

宇宙をとらえる光応用技術

国立天文台教授 光学赤外線天文学・観測システム研究系主任
家 正則

はじめに

宇宙を研究対象とする天文学は、研究対象に働きかけてその反応を調べるという研究手法を使うことができない。ひたすら天体から届く電磁波などの情報をとらえて、相手を調べるしかない。それだけに、天文学者は考えつくあらゆる手段を使って観測の限界・精度に挑戦することになる。天文学の歴史を見ると、まさにその時代時代の最先端の測定技術を応用して、それまで見えなかつた宇宙を探るという努力の連続であったことが分かる。

1. 光学天文学の歩み

1.1 20世紀前半まで

20世紀前半までは、天体観測とは可視光での観測を意味していた。1609年にガリレオ・ガリレイが初めて口径数cmの屈折望遠鏡を用いて夜空を観察して以来、20世紀前半までに望遠鏡口径は最大5mとなった。この間に色消しレンズの発明、光学収差論の体系化、金属メッキ法の開発による反射望遠鏡の実用化など、望遠鏡性能の向上に重要な光学技術の進展があり、より遠い宇宙の観測が可能となってきたのである。

忘れてはならないもう1つの大きな技術革新は、天体観測での写真乾板の実用化である(図1)。インテリジェント・プロセッサーつきの肉眼観測は、高い自動識別能力があるが、標準出力がスケッチとか音声でしかないこと、メモリーが揮発性のため、客觀性に欠けるという欠点があった。写真乾板の導入により天体観測結果が客觀的になりデータが保存できるようになったことは、天文学を科学として進めるうえで大きなインパクトとなつた。

1.2 電子技術

電子技術の発展は光電子増倍管を産みだし、天体の明るさの測定精度を格段に向上させた。この流れは1980年代の半導体技術の発展によるCCD固体撮像素子革命に引き継がれる。天体観測へのCCDの導入はまさに革命的であった。写真乾板に比べて量子効率が50倍もあり、感度校正の再現性の良さと相俟って、望遠鏡は同じでも写真からCCDに検出器を変えることで観測限界が大幅に広がった(図2)。その後CCD素子は多画素化され、現在では4000×2000画素のCCDが天文学では多用されている。多層膜反射防止コーティング技術の導入で広い波長域で量子効率が80%に迫るもののが開発されている。シリコン半導体技術の進歩はシリコン以外の複合半導体にも受け継がれ、バンドギャップの小さい赤外線用のさまざまな固体撮像素子が1990年代に入り実用化された。真空や冷却の技術を要するという面では、可視光と赤外線の観測で使われる技術が共通になってきている。

空気の揺らぎのない宇宙空間から解像力の高い素晴らしい画像を多数送ってきたハッブル宇宙望遠鏡の活躍は

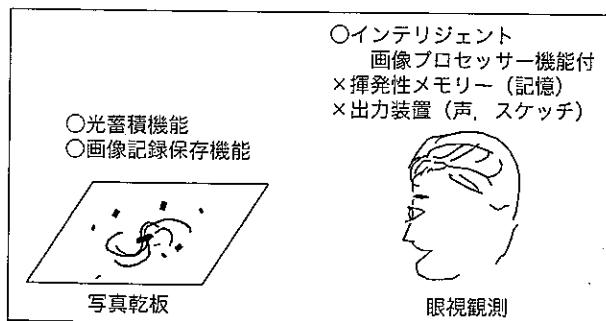


図1 肉眼観測と写真観測

いえ まさのり

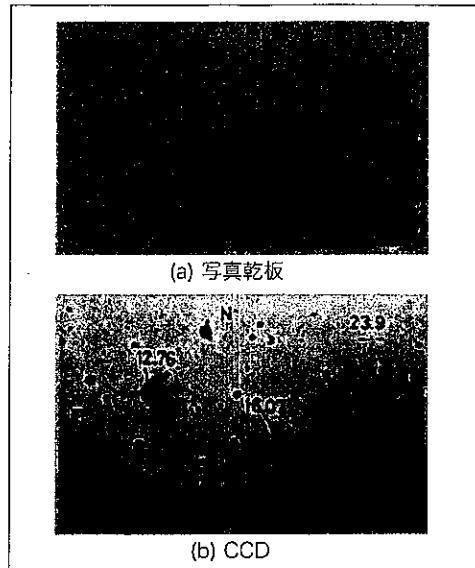


図2 写真乾板とCCDの感度比較

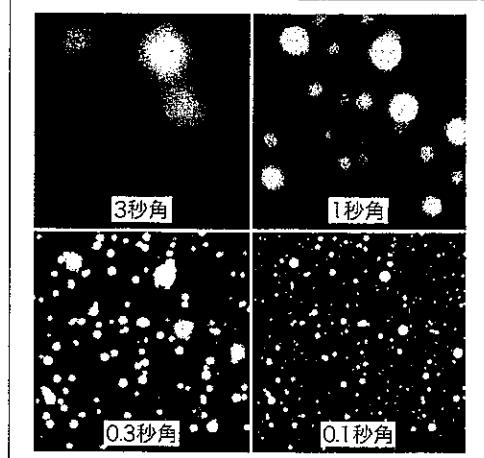


図4 補償光学による像改善効果（シミュレーション）

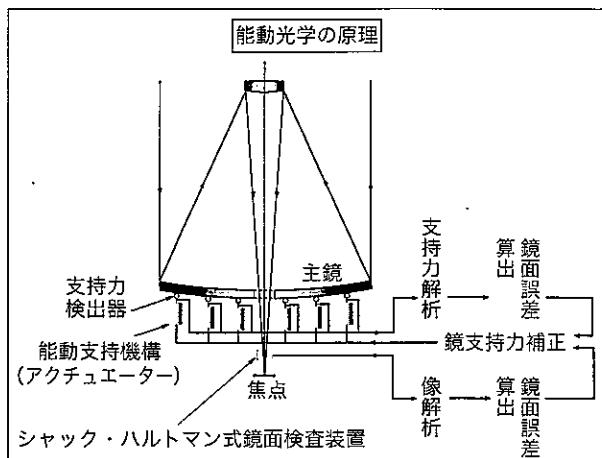


図3 すばる望遠鏡の能動光学

20世紀の人類の偉業の1つと言えるのではないだろうか。

1.3 光波面制御技術

1990年代にもう1つ大きな技術革新があった。それは光の波面を制御する技術の実用化である。日本のすばる望遠鏡などで実現した、主鏡の面形状を実時間制御する能動光学技術により、従来は不可能であった超大型望遠鏡の建設が可能となった（図3）。この技術をさらに発展させて、地球大気の温度揺らぎに起因する光波面の擾乱を実時間測定し、可変形状鏡を用いてこれを補償し望遠鏡の回折限界の解像力を実現する補償光学技術が実用段階に入っている（図4）。さらにはレーザービームで高度90kmの上層大気中のナトリウム層を照射励起

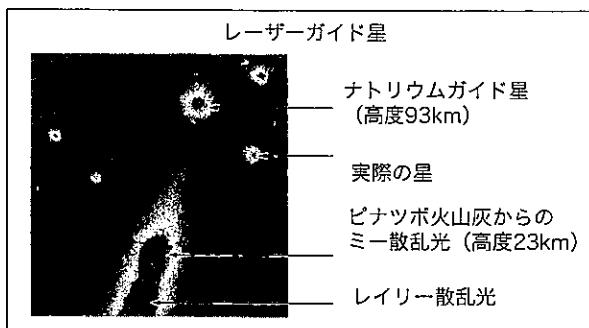


図5 レーザーガイド星

し、レーザーガイド人工星を複数つけて大気擾乱を立体的に補償する構想なども検討されている（図5）。電波で開発された干渉計の手法を光にも適用しようという試みも現実のものとなってきた（西川氏）。将来的には宇宙空間に光の干渉計を打ち上げて、太陽系以外の惑星系を見つけようという構想も検討が進められている。

地上望遠鏡計画もいちばん野心的な構想になると、直径100m高さ130mの能動光学望遠鏡に高度補償光学システムを組み込んで、解像力1ミリ秒角、限界等級38等を実現する構想さえ真剣に議論されている（図6）。このくらいの望遠鏡が2020年頃に実現すると、お隣のアンドロメダ銀河のなかの星をすべて分離して観測することができ、宇宙の果ての最初の超新星爆発をとらえることもできるはずである。

2. 全スペクトル域制覇

2.1 電波天文学

可視光での宇宙観測に限ってみても以上のように、目を見張る発展が続いた20世紀であったが、20世紀後半

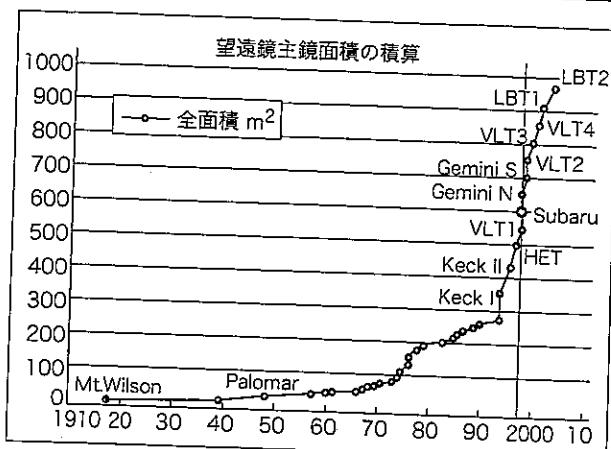


図6 望遠鏡口径増大の歴史

の飛躍的な天文学の発展は、電磁波の観測波長域の大幅な拡大がもたらしたものと言える（図7）。波長域の拡大はまず電波から始まった。1931年にジャンスキーが宇宙から電波がやってくることを発見したのがそのきっかけである。メートル波の受信から始まった電波観測であったが、中性水素原子の発する波長21cmの電波を手がかりに銀河系のなかのガス雲の分布が調べられた。連続波の観測ではパルサーやクエーサーという未知の天体が電波で発見された。さらにはさまざまな原子や分子の放射する電波スペクトルの観測が行われるようになり、より波長の短い電波の観測に主体が移っていった。国立天文台は野辺山の45m電波望遠鏡と5素子干渉計の建設を経て、現在ではミリ波サブミリ波の観測に力を注いでおり、日米欧の国際協力で南米チリの高原に巨大な電波望遠鏡群を建設し、星の生まれるガス領域などの観測

を行うALMA計画が始まろうとしている（長谷川氏）。電波干渉計の技術は、大陸を隔てた電波望遠鏡群や宇宙空間に配備した電波望遠鏡をあたかも1つの望遠鏡として使うことを可能にしている。

2.2 X線天文学

地球の大気に阻まれて地表からでは観測ができない電磁波であるX線、紫外線や赤外線についても気球やロケット、人工衛星に観測装置を搭載することにより、1960年代から天体観測が本格化した。ロッシが開拓したX線天文学は1962年のさそり座X-1の発見がその始まりである。エネルギーの高いX線では高温プラズマからの放射が見える。X線の観測により、白色わい星、中性子星、ブラックホールなどの高密度星の周囲で起こる高温プラズマ現象や、銀河団に広がった希薄な高温プラズマの研究が可能になった。X線の結像には斜入射ブレグ反射を利用した超高精度鏡製作技術、X線の検出にはCCDやガスカウンターなどが用いられる。わが国でも宇宙科学研究所を中心に次々にX線天文衛星を打ち上げ世界最先端の成果を上げている（小山氏）。X線よりさらに高エネルギーのガンマ線を観測する衛星も最近いくつか打ち上げられ、宇宙の果てから未知のガンマ線がやってくることが分かり、新しい謎を呼んでいる。X線より少し波長の短い紫外線についても観測衛星が打ち上げられている。

2.3 赤外線天文学

波長1～5μmの赤外線は地上からでもなんとか観測ができるが、2.2μm以下では地球大気の水酸分子基の

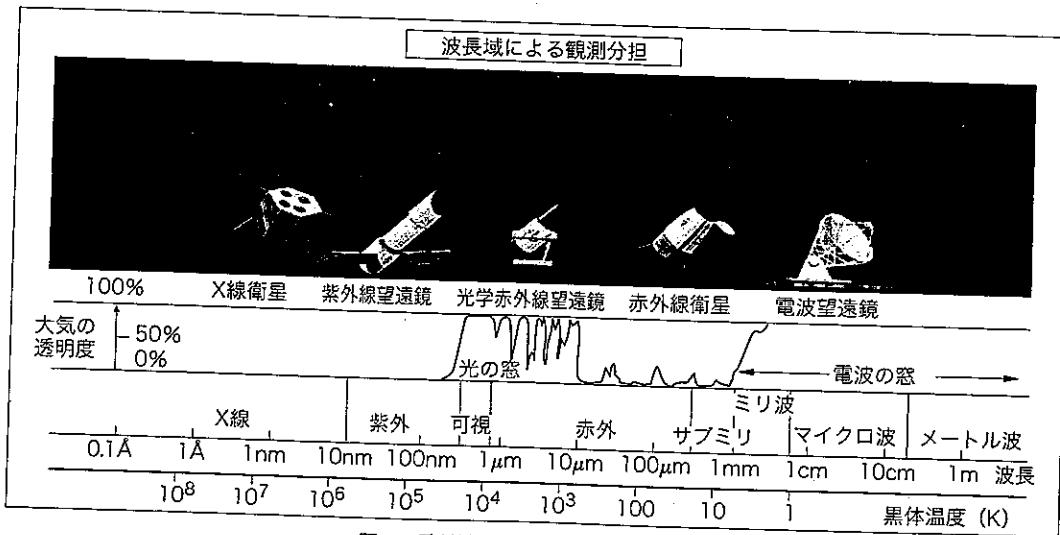


図7 電磁波のスペクトルと観測手段

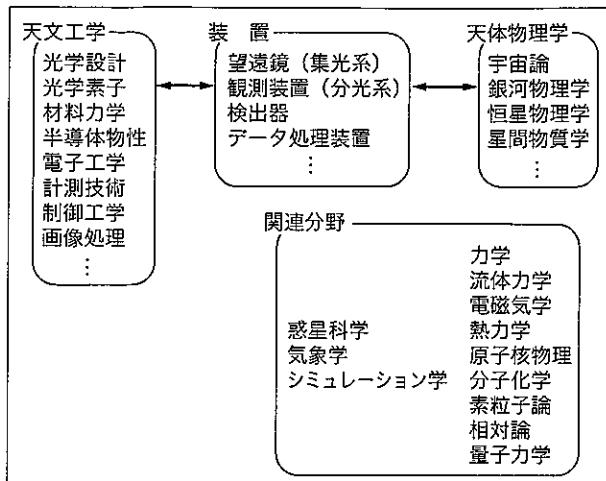


図8 さまざまな技術の総合

輝線放射が強く、 $2.2\mu\text{m}$ 以上では地球大気の熱放射が大きいため校正が容易ではない。地上での観測が難しい波長 $5\mu\text{m}$ 以上の赤外線については、1960年代から気球やロケットに検出器を搭載した観測が試みられたが、本格的には観測は1983年に打ち上げられた赤外線天文衛星IRASにより始まった。わが国もいくつかの赤外線衛星計画を国際協力で行った実績を踏まえ、地球と太陽の重力がつり合うラグランジュ点に冷却赤外線衛星を打ち上げる独創的な計画が練られている（松原氏）。

このように、宇宙を観測する技術は電磁波の広い範囲のスペクトルをカバーできるようになった。電磁波で残っているのは波長 912\AA より短い極紫外線域であるが、この波長域は宇宙空間に存在する水素原子により電磁波が吸収されるため、いずれにせよ宇宙の観測には適しない波長域である。

3. 非電磁波による宇宙観測

宇宙からは電磁波以外にも情報がやってくる。さまざまな高エネルギー粒子として飛来する宇宙線の測定には地球大気による空気シャワー現象を利用した測定システ

ムなどが使われている。東京大学宇宙線研究所でも、超高エネルギー宇宙線の観測施設を建設する計画が練られている。そのほかにも陽子崩壊と太陽ニュートリノの測定をめざして建設されたニュートリノ検出装置カミオカンデが、マゼラン星雲に発生した超新星1987Aからのニュートリノを検出して話題をさらった。さらにパワーアップしたスーパーカミオカンデが建設され、ニュートリノ天文学が始まろうとしている（金行氏）。

中性子連星やブラックホール連星が公転運動エネルギーを失い合体するときや、超新星爆発が非球対称に起こるときには重力波が発生する。重力波をとらえる装置として初期には共振型のアンテナが開発されたが、現在はレーザー干渉計で時空の歪みを直接測る方式の重力波干渉計が建設されつつある。国立天文台の重力波干渉計は連続運転が可能になった初めての装置と位置づけられている。次期装置として宇宙線研究所を中心に計画されている冷却重力波干渉計が動きだす頃には重力波の初めての検出が実現するかもしれない（水島氏）。

さいごに

宇宙をとらえるために必要なとてつもない感度、分解能、精度を要求する天文学は、光応用技術者をはじめとする工学関係者には大変チャレンジングな開発目標を提示する。天文学者の構想力と技術者のアイデアが、当初はとても無理だと思われたこれらの目標をひとつひとつ実現してきた。そこにはさまざまな技術を総合する必要がある（図8）。手前味噌かもしれないが、基礎科学が弱いと言われるわが国だが天文学関連分野では欧米にひけを取らない取り組みがなされてきた。理科離れが心配されている昨今だが日本の技術力は素晴らしいものがあると思う。本特集の以下の記事をお読みいただいて、そういう目的ならこんな技術は使えないだろうかという提案をしてくださる方が現われれば喜びである。