系外惑星「遠い世界の物語」その18 ～系外惑星最古の謎―ホットジュピターの形成過程～

河合 優悟[1]

（要旨） 短周期巨大惑星であるホットジュピターは,木星のような外側の軌道で形成されたのち,形成場所から現在の軌道まで移動してきたと考えられる. その移動機構としては,原始惑星系円盤との相互作用による「円盤移動」と,伴星や他の惑星との重力相互作用による「高離心率移動」が有力である. これまで,主星の自転軸に対する惑星の公転軌道の傾きが高離心率移動の痕跡として広く観測されてきた一方,円盤移動を直接示す観測的証拠は限られていた. 本稿では,円盤移動の痕跡を識別する新たな手法とその移動過程への示唆について筆者が行った研究を紹介する.

1. はじめに

太陽系外惑星(以下,系外惑星)の発見は,公転周期が数日ほど,質量は木星程度のホットジュピターと呼ばれる惑星に始まる. 太陽系にこのような惑星はもちろん存在せず,その形成はいまだに多くの謎に包まれる.

この形成を考える上での一番の問題点は,原始惑星系円盤(以下,円盤)における材料不足であるといえる. 数日程度の軌道では,恒星からの輻射によりダストなどの固体物質は効率的に昇華する上,その限られた軌道半径によって,円環状の供給領域そのものも矮小化する[1]. このことから,ホットジュピターは現在存在している「その場」で形成されたのではなく,円盤のより外縁で形成されたのち,何かしらの機構を持って移動してきたと考えられている.

移動過程として有力なのは,伴星や他の惑星との重力相互作用で惑星の軌道離心率(以下,離心率)が励起された後,惑星内部での潮汐散逸によって近点付近で軌道が円形化される動的な「高離心率移動」と,円盤との相互作用によって内側へ移動する静的な「円盤移動」の二つである[2,3](図1). この二つを見分けられるような観測は,ホットジュピターの形成・移動過程を明らかにする上で大きなテーマの一つである.

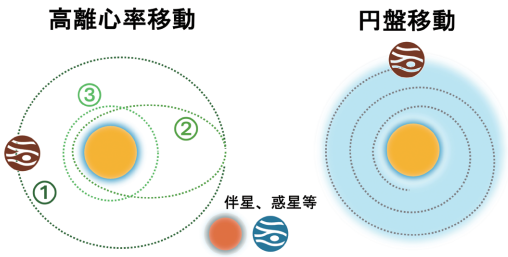


図1. 高離心率移動と円盤移動の概念図.

この鍵として長らく注目されてきた観測量に,惑星の軌道傾斜角(惑星公転軸と主星自転軸のずれ)が挙げられる. これは,円盤移動が比較的スムーズな過程であることに対し,高離心率移動では天体同士の重力相互作用によってホットジュピターの軌道が乱されると考えられてきたためである[4]. この予想は実際に的中し,現在までに数多くの(主星の自転に対して惑星の公転)軌道の傾いたホットジュピターが発見され,高離心率移動によってホットジュピターが形成されることの証左となっている[5].

1.東京大学総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系博士課程後期3年
yugo6581@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

一方で,軌道が傾いていないホットジュピターの存在の解釈については,より慎重な議論が必要である.これは,高離心率移動で形成されたホットジュピターであっても,その後の主星内部の潮汐散逸により軌道が主星と再整列する可能性があるためである[6].図2に示すように,ホットジュピターの軌道の傾きは主星の有効温度に強く依存することが知られている.主星の有効温度が6250 Kを下回ると軌道の傾いたホットジュピターはほとんど観測されておらず,これは潮汐散逸による再整列によるものと考えられている[7].

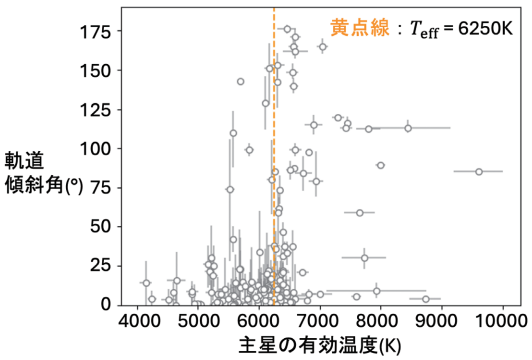


図2. 軌道傾斜角と主星の有効温度の関係.

結果的に,大きな軌道の傾きが高離心率移動の痕跡と解釈できる一方,軌道の傾いていないホットジュピターは,直ちに円盤移動を意味しないという問題につきあたる.これは軌道の傾きのみからホットジュピターの形成･移動過程(その比率など)を解き明かすことには限界があることを意味する.

そこで本稿では,軌道傾斜角が高離心率移動の証拠として有用であるならば,円盤移動の痕跡としては何が考えられるかという問いに着目した筆者の研究の成果を紹介する.

2. 手法

ホットジュピターがその場では形成されないという見地を取る場合,「円盤移動の痕跡」は,「高離心率移動と矛盾する痕跡」と同義である.この点において,軌道傾斜角を用いる場合は,軌道が傾いていないことが高離心率移動と矛盾しないことが問題であった.高離心率移動と矛盾する痕跡を検討するため,二つの移動過程の違いを再考する.

明らかな差異の一つが,移動のタイムスケールである.円盤移動では文字通り円盤が散逸する前に移動が完了するため,その過程は1000万年程度である.それに対して高離心率移動は円盤の散逸後に開始するため,例えば明らかに年齢が若いホットジュピターは,「高離心率移動と矛盾する」と考えられる.しかし,恒星の年齢を精度よく決定することは難しく,比較的高精度に年齢を決定できる星団に所属するようなホットジュピターは稀であり,サンプル数に乏しいという欠点がある.

そこで移動のタイムスケールという着眼点にもう一捻りを加えてみる.高離心率移動は円盤散逸後の(1)離心率の励起,(2)惑星の潮汐散逸による軌道の縮小と円形化の二段階に分解することができる.すると,円盤散逸直後ほど若い惑星でなくても高離心率移動と矛盾する可能性は十分にあることがわかる.

例えば第二段階の軌道の円形化について考えた場合,高離心率移動を経たホットジュピターが円軌道で観測されるためには,このタイムスケールが惑星系の年齢を下回る必要がある.逆に,円形化タイムスケールが系の年齢より長いにもかかわらず,既に円軌道を持つホットジュピターが存在する場合,その円軌道を高離心率移動で達成するには時間が不十分であり,これと矛盾する(図3).

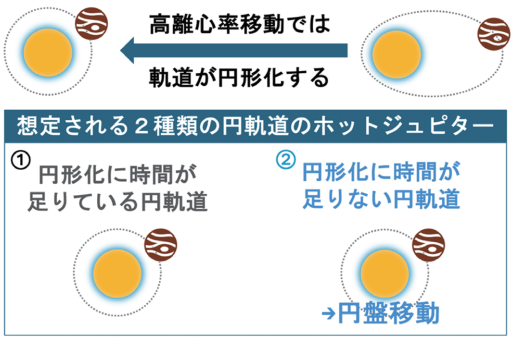


図3. 本研究で着目する「円盤移動の痕跡」.

そこで本研究の方針として,(1)円形化タイムスケールが系の年齢を上回る(2)円軌道であるという二つの条件を満たすホットジュピターを探索し,これが実際に円盤移動の痕跡として有用であるかどうかの検討をすることとした.

これにあたっての一番の課題は,円形化タイムスケールの不定性である.このタイムスケールは惑星内部における潮汐散逸効率の関数であり,ここに1-2桁の不定性がある.

潮汐散逸効率は,一軌道周期あたりに惑星系が失う軌道エネルギーの逆数として定義される. これは多くの場合定数であると仮定され,Q値(クオリティファクター)と呼ばれる[8]. ガス惑星のQ値は古くは木星とその衛星の軌道距離および離心率の関係から推定されてきた($6\times10^4<Q_J<2\times10^6$)[9]. しかし,不定性に加え,木星とは温度や圧力勾配なども異なるホットジュピターにおいてこのQ値が似た値を取るかは自明ではない.

そこでまずはホットジュピターのQ値を経験的に再導出することにした. その手法は以下のとおりである. 先述の通り,本研究で探索するのは(1)円形化タイムスケールが系の年齢を上回る(2)円軌道のホットジュピターである. 一方,軌道の傾きの観測からは,高離心率移動によって形成されたホットジュピターが少なからず存在することが示されている. したがって,円形化タイムスケールが系の年齢を上回るために高離心率移動を完遂できず,現在も楕円軌道にとどまっているホットジュピターも一定数存在すると考えられる.

このことから,ホットジュピターは,「円形化タイムスケールが系の年齢に等しくなる境界」を挟んで,円軌道の系と楕円軌道の系に最も明瞭に分かれると予想される. そこで本研究では,この関係を逆問題として捉え,現在発見されている500個以上のホットジュピターを対象に,境界の両側における離心率分布の差が最大となるような潮汐のQ値を探索した.

3. 結果

以上の解析から,ホットジュピターに典型的なQ値を統計的に導出することに成功した($Q=4.9^{+3.5}_{-2.5}\times10^5$). 見立ての通り,ホットジュピターの離心率分布には明瞭な境界が存在し,得られたQ値の不定性は1桁以下となった[10].

また,興味深いことに,この値は木星の潮汐散逸効率とも整合的である. さらにはホットジュピターのサンプルを木星質量あたりで分割して同様の解析を行なった場合も同様のQ値が得られ,これがガス惑星においては質量に大きく依存しないという示唆も得られた.

そして本題の「円盤移動の痕跡」を持つホットジュピターも約30個同定することができた. ではこの推定は本当に正しいだろうか. この手法が有用であれば,これらのホットジュピターは,円盤移動で形成された際に期待される他の特徴を持つはずである.

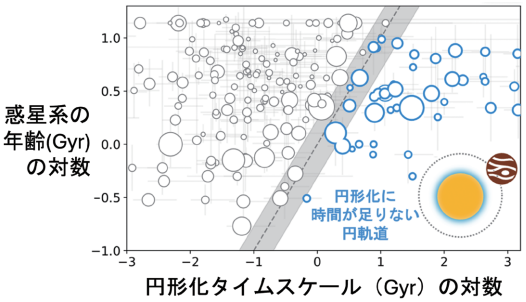


図4. 円軌道の惑星系の年齢と円形化タイムスケールの関係.点線より右に位置する惑星は円形化の時間が足りないにもかかわらず円軌道であり,円盤移動が示唆される.

まずは,ホットジュピターの観測量一番の古株である軌道の傾きを見てみる. 嬉しいことに,これまでに軌道傾斜角が計測された「円盤移動の痕跡」を持つ(高離心率移動後の再整列の懸念がない)ホットジュピターのほとんど全ての軌道が揃っている(図5). それればかりか,「円形化タイムスケールが系の年齢に等しくなる境界」は離心率のみでなく,円軌道のホットジュピターにおける軌道傾斜角も二分するようである.

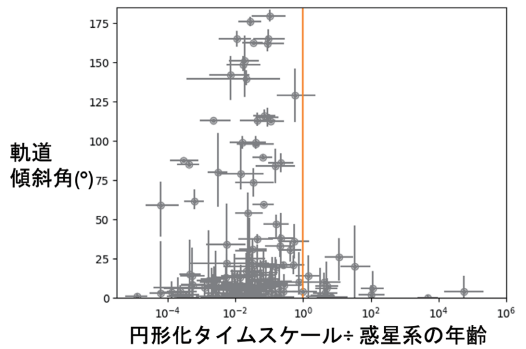


図5. 円軌道の惑星の円形化タイムスケールと軌道傾斜角の関係.横軸は同タイムスケールを惑星系の年齢で割ったもので,黄色で示した縦線でその値が1となる(軌道の円形化にかかる時間がちょうど惑星系の年齢と同じになる).図4同様,この線より右に位置する点が本研究で同定した円盤移動が示唆される惑星である.

離心率を用いた本研究の解析では軌道傾斜角の情報は用いていないため,この二つの傾向は円形化タイムスケールを用いたこの手法が,円盤移動の痕跡として正しく機能していること,またそのタイムスケールの計算に用いたQ値の導出にも妥当性があることを示している.

加えてこの結果は,円盤から形成された時点では,多くの惑星の軌道は傾いていないことも示している.冒頭では簡単のため触れなかったものの,円盤自体が主星に対して傾いた軌道で形成された場合は,惑星の軌道も傾くことが期待される.円盤がどのくらいの頻度でどの程度傾いて形成されるかは自明ではない.これは大きな軌道の傾きの解釈すら難しくする側面があったため,円盤由来の傾きが限られるという示唆は重要である.

次に,注目するのは近接する他の惑星の存在頻度である.高離心率移動においてはホットジュピターの前身である惑星は高い離心率を獲得するため,他の惑星と交差するような軌道を持つ可能性が高くなる.シミュレーションからも高離心率移動は他の惑星を排除する傾向が示されており[11],そのような惑星と共存するホットジュピターは,円盤移動で形成された可能性が高いといえる.

このことを念頭に,円形化タイムスケールと近接する他の惑星をもつホットジュピターの関係を調べた.図6に見るように,ホットジュピター全体は円形化タイムスケールが系の年齢より短い領域に集中している(比では年齢の1%ほど)ことに対し,近接惑星をもつ系は,特にそのような傾向は見せずに点在していることがわかる.むしろ7個の内4つの系は誤差の範囲内で,円盤移動の痕跡を持つ.近接惑星系において,タイムスケールの観点からも円盤移動が好んで示唆されることは,軌道傾斜角の比較と同様に本手法の有用性を示している.

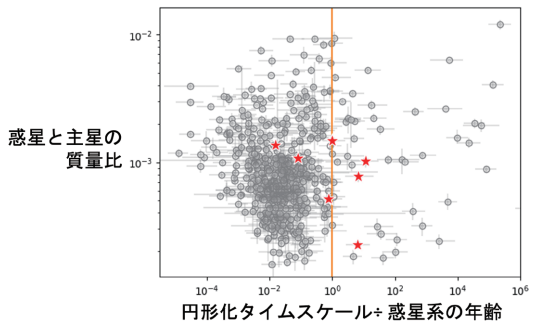


図6. 図5と同じ横軸に対して,惑星と主星の質量比を図示した図.赤い星印が近接惑星とホットジュピターをもつ惑星系を示す.

また,近接惑星を持つ系の円形化タイムスケール分布が全体と異なる傾向にあることからは,高離心率移動と円盤移動の比率を制約することができる.図4に見えるように,ホットジュピターの大半は円形化タイムスケールが系の年齢を下回り,かつ円軌道にある.このようなホットジュピターは円盤移動と高離心率移動のどちらとも矛盾しないため,いずれの過程でもその形成を説明可能であり,移動の痕跡を持たない.

仮にこれらのホットジュピターの大部分も円盤移動によって形成されていたならば,それらの周囲にも本研究で同定された円盤移動の痕跡をもつホットジュピターと同程度の頻度で近接惑星が見つかると期待される.しかし,実際には移動の痕跡を持たないホットジュピターが近接惑星を伴う例はさらに稀である.このことは,ホットジュピターの大多数が高離心率移動を経て形成された可能性を示唆する.

4. 最後に

本研究では,ホットジュピターはどのように形成されるかという系外惑星研究における最古の課題の一つに,これまで数が限られていた「円盤移動の痕跡」を探すという観点から取り組んだ.

このために,高離心率移動の前提である潮汐による軌道の円形化と,そのタイムスケールに着目した.そしてこのタイムスケールが惑星系の年齢に対して長い場合,そのホットジュピターが円軌道にあることは,円盤移動の痕跡として有用であることを多角的に示した.そして高離心率移動がホットジュピターの大多数を説明しうるという制約も与えることができた.

また,改めて推定したホットジュピターのQ値が大きな質量依存性を持たないこと,木星の値と整合的であることは,これらのガス惑星の内部構造が類似している可能性を示唆している.

最後に,軌道の傾きなどから得られる高離心率移動の痕跡に加えて,本研究で示した円盤移動の痕跡は,今後のホットジュピターの大気観測を解釈する上

でも重要な情報となる. Ariel宇宙望遠鏡などの将来計画によってC/O比をはじめとする大気組成の観測から多数のホットジュピターの円盤における形成場所の推定が期待される[12]. 形成場所と,その後の移動過程の両方を明らかにすることで,ホットジュピターの形成と進化のより包括的に理解つながるだろう.

参考文献

[1] Dawson, R. I. and Johnson, J. A., 2018, ARA&A 56, 175.
[2] Wu, Y. and Murray, N., 2003, ApJ 589, 605.
[3] Tanaka, H. et al., 2002, ApJ 565, 1257.
[4] Fabrycky, D. and Tremaine, S., 2007, ApJ 669, 1298.
[5] Knudstrup, E. et al., 2024, A&A 690, A379.
[6] Albrecht, S. et al., 2012, ApJ 757, 18.
[7] Winn, J. N. et al., 2010, ApJ 718, L145.
[8] Yoder, C. F. and Peale, S. J., 1981, Icarus 47, 1.
[9] Goldreich, P. and Soter, S., 1966, Icarus 5, 375.
[10] Kawai, Y. et al., 2025, AJ 170, 299.
[11] Mustill, A. J. et al., 2015, ApJ 808, 14.
[12] Tinetti, G. et al., 2022, EPSC 16, EPSC2022-1114.