

系外惑星 HD189733b に関する赤外観測の進展

General introduction of results of infrared
observation on exoplanet HD189733b

学生番号 22060243

高橋 康人

TAKAHASHI Yasuto

北海道大学理学部地球科学科

惑星宇宙グループ

Department of Earth Sciences, Undergraduate school of Science,

Hokkaido University

Planetaly and Space Group

指導教官

倉本 圭

KURAMOTO Kiyoshi

平成 22 年 2 月 25 日

要旨

本論文は、系外惑星の研究に関する3つの論文のレビューから、今日の系外惑星研究に関する知識を深めることを目的としている。本論文で取り上げた Swain, M. R., Vasisht, G. & Tinetti, G. “The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet” (以下 Swain et al. 2008)、Grillmair, C. J., et al. “Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD189733b” (以下 Grillmair et al. 2008)、Knutson, H. A., et al. “A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b” (以下 Knutson et al. 2007) は、いずれの論文も系外惑星の大気環境に関する研究を報告したものである。未知の部分の多いこの分野において、著者らは大気中に存在する分子や温度分布の特徴を推定するという先駆的な成果を収めており、その成果を収めるまでにどのような過程を踏んでいるのかは非常に興味深い。そこで本論文では、各論文の成果と学術的意義を知るとともに、そこで使われている観測技法やデータ補正法、モデルとの比較解釈の手順などの具体的な知識背景を学んだ。Swain et al. 2008 では、ハッブル宇宙望遠鏡を用いて惑星の大気を透過してきた近赤外の大気透過スペクトルを抽出し、それを理論モデルと比較、最も観測結果に近い特徴を示すモデルがメタンを含んでいることから、その存在を示唆している。Grillmair et al. 2008 では、スピッツァー宇宙望遠鏡を用いて惑星の日面からの中間赤外スペクトルを抽出し、その中に含まれる水分子特有の吸収線から水の存在を示している。そして Knutson et al. 2007 では、スピッツァー宇宙望遠鏡を用いて公転半周期分の赤外線放射の強度変化を観測し、それを軌道位置と対応させることで全球での温度構造を推定している。最後には、3論文から共通して浮かび上がる系外惑星研究における今後の課題として、より汎用的に使える木星型惑星の熱放射モデルの必要性を提起している。付録として、各論文を理解する上で助けとなる手法・用語の補足解説と、論文全訳を付している。

目次

1	はじめに	5
1.1	目的	5
1.2	構成	6
2	HD189733b に関する現在の理解	7
3	惑星大気成分同定	9
3.1	透過スペクトルによるメタン同定 -Swain et al. 2008-	9
3.1.1	本論文の意義	9
3.1.2	観測:ハッブル宇宙望遠鏡による近赤外スペクトル 観測	10
3.1.3	データ解析:惑星大気透過スペクトル抽出	10
3.1.4	観測結果と理論モデル比較	12
3.2	日面放射スペクトルによる水の同定 -Grillmair et al. 2008-	14
3.2.1	本論文の意義	14
3.2.2	観測:スピッツァー宇宙望遠鏡による中間赤外スペ クトル観測	14
3.2.3	データ解析:惑星自身の放射スペクトル抽出	15

3.2.4	観測結果と理論モデル比較	15
4	惑星の温度構造分析	18
4.1	8 μ m 赤外線強度分布を用いた温度マッピング -Knutson et al. 2007-	18
4.1.1	本論文の意義	18
4.1.2	観測:スピッツァー宇宙望遠鏡を使った8 μ mにおけるスペクトル強度変化観測	19
4.1.3	データ解析:惑星日面スペクトル強度変化	20
4.1.4	観測結果と理論モデル比較	20
5	今後の課題	24
A	手法・用語補足解説	25
	スペクトルタイプ	25
	ホットジュピター	25
	潮汐的に固定	25
	トランジット	26
	ハッブル宇宙望遠鏡	26
	NICMOS	26
	量子的なノイズ	27
	系統誤差	27
	H帯・K帯	27

周縁減光効果	27
黒点による効果	28
惑星日面放射スペクトル	28
水分子の ν_2 変角振動モード	28
惑星の内部熱源	28
スピッツァー宇宙望遠鏡	29
IRS	29
二次食	29
Gillmair et al. 2008 における機器的誤差の修正	29
熱再分配	30
不透明度	30
Kolmogorov-Smirnov 検定	30
χ^2 検定	30
恒星直下点・恒星対蹠点	30
惑星の方角・経度定義	30
放射のタイムスケール	31
移流のタイムスケール	31
円軌道化のタイムスケール	31
IRAC	31

感度の上昇	32
強度と照度	32
正弦曲線的分布	32
B 論文全訳	33
B.1 The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet (Swain et al. 2008)	33
B.2 Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD189733b (Grillmair et al. 2008)	40
B.3 A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b (Knutson et al. 2007)	46
謝辞	56
参考文献	57

1 はじめに

1.1 目的

1990年代以降、系外惑星の発見報告は年を追うごとに、急速に増えてきている(2010年1月10日時点での系外惑星候補数は424個)。これは、以前から考案されていたものの技術的制約から実現できなかったような観測方法が、観測機器・技術の発達により可能になった部分が多い。よく知られているドップラー法やトランジット法はもちろんのこと、より精密な観測が必要だったアストロメトリ法(例: JPL News 「Planet-Hunting Method Succeeds at Last」)や直接撮像(参考文献4)でも最近では成功例が出てきている。そうして見つかった惑星は、今まで太陽系の惑星しか知らなかった惑星科学者にとって、きわめて新鮮で刺激的な研究サンプルとなった。そのため惑星科学者たちは今日に至るまで、観測で見つかったこれらの惑星の詳しい性質を知るための観測データ分析と、それに整合する各種理論の構築を進めている。しかしこれまでの論文は惑星の天体力学的性質(つまり半径、質量、公転軌道長半径、離心率など)の解明に重点を置いたものが多く、惑星そのものの内部や大気環境の解明については、その研究手法が確立されていないためか発展途上である。

今回レビューする Swain et al. 2008、Grillmair et al. 2008、Knutson et al. 2007 は、地球から63光年ほど離れた系外惑星 HD189733b に関して、その大気組成や温度構造の推定を行っている論文である。まだ創成期にある系外惑星研究という分野において先駆的な赤外線観測の成果を収めているこれらの論文が、どんな過程を経てその成果を得たのかという点は非常に興味深い。また3つの論文は、それぞれ観測結果と理論モデルとの差異から推定される解釈を示しているが、それと同時に解決すべき課題として、理論モデルに組み込むべきパラメータの不足、あるいは欠陥を指摘している。観測結果の解釈に不可欠な理論モデルが、未整備の部分をいかに多く残しているかを読む側も理解していなければ、論文に対する正当な評価を与えることはできないだろう。それを学ぶ上でも、このレビューは大きな意義がある。

これらの論文の成果が持つ学術的意義を知ること、そしてその成果を導く過程から、宇宙望遠鏡を用いた系外惑星の赤外線スペクトル観測手法、得られたデータから求めるデータを抽出するための解析手法、そしてデータをいかに解釈する

のかを学ぶことが、今回のレビューの目的である。系外惑星研究に関わっていくにあたり、このレビューは基盤となる背景知識を身につけるために有用である。さらに、観測結果の比較対象として理論モデルが果たしている役割を知り、筆者の今後の研究テーマである大型惑星の熱放射モデルの重要性を改めて考える。

1.2 構成

第二節「HD189733bに関する今日の実理解」では、背景知識として、今日までに知られている系外惑星 HD189733b の姿をまとめている。第三節「惑星大気成分同定」では、HD189733b の大気に含まれる分子の同定に関する 2 つの論文 Swain et al. 2008 と Grillmair et al. 2008 のレビューを行っている。続く第四節「惑星の温度構造分析」では、HD189733b の大気表層における温度構造の推定に関する論文 Knutson et al. 2007 のレビューを行っている。各レビューでは、まず論文の意義を論じ、続いて観測・データ解析・観測結果分析の 3 つの観点についてまとめている。最後に、各レビューから得られた知識の総括と、今後の課題を挙げている。付録として、論文中にある手法や用語の補足解説と各論文の全訳を掲載している。

2 HD189733b に関する現在の理解

今回のレビューで取り上げられている系外惑星 HD189733b は、地球から見てこぎつね座の領域にあり、およそ 63 光年の距離にある恒星 HD189733A の周囲を公転している。

HD189733A は連星系を成しており、HD189733 が連星系の名称で、二重星のうち大きいほうを HD189733A、小さいほうを HD189733B と呼ぶ。HD189733A はスペクトルタイプ¹が K 型であり、そこから表面温度は 5000 K 程度と見積もられる。また、質量は $0.8 M_{\text{sun}}$ ほどであり、半径は $0.8 R_{\text{sun}}$ (参考文献 5) ほど、年齢は 6 億年 (参考文献 6) 前後、自転周期はおよそ 12-13 日 (参考文献 7) であると推定されている。HD189733B はスペクトルタイプが M 型であり、そこから表面温度は 3500 K 程度と見積もられ、HD189733A より一回り小さい赤色矮星である。連星系自体は 1920 年代までに発見されていたものの、その小ささから、HD189733B が発見されたのは 2006 年である (参考文献 8)。HD189733B は HD189733A とくらべて小さいことに加え、互いにかなり離れており (215 AU)、しかも公転周期が長い (3,200 年) ことから (参考文献 8)、その影響はほとんど無視できる。よって以降では、HD189733A を単に HD189733 あるいは主星と呼び、HD189733B は伴星と呼ぶ。

HD189733A の周りを回る HD189733b は、2005 年に F.Bouchy らによってトランジット法を用いて発見された (参考文献 9)。質量が $1.13 M_{\text{Jupiter}}$ 程度、半径が $1.14 R_{\text{Jupiter}}$ (参考文献 10) ほどのガス惑星であり、主星からわずか 0.03 AU の距離で公転していると見積もられている。このような高温の大型ガス惑星はホットジュピター²と呼ばれ、HD189733b もそのひとつである。公転周期は 2.2 日 (参考文献 11)、自転は HD189733 に対して潮汐的に固定³されていると予想されているためほぼ公転周期と同期している。つまり地球に対する月と同じように、常に同じ面を主星に向けており、永久日面の温度が 1200 K に達するのに対して、永久夜面は 800 K ほどである。軌道傾斜角は 85.7° (参考文献 11) で、離心率はほぼ 0 である。

前述のように、これまでの系外惑星に関する論文は天体力学的性質の解明に重点を置いたものが多かったが、HD189733b に関してはスペクトル分析の報告も比

¹補足解説「スペクトルタイプ」参照

²補足解説「ホットジュピター」参照

³補足解説「潮汐的に固定」参照

較的多い。これは、この惑星系が他のトランジット⁴を起こす惑星系に比べて地球からの距離が近く、また惑星が高温でかつ主星に対する半径比が大きいことから、各種観測が容易だからである。そのため系外惑星研究における重点的な研究対象の一つとして位置付けられている。

⁴補足解説「トランジット」参照

3 惑星大気成分同定

3.1 透過スペクトルによるメタン同定 -Swain et al. 2008-

3.1.1 本論文の意義

この論文は、HD189733bの大気中に含まれる分子を同定するために、近赤外波長域におけるスペクトル分析を行ったところ、メタンの特徴を示す吸収線が得られたことを報告した論文である。

著者らは、トランジット前後での近赤外波長スペクトルの時間変化を観測し、そこから惑星大気透過スペクトルを抽出した。大気透過スペクトルとは、トランジットの際に惑星の大気層を通過してきた光によるスペクトルである。このスペクトルは惑星の大気に関する情報を含んでいることが推測される。なぜなら、透過スペクトルは主星の光の本来のスペクトルに比べて、惑星大気に存在する分子による吸収を受けるため、その吸収線が発現するからである。今回の観測では、トランジットの起きる直前からトランジットが終了した直後までのデータを得ている。そこで、トランジット中のデータ(すなわち主星のスペクトルと惑星夜面のスペクトルと透過スペクトルとが合成されたスペクトル)から、トランジットの前後で得られたデータ(主星のスペクトルと惑星夜面のスペクトル)を減算することで、惑星の大気を通過してきた透過スペクトルを抽出できる。ちなみに惑星日面からの放射については、今回は観測期間を通じてほぼトランジットの状態であり、地球から見て惑星の夜面しか見えないので、考慮する必要はない。

著者らは大気透過スペクトルとモデル計算による予測を照らし合わせることで、HD189733bの大気には H_2O と CH_4 が存在すると推定している。これまでの理論によれば、1000 K前後の表面温度を持つHD189733bにおいては CH_4 はほとんどが分解されるのに対し、COは1000 Kでも安定に存在して大気輸送によって惑星全体に運ばれるため、最も豊富な炭素系分子は惑星上のどの地点においてもCOであると思われていたが、今回の観測からはそれを確認できなかったとしている。高温におけるエネルギー遷移の不確定さや、惑星表層における光化学反応が未知であること、またスペクトル中に昼夜境界という特殊な環境の効果が含まれている可能性があることなど、いくつかの不確定要素があるのは事実である。しかしながら、今回の結果では明らかにCOに対して CH_4 が多いことが示されており、

少なくとも現在の系外惑星大気モデルに何らかの不足があることを示唆している。さらに、このような惑星大気中における炭素系元素の存在に関する報告は、系外惑星における生命体の存在の可能性を探る上でも重要な情報となるだろう。

3.1.2 観測:ハッブル宇宙望遠鏡による近赤外スペクトル観測

この論文において、惑星大気の特徴を含むデータを得るために著者たちが用いたのは、NASA が所有するハッブル宇宙望遠鏡⁵(Hubble Space Telescope : HST)である。HST には複数の観測機器が搭載されているが、今回の観測で用いられたのは NICMOS⁶(Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) という機器である。

ただし撮影にあたって、NICMOS のカメラのフォーカスを意図的にずらしている。これは、フォーカスが合った状態で撮影した場合、主星の光度が強いためすぐに飽和してしまうためである。フォーカスをずらすことで、正確な画像は得られなくなるものの、スペクトル自体は変化しない。今回は画像ではなくスペクトルデータの取得が目的なので問題はない。さらにこの操作によって、望遠鏡やカメラに生じる姿勢制御上のブレや、各撮像素子における量子的なノイズ⁷の平均化も容易になる。

観測を行ったのは 2007 年 5 月 25 日である。これは、すでに求められている HD189733b の公転周期から、ちょうどトランジットを起こす日を狙って観測したものである。

3.1.3 データ解析:惑星大気透過スペクトル抽出

惑星大気透過スペクトルを得るためには、得られたデータに適切な処理を施さなければならない。特に、ベースとなるトランジット前後のスペクトルを正しく補正する必要がある。

未処理のデータの中には、観測機器に起因し、期待される吸収線と同程度の強

⁵補足解説「ハッブル宇宙望遠鏡」参照

⁶補足解説「NICMOS」参照

⁷補足解説「量子的なノイズ」参照

度を持つ系統誤差⁸が存在するため、最初にこれを除去した。トランジット前後の時間依存、および波長依存の系統誤差修正をしたうえで、その修正パラメータをそのまま用いてトランジット中のデータについても同様の手法で系統誤差を除去する。

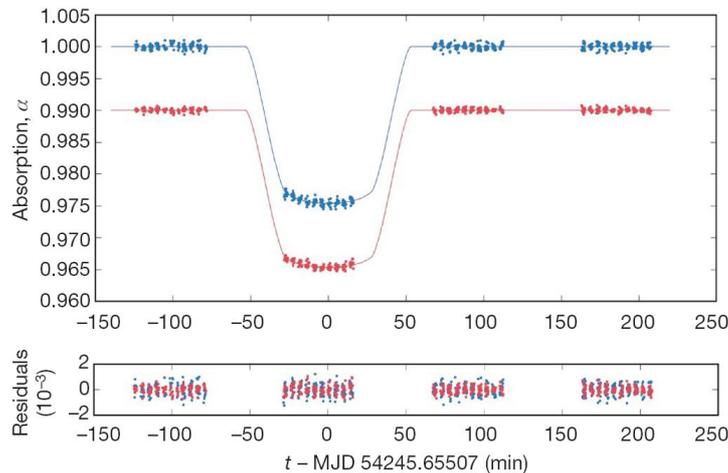


図 1: トランジットの観測結果。横軸は時間 (分)。ただし原点はトランジットの中心としている。下の数字は原点を修正ユリウス日で表したものの。上図の縦軸はトランジット前後 (主星単独) での光度を 1 とした光度。下図の縦軸はモデルからの予測と実データの残差。青い点が H 帯のデータ。赤い点が K 帯のデータ。それぞれの線は実データと最も一致するモデルの光度曲線。HST はおよそ 100 分で地球を一周するため、特定の観測対象をずっと撮影し続けることはできず、観測データは一部欠けてしまう。データの欠落はこれが理由である。赤い線は青い線と重なるため、意図的にずらして表示している。Swain et al. 2008 より。

ここまでの操作を加えた結果が図 1 に示されている。図 1 では、縦軸に H 帯と K 帯⁹ の二つの波長帯における光度変化、横軸に時間経過を表している。ただし、HST の衛星軌道 5 周回の間には得られたデータのうち、HD189733 の方向に姿勢を合わせた直後の摂動のために誤差が大きくなった最初の 1 周回分のデータを除いている。図から見てとれるように、2 周回目 (本来は 3 周回目) でトランジットが起きているために光度が減少しており、その前後では主星の光度は一定値となっている。トランジット中の光度曲線に見られる湾曲は、この波長帯における周縁減光効果¹⁰ によるものである。

⁸補足解説「系統誤差」参照

⁹補足解説「H 帯・K 帯」参照

¹⁰補足解説「周縁減光効果」参照

全データから系統誤差を取り除いた上で、トランジット中のデータからトランジット前後のデータを減算することで透過スペクトルを得ることができる。しかしこの時点での透過スペクトルには、まだ周縁減光の波長依存性を考慮していないことによる効果と、主星の黒点による効果¹¹が含まれているため、これらについても補正した。

3.1.4 観測結果と理論モデル比較

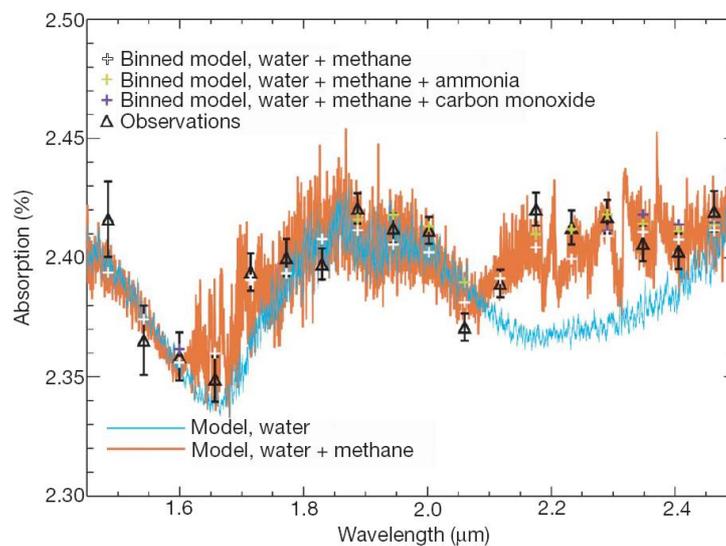


図 2: 水とメタンの吸収シミュレーションと観測結果の比較。縦軸が主星単独時のスペクトルからの吸収度。横軸が波長。黒い三角が観測された吸収度。水色の線が水のみの大気モデルから予想される吸収度。橙色の線が水とメタンを組み合わせた大気モデルから予想される吸収度。白い十字が橙色の線を観測データと同じ解像度に直したもの。緑の十字が水とメタンにアンモニアを加えた場合。紫の十字が水とメタンに一酸化炭素を加えた場合。Swain et al. 2008 より。

これまでの操作を経て得られた惑星大気の透過スペクトルを示すのが図 2 である。図 2 では、横軸に波長、縦軸に各波長における光度変化を表している。

まず目を引くのは $1.9 \mu\text{m}$ 付近における強い吸収である。また、 $1.5 \mu\text{m}$ 付近にも吸収がある。これらはいずれも、過去の観測からも示唆されている水蒸気による吸収線であると考えられ、その存在を支持する証拠となる。さらに、観測結果

¹¹補足解説「黒点による効果」参照

からは $2.2\mu\text{m}$ にも吸収線が存在することが分かる。これが今回初めて確認された CH_4 の吸収線である。

透過スペクトルモデルを用いて、大気が H_2O のみの場合、 H_2O に加えて CH_4 、あるいは CO 、あるいは NH_3 がある場合の 4 つのモデルと観測結果と比較したが、最も一致するのは $\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$ のモデルであった。さらにパラメータを調整すると、最も観測結果と一致するのは大気分圧比にして H_2O が $\sim 5 \times 10^{-4}$ 、 CH_4 が $\sim 5 \times 10^{-5}$ の場合であり、さらに NH_3 を $\sim 1 \times 10^{-5}$ だけ加えたモデルでよりよく一致している。ただし、それ以外の分圧比の大半は水素が占めているものとしている。これはホットジュピター型惑星の理論モデルの一般的な仮定である。

3.2 日面放射スペクトルによる水の同定 -Grillmair et al. 2008-

3.2.1 本論文の意義

この論文は、HD189733bの大気中に含まれると思われていたH₂Oの存在についての確証を得るために、中間赤外波長域におけるスペクトル分析を行ったところ、その特徴を示すはっきりとした吸収線が得られたこと等を報告した論文である。

水の存在自体はモデル計算から示唆されていたものの、著者自身による前年の観測(Grillmair et al. 2007)においては、その存在の証拠をはっきり示すことはできなかった。今回の報告では、中間赤外波長域においてより波長分解能の高い惑星日面放射スペクトル¹²を抽出し、そこから得られた水分子特有の ν_2 変角振動モード¹³による吸収線を、水の存在の確かな証拠としている。

また、本論文は水の存在のほかにも重要な事実を示唆している。前述のGrillmair et al. 2007において、著者は今回の観測と概ね同じ波長帯の観測を行っている。今回の観測は前回よりも少し狭い波長帯において波長分解能を高めたものであり、理論的にはそのスペクトル傾向は前回と同じになるはずである。にもかかわらず傾向に違いが出ていることから、著者らはHD189733bの日面放射そのものが時間変化している可能性を示唆している。さらに予てより示唆されていた、モデルと実際の観測結果における夜面温度の大きな食い違いについても、今回の観測はこの矛盾を解消するどころかむしろ助長するような結果が得られている。この矛盾に対する解答としては、大気深度によって熱再分配効率が異なる可能性や、惑星に内部熱源¹⁴が存在する可能性が考えられるとしている。

3.2.2 観測:スピッツァー宇宙望遠鏡による中間赤外スペクトル観測

今回の観測で用いられたのは、NASAのスピッツァー宇宙望遠鏡¹⁵(Spitzer Space Telescope : SST)である。SSTに搭載されているIRS¹⁶(InfraRed Spectrograph)の中の5-14 μm のモジュールを用いて、HD189733のスペクトルを得ている。

¹²補足解説「惑星日面放射スペクトル」参照

¹³補足解説「水分子の ν_2 変角振動モード」参照

¹⁴補足解説「惑星の内部熱源」参照

¹⁵補足解説「スピッツァー宇宙望遠鏡」参照

¹⁶補足解説「IRS」参照

観測期間は2007年6月から12月にかけてであり、この間にHD189733bの二次食¹⁷10回を観測している。各回において、二次食の中心の前後6時間にわたってデータを取得している。

3.2.3 データ解析:惑星自身の放射スペクトル抽出

二次食の前後(すなわち主星の放射と惑星日面からの放射が見えている時)のスペクトルから、二次食の間(惑星が見えていないため主星単独の放射のみが見える時)のスペクトルを減算することで、惑星日面からの放射スペクトルを得ることができる。ただし、二次食の時間が大変短い(HD189733b上での1.5時間=地球での3.3時間)ことから、主星単独のスペクトルには若干の不確定さがある。機器的な誤差の修正についてはGrillmair et al. 2007とまったく同じ手法¹⁸を用いている。

3.2.4 観測結果と理論モデル比較

今回得られた惑星日面放射スペクトルが図3である。データとともに示している3つの線はモデルによるものであり、熱再分配¹⁹パラメータと大気上層の不透明度²⁰について3種類の設定を与えている。

過去におこなわれた解像度の低い広帯域観測データと比較しても今回のデータと傾向が変わっていないことから、系統誤差の除去に問題がないことが分かる。ただし $8\mu\text{m}$ においては、今回の観測のほうが過去の観測よりも若干惑星のフラックスが少なくなっている。この違いから、惑星の永久日面でなんらかの時間変化が生じ、それが放射に影響を与えているという可能性が示唆される。

注目すべきは、 $3.6\mu\text{m}$ と $4.5\mu\text{m}$ の比(参考文献12)と、 $10\mu\text{m}$ におけるフラックスの減少である。これらはそれぞれ水蒸気と一酸化炭素の存在を示す特徴である。

また、 $6.2\mu\text{m}$ 付近にも小さいピークがあり、これも水蒸気の特徴である。これは水分子の ν_2 変角振動モード特有の吸収線である。このピークが誤差ではないこ

¹⁷補足解説「二次食」参照

¹⁸補足解説「Grillmair et al. 2008における機器的誤差の修正」参照

¹⁹補足解説「熱再分配」参照

²⁰補足解説「不透明度」参照

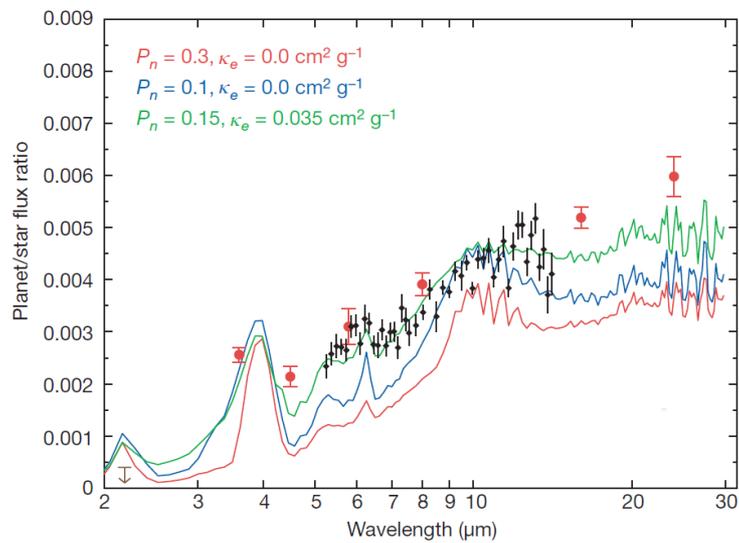


図 3: 広帯域分光によるスペクトル観測と、HD189733b の日面大気の理論モデルの比較。縦軸が惑星の光度を主星の光度で割った比。横軸が波長。黒い点が今回の観測データ。赤い点はより波長分解能の粗い広帯域観測による観測データ (Charbonneau et al. 2008 より引用)。3 色の線は、それぞれ上層大気の不透明度と熱再分配パラメータを 3 組与えたモデルによる予測である。この図では意図的なスケールの調整は施しておらず、すべて実際の値である。Grillmair et al. 2008 より。

とを確かめるため Kolmogorov-Smirnov 検定²¹を試みた結果、このピークが存在せず直線的であるという帰無仮説は 98% の確率で否定できるという結論が得られた。さらにこのピークがモデルに依存せずに存在することを示すため、該当するピーク周辺のデータを除去したうえでこの部分が直線であったと仮定して χ^2 検定²²を試みた結果、そのような帰無仮説は 99.9% 以上の確率で否定できるという結果が得られた。

しかしながら観測データ中に見られる $5.9\mu\text{m}$ 付近のピークらしきものについては、その存在が何に起因するものなのかはわかっていない。この部分で特に誤差が発生する理由も見当たらない。よってこの部分についてはデータの信頼性に不安があると思われるが、この部分のデータを除去してもなお全体として 99.3% 以上の信頼性が保持される。図で示した 3 種類のモデルはいずれも観測データとスペクトル特徴が一致しているが、観測データの絶対値や短波長域におけるデータの傾きについてもよく一致しているのは、大気上層に若干の不透明度を持つ場合のモデルである。

²¹補足解説「Kolmogorov-Smirnov 検定」参照

²²補足解説「 χ^2 検定」参照

4 惑星の温度構造分析

4.1 $8\mu\text{m}$ 赤外線強度分布を用いた温度マッピング -Knutson et al. 2007-

4.1.1 本論文の意義

本論文は、スピッツァー宇宙望遠鏡を用いた特定の赤外波長における HD189733 のスペクトル強度変化の観測から、惑星表層の温度構造等に関する分析結果等を報告した論文である。

著者らは、トランジットの直前から二次食の直後までの軌道半周期以上にわたって、波長 $8\mu\text{m}$ の赤外線における強度変化をかなり高い時間分解能で観測した。そしてその赤外線強度の時間変化の様子と、各時点における惑星の公転軌道上の位置を対応させることで、惑星表層の経度方向の温度分布を推定し、大雑把ながら図4のような擬似的な全球温度分布マップを作った。このような系外惑星のマップが作られたのは本論文が初めてである。

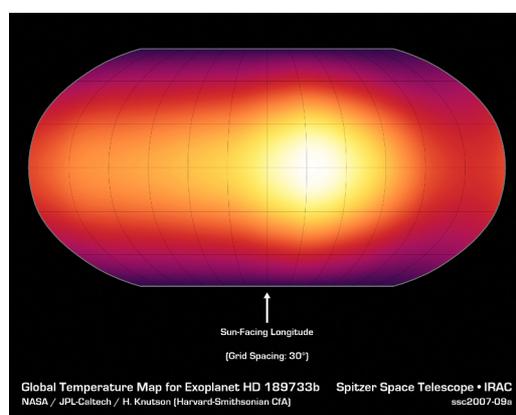


図 4: 系外惑星 Hd189733b の全球温度マップ。正面のまっすぐな縦線が恒星直下点を基準とした経度 0° 。高温部が白-黄、低温部が青-紫で示されている。Hubble Site より。

そして興味深いのは、このマップによれば惑星表層で最も高温なのが、恒星直下

点²³ではなくその東 30° ²⁴の付近だということである。さらに、逆に最も低温なのは恒星対蹠点の西 30° の付近となり、いずれも惑星の東半球に存在するということになるという。このような不思議な温度分布について、著者らはそのような環境をもたらす放射と移流のタイムスケール²⁵を推定し、その実現のためには風速が超音速に達する可能性があるとしている。それに加えて Grillmair et al. 2008 でも取り上げられた、惑星の夜面温度が理論モデルによる推定値に比べてかなり高いという問題からも、HD189733b においては複雑な大気循環が存在しており、熱の再分配に大きな役割を果たしているのではないかと推測している。

これとは別に、強度の時間変化の様子から、惑星の公転軌道に関しても興味深い考察が得られている。今回のような時間変化が得られるためには、前述の非一様な惑星放射による効果だけでは不足であり、他の要素として公転軌道の離心率による影響があるのではないかと指摘している。時間変化の一部を離心率によるものと考えれば、その離心率は $e \cos \bar{\omega} = 0.0010 \pm 0.0002$ (ただし $\bar{\omega}$ は近点経度) となり、極めて小さい値となる。この程度の離心率はドップラー法では小さすぎて検出できないため、存在する可能性は否定できない。本来、このような惑星系においては円軌道化のタイムスケール²⁶が惑星系の年齢より十分に小さくなるはずであり、仮にこのような離心率が極めて小さいながらも存在するとすれば驚くべきことであるとしている。

4.1.2 観測:スピッツァー宇宙望遠鏡を使った $8\mu\text{m}$ におけるスペクトル強度変化観測

この論文では、スピッツァー宇宙望遠鏡に搭載されている IRAC (InfraRed Array Camera)²⁷ を用いて、 $8\mu\text{m}$ の赤外波長帯におけるスペクトル強度の時間変化を観測した。

観測期間は、トランジット開始の 2.6 時間前から二次食終了の 1.9 時間後まで (すなわち公転周期の半分以上) の 33.1 時間である。観測は 0.4 秒毎に 32×32 ピクセルのデータを 33.1 時間連続して取得し、最終的に 27 万枚以上のデータを得た。

²³補足解説「恒星直下点・恒星対蹠点」参照

²⁴補足解説「惑星の方角・経度定義」参照

²⁵補足解説「放射のタイムスケール」「移流のタイムスケール」参照

²⁶補足解説「円軌道化のタイムスケール」参照

²⁷補足解説「IRAC」参照

4.1.3 データ解析:惑星日面スペクトル強度変化

得られたデータには、主星の放射と惑星日面の放射が含まれている。このうち、二次食の中心の時点における強度が主星単独の強度を表しており、それ以外の時刻における強度変化はすべて惑星日面が観測視野に入ってくることによるものである。そのため変化の様子を知る為だけであれば、減算の作業は不要である。ただし、系統誤差の補正は行わなければならない。今回の観測で発現した系統誤差は、時間経過にともなう検出素子の感度上昇²⁸であった。この効果を取り除くために、この効果が主星を中心とした同心円上にある素子(すなわち同一照度²⁹の素子)で同じような変化になるとして特徴づけることで、基準となる光度曲線を生成した。そしてこの基準をもとに各素子のデータを減算することで補正を行った。この補正の妥当性を判断するために伴星のスペクトル強度の変化をみると、その変化は0.05%未満であり、修正が有効であると判断できる。さらに、補正を掛ける前に人工的な位相変化信号を加え、その上で補正を行ってみたところ、加えた位相変化信号は13%しか減衰しなかった。このことから、この効果によらない本来の強度変化はほとんど打ち消されないため、修正は有効であるといえる。

以上の操作から得られたのが図5である。トランジット直後から二次食の直前まで、継続的に強度が上昇しているのがはっきりと見て取れる。これは惑星の日面が視界に徐々にやってきたためである。

4.1.4 観測結果と理論モデル比較

惑星が一様な放射を持つとしたモデルと今回のデータを比較すると、トランジットのタイミングについては予想通りであったが、二次食のタイミングは予想にくらべ150秒ほど遅い。予想される二次食中心時刻の誤差は ± 24 秒程度であり、この150秒のずれは誤差として無視することはできない。二次食の遅れの一部は、トランジットの時(惑星が地球から見て手前にあるとき)にくらべ二次食の時(惑星が地球から見て奥のほうにあるとき)は単純に公転軌道直径分だけ距離が伸びたことによるが、それによるずれは30秒ほどであり予想とのずれを完全に説明できるものではない。原因として、3つの可能性が考えられる。

まず、惑星の日面からの放射強度が非一様である可能性である。この効果を検

²⁸補足解説「感度上昇」参照

²⁹補足解説「強度と照度」参照

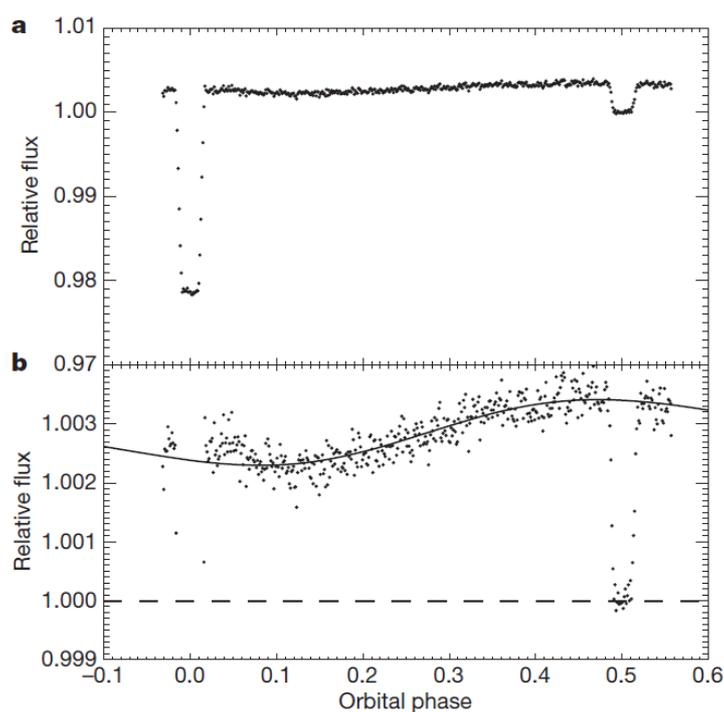


図 5: トランジットと二次食を含む HD189733b の光度の時間変化。上 a 図の縦軸は二次食の中心時 (主星単独時) を 1 とした光度。下 b 図の縦軸は光度変化を見やすくするため a の縦軸を拡大したもの。横軸はトランジットの中心を原点 0.0 とし、公転一周を 1.0 とした場合の軌道位置。各点はデータ 500 点毎 (200 秒毎) に集約されている。Knutson et al. 2007 より。

証するために、惑星表面を経度方向に 12 分割し、それぞれの区分が一定の強度を持つものとして、観測された時系列データと一致させた。その結果として、最も観測データと一致する各経度区分の光度分布が図 6b に示されており、その分布を用いて描いた光度曲線が図 5b の実線である。図 6b に示した光度分布は惑星表面層 12 区分の $8\mu\text{m}$ における強度分布であり、これに緯度方向について一般的な正弦曲線的分布³⁰を加えた図が図 6a である。

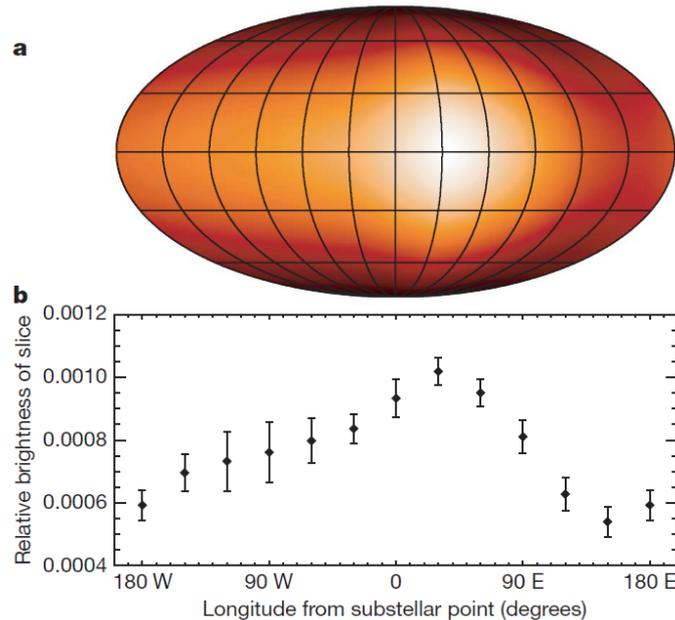


図 6: 惑星表面を経度方向に 12 分割した時の推定光度。下 b 図が得られたフラックス強度を経度方向に対応させたもの。ただし、今回の観測では公転軌道の半分程度までをみており、残りの半周期分についてはデータを取得していない。この期間では西 90° を中心とした西半球については地球側に正面を向けないため、西 90° を中心に誤差が大きくなっている。上 a 図は b 図の結果をモルワイデ図法の全球マップにしたもの。ただし、軌道上の位置から経度情報は与えられているが緯度情報は得られないため、緯度方向には正弦曲線的な分布を仮定している。自転軸と公転軸は 5° 程度ずれているが、ここではそのずれを無視している。Knutson et al. 2007 より。

以上のような非一様な温度分布を持つとすれば、遅れの一部を説明することができる。なぜなら、トランジットの少しあとに放射が最小の点を中心とした半球が地球側を向くため半球全体からの放射が最小になり、逆に二次食の直前で放射

³⁰補足解説「正弦曲線的分布」参照

が最大の点を中心とした半球が地球側を向くため半球全体からの放射が最大になるからである。しかしこれによる遅れは最大 20 秒ほどであり、すべての遅れを説明できるわけではない。

遅れをもたらす第二の可能性として、系内にある別の天体による HD189733b の運動への影響が考えられるが、これはあまりあり得そうもない。なぜなら、そのような影響があるとすればトランジットの予想時間にもずれが生じるはずだが、それは観測されていないからである。

よって、第三の可能性である惑星軌道の離心率による効果があると考えられる。今回のデータのような遅れを離心率によるものとするならば、その離心率は $e \cos \bar{\omega} = 0.0010 \pm 0.0002$ (ただし $\bar{\omega}$ は近点経度) となり、極めて小さいながらも 0 にならず、値が存在することとなる。この値は離心率を求めるためのドップラー法では検出できないほど小さいため、存在する可能性は否定できない。

5 今後の課題

各論文は、いずれも観測結果を理論モデルと比較にすることによって解釈している。しかし、観測結果は(観測法上の間違いや誤差修正の失敗を除いて考えれば)客観的事実であり絶対的なものだが、結果解釈は主観が入り込む相対的なものである。この結果解釈をいかにして客観的な視点に近づけるかが、従来から大きな課題とされてきた。それを考えれば、比較対象となる理論モデルの妥当性が研究者の間で広く認められていなければならないことは明白である。広く認められるには、まず第一に十分な議論がなされていること、そして第二に最新の観測結果との整合性があることが重要である。現にこれまで見てきた3論文でも、大気透過スペクトルモデル(参考文献13)や日面放射スペクトルモデル(参考文献14)の引用元は、当時としては最新の論文であった。

しかし、観測や研究が始まったばかりのこの分野においては、当然のことながら日々新たな成果が得られており、理論モデルも常に修正を迫られる。今回レビューした論文でいえば、Swain et al. 2008 においては惑星表層における光化学反応が問題として挙げられている。また、Grillmair et al. 2008 においては惑星鉛直方向での熱再分配の違い、そしてKnutson et al. 2007 では惑星規模の大気循環の効果が挙げられている。

今後さらに活発になると予想される系外惑星の大気環境研究に先だって、現在までに明らかになっている問題点を総合的に考慮したより新しい理論モデルが構築できれば、系外惑星研究に大きく貢献できるだろう。筆者の今後の研究テーマは、木星型惑星の大気熱放射スペクトルモデルの構築であり、ホットジュピターのような木星とは異なる環境にある惑星に対しても適用できるモデルが目標である。

A 手法・用語補足解説

スペクトルタイプ 天体のスペクトルに最も近い形状を持つ黒体輻射スペクトルからウィーンの変位則を用いて、天体の温度を推定し分類したものである。O型は60,000-29,000 K、B型は29,000-10,000 K、A型は10,000-7,500 K、F型は7,500-6,000 K、G型は6,000-5,300 K、K型は5,300-3,900 K、M型は3,900-2,500 K、L型は2,500-1,300 K、T型は1,300- K、の温度に対応するスペクトルを持っている。このスペクトルタイプと、天体半径と比例関係にある天体の絶対等級を組み合わせることで、HR図が作られている。

ホットジュピター ホットジュピターとは、その名の通り高温で木星程度の大きさをもつガス惑星のことである。高温であるというのは、軌道長半径がきわめて小さく主星のすぐ近くを公転するということであり、ほとんどのホットジュピターは1AU未満の公転軌道を持つと推測されている。これまでの惑星系形成理論では、木星のような大型ガス惑星は太陽から離れた場所でなければ形成されないと見られていた。なぜなら、初期の原始惑星系円盤では、円盤の中心付近では軽い元素が主星の光で蒸発してしまい、円盤外部でしかガスとして存在できないためである。ホットジュピターはその理論に反する存在であり、その形成過程については現在も議論がある。先述のように最初から主星に近い軌道を持つ巨大ガス惑星は形成されないはずであることから、離れた軌道で形成された惑星が何らかの原因で徐々に軌道長半径が狭まり、今のような軌道になったとする軌道移行説が考えられている。現在主流となっている考え方は、離れた軌道でできたガス惑星が周囲のガスを集めて円盤中に「溝」をつくり、主星に近い部分のガス円盤が主星に落ち込むのに伴って「溝」に収まったまま主星に近づくというものである。太陽系においては木星や土星の形成が遅く、ガス円盤が十分に希薄になってから溝を作ったために、円軌道の安定性が溝の移動による軌道変化に打ち勝っていたといわれている。しかし軌道移行の原因については諸説あり、いまだに議論が続いている。

潮汐的に固定 公転と自転の同期ともいえる。地球と月の関係が代表例であり、公転する天体が主星に対して常に同じ面を向けている状態である。これは偶然ではなく、潮汐力によって天体が変形した時に、相対速度が違っていると、天体中心部と膨らんだ部分を結んだ方向が重力方向とずれるためトルクが働き、常に膨らんだ部

分を重力方向と一致させようとするプロセスが働くことによる。公転軌道が主星に近いために潮汐力の強く働く天体の間で顕著に見られる。そのためホットジュピターも潮汐固定状態にあると考えるのが主流であるが、大気が存在がどのような影響を及ぼすかがわかっていないため、あくまで推測の域を出ていない。

トランジット トランジット(通過)とは、ある観測地点から見て、他の天体がその主星の光球面上を見かけ上通過して見える現象である。ある観測地点から見て、主星の光球面が他の天体によって遮られる現象を総称して「食」と呼ぶが、トランジットは食のなかでも特に遮られる領域が見かけの光球面より十分に小さい場合を言う。太陽系を例にとると、地球から見て内惑星である水星や金星は太陽に対して十分に小さいためトランジットと呼ばれるが、月の場合は隠れる領域が多いため食と呼ばれる。ただし、内合(太陽・惑星・地球の順に並ぶ)の時に必ずトランジットになるわけではない。これは惑星ごとに軌道傾斜角がわずかに異なるためである。

系外惑星の場合、遠方にあるため主星の光球面を分解するのは技術上大変困難であり、そこを横切る惑星の影も捉えることは現時点で不可能である。そのため、主星を長期間観測して周期的に単調な減光が起きていれば、それをトランジットしているものと判断する。ただし、トランジットが観測できるためには系外惑星の公転面が地球から見た視線方向に対して十分に平行である必要があり、なおかつ惑星が十分に主星に対して大きくなければならない。そのため、現在までにこの方法で確認された系外惑星候補数は全体の $1/6$ のおよそ 70 にすぎない。

ハッブル宇宙望遠鏡 ハッブル宇宙望遠鏡は口径 2.4m の反射望遠鏡であり、NASA によって 1990 年に打ち上げられ、数度の改修を経て現在も運用が続けられている。高度約 600km の地球低軌道を一周 100 分ほどで周回している。HST には 6 種類の観測機材が搭載されており、それらを用いて紫外から遠赤外の画像とスペクトルを得ることができる。HST をはじめとする宇宙望遠鏡は、打ち上げの技術的制約から地上の望遠鏡に比べ小口径であることが多いものの、地球大気の影響を受けずに観測が可能であるという大きなメリットを持っている。

NICMOS 今回の観測で使われたのは、惑星大気に存在すると推定される H_2O や CH_4 、そして CO の吸収線が強く見られる近赤外帯域 ($0.8-2.5\mu m$) のスペクトル分光と、その帯域における画像を得ることができる NICMOS のモジュールの一

つである。

量子的なノイズ 撮影素子は、その素子が担当する波長の光子を検知すると電気信号を発生し、それがデータとして記録される。しかし光子には量子力学的な揺らぎが存在するため、素子はその揺らぎを反映したデータ分布を記録することになる。よって、データはある程度の幅を持った強度分布を持つことになり、その値の揺れを量子的なノイズと呼んでいる。

系統誤差 得られた直後のデータには、様々な誤差が含まれている。その誤差は大きく分けて規則性を持った系統誤差と、不規則な偶然誤差とに分けられる。系統誤差は、ある測定方法を用いる限り同じような特徴を持つ誤差であり、今回のような観測では機器に由来する誤差がこれに当たる。その誤差に関する正しい修正法を用いれば消去可能である。偶然誤差は、測定毎に現れる誤差であり、今回のような観測では量子的ノイズなどがこれに当たる。その発生は無作為なため、完全に消去することはできない。その代わりに、測定回数を多くすることで平均化し打ち消すことができる。

H帯・K帯 赤外線波長帯は地球の大気による吸収を受けやすいため、地上観測は難しい。しかし、いくつかの特定の波長帯では大気による吸収が比較的穏やかであり、地上からでも観測が可能である。このような波長帯は「窓」と呼ばれており、 $1.25\ \mu\text{m}$ を J 帯、 $1.65\ \mu\text{m}$ を H 帯、 $2.2\ \mu\text{m}$ を K 帯、 $3.45\ \mu\text{m}$ を L 帯、 $4.7\ \mu\text{m}$ を M 帯、 $10\ \mu\text{m}$ を N 帯、 $20\ \mu\text{m}$ を Q 帯と呼ぶ。

周縁減光効果 地球から見ると、恒星の光球面は均一な明るさではない。恒星は中心部に近い層で温度が高く、外に向かうにつれ温度は下がるため、それぞれの層でそれぞれの温度の黒体輻射をしていると考えられる。地球から見える光球面は、視線方向についてある一定の光学的深さから出された放射を見ていることになる。この時、光球面の中心部からは光路が鉛直になるため比較的深い高温の層からの放射が見えるが、光球面の外縁部では光路が水平に近くなり、中心部と同じ光学的深さで見えるのは温度の低い層からの放射となる。

惑星が光球面の一方の端から入り、中心部を經由して反対側の端に抜けていくトランジットの過程を考えると、惑星が両端に近いところにあるときは、もともと

暗い(低温な)部分を隠すため、トランジット前後のベースとなる光度からの減光が比較的小さい。逆に中心部を隠しているときは、光球面の最も明るい(高温な)部分を遮蔽するために、ベースからの減光が比較的大きくなる。

黒点による効果 主星上の黒点は周囲に比べて若干冷たいことから、恒星全体のスペクトルよりも絶対値が低く、この部分では低温の黒体輻射となる。黒点が存在すると、放射の強度が全体として少し減少することになる。しかしながら、赤外波長帯はもともと絶対値が低いため、本論文ではこの効果を小さいとしている。

惑星日面放射スペクトル 二次食の始まる直前および直後の HD189733 のスペクトルの中には、主星自身の放射にくわえて惑星日面の放射も含まれている。なぜなら二次食の前後では、惑星表面のうちで地球から見えている側の半球と、惑星の日面がほぼ一致するためである。よって、二次食の直前・直後のデータから二次食の最中のデータ(すなわち主星単独のスペクトル)を減算することで、惑星日面からの放射スペクトルを得ることができる。日面からの放射は惑星の主要な放射過程であり、惑星の最も温度の高い領域からの放射になるため、スペクトル強度も強い。そのぶん吸収線もはっきりと得ることができる。

水分子の ν_2 変角振動モード スペクトルの輝線は、各種分子が固有のエネルギーを放射して励起状態からより安定な状態になるために発現するものが主であるが、その他にも輝線の要因となる要素がある。その一つが、分子の振動モードによるエネルギーである。Grillmair et al. 2008 の場合、水分子の変角振動(酸素原子と2つの水素原子の成す角の変化)のモードにおいてP枝とR枝で吸収が起きるがその間にあるQ枝では吸収が起きないことを利用し、Q枝の吸収体に当たる波長帯でピークが起きていることが水分子の存在の証拠であるとしている。

惑星の内部熱源 惑星の内部熱源が存在する場合は、基本的に日面・夜面に関係なく惑星全体で放射が増える。そのため、主星からの入射光だけを考える場合より夜面の温度が高くなる。内部熱源として考えられるのは、放射性壊変にともなうエネルギーや、惑星ができたころに衝突した小天体が持っていたポテンシャルエネルギー、さらに木星の衛星などで確認されている潮汐力によるエネルギー等がある。ちなみに木星においては、入射する太陽によるエネルギーから想定され

る木星からの放射に対して、実際の観測された放射がはるかに多いことから、内部熱源の存在が議論されている。この場合は、大気最下層にある液体水素の層にヘリウムが沈み込むことによるポテンシャルエネルギーが熱源とされている。

スピッツァー宇宙望遠鏡 スピッツァー宇宙望遠鏡は、NASA が 2003 年から運用している宇宙望遠鏡である。前出のハッブル宇宙望遠鏡が可視光波長域を中心とした画像の取得を主目的としているのに対して、スピッツァー宇宙望遠鏡は赤外波長域全体の観測が主目的である。

赤外線観測の難点は、エネルギーが低く低温の物体からも放射されるため、検出素子にノイズが入りやすいことにある。赤外線は太陽・地球・さらには望遠鏡自体からも放射されているので、ノイズを減らすためには赤外線望遠鏡を極低温に冷却する必要がある、そのためには大量の冷却剤を積まなければならない。しかも、冷却剤が切れれば観測精度は大きく損なわれることになる。

スピッツァーはこの問題を解決するため、地球の衛星軌道ではなく太陽中心の周回軌道(言うなれば人工惑星軌道)に地球を追いかけるように投入されている。これは地球から放射される赤外線の影響をなくすためであり、さらに太陽方向には耐熱シールドを搭載しているため、スピッツァーは大量の冷却材を必要としないのである。

IRS IRS はスピッツァーに搭載されている 4 つの分光計で、それぞれが 5-40 μm の波長域を分割して担当している。今回使用したのは、4 つのうちでもっとも短波長域を担当する 5-14 μm の分光計である。

二次食 二次食とは、トランジットの 180° 反対側であり、惑星が主星に隠されることを言う。トランジットの場合は、惑星が主星に対して極端に小さいので通過と呼ぶが、二次食では主星が惑星を完全に隠すため食と呼ぶ。二次食の際は、惑星は完全に主星に隠されてしまうため、惑星からのフラックスを含まない主星単独のスペクトルを得ることができる。

Gillmair et al. 2008 における機器的誤差の修正 本論文において参考先となっている「A SPITZER SPECTRUM OF THE EXOPLANET HD 189733b」では、まず露出に関する補正を行い、続いて望遠鏡の摂動による方位のぶれ、そして光子のノイズという順で処理している。

熱再分配 惑星の大気中では、熱力学上の要請から熱の均等化のプロセスが働いているはずである。ホットジュピターでは、特にそのプロセスが顕著であると推定されている。なぜなら、永久日面は常に膨大な熱量を受け取り、それを大気が惑星全体へと拡散させていると思われるからである。この惑星全体への拡散を熱再分配と呼び、これがどの程度活発に行われるかをあらわすのが熱再分配パラメータである。熱再分配が活発ならば、受け取った熱はすぐさま惑星全体に広がるため、惑星全体の温度は均等に近くなる。逆にそれほど活発でなければ、受け取った熱は日面側に留まりやすくなるため、昼夜の温度差が大きくなると思われる。

不透明度 惑星大気に含まれる分子によって入射してきた光の散乱・吸収が生じ、光学的に厚くなる度合いを不透明度と呼ぶ。ある大気層の不透明度が高いと、光はその層で散乱・吸収されやすくなり、その層の温度が上がって放射が増える。逆に低いと、光は透過しやすくなり、層は暖まりにくく放射も出にくくなる。

Kolmogorov-Smirnov 検定 統計学における検定法の一つであり、KS 検定と略されることもある。用途としては、実データと帰無仮説の適合度を検定するために使われる。Grillmair et al. 2008 においては、データが無特徴な直線であるという帰無仮説を否定する客観的根拠として用いている。

χ^2 検定 KS 検定と同じく、検定法の一つである。用途としては、適合度や独立性の検定に使われる。Grillmair et al. 2008 においては、ある特定のピークが帰無仮説を否定して存在する客観的根拠としている。

恒星直下点・恒星対蹠点 惑星表面のうち、最も恒星と近い点を恒星直下点、その反対側の点を恒星対蹠点と呼ぶ。地球における恒星直下点は南北回帰線上を両端とする帯状の地域を移動することになるが、HD189733b の場合、惑星が潮汐的に固定されていると考えられるために常に同じ点が恒星直下点となっている。そのため、後述のように経度の定義として利用することが可能になっている。

惑星の方角・経度定義 惑星における南北方向の定義は、基本的に自転軸と惑星地表の交点とされている。ただしそれだけでは南北の区別がつかないため、公転が反時計回りに見える側にある交点を北としている。これは地球をはじめとする

太陽系のすべての惑星が反時計回りに公転していることを基準としているからである。

HD189733b の経度については、惑星が潮汐的に固定されていると予想されることから、常に主星に一番近い地点を経度 0° としている。緯度については自転軸に垂直な赤道面という明白な定義があるが、地球以外の天体の経度の定義はあいまいであり、この論文の定義も便宜上である。

放射のタイムスケール 惑星から宇宙空間に向かったの放射は、主星からの放射を受け取り、それを一旦惑星が大気や地表で吸収したのち、今度は大気や地表から放射するという過程をたどっている。惑星への入射が微小変化したとき、それによる惑星放射の変化が放射平衡状態へ帰着するまでの時間の目安が放射のタイムスケールである。放射のタイムスケールは、おもに吸収体の性質によって変化することになる。吸収体が高温で高い不透明度を持つ場合は、活発な吸収・放射が促されるため放射のタイムスケールは短くなる。逆に低温で透明度が低ければ、吸収・放射が停滞しがちでありタイムスケールが長くなる。

移流のタイムスケール 移流とは、大気中の気塊の輸送の流れのことである。この流れは主に、大気圧や温度の勾配によってもたらされる。移流のタイムスケールは、勾配が大きいほど流れが急になるため短くなり、気塊輸送が効率よくおこなわれるため熱再分配は進みやすくなる。逆に勾配が緩やかであればより長い時間がかかり、熱再分配の効率も悪い。

円軌道化のタイムスケール 公転軌道が離心率を持っていて、惑星の公転速度に対して主星の自転速度が遅い場合、惑星の公転軌道は徐々に円軌道に近くなる。これは、主星と惑星が最も近づいたときに働く潮汐力が、公転速度と自転速度の関係から摩擦力となり、徐々に速度を奪うためである。HD189733b の場合、木星並みの質量を持ち、公転周期が 2.2 日であるのに対して主星の自転周期は 13 日ほどであることから、円軌道化が顕著に進むのはあきらかである。

IRAC IRAC は、スピッツァー宇宙望遠鏡に搭載されている赤外線カメラである。IRS は赤外スペクトルを得る分光計であるのに対し、IRAC は $3.6\mu\text{m}$ 、 $4.5\mu\text{m}$ 、 $5.8\mu\text{m}$ 、そして $8\mu\text{m}$ における画像を撮像できる。

感度の上昇 スピッツァー宇宙望遠鏡がノイズを防ぐため地球から離れた軌道にあることは前述のとおりであるが、それでも望遠鏡本体に由来する赤外線などを完全に消去することは不可能である。よって、ノイズを無視するためには検出器の感度を意図的に若干低くし、検出素子がノイズ程度の赤外線には反応しないようにしなければならない。この論文でいう「時間経過に伴う感度上昇」は、観測開始から終了にかけてスピッツァー望遠鏡本体が徐々に冷却されたことで、感度もまた徐々に引き上げられたということを示している。感度の上昇に伴い、検出素子が示す値は観測対象の本来の強度に近くなる。

強度と照度 強度とは特定の波長の光のエネルギー量である。強度が高いと、この波長でのエネルギーが高いことを表し、温度が高い、あるいは放射が多いということとほぼ同義である。低ければその逆となる。ただし赤外波長域においては、高温の物体も低温の物体もさほど変わらない量の放射となるため、単に放射の量のことを示す場合が多い。

対して照度とは光線が検出素子に当たる量である。強度と混同しやすいが、強度は放射源から出るエネルギー量を意味するのに対して、照度は検出素子が受けるエネルギー量を表している。たとえば照度が高い場合、検出素子は放射を十分に受けることになるため、放射源との距離さえわかれば実際の強度を知ることができる。しかし照度が低いと、検出素子は対象の放射を十分に得ることができず、本来の強度を得ることができなくなる。

正弦曲線的分布 今回のデータからはある時刻における惑星からの放射しか分かっておらず、実際の惑星表層の温度構造のデータが得られたわけではない。公転軌道上の位置から、潮汐的に固定されているとみられる恒星直下点を基点とした経度情報を決定することで、経度方向の温度構造を推定している。しかし緯度方向のデータについては、経度方向とは異なり変化をみることができない。なぜなら惑星の軌道傾斜角が 85° 程と地軸と公転面がほぼ垂直であることから、緯度方向には公転周期全体を通してほとんど変化がないためである。そこで、地軸と公転面の関係を逆手にとり、緯度方向には均等な温度構造を仮定することで、図4.6の地図を作っている。この仮定では、経度方向のデータを赤道上の値とし、緯度方向にはこの値を極大値とした正弦曲線的分布をしているとしている。

B 論文全訳

B.1 The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet (Swain et al. 2008)

Mark R. Swain, Gautam Vasisht & Giovanna Tinetti

Nature Vol 452—20 March 2008— doi:10.1038/nature06823

系外惑星大気中のメタンの存在

系外惑星の大気中にある分子は、大気放射のバランスに強い影響を与えていること、力学的及び化学的プロセスの痕跡を記録していること、そして非平衡による影響の存在を示していることが期待されている。分子は大気の状態や組成を明らかにする可能性を秘めているため、それらの研究は最優先の課題である。水、一酸化炭素、そしてメタンの回転-振動吸収遷移帯は、ホットジュピターでの非連続的透明性の主要な要因であると予想されている。これらの吸収帯は波長が重なることもあり、またそれらからの対応する固有の特徴は弱いため、はっきりとした同定には正確な赤外線分光が必要となる。今回われわれは、メタンの存在を示す HD189733b の近赤外線透過スペクトルを報告する。加えて、 $1.9\mu\text{m}$ の水蒸気吸収帯が分光されたことから、この天体において最近主張された水の存在を再確認できた。熱化学に基づけば、一酸化炭素はホットジュピターの大気上層に豊富に存在すると予想されているが、ここではそれを証明できていない。よって、このような熱い惑星においては、一酸化炭素よりもメタンの検出によって、永久日面からつながる水平方向の化学組成勾配の存在の証拠を得られるか、あるいはメタンの増加を導く未知の光化学的效果を意味するのかもしれない。

今日までに、ホットジュピター型系外惑星の放射スペクトル中に、分子の存在を示す特徴はまだ見つかっていない。第一食（つまり、惑星が公転軌道面の一部を隠し、主星からの光の一部が惑星のふちの大気を通過してから見えるとき）の間の透過スペクトル解析は、系外惑星の大気の温度構造に影響を受けないという利点を持っている。強い分子吸収帯の存在から考えて、 $1\text{-}2.5\mu\text{m}$ の近赤外線スペクトルは H_2O 、 CO 、そして CH_4 の示す特徴の探索に最適である。完全に熱化学平衡状態にあるホットジュピターの大気では、最も豊富な炭素系分子は高温 ($T > 1200\text{K}$)

ではCOであり、低温 ($T < 800K$) においてはCH₄であると予想されている。公転周期が短く、潮汐的に固定されているホットジュピターの日面では、その内部での炭素化学種はCOが支配的であるはずである。非平衡効果によって、昼夜境界、さらに夜面においてすら、COが主要な炭素を持っている分子となっているかもしれない。我々の2.2 μm におけるCH₄吸収帯の始まりの検出は、系外惑星大気中の炭素を含む分子の、初めての明らかなスペクトルの特徴である。

我々は、トランジットしている系外惑星 HD189733b を、ハッブル宇宙望遠鏡のNICMOSカメラ (NIC-3) を使用して、2007年5月25日に、衛星軌道5周回分にわたり観測した。これらの観測の間、NICMOSを1.4-2.5 μm 帯にわたってスペクトル光の時系列を得られるように設定した。母星HD189733はきわめて明るい(K-band光度で $K=5.52$) ため、各検出素子の飽和時間を伸ばすようにNICMOSカメラのフォーカスをぼかした。これは、時系列中の見かけ上の強度変動のもとになってしまう、望遠鏡の高速姿勢制御上の方位誤差とゆっくりとした方位の移動と、結びつく可能性のあるピクセル内、あるいはピクセル間の量子効率の変動にわたるいくつかの空間的平均を可能にするため、正確な測光にとっても有益である。フォーカスをずらすことでスペクトル解像度を決定でき、我々は十分なシグナルノイズ比を保った18の独立な波長チャンネルを抽出することができた。HD189733は衛星から「常に見える領域」におらず、また観測スケジュール上の制約のため、内合の時期について食が起きてる期間のデータは対称的でないために、時系列にはいくつかの隙間がある。

第一食の間、主星の見かけ上の明るさはおよそ2.4%減少した(図1)。しかしながら、もっともらしい水蒸気量を与えたときに期待される振幅の変化は小さいため、何か分子の特徴を見つけ、同定するには高いダイナミックレンジ($\sim 10^4$)をもったスペクトルが必要とされる。ハッブル宇宙望遠鏡は地球大気による観測的限界を避けたにもかかわらず、NICMOSや他の機材による測光は、予測された分子の示す特徴と同じくらいの強さとなる系統誤差を含んでいるため、補正が必要である。我々のデータでは、最初の軌道は強い系統的なずれ(衛星の姿勢によるもの)を持っていたため、それは我々の解析より除外した。

透過スペクトルに到達するためには、食を起こしていないときのデータについて、適切な基準を確立することが重要である。元の光度曲線にある系統誤差には、主にふたつのタイプがある。ひとつが時間的な相関、もうひとつが波長的な相関である。時間的な相関を取り除くために、食が起きていないときの衛星軌道で得られた各波長チャンネルでの観測フラックスが、衛星軌道の位置について二次関数

を使ったひとつの項と、5つの状態変数の線形結合でかけるような摂動によって、モデル化できると仮定した。状態変数はカメラの光学的状態を捉えており、それぞれは各チャンネルの中心位置(複数)、望遠鏡のフォーカスの「呼吸」によるフォーカスのぼかしを表す変数、観測器に対するスペクトルの回転、そして温度である。観測された光度曲線に回帰させることによって、モデルの係数を与える。このモデルの下で非相関化すると、時系列はそれ以上時間的な相関を示さなくなった。残存する超過ノイズの一部は、波長と強い相関があった。このノイズの大きさは全チャンネルの時系列データ(波長軸を潰した)の重み付き平均として評価し、そしてそれぞれのチャンネルから減算した。結果的なチャンネルの時系列は、理論上のノイズ限界に近い。データとモデルの適合の頑健性は、適合モデルからデータの一部を取り除き、そしてそれと結びついた残差がうまく振舞い続けていることから、確認できた。

食の間の時系列の時間的な効果は、食外でのデータによる状態変数と、その軌道中での時間変化毎における衛星軌道周期によって決まるモデル係数を適用することで非相関化された。周辺減光による食中光度曲線にある色相効果を補正した後に、波長に対する非相関化を食外軌道で用いたものと同じ方法で行った。すでに機器に由来する系統誤差を修正した食中の時系列を平均化し、透過スペクトルを構築した。このスペクトルは、弱い色相依存性をもつ宇宙物理学的な偏りを含む。これは、周辺減光した光度曲線を平均化し、そして恒星面上に冷たい黒点が存在するためである。周辺減光の効果は、可視光におけるデータほどではないが、明らかに食中の光度曲線の湾曲として見られる。(図1)文献にある非線形の周辺減光の法則に則って、我々はスペクトルチャンネルを同時に足し合わせ、HとKの波長帯に適合する合成した光度曲線を構築した。そして、モデル光度曲線を生成するために、我々は周辺減光のある星の数値モデルを作り、さらにその系のケプラーパラメータを用いて恒星面を横切る惑星の運動をシミュレートした。最急降下法を用いて、惑星の有効半径(この帯域における)とトランジットの期間を自由パラメータとして残すことで、生成した曲線を測定データと合わせた。各帯域での最も一致した光度曲線から、周辺減光バイアスは次のように推定される。平均補正は 2×10^{-4} であり、色補正は帯域内の 1×10^{-4} である。HD189733における黒点の存在は、食が起きていない状態の長期間の変動の観測、可視波長における食の起きている期間の光度曲線の形から、示唆されてきた。食で隠されていない黒点は、それらが恒星面よりも冷たいために、推定された吸収の深さに正の色相的な偏りをもたらす。赤外域において、この効果による色の変化は小さく単調であり、観測された変動の形状にはほとんど影響しない。我々はモデルスペクトルを用い、黒点の温度が5000Kの星の光球面に対して平均1000K低いと仮定する

ことで、恒星面全体に対するの黒点の被覆領域を4%とする補正を導いた。データ抽出の方法についてのより詳しい記述は補足情報を参照のこと。

図2は、相対吸収深度の形で補正スペクトルを示す。1.9 μm を中心とした水の吸収線の特徴はきわめて明瞭である。短波長における吸収の急激な増加も、そばにある1.5 μm 未満の波長に中心を持つ水の吸収線によるものである可能性が高い。したがって、この新たなスペクトルから、HD189733bの大気中の水蒸気の存在をはっきりと同定することができる。これは広帯域測光観測からの以前の水蒸気の存在の示唆を確認するものである。2.2 μm において吸収の急激な変化がおきているため、この観測は水に加えてメタンの存在も疑いなく示している。最近の惑星スペクトルモデルを使って、水とメタンの量と、一酸化炭素とアンモニアの寄与の可能性を知るために、透過スペクトルをいくつかシミュレートして生成した。このモデルは10から 10^{-10}bar の圧力をカバーしており、 $\text{H}_2\text{-H}_2$ (最も一般的な分子)による遷移を考慮している。大気各層における温度と密度は、圧力-密度プロファイルから決め、各分子による吸収への寄与は、その混合率に基づいて算出される。 H_2O の吸収係数は新たな高精度の吸収線リストを組み込んでおり、 CO の吸収係数はHITEMPデータベースより推定した(L.S.Rothmanら私信)。メタンの吸収係数は吸収線リストの組み合わせを使うことで推測した。全ての分子について、大気各層の異なる温度(500Kから2000K)における、選択されたスペクトル帯について不透明度を計算した。そしていくつかの場合には、データの得られている温度から内挿して不透明度の中間値とした。我々は「夜側から見た昼夜境界」の圧力-温度プロファイルを使った。顕著な温度プロファイルの違いは観測された水蒸気吸収特徴との不一致をもたらす。理論スペクトルは観測と同じスペクトル解像度にしたがってビンに分け、そして組成の違いによる結果と観測は、減衰²(最小二乗法)値を使って比較した。水と一酸化炭素の組み合わせ、水とアンモニアの組み合わせは、いずれも観測スペクトルと一致しなかった。最も観測と一致したモデルは、 $\sim 5 \times 10^{-4}$ の水と 5×10^{-5} のメタンの比であった。(図2参照)さらにアンモニアを 1×10^{-5} の混合比で追加すると、さらに一致がよくなった。我々の H_2O 混合比の値と以前の結果とが一致していることは重要である。なぜなら水の主要な3つの吸収線を含む広域な波長が整合的にモデル化できるからである。これは推定した H_2O 混合比がきわめて確からしいことを意味する。大気が光学的に厚くなる圧力は、吸収が強い時には数ミリバールで、吸収が弱いときには0.2barまで達する(たとえば1.7 μm 程度)。我々はエアロゾルの効果をモデル化し、我々のスペクトルは霧が無いものと決めた。なぜならそれらの寄与が、観測された吸収深度に比較して、水とメタン両方のスペクトル特徴を打ち消すからである。もし最近の観測が示唆するようにエアロゾルが存在するならば、それらは細かい粒

子の形態であり、その効果は $1.5\mu\text{m}$ 以下の波長のみ制限されるに違いない。

メタンは存在するとほぼ確実に結論付けることが出来るにもかかわらず、メタン量の推定は高温遷移の不確定性に依存する。加えて、メタンの存在は吸収スペクトル中の一酸化炭素の効果を隠してしまう。水とメタンのみを使うことで最も合致する結果が得られるにもかかわらず、一酸化炭素は水の存在量まで含まれる。そうしても二乗残差 χ^2 の値はわずかしか増加しない。よって、われわれは一酸化炭素の量、あるいは C/O 比をはっきりと決めることは出来ない。メタンの比較的高い濃度は光化学によるものかもしれない。C-O 結合と C-H 結合の強さと、冷たい母星 (スペクトルタイプ K2V) のからの紫外線フラックスの欠損のため、一酸化炭素とメタンの光分解は HD189733b の上層大気 (圧力 $P_j 10^{-4}\text{bar}$) においてはあまり顕著ではないかもしれない。しかしながら、硫黄、窒素、酸素を含む化合物の弱い結合の光分解と、高速反応する自由化学活性種が付随していることが、一酸化炭素とメタンの相対存在度について顕著な効果を持つのもかもしれない。

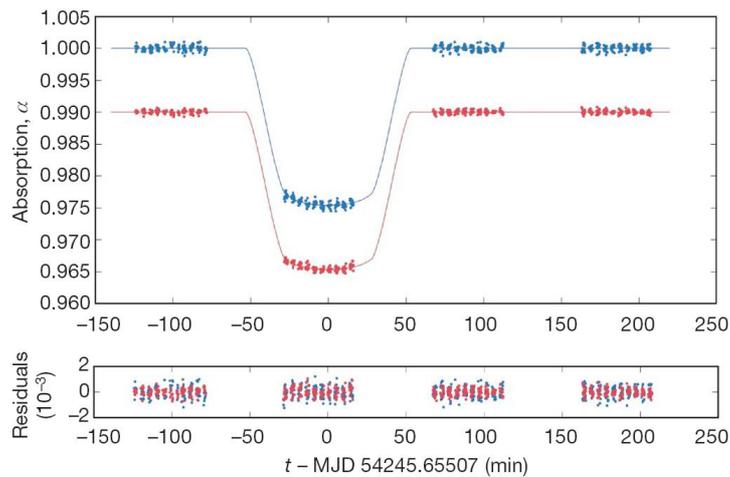


図 1: トランジット時の目盛り付測定結果

上のパネルは HST4 週分で撮られた、系統誤差修正済みの時系列（ α は吸収%であり、 t は改ユリウス暦 MJD での分を単位とした時間である）トランジットは 2 週回目のときに発生しており、トランジット時の光度曲線の湾曲は母星の周辺減光によるものである。示した二つの時系列は、H 及び K 帯 ($1.6\text{-}1.8\mu\text{m}$ の青 ; $2.0\text{-}2.4\mu\text{m}$ の赤) とおおよそ合致したスペクトルデータと併記されている。二つの時間軸の差は、HD189733 が常に HST からの可視範囲にいるわけではないためである。明らかに、赤の線の湾曲はオフセットしている。

下のパネルは測定結果の光度曲線とモデルによる予測値の間のズレに対応する残差である。

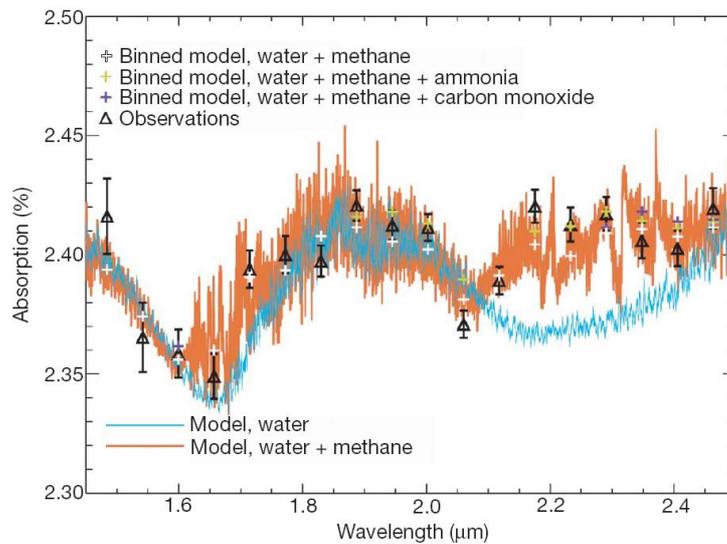


図 2: 水とメタンの吸収シミュレーションと観測結果の比較

観測スペクトル(黒三角)、そして H_2 が大部分の大気での、少量の水(青)と、水とメタンの組み合わせ(オレンジ)の効果をあらわす2つの理論スペクトル。観測スペクトルは、水蒸気の場合に期待されるものに比べて、 $1.7\text{-}1.8\mu\text{m}$ と $2.15\text{-}2.4\mu\text{m}$ において顕著な違いを含む。われわれはこの特徴を、水の中に追加的に含まれる他の種類以上の分子の存在による付加的な吸収特性と判断した。水とメタンのみと考えた場合、観測データに最も一致する理論スペクトルを、観測のスペクトル解像度にモデルを均すことによって(白いクロスで示している)決定した。分子の種類と量を変動させたことによる異なるモデル予測は、最小二乗法を使い観測と比較された。最も一致したモデルは、水が 5×10^{-4} 、メタンが 5×10^{-5} のものである。モデルスペクトルは、アンモニアあるいは一酸化炭素を少量 (1×10^{-5} 程度) 加えることで若干改善が見られる。(緑と紫のクロスでしめした) エラーバーは ± 1 をあらわす。このエラーは系統誤差の補正における不確定さを含む(補足情報を参照)。スペクトルの原点の決定は、惑星の推定直径に依存することと、黒点補正の仮定に依存することに注意しておく。このように、スペクトルの形状ははっきりと求められている。絶対値で $\pm 2 \times 10^{-4}$ の不確定さがある。

B.2 Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD189733b (Grillmair et al. 2008)

Carl J. Grillmair, Adam Burrows, David Charbonneau, Lee Armus, John Stauffer, Victoria Meadows, Jeffrey van Cleve, Kaspar von Braun & Deborah Levine

Nature Vol 456— 11 December 2008— doi:10.1038/nature07574

惑星 HD189733b の日面放射スペクトルにおける強い水の吸収線

系外惑星 HD189733b の最近の観測は、惑星からの放射スペクトル中の水の存在を明らかにできなかった。しかしホットジュピターのモデルは、大気中の豊富な水蒸気を予言している。これらのモデルを立証し制約することは、極限的環境にある惑星大気の物理と化学を理解する上できわめて重要である。最近になって、HD189733b の大気中の水の存在を示す証拠が、惑星の大気が主星の光を選択的に吸収している透過スペクトルと、広帯域測光の中に見つかった。今回われわれは、惑星自身からの高 S/N 比の中間赤外線放射スペクトルに水の強吸収線が検出されたことを報告する。我々は水蒸気による強い吸収の特徴である $10\mu\text{m}$ 以下におけるフラックス比の強い下降と、不連続なスペクトルの特徴を見出している。これらの観測とこれまでの観測の違いは顕著であり、これまで予言されていた惑星規模のダイナミックな気候構造によって、透過スペクトルが変動する可能性を示す。観測されたスペクトルと広帯域測光に適合したモデルは、日面から夜面への熱の再分配が弱いことを示唆する。この再分配の傾向と夜面の高い温度という観測結果を両立させるには、大気循環のより進んだ理解か、あるいは新たなるエネルギー源が必要となるだろう。

系外巨大惑星 HD189733b は、知られているトランジットする系外惑星の中で最も観測が容易であり、最近地上及び宇宙両方の望遠鏡による集中的な精密観測の対象となっている。比較的近く (19pc) にあり、高温で (1201K)、そして主星に対して比較的サイズが大きい (半径比 0.155) ために、惑星を二次食 (主星によって惑星が視界から隠されるとき) 中と食外でそれぞれ観測すると、惑星からの光を、赤外線におけるフラックスの変化として、簡単に区別できる。この好都合な軌道の配置は、日面大気からの赤外放射スペクトルの予備的な観測とあわせて、惑星の

経度による温度変化の高精度な観測を可能にする。

NASA のスピッツァー望遠鏡の赤外アレイカメラ (IRAC) を使用した、主トランジット中の HD189733b の広域フィルター観測によって、水蒸気による吸収と見られる $3.6\mu\text{m}$ におけるフラックスの欠損が、最近になって発見された。しかしながら、同じデータによる独立な解析では、この解釈を支持するには観測の不確定さが大きすぎると結論された。NASA のハッブル宇宙望遠鏡の、近赤外カメラと多目的スペクトルメーターによる主トランジット中の HD189733b のスペクトル光学観測によって、水蒸気とメタン両方の存在の証拠が示されている。一方で、ハッブルアドバンスドサーベイカメラを使ってなされた可視波長域での観測によって、微粒子による霞の存在を示すような、長波長域においてより小さな半径を示唆するスムーズだが特徴の無い傾向が示されている。中赤外広域観測での、二次食中の詳細なモデリングは、惑星放射スペクトル中に、水と一酸化炭素の両方が存在することを示唆している。

われわれはスピッツァー望遠鏡の赤外スペクトルグラフ (IRS) を使い、HD189733b を 2007 年 6 月半ばから 12 月半ばまでの間に起きた 10 回の二次食を観測した。各露光は、食の中心の 3 時間前に開始し、中心を過ぎて 3 時間後に終了した。これらのデータは 5 から $14\mu\text{m}$ にわたり、 $7.5\mu\text{m}$ 以下の中間赤外スペクトルを初めて得た。これは、水蒸気や他の分子による吸収の最も強いスペクトル特徴が 5 から $10\mu\text{m}$ の間で生じるため、重要である。ドリフト、検出器の待ち時間と望遠鏡の方位振動の効果の除去については、別に記述されている。要点をまとめると、我々の解析では惑星の光を、食の前後に撮られたスペクトルから、二次食中のスペクトルを減算することで計測している。実際には、すべての入手可能なデータを使うために、我々は光度曲線を、食に入る部分と食から出る部分を含め、各波長における時系列データに適合させる。不確定性は、惑星が主星の後ろを通過する時間 (HD189733b での 1.5 時間程度)、すなわち我々が主星のスペクトルを単独で観測できる間が短いことによって、おもに支配されている。スピッツァー望遠鏡はこれらの観測を現時点で実行可能な唯一の施設である。

図 1 では、波長の関数として惑星と主星のフラックス比を示している。また、スピッツァー望遠鏡の全 3 種類の観測機 (スピッツァーの IRAC、IRS、そして多帯域イメージング分光器) を用いた 3.6 -, 4.5 -, 5.8 -, 8.0 -, 16.0 -, そして 24.0 - μm 帯域のフラックス比観測値と、ケック望遠鏡における近赤外スペクトルグラフから得られた、 $2.2\mu\text{m}$ 帯におけるフラックス比の上限も示している。スペクトルの形状は、広帯域観測とよく一致している。ただし 8.0 - μm では広帯域観測のほうがスペクト

ルよりも若干上にずれている。二つのデータセットに対して適用された光度曲線解析は、(我々がスペクトルグラフを、128の独立な光度計として扱う限りにおいて)極めてよく似ている。そして系統的ずれを引き起こし得る観測機の異常がないことがわかる。一方で、惑星の日面全体での放射が時間変化していることを意味する可能性のある、さほど顕著ではない差異が、惑星の8.0- μm 放射のIRAC単独での観測において見られた。

さらに図1では、いずれも太陽元素存在度における平衡分子組成を組み込んだ三つの詳細なモデル大気を示している。モデルスペクトルは平滑化されている。そして3つの熱再分配パラメータ $P_n=0.1, 0.15, 0.3$ と、2つの不透明度の値 $K_e=0.0, 0.035\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ の取り方によっている。この不透明度は、主星からの光の入射の過剰な吸収を引き起こし、若干温度の高い上層大気の生成に関わる可能性をもつ上層大気の吸収体のものである。3.6 $\mu\text{m}/4.5\mu\text{m}$ のフラックス比と、10 μm 以下の波長における惑星/主星フラックス比の減少は、HD189733bの大気中での水蒸気による吸収の存在と、IRACでの4.5 μm が示していたのと近い働きをする一酸化炭素の存在の可能性を示すものである。我々のスペクトルの中でもっとも興味深い特徴は、モデルとデータの両方が6-6.5 μm 付近で盛り上がっていることである。これは水蒸気の ν_2 変角振動モードのP枝とR枝の間で、予測されているピークである。このモードにはQ枝がないため、P枝とR枝の吸収の間でフラックスが増加することにより、発光特徴として現れる。

我々は6.2- μm での盛り上がりと7- μm での谷の重要性について調査をした。そしてKolmogorov-Smirnov検定から、5.2-8- μm 領域のスペクトルが、惑星と主星のフラックス比が無特徴、直線形として描けたとする仮定は、98%の信頼度で拒絶されることが示された。6.2- μm での盛り上がりの重要度が、モデルに対して独立な傾向であることを確立するために、我々は5.9-6.6 μm を示すデータを除去し、残りの5.2-8 μm の間の残ったデータに合うような直線をあてた。 χ^2 乗検定を使い、我々は99.992%の可能性で、5.8-6.6 μm の間を示す観測データは直線と一致するという仮説を拒絶できるということがわかる。この結果の重要な要素の一つに、5.9 μm における見かけのピークがあるが、これは水蒸気によるものではなく、またどのモデルスペクトルからも予想されない。よく一致する統計は、この周辺の波長において光度曲線の一致の乏しさを示す兆候はなく、われわれはこのデータを無視する先験的な理由をもたない。しかしながら、5.8-6.0 μm の間のデータを除去してもなお、我々はまだ99.35%の精度で帰無仮説を否定できる。

追加の吸収体 ($K_e=0$ を満たす) を含まないモデルは、観測の基本的な特徴をす

べて再現できるが、絶対フラックスレベルは、上層大気における追加の吸収体 ($K_e=0.035\text{cm}^2\text{g}^{-1}$) を含むモデルにより、さらによく再現できる。また、このモデルは $7\text{-}10\mu\text{m}$ の間にあるなだらかなスペクトルの傾きも再現できる。しかしながら、このような低い値の κ_e は熱逆転を生成せず、つまり単純な若干温度の高い上層大気となる。HD209458b(20,21 参照)とは違って、IRAC の $3.6\mu\text{m}$ と $4.5\mu\text{m}$ の示す値の間の比は 1 より大きく、IRAC $5.8\text{-}\mu\text{m}$ の値は $3.6\text{-}4.5\mu\text{m}$ の間の線分よりそれほど上に離れていない。前者は一酸化炭素がより多いか、あるいは最も一致する κ_e の値が低い(ただし 0 ではない) ことと調和的であるのに対して、後者は水の存在度が低いことを意味する可能性がある。実際、存在度、熱再分配の性質と深さ、そして成層圏に存在し得る追加の吸収体の性質と強度における違いが、主星に近い系外大型惑星の種別に関する二次食のスピッツァーのデータ中に見られた新たな違いの中に、示唆されているのかもしれない。我々のモデルは、スーパーローテーション風による熱循環の深度として、一般的な予想を用いており、そのため我々は、この依存性を調べるより包括的な研究が、局所的熱輸送の性質をさらに制約するのではないかと期待している。さらに、惑星の日面半球での傾斜角度効果の積算をより取り込んだ 2 次元スペクトル計算をすることによって、一致がより改善されることも期待できる。

我々のスペクトルは、比較的低い熱再分配効率のモデルについて合致するようになっている。このモデルの低い熱再分配効率と、HD189733b や広帯域測光に一致したモデルの夜面が高温であるということの間にある対立については、すでに記述した。我々のスペクトルはこの対立を補強するものであり、この点において、熱再分配の度合いは大気の深度に依存し、その理解のためには三次元的モデリングが必要である、あるいは、HD189733b は内部エネルギー源を持っており、入射によって受け取るよりも多いエネルギーを放射する、という仮説を支持する。

最近の観測が $10\mu\text{m}$ 以下であらかじめ予測されていた下降を示すにもかかわらず、HD189733b についての我々の前の IRS による観測では、 $7.5\text{-}14.5\mu\text{m}$ の波長域においてフラックス比が基本的に平らであることが見出された。より狭い波長領域ではあるが、 $10\mu\text{m}$ 以下の波長における下降スロープは以前の研究で見つかったはずである。ちなみに、似たような平らな IRS スペクトルが、大型系外惑星 HD209458b(23,24 参照) において見つかった。ただし、これは惑星の大気中での熱逆転によっていたのかもしれない。独立な別の研究は、 $8\mu\text{m}$ での測光値を得た以前の IRS での観測結果を説明するには、物理的にありそうにない不透明度の源が必要と考えられると述べており、このことは IRS の系統的誤差が想定以上に大きかったかもしれないことを示唆している。

トランジット観測毎の不確定さの計測として、今回の 7.5-14.5 μm のスペクトルにおけるばらつきを使い、前の HD189733b のスペクトルと我々の新たな結果を比較すると、1.9 という還元 χ^2 値が得られた。これは前回の結果が、平均からの無作為なずれによるものではないらしいということを示唆している。同様に、波長の関数として傾きをフラックス比に当てはめるとすると、2006 年のデータに対して計測された傾きは、現在の観測から得られる平均的な傾きから 3 レベル逸脱していることがわかる。現在のスペクトル中の平均フラックス比が 10 % のレベルで異なる、そしてフラックス比におけるスロープが 30 % のレベルで異なるが、我々の前の結果はあきらかに別の性格をもっている。前のデータと現在のデータとの唯一の違いは、より長い露光を行ったことと、より広範囲の波長でアクセスしたことである。解析手法は基本的に同じであり、2006 年のデータの再分析でもフラットなスペクトルが再現された。IRS での観測について、露光の相対較正における短期と長期の系統的違いは現時点で知られていない。

第三の可能性は、HD189733b の上層大気が実際に時間変化していることである。潮汐的に固定され、ゆっくりと回転するホットジュピターについて、モデルではダイナミックな気候構造が惑星全体規模で形成されるであろうと予測している。このような仮定を立証するには、より長い期間の更なる観測が必要とされるだろう。そして 2008 年には HD189733b の IRS トランジット観測がさらにいくつか予定されている。

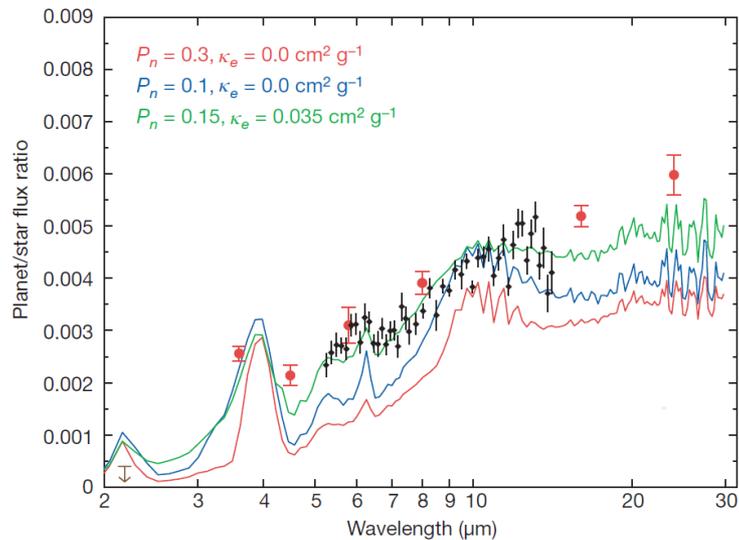


図 1: 広帯域分光によるスペクトル観測と、HD189733b の日面大気の詳細モデルの比較

黒い点は、6つの2次精度スペクトル(5-8 μm)と4つの1次精度スペクトル(7.5-14 μm)での、平均の惑星/主星フラックス比を表す。このデータは、光度曲線のフィッティング(二つのIRSの解像度の要素に対応する)後に、元のデータ点数の1/4に再区分し、プロットされた不確定さは各波長区分の平均した標準誤差を反映している。赤い丸は、ref.5より3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 16, そして24 μm における(このデータのエラーバーはs.e.)広帯域観測を示す。2.2 μm における上限はケック望遠鏡から得られた。赤、青、そして緑のトレース線は、日面-夜面熱再分配パラメータ P_n の3つの値、そして最上層大気の不透明度 K_e の2つの値による大気モデル予測である。モデル予測にスケール調整はまったく行っていない。

B.3 A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b (Knutson et al. 2007)

Heather A. Knutson, David Charbonneau, Lori E. Allen, Jonathan J. Fortney, Eric Agol, Nicolas B. Cowan, Adam P. Showman, Curtis S. Cooper & S. Thomas Megeath

Nature Vol 447— 10 May 2007— doi:10.1038/nature05782

系外惑星 HD189733b の日面-夜面コントラストマップ

ホットジュピターは母星に近すぎるため (1AU を太陽地球間の平均距離としたときの、0.05 天文単位未満)、潮汐的に固定されており、結果として永久日面と永久夜面を作ると予想されている。惑星と母星が周期的に互いに食を起こす系の観測から、いくつかの系においては惑星の日面と夜面の温度を見積もることが可能になっている。鍵となる問題は、大気はエネルギーを日面から夜面へ輸送できるのかどうかであり、これは惑星地表における各地点の温度を決めているだろう。今回われわれは、食を起こす惑星系の中で最も近くにある HD189733b について、われわれが温度分布のマップを作ることができるよう、公転周期の半分にわたって行った観測について報告する。われわれは観察範囲に惑星の日面が見えてくるにつれ、輝度が増加するのを確認した。われわれは、 $8\mu\text{m}$ の波長において、最低輝度温度を $973 \pm 33\text{K}$ 、そして最高輝度温度を $1212 \pm 11\text{K}$ と見積もった。これは最近のもう一つのホットジュピターについての主張とは対照的に、放射のあたっている日面からエネルギーが大気全体に効率的に再分配されていることを示している。われわれのデータは、半球積分した輝度のピークは衝の $16 \pm 6^\circ$ 前で起きていると示しており、これは最高温度点が恒星直下点の東へずれているのに対応している。二次食 (惑星が母星の裏に回る) は予測より 120 ± 24 秒遅く起きており、これは惑星の軌道が少し離心率をもつことを示しているかもしれない。

我々は、スピッツァー宇宙望遠鏡にある赤外アレイカメラ (IRAC) の $8\mu\text{m}$ チャネルを使い、HD189733b を 33.1 時間にわたって継続的にモニターした。これは 0.4 秒毎の subarray モードでの観測である。我々の観測は惑星の軌道運動の半分より少しだけ長い期間行われ、トランジット (惑星が主星の前を動くとき) の始まりの 2.6 時間前に開始し、二次食の終わった 1.9 時間後に終了した。この観測から、 32×32 ピクセルの画像を計 278,528 枚得ることが出来た。我々は、各素子におけ

る観測された信号の中に、検出器に由来する 10 % 程度までの時間的な上昇が存在することを見出した。この上昇は照度に依存している。高い照度レベル (250MJy st^{-1} 以上) の素子は、観測の最初の二時間以内に一定の値に収束し、そして低いフラックスの素子は時間を通して直線的に増加する。我々はこの効果を、主星を中心とする同心円上の信号の時系列 (HD189733 のより小さく微弱な M 矮星の伴星上に中心を持つ、5 ピクセル幅の箱型をマスクしている) を作ることによって特徴づけている。この曲線のセットは、異なる照度レベルに対する明かりの振る舞いを記述する。

画像を修正するために、我々はアレイ中の各ピクセルに対する照度の中央値を見積もり、われわれの基本となる曲線のセット (照度の自然対数になるようスケールリングする) 全体に内挿することによって、ピクセルにおける振る舞いを記述する曲線を計算する。我々はこの機器的な効果を、任意の画像の各ピクセルにおけるフラックスを内挿済みの曲線の値で割ることで修正する。 210MJy sr^{-1} 以上の照度レベルを持つピクセルは修正しない。なぜならこれらのピクセルはトランジット前に一定値に収束しているからである。続いて我々は M 型矮星である伴星からのフラックスを測り、それが 0.05 % 未満のレベルで一定であることがわかった。これは検出器の効果が取り除かれたことを意味する。さらに、我々は半径 3.5 ピクセルの開口測光を使い、時系列を作成した (詳細は fig.1 参照)。我々は、アレイ上での恒星の位置変化によるフラックスの損失を避けられる範囲で、最も小さい絞りを選んだ。修正されたピクセルからは、われわれの絞りの中の全フラックスのわずか 33 % しか来ていない。我々は、修正を適用する前のイメージに人工的な位相変化信号を加えることで、観測された信号のサイズにおける我々の修正による効果をテストした。我々は、信号の振幅がその全体のサイズの 13 % しか減衰しないことがわかる。

われわれの最終的な時系列 (図 1) では、トランジットの終りの直後にはじまり、二次食の始まる直前まで続くフラックスの顕著な上昇が見られる。(トランジットと二次食は、それぞれ軌道周期の 0、0.5 くらいで起きる) 我々は、極大付近の位相曲線の小領域に二次関数をフィッティングし、その関数の最大値を位相曲線の極大としてとることで、その振幅を推定した。最小値付近の領域で同じようにフィッティングしたのち、われわれはこの上昇全体の振幅を $0.12 \pm 0.02 \%$ と推定した。ただしこの誤差は、主としてわれわれがおこなった検出器の効果のための補正による不確定さによるものである。(我々はこの系統的効果をこれ以下で示すすべての不確定さに反映させている) この変化と二次食の深さを比較することで、半球積分フラックスの最小値は、半球積分フラックスの最大値の $64 \pm 7 \%$ であることがわか

る。フラックスのピークは二次食の中心の 2.3 ± 0.8 時間前に起きる。これは衝の位置から $16 \pm 6^\circ$ に対応する。存在しうる紛らわしい効果は、HD189733 が活動的な恒星であり、13.4 日の自転周期にわたって、可視光で $\pm 1.5\%$ ほどのフラックス変化を引き起こす黒点を持つという事実に起因する。我々は、恒星と黒点を、それぞれ温度 5050K と 4050K の、いずれも黒体として扱い、可視光波長で観測される変化を、 $8\mu\text{m}$ の振幅としてスケーリングすることで、 $8\mu\text{m}$ におけるこの効果の大きさを推定した。これらの変化を時間に投影することで、われわれの観測期間にわたって黒点が視界に入ってくると、フラックスが 0.1% 線形的に増加し得ることがわかった。重要なのは、これらの黒点を考慮することは、惑星の位相変化の振幅の減少しかもたらさないであろうということである。観測された変化の形状が、期待される惑星からのフラックスの本来の変化と調和的であることから、われわれはそう仮定して、以下の議論で扱う。

われわれのデータが高い精度であることから、われわれは現時点で入手可能なもの (図 2 とその説明文を参照) にくらべ、より正確な惑星系のパラメータの推定を得ることができる。我々は、二次食の観測された深さから、惑星の日面の輝度温度を $1205 \pm 9.3\text{K}$ と計算した。我々は、惑星が、トランジットから 6.7 ± 0.4 時間後に半球平均輝度温度の極小値 $973 \pm 33\text{K}$ をとり、二次食の始まる 2.3 ± 0.8 時間前に半球平均輝度温度の極大値 $1212 \pm 11\text{K}$ ととると推定した。

我々はトランジットの中心が $t_1 = 2454037.611956 \pm 0.000067$ HJD (6 秒の誤差) に起き、それに対して二次食の中心が $t_2 = 2454038.72294 \pm 0.00027$ HJD (24 秒の誤差) に起きることを知った。ただし、誤差は 10^5 ステップの Markov 連鎖から推定している。これらは現時点で最も正確なトランジットと二次食のタイミングの測定値である。トランジットは予言どおりの時間に起きているが、二次食はトランジットのあとの軌道周期の半分という予測時間よりも 150 ± 24 秒遅れて起きている。われわれは二つの食を観測し、周期もよく制約されていることから、われわれは二次食の時間を大きな不確定さなしに予言することができる。二次食の遅れの一部は、系を横切る光の飛ぶ時間が 30 秒であることによるものである。残りの遅れは、(1) 非一様な惑星放射、(2) 系内に第三の天体がある、(3) 離心率をもった軌道、によるものである可能性がある。

最初の効果による光度を推定するため、我々は観測された位相の変化を、一定の輝度をもつ 12 の経度方向断面から成り立つ惑星のシンプルなモデルとフィットさせた。結果的なモデル光度曲線は図 1b に示されており、最もフィットする経度方向のフラックス値は図 3b (より詳細なことは図の説明文を参照) に示されている。

図 3b は、経度について 30° 、緯度については解像度をもたない、惑星の大まかな $8\mu\text{m}$ の地図にあたる。図 3a は、緯度についての正弦曲線的な依存性を追加し、惑星の地表に投影した輝度の分布を示している。我々は軌道周期の半分しか惑星を観測していないため、エラーバーは恒星直下点の西 90° に近い緯度においてもっとも大きい。この輝度の分布は、光度曲線の後半部分とはよく一致する (図 1) にもかかわらず、トランジットの付近では偏差が顕著である。この不一致は、より経度方向の解像度の高いデータを使うことで改善する可能性がある。我々は最も明るい区分が、恒星直下点から 30° 東にあることを発見した。惑星のもっとも暗い区分もまた (驚くべきことに)、恒星対蹠点から 30° 西の東半球にあらわれている。最も明るい区分は、最も暗い区分のおよそ 2 倍の明るさであり、温度にして 350K ほどの差である。この非一様な光度分布は、二次食開始時と終了時の光度変化の形状を変える。惑星を、われわれのデータにおいて一様な光度を持つ円盤として扱おうと、二次食の時間について最大で 20 秒程度の見かけ上の遅れが発生する。したがって、惑星の非一様な放射は二次食の 120 秒の遅れを説明することはできない。

このずれは、系内にある第三の天体による惑星の平均運動に対する摂動の結果ではないようだ。そのような摂動では、トランジットの時間も同じように動くはずだが、そのような動きの証拠は見つからなかった。これから、もっとも説明のつくものとして、第三の選択肢が残る。もし、時間の遅れが離心率 e によってあらわされるならば、 $e \cos \omega = 0.0010 \pm 0.0002$ であり、離心率が極めて小さいもののゼロではないことを示す。ここで ω は近点経度である。これは驚くべきことである。なぜなら円軌道化のタイムスケールは、これらの系の年齢よりもあきらかに短いからである。この離心率は視線速度の観測で検出するには小さすぎる。観測された遅れは、 $16\mu\text{m}$ での食のタイミングと若干一致していない。後者は予測より 29 ± 65 秒の遅れて起こっている。

大気モデルから、我々は日面-夜面の温度対比を支配する要素について考察をすることができる。恒星からの放射に対する惑星の応答は、放射のタイムスケール (恒星の光の吸収と赤外放射によって温度が変わるまで) と移流のタイムスケール (気塊が日面から夜面へ移動するまで) の間の比に依存している。もし放射の時間が移流の時間より十分に短いならば、熱い日面は吸収した恒星のフラックスを再放射し、夜面は冷たいままである。もし放射の時間が移流の時間より十分に長いならば、逆に、効果的な熱の均質化が起きる。高い放射を受ける大型惑星の放射輸送モデルは、恒星のフラックスの吸収と熱フラックスの放射の大部分が、数十ミリ気圧から数気圧の圧力範囲で起きると预言している。ここで预言された放射のタイムスケールは 10^4 から 10^5 秒の範囲である。移流時間はそれほど制約されて

いないが、風速の推定 (数百から数千 ms^{-1}) からは移流時間は 10^5 秒ほどであると示唆されている。このように、現在のモデルからは放射のタイムスケールは移流時間とほぼ同程度であり、温度の差異は 1000K に達しうると示唆される。対照的に、われわれの観測した小さなフラックス変化は、放射による温度の変化のタイムスケールが、日面と夜面の間の温度の均質化のタイムスケールより若干ながいということの意味している。

観測された惑星のフラックスが、予想よりも大気の高い領域から出てきたものである可能性はある。このような領域では放射のタイムスケールはより長い。 $8\mu\text{m}$ 帯において、モデルでは H_2O が不透明度を決めており、 CH_4 や、 H_2 の衝突誘起吸収の追加的な寄与があると示唆している。ケイ酸塩の雲の不透明度はこれらの温度では予想されていない。もし放射時定数が想定されているとおりの小ささならば、夜面へエネルギーを運ぶのには 10kms^{-1} を超える超音速の風 (音速の 4 倍) が必要となるだろう。最小及び最大フラックスの時間は惑星の気象についての情報も与えてくれる。われわれの観測では最小及び最大はそれぞれ位相 0 や 0.5 でおきておらず、これは大気風による温度パターンの移流を示している。片半球のみに最小及び最大のフラックスが存在することは、現在の循環モデルではまだとらえきれていない複雑なパターンがあることを示唆している。

今回紹介した HD189733b の $8\mu\text{m}$ における位相変化とは対照的に、トランジットしない惑星 ν アンドロメダ b について報告された $24\mu\text{m}$ 変化はとても大きい。この結果の違いの理由はまだ明らかではないが、データのサンプリングが少ないことと ν アンドロメダ b の半径が未知であることは、推定された日面-夜面の比の不確定さが非常に大きいことを意味する。 $24\mu\text{m}$ における高い不透明度と ν アンドロメダ b の弱い地表重力から、光球面の圧力が半分になるかもしれないが、この違いはこの相違を説明するには不十分かもしれない。 ν アンドロメダ b の日面は主星から 50% 多くフラックスを受けるが、これが日面-夜面の温度比にどのように影響を与えるかははっきりしていない。いくつかの惑星についての二次食のフラックス減少の深さはシンプルな一次元モデルに基づく予測とよく一致している。このモデルは日面-夜面温度を非一様と仮定しており、これは HD189733b に関する我々の結論と一致している。総合すると、これらの結果は可視波長域においてとても暗く、もしかすると主星からの入射フラックスの 90% かそれ以上を吸収しており、それと同時にこのエネルギーを夜面へ輸送することができるかもしれないという大気存在を提起する。

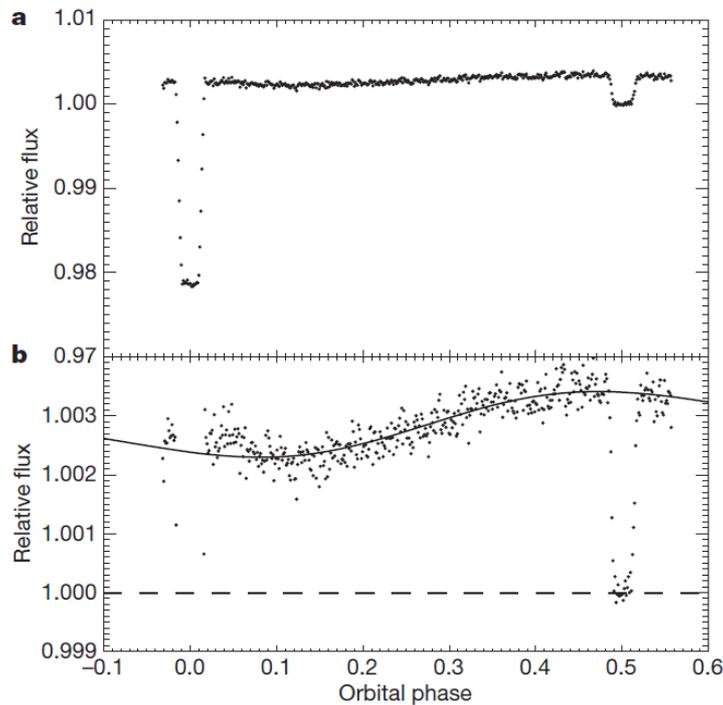


図 1: トランジットと二次食を含む HD189733b の観測された位相変化

我々は、点分布関数のピークに中心をもつ 7 ピクセル四方に含まれるフラックスの重量平均を取ることで、主星の位置を決めた。観測された変化の形状は、3.5 から 7 ピクセルの間の絞りと一致することがわかる。IRAC は 64 セットの画像を撮影し、我々は最初の三枚の画像と 58 枚目の画像での平均フラックスが、いつも低いことに気がついた。さらに、画像の 2 % が、われわれのすきまに含まれるため使い物にならなかった。我々はそれら両方の画像セットを最終的な時系列から除くことを選んだ。また、データの最初の 1.8 時間も分析から除外した。なぜならわれわれの補正がトランジットの開始を過ぎて以降のデータのみを補正するよう設定されていたためである。我々は、画像の端にあるピクセルの一部からのフラックスのヒストグラムをガウス関数で一致させることにより、背景フラックスを推定している。この背景はわれわれの絞りでの全フラックスの 1.3 % を占め、我々は我々の時系列から一定値を減算している。最終的な時系列でのばらつきは、光子ノイズのみから予想されるものより 20 % 高かった。我々は各点のエラーとして、二次食の終了後の点の標準偏差を使っている。二次食の中心で計測された主星のフラックスは 1 に規格化されている (b での破線)。そしてデータは 500 点毎 (200 秒毎) に bin されている。パネル a と b は同じデータを示しているが、b における y 軸は変化のスケールを見せるため拡張されている。b での実線は最も一致するモ

デルの位相曲線である (図 3)。

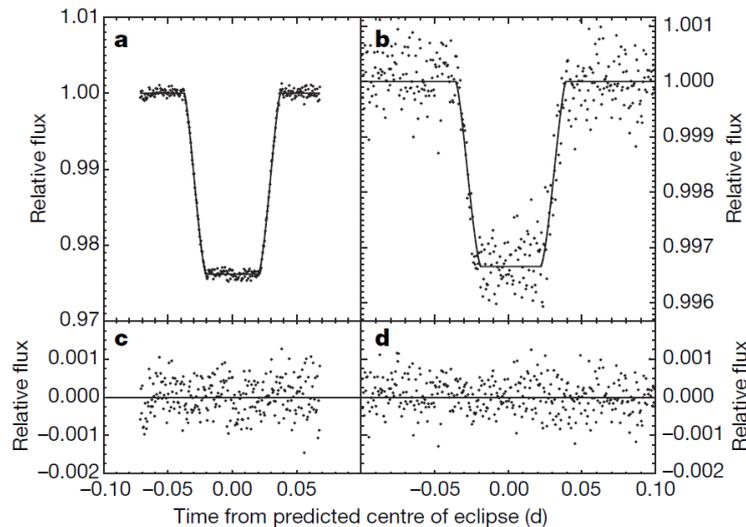


図 2: トランジットと二次食の時系列

データは100点(40秒)毎にbinされており、トランジット外のフラックスは1に規格化している。トランジットと二次食はそれぞれaとbに示されており、時間のずれとともに、もっともよく一致する食曲線が重ねられている。cのトランジットとdの二次食の残差は下に示している。それぞれの食でのトランジット外のデータは定数で規格化されている。我々は、顕著でない差異として代わりに直線フィットを使うと、トランジットが1秒早く、そして二次食が8秒早く起きることを知った。我々は両方の食を、恒星の質量を固定し、トランジットの時間が自由に变化することを許すことでフィットする。トランジットから、惑星の半径は $1.137 \pm 0.006 R_{Jupiter}$ で、軌道傾斜角は $85.61 \pm 0.04^\circ$ 、そして主星の半径が $0.757 \pm 0.003 R_{Sun}$ であることがわかった。惑星/主星の半径比は 0.154 ± 0.0002 である。主星の質量についての公式な不確定さから、二つの半径についての推定には、さらに $\pm 1.8\%$ の追加的な誤差が生じる。二次食の深度は相対フラックスにおいて $0.3381 \pm 0.0055\%$ である。我々は、輝度温度はプランク関数と平均表面輝度を一致させることによって決まるところで、 $8\mu\text{m}$ スピッツァー帯域において恒星輝度温度を 4512K と推定するモデルを使っている。トランジットの深度(惑星と恒星の半径比によって決まる)に最も一致するわれわれの値は、既出の値より若干小さい。この差異は恒星の黒点の効果によるところがほとんどかもしれない。大きな黒点は可視光波長におけるトランジットの見かけの深度を増加させるだろうが、 $8\mu\text{m}$ においては影響は少ない。

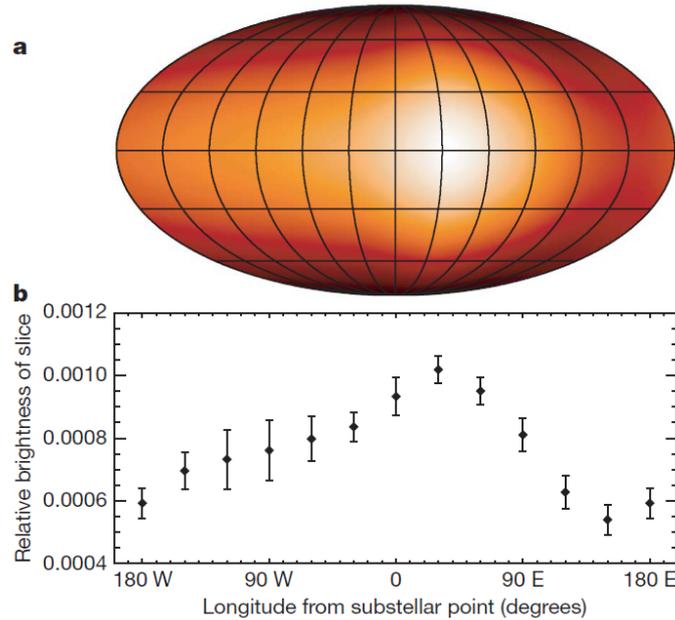


図 3: 惑星表面を経度方向に 12 分割した時の推定光度

色マップ (a) とグラフ (b) にてデータを表している。詳細は以下を参照のこと。我々は惑星が潮汐的に固定されていると仮定し、かつ周辺減光のないエッジオンであり、そのため i 番目のスライスの輝度は $F_i(\sin \phi_{i,2} - \sin \phi_{i,1})$ である。ここで $-\pi/2 \leq \phi_{i,1}, \phi_{i,2} \leq \pi/2$ は各スライスの可視部分の区分であり、 F_i は我々に最も近づいた時のスライスからのフラックスである。我々は光度曲線を 4000 のデータポイント毎に 32 のビンに分け、食の間のデータを除去している。我々は一致の良さのパラメータとして、 $\chi^2 + \lambda \sum_{i=1}^{12} (F_i - F_{i-1})^2$ を定義した。ここで χ^2 は光度曲線への一致の良さであり、第二項は線形正規化項であり、これは大きい λ と隣り合ったスライスにおける小さな変動を強制しており、任意の λ の値への F_i についての特解の存在を許す。我々はこの関数を、1000 ステップの Markov Chain Monte Carlo 法を使って最適化し、惑星のフラックスプロファイルと、対応する不確定さを決めている。我々は λ の値としてある値を選んだ。これは、一致の質と最終的な光度マップの平滑さの間の、あり得そうな中間値を生成する。我々は、ビンのサイズと経度方向スライスの数の両方を変化させてみたが、我々の結果的なスライスのフラックスは頑健である。b での光度値は、フェイスオンから見た各スライスからのフラックスと主星からのトータルフラックスの比に基づいて与えられており、誤差は $\pm 1\sigma$ である。パネル a では、この輝度分布のモルワイデ図法を示しており、緯度を含む追加的な正弦依存もともに示している。(ただし、データからは緯度方向の情報は得られていないことに注意する。) このプロットは線形スケ

ルを用いており、白が最も明るい点で、黒が最も暗い点である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方からご指導・ご協力をいただきました。

指導教官である北海道大学 倉本圭 教授には、講読論文の内容理解に関するご指導をいただいたほか、論文の構成や基本的なレビューの書き方、そしてなによりも、系外惑星研究がいかに未知の可能性を秘めているかを教えていただきました。また、北海道大学 石渡正樹 准教授にも、おもに惑星の大気構造による熱輸送に関してご助言をいただきました。惑星物理学研究室 博士課程3年の福井隆 氏には、ご自身の博士論文執筆でお忙しいにもかかわらず、本論文の全体校閲を快くお引き受けいただきました。そのほか、本研究グループに所属する教員・学生の皆さまからも、様々な形で本論文の執筆にご協力をいただきました。

以上の皆さまに、厚くお礼申し上げます。

参考文献

1. Swain, M. E., Vasisht, G. & Tinetti, G. The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature* 452, 329-331 (2008).
2. Grillmair, C. J. et al. Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD189733b. *Nature* 456, 767-769 (2008).
3. Knutson, H. et al. A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD189733b. *Nature* 447, 183-186 (2007).
4. Thalmann, C. et al. Discovery of the Coldest Imaged Companion of a Sun-like Star. *ApJ* 707, L123-L127 (2009)
5. Baines, K. et al. Eleven Exoplanet Host Star Angular Diameters from the Chara Array. *ApJ* 701, 154-162 (2009)
6. Melo, C. et al. On the age of stars harboring transiting planets. *A & A* 460, 251-256 (2006)
7. Henry, G. W. & Winn, J. N. The Rotation Period of the Planet-Hosting Star HD 189733. *The Astronomical Journal* 135, 68-71 (2008)
8. Bakos, G. et al. A Stellar Companion in the HD 189733 System with a Known Transiting Extrasolar Planet. *ApJ* 641, L57-L60 (2006)
9. Bouchy, F. et al. ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters. II. A very hot Jupiter transiting the bright K star HD 189733. *A & A* 444, L15-L19 (2005)
10. Baines, K. et al. Direct Measurement of the Radius and Density of the Transiting Exoplanet HD 189733b with the CHARA Array. *ApJ* 661, L195-L198 (2007)
11. Winn, J. N. et al. The Transit Light Curve Project. V. System Parameters and Stellar Rotation Period of HD 189733. *The Astronomical Journal* 133, 1828-1835 (2007)
12. Charbonneau, D. et al. The Broadband Infrared Emission Spectrum of the Exoplanet HD 189733b. *ApJ* 686, 1341-1348 (2008)

13. Tinetti, G. et al. Infrared Transmission Spectra for Extrasolar Giant Planets. ApJ 654, L99-L102 (2007)
14. Burrows, A., Budaj, J. & Hubeny, I. Theoretical Spectra and Light Curves of Close-in Extrasolar Giant Planets and Comparison with Data. ApJ 678, 1436-1457 (2008)
15. 柴田清孝. 応用気象学シリーズ 1 光の気象学. 朝倉書店
16. 松井敬. 勉強したい人のための統計解析のきほん. 日本実業出版社
17. コルモゴロフ, ジュルベンコ, プロホロフ共著. 丸山哲郎, 馬場良和共訳. コルモゴロフの確率論入門. 森北出版株式会社
18. JPL News. May 28, 2009. Planet-Hunting Method Succeeds at Last.
<http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2009-090>
19. 東京理科大 矢島研究室, 物理化学 3 資料.
<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/yajilab/bukka3Raman&IR.pdf>