

ガス巨大惑星の形成と極低質量星の進化に関する論文レビュー

笠 嗣瑠（総合研究大学院大学天文科学専攻 M1）

Abstract

ガス巨大惑星の形成と M 型星、褐色矮星について理解を深めるために、ガス巨大惑星の形成理論について書かれた Spiegel & Burrows(2012) の Spectral and Photometric Diagnostics of Giant Planet Formation Scenario と極低質量星の進化計算について書かれた G.Chabrier et al.(2000) の Evolutionary Models for Very Low-Mass Stars and Brown Dwarfs with Dusty Atmospheres のレビューを行った。

1 Introduction

観測による研究を行うには、理論の面から観測天体について理解をしていることが必要である。系外惑星の観測的研究をこれから行うにあたり、ガス巨大惑星の形成理論、M 型星と褐色矮星の理論モデルについて理解を深めるためにそれぞれに該当する論文のレビューを行った。

2 Spiegel & Burrows(2012)

2.1 Introduction

惑星形成は、原始惑星系円盤の重力不安定から惑星が生まれたとする hot-start モデルと岩石のコアが集まって惑星ができたとする cold-start モデルの二種類のモデルが存在している。そのため、直接撮像で光度からモデルを用いて質量などを計算するときにおいて、使うモデルによって差が存在し、不定性になっている。

2.2 Formation Scenarios

ガス巨大惑星から褐色矮星の質量の天体がどのように形成されたのかについては 2 つの考え方がある。一つは ~10 地球質量ほどのコアができ、その「大気」が増大していくモデルである。周囲のガスが惑星へ降着していき、成長中の惑星の境界面で降着衝撃波が起こり、とても明るくなる。もう一つは原始惑星系円盤が重力不安定になって断片ができ、惑星が直接形成されたというモデルである。

モデル間の違いの一つが、コア集積モデルを通じてできた天体は岩石を核にして成長するために円盤不安定モデルを経てできた天体より高い金属量を持つことである。もう一つは惑星形成のタイムスケールの違いである。コア集積モデルは岩石コアの形成とガスの降着の 2 つのステップがあるために、円盤の不安定から直接惑星が形成されるよりも遅くなる。最後の違いは、形成された天体に残っている形成の熱である。原始惑星系円盤でのガスの比エントロピーは惑星や褐色矮星よりとても高いが、コア集積モデルではガスの集積の過程で降着衝撃波が発生することでその初期エントロピーは失われてしまう。このことからこれを cold-start モデルと言う。これに対して円盤不安定を通じた惑星は初期エントロピーをより多く持っているため hot-start モデルと呼ばれている。ある年齢の天体で、異なる初期エントロピーは観測的には異なる年齢の天体との違いと同じようになる。

実際は cold-start と hot-start のような簡単なアイデアよりはもっと複雑なものであり、コア集積モデルの降着衝撃波は初期エントロピーを 100% の効率で取り除くわけでもなく、降着衝撃波は円盤不安定モデルでも起こりうる。つまり、cold start は思っていたよりも cold ではなく、hot start は hot ではない。これは “warm-start” という中間のモデルにつながるのである。

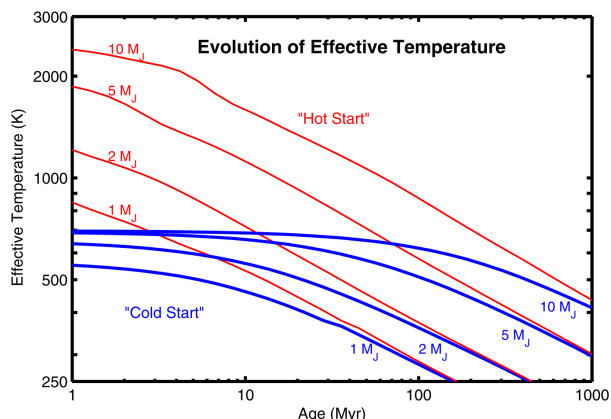


図 1: それぞれのモデルでの有効温度の進化

2.3 A Continuum of “warm-start” Planets

図 1 は 10 億年にわたって惑星の有効温度の進化を示している。初期においては“hot-start”と“cold-start”の差は特に質量の大きい天体でとても大きいですが、進化するにつれて差はなくなり収束していく。10 M_J では数億年で初期条件の痕跡がなくなるが、質量の小さいものではより早い数千万年でなくなってしまう。

“hottest-start”と“coldest-start”の間を warm-start で変化させる。図 2 と図 3 は K バンドにおける惑星の絶対等級の進化について示したものである。図 1 と同様に質量の大きい惑星で初期においては差が大きく、小さい惑星ではその差が数千万年でなくなっている。

2.4 Conclusion

一連のガス巨大惑星の進化の計算より (1) hot-model では最初の数百万年において特に明るくなり (質量やスペクトルバンドによるが 2-9 等)、この差は H と K バンドにおいて特に顕著であること、(2) 質量の小さい (1-2 M_J) ガス巨大惑星では、この差は 1-3 千万年であらうじて観測できるにまで減衰し、一方でより質量の大きい (5-10 M_J) ものでは、hot-start モデルは 1 億年以上でも K バンドにおいては数等級、cold-start モデルよりも明るいこと、(3) 大気

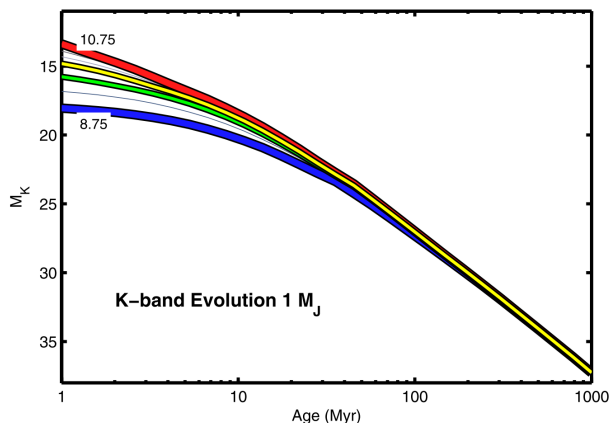


図 2: M_J での K バンドでの絶対等級の進化。赤が hottest-start、青が coldest-start を表しており、数字は初期エントロピーである。

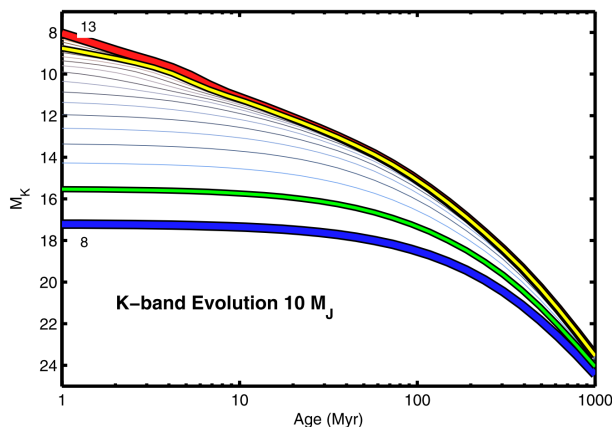


図 3: 10 M_J での K バンドでの絶対等級の進化。図 2 と同様。

タイプ (金属量、雲の有無) の変化は、ある質量、年齢、初期エントロピー、スペクトルバンドで数等級の違いを生み出すことになるが、質量や年齢、初期エントロピーよりは惑星の emergent flux への影響は小さいということ、という結論を得ることになった。

3 G.Chabrier et al.(2000)

3.1 Introduction

最初の褐色矮星 Gl 229b の発見以来、M 型星よりも冷たい天体の発見は増加している。褐色矮星は L

型と T 型とに分類され、メタンの吸収線が J,K,L バンドで見られる。これらの褐色矮星のスペクトルの性質は、ダストなしのモデルでは厳密に再現することはできず、 $T_{\text{eff}} \leq 2800\text{K}$ よりも低い場合には理論モデルはダストの生成と opacity を含まなければならない。

3.2 Model description

低温の天体では凝縮相の形成により多くのガス分子と難揮発性元素は激減している。晩期型 M 型星と若く重い褐色矮星において、雲の生成は主に光球の近くで行われていると予測されている。現在の計算ではサブミクロンの範囲で粒子の大きさの分布を仮定しているが、この粒子の扱いは DENIS や 2MASS のとても赤い光を持ち、強い熱放射をしている天体の観測と一致している。

粒子形成は凝縮、蒸発、凝固、合体、対流などの様々なタイムスケールの間でのバランスを含んでいることから様々な極端な仮定の下で計算を行った。

1 つ目は dust-free の “NextGen” モデル（一点鎖線）である。2 つ目が輻射輸送方程式での dust の散乱と吸収を考慮に入れて、凝縮した平衡な種類が状態方程式と opacity に含まれている “DUSTY” モデル（実線）である。3 つ目が光球でのガス相にある dust を生成する元素の減少を考慮に入れているが、輸送方程式ではそれを考慮していないために凝縮物の opacity を無視した、大気中の粒子の生成を含んだ “COND” モデル（長点線）である。図 4 はそれぞれのモデルでの $T_{\text{eff}} = 1800\text{K}$, $\log g = 5$ での圧力-温度図である。DUSTY モデルで光球の外側でダストの温室効果による熱の超過が見られる。

3.3 Color magnitude-diagrams

現在のモデルと晩期型 M 型、L 型とメタン矮星の観測を色等級図で比較する。図 5 はモデルと M_V 対 $(V - I)$ の色等級図を比べたものである。

$M_V > 20$ では COND モデル（一点鎖線）は DUSTY モデルよりも 0.3-0.4 等青く、これはダストの効果であり、 $M_V \gtrsim 19$, $(V - I) \gtrsim 4.8$ で見られる。

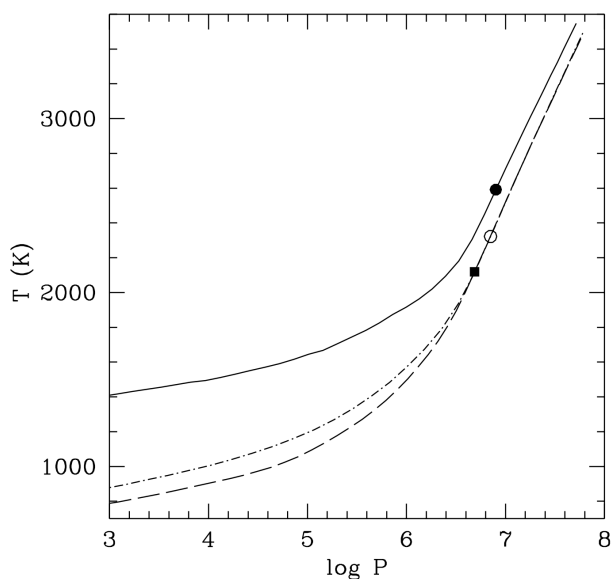


図 4: それぞれのモデルでの圧力-温度図。各点は光球に対応する。

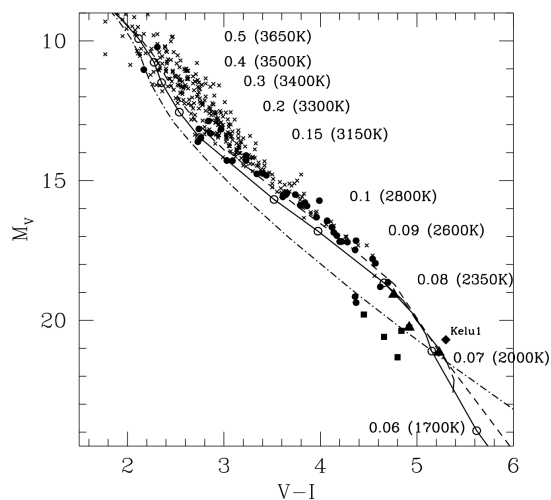


図 5: M_V 対 $(V - I)$ の色等級図。短点線は 0.1Gyr での DUSTY モデル、実線は 1Gyr での DUSTY モデル、長点線は 1Gyr での COND モデル、一点鎖線は 1Gyr での NextGen モデルである。白丸は 1Gyr での DUSTY モデルの質量 (M_{\odot}) と T_{eff} に対応する点である。

図 6 は近赤外で M_K 対 $(J - K)$ の色等級図である。DUSTY モデルが晩期型の M 型星と L 型星赤外における測光について一番よくフィッティングしてお

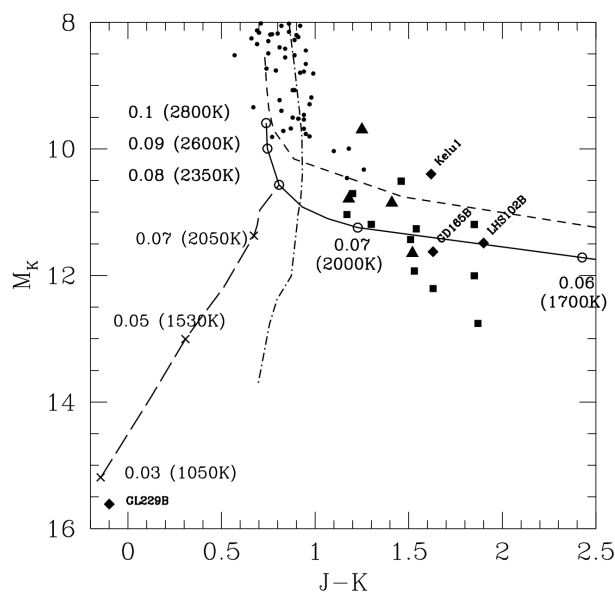


図 6: 近赤外での M_K 対 $(J-K)$ の色等級図。各線は 5 と同様である。COND の線にあるバツ印は 1Gyr での質量 (M_\odot) と T_{eff} である。

り、粒子の吸収による大気の輻射加熱によって、これらの天体のとても赤い特徴を説明している。

dust の opacity が無視される (COND, NextGen) とき、H と K バンドに現れる H_2 、 H_2O 、CO、 CH_4 による強い吸収が無視されることになるので近赤外の色は青くなる。Gl 229 b は COND トラックといひ一致をしている。 CH_4 が光球の近くで形成されると、Gl 229b のように、フラックスのピークが $1\mu\text{m}$ にあったとしても、K バンドで強く減少するためである。

3.4 Discussion

CMD との比較によって、DUSTY モデルは観測された低質量星と dusty な大気を持つ褐色矮星の赤外線でのスペクトルとかなり一致している。このことからモデルは妥当な信頼性があるので、確認されている晩期型 M 型星と L 型星の主な特徴、質量、年齢、 T_{eff} 、 L を較正するのに使うことができる。欠点はまだ存在しており、dust の扱い方についてである。 $\sim 2300\text{K}$ より下で、DUSTY モデルと観測の $(V-I)$ との比較は可視光での opacity を過小評価している

ことか、粒子が凝結する間での分子吸収物の減少を過小評価していることを示唆している。そして、Gl 229b のスペクトルは正確に説明されていない。

dust の形成と吸収が M 型星と L 型星の遷移をうまく説明できるとしても、理論と観測のギャップは L 型星とメタン矮星 (T 型星) との間に存在している。

ダストの opacity を含むモデル (DUSTY モデル) は $(J-K) > 2$ と赤外線でもとても赤くなるが、観測で最も赤い L 型星は $(J-K)$ で 1.9 であり。これは $T_{\text{eff}} \sim 1700 - 1800\text{K}$ に相当する。図 4 よりこれは光球の近くであり、ダストの形成が光球の近くで起こっていることの可能性が非常に高いことを示している。

4 自分の研究との関係、見解

図 2 のように低質量星、褐色矮星は時間が経つにつれて冷却していく。これらの天体を検出するためには、形成間もない天体を観測対象に選ぶことが重要になる。

M 型星は赤外線で見やすく、観測するには近赤外線が適しているが、M 型星の周囲は低温によって dust が形成されている。M 型星のトランジット観測においては、この dust の分布にムラがあることによる減光と惑星による減光とを注意して区別しなければならないと考えられる。ドップラー観測においては、dust による吸収線が視線速度でふらついていてもそれは惑星によるふらつきではなく、光球近くの dust が膨張収縮しているために見かけ上視線速度のふらつきが見られる可能性があり、注意する必要があると考えられる。

Reference

- [1] Spiegel, D.S, & Burrows, A. 2012. ApJ, 754, 174.
- [2] Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., & Hauschildt, P. 2000. ApJ, 542, 464.