

Toruń, 20.05.2024

Prof. dr hab. Andrzej T. Niedzielski  
Instytut Astronomii UMK w Toruniu

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Małgorzaty Dominiki Pietras zatytułowanej „Badanie fizyki rozbłysków gwiazdowy i słonecznych”.**

Rozprawa została przygotowana w języku polskim i ma formę pracy pisemnej. Jej zawartość merytoryczna oparta jest o cztery publikacje w czasopismach recenzowanych, a część wyników przedstawionych w rozprawie jest w trakcie przygotowań do publikacji.

Rozprawa składa się ze streszczeń w językach polskim i angielskim, wstępu, będącego zwięzłym przewodnikiem po rozprawie oraz sześciu rozdziałów, spisu rysunków i zestawienia literatury.

Praca jest dość obszerna i obejmuje 141 stron, w tym zestawienie licznych pozycji literaturowych wykorzystanych w trakcie jej przygotowywania. Jest starannie przygotowana od strony graficznej i stylistycznej oraz bogato ilustrowana

Rozprawa dotyczy ciekawej tematyki badawczej. Rozbłyski słoneczne to intensywne krótkotrwałe zjawiska obserwowane w całym widmie promieniowania elektromagnetycznego. Są one wynikiem uwalniania energii magnetycznej rekoneksji magnetycznej w formie energii kinetycznej, termicznej czy strumienia cząstek. Na naszym Słońcu zjawiska tego typu, choć częste, zazwyczaj uwalniają stosunkowo niewielką ilość energii, rzędu  $10^{24}$  -  $10^{32}$  ergów. Nawet takie rozbłyski powodują jednak zakłócenia działania satelitów czy urządzeń elektronicznych na powierzchni Ziemi ilustrując jak ogromny wpływ na życie na Ziemi mają zjawiska zachodzące na Słońcu. Na szczęście bardziej intensywne rozbłyski zdarzają się na Słońcu znacznie rzadziej. Tymczasem na gwiazdach podobnych do Słońca obserwacje tego typu zjawisk umożliwiło intensywne monitorowanie zmienności wielu gwiazd w ramach misji poświęconych poszukiwaniu planet pozasłonecznych, takich jak Kepler, czy TESS. Obserwowalne tam rozbłyski charakteryzują się znacznie wyższymi energiami -  $10^{32}$  -  $10^{38}$  ergów. Próba powiązania mechanizmu powstawania rozbłysków na Słońcu z fizyką rozbłysków na innych gwiazdach będąca celem niniejszej rozprawy jest wciąż aktualnym i ważnym problemem badawczym.

### **Opis pracy oraz uzyskane wyniki.**

Tematyka rozprawy jest zgodna z jej tytułem. Lekturę rozprawy rozpoczyna **rozdział pierwszy** wprowadzający nas w problematykę rozprawy, w którym zawarto krótką historię obserwacji rozbłysków słonecznych i gwiazdowych, ich ogólną charakterystykę, a także podsumowano obecny stan wiedzy na temat mechanizmu powstawania rozbłysków w gwiazdach różnych typów.

Kolejny **drugi rozdział** poświęcono omówieniu wykorzystanych danych obserwacyjnych oraz opisowi eksperymentów, czy wręcz poszczególnych detektorów z których one pochodzą. Większość danych pochodzi z misji TESS pobranych z Mikulski Archive for Space Telescope (MAST). Jest to fotometria aperturowa PDCSAP zazwyczaj w kadencji dwuminutowej. Wykorzystując autorskie oprogramowanie pobrano ponad 800 tysięcy krzywych blasku dla około 330 tysięcy gwiazd. Dane o gwiazdach zebrano z katalogu TESS Input Catalog oraz z bazy danych Simbad. Dla gwiazdy Wolf 359 wykorzystano w pracy także pomiary UV i rentgenowskie z satelity XMM-Newton z roku 2021, kiedy obserwacje XMM-Newton i TESS prowadzone były przez cztery dni jednocześnie. Dane dotyczące analizowanych rozbłysków słonecznych pochodzą z misji Solar Dynamic Observatory (SDO), GEOS, RHESSI i Fermi.

W **rozdziale trzecim** zaprezentowano przyjęte metody analizy zgromadzonych danych. Wstępnym etapem analizy było poszukiwanie sygnałów okresowych za pomocą peridogramów Lomb-Scargla budowanych oparciu o zgromadzone krzywe blasku. Zasadnicza detekcja rozbłysków miała miejsce za pomocą trzech niezależnych metod: trendów, różnic i profili. Algorytm każdej z tych metod wchodzących w skład zaprezentowanego oprogramowania WARPFINDER został przedstawiony i zilustrowany przykładem działania. W przypadku trzeciej z metod, metody profili, uzasadniono i wprowadzono istotną modyfikację „profilu wrocławskiego” (Gryciuk et al. 2017) polegającą na zastosowaniu profilu podwójnego. Rozdział ten kończy podsumowanie wyników testów oprogramowania z wykorzystaniem sztucznych danych. Dobrze wykryte rozbłyski mają za zwyczaj amplitudy większe niż 0.01 względnego strumienia (wykrywalność jest niższa dla karłów M). Oryginalne wyniki naukowe autorki zawarte są w rozdziałach czwartym i piątym.

**Rozdział czwarty część pierwsza** zawiera analizę statystyczną rozbłysków gwiazdowych zidentyfikowanych w trzech pierwszych latach misji TESS. Jest on zwięzłym podsumowaniem najważniejszych wyników zawartych w publikacji Pietras et al. (2022). Wykorzystano tu i wszechstronnie przetestowano opracowane oprogramowanie do detekcji analizy rozbłysków. Po przeanalizowaniu około 330 tysięcy obiektów znaleziono blisko 150 tysięcy rozbłysków na około 25 tysięcy gwiazd (około 8% analizowanych gwiazd). Przeprowadzono analizę rozkładów statystycznych takich parametrów jak temperatura efektywna gwiazdy, czas trwania rozbłysku, amplituda, częstość występowania czy energia. Energię rozbłysków oceniono na  $10^{31}$  -  $10^{36}$  ergów. Przedstawiono także zależności między temperaturą efektywną gwiazdy a amplitudą rozbłysku czy długością pętli magnetycznej a promieniem gwiazdy. Sporo uwagi poświęcono w pracy analizie rozkładu poszczególnych parametrów w zależności od typu profilu zjawiska zastosowanego w procesie detekcji. Zaprezentowane tu wyniki stanowią najbardziej obszerny katalog rozbłysków gwiazdowych dostępny w literaturze.

**Druga część rozdziału czwartego** poświęcona jest analizie rozbłysków zaobserwowanych na gwiazdach typu słonecznego (o podobnej masie i etapie ewolucyjnym) w ramach czterech pierwszych lat misji TESS. Bazując na znacznie większej próbie bo ponad 425 tysięcy gwiazd zidentyfikowano 3500 obiektów wykazujących aktywność w postaci około 17 tysięcy rozbłysków o energiach  $10^{31}$  -  $10^{36}$  ergów. Zależność czasu trwania rozbłysków od ich energii bolometrycznej sugeruje, że mechanizm generujący rozbłyski w takich gwiazdach jest analogiczny do słonecznego, rekoneksja magnetyczna. Interesującym wynikiem jest rozkład częstości występowania rozbłysków w funkcji okresu rotacji gwiazd, który wskazuje na rodzaj maksimum częstości dla okresów rotacji około 3 dni. Zważywszy

na fakt, iż okres obserwacji jednego sektora TESS wynosi 27 dni zauważyć należy, iż w badanej próbce faktycznie brak gwiazd o okresach znacząco dłuższych, raczej typowych dla gwiazd podobnych do Słońca. Zwrócono także uwagę na silny efekt obserwacyjny związany z problemem detekcji zjawisk rozbłysku na krzywych blasku o bardzo szybkiej zmienności. Odnotowano i przeanalizowano wyjątkowo długi, 27-godzinny rozbłysk gwiazdy CD-36 3202 co było przedmiotem publikacji Bicz et al. (2024).

W rozdziale 4.1 zwrócono uwagę na wzrost amplitud rozbłysków dla gwiazd chłodniejszych, a w rozdziale 4.2 na problem z detekcją rozbłysków w przypadku obiektów o szybkiej zmienności. Przedmiotem badań **trzeciej części rozdziału czwartego** są wybrane trzy aktywne gwiazdy typu widmowego M o krótkich okresach rotacji i silnej rotacyjnej modulacji krzywych blasku (Bicz et al. 2022). Po oczyszczeniu krzywych blasku gwiazd GJ 1243, V374 Peg i YZ CMi z modulacji rotacyjnej poprzez wymodelowanie plam na ich powierzchni (kodem BASSMAN) uzyskano z wykorzystaniem kodu WARPFINDER poprawę skuteczności detekcji rozbłysków o 17-30% i detekcję słabszych zjawisk. Okazało się, że badane gwiazdy wykazują aktywność z częstością średnio jeden rozbłysk na dzień. Uzyskane wyniki potwierdzają, że również w tym wypadku mechanizmem stojącym za zjawiska flar jest rekoneksja magnetyczna.

Nieco inny od poprzednich charakter ma **część czwarta rozdziału czwartego**. Tu poddano dogłębnej analizie jeden rozbłysk w gwiazdzie Wolf 359 ze 103 wykrytych w danych TESS. Wykorzystano tu fakt, że w okresie około czterech dni obserwacje tej gwiazdy prowadził także satelita XMM-Newton co umożliwiło dostęp do równoczesnych obserwacji w zakresie UV i rentgenowskim. Oceniono temperaturę i miarę emisji w trakcie rozbłysku, a także gęstość elektronową plazmy. Uzyskane parametry rozbłysku pokazują, że odpowiedzialny za niego mechanizm jest taki sam jak na Słońcu. Wyniki analizy, pierwszy opis rozbłysku słonecznej klasy X w tej gwiazdzie, zawarto w pracy Pietras et al. (2023).

**Rozdział piąty** stanowi próbę rozstrzygnięcia problemu podobieństwa mechanizmów odpowiedzialnych za rozbłyski w Słońcu i innych gwiazdach od innej strony. Na podstawie obserwacji archiwalnych z satelitów SDO/HMI, RHESSI, GEOS i Fermi zgromadzono krzywe blasku w zakresie optycznym i rentgenowskim dla 44 rozbłysków na Słońcu w latach 2011-2015. Porównanie wyników analizy tych danych z wynikami uzyskanymi w poprzednich rozdziałach pokazuje oczywisty problem obserwacyjny: na Słońcu obserwowane są stosunkowo słabe rozbłyski o energiach poniżej  $\sim 10^{30}$  ergów, podczas gdy na innych gwiazdach obserwowalne są rozbłyski o energiach powyżej  $10^{31}$ - $10^{32}$  ergów. Znacznie różne są także czasy trwania rozbłysków,  $\sim 11$  minut średnio dla Słońca, 88 minut dla podobnych gwiazd. Jest to związane, jak się wydaje, ze znacznie dłuższym okresem rotacji Słońca w porównaniu do obserwowanych przez TESS gwiazd do niego podobnych, gdzie okresy rotacji nieznacznie przekraczają 10 dni (ograniczenie TESS). Możliwe jest także, że silne super-rozbłyski (obserwowane w innych gwiazdach) charakteryzują się nieco inną ewolucją w czasie. Ogólna charakterystyka rozbłysków wskazuje na rekoneksję magnetyczną jako mechanizm odpowiedzialny za obserwowane w Słońcu i innych gwiazdach.

Najciekawsze wyniki przedstawionej dysertacji to opracowanie automatycznego oprogramowania do poszukiwania rozbłysków w ciągach obserwacji fotometrycznych i jego zastosowanie do analizy krzywych blasku TESS z okresu pierwszych trzech lat misji, co zaowocowało katalogiem 25 tysięcy aktywnych gwiazd i 150 tysięcy rozbłysków (Pietras et al. 2022). Bardzo interesujące są także wyniki zastosowania opracowanej procedury do

danych TESS z czterech pierwszych lat i analiza zjawiska rozbłysku w przypadku gwiazd podobnych do Słońca (w tym CD-36 3202, Bicz et al. 2024) w oparciu o dane z czterech lat misji TESS. Powiązanie opracowanej metodologii z modelowaniem plam na powierzchni badanych gwiazd (kod BASSMAN, Bicz et al. 2022) stworzyło możliwość analizy rozbłysków na gwiazdach szybko rotujących, co pokazano na przykładzie GJ 1243, V374 Peg i YZ CMi. Drugim najciekawszym wynikiem jest w mojej ocenie pogłębiona analiza rozbłysku gwiazdy Wolf 359, gdzie dane TESS poszerzono o jednoczesne obserwacje rentgenowskie XMM-Newton (Pietras et al. 2023). O ile dotąd rozprawa miała charakter w dużej mierze techniczny tu doktorantka wykazała się umiejętnością dogłębnej fizycznej interpretacji badanego zjawiska. Pozwoliło to na ocenę szeregu parametrów fizycznych rozbłysku jak temperatura czy gęstość elektronowa plazmy. Bardzo ciekawy jest też pomysł zaprezentowany w rozdziale piątym: zastosowanie metodologii opracowanej dla gwiazd do naszego Słońca. Wydaje się, że podjęte badania w przekonujący sposób uzasadniają postawioną tezę o jednakowym mechanizmie odpowiadającym za zjawisko rozbłysków w Słońcu i innych gwiazdach.

## Uwagi

Praca została bardzo dobrze zaplanowana i wykonana. Jest przygotowana w mojej ocenie starannie i w eleganckiej postaci. Bardzo pozytywne wrażenie zrobiła na mnie taka drobnostka w rozdziale 1.3 gdzie bolometryczna energia emitowana w trakcie rozbłysku podawana jest w tradycyjnych w astronomii jednostkach cgs (erg) oraz w jednostkach układu SI (J). Potem niestety już tak dobrze nie jest.

Autorka nie ustrzegła się jednak drobnych niezręczności językowych. Z dostrzeżonych pozwolę sobie przytoczyć kilka:

strona 11 (18 i inne): „...badania w tym temacie ...”;

rozdział 4.1 str. 49 (też 55): „...analizy rozbłysków na różnych typach widmowych gwiazd ...”;

strona 55 (i inne): „... na fazie wzrostu ...”;

strona 66: „... krótszych długościach fali ...”;

strona 72 „... maksimum histogramu wynosi ...”;

strona 101, opis rysunku 4.38: „Tryplet tlenu OVII uzyskany na podstawie widma ...”.

W kilku miejscach język rozprawy jest nieprecyzyjny. Dla przykładu zwracam uwagę na omówienie rysunku 4.3 na stronie 51: „Dla tego rozkładu dostępność danych jest jednak najgorsza...”, rozumiem, że dla tego filtra?

Podobnie w omówieniu rysunku 4.9 na stronie 58: „Istotne jest zwrócenie uwagi na fakt, że duża amplituda rozbłysku nie zawsze związana jest z dużą energią emitowaną podczas jego trwania.” Mam wrażenie, że w pracy nie przedstawiono takich danych.

Strona 69: „Do najbardziej aktywnych należą gwiazdy typu widmowego M. Wpływa na to znacząco efekt obserwacyjny polegający na dużym kontraście pomiędzy powierzchnią gwiazdy a obszarem rozbłyskowym.” Kontraście czego?

Strona 89: „Czas wzrostu został oszacowany na 24 minuty ...” ale już na stronie 91 „... faza wzrostu trwała mniej niż długość jednego binu czasowego, czyli dwie minuty.”

Wszystko to są jednak drobne usterki językowe.

Mam też kilka uwag o charakterze bardziej merytorycznym.

1. Nie rozumiem jaki był cel badania równomierności rozkładu znalezionych rozbłysków w poszczególnych sektorach obserwacji TESS. Ale skoro już ten wątek podjęto to czy nie należałoby powiązać tych sektorów i uzyskanych wyników z widzianymi w nich obszarami Galaktyki?
2. W rozdziale 4.1 zabrakło mi informacji jak energia rozbłysku zależy od temperatury efektywnej gwiazdy. Autorka przy dyskusji rys. 4.9 (amplituda w funkcji  $T_{\text{eff}}$ ) zauważa, że duża amplituda nie zawsze związana jest z dużą energią emitowaną podczas rozbłysku lecz zagadnienia tego nie rozwija.
3. Rozkład częstości występowania rozbłysków na gwiazdzie w funkcji jej okresu rotacji (rysunek 4.22) wskazuje na maksimum dla około 3 dni. Tymczasem w pracy Doyle et al. (2020) opartej o podobne dane rozkład ten wydaje się wyglądać inaczej (ich rys. 3). Jak to rozumieć?

### **Podsumowanie i konkluzja**

Powyższe uwagi nie umniejszają jakości rozprawy czy wartości wyników uzyskanych w przedstawionej rozprawie. Mgr Małgorzata Dominika Pietras w swojej rozprawie doktorskiej zaprezentowała ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem jej rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Przedstawiona rozprawa spełnia w mojej ocenie ze sporym naddatkiem zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim z zakresu astronomii. Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr Małgorzaty Dominiki Pietras do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A. Kródelki