

Zespołowy projekt studencki

Statystyka planet pozasłonecznych

Opiekun: dr hab. Radosław Poleski

Uczestnicy: Maciej Burzyński, Marcin Gmyrek, Gabriela Karasim-Piotrowska, Paweł Maliński, Jakub Suchecki

Lokalizacja repozytorium projektu: <https://github.com/Kricek/ZPSplanetdet>.

1 Wstęp

Jedną z kilku współczesnych metod poszukiwania planet pozasłonecznych jest mikrosoczewkowanie grawitacyjne. Sposób ten nie prowadzi aktualnie do dużej liczby odkryć w porównaniu do innych metod, jednak pozwala na znajdowanie planet niewykrywalnych innymi metodami. Szczególnie dotyczy to małomasywnych obiektów (~ 1 masy Ziemi) poza linią śniegu, które miały potencjał, aby stać się gazowymi olbrzymami, jednak w drodze ewolucji układa pozostawały z nich wyłącznie jądra.

Dzisiaj podejmuje się coraz ambitniejsze próby analizy statystycznej dotyczącej parametrów planet pozasłonecznych. Projekt skupia się na odtworzeniu analizy przeprowadzonej przez zespół MOA (Suzuki et al., 2016), bazującej na ich obserwacjach z lat 2007–2012. W projekcie wykorzystano te same dane, zebrane w Tabeli 1, bez zjawiska MOA-2012-BLG-355, które nie zostało do dzisiaj opublikowane w żadnym artykule.

Obserwacje mikrosoczewkowania, pozwalają bezpośrednio określić dwa parametry wykrytej planety. Jest to stosunek mas planety i gwiazdy - q oraz odległość kątowa w jednostce promienia Einsteina - s . Niektóre analizy stosują założenia dotyczące gwiazdy układu, aby przejść do bezwzględnych wartości odległości i mas, jednak dla zachowania poziomu ogólności rozważań analiza została przeprowadzona w dziedzinie parametrów wynikających bezpośrednio z obserwacji.

Parametry planety są otrzymywane z obserwacji poprzez dopasowywanie modelu do zaobserwowanej krzywej blasku. Niestety dla części obserwacji można z podobną dokładnością określić dwa modele o różnych separacjach s , które są swoimi odwrotnościami $s_1 = 1/s_2$. Przypadki takie są nazywane zdegenerowanymi, a cztery przykłady są widoczne w Tabeli 1.

2 Powtórzenie badań z pracy Suzukiego i innych

W cytowanej pracy przeprowadzono cały tok analizy prowadzący do określenia funkcji częstości występowania planet w postaci:

$$f(q, s; A, n, p, m, q_{br}) \equiv \frac{d^2 N_{pl}}{d \log q \, d \log s} = A \left[\left(\frac{q}{q_{br}} \right)^n \Theta(q - q_{br}) + \left(\frac{q}{q_{br}} \right)^p \Theta(q_{br} - q) \right] s^m, \quad (1)$$

gdzie q_{br} to wartość stosunku mas, dla którego dochodzi do przeskoku wykładnika zależności $f(q)$ z n do p , a Θ to funkcja skokowa Heavyside'a. Model bez załamania w punkcie q_{br} został wyeliminowany, natomiast sama jego wartość została określona jako $1.7 \cdot 10^{-4}$ i z takiej też skorzystano w projekcie.

Funkcja czułości metody na wykrycie planet $S(\log s, \log q)$, została w niezmienionej formie za-aplikowana do tego projektu z pracy Suzukiego i innych (Suzuki et al., 2016).

Dopasowanie parametrów modelu do określonej postaci funkcji zostało przeprowadzone metodą próbkowania Monte-Carlo łańcuchami Markowa (MCMC), zaimplementowaną w pakiecie emcee zespołu z MIT (Foreman-Mackey et al., 2013). Próbkowania wykonywano w 6000 kroków, za pomocą 50 próbników.

Przedmiotem zainteresowania było podejście w cytowanej pracy do określania wartości tzw. funkcji *likelihood* \mathcal{L} , będącej wskaźnikiem dopasowania w metodzie MCMC, dla przypadków zdegenerowanych. W artykule Suzukiego zastosowano podejście, które traktowało oba modele zjawiska zdegenerowanego jako osobne obserwacje, jedynie ich wkład do funkcji \mathcal{L} był skalowany zgodnie z wagą przypadku (w_i). Wagi zostały określone przez stosunki wskaźników dopasowania $\Delta\chi^2$ dla obu modeli pasujących do zjawiska. W rzeczywistości każda z zaobserwowanych planet posiada pewien jednoznacznie określony zestaw parametrów q i s , jednak w tej metodzie dane były poniekąd duplikowane. Celem dalszej analizy w projekcie było sprawdzenie czy inne podejście wpłynie na otrzymane wyniki, to znaczy parametry funkcji f .

Wizualizacja otrzymanych wyników została przedstawiona na Rysunku 1, natomiast porównanie wartości liczbowych w Tabeli 2. Zgodność otrzymanych wyników z pracą Suzukiego jest akceptowalna, mimo względnie dużej różnicy w parametrze p .

3 Alternatywne podejście do uwzględnienia przypadków zdegenerowanych

Zaproponowana w projekcie zmiana w sposobie wyznaczania parametrów funkcji f dotyczyła podejścia do przypadków zdegenerowanych. Do analizy wprowadzono dodatkowe parametry x_i dla każdego przypadku zdegenerowanego, które były liczbą rzeczywistą z zakresu $[0,1]$. Zamiast traktować dwa modele dla przypadku zdegenerowanego jako osobne obserwacje, w każdym kroku metody warunek decydowano, który model będzie tym razem brany pod uwagę. Realizowane jest to poprzez prosty warunek: jeżeli $x_i < w_i$, gdzie w_i to waga modelu o mniejszym s , wybierany jest przypadek o tej separacji.

Na Rysunku 2 przedstawiono rozkłady parametrów funkcji f , natomiast w Tabeli 2 zestawiono wartości uzyskanych parametrów. Wartości nie różnią się w sposób znaczący. W Tabeli 3 porównane zostały wartości wag oraz częstość występowania danego przypadku degeneracji.

Dodatkowo, na Rysunku 3, przedstawiono rozkłady prawdopodobieństwa parametrów funkcji f rozbijając analizę na dwa przypadki w zależności od tego, który model zdegenerowanego zjawiska MOA-2012-BLG-288 został wzięty pod uwagę. W tym zjawisku, jako jedynym, za- uważano istotną różnicę między częstotliwością występowania modelu o mniejszej separacji s oraz jego wagą w . Na Rysunku 3 widoczne jest jak znacząco na parametr m ($0.31^{+0.49}_{-0.52}$ vs $0.80^{+0.48}_{-0.51}$) wpływa wybór przypadku degeneracji, reszta parametrów nie różni się istotnie.

4 Wnioski

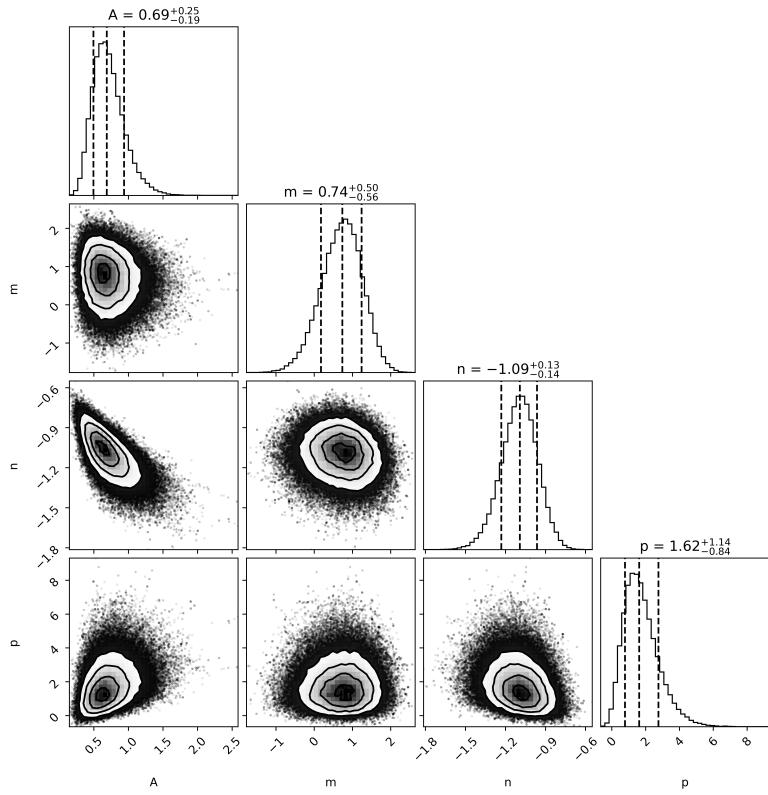
Powtórzenie wyników z pracy Suzukiego i innych (Suzuki et al., 2016) udało się przeprowadzić z zadowalającą zgodnością. Rozbieżność między wartościami parametrów najprawdopodobniej spowodowała zmniejszona próbka zjawisk użytych w projekcie.

Przeprowadzono analizę z alternatywnym sposobem uwzględnienia zdegenerowanych zjawisk. Określono, że parametr m funkcji f jest najbardziej podatny na zmianę sposobu podejścia do zdegenerowanych przypadków. W zależności od tego, czy pod uwagę zostały wzięte wyłącznie próbki wybierające model o mniejszej separacji, czy o większej, dla zjawiska MOA-2012-BLG-288, parametr m przyjmuje wartości różniące się od siebie o 1σ . Jasno pokazał to histogram dla parametru m na Rysunku 3.

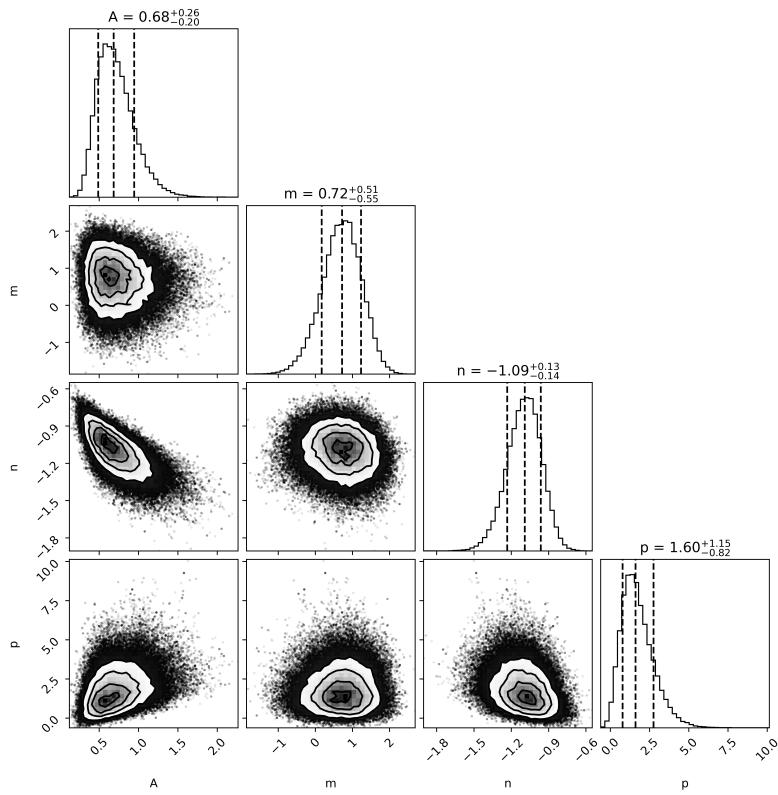
Literatura

Daniel Foreman-Mackey, David W. Hogg, Dustin Lang, and Jonathan Goodman. emcee: The MCMC Hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925):306, March 2013. doi: 10.1086/670067. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/670067>.

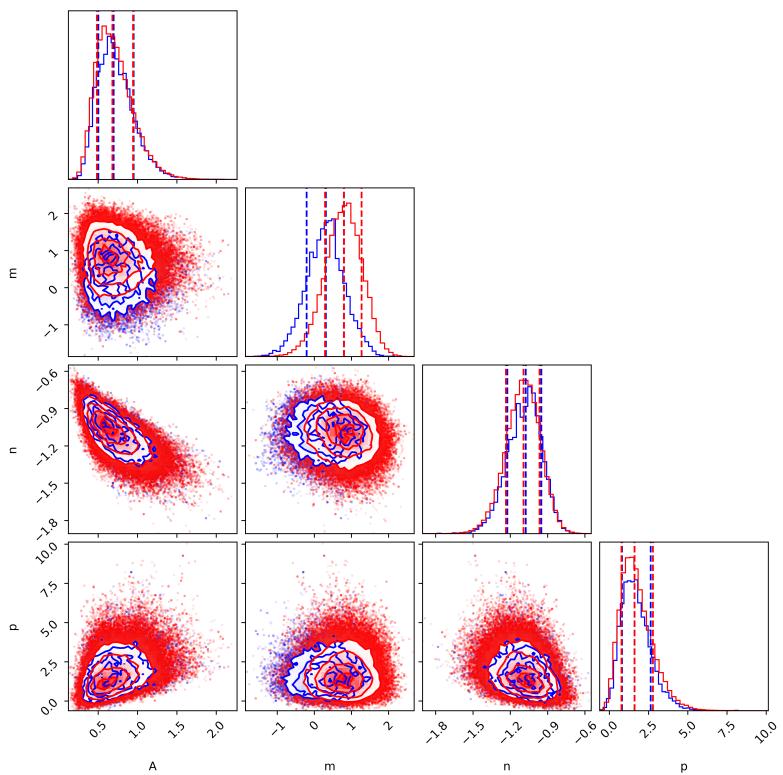
D. Suzuki, D. P. Bennett, T. Sumi, I. A. Bond, L. A. Rogers, F. Abe, Y. Asakura, A. Bhattacharya, M. Donachie, M. Freeman, A. Fukui, Y. Hirao, Y. Itow, N. Koshimoto, M. C. A. Li, C. H. Ling, K. Masuda, Y. Matsubara, Y. Muraki, M. Nagakane, K. Onishi, H. Oyokawa, N. Rattenbury, To. Saito, A. Sharan, H. Shibai, D. J. Sullivan, P. J. Tristram, and A. Yonehara and. THE EXOPLANET MASS-RATIO FUNCTION FROM THE MOA-II SURVEY: DISCOVERY OF a BREAK AND LIKELY PEAK AT a NEPTUNE MASS. *The Astrophysical Journal*, 833(2):145, dec 2016. doi: 10.3847/1538-4357/833/2/145. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/145>.



Rysunek 1: Rozkład prawdopodobieństwa parametrów funkcji f dla rozwiązań metodą z pracy Suzukiego i innych (Suzuki et al., 2016).



Rysunek 2: Rozkład prawdopodobieństwa parametrów funkcji f dla rozwiązań metodą z alternatywnym podejściem do przypadków zdegenerowanych.



Rysunek 3: Rozkład prawdopodobieństwa parametrów funkcji f z nowym podejściem do degeneracji. Wizualizacja pokazuje różnicę między wynikami biorąc pod uwagę wyłącznie pierwszy lub drugi przypadek możliwej separacji dla zjawiska MOA-2012-BLG-288. Niebieski: $s = 0.41$, czerwony: $s = 2.43$. Histogramy zostały znormalizowane.

Tabela 1: Dane planet wykrytych przez zespół MOA. Dla przypadków zdegenerowanych podane są dwa zestawy parametrów wraz z ich wagami

Zjawisko	$q \cdot 10^{-3}$	$s(\theta_E)$	w
MOA-2007-BLG-192	0.18	1.00	
MOA-2007-BLG-308	0.10	0.93	
MOA-2007-BLG-379	0.32	1.26	
MOA-2008-BLG-288	11.8	0.88	
	6.85	0.90	0.587
MOA-2008-BLG-379	6.99	1.12	0.413
MOA-2009-BLG-266	0.06	0.91	
MOA-2009-BLG-319	0.40	0.98	
MOA-2009-BLG-387	13.6	0.91	
MOA-2010-BLG-117	0.75	0.86	
MOA-2010-BLG-328	0.26	1.15	
MOA-2010-BLG-353	1.38	1.46	
MOA-2010-BLG-477	2.18	1.12	
MOA-2011-BLG-028	0.18	1.67	
MOA-2011-BLG-197	3.95	1.04	
MOA-2011-BLG-262	0.45	1.01	
MOA-2011-BLG-291	0.41	1.21	
MOA-2011-BLG-322	28.4	1.82	
MOA-2012-BLG-006	16.1	4.32	
	1.09	0.41	0.574
MOA-2012-BLG-288	1.09	2.43	0.426
MOA-2012-BLG-355	0.70	0.76	
	0.19	0.91	0.498
MOA-2012-BLG-505	0.20	1.12	0.502
	0.24	0.89	0.413
MOA-2012-BLG-527	0.22	1.00	0.587

Tabela 2: Porównanie parametrów funkcji f uzyskanych podczas: (1) odtwarzania analizy Suzukiego i innych, (2) analizy z alternatywnym podejściem do przypadków zdegenerowanych oraz wynikami z cytowanej pracy

Parametr	(1)	(2)	Ref.
A	$0.69^{+0.25}_{-0.19}$	$0.68^{+0.26}_{-0.20}$	$0.56^{+0.22}_{-0.17}$
n	$-1.09^{+0.13}_{-0.14}$	$-1.09^{+0.13}_{-0.14}$	$-0.96^{+0.14}_{-0.15}$
p	$1.62^{+1.14}_{-0.84}$	$1.60^{+1.15}_{-0.82}$	$1.00^{+0.90}_{-0.60}$
m	$0.74^{+0.50}_{-0.56}$	$0.72^{+0.51}_{-0.55}$	$0.62^{+0.55}_{-0.58}$

Tabela 3: Porównanie prawdopodobieństwa wyboru modelu o mniejszej separacji $p(s_1)$ ($s_1 < s_2$) oraz jego wagi

Zjawisko	$p(s_1)$	w
MOA-2008-BLG-379	0.395	0.587
MOA-2012-BLG-288	0.163	0.574
MOA-2012-BLG-505	0.500	0.498
MOA-2012-BLG-527	0.348	0.413