

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2012～2016

課題番号：24253004

研究課題名(和文) 重力マイクロレンズによる浮遊惑星の探索

研究課題名(英文) Search for free-floating planets by using gravitational microlensing

研究代表者

住 貴宏 (Sumi, Takahiro)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30432214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,429,142円

研究成果の概要(和文)：本研究は、主星の周りを回らない「浮遊惑星」をより多く発見し、その存在量、質量分布を見積もるために、我々MOAグループが行っている重力マイクロレンズによる系外惑星探査を4年間継続した。平成24-27年度の2月から11月に、日本人メンバー及びNZ現地観測員が、1.8m望遠鏡で銀河系バルジの50平方度を高頻度観測し、約2,500個のマイクロレンズイベントをリアルタイムで発見し順調に統計をためることができた。現在はこれまでに観測されたデータを解析して、タイムスケールの短い浮遊惑星候補がどれくらい存在するかを統計的にまとめる準備をしている。

研究成果の概要(英文)：This project continued the exoplanet search by MOA group via gravitational microlensing for 4 years aiming to increase free-floating planet candidates to study their abundance and mass function. During February-November in 2014-2017, we, Japanese members and NZ local observers, conducted the high cadence continuous survey observation in 50 square degree field towards the Galactic Bulge and succeeded to find about 2,500 microlensing events in real time. We are currently working on the statistical analysis of this dataset to estimate the number of short timescale microlensing events, which are free-floating planet candidates.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：系外惑星 重力マイクロレンズ

1. 研究開始当初の背景

系外惑星は、1995年に初めて発見されてから、ドップラー、トランジット、直接撮像等により、今迄に3000個以上発見されている(Udry & Santos 2007)。これらの惑星の多くは木星質量程度で、最近見つかり始めた海王星質量惑星や数倍地球質量の「スーパーアース」も小軌道半径に限られ、惑星形成はまだ十分理解されていない。そんな中、我々MOA (Microlensing Observations in Astrophysics)グループはニュージーランドのMt.John天文台の61cm望遠鏡で重力マイクロレンズによる系外惑星探査を行ってきた。2005年には同天文台に1.8m広視野望遠鏡を建設し翌4月から高頻度観測を開始した(MOA-II)。背景天体の前を他の星(レンズ天体)が通過すると、その重力がレンズの様な働きをして背景天体からの光を一時的に増光し、マイクロレンズイベントとして観測される。実際には、銀河系中心バルジ内の比較的奥の星がバルジ内手前や銀河円盤内の星に増光される。この時レンズ天体の周りに惑星があると、この惑星の重力によってさらにレンズを受け、光度曲線は標準的な単星によるマイクロレンズの理論曲線から逸脱し、これを観測する事により惑星を検出でき、惑星と主星の質量比、軌道半径等が求まる。

2003年我々MOAはOGLEグループと共同で、世界で初めてマイクロレンズを使って木星質量の系外惑星を(Bond et al. 2004)、さらに当時最小の5.5倍地球質量惑星を発見した(Beaulieu et al. 2006)。また、2008年までに発見された系外惑星10個から、M-K型矮星のスノーラインの外側での質量比関数を初めて求め、海王星質量惑星が木星質量惑星の3倍以上多い事を見出した(Sumi et al. 2010)。これは、この領域で海王星質量惑星は形成されるが、それらにガスが降着して巨大ガス惑星に成長する前にガスが散逸してしまっている事を示し、惑星形成理論に強い制限を与える等の実績を残してきている。

2. 研究の目的

これら発見された惑星は全て主星の周りを回っているが、主星の周りを回っていない「浮遊惑星」は、星の周りで形成された後に、他の惑星や星との重力的相互作用で軌道から弾き飛ばされてきたと考えられている。主星に付随していない「浮遊惑星」候補は、これ迄いくつか観測例があるが、星形成領域の非常に若く高温な5倍木星質量までの巨大ガス惑星に限られ、星間空間では発見されていない。惑星形成理論では、複数の惑星ができるとそれらの軌道は不安定になり、主星の重力圏からはじき飛ばされる。他の方法と違い、マイクロレンズは主星の光を必要とせず、唯一この浮遊惑星を検出できる(Sumi et al. 2011)。本研究は、我々MOAグループが行っている重力マイクロレンズによる系外惑星探査を5年間継続する事によって、主星の周

りを回らない「浮遊惑星」候補を約40個発見し、その存在量、質量分布を見積もる。この結果から、木星型惑星の形成はコア集積モデルと重力不安定モデルのどちらが支配的かを解明し、また、その後の軌道進化のモデルも検証する。

3. 研究の方法

本研究は、ニュージーランド(NZ)にあるMOA-II 1.8m望遠鏡の2.2平方度という広視野を利用して、銀河系バルジの50平方度内の星5千万個を15-90分に1回と言う高頻度サーベイを継続する。これによりタイムスケールが2日以下と非常に短いマイクロレンズイベントをより多く発見する。マイクロレンズイベントのタイムスケールはレンズの質量の平方根に比例する。普通の星で20日程度だが、木星質量程度で1日、地球質量程度では数時間と非常に短い。つまりこのタイムスケールの短いイベントのレンズは浮遊惑星の候補である。さらにこれをリアルタイムで検出し、同じサイトにある61cm望遠鏡で即座に追観測をして信頼性を上げる。最終年度には、本研究期間以前のデータも合わせて統計的にまとめる。画像レベルのシミュレーションを行いイベントのタイムスケールごとの検出効率を求めてタイムスケール分布を求める。この内タイムスケールの短いイベントの数から、浮遊惑星の存在量、質量分布等を統計的に見積もる。

4. 研究成果

当初5年間の観測計画であったが、別科研究費研究開始のため4年間で本研究を終了することとしたが、観測は順調に行われたため、当初予定の8割程度のデータは無事取得できた。

マイクロレンズイベントを検出するには、取得された画像を、Difference Image Analysis (DIA) で解析する。これは、あらかじめ取得されていたseeingが良くシグナル/ノイズ比の高い画像をリファレンスとし、観測された各画像からこれを引き算して得られた差分画像に変光した天体のみが残る(図1)。これが観

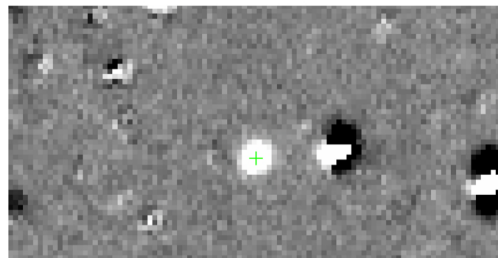


図1: 2012年に発見されたマイクロレンズイベント gb4-R-1-1-571956 のピーク付近のDIAにより引き算処理後の差分画像。緑十字がイベントの中心。リファレンス画像より明るくなった分が白く残っている。

測後5分以内に行われて、光度曲線が作られる。計算機による初期フィルタリングの後、観測者が目で最終確認をして、マイクロレンズイベントを発見する。発見したイベントのアラートを世界中に発し、他のグループが追観測をできる様にしている。

本研究期間2012年度から2015年度の間、2月～10月の9ヶ月間、毎晩サーベイ観測を継続的に行い、毎年約5TByteの画像データを取得した。これによりマイクロレンズイベントを毎年約600個、4年間で2,500個検出した。各年度の観測シーズンに我々が発見したマイクロレンズイベントの数を以下に示す。

2012年 680個
 2013年 668個
 2014年 621個
 2015年 577個
 合計 2,546個

現在は、計画通り本研究期間以前の2006年からのデータと合わせて、2014年までのデータをまとめて解析を行っている。この期間内で5047個のマイクロレンズイベントを発見しており、その内、増光期間が二日以下の短いイベントをこれまでに36個確認している(依然探索中であり、設定する閾値による変動もある)。その内の1つの光度曲線を図2に示す。

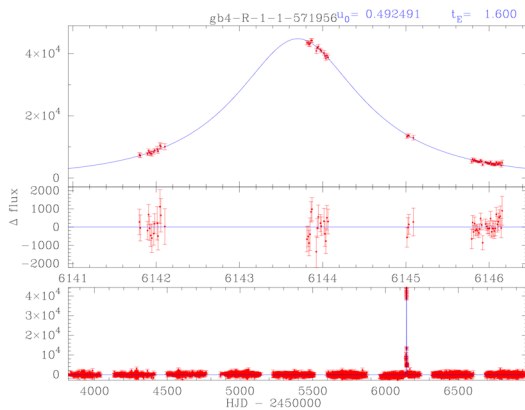


図2：2012年に発見した、タイムスケール1.6日の短いマイクロレンズイベントgb4-R-1-1-571956の光度曲線。横軸は時間(ユリウス日)、縦軸は明るさ。上段：増光期間中の高度曲線の拡大。青線は単星ベストフィットモデル。中段：モデルからの残渣。下段：2006-2014年までの光度曲線。

今回の解析では、本研究期間前の2011年以前のデータの再解析も行っているが、リアルタイムでは検出できなかったものも多数発見されている。それらのうち、増光期間の短いものの一つを図3に示す。

今後、さらに解析を進めてイベント検出の閾値をきめてサンプルを決定する。そして観測画像に直接擬似イベントを埋め込むシミュレーションを行い、イベントのタイムスケール

ごとの検出効率を求めてタイムスケール分布を求める。この内タイムスケールの短いイベントの数と長いイベントの数の比から、浮遊惑星の存在量、質量分布等を統計的に見積もる。

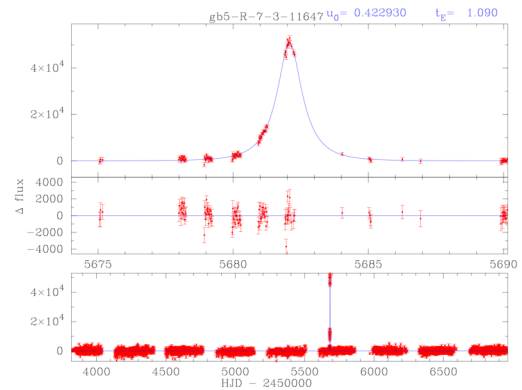


図3：2011年中のデータで新たに発見した、タイムスケール1.0日の短いマイクロレンズイベントgb5-R-7-3-11647の光度曲線

さらに、この様なレンズ一つからなる短いイベント以外に、連星レンズによる短いイベントも数例発見した。これは、主星による長い増光が見えないが、伴星による増光に主星の影響がわずかに残っており、単星レンズの光度曲線モデルからずれが生じる。今回観測されたもの内の一つを図4に示す。連星レンズモデルでのフィッティングの結果、伴星は惑星質量である可能性があることがわかった。普通の連星である可能性も排除しきれないので、今後詳細に解析をする予定である。

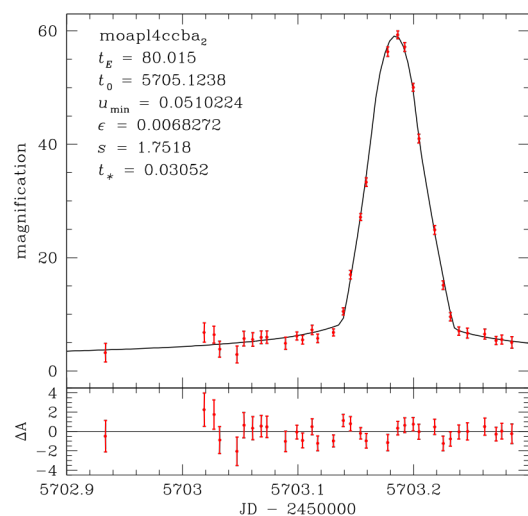


図4：新たに発見した、タイムスケールが非常に短い連星マイクロレンズイベントの光度曲線。実線はベストフィット連星モデル。主星と伴星の質量比が0.0068と小さく伴星は惑星である可能性がある。

<引用文献>

Udry, S. & Santos, N., 2007, ARA&A, 45, 397
Beaulieu, J. P., et al., 2006, Nature, 439, 437
Sumi T., et al., 2011, Nature 473, 349
Bond, I. A., et al., 2004, ApJ, 606, 155
Sumi T., et al., 2010, ApJ, 710, 1641

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 41 件)

- ① “OGLE-2012-BLG-0563Lb: A Saturn-mass Planet around an M Dwarf with the Mass Constrained by Subaru AO Imaging”, *Fukui, A., Sumi, T(3番目), Abe, F. (14), (62authors), ApJ, 809, 74-89 (2015). Refereed, DOI:10.1088/0004-637X/809/1/74
- ② “A terrestrial planet in a ~ 1 -AU orbit around one member of a ~ 15 -AU binary”, Gould, A., Abe, F. (33), Muraki, Y. (46), Sumi, T(53), (64 authors), Science, 345, 46-49 (2014). Refereed, DOI:10.1126/science.1251527
- ③ + “OGLE-2008-BLG-355Lb: A Massive Planet around a Late-type Star”, *Koshimoto, N., Sumi, T (3), Abe, F. (7), Muraki, Y. (17), (35 authors), ApJ, 788, 128-140 (2014). Refereed, DOI: 10.1088/0004-637X/788/2/128
- ④ + “MOA-2011-BLG-262Lb: A Sub-Earth-Mass Moon Orbiting a Gas Giant Primary or a High Velocity Planetary System in the Galactic Bulge”, *Bennett, D. P., Abe, F. (10), Muraki, Y. (20), Sumi, T(26), (95 authors), ApJ, 785, 155-168 (2014). Refereed DOI:10.1088/0004-637X/785/2/155
- ⑤ + “MOA-2008-BLG-379Lb: A Massive Planet from a High Magnification Event with a Faint Source”, *Suzuki, D., Sumi, T(3), Abe, F. (6), Muraki, Y. (16), (36 authors), ApJ, 780, 123-132 (2014). Refereed, DOI: 10.1088/0004-637X/788/1/97
- ⑥ “MOA-2010-BLG-328Lb: a sub-Neptune orbiting very late M dwarf?”, Furusawa, K., *Sumi, T(3), Abe, F. (11), Muraki, Y. (22) (122 authors), ApJ. 779, 91-103 (2013). Refereed,

DOI:10.1088/0004-637X/779/2/91

- ⑦ “The Microlensing Event Rate and Optical Depth Toward the Galactic Bulge from MOA-II”, *Sumi, T(1), Abe, F. (4), Muraki, Y. (12) (22 authors), ApJ. 778, 150-165, Refereed, DOI:10.1088/0004-637X/778/2/150
- ⑧ “Planetary and Other Short Binary Microlensing Events from the MOA Short-event Analysis”, *Bennett, D. P., Sumi, T(2), Abe, F. (5), Muraki, Y. (16) (27 authors), ApJ, 757, 119-135 (2012). Refereed, DOI:10.1088/0004-637X/757/2/119
- ⑨ “A Possible Binary System of a Stellar Remnant in the High-magnification Gravitational Microlensing Event OGLE-2007-BLG-514”, *Miyake, N., Sumi, T (3), Abe, F. (16), Muraki, Y. (25), (81 authors), ApJ., 752, 82-93, (2012), refereed DOI:10.1088/0004-637X/752/2/82
- ⑩ “One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations”, *Cassan, A., Sumi, T (36), (42 authors), Nature, 481, 167-169 (2012), refereed, DOI:10.1038/nature10684

[学会発表] (計 34 件)

- ① Sumi, T., et al., 海王星に似た惑星:MOA-2013-BLG-605Lbの公転軌道, 日本天文学会2016年春季年会, 首都大学東京, 3/2016
- ② Sumi, T., Microlensing exoplanet search toward the solar system analog, International Workshop on “Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III”, Ishigaki, 2/2016
- ③ Sumi, T., Exoplanet Microlensing Context, IAU XXIX General Assembly WFIRST Splinter Session, Honolulu Hawaii, 8/2015
- ④ Sumi, T., 重力マイクロレンズ探査で探る天の川銀河構造, 天の川銀河研究会, Tokyo University, 3/2015
- ⑤ Sumi, T., et al., MOA-2013-BLG-605Lb:The Neptune Analog, 19th International Conference on Microlensing, Annapolis Maryland, 1/2015
- ⑥ Sumi, T., et al., WFIRST, 宇宙科学シンポジウム, ISAS, 1/2015
- ⑦ Sumi, T., 重力マイクロレンズによる系外惑星探査, 名古屋大学南半球宇宙観測研

- 究センター研究会, Nagoya University, 10/2014
- ⑧ Sumi, T., MOA-2013-BLG-605Lb:晩期M型矮星に付随する海王星質量惑星, 日本天文学会2014年秋季年会, Yamagata University, 9/2014
 - ⑨ Sumi, T., Free-floating planets from microlensing, The American Astronomical Society meeting, Boston, 6/2014
 - ⑩ Sumi, T., et al., MOA-IIの重力マイクロレンズによる銀河系バー構造の解明, 日本天文学会2014年春季年会, 国際キリスト教大学, 3/2014
 - ⑪ Sumi, T., The Microlensing Event Rate and Optical Depth Toward the Galactic Bulge from MOA-II, 18th International Conference on Microlensing, Santa Barbara, California, 1/2014
 - ⑫ Sumi, T., Current and Future of Microlensing Exoplanet Search, Subaru International conference, Kona, 12/2013
 - ⑬ Sumi, T., MOA-IIによる系外惑星探査: 2013年の経過報告, 日本天文学会2013年秋季年会, Tohoku University, 9/2013
 - ⑭ Sumi, T., Medium-Size Telescope Science Workshop, 昆明 中国, 6/2013
 - ⑮ Sumi, T., et al., MOA-IIによる系外惑星探査: 2012年の結果, 日本天文学会2013年春季年会, Saitama University, 3/2013
 - ⑯ Sumi, T., Microlensing, 日本天文学会2012年秋季年会, Oita University, 9/2012
 - ⑰ Sumi, T., et al., MOA-IIによる系外惑星探査: 2012年の経過報告, 日本天文学会2012年秋季年会, Oita University, 9/2012
 - ⑱ Sumi, T., Current and Future of Microlensing Exoplanet Search, IAU Symposium 293, China, Invited talk, 8/2012
 - ⑲ Sumi, T., et al, Space Microlensing Exoplanet Survey with WFIRST, 220th The American Astronomical Society meeting, Alaska, 6/2012
 - ⑳ Sumi, T., et al., Microlensing Exoplanet search by MOA and WFIRST, 第8回太陽系外惑星大研究会, Atami, Invited talk, 4/2012

[その他]

<http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住 貴宏 (SUMI, Takahiro)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 30432214