

# スローン・デジタル・スカイ・サーベイ計画

浜部 勝

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

E-mail: hamabe@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

岡村 定矩, 土居 守

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113 東京都文京区弥生 2-11-16〉

E-mail: okamura@astron.s.u-tokyo.ac.jp, doi@astron.s.u-tokyo.ac.jp

現代の光学天文観測技術の粋を集めた非常に大規模な銀河およびクエーサーの観測計画が日米の共同プロジェクトとして進められている。口径 2.5 m の専用広視野望遠鏡と大型 CCD カメラによって、全天の約 1/4 の領域を 5 つの波長域 (バンド) で観測し、約 23 等級までの 1 億個の銀河の天球面上での分布、明るさや色を測定し、さらにそこから選び出した約 19 等までの 100 万個の銀河と 10 万個のクエーサーを分光観測して、我々の宇宙の大規模構造と進化の謎に迫ろうというものである。ここでは、このスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) 計画の概要を紹介する。

## 1. サーベイとは

天文学観測の様式 (モード) は一般に大きく 2 通りに分けることができる。そのひとつは、ごく通常に行われる観測の方法で、ある特定の天体を対象として、その天体をできるだけ詳しく精密に調べようとするものである。これに対して、いわゆる「サーベイ観測」は、特定の観測対象に限定するのではなく、ある一定の (一般にはかなり広い) 領域をくまなく被い尽くすように行う観測のモードである。広くくまない観測を完成させるためには、観測の効率が重要なポイントとなる。そこでサーベイ観測は一度に多数の天体を短時間で観測できるような装置が用いられる。シュミット望遠鏡という広視野で明るい光学系が (撮像の) サーベイ観測に用いられるのはこのためである。

その方法からわかるように、サーベイ観測の目的は個々の天体を観測することではない。広い領域から多くの天体を観測して統計的な情報を得たり、多くの天体の中からある特別な性質を持つ (一般には珍しい) 天体を探し出すことが主な目的で

ある。またサーベイ観測のデータは、あまり特殊化された観測ではなく比較的単純な標準的方法によって得られるため、様々な研究目的に再利用できるという特徴を持っている。

撮像によるサーベイ観測の最も有名なものはパロマー天文台の、いわゆる「パロマー・サーベイ」であろう。1949 年から 1956 年にかけて 48 インチのシュミットカメラを用いて、赤緯 -27 度までの天域が赤と青の 2 色で 6 度四方 879 組の写真として撮影された。このパロマー写真星図は、オーストラリアにある英国の 1.2 m シュミット望遠鏡およびチリに置かれた欧州南天文台 (ESO) の 1 m シュミット望遠鏡による南天のサーベイなどに補完されて、今でも観測天文学における非常に重要な基礎データとなっている (サーベイは何回か繰り返し行われ、現在はその写真乾板が測定機により数値化され、102 枚の CD-ROM として利用できるようにもなっている)。

## 2. デジタル・スカイ・サーベイとは

さて、これまでの光学領域のサーベイ観測 (特

に撮像)は、大半がシュミット望遠鏡と写真乾板の組合せで行われて来た(分光サーベイは大型の反射望遠鏡を用いるのが通常である)。それが最も現実的で効率の良い撮像装置であったからである。

写真乾板は10数年あまり前までは光学天文学において最もよく使われる主要な検出器であった。しかし CCD が出現すると、瞬く間に大半の観測において CCD が写真乾板にとって代ることとなった。それは CCD が写真乾板の持つ非線形性(受けた光量と反応してできる黒みが単純な比例関係にないこと)および量子効率(受けた光を検出する効率、すなわち感度)の低さという2つの大きな欠点を克服するものだったからである。

こうして多くの光学観測において CCD は写真にとって代ったが、最後に残ったのがサーベイ観測である。多くの観測が写真乾板から CCD に変わる中で、サーベイ観測だけが CCD に移れなかった理由は検出器の大きさにある。写真乾板は最大 50 cm 角のものまで存在したが、CCD のサイズは高々数 cm であり、CCD の高感度を持ってしても総合的な効率としてはかなわなかったのである。

本稿で紹介するサーベイ計画は、上記の CCD の弱点を最新の技術をもって克服して行われる。写真乾板というアナログの検出器の代りに CCD というデジタルの検出器を用いることから「ディ

ジタル・スカイ・サーベイ」と呼ぶのである。また、本計画は米国のスローン財団からの資金援助を受けているので、その名前を付けることになっている。ちなみに、先に紹介した写真乾板のデジタル化による CD-ROM 版のスカイ・サーベイは「デジタル化スカイ・サーベイ (digitized sky survey)」と呼ばれている。

### 3. 計画の概要

口径 2.5 m の広視野望遠鏡をアメリカ合衆国ニューメキシコ州サクラメント山のアパッチポイント天文台(図1)に建設し、かみのけ座付近を中心とした全天の約4分の1の天域で、約19等級までの銀河100万個とある基準で選ばれたクエーサー10万個の「分光サーベイ」を行う。この領域では、既存の均質な銀河カタログは16等級までの銀河しか含んでいない。このため、分光観測を行う銀河とクエーサーを、均質な基準で選び出すためのカタログを新たに作成する。銀河の位置、明るさ、形状といった量(測光パラメータ)を測定してこのカタログを作るための「撮像サーベイ」を同じ望遠鏡を用いて分光サーベイに先だって行うのである。

撮像サーベイには、かつてない規模の大型モザイク CCD カメラが用いられる。撮像は紫外の u' バンド(中心波長 3540 Å)から近赤外の z' バンド(9250 Å)までの5つのバンドで同時に行われる。

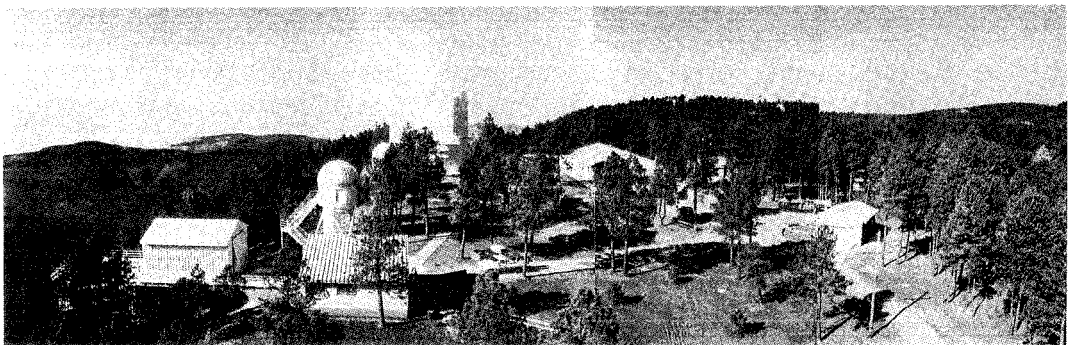


図1 アパッチポイント天文台の全景。いちばん左がSDSSの2.5m望遠鏡用のスライディング・ルーフ、その右側に60cm監視望遠鏡用のドームが見える。中央やや左の最も大きな建物は3.5m望遠鏡のドームである。

CCDカメラから得られる天体画像は、コンピュータにより解析され、一定の基準を満たす天体が自動的に同定・検出され、測光パラメータが測定されカタログされる。検出の限界はg'バンド（青に近い）で約23等級であり、約1億個の銀河とほぼ同数の星が検出されるはずである。

天体の明るさを精密に測定するために、2.5 m望遠鏡の隣に口径60 cmの監視望遠鏡を設置し、明るさの基準となる標準星を常時観測して大気による減光量などを監視して補正する。この望遠鏡は自動観測が可能なロボット望遠鏡であり、2.5 m望遠鏡とおなじバンドで観測を行う。

撮像サーベイで作られたカタログから、分光観測の対象とする天体を選び出す。どのような基準で分光観測の対象を選ぶかによって、観測対象の分布に偏りが生じる可能性があるため、計画の科学的価値に直接関係する重要なポイントである。

分光サーベイからは、100万個の銀河と10万個のクエーサーのスペクトルが得られるはずである。スペクトルから赤方偏移が求まり、赤方偏移からハッブルの法則によって距離が推定できるので、撮像サーベイによる位置の情報と合わせて、100万個の銀河の宇宙地図が描かれる。さらにスペクトルからは、単に赤方偏移だけでなく、銀河を構成する星の種類を反映するエネルギー分布、元素組成や電離度などの物理状態、さらには内部

の星の運動状態などの様々な情報を引き出すことができる。

ハードウェアとソフトウェアが完成した時点でテスト観測を開始し、システム全体の調整を行ってから5年間の予定で本観測にはいる。全期間の約4分の1が撮像サーベイに、残りの4分の3が分光サーベイに使われる。現在までにカタログに登録されている銀河の総数は約7万個、赤方偏移の測定された銀河の総数は約3万個、既知のクエーサーの総数は約7000個であるが、SDSS計画はこれらの数をそれぞれ1億個、100万個、10万個に増すことになる。

#### 4. SDSSの目的と意義

図2(a)は我々の銀河系から見た遠方の銀河の位置を点で描いた宇宙地図の一例である。これまでに行われたいくつかのサーベイ計画（図ではRSA, CfA-I, CfA-II等と示されている）によって、この地図の奥行きは次第に広がって来ているが、宇宙の果てが約150億年と言われていることを考えると、我々の知っている領域はまだ非常に狭いものである。一方、図2(b)はある宇宙モデルによって予測される銀河の分布の様子であるが、実際にこの領域の銀河分布がどうなっているかはまだ調べられていない。この未知の領域の銀河分布を明らかにし、約25億年彼方までの宇宙地図を

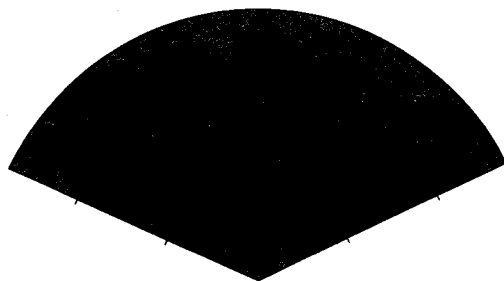
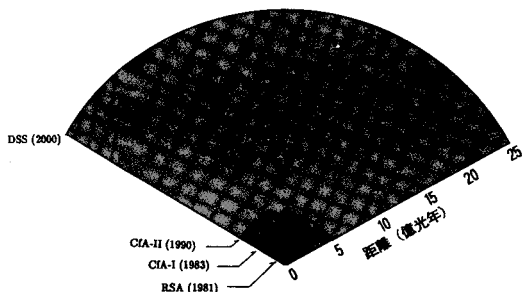


図2(a) いくつかのサーベイによる宇宙地図の領域

図2(b) 宇宙モデルによる銀河の分布の1例

図2 SDSS計画による宇宙地図の拡大。天球上で大円に沿って細長い帯状領域をとり、その中にある銀河の後退速度を測り、これを距離の指標として表したもの。銀河系は円の中心にあり、半径方向に後退速度がとってある。一点が一つの銀河に対応する。

完成させることがSDSS計画の最大の目的である。

さて、SDSS計画はこれまでの観測的な宇宙論研究の最大の基礎データであったパロマー・サーベイ（およびその後に行われた同様なサーベイを含む）を質・量ともに一新するものである。データの量が莫大なものとなるばかりでなく、その精度と均質性はパロマー・サーベイとは比較にならないほど向上し、銀河・宇宙論の研究はもとより、星そのものの研究、星を用いた銀河系構造や星間物質の研究など多くの研究分野にとって非常に大きな意義を持つものとなるはずである。

観測的宇宙論研究における本計画の科学的意義の主なものをまとめると以下の四点になるだろう。

1. 宇宙の大規模構造がより明らかになる。

この計画によって宇宙地図は現在の5倍遠方、体積にして100倍以上にまで広げられ、銀河団の分布はさらにその2倍以上遠くまで調べられる。これらのデータから宇宙の大規模構造がこれまでよりずっと明らかに描き出されることは間違いない。

2. 銀河進化の研究の基礎となる「現在」の銀河のデータベースが一挙に数十倍から百倍以上の規模になる。

銀河の進化の研究は、遠くにあつてすなわち過去の銀河と思われるものと近くにある現在の銀河の性質を比べることによって行われる。極めて遠くの銀河の観測にはもっと大きな望遠鏡（たとえば「すばる望遠鏡」）による観測が必要である。しかし、実は近くのすなわちほぼ現在の銀河の性質も充分には調べられてはいないのが現状である。SDSS計画の100万個の銀河のデータベースは遠くにある過去の銀河と比較されるべき現在の銀河の性質を明らかにする。

3. 10万個のクエーサーの観測により、ほとんど宇宙の果てまでを見通すことが出来る。

クエーサーの性質が詳しく調べられると同時に、クエーサーのスペクトル中に見られるライマン $\alpha$ 線などの吸収線を利用して、赤方偏移の大きな宇

宙の中で銀河間物質がどのように進化し銀河が誕生したかを明らかにできると期待される。

4. 特異な性質を持つ天体が多数発見される。

これは、新しい大規模サーベイに共通のことである。SDSS計画によって多数発見されるであろう特異な天体は「すばる」などの大望遠鏡に多くの興味深い研究テーマをもたらすはずである。また、これだけの規模のサーベイを行うと、全く予想もされなかったような新天体や新しい現象が見つかる可能性も大きい。

## 5. SDSS計画のハイテク観測技術

先に述べたようにSDSS計画は現代の天文観測技術の粋を集めたものである。以下にそのいくつかを紹介する。

### 5.1 広視野専用望遠鏡

先にのべたように、撮像サーベイには広視野のシュミット望遠鏡を用い、分光サーベイには普通の大型反射望遠鏡を使うのが従来の方法であった。SDSS計画の特徴は、撮像サーベイと分光サーベイを同一の望遠鏡で並行して行う所にある。このためには望遠鏡の口径、焦点距離、口径比などの性能が、撮像サーベイ用のCCDのサイズや分解能および分光サーベイ用の機器に矛盾なく適合し、かつ広視野でなければならない。

広視野反射望遠鏡としては、チリのラス・カンパナス天文台の2.5mデュポン望遠鏡が有名である。SDSS用の望遠鏡はこのデュポン望遠鏡をもとに設計された。主鏡口径はデュポン望遠鏡とおなじ2.5m、口径比は2.2で、鏡面から3.6m前方に直径1.08mという大きな副鏡がある。合成口径比は5.0で、主鏡面から76cm下にある焦点面上でのスケールは、1秒角が61ミクロンに相当し、CCDの1画素24ミクロンは0.4秒角に対応する。主鏡は軽量のハニカム鏡が採用されている。光学系を工夫した結果得られる視野は直径3度、実寸では65cmとなる。カセグレン焦点でこれだけの広い視野をもつ大型望遠鏡は他に例を見ない

(デュポン望遠鏡は1.5度である)。

## 5.2 大型モザイク CCD カメラ

前述のように、CCD が写真にかなわない唯一の点はその大きさである。この結果、CCD で観測された空は全天の広さに比べればまだほんの僅かである。CCD による広い天域のサーベイを可能にするには、CCD の面積を増やすことが不可欠である。関口真木氏を中心とする国立天文台と東大のモザイク CCD グループは、数年前から1 cm 角の CCD (1000×1018 画素) を多数並べることによって有効面積を増す研究を続けている<sup>1)</sup>。1991 年には木曾観測所シュミット望遠鏡用に16 素子を並べた1号機を完成し、1995年4月現在では8×5 列=40 素子を並べた2号機が稼働している。この技術と経験が SDSS 計画に役立つことになった。

本計画で用いる CCD は、テクトロニクス社との間の特別の契約に基づいて製造される5 cm 角の大型 CCD で、24 ミクロンの画素サイズを持ち 2048×2048 画素を有する。直径65 cm の焦点面にはこの大型 CCD を5色分×6列=30個並べる(図3)。30個の大型 CCD の上下に12個ずつあるものは2048×400 画素の細長い CCD で、22個が銀河の位置決定用の位置基準星の観測、2個はオートフォーカスに用いられる。

大型モザイク CCD カメラによる撮像サーベイは TDI (Time Delay and Integrate) モードとよぶ特殊な方法で行う(図4)。望遠鏡を空の一方方向に向けて静止させておくと、焦点面上に置かれた CCD 上では日周運動によって空の景色が動いてゆく。CCD の読みだしの速さと方向をこの動きの速さと方向に合わせれば、結果として CCD は空の細長い帯状領域を掃いてゆく。これが TDI モードである。この方法は望遠鏡位置合わせおよび CCD の読み出しを効率良く行えるので、広い天域のサーベイ観測に適している。

また電荷転送方向にある2048画素全てで測定した結果が1画素分として出力されるので、CCD の画素毎の感度むら観測時に(その方向だけで

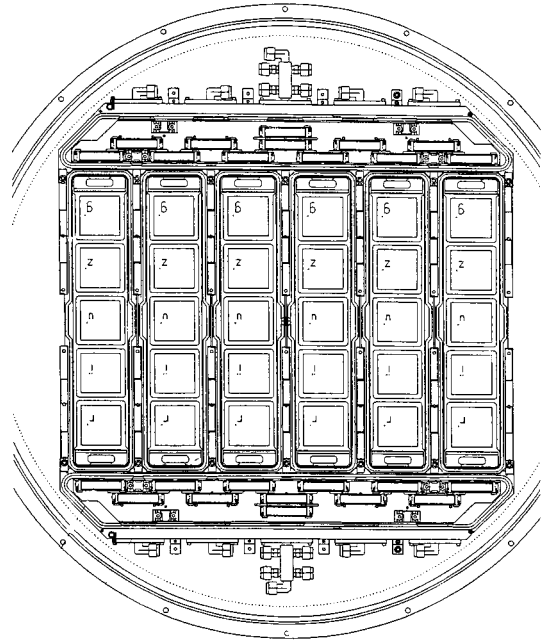


図3 大型モザイク CCD カメラの正面図。点線の円の直径は65cm である。TDI により空の景色は図上で上から下へと動く。

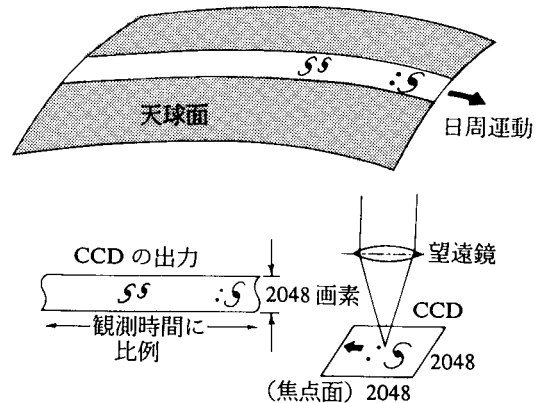


図4 TDI モードの概念図。望遠鏡を止めておくと、焦点面に置かれた CCD 上に結像された天球の像が日周運動により移動する。この移動速度と CCD の電荷転送速度を同期させると、観測を続ける間帯状のデータが出力される。(日本物理学会誌 Vol.50, No.3, 1995, P.173 より転載)

はあるが) 平均化されるという利点もある。実際にはもう少し複雑な手続きが必要であるが、結果として図3のように、空は上から下へと CCD 上を動き、一度に6本の帯状領域が5色で観測できることになる。

この大型 CCD によるモザイクカメラこそ、SDSS 計画の構想を現実のものとした最も重要な鍵である。現在の所我々のグループの作ったモザイク CCD カメラ2号機が世界最大の CCD カメラであるが、この SDSS 用の大型モザイク CCD カメラが完成すれば、世界の座をそちらに譲ることになる。

### 5.3 ファイバー多天体分光器

従来の伝統的な分光観測では、どんなに広視野の望遠鏡であっても、一度には天体1つだけのスペクトルを撮影していた。それは分光器に光を導くスリットが1本しかないためであった。しかし、広視野の望遠鏡では焦点面には多数の天体が写っている。何とかこれら複数の天体のスペクトルを同時に撮ること(多天体同時分光)はできないだ

ろうかということで、いくつかの方法が考案されてきている。

SDSS 計画で用いるのはファイバー分光と呼ばれる方式である(図5)。これは、望遠鏡の焦点面上で天体の写っている位置に多数の光ファイバーを配置し、その他端を一行に揃えて分光器のスリットに導くという方式である。この多天体同時分光は、望遠鏡がチャンネル数分だけあることに相当する画期的な技術革新であった。現在は、50—200チャンネル程度のものが多く使われている。

SDSS 計画では、5年間でサーベイを完了するという制限があるので、1回の露光を約1時間とすると、ファイバーは総計で600—700本必要という勘定になる。これはいまだにどこでも実現されたことのない数である。SDSS では同じ分光器を2台用意し、それぞれが320本のファイバーを分担することになっている。

分光サーベイ時には光学系の収差の制限が緩いので直径70cmの焦点面全体を使う。直径約80cmのアルミ板(プラグ板と呼ぶ)を用意し、分光対象天体の位置にあらかじめ機械で穴をあけておく。この穴にファイバーを刺し込み、ファイバーのもう一方の端はそのまま分光器のスリットとして用いる。プラグ板からスリットまでは一体となってカートリッジに収められている。昼間のうちにプラグ板にファイバーを刺し込んだカートリッジを10天域分用意しておき、夜間の観測中は天域を変えるたびにカートリッジごとワンタッチで交換する。この前例のない640チャンネルのファイバー多天体分光器も SDSS 計画の成否の鍵をにぎっている。

### 5.4 データ処理システム

本計画が扱うデータ量は、天文学でこれまでに行われたどんなサーベイよりも遙かに多い。実は、このような大量のデータの取得と処理の技術は、高エネルギー物理学の素粒子実験における技術と共通性が高い。フェルミ加速器研究所が計画に参加しているのはこのためである。

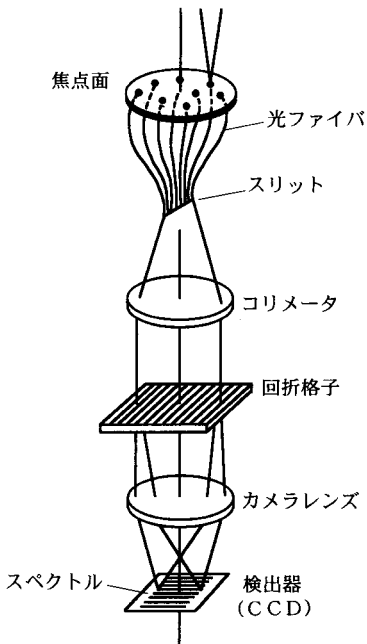


図5 ファイバー分光器の概念図。

データ処理は、アパッチポイント天文台で観測と併行して行われるオンライン処理と主にフェルミ研究所で行われるオフライン処理がある。撮像サーベイでは平均して毎秒約8MBのデータが生み出される。分光サーベイによるデータ量はこれに比べると僅かである。オンライン処理の役目は、これらの観測データから、後の処理に必要なさまざまな校正データを計算して、生データとともに記録媒体に書き出すことである。校正データとは、CCDの感度むら補正用データ、星像の形を表すPSF(点拡がり関数)、空の明るさ、位置基準とする星の測定位置などである。生データの記録媒体としては、DLT(Digital Linear Tape)が用いられることになっている。

フェルミ研究所でのオフライン処理は、一連のまとまった処理機能を持つ「パイプライン」と呼ばれるユニットを多数結合したシステムで行われる。監視望遠鏡のデータから明るさの目盛りを決める、天体の精密位置を決定する、撮像サーベイのデータから測光カタログを作る、測光カタログから分光観測の対象となる銀河とクエーサー候補などを選び出しプラグ板に開ける穴の位置を指定する、などの機能を持つさまざまなパイプラインが作られている。

表1に、SDSS計画によって得られると期待される科学的データの種類と量を示した。これらの

データのうちどれを、どのような形で、いつ公開、配布するかを検討は現在急ピッチで進められている。データ量の少ないものについてはCD-ROMによる配布が現実的と考えられており、データ圧縮の可能性も検討されている。

## 6. 計画の現状と日本グループの役割

最初SDSS計画は、プリンストン大学、プリンストン高等研究所、シカゴ大学、およびフェルミ加速器研究所の研究者グループによって立案されスタートしたが、1992年より日本グループが参加、その後、ジョンス・ホプキンス大学、ワシントン大学、およびアメリカ海軍天文台が相次いで参加した。日本グループは東大、京大、阪大、国立天文台、宇宙科学研究所の研究者から成る混成グループで、京都大学の福来正孝氏が中心的な役割を果たしている。SDSS計画で得られたデータの主要部はサーベイ終了後適当な期間(2年を目標)内に天文のコミュニティに公開されるが、共同研究グループはそれ以前にもデータを優先的に使用できることになっている。

アパッチポイント天文台における現地開発作業はほとんど完了した。監視望遠鏡はすでに納入され、現在最終調整を行っている。2.5m望遠鏡用の建物(スライディング・ルーフ方式)も完成して望遠鏡の搬入を待っている。望遠鏡全体として

表1 SDSS計画から得られる主な科学データ

内 容	種類	大きさ		CD-ROM 枚数
		非圧縮	圧 縮	
分光した天体のパラメータリスト	数値	750MB	400MB	1
全天体のパラメータリスト	数値	25GB	15GB	24
個別天体画像(注1)	画像	250GB	80GB	130
スペクトル	図形	50GB	25GB	40
スカイマップ(注2)	画像	500GB	120GB	200

注1 個別天体画像は、天体を中心とする一定領域の画像を切り出したもの。(領域サイズは天体毎に異なる)

注2 スカイマップは、全サーベイ天域の画像を重なり部分を処理して論理的に一枚の画像とした画像を、さらに4×4画素を結合して分解能を4分の1に落としたもの。

の完成は1995年6月頃の見込みである。

CCDカメラはプロトタイプの駆動回路のテストが完了し、本番用のボードが順次製作されている。機械系も一部は製作に入っている。分光器2台は製作の最終段階にあり1995年4月に完成予定である。

データ解析ソフトの中核となるパイプラインは、多数の人々により分担して開発されている。それらはフェルミ研究所で、Shivaというシステムのもとに結合される。Shivaは、図形処理、画像表示、ユーティリティなどのソフトを、コマンド言語の一種である Tcl をベースにして、新たに開発するパイプラインのソフトと結合するプラットフォームである。現在ベースとなる Shiva の強化とともに、パイプラインの開発が精力的に進められている。

このように全体計画が動いている中で、日本グループは、大型モザイク CCD カメラの開発、フィルタの製作、パイプラインの共同開発と性能テスト、分光対象の選択基準の確立と選択効果の評価、測光標準星を用いた光度の較正法の確立などを担当するとともに、研究テーマの策定に加わって計画を推進している。1995年末からテスト観測

が始まる予定である。

本計画は我国においても多くの方々のご理解とご支援をいただいているが、計画の完了までにはまだ数年間を要し、なお一層の努力が必要であると考えている。今後ともみなさんの変わらぬご支援をお願いしたい。

参 考 文 献

- 1) 関口真木, 岡村定矩 1992, 日本物理学会誌, 47 巻, 376

Sloan Digital Sky Survey Project

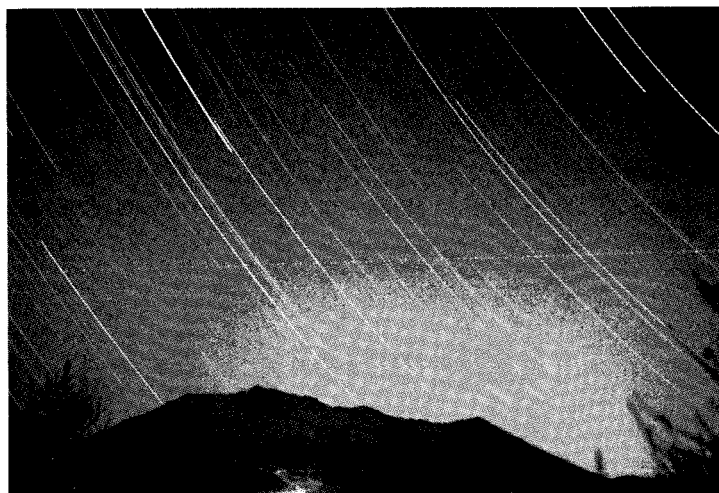
Masaru HAMABE

*Institute of Astronomy, University of Tokyo, Mitaka, Tokyo 181, Japan*

Sadanori OKAMURA and Mamoru DOI

*Department of Astronomy, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan*

Abstract: Sloan digital sky survey is a big sky survey for galaxies and QSOs over 1/4 of the whole sky using a dedicated 2.5 m-telescope. The large mosaic CCD camera will produce digital photometric maps of the sky in five color bands down to  $g' \sim 23$  mag. These maps will be used to select  $10^8$  galaxies and  $10^5$  quasars down to  $g' \sim 19$  mag for which redshifts will be obtained. The outline, scientific aims, and the present status of the project are reported.



木曾御岳に沈む星ぼし  
「遙かなる宇宙へ」より 日本天文学会©