

太陽系近傍の低温度星を公転する 新しいトランジット惑星の探索

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

ケプラーによるトランジットサーベイが進み、宇宙にはすでに数千個に及ぶトランジット惑星候補が発見されている。その中には、生命居住可能領域にあると考えられる惑星や、まさに地球と同程度のサイズの岩石惑星までであることがわかってきた。では今後の新たなトランジット惑星探しは、もはや無意味なものになってしまったのだろうか？ その答えはまだ「No」である。トランジット惑星探しは今新たな方向へと動き出している。それは、より太陽系近傍にあるトランジット惑星系の探索である。本稿では、そのような試みについての背景と、われわれが新しく開始した低温度星周りでのトランジット惑星探しについて紹介する。

1. ケプラーの新たな成果

トランジット惑星探しの歴史を紹介した本特集の第1回の記事から3カ月が経ち、その間にも数々の素晴らしい成果がNASAのケプラー計画によってもたらされている。そこで第1回の記事以降になされた歴史的な発見をいくつか紹介したい。

まず2011年12月5日には、ついに生命居住可能領域（ハビタブルゾーン）にあると考えられる初めてのトランジット惑星Kepler-22bが発表された¹⁾。Kepler-22bは太陽系から約620光年にある太陽より若干低温（約5,500 K）の恒星Kepler-22を約290日の公転周期で公転しており、この公転距離で惑星が大気をもっていると考え、温室効果によって惑星の表面温度が295 K程度（摂氏22度程度）になるだろうと議論されている。

ただ、この惑星は地球とそっくりというわけではなく、地球の2.4倍程度の大きさをもつことがケプラーの測光観測からわかっている。また、ケック望遠鏡で行われた視線速度測定では惑星由来の視線速度がはっきりとは検出されておらず、

惑星質量に対しては地球質量の124倍以下という弱い制限だけがつけられている。この制限だけでは惑星の内部構造についてほとんど決定することができないが、地球のような岩石惑星である可能性も残されている（トランジット惑星の内部構造を推定する方法については、本特集第1回の生駒大洋氏の記事をご覧ください）。

一方、2011年12月20日には、五つのトランジット惑星をもつ恒星Kepler-20に、地球サイズとほぼ同じ大きさの惑星Kepler-20fや、金星よりやや小さな惑星Kepler-20eがあることが報告された²⁾。これらの二つの惑星については、ケック望遠鏡による視線速度測定と惑星のサイズによる理論的な制限から、地球の数倍以内の質量であることが予想されており、鉄とシリケートを主体とした岩石惑星であると予想されている。

ただし、このKepler-20e, fの公転周期は約6日と約20日であり、主星は約5,500 Kの太陽型星であるため、残念ながらこれらの二つの惑星はハビタブルゾーンよりも内側にあると考えられている。しかし、まさに地球サイズと呼べる惑星が発

見されたことは、ケプラーが当初の大きな目標を一つ達成したことを意味している。

また、この惑星系ではほかにもガス惑星と考えられる三つの惑星 Kepler-20b, c, d も発見されている³⁾。しかし太陽系の常識からすると不思議なことに、この三つのガス惑星と岩石惑星と考えられる Kepler-20e, f は交互になって並んでいる^{*1}。このように奇妙な惑星配置の発見については、今後惑星系形成理論にも波紋を投げかけるだろう。

2. トランジット惑星探しの今後

前節で紹介したケプラーの新たな発見により、宇宙には地球サイズの岩石惑星や生命居住可能領域にある惑星が普遍的に存在することが明らかになってきた。それだけにとどまらず、ケプラーは2011年末の時点で2,326個ものトランジット惑星候補を報告している。そしてその中には、Kepler-22bのように生命居住可能領域にあると考えられる惑星が約50個も存在している。今後はこれらの面白いトランジット惑星に対して特徴づけの研究を行うというのもトランジット惑星研究の一つの方向性となるだろう。その点において、現在計画されている TMT や SPICA などの次世代望遠鏡が将来大きな力を発揮することは間違いない。(詳細は本特集の山下卓也氏と塩谷圭吾氏の記事をご覧ください)。

一方で、ケプラーによって数千個もトランジット惑星候補が発見され、生命居住可能惑星候補も多数発見された今、この先もトランジット惑星探しを続けることは無意味だと思われる方もいるかもしれない。実際、今後さらに統計を増やすだけのようなトランジット惑星探しはあまり意味がな

いだろう。

しかし、ケプラーにも弱点がある。それは観測の照準をある程度暗い(V等級で~12等以上)ものに合わせている^{*2}ため、観測対象の恒星のほとんどが数百光年~数千光年の遠方にあるという点である。このような暗いトランジット惑星系に対しては、視線速度測定による惑星の軌道や質量の決定、あるいは惑星の大気組成などの特徴づけがかなり難しくなる。もちろん、今回発見された Kepler-22b のような面白い惑星に対しては、TMT による視線速度測定や SPICA によるトランジット観測などを行うことができ、ある程度の特徴づけが可能だろう。しかし、やはり太陽系から遠く離れているために、より高精度な特徴づけ(例えば、惑星に存在するかもしれない生命の痕跡を探すといった研究)は非常に困難だと予想される。

そこで今後のトランジット惑星探しの方向性として注目されているのが、数十光年以内の太陽系近傍にあるトランジット惑星探しである。このような太陽系近傍のトランジット惑星系は、すばる望遠鏡などの既存の望遠鏡でもある程度観測が進められるだけでなく、TMT や SPICA などでは絶好の観測ターゲットとなり、惑星の環境や性質を詳しく調べることが可能となる。そのため、今後はより太陽系に近く、発見された後で惑星の性質を詳細に調べることが可能なトランジット惑星系を発見することに、大きな価値があるだろう。

本特集第1回の筆者の記事で紹介したように、そのような太陽系近傍のトランジット惑星探しの流れとしては、新たな宇宙望遠鏡による全天のトランジットサーベイと、低温度星に特化した地上望遠鏡によるトランジットサーベイがある。その

^{*1} 系外惑星の名前の付け方は、主星の名前の後に b, c, d... とアルファベットの小文字をつけていくというものだが、必ずしも公転周期順ではなく、「発見された順に内側から順」である。つまり、後から内側の惑星が発見された場合には、名前が内側からアルファベット順にはならなくなる。Kepler-20 の場合は先に三つのガス惑星 b, c, d が確認され、その後二つの岩石惑星 e, f が確認されたという扱いであり、実際の惑星の公転周期順に並べると Kepler-20b, e, c, f, d となる。

^{*2} ケプラーでは1回の積分時間が30分とかなり長いので、視野内に明るい恒星があると CCD が飽和してしまう。また、それによる悪影響を避けるため、ケプラーの視野は多数の明るい恒星が入らないよう観測領域が選ばれている。そのため太陽系近傍の恒星はほとんど視野内に入っていない(ただし、可視で暗い低温度星は入っている可能性がある)。

世界的な流れの中で、筆者らのチームでは後者の方法によって太陽系近傍のトランジット地球型惑星探しを開始している。本稿ではその背景と方法について紹介していこう。

3. 低温度星の特徴と困難

本稿でいう低温度星とは、スペクトル型でいうとK型晩期星からM型星にあたる太陽より低質量（太陽の0.1倍から0.5倍程度）の恒星であり、だいたい温度が4,000 K以下のものを指している。このような低温度星は、いわゆる太陽型星（スペクトル型でF, G, K型星）よりも多い割合で宇宙に存在している。実際、だいたい50光年以内の太陽系近傍の恒星は7割程度が低温度星に分類され、その数も数百個以上にのぼる⁴⁾。

このように太陽系近傍に豊富に存在する低温度星だが、これまで太陽から50光年以内の低温度星でトランジット惑星が発見されたのは、GJ436 (M2.5型星, 0.45太陽質量, 33光年)⁵⁾とGJ1214 (M4.5型星, 0.15太陽質量, 42光年)⁶⁾の2例しかない。このうちGJ436はもともと視線速度観測で見つかった海王星型惑星がトランジットをしていることが確かめられたものであり、GJ1214は低温度星に特化したトランジットサーベイ (MEarth) で初めて発見された地球型惑星である（どちらも詳細は本特集第1回の筆者の記事をご覧ください）。

このことは、第1回の記事で紹介した Super-WASP や HATNet などの地上トランジットサーベイグループ（すでに100個以上のトランジット惑星を発見している）も、低温度星周りのトランジット惑星に関してはまだ一つも発見していないことを意味している。

このように低温度星周りのトランジット惑星探しはかどってこなかった最大の原因は、たとえば低温度星が太陽系近傍にあっても、可視領域では非常に暗いことにある。例えば、先ほど紹介した

GJ436はV等級が10.7等であり、GJ1214では14.7等である。このような明るさでは、測光精度や視線速度の決定精度があまり高くないため、惑星を発見することが困難となる。

実際GJ1214ほど暗い天体に対しては、すばる望遠鏡のHDSなど現在ある可視の視線速度測定装置では正確な視線速度測定が難しい。また、そもそも可視では測光精度が低いため、トランジットサーベイでの減光検出の有意性がそれほど高くない。そのため後述する惑星発見確認のためのさまざまなフォローアップは、太陽型星周りのホットジュピターのような信頼性の高い候補のほうが優先されてきた。このように、低温度星に対してはこれまで測光や視線速度測定が高精度で実施できなかったため、地上トランジットサーベイで取得された低温度星のデータもあまり活用されてこなかった。

4. 低温度星が注目されるようになった理由

ではなぜ最近になって、トランジット惑星探しで低温度星が注目されるようになったのだろうか。その大きな要因は二つある。一つは最近になって近赤外領域での高精度測光が可能となり、高精度な視線速度測定も近い将来に可能になると期待されるようになったこと、もう一つは太陽系近傍の低温度星に対しては、潜在的に生命居住可能領域にあるトランジット地球型惑星の発見も可能であることである。

まず最初の要因から説明していこう。先ほど述べたように、低温度星は可視領域では非常に暗い。しかし、近赤外領域ではかなり明るくなるという特徴がある。例えば、GJ436はV等級が10.7等なのに対してJ等級は6.9等であり、GJ1214はV等級が14.7等に対してJ等級は9.8等となる^{*3}。典型的には、だいたい50光年以内の低温度星は、J等級が10等よりも明るい。

^{*3} 低温度星はV-Jの色がだいたい3-6等となっており、M型の晩期星になるほどV-Jの値が大きい。

このくらいの明るさがあれば、現在ある大きさの望遠鏡でも、高精度と呼ぶのに十分な量の光子を集めることが可能である。そのため、もし赤外の望遠鏡で高精度な測光や視線速度測定ができるのであれば、低温度星でのトランジット惑星探しは十分に可能なのである。しかし数年前までは、そのような観測を近赤外領域で行うことができる装置はほとんど存在していなかった。最近になって低温度星のトランジット惑星探しが注目されるようになってきたのは、この状況が変わってきたためだろう。

次に、なぜ太陽系近傍の低温度星では生命居住可能領域にあるトランジット地球型惑星の発見も可能なのか説明しよう。まず低温度星は名前の通り温度が低いため、その周りの生命居住可能領域は太陽型星の場合に比べて主星に近く、公転周期が数日～数十日のあたりになる。そして、公転周期が短くなるということは、主星に与える視線速度の振幅が大きくなり、さらに低温度星は質量が小さいために地球型惑星でも1 m/sレベルの視線速度変動を引き起こす。そのため、1 m/sレベルの高精度な視線速度測定ができれば、そのような惑星を発見することも可能である。

一方、軌道が主星に近くなるとトランジットが起こる幾何学的確率も高くなる。例えば、低温度星まわりの生命居住可能領域にある惑星がトランジットする幾何学的確率はM0型星で～1%、M6型星で2-10%となる^{*4}。また、低温度星は小さいために、地球型惑星がトランジットをした場合でも0.1-1%程度^{*5}の減光を起こす。そのため、0.1% (1 mmag)レベルの高精度な測光観測ができ

れば、そのような惑星のトランジットを検出することも可能となる。

以上のように、低温度星は近赤外領域でかなり明るくなるという特徴をもち、もし近赤外領域で高精度な測光や視線速度測定が可能であれば、太陽系近傍にあるトランジット地球型惑星の発見も可能である。しかも、その中には生命居住可能領域にある惑星も潜在的に含まれる。もしそのような惑星を太陽系近傍で発見することができれば、その天体はTMTなどの大型将来計画において注目の研究対象になるだろう。われわれのチームが目指しているのは、そのような太陽系近傍にあるトランジット地球型惑星の発見である。

5. トランジット惑星の探し方

トランジット惑星の探し方としては、まず多数の恒星のモニター測光観測を行い、各星の明るさの周期解析を行って周期的な減光を検出するのが第一歩である。

しかし、トランジット惑星はそう簡単に見つかるわけではない。なぜなら、単純に周期的な減光を検出しただけでは、トランジット惑星以外の減光現象が混入してしまうからである。そのため、トランジットサーベイによって周期的な減光が検出された後も、その減光が本当に惑星によるものかどうかを判別し、トランジット惑星以外の偽検出を取り除くことが必要となる。

トランジットのような周期的減光を起こすものとしては、図1に示したように(a)本物のトランジット惑星、(b)連星の一方がもう一方の端をかすめるタイプの食連星 (grazing eclipsing binary)、

^{*4} M6型星に分類されている主系列星には光度に幅があり、文献によって 10^{-5} - $10^{-3}L_{\odot}$ となっている。例えば $10^{-4}L_{\odot}$ を値にとると、生命居住可能領域の公転距離は0.01 AU程度となり、M6型星の半径を $0.15R_{\odot}$ と考えるとトランジット確率は7%程度となる。実際には、その恒星の光度によって生命居住可能領域の公転距離とトランジット確率には数倍程度の幅がある。なお、太陽と地球の場合は～0.5%となる。

^{*5} 例えば、 $0.15R_{\odot}$ の半径を持つ低温度星を地球サイズの惑星がトランジットした場合は0.4%程度の減光が起こり、太陽の半分程度の半径をもつ低温度星を地球の2倍のサイズのスーパーアースがトランジットした場合は0.1%程度の減光が起こる。一方、太陽サイズの主星を地球サイズの惑星がトランジットした場合は0.01%程度の減光となり、宇宙望遠鏡が必要なレベルとなる。

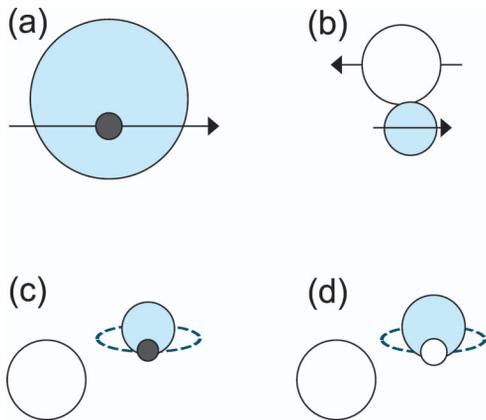


図1 惑星のトランジットとさまざまな偽検出の例。
黒丸が惑星，白丸と青丸が恒星を表している。

(c) 二重星の一方に本物のトランジット惑星（二重星が重力的に束縛されているかは問わない），
(d) 食連星を含んだ三重星（食連星ともう一つの星が重力的に束縛されているかは問わない），などの場合がある。これらの場合を判別してトランジット惑星を発見するには，高精度測光，高い空間分解能をもった直接撮像，高分散分光による視線速度測定などの確認観測が必要となる。この節ではこれらの確認観測について詳しく紹介しよう。

天体の周期的な減光現象として代表的なものは食連星である。しかし単純な食連星は，減光率が惑星にしては大きすぎたり，惑星の場合は簡単に検出されないはずの二次食 (secondary eclipse) がはっきり見えていたりするため，測光精度が低いトランジットサーベイでも比較的すぐ判別できる。一方，測光精度が低い場合にトランジット惑星とすぐ区別することができないのは，もう少し複雑な場合である。

トランジットの偽検出として最も多いのは，(b) の grazing eclipsing binary である。この場合は減光率が惑星程度になって二次食もなくなるこ

とがあるため，簡単には偽検出であることを否定できない。過去の地上望遠鏡によるトランジットサーベイでは，この偽検出が大半であることが知られている^{*6}。このような場合には，高精度測光による減光形状の確認か，視線速度測定による対応天体の最小質量や公転周期の確認によって，偽検出を取り除くことができる。

なお，連星かどうかの確認を行うだけならば，トランジットの高精度測光観測を行うのではなく，高分散分光観測を行って分光連星かどうかを確認すれば良いと思われるかもしれない。確かに高分散分光観測を行えば分光連星かどうか判別することも可能だが，伴星が暗いと検出できない場合もあり，また連星を確認しただけでは減光がその連星の食によるものなのか，(c) のように連星の一方に本物のトランジット惑星があるのかを区別できない。実際連星の一方にトランジット惑星がある例は多く発見されており，これらを区別するためには視線速度の変動周期と減光の周期が同じかどうかを確認する必要がある。しかし周期全体の視線速度を確認するほうがトランジットの高精度測光観測より圧倒的に時間がかかるため，一般的には高精度測光による減光形状の確認のほうが先に行われる。

さらに複雑な偽検出としては，(d) のように食連星を含んだ階層的な三重星系の場合がある。このような例は実際に地上トランジットサーベイやケプラー (KOI-126⁷⁾ などが有名) で発見されたこともあり，減光率だけ見ると減光がなまされて惑星程度の減光になってしまう場合がある。こうした場合にも，高精度測光や周期全体の視線速度測定によって，惑星かどうかを判別することが可能である^{*7}。

また，トランジット惑星自体は偽検出ではな

^{*6} ケプラーのように最初から高精度でトランジットサーベイを行う場合は，この(b)の場合が最初から排除されるので，偽検出の割合が劇的に少なくなっている⁸⁾。

^{*7} ケプラーではBLENDER⁹⁾と名づけられた解析により，さまざまな食連星の配置で偽検出のライトカーブを多数作成して，観測された減光と一致するものがどれだけ存在するかを確認している。

かったとしても、連星の一方にトランジット惑星がある場合や近くに背景星がある場合には、測光観測の際に別の星の光が混入してしまい、トランジットの減光量を正確に測定できなくなってしまう。このような場合には、トランジットによる真の減光量を測定するために、高い空間分解能を持った直接撮像観測によって伴星や背景星を分離し、明るさの比を測定する必要がある。

そして最後にトランジット惑星の質量を決定するには高分散分光による視線速度測定が必要となる。このように、すべての偽検出を取り除いてトランジット惑星を発見するまでには、高精度測光、高分散分光による視線速度測定、高空間分解能な直接撮像のすべての確認観測が必要となる。

6. 私たちのトランジット惑星探し

6.1 研究開始の背景

前節で説明したように、トランジット惑星を発見するためには多数の恒星のモニター観測を行うほかに、高精度な測光観測や高空間分解能な直接撮像観測、さらに精密な視線速度測定を行うことが必要となる。特に低温度星をターゲットにする場合には、高精度測光や視線速度測定を近赤外領域で実施できる必要がある。そして3節で述べたように、低温度星周りでトランジット惑星探しあまり進んでこなかった理由は、近赤外での高精度測光や視線速度測定が難しかったためである。

しかし、その状況は少しずつ変わりつつある。第1回の福井暁彦氏の記事で解説されたように、最近では1-2 m級の中口径望遠鏡でも近赤外の高精度測光観測が可能となり、岡山天体物理観測所のISLEでは、J等級で10等より明るい天体については同程度の参照星があれば、 ~ 1 mmagの

測光精度が安定的に達成できるようになっている。また、国立天文台の田村元秀氏が中心となって開発が進められているすばる望遠鏡の新しい近赤外視線速度測定装置IRDでは、J等級で10等より明るい天体について1 m/sレベルの視線速度決定精度を見込んでおり、2014年頃の稼働を目指している。また、同じく田村元秀氏らによって開発されたすばる望遠鏡の高コントラスト撮像装置HiCIAOでは、高い空間分解能の直接撮像観測が可能である。

このように、日本では低温度星周りのトランジット惑星探しの必要条件が整いつつある。実際、これらの装置がそろっている研究グループは世界的に見ても数少なく、特にIRDの存在は他のグループに比べて大きなアドバンテージとなる。そこで私たちは、IRDのサイエンスグループの一つとしてトランジット班^{*8}を立ち上げ、低温度星周りの新しいトランジット地球型惑星の探索とそのフォローアップの研究を立案している。本節ではその方法について紹介しよう。

6.2 SuperWASPからのトランジット惑星候補の選定

太陽系近傍の低温度星でトランジット惑星探しをするためには、多数の低温度星のモニター観測のデータが必要となる。そこで私たちが着目したのは、地上トランジットサーベイグループSuperWASPのアーカイブデータ^{*9}の存在である。ここでは2004年から2008年に取得されたSuperWASPのデータが公開されており、SuperWASPチームが占有している領域を除いて、V等級が15等以下のほぼ全天の恒星のデータがある。この中には太陽系近傍の低温度星も含まれており（むしろ太陽系から離れた低温度星は暗くてサン

^{*8} 現在のメンバーは私のほかに、福井暁彦氏（国立天文台・岡山）、平野照幸氏（東京大学）、末永拓也氏（総合研究大学院大学）、高橋安大氏（東京大学）、大貫裕史氏（東京工業大学）が参加している。

^{*9} <http://www.wasp.le.ac.uk/public/>

プルに含まれない)、低温度星のトランジット惑星探しを開始するにはうってつけである。

そこで筆者は、このSuperWASPのアーカイブデータの解析を行っているハワイ大学のEric Gaidos氏らのグループと共同研究を開始し、Eric Gaidos氏と学生のEmily Chang氏の協力を得て、SuperWASPの北天アーカイブデータから日本で観測できる100個弱のトランジット惑星候補をこれまでに選定した。これらは減光の検出自体は有意だが、前節で述べた偽検出をまだ含んだ候補たちである。

なお、ここでターゲットに選んだのはJ等級で10等よりも明るいもので、V-J がだいたい2-4等の恒星である。これはだいたい太陽から50光年(15パーセク)以内のK型晩期星からM型早期星に相当している。また減光の深さは2-10 mmagで、スーパーアースや海王星サイズに相当している。このくらいの明るさであれば、岡山の188 cm 望遠鏡 ISLE での近赤外測光で減光形状を確認し、すばる望遠鏡IRDの近赤外視線速度測定で質量と軌道の決定を行うことが可能である。

6.3 発見確認観測の展望

ターゲットの選定が完了したので、今後はこれらの候補の中から偽検出を取り除き、本物のトランジット惑星を選び出す発見確認観測を実施していく予定である。そこで私たちは、まず岡山の188 cm 望遠鏡 ISLE を用いた近赤外高精度測光観測を提案し、候補天体の減光形状の確認を進めている。ただ、ISLEは視野が4.3分角四方しかないため、視野内に同程度の明るさの参照星が得られるのは50個程度である。残りの候補については、岡山の90 cm 望遠鏡に新しく開発されている広視野近赤外カメラ(OAOWFC)が利用可能になれば、すべて観測することができると期待される。このように岡山での観測を中核として、すばる望遠鏡

でIRDが稼働する前までに、すべてのトランジット惑星候補の減光形状を確認することを目指している。

この高精度測光観測の結果、減光形状が惑星によるトランジットと矛盾しないものについては、次の段階として可視の視線速度測定を行い、分光連星かどうかの確認^{*10}と候補の質量の制限を実施する。この確認観測の結果、減光と視線速度の変動周期が一致した場合には、減光の正体がその連星の食であることが推測できる。それ以外の場合、すなわち視線速度の変動が精度以下だった場合は減光を起こしている候補天体の質量に制限をつけることができ、また視線速度変動が受かっていても減光と視線速度の変動周期が一致しない場合には、連星の一方にトランジット惑星がある可能性が考えられる。このような分光連星の判別と質量の制限は、すばる望遠鏡のHDSなどで行うことが可能である。

次に近傍の背景星や伴星の存在が疑われる場合には、測光の際の減光量が少なく見積もられている可能性がある。そのような場合には、真の減光量を見積るために高空間分解能な直接撮像観測で両者を分離して観測する必要がある。このような直接撮像観測はすばる望遠鏡のHiCIAOなどで行うことができる。

最後に、すべての偽検出のテストをパスした惑星候補については、2014年頃に稼働予定のIRDによって高精度な視線速度測定を行い、その質量と軌道を決定することができる。今回選定しているターゲットは可視での視線速度測定が困難なターゲットばかりなので、IRDが稼働すれば自分たちで発見した惑星候補に対して世界に先駆けて研究を行うことができる。これが私たちIRDトランジット班の最大の目標であり、低温度星周りのトランジット惑星探しの研究計画である。

^{*10} 分光連星の場合は視線速度変動がkm/sレベルなので、可視の視線速度測定装置でも十分に視線速度変動を確認することができる。

7. 発見された惑星に対するサイエンス

それでは低温度星周りの新しいトランジット惑星を発見することで、その後どのような新しいサイエンスが期待できるのだろうか？ トランジット惑星に対するさまざまなサイエンスについては本特集の他の記事で紹介されているので詳しくは触れないが、どのようなサイエンスが考えられるのか簡単に紹介していこう。

まずトランジットと視線速度が観測できれば、惑星の半径・質量・密度などがわかるため、その惑星の内部構造を推定することができる。これまでトランジット惑星が発見されたのは太陽型星の周りが主だったので、低温度星周りの惑星の内部構造が比較対象に加わるのは面白い。また、低温度星では地球型惑星や海王星型惑星のサンプルが増えていくと期待されるので、宇宙における地球型惑星の多様性などの議論も盛んになっていくだろう。

次に、惑星のトランジットの深さはその惑星の大気の組成や環境を反映して波長ごと、吸収線ごとに異なるので、多波長トランジット観測によって波長ごとの惑星の半径を調べることで、惑星の大気組成についても推測することができる。低温度星では主星が小さいためにこの半径ごとの変化が観測しやすく、また地球型惑星も観測対象となるため、太陽系外の地球型惑星が一体どのような大気をもつのか（原始地球の大気のように水素やヘリウムが主体なのか、脱ガス後の地球型惑星のように二酸化炭素が主体なのか、あるいは水蒸気が主体なのか）を明らかにすることができる。

例えば、現在発見されている低温度星周りのトランジット地球型惑星 GJ1214b では、可視から近赤外の多波長トランジット観測から、その半径が波長にほとんどよらず平坦であることが観測から示唆されている¹⁰⁾⁻¹²⁾。図2は2011年8月に南アフリカ天文台のIRSF/SIRIUSで取得したGJ1214bのトランジット測光の結果である。IRSF/SIRIUS

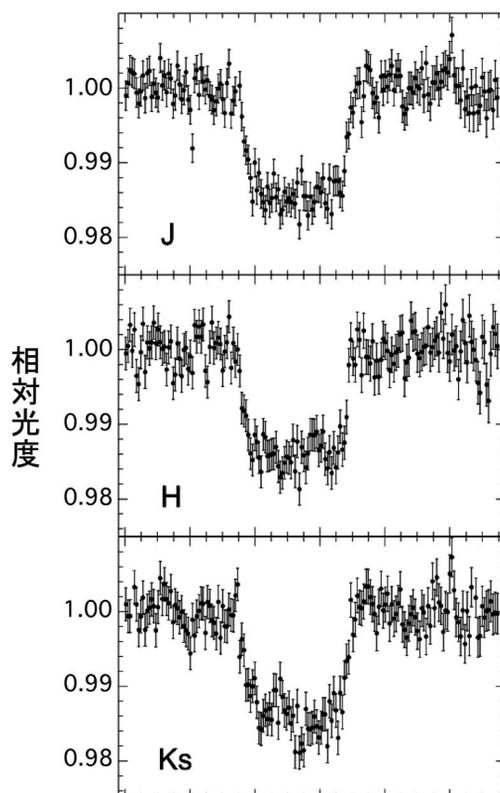


図2 南アフリカ天文台のIRSF/SIRIUSによるGJ1214bのJHKs同時トランジット測光の結果。

ではJHKsの3バンドを同時に測光できるため、多波長トランジット観測で惑星大気の特徴づけるのに好ましい。図2の結果は、これまでの観測結果と一致して、トランジットの深さがJHKsバンドでほとんど変わらないことを示していた。これはこの惑星が水素・ヘリウムを主体とした大気をもつことを否定しており、現在の理論的な考察では水蒸気を主体とした大気をもっていることが推測されている。

ただGJ1214bは現在唯一の地球型惑星のサンプルであり、今後はさらに多くの惑星で同様な観測が行われ、大気の比較が行われていくことが望まれる。例えば、最近ケプラーによって発見された新しい低温度星まわりの地球型惑星 KOI-961b, c, d¹³⁾（ただしケプラーで発見されたためやや遠い）などが、今後の面白い研究対象になっていく

だろう。

また、今後のフォローアップ観測において国際的な競争力をもつには、世界中のさまざまな場所に高精度の近赤外観測装置があることが重要となる。この点において、すでに高精度が確認できている岡山/ISLE や IRSF/SIRIUS のほかにも、サイト条件が非常に良い東京アタカマ天文台の mini-TAO/ANIR など有力な観測装置となるだろう。

さらに別の研究テーマとして、低温度星周りの惑星の軌道進化を観測的に探る方法としては、トランジット惑星のロシター効果と TTV (Transit-Timing Variation) の測定が考えられる。

ロシター効果は、トランジット中に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、この効果を測定することで惑星の公転軸が主星の自転軸に対してどれだけ傾いているかを調べることができる。この軌道の傾きを調べることによって、これまで太陽型星の周りの惑星の軌道進化の仕方についてさまざまな議論が行われてきた（詳細は第3回の平野照幸氏の記事を参照）。

ロシター効果の大きさは惑星が主星を隠す割合に比例しているため、太陽型星に対しては隠す割合が大きい木星型惑星と条件が良い少数の海王星型惑星でしか測定が困難だった。しかしサイズが小さな低温度星では、ロシター効果を検出可能な惑星のサイズも小さくなり、地球型惑星や海王星型惑星でも検出可能な（例えば ~ 10 m/s）ロシター効果を起こす場合もある。

ただ、トランジットという限られた時間内に高精度な視線速度測定を多数行う必要があるため、低温度星が暗い可視領域で観測を行うのは難しい。そのため、近赤外領域で明るくなる低温度星に対しては、近赤外の視線速度測定装置が非常に好ましい。実際、GJ1214b に対しては現在の可視の視線速度測定装置ではロシター効果を測定することが極めて困難であり、IRD の稼働によって初めてロシター効果の測定が可能となると期待されている。このように、IRD は低温度星周りのトラン

ジット惑星に対するロシター効果の測定で大きなアドバンテージをもっているとと言えるだろう。

一方、TTV はトランジット惑星の周りに別の惑星があるとトランジット惑星の周期が一定からずれて観測される現象で、トランジットをしていない惑星を発見するのに力を発揮する。特に、TTV では共鳴軌道にある惑星が発見しやすいため、トランジット惑星が共鳴軌道の惑星をもつかどうかを点検することが容易となる。

TTV の測定では、低温度星をターゲットとする場合、摂動源となる惑星と主星の質量比が小さくなるため、TTV の振幅が大きくなる傾向がある。そのため、一般的に TTV の兆候の発見は太陽型星より低温度星のほうが容易で、継続的なトランジット観測によってトランジットをしていない惑星の手がかりをつかむことが可能となる。このような惑星存在の事前情報は IRD での視線速度による惑星探しを行う上で有益となるだろう。

TTV の測定から共鳴関係にある惑星がどれだけ発見されるかという結果は、惑星系の軌道進化の仕方に依存している。太陽型星のホットジュピターの周りには共鳴軌道の惑星が少ないことが明らかとなっているが、低温度星の惑星の場合はどうなのかについてはまだ研究が進んでいない。視線速度やケプラーのサーベイから低温度星では複数の地球型惑星をもつ割合が高いことが示唆されているが、今後発見される低温度星周りのトランジット惑星に対する TTV の測定は、この傾向を検証することに役立つだろう。

以上のようなロシター効果や TTV の観測から、低温度星周りの惑星の軌道進化に対する新しい知見も拓けていこう。

8. 将来計画に向けて

本稿では主に私たちのグループのトランジット惑星探しについて紹介させていただいたが、すでに GJ1214b を発見しているマース (MEarth) や、筆者らが共同研究を行っているハワイ大のグルー

プなど、世界には同じような研究を開始しているグループがいくつも存在する。また、宇宙望遠鏡を用いた全天の明るい恒星のトランジットサーベイを計画しているアメリカのテス (TESS) やヨーロッパのプラト (PLATO) などのグループは、ターゲットに太陽系近傍の低温度星も含むことを予定している。このようにライバルの多い研究テーマではあるが、われわれとしては岡山の188 cm 望遠鏡やすばる望遠鏡などを駆使して、太陽系により近い低温度星を公転するトランジット地球型惑星の発見を狙っていきたいと考えている。

今後太陽系近傍の低温度星周りのトランジット惑星探しとそのフォローアップのサイエンスは、系外惑星研究の一つの流れになっていくと考えられる。一方、その中で発見された特に面白い惑星 (例えば生命居住可能領域にあるような地球型惑星など) に対するさらに詳細な観測は、TMT や SPICA など次世代の望遠鏡によって行われることとなるだろう (詳細は山下卓也氏と塩谷圭吾氏の記事を参照)。

そうした将来計画の時代に、日本のグループが国際競争力を持ってイニシアチブを取ろうとするためには、すばる望遠鏡をはじめとした日本の望遠鏡と装置で今後の2010年代に多くの成果を上げていくことが重要だと考えられる。今後の日本の研究グループの活躍にご期待いただきたい。

謝辞

本稿に執筆に際し、IRDトランジット班として本研究に参加してくださっている福井暁彦氏、平野照幸氏、末永拓也氏、高橋安大氏、大貫裕史氏らに感謝いたします。

また、田村元秀氏をはじめとするIRDグループの皆様、岡山188 cm望遠鏡ISLEでの観測をサポートしてくださっている柳沢顕史氏をはじめとする岡山天体物理観測所の皆様、GJ1214bのトランジット観測を実施していただいた名古屋大学・

国立天文台のIRSF/SIRIUSグループの皆様、東京大学のminiTAO/ANIRグループの皆様など、私たちの観測にご協力をいただいているすべての皆様に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

本研究は筆者を研究代表者とする科学研究費補助金「研究活動スタート支援」と、自然科学研究機構「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」の支援を受けています。

また、Eric Gaidos氏らと共同研究を開始するきっかけとなった筆者のハワイ大学への渡航は、「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」によって行われました。

最後に、本特集の実施を提案してくださった柏川伸成・天文月報編集長に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Borucki W. J., et al., 2012, ApJ 745, 120
- 2) Fressin F., et al., 2012, Nature, 482, 195
- 3) Gautier T.N., et al., 2012, ApJ, in press
- 4) Lépine S., Gaidos E., 2011, AJ 142, 138
- 5) Gillon M., et al., 2007, A&A 472, 13
- 6) Charbonneau D., et al., 2009, Nature 462, 891
- 7) Carter J. A., et al., 2011, Science 331, 562
- 8) Morton T. D., Johnson J. A., 2011, ApJ 738, 170
- 9) Torres G., et al., 2011, ApJ 727, 24
- 10) Desert J.-M., et al., 2011, ApJ 731, L40
- 11) Bean J. L., et al., 2011, ApJ 743, 92
- 12) Berta Z. K., et al., 2012, ApJ, in press
- 13) Muirhead P. S., et al., 2012, ApJ, in press

Search for New Transiting Exoplanets around Nearby Cool Stars

Norio NARITA

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

Abstract: Transiting exoplanets around nearby cool stars are interesting research targets, especially for next generation ground-based and space-based telescopes. We explain the reason why cool stars are favorable and present an overview of ongoing transit surveys.