

氏 名	神鳥 亮
学位（専攻分野）	博士（理学）
学位記番号	総研大甲第 836 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 24 日
学位授与の要件	物理科学研究科 天文科学専攻 学位規則第 6 条第 1 項該当
学位論文題目	Density Structure of Globules (Isolated Dense Cores) and Its Implication for Star Formation
論文審査員	主 査 教授 富阪 幸治 教授 林 正彦 助教授 田村 元秀 助教授 立松 健一 教授 百瀬 宗武（茨城大学）

論文内容の要旨

論文タイトル:

“Density Structure of Globules (Isolated Dense Cores) and Its Implications for Star Formation” by Ryo KANDORI

要旨:

星間物質から恒星が誕生するメカニズムを解明することは、天文学の重要課題の一つである。過去の研究により、星間分子雲(密度 $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$)の中でも特に密度の高い領域(分子雲コア)が重力収縮することで、星が形成されることが明らかになってきた。しかし、星の誕生プロセスが、いつ、どのように始まるか(星形成の初期条件)については、まだ確立した定量的描像が無い。星形成の素過程を理解することは、分子雲コア(星の直接の形成母体)の進化を理解することとほぼ等価の問題である。本研究では、近赤外線による分子雲背景星の色超過観測と、ミリ波分子輝線の電波観測とを組み合わせることにより、孤立した分子雲コア(グロービュール)の密度構造が、星形成の前後でどのように変わるかを系統的に調べた。その結果、グロービュールの密度構造の進化の様子を、Bonnor-Ebert解の安定性解析により初めて示した。

これまで、分子雲コアの観測では、 C^{18}O 、 H^{13}CO^+ 等のミリ波輝線による(原始星の付随しない)星なしコアと(星が付随する)星ありコアの比較研究や、ミリ波・サブミリ波のダスト放射による密度構造の研究などが行われてきた。しかしながら、低温の星なしコアではこれらの分子がダスト上に吸着(depletion)して存在量が減少することや、分子雲コア内でのダスト温度勾配の存在などが知られてきており、これまでの研究手法の延長では、正しい描像の獲得が困難なことがわかってきた。一方で、近赤外線での背景星の色超過観測に基づくグロービュールの減光量分布($A_V \propto$ 柱密度)の測定は、ダストの温度に影響されない利点がある。減光量は、視線方向の物質量を正確に測れる点で、特定の密度領域にのみ敏感な分子輝線観測と比べて優れている。近赤外線観測によるグロービュールの柱密度分布とモデルとの比較研究が行われた例があるが、散発的なケーススタディがあるのみで、これまで系統的な研究は行われたことがない。

本研究の目的は、星なしから星あり段階までのグロービュールの密度構造を系統的に調べ、その進化過程を明らかにすることである。名古屋大学南アフリカ観測所の1.4m望遠鏡(IRSF)による近赤外線撮像観測および野辺山観測所の45m電波望遠鏡による分子輝線観測(C^{18}O とdepletionの影響を受けにくい N_2H^+)により、グロービュール10天体の柱密度動径分布と線幅を測定した。孤立したグロービュールは、シンプルな形状と内部構造を持ち、視線方向に天体が重複する危険を回避できる点で、モデリングによる物理量の抽出に適した観測対象である。私は、グロービュールの密度構造と力学的安定性をBonnor-Ebertモデル(外圧下の等温・静水圧平衡ガス球モデル)を用いて調べた。Bonnor-Ebert球の密度動径分布は無次元変数 ξ_{max} であらわされ、 ξ_{max} がcritical値の6.5より大きい場合は不安定な平衡解、小さい場合は安定な平衡解である。 ξ_{max} が大きくなるほど、コア中心-外縁の密度比(密度コントラスト)が大きくなる。私は、本研究のグロービュール10天

体と先行研究の4天体を合わせた計14天体のサンプル(星なし: 11天体、星あり: 3天体)に基づき、各天体の ξ_{\max} と星形成活動の有無を比較した。その結果、次の事柄が明らかになった。

- (1) 星なしグロービュールの半数以上(7/11天体)が、critical Bonnor-Ebert球に近い密度構造を持つ($\xi_{\max}=6.5\pm 2$)。
- (2) 残りの星なしグロービュール(4天体)は、不安定な平衡解($\xi_{\max}>10$)を示す。
- (3) 星ありグロービュールの全てが、不安定な平衡解($\xi_{\max}>10$)を示す。このことは、星あり天体では既に重力収縮が起こっていることと調和的である。
- (4) 分子輝線の線幅測定より、ほとんどのグロービュールの非熱的線幅は熱的線幅(温度10 Kを仮定)よりも小さい(熱的サポートが卓越)。

結果(1)および(4)より、典型的な星なしグロービュールの密度構造は、ほぼ熱的にサポートされたcritical Bonnor-Ebert球でよく近似できることがわかった。この知見は、解析天体数を増やした本研究により初めて得られた。結果(2)は、グロービュールの進化を考える上で重要である。不安定平衡解は長期に渡り存在できず、わずかな摂動で収縮する。従って、不安定解の星なしグロービュールは、既に重力収縮を開始している可能性がある。収縮の初期状態としては、(結果1より)critical Bonnor-Ebert球が有力な候補である。

そこで私は、重力収縮するガス球の密度構造進化の計算結果を用いて、観測された不安定なBonnor-Ebert解のグロービュールを説明できるかどうかを検討した。中心密度を観測と良く合う $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ とし、ほぼcritical解の状態からBonnor-Ebert球を収縮させると、自由落下時間(t_f)の数倍のタイムスケール($\sim 10^6$ 年)でゆっくりと収縮する。このタイムスケールは、星あり・星なしコアの数比から求められた星なし分子雲コアの観測的寿命($\sim 10^6$ 年)とよく一致する。モデル計算では、収縮時間のほとんどの間、亜音速のInfall速度場がコア半径の広い範囲に渡って現れるが、この結果は、星なしコアで観測されるInfall速度場の特徴をよく再現する。私は、収縮するガス球の柱密度動径分布を計算し、各時間での柱密度分布を(静的な)Bonnor-Ebert平衡解でフィットできるかどうかを試みた。その結果、両者はよく一致することがわかった。例えば、収縮開始から 4.4×10^5 年経過後の収縮ガス球の密度構造は、 $\xi_{\max}=7.6$ の不安定平衡解と一致し、見かけ上Bonnor-Ebert球として観測される。収縮のタイムスケールは低密度の収縮初期ほど長いので、収縮するガス球はわずかに不安定な(ξ_{\max} が6.5付近の)Bonnor-Ebert球を長期間に渡り模倣する。従って、収縮するBonnor-Ebert球の描像は、critical Bonnor-Ebert解に近い密度構造の星なしグロービュールが多いという観測(結果1)と、不安定平衡解のグロービュールの存在(結果2)を自然に説明できる。収縮モデルと平衡解との比較から収縮時間と ξ_{\max} 値とを対応づけられるので、この描像が正しい場合に観測されるべき ξ_{\max} の頻度分布をモデルから予言できる。観測では、不安定解の星なしグロービュールの半数(4/8天体)が $\xi_{\max}=6.5-8.5$ の間に分布するが、これは、収縮モデルが予言する割合(50%)とよく一致することがわかった。

タイトル：Density Structure of Globules(Isolated Dense Cores)and Its Implications
For Star Formation

近年の観測的研究により、原始星から恒星にいたるまでの進化は比較的明瞭になってきたが、一方で、星の材料である「分子雲コア」(孤立したものを特に「グロービュール」と呼ぶ)から、どのようなプロセスで星形成に至るかはよくわかっていなかった。これまでの研究では、ミリ波の分子の回転スペクトルやミリ波・サブミリ波のダストからの熱放射を観測することにより分子雲コア(グロービュール)の性質が調べられてきたが、その密度構造決定に関して、前者では励起の状態や分子の相対存在量の変化(ダストへの吸着による存在量の減少を含む)、後者では内部の温度分布の影響を強く受けるなどの観測バイアスの欠点があった。

本研究は、近赤外線での撮像観測により、背景の星の減光をもとにして、グロービュールの柱密度分布を正確に測ることにより、グロービュールの進化と星形成の関係を探ったものである。解析手法としては外圧下の等温静水圧平衡モデルである Bonnor-Ebert 解と観測を比較する方法をとった。Bonnor-Ebert 解の系列は、中心・表面の密度比に対応する無次元パラメータ ξ_{\max} で記述でき、 ξ_{\max} が 6.5 未満のときは安定、6.5 を超過するときは不安定、6.5 のときが臨界である(臨界 Bonnor-Ebert 球)ことが知られている。また、 $\xi_{\max} = 6.5$ は密度比 14 に相当し、密度比がそれ未満の場合は安定、それを超過する場合は不安定であるということもできる。これまでに単発的な研究が4つのグロービュールに対して行われたが、密度分布から進化を探る系統的な研究はなかった。本研究では申請者が新たに取得した10天体を加え、近赤外線での撮像観測とミリ波分子線観測によって14天体に対して世界ではじめて統計的な観点からグロービュールの密度構造が調べられた。サンプルのうち、星なしグロービュールが11天体、星ありグロービュールが3天体である。

電波観測の結果、グロービュールでは非熱的な内部運動(乱流)は少なく熱的運動が支配的であることを明らかにした。14個のグロービュールの Bonnor-Ebert 解との比較を行った結果、星なしグロービュールの約半数が臨界 Bonnor-Ebert 球に非常に似た密度分布を持っていることがわかった。残りの星なしグロービュールは、(測定誤差を含めて)明らかに不安定な密度分布を、さらに、星ありグロービュールのすべては不安定な密度分布を持つことが明らかとなった。星ありグロービュールが不安定な密度構造を持つことは、すでに星が生まれている事実と整合的に理解できるが、不安定な星なしグロービュールがかなりの割合で観測にかかるといことは不自然のように見える。

そこで本研究では引き続きこの「不安定な星なし静水圧平衡グロービュール」の実体について検討した。ほぼ臨界状態の Bonnor-Ebert 球(若干不安定)を初期条件として、流体力学的な数値シミュレーションを行ない観測された不安定な Bonnor-Ebert 球に相当する密度分布との比較を行った。その結果、収縮途中の球の密度プロファイルは Bonnor-Ebert 解に酷似していること、収縮する球は比較的長く臨界状態の近くにとどまること、安定な Bonnor-Ebert 解に似た密度分布から不安定な Bonnor-Ebert 解に似た密度分布に進化すること、「不安定な星なしグロービュール」で観測されたもっとも大きな ξ_{\max} である $\xi_{\max} = 2$

0 程度の密度にまで進化した状態でも収縮速度は亜音速にすぎないこと、が示された。したがって、このような動的収縮球は、観測的に静的な Bonnor-Ebert 解の密度分布と区別がつかないことが明らかとなった。また、 ξ_{\max} の頻度分布も、シミュレーションと観測の間で大きな矛盾はなく、「不安定な星なし静水圧平衡グロービュール」の実体がゆっくりと収縮中の分子雲である可能性が高いことが示された。

申請者は、観測のバイアスによらないグロービュールの密度分布の系統的な研究をはじめに行ない、密度分布が、分子雲コアの進化段階を表す指標となる可能性を示すなど、星形成過程の解明に新たな知見をもたらした。本論文はその成果を明快に説明したものであり、本審査委員会は博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容を持つものであると結論した。