

Streszczenie

Niniejsza praca ma na celu możliwie pełne scharakteryzowanie kilku zwartych systemów wieloplanetarnych, odkrytych w ramach misji fotometrycznej KEPLER agencji kosmicznej NASA. Analizę koncentrujemy na systemach planetarnych, w których orbity planet są bliskie rezonansom ruchu średniego (MMR). Rezonans orbitalny może działać jako mechanizm chroniący planety przed bliskimi koniunkcjami i kolizjami, skutkującymi samo-destrukcją całego systemu. Obecnie wiadomo, że wiele systemów planetarnych KEPLERa, choć bardzo zwartych, pozostaje stabilnymi przez bardzo długi czas, pomimo, że nie są to konfiguracje ściśle rezonansowe, w sensie niepełnej synchronizacji okresów orbitalnych.

Wybrane do analizy gwiazdy KEPLERa są niezbyt jasne i nie można lub bardzo trudno jest zastosować do ich obserwacji metodę prędkości radialnych (tzw. *Radial Velocity*, RV) lub inne, niezależne techniki astrofizyczne, w szczególności dla potwierdzenia istnienia ich systemów planetarnych. Nie można także wyznaczyć najważniejszego parametru fizycznego, jakim jest masa planety, bezpośrednio z obserwacji tranzytów. W celu wyznaczenia mas planet, jak również określenia globalnej architektury dynamicznej układów planetarnych, można jednak użyć zmiany momentów tranzytów planet (tzw. *Transit Timing Variation*, TTV), który implikują wzajemne oddziaływania grawitacyjne planet. Modelowanie N -body TTV, jako pośredniej informacji dynamicznej, w wielu przypadkach wystarcza do wyznaczenia mas planet i stanowi odpowiednik niezależnej metody obserwacyjnej. Następnie, znając promienie planet na podstawie fotometrii, można określić ich gęstość i strukturę wewnętrzną.

W tym celu została w niniejszej pracy rozwinięta metoda, nazwana tutaj metodą modelowania dynamicznego lub fotometrii dynamicznej. Podobne podejście jest już dobrze ugruntowane we wcześniejszych badaniach przeprowadzonych metodą prędkości radialnych. Jednak nadal rzadko jest one spotykane w literaturze opisującej badania układów planetarnych wykrywanych fotometrycznie. W takim przypadku jej zastosowanie jest bardziej złożone. Zaproponowana w pracy metoda dynamicznej fotometrii opiera się na analizie surowych krzywych blasku,

wyznaczeniu tranzytów planet i obserwacji TTV, jak również na optymalizacji mas i parametrów modelu orbitalnego nowoczesnymi metodami statystycznymi (algorytmy ewolucyjne i statystyka Bayesa) oraz szczegółowej analizie struktury przestrzeni fazowej badanego systemu planetarnego z pomocą tzw. szybkich indykatorów i bezpośredniego całkowania równań ruchu. Pozwala to szczegółowo charakteryzować wybrane układy planetarne z wykorzystaniem jedynie dostępnych obserwacji fotometrycznych. W podejściu tym możliwe jest określenie struktury przestrzeni fazowej i rezonansów ruchu średniego oraz możliwych mechanizmów tworzenia się tych rezonansów, np. poprzez migrację planetarną.

W pierwszym etapie zaproponowanej metody, dostępne krzywe blasku zebrane przez sondę KEPLER są analizowane w celu wyznaczenia tranzytów oraz zmiany ich momentów (TTV), na skutek interakcji grawitacyjnych planet. Wyznaczane są również ich niektóre właściwości fizyczne, takie jak promień planet i nachylenie orbit planetarnych.

W drugim kroku szczegółowo badamy właściwości dynamiczne wybranych konfiguracji orbitalnych układów planet. W niektórych przypadkach, jak Kepler-30, natura rezonansowa układu może nie być od razu „oczywista” ani widoczna, nawet jeśli analizowane są kąty krytyczne rezonansów ruchu średniego, sugerowane poprzez bliską współmierność okresów orbitalnych.

W takich przypadkach, ze względu na niepewności parametrów orbit, musimy analizować strukturę przestrzeni fazowej i warunków początkowych blisko konfiguracji określonej przez optymalne parametry modelu orbitalnego i masy planet. Aby wyznaczyć strukturę przestrzeni fazowej, ważne jest sprawdzenie, czy układ planetarny jest umiejscowiony w strukturze rezonansu, ewentualnie jak bardzo warunek początkowy jest odseparowany od dokładnego rezonansu (o niezerowej szerokości), z uwzględnieniem niepewności parametrów modelu.

Aby skutecznie wykrywać struktury rezonansowe w systemach KEPLERa, charakteryzujące się stabilnymi lub niestabilnymi orbitami w przestrzeni fazowej, opracowaliśmy nowy, dedykowany szybki wskaźnik dynamiki o nazwie *Reversibility Error Method* (REM). Algorytm ten cechuje bardzo dobra wydajność obliczeniowa, w szczególności w zastosowaniu do systemów planetarnych zawierających planety typu Super-Ziemi, o relatywnie małej masie i słabych wzajemnych interakcjach. Inaczej niż w przypadku wykrywanych metodą RV systemów z masywnymi planetami jowiszowymi, systemy KEPLERa, w sensie optymalnych modeli obserwacyjnych, są stabilne dla większości bliskich warunków początkowych. Ich orbity charakteryzują się zwykle niewielkimi mimośrodami, dlatego separatory rezonansów są bardzo wąskie. Dlatego też, w celu analizy ich struktury, niezbędne jest numeryczne rozwiązywanie równań ruchu N -ciał w długich interwałach czasowych, nawet jeśli używane są do tego celu szybkie indykatory dynamiki. Ustalono, że metoda REM oparta o najprostszy algorytm symplektyczny (*leapfrog*) jest bardzo łatwa w implementacji, efektywna obliczeniowo, pozostając

w pełni równoważną innym indykatorem, opartym o maksymalny wykładnik Lapunowa lub analizę częstości fundamentalnych.

Dynamiczna charakterystyka i detekcja systemów rezonansowych jest istotnym krokiem dla rozwiązania nadal otwartych problemów, takich jak mechanizmy tworzenia się rezonansów ruchu średniego i zwartych systemów planetarnych, statystyczny deficyt par planet w pewnych rezonansach, wpływ interakcji dysków protoplanetarnych na obserwowane konfiguracje. W tym kontekście niniejsza praca, w której wyznaczane są parametry fizyczne i orbitalne systemów pozostających z rezonansie, lub blisko-rezonansowych, ustanawia warunki brzegowe dla zrozumienia historii mechanizmów powstawania i ewolucji systemów planetarnych w późnych stadiach ich istnienia.

W niniejszej pracy omówiony powyżej sposób rozumowania stosuje się do kilku interesujących i niezbyt dobrze zbadanych, zwartych systemów wieloplanetarnych wykrytych dzięki obserwacjom teleskopu KEPLER. Wykazujemy, że każdy z tych systemów musi być rozpatrywany praktycznie indywidualnie. Zbadano szczegółowo system trzech planet Kepler-30 oraz zweryfikowano układ dwóch planet KOI-1599 w rezonansie ruchu średniego 3:2. Praca przynosi również kontrybucję do badań systemów planetarnych Kepler-60 (trzy planety w rezonansie Laplace'a) oraz Kepler-29 (dwie planety w rezonansie 9:7). W pracy przedstawiono szczegóły teoretyczne i obliczeniowe zastosowanego podejścia oraz wyniki jego zastosowania do analizowanych układów planetarnych.

21.07.2018 ✓

Federico Perini