

新種の時間変動重力レンズの発見

大栗真宗

〈東京大学大学院理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: masamune.oguri@ipmu.jp



時間軸天文学の進展により最近新しい種類の時間変動重力レンズの発見が相次いで報告されました。その中には発見が長らく期待されていたものから少し予想外だったものまであります。筆者の研究を交えつつこの分野の進展を紹介します*1。

1. はじめに

世の中の人間はなんでも二種類に分けられるという話がありますが、天文学者も小さい頃から星や天文現象が好きでその延長で天文学者になった人と数学や物理の研究の一分野としてたまたま天文学を選んだ人に分けられるとよく言われます*2。典型的な後者の人間だった筆者は、高校時代は数学が得意で数物系の研究者になりたいと漠然と考えていて、その延長で大学でなんとなく物理学を専攻し、大学院入試で研究分野の選択をせまられてはてどうしようかと考えることになりました。その結果、天文学（宇宙物理学）は新しい観測結果がどんどん出てきていてなんだか面白そうだと思い、あまり深く考えずに*3観測的宇宙論の理論の研究室に行くことにしました。物理学は理論と観測（実験）がお互いに刺激し合い助け合ってこそ大きな進展が得られるものですが、宇宙の研究はこうした理論と観測の健全な相互作用があるように素人目には感じられたからです。

それから十何年か研究を行ってきましたが、期待通り（？）その間の天文学の進展は著しいものがありました。その中で筆者もささやかではありますが理論と観測が交差する現場でいろいろと面白い体験ができました。本稿ではそのいくつかの例として、新種の時間変動重力レンズの発見について簡単に紹介したいと思います。

2. 超新星重力レンズ

強い重力レンズは重力レンズ現象によって遠方天体が複数に分裂して観測される現象で、遠方銀河やダークマターの研究などに幅広く応用されていますが、その有名な応用例の一つに「時間の遅れ」があります。これは複数像間の光の到着時刻の違いで、光の通る経路が異なることに起因する純粋に幾何学的な効果にくわえて、一般相対論的效果である重力遅延も寄与しています。この時間の遅れの絶対値は宇宙の距離スケールに比例することから、最も基本的な宇宙論パラメータ、ハッブル定数の推定に使うことができます。この応用

*1 本稿では敬称はすべて省略させていただきます。また、本稿は受賞記念記事ですが受賞対象となった研究は他にもいくつかあります。興味があれば関連する過去の天文月報の記事を読んで頂けたら幸いです^{1)~4)}。

*2 星座が全然わからないことを「誇る」のが後者の特徴でもあります。

*3 あまり深く考えず研究室訪問なども一切せず決めたので、院試の面接の時にはなんか変なやつが来たと思われたようですが。

は1964年にノルウェー人研究者Sjur Refsdalによって提唱されました⁵⁾が、その当時はもちろん強い重力レンズの観測例はなく、1979年のクエーサー重力レンズQ0957+561の発見⁶⁾によってようやくその応用の可能性が開かれたのはよく知られたとおりです。その後1997年のQ0957+561の時間の遅れの高精度観測⁷⁾を経て、現在までに20個以上のクエーサー重力レンズでの時間の遅れが観測されています。観測精度の向上と理論の進展によりハッブル定数の決定精度も初期にくらべてどんどん向上していて現在では他の方法と肩を並べる精度でパラメータを決定できています⁸⁾。

と、ここまでは宇宙論に詳しい方にとっては周知の事実ですが、実はRefsdalの1964年の論文で念頭におかれていたのはクエーサーの重力レンズではなく超新星の重力レンズだったことはあまり知られていません。重力レンズが観測されるかは確率的な問題で、大ざっぱな計算で見積もると赤方偏移が1を超える遠方の天体に対してはざっくり1/1,000の確率で強い重力レンズが起こることがわかります。クエーサーはすでに数十万個と見つかっているので重力レンズクエーサーも百個以上見つかっていますが、超新星はある程度遠方のものに限れば観測例は数百個程度ですので最近まで重力レンズが観測されなかったのはそれほど不思議ではないと言えます^{*4)}。

では、すでにクエーサー重力レンズで時間の遅れが測られているのであれば、超新星重力レンズをがんばって探す意味はあるのでしょうか？実は、以下で議論するように超新星重力レンズは様々な面白い利点があることがわかっています。

標準光源：超新星の中でもIa型と呼ばれる性質のものはその明るさがほぼ一定であるという著しい性質をもちます。重力レンズの場合では、この標準光源の性質を利用することで重力レンズの

増光率を直接測定できますが、この情報はレンズ天体の質量分布と時間の遅れから推定されるハッブル定数との縮退をやぶることができるのでたいへん貴重です¹⁴⁾。

母銀河：時間の遅れの宇宙論解析の精度は、レンズ天体の質量分布の決定精度でほぼ決まります。クエーサーや超新星が重力レンズを受けるとその母銀河も重力レンズ効果をうけてゆがんだアーク状に観測されますが、この母銀河の形状からレンズ天体の質量分布に強い制限を与えることができます¹⁵⁾。非常に明るいクエーサー成分を差し引いて母銀河を検出することはそれ自体困難ですが、超新星の場合は爆発前後の画像を使えば母銀河をたやすく観測できるのが強みです。

時間の遅れの測定：時間の遅れは重力レンズ天体をモニター観測し各重力レンズ像の明るさの時間変動（ライトカーブ）を観測することで測定します。クエーサーのライトカーブは確率的で予測不可能なので、信頼度の高い時間の遅れの測定は何年にもわたる長期モニター観測が必須です。一方超新星のライトカーブは大きく増光し減光するという単純なものでその振る舞いもよく理解されているので、時間の遅れの測定も比較的容易かつ信頼度も高いと期待されます。

超新星の研究：もちろん重力レンズを天然の望遠鏡として利用することで超新星の性質を調べることもできます。例えば増光を利用して非常に遠方の超新星を検出することで遠方宇宙の超新星爆発率を調べることができるかもしれません。また最初に発見された複数像から次の像の出現予測ができれば、その時期を狙った観測をすることで爆発初期のライトカーブを詳しく調べることも可能でしょう^{16),17)}。

実は筆者もずっと昔に超新星重力レンズの応用の論文をいくつか書いていて、上記の点を理論的

*4 筆者とPhil Marshallが2010年に書いた論文⁹⁾でより詳細な計算を行っています。それによると、現行のPan-STARRS¹⁰⁾、DES¹¹⁾、HSC¹²⁾といった撮像サーベイで数個見つかるかどうかという程度です。将来のLSSTサーベイ¹³⁾はより強力な100個以上の重力レンズ超新星が見つかりうると見積もられています。

な見地から提案し議論しています。当時は観測のことなどにも知らない無知な学生だったため、単純に面白い現象として超新星重力レンズに着目し観測可能性を深く考えずにそれらの論文を書いたのですが、以下で述べるような実際の発見を目の当たりにした現在あらためて振り返ってみるとやはり感慨深いものがあります。

3. PS1-10afxの発見

3.1 Chornock et al.

2013年2月のある日、当時カブリIPMUにいた筆者は同僚のRobert Quimbyに声をかけられました。彼の手にはつい先日出たばかりのChornock et al.¹⁸⁾のプレプリントが握られていました。その論文では、Pan-STARRSサーベイで発見された新種の超高輝度超新星^{*5} PS1-10afxが報告されていましたが、彼がスペクトルやライトカーブなどのデータを詳しく見たところどうも重力レンズで約30倍増光されたIa型超新星に見えるといいます。筆者をはじめは懐疑的で、たとえばこの近くの銀河ではだめだ、銀河団は離れすぎている、重力レンズにはあまり見えないということを言いました。彼は納得したような納得してないような様子で去っていきましたが、その後その領域の画像(図1)を見つつふと超新星母銀河とレンズ銀河が重なっていれば説明できるかもしれないと考えました。

そこでティータイム^{*6}でQuimbyをつかまえこの可能性を議論しました。2010年の筆者の論文⁹⁾の計算結果から考えてもそんなに無理のない解釈のように思えます。Marcus Werner, Anupreet More, Surhud Moreなど他の同僚たちともいろいろ議論しましたが、ともあれ現状では決定打はないのでいずれにせよ重力レンズの解釈をレター論

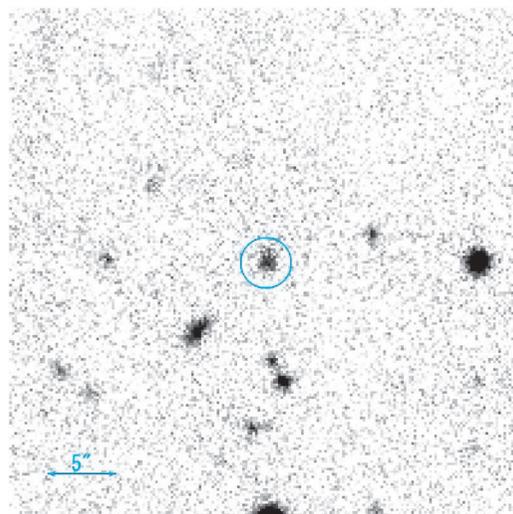


図1 超新星爆発前のPS1-10afx領域のCFHT望遠鏡画像。青丸が超新星の発生位置で、その位置にある銀河はPan-STARRSチームの分光観測により超新星の母銀河と認定されていました¹⁸⁾。筆者らはこれがレンズ銀河と超新星母銀河が重なった天体ではないかという仮説を立てました。

文で出そうということになって、議論をいそいでまとめた論文がChornock et al.が投稿された約2週間後、2月13日にプレプリントサーバに投稿されました¹⁹⁾。

筆者らの論文は期待通り大きな反響がありましたが、その内容は必ずしも期待したものではありませんでした。もちろんこの新しい解釈に純粋に感心や賞賛したものも多くありましたが、その一方でいろいろな批判もありました。その代表的なものは、重力レンズを引き起こすレンズ天体が見当たらないというものです。当のChornockらも論文の改訂版で筆者らの論文を引用しつつ重力レンズの可能性を議論し、最終的には重力レンズの可能性はなく新種の超高輝度超新星と結論づけ、全

^{*5} 超高輝度超新星 (Superluminous supernova) は十数年前に初めて発見された新種の超新星で、他の超新星よりも1桁かそれ以上明るいという性質をもちます。実はRobert Quimbyは大学院生時代にこの新種の超新星の初発見に大きく貢献していて、またその後も超高輝度超新星の研究を精力的に行っているためPS1-10afxに彼が興味をもったのはある意味当然だったのでしょう。

^{*6} カブリIPMUでは午後3時に所属する全研究者がホールに集まってざっくばらんに議論するティータイムというものがあります。参加は義務とされています。

面対決の様相を呈していました。いずれにせよなんらかの決定的な証拠が必要なのは明らかでした。

3.2 ケック望遠鏡観測

筆者らが描いていたシナリオの一つは、上で述べたようにレンズ銀河と超新星母銀河が視線方向に重なっているというものです。もしこれが本当であれば、高空間分解能の撮像観測で二つ銀河があることを示す、また手前にある銀河の存在を分光で示す、という方法で確認することができるはずです。まずは前者の撮像観測で銀河を分離しその後分光観測をするのかなど筆者は考えていましたが、Quimbyが「いきなり分光してしまおう」と言い出してケック望遠鏡での観測提案を提出し、これが無事採択され追観測できることになりました*7。

2013年9月、Robert Quimby, 守屋堯, 筆者の3名がハワイ島ワイメアでのケック望遠鏡観測に臨みました。小さなトラブルはありましたがおおむね順調にすすみ、一つの銀河を一晩中ひたすら分光観測するというやや退屈な観測を無事おえました。観測天体は暗くその場で二次元分光データを見てもよくわからないので、その後の解析を楽しみに日本にもどったのです。

帰国後しばらくして、データと格闘していたQuimbyから「これはおそらくビッグニュースだが…」からはじまる解析の報告のメールが共同研究者に送られました。いわく、超新星母銀河の手前の銀河からの輝線らしきものが見つかったというものです。これが本当なら実際に二つの銀河がかさなっていることになります。この知らせに皆色めき立ちました。その後の詳しい解析で、同じ赤方偏移に対応する吸収線もいくつかみつき手前の銀河の存在は間違いないものになったのです(図2)。

3.3 PS1-10afxの正体

以上の研究よりPS1-10afxの正体ははっきりしてきました。すなわち、普通のIa型超新星が手前

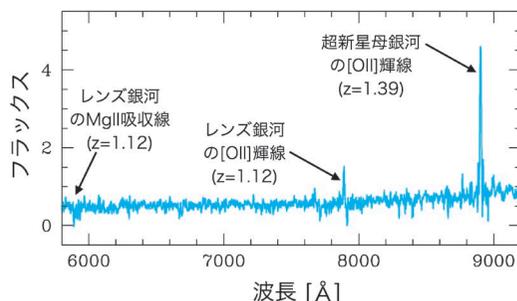


図2 ケック望遠鏡の分光観測で得られたPS1-10afx領域のスペクトル。超新星母銀河($z=1.39$)由来の輝線に加えて、手前のレンズ銀河($z=1.12$)由来の輝線や吸収線がみられます²⁰⁾。

の銀河による重力レンズ効果で約30倍に増光された現象だったのです。分光観測の結果から、手前の銀河の星質量は太陽の100億倍程度と比較的軽いことも判明し、これは観測的に要請される小さい複数像間の分離角や時間の遅れとも整合的です。

では将来のサーベイでPS1-10afxのような現象が発見された場合複数像を分離することはできるでしょうか?そもそもPS1-10afxがPan-STARRSチームの注目を引いたのはその色が非常に赤かったため、これは通常の超高輝度超新星は莫大なエネルギーを放出するため高温で青く観測されることと対照的です。筆者らは超新星の期待される色等級分布を調べ、その結果赤く明るい超新星はほぼすべてが重力レンズ超新星であることを見いだしました。つまり、将来のサーベイで赤く明るい超新星を発見した場合、それを速やかに他の高空間分解能をもつ望遠鏡で追観測すれば重力レンズ複数像を分離し時間の遅れも測定できるかもしれません。この手法をうまく使えば将来のLSST¹³⁾で1,000個近くの重力レンズ超新星を見つけることも夢ではないでしょう。

この結果はすみやかに論文にまとめられ投稿されました。幸い4人のレフェリーのコメントもおおむね好意的で、大きな問題もなく2014年4月論

*7 さすがカルテクにいた人は発想が富豪的だと思ったのですが、それはともかくこのリスクの高い観測提案を認めていただいた勇氣あるすばるTAC(時間交換枠を使ったので)には感謝しています。

文は無事サイエンス誌に出版されました²⁰⁾。

これは超新星の強い重力レンズの初発見と聞いていいと思いますが、完全に満足できるものではありませんでした。というのも、結局超新星の複数像は分離できずしたがって時間の遅れも測定できなかつたからです。しかし、次節で紹介するように「完全な」重力レンズ超新星の発見は思いがけない早いタイミングで訪れたのです。

4. SN Refsdalの発見

4.1 噂

2014年11月、筆者はカブリIPMUで開かれた強い重力レンズに関する国際研究会議の世話人としていそがしく過ごしていました。その研究会最終日の11月21日、共同研究者の一人から新しい超新星重力レンズが見つかったらしいという噂を聞きました。その後いろいろ探してみるとハッブル望遠鏡の所長裁量時間を申請しているという話のようです。所長裁量時間に関する情報は即時公開されるためさっそくハッブル望遠鏡のウェブサイトについてみると、たしかに超新星重力レンズ観測のプログラムが採択されています。どうやら銀河団銀河まわりに超新星の複数像を発見したということのようですが、それ以上の情報は得られなかつたので新しいニュースを待つことにしました。

しかし新しいニュースは思いのほかはやくやってきます。次の日の11月22日、変動天体の速報サイトでこの超新星重力レンズの発見が報じられたのです²¹⁾。「SN Refsdal」と名付けられたこの超新星は、銀河団MACSJ1149.6+2223^{*8}内の銀

河団銀河のまわりで4つの重力レンズ像が観測されているとのことでした。速報には超新星像の座標も書かれていたので、土曜日ではありましたが筆者はこの銀河団のハッブル望遠鏡アーカイブ画像をダウンロードし解析を試みました。自前のソフトウェア²⁴⁾、^{*9}で質量分布を再構築し超新星の複数像の再現を試みたところ、何が起きているのかおおよそ理解することができました。

4.2 6つの複数像

図3からわかるとおり、この銀河団の中心には重力レンズで3つに分裂して観測された渦巻銀河(1.1-1.3)がありますが、これがSN Refsdalの母銀河でした。ですので超新星の複数像も基本的には3つ期待されますが^{*10}、領域1.1の超新星像がたまたま銀河団銀河の位置に出現したため、その像がさらに4つに分裂しており、これらが報告された超新星像S1-S4に対応しています。すなわち、重力レンズモデルは観測された4つの像S1-S4の他に、領域1.2と1.3にそれぞれ1個ずつ、計6個の重力レンズ像を予言するのです。これらの新しい像はとりえずSXとSYと名付けることにしました(図3)。

重要なのは異なる像の間に時間の遅れがあることです。つまり異なる超新星像は時間差で「爆発する」ということになります。再構築した質量モデルをもとに期待される時間の遅れを計算すると、観測された超新星像S1-S4の間の時間の遅れは数日から数十日で、ほぼ同時にこれらの複数像が観測されたことと無矛盾です。一方S1-S4を基準にしたときSXはちょうど1年後、SYはおおよそ

^{*8} この銀河団はハッブル望遠鏡の所長裁量時間を大量投入して行われたHubble Frontier Fields (HFF)²²⁾の6つのターゲット銀河団の一つです。HFFの主な目的は銀河団中心部を深く撮像し重力レンズ増光を利用して遠方銀河を研究することで、SN Refsdalはこの銀河団のグリズム分光追観測プログラム²³⁾の観測によって発見されました。

^{*9} GLAFICというソフトウェアで、開発の経緯が文献4)にあります。そこには書けなかったのですが、このソフトウェアを開発した理由の一つは、研究の根幹となるところで借り物の道具を使っているようではその分野のトップを走ることにはできないと思ったからです。手間はかかりましたがそこから多くの成果が得られましたので結果的には正解だったように思います。

^{*10} 実は話をもっと複雑で、というのも超新星母銀河の一部がさらに1.2のすぐ右上に4つめ(ないしそれ以上)の像をつくっているからです。詳細なモデル計算の結果、超新星の複数像はその位置には現れないことがわかります。

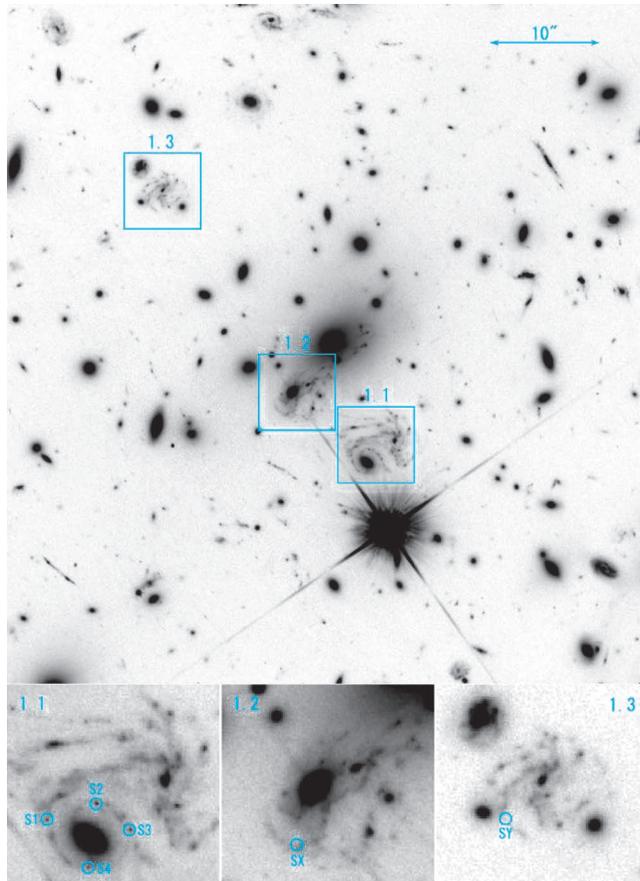


図3 銀河団MACSJ1149.6+2223 ($z=0.54$) のハッブル望遠鏡F814Wバンド画像. 1.1-1.3は超新星母銀河 ($z=1.49$) の3つの複数像を示しています. 領域1.1のS1-S4が最初に発見が報告された超新星SN Refsdalの4つの複数像を示しています^{21), 25)}. 領域1.2と1.3のSXとSYは重力レンズモデルによって存在が予言された他の超新星重力レンズ像の位置を示しています²⁶⁾.

17年前に出現する(した)という結果が得られました. 過去に爆発したはずのSYについてはいまから検証することはできませんが, 面白いのはSXで, もしこの質量モデル計算が正しければ約1年後にさらなる超新星爆発がSXの位置に観測されるはずで, これはこの銀河団をモニター観測し続けることで容易に検証が可能です.

休日を返上して質量モデルの構築と解析をした結果SN Refsdalを自分なりに理解できたことにすっかり満足した筆者は, 酒を飲んで寝たのでした.

4.3 論文

さらにニュースは続きます. 11月24日, いつも

のようにプレプリントサーバの新作論文をチェックしていると, SN Refsdal発見を報告するプレプリント(Kelly et al.)が投稿されていることに気がつきました²⁵⁾. これほどすぐに論文が出るは思っていなかったのもたまたまや驚きでした. 一番気になるのは質量モデルのところがどうかですが, ざっと論文をながめたところあまり定量的な議論はなされていないようでした. これは筆者の計算結果を出すべきだろうか, とすぐにおもいました. とくにSXが本当に1年後に出現するのであればそれに対応した観測計画をはやめに立てる必要があります.

少考の末、SN Refsdalの質量モデル計算の短いレター論文を書くことにしました。再計算を走らせつつ文章を書き、その日の夜には原稿を完成させ、Kelly et al. が出てから約12時間後、論文をプレプリントサーバとMNRAS誌に投稿しました²⁶⁾。

4.4 予言レース

筆者の論文はそれなりに注目をあびたようで、SN Refsdal発見グループのPat KellyとTommaso Treuらからも連絡をもらいました^{*11)}。しかし筆者の論文がプレプリントサーバに出た次の日の11月26日、Keren SharonとTraci JohnsonがSN Refsdalの質量モデル解析の論文を出したのです²⁷⁾。驚くべきことに彼女らはSXの出現時期を約3.6年後と予言して、筆者の計算結果と大きく食い違っていました。多くの人にどちらが正しいのか聞かれ(詰問され?)、針のむしろは大げさにしてもなんとなく不安な日々を過ごすことになりました。この食い違いの問題は、2015年2月に出た彼女らの論文の改訂版でなぜかSXの出現時期が約0.6年後に変更されたことで部分的に解消しましたが、依然として筆者の結果とは違いがあります。

時間の遅れは宇宙論パラメータとレンズ天体の質量分布から決まりますが、特に銀河団スケールでは質量分布が複雑なため質量分布からくる不定性が大きくなります。従って今回の場合、宇宙論パラメータをおよそ既知だと思うと時間の遅れの観測によって銀河団質量モデルの精度や妥当性を検証することができます。特に、時間の遅れを予言してそれを今後の観測とつきあわせれば、これまで全く不可能だった新しい質量分布のブラインドテストができるでしょう。

質量モデル再構築の精度は、使用する重力レン

ズ複数像の数や分光結果の有無など、使うデータの質にも大きく影響します。筆者の最初の質量モデルは古いデータに基づいていましたが、その後ハッブル望遠鏡の深サーベイ観測による撮像画像が得られ、また分光追観測も行われたのでデータの質は大幅に向上していました。2015年5月のある日、Treuから質量モデル比較プロジェクトの話を持ちかけられました。筆者を含む5つのグループが、最新のデータを使って同じ条件でそれぞれ独立に質量モデル構築を行いSN Refsdalの予言の相互比較をするというものです。二つ返事で承した筆者は、大学院生の川俣良太、石垣真史の助力のもと質量モデルの改訂にとりかかりました。結果、SXの期待される出現時期は約1年後でそれほどかわらず、また他のグループの結果も1年前後ではらつき、筆者の一番最初の見積もりがそれほど外していないことがわかり少し安堵しました。この比較プロジェクトの結果はハッブル望遠鏡観測再開の直前の2015年10月にプレプリントサーバとApJ誌に投稿されました²⁸⁾、^{*12)}。

4.5 再出現

2015年10月末、採択されていたKellyらのハッブル望遠鏡観測プログラムに従って、この銀河団領域のモニター観測が再開されました。10月と11月の観測では新しい像は発見されず、そのことを知らせる短いメールがKellyから届いたのみでした。

しかし12月12日、観測再開後3回目の観測でついに新しい超新星像らしきものが発見されたと報じられました²⁹⁾。出現位置もタイミング的にも質量モデルで予言されていたSXとぴったり合っています。比較プロジェクトの共著者たちは興奮

^{*11)} ちなみにTreuは前述のカプリIPMUでの研究会に参加していたのですがSN Refsdalのことは一言もいっていませんでした。このときのメールで「日本で言えなくてごめん!」ということをやっていたので、おそらくチーム内で指口令がしかれていたのでしょう。

^{*12)} この比較論文のタイトルは「“Refsdal” meets Popper」という洒落たものですが、このPopperは有名な科学哲学者Karl Popperのことを指していると思われます。Popperは科学と疑似科学を区別する鍵として反証可能性(falsifiability)を提唱しましたが、今回の新しい像の出現を予言しそれを実際の観測で確かめるという一連のプロセスはまさしく反証可能性を持つ科学的プロセスの好例ということでしょう。

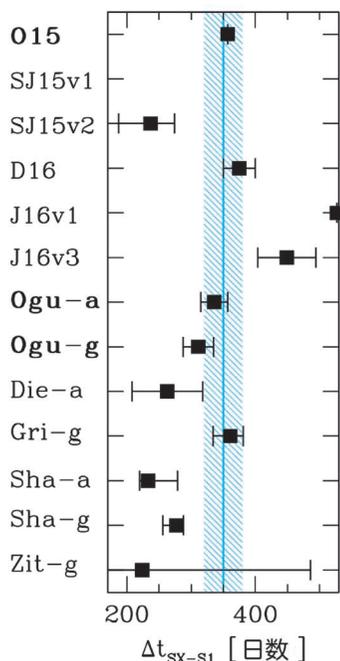


図4 観測されたSN RefsdalのS1-SX間の時間の遅れ(青線³⁰⁾)とさまざまな理論予言との比較。質量モデルとしてO15²⁶⁾, SJ15²⁷⁾, D16³¹⁾, J16³²⁾, および比較プロジェクト²⁸⁾で得られた5グループからの7モデル(Ogu-a³³⁾, Ogu-g, Die-a, Gri-g³⁴⁾, Sha-a, Sha-g, Zit-g)の時間の遅れの予言値をおよそ時系列順に黒点で示しています(v1, v2, …はプレプリントサーバ上の原稿のバージョン)。なお筆者らの質量モデルは太字で表されています。

してメールのやりとりをしていましたが、筆者自身はうれしかったというよりも安堵感とあと本当に見つかるものなんだという何か不思議な気持ちの方が大きかったです。

異なる像の間には時間の遅れだけでなく増光率の違いもあるのでこの検出で即座に時間の遅れが

確定するわけではない点は注意が必要です。Kellyらの解析によると、12月の検出から見積もられるSXとS1との間の時間の遅れは350日程度で³⁰⁾、^{*13)}、筆者の質量モデルの予言と良くあっています(図4)。予言が大きはずれていなかったことから、現在の質量モデル再構築の手法が妥当であるということこれまでと全く異なる新しいタイプの観測で確認できたという意味で意義深いといえます^{*14)}。

またSN Refsdalは赤方偏移1.49という遠方でこれまででもっとも詳しく観測された超新星といってよいと思いますので、超新星研究の観点からも面白い天体でしょう。S1-S4のライトカーブの解析と分光結果からこの超新星はSN 1987Aに似たII型の超新星であることがわかっています³⁵⁾, ³⁶⁾。

SN Refsdalに加えて、強い重力レンズで分裂して観測されたIa型超新星iPTF16geuも2016年に発見され³⁷⁾, ³⁸⁾、重力レンズ超新星天文学がいよいよ幕を開けました。細かいところでいくつか予想外だった点はあったものの重力レンズ超新星の発見自体は長らく期待されていたものでそれほど驚きはなかったと言ってよいでしょう。しかし次節で紹介するIcarusの発見は事前にほとんど期待されていなかった予想外の発見で、自然の奥深さを物語っています。

5. Icarusの発見

5.1 謎の変動天体

SN Refsdalの「再出現」後、時間の遅れを詳細に測定するために銀河団MACSJ1149.6+2223をハッブル望遠鏡でモニター観測している時にその発見がもたらされました。2016年5月、観測PIのPat Kellyが偶然に視野内で変動する天体を発見し

*13 このSX発見論文のタイトルは「Deja Vu All Over Again」という洒落たものですが、これは元プロ野球選手Yogi Berraの語録から引用したものとされます。

*14 モデルによる時間の遅れの違いは様々な要因があり複雑ですが、これらの研究によりいくつかの知見が得られています。ざっくりいうと非常にフレキシブルなダークマター分布を仮定するよりはある程度分布の形を仮定してそのパラメータを決める方がうまく行くようです。またテクニカルな側面として、パラメータ推定を効率よく行う新しい手法を開発しそれをコードに採用していて、それにより多くのパラメータ空間を精度良くかつ効率よく掃くことができた点も有利に働いたのかもしれませんが。

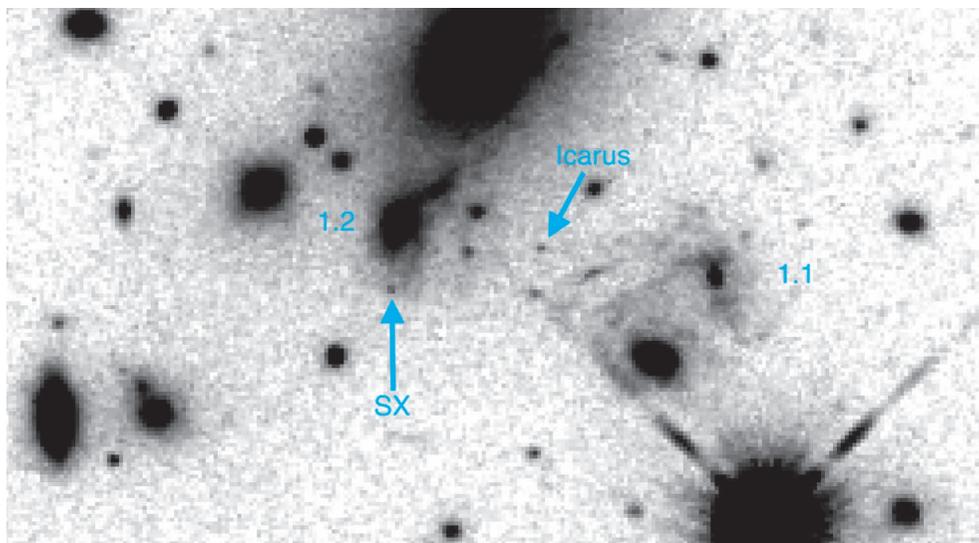


図5 謎の変動天体の発見. 画像は2016年5月のハッブル望遠鏡F125Wバンド画像で、1.1と1.2は図3にも示した母銀河複数像、SXは再出現したSN Refsdalの複数像です. 後にIcarusと名付けられる謎の変動天体はこの銀河団の増光率の非常に高い領域で発見されました.

たのです(図5). 画像をさかのぼって見てみると4月からその明るさは徐々に増してきていて発見時には26等程度になっていました. 面白いことに、重力レンズモデルと比較してみるとその天体の位置は非常に増光率の高い臨界曲線のすぐそばにあることがわかり、重力レンズとなんらかの関係がある現象だと期待できます.

この発見が5月4日にKellyから報告されてから、大量のメールが飛び交う怒涛の日々が始まりました. どういった現象かよくわからないのでいろんな案が出されましたが、その中でTom Broadhurstはかなり初期の段階から、明るく巨大な星が天球面上を少しずつ移動して増光率が高くなる領域に移動するマイクロ重力レンズではないかという説を推していました^{*15}. ただ赤方偏移1.49の単独の星が観測されるためには数千倍かそれ以上の極端に大きな増光率が必要になります. 皆そんなものが観測できるのかと半信半疑でしたが、異なるフィルターの撮像観測で変動天体の色を調べたと

ころ母銀河の赤方偏移1.49での強いバルマー不連続が見られたのです. この観測は、変動天体は超新星のような爆発現象ではなくB型星のような若い星がマイクロ重力レンズ増光されたという解釈を支持するものでした.

5.2 焦線通過

実は上記のマイクロ重力レンズは全く新しいアイデアという訳ではありませんでした. 過去の文献を注意深く調査してみるとJordi Miralda-Escudeが1991年にまさにこのテーマについて論文を書いていることが判明したのです³⁹⁾. この論文はそれまで6回しか引用されておらず最後に引用されたのは1997年といういわば「忘れ去られた」論文でしたが、今回発見された現象を見事に予言していました. 今回の現象は銀河団背後の超新星母銀河内の星が焦線(caustic)と呼ばれる増光率の高い領域に近づいていくことで徐々に増光していくというものです. しかし星が焦線を通ると重力レンズ像が消滅して一気に暗くなります.

*15 これは結局ほぼ正しかったのですが、彼のこの辺りの嗅覚というかセンスというかはさすがで見習いたいものです.

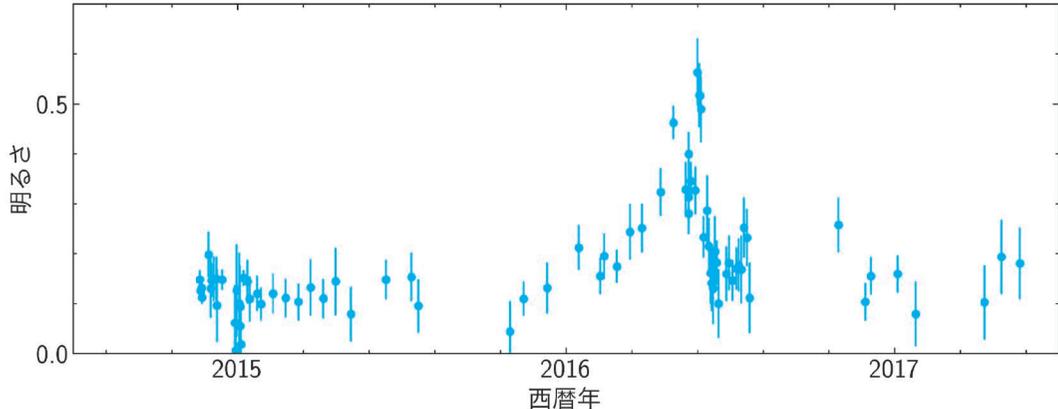


図6 変動天体Icarusのライトカーブ。ハッブル望遠鏡F125Wバンドで観測された明るさの時間変化を示しています。

よく知られた普通のマイクロ重力レンズは徐々に明るくなって暗くなるという時間軸に対して対称なライトカーブですが、今回の焦線通過では天体の明るさは徐々に明るくなりその後急激に暗くなるというとても非対称なライトカーブを持つという特徴があります。これを観測的に捉えられればマイクロ重力レンズの強い証拠となるでしょう。

これを今回の観測に当てはめてみると、その明るさは指数関数的に増大していき最終的には24等よりも明るくなってその後急激に暗くなるはず、と見積もられました。これだけ明るければ地上望遠鏡でも比較的容易に観測できますので、観測キャンペーンを行ってピーク付近のライトカーブを詳しく測定できます。変動天体の速報サイトに5月29日に報告し⁴⁰⁾ 観測の準備を急ピッチで進めていきました。

5.3 消滅

しかしまたしても予想外の事態が起こります。6月2日のハッブル望遠鏡観測で、その直前の観測に比べて1等近く急激に暗くなったのです。その文面からも狼狽ぶりが伝わるKellyのメールでそのことを知った私たちはまたも混乱に陥ります。また明るさが復活するかも、という願いもむなしくその後もさらに暗くなっていき6月半ばには元の明るさには戻ってしまいました(図6)。結局期待された非対称なライトカーブは観測され

たものの、明るさは一番明るい時で26等より少し明るい程度で終わってしまい期待どおりにはいきませんでした。

5.4 理論的解釈

何が起こったのでしょうか?その後の詳しい理論研究によって次第に状況が見えてきました。Miralda-Escudeは銀河団の質量分布として滑らかな質量分布を考えていたのですがこの仮定が正しくなかったのです。

銀河団内の銀河の間は一見何もないように見えますが、実は星がただよっています。これらの星は銀河の外縁部の星が銀河団の潮汐力によって剥ぎ取られたもので、銀河団内の淡く広がった銀河間光、intracluster light (ICL) を担っています。ICLとなる星は銀河団の全質量に対する質量の割合としては1%以下で少ないですが、それでも銀河団の高増光領域の描像を大きく変えてしまいます。具体的には、これら星によってももとの銀河団の臨界曲線は細かく分裂します^{41), 42)}。この分裂によって背後の天体の増光率はある程度焦線に近づいた段階で飽和しそれ以上大きくなれません。Chema Diegoが中心となって詳細なシミュレーションを行い⁴¹⁾、またNick Kaiserや筆者が解析的計算で相補的な検討を行って⁴³⁾、それらを森下貴弘らのICLの測定⁴⁴⁾と比較した結果、今回の現象はICLを担う星のマイクロ重力レンズでとて

もよく説明できることを見出しました。

これらの考察からわかった変動天体の解釈は以下のとおりです。赤方偏移1.49にある青色超巨星がマイクロ重力レンズで増光して観測されたもので、重力レンズを引き起こしたのはICLを担う銀河団内の星、かつ銀河団による増光もあわさって最大で数千倍の増光率になったと見積もられています。これまで単独の星が観測されたのは赤方偏移0.01以下のごく近傍に限られていたもので、単独の星の観測の最遠方記録を大幅に更新したことになります。「Icarus」と名付けられた^{*16}この星の発見論文は、難産でしたが^{*17}最終的に2018年4月にネイチャーアストロノミー誌に掲載されました⁴⁷⁾。

今回の発見はさらに副産物をもたらしました。質量分布を滑らかでなくす可能性として、ICLの星以外にも原始ブラックホールがあります。ダークマターを宇宙初期にできた原始ブラックホールで説明するモデルは多く存在しますが、このような原始ブラックホールが多数存在すると上記の飽和がより強く起こることでIcarusの観測を説明できなくなります。この議論により、広いブラックホールの質量範囲でダークマターが全て原始ブラックホールから成っているという説を棄却することができました⁴³⁾。

5.5 今後の展望

今回発見した銀河団での焦線通過はわりと普遍的にみられる現象かもしれません。Icarusの発見と同じ号で報告された謎の高速変動天体「Spock」⁴⁸⁾も実は焦線通過だった可能性が大いにあります。

またハッブル望遠鏡のアーカイブ観測データを詳しく調べることで新しい焦線通過の候補「Warhol」⁴⁶⁾も発見されました。今後はジェームズウェッブ宇宙望遠鏡が稼働すればより多数の焦線通過が観測できると期待できますが、これにより初代星(Pop III)の観測⁴⁹⁾や銀河団内の小質量ダークマターサブハローの検出⁵⁰⁾などさらに多くの応用が拓かれることでしょう。

6. 最後に

本稿では時間軸天文学の進展により最近発見された新種の時間変動重力レンズ、重力レンズ超新星および焦線通過による遠方の単独の星の観測を紹介しました。これらの発見は予想どおりだった面もあり意外だった面もあり、研究の面白さや奥深さが垣間見られると思います。

では冒頭の話に戻って、筆者の大学時代の選択は果たして正解だったといえるのでしょうか。人生は対照比較できないので究極のところはわかりません。現在の日本で天文学の研究者として生きるのはなかなか大変で、筆者もやめたいと思うこともしばしばです。それでも、研究における様々な発見の瞬間、例えばいろいろとわからなかった現象がある日ピースがはまるかのようにぱっと解明できたり理論的に半信半疑で計算したものが観測で実際に確認されるという体験は、なかなか巡り会えるものではないですが一度体験すると忘れられない強烈なもので研究をやってよかったと感じる瞬間です。

^{*16} 天文学者は何にでも変な名前をつけたがるのですが⁴⁵⁾、今回は例外ではありません。Icarusはもちろんギリシャ神話のイカロスからきていて、そのライトカーブがイカロスの最期を連想させるためそう名付けられました。他にも候補はいくつかあって、KellyはアメリカのB級(?)映画「ジャイアント・ベビー」を元にした「サリンスキー (Szalinski)」, また「15 minutes of fame」という名言を残したアメリカの画家から「ウォーホル (Warhol)」などを提案しましたが非アメリカ人が多い共同研究者の中でウケはかなりいまいちで結局採用されませんでした。後者については最近新しく発見された焦線通過候補に名付けることで⁴⁶⁾彼の悲願が成就したことになります。

^{*17} ノーベル賞受賞論文は実はリジェクトされたケースが結構多いという話がありますが、今回の発見はそこまですごい発見ではないですが、それでもかなり目新しい話だったためレフェリーに正しく理解してもらえない部分もあり苦労しました。

謝 辞

これまでとても多くの方にお世話になっており、全ての方の名前を挙げることはできませんがそれでも何人か謝意を述べさせていただきます。須藤靖さん、高田昌広さん、Michael Straussさん、Roger Blandfordさんは私の学生ポストク時代に指導して頂きその後も折にふれ励ましを頂いています。たいへんありがとうございます。稲田直久さん、加用一者さんは私が観測研究を始めるきっかけとなったSDSS重力レンズクエーサー探索で長年苦楽を共にし、またいろいろと教えて頂きました。川俣良太さん、石垣真史さん、大内正己さん、嶋作一大さんは今回の記事にも関連するハッブル望遠鏡データを使った遠方銀河の研究と一緒に一から取り組み、挑戦的な研究テーマでしたが特に川俣さんと石垣さんの頑張りの結果数多くの重要で面白い研究成果をあげることができたと思います。最近の研究はすばる望遠鏡HSCサーベイを用いた研究が主ですがPIの宮崎聡さんはカメラ作製およびサーベイ開始前からいろいろ議論して頂き、また大きなプロジェクトをリードする様を間近でみて学ぶことも多かったです。その他とてもここに書ききれない多くの共同研究者のおかげで多様なテーマで多くの面白い研究ができました。どうもありがとうございました。

参考文献

- 1) 稲田直久, 大栗真宗, 2004, 天文月報, 97, 415
- 2) 稲田直久, 2009, 天文月報, 102, 747
- 3) 大栗真宗, 2010, 天文月報, 104, 30
- 4) 大栗真宗, 2013, 天文月報, 106, 555
- 5) Refsdal, S., 1964, MNRAS, 128, 307
- 6) Walsh, D., et al., 1979, Nature, 279, 381
- 7) Kundić, T., et al., 1997, ApJ, 482, 75
- 8) Birrer, S., et al., 2019, MNRAS, 484, 4726
- 9) Oguri, M., & Marshall, P. J., 2010, MNRAS, 405, 2579
- 10) <http://pswww.ifa.hawaii.edu/pswww/> (2019/9/30)
- 11) <https://www.darkenergysurvey.org/> (2019/9/30)
- 12) <https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/> (2019/9/30)
- 13) <https://www.lsst.org> (2019/10/8)
- 14) Oguri, M., & Kawano, Y., 2003, MNRAS, 338, L25
- 15) Kochanek, C. S., et al., 2001, ApJ, 547, 50
- 16) Oguri, M., et al., 2003, ApJ, 583, 584
- 17) Suwa, Y., 2018, MNRAS, 474, 2612
- 18) Chornock, R., et al., 2013, ApJ, 767, 162
- 19) Quimby, R., et al., 2013, ApJ, 768, L20
- 20) Quimby, R., et al., 2014, Science, 344, 396
- 21) Kelly, P., et al., 2014, ATel, 6729, 1
- 22) Lotz, J. M., et al., 2017, ApJ, 837, 97
- 23) Treu, T., et al., 2015, ApJ, 812, 114
- 24) Oguri, M., 2010, PASJ, 62, 1017
- 25) Kelly, P., et al., 2015, Science, 347, 1123
- 26) Oguri, M., 2015, MNRAS, 449, L86
- 27) Sharon, K., & Johnson, T. J., 2015, ApJ, 800, L26
- 28) Treu, T., et al., 2016, ApJ, 817, 60
- 29) Kelly, P., et al., 2015, ATel, 8402, 1
- 30) Kelly, P., et al., 2016, ApJ, 819, L8
- 31) Diego, J. M., et al., 2016, MNRAS, 456, 356
- 32) Jauzac, M., et al., 2016, MNRAS, 457, 2029
- 33) Kawamata, R., et al., 2016, ApJ, 819, 114
- 34) Grillo, C., et al., 2016, ApJ, 822, 78
- 35) Rodney, S. A., et al., 2016, ApJ, 820, 50
- 36) Kelly, P., et al., 2016, ApJ, 831, 205
- 37) Goobar, A., et al., 2017, Science, 356, 291
- 38) More, A., et al., 2017, ApJ, 835, L25
- 39) Miralda-Escude, J., 1991, ApJ, 379, 94
- 40) Kelly, P., et al., 2016, ATel, 9097, 1
- 41) Diego, J. M., et al., 2018, ApJ, 857, 25
- 42) Venumadhav, T., et al., 2017, ApJ, 850, 49
- 43) Oguri, M., et al., 2018, Phys. Rev. D, 97, 023518
- 44) Morishita, T., et al., 2017, ApJ, 846, 139
- 45) 大栗真宗, 2019, 天文月報, 112, 167
- 46) Chen, W., et al., 2019, ApJ, 881, 8
- 47) Kelly, P., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 334
- 48) Rodney, S. A., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 324
- 49) Windhorst, R. A., et al., 2018, ApJ, 234, S41
- 50) Dai, L., et al., 2018, ApJ, 867, 24

Discoveries of New Time-variable Gravitational Lenses

Masamune OGURI

Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The progress of time-domain astronomy enabled us to discover new types of time-variable gravitational lenses, some of which are expected and others are not so much. I review the progress of this research field including my contributions.