

# 太陽系外惑星科学の大展開： 間接から直接へ、 木星から地球へ



田村



林



白田

田村 元秀<sup>1</sup>, 林 正彦<sup>2</sup>, 白田 知史<sup>3</sup>

〈自然科学研究機構 国立天文台 181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

<sup>1</sup> e-mail: motohide.tamura@nao.ac.jp

<sup>2</sup> e-mail: masa@naoj.org

<sup>3</sup> e-mail: usuda@naoj.org

1995年の発見以来、系外惑星は人類に新しい宇宙観をもたらしている。太陽系内の8個の惑星に対し、すでに300個を超える多様な系外惑星が発見されている今、従来の枠を超えた新機軸により、系外惑星科学を展開することが求められている。10周年を迎えるすばる望遠鏡にとっても、系外惑星と、惑星系形成の場である原始惑星系円盤は、最も重要な観測対象である。巨大望遠鏡と先進的観測装置で可能になった高コントラスト赤外線観測によって、直接撮像によるアプローチが進んでいる。その結果、惑星質量に迫る伴星天体や新しいタイプの円盤の検出に成功し、円盤の形態の多様性が明らかになった。次期補償光学や新たな高コントラスト赤外線観測装置を用いた戦略的観測により太陽系に似た系外惑星を直接観測することを目指す。さらに、赤外線ドップラー法によりハビタブル地球型惑星の検出にチャレンジし、分光観測により木星型惑星のキャラクタリゼーションを進め、今後もすばる望遠鏡はこの分野を切り拓いていくと期待される。

## 1. はじめに

惑星は一般の人々にも馴染み深い天体である。曜日の名前も惑星名にちなんでおり、最近では、冥王星が惑星の仲間から外れるというニュースが大きな社会的反響をひき起こしたことも記憶に新しい。惑星はわが太陽系の中でこそ8個しかないが、太陽系の外においてすでに300個を超える数の惑星が見つかっている。これらは系外惑星と呼ばれ、1995年以来、続々と発見されてきた。この検出は、2章で述べるように、ほとんどが惑星の存在が主星に及ぼす影響を間接的にとらえる手法(間接法)によるもので、惑星を直接に画像にとらえたもの(直接法)は数少ない。

系外惑星を探す試みは決して新しくなく、20世紀なかごろには、2番目に太陽に近い恒星であるBarnard星に木星クラスの惑星が存在すると報告された<sup>1)</sup>が、当時の観測技術は全く精度が足りず、今から見ると惑星を検出できるレベルではなかった。1980年代に入って、惑星検出のための新たな観測技術は著しく向上したが、口径3.6メートル望遠鏡(CFHT)を12年間も用いた観測によっても系外惑星は見つからず<sup>2)</sup>、その検出には否定的な天文学者も多かった。

その風向きを一挙に変えたのが、1995年のMayorとQuelozのNature誌への論文だった<sup>3)</sup>。それは1/2木星質量\*<sup>1</sup>の惑星が、太陽に似た恒星51 Pegの周りをわずか4日の周期で公転してい

\*<sup>1</sup> 木星の質量を1とすると、太陽質量は約1,000、地球質量は約1/300となる。太陽質量は、 $2 \times 10^{30}$  kg。

るという驚くべき報告であった。木星は太陽を12年かけて公転するので、そのあまりの差異に、恒星大気論の大家により、惑星ではなく恒星振動の一種であるという異議が唱えられたりした<sup>4)</sup>。しかし、過去の例と異なり、独立な追観測でも確認され、恒星を周回する系外惑星の最初の発見となった。

## 2. 系外惑星を検出するためのさまざまな方法

惑星は恒星に比べると軽くて暗いため、遠くから発見するのは難しい。例えば、太陽系を10 pcの距離から眺めると、太陽と地球の角距離は0.1秒角（東京から100 km離れた富士山頂のピンポン玉を見込む角度）、地球の明るさは太陽の100億分の1暗い。惑星と恒星とを区別して直接撮像することは、現在の技術でも容易ではない。

ところが、惑星の公転運動によって、わずかながら恒星自体がふらつく。この効果のうち、視線に沿う速度を恒星からの光のドップラー効果を利用して測定するのが「ドップラー法」であり、上記の最初の発見もこの手法である。太陽系の木星および地球の公転による太陽の速度変動はそれぞれ13 m/s および0.1 m/s で、巨大惑星検出でさえも数 m/s の精度が必要である。系外惑星の実に約8割以上がこの方法で発見されている。

同様に、恒星のふらつきのうち天球上の位置変動を精密位置測定するのが「アストロメトリー法」である。地上からの観測では大気揺らぎのため位置測定精度に限界があり、現在のところ、この手法で最初に惑星を発見した例はまだない。先に述べた初期の失敗はこのアストロメトリー法に基づくものであった。ただし、ハッブル宇宙望遠鏡を用いて、既知の惑星によるふらつきの確認に成功しており<sup>5)</sup>、今後のスペースアストロメトリー計画 (SIM) において、この手法は大きく進展するだろう。

最近、目覚ましい成果を上げているのが、惑星

が恒星の前面を通り過ぎることによる明るさの微小変化を検出する「トランジット法」である。木星および地球が太陽の前面を通過することによる太陽全体の明るさの変化はそれぞれ約1%および0.01%である。これまでに約50例が確認されている。スペース・トランジット衛星のコロー(2007年12月打ち上げ)やケプラー(2009年3月打ち上げ)により、今後、さらに大きな展開が期待される手法である。また、この手法を利用して、限られた例ではあるが、惑星大気の議論が可能になり、実際に水やメタンが検出されたこと<sup>6)</sup>は注目に値する。

ほかにも、重力レンズによる背景天体の増光現象において、惑星が存在する場合に特有な短時間のスパイク増光をとらえる「重力レンズ法」、惑星の反射光の微小な( $10^{-6}$ 程度)の偏光、あるいは、惑星の運動に伴う反射光の速度変化を検出する方法などもあるがここでは説明を割愛する。このうち、重力レンズは8個の系外惑星の検出例があるが、偏光法と反射法は確たる例はいまだない。

## 3. 系外惑星の一般的性質のまとめ

数千個の恒星の探査の結果、系外惑星の性質が解明されつつある。ここでは、ドップラー法による系外惑星の統計をまとめよう。まず、恒星が惑星をもつ確率については、太陽に似た恒星の周りで惑星が見つかる頻度は5-10%程度であることがわかった。今後の観測精度向上により、まだ発見されていない惑星が検出される可能性があるのも、これは下限値である。そのことを考えれば、恒星に惑星が存在することは、それほど珍しい現象ではないと言ってよいだろう。発見された系外惑星の質量は、基本的には木星型の巨大惑星質量で、真の地球型惑星は未検出と言ってよい(ただし、軽いほうの開拓も進んでいて、褐色矮星を除いた恒星を周回する惑星としては、質量下限値が4地球質量まできている)。

(巨大)惑星検出確率の主星の質量依存性も議論

可能になってきており、太陽質量の2倍の恒星は、太陽型に比べ有意に検出率が高いことが示されつつある。一方、比較的初期から、惑星検出確率の主星の金属量依存性は確立されており、コア集積モデル（5章参照）による惑星形成を支持する証拠の一つとみなされている。

系外惑星の軌道は太陽系とは大きく異なる。系外惑星は、軌道が0.02~6天文単位（1 AU, 約1億5,000万 km）、公転周期にして約1日から15年の範囲に分布している（長周期側は観測継続期間によって制限されている）。0.1 AU以内の巨大惑星は「ホット・ジュピター」と呼ばれ、周期3日前後のものが多い。主星に近いため、その表面温度は1,000 Kを超える。最近では、1 m/s よりも小さな速度を分解できる超高精度により、地球質量の10倍程度しかない惑星（ホット・ネプチューン）や、数倍程度の地球質量に迫る惑星（スーパー・アース）も発見されている。太陽系の惑星はほぼ円軌道で太陽を公転するが、系外惑星の軌道の離心率は著しく多様で、0から0.9程度まで広い範囲に分布している。このように、一方で系外惑星はわれわれの太陽系とは大きく異なる性質をもっており、その原因はまだよく理解されていない。

#### 4. 間接から直接へ：若い星の直接撮像で系外惑星に迫る

間接法は惑星からの光を直接検出するわけではないため、いろいろな不定性がある。また、ドップラー法やトランジット法ではごく内側の系外惑星検出にバイアスがかかり（6 AUまで調べるには約15年かかる）、かつ、主星の活動性の高い若い恒星（例えば、Tタウリ型星）には適用できない。一方直接観測では、ドップラー法では観測できない若い恒星を周回する若い惑星を検出することが可能となる。惑星系の内側の多様性が明らかになった現在、スノーラインを超えた外側領域（>4 AU）の多様性、しかも、円盤から形成された

ばかりの初期状態としての若い惑星に迫るには直接観測が不可欠なのである。

直接撮像観測のためには、(1) 暗い惑星を検出するための高感度、(2) 近接した主星と惑星を見分けるための高解像度、(3) 惑星の近くにある恒星からの明るい光の影響を抑えるための高コントラスト、の3者を同時に実現しなければならない。なかでも最大の課題はコントラストである。惑星からの光は可視光および近赤外波長では太陽からの光の反射が主で、明るさの比は約10桁にも達する。中間赤外より長波長では惑星自体の熱放射のため両者の明るさの比は多少緩和されるが、それでも約7桁となる。そこで、よりコントラストの小さな惑星系を検出する試みが現在の主流となっている。

地上からの天文観測の最大の障壁は地球大気の揺らぎが起こす「かげろう」である。すばる望遠鏡など地上大口径望遠鏡に、大気揺らぎを補正する補償光学と明るい主星を遮蔽しコントラストを向上させるコロナグラフを取り付け、近傍（100 pc程度）の星形成領域中の若い（年齢約百万年の）恒星などの伴星の系統的探査が行われている。これは、特定領域『太陽系外惑星科学の展開』の重要な目標の一つである。前者の中心星は、いわゆるTタウリ型星やHerbig Ae/Be型星と呼ばれる太陽質量の0.3倍から2倍程度の若い星に対応する。補償光学の性能と観測対象の温度との兼ね合いで、現在は、波長1-3ミクロンの近赤外線での観測が行われている。

すばる8.2メートル望遠鏡とコロナグラフ装置CIAO (Coronagraphic Imager with Adaptive Optics, チャオ)<sup>7)</sup>を用いて発見された、Tタウリ型星DH Tauを周回する伴星（伊藤、林、田村ほか<sup>8)</sup>）や、すばるデータアーカイブを利用してドイツのチームが発見したTタウリ型星GQ Lupを周回する伴星<sup>9)</sup>は、若い褐色矮星である（図1）。若い惑星の質量推定は難しく、分光から求めた有効温度にも不定性があり、惑星の年齢が大きめに求め

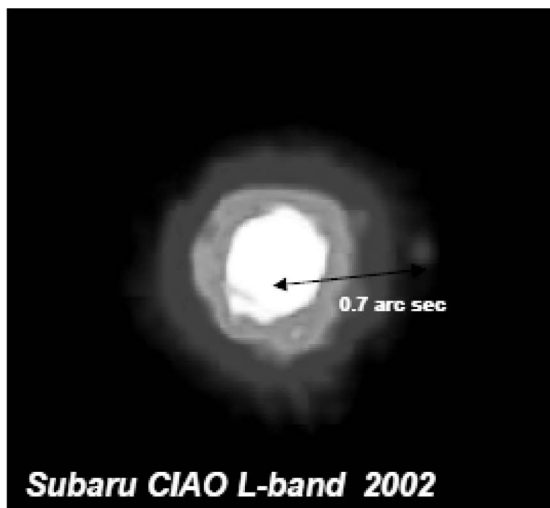
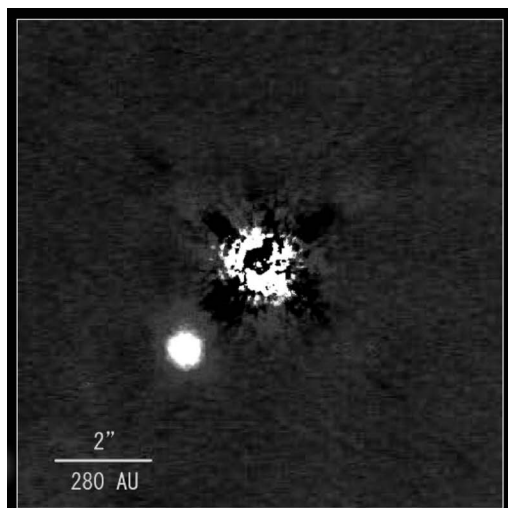


図1 すばる望遠鏡と CIAO によって近赤外線波長で撮影された若い恒星の周りの褐色矮星。(左) DH Tau, (右) GQ Lup. 中心星はコロナグラフのマスクで隠されている。中心星から伴星までの距離は、それぞれ、約 330 AU と 100 AU.

られているが、年齢を主星と同じと仮定すると、いずれも木星質量の 10 倍程度となる。これらは、伴星型の超低質量星の直接観測としては、惑星の直接撮像に肉薄するものであった。同種の伴星型褐色矮星はほかにもいくつか発見されている。最近、ジェミニ望遠鏡で木星質量の 10 倍程度の惑星の直接撮像に成功というニュースがあった<sup>10)</sup>が、上記の天体と同様に主星からの距離は遠く(約 300 AU)、その形成はコア集積モデル(5章参照)で説明することが難しい。

一方、G 型星である太陽より重い星(A 型星)の直接撮像はごく最近、極めて著しい進展を見せている。2008 年 11 月には、アメリカのチームがフォーマルハウトと HR 8799 を周回する約 10 木星質量以下の天体の直接撮像に成功した(ハッブル、ケック、ジェミニ)。前者は、有名な塵円盤の内側に位置し、2 年間の間に円軌道から期待される位置の変化を示す。しかし、赤外線では検出されていないことから、原始惑星の星周構造が散乱光で検出された可能性が高い<sup>11)</sup>。後者は、一度に 3 個もの惑星の撮像とその軌道運動を確認したものである<sup>12)</sup>。ただし、どちらも A 型星の周りの 30

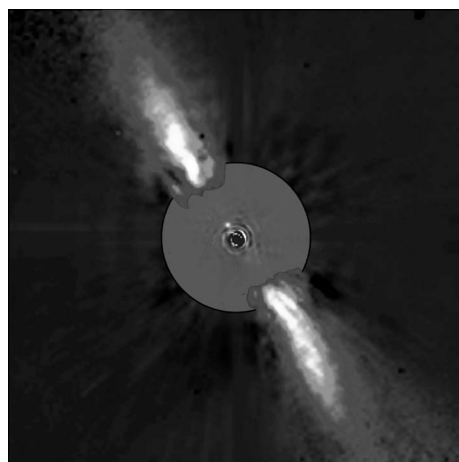


図2 すばる望遠鏡と CIAO によって近赤外線波長で撮影された若い恒星のがか座ベータ星( $\beta$  Pic)の惑星候補画像(3.8 ミクロン, VLT)と可視光画像の合成。惑星候補天体は、中心星からわずか 0.44 秒角(8 AU)のところにある微小な点状天体候補。

AU より遠方の惑星であり、コア集積モデルでは説明できない惑星だと思われる。さらに、その 1 週間後には、フランスのチームが有名ながか座ベータ星(A 型星)から 8 AU の距離に 8 木星質量の惑星候補を VLT で撮像したというニュース

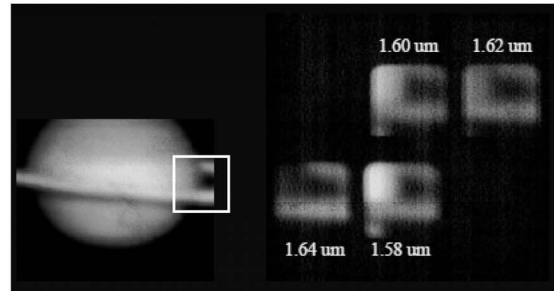
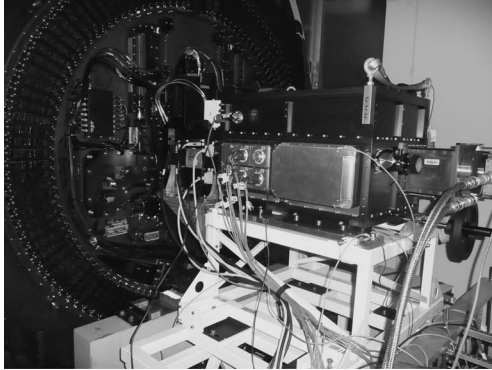


図3 すばる望遠鏡のための新規コロナグラフ HiCIAO (ハイチャオ)。多波長および偏光差分撮像機能をコロナグラフと組み合わせることができる点がユニークである。2007年12月に補償光学なしで望遠鏡ファーストライトを迎えた。右図のように、同じ天体の4波長異なった画像を同時撮像可能なため、惑星大気メタンバンドの有無が判別できる。また、それらを差し引くことにより、明るい恒星のスペックルノイズを抑制することもできる。

が飛び込んできた<sup>13)</sup>(図2)。残念ながら、データは5年前のもので追証や軌道運動の確認はまだ行われていないが、これらの発見は、「百聞は一見にしかず」という系外惑星の直接観測の時代の幕開けを飾るものと言えよう。

国立天文台においては、観測のコントラストをさらに向上させる装置開発を進めてきた。大気揺らぎを補正する補償光学は、従来の36素子の補償光学素子から188素子へのアップグレード(AO188)を行い、よりシャープな星像が得られるようになった<sup>14)</sup>。一方、新しいコロナグラフは、異なる波長あるいは異なる偏光方向を同時に検出器に写し込める差分撮像機能を設け、大気揺らぎによる星像の変動の影響を最小限に抑える。この新規コロナグラフ装置 HiCIAO<sup>15)</sup>(ハイチャオ; High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics, 図3)とAO188との組み合わせによって、従来に比べ約10倍の高コントラストが期待できる。後者の開発は、上記の特定領域研究の予算に基づき、若手の鈴木竜二らを中心に進められてきた。すばるでは、その性能を他の望遠鏡に先駆けて活かすため、太陽型の恒星を周回する若い惑星の初検出を目指す戦略的観測プロジェクト SEEDS (Subaru Strategic Exploration

of Exoplanets and Disks with HiCIAO/AO188)を2009年より開始する。現在、日本のみならず海外も含めた24機関の約90人のスタッフ・ポストドク・学生が参加する国際的大プロジェクトとなっている。上記のA型星における惑星撮像の成功は、ドップラー法で開拓されていない主星から比較的遠方(数AU-20AU)で太陽型の恒星の周りの系外惑星を直接撮像するSEEDSにとって、強い追い風になるだろう。

さらに、高コントラスト直接分光観測を行うことができれば、ドップラー法では得られない、惑星の色、光度、スペクトル、したがって、温度や大気組成の情報まで手に入れることができ、単なる検出を超えた惑星系の特徴づけ(キャラクターゼーション)をトランジット惑星以外にも普遍的に行うことが可能になる。今後、すばる望遠鏡において、系外惑星や同様に低温の褐色矮星の大気を調べるための高解像度赤外線面分光装置を開発することが急務であろう。

## 5. 若い星の直接撮像で惑星の誕生現場に迫る

すばる望遠鏡が最も目覚ましい成果を上げている分野の一つが、惑星系が実際に生まれている現

場、すなわち、原始惑星系円盤の直接観測である。惑星は、恒星誕生の副産物である。惑星系形成時に取り残された星周物質が星周円盤となり、中心

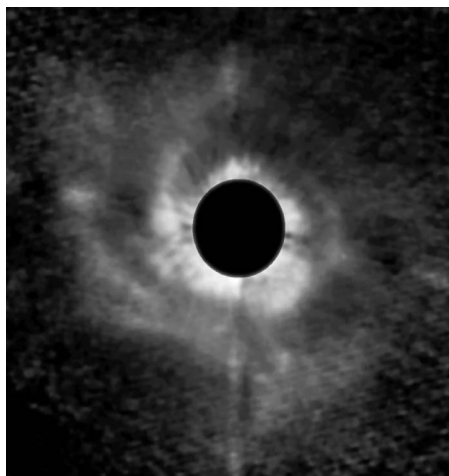


図4 すばる望遠鏡と CIAO によって近赤外線波長で撮影された若い恒星 **AB Aur** の周りの原始惑星系円盤の微細構造。中心星はコロナグラフのマスクで隠されている。中心星からの光が円盤で反射して、あたかも間接照明のように渦巻き状に輝いている状況を見ている。黒丸の大きさは約 240 AU。

星が原始星から T タウリ型星、主系列星と進化するのに伴って、円盤の中では、微惑星の形成・成長やガス降着で惑星が形成されていく（コア集積モデル惑星形成理論。以下、集積モデル）。一方、円盤自体が十分に重い場合は、重力不安定性を起こして、惑星が成長する可能性もある。しかし、観測的にはこれらの素過程の詳細の解明は進んでいない。これまでに検出されている系外惑星の性質を見てみると集積モデルが一般的と考えられるが、重力不安定性で生まれたと思われる惑星も存在する<sup>16)</sup>。星周円盤の期待される大きさは、ほぼ太陽系サイズ（約 100 AU）であるため、100 pc の距離にある典型的な星形成領域でも、1 秒角より小さな角度分解能が必要になる。これが、円盤の観測が進んでいなかった理由である。

深川、林、田村らがコロナグラフ CIAO を用いて観測した **Herbig Ae** 型星（太陽質量の約 2 倍）**AB Aur** の近赤外線画像（図 4）により、渦巻状の円盤構造が明らかになった<sup>17)</sup>。円盤の構造や模様自体から、その形成原因が議論できるようになったのである。重力不安定説から予想される渦巻構

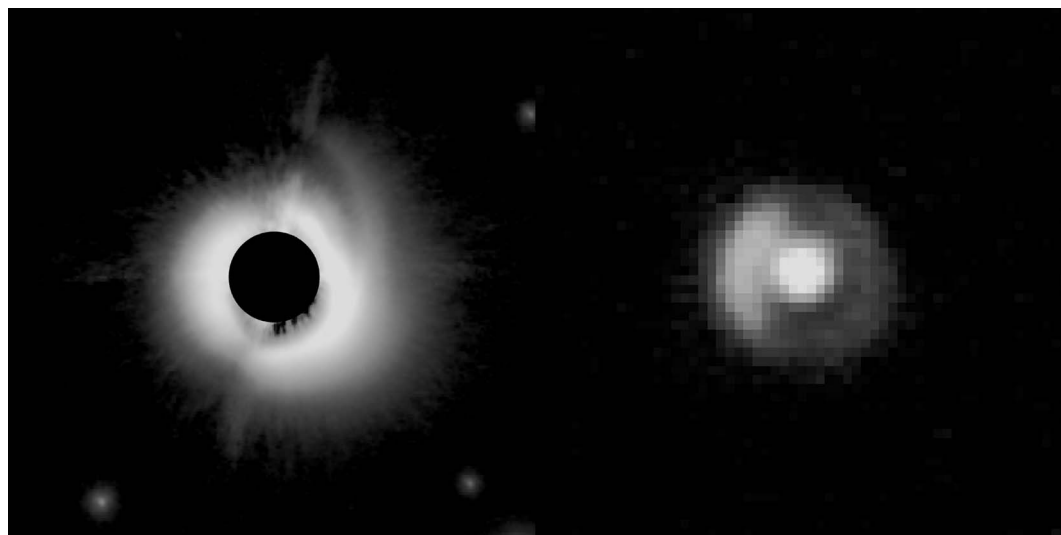


図5 すばる望遠鏡によって近赤外線波長で撮影された **HD142527** の原始惑星系円盤の構造。左側が CIAO による近赤外線画像、右側が COMICS（コミックス）による中間赤外線画像。図の大きさは 1,550 AU。左の図では、中心星はコロナグラフのマスクで隠して観測しているため、黒丸で表示している。向かい合うバナナ状の構造とそのすきま（バナナ・スプリット）、中心星との間のすきま、右側に見られる腕状構造に注意。

造と極めて似ており、実際、A型星の周りの重い円盤の外側の領域で惑星形成が起こっている場合（前述のフォーマルハウトやHR8799）は、このようなメカニズムによるものと考えられる。

同じく、CIAOを用いて観測されたHerbig Ae型星HD142527（図5左）では、さらに複雑な円盤構造の存在が明らかになった<sup>18)</sup>。バナナ・スプリットと呼ばれるこの構造は、特殊な状況で生じる円盤構造として理論的な議論はあったものの、過去に実際の天体で観測された例はなく、すばる望遠鏡オリジナルの円盤構造である。この円盤はすぐさまCOMICS (Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer) による中間赤外線観測でも追観測され<sup>19)</sup>、円盤の内側の間隙やダストサイズの情報を得られた（図5右）。そのほかにも、工藤らは、太陽質量のわずか1/10の太陽のようなTタウ型星にも円盤を撮像することに世界で初めて成功している<sup>20)</sup>。また、単独星とは異なるが、Tタウ型星の連星の周りの円盤でも、GG Tau<sup>21)</sup> や UY Aur<sup>22)</sup> において、従来にない詳細な円盤構造が得られており、すばるで描かれた円盤の姿は多種多様であったということが出来る。このような円盤形態・組成の解明は、特定領域「系外惑星」の最大の成果と言えるものである。

一方、すばる望遠鏡では他の8メートル・クラス望遠鏡に先駆け赤外線偏光観測機能を実用化し、オリジナルな結果を出している。若い星が主系列星に至る過程で、(すでに生じていた)微惑星同士が衝突して塵円盤を形成する（残骸円盤とも呼ばれる）。赤外線衛星IRAS (Infrared Astronomical Satellite) が1983年に発見したもので、ベガ型星と呼ばれる主系列星の中でも、がか座ベータ星は最初にその残骸円盤が撮像されたものであった。しかし、このような有名天体であるにもかかわらず赤外線での偏光観測は過去になく、田村、深川らのCIAOによる近赤外線偏光撮像観測が世界初の例となった<sup>23)</sup>。残骸円盤からの近赤外線は、中心星からの光が円盤中のダストで反射さ

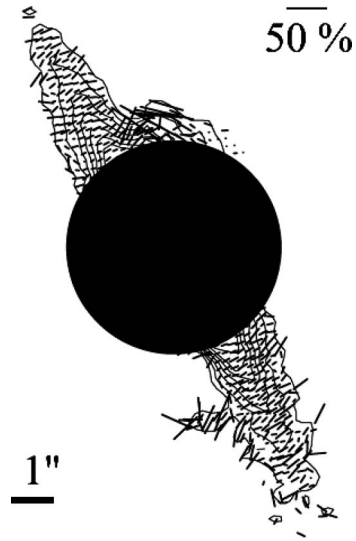


図6 すばるCIAOによる、がか座ベータ星( $\beta$  Pic)の塵円盤の波長2ミクロン偏光ベクトル画像。中心の明るい星はコロナグラフにより隠されている。黒丸の大きさが、ほぼ太陽系のサイズ(100 AU)に対応する。偏光の原因は、中心の星からの光が円盤中の塵に反射されているためである。偏光の典型的な大きさはおおよそ10%。50%偏光のベクトルと1秒角の大きさが示されている。

れたものであり、ダストの性質の情報を含んでいる。得られた偏光（図6）は、円盤中のダストがふわふわとしたアイス(fluffy ice dust)からなるモデルで説明できた。先行する岡本、片坐らのCOMICSによる中間赤外線に加えこの近赤外線の観測から<sup>24)</sup>、円盤には幾筋かの「ダストの帯」が存在し、太陽系の小惑星帯に対応するものが太陽系の外にも確認できたのは大きな成果である。

前出のHiCIAOには偏光同時撮像機能が備わっている。AO188によって、現在よりも短波長域（波長約 $1\mu\text{m}$ ）での回折限界観測が可能になるので、ハッブル宇宙望遠鏡の解像度を3倍以上上回るシャープな撮像によって円盤の詳細構造が解明されるだろう。

## 6. 木星から地球へ

ドップラー法の超高精度化(<1 m/sの精度)と

重力レンズ法により、より軽い惑星の検出への競争が続いている。その到達目標は、生命生存可能な領域にある地球型惑星の検出にある。しかしながら地球型惑星があまりにも小さく、暗く、かつ内側にあると期待されるため直接観測は現在の技術では難しい。

系外惑星検出で現在最も効率的なものは高精度分光に基づくドップラー法であるが、太陽型恒星の周りの地球型惑星探査のためには現在よりも2桁高い精度が必要にある。また、可視光波長におけるアプローチには次のような問題がある。(1) 今後、ドップラー法の数値決定精度がさらに向上し、地球型惑星が検出されても、太陽系の地球のような生命存在の可能性が低い軌道にある（ハビタブルゾーンにはない）こと、(2) 精度が向上しても、恒星の大気運動が無視できないため地球質量の惑星は検出が難しいこと、(3) ハビタブルゾーンにある地球型惑星が検出可能な低質量星（M型星）は大気変動が大きいため惑星探査には向かないこと、などである。

一方、同程度（1 m/s）の精度でも太陽質量の0.1倍程度のM型星を周回する地球質量の惑星が検出できる。さらに、このような地球型惑星は主星であるM型星は低温なのだが、軌道が主星に近いので温度が高く、水が液体で存在できるハビタブル惑星となりうる。しかしながら、M型星は可視光では非常に暗いため従来の可視光分光器による観測は難しい。そこで、すばる望遠鏡において1 m/sの精度をもつ「赤外線」高分散分光器を開発し、M型星の周りのハビタブル地球型惑星を多数検出することが望まれる。

赤外線ドップラー法では、可視光ドップラー法で簡便に用いられていた高精度速度校正手法であるガスセルの適当なものがない。しかし、近年の安定化された赤外線レーザーには、9桁以上の周波数安定性をもつものがあり、波長基準として使用できる。それを変調することで発振波長周辺に複数の波長の光（Comb）を発生させ、100 nm程

度の波長域にわたって強度が一様になるようにフィルターを挿入する、いわゆる周波数コム（Comb）の技術を応用することができるだろう。また、高分散素子の巨大化を抑え低コストの真空冷却系にするためのイメージンググレーティングの活用も重要となる。これらの最新技術を応用した赤外線ドップラー装置とすばるの組み合わせは、地球型惑星の開拓にとって強力な武器となる。

## 7. まとめ

系外惑星の数は、発見からわずか13年で300個を超えた。系外惑星と円盤観測の分野では、太陽系やその惑星からは想定できなかった驚きのニュースが毎年のようにもたらされる。すでに、新しいタイプの系外惑星類似伴星や新しい形態の円盤の検出に成功したすばる望遠鏡は、今後この分野で成果を上げていくことが期待される。2008年度から、次期補償光学AO188と新規コロナグラフHiCIAOが稼動し始め、系外惑星と円盤の観測は、いわば第2ステージに突入する。しかし、2010年以降には、欧米の口径8メートル・クラス望遠鏡においても、GPI（ジーパイ、Gemini Planet Imager）やSPHERE（スフィア、VLTのSpectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research）といった系外惑星探査のための次期直接観測装置が立ち上がってくる。この競争に勝ち抜くためにも、すばる望遠鏡の「匂」となる観測装置を活用した集中的な観測的研究の推進のみならず、さらに一歩先をいく装置開発の継続が不可欠であろう。



## 参考文献

- 1) van de Kamp P., 1963, AJ 68, 515; van de Kamp P., 1975, AJ 80, 658
- 2) Walker G. A. H. D., et al., 1995, Icarus 116, 359
- 3) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355
- 4) Gary D. F., 1997, Nature 385, 795
- 5) Benedict F., et al., 2002, ApJ 581, L115; *ibid.*, 2006, AJ 132, 2206
- 6) Swain M. R., 2008, Nature 452, 329
- 7) Tamura M., et al., 2000, Proc. SPIE 4008, 1153
- 8) Itoh Y., Hayashi M., Tamura, M., et al., 2005, ApJ 620, 984
- 9) Neuhäuser R., et al., 2005, A& A 435, L13
- 10) Lafreniere D., Jayawardhana R., van Kerkwijk M. H., 2008, ApJ, in press
- 11) Kalas P., et al., 2008, Science Express 1166609
- 12) Marois C., et al., 2008, Science Express 1166585
- 13) Lagrange A.-M., et al., 2008, A&A in press
- 14) Takami H., et al., 2006, Proc. SPIE 6272, 62720C
- 15) Tamura M., Hodapp K., Takami H., et al., 2006, Proc. SPIE 6269, 62690V
- 16) Matsuo T., Shibai H., Ootsubo T., Tamura M., 2007, ApJ 662, 1282
- 17) Fukagawa M., Hayashi M., Tamura M., et al., 2005, ApJ 605, L53
- 18) Fukagawa M., Tamura M., Itoh Y., et al., 2006, ApJ 636, L153
- 19) Fujiwara H., Honda M., Kataza H., et al., 2006, ApJ 644, L193
- 20) Kudo T., Tamura M., Kitamura Y., et al., 2008, ApJ 673, L67
- 21) Itoh Y., Tamura M., Hayashi S. S., et al., 2002, PASJ 54, 963
- 22) Hioki T., Itoh Y., Oasa Y., et al., 2007, AJ 134, 880
- 23) Tamura M., Fukagawa M., Kimura H., et al., 2006, ApJ 641, 1172
- 24) Okamoto Y., Kataza H., Honda M., et al., 2004, Nature 431, 660

### Significant Development of Exoplanetary Science: From Indirect to Direct, from Jupiters to Earths

Motohide TAMURA, Masahiko HAYASHI, Tomonori USUDA

*NAOJ/NINS, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Exoplanets have provided new views of cosmos from their discovery of 1995. After more than 300 planets have been discovered outside of the Solar system, besides our well known 8 planets, now is the time to further develop the exoplanetary science with new approaches. For the Subaru telescope, just celebrating 10 years anniversary, exoplanets and their birth places, protoplanetary disks, are the most important targets. Approaches by high contrast infrared observations with giant telescopes and new instruments are ongoing, which resulted in the discovery of near-planetary mass companions and the revealing of disk morphology. Next we aim to directly image exoplanets similar to those in our solar system with the next generation adaptive optics and the new coronagraph. Furthermore, infrared Doppler methods will explore the detection of habitable earth-like planets and infrared spectroscopy will directly characterize the giant planets. In such ways, the Subaru telescope will lead the field of exoplanetary science observations.