Warszawa, 9 wrzesień 2026

Prof. Tomasz Lipniacki,
Zakład Biosystemów i Miękkiej Materii
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Recenzja osiągnięć naukowych dr. Gustavo Abade w kontekście wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauk fizycznych.

## *Sylwetka naukowa Kandydata*

Dr Gustawo Abade jest absolwentem Uniwersytetu w Brasilii, gdzie otrzymał licencjat (2003) i magisterium (2005) na wydziale Inżynierii Mechanicznej. W roku 2010 obronił na wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego doktorat pt. *Analysis of transport phenomena in concentrated suspensions by numerical simulations* pod kierunkiem Prof. Bogdana Cichockiego.

W latach 2010–2014 był adiunktem na macierzystym Uniwersytecie w Brasilii, w latach 2014–2016 pracował jako postdoc na Uniwersytecie w Konstancji, a od 2016 roku jest adiunktem w Instytucie Geofizyki w Warszawie.

**Publikacje:** Dr Gustavo Abade jest współautorem 17 publikacji oraz posiada jedną publikację samodzielną. Co istotne, w siedmiu z ośmiu prac związanych z doktoratem jest pierwszym autorem. Prace dotyczą dwóch obszarów mechaniki płynów: fizyki zawiesin i turbulencji i kondensacji w chmurach. Z jednej strony zagadnienia są odległe z perspektywy występujących (bardzo małych i ogromnych) liczb Reynoldsa, a z drugiej trochę pokrewne z perspektywy śledzenia trajektorii cząsteczek zawiesiny bądź kropelek lub kryształków lodu. Wspólnym narzędziem w przypadku Habilitanta są symulacje numeryczne, choć nie są to symulacje całości przepływu.

Prace habilitanta zgodnie z bazą Scopus były cytowane 636 razy (426 z wyłączeniem cytowań własnych i współautorów). Habilitant swoje wyniki naukowe habilitant prezentował na kilkunastu międzynarodowych konferencjach, daje to rozsądną proporcja między liczbą publikacji i konferencji.

**Projekty:** W latach 2011–2015 habilitant był kierownikiem dwóch indywidualnych projektów badawczych w Brazylii. W Polsce i w Niemczech był wykonawcą bądź głównym wykonawcą w siedmiu projektach ale nie uzyskał jeszcze samodzielnie żadnego projektu.

**Dydaktyka:** Habilitant prowadził łącznie kilkanaście kursów głownie z hydrodynamiki, fizyki atmosfery i oceanów. Był promotorem 4 prac licencjackich, i co istotne jednego doktoratu: D.G. Albuquerque pt. Modeling particle growth by condensation and deposition in turbulent mixed-phase cloud volumes. Trudno nie zauważyć, że owocem tego doktoratu jest wspólna praca wchodząca w skład osiągniecia habilitacyjnego. Z perspektywy pracownika PAN zaangażowanie dydaktyczne habilitanta zasługuje na uznanie, i po części może być odpowiedzialne za niewielka liczbę publikacji po 2019 roku.

## Omówienie i ocena przedłożonego osiągnięcia naukowego *Turbulentna kondensacja w chmurach*

Przedłożone osiągnięcie habilitacyjne składa się z czterech prac:

1. Grabowski, W. W., & Abade, G. C. (2017). *Broadening of cloud droplet spectra through eddy hopping: Turbulent adiabatic parcel simulations*. **Journal of the Atmospheric Sciences, 74**, 1485–1493.
2. Abade, G. C., Grabowski, W. W., & Pawlowska, H. (2018). *Broadening of cloud droplet spectra through eddy hopping: Turbulent entraining parcel simulations*. **Journal of the Atmospheric Sciences, 75**, 3365–3379.
3. Abade, G. C., & Albuquerque, D. G. (2024). *Persistent mixed-phase states in adiabatic cloud parcels under idealised conditions*. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 150**, 3450–3474.

4. Abade, G. C. (2025). *On idealized models of turbulent condensation in clouds*. **Journal of the Atmospheric Sciences, 82**, 1563–1584.

Z oświadczeń współautorów wynika, że w pracach 2 i 3 wkład habilitanta był dominujący, był on autorem koncepcji badań oraz był odpowiedzialny za przygotowanie manuskryptu. W pracy 1 głównym autorem był dr Grabowski, i to on przygotował manuskrypt.

Prace 1, 2, 4 dotyczą analizy rozkładu rozmiaru kropli w chmurze. Wszystkie prace są motywowane obserwacjami i wcześniejszymi symulacjami numerycznymi (Large Eddy Simulations, LES), które pokazują stosunkowo szeroki rozkład rozmiarów kropli, nie możliwy do wytłumaczenia homogenicznym modelem adiabatycznym.

W pracach 1 i 2 autorzy analizują mechanizm poszerzania rozkładu rozmiarów kropli wynikający z faktu, że poszczególne krople poruszające się w turbulentnej chmurze podlegają różnym historiom prędkości pionowej, a w konsekwencji różnym historiom przesycenia pary wodnej i wzrostu kondensacyjnego. Punktem odniesienia jest homogeniczny model adiabatyczny, w którym rozważany fragment powietrza wznosi się bez wymiany masy z otoczeniem, a znajdujące się w nim krople doświadczają podobnej historii przesycenia i w konsekwencji osiągają zbliżone rozmiary. Model adiabatyczny zatem prowadzi do bardzo wąskiego rozkładu rozmiarów kropli.

W obu pracach zamiast bezpośredniej symulacji turbulentnych wirów zastosowano opis stochastyczny, w którym fluktuacje pionowej prędkości kropli są modelowane za pomocą procesu Ornsteina–Uhlenbecka (OU). Proces ten opisuje losowe fluktuacje o pewnym czasie korelacji i prowadzi do różnych stochastycznych trajektorii poszczególnych kropel. W rezultacie krople doświadczają różnych wartości przesycenia pary wodnej zintegrowanych w czasie, co prowadzi do poszerzenia rozkładu ich rozmiarów. Istotnym parametrem modelu jest skala $L$ ruchu turbulentnego.

W pracy 1 zastosowano podejście Lagrange'owskie, w którym śledzone są trajektorie poszczególnych kropli poruszających się wraz z turbulentnym przepływem, w odróżnieniu od podejścia Eulerowskiego, które opisuje prędkość i inne wielkości fizyczne w ustalonych punktach przestrzeni w funkcji czasu. Szerokość otrzymanego rozkładu rozmiarów kropli rośnie wraz ze skalą $L$ ruchu turbulentnego. Wzrost $L$ odpowiada większej amplitudzie stochastycznych przemieszczeń kropli; dla większego $L$ ich trajektorie obejmują większy zakres wysokości, a tym samym szersze spektrum historii wzrostu kondensacyjnego, zależnego od wysokości. Efektywne mieszanie turbuletne powoduje, że rozkład rozmiarów kropli wyznaczony dla całego obszaru $L^3$ jest taki sam jak rozkład obserwowany lokalnie, w obszarze o rozmiarze znacznie mniejszym niż $L^3$. Wynika to z faktu, że krople znajdujące się w tym samym niewielkim obszarze przebyły wcześniej różne trajektorie w obrębie obszaru $L^3$ i zachowują w swoich rozmiarach informację o różnych historiach wzrostu kondensacyjnego.

Praca 1 nie odkrywa samego zjawiska szerokich rozkładów rozmiarów kropli, które było znane z wcześniejszych obserwacji i symulacji numerycznych [Cooper, 1989; Lasher-Trapp et al., 2005], ani też samej koncepcji *eddy hopping*, zaproponowanej wcześniej przez Coopera (1989). Jej istotnym osiągnięciem jest natomiast pokazanie, że stosunkowo prosty model stochastyczny, w którym fluktuacje prędkości pionowej opisane są procesem Ornsteina–Uhlenbecka, pozwala odtworzyć mechanizm prowadzący do znacznego poszerzenia rozkładu rozmiarów kropli. Model dostarcza zatem fizycznej interpretacji szerokich rozkładów otrzymywanych wcześniej w znacznie bardziej złożonych symulacjach. Praca została dobrze przyjęta przez środowisko i dotychczas została zacytowana ponad 80 razy.

W pracy 2 model został rozszerzony o entrainment, tj. turbulentne wciąganie do chmury powietrza z jej otoczenia. Wprowadzane powietrze ma inną wilgotność i zawiera nieaktywowane jądra kondensacji chmur (CCN), czyli cząstki aerozolu pokryte niewielką ilością wody, które nie osiągnęły jeszcze krytycznego rozmiaru wymaganego do rozpoczęcia swobodnego wzrostu kondensacyjnego. Przy dostatecznie dużym przesyceniu cząstki te mogą przekroczyć krytyczny promień określony przez teorię

Köhlera i ulec aktywacji, stając się kroplami chmurowymi. Pojawiające się w ten sposób nowe krople miały krótszy czas na wzrost kondensacyjny, co prowadzi do charakterystycznego poszerzenia rozkładu w kierunku małych promieni; w tym zakresie otrzymany rozkład jest niemal płaski i jakościowo odtwarza rozkłady uzyskane we wcześniejszych symulacjach LES, przedstawione na Rys. 1. Liczba małych kropli zależy przy tym od tempa entrainment, określającego dopływ nowych CCN z otoczenia chmury. Interesujący jest wynik przedstawiony na Rys. 4: uwzględnienie entrainment bez turbulentnych fluktuacji prowadzi do silnego poszerzenia rozkładu w stronę małych promieni, ale praktycznie nie prowadzi do powstawania kropli większych niż te osiągane w przybliżeniu adiabatycznym. Dopiero dodanie turbulentnych fluktuacji trajektorii kropli rozmywa również tę górną granicę rozkładu i prowadzi do pojawienia się kropli o promieniach większych niż w przypadku adiabatycznym. Entrainment i turbulencja wpływają więc na przeciwne strony rozkładu: pierwszy mechanizm przede wszystkim dostarcza nowych, późno aktywowanych i przez to małych kropli, podczas gdy drugi umożliwia części kropli realizację historii wzrostu prowadzących do rozmiarów przekraczających wartość adiabatyczną.

Istotnym ograniczeniem modelu w pracy 2 jest fakt, że entrainment jest zadany jako jednorodny przestrzennie proces stochastyczny, a nie wynika z przestrzennie rozwiązywanego transportu turbulentnego. Model nie uwzględnia w szczególności odległości rozważanego obszaru od granicy chmury. Można oczekiwać, że w rzeczywistej chmurze dostępność świeżych CCN będzie zależała od relacji między tą odległością a charakterystyczną skalą turbulentnego mieszania: dostarczenie CCN głęboko do wnętrza chmury wymaga ich transportu na odpowiednio dużą odległość od jej granicy. Zależność ta nie jest bezpośrednio uwzględniona w modelu. Praca 2 również została dobrze przyjęta przez środowisko i doczekała się ponad 60 cytowań.

W obu pracach pominięto zderzenia i koalescencję kropli, co autorzy wyraźnie zaznaczają. Modele opisują zatem poszerzanie rozkładu wyłącznie wskutek procesów kondensacji, parowania, transportu turbulentnego oraz, w pracy 2, entrainment i aktywacji nowych CCN. W tym sensie są to modele chmury na etapie poprzedzającym powstawanie opadu, czyli, w pewnym uproszczeniu, modele „chmury bez deszczu". Poszerzenie rozkładu ma natomiast istotne znaczenie dla kolejnego, nieuwzględnionego tutaj etapu ewolucji chmury, ponieważ zwiększenie zróżnicowania rozmiarów kropli sprzyja ich zderzeniom i koalescencji.

Praca 4, będąca samodzielną pracą autora, ma charakter pośredni między artykułem przeglądowym a oryginalną pracą badawczą. Autor dokonuje w niej krytycznej analizy stosowanych modeli turbulentnej kondensacji, koncentrując się w szczególności na problemie właściwej definicji rozkładu rozmiarów kropli (DSD) i jego zależności od przestrzennej skali próbkowania. Zwraca uwagę, że rozkład mierzony lokalnie nie musi być taki sam jak rozkład otrzymany przez zebranie kropli z większej objętości chmury. Ponieważ średni rozmiar kropli zmienia się z wysokością, zwiększanie pionowego rozmiaru obszaru próbkowania samo w sobie prowadzi do poszerzenia obserwowanego rozkładu. Efekt ten staje się szczególnie istotny, gdy rozmiar próbkowanego obszaru przekracza charakterystyczną skalę turbulentnego mieszania, tak że próbka obejmuje obszary, pomiędzy którymi turbulencja nie doprowadziła do homogenizacji populacji kropli. W pewnym przybliżeniu mechanizm ten przypomina poszerzenie uzyskane w pracy 1 przez zwiększenie skali $L$; w obu przypadkach do rozkładu włączane są krople związane z większym zakresem wysokości, jednak w pracy 1 wynika to z szerszego zakresu turbulentnych trajektorii kropli, natomiast w pracy 4, z objęcia pomiarem większego zakresu przestrzennego.

Pewną wątpliwość budzi przedstawiona na Rys. 5a tej pracy interpretacja wpływu zwiększenia pionowego rozmiaru obszaru próbkowania na kształt rozkładu. Jeżeli, jak pokazano na rysunku, średni kwadrat promienia kropli zmienia się w przybliżeniu liniowo z wysokością, a lokalny rozkład jest wąski i w przybliżeniu gaussowski, to równomierne próbkowanie znacznie większego zakresu wysokości powinno prowadzić raczej do rozkładu o spłaszczonym wierzchołku (*flat-top*), z brzegami wygładzonymi przez lokalny rozkład gaussowski. Na Rys. 5a rozkład dla większej objętości próbkowania przedstawiono natomiast jako nadal w przybliżeniu gaussowski, jedynie znacznie szerszy.

Chciałbym zatem poprosić Autora o wyjaśnienie podczas kolokwium habilitacyjnego, z czego wynika zachowanie gaussowskiego kształtu rozkładu przy zwiększaniu pionowej skali próbkowania, tym bardziej , że rysunek ten jest powielony w autoreferacie.

Praca 3 dotyczy stabilnosci chmur mieszanych, zawierających jednocześnie przechłodzone krople wody i kryształki lodu. Klasyczny mechanizm Wegenera–Bergerona–Findeisena (WBF) wynika z faktu, że w ujemnych temperaturach ciśnienie pary nasyconej nad wodą jest większe niż nad lodem. W zakresie wilgotności pomiędzy tymi dwiema wartościami krople powinny zatem parować, podczas gdy uwolniona para wodna resublimuje na kryształach lodu, prowadząc ostatecznie do zaniku fazy ciekłej. Autorzy pokazują, dlaczego w warunkach turbulentnych proces ten może zachodzić znacznie wolniej i możliwe jest długotrwałe współistnienie obu faz. Kluczowe znaczenie ma bardzo duża przewaga liczebna kropli wody nad kryształkami lodu, zgodna z obserwacjami chmur mieszanych, oraz niewielkie turbulentne fluktuacje przesycenia pary wodnej. Fluktuacje te powodują, że choć zachodzi resublimacja pary na kryształkach lodu, w każdej chwili część (znacznie liczniejszych) kropli znajduje się w warunkach sprzyjających kondensacji. W rezultacie para wodna jest pobierana jednocześnie przez obie fazy, co ogranicza jednokierunkowy transfer masy od kropli do kryształków, charakterystyczny dla mechanizmu WBF, i pozwala na utrzymywanie się stanu mieszanego. Co szczególnie interesujące, efekt ten nie wymaga dużych fluktuacji przesycenia: potrzebne fluktuacje przesycenia względem wody są rzędu zaledwie ułamków procenta, a więc znacznie mniejsze niż kilkunastoprocentowa różnica pomiędzy ciśnieniami pary nasyconej nad wodą i lodem w rozważanym zakresie temperatur. Mechanizm ten może działać w szerokim zakresie temperatur, w których występuje przechłodzona woda, aż do około −38 °C, poniżej której istotne staje się homogeniczne zamarzanie kropli bez udziału jąder lodowych.

Problem długotrwałego utrzymywania się chmur mieszanych oraz ograniczeń klasycznego mechanizmu WBF był szeroko analizowany we wcześniejszej literaturze (np. Korolev, 2007; Korolev i Field, 2008; Morrison et al., 2012), w której wskazywano m.in. na znaczenie ruchów pionowych, turbulencji, entrainment i innych procesów dynamicznych. Szczególnie interesującą cechą pracy 3 jest natomiast pokazanie, że do uzyskania trwałego stanu mieszanego nie jest konieczne uwzględnienie całej złożoności dynamiki rzeczywistej chmury. Autorzy rozważają wyidealizowany adiabatyczny parcel i wprowadzają stosunkowo niewielką modyfikację klasycznego przybliżenia średniego pola: poszczególne krople i kryształki mogą doświadczać nieco różnych lokalnych warunków termodynamicznych. Już niewielkie fluktuacje przesycenia, rzędu ułamków procenta, prowadzą w modelu do znacznego ograniczenia tempa glacjacji i powstania trwałego stanu mieszanego. Uważam uchwycenie kluczowego mechanizmu i niewielką liczbę koniecznych założeń za istotną zaletę pracy.

Cztery prace tworzące osiągnięcie habilitacyjne poszerzają zrozumienie mechanizmów prowadzących do szerokich rozkładów rozmiarów kropelek (1, 2, 4) oraz mechanizmu współistnienia kropelek i kryształków lodu w przechłodzonych chmurach. Mimo, iż są to oparte na numeryce, ich istotą jest identyfikacja kluczowych procesów odpowiedzialnych za obserwowane zjawisko (znane wcześniej). Uważam takie podejście za cenne, gdyż pokazuje co jest istotą procesu.

W latach 2020–2024 habilitant nie opublikował ani jednego artykułu naukowego, co jest trochę niepokojące z perspektywy zdobywania samodzielności w pracy naukowej, ale nie wpływa to na moją pozytywną ocenę osiągnięcia naukowego i całości dorobku kandydata.

Podsumowując, biorąc pod uwagę znaczenie naukowe prac wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego i istotny udział Habilitanta w ich powstaniu, uważam, że przedłożone osiągnięcie spełnia w stopniu wystarczającym wymagania określone w art. 221 ust. 5 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.) i popieram wniosek dr Gustavo Abade o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauk fizycznych.

Dokument
podpisany przez
Tomasz Lipniacki
Data: 2026.09.28
19:37:18 CEST