

Toruń, 26.09.2019

Prof. dr hab. Michał Hanasz
Centrum Astronomii UMK
ul. Gagarina 11
87-100 Toruń

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Dariusza Wójcika
pt. *JOANNA – dwupłynowy model numeryczny
częściowo zjonizowanej atmosfery Słońca***

Rozprawa doktorska mgr Dariusza Wójcika dotyczy badań częściowo zjonizowanej atmosfery Słońca w opisie dwupłynowym. Badany ośrodek składa się z gazu neutralnego oraz plazmy sprzężonej dynamicznie z polem magnetycznym. Neutralny gaz opisywany jest klasycznymi równaniami hydrodynamiki (HD) a plazma równaniami magnetohydrodynamiki (MHD). Obydwa ośrodki sprzężone są za pomocą wyrazów źródłowych opisujących wymianę pędu i energii pomiędzy składnikami. Model zakłada ponadto możliwość uwzględnienia efektów jonizacji, rekombinacji oraz grzania termicznego i strat promienistych. Postawiony w zaprezentowanej rozprawie doktorskiej problem jest bardzo aktualny i reprezentuje naturalne rozszerzenie stosowanych dotychczas w podobnych badaniach jednopłynowych modeli MHD.

Rozprawa składa się z 5 rozdziałów: wstępu, krótkiego przeglądu modeli płynowych, numerycznego modelu atmosfery Słońca, oraz opisu badań autora podsumowującego wyniki badań autora zawarte w załączonych 6 artykułach. Autor rozprawy skorzystał z możliwości jakie daje Ustawa o stopniach i tytule naukowym odnośnie wykorzystania w rozprawie zbioru opublikowanych artykułów. Wszystkie artykuły wchodzące w skład rozprawy doktorskiej są pracami wieloautorskimi. Współautorzy wspomnianych publikacji dostarczyli oświadczenia z których wynika, że mgr Dariusz Wójcik wniósł dominujący wkład pracy w powstaniu trzech artykułów, których jest pierwszym autorem oraz wniósł istotny wkład poprzez dostarczenie kodu, wykonanie symulacji oraz udział w dyskusji wyników i edycji tekstu w przypadku pozostałych artykułów.

We wstępie omówiony jest cel badań oraz motywacja nawiązująca do nierozwiązanego dotychczas problemu grzania korony słonecznej oraz generacji wiatru słonecznego. Autor zauważa, że dotychczasowe badania opierały się na jednopłynowych modelach hydrodynamicznych i magnetohydrodynamicznych, tymczasem atmosfera Słońca jest częściowo zjonizowana, co implikuje potrzebę rozszerzenia modelu poprzez niezależne potraktowanie dynamiki gazu neutralnego i zjonizowanego oraz poprzez uwzględnienie energii cieplnej wytwarzanej w wyniku zderzeń cząstek obydwu składników. Motywacja pracy jest jasno określona, jednakże brakuje w tym miejscu podsumowania aktualnego stanu wiedzy w zakresie planowanych badań opartego na krótkim chociażby przeglądzie literatury dotyczącej badań mechanizmów grzania korony słonecznej.

W kolejnym rozdziale 2 autor omawia skrótowo modele płynowe atmosfery Słońca oraz m. in. warunki w których można stosować przybliżenie dwupłynowe. W rozdziale tym jak i w całej pracy zdecydowanie brakuje informacji o wartościach liczbowych wielu podstawowych parametrów ośrodka takich jak gęstości, częstości zderzeń termicznych, średnich dróg swobodnych, częstości cyklotronowych składnika neutralnego i zjonizowanego w różnych warstwach atmosfery Słońca. Prezentacja tych parametrów ułatwiłaby bieżącą ocenę stosowalności przybliżenia dwupłynowego w konkretnych sytuacjach fizycznych

modelowanych w artykułach załączonych do rozprawy doktorskiej. W podrozdziale 2.3 autor charakteryzuje przybliżenie magnetohydrodynamiczne. W kolejnym podrozdziale 2.4 przedstawiony został układ równań zastosowanych w kodzie JOANNA do modelowania plazmy częściowo zjonizowanej w przybliżeniu dwupłynowym.

Rozważana jest tu dynamika ośrodka neutralnego opisywanym standardowym układem równań hydrodynamiki i ośrodka zjonizowanego opisywanego układem zmodyfikowanych równań magnetohydrodynamiki opatrzonych nazwą GLM-MHD. Brakuje wyjaśnienia dlaczego właśnie ta postać równań została użyta oraz co oznacza wspomniana nazwa. Wtajemniczeni wiedzą, że pewne metody całkowania numerycznego równania indukcji magnetycznej na dyskretnej siatce obliczeniowej generują błędy numeryczne skutkujące złamaniem warunku bezźródłowości pola magnetycznego. W rozdziale 2 zabrakło wyjaśnienia, że modyfikacja równań MHD pojawiająca się pod nazwą GLM-MHD, zaproponowana przez Dednera i in. (2002) ma na celu usuwanie z układu нефizycznych źródeł pola magnetycznego wynikających niedokładności algorytmu numerycznego. Poza tym, opis oddziaływania między płynami jest niejasny. Autor odwołuje się m. in. do wielkości oznaczonych jako $I_1(s)$, $I_2(s)$, $I_3(3)$ zdefiniowanych w pracy [4] lecz nie tłumaczy ich sensu fizycznego ani przyjętych wartości liczbowych.

Omówieniu kodu JOANNA autor poświęcił fragment rozdziału 3. Niespełna jednostronnicowy opis kodu jest moim zdaniem zbyt ogólnikowy. Brakuje prezentacji algorytmów, struktury kodu, omówienia jego modułów, parametrów kontrolujących symulacje numeryczne i prezentacji wyników działania kodu w standardowych problemach testowych.

Niemniej jednak chciałbym zaznaczyć, że opracowanie wielopłynowego kodu magnetohydrodynamicznego opartego na tzw. solverze Riemannowskim typu HLLD wspartym metodą czyszczenia dywergencji Dednera jest dużym przedsięwzięciem.

Z pomocą kodu JOANNA uzyskane zostały wyniki do 4 spośród 6 publikacji składających się na rozprawę doktorską. Stworzenie kodu, doprowadzenie do etapu dojrzałości produkcyjnej oraz opublikowanie z jego pomocą 4 prac w skali czasowej studiów doktoranckich zasługuje na wyrazy uznania.

W dalszej części rozprawy, w rozdziale 4 zawarte zostało podsumowanie wyników badań zawartych w załączonych publikacjach doktoranta. Pierwszy artykuł (Wójcik, Murawski, Musielak, Konkol i Mignone, 2017, Solar Physics, 292, 31) dotyczy numerical simulations torsyjnych fal Alfvena w rurach strumienia magnetycznego korony słonecznej. Wynikiem badań jest spostrzeżenie, że przy założonej pionowej stratyfikacji gazu oraz szczególnej geometrii ekspandujących linii pola magnetycznego falowanie prędkości oraz pola magnetycznego w funkcji wysokości ma odmienny charakter – zaburzenie prędkości propaguje się do korony a zaburzenie pola magnetycznego jest tłumione. Na tej podstawie wyprowadzony został wniosek, że w fala Alfvena nie spełnia warunku ekwipartycji energii, zatem ma odmienne własności w górnych warstwach atmosfery Słońca.

W kolejnym artykule (Srivastava, Shetye, Murawski, Doyle, Stangalini, Scullion, Ray, Wójcik i Dwivedi, 2017, Scientific Reports, 7, 1) autorzy analizują spektroskopowe dane obserwacyjne ze szwedzkiego 1-m Teleskopu Słonecznego. Autorzy donoszą, że dokonali pierwszej detekcji torsyjnych fal Alfvena o wysokiej częstotliwości w chromosferze Słońca. W dalszej części pracy opisane są modele numeryczne, które pokazują, że fale te unoszą energie rzędu 1000 W na metr kwadratowy w kierunku korony słonecznej. Strumienie tego rzędu są

wystarczające nie tylko do ogrzania korony słonecznej ale również do zainicjowania naddźwiękowego wiatru słonecznego.

Obydwie wspomniane prace wykorzystują jednopłynowe symulacje magnetohydrodynamiczne wykonane publicznie dostępnymi kodami PLOT0 i FLASH. Łatwo dostrzec, że prace te wykraczają poza zakres tematyczny określony tytułem rozprawy, jakkolwiek można uznać, że prace te stanowią punkt wyjścia w kierunku bardziej zaawansowanych modeli dwupłynowych.

W artykule (Kuźma, Murawski, Kayshap, Wójcik, Srivastava i Dwivedi, 2017, *The Astrophysical Journal*, 842, 2) opisane są symulacje numeryczne tzw. spikul, czyli wąskich wyrzutów plazmy w dolnych warstwach korony. Dwupłynowe symulacje wykonane z pomocą kodu JOANNA pokazały pewne różnice w ewolucji ośrodka neutralnego i zjonizowanego. Pokazano, że rdzeń spikuli jest szerszy w składowej neutralnej i jest zdominowany przez gaz neutralny. Kolimacja składnika zjonizowanego wynika z ukierunkowania ruchu jonów w polu magnetycznym.

W artykule (Wójcik Murawski i Musielak, 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481, 262) badane są fale dźwiękowe w dwupłynowej atmosferze Słońca. Celem pracy było zbadanie zależności częstości odcięcia od wysokości w atmosferze. Pokazano, że gdy okres fali jest większy od okresu odcięcia generowane są fale o okresie równym okresowi odcięcia fale takie rozchodzą się w atmosferze i przenikają w efekcie tunelowania do korony. Wynik pracy jest interesujący, jakkolwiek trudno jest zorientować co nowego wnosi tu model dwupłynowy. Czy w modelu jednopłynowym wyniki byłyby istotnie odmienne? W pracy tej autorzy założyli brak pola magnetycznego i jednocześnie jednakowe wykładniki adiabatyczne i temperatury obydwu składników. Wobec tego cząstki obydwu płynów wydają się nierozróżnialne. Skąd zatem wynikają widoczne na ilustracjach (Rys 2 i 3) różnice w zachowaniu obydwu płynów?

W kolejnej pracy (Srivastava, Murawski, Kuźma, Wójcik, Zaquarashvili, Stangalini, Musielak, Doyle Kayshap, Dwivedi, 2018, *Nature Astronomy Letters*, 2, 951) autorzy analizują z pomocą symulacji dwupłynowych tzw. pseudoszoki w pętlach koronalnych atmosfery Słońca. Praca opiera się na spektroskopowych danych obserwacyjnych okolic plam słonecznych. W pracy pokazano z pomocą modelu dwupłynowego, że wspomniane pseudoszoki, będące efektem drobnoskalowych wypływów unoszą strumienie masy i energii wystarczające do wyjaśnienia budżetu energetycznego korony oraz napędzania wiatru słonecznego. Ponieważ część teoretyczna pracy opiera się na modelu dwupłynowym ponownie pojawia się pytanie co nowego wnosi do tych badań model dwupłynowy w porównaniu z jednopłynowym modelem magnetohydrodynamicznym.

Ostatni załączony artykuł (Wójcik, Kuźma, Murawski i Srivastava, złożony do druku w *Astrophysical Journal*, 2019) dotyczy dwupłynowych symulacji wypływów plazmy związanych z granulacją słoneczną. Autorzy pokazują, że wypływy stowarzyszone są z dżetami wzbudzanimi przez granulację słoneczną w obecności pola magnetycznego. Wynik ten jest bardzo interesujący, lecz podobnie jak w poprzednich pracach brakuje tu dyskusji efektów specyficznych dla modelu dwupłynowego.

Publikacje mgr Dariusza Wójcika uzyskały dotychczas ponad 48 cytowań a jego indeks Hirscha wynosi 4, co jest dobrym wynikiem na tym etapie kariery naukowej. Warto docenić fakt, że jedna z tych prac została opublikowana w *Nature Astronomy* a dwie inne w głównych

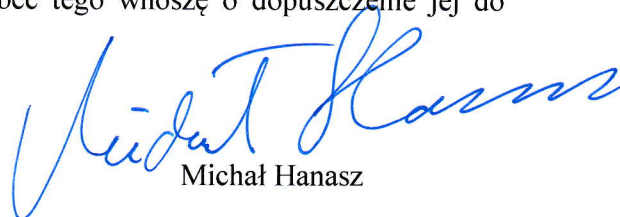
światowych czasopismach astronomicznych: The Astrophysical Journal i Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Uwagi dotyczące strony edytorskiej

- Artykuły zamieszczone w rozprawie wydrukowane zostały wraz z kolorowymi rysunkami w wersji czarno-białej. Skutkiem tego rysunki zawierające istotne informacje zakodowane z pomocą kolorów stały się nieczytelne i niezrozumiałe. Doktorant przypuszczalnie uznał, że wszystkie zamieszczone w rozprawie artykuły można znaleźć w internecie, ale nie pomyślał, że ocenie podlega oficjalny dokument jakim jest przedłożona do recenzji rozprawa doktorska.
- Autor wybrał sposób cytowania odwołujący się do numerów porządkowych prac w spisie literatury. W tej konwencji zdanie (str. 16) „Zgodnie z obliczeniami przeprowadzonymi przez [4] i [8] należy zacząć od obliczania członu źródłowego ...” jest błędnie skonstruowane. Zamiast słowa „przez” należałoby użyć „w pracach”. Ten błąd powtarza się wielokrotnie.
- Styl prezentacji zagadnień naukowych w części głównej rozprawy, oraz strona edytorska prezentują się dosyć niedbale i nieporadnie. Oto przykłady niepoprawnie skonstruowanych zdań: „Model ten ma tę zaletę, że wszelkie efekty liniowe mogą zostać łatwo porównane z analitycznymi rozważaniami” (str. 9). Co autor miał na myśli?
- Inne przykłady: „Pole magnetyczne zmienia równanie energii” (s. 14). „Kompletny zestaw równań opisujących plazmę częściowo zjonizowaną i używaną w kodzie [...]”, „[...] wygenerowane fale wzbudzają okres P_{ac} , który następnie rozchodzi się w atmosferze [...]” (s.27). To nie okres, lecz fale rozchodzą się w atmosferze. Odnosnie wiatru słonecznego doktorant napisał, że „Wyływa on ze Słońca do układu Słonecznego” (s. 29). To sformułowanie sugeruje, że Słońce nie jest częścią Układu Słonecznego. Na tej samej stronie doktorant napisał „Odnotowano również, że modele MHD mogą być odpowiedzialne za wypływającą ze Słońca plazmę.” Należałoby raczej powiedzieć, że „... efekty magnetohydrodynamiczne są przyczyną wypływów.” W rozdziale 2.1 pojawia się termin „funkcja dystrybucji”, który mógłby zostać zastąpiony stosowanym w języku polskim pojęciem „funkcji rozkładu”. Podobnych potknięć językowych jest wiele w tekście rozprawy.

Wniosek końcowy

Zaprezentowane w rozprawie doktorskiej wyniki badań mgr. Dariusza Wójcika stanowią wartościowy wkład w rozwój badań atmosfery Słońca. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Dariusza Wójcika spełnia wymagania określone Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami. Moje uwagi krytyczne nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, wobec tego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Michał Hanasz