

Streszczenie

W niniejszej rozprawie, badamy procesy powstawania rezonansów ruchu średniego we wczesnych etapach ewolucji układów planetarnych, wtedy gdy wciąż formujące się lub już zupełnie uformowane planety zanurzone są w gazowym dysku protoplanetarnym. Koncentrujemy się na układach zawierających super-Ziemie lub mini-Neptuny, należące do najliczniejszej klasy planet odkrytych do tej pory. Planety ewoluujące w środowisku gazowym podlegają migracji orbitalnej wskutek oddziaływań pływowych pomiędzy dyskiem i planetą. Przewidujemy, że jeśli względna migracja dwóch planet jest zbieżna to planety te mogą schwytać się w rezonans ruchu średniego. Czy takie oczekiwania są zawsze spełnione? Odpowiedzi na to pytanie szukamy, wykorzystując dwuwymiarowe hydrodynamiczne modelowanie wzajemnych oddziaływań dysku protoplanetarnego i planet oraz, tam gdzie jest to możliwe, analityczne oszacowania oparte na uproszczonym opisie tych oddziaływań.

Pierwsza seria symulacji, zainspirowana konfiguracją planet obserwowaną w układzie Kepler-29, jest prowadzona w celu określenia warunków panujących w dysku, które sprzyjają tworzeniu się rezonansu ruchu średniego drugiego rzędu 9:7 pomiędzy dwoma super-Ziemiąmi o tej samej masie. Znajdujemy, że schwywanie się planet w rezonans następuje podczas zbieżnej migracji, jeśli jeden z kątów rezonansowych, w momencie dotarcia do rezonansu przyjmuje wartość z tak zwanego "okna przechwycenia". Szerokość tego okna zależy od względnego tempa migracji i ukołowania, które z kolei są określone przez parametry dysku. Okno przechwycenia jest szerokie, jeśli tempo względnej migracji jest niskie i ulega zwężeniu w miarę wzrostu tempa migracji. Jeśli tempo migracji jest wystarczająco wysokie, wtedy okno jest zamknięte i planety nie utworzą konfiguracji rezonansowej. Potwierdzamy tutaj wyniki poprzednich badań i, dzięki naszemu podejściu do problemu rezonansów drugiego rzędu z wykorzystaniem po raz pierwszy symulacji hydrodynamicznych, otrzymujemy wyniki w szerszym zakresie początkowych mimośrodów i wielkich półośi planet. Masy super-Ziem i parametry dysku zostały tak dobrane, aby zapewnić że planety nie są w stanie utworzyć obszaru o obniżonej gęstości powierzchniowej wzdłuż swoich orbit i ich ewolucję w dysku możemy uważać na zgodną z klasyczną migracją I typu.

Druga seria symulacji jest zainspirowana obserwowanym trendem, widocznym w rozkładzie stosunków okresów par planet w układach wieloplanetarnych, w którym stosunki okresów przyjmują wartości trochę większe od rezonansowych. Tendencja ta jest obecna bez względu na odległość, w jakiej para planet obiega gwiazdę macierzystą. Proponujemy tutaj, że jedną z możliwych przyczyn tego faktu obserwacyjnego jest wzajemne odpychanie się planet wskutek oddziaływań pomiędzy dyskiem i planetami. W zaproponowanym scenariuszu, przekazanie momentu pędu poprzez fale gęstości wzbudzone przez jedną planetę drugiej planecie prowadzi do rozbieżnej migracji i tym samym uniemożliwia powstanie rezonansu. Podobny mechanizm został opisany w literaturze w przypadku par: gazowy olbrzym i super-Ziemia, dwie planety podobne do Saturna i dwie planety podobne do Urana. W niniejszej rozprawie, potwierdzamy te wyniki i dowodzimy, że wzajemne odpychanie się planet jest efektywne również w przypadku dwóch super-Ziem, jeśli są one w stanie usunąć część materii z obszarów wzdłuż swoich orbit (ich migracja nie jest klasyczną migracją I typu) i jeśli w tych obszarach pozostała jeszcze wystarczająca ilość gazu niezbędna do efektywnego przekazania momentu pędu planecie. Te dwa warunki na efektywność odpychania się planet uzyskujemy, wykorzystując uproszczony analityczny opis oddziaływań pomiędzy dyskiem i planetami. Za pomocą dwuwymiarowych symulacji hydrodynamicznych weryfikujemy wyprowadzone kryteria dla szerokiego zakresu mas i warunków panujących w dysku. Nasze wyniki wskazują na to, że jeśli warunki na wzajemne odpychanie się planet są sprzyjające to oczekujemy, że obserwowane stosunki okresów orbitalnych planet są większe, często tylko nieznacznie większe od rezonansowych, albo że w ogóle nie dochodzi do powstania rezonansu. Zatem rezonanse powstające na wczesnych etapach ewolucji układów planetarnych niekoniecznie muszą być powszechne.