

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21740324

研究課題名（和文） 複数の惑星を持つ系外惑星系の形成と遠方領域への軌道進化

研究課題名（英文） The evolution of multiple planetary systems and their scattering to distant locations

研究代表者

長沢 真樹子 (NAGASAWA MAKIKO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00419847

研究成果の概要（和文）：

太陽系外で数多く発見されている惑星は、星のごく近くにあつたり、逆に離れていたり、あるいは軌道が傾いていたり、太陽系の惑星とはかなり異なっている。こうした系外惑星がどのように作られるかを、惑星の重力軌道計算を行うことで調べた。複数の木星型惑星がある程度近くに形成された場合、惑星同士は重力散乱を起こす。その過程で、惑星が太陽系とは異なるような場所に移動したり、軌道が傾いたりすることが判明した。

研究成果の概要（英文）：

The discovered extrasolar planets have strange orbits. We investigated the formation of close-in planets and distant planets through N-body simulations of gas giant planets. We found that the close-in planets and distant planets can be formed by the planet-planet scatterings. The close-in planets formed by scattering can have broad range of orbital inclinations as observations suggest.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成・進化

1. 研究開始当初の背景

研究当初には、300個程度の木星型惑星が太陽系外に発見されていた。太陽系外木星型惑星は、大質量、大離心率、小さな軌道長半径など、太陽系の惑星と大きく異なった軌道

要素を持つものが多い。これは、中心星から少し離れた領域の観測は主にドップラーシフトの技法が用いられていることにも起因しているが、太陽系に似た木星型惑星系をもつ系はあまり見つかっておらず、10AUを超

える範囲の系外惑星の分布は現在においてもよく知られていない。

太陽系において、10AU を越える領域の惑星は、成長に時間がかかりすぎる問題が指摘されている。このこともあって、惑星は内側領域で形成された後で、軌道反発などの散乱過程を経て現在の配置になった可能性が指摘されている。しかし研究当初までに行われてきた惑星の軌道散乱の計算は、適当な質量の惑星を適宜に配置した、条件の非常に限られたモデル的なものであり、現実の惑星系を生み出す物理条件を反映していない。逆に、惑星の成長過程を追った計算では、考えられているのは主に内側領域での単体の成長過程であり、複数の木星型惑星が形成され、相互作用することが考慮されていなかった。

2. 研究の目的

太陽系外で中心星近くに発見されている巨大ガス惑星は、惑星間散乱を受けた可能性が高い。一方で、10AU 以遠の領域では観測技術の制約上、惑星の分布は知られていない。そこで、太陽系外惑星系を対象に、考えられる様々な惑星系に対し、複数惑星系の軌道進化を計算し、太陽系外惑星系における惑星分布を研究する。

3. 研究の方法

数値計算によって惑星の軌道進化を計算する。惑星の初期軌道長半径や質量、個数、を変化させて配置し、重力相互作用の多体計算によって軌道の散乱とその後の軌道進化を追う。散乱過程は、カオティックであるため、自由度のある空間配置をたくさん振った統計的な扱いが必要である。軌道散乱によって、惑星は中心星近く側と中心星から離れた領域へと移動する。中心星近くに近づく場合は中心星との潮汐力によって、惑星の軌道が円軌道化されることが知られている。このため、相対論的な効果と中心星潮汐力を含めて数値計算を行う。パラメーターをいくつか変化させて計算を行い、中心星寄りに飛ばされて進化した惑星の分布を観測されている太陽系外木星型惑星の軌道と比較し、そのキャリブレーションから、外側に飛ばされた遠方領域の惑星の範囲と分布、軌道要素や存在確率を求める。また、こうした力学的な散乱計算に基づく安定性議論から、実際に観測されている系外惑星の状況に制約をつけることを目指す。

4. 研究成果

(1) 惑星の軌道散乱について

まず、潮汐力等を含まない、惑星の重力散乱の発生とその効果について述べる。惑星が軌道不安定を起こすまでの時間は、惑星の質量や軌道間隔に依存していることが知られ

ている。一方で、近年の観測では、惑星が平均軌道共鳴と呼ばれる特別な公転周期の関係をもつ軌道にある例もしばしば発見されている。こうした軌道はこれまで一般的に極めて長時間安定であり、軌道散乱を起こさないと考えられてきたが、Y. Matsumoto et al. (2012) で発表した計算によって、たとえ惑星軌道が共鳴軌道にあっても、系が安定に保ちうる惑星の数には上限があり、それを超えると惑星散乱が発生することが判明した。

質量の異なる2つの木星型惑星が軌道不安定を起こした場合には、質量比が大きくなると軽い惑星は系外に飛ばされやすいこと、質量比が1対3程度になると離心率は0.5以下のものが大半を占めるようになり、質量が1対10程度になると系に残る離心率はほぼ0.2以下となることが確認された。

散乱された惑星がカオティックに様々な軌道となるために必要とされる最少の惑星数は3つである。そこで木星型惑星を3体置いて、Nagasawa et al. (2011) でまとめたように、1000 ランを超える数値計算を行った。

惑星が3体である場合には、軌道不安定によって生じる散乱によって惑星は、視線速度法によって観測可能な内側領域と、直接撮像法によって観測可能な遠方領域、そして観測のできない中間領域とに分布をする。この中間領域と遠方領域は、外側に散乱された惑星で作られるひと続きの分布となる。数値計算の結果によって得られる内側領域の惑星分布は観測されている1AU から数 AU 程度の木星型惑星の分布と類似する。また、惑星散乱だけでは中心星近傍の短周期木星型惑星形成に重要な役割を果たしていることを示している。中間領域の惑星は、外側に行くほど、離心率が大きく軌道傾斜角が小さくなる傾向を持っている。しかし、100AU を超えるような遠方領域の惑星は、散乱によって離心率が極めて高くなり、この結果は必ずしも直接撮像され始めた観測結果とは合致しない。このため直接撮像のターゲットとなるような遠方領域では何らかの抵抗が働いて軌道が円軌道化するような効果が惑星形成時に働いていたと示唆される。

(2) 短周期木星型惑星(ホットジュピター)の形成

軌道散乱によって中心星近くに近づいた木星型惑星は、中心星潮汐力によって軌道が円軌道化される。惑星の初期位置を変化させて軌道散乱の計算をした結果の惑星の近点距離(軌道上で中心星へ最も近づく点)の分布は次ページの図1のようになっている。この図は3つの惑星のサイズと質量がすべて木星と同じであった場合に、3つの異なる初期軌道長半径をもつ系を各100ランずつ計算し

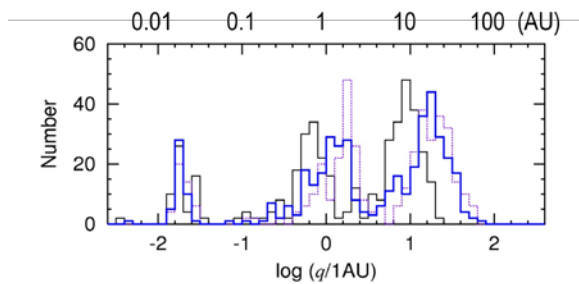


図1：軌道散乱によって作られる惑星の近点距離の分布。1AUは太陽と地球の距離を1とする距離の単位。黒い線は初期の惑星系でいちばん内側の惑星が3AUにあった場合、青線は5AUの場合、紫線は7AUの場合である。

たものである。中心星から初期の系が離れていけばいるほど、外側の惑星の分布は中心星から離れていく。一方、潮汐力によって短周期化され、0.01AUから0.1AUの間に分布する短周期木星型惑星の位置は潮汐力の強さに依存して決まるため、3つの初期分布に対しては異なることはない。また、これら短周期木星型惑星は、潮汐進化をしない0.5AU程度より遠くの惑星と位置的に離れて分布する特徴をもつ。中心星から初期配置が離れるとやや短周期木星型惑星の形成率が下がるが、古典的に木星型惑星が形成されると考えられる3AUから7AUの範囲では、1000ラン程の数値計算の結果、形成率は、2から3割の確率となっていた。

特徴的な点としては、一つの惑星が系外に飛ばされた後に長期軌道進化で形成される短周期木星型惑星と、3つの惑星が軌道相互作用を続けている間に形成された短周期木星型惑星とは、軌道傾斜角(中心星の回転軸に対する軌道面の傾きの角度)の分布が異なっていることである(図2)。これは、長期軌道進化の場合、もともと惑星が持っている軌道傾斜角が永年摂動で軌道離心率に変換され、離心率が増加することで中心星に近づくことで短周期惑星となるためである。

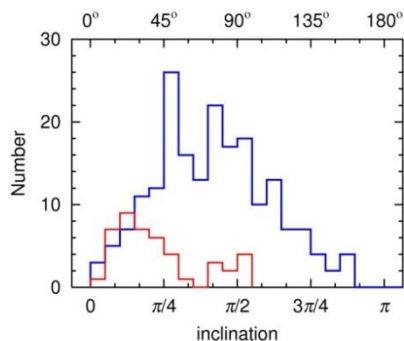


図2：形成された短周期木星型惑星の軌道傾斜角(inclination)のヒストグラム。赤線は長期軌道進化で形成された惑星、青線は3体散乱によって形成された惑星。

この結果は、観測される太陽系外のホットジュピターの軌道が中心星スピンに対して逆行しているものがあること、離心率が高いもので軌道傾斜角が大きいものが発見されていないこと、逆に軌道傾斜角が高く離心率が大きいものは発見されていないことと整合的である。

(3) 遠方惑星の形成

惑星散乱によって、通常木星型惑星がその場形成できない場所に飛ばされた惑星の離心率と軌道傾斜角の分布は、図3のとおりである。離心率は小さいものから大きいものまで分布しているが、実際には近点距離との相関をもっており(2)の項参照)、遠方に行けばいくほど離心率は高くなる。

軌道傾斜角は、図3に示すように、図2の短周期木星型惑星と比べても一般的にあまり大きな値とはならない。離心率の分布とは逆に、遠方に行けばいくほど一般的に小さくなる傾向を持っている。

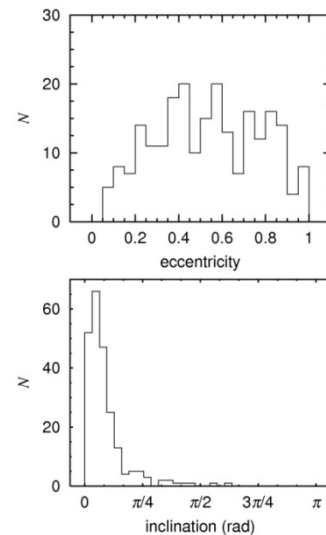


図3：形成された遠方木星型惑星の離心率(上)と軌道傾斜角(下)のヒストグラム。

(4) 木星型惑星が不安定を起こした場合の地球型惑星の安定性について

近年、中心星近くに多くの地球型・海王星型の惑星が発見されて来た。こうした地球型惑星の安定性を調べ、ホットジュピターや遠方惑星を持つ系での地球型惑星の可能性が議論されている。しかし、ホットジュピターや遠方木星型惑星が、軌道散乱を経由してきたと考えれば、最終的な軌道配置のみで、地球型惑星の安定性を議論することはできない。そこで、Matsumura et al. (2013)では、3つの木星型惑星の散乱過程に地球型惑星を含めて計算を行い、実際には、木星型惑星の軌道不安定の際に、かなり中心星近くまで、木星型惑星の永年摂動がおよび、地球型惑星が不安定化できることを示した。

(5) 連惑星の形成の可能性

天体同士が近付いたときに働く潮汐力は、中心星と惑星間だけではなく、惑星-惑星間でも作用する。惑星が重力不安定を起こし近接相互作用する場合にも潮汐力を入れたところ、1割程度の確率で、惑星同士が連惑星となることがわかってきた。できる連惑星間距離は太陽半径程度で、形成される場所は、ほぼ木星型惑星領域近傍である。このため、こうした連惑星は現在観測できるような中心星近傍で観測される可能性は極めて低いものの、重力レンズ法などでは観測可能であるため、今後さらに研究を行う必要がある。

(6) 観測された複数系外惑星への制約

Narita et al. (2010)やSato et al. (2013)では、観測で発見された複数惑星系の軌道の安定性を数値計算し、実際の惑星系へ力学的観点から与えられる制約を求めた。Narita et al. では、直接撮像により、短周期惑星を持っている HAT-P-7 と呼ばれる系の外側に小さな星が連星として回っていることが発見された。直接撮像法では、天体間の軌道距離を知ることができない。そこで、発見された星の中心星との距離をいくつか変えた力学安定性より、発見されている惑星の外側に木星型惑星がさらに存在できる領域を求めた。当然ながら、連星間が離れているほど、惑星質量が小さく、中心星によっているほど、惑星は存在しやすくなっている。

Sato et al. (2013)では、HD4732 と呼ばれる系で視線速度法で発見された2つの惑星の運動の解析を行った。視線速度法では、天体の軌道の傾きと惑星の質量を求めることができない。そこで、複数惑星系の散乱の軌道計算を行い、惑星が安定であるために持ちうる最大の質量を計算した。惑星の質量が大きいくほど、惑星の散乱は起こりやすい。この系の持つパラメーターを用いた計算の結果、HD4732 で発見された天体は、最大でも約30倍の木星質量よりも軽く、褐色矮星ではなく惑星であると示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①S. Matsumura, S. Ida, & M. Nagasawa, Effects of Dynamical Evolution of Giant Planets on Survival of Terrestrial Planets, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, 767, 129, 14pp, DOI:10.1088/0004-637X/767/2/129
- ②B. Sato, M. Omiya, R. A. Wittenmyer, H. Harakawa, M. Nagasawa, and 8 coauthors, A Double Planetary System around the

Evolved Intermediate-Mass Star HD 4732, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, 762:9, 7pp

DOI:10.1088/0004-637X/762/1/9

③Y. Matsumoto, M. Nagasawa, S. Ida, The orbital stability of planets trapped in the first-order mean-motion resonances, *Icarus*, 査読有, 2012, 221, 624-631

DOI:10.1016/j.icarus.2012.08.032

④ M. Nagasawa & S. Ida, Orbital distributions of close-in planets and distant planets formed by scattering and dynamical tides, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2011, 742, 72, 16pp

DOI: 10.1088/0004-637X/742/2/72

⑤ N. Narita, T. Kudo, C. Bergfors, M. Nagasawa, C. Thalmann, and 44 coauthors, Search for Outer Massive Bodies around Transiting Planetary Systems: Candidates of Faint Stellar Companions around HAT-P-7, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2010, 62, p.779-786

[学会発表] (計 6 件)

①長沢真樹子, 井田茂, 複数系外惑星系の不安定性と軌道進化, 日本天文学会 2012 年秋季年会, 2012 年 9 月 21 日, 大分大学(大分県)

②長沢真樹子, Orbital Evolution of Exoplanets Caused by Scattering and Tides, *Extreme Solar System II*, 2011 年 9 月 13 日, Moran, WY, U. S. A.

③長沢真樹子, Lin, D. N. C. 原始惑星系円盤散逸と小惑星の進化, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 22 日, 金沢大学(富山県)

④長沢真樹子, Orbital evolution due to scattering and tide, *An Ishigaki International Conference on Evolving Theory for Planet Formation*, 2010 年 6 月 24 日, 石垣市 ANA ホテル(沖縄県)

⑤ 長沢真樹子, 井田茂, 太陽系外の逆行惑星の形成, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 25 日, 幕張メッセ(千葉県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長沢 真樹子 (NAGASAWA MAKIKO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 00419847