

氏 名 末永 拓也

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1655 号

学位授与の日付 平成26年3月20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 Brown Dwarfs and Planetary Mass Objects in Star Forming  
Regions: Toward the Low Mass End of Initial Mass Function

論文審査委員 主 査 准教授 浮田 信治  
准教授 竹田 洋一  
准教授 中村 文隆  
准教授 町田 正博 九州大学  
教 授 杉谷 光司 名古屋市立大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

褐色矮星や惑星質量天体は太陽質量の  $1/10 \sim 1/1000$  程度の、超低質量かつ低温の天体である。なかでも惑星質量天体は、これまで主に星形成領域で観測されてきた (e.g., Tamura et al. 1998)。近年では、UKIDSS サーベイや WISE 衛星によってフィールドでも、T 型晩期星あるいは Y 型星という超低温 ( $T < 500\text{K}$ ) が観測されてきており、そのいくつかは孤立した惑星質量天体である。

このように超低質量天体は宇宙に普遍的に存在する天体にも関わらず、その形成過程については、星のように分子雲から形成される説がある一方で、惑星のように原始惑星円盤から形成される説もあり、決着がついていない。しかし、後者のように星とは違った形で形成される場合、星の初期質量関数や空間分布にその違いが現れるはずである。Sumi et al. 2011 ではマイクロレンズ法を用いて、浮遊惑星質量天体が多く存在している事を示唆している。しかし、マイクロレンズ法では限られた統計で惑星質量天体の存在を示しているだけであり、直接撮像観測による独立な観測が不可欠である。若い天体ほど光度が大きいため、星形成領域においてはいくつかの領域で惑星質量天体を検出できる感度を達成されつつあり、褐色矮星に対して惑星質量天体は 10-20% の割合で存在する事が示唆されている。しかし、統計的な議論をするためには高感度を保ちつつ広い領域をカバーする必要があり、質量関数のボトム領域による差異は議論が難しかった。

本博士論文の目的は、星形成領域において褐色矮星はもちろん惑星質量天体を検出できる高感度で代表的な星形成領域であるオリオン分子雲およびおうし座分子雲における測光・分光観測を実施し、超低質量天体の性質および星の初期質量関数を調べ、これらの天体の形成起源に迫る事である。

論文は主に、1. オリオン大星雲における多天体同時分光観測、2. おうし座星形成領域の超高感度広域撮像と分光観測、で構成されている。

### 1. オリオン大星雲における超低質量褐色矮星の多天体同時分光観測

背景: オリオン大星雲は地球からおよそ 1500 光年の距離にある、最も近い大質量形成領域であり様々な先攻研究がなされている。しかし、その中心領域では星雲の表面輝度が高いため低光度天体を観測するのが難しい。そのため、20 木星質量より低質量側の初期質量関数はこの領域では依然として明らかにされていない。Lucas, Roche and Tamura 2005 はオリオン領域中の外側の領域を測光観測し、5 木星質量程度まで候補天体を検出する事に成功した。しかし、この低質量褐色矮星および惑星質量候補天体に対する分光フォローアップは、スリット分光観測であり観測効率が悪く天体数が不十分である。いっぽう、より外側の領域をカバーする撮像観測も行われて、オリオン大星雲内では中心から外側にいくにつれ褐色矮星の相対的な割合が多くなる事が示唆されている。これは、星形成領域内における初期質量関数の空間依存性を指摘するものである。しかし、外側の領域では背景星

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

の混入も多い事が考えられるため、これらの結果を確かめるためにも分光観測サーベイが不可欠である。

観測： Lucas, Roche and Tamura 2005 による測光観測に基づき選出された低質量褐色矮星および惑星質量候補天体に対して、すばる 8m 望遠鏡に搭載された近赤外撮像分光装置 MOIRCS を用いて多天体分高観測を行った。さらに、岡山 188cm 望遠鏡に搭載された近赤外撮像分光装置 ISLE を用いて褐色矮星候補のスリット分光観測を行った。その結果 12 天体のスペクトルを取得した。

解析： 観測スペクトルから超低質量天体の物理量を求めるために、理論大気モデルから計算されたスペクトルを用いて  $\chi^2$  検定およびモンテカルロシミュレーションを行った。導出した温度と絶対等級を HR 図にプロットし、進化モデルと比較することにより超低質量天体の質量を導出した。

結果： 12 天体中 8 天体が低温褐色矮星質量天体である事が分かった。そのうち、3 天体は本研究で初めて褐色矮星質量であると同定された天体であり、3 天体のうち 1 天体は惑星質量との境界に位置する天体だった。初期質量関数の低質量端の指標として、恒星質量と褐色矮星質量の存在数の比を求めた。この存在比を、オリオン中心領域の値と比較したところ、誤差の範囲内で一致する事が分かった。これは、オリオン領域においては、中心部から外側 ( $r < 6'$ ) の領域までは初期質量関数の低質量端に空間依存性がないことを意味している。

## 2. おうし座星形成領域における惑星質量天体の超高感度広域撮像と分光観測

背景： おうし座星形成領域は、地球から約 400 光年の距離に位置する小質量星形成領域である。近傍かつ若い星の豊富な領域であるため、様々な研究がなされている。しかしながら、分子雲は天球上に広がって分布しているため ( $> 100 \text{ deg}^2$ ) 星密度が低く、惑星質量まで十分な感度とサンプル数を達成した広域観測は存在せず、超低質量天体の存在とその初期質量関数は明らかになっていない。

観測： すばる望遠鏡に搭載された主焦点広視野カメラ Suprime-Cam を用いて、本領域における最高感度かつ広域撮像観測を行った。さらに、UKIRT 望遠鏡によるサーベイプログラム UKIDSS のカタログと組み合わせる事で、初めて可視から近赤外にわたって惑星質量を十分検出できる感度もつサーベイ観測を行った。Spitzer および WISE 両衛星の  $3 \mu\text{m}$  以降の長波長データも加味した。さらに、岡山 188cm 望遠鏡の ISLE による近赤外撮像フォローアップおよびすばる望遠鏡の近赤外撮像分光装置 IRCS を用いた近赤外分光フォローアップを行った。

解析： 上記の測光データを用いて惑星質量候補天体の選出を行った。選出では、色等級図、二色図を使ってフィールド星との区別を行った。さらに、星の進化モデルから予測される

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

等級を用いて SED フィットを行い有効温度等の物理量を導出し、HR 図から若い低質量の惑星質量候補天体の選出を行った。また、分子雲による減光量の導出に、従来の色等級図もしくは二色図を用いた方法ではなく、SED フィットの際に減光量も同時に求めるという手法を採用して行った。これは、色等級図を用いる手法は低温で暗い天体に対しては減光量を過小評価してしまうという問題を避けるためである。SED フィットを用いた手法は測光情報が多く必要だが、天体の明るさに関係なく精度よく減光量を推定する事が可能である。分光データはオリオンでの研究と同様の解析を行い温度の推定を行った。

結果：分光解析の結果、および SED フィットによる測光解析の結果から、選出された天体は背景星の可能性が高い事が分かった。この結果は、おうし座では褐色矮星以上の存在数に対して惑星質量天体の存在数が極端に少なく、他の領域と比べても惑星質量天体の数が少ないということを示唆する。この質量分布は惑星質量天体が多重連星系から散乱されたため観測領域ではそのような天体が少ないとして説明することができる。このシナリオは Sumi et al. 2011 の観測結果と矛盾しない。しかし、おうし座領域は星密度が低くそのような散乱効果が促進されるとは考えにくい。別の可能性として、おうし座は他の領域と比べて最低ゼーンズ質量が高いと考えられる。従来の星形成シナリオでは 1-10 木星質量形成が予測されていたため、今回の質量分布を説明するには低質量形成を抑制する効果を新たに考慮する必要がある。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

出願者は星形成領域において褐色矮星や惑星質量天体の高感度探査を行い、これらの質量分布(初期質量関数)や空間分布を調べ、これらの天体の形成起源を解明する観測的研究を行った。これらの天体は質量が太陽の0.07倍~0.001倍程度であるため水素核融合反応が起こらず、その重力エネルギーを徐々に解放して輝いている暗い天体である。恒星は暗黒星雲の収縮・分裂過程を経て形成され、小質量の星の方が大質量の星よりも多く誕生する。褐色矮星も恒星と同様な過程で形成されるという説がある一方で、惑星のように原始惑星円盤から形成された後に系から散乱・放出されるという説もある。その存在が観測的に確かめられたのは最近(1995年)のことであり、質量分布や空間分布及びその形成過程は未だに明らかではない。

出願者は、星形成領域ではこれらの天体は形成直後の明るい時期にあると予想されることに着目し、オリオン座大星雲と牡牛座暗黒星雲において惑星質量天体を十分検出できる感度を持つ測光・分光観測を行った。

オリオン座大星雲では、先行研究による測光観測に基づき褐色矮星/惑星質量候補12天体を選んだ。すばる8m望遠鏡及び岡山188cm望遠鏡の近赤外撮像分光装置を用いて近赤外スペクトルを取得し、理論大気スペクトルと比較して大気温度を求めた。導出した温度と絶対等級をHR図上で理論進化モデルと比較することにより超低質量天体の質量を求めた。12天体中8天体が低温褐色矮星質量天体と判定出来た。そのうち、3天体は本研究で初めて褐色矮星質量であると同定された天体である。初期質量関数の低質量端のひとつの指標として、恒星質量と褐色矮星質量の存在数の比を求め、先行研究によるオリオン中心領域の値と比較したところ、誤差の範囲内で一致する事が分かった。オリオン領域においては、中心部から外側( $r < 6'$ )の領域までは初期質量関数の低質量端に空間依存性がないことを観測的に明らかにした。

牡牛座暗黒星雲では、惑星質量を十分検出できる感度を持つ可視(すばる望遠鏡)及び近赤外の撮像サーベイ観測カタログ(UKIDSS, Spitzer, WISE)から候補が4天体あることを見出した。候補天体の内3つについてはすばる望遠鏡による分光観測を行ったところ、いずれも背景星の可能性が高い事が分かった。測光観測のみを用いた先行研究から予想される期待個数(2-5)と比較して、この結果は牡牛座では褐色矮星以上の存在数に対して惑星質量天体の存在数が極端に少なく、他の領域と比べても惑星質量天体の数が少ないということを示唆している。このような質量分布は惑星質量天体が多重連星系から散乱されたため観測領域ではそのような天体が少ないとして説明することができる。しかし、牡牛座領域は星密度が低くそのような散乱効果が促進されるとは考えにくい。別の可能性として、牡牛座暗黒星雲は他の領域と比べて最小ジーンズ質量が大きいと考えられる。従来の星形成シナリオでは0.001~0.01太陽質量形成が予測されていたため、今回の質量分布を説明するには低質量形成を抑制する効果を新たに考慮する必要がある。

本論文は褐色矮星や惑星質量天体の形成過程の解明に関して新たな知見を与えた観測的研究であると高く評価できた。また同時に、出願者の優れた観測研究遂行の能力、観測データの解析、結果の取りまとめ、その解釈や議論のために必要な広範かつ高度な天文・物

(Separate Form 3)

理の背景知識等が備わっていることを示すものである。審査委員会は全員一致で、本論文が博士論文として十分な価値を有していることを認め、合格であると判断した。