

恒星の固有運動を考慮した クェーサーマイクロレンズ現象

米 原 厚 憲

要 旨

クェーサーマイクロレンズ現象は、背景クェーサーと前方銀河内の恒星の相対運動によって引き起こされる。その際、恒星の固有運動を考慮することで期待される、マイクロレンズ現象の性質の変化について数値計算を用いた評価を行った。過去行われた計算よりも高精度の計算を行った結果、固有運動はマイクロレンズ現象のタイムスケールの分布を大きく変化しないまま、増光の大きさの分布を変化させることが分かった。

キーワード： クェーサー、系外惑星、重力レンズ、固有運動、マイクロレンズ現象

1. 研究の背景と目的

これまでの様々なサーベイ観測プロジェクトにより、前方にある銀河による重力レンズ現象で多重像に観測されるクェーサー（多重像クェーサー）が多数発見されてきた（例えば、Inada, Oguri, Shin et al. (2012)）。これら多重像クェーサーに関わる現象は、宇宙論に関わる様々な物理を探る上で有用である（例えば、Kundić et al. (1997)）ばかりでなく、重力レンズ現象を引き起こしている前方の銀河（レンズ銀河）の質量測定を可能にする（例えば、Lehár, Falco, Kochanek et al. (2000)）など、宇宙物理学の研究において多様な情報を提供してくれる。

多重像クェーサーの像から放たれた電磁波は、レンズ銀河内部を通過してくることから、レンズ銀河内の恒星による重力レンズ現象（マイクロレンズ現象）により、レンズ銀河全体による重力レンズ現象での増光に加え、マイクロレンズ現象による増光も受ける。そして多重像クェーサーの像と恒星の相対運動により、マイクロレンズ現象は多重像クェーサーの光度変動として観測される（クェーサーマイクロレンズ現象、Wambsganss (1990)）。クェーサー自身も光度変動を示すが、多重像全てが同一のクェーサーであることから、多重像間の時間の遅れを考慮すれば、クェーサー自身の光度変動は多重像で全く同じように観測される。一方で、マイクロレンズ現象は多重像の前にある恒星によって引き起こされるため、マイクロレンズ現象による光度変動は多重像おのおの独立なふるまいを示すことから、クェーサー自身の光度変動と区別することが可能であり、Irwin et al. (1989) による発見を皮切りに、実際に多くのクェーサーマイクロレンズ現象が発見されてきた。そしてクェーサーマイクロレンズ現象時の光度変動からは、クェーサー中心部の構造を空間分解できる（例えば、Mineshige

& Yonehara (1999))。そして近年は、クェーサーマイクロレンズ現象による銀河系外惑星の発見報告がされるまでにいたった (Dai & Guerras (2018))。

クェーサーマイクロレンズ現象のタイムスケールは、恒星とクェーサーの相対運動による増光パターンの時間変化のタイムスケールで決まる。そのため、レンズ銀河が $z=0.0394$ と我々に非常に近い Q2237+0305 という多重像クェーサー ($z=1.695$) は、レンズ銀河とクェーサーの相対速度がレンズ銀河の運動速度にして数千 [km/s] と比較的大きいと考えられており、固有運動に期待される速度よりも十分に大きい。そのため、数か月のタイムスケールのマイクロレンズ現象が期待され、実際に検出されたクェーサーマイクロレンズ現象の観測結果とも矛盾していない。しかし他の多重像クェーサーの場合、レンズ銀河は $z \sim 1$ と我々から十分に遠いことから、そのタイムスケールは数十年程度と非常に長く、その検出はあまり現実的ではないと考えられてきた。しかし近年の観測で、様々な多重像クェーサーでクェーサーマイクロレンズ現象の検出が報告されるようになった。このことは、クェーサーマイクロレンズ現象の発生に対して、恒星の固有運動の影響が無視できないことを示唆している。

観測結果の解釈には通常、逆光線追跡法を用いた数値計算によって増光パターンを生成する。その際、恒星の固有運動を考慮すると計算コストが非常に高くなることから、レンズ銀河と多重像クェーサーの相対速度を大きくすることで、固有運動を実効的に取り入れたと見なし (例えば Wythe, Webster, and Turner (1999))、固定された増光パターン中を多重像クェーサーが移動するとして計算された理論的な光度変動が観測と比較されてきた。しかし恒星の固有運動は、増光パターンそのものを变形させるため、固有運動の効果がレンズ銀河と多重像クェーサーの相対速度を大きくすることだけで正しく考慮されているかは自明ではなく、観測結果を正しく解釈できているという保証はない。これまでに Wamgsganss & Kundić (1995) によって、恒星の固有運動を考慮したマイクロレンズ現象時の増光パターンの計算が行われたが、その結果は“恒星状天体の固有運動のみを考慮すると、同程度のレンズ銀河と多重像クェーサーの相対運動のみを考慮した場合と比較して、マイクロレンズ現象時の光度変動が、より短時間で急激に変化するようになる”という定性的な違いに簡単に言及したのみであり、その後は固有運動の影響に関する系統的な研究はほとんど行われていない。また当時クェーサーマイクロレンズ現象の具体的な対象として考えられたのが前述の Q2237+0305 のみであったこともあり、固有運動の影響について十分に検討されたとは言い難い。

そこで本論文では、改めて固有運動を考慮したクェーサーマイクロレンズ現象による増光パターンを計算し、固有運動を考慮しない場合との違いを統計的に示すことで、観測結果の解釈にどのような影響があるかを考察する。

2. クェーサーマイクロレンズ現象とその計算

クェーサーマイクロレンズ現象は、着目している像の位置におけるレンズ銀河による重力レンズ効果を convergence (κ) と external shear (γ) という 2 つのパラメータで取り入れ、更に像周辺に

ある N 個の恒星状天体によるマイクロレンズ現象を重ね合わせた以下のレンズ方程式で記述される。

$$\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\theta} - \kappa \boldsymbol{\theta} - \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & -\gamma \end{pmatrix} \boldsymbol{\theta} - \sum_{i=1}^N \frac{\theta_{E,i}^2}{|\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_i|^2} (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_i) \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_x, \theta_y)$ と $\boldsymbol{\beta} = (\beta_x, \beta_y)$ はそれぞれ、天球面上においてレンズ銀河の位置で光線が通過する場所、ならびに、背景のクェーサーの位置で光線が通過する場所をそれぞれ表している。また $\boldsymbol{\theta}_i$ と $\theta_{E,i}$ はそれぞれ、 i 番目の恒星状天体の天球面上での位置と、そのアインシュタインリング半径である。

通常は、ある $\boldsymbol{\beta}$ に対してレンズ方程式を満たす $\boldsymbol{\theta}$ (重力レンズ現象で生成される各像の位置に対応) を全て求め、それぞれの $\boldsymbol{\theta}$ でのヤコビアンを計算することで、各像の増光の大きさを求める。しかしクェーサーマイクロレンズ現象の場合、 N が非常に大きいためにレンズ方程式を解くことは、高次の非線形方程式を解くことを意味する。そこで増光のパターンを計算する際には、レンズ銀河の位置で一様かつ高密度に光線を設定し、レンズ方程式を用いて各光線の経路を追跡、クェーサーの位置でどの領域に何本の光線が到達するかを数値計算することで、増光パターンを計算する逆光線追跡法などが用いられる (例えば、Wambsganss (1990))。本研究でも、逆光線追跡法を用いて増光パターンの数値計算を行った。なお実際の計算にあたり、高速化のために GPGPU を用いた計算を行うための計算コードを制作・使用した。

クェーサーマイクロレンズ現象の場合、多数の恒星状天体による重力レンズ現象の重ね合わせによって、今注目している領域から大きく離れた領域に向けて放たれた光線が注目している領域に入ることがあるため、必要となる計算精度に応じて恒星状天体の数や、計算に考慮する領域のサイズを設定する必要がある。今回の計算では、Katz, Balbus, & Paczyński (1986) の評価に基づいて、1% 以下の精度が達成できると考えられる天体数と領域のサイズを設定した。

実際に発見されている多重像クェーサーの像の位置では、様々な κ と γ の値が示唆されているが、どの多重像クェーサーの場合もそれぞれの値は軒並み 1 のオーダーと考えられている。通常 κ は、滑らかに分布している成分 κ_{smooth} と恒星状天体の成分 κ_{star} の和に等しいはずである。様々な値を設定して計算することは可能であるが、本研究では固有運動の影響に着目したいので、簡単のため $\kappa_{\text{smooth}} = \gamma = 0$ とし、恒星状天体による実効的な κ_{star} の値が 1 のオーダーになる場合の計算を行うこととした。恒星状天体の空間分布と各恒星状天体の固有運動の方向はランダムとし、固有運動の速度の大きさはガウス分布に従うものとした。

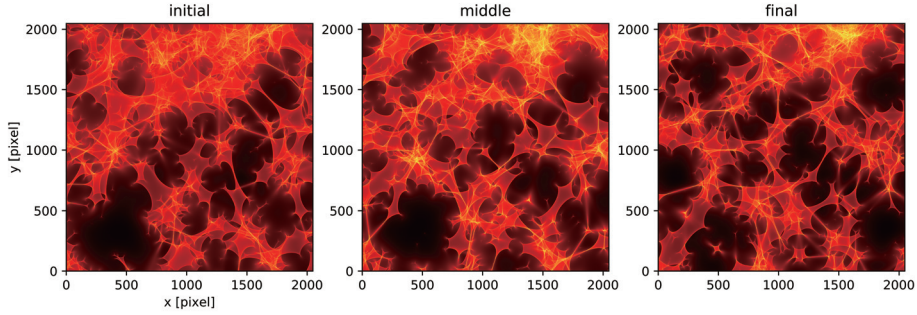


図1 固有運動を考慮した際の増光パターンの計算結果 ($\kappa_{\text{star}}=0.6$ の場合)

今回使用した計算結果の最初 (左)、真ん中 (中)、最後 (右) に相当する。

具体的には、 $\kappa_{\text{star}}=0.6$ で簡単のため全ての恒星状天体の質量は同じとした。今回は、増光パターンはクェーサーの位置で一辺 $20\theta_E$ の正方形の領域を縦横それぞれ 2048 等分して計算を行い、2048 ピクセル \times 2048 ピクセルの増光パターンを生成した。更に、恒星状天体の位置を設定した固有運動に従って更新しながら、計 2048 枚の連続的に変化する増光パターンの生成を行った。連続的に生成した増光パターンの最初、真ん中、そして最後の様子を図1に示している。この場合、1枚の増光パターンを計算するために半径 $83.6\theta_E$ の円形の領域の中に、4196 個の恒星状天体をランダムに分布させており、増光パターンの1ピクセルあたり平均的に 10^5 本の光線を飛ばすように計算を実行した。

ここで θ_E はその定義により、レンズ銀河や多重像クェーサーの赤方偏移、更には典型的な恒星状天体の質量に依存して、以下ようになる。

$$\theta_E \equiv \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ls}}{D_o D_{os}}} \sim 10^{-6} \left(\frac{M}{0.1M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{D_{ol} D_{os}/D_{ls}}{1[\text{Gpc}]} \right)^{-1/2} [\text{arcsec}] \quad (2)$$

ここで、 M は恒星状天体の質量、 D_{ls} , D_{ol} , D_{os} はそれぞれレンズ銀河・多重像クェーサー間、観測者・レンズ銀河間、そして観測者・多重像クェーサー間の角径距離を示す。レンズ銀河、ならびに多重像クェーサーの赤方偏移はそれぞれ典型的に1程度であることから、どの天体の場合であっても、(2)式の最右辺の値程度で大きくは変わらないと考えられる。また、 θ_E に相当する実スケールは θ_E を D_{ol} あるいは D_{os} 倍すれば良く、 $10^{16}[\text{cm}]$ 、あるいは $1000[\text{AU}]$ 程度に相当する。従って、増光パターンの1ピクセル ($\sim 0.01\theta_E$ に相当) は $10^{14}[\text{cm}]$ 程度に相当しており、クェーサー中心部に期待される降着円盤の可視光放射領域のサイズよりは小さなスケールと考えられる。そして仮にレンズ銀河と多重像クェーサーの相対運動の速度が $200[\text{km/s}]$ であった場合、増光パターンの1ピクセルを横切るのに要する時間は数か月に相当する。また、恒星状天体の固有運動の典型的な速度、すなわち運動速度の分布として考えているガウス分布の偏差に相当する値を1ステップあたり $0.002\theta_E$ として

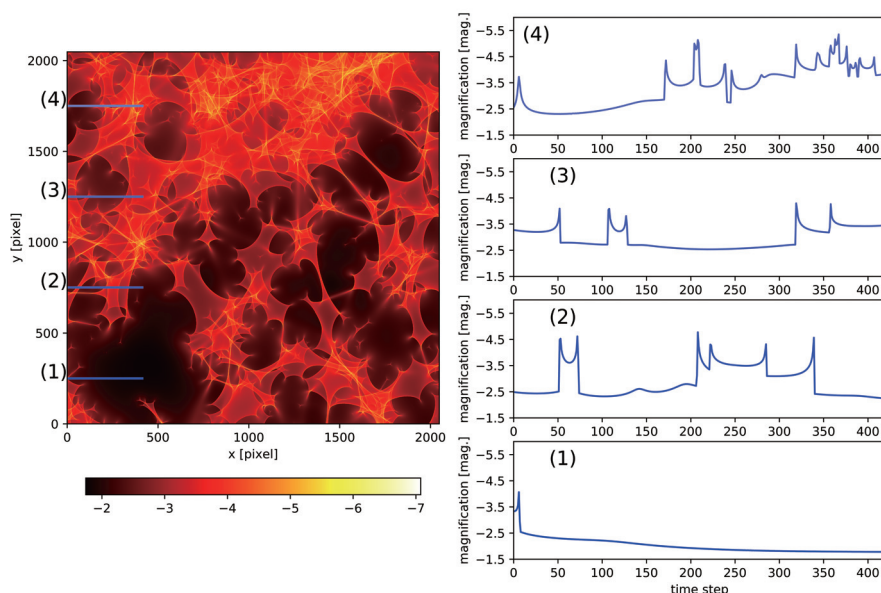


図2 増光パターン（左）と光源天体との相対運動で期待される光度変動（右）。
 増光パターンの色は、黒から白になるにつれて、増光の大きさが大きくなる。
 左図の(1)～(4)の経路を横切った際に期待されるマイクロレンズ現象では、
 右図の(1)～(4)のような光度変動が観測されると考えられる。

数値計算を行った。これは仮に、レンズ銀河内の恒星状天体の速度分散を $200[\text{km/s}]$ である場合には、
 1 ステップが約半月に相当することを意味する。

3. 計算結果とその解析

増光パターンから、任意の方向に沿って連続的に増光の大きさを抽出したものがクェーサーマイクロ
 ロレンズ現象時に期待される光度変動に対応する。レンズ銀河全体と多重像クェーサーの視線と垂直
 な方向の相対速度のみを考慮する場合（以下、bulk の場合）は、単一の増光パターン内である直線
 方向に増光の大きさを抽出したものが光度変動となる（図2参照）。一方で、レンズ銀河内の恒星状
 天体の固有運動のみを考慮する場合（以下、random の場合）はまず、1つの増光パターンからある
 直線状の領域を選び、同じ領域を恒星状天体の位置を変化させながら連続的に計算した増光パターン
 全てから抽出し、つなぎ合わせたパターンを作成する。このパターンの中から、つなぎ合わせた方向
 と平行な方向に増光の大きさを抽出したものが光度変動となる（図3参照）。

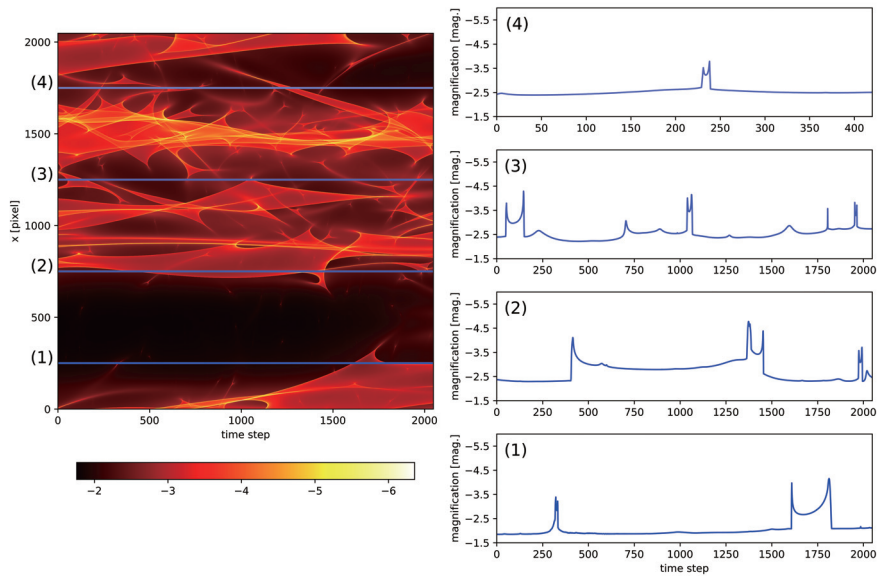


図3 増光パターン（左）と光源天体との相対運動で期待される光度変動（右）。

図2と同様であるが、図2のy軸が（1）の線と同じ領域のみを取り出し、その線上の領域がこの左図の縦軸（左端）の領域に相当する。その領域において、恒星状天体の固有運動によって時間変化する各点の増光の大きさを、横軸に並べたもの。

光度変動は、レンズ銀河と多重像クェーサーの相対速度が、固有運動としての典型的な速度と同じと考えた際、図2の光度変動と同じ時間の長さになるように、図2の光度変動のグラフを作成している。

このようにして計算された光度変動の中から、まず極大とその両隣の極小を抽出する。その後、極大と両隣の極小との差のうち小さい方の半分（ Δm とおく）だけ極大から小さくなるまでの領域を1つのマイクロレンズ現象と見なす。この1つのマイクロレンズ現象に対して、 Δm を増光の大きさ、このマイクロレンズ現象の極大の前と後の時間（それぞれ Δt_- と Δt_+ とおく）の和（すなわち $\Delta t_- + \Delta t_+$ ）をこのマイクロレンズ現象のタイムスケール（ τ とおく）、そして、そのマイクロレンズ現象の光度変動の極大前後での対称性を $| \Delta t_- - \Delta t_+ | / \tau$ で与えるものとする（図4参照）。これらの量を増光パターンのいくつかの場所を利用して抽出した光度変動中に見られる多数のマイクロレンズ現象に対して求め、それらの統計的な性質の比較を行った。今回、の計算した増光パターンをもとに、bulk の場合については2つの大きく異なる増光パターンについてそれぞれ、十分に離れた4つの直線状領域を選び、計8つの直線状領域を用いて光度変動を作成、その中に計381個のマイクロレンズ現象を検出した。またrandomの場合については、増光パターン中に十分に離れた16個の点を選んだ。

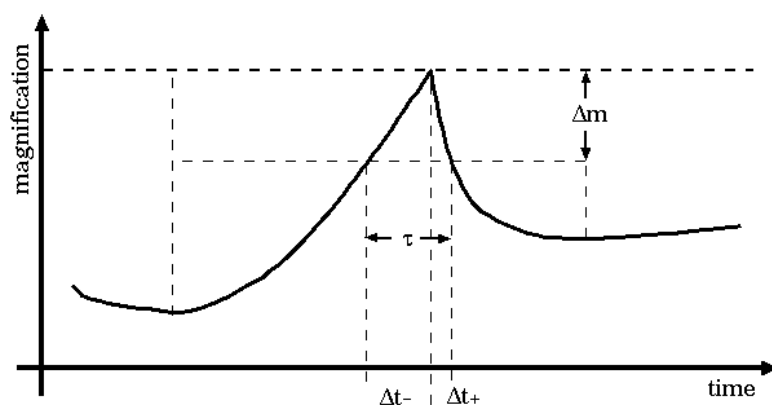


図4 各マイクロレンズ現象の増光の大きさやタイムスケールの評価方法

更にそれらの点の時間変化について、1ステップがbulkの1ピクセルの変化とほぼ同じになるよう、データ点を等間隔で1/5に間引くことで、bulkの場合とタイムスケールを直接比較できる光度変動を作成、その中に計239個のマイクロレンズ現象を検出した。これら数値計算で得られたマイクロレンズ現象に対して、対称性、タイムスケール、そして増光の大きさの統計的性質についてまとめたのが図5である。

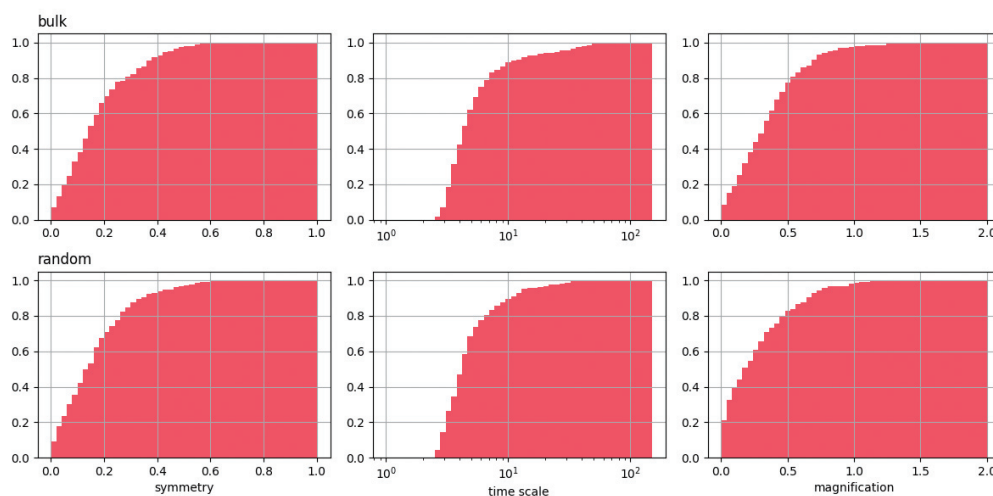


図5 マイクロレンズ現象の統計的性質（上段がbulk、下段がrandom）。

左から順に、対称性、タイムスケール、そして増光の大きさの累積分布。

対称性は値が0のものが極大の前後の時間が等しい場合に相当する。

タイムスケールは、1ピクセルの移動にかかる時間を1としている。

増光の大きさは、等級の絶対値である。

マイクロレンズ現象の特徴を bulk と random で比較したとき、まず対称性には2つの場合で大きな違いが見られない。これらの分布に対してコルモゴロフ・スミルノフ検定（以下、KS 検定）を行った結果、今回の計算結果については確率 0.79 程度で同一の分布であるという結果が得られた。一方で、タイムスケールと増光の大きさについては、その分布に差が見られる。タイムスケールについては bulk に比べて random の方が若干短い値の領域に多いように見える。しかし KS 検定から、これら2つの分布が同一である確率は 0.063 程度とあまり大きくはないが、同一であることを強く棄却できるほどの違いではない。一方で、増光の大きさの分布については、bulk に比べて random の方が、0.3[mag] 以下の小さな値の領域により多く分布しており、KS 検定によりこれら2つの分布が同一である確率は、 2.9×10^{-6} 程度と極めて低いことが分かった。

そこで、bulk と random の違いがより顕著であると考えられる、増光の大きさが 0.25 [mag] 以下のマイクロレンズ現象のみについて、2つの分布を比較した結果を図6にまとめた。この場合、bulk と random の場合でそれぞれ、153 個と 136 個のマイクロレンズ現象が存在する。対称性については先ほどと同様、2つの分布にほとんど差は見られず、KS 検定からも同一の分布である確率は 0.86 程度であることが分かった。同様に、タイムスケールと増光の大きさそれぞれの分布についても KS 検定を行った結果、同一の分布である確率はそれぞれ、0.12 程度、 8.0×10^{-4} 程度となった。タイムスケールの分布については微妙な値であるが、増光の大きさの分布については同一である可能性は低いと考えられる。増光の大きさについては、bulk に比べて random の方が、より多くの小さな増光を示すマイクロレンズ現象が起きることを示している。

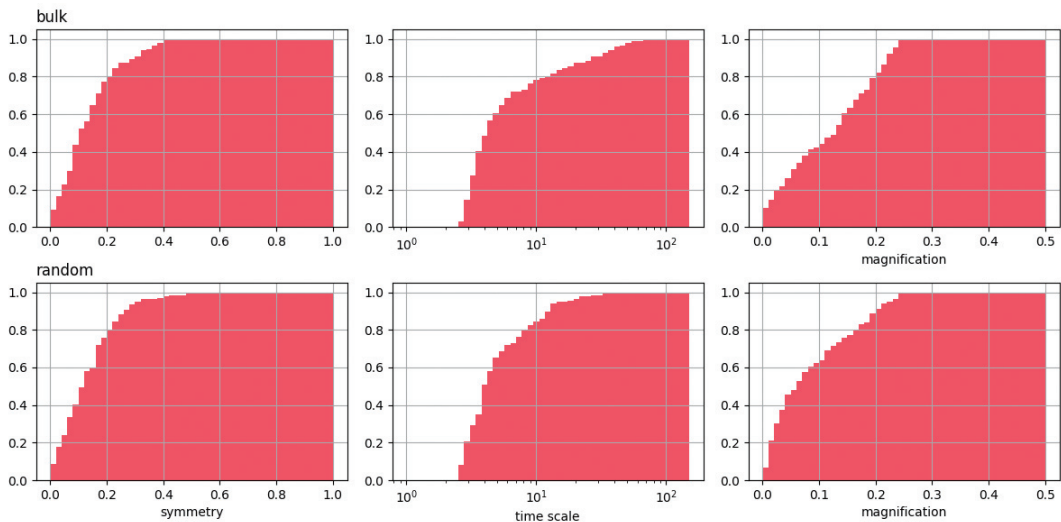


図6 増光の大きさが 0.25 [mag] 以下のマイクロレンズ現象の統計的性質。

上段が bulk、下段が random の場合であり、軸などの意味は図5と同じだが右図（増光の大きさの分布）の横軸は図5と異なる。

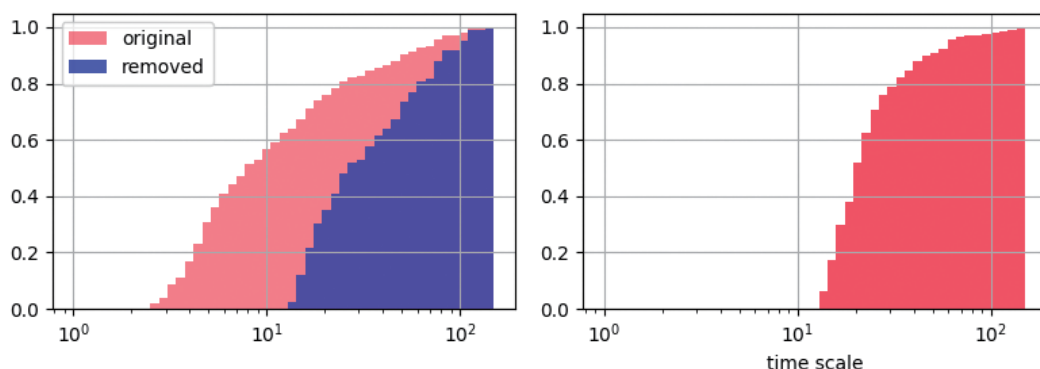


図7 タイムスケールの分布を random についてのみの、時間分解能の異なる光度変動で評価した結果。左図は右図に比べて時間分解能は5倍高い。

なお removed とあるのは、単純に右図の最小のタイムスケール以下を省いた場合の分布である。

4. 議論

今回の計算結果には、恒星状天体の固有運動を考慮することで Wamgsganss & Kundić (1995) で報告されたような、急激な光度変動の割合の増加がはっきりとは現れなかった。タイムスケールについて bulk と random を比較すると、わずかに random の方で短いタイムスケールの現象が多い傾向が見られるが、今回の計算結果からは統計的に有意とは言い難い違いでしかなかった。むしろ、増光の大きさの分布からは、random の方が bulk よりも小さな増光を示すマイクロレンズ現象が多い傾向を示すことが分かった。このことはむしろ、random の方で光度変動が緩やかであることを示唆しており、Wamgsganss & Kundić (1995) とはむしろ逆の傾向を示す結果となった。今回の計算を Wamgsganss & Kundić (1995) の計算と比較すると、計算に用いた増光パターンが今回の方が4倍細かい一方で、Wamgsganss & Kundić (1995) の計算では単純に増光パターンのみを比較するのではなく、 $\sigma = 0.16 \theta_E$ のガウス分布に従う輝度分布をもつ光源を想定して光度変動を計算している。

今回の計算では、bulk と比較するためにわざと random の時間方向のサンプリングを粗くした光度変動について解析を行ってきた。そこで random の場合について、サンプリングが細くなることで、今回の方法で検出されるマイクロレンズ現象のタイムスケールの分布がどのように変化するかを調べたのが図7である。サンプリングが細かい方は当然、より小さなタイムスケールのマイクロレンズ現象まで検出することが可能となるため、これまで比較に用いてきたサンプリングの粗い方と比較して、より小さなタイムスケールまで分布が広がっている。しかし、単純にサンプリングの粗い方で最短のタイムスケールよりも短いタイムスケールのマイクロレンズ現象をサンプリングの細かい方から取り除いた場合の分布と比較しても、2つの分布は大きく異なるように見える。この2つの分布が同一である確率は、KS 検定から 1.4×10^{-4} 程度と低い。輝度分布を考慮することも、ある種の粗視

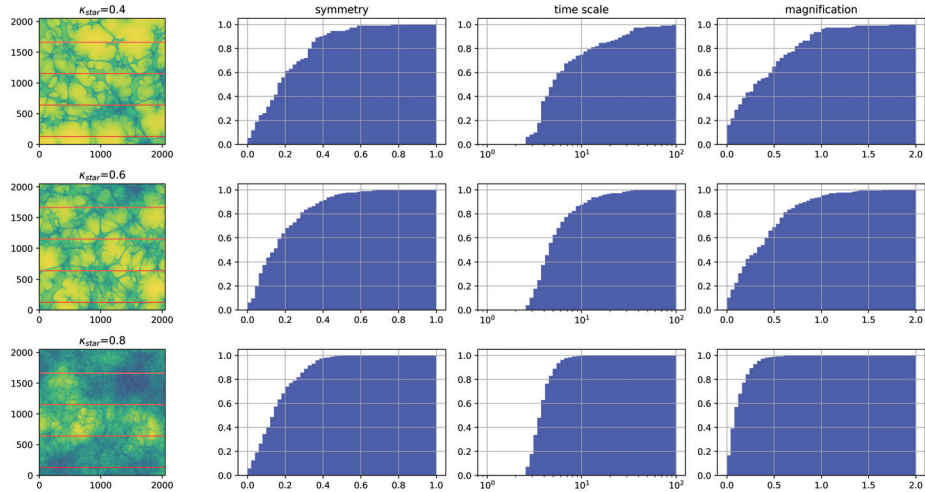


図8 一番左が増光パターン（上： $\kappa_{\text{star}}=0.4$ 、中： $\kappa_{\text{star}}=0.6$ 、下： $\kappa_{\text{star}}=0.8$ ）

その右に、対応する対称性、タイムスケール、増光の大きさの累積分布が順番に並んでいる。図の見方は図5と同じ。

化を行っていると考えられるため、よりサンプリングを粗くする効果があると考えられる。固有運動の効果により正しく理解するためには、より詳細な計算と解析が必要であると考えられる。

またこれまで、観測結果の解釈のために増光パターンと比較する際、固有運動の効果を考慮する代わりに、レンズ銀河全体と多重像クェーサーの相対速度を実効的に大きくして扱うことが常であった。しかし、今回の計算で明らかになった bulk と random を比較したときのタイムスケールや増光の大きさの分布の違いは、単純に相対速度を大きくすることに疑問を呈するものである。そして適切な分布を持った増光のパターンと比較しなければ、観測結果の解釈を間違えることにつながる。図8には bulk のみだが、 κ_{star} の値が異なる3つの場合について、マイクロレンズ現象の対称性、タイムスケール、増光の大きさの分布が示してある。例えば、恒星状天体の面密度を変化させるだけで、増光パターンが変化するだけでなく、マイクロレンズ現象のタイムスケールの分布や増光の大きさの分布が大きく変化していることが分かる。従って、クェーサーマイクロレンズ現象の観測結果から実際の κ_{star} の値を評価するなど、興味ある物理量を適切に導き出すためには、固有運動を適切に考慮する方法の構築と、それを取り入れた解析を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究成果は、総合学術研究所の研究資金の援助により得られた研究成果でもある。その援助に対して、ここで謝意を表す。

[引用文献]

- Dai, X., & Guerras, E., 2018, ApJ, 853, id. L27
Inada, N., Oguri, M., Shin, M.-S., et al., 2012, AJ, 143, id 119
Irwin, M. J., Webster, R.L., Hewett, P.C., et al., 1989, AJ, 98, 1989
Katz, N., Balbus, S., & Paczyński, B., 1986, ApJ, 306, 2
Kundić, T., Turner, E.L., Colley, W.N., et al., 1997, ApJ, 482, 75
Lehár, J., Falco, E.E., Kochanek, C.S., et al., 2000, ApJ, 536, 584
Mineshige, S., and Yonehara, A., 1999, PASJ, 51, 497
Wambsganss, J., 1990, Ph.D. thesis, Univ. München
Wambsganss, J., & Kundić, T., 1995, ApJ, 450, 19
Wyithe, J.S.B., Webster, R.L., & Turner, E.L., 1999, MNRAS, 309, 261

Microlensing study including proper motion of stellar lens objects

Atsunori YONEHARA

Abstract

Quasar microlensing events occur due to relative motion between background quasar and stars in foreground galaxy. In this paper, we evaluate the effect of stellar proper motion on statistical properties of the lensing events by using numerical simulations. Our results based on numerical simulations with higher accuracy indicate that stellar proper motion alters distribution of event magnification without changing distribution of event timescale largely.

Keywords: quasar, exoplanet, gravitational lens, proper motion, microlens event