

# 次世代超大型望遠鏡 TMT で狙うトランジット系外惑星観測

山下 卓也

〈国立天文台・TMT プロジェクト室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takuya.yamashita@nao.ac.jp

成田 憲保

〈国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: norio.narita@nao.ac.jp

TMTは日本が参加した国際協力で建設を目指している口径30 mの次世代光学赤外線超大型望遠鏡である。これまで木星型のガス巨大惑星に限られていたトランジット惑星大気の観測が、TMTの大集光力を用いれば地球型惑星にチャレンジすることが可能となる。地球型惑星に生命痕跡となる酸素やメタン、また惑星環境の手がかりとなる温暖化ガスである二酸化炭素などが重要なターゲットとなるであろう。惑星トランジット現象を用いると主星光の一部が惑星大気を通過することで大気観測が可能となるが、地球型惑星の大気は非常に薄い（高さが低い）ために容易な観測ではない。また、ケプラー衛星の発見する地球型惑星の視線速度観測による軌道パラメーター決定も意義深い。さらに、ロシター効果を用いた軌道傾斜角の決定も地球型惑星まで可能となり、ガス巨大惑星の重力的影響を受ける立場にある地球型惑星の軌道進化を初めて明らかにすることができるようになるであろう。

## 1. TMT 望遠鏡

本特集の最後に、日本の光赤外線天文学の将来計画として進んでいる望遠鏡計画でどのようなトランジット惑星観測が考えられているかを紹介したい。SPICA衛星計画については塩谷氏の記事に紹介されており、本記事ではTMT (Thirty Meter Telescope) 計画について紹介する。

TMT計画は、主鏡口径30 mの次世代光赤外超大型望遠鏡を国際協力で建設するプロジェクトで、いくつかのパートナーが独自に計画していた次世代超大型望遠鏡が徐々に統合されてきたものである。カリフォルニア大学・カリフォルニア工

科大学の2大学と国としてはカナダ、日本、中国、インドの4カ国が参加表明をしている。米国については国内にTMTとGMT (Giant Magellan Telescope) という二つの計画があり両方に出資できる財政状況にないことから、どちらかを選択して参加することになっている。現在は、各国が予算申請をして建設資金を獲得する建設準備段階にあり、カリフォルニアの2大学とムーア財団による寄付以外は建設予算が認められているパートナーはまだない。

主鏡口径30 mという数字は、現在の世界最大クラスの8-10 mに比べて3倍以上、面積にして10倍以上という飛躍的なジャンプになる。これを実現

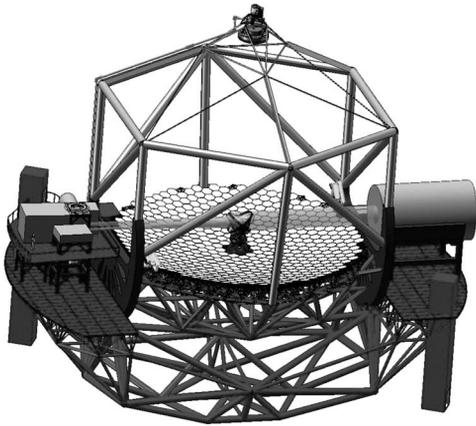


図1 TMT望遠鏡本体の構造 (Courtesy TMT Observatory Corporation<sup>1)</sup>).

するためのキーとなる技術がセグメント鏡（分割鏡）である。セグメント鏡とは、多数の小型の鏡を組み合わせて一つの大きな鏡を実現する手法である。この技術の最大の利点は、一体では事実上製作できない大きなサイズの主鏡を実現できるところである。すばる望遠鏡の主鏡は口径8.3 mの一体の主鏡であるが、これ以上の大きさの一体の主鏡を製作するのは、製造設備・ハンドリング・運搬の観点などから現実的ではない。現在でも、ケック望遠鏡をはじめとする10 mクラスの望遠鏡は全てセグメント鏡を採用している。図1がTMT望遠鏡の構造図である。主鏡は492枚のセグメント鏡の集合体となっている。このような飛躍的な大集光力をもつTMT望遠鏡によって初めて可能となるトランジット観測を以下に紹介する。

## 2. 地球型惑星の生命痕跡の検出

これまでにハッブル宇宙望遠鏡やスピッツァー望遠鏡を中心にしてガス巨大惑星のトランジット観測により惑星大気の研究が行われてきた<sup>2)-6)</sup>が、最近では地上望遠鏡による観測も成果を出し始めている<sup>7)-9)</sup>。TMTが完成すれば、ガス巨大惑星や海王星クラスのより低質量の惑星について高波長分解能の分光観測が可能になり、より詳細な大気情報が得られるであろう。しかし、最もイ

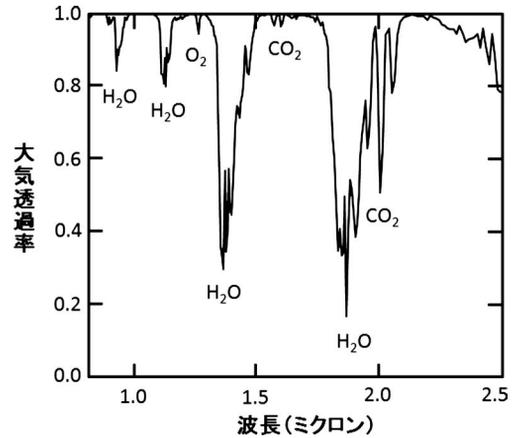


図2 可視光から近赤外線にかけての地球大気吸収線スペクトル。すばる望遠鏡の設置されているマウナケア山頂の条件でのATRAN<sup>10)</sup>を用いたモデル計算。

ンパクトの大きいのは地球型惑星の生命痕跡（バイオマーカー）の検出であろう。地球大気は当初は金星や火星と同じく二酸化炭素が主成分であったと考えられているが、海が存在によってその大部分が地球史の初期に炭酸塩鉱物として地殻に固定された。そして、生命の発生に伴い、まずメタンが、その後、酸素分子が大気成分に登場する。このような生命に由来する物質を生命痕跡と呼び、系外惑星に検出できれば生命の存在の有力な証拠となる。しかし、この観測は30 m望遠鏡をもってしても容易ではない。現在われわれが唯一知っている地球の生命を基準に考えると、水が液体状態で存在できる温度をもちうる軌道範囲（生命居住可能領域：ハビタブルゾーン）にある岩石惑星（地球型惑星と呼ぼう）を分光観測して、その大気に生命痕跡の検出を目指すことになる。

図2は可視光から近赤外線にかけての地球大気吸収線スペクトルのモデル計算であり、地球型惑星の大気吸収線テンプレートとして考えることができる。一番目立つのは強い蒸気の吸収フィーチャーである。地球大気吸収フィーチャーが地上からの天体観測の障害となり1本1本の吸収線の検出は困難であるが、フィーチャーが十分に強

くて幅が広いために低分散分光や広帯域測光によるスペクトルの形を変えるほどになるために、比較的検出は容易である。一方、これらの吸収フィーチャーの間に、酸素や二酸化炭素などの吸収フィーチャーも見られる。0.76ミクロンあたりと1.27ミクロンあたりの酸素の吸収フィーチャーは比較的強かつ水蒸気との重なりもないので検出を目指すターゲットとして重要である<sup>\*1</sup>。1.6ミクロンあたりの二酸化炭素も水蒸気吸収フィーチャーから離れており、地上からの検出を目指すことが可能であろう。

### 2.1 トランジットによる系外惑星大気の検出

では、トランジット現象を利用して惑星の大気成分を検出するにはどうすれば良いのであろうか？ 図3がその模式図である。惑星が主星の手前を通過（トランジット）するとき、主星の光のごく一部は惑星大気を通過する。このため、そのスペクトルには惑星大気の吸収線を含むが、実際には惑星大気の面積が主星に比べて非常に小さいために吸収線は極端に弱い。トランジット前後のスペクトルには惑星大気の吸収線を含まないため、トランジット中のスペクトルとトランジット前後のスペクトルの差分を取ることで、非常に弱い惑星大気吸収線を検出しやすくなる。また、惑星トランジットとは逆の「惑星が主星に隠される」2次惑星食では、食中と前後の差分から惑星の放射光や反射光を測定することができる。惑星放射光や反射光も惑星大気を通過するため、そのスペクトルには惑星大気の吸収線が含まれているのである。したがって、惑星トランジットの場合とは惑星大気について異なる情報をもたらす。2次惑星食の赤外線観測では惑星放射そのものを検出するので、岩石惑星の固体表面の熱放射を大気中の分子が吸収・放射する（放射伝達過程）ことになる。このため、大気の温度構

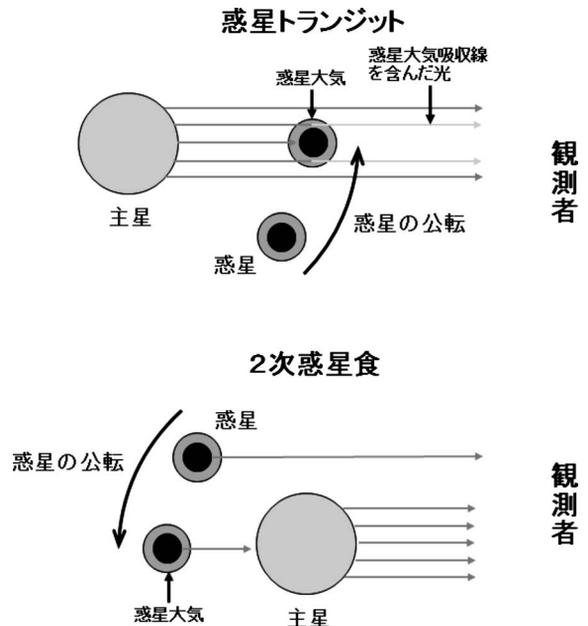


図3 惑星トランジットと2次惑星食を利用して惑星大気の分光情報を得る方法. (上) 惑星が主星の手前を通過するとき、主星の光のごく一部は惑星大気を通過する。(下) 主星に隠れることによって減少する惑星放射（や反射光）を検出する。惑星放射や反射光には大気の上方が含まれている。

造がスペクトルに影響する。固体表面と上空の温度差が小さければ吸収フィーチャーが浅くなるし、温度逆転層があれば場合によっては放射フィーチャーも生じる。

これに対して、トランジット分光の場合は高温の主星を背景に惑星の大気分子が吸収するので惑星大気の温度構造は反映されない。また、主星の光は惑星表面に水平に透過するので吸収層が厚くなり単位面積あたりの吸収が深くなる（逆に、吸収面積は小さいのでトータルでは同程度となる）。一方、低層大気では大気分子のレイリー散乱やエアロゾルなどによって連続光でも光学的に厚くなり大気分子の吸収フィーチャーが見えなくなって

<sup>\*1</sup> 図2ではこれらのフィーチャーは浅く見えるが、1本1本の吸収線は非常に深い（図5-7参照）。また、図2は大気を地上から上方に見たときのモデルであるが、後に述べるトランジットを用いた透過分光では大気を水平に横切って吸収を受けるために吸収フィーチャーはさらに深くなる<sup>11)</sup>。

しまうという現象も起こる。このため、地球をトランジット分光で観測した場合には、大気の下層に集中している水蒸気は地球大気全体の平均から期待されるよりは弱いフィーチャーしか示さない。逆に、上空に集中しているオゾンを検出されやすくなる。

また、惑星の熱放射の検出を目指す2次惑星食では、低温の地球型惑星はTMTなどの地上望遠鏡よりは宇宙望遠鏡による観測が圧倒的に有利となるため、TMTによる地球型惑星の場合には、主に惑星トランジット現象を利用する。

## 2.2 地球型惑星の大気検出

すでに現在利用可能な望遠鏡や観測装置を用いてトランジット現象を利用したガス巨大惑星の大気分光が行われていると述べたが、地球型惑星について同様の観測を行うには飛躍的に困難さが増す。まず、地球型惑星はガス巨大惑星に比べてトランジットの際の影の断面積が小さいことが考えられるが、実はこの要因はあまり大きくない。惑星大気はトランジット時に固体惑星の周りにリング状に取り囲む形で見られる(図4)が、このリング状の部分を通る光に大気の情報が含まれる。したがって、このリングの面積が検出される吸収線フィーチャーの深さに比例することになる。リングの面積は、厚さ×円周長で近似でき、円周長は固体惑星の半径に比例するので、惑星のサイズが大きいとリングの面積は大きくなるように思える。ところが、リングの厚さは大気のスケールハイト(式(1))に比例すると近似できる(ただし、比例係数は簡単ではない<sup>\*2)</sup>)ので、表面重力に反比例する。

$$H = \frac{kT}{\mu g} = \frac{kT}{G\mu\rho R} \quad (1)$$

ここで、 $H$ はスケールハイト、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は惑星大気温度、 $\mu$ は大気の実平均分子量、 $g$ は惑星表面重力(加速度)、 $G$ は重力定数、 $\rho$ は

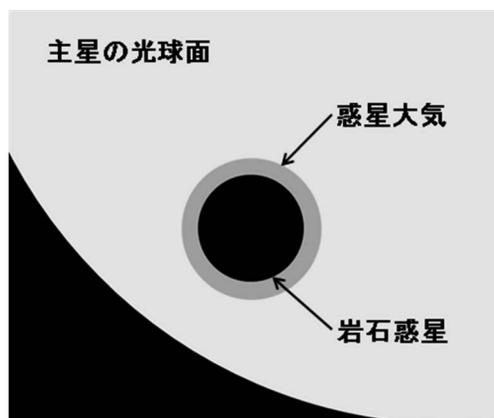


図4 主星の手前を通過する惑星と大気のイメージ。厳密には、惑星大気の底部が連続光で光学的に厚くなる場合には大気の底部も図の黒に相当する部分に含まれる。

惑星の平均密度、 $R$ は惑星半径である。

したがって、平均密度が一定のまま惑星半径が大きくなると表面重力も大きくなり、1次近似では惑星が大きくなってもリングの面積( $2\pi RH$ )は増えない。つまり、リングの面積は惑星半径には無関係で平均密度に反比例するのである。ガス巨大惑星の平均密度は1程度であるが岩石惑星は5程度なので、岩石惑星の大気リングはガス巨大惑星の1/5程度しかなく、大気の検出が困難になるのである。

実は、それ以上に大きな要因が大気の実平均分子量である。スケールハイトは実平均分子量 $\mu$ に反比例するので、実平均分子量が小さいほどスケールハイトが大きくなり検出しやすい。木星などのガス巨大惑星は大気の主成分が水素分子なので、実平均分子量はほぼ2である。これに対して、窒素が主成分の地球大気の実平均分子量は28.8と14倍も大きいので、それだけスケールハイトやリングの面積が小さくなってしまふ。系外惑星は多様な大気をもっていると期待されるが、地球型惑星のような小質量惑星は分子量が小さくて分子速度の速い水

<sup>\*2)</sup> 実際には、大気の実平均分子量の種類によって光学的厚みが異なったり、高度分布が異なる場合があるので、正確に求めるには詳細なモデル計算が必要である<sup>12)-16)</sup>。

素を大量に長期間保持することができないので、水素が大気の主成分にはならないであろう。このように、惑星の平均密度とその大気の大気平均分子量の両方の効果により地球型惑星は木星型惑星に比べて大気の検出が大幅に難しくなるのである<sup>\*3</sup>。

では具体的にどの程度の数値になるのであろうか？ 太陽をトランジットする地球を遠方から観測した場合の減光率は0.008%（木星は約1%）とかなり小さいが、大気リングの面積（スケールハイトの5-10倍と仮定）は地球の断面積の1-2%しかなく、大気による減光率は $1-2 \times 10^{-6}$ と極端に小さい。このため、トランジット時の分光観測における惑星大気吸収スペクトルの深さは $1-2 \times 10^{-6}$ にまで薄められてしまうのである。したがって、主星の光に対するS/N比は $1 \times 10^6$ も必要となる。ノイズは集めた光子総数のルートになるので、 $1 \times 10^6$ のS/N比を得ようとすると、 $10^{12}$ の光子を集めなくてはならない。このためには大口径の望遠鏡が必要である。しかも、単に大量の光を集めただけでは、無限にS/N比が向上するわけではない。望遠鏡や観測装置の安定性に加えて、地上からの観測の場合は大気の影響をいかに抑えるかが重要なポイントとなる。この点については後述する。

### 2.3 M型星を狙う

このような困難を緩和するのに良い方法がある。それは、直径の小さい主星を狙うことである。主星の明るさと惑星大気による吸収量のコントラストは、主星の面積とトランジット惑星の大気リングの面積の比であるから、主星の直径が小さくなれば必要なコントラストはその2乗で緩和されることになる。恒星の直径は質量が小さいほど小さいので、恒星の中では最も低質量のM型星をトランジットする惑星をターゲットにすると最も有利となる。例えば、M4型矮星の直径は太陽の約0.26倍<sup>15), 18)</sup>なので、惑星大気吸収スペクト

ルの深さは $1-2 \times 10^{-5}$ とG型矮星に比べて約10倍程度有利となる。これがM8型矮星となると直径が太陽の0.1倍（木星と同程度）となりさらに有利になるが、観測可能な距離内にある存在数（正確には発見数）が少ないので、存在数も多いM4-5型矮星が現実的なターゲットであろう。

さらに、惑星大気スペクトルのS/N比に関してもM型矮星は有利となる。M型星の高分散分光は超大型望遠鏡にとっては非常に明るいターゲットとなるので、ノイズは主星からの光子数によって決まる。したがって、直径の小さいM型矮星はノイズも小さくなり、S/N比の点でも有利なのである。

このようなターゲットはまだ発見されていない。ケプラー衛星は地球類似惑星を多数検出すると期待されており、実際一つめの候補惑星ケプラー22bの発見が報告されている。しかし、ケプラー衛星は夜空のごく一部を連続的に観測する手法を取るなどのため、主星は遠方の暗い星になってしまうのである。地球型惑星の大気分光を行うには地球近傍の明るい主星に対して起こるトランジット現象を利用しなければならないのである。したがって、ケプラー衛星の発見する地球型惑星は候補とはならない。このようなターゲットとして、近傍の特に低質量星にトランジット惑星を探そうというプロジェクトは世界中で競って行われ始めているが、日本のプロジェクトを含めて本特集の成田氏の記事で紹介されている。

### 2.3 地上からバイオマーカーを検出？

地球型惑星の大気からの検出を目指す酸素やメタン・二酸化炭素などは、当然ながら地球大気にも存在しており、検出の障害になるはずであるが、なぜこれらの吸収フィーチャーは地上からでも観測できるのであろうか？ 地上の望遠鏡から観測した太陽スペクトルには地球大気の大気吸収線も刻まれているので、高波長分解能の太陽スペクト

\*3 地球の6倍程度の質量の系外惑星・GJ1214bについて大気分光観測が試みられているが、大気ガスフィーチャーは検出されていない<sup>7-9), 17)</sup>。

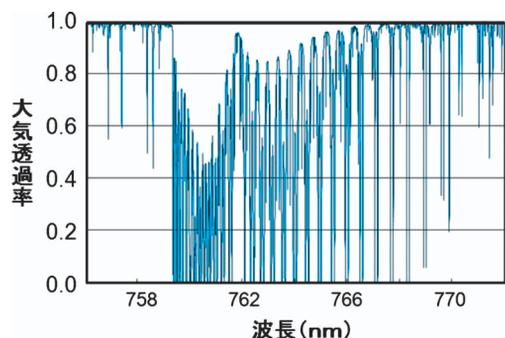


図5 地球大気の波長760 nm付近の酸素吸収線（太陽スペクトル<sup>19)</sup>より生成）。

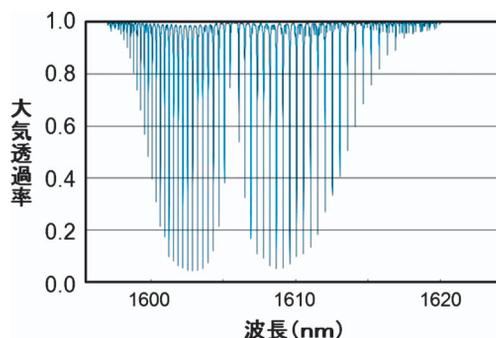


図7 地球大気の波長1,610 nm付近の二酸化炭素吸収線（太陽スペクトル<sup>19)</sup>より生成）。

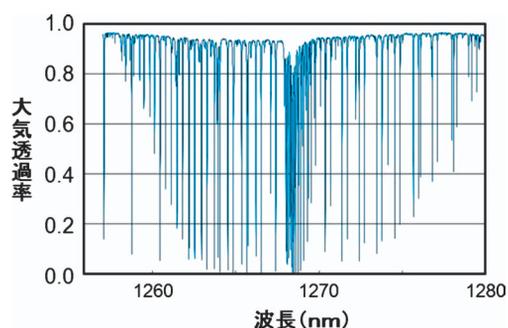


図6 地球大気の波長1,270 nm付近の酸素吸収線（太陽スペクトル<sup>19)</sup>より生成）。

ルから地球大気の吸収線の様子を推定することができる。図5-7は酸素と二酸化炭素の吸収線のスペクトルである。この図は広い波長範囲を表現しているので1本1本の吸収線の速度幅を読み取ることはできないが、吸収線のコア部分の速度幅はせいぜい数  $\text{km s}^{-1}$  程度である。したがって、観測時の望遠鏡から見た系外惑星の視線速度がそれ以上ずれていれば、系外惑星大気の吸収線の情報は地上に到達することになる。

系外惑星がトランジットを起こす時はその視線速度は主星と同じとなるので、主星の視線速度を考えれば良い。近傍の星の視線速度は太陽を基準として数  $\text{km s}^{-1}$  から数十  $\text{km s}^{-1}$  程度であり、地上から観測する場合には、これに地球の公転運動（最大  $30 \text{ km s}^{-1}$ ）・自転運動（最大  $0.5 \text{ km s}^{-1}$ ）が加わることになる。したがって、ほとんどのターゲットに対して、高い頻度で十分な視線速度差を

もった観測が行えるはずである。ただし、観測される分光スペクトルは分光器の波長分解能でなまされてしまうので、系外惑星大気の吸収線スペクトルは深い地球大気の吸収プロファイルの裾野に重なって観測されることになる。地球類似惑星大気の吸収線スペクトルは  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  程度と非常に浅いため、地球大気の吸収プロファイルのわずかな変動（分光器の変動によるものも含む）の影響を受けてしまうと考えられる。地球大気の吸収線の裾野をなるべく小さくするには分光器の波長分解能が高いほうがよく、その変動の影響を小さくするには分光器の波長やプロファイルが安定しているのが望ましい。また、地球大気と系外惑星の視線速度差は大きいほうが望ましいが、大気分光の行える条件を満たすトランジット地球型惑星は非常に限られたものになると思われるので、選択の余地はないであろう。

このような、なるべく高い分散の分光器を用いることで系外惑星大気と地球大気の吸収線を分離する手法に加えて、同時分光の利点を追求するアイデアも考えられる。夜空の広い範囲で同時に分光観測を行うことができれば、トランジットを起こす星と比較星のスペクトルを比較して、大気による変動とトランジットによる変動を分離することが可能となる。しかし、地球型惑星大気を観測するにはターゲットがかなり明るい星に限られてしまうため、TMT望遠鏡に同時分光が可能な観

測装置を作ったとしても、その同時分光範囲内に同程度の明るさの比較星を見つけることができるかどうかガキとなる。

## 2.4 TMTによる観測

TMT望遠鏡は国際協力で作る超大型望遠鏡なので多様な観測装置が計画されているが、望遠鏡の観測開始時に利用可能となる第1期観測装置の3台には可視光と近赤外線の高分散分光器は含まれていない。次の世代の観測装置の候補には入っており、日本も可視光と赤外線の高分散分光器を担当することを目指して開発を進めている。

しかし、M型矮星のトランジット岩石惑星の大気の検出は、口径30 mの次世代超大型望遠鏡にとって容易ではない。例えば、仮想ターゲットとして、距離3 pcにあるM4-5型矮星を考える。M型星は光度が小さいので、惑星表面に水が液体で存在できるハビタブルゾーンの主星-惑星間距離が0.1天文単位と小さく、惑星が偶然トランジットする確率は約5%<sup>\*4</sup>とそれほど小さいわけではない。太陽からの距離5 pc以内にはM型矮星が44個あるので、運がよければこのなかに一つのトランジットするハビタブル岩石惑星が見つかるかもしれない。また、軌道周期も17日と短いのでトランジットを起こす頻度も高くなる。トランジットの継続時間は2時間程度なので、この半分を観測可能と考えると1年間あたり22時間のトランジット観測が可能となる。TMTに（すばる望遠鏡のHDSと同じシステム効率の）波長分解能10万の高分散分光器を取り付けて22時間観測し、760 nmの酸素吸収フィーチャー全体を積分すると酸素の検出についてのS/N比がようやく1程度となる。ターゲットの主星は表面温度の低いM型矮星なので可視光より赤外線のほうが明るい。したがって、赤外線の酸素や二酸化炭素の吸収フィーチャーではS/N比が高くなるが、それでも2-3程度である。したがって、10年間の

観測可能なトランジットをすべて観測してようやくS/N比が10程度となり検出できるレベルとなるのである。

このように、地球とそっくりの岩石惑星大気を考えると、生命痕跡を探すのは非常に困難な観測となる。しかし、これまでの主にガス巨大惑星についての観測から系外惑星は太陽系とそっくりなものはまれであることが明らかとなってきた。岩石惑星についても太陽系以上の多様性をもっていることが期待される。また、われわれの想像できないような生命があっても不思議ではない。あったとしてもそれを証明することは容易ではないことは想像に難くないが、今後の理論・観測手法両面の研究の進展に期待したい。

## 3. トランジット惑星系の視線速度測定とそのサイエンス

### 3.1 TMTでの視線速度観測の意義

TMTの第2期装置として計画されている可視と近赤外の高分散分光器には、高精度な視線速度測定装置の搭載が検討されている。特に可視の装置では10 cm/s程度の視線速度の決定精度が目標とされている。もしこれが実現すれば、TMTは30 m級の望遠鏡として北天で唯一の、高精度視線速度測定装置を備えた望遠鏡となる。このことの最大のメリットは、北天の面白い惑星系の視線速度フォローアップがTMTの独壇場となることだろう。

本特集の他の記事でも紹介されているように、ケプラー衛星によって北天には多数の面白いトランジット惑星系が発見されている。しかし、ケプラー衛星で観測されている大多数の惑星系はVバンドで11-16等級程度であり、現在ある10 m級の望遠鏡にとっては暗すぎるターゲットが多い。TMTでは望遠鏡の口径が大きくなるため、より暗い惑星系まで高精度な視線速度測定を行え

<sup>\*4</sup> M型星のパラメーターには不定性が大きいために、この値も不定性が大きい。本稿の成田氏の記事の脚注も参照。

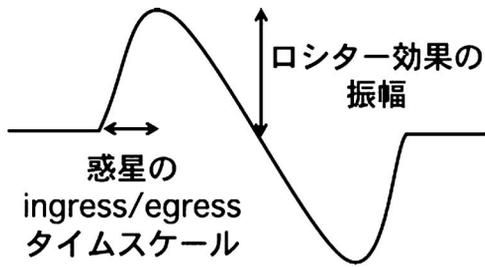


図8 ロシター効果による視線速度のずれの概念図。

るようになる。特に、ちょうどケプラーによって発見されつつあるトランジットをする地球型惑星などは、TMTでの格好の観測ターゲットとなる。そのため、TMTによって初めて高精度な視線速度測定が可能となる惑星はかなりの数となるだろう。

トランジット惑星の視線速度フォローアップをすることの最大の意義は、それによって惑星の正確な半径と質量、ひいては密度まで決定することができることだろう。こうした惑星の物理量は、他の方法では得られない貴重な情報であり、本特集第1回の生駒氏の記事で解説されたように、これらの物理量は惑星の内部構造を決定する有力な手がかりとなる。

また、視線速度観測によって惑星の軌道離心率などの軌道要素が求まることも重要である。これはトランジット惑星系でなくても良いことだが、軌道傾斜角の不定性がなく惑星の真の質量までわかることは、観測された惑星の軌道要素を惑星形成・移動理論と比較する際に都合が良い。また、TMTの時間は貴重であるため、観測ターゲットには優先順位をつける必要がある。そのため、すでに惑星があることがわかっているケプラー領域のトランジット惑星系は、惑星の軌道を決定し、その多様性を調べる良いサンプルとなるだろう。

### 3.2 ロシター効果の測定

TMTの視線速度測定装置によって可能となるもう一つのサイエンスは、本特集第3回の平野氏の記事で紹介されたロシター効果の測定である。ロシター効果は、トランジットをしている惑星が

主星の自転を隠すことによって起こる視線速度のずれであり、典型的には図8のような形で観測される。このロシター効果は、惑星の公転軌道の傾きを反映しており、これは前述の軌道離心率とともに惑星の軌道進化の仕組みを反映している。例えば、図8は惑星の公転軸が主星の自転軸とそろっている場合のロシター効果を表しているが、現実には主星の自転に逆行して公転しているような惑星も存在する<sup>20)</sup>。これは惑星同士の重力散乱や伴星による永年摂動など、太陽系では起こらなかったような物理過程が関係していると考えられている。

このように惑星の軌道進化を知るために有力なロシター効果の測定だが、その観測ターゲットはこれまで太陽型星の周りの木星型惑星にほぼ限られていた。これはロシター効果が限られた時間で起こる現象であり、現在ある10 m級望遠鏡の視線速度測定装置では、ロシター効果の検出が可能なのはそれらだけだったためである。

これがどうしてなのかももう少し詳しく説明しよう。ロシター効果を検出し正確にモデル化するには、惑星のingress/egressのタイムスケール程度の積分時間で、ロシター効果の振幅程度の視線速度のずれを判別できる必要がある（より長い時間積分するとロシター効果はなまされてしまう）。ではロシター効果の振幅がどれくらいかという、典型的には主星の見かけの自転速度に惑星の隠す割合を掛けたものとなる。例えば、自転速度が1 km/sの主星を、惑星が1%だけ隠すと、およそ10 m/sのロシター効果が表れる。この1%というのは、だいたい太陽型星を木星型惑星が隠す割合に相当する。しかし惑星のサイズがより小さな海王星型惑星や地球型惑星となると、0.01–0.1%程度まで隠す割合は小さくなってしまう。このため、短時間で高精度な視線速度測定が必要となり、現在ある望遠鏡の視線速度測定装置ではロシター効果が検出可能なターゲットがほとんど木星型惑星しかなくなってしまったのである。

一方、TMTの可視の視線速度測定装置が稼働した場合、ロシター効果が測定できるターゲットは格段に増加する。特にケプラー衛星で発見されている地球型惑星や海王星型惑星はその新しい候補となるだろう。こうして観測ターゲットが広がることによって、これまで調べられていなかった地球型惑星や海王星型惑星の軌道進化まで知ることができるようになる。

なお低温度星の場合は、主星のサイズが小さくなるため、主星と惑星の大きさの比が比較的大きくなり、ロシター効果の振幅も大きくなる傾向がある。また、低温度星は近赤外領域ではかなり明るくなるという性質をもつため、特に太陽系近傍の低温度星に対しては、2014年頃に稼働予定のすばる望遠鏡の近赤外視線速度測定装置IRDでも地球型惑星程度まで観測が可能だろう。しかし、豊富なターゲットを与えてくれるケプラー衛星で発見されるようなやや遠い低温度星に対しては、TMTの近赤外視線速度測定装置が必要となる。

これまでのところ、太陽型星の周りの木星型惑星に関しては、50個程度の惑星でロシター効果が測定されている。それをもとに木星型惑星の軌道進化に対して議論がなされているが、今後海王星型惑星や地球型惑星の軌道進化にまで議論を広げていくには、こうした惑星でもある程度の観測数が必要である。

TMTの視線速度測定装置によってより小さな惑星の軌道進化まで調べることは、惑星系はどのようにしてできたのかという問いに対する答えを導くことにつながっている。また、木星型惑星はその質量の大きさから惑星系内では主に重力擾乱源として働くが、地球型惑星はその重力擾乱を受ける立場にあり、軌道進化の様子が木星型惑星と全く異なることが予想される。生命の発生する可能性のある地球型惑星がどのような軌道をもっているのか？ どのような軌道進化を遂げてきたのか？ このような課題の解明には、超大型望遠鏡の完成を待たなければならない。

## 謝 辞

ATRANの計算をしていただいた藤原英明氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) <http://www.tmt.org/>
- 2) Charbonneau D., et al., 2002, ApJ 568,377
- 3) Videl-Madjar A., et al., 2003 Nature 422, 143
- 4) Knutson H., et al., 2007, ApJ 655, 564
- 5) Barman T., 2007, ApJ 661, L191
- 6) Swain M. R., et al., 2008, Nature 452, 329
- 7) Bean J. L., et al., 2010, Nature 468, 669
- 8) Croll B. et al., 2011, ApJ 736, 78
- 9) Bean J. L., et al., 2011, ApJ 743, 92
- 10) Lord 1992, NASA Technical Memorandum 103957
- 11) Palte E. et al., 2009, Nature 459, 814
- 12) Ehrenreich D., et al., 2006, AAp 448, 379
- 13) Kaltenegger L., 2007, ApJ 658, 598
- 14) Miller-Ricci E., et al., 2009, ApJ 690, 1056
- 15) Kaltenegger L., Traub W. A., 2009, ApJ 698, 519
- 16) Rauer H., et al., 2011, AAp 529, A8
- 17) Désert J.-M., et al., 2011, ApJ 731, L40
- 18) Reid N. A., Hawley S. L., 2005, in *New Light on Dark Stars: Red Dwarfs, Low-Mass Stars*, ed. Reid N. A., Hawley S. L., p. 169, Brown Dwarfs, New York
- 19) <http://www.nso.edu/>
- 20) Narita N., et al., 2009, PASJ 61, L35

## Transit Observations of Exoplanets

Takuya YAMASHITA and Norio NARITA

National Astronomical Observatory of Japan,  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: TMT (Thirty Meter Telescope) is an international project to build a next generation extremely large telescope. Large aperture of the telescope enables us to extend the transit observations of exo-planetary atmosphere into terrestrial ones. Biomarkers, such as oxygen and methane, and warming gas, such as carbon dioxide are important target gases. During the planetary transits, a small portion of star light goes through planetary atmosphere, where atmospheric gases print their absorption features. However, atmospheric layer of terrestrial planets is very thin and, hence, its detection is not easy even with the 30 m telescope. TMT will be the unique telescope to make radial velocity measurements of terrestrial planets to be discovered with Kepler. The Rossiter-McLaughlin effect measurements of terrestrial exo-planets can be made only with TMT class telescopes.