

太陽系外における連惑星の形成とその観測

東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻 修士1年
落合 裕道

概要

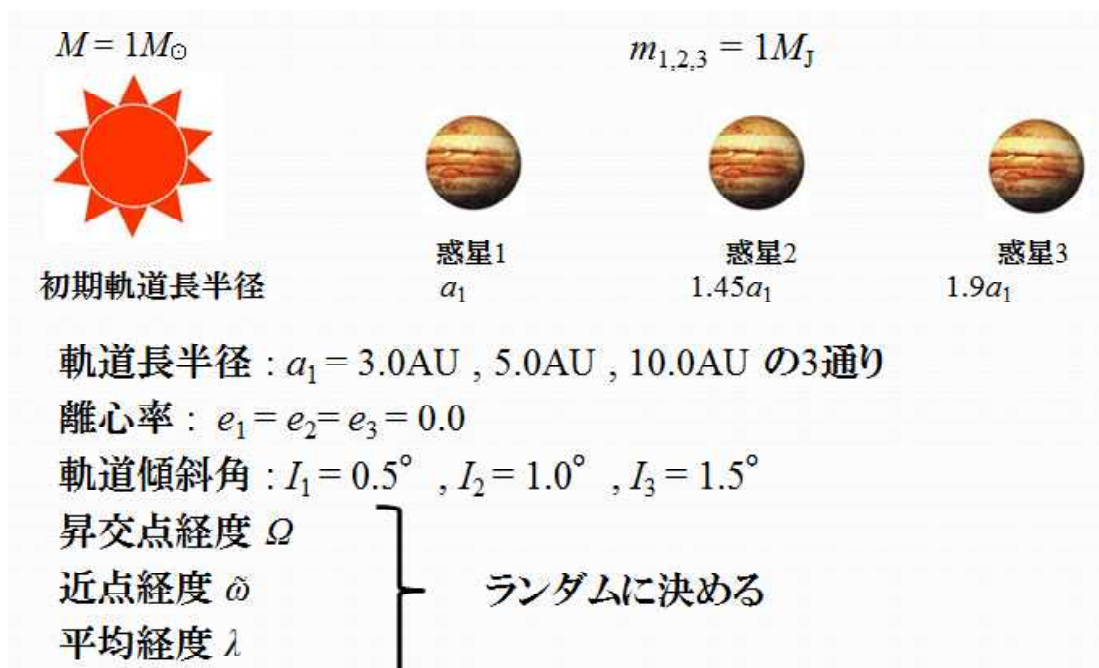
連惑星とは、2個の惑星がお互いの共通重心の周りを回りながら、中心星の周りを公転する(つまり、2個の惑星が地球と月のような関係にある)系のことである。これまでの系外惑星の観測ではまだ発見されていないが、今後の系外惑星観測で見つかることが期待される。

先行研究として、Podsiadlowski et al. (2010)がある。この研究では2個の惑星がすぐ近くを回る系で連惑星の形成確率を計算し、中心星から5AUの位置で約20%の確率で連惑星が形成されるとした。

しかし、この先行研究には初期条件で惑星が近過ぎる(2.4ヒル以内)という問題点がある。このような近い位置を円軌道で回る2個の惑星が原始惑星系円盤から形成されるとは考えにくい。惑星散乱の結果としてそのように近づくことがあるとしても、その過程を考えていないため正しく確率を見積もれていない。そこで本研究では初期に3個の惑星を4ヒル程度離して置くことで先行研究の前段階から計算し、惑星散乱過程を追いながら連惑星の形成確率を調べた。また、系外連惑星の観測可能性も考えた。

手法

初期に3個の惑星(番号を中心星に近い側から順に $i=1,2,3$ と定めた)を以下のような初期条件で置き、この条件から1000万年分の軌道計算を行って連惑星形成確率を調べる。



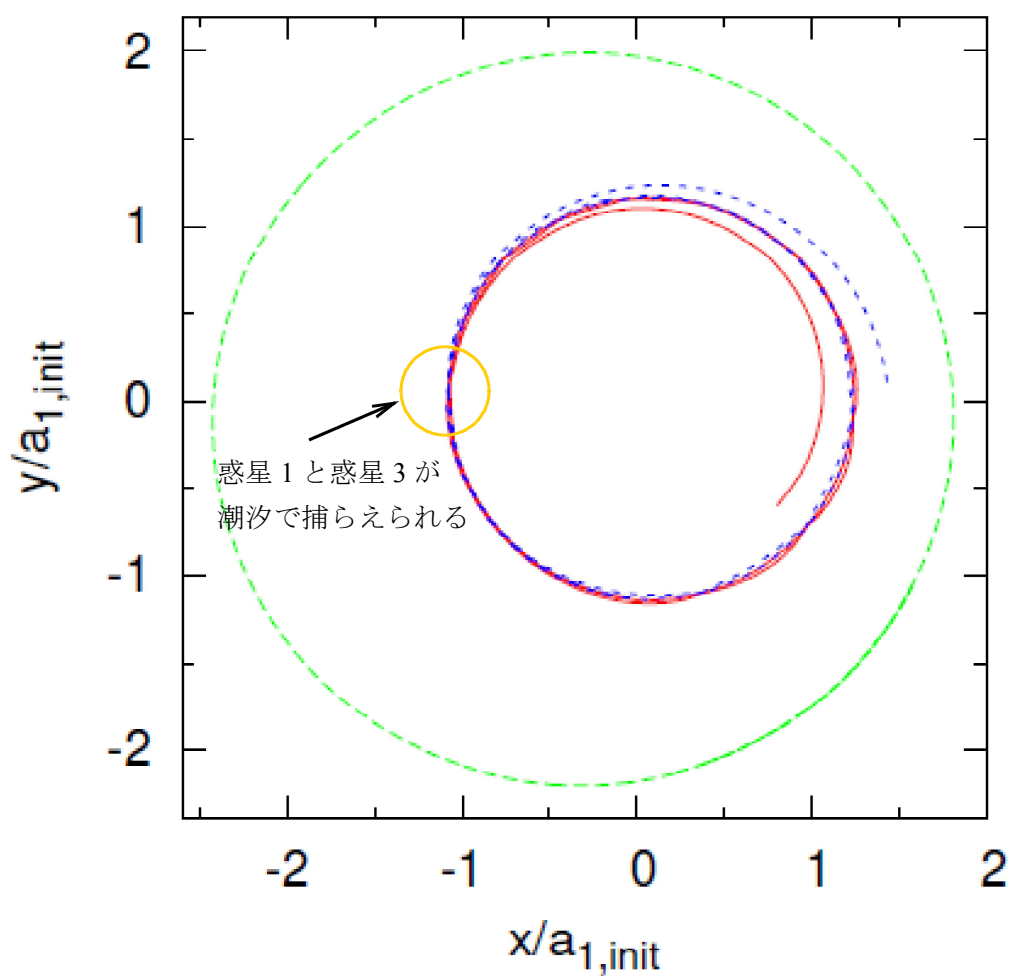
惑星 i の運動方程式は以下の通り。

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -G \frac{M + m_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i - \sum_{j \neq i} G m_j \left(\frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} + \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3} \right) + f_{\text{tide}}$$

ここで f_{tide} は潮汐力を表す。惑星間潮汐力は惑星間距離が 0.04AU 未満になったときに Portegies Zwart & Meinen (1993) に従って掛け、惑星の軌道エネルギーを散逸させる。

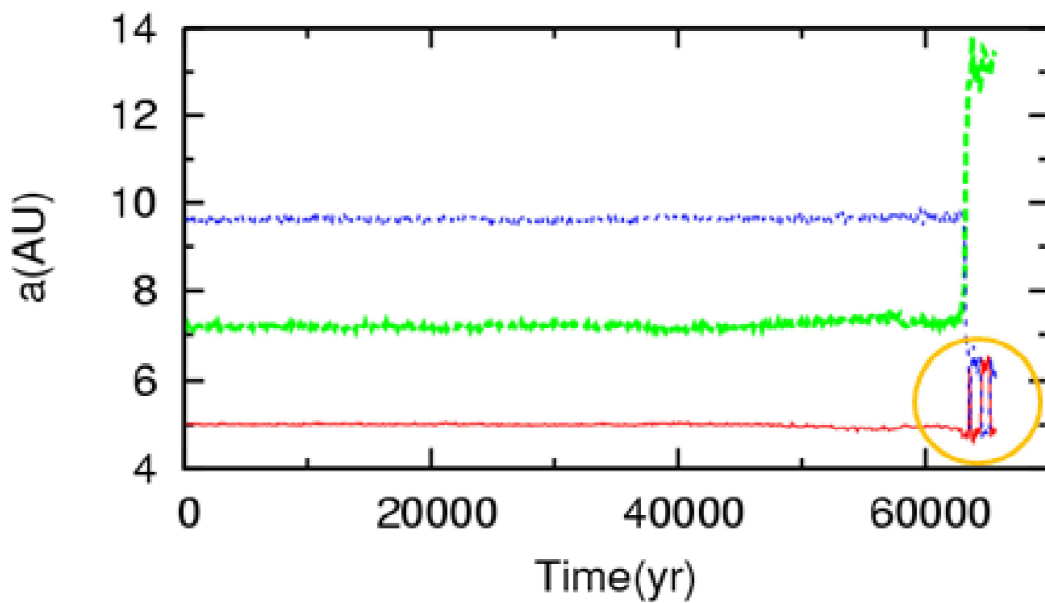
結果

惑星が 3 個でも連惑星が形成された。以下に連惑星形成時の 3 惑星の x - y 平面上における軌道の 1 例を示す。



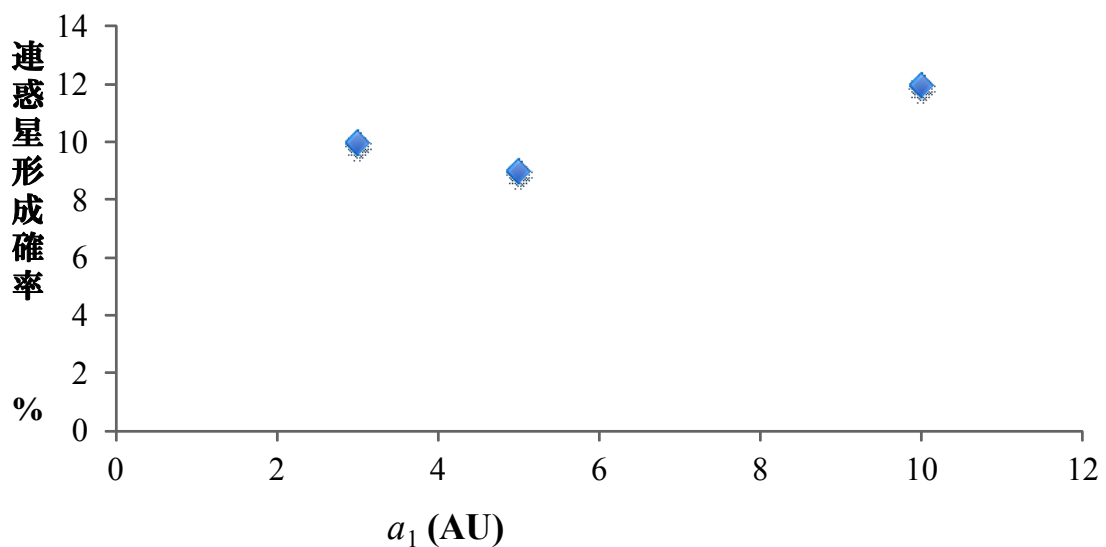
赤が惑星 1、緑が惑星 2、青が惑星 3 である。丸で囲った部分で惑星 1 と 3 が強い潮汐相互作用によって捕らえられ、その後潮汐が連続して連惑星になった。

次に連惑星形成時の 3 惑星の軌道長半径の時間変化を以下に示す。



丸で囲った部分で惑星 1 と 3 が連惑星になっている。この計算のように軌道交差を始めてから数千年で連惑星になる場合がほとんどであったことから、連惑星は軌道不安定の初期段階で形成されやすいものと考えられる。

本研究では初期条件 a_1 の値によらず、連惑星の形成確率は約 10% だった。以下に a_1 と連惑星形成確率の関係を示す。



このように初期条件によらないことや、軌道不安定の初期段階で形成されやすいことは惑星間の相対速度と関係しているのではないかと考えられるが、これは今後の検討課題である。

連惑星が形成されない他の 90% の計算では惑星同士の衝突や、中心星に近づくことで捕らえられてのホットジュピター形成、1 個または 2 個の惑星が系外に排出されて残りの惑星が安定軌道で回り続ける等の結果になった。

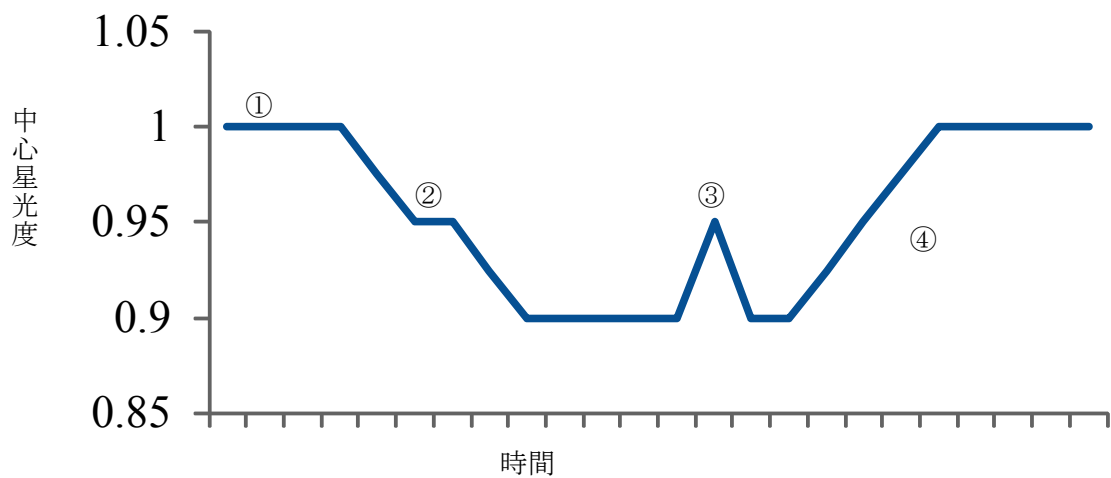
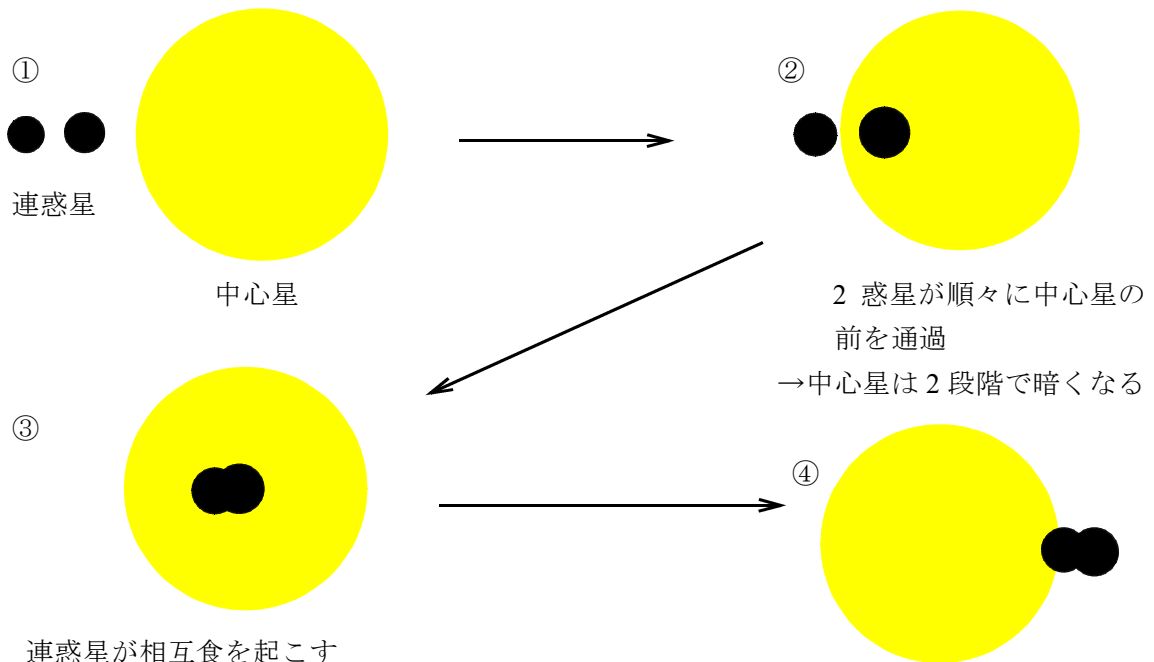
観測

系外連惑星の観測可能性を考えると、視線速度法では連惑星の場合と、連惑星の合計質量を持つ1惑星の場合とでの中心星視線速度のずれは以下の式で見積もられる。

$$\Delta V_r \cong \frac{9}{32} \left(\frac{a_{\text{binary}}}{r_G} \right)^{\frac{7}{2}} \sqrt{\frac{2m}{M}} V_G \quad \text{Podsiadlowski et al. (2010)}$$

木星質量連惑星の場合、この式からは数 mm/s 程度と見積もられるため現在の観測技術ではやや厳しいようである。

現時点で連惑星発見の手段として最も有力と考えられるのはトランジット法である。連惑星が中心星の前を横切るときは以下のような光度曲線が得られると考えられる。



よってこのような光度曲線が観測によって得られれば連惑星発見の可能性が高い。

まとめと今後の課題

本研究では 3 個の木星形惑星を置いて中心星潮汐と惑星間潮汐を入れて軌道計算し、連惑星が形成される確率を調べた。その結果、初期条件 a_1 の値によらず、約 10% の確率で連惑星が形成された。初期条件によらないことに関しては惑星間の相対速度と関係していると考えられる。

今後は以下に取り組んでいきたいと考えている。

- ・他の初期条件を試す ($a_1=1.0\text{AU}$ など)
- ・連惑星形成と相対速度の関係の調査
- ・現在の観測技術に照らし合わせたトランジット法による連惑星観測可能性の検証

最終的には数値計算結果と観測技術を総合して連惑星の観測可能性を見積もり、観測に役立てていきたい。

参考文献

Bessho, T., 修士論文, 2005

Podsiadlowski, P. et al., arXiv:1007.1418v1[astro-ph.EP], 2010

Portegies Zwart, S.F. and Meinen, A.T., Astron. Astrophys. 280, 174-176, 1993

Ivanov, P.B. and Papaloizou, J.C.B., MNRAS, 347, 437, 2004

Ivanov, P.B. and Papaloizou, J.C.B., MNRAS, 376, 682, 2007

Nagasawa, M. et al., Astrophysical Journal, 678:498-508, 2008

Ford, E.B. and Rasio, F.A., ApJ, 686, 621, 2008

Rasio, F.A. and Ford, E.B., Science, 274:954-956, 1996

謝辞

The authors thank the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University, where this work was initiated during the YITP-W-12-08 on "Summer School on Astronomy & Astrophysics 2012".