

系外惑星大気の構造についての理論的研究

2011 年度 第 41 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 M1 田中佑希

1 Introduction

本発表では、N. Madhusudhan & S. Seager(2009) の「A temperature and abundance retrieval method for exoplanet atmosphere」の論文のレビューを行った。

現在までに多数の太陽系外惑星が発見されている。その数は、7月13日現在で563個であり、さらにケプラー宇宙望遠鏡によって1235個もの候補天体が発見されている。

これらの系外惑星のうち、いくつかの惑星は分光観測によるスペクトルの分析がされている。系外惑星の分光観測は大きく分けて、惑星が主星の前を通過するときの惑星大気の透過光が観測できるトランジットと、惑星が主星の背後を通過する secondary eclipse 時惑星からの反射光の観測がある。どちらも、トランジット時、secondary eclipse 時とそうでないときのスペクトルの差分を取ることで、惑星のスペクトルの情報を得ることが出来る。これらの観測は Spitzer 宇宙望遠鏡や Hubble 宇宙望遠鏡などによって行われており、惑星のスペクトルの分析から H_2O 、 CO_2 、 CH_4 などの分子の存在が示唆されている。また、強い輝線スペクトルも検出されており、これは惑星大気に温度逆転層があることを示唆している。

惑星大気の温度逆転層は太陽系の惑星には一般的であり、例えば地球の場合は高度 11km の対流圏界面までは高度上昇に伴って温度は低下するが、成層圏上部から成層圏界面にかけては温度が高度上昇に従って温度が上昇する。太陽系のガス惑星や氷惑星についても、様々な観測から温度逆転層が存在することが判明している。このように温度逆転層が存在する場合、高温になっている部分に存在する分子からの強い放射が見えるため、輝線スペクトルが観測される。地球の場合は O_3 、木星の場合は CH_4 が温度逆転層を形成している。太陽系外の Hot Jupiter の場合は TiO や VO が寄与していると考えられているが、これについては反論もあり議論中である。

観測が進み、このような系外惑星の大気に関する情報を得ることが出来るようになってきたことで、系外惑星がどのような大気構造を取りうるのかというモデルを構築する重要性は高くなっている。

2 Parametric P-T profile

ここで紹介するのは、N. Madhusudhan & S. Seager による Parametric P-T profile である。この手法では、まず惑星大気の温度-圧力構造と大気分子の存在量をパラメータ化する。そのパラメータを様々な値に設定することにより多数の大気構

造を仮定し、それぞれの気体構造から得られるスペクトルを輻射輸送の計算から求める。その後、得られたモデルのスペクトルと、実際に Spitzer や Hubble などにより観測されている実際のデータとを比較して誤差を評価し、パラメータの範囲に制限をかけるというものである。

温度-圧力構造 (P-T profile) のパラメータ化では、まず惑星大気を大きく 3 つの層に分割する。惑星大気の最上部が、温度逆転が無い層である Layer 1、中層が温度逆転が可能な層である Layer 2、最下部が光学的に厚いため等温となっている Layer 3 である。ここで、惑星大気として扱うのは、圧力が $10^{-5}\text{bar} \leq P \leq 100\text{bar}$ の範囲である。この範囲において、P-T profile の形を

$$P = P_0 \exp(\alpha_1 (T - T_0)^{0.5}) \cdots \text{Layer 1} \quad (1)$$

$$P = P_2 \exp(\alpha_2 (T - T_2)^{0.5}) \cdots \text{Layer 2} \quad (2)$$

$$T = T_3 \cdots \text{Layer 3} \quad (3)$$

とおく。

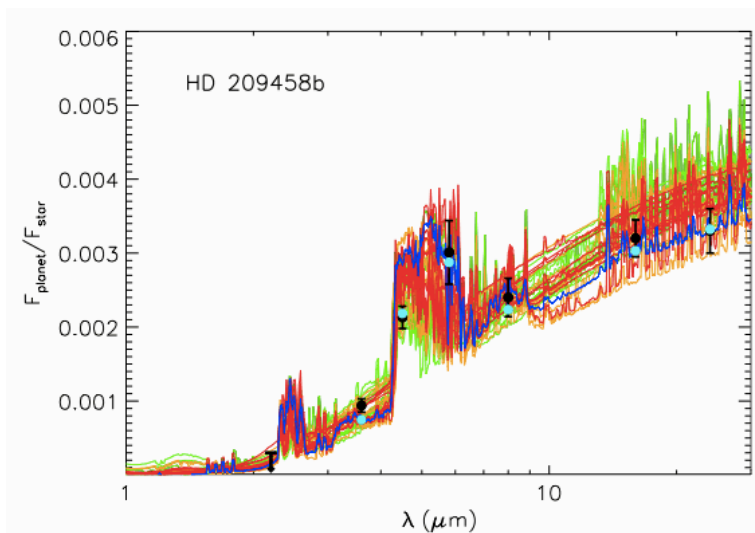
フリーパラメータが多数あるが、それぞれの関数は境界で連続であり、また大気の最上部の圧力は $P = 10^{-5}\text{bar}$ としているため、P-T profile でのフリーパラメータは $T_0, \alpha_1, \alpha_2, P_1, P_2, P_3$ の 6 つである。

次に、大気分子存在量のパラメータ化をする。ここで考える分子は、 $\text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{NH}_3$ の 5 種類である。惑星大気は化学平衡状態に無いため、まずは化学平衡状態を仮定した場合の各分子の濃度を求め、その濃度を基準として基準からのずれをパラメータとして与える。フリーパラメータはそれぞれの分子につき、 $f_{\text{H}_2\text{O}}, f_{\text{CO}}, f_{\text{CH}_4}, f_{\text{CO}_2}$ である。 NH_3 については、観測から弱いスペクトル情報しか得られていないため、パラメータからは除外してある。

P-T profile でのフリーパラメータ、分子存在量のフリーパラメータで合計 10 個のフリーパラメータがあることになる。このパラメータを様々な値に振り、観測データとの比較をする。ここでは、系外惑星 HD 189733b、HD 209458b に適用する。両者はともに中心星に非常に近い所を公転する Hot Jupiter であり、Spitzer や Hubble 等による観測データが得られている。

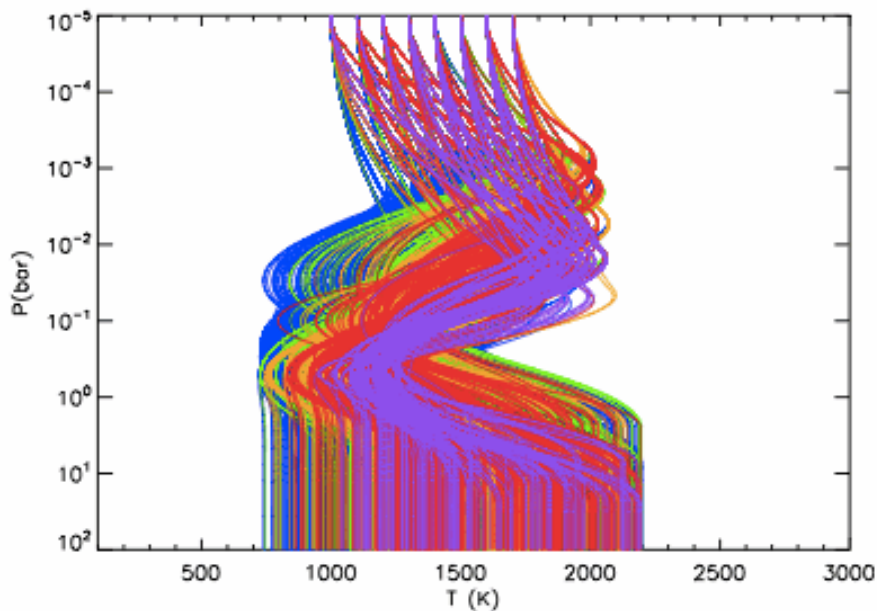
3 Result

3.1 HD 209458b



左のグラフは、HD 209458bの観測データとモデルの比較である。黒い点がSpitzerによる secondary eclipse 時の観測データ、水色の点が観測データに最も良い一致を示すモデルのスペクトルである。このデータではスペクトルに強い輝線があることを示している。

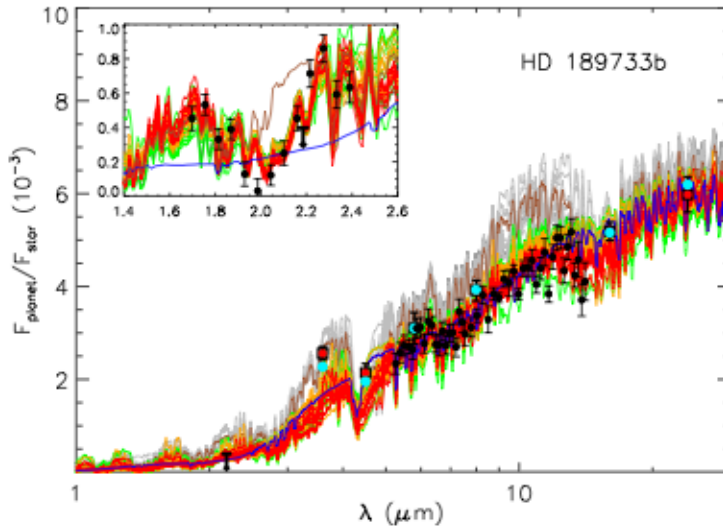
モデルは全体で 6×10^6 個 計算し、そのうち実際の観測データとよく一致する 7000 モデルを選ぶ。この 7000 モデルの P-T profile は次のようになる。



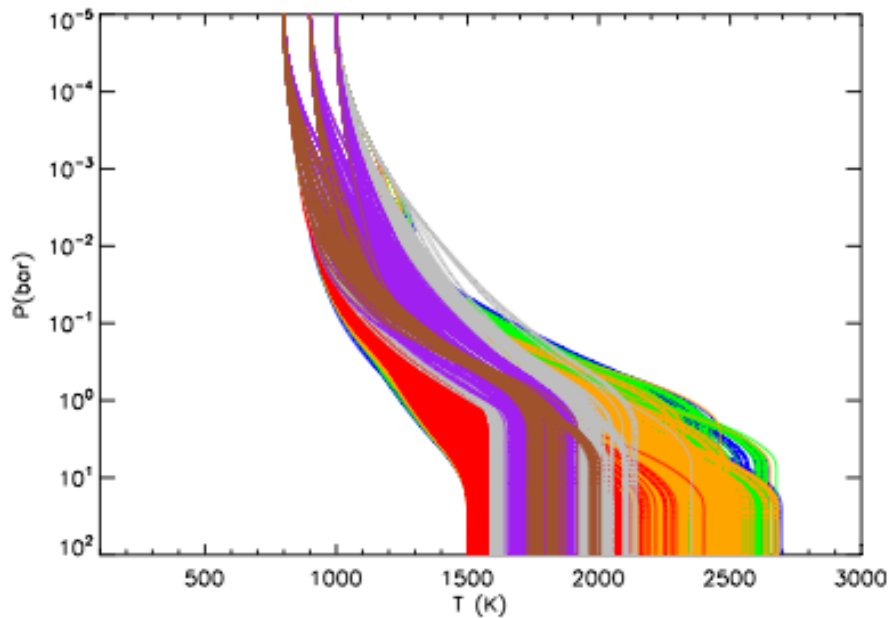
紫色で表示された温度構造が、観測データとの誤差が小さいモデルである。観測データと良い一致を示すモデルは、全て温度逆転層が存在していることが分かる。また、大気の子分子存在量については、 $10^{-8} \leq \text{H}_2\text{O} \leq 10^{-5}$ 、 $4 \times 10^{-8} \leq \text{CH}_4 \leq 0.03$ 、 $\text{CO} \geq 4 \times 10^{-4}$ 、 $4 \times 10^{-9} \leq \text{CO}_2 \leq 7 \times 10^{-8}$ というパラメータの制限が得られる。数値は全て、水素分子との個数比である。

観測データとの比較より、HD 209458b は温度逆転層が存在する大気構造を持つとすると、観測されているスペクトルをよく説明できる。

3.2 HD 189733b



次に、HD 189733b の観測データとの比較をする。こちらの観測データでは、明確な輝線スペクトルは得られていない。先程と同様に、モデルのうち観測データによく合うものを選び出す。P-T profile は次のようになる。



茶色で表された温度構造が、観測データとの誤差が小さいモデルである。HD 189733b の場合、観測データと良い一致を示すモデルは、全て温度逆転層が存在していないことが分かる。よって、温度逆転層が存在しない大気構造を持つとすると、観測されているスペクトルをよく説明することが出来る。

4 Conclusion

parametric P-T profile では、輻射輸送、非平衡の分子組成、静力学的平衡、全球のエネルギー収支を考慮して各種のパラメータを制限することにより、大気モデルを決定することが出来る。温度逆転層が惑星大気に存在するかどうかを推定できたり、分子存在量の上限と下限を与えたりすることが出来る。また、その他パラメータの範囲に制限をかけることが出来る。

この手法の今後の展望としては、Hot Jupiter だけではなくより幅広い系外惑星大気への拡張である。この手法では Hot Jupiter の大気構造を念頭に置いているが、ハビタブルゾーン内の Super Earth や、Hot Jupiter ではない冷たい惑星への拡張も可能である。Cooler planet では、「雲」の存在を考慮する必要がある。これは、波長依存性のある吸収率として新しくパラメータを増やすことによって対応することが可能である。

また、この手法では惑星内部からの熱源は無視しているが、内部からの熱の供給を考慮すれば、形成したばかりの熱い惑星や、褐色矮星へのモデルの拡張も可能である。

この手法ではモデルを制限するのに観測データを用いているが、信頼できる観測データが増えることによってさらにモデルを制限でき、様々なパラメータの範囲をより強く制限することが出来る。よって、今後観測が進むことによって、さらに詳細な大気構造を決定することが出来る。James-Webb 宇宙望遠鏡の打ち上げによってさらに詳細なデータが得られ、系外惑星の大気構造についてさらに理解が進むことが期待される。

参考文献

Madhusudhan, N., & Seager, S 2009, ApJ, 707, 24