

系外惑星「遠い世界の物語」その 5 ～重力マイクロレンズ法を用いた氷境界外側の系外惑星探査～

鈴木 大介¹, 住 貴宏², MOAコラボレーション

(要旨) 重力マイクロレンズ法は、氷境界の数倍外側に位置する惑星を検出する事ができ、地球質量程度の惑星にまで感度がある。この手法によって30個以上の惑星が発見され、それらは他の観測手法では検出が難しい惑星である。また、重力マイクロレンズ法でのみ検出可能な浮遊惑星も検出され、それらの数量まで見積もられている。日本、ニュージーランドが主体の国際共同研究グループ、MOAはこれまでの惑星検出に多くの貢献をしてきた。本稿では、重力マイクロレンズ法の原理、MOAの日々の観測について説明する。また、惑星が発見されたときのエピソードを交えて、これまでの重要な発見を紹介する。

1. 重力マイクロレンズ法とは

1.1 はじめに

重力マイクロレンズ法とは、重力マイクロレンズ現象を利用した太陽系外惑星の検出方法である。系外惑星の発見から今年で20年となるが、系外惑星の分野はめざましい発展を続けていて、分野外の人に知られる機会は確実に増えてきているはずである。しかし、重力マイクロレンズという言葉にあまり馴染みがない読者もいるかもしれない。というのも、これまでに見つかった系外惑星のほとんどが視線速度法、トランジット法によって発見されていること、また、重力マイクロレンズのコミュニティーが他の観測手法のそれと比べて、世界的に見てもやや小さい、といったことが理由として考えられる。しかし、後述するように重力マイクロレンズ法によっていくつもの重要な発見がされており、今後の発展も期待されている。今回は、重力マイクロレンズ法をより多くの人に知ってもらうためにも、丁寧に説明したい。

重力マイクロレンズ(以下、マイクロレンズとする)法の特徴の一つとして、他の手法では現在検出するこ

とが難しい、中心星から数AU付近において地球質量程度の軽い惑星まで発見できることが挙げられる。その原理については次節で説明するが、比較のために他の系外惑星検出手法について簡単にふれておく。近年のケプラー宇宙望遠鏡の大活躍によりトランジット法による惑星発見数は飛躍的に増え、地球半径よりも小さい惑星も発見されている。しかし、これらの惑星のほとんどは水星軌道よりも内側を回るような中心星近傍の惑星である。トランジット法で地球軌道よりも外側を回るような惑星を検出することは原理的に難しい。また、最初の系外惑星発見をもたらした視線速度法も、中心星近傍の重たい惑星に感度が最も高い。視線速度法でこれまでに見つかった惑星も中心星近傍を回るものが多いが、長期間の観測を続けることで長周期惑星を検出することが可能である。一方、日本のグループが大きな成果を上げている直接撮像法による惑星探査では、惑星からの微弱な光を直接捉える際、相対的にとても明るい中心星の光が邪魔となる。したがって直接撮像法では、この影響がなるべく少ない、中心星から数10 AU以上離れた軌道を回る巨大ガス惑星が検出可能である。将来的には、より中心星とのコントラストが高い、より内側のより小さな惑星を捉えると期待されるが、現状ではまだ難しい。このように、トランジット法、視線速度法では手の届かない、また、直接撮像法でも観測が困難なより内側の軌道を持つ惑星

1. ノートルダム大学物理学専攻

2. 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻
dsuzuki@nd.edu

に対して、ちょうどマイクロレンズ法は感度があり、相補的であると言える。

また、マイクロレンズ法で最も感度が高い軌道長半径は、ちょうど氷境界の数倍外側に相当する。氷境界（または、雪線）とは、宇宙空間で水が昇華する温度境界のことで、太陽型星の場合2.7 AU付近である。氷境界のすぐ外側は、木星のような巨大ガス惑星が形成される領域だと考えられている。一般的な惑星形成モデルであるコア集積モデルによると、巨大ガス惑星が形成されるには、原始惑星系円盤内のガスが散逸してしまう前に、惑星の質量がガスを集められるだけの重さである10地球質量程度になる必要がある。原始惑星系円盤中の氷境界以遠では、氷ダストが増えることで円盤の表面密度が4～5倍になり、惑星が成長しやすい。あまりにも円盤の外側だと、惑星が成長した際にすでにガスが散逸しまっていると予想される。したがって、巨大ガス惑星は氷境界のすぐ外側で形成されやすく、ちょうどマイクロレンズ法で感度がある領域に対応する。惑星は形成時に軌道移動することが考えられるが、惑星形成後に氷境界のすぐ外側において、どの程度の重さの惑星がどのくらい残っているかを観測的に調べることは、惑星形成理論の観点からも非常に重要な課題である。

これまでに、マイクロレンズ法によって30個以上の惑星が発見されている。これらの発見に大きく貢献しているサーベイ観測グループとして、ポーランドのチームであるOptical Gravitational Lensing Experiment (OGLE)と、日本とニュージーランドが主体の国際共同研究グループであるMicrolensing Observations in Astrophysics (MOA, モア^{*1})がある。日本では名古屋大学と大阪大学が中心となってニュージーランドのMOA-II望遠鏡を用いた研究活動を進めている。本稿では、1.2, 1.3節ではマイクロレンズ現象及びそれを用いた系外惑星探査法について説明し、1.4節ではMOAの日々の観測についてふれる。2節では代表的な発見された惑星、マイクロレンズ法でのみ検出可能な浮遊惑星や、最近の統計的解析結果を紹介し、3節では今後の展望についてまとめる。

1.2 重力マイクロレンズ現象

マイクロレンズ現象は、重力の影響によって光の経路が曲げられるという一般相対性理論に基づいている。夜空に見える星は、実は天球面上を少しずつだが動いている。観測者がある遠方の星（背景星）を見ている時に、偶然別の星がその視線上の手前に来たとしよう。はるか遠方の背景星からの光が、この手前にいる星の近くを通る際に、重力の影響で曲げられてしまう。背景星、手前の星と観測者が一直線上に並んでいるとすれば、ある角度で曲がった背景星からの光は全て観測者に届く。つまり観測者から見ると、手前の星の周りにグルッとリング状の背景星の像が見えるはずである。あたかも手前の星がレンズの役割をしているようなので、これをレンズ星と呼ぶ。また、このリング状の像はアインシュタインリングと呼ばれるが、天球面上での半径が数百“マイクロ”秒角なので、リングを望遠鏡で分解して見ることはできない。その代わり像が出来たことによって背景星の見かけの面積が広がり、観測者に届く光が増えるため背景星が明るくなったように見える。これがマイクロレンズ現象である。観測者から見て背景星とレンズ星が離れば、リング状の像は二つの円弧状の像に分裂し、それによって像の面積は小さくなり、観測者から見ると背景星の増光が弱くなって見える(図1)。背景星とレンズ星はそれぞれある速度を持って動いているので、背景星の明るさの時間変化(光度曲線)は、左右対称の釣り鐘型の曲線を描く。

今述べたように、マイクロレンズ現象が起きるためには、観測者、レンズ星、背景星がほぼ一直線上に並ぶ必要がある。星の数ほどたくさんある星だが、マイクロレンズ現象が起きるほど星と星が重なる確率は非常に低い。単純に確率の問題なので、背景星、レンズ星となる星が多いほど確率は上がる。従って、星の分布密度が高い銀河中心方向を観測すればマイクロレンズ現象が最も見つかりやすいのだが、それでもある背景星がマイクロレンズ現象を起こす確率は、 10^5 年に一回程度である。しかし、 10^7 個くらいの星を観測し続ければ、一年に100個ほどのマイクロレンズイベントを期待できる。実際に、MOAは銀河中心方向を観測することで、年間約600個のマイクロレンズイベントを検出している。銀河中心方向のマイクロレンズイベントでは、背景星はバルジ(銀河中心)の星(典型的に

^{*1}MOAは、かつてニュージーランドに存在した最大級の鳥moaにちなんで名付けられた。

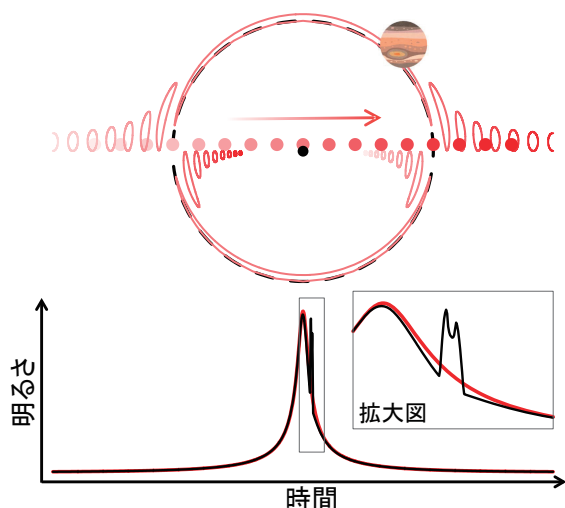


図1：観測者から見たマイクロレンズ現象の概念図と、対応する光度曲線(下図)。上図において、中心の黒丸がレンズ星で、そのすぐ近くを赤丸で描かれた背景星が色が濃くなる方へ(左から右へ)移動する際、赤線で描かれた背景星の二つの像も動いて行く。黒破線の大きい円はアインシュタインリングを示す。このときの光度曲線が赤色で描かれている。また、上図のように惑星が存在した場合の光度曲線を黒色で示す。ただし、背景星と惑星の大きさは、アインシュタインリングに対して大きめに描かれている。

は地球から8kpc、ただし1pc = 3.26光年)、レンズ天体はバルジの星(約6kpc)もしくは、銀河ディスクの星(1~5kpc)となる。また、背景星が増光される期間は、数十日となる。

1.3 重力マイクロレンズ法による系外惑星探査

(1) 原理

さて、このマイクロレンズ現象を用いた具体的な系外惑星探査が提案されたのは、1991年^{*2}のことである[1]。その原理は以下のようである。マイクロレンズ現象が起きると天球面上では、図1のように背景星の像がレンズ星の周囲にできる。もし、レンズ星が惑星を保持していてその惑星が背景星の像の位置にいるとすれば、惑星の重力によって、その像がさらに歪められることになる。その結果、観測される光度曲線には、左右対称の釣り鐘型の曲線からの“ずれ”(アノマリー)が生じる(図1の拡大図)。このアノマリーを精度よく観測することがレンズ星に付随する惑星の発見

*2. 当時、マイクロレンズイベントはまだ検出されていなかった。

となる。背景星、レンズ星、観測者が一直線からずれると、背景星の像の面積は次第に小さくなっていく。したがって、像の面積が最も大きいとき、つまり像がアインシュタインリングとなっているときに、惑星の位置と背景星の像が重なる可能性が最も高い。それゆえマイクロレンズ法では、レンズ星を回っている惑星のうち、天球面上に射影したときにアインシュタインリングの半径付近に位置する惑星に最も感度が高く、典型的なアインシュタインリングの半径は約2.5 AUである。

光度曲線のアノマリー部分の形は、惑星の質量と位置によって異なる。特に重要なのがアノマリーの継続時間である。マイクロレンズ現象の増光期間は、レンズ天体の質量の平方根に比例する。したがって、レンズ天体に付随する惑星によるアノマリーの継続期間は、木星質量の惑星だと数日、地球質量の惑星だと数時間程度となってしまふ。さらに、惑星の位置を予測することはできないので、ほとんどのマイクロレンズイベントでは、いつアノマリーが起きるかを予測できない。したがって、マイクロレンズ法で惑星を発見するためには、まずたくさんの星の中から、マイクロレンズ現象を起こしている星を見つけ出し、そのマイクロレンズイベントを少なくとも数十分に一回の頻度でモニターし続ける必要がある。この要件を満たすには、広視野かつ高頻度で銀河中心方向を観測する必要がある。マイクロレンズを起こしたレンズ星が別の背景星を再び増光させることはほぼない^{*3}。同様に、アノマリーも終わってしまうと、二度と観測されることはない。それゆえ、次節で説明するようにアノマリーを見逃さないよう熱心な観測が行われている。

(2) 観測ストラテジー

マイクロレンズ法を用いた系外惑星探査が始まった当初、広視野かつ高頻度で観測できる望遠鏡はなかった。そのため、まずやや視野の広い望遠鏡を用いたサーベイ観測によりマイクロレンズイベントを検出し、めばしいイベントを小口径の望遠鏡を用いて高頻度で観測する、というストラテジーがとられた[2]。特に前者はサーベイグループ、後者はフォローアップグループと呼ばれている。ここでめばしいイベントとは、マイクロレンズ現象による増光が特に明るくなるイベント、高増光率イベントのことである。めばしい理由

*3. 背景星が連星の場合はそれぞれの星が増光することがある。

は二つあり、一つ目は、明るくなるので(イベントによってはI-bandで10等くらいまで)、世界中の小口径の望遠鏡でも観測できるからである。二つ目の理由は、高増光率イベントでは、増光のピーク付近でアノマリーが起きる期待値が高く、なおかつ、増光のピーク時刻を予測できるからである。高増光率イベントにおける増光のピーク時刻付近では、図1のように背景星の像はほぼアインシュタインリングのようになっていて惑星を検出しやすい。また、増光のピークの時刻は、ピークを迎える前の光度曲線をモデルフィッティングすることにより、予測できる。

このようにして、高増光率イベントを狙った“サーベイ+追観測”の連携により、マイクロレンズ法でこれまでに発見された惑星の半分以上を見つけてきた。また、高増光率イベントでなくても、アノマリーが検出された場合は、サーベイ、もしくはフォローアップグループが互いにメールでアラートを出し合い、観測頻度をあげるなどして協力し合うことで、アノマリーを精度よく観測し惑星を発見してきた。

実際には、マイクロレンズのシーズンのピークである5～8月にかけては、数百イベントが同時に進行中である。惑星が見つかるのと同じ原理で、レンズ星の伴星によるアノマリーも観測される。アノマリーが検出された直後は、惑星か連星もしくは、褐色矮星質量(13～80木星質量)の伴星によるアノマリーなのか判別が難しい。したがって、どのイベントが重要でどのイベントを優先させるかといった内容のメールが、この時期は毎晩飛び交う。

2006年にMOA-II望遠鏡が広視野高頻度観測を始め、2011年にはOGLEの望遠鏡もグレードアップし高頻度サーベイを始めた。また、イスラエルのチームWiseも2011年からサーベイ観測を開始した。これによりほぼ24時間連続のサーベイ観測が可能となり、今まで検出できていなかった増光率が低いイベントにおけるアノマリーをサーベイグループのみで捉えることが可能となってきた。依然として、フォローアップグループによる追観測は重要であるが、現在、マイクロレンズ法による観測ストラテジーは“サーベイ+追観測”から“サーベイ中心”へと、次の段階へシフトする時期にある。

(3) 観測から何がわかるか

惑星イベントの光度曲線をモデルフィッティングす

ることによって、増光期間、中心星と惑星との質量比、中心星と惑星の距離をアインシュタイン半径で規格化した値がわかる。増光期間は、レンズ星(厳密には中心星と惑星)の質量、地球からレンズ星までの距離、天球面上をレンズ星と背景星が離れていく速度(レンズ-背景星の相対固有速度)の関数であり、三つのパラメーターが縮退している。つまり、ほとんどのマイクロレンズイベントでは、中心星の質量、したがって惑星の質量を直接求めることができない。このような場合は尤もらしい値を推定するのだが、2.1節で説明するような特殊なマイクロレンズイベントにおいては上記の縮退が解けて、中心星、惑星の質量などを直接求めることができる。

他の系外惑星検出法と比べ大きく異なる点として、惑星が回っている中心星(マイクロレンズ法ではレンズ星)を直接観測することが難しいことがあげられる。というのは、レンズ星が遠いため^{※4}、M型星のような暗い星であることが多いため、また、レンズ星が背景星とほとんど重なっているためである。さらに、銀河中心方向は星が非常に密集しているため(図2)、地上望遠鏡から見ると、背景星、レンズ星はマイクロレンズ現象と関係ない星とも重なって見える。

そのため、重要なイベントでは、すばる望遠鏡などの大型地上望遠鏡のAdaptive Optics(AO)観測やハッブル宇宙望遠鏡を用いて、図2のように「背景星+レンズ星」を他の星と空間的に分解し、光度曲線のモデルフィッティングから求めた背景星のフラックスを引くことでレンズ星からのフラックスを得る、といった手法がとられる。

また、地球から見て背景星とレンズ星は天球面上を1年間で1～10ミリ秒角ずつ離れて行く。したがって、10年くらい前のイベントを高空間分解することで、背景星とレンズ星をも分離して観測することが期待でき、今後このようなイベントが増えてくる。

このようにレンズ星からのフラックスを観測することで、中心星、惑星の質量、中心星-惑星間距離^{※5}を決定、もしくはこれらの推定値に強い制限を与えることが可能である。

※4. 遠いと言われていたケプラー宇宙望遠鏡で見つかった惑星系までは500pcほどである。マイクロレンズ惑星までの距離は1～6kpc。

※5. 離心率がわからないことが多いため軌道長半径は推定値となる。

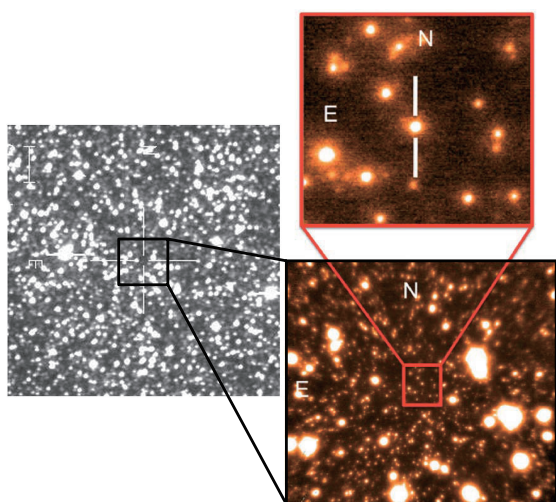


図2：マイクロレンズイベントMOA-2011-BLG-293が発生した付近の画像。右下がイベント発生翌年にKeck望遠鏡のAOを用いて高空間分解撮像されたもので、その拡大が右上(3秒角×3秒角)である。右上の画像で中央に映っている星が背景星とレンズ星が重なったものである。左は、MOA-II望遠鏡でイベント発生前に撮られた画像^{※6}だが、背景星もレンズ星も暗いため映っていない。[3]の図を一部改訂。

1.4 MOAの日々の観測

MOAグループは、ニュージーランド南島のマウントジョン天文台にてマイクロレンズ探査専用のMOA-II望遠鏡を用いて^{※7}、毎晩銀河中心方向を観測している(図3)。口径は1.8 m、視野は2.2平方度あり、マイクロレンズ観測を行っている望遠鏡では最大の視野を持ち、ニュージーランド最大の望遠鏡でもある。実際には銀河中心は可視では見えないので、中心から少しずれた、目で見ても最も明るい領域である約50平方度を観測している。最も高頻度の領域は15分に一度観測される。

また、マウントジョン天文台は南極を除けば世界最南端の天文台であり、銀河中心が見える南天の観測に適している。緯度が高いということは、銀河中心方向がよく見える南半球の冬の夜が長いことを意味する。特に7月前後は観測時間だけでも12時間以上となる。観測中はマイクロレンズイベント候補から新しいイベントを探し出したり、既にマイクロレンズイベントとわかっているものに対しては、アノマリーがないか確

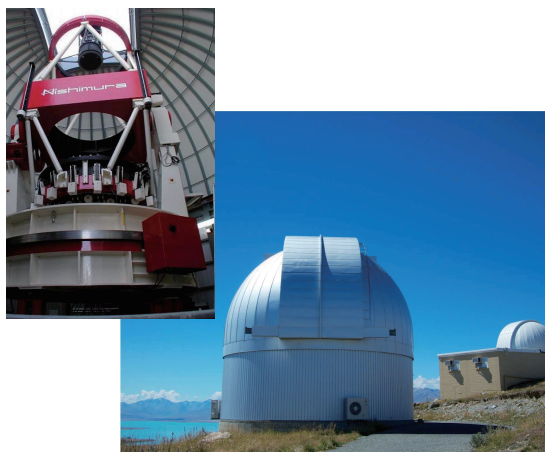


図3：マウントジョン天文台の様子。中央のドームがMOA-II望遠鏡(左写真)のもので、右の小さなドームには61cm望遠鏡がある。天文台の後ろにはテカポ湖が見えている。

認する。重要なイベントがあれば、観測ターゲット、頻度を適宜変更する。不幸にも主焦点カメラのシャッター幕が破れた場合は、予備のシャッター幕への取替え作業も行^{※8}。もちろん、観測準備、片付けもする必要があるが、マウントジョン天文台には食堂がないので、食事の用意もする必要がある。専属の技術スタッフはいないので、望遠鏡や計算機にトラブルが発生した場合は、全て自ら解決する必要がある。観測シフトは名古屋大学、大阪大学、京都産業大学の大学院生が中心となって組まれており、現地の観測スタッフと合わせて2、3人で1ヶ月間観測を行う。英語環境ということもあり、現地での観測で学生のサバイバル能力が鍛えられると筆者は思う。マウントジョン天文台のすぐ隣にはテカポ湖があり、銀河中心方向が観測できなくなる初夏の景色は素晴らしい。

2. 氷境界外側の惑星たち

マイクロレンズ法で発見された惑星は他の手法では検出することができないユニークな惑星である。以下では、筆者が発見時の観測に関わっているイベントを中心に重要な発見をいくつか紹介する^{※9}。

※6. <https://it019909.massey.ac.nz/moa/>

※7. 2005年までは同じ場所にある61 cmの望遠鏡を用いてサーベイ観測を行っていた。現在この望遠鏡は主に追観測に使われている。

※8. 2012年4月以降、このような惨事は起きていない。

※9. マイクロレンズイベントは、「イベントを発見したグループ名-年-バルジ-通し番号」の名前がつく。レンズ天体には最後にLがつき、レンズ天体に付随する惑星にはb, c... とつく。

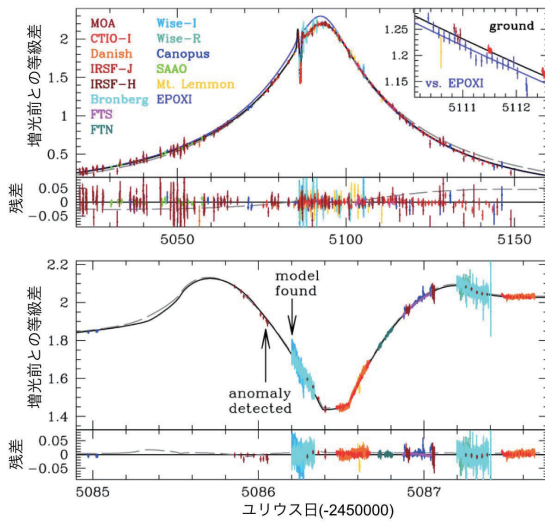


図4：MOA-2009-BLG-266の光度曲線とベストフィットモデル（黒線）。上のパネルは増光率が25%以上の部分を表し、下のパネルは惑星によるアノマリー部分の拡大である。それぞれのパネルの下部には、ベストフィットモデルからの残差を示す。破線はパララックス効果を考慮していない光度曲線モデルを示し、青線は地球から0.1AU離れたEPOXI衛星の位置から観測される光度曲線モデルである。上のパネルの右上には、EPOXI衛星で得られたデータを拡大して示す。[4]の図を一部改訂。

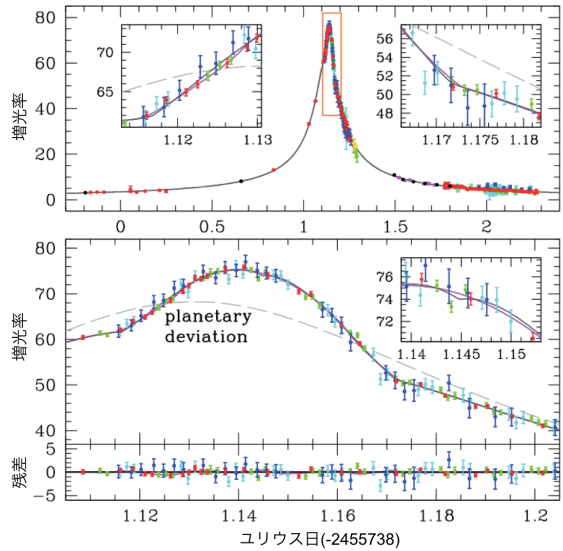


図5：MOA-2011-BLG-262の光度曲線とベストフィットモデル（黒線）。上のパネルの赤枠の拡大が下のパネルである。MOA-II(赤色)、B&C望遠鏡(Iバンドが緑色、Vバンドが水色)、Canopus(青色)、CTIO(マゼンタ)、OGLE(黒色)、Faulkes Telescope South(黄色)のデータがプロットされている。破線はアノマリーがなかった場合のモデルを示す。黒線の「浮遊惑星+月」のモデルに対し、「M型星+惑星」のモデルがマゼンタで描かれている。両者のモデルの増光率に差がある部分が拡大されている。[5]の図を一部改訂。

2.1 MOA-2009-BLG-266Lb: 巨大ガス惑星コア？

筆者が修士1年の9月に観測中にアノマリーに気づいたイベントである。このイベントでは、アノマリーアラートが出された時には、ニュージーランドではバルジは沈んでしまっていたが、イスラエルと南アフリカの望遠鏡が迅速に追観測を始め、その後もチリ、アリゾナ、ハワイからも追観測が続いたため、アノマリーの全体を観測することに成功した(図4)。また韓国のチームはアノマリー進行中のデータからモデルフィッティングを素早く行い、今後どのようにアノマリーが続くかを予測し、追観測の必要性を議論する上で重要であった。

得られたデータからは、(a)背景星が点光源ではなく、有限の大きさを持つことを考慮したモデルが正しいこと(有限ソース効果)、(b)地球の公転を考慮したモデルが正しいこと(パララックス効果)、がわかった。マイクロレンズイベントにおいて、(a)と(b)が同時にわかると、増光期間に縮退していた三つのパラメーター(レンズの質量、レンズまでの距離、レンズ-背景星

の相対固有速度)を全て決定できる。最終的には、地球からレンズ星までの距離は3kpc、中心星は0.56太陽質量、付随する惑星は 10.4 ± 1.7 地球質量で、軌道長半径は3.2 AUだとわかった[4]。この惑星は、氷境界の2倍外側に位置し10倍の地球質量を持つということから、巨大ガス惑星になり損ねた巨大ガス惑星コアではないかと示唆されている。中心星から離れた軌道を回る低質量惑星の質量が精度よく求まったケースはこれが初めてである。

2.2 MOA-2011-BLG-262Lb: 月かそれとも惑星か

このイベントが検出された夜は曇り空でなかなか観測ができていなかった。そのため筆者と後輩の学生は食事休憩のため観測室を出て宿舎に向かって歩いていたら、雲の切れ目からうっすらと星が見え隠れしていることに気づき、筆者らは観測室へ急いで戻り、雲越しの観測を始めた。徐々に天候は回復し、急増光し始めたイベントを発見し、新たなマイクロレンズイベントとしてアラートを出した。その直後、ノートル

ダム大学のDavid Bennett氏とオハイオ州立大学のAndrew Gould氏からほぼ同時にこのイベントを集中的に観測するよう要請が来た。高増光率イベントであり、増光期間が短い可能性があったからである。高増光率イベントのピーク付近は惑星に感度が高く、増光期間が短いことは、レンズ星の質量が軽い可能性がある。筆者らは、サチらないように露光時間に注意しながら観測を行い、61cmのB&C望遠鏡でもこのイベントを集中して観測した。不運なことに、その晩はリアルタイムで光度曲線を確認するプログラムがうまく動作しなかったのだが、夜が明け、光度曲線を確認すると、イベントタイムスケールが数日くらいと短く、さらに明らかにアノマリーが見えていた(図5)。ひょっとすると浮遊惑星(中心星を持たない惑星質量天体、次節で説明する。)に月が回っている系の発見かもしれないと喜んだのを覚えている。

重要なイベントであることは確かだったので、翌年Keck望遠鏡のAOを用いて高空間分解撮像観測されたが、決定的なレンズ天体の情報は得られなかった。残念だが結論としては、4木星質量の浮遊惑星から0.13 AUの距離に0.5地球質量の月が付随している系、もしくは、0.1太陽質量の中心星周りを海王星質量程度の惑星が軌道長半径0.95 AUで回っている系のどちらかである、となった[5]。ただし、天球面上でレンズ星と背景星が離れていく速さが、前者と後者のモデルでそれぞれ、20、12ミリ秒角/年なので、将来の高空間分解撮像観測によってモデルの縮退を解ける可能性がある。いずれにせよ、このイベントの発見によってマイクロレンズ法は「浮遊惑星+月」のような系にも感度があることが示された。

2.3 浮遊惑星

マイクロレンズ法では、何らかの理由で中心星からはぐれてしまった惑星質量天体を発見することができる。これらの低質量天体は浮遊惑星と呼ばれている。そもそも惑星の定義は「恒星の周りを回る」ということなので、このような天体を「惑星」と呼んでいいのかわからないが、英語でもfree-floating planetとかrogue planetと呼ばれている。星形成領域において年齢が若い浮遊惑星候補が以前から撮像され発見されていた。しかし、これらは褐色矮星に近い質量であり、また、それらの統計的な量についての議論はされてい

なかった。当時の大学院生と住貴宏氏が解析をリードし、MOAの2006-2007年の2年分のデータを全て解析し、増光期間が2日以下のイベントを10例発見した[6]。増光期間が短くても、レンズ-背景星の相対固有速度がとても速いか、レンズ天体までの距離がとても遠い(つまりレンズ天体が背景星に近い)場合が考えられる。しかし、これら10イベントを説明するには木星質量程度の浮遊惑星が恒星の数の約2倍存在するべきだと結論づけ、Nature誌に投稿された。浮遊惑星が惑星形成の途中でその系から放出されたものだと考えると、惑星形成を考える際にはこれらも説明される必要がある。恒星数の2倍ほどある浮遊惑星がどのような過程を経て今に至るのか。包括的な説明は待たれるが、浮遊惑星の量に対するより強い制限、特定の浮遊惑星イベントにおける質量の決定、また、より軽い質量の浮遊惑星イベントを検出することが次の目標である。

2.4 統計的議論

トランジット法、視線速度法で見つかった惑星数と比較すると、マイクロレンズ法で検出された惑星数は少ない。統計量が多いとは言えないが、重要な統計的な解析結果が発表されている。マイクロレンズ法で感度のある、氷境界の約3倍外側付近における惑星の平均的な数は、木星のような惑星(0.3-10木星質量)では0.17個、海王星のような惑星(10-30地球質量)では0.52個だとわかった[7]。これらの数字は、視線速度法から求めた中心星近傍を回る惑星の平均的な数よりも多い。特に土星質量付近では8倍ほど多い[8,9]。もちろん、視線速度法とマイクロレンズ法とでは中心星のスペクトル型や軌道長半径といったパラメーター空間が異なるので、両者の数字が異なることに問題はない。また、軌道長半径の違いを考慮すれば、両者の違いは説明できるとされていた。しかし、マイクロレンズ法から求めた惑星の平均数は、コア集積モデルに基づくシミュレーション結果よりも多いと考えられていて、また、マイクロレンズ法で見つかった惑星系の追観測が難しいことから、マイクロレンズ法の統計的な結果を疑問視する人が少なくない筆者は感じている。

ところが最近では、マイクロレンズ法が主に見えているM型星に対する視線速度法の観測データが蓄積され、氷境界外側付近の惑星にまで感度が出てきた[10]。

このことにより、マイクロレンズ法と視線速度法とで、同じパラメーター空間における比較が可能となった。マイクロレンズ法で見つかっている惑星分布を、もし視線速度法で観測したらどの程度惑星が見つかるか、というシミュレーション結果と、M型星周りの長周期惑星に対する視線速度法の観測結果は実際に一致していることが最近わかった。今後視線速度法の軽い惑星に対する感度が高くなれば、マイクロレンズで見つかっているような冷たい海王星が検出されると予測されている[11]。

3. 今後の展望

マイクロレンズ観測は“サーベイ+追観測”から“サーベイ中心”に移行しつつある。広視野高頻度サーベイをしているMOA, OGLE, Wiseに加え、2015年からは韓国のグループKorean Microlensing Telescope Network(KMTNet)が動き出す。彼らは1.6 mの望遠鏡をチリ、オーストラリア、南アフリカに設置し、彼らのグループだけでもマイクロレンズイベントの24時間監視ができる計画であり、年間惑星検出数は今の2倍になると予想されている。

さらに次の段階である“スペースからのサーベイ観測”への準備も始まっている。NASAはマイクロレンズ観測を主目的の一つとしたWide Field Infrared Survey Telescope(WFIRST)を計画している。口径24 mの宇宙望遠鏡を用いて、赤外波長で銀河中心方向のマイクロレンズサーベイ観測を行う予定である。これに先立ち、ハッブル宇宙望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡を用いたマイクロレンズイベントの観測がすでに行われていて、高空間分解、地上望遠鏡と宇宙望遠鏡との視差などを利用した、レンズ天体の質量決定方法が研究されている。

また、ケプラー宇宙望遠鏡を用いた計画であるK2により、2016年4～6月はケプラー宇宙望遠鏡が銀河中心方向を観測する。もちろん、トランジット惑星の検出も期待されるが、マイクロレンズ観測によっていくつかの惑星イベント、浮遊惑星イベントにおいて質量が決まると期待される。また、他の手法では不可能な浮遊惑星の質量関数が得られると期待される。非常に暗い中心星周りの冷たく暗い惑星を検出するマイクロレンズ法の今後の展望は、明るいのではないだろう

か。

謝 辞

本稿を執筆する機会をくださり、注意深く原稿を読んでいただいた成田憲保氏、住貴宏氏に感謝いたします。また、MOAグループの皆様に感謝いたします。この記事の図は[3], [4], [5]に掲載されている図を改訂して作成しましたが、AASから転載許可を頂いています。

参考文献

- [1] Mao, S. and Paczyński, B., 1991, ApJL 374, L37.
- [2] Gould, A. and Loeb, A., 1992, ApJ 396, 104.
- [3] Batista, V. et al., 2014, ApJ 780, 54.
- [4] Muraki, Y. et al., 2011, ApJ 741, 22.
- [5] Bennett, D. P. et al., 2014, ApJ 785, 155.
- [6] Sumi, T. et al., 2011, Nature 473, 349.
- [7] Cassan, A. et al., 2012, Nature 481, 167.
- [8] Cumming, A. et al., 2008, PASP 120, 531.
- [9] Gould, A. et al., 2010, ApJ 720, 1073.
- [10] Bonfils, X. et al., 2013, A&A 549, A109.
- [11] Clanton, C. and Gaudi, B. S., 2014, ApJ 791, 91.