

Greenbelt, MD, USA, 01.06.2020

dr hab. Grzegorz Michałek
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Jagiellońskiego

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana magistra Błażeja Kuźmy

**Tytuł: "Symulacje numeryczne magnetycznie zdominowanej atmosfery Słońca
(Numerical simulations of magnetically dominated atmosphere of the Sun) "**

Promotor: prof. dr hab. Krzysztof Murawski

Praca wykonana w Zakładzie Astrofizyki i Teorii Grawitacji na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Głównym celem pracy doktorskiej było numeryczne badanie różnych zjawisk fizycznych zachodzących w atmosferze Słońca, które mogą odgrywać istotną rolę w transporcie energii oraz masy do wyższych warstw słonecznej atmosfery. Jest to jeden z kluczowych problemów heliofizycznych, który ciągle wymaga zrozumienia.

Przedłożona mi do oceny rozprawa składa się z opublikowanych przez Doktoranta ośmiu artykułów poprzedzonych krótkim wprowadzeniem i przewodnikiem po tych publikacjach. Wszystkie prace zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych (A&A (2), ApJ (4), MNRAS (1), Nature Astronomy (1)). Doktorant jest pierwszym autorem w przypadku 5 prac. W pozostałych trzech pracach jest drugim i trzecim współautorem. Zaprezentowany dorobek naukowy, jak na rozprawę doktorską, jest wybitny. Mógłby on nawet stanowić podstawę rozprawy habilitacyjnej. Publikacja wyników w prestiżowych czasopismach potwierdza, że stanowią one istotny i nowatorski wkład w tej dziedzinie badań.

Rozprawa jest jednorodna tematycznie i dotyczy procesów fizycznych mogących odgrywać istotną rolę w transporcie energii i masy w słonecznej atmosferze. Wszystkie prace oparte są na symulacjach MHD (model dwupłynowy) wykorzystujących zaawansowane kody numeryczne FLASH, PLUTO i JOANNA.

Na początku (Wstęp) Doktorant syntetycznie opisał aktualny stan wiedzy na temat atmosfery słonecznej, procesów fizycznych tam zachodzących oraz przedstawił istotne zagadnienia

badawcze wymagające lepszego zrozumienia. W kolejnym rozdziale (Modele plazmy astrofizycznej) zostały przedstawione fundamentalne równania MHD, które stanowią podstawę wszystkich badań (symulacji MHD) przedstawionych w tej rozprawie doktorskiej. Trzeci rozdział (Badania własne – symulacje numeryczne zjawisk w atmosferze Słońca) stanowi przewodnik po kolejnych opublikowanych artykułach składających się na rozprawę doktorską.

W każdej z ośmiu prac został dokładnie rozpracowany konkretny problem badawczy. W tej części recenzji skupię się na bardzo krótkim omówieniu zawartości merytorycznej wszystkich publikacji.

Dwie pierwsze prace dotyczą problemu generacji spikul w chromosferze słonecznej. To bardzo dawno odkryte zjawisko na Słońcu do dziś nie znajduje ostatecznego wyjaśnienia. W pierwszej z tych prac pokazano, że można uzyskać model spikuli zgodny z podstawowymi obserwacjami (prędkość, wysokość rozchodzenia) w wyniku wertykalnego pulsu prędkości. W drugiej pracy do badania powstawania i ewolucji spikul został zastosowany bardziej realistyczny (w dolnych partiach atmosfery słonecznej) dwupłynowy model MHD (materia neutralna + zjonizowana). Dzięki temu udało się prześledzić ewolucje spikul w postaci gazu neutralnego oraz plazmy.

Trzecia z przedstawionych prac dotyczy bardzo interesującego zjawiska zaobserwowanego na brzegu plamy, a mianowicie pseudo fali uderzeniowej. Taka pseudo fala uderzeniowa, w przeciwieństwie do zwykłej fali uderzeniowej, charakteryzuje się jedynie skokowym wzrostem gęstości. Symulacje numeryczne przeprowadzone w celu wymodelowania tego zjawiska pokazały, że może ono odgrywać istotną rolę w transporcie energii i masy do korony słonecznej. Jak pokazano, ten proces może być bardzo łatwo wzbudzany (mikrorekoneksje) w półcieniu plamy słonecznej, gdzie istnieje silne pole magnetyczne.

Kolejna praca (czwarta) dotyczy problemu zachowania się fal Alfvena w arkadach magnetycznych, które są powszechnie obserwowanymi strukturami w atmosferze słonecznej. Istotnym elementem takiej struktury jest magnetyczny punkt zerowy pojawiający się powyżej arkad. Formalnie jest to bariera, przez którą fala Alfvena nie może przenikać. Przeprowadzone symulacje pokazały, że w takiej konfiguracji magnetycznej, powstające fale magnetoakustyczne i Alfvena ulegają sprzężeniu i mogą częściowo przenikać do korony słonecznej.

Kolejna praca (piąta) również dotyczy tej samej problematyki, czyli transportu energii za pomocą fal Alfvena. Tym razem jednak symulacje skupiły się na skrętnych falach Alfvena występujących w niejednorodnych tubach magnetycznych. W przedstawionym modelu fale te były wzbudzane w wyniku skrętnego zaburzenia umiejscowionego u podstawy tuby. Badania pokazały, iż w wyniku takich wzbudzeń powstają fale typu żmijki oraz skrętne fale Alfvena, które mogą transportować istotne ilości energii do korony słonecznej. Najbardziej efektywne w tym procesie są fale o dłuższych okresach oscylacji.

Następna publikacja dotyczy ogólnego problemu związanego z budżetem energii w koronie słonecznej. W pracy tej pokazano, iż fale Alfvena nie są wystarczającym źródłem energii dostarczanej do górnych warstw atmosfery słonecznej. Oznacza, to że proces transportu masy i energii musi wykorzystywać jeszcze inne zjawiska.

Ostatnie dwie publikacje dotyczą wpływu granulacji słonecznej na budżet energii w fotosferze i chromosferze oraz generacji wiatru słonecznego. W pierwszej z tych prac pokazano, iż fale dwupłynowe tworzone w naturalny sposób przez cele konwektywne całkowicie tłumaczą energetyczną stabilność dolnych warstw atmosfery słonecznej. Druga z wymienionych prac dostarcza jeszcze bardziej fascynujący rezultat. Symulacje przeprowadzone w tej pracy pokazały, że fotosferyczne cele konwektywne mogą generować przepływy plazmy, które są źródłem spokojnego wiatru słonecznego (dostarczają energii i materii dla generacji tego wiatru).

Wszystkie przedstawione publikacje stanowią istotny przyczynek do wiedzy na temat fizyki słońca. Każda z prac ma jasno postawiony cel badawczy, właściwą metodologię (do każdego problemu badawczego dobrane zostały odpowiednie podejście) oraz ciekawe wyniki badań. Można jednoznacznie stwierdzić, że Doktorant doskonale rozumie problemy badawcze, z którymi się zmierzył podczas swojej pracy naukowej. W przedstawionej pracy doktorskiej trudno doszukiwać się jakichkolwiek mankamentów.

Podsumowując, rozprawa spełnia wszelkie formalne, jak i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, dlatego wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.



dr hab. Grzegorz Michałek