

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05732

研究課題名(和文) マイクロレンズ法による太陽系外惑星の探索

研究課題名(英文) Search for extrasolar planets with microlensing

研究代表者

阿部 文雄 (Abe, Fumio)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：80184224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：太陽以外の星をまわる太陽系外惑星の研究は、地球外生命や惑星の起源の理解に重要な知見が期待される。マイクロレンズ法は、重力レンズ効果による遠方の星の見かけ上の増光現象を利用し、手前の星に付随する惑星を発見する手法である。この手法は、主星から隔たった"氷境界"の外側をまわる惑星に感度が高く、この領域では地球質量程度まで発見可能ということが特徴である。我々は、ニュージーランドに設置した1.8m望遠鏡を利用して、マイクロレンズ法による太陽系外惑星の探索を実施し、氷境界の外側の惑星の分布を求めた。その結果、惑星の存在量は質量が小さくなるほど増えるが、海王星質量程度で頭打ちになることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系外惑星の研究は、地球外生命や惑星形成の理解に重要な知見を与えることが期待され、今世紀の天文学の最重要課題である。マイクロレンズ法は、小型の望遠鏡で実施可能な手法で、木星のような巨大惑星の形成領域を深く探索できるユニークな手法である。

太陽系外惑星は、大きなものほど発見しやすく、発見された惑星数は大きなものに偏っている。しかし、こうしたバイアスを除いた真の分布は、小さいものほど多いことが期待される。我々は、マイクロレンズ法による惑星探索を実施し、統計処理を行うことにより、惑星の真の分布をステイした。その結果、惑星は軽いものほど多くなるが、海王星質量程度で頭打ちになることが判明した。

研究成果の概要(英文)：Studies of extrasolar planets i.e. planets moving around distant stars are expected to find some hints for extraterrestrial lives or formation of planets. Microlensing is using apparent brightening of a distant star by gravitational lensing to find planets around the front star. This method is sensitive to small planet like Earth in the distant orbit i.e. outside of the "snow line".

We have studied extrasolar planets using microlensing and 1.8 m telescope in New Zealand. Excluding observation bias, we have obtained the distribution of planets outside of the snow line. The result shows increase of the abundance of the planets as the decrease of the planet mass. But it reaches a limit around the Neptune pass. This finding is expected to provide important information to the formation theories of planets.

研究分野：宇宙物理、天文学

キーワード：太陽系外惑星 重力レンズ 光学赤外線天文学 惑星科学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球の様な惑星がどの様にして生まれたのか？惑星形成は、18世紀に提唱されたカント・ラプラスの星雲説以来、約300年もの論争が続いている歴史的な天文学の大問題である。現代の惑星形成モデルは、原始星の周りにできたガス円盤(原始惑星系円盤)の中の塵が集積して惑星になったというコア集積モデルと、原始惑星系円盤が分裂してできたというディスク不安定モデルがある。1970年代に作られたコア集積モデルは、その後のシミュレーション研究によって太陽系の現在の姿を再現することに成功し、標準理論として確立された。

一方、1990年代になると、太陽以外の遠方の恒星の周りに次々と惑星(太陽系外惑星)が発見されるようになった。こうした太陽系外惑星の中には、ホットジュピターや、エキセントリックプラネットなどと呼ばれる、太陽系には無い奇妙な惑星が多く含まれ、遠方の星の周りに多様な惑星系が存在することが明らかとなった。さらに、観測技術の進歩により、原始惑星系円盤の直接撮像が可能となり、惑星形成の現場の様子がわかるようになって来た。その結果、惑星形成モデルは、様々な変更を迫られることとなった。コア集積モデルは、多くの複雑な物理プロセスを含んでおり、多くの仮定を含んでいて不定性が大きい。こうした不定要素を除いて惑星形成を理解することが、今世紀の天文学の大きな課題の一つである。

この問題の解決策としては、多様なパラメーター空間における惑星の分布を求め、理論と比較することが考えられる。しかし、発見された惑星の分布には、大きな観測バイアスがあり、実際の惑星分布とは大きな隔たりが予想され、理論と比較することは困難である。これは、太陽系外惑星を発見する手法が、主星に近い惑星や巨大惑星に感度が高いなど、得手不得手が大きく、発見された惑星の分布が、実際の分布を反映していないからである。また、星の選び方も統計処理のしやすいランダムサンプリングではなく、バイアスのかかったサンプリングが行われている。さらに、発見された惑星数は、統計処理を行って広大なパラメーター空間における分布を求めるにはまだ十分とは言えない。

我々が採用しているマイクロレンズ法は、遠方の星(ソース天体)の手前を通過する星(レンズ天体)の重力レンズ効果を利用して、手前の星に付随する惑星を発見する手法である。このイベントはランダムに起きるもので、他の手法に比べて統計処理がしやすく、惑星の分布を求めやすいと考えられている。しかし、まだ発見数が少なく、発見数を増やすことが重要である。さらに、惑星分布を求めるには、シミュレーションを行い検出効率を求めるなど、注意深い解析を必要としている。

### 2. 研究の目的

本研究は、マイクロレンズ法による太陽系外惑星の探索を実施し、この手法による惑星の発見数を増やし、統計処理を行って理論と比較可能な惑星分布を求めることを目的とする。

このため、従来から我々が行って来たニュージーランド・マウントジョン天文台での1.8m望遠鏡(MOA II望遠鏡)および61cm望遠鏡(B&C望遠鏡)によるマイクロレンズ観測を継続してより多くのマイクロレンズイベントを発見する。また、発見されたイベントを他の研究機関と協力して追観測しそのデータを解析することにより、惑星の発見数を増やす。さらに、統計処理を行って惑星分布を求め、理論との比較を可能とすることを旨とする。

### 3. 研究の方法

マイクロレンズ法によって惑星を発見するためには、まず広視野の望遠鏡を使ってバルジ(我々の銀河の中心付近)の多くの星を毎晩モニターして、重力レンズによる増光現象を発見する必要がある。マウントジョン天文台に設置した1.8m望遠鏡は、2.2平方度の広視野を誇っており、この目的に特化した観測を行っている。観測で得られたデータは、直ちにリアルタイム解析が行われ、マイクロレンズイベントの検出がなされる。発見したマイクロレンズイベントは、直ちにマイクロレンズ観測を行っている世界中の研究期間に通知される。

レンズ現象を引き起こした星に惑星が付随していた場合、イベントの明るさの変化(光度曲線)に特有の歪み(アノマリー)が現れる。このアノマリーを検出し、詳細な観測を行って分析することが惑星発見と、そのパラメーター決定に特に重要である。このため、1.8m望遠鏡の他61cm望遠鏡およびマイクロレンズ観測を行っている他の研究機関の望遠鏡とも協力をして、マイクロレンズイベントの追観測を実施する。また、地上からの観測だけでは、距離などのパラメーターを決定することは困難な場合が多いので、Spitzer衛星などを利用して、宇宙からの観測で視差を求め、パラメーターを決定する。

こうして得られた観測データは、画像同士の差分を取るDIA測光と呼ばれる手法を使って星の

明るさに変換され、光度曲線が求められる。この光度曲線に対して、多重レンズの解析を行い、惑星を発見しパラメーターを決定する。この解析は、解析的に難しい特異性のある重力レンズモデルによる多次元パラメーター空間で最適値を求める複雑な解析で非常に時間がかかる。また、アノマリーも連星によって引き起こされる場合もあり、惑星イベントの場合でもパラメーターの縮退などの厄介な問題が起きる場合がある。これらの問題を解決して、惑星のパラメーターを決定する。しかし、この段階ではパラメーターの絶対値は決まらない。そして、ソース天体の色と明るさからその視直径を求め、ソース天体が広がっていることによって光度曲線がなまる現象（有限ソース効果）を利用して、アインシュタイン角半径を求める。そして、地球の軌道運動によって生じる視差または、Spitzer 衛星などによる視差が観測されれば、それらと組み合わせ、レンズ天体までの距離がわかり、すべての物理パラメーターが確定する。もし、距離が決まらなかった場合は、銀河モデルに基づいて距離や物理パラメーターを確率的に推定する。

この様にして惑星の発見数を増やし、惑星のパラメーターを求めた後、統計処理をして惑星分布を求める。まず、モンテカルロシミュレーションを行い、各パラメーターにおける検出効率を求める。次に、この検出効率を利用して発見数を補正し、統計処理を行って最尤値の分布を求める。

#### 4. 研究成果

バルジのマイクロレンズ観測については、特に大きなトラブルは無く、順調に観測を実施した。2016年には618個、17年には511個、18年には413個、19年には448個のマイクロレンズイベントをリアルタイムで発見し、関係機関にアラートを発した。惑星の可能性のあるアノマリーのあるイベントや高増光率のイベントは、集中的に追観測を実施した。だいたい、年約20-30イベント程度である。そうした惑星候補イベントのデータを国際協力で解析し、惑星を発見する。通常、年換算で数イベント程度の惑星が発見される。イベントの解析は、多くの場合1-2年を要し、必ずしも同期して結果が公表されるわけではない。しかし、マイクロレンズ法による発見数は、2020年には、100個を越えた。マウントジョンでの観測は、2019年に始まった天文台を運営するカンタベリー大学との間の契約を更新する話し合いのため一時観測を中断し、その後コロナ禍により観測停止を余儀なくされたが、間もなく再開する予定である。

この様にして発見された惑星の統計処理をするには、様々な観測バイアスを除く必要がある。こうした統計処理の計算には、我々MOAによる観測に限った方がよりやりやすいことから、まずMOAのみによるイベントに限って解析を行った。MOAによる惑星イベントの中から、条件の良い22イベントを選んだ。また、惑星のパラメーターとしては、主星質量、惑星質量、軌道超半径など、非常に多くのパラメーターがあるが、イベント数が限られていることから、より求めやすい惑星の質量比（惑星質量/主星質量）の分布を求めた(Suzuki et al., 2016)。

その結果、惑星の存在量は予想通り質量比が小さいほど大きくなる。しかし、存在量はほぼ海王星質量（地球の約20倍）程度で頭打ちになることがわかった。マイクロレンズ法での発見は、主星が太陽より軽いM型星の周りの主に巨大惑星が期待される氷境界の外側（1-2天文単位）付近の惑星である。この領域では、惑星形成の最終段階で原始惑星系円盤の拡散が早く進んだ場合、木星の様な巨大ガス惑星が形成する前に円盤ガスが消失してしまい、海王星の様な氷惑星が残ると考えられている。惑星分布が質量比の小さなおとこで頭打ちになることは、巨大惑星の核となる氷の塊の大きさに下限がある可能性を示唆している。

惑星形成モデルは、複雑な物理プロセスであり、なお大きな不定性がある。今回の成果から、直ちに特定のモデルの正しさを実証したりモデルを棄却したりすることはできない。また、発見数が増えたとは言え、広大なパラメーター空間における分布を決定するには、さらに多くの発見を必要としている。しかし、初めて理論と比較しうる様な信頼しうる惑星分布を導出した意義は大きい。

マイクロレンズ法による太陽系外惑星の探索は、今後もニュージーランドで継続する一方南アフリカに建設される赤外線望遠鏡PRIMEや、宇宙からのマイクロレンズ観測を目指すNASAの衛星WFIRSTに引き継がれ、さらに多くの惑星の発見が期待され、統計を向上してより詳細な分布が得られるものと期待できる。今回の成果は、今後さらにこの手法を推し進め、さまざまなパラメーターに対する分布を求めて理論と比較するための手法を示したものと考えられ、将来理論に対してさらに強い制限を課すことができるものと期待される。

また、この研究期間中に、これまでに発見された惑星イベントのデータを使い、惑星に衛星が付随している可能性を調べ、その検出効率を求めた。現時点では、この試みは無謀と考えられたが、興味深いことに、惑星が主星のアインシュタインリングの近傍にある場合、検出感度が大きくなり、海王星質量程度の衛星があれば、発見可能であることが判明した。また、将来WFIRSTなどによる大気圏外からの観測が行われれば、測光精度が大幅に向上し実際に衛星が発見される可能性が高い。近年、太陽系内のエウロパやエンケラドスなどの氷衛星の氷の下に、液体の海が存在することが明らかになり、生命の存在に期待が膨らんでいる。もし、発見されれば、こうした

液体の海を持った氷衛星が宇宙には数多く存在することの証拠となる。

我々の観測は他の望遠鏡から隔絶した南半球のユニークな場所で行っている。マイクロレンズ観測をはじめ、様々な突発現象を観測するうえで極めて重要である。実際本研究の期間でも、重力波の検出によって発見された最初の中性子星連星の合体 GW170817 の追観測に成功した。副産物ではあるが、非常に大きな成果が得られた。

また、バルジの見えない時間帯は、マゼラン雲のマイクロレンズ観測を行っている。すでに 15 年以上の長期にわたるデータの蓄積がある。このデータの解析から、10 太陽質量程度の原始ブラックホールの存在量に制限を付けることが期待されている。また、大マゼラン雲に対しては、3 年間 15 分に 1 回の高頻度観測のデータがすでにあり、解析が進行中である。このデータからは、惑星質量の原始ブラックホールに対する強い制限が期待される。

総じて、本研究は当初の目的をほぼ達成したと言える。マイクロレンズ法による太陽系外惑星の発見数を増やし、統計を上げる一方、その観測バイアスを補正して、真の惑星分布を求める方法を示した。これにより、今後されに当家を上げ様々な物理パラメーター空間における惑星「分布」を求めることにより、惑星形成理論にさらに強い制限を付けることが可能となった。それに加え、重力波天体の観測といった副産物の成果もあり、ブラックホール探索や衛星探索など、将来の発展を目指した研究も実施することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計51件（うち査読付論文 49件 / うち国際共著 49件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Han C.他	4. 巻 155
2. 論文標題 OGLE-2017-BLG-0482Lb: A Microlensing Super-Earth Orbiting a Low-mass Host Star	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 211 ~ 211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabad2">https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabad2</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hwang K.-H.他	4. 巻 155
2. 論文標題 OGLE-2015-BLG-1459L: The Challenges of Exo-moon Microlensing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 259 ~ 259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/aac2cb">https://doi.org/10.3847/1538-3881/aac2cb</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Suzuki D.他	4. 巻 155
2. 論文標題 A Likely Detection of a Two-planet System in a Low-magnification Microlensing Event	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 263 ~ 263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabd7a">https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabd7a</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Bennett David P.他	4. 巻 156
2. 論文標題 A Planetary Microlensing Event with an Unusually Red Source Star: MOA-2011-BLG-291	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 113 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad59c">https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad59c</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyazaki S.他	4. 巻 156
2. 論文標題 MOA-2015-BLG-337: A Planetary System with a Low-mass Brown Dwarf/Planetary Boundary Host, or a Brown Dwarf Binary	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad5ee">https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad5ee</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Han Cheongho他	4. 巻 156
2. 論文標題 MOA-2016-BLG-319Lb: Microlensing Planet Subject to Rare Minor-image Perturbation Degeneracy in Determining Planet Parameters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 226 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/aae38e">https://doi.org/10.3847/1538-3881/aae38e</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Han C.他	4. 巻 867
2. 論文標題 OGLE-2017-BLG-0039: Microlensing Event with Light from a Lens Identified from Mass Measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae536">https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae536</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Li M C A, Rattenbury N J, Bond I A, Sumi T, Bennett D P, Koshimoto N, Abe F, Asakura Y, Barry R, Bhattacharya A, Donachie M, Evans P, Fukui A, Hirao Y, Itow Y, Masuda K, Matsubara Y, Muraki Y, Nagakane M, Ohnishi K, Saito To, Sharan A, Sullivan D J, Suzuki D, Tristram P J, Yonehara A	4. 巻 480
2. 論文標題 A study of the light travel time effect in short-period MOA eclipsing binaries via eclipse timing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4557 ~ 4577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/mnras/sty2104">https://doi.org/10.1093/mnras/sty2104</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Bachelet E.他	4. 巻 870
2. 論文標題 First Assessment of the Binary Lens OGLE-2015-BLG-0232	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaedb9">https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaedb9</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mr?z Przemek他	4. 巻 622
2. 論文標題 Two new free-floating or wide-orbit planets from microlensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A201 ~ A201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834557">https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834557</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chung Sun-Ju他	4. 巻 871
2. 論文標題 Spitzer Microlensing of MOA-2016-BLG-231L: A Counter-rotating Brown Dwarf Binary in the Galactic Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 179 ~ 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf861">https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf861</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Calchi Novati S.他	4. 巻 157
2. 論文標題 Spitzer Microlensing Parallax for OGLE-2016-BLG-1067: A Sub-Jupiter Orbiting an M Dwarf in the Disk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 121 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab0106">https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab0106</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shan Yutong他	4. 巻 873
2. 論文標題 OGLE-2014-BLG-0962 and a Comparison of Galactic Model Priors to Microlensing Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0021">https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0021</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Rattenbury N. J., et, al.	4. 巻 466
2. 論文標題 Faint-source-star planetary microlensing: the discovery of the cold gas-giant planet OGLE-2014-BLG-0676Lb	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2710 ~ 2717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw3185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jung Y. K., et al.	4. 巻 841
2. 論文標題 OGLE-2016-BLG-1003: First Resolved Caustic-crossing Binary-source Event Discovered by Second-generation Microlensing Surveys	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 75 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa7057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirao Y., et al.	4. 巻 154
2. 論文標題 OGLE-2013-BLG-1761Lb: A Massive Planet around an M/K Dwarf	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa73da	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Koshimoto N., et al.	4. 巻 154
2. 論文標題 MOA-2016-BLG-227Lb: A Massive Planet Characterized by Combining Light-curve Analysis and Keck AO Imaging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 3~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa72e0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nagakane M., et al.	4. 巻 154
2. 論文標題 MOA-2012-BLG-505Lb: A Super-Earth-mass Planet That Probably Resides in the Galactic Bulge	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 35~35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa74b2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Han C., et al.	4. 巻 843
2. 論文標題 OGLE-2016-BLG-1469L: Microlensing Binary Composed of Brown Dwarfs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 59~59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa740e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Poleski R., et al.	4. 巻 604
2. 論文標題 A companion on the planet/brown dwarf mass boundary on a wide orbit discovered by gravitational microlensing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A103~A103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730928	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bennett D. P., et al.	4. 巻 154
2. 論文標題 MOA Data Reveal a New Mass, Distance, and Relative Proper Motion for Planetary System OGLE-2015-BLG-0954L	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 68 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa7aee	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Tianshu, et al.	4. 巻 845
2. 論文標題 Ground-based Parallax Confirmed by Spitzer: Binary Microlensing Event MOA-2015-BLG-020	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 129 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa813b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bond I. A., et al.	4. 巻 469
2. 論文標題 The lowest mass ratio planetary microlens: OGLE 2016?BLG?1195Lb	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2434 ~ 2440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bensby T., et al.	4. 巻 605
2. 論文標題 Chemical evolution of the Galactic bulge as traced by microlensed dwarf and subgiant stars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A89 ~ A89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730560	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li M. C. A., et al.	4. 巻 470
2. 論文標題 The first eclipsing binary catalogue from the MOA-II data base	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 539 ~ 550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Han C., et al.	4. 巻 154
2. 論文標題 OGLE-2016-BLG-0263Lb: Microlensing Detection of a Very Low-mass Binary Companion through a Repeating Event Channel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 133 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa859a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Abbott B. P., et al.	4. 巻 848
2. 論文標題 Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L12 ~ L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa91c9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mr?z Przemek, et al.	4. 巻 154
2. 論文標題 OGLE-2013-BLG-0132Lb and OGLE-2013-BLG-1721Lb: Two Saturn-mass Planets Discovered around M-dwarfs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 205 ~ 205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa8f98	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Pasachoff Jay M., Babcock Bryce A., Durst Rebecca F., Seeger Christina H., Levine Stephen E., Bosh Amanda S., Person Michael J., Sickafosse Amanda A., Zuluaga Carlos A., Kosiarek Molly R., Abe Fumio, Nagakane Masayuki, Suzuki Daisuke, Tristram Paul J., Arredondo Anicia	4. 巻 296
2. 論文標題 Pluto occultation on 2015 June 29 UTC with central flash and atmospheric spikes just before the New Horizons flyby	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 305 ~ 314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.05.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Utsumi Yousuke, et al.	4. 巻 69, id.101
2. 論文標題 J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Masaomi, et al.	4. 巻 69, id 102
2. 論文標題 Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ryu Y.-H., et al.	4. 巻 155
2. 論文標題 OGLE-2016-BLG-1190Lb: The First Spitzer Bulge Planet Lies Near the Planet/Brown-dwarf Boundary	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa9be4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Finzell Thomas, et al.	4. 巻 852
2. 論文標題 A Detailed Observational Analysis of V1324 Sco, the Most Gamma-Ray-luminous Classical Nova to Date	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa12a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Udalski A., et al.	4. 巻 853
2. 論文標題 OGLE-2014-BLG-0289: Precise Characterization of a Quintuple-peak Gravitational Microlensing Event	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 70 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bennett D. P., et al.	4. 巻 155
2. 論文標題 The First Planetary Microlensing Event with Two Microlensed Source Stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 141 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aaadfa	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tominaga Nozomu, et al.	4. 巻 70, id 28
2. 論文標題 Subaru Hyper Suprime-Cam Survey for an optical counterpart of GW170817 †	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy007	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shvartzvald, Y.他	4. 巻 457
2. 論文標題 The frequency of snowline-region planets from four years of OGLE-MOA-Wise second-generation microlensing	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4089-4113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bealieu, J.-P.他	4. 巻 824
2. 論文標題 Revisiting the Microlensing Event OGLE 2012-BLG-0026: A Solar Mass Star with Two Cold Giant Planets	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.83, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/824/2/83	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirao, Y.他	4. 巻 824
2. 論文標題 OGLE-2012-BLG-0724Lb: A Saturn-mass Planet around an M Dwarf	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.139, 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/824/2/139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sumi, T.他	4. 巻 825
2. 論文標題 The First Neptune Analog or Super-Earth with a Neptune-like Orbit: MOA-2013-BLG-605Lb	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.112, 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/825/2/112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Abbot, B. P.他	4. 巻 826
2. 論文標題 Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 id.L13, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/826/1/L13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Abbot, B. P.他	4. 巻 225
2. 論文標題 Supplement: "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914" (2016, ApJL, 826, L13)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 id.8, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0067-0049/225/1/8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morokuma, T.他	4. 巻 68
2. 論文標題 J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.L9, 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Bennett, D. P.他	4. 巻 152
2. 論文標題 The First Circumbinary Planet Found by Microlensing: OGLE-2007-BLG-349L(AB)c	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id.125, 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-6256/152/5/125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bhattacharya, A.他	4. 巻 152
2. 論文標題 Discovery of a Gas Giant Planet in Microlensing Event OGLE-2014-BLG-1760	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 140, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-6256/152/5/140	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shvartzvald, Y.他	4. 巻 831
2. 論文標題 The First Simultaneous Microlensing Observations by Two Space Telescopes: Spitzer and Swift Reveal a Brown Dwarf in Event OGLE-2015-BLG-1319	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 183, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/831/2/183	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki, D.他	4. 巻 833
2. 論文標題 The Exoplanet Mass-ratio Function from the MOA-II Survey: Discovery of a Break and Likely Peak at a Neptune Mass	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 145, 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/833/2/145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Henderson, Calen B.他	4. 巻 124401
2. 論文標題 Campaign 9 of the K2 Mission: Observational Parameters, Scientific Drivers, and Community Involvement for a Simultaneous Space- and Ground-based Microlensing Survey	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Pacific	6. 最初と最後の頁 id.124401, 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1538-3873/128/970/124401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Koshimoto, N.他	4. 巻 153
2. 論文標題 OGLE-2012-BLG-0950Lb: The First Planet Mass Measurement from Only Microlens Parallax and Lens Flux	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 1, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/153/1/1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida, M.他	4. 巻 69
2. 論文標題 J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226*	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.9 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jung, Y. K.他	4. 巻 153
2. 論文標題 Binary Source Microlensing Event OGLE-2016-BLG-0733: Interpretation of a Long-term Asymmetric Perturbation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 129, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa5d07	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 宗像恒
2. 発表標題 MOA 望遠鏡を用いた大質量ブラックホールの探索
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部文雄
2. 発表標題 Follow-up observations of GW events and search for black holes by MOA
3. 学会等名 The Second Annual Area Symposium of innovative area Gravitational wave physics and astronomy: nenesis (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井悠平
2. 発表標題 Follow up observations with B&C telescope
3. 学会等名 The Second Annual Area Symposium of innovative area Gravitational wave physics and astronomy: nenesis (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部文雄
2. 発表標題 Massive black hole search by MOA
3. 学会等名 23rd International Microlensing Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumio Abe
2. 発表標題 Gravitational wave followup by the MOA collaboration
3. 学会等名 Microlensing 22 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ian Bond
2. 発表標題 Update on the MOA project
3. 学会等名 Microlensing 22 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Man Cheung Alex Li
2. 発表標題 Using the MOA database and the eclipse time variation 27 Jan method
3. 学会等名 Microlensing 22 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Suzuki
2. 発表標題 Planet formation theory
3. 学会等名 Microlensing 22 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 越本直季
2. 発表標題 重力マイクロレンズ天体の星像内のコンタミの確率のベイズ推定法の確立
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永金昌幸
2. 発表標題 MOA-2015-BLG-404 : 低質量星周りの巨大ガス惑星
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎翔太
2. 発表標題 巨大ガス惑星に付随するスーパーネプチューンの衛星系、または褐色矮星連 星: MOA-2015-BLG-337
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大介
2. 発表標題 重力マイクロレンズ観測結果と惑星形成モデルとの比較
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木大介
2. 発表標題 低増光率マイクロレンズイベントにおける複数惑星系の初検出 : OGLE-2014- BLG-1722
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部文雄
2. 発表標題 MOA グループによる重力波天体 GW170817/AT2017gfo の観測
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝倉悠一郎, MOA共同研究, J-GEM共同研究
2. 発表標題 LIGO O2におけるMOA望遠鏡を用いた重力波天体の探索
3. 学会等名 日本天文学会 2 0 1 7 年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 朝倉悠一郎, MOA共同研究, J-GEM共同研究
2. 発表標題 MOA望遠鏡を使った重力波フォローアップシステムの開発及び運用
3. 学会等名 日本天文学会 2 0 1 6 年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Abe, Fumio, MOA Collaboration
2. 発表標題 Follow-up observations by MOA in LIGO 01 and prospect for 02
3. 学会等名 Symposium on "New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources" (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuichiro, Asakura, MOA Collaboration
2. 発表標題 EM follow-up observation with MOA telescope
3. 学会等名 Symposium on "New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources" (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 阿部 文雄	4. 発行年 2017年
2. 出版社 日本天文学会	5. 総ページ数 7
3. 書名 天文月報第110号第3巻227ページ「重力レンズとアマチュア」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Microlensing Observations in Astrophysics  <a href="http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/">http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/</a>          Microlensing Observations in Astrophysics  <a href="http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/">http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/</a>          MOA, Microlensing Observations in Astrophysics  <a href="http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/">http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/</a></p>
--

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
研究分担者	米原 厚憲  (Yonehara Atsunori)  (10454472)	京都産業大学・理学部・教授    (34304)	

## 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
研究 分 担 者	松原 豊  (Matsubara Yutaka)  (80202323)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授     (13901)	