

天体観測で探る太陽系外惑星と 星惑星形成領域

伊藤洋一¹, 大朝由美子¹, 立原研悟¹

(要旨) この十年ほどの観測的研究によって、太陽以外の恒星を回る惑星「太陽系外惑星」が宇宙に数多く存在することがわかってきた。しかしそれらの中には、太陽系の惑星とは似ても似つかない姿をみせるものもあり、惑星系は個々に個性を持つ。そこで我々は、太陽系のように既にできあがっている「太陽系外惑星」、生まれたての太陽系外惑星である「原始惑星」、惑星系の母体である「原始惑星系円盤」、そしてそれらの親星となる「若い星」を観測的に研究することで、惑星系の起源と進化を解明しようとしている。

1. 研究目的

1-1. We are not alone.

もしかしたら、この言葉はもはや使い古された言葉なのかもしれない。「我々の太陽系以外にも惑星があるのか?」という問いは、エピクロスの前から人類の大きな疑問のひとつであったが[1]、1995年に太陽以外の恒星を回る惑星「太陽系外惑星」が発見され、“yes”という答えが出された[2]。これまでに240個以上の太陽系外惑星が検出されており、惑星は宇宙に普遍的に存在することがわかってきた。現在のところ、恒星の5%から10%には惑星が付随すると考えられている[3]。その一方で、太陽系外惑星は太陽系の惑星とは大きく異なる姿をしていることもわかってきた。たとえば「灼熱木星(hot Jupiter)」という種類の惑星は、木星質量程度の巨大惑星が太陽系の水星よりも内側の軌道を公転している。また、彗星のように非常に大きな離心率を持った軌道を回る惑星も多い。このように、惑星は宇宙に普遍的に存在するが、その姿は多様である。

1-2. 我々の目標

このような惑星はどのように形成されるのであろうか。そして、何が惑星系の多様性を生むのだろうか?そこで筆者らを中心とする研究グループでは、太陽系のように既にできあがっている「太陽系外惑星」、生まれたての太陽系外惑星である「原始惑星」、惑星系の母体である「原始惑星系円盤」、そして生まれたての親星となる「若い星」を観測的に研究することで、惑星系の起源と進化を解明しようとしている。

1-3. 我々の戦略

多様な惑星系を解明するためには多様な観測手法を用いなければならない。それは観測には必ず「バイアス」が存在するからである。例えば、最も多くの系外惑星を検出している「ドップラーシフト法」は恒星の近傍を回る巨大惑星には敏感であるが、軌道長半径の大きな惑星の検出は難しい。また、軌道傾斜角の不定性により惑星の質量は下限値しか求められない。「トランジット法」という検出方法もやはり、軌道長半径の小さな巨大惑星の検出にバイアスがかかるが、軌道傾斜角が一意に求まるので、ドップラーシフト法と組み合わせることによって惑星の質量を決定できる。よ

1. 神戸大学理学研究科

り公転周期の長い惑星や原始惑星系円盤に対しては、直接撮像やその応用である「コロナグラフ」を用いることが有効だと考える。また、誕生したばかりの天体に対しては可視光に比べ星間吸収の少ない近赤外線や電波での観測が適している。我々はこのような数多くの観測手法を用いて系外惑星系と星形成領域を探索している。この観測手法の多様性が我々の研究グループのオリジナリティーである。

2. 太陽系外惑星

2.1 間接的検出法 – その1. ドップラーシフト観測 –

太陽系外惑星の画像を撮る、すなわち直接的に検出することは非常に難しい。そこで、中心星(恒星)を観測することによって太陽系外惑星の存在を求める「間接的検出法」が現在の主流の観測方法である。

最も多くの系外惑星を検出している方法はドップラーシフト法と呼ばれるものである(例えば[2])。惑星は恒星の周りを公転するが、「恒星+惑星」の共通重心はわずかではあるが恒星の中心とは異なるために、主星も共通重心の周りを公転する。この公転の視線速度方向の変化を検出する方法がドップラーシフト法である。太陽系に太陽と木星しかない場合を考えてみよう。両者の共通重心はちょうど太陽表面に存在する。太陽は、この共通重心の周りを木星の公転周期と同じ周期、すなわち12年で回る。簡単な計算から太陽の公転速度は 13m s^{-1} と求まる。光速は 30万km s^{-1} なのでドップラーシフト量($\Delta\lambda/\lambda$)は 4×10^{-8} と非常に小さい。例えば波長5000オングストロームでは、ドップラーシフト量は0.0002オングストロームにしかない。この微量なドップラーシフトの変化を検出するためには、高分散の分光器と波長の基準を与えるトリウムアルゴンランプやヨードセルを使用する[4]。精密なドップラーシフト量の測定方法は、まず太陽の高分散分光観測のために開発され、恒星や太陽系外惑星の分野に応用されてきた。

現在までに約240個の太陽系外惑星が検出されているが、その大半がこの方法によるものである。ところで、現在知られている太陽系外惑星は、そのほとんどが単独星を公転しているものである。しかしながら、太陽近傍の恒星は半数以上が連星として存在することが過去の研究から知られている[5]。惑星は単独星の周りにしか形成されないのだろうか?我々はそうではないと考えている。つまり、これはそもそも単独星の周りばかり探索を行っているからであろう。連星系に存在する惑星を探索するためには2つの方法がある。一つは連星系を探索し、系外惑星を発見すること、もう一つは太陽系外惑星が発見されている恒星の周りに伴星を探索することである。連星系を対象にしたドップラーシフト探索は、世界中で数グループが活動を開始している。

我々の研究グループの一員である豊田(神戸大学博士三年)らは、これらのグループに先駆けて、約5年前からドップラーシフト法を用いた連星系に付随する太陽系外惑星の探索を行っている。彼女らは、国立天文台岡山観測所の188cm望遠鏡を用いて100天体あまりの連星を高分散分光で観測し、視線速度の変化を調査している。この観測は、ひと月に一度程度の観測を繰り返さず必要があり、非常に地道なものであるが、ようやく太陽系外惑星の候補天体を得つつある。なお、連星系に付随する惑星探索のもう一つの方法である伴星探索は、ドイツのグループが伴星を発見し始め、注目を集めている[6]。我々もこのグループの成功を参考にし、西はりま天文台の2m望遠鏡「なゆた」に取り付けるコロナグラフを開発し、伴星候補天体を2天体検出した。今後は、この2天体のスペクトルを取得し、天体が本当に伴星なのかを確かめたい。

2.2 間接的検出法 – その2. トランジット観測 –

太陽系外惑星を検出するには別の方法もある。惑星の軌道面が我々の視線方向と一致する場合には、惑星が恒星の前面を横切る。この時、恒星からの光は一部

が惑星によって遮られ、恒星の明るさが一時的に減少する。この減光を捕らえようとする方法をトランジット法という[7]。しかしながら、この減光は非常に小さい。例えば太陽系を外から見た場合を考えよう。太陽系の大きさに比べ非常に遠い位置から太陽系を観察した場合には、減光の割合は恒星と惑星の投影面積の比で表すことができる。太陽系で最も大きな惑星である木星でも、その半径は太陽の半径の1/10でしかない。従って、木星によって生じる太陽の減光は、たかだか1%にすぎない。このために高精度の測光観測が必要となる。

我々の研究グループの石隈(神戸大学博士一年)らは、神戸大学のキャンパス内に30cmの望遠鏡を設置し、トランジット探査観測を行っている。トランジット探査は単純な測光観測のため、特殊な観測装置は必要でない。また明るい天体を対象とする場合には、大型の望遠鏡も必須ではない。従って、世界各国の研究機関や大学でトランジット探査は行われている。石隈らは、恒星近傍を回る巨大惑星の発見に特化したプログラム「N2Kコンソーシアム」[8]に参加し、すばる望遠鏡などのドップラーシフト観測から惑星が存在する可能性が高いと認識された天体に対して、トランジット観測を行っている。この点が他の観測に対する大きなアドバンテージである。現時点で10天体以上の天体を観測したが、未知の太陽系外惑星によるトランジット現象は、まだ検出できていない。しかしながら、神戸の明るい夜空でもトランジット現象を検出するために必要な1%の測光精度を出せることがわかり、今後を期待したい。

2.3 直接検出

太陽系外惑星の直接検出は、いまだになされていないが、世界中で多くのグループが熾烈な競争を繰り広げている。しかし、惑星は非常に暗く、明るい恒星のすぐ近くに存在するので、通常の撮像観測では検出が難しい。例えば可視光や近赤外線観測した場合、木星の明るさは太陽の20億分の一でしかない。しかも、

こうした非常に暗い惑星が中心星のすぐ近くに存在する。太陽系を10pc離れた所から観測した場合、太陽と木星の離角は最大で0.5秒角でしかない。こうしたことから、太陽系外惑星を通常の撮像方法で直接検出することは非常に難しいことだと考えられている。

伊藤らは近傍の若い恒星であるベガとエリダヌス座 ϵ 星を観測した[9]。これらの星は年齢が若く、ドーナツ状のデブリ円盤が付随していることがサブミリ波の観測などから明らかになっており、若い惑星が存在すると予言されている。惑星も、まだ若く収縮段階にある時には、わずかに温度が高く光度も大きいと考えられている。伊藤らはこの二つの星を、国立天文台の「すばる望遠鏡」のステラーコロナグラフ装置を用いて観測した。ステラーコロナグラフとは、中心星をオカルティングマスクと呼ばれる目隠しで隠すことにより、中心星の明るさを減じ、周囲にある惑星を検出しようとするものである。現在では、太陽系外惑星の直接検出のためにコロナグラフが有効であることが広く認識され始めており、瞳形状などにさまざまな工夫がなされたコロナグラフが開発されだしている。すばるのステラーコロナグラフは、オカルティングマスクと瞳の形状を最適化した最も初期の世代のコロナグラフであり、装置としてのオリジナリティーは非常に高い。伊藤らは、確実に惑星と言える天体を検出することはできなかったが、世界中の観測で最も深い感度を達成した。

3. 原始惑星と惑星質量天体

3.1 原始惑星

恒星も惑星も、その形成初期には重力収縮の段階にあり、非常に明るいと考えられている。ある進化モデルに基づくと、惑星と恒星の明るさの比は、年齢が100万年から1億年の時に最も大きくなると予想されている[10]。しかしながら現時点では確実な原始惑星は検出されていない。我々は「すばる望遠鏡」などを使い、

原始惑星の探査も行っている。伊藤らは、近傍の星形成領域である「おうし座分子雲」に付随する、古典的Tタウリ型星「おうし座DH星」に伴星を発見した(図1)[11]。主星からの離角は $2.34''$ で330天文単位に相当する。その近赤外域の明るさやスペクトルから、伴星の質量は木星の40倍程度であることがわかった。従ってこの天体は原始褐色矮星(3.2章参照)として分類されるものである。なお、使用する進化トラックによっては質量は5木星質量と求まり、この天体は原始惑星である可能性も残されている。

この発見には2つの重要な意義がある。一つは、伴星の形成過程に対して新たな問題を提起したことである。伴星の質量は主星の1/10から1/100と見積もられ、しかも中心星から非常に遠いところに存在する。このような天体を形成することは非常に難しいことだと考えられている。すなわち、離角の大きな連星は母体となる分子雲が分裂して形成されると一般的には考えられている。しかし、こうしてできる連星は等しい質量を持ったものほど誕生しやすいことが、理論的に明らかになっている[12]。おうし座DH星のように質量比が極端に大きな系は、伴星が原始惑星系円盤の中で誕生したと考えたほうが自然である。ところが、そのようにして誕生した伴星は、これほど大きな離角を持つことはないであろう。この天体をさらに様々な手法で観測するとともに、似たような形態を示す系を発見することが、連星の形成過程の解明につながるものと思われる。

もう一つの意義は、観測の有効性を証明できたことである。おうし座DH星の伴星は、図1を見ても明らかのように、比較的明るく簡単に発見することができた。従って、より暗いと予想される、どの進化トラックを使っても原始惑星として認識されるような天体も十分に検出することが可能だろう。しかしながら、我々はコロナグラフを用いてTタウリ型星を中心として70個以上の前主系列星を探索したが、確実な原始惑星の発見には至っていない。中心星がTタウリ型星の進化段階では、まだ原始惑星は形成されていないのかもしれ

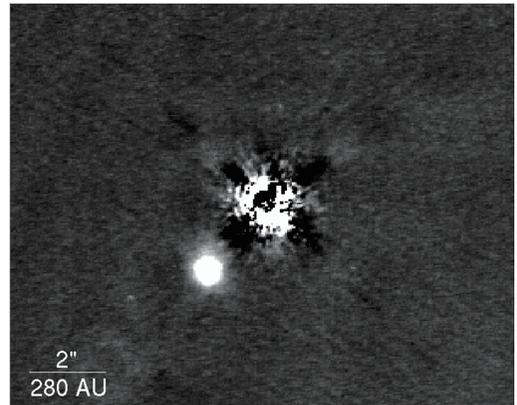


図1: おうし座DH星のステラーコロナグラフ画像。観測波長は1.6ミクロン(近赤外線)。中心に古典的Tタウリ型星のDH星(中心星)がある。この星の年齢は100万年程度と見積もられている。コロナグラフによって、中心星からの光は大幅に抑えられている。左下(南東)に見える白い点が伴星(おうし座DH星B)で、原始褐色矮星と考えられる。

ない。

3.2 単独惑星質量天体

恒星は水素の核融合反応によって輝くが、その質量が太陽の約0.08倍(木星の80倍)未満である場合には、中心温度が十分高くないために内部の水素ガスを安定に燃焼することができない。このような天体が「褐色矮星」である[13]。一方、褐色矮星は水素の同位体である重水素を燃焼しているが、惑星は重水素さえも核融合を起こせない、核融合反応の有無という定義に従うと、太陽の約0.013倍(木星の約13倍)が褐色矮星と惑星の境界質量となる。非常に暗い褐色矮星や惑星も、形成初期段階には特に赤外線で明るく輝く(3.1章参照)。

この点に着目し、大朝らは近傍の星形成領域の探査観測を行い、巨大惑星に相当する質量を持つが恒星を周回せず単独で存在する天体(単独惑星質量天体)を、1999年に世界で初めて発見した[14]。太陽のような恒星の周りを回る天体を惑星と呼ぶのに対し、この天体には周回する恒星がないため、惑星という言葉は適当でない。

こうした天体の名前は世界的にまだ定まっていなく、



図2: はくちょう座分子雲S106領域の近赤外画像。中心付近の白い部分に、年齢約10万年、質量が太陽の20倍程度の星「IRS4」がある。この領域では、単独惑星質量天体を含む多数の天体が生まれていることがわかった。

「単独惑星質量天体」「準褐色矮星」などという。その後、大朝らがすばる望遠鏡などを用いて行なった赤外線測光・分光観測から、様々な環境をもつ星形成領域(5章参照)で若い惑星質量天体が100個以上見つかり、その誕生する割合は生まれてくる領域の環境によって異なることがわかってきた(図2)[15]。

これら様々な観測から数々の単独惑星質量天体の存在が明らかになる一方、恒星の周りの伴星として存在する惑星とどのように異なるのか、その正体は何なのか、そして惑星のように原始惑星系円盤から誕生するのか、恒星のように分子雲の収縮から生まれるのか、など、未解明の部分が多い。今後の詳細な観測により惑星質量天体のなぞを解き明かしていきたい。

4. 原始惑星系円盤

惑星は原始惑星系円盤から誕生すると考えられており、この円盤の多様性が太陽系外惑星の多様性を生み出しているのかもしれない。我々はステラコーナグラフを用いて原始惑星の探索も行っている。

原始惑星系円盤も、太陽系外惑星の場合と同じく、

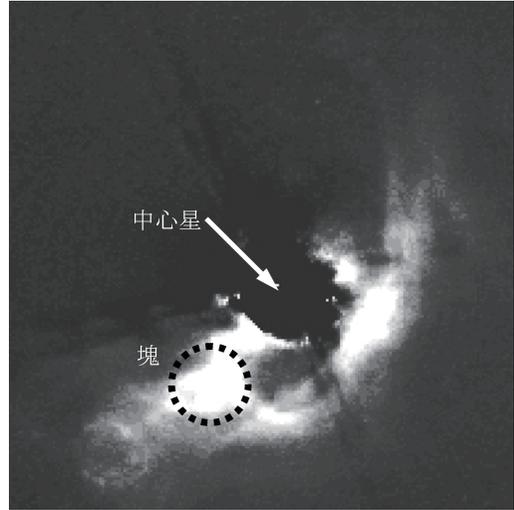


図3: ぎょしゃ座UY星を取り巻く原始惑星系円盤。中心の黒い円状の部分にUY星があり、コロナグラフに隠されている。円盤は南西側が明るく、北東側はほとんど見えない。これは円盤が傾いていて、南西側が前方散乱をしているからだと考えられる。円盤の南東部分にある明るい部分が「塊」で、ここから惑星が誕生する可能性もある。

単独星に対する探査が主であった。これは、理論計算が単独星に対するものがほとんどであったことや、その計算から連星の周囲には円盤が存在できない領域があると予測されたこと、さらに観測が技術上難しいことが主な理由である。しかし近年の研究から、連星系にはそれぞれの恒星に付随する2個の原始惑星系円盤とともに、連星の両方を取り囲むように存在する「周連星系円盤」があることが、理論的に予想された[16]。すなわち、単独星には1個しかない星周円盤が連星系には3個あると予測でき、その形状は複雑であることが推測できる。

日置らは「ぎょしゃ座UY星」の周りに円盤を検出した(図3)[17]。この星は年齢が100万年程度の連星であり、その重力により円盤はドーナツ状に(中空)になっている。それまでに知られていた連星回りの原始惑星系円盤は、例えば「おうし座GG星」のように比較的スムーズな構造を持っているが[18]、ぎょしゃ座UY星の円盤は複雑な構造をしている。特に、南東の最も明るい部分は塊状になっており、その質量は10地

球質量以上であることがわかった。この塊が重力収縮を起こしている可能性もあり、我々は「惑星の卵」を見ているのかもしれない。

このことは、連星系に付随する系外惑星について重要な知見をもたらす。すなわち、まだ発見されていない「両方の連星を回る惑星」が形成される可能性を、この円盤の発見から言うことができる。とはいえ、近赤外線観測では円盤の光学的厚さが非常に大きいため、そのごく表面のみしか観測できていないと考えられる。より光学的に薄い、電波やサブミリ波による高空間分解能観測を行い、今回発見した「塊」の質量を求めることによって、ここから惑星が生まれる可能性があるのか、議論していきたい。

5. 若い星

星がどのように誕生するかは、惑星形成を理解する上でも非常に重要である。近年の天文学の発展により、太陽程度の質量を持った星の形成については、おおよその描像ができつつある。一方で、低質量星や褐色矮星等の形成過程については不明瞭な部分も多い。我々は、質量が軽い天体の形成過程に着目した観測的研究を行っている[遊星人16巻第2号(2007年6月)も参照のこと]。

5.1 原始星

星形成の初期条件にどの程度の多様性があるかは、変化に富む星惑星系の起源を知る上でも意義深い。しかし「class 0天体」と呼ばれるごく若い原始星の観測は不十分で、特に近傍の星形成領域では、わずかに10個程度しか観測されていない。立原らは近傍のおおかみ座分子雲で3つの高密度分子雲コアと、その1つに埋もれるclass 0天体を新たに発見した(図4)[19]。多波長観測データによるエネルギースペクトル分布から、この天体は非常に低温度低光度で、ごく若い段階にあることが分かった。

原始惑星系円盤の形成や成長に関して、角運動量の

輸送は重要な過程である。一般に形成初期の原始星に特有な現象として、双極方向に高速の分子ガスが放出され、角運動量を外部に捨てることで質量降着が促進されることが知られている(分子流天体という)。立原ら、宮本(神戸大学修士二年)らは、チリ・アタカマ砂漠にあるASTE望遠鏡でのサブミリ波観測により、それぞれおおかみ座、ハエ座分子雲において分子流天体を発見した。このことは、活発な質量降着を起こしている若い原始星である直接的証拠であるといえる。特にハエ座領域では星形成を示す初めての結果であり、ハエ座分子雲が進化の初期段階にあることがわかった。この分子雲は棒状の特徴的な形をしている。フィラメント構造からどのように星が形成されるかという理論シミュレーションは数多くなされておられ、この領域は観測結果と理論的研究を直接対比できる貴重な場所といえよう。

5.2 前主系列星

原始星段階を過ぎた若い星は、光の波長でも輝き始める。若くて軽い星は、まだ分子雲に埋もれていることや、原始惑星系円盤などの星周構造を伴うこと、比較的低温であることなどから、とりわけ近赤外波長域での観測が有効な手段となる。そこで我々は近赤外撮像観測でも、多種多様な星形成の現場を探っている。

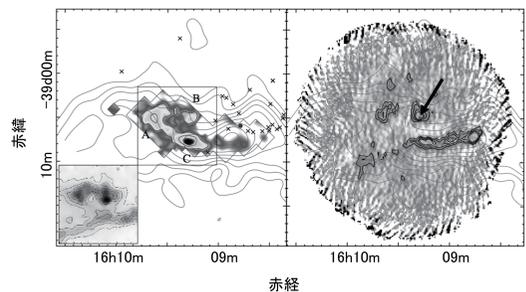


図4: おおかみ座, Lupus 3分子雲の分子ガスとダストの分布図。左: 3つの高密度分子雲コア(グレー)がフィラメント状に延びた分子雲(コントア)に埋もれている。四角は左下に示した減光マップの領域に対応する。Xマークは前主系列星の分布。右: ダストの連続波放射で観測した同じ領域。3つのコアに対応したダストの塊と、それに埋もれるclass 0天体を点源として検出した(矢印)。

なお、前主系列星に関しては非常に数多くの観測的研究が行われているので、詳細については他の記事を参照のこと(例えば[20], [21]).

松柳らは、W5HII領域に付随するBRC14において、電離ガス領域から分子雲に向かって低質量星の形成が連鎖的に行われている様子を、近赤外線測光観測で明らかにした(図5) [22]. すなわち、HII領域側から分子雲内部に向かって、背景星の吸収量として観測される分子雲の柱密度が高くなること、若い星(Young Stellar objects, YSO)の個数密度が高くなること、およびYSOの赤外超過量が大きくなることを示した。大質量星の誕生により周囲に残存する分子ガスが圧縮され次世代の星が形成されることは、理論的にも30年ほど前から言われ続けていることである[23]. また観測的にも、大規模な連鎖的星形成はオリオン分子雲などで確認されている。松柳らの研究は、ごく小さな領域の中でも星が年代順に並んで形成されていることを、非常に明確に示した。

近年の隕石中の同位体比の研究から、太陽もまた、このような大質量星形成領域の中で形成されたとの説が有力になりつつある。従って、今回発見した低質量YSOの進化過程を探ることは、太陽の進化を知る上でも重要な観点となるかもしれない。また、こうしたYSOに付随する原始惑星系円盤や原始惑星を検出できれば、我々の太陽系がどのようにして生まれてきたのか、理解をする助けになると考えられる。

大朝らは反射星雲を伴う中質量星が誕生し、双極分子流やジェットなどの活発な星形成活動が見られるペルセウス座分子雲NGC1333において、多波長測光・分光観測から、原始惑星系円盤などの星周構造を伴うYSOを多数同定した。そして、その半数以上が若い褐色矮星や単独惑星質量天体(3.2章参照)であり、低質量YSO同様に超低質量天体が盛んに形成されていること、YSOの質量頻度分布が軽い天体ほど増加すること、電波観測結果との比較から分子雲コアの質量関数と似ていることを明らかにした[24]. これは、褐色矮星や惑星質量天体などの超低質量天体の形成に質量

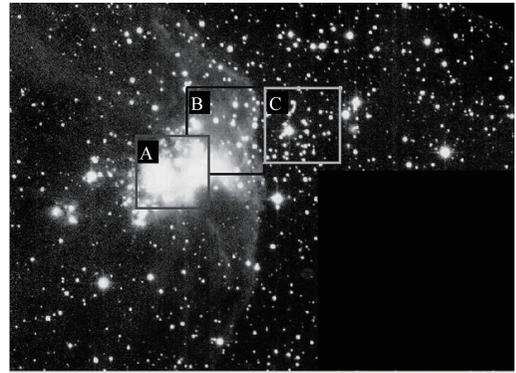


図5: W5 HII領域の一部, BRC14の近赤外画像, 図の右側(西)が電離ガス領域で、図の左側にある分子雲を圧縮している。その境界面が図の中央にあり、C,B,Aの順に星が誕生している(Aの領域が最も若い)ことがわかった。

下限値がなく、恒星と同様な形成過程を経る可能性があることを示唆する。

6. まとめと今後の展望

We are not alone. 我々は多数の共同研究者とともに研究を行ってきた。研究対象は、太陽系内の小惑星から、最も遠いものでは銀河系内の大質量星形成領域まで多岐にわたる。また、将来の太陽系外地球型惑星の探査のための基礎的な研究も進めつつある。この稿のまとめとして、今までに行ってきた研究の結果や現状、そして将来の展望などを記す。

- A. 連星系に付随する太陽系外惑星について、約5年に渡りドップラーシフト探査を継続している。太陽系外惑星の確実な証拠はまだ得られていないが、ドップラーシフト量が周期的に変動し、惑星が付随する可能性のある天体があることがわかった。今後は、さらに長期間の観測を継続し、ドップラーシフトの変動の周期性を確かなものにするとともに、変動が恒星本体の活動、すなわち脈動や恒星表面にある巨大黒点などの模様によるものではないことを確かめる観測を行うことが重要である。
- B. すばる望遠鏡などを使ったドップラーシフト法による系外惑星探査「N2K」によって惑星が存在す

る可能性が高いと判断された天体に対して、トランジット法によるフォローアップ観測を行っている。神戸大学のキャンパス内に小型望遠鏡を設置し、高精度の測光観測から太陽系外惑星の検出を目指している。今のところ新たな太陽系外惑星の検出には至っていないが、系外惑星を検出するために十分な精度を達成できることがわかった。この観測は継続性が最も重要だが、問題は晴天率である。神戸は比較的穏やかな気候に恵まれているが、それでも空が雲に覆われ観測できない日も多い。そこで、観測システムを全自動化し、遠隔地に望遠鏡を設置することを今後は考えたい。ガンマ線バーストの研究グループは夜空の暗い場所に完全自動制御の小型望遠鏡を設置しており、これを参考に観測システムを複数個所に構築する準備を進めつつある。

- C. ステラーコロナグラフを用いて原始褐色矮星と原始惑星系円盤を検出した。今後は原始惑星の検出を目標とする。コア集積モデルによると、中心星の年齢が1000万年から1億年の時に原始惑星が形成されると考えられている。従って、この年代の前主系列星をターゲットとする必要があるだろう。しかしながら1000万年程度の年齢と考えられている弱輝線Tタウリ型星や、より年をとったポストTタウリ型星は恒星の活動が弱く、スペクトル中に顕著な指標もないことから、数多くは検出されていない。原始惑星の検出のためには、遠回りにも思えるがポストTタウリ型星の探査も重要だと考える。
- D. すばる望遠鏡など国内外の望遠鏡による赤外測光・分光観測から、多数の若い低質量星や褐色矮星、惑星質量天体を発見した。これらYSOの頻度分布・質量分布は、生まれてくる環境によって異なる可能性があることがわかってきた。また、単独惑星質量天体を含む系外惑星系の多様な姿は、形成時の物理状態の非一様性を反映すると考えられる。新しい惑星形成の理論構築と同時に、生まれ

た直後の単独惑星質量天体や系外惑星を探索していかねばならない。

- E. 星惑星系の母体である分子雲や、それに深く埋もれている生まれた直後の天体「原始星」を観測してきた。今後数年のうちにALMA望遠鏡がチリで運用を始める。従って、南天の分子雲サーベイや原始星探査がますます重要になっていくだろう。

私たちのグループの研究は、国立天文台、西はりま天文台、ぐんま天文台をはじめ、多くの施設を利用して行っているものである。この場を借りて深く感謝する。今後も一層のご協力を賜りたい。

参考文献

- [1] エピクロス、「教説と手紙」、1959, 岩波文庫
- [2] Mayor, M., Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- [3] Butler, R. P. et al. 2006, *Astrophys. J.*, 646, 505
- [4] Kambe, E. et al. 2002, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 54, 865
- [5] Duquennoy, A. Mayor, M. 1991, *Astron. & Astrophys.*, 248, 485
- [6] Mugrauer, M. et al. 2005, *Astron. & Astrophys.*, 440, 1051
- [7] Charbooneau, D. et al. 2000, *Astrophys. J.*, 529, L45
- [8] Fischer, D. A. et al. 2005, *Astrophys. J.*, 620, 481
- [9] Itoh, Y., Oasa, Y., Fukagawa, M. 2006 *Astrophys. J.*, 652, 1729
- [10] Baraffe, I. et al. 2003, *Astron. & Astrophys.*, 402, 701
- [11] Itoh, Y. et al. 2005, *Astrophys. J.*, 620, 984
- [12] Bate, M. R. 2000, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 314, 33
- [13] Hayashi, C. 1981, *Prog. Theoretical Phys.*, 70, 35

- [14] Oasa, Y., Tamura, M., Sugitani, K. 1999,
Astrophys. J., 526, 336
- [15] Oasa, Y. et al. 2006, Astron. J., 131, 1608
- [16] Artymowicz, P. et al. 1991, Astrophys. J., 370,
L35
- [17] Hioki, T. et al. 2007, Astron. J., 134, 880
- [18] Itoh, Y. et al. 2002, Publ. Astron. Soc. Japan,
54, 963
- [19] Tachihara, K. et al. 2007, Astrophys. J., 659,
1382
- [20] 伊藤洋一, 2002, 遊星人, 11, 218
- [21] 高見道弘, 2005, 天文月報, 98, 799
- [22] Matsuyanagi, I. et al. 2006, Publ. Astron. Soc.
Japan, 58, L29
- [23] Elmegreen, B. G., Lada, C. 1977, Astrophys. J.,
214, 725
- [24] Oasa, Y. 2003, Proc. of I. A. U. Symposium,
211, 91