

系外惑星「遠い世界の物語」その2

～灼熱天王星GJ3470bの大気を初めて観測～

福井 暁彦¹, 成田 憲保²

(要旨) トランジット系外惑星を多波長で観測し、減光率の波長依存性を調べる事で惑星の大気成分を調べる事が出来る。透過分光法と呼ばれるこの方法は、近年地球質量の数～20倍程度の低質量の惑星にも適用されるようになってきた。これまでにGJ1214bとGJ436bという2つの低質量惑星について詳細な観測が行われており、どちらも厚い雲で覆われている可能性が高いという結果が得られている。一方、2012年に新たに発見された低質量トランジット惑星GJ3470bは、低質量惑星大気の比較研究を行う上で重要なサンプルとして注目されている。筆者らは岡山天体物理観測所の2台の望遠鏡を用いていち早くこの惑星の多波長トランジット観測を行い、この惑星が晴れた大気をもっている可能性を示唆する結果を得た。

1. はじめに

昨今の系外惑星研究の発展はめざましい。系外惑星が初めて発見された1995年から最初の5年間に発見された系外惑星の数は22個であるが、その後惑星の発見数は加速度的に増えて行き、過去5年間には600個を超える系外惑星と、約3,600個もの系外惑星候補の発見が報告された。今後もこの激しい惑星探索競争はしばらく続く事が予想され、我々はいままさに系外惑星の「大量発見時代」の真っただ中にあると言える。

これらの多数の惑星発見によって、惑星系は銀河系において普遍かつ多様であることが明らかとなった。また、地球のようなハビタブル惑星もそれなりに存在しそうということも分かってきた。しかし、これらの惑星系は地球から遠く離れた位置に在るため、個々の惑星に関して我々が得られる情報は非常に限られたものになる。惑星の引力による主星のふらつきを捉える視線速度法や、惑星のシルエットを捉えるトランジット法の観測で得られる情報は、通常はせいぜい惑星の質量や半径、軌道要素のみである。では、これらの惑星は実際にはどのような姿をしているのであろうか？

太陽系内の惑星とは大きく異なるタイプの惑星たちは、いったいどのような表層環境、大気環境を持っているのであろうか？

系外惑星の大気を調べる方法の一つは、高空間分解能・高コントラストの観測を多波長で行い、惑星の放射光を直接分光する方法である。しかし、この方法で観測出来る惑星は現在の観測技術では主星から数十～数百AU離れた巨大惑星に限られる。一方、トランジットを起こす惑星では、惑星の縁の大気を透過してくる主星の光を分光することで惑星の大気を調べることが出来る。「透過分光法」と呼ばれるこの方法は、近年スーパーアースや海王星クラスの低質量惑星でも適用出来るようになってきた。本稿では、この透過分光法による惑星大気研究の現状を紹介し、筆者らが低質量惑星GJ3470bに対して行った多波長トランジット観測の結果について報告する。

2. 透過分光法

透過分光法の原理を以下に紹介する。まず、惑星がトランジットをする際、主星からの光の一部が惑星により隠されることで惑星の大きさに応じた主星の減光が起こる。このとき、惑星が大気を保持していると、主星からの光の一部が惑星の大気を透過して地球に届

1. 国立天文台・岡山天体物理観測所

2. 国立天文台・太陽系外惑星探索プロジェクト室
akihiko.fukui@nao.ac.jp

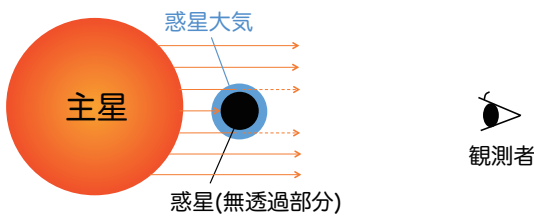


図1：透過分光法法の概念図。

く(図1)。大気の透過率はその組成に応じて波長依存性を持つため、波長ごとに実効的な惑星の大きさが異なることになる。つまり、主星の減光率が波長ごとにわずかに変化するため、主星の減光率の波長依存性(トランジットスペクトル)を測定して理論スペクトルと比較することで、惑星の大気組成を調べることができる。

ただし、波長ごとの減光率の違いを比較するためには非常に高い観測精度が要求される。そのため、この手法はこれまで主に観測しやすい巨大惑星(ホットジュピター)に対して適用されてきた。例えば、HD209458bとHD189733bと呼ばれる2つのホットジュピターの大気がこれまでに詳細に観測されており、HD209458bに対しては可視の高分散分光観測からNaなどのアルカリ金属、近赤外の低分散分光観測からH₂OやCOなどの分子が検出されている[1, 2, 3]。一方、HD189733bでは原子や分子の吸収による特徴はあまりみられず、近赤外から可視の短波長側にかけてスペクトルがなめらかに上がっていく特徴が観測された[4]。これは、大気中にレイリー散乱を起こすようなもや(ヘイズ)が漂っているためであると解釈されている。このように、同じようなホットジュピターでもその大気環境には多様性があることが分かってきた。

3. 低質量惑星の大気

一方、最近は低質量惑星の大気にも注目が集まるようになってきた。惑星探索技術の向上によって地球サイズの小さな惑星まで見つかるようになり、地球～海王星質量程度の低質量惑星が主星近傍(<0.1 AU)に豊富に存在することが分かってきた[5]。ホット・スーパーアースやホット・ネプチューンと呼ばれるこれらの惑星は我々太陽系には存在しないタイプの惑星であ

り、これらの惑星がどの程度の厚さの大気を保持するのか、また大気をもつ場合にはそれらがどのように形成され、どのような組成を持つのかは大きな謎である。しかし、低質量惑星はサイズが小さいため、その大気を観測する事は容易ではない。ところが、もし主星のサイズが太陽型星に比べて小さければ、惑星のサイズが相対的に大きくなるため、より大きなトランジットの減光を見せるようになり、低質量惑星でも大気の観測が可能になる。ただしM型星と呼ばれる太陽型星よりも小さな恒星は、低温度で暗いため、出来るだけ太陽系から近くて主星が明るい惑星系でない高精度な観測を行う事が出来ない。そのような、太陽系近傍(<30 pc)のM型星を主星にもつ低質量のトランジット惑星は発見数がまだ少なく、現時点(2014年1月)ではGJ436b, GJ1214b, そしてGJ3470bの3つのみである。

これらのなかで、2009年に発見されたGJ1214bは質量が6.6倍地球質量と3つのなかで一番軽く、なおかつ主星の半径が太陽の約20%と非常に小さいため、透過分光観測が容易に出来るスーパーアースとしてこれまでに多くの注目を集めてきた。これまでに、筆者らの研究グループを含めて世界の多数の観測グループがこの惑星の大気を調べる観測を行っており、その結果、この惑星は可視から赤外領域にかけてほぼフラットなトランジットスペクトルを示すことが分かってきた[6]。スペクトルに現れる様々な分子の特徴は大気のスケールハイトが大きいほど大きくなることから、この惑星の大気は逆にスケールハイトが非常に小さい、つまり水蒸気などの分子量の大きな分子で満たされているか、あるいは厚い雲に覆われていて実効的な大気の層が薄くなっているかのどちらかであると考えられてきた。どちらの説が正しいかは長らく議論的であったが、今年の1月にハッブル宇宙望遠鏡でGJ1214bを集中的に観測した決定的な結果がNatureに掲載され、この惑星は高層の雲(あるいはヘイズ)に覆われている可能性が最も高い事が示された[7]。

一方、約23倍地球質量をもつGJ436bでは、これまでGJ1214bほど精力的な観測は行われてこなかったが、最近GJ1214bと同様にハッブル宇宙望遠鏡を用いて高精度な観測が行われ、その結果がNatureの同じ号に掲載された[8]。それによると、やはりこの惑星もフラットなスペクトルを示すことから、雲(ヘイズ)に覆われているか、もしくは平均分子量が非常に大きな大

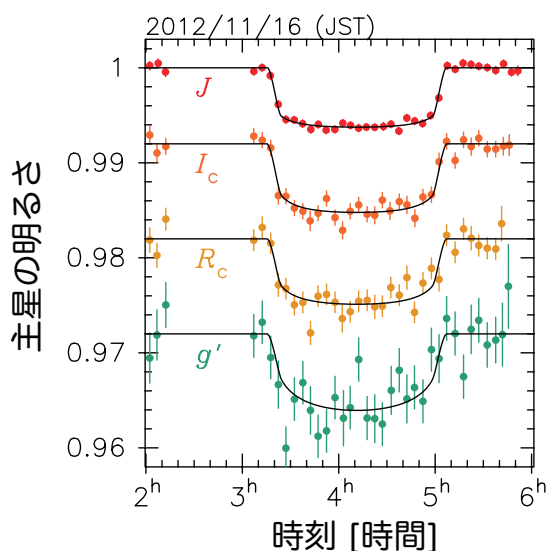


図2：188cm望遠鏡/ISLEとMITSuME望遠鏡で同時に観測したGJ3470bの光度曲線。上から順にISLE/Jバンド、MITSuME/ I_c 、 R_c 、 g' バンドのデータ。縦軸は主星の相対的な明るさを示し、バンドごとのデータを任意にずらして表示してある。トランジットの直前のデータが欠損しているのは、薄雲が通過して良質なデータが得られなかったため。(クレジット：国立天文台)

気をもつ可能性が高いようである。もしGJ436bも雲に覆われた大気をもっているとする、低質量惑星の空は一般的に曇天なのかもしれない。もしそうだとすると、そのような惑星の外観を想像することは楽しいかもしれないが、晴れた大気を持つ場合に得られるはずの大気成分の情報が全く得られなくなってしまう。では、果たして本当に曇った低質量惑星は一般的なのだろうか？

4. 灼熱天王星GJ3470b

2012年6月に、太陽系近傍のM型星をまわる低質量トランジット惑星として3番目となるGJ3470bの発見が報告された[9]。この惑星は単に透過分光観測が可能な新たな低質量惑星というだけでなく、質量が約14倍地球質量と、ちょうどGJ1214bとGJ436bの中間にあたるため、低質量惑星大気と比較研究を行う上でも貴重なサンプルとして注目されている。ちなみに、この惑星は質量が天王星に近く公転周期が約3.3日と短いことから、「灼熱天王星(hot Uranus)」という異

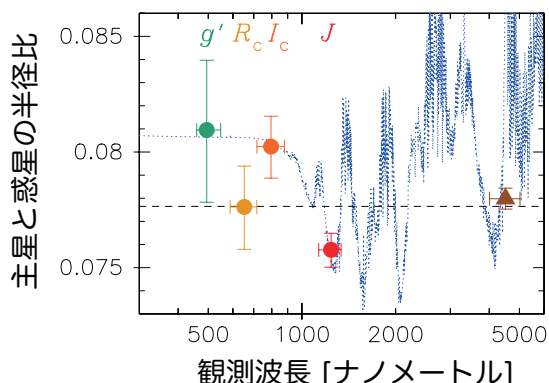


図3：波長ごとの主星－惑星半径比(=減光率の2乗根)の比較。丸のプロットは今回の観測で得られたデータを示し、左から順にISLE/Jバンド、MITSuME/ I_c 、 R_c 、 g' バンドのデータを示す。三角のプロットはSpitzer宇宙望遠鏡で観測された4.5 μ m帯のデータを示す。Jバンドの値が他のバンドに比べて僅かに小さくなっている。点線は太陽組成の0.3倍の金属量をもつ水素主体の晴れた大気に0.1 μ mサイズのヘイズを含む大気モデルスペクトル、破線は厚い雲に覆われた場合を仮定したフラットなスペクトルを示す。(クレジット：国立天文台)

名をもつ。発見当初はまだ多波長観測による透過分光光はおろか、単色での高精度なトランジット観測も行われていなかった。発見者たちはトランジットの観測を可視光で行っていたが、M型星である主星は温度が低く可視光では暗いため、精度の低いデータしか得られなかったためである。そのため、惑星の半径や密度の決定精度にまだ改善の余地があった。

そこで筆者らは、岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡とISLE(アイル)という近赤外観測装置を用いて、GJ3470bの高精度トランジット観測を試みた。M型星は近赤外領域に光度ピークがくるため、可視光に比べて近赤外での観測が有利となる。さらに、ISLEはこれまでも近赤外で0.1%レベルの精度で測光観測が行える事が実証されている、世界でも有数の装置である。さらに筆者らは、同観測所にある口径50 cmのMITSuME(ミツメ)望遠鏡という、可視光3色を同時に撮像出来る望遠鏡も使用して、近赤外1色と可視光3色での4色同時観測を試みた。

この惑星系はかに座の方向にあり、秋から冬にかけてが観測の好機である。しかしこの年の188 cm望遠鏡の装置スケジュールは既に決まっていた、トランジットが起きるときにちょうどISLEが望遠鏡に取り付

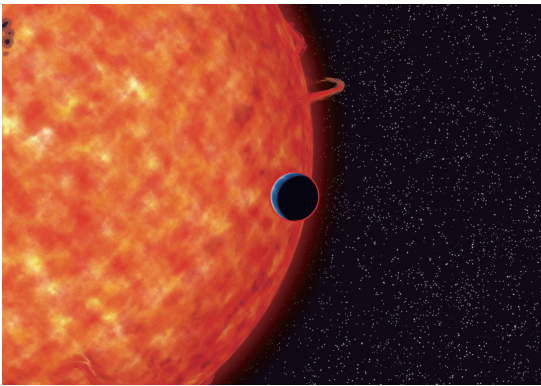


図4：晴れた大気を持つGJ3470bの想像図。(クレジット：国立天文台)

けられる予定の夜は合計4夜だけであった。そこで筆者らはToO(Targets of Opportunity)観測を申請し、この4夜に割込でGJ3470bの観測をさせてもらえることになった。

幸運にも、4夜すべて快晴に恵まれた。ところが、発見論文で報告された公転周期の誤差が大きかったため、その周期を元に予測したトランジット時刻よりも実際のトランジットが20分ほど早く起こってしまい、最初の3夜は継続時間が1時間半強のトランジットを開始から終了まで全てカバーする事が出来なかった。トランジット全体をカバー出来なければ惑星半径などの測定精度が大きく落ちるため、観測は徒労に終わってしまう。しかし4回目の夜に、ついにトランジット全体をカバーする観測に成功した。

図2に、得られたトランジットの光度曲線を載せる。これらのデータの解析から、2つの面白い事が分かった[10]。1つ目は、得られた惑星の半径と質量から惑星の平均密度を求めたところ、 0.80 g cm^{-3} という小さな値となったことである。系外惑星の内部構造を研究している大学院生の黒崎健二君(東京大学)にGJ3470bの構造計算を行ってもらったところ、質量比で約5–20%程度の比較的多量の水素・ヘリウム大気を保持していなければならない事が分かった。同様の結果はSpitzer宇宙望遠鏡を用いて高精度な赤外線観測を行ったDemoryらの論文でも報告されており[11]、今回我々はそれを裏付ける結果を得た事になる。もう1つは、Demoryらの赤外 $4.5 \mu\text{m}$ 帯の観測結果を含めてトランジットの減光率(=主星－惑星半径比の2乗)を比較したところ、ISLEで得られたJバンドでの

減光率が他の波長帯での減光率に比べて僅かに小さくなったことである(図3)。この結果は、惑星が晴れた水素主体の大気を持ち、大気中に $0.1 \mu\text{m}$ サイズのヘイズが漂うような場合にうまく説明が出来る。一方で、もし惑星が厚い雲で覆われていたとすると、GJ1214bやGJ436bのようにフラットなトランジット・スペクトルとなるはずである。つまり今回の結果は、GJ3470bが少なくとも晴れた大気をもっている可能性を示唆するものである(図4)。この結果は、今後より詳細な観測を行う事で、大気中に含まれる様々な成分を検出できる可能性を示している。

5. 今後の展望

今回の観測から、筆者らは低質量惑星GJ3470bの大気に「晴れの兆候」を捉えた。しかしその有意性はまだ十分とは言えないため、今後の裏付け観測が必要である。筆者らが結果を報告したあと、別のいくつかの観測グループが別の波長帯で観測を行いその結果を報告しているが、まだ決定的と言える結果は得られていない[12, 13]。筆者らのグループも現在岡山天体物理観測所の望遠鏡やハワイのすばる望遠鏡を用いてさらに詳細な観測を進めており、近いうちに決定的な証拠を得たいと考えている。また同時に、大気中に水やメタン等の揮発性物質が存在するかどうかを検証していく予定である。もしこれらの物質が大気中に検出されれば、この惑星の大気(の少なくとも一部)は水成分が豊富な雪線以遠の領域が起源である証拠となるため、惑星の形成過程を探る上で重要な手がかりが得られる事になる。なお、観測で得られたスペクトルを理論スペクトルと比較して惑星の大気組成を決定したり、得られた大気組成から惑星の形成過程を推定するためには、筆者らのような観測屋だけでなく、理論研究者の協力が必要不可欠である。筆者らは数年前から惑星大気や内部構造の理論研究者である生駒大洋氏(東京大学)や同氏の研究室の大学院生、惑星形成の理論研究者である堀安範氏(国立天文台)らと共同研究を開始しており、今後も上記の方々と協力しながらこの分野の研究を押し進めて行きたいと考えている。

筆者らの研究グループは今後、さらに別の低質量惑星の大気についても調査していく予定である。現在は透過分光が可能な低質量惑星はまだ3つしか発見さ

れていないが、今後数年間でそういった惑星の探索が大きく進むと期待されている。筆者らはその時代に備え、可視から近赤外にかけて多色で同時に撮像可能な新しいカメラ「MuSCAT (Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting Planets)」の開発を現在進めており、2015年度に岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡に搭載予定である。このカメラが完成すれば、筆者らが今回行ったようなISLEとMITSuME望遠鏡を同時に使用した観測よりも、精度と効率が格段に向上することが見込まれる。今後MuSCATを使用して多数の低質量惑星の大気を調査することで、低質量惑星の大気に共通な性質を見だし、その形成過程の謎に迫りたいと考えている。さらに将来的には、2020年代に完成予定の口径30 mのTMT (Thirty Meter Telescope) などを用いて、より小さな地球型系外惑星の大気成分についても調査したいと考えている。そのような大型装置を用いれば、ハビタブル惑星の大気に生命の兆候を探る観測も夢ではないであろう。

謝 辞

我々の観測をサポートして頂いている国立天文台・岡山天体物理観測所およびハワイ観測所の方々に深く感謝致します。また本研究をはじめとしたトランジット惑星に対する観測的・理論的研究を筆者らと一緒に進めている、PEaCHグループの皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Charbonneau, D. et al., 2002, *ApJ* 568, 377.
- [2] Barman, T., 2007, *ApJL* 661, L191.
- [3] Snellen, I. A. G. et al., 2010, *Nature* 465, 1049.
- [4] Pont, F. et al., 2008, *MNRAS* 373, 231.
- [5] Fressin, F. et al., 2013, *ApJ* 766, 81.
- [6] Narita, N. et al., 2013, *PASJ* 65, 27.
- [7] Kreidberg, L. et al., 2014, *Nature* 505, 69.
- [8] Knutson, H. A. et al., 2014, *Nature* 505, 66.
- [9] Bonfils, X. et al., 2012, *A&A* 546, A27.
- [10] Fukui, A. et al., 2013, *ApJ* 770, 95.
- [11] Demory, B.-O. et al., 2013, *ApJ* 768, 154.
- [12] Nascimbeni, V. et al., 2013, *A&A* 559, A32.
- [13] Crossfield, Ian J. M. et al., 2013, *A&A* 559, A33.