

ホットジュピターにおけるオーム加熱 および質量散逸量について

2012年度 第42回 天文天体物理若手 夏の学校 集録
名古屋大学理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻
理論宇宙物理学研究室 M2 田中佑希

1 Introduction

本発表では、Wu & Lithwick(2012)の「Ohmic heating suspends, not reverses, the cooling contraction of hot Jupiters」のレビューと合わせて、大気散逸量に関する研究について発表した。

現在までに、様々な観測手法を用いて数多くの系外惑星が発見されている。その数は、存在が確定しているものだけでも777個にのぼり(2012年8月初頭現在)、最近ではケプラー望遠鏡での観測により系外惑星候補数は一気に千個のオーダーになっている。数多く発見されている系外惑星は、軌道長半径や軌道離心率、質量などにおいて非常にバラエティ豊かである。際立った特徴を持つ系外惑星として、中心星に非常に近い場所を公転している($\sim 0.05\text{AU}$)巨大ガス惑星である「ホットジュピター」、彗星のような非常に大きな軌道離心率を持っている「エキセントリックプラネット」、近年注目されている大型の岩石惑星である「スーパーアース」などが挙げられる。これらの様々な系外惑星のうち、今回は「ホットジュピター」に注目したいと思う。ホットジュピターでのトピックは、その大気構造及び内部構造、大気の散逸気候及び散逸量、形成過程や惑星の移動、将来的な進化の行方などがあるが、本発表では特に大気構造や大気散逸について紹介したい。

2 ホットジュピターの膨張半径とオーム散逸

2.1 ホットジュピターの半径

系外惑星の中には、半径や質量が観測されている物がある。トランジット法と呼ばれる観測手法では、地球から見て惑星が中心星の手前を通過する時の中心星の減光を観測することによって惑星を間接的に観測することができるが、この時の減光から惑星の大きさを決定することができる。また、視線速度法と呼ばれる観測手法では、惑星が中心星の周りを公転することによる中心星のふらつきを観測しているが、これによって惑星の質量(正確には最小質量)を決定することができる。トランジット法と視線速度法の両方を組み合わせることによって惑星の大きさと質量を決めることができ、この方法で多数の惑星の情報が得られている。

惑星の大きさはまちまちであるが、巨大ガス惑星の半径の時間進化はCooling theoryによって求めることができる。ガス惑星の形成当初は温度が高く惑星自体も大きな半径を持っているが、その後冷却していくため、ガス惑星はその質量に依らず

数十億年で木星半径程度にまで収縮する。また、ガス惑星の半径には、

- ・ 輻射、コア質量、大気組成によって10~20%の違いがある
- ・ 中心星輻射が強いと惑星半径も大きくなる傾向がある (Enoch et al 2011, Laughlin et al 2011)

という性質がある。

しかし、実際のホットジュピターの半径の観測値は、0.8~2倍の木星半径と、大きくばらついているということが分かっている。特に、理論的に予測されるよりも大きく膨張した半径を持っているホットジュピターが複数発見されている。これは、強い中心星の輻射を受けていることを考慮しても異常な程の膨張であり、このような膨張した半径を維持する為には恐らくは何らかの別の熱源が必要であると考えられる。この熱源として提案されているのが、惑星内部での「オーム散逸」による加熱である。

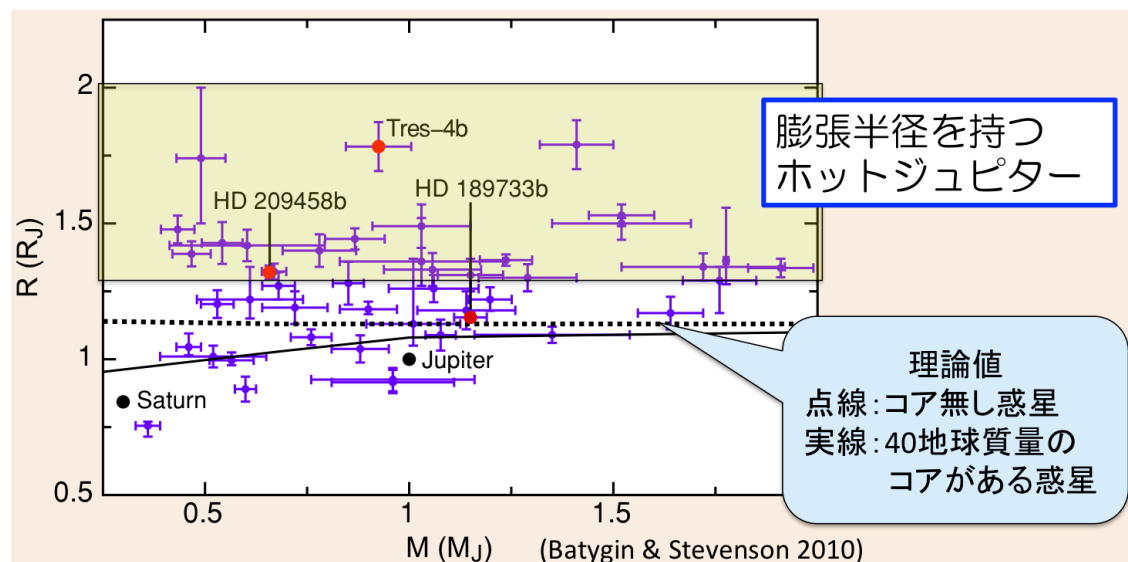


図 1: 惑星半径の理論値と観測値の比較

2.2 オーム散逸

オーム散逸による加熱の前提条件として、

- ・ 惑星が大規模な磁場を持つ
- ・ 惑星内部での電流がオーム散逸によって熱化される

というものがある。

ガス惑星は、形成当初は熱く、半径も大きい高エントロピーの状態となっている。その後、時間の経過に従って惑星からの輻射によって熱が外部に捨てられ、惑星はエントロピーを失って収縮していく。この時の輻射のエネルギーをオーム散逸によ

る加熱によって賄うことで、惑星内部のエネルギーを失いにくくし、それによって惑星の収縮を遅らせることができる。

惑星内部でのオーム加熱による加熱率や、加熱が効く場所を決定する物理量には様々な物がある。惑星磁場の大きさや電流を担う大気の流れ、惑星内部の電気伝導度、対流層の深さなど惑星の大気構造がその例である。これらを厳密に決定するのは極めて困難である為、加熱率はまずはパラメータで設定する。

2.3 オーム散逸に関する詳細設定

オーム散逸の加熱効率について、中心星から受ける輻射フラックスに対する比として表す。

$$\int_0^R \frac{dQ}{dt} dr = \int_0^R \frac{J^2}{\sigma} \sim \epsilon \frac{L_*}{16\pi a^2} \quad (1)$$

ここで、 R は惑星半径、 J は電流、 σ は電気伝導度、 a は軌道長半径、 L_* は中心星のフラックスを表す。また、中心星からのフラックスの比を ϵ と置き、これを Heating efficiency parameter と呼ぶ。数値計算より、膨張半径を維持するのに必要な ϵ は3%程度である。惑星内部における電流分布は、

$$\mathbf{J} = \sigma \left(-\nabla\Phi + \frac{\mathbf{v}_{\text{wind}} \times \mathbf{B}_{\text{dipole}}}{c} \right) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

の式を解くことによって決定する。これによって、オーム加熱の半径依存性を決めることができる。

オーム散逸による加熱を、膨張半径を持つホットジュピターに適用して計算した例が図2である。(Wu & Lithwick 2012) この論文では、TrES-4 という系外惑星について計算を行っている。この惑星は軌道長半径が0.05AUのホットジュピターであり、質量は0.917木星質量と木星とほぼ同程度であるが、半径は1.706木星半径と大きく膨張していることが分かっている。図の水色の線で示してあるのが、中心星の輻射が無い場合(無視出来る場合)の半径の時間進化である。惑星が中心星から離れた場所にある場合は、 10^7 年未満の短時間で現在のTrES-4の半径を下回ってしまう。緑色の線で示してあるのは、中心星から0.05AUの位置で強い輻射を受けている場合の半径の時間進化である。輻射が無い場合に比べると惑星の収縮のスピードはゆっくりになるが、この場合も 10^8 年程度で現在の半径まで収縮してしまい、膨張半径を維持することは出来ない。

赤い線で示してあるのが、中心星輻射に加えてオーム散逸を考慮した場合の半径の時間進化である。オーム散逸を考えた場合は、 10^9 年経過した後でも現在の膨張した半径に近い値を維持することができている。この結果より、オーム散逸による惑星内部での加熱効果により、惑星の収縮を遅らせることによってホットジュピター

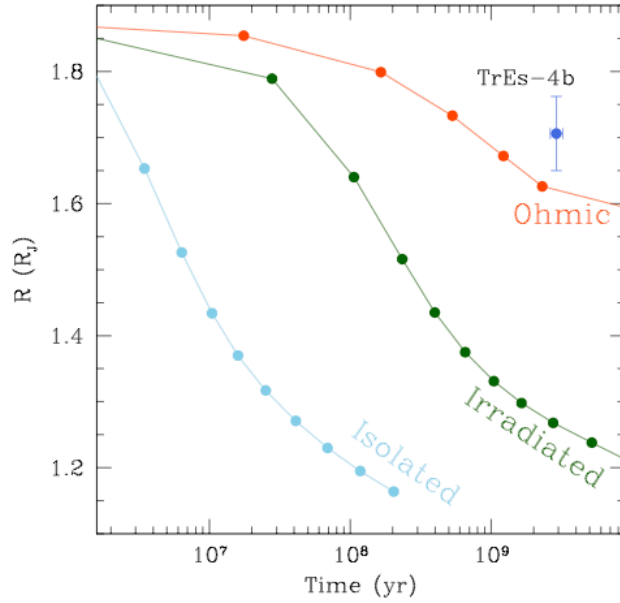


図 2: オーム散逸を考慮した場合の惑星半径の時間進化

の膨張半径を説明することが可能である。

なお、この論文においては、惑星表面磁場は 5Gauss、電流の担い手は H, He, Na, K, Al の各イオンである。

3 磁場の存在と大気散逸量

惑星の膨張半径とオーム散逸の関連性より、ホットジュピターは強い磁場を持っているであろうことが示唆される。惑星が強い磁場を持っている場合、磁場が惑星の諸現象にも影響を及ぼす物と考えられる。その代表的な例が、惑星からの大気散逸気候及び大気の散逸量である。磁場の存在を考慮した大気散逸量を見積もることは出来ないだろうか。

磁場を持つ天体による質量散逸の代表的な例は、太陽風や恒星風である。太陽風、すなわち中小質量星における恒星風とは、表面对流に起因するアルフヴェン波駆動ガス流による質量散逸のことを指す。このメカニズムによる質量散逸の理論 (Suzuki 2007) を磁場を持つホットジュピターに適用し、質量散逸量を計算する。質量散逸量の見積もり、以下の式で与えられる。

$$\frac{1}{2}\dot{M}v^2 = f\frac{1}{2}\rho\langle dv^3 \rangle \cdot 4\pi R^2 \quad (4)$$

ここで、 \dot{M} は質量散逸率、 v は天体表面からの脱出速度、 ρ は表面での密度、 dv は速度分散、 R は天体の半径である。また、 f は散逸する割合を表したパラメータで

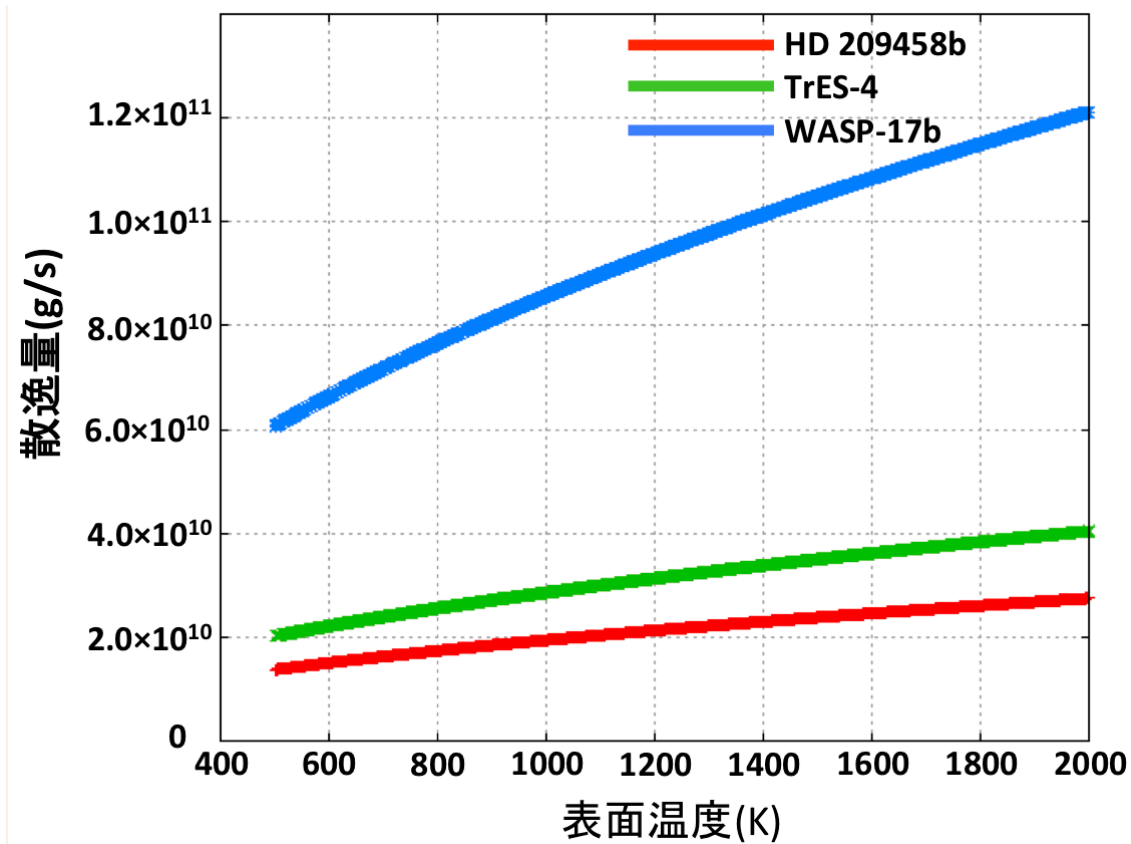


図 3: 表面温度による散逸量の変化

あり、 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ までの値を取り得る。現在の太陽における値は $f \sim 10^{-4}$ である。図 3 は、いくつかのホットジュピターにおいて質量散逸量を計算した結果である。

次に、計算で見積もった値の整合性について議論する。代表的なホットジュピターである、「HD 209458 b」における質量散逸率の、観測値および理論系な予測との比較を行う。

本研究において、表面温度を 750 ~ 1000K とし、 $f = 10^{-6}$ とした場合は、

$$\dot{M} \simeq (1.84 \sim 2.12) \times 10^{10} \text{g/s}$$

となる。

トランジット観測により、HD 209458 b からの質量散逸量の下限值が求められているが、その値は

$$\dot{M} \sim 10^{10} \text{g/s}$$

である (Vidal-Madjar 2004)。

また、ホットジュピターの超高層大気に関する理論的計算からの質量散逸量の予測値は

$$\dot{M} \simeq 4.7 \times 10^{10} \text{g/s}$$

である (Yelle 2004)。以上の結果より、当研究による質量散逸量の見積もりは、観測からの下限値と、先行研究に夜結果との整合性があることが示される。

4 まとめ

本発表では、一部のホットジュピターに見られる膨張した半径は、惑星内部におけるオーム散逸による熱源を考えることによって説明することが可能であるということを示した (Wu & Lithwick 2012)。これは、膨張したホットジュピターにおける強い磁場の存在を示唆する物である。惑星に強い磁場が存在する場合、ホットジュピターからの大気散逸量を太陽風の理論を適用することによって見積もることが可能であることを示した。またこの計算結果は、観測値、理論的予測との整合性もある。

ただし、パラメータ次第では、現時点での観測値や理論的予測よりも数桁大きな値を取りうることも同時に示すことができる。そのため、より大量の大気散逸が発生している可能性は考慮すべきであるということを強く示唆する。

ホットジュピターにおいて、磁場の存在は様々な現象に大きな影響を及ぼす。今後の展望としては、磁場の存在も含めたホットジュピターの大気構造や内部構造、質量散逸について、包括的に説明することの出来る理論的なモデルを構築することを目標としている。