

論文内容の要旨

論文題目 Very Low Mass Stellar Populations in Star Forming Regions :
Deep Near-Infrared Surveys and Luminosity Functions

(星形成領域における超低質量天体探査とその光度関数)

氏名 大朝 由美子

星の質量は、分子雲からの誕生時にその大半が決定される。誕生する星の質量及び質量分布は、星自身の物理状態を決めるだけでなく、銀河の形成や化学進化にも影響を及ぼす。1954年にSalpeterは、星が誕生する際の質量と数を表す質量分布(初期質量関数)が、大質量星から低質量星に向かって単調増加する関数で表現されることを発見した。このことは、生まれてくる星の大半は我々の太陽より軽い星が占めることを意味する。その後の様々な観測的研究から、太陽の約1/10以上の質量($0.1M_{\odot}$)を持つ近傍の星から求めた初期質量関数は、約 $0.3M_{\odot}$ 付近に分布のピークを持ち、褐色矮星は数が非常に少ないという説と、質量のより軽い方向に向かって減少傾向は見られないという相反する説が提唱されている。この矛盾は、質量が軽い天体は光度が非常に暗いため観測が困難であり、統計的な議論にはまだ数が不十分であるのが大きな要因である。褐色矮星や惑星などの超低質量天体の数は、太陽のような恒星の数よりも多く、軽いほどその数は増え続けるのだろうか? この問いに答えるためには、低質量星から超低質量天体について詳細な探査観測が必要となる。ところで、初期質量関数については普遍的であると仮定されることが多い。しかし、場所によらず単一の形で表されるかについては現在までのところ明確に示されていない。形成される超低質量天体の数は、母体である分子雲の温度などの初期条件や同時に形成されている星の物理条件に依存するのだろうか? それとも、異なった条件から形成されても、その過程で自己調整が行なわれ、生まれてくる星は普遍的な質量分布を持つようになるのだろうか。初期質量関数の形及び普遍性を解明する目的には、異なる物理状態を持つ星形成領域において若い褐色矮星を無バイアスに検出し、その光度関数を求める手法が非常に有効である。近赤外線波長域では、星間塵による減光量が小さく分子雲に埋もれた若い星をも検出可能なこと、星周ディスクを持つ前主系列星の輻射が最大であること、から埋もれている天体の探査観測に最適である。従って、近傍の複数の星形成領域に対して、質量の大部分が決まりつつある若い褐色矮星が十分検出可能である詳細な近赤外高感度探査観測を行った。本論文では、異なる物理状態を持つ星形成領域における光度関数を求め、その質量関数を推測するという手法を用いて、初期質量関数の超低質量側の形、普遍性について比較検証する。以下に、これらの観測・研究の詳細を述べる。

1. 低質量星形成領域における探査

低質量星形成の現場に埋もれている生まれたての褐色矮星の有無、及び質量分布を求めるための探査観測を行った。非常に暗い褐色矮星を検出するために最近傍の低質量星形成領域である、カメレオン座分子雲(距離 160pc)とおうし座分子雲(距離 140pc)を選択した。これらの分子雲では大質量星は形成されておらず、主に K 型星から M 型星などの低質量の星を形成している暗黒星雲である。

観測はカメレオン座分子雲中で最も密度の濃いコアの領域 30 平方分とおうし座分子雲中で平均的な密度を持つ領域 100 平方分について、チリのセロトロロ天文台の 1.5 m 望遠鏡、パロマー山天文台の 1.5 m 望遠鏡に近赤外カメラを取りつけて $J(1.2\mu\text{m})$, $H(1.6\mu\text{m})$, $K(2.2\mu\text{m})$ の 3 バンドで行なった。星像の FWHM は典型的に $1-1.5''$ 程度である。S/N=10 の限界等級は K バンドで 16 等を越え、以前の同領域における観測よりも 3 - 4.5 等深い観測が達成された。

3 バンドで同定され、かつ、K バンドにおける測光誤差が 0.1 等以下 (S/N=10) の天体はカメレオン座分子雲で 61 天体、おうし座分子雲で 130 天体であった。ディスクやエンベロープなどの星周構造を伴う若い天体 (Young Stellar Objects: YSOs) は近赤外超過を示すことから、分子雲の手前、もしくは後ろにある星と $J-H/H-K$ の二色図上で区別できる。YSO 候補天体は、カメレオン座分子雲で 19 天体、おうし座分子雲で 10 天体であり、新しく同定された YSOs 候補天体は、カメレオン座領域で 12 天体、おうし座領域で 10 天体である。

新しく検出された YSOs の光度は、既知の T タウリ型星より 7 等以上も低光度であった。なかにはブレアデス星団 (125pc, $\sim 10^8$ 年) に存在する、より年老いた褐色矮星よりもさらに 3 等程度暗い天体が存在した。そこで最新の理論モデルによる進化トラックを用いてこれらの天体に対して質量を推定した。YSOs の光度は年齢と質量に依存しているため、年齢を仮定することにより質量光度関係を求め、それぞれの天体の光度から質量を求めた。YSOs の光度は J バンドの光度を赤化補正して求めた。星周ディスクを持つ YSOs は、その輻射エネルギー分布の形から、J バンドで中心星の光球からの輻射が星とディスクを合わせた輻射量に比べて最も優勢になる。年齢はディスクを持つ T タウリ型星の典型的な年齢と同じ 10^6 年を仮定した。結果、若い褐色矮星候補天体はカメレオン座分子雲では 11 天体、おうし座分子雲では 8 天体であった。これは、T タウリ型星の年齢の上限と考えられる 10^7 年と仮定しても変わらなかった。つまり、若い褐色矮星がカメレオン座分子雲、おうし座分子雲中で形成されていると考えられる。さらに木星の質量の数倍程度、つまり巨大惑星の質量のものも含まれており、伴星ではなく単独天体として巨大惑星質量の天体が形成されている可能性が示唆された。

同定した YSOs について求めた星間吸収を補正した J バンドの光度関数は、星形成のモードが異なる両領域ともに限界等級までカットオフがなく、 $0.3M_{\odot}$ 付近でのターンオーバーは見られなかった。一方おうし座分子雲の光度関数については単調増加を示すのに対して、カメレオン座分子雲については若干平坦な傾向が見られた。

C^{18}O 分子輝線の電波観測との比較から両領域における YSOs の星形成率、数密度について求めた結果、おうし座領域では孤立的な星形成、カメレオン座領域ではクラスター的な星形成が行なわれていることが判明した。したがって、星形成のモードが異なっても褐色矮星は低質量星の数に比べて減少することなく形成されていると考えられる。

2. 中質量星形成領域における探査

低質量星が形成される現場では、光度が暗い、つまり質量が軽くなるほど星の数が増える傾向が褐色矮星についても当てはまることが明らかになった。次に、中質量星が形成されている分子雲に埋もれている若い褐色矮星の探査観測を行っ

た。観測領域は最近傍の中質量星形成領域である、ペルセウス座分子雲中の NGC1333 領域 (距離 320pc) である。ペルセウス座分子雲は OB アソシエーションを伴い、中質量から低質量の星を形成している。NGC1333 はその中の B 型星によってできた反射星雲である。

観測は NGC1333 星雲の約 25 平方分について、マウナケア山頂にあるハワイ大学 2.2m 望遠鏡に近赤外 3 バンド同時撮像カメラ (SIRIUS) を取りつけて J, H, K_s の 3 バンドで行なった。星像の FWHM は典型的に $0.''6$ 程度である。S/N=10 の限界等級は K_s バンドで 18 等を越え、以前の同領域における観測よりも 2 等深い観測が達成された。観測は一部、岡山 1.8m 望遠鏡と近赤外カメラ (OASIS) を用いても行った。

3 バンドで同定され、かつ、 K_s バンドにおける測光誤差が 0.1 等以下の天体は 76 天体であった。 $J-H/H-K_s$ の二色図から近赤外超過を示す YSO 候補天体として同定された天体は 42 天体である。YSO 候補天体の中には低質量星形成領域で見つかったのと同様の超低光度天体が多数存在していることがわかった。これらの若い超低光度天体について、天体の年齢を 10^6 年、または 10^7 年と仮定して、進化モデルを用いて質量を推定すると、25 天体が若い褐色矮星候補天体であった。またこの領域においても、巨大惑星に迫る質量を持つ単独天体が存在する可能性がある。

同定した YSOs について求めた星間吸収を補正した J バンドの光度関数は、褐色矮星域に対して減少せず、平坦な傾向を示していた。 $0.3M_{\odot}$ 付近でのターンオーバーは見られなかった。また、その光度関数から恒星と褐色矮星の境界質量付近のポピュレーションと褐色矮星と惑星の境界質量付近のポピュレーションの二つが存在する可能性が示唆された。

また、野辺山の 45m 電波望遠鏡を用いて、 ^{13}CO 及び C^{18}O 分子輝線観測を行い、母体である分子雲について調べた。赤外観測から得られた YSOs の情報と電波観測から得られた分子雲の情報を合わせると、今回同定された YSO 候補天体は高密度分子雲の表面近くで密集して形成されていると考えられる。

3. 大質量星形成領域における探査

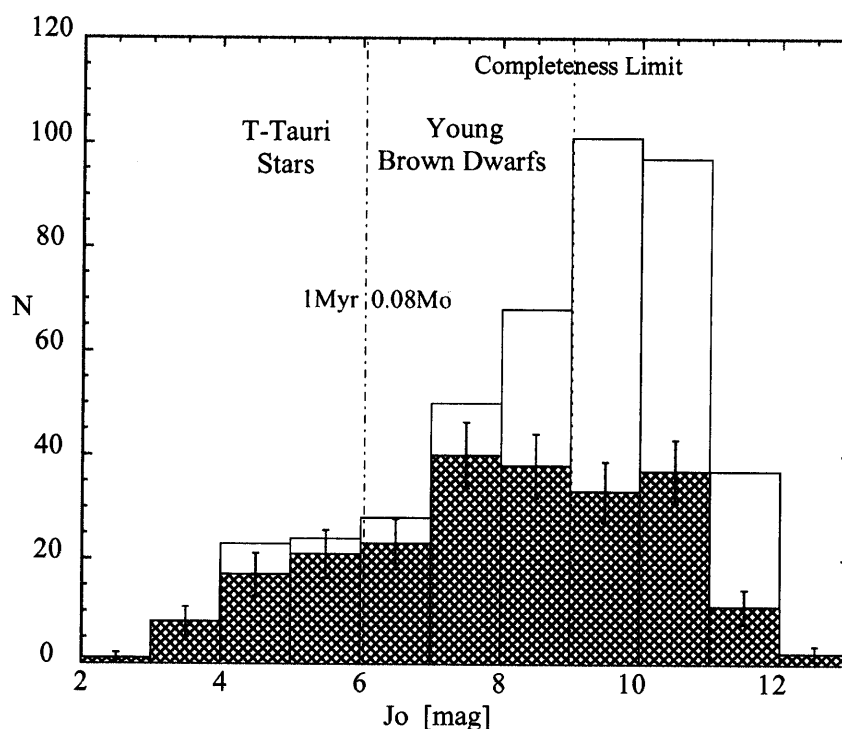
超低質量天体の銀河系全体での頻度を推測するためには、大質量星形成領域についての褐色矮星の頻度分布についても調べる必要がある。しかしこれまでのところ、 $0.2M_{\odot}$ 付近でターンオーバーがみられると考えられているオリオン座分子雲 (距離 500pc) についてしか超低質量側での観測はない。そこで、近傍の大質量星形成領域である、はくちょう座分子雲中の S106 領域 (距離 600pc) に埋もれている若い褐色矮星の探査観測を行った。OB アソシエーションを多数伴うはくちょう座分子雲は大質量から低質量の星を形成しており、S106 は O9.5 型星によってできた HII 領域である。

S106 星雲の中心星を含む約 25 平方分について、マウナケア山頂にあるすばる 8.2m 望遠鏡に近赤外カメラ (CISCO) を取りつけて、 J, H, K' の 3 バンドで観測した。星像の FWHM は典型的に $0.''3$ 程度であり、S/N=10 の検出限界が K' バンドで 20 等を越える撮像観測が達成された。これは現在までのいかなる星形成領域における探査観測よりも深い。

3 バンドで同定され、かつ、 K' バンドにおける測光誤差が 0.1 等以下の天体は 1697 天体であった。 $J-H/H-K'$ の二色図から近赤外超過を示す YSO 候補天体として同定された天体は 575 天体であった。過去に同領域で YSO 候補天体と同定されている天体は明るい天体 ~ 10 個程度であり、この観測により分子雲に埋もれている新たな超低光度天体の検出が可能となった。これら超低光度天体は中・低質量星形成領域で見つかった天体と同種の光度を持つ。同様に天体の年齢を 10^6 年、または 10^7 年と仮定して、進化モデルを用いて質量を推定すると、半数以上の天体が若い褐色矮星候補天体であった。また、大質量星形成領域においても、巨大惑星と同様の質量を持つ可能性がある天体が多数存在する。

これらの天体は空間的に一様には分布しておらず、その星間吸収や YSOs の数密度、割合などから、4つのグループに分類できた。グループごとに求めた星間吸収を補正した J バンドの光度関数は、どれも $0.3M_{\odot}$ 付近でのターンオーバーは見られなかったが、褐色矮星の質量域に向かって、増加するもの、平坦な傾向を示すものがあった。従って、一つの分子雲に対して空間分布や分子雲、星の密度に対して光度関数は一様ではないことが明らかになった。これにより、異なった条件から形成されてもその過程で自己調整が行なわれ、普遍的な初期質量関数を持つという説が否定された。

以上の観測から、星形成領域には超低質量天体が分子雲によらず形成されていること、超低質量天体の数が低質量星の数に比べて減少しないことが判明した。さらに、本論文で得られた結果とオリオン座分子雲で低質量星の数にピークがあることも考え合わせると、光度関数は母体となる分子雲、同時に形成される星の数や密度により異なるといえる。



大質量星形成領域 S106 における星周ディスクを持つ前主系列星の J バンド光度関数。

J バンドの光度は、赤化補正された絶対等級で表している。緑色のヒストグラムはより確実な YSO 候補天体を示す。破線は 10^6 年における $0.08M_{\odot}$ の質量を持つ天体の光度を表す。これは恒星と褐色矮星の境界であり、これより暗い天体は若い褐色矮星である可能性が高い。点線は限界等級の平均を示し、限界等級は場所により異なり ± 0.8 等程度の幅を持つ。