

Ocena rozprawy doktorskiej mgra Federico Panichi p.t. „Dynamical analysis of selected, multiple planetary systems detected by KEPLER mission”

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy badań dynamiki kilku zwartych układów planetarnych, które odkryto analizując krzywe blasku dostarczone przez misję Kepler. Charakterystyczną cechą wielu tych układów jest to, że okresy orbitalne planet są prawie współmierne, tzn. w układach tych występują rezonanse ruchów średnich, bądź też odstępstwo od takich rezonansów jest niewielkie. W rozprawie szczegółowej analizie zostały poddane układy: Kepler-30 i KOI-1599, a ponadto uzyskano pewne wyniki dla układów Kepler-60 i Kepler-29. Tematyka rozprawy dotyczy w ogólności detekcji i analizy układów pozasłonecznych, która jest bardzo aktualna. Na dzień 27 sierpnia 2018 r. The Extrasolar Planets Encyclopaedia podaje 3823 planety, a w szczególności misja Kepler ma fundamentalny wkład w zwiększenie tej liczby: 2327 w głównej części misji + 325 w części K2 misji (po awarii żyroskopów stabilizujących orientację satelity) potwierdzone planety oraz 2244 + 496 kandydatów zgodnie z danymi na stronie NASA projektu.

Do ustalenia budowy układów planetarnych: liczby planet, wyznaczenia ich mas i promieni oraz elementów orbit autor wykorzystał analizę zmiany momentów tranzytów planet (ang. Transit Timing Variation, TTV). Jeśli obiektowi centralnemu (gwiazdzie) towarzyszy tylko jedna planeta (układ jednoplanetarny), to wówczas czasy pomiędzy przejściami planety przez tarczę gwiazdy są stałe. Jeśli jednak obecna jest druga planeta (lub więcej), to w trakcie ruchu po orbicie planety wymieniają energię i moment pędu na skutek oddziaływania grawitacyjnego i oddziaływanie to jest najsilniejsze podczas koniunkcji planet. Zaburzenia grawitacyjne wywołują zmiany quasi-okresowe elementów orbit, co skutkuje zmianami okresu tranzytów. Analiza nieregularności momentów tranzytów w krzywej blasku pozwala wnioskować o architekturze (rozmiarach i kształcie orbit) układu planetarnego. Obserwacje tranzytów są aktualnie najwydajniejszą metodą wykrywania planet pozasłonecznych i pozwalają na wyznaczenie nie tylko masy ale i promieni planet, a więc ich gęstości, a zatem budowy wewnętrznej. W tym sensie masa jest jednym z fundamentalnych parametrów definiujących charakter planet.

Na uwagę zasługuje fakt, że w rozprawie dokonywana jest całościowa analiza danych fotometrycznych. Z surowych krzywych blasku wyznaczane są średnie czasy tranzytów planet (od niezaburzonych przejść planet przez tarczę gwiazdy), następnie zmiany momentów tranzytów, na podstawie których modeluje się masy i parametry orbit układu planetarnego oraz podaje się interpretację astrofizyczną wyników (w szczególności scenariusze formowania się i ewolucji orbitalnej układów wielokrotnych). Do tego celu została w rozprawie użyta i rozwinięta metoda nazwana *modelowaniem dynamicznym* lub *fotometrią dynamiczną*. Takie podejście jest znane w metodzie detekcji planet pozasłonecznych np. przy pomocy prędkości radialnej i efektu Dopplera. Jednak w zastosowaniu do detekcji na podstawie danych fotometrycznych metoda ta jest wykorzystywana od niedawna (od ok. 2005 roku, kiedy opublikowano pierwsze prace modelujące TTV).

Praca składa się z pięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym autor opisuje układy pozasłoneczne, misję KEPLER oraz problemy z interpretacją danych obserwacyjnych pochodzących z tej misji. Rozdział ten kończy się sformułowaniem problemów i opisem struktury rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiona jest, fundamentalna dla pracy, metoda modelowania krzywej blasku nazywana fotometrią dynamiczną lub metodą modelowania dynamicznego. Część pierwsza tej metody dotycząca wstępnej obróbki krzywych blasku dostarczonych przez misję KEPLER opisana jest algorytmicznie. Podano nazwy gotowych programów wykorzystanych do ich obróbki. Podobnie opisano następny krok polegający na dopasowaniu parametrów orbity do geometrycznego modelu tranzytu. Niestety brakuje tutaj, choćby krótkiego wyjaśnienia, czym są parametry tranzytu. W istocie jeden rysunek z krótkim opisem byłby wystarczający. W pracy nie podano modelu tranzytu (jedno-planetarny układ), a przy okazji omawiania zjawiska tranzytu autor informuje, że założono w nim iż mimośród planety jest zerowy (koniec trzeciego akapitu na str. 16). Nie wiadomo dlaczego zrobiono takie założenie, a uzasadnienie, że planety w układach odkrytych przez misję KEPLER mają małe mimośrody jest raczej niewystarczające. Trochę szczegółowiej jest tylko opisane wyznaczanie parametrów orbitalnych z obserwowanych zmian momentów tranzytów (model TTV).

To czego mi zabrakło w tym rozdziale, to wyjaśnienie, jakie efekty oddziaływania na planetę tranzytującą pochodzące od ciała centralnego i innych planet były wzięte pod uwagę, a jakie zostały pominięte: czy uwzględniano efekty relatywistyczne od gwiazdy centralnej i innych planet, czy rozważano wpływ splaszczenie gwiazdy, oddziaływanie pływowe z gwiazdą, czy uwzględniano poprawkę czasoprzestrzenną (ang. light-time travel effect, LTT) związaną ze zmianą odległości

miedzy gwiazdą i obserwatorem spowodowaną ruchem gwiazdy względem środka masy jej układu planetarnego. Autor wspomina na str. 10, że wykorzystywana jest a priori wiedza astrofizyczna odnośnie oddziaływania dysk-planeta, więc prawdopodobnie również tego typu oddziaływanie było uwzględniane, jednak przydatny były dla czytelnika chociaż ogólny opis tego modelu. Z drugiej strony pewne stwierdzenia są trywialne, jak np. tłumaczenie, że amplituda TTV rośnie gdy druga planeta zbliża się do planety tranzytującej (koniec drugiego akapitu na str. 20). Przydatne byłoby również wykorzystanie najprostszej analitycznej teorii ruchu zaburzonego do objaśnienia jakościowego charakteru zmian TTV. Przykład takiego opisu można znaleźć w pracy Renu Malhotra *Dynamical model of pulsar-planet systems*, in *Millisecond Pulsars -- A Decade of Surprise*, M. Tavani, D. Backer & A. Fruchter, eds. Pub.: Astronomical Society of the Pacific. p. 399-410 (1995), astro-ph/9406033. Podano w niej prostą analityczną teorię układu posiadającego dwie planety, którą wykorzystano do opisu chronometrycznego sygnału pochodzący od pulsara posiadającego te planety.

Rozdział trzeci jest poświęcony nowemu wskaźnikowi dynamiki nazwanemu metodą błędu odwracania (ang. Reversibility Error Method (REM)). Charakteryzuje się bardzo dobrą wydajnością obliczeniową i wykorzystywany jest do rozróżniania stabilnych i niestabilnych orbit w przestrzeni fazowej oraz detekcji rezonansów w równaniach ruchu N -ciał w długich interwałach czasowych. Błąd odwracania w n -tej iteracji jest zdefiniowany jako średnia kwadratowa przesunięcia warunku początkowego w przestrzeni fazowej przy pomocy n iteracji w przód stochastycznie zaburzonego strumienia fazowego odwzorowania symplektycznego i n iteracji w tył do punktu początkowego przy pomocy odwrotnego strumienia. Należy podkreślić, że z teoretycznego opisu REM zawartego w oryginalnych pracach wynika, że ma on zupełnie inny charakter niż inne szybkie wskaźniki dynamiczne, które w pewien sposób mierzą wykładnicze rozbieganie się bliskich trajektorii w przestrzeni fazowej. By zdefiniować REM potrzeba rozpatrywać stochastyczny układ różniczkowy, który ma być zaburzeniem badanego układu hamiltonowskiego. Niestety, opis metody przedstawiony w pracy trudno uznać za jasny. Jeżeli badamy stabilność (chaos) układu opisanego iteracjami odwzorowania symplektycznego podanego wzorem (3.14), to nie wiadomo czym jest odwzorowanie z indeksem Υ we wzorze (3.15). Określenie, że jest to „perturbed map with amplitude gamma” trudno uznać za precyzyjne, szczególnie, że w tym samym wzorze pojawiają się nawiasy, które mają oznaczać uśrednianie ale również nie jest to zdefiniowane.

W istocie REM liczony jest jako norma różnicy pomiędzy warunkiem początkowy oraz wynikiem całkowania numerycznego w przód i w tył tegoż warunku początkowego. Rolę „szumu” mają spełniać błędy metody oraz błędy zaokrążeń. Jednakże, jak to okazało się w dalszej części

pracy, metodę tę w pewnych sytuacjach trzeba było zmodyfikować dodając ad hoc „małe zaburzenie” do warunku początkowego. Do całkowania numerycznego został wykorzystany prosty algorytm symplektyczny *leapfrog*.

W rozdziale trzecim porównano również wyniki zastosowania REM i innych szybkich indyktorów dynamiki: cięcia Poincare, MEGNO i NAFF (analizy częstości fundamentalnych) do układów modelowych o niewielkiej ilości stopni swobody i płaskiego ograniczonego zagadnienia trzech ciał. Przykłady te pokazują dużą czułość w odróżnianiu orbit chaotycznych od regularnych w reżimach zarówno Chirikova jak i Nekhorosheva.

Rozdział czwarty zawiera główne wyniki dotyczące odtwarzania architektury wybranych układów pozasłonecznych z danych obserwacyjnych misji KEPLER. Autor opisał szczegółowo zastosowanie opisanej wcześniej metody fotometrii dynamicznej do układu trzech planet Kepler-30 i układu dwóch planet KOI-1599 w rezonansie ruchu średniego 3:2.

Układ Kepler-30 jest trudny do analizy, ponieważ okresy orbitalne planet są bliskie kilku rezonansom, a masy planet są bardzo zróżnicowane: masa najbardziej masywnej planety jest 60 razy większa od masy najlżejszej planety. To zróżnicowanie jest bardzo interesujące z punktu widzenia powstawania tak niejednorodnego układu planetarnego. Istotnym wynikiem tej części jest relatywnie bardzo dokładne wyznaczenie mas planet w systemie Kepler-30, w granicy rzędu kilku procent, co jest bardzo rzadko możliwe w innych przypadkach systemów sondy Kepler.

W układzie KOI-1599 zweryfikowano dynamicznie obecność dwóch planet-kandydatek w rezonansie ruchu średniego 3:2. Najważniejszym wynikiem tego rozdziału jest szczegółowa weryfikacja hipotezy zmienności obserwowanych momentów tranzytów jako efektu TTV oraz wyznaczenie prawdopodobnych mas planet, pomimo degeneracji masa-mimośród. Do analizy tego układu wykorzystano metodę fotometrii dynamicznej do detekcji planet i mapy dynamiczne konstruowane przy pomocy szybkich indyktorów (głównie REM i MEGNO) do badania rezonansowego charakteru i stabilności dynamicznej układu.

Ponadto uzyskano pewne wyniki o charakterze kontrybucji do publikacji, dotyczących układu trzech planet Kepler-60 w rezonansie Laplace'a i układu dwóch planet Kepler-29 w rezonansie 9:7. Rozdział piąty zawiera podsumowanie głównych wyników rozprawy.

Warto podkreślić, że część rezultatów opisanych w rozprawie została opublikowana w formie 7 artykułów w renomowanych czasopismach MNRAS, Chaos Solitons and Fractals, Journal of Physics A: Mathematical General i Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, spośród których w czterech pan Federico Panichi jest pierwszym autorem, a jeden artykuł jest w przygotowaniu.

Rozprawa napisana jest poprawnie pod względem językowym, bardzo starannie i czytelnie wykonane są rysunki. Jest uzupełniona dodatkami zawierającymi zestawienie danych uzyskanych z analizy krzywych blasku układów Kepler-30 i KOI-1599 oraz spisem tabel i ilustracji. Obszerna bibliografia liczy 249 pozycji. W pracy można znaleźć pewne usterki typowo edytorskie, n.p. na stronie 42 brakuje wyjaśnienia znaczenia nawiasu ostrokątnego jako wartości średniej we wzorze (3.15), w oznaczeniu integratora symplektycznego we wzorze (3.16) i pod nim występuje rozbieżność w indeksach dolnych, występują literówki w nazwisku Nekhorosheva (str. 44, 48, 51-53).

Mimo przedstawionych powyżej zastrzeżeń i uwag krytycznych dotyczących sposobu prezentacji tekstu rozprawy uważam, że wypracowana i spójna metoda fotometrii dynamicznej i nowa metoda detekcji chaosu deterministycznego REM są wartościowymi narzędziami dla analizy układów planetarnych. Uzyskane wyniki dotyczące charakterystyki dynamicznej wybranych systemów i detekcji układów rezonansowych dają istotny wkład do rozumienia powstawania i ewolucji układów planetarnych. Tym samym rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane w procedurze nadania stopnia doktora i wnoszę o dopuszczenie pana mgra Federico Panichi do dalszych etapów tejże procedury.

Mania Rybicka