

Autoreferat

1) Imię i nazwisko: **Tobias Cornelius Hinse**

2) Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

i) Tytuł zawodowy licencjata fizyki-astronomii, nadany przez Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Kopenhaski, Dania, czerwiec 2001.

ii) Tytuł zawodowy magistra astronomii, nadany przez Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Kopenhaski, Dania, sierpień 2006.

iii) Stopień naukowy doktora nauk fizycznych z zakresie astronomii, nadany przez Uniwersytet Królowej w Belfaście (*Queen's University Belfast*), Wielka Brytania, grudzień 2010. Tytuł rozprawy doktorskiej „*Dynamical aspects of jovian irregular satellites*”.

3) Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych:

i) od stycznia do czerwca 2006: student-asystent (*Student Research Assistant*), Centrum Instrumentalne Duńskiej Astrofizyki (IDA, *Instrument center for Danish Astrophysics*), Instytut Nielsa Bohra, Uniwersytet Kopenhaski, Dania.

ii) od stycznia do grudnia 2011: staż podoktorski (*Postdoctoral Research Scientist*), Koreański Instytut Astronomii i Nauk Kosmicznych (KASI, *Korea Astronomy & Space Science Institute*), Daejeon, Korea Południowa.

iii) od stycznia 2012 do grudnia 2013: młodszy pracownik naukowy (*KRCF Young Scientist Research Fellow*, przyznane przez *Korea Research Council of Fundamental Science & Technology*, KRCF), KASI, Daejeon, Korea Południowa.

iv) od stycznia 2014 do sierpnia 2015: pracownik naukowy (*Research Fellow*), KASI, Daejeon, Korea Południowa.

v) od września 2015 do czerwca 2018: starszy pracownik naukowy (*Senior Research Scientist*), KASI, Daejeon, Korea Południowa.

vi) od lipca 2018 do teraz: starszy pracownik naukowy (*Senior Research Scientist*), *Chungnam National University*, Wydział Astronomii i Nauk Kosmicznych (*Department for Astronomy & Space Science*), Daejeon, Korea Południowa.

4) Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:

Zagadnienia dynamiki tranzytujących oraz okołopodwójnych pozasłonecznych układów planetarnych

b) Lista artykułów naukowych wchodzących w skład osiągnięcia (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy):

H1.

Hinse, T. C., Lee, J. W., Goździewski, K., Haghhighipour, N., Lee, C.-U., Scullion, E. M., „*New light-travel time models and orbital stability study of the proposed planetary system HU Aquarii*”, 2012, MNRAS, 420, 3609

Impact-factor czasopisma w roku wydania: 5.521

Liczba cytowań według bazy ADS[†]: 45 (stan na dzień 17 lutego 2019)

[†] Źródło: NASA Astrophysical Data Service (ADS): http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html

H2.

Horner, J., **Hinse, T. C.**, Wittenmyer, R. A., Marshall, J. P., Tinney, C. G., „*A dynamical analysis of the proposed circumbinary HW Virginis planetary system*”, 2012, MNRAS, 427, 2812

Impact-factor czasopisma w roku wydania: 5.521

Liczba cytowań według ADS[†]: 44 (17 lutego 2019)

H3.

Hinse, T. C., Lee, J. W., Goździewski, K., Horner, J., Wittenmyer, R. A., „*Revisiting the proposed circumbinary multiplanet system NSVS 14256825*”, 2014, MNRAS, 438, 307

Impact-factor czasopisma w roku wydania: 5.107

Liczba cytowań według ADS[†]: 17 (17 lutego 2019)

H4.

Lee, J. W., **Hinse, T. C.**, Youn, J.-H., Han, W., „*The pulsating sdB+M eclipsing system NY Virginis and its circumbinary planets*”, 2014, MNRAS, 445, 2331

Impact-factor czasopisma w roku wydania: 5.107

Liczba cytowań według ADS[†]: 20 (17 lutego 2019)

H5.

Hinse, T. C., Haghighipour, N., Kostov, V. B., Goździewski, K., „*Predicting a Third Planet in the Kepler-47 Circumbinary System*”, 2015, ApJ, 799, 88

Impact-factor czasopisma w roku wydania: 5.909

Liczba cytowań według ADS[†]: 14 (17 lutego 2019)

c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

[†] Źródło: NASA Astrophysical Data Service (ADS): http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html

Wprowadzenie

Jeden z najbardziej zaawansowanych obszarów badawczych astronomii i astrofizyki dotyczy odkrywania i charakterystyki *planet pozasłonecznych*. Odkrycie pierwszej planety poza Układem Słonecznym zostało ogłoszone ponad dwie dekady temu (Mayor i Queloz 1995). Od tego czasu nasze zrozumienie natury układów planetarnych znacząco wzrosło i najprawdopodobniej dalej będzie rosło, prowadząc do niespodziewanych i fascynujących odkryć innych światów oraz, być może, pozwalając odkryć życie poza granicami Układu Słonecznego.

Odkrycie planety HD 209458b, pierwszego tranzytującego „gorącego Jowisza” (Charbonneau 2000; Henry et al. 2000) o okresie orbitalnym kilku dni, było dużym krokiem naprzód w historii detekcji planet. Użycie techniki fotometrycznej w połączeniu z obserwacjami spektroskopowymi gwiazdy centralnej pozwoliło, po raz pierwszy, na zmierzenie absolutnej *masy* i *promienia* planety, w rezultacie czego oszacowano średnią gęstość, umożliwiającą empiryczne rozróżnienie pomiędzy populacjami planet pozasłonecznych, tj. gorących Jowiszy, planet lawowych oraz skalistych o rozmiarach Ziemi, lodowych olbrzymów oraz zimnych gazowych olbrzymów.

Obserwacje i detekcja okółpodwójnych planet pozasłonecznych

Obecnie znamy prawie cztery tysiące¹ potwierdzonych planet obiegających gwiazdy inne niż Słońce. Ich odkrywanie odbywa się przy użyciu różnych bardzo skutecznych metod obserwacyjnych, podlega jednak również ograniczeniom. Przykładowo, technika mikrosoczewkowania (Udalski i in. 1995; Bond i in. 2004) jest czuła na planety znajdujące się na rozległych orbitach, dzięki czemu możliwe jest odkrywanie planet w zewnętrznych obszarach układu planetarnego, co znacząco dopełnia populację planet krótkookresowych typu gorących Jowiszy. Najbardziej skutecznym projektem odpowiedzialnym za detekcję większości znanych obecnie planet jest misja teleskopu *Keplera* (Borucki i in. 2010), odkrywająca ogromną liczbę planet tranzytujących w pośrednim zakresie okresów

¹ NASA Exoplanet Archive: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

orbitalnych $\sim 1 - 300$ dni. Dzięki uzyskanej w ten sposób populacji planet możliwa stała się analiza statystyczna obserwowanych systemów, jak również tzw. synteza populacji (Mordasini i in. 2009), służąca testowaniu teorii powstawania oraz ewolucji układów planetarnych.

Prawdopodobnie jednym z najbardziej zaskakujących odkryć dokonanych w ramach misji *Kepler* była detekcja planet wokół gwiazd podwójnych. Większość planet odkrytych dzięki teleskopowi *Keplera* obiega *pojedyncze* gwiazdy od słonecznego do późnego typu widmowego. Z drugiej jednak strony, większość ($\sim 60\%$) gwiazd w Galaktyce tworzy związane grawitacyjnie systemy, złożone z dwóch lub większej liczby gwiazd (Duquennoy i Mayor 1991). Doyle i in. (2011) ogłosili po raz pierwszy detekcję planety Kepler-16b o rozmiarach Saturna, obiegając układ podwójny zaćmieniowy. Od tego czasu odkryto dziesięć okołopodwójnych układów planetarnych, w tym system dwóch planet wokół gwiazdy podwójnej Kepler-47 (Orosz i in. 2012a). Najnowsze odkrycia dotyczące częstotliwości występowania tranzytujących planet okołopodwójnych sugerują, że w Galaktyce istnieje może kilka milionów tego typu systemów (Welsh i in. 2012).

Co interesujące, w pracy na temat systemu Kepler-47, Orosz i in. (2012a) wskazali na możliwość istnienia dodatkowej planety. Przypuszczenie to oparte było na pojedynczym tranzycie, który nie może być wyjaśniony przez model z dwiema znanymi planetami. W nawiązaniu do powyższego artykułu, Hinse i in. (2015, **H5**) zbadali scenariusz układu trzech planet w ramach modelu pięciu ciał, uwzględniającego oddziaływania pomiędzy wszystkimi obiektami tworzącymi układ. Autorzy znaleźli kilka obszarów stabilnego ruchu, w których trzecia planeta może istnieć. W najnowszej pracy Orosz i in. (2019, AJ, złożona do recenzji) przedstawili nową kompilację wszystkich (kwartały od 1 do 17) istniejących danych fotometrycznych systemu Kepler-47 oraz przeprowadzili ich pełną analizę obejmującą scenariusze modeli wieloplanetarnych. Co istotne, trzecia planeta została odkryta w tym układzie, a wyznaczona konfiguracja orbitalna okazała się być stabilna przez okres dziesiątek milionów lat.

W erze przed misją *Kepler*, historia odkryć okołopodwójnych systemów planetarnych rozpoczęła się od długofalowych pomiarów czasowych (chronometrażu) pulsarów oraz fotometrycznych naziemnych obserwacji podwójnych układów zaćmieniowych (Pribulla i Rucinski 2006; Pribulla i in. 2012). Najbardziej znaczącymi przykładami są: *i*) „planety pulsarowe” odkryte za pomocą techniki chronometrażu (Wolszczan i Frail 1992) wokół szybko-rotującej gwiazdy neutronowej PSR 1257+12, poprzez analizę zmierzonych odchyłek w okresie pulsacji oraz *ii*) stwierdzenie na podstawie pomiarów czasów przybycia pulsacji gwiazdowych (w modzie p) istnienia towarzyszy planetarnych wokół V391 Pegasi (Silvotti i in. 2007, Silvotti i in. 2018). Nie mniej jednak, istnienie większości z populacji niewidocznych okołopodwójnych towarzyszy planetarnych oraz podgwiazdowych stwierdzone zostało na podstawie fotometrycznego monitorowania czasów zaćmień, wykazujących anormalne zmiany okresowości. Zasadnicza metoda detekcji bazuje na efekcie LTTE, tj. skończonego czasu podróży sygnału świetlnego (od ang. *light-travel time effect*, czasami oznaczanego przez LTT, Irwin 1952, 1959), w którym regularne zaćmienia układu podwójnego używane są jako zegar referencyjny. Anomalie czasowe – lub zmiany okresu – są tutaj wynikiem obecności dodatkowych ciał masywnych, które zmieniają położenie środka masy systemu podwójnego. Powoduje to okresowe opóźnienia w obserwowanych czasach zaćmień. Efekt LTTE/LTT prowadzi do problemu optymalizacji jednowymiarowej, który może być rozwiązany przy pomocy technik minimalizacji odchyłek kwadratowych lub maksymalizacji prawdopodobieństwa. Dokładne pomiary czasów zaćmień pozwalają wyznaczyć parametry opisujące konfigurację orbitalną układu. Amplituda K zmian czasowych zależy od rozmiaru orbity (lub okresu, jako że $K \propto P^{2/3}$) oraz masy ($K \propto M$) towarzysza (Pribulla i in. 2012). Większa czułość osiągana jest dla systemów podwójnych o mniejszej masie całkowitej ($K \propto (M_1 + M_2)^{-2/3}$). Tak więc, w przeciwieństwie do metody prędkości radialnych, technika chronometrażu zaćmień jest czuła na masywne obiekty na rozległych orbitach wokół małowasywnych podwójnych układów zaćmieniowych, co umożliwia badanie populacji planet/towarzyszy podgwiazdowych w zewnętrznych obszarach układów wokół gwiazd podwójnych późnego typu widmowego. Istotną wadą techniki LTTE/LTT jest to, że w celu określenia rzeczywistego okresu orbitalnego towarzysza/y, konieczne jest wykonanie pomiarów chronometrycznych obejmujących znaczną liczbę zaćmień. Ponadto, możliwe jest określenie jedynie masy minimalnej

towarzysza, który sam nie tranzytuje. Jednakże, misji *Kepler* udało się dokonać detekcji zmian okresowości zaćmieniowych układów podwójnych Kepler-34 oraz Kepler-35 (Welsh i in. 2012), wokół których, dzięki pomiarom czasów tranzytów oraz zaćmień, odkryto dwie planety okołopodwójne. Zmiany okresów spowodowane były istotnymi, wywołanymi przez planety, zaburzeniami orbit układów podwójnych. Podczas gdy teleskop *Keplera* został wycofany z użycia pod koniec 2018 roku, w ostatnich latach rozpoczęto programy obserwacyjne w postaci rozmieszczonych na różnych długościach geograficznych teleskopów monitorujących północną (Pribulla i in. 2012; DWARF²) oraz południową półkulę (Konacki i in. 2012; SOLARIS³), celem których jest dalsza obserwacja znanych oraz detekcja nowych anomalii w chronometrażu podwójnych gwiazd zaćmieniowych późnego typu widmowego.

Na chwilę obecną, większość ogłoszonych odkryć planet/towarzyszy wokół gwiazd podwójnych budzi kontrowersje, natomiast pierwotne wnioski na temat ich parametrów orbitalnych są zmieniane *i*) na podstawie analizy nowych danych fotometrycznych oraz/lub *ii*) w wyniku bardziej wnikliwego modelowania istniejących w literaturze danych, uwzględniającego więzy stabilności orbitalnej w długim przedziale czasu oraz alternatywne efekty powodujące zmiany w czasach zaćmień.

Zagadnienie planet okołopodwójnych – uzgodnienie teorii z obserwacjami

Większość doniesień na temat wykorzystujących efekt LTTE/LTT odkryć towarzyszy wokół gwiazd podwójnych bazuje na kompilacji historycznych danych fotometrycznych często w połączeniu z nowymi obserwacjami wykonanymi przy użyciu układów elementów światłoczułych (CCD, z ang. *charged-couple device*) oraz pomiarami fotoelektrycznymi (PE, z ang. *photo-electric*). Zwiększona precyzja obserwacji fotometrycznych pozwoliła na dokładniejszy chronometraż. Zależnie od konkretnego typu zaćmienia, pomiary CCD oraz PE pozwalają typowo na uzyskanie dokładności wyznaczenia czasu zjawiska wynoszącej ± 10 sekund (Pribulla i in. 2012), umożliwiającej detekcję towarzysza o masie $\sim 10 M_{\text{Jup}}$ na orbicie

2 DWARF, <http://www.ta3.sk/~pribulla/Dwarfs/pribulla/Dwarfs/>

3 SOLARIS, <http://projektsolaris.pl/en/homepage/>

o okresie 10 - 20 lat (Ribas i in. 2006). Pomimo dołożenia wszelkich starań w redukcji pomiarów jak również ich dalszej analizie, większość zestawów danych jest niejednorodna, uzyskana z wykorzystaniem różnych teleskopów, w różnych warunkach pogodowych, co skutkuje niejednakową jakością materiału obserwacyjnego.

Deeg i in. (2000) jako pierwsi wykonali pomiary chronometryczne układu CM Dra z wykorzystaniem dedykowanego przeglądu nieba, donosząc o odkryciu planety o masie Jowisza na orbicie o okresie ~ 1000 dni. Wniosek ten nie mógł być potwierdzony przez kolejne obserwacje i dzięki nowej analizie Deeg i in. (2008) skorygowali swoje wcześniejsze ustalenia, proponując planetę o masie Jowisza na orbicie o okresie ~ 19 lat wokół układu dwóch czerwonych karłów. Również wyniki tej pracy zostały *zakwestionowane* w artykule (Morales i in. 2009), gdzie autorzy wyznaczyli absolutne parametry systemu CM Dra dzięki dobrej jakości obserwacjom fotometrycznym i spektroskopowym. *Nie byli oni w stanie potwierdzić* zmian okresu stwierdzonych w pracy (Deeg i in. 2008), ale wyznaczyli niezerowy mimośród orbity układu podwójnego, który może być wywołany przez zaburzenia pochodzące od masywnego towarzysza, zapobiegające ukołowieniu orbity na skutek efektów pływowych (Murray i Dermott 2000). Innym możliwym wyjaśnieniem obserwowanego kształtu orbity może być mechanizm wzbudzania mimośrodu przez dysk wokół systemu podwójnego (Vos i in. 2015). Prawdziwa natura układu CM Dra pozostaje nie w pełni poznana.

Mniej kontrowersyjne jest natomiast odkrycie planety o masie $\sim 6 M_{\text{Jup}}$ wokół krótkookresowego układu zaćmieniowego – kataklizmicznej zmiennej typu AM Herculis – DP Leo (Schwope i in. 2002, Qian i in. 2010, Beuermann i in. 2011). We wszystkich trzech pracach uzyskano zgodne wyniki dotyczące zmian okresu, które zinterpretować można przez obecność masywnej planety na orbicie o umiarkowanym mimośrodku oraz okresie ~ 28 lat.

Pierwszy okołopodwójny system dwóch planet odkryty techniką chronometryczną zaćmień zaproponowany został przez Lee i in. (2009a). Przedstawiając nowe dane fotometryczne, autorzy argumentują za istnieniem dwóch ciał o masach planetarnych wokół krótkookresowego układu zaćmieniowego HW Vir, składającego się z podkarła typu

widmowego B (sdB) oraz karła typu M. Wyznaczono masy towarzyszy na ~ 9 oraz $\sim 19 M_{\text{Jup}}$, odpowiednio dla obiektu wewnętrznego oraz zewnętrznego. Okresy orbitalne wynoszą ~ 9 oraz ~ 16 lat. *Również w przypadku tego systemu istnieją kontrowersje.* W pracy (Horner, Hinse i in. 2012, **H2**) zbadano stabilność orbitalną systemu w długich skalach czasu. Autorzy stwierdzili, że zaproponowane przez Lee i in. (2009a) obiekty obiegające układ podwójny *znajdują się na bardzo niestabilnych orbitach*, o skalach czasowych rozpadu rzędu kilku tysięcy lat. Zbyt krótkich, aby istnienie takiej konfiguracji było prawdopodobne. Powodem niestabilności jest zaproponowana przez Lee i in. (2009a) architektura modelu z orbitami kolizyjnymi. W celu *pogodzenia obserwowanych zmian okresu z modelem wieloplanetarnym*, Horner, Hinse i in. (2012) zaproponowali alternatywną konfigurację, w której zewnętrzna planeta znajduje się na znacząco bardziej rozległej orbicie, co jednak jest słabo określone przez obserwacje z uwagi na zbyt krótki ciąg obserwacyjny.

Pierwszym wieloplanetarnym systemem okołopodwójnym, w przypadku którego zauważono problem stabilności orbitalnej, był układ wokół gwiazdy podwójnej zaćmieniowej HU Aqr. Qian i in. (2011) stwierdzili detekcję dwóch masywnych towarzyszy planetarnych. Wynik ten *został wkrótce zakwestionowany* w pracy (Horner i in. 2011), poddającej w *wątpliwość istnienie proponowanych planet*, z uwagi na fakt, iż znajdują się one na orbitach kolizyjnych, przy czym uwzględniono wiele konfiguracji zgodnych z niepewnościami parametrów wyznaczonych z obserwacji. Co ciekawe, stabilność orbitalną w długim przedziale czasu można uzyskać, jeśli zewnętrzna planeta porusza się po orbicie wstecznej. Scenariusz taki wydaje się jednak mało wiarygodny fizycznie, ponieważ, jak się powszechnie uważa, planety powstają we wspólnym dysku rotującym wokół układu podwójnego (Pierens i Nelson 2008). Inne badania (Horner i in. 2013, QS Virginis) jednoznacznie wykazały, że proponowane planety nie mogą istnieć z powodu silnych wzajemnych zaburzeń ruchów orbitalnych. W związku z wyżej opisanymi trudnościami, Hinse i in. (2012, **H1**) podjęli próbę znalezienia *alternatywnych konfiguracji* tego systemu, *które można pogodzić z warunkiem stabilności planet* w układzie HU Aqr. Stabilne konfiguracje zostały znalezione dla modeli obserwacyjnych z mniejszym mimośrodem zewnętrznej planet – podobny wynik uzyskali Horner i in. (2012) w przypadku towarzyszy NN Serpentis. Autorzy przeprowadzili rozległe symulacje Monte Carlo w celu wyczerpującego przeszukania przestrzeni parametrów,

włączając warunek stabilności orbitalnej jako dodatkowe więzy w procesie dopasowywania modelu do obserwacji (Goździewski, Konacki i Maciejewski, 2005). Podobne problemy ze stabilnością pojawiły się w przypadku analizy układów zaćmieniowych NSVS 14256825 (Hinse i in. 2014, **H3**) oraz NY Vir (Lee, Hinse i in. 2014, **H4**). W pierwszej z tych prac Hinse i in. (2014) wykazali, że analiza bayesowska nie dostarcza pełnego rozwiązania tych problemów, a sama technika nie jest wolna od ograniczeń nakładanych przez dane obserwacyjne. W przypadku modelowania sygnałów astrofizycznych, modele będące wynikiem analizy bayesowskiej często uważane są za bliskie ostatecznym rozwiązaniom, a wnioskom płynącym z tego typu analiz przypisuje się im zbyt wysoką wiarygodność. W pracy **H4** przedstawiamy nowe pomiary chronometrażowe, pochodzące z analizy danych fotometrycznych pulsacji układu podwójnego gwiazd typów sdB oraz M, oraz stwierdzamy, że najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem znalezionych zmian okresu jest obecność dwóch towarzyszy planetarnych. Chociaż, podobnie jak w poprzednich przypadkach, system ten również *okazuje się być niestabilny*, przedstawiamy stabilne rozwiązania zlokalizowane w przestrzeni parametrów w odizolowanych „wyspach” stabilności, znajdujących się w okolicy modelu najlepiej pasującego do obserwacji.

Istnieją inne, niegravitacyjne mechanizmy, które mogą powodować dodatkowe zmiany okresu względem tych wywołanych obecnością towarzyszy wokół gwiazdy podwójnej. Mechanizmy te związane są z utratą/transferem masy, magnetycznym wiatrem gwiazdowym, promieniowaniem grawitacyjnym oraz oddziaływaniem z polem magnetycznym. Ostatni z tych mechanizmów nazywany jest efektem Applegate’a (Applegate 1992), w którym zmiana okresu wynika ze zmiany stopnia spłaszczenia gwiazdy, co jest z kolei efektem zmiany momentu magnetycznego. Utrata masy przez gwiazdę prowadzi do jej redystrybucji, w konsekwencji zmieniając okres układu podwójnego. Wszystkie te efekty (Hilditch 2001) powodują zmianę okresu w typowych skalach czasu rzędu dekad i w procesie modelowania obserwacji są uwzględniane łącznie w postaci parametru tłumienia β (Goździewski i in. 2012). Rozróżniając wiekowe niegravitacyjne zmiany okresu od tych wywołanych przez niewidoczne obiekty towarzyszące, można oszacować wielkości poszczególnych przyczynków. Przykładowo, w przypadku HU Aqr, Schwarz i in. (2009) zauważyli, że amplituda zmian okresu jest zbyt duża, aby mogła być wyjaśniona przez mechanizm

Applegate'a. Dalej, w pracy (Lee i in. 2009a) autorzy stwierdzili, że wiekowa zmiana okresu jest najprawdopodobniej spowodowana przez utratę momentu pędu spowodowaną magnetycznym wiatrem gwiazdowym. Zwykle, opisane powyżej efekty niegrawitacyjne uwzględnione są w modelach obserwacyjnych łącznie z postulowanymi niewidocznymi towarzyszami.

Wkład naukowy do badań okołopodwójnych planet pozasłonecznych

Poniżej przedstawiam w większych szczegółach oryginalne pomysły oraz wyniki niezależnych analiz (**H1** – **H4**), dotyczących rozwiązań fundamentalnych problemów związanych z modelowaniem danych obserwacyjnych okołopodwójnych układów planetarnych, odkrytych przy użyciu techniki chronometrażu zaćmień oraz pomiarów tranzytów. Jako szczególnie istotny wynik przedstawiam teoretyczne przewidywania na temat możliwej trzeciej planety tranzytującej wokół gwiazdy podwójnej Kepler-47 (**H5**). Trzecia planeta została rzeczywiście znaleziona, a praca na temat jej detekcji jest obecnie na etapie recenzji i oczekuje na publikację w najbliższej przyszłości. Przez szereg lat, od czasu ogłoszenia odkrycia obiektów o masie planetarnej przez Lee i in. (2009a), w literaturze przedmiotu mamy do czynienia z wnioskami, których nie można pogodzić z podstawowymi wymogami teoretycznymi, dotyczącymi stabilności orbitalnej systemów tego typu. Cel naukowy przedstawianego tutaj projektu polega na uzyskaniu lepszego zrozumienia aspektów modelowania danych chronometrycznych. Poprzez ten projekt staram się znaleźć przyczynę źródłową podkreślonej tutaj niezgodności pomiędzy obserwacjami oraz teorią, mając zawsze na celu rozwinięcie tego obszaru badawczego poprzez użycie nowych dla niego metod analizy, które jednak znalazły zastosowanie w innych zagadnieniach opisywanych w literaturze astronomicznej. Wcześniejsze badania okazały się niedostateczne w kwestii krytycznego i rygorystycznego stosowania technik analizy danych, jak również odpowiedniego określania niepewności wyznaczenia parametrów modeli, skutkujących pochopnymi i pozbawionymi podstaw doniesieniami o odkryciach planet okołopodwójnych. Moim celem było podwyższenie standardów naukowych oraz rygoru analiz dotyczących modelowania danych chronometrycznych, co może prowadzić do bardziej wiarygodnych wniosków na temat natury obserwowanych zjawisk.

Podstawowym założeniem w większości moich badań jest to, że wzajemne zaburzenia grawitacyjne pomiędzy planetami są słabe, przez co można przyjąć w pierwszym przybliżeniu, że mierzone anomalie chronometrażu wywołane są przez efekt skończonego czasu podróży sygnału świetlnego (LTTE/LTE). Opierając się na dotychczasowej liczbie cytowań, można stwierdzić, że opisywany projekt wywiera wpływ na kierunek badań dotyczących planet/towarzyszy wokół gwiazd podwójnych, zwracając uwagę na problemy, które wcześniej nie były zauważane. Obszar badawczy związany z planetami pozasłonecznymi rozwijał się w ciągu ostatnich pięciu do dziesięciu lat z rosnącą szybkością, sprawiając, że czasami, co trzeba przyznać, nie jest łatwo nadążyć za stale przyspieszającym postępem w tej dziedzinie badań. Niemniej jednak, obszar ten jest niezwykle fascynujący, przez co niezmiennie przyciąga moją naukową uwagę i wzmaga chęć odkrywania prawdziwej natury tych odległych światów.

Projekt ten został zapoczątkowany w 2011 roku jako wynik rozpoczynanego przez mnie wtedy siedmioletniego okresu stażu podoktorskiego w instytucie KASI (*Korea Astronomy & Space Science Institute*) w Korei Południowej. W tym czasie powstało 11 recenzowanych publikacji dotyczących towarzyszy wokół gwiazd podwójnych, jako mojego głównego pola zainteresowań naukowych. Poza tym, prowadziłem inne badania spoza tego obszaru. Podczas stażu podoktorskiego opublikowałem łącznie 105 recenzowanych publikacji.

Opisywana tutaj praca badawcza została zainicjowana i prowadzona przez mnie jako część międzynarodowej współpracy⁴, w którą zaangażowani są naukowcy m. in. z Korei Południowej, Wielkiej Brytanii, Stanów Zjednoczonych, Australii oraz Polski. Znacząca część przedstawianych wyników naukowych uzyskana została poprzez obliczenia numeryczne wykonane dzięki wydajnemu klastru obliczeniowemu, znajdującemu się w Korei Południowej oraz zarządzanemu przez instytut KASI (klastry KMTNet, PLUTO oraz POLARIS). Ponadto, znaczna część wyników, które tutaj omawiam, uzyskana została dzięki wielkoskalowym obliczeniom numerycznym z wykorzystaniem klastrów SFI/HEA (zlokalizowanym w *Irish Centre for High-End Computing*, ICHEC) w Irlandii (poprzez dostęp w ramach grantu otrzymanego dzięki uprzejmości *Armagh Observatory* w Wielkiej

4 uczestnikom której jestem głęboko wdzięczny za cenny wkład oraz naukowe dyskusje/wskazówki

Brytanii), „Beehive” (w *Armagh Observatory*) oraz klastra w *Centre for Scientific Computing* w *University of Sheffield* (Wielka Brytania). Użyto również mocy obliczeniowych superkomputera EPIC, znajdującego się w *University of Western Australia*.

Ponadto, obserwacje fotometryczne typu *follow-up* wykonano przy użyciu teleskopów w Chile (DK 1.54m, ESO/La Silla) oraz Korei Południowej (1.8m, BOAO; 1.0m, LOAO; 0.6m, SOAO and 0.7m, CbNUO) w celu uzyskania nowych pomiarów czasów zaćmień układów, dla których spodziewaliśmy się zmian okresu, spowodowanych przez niewidoczne masywne obiekty towarzyszące. Wnioski obserwacyjne⁵, składane zarówno indywidualnie (jako PI, z ang. *Principle Investigator*), jak również we współpracy (jako co-I, z ang. *co-Investigator*), zaowocowały uzyskaniem łącznie ponad 250 nocy obserwacyjnych, z których ~30% dostarczyło danych o odpowiednio wysokiej jakości. Opisywana tutaj praca jest wciąż w toku, zatem znacząca część uzyskanych danych obserwacyjnych oraz wyników obliczeń numerycznych nie została jeszcze opublikowana i oczekuje obecnie na przyszłą analizę.

Ponowne spojrzenie na HU Aquarii: Pogodzenie chronometrażu zaćmień z wymogami stabilności orbitalnej (H1)

Motywacją do powstania tego artykułu była praca (Horner i in. 2011), w której autorzy po raz pierwszy krytycznie odnieśli się do twierdzeń Qian i in. (2011) i wskazali na problem długookresowej stabilności systemów planetarnych wokół gwiazd podwójnych. Horner i in. (2011) przedstawili bezsprzeczny, bazujący na zbadaniu dynamiki układu w szerokim zakresie warunków początkowych, dowód teoretyczny pozwalający autorom na wyciągnięcie wniosku, że system dwóch planet wokół HU Aquarii (HU Aqr) nie może istnieć w konfiguracji podanej przez Qian i in. (2011).

Mój wkład (Hinse i in. 2012, **H1**) do tego rozwijającego się obszaru badań ma swoje źródło w pomysłach przedstawionych w pracy (Goździewski, Konacki i Maciejewski, 2005), gdzie autorzy wprowadzili warunek stabilności jako dodatkowe ograniczenie w procesie

5 Częściowo uzyskane w ramach projektów „*Observational Surveys of Variable Objects*” (co-PI), jak również „*Transit-timing variations of unseen companions and follow-up of eclipsing binaries*” (PI) oraz MiNDSTEp wykonywanych w *Korea Astronomy & Space Science Institute* w Korei Południowej.

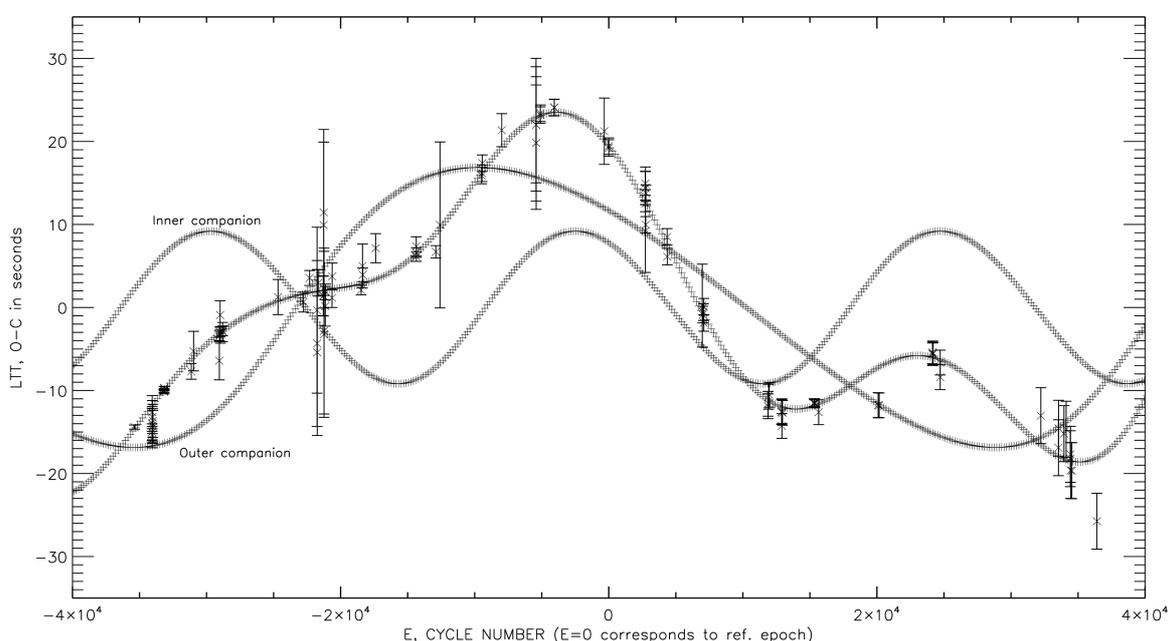
modelowania danych obserwacyjnych. Jest to przykład zastosowania znanych w literaturze metod do nowych zagadnień, w celu wyjaśnienia/rozwiązania istniejących problemów naukowych. Takie podejście wydaje się wiarygodne i w ogólności może pozwolić na pogodzenie obserwacji z koniecznym warunkiem stabilności układów planetarnych. Używając jakościowych argumentów probabilistycznych, wydaje się mało prawdopodobne, że układ wokół HU Aqr, taki jaki opisywany jest przez Qian i in. (2011), znajduje się obecnie w fazie dramatycznego rozpadu, będącego wynikiem zaburzeń grawitacyjnych.

W pracy **H1** staramy się znaleźć bardziej prawdopodobną konfigurację orbitalną tego systemu, która dobrze opisuje obserwacje oraz spełnia warunek stabilności. Przeanalizowaliśmy różne modele LTTE/LTT w odniesieniu do pełnego zestawu danych. Równoległe z procesem dopasowywania modelu, przeprowadziliśmy analizę stabilności różnych konfiguracji orbitalnych, najlepiej pasujących do obserwacji. Mówiąc bardziej ogólnie, w celu uniknięcia korelacji pomiędzy parametrami, rozszerzyliśmy modele Qian i in. (2011) do systemów, które dopuszczają niezerowy mimośród orbity wewnętrznej planety. Wykazujemy, że nie istnieją żadne przesłanki obserwacyjne, ani więzy teoretyczne, które wskazywałyby na dokładne kołowe orbity w tym systemie.

W naszej analizie zebraliśmy pomiary czasów wyjścia z zaćmienia z prac Schwöpe i in. (2001), Schwarzwald i in. (2009) oraz Qian i in. (2011). Uzyskano łączną liczbę 113 pomiarów czasowych dla HU Aqr, obejmujących zakres od kwietnia 1993 roku do maja 2010, co stanowi przedział czasu około 17 lat. Wszystkie pomiary (HJD/UTC) zostały przetransformowane do barycentrum Układu Słonecznego, poprzez wykorzystanie formatu czasu BJD w standardzie TDB. Zaimplementowany model LTTE/LTT korzysta z formalizmu opisanego w pracy (Irwin 1952). W podejściu tym, gwiazdy tworzące układ podwójny traktowane są jak jeden obiekt o łącznej masie równej sumie mas składników. Model najlepiej pasujący do obserwacji przedstawiony jest na Rys. 1A.

W procesie dopasowywania modelu do obserwacji z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, użyliśmy algorytmu minimalizacji Levenberga-Marquardta (LM),

zaimplementowanego w języku IDL⁶ jako procedura MPFIT (Markwardt, 2009). Procedura ta minimalizuje sumę ważonych odchyłek kwadratowych (χ^2) pomiędzy modelowymi a obserwowanymi wartościami czasów wyjścia z zaćmienia. Ostateczna wersja oprogramowania została intensywnie przetestowana i poddana wielu kontrolom jako część współpracy w ramach projektu. W procesie tym zidentyfikowano oraz następnie skorygowano błędy w kodzie, upewniając się w ten sposób o poprawności wyników działania programu. W szczególności, dotyczy to wyznaczania minimalnej masy towarzyszy w ramach iteracyjnego algorytmu rozwiązywania funkcji mas.



Rys. 1A: Przykład statystycznie istotnego, pasującego do obserwacji modelu LTTE (LTT) dwóch planet wokół HU Aqr o wartości funkcji $\chi^2 = 1.43$. Przedstawiono oraz oznaczono indywidualne sygnały LTTE obu towarzyszy. Użyto danych chronometrycznych z literatury (Schwobe i in. 2001, Schwarz i in. 2009, Qian i in. 2011). Rysunek pochodzi z pracy (Hinse i in. 2012, Rys. 2, **H1**).

W celu uwzględnienia kryterium stabilności danego modelu, traktowaliśmy stabilność dynamiczną jako „obserwable”. Następnie przeprowadziliśmy intensywne, bazujące na metodzie Monte Carlo, przeszukiwanie przestrzeni parametrów orbitalnych, wykorzystując różne zasoby obliczeniowe. Wykonanie periodogramu Lomba-Scargle’a (Lenz i Breger 2005) pozwoliło na oszacowanie okresów orbitalnych. Po uzyskaniu zbieżności metody LM dla danego rozwiązania, sprawdzaliśmy otrzymane parametry pod kątem następujących kryteriów stabilności:

⁶ https://www.harrisgeospatial.com/docs/using_idl_home.html

- (i) $a_1 < a_2$,
(ii) $q_2 - n R_H^{(2)} > Q_1 + n R_H^{(1)}$ (dla $n = 1, 2$),

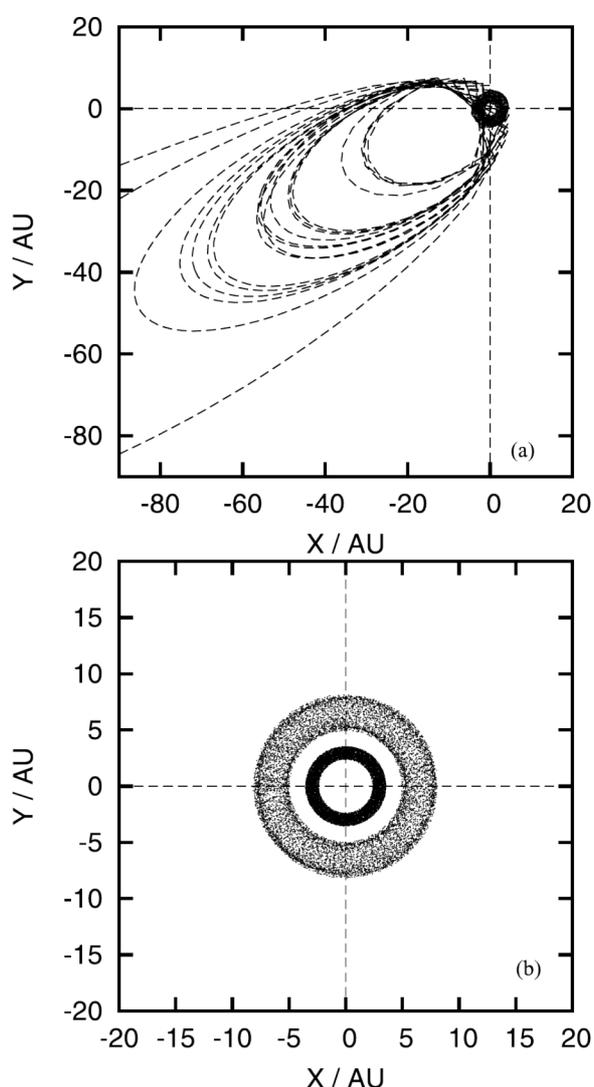
gdzie q_2 jest odległością w perycentrum planety zewnętrznej, natomiast Q_1 jest odległością apocentrum planety wewnętrznej, $R_H^{(k)}$ jest zmodyfikowanym promieniem Hilla k -tej planety, natomiast a_k oznacza póló wielką jej orbity. Pierwsza spośród wymienionych wyżej nierówności wyraża żądanie, aby układ był hierarchiczny, tj. aby orbita wewnętrznej planety była zawsze mniejsza niż orbita planety zewnętrznej. Dla orbit mimośrodowych, używamy „parametru separacji” n (dla $n = 1$), aby określić ilościowo warunek stabilności. Drugi z warunków wymaga, aby perycentrum zewnętrznej planety było dalej od gwiazdy centralnej niż apocentrum planety wewnętrznej. Warunek ten jest w oczywisty sposób naruszony w przypadku konfiguracji orbitalnej zaproponowanej przez Qian i in. (2011). W celu uniknięcia bliskich spotkań pomiędzy planetami, warunek ten jest rozszerzony o żądanie, aby odległość pomiędzy planetami była wielokrotnością ich promieni Hilla.

Eksperymenty bazowały na ponad 100 tysiącach losowo wybranych początkowych rozwiązaniach. Dla każdej ze startowych konfiguracji, dla której $\chi^2 < 10.0$, notowano wartość χ^2 , parametry początkowego oraz końcowego modelu, będącego wynikiem działania algorytmu LM. Wynikiem obliczeń była populacja najlepszych modeli, z których część spełniała nałożone więzy stabilności orbitalnej opisane powyżej.

Następnie sprawdzamy bezpośrednio stabilność badanych konfiguracji, używając pakietu do całkowania równań ruchu orbitalnego MERCURY⁷ (Chambers, 1999). Przeprowadziliśmy całkowania dla dwóch scenariuszy: *i*) dla nominalnych parametrów najlepiej pasującego modelu, którego $\chi^2 = 1.43$ oraz *ii*) w optymistycznym scenariuszu, w ramach którego rozważamy najmniejsze możliwe masy oraz mimośrody oraz największe możliwe wartości póló wielkich obu towarzyszy. Układy te zostały przecałkowane na okres czasu 10 tysięcy lat. Rysunek 1B pokazuje wyniki całkowania dla dwóch modeli.

⁷ <https://github.com/4xxi/mercury>

Model z nominalnymi parametrami wykazuje niestabilność orbitalną przynajmniej jednego z towarzyszy, co skutkuje jego ucieczką z układu. Z drugiej strony, dla scenariusza optymistycznego, konfiguracja orbitalna ewoluuje względnie stabilnie w porównaniu z pierwszym przypadkiem. Przeprowadziliśmy również długookresowe całkowania w celu określenia stabilności w wiekowych skalach czasu. Omawiana praca została zwieńczona przez przedstawienie podzbioru najlepiej pasujących modeli orbitalnych, spełniających wymagania stabilności. Podejście to było oryginalne i dostarczyło nowego bodźca do rozwoju badań okołopodwójnych systemów planetarnych.



Rys. 1B: Wyniki bezpośredniego całkowania równań ruchu dla modeli uzyskanych z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia więzów stabilności. Górny panel (a) ilustruje przykład ewolucji niestabilnej, natomiast dolny panel (b) pokazuje stabilną konfigurację, co jest wymagane, aby istnienie tego systemu miało sens fizyczny. Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2012, Rys. 3, **H1**).

Do lutego 2019 roku praca **H1** doczekała się 45 cytowań. Jako szczególnie ważny wynik dotyczący badań HU Aqr w ostatnim czasie, wskazujemy pracę (Goździewski i in. 2015), gdzie zbadano na nowo hipotezę planetarną tego systemu. Autorzy przedstawili nowe pomiary chronometrażu bazującego na obserwacjach fotometrycznych, uzyskanych przy użyciu teleskopów naziemnych w latach 2011 do 2014. Dokładne modelowanie, z uwzględnieniem wzajemnych oddziaływań pomiędzy masywnymi obiektami, w połączeniu z więzami stabilności pozwoliło autorom wykluczyć płaską konfigurację dwóch planet oraz wskazać na możliwą bardziej złożoną strukturę hipotetycznego układu wokół HU Aqr: zmiana okresu może być spowodowana przez oscylacje momentu kwadrupolowego składnika wtórnego układu podwójnego, tak jak przewiduje modyfikacja mechanizmu Applegate'a opisana przez Lanza i in. (1998). Wniosek powyższy został potwierdzony w pracy teoretycznej (Völschow i in. 2016), gdzie autorzy argumentują, że układ zaćmieniowy HU Aqr znajduje się obecnie w stanie energetycznym, dopuszczającym działanie mechanizmu Applegate'a, dostarczającego bardziej realistyczne wyjaśnienie obserwowanych zmian okresu.

Szczegółowa analiza proponowanego układu planetarnego wokół HW Virginis (H2)

Wraz z postępem w przeglądzie literatury związanej z projektem w temacie okołopodwójnych układów planetarnych, stało się oczywiste, że stosowanym wcześniej metodom analizy danych chronometrażu systemów zaćmieniowych brakuje naukowego rygoru oraz analitycznej precyzji. Jakkolwiek obszar badań dotyczących odkryć planet wokół gwiazd pojedynczych oraz ich statystycznego uwiarygodnienia podlega gwałtownemu rozwojowi, badania systemów okołopodwójnych zdają się nie podlegać takim samym standardom analizy. Co więcej, czasami czynione są założenia, które nie są oparte na przesłankach obserwacyjnych ani na uzasadnieniu teoretycznym. Często, dane stanowiące główny dowód nie są poddawane szczegółowej analizie ani krytyce mającej na celu zidentyfikowanie możliwych błędów. Oto niektóre tego przykłady. Niepewności wyznaczenia parametrów przedstawione przez Lee i in. (2009a) otrzymane zostały z macierzy kowariancji dla najlepszego dopasowania, która nie dostarcza wiarygodnego oszacowania tych wielkości, ponieważ nie uwzględnia istnienia możliwych korelacji pomiędzy parametrami.

Na przestrzeni wielu lat, rozwinięto bezpośrednie numeryczne metody Monte Carlo (Press i in. 1992; Bevington i Robinson, 1992), pozwalające na otrzymanie bardziej wiarygodnych niepewności parametrów. Co więcej, korelacje pomiędzy parametrami, jak również możliwość braku ograniczenia danego parametru przez obserwacje, rzadko są dyskutowane czy podnoszone w literaturze. Dodatkowo, Beuermann i in. (2012a) w swojej analizie systemu HW Vir bazowali na, mających nikłe uzasadnienie, założeniach odnośnie orbity planety wewnętrznej.

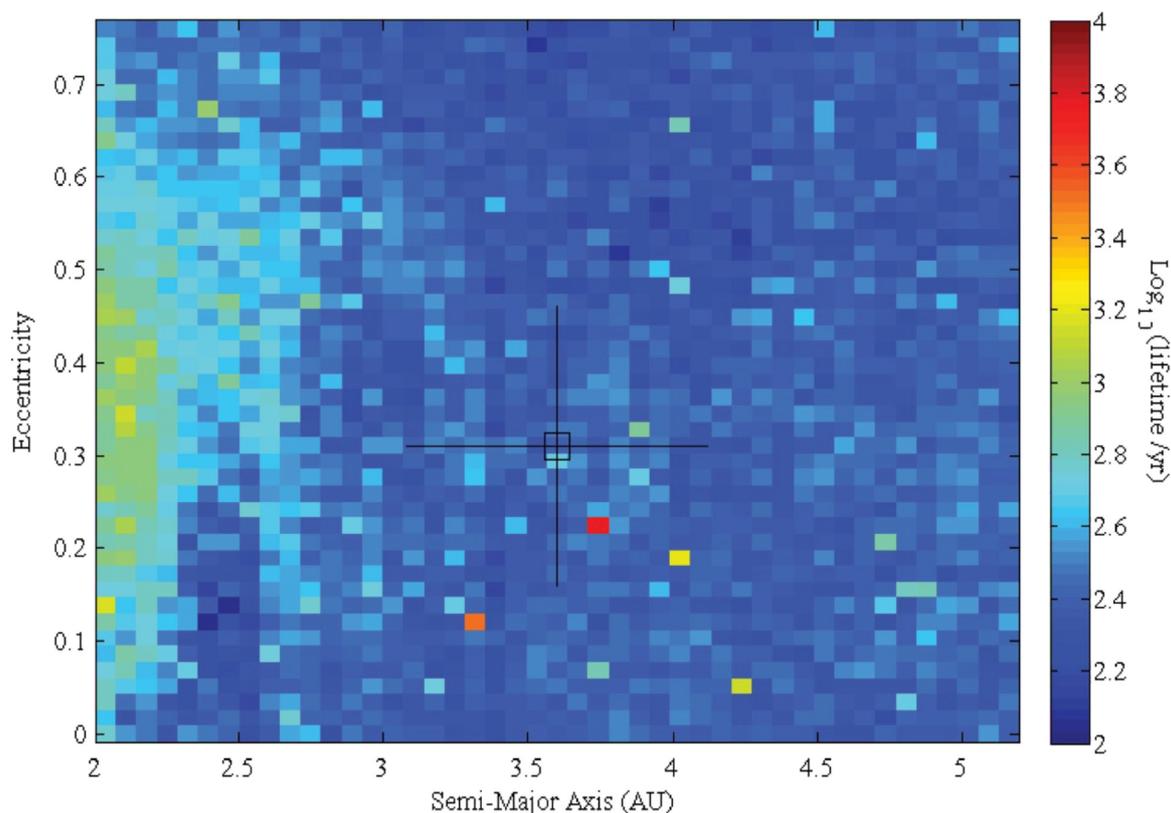
Z naukowego punktu widzenia, brak ścisłości, z jaką przeprowadzana jest analiza danych, jest wysoce niesatysfakcjonujący. Istnieją dobrze rozwinięte metody i techniki analizy, które mogą być zastosowane do omawianego problemu przy niewielkim wysiłku (Hughes i Hase 2010). Szczególnie w przypadku ogłaszania nowych odkryć, jak również prób potwierdzenia wcześniej ogłoszonych planet/towarzyszy, techniki te powinny znaleźć swoje zastosowanie.

Praca **H2** została wykonana jako część międzynarodowej współpracy koreańsko-australijskiej, w ramach której początkowe pomysły oraz zdobyte doświadczenie były dzielone oraz dyskutowane, a której celem było szczegółowe zbadanie ogłoszonych planet wokół HW Vir.

Lee i in. (2009a) ogłosili odkrycie systemu dwóch planet wokół układu zaćmieniowego HW Vir – składającego się z podkarła typu widmowego B (składnika głównego) oraz czerwonego karła – charakteryzującego się zaćmieniami obu składników z okresem około 2.8 godziny. Masę planety zewnętrznej wyznaczono na $M \sin I = 19.2 M_{\text{Jup}}$, okres orbitalny na 15.8 roku oraz pół-amplitudę na 88 sekund, podczas gdy dla drugiej, wewnętrznej planety $M \sin I = 8.5 M_{\text{Jup}}$, okres 9.1 roku oraz pół-amplitudę równą 23 sekundy.

Wyniki modelowania przedstawione przez Lee i in. (2009a) są alarmujące: obie planety są masywne, na granicy pomiędzy planetami olbrzymami a brązowymi karłami, znajdują się na orbitach o dużych mimośrodkach, dopuszczając ich przecinanie się, oraz we wzajemnych odległościach gwarantujących bliskie przejścia pomiędzy planetami, co w rezultacie prowadzić może z dużym prawdopodobieństwem do niestabilności dynamicznej.

W pierwszej części pracy **H2**, w celu określenia stabilności dynamicznej proponowanych planet, przeprowadziliśmy dużą liczbę bezpośrednich całkowań orbitalnych. Użyliśmy integratora hybrydowego (z pewnymi modyfikacjami) w programie MERCURY (Chambers 1999) i śledziliśmy ewolucję systemu w maksymalnym przedziale czasu równym 100 milionów lat. Algorytm hybrydowy opracowany przez Chambersa (1999) pozwala na wiarygodne całkowanie mimośrodowych orbit. W celu zbadania szerokiego zakresu rozwiązań orbitalnych (w zakresach parametrów pokrywających opublikowane przedziały ufności 1σ), rozważyliśmy dużą siatkę ($45 \times 45 \times 15 \times 3$ punktów w przestrzeni $a - e - \omega - M$) konfiguracji systemu wokół HW Vir. Stwierdziliśmy, że system zaproponowany przez Lee i in. (2009a) jest bardzo niestabilny, co zostało pokazane na Rys. 2A. Wniosek ten, podobnie jak w przypadku HU Aqr, poddaje w wątpliwość fizyczność tej konfiguracji. Przynajmniej, rozwiązanie podane przez Lee i in. (2009a) nie spełnia warunku stabilności.

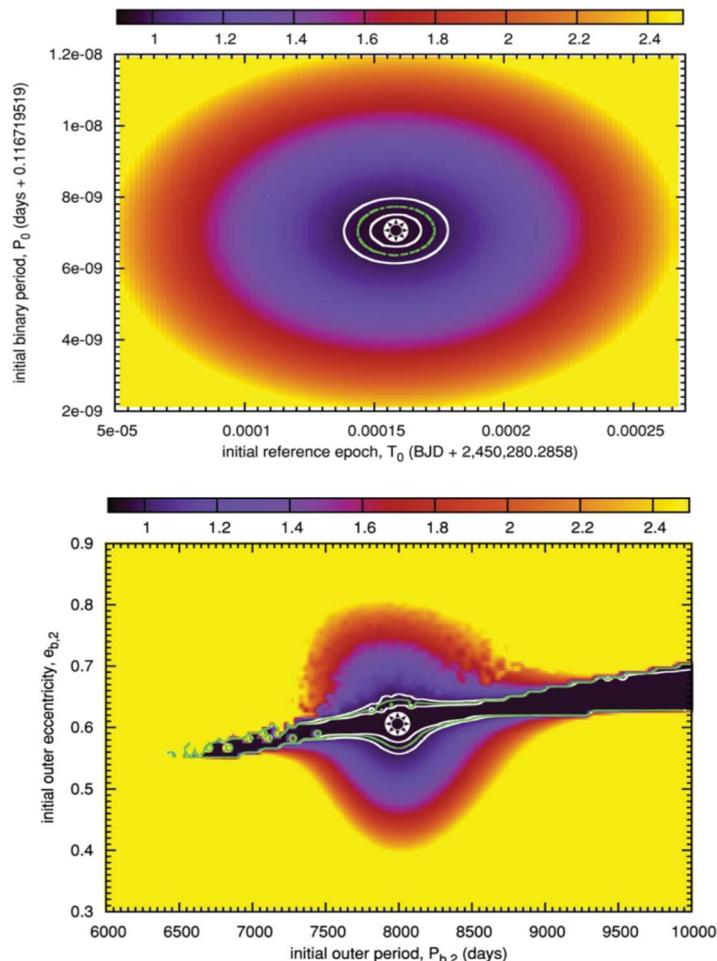


Rys. 2A: Wyniki szczegółowych badań stabilności/czasu życia systemu planetarnego wokół HW Vir w przestrzeni półosi wielkiej i mimośrodu (a, e) wewnętrznego towarzysza. Znak krzyża pośrodku diagramu wskazuje najlepsze dopasowanie (a, e) wraz z zakresem niepewności $\pm 1\sigma$ zgodnie z wynikami Lee i in. (2009a). Czas życia systemu oznaczony jest kolorami – niebieski oznacza bardzo krótki czas życia. Rysunek pochodzi z pracy Horner, Hinse et al. (2012, Rys. 1, **H2**).

Zadaliśmy więc następujące pytanie „*czy można znaleźć taki model LTTE/LTT, który odpowiada stabilnemu systemowi?*”. Lee i in. (2009a) przedstawili wszakże przekonujące argumenty za tym, że obserwowane zmiany okresu są najprawdopodobniej wywołane przez dodatkowe obiekty towarzyszące. Z tego też powodu, w drugiej części pracy **H2**, przeprowadziliśmy wielkoskalowe numeryczne symulacje Monte Carlo służące gruntownemu zbadaniu przestrzeni parametrów w celu znalezienia stabilnych systemów planetarnych. Podstawowa technika modelowania bazuje na metodzie opisanej w pracy Hinse i in. (2012, **H1**). W celu dalszego postępu na tym polu oraz rozważania problemu wiarygodnej oceny niepewności wyznaczenia parametrów, zastosowaliśmy algorytm typu *boot-strap* (Press i in. 1992), który jest powszechnie akceptowany jako metoda określenia niepewności wyznaczenia parametrów modelu, przy założeniu rozkładu normalnego dla błędów danych pomiarowych. W dalszej kolejności, skupiliśmy się na ocenie możliwości występowania korelacji pomiędzy parametrami. Co zaskakujące, poszukiwania nowego modelu zakończyły się znalezieniem zestawu parametrów, różniącego się od tych podanych przez Lee i in. (2009a). W szczególności, co częściowo było wynikiem zastosowania metody *boot-strap*, byliśmy w stanie wykazać, że okres zewnętrznego składnika nie jest ograniczony przez obserwacje. Mogliśmy przekonująco pokazać, że proste zastosowanie periodogramu Lomb-Scargle’a nie dostarcza wystarczającego dowodu na istnienie poszczególnych okresowości w danych chronometrycznych. Wynik ten był następnie niezależnie potwierdzony przez badanie korelacji. Na Rys. 2B przedstawione są korelacje wybranych parametrów dwuplanetarnego modelu LTTE/LTT. Na każdym z paneli przedstawiono poziomy ufności 1 , 2 oraz 3σ dla najlepszego rozwiązania. Dane pomiarowe prowadzą do dobrego, zarówno jakościowego jak i ilościowego ograniczenia na okres układu podwójnego, jak i epokę odniesienia.

Parametry te reprezentują efemerydę liniową układu podwójnego, która jest częścią przyjętego modelu. Jednak okres orbitalny zewnętrznej planety (oraz pól wielkiej, jako konsekwencji trzeciego prawa Keplera), jak również jej mimośród, nie są określone przez dane obserwacyjne. Wynik ten pokazuje, że modele o porównywalnej jakości dopasowania (w zakresie poziomu ufności 1σ), lecz o bardzo różnych własnościach fizycznych, okazują

się być równie prawdopodobnymi konfiguracjami, wyjaśniającymi obserwowane zmiany okresu.



Rys. 2B: Wybrane skany, przedstawiające zależność funkcji χ^2 od parametrów orbitalnych. Najlepszy model oznaczony jest przez symbol gwiazdki. Kontury oznaczają poziomy ufności 1, 2, oraz 3σ względem najlepszego dopasowania. Górny panel: epoka referencyjna vs okres układu podwójnego; Dolny panel: półoś wielka vs mimośród zewnętrznej planety. Rysunek pochodzi z pracy Horner, Hinse i in. (2012, Rys. 5, H2).

Aby pozbyć się omawianej degeneracji, potrzebne by były dane fotometryczne w postaci tranzytów planet (mało prawdopodobne) lub/i dodatkowych danych chronometrażu z przyszłych obserwacji. W trzeciej, i ostatniej, części analizy sprawdziliśmy stabilność nowych, znalezionych przez nas konfiguracji. Jako że powtórna analiza danych dla HW Vir dostarczyła nowych rozwiązań, różniących się od tych podanych przez Lee i in. (2009a), warto sprawdzić czy modele te są lepsze w sensie stabilności orbitalnej. Powtórzyliśmy więc naszą wcześniejszą analizę dla nowych rozwiązań, stosując tę samą metodologię, polegającą

na bezpośrednim całkowaniu równań ruchu w celu wyznaczenia czasu życia systemu jako funkcji parametrów orbitalnych. Podobnie jak w przypadku oryginalnego rozwiązania orbitalnego podanego przez Lee i in. (2009a), bardzo niewiele systemów przeżyło dłużej niż 1000 lat, przy czym tylko 0.029% spośród badanej grupy przeżyło dłużej niż 3000 lat, natomiast jedynie trzy układy przeżyły dłużej niż 10 tysięcy lat. Wydaje się niemal pewne, że proponowane planety wokół HW Vir po prostu nie istnieją – przynajmniej nie na orbitach podanych przez Lee i in. (2009a) lub przez Horner, Hinse i in. (2012, **H2**).

Przedstawione wyniki oraz naświetlone w pracy Horner, Hinse i in. (2012, **H2**) problemy miały swój oddźwięk w literaturze przedmiotu. Do lutego 2019 roku praca ta była cytowana 44 razy. Wśród ostatnich wyników na temat układu HW Vir następujące zasługują na uwagę. Bours i in. (2016) przedstawili nowe pomiary chronometryczne uzyskane jako część długofalowego programu monitorującego. Autorzy przedstawiają argumenty za tym, że najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem obserwowanych zmian okresu HW Vir jest mechanizm Applegate'a z wywołanymi cyklami magnetycznymi składnika wtórnego, powodującymi zmianę orbity układu podwójnego, a w rezultacie zmianę okresu. Powyższe wnioski na temat prawdopodobnych zmian orbitalnych, wywołanych przez mechanizm Applegate'a, zostały wsparte przez wyniki pracy Pullet i in. (2018). Ponadto, autorzy podkreślają jak złożony jest układ podwójny typu HW Vir, gdzie składnik wtórny jest słaby, co utrudnia dokładne scharakteryzowanie systemu. Ponadto, przedstawiono interesujące pomiary pulsującego składnika HW Vir, wykorzystujące fotometrię wysokiej precyzji dostarczoną w ramach misji *Kepler* (Borucki et al. 2010). Autorzy byli w stanie zmierzyć własności pulsacji, dzięki czemu mogli nałożyć dodatkowe więzy na parametry fizyczne pulsującego składnika.

Krytyczne spojrzenie na zaproponowany układ wokół NSVS 14256825 (H3)

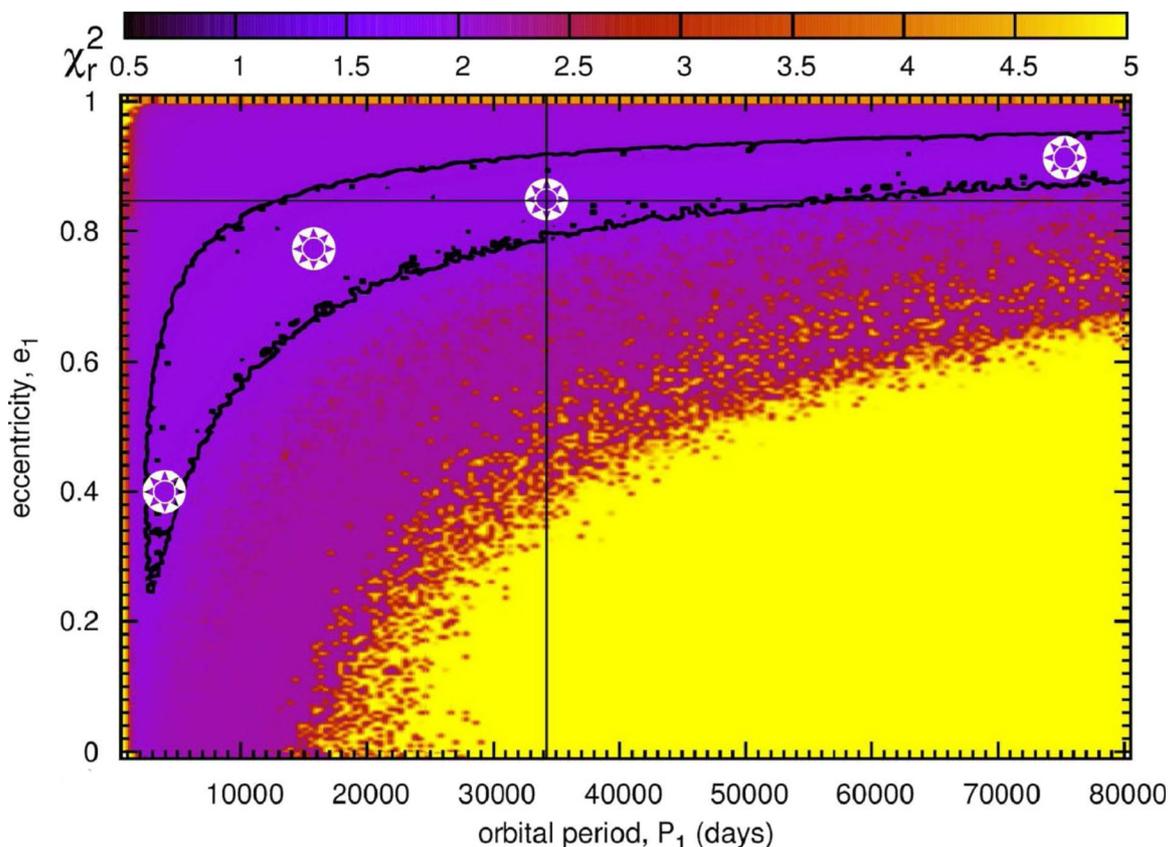
W nawiązaniu do analizy potencjalnego układu planetarnego wokół HW Vir, zwróciliśmy naszą uwagę na podobny przypadek zaproponowanych planet obiegających system podwójny NSVS 14256825 (Hinse i in., 2014, **H3**).

W niedawnej pracy, Almeida i in. (2013) zinterpretowali obserwowane zmiany okresu zaćmień NSVS 14256825, układu podwójnego po fazie wspólnej otoczki (okres orbitalny ~ 0.11 dnia), jako wynik podwójnego efektu LTTE/LTT, powodowanego przez dwa niewidoczne obiekty okołopodwójne. Autorzy wykorzystali do analizy danych chronometrycznych metodę łańcuchów Markova (MCMC, z ang. *Monte-Carlo Markov-Chain*)/bayesowską. Stwierdzono, że zaproponowane obiekty planetarne mają okresy orbitalne ~ 3.5 oraz ~ 6.7 roku, natomiast masy odpowiednio $\sim 3 M_{\text{Jup}}$ oraz $\sim 8 M_{\text{Jup}}$. Niemniej jednak, niedawna praca Wittenmyer i in. (2013) pokazuje, że zaproponowany układ planetarny byłby niestabilny w bardzo krótkim przedziale czasu. Wynik ten zmotywował nas do zainicjowania projektu, mającego na celu krytyczne spojrzenie na rezultaty pracy Almeida i in. (2013) oraz będącego próbą znalezienia takich parametrów modelu, które wyjaśniałyby obserwowane zmiany czasów zaćmień, jak również prowadziły do stabilnej ewolucji układu, co było wyjściową hipotezą roboczą.

Jako podstawę do analizy, przyjęliśmy pomiary opublikowane w pracy Almeida i in. (2013). Przeprowadziliśmy dwie niezależne analizy, bazujące na następujących zestawach danych. Zestaw I: dane przedstawione przez Almeida i in. (2013). Obejmują one okres czasu od 22 czerwca 2007 r. do 13 sierpnia 2012 r., co odpowiada przedziałowi czasu około 5 lat. Zestaw II: dane z zestawu I oraz trzy punkty pomiarowe (czasy zaćmień głównych) z pracy Beuermann i in. (2012b). Drugi zestaw danych rozciąga się od 10 czerwca 1999 r. do 13 sierpnia 2012 r., co daje przedział czasu około 13 lat. Celem rozpatrywania drugiego zestawu danych jest zbadanie wpływu dodatkowych pomiarów na najlepiej pasujące rozwiązanie.

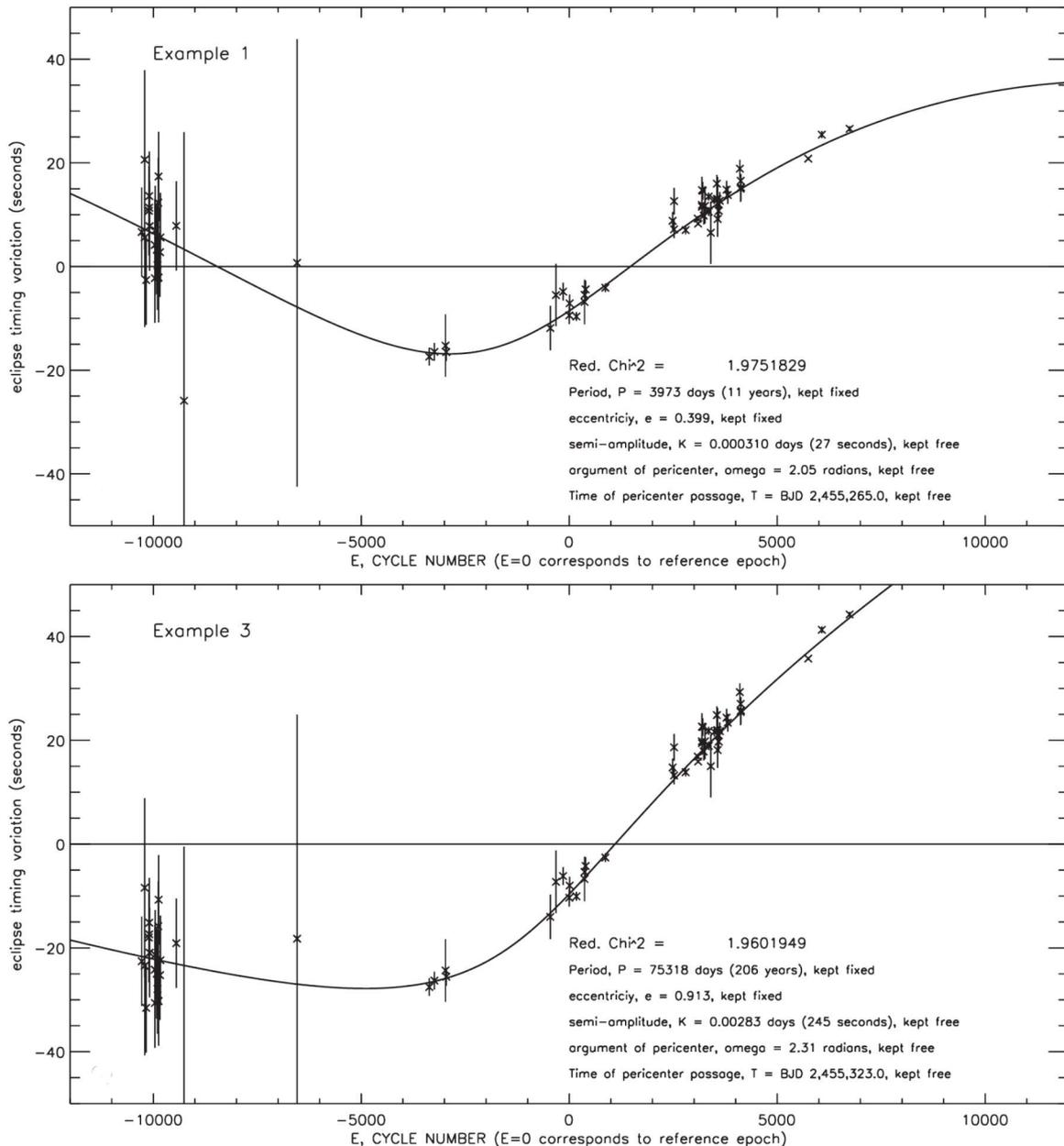
Używamy sformułowania efektu LTTE/LTT, bazującego na współrzędnych Jacobiego, opisanego w pracy Goździewski i in. (2012). W modelu tym traktujemy centralną gwiazdę podwójną jak obiekt pojedynczy o masie równej sumie mas składników. W przypadku jednego towarzysza, opis efektu LTTE/LTT w zmiennych Jacobiego odpowiada sformułowaniu podanemu przez Irwina (1952, 1959). Dla spójności, przetestowaliśmy nasze wyniki uzyskane w ramach używanego przez nas sformułowania modelu LTTE/LTT (we współrzędnych Jacobiego) z procedurą opisaną w pracy (Irwin 1952) i otrzymaliśmy takie same wyniki. Najlepiej pasujący model został znaleziony poprzez obszerne

przeszukiwanie przestrzeni parametrów z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Jako pierwszy wynik, włączenie dodatkowych trzech punktów pomiarowych (Beuermann i in. 2012b) do analizowanego zestawu danych pozwoliło na poprawienie efemerydy podwójnego układu zaćmieniowego.



Rys. 3A: Dwuwymiarowy poziom ufności na płaszczyźnie okresu oraz mimośrodzie wewnętrznego towarzysza, uzyskany poprzez obliczenie wartości χ^2 wokół najlepszego dopasowania (skrzyżowanie dwóch prostych). Czarny kontur oznacza poziom ufności 1σ (z $\Delta\chi^2 = 2.3$, poziom 68.3%). Dodatkowe trzy pary parametrów testowych (oznaczone przez symbole gwiazdki) zostały użyte w dalszych badaniach. Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2014, Rys. 10, **H3**)

W celu wiarygodnego określenia słuszności modelu z dwoma towarzyszami, w pierwszej kolejności rozważyliśmy model z jednym towarzyszem. Analiza okresowości wskazuje na okres orbitalny $P_1 \sim 7$ lat oraz pół-amplitudę $K_1 \sim 0.000231$ dnia. Następnie szukaliśmy najlepszych modeli w wąskim zakresie wokół tych wartości, sprawdzając ponad 500 tysięcy początkowych konfiguracji. Dla najlepszego dopasowania $\chi^2 = 1.98$. Ponownie, starając się poprawnie traktować korelacje pomiędzy parametrami, zbadaliśmy zachowanie funkcji χ^2 w pobliżu najlepszego modelu, konstruując dwuwymiarowe poziomy ufności.



Rys. 3B: Wyniki (fragmenty) obliczeń dla różnych modeli pokazany na Rys. 3A. Wszystkie modele mają wartości χ^2 w zakresie poziomu ufności 1σ , podczas gdy parametry modeli bardzo się od siebie różnią. Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2014, Rys. 11, H3).

Drugim wynikiem jest stwierdzenie, że część parametrów koreluje ze sobą, co jest istotne dla określenia degeneracji parametrów. Pokazaliśmy również, że poziom ufności 1σ w przestrzeni (P_1, e_1) obejmuje szeroki zakres wartości okresu (P_1) oraz mimośrodę (e_1). Następnie policzyliśmy wartości χ^2 na siatce (P_1, e_1) w szerokim przedziale wartości obu parametrów. Wyniki tych obliczeń, przedstawione na Rys. 3A, sugerują, że najlepszy model

znajduje się najprawdopodobniej w lokalnym minimum. W celu ilościowego określenia degeneracji parametrów, przyjrzelśmy się trzem dodatkowym konfiguracjom o jakości dopasowania do obserwacji podobnej jak dla najlepszego modelu, dla którego $\chi^2 = 1.98$. Część wyników, przedstawiona na Rys. 3B, odpowiada konfiguracjom bardzo różniącym się od siebie, będąc dowodem na to, że dane obserwacyjne nie nakładają więzów na parametry modelu. Najbardziej prawdopodobną tego przyczyną jest zbyt krótki ciąg obserwacyjny czasów zaćmień. W konsekwencji, niepewności wyznaczenia parametrów uzyskane czy to z macierzy kowariancji czy też z bezpośredniego podejścia typu *boot-strap* pozbawione są znaczenia w przypadku nieokreślonych parametrów. Należy zatem uważać na ślepe stosowanie metod bayesowskich bazujących na MCMC, jako sposobu na uzyskanie ilościowej informacji o fizycznych właściwościach układów planetarnych, przyjmując, że tak zaawansowane metody automatycznie dostarczają wiarygodnych wyników. Najważniejszy przy wyciąganiu wniosków statystycznych jest dowód obserwacyjny. Jak wykazano w pracy Hinse i in. (2014, **H3**), wyniki artykułu Almeida i in. (2013) są silnie naznaczone przez lokalny charakter znalezionej konfiguracji. Ponadto, analiza sygnału residualnego modelu z jednym towarzyszem pokazuje, że wartość $\text{RMS} \sim 5\text{s}$ (z ang. *root-mean-square*) wokół najlepszego dopasowania jest tego samego rzędu co średnia niepewność pomiarowa obserwacji chronometrycznych. Wiarygodność detekcji drugiego towarzysza, jak proponują Almeida i in. (2013), jest minimalna, co pozwala nam stwierdzić, że model bayesowski drugiej planety, zaproponowany w pracy Almeida i in. (2013), jest najprawdopodobniej wynikiem dopasowania do szumu pomiarowego.

Wyniki przedstawione w pracy Hinse i in. (2014, **H3**) miały pewien wpływ na literaturę przedmiotu. Do lutego 2019 r. praca ta była cytowana 17 razy. Najbardziej znaczące postępy w temacie badanego układu są następujące. Nasiroglu i in. (2017) przedstawili 83 nowe pomiary chronometryczne systemu NSVS 14256825. Autorzy wykryli znaczące kwazi-okresowe zmiany okresu i wyjaśnili, że najprawdopodobniej są one wynikiem efektu LTTE/LTT lub działania mechanizmu Applegate'a w składniku wtórnym w postaci cykli magnetycznych. Posługując się argumentem dotyczącym budżetu energetycznego, druga z tych możliwości może być wykluczona, co pozwoliło autorom zaproponować obecność

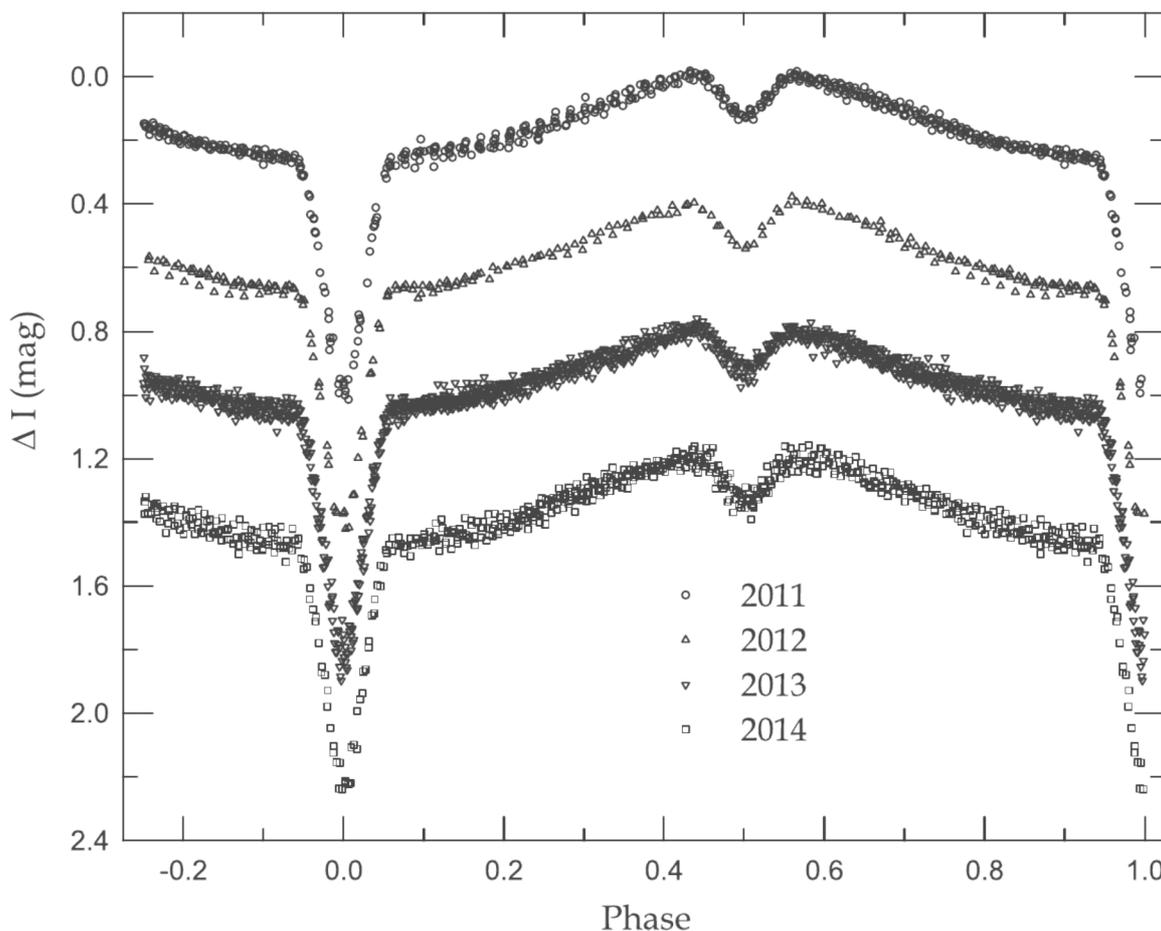
brązowego karła o masie $\sim 15 M_{\text{Jup}}$, obiegającego układ podwójny na orbicie o okresie ~ 10 lat oraz małym mimośrodzie.

Dwie planety wokół układu zaćmieniowego NY Virginis? (H4)

Większość przedstawionych dotychczas wyników bazowała na zebranych z literatury danych fotometrycznych. W celu uzyskania nowych danych chronometrycznych, które posłużyć by mogły do poszukiwania dodatkowych towarzyszy gwiazd podwójnych, zdobyliśmy czas obserwacyjny jako część projektu monitorującego typu *follow-up*. Na liście celów znalazło się wiele gwiazd podwójnych, o których wiadomo, że wykazują znaczące zmiany okresu. Celem naukowym projektu jest dalsza charakterystyka fizycznych własności tych systemów. Układ zaćmieniowy NY Virginis (NY Vir) był częścią długoterminowego programu monitorującego. W pracy Lee, Hinse i in. (2014, **H4**) przedstawiamy wyniki nowych fotometrycznych obserwacji oraz dyskutujemy ich wpływ na możliwość istnienia dwóch planet wokół systemu NY Vir.

W celu zebrania dodatkowych pomiarów czasów zaćmień NY Vir, wykonano obserwacje fotometryczne w ciągu 17 nocy na przestrzeni czasu od stycznia 2011 r. do maja 2014 r. Użyliśmy kamer CCD (zaktualizowanych w tym czasie) oraz filtra *I* systemu *Cousins*, zainstalowanych na 1.0-metrowym reflektorze, znajdującym się w obserwatorium LOAO (*Mt. Lemmon Optical Astronomy Observatory*) w Arizonie w Stanach Zjednoczonych. Instrumenty oraz metody redukcji danych z kamer FLI IMG4301E oraz ARC 4K CCD są takie same jak te opisane w pracy Lee i in. (2009b). W celu uzyskania optymalnego sztucznego źródła porównania podczas obserwacji, monitorowaliśmy kilkadziesiąt gwiazd zobrazowanych na czipie CCD razem z badanym układem zaćmieniowym. Wybrano pięć gwiazd tła, a następnie przy pomocy średniej ważonej, utworzono z nich źródło porównania. Obliczana była różnica jasności pomiędzy badaną gwiazdą a tym źródłem. Używając metody z pracy Kwee i van Woerden (1956), wykonaliśmy łącznie 19 nowych pomiarów zaćmienia głównego. Pomiarów chronometrycznych dla zaćmienia wtórnego zostały odrzucone, z uwagi na zbyt duże niepewności pomiarowe. Ostateczne krzywe jasności względnej dla każdego z sezonów obserwacyjnych zostały przedstawione na Rys. 4A.

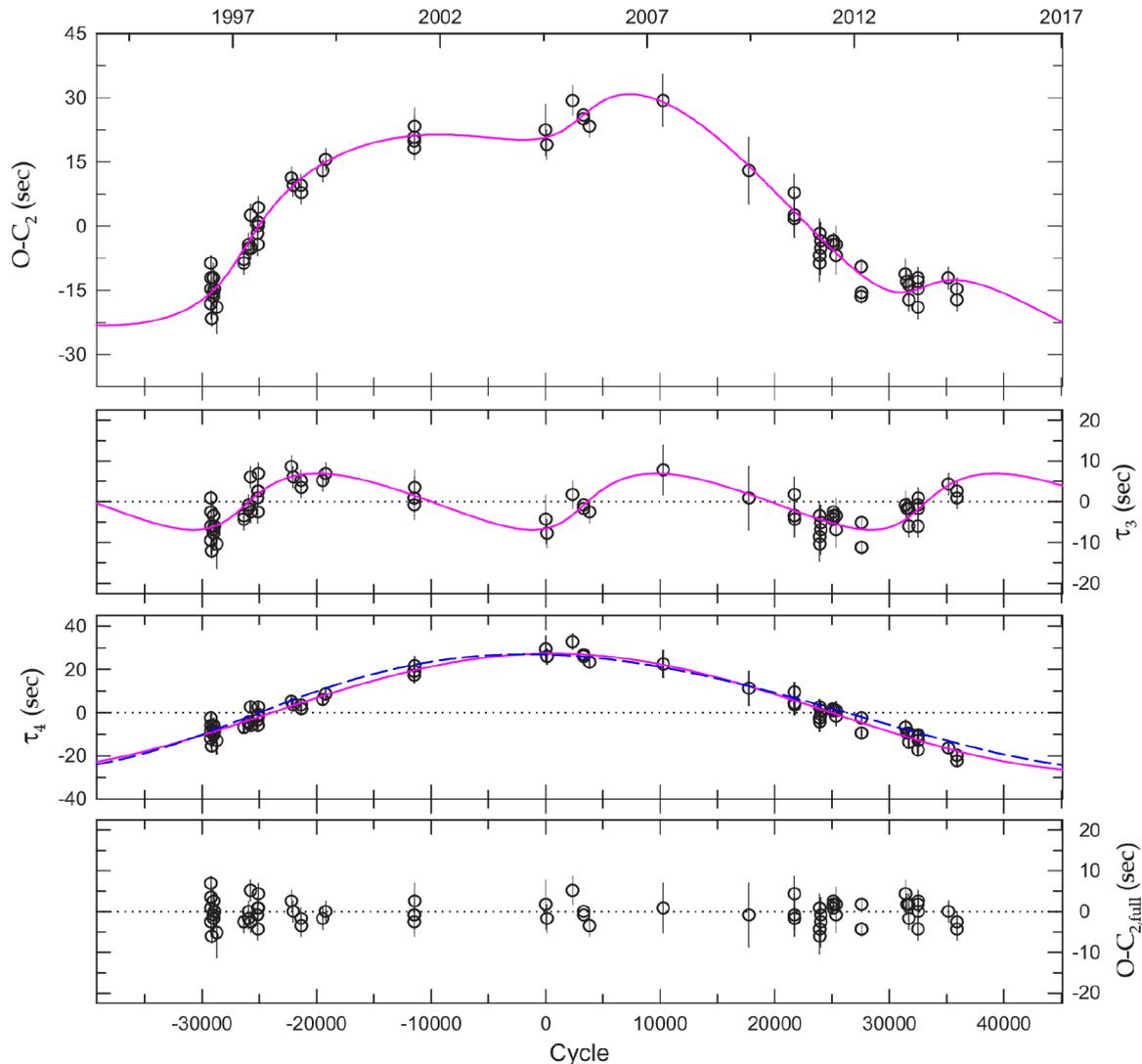
We wcześniejszej pracy, Qian i in. (2012) stwierdzili, że okres orbitalnych zmienia się w sposób, który można opisać przez połączenie skierowanej w dół paraboli ($dP/dt = -3.36 \cdot 10^{-9}$ dni/rok) oraz sinusoidy o okresie ~ 8 lat oraz pół-amplitudzie wynoszącej ~ 6 sekund. Autorzy zasugerowali, że zmiana sinusoidalna może wynikać z efektu LTTE/LTT, wywołanego obecnością planety wokół układu podwójnego o masie minimalnej $\sim 2.3 M_{\text{Jup}}$, natomiast zmiana paraboliczna może być częścią okresowej modulacji, wywołanej obecnością czwartego ciała w systemie.



Rys. 4A: Krzywe blasku (zmiany jasności w filtrze I systemu Cousins w funkcji fazy orbitalnej) układu HW Vir, uzyskane 1.0-metrowym reflektorem LOAO na przestrzeni czterech lat. Do analizy danych chronometryczowych wykorzystano jedynie zaćmienia główne (faza = 0.0). Rysunek pochodzi z pracy Lee, Hinse i in. (2014, Rys. 1, H4).

W pierwszym kroku, dopasowaliśmy metodą najmniejszych kwadratów model paraboliczny do pomiarów czasów zaćmień głównych. Jednakże, uzyskana w ten sposób efemeryda kwadratowa nie opisywała danych wystarczająco dobrze, a residua $O - C$ wykazywały

oscylacje o pół-amplitudzie ~ 0.0001 dnia (~ 8 sekund). Oznacza to, że zmiana okresu może być wyjaśniona jako kombinacja jego wiekowego skracania oraz oscylacji zachodzących w krótkich skalach czasu, co przedstawiono na Rys. 4B.



Rys. 4B: Zmiana okresu układu HW Vir. Górny panel: najlepszy model podwójnego efektu LTT dopasowany do pomiarów czasów zaćmień. Dwa środkowe panele, od górnego do dolnego: indywidualne sygnały LTT odpowiednio dla wewnętrznego oraz zewnętrznego towarzysza. Dolny panel: ostateczne residua po usunięciu dwu-składnikowego modelu, o wartości RMS ~ 3 sekund. Rysunek pochodzi z pracy Lee, Hinse i in. (2014, Rys. 3, **H4**).

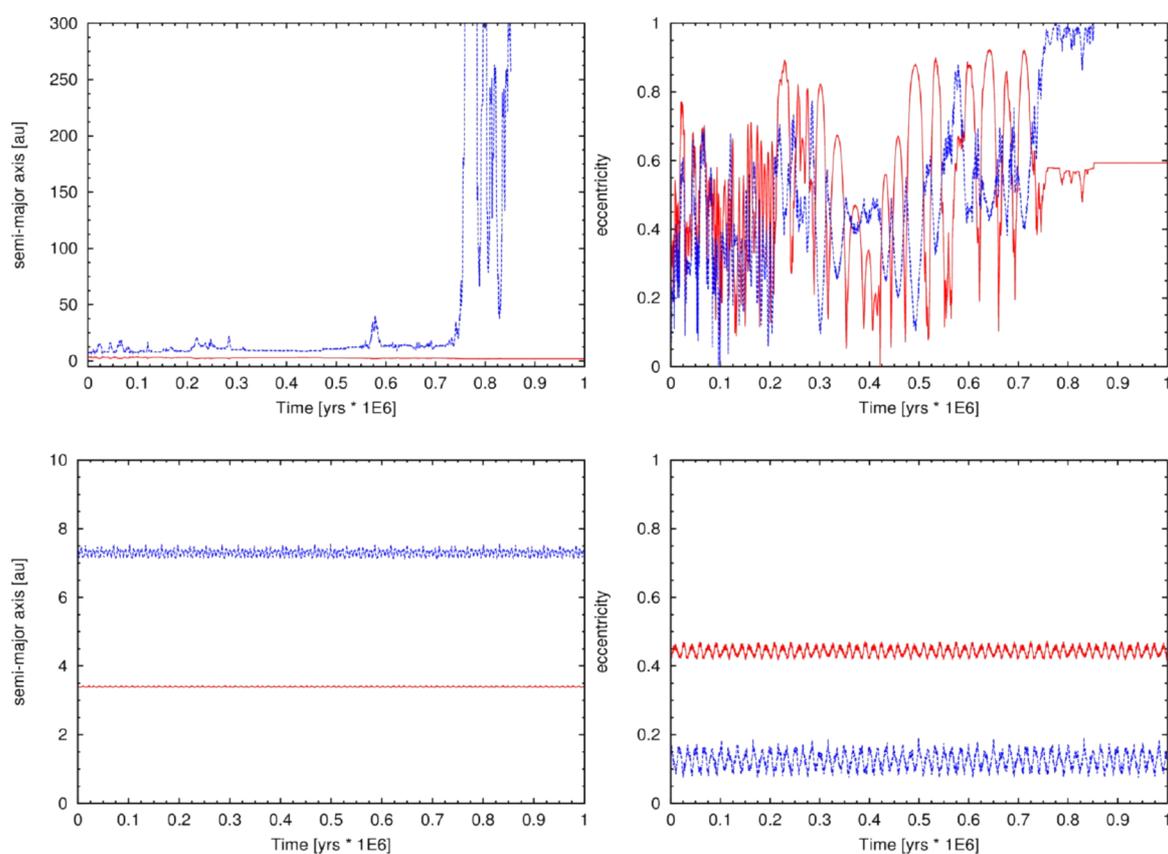
W celu sprawdzenia czy towarzysz gwiazdy podwójnej może być przyczyną okresowych zmian sygnału chronometrycznego, zastosowaliśmy model LTTE/LTT (Irwin 1952) w procedurze minimalizacji Levenberga-Marquardta, wyznaczając efemerydę oraz parametry orbitalne. Podejście to różniło się od zwykłego modelu sinusoidalnego z pracy

Qian i in. (2012). Następnie, wykonując eksperyment *boot-strap Monte Carlo*, określiliśmy niepewności wyznaczenia parametrów. Aby to zrobić, wygenerowaliśmy 50 tys. zestawów danych syntetycznych oraz użyliśmy najlepszego modelu jako startowego w procesie modelowania każdego z zestawów.

Zgodnie z analizą spektroskopową oraz fotometryczną zaprezentowaną w pracy Kilkenny (1998), paraboliczny charakter zmian okresu nie może być wyjaśniony przez przepływ masy pomiędzy składnikami gwiazdy podwójnej, ponieważ układ ten jest dobrze rozdzielony, a obie gwiazdy mają kształt zbliżony do sfery. Zatem, wiekowe skracanie okresu w tempie $-3.36 \cdot 10^{-9}$ dnia/rok może być zinterpretowane jako utrata momentu pędu (AML, z ang. *angular momentum loss*), odpowiadająca $dJ/dt = -1.38 \cdot 10^{35}$ (w jednostkach cgs). Możliwymi mechanizmami wyjaśniającymi AML są promieniowanie grawitacyjne oraz/lub hamowanie magnetyczne poprzez wiatr gwiazdowy chłodnego składnika wtórnego. Obliczyliśmy tempo utraty momentu pędu dla każdego z mechanizmów w ten sam sposób jak dla HW Vir (Lee i in. 2009a). Dla promieniowania grawitacyjnego teoretyczne tempo AML wynosi $-1.01 \cdot 10^{33}$ (cgs), tj. o dwa rzędy wielkości mniejsze niż obserwowane, podczas gdy dla drugiego z mechanizmów jest to $-2.07 \cdot 10^{35}$ (cgs). Wyniki powyższe wskazują, że prawdopodobnym mechanizmem powodującym wiekowe skracanie okresu orbitalnego NY Vir jest utrata momentu pędu na skutek wiatru gwiazdowego. Jednakże, zmiany wiekowe mogą być wyjaśnione przez inny mechanizm. Możliwe jest, że zmiany o charakterze parabolicznym są częścią drugiego sygnału LTTE/LTT, wynikającego z istnienia dalszego obiektu wokół gwiazdy podwójnej. Zgodnie z tą hipotezą, dane chronometryczne modelowane były przy użyciu modelu z dwoma składnikami LTTE/LTT. Wyniki wskazują na dwa ciała towarzyszące o masach $\sim 2.8 M_{Jup}$ oraz $\sim 4.5 M_{Jup}$ oraz okresach orbitalnych odpowiednio ~ 8 oraz ~ 27 lat.

W świetle wcześniejszych doniesień o możliwych towarzyszach układu zaćmieniowego, przeprowadziliśmy testy, mające na celu sprawdzenie czy uzyskane planety ewoluują w sposób stabilny w długim przedziale czasu. Zbadaliśmy zatem stabilność najlepszego modelu orbitalnego systemu NY Vir. Z uwagi na względnie wysokie wartości mimośrodków, zastosowaliśmy zmiennokrokowy algorytm interpolacyjny zaimplementowany w pakiecie

MERCURY (Chambers 1999). Przeprowadziliśmy kilka grup całkowań dla różnych warunków początkowych zgodnych z najlepszym modelem. Całkowity czas całkowania wynosił 10^6 lat. Z uwagi na niepewność wyznaczenia czasu przejścia przez perycentrum, wybieraliśmy różne początkowe wartości długości średnich dla obu planet. Ponadto, jako że znamy jedynie masy minimalne planet, rozważaliśmy różne wartości nachyleń orbit, skalując odpowiednio masy planet. W większości przypadków stwierdziliśmy, że system ewoluuje bardzo niestabilnie. Niestabilność skutkuje bądź to wyrzuceniem jednego z ciał, bądź też zderzeniem się planet ze sobą.



Rys. 4C: Ewolucja półosi wielkiej (lewe panele) oraz mimośrodów (prawe panele) w czasie dla proponowanego systemu dwóch planet (kolor czerwony: planeta wewnętrzna; niebieski: zewnętrzna) w przedziale czasu 1 miliona lat. Górne panele: ewolucja chaotyczna, niestabilna. Dolne panele: dynamika kwazi-okresowa, stabilna. Rysunek pochodzi z pracy Lee, Hinse i in. (2014, Rys. 4, H4).

Na górnych panelach Rys. 4C przedstawiamy ewolucję półosi wielkiej oraz mimośrodu obu towarzyszy. Jako przykład, pokazujemy wyrzut zewnętrznej planety z systemu po czasie 850 tys. lat. W celu bardziej szczegółowego poznania dynamiki układu dwóch planet, zbadaliśmy przestrzeń fazową zewnętrznego towarzysza w okolicy najlepszego rozwiązania.

Obliczaliśmy czas życia układu, jak również indeks MEGNO⁸ (Goździewski i in. 2001), w celu rozróżnienia obszarów ruchu chaotycznego od kwazi-okresowego. Wyniki potwierdzają wcześniejsze stwierdzenie, że najlepszy model dwuplanetarny znajduje się w obszarze ruchu chaotycznego. Jednakże, symulacje wykazały również istnienie pobliskich „wysp” odpowiadających ewolucji kwazi-okresowej. Rozważając minimalne wartości mimośrodków w zakresie niepewności 1σ , znaleźliśmy konfiguracje stabilne w przedziale czasu równym 1 milionowi lat.

Przedstawione powyżej wyniki mają wpływ na rozwój wiedzy na temat zmian okresu układu NY Vir. Do lutego 2019 roku praca Lee, Hinse i in. (2014, **H4**) cytowana była 20 razy. Główny postęp w tym temacie jest następujący. Baştürk i Esmer (2018) przedstawili nowe pomiary fotometryczne NY Vir, rozszerzając bazę czasową o trzy lata. Co interesujące, autorzy wskazali również na możliwość systematycznych błędów w pomiarach chronometrycznych, wynikających z pulsacji gorętszego składnika. Obecnie, wpływ pulsacji na czasy minimów zaćmień nie jest zbadany w szczególności. Z drugiej strony, pulsacje mogłyby posłużyć do wyciągnięcia wniosków na temat istnienia masywnych towarzyszy (Silvotti i in. 2007). Ponadto, w niedawnej pracy, Song i in. (2018) przedstawili dodatkowe dane fotometryczne NY Vir. Jakkolwiek ich wnioski na temat natury zmian okresu nie są przesądzające, dyskutują oni pewne aspekty technik modelowania danych, które zostały pominięte we wcześniejszych pracach.

Przewidywanie trzeciej planety wokół układu Kepler-47 (H5)

Ostatnie obserwacje fotometryczne z kosmicznego teleskopu *Keplera* (Borucki i in. 2010) dostarczają silnych dowodów za powstawaniem planet wokół układów podwójnych gwiazd. W ostatnich kilku latach odkryto kilka układów z jedną planetą (Doyle i in. 2011, Orosz i in. 2012b, Welsh i in. 2012, Kostov i in. 2013; 2014 oraz Welsh i in. 2015), używając głównie metody tranzytów. W niektórych przypadkach masa oraz elementy orbitalne planety są takie, że grawitacyjne zaburzenie orbity układu podwójnego powoduje mierzalne zmiany okresu gwiazdy podwójnej.

8 Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits

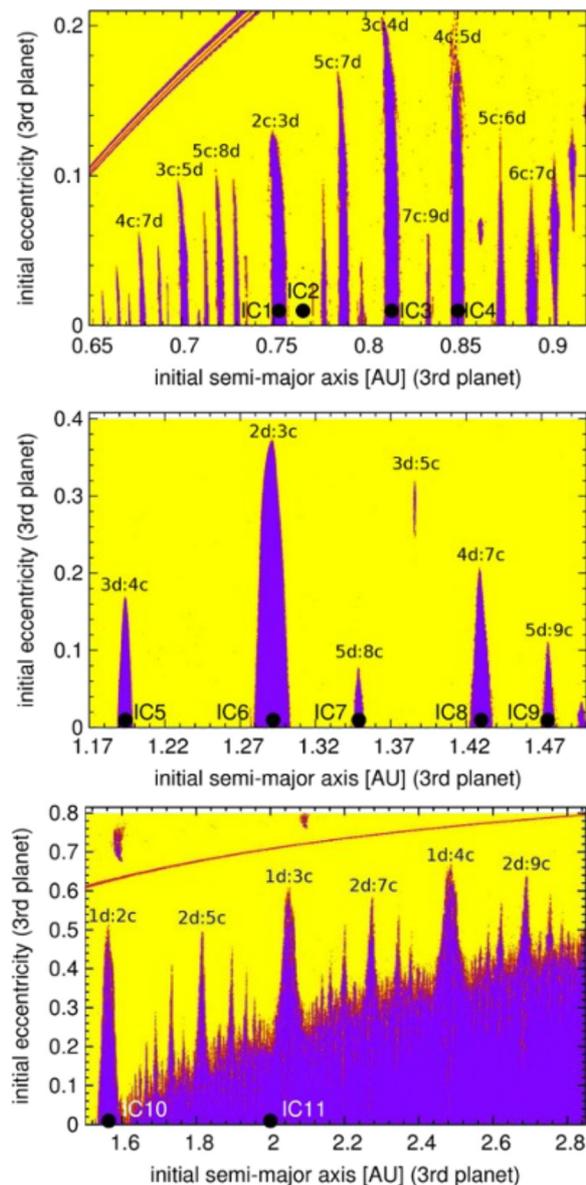
Jednym w najciekawszych wyników misji *Kepler* było odkrycie układu dwóch planet (Kepler-47b oraz Kepler-47c) tranzytujących wokół gwiazdy podwójnej Kepler-47. Fakt istnienia dwóch planet wokół tej gwiazdy jest silnym dowodem na możliwość powstawania planet okołopodwójnych. W pracy donoszącej o odkryciu dwóch planet (Orosz i in. 2012a) w układzie Kepler-47, postulowano również istnienie trzeciej planety, jako wyjaśnienie dla przypominającego tranzyt spadku jasności w krzywej blasku gwiazdy podwójnej (w epoce BJD = 2455977.363 podczas koniunkcji głównego składnika). Najistotniejszy odkryty przypadek tego typu, pojedynczy tranzyt o głębokości 0.2%, nie mógł być wyjaśniony przez dwuplanetarny model fotodynamiczny.

W pracy Hinse i in. (2015, **H5**) testujemy hipotezę trzeciej planety i przewidujemy, gdzie planeta ta mogłaby się potencjalnie znajdować. Nasze podejście polega na zbadaniu dynamiki globalnej układu pięciu ciał (dwóch gwiazd oraz trzech planet), w celu zidentyfikowania obszarów stabilnego ruchu dla trzeciej planety o masie w realistycznym zakresie. Względnie wysoka wartość mimośrodowość oskulacyjnego (~ 0.4) planety Kepler-47c, wskazuje, że przestrzeń fazowa tego układu może odpowiadać bardzo złożonej dynamice.

Gwiazda Kepler-47 jest spektroskopowym układem podwójnym z jednym składnikiem widocznym w widmie, składającym się ze składnika głównego o masie $\sim 1.0 M_{\text{Sun}}$ oraz składnika wtórnego o masie $\sim 0.4 M_{\text{Sun}}$ oraz o okresie 7.5 dni. Planeta wewnętrzna, Kepler-47b, ma okres 50 dni oraz promień $\sim 3 R_{\oplus}$. Orosz i in. (2012a) oszacowali masę tej planety na 7 - 10 M_{\oplus} . Planeta zewnętrzna, Kepler-47c, ma okres orbitalny ~ 303 dni oraz promień $\sim 4.6 R_{\oplus}$. Autorzy oszacowali jej masę na 16 - 23 M_{\oplus} . Czas trwania dodatkowego, niewyjaśnionego tranzytu to ~ 4.15 godziny. W pracy donoszącej o odkryciu, Orosz i in. (2012a) sugerują, że tranzyt ten spowodowany jest przez trzecią planetę, a biorąc pod uwagę jego głębokość 0.2%, planeta musiałaby mieć opromień ~ 4.5 promienia Ziemi.

Nasze badania numeryczne polegały zarówno na całkowaniach pojedynczych warunków początkowych, jak i zastosowaniu techniki MEGNO (Goździewski i in. 2001). Obliczenia numeryczne wykonano z wykorzystaniem zasobów dedykowanych super-komputerów. Naszą analizę rozpoczęliśmy od dodania trzeciej hipotetycznej planety do modelu oraz obliczenia

indeksu MEGNO na siatce półosi wielkiej oraz mimośrodów tej planety, podczas gdy jako elementy orbitalne znanych planet przyjęto wartości najlepszego modelu. W symulacjach przyjęto zarówno zerową, jak i niezerową masę trzeciej planety, przy czym w tym drugim przypadku użyto empirycznej zależności pomiędzy masą a promieniem (Kane i Gelino, 2012) oraz wartości promienia odpowiadającej obserwowanej głębokości tranzytu.

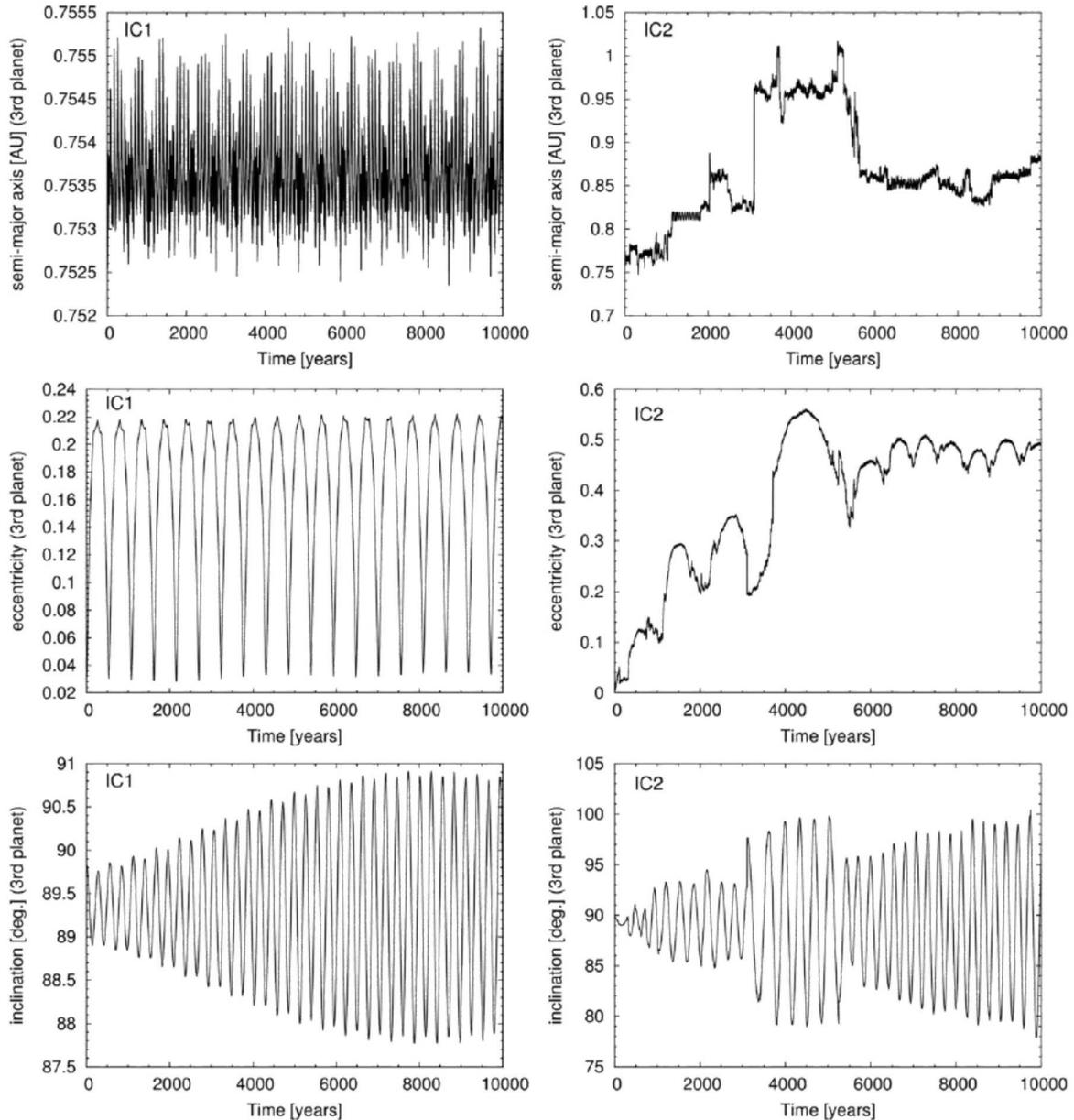


Rys. 5A: Mapy dynamiczne MEGNO trzeciej hipotetycznej planety w układzie gwiazdy podwójnej Kepler-47. Kolor żółty oznacza dynamikę chaotyczną, podczas gdy niebieski ewolucję kwazi-okresową. Wskazane są położenia rezonansów ruchów średnich. Czarne punkty oznaczają warunki początkowe (IC1 – IC11), które zostały użyte do szczegółowej analizy opisanej w pracy Hinse i in. (2015, **H5**). Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2015, Rys. 2, **H5**).

Przyjęto jako realistyczne założenie, że orbity wszystkich planet leżą w jednej płaszczyźnie. Pierwsze wyniki pokazane są na Rys. 5A. Znaleźliśmy trzy obszary (słabo zależące od przyjętej masy trzeciej planety), w których hipotetyczna trzecia planeta może znajdować się na kwazi-okresowej orbicie: *i*) obszar w pobliżu planety Kepler-47b, *ii*) obszar pomiędzy dwiema znanymi planetami oraz *iii*) obszar na zewnątrz planety Kepler-47c. Drugi z tych obszarów charakteryzuje się obecnością rezonansów ruchów średnich pomiędzy zewnętrzną planetą c oraz hipotetyczną planetą d. Kwazi-okresowy charakter orbit wskazuje na obszary stabilności. Małe mimośrodowo trzeciej planety opisują najbardziej korzystne konfiguracje, dla których ewolucja jest stabilna. W celu poznania ewolucji poszczególnych konfiguracji trójplanetarnych w długich przedziałach czasu wykonano całkowania dla tych orbit w ramach modelu pięciu ciał. Pokazujemy różnicę pomiędzy ewolucją warunków początkowych, których trzecia planeta znajduje się na kwazi-okresowej orbicie z konfiguracjami odpowiadającymi orbitom chaotycznym. Przykładowo, na Rys. 5A pokazany jest rezonans ruchów średnich 2c:3d pomiędzy hipotetyczną planetą oraz zewnętrznym towarzyszem, który odpowiada stabilnej konfiguracji. Porównana zostaje ewolucja w długim przedziale czasu testowego warunku początkowego (IC1) z ewolucją dla pobliskiej konfiguracji w obszarze dynamiki chaotycznej (IC2). Wyniki całkowania tych systemów pokazane są na Rys. 5B, gdzie przedstawione są zmiany w czasie półosi wielkiej, mimośrodu oraz nachylenia orbity trzeciej planety. Pokazany jest tutaj kwazi-okresowy charakter rezonansu 2c:3d. Całkowania na długie okresy czasu (10 milionów lat) wykonywane były również dla kilku innych konfiguracji.

W celu ograniczenia potencjalnych lokalizacji hipotetycznej planety, wykorzystaliśmy zmierzony czas trwania tranzytu. Czas ten silnie zależy od rozmiaru orbity. Obliczyliśmy zatem zmiany czasu trwania tranzytu (TDV, od ang. *transit duration variation*) oraz zmiany czasów tranzytu (TTV, od ang. *transit timing variation*) wywołane przez trzecią planetę, dla konfiguracji charakteryzujących się stabilną ewolucją. Zaprogramowaliśmy algorytm wyznaczający numerycznie czasy tranzytów oraz długość ich trwania z bezpośrednich całkowań równań ruchu. Podczas poszczególnych kroków całkowania, monitorujemy rzut odległości planety od głównego składnika na płaszczyznę obserwacji (r_{sky}). Momenty

początku (t_1) oraz końca (t_2) tranzytu obliczane są w procesie iteracyjnym, kiedy $|r_{\text{sky}} - (R_A + R_{\text{pl}})| < 10^{-15}$.



Rys. 5B: Ewolucja w czasie elementów orbitalnych hipotetycznej planety dla dwóch różnych warunków początkowych IC1 (po lewej) oraz IC2 (po prawej). Są to przykłady kwazi-okresowej oraz chaotycznej ewolucji. Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2015, Rys. 3, H5).

Moment czasu odpowiadający środkowi tranzytu obliczany jest wtedy z formuły $t_1 + (t_2 - t_1)/2$. Następnie wykorzystując regresję liniową obliczane są zmiany w czasach tranzytu. Czas trwania tranzytu równy jest $(t_2 - t_1)$. Obliczyliśmy czas trwania tranzytów trzeciej planety dla

różnych kwazi-okresowych orbit, a następnie porównaliśmy uzyskane wyniki z wartością obserwowaną (~4.15 godziny). Z powodu wzajemnych oddziaływań pomiędzy planetami, czas trwania tranzytów trzeciej planety będzie się zmieniał. Znaleźliśmy kilka cykli tranzytów, dla których czas trwania tranzytów trzeciej planety jest porównywalny z obserwowaną wartością (~4.15 godziny). Przykładowo, całkowanie warunku początkowego IC1 prowadzi do długości trwania jednego z tranzytów wynoszącej 4.16 godziny.

Podsumowując, byliśmy w stanie wskazać obszary, dla których, po dodaniu trzeciej masywnej planety, ewolucja układu pięciu ciał jest stabilna. Wykorzystaliśmy informację o obserwowanej długości trwania tranzytu hipotetycznej planety, w celu nałożenia ograniczeń na jej możliwe parametry orbitalne. Ostatnie postępy w tym temacie: W niedawnej pracy, Orosz i in. (2019) przedstawili wyniki powtórnej analizy wszystkich danych fotometrycznych Kepler-47 pochodzących z satelity *Kepler* oraz ogłosili odkrycie trzeciej planety pomiędzy orbitami dwóch znanych wcześniej towarzyszy. Z powodu korelacji pomiędzy parametrami, obecny najlepiej pasujący model z trzema planetami odpowiada prawie kołowym orbitom, co jest zgodne z mimośrodami w układach planetarnych wokół gwiazd pojedynczych. Wyniki te wskazują, że niektóre aspekty mechanizmów powstawania oraz migracji planet są podobne w systemach planet wokół gwiazd pojedynczych oraz wielokrotnych.

Podsumowanie

Pięć opisanych tutaj artykułów (**H1 – H5**), które są częścią dłuższej listy prac (opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora), dotyczy wielociałowej dynamiki układów gwiazd podwójnych oraz technik modelowania danych obserwacyjnych. W szczególności, moja uwaga była skupiona na okołopodwójnych pozasłonecznych układach planetarnych, które w ostatnim czasie stały się obiektem zainteresowania, z uwagi na odkrycia planet wokół gwiazd podwójnych przez teleskop *Keplera*. Większość planet w systemach wokół krótkookresowych układów zaćmieniowych odkryta została dzięki obserwacjom naziemnym. Krótco po starcie tego projektu, zauważyłem, że ten obszar badawczy naznaczony jest poważnymi problemami związanymi ze stabilnością orbitalną oraz z wnioskami płynącymi z analizy danych. Wyniki przedstawione w pracach (**H1 – H4**) krytycznie odnoszą się

do skrótów w metodologii oraz używanych technikach analizy danych w obszarze okołopodwójnych układów planetarnych. W każdej z tych prac prezentowałem bardziej rygorystyczne oraz krytyczne podejście do danych obserwacyjnych, chcąc wprowadzić nowe pomysły oraz zachęcić do zmiany, często niestarannych, praktyk analizy danych spotykanych uprzednio w literaturze. Zbyt często przedwcześnie ogłaszane są odkrycie, bazujące na względnie słabej analizie danych oraz związanej z nią dyskusji na temat ograniczeń stosowanych metod. Najciekawszym wynikiem niniejszego projektu jest teoretyczne przewidzenie obecności trzeciej planety w układzie Kepler-47. Wynik ten przedstawiony został w pracy **H5**. Praca donosząca o odkryciu dodatkowej planety, Kepler-47d, jest obecnie na etapie recenzji. W artykule tym, którego jestem współautorem, wykonałem obliczenia dotyczące dynamiki globalnej. Artykuły przedstawione w autoreferacie zostały wybrane, aby odzwierciedlić mój wkład naukowy do tego nowego obszaru badawczego w ciągu minionych ośmiu lat. Przeglądając ostatnie wyniki na ten temat w literaturze, zauważyłem zmianę w jakości badań oraz zwrócenie większej uwagi na dokładność i rygor naukowy. Liczba cytowań każdej z prac **H1** – **H5** wskazuje na znaczenie tych badań dla społeczności astronomicznej/astrofizycznej. Na końcu, deklaruje, że przedstawione tutaj badania zostały wykonane zgodnie z moimi najlepszymi umiejętnościami oraz wiedzą.

Literatura

- Almeida, L. A., Jablonski, F., Rodrigues, C. V., 2013, ApJ, 766, 11
Applegate, J. H., 1992, ApJ, 385, 621
Baran, A. S., Østensen, R. H., Telting, J. H., et al., 2018, MNRAS, 481, 2721
Baştürk, Ö., Esmer, E. M., 2018, OAst, 27, 14
Beuermann, K., Buhmann, J., Diese, J., Dreizler, S., et al., 2011, A&A, 526, 53
Beuermann, K., Dreizler, S., Hessman, F. V., Deller, J., 2012a, A&A, 543, 138
Beuermann, K., Breitenstein, P., Debski, B., et al., 2012b, A&A, 540, 8
Bevington P. R., Robinson K. D., 1992, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 2nd edn. McGraw-Hill, New York
Bond, I. A., Udalski, A., Jaroszyński, M., Rattenbury, N. J., et al., 2004, ApJ, 606, 155
Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., et al., 2010, Science, 327, 977

- Bours, M. C. P., Marsh, T. R., Parsons, S. G., et al., 2016, MNRAS, 460, 3873
- Chambers J. E., 1999, MNRAS, 304, 793
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M., 2000, ApJ, 529, 45
- Deeg, H. J., Doyle, L. R., Kozhevnikov, V. P., Blue, J. E., et al., 2000, A&A, 358, 5
- Deeg, H. J., Ocaña, B., Kozhevnikov, V. P., et al., 2008, A&A, 480, 563
- Doyle, L. R., Carter, J. A., Fabrycky, D. C., et al., 2011, Science, 333, 1602
- Duquennoy, A., Mayor, M., 1991, A&A 248, 485
- Goździewski, K., Bois, E., Maciejewski, A. J., et al., 2001, A&A, 378, 569
- Goździewski, K., Konacki M., Maciejewski, A. J., 2005, ApJ, 622, 1136
- Goździewski, K., Nasiroglu, I., Słowikowska, A., et al., 2012, MNRAS, 425, 930
- Goździewski, K., Nasiroglu, I., Słowikowska, A., et al., 2012, MNRAS, 425, 930
- Goździewski, K., Słowikowska, A., Dimitrov, D., et al., 2015, MNRAS, 448, 1118
- Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S., 2000, ApJ, 529, 41
- Hinse, T. C.**, Lee, J. W., Goździewski, K., et al., 2012, MNRAS, 420, 3609, **H1**
- Hinse, T. C.**, Lee, J. W., Goździewski, K., et al., 2014, MNRAS, 438, 307, **H3**
- Hinse, T. C.**, Haghighipour, N., Kostov, V. B., et al., 2015, ApJ, 799, 88, **H5**
- Horner, J., Marshall, J. P., Wittenmyer, R. A., Tinney, C. G., 2011, MNRAS, 416, 11
- Horner, J., **Hinse, T. C.**, Wittenmyer, R. A., et al., 2012, MNRAS, 427, 2812, **H2**
- Horner, J., Wittenmyer, R. A., **Hinse, T. C.**, et al., 2012, MNRAS, 425, 749
- Horner, J., Wittenmyer, R. A., **Hinse, T. C.**, et al., 2013, MNRAS, 435, 2033
- Hughes, I., & Hase, T., 2010, *Measurements and their Uncertainties*, Oxford University Press, UK
- Irwin, J. B., 1952, ApJ, 116, 211
- Irwin, J. B., 1959, AJ, 64, 149
- Kane, S. R. & Gelino, D. M., 2012, PASP, 124, 323
- Kilkenny, D., O'Donoghue, D., Koen, et al., 1998, MNRAS, 296, 329
- Konacki, M., Sybilski, P., Kozłowski, S. K., et al., 2012, IAUS, 282, 111
- Kostov, V. B., McCullough, P. R., **Hinse, T. C.**, et al. 2013, ApJ, 770, 52
- Kostov, V. B., McCullough, P. R., Carter, J. A., et al. 2014, ApJ, 784, 14
- Kwee, K. K., van Woerden, H., 1956, Bull. Astron. Inst. Neth., 12, 327
- Lanza, A. F., Rodono, M., Rosner, R., 1998, MNRAS, 296, 893

- Lee J. W., Kim S.-L., Kim C.-H., Koch R. H., Lee C.-U., Kim H.-I., Parks J.-H., 2009a, AJ, 137, 3181
- Lee, J. W., **Hinse, T. C.**, Youn, J.-H., Han, W., 2014, MNRAS, 445, 2331, **H4**
- Lenz P., Breger M., 2005, Commun. Asteroseismol., 146, 53
- Markwardt C. B., 2009, in Bohlender D. A., Durand D., Dowler P., eds, ASP Conf. Ser. Vol. 411, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII. Atron. Soc. Pac, San Francisco, p. 251
- Mayor, M., Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
- Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W., 2009, A&A, 2009, 501, 1139
- Morales, J. C., Ribas, I., Jordi, C., et al., 2009, ApJ, 691, 1400
- Murray, C. D., Dermott, S. F., 2000, *Solar System Dynamics*, Cambridge University Press, UK
- Nasiroglu, I., Goździewski, K., Słowikowska, A., et al., 2017, AJ, 153, 137
- Orosz, J. A., Welsh, W. F., Carter, J. A., et al., 2012a, Science, 337, 1511
- Orosz, J. A., Welsh, W. F., Carter, J. A., et al. 2012b, ApJ, 758, 87
- Orosz, J. A., Welsh, W. F., Haghighipour, N., et al. (including **Hinse, T. C.**), 2019, ApJ, in review.
- Pierens, A., Nelson, R. P., 2008, A&A, 483, 633
- Press, W. H., Saul, A. T., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing*, 2nd ed. Cambridge University Press, UK
- Pribulla, T., Vaňko, M., Ammler-von Eiff, M., et al., 2012, AN, 333, 754
- Pribulla, T., Rucinski, S. M., 2006, AJ, 131, 2986
- Pulley, D., Faillace, G., Smith, D., et al., 2018, A&A, 611, 48
- Qian, S.-B., Liao, W.-P., Zhu, L.-Y., Dai, Z.-B., 2010, ApJ, 708, 66
- Qian, S.-B., Liu, L., Liao, W.-P., Li, L.-J., et al., 2011, MNRAS, 414, 16
- Qian, S.-B., Zhu, L.-Y., Dai, Z.-B., et al., 2012, ApJ, 745, 23
- Ribas, I., 2006, in: C. Sterken, C. Aerts (eds.), *Astrophysics of variable stars*, ASPC, 349, 55
- Schwarz, R., Schwöpe, A. D., Vogel, J., et al., 2009, A&A, 496, 833
- Schwöpe, A. D., Schwarz, R., Sirk, M., Howell, S. B., 2001, A&A, 375, 419
- Schwöpe, A. D., Hambaryan, V., Schwarz, R., Kanbach, G., et al., 2002, A&A, 392, 541
- Silvotti, R., Schuh, S., Janulis, R., Solheim, J.-E., et al., 2007, Nature, 449, 189

- Silvotti, R., Schuh, S., Kim, S.-L., Lutz, R., Reed, M., et al., 2018, *A&A*, 611, 85
- Song, S., Mai, X., Mutel, R. L., et al., 2018, <https://arxiv.org/pdf/1812.01726.pdf>
- Udalski, A., Szymanski, M., Kaluzny, J., et al., 1995, *AcA*, 45, 1
- Vos, J., Østensen, R. H., Marchant, P., Van Winckel, H., 2015, *A&A*, 579, 49
- Völschow, M., Schleicher, D. R. G., Perdelwitz, V., Banerjee, R., 2016, *A&A*, 587, 34
- Welsh, W. F., Orosz, J. A., Carter, J. A., et al., 2012, *Nature*, 481, 475
- Welsh, W. F., Orosz, J. A., Short, D. R., et al., (including **Hinse, T. C.**), 2015, *ApJ*, 809, 26
- Wittenmyer, R. A., Horner, J., Marshall, J. P., 2013, *MNRAS*, 431, 2150
- Wolszczan A., Frail, D. A., 1992, *Nature*, 355, 145

5) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych):

Po uzyskaniu stopnia doktora przenieśliem się do Korei Południowej, rozpoczynając staż podoktorski w *Korea Astronomy and Space Science Institute* (7.5 roku) oraz w *Chungnam National University* (od lipca 2018 r.). Głównym tematem badań była detekcja oraz charakterystyka masywnych towarzyszy w układach podwójnych gwiazd. Dodatkowo, jako przejaw mojej aktywności w ramach międzynarodowej współpracy MiNDSTEP (<http://www.mindstep-science.org/>), kontynuowałem organizację obserwacji fotometrycznych typu *follow-up* znanych układów z planetami tranzytującymi, z wykorzystaniem duńskiego 1.54-metrowego teleskopu w obserwatorium ESO/La Silla w Chile. Projekt ten został następnie rozwinięty przez włączenie teleskopów koreańskich jako część sieci teleskopów z Korei, Stanów Zjednoczonych, Chin oraz Turcji. Następnie, jako część dwuletniego (2014/2015) projektu badawczego oraz działalności edukacyjnej (R&E, z ang. *Research & Education*), zainicjowałem instalację pierwszego w Korei profesjonalnego dwustanowiskowego wideo-detektora meteorów/bolidów. Ponadto, jako wieloletni uczestnik warsztatów *Sagan Summer School Workshop* byłem zaangażowany w mniejsze projekty dotyczące techniki mikrosoczewkowania w celu detekcji planet pozasłonecznych oraz badania dynamiki tzw. planet typu S w układach podwójnych gwiazd.

Instalacja kamery monitorującej niebo w celu detekcji meteorów

W reakcji na zaobserwowane w marcu 2014 roku w Korei Południowej zjawisko bolidu (bolid Jin-ju), zainicjowałem instalację prototypowej kamery, służącej do wizualnej detekcji meteorów oraz bolidów.

Projekt ten stanowił główną część programu badawczo-dydaktycznego w latach 2014/2015 pomiędzy *Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI)* oraz *Daejeon Science Highschool (DSHS)*. W momencie pojawienia się bolidu Jin-ju w Korei nie istniał żaden podobny instrument.



Rys. 6A: Dwustanowiskowy system kamer monitorujących, służący do optycznej detekcji meteorów oraz bolidów w Korei Południowej (lewy panel: stanowisko BOAO; prawy panel: stanowisko SOAO). Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2017, Rys. 2).

System składa się łącznie z sześciu kamer zamontowanych na dwóch słupach. Każde stanowisko składa się z trzech kamer, każda zorientowana jest indywidualnie, tak aby ich pola obserwacji nakładały się na siebie. Takie ustawienie pozwala na uzyskanie trójwymiarowych trajektorii obiektów, obserwowanych jednocześnie z dwóch punktów widokowych. Rys. 6A przedstawia dwa systemy kamer zlokalizowane w obserwatoriach BOAO oraz SOAO. Baza tego systemu to około 100 km. W ogólności, zarówno sprzęt jak i oprogramowanie są dla obu stacji identyczne, co ułatwia ich utrzymanie i konserwację. Optyczne składniki stacji to szybkoklatkowe kamery wideo WATEC 902-H2, współpracujące z układem soczewek o ogniskowej $f/1.2$.

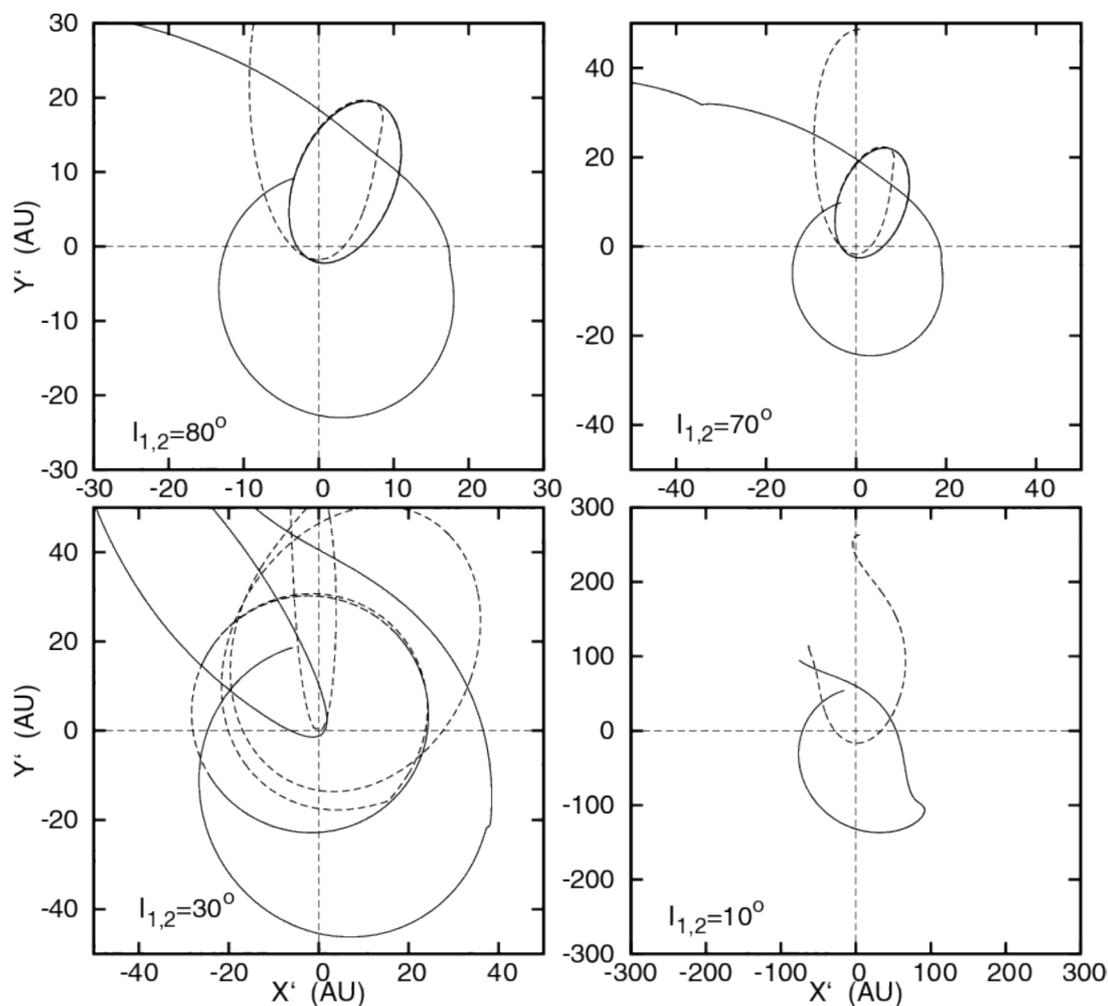
Różne pola widzenia zostały wybrane w celu określenia granicznej wielkości gwiazdowej oraz szybkości detekcji jako funkcji długości ogniskowej. Szczegóły systemu monitorującego zostały opisane w pracy Hinse i in. (2017). W celu dokładnego wyznaczenia orbity obiektu, oprogramowanie systemu zostało zsynchronizowane w czasie. Uzyskano następujące wyniki. W czasie 2.5 roku działania stacji, zarejestrowano łącznie 1886 meteorów. Wykryto łącznie 113 zdarzeń zarejestrowanych jednocześnie przez obie stacje, a orbity obiektów zostały poddane analizie. Zaobserwowano zarówno meteory typu asteroidalnego, jak i kometarnego.

Dynamika towarzyszy podgwiazdowych w układach gwiazd podwójnych

Efekt skończonego czasu podróży sygnału świetlnego (LTTE/LTT) został również wykorzystany do analizy układów zaćmieniowych, których mierzone zmiany okresów wskazywały na obecność towarzyszy o masach podgwiazdowych. Zbadanie stabilności orbitalnej takich systemów w długich skalach czasu jest konieczne, aby uzasadnić istnienie towarzyszy.

Zaproponowano kilka układów podwójnych, których zmiany okresów mogłyby być wyjaśnione obecnością dodatkowych obiektów. W pracy Hinse i in. (2012) odnosimy się do niedawnych doniesień na temat podgwiazdowych towarzyszy (karłów typu M) podwójnego układu zaćmieniowego SZ Herculis (Fig. 6B). Podobne badania przeprowadzono w przypadku zaobserwowanych zmian okresu systemu RZ Draconis (Hinse i in. 2014). Dla

obu tych systemów przeprowadziliśmy powtórny analizę danych chronometryczowych. Ich celem było określenie parametrów modelu LTTE/LTT, odpowiadających długookresowej stabilności tych konfiguracji. We wszystkich przypadkach stwierdziliśmy, że układ czterech ciał jest bardzo niestabilny, a jego maksymalny czas życia wynosi mniej niż ~ 1000 lat.



Rys. 6B: Przykłady niestabilnych konfiguracji proponowanego poczwórnego układu gwiazdowego SZ Herculis. Przyjęto, że początkowe orbity dwóch towarzyszy leżą w jednej płaszczyźnie. Przebadano różne nachylenia orbit. We wszystkich przypadkach stwierdziliśmy ewolucję niestabilną. Rysunek pochodzi z pracy Hinse i in. (2012, Rys. 5).

Przeprowadzono ponadto badania stabilności układów okołopodwójnych. W pracy Horner i in. (2013) zbadaliśmy w szczególności ewolucję orbitalną zaproponowanych brązowych karłów wokół układu zaćmieniowego BD+202457. Również w tym przypadku wykazano, że układ jest niestabilny w pełnym zakresie niepewności pomiarowych. Podobna analiza, dotycząca układu SW Lyncis, została przeprowadzona w pracy Hinse i in. (2014), gdzie

stwierdzono, że zaproponowany system jest niestabilny w bardzo krótkich skalach czasu. Przedstawiona analiza modelu LTTE/LTT ma jednak pewną istotną wadę. Model ten zakłada bowiem orbity keplerowskie, zaniedbując oddziaływania grawitacyjne. Aby usunąć tę wadę, prowadzone są obecnie prace mające na celu opracowanie modelu LTTE/LTT opierającego się na numerycznym modelu kilka ciał. Być może wprowadzenie wzajemnych oddziaływań pozwoli znaleźć stabilne konfiguracje tych systemów.

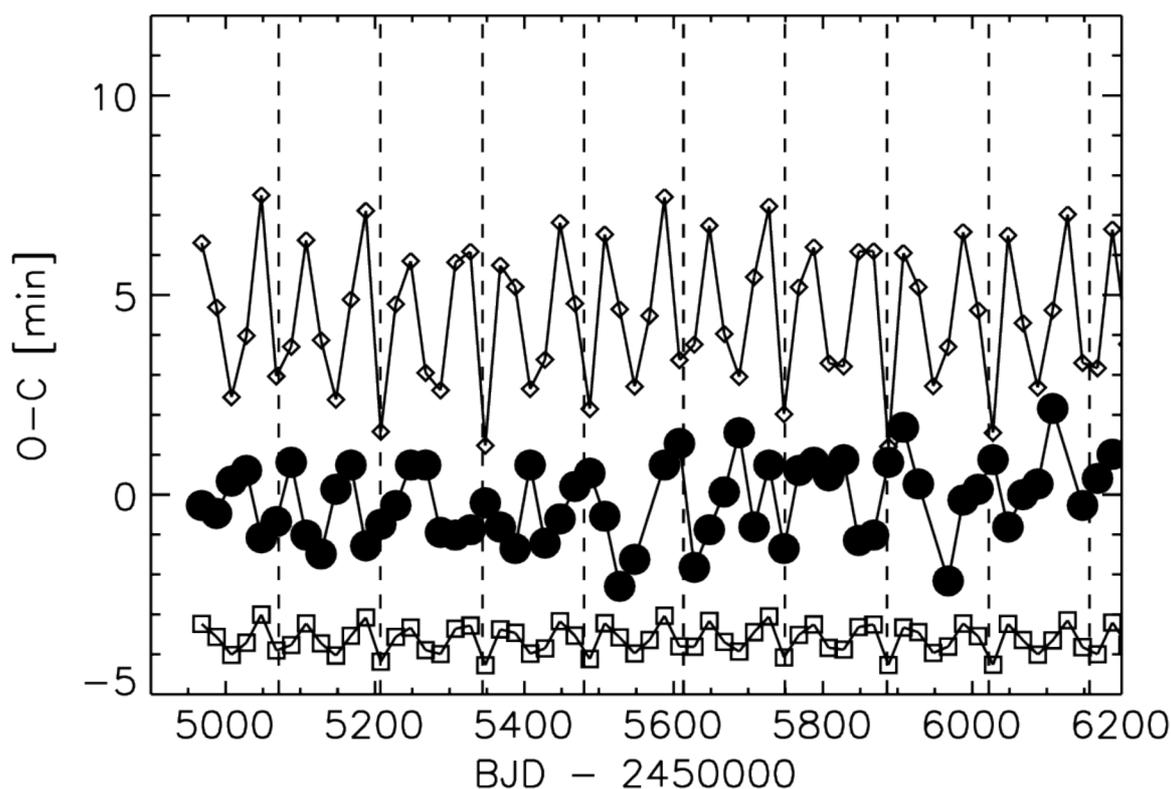
Dynamika planet pozasłonecznych typu S wokół gwiazd podwójnych

Odkrywane są również planety obiegające jedną z gwiazd układu podwójnego. Są one nazywane planetami typu satelitarnego. W ramach współpracy amerykańsko-koreańskiej badaliśmy własności dynamiczne takich planet. W celu określenia stabilności orbitalnej wykorzystaliśmy techniki numeryczne rozróżniające pomiędzy konfiguracjami chaotycznymi a kwazi-okresowymi. Rozważyliśmy trzy różne kryteria stabilności: *i)* stabilność Hilla, *ii)* maksymalny wykładnik Lyapunowa (*Maximum-Lyapunov Exponent*) oraz *iii)* indeks MEGNO. Porównaliśmy powyższe techniki w zastosowaniu do układów γ Cep oraz HD 196885 (Satyal, Quarles i Hinse 2013), stwierdzając bardzo dobrą zgodność pomiędzy nimi. W drugiej pracy (Satyal, Hinse i in. 2014) przeanalizowaliśmy wpływ rezonansu Kozai na ewolucję planety w układzie HD 196885, jak również zastosowaliśmy metodę MEGNO, w celu zbadania dynamiki, co pozwoliło nam na określenie zakresu parametrów, dla których rezonans Kozai jest najbardziej efektywny.

Odkrycie planet okółpodwójnych przy pomocy fotometrii *Keplera*

We współpracy z Veselinem B. Kostovem uczestniczyłem w badaniach, których wynikami były, wykorzystujące precyzyjną fotometrię *Keplera*, odkrycia tranzytujących planet okółpodwójnych (Kepler-64, Kepler-47, Kepler-413, Kepler-453). Badania te zapoczątkowano w 2012 roku podczas warsztatów *Sagan Summer School Workshop*. Podstawowym problemem w modelowaniu zmian czasów tranzytów było włączenie do modelu oddziaływań pomiędzy wszystkimi ciałami układu.

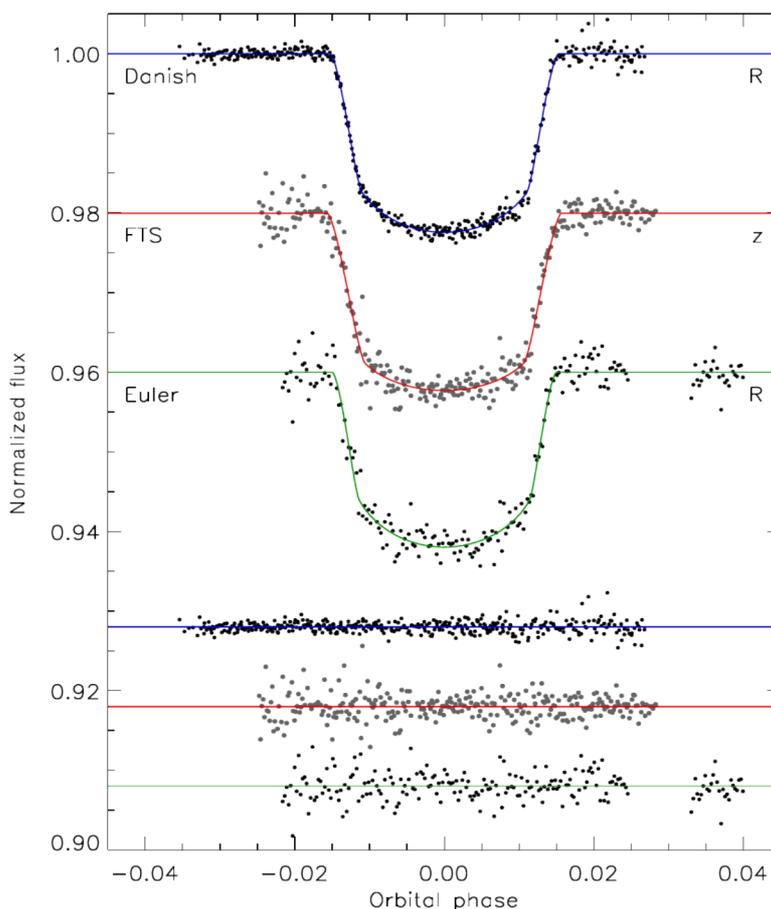
Moim wkładem w powyższe badania było zaimplementowanie numerycznego kodu wielociałowego, umożliwiającego całkowanie równań ruchu oraz wyznaczanie czasów zaćmień oraz środków tranzytów dla gwiazdy podwójnej oraz okołopodwójnych planet (Rys. 6C). Zaowocowało to współodkryciem układów planetarnych wokół Kepler-64 (KIC 4862625 lub PH-1) oraz Kepler-47 (Kostov i in. 2013). Projekt ten został później rozszerzony w kierunku badania dynamiki globalnej z wykorzystaniem techniki MEGNO (Kostov i in. 2014; 2016). Wynikiem tego projektu było również członkostwo w grupie badającej gwiazdy podwójne przy pomocy danych uzyskiwanych przez satelitę *Kepler* (*Kepler Eclipsing Binary Working Group*, <http://keplerebs.villanova.edu/members>), w ramach której przeprowadziłem dodatkowe badania stabilności orbit nowo odkrytych planet okołopodwójnych (Welsh i in., 2015; Orosz i in., 2019).



Rys. 6C: Zmiany czasów zaćmień głównych ($O - C$ w funkcji czasu) układu KIC 4862625 (Kepler-64 lub PH-1), wywołanych planetą okołopodwójną o różnej masie. Zmiany czasów zaćmień (różne symbole) obliczone zostały przy użyciu integratora problemu trzech ciał. Mierzone czasy zaćmień wskazane są pionowymi liniami. Rysunek pochodzi z pracy Kostov, McCullough, Hinse i in. (2013, Rys. 6).

Fotometryczne obserwacje typu *follow-up* pozasłonecznych planet tranzytujących

W roku 2008 we współpracy z Johnem Southworthem zainicjowałem projekt, którego celem było przeprowadzenie fotometrycznych obserwacji z półkuli południowej znanych pozasłonecznych planet tranzytujących (Southworth, Hinse i in. 2009a). Projekt ten jest częścią współpracy MiNDSTeP (<http://www.mindstep-science.org/>), wykorzystującej duński 1.54-metrowy teleskop zlokalizowany w obserwatorium ESO/La Silla w Chile. Jest on wciąż realizowany (Southworth, Hinse i in. 2012). Jako przykład, na Rys. 6D przedstawione są krzywe blasku gwiazdy WASP-25 (Southworth, Hinse i in. 2014), uzyskane przy użyciu różnych teleskopów, w tym instrumentu duńskiego.



Rys. 6D: Krzywa blasku WASP-25. Górna krzywa pokazuje wyniki uzyskane duńskim teleskopem o średnicy 1.54 m. Dolne panele pokazują residua dla najlepszego modelu. Uzyskano również dane z innych instrumentów. Rysunek pochodzi z pracy Southworth, Hinse i in. (2014, Rys. 6).

Tradycyjnie, planety tranzytujące odkrywane są w wyniku dedykowanych przeglądów naziemnych (projekty WASP, Super-WASP, HAT, TrES). Pomimo tego, że jakość tego typu danych fotometrycznych jest często niska, wystarczy ona do odkrycia planet. Początkowo, odkrywano planety typu gorących Jowiszy, z czasem baza obserwacyjna się rozszerzała i zaczęto odkrywać planety na coraz rozleglejszych orbitach.

Tranzyty obserwowane w krzywej blasku (Fig. 6D) dostarczają informacji na temat stosunku promieni planety i gwiazdy. W szczególności, stosunek promieni jest proporcjonalny do głębokości tranzytu. W konsekwencji, większa dokładność fotometrii skutkuje większą precyzją wyznaczonego stosunku promieni. W połączeniu z dokładnym pomiarem promienia gwiazdy (zwykle z analizy spektroskopowej), wyznaczany jest promień planety (Southworth, Hinse i in. 2009a, Southworth, Hinse i in. 2009b).

Fotometryczna precyzja, z którą naziemne teleskopy mierzą jasność gwiazdy zależy w dużej mierze od szumu scyntylacyjnego (Southworth, Hinse i in. 2009a; Hinse i in. 2015), który z kolei zależy od warunków atmosferycznych (ruch turbulentny vs laminarny). Istnieją również inne źródła błędów. Wszystko razem składa się na stosunek sygnału do szumu (SNR, od ang. *signal-to-noise ratio*). Jedną z metod zwiększenia SNR jest zastosowanie techniki rozogniskowania teleskopu, co pozwala na wydłużenie ekspozycji, bez wysycenia (saturacji) odbiornika CCD. Dla teleskopu o średnicy zwierciadła 1.54m uzyskiwaliśmy typowo precyzję fotometrii (średni rozrzut) na poziomie poniżej milimagnitudy dla gwiazdy o jasności $V \sim 12$ mag, co pozwala zmierzyć promień planety z dokładnością kilku procent.

W 2008 roku przeprowadziłem pierwsze testy z wykorzystaniem tej techniki. W kolejnych latach, zarządzałem oraz asystowałem przy redukcji danych oraz modelowaniu krzywych blasku. Było to również związane z pracą promotorską rozprawy doktorskiej związanej z planetami tranzytującymi (Harpsoe, Hardis, Hinse i in. 2013). Następnie, technika ta była z sukcesami wykorzystywana w ramach współpracy z kolegami z Turcji, z użyciem 1.0-metrowego teleskopu TUG (Baştürk, Hinse i in. 2014).

Częste i precyzyjne pomiary jasności mogą pozwolić na odkrycie dodatkowych planet obiegających gwiazdę macierzystą. Wykorzystując dokładne pomiary czasów tranzytów, technika TTV (Haghighipour i in. 2013) może służyć do wyznaczenia zmian okresów planet tranzytujących wywołanych przez zaburzenia pochodzące od innych planet. Technika ta jest bardzo skuteczna. Możliwe jest odkrywanie planet nietranzytujących, poza tym wielkość zmierzonych zmian okresów umożliwia określenie górnego ograniczenia na masy dodatkowych planet. W celu lepszego określenia parametrów planet tranzytujących oraz wyznaczenia zmian okresów, dołączyłem niedawno do współpracy chińsko-amerykańskiej (TEMP⁹), wykorzystującej różne zasoby obserwacyjne, włącznie z teleskopami koreańskimi (Wang i in. 2018a, Wang i in. 2019b). Moim wkładem to tego projektu jest zaplanowanie oraz ustalenie harmonogramu czasu obserwacyjnego przyszłych zjawisk tranzytów, w celu uzyskania danych fotometrycznych przy użyciu teleskopów w Korei (Wang i in. 2019a). Dodatkowo, zajmuję się przeprowadzaniem wielkoskalowych obliczeń numerycznych na klastrach komputerowych w celu określenia górnych ograniczeń na masy planet, na bazie mierzonych wielkości zmian okresów danego systemu (Wang i in. 2019c). Szczególnie interesujące są układy rezonansowe dwóch planet. W przypadku tego typu szczególnych konfiguracji, prawdopodobieństwo znalezienia dodatkowych planet jest większe, z uwagi na większą zmienność okresów orbitalnych, w porównaniu z podobnymi konfiguracjami nierezonansowymi. Obliczenia z wykorzystaniem techniki MEGNO pozwalają na określenie pozycji rezonansów w przestrzeni fazowej. Projekt ten zaowocował licznymi publikacjami, z których dwie są obecnie na etapie recenzji (Wang et al. 2019a, 2019b).

Dynamika posiadających pierścienie małych ciał Układu Słonecznego

W ramach zadań promotorskich, brałem udział w badaniach Jeremy'ego Wooda jako współpromotor oraz współpracownik. Badania dotyczyły dynamiki i stabilności małych ciał Układu Słonecznego posiadających pierścienie. Współpraca w okresie czasu od 2015 r. do połowy 2018 r. zaowocowała serią trzech artykułów (Wood i in. 2017, Wood i in. 2018a, Wood i in. 2018b). Projekt ten został zainspirowany odkryciem pierścienia wokół planetoidy Chariklo, należącej do populacji Centaurów. Badania polegają na analizie statystycznej,

9 Transiting Extrasolar Monitoring Project

będącej wynikiem szczegółowych symulacji numerycznych cząstek testowych oraz ich długofalowej ewolucji na skutek oddziaływania ze Słońcem oraz czterema planetami olbrzymami. Rozważana jest zarówno orbita planetoidy jak i system jej satelitów. Wykonano również mapy dynamiczne MEGNO w celu zbadania struktury przestrzeni fazowej. Podsumowując, stwierdzono, że bliskie przejścia pomiędzy Chariklo oraz dużymi planetami nie wpływa istotnie na stabilność pierścienia. Orbita samej planetoidy okazała się być stabilna w długim przedziale czasu, oszacowano również, że przyłączenie Chariklo do populacji Centaurów nastąpiło w ciągu ostatnich 9 milionów lat. Stwierdziliśmy ponadto, że w okolicy rezonansów z Neptunem możliwe jest wydłużenie czasu życia klonów Centaurów.

Badania teoretyczne na temat kosmicznych pomiarów paralaksy mikrosoczewkowania

Badania te mają swój początek w moim rocznym zaangażowaniu w obserwacje fotometryczne typu *follow-up* zjawisk mikrosoczewkowania w kierunku zgrubienia centralnego Galaktyki. W wyniku mojego udziału w warsztatach *Sagan Summer School Workshop* w roku 2017, zainicjowałem współpracę naukową z dr. E. Bachelet oraz dr. R. Street. W ramach teorii mikrosoczewkowania, degeneracja masa-odległość może być usunięta poprzez pomiary tego samego zjawiska mikrosoczewkowania z dwóch różnych miejsc. Efekt ten jest nazywany paralaksą mikrosoczewkowania. W artykule Bachelet, Hinse i Street (2018) badamy systematycznie wielkość i niepewność (poprzez analizę macierzy Fishera) efektu paralaksy dla różnych hipotetycznych obserwatoriów kosmicznych, włączając w to stacje obserwacyjne na Księżycu. Aby efekt paralaksy był znaczący, potrzeba dużej bazy pomiędzy dwoma stanowiskami obserwacyjnymi. W szczególności, zwracaliśmy dużą uwagę na możliwość detekcji paralaksy mikrosoczewkowania, możliwą do obserwacji z wykorzystaniem planowanego teleskopu kosmicznego NASA WFIRST. W rezultacie opisujemy słabe punkty metody macierzy Fishera w wyznaczaniu niepewności paralaksy oraz przedstawiamy przewodnik związany z modelowaniem paralaksy mikrosoczewkowania.

Literatura

- Bachelet, E., **Hinse, T. C.**, Street, R., 2018, *AJ*, 155, 191
- Baştürk, Ö., **Hinse, T. C.**, Özavcı, İ., et al., 2014, *CoSka*, 43, 402
- Haghighipour, N., Capen, S., **Hinse, T. C.**, 2013, *CeMDA*, 117, 75
- Harpsøe, K. B. W., Hardis, S., **Hinse, T. C.**, et al., 2013, *A&A*, 549, 10
- Hinse, T. C.**, Goździewski, K., Lee, J. W., et al., 2012, *AJ*, 144, 34
- Hinse, T. C.**, Horner, J., Lee, J. W., et al., 2014, *A&A*, 565, 104
- Hinse, T. C.**, Horner, J., Wittenmyer, R. A., 2014, *JASS*, 31, 187
- Hinse, T. C.**, Han, W., Yoon, J.-N., et al., 2015, *JASS*, 32, 21
- Hinse, T. C.**, Kim, W.-K., Ahn, S.-H., et al., 2017, *PKAS*, 32, 381
- Horner, J., Wittenmyer, R. A., **Hinse, T. C.**, et al., 2014, *MNRAS*, 439, 1176
- Kostov, V. B., McCullough, P. R., **Hinse, T. C.**, et al., 2013, *ApJ*, 770, 52
- Kostov, V. B., McCullough, P. R., et al., (including **Hinse, T. C.**), 2014, *ApJ*, 784, 14
- Kostov, V. B., Orosz, J. A., et al. (including **Hinse, T. C.**), 2016, *ApJ*, 827, 86
- Orosz, J. A., Welsh, W. F., et al., (including **Hinse, T. C.**), 2019, *ApJ*, in review.
- Satyral, S., Quarles, B., **Hinse, T. C.**, 2013, *MNRAS*, 433, 2215
- Satyral, S., **Hinse, T. C.**, Quarles, B., et al., 2014, *MNRAS*, 443, 1310
- Southworth, J., **Hinse, T. C.**, Jørgensen, U. G., et al., 2009a, *MNRAS*, 396, 1023
- Southworth, J., **Hinse, T. C.**, Burgdorf, M. J., 2009b, *MNRAS*, 399, 287
- Southworth, J., **Hinse, T. C.**, Dominik, M., et al., 2012, *MNRAS*, 426, 1338
- Southworth, J., **Hinse, T. C.**, Burgdorf, M., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 776
- Wang, S., Wang, X.-Y., Wang, Y.-H., et al., (including **Hinse, T. C.**), 2018a, *AJ*, 156, 181
- Wang, X.-Y., Wang, S., **Hinse, T. C.**, et al., 2018b, *PASP*, 130, 4401
- Wang, Y.-H., Wang, S., **Hinse, T. C.**, et al., 2019a, *AJ*, under review
- Wang, J.-H., Wang, S., **Hinse, T. C.**, et al., 2019b, *AJ*, under review
- Wang, Y.-H., Wang, S., **Hinse, T. C.**, et al., 2019c, *AJ*, 157, 82
- Welsh, W. F., Orosz, J. A., et al. (including **Hinse, T. C.**), 2015, *ApJ*, 809, 26
- Wood, J., Horner, J., **Hinse, T. C.**, et al., 2017, *AJ*, 153, 245
- Wood, J., Horner, J., **Hinse, T. C.**, et al., 2018a, *AJ*, 155, 2
- Wood, J., Horner, J., **Hinse, T. C.**, et al., 2018b, *MNRAS*, 480, 4183

Daejeon, Korea Południowa, dnia: 25. March 2019

Podpis: T.C. Hinse

(Tobias Cornelius Hinse)