

**Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. Roberta Grosza
pt. „Small-scale temperature fluctuations in atmospheric flows”**

**wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Szymona Malinowskiego
oraz prof. Raymonda A. Shaw’a (Department of Physics, Michigan Technological University)
na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego**

Rozprawa doktorska mgr. Roberta Grosza została zgłoszona do oceny decyzją Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego.

Przesłana do recenzji rozprawa doktorska podejmuje tematykę pomiarów, turbulentnych fluktuacji temperatury i ich dyssypacji wykonywanych za pomocą miniaturowych termometrów typu UltraFast (opracowanych na Wydziale Fizyki UW) oraz analizy i interpretacji otrzymanych danych. Prace eksperymentalne wchodzące w zakres rozprawy obejmują badania w warunkach laboratoryjnych (tunel aerodynamiczny, komora konwekcyjno-chmurowa) oraz badania wykonane w warunkach terenowych (loty badawcze w ramach międzynarodowej kampanii EUREC⁴A). Wyniki pomiarów i ich analiz w komorze konwekcyjno-chmurowej zostały zrekonstruowane w symulacji komputerowej DNS.

Tematyka pracy jest istotna w zagadnieniach modelowania zjawisk atmosferycznych, tworzeniu zaawansowanych modeli pogody i klimatu, a także zrozumienia fundamentalnych procesów w dwufazowych przepływach turbulentnych o wysokiej liczbie Reynoldsa. Należy zatem uznać wybór problematyki rozprawy jako uzasadniony.

Praca została napisana w języku angielskim i jest podzielona na pięć głównych rozdziałów:

1. **Rozdział 1 (Introduction)**, zawiera wprowadzenie do tematyki prac podjętych w rozprawie doktorskiej. W jego pierwszej części Autor przedstawia zagadnienie konwekcji w kontekście złożonych zjawisk istotnych w fizyce atmosfery. Opisuje dlaczego wieloskalowy i turbulentny charakter konwekcji jest kluczowy dla kształtowania zjawisk pogodowych, w szczególności powstawania chmur oraz wyjaśnia znaczenie poznania tego zjawiska w zrozumieniu procesów zachodzących w wyniku zmian klimatu. Następnie Doktorant omawia jak turbulencja wpływa na zachowanie wielkości skalarnych (udziału masowego wody - wodności, temperatury) oraz podaje modele fizyczne stosowane w literaturze do opisu obserwowanych różnic w turbulentnym transporcie pędu, masy lub ciepła. Doktorant podaje, że głównym tematem pracy jest badanie rozpraszania temperatury w wyniku dyssypacji drobnoskalowych fluktuacji pola prędkości oraz uzasadnia ten wybór. Autor w zwięzły, a jednocześnie wyczerpujący sposób opisuje stan wiedzy w tematyce, której

poświęcona jest jego praca. Potwierdza to, że Autor pracy dobrze zna literaturę przedmiotu, orientując się w najnowszych badaniach i wynikających z nich wnioskach.

2. **Rozdział 2 (UltraFast Thermometers)** ma charakter ogólny i jest poświęcony dokładnemu opisowi rozwoju instrumentów pomiarowych (termometrów typu UltraFast) opracowanych w Instytucie Geofizyki UW i wykorzystanych przez Doktoranta do pomiarów. Zawiera opis dwóch stanowisk eksperymentalnych: w tunelu aerodynamicznym LACIS-T (TROPOS, Niemcy) oraz komorze chmurowej Π Chamber (MTU, USA). Ponadto podaje opis kampanii EUREC⁴A zbierającej pomiary w trzech różnych obszarach atmosfery, w szczególności w chmurach. Tabele (2.1-2.2) zawierają warunki, przy których dokonywane były badania eksperymentalne odpowiednio w tunelu i komorze chmurowej. W rozdziale tym opisano w jaki sposób zbierano dane w zależności od prowadzonych pomiarów oraz podano założenia, które pozwalają uprościć analizę danych pomiarowych, np. w wyniku ograniczeń w częstotliwości/czasie próbkowania.
3. **Rozdział 3 (Laboratory experiments)** zawiera szczegółowy opis warunków i wyników badań zebranych ze stanowisk pomiarowych w eksperymentach: LACIS-T (Tabela 2.1) oraz Π Chamber (Tabela 2.2). Autor rozprawy przedstawia spektralną analizę szeregów czasowych uzyskanych z badań laboratoryjnych, wykonanych w kontrolowanych i powtarzalnych warunkach. Doktorant opisuje także podstawowe właściwości termiczne zaobserwowane w obu eksperymentach i przedstawia obszerną dyskusję na temat widm temperatury, wykorzystując statystyczną analizę danych i różne podejścia analityczne.
4. **Rozdział 4 (Field experiments)** koncentruje się na analizie wyników pomiarów terenowych wykonywanych z pokładu samolotu w trakcie kampanii EUREC⁴A w rzeczywistej atmosferze, rozróżniając trzy rodzaje segmentów atmosfery i badając zmienność znormalizowanego współczynnika rozpraszania temperatury w tych regionach. Wprowadzenie tego kryterium pozwala na porównanie tempa dyssypacji temperatury w badanych we wszystkich przypadkach przepływowych badanych w pracy.
5. **Rozdział 5 (Summary and discussion)** podsumowuje otrzymane wyniki i przeprowadza dyskusję na temat ich szerszych implikacji, zarówno dla przyszłych eksperymentów, modelowania numerycznego, jak i dla ogólnej interpretacji zjawisk zachodzących w atmosferze.
6. **Dodatki A.** oraz **B.** zawierają, odpowiednio, dane eksperymentalne z kampanii EUREC⁴A uzupełniające dane analizowane w Rozdziale 4, oraz badanie wpływu doboru obszaru uśredniania na statystyki tempa dyssypacji temperatury dla różnych serii/lotów pomiarowych. **Dodatek C.** zawiera zaakceptowany do publikacji manuskrypt artykułu, w którym Doktorant jest pierwszym autorem. W załączonym manuskrypcie dane otrzymane z badań w komorze chmurowej zostały porównane z wynikami symulacji DNS konwekcji typu Rayleigh'a-Benard'a dla różnych różnic temperatury, wykazując zgodność hipotez i analiz w pracy z wynikami niezależnej symulacji komputerowej.

Przygotowanie pracy należy ocenić jako staranne zarówno od strony edytorskiej jak i merytorycznej, każdy z rozdziałów zawiera szczegóły niezbędne dla zrozumienia toku myślowego Autora, głównych tez stawianych w pracy oraz interpretacji otrzymanych wyników. Zamieszczone w rozprawie rysunki są dobrej jakości, dane zamieszczone w licznych tabelach pozwalają na szybką orientację w analizowanych w rozprawie przypadkach.

Pozytywnie zwraca uwagę Rozdział 1 zawierający wprowadzenie. Autor w interesujący sposób przedstawia złożone zagadnienia fizyczne zachodzące w wyniku zjawisk konwekcji w atmosferze, w przekonujący sposób uzasadniając wybór tematyki swojej rozprawy doktorskiej.

Rozpraszanie temperatury spowodowane efektami molekularnymi na małych skalach wirowych jest ważnym tematem w naukach o atmosferze, z szeroko zakrojonymi implikacjami dla przewidywania pogody, modelowania klimatu, monitorowania środowiska i podstawowej dynamiki płynów. Chociaż proces ten zachodzi w najmniejszych skalach fizycznych, odgrywa on istotną rolę w zachowaniu atmosfery na dużych skalach, wpływając na budżety energetyczne, mechanizmy transportu i strukturę pól temperatury w różnych warstwach atmosfery. Zrozumienie tego skalarnego rozpraszania ma kluczowe znaczenie, ponieważ określa jak skutecznie atmosfera miesza energię cieplną i jak ta energia jest redystrybuowana w skali przestrzennej i czasowej.

Aby zbadać ten złożony problem, Doktorant przeprowadził pomiary/analizę turbulentnego pola temperatury za pomocą metodologii opisanej w Rozdziale 2, w trzech eksperymentach opisanych w Rozdziale 3 recenzowanej pracy. W szczególności wykorzystał metodę analizy spektralnej, aby w każdym z badanych przypadków zidentyfikować obszar, w którym głównym mechanizmem jest dyssypacja temperatury (pasywnego skalaru) wywołana zanikającymi fluktuacjami pola prędkości.

Analiza pomiarów z wyżej wymienionych badań eksperymentalnych prowadzi Autora do uzupełnienia propozycji wykładniczego, fenomenologicznego modelu zachowania spektrum dyssypacji temperatury na małych skalach poprzez wyznaczenie jego współczynników. Otrzymane wyniki sugerują, że widmo wykładnicze skutecznie opisuje reżim dyssypacyjny w różnych obszarach atmosfery mając znamiona uniwersalnego prawa (Rys. 3.12-3.16). Ponadto, analiza porównawcza wskazuje, że turbulencje w małej skali w polu skalarnym temperatury są niezależne od zdarzeń na dużej skali. Chociaż takie założenie jest typowo stosowane w literaturze, opracowane wyniki stanowią jakościowe potwierdzenie tego założenia w eksperymencie.

Kolejnym, istotnym celem pracy, było porównanie pomiędzy sobą wyników otrzymanych w warunkach laboratoryjnych (Rozdział 3) oraz rzeczywistych (Rozdział 4) oraz próba ustalenia czy istnieje uniwersalny mechanizm dyssypacji temperatury na małych skalach we wszystkich badanych przypadkach (Rozdziały 4.3, 5). Należy nadmienić, że w badaniach terenowych dane doświadczalne zawierały informacje na temat trzech wyodrębnionych obszarów: (1.) swobodnej atmosfery, (2.) chmur, (3.) warstwy granicznej (Str. 33). Porównanie wyników w tych obszarach z wynikami laboratoryjnymi (otrzymanymi w suchym powietrzu) pozwoliło ustalić wpływ obecności rozproszonej pary wodnej na badane charakterystyki pola temperatury. W tym celu pokazano, że widmo szybkości rozpraszania temperatury można skutecznie opisać prawem potęgowym, w którym współczynniki są powiązane zależnością logarytmiczną. Podana, zależność wydaje się być uniwersalna dla badanych przepływów, co według Autora może stanowić podstawę do budowy modeli zredukowanych (pod siatkowych) stosowanych w symulacjach numerycznych.

Ponadto, w ramach analizy zaprezentowanej w pracy porównano wyników eksperymentu z komory konwekcyjno-chmurowej dla trzech różnic temperatur z wynikami symulacji typu DNS (przyjęty do publikacji artykuł w Dodatku C.). Pomimo uproszeń w geometrii i pewnych różnic pomiędzy rzeczywistymi parametrami w eksperymencie i modelem obliczeniowym uzyskano zgodność potwierdzającą poprawność analizy danych przeprowadzonej przez Autora rozprawy.

Uwagi

Pomimo pozytywnej oceny większości materiału zaprezentowanego w pracy, należy zwrócić uwagę na kwestie/stwierdzenia w rozprawie wymagające wyjaśnienia:

- Jakie narzędzia analizy danych (np. MATLAB, które konkretnie metody numeryczne) zostały użyte do analizy spektralnej zaprezentowanej w pracy. Czy wybór metod i ich właściwości mógłby mieć wpływ na interpretację wyników?
- Jak interpretować wartości współczynników Pearson'a? Informację tą można znaleźć w literaturze, jednak w nie jest to (jasno) wyjaśnione w recenzowanej rozprawie.
- Poczynając od metody najmniejszych kwadratów, istnieje cały szereg metod numerycznych pozwalających dopasować dane do parametrycznej krzywej. Dlaczego w pracy zastosowano wyłącznie metodę graficzną?
- Autor rozprawy pisze, że jego pomiary laboratoryjne umożliwiły pełną charakterystykę termiczną obu stanowisk w całym zakresie skal, co może mieć kluczowe znaczenie dla przyszłych eksperymentów w środowiskach laboratoryjnych. Czy można podać przykład „kluczowego” wpływu uzyskanych wyników na przyszłe pomiary.
- Doktorant pisze (na Str. 69), że mieszanie dwóch strumieni o różnych prędkościach może prowadzić do efektów „nie kanonicznych”, jakie efekty Autor ma na myśli?
- Autor pracy stwierdza (na Str. 69), że reżim związany z wymiarami przewodu czujnika, określany tutaj jako zakres wpływu przyrządu, charakteryzował się nachyleniem około -8,5. Czy istnieje możliwość wyznaczenia tej wielkości w oparciu o analizę teoretyczną i/lub bezwymiarową? Jak do powyższego wniosku ma się stwierdzenie na Str. 70, że sam czujnik nie miał znaczącego wpływu na pomiary w skali porównywalnej z jego wymiarami?
- Autor rozprawy zauważa, że jego praca zapewnia metodologię i nakreśla możliwe przyszłe kierunki osiągnięcia bardziej precyzyjnych szacunków dyssypacji pola skalarnego, sugerując, że niektóre cechy turbulentnych przepływów mogą być bardziej uniwersalne i nie ograniczać się do określonych reżimów przepływu. Brakuje tutaj jasnego wskazania z których punktów jego analizy taki wniosek może wynikać.
- W podsumowaniu Autor wspomina o dwóch ograniczeniach eksperymentu: (1.) różnice w czasie próbkowania w różnych obszarach atmosfery, (2.) ograniczenie wynikające z pominięcia pola prędkości w przeprowadzonych analizach. Jak zaprojektować eksperyment rozwiązujący te problemy?
- W rozprawie brakuje jednoznacznej informacji, w jakim zakresie wykonane prace eksperymentalne były/są dziełem Autora rozprawy, a w jakim stopniu stanowią wynik współpracy z ośrodkami w których przeprowadzono badania, trudno jednoznacznie określić wkład pracy Doktoranta w wykonane badania.
- Na Rys. 4.12 w kolory w przypadku D-1-MIX oraz D-2-MIX odpowiadają wynikom z Rys. 3.4, podobnie jak w przypadku wyników dla komory chmurowej?
- Jak zastosować funkcję f_1 w równaniu (3.1) ?
- W pracy znajdują się nieliczne usterki edytorskie, np. jednostka prędkości w na Str. 41, opis danych na Rys. 5.1 powinno być V10-S-L, itp. jednak nie obniżają one ogólnie bardzo dobrej oceny na temat przygotowania pracy.

Podsumowanie recenzji

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr Roberta Grosza stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie Fizyka, w szczególności w zakresie fizyki atmosfery i przepływów turbulentnych. Wyniki badań zostały (lub będą) opublikowane w trzech artykułach naukowych zamieszczonych w renomowanych czasopismach z dziedziny fizyki atmosfery, co dodatkowo potwierdza jakość prac przedstawionych do recenzji w rozprawie.

Całość dokonań mgr. Roberta Grosza potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej – spełniając tym samym warunki określone w uchwale nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego dotyczącej nadania stopnia doktora. Rozprawę oceniam pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych czynności przewodu doktorskiego.

