

# Chronometraż tranzytów egzoplanet

Gracjan Maciejewski

Centrum Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, ul. Gagarina 11, 87-100 Toruń, gm@astri.uni.torun.pl

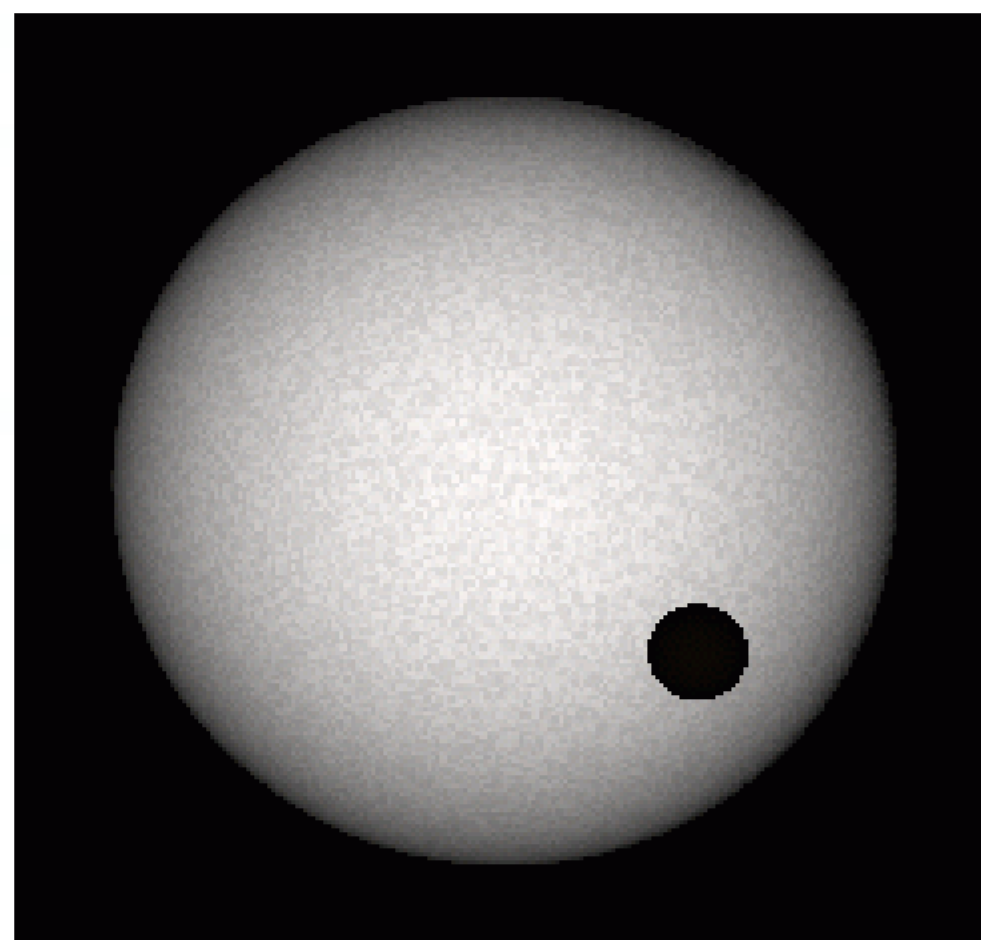


## 1. Tranzytujące egzoplanety

Fotometryczne obserwacje tranzytów egzoplanet wraz z precyzyjnymi pomiarami prędkości radialnych gwiazd centralnych pozwalają na wyznaczenie pełnego zestawu parametrów fizycznych odległych światów. Fakt ten jest niezwykle istotny w astronomii egzoplanetarnej. Możliwe staje się wyznaczenie rzeczywistej masy i promienia egzoplanet, co dalej ma istotny wpływ na naszą wiedzę na temat ich budowy wewnętrznej. Ta gałąź astronomii jest stosunkowo młoda – pierwszy tranzyt egzoplanety zaobserwowano nieco ponad 10 lat temu.

W układzie planetarnym, w którym znajduje się tylko tranzytująca planeta, jej kolejne tranzyty następują po sobie ściśle periodycznie, tj. w równych odstępach czasu. Natomiast jeżeli w układzie znajduje się dodatkowa planeta, wówczas skutek jej oddziaływania grawitacyjnego z tranzytującą planetą, ruch tej ostatniej zostaje zaburzony. Perturbacje te powodują odchyłki od modelu keplerowskiego w obserwowanych momentach tranzytów, a na diagramie O-C (obserwacje odjęte przewidywania teoretyczne), narzędziu powszechnie stosowanym w astronomii, pojawiają się modulowane okresowo

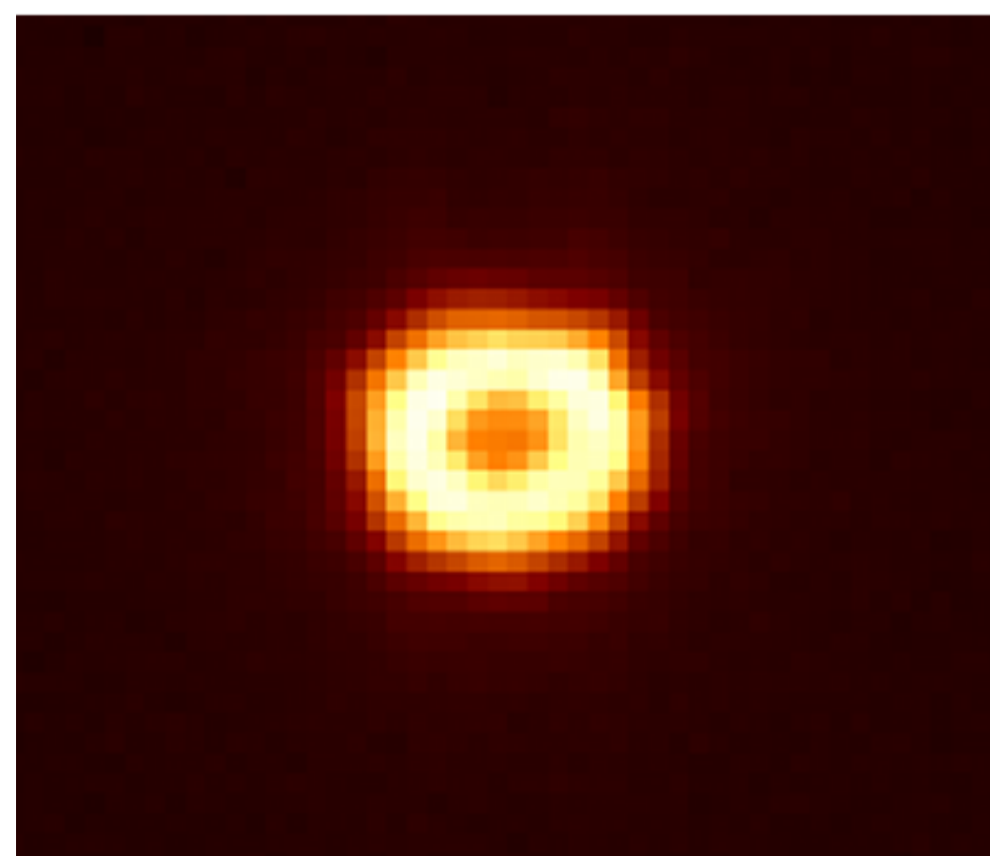
odchyłki chronometrażowe (sygnał chronometrażowy). Dzięki pomiarom tych odchyłek można stosunkowo łatwo odkryć dodatkowe planety o masach porównywalnych do Ziemi czy Marsa, gdy zastosowanie innych metod detekcji (np. precyzyjny pomiar prędkości radialnej gwiazdy centralnej) nie jest możliwy ze względu na ograniczenia astrofizyczne lub instrumentalne.



Rysunek 1: Wizja artystyczna egzoplanety tranzytującej na tle tarczy swojej macierzystej gwiazdy WASP-12.

## 3. Fotometria submilimagnitudowa

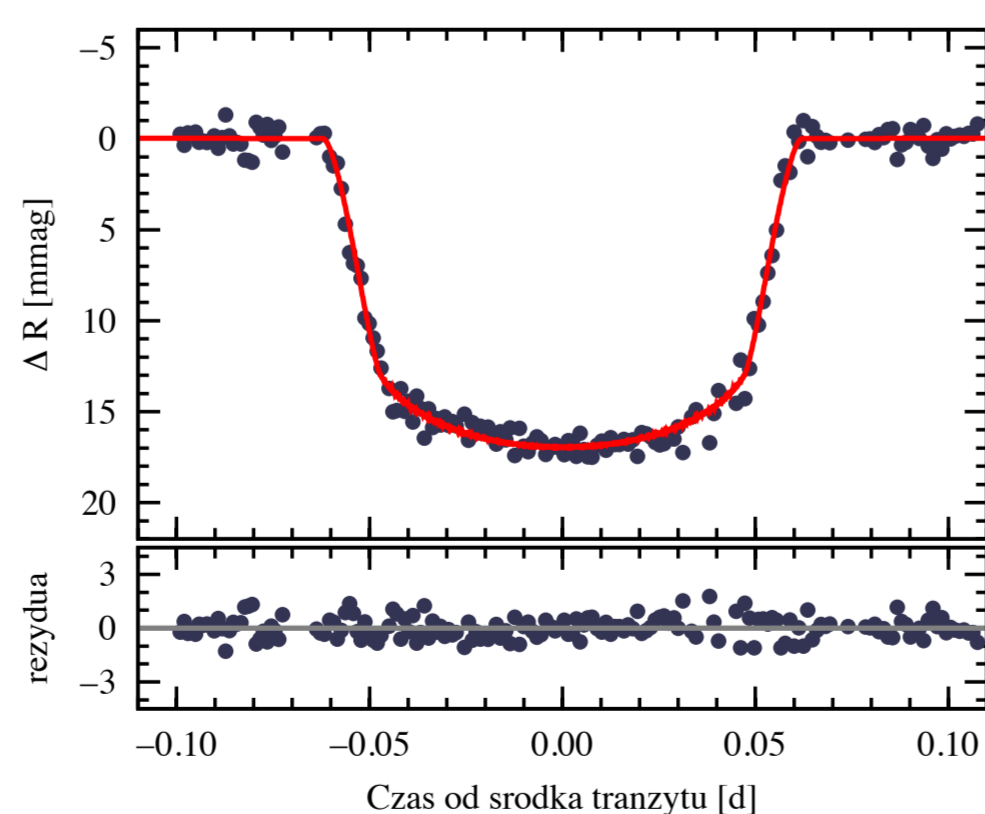
Do rzetelnego wyznaczenia momentu środka tranzytu niezbędne jest zaobserwowanie kompletnego zjawiska i monitorowanie jasności gwiazdy także przed początkiem i po zakończeniu tranzytu. Obserwacje w tzw. fazie poza tranzytem pozwalają określić, a następnie usunąć trendy w fotometrii spowodowane różnicową ekstynkcją atmosferyczną, efektami sprzętowymi lub rzadziej zmiennością fotometryczną gwiazdy centralnej. Obserwacje wykonuje się w filtrze, w którym dany instrument (teleskop i detektor CCD) cechuje się największą czułością, zwykle w V, R lub I. Korzystanie z zakresów długofalowych jest szczególnie pożądane z uwagi na zminimalizowanie efektów związanych z ekstynkcją atmosferyczną i pociemnieniem brzegowym dysku gwiazdy centralnej.



Rysunek 3: Profil rozkładu światła obserwowanej gwiazdy na obrazie CCD (górny panel) i jego trójwymiarowa reprezentacja (dolny panel, Maciejewski et al. 2011, AcA, 61, 25).

Badane obiekty – gwiazdy centralne tranzytujących planet – są stosunkowo jasne ( $V < 13$  mag) i możliwe jest zastosowanie metody rozogniskowania teleskopu w celu zwiększenia dokładności pojedynczego pomiaru, efektywniejsze wykorzystanie czasu obserwacyjnego poprzez wydłużenie czasu ekspozycji i skrócenie tzw. czasu martwego (czasu potrzebnego na odczyt pojedynczej ekspozycji z matrycy CCD) oraz zminimalizowanie efektów instrumentalnych. Zastosowanie rozogniskowania powoduje, że profil rozkładu światła gwiazdy ma kształt podobny do obwałanka, co zaprezentowano na rys. 3.

Zebrane dotychczas doświadczenie pokazuje, że w zależności od wielkości instrumentu można uzyskać precyzję pomiarów fotometrycznych na poziomie od 1,5 mmag (milimagnitudo) dla teleskopu o średnicy zwierciadła 0,5 m do 0,6 mmag dla 2,2-metrowego instrumentu (rys. 4). W tym ostatnim przypadku precyzja fotometryczna przekłada się na dokładność wyznaczenia momentu środka tranzytu na poziomie kilkunastu sekund. Umożliwia to detekcję potencjalnych perturbatorów w badanych pozasłonecznych układach planetarnych.



Rysunek 4: Krzywa blasku tranzytu planety WASP-12 b zaobserwowana 2 lutego 2010 za pomocą 2,2-m teleskopu na Calar Alto w Hiszpanii. Osiągnięto precyzję równą 0,6 mmag, co przekłada się na dokładność chronometrażową 12 s. Na dolnym panelu przedstawiono rezydua po dopasowaniu modelu zjawiska (Maciejewski et al. 2011, A&A, 528, 65).

## 2. Sygnał chronometrażowy

Ekspertyzy numeryczne wskazują, że planeta o masie Ziemi (perturber), oddziałując na tranzytującą planetę o masie Jowisza, może generować odchyłki w chronometrażu tego ostatniego na poziomie 1 minuty, gdy planety pozostają w rezonansie orbitalnym. Tego typu efekty są łatwe do wykrycia teleskopami o średnicy zwierciadła rzędu 0,5 m, a bardziej dokładne pomiary uzyskane teleskopami 1-metrowymi i większymi umożliwiają bardziej precyzyjne wyznaczenie własności fizycznych dodatkowej planety. Ponadto prace teoretyczne wskazują, że poprzez chronometraż tranzytujących planet można odkryć ich naturalne satelity, a nawet planety trojańskie.

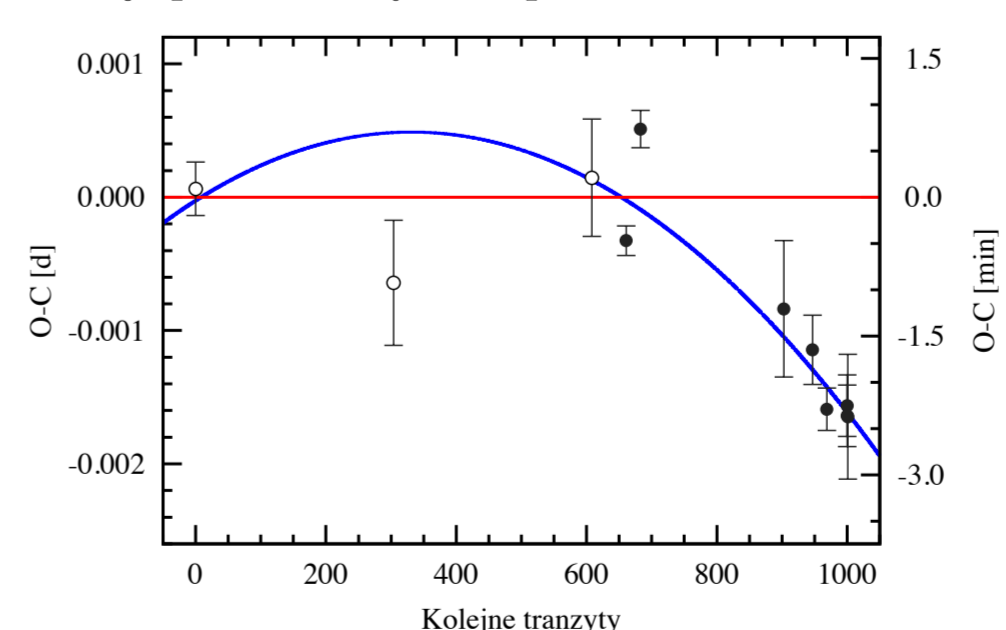
Obserwowany sygnał chronometrażowy zależy od nieznanymi parametrów perturbatora: jego masy, półosi wielkiej orbity, jej mimośrodowości oraz orientacji orbity w przestrzeni. Poszukiwanie rozwiązań w tej wielowymiarowej przestrzeni nie jest zadaniem łatwym i wymaga znacznych mocy obliczeniowych. Co więcej, poznanie parametrów orbity, po której porusza się perturbator, nie jest trywialne także z uwagi na nieuniknioną degenerację rozwiązań. Z tego

## 4. Najnowsze wyniki

### 4.1 Spadek planety na gwiazdę?

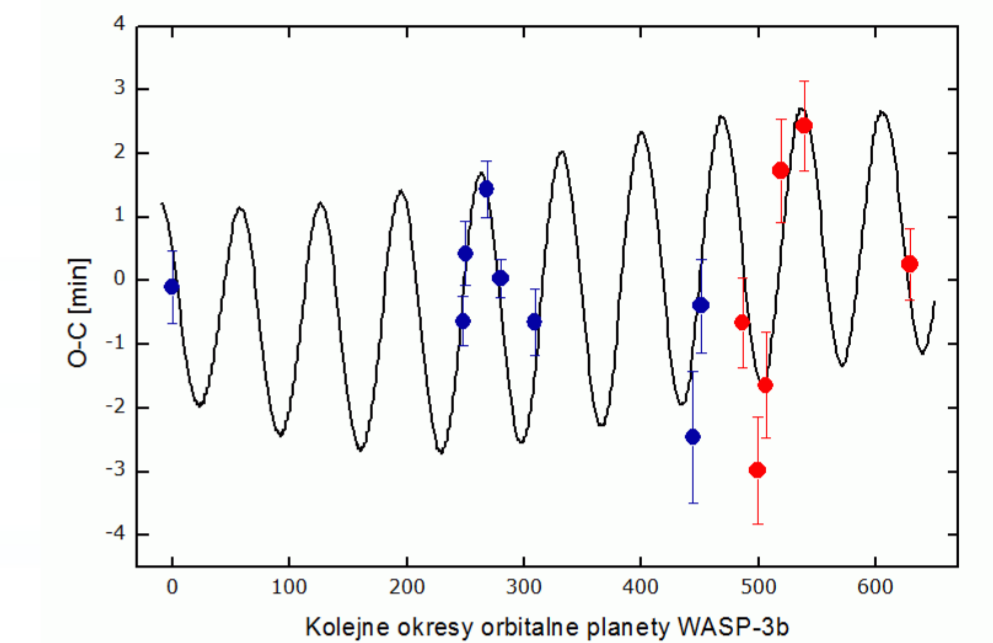
Egzoplaneta WASP-12 b została odkryta jako jedna z najgorętszych planet. Jej okres orbitalny wynosi nieco ponad 26 godzin, masa została oceniona na 1,4 masy Jowisza, a rozmiar na 1,8 promienia Jowisza (rys. 1). Tak duże rozmiary planety wymagają znalezienia mechanizmu zwiększającego rozmiary planety ponad wartość wynikającą ze stanu równowagi hydrostatycznej. Analiza geometrii układu oraz obserwacje fotometryczne i spektroskopowe wskazują, że planeta może tracić masę w postaci wiatru z górnych warstw atmosfery, opadającego następnie w kierunku gwiazdy poprzez punkt libracyjny L1 układu planeta-gwiazda.

Ta niezwykle interesująca egzoplaneta jest celem precyzyjnych obserwacji prowadzonych od 2010 roku. Rozkład punktów na diagramie O-C wskazuje na wyraźne odejście od liniowej efemerydy (rys. 5). Zjawisko to może być efektem zacieśniania orbity wskutek utraty momentu pędu poprzez oddziaływania pływowe z macierzystą gwiazdą i w rezultacie spadkiem planety na ciało centralne. Zaobserwowana odchyłka może być także fragmentem długookresowych cyklicznych zmian powodowanych przez perturbatora. Planowane są dalsze obserwacje w celu weryfikacji postawionych hipotez.



Rysunek 5: Diagram O-C dla planety WASP-12 b. Puste punkty to dane literaturowe, natomiast pełne punkty to wyniki najnowszych obserwacji. Czerwoną linią zaznaczono efemerydę liniową z pracy Maciejewski et al. 2011, A&A, 528, 65, niebieska linia odzwierciedla efemerydę z niezerowym wyrazem kwadratowym, lepiej pasująca do obserwacji.

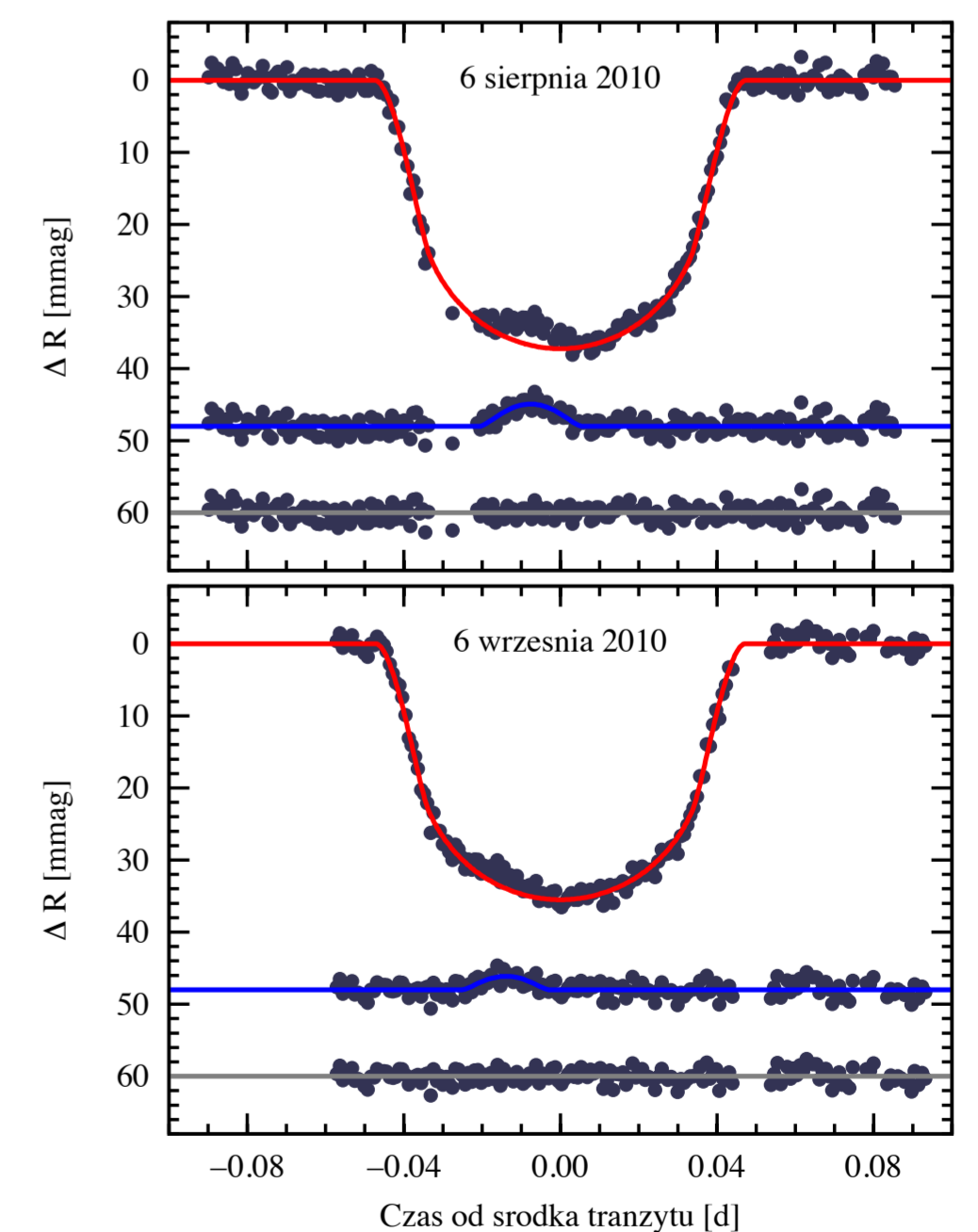
względem przy analizie chronometrażu tranzytów należy posilkować się dodatkowymi danymi (np. prędkościami radialnymi centralnej gwiazdy) lub, jeśli inne metody zawiodą, prowadzić długotrwałe (nawet kilkudziesięcioletnie) i systematyczne obserwacje fotometryczne układu.



Rysunek 2: Diagram O-C dla chronometrażu tranzytów planety WASP-3 b. Rozrzut punktów pomiarowych (niebieskie to dane literaturowe, czerwone zaczerpnięte z pracy Maciejewski et al. 2010, MNRAS, 407, 2625) sugeruje istnienie sygnału chronometrażowego, którego model (zaznaczony czarną linią) zakłada istnienie dodatkowej planety o masie zaledwie 15 mas Ziemi i okresie orbitalnym dwukrotnie dłuższym od planety b.

### 4.2 Okultacje plam gwiazdowych

Planeta WASP-10 b obiega gwiazdę centralną w ciągu 3 dni i wyróżnia się spośród typowych gorących planet-olbrzymów znaczną gęstością: jej masa to 3 masy Jowisza, a promień nieznacznie przekracza promień Jowisza. Analiza wysokiej jakości obserwacji tranzytów tej planety pozwoliła przeprowadzić modelowanie parametrów fizycznych planety, w wyniku którego potwierdzono zaskakująco małe rozmiary planety, anonsowane wcześniej w literaturze. Opracowano model budowy wewnętrznej planety, który wskazuje na znaczną zawartość metali w planecie o łącznej masie 270-450 mas Ziemi. Co ciekawe, odkryto wyraźne ślady okultacji przez dysk planety ciemnych plam występujących na powierzchni macierzystej gwiazdy (rys. 6).



Rysunek 6: Krzywe blasku tranzytów planety WASP-10 b, w których zaobserwowano efekty okultacji ciemnych plam. Obserwacje wykonano 2,2-m teleskopem na Calar Alto w Hiszpanii. Na każdym panelu górny wykres przedstawia obserwacje wraz z dopasowanym modelem. Środkowy wykres zawiera rezydua, w których okultacje plam widoczne są jako pozorne pojaśnienia. Dolny wykres przedstawia rezydua po wymodelowaniu plam.