

すばる望遠鏡で見る遠宇宙

家 正 則

〈国立天文台光学赤外線天文学・観測システム研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

国立天文台は、ハワイ島のマウナケア山頂（標高 4200m）に直径 8.2 m の世界最大、最高精度の 1 枚鏡をもつ大型光学赤外線望遠鏡「すばる」を建設した。すばる望遠鏡は 1999 年 1 月にファーストライト試験を行った後、2000 年秋からの一部共同利用の開始に向けて望遠鏡や観測装置の調整を続けている。すばる望遠鏡建設の背景と目的、試験観測で証明されたすばる望遠鏡の性能と遠宇宙の銀河団や重力レンズ効果の観測成果について紹介する。この記事は 2000 年 4 月 2 日に東京大学安田講堂で行われた日本天文学会 2000 年春季公開講演会の内容をまとめたものである。

1. 天文学の歴史とすばるの目的

すばる望遠鏡は、天文学の歴史の中でどのような背景と目的から建設されたのでしょうか。まず世界と日本の天文学の歴史を簡単に見てみましょう。

ガリレオ・ガリレイが自作の望遠鏡で初めて宇宙を観察したのは、およそ 400 年前です。彼は天の川が無数の星の集まりであることを発見しました。その後、多くの星が集まった星団や光の雲のように輝く星雲、渦巻星雲などの存在もわかってきました。200 年前には、夜空に輝く星々がレンズの形をした星の大集団をつくっていることがわかりました。この星の大集団は「銀河系」と名づけられました。天の川はこの銀河系を内側から眺めたものです。しかし、銀河系の外の世界に議論が及んだのは 20 世紀になってからです。

渦巻星雲などの正体について、シャプレーとカーチスの有名な公開大論争が 1920 年にありました。カーチスは、渦巻星雲は非常に遠くにある星の大集団、銀河であると主張しました。すなわち銀河系は宇宙に無数ある銀河の一つにすぎないと考えたのです。

一方シャプレーは、渦巻星雲は銀河系の中にある星になろうとしているガス星雲であり、銀河系

が宇宙そのものであると主張しました。どちらもそれなりにさまざまな観測結果を基にしていたので、論争は平行線のままでした。

この論争に決着をつけたのが、ウィルソン山天文台のエドウィン・ハッブルです。彼はアンドロメダ大星雲までの距離を「セファイド型変光星」を見つけて測ろうとしました。セファイドは周期的に明るさが変わる変光星です。その変光周期と星の絶対的な明るさの間に非常にきれいな関係があることが 1908 年に発見され、宇宙の距離を測るものさしとして注目されはじめていました。でも、アンドロメダ大星雲の中の星が一つ一つ分れて見えるような切れ味の良い写真を撮り、無数の星の中から明るさが変化している星を見つけ出すのは、当時世界最大の口径を誇ったウィルソン山天文台の 2.5 m 望遠鏡をもってしても、とても難しい観測でした。粘り強い観測を続けたハッブルは、1923 年 10 月について最初のセファイドを発見したのです。こうしてハッブルが求めたアンドロメダ大星雲までの距離は、当時シャプレーが主張していた天の川銀河系の大きさの約 3 倍でした。アンドロメダ大星雲が銀河系のはるかかなたにあると結論づけるのに十分な距離です。宇宙は銀河系の外側にも大きく広がっていることが明らかになっ

たのです。

渦巻星雲の観測を続けたハッブルは、その後1929年に、遠くにある渦巻銀河ほど大きな速度でわれわれから遠ざかっているという大発見をしました。この法則はやがて「ハッブルの法則」と呼ばれるようになりますが、宇宙が膨張していることを示しています。当時、宇宙は永久不変だと考えられていました。ハッブルはこの永久不変の宇宙観を覆したのです。ここで強調しておきたいことは、ハッブルが銀河系の外側にも銀河があることや宇宙が膨張していることを発見してから、まだ約70年しかたっていないということです。

ハッブルの発見の後、1946年ごろ、ガモフは頭の中で膨張する宇宙の過去に考えを巡らし、宇宙が有限の過去に高温・高密度の火の玉状態からはじまったはずだと考えました。ガモフは、宇宙がこのような高温・高密度のビッグバンからはじまったとしたら、膨張して冷えた現在の宇宙にも、ビッグバンの火照りのなごりが電波として観測できるはずだと考えました。実際、1965年になってこの電波（宇宙背景放射）が発見され、ビッグバン膨張宇宙論はより確かなものとなったのです。

1960年ごろからX線や電波望遠鏡での観測がはじまり、宇宙の観測が飛躍的に進みました。現在では100億光年かなたの銀河もとらえられはじめています。遠い銀河を調べることにより、天文学者は“宇宙の考古学”を研究できるようになってきたのです。

でも、火の玉宇宙からどのようにして星や銀河が生まれ、育ち、現在のような宇宙になったのかという、銀河の誕生と進化については、まだよくわかっていません。また太陽系のような惑星系が他にも存在するのか、われわれの地球のような惑星はどのくらいあるのかも人類の大きな関心事です。すばる望遠鏡は、このような大きな謎に迫ろうとしているのです。

2. 日本の天文学とすばるの建設

20世紀の天文学が以上のように発展してきた中で、日本の天文学はどのように歩み、すばる望遠鏡を建設するまでに至ったのでしょうか。

1960年、岡山県の東京大学東京天文台（現国立天文台）岡山天体物理観測所に、当時世界第6位の口径をもつ188cm反射望遠鏡が完成しました。この望遠鏡は主に星の観測に使われ、X線星の光学対応天体の発見、さまざまな風変わりな星のスペクトル分析、1994年のシューメーカー・レビー第9彗星の木星への衝突の観測などで成果を上げてきました。

私も大学院に入って、銀河の観測で初めてこの望遠鏡を使わせてもらったときには、たいへん感激したものです。しかし経済成長に伴って、夜空が明るくなってきた岡山では、暗い天体の観測は急激に難しくなってきました。

1974年、夜空の暗い長野県の本曾にある東京大学本曾観測所に口径105cmのシュミット望遠鏡が完成しました。そこでは多数の銀河の明るさや形を調べる研究がはじめられました。1980年代になり、冷却CCDカメラを使うようになると、日本の天文学もデジタル観測の時代に一挙に突入しました。でも晴天率が低く、夜空が明るい日本では、暗い銀河の詳しい観測はとてできません。最先端の観測をするには外国の望遠鏡を使わせてもらうしか方法がなかったのです。日本の天文学者が自由に使える望遠鏡が欲しい。世界の天文学をリードするには、海外の天体観測に適した場所に、最先端の望遠鏡をつくるしかない。1980年代半ばには日本の天文学者が皆そう考えるようになったのです。

こうして選ばれたのがハワイ島のマウナケア山頂でした。周囲の街明かりから遠く離れ、空が澄んでいて星がシャープに見える、晴れの日が多く1年を通じた温度差も少ない、など天体観測に適した条件がすべてそろっています。実際に現在では

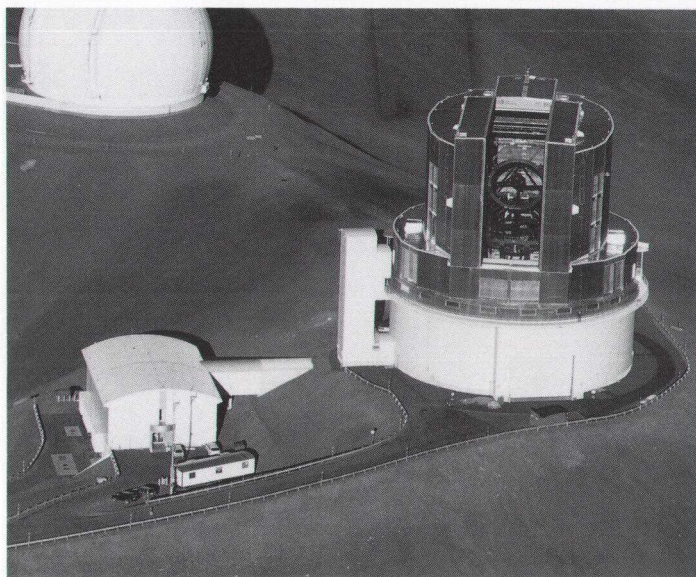


図1 すばる望遠鏡ドームの全景。ドームの中に望遠鏡の本体が見えている。

マウナケア山頂に世界各国の大口径望遠鏡が数多く設置されています。

3. 今、なぜ大口径の望遠鏡が必要か？

現在、すばる望遠鏡のほかにも、大口径の光学赤外線用望遠鏡が次々と建設されて、稼動をはじめています。なぜ現在の天文学において、大型望遠鏡による観測が必要なのでしょうか。

400年前にガリレイがつくった望遠鏡の口径は3～4 cmでした。そのころはもちろん肉眼での観測でしたが、人間の目は実はなかなか優れた双眼鏡なのです。頭の中には、見た画像を認識し記憶する高性能の“コンピュータ”があります。しかしこのコンピュータのメモリは“揮発性”で、時間がたつと記憶があやふやになってしまいます。また出力装置もありません。絵に描くことはできますが、見たものをそっくりそのまま客観的に再現できません。それで昔の天文学では「見えた、見えない」という論争が絶えませんでした。約100年ほど前から、天体観測に写真乾板を使えるようになり、天文学が客観的になりました。

1948年、アメリカのパロマー山に口径5 mの望遠鏡ができました。その後、世界の天文台では口径4 mクラスより大きな望遠鏡はつくられませんでした。口径を大きくしすぎると、鏡自体の重さのせいで傾けるとゆがんでしまうという問題があり、良い望遠鏡にできる見通しがなかったからです。

それでも、1970～80年代に天文観測は飛躍的な進歩を遂げました。飛躍の大きな要因は、遠くても観測条件の良い場所に望遠鏡を建設したことと、望遠鏡で集めた光を記録する写真乾板が半導体画素子のCCDに替わったことにあります。

CCDは集めた光をほぼ漏らさず100%

近くとらえられるほどに性能が向上してきました。したがって、さらに観測能力を高めるには、大きな口径の望遠鏡でより多くの光を集めることが必要な時代になったのです。このような背景の中で、われわれも1980年代中ごろから大口径の望遠鏡をつくろうと努力してきたのです。

現在では、口径8 mクラスの望遠鏡が動きはじめたことを受けて、次世代の望遠鏡や観測装置を考える国際会議が開催されています。そこでは口径30～100 m級望遠鏡の実現可能性を検討した論文がいくつも発表されています。20年後には、100m級望遠鏡の完成を、新しい世代の研究者が皆さんに報告できるかもしれません。

4. 世界最大、最高精度の鏡を製造

すばる望遠鏡(図1)の建設には9年の歳月と約400億円の費用がかかりました。すばる望遠鏡の建設には、国立天文台の研究者、技術者はもとより、さまざまな行政関係の方々、国内外のメーカーの技術者も含めると数千人の人が関わりました。仕事量を計算すると約200人が10年間、すば

る望遠鏡の建設のためだけに働き続けた計算になります。

すばるの建設では主鏡の製作に最も時間がかかりました。ガラスをつくるのに3年、磨くのに3年、鏡を望遠鏡に組み込んで調整するのに3年です。台所で使われている耐熱ガラスは、温度変化に対して膨張率が小さいので、直接火にかけても割れないのですが、それでも1度の温度変化で100万分の1程度膨張します。すばる望遠鏡の鏡は、温度が1度変化しても1億分の1以上は膨張しない「ゼロ膨張」と呼ばれる特殊ガラスでつくりました。アメリカのニューヨーク州ででき上がったガラスは、研磨工場のあるペンシルバニア州まで、高速道路を借り切って運びました。コンピュータの時代とはいえ、鏡の研磨は忍耐と根気の要る仕事です。間違っ磨きすぎると最初からやり直しになるからです。

鏡の凹凸が少ないほど良い望遠鏡になります。目標は光の波長の20分の1以下の凹凸に抑えることでした。それには例えば8 mの鏡を1万倍の大きさの直径80 kmに拡大した場合、0.3 mm以下の凹凸しか残らないほど滑らかに磨く必要があります。

実際には凹凸が0.1 mmの精度まで磨くことに成功しました。これは、東京都全体を新聞紙一枚の凸凹に地ならしたことに相当します。こうして1枚鏡として世界最大、滑らかさの精度としても世界最高の鏡ができました(図2)。

5. 薄い鏡をたくさんの腕で支える

これまでの望遠鏡は、鏡を厚く丈夫にすることによって、傾けても鏡がゆがまないようにしました。しかし直径8 mの鏡を厚くするとガラスだけでも100 tを超えてしまい、自分の重みでゆがんでしまいます。製作コストも“天文学的”な金額になってしまいます。

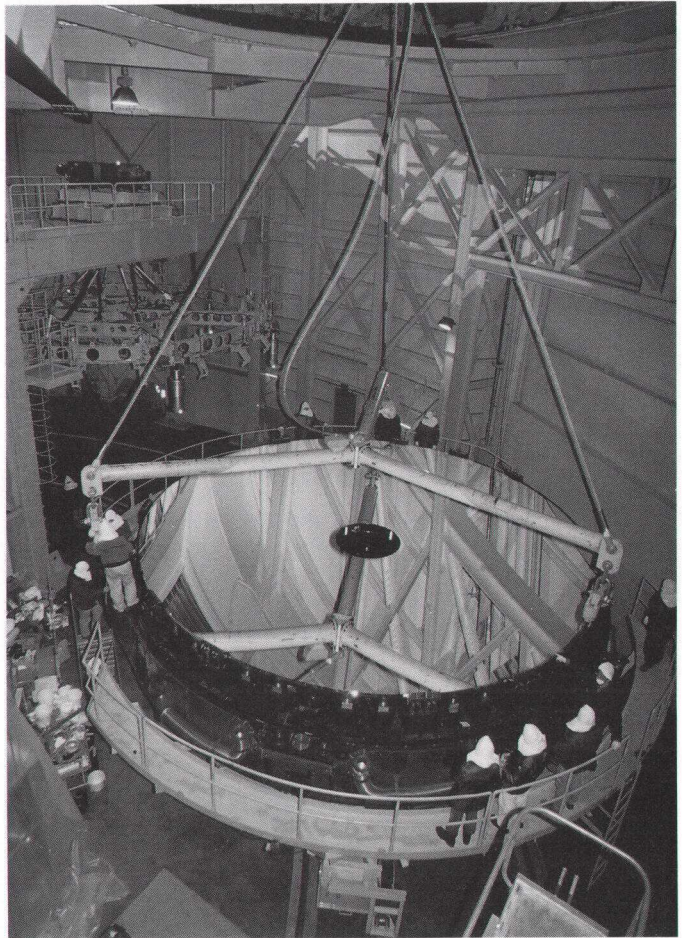


図2 直径8.2 mのすばる望遠鏡の主鏡。

すばる望遠鏡では思い切って薄い鏡をつくることにしました。薄くすると光の波長レベルの精度で見ると鏡はフニャフニャにゆがんでしまいます。しかしゆがみを測ってきちんと形を直すことができれば良いと考えたのです。これが「能動光学」の考え方です。

薄い鏡を裏側から多数の腕で支え、支える力を調節して常に鏡をゆがみがない形に保つのです。すばる望遠鏡では261個の腕「アクチュエーター」にセンサーを取り付け、支える力をコンピュータで制御して主鏡の正しい形を保ちます。能動光学を利用すると、今までの望遠鏡よりも、ずっと良いものがで

きることがわかってきました。鏡をゆがませる要因が働いても、それを補正することができるからです。

鏡をゆがませる要因には、例えば研磨工場と天文台の温度差があります。研磨工場の多くは大都市にあります。そこでいくらゆがみがない鏡に磨いても、天文台がある高い山の山頂は大都市よりも気温が低く、温度差のため鏡がゆがんでしまいます。

これまでは、こんな場合にはだましましたし使用するしかありませんでした。しかし能動光学では、温度差で鏡がゆがんでも、それをきちんと測って支える力を調節すれば、ゆがみがない鏡にすることができます。能動光学では、望遠鏡をいつもチューンナップした状態で使用できるのです。

実際にすばる望遠鏡に星の光を初めて入れるファーストライト試験を行ってみると、能動光学の考え方が正しかったことがわかりました。ファーストライトからわずか1週間で非常にきれいな画像が得られたのです。

6. 宇宙を探る7台の観測装置

すばる望遠鏡には、主鏡で反射した光が集まる「主焦点」、主焦点の手前に置いた副鏡で主鏡からの光を再び反射させ、主鏡の中央にあけた穴を通して裏側で集める「カセグレン焦点」、カセグレン焦点の手前で光を斜鏡で折り曲げて左右に取り出す2か所の「ナスミス焦点」、つまり合計で4か所の焦点があります。これらの焦点に7台の特色ある観測装置を据え付け、順番に試験観測を進めています。

主焦点には主焦点カメラと呼ばれる可視光カメラが取り付けられています。8000万画素のCCD検出器群で広い視野を一度に撮影できる特徴を生かして、例えば銀河の分布に見られる宇宙の大構造の起源を探ります。

ナスミス焦点の高分散分光器は、天体の光を10万色に分解するスペクトル観測ができます。スペクトルを分析することによって、天体の化学組成や物理状態、運動状態を詳しく調べることができ

ます。できるだけ遠い宇宙の銀河やクエーサーの光を分析して、宇宙の歴史をひもとく計画がいろいろと検討されています。「遠くを見ることは昔を見ること」だからです。

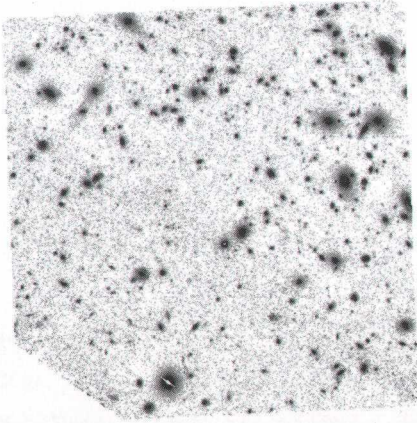
7. 観測データが示す すばるの性能

NASAのハッブル宇宙望遠鏡とすばる望遠鏡はライバルでもあり、助け合う関係でもあります。口径2.4mのハッブル宇宙望遠鏡は、じゃまな大気の影響がない宇宙空間から、紫外線の観測などで数々の観測成果を上げてきました。

国立天文台岡山天体物理観測所の望遠鏡では可視光で平均2.2秒角の広がりに見える星の光が、すばる望遠鏡では1秒角以下とシャープに縮んでくっきり見えます。いちばん条件が良い時には0.3秒角になると予測していましたが、実際にそうになりました。近赤外線ではさらにシャープに見え、最良で0.2秒角です。このシャープさはハッブル宇宙望遠鏡の解像度に匹敵します。

図3は、約30億光年かなたの銀河団で、Abell 851と名づけられた銀河の集まりです。同じ領域を撮影したすばる望遠鏡の画像(左)とハッブル宇宙望遠鏡の画像(右)を並べてみました。観測できた最も暗い天体はどちらも28等級でした。肉眼で見える最も暗い天体は約6等級、写真乾板でとらえられる限界は約21等級ですから、すばる望遠鏡は一昔前の写真乾板の時代よりも数100分の1の暗い天体を、わずか1時間の露出でとらえたのです。写真を撮る性能では、ゆらぐ大気越しというハンディにもかかわらず、すばる望遠鏡はハッブル宇宙望遠鏡にほぼ並んだと言えます。現在、すばる望遠鏡はまだ試験調整中ですが、光をスペクトル分析する能力ではハッブル宇宙望遠鏡よりも12倍も優れた性能が実現できます。天体からのわずかな光を波長ごとに分けて調べるには、大きな鏡でたくさんの光を集めることが必要だからです。

Subaru R
3600 s



HST F702W
4200 s

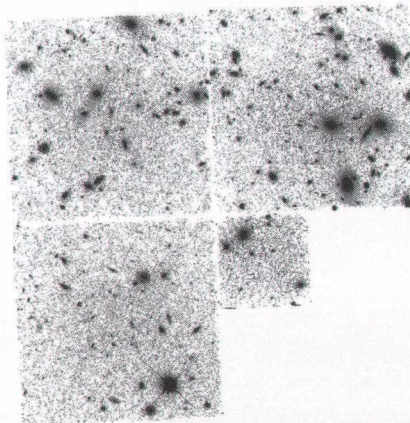


図3 銀河団 Abell 851 の同一視野で比較したすばる望遠鏡の画像 (左) とハッブル宇宙望遠鏡の画像 (右) (国立天文台ハワイ観測所 Chris Simpson さん). 解像力ではハッブル宇宙望遠鏡の方がやや勝るが, どちらも 28 等級の天体まで写っている. 写真を撮る観測ではすばる望遠鏡はハッブル望遠鏡に並んだと言える. 天体の光をスペクトル分析する観測では, 鏡の面積で 12 倍大きいすばる望遠鏡がハッブル望遠鏡をしのぐ性能を発揮する.

すばる望遠鏡の画像 60 分露光 解像力 0.5 秒角

ハッブル宇宙望遠鏡の画像 70 分露光 解像力 0.2 秒角

8. 30 億光年かなたの遠宇宙

最後になりますが, すばる望遠鏡による遠宇宙の天体観測からわかったことをいくつか紹介しましょう.

われわれが最も力を入れて観測してきた天体の一つである銀河団 Abell 851 の画像には, 約 600 個の銀河が写っています. それぞれの銀河について色と明るさを調べてみました. 宇宙の歴史の中で, ある年代の銀河の明るさや色はどうなるかという銀河進化モデルが, 星の進化の理論からつくられています. 理論モデルを使って東京大学の嶋作一大さんが計算した銀河の色や明るさは, すばる望遠鏡の観測データとたいへん良く一致することがわかりました. 30 億光年かなたの銀河, したがって 30 億年前の宇宙も, 現在の理論を延長して理解できることが確かめられたのです.

銀河の進化を理解することはとても重要です. 50

年前にパロマー山の 5 m 望遠鏡ができたとき, これで宇宙のことがすべてわかると言われたそうです. しかし「銀河がどのようにして生まれ, 育ち, 年老いていくのか」を正しく把握しないと, 銀河を用いて調べる宇宙の大きさや構造も正しくつかめないことがわかってきました. これまでの望遠鏡では, 遠い宇宙の銀河を精密に測ることはできなかったのですが, すばる望遠鏡など赤外線での観測もできる新しい大型望遠鏡

の登場によって, ようやく銀河進化の詳しい観測ができるようになってきたのです.

9. 重力レンズ現象の詳しい研究が可能に

すばる望遠鏡がとらえた Abell 851 の画像の中に渦巻銀河のモデルとは合わない, 赤すぎる銀河を見つけました (図4). これまでだれも見たことのない, この「極赤銀河」の正体はまだ不明ですが, この銀河が銀河団 Abell 851 の重力レンズ効果を受けた, より遠くにある楕円銀河だとすると現在の理論でもかろうじて説明できます.

重力レンズ効果とは手前にある天体によって, 背後にあるより遠い天体からの光が曲げられてしまう現象です. 巨大な質量をもっている天体はまわりの空間をゆがめ, 背後の天体からの光の進路をレンズのように曲げてしまいます. これはアイン

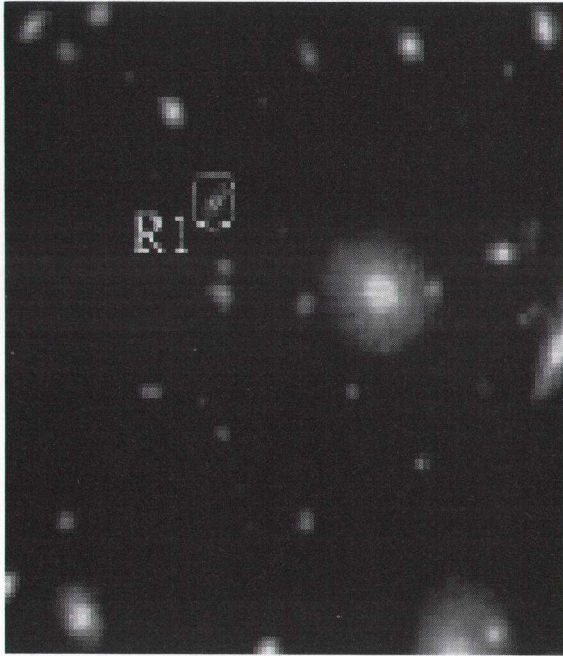
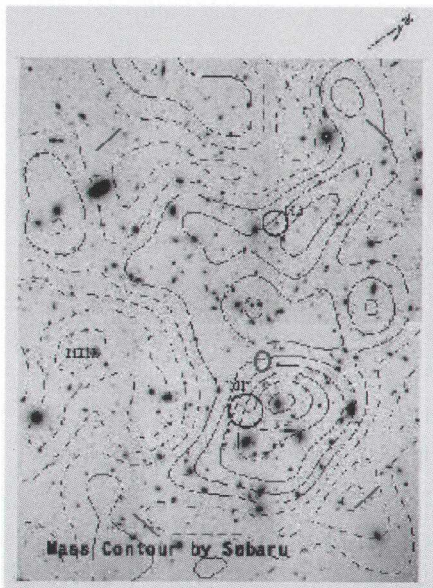


図4 すばる望遠鏡で発見された「極赤銀河」R1.

シュタインが提唱した一般相対性理論から予言される現象です。

Abell 851 の画像には、重力レンズ効果による別の現象も写っていました。画像の中の特に暗い天体、したがって銀河団よりも遠くにある天体をよく見ると、銀河団を取り囲むように、少しひしゃげて見えます。ひしゃげ方から光がどのように曲げられたかという逆問題を解くことにより、重力レンズ効果を及ぼしている銀河団の中の質量の分布を導き出すことができます。このような研究はこれまでは解像度の高いハッブル宇宙望遠鏡でしかできませんでした。実際にすばる望遠鏡のデータから求めた銀河団の質量の分布と、X線観測衛星ローサットによるX線強度の分布を比べてみると、質量密度が高いところではX線が強くなっていることが確かめられました(図5)。銀河団の質量密度が濃いところでは高温のガスも集まってX線で光っているためです。すばる望遠鏡の画像がこのような研究にも十分使えることが裏づけられたのです。

重力レンズによる現象としては、ほかにも「アイシュタイン十字」と呼ばれるものがあります。遠



宮崎2000

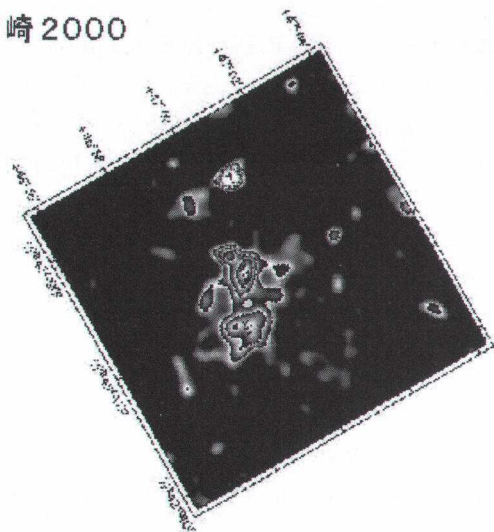


図5 すばる望遠鏡による重力レンズ現象の解析から求めた銀河団 Abell 851 の質量密度の分布 (左: 国立天文台 宮崎 聡さん) と、X線天文衛星ローサットによるX線強度の分布 (右)。両者の分布がほぼ一致していることがわかる。

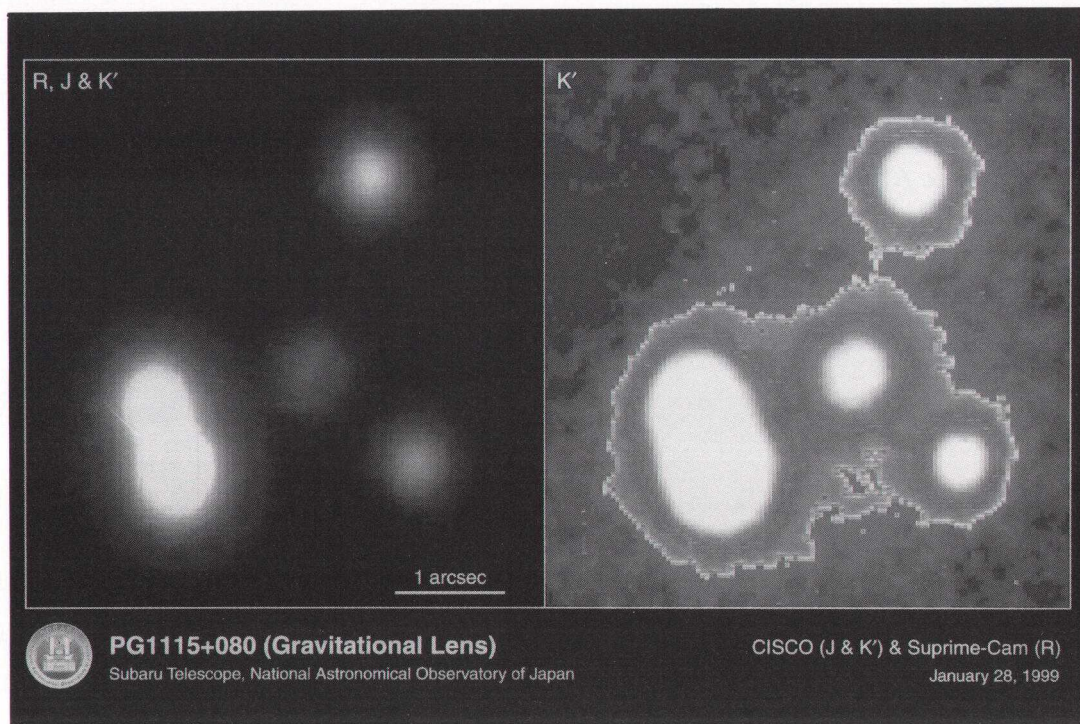


図6 すばる望遠鏡がとらえた重力レンズクェーサー PG1115+080. 約100億光年かなたにある1つのクェーサーからの光が、手前にある約30億光年かなたの銀河によって曲げられ、台形を描く4つのクェーサー像として見えている。台形の中央に銀河がある。右の画像は広がった淡い光を強調したもの（京都大学 岩室史英さんほか）

くの1つのクェーサーからの光が、偶然ちょうどその手前に銀河があると、銀河の重力場で曲げられて4つの像に分れ、手前の銀河とともに十字を描く現象です。クェーサーと銀河の位置関係が少しずれると4つのクェーサー像は台形を描きます。すばる望遠鏡を用いた京都大学のグループの観測では、そのような台形に配置されたクェーサー像をみごとにとらえています（図6）。このような重力レンズ現象をたくさん観測すると遠い宇宙のようすがもっと精密にわかってくるでしょう。

1999年1月のファーストライト以来、すばる望遠鏡を制御するコンピュータのプログラムのチェックや、7台の観測装置の立ち上げ試験を行ってきました。2000年春からはスペクトル観測のテストもはじまっています。スペクトル分析ができるようになると、学術的に内容が深い研究が行われます。2000年末

からは国立天文台の研究者だけではなく、国内外の研究者にも使ってもらえるようにして、本格的な観測体制に入る予定です。すばる望遠鏡ではこれからいろいろな観測装置が動きはじめ、成果が出てきます。

今後、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡やさまざまな科学衛星による観測によって、次々と宇宙の謎が解明されていくはずですが、皆さんもぜひ注目して応援してください。

参考資料

- ・「宇宙の果てに挑む」国立天文台ビデオ第3巻，天文学振興財団，1999
- ・Iye M., et al., PASJ 52, 9, 2000
- ・Iwamura F., et al., PASJ 52, 25, 2000