

Kraków 09.10.2023

Prof. dr hab. Grzegorz Michałek
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Jagiellońskiego

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani magister Żanety Szaforz

Tytuł: „Badanie rozbłysków słonecznych wykazujących quasi-okresowość na podstawie obserwacji satelity Solar Orbiter”

Promotor: prof. dr hab. Michał Tomczak
Promotor pomocniczy: dr Tomasz Mrozek

Praca wykonana w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu Wrocławskiego

Głównym celem pracy doktorskiej było badanie rozbłysków słonecznych wykazujących quasi-okresowe pulsacje (Quasi-Periodic Pulsations, QPPs) w emisji w zakresie promieniowania X. Rozważania te oparto przede wszystkim na obserwacjach prowadzonych przez instrument STIX umieszczony na satelicie Solar Orbiter i krążący po bardzo bliskiej orbicie dookoła Słońca.

Praca liczy 188 stron i składa się z sześciu rozdziałów. Struktura pracy jest poprawna, a układ jej treści jest przejrzysty.

W pierwszym rozdziale Autorka opisała klasyfikację rozbłysków oraz zmiany intensywności promieniowania elektromagnetycznego (w całym zakresie widma, Rys.1.1) rejestrowanego w czasie ich ewolucji (1.1). W podrozdziale 1.2 zostały omówione dwa standardowe modele rozbłysków dobrze odzwierciedlające dane obserwacyjne.

Drugi rozdział rozprawy doktorskiej bardzo przejrzystie przedstawia modele teoretyczne, które są wykorzystywane do wyjaśnienia występowania QPPs. Autorka scharakteryzowała 15 modeli, które zostały podzielone na trzy podstawowe grupy: modulacja generowana przez fale MHD, modulacja wydajności procesu uwalniania energii oraz spontaniczne wydzielanie energii. Istotne jest to, iż zostały zdefiniowane różnice pomiędzy proponowanymi modelami. Może to stanowić podstawę do identyfikacji procesów, które mogą być odpowiedzialne za QPPs (Tabela 2.1, Rysunek 2.2).

Rozdział trzeci składa się z kilku podrozdziałów, charakteryzujących kilka instrumentów obserwacyjnych, wykorzystanych w badaniu słonecznych rozbłysków. Przeprowadzone w przedstawionej pracy badania zostały oparte głównie na danych uzyskanych z instrumentu STIX (Spectrometer Telescope for Imaging X-rays), umieszczonego na satelicie Solar Orbiter. Jest to dość nowy instrument, który ze względu na swoje parametry, bardzo dobrze nadaje się do obserwacji rozbłysków w paśmie rentgenowskim (4-150KeV). Obecnie jest on w fazie rozruchu.

Jednak najważniejszym fragmentem tego rozdziału jest opis procedury zastosowanej do selekcji rozbłysków poddanych dalszej analizie. Na przestrzeni dwóch (2020-2022) lat udało się wyselekcjonować 129 rozbłysków potencjalnie wykazujących QPPs w emisji X (na krzywych blasku posiadały przynajmniej trzy lokalne maksima). Dodatkowo wyselekcjonowano 14 rozbłysków posiadających wyraźne pulsacje, które miały różnorodny przebieg. Rozbłyski te zostały w dalszej części pracy poddane szczegółowej analizie.

Kolejne rozdziały omawiają wkład własny Pani Szaforz w badaniu QPPs. W rozdziale czwartym zostały opisane metody analizy danych. Na wstępie tego rozdziału, Autorka przedstawiła trudności w wyznaczeniu oscylacji rozbłysków oraz zaprezentowała procedurę (dwie metody wyszukiwania oscylacji oraz warunki graniczne), która pozwoliła wyłonić 95 rozbłysków (ze wstępnej listy 129 rozbłysków), jednoznacznie charakteryzujących się QPPs w paśmie X. Ich lista została wraz ze zdefiniowanymi okresami pulsacji umieszczona w Tabeli 4.1. Niestety, w pracy nie znalazłem definicji parametru rozmycia, również znajdującego się w tej tabeli.

W dwóch kolejnych podrozdziałach zostały przedstawione metody wyznaczania parametrów źródeł emisji rentgenowskiej (między innymi: ich rozmiary, kształt, parametry emisji rentgenowskiej, gęstość, temperatura). Parametry te zostały wyznaczone dla wybranych 14 rozbłysków i zostały przedstawione w Tabeli 4.2. W podrozdziałach pojawia się pewna nieścisłość dotycząca parametru β (strona 75). Autorka pisze, że w koronie ciśnienie magnetyczne przewyższa wartość ciśnienia termicznego plazmy (co jest w dużym przybliżeniu prawdą), ale podaje jednocześnie, że $\beta > 1$.

Kolejny rozdział przedstawia charakterystykę 14 wybranych rozbłysków, wykazujących wyraźne QPPs zaobserwowane przez Solar Orbiter. Autorka wybrała te rozbłyski, ponieważ dla nich były dostępne dane z innych instrumentów (SO/EUI, GOES/XRS, SDO/AIA, STEREO-A/SECCHI) oraz z tego powodu, że obrazują różnorodność omawianego zjawiska. Interesująca była, prócz pokazania krzywych blasku, rekonstrukcja wyglądu źródeł emisji w momentach pulsów obserwowanych na krzywych blasku. Tutaj można dodać uwagę, iż czasami na przedstawionych krzywych blasku (szczególnie w późniejszych fazach rozbłysku), trudno zauważyć wyraźne pulsy. Może warto by było dodać znormalizowane serie czasowe, tak jak na rysunku 4.1b.

Najciekawszą część pracy stanowi rozdział szósty. W podrozdziale 6.1 przedstawiona jest analiza zbiorcza dla 129 rozbłysków z potencjalnymi (mającymi przynajmniej trzy lokalne maksima na krzywej blasku) QPPs w zakresie rentgenowskim. W tym podrozdziale zaprezentowano szereg histogramów przedstawiających parametry pulsacji (okresy, amplitudy, zmienność amplitudy, czas trwania) oraz źródła rozbłysków na Słońcu (rozmiary źródła, temperaturę, miarę emisji, gęstość, ciśnienie, minimalną wartość pola magnetycznego, wykładnik funkcji promieniowania, energią obciążenia). W przypadku 48% rozbłysków udało się potwierdzić występowanie QPPs przy wykorzystaniu obu zastosowanych metod (metoda Lomb-Scargle'a oraz autokorelacji). Zaobserwowane okresy mieściły się w przedziale 43-1355s. Odnotowano wyraźny spadek liczby rozbłysków z dłuższymi okresami, powyżej 500s (Rys.6.2). Najsilniejsze pulsacje zarejestrowano w kanale energetycznym 4-10keV, który jest zdominowany przez emisję termiczną (Rys.6.3). Generalnie amplitudy pulsacji miały chaotyczny przebieg (Rys.6.6a). Na tym samym rysunku (Rys.6.6b) przedstawiono wykres amplitudy względem okresu. Do wartości amplitudy 1.0 nie obserwujemy żadnej korelacji liniowej między tymi

parametrami. Powyżej tej wartości pojawia się kilka rozbłysków, dla których widać wyraźny wzrost okresu wraz z rosnącą amplitudą. Czy tutaj nie obserwujemy jakichś fizycznych różnic między tymi podgrupami rozbłysków? Warty odnotowania jest inny rezultat przedstawiony na Rysunku 6.3. Zaprezentowany tam diagram kołowy pokazuje, że QPPs są głównie obserwowane w fazie wzrostu promieniowania X (63% zdarzeń). Często też zauważano wydłużenie pulsacji wraz z fazą rozbłysku. Czy to może oznaczać, że obserwowane QPPs mogą mieć inną naturę w fazie wzrostu i zaniku rozbłysku (zmiana mechanizmu wzbudzenia QPPs)?

Paragraf 6.2 traktuje o poszukiwaniu mechanizmów pulsacji. Niestety, na podstawie otrzymanych rezultatów, nie udało się przypisać jednoznacznie omówionych w rozdziale drugim mechanizmów wzbudzenia pulsacji do przedstawionych 14 dobrze opisanych rozbłysków z QPPs w emisji rentgenowskiej. Jak widać z Tabeli 6.1, każdej zaobserwowanej pulsacji można przypisać kilka modeli teoretycznych. Jedynie, na podstawie zebranych danych, udało się odrzucić modele [1], [3], [10], [14]. Autorka wskazuje dwie przyczyny tego problemu. Dotyczą one jakości charakterystyki modeli teoretycznych oraz jakości obecnie pracujących instrumentów obserwacyjnych. Wydaje się, że rozdzielczość przestrzenna jest tym kluczowym parametrem, który nie pozwala ograniczyć obserwacji do zawężonych obszarów korony słonecznej, gdzie mogą występować oddzielnie omawiane modele pulsacji (Rys.2.2). Doktorantka zakłada, że poprawa obserwacji uzyskiwanych z Solar Orbiter wraz z pełnym rozwojem misji, pozwolą w dużej części rozwiązać ten problem. Jednak ograniczenie się tylko do poprawy jakości obserwacji z satelity Solar Orbiter w perspektywie dalszych badań nad QPPs, jest minimalistycznym podejściem. Warto by było kierunki dalszych prac znacznie rozszerzyć i obszerniej opisać.

Podsumowując, przedstawiona dysertacja jest bardzo obszernym, ale jednocześnie spójnym opisem aktualnej wiedzy na temat QPPs w emisji rentgenowskiej. Przedstawia ona szereg nowych interesujących wyników obserwacyjnych wraz z ich bardzo ciekawą analizą. Trudno doszukiwać się w tekście pracy oraz przeprowadzonych analizach jakichkolwiek niedociągnięć. Uwagi czy zapytania przedstawione w mojej recenzji w żaden sposób nie umniejszają wartości przedstawionej pracy (chodzi jedynie o doprecyzowanie moich subiektywnych przemyśleń). Pani Szaforz wykazała się bardzo dużą wiedzą (teoretyczną oraz obserwacyjną) w zakresie przeprowadzonych badań oraz ogromnym wkładem pracy przy realizacji doktoratu. Bez wahania mogę stwierdzić, iż recenzowana praca spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe kryteria właściwe dla rozpraw doktorskich, co uzasadnia postawienie wniosku o przyjęcie rozprawy, dopuszczenie jej do publicznej obrony i kontynuowanie czynności w ramach przewodu doktorskiego pani mgr Żanety Szaforz.