

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22403003

研究課題名（和文）

MOA II 1.8m望遠鏡によるマイクロレンズ事象の探索

研究課題名（英文）

Gravitational Microlensing Survey with MOA II 1.8m Telescope

研究代表者

阿部 文雄 (Abe Fumio)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：80184224

研究成果の概要（和文）：

重力マイクロレンズ探索により、惑星5個と褐色矮星や通常の伴星などを発見し、質量比分布や存在確率を求めた。また、主星に付随しない浮遊惑星が通常の星の1.8倍存在することを発見した。これらの発見により、星惑星形成の理解に大きく貢献した。

研究成果の概要（英文）：

With gravitational microlensing method, we found five planets, several brown dwarfs, etc. Then we obtained mass ratio distribution and probability of planets. We discovered 10 free-floating planets and found that they are 1.8 times as abundant as main sequence stars.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
総計	12,400,000	3,720,000	16,120,000

研究分野：数物系科学 B

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：重力レンズ、光学赤外線天文学、太陽系外惑星

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星は、1990年代の最初の発見以来、これまでに800個以上が発見されている。地球の様な、生命の存在しうる惑星の発見や、太陽系とは異なる惑星サンプルを研究することにより、惑星形成の理解が進むことが期待されている。

マイクロレンズ法は、2003年に初めて成功した新しい手法である。視線速度法やトランジット法など他の探索法と異なり、主星から1-4天文単位ほど離れた惑星に感度が高く、地球質量程度までの惑星を検出可能である。2006年には、当時最軽量となる5.5地球質量の惑星を発見し、一躍注目を浴びた。2008年には、太陽系に似た葉巻型の惑星系が初めて発見された。他の手法とは観測バイアスが異

なり、マイクロレンズ法による惑星の分布などから、惑星形成の理解が進むことと、地球の様な低質量惑星の発見が期待されていた。主星に付随せず、単独で銀河内を運動している浮遊惑星は、生成直後の高温の状態と思われる天体が星形成領域に発見された例がある。しかし、質量の不定性が大きく、また自由空間にどの程度存在するかは不明で、謎の多い天体だった。また、こうした浮遊惑星は、複数の巨大惑星からなる惑星系で、惑星同士の引力により軌道が不安定となって、一方が自由空間に放出されることにより生成すると考えられてきた。しかし、その数は通常の星の数に比べて、それほど多いとは考えられていなかった。

2. 研究の目的

上記の様なマイクロレンズ法の特徴をふまえ、ニュージーランドマウントジョン天文台の 1.8m 広視野望遠鏡によるマイクロレンズ探索を実施し、惑星の分布などから惑星形成の理解を深め、地球程度の低質量惑星発見を目指す。また、自由空間を運動する主星に付随しない浮遊惑星の発見を目指す。

3. 研究の方法

マイクロレンズ法では、まず広視野望遠鏡による広域サーベイによって多数の星を連続的に観測し、マイクロレンズ事象を発見する。次に、発見された事象を追観測して光度曲線(星の明るさの変化)を求める。また、リアルタイム解析を行い、惑星によると思われる変位(アノーマリー)が検出されれば、世界中の研究者と協力して追観測を実施し、より詳しい光度曲線を求める。

こうして得られた光度曲線を連星重力レンズのモデルで解析して惑星を発見しパラメータを決定する。光度曲線に視差の効果が観測された場合は、視差と光源星の視半径からレンズ天体(惑星系)までの距離が決定される。これにより、主星質量・惑星質量などの物理パラメータが一意に決定される。視差が観測されなかった場合は、銀河モデルによる星の分布から、確率的に距離を推定し、物理パラメータを推測する。

浮遊惑星は、通常のマイクロレンズ事象に比べて継続時間が短いことが期待される。このため、タイムスケールの小さな事象を調べて、その存在を確認する。さらに、モンテカルロシミュレーションを実施し、検出効率を求めることにより、実際の存在量を推定する。

4. 研究成果

1.8m 望遠鏡によるマイクロレンズ探索を実施し、2010 年には 607 個、2011 年には 485 個、2012 年には 680 個のマイクロレンズ事象を銀河中心方向に発見した。リアルタイム解析と、他のグループとの協力による追観測も順調に進み、アノーマリーのある事象の詳細な光度曲線を取得することに成功した。これらを解析して、毎年数個から 10 個程度の惑星候補や褐色矮星、さらに浮遊惑星や中性子星などの暗天体らしき事象を抽出して、国際協力で解析を実施した。

これまでのところ、5 個の惑星を新たに確認し国際誌の公表済みであり、他の事象についてはなお解析を続行中である。今後さらに惑星数が増えるものと考えられる。これまでのところ、発見された惑星は木星の様な巨大惑星が多く、低質量のものでも 10 地球質量程度である。このことは、低質量惑星の検出がより困難であることを反映しているが、地

球質量程度の惑星は、予想ほどたくさんは無い可能性もある。

一方、惑星などの分布に関する研究も進んだ。神原らにより、リアルタイム解析でアノーマリーが検出されなかった事象も含めて再解析を行い、連星や褐色矮星も含めた室料分布が求められた。この解析結果から、褐色矮星の存在量が少なくいわゆる褐色矮星砂漠が裏付けられた。しかし、その後褐色矮星の発見が相次いでおり、褐色矮星の欠損は思ったほど大きくは無さそうである。

また、これまでに求められた惑星の質量分布の傾きは、マイクロレンズ法と視線速度法による推定が比較的良く一致している。しかし、マイクロレンズ法から推定される星が惑星を持つ確率は、視線速度法による推測値より大きい。この原因は、まだ理解できていないが、観測している星のサンプルが異なるので、それによる違いまたは発見しやすい惑星のパラメータ(質量、軌道長半径など)が異なるためと考えられる。

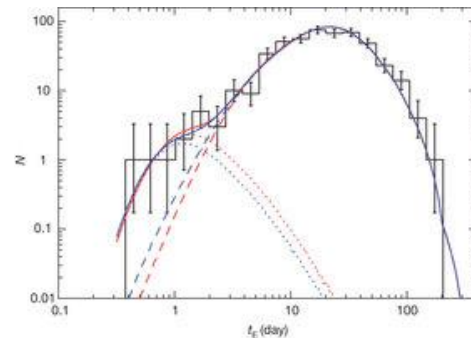


図1 発見された事象のタイムスケール分布。左側の短時間事象の超過は、浮遊惑星による(Sumi 他、2011)。

一方、本研究期間における最大の発見は、発見された事象のタイムスケール分布(図1)から、浮遊惑星の存在とその存在量の推定値を求めたことである。マイクロレンズ探索から求められた木星質量程度の浮遊惑星の存在量は、通常の星の 1.8 倍もあり、銀河の重要な構成要素であることを示している。この様な数値を明確に示したのは、これが初めてであり、天文・宇宙物理に衝撃を与えた。この様な浮遊惑星は、複数の巨大惑星が互いに重力を及ぼし合っ力学的に不安定となり、一方が宇宙空間に放出されたものと考えられてきた。しかし、これまでの星惑星形成理論では、これほど多数の浮遊惑星の存在は予想されていなかった。

この様に、本研究により星が惑星などの伴星を持つ確率や質量分布などの理解が進み、星惑星形成理論に重要なフィードバックをもたらした。しかし、何と言っても大きいのは、浮遊惑星が主系列星の 1.8 倍もあることを示したことである。

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)

- 1) Street, R. A. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., MOA-2010-BLG-073L: An M-dwarf with a Substellar Companion at the Planet/Brown Dwarf Boundary, 2013, ApJ 763, 67, 査読有り
 - 2) Shin, I.-G. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Microlensing Binaries with Candidate Brown Dwarf Companions, 2012, ApJ 760, 116, 査読有り
 - 3) Miyake, N. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., A Possible Binary System of a Stellar Remnant in the High-magnification Gravitational Microlensing Event OGLE-2007-BLG-514, 2012, ApJ 752, 82, 査読有り
 - 4) Sumi, T. 他、Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing, 2011, Nature 473, 349, 査読有り
 - 5) Miyake, N. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., A Sub-Saturn Mass Planet, MOA-2009-BLG-319Lb, 2011, ApJ 728, 120, 査読有り
 - 6) Abe, F., Gravitational Microlensing by the Ellis Wormhole, 2010, ApJ 725, 787, 査読有り
 - 7) Gould, A. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Frequency of Solar-like Systems and of Ice and Gas Giants Beyond the Snow Line from High-magnification Microlensing Events in 2005-2008, 2010, ApJ 720, 1073, 査読有り
- [雑誌論文] (計 23 件)
- 1) Shin, I.-G. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Using Orbital Effects to Break the Close/Wide Degeneracy in Binary-lens Microlensing Events, 2013, ApJ 764, 64, 査読有り
 - 2) Gould, A. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., MOA-2010-BLG-523: "Failed Planet" = RS CVn Star, 2013, ApJ 763, 141, 査読有り
 - 3) Bachelet, E. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K.,

- Saito, To., A brown dwarf orbiting an M-dwarf: MOA 2009-BLG-411L, 2012, A&A 547, 55, 査読有り
- 4) Bennett, D. P. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Planetary and Other Short Binary Microlensing Events from the MOA Short-event Analysis, 2012, ApJ 757, 119, 査読有り
- 5) Choi, J.-Y. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., A New Type of Ambiguity in the Planet and Binary Interpretations of Central Perturbations of High-magnification Gravitational Microlensing Events, 2012, ApJ 756, 48, 査読有り
- 6) Bozza, V. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., OGLE-2008-BLG-510: first automated real-time detection of a weak microlensing anomaly - brown dwarf or stellar binary?, 2012, MNRAS 424, 902, 査読有り
- 7) Yee, J. C. 他、MOA-2011-BLG-293Lb: A Test of Pure Survey Microlensing Planet Detections, Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., 2012, ApJ 755, 102, 査読有り
- 8) Shin, I.-G. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Characterizing Low-mass Binaries from Observation of Long-timescale Caustic-crossing Gravitational Microlensing Events, 2012, ApJ 755, 91, 査読有り
- 9) Bachelet, E. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., MOA 2010-BLG-477Lb: Constraining the Mass of a Microlensing Planet from Microlensing Parallax, Orbital Motion, and Detection of Blended Light, 2012, ApJ 754, 73, 査読有り
- 10) Choi, J.-Y. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Characterizing Lenses and Lensed Stars of High-magnification Single-lens Gravitational Microlensing Events with Lenses Passing over Source Stars, 2012, ApJ 751, 41, 査読有り
- 11) Shin, I.-G. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Microlensing Binaries Discovered through High-magnification Channel, 2012, ApJ 746, 127, 査読有り
- 12) Muraki, Y. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Discovery and Mass Measurements of a Cold, 10 Earth Mass Planet and Its Host Star,

2011, ApJ 741, 22, 査読有り

13) Toki, Y. 他、Abe, F., Astrometric Image Centroid Displacements due to Gravitational Microlensing by the Ellis Wormhole, 2011, ApJ 740, 121, 査読有り

14) Skowron J. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To.,

15) Binary Microlensing Event OGLE-2009-BLG-020 Gives Verifiable Mass, Distance, and Orbit Predictions, 2011, ApJ 738, 87, 査読有り

16) Hwang, K.-H. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., OGLE-2009-BLG-023/MOA-2009-BLG-028: characterization of a binary microlensing event based on survey data, 2011, MNRAS 413, 1244, 査読有り

17) Batista, V. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., MOA-2009-BLG-387Lb: a massive planet orbiting an M dwarf, 2011, A&A 529, 102, 査読有り

18) Fukui, A. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Measurements of Transit Timing Variations for WASP-5b, 2011, PASJ 63, 287, 査読有り

19) Hwang, K.-H. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., OGLE-2005-BLG-153: Microlensing Discovery and Characterization of a Very Low Mass Binary, 2010, ApJ 723, 797, 査読有り

20) Ryu, Y.-H. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., OGLE-2009-BLG-092/MOA-2009-BLG-137: A Dramatic Repeating Event with the Second Perturbation Predicted by Real-time Analysis, 2010, ApJ 723, 81, 査読有り

21) Hwang, K.-H. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Determining the Physical Lens Parameters of the Binary Gravitational Microlensing Event MOA-2009-BLG-016, 2010, ApJ 717, 435, 査読有り

22) Forque, P. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., OGLE 2008-BLG-290: an accurate measurement of the limb darkening of a galactic bulge K Giant spatially resolved by microlensing, 2010, A&A 518, 51, 査読有り

23) Bennett, D. P. 他、Sumi, T., Abe, F., Masuda, K., Matsubara, Y., Ohnishi, K., Saito, To., Masses and Orbital Constraints for the OGLE-2006-BLG-109Lb, c Jupiter/Saturn Analog Planetary System,

2010, ApJ 713, 837, 査読有り

[学会発表] (計 37 件)

1) 住 貴宏, 他 MOA, 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、2012 年 9 月、大分大学

2) 鈴木大介、他 MOA, MOA-II による惑星の存在確率への制限、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012 年 9 月、大分大学

3) 滝野 奨, 他 MOA, 重力マイクロレンズサーベイ観測による惑星イベント候補の発見: MOA-2008-BLG-288、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012 年 9 月、大分大学

4) 鈴木浩太、他 MOA, 惑星を伴う重力マイクロレンズイベント MOA 2008-BLG-379、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012 年 9 月、大分大学

5) 阿部文雄, 他 MOA, 重力マイクロレンズによる原始ブラックホール探索法、日本天文学会 2012 年秋季年会、2012 年 9 月、大分大学

6) 鈴木大介、他 MOA, MOA-II による snow line の外側における惑星頻度、日本天文学会 2013 年春季年会 2013 年 3 月、埼玉大学

7) 住 貴宏, 他 MOA, 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、2013 年 3 月、埼玉大学

8) 和田光平、他 MOA, MOA-II 望遠鏡を用いた重力マイクロレンズ法による惑星イベントの解析、日本天文学会 2013 年春季年会、2013 年 3 月、埼玉大学

9) F. Abe, MOA collaboration, New LMC observation strategy by MOA, 1st Doha International Astronomy Conference: "Gravitational Microlensing - 101 years from theory to practice", 2013 年 02 月 10 日 ~ 2013 年 02 月 13 日, Qatar National Convention Centre (QNCC)

10) D. Suzuki, MOA collaboration, Planet frequency beyond the snow line from MOA-II observations in 2007-2011, 1st Doha International Astronomy Conference: "Gravitational

Microlensing - 101 years from theory to practice" 2013 年 02 月 10 日 ~ 2013 年 02 月 13 日, Qatar National Convention Centre (QNCC)

11) Abe, Fumio, Wormhole hunting: methods and problems, 研究会「ワームホール: その理論と観測的検証可能性」, 2012 年 10 月 27 日 ~ 2012 年 10 月 28 日, 立教大学

12) Fumio, Abe, MOA II gravitational microlensing survey, 招待講演, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics, FQMT11, July 27, 2011, Prague, Czech

13) 神原周平、MOA-II で観測された惑星系を含む連星イベントの解析、日本天文学会秋季年会、2011 年 9 月 21 日、鹿児島大学

14) 鈴木大介、低増光率重力マイクロレンズイベントにおける惑星の検出効率、日本天文学会秋季年会、2011年9月21日、鹿児島大学
15) 福井暁彦、TTV法を用いた、ホットジュピターと共鳴軌道の惑星の存在確率の計算、日本天文学会秋季年会、2011年9月21日、鹿児島大学
16) 神原周平、MOA-IIによるM型矮星における惑星系及び連星系の質量比関数、日本天文学会春期年会、2012年3月22日、龍谷大学
17) 古澤圭、惑星イベント:MOA-2010-BLG-328、日本天文学会春期年会、2012年3月22日、龍谷大学
18) 鈴木大介、MOA-IIにおける系外惑星探査:2011年の結果、日本天文学会春期年会、2012年3月22日、龍谷大学
19) 滝野奨、冷却InGaAsカメラC10633-34のノイズ評価試験、日本天文学会春期年会、2012年3月22日、龍谷大学
20) Abe, Fumio, Gravitational microlensing by the Ellis wormhole, The 15th International Conference on Gravitational Microlensing, 2011.1.22, Salerno, Italy
21) Takahiro Sumi, MOA-II observation in 2010 season, The 15th International Conference on Gravitational Microlensing, 2011.1.20, Salerno, Italy
22) Kei Furusawa, Planetary microlensing event MOA-2010-BLG-328, The 15th International Conference on Gravitational Microlensing, 2011.1.21, Salerno, Italy
23) 阿部文雄、重力マイクロレンズ効果を利用したワームホール探索、日本物理学会2010年秋季大会、2010.9.11、九州工業大学
24) 住貴宏、MOA-IIによる系外惑星探査:2009年の結果と2010年の経過報告、日本天文学会2010年秋季年会、2010.9.23、金沢大学
25) 鈴木大介、最小質量比重力マイクロレンズイベントMOA-2009-BLG-266の検出効率、日本天文学会2010年秋季年会、2010.9.23、金沢大学
26) 三宅範幸、惑星マイクロレンズイベント:MOA-2009-BLG-319、日本天文学会2010年秋季年会、2010.9.23、金沢大学
27) 古澤圭、重力マイクロレンズイベントMOA-2010-BLG-073、日本天文学会2010年秋季年会、2010.9.23、金沢大学
28) 林文也、重力マイクロレンズ法による、MOA II望遠鏡を用いたMACHOs探索、日本天文学会2010年秋季年会、2010.9.23、金沢大学
29) 阿部文雄、重力マイクロレンズを利用したワームホール探索、日本天文学会2010年秋季年会、2010.9.23、金沢大学
30) 三宅範幸、MOA-IIによる系外惑星探査:2010年の結果、日本天文学会2011年春期年会、2011.1.27、要旨集

31) 鈴木大介、低増光率重力マイクロレンズイベントにおける検出効率、日本天文学会2011年春期年会、2011.1.27、要旨集
32) 古澤圭、Planetary microlensing event MOA-2010-BLG-328、日本天文学会2011年春期年会、2011.1.27、要旨集
33) 神原周平、MOA-2010-BLG-523の隠れた惑星、日本天文学会2011年春期年会、2011.1.27、要旨集
34) 林文也、重力マイクロレンズ法による、MOA-II望遠鏡を用いたMACHOs探索、日本天文学会2011年春期年会、2011.1.27、要旨集
35) 阿部文雄、重力マイクロレンズによるワームホール探索2、日本天文学会2011年春期年会、2011.1.27、要旨集
36) Takahiro Sumi, Planet distribution beyond the snow line by gravitational microlensing, 第7回太陽系外惑星大研究会、2011.3.9、国立天文台(三鷹)
37) Kei Furusawa, Planetary microlensing event MOA-2010-BLG-328, 第7回太陽系外惑星大研究会、2011.3.9、国立天文台(三鷹)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 文雄 (Abe Fumio)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号: 80184224

(2) 研究分担者

松原 豊 (Matsubara Yutaka)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号: 80202323

大西 浩次 (Ohnishi Koji)

長野工業高等専門学校・一般科・教授

研究者番号: 20290744

齋藤 敏治 (Saito Toshiharu)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授

研究者番号: 40259833

(3) 連携研究者

住 貴宏 (Sumi Takahiro)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 30432214

増田 公明 (Masuda Kimiaki)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号：40173744
さこ 隆志 (Sako Takashi)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助授
研究者番号：90324368