

# 褐色矮星を搜索せよ

舞原俊憲・長田哲也

〈京都大学理学部 〒606 京都市左京区北白川追分町〉

褐色矮星（かっしょくわいせい；brown dwarf）とは、軽くて、水素の核融合反応が起こるほどには中心の温度が上がらない星である。銀河スケールでの「暗黒物質」の最有力候補の一つとされ、また、星の形成のメカニズムを解き明かす上でも重要なカギとなると言われながら、多くの人々が「褐色矮星だ」と納得するような天体はまだ発見されていない。これまでのところ、近年感度が飛躍的に良くなった波長2.2ミクロンまでの赤外線観測などから、1) 恒星のまわりを回っているものがないか、2) 若い星団や星の生まれつつある領域にあってまだ冷えきっていないものはないか、といった探索がなされ、かなり期待のもてる候補天体は見つかってきている。それらを紹介するとともに、今とりかかることのできる「究極の褐色矮星発見法」、良い気象条件の場所に置かれたハイテク小望遠鏡による波長3.5ミクロンでの大規模なサーベイを提案する。

## 1. はじめに

褐色矮星という天体が、いま注目されている。“土色のこびと星”は、まぼろしのへび「つちのこ」のように、色々な人が見つけたようだと報告すると、そのたびにそれはどうも違うようだと言って否定されてきている。褐色矮星の構造と進化の様子については、理論的に詳しく研究されて、基本的なことはかなり予想できているのだが、なかなか正体を現わさないのが、本当に実在するのかしないのかすらまだ言えないようである。実際には全天の赤外線サーベイの方法による、本格的な褐色矮星探索を行なって系統的に調べることがどうしても必要なようである。とはいえ、褐色矮星探索の試みは最近ますます盛んになっていて、十分期待を抱かせる観測結果もでてきている。そこでこの際、特に最近の褐色矮星ハントの成果について少し詳しく調べ、本格探索を行なうとすればど

Toshinori Maihara & Tetsuya Nagata: Search for brown dwarfs!

んな方法がよいか考えてみることにしよう。

## 2. 褐色矮星とは

通常の主系列星は、中心で水素が燃えてヘリウムになるときにでるエネルギーで明るく輝き、その光度を保っている。ところが星の質量が太陽質量の約0.08倍以下のような軽い星の場合には、水素を燃やすのに必要な温度まで中心温度が上がらないので、主系列星の段階を経ないまま、ゆっくりではあるがずぶずぶと重力収縮を続け、冷えてゆくと考えられる。そのような星のことを褐色矮星と呼ぶ<sup>1)</sup>。非常に小質量の主系列星が赤色矮星と呼ばれているのに対応してつけられた名前である。

このような星についても、内部構造や時間的な進化のプロセスはかなり計算されているので、色々な年齢の時期においてどのように見えるのかが予想できる。例として、生まれてから100億年経った小質量星の可視から赤外線にかけてのエネルギースペクトルを、アリゾナ大のパロウズらの

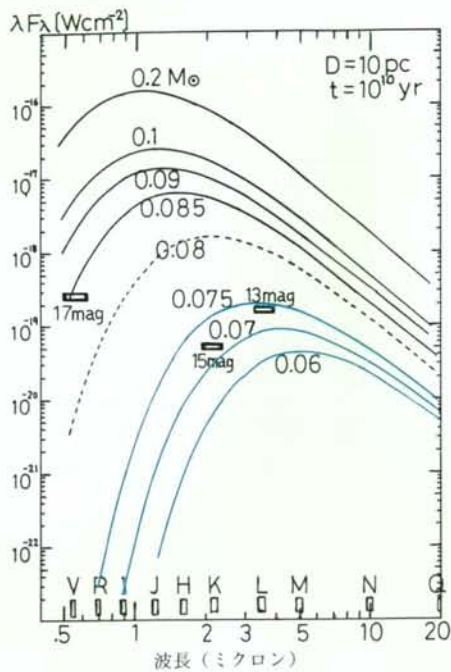


図1 年齢100億年の、0.2から0.06太陽質量の範囲の小質量星のエネルギースペクトル。カーブは黒体放射で近似して書かれており、縦軸は10パーセクの距離に置いたときのフラックス強度である。等級の目安として、Vバンドの長方形マークは17等、Kバンドは15等、Lバンドは13等の位置に描いた。

モデル<sup>2)</sup>にもとづく半径と表面温度を用いて図1に示した。詳細なスペクトルを求められるほどには星の大気の吸収係数がわかっていないので、すべて黒体放射としてある。グラフは縦軸のフラックスを、星が10パーセクにある時の値(絶対等級)にして描かれている。この図からわかるように、十分年齢の古い小質量星は、約0.08太陽質量を境にして、赤色矮星と褐色矮星がエネルギースペクトルの上で判然と分離するのである。最も暗い赤色矮星は絶対等級が可視で17等程度であるが、褐色矮星の場合は、最も明るいものでも可視で25等以上となり、可視光ではまず絶対に見つけられないであろう。それは星のエネルギー放射量が小さいこともあるが、表面温度が2000 K以下に下がり、大部分は赤外線領域でしか光らなくなるから

である。いずれにせよ、この図1を参考にして、後ほど褐色矮星探査の方法を考える。

### 3. 褐色矮星は暗黒物質か

褐色矮星というのは、単に質量の軽い星にすぎないのだけれど、これがなかなか重要な役割を果たす可能性をもっている。もしも数が非常に多ければ、宇宙の「暗黒物質」の問題に、少なくとも部分的には答えが出せるかもしれないからである。

宇宙空間には、重力はおよぼしているのに他のどのような観測手段をもってしても今のところ「見る」ことのできない物質があるらしい<sup>3)</sup>。太陽の近くのような、渦巻銀河の内部でも、この「暗黒物質」の存在がほとんど確かなようである。たとえば渦巻銀河に含まれるガスの回転速度を測って銀河の質量分布を求めてみる。真中に太陽があるだけで他には大して質量のない太陽系で惑星の回転速度を測れば、外の惑星になるほど落ちているのがわかる。ところが、渦巻銀河では、この回転速度の曲線がどこまでも平坦に続いているのである。これは、半径Rの中に含まれる質量M(R)がどこまでもRに比例して増えていっていることを示している。われわれの銀河系でも、半径数十キロパーセクの中に、星や星間物質として観測できるものの十倍以上の質量(暗黒物質)が存在していると考えられている。

この暗黒物質はどこにあるのだろうか。銀河のディスク部分にこんなにたくさんあるとすると力学系として不安定になったり、銀河の端での歪み(ワープ)をうまく説明できなかつたりして都合が悪い。種族IIの星からなる普通の楕円体成分でもないようだ。そこで球形に分布するダークハローなるものが考えられている。銀河系の場合、この密度はわれわれの近傍で1立方パーセクあたり太陽0.01個分程度の質量とされている。わずかのように見えるかもしれないが、こういったものが銀河系を球形におおっているわけで、全体では、ディ



スク部分で「見えて」いるものの何倍もの質量をもち、平坦な回転曲線の原因となるのである。

一方、銀河のディスク部分の光の分布と同じように平べったく分布した暗黒物質（いわゆる古いディスクまたは厚いディスク）も必要と考えている研究者が多い。太陽近傍で、星やガスなど正体のわかっているものの密度は1立方パーセクあたり0.1太陽質量程度だが、銀河面に垂直な方向の星の運動から、暗黒物質もまた同じくらいあると計算されている。（上で述べた密度の10倍もあるが、平らにしか分布していないので、全体ではそれほど質量にならない。）われわれの銀河系ではディスク部分に暗黒物質は不要ではないかとしている研究者もいるが、他の渦巻銀河からの類推から言っても、ダークハローだけに暗黒物質を押し込めるのは無理がありそうだ。

この暗黒物質の候補として最も有力視されているのが褐色矮星である。「えっ？ 暗黒物質ってもっとエキゾチックなものじゃなかったっけ？」という声が聞こえてきそうである。が、そこには、ちょっと誤解があるようだ。暗黒物質の問題というのは、上にあげたような銀河のスケールだけでなく、銀河団・超銀河団のスケールや宇宙全体の密度についても一層深刻なものとなっている。そして、宇宙全体として見たときは、普通の物質（バリオン）以外のニュートリノや新種の粒子が暗黒物質の主な担い手だ、と思っている研究者が多い<sup>4)</sup>。理由はいくつかあるが、何とんでも、初期宇宙での軽元素合成の標準的なモデルを信用すれば、バリオンは宇宙を平坦にする物質密度の何十分の一かしか存在しないのだから。しかし、逆に言うと、バリオンは宇宙を平坦にする物質密度の何十分の一「も」存在するはずなのである。観測にかかる星や星間物質を足し合わせたところでその一割にもならない。つまり、標準的な宇宙論からの要請としても、バリオンの暗黒物質が多量に必要なのだ。そして、銀河のスケールで存在するはずの暗黒物質としては、まずバリオンが候補と

なっているのである<sup>5)</sup>。

バリオンと限定しても、それは普通の物質というだけのことで、いくらでも候補がありそうに見える。ところが、これまでの観測と矛盾しないという拘束をつけると、よい候補はあまりない。ガスならば輝線や吸収線として検出できるのでダメである。水素の固体の小さな塊はガスとして蒸発してしまうし、惑星ぐらいの天体に対しても反論がある。普通の恒星ならいくら暗いものでも観測にかかっているはずだし、星の末路であるブラックホールや中性子星ならまわりと相互作用してX線を出し、これまた観測できているはずだ。無理な仮定をせずに考えられる天体としては、褐色矮星が最も見込みが高そうなのである。

#### 4. 小質量星の「人口調査」

一般に質量の軽い星の方が個数はどんどん多くなると考えがちであるが、非常に軽い星の数が多いのかは、実はあまりよくわかっていない。星の質量と個数との関係（質量関数）は、まずどのぐらいの光度の星がどれだけの個数あるのか（光度関数）を観測から求めて、次に光度・質量関係を用いて、導き出されている。非常に軽く暗い星については、観測で求められた光度関数も観測方法ごとに一致せず、さらに光度・質量の関係は経験式とモデル計算とでずいぶん異なっている<sup>6)</sup>。そこで、太陽の5分の1の質量の星が、太陽と同じ質量をもつ星の数よりも約5倍以上多いことあたりまではわかっているが、それよりも軽い星となると非常に観測が難しくなり、まだその存在量：いわば人口調査ができていないのである。

そこで、褐色矮星探査は暗黒物質の問題にとどまらず、星の形成のメカニズムの研究にも重要なインパクトを与えるに違いない。星形成の理論は、質量関数を予測できるようなものでなければならぬからである。さらに、低温度星の大気構造の点でも、褐色矮星の研究から得られるものは大き

いだろう。光度・質量関係が確立していないのは、低温の大気に含まれる分子の吸収係数がよくわからないことも原因しており、実際に褐色矮星が見つかってその赤外スペクトルが得られれば、吸収についての情報が格段に増えるはずである。

暗黒物質の問題に戻ると、銀河全体の質量を推定する上で重要なのは、約0.1太陽質量から褐色矮星の領域にかけての質量関数を決定することであることがわかる。はたして質量の小さい星ほど個数が増大していく、ベキ関数の形なのか、それともむしろ減ってしまう関数なのか、銀河内の暗黒物質を説明できるかどうかに関係するからである。したがって、一個一個の褐色矮星の素顔を詳しく調べると同時に、統計的な側面を明らかにしなければならない。

## 5. 連星系を探す

褐色矮星は固有の光度はたいへん小さいが、温度が低い赤外線域では相対的には結構明るい。そこでまず、普通の星と連星系を形成している可能性に望みを託して、連星の一方が非常に低温天体であるものを探すのが良さそうに思われる。連星系ならば、うまくするとそれぞれの星の質量を直接決定することも可能である。こうして次のような、連星系に着目した幾つかの独創的な観測方法が考えられて試された。

まずアリゾナ大のマッカーシは、赤外線スペックル干渉計で、太陽から10パーセク以内にあるすでに知られている赤色矮星を測り、連星系になっているものがないかどうかを調べるという方法で、観測をやり始めた。スペックルの方法によれば、離角が0.1秒角位までの連星系を見つけられる。この方法を使った初期の観測により、VB8という赤色矮星に0.06前後の褐色矮星があると報告して注目を浴びたが、残念ながらこれはしばらく後に別の人達の観測によって否定された。しかし最近マッカーシは、ごく若手のヘンリーと一緒に<sup>7)</sup>、赤外線スペックル観測のデータが得られた

赤色矮星の個数を77個までのぼしている。そして連星系の軌道要素がわかったものの内に、褐色矮星に相当する質量の伴星が3つ見つかったと報告している。ところで彼らの結果で重要なことの1つは、2.2ミクロンのKバンド絶対等級がほぼ10等あたりまで光度関数が増加したあと、それ以上の等級のものが抜けているということである。

このことは、実は図1からごく自然に予想されることである。つまりK等級の10等は、赤色矮星の最小質量限界である0.085太陽質量の星の光度に対応するので、そのあたりまでは沢山の小質量星が生成されたことを示している。またそれよりも軽い褐色矮星に属する星は、Kバンドの絶対等級が13等以上の暗さになっているために、観測にかかってこなかったと解釈できる。ちなみに彼らの限界等級は、Kバンドの絶対等級にして約11等である。

つぎに、UCLAのベックリンとザッカマンの2人組の方法は、白色矮星と連星系になっているかもしれない褐色矮星を、赤外線域でのエネルギースペクトルの超過を検出することによって見つけたそうというものである。彼らの最初の獲物であるG 29-38と呼ばれる白色矮星に付随した赤外線源は、超過成分の色温度および推定された星の半径などから、褐色矮星のモデルにぴったりとあう小質量の伴星と思われたが、その後の10ミクロンの観測や赤外線強度の周期変動の解釈から、ダスト円盤だということになってしまった。しかしその後も精力的に観測を続けており、ある割合で褐色矮星と思えるような赤外線超過を示すものを見つけたと述べている。例えば、GD 165と名付けられた白色矮星には、2100 Kというかなり低温の伴星が見つかった<sup>8)</sup>。はっきりとKバンドの赤外線画像に星として写っていたので、ダスト円盤ではないことは確かだ。ただその伴星の質量の推定には不定性が残っており、必ず褐色矮星であるとは言いきれない。

スオートモア大のハイントスは、何10年間か写真



の記録が残されていた赤色矮星で、Wolf 424 と名付けられた星を調べていて、これが連星であること、そして軌道要素などから 0.05 と 0.06 太陽質量の 2 つの星からなる連星系であることを見つけた<sup>9)</sup>。星の光度は、どちらも可視の絶対等級で約 15 等となり、0.05 太陽質量の褐色矮星にしては明るすぎる。ただし年齢が 1 億年程度の若い褐色矮星と考えれば問題はないようである。しかし、前述のヘンリー達がスペックルの方法で測ってみたら、ハインツの軌道要素とはあわないということになって、クレームがついた状態である。

ビクトリア大のキャンベルらのグループ<sup>10)</sup>、およびハーバード・スミソニアン天体物理研究所のレイサムらのグループ<sup>11)</sup>は、速度分解能が毎秒 0.1 km 以下という非常に高分解能の分光観測により、星の視線速度の周期変動を測って伴星の質量を推定している。これまでに 2、3 個の星で、太陽質量の 0.02 倍以下程度の伴星を見つけたとしているが、これは褐色矮星なのか、または巨大惑星というべきものなのか、その小天体の性質はよくわからない。この方法では、星のかなり近傍の伴星以外は検出することが難しいので、10 天文単位以上の軌道をもつ褐色矮星の伴星があってもなかなか発見されないであろう。

このように、連星系での褐色矮星探しによって、いくつかの候補は見つかっているものの、明らかに褐色矮星に違いない天体が発見されて詳しく調べられているわけでも、数多くの候補から統計的な性質が浮かび上がってきているわけでもない。年齢がわからない星で K バンド (2.2 ミクロン) までの探索をしても、候補の数が増えるばかりで、結局のところ何も確実なことが言えないままになってしまうおそれがあるように思える。波長 2.2 ミクロンまででは高温の天体ばかり受かってしまうのである。それなら逆に高温でも褐色矮星と言える天体を探そう、という試みを次の節で述べる。

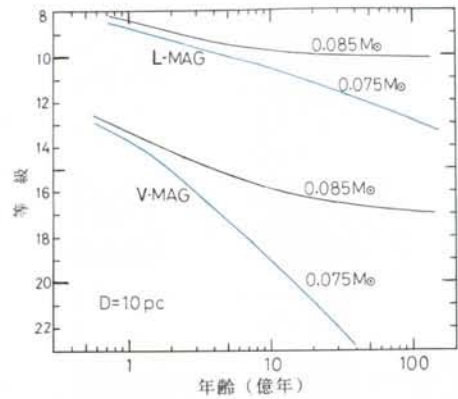


図 2 小質量星の L および V 等級の時間的な変化。0.085 太陽質量の星は赤色矮星の、0.075 太陽質量の星は褐色矮星の代表として描かれている。

## 6. 若い褐色矮星の候補

年齢が 100 億年の古い褐色矮星は、図 1 のように暗い低温度天体になって、容易に観測にかかってきてくれない。しかし若い褐色矮星は、表面温度も高くかなり明るい天体である。最初はすべての若い星と同様に、星が誕生するときの重力エネルギーの解放によってかなりの明るさで輝きはじめ、その後ゆっくりと非常に長いタイムスケールで暗い低温度の天体になっていく。図 2 に、パロウズらのモデルに基づいて 0.08 太陽質量前後の赤色矮星や褐色矮星が、時間的にどんな明るさと温度の履歴をもつかを予想したグラフを示した。年齢が 1 億年以下の若い褐色矮星は、普通の軽い星すなわち赤色矮星とあまり違いがないことがわかる。年齢が違っていると、明るさや表面温度で両者を区別することはできない。

そこで、ほぼ同時に星生成が起こり星団になっているものを調べるという方法が幾つか試されている。これまでに、ヒヤデス星団やプレアデス星団などの散開星団についてのサーベイ観測が行われている。距離約 45 パーセクにあるヒヤデス星団は、年齢が約 7 億年であり、褐色矮星の領域の星を可視の 20 等程度の天体として観測できる可能

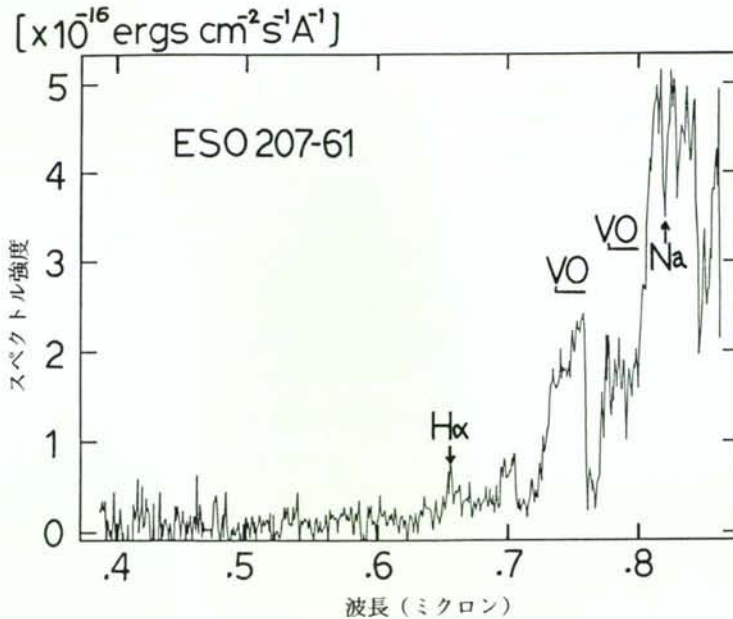


図3 ヒアデス星団に属すと推定されている褐色矮星の候補 ESO207-61のスペクトル。

性がある。チリ大のルイズらは、固有運動のデータからヒアデス星団と一緒に生まれたと思われる低温度天体を見つけた<sup>12)</sup>。彼女たちは、光度と色温度から、この星を褐色矮星と考えてよいだろうとしている。分光観測では図3のように、星の大気の中の種々の分子の吸収が錯綜した複雑なスペクトルが得られている。このスペクトルの様子から推察できるように、測光結果から求めた色温度が信用できないのはもちろん、こんな低温では、分子の吸収線にもとづく温度 (2200 K) にも不確定性があり、絶対光度や本当の質量を知る上で問題が残っている。

プレアデス星団はもっと若くて、年齢は6000万年と推定されている。最初ハーバード・スミソニアン天体物理研究所のストファーらが、0.07太陽質量前後の4つの星を見つけたと報告したが、温度の推定の誤差が指摘されて疑問視されている。最近レスター大のハンブリらはシュミット乾板を解析して、約300個の星団メンバーの星について、有効波長約0.9マイクロンのIバンドと0.7マイクロ

ンのRバンドのデータを得た<sup>13)</sup>。それをもとにして、プレアデス星団の質量関数が求められている。その結果によると、褐色矮星の領域には少なくとも30個の星が入る。測定限界に近い暗い星の像を考慮すると、0.06太陽質量以上の褐色矮星の数は100個以上になる。しかし、プレアデス星団の全質量は太陽質量の500倍相当なので、これ位の褐色矮星の数ではあまり銀河質量に寄与することにはならない。

年齢が1000万年以内の生まれて間もない若い褐色矮星ならば、今の赤外線観測の能力からすると、かなり遠い星生成領域のなかにあっても、十分検出が可能な光度になっているであろう。ロチェスター大のフォレストらは、新しく開発した2次元赤外線検出器を用いて、おうし座暗黒星雲の赤外線撮像のサーベイ観測を行なっているときに、非常に暗い低温度の赤外線天体を見つけた。それらの星のうち、暗黒星雲とほぼ同じ固有運動をもつ4つを、年齢が100万年程度の褐色矮星の候補であると発表した。しかしその後、前述のス



トファーらが0.6~0.9ミクロン領域と、1~1.35ミクロン領域の分光観測を行ない、それらは大きな星間吸収を受けた、G型からK型くらいのスペクトルタイプの星であることを示した<sup>14)</sup>。ということは、暗黒星雲の向こう側にある、遠くの明るい星にすぎない可能性が高い。

おうし座の暗黒星雲よりも少しだけ遠いへびつかい座暗黒星雲でも、アリゾナ大のリーキらが同様の赤外線撮像観測を試みている<sup>15)</sup>。彼らは、多く見つかった若い星の推定年齢などから、この暗黒星雲の年齢を300万年として、非常に暗い赤外線天体の幾つかは、質量が0.08太陽質量以下の褐色矮星であると考えた。この報告に対する確認の追試観測はまだ行なわれていないが、暗黒星雲中には、暖かい星周塵の殻に包まれた生まれたばかりの原始星天体が多数共存しているので、見かけ上暗い低温天体であっても、それが本当に褐色矮星であると断定するのはとても難しそうである。

結局、若い褐色矮星の探索も、温度や光度推定の不定性や、星生成領域の星間吸収にはばまれて、決定的な褐色矮星の候補を見つけられずにいるのが現状である。

## 7. 太陽近傍をさがす

第3節に述べたように、われわれの住んでいる宇宙の物質密度という最も基本的な量が、宇宙の広範囲な階層レベルで観測的に矛盾を含んだままになっている。もしもこの見えない質量の多くを褐色矮星が担っているとすれば、一体どの位の褐色矮星が存在していなければならないのだろうか。とりあえず太陽近傍に話を限るとすると、控えめに言って、ざっと1立方パーセクあたりに0.05太陽質量相当を褐色矮星に担ってもらおうということになる。半径10パーセク以内の領域には、0.05太陽質量の褐色矮星ならば約4000個あればよい。質量関数にもよるが、0.07から0.08太陽質量のものは約500個程度が期待される。

ところで太陽は生まれてから45億年、銀河は100億年も経っていることを考えると、褐色矮星もかなり古いもの、つまり非常に暗くて低温度になってしまっているものが大部分であるかも知れない。そういう褐色矮星でも、検出する方法はないであろうか。比較的小さな望遠鏡でも、赤外線域での広域サーベイ観測に占有して使うことにより、効率よく褐色矮星を見つけていけるならば、たいへん重要な興味深いプロジェクトになりうる。

最初の図1をもう一度見なおしてみよう。0.75太陽質量以下の星は、3.5ミクロンのLバンドあたりがスペクトルのピークになっている。距離10パーセクとして、可視光では30等より暗い訳だから、これまでの観測で発見されていないのは不思議でも何でもない。有効な検出方法は、したがって、Lバンドで全天をサーベイすることであるように思われる。仮に口径1.3mの赤外線望遠鏡に、現在考え得る最も画素数の大きな2次元赤外線検出器(すでに640×480素子のものは使える)を4個並べて1画素を1秒角弱に設定し、Lバンドでサーベイ観測を進めるとしてみよう。大気の状態が良くて像がぼけないならば、2×2画素でのサンプリングで充分となり背景輻射によるノイズを実質的に減らせるので、1分間の積分でL等級が13等以上の星を見つけられるはずである。(図1に、Lバンドの13等の明るさをマークした。)さらに、Kバンド(2.2ミクロン)でのモニターも行ない、検出した天体の色温度を求めて褐色矮星の候補を選び出せばよい。1視野は0.2度平方位になるので、1日8時間観測できるとすると、大雑把な見積もりでは約10日に1個の割合で、0.07~0.08太陽質量の褐色矮星が発見できると予想される。勿論すべて晴れる訳ではないので、実際にはもっと日数を要するはずである。ただ、太陽近傍の星は種族Iのいわゆる銀河ディスク成分に属するものが大部分で、相対的に年齢の若いものがかなり含まれており、10億年と100億年の

間に年齢が分布していると思われる。したがって、図1の光度よりも平均的にはかなり明るい可能性があるのですが、実際にはもっと多数の褐色矮星が見つけれられるかもしれない。

赤外線検出器の飛躍的な進歩をうけて、ここ数年は特に、背景の熱放射があまり効かず感度の高いKバンドまでの観測が何に対しても行なわれ、成果をあげてきた。しかし、低温の天体はやはり長い波長で観測しやすいものなのである。Lバンドでの探索は相当の感度があり、しかもこの方法で選びだした天体の大部分は、温度が十分に低く褐色矮星に違いないものばかりだろう。(銀河面から離れたところに1500 Kの暗い天体がたくさん見つかって、それが褐色矮星でなかったりしたら、それはそれで大発見だ!) しかも見つかった天体は距離が近く、さまざまな観測手段で徹底的に研究できるはずだ。そう考えてくると、地上からできる大規模な探索法として、こういったLバンドサーベイはほとんど究極の褐色矮星発見法ではなからうか。

## 8. おわりに

たった10パーセクの距離にあっても、可視光では30等の明るさにしかならないのだから、褐色矮星がなかなか見つからないのが当然としても、宇宙にはごく普通にたくさん存在していると考えるほうが自然であり、これまでの観測でも、何となくそのような感触が得られている。しかし、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まだはっきりあるとは断言できない。

少し遠くても年齢の若い褐色矮星を連星系や星団に探すという方法で、候補が挙げられている内には、もしかしたら既に0.08太陽質量以下のもの

が含まれているかもしれないし、おそらくある程度は確実な褐色矮星も発見されるに違いない。しかし銀河のミッシングマスを担っているかも知れない、本当に低温度になってしまった文字どおりの褐色矮星は、前の節で述べたようなゼネラルなサーベイを行なわない限り、まず見つかることはないであろう。その意味で、将来の赤外線衛星望遠鏡による観測が有効な手段になることは間違いないが、当面期待ができるのは、やはり高地に置かれた地上の専用小望遠鏡による赤外線サーベイではないだろうか。

## 参考文献

- 1) Stevenson, D. J. 1991, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 29, 163.
- 2) Burrows, A., Hubbard, W. B., & Lunine J. I. 1989, *Astrophys. J.*, 345, 939.
- 3) 宮本昌典 1986, *天文月報*, 79, 175.
- 4) 郷田直輝, & 杉山直 1990, *天文月報*, 83, 363.
- 5) Trimble, V. 1987, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 25, 425.
- 6) Liebert, J., & Probst, R. G. 1987, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 25, 473.
- 7) Henry, T. J., & McCarthy, D. W. Jr. 1990, *Astrophys. J.*, 350, 334.
- 8) Becklin, E. E., & Zuckerman, B. 1988, *Nature*, 336, 656.
- 9) Heintz, W. D. 1989, *Astron. Astrophys.*, 217, 145.
- 10) Campbell, B., Walker, G. A. H., & Yang, S. 1988, *Astrophys. J.*, 331, 902.
- 11) Latham, D. W., Mazeh, T., Stefanik, R. P., Mayor, M., Burki, G. 1989, *Nature*, 339, 38.
- 12) Ruiz, M. T., Takamiya, M. Y., & Roth, M. 1991, *Astrophys. J. Lett.*, 367, L59.
- 13) Hambly, N. C., & Jameson, R. F. 1991, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 249, 137.
- 14) Stauffer, J., et al. 1991, *Astrophys. J. Lett.*, 367, L23.
- 15) Rieke, G., & Rieke, M. J. 1990, *Astrophys. J. Lett.*, 362, L21.