観測で広がる宇宙像*

——星と惑星の形成の現場を例として——

田村 元秀**

New Frontiers of Observational Astronomy

——Recent Topics on Star and Planetary Formation——

Motohide TAMURA

1. 天文観測における“次元”

人々が描く天文学者のイメージと言えば、「夜な夜な望遠鏡を覗いては新天体の発見に夢を抱き、あまたの星の位置を精密に測る」人々といった感があるかもしれない。このような形態の観測は今日でもないことはないが、もはやほとんどの天文学者は観測のために望遠鏡を一晩中直接に覗くという作業をしない。彼らの代わりに“眼”となるのは、近代化された望遠鏡、それに取付けられた高感度センサー（検出器）を内蔵した複雑な観測装置、および、望遠鏡と観測装置を制御したり、得られたデータ（天体の情報）を表示する計算機群である。天文学者は、その端末とディスプレイの前からコマンドを送り、判断をするだけである。したがって、これらの天体の情報（その多くは直接に眼には見えない！）のうち必要なものを選択しそれを可視化するプロセスが重要なのである。

それでは天文学で可視化される観測の次元（パラメータ）にはどのようなものがあるのだろうか？宇宙からの情報は電磁波のみではなく、宇宙線・ニュートリノ・重力波などもあるが、ここでは、最もよく使われている電磁波に話をしよう。

第1の次元は「波長」である。昔は天文学においては「光＝可視光」であった。しかし、1931年にジャンスキーが宇宙電波を発見したのを始めに、

1963年にはX線、1965年に赤外線、1968年に紫外線、1972年にγ線、1973年にサブミリ波による観測が行われ、今日では、電磁波スペクトルのうち開拓されていない領域はほとんどない（波長範囲は、γ線が0.01nm未満、X線が0.01～10nm、紫外線が10nm～0.4μm、可視光が0.4～0.7μm、赤外線が1～300μm、サブミリ波が300～1000μm、電波が1000μm以上）。一方、波長を細かく分ける“分光”学は、1850年代に太陽光の中にナトリウムの原子からの線スペクトルを同定したことをもってその天文学応用への始まりとされている。どのくらい波長を細かく分けるかの目安を波長分解能とよぶ。分光の情報から得られる天体の速度の情報（ドップラー効果を利用したもの）は最も基本的な物理量の一つである。

第2の次元は「空間」である。ある天体の位置はその天体の方向とその天体までの距離が決まれば一意に決まるが、距離の方は不定性が大きい。一方、天体の空に投影した2次元の情報は、最近の観測技術で最も向上した部分である。天体を細かく見分ける能力を空間分解能（解像度）と呼ぶ。望遠鏡の空間分解能は理論上は、（波長／望遠鏡口径）で決まる。しかし、大望遠鏡では地球大気の揺らぎの方が大きく、単に口径を大きくするだけではもはや高い分解能は得られない。

第3の次元は「感度」である。われわれの眼はなかなか優秀な光学センサーであるが、遠い天体からの微弱な光を検出するには人間の瞳はなにぶ

*原稿受付 1995年6月21日

**国立天文台

ん小さい。口径15cmの望遠鏡を用いればこれよりも約400倍、アメリカのパロマー山5m望遠鏡ならば約50万倍暗い天体を“見る”ことができる。さらに、眼以外の検出器を用いて光を溜めれ（積分すれ）ば、もっと暗い天体を観測できる。

第4の次元は「時間」である。規則的あるいは不規則的な光度の変化を追いかけることは重要な天文課題である。また、時間分解能を上げることで、可能になった天文学的発見もある。

第5の次元としては「偏光」があり、第6の次元として「コントラスト」をとりあげよう。

これら六つの観測次元を追究することによって、われわれの宇宙に対する描像は大きく広がってきた。すべての天文分野を網羅するのは筆者の任ではないが、最先端がいかに宇宙のフロンティアを開拓してきた、かつ、しつつあるかを、われわれの太陽のような恒星の誕生とそれに付随した惑星の形成を例にとって紹介したい。

2. 波長の次元

星は暗黒星雲（その中で種々の分子が発見されるため分子雲とも呼ばれる——斉藤修二氏の稿P. 246を参照）と呼ばれるガスとダスト（固体微粒子、宇宙の埃）の集合体の中で生まれるが、その具体的な姿が直接に観測され、星形成の理論と比較されるようになった背景には、可視光のみに限らないさまざまな波長において星形成領域が観測できるようになったことがある。実際、星形成の現場である暗黒星雲は、その中に含まれるダストが光を散乱・吸収する。波長の短い可視光はより散乱・吸収されやすく、“暗黒”という名のとおり可視光では見通すことができないので、より波長の長い光である赤外線や電波での観測が必要となる。また、生まれたばかりの天体は低温で、周りを取り囲むダストからの熱放射が遠赤外線波長にピークを持つので、長い波長での観測が有利である。

1983年に米・英・蘭の3国協同で打ち上げられた赤外線天文衛星アイラスは、口径わずか60cmの望遠鏡ではあるが、初めて遠赤外線波長で全天を観測した。その結果、太陽系天体から宇宙論にいたるまでのさまざまな分野に目覚ましい発見をもたらした。その一つが、暗黒星雲の中に可視光で

はまったく見えない赤外線源を多数発見したことである。これらの天体から1秒間に放出されるエネルギーを見積もると太陽と同じくらいの値を持っているが、その温度は非常に低いことがわかった。このような低温の遠赤外線源は、核融合ではなくガスが収縮する重力エネルギーで暖められると考えられる。つまり、これらの天体はガスが重力収縮して星になりつつある「原始星」であるらしい。アイラスによって、初めてこのような星が生まれつつある現場が全天にわたって明らかにされた。

3. 空間の次元

しかし、アイラスの解像度は非常に粗く、これら原始星がどのような空間構造を持っているかはよくわからなかった。一方、アイラスとほぼ時を同じくして80年代の初頭から大口径のミリ波用電波望遠鏡が稼働し始めた。これによって、波長が長いために解像度が得られないという電波の問題が緩和され、アイラスを凌ぐ解像度で星形成領域を観測できるようになった。わが国でも、長野県野辺山に口径45mの電波望遠鏡が建設された。それらを用いた観測の結果、暗黒星雲中找到したアイラス赤外線源の周りにはそれを内蔵するように、高密度（普通の星間物質の1万倍以上）のガスの塊があることが明らかになった。このようなガス塊は暗黒星雲（もしくは分子雲）コアと呼ばれる。なかにはアイラス源を内蔵しないコアもある。コアは約0.3光年（太陽—地球間距離の約2万倍）の大きさを持ち、数10光年にも及ぶ暗黒星雲の中に埋もれたツブツブの、あたかも星の卵のように見える（図2の右上参照）。

電波による赤外線源の観測に関してさらに特筆すべきことは、アイラス赤外線源に限らず多くの若い星々の周りのガスの運動を調べると、驚くべきことに、重力から予想される中心星への落下運動ではなく、数10km/sにも及ぶ高速のガス分子の吹き出し（アウトフロー）が対極状に見られることであった（図1）。これと類似した物質の吹き出しは、可視光などでも見つかっていて、ジェットとも呼ばれている。おそらくすべての星は、その若い時期に、このような著しい質量放出を行う

図1 若い星からのアウトフロー模式図 (断面図)

らしい。

アイラスで発見された赤外線源は、可視光ではまったく見えないものばかりではなく、そのうちの幾つかは可視光でも見える天体があった。Tタウリ型星と呼ばれている一群がそれである。これらの天体が、可視光で見えて、かつ、遠赤外線でも明るいというのは不思議なことである。その天体には少なくとも高温と低温を放つ2種類の光源があるか、星の周りの構造が特殊か、もしくはその両方でないと理解できない。この謎を解くには長波長での高解像度の観測が必要だが、その空間構造は大口徑ミリ波望遠鏡をもってしてもまだ分解できないものだった。

90年代に入ると、一つの大きな望遠鏡を作る代わりに、比較的小口径の望遠鏡を何台か離して並べ波を干渉させ、高い空間分解能を得ることのできるミリ波用電波干渉計が動きだした。これによって、電波天文学が可視光や赤外線に匹敵する約1秒角の分解能を得た。この分解能でTタウリ型星を観測したところ、いくつかの星の周りに平たい円盤状のガスやダストの塊が見つかった。その大きさは太陽系の数倍から数10倍で質量は太陽の1/10から1/100程度である。これは、われわれの太陽系を作るのに十分な質量とされている。さらに、あるものは、回転しながら中心の星に向かって落下する運動を示している例も発見された。これは、分子ガスが収縮して星が生まれる際に円盤状の構造(ディスクと呼ばれる)が形成され、その構造をとおして物質の落下・降着(アクリーション)が進む一方、ディスクの一部は惑星を形成する(原

図2 若い星の進化(暗黒星雲から主系列星まで)とその周りの構造の進化のまとめ(砂田ほか、大橋ほかより作成)

始惑星系) という考えをサポートするものであった。

こうして、赤外線、ミリ波、可視光というさまざまな波長で認識された若い星とその周りの構造(暗黒星雲、コア、原始星、Tタウリ型星、ディスク、アウトフロー・ジェット)を総括的に理解し、それを恒星が生まれる進化の過程に位置付けることが可能になった。まとめると図2のようになる。

しかし、これまでに観測されているディスクの大きさは、太陽系のサイズよりはまだ大きめであるため、幾分特殊なディスクを選択的に観測している可能性がある。太陽系サイズのディスクを確実に観測し、その中での惑星形成の核心に迫るためには、より高い分解能(例えば、0.1秒角)が必要と思われる(第6章参照)。また、それよりもさらに高解像度(0.01秒角以下)を目指して、可視光・赤外線波長における干渉計の計画も各国で進んでいる。

4. 感度の次元

観測可能な電磁波の波長範囲が広がるということは、ある波長範囲で有効な検出器が発展し、それを活用できる適当な望遠鏡ができたことにほかならない。特に、可視光および赤外線波長では過去20年の間に検出器の2次元化と高感度化が進み、観測の効率と可能性が著しく改善された。1995年現在、可視光では 2048×2048 以上の素子数を持つものが、近赤外線では 1024×1024 素子のものが、中間赤外では 128×128 素子のものが使用されつつある。

特に、以前は1素子の検出器しか利用できなかった赤外線波長で高感度2次元検出器が現れたことは革命的だった。その結果、(1) 以前よりはずっと高い空間分解能（大気と揺らぎで決まる1秒角程度）で、天体の画像が簡単に得られるようになった。したがって、(2) 広い空間領域あるいはさまざまな波長での天体画像が短い時間で得られるようになり、データの信頼性も向上した。こうして、星形成領域の高解像度の画像が続々得られるようになった（図3（口絵9参照））。これを見ると多数の星が集中しているのがわかる。これらはほとんどが生まれたばかりの若い星で、そのような星が数百個もまとまって生まれたものと考えられる。また最近では、暗黒星雲の広い領域を高感

〔赤が波長 $2.2\mu\text{m}$ 、緑が $1.65\mu\text{m}$ 、青が $1.25\mu\text{m}$ を表す。〕
〔中心の明るく白い星のかたまりがトラペジウム〕
図3 オリオン星雲の近赤外線3色合成画像（小林ほか）

度の赤外線素子でくまなく探すこと（サーベイ）によって、若い星の中には、太陽よりもずっと軽い星に進化していくと予想されるものが多数あることもわかってきた。

5. 偏光の次元

偏光は電磁波の持つ重要な性質である。偏光が生じる過程には、高エネルギー天文学でよく見られるシンクロトン放射のような磁気制動放射もあるが、ここでは、ダストとの相互作用で生じる2種類の偏光を取り上げる。

一つは、散乱による偏光である。電磁波がダストによって散乱されると偏光を生じる。前述のように、多くの若い星の周りには、それを取り巻くガスとダストのディスクとその面に垂直な方向に吹き出すアウトフロー現象が見られる。このような星をほぼ真横から見ると中心の星はディスクに隠されて見えないことがよくある。このような場合でも、アウトフローによってディスクの上下に散らばったダストが、直接には見えない中心星からの光を反射して見えることがある（部屋の間接照明と同じ）。この反射光はディスクの上下に照明の「かさ」のように広がって見えるが、その偏光を観測すると、中心の光源から花びら状に偏光ベクトルが描ける。これから逆に、中心星がどこにあるかわからない場合でも、周りの反射星雲の偏光パターンを観測すれば、偏光ベクトルの法線の集まる所としてその位置を正確に定めることができる。例えば、図4はHH135-136と呼ばれるジェットの波長 $2\mu\text{m}$ での偏光と強度の図である。従来、このジェットを放出している天体がどこにあるかはわかっていなかった。しかし、この偏光図によれば、反射星雲の偏光ベクトルの法線をたどった十字の所に光源があると考えられるが、実際、アイラス衛星のデータによるとこのあたりに遠赤外線の非常に低温の天体がある。アイラスの位置精度では決められなかったが、この偏光観測によってジェットを産み出す若い星の位置がピッタリと決まったわけである。

もう一つは、吸収による偏光である。宇宙のダストは丸い形をしているのではなく、ラグビーボールのような扁平で細長いか、ホットケーキのよ

うに平たい形をしていると考えられている。丸くないダストが、磁場が貫く空間中であって、ぐるぐるとスピンをしていると、ダストの長軸は磁場と垂直な方向に揃う傾向があることが知られている。このような空間を光が通り抜けると、光の偏光成分のうちダストの長軸方向の成分が吸収されやすく、透過してきた光はダストの短軸方向に偏った成分を持つ。この方向は磁場の方向と一致するので、逆に、星間空間中を透過した光の偏光を測定すると、その偏光の方向から星間空間中の磁場の方向が決定できる。図5は、このような仕組みで生じている、牡牛座の暗黒星雲を通して見えている星からの光の偏光（可視光での観測）と、その暗黒星雲の最も濃い部分を透過して見えている星の偏光（赤外線での観測）とを描いたものである。偏光ベクトルの方向が磁場の方向を表しているので、この暗黒星雲では主に左上から右下に流れるように磁場が貫いていて、その方向は、暗黒星雲の最も濃いところでも同じであることがわかった。ただし、細かく見ると、局所的に磁場の方向が違うところもある。最近では、ここで述べた可視光と赤外線以外にも、サブミリ波やミリ波でダストの熱輻射の偏光を測り、星の周りのディスクなどの磁場構造を解明する新しい試みも行われている。

Polarization maps in the outer and inner regions of Hais cloud 2(Taurus)

(偏光ベクトルは天球上に射影した磁場の方向を表す)

図5 牡牛座暗黒星雲の可視光と赤外線 ($2.2\mu\text{m}$) の偏光マップ

6. コントラストの次元

コントラストという観測パラメータは（太陽コロナを除いては）これまでの天文観測ではあまり追究されたことがない。しかし、ある明るい天体のすぐ近くにある暗い天体を観測するには両者の明るさのコントラストを克服する工夫が必要である。このような例で最も興味深くかつチャレンジなものは、太陽系の外にある惑星の検出である。

われわれの太陽系のような惑星系を持った星がどれくらい存在するかは、地球外生命の問題にも関係する重要な天文学的課題である。これまでに、系外惑星の存在を示す例は皆無ではないが、すべて間接的証拠ばかりで、直接に惑星を捕らえた例はまだない（中性子星の周りに惑星の質量を持つ天体の存在が確認されているが、このような天体が生まれる過程は上記の太陽系形成とはかなり異なるものだろう）。実際、系外惑星を直接観測するのは非常に難しい。例えば、太陽系をわずか15光年の距離から眺めたとしても、木星は太陽からた

った1秒角だけ離れたところにある約9桁暗い「しみ」にしかすぎない。したがって、系外惑星検出にとっては、空間分解能と感度、そしてなによりもコントラストが重要な観測次元である。

このコントラストの問題を克服するための工夫が、太陽コロナを日食時以外にも観測可能にしているコロナグラフである。これは、望遠鏡の焦点面にできた明るい太陽像を円盤（オカルティングマスク）で隠し、さらに瞳面の位置に主鏡や副鏡スパイダーの回折・散乱を除くための覆い（リオストップ）を設けることで、太陽周辺の淡いコロナを観測することができる。

われわれ国立天文台の赤外線グループはこのコロナグラフの概念を星に応用し、大気揺らぎをリアルタイムで取り除く補償光学と組み合わせ、近赤外波長で最適化した観測装置を設計・製作している。このステラーコロナグラフ観測装置は国立天文台が現在ハワイのマウナケア山頂に建設中のすばる8.2メートル望遠鏡に取付けられる予定である。マウナケア山頂は世界でも有数の天文観測好地で、とりわけ、大気の揺らぎが小さいことで有名である。そこに位置するすばる望遠鏡は世界でも有数の光学性能を持ち、波長 $0.3\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ の波長範囲において、高解像度かつ高感度の観測を可能にする（波長 $300\mu\text{m}$ 以上でも大気の窓のある所は観測可能）。これらの利点によって、補償光学が有効に働く近赤外波長域では、8.2メートルの口径で決まる回折限界の高解像度の観測ができる。

では、ステラーコロナグラフ観測装置で実際どのような観測ができるだろうか？ そのために、望遠鏡の鏡面の製作誤差と大気の揺らぎの影響を考慮に入れた計算機シミュレーションを行った。図6（口絵10参照）はわれわれから420光年の距離の若い星の周りに、惑星よりは重いが恒星になるには軽すぎるような星（褐色矮星と呼ばれる）がある場合、これを普通の装置で見た場合とステラーコロナグラフ装置を用いた場合の違いを示す。普通の装置では（図6左）、明るい中心の星のハローと望遠鏡の光学系の支持具での回折光によって、すぐ近くの褐色矮星は見づらいが、ステラーコロナグラフ装置では（図6右）明らかに見える。系

図6 補償光学を用いたステラーコロナグラフによる褐色矮星の観測のシミュレーション

外惑星の場合は、このシミュレーションよりずっと大きなコントラストが必要になるが、十分な時間をかけると観測できるだろう。

惑星形成の現場を見るには、第3章で述べたように、太陽系のサイズのディスクを高解像度で観測する必要があるが、このようなディスクは中心の星からの光をその極く近くで反射する淡い円盤にしか見えないので、ステラーコロナグラフ装置はこの観測にとっても非常に重要である。

7. おわりに

ここで紹介した星・惑星の形成の問題と系外惑星探査他にも、銀河の形成と進化、活動銀河、宇宙の大規模構造、暗黒物質などは今後10年間の大きな課題であろう。

観測的天文学の進歩の形態は多様である。確かに、近年、他の科学分野と同様に巨大科学化し、最先端の科学技術を取り入れることによって前進してきた。ここで足早に紹介した六つの観測次元がそのような技術の発展とともにじわじわと広がるに連れて、まだまだわれわれの宇宙像も広がっていくだろう。しかし、まったく新しい発想に基づく観測装置・手段が新しい宇宙の窓を開くことも考えられ、また、既存の設備を使って地道だが綿密な観測を続けることで新しい現象を発見することもあるだろう。これまでわれわれの宇宙観を大きく変えるような天文学的発見はどちらかと言えばこのような創意工夫と努力をもとに行われてきたものが多いようである。

赤が波長 $2.2\mu\text{m}$, 緑が $1.65\mu\text{m}$, 青が $1.25\mu\text{m}$ を表す。中心の明るく白い星のかたまりがトラペジウム。

口絵9 オリオン星雲の近赤外線3色合成画像 (小林ほか)

明るい星の近く(0.7秒角)に1万倍暗い褐色矮星がある場合。(左)補償光学は作動, コロナグラフは不使用の場合。明るい星のハローと望遠鏡の第2鏡の影響で褐色矮星はよく見えない。(右)補償光学もコロナグラフも使用する場合。褐色矮星が左下に明らかに見える。

口絵10 補償光学を用いたステラーコロナグラフによる褐色矮星の観測のシミュレーション