

Warszawa, 18 maja 2020

Barbara Popielawska, prof. dr hab.  
Zakład Fizyki Plazmy,  
Centrum Badań Kosmicznych PAN

### **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Błażeja Kuźmy**

„Symulacje numeryczne magnetycznie zdominowanej atmosfery Słońca”,  
napisanej pod opieką prof. dr hab. Krzysztofa Murawskiego z Uniwersytetu  
Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

### **Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska przedstawia wyniki badań zjawisk falowych w fotosferze i chromosferze Słońca analizowanych pod kątem możliwości zasilania strumieniami plazmy i energii dolnych warstw korony słonecznej. Badania przeprowadzono poprzez wykonanie numerycznych symulacji zaburzeń w realistycznych modelach stacjonarnej, przenikniętej polem magnetycznym zjonizowanej atmosfery słonecznej, w ramach jednopłynowego opisu MHD oraz opisu dwu-płynowego z uwzględnieniem składowej neutralnej.

Rozprawa ma formę spójnego tematycznie zbioru 8 artykułów opublikowanych w latach 2015-2020 w renomowanych czasopismach astronomicznych, takich jak *Astronomy and Astrophysics* (140 pkt, 3 art.) i *Astrophysical Journal* (140 pkt, 4 art.) oraz 1 artykuł w *Nature Astronomy* (40 pkt). Prace są wieloautorskie: 1 współaut. - 1 praca, 2 - 2 prace, 3 - 2 prace oraz 3 prace wieloautorskie (5, 6, 10 autorów). Oświadczenia większości współautorów są udostępnione, ale do kompletu brakuje w sumie 11 oświadczeń. Pan Kuźma jest pierwszym autorem 5 publikacji, i choćby ten fakt wskazuje na jego znaczący wkład w opublikowane wyniki badań. We wszystkich pracach współautorem jest Promotor.

W 3 pracach symulacje wykonano z użyciem publicznie dostępnych kodów numerycznych MHD takich jak kod PLUTO (Uniwersytet w Turynie) w dwu pracach i w jednej - kod FLASH (*University of Chicago*). W pozostałych 5 publikacjach zaprezentowano wyniki uzyskane w oparciu o nowy kod JOANNA (*JOint ANalytical and Numerical Approach*) autorstwa jednego ze współautorów – p. Dariusza P. Wójcika. Kod ten powstał w ramach pracy magisterskiej na UMCS i rozwiązuje numerycznie równania dwupłynowe dla ośrodka plazma-płyn neutralny.

Załączone oryginalne artykuły poprzedzone są 42-stronicowym przewodnikiem autorskim, który składa się z czterech podrozdziałów o tytułach: Wstęp, Modele plazmy astrofizycznej, Badania własne - symulacje numeryczne zjawisk w atmosferze Słońca, Podsumowanie.

### **Opis poszczególnych elementów rozprawy:**

#### **I. Przewodnik autorski**

##### **1) Wstęp**

Rozdział zawiera krótki opis atmosfery Słońca i leżącej poniżej warstwy konwekcyjnej. Zarysowana jest sceneria, struktury i zjawiska, które będą przedmiotem badań czyli dyskretne strumienie (*jets*) i spikule (*spicules*) zwane także bryzgami chromosferycznymi. Omówione są aktualne wielkie problemy heliofizyki. Pierwszą niewiadomą i jedną z najważniejszych jest źródło i rodzaj strumienia energii zapewniającego gwałtowny wzrost temperatury plazmy poprzez cienką warstwę przejściową między chromosferą a dolną koroną. Drugi problem to pochodzenie wiatru słonecznego – czy jest to jednorodna gorąca plazma z dolnej korony swobodnie ekspandująca w przestrzeń po przekroczeniu sfery Alfvéna czy też źródłem wiatru słonecznego są dyskretne wytryski (wyrzuty, odpływy, wypływy) plazmy z chromosfery w wyniku różnych procesów fizycznych, nie ustalonych ostatecznie do tej pory. Celem pracy jest zbadanie mechanizmów powstawania i ewolucji

BR

wyrzutów plazmy chromosferycznej oraz poznanie skutków generacji i rozchodzenia się różnorodnych fal w strukturach atmosfery Słońca. O wadze podjętych w rozprawie badań świadczy to, że są one jednymi z celów naukowych nowych misji kosmicznych takich jak *Parker Solar Probe* czy *Solar Orbiter*.

## 2) Modele plazmy astrofizycznej

Autor omawia krótko równania opisujące atmosferę Słońca w ramach idealnej magnetohydrodynamiki z polem grawitacyjnym oraz w ramach modelu dwu-płynowego plazma-gaz niejonizowany, gdzie oba płyny są sprzężone zderzeniowo. W równaniach tych uwzględniona jest jonizacja i rekombinacja, efekty zderzeniowe, przewodnictwo cieplne i radiacyjne straty energii. Ta część teoretyczna jest bardzo zwięzła, ale wystarczająca, zważywszy, iż równania te są omawiane w każdej z publikacji. Jest tu jednak pewna ilość niejasności czy pominięć. Np., w równaniu (5) nieco skrótowo potraktowana masa cząsteczkowa, w równaniu (12) po lewej stronie występują nie opisane człony  $L_r$  i  $q_i$ , brak definicji symboli  $\mu_i$  i  $\mu_H$ , nie do końca wyjaśniona fizyczna przyczyna różnicy częstotliwości zderzeń między cząstkami neutralnymi a jonami wynikająca z równań (18). Nie opisano oscylacji, fal i szoków charakterystycznych dla badanego ośrodka, które przecież są przedmiotem badań.

## 3) Badanie własne – symulacje numeryczne zjawisk w atmosferze Słońca.

W tej części w ośmiu podrozdziałach omówiono szczegółowo każdą z ośmiu publikacji przedstawiając na 3-4 stronach dla każdej cel badań, zastosowaną metodykę i wyniki.

## 4) Podsumowanie badań

Zwięzłe i jasne pół-stronicowe autorskie podsumowanie uzyskanych wyników.

## 5) Lista publikacji

Lista publikacji cytowanych w Przewodniku jest wysoce niekompletna. Obejmuje tylko 44 pozycje. Dane pozostałych cytowanych w Przewodniku prac prawdopodobnie znajdują się w załączonych publikacjach, ale nie jest to rozwiązanie wygodne dla recenzenta Rozprawy. Na dodatek, nie mogę nigdzie znaleźć referencji do wielokrotnie cytowanej publikacji Tu (2005). Czy to ma być Tu et al. (2005)?

## II. Szczegółowa analiza 8 publikacji (wg kolejności wynikającej z powiązania tematyki)

1) „*Numerical simulations of solar spicules: Adiabatic and non-adiabatic studies*”, Kuźma, B., K. Murawski, T.V. Zaqarashvili, P. Konkol, and A. Mignone, *Astronomy and Astrophysics*, 2017.

Są oświadczenia wszystkich 4 współautorów. Wykorzystano kod PLUTO do rozwiązania układu równań MHD w wersji adiabatycznej i nie-adiabatycznej w celu prześledzenia efektów zlokalizowanego pionowego impulsu prędkości o cylindrycznej symetrii zadanego w górnej chromosferze. Chromosfera modelowa początkowo jest w równowadze hydrostatycznej, a jej pole magnetyczne jest potencjalne. Symulacje pokazały, że początkowy impuls prędkości przeradza się w falę uderzeniową, która w warstwie przejściowej pobudza strumień plazmy propagujący się do korony słonecznej. Chłodna i gęsta plazma chromosferyczna w postaci fali kontaktowej wnika do korony z prędkością 20-25 km/s, a za nią rozprzestrzenia się w dół fala rozrzedzenia. Po pewnym czasie gęsta plazma chromosferyczna spada z powrotem do obszaru przejściowego i górnej chromosfery wywołując szok odbicia i kolejny impuls prędkości ku koronie o takiej samej strukturze jak pierwszy. Powstaje oscylacyjne zaburzenie o okresie zbliżonym do progu odcięcia dla fal akustycznych w chromosferze. Dobra rozdzielczość przestrzenna symulacji numerycznych pozwala na uzyskanie ostrego obrazu rozmaitych nieciągłości w plazmie i poprawną ich interpretację. Pokazano także, iż uwzględnienie efektów nie-adiabatycznych (straty promienne, zewnętrzne grzanie i przewodnictwo cieplne) w niewielkim stopniu wpływa na strukturę oscylacyjnego zaburzenia. Efekt przyłożonego zaburzenia podobny jest do bryzgów chromosferycznych, z czego wypływa wniosek, iż zlokalizowany impuls prędkości w górnej chromosferze (np., pochodzący od mikro-rekoneksji magnetycznej) może być ich przyczyną. Wynik jest istotny, choć autorzy zaznaczają, iż potrzebne jest



jeszcze dokładne porównanie z konkretnymi obserwacjami. Przegląd wcześniejszych prac dotyczących bryzgów chromosferycznych i fakt opublikowania pracy w dobrym czasopiśmie uprawnia do stwierdzenia, że autorzy uzyskali nowy, ważny wynik dotyczący istotnego problemu naukowego. Współautorzy zadeklarowali: współpracę i wsparcie techniczne w wykorzystaniu do obliczeń kodu PLUTO (A. Mignone), udział w dyskusji teoretycznych aspektów symulacji numerycznych (T. Zaqarashvili), pomoc w wyborze tematyki badań, w przygotowaniu modelu nieadiabatyicznego i w dyskusji wyników (Promotor). Czwarty współautor, pan Piotr Konkół zadeklarował ustawienie warunków początkowych i brzegowych dla kodu FLASH, podczas gdy w tej konkretnej pracy używany był kod PLUTO. (Inna nieco zabawna pomyłka, to górna stopka publikacji 1) z tekstem odpowiadającym publikacji 4)). Stwierdzam, iż udział pana Błażeja Kuźmy w tej ważnej publikacji był dominujący.

2) *"Two-fluid numerical simulation of solar spicules"*, **Kuźma, B.**, K. Murawski, P. Kayshap, D. Wójcik, A. K. Srivastawa, and B. N., Dwivedi, *The Astrophysical Journal*, 2017.

Są oświadczenia dwu współautorów z Polski, brak 3 oświadczeń naukowców w Indii. W tej pracy wykorzystano kod dwupłynowy JOANNA i po raz pierwszy dokonano symulacji bryzgów chromosferycznych z uwzględnieniem składowej neutralnej chromosfery. W równaniach uwzględniono zderzenia, jonizację i rekombinację jonów. Stan początkowy to atmosfera w równowadze hydrostatycznej, o rozkładzie temperatur z wysokością określonym według modelu pół-empirycznego, przeniknięta potencjalnym (bezpładowym) polem magnetycznym. Tym razem czynnikiem wzbudzającym bryzgi chromosferyczne był impuls ciśnienia zaaplikowany w górnej chromosferze w obszarze o parametrze  $\beta < 1$  czyli w ośrodku zdominowanym przez pole magnetyczne. Symulacje pokazały, że wzbudzona w plazmie powolna fala magnetosferyczna ze wzrostem wysokości przeradza się w falę uderzeniową propagującą się wzdłuż pola magnetycznego w warstwie przejściowej do korony. Za frontem fali uderzeniowej ciągnie się fala kontaktowa gęstej plazmy chromosferycznej czyli bryzg chromosferyczny, podobnie jak to opisano w pracy 1). Wewnątrz powierzchni kontaktowej w plazmie rozprzestrzenia się fala rozrzedzenia. Część podgrzanej na czole fali uderzeniowej materii przenika do korony, część spada po bokach bryzgu do chromosfery. Impuls ciśnienia w składowej neutralnej wzbudza w niej fale akustyczne. Zderzeniowe zaś sprzężenie z plazmą wytwarza w składowej neutralnej strukturę podobną do tej wygenerowanej w plazmie, strukturę jednak bez fali rozrzedzenia i nie tak smukłą i subtelną jak w przywiązanej do pola magnetycznego plazmie. Dynamika obu składowych nieco się różni. Symulacje pokazują też zmienność temperatury, gęstości masy i stopnia jonizacji w obszarze bryzgu, np. rdzeń bryzgu jest zdominowany przez chłodną składową neutralną, stopień jonizacji wzrasta ku górze. Obserwacje linii chromosferycznych o dobrej rozdzielczości przestrzennej wskazują, że bryzgi podlegają ewolucji termicznej z wysokością, co jest widoczne w wynikach symulacji. Reasumując, symulacje dwupłynowe bryzgów chromosferycznych wzbudzonych zlokalizowanym impulsem ciśnienia w górnej chromosferze pokazały, jakie mechanizmy kształtują formowanie i ewolucję w czasie tych drobnoskalowych struktur i jaka jest rola składowej neutralnej. Uważam, że wyniki te są interesujące i ważne, ponieważ bryzgi chromosferyczne są potencjalnym źródłem materii dla korony. Zakładam, że pan Błażej Kuźma jako pierwszy autor ma w tej publikacji wkład dominujący, obok autora kodu numerycznego p. Dariusza P. Wójcika i Promotora, który deklarował pomoc w interpretacji wyników symulacji i w pracy nad tekstem.

3) *Srivastava, A. K., K. Murawski, B. Kuźma, D. P. Wójcik, T. V. Zaqarashvili, M. Stangalini, Z. E. Musielak, J. G. Doyle, P. Kayshap, and B.V. Dwivedi, „Confined pseudo-shocks as an energy source for the active solar corona”, Nature Astronomy- Letters, 2018, doi.org/10.1038/s41550-018-0590-1.*

Są oświadczenia 4 współautorów (Murawski, Wójcik, Zaqarashvili, Doyle). Praca stanowi wspólnie wykorzystanie kodu JOANNA do wyjaśnienia szczegółowych obserwacji dynamicznych drobnoskalowych struktur o kształcie kijanki (*tadpole jets*) w dolnej atmosferze Słońca wykonanych przez satelitę IRIS (*Interface Region Imaging Spectrograph*). Tym razem dynamiczne masywne „główki” gęstej plazmy z ogonem rozrzedzenia za nimi nazwane tu pseudo-szokami zaobserwowano



w obszarze aktywnym w półcieniu plamy słonecznej na wysokości warstwy przejściowej i dolnej korony. Kod JOANNA posłużył do interpretacji fizycznej tych dynamicznych struktur. Podobnie jak w poprzednich dwu pracach, model dwu-płynowej atmosfery hydrostatycznej przenikniętej potencjalnym polem magnetycznym o słabo zakrzywionych liniach pola został pobudzony w górnej chromosferze ograniczonym w przestrzeni impulsem ciśnienia składowej neutralnej i zjonizowanej. Wzbudzone wolne fale magneto-akustyczne propagujące się wzdłuż pola magnetycznego przekształcają się w słabą falę uderzeniową w warstwie przejściowej, a za nią postępują odłączone od szoku fale kontaktowe (*plasma-neutral entropy mode*), o gęstym czole i widocznym ogonie rozrzedzenia wyciągniętym wzdłuż pola magnetycznego. Wyniki symulacji pokazały także, iż strumienie masy i energii związane w pseudo-szkoki są większe niż te niesione przez powolną falę uderzeniową, a ich wielkość jest znacząca dla dolnej korony jako kompensacja strat radiacyjnych i ucieczki masy. Uważam tę pracę za bardzo ciekawą i dającą perspektywy dla wyjaśnienia innych zlokalizowanych dynamicznych struktur w obszarze plam słonecznych i ich pobliżu.

4) **Kuźma, B., D. Wójcik, and K. Murawski**, „*Heating of a quiet region of the solar chromosphere by ion and neutral acoustic waves*”, *The Astrophysical Journal*, 878:81, 2019.

Są oświadczenia dwu współautorów. Udział pana Błażeja Kuźmy jest dominujący (wykonanie symulacji, napisanie publikacji). Jest to kolejna praca z wykorzystaniem kodu JOANNA. Tym razem autorzy postanawiają dowiedzieć się, czy fale akustyczne wzbudzone u podstaw fotosfery i propagujące się do grawitacyjnie uwarstwionej i częściowo zjonizowanej chromosfery mogą efektywnie ją podgrzewać. W dwu-płynowych równaniach bez pola magnetycznego uwzględniono zderzeniową produkcję ciepła. Początkowa równowaga hydrostatyczna i termiczna ( $T_i = T_n = T_0$ ) w atmosferze została zaburzona u podstawy fotosfery periodycznym sygnałem pionowej składowej prędkości jonów i cząstek neutralnych, o okresach 5s do 300s i amplitudzie 0.1 km/s. Symulacje pokazały, że fale o okresie 30s do 200s powodują znaczący wzrost temperatury chromosfery (do  $10^4$  K w skali  $10^3$  s), podczas gdy poniżej fotosfera nie doznaje zmian. Początkowa amplituda fal narasta z wysokością dzięki spadkowi gęstości ośrodka, i ten proces dominuje nad zderzeniowym tłumieniem. W wyższych warstwach tworzą się periodycznie podgrzewające gaz szoki akustyczne, a za nimi powstają fale rozrzedzenia, w których temperatura gazu spada. Otrzymany z symulacji uśredniony strumień energii fal akustycznych przy małej amplitudzie początkowej fal nie rekompensuje jednak realnych strat radiacyjnych.

5) **Wójcik, D., B. Kuźma, K. Murawski, and A. K. Srivastava**, „*Two-fluid numerical simulations of the origin of fast solar wind*”, *The Astrophysical Journal*, 884:127, 2019.

Są oświadczenia dwu polskich współautorów. Do symulacji numerycznych wykorzystano kolejny raz kod JOANNA. Tym razem autorzy podjęli zadanie prześledzenia, czy naturalna konwekcja w warstwie poniżej fotosfery poprzez granulację i związane z nią wytryski plazmy do dolnej atmosfery (*chromospheric jets*) może być źródłem masy i energii dla szybkiego wiatru słonecznego z dziur koronalnych. Obszar symulacji rozciąga się od 2500 km pod powierzchnią fotosfery do 30 000 km w koronie. W równaniach uwzględniono straty radiacyjne, przewodnictwo cieplne i grzanie zderzeniowe, oraz pewien strumień energii w dolnych warstwach dostarczany z wnętrza Słońca. Stan początkowy ośrodka to równowaga hydrostatyczna, temperatury składników gazu jednakowe ( $T_i = T_n$ ) i stałe pole magnetyczne o prostej konfiguracji otwartej. Symulacje pokazały, że wzbudzone przez turbulentną konwekcję pod fotosferą fale, szoki i impulsywne, zlokalizowane nad granulami wypływy plazmy z dolnej atmosfery składają się na stały strumień masy i energii ekspandujący do chromosfery i korony. Autorzy uważają, że ten proces może być wystarczającym źródłem szybkiego wiatru słonecznego w dziurach koronalnych.

6) **Wójcik, D., B. Kuźma, K. Murawski, and Z. E. Musielak**, „*Wave heating of the solar atmosphere without shocks*”, *Astronomy & Astrophysics*, 635, A28 (2020)

Są oświadczenia dwu polskich współautorów. (W dalszym tekście posługuję się ostateczną edycją artykułu opublikowaną online na stronie internetowej czasopisma A&A.) W tej publikacji opisano



najnowsze wykorzystanie kodu JOANNA do rozwiązania dwu-płynowych równań opisujących atmosferę spokojnego Słońca z warstwą konwekcyjną pod fotosferą. Celem jest wyjaśnienie, jak powstaje rozkład temperatur w atmosferze spokojnego Słońca, z permanentnie obserwowanym gwałtownym wzrostem temperatury w wąskiej warstwie przejściowej i z koroną o temperaturach rzędu  $10^6$  K. Obszar symulacji rozciąga się od głębokości 5000 km pod dolną granicą fotosfery do 30 000 km w koronie. W równaniach nie uwzględniono jonizacji, rekombinacji i reakcji wymiany ładunku. Zderzenia zapewniają lepkie sprzężenie obu płynów i grzanie ośrodka. W symulacjach zadano strumień ciepła z niższych obszarów wnętrza Słońca, który o 5% przewyższa straty radiacyjne pod fotosferą. Pod fotosferą zderzenia są tak częste, iż oba płyny są sprzężone stanowiąc *de facto* jeden płyn. Stan początkowy ośrodka to hydrostatyczna równowaga i stałe pole magnetyczne o prostej otwartej konfiguracji. Samo-ewolucja ośrodka prowadzi to niestabilnej konwekcji i rekonfiguracji pola magnetycznego unoszonego przez plazmę w konwekcyjnych ruchach wznoszących i opadających. Wzbudzone są samouzgodnione z konwekcją fale akustyczno-grawitacyjne, fale Alfvéna i jonowe fale magnetoakustyczno-grawitacyjne. Część fal wydostaje się do chromosfery i korony. Fale są zderzeniowo tłumione w fotosferze i chromosferze, a przekaz energii do plazmy rekompensuje z nadkładem straty radiacyjne. Otrzymany z symulacji średni pionowy profil temperatury jest bardzo podobny do klasycznego semi-empirycznego modelu temperatury atmosfery Słońca, modelu zbudowanego na podstawie m.in. danych spektroskopowych. Najważniejszy wniosek z symulacji jest taki, że zderzeniowe tłumienie energii fal zapobiega powstawaniu fal uderzeniowych, wystarcza do zrekompensowania strat radiacyjnych i zapewnia wzrost temperatury z wysokością. W spokojnej atmosferze Słońca do uzyskania gorącej korony nie są zatem niezbędne fale uderzeniowe. Jest to ważny wynik, pomimo iż w modelu nie uwzględniono wszystkich procesów zachodzących w ośrodku.

Dwie pozostałe prace poświęcone są badaniu fal w strukturach magnetycznych w warstwie przejściowej i koronie Słońca (powyżej 1900 km nad podstawą atmosfery) w oparciu o równania idealnej magnetohydrodynamiki.

7) **Kuźma B., K. Murawski, and A. Solov'ev**, „Numerical simulations of sheared magnetic lines at the solar null line”, *Astronomy&Astrophysics*, 577:A138, 2015.

Jest to najwcześniejsza publikacja z serii przedstawionej w Rozprawie. Wykorzystano do symulacji kod FLASH. Zadanie polegało na opracowaniu modelu matematycznego charakterystycznej obserwowanej struktury magnetycznej w koronie – złożenia dwu arkad z linią neutralną ponad nimi i zbadanie, jak w takiej strukturze propagują się fale Alfvéna. Struktura początkowa jest *quasi*-dwuwymiarowa w równowadze magnetohydrostatycznej, gdzie siła Lorentza jest równoważona przez gradient ciśnienia plazmy i pole grawitacyjne. W symulacjach poddano taki układ zaburzeniu wprowadzając narastające w czasie dodatkowe tzw. ścinające pole magnetyczne w płaszczyźnie prostopadłej do pętli arkad. Układ zaczyna ulegać ewolucji, powstają fale Alfvéna, fale magnetoakustyczne, dochodzi do sprzężenia obu rodzajów fal. W okolicy linii neutralnej pole magnetyczne jest bardzo niejednorodne. Prowadzi to do nakładania się fal alfvénowskich o różnych fazach, ich rozproszenia i częściowego odbicia w obszarach silnie zmiennej prędkości Alfvéna. W efekcie amplituda wzbudzonych fal ulega osłabieniu i układ powoli ulega relaksacji, w skali czasu zależnej od tempa zaburzenia. Odpowiednio dobrana siatka numeryczna pozwala śledzić ruch plazmy i identyfikować poszczególne rodzaje fal. Współczesne instrumenty pozwalają obserwować tego typu struktury z dużą rozdzielczością w czasie i przestrzeni, stąd zaprezentowane symulacje numeryczne będą z pewnością służyć pomocą w interpretacji pomiarów. Jest to bardzo ciekawa analiza pozwalająca tłumaczyć stabilność arkad.

8) **Kuźma, B. and K. Murawski**, „Numerical simulation of transverse oscillations of a finely structured solar flux tube”, *The Astrophysical Journal*, 866:50, 2018.

Nowe obserwacje spektro-polarymetryczne z teleskopu SST pokazały wyraźnie, że tuby magnetyczne w koronie nie są monolityczne, ale składają się z cienkich włókien (pasm). Autorzy postanowili zobaczyć, jakie fale powstają w tego rodzaju strukturach pod wpływem zaburzeń wygenerowanych w

BR

chromosferze. Do symulacji numerycznych w 3D wykorzystano kod magnetohydrodynamiczny PLUTO. Stan początkowy to matematyczny model potencjalnej (rot  $\mathbf{B}=0$ ) magnetycznej tuby o rozciągłości pionowej od 1750 do 20000 km osadzonej na kwadracie około  $0.8 \times 0.8$  Mm. Tuba jest zanurzona w atmosferze o rozkładzie gęstości odpowiadającym równowadze hydrostatycznej przy zadanym rozkładzie temperatury. Taki układ poddano pobudzeniu przez stopniowe zwiększenie ciśnienia w pięciu dyskretnych obszarach w chromosferze, tak, żeby poprzez wstrzyknięcie plazmy chromosferycznej wytworzyć subtelą strukturę w tubie w postaci centralnego włókna i czterech „przyklejonych” włókien wokół. Następnie zastosowano drugi rodzaj pobudzenia przez zaaplikowanie u podstawy tuby periodycznych zmian prędkości azymutalnej, o maksymalnej amplitudzie w środku tuby. Dyskretna struktura tuby staje się widoczna dzięki gromadzeniu się plazmy na brzegach włókien. Symulacje pokazują, że wraz ze wzrostem wysokości włókna oddalają się od rdzenia, a także to, że rdzeń oscyluje inaczej niż włókna boczne. Rdzeń (centralne włókno) podlega rotacjom w postaci torsyjnych fal Alfvéna, podczas gdy włókna boczne stają się tunelami dla szybkich magnetoakustycznych oscylacji typu *kink*. Oba rodzaje fal transportują energię do korony słonecznej. Symulacje pokazały, że w tym przypadku fale Alfvéna są dominującym źródłem energii dla korony. Ten wynik wiąże tematykę ostatniej publikacji z centralną tematyką Rozprawy.

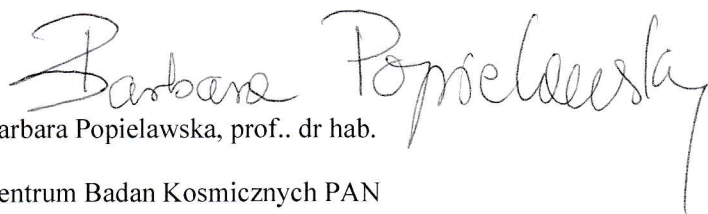
### III. Podsumowanie

Rozprawa doktorska w postaci Przewodnika i 8 tematycznie powiązanych publikacji jest wartościowym wkładem w badania dotyczące źródeł energii i masy dla korony i wiatru słonecznego.

Co do Przewodnika autorskiego, to mam uwagi krytyczne dotyczące części teoretycznej. Uważam, że fragment pt. „Modele plazmy astrofizycznej” jest zbyt skrótowy. Np., brak podstawowego tekstu na temat fal, oscylacji plazmowych i fal uderzeniowych, w różnych ośrodkach i konfiguracjach magnetycznych. Być może jednak dla doktoranta UMCS jest to wiedza tak podstawowa jak tabliczka mnożenia, i dlatego mniej zasługuje na opis niż np. równania MHD?

Co do wyników pracy badawczej to warto jest podkreślić, że zostały opublikowane w najlepszych czasopismach astrofizycznych. To potwierdza ich dużą wagę naukową. Wkład pana Błażeja Kuźmy jest znaczący, w części prac wydaje się być dominujący. Żaden ze współautorów, którzy przysłali oświadczenia nie deklaruje, że napisał tekst publikacji. Co najwyżej, w paru przypadkach była to pomoc w pracy nad tekstem. Publikacje są bardzo profesjonalnie napisane, a poprawna i wyczerpująca interpretacja nie trywialnych wyników symulacji numerycznych jest dowodem zdobycia wystarczającej wiedzy w zakresie fizyki plazmy kosmicznej.

Reasumując, uważam, iż pan Błażej Kuźma zdobył odpowiednie kwalifikacje i ma osiągnięcia badawcze niezbędne do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych. Zatem wnoszę o dopuszczenie pana Błażeja Kuźmy do dalszych przewidzianych prawem etapów procedury nadania stopnia doktora.



Barbara Popielawska, prof., dr hab.

Centrum Badan Kosmicznych PAN