

## 連載

## 望遠鏡 400 年 【6】

## 宇宙空間から観測する望遠鏡

長田 哲也（京都大学理学研究科）

## 1. 大気の外へ

前回の半田さんの記事のように、可視光以外の望遠鏡が 20 世紀後半からの天文学を切りひらくのに大活躍してきた。そして、そのほとんどは電磁波を観測するものであり、電磁波はその波長によって地球大気との相互作用のしかたが異なり、地上まで届かずに減衰してしまうものが多い（前回の「図 4 大気の窓」を参照されたい）。となると、天体からのさまざまな波長の電磁波をとらえるためには、宇宙空間からの観測が不可欠となる。

大気透過率が良い波長であっても、第 3 回の臼田・佐藤さんの記事のように、大気のゆらぎが可視光の像をぼやけさせてしまうならば、これもまた宇宙空間からの観測が有利ということになる。大気ゆらぎではなく、主鏡の大きさで決まる回折限界までの解像度が得られれば、口径 2.4m でも可視光で 0.05 秒角の分解能が達成できる。そこで、赤外線や X 線ではもちろん、可視光などの波長域でも、1) 大規模なものが打ち上げにくいとか、2) 観測開始後のメンテナンスが不可能であったり難しかったりするとか、3) そもそも最新技術を気軽に試せないとかいった不利はあるものの、それを補ってあまりある成果を生み出している。以下では、宇宙空間から観測を行なう望遠鏡についていくつかのトピックスをまとめてみた。まず地上にも届く可視光や電波、そして波長が短い高エネルギー側、最後に波長が長い低エネルギーの赤外線側の順である。

なお、上空からの観測という意味では、航空機や気球からの観測もあるので、ここで短くふれておこう。X 線では、数十 km 上空に上がっても一部の高エネルギーのもの以外検

出することができないので、ロケットや人工衛星からの観測がほとんどである。しかしながら、赤外線波長域では地上付近数 km の大気だけが問題になる場合もあるので、高さ 10km 以上を飛ぶ飛行機や、30km 以上まで上がる気球からの観測が多く成果を出してきた。飛行機からの観測としては、「KAO」（カイパー空中天文台；1905 年にオランダに生まれ、シカゴ大・アリゾナ大で研究し、太陽系のカイパーベルトの名のもとにもなった Gerard Kuiper にちなんで名づけられた）という C-141 ジェット貨物機を改造して口径 91cm の赤外線望遠鏡を搭載したものが有名である。1974 年から活躍し、1995 年に役目を終えるまで、天王星の輪の検出などさまざまな赤外線観測を行なった。その後継機としては、2009 年にファーストライト予定の口径 2.5m 望遠鏡「ソフィア」（こちらはボーイング 747SP 旅客機を改造）がある。また、気球の赤外線望遠鏡も、三陸・テキサス・オーストラリアで放球して、高度 37km 付近から、銀河系にひろがる一階電離の炭素の遠赤外線輝線[C II]ラインを検出した宇宙科学研の「BICE」のシリーズの観測など、多くの成果が出ている。

## 2. 可視光や電波の望遠鏡

宇宙空間から観測する望遠鏡のなかで、もっとも一般に親しまれているのは、「HST」（ハッブル宇宙望遠鏡；宇宙膨張の法則で有名な Edwin Hubble にちなんで命名された）であろう。HST は 1990 年 4 月 25 日にスペースシャトルによって地表から 600km の軌道に投入された。97 分で地球を一周する低い

軌道に乗せられた理由は、空飛ぶ天文台として、何度も何度もメンテナンスのために宇宙飛行士が訪れて修理や観測装置の交換（サービスミッション）を行なうためである。実際、スペースシャトルが 93 年 12 月、97 年 2 月、99 年 12 月、02 年 3 月に訪れ（SM1, 2, 3A, 3B）、まず主鏡の球面収差を補正する光学系（COSTAR）と広視野カメラ 2（WFPC2）を取り付け、次に分光器（STIS）と近赤外線観測器（NICMOS）を載せ、第 3 期では軌道維持に重要なジャイロを交換して新しいカメラ（ACS）と NICMOS のための冷凍機を装着した。次のサービスミッション 4 は 2009 年初めに予定されていて、広視野カメラ 3（WFC3）と紫外線分光器（COS）を搭載する。そもそもの計画では、5 年ごとに地上に持って帰って修理し、軌道上でもその半分の時期に修理をするという予定だったという。結局、軌道上で 3 年ごとのメンテナンスとなったわけだが、2003 年のスペースシャトルコロンビアの事故のあと一時は HST の退役も検討されたように、ここしばらくサービスミッションが実施されていない。

HST の歴史は、1946 年に天文学者スピッツァー Lyman Spitzer が地球外からの観測の優位を主張する論文を書いたことに始まる。彼は 65 年に宇宙望遠鏡の科学目的を策定する委員長に任命される。68 年の NASA の計画では 79 年打ち上げの口径 3m 望遠鏡であったが、予算削減による計画中止やヨーロッパ宇宙機関 ESA との協力による復活などを経て、ハッブルの名を冠した望遠鏡として 83 年に打ち上げ予定が設定された。さらに、開発の遅延やスペースシャトルチャレンジャーの事故などのため、90 年の打ち上げとなった。

口径 2.4m の主鏡は 81 年末に米国パーキンエルマー社で完成した。コーニング社の超低熱膨張ガラス製で、10nm の精度まで磨かれ、

アルミの反射膜・ $MgF_2$  の保護コートがなされている。光学系は、カセグレン型で収差を補正するリッチークレチエン方式、グラフィトエポキシのフレームに支えられ、上述のように頻りに太陽光と地球の影を経験する軌道のため温度変化を少なくする絶縁材とアルミシエルに包まれている。ところが、打ち上げ後すぐに主鏡に問題があることが発覚した。研磨時のテストに用いられたヌルレンズの設定位置が 1mm あまり間違っていたために、正しい形状よりも鏡面のへこみが  $2.3\mu m$  足らず、球面収差が発生し、点像が 1 秒角以上の半径にひろがっていたのである。この HST の「ピンボケ」は社会的にも、ジョークのネタにされるなど、大きな影響を及ぼした。しかし、間違った形状にとは言え、可視光の波長の数十分の一までの精度に磨き上げられた主鏡であれば、それを補正することは必ずできる。逆向きの収差を作り出す光学系が作られ、第 1 回のサービスミッションで装着されて見事な像を得たのであった。

現在の観測装置は WFPC2、ACS、STIS、NICMOS である。WFPC は 4 つのカメラから成り立っていて、L 字型の 3 つの広視野（Wide Field）カメラと 1 つの高解像度（Planetary）カメラが作る画像は、独特の

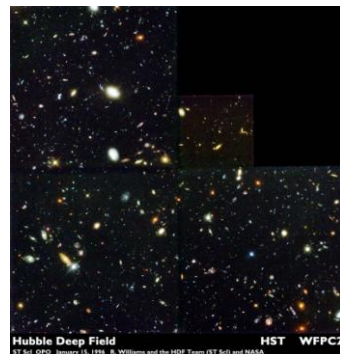


図 1 ハッブル深宇宙フィールド

独特の形の視野に数多くの遠方銀河が散在する。ハッブル宇宙望遠鏡のウェブページ (<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1996/01>) より

視野の形になり、かつては HST の画像の特徴だった (図 1 や図 2 を参照)。その CCD の感度を上げ、広視野チャンネルでは画素数を増やして 1600 万ピクセルとして、サーベイ観測の効率を 10 倍にしたのが ACS である。その広視野部 (WFC) に加え、コロナグラフなどを持った高解像度 (HRC)、波長 170nm までの極紫外線 (SBC) と 3 つのチャンネルを持ち、02 年 3 月のサービスミッションから 07 年まで、最も頻繁に使われた観測装置だったが、現在はエレクトロニクスの不調で極紫外線チャンネルしか使われていない。STIS は波長 115nm から 1000nm までの分光器である。3 つの検出器が使われており、2 種のマイクロチャンネルアレイを使った紫外部と CCD を使った紫外・可視・近赤外部である。NICMOS は近赤外線撮像と分光のできる装置。6 万ピクセルの水銀カドミウムテルル検出器を持ち、当初は 104kg の固体窒素で、現在は冷凍機で、検出器を冷却して波長 2.4  $\mu\text{m}$  までの赤外線の観測ができる。97 年の搭載から 99 年の固体窒素の枯渇まで、次いで 02 年のサービスミッションから現在まで活躍している。

とは言え、NICMOS は現在最先端の赤外線アレイに比べると画素数がきわめて少なく、また STIS も 2004 年に電源部の故障で使われなくなっており、主要部が故障した ACS とともに、現在の HST は満身創痍の状況である。そこで、2009 年のサービスミッション搭載が予定されている広視野カメラ 3 (WFC3) と紫外線分光器 (COS) に期待がかかる。WFC3 は波長 200nm から 1000nm までをカバーする部分と、100 万ピクセルで 1.7  $\mu\text{m}$  までカバーする近赤外部の 2 チャンネルを持っている。COS のマイクロチャンネルプレートと光学系も STIS のものに比べて大きく改善されている。

HST を使った成果として第一にあげられ

るのは、その高解像度撮像によっておとめ座銀河団の銀河の中に多数のセファイド型変光星を見つけ、その光度周期関係から距離を求めて、宇宙膨張の係数つまりハッブル定数を決めたことであろう。2001 年に発表された値は  $72 \pm 8$  (km/s)/Mpc となっており、その後の WMAP 衛星の観測などとも整合している。さらに、その膨張が徐々に加速しているとの証拠が、HST をはじめとする多くの望遠鏡を使った、超新星の明るさの観測から得られてきた。また、空の一角をじっと見続けて暗い暗い遠方の銀河を撮像するプロジェクトもインパクトを与えた。1) 1995 年の 12 月に、おおぐま座の 6 平方分角の領域を WFPC2 を使って波長 300nm、450nm、606nm、814nm で数十時間ずつ観測して得られたハッブル深宇宙フィールド (図 1)、2) 98 年 10 月のきょしちょう座の観測によるその南半球版、そして 3) 2003 年から 04 年にかけて、ろ座の 11.5 平方分角を ACS で 11.3 日間、NICMOS で 4.5 日間かけて観測したハッブル超深宇宙フィールドは、他の波長での観測や地上の大望遠鏡での分光観測などと組み合わせられて、

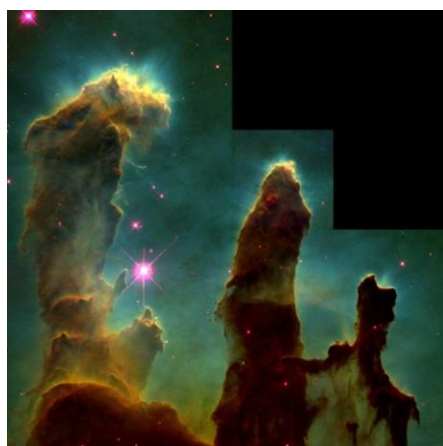


図 2 わし星雲 M16

図で右上方向にある O 型星からの紫外線により、あたかも蒸発しつつあるように見える 3 列の暗黒星雲。ハッブル宇宙望遠鏡のウェブページ

(<http://www.spacetelescope.org/>)

images/html/opo9544a.html)より

遠方の宇宙に関する情報を与え続けている。

また、銀河系内の星形成領域の画像も見事だった。図 2 に示した M16 わし星雲の中の暗黒のピラーはこの図で右上にある早期型星からの強烈な輻射によってあたかも蒸発しつつあるように見え、やはり赤外線などの観測と組み合わせて、次世代の星の形成に関する示唆を与えるものとなった。同様に、オリオン大星雲をバックにたくさんの原始惑星系円盤が淡くあるいは黒く写っている画像や、ハービック・ハロー天体に付随するさまざまなジェット画像(図 3)は、太陽と同じぐらいの質量の若い星が生まれつつある姿を明らかにした。また、太陽系内の天体も美しくとらえており、94年のシューメーカー・レヴィー彗星の木星への衝突も高解像度の画像が得られた。

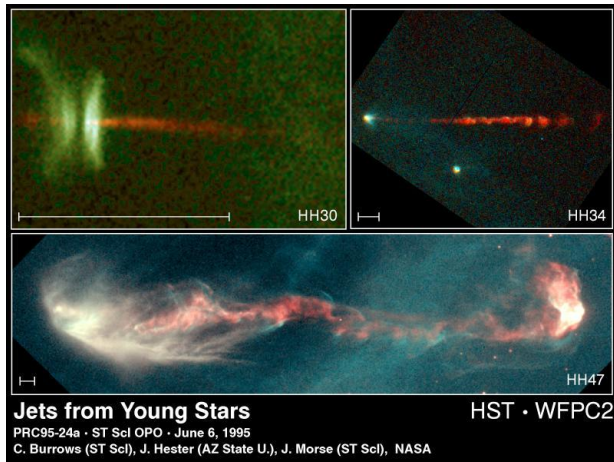


図 3 前主系列星からのジェット  
ハッブル宇宙望遠鏡のウェブページ  
(<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/24/image/a>)より

さて、可視光と同様に地上まで届く電磁波である電波ではあるが、干渉計として長い基線をとって高い分解能を得るために、宇宙空間が利用されている。長距離へだてた複数の望遠鏡を使って、回折限界から来る解像度の

限界を細かくしていく超長基線干渉計(VLBI)は、地球の直径で壁に当たるわけだが、それを克服するために人工衛星を用いるのである。1997年に打ち上げられた衛星「はるか」を使ったVSOP計画は、世界各国の電波望遠鏡とともに観測が行なわれ、クエーサーの研究に寄与した。次世代のVSOP-2計画も2012年打ち上げを目指して進行中である。

### 3. X線望遠鏡

現在運用中の代表的なX線天文衛星は、わが国の「すざく」、米国の「Chandra」、ヨーロッパの「XMM-Newton」である。すざくは2005年7月に内之浦から打ち上げられた衛星で、X線の精密なスペクトルを特徴とする。チャンドラは1999年7月にスペースシャトルコロンビアで打ち上げられ、高解像X線画像を特徴とする。XMMニュートンは99年12月に打ち上げられ、大口径のミラーによる高感度を特徴とする。現在、これら3つの衛星が特色を出し合って相補的にX線天文学の観測的研究を進めている。

X線天文学の歴史は、前回の半田さんの記事にあるように、1962年のロッシやジャコーニらによるロケット観測から始まる。多くの天文学者が「何も受からないさ」と言ったにもかかわらず、小さなガイガー計数管を搭載して大気圏外に送り出したのだった。続いて、70年12月に米国が最初の衛星SAS-1をケニヤ基地から打ち上げ、このX線天文衛星は、スワヒリ語で自由を意味する「UHURU」と名づけられた。全天のX線天体のサーベイを行ない、連星や超新星残骸、セイファート銀河、銀河団などからのX線を検出して73年に役目を終えた。次いで、74年から80年まで英国の「Ariel V」と「SAS-3」が活躍する。X線バースト天体やX線新星などを発見している。77年から79年にかけては大規模な衛

星「HEAO-1」が 0.2keV から 100MeV の広いエネルギー範囲でサーベイした。そして、かすめ入射鏡（半田さんの記事参照）を用いて像を撮ることのできる HEAO-2 が 78 年 11 月に打ち上げられ（「Einstein」と名づけられた）、数秒角の解像度で X 線天文学に革命をもたらした。その後、ヨーロッパの「EXOSAT」などが登場するが、米国の衛星はなく、しばらくの間は日本の独壇場として「はくちょう」「てんま」「ぎんが」が活躍する。90 年代に入ると、2.5keV までの低エネルギー領域に限られてはいるものの、ヨーロッパの「ROSAT」が 90 年 6 月打ち上げから 99 年までの 9 年間観測し、15 万天体におよぶ X 線天体のカタログを作る。CCD 検出器を持つ初めての衛星「あすか」も 93 年に登場し、10keV までのエネルギー範囲で精度の良い分光を行なって、活動的銀河核からの鉄の輝線がブラックホール周囲の強い重力場で波長方向に広がっていることを見出すなど、2001 年まで活躍した。なお、太陽観測の X 線衛星では 91 年打ち上げの「ようこう」と、現在運用中の「ひので」の成果がある。

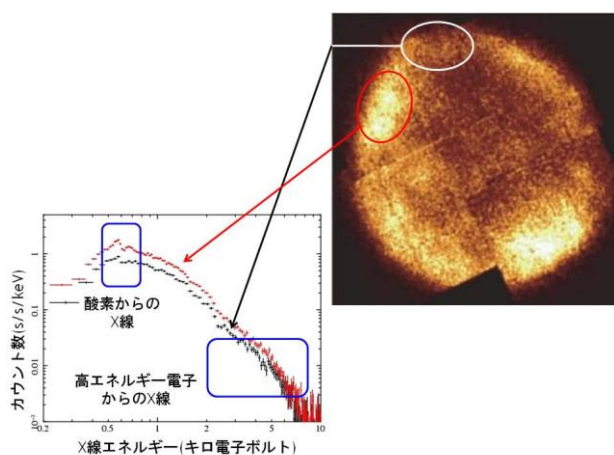


図 4 超新星残骸 SN1006 の X 線画像とスペクトル

すざく望遠鏡のウェブページ

(<http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/flash/2008/0605/>) より

現在の X 線望遠鏡すざくの成果から、超新星残骸 SN1006 の画像を示す (図 4)。藤原定家が記録を調べさせて明月記に記した 1006 年の超新星爆発の千年後の姿が、この天体だとされている。X 線の観測から、今も秒速 3000km で膨張するプラズマの中で宇宙線粒子が加速されていると考えられる。また、図 5 は、チャンドラの成果から、かに星雲のパルサーのまわりのリングの画像である。

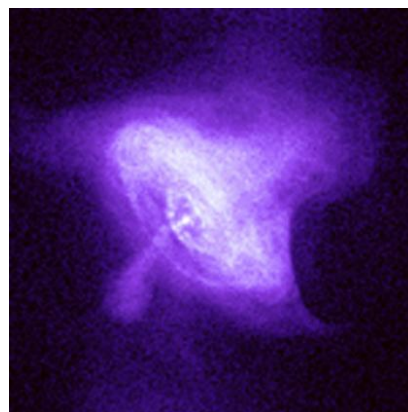


図 5 かに星雲のパルサーのまわりのリング  
チャンドラ望遠鏡のウェブページ  
(<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/24/image/a>) より

#### 4. 紫外線やガンマ線の望遠鏡

HST の分光器も紫外線をとらえることができるが、それ以前から紫外線分光の衛星が活躍していたし、HST と平行していくつかの衛星が成果を出している。1972 年に打ち上げられ 81 年まで観測した OAO-3 は「コペルニクス」の名を与えられ、数百の星の高分解能のスペクトルを測定した。次に 78 年から 96 年まで運用された衛星が「IUE」である。口径 45cm のリッチークレチエン光学系をもつ IUE は、波長 115nm から 320nm のスペクトルをとり、木星のオーロラから銀河間空間の組成計測まで、実にさまざまな成果をもたらした。99 年からは「FUSE」衛星が HST の観測できない 120nm 以下の波長の極紫外域

のスペクトル観測を行なってきた。また、03年からは「GALEX」衛星が波長 135nm から 280nm で全天サーベイをして銀河進化を研究している。

ガンマ線をとらえる望遠鏡としてはコンプトン・ガンマ線天文台「CGRO」があった。1991年から2000年まで、広視野望遠鏡の部分(EGRET)が271個のガンマ線源を発見し、また、搭載されていた全天モニター観測装置(BATSE)によって約2700回のガンマ線バースト現象を記録した。CGROは、HST、チャンドラ、スピッツァーとともに、NASAの「グレート・オブザーバトリー」プロジェクトを構成していた。その後、2000年打ち上げの「HETE-2」衛星、02年打ち上げのヨーロッパの「INTEGRAL」衛星、04年打ち上げの「Swift」衛星がガンマ線バースト現象を全世界に報告し、他の望遠鏡による追観測を促している。今年6月に打ち上げられた「フェルミ」は、CGRO搭載のEGRETやBATSEよりも高性能なLATとGBMを擁し、高エネルギー天体やガンマ線バーストの謎にせまることが期待されている。

## 5. 赤外線望遠鏡

それまでに地上からの近赤外線観測や、ロケットからのサーベイ観測はあったものの、赤外線天文衛星「IRAS」が中間赤外線から遠赤外線の窓を開いたと言って良いだろう。1983年1月に打ち上げられ、波長 $8\mu\text{m}$ から $120\mu\text{m}$ までの赤外線を4つのバンドに分けて全天のサーベイ観測を行なった。液体ヘリウムが枯渇するまでの10か月の間に、25万個の天体のIRAS点源カタログと、微弱な17万個の赤外線天体のカタログとを作った。A0型のスペクトルとして基準にもなっていたベガやその他いくつかの主系列星のまわりにダストの雲を発見し、銀河系の中には薄い雲の

ように低温のダストがひろがっていることを見出し(infrared cirrus 赤外線巻雲と名づけられた)、星形成が活発なために遠赤外線できわめて明るい銀河を多数発見した。続いて、サーベイ観測だけではなく天文台型の観測ができるヨーロッパの「ISO」衛星が1995年から98年まで活躍した。日本も運用に協力し、晩期型星のまわりのダストや、銀河系中心部まで見通した時に見えるドライアイスの吸収などの検出を行なった。

そして現在軌道にあるのが米国の「スピッツァー宇宙望遠鏡」(HSTの項でふれたSpitzerの業績をしのいで、一般公募で名づけられた)と、わが国の「あかり」である。スピッツァーは2003年8月に打ち上げられ、地球の公転から少しずつ遅れる公転軌道に投入された。巨大な熱源である地球から遠ざかることで冷却の効率が上がり、赤外線の観測に都合が良い。

口径 $85\text{cm}$ の主鏡はベリリウムという軽量金属で作られ、望遠鏡全体は $360\text{kg}$ の液体ヘリウムで冷却されている。スピッツァーは3つの精巧な観測装置を持っている。撮像器IRACは $3.6\mu\text{m}$ から $8\mu\text{m}$ の4バンドを同時に観測できる。分光能力も少しある観測装置MIPSは $24, 70, 160\mu\text{m}$ のバンドを持ち、分光器IRSは4部分からなり、波長 $5\mu\text{m}$ から $40\mu\text{m}$ をカバーする。

一方、あかり衛星の口径 $68.5\text{cm}$ の主鏡、やはり軽量にするためにこちらはシリコンカーバイト製で、鏡筒を支えるトラスがベリリウム製である。液体ヘリウムとともに機械式冷凍機も積んでいて、06年5月から07年8月まで液体ヘリウムで冷却しての観測、ヘリウムがなくなった後は冷凍機だけで冷やす観測を続けている。米国のように遠方まで持つて行くことはできないが、北極と南極を結んだ昼と夜の境目に沿って地球の周りを100分

で周回する太陽同期軌道に投入された。これによって、地球の公転にしたがって全天をサーベイするわけである。観測装置としては、遠赤外線サーベイヤーFISが  $50\ \mu\text{m}$  から  $180\ \mu\text{m}$  を4つのバンドでカバーし、赤外線カメラIRCが  $1.7\ \mu\text{m}$  から  $27\ \mu\text{m}$  を3バンドで撮像し、プリズムやグリズムでの分光観測を行なう。

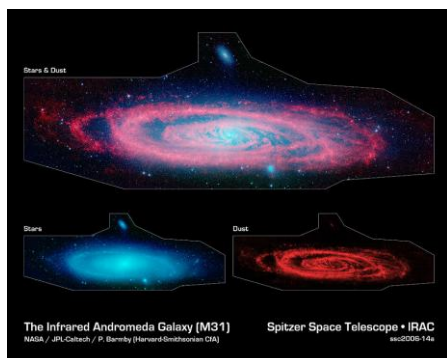


図6 アンドロメダ銀河の古い星と星間ダスト  
古い星は波長  $3.6\ \mu\text{m}$  と  $4.5\ \mu\text{m}$  の撮像；左下の成分。星間ダストは波長  $8.0\ \mu\text{m}$  の撮像；右下の成分。

スピッツァー望遠鏡のウェブページ

(<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/mediaimages/index.shtml>)より

図6は、スピッツァーの撮影したアンドロメダ銀河である。古い星が比較的のっぺりと分布しているのに対し、星間ダストが渦状に局在している様子が良くわかる。



図7 大マゼラン雲の「あかり」画像  
あかりのウェブページ

(<http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/>

[Outreach/results/results.html](http://Outreach/results/results.html))より

あかりの成果としては図7をあげよう。大マゼラン雲全体にわたって、誕生した星が近傍のダストを温めている様子が鮮やかにとらえられている。

## 6. その他特色ある望遠鏡

マックスプランク研究所のホワイト教授 Simon White が2006年の論文の中で、豊かな宇宙の多様な姿を明らかにする望遠鏡の代表として HST をあげ、その好対照としてあげたのが「WMAP」衛星である。WMAP は宇宙背景放射を探るためだけに企画された衛星で、「COBE」衛星(1989年から約4年間運用)の後継機である。COBE は宇宙背景放射が絶対温度  $2.73$  度の黒体放射に一致することを明らかにし、わずかな非等方性も見出して、John Mather と George Smoot に2006年ノーベル物理学賞をもたらした。WMAP は2001年に打ち上げられ、宇宙論のパラメータをきわめて正確に決定しつつある。HST がさまざまな美しい画像を提供してアウトリーチにも貢献するのに対して、WMAP の生み出した画像と言えは背景放射の非等方性を示すものだけ、あまり一般受けのするものではない。そして、そのゆらぎの角度依存性を球面調和関数の成分に分解して宇宙開闢時の物理定数を決めようと言うわけである。もちろん HST の行き方も WMAP の行き方も、両方とも重要であろう。

WMAP は、上記のスピッツァーに少し似て、やはり地球から遠く離れた軌道にある。WMAP は月の引力を利用し、スイングバイを行なった後3か月かけて  $150$  万 km 離れたラグランジュ点に向かい、そこにとどまって、観測を続けている。ここは太陽・地球・月の引力が作る安定な点であり、特にこの第2ラグランジュ点ではこれらの天体が一直線に見えるので、それに背を向け、邪魔されない観

測ができる。観測波長は数 mm の程度で、周波数で言うと 22GHz から 90GHz を 4 つのバンドに分けている。軸外しグレゴリアンの光学系で、主鏡は 1.4m×1.6m、各波長で 0.93 度から 0.23 度までの分解能となる。2.2 分に一度回転しつつ、1 時間に一度の歳差運動をして、さらに地球とともに公転していくことで全天をスキャンする。2006 年にまとめられた 3 年分のデータ発表に次いで、今年の 3 月には 5 年分のデータを蓄積した結果が公表された。これによると、宇宙の構成成分は 72% がダークエネルギー、23% がダークマターで、原子など通常の物質はわずか 4.6% であるという。上述のハッブル定数や超新星観測からの宇宙膨張の加速のデータとともに、宇宙のパラメータを正確に決めるため、さらに 09 年までの観測が予定されている。

このように目的をしばって大きな成果をあげた例は、他にもたとえば ESA の「ヒッパルコス」衛星があった。1989 年に打ち上げられ、当初予定されていた軌道に投入することに失敗しながらも、巧みなデータ処理で 12 万個の星の位置を当初の予定どおり、いやそれよりも良い 1 ミリ秒角の精度で決めることをやりとげ、年周視差などの位置天文学情報を決定したプロジェクトである。

将来に向かってさまざまな宇宙望遠鏡が計画されている。天文台型で多機能のものもあれば、目的をしばって一点突破のものも多い。地上の各種望遠鏡との連携のもと、これからも数限りない新たな知見をもたらしてくれることを願っている。

## 文 献

- [1] 現代の天文学 第 15～17 巻 宇宙の観測 1～3 (日本評論社)

長田哲也

### 【付記 編集委員長より】

私たちは 400 年前に望遠鏡を手に入れてから宇宙を眺める第 2 の眼として活用してきました。その結果、宇宙はそれまで考えられていたよりずっと大きくかつ古いことがわかりました。またそれまで全く知らなかった天体现象が多数発見されました。

今や望遠鏡は地球を飛び出し、宇宙空間から昼夜天候に関わらず、観測が行われています。ようこうによる「怒れるアポロン」の姿、HST による「虚像の銀河」像、WMAP による「太古の宇宙のゆらぎ」などは私たちに強い衝撃をもたらしました。

次のステップは何でしょうか。天体の成分を直接採集すること？いやそれもすでに始まっています。

本年度の連載「望遠鏡 400 年」はこれで終わります。6 人の執筆者の皆様、どうもありがとうございました。来年は世界天文年についての連載記事にご期待ください。