

機関番号：34506

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19340058

研究課題名 (和文) マイクロ重力レンズ効果を利用した暗天体と太陽系外小型惑星の探索

研究課題名 (英文) Search for Extra-solar Planet and Dark Stars by Gravitational Microlensing

研究代表者

村木 綏 (MURAKI YASUSHI)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：70013430

研究成果の概要 (和文)：

天文学では自ら光を放出しない天体は太陽系惑星を除き検出が不可能であった。一般相対性理論によれば、質量を有する天体の周辺を通過する光線は直進せず曲がる。光線の屈曲は、空間がレンズの役割を果たすことに対応する。この空間の“重力レンズ”を利用して暗黒天体(暗天体)を検出する観測法が1986年にパチンスキーにより提案された。彼の提案の骨子は、遠方の天体を大量に観測しその星の中から“重力レンズ”で増光する天体を探し出し、その星の手前にある暗黒天体を検出する方法である。彼の提案を受けて重力レンズを用いて暗天体を検出する試みが1990年ころから開始された。

日本とニュージーランドの共同研究グループMOAは、重力レンズ効果の研究に特化して日本の科学研究特別推進費でNZに作られた1.8m望遠鏡を駆使して、本科研費を利用して、2006年度から銀河中心方向と大・小マゼラン星雲の本格的なsurvey観測を実施してきた。その結果ドップラー法で発見できなかったような、主星から遠く離れたところに存在する系外惑星を16個見つけた。ドップラー法による観測結果は、太陽系外の惑星分布が主星のごく近くを回る灼熱の木星が大半を占め、我々の太陽系のような惑星分布をした惑星系は稀であることを語っている。しかしながら今回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かなり存在していることがわかってきた。これはこれまでの観測結果を覆す結果である。しかしながら重力レンズ法による観測法では、見つかる系外惑星の数が年間2～4個と限られており、さらなる大量測光観測が必要であることも確かである。

なお甲南大学のグループは、1999年から2005年に大マゼラン雲の観測で得られたMOA I データのデータベースを完成させ、その中にミラ型変光星を9,000個、セファイド型変光星を13,000個見つけた。これらの結果の物理は学会や論文で順次発表する予定である。またMOA グループはNature やScience誌に、それぞれ重要発見を現在投稿中である。2008年度は査読付き論文3編、2009年度は査読付き論文6編、2010年度は11編、4年間で査読付き論文を20篇公表した。また4年間で、国際会議で15回、日本物理学会および天文学会で26回発表した。

研究成果の概要 (英文)：

The Japan-NZ astronomy collaboration known as MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) was formed in 1995 with the aim of searching for a component of dark matter in the form of MACHOs (Massive Compact Halo Objects) and also for extra-solar planets using the gravitational microlensing technique. This technique uses the gravitational fields of stars and other massive objects to effectively form large lenses in space as predicted by general relativity. The

feasibility of the microlensing technique was pointed out by Bohdan Paczynski in 1986. He proposed monitoring as many stars as possible in the Magellanic Clouds and the galactic bulge to find gravitational lenses in the galactic halo or the galactic disc.

The MOA collaboration commenced observations in 1995 using a 0.6m telescope at the Mt John observatory in NZ. In 2005 a 1.8m telescope was installed at Mt John by Japan. Since that time more than 500 microlensing events have been found each year towards the galactic bulge. Also, events have been found towards the Magellanic Clouds.

The events found by MOA were made publicly available via the world wide web to enable other observatories to monitor selected events, in particular those with high magnifications. This resulted in the discovery of 16 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.

Finally, the Konan University group of MOA completed the analysis of observations made between 1999 and 2005 towards the Large Magellanic Cloud with the 0.6m telescope at Mt John. Approximately 9,000 Miras and 13,000 Cepheid variable stars were found. Those results will be presented in elsewhere.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：重力レンズ効果、ダークマター、太陽系外惑星、暗黒天体、暗天体、変光星

## 1. 研究開始当初の背景

最初の研究目的は、暗黒天体（暗天体）がダークマターの主成分か否かを明らかにすることであった。我々の銀河系にダークマターが付随していることは、銀河の回転曲線から広く認められている。しかしその成分が、星の燃焼した後の中性子星やブラックホールか、核燃焼が進まなかった褐色矮星か、未知の素粒子が広く銀河に分布しているのか不明であった。前述の成分はマッコ (MACHOs) または暗黒天体 (dim stars) と呼ばれ、素粒子の成分は WIMPs と呼ばれている。

しかしながら暗黒天体は自ら光を放出しないため光学観測で検出することは困難であった。1986年パチンスキーにより暗黒天体を検出する方法が提案された。それは暗黒天体自身の有する重力場が作り出す空間の歪み、すなわち重力レンズを利用する方法であった。1990年から始まった MACHO グループは、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した。

しかし1997年頃から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問題が提起された。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いるからである。しかし二重星がレンズ天体となった binary lens による光度曲線を用いれば、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動した。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一桁台と少なく、なかなか観測的には決着がつかないことも一因であった。その後の太陽系外惑星を検出する試みは成功したといえる。

研究の転機となったのは、本科研費がスタ

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ろう。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...Muraki.. 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、今までに 490 例が見つかった。しかしながら 490 例の系外惑星は 2 つの大きな特徴がある。第一の特徴は、ほとんどの惑星の質量が木星のように大型ガス惑星である。第二の特徴は、多くの系外惑星が主星のごく近傍を回転していることである。これらの分布を、我々太陽系の惑星分布と比較すると、我々の太陽系の惑星分布は非常に珍しいことになる。

しかしながら、東工大井田氏らのシミュレーションによる惑星形成理論によると、木星のような大型ガス惑星からなる惑星系もあるし、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していることが予想された。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りうる惑星系の質量分布は、原始太陽系の分子雲の質量による。

このような背景で我々は、2006年から現地在冬季には銀河中心部の観測を中心に実施し、夏季にはマゼラン星雲の徹底的な survey 観測を実施することにした。

## 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が、欠点もある。それは見つかる惑星の数が少ないことである。一方 Kepler 衛星や地上からの Doppler 法による方法では、見つかる惑星数は多いが、惑星の検出効率が主星のごく近くを周遊する大型惑星に高く、主星から離れた惑星はその検出が困難である。このような検出効率のバイアスがあり、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。Doppler 法と重力レンズ法は、今後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  $10^{(-7)}\sim 10$  倍の星や褐色矮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、1000 万分の一以下の小型天体(ほぼ火星ないし水星の質量に対応)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。この可能性を探る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。

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った。

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秒で済む。3,4,5,9,14領域以外は一晚で十回観測した。

今までの観測の結果、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50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り、現在名古屋大学グループが定量的評価を終えNature論文として投稿している。このような短時間増光イベントを検出できるのはMOAのみである。

ここで光度曲線の縮退問題について説明する必要がある。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)上を通過するとき現れる。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。

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

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になることがわかる。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MOAのみである。

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。また大マゼラン雲のデータベースを確立することを試みた。

### 4. 研究成果

日本とニュージーランドの国際共同研究(MOA)が、本科研費を使って推進された。重力レンズ効果の研究に特化して日本の科学研究特別推進費でNZに作られた1.8m望遠鏡を駆使して、本科研費を利用して、2006年度から銀河中心方向と大・小マゼラン星雲の本格的なsurvey観測を実施した。

その結果ドップラー法で発見できなかったような、主星から遠く離れたところに存在する系外惑星を16個見つけた。ドップラー法による観測結果は、太陽系外惑星の分布が主星のごく近くを回る灼熱の木星が大半を占め、

我々の太陽系のような惑星分布をした惑星系は稀であることを語っている。

しかしながら今回我々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かなり存在していることがわかった。これはこれまでの観測結果を覆す結果である。しかしながら重力レンズ法による観測法では、見つかる系外惑星の数が年間2~4個と限られており、今後のさらなる大量測光観測が必要であることも確かである。

なお甲南大学のグループは、1999年から2005年に大マゼラン雲の観測で得られたMOA Iデータのデータベースを完成させ、その中にミラ型変光星を9,000個、セファイド型変光星を13,000個見つけた。これらの結果の物理は学会や論文で順次発表する予定である。またMOAグループはNatureやScience誌に、それぞれ重要発見を現在投稿中である。2008年度は査読付き論文3編、2009年度は査読付き論文6編、2010年度は11編、4年間で査読付き論文系20篇公表した。また4年間で、国際会議で15回、日本物理学会および天文学会で26回発表した。

#### 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21件)

- ① Sumi, T., Muraki, Y., Sako, T. et al., Unbound or Distant Planetary Mass Population detected by Gravitational Lensing, *Nature*, Volume 473, pp 349-352, 2011. 査読有
- ② Skowron, J., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Binary microlensing event OGLE-2009-BLG-020 gives a verifiable mass, distance and orbit predictions, arXiv:1101.3312, 2011. ApJ, in pres. 査読有
- ③ Fukui, A., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Measurements of Transit Timing Variations for WASP-5b, *PASJ*, Volume 63, pp287-300 (2011). 査読有
- ④ Miyake, N., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., A sub-Saturn Mass Planet, MOA-2009-BLG-319Lb, *The Astrophysical Journal*, Volume 728, pp 120-130 (2011). 査読有
- ⑤ Sumi, T., Muraki, Y., Sako, T. et al., A Cold Neptune-Mass Planet OGLE-2007-BLG-368Lb: Cold Neptunes Are Common, *The Astrophysical Journal*, Volume 710, Issue 2, pp. 1641-1653 2010. 査読有
- ⑥ Janczak, J., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Sub-Saturn Planet MOA-2008-BLG-310Lb: Likely to be in the Galactic Bulge, *The Astrophysical Journal*, Volume 711, Issue 2, pp. 731-743 (2010). 査読有
- ⑦ Bennett, D. P., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Masses and Orbital Constraints for the OGLE 2006-BLG-109Lb, c Jupiter/Saturn Analog Planetary System, *The Astrophysical Journal*, Volume 713, Issue 2, pp. 837-855 (2010). 査読有
- ⑧ Fouqué, P., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., OGLE 2008-BLG-290: an accurate measurement of the limb darkening of a galactic bulge K Giant spatially resolved by microlensing, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 518, id. Article 51 (2010). 査読有
- ⑨ Hwang, K.-H., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Determining the Physical Lens Parameters of the Binary Gravitational Microlensing Event MOA-2009-BLG-016, *The Astrophysical Journal*, Volume 717, Issue 1, pp. 435-440 (2010). 査読有
- ⑩ Gould, A., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Frequency of Solar-like Systems and of Ice and Gas Giants Beyond the Snow Line from High-magnification Microlensing Events in 2005-2008, *The Astrophysical Journal*, Volume 720, Issue 2, pp. 1073-1089 (2010). 査読有
- ⑪ Ryu, Y.-H., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., OGLE-2009-BLG-092/MOA-2009-BLG-137: A Dramatic Repeating Event with the Second Perturbation Predicted by Real-time Analysis, *The Astrophysical Journal*, Volume 723, Issue 1, pp. 81-88 (2010). 査読有
- ⑫ Hwang, K.-H., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., OGLE-2005-BLG-153: Microlensing Discovery and Characterization of a Very Low Mass Binary, *The Astrophysical Journal*, Volume 723, Issue 1, pp. 797-802 (2010). 査読有
- ⑬ Dong, S., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., OGLE-2005-BLG-071Lb, the Most Massive M Dwarf Planetary Companion?, *The Astrophysical*

- Journal, Volume 695, Issue 2, pp. 970-987, 2009. 査読有
- ⑭ Dong, S., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Microlensing Event MOA-2007-BLG-400: Exhuming the Buried Signature of a Cool, Jovian-Mass Planet, The Astrophysical Journal, Volume 698, Issue 2, pp. 1826-1837, 2009. 査読有
- ⑮ Gould, A., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., The Extreme Microlensing Event OGLE-2007-BLG-224: Terrestrial Parallax Observation of a Thick-Disk Brown Dwarf, The Astrophysical Journal Letters, Volume 698, Issue 2, pp. L147-L151, 2009. 査読有
- ⑯ Yee, J. C., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Extreme Magnification Microlensing Event OGLE-2008-BLG-279: Strong Limits on Planetary Companions to the Lens Star, The Astrophysical Journal, Volume 703, Issue 2, pp. 2082-2090, 2009. 査読有
- ⑰ Han, C., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Interpretation of Strong Short-Term Central Perturbations in the Light Curves of Moderate Magnification Microlensing Events, The Astrophysical Journal, Volume 705, issue2, pp. 1116-1121 (2009). 査読有
- ⑱ Batista, V., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Mass measurement of a single unseen star and planetary detection efficiency for OGLE 2007-BLG-050, Astronomy and Astrophysics, Volume 508, Issue 1, pp. 467-478, (2009). 査読有
- ⑲ Bennett, D. P., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., A Low-Mass Planet with a Possible Sub-Stellar-Mass Host in Microlensing Event MOA-2007-BLG-192, The Astrophysical Journal, Volume 684, Issue 1, pp. 663-683, (2008). 査読有
- ⑳ Sako, T., Muraki, Y., Sumi, T., et al., MOA-cam3: a wide-field mosaic CCD camera for a gravitational microlensing survey in New Zealand, Experimental Astronomy, Volume 22, Issue 1-2, pp. 51-66, (2008). 査読有
- ㉑ Gaudi, B. S., Muraki, Y., Sumi, T., Sako, T. et al., Discovery of a Jupiter/Saturn Analog with Gravitational Microlensing, Science, Volume 319, pp. 927-932 (2008). 査読有

[学会発表] (計 44 件)

(国際会議での発表)

- ① Sumi, T., MOA-II microlensing survey, Manchester microlensing conference, Manchester, January 2008.
- ② Sumi, T., Planetary microlensing event OGLE 2007-BLG-368, 13<sup>th</sup> Microlensing workshop, Paris, January 2009.
- ③ Sumi, T., MOA II observation in 2009 season, 14<sup>th</sup> workshop on gravitational microlensing, Auckland, January 2010.

他 12 件

(国内学会での講演)

- ① 和田幸平、村木 綏、竹内 峯他MOAグループ  
MOA I 望遠鏡観測による LMC 領域の変光天体データベース  
2010 年秋季 物理学会 九州工業大学 (2010 年 9 月 12 日)
- ② 和田幸平、村木 綏、竹内 峯他MOAグループ  
MOA-I 望遠鏡による LMC 観測データの変光天体データ  
2010 年秋季 天文学会 金沢大学 (2010 年 9 月 22 日)

他 27 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)

甲南大学理工学部・教授

研究者番号：70013430

### (2) 研究分担者

住 貴宏 (SUMI TAKAHIRO)

名古屋大学太陽地球環境研究所・助教

研究者番号 30432214

裕 隆志 (SAKO TAKASHI)

名古屋大学太陽地球環境研究所・助教

研究者番号 90324368

### (3) 連携研究者

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