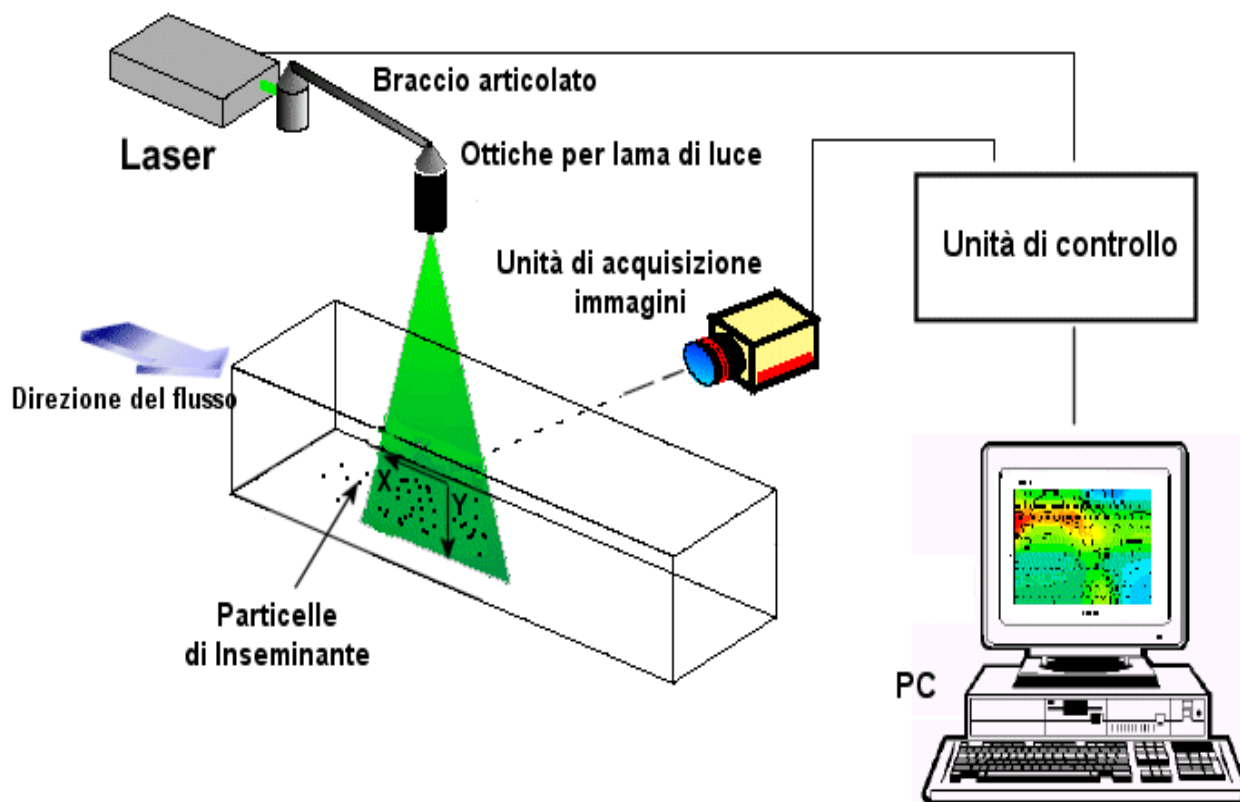


PIV: Particle Image Velocimetry

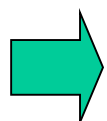
- Sistema ottico di visualizzazione di flusso 2D o 3D
- Non Intrusivo



- Un sistema PIV è costituito da più *sottosistemi*:
 - ⇒ Particelle di insemiante: seeding
 - ⇒ Sorgente di radiazione
 - ⇒ Ottiche per realizzazione lama di luce
 - ⇒ Acquisizione immagini
 - ⇒ Elaborazione immagini

Seeding

- PIV: misura indiretta di velocità
 - Si misura la velocità delle particelle, non del fluido



Il seeding deve seguire il più possibile il moto del fluido.

- Primo errore dovuto a questa approssimazione:
 - contributo al moto delle particelle dato dalle forze gravitazionali

- Dalla legge di Stokes:

- particella sferica

- fluido con basso Reynolds

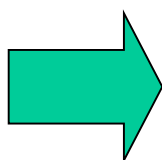
$$\mathbf{U}_g = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} \mathbf{g}$$

In analogia si può dare una stima della differenza tra la velocità particella e la velocità del fluido che si muove con accelerazione continua \mathbf{a} :

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{U}_p - \mathbf{U} = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} \mathbf{a}$$

μ = viscosità dinamica fluido

d_p = diametro particella



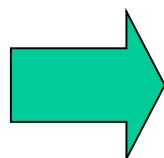
particelle di piccole dimensioni

Seeding

Cenni di teoria dello scattering

➤ Quantità di luce ridiffusa

- ⇒ Rapporto tra gli indici di rifrazione
- ⇒ Dimensioni particella
- ⇒ Forma
- ⇒ Orientazione
- ⇒ Angolo di polarizzazione
- ⇒ Angolo di osservazione



Particelle sferiche
e uniformi

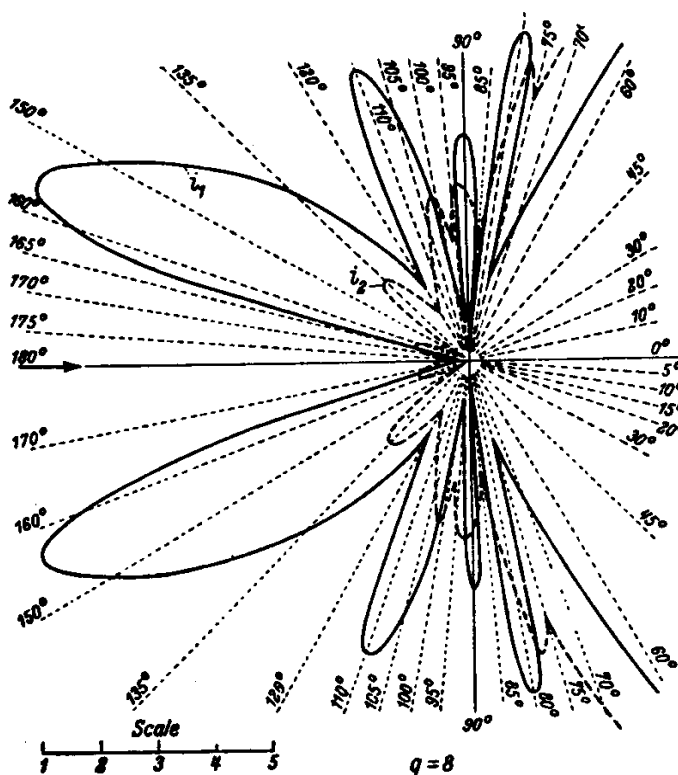
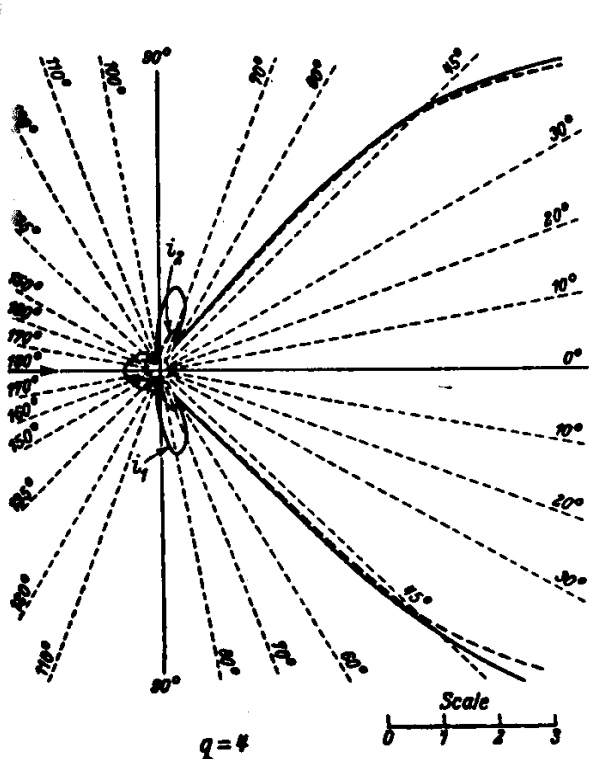
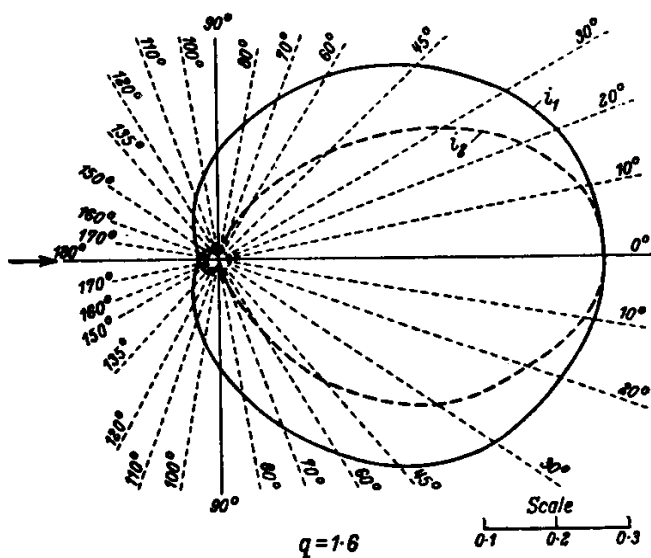
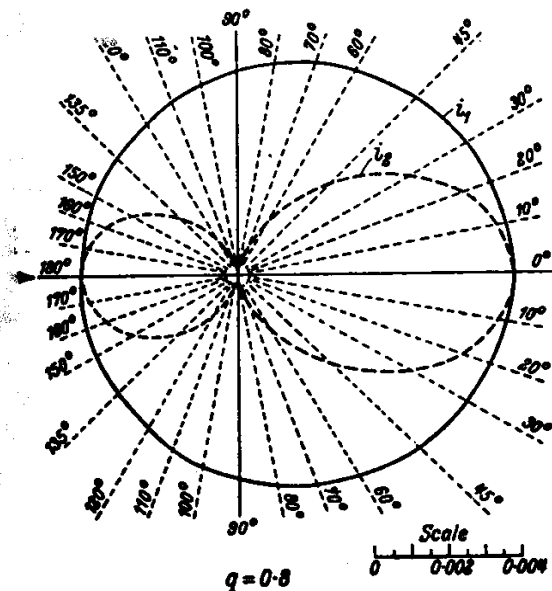
➤ La teoria riguardante la diffrazione di un'onda elettromagnetica su particolato sferico è stata elaborata da Gustav Mie (1908).

➤ Mie ottenne una soluzione rigorosa per la diffrazione di un'onda piana da particella sferica omogenea, di composizione e dimensioni qualunque, posta in un mezzo omogeneo.

Si definisce il parametro:
 q = diametro normalizzato

$$q = \frac{\pi d}{\lambda}$$

Seeding: cenni di teoria dello scattering



Distribuzione angolare dell'intensità della radiazione ridiffusa al variare di q

- $q \rightarrow 0$:
 - max $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$
 - min $\theta = 90^\circ$
- $q \gg 1$:
 - + max e min irregolari
 - aumenta forward scatter

Seeding: caratteristiche

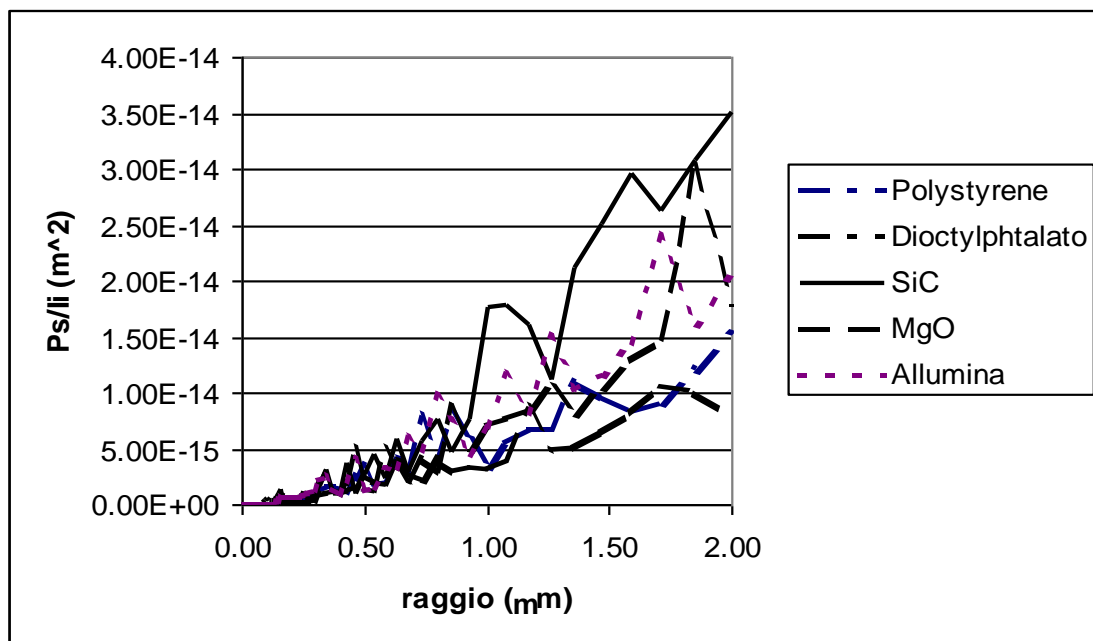
Tipo	Materiale	Diametro medio [μm]
Solidi	Polystirene	10-100
	Ossido d'alluminio	2-7
	Sfere di vetro	10-100
	Grani per rivestimenti sintetici	10-500
Liquidi	Particelle di diversi tipi d'oli	50-500
Gassosi	Bolle d'ossigeno	50-1000

Seeding per fluidi liquidi

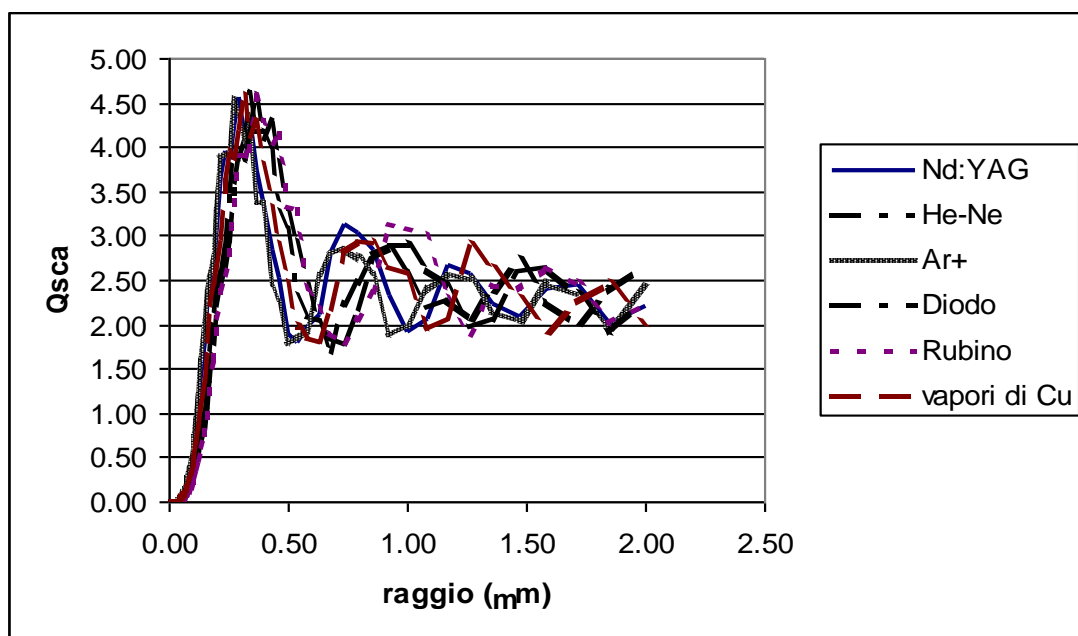
Tipo	Materiale	Diametro medio [μm]
Solidi	Polystirene	0,5-10
	Ossido d'alluminio	2-7
	Magnesio	2-5
	Micro-balloons	30-100
	Diocetylphalato	1-10
	Grani per rivestimenti sintetici	10-50
Fumo		<1
Liquidi	Particelle di diversi tipi d'olio	0.5-10

Seeding per fluidi gassosi

Proprietà delle particelle insemnanti



Andamento della potenza diffratta da particelle di differenti materiali, al variare della loro dimensione ($\lambda=532$ nm)



Andamento della efficienza di scattering al variare del raggio della particella di polystyrene per diversi valori di λ

Sorgente di radiazione

➤ Luce bianca

- ⇒ Sorgente di dimensione finita
 - ⇒ Non può essere collimata ↓
 - ⇒ Bassa densità di energia ↓
 - ⇒ Più economica ↑
 - ⇒ Meno problemi sicurezza ↑
 - ⇒ Flussi lenti
-

➤ Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

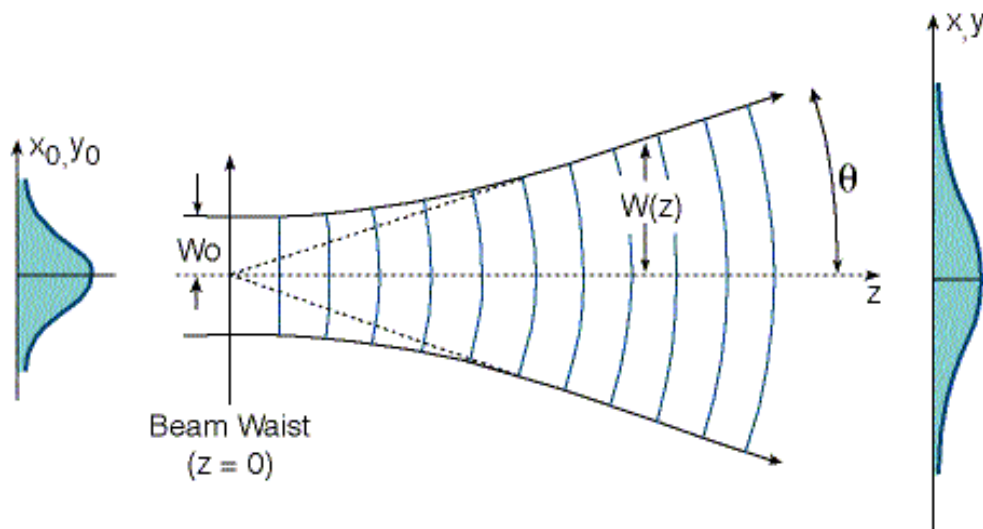
- ⇒ Sorgente puntiforme
- ⇒ Elevata densità di energia ↑
- ⇒ Luce monocromatica ↑
- ⇒ Lama di luce sottile ↑
- ⇒ Costo maggiore ↓

Un sistema laser è caratterizzato da:

- ⇒ Mezzo attivo impiegato
 - laser a gas
 - ai vapori di metallo (laser *Copper-vapor*) e agli ioni di gas nobile (laser ad Argon)
 - Laser allo stato solido
 - laser al rubino, a semiconduttore, a Nd:YAG
 - Laser a liquido
- ⇒ Modalità di emissione
 - Continuo
 - Pulsato

Sorgente di radiazione: laser

- Distribuzione di intensità di un raggio laser: andamento gaussiano avente il picco sull'asse



Propagazione di un fascio gaussiano

- Caratteristiche dei fasci gaussiani:
 - ⇒ ha il più piccolo angolo di divergenza
 - ⇒ può essere focalizzato ottenendo uno spot molto piccolo
 - ⇒ ha la massima coerenza spaziale
 - ⇒ la distribuzione gaussiana rimane gaussiana in tutto il cammino
 - ⇒ le lenti e altri dispositivi ottici trasformano il fascio gaussiano in un altro fascio gaussiano

Laser allo stato solido

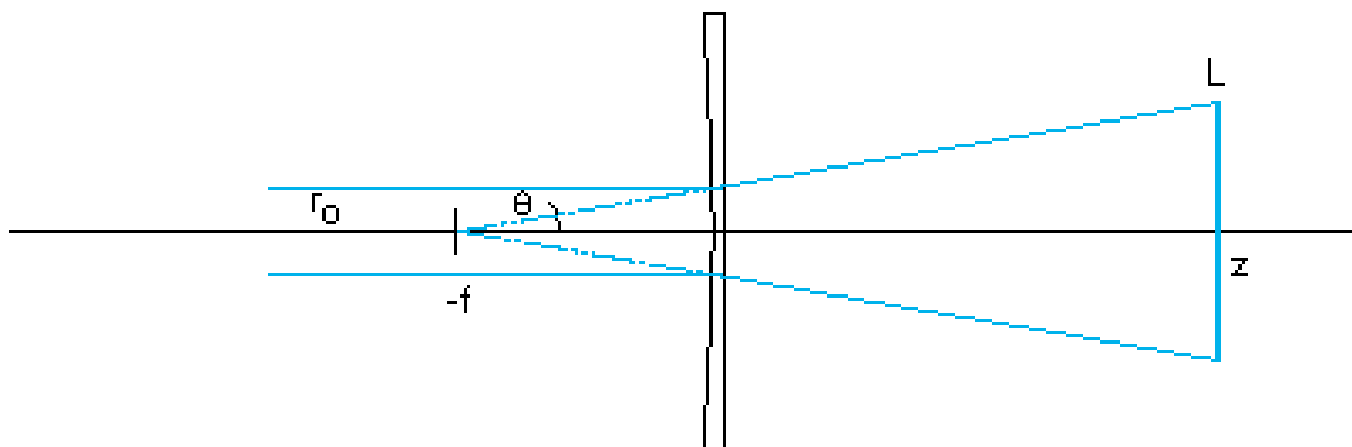
- Il laser a Nd:YAG è quello più utilizzato nelle applicazioni di PIV pulsato.
 - ⇒ La transizione laser avviene tra i livelli eccitati degli ioni di neodimio Nd^{3+} immersi nella matrice cristallina dello YAG (*yttrium-aluminum-garnet*)
- Proprietà di questo laser:
 - ⇒ buone proprietà meccaniche e termiche,
 - ⇒ consente di avere degli impulsi ad energia piuttosto elevata, fino a decine di J per impulso (nelle applicazioni PIV sono tipicamente usati sistemi laser con energia per impulso che può variare da 10 mJ a impulso fino a diverse centinaia di mJ a impulso).
 - ⇒ I valori tipici della durata dell'impulso sono di circa 5-10 ns, nel caso in cui si utilizzi un sistema con *Q-switch*
- La lunghezza d'onda caratteristica di questa sorgente è di 1064 nm: regione dell'infrarosso.
- Nelle applicazioni PIV, la radiazione emessa è raddoppiata in frequenza, ottenendo quindi emissione di luce verde: 532 nm è la lunghezza d'onda tipica delle applicazioni PIV.
- In commercio si trovano diverse soluzioni, quali ad esempio i sistemi a doppia cavità, in modo da ottenere una piccolissima separazione temporale tra due impulsi (dell'ordine di qualche centinaio di nanosecondi), utilizzati per illuminare le particelle di seeding; in questo modo è possibile seguire efflussi molto rapidi.

Q-switch

- La tecnica del Q-switch è stata sviluppata per ottenere l'emissione di radiazione laser pulsata, con durata temporale degli impulsi breve (tipicamente dell'ordine del ns) associata ad elevata energia.
- La tecnica consiste nel variare il fattore di qualità (Q) della cavità
- In pratica il Q-switch agisce come un otturatore, che può essere aperto in modo molto rapido all'interno della cavità.
- Il “prezzo” di questa operazione consiste in una diminuzione dell'energia totale complessivamente emessa dalla cavità. Questa tecnica è utilizzata con laser allo stato solido o a gas.

Le ottiche

- Per realizzare una lama di luce occorre impiegare una lente cilindrica divergente



⇒ Lama di luce di spessore $2r_0$ e lunghezza: $L = 2\frac{r_0}{f}(z + f)$

- Se si vuol ottenere una lama più stretta si utilizza una seconda lente convergente ortogonale alla prima oppure una lente sferica
- Problemi se si usa un laser pulsato (elevata energia per impulso)
 - ⇒ elevata densità di potenza nel piano focale
 - ⇒ si rischia di bruciare le particelle
- A seconda della lunghezza d'onda bisogna fare un trattamento antiriflesso sulle ottiche usate
- Per inviare la radiazione nella zona di misura si utilizza un braccio articolato con specchi

Le ottiche

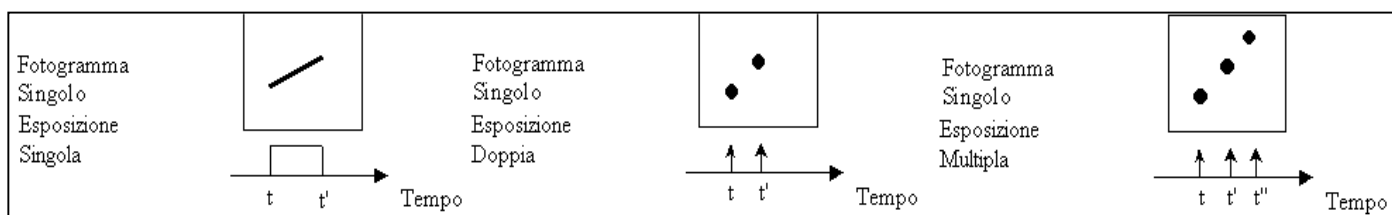
Materiali	Range di Trasmissività [nm]	Costo	Caratteristiche	Lenti sferiche	Lenti cilindriche
BK 7	380-2100	Basso	Alta trasmissività nelle regioni VIS e NIR; è il più comune vetro ottico	Piano-Convessa, Bi-Convessa, Piano-Concava, Bi-Concava	Piano-Convessa, Piano-Concava
Quarzo	185-2100	Medio	Eccellente omogeneità e bassa espansione termica; elevata resistenza a danni da laser.	Piano-Convessa, Bi-Convessa, Piano-Concava, Bi-Concava	Piano-Convessa, Piano-Concava
GRADIUM	380-2000	Medio	Vetro con indice di rifrazione variabile nella direzione dell'asse principale; presenta eccellente correzione per le aberrazioni.	Piano-Convessa	
CaF₂	170-8000	Elevato	Elevata trasmissività dal lontano UV a IR.	Piano-Convessa	Piano-Convessa, Piano-Concava
MgF₂	150-6500	Elevato	Materiale birifrangente, eccellente per applicazioni da UV a IR.	Piano-Convessa	

Sistema di acquisizione immagini

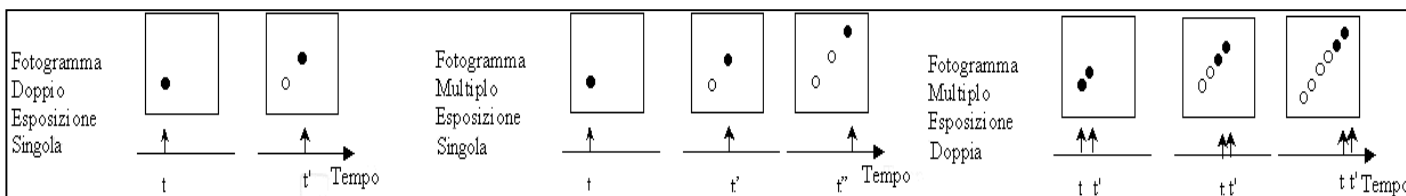
- Tecniche analogiche (film fotografico)
 - ⇒ Singolo fotogramma esposizione doppia o multipla (sorgente pulsata)
 - ⇒ Verso della velocità: *image shift*
 - ⇒ Problemi nella messa a fuoco

- Tecniche digitali (sensore a CCD)
 - ⇒ Risultati immediati
 - ⇒ Salvataggio diretto su PC e elaborazione tramite algoritmi

➤ Acquisizione a fotogramma singolo



➤ Acquisizione a fotogramma multiplo



Sensori a CCD (Charge Coupled Device)

- Materiale semiconduttore (silicio)
- Segnale fotonico in ingresso → segnale elettronico in uscita
 - ⇒ I fotoni incidenti sul sensore sono convertiti in coppie elettrone/lacuna e gli elettroni sono poi catturati dagli elettrodi dei gate del CCD. Di qui sono trasferiti ad un amplificatore di uscita, dove il segnale di carica è convertito in un segnale in tensione.
- Caratteristiche CCD:
 - ⇒ Risposta spettrale (efficienza quantica)
 - ➔ Efficienza di produzione di carica elettronica a partire dai fotoni incidenti (rapporto tra numero di fotoelettroni raccolti e numero di fotoni incidenti)
 - ⇒ Linearità di risposta
 - ➔ Segnale digitale = costante x quantità di luce incidente
 - ⇒ Capacità di raccolta di carica e saturazione
 - ➔ Full well capacity: capacità di raccolta di carica del singolo pixel
 - Dipende dalla dimensione del CCD e dalle tensioni regolate sui CCD
 - ➔ Blooming: il pixel saturato non riesce più ad accogliere carica che viene inviata ai pixel adiacenti falsando il segnale
 - ⇒ Tempo di lettura
 - ➔ *frame rate*: inverso del tempo impiegato dal CCD ad acquisire e leggere un'immagine
 - ⇒ Rapporto segnale rumore

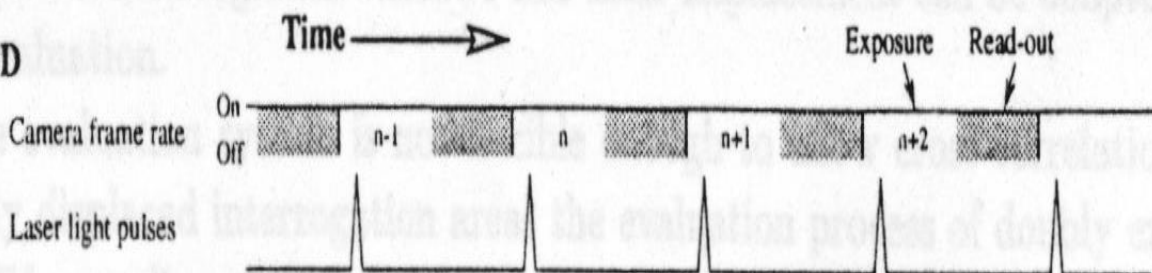
CCD Full-Frame

- Il CCD è esposto alla luce e l'informazione è accumulata contemporaneamente su tutta l'area sensibile (solo area attiva)
 - ⇒ L'informazione è letta sequenzialmente riga per riga dalla prima all'ultima.
 - ➔ Questo processo dura in genere alcuni secondi
 - ⇒ Se l'area del sensore, nel frattempo, non è protetta dal flusso incidente dei fotoni, l'immagine finale sarà affetta da **smearing**, ossia da un alone provocato dal continuo assorbimento di energia luminosa.
 - ⇒ Tale inconveniente può essere eliminato equipaggiando queste camere CCD con otturatori elettromeccanici

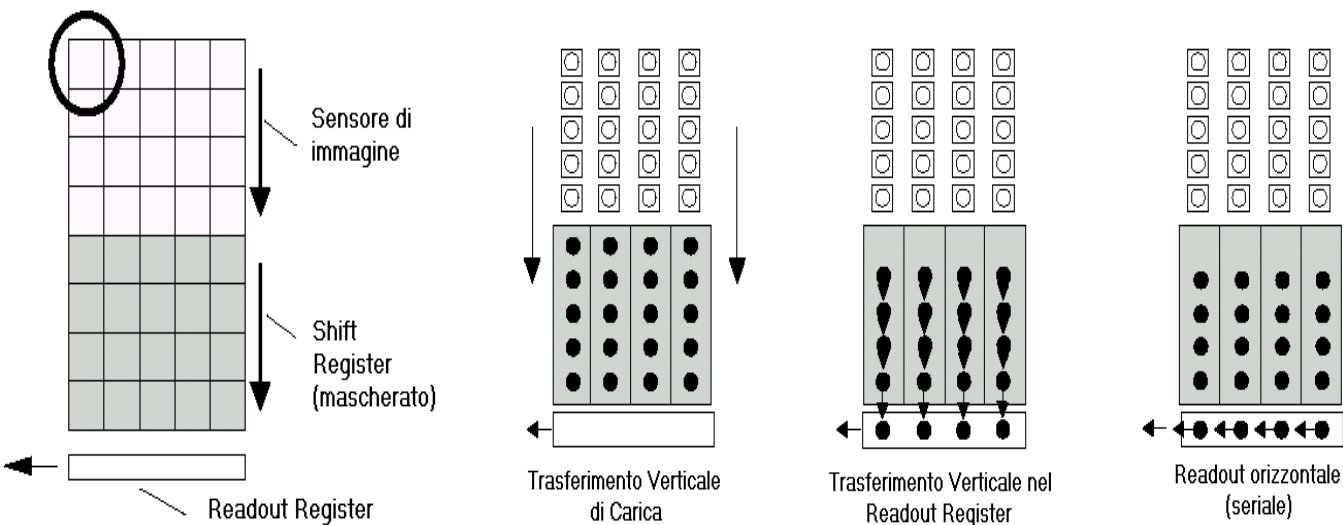
- Grande numero di pixel
 - ⇒ Il frame rate è piuttosto basso
 - ⇒ È bene acquisire un solo frame con una sola esposizione

Standard CCD

(a) Mode 1



CCD Frame Transfer

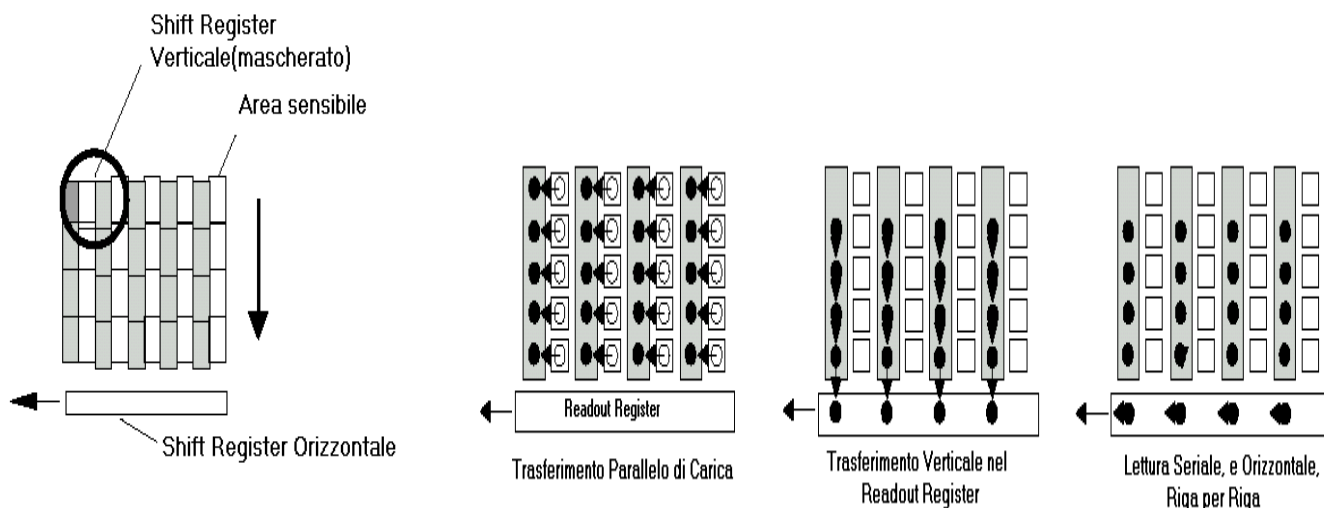


**Struttura di un CCD
frame transfer**

**Modalità di readout
di un CCD frame transfer**

- Il sensore è diviso in due parti identiche in dimensione:
 - ⇒ *array di immagine*: la luce proveniente dall'oggetto è convertita in carica pixel per pixel
 - ⇒ *array di storage (mascherato)*: la carica accumulata vi è trasferita prima di essere letta.
- Tempo di trasferimento della carica Δt_{trasf} molto rapido: 1-2 millesimi di secondo.
 - ⇒ consente una seconda esposizione entro un intervallo di tempo breve $\Delta t \geq \Delta t_{trasf}$.

CCD Interline Transfer



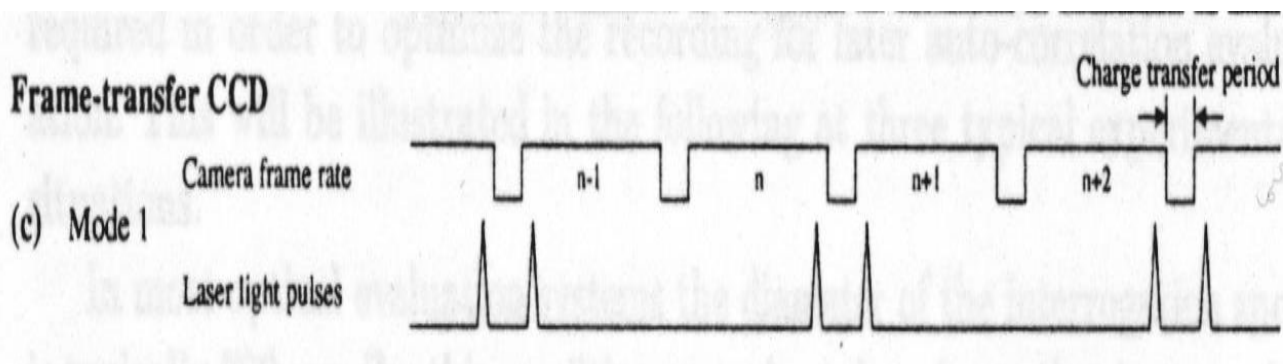
Struttura di un CCD frame transfer

Modalità di readout di un CCD frame transfer

- Registro posizionato accanto a ciascun pixel
- Alla fine del processo di integrazione, le cariche accumulate negli elementi fotosensibili sono istantaneamente trasferite nei registri verticali per poi essere trasferite, riga per riga, nel registro orizzontale di lettura del segnale di uscita del CCD.
- Lo shift delle cariche dai pixel ai registri verticali di lettura dura poco più di un milionesimo di secondo
- Si ottiene un segnale video interlacciato

CCD Frame Transfer: acquisizione immagini

- L'emissione del primo impulso laser coincide con la prima immagine
- Il secondo impulso cade all'inizio della seconda esposizione
 - ⇒ si ottengono 2 immagini consecutive rappresentanti lo spostamento delle particelle a 2 istanti di tempo successivi (*frame straddling*).



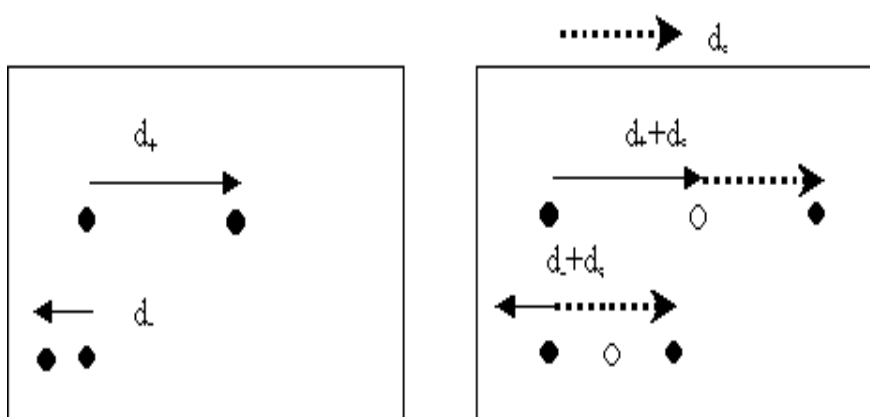
- Si possono studiare efflussi molto rapidi

Acquisizione immagini

Frame singolo / esposizione multipla

➤ Image shifting

⇒ Viene introdotto uno spostamento di quantità nota e costante all'istante della loro seconda esposizione



➤ Tecniche a più colori

⇒ Sono impiegati due impulsi di due lunghezze d'onda

Frame multiplo / esposizione singola

➤ Elimina il problema della direzione

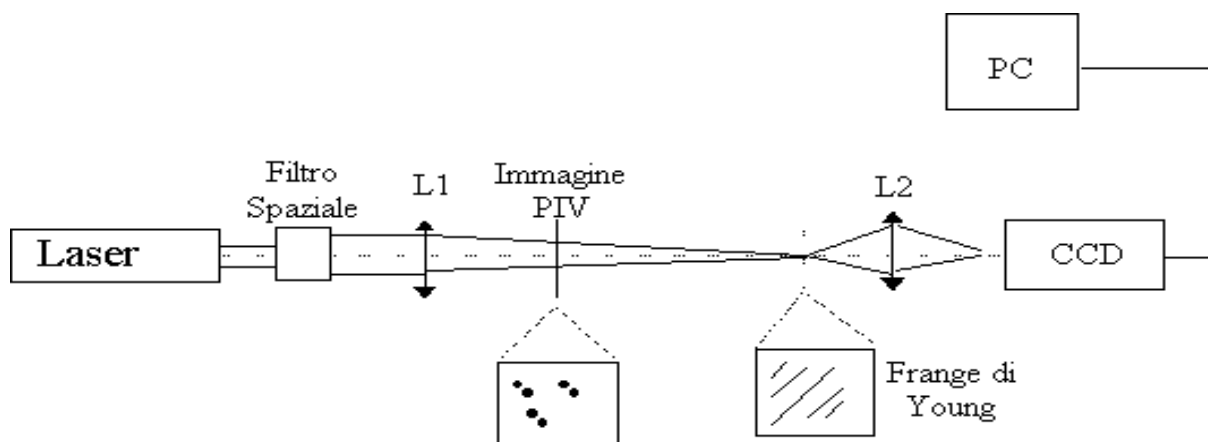
➤ Sincronizzazione tra impulsi laser e il segnale video

Elaborazione immagini

Tecniche ottiche

➤ Analisi delle frange di interferenza

- ⇒ si illumina con un laser a bassa potenza una piccola porzione del negativo dell'immagine
- ⇒ I puntini delle immagini rifletteranno la luce
- ⇒ le immagini delle particelle danno una figura di diffrazione causale se le immagini sono di particelle diverse, organizzata se sono le immagini della stessa particella spostata.
- ⇒ Interponendo un'opportuna lente è possibile creare delle frange di Young
- ⇒ La distanza delle frange è proporzionale allo spostamento delle singole particelle.
- ⇒ la direzione dello spostamento è ortogonale alla direzione delle frange.



Elaborazione immagini

Tecniche digitali

- Sono tecniche statistiche: si basano sulla valutazione della correlazione della matrice costituita dai livelli di grigio dell'immagine.

- Le immagini vengono analizzate con una scansione per finestre rettangolari e in ogni finestra deve essere accettabile l'ipotesi di moto uniforme.

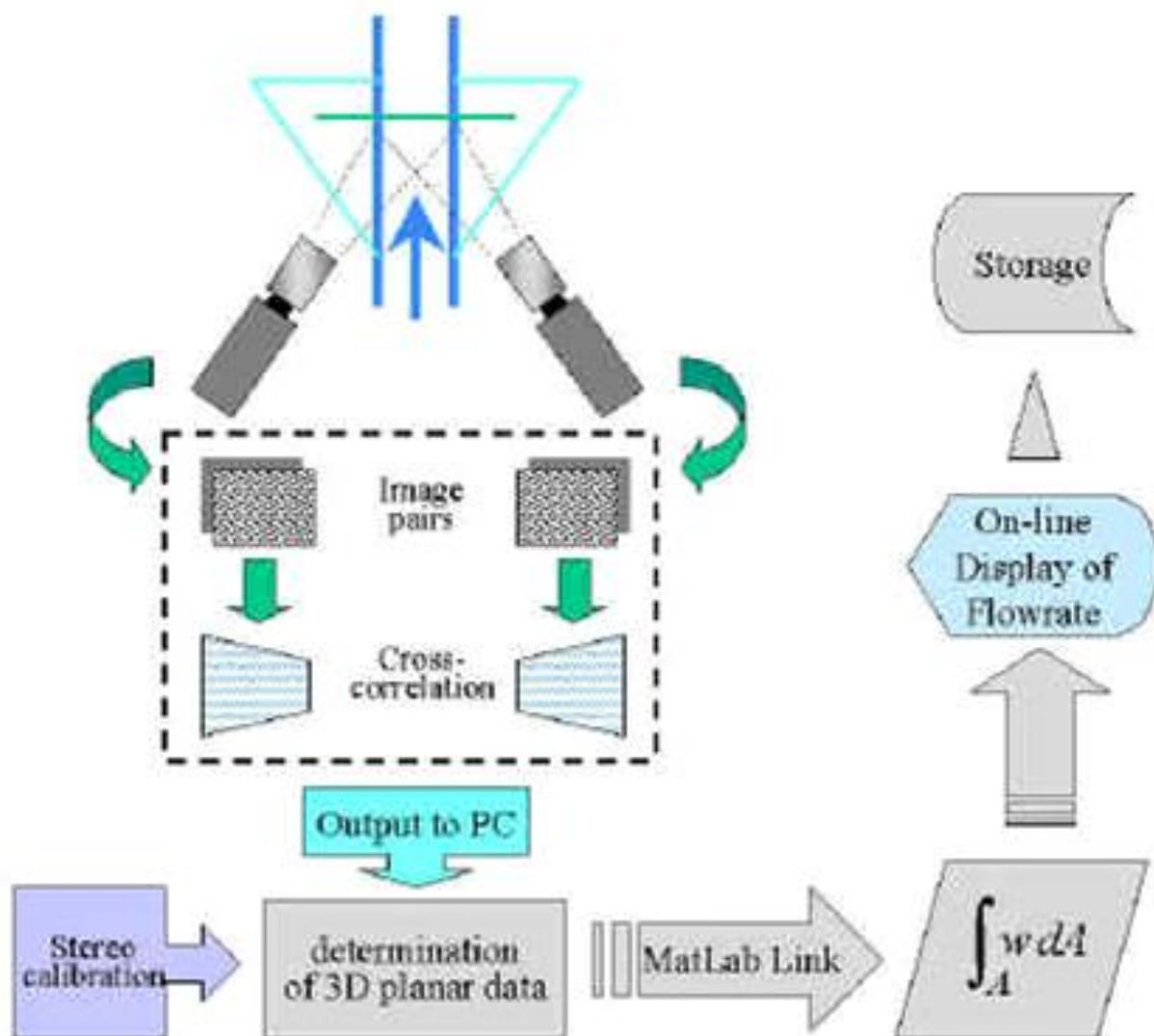
- Sui sistemi a singolo fotogramma su ogni finestra è calcolata l'autocorrelazione.
 - ⇒ Dall'analisi della matrice di autocorrelazione si possono determinare i due picchi simmetrici che corrispondono al vettore spostamento sulla singola finestra (la simmetria non consente la determinazione del verso dello spostamento).

- Nel caso di sistema a più fotogrammi si valuta la crosscorrelazione per ogni coppia di immagine.
 - ⇒ In tal caso il picco prevalente è singolo e rappresenta il vettore spostamento completo in modulo direzione e verso.

Visualizzazione 3D

➤ Stereo PIV

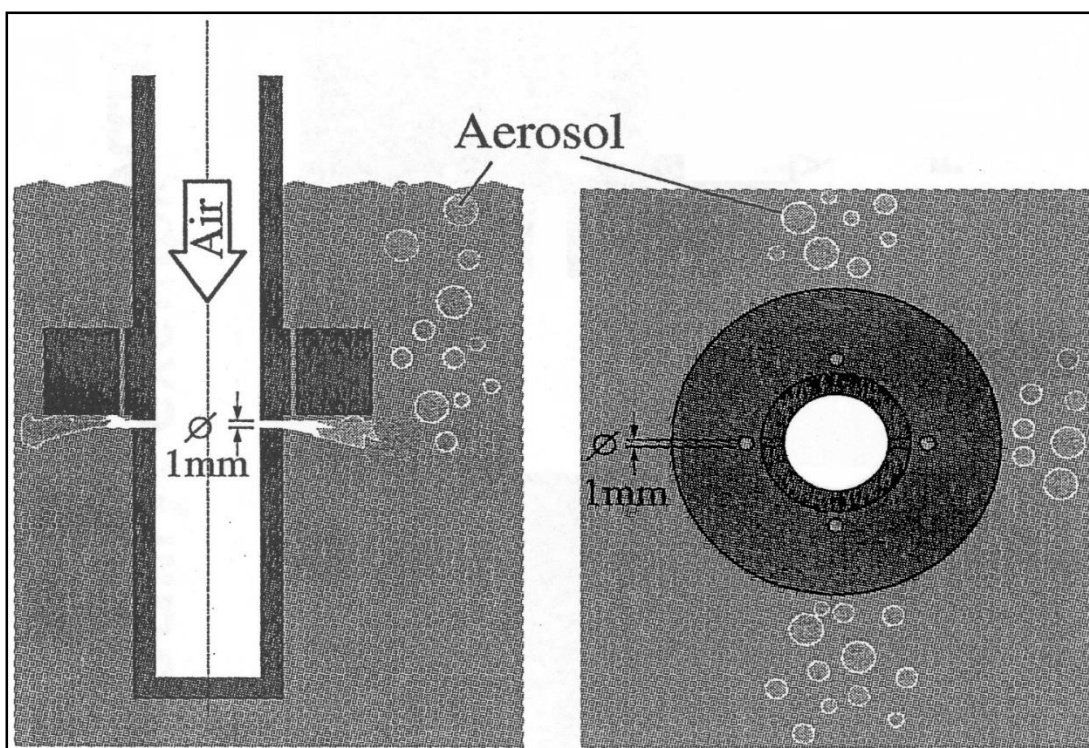
- ⇒ Due camere acquisiscono le immagini da angolature diverse.
- ⇒ Tramite opportuni algoritmi si ricostruisce il moto 3D del fluido.



➤ HPIV: Holographic Particle Image Velocimetry

Generatore di seeding

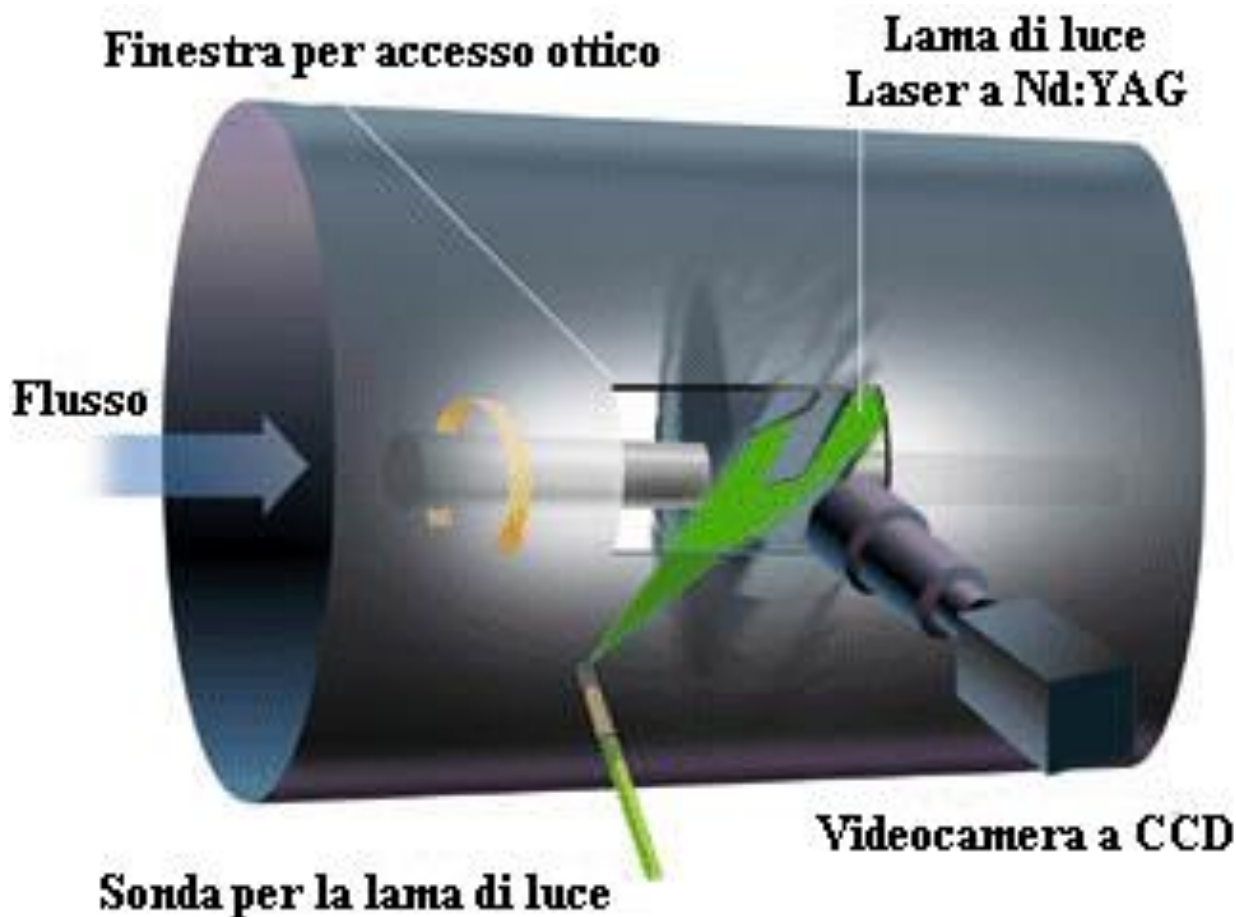
Ugello di Laskin



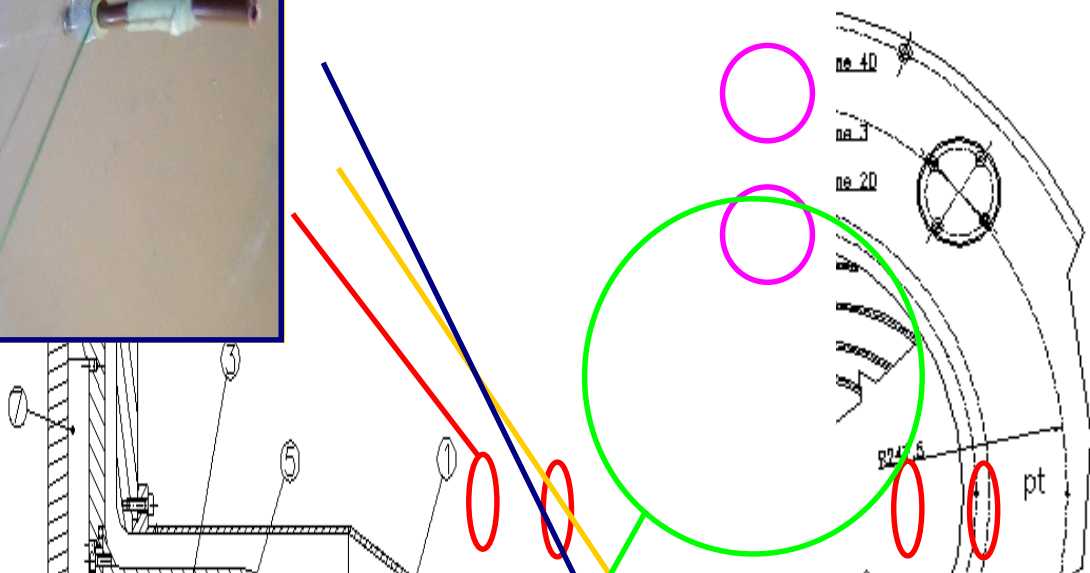
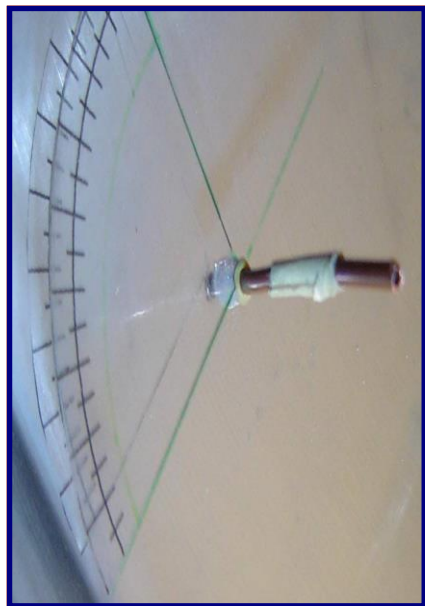
- ⇒ Inseminante: olio di oliva
- ⇒ Aria compressa immessa nella parte alta del cilindro
- ⇒ L'aria fuorisce dai 4 fori sul cilindro
- ⇒ Crea una depressione che aspira piccole particelle di olio
- ⇒ Si formano bolle d'aria che contengono particelle di olio che risalgono in superficie e raggiunto il pelo libero rilasciano il seeding

Applicazione del PIV alle turbomacchine

- Accesso ottico
- Inseminante
- Inserimento lama di luce



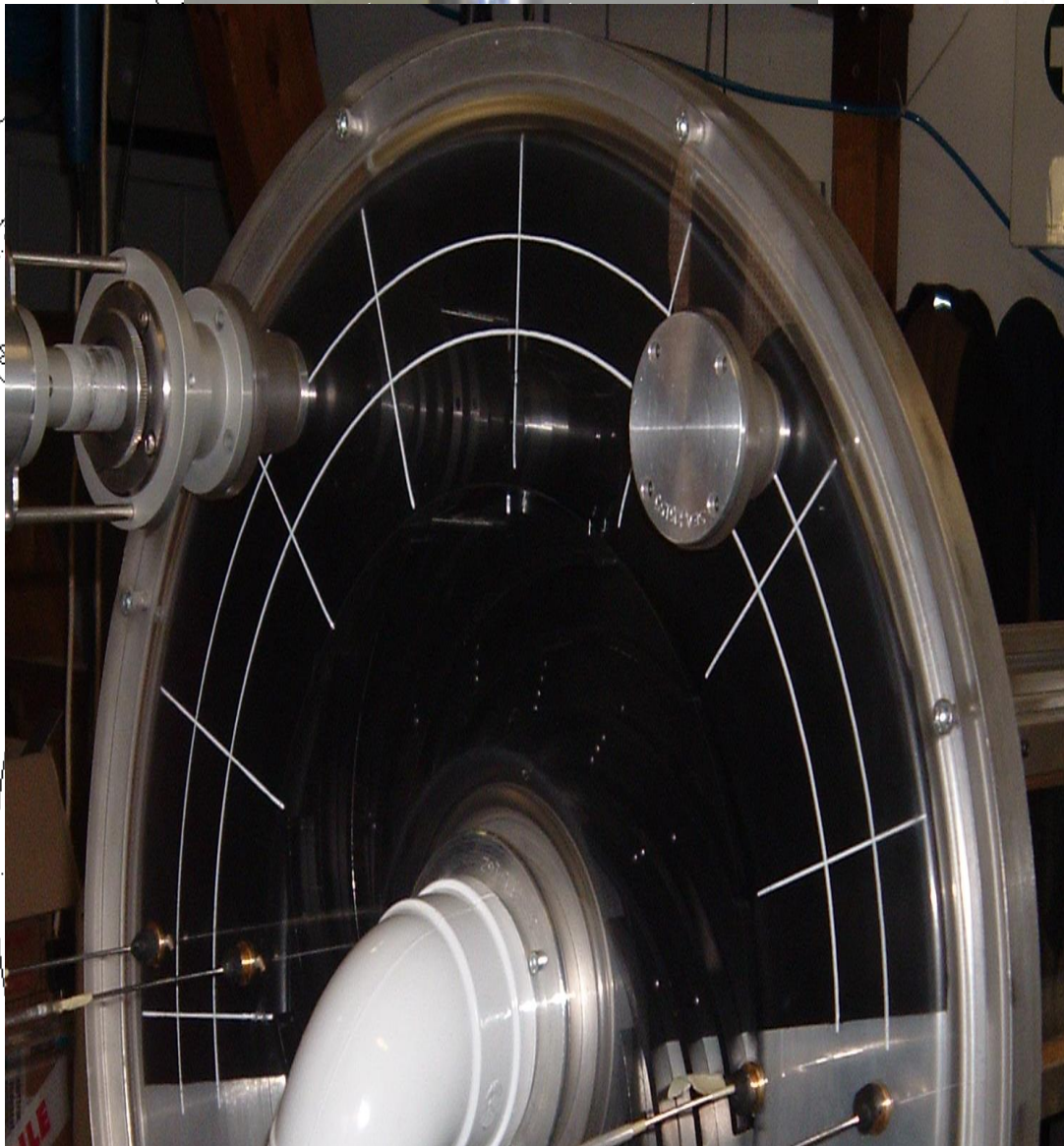
Modello realizzato



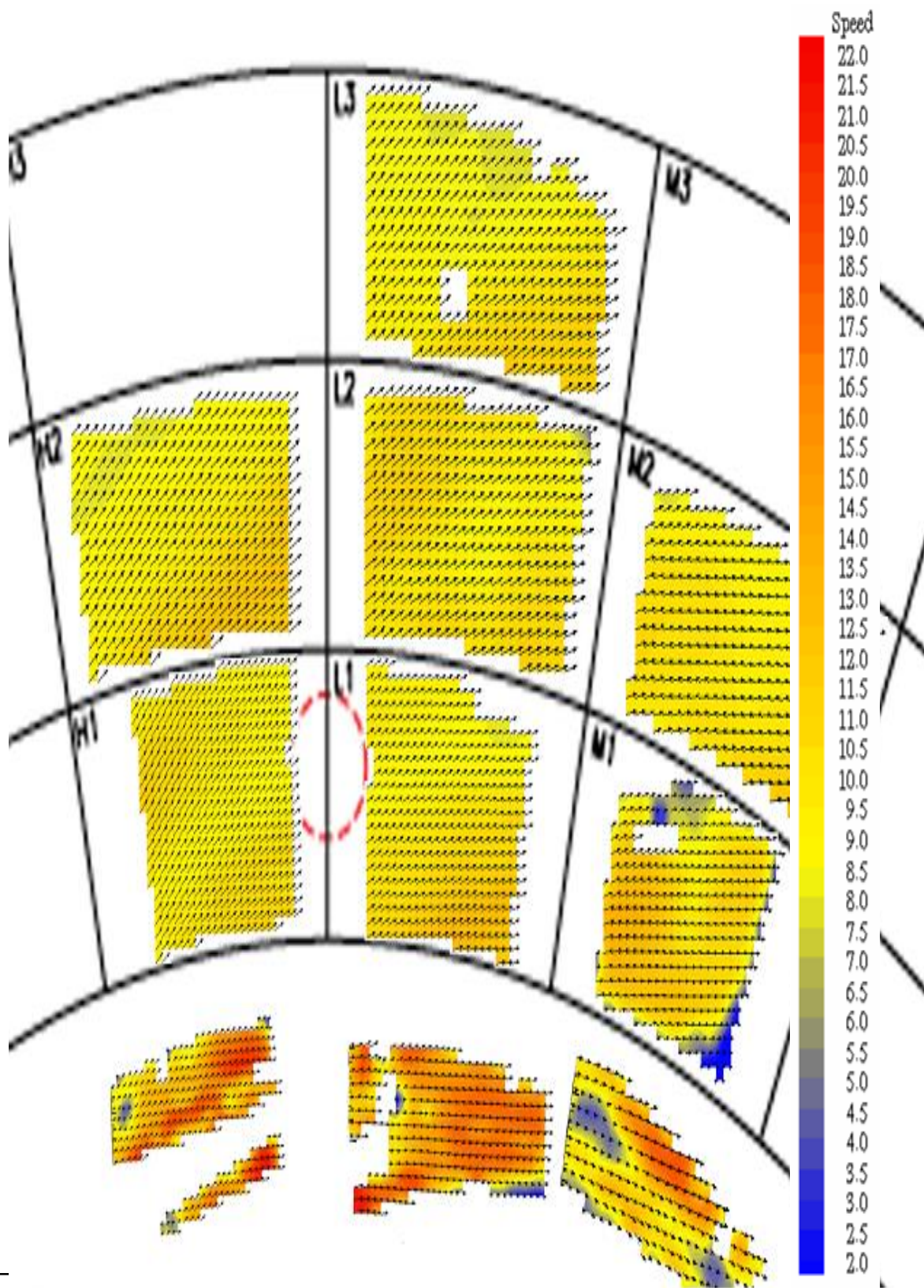
Sez. 2 uscita
deviatori
Deviatori di flusso
Sez. 20 possibilità di
variazione
dell'angolo di
Sez. 3 inizio pareti
parallele
diffusore tra 7°
Sez. 40 uscita
diffusore

1: imbocco galleria
2: parete canale di ritorno
3: canale guida flusso
4: disco sagomatura
diffusore
5: imbocco flusso aria
6: contro-disco in plexiglas
7: deviatori di flusso

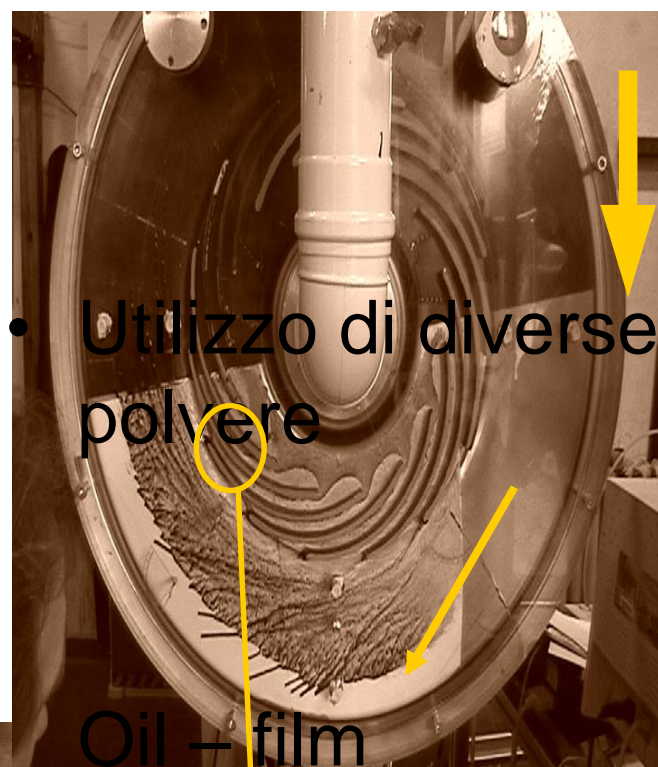
Misure PIV sul modello



Misure PIV sul modello



Visualizzazione a parete

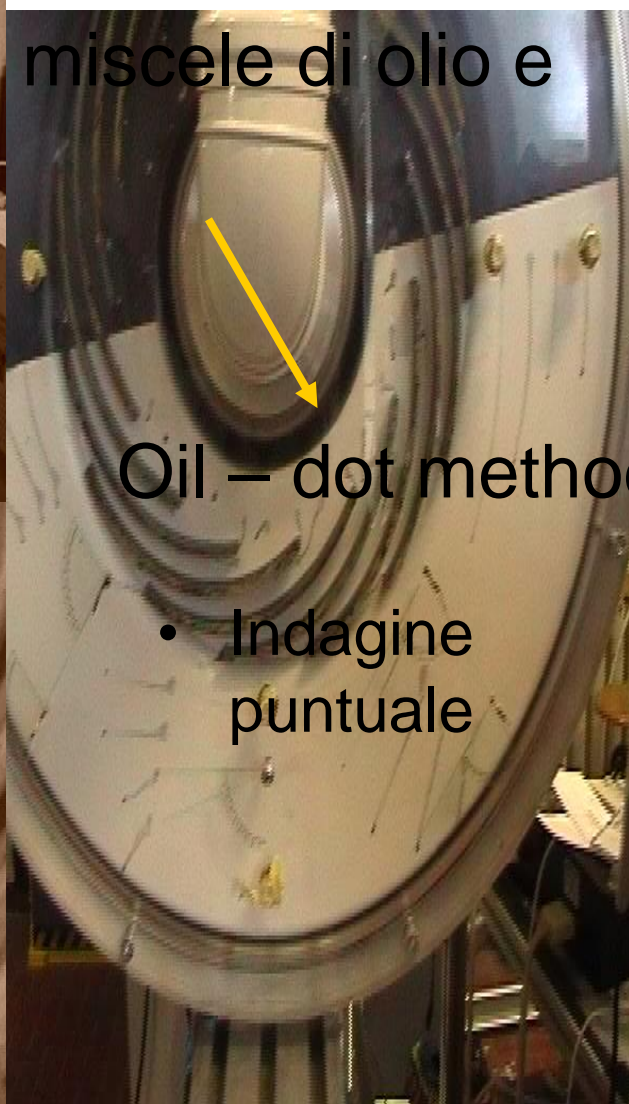


- Utilizzo di diverse miscele di olio e polvere

Oil – film

method:

- Andamento generale del flusso
- Evidenza di vortici all'ingresso dei deviatori



Oil – dot method:

- Indagine puntuale

