

すばる望遠鏡で探る宇宙

はじめに
すばる望遠鏡の観測成果
すばる望遠鏡と観測装置の技術開発
太陽系外惑星と惑星の誕生に迫るすばる
すばるで探る遠方宇宙／初期宇宙
すばるで観測する宇宙の暗黒成分

海部 宣男
林 正彦
家 正則
田村 元秀
佐藤 文衛
柏川 伸成
嶋作 一大
宮崎 聰



小特集：すばる望遠鏡で探る宇宙

はじめに

海部 宣男

〈放送大学 261-8586 千葉市美浜区若葉 2-11 e-mail: Kaifunorio@aol.com〉

21世紀の天文学は、新たに活動を開始した新世代望遠鏡による観測の競演とともに幕を開けた。国立天文台が1991年から建設を開始した口径 8.2 m の可視光・赤外線用望遠鏡「すばる」がハワイ・マウナケア山頂でファーストライトを迎えたのは、1998年末から1999年の初めにかけてである。能動光学による主反射鏡面の高精度制御という新しい技術を基礎に、それまでの口径 4~5 m から一足飛びの大口径化を目指す世界的流れの中で、欧州連合(ESO)の 8.1 m×4 台の VLT(チリ)、米・英などが連携した 8.0 m×2 台の ジュニイ望遠鏡(マウナケアとチリ)との競い合いの中で、すばる望遠鏡も建設された。これらの望遠鏡は1998年から2002年にかけ相前後して完成し、観測態勢に入ったのである。

それ以後、改良されたハッブル宇宙望遠鏡や合わせ鏡方式の 10 m×2 台 KECK 望遠鏡と並んで、これら新世代望遠鏡は期待に背かない観測成果を生み出している。すばる望遠鏡の活躍は、中でもめざましいものがあった。特に望遠鏡の生命線とも言えるイメージがシャープなことでは、地上望遠鏡の中ですでに定評を得ているといってよいだろう。高精度の能動光学と駆動制御機構、円筒型ドームによる気流制御、周到な温度維持機構など、優れた結像性能実現のために考えられる限りの面で手を打ってきた、すばる望遠鏡建設の成果といえる。

本小特集は、ファーストライト以降のすばる望遠鏡による観測成果の一端を紹介するものである。全般的な活動状況と観測成果の概観(林論文)、観測装置や補償光学など技術面での進展のまとめ(家論文)に続いて、21世紀の天文学の二大中心分野でありかつすばる望遠鏡がいま世界をリード中の代表的観測分野である、太陽系外惑星の観測(田村・佐藤論文)、および観測的宇宙論における観測の進展(柏川・嶋作論文)がそれぞれ紹介される。最後は、ダークエネルギー研究に新たな可能性を開く次期大型カメラについての報告(宮崎論文)である。

太陽系外惑星は1995年以来、主にドップラー法という間接的観測法によって、すでに 250 個を超えて発見されている。相次ぐ発見は、これまでわが太陽系ただ一つがサンプルであった惑星系の概念に革命的な変動をもたらし、太陽系と地球の位置づけ、また宇宙における生命への視点も、大きく変わろうとしている。すばる望遠鏡は、補償光学と恒星コロナグラフを合わせたユニークな観測装置 CIAO や、目下世界最高の性能を持つ中間赤外線観測装置 COMICS によって、太陽系外惑星形成の現場である原始惑星系円盤

の観測で先頭を走っている。CIAO はまた、前人未到の課題である惑星の直接観測へのステップを確実に縮めている。観測的宇宙論では、これも新世代望遠鏡ではユニークな主焦点と組み合わせた広視野カメラ Suprime CAM、それに独自のフィルターシステムを組み込むことで、すばる望遠鏡は最遠方の銀河観測で独走的リードを保ってきた。いま観測は、「最初の天体」候補である原始銀河に迫り、ダークマターを追い詰め、ダークエネルギーの追及へと向かっている。

天文学における21世紀は、「宇宙の生命」を観測的に追う時代である。それとともに、時空と物質の起源の解明に向かう時代でもある。この二つの大きな流れを作り出す分野でのすばる望遠鏡の活躍は、日本はもちろん国際的にも、大きな刺激をもたらしている。しかし冒頭の林論文で紹介されているように、この間すばる望遠鏡によって得られてきた観測の成果は、これら両分野にとどまるものではもちろんない。すばるによる観測は、身近な太陽系から宇宙の森羅万象にわたる多彩かつ刺激的なもので、残念ながらこの小特集の紙面には、とうてい盛りきれるものではない(我田引水で恐縮だが、私の近著『すばる望遠鏡の宇宙』[岩波新書カラー版]に、かなり広い分野にわたるすばる望遠鏡の観測成果の紹介がある)。この多彩な観測を支えているのが、先に述べたイメージの良さに加えてすばる望遠鏡が持つもう一つの特徴、豊富な観測装置群だ。すばる望遠鏡は、日本が持つ唯一の光学赤外線の大望遠鏡であることに配慮し、一つの望遠鏡としては破格ともいえる七つの観測装置(可視光から中間赤外線、撮像から分光まで、それぞれに最先端の性能を有するものだ)を備えている。これら観測装置群が、自動装置による迅速な装置交換とともに多様な研究を支え、また個別の研究対象にも多岐にわたる観測データを提供してきた。各装置を大学で分担開発したことで若手研究者が大きく育ったことも含めて、すばるが日本のみならずアジア・世界の天文学研究に広く貢献し得ている要因ともなっていることは、重要である。

いま、8~10 m 望遠鏡の技術を基礎としたさらなる大型望遠鏡一口径 20~30 m の ELT の議論が、世界的に盛んである。日本でも、さまざまにその可能性が検討されている(家論文)。ELT は現在チリに建設中の日・米・欧共同の次世代電波望遠鏡 ALMA と同様、1,000 億円規模の計画であり、その実現には緊密な国際共同と10年を大きく超える時間が必要であろう。その前にすばる望遠鏡には、現在活躍中の観測装置を飛躍的な高性能を持つ次世代観測装置へと

更新し、次期スペース望遠鏡JWSTやELTが活躍する時代へとつなげていくことが求められている。こうした新しい観測装置の開発は、いまや10基前後が活動する8~10 mクラスの新世代望遠鏡の激しい競争の場でもある。本特集でも紹介されるHi-CIHO(田村・佐藤論文)やHyper Suprime-Cam(宮崎論文)は、その重要な一環だ。すばる望遠鏡には、今後10年から20年に及ぶであろう「充実・成熟と収穫の時期」に向けて、新たなレベルの国際共同と国際競争の中で、一層の観測能力の強化と組織的充実が求められている。そこでは、これまでの建設と観測で育った国内若手研究者の

力に加えて、アジアを中心とする国際的協力の抜本的強化も、重要なポイントになるだろう。

著者紹介



海部宣男氏：1943年生まれ。電波天文学・赤外線天文学を中心に星間物質、星と惑星の形成の研究、装置開発を推進。科学の普及と文明史的役割に関心を持つ。

(2007年8月28日原稿受付)

すばる望遠鏡の観測成果

林 正彦

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North Aohoku Place, Hilo, HI 96720, USA e-mail: masa@subaru.naoj.org〉

2000年に共同利用観測を開始して以来、すばる望遠鏡は可視光・赤外線天文学の幅広い分野で第一線の成果を上げてきた。なかでも、8~10 m級の可視光・赤外線望遠鏡ではすばるにしかない主焦点が利用できることで、広い視野にわたって高い感度と画質を必要とする観測では他の追随を許さない研究が行われている。本稿では、すばる望遠鏡の観測装置と共同利用について概説した後、代表的な観測成果について簡単に紹介し、世界におけるすばる望遠鏡の位置について考えてみたい。

1. はじめに

2007年は、すばる望遠鏡を運用する国立天文台ハワイ観測所が発足してちょうど10年目であった。日本で初めて海外に設置する研究施設として、その実現には予算だけではなく、制度上の困難が多く伴った。それらは今や過去の思い出となりつつあるが、多くの人々の努力や支援の結果として、すばる望遠鏡は天文学の広い分野にわたって第一線の成果を出すことができるようになった。この記事では、すばる望遠鏡のこれまでの成果を振り返り、世界におけるすばる望遠鏡の位置づけについて考えてみたい。

すばる望遠鏡の建設は1991年に始まった。標高4,200 mのハワイ島マウナケア山頂では、年を追って巨大な円筒型ドームが姿を現していく。同時に、日本国内では重さ555トンに及ぶ超精密機械、望遠鏡本体の製造が進んだ。主鏡となる直径8 m、厚さ20 cmのガラス材は、アメリカ合衆国で製作が進む。1997年、ハワイ島の東部、ヒロの町では、ハワイ大学ヒロ校の敷地内に研究実験棟が完成し、4月には日本から約20名の職員が赴任してハワイ観測所が発足した。仕事の中心が、それまでの日本からハワイへと大きく移る。ドームが完成し、内部では日本から運ばれてきた望遠鏡本体が組み立てられ、機械的な試験が進む。そして、1998年11月に主鏡となるガラス材がマウナケア山頂に到着した。誤差14 nmまで研磨されたその表面に、100 nmの厚さで一様にアルミニウムを蒸着し、主鏡を完成させる。1998年12月末、完成した主鏡を望遠鏡本体に組み込み、初めて天体を入れる。主鏡を支える261本のアクチュエータ

にかける力を調整すると、ひょうたん状の星がシャープな点状になっていく。新年を迎えて1月28日(ハワイ時間では27日)、試験観測で撮影した9枚の天体画像をファーストライトとして発表した。その後は、次々とやってくる観測装置を搭載しての総合試験が続いた。そして、2000年の12月から国内外の研究者に開かれた共同利用観測を開始した。

現在では、8~10 mの主鏡を有する可視光・赤外線望遠鏡は世界に10台以上存在する。このような状況のなか、他の大型望遠鏡を使用した研究者からは、すばるは撮像性能が極めて良いとの話を聞く。たいていは社交辞令だと受け流すが、なかには実際に他の大型望遠鏡で取得したデータと、すばるで同様の観測を行って取得したデータを比較して見せてくれる人がいる。それを見ると、たしかにすばるの性能が優れていることが分かる。これは、望遠鏡の固有振動を極限まで抑えこんだ精密制御技術の結果と言えよう。この撮像性能は、以下に紹介する観測装置と組み合わされ、広範な天文学の分野で特徴ある成果を出すに至っている。

2. 観測装置

すばる望遠鏡には焦点が4カ所あり、それぞれ特徴ある観測装置を搭載できる。可視光・赤外線天文学でいう観測装置とは、通常、二次元の半導体検出器と、それに像を結ばせるための光学系やフィルタなどからなり、雑音を低減するために全体、あるいは一部を真空容器に入れて冷却して使用する。検出器は、1 μmより短波長側ではCCD(Si)が使用できるが、それより長波長側ではSiよりバンドギャ

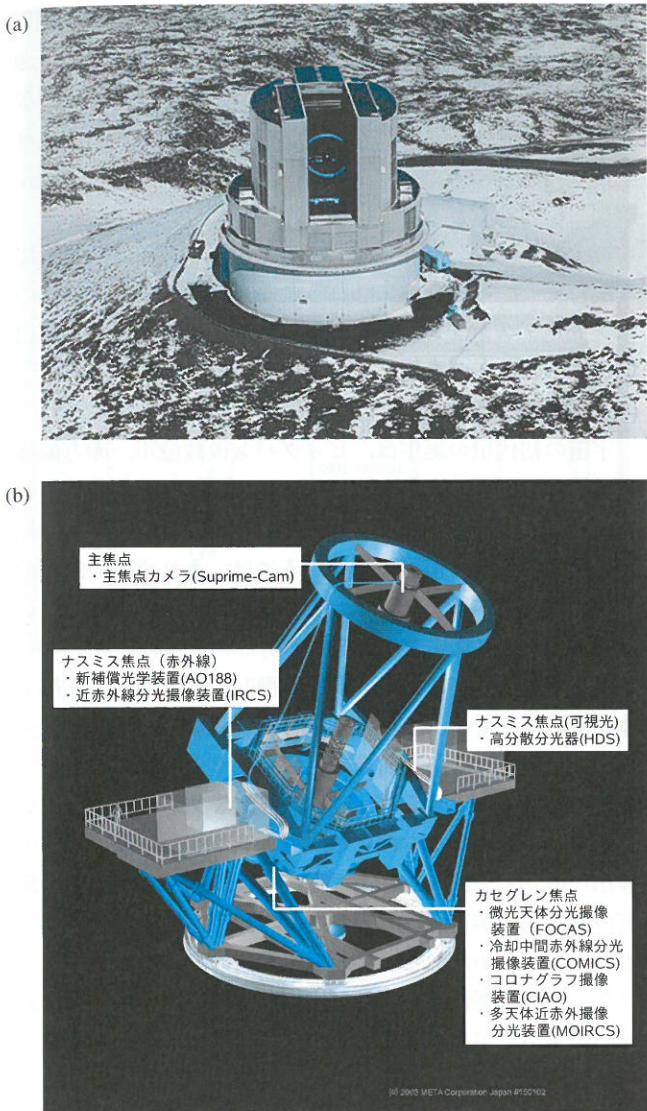


図1 (a) すばる望遠鏡全景. (b) すばる望遠鏡本体の概念図. 各焦点の位置と観測装置の名称を示す.

ップの小さい半導体を使用する必要がある。このため、天文学では「可視光」と「近赤外線」の境界は波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ とするのが普通である。当然のことながら、可視光、近赤外線、中間赤外線と波長が長くなるに従って、より低温の天体を観測する場合に重要となるが、また透過率も大きくなるため、暗黒星雲に埋もれた若い天体も観測できるようになる。さらに、最近では宇宙遠方にあって赤方偏移 $z (= \lambda/\lambda_0 - 1)$; ただし λ, λ_0 は、それぞれ観測系および静止系での波長) が 7 に近い天体も観測されるようになってきたが、このような天体では可視光が完全に近赤外線まで偏移してくるため、近赤外線は遠方宇宙の観測にとってますます重要となっている。

観測装置には、大きく分類すると天体を撮像するものと分光するものがある。以下に現在稼働しているすばる望遠鏡の観測装置を紹介する。¹⁾ なお、波面補償光学装置(AO)に関しては、本誌家正則氏の記事を参照されたい。

○すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam)

主焦点に搭載される広視野カメラであり、東京大学と共に開発された。視野は34分角×27分角で、8-10 m 鏡では他に例を見ない大きさである。遠方銀河や太陽系外縁部天体の探査、宇宙大規模構造の形成の研究などに使用されている。検出器は 800 万画素の CCD を10個並べてあり、いわば 8,000 万画素の超望遠広角デジタルカメラである。

○微光天体分光撮像装置 (FOCAS)

可視光での基本的な観測モード(撮像、分光、偏光)を提供する観測装置で、カセグレン焦点(主鏡の裏側にできる焦点)に設置される。多天体分光機能を備えており、視野内の 100 天体を同時にスリット分光できる。Suprime-Cam で発見した天体の分光に使用されることも多い。

○高分散分光器 (HDS)

ナスマス焦点(望遠鏡の両側で仰角軸上にできる焦点)に設置されている総重量 6 トンの可視光分光器。波長分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$) は10万で、星の元素組成を測定して宇宙の元素合成の歴史を研究したり、太陽系近傍の星のドッpler効果を秒速数メートルの精度で測定し、太陽系外惑星を検出する研究などに使用されている。

○近赤外線分光撮像装置 (IRCS)

ハワイ大学と共に開発された、波長 $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ の近赤外線で基本的な観測モードを提供する観測装置で、撮像用と分光用それぞれに 100 万画素の InSb 検出器を備えている。当初、カセグレン焦点で AO と組み合わせて使用していたが、新 AO がナスマス焦点に設置されることに伴い、今後はナスマス焦点で使用される。0.1秒角の角分解能と 2 万という波長分解能を生かして、星・惑星系形成領域や高赤方偏移天体の分光観測に多く使用されている。

○コロナグラフ撮像装置 (CIAO)

明るい天体の光を遮ることによって、そのすぐ近くにある暗い天体の近赤外線画像を取得する装置。カセグレン焦点で AO と組み合わせて使用される。100 万画素の InSb 検出器を使用。原始惑星系円盤の観測や、古い星からの質量放出現象の観測などに使用される。

○冷却中間赤外線分光撮像装置 (COMICS)

波長 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ から $25\text{ }\mu\text{m}$ の中間赤外線を観測する装置で、カセグレン焦点に設置される。8 万画素の Si:As BIB 検出器を分光用に 5 個、撮像用に 1 個使用する。この波長帯では星間ダスト(固体微粒子)の放射が強く、ダストの物理的性質や、惑星系の形成過程、銀河の大規模な星形成現象などの研究に使用される。

○多天体近赤外撮像分光装置 (MOIRCS)

近赤外線用としては巨大な 400 万画素の HgCdTe 検出器を 2 個使用した装置で、波長 $1\text{--}2.5\text{ }\mu\text{m}$ に感度を持つ。すばる望遠鏡のカセグレン焦点で 7 分角×4 分角の視野を撮影可能。また、視野内で 50 個の天体のスペクトルを同時に観測することができる。このレベルの装置は、他の 8-10 m 級望遠鏡ではまだ開発段階にある。

3. 共同利用

すばる望遠鏡を用いた観測提案は年2回公募され、半期(半年)平均で約130件の申請がある。観測申請書に名前を連ねている研究者の延べ人数(大学院生を含む)は約1,000名で、ひとつの申請あたり平均8名の研究者が参加している計算になる。提出された一つひとつの観測申請書は、通常5名のレフェリーによって審査される。5名のレフェリーのうち、平均すると2名は外国人である。申請が採択される倍率は、初期には5倍程度だったが、ここ2年は3倍から4倍程度に落ち着いてきた。それでも、すばる望遠鏡の観測時間を得るのは簡単ではない。

すばる望遠鏡による共同利用観測の機会は、全世界の研究者に公平に開かれている。現在のところ、主申請者が日本人以外である割合は全申請数の1割程度である。すばる望遠鏡の評判は天文学が盛んな欧米でも高いが、これらの国ではすでに10台以上の8-10 m級望遠鏡が稼働しているため、すばる望遠鏡でなければ実行できないテーマに的を絞って応募してくるようである。それに対して日本の研究者は、可視光や近赤外線で第一線のデータを得ようすると、どのようなテーマであれすばる望遠鏡に頼らざるを得ない状況にある。

すばる望遠鏡では、年間約240夜をこのように形での共同利用観測に使用している。共同利用の通常プログラムは、半期内で最大5夜の観測を限度としているが、研究者コミュニティからの要請により、重要と判断された観測計画に対して、複数期にわたって最大20夜を割り当てるインテンシブ観測プログラムも、2002年から実施している。また、すばる望遠鏡の特長を生かして歴史に残るような観測データを取得するため、戦略観測プログラムも今後は実施していく予定である。このような共同利用観測時間を使って、年間約80件の観測プログラムが実施される他、観測者不在で行う短時間プログラムも多数実施される。残りの夜数は、マウナケア山頂を管理するハワイ大学が協定に基づいて52夜を使用するほか、望遠鏡の機能更新や新規観測装置に伴う技術試験、国際共同観測などに充てられる。すばる望遠鏡で取得したデータを使用した査読論文数を見ると、過去3年の年間平均で約70編が出版されている。これは、マウナケアでの晴天率が約75%であることを考慮すると、データが取得できたほぼすべての共同利用観測プログラムで、その成果が査読論文となって出版されていることを意味する。

4. 主要な観測成果

すばる望遠鏡は、共同利用観測を通して広範な天文学分野の最先端の研究を推進していくとともに、現代天文学の重要なテーマの解明をめざすことを使命としている。現在の天文学の動向をみると、特に重要と考えられるテーマのひとつは「宇宙の進化」であり、最初の天体や大規模構造の形成、銀河の進化、ダークマター、ダークエネルギー等が

主たる対象となっている。もうひとつは「太陽系外の惑星」であり、主星のドップラー運動を検出する方法によって過去10年で多数の惑星の存在が確認されたが、より直接的な方法で惑星を検出し、その物理的特徴を明らかにする試みが続けられている。また、惑星系の形成過程についても、観測的に実証できる時代になった。

以上のテーマに関するすばる望遠鏡の成果については、本稿に続く記事で詳細に触れられるが、ここではそれらのイントロダクションも含めて、より広範なテーマから面白いと思われるものを選んでいくつか紹介したい。

(1) 最遠方銀河の検出

宇宙の初代星の誕生は、ビッグバン後数億年、赤方偏移で言うと $z=10$ 前後であると考えられている。遠方銀河の探査は、2002年の時点で $z=6$ 前後まで進んでいたが、初期の銀河形成や宇宙再電離を探るには、より遠方の銀河の大規模な探査が不可欠とされていた。Suprime-Camを用いた「すばる深宇宙探査」計画は、明るい天体の存在しない天域を長時間露出によって多色撮像し、遠方銀河の候補天体を多数検出した。その候補天体の分光観測はFOCASを用いて行われ、 $z=6.6$ 前後の天体が続々と確認されるようになった。²⁾同じ領域に対して、新たなフィルターを用いて観測を追加することにより、2006年には $z=7.0$ の銀河の検出に成功した。³⁾この赤方偏移では、 $z=6.6$ に比べて銀河の個数密度が有意に減少しており、宇宙再電離が完了していなかったか、あるいは明るい銀河の形成が十分進んでいなかった可能性が考えられている。いずれにしても、銀河の観測が、宇宙初期の銀河誕生の時期にいよいよ踏み込んできたといえる。詳細は、本誌柏川・嶋作両氏による記事を参照されたい。

(2) ガンマ線バーストの起源

短時間の間、強力なガンマ線が放出される現象はガンマ線バーストとして知られ、発見から約30年もの間、その起源は不明のままであった。しかし、ガンマ線バーストのうち比較的継続時間の長いものは、爆発エネルギーの極めて大きな超新星爆発(極超新星)に関係していることがほぼ明らかになってきた。その重要な観測的根拠のひとつは、GRB030329に対応する天体が可視光観測によって検出されたことによって得られた。対応天体は、Ic型超新星(大質量星が最後に引き起こす爆発の一種)であると確認されたが、すばる望遠鏡のFOCASを用いたこの天体の分光観測の結果、そのスペクトルは過去に知られている極超新星によく似ていることが示され、ガンマ線バーストと極超新星の関連性を明瞭に示すことになった。⁴⁾

(3) 赤方偏移6.3のガンマ線バースト

宇宙の中で最もエネルギーの大きな爆発現象とみられるガンマ線バーストは、可視光の残光も極めて明るいため、数日間という短期間ながら、高赤方偏移においても観測が可能である。赤方偏移の測定には分光観測が必要とされるが、2005年9月に出現したGRB050904は $z=6.3$ という、

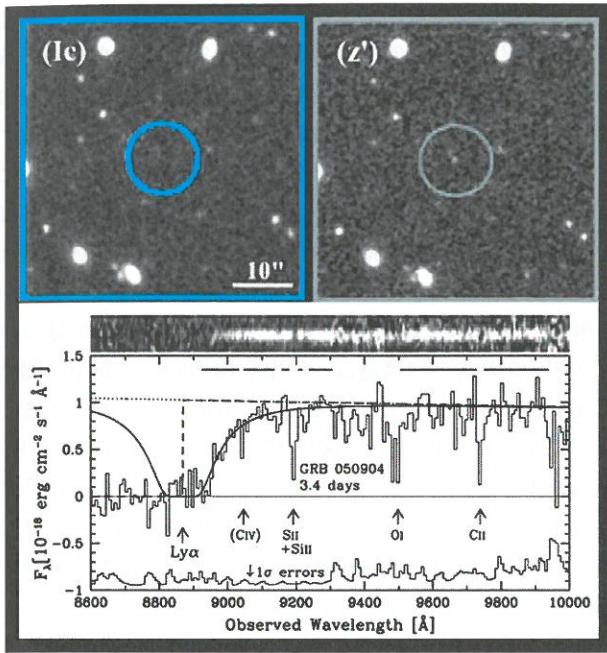


図2 ガンマ線バーストGRB050904の残光スペクトル(発生から3.4日後)。上段が検出器上のデータで、中段がフラックス密度に直したスペクトル。下段は比較のために示した地球大気の発光スペクトル。戸谷らによる結果。

過去に例のない高赤方偏移での爆発であることが、すばる望遠鏡のFOCASによる観測で明らかになった。⁵⁾ そのスペクトルの水素のライマン系列吸収線の解析(図2参照)から、 $z=6.3$ における宇宙の中性度に制限が得られた。⁶⁾ ガンマ線バースト残光の観測は、宇宙再電離への制限として期待されていたが、それが現実のものとなった最初の例である。⁷⁾

(4) 重力レンズ現象を用いた暗黒物質分布の測定

銀河、銀河団、宇宙の大規模構造などは、宇宙初期にダークマターに小さな密度揺らぎが生まれ、それが130億年以上かけて成長することにより作られたと考えられている。ハッブル宇宙望遠鏡のCOSMOSプロジェクトでは、0.05秒角の分解能で約50万個の銀河の形態を詳細に調べ、重力レンズ効果を用いて視野内のダークマターの分布を調べた。一方、すばる望遠鏡では、Suprime-Camを用いて多色撮像観測を行い、これらの銀河の距離を推定した。これによって、重力レンズ現象を引き起こしているダークマターの距離を推定して、ダークマターの3次元的な空間分布(図3参照)を世界で初めて明らかにし、銀河の3次元分布と比較した結果、銀河はまさにダークマターの作る大規模構造の中に分布していることがわかった。⁸⁾ これによって、ダークマターの作る大規模構造の中で、銀河が形成され、進化してきたというシナリオに観測的に強い支持が与えられた。

(5) 銀河団形成

銀河団は、数百から数千もの銀河が群れる、宇宙で最大の天体である。その中では年齢の古い楕円銀河が多いことが知られており、比較的年齢の若い渦状銀河が多い一般領

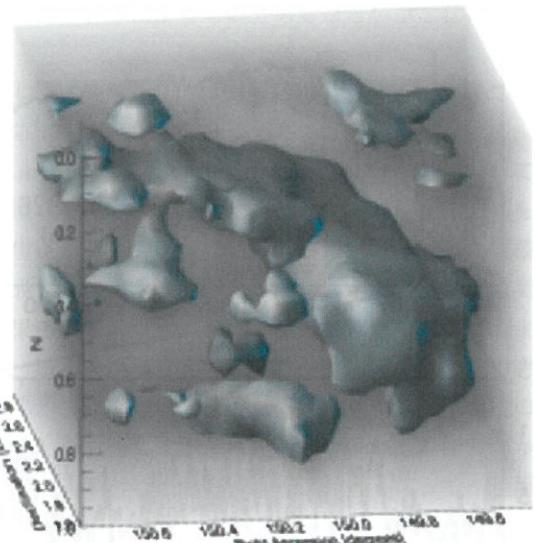


図3 重力レンズ効果を用いて明らかにされた暗黒物質分布。高さが奥行き方向(単位は赤方偏移)、それ以外が天球面上での拡がりを示す。COSMOSプロジェクト⁸⁾による結果。

域(フィールド)とは対照的である。このような銀河団自体と、それを構成する銀河に見られる強い環境依存性がどのように形成されたかは、依然大きな問題である。すばる望遠鏡の広い視野はこのような大きな天体の観測に最適であり、遠方銀河団の系統的な広視野観測がなされている。Suprime-CamやFOCASを用いた可視光での撮像分光観測では、宇宙年齢が現在の1/3から2/3の時代の銀河団の大規模構造が明らかにされた。銀河団本体から伸びる複数のフィラメントに沿って銀河群が並んでおり、銀河団はそれらの構造を飲み込みながら成長する進化途上にあることがわかった。⁹⁾ また、すでにこの時代に銀河の特性に強い環境依存性が見られ、特に銀河群のスケールで顕著な変化を示すことから、ある程度銀河が寄せ集まつた環境で、銀河同士の相互作用により、銀河特性が変化すると考えられる。¹⁰⁾ これらの観測により、銀河団が重力的に成長していくという階層構造形成の理論の予測が実証的に確認されたといえよう。

(6) 宇宙の初代星の元素合成

ビッグバン後の宇宙は水素とヘリウム、および微量のリチウムだけからなり、宇宙の初代星は重元素を全く含んでいなかった。銀河系には、重元素をわずかしか含まない星(極低金属星)が存在しているが、これらは宇宙誕生からまもない時代に生まれた星の生き残りと考えられている。HDSによる観測から、これまでに知られている中で、鉄などの重元素組成が最も低い星が発見された(図4参照)。その化学組成は、重元素の極端な少なさにもかかわらず、炭素や窒素などの軽元素は比較的多量に存在するという特異なもので、宇宙の初代星が起こした特殊な(非球対称の)超新星爆発などがその起源として考えられている。この天体では、軽元素リチウムや重元素ストロンチウムの組成においても、他の低金属星からの予想とは異なる値が得られ

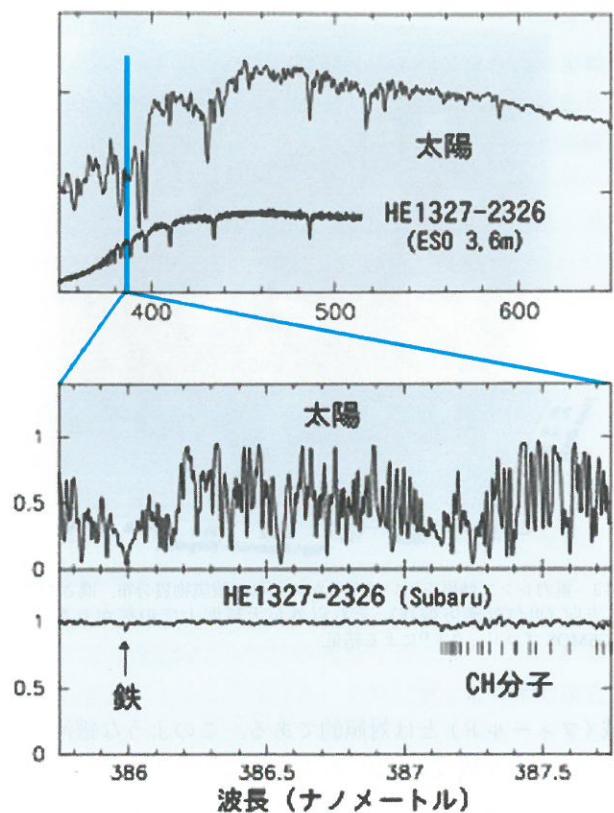


図4 最も重元素組成の低い星 HE1327-2326 の可視光スペクトル。上段が準備観測で得られた分散の低いスペクトルで、下段がすばる望遠鏡によって得られたスペクトル。比較のために太陽のスペクトルも示した。

ており、初代星の元素合成の理解に重要な制限を与える結果となっている。¹¹⁾

(7) 矮小銀河のハロー構造の発見とその形成過程

銀河系のグループには、その周りを取り囲むように矮小銀河も多数属している。銀河系とアンドロメダ銀河という大型銀河から比較的離れたところにある矮小銀河は、他の銀河と相互作用することなく進化し、構造も単純であると考えられてきた。しかし、Suprime-Camによる矮小銀河しし座Aの観測によって、この銀河の赤色巨星の分布が調べられ、従来知られていたのに比較して2倍の距離までしし座Aに属する星が存在していることがわかった。また、この新たに発見された領域の星の密度分布は円盤部のそれとは異なり、渦状銀河のハローの星の分布に近いことも明らかになった。色等級図からこれらの星の金属量は低いと推定され、年齢も古くと見られることから、この新しい構造は矮小銀河しし座Aのハローであると考えられる。一般に、銀河のハローは銀河の衝突・合体の痕跡と考えられているから、この発見から、孤立して存在しているこの銀河も複雑な構造をもっていることがわかり、矮小銀河もさらに小さな銀河が合体して形成された可能性が示された。¹²⁾

(8) 様々な形態を示す原始惑星系円盤を発見

太陽質量程度の若い星（年齢100万から1,000万年）には、質量が太陽の0.1%から10%で、半径が数十から数百天文単位（1天文単位は太陽・地球間の距離）の円盤が付随し

ている。このような円盤は、私たちの太陽系の形成を考えるときに想定される原始太陽系星雲の条件によく似ていることから、原始惑星系円盤と呼ばれる。原始惑星系円盤の内部で微惑星形成が進行するためには、ガスを主成分とする円盤は重力的に安定で、十分に長期（1,000万年以上）にわたって存在し続ける必要があり、内部で惑星が形成されない限り、その表面の構造は滑らかなものと考えられてきた。しかし、CIAOとAOを使用して撮影されたいつかの星の円盤には、渦巻きやアーチ状などの構造が見られた。^{13,14)} このような構造は、円盤が重力的に不安定な場合には生じるが、そのような円盤は、数回転する間に不安定性が成長して円盤全体が分裂してしまうので、観測にかかる可能性は確率的に低い。円盤内に惑星が存在する場合にも同様の構造が生じるが、発見された構造の中には木星質量の10倍以上の惑星は検出されていないので、もし惑星が存在するならばこれより小質量のものに限られる。

(9) 星の周りでの微惑星の形成とその組成

太陽系のような惑星系形成にあたっては、まず種になる微惑星の形成が進むと考えられている。惑星系が形成されている途上にあると予想されるがか座ベータ星に対して行われた、COMICSによる観測から、この星の周りに、リング状にダストが撒き散らされている場所があることが判明した（図5参照）。観測されたのは大きさ1μm以下のダストであるが、このような小さなダストは数年程度のタイムスケールで吹きとばされるため、より大きな天体、すなわち微惑星の衝突によって常に供給されていると考えができる。すなわち、この検出は微惑星の存在を強く示唆するものとなった。微惑星の存在していると考えられるベル

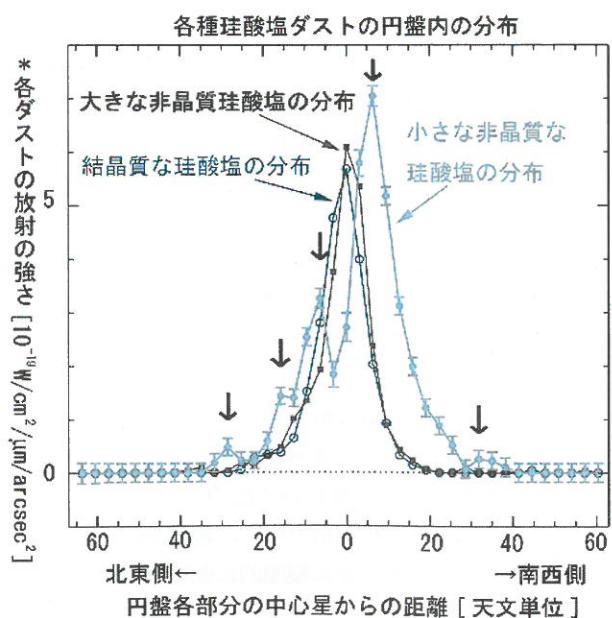


図5 かか座β星円盤内のケイ酸塩ダストの分布。横軸は中心星からの距離で、3本の線はそれぞれ、結晶質のケイ酸塩（白丸）、数ミクロン程度の非晶質ケイ酸塩（四角）、1ミクロン以下の小さな非晶質ケイ酸塩（黒丸）の放射強度分布を表す。小さな非晶質ケイ酸塩は星の中心から離れたところに分布のピークをもつことがわかる。（結晶質および大きな非晶質ケイ酸塩の分布は、この観測では空間的に分解できていない。）

ト状の領域は、中心星から半径 6, 16, 30天文单位の三つが見つかっており、その周辺では惑星形成が進んでいる可能性がある。¹⁵⁾

(10) 分子スピン温度で探る彗星の形成

彗星は太陽系の形成初期に作られ、現在まで生き残っている天体であると考えられ、太陽系の誕生を理解する上で重要な天体である。彗星に含まれるアンモニアや水などの分子は、含まれる水素原子の原子核がもつスピン状態により、オルソとパラという二つの状態に分類できる。その存在比は、彗星核が凍りつく前の比率がそのまま保存されていると考えられ、彗星物質の起源を探ることに利用できる。すばる望遠鏡のHDSやIRCSを用いて、これまでに3個の彗星について、NH₂分子（アンモニア分子起源）や水分子、メタン分子の高分解能分光観測が行われた。その結果はいずれも、約30 Kの温度環境において分子のオルソとパラの比率が平衡になった可能性を示唆しており、太陽系の外縁部（あるいは太陽系の起源となった分子雲）における温度を反映していると考えられる。^{16, 17)}

(11) 小惑星のサイズ分布と月クレーターの起源

火星と木星の間の小惑星帯に属する天体は、地上からの観測で発見され、そのサイズ分布が調べられてきた。その中で、直径1 km以下の天体については、すばる望遠鏡のSuprime-Camの観測が初めて多数（約2,000天体）の検出に成功し、そのサイズ分布を決定した。その結果、小惑星帯の天体のサイズ分布は、地球に接近する軌道をもつ（そのためには小さなものまでよく研究されている）天体のサイズ分布とは異なることが明確になった。このサイズ分布の違いは、月表面の比較的古い（約38億年前）クレーターを作った衝突天体と新しいクレーターを作った衝突天体のサイズ分布の違いに対応しており、約38億年前に起こったとされる月（および地球を含めた惑星）への激しい天体衝突

が小惑星帯の天体によるものであることが示された。^{18, 19)}

5. すばる望遠鏡の世界における位置と今後

すばる望遠鏡は、その極めて高い撮像性能によって、他の8-10 m級望遠鏡と比較して十分互角に、場合によっては勝る成果を上げてきた。特に、他の大型望遠鏡には類を見ない主焦点の存在によって、最遠方銀河の発見や大規模構造の形成メカニズムの究明など、初期宇宙の観測では突出した成果を上げ、世界における位置を確立したと言えよう。

また、可視光から近・中間赤外線にかけて、大気の窓をカバーする装置をすべて揃えているのもすばる望遠鏡の特徴である。そのため観測装置の台数が多く、維持費がかかる割には1台あたりの平均使用頻度が低くなっている。運用面では不利になる。しかし、すばる望遠鏡1台で多くの研究者の観測要求を満たすことができるため、太陽系天体から宇宙論まで、天文学の広い範囲で第一線の研究ができる望遠鏡となっていることは重要な点である。

すばる望遠鏡は、今後も長期にわたって第一線の成果を出し続けていくに違いないが、それには当然のことながら望遠鏡の性能を不斷に向上させていく必要があり、同時に時代の最先端の観測装置を開発していく必要がある。また、今後10年程度を目処に、ハッブル望遠鏡の後継機となる宇宙望遠鏡や、20-30 m級の可視光・赤外線望遠鏡が地上で稼働を開始する予定だが、その時代にすばる望遠鏡が果たす役割を戦略的に考えておく必要がある。

望遠鏡本体の性能向上に関して、早急に実施しなくてはならないのは、精密制御の基本となっている下層レベルの制御ユニットの刷新である。これらに組み込まれているマイクロプロセッサは10年以上前のもので、負荷が大きく、壊れても代替品が入手できない状態にある。この作業は、数年かけて現在実施している段階にある。

新たな観測装置に関しては、すばる望遠鏡の独壇場である主焦点の機能を最大限に生かす装置や、高い撮像性能を利用する装置などが製造や設計の段階にある。これらの完成によって、すばる望遠鏡は少なくともあと10年は第一線の成果を出し続けていけるはずである。以下に、それらを紹介しておく。

○次世代波面補償光学装置(AO188)

第一世代のAOは36自由度の波面補正を行うものだったが、共同利用に向けて現在最終調整を行っている第二世代のAOは188自由度の補正を行うことができる。これによって、近赤外域における性能（主鏡の回折パターンへのエネルギー集中）は限界近くまで高められ、また波長600 nm程度の可視光でも分解能0.1秒角を実現できる。AO188は、従来のように自然星を参照して波面補正を行う方法以外に、夜空にレーザーを打ち上げて人工の星を作り、これを参照星として波面補正を行うこともできる。これによって、明るい自然星のない天域でもAOが使えるようになるため、観測対象や天域が飛躍的に広がる。共同利用に向けて最終

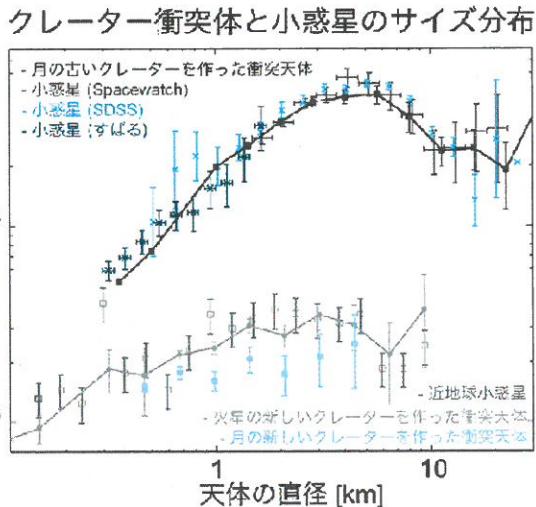


図6 クレータを作った衝突天体のサイズ分布と、現在の小惑星サイズ分布の比較。小さな小惑星のサイズ分布（四角で示したデータ点）はすばる望遠鏡による観測で決められた。月の古いクレータを作った天体の分布（上の実線）の分布が現在のメインベルト（火星と木星の間）の小惑星のそれと一致する。

調整中。詳細は、本特集の家正則氏の記事を参照。

○新コロナグラフ撮像装置 (HiCIAO)

第一世代の AO と CIAO の組み合わせでは、明るい星のすぐ近く（1秒角程度の距離）に、それに対して1万分の1くらい暗い星があっても検出可能だった。AO188用に開発されているコロナグラフ HiCIAO では、これが10万分の1程度の明るさでも検出できるようになる。新コロナグラフは、わずかな波長差や偏光の違いを利用して、主星の強い光を差し引く工夫がされている。共同利用に向けて最終調整中。詳細は、本特集の田村元秀氏の記事を参照。

○ファイバー多天体分光装置 (FMOS)

すばる望遠鏡の主焦点の広い視野を生かして、最大400個の天体の近赤外線スペクトルを一度に撮影できる装置。望遠鏡で集められた天体の光は、1天体ごとに別々の光ファイバーで分光器に導かれる。共同利用に向けて最終調整中。

○超広視野主焦点カメラ (Hyper Suprime-Cam)

現在の Suprime-Cam の視野をさらに10倍広げて、宇宙遠方の銀河の観測などに用いるほか、ダークエネルギーの研究にも用いるカメラ。現在、概念設計の段階にある。詳細は、本特集の宮崎聰氏の記事や本誌2007年2月号の須藤靖氏の記事²⁰⁾を参照。

10年後には、2013年に NASA が打上げる直径6mの赤外線宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope) が稼働しており、また、それに合わせて直径30~40m級の超大型地上可視光・赤外線望遠鏡も稼働を開始する予定である。そのような時代にも、すばる望遠鏡は重要な役割を担い続けるはずだが、しかし、その時代におけるすばる望遠鏡の役割をより一層重要なものにするためには、日本も遅れることなくこれらの超大型計画に関与し、すばる望遠鏡で培われた第一級の研究レベルを維持しさらに発展させていくことが必要であろう。

最後に、本記事の執筆を企画し、細部にわたって支援をいただいた青木和光、有本信雄の両氏に感謝します。

参考文献

- 1) <http://www.naoj.org/Observing/Instruments/index.html>

- 2) K. Kodaira, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **55** (2003) L17.
- 3) M. Iye, et al.: Nature **443** (2006) 186.
- 4) K. S. Kawabata, et al.: Astrophys. J. **593** (2003) L19.
- 5) N. Kawai, et al.: Nature **440** (2006) 184.
- 6) T. Totani, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **58** (2006) 485.
- 7) 戸谷友則: 日本物理学会誌 **62** (2007) 23.
- 8) R. Massey, et al.: Nature **445** (2007) 286—Dark matter maps reveal cosmic scaffolding.
- 9) T. Kodama, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **57** (2005) 309.
- 10) M. Tanaka, et al.: Mon. Not. R. Astron. Soc. **362** (2005) 268.
- 11) A. Frebel, et al.: Nature **434** (2005) 871.
- 12) V. Vansevicius, et al.: Astrophys. J. **611** (2004) L93.
- 13) M. Fukagawa, et al.: Astrophys. J. **605** (2004) L53.
- 14) M. Fukagawa, et al.: Astrophys. J. **636** (2006) L153.
- 15) Y. Okamoto, et al.: Nature **431** (2004) 660.
- 16) H. Kawakita, et al.: Science **294** (2001) 1089.
- 17) H. Kawakita, et al.: Astrophys. J. **643** (2006) 1337.
- 18) F. Yoshida, T. Nakamura, J. Watanabe, D. Kinoshita, N. Yamamoto and T. Fuse: Publ. Astron. Soc. Jpn. **55** (2003) 701.
- 19) R. G. Strom, R. Malhotra, T. Ito, F. Yoshida and D. A. Kring: Science **309** (2005) 1847.
- 20) 須藤 靖、高田昌広、相原博昭: 日本物理学会誌 **62** (2007) 83.

著者紹介



林 正彦氏: 専門は星・惑星系形成過程の観測的研究。特に、原始惑星系円盤の構造、運動、形成過程や、円盤から星へのガス降着に伴うジェットなどの質量放出現象を主なテーマとしている。

(2007年8月28日原稿受付)

Subaru Telescope and Its Science Achievements

Masahiko Hayashi

abstract: Subaru Telescope has been producing world frontier results in the wide areas of optical and infrared astronomy since its open-use operations began in 2000. It is unrivaled, above all, in wide field observations that require the highest sensitivity and image quality, thanks to the unique prime focus availability among 8–10 m class telescopes. In this article, I would like to briefly introduce major scientific achievements of Subaru Telescope along with an overview of its instruments and open-use system, and discuss its role and place in the world astronomy.

すばる望遠鏡と観測装置の技術開発

家 正則 〈国立天文台光赤外研究部 181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 e-mail: iye@optik.mtk.nao.ac.jp〉

すばる望遠鏡による観測成果は、先端技術を導入して製作した観測装置と望遠鏡の結像性能に負うところが大きい。本稿では、すばる望遠鏡建設と観測装置開発の裏舞台にあつたいくつかの技術開発のエピソードと、補償光学技術など最先端の光制御技術の原理、そして次世代の超大型望遠鏡の実現に向けた開発について解説する。

1. 「技術検討会」と「8 m クラブ」

基本設計

光赤外天文学者が結成した光学天文連絡会は激論の末、1984年に7.5 m 大型光学赤外線望遠鏡計画の推進を決議した。これを受け、東京大学東京天文台（1988年からは国立天文台）は、延べ50回の「技術検討会」を開催し、望遠鏡構想の具体化を進めた。有効口径を8.2 m に格上げするなどの紆余曲折があったが、1991年から建設が開始され、1999年に「すばる望遠鏡」が完成した。¹⁻⁵⁾

望遠鏡設計はまず観測目的に適した光学系の設計から始まる。さまざまな目的の観測装置を装備するため、すばる望遠鏡では筒先の主焦点、主鏡の裏側のカセグレン焦点、望遠鏡の両サイドにナスミス焦点を備えることが早い時期に合意された（図1）。最大の課題であった主鏡については、単一の薄いガラス鏡を後述の「能動光学」方式を用いて、反射面形状を制御し性能を出す方式とした。

東京天文台岡山天体物理観測所の188 cm 望遠鏡に筆者が液体窒素冷却CCDカメラを導入したのは1986年のことであった。最初のCCDはわずか16万画素で大きさも1.5 cm 角程度でしかなかったが、写真乾板の時代が終わることを示すには十分な性能だった。CCDの大型化、モザイク化に目処があったわけではないが、すばる主焦点の視野は、視野補正レンズの製作限界一杯を確保することとした。

8 m クラブ

さて、このようにして基本方針が固まり、すばる望遠鏡の建設が始まろうとしていた頃、後発の米・英・カナダ他の国際構想8.0 m ジェミニ（Gemini）望遠鏡計画が予算承認

の最終段階にきていた。そこでジェミニグループが、先行して8.1 m VLT（Very Large Telescope）の建設に着手していた欧洲南天天文台（ESO）と日本のすばるグループに呼びかけ、互いの計画を比較検討する場を設けることになった。「8 m クラブ」と名づけた会議は、1994年までに計5回開催された。この三つのグループは互いにライバル関係にあるが、8 m 級の薄いガラス鏡を能動光学方式で実現するという、初挑戦の共通課題を持っていたため、8 m クラブの議論は大変率直で中身のある交流となった。

互いの計画を比較すると、ゴールが共通なのにアプローチが三者三様であることが浮き彫りになった。まず、主焦点を備えるのは、すばる望遠鏡だけであった。主焦点装置は望遠鏡構造への負担が大きく、ドームも大きくなり、予算も高くなるため米欧の8 m 級望遠鏡は主焦点を断念した。また、すばるでは、主焦点カメラや副鏡類を交換し、カセグレン観測装置も交換して運用することにしたが、米欧の望遠鏡では副鏡や観測装置は交換しない方式を選んだ。これは装置交換の再調整に時間がかかり、観測効率が下がるという経験からの判断だった。

当時、米欧の一部の研究者からは、すばるの基本方針は野心的過ぎないかと心配する声があった。この不安を解消したのが、後述するすばらしい性能の主焦点補正光学系の完成と、副鏡やカセグレン装置のロボット交換機構の実用化であった。

2. 「能動光学」と主鏡精度

能動光学

比較的剛性の低い薄ガラス主鏡の反射面形状を測定し、鏡の力支持機構をリアルタイム制御して、低次の変形モードを修正すれば、常に理想的な鏡にすることができるという「能動光学」のアイデアは、欧洲南天天文台のR. ウィルソンが1980年代初めに提唱したものである。一見関係なさそうだが、銀河円盤の自己重力振動の問題を研究していた筆者には、構造行列の固有値問題に帰着するこの考え方は極めて素直に受け入れることができた。

すばる望遠鏡の能動光学方式の採用は、直径62 cm の球面鏡にすばる主鏡支持用に開発中であったアクチュエータ^{†1}を9本取り付け、その鏡面形状を十分な精度で測定し制御できることを実証した試験（図2）で本決まりとなっ

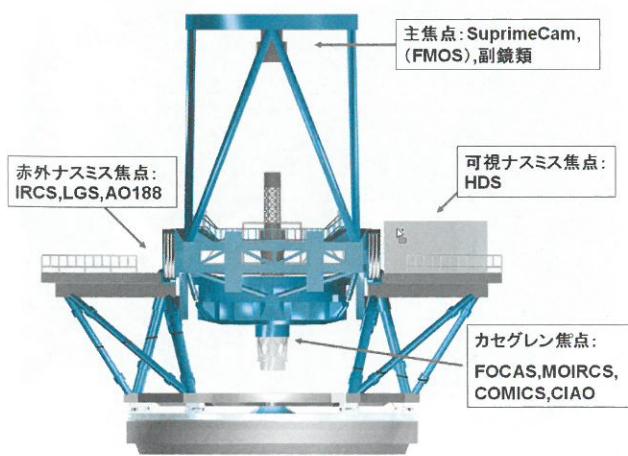


図1 すばる望遠鏡の四つの焦点と搭載装置類

†1~†4 の用語説明は、本文末にある。

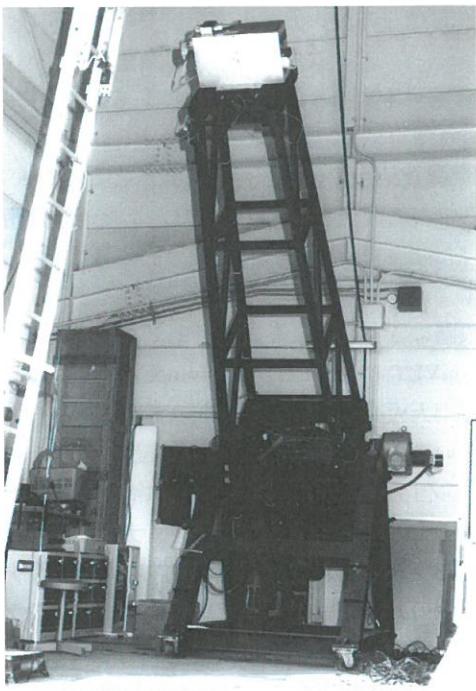


図2 すばる望遠鏡実現のブレークスルーとなった62 cm能動光学実証試験装置(1989年10月)。

た。主鏡測定には当時、国立天文台で手作りしたシャック・ハルトマン型カメラ¹²を用いた。

すばる望遠鏡の実際のシステムは直径8.3 m、厚さ20 cm、重さ22トンの超低膨張ガラス主鏡を261個のアクチュエータと3カ所の固定点で支え、天体の追尾中も支持力をフィードバック制御して、その反射鏡面の形状を理想的な回転双曲面形状に維持する。ときおり、明るい恒星を光源として、シャック・ハルトマン型カメラで主鏡の絶対形状を測定し、最適な支持力の設定を校正する。形状の時間変化はアクチュエータ内蔵した高精度センサーで測定した支持力分布から算出する。このために必要な誤差0.01%の高精度力センサーは、応力による音叉の振動数の変化を測定する新しい方式のものが開発され、実用化することができた。

能動光学系は実時間制御系なので、状況の変化に対応して自重変形誤差、熱変形誤差、研磨・調整誤差などをほぼ完全に除去でき、光学系の自動合焦、自動収差除去が実現できる。

薄レンズのポケット

コーニングガラス社で製作された直径8.4 m厚さ30 cmの超低膨張ガラス材の研削・研磨は、ピッツバーグ近郊の石灰岩の採掘鉱跡の地下にあった同社の施設を拡張して行うことになった。地下施設は気温の変化や風の影響を受けないという利点がある。まず、ガラスの裏面に261個の主鏡支持用アクチュエータを差し入れるポケットを掘った。ポケットの隅に傷があると、規定以上の力がかかったときに傷が進行して、大切な主鏡が割れてしまう恐れがある。ポケットを掘らないほうが安全だが、その場合は力の作用点をガラスの重心面に一致させることができないため、鏡の

形状の制御誤差が大きくなる。詳細は省くが細心の安全策を講じて、最高性能を目指すこととした。プロジェクトの中でもリスクのある決断の一つだった。

鏡面測定法

鏡面を正しく研磨するには鏡面を正確に測定することが不可欠である。凹面球面の測定法としては、曲率中心において点光源からの光束をマルレンズ¹³で被検非球面に垂直に光線が入射するように変換し、被検面からの反射光と基準参照光の干渉縞をフィズー干渉計¹⁴で測定するのが最も一般的である。短時間露出により空気の揺らぎを凍結した計測を多数行い、統計処理により揺らぎの効果を除去して鏡面形状を評価する。

主鏡の測定はマルレンズを頼りにして進めるので、マルレンズに間違いがあることはない。実際には赤外用マルレンズと可視用マルレンズを独立に作り、研磨誤差が小さくなり測定方式を赤外から可視に切り替えるときに両方のマルレンズでの測定に矛盾がないことを確認した。

鏡面研磨

研磨の基本はモグラ叩きに似ている。鏡面のわずかな山を着実につぶしていくことが大切である。山と谷を見誤って谷を削ってしまうと、その分全体を磨き直す必要が生じ、一大事である。通常、一工程での各点での研磨量が目標量の2/3程度となるように、研磨砥石の押下圧、砥石と鏡面との相対速度、その点の総通過時間を調節する。研磨は直径3 mの大型砥石からしだいに小さいサイズの砥石に移行する。

研磨の最終検査は山頂で使う実際の主鏡支持装置を研磨工場に持ち込み行った。契約上は1998年8月上旬に仕様値をクリアしたが、当時、フランスのレオスク社で先行製作された欧州南天天文台の8 m主鏡の1枚目の仕上げ精度を超えることを目標にさらに2週間の研磨を行った。その結果、能動支持機構で修正できる変形モードの補正後の形状誤差が14 nmの世界最高の鏡が完成し(図3)、1998年8月

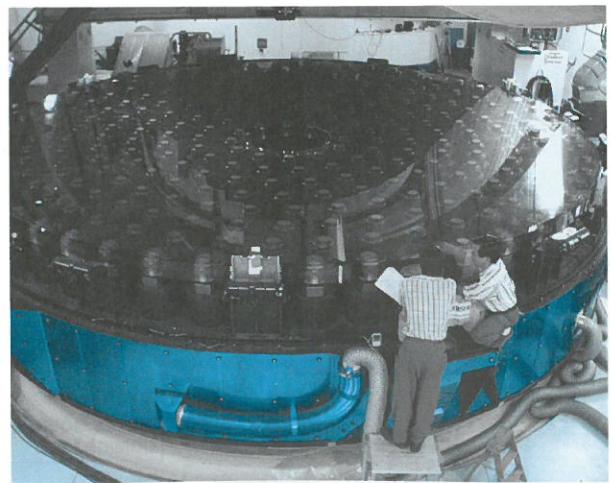


図3 主鏡の最終検査。裏面の能動支持機構のアクチュエータ群が透けて見える。

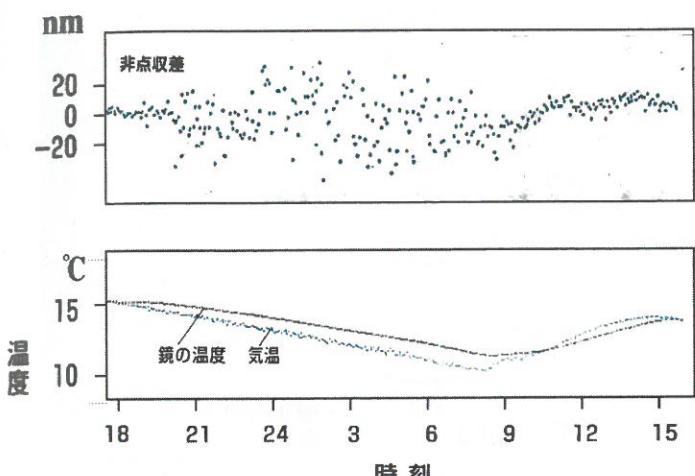


図4 ミラーシーイング現象の発見。気温が低下していく夜間、遅れて冷える鏡面の温度が気温より高く、鏡から陽炎が立つため、波面測定値が乱れることが示された。

26日に現地で記者会見を行った。翌朝の現地新聞には当時封切りされていた日本映画「ゴジラ」にかけて、「ゴジラのコンタクトレンズが完成した」という見出しが躍った。

3. 星像改善の方策

ミラーシーイング

62 cm 鏡の能動光学実証実験の過程で思わぬ発見があった。鏡の形状測定を精度良く行うため、人や自動車による外乱の少ない夜間に連続自動測定試験をしたところ、期待に反して夜間の測定データのほうが昼間に測ったデータよりも、値がばらついてしまった(図4)。この原因は鏡から立つ陽炎であった。気温が下がっていく夜間、熱容量の大きい鏡の温度降下は気温の降下より必ず遅れる。このため、気温より鏡が暖かい状態になり、鏡から陽炎が立つ現象が起こるのである。この発見は、世界中の望遠鏡が、実は夜間、鏡から陽炎を立たせながら観測していることを意味する。明確な測定データとしてこのことを立証したこの論文は海外でも注目され、望遠鏡の熱管理の重要性が認識されるきっかけとなった。陽炎は明らかにシーイング(大気揺らぎによる星像の拡がり)を悪くするので、すばる望遠鏡では主鏡を、予測される夜間気温より2-3度低い温度に昼から予冷し、陽炎が立たないように工夫することにした。

通風ドーム

もう一つの工夫はドームの構造である。まず、従来の常識であった半球形のドームに比べて地上付近の乱れた風(接地境界層)を巻き上げず、両側に流すことができる円筒型ドームを採用した。さらに、ドームに十分な開口部を設けて適度な通風を確保し、ドーム内外の気温差が生じないようにした。そして、望遠鏡の両側に高さ20 m長さ35 mの黒壁を設けて、流れる風が乱れないように工夫した。銀河の分布の大規模構造の研究にちなんで、この黒壁をグレートウォールと名づけた。

これらの工夫が実際にそれぞれどれくらい効いているの

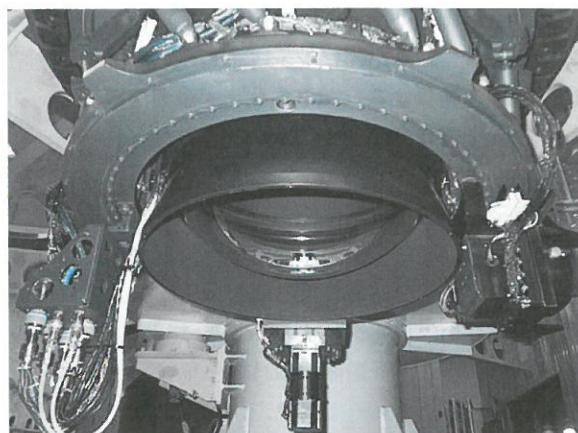


図5 主焦点補正光学系の第一レンズ。

か、定量的な分析はまだできていない。だが、すばる望遠鏡の星像が同じマウナケア山頂の他の望遠鏡に比べて良い理由の一つであることは間違いない。

4. 主焦点の活用

すばる望遠鏡の自慢は視野の広い主焦点カメラの活躍である(宮崎氏の稿参照)。他の8m級望遠鏡が主焦点を断念した理由の一つは、広い視野の端まで良い画質を確保するための大型の補正レンズ系の設計・製作が困難だったからである。

キヤノンの光学設計者武士邦雄さんの独創的なアイデアで、新しい方式の大気分散補正機能を搭載した補正レンズ系の設計が完成した。武士さんはこの設計研究で総合研究大学院大学の論文博士号を取得した。色収差補正のために必要な大型の低分散ガラス材を製作したオハラ社とそのガラスを研磨したキヤノン社は、実際の製作過程でガラスが破損するなどの困難に突き当たったが、最終的にはすばらしい補正レンズ系が完成した(図5)。

5. ロボット運用

すばる望遠鏡は主焦点、カセグレン焦点、二つのナスミス焦点の、合計4カ所で観測が可能である。これらの焦点を使い分けるため、望遠鏡の先端にカセグレン焦点用の可視光用副鏡、赤外線用副鏡、ナスミス焦点用の可視光・赤外線兼用副鏡、それに主焦点補正光学系と一体となった主焦点カメラのどれかを装着する。これらのトップユニットはどれも重量が1トン以上に及ぶので、人力での交換作業は不可能である。ドーム上部のトップユニット格納場所から、望遠鏡の先端に必要な副鏡を運び、脱着交換するための半自動交換装置が製作された。

カセグレン焦点用の観測装置を格納するため、ドーム観測床に装置格納ベイを4カ所設けた。現在はFOCAS, MOIRCS, COMICS, CIAO の4装置を観測目的に応じて、半自動的に交換作業ができるようにしている。装置交換作業は、自走台車を用いて、次の出番のカセグレン焦点用の

観測装置を待機エリアから運び出し、望遠鏡の下まで運搬する。望遠鏡に組み込んだジャッキボルトが、装置を望遠鏡に引き上げ装着する。電気系ケーブルの接続や、冷却水・ヘリウム配管は自動脱着コネクタで接続される。

これらの「ロボット」技術が、当初不可能とさえ思われたすばる望遠鏡の多様な観測機能のスムーズな交換運用を実現した。すばる望遠鏡の副鏡交換、装置交換の頻度を聞くと、他の天文台の研究者は驚きの声を上げる。他の大型望遠鏡にはない、自慢の工夫といえよう。

6. 補償光学

その歴史

光の波長を λ 、望遠鏡の口径を D とすると、完全な光学系では星の回折限界像の直径は、角度にして $2.44\lambda/D$ ラジアンとなる。波長 0.5 ミクロメートル、直径 8.2 m のすばる望遠鏡のでは回折限界像は 0.03 秒角に相当し、直径 2.4 m のハッブル宇宙望遠鏡の解像力を 3 倍凌駕するはずである。だが、8 m 級望遠鏡の中でも最も「見え味」が良いと定評のあるすばる望遠鏡でも、平均的星像サイズは 0.6 秒角であり、回折限界と比べると約 20 倍もぼけた像となる。

この原因は地球大気の温度揺らぎに起因する光波面の乱れである。乱れた光波面を十分素早く直すことができれば、大気の揺らぎを打ち消して、回折限界の解像力を実現できる。この「補償光学」のアイデアは 1953 年にバブコックが提唱した。⁶⁾ 補償光学の技術は冷戦時代の 1970 年代に人工衛星を地上から監視することを目的に、巨額を投じて米国で密かに開発が進められていた。だが、70 年代末には、全く独立に同じ技術の開発が天文学の分野で始まった。幸い冷戦の終結もあって、80 年代末には技術公開が進んだ。実用的な補償光学装置が観測に登場したのは 1990 年代からである。⁷⁾

すばる望遠鏡グループでは 1980 年代末から基礎開発に取り組み、2002 年にはカセグレン焦点に制御素子数 36 の補償光学系を完成させ、共同利用に提供した。^{8,9)} この補償光学系を用いて、原始惑星系円盤の渦状構造の発見、前主系列星の星周円盤の構造の解明、重力レンズクエーサーのスペクトル解析による銀河間雲のサイズの測定、クエーサー吸収線中の銀河間金属吸収線の発見など、さまざまな成果が得られた（林氏の稿参照）。

だが、波面揺らぎの測定に明るいガイド星が必要なため、この装置では遠宇宙の観測はほとんどできなかった。このため、科学研究費補助金特別推進研究（2002–2006 年度）の補助を得て、第 2 世代の補償光学系として制御素子数 188 の補償光学系とレーザーガイド星生成システム（図 6）を作製した。^{11,12)} 制御素子数が 5 倍になり、36 素子の補償光学系よりも波面誤差をきめ細かく修正できるため、波長 2.2 ミクロメートルでは点光源の回折限界像の中心強度は 36 素子の補償光学系の 2 倍以上となった。さらに、これまででは補償が効かなかった 0.8 ミクロメートル付近の CCD 感光域でも補償

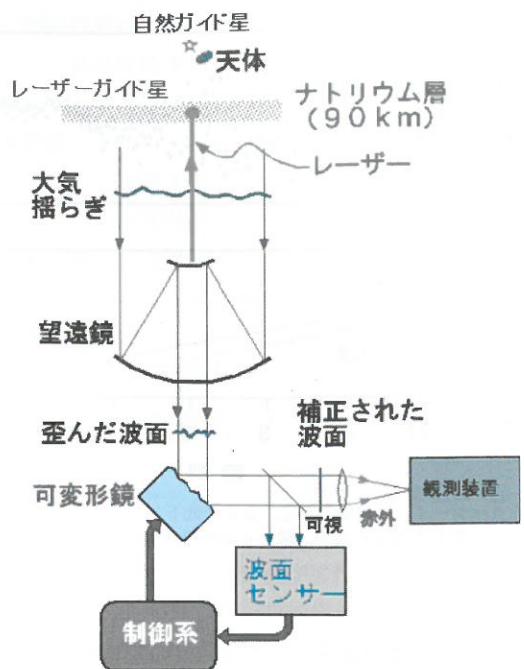


図 6 レーザーガイド補償光学系の原理。自然ガイド星またはレーザーガイド星からの光が大気揺らぎで乱れる様子を波面センサーで測り、可変形鏡を実時間高速駆動して波面歪みを補正すると、ガイド星近くの目的天体の回折限界像を観測することができる。

効果が認められ、観測の広がりが期待される。

波面測定装置と可変形状鏡

補償光学系は波面センサーと可変形状鏡からなる。補償光学系で使われる波面測定の原理はシャック・ハルトマン法¹²⁾ または波面曲率測定法である。

曲率測定法は波面の二次微分に相当する曲率の分布を瞳位置前後のデフォーカス像の輝度分布の比から求める方法である。波面曲率センサーは、大気の揺らぎにより主鏡の各部分を通過する光の波面がどう凸凹しているのかを直接測定するカメラである。

可変形状鏡としては、積層型のピエゾ素子を鏡面の裏側に多数貼り付けて押し引きする方式と、2 枚のピエゾシートの間に独立電極を多数配置し、表側に反射面を形成したバイモルフ型可変鏡方式がある。積層型可変鏡はシャック・ハルトマン型カメラと相性が良く、バイモルフ型可変鏡は波面曲率センサーと相性が良い。

188 素子補償光学系

すばる望遠鏡の補償光学系には、36 素子系で実績のある波面曲率センサーとバイモルフ型可変鏡を発展させることにした。このシステムは、光束をマイクロレンズアレーで 188 分割し、各部分領域を通過する光をそれぞれ光ファイバーで光ダイオードに導き、毎秒 1,000 回測定する。光量の変化は波面の局所曲率に比例するので、この測定により、波面曲率の分布を把握できる。この測定情報を形状可変鏡の 188 個のバイモルフピエゾ素子の駆動電圧にフィードバックすることで、大気の揺らぎの効果をリアルタイムで打ち消すことができる。波面測定のマイクロレンズアレーの

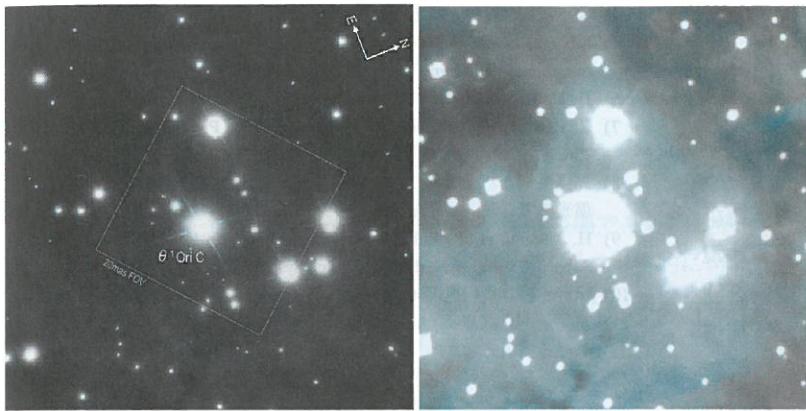


図7 188素子補償光学系のファーストライト画像(2006年10月)。オリオン座のトラベジウム星団。すばる望遠鏡近赤外カメラ CISCO で1999年に撮影した右の画像(分解能0.6秒角)と比べると、左の補償光学系の画像(分解能0.06秒角)の切れ味の良さは一目瞭然である。

レンズ配置と可変形状鏡のピエゾ駆動電極の配置を最適化した設計を行い、それぞれを特注で製作した。

2006年10月に行った試験観測で、このシステムを使わないときに0.6秒角になる星像直径が、回折限界にあたる0.06秒角にまで改善されることを実証した(図7)。空間解像力を約10倍にし、感度が格段に改善されたことになる。

レーザーガイド星

補償光学系は非常に強力な装置だが、実際に働くかせるには波面を測定する光源となる比較的明るい参照ガイド星が必要である。観測したい天体とガイド星が離れすぎていると、それぞれの光は大気の別の部分を通過することになるので、波面補償がうまくいかなくなる。第一世代の36素子補償光学系では、明るいガイド星のごく近くしか観測できなかったため、全天の1%程度の領域しか観測できなかった。

そこで第二世代の補償光学系では、自然のガイド星に頼

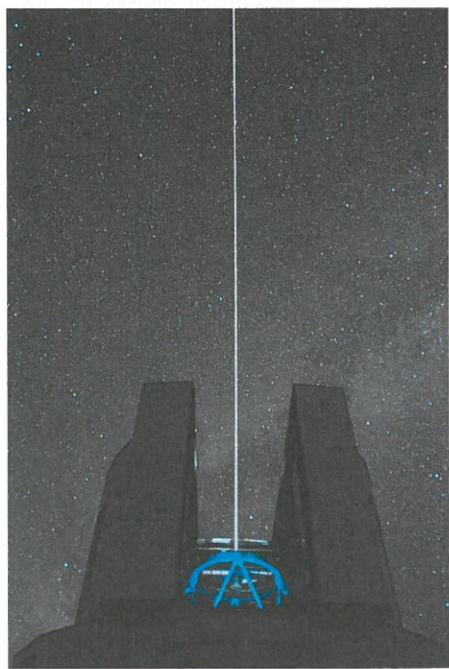


図8 レーザーガイド星生成システムによる初照射試験(2006年10月)。

らず、すばる望遠鏡から高出力レーザービームを放って、上層大気中に人工の「星」を作ってしまうことにした。地球大気の高度約90kmには、ナトリウム原子の密度が濃い、厚さ10km程度の層がある。この層に、波長589nm(ナトリウムD2線)のレーザー光を照射すると、ナトリウム原子が共鳴散乱で励起発光し、地上からはあたかも「星」のように見える。このようにして人工の星を作れば、補償光学で観測できる天域が格段に広がる。

レーザー光源は、理化学研究所の協力を得て、Nd:YAGの2波長のレーザーを混台して589nmのナトリウムD2線で発振する全固体和周波レーザーを開発した。レーザー伝送は、制御が必要な鏡リレー方式でなく、伝送損失の少ないフォトニック結晶光ファイバーを利用した。レーザー射出望遠鏡は、すばる望遠鏡の側面装備でなく、副鏡の裏側に装備することとした。

完成したシステムをすばる望遠鏡に搭載して、2006年10月に行った試験観測では、このレーザービームにより、十分に明るさの人工星を任意の方向に作ることができることが実証された(図8)。現在、本格的な共同利用観測開始に向けて、システムの最終整備に取り組んでいる。すばるで発見した赤方偏移7.0の最遠方の銀河などをレーザーガイド補償光学系で詳しく観測する計画や、補償光学観測が有効なガンマ線バースト天体、超新星、アンドロメダ銀河の球状星団の深撮像観測などについて、準備を進めている。

レーザーガイド補償光学系は、大型望遠鏡に必須の技術となった。マウナケア山のように多数の望遠鏡が設置されたところでは、各観測所が勝手にレーザーを撃っては、スタートウォーズさながらになり、お互いの観測の邪魔になる。互いの観測スケジュールを調整し、レーザービームが他の観測の障害にならないようにビーム管制するシステムを天文台の参加で構築中である。

補償光学の考え方は、天文学以外のさまざまな分野でも応用が検討され始めている。その一例が、人間の目の眼底検査への応用である。眼底を見ようすると角膜・水晶体・ガラス体等を通して見ることになり、そこでの屈折率ムラにより眼底像はぼやけてしまう。しかし、眼底に極めて弱いレーザースポットを作り、それを参照光源として補償光学を働かせれば、視細胞1個1個が見えるほどの極めてシャープな画像での診断が可能となる。天文学の開発も実社会の開発につながるという良い例といえよう。

7. これからのはる

第一世代の観測装置に加えて、多天体分光機能を持つ近赤外カメラとして現在世界最強となるMOIRCS、レーザーガイド補償光学系LGS-AO188、そして主焦点の広視野を活

かして400天体を同時に分光観測ができるファイバー多天体分光装置FMOSが完成しつつある。また、主焦点カメラSuprime-Camの10倍の視野を持つHyper Suprime-Camの製作が始まろうとしている(林氏の稿参照)。

日本の光赤外天文学コミュニティは、すばる望遠鏡の活躍を次世代に引き継ぐため、カリフォルニア工科大学他が中心となって検討を進めている、口径30mの次世代望遠鏡計画(TMT)に合流して、マウナケア山での建設実現を期している。¹³⁻¹⁷⁾すばる望遠鏡の主焦点機能の増強と、補償光学系の新たな開発は2010年代後半に到来する30m級望遠鏡の時代に向けた戦略である。天文学と物理学の接点がますます広く強くなる中、一般の方にも親しみやすい天文学での成果は、物理学界にも共有していただけると考える。

用語説明

^{†1} アクチュエータ

鏡の支持力を内蔵の力センサで測定し、計算機制御でボールネジを回転してバネを圧縮し、支持力を変化させる駆動装置。

^{†2} シャック・ハルトマン型カメラ

鏡面測定や補償光学の波面測定に用いるマイクロレンズ光学系、点光源からの光束を瞳面に置いたマイクロレンズで分割し、各レンズが作る像の位置ずれから各部分光束の波面傾斜(波面の一次微分)を測定する装置。測定結果から主鏡面の形状誤差や大気の揺らぎによる波面誤差が把握できる。

^{†3} ヌルレンズ

被検面が所望の非球面となっているかを光学的に検証できるようとするレンズ。被検面が所望の非球面のとき、レンズを通して被検面から反射した光が球面となるように設計される。

^{†4} フィゾー干渉計

参照面と被検面からの反射光の干渉縞により被検面をテストするための最も多用されている干渉計。

参考文献

- 1) 家正則、海部宣男、小平桂一: 日本物理学会誌 **47** (1992) 269.
- 2) 山下泰正:『反射望遠鏡』(東京大学出版会、1992) p. 291.
- 3) 安藤裕康:『世界最大の望遠鏡』(平凡社、1998).

- 4) 家正則:『すばる望遠鏡』(岩波書店、2003).
- 5) M. Iye, et al.: Publ. Astr. Soc. Jpn. **56** (2004) 381—Current Performance and On-Going Improvements of the 8.2 m Subaru Telescope.
- 6) H. M. Babcock: Publ. Astron. Soc. Pacific **65** (1953) 229.
- 7) C. Roddier, F. Roddier, A. Stockton and A. Pickles: SPIE **1236** (1990) 756.
- 8) 高見英樹: パリティ **17** (2002) 22—分解能0.06秒角の星像を得る: 補償光学でシャープな星像を.
- 9) H. Takami, et al.: Publ. Astr. Soc. Jpn. **56** (2004) 225—Performance of Subaru Cassegrain Adaptive Optics System.
- 10) 早野裕: 情報処理 **45** (2004) 1239—補償光学.
- 11) 家正則、高見英樹、早野裕: 光アライアンス (2006) 8—天文学における補償光学.
- 12) 大屋真、渡邊誠: 光技術コンタクト **45** (2007) 227—すばる望遠鏡レーザーガイド補償光学システムの開発.
- 13) 家正則著監修:『21世紀の宇宙観測』(誠文堂新光社、2002).
- 14) M. Iye: Proc. SPIE **5489** (2004) 417—Concept study of Japan Extremely Large Telescope.
- 15) M. Iye: Proc. SPIE **6269** (2006) 626905—Current and future Subaru instruments.
- 16) 家正則、岩室史英、舞原俊憲、水本好彦、吉田道利編:『宇宙の観測I—光・赤外天文学』(日本評論社、2007).
- 17) 家正則: 科学 (2007) 9月号 938—光赤外超大型望遠鏡と次世代宇宙望遠鏡.

著者紹介



家正則氏: 国立天文台教授。専門は銀河物理学。すばる望遠鏡計画、次世代超大型望遠鏡計画を推進し、最遠銀河の観測的研究や補償光学技術の開発の研究を進めている。

(2007年10月3日原稿受付)

Technology Developments for Subaru Telescope and Its Instruments

Masanori Iye

abstract: Scientific discoveries made with Subaru Telescope owe much to its superb image quality and unique capabilities of high-tech instruments. Some background episodes on engineering the Subaru Telescope and its instruments, the principle and performance of the adaptive optics technology, and the status of next generation large telescope projects, are described.

太陽系外惑星と惑星の誕生に迫るすばる

田村元秀

〈国立天文台 181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 e-mail: hide@optik.mtk.nao.ac.jp〉

佐藤文衛

〈東京工業大学グローバルエッジ研究院 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 e-mail: sato.b.aa@m.titech.ac.jp〉

太陽系外惑星（系外惑星）の探査と惑星系誕生の場である原始惑星系円盤（円盤）は、すばる望遠鏡の最も重要な観測対象のひとつである。巨大望遠鏡と先進的観測装置で本格的に可能になった高解像度、高感度、高コントラスト観測によって、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。また、大口径を生かした効率的観測により、間接法においても、今までにない巨大コアを持つ系外惑星の発見に至っている。次期補償光学や新規コロナグラフ観測装置等により、すばる望遠鏡は、今後もこの分野を切り拓いていくと期待される。

1. はじめに：系外惑星の発見から12年

惑星の名前は、曜日名にもなっているように、一般の人々にも馴染み深い天体である。2006年8月、「冥王星が惑星の仲間から外れる」というニュースが予想を超える大きな社会的反響を引き起こしたこと記憶に新しい。惑星の数は太陽系の中でこそ8個しかないが、すでに250個（2007年10月現在）を超える数の惑星が太陽系の外で見つかっている。^{*1} これらは「太陽系外惑星」あるいは「系外惑星」と呼ばれ、主に、惑星の存在が主星に及ぼす影響を間接的に捉えること（間接的系外惑星検出）によって、過去12年間に続々と発見してきた。

系外惑星を探す試みは決して新しくない。20世紀はじめから中葉にかけてバンデカンプ（P. van de Kamp, 米）が精力的な観測を行い、太陽に2番目に近い恒星「バーナード星」に木星クラスの惑星が2個存在すると発表した。¹⁾ ところが、数十年にも及ぶこの観測結果は、別のグループによる観測で否定されてしまった。1952年には、スツルーベ（O. Struve）が雑誌「The Observatory」に、伴星検出のためのドップラー法やトランジット法（後述）によって、系外惑星を検出できる可能性を示唆している。しかし、当時の観測技術は全く精度が足りなかった。

1980年代に入って、惑星検出のための観測技術は著しく向上した。しかし、カナダのウォーカー（G. Walker）が、改良した高精度ドップラー法とCFHT4メートル望遠鏡を12年間用いた観測によっても系外惑星は見つからず（1995年8月の Icarus 論文²⁾），その検出には否定的な雰囲気が漂っていた。

その風向きを一挙に変えたのが、1995年10月に出版されたスイスのメイヤー（M. Mayor）とケロッズ（D. Queloz）の Nature 論文³⁾だった。それは1/2木星質量^{*2}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、その余りの差異に、恒星研究の大家からは、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もした。しかし、過去の例と異なり、マーシー（G. Marcy, 米）らによる独立な追観測でもすぐさま確認され、最初の系外惑星発見となった。^{*3}

2. 系外惑星探査の手法

惑星は恒星に比べると軽くて暗い存在である。例えば、太陽系を10 pc（1 pcは約3.3光年）の距離から眺めると、太陽と地球の角距離は0.1秒角、^{*4} 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（直接観測）は、現在の技術でも難しいため、現在専ら成功しているのは間接法である。

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、メイヤーらが用いたのもこの手法である。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。最近では、1 m/s（人の歩く速さ！）よりも小さな速度を分解できる精度により、地球質量の10倍程度しかない惑星も7例発見されており（現時点の最小質量系外惑星は5地球質量）、系外惑星の9割以上がこの方法で発見されている。ただし、軌道傾斜角が不明な場合は、質量の下限値しか求めることができないことに注意が必要である。

同じく、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、この手法による最初の例はまだ無い。

*1 これらの大部分は、第2節で紹介するドップラー法で発見されたものである。この手法だけでは質量は下限値しか求められないで、厳密には惑星「候補」である。ただし、統計的な議論を行う場合は質量の不定性は問題とならず、また、トランジット法で確認された個々の天体には下限値ではなく質量が正確に求められることに注意。

*2 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、 2×10^{30} kg。

*3 レイサム（D. Latham）が1989年にドップラー法で発見した HD114762 は、当時は軌道傾斜角の不定性で系外惑星にみなされなかつたが、現在はカウントされている。ウォルツザン（A. Wolszczan）らがパルサー PSR1257+12 の周囲に発見した地球質量の天体は、惑星と呼ぶべきかどうかの議論がある。

*4 これは東京から100 km 離れた富士山頂のピンポン玉を見込む角度にほぼ相当する。

現在、他に広く行われているのは、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27例が確認されている。観測者から見て惑星の軌道面が視線と一致する偶然が必要なため、一度に多数の星を観測する必要がある。CCDを備えた口径1メートル以下の小型望遠鏡によっても惑星検出が可能である。ただし、地上からは地球の大気揺らぎのため、地球型惑星の検出は難しい。いっぽう、大気揺らぎのない宇宙空間におけるトランジット法は木星型だけでなく地球型の小さい惑星による明るさの変化を捉えることもできる。2006年に打ち上げられたコロー衛星(仏)にも期待がかかるが、2009年打ち上げ予定のケプラー衛星(米)では数百個の地球型惑星を検出できるかもしれない。2003年に打ち上げられたスピッターア赤外線望遠鏡(米)は、最近、逆トランジット法とも言うべき、惑星が恒星の背後に隠れたときの微小な赤外線の減少を検出し、初めて、惑星からの光子と恒星からの光子を見分けた。

これ以外にも、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捉える重力レンズ法、惑星の反射光の微小な(10^{-6} 程度の)偏光、^{*5}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。このうち、重力レンズは4個の系外惑星の検出例がある。^{*6}

3. 系外惑星の一般的性質

数千個の恒星の探査の結果、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恒星の周りにも惑星が検出される可能性があるので、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、眞の地球型惑星は未検出と言ってよい。惑星の質量分布としては、とりわけ巨大な惑星の数が少ないのが特徴で、惑星質量を超えるが恒星より軽い褐色矮星^{*7}はドップラー法ではほとんど見つかっておらず、「褐色矮星砂漠」と呼ばれている。ただし、これは、ドップラー法が

^{*5} 偏光度は0~1の値を取り、光の振動面が一方向に偏った光が100%を占める場合が偏光度1に対応する。惑星は、主星からの反射光で輝いているため、一般に偏光している。系外惑星の場合、主星と惑星を見分けることができないため、惑星の偏光は無偏光の主星からの光で薄められて著しく小さくなる。実際に、 10^{-6} 以上の偏光測定精度を持つ天文用偏光器はすでに開発されている。

^{*6} 日本では、名大太陽地球環境研のチームが国際協力により、専用望遠鏡を用いた重力レンズ法による惑星検出で成果を上げている。

^{*7} 褐色惑星は、質量が軽いために安定して水素核融合を起こすような恒星になれない天体である。惑星と区別するために、質量の下限値は、重水素を燃焼できるものとすることが多い。その場合、木星質量の約80倍未満、約13倍以上の質量の天体に対応する。

周期の長い遠方の惑星を検出するのが不得手、というバイアスの可能性もある(後述)。

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天文単位は、地球・太陽間の距離で、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(周期の長いほうは観測継続期間によって制限されている)。0.1天文単位以内の巨大惑星は「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、その表面温度は摂氏1,000度を超える。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、系外惑星は我々の太陽系とは大きく異なる性質を持っており、その原因はまだよく理解されていない。

4. 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、どうしても不定性が残る。系外惑星探査の次の重要なステップは直接観測である。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)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。なかでも最大の問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。^{*8} 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(100pc程度)の星形成領域中の若い(年齢約百万年の)恒星、あるいは、さらに近傍(約数十pc)の若い(年齢約千万年の)伴星の系統的探査が行われている。前者の中心星は、いわゆるTタウリ型星やハーピック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。

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)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、他⁴⁾)や、すばるデーターアーカイブを用いてドイツのノイホイザー(R. Neuhäuser)らが発見したTタウリ型星GQ Lupを周回する伴星⁵⁾は、それぞれ推定質量が約40および30木星質量の褐色矮星であるが(図1)、伴

^{*8} 将来の地球型惑星直接観測のための技術開発は日本でも急速に進んでおり、国立天文台・農工大・電通大・北大・宇宙科学研究所本部が4つの異なる手法で、すでに各々6-7桁のコントラストを室内実験で実現している。

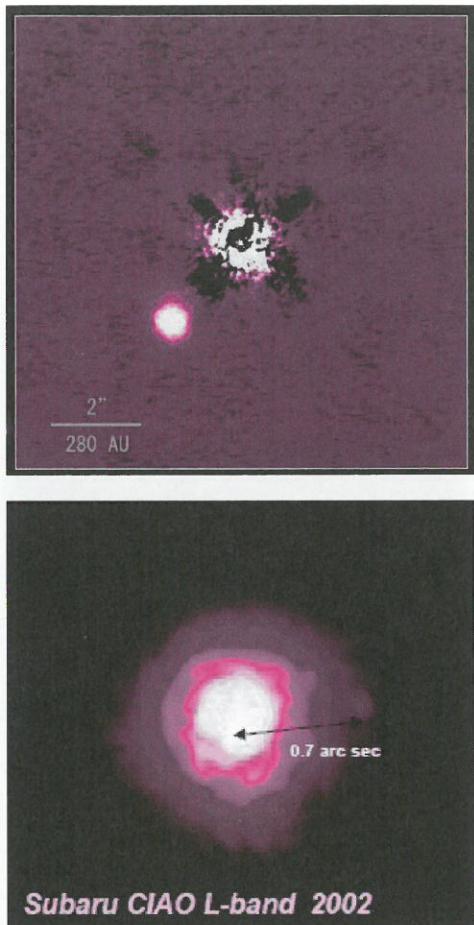


図1 すばる望遠鏡と CIAO (チャオ) によって近赤外線波長で撮影された若い恒星の周りの褐色矮星。(上) DH Tau, (下) GQ Lup. 中心星はコロナグラフのマスクで隠されている。中心星から伴星までの距離は、それぞれ、約 330 天文単位と 103 天文単位。1 天文単位は、地球・太陽間の距離で、約 1.5×10^{11} m。

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他にも発見されており、直接観測からは、ドップラー法で示唆された褐色矮星砂漠は否定されるかもしれない。これは、ドップラー法が周期の短い主星に近い惑星検出にバイアスがあり、他方、直接撮像がその逆の性質を持つからであろう。

望遠鏡が同じでも、観測装置(補償光学とコロナグラフ)の改善によってコントラストをさらに向上させることができある。すばる望遠鏡ではこの両面での開発を進めている。補償光学(本特集の家正則氏の記事を参照)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る。⁶⁾ さらに、暗い天体に対しても乱れた波面を補正可能にするため人工光源を作るレーザーを使用する。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む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 (ハイチャオ; High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics, 図2) と AO188との組み合わせによって、従来に比べ約10倍

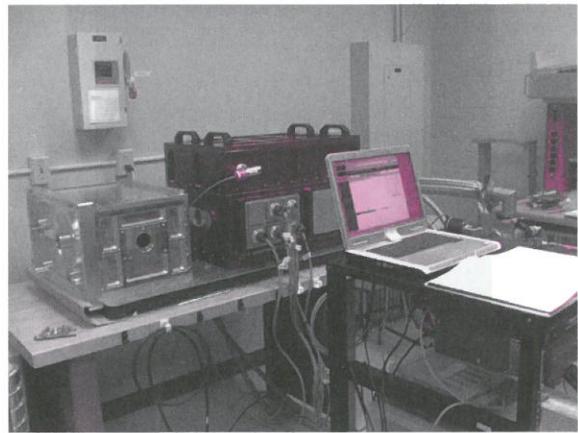


図2 すばる望遠鏡のための新規コロナグラフ HiCIAO (ハイチャオ)。多波長および偏光差分撮像機能をコロナグラフと組み合わせができる点がユニークである。2007年度中のファーストライトを目指して、実験室でのアセンブルと試験を行っている。

の高コントラストを2007年度中には実現できる見通しである。⁷⁾ その結果、太陽型の恒星を周回する若い惑星の初検出を目指す。

5. 若い星の直接撮像で円盤に迫る

現在、すばる望遠鏡が最も目覚しい成果を上げている分野のひとつが、上記のような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(恒星の 1/100 程度の質量)が星周円盤となり、中心星が原始星から 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。いわゆる、コア集積モデル惑星形成理論(以下、集積モデルと呼ぶ)である。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。⁸⁾ 星周円盤の大きさは、ほぼ太陽系サイズ(約 100 天文単位)であるため、100 pc の距離にある典型的な星形成領域でも、一秒角より小さな角度分解能が必要になる。⁹⁾ これが、もっぱら、原始惑星系円盤(以下、円盤と略す)の観測が進んでいなかった理由である。

円盤の存在自体は間接的には1970年代から知られていた。赤外線・サブミリ波・ミリ波波長における放射の超過(星周ダストの熱放射が原因)、アウトフロー・ジェットなど降着現象と表裏一体な現象、偏光など星周構造と非球対称性を示唆するといった根拠である。しかしながら、最初に円盤のあるがままの形を示したのは、ハッブル望遠鏡による画像である。⁹⁾ 中でも、背景の明るい星雲に影として浮

*⁹ 1 天文単位を見込む角度が 1 秒角になる距離が 1 pc である。

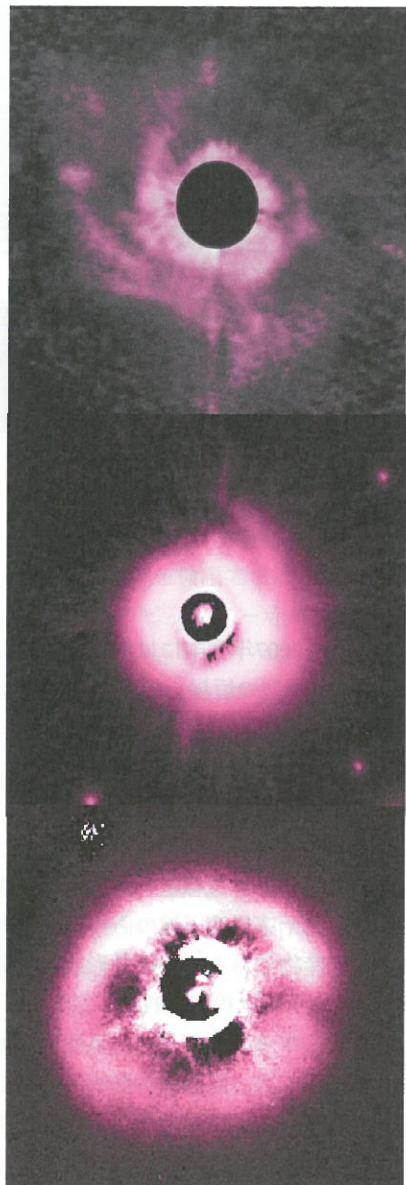


図3 すばる望遠鏡とCIAOによって近赤外線波長で撮影された若い恒星の周りの原始惑星系円盤の微細構造。中心星はコロナグラフのマスクで隠されている。中心星からの光が円盤で反射して、あたかも間接照明のように輝いている状況を見ている。(上段) AB Aur, (中段) HD142527, (下段) GG Tau. 黒丸の大きさは、それぞれ、約240天文単位、200天文単位、140天文単位。

かぶシルエット円盤は印象的であった。しかし、それでも、円盤の形や模様について議論することには及ばなかった。深川、林、田村らがコロナグラフ CIAO を用いて観測したハービック Ae 型星 AB Aur の近赤外線画像(図3)により、渦巻状の円盤構造が明らかになった。¹⁰⁾ 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造と極めて似ているが、残念ながら質量の推定が困難で、集積説と重力不安定説に決着をつけるところまでは至っていない。

同じく、深川らがCIAOを用いて観測したハービック Ae 型星 HD142527(図4上)では、さらに複雑な円盤構造の存在が明らかになった。¹¹⁾ 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

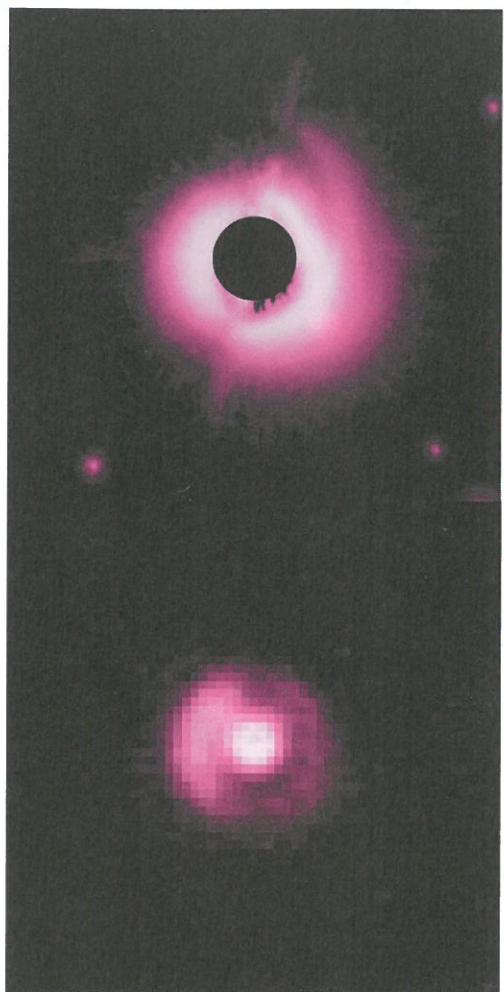


図4 すばる望遠鏡によって赤外線波長で撮影された HD142527 の原始惑星系円盤の構造。上側が CIAO による近赤外線画像、下側が COMICS (コミックス) による中間赤外線画像。図の大きさは 1,550 天文単位。上の図では、中心星はコロナグラフのマスクで隠して観測しているため、黒丸で表示している。向かい合うバナナ状の構造とそのすきま (バナナ・スプリット)、中心星との間のすきま、右側に見られる腕状構造に注意。

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 Spectrograph) による中間赤外線観測でもフォローアップ観測され、¹²⁾ 円盤の内側の間隙やダストサイズの情報が得られた(図4下)。T タウリ型星の連星の周りの円盤でも、GG Tau や UY Aur において、従来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は多様であったと言いうことができる。

円盤のガス成分に迫るには分光観測が有効である。後藤、臼田らは、若い恒星 HD141569A の IRCS (Infrared Camera and Spectrograph) 分光観測から(図5)、中心星からわずか半径50天文単位以内のところで一酸化炭素ガスがケプラー回転していることを確認し、その内側(半径11天文単位以内)にはガスはないことを示した。¹³⁾ これは、ガス円盤が蒸発している証拠と考えられる。

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偏光観測機能を実用化し、オリジナルな結果を出

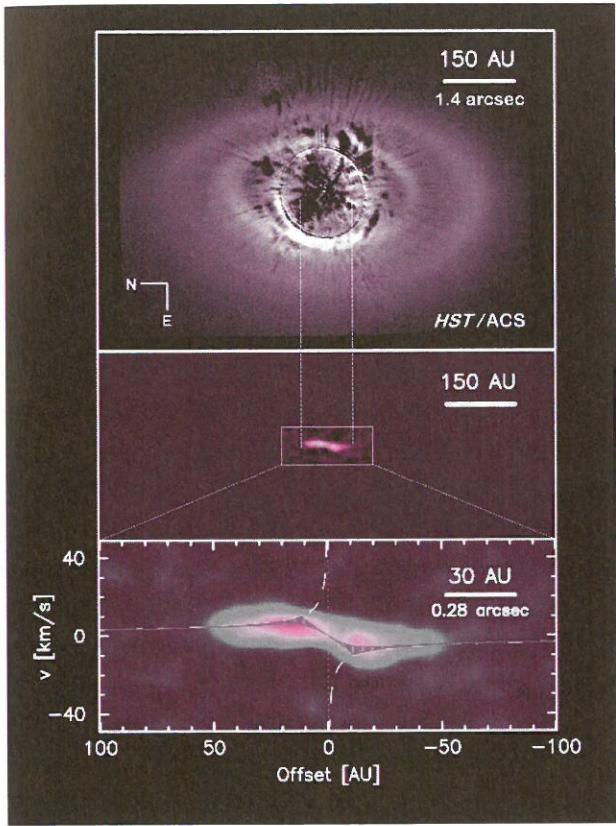


図5 HD141569Aの円盤。(上段)ハッブル宇宙望遠鏡による可視光撮像観測。(中段)すばる IRCS によるスペクトル観測で得られたデータに基づく位置速度図の全体。横軸が中心天体からの距離で、縦軸は一酸化炭素ガスの輝線を放射しているガスの速度。(下段)位置速度図の拡大。ガス円盤の回転運動を表す。中心の半径約11天文単位で放射が弱く、この部分がすきまになっていることが分かる。

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、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。¹⁴⁾ 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(fuzzy ice dust)から成るモデルでよく説明できた。先行する岡本、片山らの COMICS による中間赤外線やこの近赤外線の観測から、¹⁵⁾ 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 $1\text{ }\mu\text{m}$)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倍以上勝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。

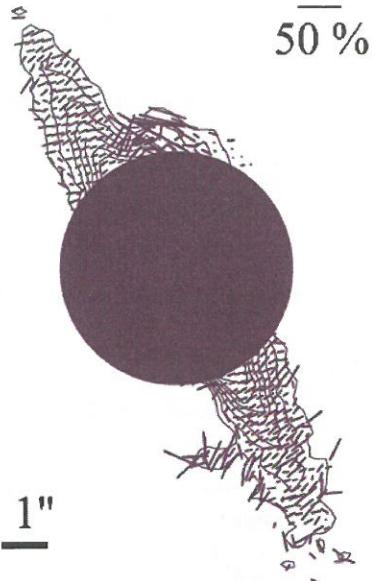


図6 すばる CIAO による、がか座ベータ星(β Pic)の塵円盤の波長 $2\text{ }\mu\text{m}$ クロマン偏光ベクトル画像。中心の明るい星はコロナグラフにより隠されている。黒丸の大きさが、ほぼ太陽系のサイズ(100 天文単位)に対応する。偏光の原因は、中心の星から光が円盤中の塵に反射されているためである。偏光の大きさはおおよそ 10%。

6. すばる望遠鏡におけるドップラー法とトランジット法

すばる望遠鏡の高分散分光器 HDS (High Dispersion Spectrograph) には立ち上げ当初からヨウ素ガス吸収セル^{*10}が取り付けられており、ドップラー法による系外惑星探索に威力を発揮している。¹⁶⁾ 現在 HDS では短期的には約 3 m/s の精度が達成されており、引き続き精度向上への努力が続けられている。

佐藤、井田らは、アメリカとチリの研究者と協力して2004年から HDS を用いて、ホット・ジュピターと呼ばれる中心星からわずか 0.1 天文単位未満の距離にある系外惑星の探索を行っている。ドップラー法では、系外惑星の質量の下限値、周期、公転速度、軌道の半径と離心率が導かれる。公転周期約 2 週間以内というホット・ジュピターは、中心星のすぐ近くを公転しているためトランジットを起こす確率が高い。トランジットが検出されると中心星の明るさの減少量から惑星の大きさが分かり、かつ、軌道傾斜角も決まるので、ドップラー法から求められる質量(下限値)と合わせて惑星の密度や内部構造を推定することができる。2005年、同研究グループは、すばる望遠鏡で初めて HD149026 という G0 型の準巨星において公転周期 2.9 日の 1.2 土星質量を持つ惑星(図7)を発見した。¹⁷⁾ その後、測光観測によってこの惑星のトランジットが検出され、惑星の半径は土星の約 0.9 倍、密度は土星の約 1.7 倍というコンパクトで高密度な惑星であることが判明し(図8)、理論モ

^{*10} ヨウ素ガスを封入した小さな容器を分光器のスリットの前に置き、これを通して天体を分光することによって、天体のスペクトルにヨウ素ガスの吸収線を同時に焼き込む。このヨウ素の吸収線が、視線速度測定の際に精密な波長校正の基準となる。

デルとの比較から、惑星の中心に地球質量の約70倍という超巨大なコアが存在する可能性が示された。理論的にはガス惑星のコア質量の上限は地球質量の約30倍程度と考えられているため、このような惑星の発見はそれまでの常識を覆すものであった。超巨大コアを持つ惑星の存在は惑星形成シナリオとして、コア集積モデルを支持する強力な証拠のひとつとなつたが、その形成過程はまだ解明されておらず、2つの惑星が衝突した可能性などを含め議論が続いている。

トランジットを起こす惑星系では、内部構造の他にも惑星自身に関する様々な情報が得られる。成田、須藤らは、

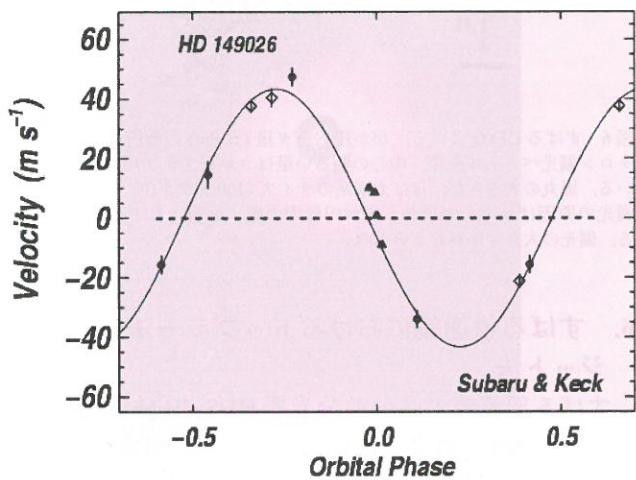


図7 HD149026で検出された視線速度の時間変化。黒丸がすばる望遠鏡、それ以外がケック望遠鏡で得られたデータ。周期約2.9日、振幅約43メートル毎秒の変化を示している。

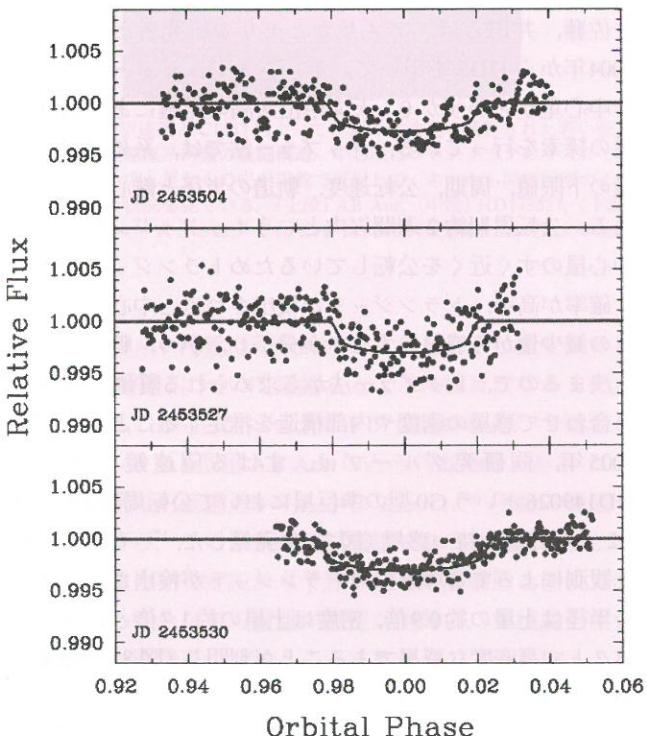


図8 HD149026で検出されたトランジットによる光度変化。観測はフェアボーン天文台の80 cm APT望遠鏡。3回のトランジットのデータを並べている。減光の深さは約0.3%、継続時間は約3時間。

トランジット惑星系 HD209458 の大気吸収線強度の時間変化を、HDS を用いて詳細に測定し、惑星のトランジットが起こっているときと起こっていないときの強度の差から惑星の大気成分に対して地上観測としては最も精度の良い上限値を与えた。¹⁸⁾ さらに、TrES-1 という恒星において、自転する主星表面の一部をトランジット中の惑星が隠すことによって生じる見かけの視線速度変化（ロシター効果）を検出し、主星の自転軸と惑星の公転軸のずれを求めた。¹⁹⁾ 一般に惑星は円盤内で形成されると考えられるため主星の自転軸と惑星の公転軸はほぼ一致することが期待されるが、これが大きくずれている場合は進化の過程で惑星同士の重力散乱などを経験している可能性がある。トランジット惑星の発見数は近年増加しつつあり、HDS を用いたフォローアップ観測が今後も大きな役割を果たすと期待される。

すばるの主焦点カメラ Suprime-Cam (Subaru Prime Focus Camera) を用いたトランジット惑星の探索も行われている。トランジットによる主星の減光率は典型的には約1%程度と小さく、観測時間内にトランジットが起こる確率も1万分の1以下と非常に小さいため、トランジット法で惑星を検出するには多数の天体を高精度でモニター観測する必要がある。浦川、山田らは、Suprime-Cam の広視野を生かして数万個の恒星の高精度測光観測を行い、トラン

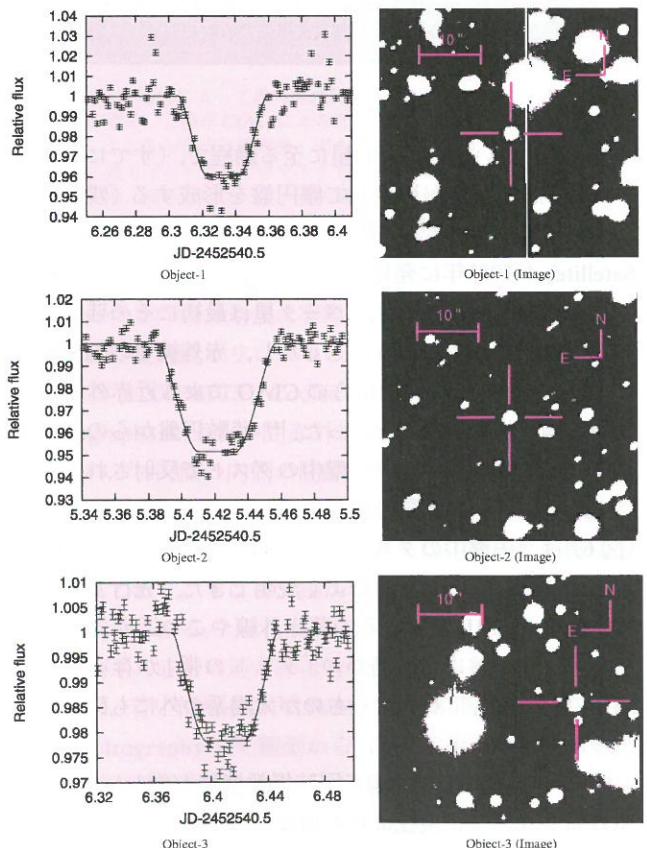


図9 すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) で見つかったトランジット惑星候補 (右写真中の十字印の中心) とその光度変化 (左)。それぞれG~M型矮星の周りを、木星程度の大きさの伴星が周期数日で公転していると説明できる。その確認や伴星の質量を決定するには、将来、ドップラー法によるフォローアップ観測が必要である。

ジット惑星の候補を複数検出することに成功している²⁰⁾(図9)。

7. 惑星を持つ恒星の化学組成

惑星を持つ恒星は、惑星を持たない恒星に比べて鉄などの金属量が多いことが知られている。この原因については2通りの説があり、系外惑星発見当初から議論が続いている。ひとつは、元々金属量の多い環境から惑星が生まれやすいという先天説、もうひとつは、微惑星が形成過程で中心星に落ち込んで中心星の外層の金属量を増やしたという後天説である。定金、竹田らは、HDSを用いて惑星を持つ恒星12個の高分散分光観測を行い、恒星大気に含まれる多数の元素の組成を求めた。その結果、惑星を持つ恒星の元素組成のパターン(鉄に対する存在度)は銀河の化学進化で説明可能であり、惑星を持たない恒星の元素組成パターンとの間に顕著な差が見られないことから、惑星を持つ恒星の金属量が多いのは先天的なものであると結論づけた。²¹⁾その後、系外惑星発見数の増加に伴って統計的な精度が上がり、現在は先天説が定説となっている。すばるのこの結果は、本研究分野の黎明期になされた重要な成果である。

8. まとめと今後の展望

太陽以外の恒星を周回する系外惑星の数は、発見からわずか12年で250個を超え、系外惑星と関連する円盤の観測の分野では、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、今後もこの分野で成果を上げていくことが期待される。今年度には、次期補償光学AO188や新規コロナグラフ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だろう。しかし、2010年以降には、欧米の8メートル・クラス望遠鏡においても、GPI(Gemini Planet Imager)やSPHERE(VLT,Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research)といった系外惑星探査のための次期専用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「旬」となる新規観測装置を活用した集中的な観測的研究の推進や、さらに一步先をいく装置開発の継続が望まれている。

参考文献

- 1) P. van de Kamp: Astron. J. **74** (1969) 238.
- 2) G. A. H. Walker: Icarus **116** (1995) 359.
- 3) M. Mayor and D. Queloz: Nature **378** (1995) 355.
- 4) Y. Itoh, M. Hayashi, M. Tamura, et al.: Astrophys. J. **620** (2005) 984.
- 5) R. Neuhäuser, et al.: Astron. & Astrophys. **435** (2005) L13.
- 6) H. Takami, et al.: SPIE, **6272** (2006) 62720C.
- 7) M. Tamura, K. Hodapp, H. Takami, et al.: SPIE **6269** (2006) 62690V.
- 8) T. Matsuo, H. Shibai, T. Ootsubo and M. Tamura: Astrophys. J. **662** (2007) 1282.
- 9) C. R. O'Dell and Z. Wen: Astrophys. J. **436** (1994) 194.
- 10) M. Fukagawa, M. Hayashi, M. Tamura, et al.: Astrophys. J. **605** (2004) L53.
- 11) M. Fukagawa, M. Tamura, Y. Itoh, et al.: Astrophys. J. **636** (2006) L153.
- 12) H. Fujiwara, M. Honda, H. Kataza, et al.: Astrophys. J. **644** (2006) L193.
- 13) M. Goto, T. Usuda, et al.: Astrophys. J. **652** (2006) 758.
- 14) M. Tamura, M. Fukagawa, H. Kimura, et al.: Astrophys. J. **641** (2006) 1172.
- 15) Y. Okamoto, H. Kataza, M. Honda, et al.: Nature **431** (2004) 660.
- 16) 佐藤文衛、神戸栄治、安藤裕康: 日本物理学会誌 **59** (2004) 751.
- 17) B. Sato, et al.: Astrophys. J. **633** (2005) 465.
- 18) N. Narita, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **57** (2005) 471.
- 19) N. Narita, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **59** (2007) 763.
- 20) S. Urakawa, et al.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **58** (2006) 869.
- 21) K. Sadakane, M. Ohkubo, Y. Takeda, B. Sato, E. Kambe and W. Aoki: Publ. Astron. Soc. Jpn. **54** (2002) 911.

著者紹介



田村元秀氏: 専門は、赤外線天文学、星・惑星系形成、系外惑星探査、宇宙磁場に関する観測的研究と天文装置開発。



佐藤文衛氏: 専門は系外惑星、恒星天文学、すばる望遠鏡や岡山観測所で系外惑星探索を推進。現在、新たな展開を模索中。

(2007年8月9日原稿受付)

Exploring Exoplanets and Disks with the Subaru Telescope

Motohide Tamura and Bun'ei Sato

abstract: Since the discovery of the first exoplanet orbiting around a normal star, exoplanets and protoplanetary disks are the two most important research areas that the Subaru telescope should tackle. High resolution, high sensitivity, and high contrast observations enabled by the large telescopes urge the direct approaches to detection of planets and disks. The Subaru telescope has successfully detected a companion around young stars whose mass is close to that of planets, and found new types of disks around young stars, suggesting morphological diversity of protoplanetary disks. It has also discovered a new type of exoplanets having an exceptionally large core. With the advent of new adaptive optics and a new coronagraph, the Subaru telescope will be one of the main observatories leading this hot field.

すばるで探る遠方宇宙/初期宇宙

柏川 伸成
嶋作 一大

〈国立天文台 181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 e-mail: kashik@zone.mtk.nao.ac.jp〉

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 e-mail: shimasaku@astron.s.u-tokyo.ac.jp〉

遠方宇宙はすばるがこれまで最も成果を上げた研究分野の一つである。その背景には、他の大型望遠鏡にはない広視野撮像という観測手法を最大限に活かすことができるという強みがある。すばるを用いた遠方宇宙の研究成果を総括する。

はじめに

「この宇宙には何があるのか？」一人類が400年前に直径5 cmの最初の天体望遠鏡を覗いたとき、こんな素朴な好奇心を抱いていたのかもしれない。以来人類は望遠鏡を巨大化させることによって、地球が太陽の周りを回っていること、天の川は太陽と似たような星の集まりであること、天の川のような銀河がこの宇宙には無数に存在し、膨張する宇宙の中で銀河同士が大規模構造と呼ばれる巨大なネットワークを作っていることを発見してきた。少なくともわれわれに近い宇宙には「何があるのか」が明らかになった現在、口径8–10 mの巨大望遠鏡を手にし、望遠鏡を宇宙に飛ばすようになった人類は、「ではこの宇宙はどのようにできあがったのか」という新しい好奇心を抱いて、遠方の宇宙を調べ始めている。本稿ではすばる望遠鏡を用いた遠方宇宙の研究^{*1}の成果を紹介する。

遠方天体を調べることの意義

宇宙には無数の銀河が存在する。これらの銀河の観測から、宇宙が膨張していること、そして長い宇宙の歴史の中で銀河が進化^{*2}してきたことがわかっている。光速度は有限なので、遠方の銀河を観測することは昔の銀河を観測することに対応する。非常に遠方の銀河からの光は、形成されたばかりの銀河の情報を運んできている。形成されたばかりの銀河、すなわち進化の「始まり」としての銀河を観測することは、銀河の進化を理解する上で非常に重要である。

銀河や大規模構造の起源は、宇宙初期に発生した物質の密度揺らぎである。この揺らぎはWMAP¹⁾によって 10^{-5} 程度のCMB(Cosmic Microwave Background=宇宙マイクロ波背景輻射)の温度揺らぎとして観測されている。遠方銀河の観測によって、この初期密度揺らぎから現在の銀河に至る進化の道筋をたどることができる。また、宇宙の大規模構造の形成史を明らかにすることも、遠方銀河の観測

の大きな目的の一つである。

宇宙と同程度の年齢を持つ銀河の進化、そしてその銀河の形作る大規模構造の進化を解明することによって、これらの進化に大きな影響を及ぼしたダークマター^{*3}、ひいては宇宙膨張を支配するダークエネルギー^{*4}についても理解が進むであろう。^{*5} 銀河進化は銀河同士の衝突・合体で促進されてきたと考えるのが現代天文学の主流であるが、重力相互作用のみならず、銀河内における星形成史、周囲の銀河あるいは銀河間ガスとの輻射相互作用、銀河中心部におけるブラックホールの形成、星間空間におけるダストの形成、超新星爆発による重元素汚染^{*6}、磁場、など種々の物理過程が銀河進化を複雑に決定している。これらの過程を一つひとつ明らかにしていくためにも初期条件としての形成直後の銀河を観測することに意義があることは想像に難くない。

また後述するように銀河間空間の電離化状態も宇宙の「始まり」の頃^{*7}と現在とでは大きく異なっていたと考えられている。遠方銀河の観測は今やこの宇宙空間の状態変化を明らかにするという新たな課題を背負うことになった。

遠方天体の探査方法

多くの物理実験では基本的にこちらから対象にアクションを加えそれに対する反応を見ることで物事の本質を見ようとする。これに対し、対象にアクションを加えることが到底できない宇宙観測はやや受動的な「観察」手法のように感じるかもしれない。しかしこの広大な宇宙に対して、アイデアが全くないままちっぽけな8 m望遠鏡を向けても、物事の本質は決して見えてこない。

地球からの距離の並びがそのまま時系列に相当する遠方銀河の観測研究で大きな鍵となるのは、無数に写っている

*3 宇宙の質量のうち、水素やヘリウムなどわれわれのよく知っている物質(パリオン)はわずか15%程度であり、残りは暗黒物質(ダークマター)が占めている。ダークマターは電磁波を出さないため直接観測することはできないが、銀河の運動や重力レンズ現象を通して存在が確認されている。宮崎氏の記事参照。

*4 遠方超新星の観測などから判明している宇宙の加速膨張は、ダークエネルギーによって引き起こされていると考えられている。正体がわからないこの仮想物理量が導入された背景とわれわれの実際の問題意識については文献2を参照。

*5 あるいは根本的な理論修正を迫られるかもしれない。

*6 星内部の核反応で生成された重元素は超新星爆発によって周囲の星間空間に放出され、しだいに宇宙の重元素量は増加していく。

*7 この頃の初期宇宙を暗黒時代(ダークエイジ)と呼んでいる。

*1 ここでは「遠方宇宙」として赤方偏移 $z=3$ 以上(宇宙誕生から20億年後まで)の宇宙に着目する。赤方偏移とは、天体からの光の波長が宇宙膨張のために長波長側にずれるそのずれ量。一般に z と書き表す。本来の波長を λ 、それを $\Delta\lambda$ として、 $z=\Delta\lambda/\lambda$ で定義される。宇宙論的には z が大きい天体ほど遠方にある天体=過去の宇宙の天体である。図1に赤方偏移とわれわれからの距離の関係を示す。

*2 天体の明るさ、色、質量、金属量などの物理的諸性質が時間に応じて変化することを天文学では「進化」と呼ぶ。

銀河からいかにして目的の距離にある銀河を選び出すかということである。分光観測をすれば距離は求まるが、それには長い観測時間がかかる。^{*8} しかも、写っている銀河のうち、われわれが興味のある遠方銀河はごく一部なので、銀河をしらみつぶしに分光しても遠方銀河に出会える可能性は低い。そこで、遠方銀河を撮像観測だけからある程度の信頼性で選び出す方法がいくつか考案されている。その代表的な二つの方法を以下に紹介する。

1) ライマンブレイク法—遠方天体からの光は、その経路上にある銀河や銀河間物質に多く含まれる中性水素ガスによってライマン α 遷移（波長 $\lambda = 121.6 \text{ nm}$ ）にちょうど合致する波長で吸収を受ける。この経路上の天体・物質は当然ながら対象の遠方銀河より小さい赤方偏移を持つために、遠方銀河のライマン α 線より短波長側の光はこうした天体・物質によってほぼ連続的に吸収され、観測されるスペクトルにはライマン α 線の前後で大きな段差=ブレイクが生じる。この段差をライマンブレイク^{*9}と呼び、この手法で検出される遠方にある銀河種族はライマンブレイク銀河（Lyman Break Galaxy=LBG）と称されている。ライマンブレイクの生じる観測波長から、その銀河の赤方偏移すなわち距離が推定できる。この手法は遠方銀河に限らずQSO（クエーサー）、GRB（ガンマ線バースト）など他の遠方天体にも応用されている。しかし銀河の連続光が弱すぎるとこのブレイクはノイズに埋もれて見えなくなってしまう。

2) ライマン α 輝線法—そこで遠方銀河のライマン α 輝線を直接観測するという手法が二つめの方法として挙げられる。形成初期の銀河は活発な星形成を起こしていると考えられるが、銀河中の塵（ダスト）が少ない場合には、若い星からの光によって電離された水素ガスが再結合する際に発するライマン α 輝線を観測で検出できる。このライマ

ン α 輝線が検出された遠方銀河のことをライマン α 輝線銀河（Lyman- α emitter=LAE）と呼んでいる。この輝線だけを効率よく検出するためには、ある狭い波長幅の光だけを透過する狭帯域フィルターと呼ばれる特殊なフィルターを用いる。このフィルターの透過波長範囲内にライマン α 輝線が存在すれば他の波長域に比べて明るく観測されるはずである。しかしこの方法にも難点がある。地上から観測する場合、可視光（300–1,000 nm）の長波長域では地球大気中の原子・分子からの輝線が卓越し、どの波長でも効率よく観測できるというわけにはいかない。暗い遠方のライマン α 輝線が検出できるような、大気の輝線の弱い波長域=赤方偏移範囲は限られている。

以上見てきたように、LBG と LAE は検出手法が異なる遠方銀河であるが、LAE が LBG よりも質量や年齢が小さいという観測や、LAE がいわずれは LBG に進化することを示唆する観測なども得られており、両者の進化上・物理上のつながりは強いと考えられている。今後の観測によって両者の関係がもっとはっきりすることが期待される。これら二つの手法^{*10}はそれぞれ難点を抱えつつもこの10年間ににおける遠方銀河探査において大きな成功を収め、今や $z=3\text{--}7$ にかけての遠方宇宙における銀河はほとんどこれらの手法で発見されたものとなっている。

遠方宇宙研究におけるすばるの役割

さて、これらの手法はすばる望遠鏡における遠方宇宙研究にももちろん活用されているが、すばるの場合にはもう一つ特筆すべきアクションがある。それは「広視野」観測—宇宙の広い範囲にある天体を一度に検出することができる観測—である。広視野観測の遠方銀河研究におけるメリットは絶大である。

より遠い銀河からの光は弱くなり、検出がより難しくなる。例えば、8 m 望遠鏡で検出できる全銀河のうち、 $z=4$ 前後の銀河の割合は4%， $z=6.5$ の銀河に至っては0.1% 以下しかない。このように非常に個数密度の低い天体に対して統計的に意味のある考察をするには、当然広い天域を探査しなければいけない。

この広視野撮像の機能を持っているのは大型望遠鏡の中ですばるだけである。すばるの主焦点カメラは他の大型望遠鏡の視野の20–30倍に相当する $34' \times 27'$ （満月1個分の大きさ）の視野を誇る（林氏の記事参照）。非常に稀な遠方銀河を探査する際はこの視野の広さがそのまま検出効率につながる。もちろん狭い視野しかない他の大型望遠鏡を用いても、幸運にもこうした遠方銀河が検出されることがある。しかし天文学における多くの研究分野について言えることだが、一つの天体・現象を見てもそこから宇宙に普遍的な規則性・法則性を見つけ出すのが難しい場合が多い。遠方銀河と一言で言っても、明るさ、質量、年齢などに大

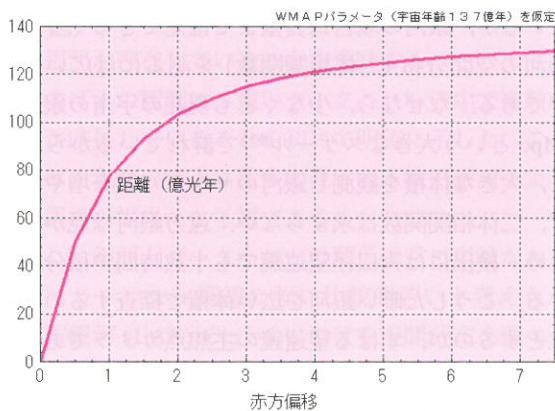


図1 赤方偏移 (z) と地球からの距離との関係。

*8 例えば、後述するすばる主焦点カメラが10時間撮像観測することによって検出できる約10万個の天体をすべて分光観測するためには、現在の最先端の観測技術をもってしても約1,000時間かかる。

*9 実際にはライマン α より高励起のライマン系列すべてがこのブレイクに寄与する。また、91.2 nm のライマン吸収端による連続光吸収も寄与する。

*10 実際には、これら二つの手法によって候補天体を探した後に、分光観測によって赤方偏移が決定されると確実に遠方銀河だと言える。

きな幅があるため、少数の銀河を調べても銀河進化の全体像は見えてこない。この意味で、幸運に頼る遠方宇宙研究には限界がある。

さらに、後述するように、銀河の空間分布（クラスタリング）を調べるには、銀河の典型的なクラスタリングスケールを超える広い天域を探査する必要がある。この意味においても広視野観測は不可欠だと言える。特に、大規模構造の進化を調べるには、遠方宇宙においても、現在見られる 50 Mpc^{*11} スケールの大規模構造を凌駕するスケールで観測を行わなければいけない。このようにすばるにおける遠方宇宙研究は、主に広視野観測を適用するというアクションを最大限に活かし、銀河を効率よく選択する二つのアクションと様々な新しいアイデアを駆使し、空間分解能に秀でた宇宙望遠鏡、電波・赤外線・X 線などの多波長観測と相補的に研究を続けている。

すばる望遠鏡による遠方宇宙研究の成果

では、すばる望遠鏡による遠方銀河の観測の成果を紹介しよう。まずは、背景知識として、銀河の形成と進化のシナリオをスケッチしよう。銀河は、星や惑星の生まれる舞台として、また、銀河団や大規模構造を構成する要素として重要な天体である。

現在標準的とされている銀河形成モデル（以下、標準モデルと呼ぶ）によると、銀河やその集団は、宇宙初期に量子的に発生した微小な密度揺らぎが自己重力によって成長してできた。この際、宇宙の物質質量の 8 割以上を占めるダークマターの揺らぎの成長を考えなければならない。標準モデルにおいては、コールドダークマター（CDM）という速度分散の小さい未知の物質を仮定する。様々な観測から、ダークマターが実際に CDM の性質を持つことは確実である。^{*12}

ダークマターは重力相互作用しかしない粒子なので、宇宙の歴史の中で、いつ、どれくらいの質量の重力束縛系ができるかは正確に予想することができる。この束縛系は、ダークマターの重力に支配されていることからダークハローと呼ばれる。^{*13} われわれが実際に目にする銀河、すなわち星とガスの系は、ダークハローの中でガスが冷えて星が生まれることでできると考えられる。

銀河の形成と進化を解明するには、ガスの冷却と星の形成、超新星爆発によるガスの再加熱、星で作られた金属によるガスの汚染、銀河中心の巨大ブラックホール活動、銀河と銀河間物質との相互作用、銀河同士の相互作用などのバリオンの物理を理解しなければいけない。いずれも大変複雑な過程である。見過ごされている過程もあるに違いない

い。このような複雑な過程を伴っている上に、遠方銀河の観測の歴史もまだ浅いため、銀河の形成と進化の理論は完成にはほど遠い。しかし、新しいデータやアイデアをもとに、銀河に対するわれわれの理解が急速に深まっているのも事実である。以下に見るように、すばるはわずか数年の観測で、遠方銀河の知識を飛躍的に増大させた。

（1）遠方銀河の空間分布—銀河はどこで生まれるか—

銀河がダークハローの中で成長するとすれば、ダークハローの質量は銀河にとって非常に重要なパラメータといえる。遠方銀河はどんな質量のダークハローの中に存在するのだろうか。そもそも、銀河がダークハローの中で生まれるという仮説は正しいのだろうか。ダークハローの質量は、内部の物質（星やガス）の運動から原理的には測定できる。しかし現在の、つまりわれわれの近くにある銀河についてさえ、ダークハローの質量を測定するのは難しい。銀河の内部運動を、星やガスがほとんど存在しないようなハロー外縁部まで調べる必要があるからである。まして遠方銀河のダークハローの質量をこのような方法で測ることはまだできない。しかし全く手段がないわけではなく、銀河の空間分布の強度からダークハローの質量を「推定」することができる。

ダークハローの形成モデルは、重いダークハローほど強く群れる、すなわち寄り集まる傾向が強いことを予想する。群れ具合（クラスタリング）の定量的指標としては二体相関関数がよく用いられる。二体相関関数とは、ある距離だけ離れた二つの場所に銀河が存在する確率（の、ランダム分布の場合の期待値からのずれ）を距離の関数として表したものである。銀河の二体相関関数から、その銀河の属するダークハローの群れ具合がわかり、ダークハローの質量を推定することができる。^{*14} 見えないダークハローを、銀河の分布を通して「見る」わけである。夜の地球の衛星画像から光の分布を手掛かりに都市の場所を推定するのと似ているが、銀河の場合は質量まで推定できる（図 2）。

銀河の空間分布（二体相関関数）を測るには広い体積が必要である。なぜなら、少なくとも現在の宇宙の銀河は数十 Mpc という大きなスケール^{*15}で群れているからである。また、大きな体積を観測し銀河のサンプル数を増やすなければ、二体相関関数は求められない。遠方銀河は見かけが暗いため、検出には大口径望遠鏡でも十数時間の積分時間を要する。こうした暗い銀河を広い体積で探査するのを最も得意とするのが、すばる望遠鏡の主焦点カメラである。すばるは、遠方宇宙における銀河とダークマターの関係について、質・量ともに他の望遠鏡を圧倒するデータをもたらした。

図2はSXDF(すばる XMM ディープフィールド)という

*11 1 pc (パーセク) = 約 3.26 光年。

*12 ダークマターの正体は、地上の実験で直接検出するまでわからないかも知れない。

*13 ハロー（halo）とは量（かさ）のことである。いわゆる銀河と呼ばれる、光っている天体を包み込むように、暗黒物質の大きな量が存在する、とイメージしていただきたい。

*14 もちろん、内部運動などから直接測る場合に比べて、質量の決定精度は相当落ちる。

*15 現在の宇宙では銀河の二体相関関数は約 10 Mpc、銀河団の二体相関関数は数十 Mpc の距離までほぼべき関数に従うことが知られている。

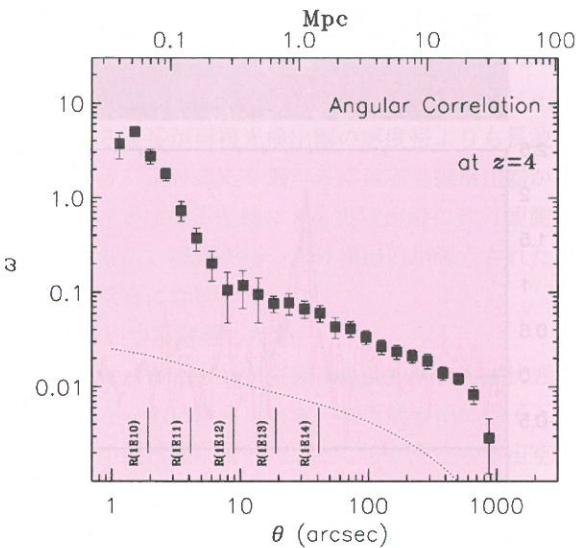


図2 $z=4$ の遠方銀河 LBG の二体相関関数。横軸は見かけの銀河同士の角度距離（下横軸、arcsec は角度秒）、あるいは $z=4$ での実距離（上横軸）、縦軸は群れ具合の強さを表す。点線は CDM モデルより予想されるダークマターの二体相関関数。ダークマターに対して銀河のほうがより強く群れていることが分かる。 $R(\cdot)$ は (\cdot) 内の質量（単位は太陽質量）に相当するダークハローの半径 [文献 3 より改変]。

1.3 平方度の天域で見つかった $z \sim 4$ の銀河の二体相関関数である。³⁾ まず、10 秒角以上のスケールにおける二体相関関数はダークハロー同士の相関を反映している。図から、ダークハローが現在の銀河系並みに重い質量を持っている (10^{11} – 10^{12} 太陽質量) ことがわかる。

さらに、約 10 秒角を境に二体相関関数が折れ曲がっていることが分かる。10 秒角という角度スケールは約 300 kpc という実スケールに対応し、これは CDM を仮定した場合の $z=4$ における 10^{11} – 10^{12} 太陽質量の質量を持つダークハローの大きさにぴったり一致する。折れ曲がりの 10 秒角以下の部分は、一つのダークハロー内での複数の銀河同士の相関を反映する。すなわち図 2 で小スケールでの二体相関関数が盛り上がっているのは、一つのダークハローの中に複数の銀河が存在していることを意味する。

このすばるの観測は、重いダークハローの中で複数の遠方銀河が成長していることを初めて明確に示した。これらの銀河は、現在の宇宙に数多く見られる橢円銀河のような明るい銀河の祖先だと予想できる。

しかし、銀河とダークハローの関係は常に単純なわけではない。ライマン α 輝線の強い比較的若いと考えられている遠方銀河 (LAE) の $z=5$ における空間分布を調べた結果、図 3 に示すように数十 Mpc という大きなスケールの個数密度の濃淡があることが分かった。⁴⁾ これは現在の宇宙の大規模構造に匹敵する。このような大スケールの構造が早くも $z=5$ という宇宙初期に形成されていることは驚きであり、しかも、その分布は、CDM を仮定するダークハローの分布では容易に再現できない。同じく $z=3$ においても、さらに広範囲 (~ 50 Mpc) に及ぶ LAE の大規模構造がすばるによって発見されており、やはり CDM モデルでは

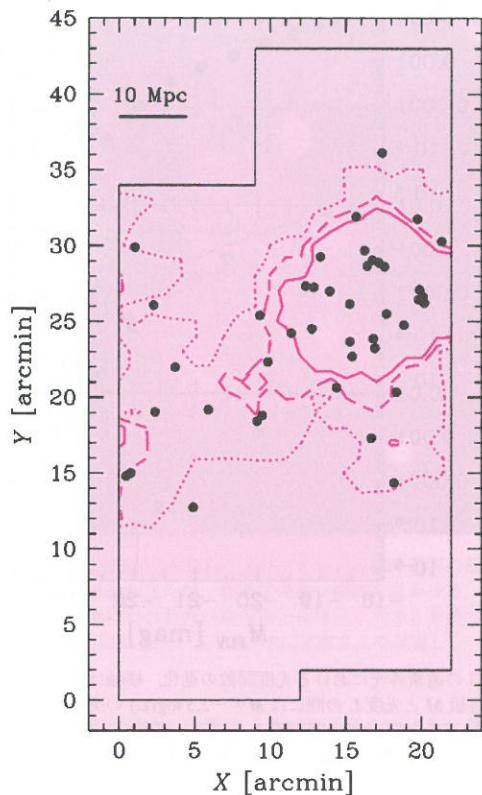


図3 $z=4.86$ で発見された遠方銀河 LAE の初期大規模構造。図の右上で強く群れて分布していることが分かる。縦軸横軸は角度距離で LAE の天球上分布と見てよい。実距離 10 Mpc に相当する長さを横棒で示す [文献 4 より改変]。

単純に説明することができていない。⁵⁾ この予想外の発見は、銀河が生まれ育つ場所について新たな謎を投げかける。

(2) 遠方銀河の光度関数—銀河はいつ星を作ったのか—

遠方銀河から届く光は赤方偏移のために $1+z$ 倍に波長が長くなっている。したがって、可視光で遠方銀河を観測する場合、その光は銀河自身にとって遠紫外域 (10–200 nm) で放射された光である。遠紫外光は重い（すなわち寿命の短い）星からの寄与が卓越するため、遠紫外光の強度からその銀河の星形成率 (1 年当たりに生まれる星の総質量) を評価することができる。すばる望遠鏡は、 $z > 4$ の銀河を多数検出し、その光度関数¹⁶を求めて、銀河の星形成活動の時間変化を調べた。この観測でもすばるの広視野が活かされている。

図 4 は、 $z=4, 5, 6$ における LBG の光度関数を示す。黒丸と赤丸がすばる望遠鏡の結果である。^{6, 7)} 参照として、 $z=6$ には、ハッブル望遠鏡で得られた最新の結果も示す⁸⁾ (ただし、すばるのデータを含め、 $z=6$ の銀河は $z=4, 5$ に比べて分光同定が進んでいないため信頼性が劣る)。この図を見ると、 $z=5$ の値には多少の食い違いが残っているものの、全体の傾向として、過去ほど銀河の星形成活動が低下していることが分かる。星形成活動が高い大質量銀河は、 $z=6$ から $z=4$ にかけて宇宙に現れたと言えそうである。

¹⁶⁾ 光度 (単位時間あたりに天体から放出される全エネルギー量) に対する分布関数。天文学において最も基本的な統計量の一つ。

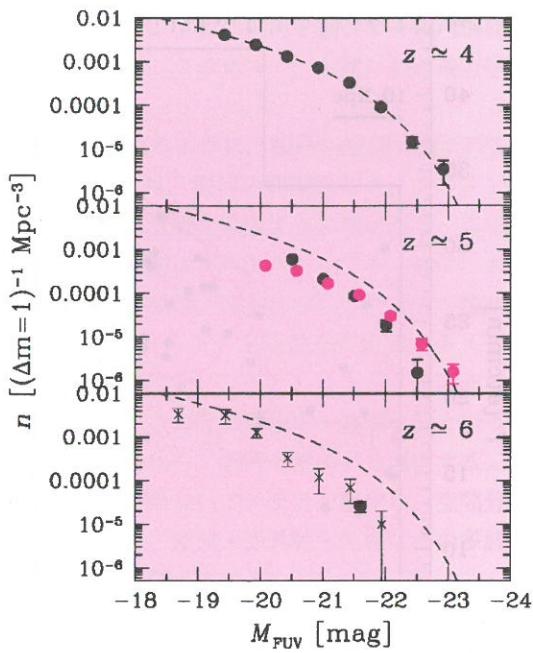


図4 LAEの遠紫外光における光度関数の進化。横軸は遠紫外光の絶対等級。絶対等級 M と光度 L の間には $M \propto -2.5 \log(L)$ の関係があり、この図の右側へいくほど銀河の光度が明るくなる。縦軸は1等級あたり 1 Mpc^3 あたりの銀河個数密度。点線は $z \approx 4$ の場合の光度関数のフィット [文献6-8より改変]。

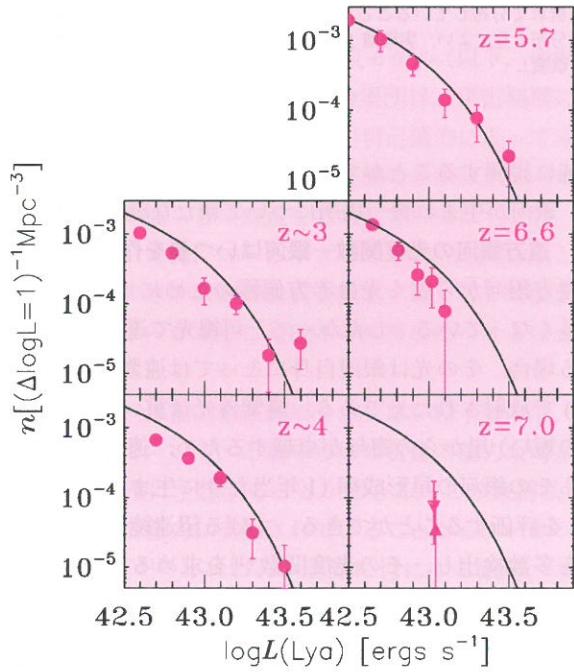


図5 LAEのライマン α 輝線光度における光度関数の進化。横軸はライマン α 輝線光度、縦軸は1等級あたり 1 Mpc^3 あたりの銀河個数密度。曲線は $z=5.7$ の光度関数のフィット。 $z=6.6, 7.0$ については文献9, 10より、 $z=3.0-5.7$ については大内氏よりデータ提供。

一方、図5は、ライマン α 輝線の強い銀河 (LAE) に限定して、 $z=3$ から7までのライマン α 輝線光度の光度関数を描いたものである。これを見ると、過去にいくに従って星形成銀河の個数の減少が見られた図4とは異なり、 $z=3$ から $z=5.7$ までは光度関数はほぼ一定である。ライマン α 輝線は進化の進んでいない若い星形成銀河から出やすいこと

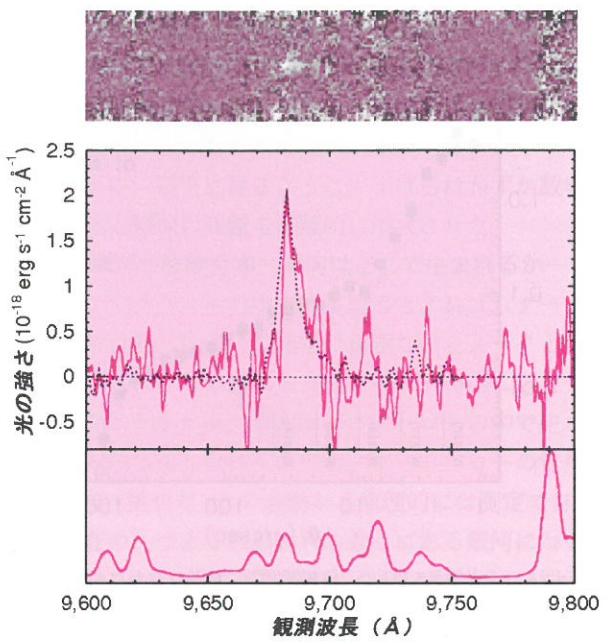


図6 すばるによって $z=6.96$ に発見された銀河のライマン α 輝線スペクトル。上の図は実際に取得されたスペクトル画像で、下の図はスペクトルを1次元プロットしたもの。遠方銀河のライマン α 輝線に特徴的な左右非対称な輝線プロファイルが見える。この銀河は現在分光同定された最遠方の天体である。最下段の図はノイズとなる地球大気のスペクトル [文献10より改変]。

を考えると、この結果は、過去にいくにつれて若い銀河の比率が高まっていることを示唆する。

図5のもう一つの特徴は、ライマン α 輝線が明るい銀河の数が、 $z > 5.7$ で減少していることである。後述^{*17}するように、この減少は、銀河自身の進化ではなく、宇宙の再電離現象を反映している可能性がある。⁹⁾

(3) 最も遠い銀河を探す—銀河はいつ生まれたのか—

これは、銀河形成の現場を直接見るという分かりやすい課題であるとともに、宇宙の再電離を探る上でも重要である。分光観測で赤方偏移の確定している銀河のうち、現在最も遠くにあるのは、SDF (すばるディープフィールド) という天域で発見された $z=6.96$ の銀河である。¹⁰⁾ これは、すばる望遠鏡を使って2006年に発見された。^{*18} この銀河は、先に述べた(2) ライマン α 輝線を使う方法によって検出された。 $z=7$ 付近、すなわち 970 nm 付近に赤方偏移したライマン α 輝線を専用の狭帯域フィルターで捕らえ、分光観測をして赤方偏移を確定する。

分光観測で得られた $z=6.96$ の銀河のスペクトルを図6に示す。 $z=7$ 付近の銀河は広い主焦点カメラの視野にこの1個だけしか見つからなかった。これは予想外に少ない数である。

銀河探査は赤方偏移が7の辺りから急に難しくなるようだ。これは $z=7$ の時代にはまだ銀河の形成が進んでいないか、あるいは宇宙の再電離がまだ完了していないためだと

^{*17} 詳細は文献4を参照。

^{*18} なお、分光同定された $z > 6$ の銀河の大部分はすばるで発見されたものである。

考えられる。

残念ながら、すばるの主焦点カメラで探査できるのは $z=7.5$ 付近が限界である。これを超えるとライマン α 輝線の観測される波長が可視光検出器の感度帯よりも長波長になってしまう。より遠くを調べるには赤外線検出器が必要である。最近すばる望遠鏡に8m級望遠鏡の赤外観測装置の中では最も広い視野を持つ赤外検出器が導入された。その遠方銀河探査に期待したい。

(4) 宇宙はいつ再電離したか

宇宙空間は、ビッグバン直後は高温のプラズマ状態だったが、膨張とともに冷えていき、40万歳の頃に陽子と電子が結合して中性状態になった。ところが現在の宇宙空間はほぼ完全に電離した状態である。宇宙背景輻射やQSOの観測によると、宇宙は $z \sim 10$ から $z \sim 6$ の間に再び電離状態になったらしい。これを宇宙の再電離という。¹¹⁾再電離に必要な電離紫外光は初代天体から放射されたと考えられる。再電離が始まることによって、宇宙は天体の存在しない暗黒時代(ダークエイジ)に終わりを告げることになる。初期宇宙の飛躍的な宇宙空間の変化である再電離過程は非常におおまかには以上のように考えられているのだが、いつ、どのように、何によってこの現象が引き起こされたのかは、まだほとんどわかっていない。

宇宙空間の電離状態を探る方法の一つに、ライマン α 輝線銀河を使う方法がある。ライマン α 輝線は水素原子に散乱されてしまうため、中性状態の宇宙からやってくる銀河のライマン α 輝線は弱くなる。実は、図5で、ライマン α 輝線の光度関数が $z > 5.7$ で減少し、特に $z = 7$ では主焦点カメラの視野に1個しか見つかっていないのは、その時代には宇宙空間がまだ十分に電離していなかったからかもしれない。もしこれが事実なら、再電離過程の時代の天体を発見したことになり、宇宙の進化を考察する上で非常に大きな意義を持つが、銀河の数がそもそも $z > 6.5$ で少なかった可能性や、再電離過程の空間的非一様性の可能性など、議論の余地は残されている。なお、すばる望遠鏡によって、 $z = 6.3$ のGRBのスペクトルに現れた中性の銀河間物質による減衰翼からも当時の宇宙の電離度が見積もられ、ほぼ同様な値が得られている。¹⁰⁾ いずれにしても、いよいよ銀河の観測は宇宙再電離時代に足を踏み入れようとしている。

(5) 原始銀河を探す—銀河はどのように生まれるのか—

銀河が生まれる瞬間を見た者はまだいない。おそらく、冷えたガスから最初にまとまった量の星が生まれたら、銀河が誕生したといえるのだろう。 $z = 7$ に銀河が見つかったからといって、すべての銀河が $z = 7$ 以前に生まれたとは限らない。実際、銀河は幅広い時代に生まれ得ると考えられている。しかし、生まれたての銀河(ここでは原始銀河と呼ぶ)と言える期間は非常に短い(典型的に 10^6 年以下)ため、稀にしか存在しないと予想される。したがって、ここでも、広視野・大口径が発見に有利になる。

原始銀河は、ガスの降着などによって空間的に広がった

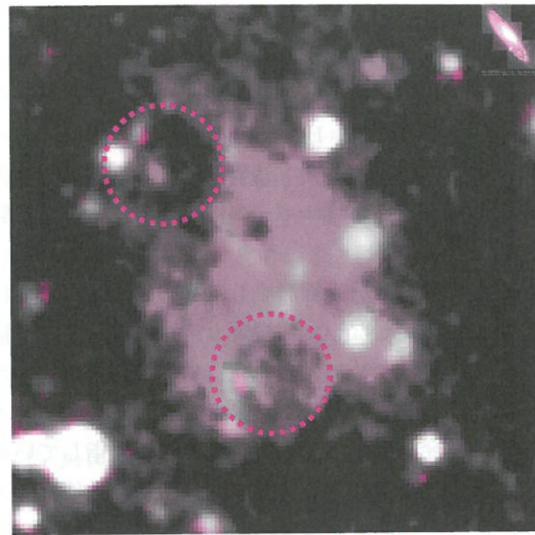


図7 すばるで観測された $z=3.1$ の巨大ライマン α 輝線銀河の画像。赤い丸のところに泡状構造が見られ、超新星爆発の痕跡と思われる。大きさの比較のために右上隅にわれわれの銀河系とほぼ同じ大きさを持つM31(アンドロメダ銀河)と同じスケールで並べた[文献5より改変]。

ライマン α 輝線を出すと考えられる。また、星が非常に若い場合や、金属量がゼロに近い場合は、ライマン α 輝線が非常に強くなる。したがって、こうした特徴を持つ天体の中に原始銀河が隠れている可能性がある。

すばるはこうした銀河の探査を初めて大規模に行い、 $z=3\text{--}5$ の宇宙で、原始銀河の候補を多数見つけた。その中から、巨大なライマン α 輝線銀河の画像を図7に示す。この銀河はすでに知っていた銀河だが、すばるによってその内部構造が明らかになった。⁴⁾ この銀河はわれわれの銀河系の数倍の大きさがあり、所々に泡のような構造が見える。これは初期の激しい星形成活動に伴うたくさんの超新星爆発によってできたのかもしれない。

すばるはこのような原始銀河の候補を多数見つけたが、その性質を詳細に調べるには、赤外や電波など多波長での深い追観測が必要であり、これは今後の課題である。すばるの見つけた銀河は明るいものが多いため追観測に向いている。また金属量がゼロに近いガスから生まれる最初の星は、我々が知っている星とは随分違うと考えられているため、恒星物理の点からも興味深い。

今後の観測

すばる望遠鏡は遠方宇宙の知識を大きく広げた。今後は、これまでの成果を土台にして、銀河の新しいパラメータ空間を開拓していくなければならない。例えば、銀河の性質のどこまでがダークハローの質量で決まり、どの性質が他の要因で決まるのか、宇宙再電離の時代にはどのような性質の銀河が存在するのか、原始銀河内ではどのような星が生まれているのか等、興味深い課題が多い。もちろんこれらの課題はすばる望遠鏡だけで解決するわけではないが、すばるも新しい観測装置を用意して次の観測に備えている。最後にこれら次期観測装置のいくつかを紹介したい。

まず、主焦点カメラのグレードアップが計画されている。現在のカメラの視野を約10倍にするというので、Hyper Suprime-Camと呼ばれる。 $z > 7$ の銀河や原始銀河の探査に威力を発揮するだろう。Hyper Suprime-Camと次に述べるFMOSなどを用いてバリオൺ音響振動という現象を遠方宇宙で検出し、ダークエネルギーの性質を探ろうという野心的な計画もある。

遠方銀河の候補は分光観測をして赤方偏移を決めなければ遠方銀河と確定しない。広視野カメラで見つかる候補を効率よく分光するためには、分光器にも広視野が要求される。すばるは、FMOSという主焦点広視野多天体ファイバ一分光器を開発中であり、2008年の稼働を目指している。

レーザー光による人工星を空に作り、それを使って大気の揺らぎをリアルタイムにモニターして星像の歪みを防ぐ、補償光学も運用される予定である(家氏の記事参照)。ハッブル宇宙望遠鏡を上回る解像度が実現され、遠方天体に対する感度も飛躍的に向上する。形成期の銀河の姿を目の当たりにする日も近いかもしれない。

本稿にコメントをくださった青木和光氏、図5を快く作成してくださった大内正己氏に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 小松英一郎: 日本物理学会誌 **62** (2007) 583.
- 2) 須藤 靖, 他: 日本物理学会誌 **62** (2007) 83.
- 3) M. Ouchi, et al.: *Astrophys. J.* **635** (2005) L117.
- 4) K. Shimasaku, et al.: *Astrophys. J.* **586** (2003) L111.
- 5) Y. Matsuda, et al.: *Astron. J.* **128** (2004) 569.

- 6) M. Yoshida, et al.: *Astrophys. J.* **653** (2006) 988.
- 7) I. Iwata, et al.: *MNRAS* **376** (2007) 1557.
- 8) R. Bouwens, et al.: *Astrophys. J.* **653** (2006) 53.
- 9) N. Kashikawa, et al.: *Astrophys. J.* **648** (2006) 7.
- 10) M. Iye, et al.: *Nature* **443** (2006) 186.
- 11) 戸谷友則: 日本物理学会誌 **62** (2007) 23.
- 12) T. Totani, et al.: *PASJ* **58** (2006) 485.
- 13) Y. Matsuda, et al.: *Astron. J.* **128** (2004) 569.

著者紹介



柏川伸成氏: 銀河の形成や進化についての観測的な研究が専門。最近は銀河と銀河間ガスの関係に焦点をあてている。

嶋作一大氏: 専門は銀河天文学。主に可視と赤外線を用いて銀河を研究している。最近は形成初期の銀河に興味がある。

(2007年8月10日原稿受付)

The Early Universe Probed with Subaru

Nobunari Kashikawa and Kazuhiro Shimasaku

abstract: Subaru has obtained many important results in the study of the distant universe. It is primarily because Subaru has a unique capability of wide-field imaging observation, which is an essentially powerful tool for studies of high-redshift galaxies. This article summarizes a series of scientific milestones.

すばるで観測する宇宙の暗黒成分

宮 崎 聰

〈国立天文台先端技術センター Advanced Technology Center/Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 N A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA e-mail: satoshi@subaru.naoj.org〉

宇宙には、光を発しない暗黒物質が、通常の物質の10倍以上存在することは、1930年代から指摘されていた。一方近年、超新星の観測により宇宙は加速膨張しているということが指摘されるようになった。この観測結果を現在の宇宙論で説明しようとすると、暗黒物質の(エネルギー換算で)2-3倍の量の暗黒エネルギーで宇宙が満ちている必要がある。これら宇宙の暗黒成分の存在は、3度K背景放射の精密観測により確定的になった。存在を議論する時代はすでに終わり、我々はその正体を解明することを目指さなければならない。本稿ではすばる望遠鏡によるこれまでの観測成果を概観し、将来計画について議論する。

1. イントロダクション

ダークマターとは自ら光(電磁波)を発しないため、直接観測することが困難な物質の総称である。弾丸銀河団(Bullet cluster)と呼ばれる銀河団がある(図1)。これは二つの銀河団が過去に衝突を経験して、互いに離れ去りつつある状況を観測していると考えられている。図中で点線で囲んだところは、銀河が密集している領域を示し、中央の実線で囲まれた領域はX線で観測した高温プラズマを示す。衝突の際、銀河同士は無衝突系であると考えられるので、

ほとんどがそのまますり抜ける、一方、互いに相互作用する衝突系であるプラズマは、衝突時にお互いに圧力(ラム圧)を受けるため、少し遅れる。これが、銀河分布とプラズマ分布がずれている理由である。一方、外側の実線で囲まれたところは、重力レンズ効果(第2.1章を参照)から計測した(ダークマターの)質量集中が見られる領域であるが、これは銀河の分布とほぼ一致している。これは、ダークマターが通常物質(バリオン)ではなく、無衝突系の粒子であるという、直接的な証拠となっている。一方、銀河

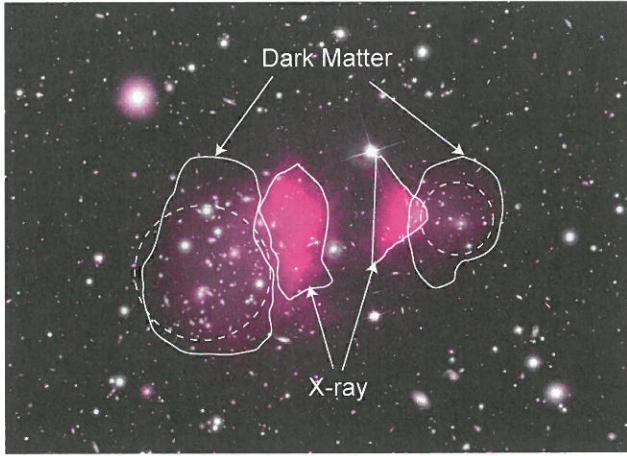


図1 弾丸銀河団 (Bullet cluster).

分布の観測とシミュレーションの比較により、ニュートリノはダークマター候補から外され、はるかに重い未発見粒子が有力候補とされている (Cold Dark Matter; CDM と呼ばれる)。

1980年代半ばころまでには、インフレーション理論と CDM に立脚した宇宙モデルが確立した。すなわち、インフレーション理論が予言する曲率ゼロの空間を実現するように、CDM を含む物質の密度がある臨界値に等しいと仮定するモデルである (後に StandardCDM モデル; SCDM と呼ばれる)。ところがその後、より精密な計算機シミュレーションにより、物質密度が臨界値に等しい場合、物質が多すぎるため、宇宙の大規模構造 (銀河の大局的な分布) を作り過ぎてしまうということが分かってきた。銀河分布の観測結果を説明するためには、物質を減らして臨界値の 1/3 程度にしなければならないが、これでは臨界値を要求するインフレーション理論と矛盾することになる。このため、真空中に残りの 2/3 のエネルギー分担させて、整合性をとろうというモデルが提案された。これはアインシュタインが提案した (後に撤回した) 宇宙項の現代的な復活であり、この宇宙モデルは Λ CDM と呼ばれるようになった。物質の密度と真空中のエネルギー密度それぞれ臨界値で割り算したものを、 Ω_{M_0} , Ω_{Λ_0} と呼ぶ。ここで $\Omega_{M_0} + \Omega_{\Lambda_0} = 1$ である。しだいに Ω_{Λ_0} がゼロではないという観測的証拠が集まり始めたが、これを決定的に示したのは Ia 型超新星の観測であろう。¹⁾

その後、宇宙背景放射 (CMB) の精密観測によりダークマターおよび宇宙項の存在は決定的になった。²⁾ 存在そのものを議論していた時代は終り、観測的宇宙論は新たな時代に入った。これからは、より本質的な事柄、すなわち、

1. インフレーションの起源^{*1}
2. ダークマターの正体

^{*1} 直接探査にはもはや電磁波は使えない。これには重力波の検出が鍵を握っている可能性がある。また CMB 偏光 B モードのパワースペクトルから背景重力波を間接的に検出することも原理的に可能であり、CMBpol 等いくつかの観測計画が提案されている。

3. 宇宙項の物理的な説明、

のような疑問に答えることを目指す観測が求められている。

ダークマターについては、上述したように、天体観測から無衝突系であるという確かな証拠が見つかっている。今後は、稼働間近の Large Hadron Collider などの素粒子実験や、Xe の二重ベータ崩壊などの原子核実験により、CDM 粒子の直接検出が期待されている。

一方、宇宙項に物理的な背景を求める試みの第一歩は、次のような状態方程式を導入することである。

$$p_X(z) = w(z)\rho_X(z) \quad (1)$$

ここで、 $p_X(z)$ と $\rho_X(z)$ はそれぞれ圧力とエネルギー密度を表し、係数 $w(z)$ で結ばれている。 z は赤方偏移を表し、宇宙膨張史の時刻を表す現在を $z=0$ で、過去にいくに従って z は増加し、宇宙の開闢のときが $z=\infty$ である。CMB はおよそ $z \sim 1,000$ の宇宙を観測していることになる。式(1)では、自分自身と重力としか相互作用しない場合を想定しており、このパラメータ化を XCDM と呼ぶ。また、このように宇宙項が一般化されたものは、ダークマターという言葉の類似性から、ダークエネルギーという名前がつけられた。

宇宙膨張により、銀河間の距離は広がっていくが、その広がる速度 v は、銀河間距離 r に比例し、 $v = H_0 r$ と書けることが観測により確かめられている。 H はハッブルパラメータと呼ばれ、宇宙の膨張率を表し、その現在の値を H_0 とする。ハッブルパラメータは一般には z の関数で

$$H^2(z) = H_0^2 \left(\Omega_{M_0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda_0} \exp \left(3 \int_0^z \frac{1+w(z)}{1+z} dz \right) \right) \quad (2)$$

と書ける。²⁾ ここで、現在の Ω_{Λ_0} はダークエネルギーの密度指数で、前出の宇宙定数 Ω_{Λ_0} を、時間変化することを許して一般化したものと考えることができる。式(2)の意味するところは、 $z \gg 1$ の過去においては、物質密度 (Ω_{M_0}) が宇宙の膨張率を決めていたが、 $z \sim 1$ くらいになると、ダークエネルギーの効果が効きだして、宇宙膨張が加速に転じた、ということである。すなわち、ダークエネルギーの性質を詳細に知ろうとすると、 $z \sim 1$ 以降の宇宙膨張率を精密に計測する必要があり、 $z \sim 1,000$ を見ている CMB の精密観測だけでは決められない。

宇宙膨張率を計測する手段として、先に述べた超新星が最も強力であると考える人が多い。他の計測手段としては、「構造形成の時間発展」があげられる。ある場所での物質密度を $\rho(R, t)$ は、その場所での平均密度からのずれ $\delta(R, t)$ を定義すると、 $\rho(R, t) = \rho(\bar{t})(1 + \delta(R, t))$ と書き直される。 $\delta(R, t)$ の時間発展は、線形の範囲では次式に従う。

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - (3/2)H^2\Omega_M\delta = 0 \quad (3)$$

これは強制振動の式と見ると、第2項が摩擦 (Hubble drag と呼ばれる) を表し、第3項が source を表す。宇宙膨張 H に起因する摩擦項がないと δ は exponential で成長してしまうが、実際には膨張のため、成長は「べき」で済んでいる。

このように、構造形成の時間変化と宇宙膨張は密接な関係がある。すなわち、物質分布の時間変化の精密計測が、ダークエネルギーを調べるための有力な手段となる。

宇宙の構造は、古典的には銀河や銀河団の可視光やX線の観測を通じて行われてきている。

ところがこれまで見てきたように、電磁波を発するバリオンは全物質の1/10程度しか存在せず、ほとんどがダークマターである。バリオンの分布は、関連する複雑な物理過程により、さまざまな歪みを受けている可能性がある。よって、ダークマターの分布は直接計測するほうがよい。重力レンズ効果がこれを実現するための有力な手段を提供する。次章では、この重力レンズ効果の解説とすばるによる最近の成果を紹介する。

2. 重力レンズ効果を利用した観測方法とすばるの成果

2.1 重力レンズ効果

一般相対論によれば、光が重力場を通過すると進行方向が変わる。図2(a)に質点のそばを通過する光線の屈折を模式的に示した。通常の凸レンズでは、光軸から離れるに従って屈折角が大きくなるので、遠方からきた光は焦点に集光される。ところが重力レンズでは、光軸から離れるに従って屈折角 α は小さくなる。質点から遠ざかると重力が弱くなるからである。このため、重力レンズは焦点を持たない。

図2(b)のSにある丸い銀河の像が、質点Mの存在でどのように変形を受けて、観測者Oに観測されるか考えてみる。破線は質量Mがないときの光路図であるが、Mがあると、Mに近い光路のほうが屈折角が大きくなる。よって、図の実線のような光路の光が観測者Oに届く。このため像はMから遠ざかる方向に浮き上がり、また見かけの角度 $\Delta\theta$ は、Mがないときの角度 $\Delta\beta$ より小さくなる。つまり背景銀河は質点に向う線と垂直な方向(Mを中心に円を考えたときに、その接線方向)に引き伸ばされて楕円のように観測されることになる。質量が大きければこの歪み具合は大きくなる。逆に言うと、背景にある銀河の像の歪み具合を測定することで、手前にある前景天体の質量分布を推定することができる。

背景天体S、レンズ中心、観測者が一直線上にほぼ揃うと、背景天体は大きく弧状に歪みを受け、一般的には多重像が観測される。これは「強レンズ効果」と呼ばれ、実際に1980年代の後半にA370銀河団の中心付近で初めて発見された。

一方、光線のインパクトパラメータが大きいと、背景銀河の形状を元々の形からほんの少しだけ歪めることになる。

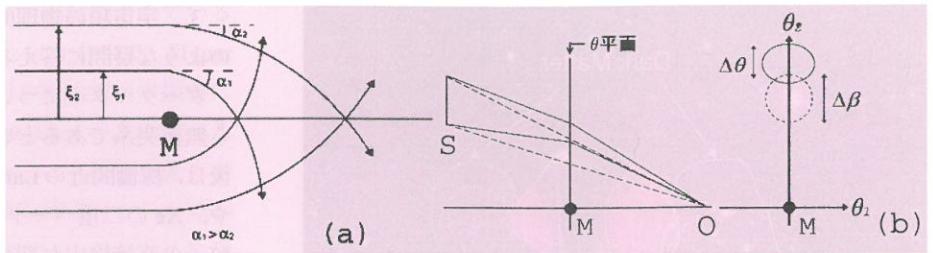


図2 重力レンズ効果。

これを「弱レンズ効果」と呼ぶ。背景の銀河は様々な形をしており、重力レンズにより変形を受ける前の元々の形状や向きを知る術はない。このため、弱重力レンズ解析では、実際には以下に述べるような統計的な方法で歪みを検出する。ある点Rを決めて、その周りに円を描く。その円内に写っている銀河のうち、十分遠方にあるものを選び出し、²⁾ この背景銀河の形状を計測する。銀河の形状の細かい点は無視して、楕円で近似する。この楕円が、円の接線方向にどのくらい揃っているかを円内の背景銀河すべてに対して足し合わせると、³⁾ この和はRにおける前景天体の質量に比例する。Rを変えて、この接線方向の揃い具合を計測することで、前景天体の質量分布図を得る。

弱重力レンズ効果の原理は比較的単純であるが、遠方で暗い銀河の形状を精度よく計測する必要があるため、観測に対する要求は極めて高い。また、銀河団スケールの天体を観測対象とするため、広い視野を撮像しなければならない。このため、大型CCDが開発され、当時最大であった4m級の大望遠鏡に搭載されるようになり、実際の観測が可能になった。最初に報告したのは、当時Bell研でCCDを用いた天体観測の最先端を走っていたTony Tysonのグループである。³⁾

すばる望遠鏡用広視野カメラ「Suprime-Cam」は、大集光力、高解像度、広視野、という弱重力レンズ効果観測に要求される条件をすべて兼ね備える。⁴⁾ 実際、「銀河団内の質量分布」、「銀河団計数」、「Cosmic shear」の観測で成果をあげている。

2.2 銀河団内の質量分布

2.2.1 ユニバーサル質量分布の検証

CDM宇宙モデルにおける構造形成は次のように進行すると考えられている。CDM粒子の初期密度揺らぎが、重力により成長し、クラスタリングが進行していく。CDMの集中を、ダークマターハローとよぶ。ダークマターハローは最初スケールの小さいものからでき、さらにハローが合体して、より大きなハローが形成される。ハローが作る重力ポテンシャルの中にバリオンが寄せ集められて、光り輝く天体が形成される。

ダークマターハローの成長の様子は、重力が主に効く過

²⁾ 銀河の色や明るさに基づき選択する。

³⁾ 実際には、SNを最大にするためには、円の中心からの角距離 θ に反比例する重みを、足し合わせの際にかける。

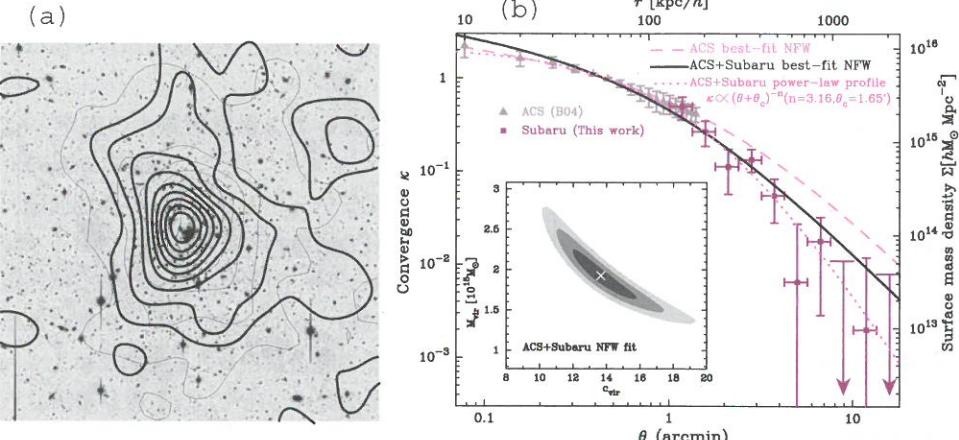


図3 (a) すばるで取得したデータに弱レンズ解析を施して求めた、銀河団A1689 ($z=0.183$) のダークマターマップ (b) A1689の質量分布の動径プロファイル。 $\theta>1\text{ arc min}$ のデータは(a)図より求めたすばるの結果。 $\theta<2\text{ arc min}$ のデータはハッブル宇宙望遠鏡の強レンズ解析の結果。

程であるので、 N 体計算機シミュレーションにより詳細に調べることができる。ハロー中のダークマター分布の動径プロファイルを調べると、以下のような表式が提案されている。⁹⁾

$$\rho(r, M) \propto \frac{1}{(c/r_h)r(1+(c/r_h)r)^2} \quad (4)$$

ここで、 r_h は質量 M を求めている半径、 c は、 $c=r_h/r_s$ で定義され、質量分布の中心集中度を表すパラメータである。なお、 r_s は動径プロファイルのべきが r^{-3} から r^{-1} に変化するスケールである。この関数形は提案者の頭文字を取り、NFWプロファイルと呼ばれる。銀河スケールから銀河団スケールまで、幅広く記述できると言われている。このようなプロファイルが出現する、物理的な説明はまだ必ずしも十分されているとは言えないものの、CDMモデルの妥当性を検証するための一つの手段であると見なされている。

Suprime-Camによる銀河団観測の例として、銀河団A1689の結果を図3(a)に示した。⁵⁾太線の等高線が弱重力レンズ解析により求めたダークマターの分布図である。細線の等高線は、銀河団メンバー銀河の出す光の量を示す。この銀河団ではダークマター分布と銀河の分布がよく一致していることが分かる。

A1689の中心部には、多数の強レンズ効果を受けた背景銀河の多重像が存在することが知られており、ハッブル宇宙望遠鏡の高解像度観測で詳細に調べられている。⁶⁾これらの多重像を用いて、レンズ方程式の逆問題を直接解くことにより、この銀河団中心領域の質量分布は詳細に調べられている。これにより求まった銀河団中心から動径方向の質量密度を、図3(b)で三角印($\theta<2\text{ arc min}$)に示してある。一方、図3(a)のすばるの質量分布図から求めた質量密度を四角印($\theta>1\text{ arc min}$)で示してある。ハッブルは視野が狭く、 r が小さい中心部分しかカバーできていないが、すばるでは広範囲に観測していることが分かる。ハッブルのデータとすばるのデータが重なり合う半径1-2分角の領域で

は、両データは非常に良い一致を示す。ハッブルとすばるのデータを合わせて、NFWモデルでフィットしてみると、最適値は実線のようになり、よくデータを再現している。10 kpcから2 Mpcまでの銀河団規模のダークマターハローの特徴的なスケールすべてにわたり、質量密度がNFWでよく記述されることが分かった。

このNFWモデルフィットにより得られる中心集中度 c は13.7である。一般に、中心集中度は、軽い天体ほど大き

くなることが N 体シミュレーションにより確かめられている。また、宇宙頂優勢のCDMモデルにおいて、銀河団スケールのダークマターハローに期待される c は4程度であり、A1689の例は、これよりは有意に大きいことが分かる。これを説明するために、「銀河団形成時期を早める」、「ダークマターハローの形状の球対称からのずれ⁷⁾」等が提唱され活発な議論を呼んでいる。今後はより多くの銀河団で、質量プロファイルを調べ、A1689の結論の一般性を観測的に確認するべきであろう。

なお、ハッブルのデータは銀河団中心のみをカバーしているが、これのみを用いてNFWプロファイルのパラメータを求めるとき、図3(b)の破線が最適値を示し、 $c\sim 8$ と低くなる。この破線を銀河団外縁部に延長すると、すばるによる観測データと大きく合わないことが見て取れる。中心集中度 c を精度よく決定し、銀河団の質量を高精度で計測するには、広視野観測のデータが重要であることが分かる。

2.2.2 衝突銀河団におけるダークマター、バリオン分布

CDMモデルでは、小型の天体が衝突合体して、より大きな天体に成長していくというのが、構造形成の基本的な描像であることはすでに述べた。この衝突の現場において、ダークマター、バリオンの分布がどのように変化するかを調べることは、構造形成の過程を理解する上で極めて重要な。

すばるを用いて、衝突前、衝突中、衝突後の各フェーズの銀河団ペラーが系統的に調べられてきている。⁸⁾これまで得られている結果によると、すべてのフェーズにおいて、ダークマター分布と銀河分布はおおむねよく合うが、X線の分布は、衝突中、衝突後において、ダークマター/銀河分布とずれている場合が多い。これは第1で紹介した弾丸銀河団の結果を再確認するものではあるが、より多くの衝突銀河団で一般的に見られる現象であることを示せたことの意義は大きい。また、プラズマが銀河団の作る重力場にトラップされて平衡状態にある(静水圧平衡)と仮定する

と、 X 線の観測量より銀河団質量(M_X)を推定できる。この量を弱重力レンズ効果を用いて推定した質量(M_{WL})と比較すると、衝突前の銀河団では $M_X \sim M_{WL}$ であるが、衝突中、衝突後の銀河団では $M_{WL} < M_X$ であることが分かり、衝突中に X 線の温度が上昇することが確認された。これは、衝突系においては平衡状態が実現していないことをはっきりと示している。また、このような衝突銀河団の質量を精度よく計測するためには、弱重力レンズ効果が有効である。

2.3 銀河団計数

密度揺らぎ δ が1を超える非線形領域では、式(3)は成立しなくなり、計算機による N 体シミュレーションが必要になる。銀河や銀河団は、密度揺らぎが非線形成長した結果生まれた天体である。銀河においては、バリオンの存在がその形成過程に大きく影響するものの、銀河団はその主成分がダークマターであるため、形成過程において重力相互作用のみを考えればよく、扱いが容易である。また、銀河団の場合は球対称な場合は解析解があり、これにより銀河団計数の準解析的な取り扱いが可能になっている(Press-Schechter理論)。このため、計算機シミュレーションの結果の妥当性をチェックできる。このように、銀河団計数観測により、構造形成の時間発展を調べることが可能であることが分かる。

ある質量 M_{\min} 以上の銀河団の個数は以下の式で与えられる,

$$N_i = \Delta\Omega \Delta z \frac{d^2V}{dz d\Omega}(z_i) \int_{M_{\min}(z_i)}^{\infty} \frac{dn(M, z_i)}{dM} dM \quad (5)$$

N_i はある赤方偏移のビン z_i に入る銀河団の個数で、 dN/dM は銀河団の質量関数 (mass function) でこれが N 体シミュレーションから導かれる。 $d^2V/dzd\Omega$ は、単位 redshift、単位立体角あたりの体積を表しており、これも宇宙構造に依存する。

銀河団を探すにはいくつかの方法がある。おそらく最も効率的な方法はX線を用いた探査であろう。銀河団の放射するX線は明るく、宇宙論的な距離($z > \sim 1$)まで観測可能である。一方、可視光による観測では、最近銀河団のメンバー銀河に特徴的な色(color)を持つ銀河の集中を探すという手法も成果をあげつつある(Red Sequence Cluster Survey)。これらの手法と相補的な探査方法が、弱レンズを用いるものである。この弱重力レンズサーベイは、質量そのものを手がかりに天体探査をするため、式(5)への適用を考えた場合、最も素直な手法である。なぜなら、他の手法で天体探査を行った場合その観測量(X線光度等)を質量に変換させる必要があり、そこにモデルや仮定が入るからである。逆に弱重力レンズサーベイは背景銀河の存在が不可欠であるので、背景銀河の距離よりも遠くの銀河団は探査できない。このため、およそ $z \sim 0.8$ に探査領域が限られる。

Suprime-Cam の視野を12視野分を探査して、銀河団を探した結果を図4に示した。¹⁰⁾ 赤い等高線が弱重力レンズ解

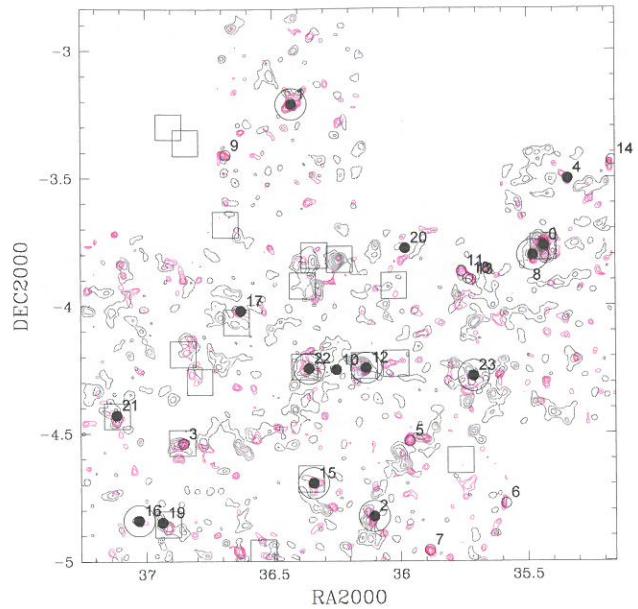


図4 すばる Suprime-Cam の観測結果に、弱重力レンズ解析を施し、再現された2次元質量分布図（赤いコントア）。ある閾値以上のピークに黒丸をつけて、ID番号を記してある。大きな四角と丸が銀河団の存在が確認された位置を示す。参考のため、黒いコントアで比較的明るい銀河の数分布を示してある。探査領域の広さは2.2平方度。横軸、縦軸はそれぞれ赤経、赤緯を角度で表示してある。

析で求めた、質量分布図で、そのピークの位置に黒丸をつけ、ID番号をその右肩につけてある。ある閾値以上の信号が受かったものをすべて表示してある。小さい白丸はピークとして検出されたが、明るい星の近傍または、カメラの視野端にあると判定されて、除外されたものを示す。これらの領域では正確な質量分布推定が困難だからである。大きな四角は、宇宙X線観測衛星(XMM)で検出された候補の中で、後の地上からの分光観測で複数の銀河が同一赤方偏移に集中が確認され、銀河団と確定されたものを示す。大きな白丸は、Suprime-Camの観測グループによる独自の分光観測で銀河団と確定したものである。図中にはある15個の候補天体中、12個までが銀河団と確定していることが分かる。従来、弱重力レンズ効果を用いた銀河団サーベイは観測的に困難と考えられてきたが、すばるの能力をすれば十分実行可能であることが示された。すばるの観測グループでは残りの3個の追観測を興味を持って進めている。

この領域は、XMM-Newton 衛星が積分時間 10 k 秒のサーベイ キャンペーンを行っている領域である。Suprime-Cam が観測した領域内にある銀河団のうち 8 個は弱重力レンズでは有意な信号は受からなかった。それでも $15/(15+8)=65\%$ は検出されたわけだから、これは使用したすばるの観測時間（約 6 時間）を考えれば、高効率であると言えなくはないだろう。ダークエネルギーに有意な制限を与えるためには、10,000 個程度の銀河団サンプルが必要となると予想されている。弱重力レンズサーベイは、このための有力な手段となることが示された。一方、弱重力レンズで受かり、X 線での検出が報告されていない銀河団が複数あるが、これらについては、X 線サーベイ キャンペーン

ーンがまだ完了していないため、たいへん興味があるものの現段階で詳しい比較はできない。

2.4 宇宙の大規模構造による重力レンズ:

Cosmic Shear

銀河団よりも大きなスケールで銀河分布を調べると、フィラメントのような分布を示し、銀河が比較的少ない領域(ボイドと呼ばれる)を取り囲んでいる。銀河団は、複数のフィラメントが交差するところに位置する。このような複雑な構造は「宇宙の大規模構造」と呼ばれている。この大規模構造が引き起こす重力レンズ効果は、Cosmic shear(宇宙歪み)と呼ばれている。Cosmic shearの観測により、統計的にではあるが、直接宇宙の大規模構造を探査する方法について紹介する。

遠方銀河から発せられた光が地球に届くまでには、大規模構造による質量分布の非一様性があるために、重力場の強い領域弱い領域を何層も通り抜けて来ることになる。これにより光は何回も屈折を受けると考えられる。図5(a)にこの様子を示した。図中 r は観測者からの距離を表し、質量分布が一様であるときには、角度 θ の方向に見える銀河 S を考えている。ある地点 r' での光の屈折角はその場所での重力場の傾き $\nabla^\perp\phi(r')$ に比例して $\delta\alpha = -2\nabla^\perp\phi(r')dr'$ で表される。これを r' に対して0から銀河 S までの距離 r_s まで積分してやれば、 θ のズレ量 $\delta\theta$ が求まる。距離が遠いと同じ角度変化でも観測される量は $(r_s - r')/r_s$ だけ小さく見える。これを考慮すると、 $\delta\theta(r_s)$ は次のように求まる。^{*4}

$$\delta\theta(r_s) = \frac{-2}{r_s} \int_0^{r_s} (r_s - r') \nabla^\perp\phi(r') dr' \quad (6)$$

銀河の距離分布が $W(r_s)$ で表されるとすると、様々な銀河を観測した結果の平均は

$$\delta\theta = \int \delta\theta(r_s) W(r_s) dr_s \quad (7)$$

となる。銀河の位置ズレ量の絶対値 $\delta\theta$ を直接検出することはできないが、その空間微分 $\Phi_{ij} \equiv \partial\delta\theta_i/\partial\theta_j$ は像の歪みの度合い shear γ として観測することができる。^{*5}

この密度揺らぎが線形-弱非線形にある大規模構造での光の伝播(屈折およびシア)は、本質的には連続的なランダムウォークとして考えることができ、それゆえに統計的な取り扱いが必要になる。そこで、最も単純な統計量として、ある角度 θ の視野中の γ の分散値

$$\gamma_{\text{rms}}^2(\theta) = \sum_{\alpha=1}^2 \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \gamma_\alpha \right)^2 \quad (8)$$

を考えることにする。ここで、 N は視野内の銀河の個数、 γ_α はベクトル γ の成分である。 $\gamma_{\text{rms}}^2(\theta)$ は θ が小さいとき

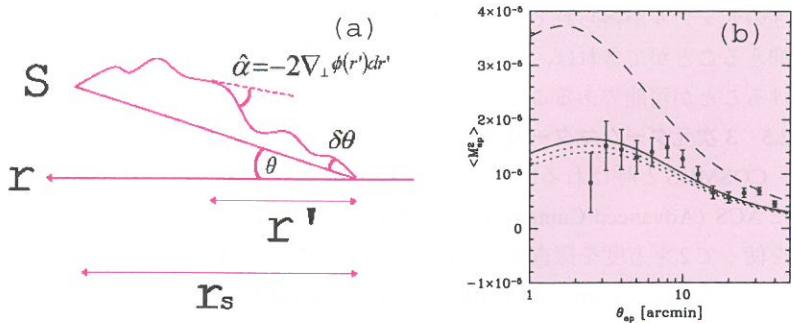


図5 (a) 大規模構造による重力レンズ効果の模式図。遠方銀河からの光は、質量コントラストによって多数回屈折を受けて観測者に届く。(b) すばるによる Cosmic shear 観測の結果。実線が宇宙項入りの CDM モデルに基づく理論予想、破線は宇宙項がない場合、点線は宇宙項の代わりにダークエネルギーを考えた場合。

に大きく、 θ が大きくなるに従って減少する量であることが予想される。それは次のような理由による。ある隣り合った銀河のペアを考える。もし途中の質量分布が一樣であれば、このペアの銀河の形状には相関はないだろう。ところが、非一様性があると、これらの銀河から発せられた光は同じような経路で地球に届くので、同じような像の歪みを受けるだろう。つまり銀河形状に相関が出るはずである。 $\gamma_{\text{rms}}^2(\theta)$ はこの相関の度合いを表している。そして、 θ が小さいほど銀河の角距離が小さいので相関は大きくなり、逆に θ が大きくなると相関は小さくなる。

観測データと比較するときは、多数の視野のアンサンブル平均 $\langle\gamma_{\text{rms}}^2\rangle(\theta)$ のほうが S/N 比が上がり都合がよい。 $\langle\gamma_{\text{rms}}^2\rangle(\theta)$ を計算すると、重力場を表す ϕ は $\langle\phi_k\phi_k\rangle$ (ϕ_k は ϕ のフーリエ積分)という項に反映される。このアンサンブル平均は質量分布のパワースペクトラム P_δ に比例することが分かっている。 P_δ は計算機シミュレーションによって様々な宇宙モデルに関して求めることができるようになっているので、これを用いて $\langle\gamma_{\text{rms}}^2\rangle(\theta)$ の理論的予測を行うことができる。

図5(b)にこうして求めたすばるの結果を示した。¹¹⁾ 観測視野は2平方度である。図の実線は宇宙項優勢の CDM 宇宙モデルが予測する値で、これとよく合っていることが示されている。一方、破線は宇宙項はゼロでダークマター優勢宇宙の場合で、これが予言する相関は強すぎて、観測結果に合わないことが示されている。図5(b)の二つの点線は宇宙項($w_0 = -1$)ではなくて、ダークエネルギーの場合の予想値である($w_0 = -0.95, 0.9$ の場合)。現在のデータの統計から、これらを区別することは困難であり、より広い視野を観測して、統計を改善する必要があることが見て取れる。

本稿の第1章で述べたように、Cosmic shearを通じて、構造形成の時間発展を観測し、宇宙の膨張歴史を決定することにより、ダークエネルギーの性質を調べることができる。上の例では赤方偏移情報は使用していないが、背景銀河をいくつかの赤方偏移サンプルに分けることができれば、構造の進化をより直接捉えることが可能である。十分な広

^{*4} 今は、簡単のため曲率0のユークリッド空間での結果を示している。

^{*5} $\gamma_1 = \frac{1}{2}(\phi_{11} - \phi_{22})$, $\gamma_2 = \frac{1}{2}\phi_{12}$

さのサンプルが得られて、系統誤差を必要なレベル以下に抑えることができれば、ダークエネルギーに強い制限をつけることが可能であることが示されている。^{12),*6}

2.5 3次元ダークマター分布

COSMOSと呼ばれる、ハッブル宇宙望遠鏡に搭載されたACS (Advanced Camera for Survey)というCCDカメラを使って2平方度を探査するプロジェクトがある。ACSの視野はSuprime-Camの約1/100しかないので、2平方度を探査するためには、500視野以上撮らなければならず、比較的大規模なプロジェクトとなる。日本からも研究者が参加し、Suprime-Camは主に可視光での測光を担当している。¹³⁾ 宇宙望遠鏡の高い解像度は銀河の形状測定に有利である。また、豊富な多色データを生かして、測光的赤方偏移計測と呼ばれる手法で、分光観測をしないで背景銀河の粗い z を推定することができている。

背景銀河を赤方偏移ごとにグループ化し、それぞれのグループごとに、本稿第2.1章で述べた手法を用い、接線方向のそろい具合を計測し質量分布図を作る。背景銀河の赤方偏移を z_s とすると、重力レンズ効果では $z_s/2$ 付近の構造を主に再構築することになる。 z_s を変えた質量分布地図を作りこれを断層写真のように並べることで、ダークマターの3次元地図を得ることができる。こうして作成された図は非常に印象的で、2007年1月に日本でも新聞報道された。¹⁵⁾ ただし、実際には、距離 $z_s/2$ を中心に割と幅広い領域が再構築されるため、いくら z_s を細かくとっても、ダークマターの奥行き方向の解像度を上げることは原理的に困難である。構造形成研究の手段として用いるためには、さらに工夫が必要で、今後の研究課題である。

なお、このデータセットを用いてCosmic shearの解析が行われているが、ダークエネルギーを議論するには至っていない。¹⁴⁾ 2平方度ではまだ視野が狭すぎるためである。

3. 今後の展望

重力レンズ効果を利用した、Cosmic shearや銀河団計数の観測は、ダークマターを主成分とした宇宙の構造形成の進化を探る方法として有効であることを紹介してきた。重力レンズ効果のより精密な計測が、ダークエネルギーの正体解明のための方法の一つであることも述べた。しかし、精密計測のためには、数平方度という規模では十分ではなく、約1,000倍程度の視野を観測しなければならない。この規模の探査を現有のSuprime-Camで達成するのは困難である。

Suprime-Camは現在のところ1秒角以下の像質を持つカ

メラの中で、世界最高のサーベイ能力を有しており、これがすばるの特徴の一つになっている。しかし、カナダフランス-ハワイ望遠鏡用のMegaCam等、Suprime-Camに匹敵するカメラが次々と開発されつつある。さらに、米国を中心とする複数のグループ (DES, Pan-STARRS, LSST) がSuprime-Camの10倍以上のサーベイ能力を持つ望遠鏡とカメラの実現を目指して、開発を進めている。このように21世紀に入りダークマター、ダークエネルギーの存在が確実になっていく中、これをより詳しく調べるために、可視光広視野撮像による観測がかつてないほどに重視されるようになってきた。

そこで、すばるにおいてもその視野を10倍程度拡大することを目標とする開発プロジェクトが始まった。¹⁶⁻¹⁹⁾ Hyper Suprime-Cam (HSC) と名づけられた新カメラは、現状の結像性能を維持し、視野直径1.5度角程度以上の実現を目指している。このためには、第一レンズの直径は1m程度とかつてないほどの大きさのレンズ系が必要となる。また、焦点面の物理的な大きさも直径60cm程度に達するが、ここには浜松ホトニクスと国立天文台が共同開発してきた完全空乏型CCD (FDCCD)²⁰⁾が配置される。すばる望遠鏡主焦点の開発を通じて蓄積してきた技術資産を最大限生かし、現在詳細な検討が進められている。

図6において、我々が計画しているサーベイ計画の規模を他のサーベイと比較している。横軸は限界等級(右ほど暗い天体まで観測する)を示し、縦軸はサーベイ領域の広さを示す。これまでに行われてきたサーベイは黒三角、現在進行中のサーベイは灰色三角で示してある。図中のPS (Pan-STARRS)とLSSTは、HSCのライバルとなり得る今後の計画である。右下がりの直線は、ある観測時間が与え

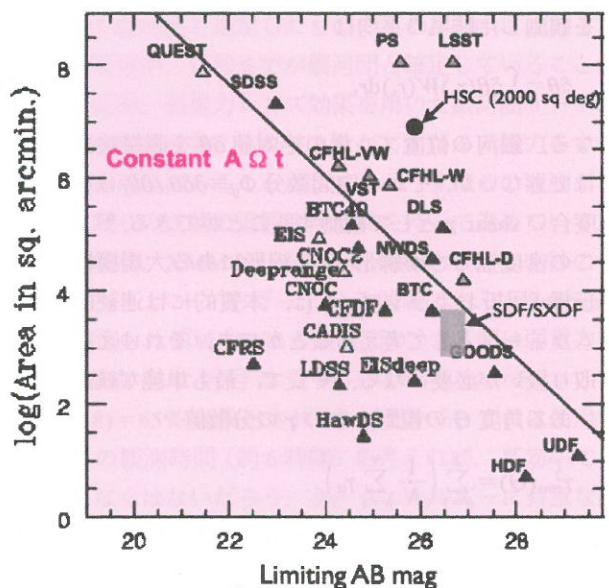


図6 これまで行われてきたサーベイ(黒三角)と現在進行中(計画も含む)のサーベイ(灰色三角)Hyper Suprime-Camで計画しているサーベイ規模を黒丸で示した。四角の灰色ハッチは、これまですばるで行われてきたサーベイを示す。横軸は限界等級、縦軸が広さを示す。

*6 ダークエネルギーパラメータ(式(1)中の $w(z)$)の決定精度の上では銀河団計数を用いる方法より、Cosmic shearの方が有望視されている。なぜなら、式(5)の $d\eta/dM$ の理論計算より、大規模構造のパワースペクトル P_δ の計算のほうが、単純で精度が高いとされているからである。とはいっても、銀河団計数により、全体の整合性のチェックが行えるし、また、観測結果を天体カタログにまとめることができることが強みでもある。

られたときに達成できる深さ、広さの限界を表す。図中の CFHL-VW, W, D というのは口径 3.6 m の望遠鏡をほぼ独占して現在進行中のサーベイで、図上で右上の限界に位置していることが分かる。このため、これが現在存在する装置を利用した最大規模のサーベイであることを示している。すばるはこれまで、SDF/SXDS と呼ばれる撮像サーベイを行ってきた（図中灰色の網目領域）が、これもだいたい限界領域に位置している。すばるは口径が大きいのだが、共同利用望遠鏡であるため、思い切った長さの観測時間を投入することができず、CFHL のサーベイを大きくしのぐまでには至っていない。

この一群から抜け出すためには、HSC のようなカメラが必要である。HSC による 2,000 平方度サーベイは、図中の黒丸に位置づけられる。Pan-STARRS や LSST はまだ完全に予算が認められてはいないというものの、専用望遠鏡計画のため、広い視野を短期間でサーベイすることができる。HSC/すばるのサーベイが意味を持つためには、これらの計画より十分早くサーベイを完了して、本質的な科学成果を出すことが必要となる。タイミングが極めて重要であるが、予定通りカメラが完成しつつ観測時間を得ることができれば、前人未踏の宇宙を探査することができる。このチャンスを生かし、なにかおもしろい成果につなげたいものである。

この稿を準備するにあたり、台湾中央研究院 (ASIAA) の梅津氏、国立天文台の青木和光氏にはたいへんお世話になりました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土居 守, 日本物理学会編: 宇宙を見る新しい目 (日本評論社, 2004) p. 145.
- 2) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭: 日本物理学会誌 **62** (2007) 83.
- 3) J. A. Tyson, R. A. Wenk and F. Valdes: *Astrophys. J.* **349** (1990) L1.
- 4) S. Miyazaki, *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **54** (2002) 833.
- 5) K. Umetsu, M. Takada and T. Broadhurst: *Mod. Phys. Lett.* **22** (2007) 2099.
- 6) T. Broadhurst, *et al.*: *Astrophys. J.* **621** (2005) 53.
- 7) M. Oguri, M. Takada, K. Umetsu and T. Broadhurst: *Astrophys. J.* **632**

- (2005) 841.
- 8) N. Okabe and K. Umetsu: *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, in press (astro-ph/0702649).
- 9) J. F. Navarro, C. S. Frenk and S. D. M. Whilte: *Astrophys. J.* **462** (1996) 563.
- 10) S. Miyazaki, T. Hamana, R. S. Ellis, N. Kashikawa, R. J. Massey and J. Taylor: *Astrophys. J.* **669** (2007) 714.
- 11) T. Hamana, *et al.*: *Astrophys. J.* **597** (2003) 98.
- 12) M. Takada and B. Jain: *MNRAS* **348** (2004) 897.
- 13) Y. Taniguchi, *et al.*: *Astrophys. J. Supplement* **172** (2007) 9.
- 14) R. J. Massey, *et al.*: *Astrophys. J. Supplement* **172** (2007) 239.
- 15) R. J. Massey, *et al.*: *Nature* **445** (2007) 286.
- 16) S. Miyazaki, *et al.*: *Proc. SPIE* **6269** (2006) 9.
- 17) Y. Komiya, *et al.*: *Proc. SPIE* **6269** (2006) 106.
- 18) H. Nakaya, *et al.*: *Proc. SPIE* **6269** (2006) 108.
- 19) Y. Doi, *et al.*: *Proc. SPIE* **6269** (2006) 111.
- 20) Y. Kamata, *et al.*: *Proc. SPIE* **6276** (2006) 52.

著者紹介



宮崎 聰氏：すばる望遠鏡用広視野カメラと CCD 検出器の開発を行い、それを用いてサーベイ観測を行っている。特に観測的宇宙論に興味を持っている。

(2007 年 10 月 2 日原稿受付)

Subaru Telescope Observation of Dark Sector of the Universe

Satoshi Miyazaki

abstract: Since 1930's, various astronomical observations have suggested the existence of Dark Matter which amounts up to about ten times more abundant than ordinary matter (baryons). Meanwhile, recent observation of type Ia supernovae indicates that the expansion of universe is accelerating, which can be explained if one assumes Dark Energy. The existence of these dark components of the Universe are further confirmed by the recent precise observation of cosmic microwave background. The next step of this research field is to probe the nature of the dark components. In this paper, we review the observational results obtained using Subaru Telescope and discuss about the future projects.