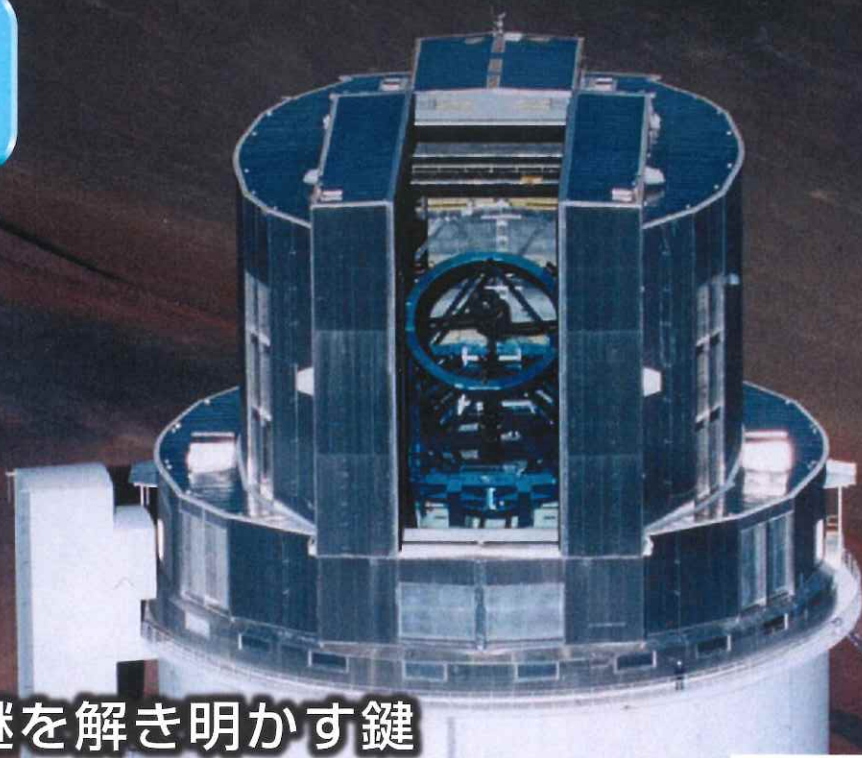




宇宙の謎を解き明かす鍵

進化する天体望遠鏡

天文学は、最も古くからあった科学の1つといわれる。宇宙にロマンを感じ、宇宙の謎を探る研究者たちにとって、望遠鏡は不可欠な道具である。最近の天文学の飛躍的な進歩を支えてきたのは、観測技術の進歩にほかならない。宇宙のより遠くを、より精密に観測するために生まれてきた新世代望遠鏡を、精密さと頑丈さを兼ね備えた鉄鋼構造が力強く支えている。



「まるで火星の表面のよう」ともいわれるハワイ島・マウナケア山頂に建設された「すばる」望遠鏡。周囲には世界各国の大型望遠鏡が競って立ち、地球上で最も天体観測に適した場所の1つである。

見えないものを見つける道具、天体望遠鏡

2002年8月、東北大学、国立天文台などの共同研究チームが、宇宙が生まれてからわずか10億年しかたっていないころの、星が爆発的に誕生している銀河を発見した、と発表した。続く観測により、この銀河から宇宙空間へ高速に噴き出す水素ガスの存在が明らかになった。ガスの噴出は、銀河内部で星が活発に形成されているためと考えられている。宇宙は今からおよそ150億年前に誕生したと考えられており、高速に水素ガスを噴出しているこの銀河までの距離は140億光年となり、これまでの観測の中で最も遠方のものである。この光をとらえたのは、現在世界最高レベルの能力を持つ、日本の「すばる」望遠鏡である。

現在の天文学では、宇宙は「無」の状態から量子的効果によって生まれた、とされている。素粒子のように小さい量子宇宙は、「インフレーション」と呼ばれる急激な膨張が始まり、

その終了のころに「真空のエネルギー」が物質エネルギーとして解放され、宇宙は物質とエネルギーに満ちた火の玉宇宙（ビッグバン）となった。そして火の玉宇宙が膨張し温度が下がる過程で、銀河や星が生まれた。このような宇宙創生のシナリオの解明は、最近20年の間に急速に進歩した研究分野である。

このような宇宙創生の解明に向けた研究の進歩には、天体や電磁波の観測の飛躍的な進歩があった。天文学の観測対象は、宇宙空間にある星やさまざまな物質が放つ電磁波などである。私たちはそれが発生した宇宙空間に実際に行くことができない。宇宙からの信号ををできるだけ鮮明にとらえ、これに基づいてさまざまな仮説を導き出したり、仮説を裏付けたりする。

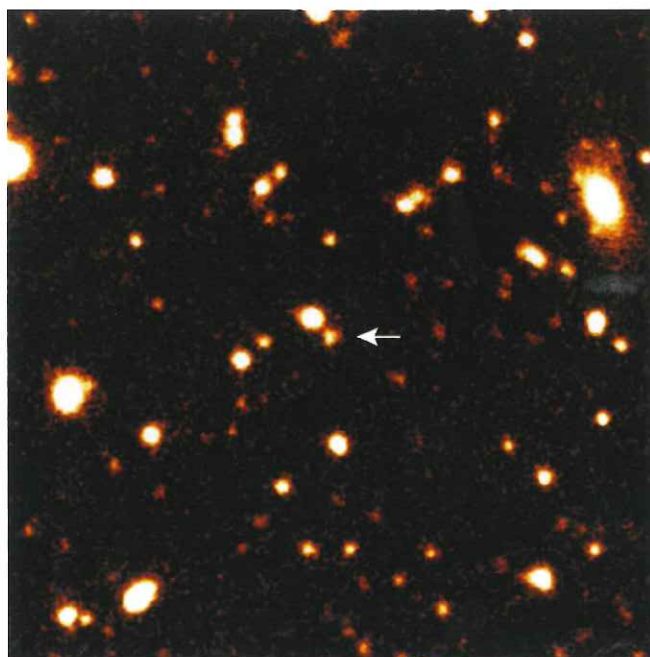
昔の天文学は人間の眼で見える太陽、月、星が対象だった。しかし、望遠鏡が発明された後の天文学は、宇宙空間に存在する、人間の眼で見えないものを見ようとする学問として、大きく発展することになったのである。

次々に考案された新型望遠鏡

1609年、ガリレオ・ガリレイが世界で初めて望遠鏡による天体観測を行った。彼は、月のクレーター、木星の4つの衛星などを観測し、さらに天の川が光の帯でなく星の集まりであることを発表した。このとき使用された望遠鏡は、筒の片端に凸レンズ、もう片端に凹レンズを付けた屈折望遠鏡だった。アイザック・ニュートンは、倍率を上げるほど筒を長くしなければならない屈折望遠鏡に対して、1668年、レンズに替わり凹面鏡を使用した反射望遠鏡を製作した。ニュートンの反射望遠鏡は、屈折望遠鏡で現れる色収差(レンズを通った光が、波長によって異なる場所に焦点を結ぶため全体の像がぼけて見える現象)の問題も解決した。この仕組みが現在の反射望遠鏡に受け継がれている。

1781年、ウィリアム・ハーシェルは、当時世界最大の口径4フィート(約1.2m)、焦点距離40フィート(約12m)の反射望遠鏡で星の方向分布を観測し、天の川銀河の構造を推測した。その後、望遠鏡の能力は次第に向上し、太陽系や天の川銀河の構造が次第に明らかになっていった。

1929年、エドウィン・ハッブルは「銀河の赤方偏移(コラム「光でわかる星の性質」参照)はその銀河までの距離に比例する」という、いわゆるハッブルの法則を発見した。彼は、口径約2.5mの望遠鏡を使い、銀河内の星の観測によって多くの銀河までの距離を測定し、また銀河のスペクトルに見られる赤方偏移を測定した。ハッブルの法則は、遠くの銀河ほどより速い速度で



「すばる」望遠鏡がとらえた高赤方偏移の星形成銀河(LAE J1044-0130)
2002年5月撮影

遠ざかっており、宇宙が膨張していることを示したもので、宇宙創生の謎に迫る大発見となった。

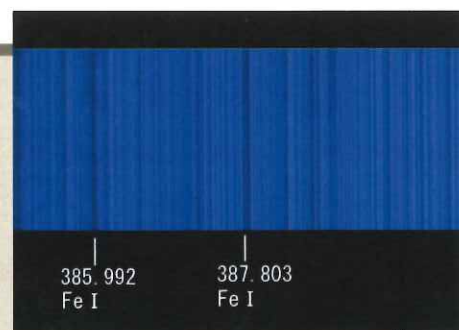
より口径の大きい望遠鏡を求めて、ジョージ・エラリー・ヘールは1928年に直径5mの望遠鏡建設を計画、推進した。当時の技術では無理とさえ言われた鏡の製作など、建設は困難を極めたが、ヘールの死後、1948年、アメリカ・サンディエゴ市郊外のパロマ山に望遠鏡が完成した。

【コラム】

光でわかる星の性質

太陽光の可視スペクトル(左)と鉄の吸収線(右)
(資料提供: 国立天文台 岡山天体物理観測所)

The Sun



プリズムに太陽光を通すと、虹の七色に分かれる。このように波長別に分解された光を「スペクトル」と呼ぶ。元素はそれぞれ特有の波長を吸収するので、スペクトルの中では元素の存在により吸収された波長の部分が弱められ黒く見える。太陽光スペクトルを見ると、吸収線的位置、幅や濃さにより、含まれる元素の種類、温度や量もわかる。こうして、遠い宇宙からの光を頼りに、そこに存在する元素を判断できる。

星の運動は、ドップラー効果から測定することができる。ドップラー効果は、移動する音源が近づいてくると振動数が増して高音となり、遠ざかっていくと振動数が減って低音となる現象である。光も波の一種であり、光源の移動はスペクトル線での波長の位置の移動と

なって現れる。スペクトルの中で、波長の長い赤色の方に移動する(赤方偏移)と光源は遠ざかっていることになり、波長の短い紫色の方に移動する(青方偏移)と近づいていることになる。

星の距離は、三角測量と同じ方法で行う。地球の公転軌道半径を基準となる一辺として、異なる2点から見える視差から距離を計算する。さらに遠い星の場合は、光のエネルギーは距離の2乗に反比例して弱くなることを利用し、その星の絶対光度と見かけの光度との比較から計算する。1つの星のデータを得ると、それを手がかりにして次の星を調べるといのように、天文学者たちは宇宙からの情報を獲得していったのである。

日本が誇る大型望遠鏡「すばる」

1970年代になると、米国、ヨーロッパ、ソビエトなどで3m以上の望遠鏡が建設された。引き続き1990年代を目指した新世代望遠鏡建設の議論が起こった。米国のケック望遠鏡計画(36枚の鏡を合せた口径10mの主鏡を持つ望遠鏡2基を建設する計画)、米国、イギリス、カナダ、チリ、オーストラリア、ブラジル、アルゼンチンが参加するジェミニ計画(ハワイとチリの2箇所に口径8.1mの望遠鏡を建設する計画)、ドイツ、フランス、イタリア、オランダ、スイス、ベルギー、スウェーデン、デンマークが参加するVLT (Very Large Telescope) 計画(口径8.2mの望遠鏡4台を建設する)などが開始された。

この時期の日本には、岡山観測所の口径1.88mの望遠鏡のみであった。世界の新世代望遠鏡の流れから取り残されかけていた日本が、一気に世界のトップを目指して取り組んだのが「すばる」望遠鏡であった。

「すばる」は、可視光と赤外線用の口径8.2mの反射望遠鏡である。地球上で宇宙観測に最も適した場所の1つといわれているハワイ島・マウナケア山頂に設置されている。

1991年からマウナケア山頂でのドーム建設工事、米国での

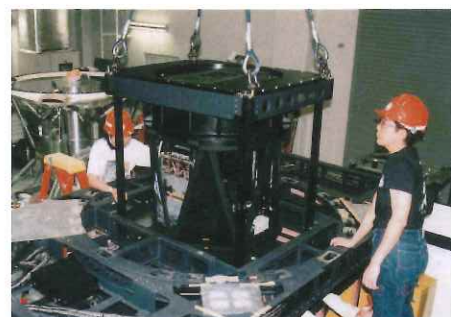
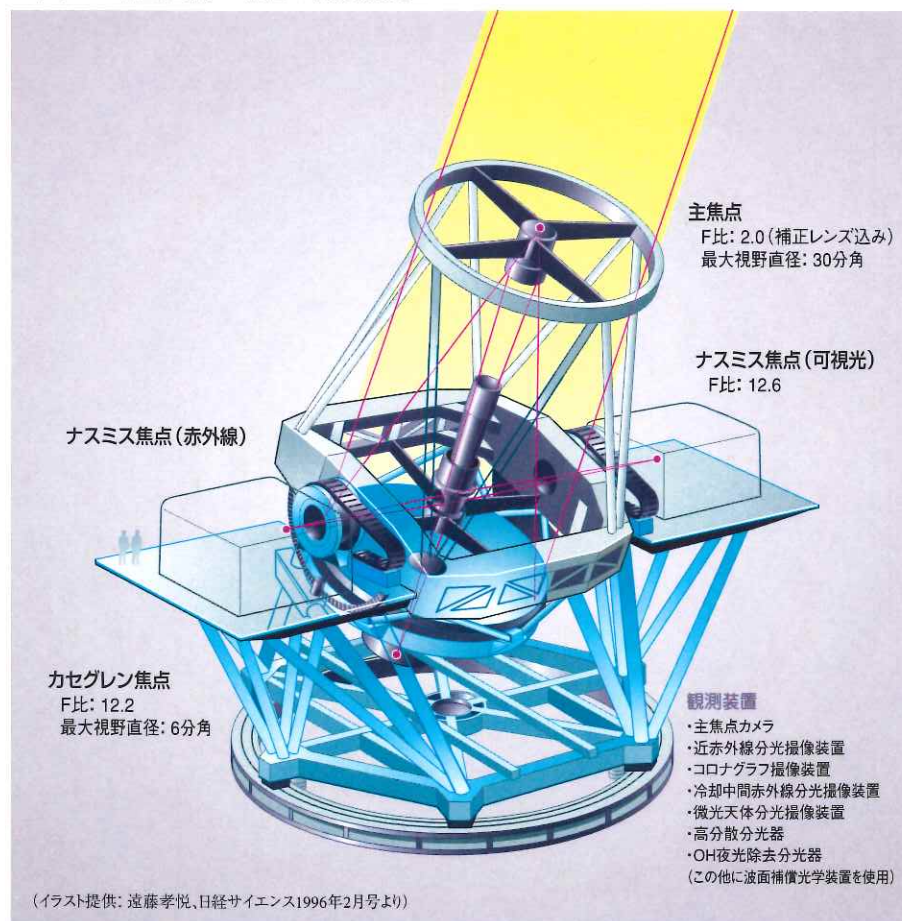
主鏡製作および日本での望遠鏡の製作が並行して進められた。1998年に建設が終了し、1999年から約1年間をかけて鏡、観測装置、カメラなどの試験観測が行なわれた。2000年後半からは、日本および外国の研究者による共同利用観測施設として本格的な観測を開始し、年間約80の研究チームがここを訪れている。

世界最大の主鏡とそれを支える先端技術

「すばる」は、大型望遠鏡の最新技術の結集といわれ、世界中から注目を集めている。最も大きな特徴は、単一の鏡としては、大きさおよび精度の両面で世界一の口径8.2mの主鏡を持つことである。主鏡は「望遠鏡の命」であり、天体の光をたくさん集めるためには、大きな鏡が必要となる。また望遠鏡の解像度は波長と口径の比で決まる。特に宇宙の遠くから届く光は、赤方偏移で波長が伸びるため、観測しようとする天体が遠くなるほど大口径が要求される。

主鏡には、大きさに加え、精密さと軽さが求められた。そのため、平均誤差12nmの高精度に研磨された主鏡は厚さわずか20cmで、この裏面から261本のアクチュエータが鏡を支えている。各々のアクチュエータは、常に主鏡の形状を荷重センサで計測して1g単位で補正を行う。このように、光学系を積極的に調整する方法を能動光学と呼ぶ。この技術により、8m級の巨大な主鏡でも常に最適な形状を保つことができる。主鏡を含む望遠鏡全体は一体となって動き、天体を追尾する。その駆動にはリニアモータが使用されている。

■「すばる」望遠鏡の構造と性能諸元



8,000万画素の高性能を持つ主焦点カメラ



コンピュータ技術を駆使して像の乱れを補正する波面補償光学装置

光を多く集め、シャープな画像を得るためには、望遠鏡周囲で発生する熱を除去し、空気の状態を安定させる必要がある。ドームは水流実験やコンピュータシミュレーションにより独特な円筒形に設計され、外部からの攪乱した空気を持ち込まず、内部の熱を効果的に排出できる。望遠鏡周囲にある数多くのモータ、コンピュータ、電子・電気回路などから発生する熱は冷却液を循環させて逃がし、人間の立ち入りも避けて別棟から遠隔操作するようになっている。

天体から届いた光は、主鏡で反射させる。これを望遠鏡上部の主焦点に集めて観測することができる。また主焦点の手前に別の鏡(副鏡)を置いて光を反射させると、主鏡下部にあるカセグレン焦点や側面にある2つのナスマス焦点に光を送ることができる。各焦点には撮像観測や分光観測を行う観測装置が設置されている。観測される画像入力、CCD等の半導体検出器によりデジタル情報としてコンピュータに蓄える。これにより、複数の像をコンピュータ内で合成するなどの画像処理も可能である。観測装置の1つである主焦点カメラは30分角の視野を一度に撮影でき、高性能CCDを10個設置することにより8,000万画素のデジタルカメラとして働く。「すばる」の解像度は0.2秒角と極めて高いが、これでもまだ空気の乱れの影響を受けている。より精細な像を得るため波面補償光学装置を組み合わせ、空気の乱れを実時間で補正を可能とし、解像度は0.06秒角にまで向上している。

精密さを支える鉄鋼材料

「すばる」の極めて精密な光学系を支えているのは、多くの鉄鋼材料である。特に主鏡セルは、薄くて軽い主鏡の変形を

支える基盤であり、その総重量は約20t、高い剛性と寸法精度が求められた。使用された鋼板は厚さ9mm、幅4,500mm、板厚誤差は0.4mmであり、まず直径8.8mの円盤を2枚作り、次にアクチュエータを入れるために261個の穴が開けられ、そこにパイプが溶接された。片面261箇所の溶接仕上げの後、溶接歪みを取るため応力除去焼鈍が行なわれた。冷却過程での温度



板の平坦度、溶接品質、仕上がり寸法など、極限の鉄鋼技術が生かされた主鏡セル

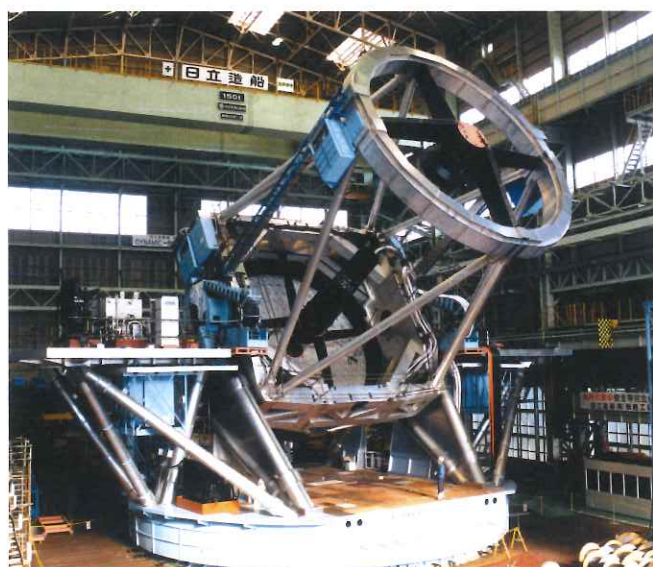


巨大な主鏡は主鏡セルの上に載せられ表面蒸着を待つ

望遠鏡の中で最も大きな力を支える鏡筒の回転軸部品(鍛造材)



鏡筒構造を支えるセンターセクションは厚さ40mmの鋼板によるボックス構造



仮組みを終えた望遠鏡本体の骨組み



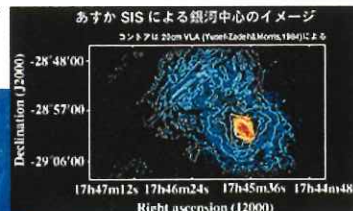
ドームの鉄骨構造(1995年1月)

ムラによる変形を防ぐため、細かな温度管理の下に3日を要したという。こうして完成した主鏡セルは、「すばる」に使用された単一構造物として最大のものであり、「すばる」部品の傑作の1つといわれている。

このほか、高強度が要求される鏡筒や架台は鉄骨で組み立てられ、鏡筒の回転軸部分には鍛造材が用いられた。ドームは、地下6mに作られた厚さ2.5mの基礎部の上で頑丈な鉄骨構造物である。

このように、精密さと頑丈さが一体となり、世界最高レベルの望遠鏡が実現したのである。

X線天文衛星「あすか」がとらえた銀河中心のイメージ

X線天文衛星「あすか」
(資料提供: 宇宙科学研究所)

【コラム】

電波やX線による観測技術の進歩

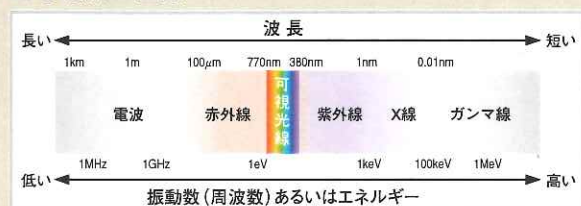
「すばる」が観測できるのは可視光と赤外線であるが、20世紀の後半には電波、X線などの観測技術が目覚ましく発達してきた。電波天文学は、赤外線より波長が長い電波を観測し、星と星の間にある希薄ガスなどの観測を対象とする。日本では1982年、長野・野辺山に45m電波望遠鏡が設置され、宇宙空間の有機分子やブラックホールの発見で成果を挙げている。1997年には電波天文衛星「はるか」の観測も開始された。

一方、X線は紫外線より波長が短く、ガスとガスがぶつかる時やブラックホール付近にみられる高エネルギー領域の観測を対象とする。1979年のX線天文衛星「はくちょう」以来次々と衛星が打ち上げられ、日本は世界のX線天文学をリードする存在となっている。現在のX線天文衛星「あすか」は、電離の進んでいない鉄原子が放つ特性X線の輝線を、銀河系の中心からその周囲数百光年以内の

空間で発見している。この特性X線強度の強い場所は、巨大分子雲がある場所と一致している。このことは、銀河中心に巨大ブラックホールがあり、そこで強烈なX線照射にさらされた分子雲の中の鉄原子が特性X線を放っているものと考えられている。

宇宙空間の物質が集まってできた星は、内部の核融合により水素とヘリウムから順々に重い元素を作り出し、最後に鉄の元素を合成する。進化の過程の最後には超新星爆発を起こすが、ある種の星では爆発時に鉄よりも重い元素が作られる。鉄の元素も、超新星爆発で宇宙空間に放出される。これがまた新しい星となる。現在地球上で私たちが利用している鉄鋼材料も、こうした宇宙の現象からもたらされたものである。

■電磁波の種類

45m電波望遠鏡
(資料提供: 国立天文台 野辺山電波観測所)

可視光から広がる多様な観測技術

天体観測は、「すばる」のような大型望遠鏡のほかにも、さまざまな方向に進化を続けている。

宇宙空間から観測を行うのが、1990年に打ち上げられた「ハッブル」宇宙望遠鏡である。宇宙空間の観測では、地球上の観測で妨げとなる空気の流れ、人工の光、重力による鏡の変形などがなく、極めて遠い銀河、新星の観測など、多くの成果を挙げている。

「すばる」ではシャープな画像を得るため波面補償光学装置などの技術が駆使されている。今後は、複数の望遠鏡のデータを集めてコンピュータで処理し、1つのシャープな像を得るという干渉計の手法も多く用いられるようになるだろう。現在まで、可視光、赤外線、電波、X線など電磁波の観測技術が発達してきた。種々の波長域での観測情報を得て、宇宙の姿をとらえることができるのだといえる。その基本になるのが、長い歴史を持つ可視光による観測である。観測精度の向上への挑戦は留まることを知らない。高精度な制御・機械系と頑丈な構造体、それを支える鉄鋼材料が今後も新しい成果をもたらしてくれる

に違いない。

最近では、深宇宙(極めて遠い宇宙)を観測する試みが注目されている。宇宙観測では、遠くを見ることは過去を見ることと同じである。1992年の宇宙背景放射衛星「COBE(コービー)」による宇宙全体のマイクロ波分布の観測結果は、ビッグバン後約30万年の「宇宙の晴れ上がり」時の宇宙空間にムラがあったことを示す大きな手がかりとなった。

また電磁波以外の観測手段として注目されているのが、ニュートリノや重力波である。どちらも地球を通り抜けるような大きな透過性を持ち、電磁波のように電荷と直接の相互作用がないことから、宇宙の晴れ上がり以前の膨張初期の状態を観測できる可能性があるといわれている。2002年のノーベル物理学賞でも話題となった岐阜県・神岡町の「カミオカンデ」が、1987年に大マゼラン星雲の超新星爆発から飛来したニュートリノを検出したことで、ニュートリノ天文学という新しい分野を開拓した。

宇宙には、まだ多くの謎が残っている。何かが発見された次の瞬間から、また新しい謎への挑戦が始まる。次世代の宇宙観測技術が何を明らかにするのか、興味は尽きない。

●取材協力: 国立天文台