

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540339

研究課題名(和文) マイクロ重力レンズ効果を利用した暗黒天体の探索

研究課題名(英文) Search for dark stars and planets by the gravitational microlensing method

研究代表者

村木 綏 (Muraki, Yasushi)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・名誉教授

研究者番号：70013430

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本報告書は、2004年12月1日NZ南島テカポに科研費で設置された口径1.8mの光学望遠鏡(MOA)を使用して得た成果を述べたものである。口径1.8mの望遠鏡の限界等は22.8等星、設置されたCCDカメラは一度に2.2平方度の広視野を測光できる性能を有している。重力マイクロレンズ検出用望遠鏡としては世界で最も優れたシステムである。本システムを使用して銀河中心部を高頻度観測した結果、1.8m望遠鏡の完成時点では1例しか無かった重力レンズ法による太陽系外惑星数が53例に増大した。主星から離れ水が氷結する領域(snow-line)での惑星成長に係わる極めて重要な情報が得られた。

研究成果の概要(英文)： The Japan-NZ astronomy collaboration known as MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) installed a 1.8m telescope at Mt John in 2005. Since that time more than 500 microlensing events have been found each year towards the galactic bulge.

This resulted in the discovery of 53 extra-solar planets orbiting stars in the galactic disc and the galactic bulge. These planets were found just beyond the snowlines of their host stars. This is the region of maximum sensitivity of the microlensing technique, and it also the region where ice-giant and gas-giant planets form according to the core accretion theory. The data on these planets complements data being obtained on closer-in planets by the radial velocity and transit techniques. In addition to the above discoveries, a new class of extra-solar planets was discovered by MOA. These planets are not bound to stars. They have masses similar to that of Jupiter, and they are approximately as abundant as stars in the galaxy.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：宇宙物理学

キーワード：太陽系外惑星 重力レンズ効果 ダークマター 褐色矮星 暗黒天体 MOA スーパーアース

1. 研究開始当初の背景

重力レンズ効果を天文学で応用するアイデアはそう古い話ではない。1934 年にアインシュタイン自身がこの可能性を検討し、この効果が観測できるのは非常に稀であると言っている。しかし事実上不可能と思われたことを可能にさせたのは、近年の CCD 素子技術と計算機性能の飛躍的進歩であると言えよう。大量の星を測光しそのデータをいち早く解析することが可能になったからだ。

アインシュタインの方法を再検討し復活させたのはポーランド出身でプリンストン大学の教授であったパチンスキー氏である(1986 年のこと)。彼は暗黒天体自身の有する重力場が作り出す空間の歪み、すなわち重量レンズを利用して後方天体の光の増光を検出することを提案した。観測者と光源星の間に暗黒天体が存在すれば光源星の光が暗黒天体の重力レンズのため増光するのでその存在が検出できるはずだと予想した。1990 年から始まった MACHO グループは、この方法で銀河のダークマターの 20-40% が、暗黒天体で構成されていると結論を出した。

しかし 1997 年頃、マゼラン雲の中にある暗黒天体がレンズ天体となり、マゼラン雲の中の後方の星の光を増光しているのではないかという問題提起がなされた。もしこれが本当なら暗黒天体のダークマターに占める割合は少ないことになる。これを自己重力レンズ効果と称し、まだ決着がついていない。(詳細は J. Granz, Science 281(1998) 332 に詳しい)

論争の原因は、重力レンズ効果で増光した光度曲線にレンズ天体までの距離と質量と移動速度が縮退しており各々が独立に分離できないからである。しかし二重星がレンズ天体となった binary lens の光度曲線に有限ソース効果と年周視差が検出できれば、この縮退を解くことが可能である。そこで NZ に設置された MOA 望遠鏡の優れた性能を発揮し、二重レンズ天体により増光したマゼラン雲の星の重力レンズ効果をより多く捕らえ、この問題に解答を与えることが提案された。

一方 1997 年頃より、重力レンズ効果を利用して太陽系外惑星を検出する方法に学会の関心が移行した。これはマゼラン雲を連続

観測しても重力レンズ効果で増光した星の数が年間一桁台と少なく、なかなか観測的には自己重力レンズ論争に決着がつかないことがその一因であった。その後の太陽系外惑星を検出するというコミュニティの大方針は成功したといえる。

研究の転機となったのは、本 1.8m 望遠鏡による観測が本格的にスタートした 2007 年に太陽系と酷似したシステムが、我々 MOA を含む国際共同観測で発見されたことである。この発見は我々太陽系が宇宙の中で珍しい存在ではないということを示唆した。詳細は以下の Science 論文にまとめられている。(B.S. Gaudi et al, Science, 319 (2008) 1927p)。

我々の銀河の中に、生命を宿す可能性のある惑星が存在するか否か、これは自然科学の大きな研究テーマである。1995 年ジュネーブ大学の Mayor 教授らによって初の系外惑星が発見されて以来、2013 年度末までに 960 例も系外惑星は見つかった。しかしながら 960 例の系外惑星には 2 つの大きな特徴がある。第一の特徴は、主星から遠方にある惑星の質量が木星のように大型惑星であること。第二の特徴は、地球の 10 倍程度の質量を有した系外惑星は主星のごく近傍を回転していることである。後者はホット・スーパー・アースと呼ばれている。これらの分布を、我々太陽系の惑星分布と比較すると、かなり異なっており我々の太陽系の惑星分布が珍しいことになる。

しかしながら、東工大の井田氏や国立天文台の小久保氏らの惑星形成シミュレーションによると、木星のような大型ガス惑星からなる惑星系もできるし、地球のような小型岩石惑星ばかりからなる惑星系も存在することが予想される。また我々の太陽系のような大型や小型の惑星が混在する惑星系もあろう。惑星の質量分布は、原始惑星系の分子雲の質量によると予想されている。

このような背景で我々は 2005 年から 2014 年まで、現地 NZ が冬季には系外惑星を見つけるために銀河中心部の観測を中心に実施し、夏季には銀河系外の惑星の発見を目指してマゼラン星雲の徹底的な survey 観測を実施した。

2. 研究の目的

研究の目的は大きく言って2つある。すなわち(1)太陽系外惑星の研究と(2)暗黒天体の検出による宇宙ダークマターの解明である。(1)の研究テーマに関しては主星から遠く離れた系外惑星をバイアス無しに検出できることが本方法の大きな特徴である。欠点は見つかる惑星の数が少ないことである。一方 Kepler 衛星による Transit 法観測では、見つかる惑星数は多いが主星のごく近くを周遊する惑星に検出効率が高く、主星から離れた惑星は検出が困難になる。一方 Doppler 法による地上からの観測では木星のような重い惑星の検出は容易であるが軽い惑星の検出は困難である。両者の観測法にはこのような検出効率のバイアスが伴っており、我々太陽系のような構成を有する惑星系の発見が困難であった。しかし今後は Doppler 法や Transit 法と重力レンズ法は相補的な役割を惑星科学に対して果たすだろう。

また(2)の研究目的に関しては、ダークマターの主な構成要素は星ではないという見解が学会では主流を占めている。しかしながら観測的にはまだ確定したわけではない。今までの重力レンズ効果による survey 観測では太陽質量の10倍から100万分の1倍の星がダークマターを構成する可能性はほぼ無いと考えられているが、太陽質量の100万分の1以下の小型天体が大量に銀河にある場合と、10倍以上のブラックホールのような重い天体がダークマターを構成している可能性はまだ観測からは排除されていない。またワームホールが存在する可能もある。これらの可能性を押さえていくのがもう一つの研究目的である。

3. 研究の方法

NZ が冬期の5月~9月は、銀河中心を主に観測し、太陽系外惑星システムの検出を目指した。5月には銀河中心部が天頂近くに来る前にマゼラン雲を観測し、9月には銀河中心部が沈んだ後にマゼラン雲を観測した。

NZ マウントジョン天文台は南緯45度に位置しているので、マゼラン雲の観測が一年中可能となる。同じ南半球でも南米チリでは、冬期はマゼラン雲が地平線すれすれを通過するため観測不能となる。またマゼラン雲の星は銀河中心部の星と比較すると遠いので暗く、一領域の観測に300秒の測光時間を必要とする。

具体的には大マゼラン雲の15領域の2.2平方度と、小マゼラン雲の2領域の2.2平方度を毎晩測光した。冬期NZでは14時間にわ

たり長時間連続観測が可能である。

銀河中心部は23領域の2.2平方度の観測を実施した。23領域中、特に星が密集する3,4,5,9,14領域は5分に一回の間隔でデータをとった。その他の領域は50~90分に一回撮像した。銀河中心部は明るいので露光時間は一領域60秒ですむ。3,4,5,9,14領域以外は一晩で十回観測した。

2005年から始まった観測の結果、増光期間1日以下の短い時間で増光した重力レンズ効果を198例見つけた。これは我々が科研費の申請の際、予測したとおりであった。この短時間増光イベントは褐色矮星や浮遊惑星に対応しており非常に重要である。成果は定量的評価を終え Nature 論文として発表された(T. Sumi et al. Nature 473 (2011) 349)。このような短時間増光イベントを検出できるのは2011年度は世界でMOAのみであった。

ここで光度曲線の縮退問題について説明する。望遠鏡で観測できるのは重力レンズ効果による光源星の増光時間(t_E)のみである。この t_E には三つの量が縮退している。すなわちレンズ天体の速度(v)、レンズ天体の質量(M)、レンズ天体と光源星の距離の比(x)である。この縮退を解くためには有限ソース効果と年周視差(parallax)を用いる必要がある。有限ソース効果はbinary lens event のとき後方の星が火線(caustic)上を通過するとき検出できる。

銀河中心方向で観測された重力レンズ効果に対しては次の式が良い近似で成り立つ。

$$t_E \approx R_E/v \approx (5\text{AU}/v) * (M/M_\odot * 0.2) \\ \approx 170 \text{日} * 0.2(M/M_\odot)$$

ここで R_E はレンズ天体のアインシュタイン半径、 v として50km/s、 $x=0.5$ を採用する。そしてこの式の M に、太陽、木星、海王星、地球、25太陽質量を有するブラックホールの質量をそれぞれ代入すると、増光時間はレンズ天体が太陽程度の質量で77日、木星5.3日、海王星1.2日、地球0.3日、ブラックホール1年となる。この式から地球型系外惑星を見いだすためには一日に数回の観測が必要であることがわかる。従って大面積 CCD カメラで一度に沢山の星を繰り返し測光する必要がある。これが可能なのは2011年度は世界でMOAのみであった。

一方長時間の観測データベースを利用すると、ブラックホールが見つかる。これにより今まで電波やX線、連星運動の観測でしか得られなかったブラックホールが重力レンズで見つかる可能性が高い。本観測により、系外惑星・浮遊惑星から、褐色矮星、ブラックホールまでの星の初期質量関数(Initial Mass Function)が求まることが期待される。

3. 研究成果

日本とニュージーランドの国際共同研究 (MOA) が科研費により推進された。重力レンズ効果を用いた研究のために日本の科学研究特別推進費を使って2005年に1.8m望遠鏡がNZ南島テカポに作られた。この望遠鏡を、2006年から科研費によりフル稼働させ、銀河中心方向と大・小マゼラン星雲の本格的なsurvey観測を実施した。

その結果トランジット法で発見できなかった主星から遠く離れたところに存在する系外惑星を53個見つけた。トランジット法による観測結果によると、太陽系外惑星の分布は主星のごく近くを回る“灼熱の惑星”(hot super earth)が大半を占め、地球のように生命が存在できる環境(生命圏: habitable zone)に置かれた系外惑星系は稀である。

しかしながら今回の重力レンズ法による観測で、主星から遠く離れたところに存在する冷たい海王星のような小型惑星を伴った惑星系が多数存在することが明らかになった。

また惑星系から放出された孤立惑星も非常に多数存在することがわかった。この発見は重い原始惑星系円盤における惑星形成過程を推定するのに初めて有益な情報を与えた。

これらの発見はDoppler法やTransit法では得られなかったものである。Doppler法やTransit法で960個近くの惑星が発見されているが、これらの観測結果には検出バイアスが伴っていることがはっきりした。系外惑星形成論の発展のためにはバイアス・フリーな重力レンズ法による観測が国際学会から大きく期待される所以である。

ここでもう一つの研究テーマ-ダークマターに関する解析結果を報告しておく。2007年2月から2010年11月までの観測で検出された2,135個の重力レンズ効果イベント中に142例の連星による重力レンズ効果イベントが含まれていた。この例を詳細に解析した結果、連星の平均質量比(q)が 0.35 ± 0.03 であった。これは光学的手法で得られた観測結果と一致している。そして $q=0.03 \pm 0.01$ の領域に褐色矮星砂漠の存在が明らかになった。重力レンズ法を使って初めて bias free な観測に成功した。

また望遠鏡を大マゼラン雲方向に向けて重力レンズ効果を利用して銀河のハロー中の暗天体の存在量を調べた。その結果、暗

天体の存在量は今まで言われてきた値より一桁少ないことがわかった。2011年から2013年には連星による重力レンズ効果の例が2倍に集積されたので、この大量の data を解析して、精度の良く褐色矮星がダークマターに占める割合が導出できると思われる。

なお MOA グループは、2011 年度査読付き論文 9 編、2012 年度は査読付き論文 11 編、2013 年度、査読付き論文 14 編、3 年間で査読付き論文を計 29 篇公表した。うち一遍は孤立惑星発見に係る Nature 論文を含んでいる。また3年間で、国際会議で7回、日本物理学会および天文学会で21回発表した。

以上のように、本科研費を利用した MOA の銀河中心部と大・小マゼラン星雲の集中観測は天文学及び宇宙物理学の分野に多大な貢献をした。

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29件)

- (1) MOA-2011-BLG-262Lb: A Sub-Earth-Mass Moon Orbiting a Gas Giant Primary or a High Velocity Planetary System in the Galactic Bulge, D. P. Bennett...F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2014 ApJ **785** 155-168. doi:10.1088/0004-637X/785/2 査読有
- (2) A Super-Jupiter Orbiting a Late-type Star: A Refined Analysis of Microlensing Event OGLE-2012-BLG-0406 Y. Tsapras..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2014 ApJ **782** 48-57. 査読有 doi:10.1088/0004-637X/782/1/4
- (3) MOA-2011-BLG-322Lb: a 'second generation survey' microlensing planet Y. Shvartzvald..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2014 MNRAS **439** 604-610. doi:10.1093/mnras/stt2477 査読有
- (4) MOA-2008-BLG-379Lb: A Massive Planet from a High Magnification Event with a Faint Source D. Suzuki..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2014 ApJ **780** 123-132. 査読有 doi:10.1088/0004-637X/780/2/123
- (5) MOA-2010-BLG-328Lb: A Sub-Neptune Orbiting very Late M Dwarf? K. Furusawa..F. Abe, Y. Muraki,

- T. Sumi... et al. 2013 ApJ **779** 91-103. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/779/2/91
- (6) Microlensing Discovery of a Tight, Low-mass-ratio Planetary-mass Object around an Old Field Brown Dwarf
C. Han..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2013 ApJ **778** 38-44. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/778/1/38
- (7) Interpretation of a Short-term Anomaly in the Gravitational Microlensing Event MOA-2012-BLG-486
K.-H. Hwang..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2013 ApJ **778** 55-61. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/778/1/55
- (8) The Microlensing Event Rate and Optical Depth toward the Galactic Bulge from MOA-II
T. Sumi..F. Abe, Y. Muraki... et al. 2013 ApJ **778** 150-165. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/778/2/150
- (9) MOA-2010-BLG-311:A Planetary Candidate below the Threshold of Reliable Detection
J.C. Yee..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. ApJ **769** 77-90. [査読有](#)
Doi:10.1088/0004-637X/769/1/77
- (10) Microlensing Discovery of a Population of Very Tight, Very Low Mass Binary Brown Dwarfs
J.-Y. Choi..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2013 ApJ **768** 129-136. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/768/2/129
- (11) USING ORBITAL EFFECTS TO BREAK THE CLOSE/WIDE DEGENERACY IN BINARY-LENS MICROLENSING EVENTS
I.-G. Shin...F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2013 ApJ **764** 64-70. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/764/1/64
- (12) MOA-2010-BLG-073L: AN M-DWARF WITH A SUBSTELLAR COMPANION AT THE PLANET/BROWN DWARF BOUNDARY
R. A. Street...F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2013 ApJ **763** 67-80. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/763/1/67
- (13) Extending the planetary mass function to Earth mass by microlensing at moderately high magnification
F.Abe et al. 2013 MNRAS **431** 2975-2985. [査読有](#) doi:10.1093/mnras/stt318
- (14) A giant planet beyond the snow line in microlensing event OGLE-2011-BLG-0251
N. Kains..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2013 A&A **552** A70-80. [査読有](#)
doi:10.1051/0004-6361/201220626
- (15) MICROLENSING BINARIES WITH CANDIDATE BROWN DWARF COMPANIONS
I.-G. Shin..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2012 ApJ **760** 116-126. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/760/2/116
- (16) PLANETARY AND OTHER SHORT BINARY MICROLENSING EVENTS FROM THE MOA SHORT-EVENT ANALYSIS
D. P. Bennett..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2012ApJ **757** 119-136. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/757/2/119
- (17) A NEW TYPE OF AMBIGUITY IN THE PLANET AND BINARY INTERPRETATIONS OF CENTRAL PERTURBATIONS OF HIGH MAGNIFICATION GRAVITATIONAL MICROLENSING EVENTS
J.-Y. Choi..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2012 ApJ **756** 48-57. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/756/1/48
- (18) MOA-2011-BLG-293Lb: A TEST OF PURE SURVEY MICROLENSING PLANET DETECTIONS
J. C. Yee..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2012 ApJ **755** 102-116. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/755/2/102
- (19) Characterizing low-mass binaries from observations of long-timescale caustic-crossing gravitational microlensing events
I.-G. Shin..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2012 ApJ **755** 91-101. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/755/2/91
- (20) MOA-2010-BLG-471Lb: Constraining the mass of a microlensing planet from microlensing parallax, orbital motion and detection of blended light
E. Bachelet..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2012 ApJ **754** 73-90. [査読有](#)
doi:10.1088/0004-637X/754/1/73
- (21) A POSSIBLE BINARY SYSTEM OF A STELLAR REMNANT IN THE HIGH-MAGNIFICATION GRAVITATIONAL MICROLENSING EVENT OGLE-2007-BLG-514
N. Miyake..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi...

- et al. 2012 ApJ. **752** 82-94. 査読有
doi:10.1088/0004-637X/752/2/82
- (22) CHARACTERIZING LENSES AND LENSED STARS OF HIGH-MAGNIFICATION SINGLE-LENS GRAVITATIONAL MICROLENSING EVENTS WITH LENSES PASSING OVER SOURCE STARS
J.-Y. Choi..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi...
et al. 2012 ApJ **751** 41-55. 査読有
doi:10.1088/0004-637X/751/1/41
- (23) Microlensing binaries discovered through high-magnification channel
I.-G. Shin..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi...
et al. 2012 ApJ **746** 127-140. 査読有
doi:10.1088/0004-637X/746/2/127
- (24) DISCOVERY AND MASS MEASUREMENTS OF A COLD, 10 EARTH MASS PLANET AND ITS HOST STAR
Y. Muraki..F. Abe, T. Sumi...et al. 2011 ApJ **741** 22-37. 査読有
doi:10.1088/0004-637X/741/1/22
- (25) BINARY MICROLENSING EVENT OGLE-2009-BLG-020 GIVES VERIFIABLE MASS, DISTANCE, AND ORBIT PREDICTIONS
J. Skowron..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi...
et al. 2011 ApJ **738** 87-98. 査読有
doi:10.1088/0004-637X/738/1/87
- (26) A sub-Saturn mass planet, MOA-2009-BLG-319Lb
N. Miyake..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi...
et al. 2011 ApJ **728** 120-130. 査読有
doi:10.1088/0004-637X/728/120
- (27)
OGLE-2009-BLG-023/MOA-2009-BLG-028: Characterization of a binary microlensing event based on survey data
K.-H. Hwang..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi... et al. 2011 MNRAS **413** 1244-1250.
査読有
doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18206.x
- (28) Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing
T. Sumi..F. Abe, Y. Muraki...et al. 2011 Nature **473** 349-352. 査読有
doi: 10.1038/nature10092

- (29) MOA-2009-BLG-387Lb: A massive planet orbiting an M dwarf
V. Batista..F. Abe, Y. Muraki, T. Sumi...
et al. 2011 A&A **529** A102-118. 査読有
doi: 10.1051/0004-6361/201016111

[学会発表](計 28 件)

[その他]

ホームページ等

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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

村木 綏 (MURAKI YASUSHI)

研究者番号 : 70013430

(2)研究分担者

(3)連携研究者

阿部 文雄 (ABE FUMIO)

研究者番号 : 80184224

住 貴宏 (SUMI TAKAHIRO)

研究者番号 : 30432214