



ガリレオ・ガリレイ (1564-1642) と
彼が天体観測に使用した望遠鏡 (左上の写真)。

NEW EYS, NEW SKIES

次世代望遠鏡が約束する 新しい眺め

Nature Vol.457(18-25)/1 January 2009

1609年、イタリアの科学者ガリレオ・ガリレイは手製の望遠鏡で月を見上げた。そのちょうど400年後にあたる今年、世界天文年である。今後40年間は、既存のどの望遠鏡をもはるかにしのぐ性能を備えた次世代望遠鏡が続々と建設されてくるだろう。Jeff Kanipeがそのうちの4基を紹介する。イラストはLynette Cookによる。

今日、天球儀やアストロラーベなどの天体観測装置を博物館や骨董品店以外の場所で目にすることはめったにない。けれども天体望遠鏡は、400年前に近世ヨーロッパの天文台で使われるようになって以来、ずっと天文学の世界の中心にある。

しかし、その光学的な精度や、利用される波長、大きさの点では、400年前の望遠鏡とは比較にならないほどの変化を遂げている。望遠鏡がとらえた映像は、最初の2世紀ほどはスケッチにより記録されるだけだったが、次の1世紀は写真乾板に記録されるようになり、ここ数十年で完全に電子的に記録されるようになった。今日の望遠鏡は、海、砂漠、山頂、各種の地球周回軌道など、あらゆる場所に設置されている。しかし、望遠鏡の役割は昔も今も変わらない。宇宙が私たちに向けて送ってくる情報を収集し、焦点を合わせることである。

天体望遠鏡の400年の歴史は数々の輝かしい発見に彩られているが、その最

良の日々はこれからやってくるのかもしれない。現在開発中の望遠鏡は、ほんの1世代か2世代前には人間の手に負えるものではないと思われていた疑問に最終的ともいえる答えを出そうとする、かつてない技術的挑戦となっている。

ここで紹介する望遠鏡は、しばしば互いの能力を補い合いながら、謎を解いていくことになる。最初の星と銀河が誕生した宇宙の「夜明け」の時代を調べるのには、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) の赤外域の観測能力と、スクエアキロメートルアレイ電波望遠鏡 (SKA) の電波領域での鋭い感度が利用されるだろう。SKAはまた宇宙の大規模構造の地図を作り、ダークマター (暗黒物質) とダークエネルギーが宇宙の構造にどのような役割を果たしているかを解明するだろう。大型シノプティックサーベイ望遠鏡 (LSST) と欧州超大型望遠鏡 (E-ELT) も、遠方の銀河を調べてこの問題の解明に貢献するだろう。E-ELTとJWSTは、互いの能力

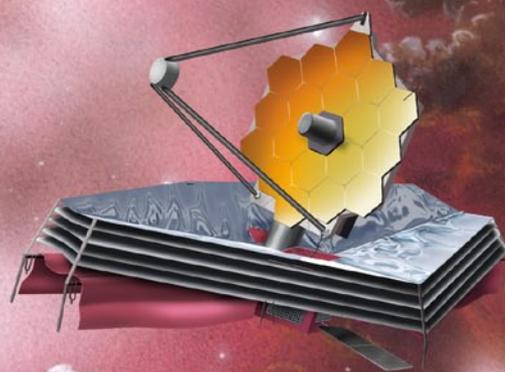
を補い合っ、これまでにない詳細さで太陽系外惑星を調べることになるだろう。

この4基の望遠鏡の掲げている目標は遠大で、かかる費用は莫大である。しかし、天文学者たちが可能性を探っていること、実現を願っていることはまだまだたくさんある。まもなく、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計が、その波長での天文学に革命を起こすだろう。電磁波スペクトルのあらゆる領域で、さらには重力波やニュートリノなどの新しい領域でも、観測プロジェクトが計画されている。天文学者たちは、具体的な科学的課題を念頭に置いてこうした観測装置を設計している。しかし同時に、ガリレオが月面に見つけた山々や太陽表面の黒点と同じくらい、奇妙で思いがけない何かを発見することも切に願っている。 ■

Jeff Kanipeは米国メリーランド州在住のサイエンスライターで、『Cosmic Connection (宇宙とのつながり)』(邦訳なし)の著者。Lynette Cookは、米国カリフォルニア州の画家兼イラストレーター。

The James Webb Space Telescope

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)



開口面積：33 平方メートル

観測開始：2013 年

費用：総額 45 億ドル
(約 4200 億円)*

特長：赤外域では最高レベルの観測が可能



モニターで見る恒星の一生。① オリオン大星雲は厚いガス雲であり、その内部では新しい星が形成されつつある。はめ込み図は若い星のクローズアップ。星はちりの雲に包まれていて、今後、惑星系を形成していく可能性がある。② 大マゼラン雲の中にある青く輝く若い星々。星々はまだ、その材料となったガスの残りに包まれている。③ いかくじゅう座の変光星 V838 は、今まさに進化の途上にある。この星が増光したときには、それ以前の恒星風により宇宙空間に放出された物質が明るく照らし出された。④ 死にゆく恒星の外層が宇宙空間に放出されると惑星状星雲が形成され、その中心には暗い白色矮星が残る。⑤ 多数の年老いた恒星からなる球状星団。なかでも光の弱い星々は白色矮星である。(Nature 2009年1月1日号 p.41 の Review Article「ハッブル宇宙望遠鏡による科学研究の18年間」の中の図3より)

ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の後継者ともいえるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) は、ハッブル宇宙望遠鏡と同様、同世代の宇宙望遠鏡を代表するものになるだろう。HST が主に可視光と紫外線を観測したのに対して、JWST は赤外域の観測に最適化されているため、ちりに阻まれて HST などでは見えなかった天体を観測したり、ビッグバン直後の赤方偏移が大きい時代を覗き込んで、宇宙最初の星などの可視光波長では見えない天体を観測したりすることができる。

宇宙望遠鏡科学研究所 (米国メリーランド州ボルティモア) の天文学者たちが HST の後継望遠鏡の計画をスタートさせたのは、HST が打ち上げられる 1 年前の 1989 年のことだったが、その打ち上げは計画開始から 24 年後の 2013 年に予定されている。JWST の設計と費用は過去 20 年間に数回変更されてきたが (Nature 440, 140-143; 2006 参照)、その主なミッション (任務) は変わらずシンプルで独創的である。それは、宇宙の歴史のあらゆる段階につき、これまでの技術では見えなかった側面を調べることだ。このミッションを達成するため、JWST はベリリウム製の超軽量光学系や超高感度の赤外線検出器、中赤外線検出器を常に 7 ケルビ

ンという低温に保てる冷却装置など、いくつかの革新的な技術を用いることになる。

しかし、新技術の中で最も目立つものは望遠鏡の心臓部にある。JWST の設計者が望んだ鏡は、既存のどのロケットのペイロードフェアリング (ペイロードを格納する部分) にも収まらない大きさのものだった。そこで彼らはいくつかの部分に分かれた鏡を設計した。鏡は折り畳まれた状態で打ち上げられ、望遠鏡が地球から 150 万キロメートル離れた最終的な軌道に入ったら、直径 6.5 メートルの大きさに展開する。地球からこれだけ離れていると、HST よりもずっと広い範囲の空を見ることができるよう、望遠鏡を低温に保つのも都合がよい。しかし、不利な面もある。JWST がひとたび軌道に入ってしまったら、どんな問題が生じて、そこに駆けつけて修理することはできないのである。それゆえ、HST とは異なり、JWST は最初から完璧に作動する必要がある。

JWST のシニアプロジェクトサイエンティストである 2006 年ノーベル物理学賞受賞者の John Mather は、「現在、JWST は最短でも 5 年間は機能するように設計されていますが、もっと長く運用することも可能かもしれません」と話す。JWST は 10 年分の燃料を積んでいるうえ、初期の赤外線

宇宙望遠鏡とは違って冷却装置を備えているので、冷却剤の枯渇で寿命が制限されることもない。「私たちが幸運で賢明であれば、燃料を節約して、ずっと長く運用できるかもしれません。もちろん、確約することはできませんが」と Mather。彼が自信をもって約束するのは、何らかの発見があるということだ。「ブラックホールと銀河のどちらが先に誕生したのかも、大きな銀河のほとんどすべてがその中心に巨大なブラックホールをもっている理由もわかっていません。初期の宇宙について驚くべき発見があるとしたら、それはこうした問題に関係したものになるでしょう」と彼は語った。

しかし、JWST が調べるのは深宇宙や遠い過去の時代だけではない。宇宙望遠鏡科学研究所の Matt Mountain 所長は、「形成途上にある太陽系、合体する星、ちりの多い星雲の中で集合する星団など、地球の近くにある天体の謎に包まれた起源についても詳細に調べるつもりです」という。とはいえ、JWST の真にすぐれた点はごく初期の宇宙を探る能力にある。「JWST の感度は非常に高く、HST でもかろうじて検出できた程度のごく初期の天体のスペクトルをも分析することができます」と Mountain 所長は話す。■

*費用は 1 ドル = 93 円で換算、以下同様。

A DEEP, MOVING IMAGE

The Large Synoptic Survey Telescope

天の映画撮影

大型シノプティックサーベイ望遠鏡 (LSST)

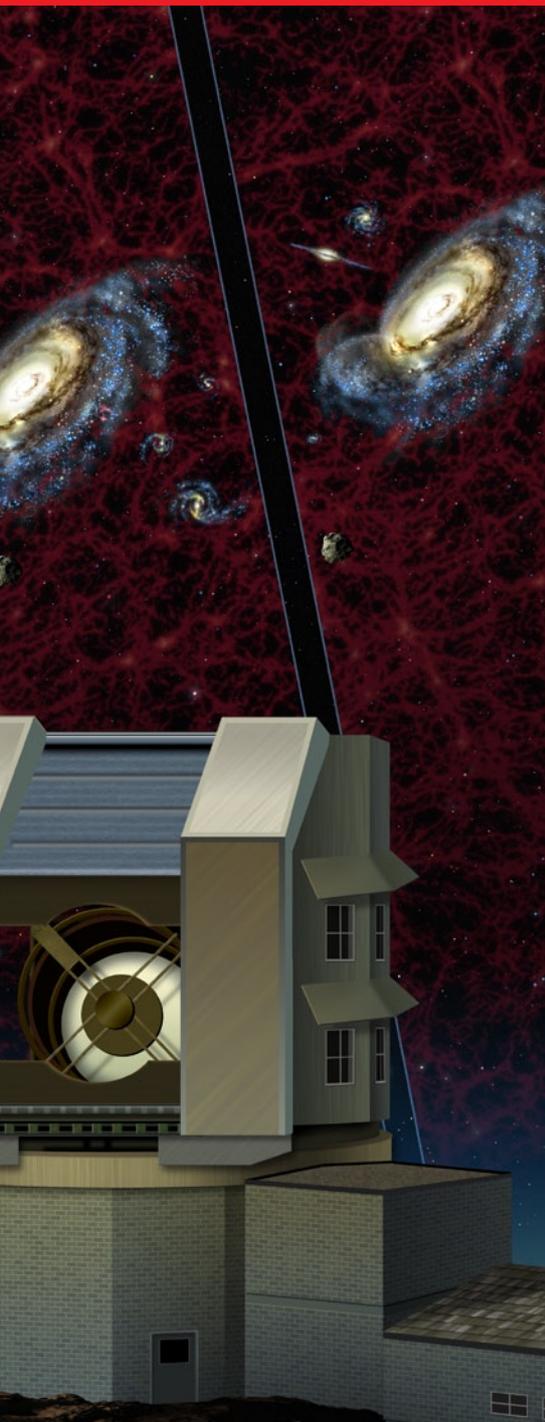
開口面積：35 平方メートル
観測開始：2015 年
費用：観測開始まで 3 億 9000 万ドル
(約 360 億円)
特長：リアルタイムで全天を観測

望遠鏡で宇宙を観測していると、天体が二重に見えることがある。これは望遠鏡の収差ではなく、宇宙の性質に起因する現象である。一部の銀河は、銀河と地球の間に存在する質量により光が屈曲する「重力レンズ効果」のため、2 か所以上の場所に見えることがある。地球から見上げる空には、重力レンズ効果によるこうした像が 1 平方度あたり約 1 万個あると見積もられている。大型シノプティックサーベイ望遠鏡 (LSST) の設計者は、観測画像を

いくつも加え合わせることで、個々の画像には表れていないものを測定し、多くの重力レンズ像を見つけたいと考えている。彼らはまた、天文学でこれまで無視されてきた次元も切り開きたいと考えている。それは時間である。LSST には、空の同じ部分を繰り返し撮影した画像を加え合わせてこの新しい次元を探るだけでなく、これらの画像を比較して、超新星、小惑星、太陽系周辺部のカイパーベルト天体など、ほかの方法では見落とされてしまうような

天体を見つけ出すことが期待されている。LSST の支持者はこれを「天の映画撮影」とよんでいる。

LSST は毎週、チリのセロパチオン山から見える空のほぼ全域を観測し、一晩の観測でテラバイト単位のデータを生成する。こうした観測を可能にするのが 8.4 メートルの主鏡である。この主鏡は 10 平方度の視野が得られるように磨かれる。この視野は満月の大きさの 49 倍にあたり、LSST と同程度の大きさの鏡をもつジェミ



小惑星追跡ネットワーク

LSSTは、空に異常な天体を見つけると1分以内にインターネットに警報を発信することができる。その警報を待ち受けることになるのが、米国カリフォルニア州のラスカンブレス天文台グローバル望遠鏡(LCOGT)である。この望遠鏡が完成すると、各半球に1つずつ、リング状に配置されたロボット望遠鏡のネットワークができることになる。現在、このネットワークは民間の非営利組織(NPO)によって運営されており、稼働している望遠鏡は2基しかない。そのうちの1つはハワイのハレアカラ山にあり、もう1つはオーストラリアのニューサウスウェールズ

のイディンズプリング天文台にある。このほかにも、メキシコ、カナリア諸島、チリ、南アフリカ、オーストラリアでの建設が計画されている。ネットワークの最終目標は、25基前後の0.4メートル望遠鏡と、同程度の数の1メートル望遠鏡を備えることにある。小さい望遠鏡は主に教育目的に使われ、大きい望遠鏡は主に科学研究に使われる予定だが、その役割分担は厳格なものではない。このネットワークが完全に動き出せば、新たに見つかった超新星や新しい小惑星などの天体を数日から数週間にわたって観測することが可能になる。

になっている。これにより、コンピューターさえもっていれば、プロの天文学者以外の学生やアマチュア天文学者も科学的発見のプロセスに参加できることになる。

重力レンズ像の研究から、宇宙の構造について非常に多くの知見が得られるはずである。特に期待されているのは、ダークマターの分布とダークエネルギーの効果が解明されることである。LSSTは、これと並行してバーチャル「宇宙パトロール」も実施する。つまり、地球に近いところにある、潜在に危険な小惑星を探すのだ。天文学者たちはすでに、地球に衝突すれば生物種の大規模絶滅を引き起こす可能性のある大きな小惑星については、そのほとんどの位置を把握している。小惑星の大部分はもっと小さいが、それでも地球に衝突すれば都市をまるごと破壊するほどの被害をもたらす。LSSTは、そうした小惑星のカタログ作りの道具の1つになる。しかし、かすかな明るさしかない一時的な現象に対するLSSTの感度は、こ

れまでの望遠鏡の最高感度よりも1000倍も高いのだ。これだけ高い感度をもつLSSTの用途を地球の周りの「空からくる脅威」探しに限定する必要はない。LSSTは遠方で起こる中性子星どうしの衝突などの大変動を観察し、まったく新しい種類の一時的な現象を発見するだろう。

この計画を監督するLSST協会は、100人以上の科学者、20以上の研究室、大学、研究所から構成されている。LSSTの設計は現在進行中だが主鏡はすでに铸造された。天文学者たちは、LSSTの建設が計画どおり2011年に始まり、2015年に観測が始まることを期待している。LSSTはそれから10年間の観測で、宇宙にあるすべての天体を調べることになる。そのカタログには、よく知られた天体や、あまりよく知られていない天体のほか、新たに発見される天体も掲載されることになるだろう。「歴史上初めて、地球上の人間の数よりも多くの天体のカタログを作り、研究することになるのです」とIvezicは話す。 ■

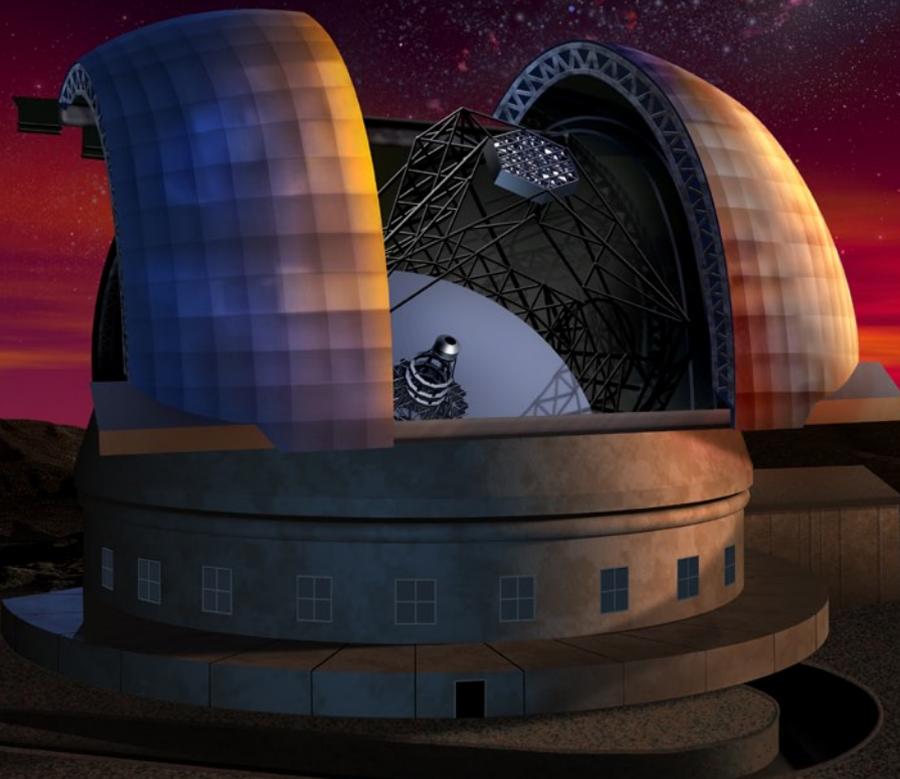
二望遠鏡(ハワイとチリに設置された2基の望遠鏡で、1つのポイントを観測することに最適化されている)の視野の300倍以上に相当する。ワシントン大学(同州シアトル)のZeljko Ivezicは、「LSSTは、その視野のすべてを10年間で約1000回観測することになっています」と説明する。LSSTでは莫大な計算機パワーを投入して大量のデータの相関を調べ、比較し、カタログを作成し、すべてのデータをインターネット上で利用できるようにすること

SUPERSIZING THE HEAVENS

The European Extra Large Telescope

巨大な目

欧州超大型望遠鏡 (E-ELT)



開口面積：1385 平方メートル
 観測開始：2010 年代
 費用：観測開始まで 14 億ドル
 (約 1300 億円)
 特長：名前の通り

宇宙望遠鏡には地上の望遠鏡にはない長所がたくさんある。地上では絶対に使えない波長で観測を行うことができるし、空気のない空は水晶のように澄んでいる。けれども宇宙望遠鏡は、望遠鏡の設計上最も重要な点の1つで決定的に不利である。それは大きさだ。裏庭で使う望遠鏡でも、山頂に設置する望遠鏡でも、光を集める開口面積を大きくすれば、それだけ多くの光子をとらえることができる。欧州超大型望遠鏡 (E-ELT) は直径 42 メートルの

主鏡を備え、宇宙望遠鏡ではかすかにしか見えない天体を見分け、太陽系外惑星のような弱い光しか発しない天体をも検出できるよう設計されている。E-ELT 計画に従事する人々は、この望遠鏡が完成すれば、これに匹敵する大きさの望遠鏡が軌道上 (あるいは月面上) に建設されるようになるまで、可視光と近赤外線の領域で宇宙望遠鏡が活躍する余地はなくなり、それ以外の波長での観測に限定されてしまうかもしれないと考えている。

E-ELT は欧州南天天文台 (ESO) が進めている計画であり、現在、3 年半の歳月と 5720 万ユーロ (約 69 億円; 1 ユーロ = 121 円で換算、以下同様) の費用をかけた詳細設計段階の半ばにある。建設は 2010 年代中頃にも始まるかもしれない。ただし、巨大望遠鏡計画は E-ELT だけではない。北米では大学を含めた官民連携コンソーシアムが 30 メートル望遠鏡 (TMT) を建設しているし、米国とオーストラリアのいくつかの大学と研究機関は共



宇宙と地上から太陽系外惑星を探索

欧州宇宙機関 (ESA) の国際ミッションであるコロー宇宙望遠鏡は、2006 年の打ち上げから 2 年間にわたって、恒星と地球の間に惑星が入ることによる恒星の明るさの低下を検出しようと試みてきた。米航空宇宙局 (NASA) のケプラー宇宙望遠鏡もまもなく打ち上げられるし、2010 年代後半には ESA のプラトン宇宙望遠鏡の打ち上げが予定されている。どの計画も、太陽以外の恒星の周りに地球程度か、それよりも小さい惑星を発見することを目的としている。なかでも期待されているのは、地表に液体の水が存在しうる「生

命居住可能領域」内かその近くにある惑星が発見されることである。E-ELT は、そうしたミッションの発見を確認し、追跡調査する役に立つかもしれない。新たに発見された惑星の大気の分光を行う可能性もある。宇宙望遠鏡がもたらす発見と、E-ELT などの新世代の超大型望遠鏡を使った地球での研究を組み合わせることにより、太陽系以外の惑星系の概要をまとめることも可能になってくるだろう。こうした惑星系のなかには太陽系に似ているものもあるかもしれないが、まったく異なるものもあるだろう。

変化させて大気の乱れを相殺する補償光学がこの大きさのシステムでもうまく働けば、E-ELT の空間分解能はハッブル宇宙望遠鏡の 18 倍になるはずだと設計者は考えている。現在最大の鏡をもつ望遠鏡は、マウナケア山のケック望遠鏡であり、直径 10 メートルの望遠鏡 2 基からなる。E-ELT の集光面積はケック望遠鏡 2 基の合計のほぼ 9 倍になる予定である。

E-ELT 計画に従事する研究者たちには、米国の天文学者が望めない強みがある。毎年の予算が確保できているのである。欧州南天天文台の首脳陣は、この計画に参加している 13 か国に予算の増額を頼んだり、新しい出資者を求めて奔走したりすることなく E-ELT を建設したいと考えている。とはいえ、その目論見は今後変わるかもしれない。E-ELT の光学系の設計も、最終的な建設場所もまだ決まっていないからである。現時点では、カナリア諸島、モロッコ、アルゼンチン、およびチリの 2 か所が建設場所として検討されている。

E-ELT の研究責任者 (PI) である Roberto Gilmozzi には、こうしたもろもろの問題もバックグラウンドノイズにす

ぎない。彼の目はすでに望遠鏡が成し遂げる発見のほうに向けられている。「E-ELT の重要な目標の 1 つは、地球に似た太陽系外惑星を探ことです。探索は、親星の視線速度の変化を測定するなどの間接的な方法と、惑星の撮影と惑星大気の分光という直接的な方法の両方から進めていきます」と彼は話す。E-ELT は、若い恒星の周りに形成されつつある原始惑星系をこれまでにない詳細さで研究することもめざしている。

「E-ELT の感度は、今日の望遠鏡に比べて飛躍的に高いものになるでしょう。その差は、裸眼とガリレオの望遠鏡の差に匹敵するものになるでしょう」と Gilmozzi は話す。E-ELT はあらゆるスケールの天文学に影響を与えるだろう。今はぼんやりとしか見えない銀河が、星々の集団として見えるようになるだろう。「最大のスケールでは、E-ELT 以外の望遠鏡にはできない『物理実験』を行う予定です」と Gilmozzi はいう。E-ELT は、超遠距離の天体の運動速度を数年間の間隔をおいて測定し、これを比較することにより宇宙の膨張速度の変化を初めて直接測定しようとしているのだ。

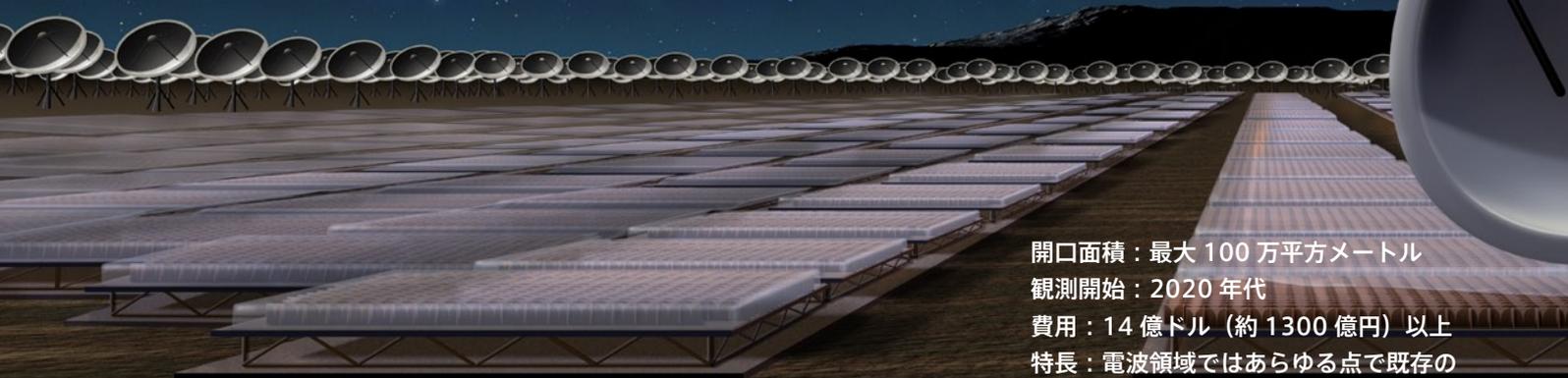
同事業として巨大マゼラン望遠鏡 (GMT) 計画を進めている (*Nature* **452**, 142-145; 2008 参照)。しかし、E-ELT は最も野心的な計画であり、その予算も 9 億 5000 万ユーロ (約 1100 億円) と最大である。実は、現在の E-ELT の設計は縮小版であり、圧倒的大型 (OWL) 望遠鏡という名前で検討されていた当初は、直径 100 メートルの鏡を備える予定だった。現在の 42 メートルという大きさは現実的な選択である。しかし、鏡の形を常に

LOOKING EVERYWHERE

The Square Kilometre Array

立ち並ぶアンテナ群

スクエアキロメートルアレイ電波望遠鏡 (SKA)

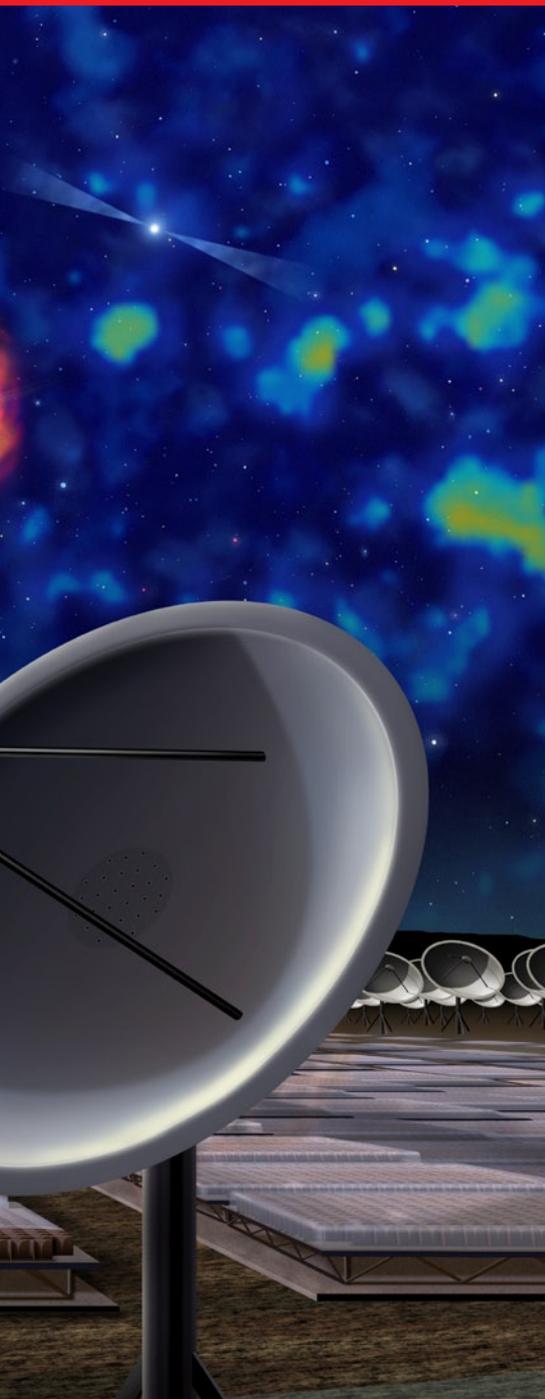


開口面積：最大 100 万平方メートル
 観測開始：2020 年代
 費用：14 億ドル（約 1300 億円）以上
 特長：電波領域ではあらゆる点で既存の望遠鏡を上回る

スクエアキロメートルアレイ電波望遠鏡 (SKA) の建設場所はまだ決まっていない。建設のための資金も調達できていない。このように、SKA は実現にはまだまだ遠いところにあるのだが、そんなことも気にならなくさせるほど魅力的な目標を掲げている。それは、世界のあらゆる種類の望遠鏡の中で最大のものになるという目標である。現在、世界最大の単体の電波望遠鏡であるプエルトリコのアレシボ天文台の開口面積でさえ 7 万 3000 平方メー

トルであるのに、SKA は 100 万平方メートルをめざしている。ただし、この開口面積は数千個の小さなパラボラアンテナによって分担される予定である。一部のパラボラアンテナは中心部分に固まって建設され、残りは小麦畑のミステリーサークルのように、複数の巨大ならせん状の腕に沿って配置され、全体の半径は数千キロメートルに達する。この巨大な半径が、その広い開口面積がもたらす信じられないほどの感度に見合った分解能を可能にする。

SKA は、70 メガヘルツから 10 ギガヘルツの周波数範囲にわたって観測を行える電波望遠鏡であり、周波数 1 ギガヘルツ未満では 200 平方度、より高い周波数でも 1 平方度という大きな視野をもつ。SKA の最終設計には、高い周波数用のパラボラアンテナと、低い周波数用の平らなフェーズアレイ（位相配列）パネルが組み込まれるだろう。フェーズアレイの長所は、空の複数の部分を同時に観測できることである。この設計は、同様の



画像が得られる電波望遠鏡の1万倍も速く空を観測することを可能にする。その研究テーマは、銀河の進化やクェーサーがはき出すコスミックジェットから、パルサーや超新星残骸の研究まで、事実上、天文学のあらゆる範囲をカバーすることになるだろう。

SKAは、ヨーロッパ、アルゼンチン、オーストラリア、ブラジル、カナダ、中国、インド、南アフリカ、スウェーデン、米国を含む19か国の研究機関が参加する、まさに国

宇宙望遠鏡も大型化をめざす

地上に巨大な望遠鏡を建設することは比較的容易であるが、宇宙でははるかに厳しい制約がある。しかし、次の「大物」を探している宇宙望遠鏡科学研究所（米国メリーランド州ボルティモア）の天文学者たちは、今、必要とされているのはまさにそれであると考えている。すなわち、宇宙望遠鏡の大型化である。

NASAに提案されているATLAS宇宙望遠鏡は、大重量打ち上げロケット「アレスV」でしか打ち上げられないかもしれない。アレスVは、人間を月に運ぶためにNASAが開発しているロケットであり、アポロ計画以来最大のロケットである。ATLASの鏡は直径16メートルもあり、現時点で最大の地上望遠鏡よりも大きく、その感度はハッブル宇宙望遠鏡の約40倍にもなる予定である。ATLASはダークマターと銀河の進化について新た



アレスV

な全体像をもたらすだろう。しかし、最もエキサイティングなのは、太陽以外の恒星の周りには生命が居住できる惑星（もしかしたら実際に生命がいるかもしれない）を調べる任務だろう。

際的な共同プロジェクトである。コンソーシアムのメンバーは2020年にSKAを完成させ、その後50年にわたって科学的成果をあげ続けたいと考えている。ほとんど避けられない遅れ、後のグレードアップなどを考えれば、SKAは22世紀にも活躍する最初の大型望遠鏡になるまで働き続けるかもしれない。

米国SKAコンソーシアムの議長であるJames Cordesは、「SKAは、最初の銀河についての理解や、宇宙が『金属』（天文学者は、ヘリウムよりも重いすべての元素をこうよぶ）を作り出した過程についての理解に革命を起こすでしょう」と話す。ビッグバンのわずか5億年後には、それまでにできた星でのみ作られたはずの一酸化炭素ガスが銀河を覆っていたことが

わかっている。SKAなら、一酸化炭素ガスの広がり地図を作り、銀河形成前天体（いわゆる「銀河の種」）の星間物質中にある一酸化炭素分子を測定することができるだろう。しかし、自分たちの大型望遠鏡にほれ込んでいる研究者が皆そうであるように、Cordesも彼の愛する望遠鏡の能力をもたらすはずの驚くべき発見について強調しようとする。「SKAは発見マシーンになるでしょう」と彼はいう。これまで宇宙に向けられてきた小さい目が見落としていたもののうち、何がみつかるかはだれにもわからない。「それは、太陽系外の惑星や新種の閃光星かもしれません。それよりもっと風変わりなもの、例えば蒸発するブラックホールや地球外文明かもしれないのです」。