

# ANEMOMETRIE LASER BAZATĂ PE EFECT DOPPLER

## 1. Scopul lucrării.

Scopul lucrării constă în determinarea vitezei de curgere a unor microparticule aflate în suspensie într-un fluid (aer, apă). Metoda se bazează pe modificarea prin efect Doppler a radiației laser reflectate de obiecte aflate în mișcare.

## 2. Dispozitivul experimental. Instalare și instrucțiuni de folosire.

Dispozitivul experimental (v. Fig.1 și Fig.2) conține: un banc optic BO, un laser L cu He-Ne prevăzut cu sursa de alimentare SA, două oglinzi  $O_1$  și  $O_2$ , un beam-splitter BS, două lentile  $L_1$  și  $L_2$ , o măsută suport M, o diafragma iris DI, un fotodetector FD cuplat la un fotoamplificator FA care la rândul lui este conectat la interfața Cobra IC cuplata cu un calculator, o cuva paralelipipedică C, două furtune din silicon F, doi recipiente cu soluție R și mai mulți suporturi de prindere și susținere a elementelor optice.

Pentru operația de aliniere, mai sunt necesare o diafragmă pinch-hole PH și un ecran EC. Înălțimea recomandată la care trebuie să se află raza laser este de 130 mm față de bancul optic

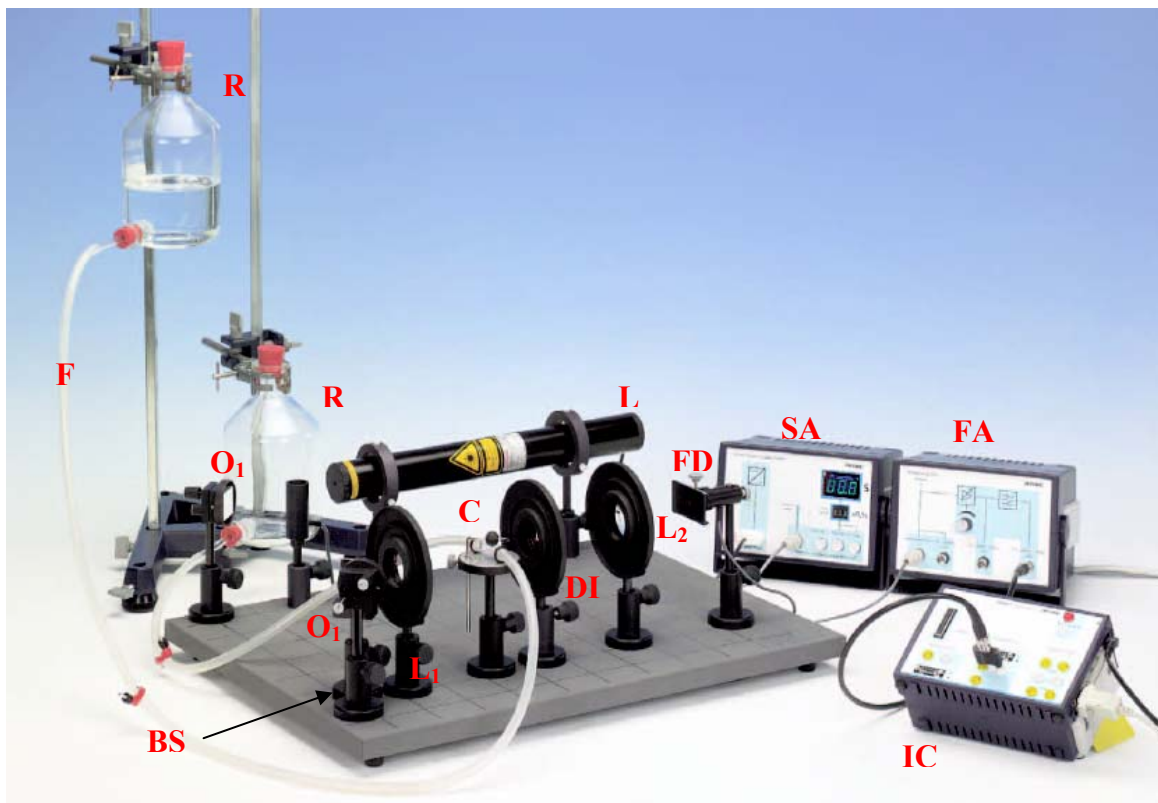


Fig. 1. Instalatia experimentală pentru anemometrie laser bazata pe efect Doppler.

Perechile de numere din parantezele drepte se referă, în cele ce urmează, la coordonatele de pe bancul optic din Fig. 2. Spre exemplu, oglinda  $O_1$  se găsește în

punctul de coordonate [1,8]. Cunoașterea acestor coordonate face ca alinierea și ajustările necesare bunei funcționări a dispozitivului să devină mai ușoare.

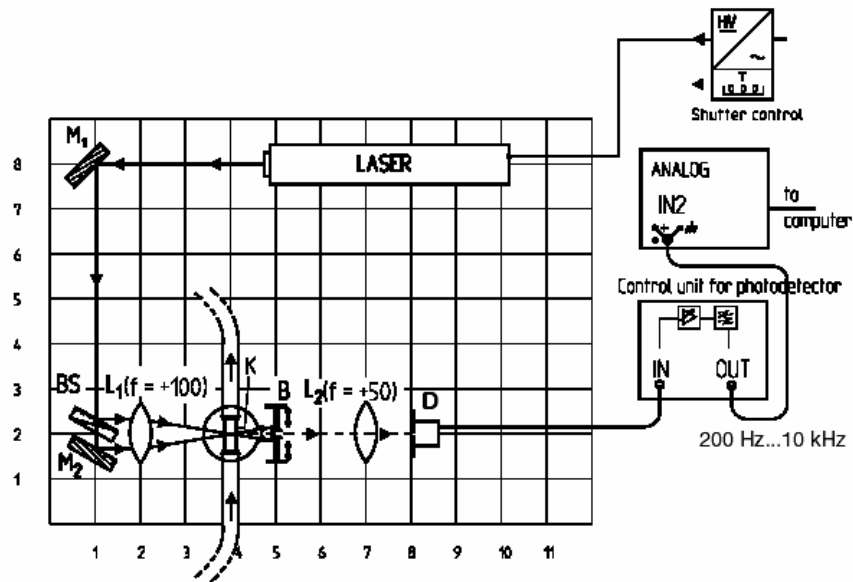


Fig. 2. Amplasarea pe bancul optic a diverselor elemente optice.

### Prepararea lichidului.

Se amestecă într-un mic vas o cantitate mică de apă distilată (aproximativ 10 ml) cu o spatulă de sfere de argint acoperite cu sticlă. Se umple recipientul superior R, a cărui scurgere a fost deja conectată la un tub de silicon F închis cu o clemă, cu o cantitate de aproximativ 500 ml apă după care se pun aproximativ 2 sau 3 ml din soluția preparată mai sus. Pentru a omorâ bacteriile este recomandat să se adauge câteva picături de formaldehidă (30%).

Se atașează recipientul pe suport prin prinderea gâtului acesteia cu una din cleme. Se procedează la fel și cel de-al doilea recipient. Orificiile de sus ale recipientelor R trebuie acoperite cu dopuri din cauciuc, pentru a minimize depunerea prafului.

*Observație:* este preferabil ca cele două recipiente să se găsească unul pe masa de lucru, iar altul pe un suport la o anumită înălțime. Cele două recipiente vor schimba locul între ele, singura modificare fiind sensul de curgere al lichidului prin cuvă.

### Instalarea componentelor optice.

Se plasează oglinzile  $O_1$  și  $O_2$  în punctele de coordonate [1,8] respectiv [1, 1.5] astfel încât raza laser să se propage paralel cu axa  $Oy$  a bancului optic.

Se poziționează beam-splitterul BS [1,2.5], cu baza lui magnetica, aproape de oglinda  $O_2$ , astfel încât unda parțial reflectată să fie paralelă cu latura  $Ox$  a bancului optic. Partea metalizată a divizorului de undă se află îndreptată către oglinda  $O_1$ . Raza laser reflectată de beam-splitter-ul BS și raza laser reflectată de oglinda  $O_2$  trebuie să păstreze aceeași distanță între ele pe tot traseul! Distanța nu trebuie să fie mai mare de 3 cm (în cazul prezent ea este de aproximativ 1 cm).

Se plasează lentila  $L_1$  (având distanța focală  $f_1 = +100 \text{ mm}$ ) în poziția [2,2] astfel încât cele două raze să treacă prin lentilă simetric față de mijlocul ei.

Ajustarea punctului de intersecție.

Cele două raze ce trec prin lentila  $L_1$  se intersectează la distanța de 10 cm în spatele lentilei (la poziția [4,2] - în planul focal). Ajustare fină a punctului de intersecție se face folosind aranjamentul următor :

Se fixează diafragma PH (pinhole cu diametru de 30  $\mu\text{m}$  aflat într-un dispozitiv cu posibilitate de ajustare în plan vertical) în punctul de intersecție al celor două raze, adică în poziția [4,2]. Ecranul EC din poziția [11,2] servește ca ecran de observare. Se obturează cu o hârtie raza reflectată de oglinda  $O_2$ , lăsând doar raza ce vine de la beam-splitter-ul BS.

Modificați ușor poziția diafragmei PH cu ajutorul șuruburilor de ajustare ale dispozitivului în așa fel încât raza de lumină de la BS cade pe diafragma PH, pe ecranul EC observându-se un spot luminos înconjurat de câteva inele luminoase (ca efect al difracției de tip Fresnel pe un orificiu circular). Imaginea apare pe ecranul EC în dreapta axei de simetrie optice.

Se obturează cu o hârtie raza reflectată de BS și se lasă liberă raza reflectată de oglinda  $O_2$ . Fără a modifica poziția diafragmei PH, se schimbă fin traiectoria razei ce vine de la oglinda  $O_2$ , prin ajustarea fină a oglinzii  $O_2$ , astfel încât să treacă prin diafragma PH plasată în punctului de intersecție. Când acest lucru este realizat pe ecranul EC apare, în partea stângă față de axa de simetrie un spot luminos însoțit de cele câteva inele datorate difracției. Dezobturând și raza ce vine de la BS pe ecranul EC pot fi văzute simultan cele două spoturi luminoase însoțite de fenomenul de difracție, iar între cele două spoturi pot fi de asemenea observate franje de interferență.

Determinarea jumătății unghiului de interferență  $\varphi$ :

Razele de lumină care trec prin lentila  $L_1$  (și sunt focalizate la 10 cm în spatele ei, în mijlocul diafragmei PH) dau două spoturi de lumină care se pot observa ușor fie pe ecranul EC, fie la o distanță mai mare de aproximativ 2 sau 3 metri, pe un perete al camerei. **Se determină distanța  $l'$  dintre lentila  $L_1$  și planul de observare și distanța  $D$  dintre cele două spoturi de pe plan** (acest lucru se poate face cu o precizie suficientă pe ecranul EC). Distanța  $l$  dintre punctul de intersecție al celor două raze (planul focal imagine al lentilei  $L_1$ ) și planul de observare se determină din relație (v. Fig. 3):

$$l = l' - f_1 \tag{1}$$

Jumătatea unghiului de interferență se obține din relația:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{D}{2l}\right) \tag{2}$$

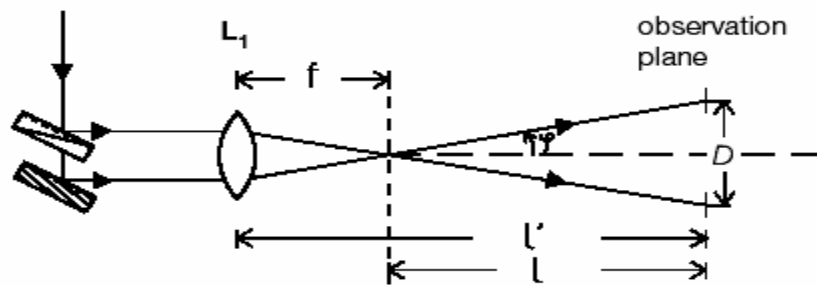


Fig. 3. Schema pentru determinarea unghiului  $\varphi$  de suprapunere.

Observație: Examinarea calitativă a regiunii de interferență. La intersecția celor două raze există o regiune de interferență ce poate fi testată calitativ reproducând acest punct cu ajutorul lentilei  $L_2$  (de distanța focală  $f_2 = +20 \text{ mm}$ ). Pentru aceasta se plasează lentila  $L_2$  în poziția [4.5,2] (v. fig. 1 sau fig. 2). Pe un plan de observare distant (un zid la cel puțin 4 m) sau pe ecranul EC care a fost întors aproape razant pentru a expanda talia domeniului ce trebuie observat, apar 2 spoturi de lumină. Acestea pot fi făcute să coincidă prin ajustarea oglinzii  $O_2$ . La o examinare atentă a suprafeței iluminate, se pot vedea franjele de interferență.

Când o particulă trece printr-o astfel de regiune, ea se va afla succesiv în zone de lumină sau în zone de întuneric. Doar atunci când se află în zonele de maximum de interferență ea va împrăști lumina laser. La fotodetectorul FD va ajunge un semnal temporal ce conține informație despre viteza de mișcare a particulei prin zona de interferență.

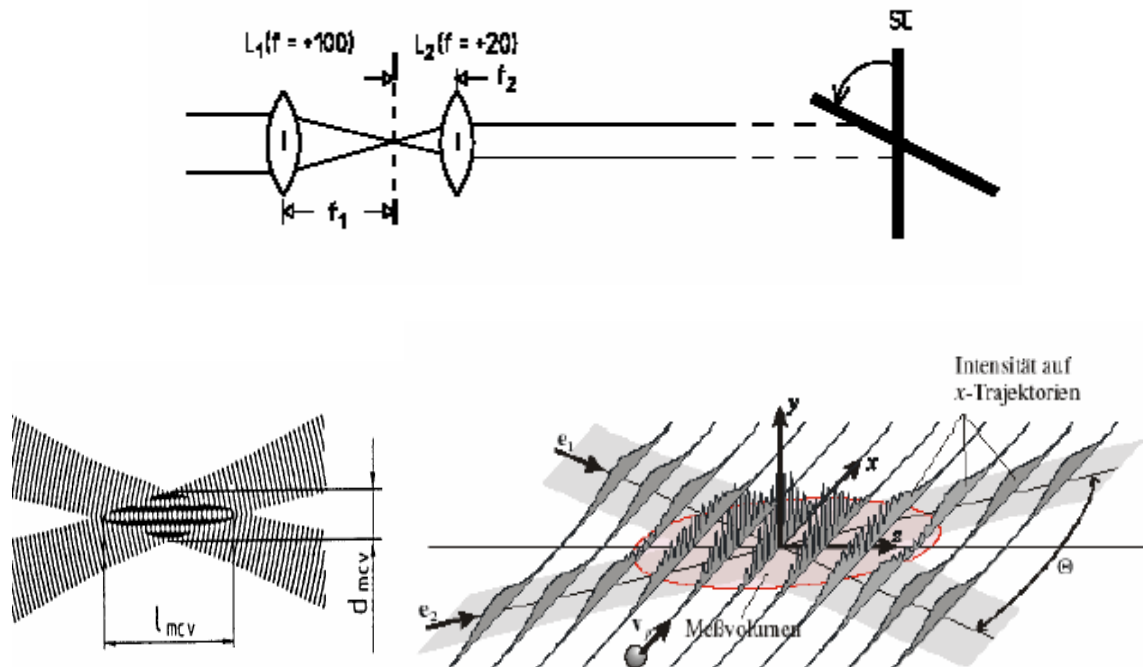


Fig. 4. Examinarea calitativă a regiunii de interferență. În ultima imagine este schematizată interferența celor două fascicule laser având profile gaussiene.

După examinarea calitativă a regiunii de interferență îndepărtați lentila  $L_2$  și ecranul EC.

#### Instalarea celulei.

Se plasează cele 2 inele în forma de "O" la aproximativ 10 cm de capetele celor două furtune de silicon F conectate la recipientii de sticlă R. Se împing cu grijă capetele tuburilor de silicon spre celulă, prin mișcări de rotație stanga-dreapta astfel încât tuburile de silicon să acopere cca 1 cm din celulă. Se culisază cele 2 inele în formă de "O" în regiunea de conectare a capetelor tuburilor de silicon cu celula (v. Fig. 5).

ATENȚIE: Celula este făcută din cuarț și este foarte fragilă. Manevrați-o cu grijă!! După conectarea celulei la tuburile de silicon stergeți celula de amprete și de grăsime cu o cârpă moale.

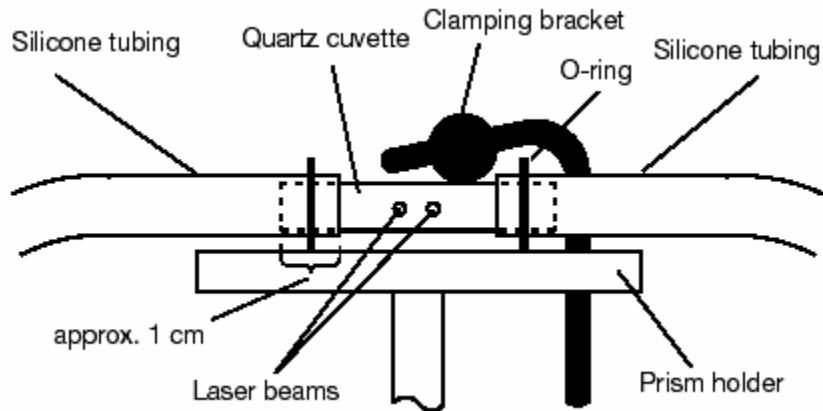


Fig. 5. Instalarea celulei.

Se prinde celula de măsura suport astfel încât unda laser să atingă perpendicular pereții celulei. Se așază măsura de susținere în calea undelor laser la poziția [4,2] astfel încât razele laser ce trec prin partea laterală a celulei să se intersecteze în mijlocul celulei (pentru o vizibilitate mai bună se umple celula cu lichid).

O cantitate mică de lichid trebuie să treacă prin celulă chiar și atunci când robinetul este ușor deschis. Pentru aceasta, recipientul de sticlă cu lichid trebuie atașat la capătul de sus al suportului, iar cel gol trebuie fixat în poziția cea mai de jos.

#### Poziționarea fotodetectorului.

Poziționați diafragma iris DI, a cărei fantă este redusă până când cele două raze principale nu mai pot trece prin ea, într-un suport de lentile, în spatele celulei, în poziția [5,2]. O lentilă  $L_2$  [7,2] cu distanța focală de  $f_2 = +50 \text{ mm}$ , focalizează lumina dispersată de celulă pe fotodetectorul FD[8,2]. Semnalul din fotodetectorul FD este conectat la o unitate de control. Semnalul de ieșire al unității de control este conectat în portul de intrare  $IN3$  al interfeței COBRA(“+” și “GND”).

#### Observarea semnalului temporal. Determinarea vitezei de curgere:

Odată sistemul optic aliniat, se schimbă poziția recipientilor: cel plin se așază sus, iar cel cel gol jos. Pentru început, pentru a obține o curgere cu viteză mică, un robinet este închis.

Mișcarea particulelor poate fi observată cu ochiul datorită dispersiei luminii în celulă. În timpul procesului de curgere nivelul lichidului scade ușor, încât pentru efectuarea măsurătorilor sunt disponibile câteva minute.

În Fig.6 este aratat un semnal înregistrat pe monitorul computerului  $F(t)$ , iar în Fig. 7 este aratăta prelucrarea acestui semnal după înregistrare..

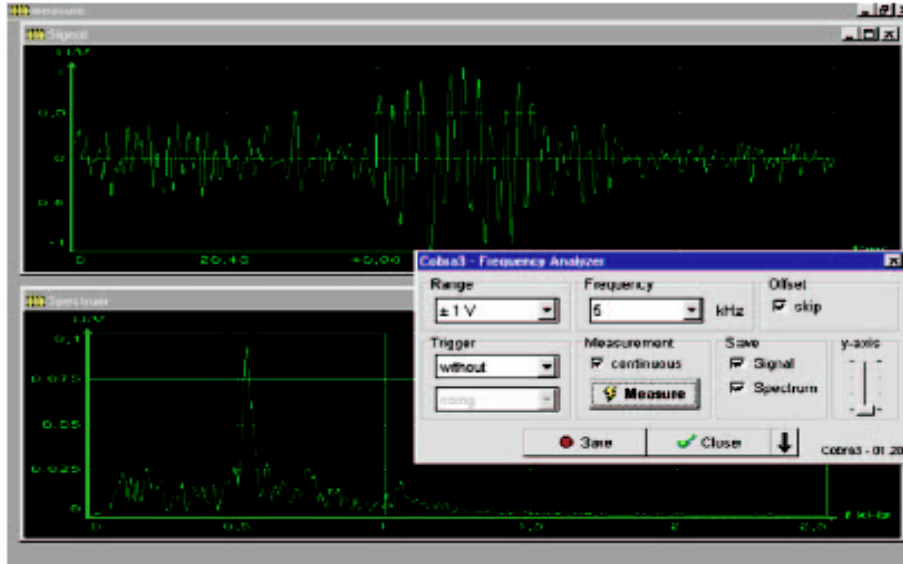


Fig. 6. Afișarea semnalului de timp  $F(t)$  ca tensiune măsurată la fotodetector.

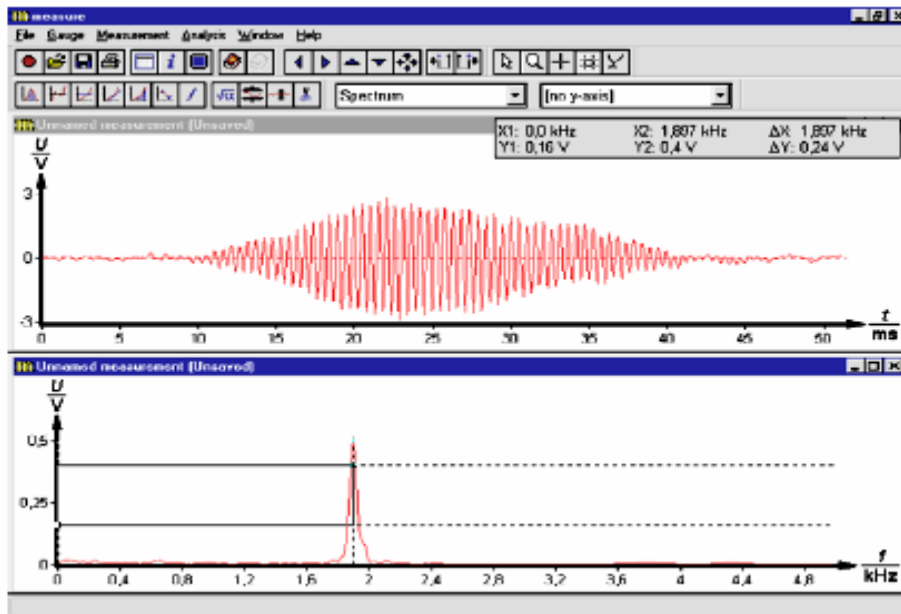


Fig.7. Semnal optic prelucrat.

La viteze mici de curgere este posibil ca vârful semnalului să se plaseze pe spectru prea aproape de zero ( $f \sim 0$  Hz) și acest lucru nu poate decât să îngreuneze localizarea lui și să altereze rezultatele.

La viteze foarte mari de curgere pot apărea turbulențe ce induc erori mari în calculul vitezei particulei. În plus este posibil ca vârful semnalului să fie aplatizat și să se întindă pe cea mai mare parte a domeniului de frecvență.

Cu ajutorul cursorului se poate determina direct de pe graphic frecvența principală a vârfului semnalului (clic stânga pe mouse, iar valoarea frecvenței este afișată în josul ecranului).

Determinarea frecvenței vârfului semnalului maxim din spectru de frecvențe se va face pentru diferite viteze de curgere. Pentru a modifica viteza de curgere este suficient să se modifice ușor gradul de închidere al robinetului (Obs: după modificarea gradului de închidere al robinetului trebuie așteptat aproximativ două minute până când diametrul tubului de silicon s-a stabilizat).

*Nota:* Corpurile dispersate se sedimentează după câteva ore, fapt pentru care trebuie returnate în stadiul de soluție prin agitarea lichidului la intervale regulate de timp (la fiecare 30 min)!

Lumina de fundal trebuie să fie puțină pentru ca vârful de semnal să fie cât mai ușor de vizualizat.

Ieșirea din program se face un dublu click în colțul din stânga sus al ecranului cu ajutorul butonului de pe mouse.

### 3. Teoria lucrării.

#### *Efectul Doppler.*

Există două cazuri ale efectului Doppler ce sunt folosite pentru explicarea principiului de funcționare LDA (vezi fig. 8).

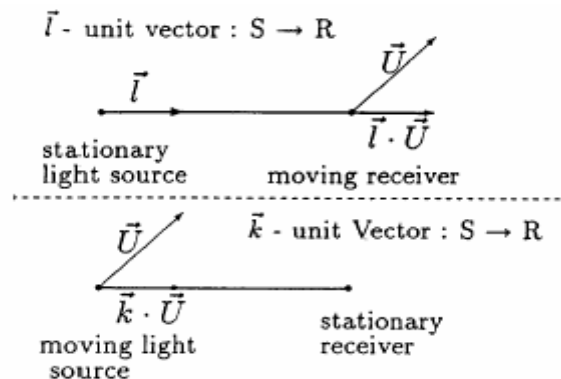


Fig.8. Situații în care apare efectul Doppler.

a) În primul caz, considerăm o sursă de lumină staționară și un receptor aflat în mișcare cu vectorul viteză  $\vec{U}$ . Frecvența luminii  $f_R$  "văzută" de receptor este definită în funcție de frecvența  $f_s$  a sursei de lumină:

$$f_R = f_s \left( 1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{l}}{c} \right) \quad (3)$$

unde  $c$  este viteza luminii în aer, iar  $\vec{l}$  este versorul direcției sursă-receptor.

b) În cazul al doi-lea se consideră sursa de lumină în mișcare cu viteza  $\vec{U}$ , iar receptorul este fix (staționar). În această situație frecvența luminii recepționate este dată de:

$$f_R = \frac{f_s}{\left(1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{k}}{c}\right)} \quad (4)$$

unde  $\vec{k}$  este versorul unitate al direcției sursă-receptor.

În lucrarea de față se folosește un laser cu He-Ne ca sursă staționară de lumină, iar un flux de particule mici în curgere dispersează lumina, care este apoi recepționată de un fotodetector FD (o fotodiodă).

Utilizând relațiile (3) și (4) se obține frecvența luminii recepționată de fotodetector după ce lumina a fost dispersată de particulele aflate în mișcare (v. fig. 9):

$$f_R = f_s \left(1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{l}}{c}\right) / \left(1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{k}}{c}\right) \quad (5)$$

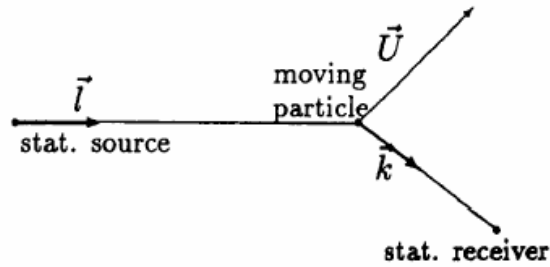


Fig. 9. Împrăștierea luminii de către particule aflate în mișcare.

Schimbarea Doppler a frecvenței luminii ca rezultat al mișcării particulelor (așa cum reiese din ecuația (5)) este mică în comparație cu frecvența luminii incidente. Ca urmare, măsurarea directă a frecvenței (de ex. cu ajutorul interferometrului Fabry-Perrot) nu poate fi făcută decât cu o acuratețe scăzută.

Există diferite metode de a evita măsurarea directă a frecvenței optice.

Datorită caracteristicilor cuadractice ale fotodetectorului, este posibilă amestecarea (mixarea) celor două frecvențe, frecvența laserului și frecvența recepționată după împrăștierea luminii pe micile sfere de argint din lichid. Cele două frecvențe fiind foarte apropiate apare fenomenul de bătăi, iar frecvența bătăilor celor două semnale poate fi detectată. Semnalul cu frecvență șifată Doppler se amestecă cu semnalul laser, iar la măsurarea frecvenței bătăilor se obține diferența celor două frecvențe.

$$T_b = \frac{T_1 T_2}{|T_2 - T_1|} \Rightarrow \nu_b = |\nu_2 - \nu_1| \quad (6)$$

În montajul experimental utilizat, fascicolul laser este împărțită în două raze de intensități egale, care sunt apoi focalizate pe cuva C prin care trece lichid. Particulele din fluxul de fluid dispersează lumina ambelor raze. Schimbarea frecvențelor celor două raze prin efect Doppler este diferită (razele au același vector de undă  $\vec{k}$ , dar vectorii deplasare  $\vec{l}$  sunt diferiți). Frecvența bătăilor (diferența frecvențelor modificate Doppler) este mult mai mică decât frecvența sursei de lumină, astfel încât este posibilă măsurarea și detectarea exactă a acesteia cu ajutorul mijloacelor electronice.



Frecvențele luminii împrăștiate pentru fiecare din cele două fascicule sunt date de expresiile :

$$f_{R1} = f_s \left( 1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{l}_1}{c} \right) / \left( 1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{k}_1}{c} \right) \quad (7)$$

$$f_{R2} = f_s \left( 1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{l}_2}{c} \right) / \left( 1 - \frac{\vec{U} \cdot \vec{k}_2}{c} \right) \quad (8)$$

iar diferența dintre cele două este dată de:

$$f_D = f_{R1} - f_{R2} = f_s \cdot \frac{\vec{U} \cdot (\vec{l}_2 - \vec{l}_1)}{c} \quad (9)$$

ceea ce arată proporționalitatea ei cu viteza particulei.

Folosind relația din fig. 10 și legătura dintre viteza luminii, frecvență și lungimea de undă  $\lambda$  a radiației laser,  $c = f_s \cdot \lambda$ , deplasarea frecvenței prin efect Doppler poate fi exprimată în forma:

$$f_D = \frac{\vec{U} \cdot (\vec{l}_2 - \vec{l}_1)}{\lambda} = \frac{\vec{U} \cdot \vec{n} \cdot 2 \sin \varphi}{\lambda} = \frac{\vec{U}_\perp \cdot 2 \sin \varphi}{\lambda} \quad (10)$$

unde  $\vec{U}_\perp$  este componenta vitezei particulei perpendiculară pe bisectoarea unghiului format de cele două fascicule în cuva de măsurare (și care poate fi chiar viteza particulelor atunci când cuva este perpendiculară pe axa de simetrie optică).

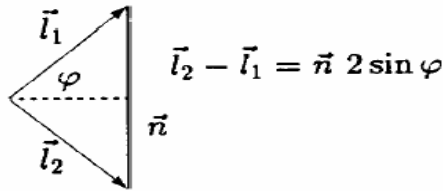


Fig. 10.

Ecuția (10) arată că viteza particulei poate fi măsurată prin determinarea deplasării Doppler a frecvenței, dacă particula trece prin volumul cuvei C. Unghiul  $2\varphi$  dintre fascicule și lungimea de undă  $\lambda$  pot fi determinate cu un grad mare de acuratețe.

### 3. Modul de lucru.

- se realizează montajul experimental conform instrucțiunilor din secțiunea 2;
- se determină mărimile  $l$ ,  $l'$  și  $D$  în vederea stabilirii unghiului de suprapunere. Acesta se calculează folosind relația (2);
- se agită lichidele din recipiente și se poziționează recipientul cu mai mult lichid la o anumită înălțime;
- se ajustează clemele pe furtunele din cauciuc pentru a avea fluxul dorit de curgere;
- se pornește de pe desktop programul "measure4";
- se fixează următorii parametri:  $u = 1V$ ,  $f = 5kHz$ , measurement *Continue*, skip activat, etc;
- se pornește o măsurătoare nouă;

- se salvează măsurătoarea și se prelucrează funcția  $G(t)$ . Pentru aceasta, se face întâi o netezire a curbei, prin smootare sau prin fitare cu "*fit cu distribuție normală offset*";
- în josul ecranului este afișată valoarea peak-ului în frecvență;
- se calculează viteza de curgere utilizând relația (10);
- se modifică deschiderea robinetilor și se fac măsurători și pentru alte viteze de curgere, remarcându-se proporționalitatea dintre viteza de curgere și deplasarea Doppler în frecvență.