

交流

口径 8 m 「すばる」 望遠鏡計画：宇宙の生い立ちを解明する

家 正則
海部 宣男
小平 桂一

〈国立天文台光学赤外線天文学研究系 181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈国立天文台光学赤外線天文学研究系 181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈国立天文台光学赤外線天文学研究系 181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

国立天文台は平成 3 年度から 8 年計画でハワイ島マウナケア山頂に口径 8 m の光学赤外線望遠鏡（JNLT、愛称「すばる」）の建設を開始した。この望遠鏡（図 1）は、集光力・解像力・観測波長帯域などにおいて既存の望遠鏡をはるかに凌ぐ性能を持ち、観測天文学に新しい時代を拓くことを目指して建設される。具体的には波長 0.3–30 μm の可視光・赤外線で、宇宙の果てのクエーサーや銀河を観測し宇宙の構造と進化を解明すること、銀河内の星形成領域の観測から星や惑星系の誕生の過程を解明すること、などを目的としている。本計画の概要と天体物理学に与えるインパクトについて展望する。

§1. 「すばる」 望遠鏡計画の概要

1.1 計画推進の経緯

1960年代以降の観測天文学の進歩には目を見張るものがある。この発展は観測波長域を拡大したことに負うところが大きい。わが国でも東京大学東京天文台（現国立天文台）が1982年に完成した野辺山宇宙電波観測所の 45 m 宇宙電波望遠鏡と 5 素子宇宙電波干渉計、それに宇宙科学研究所が打ち上げてきた一連の X 線天文衛星（はくちょう、てんま、ぎんが）は、世界をリードする天体観測装置として活躍してきた。これらの装置はそれまでの光の望遠鏡では見えなかった星間分子雲、X 線連星などの存在を明ら

かにしただけでなく、温度・密度の広い範囲にわたる宇宙物質の多様な物理現象をとらえ、その理解を飛躍的に前進させた。

一方、わが国の光学赤外線観測では、1960年に完成した東京天文台岡山天体物理観測所の 188 cm 望遠鏡や1973年完成の京都大学上松赤外線観測室の 108 cm 望遠鏡などが活躍してきたが、完成当時世界第 6 位であった岡山の望遠鏡も1980年頃には世界第30位以下となり、光学観測の第一線に立てる観測装置がない状態が続いていた。また、赤外線観測において原始星などの新発見が相次ぎ、赤外線観測の重要性が認識されるようになった。電波や X 線で発見された新しい天体の光学観測のためにも、国際レベルの大型光学望遠鏡を建設することが、わが国の天文学者全体の強い要望となった。

このような中で、全国の関連研究者により光学天文連絡会が1980年に結成され、次期大型望遠鏡計画策定の機運が高まってきた。全国共同利用を念頭においた次期大型望遠鏡は JNLT (Japan National Large Telescope) と名づけられ、具体的な検討は東京天文台の望遠鏡ワーキンググループを中心に始められた。1984年には台外の専門家を交えた望遠鏡技術検討会が発足して、これらの検討の積み重ねにより次第に JNLT の姿が固まっていった。1985年には日本学術会議天文学研究連絡委員会により JNLT 計画の推進決議がなされ、学会としての強い決意表明がなされた。建設候補地としてハワイ島のマウナケア山頂（図 2）が選ばれ、地元のハワイ大学との協議も進み、1987年には現地でのサイトテスト（図 3）を実施し、予備的な測量や気象

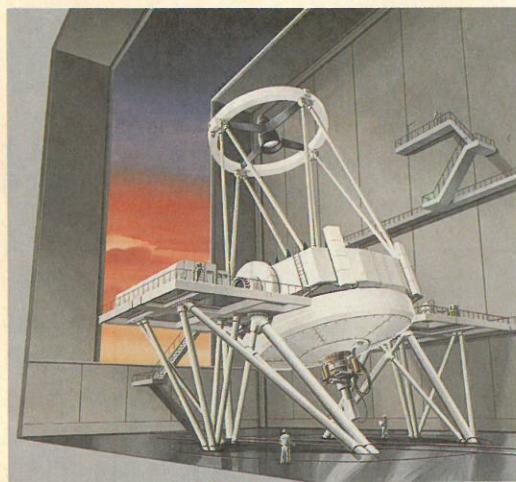


図 1 「すばる」 望遠鏡完成予想図。ドームは望遠鏡と一体となって回転し、天体を追尾する。望遠鏡の両側に高精度観測装置を設置するためのナスミス焦点プラットフォームがある。

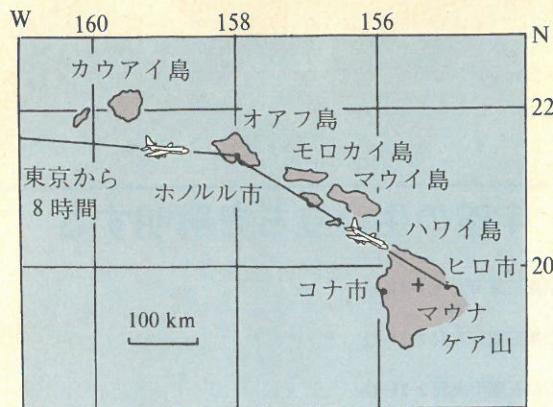


図2 ハワイ諸島地図。

測定を行った。

1988年には東京大学東京天文台が改組拡充されて、緯度観測所や名古屋大学空電研究所の一部と合併して、大学共同利用機関としての国立天文台が発足した。これによって、JNLT計画の推進体制の基盤が整い、関係各方面のご支援を得て、いよいよ1991年度からJNLT建設が開始の運びとなった。開始にあたってJNLTの愛称を公募したところ、3,500通余りの応募があり、その中から「すばる」がJNLTの愛称として選ばれた。「すばる」は直径8m、曲率半径30mの回転双曲面形状の主鏡を持ち、広い視野にわたる観測ができる主焦点、微かな暗い天体を観測するカセグレン焦点、高精度観測を行うためのナスマス焦点を備えた望遠鏡である。可視光及び赤外線で多面的な観測ができる「すばる」の完成予定は7年後の1998年、予算要求総額約380億円のプロジェクトである。^{1~4)}

1.2 大型光学望遠鏡の動向

地上に設置する可視光・近赤外線用の望遠鏡は、1948年完成のパロマー山の5m望遠鏡以後、約40年余りは4mクラスの望遠鏡の時代であった。この間、ソ連の6m望遠鏡(充分な性能が出ていないと言われている)を除くと、口径4.2m以上の望遠鏡が一台も建設されなかったのには、二つの理由がある。一つは、5m以上の大型望遠鏡は構造物としてあまりに大きく重く、これを精度良く造ることが技

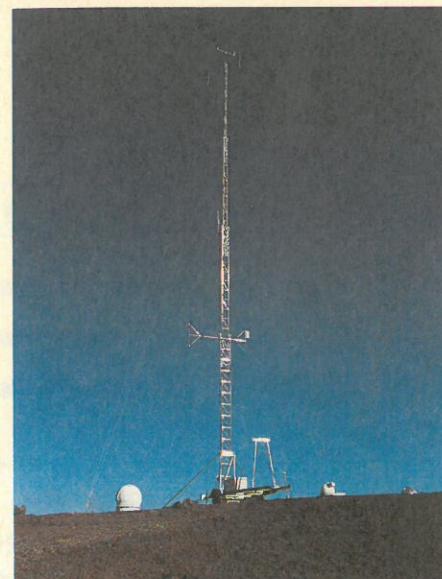


図3 マウナケア山頂「すばる」望遠鏡建設予定地でのサイトテスト(1987年)。背景に見えるのは左からカナダ・フランス 3.6 m 望遠鏡、ハワイ大学 2.2 m 望遠鏡、英国 3.9 m 赤外線望遠鏡のドーム。

術的に困難であること。もう一つは、この間に光の検出器が光化学反応を用いた写真乳剤から半導体の内部光電効果を用いたCCDに移行したことである。量子効率が1%程度であったのが、最大で80%にもなったため、望遠鏡の集光力を大きくしないでも観測効率が2桁近くも向上した(図4)。だが、量子効率が100%に近づいた現在、より多くの光子を集めるには再び望遠鏡の口径を大きくするしか方法が無くなった。4m級望遠鏡でやっと見えている数十億光年の天体より2倍ほど遠くを見ることは、宇宙の果てに近い天体、つまり宇宙の歴史の前半の時代の天体、を見るに相当する。4m級から8m級への拡大は、人類の視野を空間的にほぼ全宇宙に広げるだけでなく、時間的にもほぼ全時代に広げるという意味をもつ。このため、日本、米国、欧州で8mクラスの望遠鏡を建設する計画が1980年代中ごろから具体的に検討され始めたのである。

現在米国では、ケック財団の出資によりカリフォルニア大学のグループが中心となって、マウナケア山頂に有効口

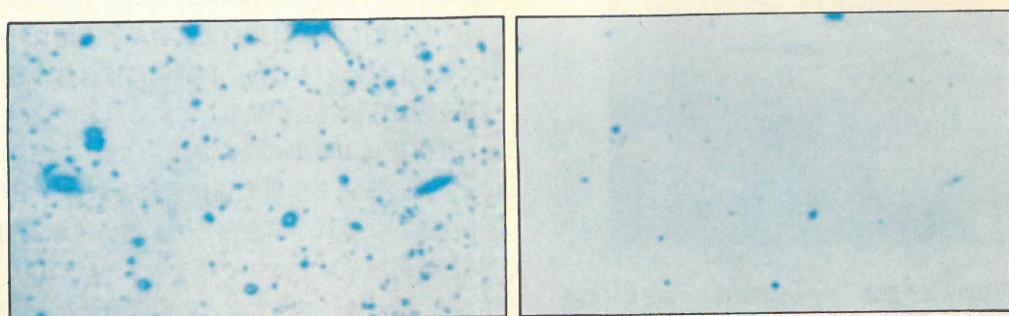
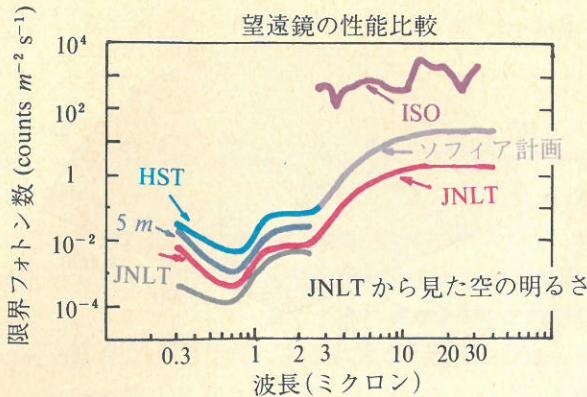


図4 乳剤写真(右)とCCD(左)で撮影した同じ天域の像。両者の感度の違いが明らかである。(ケンブリッジ大学天文学研究所、C. Mackay 氏提供。)



径 10m の分割鏡方式の望遠鏡を建設している。この望遠鏡は直径 1.8 m の六角セグメント鏡を 36 枚敷き詰めて、直径 10 m の望遠鏡相当の集光力を実現しようとするものである。技術的には解決すべき困難が多いが、完成すれば集光力では世界一の望遠鏡となる。欧州 8 カ国が共同運営する欧州南天天文台 (ESO) は、宇宙の南半分を観測するために、南米チリのアンデス高原に口径 8 m の望遠鏡 4 台からなる VLT の第 1 基目の建設を開始した。米国の国立光学天文台 (NOAO) は英国・カナダとの共同によりハワイとチリに 8 m 鏡を 1 基ずつ建設するジェミニ計画を企画しており、その第 1 基目をマウナケアに建設する予算が認められた。そのほかにも、中空構造のハネカム鏡の鋳造により主鏡の軽量化を図ろうとしているアリゾナ大学など、8 m 級望遠鏡の建設を企画しているグループがいくつある。

これらの大望遠鏡の建設には、いかにして主鏡を軽量化し、かつ高精度を実現するかが第一の鍵となる。日本の「すばる」と欧州グループの VLT では主鏡のガラス材をごく薄くして軽量化を実現し、鏡の変形はコンピュータ制御の支持機構で補償するという「能動光学方式」を採用する。ケック望遠鏡は鏡を分割することで軽量化を実現し、多数の鏡の位置と姿勢を調節して一枚鏡に匹敵する性能をねらっている。アリゾナ大学のハネカム鏡は主鏡自体の中空構造の採用で軽量化を実現し、鏡面温度の一定化に力を注ぐ。これらの三方式の得失を論じるには紙数が足りないが、我々 JNLT グループは三方式を比較検討した結果、その早い段階から薄鏡の能動光学方式の採用を決心し、その技術開発を進めてきた。⁵⁾

地上に設置する大型望遠鏡と大気圏外に打ち上げる軌道望遠鏡とは、相補的な関係にある。軌道望遠鏡は地上に到達しない紫外線や特定の赤外線の観測に絶大な威力を発揮する。大気の揺らぎがないため、解像力も地上望遠鏡に比べて高いものにすることができる。しかし一方、日々の改良が困難で高価な軌道望遠鏡に比べて、地上望遠鏡は大型化・高度化が可能であり、最新の観測装置を取り付けて、

図 5 波長分解能 10,000 での分光観測における望遠鏡の観測限界。「すばる」(JNLT) はパロマー望遠鏡(5 m), ハッブル宇宙望遠鏡(HST), 赤外線観測衛星(ISO 及びソフィア)より暗い天体まで観測することが可能である。

斬新できめ細かい観測を行うことができる。特に、集光力が重要となる微光天体の分光観測では大口径の地上望遠鏡が威力を発揮する。空間解像力についても赤外領域では大口径の威力が発揮され、また、補償光学技術の発展により、地上からでも望遠鏡口径の回折限界に近い解像力を実現することが可能となりつつある。光干渉望遠鏡が実現するとさらに飛躍的な解像力の向上が期待できる。

§2 「すばる」が目指す天体物理学

「すばる」は多くの技術開発の集積によって、望遠鏡の性能に革命的な飛躍をもたらす。8 m という大口径による集光力はパロマー 5 m 鏡の 2.5 倍であり、主鏡面の高精度化とドーム環境などの改良により、像分解能は 0.2 秒角を目指している。従来の 1 秒角程度の分解能に比べると点光源に対する感度は 10 倍以上になる。標高 4,200 m のマウナケアでは上空の水蒸気量が少なく、天体からの赤外線を観測できるため、0.3–30 ミクロロンという広い観測波長域をカバーすることができる(図 5)。

天体物理学は進展の極めて著しい分野であり、7 年後の「すばる」完成時およびそれ以降の研究動向を展望することは、ある程度の独断と偏見なしでは困難である。「すばる」が目指す観測テーマをここですべて紹介するわけにはゆかないが、その中でも特に重要ないくつかのテーマについて、現時点でのその天文学的な意義と背景を解説し、若干の展望を述べる。

2.1 観測的宇宙論

まず、第一は「すばる」による観測的宇宙論の展開である。1960 年代以降の天体観測技術の発展と素粒子物理学の発展が融合して、いまや宇宙論は新たな段階を迎つつある。

(1) 宇宙モデルの確立

宇宙の全体構造を決めるには、宇宙膨張の大きさを表すハッブル定数 H_0 と、宇宙の密度を表す密度定数 Ω_0 を、観測により求める必要がある。実はこの問題については、1948 年のパロマー山の 5 m 望遠鏡の完成により、一挙にその答えが得られるのではないかという楽観論があった。ところが、当時の期待に反してその答えはいまだに得られていない。その最大の原因是、銀河を物差しに使うのに銀河自身の進化効果が正確に把握できていないことにあった。宇宙の構造を把握するには、どうしても火の玉宇宙の時代に近い昔の銀河を観測により調べ、その性質を理解する必要がある。このような観測は 8 m 級望遠鏡と高度な赤外線観測装置の完成によって初めて可能となるのである。

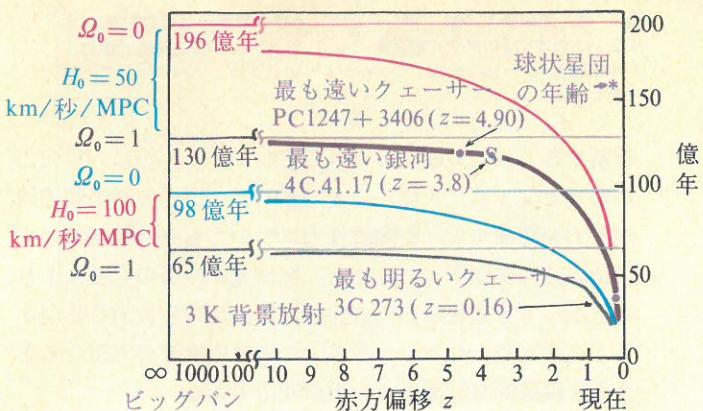


図6 $\Omega_0=0$ または 1, $H_0=50$ または 100 km/s/Mpc の 4 つの宇宙モデルにおける赤方偏移 z と宇宙年齢の関係。

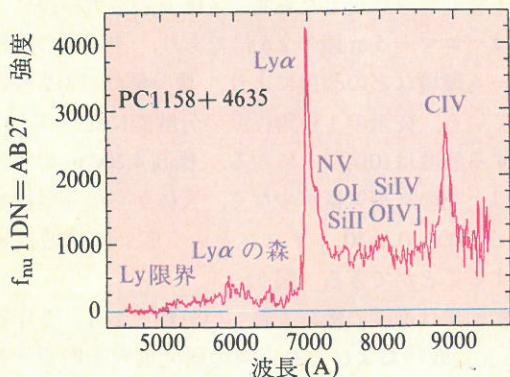


図7 宇宙で 2 番目に遠いクエーサー PC1158+4635 ($z=4.73$) のスペクトル。 (Schneider, et al.: Astrophys. J. 98 (1989) 1951 より一部修正の上転載。) 波長 $1,215\text{\AA}$ のライマン α 輝線が波長 $7,000\text{\AA}$ に赤方偏移している。

宇宙の一様性を説明するインフレーション宇宙論によると $\Omega_0=1$ と予想されるが、物質密度のみから求めた Ω_0 は 0.1 程度である。いわゆる「見えない質量」があるのかないのか、あるとしたらその正体はなにか、が大きな謎とされている。見えない質量の存在の兆候は銀河系規模から宇宙全体規模にまで共通に認められる。「見えない質量」の正体が、質量がゼロでないニュートリノなどの熱い暗黒物質 (HDM) なのか、まだ未発見のアクションなどの冷たい暗黒物質なのか、素粒子論との関係で重要な問題とされている。ハッブル定数は $H_0=50-100 \text{ km/s/Mpc}$ と言われているが、ファクター 2 程度の不定性が残っている。 H_0 は宇宙年齢と直接関係するため特に重要であるが、恒星進化論から求めた球状星団の年齢が 170 億年程度、放射性元素から求めた銀河系内の星の年齢が 110 億年程度とされる中で、 $H_0=100 \text{ km/s/Mpc}$ では宇宙年齢が星々の年齢よりも若いという矛盾が生じる恐れがあり、 H_0 の正確な測定が望まれている(図6)。

「すばる」の模擬観測提案には、遠くのクエーサーや銀

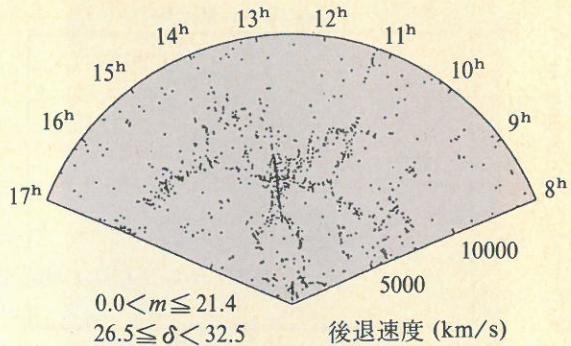


図8 銀河の分布におけるグレートウォールとボイドの発見。
(Huchra, et al.: Large Scale Structures of the Universe, IAU Proc. 130 (1988) 109 より転載。)

河の観測からこれらの宇宙定数を決めようという提案が数多くある。

(2) 原始銀河

絶対温度 3 K の宇宙背景放射は極めて一様であることが宇宙背景放射観測衛星 (COBE) の測定で実証された。これにより、赤方偏移 $z=1,000$ の時代の宇宙には銀河の種となるような十分に発達した密度ゆらぎは存在しなかったことが、確認された。一方、 4 m 級望遠鏡の活躍で、現在最も遠い天体としては、 $z=4.90$ のクエーサー PC1247+3406 や $z=4.73$ の PC1158+4635 (図7)、それに $z=3.8$ の銀河 4C41.17 が見つかっている。銀河の形成は $3 < z < 10$ の時代に起こったと推定されているが、そのような生まれたての原始銀河を発見し研究することにより、銀河の形成と進化の謎を解明することができる期待されている。銀河形成の時期を特定することは、宇宙構造の定数に制限を与えることにもつながる。

このような遠い天体は赤方偏移が大きいため、そのスペクトルの重要な領域が可視域から赤外線に移行する。したがって、このような遠い天体の観測では赤外線での観測能力が極めて重要となる。銀河の形成と進化の様子を観測的に明らかにし、そこで作用している物理機構を把握することが、銀河を構成単位とする宇宙の理解には不可欠である。

(3) 銀河の元素組成進化

8 m 級望遠鏡はその集光力の大きさのため、これまでより暗い微かな天体までそのスペクトル観測が可能となる。天体の撮像観測に比べると、分光観測ははるかに豊富な物理情報を提供する。例えば、天体のヘリウムや炭素、窒素、酸素などの元素組成が宇宙進化とともにどう変化してきたのかという問題は、理論と観測の接点となる重要なテーマであり、「すばる」による進展の期待される分野の一つである。

(4) 活動銀河中心核

クエーサーやセイファート銀河中心核にはブラックホールがあり、そこへ落ちて行くガスからなんらかの機構で莫

図9 がか座ベータ星に発見されたダスト円盤。(Paresce and Burrows; Astrophys.J. 319 (1987) L23 より転載。)

大なエネルギーが放射され、数十万光年もの長さに達する巨大なジェットを放出していると考えられている。観測されているエネルギー放射率は核融合反応のエネルギー発生率よりも大きい場合すらあり、通常の核反応では説明できない。ブラックホールへ落ちて行くガスは、その角運動量のため降着円盤を形成し、降着円盤の内端からブラックホールへ最終的に落下する。M87や3C273のジェット構造は、落下ガスの運動エネルギーを鋭いビーム状に絞り込んで外部へ解放する「エンジン」の存在を示している。クエーサーの構造やセイファート銀河中心核の構造の研究は、1980年代以来の天体物理学の大きなテーマの一つであった。空間解像力の飛躍的な向上が期待される補償光学や光干渉技術の実用化により、この分野でも新しい発見がもたらされると期待されている。

(5) 宇宙地図の作成

10年に及ぶ多数の銀河の赤方偏移測定計画の所産として、ボイドやグレートウォール(図8)が発見され、銀河の分布には大規模な泡状の構造があることが明らかになってきた。また、60億光年の距離にわたって、約4億光年間隔で銀河が密集しているという「宇宙柵」構造の発見は、銀河分布の泡状構造が宇宙全体にわたり続いていることを窺わせる。膨張宇宙におけるこのような大規模構造の存在は、既存の理論的宇宙モデルに大きな矛盾を投げかけるものとなっている。このような観測は4m級にリードされる諸望遠鏡の活躍で初めて可能になってきたものであり、10年前には予想さえされなかった現象ばかりである。8m級の望遠鏡の完成により、精密観測が100億光年を越える範囲にまで拡大され、宇宙の果てに近い天体の観測が日常化することのインパクトは実に大きいと期待できる。そこでの真に重要な発見は我々の想像をはるかに越えたものであるに違いない。

2.2 星形成

可視光は3千度から1万度の高温ガスから放射される。星々の表面温度や電離した星間ガスの温度がほぼ数千度であるため、可視光放射は星々や熱い星間ガスの様子を見るのに適している。これに対して波長1-30μmの赤外線は絶対温度で百度から3千度程度の暖かいガスから放射される。このような温度範囲にある天体としては、主系列にある小質量の星々、核融合反応に着火する直前の生まれかけの星々、恒星により照らされたダスト雲、などがある。光学赤外線天文学のもう一つの大きな柱は、このような星とガスの輪廻の科学である。これは、太陽系・地球、さらに生命の起源とも直接つながる問題である。



(1) 恒星と惑星系の誕生

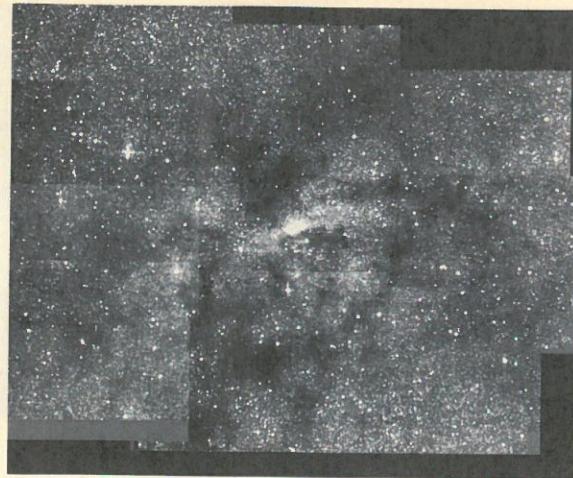
自ら輝く一人前の星が誕生するには、低温の暗黒星雲が自己重力で収縮し、その中心で核融合反応に火が付かねばならない。このような生まれかけの星からは強い赤外線が放射されるはずである。暗黒星雲中のダストが可視光を吸収するため、可視光では暗黒星雲の奥で産声をあげようとしている原始星を見ることができない。だが、星間吸収の影響を受けにくい赤外線ならば、星々の誕生の現場を見ることができる。1970年代に赤外線天文学が本格的に始まるとき、暗黒星雲の中に極めて明るい赤外線源が続々と発見された。さらに大型ミリ波望遠鏡の登場によって原始星周辺の構造が詳しく調べられ、原始星を囲む巨大なガス円盤の存在や円盤から放たれる高速の分子ガス流、細く絞られたイオンガスジェットなどが次々と発見された。これらの多彩な現象はガス雲が収縮して星になる際のエネルギーと物質の放出による安定化プロセスとして理解されるようになってきた。

原始星ガス円盤の中心部にはダストの薄い円盤があるらしいことが分かってきた(図9)が、解像力の不足のためにお間接的な観測にとどまっている。

ここ数年の赤外線用半導体を用いた2次元検出器の進歩により、赤外線でも可視光と同じような高画質の写真が撮れるようになってきた(図10)。「すばる」はその高い分解能と集光力を高感度赤外線カメラを組合せ、誕生する星を取り巻くダスト円盤(おそらく原始の惑星系であろう)を直接観測することができると期待される。

(2) 赤外線分光

星間物質や星の形成の観測には、分光観測がやはり重要なとなる。原始星のもととなる星間分子雲の観測は、波長がmm程度の電磁波を捉えるミリ波望遠鏡により、1980年代に入って急速に発展した。だが、金属の水素化物やH₂O、CHなどの基本的な分子の回転スペクトルの多くと有機分子の振動スペクトルなどの大部分は赤外線領域にある。



また、炭素、酸素、など重要な原子とそのイオンのスペクトル線もこの領域に多数存在する。透過力が高く、またさまざまな励起状態にある赤外スペクトル線は銀河全体を見通して、物質の物理状態を明らかにするのに極めて強力である。「すばる」は赤外線での観測能力が十二分に発揮できるように設計された8m級望遠鏡となる。赤外線での本格的な観測は始まったばかりであり、マウナケアでの好条件を生かしての「すばる」での新しい発見が大いに期待できる。

(3) 爆発的星形成と銀河の歴史

星間物質から星が生まれるプロセスは、時として爆発的に進むことが知られている。我々の銀河系中心部でも小規模ながら爆発的な星形成が起こっていると考えられている。遠方の銀河では星形成過程が非常に激しく進んでいる例が数多く観測されている。M82や衝突銀河においては特に著しい。銀河どうしの衝突が一つの要因と考えられている。爆発的星形成現象は、個々の銀河の歴史を大きく左右してきたであろう。その最大規模の現象はおそらく銀河形成時に起こったものと考えられる。爆発的星形成現象の解明は銀河の全歴史につながる大きな課題となっている。近紫外線領域から中間赤外線までを高感度でカバーする「すばる」は爆発的星形成プロセスの解明に威力を発揮するものと期待されている。

(4) 褐色わい星

見えない質量の問題とからんで重要なのが、褐色わい星の問題である。太陽質量の約0.1倍以下の星々は中心の温度・圧力が低く、核融合反応を起こさない。これらの星はゆっくりと収縮して重力エネルギーを解放して光るが、絶対光度が低いためこれまでの観測からは完全に見逃されていた可能性がある。そのような星は、表面温度が低く暗く放射のピークが赤外線領域になるので褐色わい星と呼ばれているが、さまざまな努力にもかかわらずこれまで確実

図10 PtSiカメラで撮影した12枚の赤外画像から合成した銀河系中心（視野約 $2^{\circ} \times 3^{\circ}$ ）のモザイク画像（国立天文台、上野宗孝氏提供）。ダストによる強い吸収のため可視光では見通せなかった銀河中心領域が見えてきた。

な発見はなされていない。見える範囲では暗くて小質量の星ほど数が多くなっているが、この傾向がどこまで続くのか、光らない星が存在するのかどうか、存在するのならその数と分布はどうなっているのか。この問題は星々の生まれ方を理解する上で基本的に重要な問題である。

§3. 「すばる」の工夫

前章で述べたような多様な観測を実現するために、「すばる」の設計には数々の新しい工夫が盛り込まれている。望遠鏡本体については、能動光学方式の採用とフラッシング型のドームの採用がその二大特徴といえよう。

(1) 高精度鏡面を実現する能動光学

「すばる」の主鏡は熱膨張率が低くて薄いガラス材でつくる。薄いガラス材は剛性が低く変形しやすいが、鏡の形状をコンピュータ制御の約300個の支持機構（図11）で、いつも設計どおりの曲面に保つよう工夫する。「能動光学」と呼ばれるこの工夫により、望遠鏡を軽量化して安くつくることが可能になっただけでなく、重力変形、熱変形などを補正してその結像性能を常に最良の状態に保てるため、従来よりもシャープな像を結ぶ望遠鏡とができる。

能動光学の実現のために、鏡の形状を正しく測定する方法と鏡の形状を精度良く修正する装置の開発が必要であった。国立天文台ではマイクロレンズアレーを内蔵したシャックハルトマン型鏡面測定装置を開発して、鏡の形状を数nmの精度で光学的に測れることを実証した。この方法とは独立に、多数の支持機構に高精度力センサーを内蔵し、鏡の形状を測定することもできる。これらの2つの測定方法から得られた鏡の形状誤差を修正するには、0~150kg重の範囲にわたって、10g重程度の精度で力を制御できる

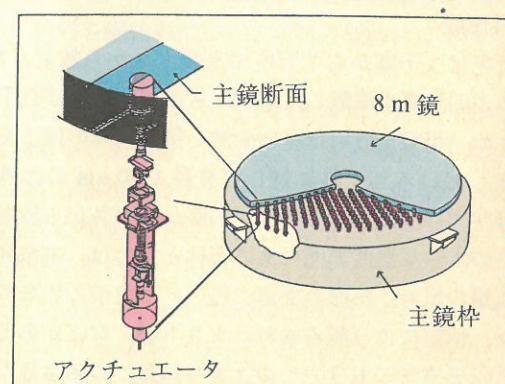


図11 「すばる」望遠鏡の主鏡能動支持機構。鏡はコンピュータ制御の約300個のアクチュエーターで支えられる。



図 12 「すばる」望遠鏡ドーム模型。ドーム上部は橢円柱型で望遠鏡と共に回転する。

超精密アクチュエータの開発が必要であった。これについても関連研究者の協力を得て、「すばる」で使用できるアクチュエータの試作機が完成した。これらの基礎研究をもとにして、1989年には口径 62 cm の薄鏡望遠鏡を試作して、能動光学方式の実証実験を行い、鏡の形状誤差を必要な精度で矯正できることなどを示すことができた。能動光学方式は21世紀の望遠鏡には標準装備の技術となるものと思われる。

(2) 斬新なドーム

建設候補地マウナケア山頂は海拔 4,200 m で、年間 250 日程度の晴天夜に恵まれる。町明りも届かず、気流が安定し、残存水蒸気量も極めて低いため、可視光や赤外線の観測には世界一適した場所とされていて、すでに10台ほどの望遠鏡が日夜宇宙をにらんでいる国際観測所である。

地上では最良の建設地マウナケア山頂を選び、能動光学でせっかく立派な鏡を実現しても、ドーム内外に陽炎が立って光波面を乱してしまったのでは台無しである。実際、従来の望遠鏡ではドームや主鏡自体から空気の熱ゆらぎが発生して、結像性能を劣化させていることが分かってきた。そこで、「すばる」では地表の乱れた風を避けて望遠鏡を据え付けるため望遠鏡土台の高さを 24 m 程度に設定する。ドームの形状も半球形ではなく、橢円柱形にして地表近くの乱れた風がドームに沿って登って来ないようにする。ドーム内の熱源を最小限に抑えた上、発生する熱はすべて遠くへ排出するように工夫する。観測者もドーム内部には立ち入らず、隣接の制御棟から望遠鏡や観測装置を制御することになる。それでも、熱容量の大きな構造物が多いため、わずかな陽炎が立つのは避けられない。このため、「すばる」ではドームにフランシング機能を持たせる。フランシングドームは、従来の半球形の閉じたドームとは異なり、内部に風の通り道を確保し、ドーム内で発生する空気ゆらぎを流し去ることにより、像の乱れを抑えようという新しい工夫である。複数の風量調節板や気流減速フィルターを制御し、風向や風速の様々な条件下でも最良の観測条件を作り出す(図 12)。

望遠鏡は構造的にシンプルな経緯台方式で追尾誤差 0.1 秒角以内で精密に駆動される。地球物理学のプレートテクトニクス理論からもマウナケア山の噴火の危険性は極めて低いと考えられているが、火山性地震や強い風にも耐えられるようにしっかりした土台の上にドームは立てられる。ドーム上部は望遠鏡と一緒に回転するので、運用上の安全性も確保しやすい。

(3) 新時代の観測装置の工夫

観測装置は目的に応じた特徴のある試験的観測装置数台に加えて、機能の異なる汎用の基本装置 3~4 台を初めに建設する。その後、順次新しい独自の装置が開発、完成される予定である。

撮像観測では、主焦点に広角用の補正レンズ光学系を取り付け、高感度の Si-CCD を 100 個程度並べて直径 30 分角の視野を一度に撮影する。現在、このためのモザイク CCD カメラを開発中であり(図 13)、東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡を用いた試験観測が始まっている。モザイク CCD カメラは遠い銀河団をモニターして超新星を発見し、その観測からハッブル定数を求める観測などに活躍するものと期待される。視野の広い主焦点カメラは天文的な面白い天体を見つけ出すサーベイ研究にも威力を発揮すると期待されている。

一方、PtSi, HgCdTe, InSb などの新しい赤外線用二次元半導体検出器の開発により、1~3 μm の近赤外線でも、可視光用の CCD カメラの画質に近い高画質の観測が実現され始めている。わが国独自の開発として PtSi を用いた赤外検出素子の実用化が進み、試験観測にも成功している。近赤外線撮像観測は1990年代に入って本格化した分野であるが、未開拓の 3~30 μm の中間赤外線での撮像についても「すばる」での実用化を目指してカメラの開発が企画さ

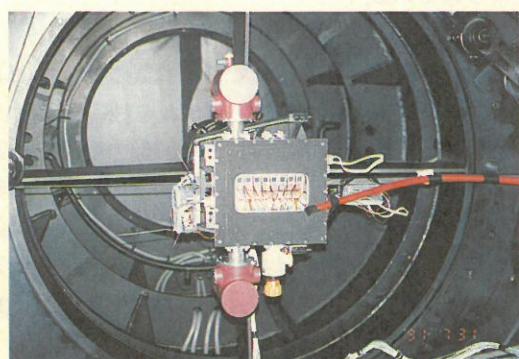


図 13 東京大学木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡に取り付け試験観測中のモザイク CCD カメラ(国立天文台、関口真木氏提供)

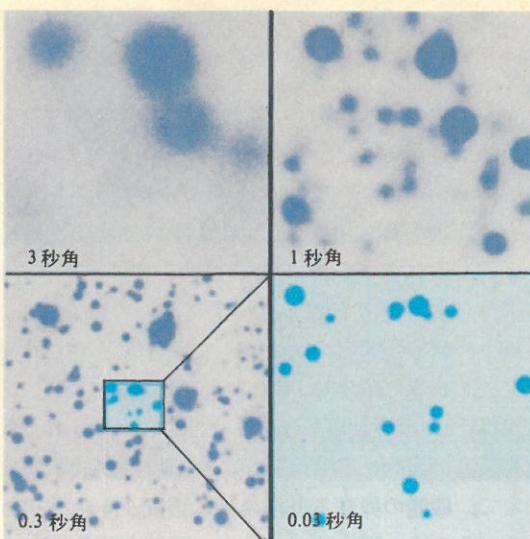


図14 空間解像力と星の見え方のシミュレーション。補償光学が実現すると回折限界に近い高い解像力が達成できる。

薄型可変鏡を最高で1kHz程度の高速動作させることが要求される。高感度高速カメラの実用化と、高速制御プロセッサーの進歩により、このような高速動作が可能になりつつある。宇宙空間に出かけなくとも望遠鏡の理論的な解像力を達成できる可能性が出てきたのである。能動光学や補償光学による解像力の向上は、S/N比向上にもつながり、望遠鏡口径の増大、半導体検出器による量子効率の向上とならんて、天文学上重要な技術的ブレークスルーである。

§4. 最後に

「すばる」計画は、ハワイ島に單一口径としては世界最大の望遠鏡を1991年度から8年がかりで建設しようという、我が国の基礎科学分野では初めての国際的な国家事業である。国際的なビッグプロジェクトをどう進めたら良いのか、ある意味では手探りでここまで来た面がある。国際社会での日本の役割の重要性が増す中、学術分野でも関連研究者・技術者の衆知を結集して、是非とも世界をリードする望遠鏡に仕上げ、新しい天文学の開拓に寄与して行きたいと願っている。

文 献

- 1) 山下泰正、小平桂一、家正則：精密工学会誌 **53** (1987) 49.
- 2) 小平桂一、他：大型光学赤外線望遠鏡（JNLT）計画説明書（国立天文台、1989）.
- 3) T. Kogure and A. Tokunaga, ed.: Japanese National Large Telescope and Related Engineering Developments (Kluwer Academic Publishers, 1989).
- 4) 小平桂一、他：天文月報 **83** (1990) JNLT 特集.
- 5) M. Iye, et al.: Proc. SPIE Instrumentation in Astronomy **7 1236** (1990) 929.

非会員著者の紹介：記事の著者の一人、家正則氏は1949年札幌生まれ。東大理学部1972年卒、同大学院博士課程1977年修了。東大理学部助手、東大東京天文台助手、同助教授を経て、現在、国立天文台助教授。専門は銀河物理学。海部宣男氏は1943年新潟生まれ。東大理学部1966年卒。東大理学部助手、東京天文台助手、同助教授を経て、現在、国立天文台教授。専門は電波天文学。また、小平桂一氏は1937年東京生まれ。東大理学部1959年卒、東大東京天文台助手、東大理学部助教授、ハイデルベルグ大客員教授等を経て、現在、国立天文台教授。専門は銀河物理学。

れている。

分光観測用には、エシェルグレーティングを用いて波長分解能10万以上を達成する本格的な高分散分光装置をナミス焦点に設置することが計画されている。この装置は恒星の化学組成や大気構造の研究はもとよりとして、クエーサーのライマン α 吸収線の観測や視線速度の変化による惑星系の探査などの研究にも活躍するものと期待されている。原始星や星間ガスの赤外線のスペクトル観測ができる冷却型赤外分光装置は「すばる」でも最も活躍する装置の一つであろう。そのプロトタイプとしての冷却型プリズム赤外分光装置の試作研究が進んでいる。赤外分光装置としては、大気中のOH夜光輝線を除去して大気発光の著しい赤外線領域でも暗い天体を観測できるようにしようという夜光マスク分光装置の構想があり、試作が進められている。

この他にも、非常に暗い天体の撮像観測やさまざまなモードでの分光観測がスイッチ一つ切り替えるだけで行え、天体の多面的な観測が可能な微光天体分光撮像装置、100本以上の光ファイバーで多数の銀河のスペクトルを一度に撮れる多天体分光装置など、ユニークな装置の設計・開発が進められている。

(4) 大気の揺らぎを消す補償光学

地上観測の宿命とも思われてきた大気の揺らぎによる像のボケについても、補償光学と呼ばれる技術の発展により、赤外線では望遠鏡の回折限界に近い解像力の達成が実現されつつあり、可視光でも0.1秒角を切る解像力の実現が見込まれている(図14)。補償光学は「すばる」の主鏡制御に用いる能動光学と原理的には共通な技術であるが、大気の揺らぎを補正対象とするため、入射瞳の再結像位置に置いた