Lo spessore della zona attraversata varia con la posizione della linea di attraversamento (nella zona illuminata) ma la **distanza tra luce-buio rimane costante** e pari a D in direzione ortogonale alla zona di interferenza. Su un asse dei tempi la **distanza tra i picchi di luce dipende da v**

Il profilo del fascio ottico, attraversato dalle particelle, è di tipo gaussiano e dunque **l'intensità della luce diffusa varia con la posizione**. Ad ogni modo la frequenza dell'alternanza luce-buio dipende solo dalla distanza tra le frange e dalla velocità $f_D \propto v$

LDV: periodo e frequenza del segnale



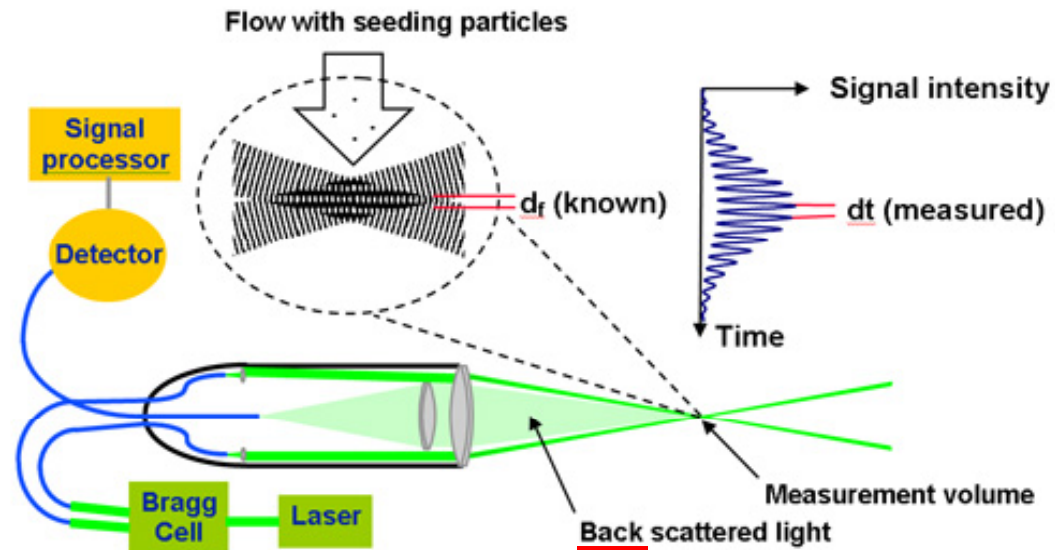
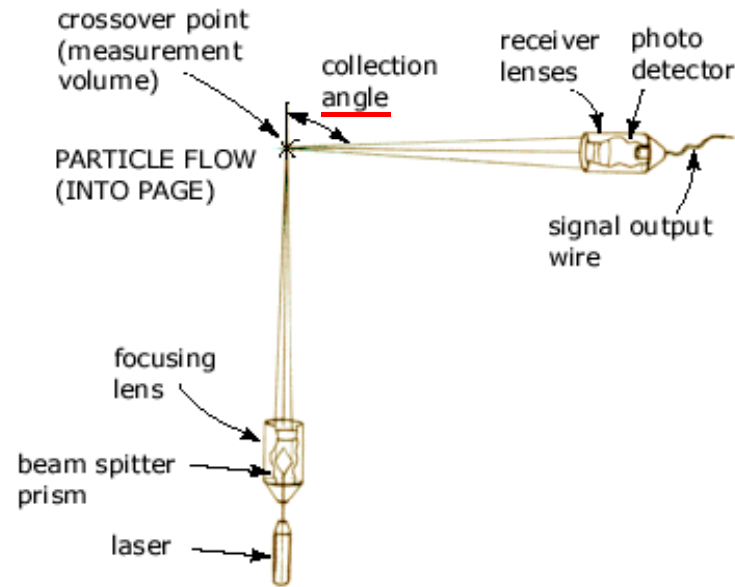
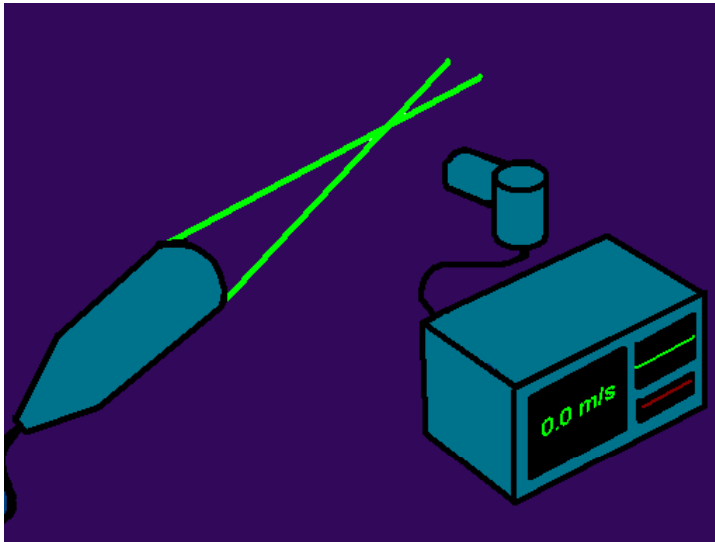
$T_D = D / v$ periodo del segnale di luce diffusa (luce-buio)

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

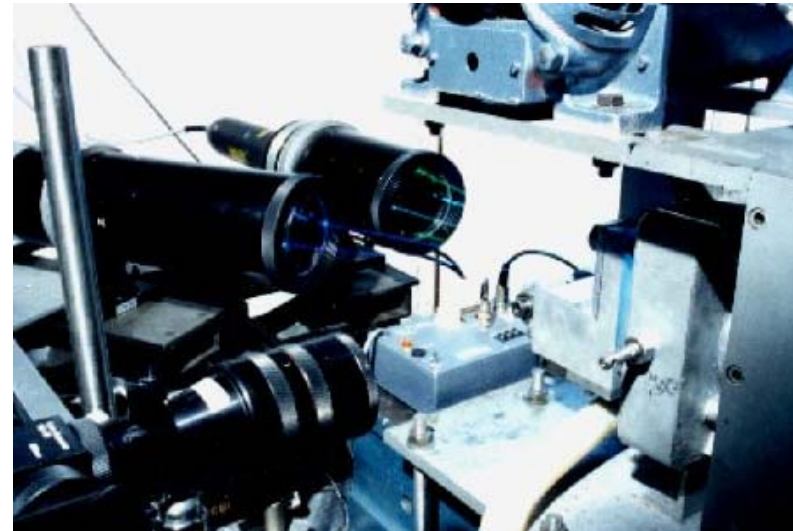
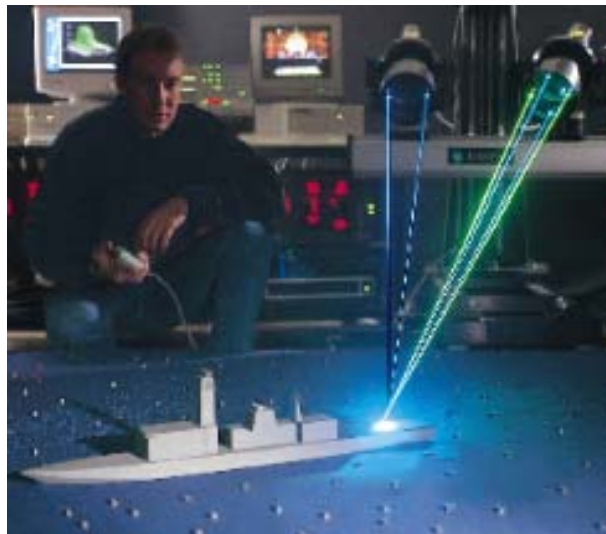
SENSIBILITA' della misura: $S_{f \leftarrow v} = \Delta f / \Delta v = 2 \sin \theta / \lambda$ (Hz/ms⁻¹)

Misura di f_D : 1) contatore; 2) AS a FFT; 3) correlazione 9/20

LDV: schemi (*angle_scatt.* e *back_scatt.*)



LDV: foto sistemi LDV in 3D



LDV: esempio pratico

$\lambda = 532 \text{ nm}$ (Nd:YAG duplicato)

$\theta_1 = 3^\circ$ ($\approx 0.05 \text{ rad}$) $\Rightarrow S_{1, v \rightarrow f} \approx 200 \frac{\text{kHz}}{\text{m/s}}$

$\theta_2 = 20^\circ$ ($\approx 0.35 \text{ rad}$) $\Rightarrow S_{2, v \rightarrow f} \approx 1.3 \frac{\text{MHz}}{\text{m/s}}$

Se si misura una velocità $v = 500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$f_{D,1} = 100 \text{ MHz}$

$f_{D,2} = 650 \text{ MHz}$

$$S = \frac{\Delta f_D}{\Delta v} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda}$$

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

con $\theta = 0.5 \text{ rad}$ ($\approx 32^\circ$) $\Rightarrow S_{v \rightarrow f} \approx 2 \frac{\text{MHz}}{\text{m/s}}$

e f_D è per $v = 1 \text{ mm/s} \Rightarrow f_D = 2 \text{ kHz}$.

Agevolmente misurabile dopo conversione A/D del segnale di luce diffusa in funzione del tempo.

LDV: prestazioni

PRESTAZIONI DI MISURA

La sensibilità del velocimetro Doppler è:

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

per cui, in termini di incertezza relativa:

$$\frac{u(S)}{S} = \sqrt{\frac{u^2(\theta)}{\theta^2} + \frac{u^2(\lambda)}{\lambda^2}}$$

e potendo considerare un solo contributo d'incertezza alla volta si ha:

$$\frac{u(S)}{S} \approx \frac{u(\theta)}{\theta}$$

oppure

$$\frac{u(S)}{S} \approx \frac{u(\lambda)}{\lambda}$$

Soltanto l'incertezza nella lunghezza d'onda non è un problema in quanto si può con-

$$v = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} f_D \approx \frac{\lambda}{2 \theta} f_D$$

scere λ con incertezza relativa $\frac{u(\lambda)}{\lambda} < 10^{-4}$. Invece essendo

$$\theta = \arctg \frac{r}{f} \approx \frac{r}{f}$$

\rightarrow disassamento del fascio nella lente
 \rightarrow focale della lente

mentre f può essere creata con incertezza di 10^{-4} , il valore di r può essere mantenuto con incertezza relativa di qualche parte per mille (a causa della instabilità a lungo termine dei componenti meccanici).

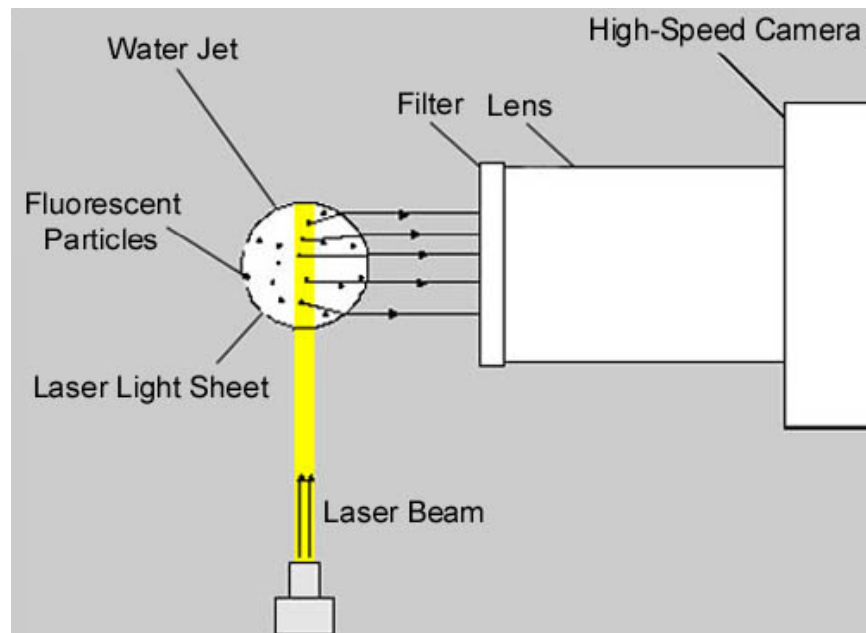
Pertanto un limite di accuratezza nel coefficiente di sensibilità, e naturalmente sulla conseguente misura di velocità, può essere nell'ordine di 10^{-3} .

La misura della frequenza f_D naturalmente si può fare con incertezza anche minore di 10^{-6}

(13)

PIV (solo il "principio" di misura)

La misura della velocità delle particelle presenti nel fluido avviene "illuminando" la zona d'indagine, con luce laser o comunque con flash ultrarapidi



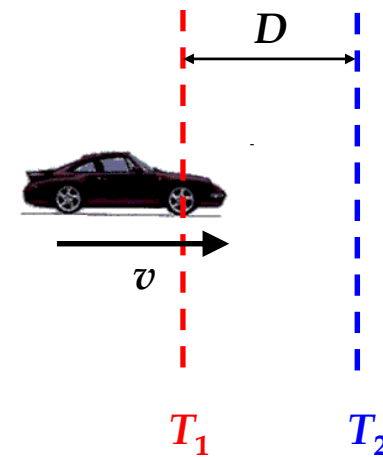
Si rivelano quindi con un CCD veloce le **immagini delle particelle in funzione del tempo**, da cui è possibile ricostruire il profilo spaziale (campo) di velocità: $v_i = \Delta l_i / \Delta t$

Autovelox a barriera ottica (es. 104 C2)



barriera ottica

$$D = 0.5 \text{ m}$$



$$v = D / (T_2 - T_1) = D / \tau_{21}$$

Es. $v = 150 \text{ km/h}$ $\tau_{21} = 12 \text{ ms}$

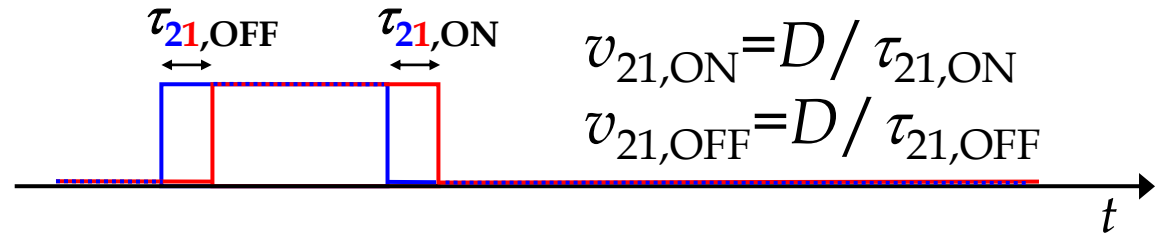
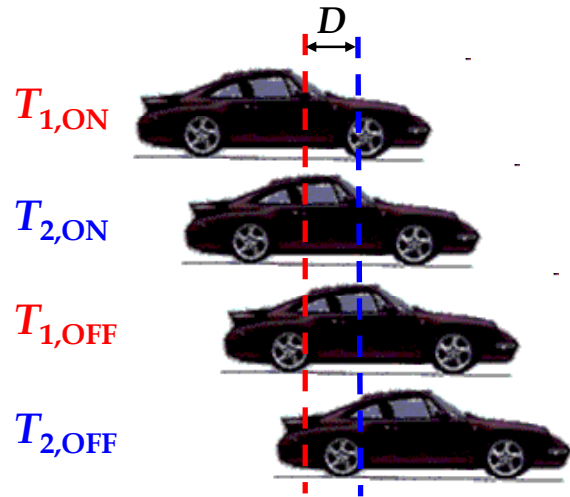
$\Delta \tau_{21} \cong 1 \mu\text{s}$ $\Delta v = -v / (\tau_{21})^2 \cdot \Delta \tau_{21} \cong 1 \text{ km/h}$

Rilevazione con laser NIR (classe 1)

Ripresa TARGA con foto/video

Non intercettabile/disturbabile 15/20

Autovelox a barriera ottica (es. 104 C2)



$$v_{21,ON} = D / \tau_{21,ON}$$

$$v_{21,OFF} = D / \tau_{21,OFF}$$

La misura risulta insensibile al profilo del veicolo e la doppia rilevazione ($v_{21,IN} \cong v_{21,OFF}$ entro 1 km/h) permette di eliminare false letture ed errori di misura

Si rilevano i segnali retrodiffusi dal bersaglio colpito dai laser

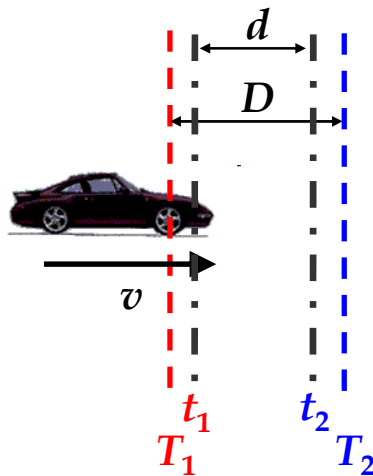


Autovelox a barriera ottica (es. 104 C2)

E' importante la **complanarità** ($\theta_{\text{Orizz.}} = \theta = 0$) della barriera ottica con la strada e anche la **taratura** (necessaria ogni anno) dello strumento

orizzontale vs. inclinato

$$d = D \cdot \cos \theta < D$$



Lo strumento orizzontale misura

$$v = v_{21} = D / (T_2 - T_1) = D / \tau_{21}$$

ma se è inclinato di θ si misura

$$\tau_{21}^* = (t_2 - t_1) = d / v < \tau_{21} \text{ e dunque}$$

$$v^* = D / \tau_{21}^* = v \cdot D / d = v / \cos \theta > v$$

Un disallineamento barriera-strada di 10° comporta un errore (per eccesso!) nella misura pari all'1.5% che corrisponde a 2.3 km/h a 150 km/h

Se ben allineato e tarato, lo strumento raggiunge accuratezze inferiori all'1% che - ahinoi! - risultano del tutto adeguate per la misura ("tolleranza 5%")

Telelaser (telemetro TOF)

Caratteristiche tecniche:

$$T_{\text{mis}} = 0.4 \text{ s}$$

$$\text{Range} = 610 \text{ m}$$

$$\lambda = 904 \text{ nm}$$

$$\theta_{\text{div}} = 3 \text{ mrad}$$

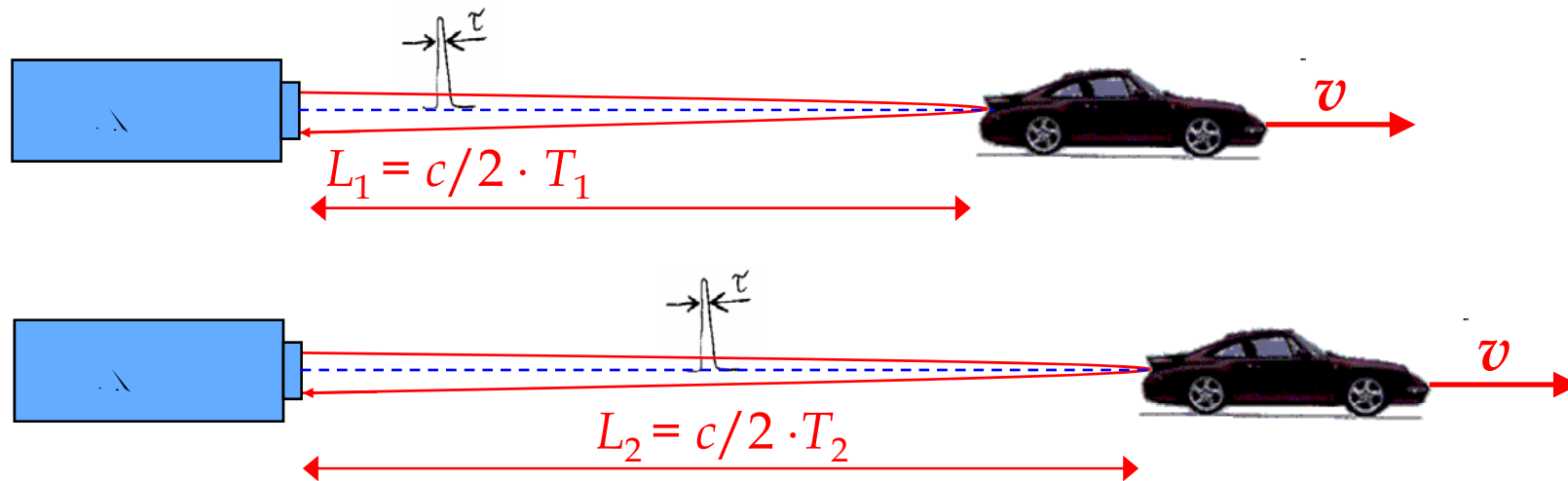
laser class 1

$$u(L) = 15 \text{ cm}$$

$$u(v) = 2 \text{ km/h}$$



Telelaser (telemetro TOF)



$$v = (L_2 - L_1) / T_{\text{rep}} = c/2 \cdot (T_2 - T_1) / T_{\text{rep}}$$

$$T_{\text{rep}} = T_{\text{NA}} = 2L_{\text{NA}} / c \approx 8 \mu\text{s} \quad (f_{\text{rep}} = 125 \text{ kHz}) \quad \text{con } L_{\text{max}} \approx L_{\text{NA}} = 1200 \text{ m}$$

Dato il valore elevato di f_{rep} , si possono eseguire misure ripetute di velocità e poi ricavarne la media (ad esempio in 0.2-0.5 s) eliminando gli errori di misura e riducendo l'incertezza

FINE del CORSO

Grazie per la vs attenzione!