

**ANALIZA PROCESÓW TRANSPORTU ENERGII W TURBULENTNEJ  
WARSTWIE PRZYŚCIENNEJ W OBECNOŚCI GRADIENTU  
CIŚNIENIA**

mgr inż. Artur Dróżdż

Promotor: dr. hab. inż. prof. PCz, Witold Elsner

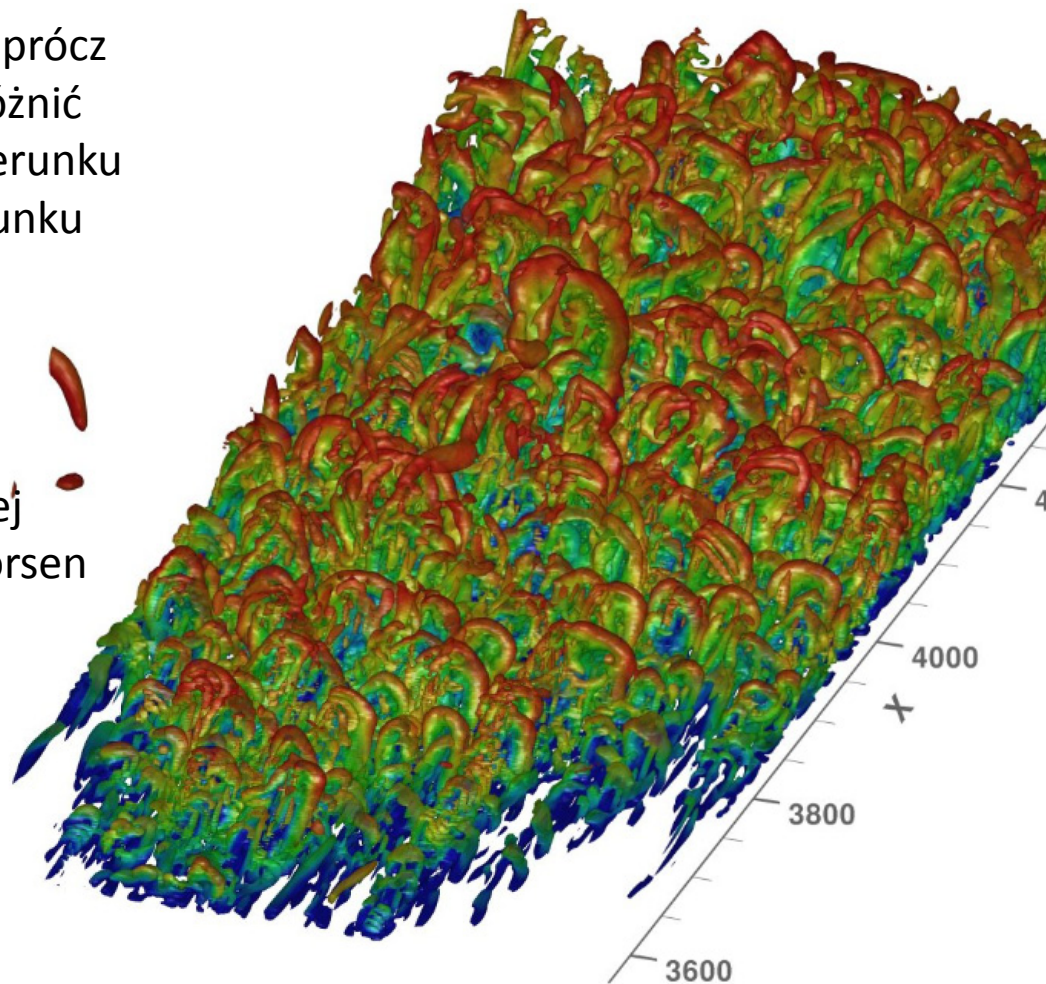
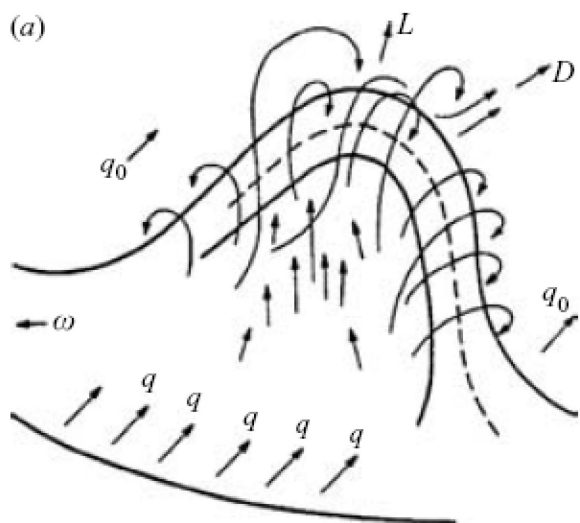
# Plan prezentacji

- 1. Wprowadzenie - struktura turbulentnej warstwy przyściennej**
- 2. Opis stanowiska i technik pomiarowych**
- 3. Charakterystyka przepływu średniego**
- 4. Skalowanie profili prędkości średniej i naprężeń Reynoldsa**
- 5. Detekcja struktur koherentnych w turbulentnej warstwie przyściennej**
- 6. Analiza cross-korelacyjna**
- 7. Określenie stopnia modulacji struktur drobnoskalowych przez struktury gruboskalowe**
- 8. Wnioski i podsumowanie**

# Struktura turbulentnej warstwy przyściennej

W turbulentnej warstwie przyściennej oprócz losowego charakteru ruchu można wyróżnić zjawiska quasi-okresowe: zarówno w kierunku równoległym jak i poprzecznym do kierunku ruchu.

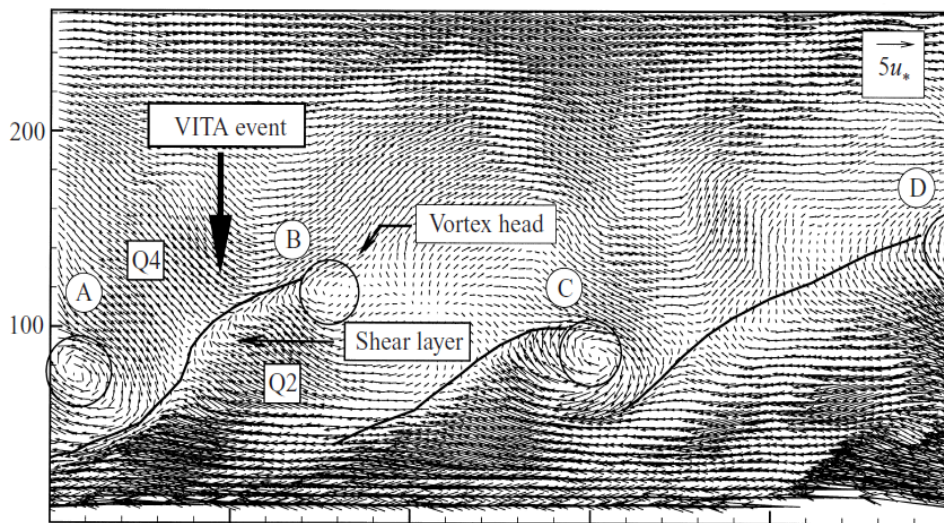
Jako pierwszy istnienie struktury wirowej (horseshoe vortex) zasugerował Theodorsen (1952)



DNS, Wu X. and Moin P., 2009

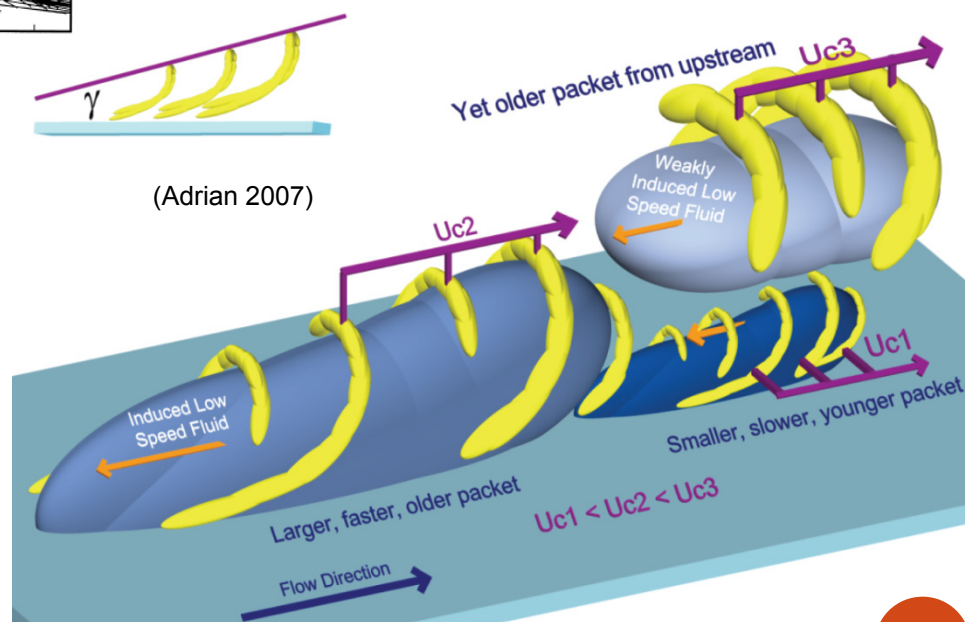
# Struktura turbulentnej warstwy przyściennej

## Koncepcja pakietowa rozwoju struktur koherentnych



Mapa wektorowa PIV  $Re_{\tau}=600$  (Adrian i inni 2000)

- Pakiet zawiera struktury typu horseshoe lub hairpin poruszające się ze zbliżoną prędkością
- Odległość między strukturami i ich tempo wzrostu jest zbliżone
- Pakiety rozwijają się poprzez proces autogeneracji struktur



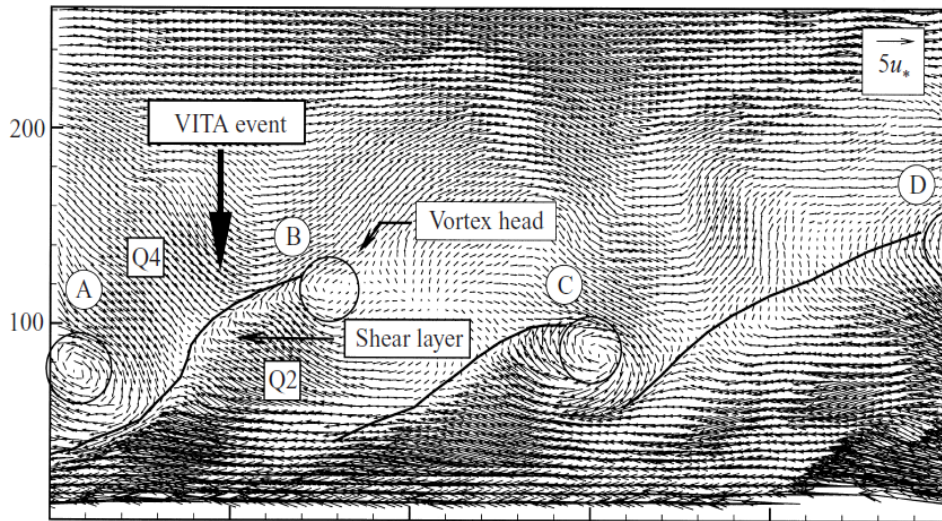
(Adrian 2007)

- Grupa struktur generuje przepływ zwrotny
- Rozmiar pakietów zmienia się w funkcji odległości od ściany
- Pomędzy strukturami występuje warstwa ścinająca, która może być wykryta za pomocą metody VITA

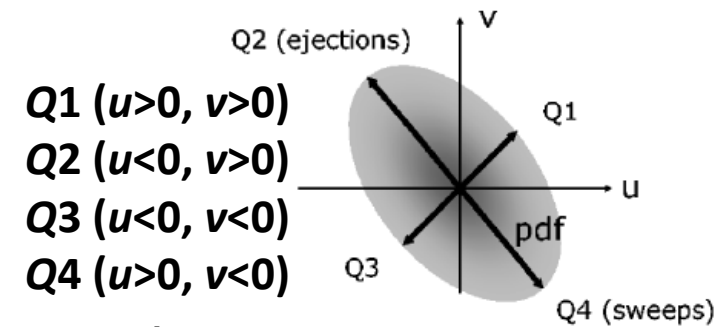
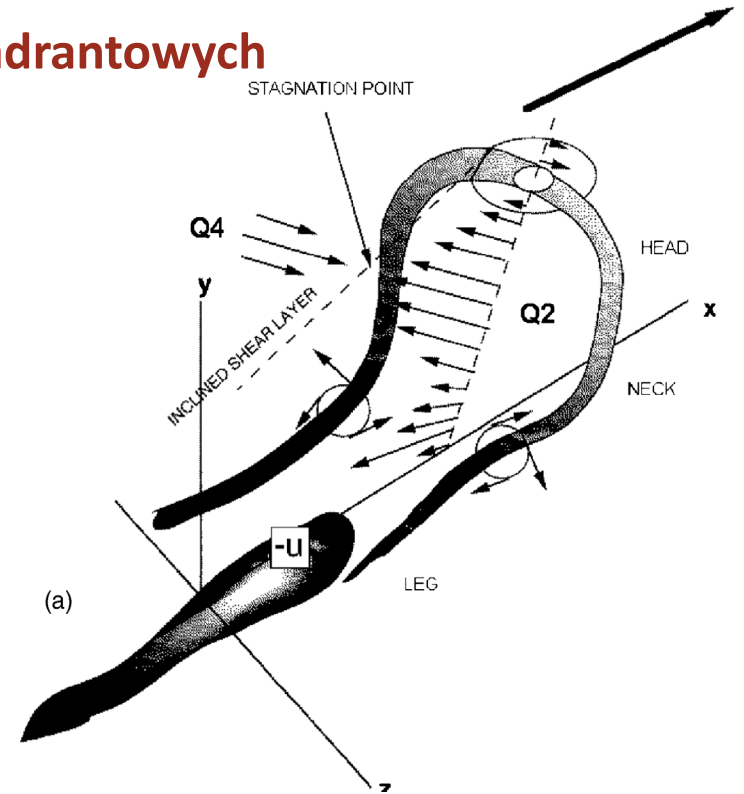


# Struktura turbulentnej warstwy przyściennej

## Identyfikacja zdarzeń kwadrantowych



Mapa wektorowa PIV (Adrian 2000)



Źródło: (Adrian 2007)

- Wir hairpin indukuje zdarzenie Q2 pomiędzy jego ramionami
- zdarzenie Q4 utworzone jest przez głowę kolejnego wiru podkowiastego znajdującego się za wirem pierwotnym
- Przeciwdziałające zdarzenia Q2 i Q4 tworzą warstwę ścinania w wyższych obszarach turbulentnej warstwy
- nogi wiru podkowiastego wytwarzają struktury wzdłużne, które też produkują zdarzenia gruboskalowe Q2 i Q4

# Struktura turbulentnej warstwy przyściennej

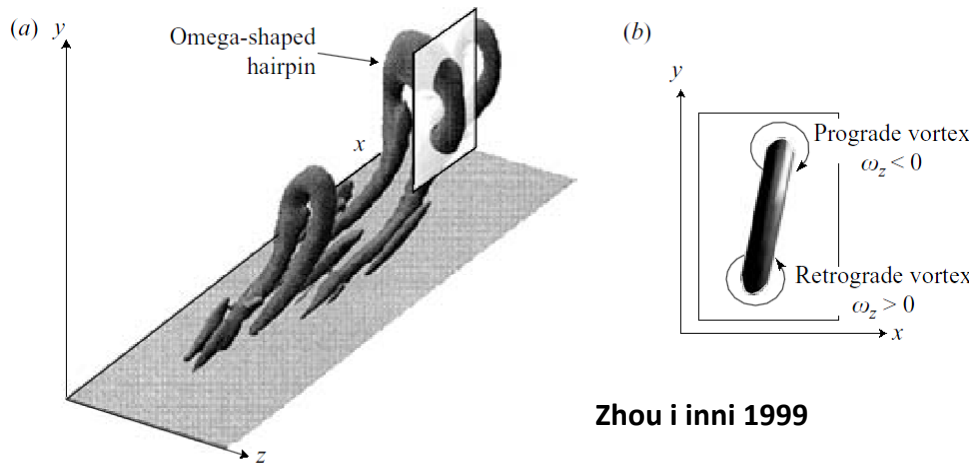
## Zwrot wirowość i prędkość konwekcji struktur

Istnieją dwa kierunki wirowości struktur wirowych:

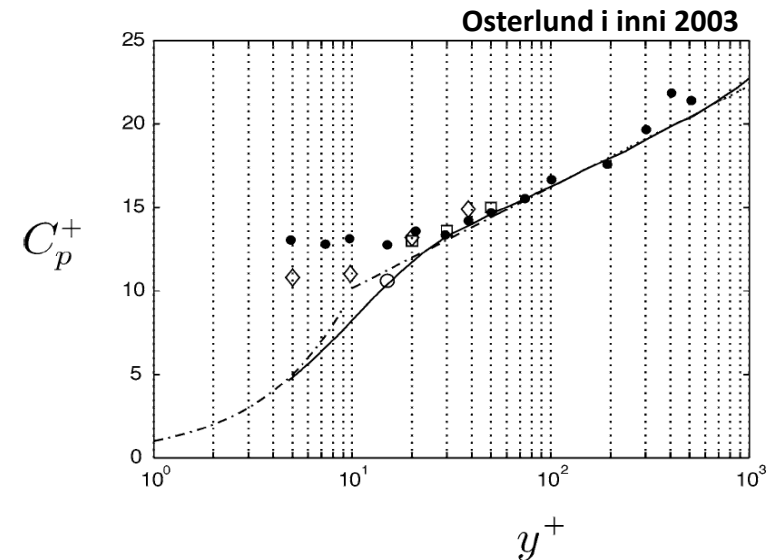
- retro-gradientowe: dodatnia wirowość
- pro-gradientowe: ujemna wirowość

Prędkość konwekcji dominujących struktur w ZPG:

- Stała prędkość konwekcji dla  $y^+ < 15$  30 równa  $U_k^+ \approx 13$
- Równa prędkości średniej w strefie logarytmicznej



Zhou i inni 1999



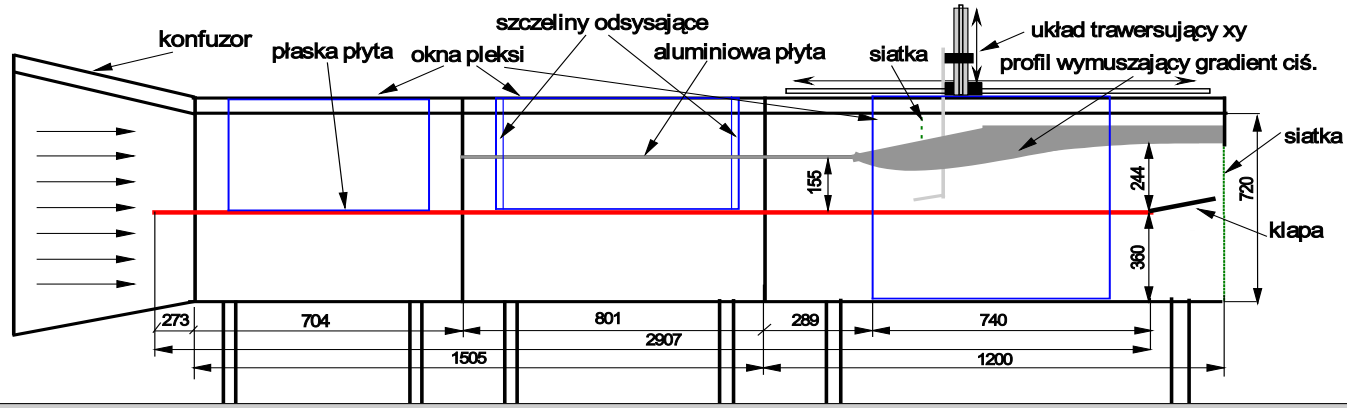
Nieznane pochodzenie wirów retro-gradientowych (występują blisko struktur pro-gradientowych)

Brak danych o wartościach prędkości konwekcji struktur dla warstwy z gradientem ciśnienia.

## *Cel badań*

- **Poznanie i wyjaśnienie mechanizmów zjawisk zachodzących w turbulentnej warstwie przyściennej poddanej oddziaływaniu zmiennego gradientu ciśnienia**
- **Analiza metod skalowania profili prędkości średniej oraz naprężeń Reynoldsa w obszarze FPG oraz APG i próba doboru metody pozwalającej uzyskać uniwersalność tych profili.**
- **Opracowanie i zastosowanie metody detekcji struktur koherentnych w obszarze dodatniego i ujemnego gradientu ciśnienia.**
- **Analiza prędkości konwekcji struktur i kąta nachylenia struktur przy zastosowaniu funkcji cross-korelacji sygnałów z dwóch sond termooanemometrycznych.**
- **Analiza zjawiska modulacji struktur drobno-skalowych przez struktury grubo-skalowe przy wykorzystaniu metodyki opartej o transformatę Hilberta sygnału czasowego prędkości.**

# Sekcja testowa i tunel aerodynamiczny



**Wymiary płaskiej płyty:** 2807 mm długość, 250 mm szerokość, 10 mm grubość

- **Pręt zaburzający** : - ulokowany 210 mm za płaszczyzną natarcia na dolnej i górnej płycie – **uzyskanie w pełni rozwiniętej turbulენტnej warstwy przyściennej**
- **klapa** – 15° i siatka na wylocie – **zapewnienie dwuwymiarowości za pomocą szczelin odsysających na ściankach bocznych**

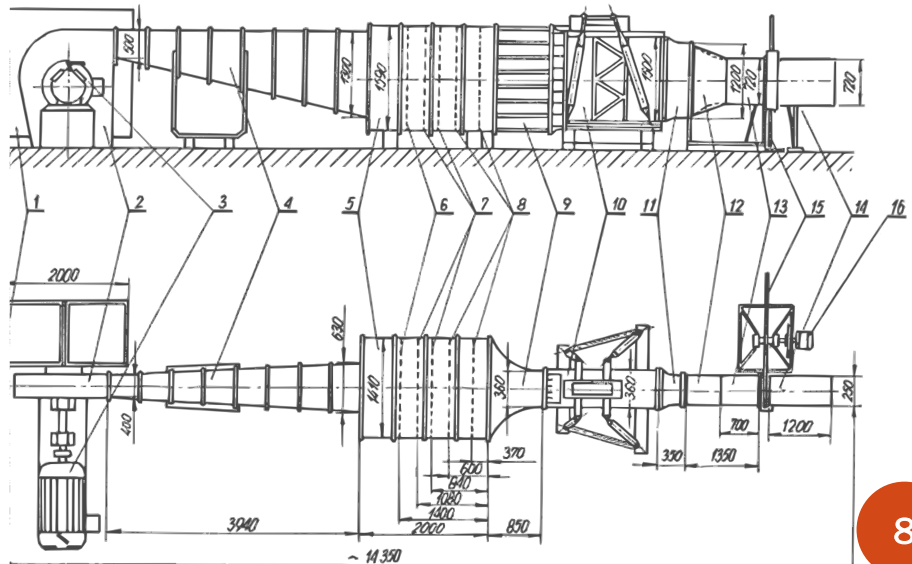
## Tunel aerodynamiczny o otwartym obiegu:

**Warunki wlotowe:**

$U=15 \text{ m/s}$

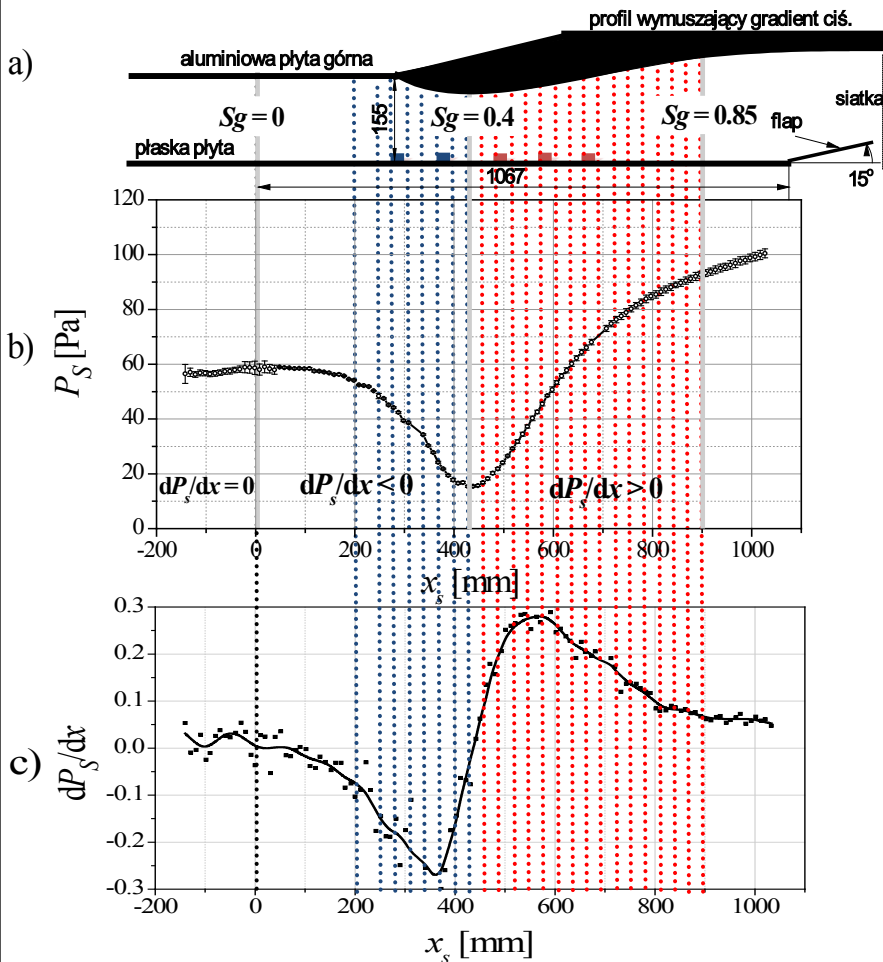
$Tu \approx 0.5\%$

$Re_{\theta}=2500$

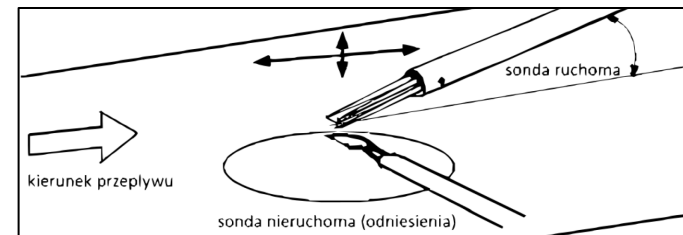
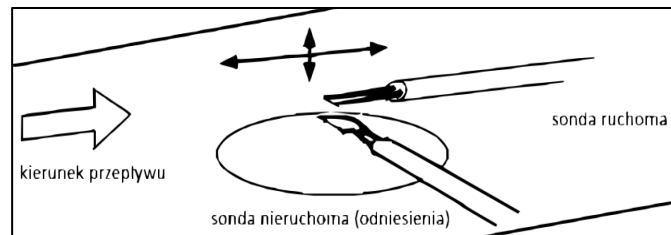




# Zakres pomiarowy



PG	Numer przekroju	Odległość od płaszczyzny wlotowej $x_s$ [mm]	Współrzędna bezwymiarowa $Sg$ [-]	Pomiary sonda pojedynczą	Pomiary sondą X	Pomiary korelacyjne oba typy	Naprężenia styczne
FPG	1	197	0.185	własne	własne	-	Clauser
	2	247	0.231	własne	własne	-	Clauser
	3	277	0.260	własne	własne	✓	Clauser
	4	307	0.288	własne	własne	-	Clauser
	5	337	0.316	własne	własne	-	Clauser
	6	367	0.344	własne	własne	✓	FSF
	7	397	0.372	własne	własne	-	FSF
	8	427	0.400	własne	własne	-	FSF
APG	9	457	0.428	własne	Materny	-	FSF
	10	487	0.456	własne	Materny	✓	FSF
	11	517	0.485	własne	Materny	-	FSF
	12	547	0.513	własne	Materny	-	FSF
	13	577	0.541	własne	Materny	✓	FSF
	14	607	0.569	własne	Materny	-	FSF
	15	637	0.597	własne	Materny	-	FSF
	16	667	0.625	Materny	własne	✓	FSF
	17	697	0.653	Materny	-	-	FSF
	18	727	0.681	Materny	własne	-	FSF
	19	757	0.709	Materny	-	-	FSF
	20	787	0.738	Materny	własne	-	FSF
	21	817	0.766	Materny	-	-	FSF
	22	847	0.794	Materny	własne	-	FSF
	23	877	0.822	Materny	-	-	FSF
	24	907	0.850	Materny	własne	-	FSF

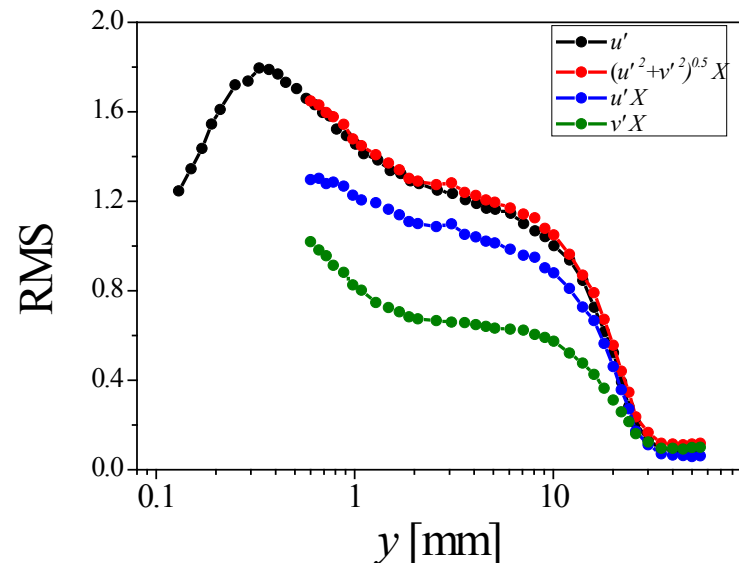
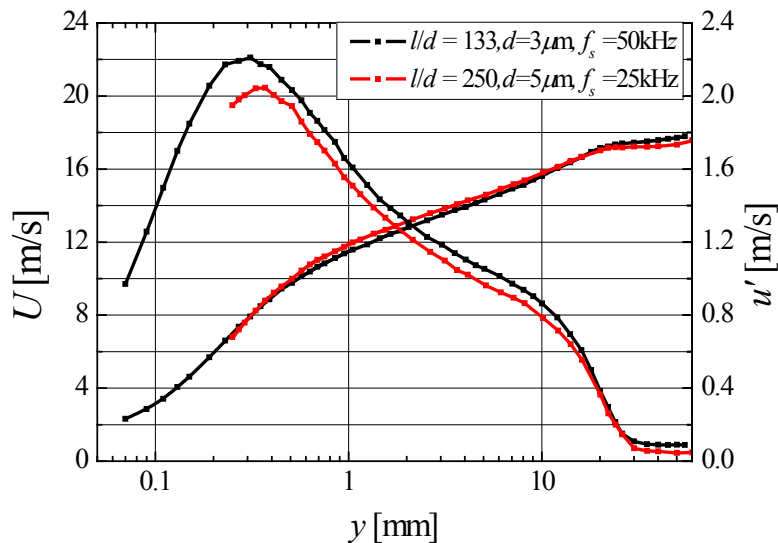
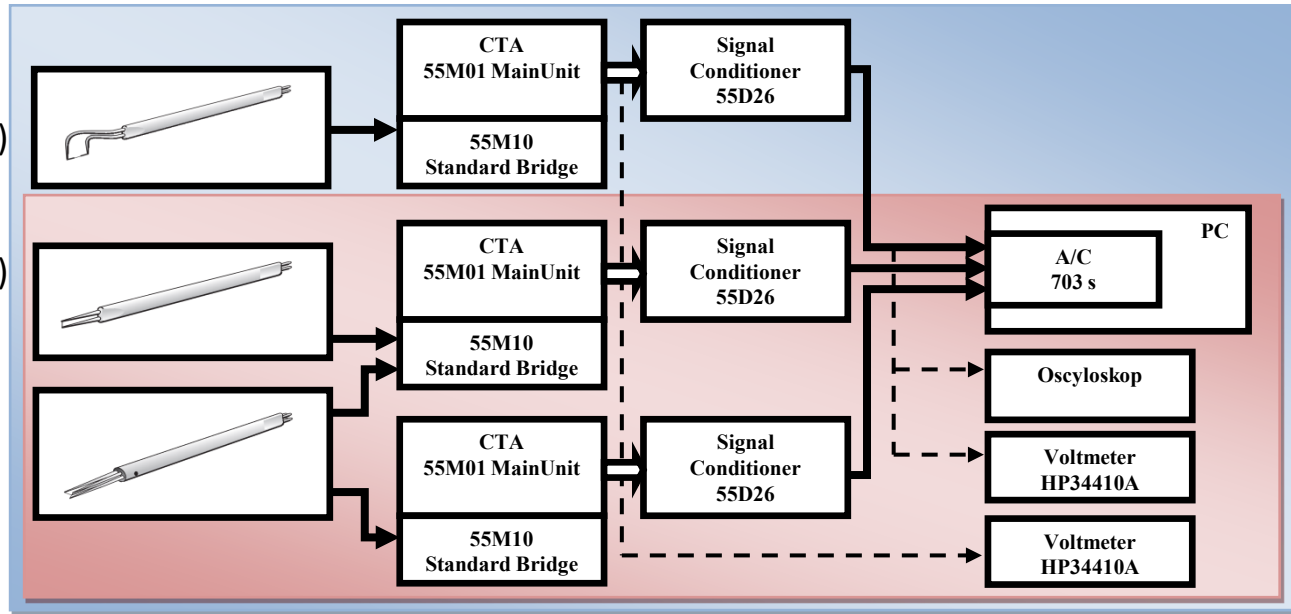


# Tor pomiarowy i akwizycja danych

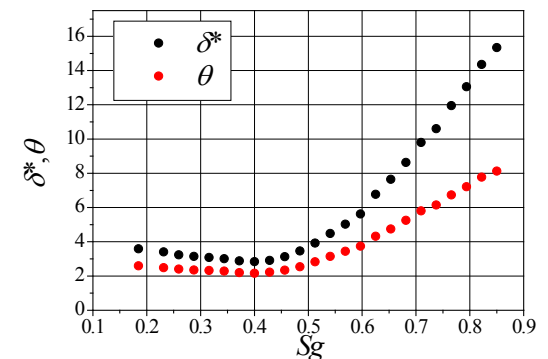
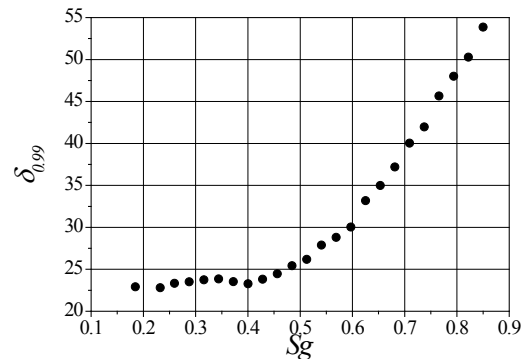
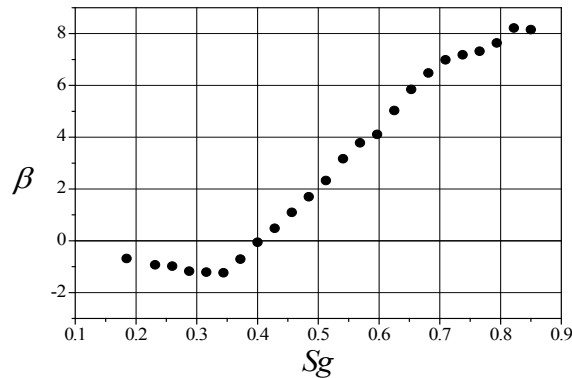
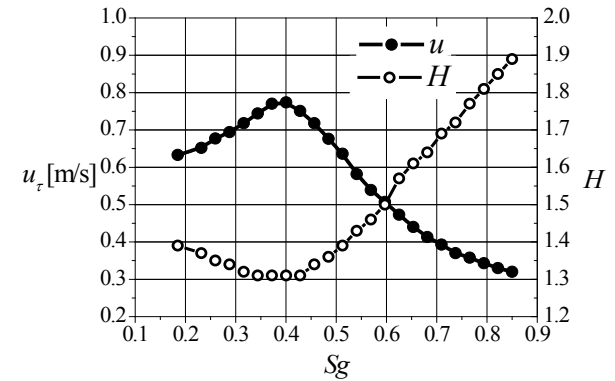
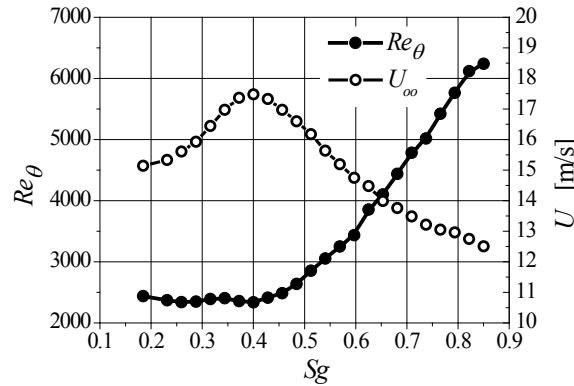
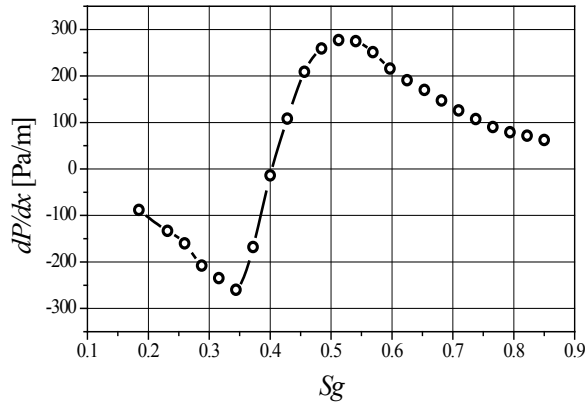
## Pomiary prędkości:

- sonda pojedyncza (Dantec 55P03)  
d = 5  $\mu\text{m}$ , l = 1.25 mm
- sonda pojedyncza (Dantec 55P31)  
d = 3  $\mu\text{m}$ , l = 0.4 mm
- sonda typu X (Dantec 55P61)  
d = 5  $\mu\text{m}$ , l = 1.25 mm

Akwizycja sygnału: czas = 10s,  
próbkowanie: 50kHz (33kHz)



# Rozwój parametrów warstwy przyściennej

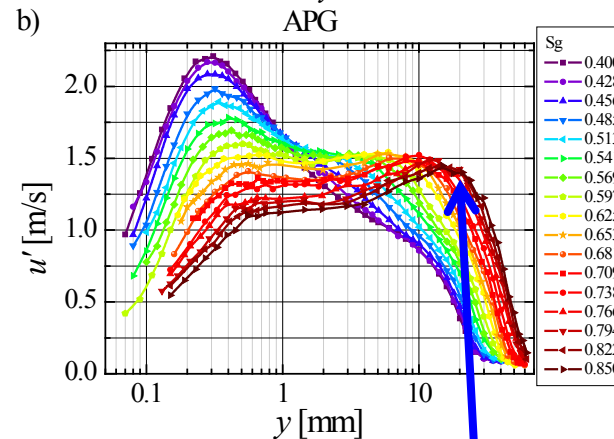
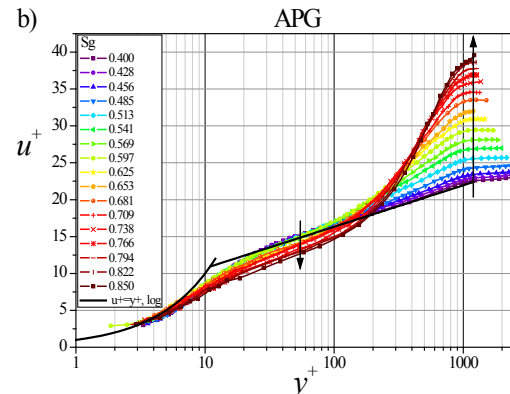
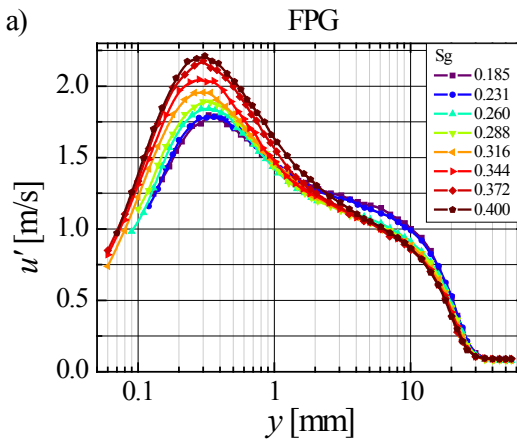
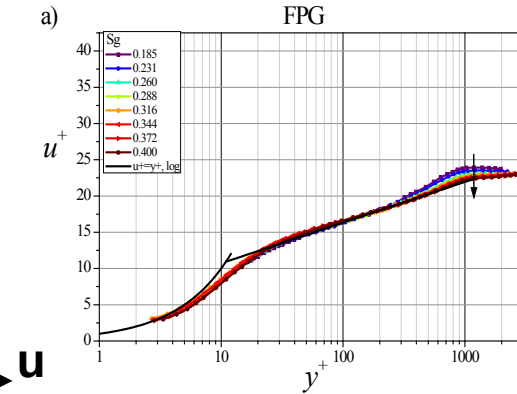
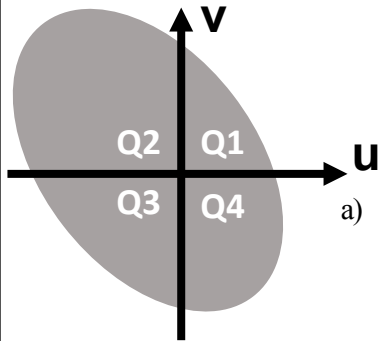


- wymuszony dodatni gradient ciśnienia jest niewystarczający do wywołania oderwania, co potwierdza rozkład prędkości tarcia czy parametru kształtu  $H$  (oderwanie zachodzi gdy  $u_\tau = 0$  i  $H \approx 2.76$ )
- brak stałości parametru ciśnienia Clausera-Rotta'y  $\beta$  (warstwa nie skaluje się na zmiennych wewnętrznych)
- $\beta > 3$  w strefie APG - silny gradient ciśnienia – obniżenie wartości profilu pod linię logarytmiczną

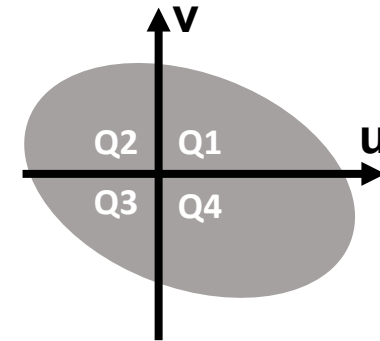
# Struktura turbulentnej warstwy przyściennej

## Oddziaływanie ujemnego i dodatniego gradientu ciśnienia

FPG



APG



Wzmocnienie pików wewnętrznych.

Wzmocnienie zdarzeń kwadrantowych posiadających  $u < 0$ :

Q2 (wyrzut) i Q3 (zagarnianie w tył) (McEligot i inni 2009)

Charakterystyczne jest pojawienie się pików turbulencji w strefie logarytmicznej! - modulacja drobnych skal?

Wzmocnienie zdarzeń kwadrantowych posiadających  $u > 0$ :

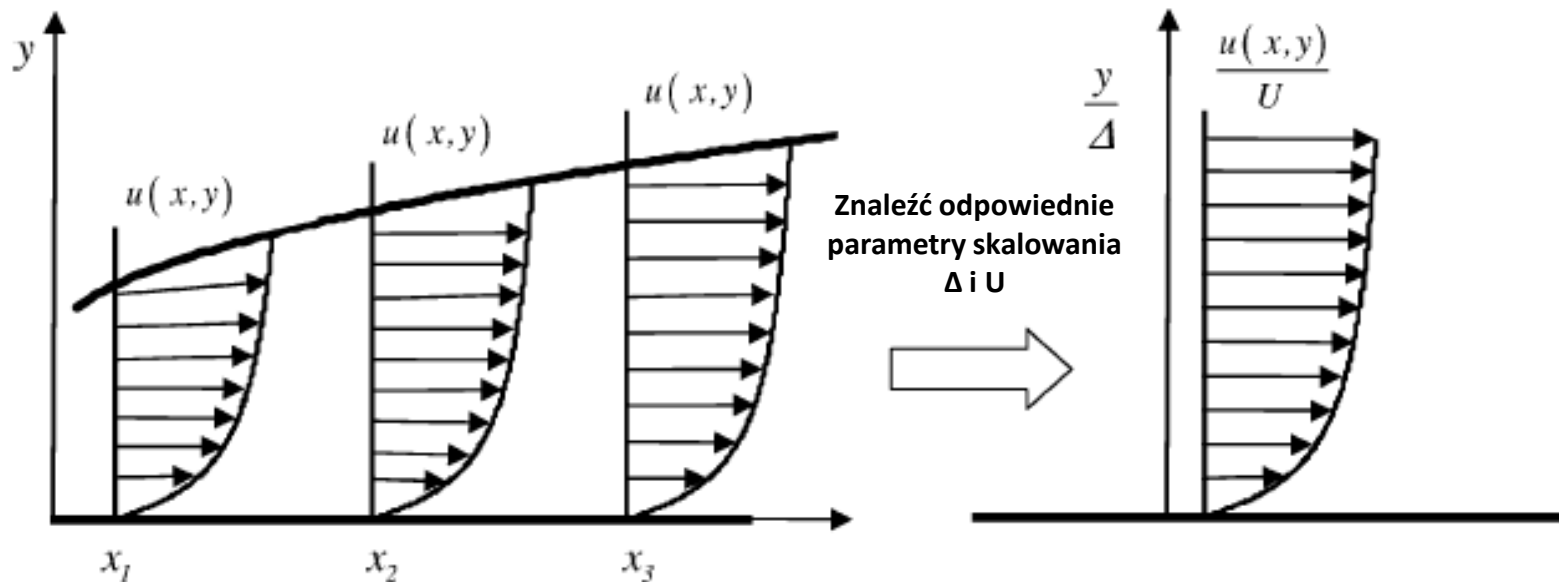
Q1 (wyrzut w przód) i Q4 (zagarnianie) (Krogstad i Skare 1995)



# Skalowanie turbulენტnej warstwy przyściennej

## Cel skalowania turbulენტnej warstwy przyściennej:

- transformacja układu współrzędnych za pomocą indywidualnych parametrów, które pozwolą skalować różne profile prędkości średniej i naprężeń Reynoldsa w jeden uniwersalny profil



Typy skal:

prędkości

długości

• wewnętrzne:

$$u_\tau$$

$$v / u_\tau$$

• zewnętrzne:

$$U_\infty, U_{zs} = U_\infty \frac{\delta^*}{\delta}$$

$$\delta, \Delta = \frac{\delta^* U_\infty}{u_\tau}$$

# Skalowanie turbulენტnej warstwy przyściennej

## Najważniejsze spostrzeżenia:

- metoda skalowania obszaru zewnętrznego zaproponowana przez Castillo-George'a (1997), oparta o analizę zmienności członów równań transportu pędu dla warstw przyściennych zapisanych z wykorzystaniem uśredniania Reynoldsa (równania RANS):

$$\frac{U_\infty - U}{U_\infty} = f(y/\delta) \quad \frac{-u'v'}{U_\infty^2 d\delta/dx} = g_{12}(y/\delta)$$
$$\frac{u'u'}{U_\infty^2} = g_{11}(y/\delta) \quad \frac{v'v'}{U_\infty^2} = g_{22}(y/\delta)$$

Kryterium równowagi warstwy w strefie zewnętrznej:

$$\Lambda = \frac{\delta}{\rho U_\infty^2 d\delta/dx} \cdot \frac{dP_\infty}{dx} = -\frac{\delta}{U_\infty d\delta/dx} \cdot \frac{dU_\infty}{dx} = const$$

- Zagarola-Smits (1998) zaproponowali inną skalę, która pierwotnie oparta była na obserwacjach prawa defektu prędkości przepływu w rurze a następnie rozszerzona dla przypadku zewnętrznego obszaru turbulენტnej warstwy przyściennej:

$$\frac{U_\infty - U}{U_{zs}} = f(y/\delta) \quad \frac{u'u'}{U_{zs}^2} = g_{11}(y/\delta) \quad \frac{-u'v'}{U_{zs}^2} = g_{12}(y/\delta) \quad \frac{v'v'}{U_{zs}^2} = g_{22}(y/\delta) \quad U_{zs} = U_\infty \frac{\delta^*}{\delta}$$

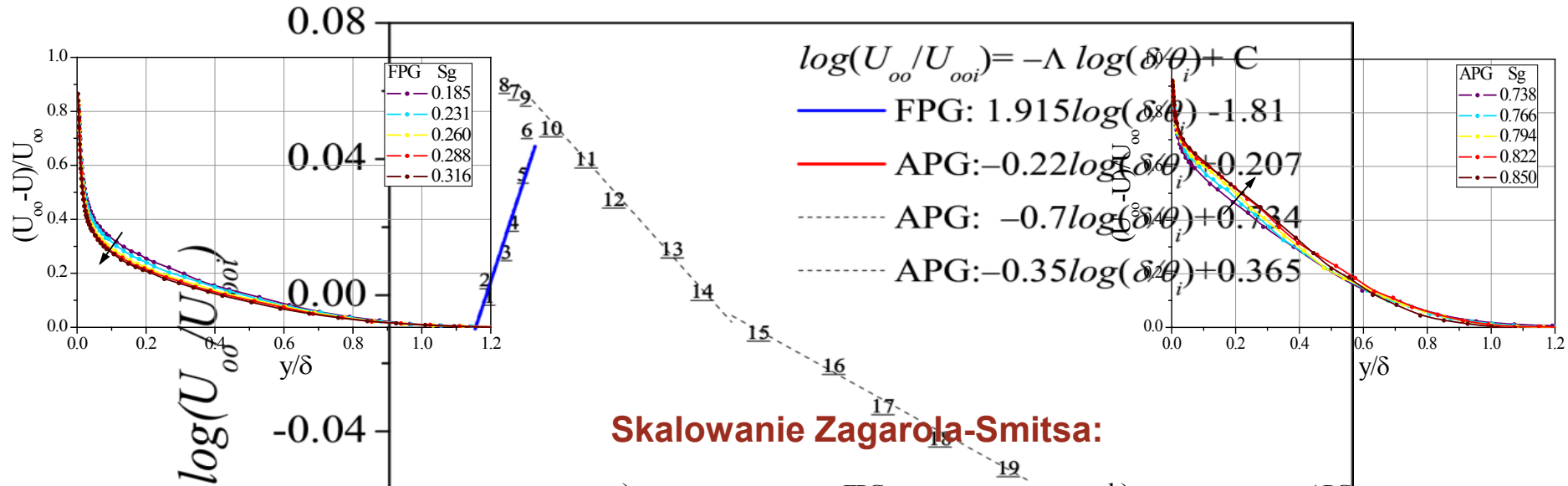
## Uwaga:

- skalowanie Zagarola-Smitsa można zredukować do formuły von Karmana  $\delta^* / \delta \rightarrow u_\tau / U_\infty$   
lub Castillo-George'a  $\delta^* / \delta \rightarrow const$

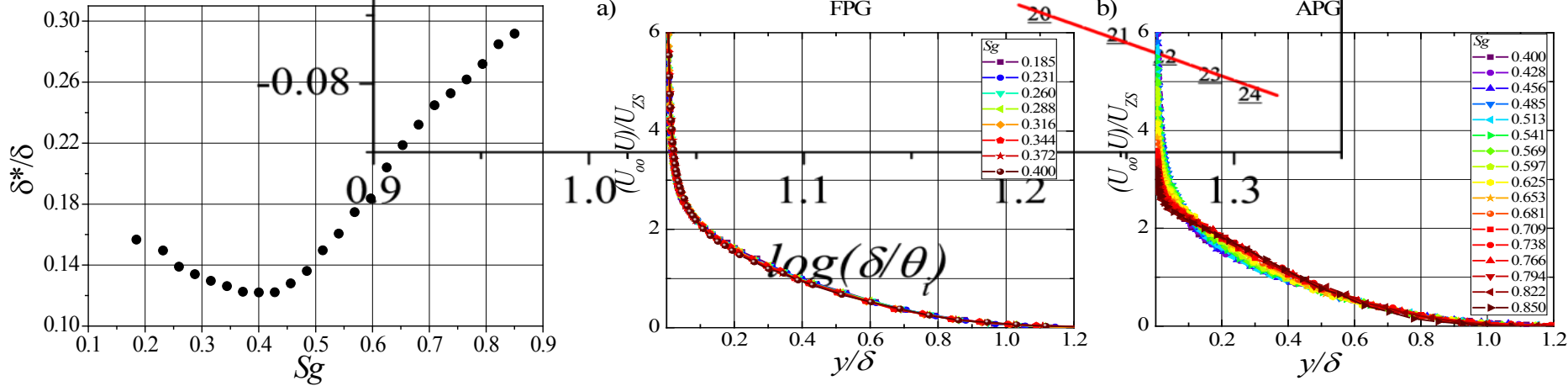
Skalowanie Zagarola-Smitsa jest bardziej uniwersalne (szerszy zakres stosowalności)

# Analiza metod skalowania

## Skalowanie Castillo-George'a (deficytu prędkości) – kryterium równowagi:



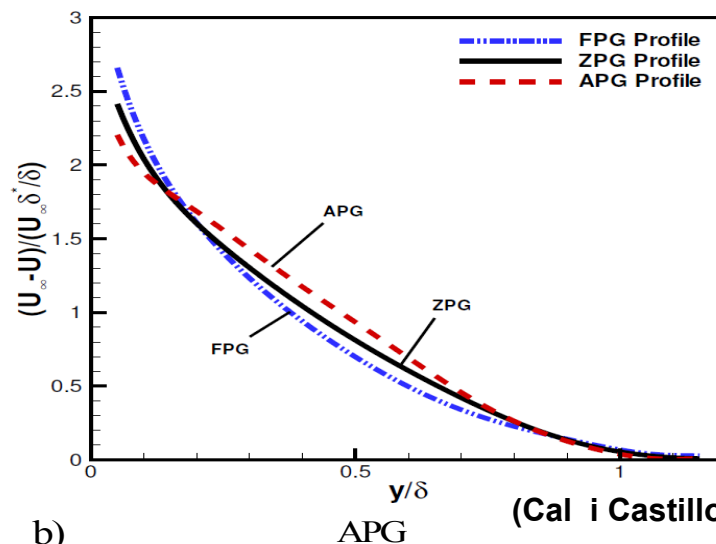
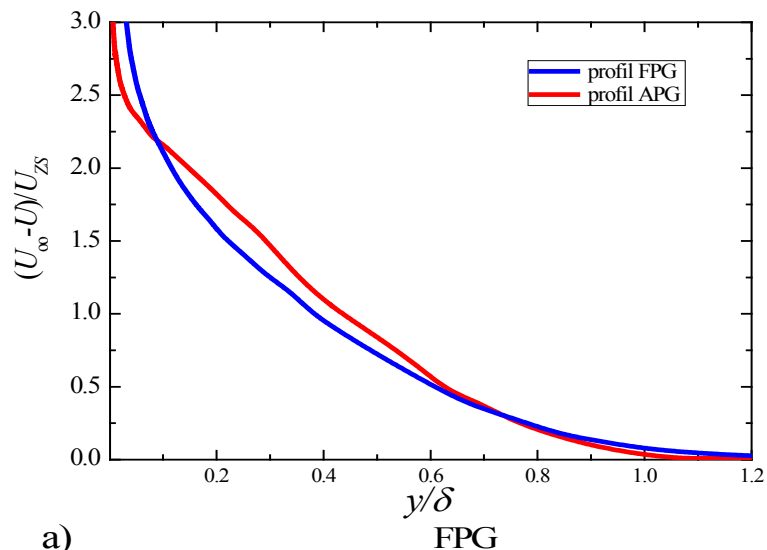
## Skalowanie Zagarola-Smitsa:



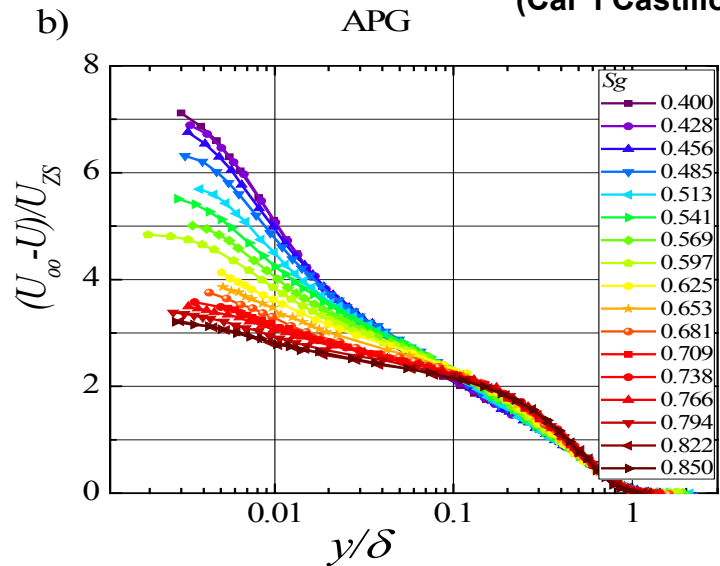
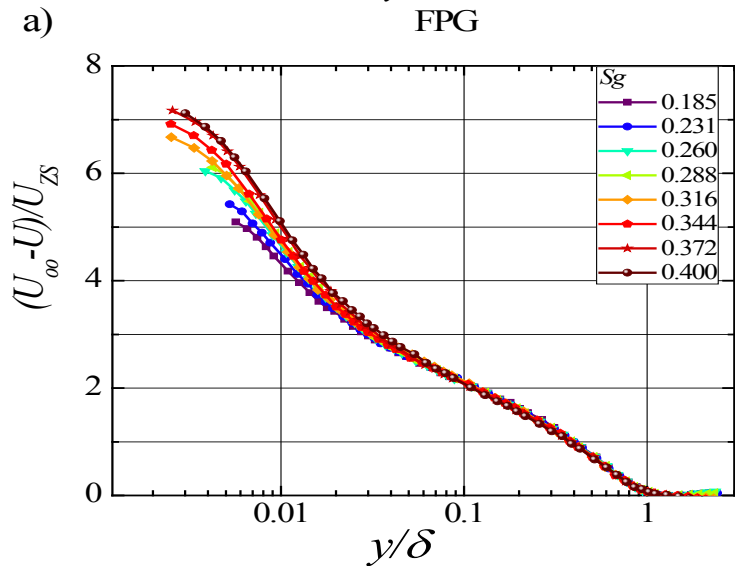
# Analiza metod skalowania

## Skalowanie ZS – kształty deficytów prędkości

Kształt profili zmienia się w zależności od typu gradientu ciśnienia oraz liczby Reynoldsa



(Cal i Castillo 2008)



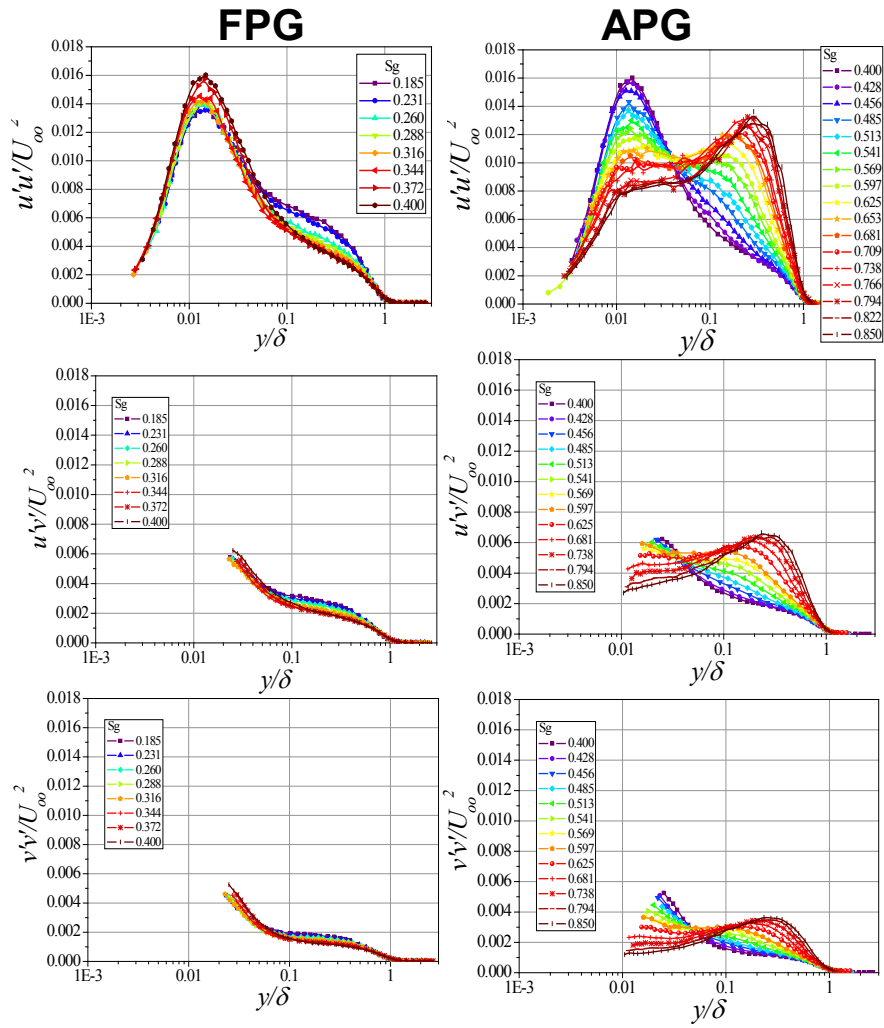
Profile są zbieżne w obszarach lokalnej równowagi lecz tylko w strefie zewnętrznej warstwy



# Analiza metod skalowania

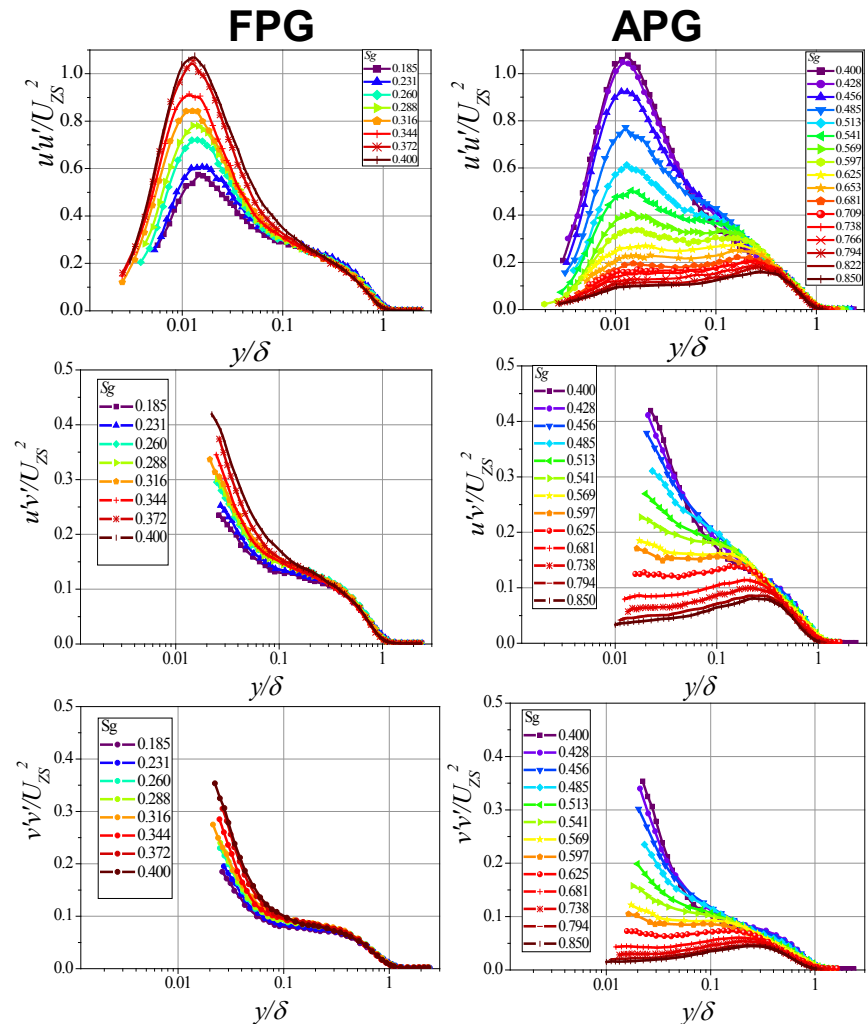
## Skalowanie naprężeń Reynoldsa

### Skalowanie Castillo-George'a:



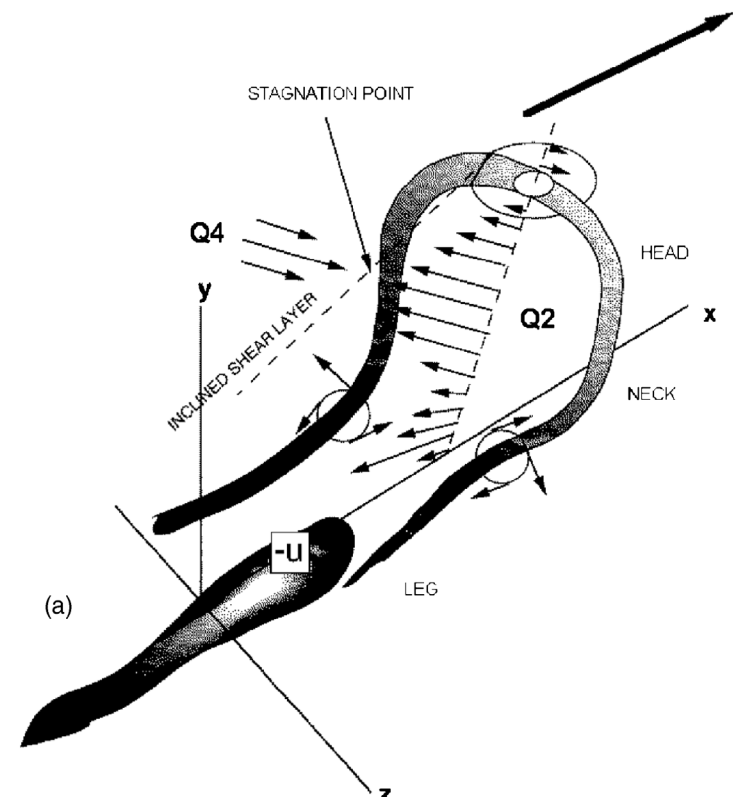
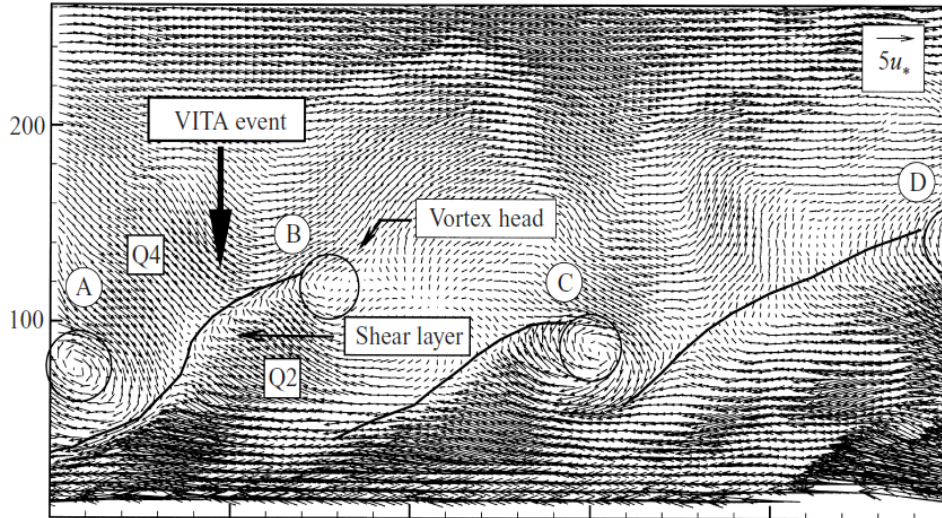
- Brak uniwersalności profili

### Skalowanie Zagarola-Smitsa:



- Spójność profili dla obszarów z lokalną równowagą  $\lambda=const$  w strefie zewnętrznej

# Cel detekcji struktur i zdarzeń



**Metody detekcji zdarzeń oraz struktur w sygnale prędkości:**

**1. VITA, WTA, WAG, .... (detekcja zmian sygnału)**

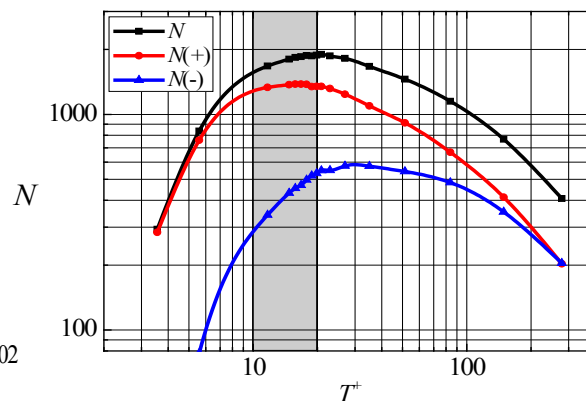
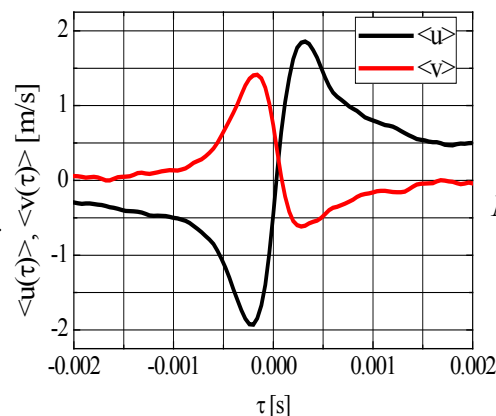
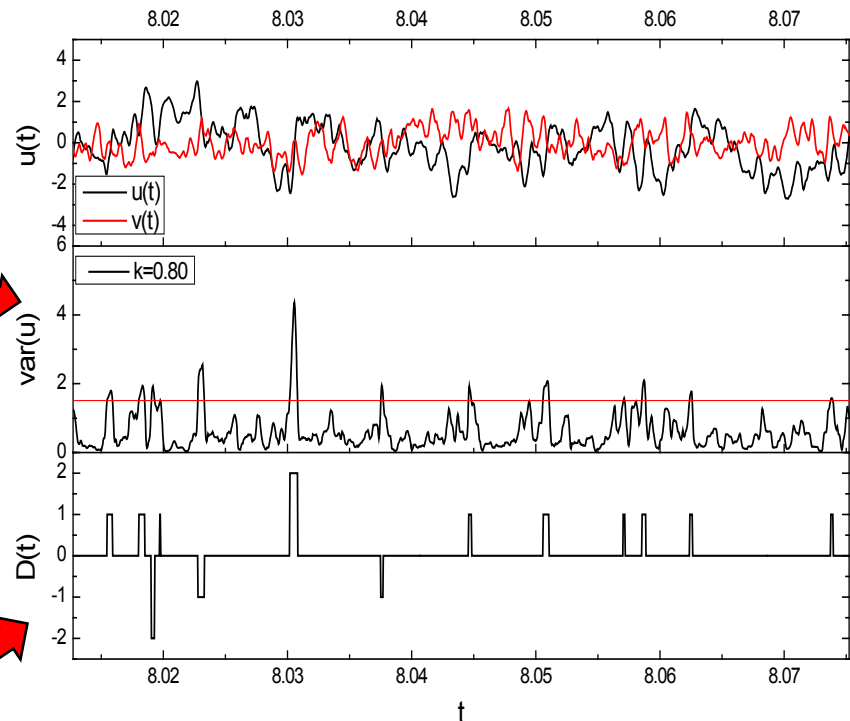
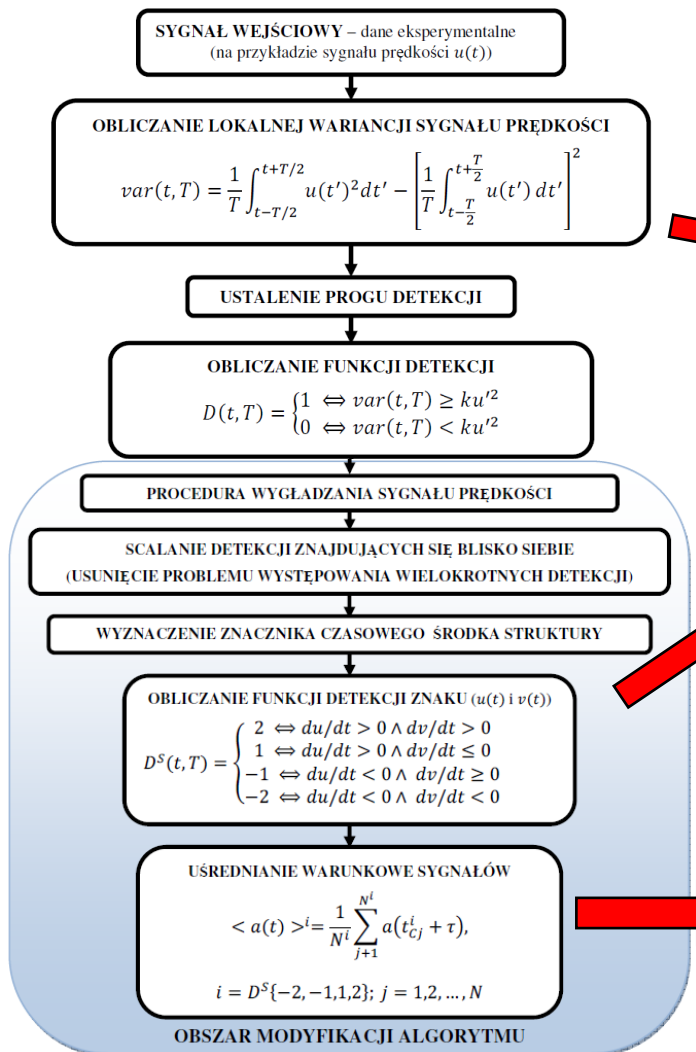
- zdarzenia przyspieszenia i opóźnienia (pośrednio zdarzeń kwadrantowych)
- struktury tj. wiry oraz warstwa ścinania posiadają również zdarzenia kwadrantowe

**2. Kwadrantów-uv, u-level, v-level , ..... (detekcja wysokich wartości w sygnale)**

- jedynie zdarzenia kwadrantowe

# Schemat detekcji VITA

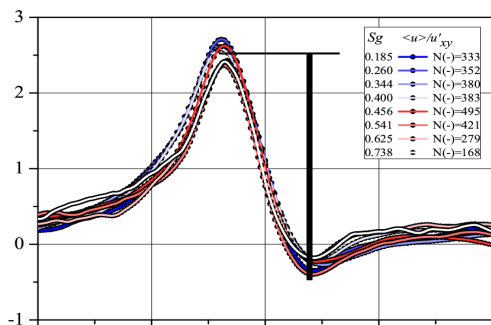
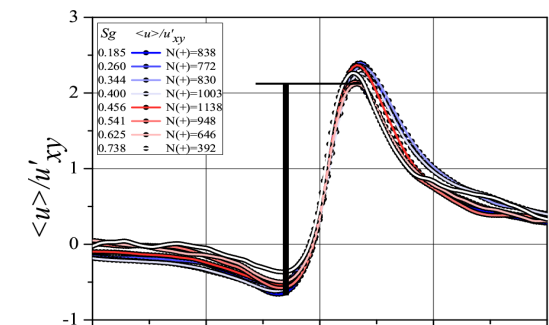
## VITA – Variable Interval Time Averaging



Okno uśredniania lokalnej wariacji:  $T = T(N(+))_{max}$ ,  $N$  – liczba struktur, poziom detekcji:  $k = 0.9$

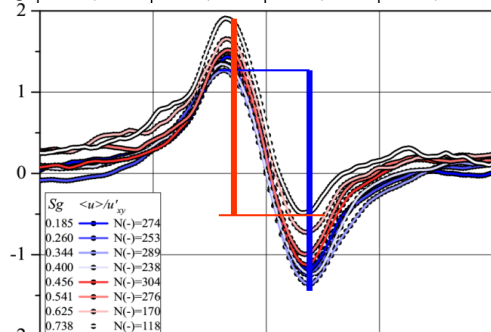
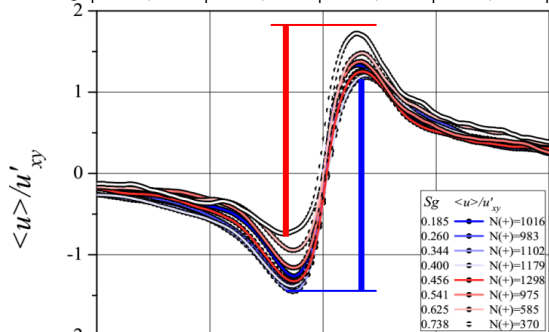
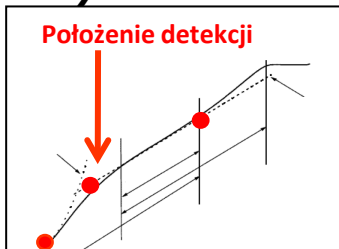
# Fazowo uśrednione przebiegi (sonda pojedyncza)

$y^+ = 4 \quad 5$



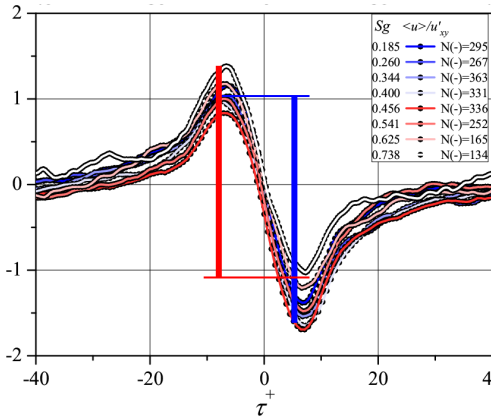
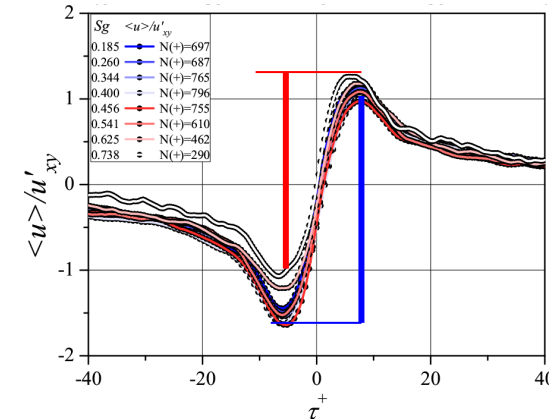
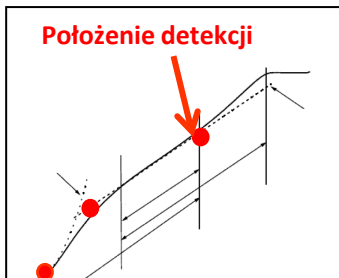
	FPG	APG
$S_k$	0.6	0.8
ZPG: $U_k^+ \approx$	13	
$U^+ \approx$	5	

$y^+ = 14 \quad 16$



	FPG	APG
$S_k$	-0.05	0.25
ZPG: $U_k^+ \approx$	13	
$U^+ \approx$	11.5	

$y^+ = 175 \quad 185$



	FPG	APG
$S_k$	-0.2	0
ZPG: $U_k^+ \approx$	$U^+$	

$$S_k = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{3/2}} = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$$

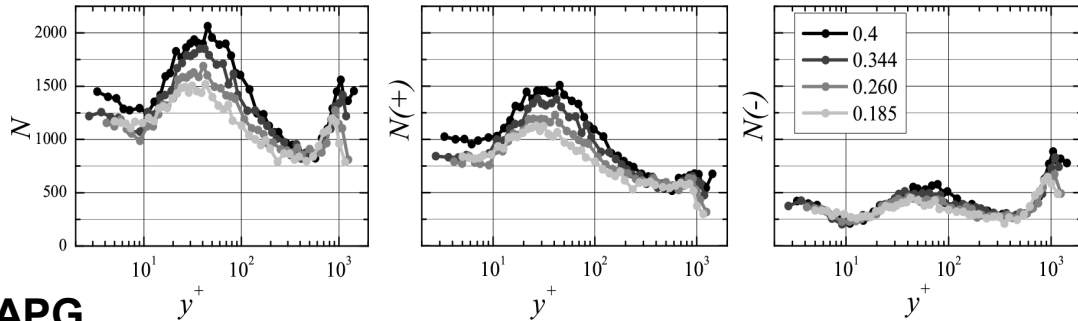
- wartość współczynnika skośności  $S_k$  (z przebiegu) zależy od różnicy pomiędzy prędkością konwekcji i prędkością średnią
- prędkość konwekcji jest mniejsza od prędkości średniej w FPG oraz większa od prędkości średniej w APG



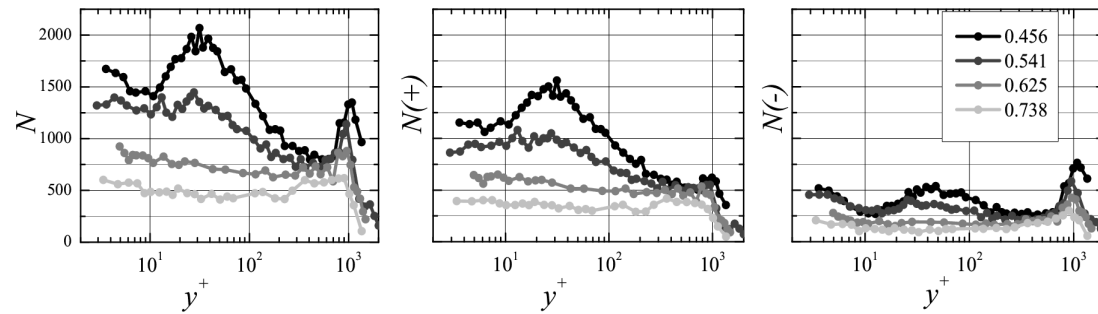
# Analiza statystyczna detekcji VITA

## Liczba wykrytych struktur:

### FPG

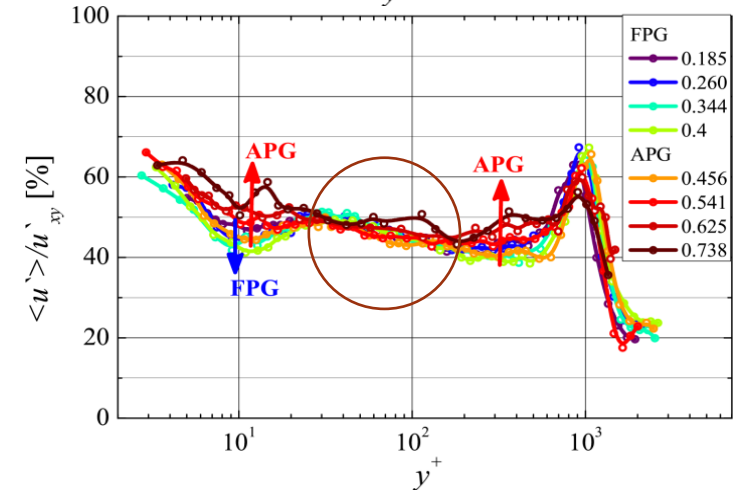
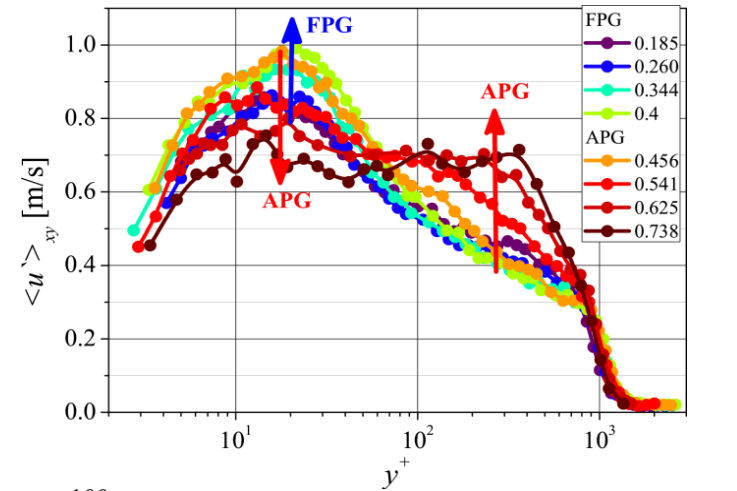


### APG



- ponad dwukrotna dominacja zdarzeń przyśpieszenia (+) nad zdarzeniami opóźnienia (-)
- Lekki wzrost liczby struktur w obszarze FPG
- Około czterokrotny spadek liczby struktur w obszarze APG  
- głównie ze zdarzeniem przyśpieszenia (+)

## Fluktuacje dla wykrytych struktur :



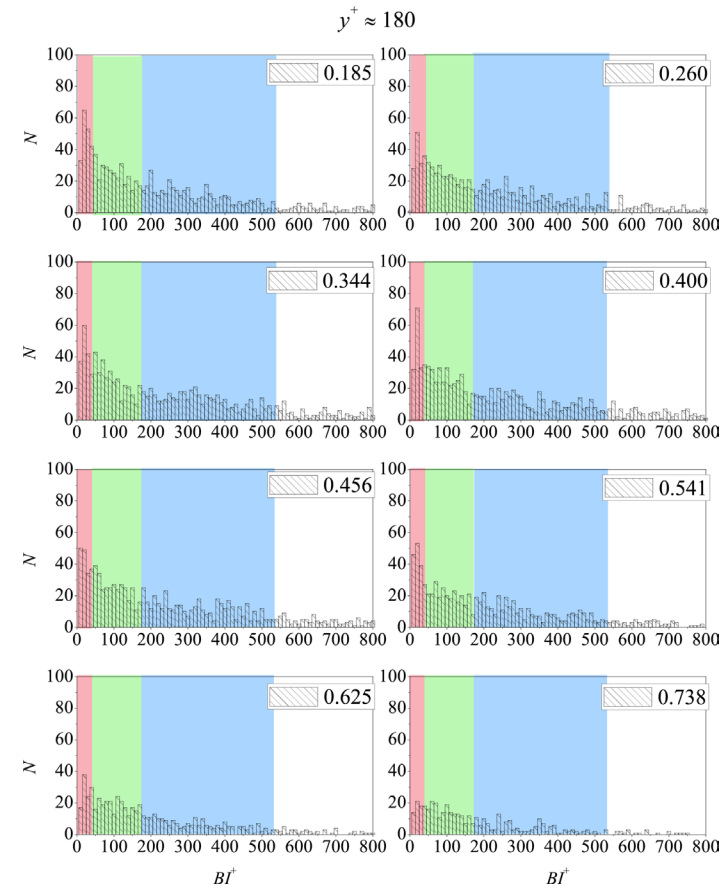
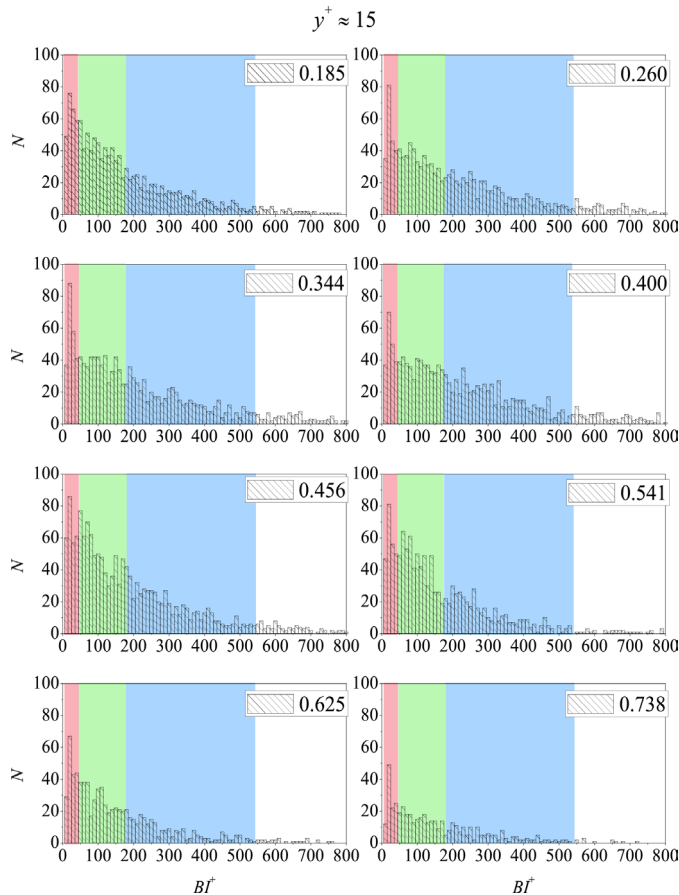
- **Zmiany w profilach fluktuacyjnych wynikają głównie z aktywności struktur koherentnych**

# Skalowanie odstępów między strukturami ( $BI$ )

Zależność  $MBI^+$  dla ZPG:  $MBI^+ = MBIu_{\tau}^2/\nu = 0.65Re_{\theta}^{0.73}$

dla  $Re = 2500$   $MBI^+ = 210$

$MBI^+ = 166 \div 310$

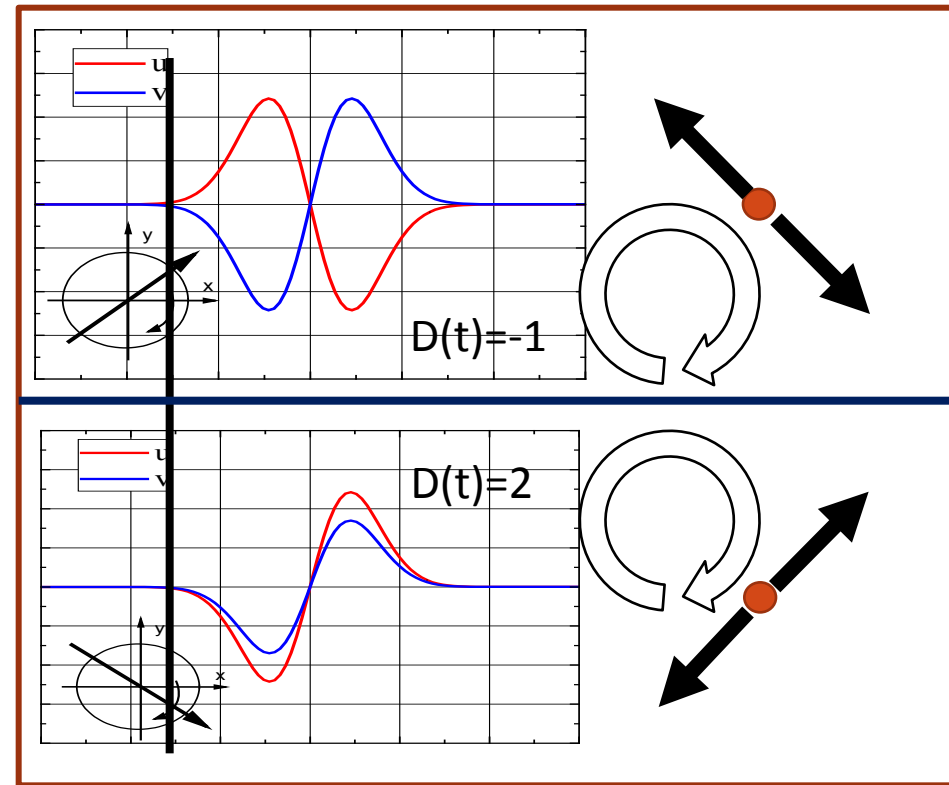
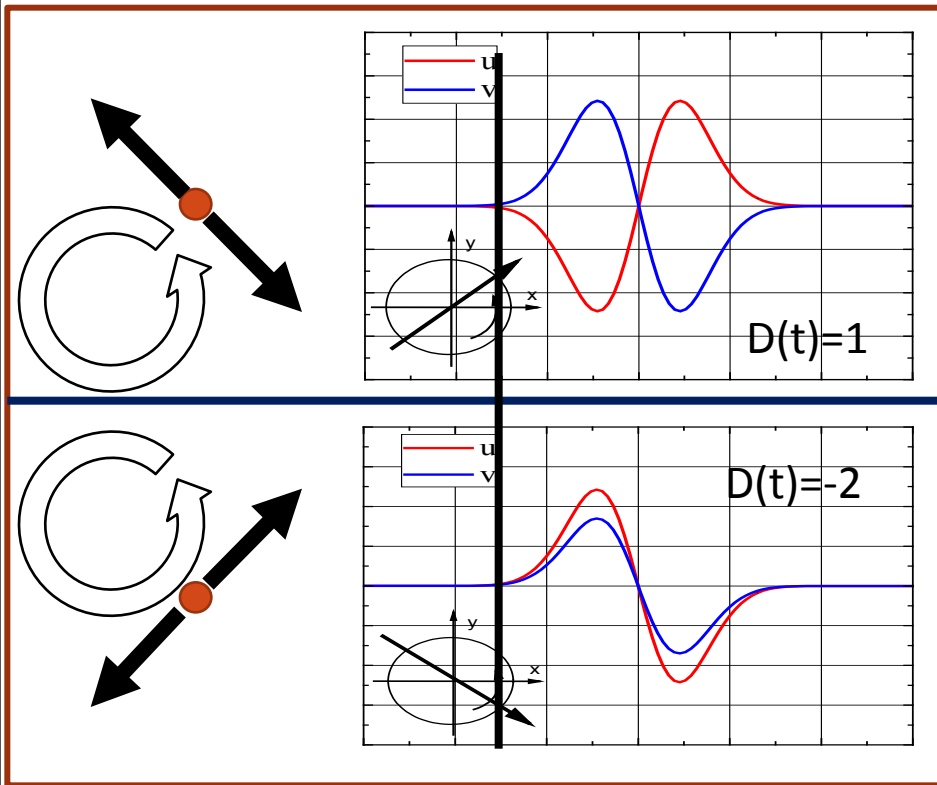


- $BI$  w pakiecie poddaje się skalowaniu lepkiemu (skala wewnętrzna)
- $MBI$  zmienia się pod wpływem wzrostu energii struktur gruboskalowych (skala zewnętrzna)

# Interpretacja struktur VITA (sonda X)

**retro-gradientowa**

**pro-gradientowa**



## Fizyczna interpretacja struktur VITA:

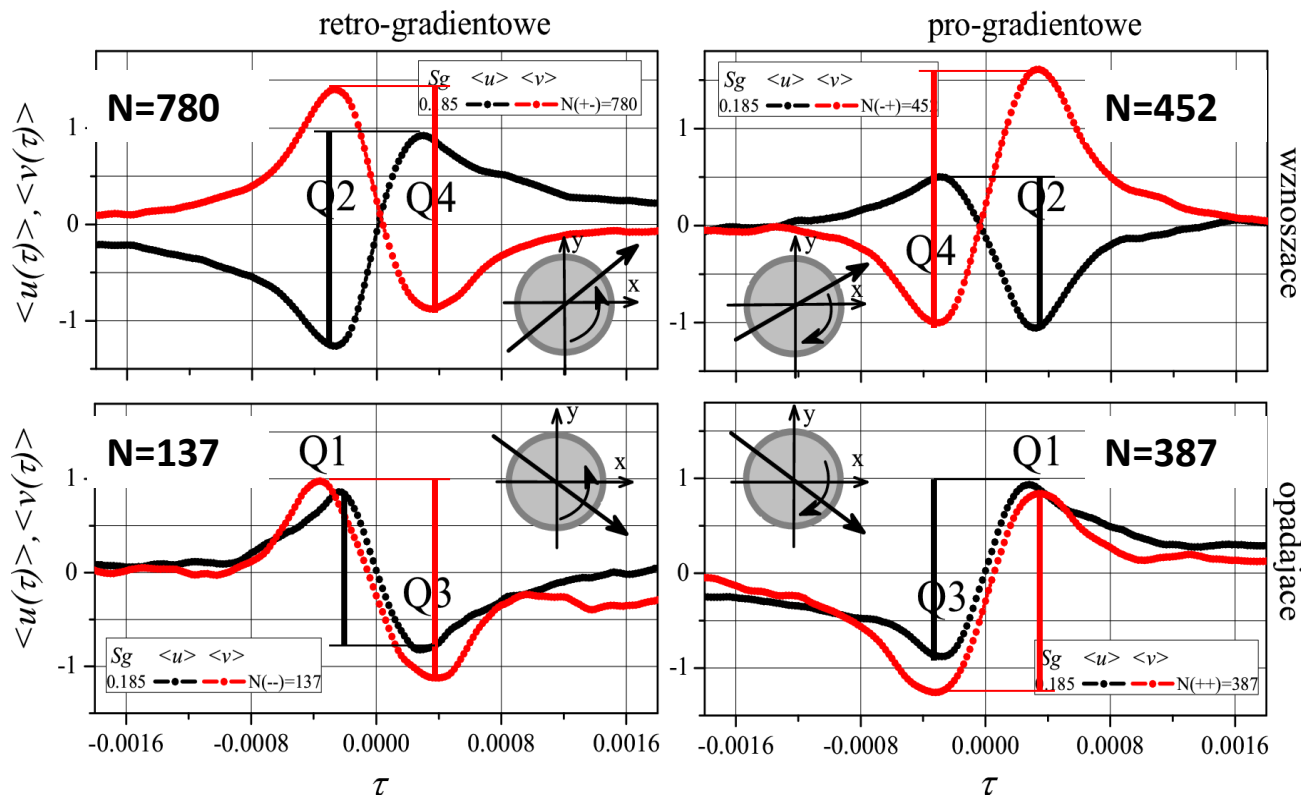
- retrogradientowa struktura VITA jest wyprodukowanym w nachylonej warstwie występującym wewnątrz pakietu
- progradientowa struktura VITA jest efektem przemieszczania się głowy struktury hairpin

wirem ścinania  $D^s(t, T) =$

$$D^s(t, T) = \begin{cases} 2 \Leftrightarrow du/dt > 0 \wedge dv/dt > 0 \\ 1 \Leftrightarrow du/dt > 0 \wedge dv/dt \leq 0 \\ -1 \Leftrightarrow du/dt < 0 \wedge dv/dt \geq 0 \\ -2 \Leftrightarrow du/dt < 0 \wedge dv/dt < 0 \end{cases}$$

# Interpretacja struktur VITA (sonda X)

$y^+ = 22.5$

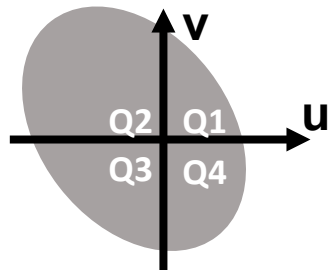


Widoczna dominacja struktur wznoszących (N=1232 – struktury wznoszące; N=524 – struktury opadające) - wysoki udział ujemnych naprężeń stycznych Reynolds'a ( $-uv$ )

Potwierdzenie wznoszącego lub opadającego kierunku poruszania się wirów:

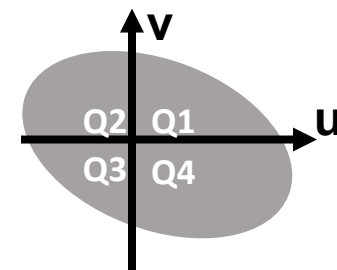
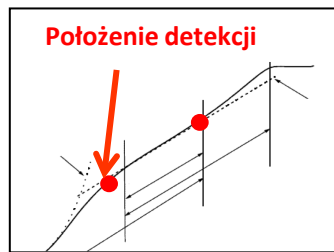
- przebieg  $\langle u \rangle$  składowej prędkości dla wznoszącego wiru jest przesunięty w obszar ujemnych wartości zaś przebieg  $\langle v \rangle$  w stronę dodatnich (wir pochodzi z obszaru o mniejszym pędzie)
- przeciwna sytuacja jest widoczna dla opadającego wiru
- Skala czasowa struktur wyrażona w skali lepkiej wynosi 20, co w przestrzeni odpowiada skali 150.

# Fazowo uśrednione przebiegi dla $y^+ \approx 25$ (sonda X)

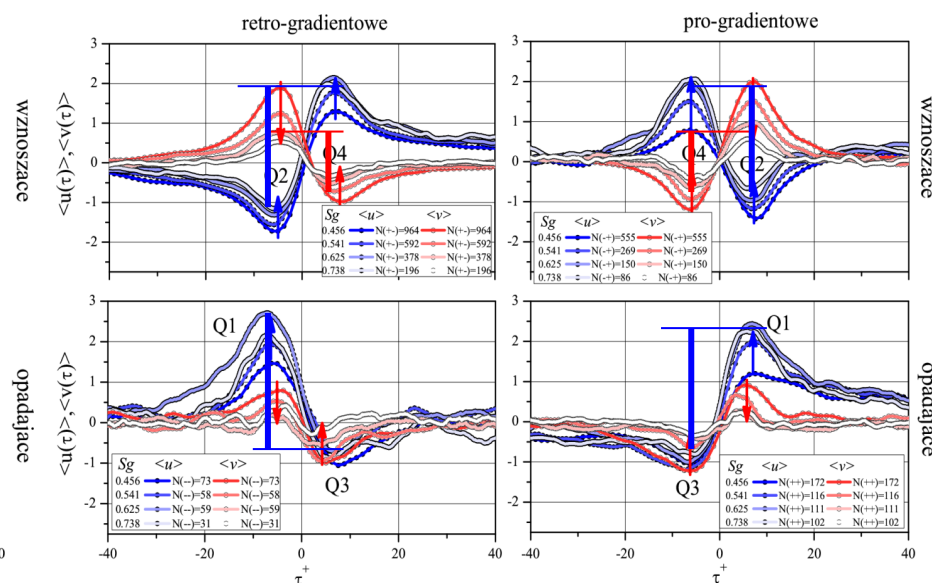
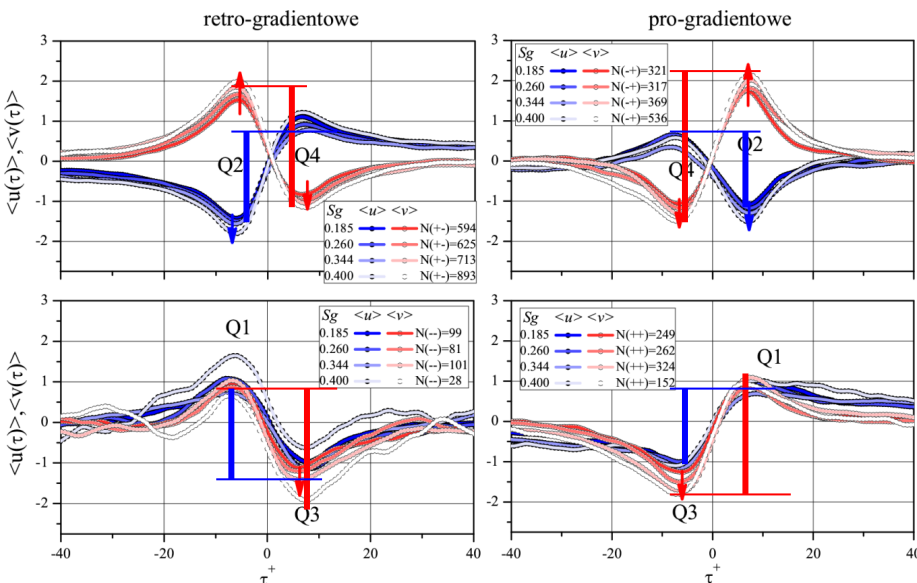


$$S_k = \begin{matrix} -0.2 & 0.2 \\ U_k^+ \approx 13 \\ U^+ \approx 12 \end{matrix}$$

**FPG**



**APG**

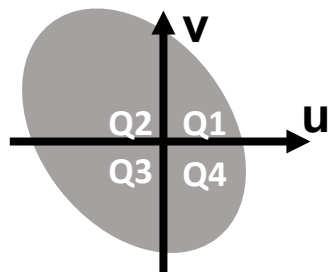


Analiza w obszarze największych zmian => w strefie buforowej ( $y^+ \approx 25$ )

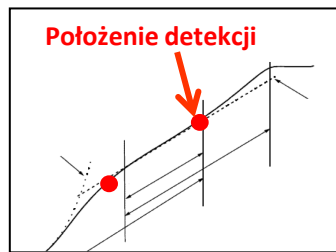
- Największe zmiany obserwuje się dla strefy APG
- Większy udział Q2 i Q3 w strefie FPG – mniejsza lokalna prędkość konwekcji struktur w stosunku do prędkości średniej
- Większy udział Q4 i Q1 w strefie APG – większa prędkość konwekcji struktur w stosunku do prędkości średniej
- Zmiana stosunku amplitud  $u$  do  $v$ , który w strefie APG zwiększa się => wzrost kąta trajektorii struktur wirowych



# Fazowo uśrednione przebiegi dla $y^+ \approx 180$ (sonda X)

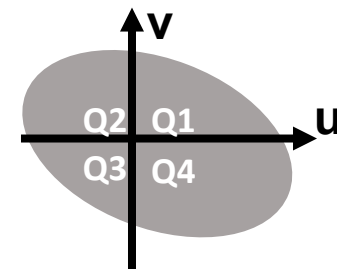


FPG



$$S_k = -0.2 \quad 0$$

$$U_k^+ \approx U^+$$



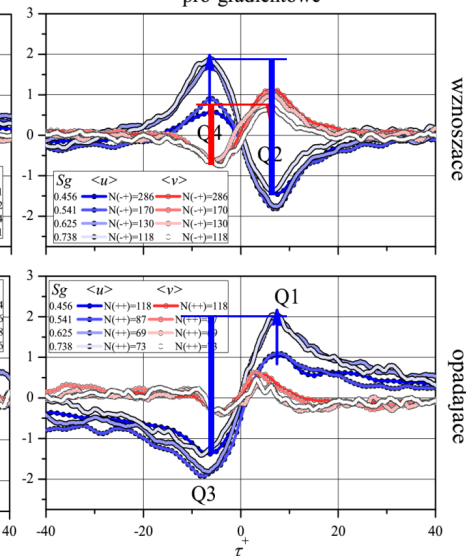
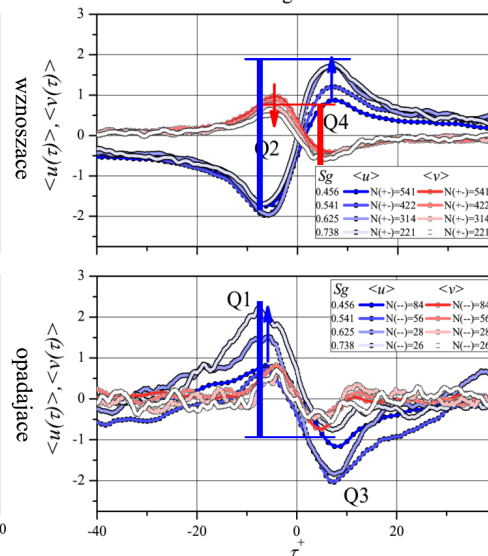
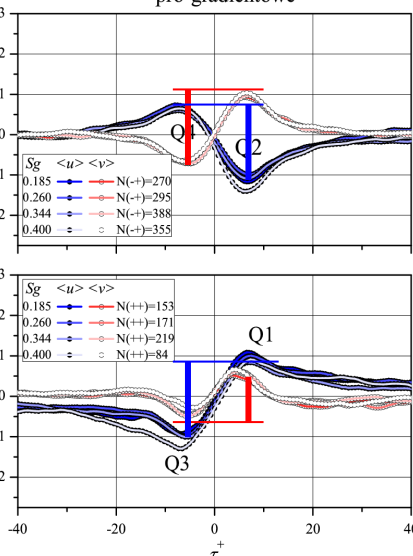
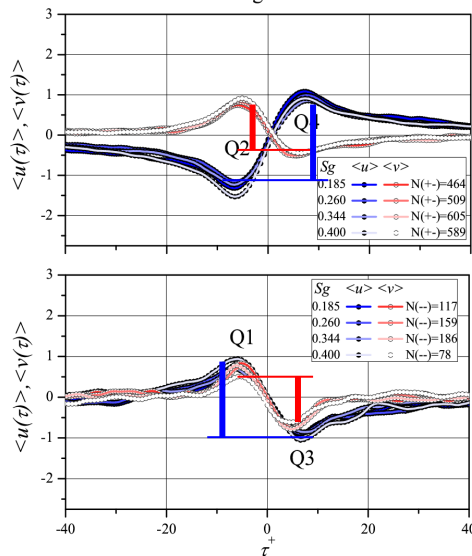
APG

retro-gradientowe

pro-gradientowe

retro-gradientowe

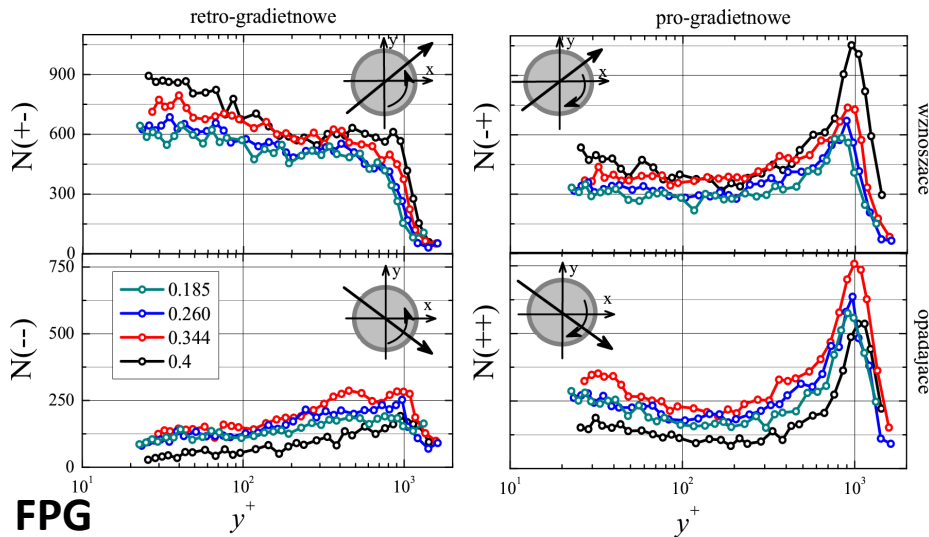
pro-gradientowe



- Największe zmiany obserwuje się również dla strefy APG
- wzrost udziału Q2 i Q3 w strefie FPG oraz Q4 i Q1 w strefie APG – lecz już nie tak wyraźny jak dla strefy buforowej – wartość prędkość konwekcji struktur jest bliska wartości prędkości średniej.
- Zmiana stosunku amplitud u do v, który w strefie APG zwiększa się => wzrost kąta trajektorii struktur wirowych

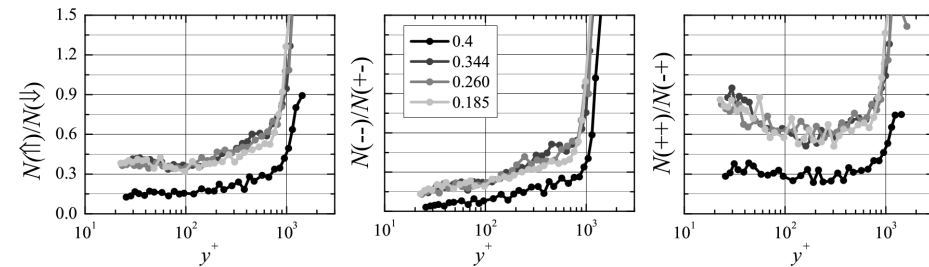
# Analiza statystyczna – liczba struktur (sonda X)

- Dominacja struktur wznoszących (retro-gradientowych) nad opadającymi
- Na granicy warstwy struktury pro-gradientowe przeważają liczebnością struktury retro-gradientowe

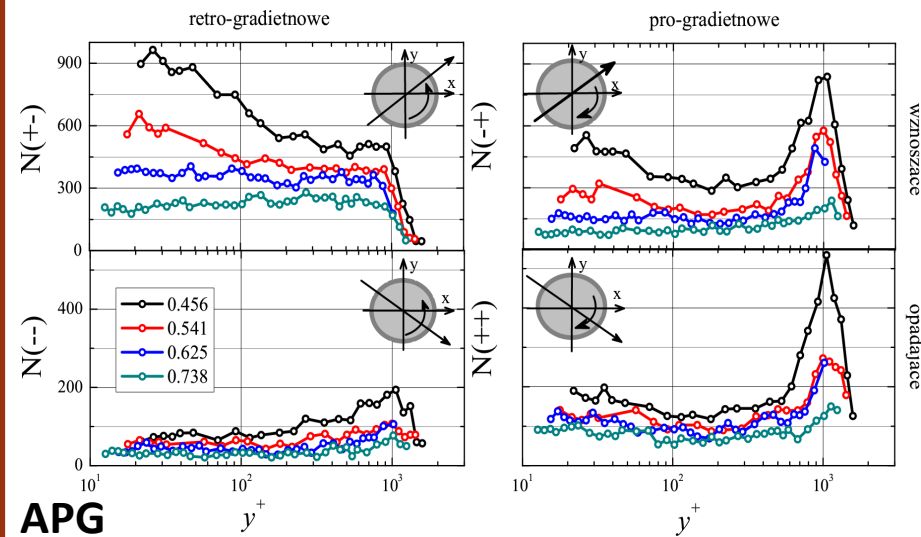


## FPG

Liczba wszystkich struktur niewiele wzrasta (prócz opadających dla profilu przejściowego ( $Sg = 0.4$ ))

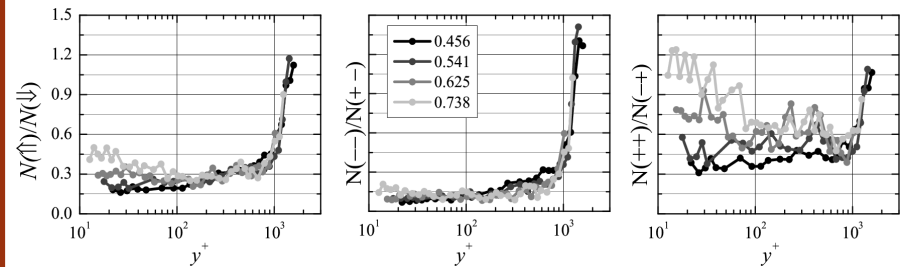


- Stały stosunek wznoszących do opadających struktur wzdłuż przepływu
- Wzrost stosunku wzdłuż grubości warstwy (prócz pro-gradientowych w warstwie wewnętrznej)



## APG

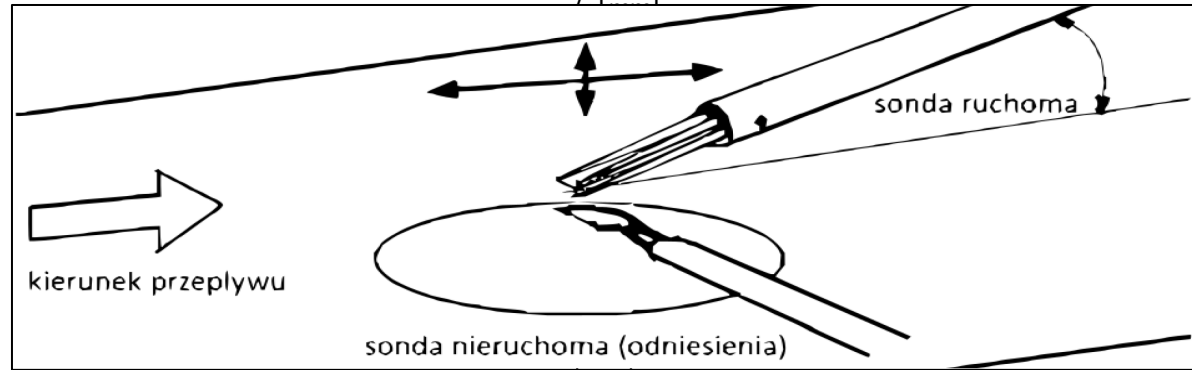
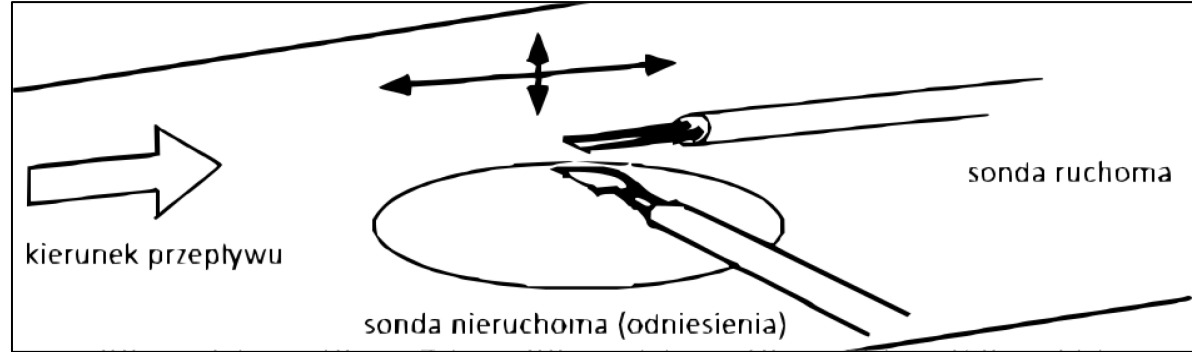
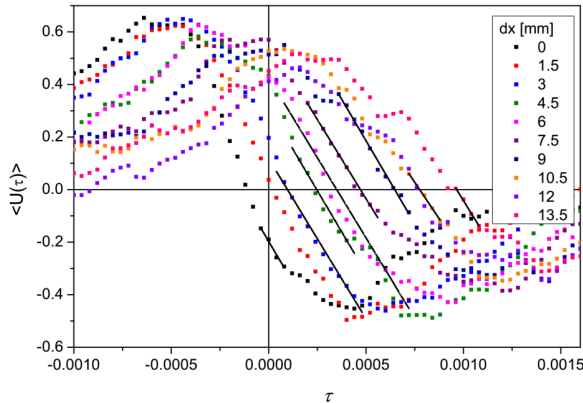
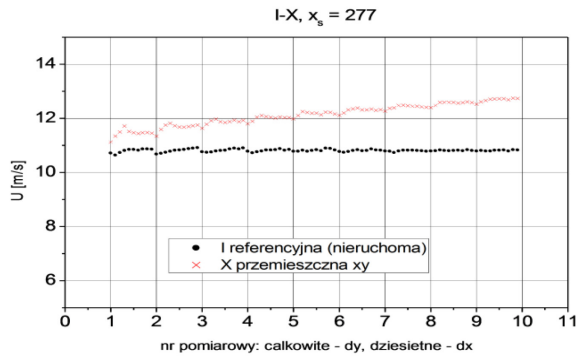
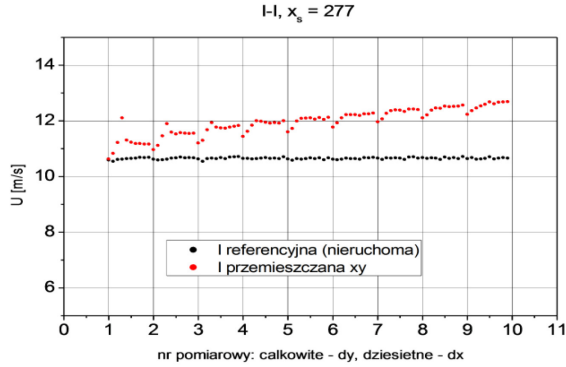
Liczba wszystkich struktur maleje czterokrotnie głównie struktur retro-gradientowych wznoszących



- Zmienny stosunek wznoszących do opadających struktur wzdłuż przepływu
- Przewaga struktur opadających pro-gradientowych przy ścianie

# Analiza cross-korelacyjna

## Analiza oddziaływania pomiędzy sondami



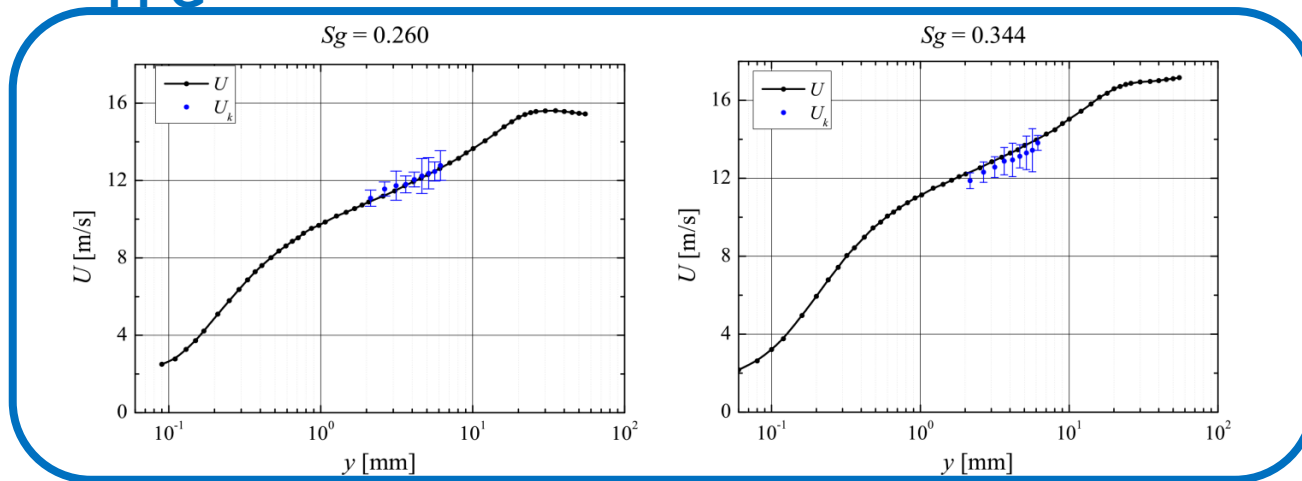
$$R(dx, dy)_{\Delta\tau=0} = \frac{\overline{u_r(t, x, y)u_p(t, x + \Delta x, y + \Delta y)}}{\overline{u'_r(t, x, y)u'_p(t, x + \Delta x, y + \Delta y)}}$$

Zauważa się silne oddziaływanie sond co zniekształca wyniki (zwłaszcza kąt poruszania się struktur)

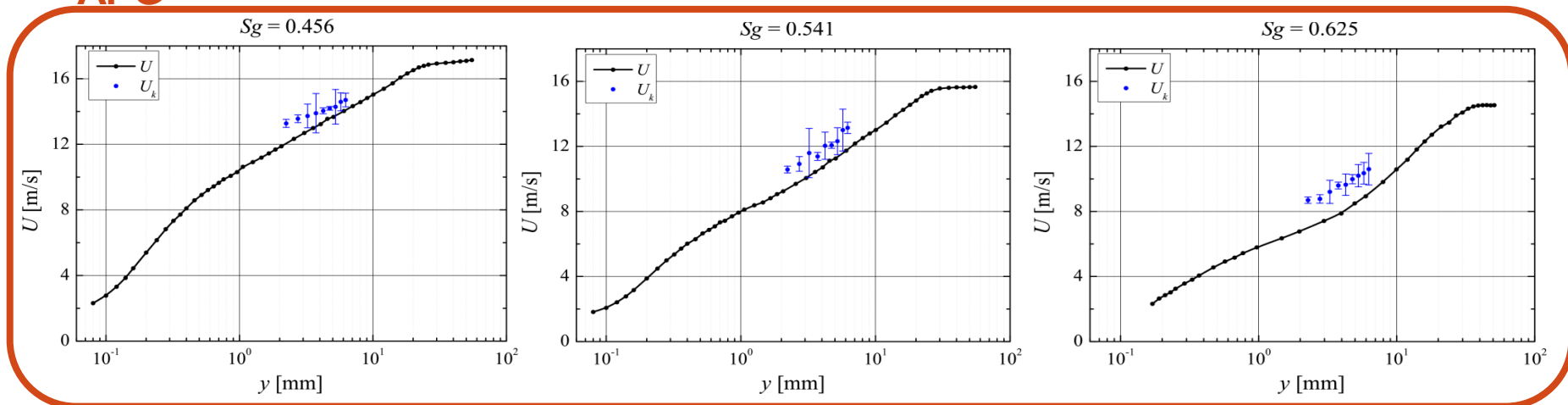
# Analiza cross-korelacyjna

## Analiza prędkość konwekcji struktur

FPG



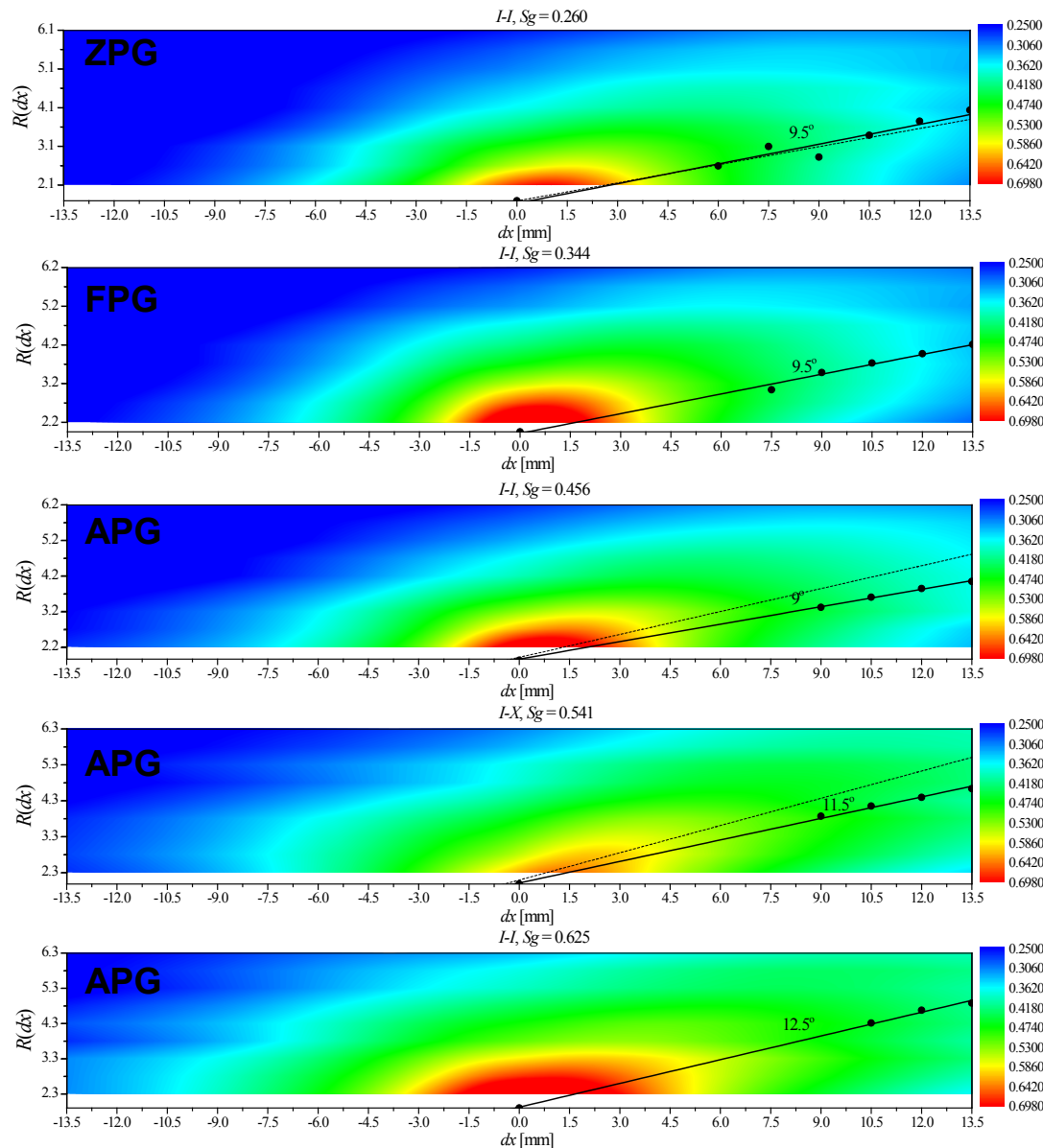
APG



- potwierdzenie hipotezy mówiącej o opóźnionej reakcji struktur wirowych na zmianę prędkości średniej sformułowanej podczas analizy detekcji struktur

# Analiza cross-korelacyjna

## Mapy cross-korelacyjne (Hipoteza Taylora)



$$R(\Delta x) = R(-U_k \Delta \tau)$$

Wartości kątów dla:

ZPG – 9.5°

FPG – 9°

APG – 12.5°

- zmiana kąta nachylenia struktury: spadek oraz wzrost odpowiednio dla obszaru FPG i APG – potwierdzenie zjawiska zauważonego podczas analizy detekcji struktur

# Interakcja struktur drobno i grubo-skalowych

## Oddziaływanie struktur gruboskalowych na struktury drobnoskalowe

Dwa wyraźne piki zaznaczone symbolem „+” na zredukowanym spektrum energii (Mathis i inni, 2007):

- pik wewnętrzny wywołany pojedynczą strukturą hairpir

Lokalizacja:  $y^+ = 15$  i  $\lambda_x^+ = 1000$      $\lambda_x = 2\pi/k_x$

-pik zewnętrzny w strefie logarytmicznej (pakiet struktur

Lokalizacja:  $y/\delta = 0.05$      $\lambda_x = 6\delta$

**Zewnętrzny pik oraz oddziaływanie skal grubych na drobne nie występuje dla  $Re_\tau \lesssim 1700$  !!!!!**

**Analizowana warstwa ZPG:  $Re_\tau \approx 1000$**

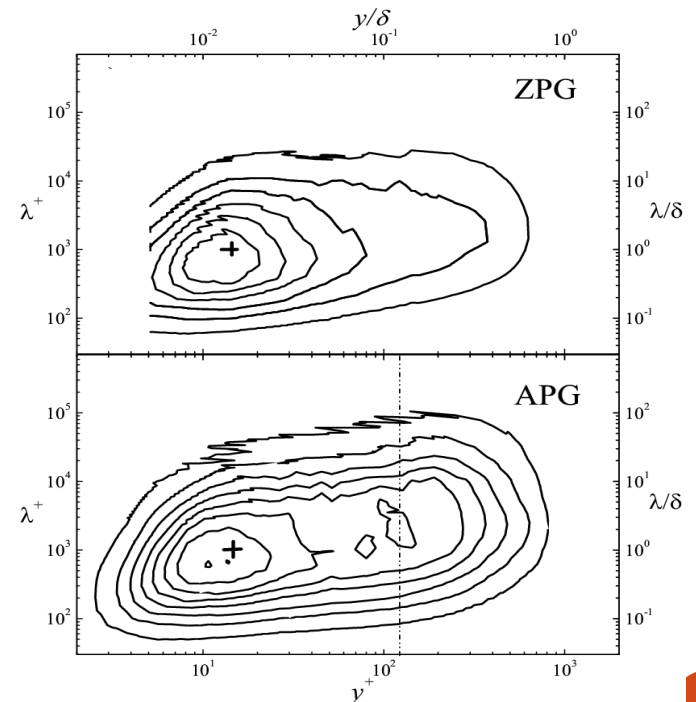
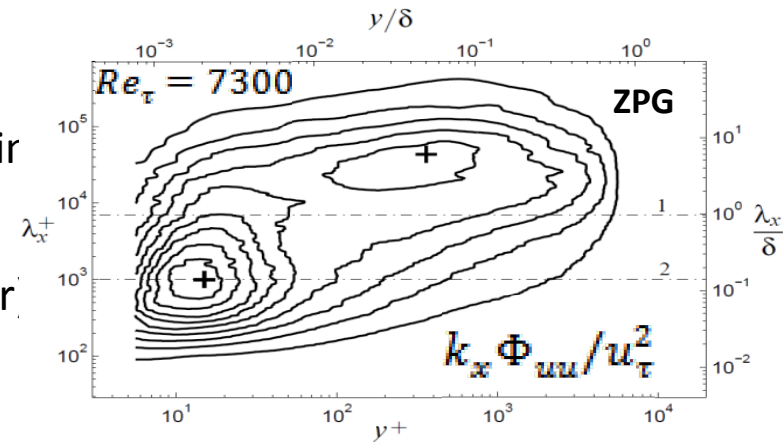
- widoczny tylko pik wewnętrzny
- pik zewnętrzny jest zbyt słaby aby był widoczny w rozkładzie spektrum - brak separacji pomiędzy skalami

**APG:**

- widoczne oba piki wewnętrzny i zewnętrzny
- występowanie separacji pomiędzy skalami

**Wnioski te wskazują na oddziaływanie grubych skal na skale drobne również w obszarze APG dla niskich Re**

Seminarium, Warszawa 7 marzec 2012





# Interakcja struktur drobno i grubo-skalowych

Identyfikacja oddziaływania skal zgodnie z metodyką Mathisa (2007):

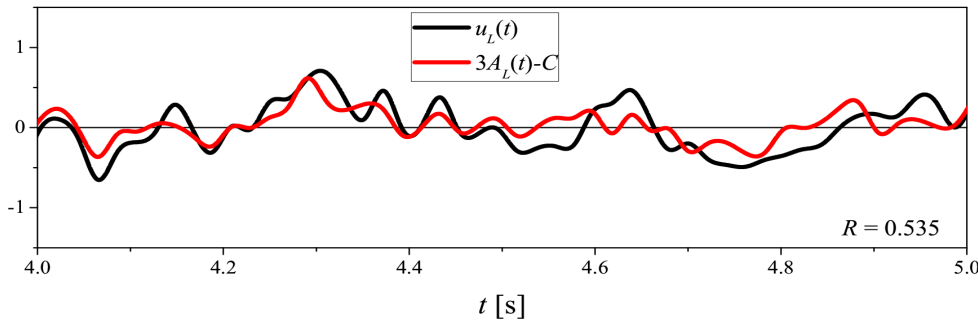
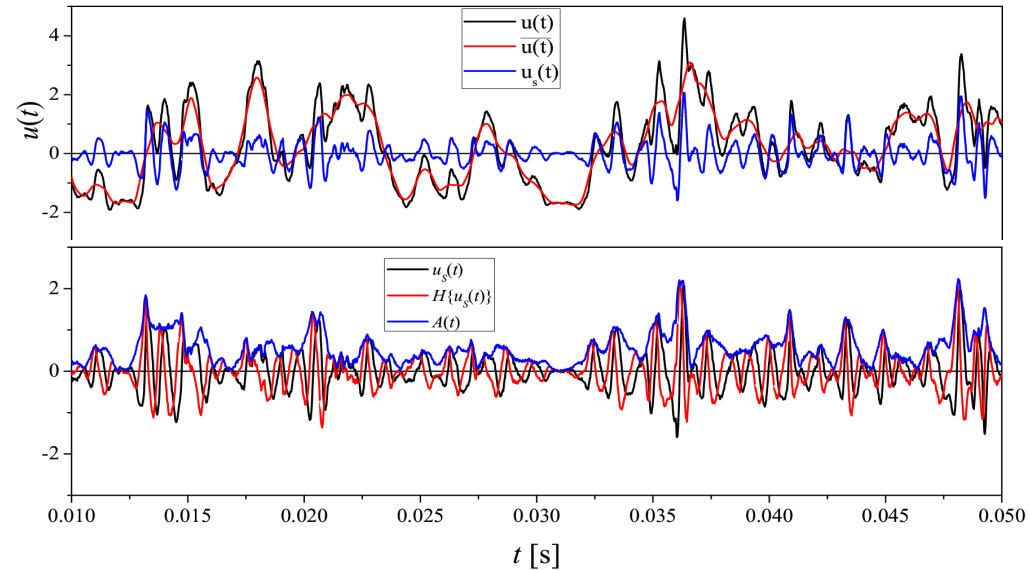
- transformata Hilberta sygnału drobno-skalowego:

$$H\{u_s\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u_s(\tau)}{\tau - t} dt,$$

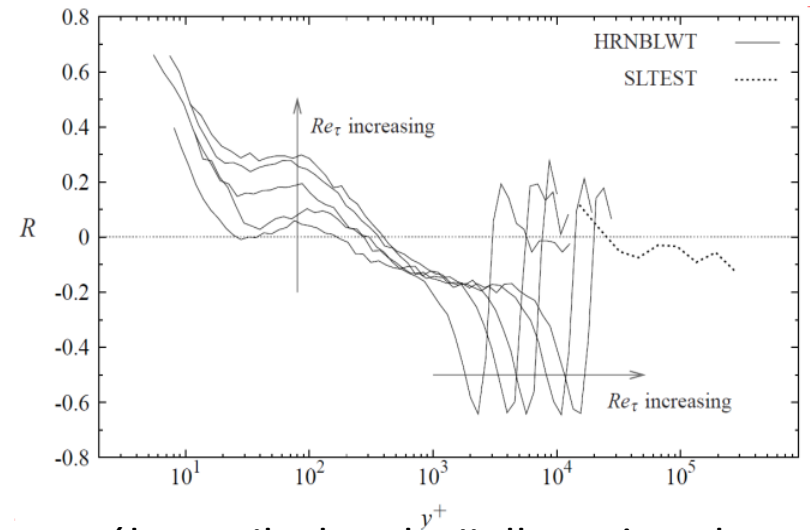
- obwiednia amplitud:

$$A(u_s) = \sqrt{(u_s)^2 + (H\{u_s\})^2},$$

- wyznaczenie współczynnika korelacji pomiędzy sygnałem grubo-skalowym i obwiedni amplitud drobnych skal :

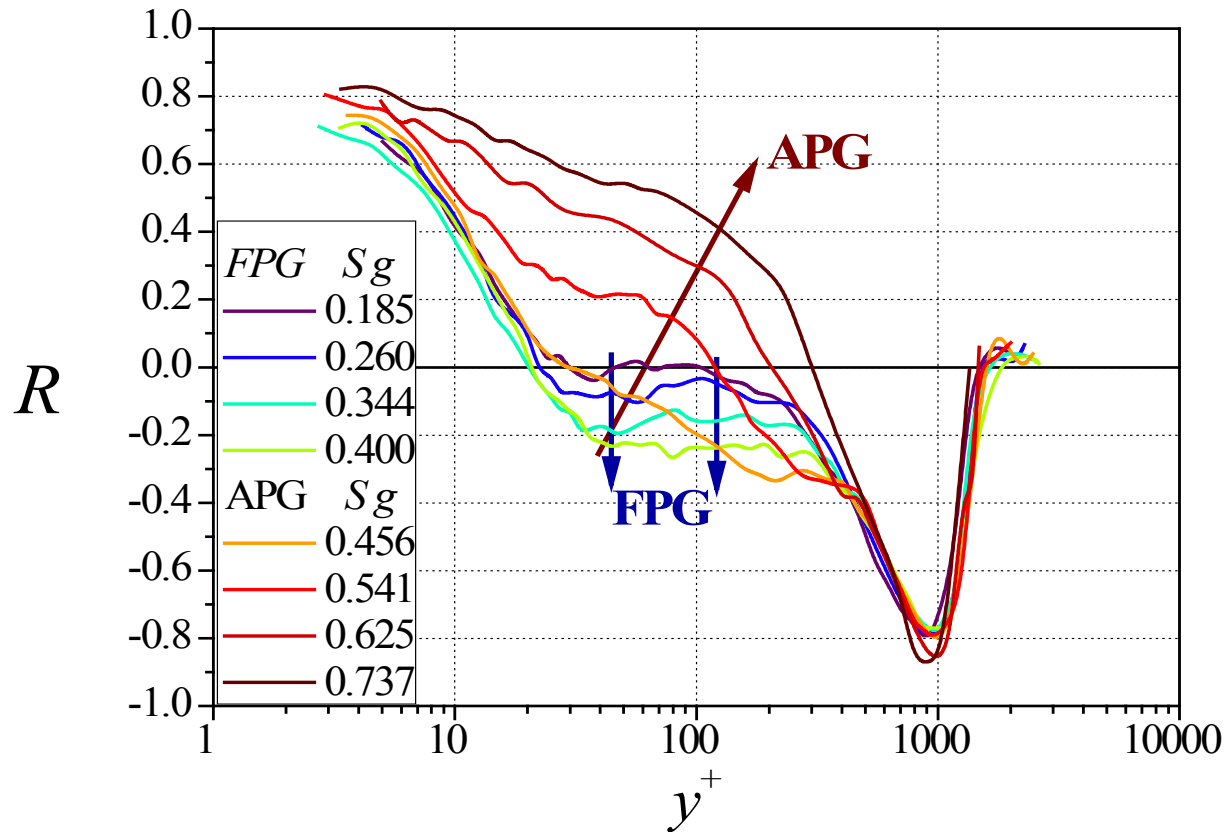


$$R = \frac{\overline{A_L(u_s)u_L}}{\sqrt{A_L(u_s)^2} \sqrt{\overline{u_L^2}}},$$



Wyznaczenie współczynnika korelacji dla wyższych liczb Reynoldsa pokazuje, że modulacja drobnych struktur zwiększa się w strefie buforowej

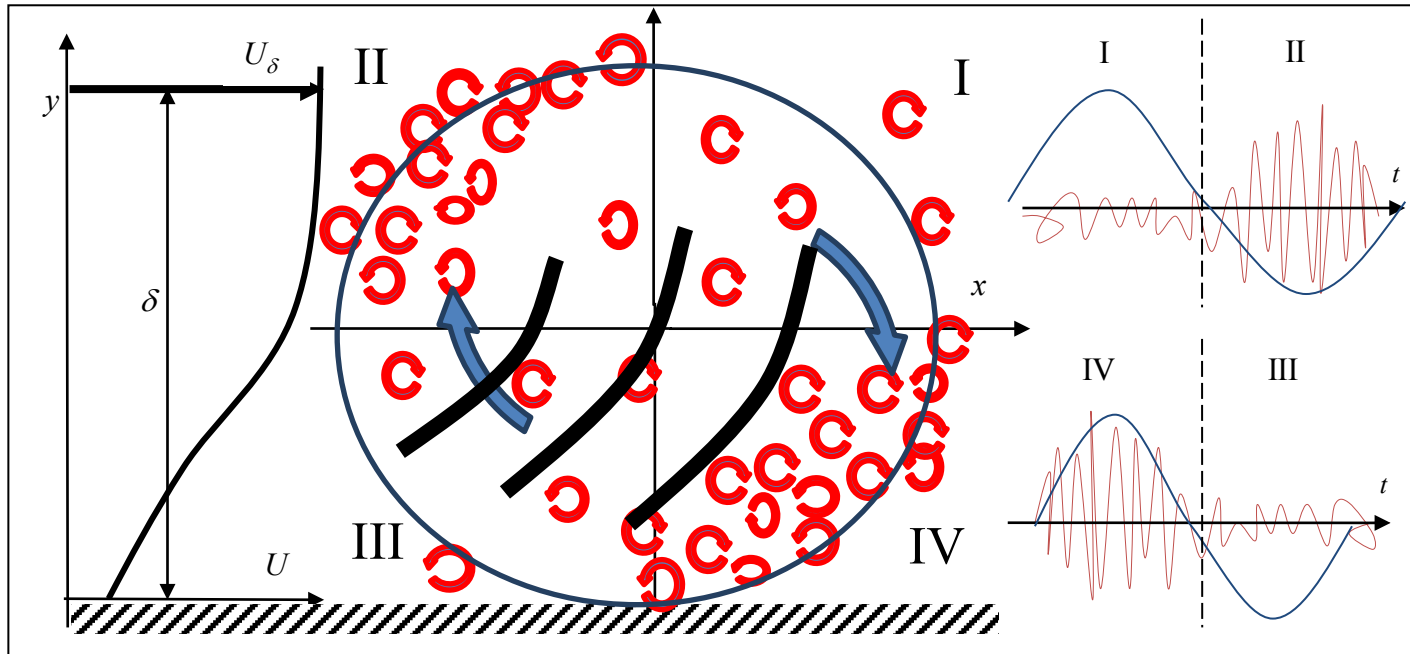
# Interakcja struktur drobno i grubo-skalowych



- w warunkach FPG rośnie obszar ujemnie skorelowanego przepływu – brak separacji pomiędzy skalami.
- w warunkach APG rośnie obszar dodatnio skorelowanego przepływu
- dodatkowo w warunkach APG obserwuje się zmianę położenia punktu przejścia funkcji  $R$  przez zero.

# Interakcja struktur drobno i grubo-skalowych

## Proponowana koncepcja modulacji struktur drobnoskalowych przez struktury gruboskalowe



Wyrzut wywołany strukturą gruboskalową powoduje spadek pędu na granicy warstwy – tworzenie się struktur drobno-skalowych w indukowanej warstwie ścinania

Zagarnianie wywołane strukturą gruboskalową powoduje wzrost pędu przy ścianie – tworzenie się struktur drobno-skalowych w indukowanej warstwie ścinania

**Gruboskalowe zdarzenia wyrzutu i zagarniania powodują również wzrost kąta trajektorii struktur w obszarze APG**

# Wnioski

- **Uniwersalne profile deficytów prędkości oraz naprężeń Reynoldsa otrzymano dla metody Zagarola-Smitsa w obszarach FPG i APG w zewnętrznej strefie warstwy, ale tylko tam, gdzie uzyskano stan lokalnej równowagi ( $\lambda = \text{const}$ ).**
- **Przyspieszenie i opóźnienie przepływu w wyniku oddziaływania gradientu ciśnienia modyfikuje prędkość konwekcji wirów**
- **Wartość prędkość konwekcji względem prędkości średniej jest proporcjonalna do współczynnika skośności struktur.**
- **W przepływie z wyhamowaniem obserwuje się wzmocnienie zdarzeń posiadających dodatnią wartość składowej fluktuacyjnej  $u$ , natomiast w przepływie z przyspieszeniem wzmocnione są zdarzenia o ujemnej wartości składowej fluktuacyjnej  $u$ .**
- **Przyczyną pojawienia się zewnętrznego maksimum fluktuacji jest zwiększony kąt trajektorii struktury wirowej w obszarze APG.**
- **Liczba struktur lekko wzrasta w obszarze FPG oraz wyraźnie maleje w obszarze APG – największa zmiana dla struktur retro-gradientowych.**
- **Odstęp zdarzeń jest zależny od gradientu ciśnienia, lecz w pakiecie poddaje się on również skalowaniu wewnętrznemu (skalą lepka).**

# Spis publikacji

## Publikacje w czasopismach anglojęzycznych:

1. Drózdź A., Elsner W.: 2011, Detection of coherent structures in a turbulent boundary layer with zero, favourable and adverse pressure gradients. *J. Phys.: Conf. Ser.* 318 062007
2. Drózdź A., Elsner W., Drobniak S. : 2011, Application of VITA technique for detection of the organized structures present in a turbulent boundary layer under an adverse pressure gradient. *Archives of Mechanics*, vol. 63, issue 2, pp.183-199.
3. Drozdź A., Elsner W., Drobniak S., Analysis of development of vortical structures in a turbulent boundary layer under adverse pressure gradient based on VITA method, *Progres in Turbulence - Proc. of ITI Conference on Turbulence, 2010 Bertinoro, Italy* (w druku)
4. Drobniak S., Drózdź A, Elsner W, Materny M, 2009: Turbulent boundary layer under the influence of adverse pressure gradient, *PAMM, Proc. Appl. Math. Mech.* 9, 453 – 454 () / DOI 1002, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co
5. Drobniak S., Drózdź A., Elsner W., Materny-Latos M.: Experimental analysis of turbulent boundary layer with adverse pressure gradient corresponding to turbomachinery condition., „Progress in wall turbulence: understanding and modelling” ERCOFTAC Series 14 pp. 143 – 150, Springer, Proceeding of the WALLTURB International Workshop held in Lille, France, April 21-23, 2009
6. Materny M., Drózdź A., Drobniak S., Elsner W.: Experimental analysis of turbulent boundary layer under the influence of APG. *Archives of Mechanics*, vol. 60, 6, 2008, pp. 1-18
7. Drózdź A., Elsner W., Drobniak S.: Application of oil – fringe interferometry for measurements of wall shear stress in turbulent boundary layer. *Politechnika Łódzka ZN Nr 1017 Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery No. 133 str.: 103-110, 2008*
8. Materny M., Drózdź A., Drobniak S., Elsner W.: The Structure of turbulent boundary layer with adverse pressure gradient corresponding to turbomachinery condition. *Politechnika Łódzka ZN Nr 1017 Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery No. 133 str.: 221-228, 2008*

## Publikacje w materiałach konferencji zagranicznych:

1. Drobniak S., Drózdź A, Elsner W, Materny M, Turbulent boundary layer under the influence of adverse pressure gradient, *Proc. GAMM2009*, str. 2
2. M. Materny, A. Drózdź, S. Drobniak, W. Elsner, Turbulence structure of turbulent boundary layer subjected to adverse pressure gradient, *Proc. Conf. Mod. Fluid Flow CMFF09, 9-12.09.2009, Budapeszt 2009*, Publ. By Budapest University of Technology and Economics, Ed. J. Vad, ISBN 978-963-420-985-0, (ISBN 978-963-420-987-4 CD), vol. 1, pp. 260 – 267
3. A. Drozdź, W. Elsner, S. Drobniak.: Detection of organized structures in the turbulent boundary layer by VITA technique., *Proc. of Collogium FLUID DYNAMICS* pp. 3-4, 2009
4. S. Drobniak, A. Drózdź, W. Elsner, M. Materny, Structure and scaling of turbulent boundary layer under the influence of APG. *Proc. of Collogium FLUID DYNAMICS* pp. 5-6, 2008

# Dziękuję za uwagę

## **Praca realizowana w ramach:**

- Grantu promotorskiego N N501 098238
- Projektu europejskiego WALLTURB — A European synergy for the assessment of wall turbulence (Contract number: AST4 - CT - 2005 - 516008)
- Projektu „Plan rozwoju Politechniki Częstochowskiej” EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU SPOŁECZNEGO nr.: POKL. 04.01.01-00-059/08, (2009-2010)