

論文内容の要旨

論文題目: Studies of Gas Giant Planet Formation and
Evolution with Direct Imaging Observations

(直接撮像観測による巨大ガス惑星の形成と進化の研究)

氏名 葛原 昌幸

巨大ガス惑星の形成過程として広く支持されている理論にコア集積モデル(Mizuno 1980)がある。その理論では、微惑星の衝突や合体を通して形成された大きな固体のコアが周囲から急速にガスを獲得し巨大ガス惑星が誕生することを説明する。コア集積理論の特徴としては惑星の形成可能な領域に制限があることがあげられる。まず大きな固体コアの形成は雪線より外側に限られることである。しかし、微惑星の集積は惑星系外縁部ほど遅いため、あまりに外側になるとガス惑星の形成は困難になる。近年の理論的見積もりでは、少なくとも主星から約 30 天文単位 (AU) よりも内側でないとそのようなコアの形成は難しいと予測されている (例: Dodson-Robinson et al. 2009)。しかし、これまで検出された太陽系外惑星 (系外惑星) の中には、雪線より内側に存在するものも多く発見されている。現在ではそのようなコア集積理論だけでは説明困難な内側ガス惑星の起源としてタイプ II 型移動モデル (中心星への円盤降着に伴い内側にガス惑星が移動する過程; Lin & Papaloizou 1985) が支持されている。これと同様に有力な惑星の移動理論としては、複数形成されたガス惑星同士の重力相互作用による惑星散乱モデルがある (Nagasawa et al. 2008)。散乱モデルの特徴の一つに、系の外側へも惑星が移動することがあげられる。このように現在では、惑星の内側や外側への移動によって、系外惑星の特徴を説明する試みられている。さらに様々な円盤の特徴に基づいて、惑星の形成や成長、移動などを総合的にモデル化することで惑星の質量や軌道などの特徴の母集団を推定し (population synthesis model)、それを系外惑星の観測結

果と比較する試みもなされている(例: Ida & Lin 2004)。またさらに別の枠組みとして、重力不安定モデル(例: Durisen et al. 2007)では、中心星から数十 AU という外側にガス惑星がその場で直接形成されることが予測されている。

系外惑星の観測はそのような理論的予測の検証に有効である。これまで主に系外惑星の検出に利用されてきた手法は視線速度法やトランジット法と呼ばれる間接的手法である。これら間接法は惑星が中心星を公転することで、その主星の視線速度や明るさに変化が生じる効果に基づいて惑星を検出する方法であり、系の比較的的内側を公転する惑星の質量や半径、軌道長半径などを高い精度で導出できる点で有益である。しかし、間接法は惑星の公転運動に基づいているため、系の外側を公転する大軌道惑星の探査に対しては、必要精度や要求観測時間などの点から非現実的である。さらに、若い星は自らの(黒点)活動などによって、視線速度や明るさが大きく変化する。従って、これらの手法で若い惑星を探査するのは困難である。一方、直接撮像法は惑星からの放射を検出し、それを撮像する手法であるが、大きな軌道を持つ惑星や若い惑星の観測に対して有効である。最大の課題はそれが技術的に極めて困難な点であったが、補償光学技術などの近年の技術的進歩によりその問題は徐々に改善されており、巨大ガス惑星に対してはその撮像が可能になってきた。実際、約 10 例の若い巨大ガス惑星の直接撮像が報告されている(例: Marois et al. 2008)。

本研究では、若くかつ大きな軌道半径の巨大ガス惑星を直接撮像観測により探査することで、上で説明した様な惑星形成モデルの理論的枠組みを検証することを目指した。そこで、すばる望遠鏡を用いて近赤外線観測により惑星および円盤を探索する SEEDS 計画に参加して、観測的研究を勧めた。とりわけ、SEEDS プロジェクト内における観測ターゲット選定において、年齢が 1 千万年から 2 億年ほどの若い星を選定してきた。これらの星の年齢は、もしその星の周りで巨大ガス惑星が複数存在すれば惑星間の力学的相互作用が活発に起こる時代に相当する。そのため、その影響による巨大ガス惑星の移動の効果を調べるには重要な時期でもある。そのターゲットの選定においては、星の年齢をより良い精度で合理的に決めることが必要になる。そこで、まず運動学的星団に属していることが知られている星に注目した。運動学的星団は同じ起源を持つ星で構成されており、その星団の年齢はその中に含まれる複数の星の光度・温度進化関係などから比較的良い精度で求められている。次に、星団に属していない太陽近傍の星にも注目したが、これらの星には上記の手法は適用できないため、近年導出された星の年齢と自転周期の関係を示した経験式(gyrochronology)や星の彩層活動をその年齢の関数として求めた経験式(Mamajek & Hillenbrand 2008)を用いて年齢を推定し、ターゲットを選定した。そのターゲットの実際の

観測は2009年から開始したが、取得した36天体のデータを解析したところ、およそ40の伴星候補天体を検出した。星は固有に天球面上を運動していることが知られているが、その星に物理的に付随する天体も同じ固有運動をしている。その原理に基づいて40の星がその主星に付随するかどうかを調べたところ、GJ 504 という1.2太陽質量の星周囲で検出された伴星天体(GJ 504 b)のみ、主星に対しておよそ43.5AUの距離を保ちながら同じ運動をしていることを確かめた。

さらにその天体の主星に対する位置変化を約一年間に7回測定した結果、その運動がケプラー運動で説明できることを確認した。この検出した天体の質量は、主星の年齢が惑星の年齢とほぼ一致するという仮定のもと、その近赤外光度を巨大ガス惑星の光度進化モデル(Baraffe et al. 2003)と比較することにより導出した。GJ 504の年齢は最も直接的かつ精度の良い方法である gyrochronology 法を用いて1億年から2.3億年と推定されるが、その年齢ではGJ504 bの質量はおよそ2-4.5木星質量 (M_{Jup})と推定された(図2)。年齢推定としては2次的であり、統計的精度も悪い彩層活動に基づいた手法ではGJ 504の年齢は1.5-5億年と見積もられたが、その年齢を保守的に採用した場合でも、質量は2-7.5 M_{Jup} となる。そのため検出した天体は巨大ガス惑星と考えられる質量を持ち、これまで検出された大きな軌道を持つ惑星の中でも最小質量の惑星の一つであることが分かった。特筆すべきは、年齢が1億年より大きい場合、質量推定の際に使われる光度進化モデルの不定性が比較的小さい(Spiegel & Burrows 2012)ために、GJ 504 bの質量推定も不定性が小さいことである。過去に直接撮像されてきた巨大ガス惑星は5千万年より若いため、その不定性の影響は無視できない。これまで直接撮像法では、巨大ガス惑星は主に太陽の1.5倍以上大きな質量をもつ星の周囲で検出されてきたが、GJ 504 bは太陽に近い質量を持つ星の周囲で検出された初の確実な検出例である。これは、古典的なコア集積の枠組みでは説明するのが難しい大きな軌道の巨大ガス惑星が太陽より1.5倍以上というような限られた範囲の質量を持つ星の周囲でのみ存在するわけではないことを観測的に支持する。

さらに本研究では、本探査の総合的な結果がコア集積および惑星の理論モデルによって、どの程度説明可能かどうかを検証するために下記の統計分析をおこなった。この方法では、巨大ガス惑星の population synthesis と今回得た総合的な観測結果を比較し、一つの惑星検出を再現できるかどうかを調べた。この方法では、Ida & Lin らの population synthesis model (参考: Ida & Lin 2004; Ida & Lin 2010)からモンテカルロ法により惑星をランダム抽出した。さらに各々観測したターゲットに分配、天球面上座標系への変換などもモンテカルロ法を用いて統計的に扱うことでモデルにより産出された惑星の物理的情報を観測と比較可能な量に

変換した。さらに、それらの惑星が各々のターゲットに対して導出した検出限界と比較したときに検出可能であるかを調べた。これらの作業を一万回独立に繰り返すことで、全体のターゲットを観測したときに一つガス惑星が検出される確率を推定すると、34%の確率でそれが実現されることがわかった。この確率は採用した理論モデルを否定する値ではない。本研究で用いたガス惑星の形成/軌道進化モデルはまだ発展途中のものであり、既に間接法による探査から明らかになった系外惑星探査の統計的特徴を一部再現するのに失敗している(Howard et al. 2010)。また、より一般的な検証のためには本研究で採用した Ida & Lin 以外のモデルとの比較も必要である。さらにそれらの問題点に加え、ガス惑星の光度進化モデルの不定性などを考慮すると、本研究の統計的分析で得られた確率に基づいてコア集積やガス惑星の移動理論の妥当性を結論するのは未だ現実的ではない。しかし、本研究で試みた統計分析は直接撮像観測がガス惑星の形成および進化理論を統計的な観点から制限可能であることをデモンストレーションするに至ったと言える。また、本研究では同分析手法に基づいて将来の直接撮像探査における見込みも提示している。

以上のように本研究では、巨大ガス惑星の検出に成功し、さらに全体的な観測結果から巨大ガス惑星の形成や進化に対する理論を統計的に検証する糸口を与えることに寄与した。

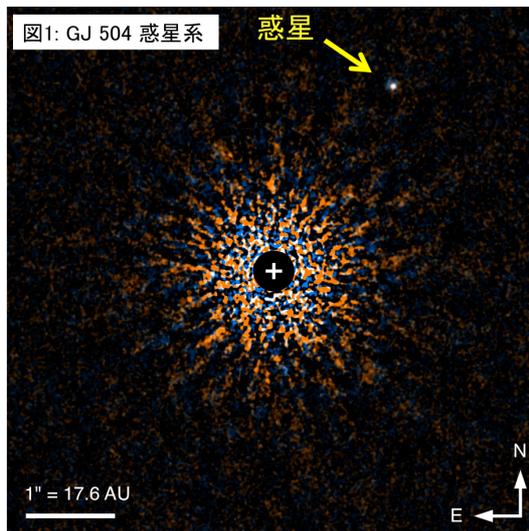
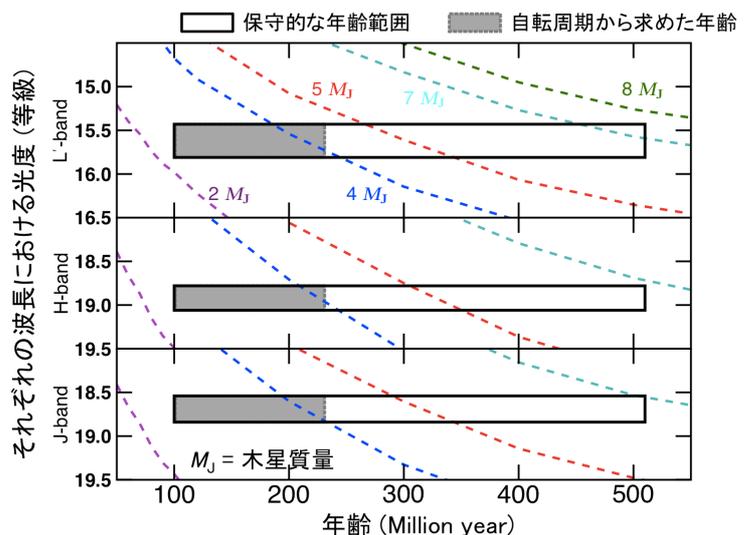


図2: 光度進化モデルとの比較による質量推定



GJ 504 b の波長 J ($\sim 1.2 \mu\text{m}$), H ($\sim 1.6 \mu\text{m}$), (L: $\sim 3.8 \mu\text{m}$) における光度を巨大ガス惑星の光度進化モデル(破線)と比較した結果。図の四角の横幅は推定年齢範囲、縦幅は測定光度とそのエラー範囲に相当。