

Pomiar prędkości metodą dopplerowską

Wyznaczanie profilu przepływu cieczy

Piotr Czaban, Damian Orlef, Michał Pacholski

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Zakład optyki
Laboratorium Procesów Ultraszybkich

Warsztaty Krajowego Funduszu na Rzecz Dzieci, 2011
Pod opieką Prof. Czesława Radzewicza i mgr Filipa Ozimka

Problem

- Celem pomiarów było określenie profilu prędkości wody w rurce.
- Pomiary prędkości wykonano metodą opartą na interferencji światła laserowego rozproszonego na obiekcie (LDA - Laser Doppler Anemometry).

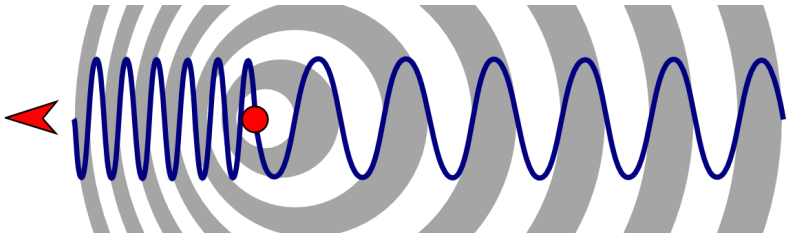
Cechy metody

- Praktyczny brak wpływu na mierzoną wartość.
- Dostatecznie wysoka rozdzielczość.
- Trudna interpretacja wyników.

Efekt dopplera

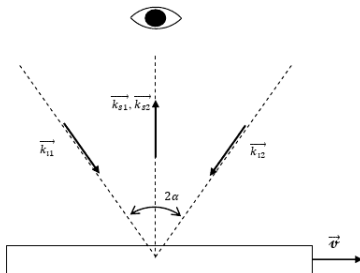
Fala emitowana przez poruszające się źródło zmienia częstotliwość:

$$\vec{k} = \vec{k}_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$



Podwójny efekt dopplera

Para wiązek rozproszonych na poruszającym się obiekcie

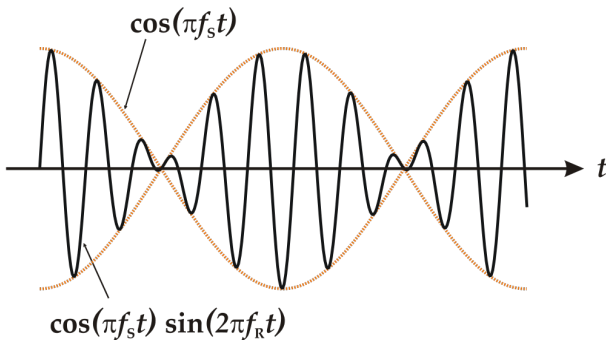


$$\Delta f = 2f_0 \frac{v}{c} \sin \alpha$$

- Aby uzyskać rozproszenie na małych obiektach należy użyć fali, o małej długości, np. światła widzialnego.
- Bezpośredni pomiar częstości optycznych jest niemożliwy.

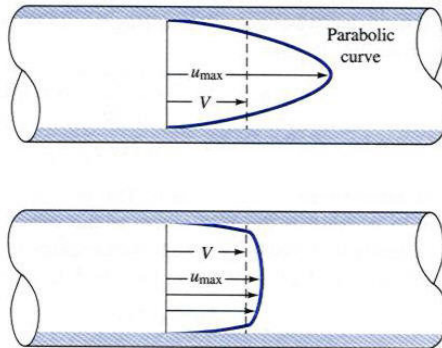
Dudnienie

Inteferencja fal o zbliżonej częstotliwości wywołuje dudnienie.



- Różnice częstotliwości można zmierzyć korzystając z interferencji.

Model przepływu

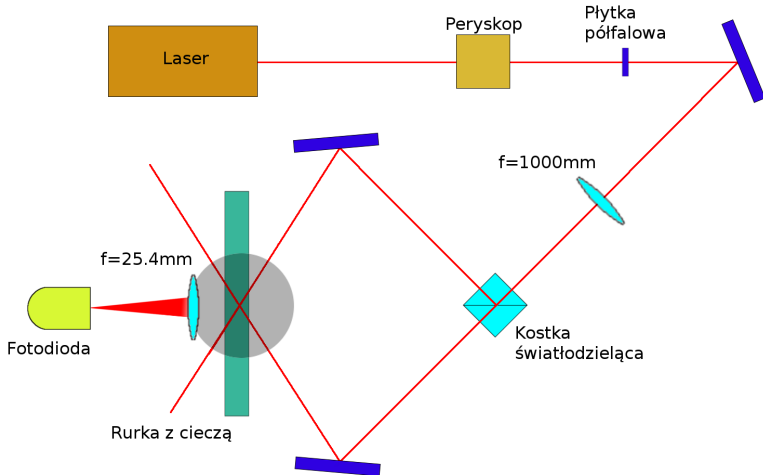


Liczba Reynoldsa

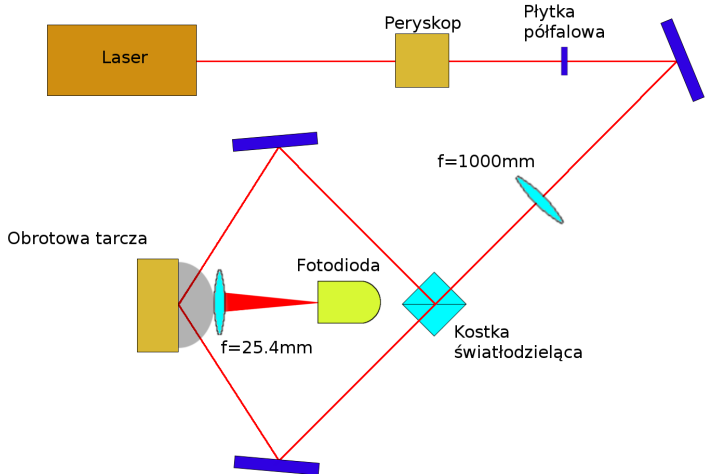
$$R = \frac{\rho v d}{\mu}$$

- Do 2300 - przepływ laminarny
- Od 2300 do 10000 - częściowo turbulentny
- Powyżej 10000 - przepływ turbulentny
- Pomiary dla liczb z zakresu około 3000-6000

Układ z rurką

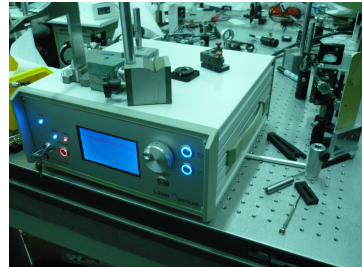
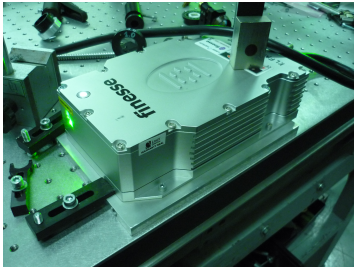


Układ z tarczą



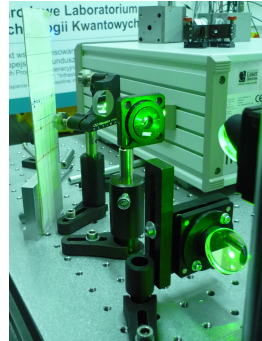
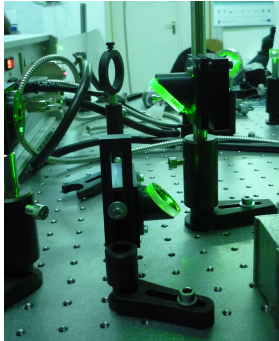
Laser

- Długość fali: 532nm
- Moc: ustalona 0.2W, właściwa 0.45W
- Ośrodek czynny: jony neodymu Nd^{3+}
- Polaryzacja: eliptyczna z długą osią poziomą (10:1)



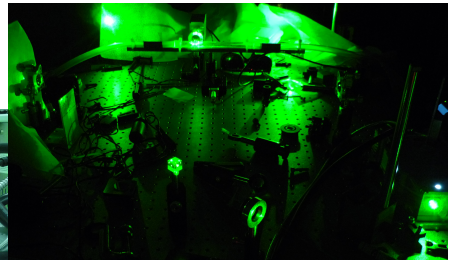
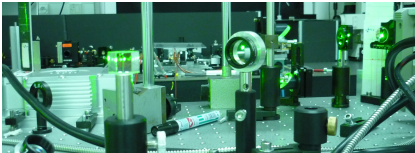
Elementy optyczne

- Peryskop
- Płytki półfalowa



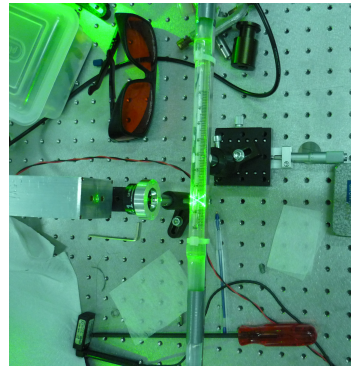
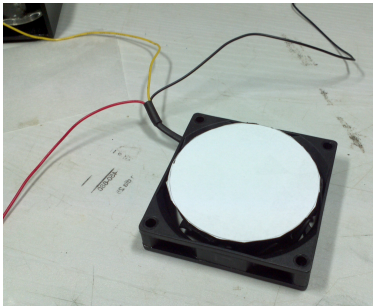
Elementy optyczne

- Soczewka skupiająca o ogniskowej 1000mm
- Kostka światłodzielnąca 50:50
- Zwierciadła kierujące wiązkę pod kątem 51°



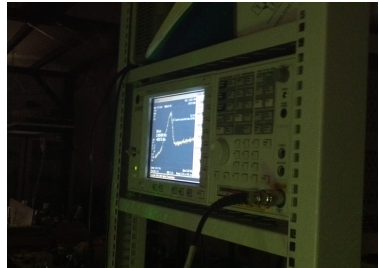
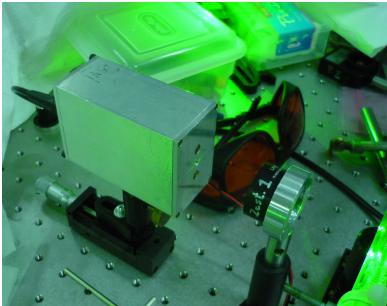
Obiekt badań

- Tarcza kalibracyjna
- Rurka szklana o średnicy $9.75\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ z przepływającą wodą na przesuwanej platformie



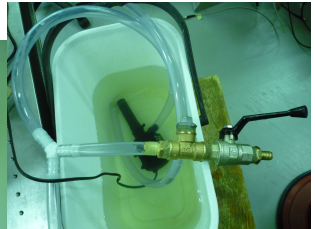
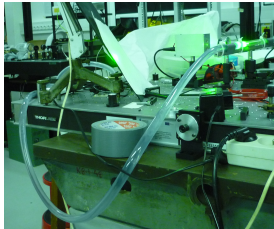
Układ detekcyjny

- Soczewka skupiająca o ogniskowej 25.4mm
- Fotodioda lawinowa
- Analizator widma



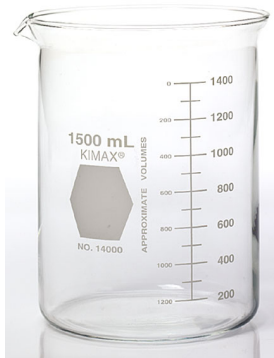
Układ pompujący

- Rurki
- Pompka akwariowa o mocy 6W
- Bypass z zaworem kulowym



Pomiar całkowitego przepływu

Pomiar czasu potrzebnego na napełnienie zlewki o pojemności 1.5l.



Badana ciecz

Woda kranowa lub z dodatkiem śmietanki do kawy.



Tarcza referencyjna

Tarcza obracała się z różną prędkością zależną od podanego napięcia.

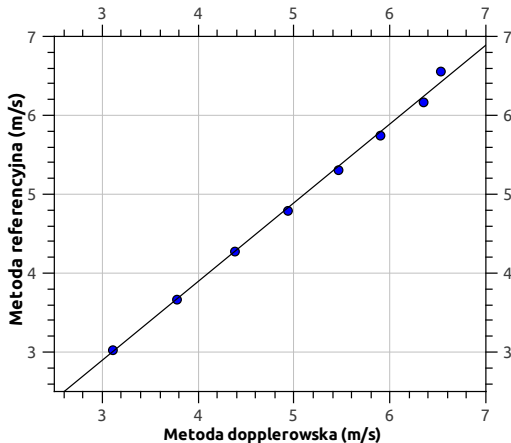
Prędkość była mierzona dwoma sposobami:

- analizując sygnał z tarczy na oscyloskopie
- mierząc częstość dudnień sygnału rozproszonego na tarczy

Korelacja wyników pomiarów

Współczynnik korelacji wyników pomiarów prędkości wynosi:

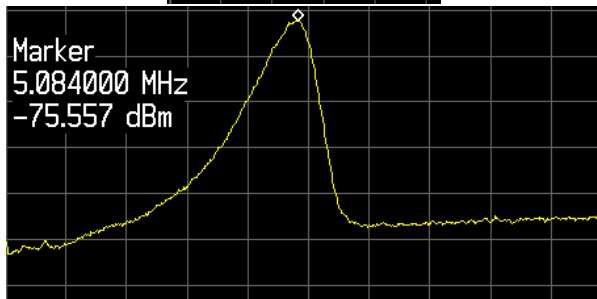
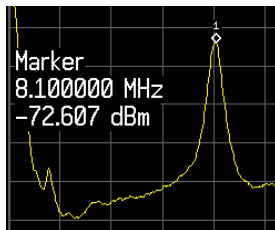
$$r = 0.998$$



Parametry metody

- Pomiar dokonywany tylko dla światła przechodzącego przez rurkę (moc 0.6mW)
- Największa moc sygnału dla czystej wody
- Objętość przecięcia się wiązek to około 0.12mm^3
- Najniższa mierzalna częstotliwość to 2,09 MHz, co odpowiada prędkości $0.94\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Odczytywanie częstości dudnień



Wyznaczanie profilu

$$v = \frac{\lambda n \Delta f}{2 \sin(\alpha)}$$

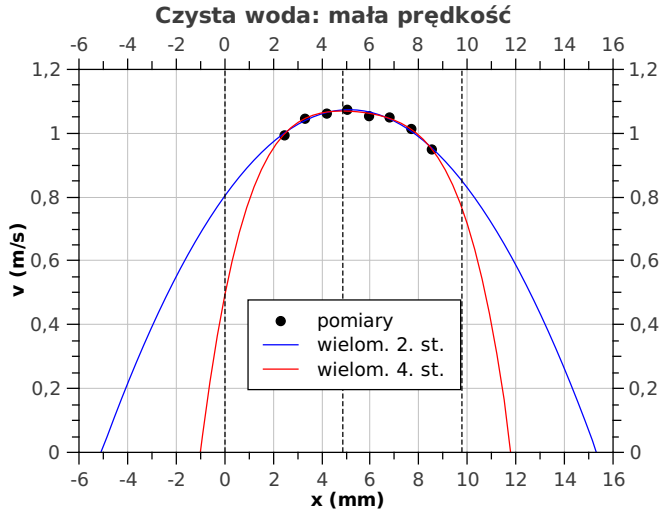
λ - długość fali światła

n - współczynnik załamania

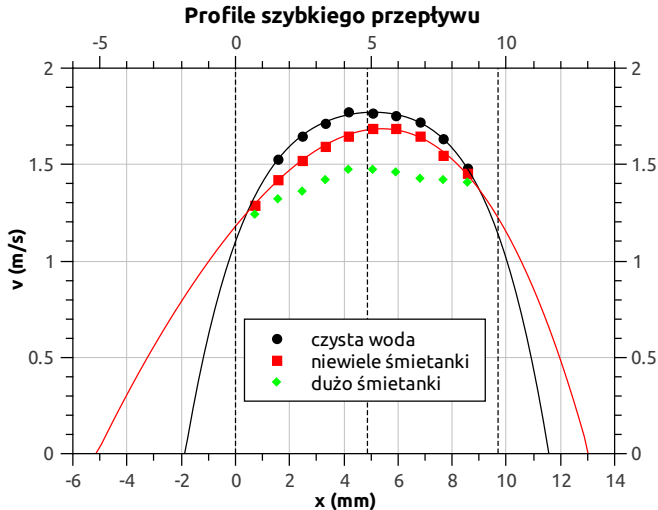
Δf - częstość dudnień

α - kąt padania wiązki

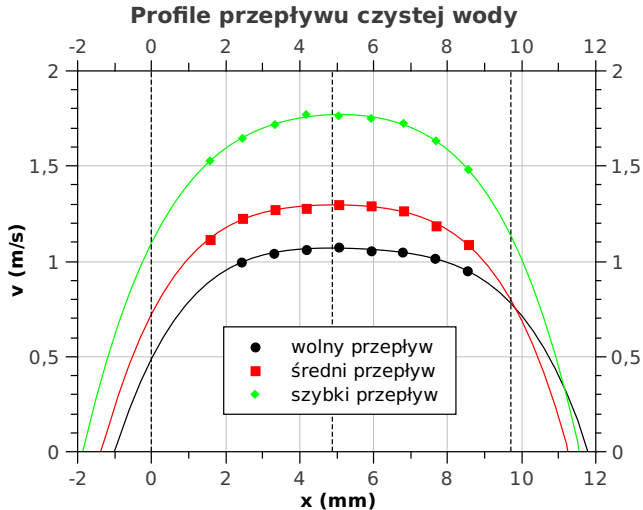
Dopasowywanie krzywej



Różne stężenia śmietanki

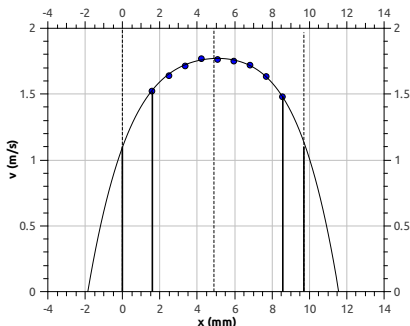


Różne prędkości



Obliczanie przepływu

- Dopasowujemy krzywą profilu prędkości
- Uśredniamy prędkości po przeciwległych stronach osi rurki
- Uogólniamy profil na cały przekrój rurki
- Całkujemy prędkość po powierzchni przekroju rurki w granicach rurki lub pomiarów



Porównanie wartości prędkości przepływu

Metody:

- 1 Metoda dopplerowska w granicach rurki
- 2 Metoda dopplerowska w granicach pomiarów
- 3 Średnia wyników z metod dopplerowskich
- 4 Metoda bezpośrednia

Czysta woda	1.	2.	3.	4.
szybki przepływ	0.111 l/s	0.057 l/s	0.084 l/s	0.076 l/s
średni przepływ	0.080 l/s	0.042 l/s	0.061 l/s	0.050 l/s
wolny przepływ	0.067 l/s	0.019 l/s	0.043 l/s	0.046 l/s

Woda ze śmietanką	1.	2.	3.	4.
szybki przepływ	0.107 l/s	0.085 l/s	0.096 l/s	0.076 l/s

Podsumowanie

- Wyniki potwierdzają teorię
- Metoda nieinwazyjna
- Trudny model teoretyczny przepływu

Dalsze badania

- Profil przepływu innych cieczy
- Profil przepływu dla większych średnic rurki (przepływ laminarny)
- Profil przepływu dla różnych przekrojów rurki

Podziękowania

- Prof. Czesław Radzewicz
- mgr Filip Ozimek
- mgr Piotr Ciąćka
- Krajowy Fundusz na rzecz Dzieci

Bibliografia



Jarno van Roosmalen
The Laser Doppler Effect
2007