

マイクロレンズで見るクェーサー中心

米 原 厚 憲

〈日本学術振興会特別研究員 (PhD) / 筑波大学計算物理学研究センター 〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1 丁目 1-1〉
e-mail: yonehara@rccp.tsukuba.ac.jp

クェーサーの発見から現在に至るまでの、精力的な理論的・観測的研究によって、その中心には超巨大ブラックホールとそれを取りまく降着円盤が存在すると考えられるようになった。通常、その中心部を直接空間分解し観測することは不可能であり、間接的な手法によってのみ、中心部の構造は議論される。しかし、重力レンズ現象を用いると、中心部の構造を空間分解する事が可能となる。とすれば、言葉を聞いただけで敬遠されそうな「重力レンズ現象」、中でもマイクロレンズ現象と呼ばれるスケールの小さな現象を用いて、いかに中心部を空間分解するのか、またその有用性について紹介する。

1. はじまりは突然やってくる

あれは忘れもしない、といってもだいぶ記憶が曖昧になってきたくらい昔の、私が修士1年の秋の出来事。いわゆる卒業研究の話をまとめて、「何かブラックホールに関係する研究をやりたい」などと思いつきながら、漠然と研究テーマを探していたときのことだった。当時、プリンストン大学への出張から帰ってきたばかりの嶺重さん（当時、京都大学宇宙物理学教室助教授であり、私のボス）が、さっさささと駆け寄ってきて一言、「よねはらくん、こんなあるけどやってみない？」と僕にある研究テーマを持ちかけてきた。話を聞けば、「クェーサー？ 重力レンズ？ 何か面白そうな臭いがするなあ。」ってなわけで、ボスのアメリカ土産に早速飛び付いたわけである。だがその時点では、このテーマを博士論文まで引き摺ることになるなどとは、夢にも思わなかった。そしてこの「アメリカ土産」は、今となってはチョコレートなどとは比べ物にならないくらい（といっても、アメリカのチョコレー

トは一般にあまり美味しくないと思う）、甘いものが好きな私にとっても貴重なものである。

と、まえふりはこのくらいにして、本題に入ろう。

2. クェーサー中心部を見る!?

これまでの観測的・理論的研究から、クェーサー中心部には超巨大ブラックホールがあり、その周りには降着円盤が存在し、さらにその外側を、ダストトーラス、広輝線領域^{脚注1}、狭輝線領域^{脚注2}と呼ばれるものが取り巻いており、時には中心部からジェットが出ていると考えられている¹⁾。

特に、そのコンパクトさや光度、光度変動のタイムスケール、そして、光学-紫外波長に及ぶスペクトルの再現等から、このような、いわゆる「クェーサーの統一モデル」は広く受け入れられているようである^{脚注3}。しかし、「実際の降着円盤が一体どんなものなのか？ どのくらいの大きさなのか？」といった問いに対して明確な答えを示すには、降着円盤のサイズまで直接空間分解した観測を行い、確固たる観測事実、あるいは証拠を突きつけるべ

(脚注1) または、BLR (Broad Line Region)

(脚注2) または、NLR (Narrow Line Region)

(脚注3) ただし Terlevich らは、爆発的星形成に伴う、超高頻度（例えば一日一つ）の超新星爆発の重ね合せで、これらの特徴を説明できるとするモデルを提案している²⁾。まあ今となっては、ほとんど潰れているとは思うのだが……。

きだと思われる。

ところが、そこに大きな問題がある。サイズが小さい、つまり、既存のいかなる観測装置を持ってしても、その直接空間分解は不可能だということである。仮に、 $10^8 M_{\odot}$ のブラックホールの周りに、 $1000 r_g$ ^{脚注4} に渡って降着円盤が存在していたとしよう。この降着円盤（あるいはキューサー）が宇宙論的な距離、ひとこえ 1 (Gpc) にあったとすると、期待される見掛けの大きさは、大体 $1 (\mu\text{as})$ 程度となる。現在進行中の計画

の中でも一番高い空間分解能を持つものでせいぜい数 (μas) 程度であることを考えれば^{脚注5}、 $1 (\mu\text{as})$ 程度のサイズの天体の構造を調べることは不可能である。

では、今の我々では降着円盤のサイズを計ることすらできず、直接分解可能な観測装置が開発されるまで指をくわえて待つしかないのか？ 答えは「ノー」である。ここで普通の方なら、「今の観測装置で直接観測できないはずなのに、どこをどうやったらそれが可能になるのか？ 怪しげな錬金術のごとき技でも使うのか？」といぶかしがられるに違いない。無論、現在「我々の有する観測装置」

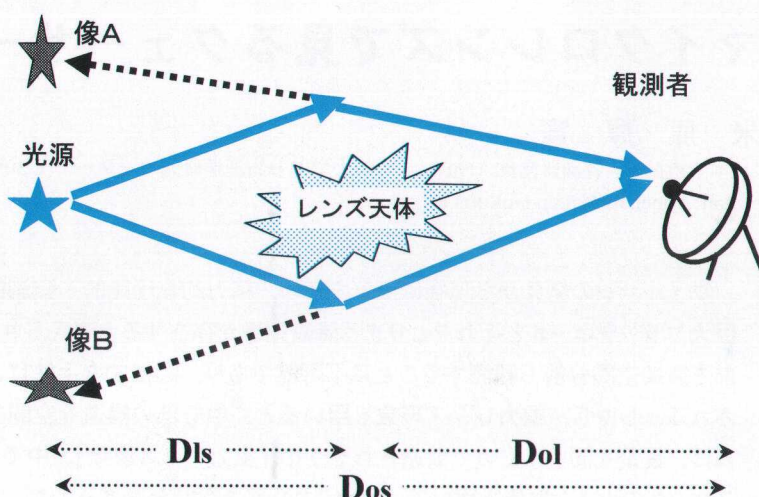


図1：重力レンズ現象の概念図

だけでは不可能である。今は、まともなサイエンスの話をしている（少なくとも私はそのつもりである）ので、当然「我々以外の知的生命体が有する観測装置」を使うなどという話でもない。使うのは「天然の巨大な望遠鏡」こと、「重力レンズ現象」^{脚注6}（図1）」である（ここで、「重力レンズ？なんか難しそうやし、読んでもわからへんのちゃうか？」などと敬遠したり、読むのをやめないでいただきたい）。

さて、この重力レンズ現象で有効に増光される領域の典型的なサイズ^{脚注7}は、アインシュタインリング半径 (θ_E) と呼ばれ、

(脚注4) r_g は Schwarzschild 半径で、 $2GM_{\text{BH}}/c^2$ で表される。ちなみに、 M_{BH} は中心天体（今の場合、ブラックホール）の質量。

(脚注5) 現在、宇宙空間における干渉計計画が国内外で進行中であり、プロジェクトの内容がホームページで紹介されているものもある。例えば、光学波長での Space Interferometry Mission (SIM, <http://sim.jpl.nasa.gov/>) や、X 線での MicroArcsecond X-ray Imaging Mission (MAXIM, <http://maxim.gsfc.nasa.gov/pathfinder.html>) などである。

(脚注6) 一般相対論によれば、光が質量を持つ天体の側を通過する際、その光の経路は曲げられる。これが重力レンズ現象である³⁾。この効果によって、本来観測者に届くはずのない光が、観測者に届くようになり、ある天体の像が複数観測されたり、像の形が歪んだり、また見掛け上明るくなったりする（これが、「天然の望遠鏡」と呼ばれる所以である）。つまり、重力レンズ現象は、宇宙に何らかの天体が存在する限り、宇宙のあちこちで起きてしかるべき現象である。実際、太陽による恒星の位置のズレを測定した Eddington らを始めとして、惑星・恒星から銀河団・大規模構造に至るまでの様々なスケールの重力レンズ現象が現在までに報告されており、その数は現在も増え続けている。

(脚注7) レンズの大きさと読み替えてもらっても構わない。ちなみにこのサイズは、複数できる像同士の間隔の典型的なサイズを表す指標にもなる。

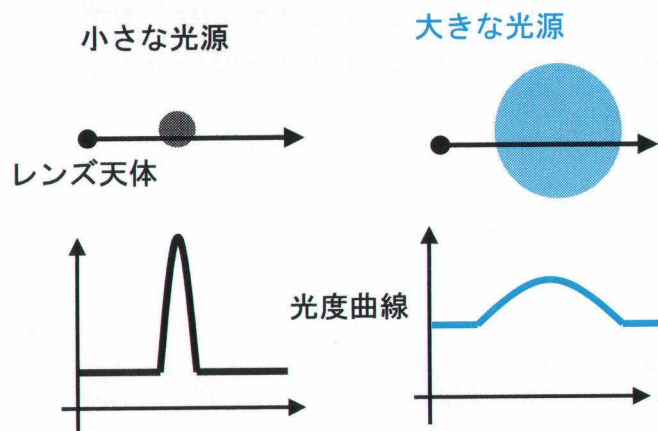


図2：マイクロレンズ現象の光度曲線の、光源のサイズへの依存性の概念図。コンパクトな光源は、短く鋭い光度変動を示し、一方で、広がった光源は、長く緩やかな光度変動を示す。

$$\theta_E = \left(\frac{4GM_{\text{lens}}}{c^2} \frac{D_{\text{ls}}}{D_{\text{os}} D_{\text{ol}}} \right)^{1/2}$$

で表される（ちなみに、 M_{lens} はレンズ天体の質量、 D_{ls} 、 D_{os} 、 D_{ol} はそれぞれ、レンズ天体－光源、観測者－光源、観測者－レンズ天体間の距離^{脚注8}を表す）。このサイズを、クエーサーが光源で（どの距離も大体1 (Gpc) 程度）、太陽質量程度の星による重力レンズ現象（マイクロレンズ現象）の場合について見積もると、1 (μas) 程度となることがわかる。つまり、期待される降着円盤のサイズと同程度になるのである^{脚注9}。このことは、クエーサー中心部の降着円盤は、太陽質量程度の天体による重力レンズ効果によって、有効に増光されることを意味している^{脚注10}。更に、アインシュタインリング半径程度のサイズを持つ光源の場合、重力レンズ効果によってどのような増光を受けるかは、光源

の輝度分布にも依存する。ところで、レンズ天体が適当な速度で光源の前を横切れば、レンズ天体と光源の相対位置の変化に伴い、増光の大きさが時々刻々と変化してゆく。そして、この現象は光度変動として観測され、その光度曲線は光源のサイズや輝度分布に依存することになる（図2）。

このことは、裏を返せば、マイクロレンズ現象が降着円盤の輝度分布のプロープになるということである。つまり、重力レンズ現象を用いて、「クエーサー中心部を見える」ことが可能なのである。

3. 「でも、それってホンマに使えるの？」

というのが素直な疑問であり、かつこの種の問題において一番の問題だろう。例えば、ばけ一つと、あるクエーサーを眺めているだけで、マイクロレンズ現象を検出できるだろうか？ その答えは、かなり悲観的な「Yes」である。

何が悲観的なのかというと、クエーサーのマイクロレンズ現象を確固たるものとして検出するためには、以下のように問題が山積みだからである。

- (1) 果たして、十分な頻度でこのような現象が起きるのか？（例えば、Galactic なマイクロレンズ現象検出のプロジェクトでさえ、現象が起きる確率は、 10^{-6} 程度である。）
- (2) 運良くこのような現象が検出されたとして、その現象のタイムスケールは、果たして常識的

(脚注8) 正確には、angular diameter distance と呼ばれる距離を用いる。

(脚注9) 通常、重力レンズ効果によって、光源の像は複数できる。しかしこの場合については、その像同士の離角（アインシュタイン・リング半径程度）は非常に小さいため、個々の像を分解して観測することはできない。だが、レンズ天体がアインシュタイン・リング半径程度のサイズの領域を常識的なタイムスケール（例えば数十日から数年）で横切るならば、この現象を光源の増光・減光現象として観測することが可能となる。

(脚注10) ちなみに、アインシュタイン・リング半径に比べて、光源が大きすぎると、光源全体に対して、有効に増光される領域の割合が小さくなり、全体としてほとんど増光されなくなる。

な長さなのか？（あまりに短すぎれば、光度変動を十分にサンプリングできず、光源の構造に関する議論が十分にできないだろう。一方で、あまりに長すぎれば、一回のマイクロレンズ現象をサンプリングするのにあまりに時間がかかり、非現実的な話になりかねない。）

- (3) そもそもクェーサーには、それ自身の光度変動がある。（つまり、マイクロレンズ現象を検出するには、クェーサー自身の光度変動とマイクロレンズ現象による光度変動を区別しなければならないが、そのようなことは現実に可能なのか？）

中でも、(1)と(3)はかなり本質的に重要な問題であり、これらを何とかクリアしない限り、私がここで紹介しようとしている手法は、日の目を見ず、お蔵入りになるしかないのである。冷静になればなるほど、頭を抱えなくなるこれらの難点、というわけで、このお話はおしまい、おしまい……というわけにはいかない。どうにかならないものだろうか（ここで「いくらあがいても、そんなもん絶対に無理や！」と突っ込みを入れた方には、今後もう少し謙虚になることをお勧めする）？

そんなことを考えたとき、宇宙の広大さを実感せずにはいられなくなる。実は、この手法を使うために、これ以上無いと言うほど恵まれた天体が、この世の中に存在しているのである。それが、通称「アインシュタインクロス」と呼ばれるクェーサーである。

4. 「アインシュタインの十字架」 または、「フクラのレンズ」

このクェーサー Q2237+0305 ($z = 1.695$, B 等級で約 17 等) は、近傍の渦状銀河 ($z = 0.0394$, B 等級で約 15 等) のちょうど背後にあり、CfA Redshift Survey の際、Huchra 達によって「新たな重力レンズ天体の発見」として報告された⁴⁾、脚注¹¹。ただし彼らは、このクェーサーの複数の像を空間分解すること無く、

- (a) Baldwin 効果⁵⁾、脚注¹² から見積もられるこのクェーサーの光度が、実際に観測されている光度に比べて小さいこと。

- (b) この程度の明るさのクェーサーが、たまたま前方の銀河と重なる確率は小さい。（しかし、実際の光度が観測されている光度に比べて暗いのであれば、そのように重なる確率は大きくなる^{脚注¹³}。）

という二つの根拠をもって、この天体がマクロレンズ効果を受けているクェーサーであると結論づけている。今から思えば「Huchra おそろべし！」と、Huchra の先見の明に驚かされるばかりである（余談であるが、この論文を読んで以降、それまでこの天体の事を「Einstein Cross」と呼んでいた私は、Huchra に敬意を表し、もう一つの通称「Huchra's Lens」で呼ぶようにしている）。

その後高空間分解能での観測から、Q2237+0305 が 4 つの像を持つことが明らかになり^{6), 7)}、脚注¹⁴、全ての像のスペクトルに同様の特徴（主に輝線）が見られることも確認され⁸⁾、このクェーサーが前方の銀河による重力レンズ効果を受けていることが確認された。

(脚注 11) ここで言う重力レンズとは、先ほど少し触れたマイクロレンズではなく、前方にある銀河によって受ける、比較的大きなスケールの重力レンズ現象で、マクロレンズ現象とも呼ばれる。マクロレンズ現象の場合、アインシュタインリング半径が 1 秒角程度となり、複数の像が十分に分解できるようになる。

(脚注 12) クェーサーの光度と C IV 輝線の等価幅の間に見られる経験則で、逆相関の関係にあるとされる。

(脚注 13) クェーサーの光度関数（どの明るさのものがいくつあるか）を考えると、暗いものほど数が多いので、当然前方にある銀河とたまたま重なる確率は高くなる。

(脚注 14) 全ての像からの光は、前方銀河のバルジを通過してくる。また、4 つの像の配置は、丁度、十字架のようになっている。

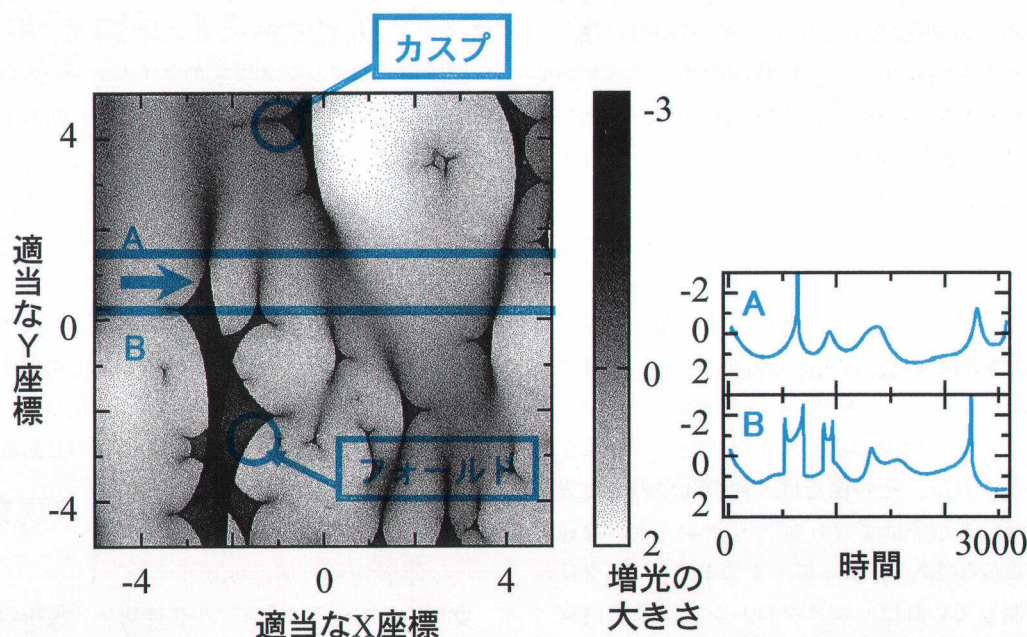


図3：増光（コースティック）のパターンの一例（左図）と、そのパターンを横切る際に期待される光度曲線の例（右図）。増光のパターンは、濃いところほど増光の度合いが大きい。パターンの中にある上側の横線（A）を十分小さな光源が左から右へと横切った際に期待される光度曲線が、上段（A）の光度曲線に、下側（B）の光度曲線に対応する。座標の単位はアインシュタイン・リング半径であり、増光の大きさの単位は等級になっている。また光度曲線の時間は、Q2237+0305を想定し、重力レンズ天体が太陽質量程度と仮定した場合の値で、単位は日である。

少なくとも見た目に興味をそそる天体であるから、いかにしてこのような配置で4つの像が実現されたのか知りたくなるのが自然の流れというもの、実際レンズ銀河のモデリングが行われてきた⁹⁾。このモデリングから、レンズ銀河における、個々の像の光が通過してくる領域の（星やガス、そしてダークマターを足し合わせた）質量密度を推定することができる。そして、そのレンズ銀河の構成天体がマイクロレンズ現象を引き起こすことで、各々の像におけるマイクロレンズ現象の起きる確率が、大体0.1～1程度であると見積もられた。期待される増光のパターンは、複数のレンズ天体

の寄与が重なりあうことで、単一のレンズ天体の場合に比べて、図のように非常に複雑で（図3）、かつ、大きな増光を示す領域が密になる。現実的な増光のパターンの計算を通して、このようにマイクロレンズ現象が高い頻度で起こることが裏付けられる^{脚注15}。よって、Q2237+0305においてはほとんどいつも、何がしかのマイクロレンズ現象が起きていることを意味しており、問題の（1）は解決されたことになる。

更に、像の位置の対称性からもある程度類推できる通り、どの像を通ってくる光の経路の長さもほとんど同じである。つまり、マクロレンズを受け

（脚注15）ちなみに、非常に大きな増光（理論上は無限大の増光）を示す狭い領域を火点（caustics：コースティック）と呼ぶ。一般にこのコースティックは、所々にある鋭い角のような先端（cusp：カスプ）コースティックと、それをつなぐ滑らかな曲線状のひだ（fold：フォールド）コースティックと呼ばれる構造からなる閉じた曲線になる。

ているキューサーにおける複数の像の間の時間差は、有名なダブル キューサー (Q0957+561) 等と比較すると非常に小さく、数時間のオーダーであると見積もられている¹⁰⁾。このことから、問題の(3)も比較的容易に解決される。

なぜなら、

キューサー自身の光度変動：全ての像において、ほぼ同時に、ほぼ同じ光度変動を示す

マイクロレンズ現象：像毎に、他の像とは異なった光度変動を示す。
からである。

例えば、一つの像のみでマイクロレンズ現象が起きたとすれば、その像だけ、他の3つの像と異なった変動を示すはずである^{脚注16}という大きな違いがあるからである。よって、4つの像をモニタリング観測していれば、マイクロレンズ現象に由来する光度変動と、キューサー自身の光度変動を容易に区別することができる。しかも、マイクロレンズ現象による光度変動のみを取り出すことが可能となる。

これで、やっかいな問題は片付いた。最後に(2)の問題が残っているが、幸運なことにこれも心配には及ばない。マイクロレンズ現象のタイムスケールは、レンズ天体と光源との位置関係、光源のサイズ、アインシュタイン・リング半径、および、その二つの相対速度によって決まる。仮に、相対的な位置が全く動かないとしよう。我々から光源までの距離の中間付近にあるようなレンズ銀河内の星の運動のみでマイクロレンズ現象が起きているとしよう。通常の銀河内の星の速度分散である $200 \text{ (km s}^{-1}\text{)}$ 程度を星の速度に適応すると、典型的には数年以上となり、少し長い。しかし、Q2237+0305の場合、前方の銀河が我々に非常に近いので、レンズ天体の見掛け上の動きは、レン

ズ天体が光源までの距離の中間辺りにある場合に比べて、一桁程度速いことに対応する。すると、一回のマイクロレンズ現象のタイムスケールは数十日から数ヶ月程度と、まさに「長からず短からず」という見積りが得られる。

これだけ都合な天体を見ないわけにはいかない！ ということだったかどうか、当時大学生にもなっていない私には分からない。だが、4つの像を分解して観測することが可能になってから、徐々にではあるが、モニタリングをはじめとする観測が精力的になされ、実際にいくつものマイクロレンズ現象が検出されるようになったのである。

5. 史上初、マイクロレンズ現象の発見！

Q2237+0305におけるマイクロレンズ現象の最初の発見は、1989年にIrwinらによって報告された¹¹⁾。そしてこれは、Galacticなマイクロレンズ現象の発見が1993年¹²⁾であるので、世界で初めてマイクロレンズ現象を発見したことにもなる。

彼らは、約2年間の4度にわたる撮像データを寄せ集め、1987年9月から1988年8月の間に、像Aと像Bのrバンドでの「等級の差」が0.5等級（ちなみに観測誤差は、0.1等級以下である）変化していることを発見した。この「等級の差」の変化を説明するには、一方の像の方にだけ、光度変動の原因となる「何らかの現象」が起こっていないなければならない。しかも、その「何らかの現象」はこの場合、像Aのみの増光現象でなければならない。この観測結果を元に、Irwinらはマイクロレンズ現象を発見したと報告したのである。たった4点しか観測のない光度曲線から、マイクロレンズ現象の発見と結論付けるのは、荒っぽい気もするし、皮肉を込めて「いかにも天文学的」と言う

(脚注16) 異なった像の光は、レンズ銀河の異なった領域を通過している。つまり、マイクロレンズ現象を引き起こす、レンズ天体である星の分布は、どの像を見るかによって異なってしかるべきである（あるいは、まったく同じとは考えられない）。よって、複数の像で、同時に同様のマイクロレンズ現象が起こるとは考えられないのである。

人もいるだろう。しかし、発見は発見である。

この報告以降、今日まで、複数のグループによる光学波長でのモニタリング観測と、それに伴ういくつかの報告がなされてきた^{13), 14)}。その報告の中には、「このデータだけでは、とてもこんなこと言えんやろ！」と突っ込みたくなるような、眉唾ものの記述もあるが、少なくとも、「Q2237+0305というクエーサーの像では、マイクロレンズ現象が起きている。」ということは確かだろう。例え観測誤差を考慮にいったとしても、明らかに有意で、かつ、像毎に独立な光度変動が複数存在しているのである。そのタイムスケールは、見積もりと同程度の約数ヵ月であり、その頻度は、どれかの像で、1～2年に1回起きているという程度である。

一方で、他の手法を用いてマイクロレンズ現象の存在を確認したり¹⁵⁾、マクロレンズ現象の特徴からクエーサーの構造を調べたり¹⁶⁾、電波¹⁷⁾、赤外線¹⁸⁾、紫外線¹⁹⁾、そしてX線²⁰⁾に至る波長での、撮像観測が行われたりしている。それぞれ、非常に興味深い結果を出しているが、長くなるのでここでは割愛させて頂く。ただ、いくつかの観測的研究から言えるのは、Q2237+0305でマイクロレンズ現象が起きているのは確からしい、ということである。そして次のステップは、「このような観測データから中心部の何がわかるのか？」を調べることに、そして「観測データから実際に何かを言うこと」である。

6. 色が変わるマイクロレンズ現象!?

などといきなり言うと、「重力レンズ現象は波長依存性のない現象。ならば、色が変わるって事は何かおかしいんじゃないの?」という突っ込みを受けることになる^{脚注17)}。もちろん、マイクロレンズ現象を含む重力レンズ現象は、光の波長に依存し

ない現象である。従って、光源が重力レンズ効果によってどのように見えるかは、どんな波長で観測しても、基本的には同じはずである。これはいわゆる「定説」である。

しかし、この話を前提条件から良く考えてみよう。例えばGalacticなマイクロレンズ現象において、観測される光度曲線の再現や、様々な見積もりが行われる際、「レンズ天体、光源ともに点である」という仮定がおかれている。確かにこの仮定、アインシュタインリング半径に比べて、光源である星のサイズが十分小さい、特にGalacticなマイクロレンズ現象の場合は良いことがほとんどである^{脚注18)}。ところがこの仮定、光源がアインシュタインリング半径に近いサイズの場合、「不適切」な仮定となる。なぜなら、光源のサイズを考慮し、光源の領域全体にわたって増光の大きさを積分しなければならないからである。その結果、光源のサイズによって増光のされ方が違うことになる(図2)。

では、観測波長によって、光源のサイズや輝度分布が違えばどうなるか? サイズなどによって、増光のされ方が違うのだから、色変化として観測されるのである²¹⁾。例えば、活動銀河核から出ているジェットの電波像であったり、あるいは、標準的な降着円盤モデルであったり、更には通常の恒星にしても、観測波長ごとに天体のサイズは大なり小なり異なる。そして、程度の差こそあれ、この種の天体を光源としたマイクロレンズ現象の際には、増光中の色変化が期待されるわけである。

ではこの色の変化の仕方が、仮に降着円盤モデルの違いによって異なるのなら、マイクロレンズ現象中の色変化の仕方をモニタリングすることで、現実の降着円盤モデルのタイプを判別することに使えないだろうか?

というわけで、標準降着円盤モデルと、移流項

(脚注17) 現に、Galacticなマイクロレンズ現象においては、基本的に光度変動に波長依存性がないことが、紛らわしい変光星等の光度変動とマイクロレンズ現象を区別するための一つの指標となっている。

(脚注18) ただし、MACHO 98-SMC-1という現象では、光度曲線に、光源のサイズや輝度分布の影響が見られている。

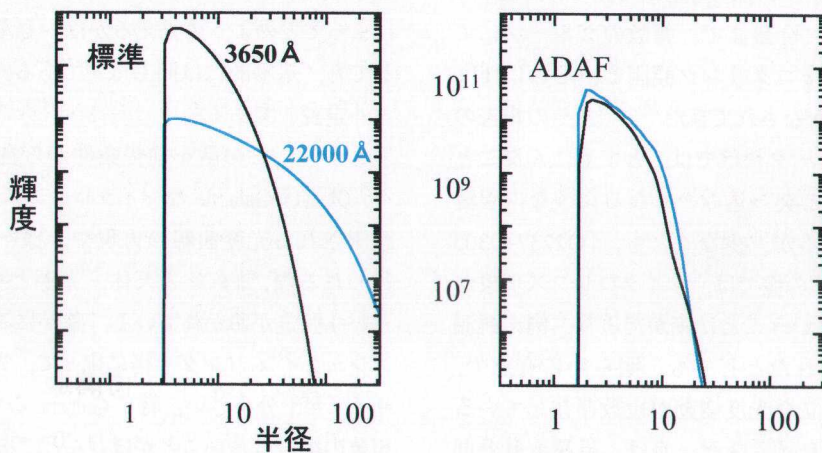


図4：2つの降着円盤モデルの、3650 Å（黒線）と22000 Å（青線）における輝度分布（正確には、単位波長当りの輝度に波長をかけたもの）。半径の単位は、中心のブラックホールのシュバルツシルト半径であり、輝度の単位は、 $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ である。

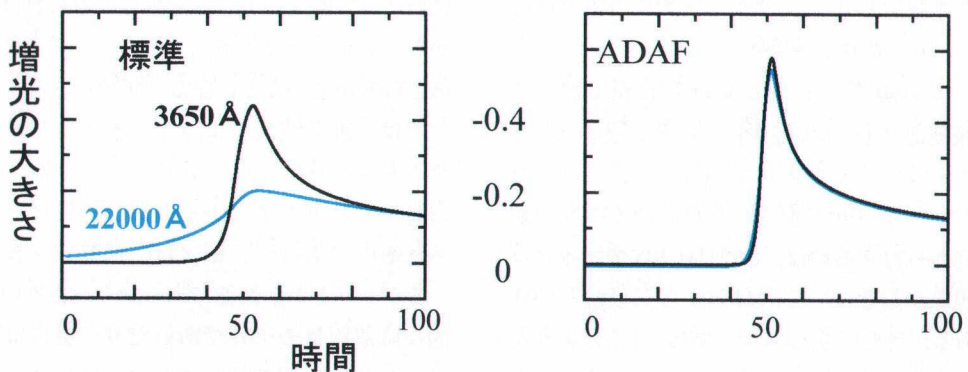


図5：2つの降着円盤モデルで期待される、フォールドコースティックを横切るマイクロレンズ現象の際の、3650 Å（黒線）と22000 Å（青線）における光度曲線の例。増光の大きさの単位は等級であり、時間の単位は日である。

優勢降着流モデル（通称 ADAF）の2つの降着円盤モデル（降着円盤モデルの詳細についてはしかるべきレビューを参照されたい²²⁾）に限定して、マイクロレンズ現象時に期待される光度曲線の色変化の違いについて考える。

ここで、2つの降着円盤モデルの違いを、大雑把に述べると以下のようになり、図4に示すように、モデル毎、波長毎に異なった輝度分布を示す。

(a) 標準降着円盤モデル

ガスはゆっくりとブラックホールへ降着するため、重力ポテンシャルエネルギーを有効に解放できる。この際、重力ポテンシャルの差を反映したエネルギーが輻射として解放されるが、重力ポテンシャルの差は、内側ほど大きい（重力ポテンシャルは内側ほど急）。また、形成されるガス円盤は光学的に厚い。よって、円盤の内側ほど高い温度の黒体輻射で光るのである。

その結果、

高エネルギー（短波長）の光：内側の比較的小
コンパクトな領域

低エネルギー（長波長）の光：外側までの比較
的広がった領域
から放射されることとなる。

つまり、「観測波長によって見た目の降着円盤の
サイズが異なる」のである。

(b) 移流項優勢降着流モデル

ガスは速くブラックホールへ降着するため、重力
ポテンシャルエネルギーを有効に解放することはで
きない。ガスが中心部（数十 r_g ）に辿りついてよ
うやくいくばくかのエネルギーを輻射として解放で
きるが、大部分を解放しないまま、ブラックホール
に落ち込んでいく。その結果、標準降着円盤モデ
ルと異なり（輻射機構も異なるが）、硬 X 線の領域
まで輻射を出すことはできるが、どの波長でも主に
中心部だけが光ることになる。

そのため、高エネルギーの光も低エネルギーの光
も、中心部の非常にコンパクトな領域から放射さ
れる。つまり、「どの観測波長でも、見た目の降着
円盤のサイズはほとんど等しい」のである。

このようなモデルの輻射機構の違い（あるいは波
長毎の輝度分布の違い）から、マイクロレンズ現
象時の光度曲線は図 5 に示した通り、

(a) 標準降着円盤モデル

光度変動は、波長依存性を持つ。短波長な光は
どコンパクトな領域から放射されていることから、
波長が短いほど、光度曲線は短いタイムスケール
で、かつ大きな変動を示す。

(b) 移流項優勢降着流モデル

光度変動は、弱い波長依存性しか持たない。つまり、
どんな波長でも、ほとんど同じ光度変動を示す。

事になるのである。

この図 5 から分かるように、二つの降着円盤モ
デルはマイクロレンズ現象時の光度曲線の振る舞
いが大きく違う。特に、多波長で精度の良いモニタ
リング観測が可能ならば、これらの降着円盤モデ
ルを観測的に区別できるのである。^{脚注 19, 23), 24)}

これまで、多波長でのモニタリング観測はなさ
れているが、残念ながら、これらのモデルの判別が
可能なほど、良い精度のデータではない¹⁴⁾。

7. 降着円盤の空間構造が分かる???

「降着円盤モデルありき」で、それらを判別で
きるのは良いだろう。しかし理想的には、何も仮
定を置かず、観測された光度曲線をどうにか料理
して、例えば降着円盤の輝度分布を得ることがで
きれば言うことはない。

このいわゆる逆問題は可能だろうか？ 現段階で
適応範囲は限られているが、原理的には可能である。

今、フォールド コースティックを光源が横切る
場合のマイクロレンズ現象を考えよう。また簡単
のため、降着円盤が軸対称の輝度分布を持ち、
その面が完全に観測者の方向を向いている、つま
り傾斜角が 0 度^{脚注 20} の状況のみに限定する。そし
て、この降着円盤を、いくつかの適当なサイズの
円環の集まりと考えよう。

以後しばらく、図 6 を参考にしながら、この逆問
題の手法について解説する。降着円盤がコースティ
ックの中に入ってくると、観測される光度は急激な
増光を示し始める^{脚注 21}。これは、コースティック内
側では大きく増光され、かつコースティック近傍は
どその増光の度合いが大きいためである^{脚注 22}。

さて、降着円盤がコースティックの内側に入り

(脚注 19) 正確には、輝度分布が異なるモデルなら、上述の二つのみに限らず、原理的に区別は可能である。

(脚注 20) いわゆる face on である。

(脚注 21) コースティック外側に出て行く場合はその逆の現象が観測される。ここからの話を外側に出ていく場合に置
き換えたければ、光度曲線を引っくり返すだけで良い。

(脚注 22) 大雑把に言って、コースティックからの距離の -1/2 乗に比例してコースティックに近ければ近いほど、大き
く増光される。

図6

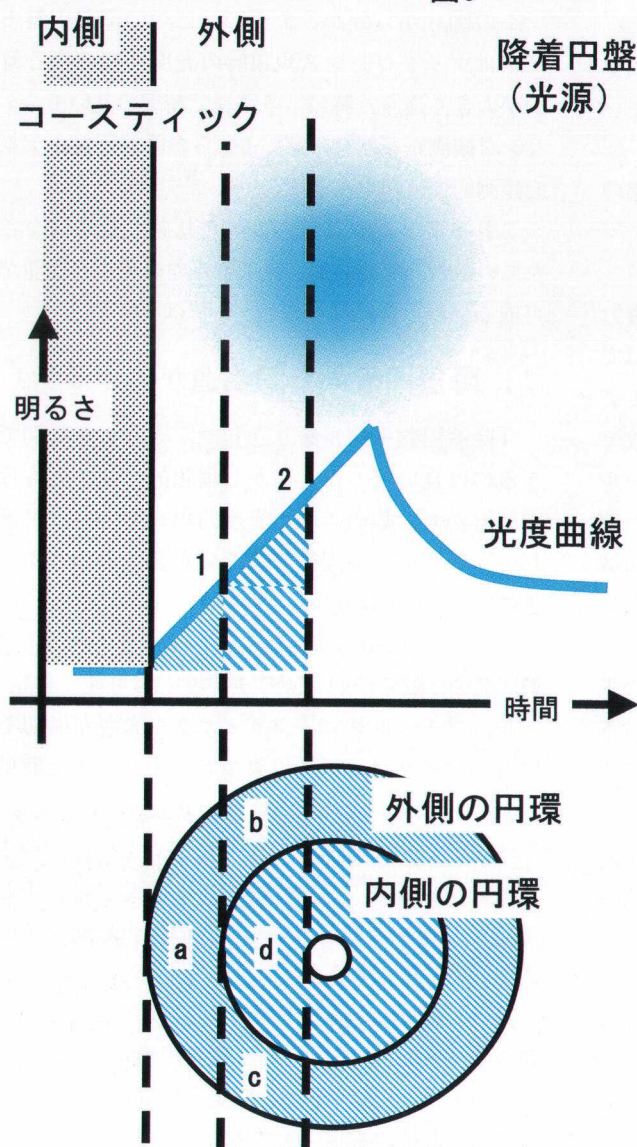


図6：降着円盤の輝度分布再構成の手法の概念図。

始めた時の一番最初の観測点（1）、つまり、光度曲線にして一番最初の立ち上がり部分のフラックスは、一番外側の円環の一部が強く増光されたことに起因する^{脚注23}。ここで、コースティック近傍の増光の特性は分かっているので、果たしてどれだけのフラックスが（a）の部分から出てきているのかを逆算することが可能となる。そして、軸対称の仮定の元では、この一番外側の円環の輝度が分かることになる。

次に、立ち上がり始めから二番目の観測点（2）に注目する。今度は先ほどに比べ少し内側まで強く増光されることになる。この時のフラックスは、一番外側の円環の一部（b, c）とすぐ内側の円環の一部（d）からの光が増光された結果、観測されたものである。ここで、一番外側の円環の輝度は、軸対称の仮定から、直前の観測点から既にわかっており（aの部分と同じ）、また、先ほど同様にコースティック近傍での増光の特性が分かっている。このことから、二番目の観測点でのフラックスに対する、一番外側の円環の寄与を差し引いたものが、すぐ内側の円環の寄与であるので、先ほど同様にして、すぐ内側の円環の輝度（d）を逆算することも可能となる。そして、この手順を繰り返すことで、外側の円環から中心部に至るまで、降着円盤の輝度分布を再構築してゆくことが可能となる。

もし、降着円盤がフォールドコースティックを横切る際に、1週間に一回以上、0.02等級以下の精度でのモニタリングが実現されれば、キューサー中心部の降着

（脚注23）円環の半径は、それぞれの観測点に対応する時間での、光源中心からのコースティックの位置に対応するように、とるのが一番簡単である。

円盤の輝度分布を、「降着円盤モデルの仮定無しで」再現できることになる²⁵⁾。いかにして数あるマイクロレンズ現象の中から、フォールド コースティックに起因するマイクロレンズ現象であるかを区別するのか等の問題はあるにしろ、この手法は、降着円盤モデルの妥当性を検証する上でも重要なものとなるだろう。

8. とりあえずサイズを測る！

このように、多波長での、高精度の密なモニタリング観測が行われていれば、マイクロレンズ現象からいろいろなことが分かりそうであるし、面白そうである。しかし、現実には望遠鏡も、お金も、時間も、全て限りがあるし、そもそもいろんな事に、いろんな人が興味を持っていれば、個人的に面白いと思うテーマでも、なかなか思い通りに事は運ばなくてあたりまえである。しかも、相手がマイクロレンズ現象であるだけに、いつ起こるか分からないという難しさもある^{脚注 24}。

本音を言えば、「同じ突発現象でも、注目度は他のものとはえらい違いだ。」などと嘆きたくもなる(それがこのような記事を書くモチベーションの一つではあるが)。「とにかく見て欲しい、できれば四つの像を何とか分解して^{脚注 25}」と思っていた矢先、OGLE の話を聞き付けた²⁷⁾。その名 (Optical Gravitational Lens Experiment) の通り、そもそも、Galactic なマイクロレンズ現象の観測が主な目的であるが、このグループは、V バンドで、一週間に数度程度の頻度、0.02 等級程度の誤差で、Q2237+0305 のモニタリングを行い、しかもその観測データを公

開してくれている。

その OGLE が公開している非常に綺麗な(?) 光度曲線を眺めると、それだけでもマイクロレンズ現象の存在は疑いようがなくなるだろう。それぞれの像が、てんでバラバラの光度変動を示しているからである。中でも JD2451300 あたりに注目すると、像 A と C がそれぞれ独立に、像 B と D とは明らかに違う光度変動を示している。つまり、マイクロレンズ現象が検出されているのである。

像 A の光度曲線はややこしい形で、一筋縄ではいかなさそうである^{脚注 26}。一方、像 C の光度曲線は、比較的シンプルな形をしている。ここで、先ほどの逆問題の手法を用いたいところだが、残念なことに逆問題で扱えていたような、フォールド コースティックによる増光現象ではなく、カスプ コースティックによる増光現象の可能性が十分考えられる形の光度曲線である。正直なところ、当初は非常に歯痒い思いであった^{脚注 27}。しかし、指をくわえて見ているわけにもいかない、というわけで、光度曲線のフィッティングを試みた。

ただし、多様な増光パターンを全て取り入れることは、現実問題として非常に困難である。そこで、マイクロレンズの特徴から明らかになった、質量密度等を用い、マイクロレンズ現象に寄与するコンパクトな質量の割合が小さい場合に現れる、いくつかの典型的なフォールド、および、カスプ コースティックに対する増光の大きさを用いることにした。

マイクロレンズ現象近傍^{脚注 28}でのデータ点は 83。それに対して、光源は簡単のため輝度一定と考え、

(脚注 24) ただし、光度曲線の変動具合から、今からどのくらい先に、どのくらいの確率で、マイクロレンズ現象が起きるかといった目安を与える、非常に興味深い、理論的な研究が最近なされた²⁶⁾。

(脚注 25) もし、マイクロレンズ現象の立ち上がりを捕えることができれば、既に採択されている HST (PI : R.Webster) や Chandra (PI : S.Mineshige) での TOO 観測が可能なのである。

(脚注 26) おそらく複数のコースティックが寄与しているマイクロレンズ現象と思われる。

(脚注 27) ただし、かなり乱暴な感じではあるが、無理やりこの種の手法を試みた論文もある²⁸⁾。

(脚注 28) このことは、光源がコースティックの近傍にあることを意味しており、私の行った比較的単純な取り扱いが適当な範囲のみで、フィッティングを行った事を意味している。

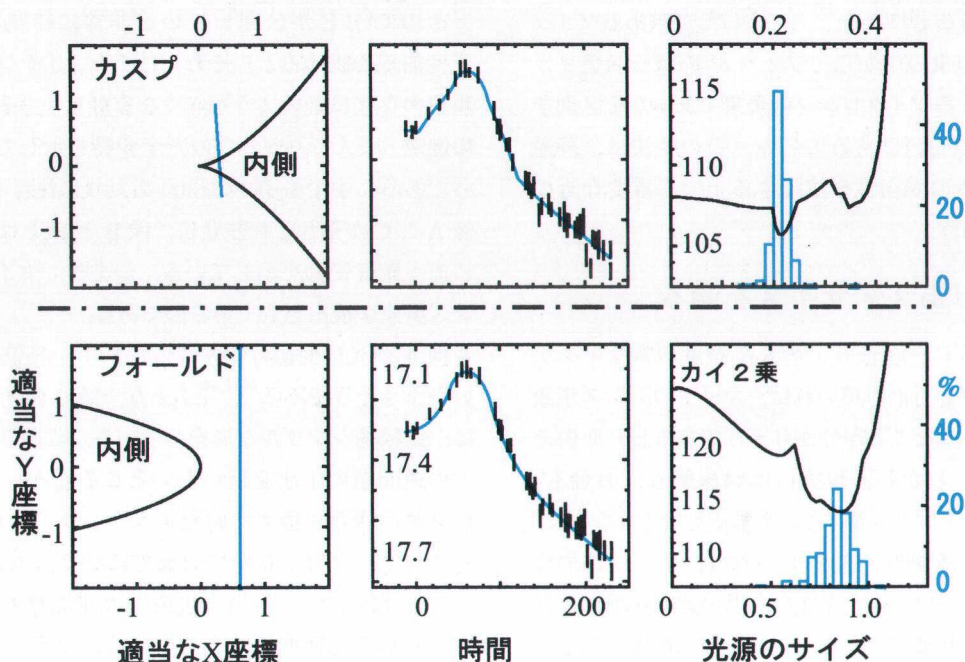


図7：カスプコースティック（上段），および，フォールド コースティック（下段）を考えた場合の光度曲線フィッティングの結果．左図が，コースティック（黒線）と，ベストフィットの光源の経路（青線）．真ん中の図が，観測データ（縦棒）と再現された光度曲線（青線）．右図が，フィッティングの結果得られた，カイ2乗の値（値は図の右）の，光源のサイズへの依存性を表したもの（黒線）で，光源のサイズの単位はアインシュタイン・リング半径である．なお，青色の頻度分布は，モンテカルロ・シミュレーションで得られた，ベストフィットの光源のサイズの分布（割合は図の左に記してある）．

用いるパラメータは

- I) 光源のサイズ
- II) 光源のコースティックに対する相対速度（計2個）
- III) コースティックに対して再接近時のインパクトパラメータ，および，その瞬間の時間（計2個）
- IV) 今回の増光現象に顕著な影響は示さないが，その他のコースティックによるグローバルな増光の大きさと，その時間微分（ゆるやかな光度変動を模倣）（計2個）

の計7個である．

いわゆる χ^2 フィッティングを行った結果，得られた光度曲線が図7のようになる．観測された光度曲線を，非常に良く再現していることが分かります．幸か不幸か，今回試みたいいくつかのケー

スに関しては，どれがベストかを選ぶとなると，甲乙付けがたいほど，どのケースにおいても，観測を良く再現できている．このことは，「フィッティングの結果得られた，ベストフィットの光源のサイズとして，どれを選んで良いのか分からない」ということを意味する．しかし，それでもなお，全ての場合を考慮にいたした上での上限値を，上限値として結論づけることには問題無いはずである．そこで得られた，光源のサイズの上限値は，アインシュタイン・リング半径の0.98倍に相当するということが明らかになった（それぞれのケースで95%の信頼領域をとった中で一番大きな値のもの）．

最後にこの得られた上限値を，実際のスケールに換算する必要がある．Q2237+0305の場合，ハッ

ブル定数を $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とし、1 太陽質量のレンズ天体を仮定すると、得られた上限値は約 10^{17} cm に対応することになる^{脚注 29}。この値は、レンズ天体として恒星質量の上限値である 100 太陽質量の星を考えれば 10 倍の 10^{18} cm (約 0.3 pc) になる。また、最近なされた Q2237+0305 に関する統計的な研究²⁹⁾を通じて得られたレンズ天体の質量である 0.1 太陽質量のレンズ天体を考えれば $3 \times 10^{16} \text{ cm}$ (約 2000 AU) になる。

ちなみに、観測データである V バンドは、キューサーの位置では 2000 オングストローム程度の紫外光に対応するので、この波長の光が、せいぜい先に示した上限値以下のサイズの領域から放射されていないといけないという制限になる³⁰⁾。

これは、様々な大きさのコースティックの中で、単にレンズ天体の質量の割合が小さな場合の代表的な大きさのものを選んできた時の結果であるから、その上限値にそもそもどのぐらい信頼性があるのかと疑う人もいるだろう。確かに定量的なことは、様々な大きさのコースティックを取り扱った上でなければ言えないかもしれない。しかし定性的には、レンズ天体の質量の割合が増えれば、あちこちに光の経路を曲げようとするレンズ天体がいるわけだから、少し場所がずれただけで、もともとの光はあらぬ方向へ曲げられてしまう。そして、そのことによって増光のパターンの凸凹がどんどん密になる。その結果、観測されたような綺麗な光度曲線を再現するためには、必然的に光源のサイズが小さくしなければならなくなる。つまり、ベストフィットの光源のサイズもコンパクトになると考えられるので、今回得られた光源のサイズの上限値は、信用しても良さそうであることを最後に付記しておく。

9. まとめに代えて。

さきほどの制限は上限値としてもまだまだ大きいし、フィッティングで許される範囲も大きいため、降着円盤モデルの判別などといった実用には程遠いと思われる方も多いだろう。しかし今後、コースティックの多様性を考慮して、既存の観測データのより詳細な解析を行うこと、新たなマイクロレンズ現象を発見しそれを解析を行うこと、また、多波長でこのような精度の良い観測を同時に行い解析を行うことなどから、それも徐々に可能となっていくであろう。

それこそ大口径望遠鏡や、衛星を使ったモニタリング、数分単位での密なモニタリング、超高精度の測光、などなど今では絵空事のように思えるような観測でも、今後可能になってくるかもしれない。そして、降着円盤のモデルはおろか、降着円盤の MHD シミュレーション³¹⁾で示唆されているような、降着円盤上の輝度分布の微細構造さえ検出されるかもしれない^{脚注 30}。また、現段階では分解不可能な、マイクロレンズ現象で形成された、無数の小さなキューサーの像や、増光・減光に伴う、像のふらつきすら検出されるかもしれないし、それによって新たな情報が引き出せるようになるかもしれない。

現在、GLITP³²⁾という重力レンズを受けたキューサーの地球規模でのモニタリングも進行中であるし、さまざまな側面からの理論的な研究も進んでいる。今のところ、この種の天体で知られているのは Q2237+0305 のみである。しかし、マクロレンズ効果を受け複数の像を持つキューサーで、マイクロレンズ現象らしき現象が検出されているし³³⁾、大規模な遠方天体のサーベイから新たな「Huchra's Lens」

(脚注 29) 宇宙論パラメーター (Ω や Λ) への依存性は、現実的な範囲の中で高々 10% 程度である。むしろ、レンズ天体の質量の 1/2 乗に比例すること、およびハッブル定数の -1/2 乗に比例することの依存性の方が大きい。

(脚注 30) ちなみに激変星まわりの降着円盤については、Eclipse Mapping や Doppler Tomography などの手法を用いることで、降着円盤の微細構造を明らかにする研究が進んでいる。

も発見されるだろう。近い現実に目を向けたところで、やはり（少なくとも私は）今後も面白い分野の一つであると確信している。

それでは、このつたない文章を読んでくださった方々に感謝し、また、皆さんに学会などで新たな研究成果について報告できる日が早く来ることを願い、そして「(面白いイベントが受かりますように) 天に祈りながら」筆を置くことにする。

なお、この文章を読まれて興味を持たれた方は、著者のホームページにある重力レンズのアニメーションもご覧下さい。³⁴⁾

謝 辞

最後にこの場を借りて、学部時代から含めて7年間、様々な面で私のサポートをしてくれた嶺重 慎 京大基礎物理学研究所教授（前 京大宇宙物理学教室助教授）に最大の感謝を表したいと思います。また、長くなるので個人名は割愛させていただきますが、この研究に関して共同研究者であった方々、セミナー等の際に厳しくも有用なコメントを下された方々、研究を進めるにあたって様々な助言を下された方々、以前所属した京都大学宇宙物理学教室の現メンバーおよびOB・OG、現在いる筑波大学計算物理学研究センターのメンバー、これまでサポートを受け、また現在もサポートして頂いている日本学術振興会、そして、両親を始めとする親類、友人達にも感謝します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、岡崎敦男, 1999, 活動する宇宙, 柴田一成, 福江 純, 松元亮治, 嶺重 慎, 共編, (裳華房, 東京), 5 章
- 2) Terlevich R., et al., 1992, MNRAS 255, 713
- 3) Schneider P., Ehlers J., Falco E.E., 1992, Gravitational Lenses (Springer-Verlag, Berlin)
- 4) Huchra J., et al., 1985, AJ 90, 691
- 5) Baldwin J., 1977, ApJ 214, 679
- 6) Yee H.K.C., 1988, AJ 95, 1331
- 7) Schneider D.P., et al., 1988, AJ 95, 1619
- 8) 例えば, de Robertis M.M., Yee H.K.C., 1988, ApJ 332, L49
- 9) 例えば, Schmidt R., Webster R.L., Lewis G.F., 1998, MNRAS 295, 488
- 10) Wambsganss J., Paczyn'ski B., 1994, AJ 108, 1156
- 11) Irwin M.J., et al., 1989, AJ 98, 1989
- 12) Alcock C., et al., 1993, Nat 365, 621
- 13) Corrigan R.T., et al., 1991, AJ 102, 34
- 14) Ostensen R., et al., 1996, A&A 309, 59
- 15) Lewis G.F., et al., 1998, MNRAS 295, 573
- 16) Mediavilla E., et al., 1998, ApJ 503, L27
- 17) Falco E.E., et al., 1996, AJ 112, 897
- 18) Agol E., Jones B., Blaes O., 2000, ApJ 545, 657
- 19) Blanton M., Turner E.L., Wambsganss J., 1998, MNRAS 298, 1223
- 20) Wambsganss J., et al., 1999, A&A 346, L5
- 21) Wambsganss J., Paczyn'ski B., 1991, AJ 102, 864
- 22) 例えば, 嶺重 慎, 1996 年, 天文月報 9 月号, 89, 388
- 23) Yonehara A., et al., 1998, ApJ 501, L41 (erratum: 511, L65)
- 24) Yonehara A., et al., 1999, A&A 343, 41
- 25) 例えば, Mineshige S., Yonehara A., 1999, PASJ 51, 497
- 26) Wyithe J.S.B., et al., 2000, MNRAS 318, 1105
- 27) <http://bulge.princeton.edu/~ogle/>
- 28) Shalyapin V.N., 2001, AstL 27, 150
- 29) Wyithe J.S.B., Webster R.L., Turner E.L., 2000, MNRAS 315, 51
- 30) Yonehara A., 2001, ApJ 548, L127
- 31) Kawaguchi T., et al., 2000, PASJ 51, L1
- 32) <http://www.ias.es/proyect/gravs-lens/GLITP/index.html>
- 33) 例えば, Oshima T., et al., 2001, ApJ 551, 929
- 34) <http://www.rccp.tsukuba.ac.jp/Astro/yonehara/works/microanime/lensanime.html>

Resolving the Central Region of Quasar by Microlensing

Atsunori YONEHARA

Research Center for Computational Physics, University of Tsukuba(JSPS Fellow)

Abstract: It is believed that there is a supermassive black hole and surrounding accretion disk in the central region of quasar. Unfortunately, the expected size of the accretion disk is too small, and it is impossible to directly resolve the structure by using current observational instruments. However, there is a strong tool to make it possible. That is quasar microlensing diagnosis. Here, I will briefly introduce this method and recent studies about it.