

重力マイクロレンズと位置天文学

越本直季

〈NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA〉

〈University of Maryland, College Park, MD 20742, USA〉

e-mail: koshimoto.work@gmail.com



重力マイクロレンズは、背景の星の光がその手前を通過するレンズ天体の重力によって曲げられて観測者に届く現象である。重力マイクロレンズ研究において位置天文学はレンズ天体の質量測定に役立ち、特に質量降着のない単独恒星質量ブラックホールの唯一の質量測定手段である。本稿では2022年について報告された単独恒星質量ブラックホールの発見を含む、近年増加している重力マイクロレンズへの位置天文観測の利用例を紹介し、いくつかの将来計画における展望を述べる。

1. 重力マイクロレンズ

天球面上で二天体が重なったとき、背景の天体（ソース天体）から発せられる光は、手前の天体（レンズ天体）の重力によって曲げられて、変形した複数の像を作る。これが重力レンズ効果である。特に、レンズ天体が恒星質量以下の小さな重力源である場合、複数の像の離角は数ミリ秒角以下になり、通常は分解して観測することができず、ソース天体の一時的な増光現象として観測される。これを重力マイクロレンズと呼ぶ。

重力マイクロレンズは星が密集した銀河系のバルジ方向でも100万個の星に一つという非常に珍しい現象であり、その探査には大量の星を高頻度でモニターすることが要求される。現在、主に銀河系バルジを対象に重力マイクロレンズ探査が行われており、日本が主導するMOAグループ、ポーランドが主導するOGLEグループ、韓国が主導するKMTNetグループがそれぞれの専用望遠鏡を用いて、最大10-15分に一度という高頻度で毎晩観測を行なっている。また、2023年からはここに日本主導のPRIMEグループによる世界初の近赤外線による広視野の重力マイクロレンズ

探査が加わる。

重力マイクロレンズにおいて、もっぱら我々の興味はレンズ天体にある。イベントの増光期間に相当する、アインシュタイン半径通過時間がレンズ天体の質量の平方根に比例するため、増光期間が数十分から数年までの様々なイベントを観測することにより、惑星質量天体からブラックホールまで、幅広い質量領域の天体を検出することができる。レンズ天体が単一星でないときは、図1のように特徴的な光度曲線を示し、惑星系も検出で

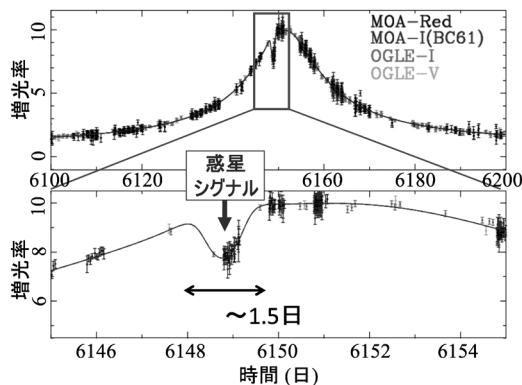


図1. 惑星イベント（レンズ天体が星+惑星のとき）の光度曲線 [1]. 惑星がないときは、対称的な光度曲線が観測される。

きる。重力マイクロレンズの歴史や系外惑星探査に関しては2017年の住貴宏氏の記事 [2]，すばる望遠鏡を用いた原始ブラックホール探査に関しては2020年の新倉広子氏の記事 [3] を参照された。本稿では重力マイクロレンズにおける位置天文学の利用について述べる。

重力マイクロレンズの科学利用は，1986年に Bohdan Paczyński が，暗黒物質候補であった MACHOs (Massive Compact Halo Objects) 探査への利用を提唱したことで始まった [4]。この提案論文で，重力マイクロレンズ現象は検出が容易な増光だけでなく，天球面上における星像位置のずれも引き起こすことは既に述べられていた。これを増光現象を指す「光学的マイクロレンズ」に対して「位置天文学的マイクロレンズ」という。その後，1993年に MACHO グループらにより大マゼラン雲方向に（光学的）重力マイクロレンズが実際に発見される [5] と，MACHOs やブラックホール，近傍星の質量測定法として，位置天文学的マイクロレンズの利用が1990年代に提案された（例えば [6-8]）。ただし，サブミリ秒角の位置決定精度が必要であるため，次世代望遠鏡や電波干渉計を用いるという内容であった。

それからおよそ30年が経過し，まさに90年代当時の次世代望遠鏡にあたる，地上の大口径光学望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた位置天文観測の重力マイクロレンズへの利用例がここ数年で増えてきた。これには，位置天文学的マイクロレンズ（つまり，重力レンズ効果により星像の位置がずれる効果）以外の利用も含まれる。本稿では，まず，なぜ位置天文学が重力マイクロレンズ研究に重要かという話をした後に，それら実際の観測例を紹介し，いくつかの将来計画における重力マイクロレンズへの位置天文学利用の展望を述べる。

2. 質量と距離の測定法と位置天文

位置天文学は，重力マイクロレンズ研究において，レンズ天体の質量とレンズ天体までの距離を

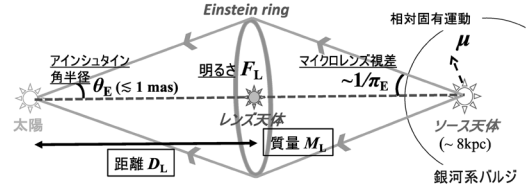


図2. 重力マイクロレンズの幾何学と，レンズ天体の質量と距離に関連するパラメーター。銀河系バルジ方向を見たとして図示している。

測定するために利用されている。その説明のために，どうしてレンズ天体の質量と距離の測定が難しいのか，どうすれば測定できるのかを述べる。

2.1 質量測定が難しい理由

図2に重力マイクロレンズの幾何学及び関連のあるパラメーターをまとめた。ソース天体とレンズ天体が完全に視線上で重なった時にできる円環状の像がアインシュタインリングであり，その視半径がアインシュタイン角半径（angular Einstein radius） θ_E である。銀河系バルジ方向での典型値は1ミリ秒角以下であるが，質量の平方根に比例し，ブラックホールのような重い天体では数ミリ秒角にもなりえる。 θ_E は，レンズ天体の質量 M_L と距離 D_L ，ソース天体までの距離 D_S で決まるが，銀河系バルジ方向の重力マイクロレンズ現象ではソース天体は銀河系バルジの星である確率が高く， $D_S \sim 8 \text{ kpc}$ であると仮定されることが多い。そのため，アインシュタイン角半径 θ_E は，レンズ天体の質量 M_L と距離 D_L の関数であるとして， $\theta_E (M_L, D_L)$ と表記することもある。

一方，重力マイクロレンズの光度曲線から普遍的に測定できる物理量は，おおよそその増光期間に相当するアインシュタイン半径通過時間 t_E のみである。これはアインシュタイン角半径をソース天体とレンズ天体の相対固有運動 μ で割った値で， $t_E = \theta_E (M_L, D_L) / \mu$ である。つまり， t_E の値が測定されても，レンズ天体の質量 M_L と距離 D_L ，ソース天体とレンズ天体の相対固有運動 μ の3つが縮退して定まらない。この，普遍的に測定できる観測量が t_E のみであるということが，レンズ天体の

質量と距離を測定することが難しい主な原因である。

2.2 大量の“候補”天体

質量の測定法の話に移る前に、アインシュタイン半径通過時間 t_E のみが測定できたときに、どれくらい質量推定値に誤差があるかを見てみよう。これには、重力マイクロレンズが視線上に存在する星々の分布を反映した確率的な現象であることを利用する。具体的には、視線上に存在する星の質量分布、数密度分布、速度分布のモデルを用いることで、今観測された t_E の値を持つ重力マイクロレンズ現象が、どの距離にあるどの質量のレンズ天体によって引き起こされた確率が高いかの分布を計算することができる（ベイズ推定）。

図3に、 $t_E=0.3$ 日、3日、30日、300日の銀河系バルジ方向の重力マイクロレンズ現象に対して、この手法を用いて推定したレンズ天体の質量の確率分布を示した。銀河系バルジ方向の星のモデルとしては筆者らが開発したモデル [9] を用いた。質量推定値の誤差はどれも一桁以上あるが、

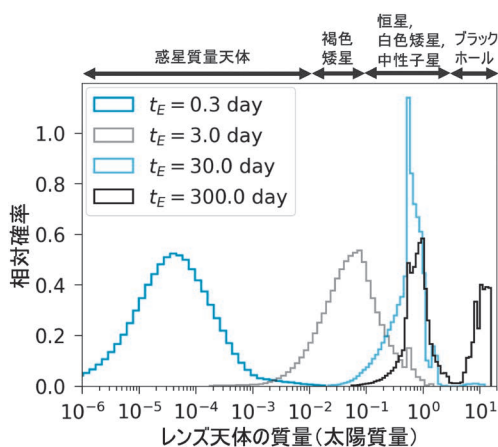


図3. アインシュタイン半径通過時間 t_E が0.3日、3日、30日、300日の銀河系バルジ方向のイベントに対して、銀河系の星のモデル [9] を用いて推定したレンズ天体の質量の確率分布。特に高質量側の分布はモデルに大きく依存することに注意。～0.5太陽質量の鋭いピークは白色矮星、～3太陽質量の谷はブラックホールの質量ギャップに相当。

例えば、 $t_E=0.3$ 日のイベントのレンズ天体は惑星質量で、地球質量（ $\sim 3 \times 10^{-6}$ 太陽質量）の可能性もあることや、 $t_E=3$ 日のものは褐色矮星の確率が高いが、惑星質量の可能性もあること、 $t_E=300$ 日のものはブラックホールである確率が50%弱あること、等がわかる。

したがって、 t_E の情報だけでも、地球質量“候補”天体だとか、ブラックホール“候補”天体だと言うことはできるのだが、あくまでも候補であって断定はできないため、我々重力マイクロレンズの研究者は、もどかしい思いを抱えているのである。

2.3 三つの特別な観測量

そうしたもどかしい思いを払拭するためには、アインシュタイン半径通過時間 t_E 以外の情報が必要になる。それが、図2に下線付きで書いた3つのパラメーター、アインシュタイン角半径 θ_E 、マイクロレンズ視差 (microlens parallax) π_E 、レンズ天体の明るさ F_L である。それぞれから、図4に描いたような質量と距離の関係が得られるため、そのうち二つ以上が測定されたとき、レンズ天体の質量と距離が決定できる。ちなみに、レンズ天体とソース天体の相対固有運動 μ は、 $t_E=\theta_E/\mu$ であるので、 t_E がわかっているときは、 θ_E と等価の情報を与える。

地上サーベイによる光度曲線からは、これら3つのうち θ_E と π_E が高次の効果を通してたまたに測

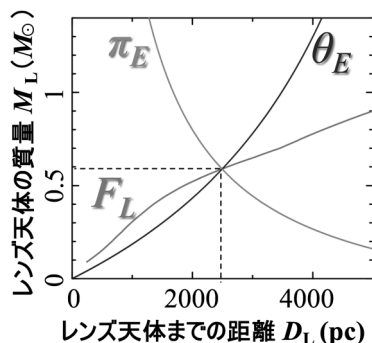


図4. 質量と距離の関係を与える3つの観測量。2つ以上が測定できた時、質量と距離を決定できる。

定できることがある。アインシュタイン角半径 θ_E は、ソース天体の大きさが光度曲線に効いてくる「有限ソース効果」を通して観測され、高増光率イベント（イベント全体の1-2%程度）の場合や、連星レンズイベント（=レンズ天体が連星系や惑星系の場合、イベント全体の~10%）の場合に測定できることがある。

マイクロレンズ視差 π_E は、地球の公転の効果が光度曲線に効いてくる「パララックス（視差）効果」を通して観測され、増光期間がある程度長いイベント（ $t_E \geq 60$ 日）で、精度の良い観測ができた時に測定できる（イベント全体の数%）。また、地球と、離れた位置にある宇宙望遠鏡から同時観測することで、二点間の視差による光度曲線の見え方の違いを利用してマイクロレンズ視差を測定する「スペースパララックス」という手法もある。Spitzer望遠鏡を用いた観測例が住氏の記事[2]で紹介されているのでそちらも参照されたい。

これらの高次効果の原理の詳細は割愛するが、共通していることは、ごく一部のイベントでしか観測できないことと、増光期間を逃したらもう二度と測定できないことである。また、3つ目のレンズ天体の明るさ F_L は、一見測定しやすいように思えるが、主な観測領域である銀河系バルジは星が密集しており、地球大気の影響で星像が広がった地上サーベイ望遠鏡の画像では、関係ない星の明るさが混じってしまい測定できない（図5の左図）。大口径望遠鏡の補償光学（AO）装置を用いて大気の影響を補正することで、図5の右図のように、関係ない星は“ぼぼ”除けるが、ソース天体の系がまだ重なっているため、それでもなおレンズ天体の明るさを測定することは一筋縄ではいかない。このような状況を手助けしてくれるのが位置天文学である。

2.4 位置天文学の利用法とその観測量

重力マイクロレンズにおける位置天文学の利用は、分解するものという観点から、大きく以下の3種類に分けられる。

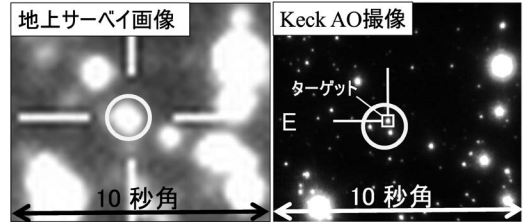


図5. 地球大気の影響で星像が広がった画像（左）と、補償光学（AO）によって地球大気の影響を補正した同領域の画像（右 [1]）。

(a) レンズ天体の分解:

過去のイベントを観測して、ソース天体とレンズ天体を分解する方法

(b) 位置天文学的マイクロレンズ:

発生中のイベントを観測して、ソース像の光重心の移動に伴う相対位置のずれを測定する方法

(c) ソース像の分解:

発生中のイベントを観測して、ソース像を分解する方法

(a)の手法は、増光期間後であっても、アインシュタイン角半径 θ_E とレンズ天体の明るさ F_L が測定できる。これまでのところ一番利用されており、後述する将来のRoman宇宙望遠鏡による重力マイクロレンズ探査でも、星や惑星系の質量測定法として活躍すると期待されている。

また、(b)と(c)の手法は、観測期間は限られるものの、有限ソース効果が受かっていないイベントに対しても θ_E を測定できる。現在達成できる観測精度では、 θ_E が数ミリ秒角あるような、近傍星やブラックホールのような高質量天体にしか適用できないが、(b)の手法はRoman宇宙望遠鏡による重力マイクロレンズ探査ではより軽い天体にも適用できると期待される。

以下で、それぞれの詳細と、観測例を紹介する。

3. レンズ天体の分解

重力マイクロレンズはソース天体とレンズ天体が視線上で $\lesssim 1$ ミリ秒角で重なる現象であるた

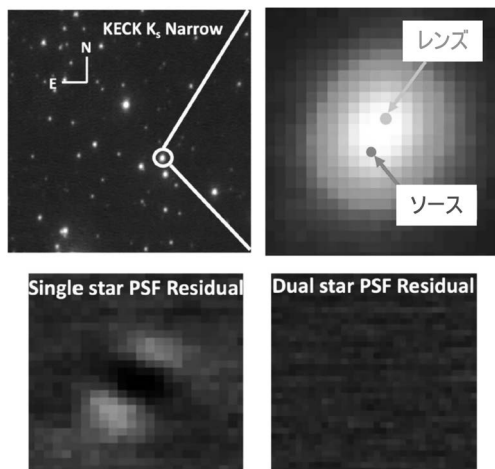


図6. レンズ天体とソース天体の分解例 [12]. 星像が楕円形になっており、34ミリ秒角離れた二星を分解した. 左下が単星フィットの残差で、右下が二星フィットの残差.

め、図5の右図のような高空間分解能撮像をイベント直後に行っても、ソース天体が分解できず*1、レンズ天体の明るさは測定できない。

それではどうすればよいかというと、ソース天体とレンズ天体が分解可能なほど離れるのを待つ必要がある。これには、画像上で直接分解する方法と、ソース天体とレンズ天体の色の違いを利用して多色画像における位置のずれを測定して分解する方法がある。

3.1 レンズ天体の直接分解

図6に、図1のイベントの増光から6年後にKeck望遠鏡で得られた撮像結果 [12] を示した。単一星と比べ、ターゲットがわずかに楕円形になっており、34ミリ秒角離れたソース天体とレンズ天体を分解することに成功した。レンズ天体の明るさ F_L および、6年で34ミリ秒角離れたという事実から、ソース天体とレンズ天体の相対固有運動 μ が測定できた。アインシュタイン角半径も $\theta_E = \mu t_E$ から決定できるため、レンズ天体の質

量と距離が測定できた。

この手法に必要な待ち時間は、レンズ天体とソース天体のコントラストや相対固有運動 μ によって変動し、レンズ天体がソース天体に対してあまりに暗かったり、 μ があまりに小さいとこの手法は適用できない。 μ はイベントによって1ミリ秒角/年以下から、20ミリ秒角/年以上まで幅があるが、典型的には5ミリ秒角/年前後であるため、レンズ天体がよほど暗い場合を除けば、増光から三年から十数年程度でこの手法により、レンズ天体の質量を測定することができる。2015年に初めてレンズ天体の直接分解が報告 [13, 14] されて以降、これまでにKeck望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡を用いて、同手法により10個弱のイベントで質量が測定されている。将来的には超大型望遠鏡による待ち時間の大幅な短縮も期待される。

3.2 ソース天体とレンズ天体の色の違いを利用した分解

また、色依存光重心シフト (color-dependent centroid shift) の測定という手法もある。ソース天体とレンズ天体が異なる色を持つ場合、二天体の光重心位置は波長によって異なる。ソース天体の明るさは光度曲線から測定できるため、二色以上のバンドで高空間分解能撮像を行い、それらのバンドでのターゲット (ソース天体+レンズ天体) の明るさ及び光重心位置の差から、相対固有運動 μ とレンズ天体の明るさ F_L を測定することができる。

一般に光重心位置の決定精度の方が空間分解能より高いため、増光後の待ち時間は上述のレンズ天体の直接分解より少なく済むが、異なる画像間でのサブミリ秒角精度での位置の較正が必要で、発展途上の手法である。これまでの検出例は二例で [15, 16]、うち一つは、増光から1.8年後にわずか6ミリ秒角離れたソース天体とレンズ天体

*1 より正確には、ソース天体の明るさは光度曲線から測定できるが、ソース天体やレンズ天体の伴星等の他の星の混入確率が無視できないため、レンズ天体の明るさを強い確度で検出できないことが多い。このことを初めて定量的に示したのが筆者の博士論文の仕事である [10, 11] が、本稿では簡単のために混入の話は割愛する。

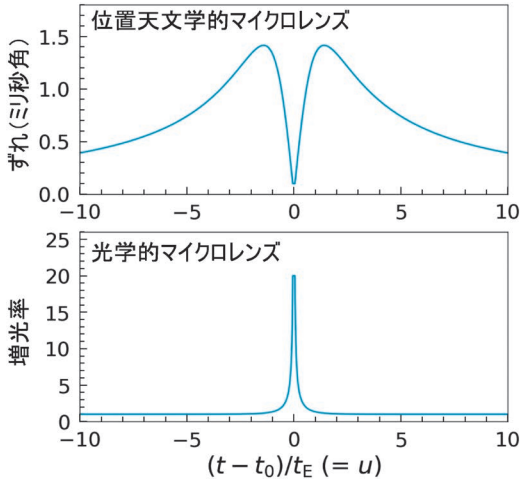


図7. 位置天文学的マイクロレンズ (上図) と光学的マイクロレンズ (下図) の時間進行の比較. アインシュタイン角半径 θ_E が4ミリ秒角 (2 kpcにある5太陽質量のレンズ天体に相当) と大きい時.

の色依存光重心シフトを $\sim 2\sigma$ で検出した [15].

4. 位置天文学的マイクロレンズ

位置天文学的マイクロレンズでは、イベントの位置の時間変化を高精度測定することにより、固有運動から予想される本来のソース天体の位置からの“ずれ”を測定する。図7に示すように、光学的マイクロレンズよりもイベントの継続時間が長く、増光終了後であっても位置のずれは生じ続ける。

重力マイクロレンズイベントの天球面上における様子を図8に示した。座標中心にレンズ天体があり、ソース天体は速度 μ で左から右に動いていく。各時刻において、ソース天体とレンズ天体を結んだ線上に二つの歪んだ像（濃い青）が作られる。この二つの像の面積の和が観測される明るさに相当する。天球面上でのソース天体とレンズ天体の離角を u (単位は θ_E) とすると、像の面積は u が小さいほど大きくなり、 $u \ll 1$ の時は、ソース

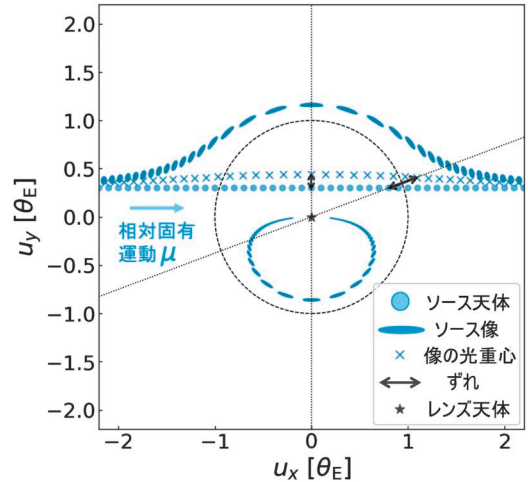


図8. 天球面上での重力マイクロレンズイベントの進行の様子.

天体は $\sim 1/u$ 倍に増光して観測される。一方で、 $u \gg 1$ の時は増光率は $\sim (1+1/u)$ となり、 u が大きくなると急激に下がる (図7の下図)。

一方、位置天文学的マイクロレンズにおける観測は、像の光重心位置 (×印) とソース天体の実際の位置 (青丸) のずれ (灰色矢印) である。光重心は二つの像の面積比と離角で決まり、兼ね合いの結果、 $u = \sqrt{2}$ のときに、ずれは $\sim 0.35 \theta_E$ の最大値をとる。 $u \gg 1$ のとき、ずれは $\sim \theta_E/u$ になり、光学的マイクロレンズに比べて遥かにゆっくと小さくなっていく (図7の上図)。

大きな u までずれを生じるため、衝突断面積もその分大きく、増光が検出できない時でも位置の精密測定のみで重力マイクロレンズを検出できる。後述のGaiaによる時系列での位置天文データが公開されると、そのような発見も期待されるが、これまでのところ、発生が予想されていたイベント*2を除いては、位置のずれのみから発見されたイベントは報告されていない。ここでは増光で発見された銀河系バルジ方向のイベントに対

*2 紙面の関係上割愛するが、Gaiaカタログ以前に発生が予想されて測定された位置天文学的マイクロレンズとしては、太陽最近傍 (5.5 pc) の白色矮星の質量測定 [19]、プロキシマ・ケンタウリの質量測定 [20] がある。

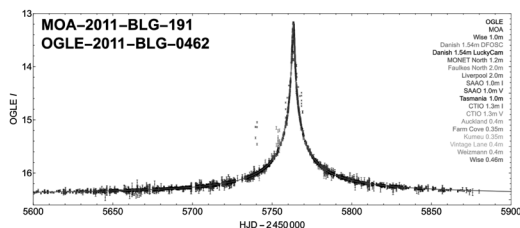


図9. 2011年に増光したブラックホール候補イベント MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462の光度曲線 [21].

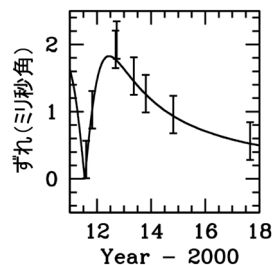


図10. ハッブル宇宙望遠鏡によるMOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462の位置天文学的マイクロレンズの測定結果 [21].

する位置天文学的マイクロレンズの今のところ唯一の有意な検出例と、その解釈をめぐる論争を紹介する。

4.1 単独恒星質量ブラックホールの発見!?

重力マイクロレンズは、質量降着をしていない単独恒星質量ブラックホールの唯一の発見手段としても注目されてきた。アインシュタイン半径通過時間 t_E が数百日にもなるようなブラックホール候補天体はこれまでに何個も発見されていた [17, 18]。2.3節で述べたように、 t_E が長いイベントではパララックス効果からマイクロレンズ視差 π_E を測定することができるのだが、アインシュタイン角半径 θ_E の測定*3が難しく、質量測定からブラックホールであると断定されたものは長らく報告されなかった。

そのような背景の中、2022年にKailash C. Sahuらが、ついに世界で初めての単独恒星質量ブラックホールの発見を報告した [21]。Sahuらは2011年に増光した t_E が約270日のブラックホール候補イベント(図9)の位置のずれをハッブル宇宙望遠鏡を用いて2011年から2018年まで追観測し(図10)、レンズ天体の質量を 7.1 ± 1.3 太陽質量と測定した。

ところが、その報告の数日後に、Casey Y. Lamらによる同天体の独立解析論文が投稿された [22]。Lamらは、レンズ天体は質量が1.6 - 4.4太

陽質量の、中性子星かブラックホールであるという、Sahuらとは異なる結論を主張した。二つの論文の主な違いは二点ある。一点目は、用いたデータである。Lamらは、Sahuらが撮った2011年から2018年のハッブル望遠鏡のデータ*4に加え、2021年に自分たちが提案して撮ったハッブルのデータも用いた。二点目は、データセットの重みの付け方である。Lamらによると、地上望遠鏡の光度曲線データが支持するマイクロレンズ視差 π_E の値と、ハッブル望遠鏡のデータが支持する π_E の値が異なっており、二つのデータセットの重み付けの仕方により結論は異なるという。Lamらはデータ点を等しく重みづける場合(データ点が多い光度曲線の π_E が採用される)と、二つのデータセットを等しく重みづける場合の二通りで質量測定を行い、それらを合わせた結果、1.6-4.4太陽質量というSahuらよりも大きな測定誤差を報告した。二つの論文の結論の差が、上述の二点の違いから来ているのか、それ以外から来ているのかはわからないとLamらは述べている。なお、Sahuらはそのような地上観測データとハッブルのデータの不一致は報告していない。

このように、どちらの結果を信じていいかわからない状況が数カ月続いた後に、Przemek Mrózらが、地上光度曲線データにおいて主要な役割を

*3 ブラックホールであるのでレンズ天体の明るさ F_L は測定できない。(F_L を測定することで候補から外すことはできる。)

*4 観測提案者(Sahuら)がデータを独占できる期間が過ぎており、既に公開されていた。

果たした OGLE データの再解析を行い、Sahu らの結論を支持する結果が得られたと報告した [23]. これにより、ひとまずは Sahu らの恒星質量ブラックホールであるという結論がもっともらしいという印象を筆者は抱いている. Lam らは論文出版後にもハッブル望遠鏡による追観測を行っており、今後その最新データも含めた解析結果の続報が待たれる. 増光終了から 10 年以上が経過してもなお有用なデータが得られることが位置天文学的マイクロレンズの強みであり、モデルの決定に時間がかかるという点で弱みでもある.

5. ソース像の分解

重力マイクロレンズ現象は、当時ワシントン DC のレストランで働いていたアマチュア科学者の Rudi W. Mandl [24] に強く促されてアインシュタインが書いた 1936 年の論文 [25] で初めて言及された. アインシュタイン自身はこの現象の観測可能性に関して（当時の技術を考えれば当然だが）否定的で、増光現象に関しては “there is no great chance of observing this phenomenon” だと述べ、ましてや作られるソース像の分解に関しては、 “the light coming from the luminous circle can not be distinguished” と述べている.

CCD の登場により “no great chance” である重力マイクロレンズ現象はこれまでに 1 万イベント以上発見された. そして、 “can not be distinguished” とまで言われたソース像の分解すら、近赤外線干渉計の登場により 2019 年に Subo Dong らによってついに達成された [26]. 近赤外線干渉計の利用にはターゲットが明るい必要があり、 ~ 8 kpc 離れた銀河系バルジ方向の重力マイクロレンズ現象は暗すぎた. そこで Dong らは、2017 年に群馬県の小嶋正さんが発見した近傍の明るい重力マイクロレンズ現象 [27, 28] に注目し、8 m 望遠鏡を 4 つ組み合わせた近赤外線干渉計である VLTI GRAVITY を用いてそのイベントのソース像を分解し、アインシュタイン角半径 θ_E

を 1.6% の精度（通常は 10% 程度）で測定した.

近赤外線干渉計の利用は近傍の非常に明るいイベントに限られ、これまでの分解例は二例のみである [26, 29]. しかし、2022 年 10 月から、従来より遥かに高感度な GRAVITY dual-field wide という新しい観測モードが利用可能になった. 筆者の友人のパリ天体物理学研究所の Clément Ranc 氏の計算によると、平均して毎年 100 以上の銀河系バルジ方向のイベントがこのモードで観測可能な明るさに達するようだ. ただし、分解能は最大でも 2 ミリ秒角ほどで、実際に θ_E が測定可能であるのはその中のさらに数%の、 $\theta_E > 1$ ミリ秒角であるようなイベントのみである.

干渉縞を得るには、それぞれのソース像がある程度近い明るさを持つ必要があるため、増光のピーク付近におけるタイムリーな観測がこの手法には要求される. 一方で、レンズ天体を分解する手法のような、長い待ち時間やレンズ天体の明るさは必要なく、位置天文学的マイクロレンズのように超高精度位置天文観測を長期間にわたり行う必要もないため、今後、ブラックホールのような重いレンズ天体の質量測定を短期間でできる新手法として期待される.

6. Gaia カタログの利用

2013 年に ESA が打ち上げた位置天文衛星 Gaia は、およそ 20 億の星の三次元の位置・速度を測定し、史上最大かつ最も精密な銀河系の地図を作ることを目指す [30]. そのデータカタログは段階的に公開されており、2016 年に最初のデータ公開 (DR1 [31]) がされて以降、2022 年 6 月に最新の DR3 カタログが発表され [32], 15 億近い天体に対する、天球面上での位置と固有運動、年周視差の値が公開されている. 残念ながら重力マイクロレンズの発生頻度が一番高い銀河系バルジ方向では、星が混み過ぎていることや、星間塵による減光の影響で精度の良い位置天文データは Gaia では得られないが、銀河系バルジ以外の方

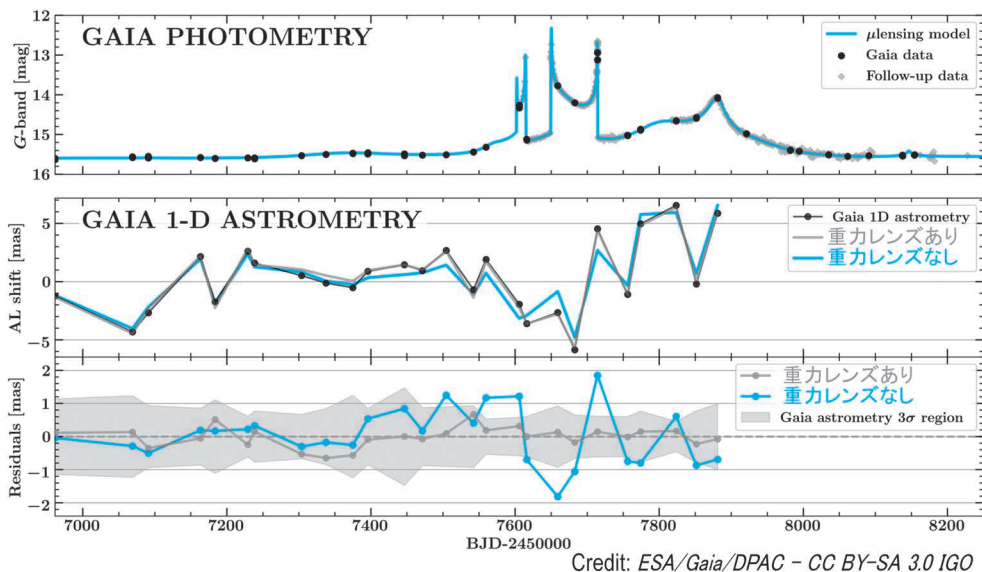


図 11. Gaia チームによって実証された位置天文学的マイクロレンズの測定 [33]. 上のパネルが光度曲線. 真ん中のパネルが平均位置からのずれで, 重力レンズ効果を考えなかったときの運動 (固有運動+年周視差のみ) のモデルに比べ, 考えた時の方がデータに合っている. 下のパネルがそれぞれのモデルとデータの残差を示している. 影の領域が 3σ の測定誤差.

向では, 位置天文学的マイクロレンズの検出を期待できる.

時系列の位置天文データの一般公開はまだ先だが, Gaia が位置天文学的マイクロレンズを検出する能力を持つことは既に Gaia チームにより実証されており, 図 11 に示した連星レンズイベントにおいて, 有限ソース効果から得られた θ_E と一致する値が位置天文学的マイクロレンズからも測定されている [33]. また, 固有運動カタログを用いた未来の重力マイクロレンズ現象の“予報”は 2018 年ごろから多数されており (例えば [34–36]), 実際に予報に基づいてハッブル望遠鏡で位置のずれを観測し, 太陽近傍の白色矮星の質量を測定した研究が今年発表された [37]. ほかに, Gaia カタログ内で位置天文フィットがうまくいっていない光学的マイクロレンズイベントを探し, それが位置天文学的マイクロレンズによるずれの影響だと仮定することで, カタログ値を再現するようなアインシュタイン角半径を推定したユニークな研究もある [38].

7. Roman 宇宙望遠鏡による重力マイクロレンズ探査

2026 年に打ち上げ予定の NASA の Roman 宇宙望遠鏡 (Nancy Grace Roman Space Telescope) は, 広視野近赤外線カメラを搭載した口径 2.4 m の望遠鏡であり, 主目的の一つが宇宙からの銀河系バルジ方向の重力マイクロレンズ探査である [39]. 図 10 の観測を行ったハッブル望遠鏡の WFC3 カメラとほぼ同等の測光精度・分解能を持ちながら, WFC3 の約 140 倍の 0.28 平方度という広視野を撮像でき, 銀河系バルジ方向の約 2 億個の星を 15 分に一度という高頻度で観測する. Roman が周回する L2 軌道から銀河系バルジ方向が観測できるのは 1 年のうち春・秋シーズンのそれぞれ 72 日間であり, 5 年間のメインサーベイ期間のうち, 最初の 3 シーズンと最後の 3 シーズンの計 432 日間を観測し, ~ 200 個の地球質量惑星を含む, 計 ~ 1400 個の惑星の発見が期待される [40]. Roman の惑星探査の詳細は住氏の記事 [2]

も参照されたい。

現在我々が抱えている質量測定の困難さは、Roman時代には一変し、発見する惑星系の6割以上で質量が測定でき、質量測定ありの惑星発見数ではKepler衛星をも凌ぐと期待されている^{*5}。これは、超高精度の測光・位置観測を15分頻度で72日間、5年間にまたがる6シーズン行うことで、ある程度の明るさをもつレンズ天体は3節で述べた二つの手法により分解できるし、ある程度大きなアインシュタイン角半径を持つレンズ天体は、4節で述べた位置天文学的マイクロレンズが検出可能になる（例えば [41]）ためである。また、地上サーベイでは $t_E \geq 60$ 日のイベントでしか測定できなかったマイクロレンズ視差 π_E も、 $t_E \geq 4$ 日であれば測定可能である [42]。

4.1節で述べたように、ブラックホールのような重い天体に対する位置天文学的マイクロレンズはタイムスケールが非常に長く、Romanのメインサーベイ期間である5年以上イベントが続くものも多い。しかし、今年投稿されたSedighe SajadianとSahuの研究によると、Romanが銀河系バルジを観測する3+3シーズンの間のギャップ期間に低頻度でも観測することができれば、およそ3割のブラックホールイベントで質量を10%以下の誤差で測定可能になるそうだ [44]。銀河系内の全天体に占めるブラックホールの数の割合を0.01%だと仮定すると約20個、0.1%だと仮定すると約200個のブラックホールの質量を測定できることになる。これに加えてメインサーベイ終了後も何度かRomanや他の望遠鏡を用いて追観測をすることによって、この数はさらに増えるだろう。

唯一、Roman単独では質量測定が不可能な

のが、 $t_E \ll 1$ 日であるような低質量天体であり、 ~ 100 万km離れたちょうどいい位置にいる他の望遠鏡との同時観測によるスペースパララックスの測定が必要である。L2と地球の距離がまさに“ちょうどいい位置”に相当し、次節で述べるJASMINEもその位置にいる。

8. JASMINE

最後に日本初の位置天文衛星として、2028年の打ち上げを目指して現在開発が進んでいるJASMINEへの重力マイクロレンズ研究の観点からの個人的な展望を述べる。JASMINEの主目的の一つが、銀河系の中心にある中心核円盤の星々の位置と速度を精密に測定し、力学構造から銀河系の歴史を紐解くことである。口径が36 cmと小さいが、約7万個の非常に明るい星にメインターゲットを絞っており、3年間の高頻度観測のデータを組み合わせることにより、125マイクロ秒角の精度（特に明るい6000個では25マイクロ秒角の精度）で星の位置を決定する^{*6}。

位置の時間変化を追う必要がある位置天文学的マイクロレンズでは、各時刻における天体位置の測定精度が重要となり、この精度は3年間のデータを合わせた上記の精度よりも悪い。しかし、ブラックホールイベントのような、アインシュタイン角半径が非常に大きく、ゆっくりと進行するイベントであれば位置のずれを検出できるかもしれない。JASMINEの ~ 7 万個のターゲットに対する光学的マイクロレンズの発生期待値は1年間に ~ 10 個ほどで、銀河系バルジ方向と同じと仮定するとその中にブラックホールが含まれる確率は低い。しかし、増光を伴わない位置天文学的マイ

*5 ちなみにRomanはトランジット法でも惑星を発見でき、2地球半径までの惑星を 10^5 個以上発見すると見積もられている [43]。この数はKeplerの惑星発見数の数十倍と驚異的だが、主星が遠く分光等の追観測が難しい。

*6 JASMINE計画の詳細は本特集の郷田氏の記事（2023年7月号）を参照のこと。

*7 ただし、増光が検出できない場合は、JASMINEの3年間の観測データのみでは長期間のイベントのモデルを決定するには十分でない可能性が高く、その後の追観測や、JASMINE打ち上げ前から同領域を定期的に観測すると期待されるRomanのデータと組み合わせる必要があるだろう。

クロレンズであれば衝突断面積が大きいので、発生期待値は1のオーダーに届きうる*7。

筆者個人としては、JASMINEの安定した測光精度での高頻度観測に期待している。主星を持たない浮遊惑星による増光は、発生頻度はブラックホールイベントほど低くないものの、イベントの継続時間が短く ($t_E \lesssim 0.1$ 日)、地上からの天気によって左右される観測ではなかなか捉えることができず検出効率は低い。宇宙からの安定した連続観測では検出効率は飛躍的に向上するため、メインターゲットの ~ 7 万天体に限らず、より暗い天体も含まれるフルフレームイメージのデータを数十分頻度で利用することができれば、浮遊惑星イベントの検出を期待できる。RomanとJASMINEの観測フィールドがどれくらいオーバーラップし、どれくらいの頻度で観測されるかはまだわからないが、Roman単独では質量測定ができないほぼ唯一の天体が浮遊惑星であるため、Roman+JASMINEの同時観測によるスペースパララックスを利用した浮遊惑星の質量測定を夢想している。

9. 終わりに

重力マイクロレンズにおけるレンズ天体の質量と距離の測定法の一つとして、高精度の位置天文学が利用できることを見てきた。位置天文学特集であるにも関わらず、脇道に逸れた内容も含めたことをご容赦願いたい。これは、位置天文学はあくまでも質量測定のための一つの手段であるため、その文脈で語られるべきであるという筆者の考えと、レンズ天体の質量測定にフォーカスした重力マイクロレンズ法の日本語の文献はなかったように見受けられたため、僭越ながらこの機会にしたためたかったという動機とに基づいている。

2026年にRoman望遠鏡が打ち上がると、重力マイクロレンズ法による系外惑星やブラックホールの探査は全盛を迎える。Romanのデータ及びその解析ツールは公開されるため、研究成果を誰が先に出すかという熾烈な競争が予想される。本

稿で扱った高精度位置天文学を含め、技術の発展とともに、重力マイクロレンズでできるサイエンスの幅は広がっている一方で、日本の重力マイクロレンズのコミュニティはまだ小さく、それらの新技術を十分に扱える人材が足りてるとは言い難い。今後、重力マイクロレンズに興味を持っていただける方が増え、地上サーベイ時代をリードしてきた日本が、Roman時代においても十分な存在感を発揮し続けられることを望んでいる。

謝辞

本稿の執筆機会をくださり、多くのフィードバックをくださった天文月報編集委員の福井暁彦氏にお礼を申し上げます。専門的な観点からのコメントをいただいた大阪大学の鈴木大介氏、JAXAの宮崎翔太氏、色依存光重心シフトに関する質問に答えてくださったNASAゴダード宇宙飛行センターのDavid P. Bennett氏、近赤外線干渉計に関する質問に答えてくださったパリ天体物理学研究所のClément Ranc氏、JASMINEの最新情報を教えてくださったUniversity College Londonの河田大介氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Koshimoto, N., et al., 2017a, AJ, 153, 1
- [2] 住貴宏, 2017, 天文月報, 110, 688
- [3] 新倉広子, 2020, 天文月報, 113, 6
- [4] Paczynski, B., 1986, ApJ, 304, 1
- [5] Alcock, C., et al., 1993, Nature, 365, 621
- [6] Hosokawa, M., et al., 1993, A&A, 278, L27
- [7] Hog, E., et al., 1995, A&A, 294, 287
- [8] Miyamoto, M., & Yoshii, Y., 1995, AJ, 110, 1427
- [9] Koshimoto, N., et al., 2021, ApJ, 917, 78
- [10] Koshimoto, N., et al., 2017b, AJ, 154, 3
- [11] Koshimoto, N., et al., 2020, AJ, 159, 268
- [12] Bhattacharya, A., et al., 2018, AJ, 156, 289
- [13] Batista, V., et al., 2015, ApJ, 808, 170
- [14] Bennett, D. P., et al., 2015, ApJ, 808, 169
- [15] Bennett, D. P., et al., 2006, ApJ, 647, L171
- [16] Dong, S., et al., 2009, ApJ, 695, 970
- [17] Bennett, D. P., et al., 2002, ApJ, 579, 639
- [18] Wyrzykowski, L., et al., 2016, MNRAS, 458, 3012
- [19] Sahu, K. C., et al., 2017, Science, 356, 1046
- [20] Zurlo, A., et al., 2018, MNRAS, 480, 236

- [21] Sahu, K. C., et al., 2022, *ApJ*, 933, 83
[22] Lam, C. Y., et al., 2022, *ApJ*, 933, L23
[23] Mróz, P., et al., 2022, *ApJ*, 937, L24
[24] <https://www.sciencenews.org/blog/context/amateur-who-helped-einstein-see-light> (2023.3.2)
[25] Einstein, A., 1936, *Science*, 84, 506
[26] Dong, S., et al., 2019, *ApJ*, 871, 70
[27] 小嶋正, 2018, *天文月報*, 111, 782
[28] Fukui, A., et al., 2019, *AJ*, 158, 206
[29] Cassan, A., et al., 2022, *Nature Astronomy*, 6, 121
[30] Gaia Collaboration, et al., 2016a, *A&A*, 595, A1
[31] Gaia Collaboration, et al., 2016b, *A&A*, 595, A2
[32] Gaia Collaboration, et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv: 2208.00211
[33] https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20210924 (2023.3.2)
[34] McGill, P., et al., 2018, *MNRAS*, 478, L29
[35] Bramich, D. M., 2018, *A&A*, 618, A44
[36] Klüter, J., et al., 2022, *AJ*, 163, 176
[37] McGill, P., et al., 2023, *MNRAS*, 520, 259
[38] Jabłońska, M., et al., 2022, *A&A*, 666, L16
[39] Spergel, D., et al., 2015, arXiv e-prints, arXiv: 1503.03757
[40] Penny, M. T., et al., 2019, *ApJS*, 241, 3
[41] Gould, A., & Yee, J. C., 2014, *ApJ*, 784, 64
[42] Zhu, W., & Gould, A., 2016, *Journal of Korean Astronomical Society*, 49, 93
[43] Montet, B. T., et al., 2017, *PASP*, 129, 044401
[44] Sajadian, S., & Sahu, K. C., 2023, arXiv e-prints, arXiv: 2301.03812

Gravitational Microlensing Study Via Astrometry

Naoki KOSHIMOTO

NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

Abstract: Gravitational microlensing is a phenomenon in which the light from a background star is bent by the gravity of a lens object passing in front of it to reach the observer. In microlensing studies, astrometry helps to measure the mass of a lens object, and is the only method of measuring the mass of an isolated stellar mass black hole so far. In this article, I introduce examples of the recent increase in the use of astrometry for gravitational microlensing studies and discuss prospects for some future projects.