

若い褐色矮星や系外惑星系の観測

伊藤 洋一¹

1. 原始褐色矮星の観測

1.1 褐色矮星とは

7月21日、私はインド洋上にいた。原始褐色矮星のサーベイ観測のため、南アフリカ天文台で観測を行なうのだ。昨日ハワイでの観測から帰ってきたばかりだということに、何というスケジュールなのだろう。なぜ、そこまでして観測をするのか、と問われれば、褐色矮星が恒星と惑星の間に位置する、興味深い天体だからである。

太陽と同じ質量を持った天体の形成過程を考えてみよう。このような天体は、分子雲が収縮することによって誕生する。形成当初は、天体が小さくなり、重力エネルギーを解放することで輝いている。その後、中心核が核融合が起こせるほど十分に高温になった時点で、星の収縮が止まる。そして、その一生の大半を同じような大きさ、同じような表面温度で過ごす。これは、輝くことによって失うエネルギーを核融合で賄うからだ。この状態にある星を主系列星という。

それでは、質量が軽く、形成過程において中心核の温度が十分に高くない天体はどのような進化をたどるのであろうか。このような天体の進化過程を初めて計算したのが、中野ら[1]である。そして、太陽の8%以下の質量しか持たない天体は、形成過程において中心核の温度が十分に高くない、核融合が起きないことを導いた。こうした天体は、重力収縮で輝くしかなく、一生を通じて暗くなる一方で、主系列の段階に到達しない。形成から充分時間が経った段

階では、最も暗い恒星「赤色矮星」よりもさらに暗いと予想されたことから、このような天体は「褐色矮星」と呼ばれるようになった。

褐色矮星が注目される理由の一つは、褐色矮星が宇宙のダークマターではないか、と思われたことであろう。銀河を光で観測すると、外側ほど星の数が少なくなっているように見える。ところが、銀河に含まれる星間ガスの回転速度を観測すると、銀河の外側でもかなりの質量があることが推測され、この部分には光っていない物質が大量にあると考えられる。この物質の候補の一つとして褐色星が考えられていた(最近の重力レンズのサーベイ観測からは、褐色矮星の数はダークマターを説明できるほどではないことが明らかになりつつある)。

しかし、褐色矮星の存在が理論的に予言されてから、観測で発見されるまでには長い時間が必要だった。名前の通り、暗くて観測が難しいからだ(発見されるまでの苦難の道程は、舞原と長田の記事が参考になる[2]。最初の発見は、カリフォルニア工科大学にいた中島紀さんらによって、1995年になされた[3]。彼らは、太陽近傍の星をサーベイし、長年にわたる観測から、伴星として存在する褐色矮星を発見した。その天体のスペクトルは、いかなる恒星のスペクトルとも違っていて、近赤外の波長域にメタンの深い吸収バンドがあり、むしろ木星のスペクトルに似ていた[4]。低温の恒星の大気では、炭素は一酸化炭素として存在するが、より表面温度の低い天体では炭素はメタンとして存在する。天体の温度の低さと暗さは、褐色矮星の決定的な証拠だった。

¹ 神戸大学大学院自然科学研究科

このような、いわゆる成熟した褐色矮星の数は、その後の観測で徐々に増えてきている。しかし、その本来の暗さから、検出には多くの観測時間が必要となる。一方で重力エネルギーを多量に放出している、天体の形成時期には、褐色矮星といえども、現在の観測技術で比較的容易に検出できる明るさを持っていると考えられる。そこで、生まれたての褐色矮星を検出することで、褐色矮星の統計的議論を行ったり、その誕生の様子を探ろうというのが、今回の観測のテーマである。

1.2 生まれたばかりの褐色矮星を検出する

7月22日。大阪から香港、ヨハネスブルグと飛行機を乗り継いで、ケープタウンから車で4時間、ようやく南アフリカ天文台に到着した。一体、何時間の長旅だったのか、日本時間で今は何時なのかさっぱりわからない。一週間ほど前から観測を行なっている名古屋大学の中島君、神戸大学の松柳さんと合流、夕食を食べる。「毎日、羊料理ばかりで、もう飽きた」と彼らは言うが、充分おいしいと思った。夕食後、車で数分のドームへ行く。ここには名古屋大学が製作したIRSFという口径1.4mの望遠鏡と、SIRIUSという近赤外3色同時撮像カメラがある。

褐色矮星も、通常の星と同じように形成されると考えるならば、星が集団的に生まれている領域、すなわち分子雲を観測すれば、数多くの褐色矮星が検出できると期待できる。分子雲に附随する天体からの光は、分子雲によって星間吸収を受ける。また、生まれた直後でも、褐色矮星は表面温度が低く、光球からの放射のピークが近赤外域(波長1ミクロン付近)にあると考えられる。こうしたことから、生まれたての褐色矮星を観測するには、可視光で観測するよりも赤外線で見つかるほうが有利である。

通常の星は分子雲が収縮して形成される。分子雲はわずかではあるが回転しているため、収縮する過程で回転軸と垂直な方向だけは遠心力が働き、収縮

が遅くなる。この結果、太陽程度の重さの星は、形成過程で原始惑星系円盤を伴い、いわゆるTタウリ型星として認識される。同様に分子雲から形成される褐色矮星も星周円盤を伴う時期があると考えられる。円盤は、中心星の光を吸収することや、内部の物質の摩擦によって暖められており、長波長に、星では説明できない特異な放射を示す。特に、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)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、フラックスの超過を示す。この結果、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、通常の恒星と、明確に区別ができる(詳しくは図1のキャプションを参照のこと)。今回の観測では、今まで観測が進んでいなかった、南天の星形成領域をサーベイするのが目的である。

観測は午後11時くらいまでは順調だったが、その後、雲が出てきてしまい、現在は待機中だ。そこで、我々が今まで行なった研究についてまとめておこう。

話は十年ほど前に遡る。その頃、近赤外域でもようやく大素子数の近赤外検出器が出始めた。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タウリ型星しか見つけられていなかった。新しい大素子数検出器は、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だった。

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なった。このカメラは近赤外域のJHKバンドを同時に撮像する、SIRIUSと似た構造を持つ物だった。この装置を使って、最近傍の(140pc)星形成領域である、おうし座分子雲の、最も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た。限界等級は、以前の観測よりも4等程度暗くKバンドで13.4等だった。図1は観測で見つかった約600個の天体の近赤外域2色図である。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た。これらの天体の多くは既知

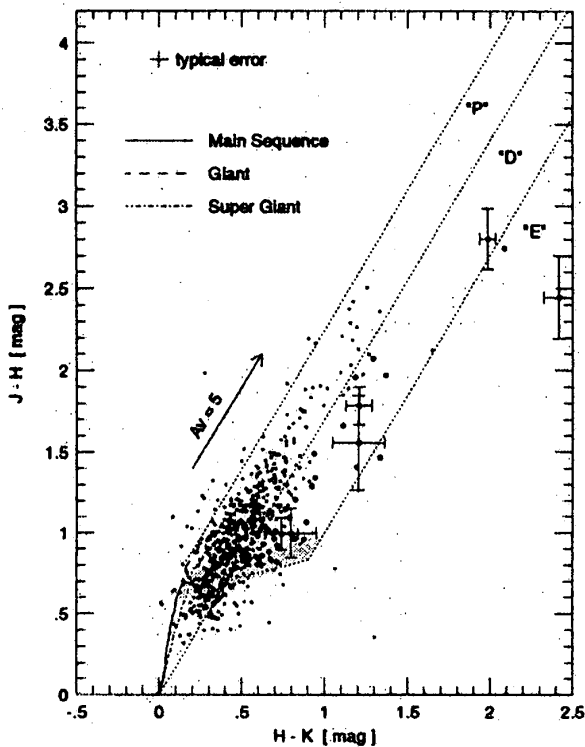


図1：おうし座分子雲Heiles Cloud 2の2色図。分子雲の吸収により星からの光が赤化されると、天体のみかけのカラーは、この図の上で矢印の方向、すなわち右上に移動する。一方で、原始惑星系円盤などの温度の低い天体をまわっていると、同じく右上に天体のカラーが移動するが、より寝た方向に移動する。この図で点線で囲まれる領域のうち、「P」とラベルされている場所にプロットされている天体は、分子雲の前景星、背景星などの通常の星や、原始惑星系円盤が消失したYSOと考えることができる。一方で領域「D」の天体は原始惑星系円盤を伴ったTタウリ型星などの天体、領域「E」は、それよりも進化段階の若い、原始星段階の星がプロットされる。

のTタウリ型星よりも2から6等も暗い天体である。どうしてこんなに暗いのだろうか？ 考えられる可能性は二つある。その一つは「天体の質量が軽い」というものだ。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100万年だとすると、質量は0.03から0.3太陽質量程度と推定できる。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という可能性だ。もう一つの可能性は「天体の年齢が比較的年寄りだ」ということだ。若い天体はヘルツシュプルング-ラッセル図(HR図)上を、主線トラックに沿って進化し、年齢とともに暗くなる。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る。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ない[5]。

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ある(撮像観測は星を色眼鏡で見ること、分光観測はプリズムを通してみることと考えればよい)。分光観測で得られるスペクトルには原子や分子に特有の輝線や吸収線がある。この線の深さや太さ、波長を測ることにより、天体の温度や運動、元素組成などがわかる。ここでは天体のスペクトルから天体の温度を決め、HR図上で進化トラックと比較することによって、天体の質量と年齢を求めた。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バンドの分光観測を行なった。天体のスペクトルに存在する、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、いくつかの天体の表面温度は3000K程度であることが判明した。今まで知られていたTタウリ型星の表面温度は約4000度で、この1000度の違い、これこそが若い低質量天体の確証である。HR図にプロットすると、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る。つまり、これらの天体は「年を取ったTタウリ型星」ではなく「若い低質量天体」なのだ[6]。

さてそれでは、こうした天体はおうし座分子雲以外でも生まれているのだろうか？ 例えば、重い星が生まれている場所では生まれているのだろうか？ 重い星が生まれている場所、すなわち大質量星形成領域では、星の約80%が生まれていると言われている。従って、もしこうした場所でも褐色矮星が生まれているのだとすると、褐色矮星は普遍的に生まれ、その数は比較的多いと考えることができる。

そこでSIRIUSを使い、いくつかの大質量星形成領域をサーベイした。今までに解析が終り、結果が出たものは、S140領域(田口、神戸大学修士論文)、ケフェウスA領域(藤田、神戸大学卒業論文)、IC1848

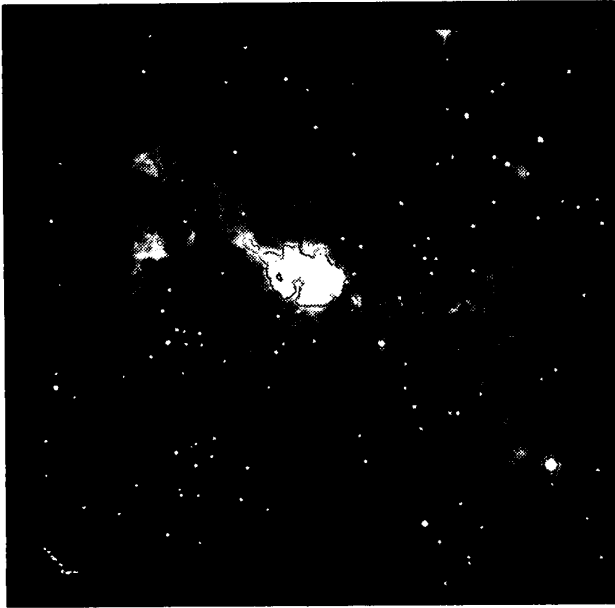


図2：大質量星形成領域ケフェウスAの近赤外面像。視野は5'×5'。上が北で左が東である。中心に大質量星があり、そこから活発なアウトフローが出ている。その周囲では低質量のYSOが生まれていることが明らかになった。

(松柳, 神戸大学卒業論文)などである。例えば, 図2はケフェウスA領域の近赤外面像で, 中心の大質量星からは活発なアウトフローが出ており, その周りでは低質量星が生まれている。図3はIC1848と呼ばれる大質量星形成領域に附随するYSOの光度関数である。このグラフを見ると, 暗い天体ほど数が増えていることがわかる。年齢をTタウリ型星と同じ100万年だと仮定すると, Jバンドの絶対等級が6等の天体が0.1太陽質量の天体に相当する。従ってこの領域では0.1太陽質量の星まで, 質量の軽い星ほど数が多いということがわかる。

残念ながら, これらの領域は比較的距離が遠いため, 観測はいずれも褐色矮星を検出するには, いくぶん観測限界が足りないが, それでもそれぞれの領域でいくつかの褐色矮星を検出し, 領域の質量関数は, 軽い天体ほど数が多いことを示している。

質量 m の星の個数を $N(m)$ とすると, 質量関数は $\alpha = -\frac{d \log N(m)}{d \log (m)}$ で表されることが多い。ここで α が2より大きいと, 軽い星ほど宇宙の質量を担うことを意味する。太陽程度の質量の星では $\alpha = 2.3$ であることが知られている。観測値を元にした光度関数

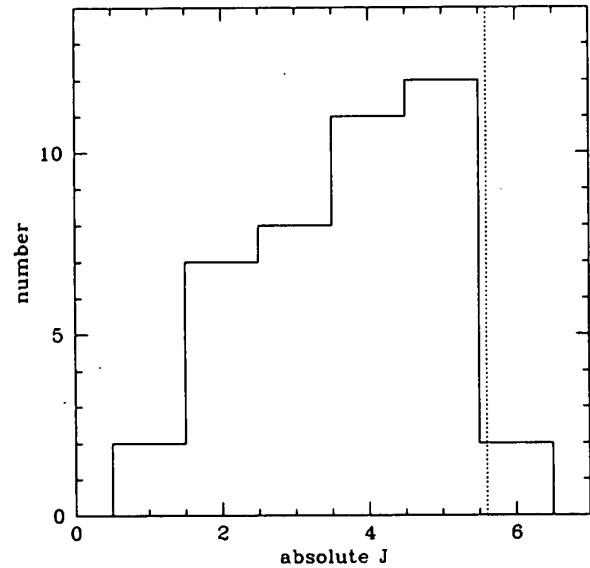


図3：大質量星形成領域IC1848のYSOの光度関数。横軸にJバンドの絶対等級, 縦軸に個数をプロットしている。右ほど暗く, 5.6等までが完全性のあるデータである。天体の年齢をTタウリ型星と同じく100万年とすると, 5.5等級の星が0.1太陽質量に相当する。すなわち, この領域では0.1太陽質量の天体まで, 軽い天体ほど数多く誕生していることがわかる。

から質量関数への変換は細心の注意が必要であり, 以上で紹介した研究では質量関数を求めるまでは行っていない。他のグループが求めた質量関数で α は0から1程度のものが多く, これが正しいとするとすれば, 低質量天体は宇宙の質量の多くは担っていないことになる。

1.3 褐色矮星よりも軽い天体

さて, もっと暗い天体が見つければ, それはより軽い褐色矮星だと言えるのではないだろうか? この観点から, 大朝らはカメレオン座分子雲に対して, より感度の高い撮像観測を行なった[7]。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ある。観測は1996年にチリのセロトロロ天文台の1.5メートル望遠鏡を用いて行なった。限界等級はKバンドで16等を越え, 61天体を検出した。

今まで説明してきた方法と同じ手法で, 天体の近

赤外域の色から赤外超過を持つ19天体を若い天体と分類した。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、若い褐色矮星である可能性がある。さらにこの中には、質量が0.012太陽質量(12木星質量)以下と推定され、巨大惑星に迫る質量のものがあつた。

同様の種類の天体は、大質量星形成領域のS106という領域でも多数検出されている(大朝, 東京大学博士論文)。この領域は大質量星が生まれている領域で、惑星質量の天体は宇宙に普遍的に存在する可能性がある。実際に、大朝らの発見の後、イギリスのグループなどが同様の天体を検出している。このような天体は、褐色矮星と言うのだろうか? それとも惑星と呼ぶべきなのか?

そもそも褐色矮星と惑星の定義は何なのだろうか? 褐色矮星の定義は「水素燃焼を起こせない天体」というもので、これは0.08太陽質量という質量の上限値を決め、恒星との明確な区別はある。しかし、惑星との区別がない。言い換えると、惑星の定義とは何だろうか?ということになる。惑星の定義については以下のようなものが考えられよう。

- 恒星の周りを回る天体。しかし、この定義では、主星の周りを回る天体が、たとえ恒星でも当てはまってしまう。
- 中心に岩石の核がある。これは良い定義のように見えるが、観測的に証明するのは、木星ですら難しく、太陽系外の天体に対しては不可能であるように思える。

さらに「恒星の周りを回る自分では光らない天体で、円盤を通して形成されるもの」という定義もあるが、天体が円盤から形成されたものであるかを観測的に証明することは、少なくとも現時点では難しいだろう。

そこで最近提唱されているものは、形成時に重水素が燃えない、という定義である。この定義に従うと、0.013太陽質量よりも軽い天体が惑星で、それより重い天体は褐色矮星となる。この定義に従うとすると、カメレオン座分子雲やS106領域で見つかった軽い天

体は、「惑星」ということになってしまう。こうした天体をどう呼べばいいのか、いろいろと議論があり、現在ではplanetary mass objectまたはsub-brown dwarfという名前が定着しつつあるようだ。やはり「惑星」という名前をつけるには抵抗があるようである。しかし重要なのは名前ではなくて、その天体の性質であろう。特にその形成過程は、いかなる理論でも説明がついていない。今後は、より多くの星形成領域をサーベイし、planetary mass objectsの普遍性や質量関数の形を調べたり、分光観測から、天体の大気状態を推定することに加え、理論的に、こうした天体をどのように形成させるか、ということが大きなテーマとなろう。

1. 原始褐色矮星の観測

2.1 ステラーコロナグラフという観測手法

9月15日、私は太平洋上にいた。原始惑星候補天体の観測のため、ハワイにあるすばる望遠鏡で観測を行なうためだ。飛行機は、家族連れや若いカップルたちばかりだが、ほくは今年だけでも既に5回も渡航しており、周りの浮かれた気分とは全く無縁だ。

太陽系外惑星は、恒星のドップラーシフトを検知する方法で、1995年に発見されたが、その姿は驚くべきものであった。すなわち、その質量や軌道要素が、その検出方法に起因するバイアスが含まれるものの、太陽系のそれらとは全く異なっていたのである。従来の太陽系形成モデルでは、我々の太陽系をいかにうまく形成されるかに焦点が集まっており、見つかった系外惑星を形成させるには無理があつた。この系外惑星系の多様性は、その形成過程によるものではないか、との説明が近年なされている。従って、惑星の形成過程、すなわち原始惑星やその母体となる原始惑星系円盤を検出することは、惑星系の多様な姿を理解するうえで、欠くことのできない観測であろう。

しかし、原始惑星や原始惑星系円盤は、中心星に対して非常に暗く、また中心星のすぐ近くに存在する

ため、通常の観測手法では検出が難しい。地上から星を見ると、星はまたたいて見える。これは、星からの光が地球大気の揺らぎを受けているためであり、通常の観測では角分解能は1秒程度でしかない。これではたった5pc離れた恒星の周りに木星があったとしても、どうにか分離できるくらいである(実際には後述するように、恒星と惑星の明るさの差が大きく、検出は困難である)。そこで、角分解能の向上を図るいろいろな観測の工夫がなされている。例えば、大気の揺らぎよりも高速のシャッタースピードで撮像する、スペックルという方法は、望遠鏡の回折限界まで角分解能を高めることができる。口径8mのすばる望遠鏡でKバンドの観測を行なった場合0.065秒の角分解能を得ることになり、角分解能は10倍以上も向上する。しかしこの方法では、系外惑星のように明るい天体のすぐ近くにある暗い天体を検出することができない。例えば中心星から1秒離れた位置では、中心天体よりも約2桁暗い天体しか検出ができない。つまり「ダイナミックレンジ」が狭い観測手法なのだ。このことは、回折限界を得る他の方法、例えば月の掩蔽を利用する方法でも同じことがいえる。

そこで、私たちのグループはCIAOというステラコーナグラフを開発した。この装置は、補償光学で星像を改善した後、オカルティングマスクという目隠しで中心星を隠すことによって、中心星のごく近傍にある暗い天体を検出しようとする装置である。世界最高性能を誇るすばる望遠鏡に、この装置を搭載することによって、おうし座分子雲にある原始木星型惑星や原始惑星系円盤が検出できると期待される[8]。CIAOは2000年2月に単体でのファーストライトを、2001年1月に補償光学と組み合わせたファーストライトを終え、その基本的性能を確認し、現在では共同利用に供している。

2.2 GG Tau Aに附随する原始惑星系円盤

ホノルルで飛行機を乗り換えて、ハワイ島のヒロとい

う町に到着、そこから車で一時間半ほどで、標高2800メートルのハレポハクという宿泊施設に到着する。高山病予防のため、観測者は観測前日からここに宿泊する義務がある。今晚は、生活リズムをハワイ時間の夜型にするため、論文を執筆して朝まで過ごそう。

論文はCIAOで検出した、GG Tauに附随する原始惑星系円盤に関するものである[9]。GG Tauは、おうし座分子雲に附随するTタウ型星で、原始惑星系円盤からの電波の放射が強い天体である。この星は四重星で、二重星のそれぞれが二重星になっている。北側の連星(GG Tau A)は、質量がそれぞれ太陽の7割から8割で、その離角は0.25" (35AU)程度である。この天体の周囲には、リング状の原始惑星系円盤があることが、補償光学を用いた観測でわかっていた。中心星が連星なので、重力により円盤はドーナツ状になっている。この円盤はハッブル宇宙望遠鏡(HST)をはじめ、いくつかの観測がなされているが、その形状は、ぶつぶつしている、ギャップがある、腕が伸びている、など様々なことが言われている。また、円盤内の中空の部分に物質があるという報告もある。そこで、我々は2001年1月にCIAOを使ってこの天体をHバンドで観測した。補償光学を使って、星像を0.09"に改善し、直径0.8"のオカルティングマスクを使い中心の連星を隠した。GG Tau Aの観測の直後に、近くの普通の星をとり、この星のPSFを引くことで、中心の連星からの光の漏れ出しをできるだけ低く抑えるように処理した。図4はこうして得られたGG Tau AのHバンド画像である。視野は10.16"×9.79"で、これは1500AU程度に相当する。中心の黒い円形に見える部分が、オカルティングマスクで隠している領域である。マスクは1%程度の透過率を持たせているので、中心の連星が減光されて見えるのがわかる。

マスクの外側は白く表現されており、強い光があることを示す。これは中心の連星からの光の漏れ出しである。その外側に十字で白くなっている部分は、望遠鏡のスパイダーが作った回折パターンを引き残しであり、天体の実際の構造ではない。その外側の円環が、

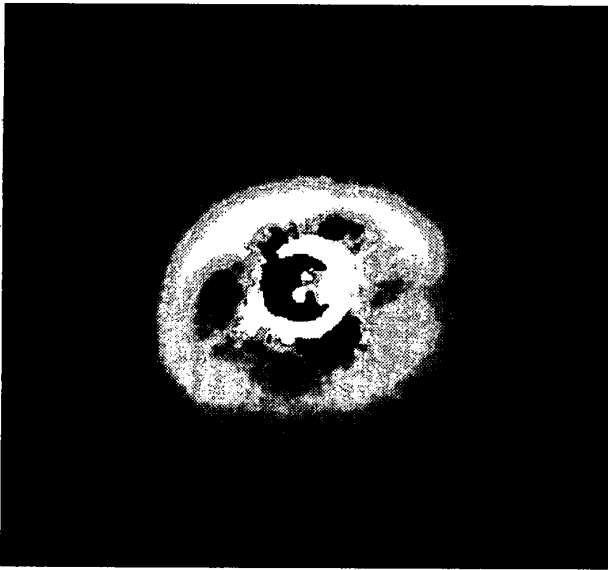


図4：GG Tau Aの近赤外コロナグラフ画像。中心の黒い部分がマスクで減光した部分。中心の二重星が見えている。その周りに円環状に原始惑星系円盤がはっきりと見てとれる。視野は10秒四方（約1500AU）。

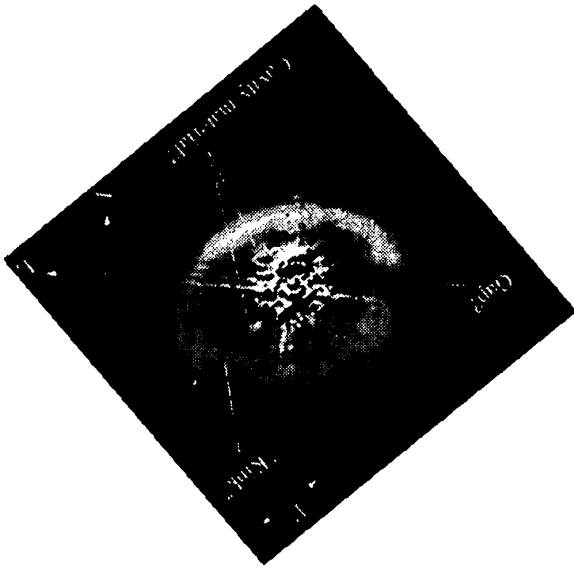


図5：ハッブル宇宙望遠鏡で撮影したGG Tau Aの近赤外画像。この画像とCIAOの画像を比べると、CIAOの画像のほうがS/N、角分解能ともに優れていることがわかる。

GG Tau Aに附随する原始惑星系円盤である。この円盤は内径が180AUで外径が270AU、北側が我々の方に近い状態で傾いている（傾斜角は37度）と考えられている。図4でも円盤は北側が明るく、北側が手前であることを意味している。また西側には、暗くなっている部分がありギャップが確認できた。電波で観測すると、ギャップの部分にも物質があることがわかり、このギャップは、内側にある物質によって中心星からの

光が遮られているのではないかと考えられる。円盤はのっぺりとした構造で、15AUのスケールで構造はなかった。また円盤の内側には腕構造や、他の物質を示す明確な証拠は得られなかった。

図5はHSTで得られたGG Tau Aの1ミクロンの画像である[10]。これとCIAOの画像を比べると、CIAOの画像のほうが角分解能、S/Nともに上回っていることがわかる。つまり、原始惑星系円盤を観測する能力は、CIAOはHSTをも上回っていることになる。

オカルティングマスクが透過率を持っていることから、中心の連星の位置が明確にわかる。過去の約10年間の観測と比較することによって、連星が動いている様子が明らかとなった。見かけ上の運動が10年間で15度程度なので、確定的な軌道要素を決めることはできないが、GG Tau A連星の軌道長半径が40AU程度で、確率的に離心率が高くない($e < 0.5$)ことが推定できる。半径が45AU程度の円軌道も、観測を矛盾なく説明できる。今後数年の同様の精度を持った観測で、軌道要素がより正確に推定できるだろう。離心率が高い連星の周りでは原始惑星系円盤に密度のむらができることが予測されているが（今枝，東京大学博士論文）、GG Tau Aの場合、離心率の低い連星が中心にあり、その周りの原始惑星系円盤には大きな密度のむらがないことから理論と矛盾しないことがわかる。このようにCIAOを使うと原始惑星系円盤の構造が詳しく観測できる。

2.3 CIAOによるその他の天体の観測

その他にもCIAOを使い原始惑星や原始惑星系円盤の観測を行なっている。図6は、L1457という高銀緯分子雲に附随するTタウ型星のHバンド画像である。マスクで減光している星は、離角が0.41"の連星であることがわかったが、そこから3.7"離れたところに、原始惑星系円盤を丁度真横から見た天体がある。このような、いわゆるエッジオン天体は、例えばHK Tauなどでも見られる構造である。

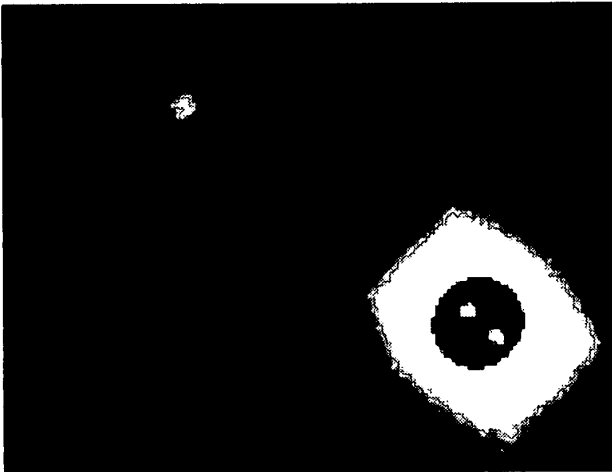


図6：L1457分子雲に附随するLkH α 263領域の近赤外画像。黒くなっている部分がマスクで明るい光を減光した部分で、中心星が連星であることが判明した。その左上に二本の筋が平行に走っている天体があり、これは原始惑星系円盤を真横から見たものだと考えられる。視野は7秒×5.4秒。

CIAOの高い性能を生かして、今年の秋から、おうし座分子雲に附随するTタウリ型星の周りの原始惑星と原始惑星系円盤の探査が、すばる望遠鏡の観測所プロジェクトとしてスタートする。観測が順調に行けば、この秋冬シーズンで30天体程度の観測ができ、原始惑星や原始惑星系円盤の検出ができることだろう。

参考文献

- [1] Hayashi, C., Nakano, T. 1963 Progr. Theor. Phys., 30, 460
- [2] 舞原, 長田, 1992, 天文月報, 85, 50
- [3] Nakajima, T. et al. 1995, Nature, 378, 463
- [4] Oppenheimer, B. R. et al. 1995, Science 270, 1478
- [5] Itoh, Y., Tamura, M., Gatley, I. 1996, ApJ, 465, L129
- [6] Itoh, Y., Tamura, M., Tokunaga, A. T. 2002, PASJ, 54, 561
- [7] Oasa, Y., Tamura, M., Sugitani, K. 1999, ApJ, 526, 336
- [8] Itoh, Y. et al. 1998, PASJ, 50, 55
- [9] Itoh, Y. et al. 2002, PASJ, December issue
- [10] Silber, J. et al. 2000, ApJ, 536, L89