

若い褐色矮星

伊藤 洋一* , 大朝 由美子**

* <すばる観測所 650 N'Aohoka Pl. Hilo Hawaii 96720 USA>

e-mail: yitoh@naoj.org

** <東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1>

e-mail: yumiko.oasa@nao.ac.jp

恒星よりも軽く惑星よりも重い天体、それが褐色矮星です。質量が小さすぎて星の中心部で水素の核融合反応が起こらないため、非常に暗くしか輝きません。数年前にその存在が初めて観測的に明らかになって以来、現在では10個以上が褐色矮星として認識されています。それでは、褐色矮星はどのようにして誕生したのでしょうか？ここでは、私たちのグループが行ってきた近赤外線の観測による褐色矮星形成過程の研究成果について述べていきます。

1. はじめに

夜空に無数に輝いている星々は、様々な色や明るさで、みなそれぞれに輝いています。でも、そのなかで、自分ではほとんど光を出して輝くことができず、じっと黙っている天体があります。

褐色矮星とは、質量が太陽の8%（木星の質量の80倍）以下で、中心温度があまり高くならないために、恒星と違って内部で水素の核融合反応を起こすことができない天体です。しばしば「星になりそこなった天体」という不名誉な呼ばれ方をされます。この天体は一生涯、力学的に平衡状態に達することがなく、重力収縮で解放された熱エネルギーのみを光として放出しながら、どんどんと冷えて暗くなっていきます。例えば、年齢が50億年の褐色矮星は太陽の1万～100万分の1の総光量しかありません。褐色矮星は、恒星と惑星の間を埋める天体（ミッシングリンク）として1960年代からその存在を予言され、宇宙の暗黒物質の正体の候補としても着目されてきました。この幻の天体を追い求めて、連星系の伴星の運動を利用した観測、可視光や赤外線の波長域でのスペックル観測、CCD撮像探査、マイクロレンズ効果を利用し

た探査など、様々な方法を用いた探索が行なわれてきました。それでも当時京都の舞原さんと長田さんが「褐色矮星を探査せよ」¹⁾という記事を天文月報に書いた1992年の時点では「なんとなく感触が得られている。しかし、正真正銘の褐色矮星と言えるものは、残念ながら今のところはっきりあるとは断言できない」と、何ともはがゆい表現をせざるを得ない観測状況でした。

そんなひっそりと隠れた天体、褐色矮星が一躍脚光を浴びたのは1995年のことでした。当時カリフォルニア工科大学にいた中島紀さんが、可視から赤外域での撮像観測で、太陽近傍（5.7 pc）の星グリーゼ229の周りに非常に暗い伴星を見つけたのです²⁾。その天体を近赤外線の波長域で分光すると、スペクトルは木星とよく似ており、メタンの深い吸収が存在することがわかりました³⁾。このことは、この天体の有効温度が約900 Kと非常に低く、褐色矮星であるという動かぬ証拠となりました。同年には可視光のCCDサーベイからプレアデス星団にも褐色矮星が見つかり⁴⁾、さらに、可視光の超高分散分光によって系外惑星まで間接的に発見されました⁵⁾。その後も褐色矮星や系外惑星等の超低質量天体の発見は相次ぎ、現在では、その存在は疑

う余地のないものになっています。

さて、それでは褐色矮星はどのように誕生するのでしょうか？ 恒星と同じように分子雲が収縮して形成されるのでしょうか？ 惑星のように何らかの星周構造から誕生するのでしょうか？ それとも何か特別な過程を経て誕生するのでしょうか？ そこで私たちは、分子雲に埋もれている天体に対しても星間塵による減光を受けにくく、かつ、低温度の超低質量天体が輻射のピークを持つ近赤外域で「生まれたばかりの若い褐色矮星」について様々な角度から調べました。

2. おうし座分子雲のサーベイ⁶⁾

話は1991年まで遡ります。その頃、近赤外域でもようやく大素子数の（といっても256×256素子ですが）近赤外検出器が始めました。それまで行われてきた可視光のCCDや近赤外域での一素子検出器での観測では、分子雲の手前側にあるTタウリ型星（太陽程度の重さで、進化初期の重力収縮段階にある星）しか見つけれられていませんでした。一素子検出器を素子数の多いアレイにし、それを用いてサーベイを行なうことは、当時誰もが待ち望んでいたことでしょう。新しい大フォーマット検出器は感度も高いから、分子雲の裏側にあるTタウリ型星が見つかるに違いない、というのが当初のもくろみでした。

観測はアメリカキットピーク1.3メートル望遠鏡とSQIIDというカメラを使って行いました。このカメラは近赤外域のJ（1.2ミクロン）H（1.6ミクロン）K（2.2ミクロン）バンドを同時に撮像する、サーベイには最適のカメラでした。この装置を使って、最近傍の（140 pc）星形成領域であるおうし座分子雲の中でも、最も濃く活発な星形成が行われているHeiles Cloud 2という領域の1度四方の測光観測をしました。この領域は星間分子の研究が盛んなTMC1を含んでいます。限界等級は、一素子検出器を使って行われていた以前の同様の観測よりも4等程度暗くKバンドで13.4等で、約

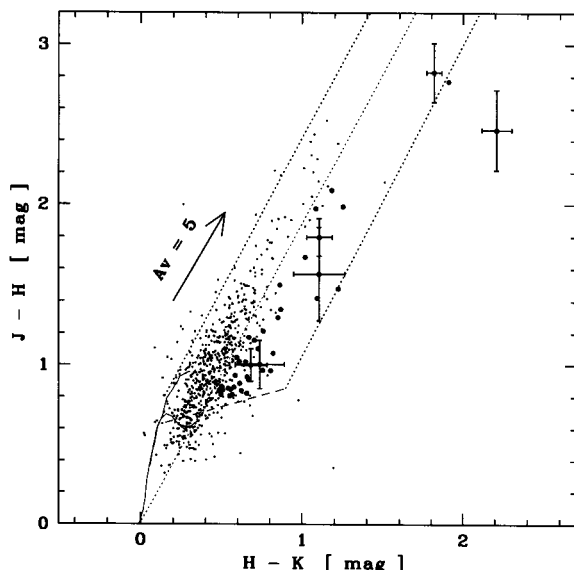


図1 サーベイ観測の近赤外2色図。縦軸はJ-Hのカラー、横軸はH-Kのカラーを表す。右上ほど赤い。青い曲線は吸収を受けていない場合の主系列星と巨星の、青い破線はTタウリ型星の本来のカラーを表す。矢印は赤化ベクトルで、長さはVバンドで5等に相当する。青い点線の右側にカラーがプロットされる天体(大きな黒丸)を、生まれたての若い天体とみなす。

600天体を検出しました。

ところで、一般に生まれたての星は周りにエンベロープや円盤を伴っています。これらの構造は中心星の光を吸収するとともに、より長い波長で再放射を行います。従ってJ, H, Kの3バンドを比べると、より波長の長いKバンドにおいて、分子雲の吸収を受けて星間赤化した主系列星や巨星では説明がつかないような色超過を示します。特に近赤外域の2色図では、年齢の若い天体は特異な領域にプロットされます（詳しい説明は1998年10月号の天文月報にある奥村氏の記事⁷⁾をご覧ください）。図1は観測で見つかった約600個の天体の近赤外域2色図です。この図をもとに、観測した領域で50個の若い天体を同定しました。これらの天体の多くは既知のTタウリ型星よりも2から6等も暗い天体です。

どうしてこんなに暗いのでしょうか？ 考えられ

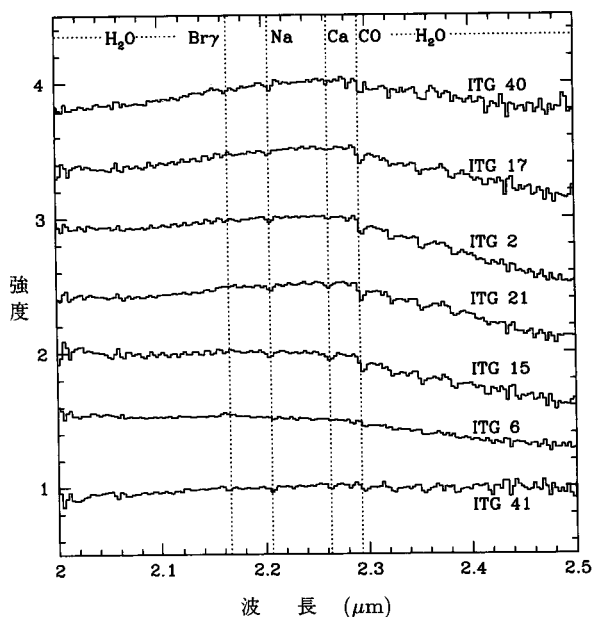


図2 暗くて若い天体の近赤外Kバンド域スペクトル。横軸は波長、縦軸は強度（スペクトルが重ならないようにずらしてある）を表す。若い天体によく見られる水素原子の輝線や、低温度星に特有のカルシウムやナトリウムの吸収線、一酸化炭素や水の吸収バンドが見える。

る可能性は二つあります。その一つは「天体の質量が軽い」ということです。もしこれらの天体の年齢が平均的なTタウリ型星の年齢と同じく100万年だと仮定すると、質量は0.03から0.3太陽質量程度と推定できます。すなわち検出した若い天体のうち暗いものは若い褐色矮星である可能性が考えられます。もう一つの可能性は「天体の年齢が比較的年寄りだ」ということです。若い天体はヘルツシュプルング-ラッセル図（HR図）上を年齢とともに林トラックに沿って進化し、年齢とともに暗くなります。もし、検出された若い天体が太陽と同程度の質量を持つとすると年齢は1億年程度と推定されます。しかし残念ながら、測光観測からだけではこの二つの可能性のどちらとも断定することはできません。

3. 近赤外分光⁸⁾

若い褐色矮星なのか、それとも年寄りのTタウリ型星なのか、その謎を解くためには分光観測が必要です。分光することにより天体の温度を決め、HR図上で進化経路と比較することによって、天体の質量と年齢を求めることができます。そこでサーベイで見つかった若い天体の中から比較的明るい21天体について、1996年にハワイの3.8メートル英国赤外線望遠鏡（UKIRT）を用いて、近赤外域のKバンドで中分散（分散～500）の分光観測を行いました。

図2は若い天体のスペクトルの例です。観測した波長域ではNaやCaといった金属線、COや水の吸収線など、低温度星に特有の特徴が見られます。またいくつかの天体ではTタウリ型星と同様の水素原子の輝線がありました。この中でNaとCaの吸収線の深さの比、および水の吸収バンドの深さを用いて、中心天体の有効温度を求めました。これらの値は低温度星では温度に敏感で、特に吸収線比は天体の金属量や星周円盤によるベイレング効果（円盤からの放射によって光球起源の吸収線が弱まったように見えること）の影響を受けない良い指標です。これらの温度指標から求まる晩期のTタウリ型星の有効温度は、可視光の分光から求められたスペクトル型と矛盾しないことが、この観測からわかりました。

解析の結果、観測したうちのいくつかの天体は有効温度が3000 K程度の低温度天体であることがわかりました。今まで知られていたTタウリ型星の有効温度は約4000度です。

この1000度の違い、これこそが若い低質量天体であることの確証です。図3は観測した天体と既知のTタウリ型星のHR図に、理論計算から求められている星の進化経路を重ねた図です。この図から、いくつかの観測天体は0.1から0.2太陽質量の重さで100万年程度の年齢を持った天体であることがわかります。つまり、これらの天体は「年

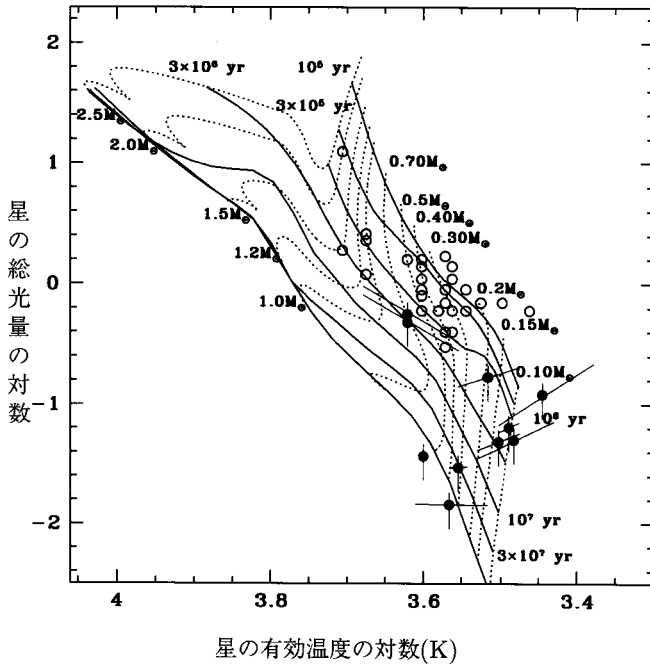


図3 分光して温度が分かった暗くて若い天体 (●) の HR 図。比較のために既知の T タウリ型星 (○印) も記載した。実線は進化モデルの等時曲線、点線は進化経路である。いくつかの天体は恒星の中で最も軽い部類に属することがわかる。年齢は T タウリ型星とほぼ同じである。

「若くした T タウリ型星」ではなく「若い低質量天体」なのです。

分光観測から求められた天体の質量と、測光観測の結果から年齢を仮定して求めた質量には、数倍程度の違いしかありませんでした。つまり、おうし座分子雲に付随し赤外超過を持つ天体の光度は、質量にほぼ比例するといえることができます。先のサーベイ観測から、若い天体の光度関数（星の光度と個数の関係）は暗い天体に向かって単調増加であることがわかっていました。したがって、観測領域の若い天体の質量関数（星の質量と個数の関係）は少なくともサーベイ観測の限界等級に対応する 0.05 太陽質量程度まで、軽い天体に向かい増加を示すことが推測されます。このことは、分子雲フィラメントがジーンズ長（ガス雲の密度揺らぎが自己重力によって成長するのに必要な最

小の長さ）程度の長さで分裂することによって星が生まれ、その典型的な質量は 1 太陽質量であるという単純な星形成の理論では、おうし座分子雲の星形成過程を説明できないことを意味します。

4. もっと深く探査する⁹⁾

さて、このような若くて暗い天体は、若くて軽い天体であることがわかってきました。同じような若さでもっと暗い天体が見つければ、それはさらに軽い天体であることをあらわします。つまり、若い褐色矮星であるともっと確実に言えるのではないのでしょうか？

若くて、より暗い天体を見つけるために、近赤外域 (J, H, K) でさらに深い撮像観測を行いました。観測は 1996 年にパロマー天文台の 1.5 メートル望遠鏡と 256 × 256 素子の赤外カメラを用いて行いました。観測領域は、先のサーベイ観測で行なった Heiles Cloud 2 の一部の約 100 平方分です。限界等級は K バンドで 16.2 等で、130 天体を検出しました。

図 4 が観測領域の 2 色図です。先のキットピークのサーベイ観測と同じ手法で、天体の近赤外域 (J, H, K) の色から赤外超過を持つ 10 天体を若い天体と同定しました。図 5 は、この方法で若い天体と分類した天体と T タウリ型星についての色等級図です。既知の T タウリ型星よりも 7 等以上も暗い天体が多数存在していることが図から明らかにわかります。これらの天体はすべて今回新たに見つかった天体です。図には T タウリ型星の平均的な年齢である 100 万年と、最も年老いた年齢である 1000 万年における、理論から予測される等時曲線を重ねています。このような色等級図を用いることにより、同定した若い天体がどの程度の明るさ、質量を持つ天体かを推測することができます。天体の年齢を 1000 万年と仮定して等時曲線

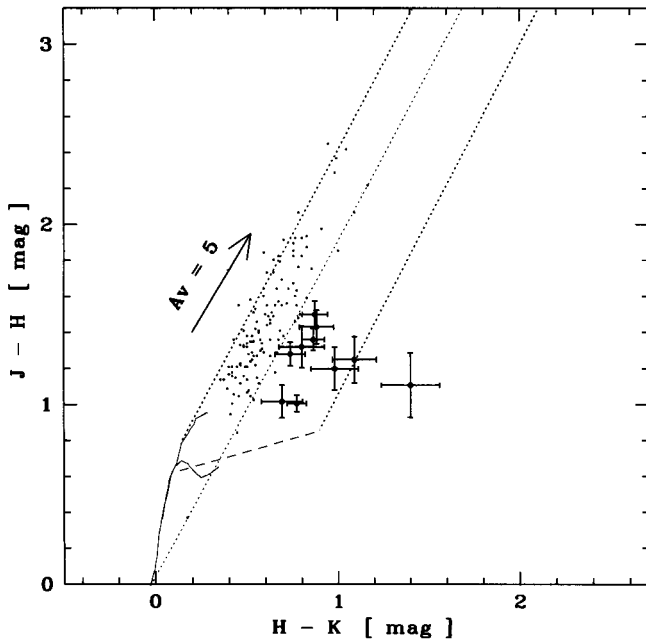


図4 おうし座分子雲領域の、より深い撮像観測の近赤外2色図。縦軸、横軸、線などは図1と同様。

と比較しても、このような非常に暗い天体の質量は全て0.08太陽質量以下であると推測できます。すなわち、これらの天体は若い褐色矮星である可能性があります。さらにこの中には、年齢が1億年のプレアデス星団の褐色矮星よりもさらに3等暗い天体が存在しました。このような天体は、平均的なTタウリ型星の年齢を持つ場合、質量が0.012太陽質量(12木星質量)以下と推定され、巨大惑星に迫る質量を持ちます。これらの若くて非常に軽い天体の光度関数は、観測の限界等級までカットオフが見られませんでした。以前の観測結果と合わせても、さらに軽い天体に向かって減少する傾向は見られません。つまり、おうし座分子雲ではTタウリ型星よりもたくさんの褐色矮星が生まれているのかもしれない。

以上のことから、褐色矮星は通常の恒星と同じく分子雲から生まれている可能性があることがわかりました。

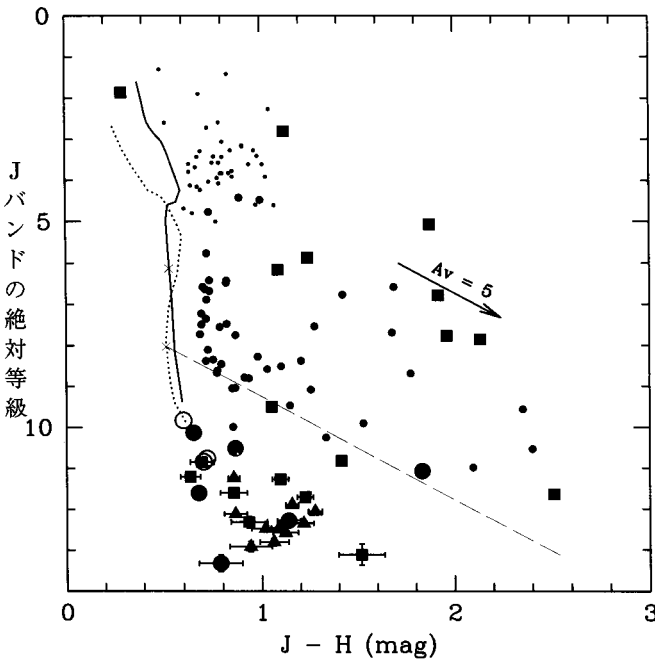


図5 若い天体と分類した天体の色等級図(中くらいの黒丸:サーベイで見つかった天体, ▲:おうし座の深い探査で見つかった天体, ■:カメレオン座で見つかった天体, 大きな黒丸:伴星として見つかった天体, 小さな黒丸:Tタウリ型星, ○:プレアデス星団の褐色矮星)。縦軸はJバンドの絶対等級, 横軸はJ-Hのカラーを表す。比較のために、理論から予測される100万年(実線)と1000万年(破線)の年齢における等時曲線を2.5太陽質量から0.02太陽質量の範囲で重ねてある。青い×はそれぞれの年齢における0.08太陽質量の天体の位置。矢印は赤化ベクトルで、長さはVバンドで5等に相当する。青い破線は1000万年の年齢での恒星と褐色矮星の境界線。

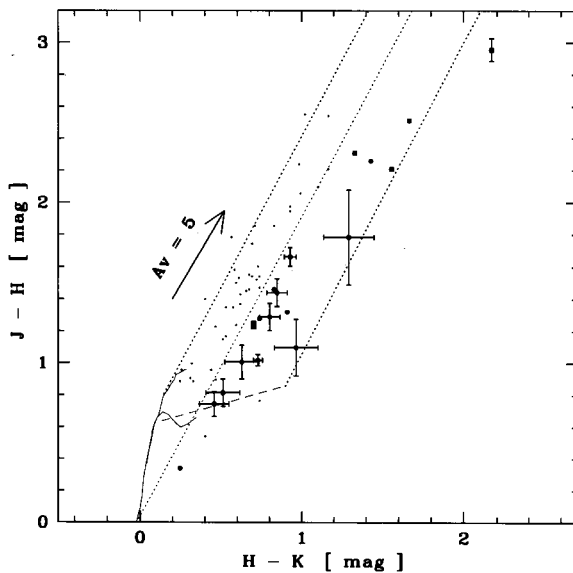


図6 カメレオン座分子雲領域の、より深い撮像観測の近赤外2色図。縦軸、横軸、線などは図1と同様。

5. 他の分子雲を探索する¹⁰⁾

太陽程度の重さの恒星（低質量星）は、分子雲の収縮によって形成されます。もし、褐色矮星も通常の高質量星と同様に分子雲で誕生するならば、そのような天体は母体と考えられる分子雲が異なっても誕生しているのでしょうか？

この観点から、同じく最近傍の代表的な低質量星形成領域であるカメレオン座分子雲でも、深い撮像観測を行いました。カメレオン座分子雲は約160パーセクの距離にあり、太陽程度の重さの低質量星が生まれている領域です。大局的には、おうし座分子雲と同じような性質を持つ星形成領域と言ってよいでしょう。観測領域は、カメレオン座分子雲の中でも最も星形成が活発なカメレオンI北領域の約30平方分です。観測は1996年にチリのセロ・トロロ天文台の1.5メートル望遠鏡と256×256素子の赤外カメラを用いて行いました。限界等級はおうし座分子雲の撮像観測と同様にKバンドで16.2等であり、以前の同領域における観

測よりも4.5等も深い観測が達成され、61天体を検出しました。

図6が観測領域の2色図です。今まで説明してきた方法と同じ手法で、天体の近赤外域（J, H, K）の色から赤外超過を持つ天体を若い天体と分類しました。その結果、19天体を若い天体と同一しました。やはり、いくつかの天体は既知のTタウリ型星に比べ7等以上も暗く、天体の年齢を、1000万年と仮定して理論の進化モデルと比較しても、0.08太陽質量以下であると推測できます。すなわち、これらの天体も若い褐色矮星である可能性があります。さらにこの中にも、質量が0.012太陽質量（12木星質量）以下と推定され、巨大惑星に迫る質量のものがありました。

電波の $C^{18}O$ 輝線観測による母体の分子雲の分子ガスとそこに付随すると考えられる若い星との関係について調べてみると、星形成率、個数密度などが高く、一度に大量の星が形成されているへびつかい座分子雲と似ていること、若い褐色矮星が集団で誕生している傾向のあることがわかりました。このことは、この領域で星形成が活発に行なわれており、同様にもっと軽い天体、つまり褐色矮星のような天体が活発に誕生していることを示唆しています。

どうやら褐色矮星は分子雲を選び好みせずに生まれてくるようです。

6. 伴星をみつける¹¹⁾

星はかなりの割合で連星です。しかもおうし座分子雲のTタウリ型星は連星系の率が高いことが知られています。Tタウリ型星の多くが連星系をなしているのならば、伴星に褐色矮星があっても不思議ではありません。

この観点から、若い星の周囲を高空間分解能で撮像観測しました。伴星として存在する褐色矮星は非常に暗いことが予想されるので、主星に明るい天体を選ぶと主星の星像の裾野によって伴星が

隠されてしまうかもしれません。ここでは、サーベイで新たに見つかった若い低質量天体のうち 23 個を観測対象にしました。

連星系の探査の手法は多岐にわたります。直接撮像以外の方法は、ごく近傍にある伴星まで検出できますが、離角の大きなものや、主星との光度差が大きいもの（ダイナミックレンジを必要とするもの）を検出しにくい性質があります。従来、直接撮像はシーイングサイズでその検出限界が決められており、多くの場合、中心天体から数秒以内にある天体は検出が困難でした。しかし副鏡をわずかに動かして星の揺らぎを抑えるティップティルトを用いることにより、星像はシーイングサイズ以下である 0.5 秒以内に収まり、直接撮像による伴星探査の可能性が広がりました。

観測は 1996 年にパロマー天文台の 5 メートル望遠鏡と、1997 年にハワイ島マウナケアにあるハワイ大学 2.2 メートル望遠鏡を用いて行ないました。ハワイ大学の望遠鏡では、1024 × 1024 素子の QUIRC 赤外カメラを使用し、近くにガイド星がある場合にはティップティルトを行い、星像を約 0.4 秒までシャープにすることができました。典型的な露出時間は 10 分で、限界等級は K バンドで 17 等でした。表紙図は K バンドの画像の一例です。主星は ITG45A という天体でキットピークのサーベイ観測で見つかった若い天体です。その右隣にある天体が、この観測で検出した ITG45B という天体で K バンドの等級が 15.8 等、中心星との離角が 2.3 秒（約 300 天文単位）です。

この観測では中心天体からの離角が 0.6 秒以上で、主星との光度差が K バンドで 7 等以内の天体に対してはほぼ完全な検出ができることがわかりました。今までの手法と同じく赤外超過を持つものをおうし座分子雲に付随する若い天体とすると、中心天体との離角が 2 秒から 8 秒、J バンドの等級が 15 ないし 19 等の若い褐色矮星候補天体が 6 個見つかりました。これらの天体の質量は、先と同様に年齢を 1000 万年と仮定しても 0.08 太陽質量

以下と推定されます。しかもそのうち 3 個については質量が 0.012 太陽質量（12 木星質量）以下と推定され、巨大惑星に近い質量を持ちます。

これらの連星系の質量比（伴星の質量/主星の質量）は多くの場合 0.4 以下でした。一方で、T タウリ型星の連星の質量比は 1 に近い値を示します。T タウリ型星の連星観測は主にスペックル法で行われることから、観測手法の違いによる影響もありますが、若い低質量天体から成る連星系と T タウリ型星から成る連星系が同じような質量比分布を持つ確率は、両観測の検出限界を考慮しても 1% 以下でした。すなわち、若い低質量天体の質量比は T タウリ型星のそれに比べて有意に小さいのです。連星系の形成は、質量比が 1 に近いものは分子雲コアの分裂によって、また、質量比の小さいものは主星の周りの星周円盤の分裂によって形成されると大局的には考えられています。すなわち、若い低質量天体の周りには若い褐色矮星候補天体は星周円盤の中で形成された可能性があるのです。

サンプルが少ないのですが、観測した若い天体の連星系率は、公転周期が 1000 万日から 1 億日のものに対して約 20% です。この数値は、スペックル観測などから求められている T タウリ型星の連星系率と矛盾しません。星の集合の中で捕獲によって連星系が形成されたとすると、主星の質量が小さいほど連星系率は下がると予測されていますが、T タウリ型星と若い低質量天体の連星系率が同じであるという観測結果は、こうした捕獲による連星系形成を否定しています。

7. まとめ

以上、私たちのグループが行ってきた若い褐色矮星の探索を紹介してきました。この一連の観測によって次のことがわかってきました。

- 1) 若い褐色矮星の候補天体が低質量星形成領域に多数存在します。つまり、褐色矮星は分子雲から形成されるといえるでしょう。

2) 孤立して形成される若い褐色矮星もあれば、若い天体の連星として存在するものもあります。伴星として存在する天体は中心星の星周円盤の中で形成された可能性があります。

一連の研究で、解き明かすべき次のテーマも見つかってきました。まず、非常に暗い若い天体の分光観測を行い、若い褐色矮星である確固たる証拠を得ようと思います。また、このような若い褐色矮星は、オリオン座分子雲などの中・大質量星形成領域でも誕生しているのかを調べたいと思います。もしかしたら、大質量星と低質量星の形成過程のメカニズムの違いから、超低質量天体形成の様子が異なっているのかもしれませんが。そして、最も魅力的なテーマは、Tタウ型星の周辺にある生まれたての褐色矮星や系外惑星の探査でしょう。

これから本格的にすばる望遠鏡も稼働していき、観測技術の発展とともに、謎はひとつずつ、わずかながらも解けていくことでしょう。もしかしたら、答えはすぐそこに見えているのかもしれませんが。新しい謎とともに。

この研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた指導教官の田村元秀博士をはじめ、共同研究者である中島 紀博士、アラン・トクナガ教授、イアン・ギャトレイ教授および杉谷光司博士に心より感謝致します。また、一連の観測を手伝ってくださった皆様にもたいへんお世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 舞原俊憲, 長田哲也, 1992, 天文月報, 85, 50
- 2) Nakajima T., et al., 1995, Nature, 378, 463
- 3) Oppenheimer B., et al., 1995, Science, 270, 1478
- 4) Basri G., Marcy G., Graham J., 1996, ApJ, 458, 600
- 5) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature, 378, 355
- 6) Itoh Y., Tamura M., Gatley I., 1996, ApJ, 465, L129
- 7) 奥村真一郎, 1998, 天文月報, 91, 474
- 8) Itoh Y., Tamura M., Tokunaga A., 1999, ApJ, submitted
- 9) 大朝由美子, 1998, 東京大学修士論文
- 10) Oasa Y., Tamura M., Sugitani K., 1999, ApJ, submitted
- 11) Itoh Y., Tamura M., Nakajima T., 1999, AJ, in press

Young Brown Dwarfs

Yoichi ITOH

Subaru telescope, 650 N'Aohoku Pl. Hilo HI 96720
USA

Yumiko OASA

University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo,
181-8588, Japan

Abstract: We have carried out extensive studies of nearby star-forming regions. The near-infrared observations, such as deep survey and spectroscopy, have revealed a significant number of very low-luminosity young stellar objects. Their faintness implies that they could be young brown dwarfs.