

最近の天体画像技術と8m望遠鏡計画

Recent Developments in Astrophysical Imaging Observations
and the 8m Telescope Project JNLT

家 正則

Masanori IYE

14-1

国立天文台

National Astronomical Observatory

Abstract

Typical examples of astrophysical image data are shown together with their involved instrumentations. Recent developments in semi-conductor imaging devices, image processing systems, observational instrumentations, and opto-electro-mechanical systems are briefly reviewed with a special emphasis on the adaptive optics system to improve the imaging performances.

The outlines of the Japan National Large Telescope project started since 1991 to construct an 8m telescope atop Mauna Kea (4200m) on the Hawaii island are presented.

1. 天体画像データ

観測天文学で扱う画像データは、光子の波長 λ 、光子の到來方向 (x, y) 、光子の到來時刻 t 、光子の偏光状態 p 、の5次元（4.5次元？）空間のデータと捕らえることができる。天文学で扱う2次元画像データの多くは、この5次元データ空間をある2次元空間に縮約したもの、あるいはある2次元断面を切り出したものである。

実際には、時間次元が重要な高密度天体の現象の観測や、偏光状態が関心の的となる磁場を伴う天体や星間塵による散乱光の観測もあるが、天文学で扱われるほとんどの画像は (x, y, λ) の3次元空間における2次元部分空間のデータと考えて差し支えない。

撮像データは天体からの電磁波強度を天球面上に投影したもので、空間分布 $I(x, y)$ と書ける。太陽と小数の超巨星を除くと、恒星は通常、点光源とか見えない。形が測定できるのは銀河や星雲である。銀河はその形から橿円銀河、渦巻銀河に大別されるが、渦巻銀河（図1）の造形美は息を飲むばかりである。撮像データは天体の構造の研究の他、天体の分布の研究にも利用される。図2は、何の変哲もない天体見えるが、現在までに知られている最も遠い天体の画像である。そのスペクトル観測からこの

クエーサーは、宇宙膨張のため光速度の94%の速さで我々から遠ざかっていることが確認されていて、宇宙の果てにある天体とされている。遠い天体からの光は伝播に時間がかかるから、我々が見ているのはこのクエーサーの宇宙初期の姿と言える。

撮像観測は、波長次元の切り出し幅を $\Delta\lambda$ としたとき、波長分解能 $R = \lambda / \Delta\lambda$ の大小に応じて、狭

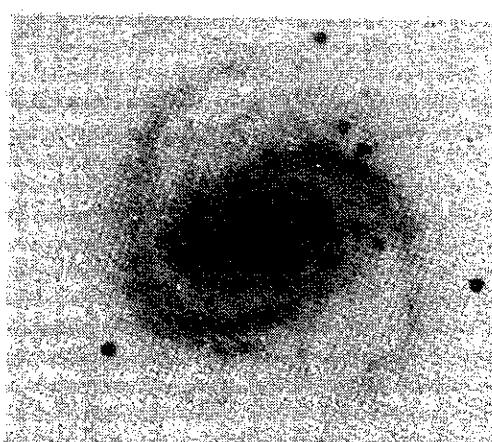


図1 みごとな渦巻構造を持つ渦巻銀河NGC4321の写真画像（岡山天体物理観測所188cm望遠鏡にて1982年撮影）

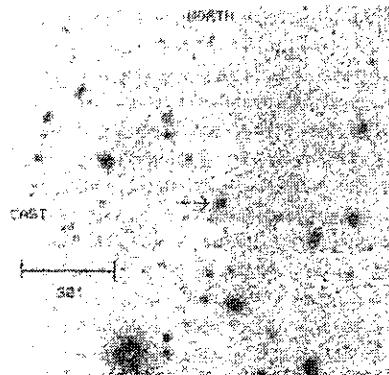


図2 確認された天体の中では最も遠い距離約130億光年にあるクエーサーP C 1247+3406。宇宙膨張のため光速度の94%の速度で我々から遠ざかっている。(Schneider et al.:1991)

帯域撮像 ($R \approx 1000$) と広帯域撮像 ($R \approx 10$) とに大別することができる。波長 656.3nm の水素原子のバルマーハ線のみを通す干渉フィルターを用いて撮影すると中性水素ガスの分布を調べることができる。これなどは狭帯域撮像画像の例である。異なる波長帯での広帯域撮像データを比べると、個々の天体の色が測定できる。色の情報は、天体の種類を推定する第一歩として重要である。

スリットで切り出した空間方向1次元と波長次元とが張る面で3次元データ断面を取り出した分光画像 $I(x, \lambda)$ も、天体観測で得られる代表的な画像データである。図3はCCDカメラで撮影したこと座の環状星雲のスリットスペクトル画像の例である。例えば、酸素原子や硫黄原子の禁制線スペクトルに着目して、その強度を測ると、電子温度や電子密度の空間変化の様子を知ることができる。銀河の分光画像からは、例えばスペクトル線の波長を精密に測ることによって、銀河の自転運動や内部運動の乱れの様子が分かる。

エシェル分光器の場合には、広帯域にわたる1次元スペクトル ($R \approx 10000$) をもう一つの分散素子を用いて干渉の次数で分離し折り畳んで、2次元検出器に適したフォーマットの画像データにして測定する。

[O]
[O]
[N]
[S]
[O]
[O]
[N]
[S]

630.0 nm
636.4 nm
654.8 nm
656.3 nm
658.4 nm
671.7 nm
673.1 nm

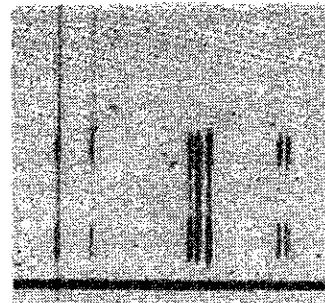


図3 環状星雲のスリットスペクトルCCD画像(岡山天体物理観測所188cm望遠鏡にて1986年撮影)。スペクトル画像から天体の温度・密度・化学組成などが分析できる。点々とあるのは宇宙線(ミューオン)による爆射雑音。

2. 天体観測技術の進歩

天体の明るさの基準とされている0等星ヴェガ(織姫星)は、日本から見える星としてはシリウスの次ぎに明るい星である。可視域では0等星からの光量は 10^4 光子/ $\text{cm}^2/\text{sec}/\text{nm}$ である。従って、直径1mの望遠鏡を用いて波長幅 100nmで露出時間20分間の撮影をした場合、20等星からの全光子数は約 10^5 個となる。実際には地球大気による吸収や、望遠鏡光学系での損失のため、検出器で光電子に変換されるのはこの1割程度となる。分光観測の場合はさらに厳しく、光を1000チャンネルに波長分解する場合、宇宙の果ての25等級の天体からの光子数は、直径8mの望遠鏡を用いて20分間積分しても、1画素あたりせいぜい数10個にしかならない。特に分光画像においては、1画素あたりの入射光量が少ないので、検出器の高感度・低雑音化を図る必要があり、最近では光子一つ一つを測るさまざまな2次元検出器が開発されている。

天体画像データの記録には1980年代中ごろまで写真乾板が広く用いられてきた。光子を捕らえる量子効率こそ1%程度しかないが、写真乾板は天体観測の客觀性向上、画像データの保存という点で、19世

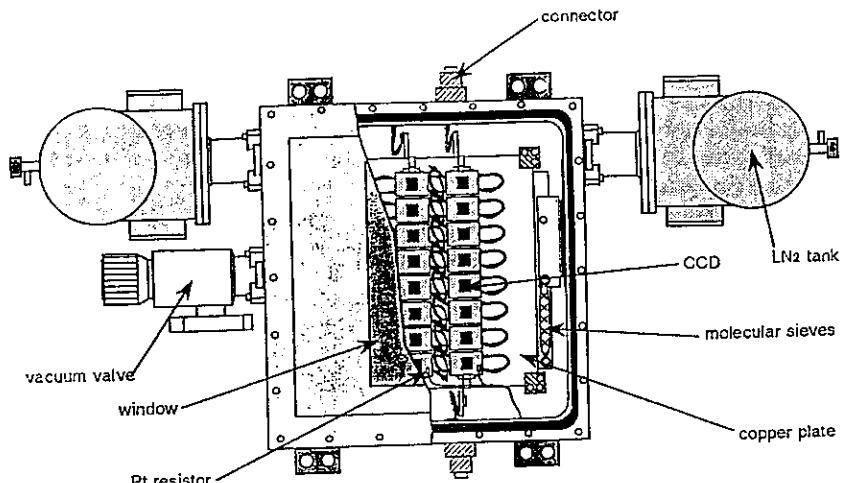


図4 モザイク CCDカメラ。1000×1000画素のCCD素子を8×8個並べて、広視野を高感度で撮影できるカメラシステムの開発が進んでいる。CCD素子は低雑音化のため、液体窒素で冷却されたデュワーに納められる (Sekiguchi et al.: 1992)。

紀後半からの天文学の進歩を支えてきた。この写真乾板も最近では CCD(電荷結合素子)に代表され

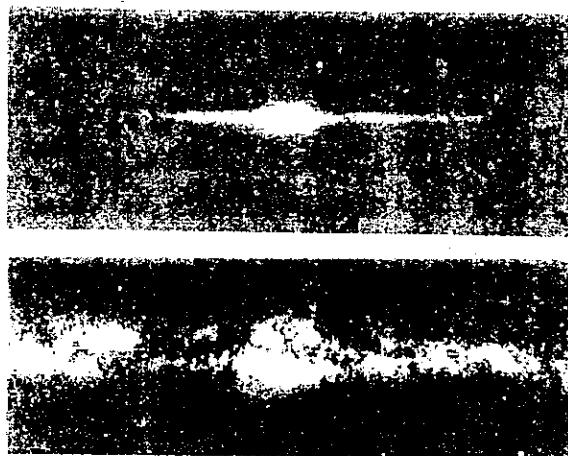


図5 天の川の近赤外線画像(宇宙背景放射観測衛星COBE撮影:1990、上)と可視光写真(欧洲南天天文台撮影:1987、下)。ともに、いて座の銀河方向から両側へ90度ずつのパノラマ写真である。星間塵による吸収が著しい可視光写真と比べると近赤外線では銀河系の形が良く分かる。

る半導体撮像素子にとって変わられた。Si半導体を用いたCCDはX線から波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ の近赤外線まで幅広い天体観測に用いられている。量子効率も最大90%のものが開発されており、画素サイズは $8\text{ }\mu\text{m}$ 角から $30\text{ }\mu\text{m}$ 角程度、画素数も1画素あたり最大400万画素のものが開発されている。CCD素子を多数並べて視野の広い検出器を構成する試みも、国立天文台などで始められている(図4)。CCD素子の読みだし回路の改良も進み、電気雑音が3電子相当のCCDカメラさえ実用化されている。ここまでくると、入射光子数が1画素あたり30個程度しかないような、微弱光レベルでもなんとか画像を撮ることができる。非破壊多重読み出し方式により、読み出し雑音を0.1電子相当にまで下げ、単一光子イベントを全て記録できるCCDカメラの開発が成功すれば、可視域では究極の光検出器となる。

波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の赤外線で天体画像を記録するために、最近では白金シリサイド(PtSi)、水銀カドミウムテルル(HgCdTe)、インジウムアンチモニン(InSb)などの半導体を用いた赤外線用の画像素子が実用レベルになってきた。観測波長域の拡大は、新しい天体や、天体の新しい側面を見させてくれる(図5)。

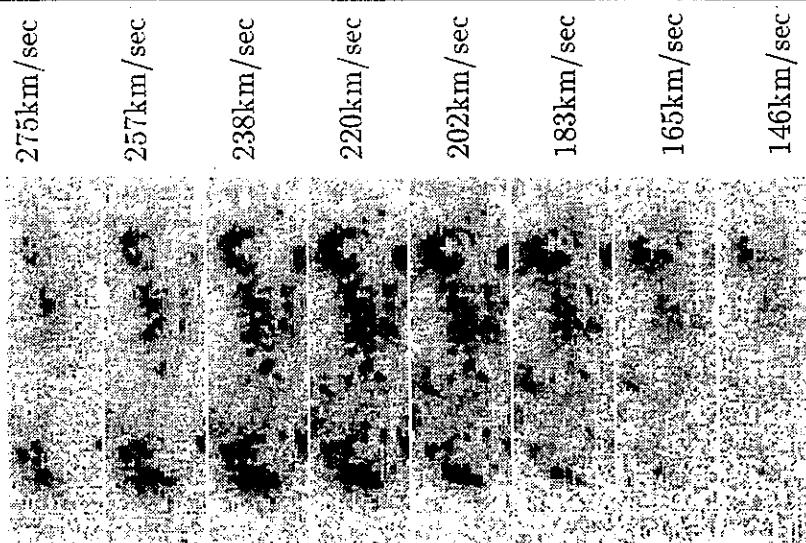


図6 岡山天体物理観測所 188cm望遠鏡星雲分光器による不規則型銀河NGC 4449の画像。各画像は運動速度の異なる天体の分布を写している。

(下関市立大：佐々木実氏提供)

観測装置においても、最近の光学技術の発展により、光ファイバーを多数用いて複数の天体からの光を同時に分光器に導き分光観測する多天体分光器、マイクロレンズアレーを用いた多瞳分光器、赤外観測用の冷却カメラや冷却分光器、ファブリ・ペロー分光撮像器、フーリエ分光器などなど、観測目的に応じたさまざまな天体観測装置が開発されてきた。図6は、天体を切り取るスリットの位置yを少しづづずらして観測したスリット分光画像 $I_y(x, \lambda)$ から (x, y, λ) の3次元データを構成し、バルマー α 線画像から銀河の内部構造と運動の様子を画像表示したものである。

半導体光検出器の開発による高感度化、観測可能波長域の拡大に加えて、集光結像装置としての望遠鏡・観測装置においても、最近著しい技術革新があった。パロマー山の5m望遠鏡が完成したのは1948年であったが、その後1980年代までに約10台の4m級望遠鏡が世界各地で建設された。しかし、1990年代に入って欧・日・米で相次いで8m級望遠鏡の建設が始まっている。大口径望遠鏡の建設を可能にしたのが、後で述べる「能動光学」技術である。さらに、大型望遠鏡の解像力を10倍以上高める新技術として「補償光学」が最近脚光を浴びている。21世紀には、複数の望遠鏡からの光を干渉させて、解像力

をさらに大幅に向上させる「光干渉」技術も実用レベルになる可能性がある。

つい10年前までは暗闇の中で寒さに凍えながら観測し、暗室で乾板を現像するのが当たり前だったが、検出器の半導体化、観測装置の多機能化、観測手順の計算機管理、遠隔操作による観測など、観測の現場もこの10年で大きく様変わりしてきている。

3. 天体画像の処理

天体画像の処理には、わが国では1970年代末から計算機によるデジタル画像処理技術が導入されてきた。写真乾板の画像もマイクロフォトメータと呼ぶ画像測定機により、デジタル画像化され、大型計算機上で構築された画像処理ソフトウェアシステムにより解析してきた。今ではCCDカメラが普及して、デジタル画像データが当たり前の時代となった。これに伴いワークステーション上で構築された画像処理システム（IRAF）の利用環境が、国内でも1990年ごろから整備され、国立天文台を中心とするネットワークを通じて、解析することができるようになりつつある。

人類共有の財産であるという観点から、シュミット望遠鏡で得られた全天の写真アトラス画像などは以前より良質のコピーが世界中の主な天文台に配布

されてきたが、可視、赤外、X線で天体を観測する様々な科学衛星で得られた重要な天体画像の多くもデータベース化され、国際的に公開されるようになってきている。

後述のJ N L Tでは、山頂の望遠鏡と麓のハワイ観測所、それに日本の国立天文台を結ぶネットワーク構想や、画像処理専用プロセッサーの開発、スーパーコンピュータの利用などが、具体的に検討されている。--晚あたり最大1テラバイト(10^{12} byte)にも達する貴重な天体観測データを、効率よく処理するシステムの完成も夢物語ではなくなりつつある。

4. 国立天文台8m望遠鏡（J N L T）計画

文部省国立天文台は平成3年度から8年計画で、ハワイ島マウナケア山頂（海拔4200m）に口径8mの大型望遠鏡（J N L T、愛称「すばる」）の建設を開始した（図7）。口径8m厚さ20cmの主鏡をつくるには、吟味したガラス材料を用意し精密な研磨を行うため約6年を要するが、平成4年末現在主鏡用の超低膨張ガラス材の製造が順調に進んでいる。平成4年7月7日（日本時間）には、現地でハワイ

式の「くわ入れ式」も無事行われ、地盤改良工事が完了している。この望遠鏡で最初の画像が得られるのは1998年頃になる見込みである。

画質の良さという点では、この望遠鏡は今までの望遠鏡とはひと味違うレベルのものとなる。その最大の理由は、この望遠鏡が「能動光学」と呼ばれる新技術に支えられたロボット望遠鏡だからである。「能動光学」とは、主鏡を支える264個のアクチュエータを、コンピュータで実時間制御することにより、光学系の調整を常時完璧に実現するというものである。これによって、自重や温度変化による光学系のたわみ、研磨ムラや光軸調整誤差などを実用上、除去できる。

能動光学方式の望遠鏡実現によって、J N L Tは星像直径0.3秒角のシャープな天体画像を得ることをねらっている。

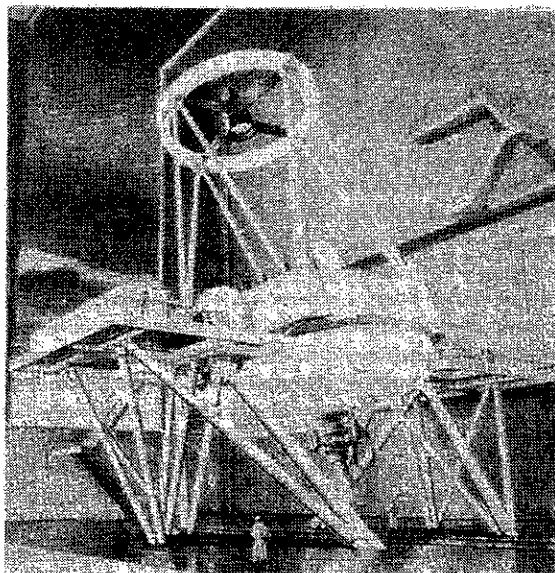


図7 すばる望遠鏡完成予想図。主鏡直径は8m、望遠鏡筒の長さ15m、ドーム外径約40m、ドームの高さ40mの巨大建物である。ドーム上部は望遠鏡とともに回転する。

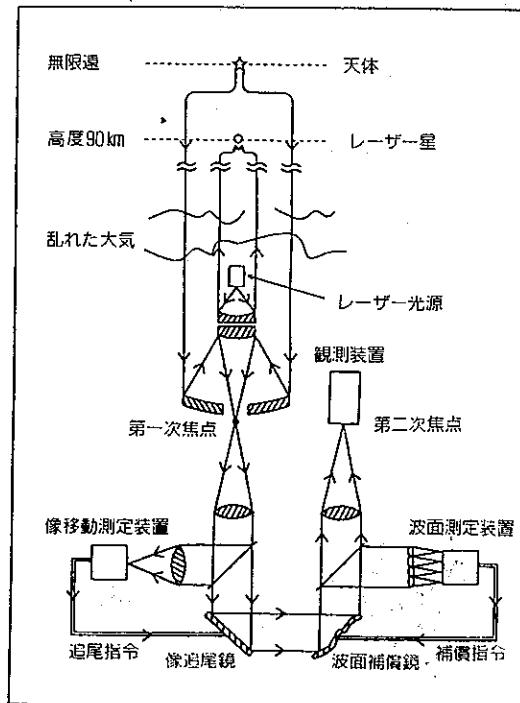


図8 検査光学システムの原理。大気による光波面の乱れを波面センサーで測定し、可変形鏡を実時間制御して乱れを補償し、回折限界に迫る解像力を達成する光学系である。

5. 大気の揺らぎに打ち勝つ「補償光学」

波長 500nmの可視光による 8m望遠鏡の空間解像力の理論的限界は、回折理論によると0.03秒角である。ところが実際には、地球大気中のわずかな温度ムラにより天体からの光波面が乱されるため、望遠鏡口径を大きくしても、星像の大きさは1秒角以下にはなかなかならない。

大気の揺らぎによる光波面の乱れを測定して、実時間で波面を補正し、望遠鏡口径で決まる回折限界に相当する解像力を達成しようというのが、波面補償光学である。波面補償光学は能動光学と共通な部分が多い技術であるが、その実現には、微弱な光を用いて大気中の揺らぎを高速測定する光学系とカメラ、波面乱れを直す可変形鏡、これらを実時間で制御する高速制御系の構築が必要である(図8)。補償光学の最も単純な例が、大気による星像の揺れを補償するイメージスタビライザである。図9はイメージスタビライザを用いた例であり、星像がシャープになる様子が示されている。より本格的な補償光学だが、比較的シンプルな近赤外線用の補償光学システムは、すでに実用レベルのものが開発されている。可視光用のシステムは構成要素が多く、より高度なものとなるが、完成すれば8m望遠鏡の場合、その解像力が約30倍も向上することになる。解像力が向上すると、より微かな天体も見えるようになる(図10)。補償光学の技術は天文學に限らず、レーザー計測、高出力レーザーなどの分野でも応用が有望視されるため、今後の開発は急速に進むものと思われる。

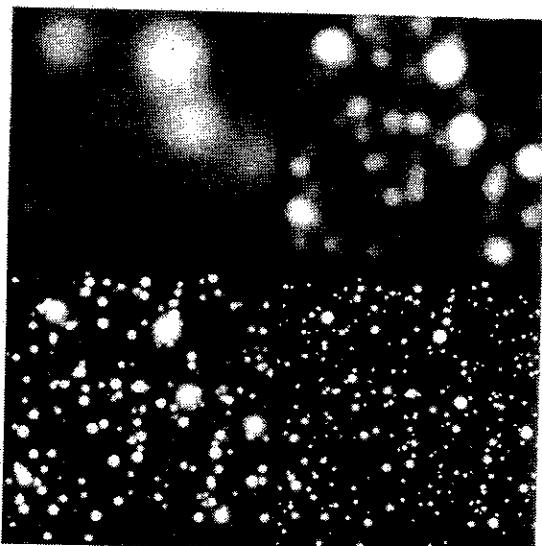


図10 補償光学シミュレーション。星像直径が
(左上) 3秒角、(右上) 1秒角、(左下) 0.3秒角、(右下) 0.1秒角のときの天体画像の切れ味の違いを示す。日本国内の天文台での平均星像直径は2~3秒角、マウナケア山頂では現在平均1秒角と言われている。J N L Tでは能動光学により0.3秒角、補償光学により0.1秒角以下を目指している。

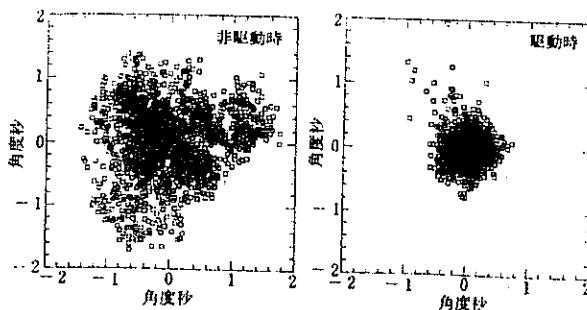


図9 補償光学の第1歩であるイメージスタビライザによる波面補償の実例。(岡山天体物理観測所 188cm望遠鏡にて1991年実験)