

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: **Gracjan Maciejewski**

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

- dyplom magistra nadany przez Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2002,
- stopień naukowy doktora nauk fizycznych w zakresie astronomii nadany uchwałą Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2007, tytuł rozprawy doktorskiej: „Fotometryczne przeglądy nieba. Poszukiwanie zmienności i astrofizyka gromad otwartych”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

- od 1 czerwca 2007 r. do 30 września 2011 asystent w Katedrze Astronomii i Astrofizyki Centrum Astronomii UMK,
- od 1 marca 2009 do 30 listopada 2010 pracownik naukowo-badawczy odbywający staż po doktoracie w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu F.Schillera w Jenie (Niemcy),
- od 1 października 2011 r. do teraz adiunkt w Katedrze Astronomii i Astrofizyki Centrum Astronomii UMK.

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

Chronometraż tranzytów gorących jowiszy: od poszukiwania dodatkowych planet do odkrycia skracania się okresu orbitalnego egzoplanety WASP-12 b

b) lista publikacji składających się na osiągnięcie (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

H1.

G.Maciejewski, D.Dimitrov, R.Neuhaeuser, A.Niedzielski, St.Raetz, Ch.Ginski, Ch.Adam, C.Marka, M.Moualla, M.Mugrauer, „Transit timing variation in exoplanet WASP-3b”, 2010, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 407, 2625

H2.

G.Maciejewski, A.Niedzielski, A.Wolszczan, G.Nowak, R.Neuhaeuser, J.N.Winn, B.Deka, M.Adamów, M.Górecka, M.Fernandez, F.J.Aceituno, J.Ohlert, R.Errmann, M.Seeliger, D.Dimitrov, D.W.Latham, G.A.Esquerdo, L.McKnight, M.J.Holman, E.L.N.Jensen, U.Kramm, T.Pribulla, St.Raetz, T.O.B.Schmidt, Ch.Ginski, S.Mottola, S.Hellmich, Ch.Adam, H.Gilbert, M.Mugrauer, G.Saral, V.Popov, M.Raetz, „Constraints on a second planet in the WASP-3 system”, 2013, Astronomical Journal, 146, 147

H3.

G.Maciejewski, St.Raetz, N.Nettelman, M.Seeliger, Ch.Adam, G.Nowak, R.Neuhaeuser, „Analysis of new high-precision transit light curves of WASP-10 b: starspot occultations, small planetary radius, and high metallicity”, 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 535, A7

H4.

G.Maciejewski, M.Fernández, F.J.Aceituno, J.Ohlert, D.Puchalski, D.Dimitrov, M.Seeliger, M.Kitze, St.Raetz, R.Errman, H.Gilbert, A.Pannicke, J.-G.Schmidt, R.Neuhäuser, „No variations in transit times for Qatar-1 b”, 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 577, A109

H5.

G.Maciejewski, D.Dimitrov, M.Fernández, A.Sota, G.Nowak, J.Ohlert, G.Nikolov, Ł.Bukowiecki, T.C.Hinse, E.Palle, B.Tingley, D.Kjurkchieva, J.W.Lee, C.-U.Lee, „Departure from the constant-period ephemeris for the transiting exoplanet WASP-12 b”, 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 588, L6

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

Wstęp

Odkąd odkryto pierwsze planety wokół gwiazdy neutronowej (Wolszczan & Frail 1992, Wolszczan 1994) i wokół gwiazd podobnych do Słońca (Latham et al. 1989, Mayor & Queloz 1995, Marcy & Butler 1996), możliwe stało się badanie architektury, ewolucji dynamicznej i procesów formowania się układów planetarnych innych niż Układ Słoneczny. Szybko okazało się, że w przypadku niektórych egzoplanet możliwe jest zaobserwowanie zjawiska tranzytu, w czasie którego dochodzi do czasowego zasłaniania części tarczy gwiazdy i przez to spadku jej obserwowanego blasku. Pierwszą tranzytującą egzoplanetą była kandydatka na planetę wokół gwiazdy HD 209458, najpierw odkryta za pomocą metody precyzyjnych pomiarów prędkości radialnej (Mazeh et al. 2000), a następnie potwierdzona za pomocą fotometrycznych obserwacji tranzytów (Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000). Początkowo tranzytujące egzoplanety były odkrywane głównie przez dedykowane fotometryczne przeglądy nieba takie jak TrES (Trans-Atlantic Exoplanet Survey, Alonso et al. 2004), HATNet (Hungarian-made Automated Telescope Network, Bakos et al. 2004) czy SuperWASP (Wide Angle Search for Planets, Pollacco et al. 2006). Z uwagi na to, że prawdopodobieństwo możliwości rejestracji tranzytu maleje wraz ze wzrostem promienia orbity, większość tranzytujących egzoplanet jest odkrywana na orbitach o okresach rzędu kilku dni. Typowy tranzyt egzoplanetarny trwa 2 – 3 godziny, choć znane są także przypadki detekcji tranzytów znacznie dłuższych, tak jak na przykład w układzie planetarnym HD 80606, w którym jedna z planet obiega gwiazdę w ciągu 110 dni i tranzytuje przez 12 godzin (np. Hebrard et al. 2010). Tak długotrwałe zjawiska są niezwykle trudne do wykrycia w obserwatoriach znajdujących się na powierzchni Ziemi, dlatego tranzytujące planety na szerokich orbitach są głównie odkrywane przez dedykowane teleskopy kosmiczne CoRoT (Baglin et al. 2007) i Kepler (Koch et al. 2010, Borucki et al. 2010).

Egzoplanety o masach większych niż 0,3 masy (M_{Jup}) Jowisza i okresach orbitalnych poniżej 10 dni (np. Hatzes & Rauer 2015, Mancini & Southworth 2016) określane są umownie mianem gorących jowiszy. Badania statystyczne wskazują, że planety te stanowią niewielki odsetek populacji wszystkich egzoplanet (Howard et al. 2012, Wright et al. 2012). Zwykle występują albo w układach jednoplanetarnych (np. Steffen et al. 2012), albo posiadają planetarnych towarzyszy na dalekich, przeważnie silnie eliptycznych orbitach (np. HAT-P-13 b – Bakos et al. 2009). Układ planetarny WASP-47 stanowi – jak dotąd – jedyny wyjątek od tej reguły. Gorący jowisz WASP-47 b (Hellier et al.

2012) okazał się być składnikiem zwartego układu wieloplanetarnego z dwiema mało masywnymi planetami ulokowanymi wewnątrz i na zewnątrz jego orbity (Becker et al. 2015). Obie dodatkowe planety zostały odkryte metodą tranzytów w wysokiej jakości krzywej blasku uzyskanej teleskopem Keplera. Planeta zewnętrzna oddziałuje grawitacyjnie na planetę WASP-47 b wywołując perturbacje w jej ruchu orbitalnym. Okres orbitalny gorącego jowisza ulega cyklicznym zmianom, co obserwuje się jako sygnał chronometrażowy o amplitudzie ok. 30 s. Detekcja takiego sygnału jest potencjalnie możliwa za pomocą teleskopów naziemnych o średnicy zwierciadeł powyżej 2 m. Odkrycie to pokazuje, że metoda chronometrażu tranzytów egzoplanetarnych (ang. transit timing variation, TTV, Miralda-Escude 2002, Holman & Murray 2005, Agol et al. 2005) może być wykorzystywana do odkrywania dodatkowych planet w układach z gorącymi jowiszami.

W przeciwieństwie do gorących jowiszy, tzw. ciepłe neptuny czy saturny, tj. egzoplanety o masach poniżej $0,3 M_{\text{Jup}}$ i okresach orbitalnych powyżej 10 dni, są obserwowane w kompaktowych układach planetarnych. Wiele z nich pozostaje ze swoimi planetarnymi towarzyszami w pobliżu konfiguracji rezonansowych (Fabrycky et al. 2014). Badania modelowe wskazują, że obserwowana architektura układów planetarnych może zależeć od wielu czynników, takich jak początkowa masa dysku protoplanetarnego, masy poszczególnych planet, masa gwiazdy układu czy typ mechanizmu migracji (np. Goldreich & Schlichting 2013). Postuluje się, że obserwowane różnice w architekturze układów z gorącymi jowiszami i planetami pozostałych typów mogą być konsekwencją różnych warunków fizycznych w czasie powstawania tych układów i odmiennych ścieżek ich dalszej ewolucji dynamicznej (np. Kley & Nelson 2012, Ogihara et al. 2013).

Proces formowania się gorących jowiszy nie jest jeszcze w pełni poznany (np. Steffen et al. 2012, Lloyd et al. 2013). Klasyczna teoria formowania się planet wskazuje, że powstanie gorących jowiszy w miejscu ich obecnego występowania jest mało prawdopodobne (Pollack et al. 1996). Jeśli jest tak faktycznie, to planety te musiały uformować się w dysku protoplanetarnym za linią śniegu, tj. w odległości kilku jednostek astronomicznych od macierzystej gwiazdy, a następnie przemieścić na obecnie obserwowane ciasne orbity. Postulowane odosobnienie tych planet wraz z nierzadko obserwowanym dużym nachyleniem orbit względem płaszczyzny równikowej ich gwiazd, a w niektórych przypadkach nawet orbitami polarnymi czy wstecznymi, przemawia na rzecz teorii migracji gazowych olbrzymów wskutek oddziaływań dynamicznych z innymi masywnymi planetami występujących początkowo w niestabilnych konfiguracjach (Rasio & Ford 1996, Weidenschilling & Marzari 1996) lub wskutek mechanizmu Lidowa-Kozai zakładającego obecność dodatkowego składnika planetarnego czy gwiazdowego na odległej orbicie (np. Fabrycky & Tremaine 2007). W obu scenariuszach planeta trafia na orbitę o znacznym mimośrodku, a następnie wytraca moment pędu ruchu orbitalnego poprzez oddziaływania pływowe z gwiazdą i ostatecznie kończy jako gorąca planeta na ukołowionej, ciasnej orbicie. Zauważono jednak, że fakt występowania w układach z gorącymi jowiszami dodatkowych masywnych planet wewnątrz granicy lodu może świadczyć przeciwko przywołanym powyżej mechanizmom tzw. migracji poprzez duży mimośród (Schlaufman & Winn 2016). Rozważania modelowe wskazują, że zwarte układy planetarne, podobne do układu WASP-47, mogły wyewoluować do obserwowanej obecnie postaci jedynie poprzez mechanizm migracji w dysku (Mustill et al. 2016).

Gdyby dopuścić, że gorące jowisze mogą powstawać *in situ*, to w efekcie tego planety te powinny często występować w konfiguracjach wieloplanetarnych z towarzyszami planetarnymi o okresach orbitalnych do 100 dni (Batygin et al. 2016). Dalsze rozważania numeryczne pokazują, że oddziaływania dynamiczne pomiędzy planetami prowadziłyby do zwiększenia różnic w nachyleniach płaszczyzn orbitalnych. Dodatkowe

planety nie tranzytowałyby, a ich detekcja byłaby możliwa jedynie za pomocą metod dopplerowskiej i chronometrażu tranzytów gorących jowiszy.

Architektura układu WASP-47 zaprzecza paradygmatowi mówiącemu o tym, że gorące jowisze nie występują w zwartych konfiguracji wieloplanetarnych. Jednak pytanie o częstotliwość występowania takich układów pozostaje nadal otwarte. Odkrycie to pokazuje także, że populacja gorących jowiszy wciąż pozostaje niezbadana. Istnieje potrzeba dalszych badań tego typu układów zarówno metodami fotometrycznymi, jak i dopplerowskimi w celu identyfikacji kolejnych układów wieloplanetarnych. Ich własności w szerszym ujęciu statystycznym rzucają nowe światło na naszą wiedzę w zakresie formowania się i ewolucji układów planetarnych.

Rozważania teoretyczne wskazują, że oddziaływania pływowe pomiędzy gwiazdą i planetą mogą być efektywnym mechanizmem ukoławiania ciasnych orbit planetarnych. Skala tego procesu jest zwykle znacznie krótsza od wieku samych układów. Istnieje jednakże grupa gorących jowiszy obiegających gwiazdy po niekołowych orbitach. Może to świadczyć o tym, że czas ukoławienia w ich przypadku jest niedoszacowany wskutek na przykład nietypowej budowy wewnętrznej tych globów. Efektywność ukoławiania orbity zależy od efektywności rozpraszania energii pływów wewnątrz planety, co bezpośrednio związane jest z własnościami fizycznymi jej wnętrza. Niekołowość orbity może też świadczyć o obecności dodatkowych planet, które wskutek perturbacji grawitacyjnych wzbudzają i podtrzymują niezerową wartość mimośrod orbitalnego (Peale et al. 1979, Bodenheimer et al. 2001, Adams & Laughlin 2006). Symulacje numeryczne pokazują, że w pewnych konfiguracjach orbitalnych już nawet planety o masach Ziemi czy Marsa mogą wzbudzać mimośród orbity typowego gorącego jowisza do wartości rzędu kilku setnych (Mardling 2007).

Wyniki dalszych analiz przewidują, że ciasne orbity masywnych planet będą się zacieśniać wskutek oddziaływań pływowych i wynikającego z nich transferu orbitalnego momentu pędu do gwiazdy (np. Levrard et al. 2009, Essick & Weinberg 2016). Tempo tego efektu zależy od efektywności rozpraszania energii pływów we wnętrzu gwiazdy. Skracanie się okresu orbitalnego może zostać wykryte dzięki precyzyjnym badaniom chronometrażu tranzytów. Oczekuje się, że dla niektórych planet skumulowana odchyłka od efemerydy liniowej może osiągnąć ok. 100 s na przestrzeni 10 lat (Birkby et al. 2014). Wstępne detekcje obserwacyjne tego efektu były sygnalizowane dla planet OGLE-TR-113 b i WASP-43 b (Adams et al. 2010, Blecic et al. 2014), jednak nie zostały potwierdzone przez kolejne obserwacje (Hoyer et al. 2016, Jiang et al. 2016).

Kolejną interesującą kwestią związaną z układami planetarnymi z masywnymi planetami na ciasnych orbitach jest fakt, że kształt brył zarówno planety, jak i gwiazdy znacząco odbiega od symetrii sferycznej wskutek deformacji pływowych. Odejście od symetrii sferycznej w rozkładzie masy wywołuje precesję peryastronu orbity planety (np. Ragozzine & Wolf 2009). Na sumaryczną precesję linii apsyd składają się efekty wywołane nie tylko odkształceniami pływowymi, ale także wynikające z odkształceń powstałych wskutek rotacji obu ciał oraz związane z ogólną teorią względności. Szacuje się, że okres precesji dla niektórych planet powinien być rzędu 10 – 50 lat. Precesja linii apsyd może być wykryta za pomocą chronometrażu tranzytów, jeśli tylko orbita nieznacznie odstaje od okręgu. Nawet niewielka wartość mimośrod ulegającej precesji orbity generowałaby sygnał chronometryczny na poziomie dziesiątek sekund czy minut, czyli wykrywalny przy obecnej precyzji chronometrażu tranzytów.

Liczba zagadnień, jakie mogą stać się przedmiotem badań gorących jowiszy za pomocą chronometrażu ich tranzytów, skłoniła mnie do zainicjowania długoterminowego projektu badawczego, którego podstawowe założenia i metodologia opisane są w pracy Maciejewski et al. (2011a). Jego celem jest próba detekcji sygnału chronometrycznego, który mógłby być obserwacyjną manifestacją jednego z opisanych powyżej zagadnień.

Projekt jest prowadzony w ramach szerokiej współpracy międzynarodowej głównie z astronomami z Niemiec, Hiszpanii i Bułgarii, ale także z Japonii, Słowacji, Południowej Korei, Stanów Zjednoczonych Ameryki (USA) i Wielkiej Brytanii. Jako osiągnięcie zgłaszam zestaw pięciu wybranych artykułów naukowych, które ilustrują różne etapy realizacji projektu (prace **H1-H4**) i wyznaczają ścieżkę do odkrycia skracania się okresu orbitalnego planety WASP-12 b (praca **H5**, wyróżniona przez redakcję A&A).

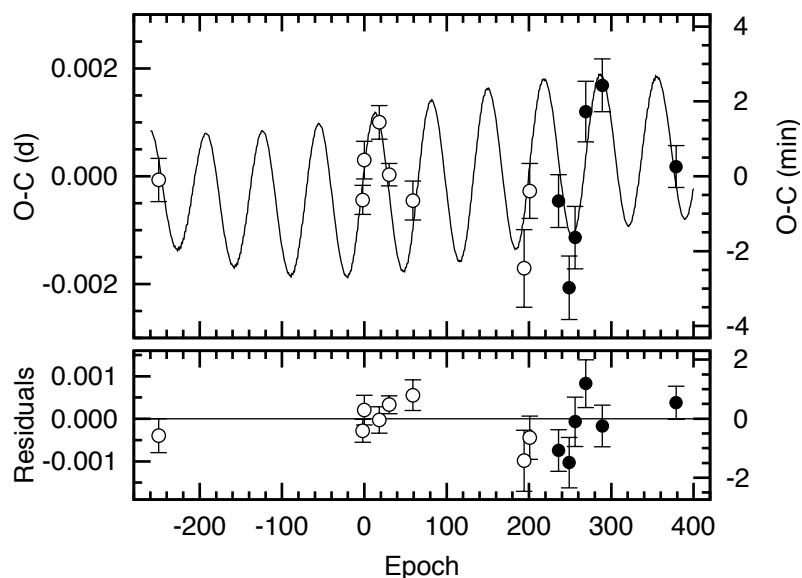
Poszukiwanie dodatkowych planet w układzie WASP-3 (prace H1 i H2)

Strategia i metodologia zastosowane w projekcie zostaną przedstawione na podstawie kampanii obserwacyjnej zorganizowanej dla egzoplanety WASP-3 b. Planeta ta jest typowym gorącym jowiszem (Pollacco et al. 2008). Jej masa wynosi ok. $1,8 M_{\text{Jup}}$, a promień ok. $1,3$ promienia Jowisza (R_{Jup}). Okres orbitalny wynosi zaledwie ok. 44 godziny, a orbita o półosi wielkiej równej ok. $0,032$ au jest kołowa. Gwiazda układu jest karłem typu widmowego F7 – F8 i cechuje się temperaturą efektywną ok. 6400 K. Obserwacje spektroskopowe efektu Rossitera-McLaughlina wskazują, że rzutowany na sferę niebieską kąt pomiędzy osią rotacji gwiazdy a momentem pędu ruchu orbitalnego planety wynosi $3,3 \pm 2,5$ stopnia i jest nierozróżnialny w granicach 2σ od zera (Tripathi et al. 2010). Wynik ten sugeruje, że planeta WASP-3 b mogła trafić na obserwowaną obecnie ciasną orbitę poprzez mechanizm migracji w protoplanetarnym dysku. Pierwsze wyniki obserwacji ujawniły, że okres orbitalny może ulegać subtelnym zmianom (Tripathi et al. 2010).

Pomiędzy lipcem 2009 a kwietniem 2010 wykonano obserwacje fotometryczne 6 pełnych tranzytów planety za pomocą 60-cm teleskopów znajdujących się w Narodowym Obserwatorium Astronomicznym na Rożenie (Bułgaria) i Obserwatorium Uniwersyteckim w Jenie (Niemcy). Wyniki tej wstępnej kampanii obserwacyjnej wskazały, że ruch orbitalny planety WASP-3 b faktycznie może być zaburzany przez dodatkową planetę na pobliskiej orbicie (Maciejewski et al. 2010, **H1**). Symulacje dynamiczne pozwoliły na identyfikację rozwiązań w pobliżu konfiguracji rezonansowych 2:1 i 5:3 (obie z dodatkową planetą na zewnętrznej orbicie), które mogłyby tłumaczyć obserwowane odchyłki chronometrażowe. Najlepszą zgodność z obserwacjami osiągnięto dla modelu z dodatkową planetą o masie ok. $15 M_{\oplus}$ na orbicie o półosi wielkiej równej ok. $0,051$ au; stosunek okresów orbitalnych obu planet wynosiłby $2,02$. Odchyłki od liniowej efemerydy tranzytów wraz z najlepiej odtwarzającym je modelem przedstawiono na rys. 1.

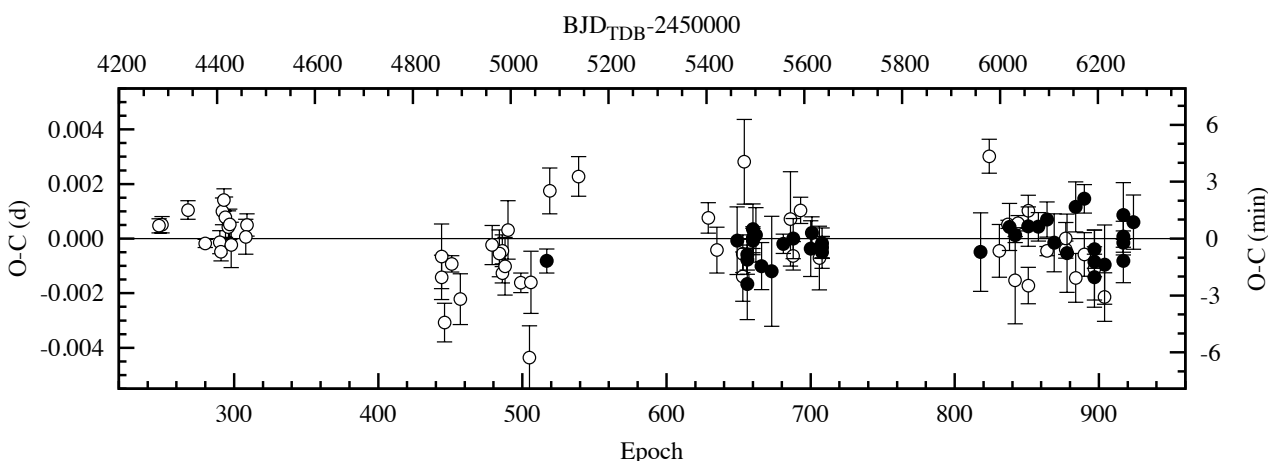
Przewidywana amplituda zmian prędkości radialnej gwiazdy, indukowanych przez dodatkową planetę, okazała się być poniżej progu detekcji określonego przez dostępne w literaturze pomiary dopplerowskie. Zaistniała zatem potrzeba zebrania dodatkowego materiału obserwacyjnego, który mógłby posłużyć do niezależnej weryfikacji postawionej hipotezy. Co więcej, dodatkowa planeta mogłaby być ciałem tranzytującym. Rachunki wykazały, że przewidywana głębokość zjawiska lokowała się w szerokim zakresie – od $0,03$ do $0,35\%$ obserwowanego strumienia gwiazdy (co przekłada się na głębokość od $0,3$ do $3,8$ mmag). Wartość ta zależałaby od średniej gęstości planety i byłaby najmniejsza dla globu skalistego, takiego jak egzoplaneta CoRoT-7 b, a największa w przypadku rozdętego gorącego neptuna, podobnego na przykład do planety WASP-17 b.

Przeprowadzona analiza opierała się o niewielką liczbę punktów pomiarowych i poczynione spostrzeżenia musiały zostać poddane dalszej weryfikacji. Badania układu WASP-3 weszły w kolejną fazę, w ramach której zebrano bardziej precyzyjny materiał obserwacyjny. W latach 2009 – 2011 uzyskano 32 krzywe blasku tranzytu za pomocą teleskopów o zwierciadłach od $0,6$ do $2,2$ m ulokowanych w Turcji, Bułgarii, Niemczech, Hiszpanii i USA. Otrzymano także 17 widm w wysokiej zdolności rozdzielczej za pomocą Teleskopu Hobby’ego-Eberly’ego w Obserwatorium McDonalda (USA). Kompleksowa analiza danych nie potwierdziła wcześniejszych przypuszczeń co do istnienia dodatkowej

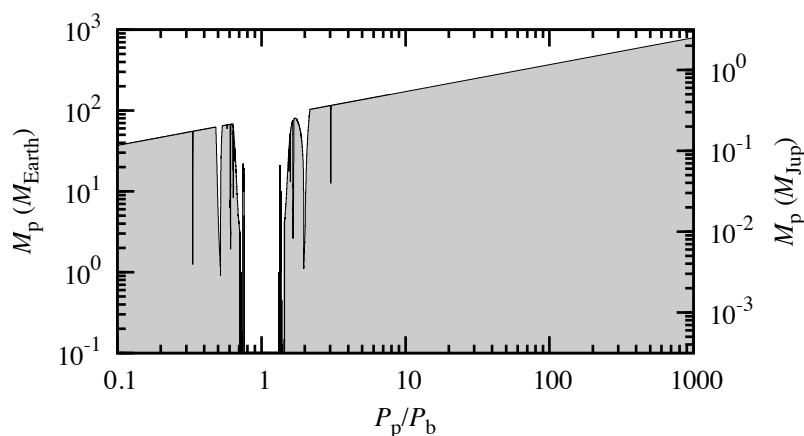


Rys. 1. Odchyłki chronometrażowe dla momentów środka tranzytów planety WASP-3 b względem efemerydy liniowej (górny panel). Na osi poziomej znajduje się czas mierzony w kolejnych cyklach orbitalnych liczonych od wybranego tranzytu. Okręgi oznaczają dane literaturowe, natomiast kropki to obserwacje opublikowane w pracy Maciejewski et al. (2010, **H1**). Linią naniesiono model, który najlepiej odzwierciedla obserwacje. Odchyłki od modelu dynamicznego, przedstawiono na dolnym panelu. Rysunek zaczerpnięto z pracy Maciejewski et al. (2010, **H1**).

planety w badanym układzie (Maciejewski et al. 2013b, **H2**). Jak zostało to pokazane na rys. 2, nowe dane chronometrażowe okazały się być zgodne z liniową efemerydą. Także obserwacje dopplerowskie nie ujawniły ani obecności dodatkowych planet w układzie, ani długoskalowych trendów mogących wynikać z obecności trzeciego ciała na dalekiej orbicie. Zebrany materiał obserwacyjny posłużył jednak do precyzyjnego wyznaczenia parametrów astrofizycznych zarówno gwiazdy, jak i obiegającej ją planety. Nałożone zostało silniejsze ograniczenie na dopuszczalną niezerową wartość mimośrod, który okazał się być równy zero w granicach 2σ . Wynik ten był zgodny z oczekiwaniami, ponieważ skala czasowa ukołowienia orbity planety WASP-3 b oszacowana została na zaledwie 1 – 14 mln lat przy typowej wartości współczynnika efektywności rozpraszania



Rys. 2. Odchyłki chronometrażowe dla momentów środka tranzytów planety WASP-3 b poszerzone o wyniki uzyskane w latach 2010 – 2011. Podobnie jak w przypadku rys. 1, okręgami oznaczono dane literaturowe, a nowe obserwacje zaznaczono kropkami. Numeracja kolejnych cykli orbitalnych jest zgodna z efemerydą podaną w pracy Pollacco et al. (2008). Rysunek zaczerpnięto z pracy Maciejewski et al. (2013b, **H2**).



Rys. 3. Górne ograniczenie na masę hipotetycznych dodatkowych planet w układzie WASP-3 w funkcji ich okresu orbitalnego P_p wyrażonego jako wielokrotność okresu orbitalnego planety WASP-3 b – P_b . Większość konfiguracji o orbitach znajdujących się w granicach ok. 3,5 promienia Hilla planety WASP-3 b (tj. w okolicach współmierności okresów orbitalnych bliskiej 1:1) okazało się być niestabilnych w krótkich skalach czasowych. Obszar zaznaczony na szaro oznacza konfiguracje, które lokują się poniżej progu detekcji metod chronometryczowej i dopplerowskiej. Rysunek zaczerpnięto z pracy Maciejewski et al. (2013b, H2).

energii pływów we wnętrzu planety równego $10^5 - 10^6$. Jest to niewielka wartość w porównaniu z wiekiem układu szacowanym na ok. 4 mld lat.

Dane chronometryczne i dopplerowskie zostały wykorzystane do określenia górnego ograniczenia na masę hipotetycznych ciał w układzie, których sygnatury znajdowałyby się poniżej progu detekcji obu metod. Wyniki tych badań zostały zilustrowane na rys. 3. Metoda dopplerowska daje silniejsze ograniczenie w szerokim zakresie półosi orbitalnych – od ok. $40 M_{\oplus}$ dla najciaśniejszych orbit po ok. $70 - 100 M_{\oplus}$ dla hipotetycznych planet w pobliżu orbity planety WASP-3 b. Z kolei metoda oparta o chronometrę tranzytów jest bardziej czuła w konfiguracjach orbitalnych bliskich rezonansom dynamicznym schodząc do mas $1,7, 0,9, i 1,9 M_{\oplus}$ w rezonansach 3:1, 2:1 i 5:3 dla planet wewnętrznych oraz do $2,6, 0,8, i 13 M_{\oplus}$ w rezonansach zewnętrznych 5:3, 2:1 i 3:1. Jak można zauważyć na rys. 3, zakres parametrów planet, które nadal unikają detekcji, ciągle jeszcze pozostaje znaczny.

Brak detekcji postulowanego sygnału chronometryczowego został także potwierdzony przez inne zespoły badawcze (Nascimbeni et al. 2013, Montalto et al. 2012). Autorzy pracy Nascimbeni et al. (2013) zauważyli, że choć brak jest przesłanek na rzecz sygnału okresowego, to efemeryda liniowa nadal nie odzwierciedla obserwacji w pełni satysfakcjonującym stopniu i takie „chaotyczne” odchyłki mogą być odzwierciedleniem obecności dodatkowej planety w pewnych specyficznych konfiguracjach orbitalnych. Z kolei w pracy Montalto et al. (2012) autorzy wskazują, że za obserwowane odchyłki mogą być odpowiedzialne efekty związane z aktywnością chromosferyczną gwiazdy układu.

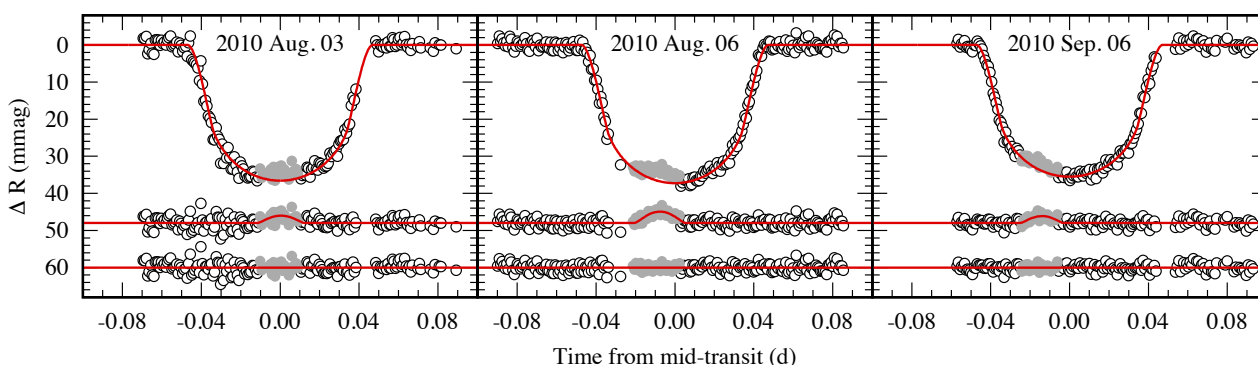
Analiza zebranych obserwacji spektroskopowych wykazała zmienność poziomu aktywności gwiazdy zarówno w długich, jak i krótkich skalach czasowych. Ten ostatni rodzaj zmienności obserwowany był w czasie zmorzonej aktywności gwiazdy i odpowiedzialność za jego generowanie została przypisana zmiennemu wskutek rotacji gwiazdy rozkładowi obszarów aktywnych. Wykonane obserwacje fotometryczne tranzytów nie ujawniły jednak charakterystycznych deformacji zdradzających obecność plam na gwiazdzie układu.

Zakrycia plam gwiazdowych przez planetę WASP-10 b (H3)

Subtelne struktury zniekształcające krzywą blasku zjawiska tranzytu zostały znalezione w przypadku układu planetarnego WASP-10, czemu poświęcona jest trzecia praca niniejszego osiągnięcia habilitacyjnego (Maciejewski et al. 2011c, **H3**). Gwiazda układu jest karłem typu widmowego K5 o temperaturze efektywnej ok. 4700 K. Obiega ją tranzytujący gazowy olbrzym o masie ok. $3 M_{\text{Jup}}$ w ciągu nieco ponad 3 dni (Christian et al. 2009). Krzywa blasku gwiazdy wykazuje zmienność spowodowaną rotacją gwiazdy z występującymi na niej plamami, będącymi przejawami aktywności gwiazdowej (Smith et al. 2009). Wstępne obserwacje chronometrażowe wykazały znaczne odchyłki nastania niektórych tranzytów od liniowej efemerydy (Maciejewski et al. 2011b).

Precyzyjne obserwacje fotometryczne tranzytów planety wędrującej na tle zaplamionej tarczy gwiazdy dają unikalną możliwość mapowania rozkładu obszarów aktywności gwiazdowej. W momencie, gdy planeta zakrywa ciemną plamę, obserwuje się chwilowy wzrost jasności układu. Z kolei plamy, które położone są poza ścieżką planety, mogą wpływać na obserwowaną głębokość tranzytu i stąd na wyznaczenia względnego rozmiaru planety. Obecność ciemnych plam niejako zmniejsza efektywną powierzchnię tarczy gwiazdy i tym samym jej efektywny promień. Obserwowane tranzyty cechują się większą głębokością w porównaniu z sytuacją, gdy fotosfera jest pozbawiona plam. Rozmiary planety jawią się więc większe, niż jest to w rzeczywistości. Przeciwny efekt można sobie wyobrazić, gdy na tarczy gwiazdy dominują jasne plamy, tj. pochodnie. Występowanie na gwiazdzie obszarów aktywnych może mieć wpływ także na chronometraż tranzytów i ich obserwowaną długość poprzez deformację morfologii krzywej blasku tranzytu.

W 2010 roku uzyskano ciągi pomiarów fotometrycznych dla 4 tranzytów planety WASP-10 b za pomocą 2,2-m teleskopu w Obserwatorium na Calar Alto (Hiszpania). Jak zostało to pokazane na rys. 4, w przypadku trzech krzywych blasku zidentyfikowano charakterystyczne pojaśnienia, których pochodzenie zostało przypisane zjawisku zakrycia ciemnych plam przez tarczę planety. Wysokość tych struktur została oszacowana na 2 – 3 mmag. Ich długość trwania okazała się być nieco krótsza od łącznego czasu wejścia i zejścia planety z tarczy gwiazdy. Co więcej, nie zaobserwowano fazy płaskiego wierzchołka. Świadczy to o tym, że zakrycia miały charakter brzegowy. W przypadku wszystkich trzech zjawisk plamy były ulokowane blisko centralnego południka gwiazdy, w odległości kątowej nieprzekraczającej 20 stopni. Zakładając, że kontrast plam na gwiazdzie układu przyjmuje wartości zbliżone do słonecznych, powierzchnie zakrytych plam mieściły się w granicach od 0,6 do 0,9% powierzchni tarczy gwiazdy (odpowiednio



Rys. 4. Krzywe blasku trzech tranzytów planety WASP-10 b. Linią zaznaczono dopasowany model zjawiska po pominięciu struktur związanych z zakryciem ciemnych plam (zaznaczonych szarymi kropkami). Przedstawione na środkowych wykresach odchyłki od modelu tranzytu zostały wykorzystane do określenia własności zakrywanych plam. Finalne odchyłki modelu tranzytu wraz z zakryciem plamy wykreślono na dolnych wykresach. Rysunek zaczerpnięty z pracy Maciejewski et al. (2011c, **H3**).

od 25 do 37% powierzchni tarczy planety). Pojedyncze plamy takich rozmiarów są niewystarczające, aby wytłumaczyć obserwowaną modulację jasności gwiazdy. Plamy te musiałyby mieć rozmiary rzędu 10% tarczy gwiazdy w przypadku kontrastu o wartości typowej dla Słońca.

W przypadku wszystkich czterech obserwowanych tranzytów, nie zauważono znaczącego odejścia od liniowej efemerydy. Aby oszacować ewentualny wpływ zakryć plam na wyznaczone parametry tranzytu, przeprowadzono serię testów opartych na krzywej blasku wolnej od efektów zakryć plam, w której umieszczano sztucznie wygenerowany efekt zakrycia ciemnej plamy. Długość trwania tego zjawiska i jego intensywność ustalono odpowiednio na 40 min i 3 mmag, czyli na wartościach zaczerpniętych z rzeczywistych obserwacji jednej z najsilniejszych deformacji. Badano dwa przypadki, kiedy plama umieszczana była w losowym momencie fazy płaskiego dna tranzytu lub w momencie wejścia lub zejścia planety z tarczy gwiazdy. W pierwszym przypadku wygenerowano 2000 sztucznych krzywych blasku, a następnie do każdej z nich dopasowano model zjawiska tranzytu bez uwzględnienia w modelu zakrycia plamy. Średnia odchyłka w chronometrażu tranzytów okazała się być mało znacząca z wartością $0,09 \pm 0,06$ min. Wynik ten został także jakościowo potwierdzony poprzez eksperymenty przeprowadzone na zaobserwowanych trzech krzywych blasku z rzeczywistymi deformacjami – pominięcie ich w modelu zjawiska nie miało istotnego (poniżej 1σ) wpływu na wyznaczenie momentu środka tranzytu. Natomiast nieuwzględnienie plam w modelu wpływało znacząco (rzędu 5σ) na wyznaczenia głębokości tranzytu, a tym samym na względny promień planety, którego wartość okazywała się być zaniżana. Wynik ten jest zgodny z oczekiwaniami, ponieważ struktury związane z zakryciami ciemnych plam podnoszą średni poziom jasności w fazie płaskiego dna tranzytu i tym samym spływają go. W drugim przypadku wygenerowano po 1000 sztucznych krzywych blasku dla faz wejścia i zejścia planety z tarczy gwiazdy. Zauważono, że takie ułożenie zakryć plam wpływa znacząco na wyznaczenia środków tranzytów, bowiem średnia różnica w chronometrażu wyniosła ok. 0,9 min. Krzywe blasku o zdeformowanych fazach wejścia były niejako opóźnione względem liniowej efemerydy, natomiast przeciwny efekt odnotowano dla krzywych o zdeformowanej fazie zejścia. Co więcej tranzyty okazywały się być krótsze średnio o ok. 1,5 min. Takie fenomenologiczne podejście dostarcza górnego ograniczenia na wyznaczone parametry tranzytów, dla których efekty zakryć plam unikają detekcji np. z powodu niedostatecznej precyzji krzywej blasku. Warto odnotować, że efekt wywołany przez plamy ułożone w okolicach brzegu tarczy gwiazdy, a więc takie, które wpływają w największym stopniu na chronometraż tranzytów, może być mniejszy o czynnik 3 – 5 ze względu na pociemnienie brzegowe i geometryczny skrót perspektywiczny.

Gdyby założyć, że orbita planety jest równoległa do równika gwiazdy, to możliwe staje się wykorzystanie momentów zakryć plam w kolejnych następujących po sobie tranzytach do uściślenia okresu rotacji gwiazdy (np. Silva-Valio 2008). W wielu układach planetarnych to założenie nie jest spełnione (np. Hébrard et al. 2011) i podobnie mogłoby być w przypadku układu WASP-10. Stosunek okresu orbitalnego planety WASP-10 b do okresu rotacji gwiazdy wynosi 1:3,8, w związku z czym obserwacje zakrycia tej samej plamy ułożonej w okolicach środka tarczy gwiazdy w czasie kolejnego tranzytu nie są możliwe (plama będzie już za krawędzią tarczy). Jednak przy założeniu, że dany obszar aktywny może utrzymać się przez czas rzędu kilku okresów rotacji gwiazdy, możliwa jest ponowna rejestracja jego zakrycia kilka tranzytów później. Korzystając z tego uściślono wyznaczenie okresu rotacji gwiazdy równego 11,85 dnia. Wartość ta jest zgodna w granicach błędów z wartością literaturową wynikającą z modulacji krzywej blasku.

Dodatkowym wynikiem badań układu WASP-10 było dokładne wyznaczenie rozmiarów liniowych gazowego olbrzyma. Po uwzględnieniu aktywności gwiazdowej okazały się one mniejsze, niż wskazywała na to większość wcześniejszych prac. Planeta

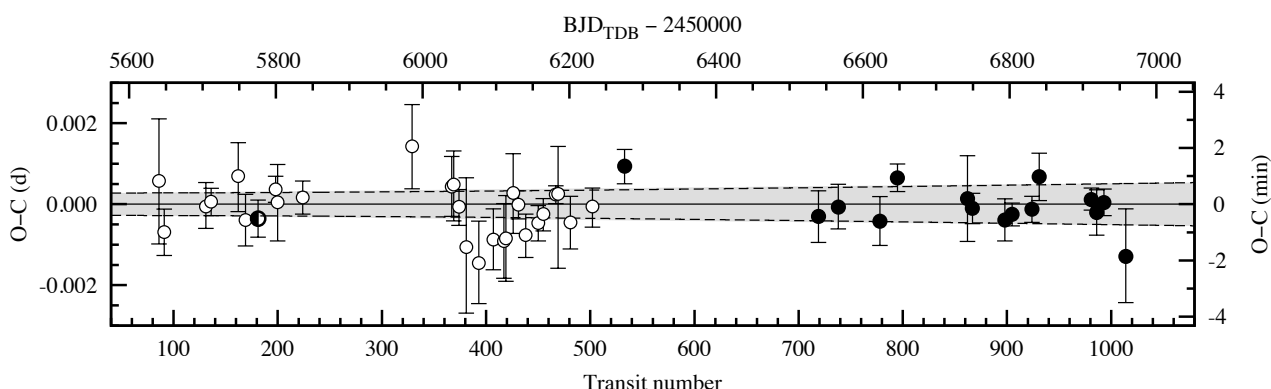
ma masę trzykrotnie większą niż Jowisz, ale jest porównywalnych do niego rozmiarów, co daje jej średnią gęstość bliską 3 gęstościom Jowisza. Dzięki współpracy z grupą badawczą z Uniwersytetu w Rostoku (Niemcy) skonstruowano model budowy wewnętrznej planety. Model ten zakładał istnienie dwóch warstw – centralnego jądra skalnego otoczonego gazowym płaszczem. Aby odtworzyć obserwowane własności planety, należało przyjąć, że w objętości globu zdeponowana jest ilość metali o łącznej masie odpowiadającej 270 – 450 M_{\oplus} . Wynik ten jest o tyle zaskakujący, że przewidywana teoretycznie całkowita ilość dostępnych metali w dysku protoplanetarnym wokół gwiazdy podobnej do WASP-10 wynosi zaledwie 80 M_{\oplus} (Leconte et al. 2010).

Brak detekcji sygnału chronometrażowego dla planety Qatar-1 b (H4)

Egzoplaneta Qatar-1 b to typowy gorący jowisz na kołowej orbicie o okresie ok. 1,42 dnia. Jego masa wynosi ok. 1,3 M_{Jup} , a promień ok. 1,2 R_{Jup} (Alsubai et al. 2011). Gwiazda układu to bogaty w metale karzeł typu widmowego K3, który przejawia umiarkowaną aktywność chromosferyczną. Obserwacje chronometrażowe układu wykazały pewne odstępstwa czasów nastania tranzytów od liniowej efemerydy (von Essen et al. 2013). Zasugerowano, że odchyłki te mają charakter okresowy o skali czasowej 190 lub 390 dni i amplitudzie ok. 1 minuty, i mogą być generowane wskutek perturbacji grawitacyjnych od jeszcze niewykrytej mało masywnej planety. Weryfikacja tych obserwacji stała się celem dedykowanej kampanii obserwacyjnej, o której wynikach traktuje czwarty artykuł wchodzący w skład zgaszanego osiągnięcia naukowego (Maciejewski et al. 2015, **H4**).

Korzystając z sześciu teleskopów o średnicach zwierciadeł od 0,6 do 2,0 m, ulokowanych w Bułgarii, Polsce, Niemczech i Hiszpanii, uzyskano 18 krzywych blasku dla 16 tranzytów w latach 2011 – 2014. Nowe dane wraz z danymi literaturowymi zostały poddane analizie przeprowadzonej w jednolity sposób w celu uniknięcia ewentualnych rozbieżności natury metodologicznej. W efekcie tego poprawiono dokładność wcześniejszych wyznaczeń parametrów układu. Pomimo aktywności gwiazdy, nie zauważono w krzywych blasku sygnałów zakryć plam gwiazdowych w czasie tranzytów.

Analiza chronometrażu planety wykazała brak jakiegokolwiek okresowego sygnału o amplitudzie powyżej 30 s, w szczególności zmienności okresu orbitalnego proponowanej wcześniej w literaturze. Wykres odchyłek od efemerydy liniowej przedstawiono na rys. 5. Model keplerowski odzwierciedla obserwacje momentów



Rys. 5. Odchyłki chronometrażowe od liniowej efemerydy dla planety Qatar-1 b. Dane literaturowe zaznaczono okręgami, a nowe obserwacje – kropkami. Położenie punktu dla epoki 181 (BJD 2455775.4) określone zostało w oparciu zarówno o dane literaturowe z pracy von Essen et al. (2013), jak i nowe obserwacje, więc zaznaczone zostało w połowie wypełnionym kołeczek. Obszar zacieniony pomiędzy przerywanymi liniami pokazuje niepewność efemerydy liniowej na poziomie ufności 95.5%. Zaczepnięto z pracy Maciejewski et al. (2015, **H4**).

tranzytów w sposób w pełni satysfakcjonujący. Dane chronometryczne i dopplerowskie zostały wykorzystane do określenia górnej granicy na masę hipotetycznej dodatkowej planety, która pozostaje pod progiem detekcji. Wykluczono proponowane wcześniej konfiguracje z dodatkowymi planetami w pobliżu współmierności okresów orbitalnych wynoszących 2:1, 5:2 i 3:1. Wykluczono także scenariusz z masywnym perturbującym na dalekiej orbicie. Brak wykrywalnych dalszych planet w układzie wskazuje, że gazowy olbrzym mógł znaleźć się na obecnie obserwowanej ciasnej orbicie za pomocą mechanizmu migracji poprzez duży mimośród.

Odkrycie odejścia od liniowej efemerydy dla planety WASP-12 b (H5)

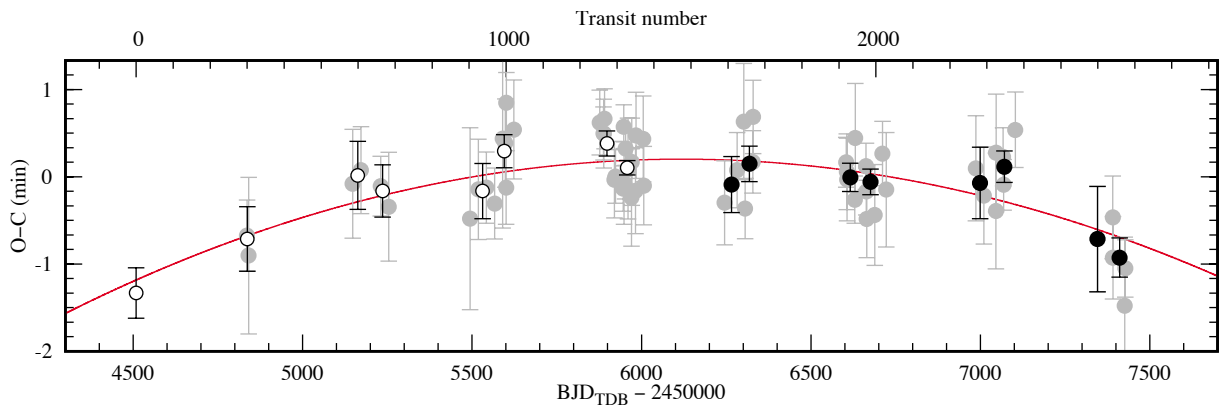
Tranzytująca planeta WASP-12 b (Hebb et al. 2009) jest jedną z najgorętszych egzoplanet. Obiega ona gwiazdę – karła typu widmowego F/G – po niezwykle ciasnej orbicie o promieniu zaledwie 0,023 au (co równa się trzem promieniom gwiazdy) w ciągu nieco ponad 26 godzin. Szacuje się, że temperatura równowagowa planety sięga 2500 K, co czyni ją atrakcyjnym obiektem licznych badań własności jej atmosfery. Przy masie planety wynoszącej ok. $1,4 M_{\text{Jup}}$ jej promień jest nadspodziewanie duży i wynosi $1,8 R_{\text{Jup}}$. Planeta jest zatem znacznie rozdęta. Początkowe obserwacje wskazywały, że mimośród orbitalny wynosi $0,049 \pm 0,015$, czyli jest zauważalnie różny od zera. Przyczynę nadspodziewanie dużych rozmiarów planety upatrywano w pływach wzbudzanych w czasie ruchu po niekołowej orbicie. Energia tych pływów byłaby rozpraszana wskutek tarcia, co z kolei owocowałoby podwyższeniem temperatury równowagowej planety i w konsekwencji wzrostem jej rozmiarów (Miller et al. 2009). Jeśli przyjąć wartość efektywności rozpraszania energii pływów typową dla olbrzymów z Układu Słonecznego, to obliczenia wskazują jednak, że orbita tego gorącego jowisza powinna zostać ukołowiona w bardzo krótkim czasie. Zaproponowano zatem, że w układzie znajduje się dodatkowa planeta, która poprzez oddziaływania grawitacyjne wzbudza i podtrzymuje niezerowy mimośród planety WASP-12 b. Perturbacje te powinny zostać łatwo wykryte poprzez chronometrą tranzytów. Te sugestie stały się uzasadnieniem dalszych obserwacji układu w ramach wspomnianego we wstępie projektu badawczego. Choć kwestia obecności dodatkowej planety nadal pozostaje otwarta (Maciejewski et al. 2011d, 2013a), to nie budzi wątpliwości odkrycie skracania się okresu orbitalnego planety WASP-12 b. O tym oryginalnym dokonaniu traktuje piąty artykuł wchodzący w skład zgłaszanego osiągnięcia naukowego (Maciejewski et al. 2016, **H5**).

Dysponując zestawem ponad 60 precyzyjnych wyznaczeń momentów tranzytów, w większości pochodzących z obserwacji wykonanych w ramach prowadzonego projektu badawczego, stwierdzono, że hipoteza o stałym okresie orbitalnym planety WASP-12 b może zostać odrzucona z poziomem ufności odpowiadającym 5σ (co przekłada się na prawdopodobieństwo równe 99,9999%). Zauważono, że obserwacje są opisywane w sposób zadowalający przez efemerydę zawierającą wyraz kwadratowy w postaci

$$T_{\text{mid}} = T_0 + P_b E + \frac{1}{2} \delta P_b E^2,$$

gdzie E oznacza epokę (numer) tranzytu od ustalonej epoki początkowej T_0 , a δP_b to zmiana okresu orbitalnego P_b pomiędzy kolejnymi tranzytami. Otrzymano wartość $\delta P_b = (-8,9 \pm 1,4) \times 10^{-10}$ dni na epokę do kwadratu, co pozwala na wyznaczenie tempa zmiany okresu orbitalnego $\dot{P}_b = \delta P_b / P_b = (-2,56 \pm 0,40) \times 10^{-2}$ s na rok. Wykres odchyłek od efemerydy liniowej przedstawiono na rys. 6.

Ujemna wartość wielkości δP_b może być zinterpretowana jako dowód zacieśniania się orbity planety wskutek dyssypacji energii pływów wzbudzanych przez planetę w gwiazdzie. Układ planeta-gwiazda, w którym całkowity moment pędu L_{tot} jest zachowany,



Rys. 6. Odchyłki chronometrażowe od liniowej efemerydy dla planety WASP-12 b. Czarne okręgi i kropki oznaczają odpowiednio dane literaturowe i prezentowane w omawianej pracy. Każdy z tych punktów oznacza średnią odchyłkę policzoną osobno dla pierwszej lub drugiej połowy każdego sezonu obserwacyjnego. Poszczególne punkty obserwacyjne zaznaczono szarymi kropkami. Linia ciągła pokazuje przebieg efemerydy kwadratowej. Zaczerpnięto z pracy Maciejewski et al. (2016, H5).

ale energia jest dyssypowana poprzez pływy, jest niestabilny, gdy L_{tot} jest mniejsze od krytycznej wartości momentu pędu L_{crit} (Levrard et al. 2009), która określa stan synchronizacji okresów rotacji obu ciał z okresami obiegu. Głównym składnikiem L_{tot} jest moment pędu związany z rotacją samej gwiazdy i w wielu przypadkach pozostaje on określony z dużą niepewnością z uwagi na nieznaną wartość okresu rotacji. W przypadku gwiazdy układu WASP-12 ograniczenie na prędkość rotacji pochodzi z obserwacji spektroskopowych (Albrecht et al. 2012) i jest wystarczające, aby stwierdzić, że $L_{\text{tot}}/L_{\text{crit}} = 0,4 - 0,7$. Wartość ta jest zdecydowanie mniejsza od jedności, zatem spadek planety na gwiazdę jest nieunikniony. Czas tego spadku został oszacowany na około milion lat, co jest wartością niezwykle krótką w porównaniu z wiekiem układu, szacowanym na ok. 2 mld lat (Hebb et al. 2009).

Obserwowane tempo zacieśniania orbity może posłużyć do określenia wartości współczynnika efektywności rozpraszania energii pływów we wnętrzu gwiazdy Q'_* . Przy założeniu synchronicznej rotacji planety (okres rotacji równy okresowi obiegu) i zerowego mimośrodu, otrzymuje się wyrażenie

$$Q'_* = 9P_b \dot{P}_b^{-1} \frac{M_b}{M_*} \left(\frac{R_*}{a_b} \right)^5 \left(\omega_* - \frac{2\pi}{P_b} \right),$$

gdzie M_b oznacza masę planety, M_* to masa gwiazdy, R_* to jej promień, a_b to półosć wielka orbity, a ω_* to prędkość kątowna rotacji gwiazdy (Levrard et al. 2009). Obliczenia dają Q'_* równe około $2,5 \times 10^5$. Modele teoretyczne wynikające z pracy Essick & Weinberg (2016) przewidują Q'_* równe $4,3 \times 10^5$ dla gwiazd zbliżonych do Słońca. Wyznaczona z obserwacji wartość wydaje się zatem nadspodziewanie mała. Gwiazda układu ma temperaturę efektywną wyższą od Słońca o 300 – 500 K, zatem posiada płytszą warstwę konwektywną, w związku z czym należałoby oczekiwać dla niej zdecydowanie większej wartości Q'_* .

Obserwowany trend w chronometrażu planety WASP-12 b mógłby być także fragmentem długookresowego sygnału o znacznej amplitudzie, wywołanego wskutek precesji orbity nieznacznie odbiegającej kształtem od okręgu. Przyjmując typowe wartości parametrów opisujących wnętrze gorącego Jowisza, otrzymuje się, że okres rotacji peryastronu w następstwie odkształcenia pływowego jest rzędu 10 lat. Efekty wynikające

ze spłaszczenia ciał wskutek rotacji i relatywistyki mogą w tym przypadku zostać pominięte, ponieważ wywołują precesję o okresie rzędu $10^3 - 10^4$ lat.

W celu sprawdzenia opisanego powyżej scenariusza, jednoczesnej analizie poddano dane chronometryczne rozszerzone o momenty okultacji i dane dopplerowskie. Otrzymano tempo precesji peryastronu $\dot{\omega} = 0,095 \pm 0,020$ stopnia na dobę, co odpowiada okresowi precesji peryastronu $\tau_{\omega} = 10,4 \pm 2,2$ roku przy wartości mimośrodu $e_b = 0,00110 \pm 0,00036$. Efekt ten miałby zaniedbywany wpływ na wartości parametrów wyznaczanych w czasie modelowania krzywych blasku tranzytów. W szczególności zmiany położenia peryastronu indukowałyby zmiany długości trwania zjawiska tranzytu o zaledwie 2,7 s, co jest wartością całkowicie ginącą w typowych niepewnościach długości trwania tranzytu, wynoszących 1 – 3 min.

W celu rozróżnienia pomiędzy obiema możliwościami (tj. między zacieśnianiem orbity a jej precesją) skorzystano z Bayesowskiego kryterium informacyjnego Schwarzera (BIC – ang. Bayesian Information Criterion). Faworyzuje ono model z efemerydą kwadratową (BIC = 21,8) nad modelem precesji (BIC = 28,6) z prawdopodobieństwem $e^{\Delta\text{BIC}/2} = 29$.

Odkrycie skracania się okresu orbitalnego planety WASP-12 b zostało potwierdzone przez inny zespół badawczy w pracy Patra et al. (2017). Autorzy przedyskutowali także dodatkowe efekty, które mogłyby generować obserwowane zmiany, takie jak przyspieszenie radialne wskutek ruchu orbitalnego układu planetarnego wokół towarzysza gwiazdowego, efekt Shklovskii'ego czy efekt Applegate'a. Wszystkie one mogą zostać odrzucone na podstawie analizy danych dopplerowskich i chronometrycznych okultacji.

Podsumowanie

Przedstawiony w ramach zgłaszanego osiągnięcia naukowego zbiór artykułów poświęconych badaniom gorących jowiszy stanowi ilustrację głównej części mojej aktywności naukowej po doktoracie. Prace **H1** i **H2** demonstrują umiejętność przeprowadzenia zarówno wstępnych badań układów planetarnych, wybranych według określonych kryteriów, jak i zakrojonych na większą skalę kampanii obserwacyjnych z wykorzystaniem fotometrycznych i spektroskopowych metod obserwacyjnych. Praca **H3** jest przykładem raportu z badań pogłębionych o dodatkowe wątki astrofizyczne, takie jak aktywność plamotwórcza gwiazdy czy budowa wewnętrzna planety. Z kolei artykuł **H4** jest przykładem reakcji na doniesienia literaturowe, których wyniki wymagają jak najszybszej weryfikacji. Zwieńczeniem tego zbioru jest praca **H5**, w której przedstawiono oryginalny wynik naukowy – prawdopodobny spadek planety na gwiazdę wskutek oddziaływań pływowych pomiędzy obydwoma ciałami.

Literatura

- Adams, F. C., Laughlin, G., 2006, ApJ, 649, 1004
Adams, E. R., López-Morales, M., Elliot, J. L., et al., 2010, ApJ, 721, 1829
Agol, E., Steffen, J., Sari, R., Clarkson, W., 2005, MNRAS, 359, 567
Albrecht, S., Winn, J. N., Johnson, J. A., et al. 2012, ApJ, 757, 18
Alonso, R., Brown, T. M., Torres, G., et al., 2004, ApJ, 613, L153
Alsubai, K. A., Parley, N. R., Bramich, D. M., et al. 2011, MNRAS, 417, 709
Baglin, A., Auvergne, M., Barge, P., et al., 2007, AIP Conf. Proc., vol. 895, 201
Bakos, G., Noyes, R. W., Kovács, G., et al., 2004, PASP, 116, 266
Bakos, G., Howard, A. W., Noyes, R. W., et al., 2009, ApJ, 707, 446
Batygin, K., Bodenheimer, P. H., Laughlin, G. P., 2016, ApJ, 829, 114
Beckers, J. C., Vanderburg, A., Adams, F. C., et al., 2015, ApJL, 812, L18
Birkby, J. L., Cappetta, M., Cruz, P., et al., 2014, MNRAS, 440, 1470

Bleicic, J., Harrington, J., Madhusudhan, N., et al., 2014, ApJ, 781, 116
 Bodenheimer, P., Lin, D. N. C., Mardling, R. A., 2001, ApJ, 548, 466
 Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., et al., 2010, Science, 327, 977
 Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M., 2000, ApJ, 529, 45
 Christian D. J. et al., 2009, MNRAS, 392, 1585
 Essick, R., Weinberg, N. N., 2016, ApJ, 816, 18
 Fabrycky, D. C., Tremaine, S., 2007, ApJ, 669, 1298
 Fabrycky, D. C., Lissauer, J. J., Ragozzine, D., et al., 2014, ApJ, 790, 146
 Goldreich, P., Schlichting, H. E., 2014, AJ, 147, 32
 Hatzes, A. P., Rauer, H., ApJ, 810, L25
 Hebb, L., Collier-Cameron, A., Loeillet, B., et al. 2009, ApJ, 693, 1920
 Hebrard, G., Désert, J.-M., Díaz, R. F., et al., 2010, A&A, 516, 95
 Hébrard, G., Ehrenreich, D., Bouchy, F., et al. 2011, A&A, 527, L11
 Hellier, C., Anderson, D. R., Collier Cameron, A., et al., 2012, MNRAS, 426, 739
 Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S., 2000, ApJ, 529, 41
 Holman, M., Murray, N. W., 2005, Science, 307, 1288
 Howard, A. W., Marcy, G. W., Bryson, S. T., et al. 2012, ApJS, 201, 15
 Hoyer, S., López-Morales, M., Rojo, P., et al., 2016, MNRAS, 455, 1334
 Jiang, I.-G., Lai, C.-Y., Savushkin, A., et al., 2016, AJ, 151, 17
 Kley, W., Nelson, R. P., 2012, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 50, 211
 Koch, D. G., Borucki, W. J., Basri, G., et al., 2010, ApJ, 713, L79
 Latham, D., Stefanik, R. P., Mazeh, T., et al., 1989, Nature, 339, L38
 Leconte, J., Barafee, I., Chabrier, G., Barman, T., & Levrard, B. 2010, A&A, 506, A385
 Levrard, B., Winisdoerffer, C., Chabrier, G., 2009, ApJ, 692, L9
 Lloyd, J. P., Lunine, J. I., Mamajek, E., et al., 2013, preprint (arXiv:1309.1520)
 Maciejewski, G., Dimitrov, D., Neuhäuser, R., et al., 2010, MNRAS, 407, 2625
 Maciejewski, G., Neuhäuser, R., Raetz, S., et al., 2011a, EPJ Web of Conferences, 11, 05009
 Maciejewski, G., Dimitrov, D., Neuhäuser, R., et al., 2011b, MNRAS, 411, 1204
 Maciejewski, G., Raetz, S., Nettelmann, N., et al., 2011c, A&A, 535, A7
 Maciejewski, G., Errmann, R., Raetz, S., et al., 2011d, A&A, 528, A65
 Maciejewski, G., Dimitrov, D., Seeliger, M., et al., 2013a, A&A, 551, A108
 Maciejewski, G., Niedzielski, A., Wolszczan, A., et al., 2013b, AJ, 146, 147
 Maciejewski, G., Fernández, M., Aceituno, F. J., et al., 2015, A&A, 577, A109
 Maciejewski, G., Dimitrov, D., Fernández, M., et al., 2016, A&A, 588, L6
 Mancini, L., Southworth, J., 2016, in Proceedings of the Haute Provence Observatory Colloquium, 5-9 October 2015, edited by I. Boisse, O. Demangeon, F. Bouchy & L. Arnold
 Marcy, G. W., Butler, R. P., 1996, ApJ, 464, L147
 Mardling, R. A., 2007, MNRAS, 382, 1768
 Mayor, M., Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
 Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., et al. 2000, ApJ, 532, L55
 Miller, N., Fortney, J. J., & Jackson, B. 2009, ApJ, 702, 1413
 Miralda-Escude, J., 2002, ApJ, 564, 1019
 Montalto, M., Gregorio, J., Boué, A., et al. 2012, MNRAS, 427, 2757
 Mustill, A. J., Davies, M. B., Johansen, A., et al., 2016, preprint (arXiv:1603.09506)
 Nascimbeni, V., Cunial, A., Murabito, S., et al. 2013, A&A, 549, A30
 Ogihara, M., Inutsuka, S., Kobayashi, H., 2013, ApJL, 778, L9
 Patra, K. C., Winn, J. N., Holman, M. J., et al., 2017, AJ, 154, 4
 Peale, S. J., Cassen, P., Reynolds, R. T., 1979, Science, 203, 892
 Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., et al., 1996, Icarus, 124, 62
 Pollacco, D. L., Skillen, I., Collier Cameron, A., et al., 2006, PASP, 118, 1407
 Pollacco D. et al., 2008, MNRAS, 385, 1576
 Ragozzine, D., Wolf, A. S., 2009, ApJ, 698, 1778
 Rasio & Ford 1996
 Schlaufman, K. C., Winn, J. N., 2016, astro-ph/1604.03107
 Silva-Valio, A. 2008, ApJ, 683, 179
 Smith A. M. S. et al., 2009, MNRAS, 398, 1827
 Steffen, J. H., Ragozzine, D., Fabrycky, D. C., 2012, PNAS, 109, 7982
 Tripathi A. et al., 2010, ApJ, 715, 421
 von Essen, C., Schröter, S., Agol, E., & Schmitt, J. H. M. M. 2013, A&A, 555, A92
 Weidenschilling & Marzari 1996

- Wolszczan, A., Frail, D., 1992, Nature, 355, 145
 Wolszczan, A., 1994, Science, 264, 538
 Wright, J. T., Marcy, G. W., Howard, A. W., et al., 2012, ApJ, 753, 160

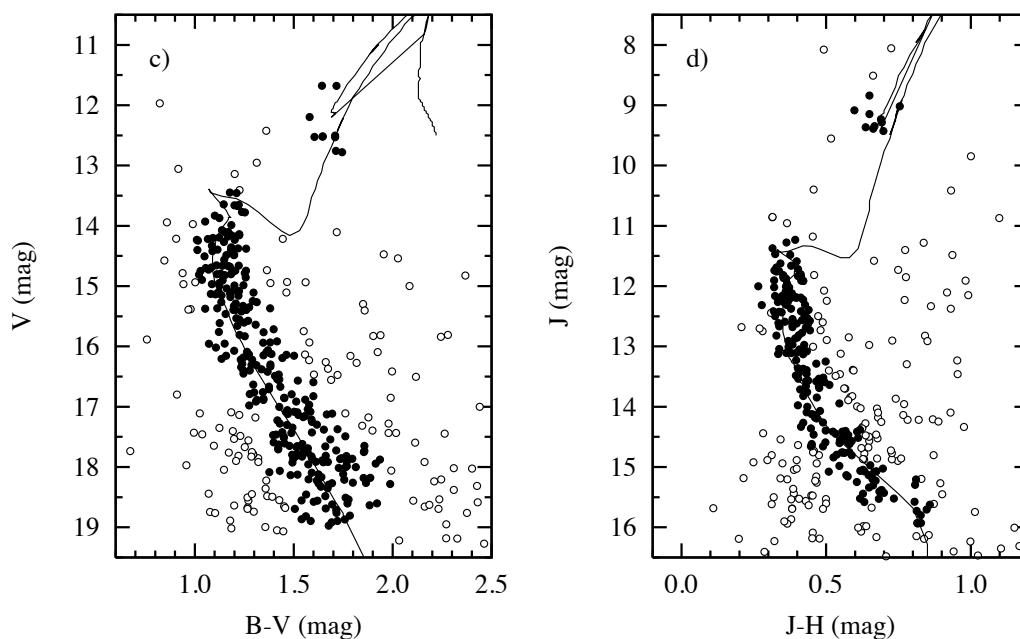
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

Moją działalność naukową po otrzymaniu stopnia doktora można podzielić na dwie części, które rozdziela mój pobyt na stażu podoktorskim w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu F.Schillera w Jenie (Niemcy). W omówieniu tym pomijam moje mniej znaczące kontrybucje (tj. o udziale procentowym poniżej 10%) do wątków badawczych, których nie byłem wiodącym autorem.

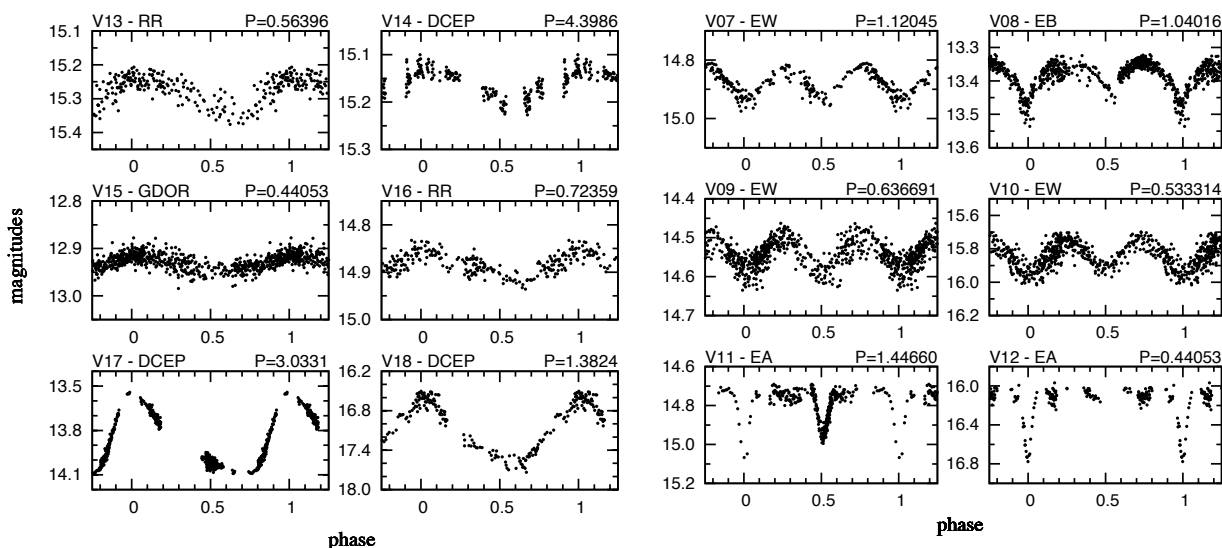
Badania słabo poznanych gromad otwartych

W latach 2008 – 2009, moja praca naukowa skupiona była wokół tematyki gromad otwartych. Była to niejako naturalna kontynuacja tematyki pracy doktorskiej. Powołany został dedykowany projekt badawczy pod nazwą „Open Cluster Survey” (<http://www.home.umk.pl/~gmac/OCS>).

Projekt realizowano w oparciu o obserwacje wielobarwne uzyskiwane głównie za pomocą 90/60-cm teleskopu Schmidta-Cassegraina znajdującego się w Centrum Astronomii UMK. Wykorzystywano także teleskopy 70/50-cm Schmidta i 2-m Ritchey-Chretien-Coude w Narodowym Obserwatorium Narodowym na Rożenie (Bułgaria). Dane z zakresu optycznego były łączone z fotometrią w bliskiej podczerwieni pochodzącą z przeglądu 2-Micron All Sky Survey. Analiza diagramów dwubarwnych i barwa-jasność (rys. 1) pozwalała na wyznaczenie podstawowych parametrów astrofizycznych badanych gromad: ich wieku, odległości, poczerwienienia międzygwiazdowego, liczebności populacji gwiazdowej, całkowitej masy i stanu zaawansowania ewolucji dynamicznej. Dla większości badanych gromad, takich jak Berkeley 95, Czernik 21, Czernik 38, Juchert 11, King 17, King 18 (Maciejewski 2008) czy Berkeley 53 (Maciejewski et al. 2009), były to



Rys. 1. Diagramy barwa-jasność skonstruowane dla gromady otwartej NGC 7762 – po lewej w zakresie optycznym, po prawej w bliskiej podczerwieni. Kropkami zaznaczone o dużym prawdopodobieństwie przynależności do gromady, natomiast okręgami – gwiazdy tła galaktycznego. Dopasowana izochrona zaznaczona jest linią ciągłą. Zacerpnięto z pracy Maciejewski et al. (2008a).



Rys. 2. Przykładowe krzywe blasku gwiazd zmiennych pulsujących (po lewej) i zaćmieniowych (po prawej) wykrytych w polu gromady Trumpler 3. Zaczerpnięto z pracy Maciejewski & Bukowiecki (2010).

wyniki pierwszy raz oparte na głębokiej (do ok. 21 mag w paśmie V) i szerokokątnej fotometrii CCD.

Populacje gwiazdowe wybranych gromad były badane pod kątem występowania w nich gwiazd zmiennych różnych typów – od gwiazd pulsujących po układy zaćmieniowe. Poznanie własności takich gwiazd dostarczało dodatkowych informacji o zawierających je gromadach (np. Maciejewski et al. 2008a, 2008b).

Badania młodej gromady otwartej Trumpler 3 zostały rozszerzone o przyrządcze dane spektroskopowe niskiej rozdzielczości w celu wyznaczenia paralaksy spektroskopowej najjaśniejszych gwiazd (Maciejewski & Bukowiecki 2010). Wyniki pokazały, że Trumpler 3 jest młodą, masywną i bogatą w gwiazdy gromadą o typowym nachyleniu funkcji masy. Poszukiwania gwiazd zmiennych w szerokim polu wokół gromady zaowocowały wykryciem 24 takich obiektów (rys. 2). Tylko jedna z nich – zmienna pulsująca typu γ -Doradus – została zidentyfikowana z wysokim prawdopodobieństwem jako należąca do populacji gwiazd gromady.

W czasie mojej aktywnej działalności w ramach projektu przeprowadzono badania łącznie 23 wcześniej słabo poznanych gromad otwartych.

Chronometraż tranzytów gorących planet

Od roku 2010 moje zainteresowania naukowe skupiały się na tranzytujących egzoplanetach. W czasie swojego pobytu na stażu podoktorskim zainicjowałem projekt naukowy, którego celem była próba wykrycia odchyłek w ruchu orbitalnym tranzytujących planet od modelu keplerowskiego (Maciejewski et al. 2011a, <http://www.home.umk.pl/~gmac/TTV>). Oprócz układów planetarnych omówionych w opisie zgłaszanego osiągnięcia naukowego, w ramach projektu przebadano ponad 20 kolejnych egzoplanet, co zaowocowało opublikowaniem blisko 20 artykułów naukowych.

Jedną z pierwszych zbadanych egzoplanet była XO-5 b, która wyróżniała się dużą wartością liczby Safronowa i dużą wartością przyspieszenia grawitacyjnego przy powierzchni¹. Celem badań była weryfikacja parametrów układu i analiza chronometrażowa. Wykorzystując z dwie krzywe blasku tranzytów uzyskanych 2-m teleskopem na Calar Alto, potwierdzone zostały literaturowe wartości parametrów układu

¹ oczywiście planety gazowe nie posiadają powierzchni składającej się z litej skały czy lodów. W ich przypadku za powierzchnię przyjmuje się np. obszar atmosfery, w którym staje się ona nieprzezroczysta w zakresie optycznym.

za wyjątkiem promienia planety, który z wartością $1,03^{+0,06}_{-0,05} R_{\text{Jup}}$ okazał się być mniejszy od wcześniejszych wyznaczeń. Uzyskane wyniki potwierdziły dużą wartość liczby Safronowa równą $0,113^{+0,013}_{-0,011}$. Tak znaczna wartość wskazuje, że planeta nie doświadczyła znacznej utraty masy wskutek promieniowania ultrafioletowego pochodzącego od gwiazdy (np. Hansen & Barman 2007). Jest to zgodne z oczekiwaniami, jeśli weźmie się pod uwagę typ widmowy gwiazdy (G8) i jej niską emisję w skrajnym ultrafiolecie. Przyspieszenie grawitacyjne wyniosło $24,6^{+2,8}_{-2,3} \text{ m s}^{-2}$, co jest wartością zbliżoną do przyspieszenia grawitacyjnego na Jowiszu. Analiza chronometrażu tranzytów nie wykazała odstępstwa od liniowej efemerydy.

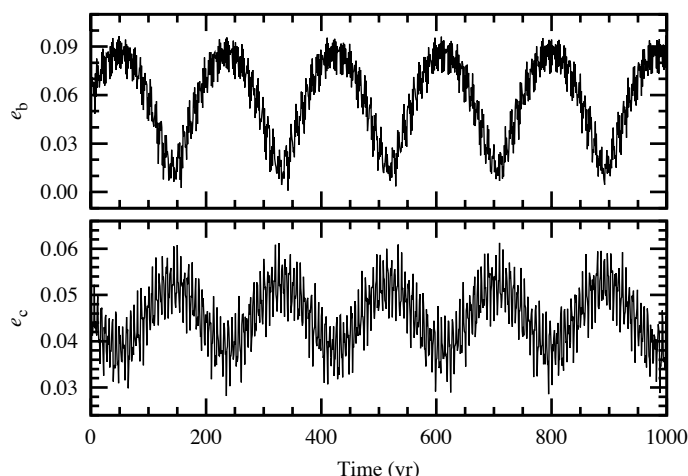
W pracy Vaňko et al. (2013) przedstawiono wyniki badań układu TrES-3. W oparciu o 14 nowych krzywych blasku dokonano rewizji wartości parametrów układu i efemerydy tranzytów planety TrES-3 b. Analiza chronometrażowa wykluczyła istnienie sygnału o amplitudzie powyżej 1 minuty na przestrzeni 4 lat obserwacji. Rozważania dynamiczne pozwoliły wykluczyć istnienie dodatkowej planety o masie ok. 1 masy Ziemi w pobliżu konfiguracji rezonansowych 3:1, 2:1 i 5:3 zarówno na wewnętrznych, jak i zewnętrznych orbitach.

Kolejnym celem obserwacyjnym był układ WASP-1. Wcześniejsze doniesienia literaturowe wskazywały, że niewielka wartość mimośrod orbit występującego w nim gorącego jowisza, wzbudzona i podtrzymywana przez pobliskiego towarzysza planetarnego, mogłaby wytłumaczyć nadspodziewanie duży rozmiar planety. Dodatkowa planeta byłaby wykrywalna za pomocą metody chronometrażu tranzytów. W latach 2007 – 2013 zaobserwowano 13 tranzytów, co pozwoliło uściślić wcześniejsze wyznaczenia wartości parametrów układu. Analiza chronometrażowa nie wykazała jakichkolwiek odchyłek od liniowej efemerydy (Maciejewski et al. 2014a). Podobne wyniki otrzymano dla układów planetarnych: HAT-P-30, HAT-P-37, TrES-5, WASP-28, WASP-36 i WASP-39 (Maciejewski et al. 2016).

Układ planetarny wokół gwiazdy GJ 436 składa się przynajmniej z jednej gorącej planety, która rozmiarem i masą jest zbliżona do Neptuna. Doniesienia literaturowe wskazywały na możliwość istnienia jeszcze dwóch, mało masywnych planet (Stevenson et al. 2012). Na przestrzeni trzech lat zaobserwowano 3 tranzyty planety GJ 436 b za pomocą 2-m teleskopów, dzięki czemu możliwe było osiągnięcie precyzji fotometrycznej poniżej 1 mmag (Maciejewski et al. 2014b). Dane te posłużyły do dokładniejszego wyznaczenia parametrów układu, a także do badań dynamiki postulowanego układu trójplanetarnego. Co prawda analiza chronometrażu tranzytów planety GJ 436 b nie wykazała odchyłek od liniowej efemerydy, to jednak wynik ten pozwolił nałożyć dodatkowe więzy na parametry dwóch dodatkowych planet. Symulacje numeryczne pokazały, że planeta c powinna doświadczać dość znaczących, bo sięgających 20 min w chronometrażu, perturbacji w ruchu orbitalnym od GJ 436 b. Okres orbitalny drugiej postulowanej planety – oznaczonej roboczo GJ 436 d – nie był wyznaczony z uwagi na zbyt małą liczbę obserwowanych tranzytów, jednak wyniki przeprowadzonej analizy dynamicznej pozwoliły na wykluczenie części możliwych wartości.

Inne wątki badawcze

Gwiazda TYC 1422-614-1 jest czerwonym olbrzymem typu widmowego K2, wokół której został odkryty układ planetarny składający się z 2 masywnych planet o okresach orbitalnych ok. 200 i ok. 570 dni (Niedzielski et al. 2015). Precyzyjne pomiary dopplerowskie, zebrane za pomocą Teleskopu Hobby'ego-Eberly'ego i 3,6-m Telescopio Nazionale Galileo na La Palmie (Hiszpania), pozwoliły wyznaczyć ich minimalne masy na ok. 2,5 i ok. 10 M_{Jup} . Stosunek okresów orbitalnych obu planet jest bliski współmierności



Rys. 3. Przebieg zmian mimośrodków planet w układzie planetarnym TYC 1422-614-1 w ciągu pierwszego 1000 lat. Zaczerpnięto z pracy Niedzielski et al. (2015).

7:20, co sugeruje, że planety mogą być w rezonansie dynamicznym. W celu weryfikacji tej tezy opracowano model dynamiczny układu, który posłużył także do uściślenia parametrów orbitalnych wynikających z modelu keplerowskiego, a także do śledzenia ewolucji dynamicznej układu. Nie stwierdzono występowania sprzężenia położenia peryastronów obu planet, co wyklucza konfigurację rezonansową. Przebieg zmian mimośrodków planetarnych w ciągu 1000 lat pokazany jest na rys. 3.

Obserwacje spektroskopowe pozwoliły na odkrycie kandydatki na planetę o minimalnej masie ok. $5,4 M_{\text{Jup}}$ wokół czerwonego olbrzyma TYC 3667-1280-1 (Niedzielski et al. 2016). Układ ten wyróżnia to, że okres orbitalny planety wynosi zaledwie 26,5 dnia, a pół wielka orbity jest tylko siedmiokrotnie większa od promienia gwiazdy. Temperatura równowagowa globu została oszacowana na ok. 1350 K, co pozwala zaliczyć planetę do ciepłych, a nawet gorących jowiszy. Prawdopodobieństwo, że planeta tranzytuje, zostało ocenione na $13,9 \pm 2,0\%$. Z uwagi na to, że gwiazda ekspanduje w następstwie zmian w budowie wewnętrznej kierujących ją w kierunku gałęzi olbrzymów, planeta również może być rozdęta. Zakładając, że jej promień jest w granicach od 1 do $2 R_{\text{Jup}}$, głębokość tranzytów byłaby w granicach 0,3 – 1,1 mmag. Z kolei długość zjawiska mogłaby być w granicach od 5,2 godz. dla tranzytu brzegowego do 29 godz. przy geometrii tranzytu centralnego. Wyliczenia te wskazują, że detekcja tranzytu za pomocą teleskopów naziemnych będzie niezwykle trudna, jeśli nie niemożliwa, tym bardziej że gwiazda wykazuje zmienność fotometryczną. Układ ten wydaje się być doskonałym celem dla teleskopów kosmicznych. Badania tranzytów planety TYC 3667-1280-1 b dostarczyłyby cennych informacji na temat interakcji planeta-gwiazda w późnych stadiach ewolucji gwiazdowej.

Literatura

- Hansen, B.M.S., Barman, T., 2007, ApJ, 671, 861
- Maciejewski, G., 2008, Acta Astronomica 58, 389
- Maciejewski, G., Boeva, S., Georgiev, Ts., et al., 2008a, Baltic Astronomy, 17, 51
- Maciejewski, G., Georgiev, Ts., Niedzielski, A., 2008b, Astronomische Nachrichten, 329, 387
- Maciejewski, G., Mihov, B., Georgiev, Ts., 2009, Astronomische Nachrichten, 330, 847
- Maciejewski, G., Bukowiecki, Ł., 2010, AN, 331, 312
- Maciejewski, G., Neuhäuser, R., Rätz, S., et al., 2011a, EPJ Web of Conferences, 11, 05009

Maciejewski, G., Seeliger, M., Adam, Ch., et al., 2011b, AcA, 61, 25
Maciejewski, G., Ohlert, J., Dimitrov, D., et al., 2014a, AcA, 64, 27
Maciejewski, G., Niedzielski, A., Nowak, G., et al., 2014b, AcA, 64, 323
Maciejewski, G., Dimitrov, D., Mancini, L., et al. 2016, AcA, 66, 55
Stevenson, K.B., et al., 2012, ApJ, 755, 9
Vařko, V., Maciejewski, G., M.Jakubík, M., et al., 2013, MNRAS, 432, 944

Toruń, dnia 08.05.2018

G. Maciejewski