

Extremely Large Telescopes

世界の次世代大型 望遠鏡計画

第2回

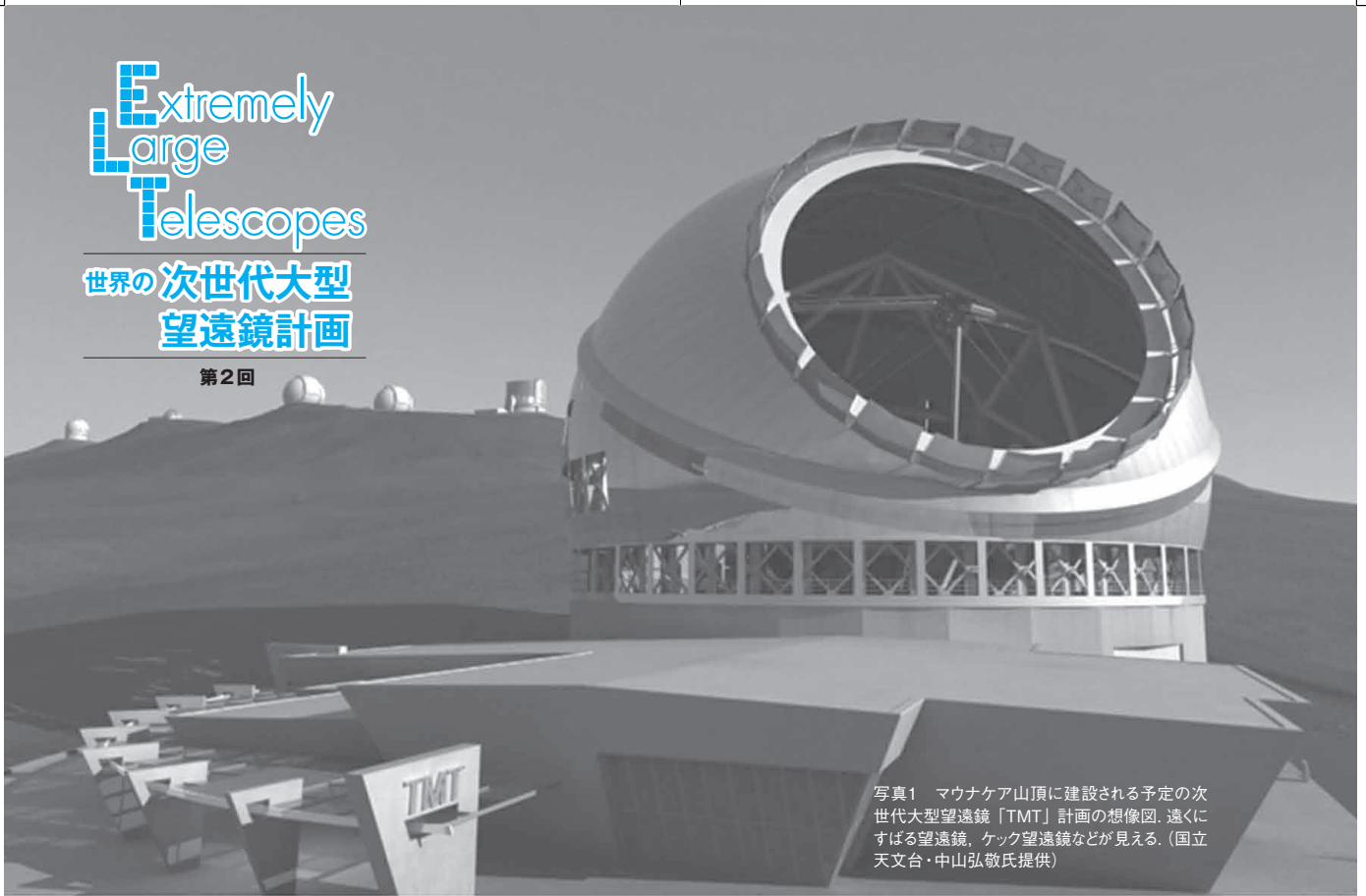


写真1 マウナケア山頂に建設される予定の次世代大型望遠鏡「TMT」計画の想像図。遠くにすばる望遠鏡、ケック望遠鏡などが見える。(国立天文台・中山弘敬氏提供)

次世代大型望遠鏡計画が 目指すサイエンス

文：柏川伸成
(国立天文台 光赤外研究部)

2000年代に入ってから、次世代の天文学を展望した超大型望遠鏡計画が世界的に検討され、それらは欧州を中心としたE-ELT計画、カーネギー天文台、アリゾナ大学などのGMT計画、日本の国立天文台が加わるTMT計画の3つの計画に集約されてきている。各国の次世代望遠鏡計画を紹介した前回に続き、今回は次世代望遠鏡で実現する観測と、そこから導かれる新たな天文学について、日本が加わるTMT計画を中心に紹介する。

PRO FILE

かしかわのぶなり
柏川伸成准教授

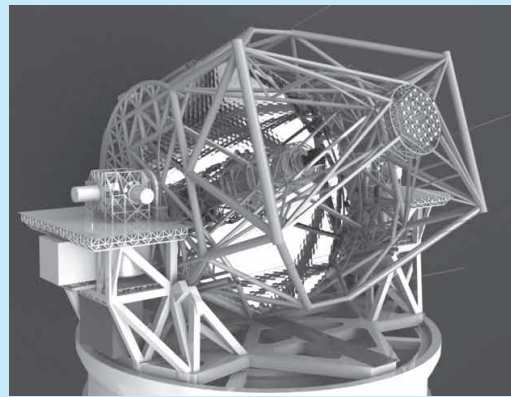
東京大学大学院理学系研究科(天文学専攻)博士課程修了。2007年より現職。専門は観測的宇宙論・銀河天文学。すばる望遠鏡を用いた遠方宇宙の観測的研究に従事。

次世代超大型望遠鏡の能力

今回は、次世代超大型地上望遠鏡計画によって、私たちが実現しようとしている未来の夢の観測をいくつかご紹介しよう。これまでの歴史がそうであったように、より高い観測技術によって、人類は認知する宇宙のフロンティアを広げ、宇宙の構造と歴史に対する理解を深めてきた。現在、すばる望遠鏡をはじめ、世界中の口径10mの地上大型望遠鏡が数かずの成果を生み出しているが、8～10年後には次世代の大型望遠鏡が登場する。

日本もその建設に参加を検討している「30m望遠鏡(Thirty meter telescope: 以下TMT)」もその一つである。このTMT計画によって、われわれの知る宇宙のフロンティアがさらに広がり、太陽系から遠方宇宙まで天文学の各分野でこれまでの研究をより深く、

図1 世界の次世代大型望遠鏡計画



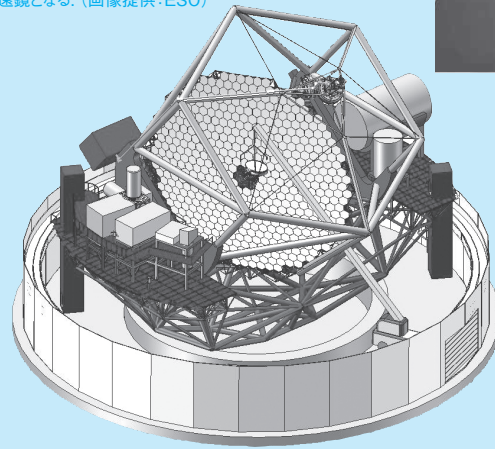
●GMT計画

米国・カーネギー天文台、アリゾナ大学が中心となって進めている、大マゼラン望遠鏡GMT (Giant Magellan Telescope) 計画。口径8mの鏡7枚で有効口径23mを得る構想で、チリのラスカンパナス山での建設を予定している。現在、アリゾナ大学の鏡製作研究所で7枚の鏡のうちの1枚目の製作にとりかかっている。(画像提供: GMT)



●E-ELT計画

欧州で進められているE-ELT (European Extremely Large Telescope) 計画。主鏡は42mの楕円鏡で、副鏡、第3鏡と3枚の非球面を使い、収差を完全に除去する。さらに2枚の折り返し鏡に補償光学機能を持たせることにより、全体で5枚の鏡からなる構想。建設予定地はチリのアルマゾネス山に決定した。技術的課題は大きい、完成すれば画期的な望遠鏡となる。(画像提供: ESO)



●TMT計画

国立天文台が、カルフォルニア大学、カルフォルニア工科大学、カナダ大学連合との国際協力で進めている、口径30mの次世代大型望遠鏡TMT (Thirty Meter Telescope) 計画。対角1.5mの六角要素鏡を492枚敷き詰め、有効口径30m、焦点距離30mの回転双曲面主鏡を構成。高度軸、方位軸の交点に配置する第3鏡を2軸駆動し、観測装置を移動させずに、左右にナスミス焦点に配置した複数の観測装置に光ビームを切り替えて送る。ハワイ・マウナケア山頂での建設を予定。2019年の観測開始を目指している。

より詳細に、さらに延長して推し進めることができる。こうした従来の研究を飛躍的に進展させる点もたいへん有意義だが、このTMT計画には、これまで実現が不可能だった、未知の新しい天文学のフロンティアが展開される可能性が秘められている。

この「新しい天文学」について紹介する前に、次世代超大型地上望遠鏡の性能をもう一度確認しておこう。前回述べたように、現在、TMT、E-ELT (European Extremely Large Telescope)、GMT (Giant Magellan Telescope) の3つの計画が進められているが、主鏡の大きさや採用される技術に多少の差はあるものの、基本的な性能はほぼ互角と考えていただきたい(図1)。

以下TMTを例にとると、TMTは主鏡の直径が30mあり、いうまでもなくこれまでに地上に出現した光学・赤外線望遠鏡の中でもっとも口径が大きい。この大きな鏡を使えば、もちろん、よりたくさんの光を集める

ことができる(集光力)ので、現在では見るることのできないもっと遠くの天体を見ることもできる(図2)。口径の大きな鏡により、同じ天体を観測するのも短時間で観測することができ、逆に同じ時間でもたくさんの天体を観測できるので、観測の効率化が図れる。さらに、口径の大きな鏡の利点としてはもう一つ、より細かいものを見ることができるといった特徴がある。これは、どこまで細かく分解して見ることができるといった望遠鏡の能力である「分解能」が、波長に比例し、鏡の大きさに反比例するという光の性質によるものである。

また、TMTでは「補償光学」という技術が日常的に観測に応用され、より高い分解能を持つことが期待される。たとえばハッブル望遠鏡による観測は、大気の揺らぎのない宇宙空間からの観測になるので分解能が優れているが、図3を見てもわかるように、補償光学を用いたTMTはハッブル望遠鏡をものしぐ分解能

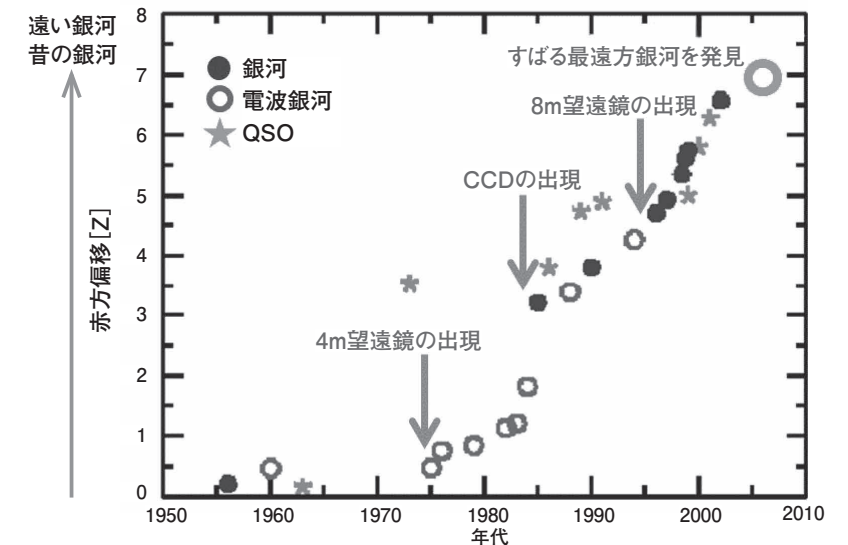


図2 最遠方天体発見の歴史。より遠い天体を飛躍的に見つけた時代には、より大きな望遠鏡や検出器の革命など、技術的な裏付けがあったことが容易に伺える。現在、最も遠い銀河を発見したのは日本のすばる望遠鏡であるが、これもわが国の天文学の基礎技術の習熟の顕れと言えよう。科学的成果の大きな進展の背景には、それまで培われたため基礎技術の蓄積が存在する。

を持っていることがわかる。これは東京から富士山頂を歩くアリの姿が見えるほどの分解能である。すばる望遠鏡と比較しても、TMTは実に13倍の集光力、4倍の分解能を持つことになるのである。

このような絶大な能力を持つTMTによって、これまで不可能だった観測が可能になり、さまざまな宇宙の謎が解明されていくことが期待される。

宇宙の果てを見る

夜空を見上げるとたくさんの星や銀河が輝いている。このような天体はいつどうやってできたのだろ

う? TMTが完成したら、まずはその抜群の集光力を活かして、もっと遠くの天体、宇宙の果てを見てみたいものである。宇宙において「遠く」を見るということは「昔」を見るということになる。今わたしたちが住んでいる銀河系が遠い昔にどのような姿だったか、どうやって生まれたのかを実際に見ることができ

るわけだ。すばる望遠鏡でも次々と遠方銀河が発見され、現在まで分光観測が行なわれているもっとも遠方の銀河(地球からの距離128.8億光年)を発見したのもすばる望遠鏡である。これら一連の研究によって、いわば銀河の「少年少女時代」が詳細にわかってきたわけであるが、TMTは銀河の「幼少時代」、もしかすると誕生し

ハッブル宇宙望遠鏡による画像

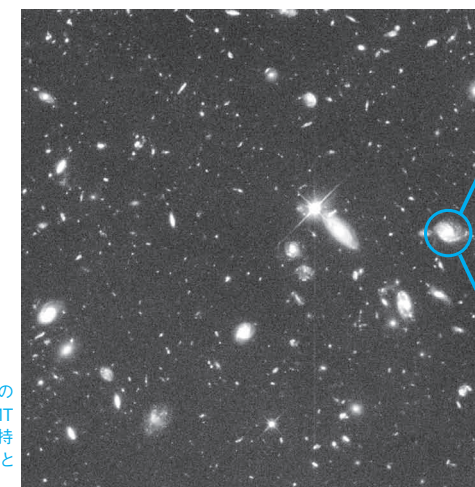


図3 TMTとHSTの分解能の比較。補償光学を備えたTMTはハッブルをも凌ぐ分解能を持ち、鮮明な画像を映し出すことが期待される。

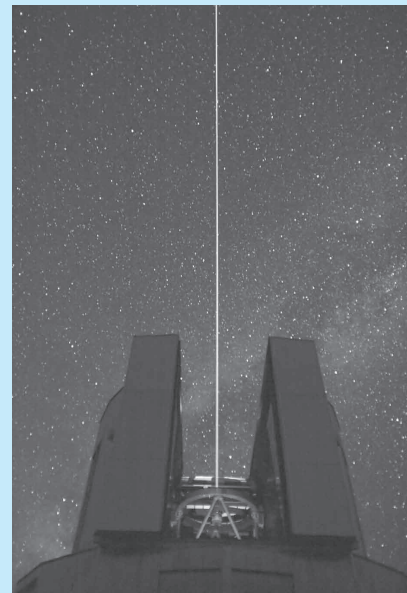
ハッブル宇宙望遠鏡(拡大画像)



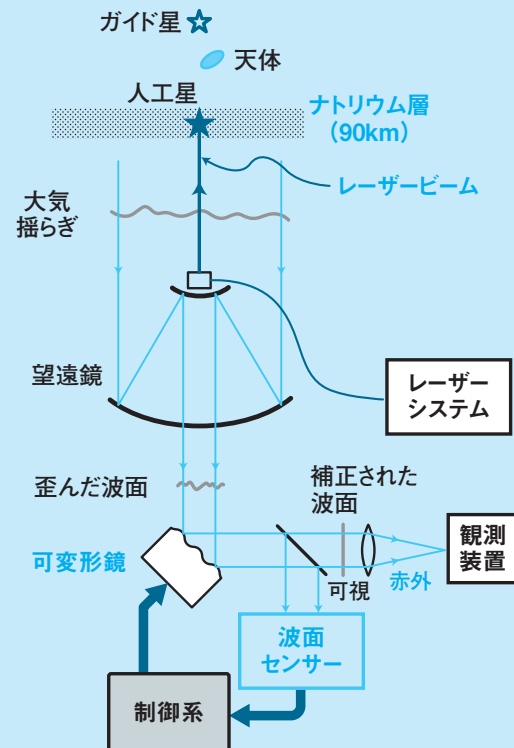
TMT (同じ部分の拡大画像のシミュレーション)

すばる望遠鏡の レーザーガイド星補償光学系

地球の大気を通して宇宙を観る天体望遠鏡は大気のゆらぎのため、その空間解像力を十分に発揮できない。そこで大気のゆらぎによる光りの乱れを測り、その乱れをリアルタイムで補正して本来の解像力を達成するのが「補償光学」技術だ。この補正には明るい星をガイド星として用いるが、明るい星がない天域にレーザー光を照射して大気中に人工星を作り、補償光学系による観測を可能にするのが「レーザーガイド星補償光学系」。次世代大型望遠鏡ではこれらの補償光学技術が平常的に活用されることになる。



2006年10月に行なわれたすばる望遠鏡のレーザーガイド星生成システムによるレーザービームの初照射。
2009年2月にはレーザーガイド星を初めて視野補正カメラでとらえた。現在、実用化の目途が見えてきた段階まで進んでいる。



すばる望遠鏡の補償光学系とレーザーガイド星生成システムの原理。可変形状鏡の形を光の波面の乱れが打ち消されるように変えることで、観測装置に光をシャープに集中させる。補償光学系は188個のアクチュエーターで秒間2000回のリアルタイム補正を行なう。近赤外観測での空間解像力はハッブル宇宙望遠鏡の約4.3倍を実現したといわれている。(図:国立天文台)

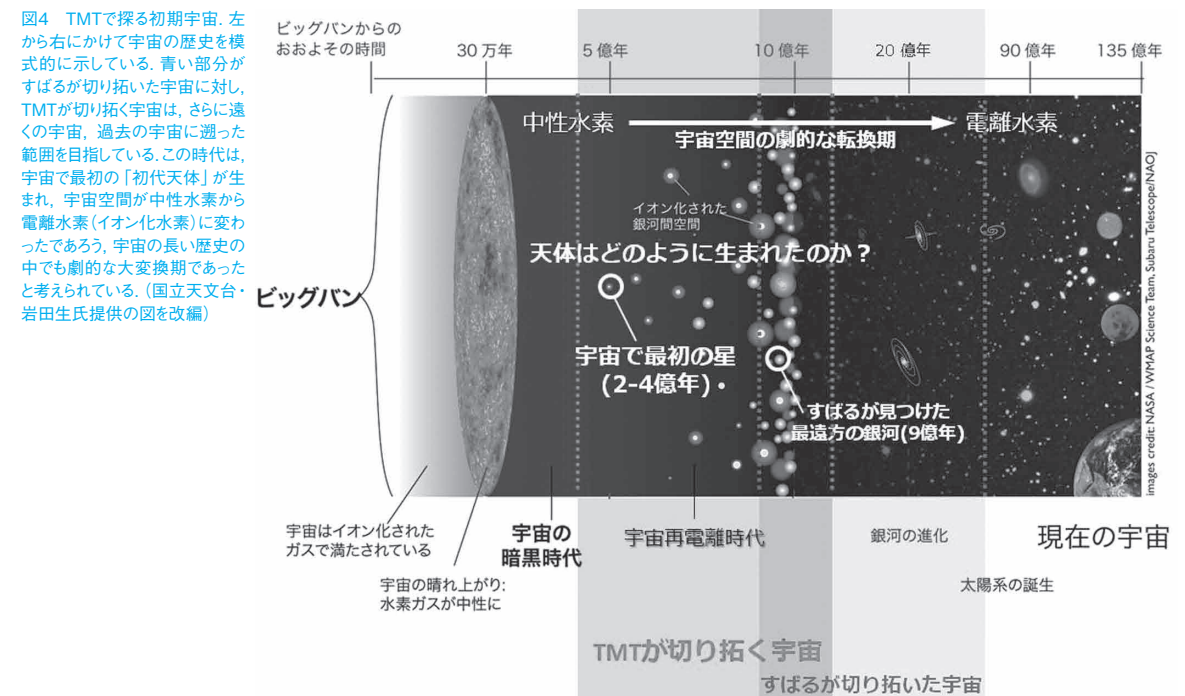
たばかりの銀河の姿を直接観測できるかもしれない。

現在多くの天文学者が信じている宇宙初期と銀河の誕生は次のとおりである(図4)。まず、大部分の水素とわずかのヘリウムからなるガスの雲が宇宙初期に存在した。まだこの宇宙には「天体」というものは存在しない(宇宙の暗黒時代)。やがて、その雲の中でガスが自己重力によって局所的に分裂・収縮して最初の星(第1世代星)が生まれる。この「宇宙で最初の星」は現在私たちが見る星とはまったく違うということが予想されている。「宇宙で最初の星」が生まれるころには、まだその周りに水素ガス雲が大量に存在する。しかし、やがてこうした第1世代星や銀河(あるいはクエーサー)が宇宙空間にたくさん生まれてくる。こうした天体が増えてくると、その全体としての光は膨大で、周りの水素ガス雲を温めて、やがてなくしてしまうことができる(宇宙の再電離)。この時期に生まれた銀河は銀河系にくらべてはるかに小さくて軽いであろうと考えられている。銀河の中ではガスの冷却による星形成

と超新星爆発によるガスの加熱が繰り返され、次第に銀河らしい形になっていく(原始銀河)。こうした銀河はお互いの重力で引き寄せられ、隣の銀河と合体していく。こうした合体を繰り返すうちに銀河はどんどん大きく育ち、現在の銀河になった、と考えられている。

小さな銀河が合体を繰り返し大きな銀河を作ったとするこうしたモデルを「階層的銀河形成モデル」とよんでいるが、いろいろな時代の銀河を数多く観測することによって、こうしたモデルに修正を加え、より正確な銀河の生い立ちを探ることができる。とくにもっとも遠い、もっとも昔の銀河の観測となると、生まれて間もない銀河を直接見ることになるので、その意義は大きいといえる。

TMTを使えばどのようにして「宇宙で最初の星」が生まれたのかを直接見るができる。最初の星の中では重い元素が作られ、宇宙空間にばらまかれる。わたしたちの体の一部となっているいろいろな元素もこのころに作られたと考えられている。天体の起源、



元素の起源をTMTは探る。

宇宙人を探す

宇宙はこれだけ広いのだ。私たち以外の生命がいても少しもおかしうはないだろう。宇宙に関する謎は数かずあるが、やはりもっとも気になるのは「宇宙人はいのか?」という謎ではないだろうか。私たちはTMTを使っていよいよ本格的な宇宙人探しに挑戦する。

まず、地球以外の多くの生命にとっても、液体の水(氷や水蒸気ではない)が欠かせないと考えられる。惑星系における液体の水の存在する範囲は「ハビタブルゾーン」、つまり「生命居住可能領域」とよばれ、図5に示すように恒星の質量と恒星からの質量によってだいたい決まることがわかっている。わたしたちの地球もちろんこのハビタブルゾーンに入っている。

このハビタブルゾーンは、どちらかという恒星の近く、しかも地球と同じくらいの大きさの惑星の周りに広がっているようだ。そこで、まずは生命のいそうな地球と同じくらいの大きさの惑星(地球型惑星)を探す。すばる望遠鏡をはじめ、現在の地上大型望遠鏡は、数多くの系外惑星(太陽系以外の惑星)を見つけてきたが、ほとんどが木星のように大きく、恒星からの距離が遠い惑星に限られている。現在の技術では、地球型惑星のように小さく、恒星からの距離が小さな惑星は、

感度的にも分解能的にも発見するのが困難なのだ。しかし、TMTの高分解能を用いれば、こうした地球型惑星を数多く発見することができ、惑星ができる現場の様子を詳細に調べることができる。このような観測から地球がどうやってできたのかが明らかになるかもしれない。

さらに、その惑星の大気を探れば、生命存在の証拠となるような物質があるかどうかがわかる。図5にあるように、惑星系を持つ恒星のスペクトルを観測した場合に、恒星の手前をちょうど惑星が通過するとき、その惑星の大気をわずかにかすめてやってきた光は惑星大気によって吸収される。この吸収されたスペクトルを見ることによって、その惑星の大気にどのような物質があるのかがわかり、その中に水、酸素、有機物

遠く天体を見る一赤方偏移

宇宙初期の姿を探るということは、昔の姿、つまり遠く天体を見るということになる。これまでの観測から、宇宙は膨張していると考えられており、そのとき、遠ざかる天体からの光は、光のドップラー効果によって波長が長くなる方向にずれ、光の場合は赤い方向にずれる。遠ざかっている天体から出るスペクトル線は赤い方にずれて観測される。このことを「赤方偏移」といい、 z の数値で表わす。膨張宇宙では遠くにあれば遠くにあるほど速い速度で遠ざかるため、遠く天体ほど赤方偏移が大きくなる。現在観測された最遠方銀河はすばる望遠鏡が発見した、赤方偏移 $z=7.0$ 、128.8億光年の距離の銀河IOK-1だ。

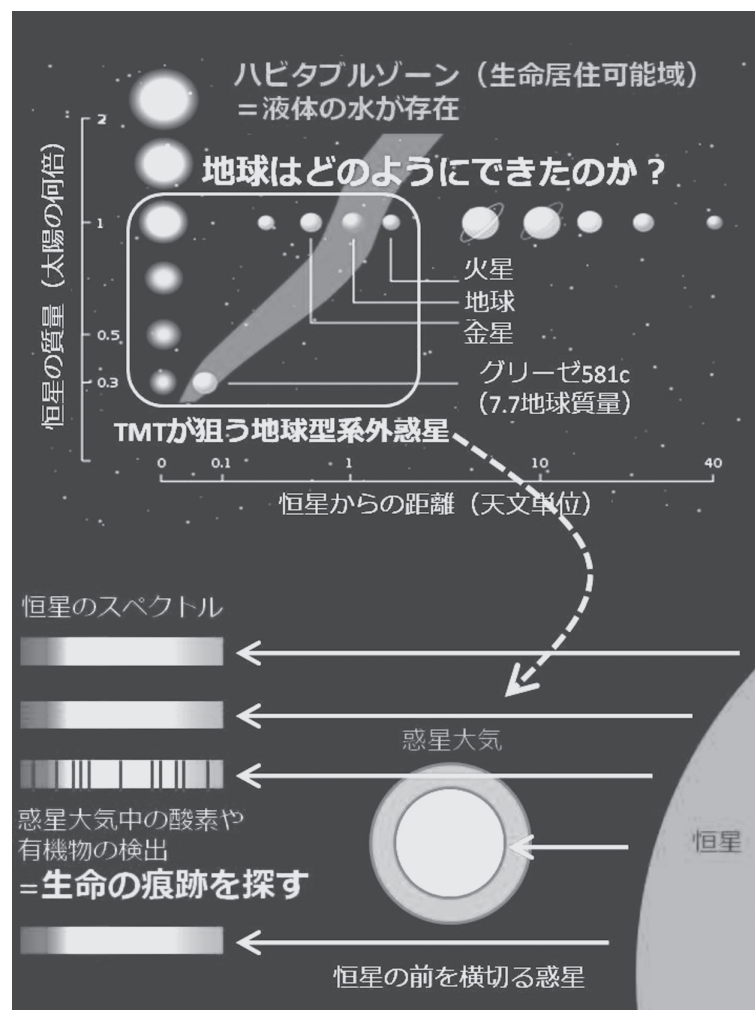


図5 TMTで探る生命の起源。上図は、縦軸に恒星の質量、横軸に恒星からの距離を示し、どのような領域に液体の水が存在するか（ハビタブルゾーン）を示している。TMTはこのような領域に存在する地球型惑星を数多く発見するであろう。また、そのように発見された惑星のいくつかについてはTMTの高分解能観測によって、下図のように、恒星の前を横切る際に、惑星大気を通過する恒星のスペクトルを観測することで、大気中にある酸素や有機物などの生命の痕跡を検出することができる。

などの生命誕生に必要な物質が見つければ、その惑星に生物が住んでいることが容易に想像できる。またその惑星に植物が生えている場合、光合成によってその大気のスペクトルが変化することが知られている。惑星大気のスペクトルを観測すれば植物の存在の有無もわかるのだ。はたして、「あの星に生命がいる」とわかったとき、われわれは次にどのような行動を起こすのだろうか。現在では不可能な惑星大気の観測をTMTで可能にすることが期待されている。



宇宙膨張を測る

これまでのさまざまな観測から「どうやら宇宙は膨張している、しかもそのスピードはどんどん速くなっている」ということがわかってきた。しかし、これまでの観測は宇宙膨張を“思わせる”間接的な証拠ばかりであった。たしかに、さまざまな観測事実は宇宙が膨張していると考えられ、つじつまが合うのだが、宇宙

は本当に膨張しているのだろうか。もし宇宙が本当に膨張していれば、充分離れた天体と天体との距離は刻一刻とどんどん遠くなる。したがって、地球から遠くにある天体の距離を測ると、今日測ったものよりも明日測った距離の方が長くなっているはずだ。しかし、残念ながらその差はほんのわずかで、現在の技術ではその距離の差を測定することはできない。しかし、TMTの高い観測能力を使えば、宇宙の膨張のしかたを直接測ることができる可能性がある。残念ながら、試算によると、この観測はTMTを持ってしても、なかなかむずかしい観測になりそうである。今日と明日、というような日替わりの距離測定の違いを区別するのはほぼ不可能で、10年間の距離測定の違いでなんとか見えてくるかもしれない。つまりTMTが完成後、1回目の距離測定を行ない、10年後に2回目の距離測定をすることで、宇宙が本当に膨張しているのか、していないかわかるわけである（図6）。10年をかけた壮大な実験である。10年の間、同じような条件で精密測定をしなければならず、望遠鏡に取り付ける装

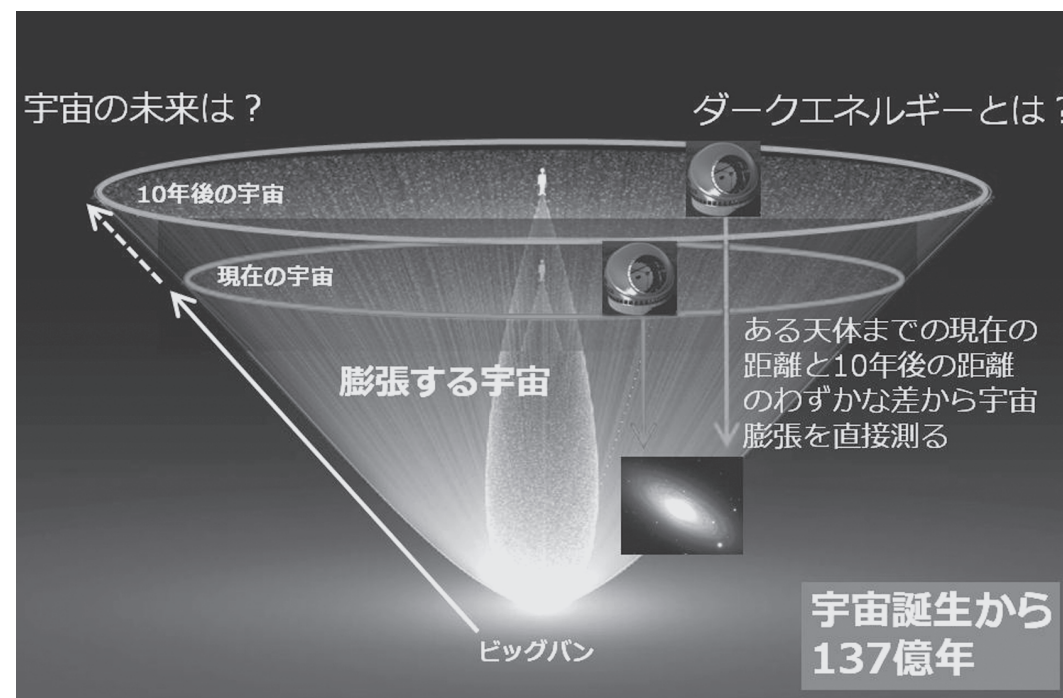


図6 TMTで探る宇宙膨張。ビッグバンで始まった宇宙は今も膨張し続けていると考えられている。現在と10年後の距離測定の差からその宇宙膨張の速度・加速度が測定できるかもしれない。

置の安定性も必要となる。観測対象も10年の間で微動だにしないものが望ましい。このように、技術的課題を抱えてはいるものの、この方法は、なんら仮定をせずに直接的に宇宙膨張を確かめる唯一の実験になるはずである。この観測結果から、これからの宇宙がどうなっていくのかわかり、宇宙を膨張させている謎の「ダークエネルギー」の正体が見つかるかもしれない。



次世代大型望遠鏡が拓く「新しい天文学」

すばる望遠鏡による観測で解明されたことは多くあるが、同時に多くの謎も生まれた。TMTはこのような新たな謎を解き明かし、これまでできなかった「新しい天文学」を可能とする、天文学の歴史を塗り替える成果を期待されているといえる。TMTによって可能となる「新しい天文学」のうち、3つの大きな挑戦について紹介したが、いずれも非常にチャレンジングな観測になるが、もし実現されれば、これまでの天文学の枠組みを超え、天文学に革命的なパラダイムシフトを引き起こす可能性を持っている。

TMTが観測する天体、観測テーマは、もちろんこれだけにとどまらず、太陽系惑星の火山・気象活動、太陽系外縁天体の組成、銀河系中心のブラックホールの詳細な構造、わたしたちの銀河系を超えた金属欠乏星の発見、近傍銀河の形成史、まだ見つからない

小さなブラックホール、100億光年かなたまでの超新星の発見、120億年かなたまでの銀河の内部構造と元素組成、銀河間物質の3次元地図の作成、初期宇宙のガンマ線バースト、物理定数の時間変化、などなど、枚挙にいとまがない。

今回はTMTを中心にその目指すサイエンスに焦点を絞って紹介したが、同様なサイエンスはE-ELT、GMT計画でも盛んに議論されている。TMTはハワイのマウナケア山に建設されるが、他の2つの計画はチリに建設されるので、それぞれ北天、南天の天体を中心に観測が進み、お互いに助け合うことで宇宙の全方向の知見が得られるであろう。

また、TMTはマウナケア山頂の既存の望遠鏡群（すばる望遠鏡、ケック望遠鏡など）、E-ELT、GMTはチリの望遠鏡群（VLT、ALMAなど）と連携することでそれぞれ独自の観測活動を展開できるであろう。現在の8～10m級の地上巨大望遠鏡がそうであるように、将来は、これら3台の30m級地上大型望遠鏡が、互いに競い合い、また助け合って宇宙の謎を解明していくにちがいない。

TMT完成までには、さまざまな技術的困難が待ち構えている。しかし、それを越えたところには確実に天文学の未来が広がっている。将来、わたしたちの宇宙観はどのように変わっているのだろうか。10年後のTMTの活躍に期待していただきたい。