

Dr hab. Łukasz Wyrzykowski
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Warszawskiego
Al. Ujazdowskie 4
00-478 Warszawa

Warszawa, 9. października 2017r.

Recenzja pracy doktorskiej
mgra Stanisława K. Kozłowskiego

pt.

Photometry and Spectroscopy of Selected Eclipsing Binaries with the Solaris Robotic Telescopes

Tematyka rozprawy dotyczy badań nad układami podwójnych na podstawie danych fotometrycznych i spektroskopowych zebranych w trakcie tworzenia projektu Solaris. Podjęty temat naukowy jest istotny, gdyż układy podwójne umożliwiają weryfikację modeli powstawania gwiazd, a zaprezentowane w pracy metody badawcze mogą doprowadzić do wykrycia planet krążących wokół układów podwójnych, które z kolei mają duże znaczenie w rozumieniu powstawania planet w ogóle.

Praca doktorska zbudowana jest w oparciu o cztery publikacje zaakceptowane do druku w czasopiśmie astronomicznym o wysokim profilu. W pracy znajduje się również obszerny wstęp, wprowadzający czytelnika w badane zagadnienie, oraz streszczający wyniki uzyskane w publikacjach. Ze względu na język publikacji, cała praca, wraz ze wstępem, napisana jest w języku angielskim, który czyta się bardzo dobrze. Praca zawiera wszystkie niezbędne elementy pracy doktorskiej i wraz z dodatkami zawarta jest na 102 stronach.

Wątkiem przewodnim pracy doktorskiej jest przygotowanie metod i narzędzi do powstającego projektu Solaris — ambitnego projektu globalnej sieci teleskopów, które działają praktycznie bez nadzoru człowieka i autonomicznie prowadzą obserwacje astronomiczne. W szczególności praca zaprezentowana w dodatku D jest podsumowaniem przygotowań do uruchomienia sieci teleskopów Solaris. Publikacje pana Kozłowskiego koncentrują się na aspektach technicznych projektu oraz analizie danych obserwacyjnych. Są one uzupełnione przez publikacje innych członków grupy Solaris, w których przedstawione były symulacje danych i ich analizy w celu sprawdzenia dokładności metody timingu do układów zaćmieniowych.

Wstęp

Wstępna część pracy doktorskiej jest obszernym wprowadzeniem do tematyki doktoratu. Opisane w niej są główne cele projektu Solaris, jakimi są poszukiwania planet wokół układów podwójnych, za pomocą skonstruowanej sieci autonomicznych teleskopów, prowadzących obserwacje fotometryczne i spektroskopowe. Opisane jest teoretyczne tło projektu i przedstawiona jest metoda timingu (opóźnień) w zastosowaniu do poszukiwań planet wokół układów podwójnych. Przyznam, że w tej sekcji (jak i w opublikowanych pracach) brakuje mi szerszego przeglądu literatury oraz opisu obecnego stanu wiedzy na temat powstawania takich układów. Układy zaćmieniowe przydają się rzeczywiście do badań nad strukturą i ewolucją gwiazd, ale wiadomym jest również, że ewolucja układów podwójnych przebiega nieco inaczej niż pojedynczych. Stąd wnioski na temat teorii ewolucji gwiazd muszą być oparte również o inne metody badawcze (np. asterosejsmologię).

Autor pokazuje natomiast zalety obszernej kampanii obserwacyjnej, mierzącej zmiany jasności jak i prędkości radialnych w celu wyznaczenia parametrów układów, udowadniając w ten sposób motywację naukową stojącą za projektem Solaris. Podana jest oczekiwana precyzja pomiarów przesunięć czasowych między 0.1 a 1 s, ale brakuje mi wyszczególnienia parametrów fizycznych układów, na które czuły będzie Solaris.

Następnie Autor przechodzi do opisu globalnej sieci teleskopów oraz cech jakie musi ona posiadać aby wspomniane cele naukowe udało się osiągnąć. Są wśród nich: możliwość obserwacji nieprzerwanych rytmem dziennym, pełna autonomia z jak najmniejszą interwencją operatora, kompatybilność poszczególnych elementów sieci w celu zmniejszenia kosztów oraz ułatwienia instalacji, możliwość zbierania danych fotometrycznych oraz spektroskopowych o wystarczająco dużej dokładności, itd.

W dalszej części Wstępu przedstawione są szczegóły techniczne teleskopów wraz z opisem ich konstrukcji i instalacji. Sieć składa się z czterech komórek, ulokowanych w Argentynie, Południowej Afryce oraz Australii. Imponuje duża ilość pracy wykonana przez mgra Kozłowskiego, który w sumie spędził prawie dwa lata w samych obserwatoriach, nie licząc czasu zdalnego przygotowywania sprzętu i jego testowania. Robi duże wrażenie fakt iż Autor, spędzając czas doktoratu przede wszystkim nad konstrukcją sieci Solaris, był w stanie robić badania naukowe i opublikować kilka publikacji.

Autor opisuje następnie część programistyczną projektu. Ponownie, godzien podkreślenia jest fakt, iż duża część oprogramowania została przygotowana przez mgra Kozłowskiego, w tym przede wszystkim skomplikowany system kontroli teleskopów. Autor przedstawia tu też szczegółowo spektrograf BACHES, o zastosowaniu którego do badań gwiazd zaćmieniowych traktują dwie z czterech prac włączonych w doktorat.

W tym momencie Wstępu Autor przechodzi już do wyników (sekcja 2.3, *Results*), jednakże w tym miejscu oczekiwałbym opisu systemu wykonywania pomiarów fotometrycznych, o które przecież w dużej mierze opiera się praca doktorska. Brakuje mi też informacji o tym jak wykonywane są podstawowe redukcje oraz kalibracje obrazów fotometrycznych (szczególnie kalibracje danych między teleskopami) i jaka jest ich precyzja.

W sekcji Wyniki we Wstępie znalazł się skrótowy opis wyników uzyskanych na podstawie pomiarów z testowej fazy projektu Solaris. Wśród obserwowanych obiektów znalazły się zarówno znane i zbadane już układy podwójne jak i nowe obiekty, dla których po raz pierwszy wyznaczono parametry. Autor przekonywująco pokazuje, że nieduże teleskopy potrafią osiągnąć dokładności pomiarów porównywalne z dużymi obserwatoriami. Pan Kozłowski w szczególności skupił się na możliwościach małego i niedrogiego spektrografu, którego zasięg został wyznaczony do około 10 magnitudo.

Nie jest dla mnie jasne czy poza krótkim sezonem obserwacyjnym w listopadzie 2015 roku projekt Solaris zbierał inne dane. Jeżeli tak, to wielka szkoda, że nie zostały one włączone w pracę doktorską pana Kozłowskiego, gdyż uczyniłyby ją bardziej kompletną.

Zarówno wstęp jak i opublikowane prace zawierają niemałą liczbę literówek, przekreśleń i błędów pisarskich.

Przejdę teraz do omówienia i zaprezentowania uwag do poszczególnych publikacji, składających się na pracę doktorską.

Dodatek A

W pracy pt. *“Radio pulsar style timing of eclipsing binary stars from the All Sky Automated Survey catalogue”* Autor przeanalizował dużą próbkę układów zaćmieniowych z katalogu ASASa w celu wykrycia opóźnień zaćmień wywołanych obecnością trzeciego ciała w układzie. Metoda została zaczerpnięta z badań radiowych nad pulsarami i skutecznie zastosowana do danych wizualnych. Zostały znalezione trzy układy pokazujące efekt opóźnienia, dla których zostały przedstawione wstępne modele i wyznaczono parametry tych układów.

Wstęp do pracy jest wyjątkowo skromny i brakuje w nim całego kontekstu do badań nad O-C dla układów podwójnych (dlaczego układy potrójne są istotne, np. efekt Kozai, zlewanie się gwiazd, supernowe, itp). Następnie została zaprezentowana metoda automatycznego poszukiwania opóźnień w krzywych zaćmieniowych. Moje zastrzeżenie budzi stosowanie rozkładu Fouriera dla układów rozdzielonych (ED), gdyż ich krzywe słabo dają się odtworzyć nawet przy dużej liczbie harmonik. Lepsze byłyby np. odwrócone profile Gaussa. Domyślam się jednak, że w większości wypadków miało to raczej zanedbywalny wpływ na dokładność wyznaczenia momentu zaćmienia.

W pracy pojawia się stwierdzenie o konieczności poprawiania okresów układów z katalogu ASAS, jednakże przynajmniej wśród obiektów z Tabeli 1 nie zauważyłem żadnego okresu, który zostałby poprawiony o więcej niż błąd pomiarowy (ostatnia cyfra znacząca) z katalogu ASASa. Jeżeli były takie przypadki to szkoda, że nie zostały podane, np. w osobnej tabeli. Rozumiem, że wyznaczanie okresu było częścią normalnej procedury by w przypadku ewentualnych rozbieżności użyć swojej wartości okresu.

Nowa zaproponowana metoda została przetestowana na obiektach wcześniej zbadanych przez innych autorów, w szczególności w pracy Pilecki i in 2007. Nie jest dla mnie jasne na czym polegało wspomniane rozszerzenie diagramu O-C Pileckiego, czyżby po prostu w katalogu ASASa znalazło się więcej danych obserwacyjnych dla danych obiektów niż miał ich do dyspozycji Pilecki?

W sumie znalezione zostały trzy układy, wykazujące znaczące regularne odchyłki i te zostały wymodelowane. Zastosowanie nowej metody (ang. *overlapping method*) pozwala na lepsze wykorzystanie dostępnych danych, np. w przypadku obiektu ASAS 141035-4546.8 widoczna w danych ekscentryczność została wykryta dopiero nową metodą. Brakuje mi jednak nieco szerszej dyskusji uzyskanych wyników i wytłumaczenia występujących rozbieżności.

Praca do roku 2017 cytowana była 3 razy, jedynie w publikacjach przygotowanych przez członków grupy Solaris.

Dodatek B

Praca pt. *“BACHES - a compact échelle spectrograph for radial-velocity surveys with small telescopes”* opisuje testy techniczne oraz możliwości zastosowania małego spektrografu z tzw. półki do badań nad prędkościami radialnymi na małych teleskopach. Tego typu techniczne prace mają zwykle nieco mniejszy

impakt naukowy, jednakże uważam, że są równie potrzebne i przydają się innym użytkownikom w projektowaniu ich eksperymentów. Praca pana Kozłowskiego również została zauważona i została zacytowana 3 razy przez autorów niezwiązanych z projektem Solaris.

Autor przetestował możliwości nowego instrumentu obserwując znane i zbadane wcześniej układy podwójne. Zaprezentowane zostały wyniki modelowania układów podwójnych, ale jedynie w formie rysunków z krzywymi prędkości radialnych. Brakuje mi zebrania danych spektroskopowych w tabeli oraz bardziej szczegółowego opisu wyników modelowania, jak również porównania otrzymanych pomiarów z literaturą (np. gwiazda HD3405 była zbadana już w roku 1962). Tylko dla jednego z układów, dla którego dostępna była fotometria z zaćmieniami, wyznaczone zostały masy składników i wynik ten został porównany z pomiarem wykonanym na profesjonalnym dużym teleskopie (AAT). Wyniki są, moim zdaniem, nieco rozbieżne (inny stosunek mas), co nie zostało w żaden sposób skomentowane. Mimo tego, uważam, że autor pokazał, że niedrogi sprzęt "z półki" jest w stanie dostarczać pomiary o wystarczająco dobrej dokładności aby prowadzić, przynajmniej wstępne, badania naukowe nad układami podwójnymi.

Dodatek C

Praca pt. "*Spectroscopic Survey of Eclipsing Binaries with a Low-cost Echelle Spectrograph: Scientific Commissioning*" została opublikowana w PASP w roku 2016. Praca jest w miarę nowa i cytowana była jedynie raz w publikacji własnej pana Kozłowskiego, przedstawionej jako dodatek D.

Przedstawione są w niej wyniki testów naukowych instrumentu BACHES, co jest swego rodzaju kontynuacją wątku rozpoczętego w pracy B. Głównym celem pracy jest weryfikacja możliwości technicznych instrumentu w zastosowaniu do badań układów zaćmieniowych. Jako motywacja podawana jest duża liczba (setki) odkrytych układów podwójnych zaćmieniowych, dla których nie zostały jeszcze wyznaczone parametry.

Pierwsza połowa pracy to szczegółowy opis konfiguracji instrumentu oraz procedur opracowywania danych. Warto podkreślić jest fakt, że za dużą część działań instalacyjnych oraz oprogramowanie odpowiadał Doktorant, ze wsparciem Promotora i członków grupy Solaris.

Następnie zaprezentowane są wyniki pomiarów prędkości radialnych kilku znanych układów zaćmieniowych o różnych jasnościach, zbierając w sumie około 50 godzin danych spektroskopowych. Porównanie parametrów dwóch układów spektroskopowych z tymi z literatury jest bardzo obiecujące, gdyż pomiary są zbliżone. W przypadku trzech układów zaćmieniowych dokonano również porównania parametrów układów wyznaczonych za pomocą spektrografu BACHES oraz innych, większych instrumentów. Wyniki są imponująco zgodne. Masy składników wyznaczone zostały z dokładnością 3%, co jest w zupełności wystarczające do większości zastosowań naukowych. Oprócz znanych układów zaćmieniowych zaobserwowanych zostało również kilka układów nowych i dla nich również wyznaczone zostały parametry składników. Szkoda, że Autor nie przedstawił nieco szerszej dyskusji na temat tych wyników, np. dlaczego w ASAS J061212-1215.8 ekscentryczność musiała być ustawiona niezmiennie na 0.

W przeciwieństwie do pracy B, praca C zawiera wszystkie brakujące we wcześniejszej elementy, takie jak tabela z modelami czy pomiarami. Podsumowując, praca C jest obszernym dziełem, pokazującym, że mały niedrogi spektrograf z powodzeniem może być stosowany w badaniach układów podwójnych do około 10 mag.

Dodatek D

Praca pt. "*Project Solaris – a Global Network of Autonomous Observatories – Design, Commissioning and First Science Results*" jest zwięźleniem wielu lat pracy nad przygotowaniem i uruchomieniem projektu Solaris. Na podstawie tej publikacji jak i poprzednich prac zebranych w doktoracie wnioskuję, że pan magister Kozłowski odegrał bardzo ważną rolę w tworzeniu projektu, czego również dowodem jest pozycja pierwszego autora w tej publikacji.

Wstęp pracy zawiera opis motywacji powstania projektu Solaris, przede wszystkim jako globalnej i autonomicznej sieci obserwacji jasnych układów zaćmieniowych mającej na celu wykrycie planet w układach podwójnych. Brakuje mi w tym miejscu rozbudowania motywacji naukowej, dlaczego takie układy są interesujące, jak mogłyby powstawać, czy są stabilne i ile można by się ich spodziewać. Następnie, również we wstępie, omówione są istniejące sieci obserwacyjne, ale niepotrzebnie jako podsekcja 1.1 (brakuje podsekcji 1.2).

W następnej części pracy Autor przechodzi do szczegółowego opisu sieci Solaris, z lokalizacją teleskopów, ich instrumentów i wyposażenia. Opisana została cała architektura systemu i sposób jego działania, co nie wymaga za bardzo komentarza, więc nie będę się o tym rozpisywał. Jak to zwykle bywa w przypadku urządzeń astronomicznych, duża część systemu (sprzęt i oprogramowanie) zostały przygotowane przez budowniczych, ale tu znowu warto podkreślić jest ogromny wkład Doktoranta do tego trudnego zadania.

Rozdział 6 wreszcie zawiera opis tzw. “*Scientific commissioning*”, czyli testów naukowych systemu. Struktura tego rozdziału jest dość chaotyczna i nie do końca przemyślana. Sekcja 6.1, pod tytułem “*Photometry Results*”, sugeruje niejako, że pojawi się też sekcja 6.2, np. z “*Spectroscopic Results*”, jednakże takiej sekcji nie ma. Poza tym, szczegóły analizy danych fotometrycznych powinny raczej pojawić się we wcześniejszych rozdziałach. Brakuje mi szczegółów w jaki sposób dane fotometryczne są redukowane oraz kalibrowane, szczególnie pomiędzy obserwatoriami sieci.

Testy naukowe zostały wykonane najpierw na 3 tranzytujących planetach o znanych wcześniej parametrach. Obserwacje wykonane siecią Solaris zostały wymodelowane pakietem EXOFAST i zebrane w tabelach, jednakże brakuje mi jakiegokolwiek dyskusji na temat ewentualnych rozbieżności. Np. dla planety WASP-64b myląco podano wartości promienia i masy w tekście, które prawdopodobnie pochodzą z literatury i nieco różnią się od wartości wyznaczonych i podanych w tabeli 8. Szkoda również, że rysunki z fotometrią i modelami tranzytów nie wszędzie zawierają słupki błędów pomiarowych. Niemniej jednak pokazane zostało, że dane uzyskane przez projekt Solaris są wystarczająco dokładne do badań planet tranzytujących.

Następnie Autorzy przechodzą do badań nad możliwościami pomiarów opóźnień w układach podwójnych, co jest głównym naukowym celem projektu Solaris. Ze względu jednak na krótki czas zebranych obserwacji nie było możliwe zmierzenie jakichkolwiek opóźnień w wybranych obiektach, dlatego ta część pracy budzi moje największe zastrzeżenia. Nie jest też dla mnie jasne skąd w badanej próbce wziął się obiekt SOL-0023 - czy jest to nowy układ zaćmieniowy, wcześniej nieopublikowany, a znaleziony przez Solaris? Tabela 6 nie podaje też współrzędnych tego obiektu — uważam, że jeżeli już zdecydowano się dodać ten obiekt do pracy to wypadało chociaż krótko wspomnieć, że, na przykład, ten obiekt będzie przedstawiony i zbadany w innej pracy. Rysunek 19 posiada tajemniczy dolny panel, który nie został wyjaśniony. Szkoda, że zaobserwowane dwa układy zaćmieniowe nie mają w pracy wyznaczonych momentów zaćmień, wraz z dyskusją precyzji takich pomiarów. Dla układu RR Cae, który obserwowano aż przez 62 dni, można było chociaż pokazać krzywą O-C.

Następnym obiektem, analizowanym w pracy D, jest układ zaćmieniowy z gwiazdą pulsującą. Zebrano aż 650 pomiarów fotometrycznych i wykryto mało-amplitudową okresowość, demonstrując możliwości teleskopów w obserwacjach obiektów szybkozmiennych.

Na koniec pracy Autor przedstawia kompletny model układu zaćmieniowego J024946-3825.6, nazwanego też SOL-0132, a wykrytego przez projekt ASAS. Jest to jedyny obiekt w pracy obserwowany fotometrycznie prawie ciągle przez większość teleskopów sieci Solaris. Widma natomiast zebrano już na większym teleskopie, ze względu na małą jasność układu (11,7 mag). Analiza obserwacji tego układu z powodzeniem mogłaby wypełnić osobną publikację, gdyż przedstawione są tu nowe obserwacje, praktycznie pokrywające całą dobę, i po raz pierwszy został wyznaczony kompletny model tego układu podwójnego. Przyznam jednak, że nie do końca rozumiem dlaczego wybrano ten właśnie obiekt do fazy testów, gdyż jest on dość ciemny i nie jest wcale prosty do analizy, z obecnością dodatkowych efektów (odbicia). Jednakże nie mam zastrzeżeń do przeprowadzonej analizy oraz sposobu wyznaczenia parametrów układu. Ponownie, szkoda, że nawet mimo krótkich danych nie zaprezentowano pomiarów O-C.

Ostatnia podsekcja pracy traktuje o precyzji fotometrii. Moim zdaniem ta część powinna stanowić osobną sekcję (6.2). Precyzję pomiarów oceniono na podstawie obserwowanego RMS w modelowaniu krzywych i sięga ona pojedynczych milimagnitud. W przypadku wyznaczania momentów tranzytów i zaćmień użyto wariacji Allana i pokazano, że odstępstwa od białego szumu nie są znaczące.

Podsumowując, praca D jest imponująca jeśli chodzi o obszerność zawartego w niej materiału. Część naukowa sprawia jednak wrażenie przygotowanej w pośpiechu, posiada spore braki, szczególnie w przypadku testów pomiarów opóźnień (które to testy de facto nie zostały wykonane). Mam również zastrzeżenia do układu pracy, przede wszystkim do pojawiających się pojedynczych podsekcji (1.1, 6.1). Mimo tego jednak, uważam, że praca jest cennym i koniecznym dziełem, rozpoczynającym, mam nadzieję, nowy rozdział w badaniach nad układami podwójnymi w ramach projektu Solaris.

Najważniejsze zalety pracy doktorskiej:

- Oparta jest aż o cztery opublikowane prace - wynik imponujący jak na doktoranta
- Praca wyraźnie pokazuje ogromny wkład mgra Kozłowskiego w powstanie i uruchomienie projektu Solaris, w tym w przygotowanie zarówno niezbędnego hardware jak i software.
- Pomimo, co jest naturalne, znaczącego wkładu promotora i innych członków grupy Solaris do powstania publikacji, kontrybucja doktoranta jest wyraźna i przoduująca. Wart podkreślenia jest aspekt pracy zespołowej.
- Autor wykazał się również profesjonalnym podejściem do zagadnień naukowych jakimi są tu badania układów zaćmieniowych za pomocą fotometrii i spektroskopii, wykazując możliwości projektu Solaris do uzyskania dokładnych parametrów układów oraz potencjalnie do wykrycia planet wokół układów podwójnych.

Poważniejsze uchybienia.

- Brak opisu redukcji i kalibracji obrazów fotometrycznych, szczególnie pomiędzy obserwatoriami (Wstęp oraz praca D).
- W pracy B brakuje opisu wyników modelowania RV oraz wytłumaczenia rozbieżności między otrzymanymi pomiarami mas.
- W pracy D sekcja o timingu jest wielce niesatysfakcjonująca, gdyż nie przedstawia żadnej oceny precyzji mierzenia opóźnień.

Drobne uwagi:

- Literówki i przekręcenia, stosunkowo częste jak na zaakceptowane do druku prace
- Brak konsekwencji w użyciu wersji amerykańskiej i brytyjskiej języka angielskiego (np. modelling - modeled, flavored)
- Tajemnicze, niewyjaśnione słowa, znane tylko ekspertom, np. PLC.

Podsumowanie:

Praca mgr Stanisława Kozłowskiego spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe normy pracy doktorskiej, dlatego wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Wnioskuje również o wyróżnienie pracy.

Warszawa, 9. października 2017r.



dr hab. Łukasz Wyrzykowski