

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13784

研究課題名(和文)近赤外高分散分光観測による早期型星周りの惑星検出

研究課題名(英文) Detecting planets around early-type stars with high-resolution infrared spectroscopy

研究代表者

佐藤 文衛 (Sato, Bunei)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：40397823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発見が難しい早期型星(BA型星)周りの惑星を検出する新たな手法を開発した。早期型星のスペクトルには吸収線がほとんど見られないため、中心星の視線速度を測定する視線速度法は適用できないが、逆に中心星のスペクトルに埋もれた惑星のスペクトルは検出しやすくなるため、惑星放射を直接検出できる可能性がある。このアイデアに基づき模擬データを作成して解析方法のシミュレーションを行った結果、地球大気吸収線をきれいに取り除くことができれば中間赤外線(Mバンド)波長域において惑星スペクトルの検出が可能であることが分かった。今回開発した手法は、次世代大型望遠鏡を用いた観測で有用になると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来困難であった早期型星周りの惑星系を発見・確認するための新たな方法論の一つを提示するものであり、系外惑星研究において新たな分野を切り拓く可能性を秘めている。特に、惑星のトランジットが観測されていないでも適用できるため、従来発見できなかった惑星の発見が可能になるという点で有用である。系外惑星は社会的にも関心の高い研究分野であり、新たな知見を社会に還元できるという意義がある。

研究成果の概要(英文)：We have developed a method to detect exoplanets around early-type stars, which are normally difficult to detect with conventional techniques. While there are almost no spectral lines in stellar spectra of early-type stars that are available for measurements of stellar radial velocities, this in turn would make it easier to detect planetary spectra that are embedded into observed spectra of planet-harboring stars. We performed numerical simulation to test validity of this method using mock data. We found that we can detect planetary signal around early-type stars in M-band of mid-infrared wavelength range if telluric lines can be clearly removed from observed spectra with high-resolution spectroscopic observations. This method will be useful to detect and characterize planets around early-type stars with extremely large telescopes in future.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：太陽系外惑星 光学赤外線天文学 早期型星 高分散分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

惑星の引力による恒星の視線速度のふらつきを精密に測定する手法(以下、視線速度法)によって、1995年に初めて系外惑星が発見された。その後、太陽型星(FGK型星; 0.7-1.5太陽質量)を中心に多数の系外惑星が発見され、さらにケプラー宇宙望遠鏡などによるトランジット(惑星が中心星の手前を横切る現象; 食)観測によって1800個を超える系外惑星が発見されていた。また、応募者らのグループなどによる視線速度法観測によって、中質量星(1.5-5太陽質量)が進化したGK型巨星を周回する惑星系も約80個発見されていた。これら巨星の周りでは巨大惑星の存在頻度が高く、また、短周期惑星が存在しない等、太陽型星周りの惑星系とは異なる特徴が明らかになりつつあった。

一方、中質量主系列星、すなわち「早期型星(BA型星; >1.5太陽質量)」を周回する惑星系はA型星で当時わずかに2つ見つかったに過ぎただけであった(WASP-33b, Kepler-13b)。早期型星は表面温度が高いためスペクトル中に吸収線がほとんど見られず、かつ高速自転のために吸収線の線幅が広がっており、恒星の視線速度を精密に測定することができない。そのため、通常の視線速度法(惑星の引力による恒星の視線速度変化を検出する手法)での惑星探索はほとんど行われておらず、また、トランジット法では惑星候補が見つかるにはあるものの視線速度法での確認観測ができないというジレンマに陥っていた(視線速度法によって質量が決定されないと惑星の発見にはならない)。太陽より重く表面温度が高い早期型星の周りでは、原始惑星系円盤の質量や円盤散逸のタイムスケールが太陽型星とは異なり、特に短周期惑星の分布・性質を明らかにすることは統一的な惑星形成・進化過程の理解には欠かせないため、同恒星の周りの惑星を検出することができないのは大きな問題であった。

2. 研究の目的

本研究では、発見が困難である早期型星(BA型星; >1.5太陽質量)周りの惑星を検出するための新たな手法の開発を目的とする。具体的には、従来の視線速度法のように惑星による中心星の視線速度変化を検出するのではなく、周囲を回る惑星の放射スペクトルを近赤外高分散分光観測によって直接検出することを試みる。早期型星のスペクトルには吸収線がほとんど見られないため中心星の視線速度を精度よく測定することはできないが、逆に中心星のスペクトルに埋もれた惑星のスペクトルは検出しやすくなるため、惑星放射を直接検出する際には有利に働く。これは、前節で述べた早期型星自体を観測する際の様々な困難を巧みに回避するもので、早期型星周りの惑星検出の切り札となり得る手法である。さらに、この手法は惑星大気スペクトルを直接検出するものであるため、惑星の物理的・化学的性質に関する情報も同時に得ることができる。まずは、シミュレーションや実際の観測データをもとに検証を重ねて方法論を確立し、これを用いて将来の早期型星における惑星系の分布・性質の解明へとつなげていく。

3. 研究の方法

本研究では、従来発見が困難であった早期型星周りの惑星を検出するため、通常の視線速度法のように中心星である早期型星の視線速度変化を測定するのではなく(これは先に述べたように非常に難しい)、周囲を回る惑星の放射スペクトルを直接検出する手法(以下、惑星放射検出法と呼ぶ)を開発する。本研究がターゲットとしているのは早期型星周りの短周期惑星(ホットジュピター)であり、表面温度約3000度に対応する熱放射を主に近赤外線(波長1-2 μm)で放射していると考えられるため、近赤外高分散分光観測によってこれを検出することを試みる。同様の手法は、元々太陽型星周りの既知のホットジュピターの大気の調査、すなわち惑星の「特徴付け」に主に用いられ成功を収めてきたが(e.g. Birkby et al. 2013, The Messenger, 154, 57)これを早期型星周りの惑星の「発見」に積極的に応用しようという試みはなされておらず、この逆転の発想が本研究の第一のポイントである。

惑星放射検出法の基本的なステップは次の通りである(e.g. Birkby et al. 2013)。

1. 系外惑星系を観測する際には、通常、中心星からの放射と惑星からの放射を分離することができないため、両者が合わさった光を観測することになる。つまり、中心星のスペクトルを分光観測すると、スペクトルデータの中には強度が千分の一から一万分の一のオーダーの惑星のスペクトル(主に近赤外線波長域)が混ざっている。両者の相対速度は公転運動に伴って周期的に変化し、相対的にスペクトルがドップラー偏移する。
2. 中心星と惑星のスペクトルが混ざった観測スペクトルから、データ処理の過程でまず中心星のスペクトルを取り除き、さらに地球大気スペクトルを取り除く。後には、残滓としてドップラー偏移した惑星のスペクトルのみがノイズ(主として中心星の光子ノイズ)の中に残される。
3. 惑星大気モデルスペクトルと上記2.の残滓スペクトルとの相互相関をとることによって、ノイズの海の中から惑星のスペクトルを検出する。

この手法の最も難しい過程の一つは、上記2.で中心星のスペクトルを取り除く過程である。太陽型星など晩期型星のスペクトルには吸収線が豊富に存在し、これが惑星のスペクトルにオーバーラップするため、これを如何にきれいに取り除けるかがその後の過程での惑星スペクトルの検出の成否を大きく左右する。ところが、早期型星のスペクトルには吸収線がほとんど見られないため、この過程が極めて容易になると考えられる。つまり、中心星の視線速度を測定する際には不利だった点が、惑星のスペクトルを検出する際には有利な点に化けるのである。従来欠点だと思われていた早期型星のスペクトルの特徴を逆転の発想で利点に変える、これが本研究の

第二のポイントである。

本研究で開発する惑星放射検出法は、中心星のスペクトルと周回する惑星のスペクトルが混ざり合った観測スペクトルから、中心星と地球大気のスペクトルを取り除き、最終的に惑星のスペクトルだけを取り出すというものである。この手法の開発を、以下の二つのプロセスによって進める。

1. 理論スペクトルを用いて作成した疑似観測データを基にしたシミュレーション

2. 実際の観測データを基にした実証

1. については、本研究は早期型星周りのホットジュピターをターゲットにしていることから、表面温度が約 3000 度の高温惑星を想定した理論的な惑星放射スペクトル(波長 1-2 μm)を作成することから始める。まずは物理モデルと組成(CO、H₂O、CH₄など)は簡単な toy model を用いてスペクトルを計算し、これに中心星である早期型星のスペクトルと地球大気のそれぞれのモデルスペクトルを足し合わせ、実際に使用を予定している近赤外高分散分光器(ケック望遠鏡/NIRSPEC、すばる望遠鏡/IRCS)での観測を模擬した疑似データを作成する。これを利用して解析方法の問題点を洗い出し、最適化を図る。

2. については、まずはすばる望遠鏡やケック望遠鏡のデータアーカイブから太陽型星周りのホットジュピターに対して同様の観測をしたデータを入手し、これを利用してデータ解析の手法を吟味、検討する。これらと並行して、すばる望遠鏡やケック望遠鏡へ近赤外高分散分光の観測提案を行う。本研究の開始時点で知られている早期型星周りのホットジュピターは WASP-33b と Kepler-13b のみであり、このうち WASP-33b の方が天体の明るさの観点からは観測しやすい。また、WASP-33b は初めて発見された早期型星周りの惑星であるため可視分光観測を含む様々な追観測が行われており、比較的惑星の物理パラメータがよく決まっているので、解析手法を検証するための天体として適している。この他、岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡などを用いた測光フォローアップ観測も行い、近赤外分光観測をサポートする。

4. 研究成果

1 年目は、理想的な疑似観測データに基づいた解析手法のシミュレーションと、惑星の理論スペクトルの作成に取り組んだ。前者では、まずケック望遠鏡の NIRSPEC 分光器での観測を想定し、トランジット観測によって惑星が見つかった早期型星 WASP-33 系の観測を模した疑似データを作成した。主星と伴天体のスペクトルを所定のフラックス比で足し合わせて規格化し、分光器の波長分解能に相当する幅をもつガウシアンを積み込んで模擬データを作成した。作成した模擬データと CO 吸収線のデータの相互相関関数を計算することで、現実的な S/N 比のもとで伴天体のシグナルを検出できることを確認した。後者の理論スペクトルについては、WASP-33 を周回するホット・ジュピターを想定したモデル計算を行った。

2 年目は、前年度に引き続き理論的な惑星放射スペクトルの作成と解析手法のシミュレーションに取り組む、さらに新たにすばる望遠鏡での観測提案と実施にも取り組んだ。理論スペクトルの作成においては、共同研究者が開発した TauREx code (Waldmann et al. 2015, ApJ, 802, 107; Waldmann et al. 2015, ApJ, 813, 13) を用いてより信頼性の高いスペクトルを計算することができるようになった。これに基づいて実際に発見されている系外惑星について放射スペクトルの観測可能性を検討したところ、K バンドよりも中間赤外線 M バンド(波長 4.4-5 μm)の方が惑星大気の吸収線が多く惑星光の検出に適していることが分かった。そこで、KELT-17b という早期型星を周回する惑星について M バンドでの惑星放射検出を目的とする観測課題をすばる/IRCS に提案した結果、高い評価で採択された。しかし、残念ながらこの観測自体は悪天候のため実施することができなかった。一方、すばる望遠鏡での観測を補助する目的で岡山 188cm 望遠鏡の多色カメラ MuSCAT を用いた多波長トランジット観測を KELT-17 系に対して実施し、これについては良好なデータを得ることができた。同惑星の物理パラメータをアップデートするとともに、3 バンド(sloan g' 2 (400-550nm), r' 2 (550-700nm), z_s2 (820-920nm))でのトランジット深さを比較したところ、波長による有意な惑星半径の違いは見られず、惑星大気の情報を引き出すには至らなかった。

3、4 年目は引き続き理論的な惑星放射スペクトルの作成と解析手法のシミュレーションに取り組んだ。前述の TauREx code を用いて M バンドでの惑星放射スペクトルを作成し、これに新たに地球大気吸収線の影響を加味して、すばる/IRCS での観測を念頭においた模擬スペクトルを作成した。これを用いて解析手法のシミュレーションを行った結果、地球大気の吸収線をきれいに取り除くことができれば、信号ノイズ比 1000 程度を達成できれば惑星スペクトルの検出が可能であることが分かった。これにより、本研究で目的としていた手法の開発についてはシミュレーションベースではあるが有用性が示され、一定の目処がついたと言える。一方、現実的には現在のすばる/IRCS の波長分解能(R=20000)では地球大気吸収線の完全な除去が困難であることも同時に分かった。この点については、他の大型望遠鏡の観測装置(VLT/CRIRES)や将来の 30m 級望遠鏡で計画されている観測装置ではより高い波長分解能を有するものがあるため、今後はそれらを用いて実際の観測データに基づく検証を進めていくことになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野津翔太, 野村英子, Christian Eistrup, Catherine Walsh, 佐藤文衛, 藤田大地, Ingo Waldmann, Giovanna Tinetti
2. 発表標題 詳細な円盤化学進化計算を初期条件とした系外ガス惑星大気の平衡化学構造
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	野津 翔太 (Notsu Shota)		
研究協力者	藤田 大地 (Fujita Daichi)		
連携研究者	野村 英子 (Nomura Hideko) (20397821)	国立天文台・科学研究部・教授 (62616)	
連携研究者	成田 憲保 (Narita Norio) (60610532)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	原川 紘季 (Harakawa Hiroki) (30771927)	国立天文台・アストロバイオロジーセンター・Exoplanet Instrument Postdoc Research Fellow (62616)	
連携研究者	井田 茂 (Ida Shigeru) (60211736)	東京工業大学・地球生命研究所・教授 (12608)	