

# Considerazioni sul volume di misura di un velocimetro laser Doppler

Lucio Araneo

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energetica, via La Masa 34, lucio.araneo@polimi.it

## Introduzione

La velocimetria laser Doppler è una ben nota tecnica non intrusiva usata per la misurazione della velocità di particelle e, nel caso di particelle sferiche ed omogenee nel campo sub-millimetrico, permette di misurarne anche il diametro, e quindi di calcolarne i flussi volumetrici e massici.

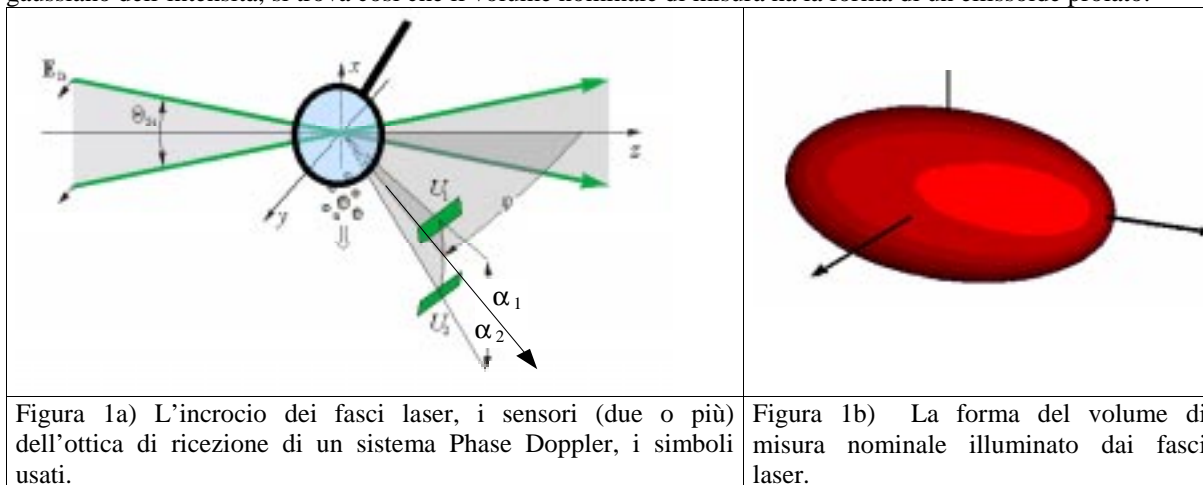
Le dimensioni del volume di misura, definito dalle dimensioni di incrocio dei fasci laser dello strumento, dipendono dalla configurazione ottica, da alcuni parametri di funzionamento e dalla dimensione delle particelle misurate. Un breve richiamo ad un precedente lavoro di simulazione fornisce le nozioni necessarie per comprendere i risultati sperimentali presentati, ottenuti utilizzando un velocimetro laser commerciale (Dantec PDA). Sono state analizzate diverse configurazioni sia per quanto riguarda l'ottica di trasmissione che per quella di ricezione e sono stati usati due diversi tipi di particelle: un flusso monodisperso di gocce d'acqua e una sfera di polistirene sostenuta da un ago rotante. Una scansione della zona di incrocio dei fasci laser con passo minimo di 12.5 micron permette di individuare le dimensioni reali del volume di misura rilevato dallo strumento. È stata in particolare analizzata l'influenza delle dimensioni relative fra la particella ed il volume nominale di misura.

La misura del diametro per mezzo di un'ottica a tre sensori permette di distinguere i segnali riflessi da quelli rifratti se i due angoli sottesi dalle due coppie di sensori non sono multipli interi uno dell'altro. L'influenza della disposizione dei tre sensori viene analizzata e discussa, per ottenere le migliori condizioni di misura in funzione anche degli altri parametri sperimentali.

## Caratteristiche del volume di misura di un anemometro laser Doppler

### Il volume nominale di misura

Il volume di misura nominale di un velocimetro laser Doppler, è definito dalla zona di incrocio di due fasci laser focalizzati dove l'intensità del segnale di interferenza supera la soglia  $1/e^2$  rispetto al massimo del profilo gaussiano dell'intensità; si trova così che il volume nominale di misura ha la forma di un ellissoide prolato.



### Il volume reale di misura per particelle microscopiche

Nel caso di particelle sub-micrometriche può essere facilmente applicato il modello a frange di interferenza; il riconoscimento delle particelle avviene quasi sempre tramite il superamento di una soglia fissa da parte del segnale raccolto, il volume di misura reale assume la forma di un ellissoide geometricamente simile a quello nominale, ma le sue dimensioni sono funzioni principalmente dalla potenza assoluta del laser, della dimensione della particella, della posizione dell'ottica di ricezione, del livello di amplificazione del segnale, del livello di soglia scelto per il riconoscimento del segnale.

Se poi, come spesso avviene, l'ottica di ricezione punta alla zona di misura attraverso una fessura che funge da filtro spaziale, il volume di misura reale assume la forma di un ellissoide tagliato dalla proiezione della fessura.

## Il volume di misura per particelle di diverso diametro

Nel caso di particelle di dimensioni maggiori, il segnale analizzato nasce dall'interferenza sul sensore del segnale luminoso proveniente principalmente da due zone limitate (punti fulgidi) della superficie della particella; la loro posizione sulla superficie dipende dalla posizione dell'ottica di ricezione e dall'ordine di scattering considerato, e quindi si può distinguere una coppia di punti fulgidi per ogni sensore e per ogni ordine di scattering. Anche nel caso più semplice di un solo ordine dominante, a particelle di diverso diametro corrispondono volumi nominali di misura differentemente traslati nello spazio, come appare evidente dalla figura 2 che mostra schematicamente la traslazione dei punti di massimo del segnale ricevuto rispetto al massimo del volume di misura illuminato, per una generica configurazione in forward scattering, per due sfere di diametro differente. Questi volumi di misura nominali hanno dimensioni uguali a quello illuminato perché tutti definiti dal livello  $1/e^2$  rispetto al proprio massimo, e sono traslati nello spazio, rispetto al volume nominale illuminato, di una distanza che è al massimo pari al raggio della particella.

In realtà i volumi di misura hanno anche dimensioni assolute diverse a causa della differente intensità del segnale rifratto da particelle di dimensione diversa. Per particelle molto piccole esso può ridursi fino a scomparire quando il segnale è troppo debole. Per particelle molto grandi può anche succedere che il segnale mandi in saturazione il sistema di ricezione nella zona interna del volume di misura, con perdita parziale o totale di informazioni.

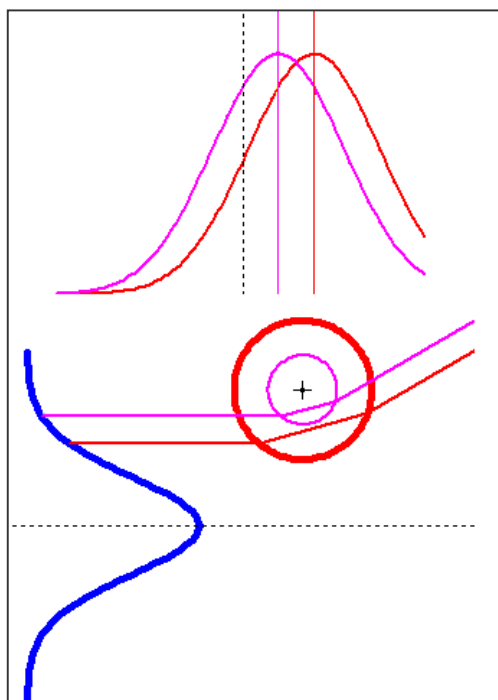


Figura 2) Profilo normalizzato del segnale rifratto (1° ordine) da due particelle di diametro diverso che attraversano il volume di misura

## Il volume di misura per diversi ordini di scattering

Quando una particella si trova nel volume di misura illuminato, i sensori del sistema fase Doppler ricevono un segnale composto dall'interferenza dei diversi ordini di scattering della luce emessa dalla particella. La presenza contemporanea di diversi ordini di rifrazione può essere inizialmente interpretata come la presenza di diversi volumi di misura che si sommano tra di loro; essi sono diversamente traslati nello spazio in funzione delle dimensioni della particella e della configurazione dei sensori di ricezione. Nominalmente essi hanno sempre la stessa distribuzione gaussiana di intensità e dimensioni, ma a causa della diversa intensità assoluta dei vari ordini di scattering, la visibilità di ciascuno di essi è differente.

Un singolo sensore di un anemometro laser Doppler non è in grado di discernere fra segnali provenienti da diversi ordini di scattering, ma vede solamente il risultato della loro sovrapposizione, rilevando la particella ogni qual volta il segnale risultante superi il livello di soglia stabilito. Il volume reale di misura può assumere una forma totale variamente complessa, sempre dipendente anche dalla dimensione della particella misurata.

Tramite un'opportuna configurazione del sistema di ricezione con almeno tre sensori, si può stabilire se un segnale sia stato generato prevalentemente da un singolo ordine di scattering, in modo da poterlo processare con gli opportuni algoritmi per misurare il diametro della particella.

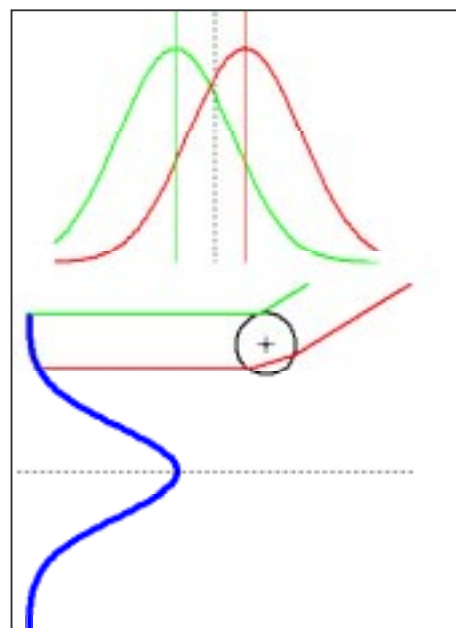


Figura 3) Profilo normalizzato dei segnali riflesso e rifratto da una particella che attraversa il volume di misura.

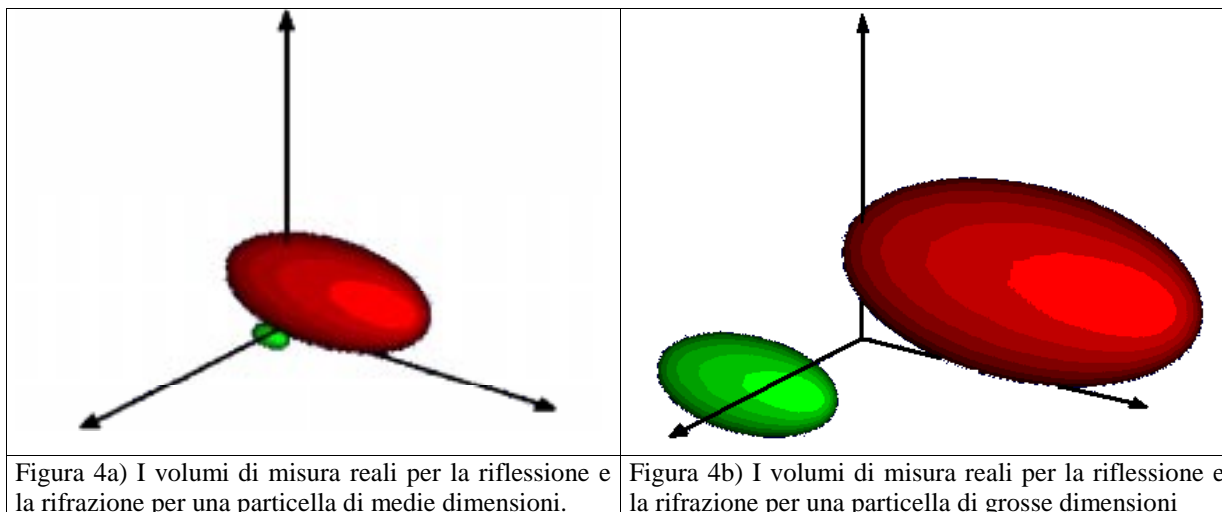


Figura 4a) I volumi di misura reali per la riflessione e la rifrazione per una particella di medie dimensioni.

Figura 4b) I volumi di misura reali per la riflessione e la rifrazione per una particella di grosse dimensioni

### Indagine sperimentale della forma del volume di misura

La verifica sperimentale della presenza di diversi volumi di misura per diversi ordini di rifrazione è stata compiuta effettuando una scansione del volume di misura con particelle di diverso tipo e dimensione, ed analizzando diverse configurazioni del sistema di misura per valutare l'effetto di diversi rapporti di dimensioni fra particella e volume di misura, e diversi angoli di scattering. Le ottiche sono montate su di un sistema di movimentazione controllato da motori passo-passo che permette una risoluzione di 12.5 micron. Le tipiche griglie di misura utilizzate presentano un passo di 50 o 100 micron lungo l'asse maggiore dell'ellissoide, su una lunghezza di 1.5 mm, ed un passo di 25 micron lungo gli assi minori.

### Anemometro fase Doppler

E' stato usato un sistema PDA Dantec, utilizzando diverse ottiche di trasmissione per variare la dimensione del volume nominale di misura e l'angolo di intersezione dei raggi laser, e diverse configurazioni dell'ottica di ricezione, variandone sia l'angolo di scattering, sia gli angoli di elevazione dei singoli sensori tramite l'uso delle differenti maschere poste davanti all'ottica ricevente [3].

Quantità	Simbolo	Valore
Angolo di intersezione fra i due fasci laser	$\Theta$	11.1°, 5.72°
Lunghezza d'onda dei due fasci laser	$\lambda$	514.5 nm
Angolo di polarizzazione rispetto al piano dei raggi		90°
Diametro dei fasci focalizzati		77 $\mu\text{m}$ , 150 $\mu\text{m}$ , 290 $\mu\text{m}$
Angolo di scattering	$\phi$	30°, 46°, 60°
Angolo di elevazione (tre sensori)	$\alpha$	<2.5°

Tabella 1) Caratteristiche e configurazione del sistema PDA utilizzato negli esperimenti e simboli utilizzati

### Scansione con generatore piezoelettrico di gocce

Un flusso di gocce monodisperse viene prodotto da un generatore piezoelettrico (TSI) e diretto nel volume di misura secondo una traiettoria inclinata a piacere. Muovendo il generatore per mezzo di servomotori con passo minimo 12.5 micron sono state eseguite varie scansioni del volume di misura in diverse configurazioni, per poi analizzare i risultati ottenuti.

I principali vantaggi dati da questo metodo sono dovuti all'uso di vere gocce, dotate di una superficie priva di difetti e che percorrono una traiettoria completa attraverso il volume di misura, come accade nelle misure reali.

Gli svantaggi sono invece nella difficoltà di uso del generatore di gocce, che funziona stabilmente solo in alcune limitate condizioni. Bisogna inoltre raggiungere un compromesso sulla distanza di lavoro dall'ugello: troppo vicino le gocce non sono ancora sferiche, troppo lontano si ha una dispersione delle traiettorie, che non sono più perfettamente ripetitive.

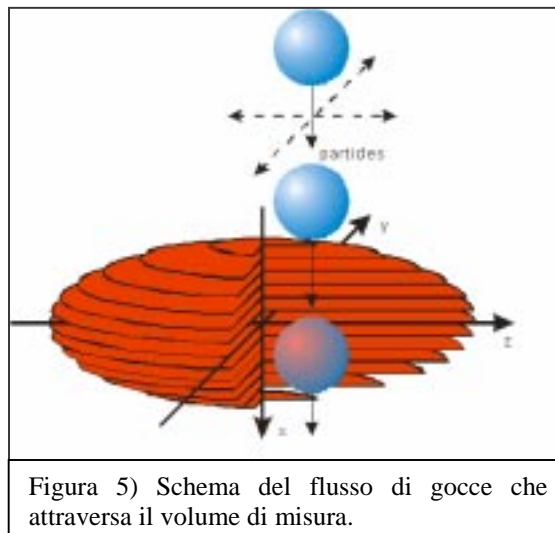


Figura 5) Schema del flusso di gocce che attraversa il volume di misura.

Infine le gocce sono molto vicine tra di loro; la distanza è dell'ordine di due-tre diametri, quindi se il volume di misura è molto più grande delle gocce, la presenza contemporanea di due o più gocce diventa inevitabile e le misure non sono più possibili.

### Scansione con una sfera di polistirene

In questo caso viene utilizzata una sfera di polistirene incollata all'estremità di un ago chirurgico che funge da supporto. In tal modo è possibile mantenere la particella fissa in una posizione determinata, per misurare la differenza di fase punto per punto all'interno del volume di misura, oppure farle descrivere la traiettoria desiderata per avere misure integrali, avendo sempre una sola particella nel volume di misura.

Lo svantaggio di questo metodo è dovuto principalmente alla scarsa qualità superficiale di una particella solida, che presenta quasi sempre graffi, corrugamenti o altri microdifetti, e alla presenza anche dell'ago di supporto che genera riflessioni indesiderate nel volume di misura. Inoltre la sfera fissa in una posizione manda rapidamente in saturazione gli strumenti, con rischi anche di danneggiare i fotomoltiplicatori a causa delle intensità di corrente elevate e prolungate per lungo tempo. Per tali motivi dati ottenuti con questa tecnica sono risultati di qualità inferiore rispetto a quelli ottenuti con il generatore di gocce d'acqua, e non sono stati riportati.

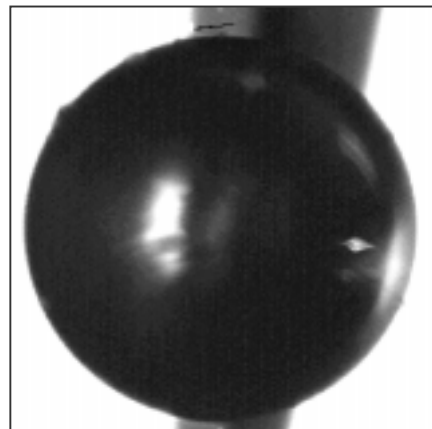


Figura 6) La sfera di polistirene utilizzata per alcune misure,

### Risultati sperimentali

I dati provenienti dai tre sensori dell'ottica di ricezione vengono salvati come frequenza e differenza di fase dei segnali, e quindi processati utilizzando i coefficienti di conversione fase-diametro [3] e i criteri di validazione per la riflessione o per la rifrazione.

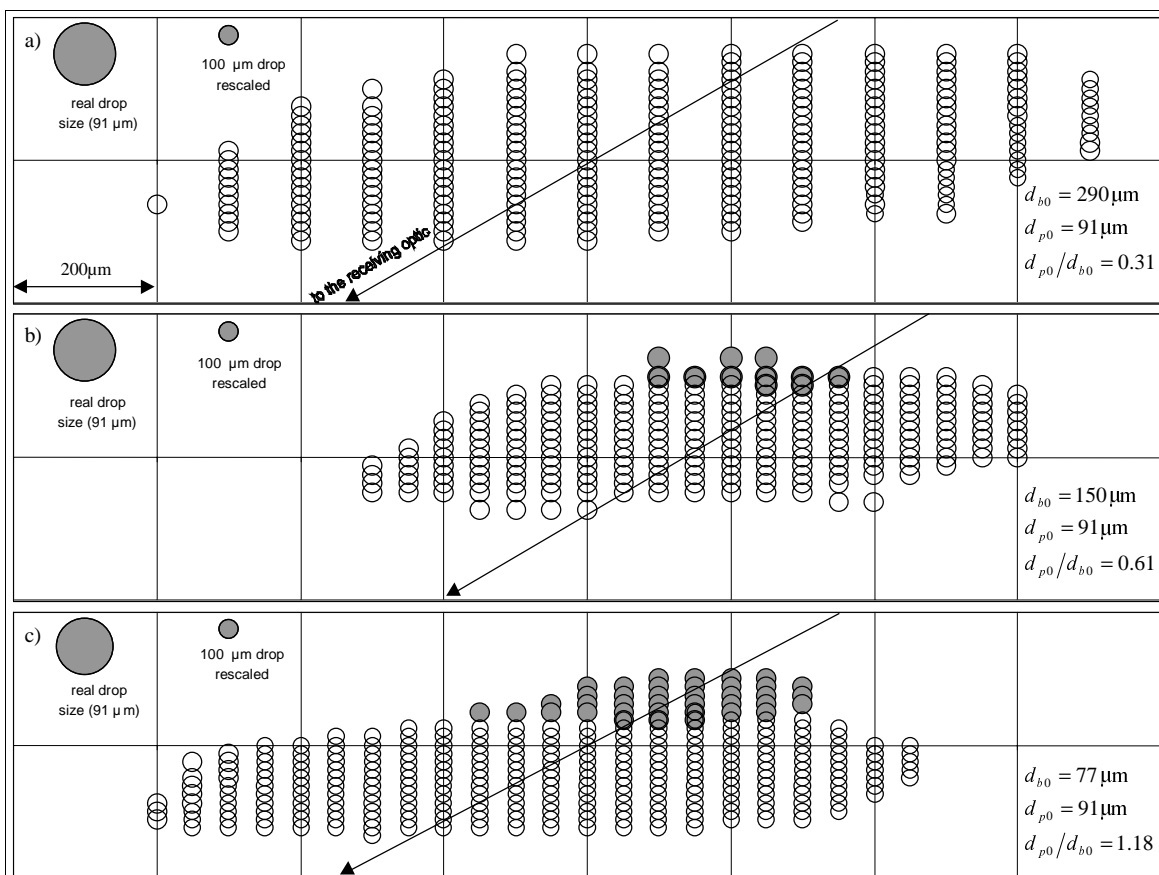


Figura 7) Risultati ottenuti per la riflessione e la rifrazione con diverse dimensioni del volume di misura. Diametro nominale  $D_{b0}$ : a) 290  $\mu\text{m}$ , b) 150  $\mu\text{m}$ , c) 77  $\mu\text{m}$ . Diametro goccia d'acqua  $D_{p0}$  91  $\mu\text{m}$ , ottica di ricezione a 30°.

La Figura 7 mostra un esempio dei risultati ottenuti utilizzando tre diverse configurazioni dell'ottica di ricezione per variare il rapporto fra la dimensione nominale del volume di misura e il diametro della goccia.

Il piano rappresentato è quello di scattering, con la freccia indicante la direzione dell'ottica di ricezione, a  $30^\circ$  rispetto a quella di trasmissione. La grigliatura di riferimento ha un lato di 200 micron. La dimensione reale della goccia è mostrata nell'angolo a sinistra. Per ogni posizione della griglia di misura viene un cerchio riporta il diametro misurato, utilizzando una scala più ristretta per evitare l'eccessiva sovrapposizione dei risultati. I cerchi di colore grigio mostrano i risultati ottenuti considerando che l'ordine dominante fosse la riflessione ( $\bullet$ ), e i cerchi bianchi e per la rifrazione ( $\circ$ ).

Viene chiaramente evidenziata la forma del volume di misura, e la differenziazione fra i due ordini di diffrazione possibile grazie alla presenza di tre sensori nell'ottica di ricezione. Questo particolare argomento verrà ampiamente discusso più avanti.

La forma del volume di misura per la rifrazione ( $\circ$ ) è data dall'intersezione dell'ellissoide di incrocio dei fasci laser con la proiezione della fessura presente nell'ottica di ricezione. In questa regione il diametro misurato è in sensibile accordo con quello calcolato dai dati di flusso del generatore di gocce, e solamente nelle regioni più esterne vengono rilevati valori differenti, probabilmente a causa della diminuzione di intensità del segnale considerato rispetto agli altri ordini di scattering presenti che interferiscono con la misura.

Il volume di misura della riflessione ( $\bullet$ ) è molto più piccolo, a causa della minore intensità del segnale per l'angolo di scattering utilizzato, e non arriva ad essere tagliato dalla proiezione della fessura. Lo spostamento relativo fra i due volumi è dato, come spiegato in precedenza, dalla diversa localizzazione sulla superficie della goccia dei punti fulgidi effettivamente rilevati dai sensori. I diametri rilevati in questa zona sono quasi sempre differenti da quelli reali, si suppone sempre a causa della debolezza del segnale considerato e alla presenza di altri ordini di scattering di simile intensità che gli si sommano.

### Risultati della simulazione

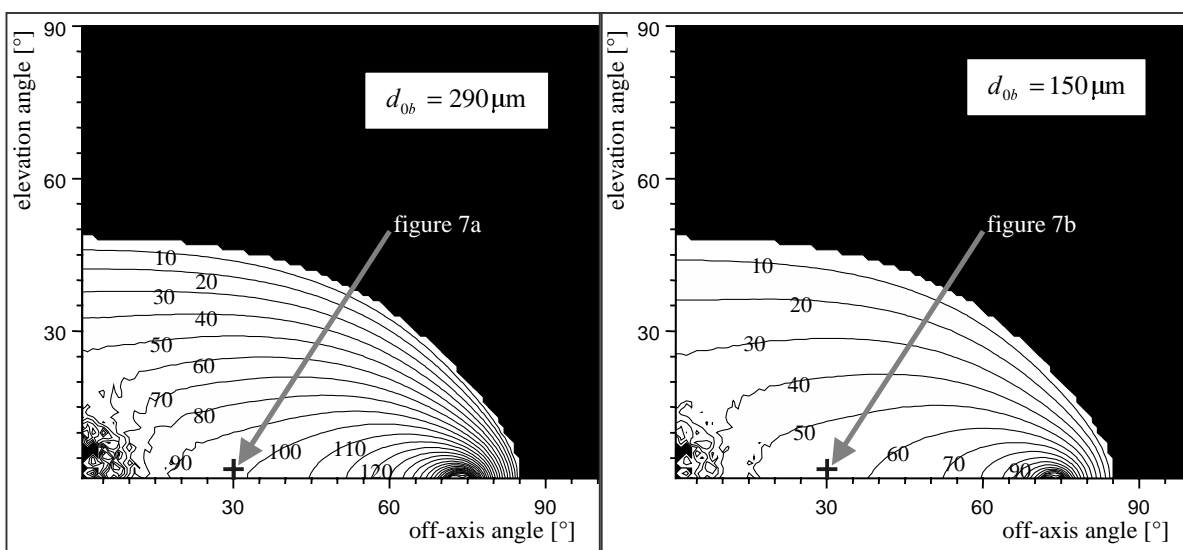


Figura 8: Diametro della goccia per il quale si calcola, nella condizione più sfavorevole, un errore di fase di  $10^\circ$  per diversi diametri nominali del volume di misura (casi a) e b) di figura 7) al variare degli angoli di posizionamento ( $\phi$ , scattering, asse orizzontale;  $\alpha$ , elevazione, asse verticale) del sensore di ricezione.

La simulazione dei casi studiati [1] è stata operata considerando la rifrazione l'ordine di scattering dominante e desiderato, e la riflessione l'ordine che genera errori. E' stato scelto un valore massimo accettabile dell'errore di misura della fase pari a  $10^\circ$  con la traiettoria più sfavorevole, cioè quella dove è massimo il segnale riflesso (esistono ovviamente altre traiettorie dove il rapporto segnale/rumore è più favorevole). Al variare dell'angolo di scattering (la posizione dell'ottica di ricezione) risulta che in prossimità dell'angolo di Brewster è massimo il diametro delle gocce per le quali non si supera ancora la soglia di errore ricercata. Questo diagramma può essere utilizzato per stabilire, dato il massimo diametro della popolazione di gocce da misurare, quale sia, in funzione del diametro nominale scelto per il volume di misura, l'intervallo di angoli ottimali per posizionare l'ottica di ricezione.

La simulazione conferma che con un volume nominale di  $290 \mu\text{m}$  la misura di gocce di  $91 \mu\text{m}$  porta ad un errore massimo di valutazione della fase prossimo al limite scelto di  $10^\circ$  per un angolo di scattering di  $30^\circ$ . Con un volume nominale di  $150 \mu\text{m}$ , sempre all'angolo di  $30^\circ$ , l'errore viene raggiunto già con una goccia di  $55 \mu\text{m}$ . Per la goccia di  $91 \mu\text{m}$  è necessario spostare l'ottica di ricezione nella zona fra i  $70^\circ$  e i  $75^\circ$ , oppure è necessario essere in grado di riconoscere i dati affetti da errori dovuti alla presenza di segnali provenienti da ordini di scattering indesiderati.

## Analisi e ottimizzazione della posizione dei sensori di un sistema PDA

Alla luce dei risultati ottenuti e delle simulazioni fatte è possibile interpretare il funzionamento di un sistema PDA in funzione della configurazione scelta.

Nel caso più semplice di un sistema LDV con un solo sensore, viene misurata la sola velocità delle particelle rilevate. Non ha importanza se il segnale sia quello riflesso o quello rifratto, poiché la frequenza misurata è la stessa, e l'informazione persa riguardante la fase in questo caso non interessa. Permane il problema della variazione del volume di misura (forma e dimensione) al variare della dimensione della particella, per cui nel calcolo dei risultati medi di velocità risulteranno maggiormente pesate le particelle di dimensioni maggiori, ma il problema non è risolvibile.

L'uso di un sistema PDA a due sensori permette di misurare la dimensione delle particelle, ma non di distinguere i diversi ordini di diffrazione. Bisogna assicurarsi che uno solo sia dominante, come nei casi mostrati prendendo un volume di misura che abbia diametro doppio della particella per un angolo di scattering di  $30^\circ$ . Nel caso si attendesse un segnale rifratto, e venisse captato un segnale riflesso, la misura del diametro risulterebbe scorretta.

I sistemi PDA più diffusi utilizzano tre sensori, in modo da estendere il campo di misura e di effettuare una convalida sul diametro misurato. Se opportunamente disposti, i tre sensori possono anche permettere di discernere fra i segnali dovuti a diversi ordini di diffrazione. Vediamo alcuni esempi che mostrano le possibili configurazioni sperimentali.

### Tre sensori, caso generico

La figura 9 mostra il piano delle differenze di fase (misurate con un sistema PDA a tre sensori), in funzione del diametro della particella misurata. L'asse orizzontale inferiore mostra la differenza di fase  $\Psi_{12}$  tra i segnali provenienti dai sensori 1 e 2 nel caso della rifrazione del primo ordine, e il corrispondente diametro misurato  $D_1$ . L'asse orizzontale superiore mostra, per la stessa differenza di fase considerata di segno opposto, il corrispondente diametro misurato per la riflessione  $D_0$ . In generale i due limiti massimi saranno diversi ( $D_{1max} \neq D_{0max}$ , anche se esiste un angolo di scattering per il quale  $D_{1max} = D_{0max}$  [2]).

L'asse verticale mostra la differenza di fase tra i segnali 1 e 3; in questo caso fra gli angoli sottesi dalle coppie di sensori vale  $\alpha_{13} > \alpha_{12}$ .

Quando una particella viene rilevata dai segnali rifratti, il punto determinato dai valori di  $\Psi_{12}$  e  $\Psi_{13}$  ricade idealmente sulla linea tratteggiata; nella pratica vengono applicati dei criteri di convalida per accettare piccole deviazioni dalla relazione ideale. Se il segnale proviene dalla riflessione, i punti ricadranno nell'intorno della linea continua, e potranno quindi essere scartati perché non validi o diversamente trattati.

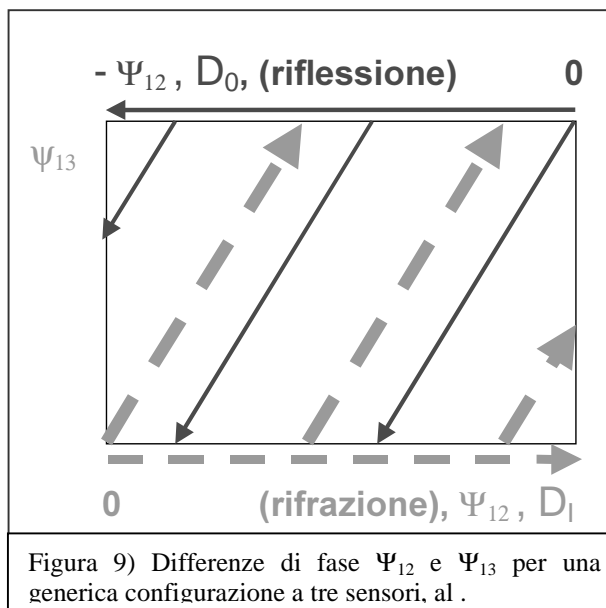


Figura 9) Differenze di fase  $\Psi_{12}$  e  $\Psi_{13}$  per una generica configurazione a tre sensori, al .

### Tre sensori, caso simmetrico

In questo caso i tre sensori sono disposti simmetricamente rispetto al piano di scattering, cioè  $\alpha_1 = -\alpha_3$ ,  $\alpha_2 = 0$ , quindi  $\alpha_{13} = 2\alpha_{12}$  e  $\Psi_{13} = 2\Psi_{12}$ .

In questo caso le linee della rifrazione e della riflessione vengono a coincidere, partendo dagli angoli opposti nel piano delle differenze di fase (figura 10). In tal caso diventa impossibile distinguere fra la riflessione e la rifrazione. Il segnale riflesso da una particella di diametro  $D = a D_{0max}$ , ( $0 < a < 1$ ) viene valutato come un segnale rifratto da un goccia di diametro  $(1-a)D_{1max}$ .

Il segnale rifratto da una goccia di diametro  $D = (1+a)D_{1max}$ , quindi eccedente il campo di misura, viene valutato come un segnale rifratto da un goccia di diametro  $a D_{1max}$ .

Si sono riproposti gli stesso problemi che si hanno con soli due sensori, e che si ripropongono anche ogni qual volta sia  $\Psi_{13} = n\Psi_{12}$  ( $n$  intero positivo).

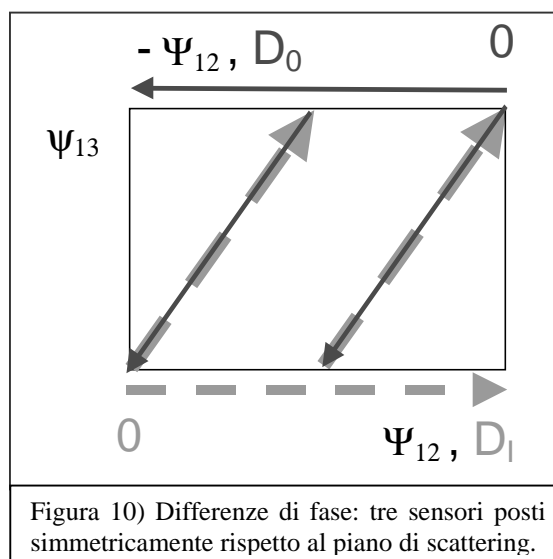


Figura 10) Differenze di fase: tre sensori posti simmetricamente rispetto al piano di scattering.

Bisogna dire che questa configurazione viene perlopiù utilizzata per il misurare gocce di piccole dimensioni, poiché massimizza l'angolo fra i due sensori più lontani e migliora la sensibilità dello strumento diminuendone il campo di misura. Sovente in tali situazioni le più grandi gocce presenti sono notevolmente più piccole del volume di misura, e il problema della presenza di un ordine di diffrazione indesiderato non si pone per quanto illustrato in precedenza.

**Sistema a 3 (o 4 ricevitori), configurazione di Qiu\***

In questo caso l'autore [2] sfrutta sia i segnali di riflessione che quelli di rifrazione per valutare i diametri delle gocce. Utilizza tre o quattro sensori disposti in modo da formare due angoli uno doppio dell'altro. Viene utilizzato un particolare angolo di scattering per cui risulta  $D_{1max} = D_{0max}$ ; ogni punto del piano  $\Psi_{12} - \Psi_{13}$  viene convalido considerando la composizione vettoriale dei due segnali di riflessione e di rifrazione in modo da fornire sempre un valore di diametro misurato, e solo nel caso della presenza di un solo ordine di diffrazione, i valori di  $\Psi_{12}$  e  $\Psi_{13}$  saranno tali da far ricadere il punto su una delle semirette tracciate nella figura 11. Il range di misura risulta dimezzato rispetto a quello permesso dalla coppia di sensori 1 e 2 che sottendono l'angolo maggiore nel caso di un solo ordine dominante. Nel caso di un segnale di sola rifrazione proveniente da una goccia eccedente il range di misura ( $D = (1+a) D_{max}$ ) il segnale verrà interpretato come emesso da una goccia di diametro a  $D_{max}$ . La forma del volume di misura risulta assai complessa, per cui risulta difficile calcolare le medie dei valori misurati pesandole correttamente secondo la dimensione del volume di misura.

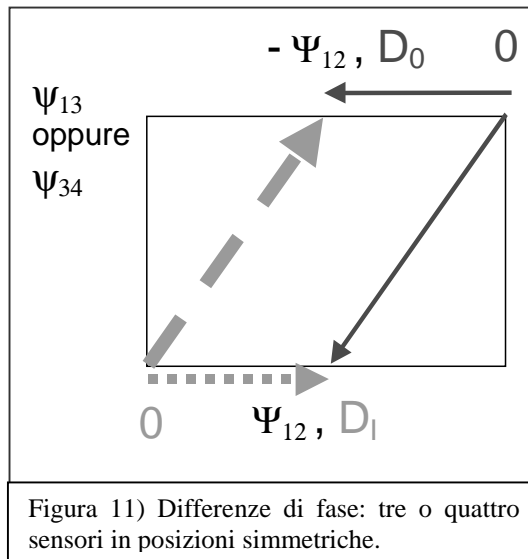


Figura 11) Differenze di fase: tre o quattro sensori in posizioni simmetriche.

La configurazione risulta allora applicabile senza rischi solamente nel caso di popolazioni di gocce piccole, ma in questo caso generalmente un solo ordine di scattering risulta dominante, non si giustifica la complicazione del sistema, e si dimezzano la scala di misura o la risoluzione sfruttate.

**Sistema a 3 ricevitori ottimizzato**

Nel caso vi sia il rischio della contemporanea presenza di segnali riflessi e rifratti, valutato dai diagrammi di figura 8, e non sia possibile ingrandire il volume di misura nominale, per far si che il sistema sia in grado di scartare i dati non desiderati conviene fare in modo che i risultati dei due ordini di diffrazione risultino disposti nel piano lungo due linee distanti il più possibile. Ciò si ottiene quando fra gli angoli sottesi dai sensori vale la relazione  $\alpha_{13} = (n+0.5)\alpha_{12}$ . (figura 12). In tale situazione anche gocce di diametro  $D = (1+a) D_{Imax}$ , eccedente il range di misura, daranno segnali di rifrazione non validi. L'unica possibilità di errore deriva da segnali di riflessione provenienti da gocce eccedenti la scala di misura.

Se non si ha la possibilità di estendere la scala di misura, è possibile adottare degli angoli fra i sensori tali per cui  $\alpha_{13} = (n\pm 0.25) \alpha_{12}$ : le linee della riflessione e della rifrazione risultano più vicine nel piano delle fasi, ma non vi è sovrapposizione alcuna per gocce aventi diametro fino al doppio del limite massimo di misura normalmente usato.

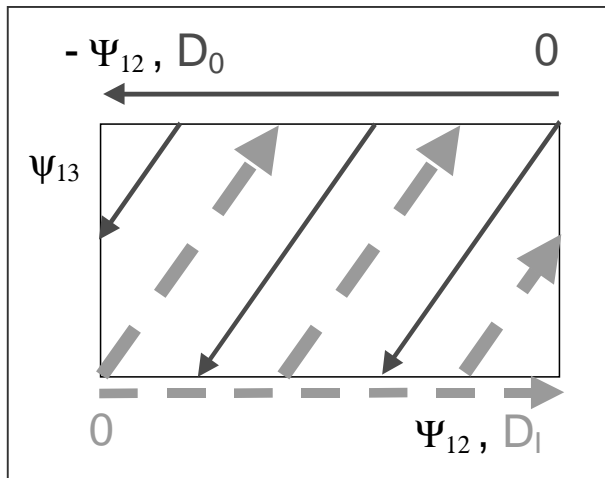


Figura 12) Differenze di fase: sensori in posizioni ottimizzate ( $\alpha_{13}=2.5\alpha_{12}$ ), riflessione e rifrazione.

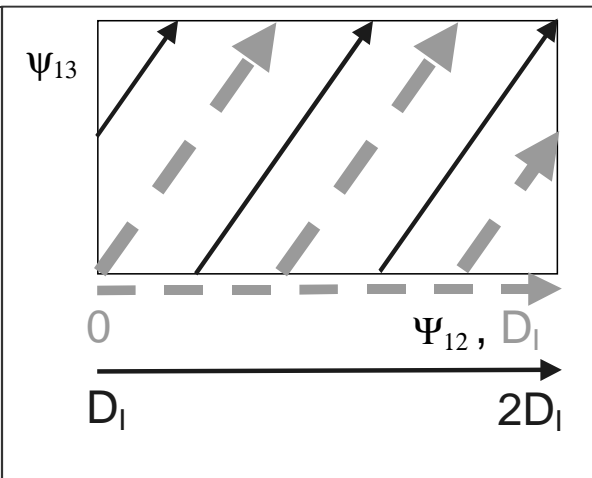


Figura 13) Un solo ordine di scattering e  $\alpha_{13}=2.5\alpha_{12}$ : estensione del campo di misura.

E' da notare altresì la possibilità di estendere il campo di misura dello strumento fino al doppio di  $D_{\text{imax}}$  nel caso di assenza di riflessione e  $\alpha_{13} = (n+0.5)\alpha_{12}$ , come mostrato nella figura 13; ciò è possibile anche in presenza di riflessione usando  $\alpha_{13} = (n\pm 0.25)\alpha_{12}$ .

### **Conclusion**

Con l'ausilio di simulazioni è stata evidenziata la conformazione del volume di misura ideale di un sistema laser Doppler e i risultati da attendersi in realtà considerando diversi ordini di scattering e diverse dimensioni delle particelle analizzate.

Sono state individuate varie entità utili per descrivere il volume di misura dello strumento di misura:

- *Volume di misura nominale illuminato*: quello definito dalla soglia  $1/e^2$  del profilo di intensità del segnale di interferenza dei due raggi laser.
- *Volume di misura nominale per un dato ordine di scattering*: stesse dimensioni del precedente, ma è traslato nello spazio in funzione della dimensione della particella, dell'ordine di scattering e della posizione dell'ottica di ricezione.
- *Volume di misura reale per un dato ordine di scattering*: quello risultante dalle misure di uno strumento in grado di distinguere fra i segnali provenienti da diversi ordini di scattering, data una certa configurazione sperimentale e la dimensione della particella.
- *Volume di misura reale totale*: quello risultante da uno strumento non in grado di distinguere fra i diversi ordini di scattering, come un semplice velocimetro laser. E' sempre funzione della configurazione sperimentale e della dimensione della particella.

E' da notare che per il calcolo delle medie pesate dei valori misurati, nella maggior parte dei casi interesserà solo la dimensione del volume reale di misura per un solo ordine di scattering, che è funzione della dimensione della particella, e non la sua traslazione nello spazio che può essere trascurata. Nel caso di misure a ridosso di pareti, tale traslazione può essere dello stesso ordine di grandezza del passo di misura utilizzato ed assumere perciò una certa importanza.

Sono state quindi analizzate sperimentalmente diverse configurazioni di un sistema laser Doppler che confermano i risultati delle simulazioni mostrando la forma rilevata dei volumi di misura per due ordini di diffrazione.

I risultati hanno permesso di individuare quantitativamente le situazioni di misura nelle quali possono insorgere problemi di accuratezza, e viene suggerito un metodo per agevolare il riconoscimento e la convalida dei dati acquisiti.

### **Riferimenti Bibliografici**

- [1] Araneo, L., Damaschke, N., Tropea, C.; *Measurement and Prediction of the Gaussian Beam Effect in the Phase Doppler Technique*, 10<sup>th</sup> International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechechnics, Lisbona, Luglio 2000.
- [2] Qiu, H., H., Hsu, C. T.; *A new approach too eliminate the measurement volume effect in PDA measurements*, 9<sup>th</sup> International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechechnics, Lisbona, Luglio 1998.
- [3] Dantec Measurement Technology A/S; *Particle Dynamics Analyser, Installation & User's guide*, Pubblicazione n. 9040U1101, 1999, Dantec MT A/S, P.O. Box 121, Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark.