

重力レンズとアマチュア

阿部 文雄

〈名古屋大学宇宙地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: abe@isee.nagoya-u.ac.jp



80年前、1アマチュアによって提唱された重力レンズは、今日では太陽系外惑星発見の手段として活用されています。そして、その観測には多くのアマチュア天文家が参加し、惑星発見に貢献しています。80年前に何が起きたのか、そして現在何が起こりつつあるのか、アマチュアの活躍を中心に重力レンズの80年を振り返ってみたいと思います。

1. アインシュタインの重力レンズ

「重力レンズ」というと、多くの人はアマチュアにはおよそ縁のない話と思っておられると思います。ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡のような大口径望遠鏡によって観測される遠方銀河や銀河団による分離した複数の像、アークや歪んだ像（強い重力レンズ, strong lensing）、または多数の銀河のイメージの僅かな歪みを統計的に処理する弱い重力レンズ（weak lensing）などを思い浮かべるのではないのでしょうか。これらは、とてもアマチュアの望遠鏡で観測できるようなものではありません。しかし、アインシュタインの論文にある重力レンズは、こうした遠方銀河によるものではなく、星による重力レンズ効果でした。しかも、このアイデアはアマチュアによるものでした。

1936年に発表された、“Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field（星の重力場内の光の変位によるレンズの様な作用）”という題のアインシュタインの論文¹⁾は、実に不思議な論文です。本文は、僅か1ページほどで平易な英語で書かれており、参考文献もありません。内容は、二つの星が完全に観測者の視線上に重なり、食のような状態のときに起きる

二つの現象について書かれています。第1の現象は、手前の星の重力で曲げられた光が観測者から見て丸い像を作るというもので、今日アインシュタイン・リングと呼ばれている現象です。第2の現象は、手前の星の重力で曲げられた光が、観測者のところに集光されて明るく見えるというものです。この現象は、今日重力マイクロレンズと呼ばれています。そして、この論文の冒頭には、不思議なことが書かれています。“Some time ago, R. W. Mandle paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request. This note complies with his wish.（少し前にマンドル氏が私を訪れ、私が彼の要請に基づいて行ったちょっとした計算を出版するように依頼しました。このノートは、彼の希望によるものです。）”。これは、どういうことなのでしょう？ マンドル氏とは、どのような人なのでしょう？ 実は、マンドル氏こそ重力レンズの発案者^{2),3)} だったのです！

ルディ・マンドル氏は、1894年モラヴィア（現在のチェコ）の生まれで、当時42歳でした。職業は、電気技師ということになっています。実際電気技師の資格をもっており、自分で発明した電気アイロンを製造・販売していたこともあったようです。しかし、さまざまな事情から彼はアメリ

カに移住し、この出来事のあった当時は、首都ワシントンのレストランで皿洗いをしていました。1936年の春、彼は青いスーツを着てワシントンにあるアメリカ・科学アカデミーを訪問し、彼の「重力レンズ」のアイデアを説明しました。一説によれば、彼は科学雑誌Science News Letter誌のオフィスに行ったことになっています。これは想像ですが、まず雑誌社に論文発表をもちかけ、説明してもらいが明かなかったので、同じ建物にある科学アカデミーに相談したのではないのでしょうか。

彼のアイデアは、だいたい次のようなものでした。一般相対性理論によれば、重力場の中では光は曲げられます。これは、すでによく知られていました。彼は、星の周りの重力場がちょうどレンズのような集光作用をするに違いないと考えました。ちょうどその頃、リング状の星雲が発見され、彼はそれが重力レンズで生じた遠方の星の像だと考えました。さらに、彼は重力レンズによる集光作用は、遠方の星や銀河などからの放射を地球上に集め、恐竜の絶滅など地球上で起きた大量絶滅は、この作用によって引き起こされたと考えました。

彼は、それ以前にも著名な科学者を訪問してはこの説を主張し、無視されたり断られたりを繰り返していたようで、いわば「札付き」の人だったようです。しかし、数式や図(図1)をもとに真摯な態度で説明するマンデル氏に、科学アカデミーの人は対応に苦慮しました。そう簡単に論駁できる内容でもなく、そうかと言って支持するのも難しい。思いあまった科学アカデミーの職員は、マンデル氏に旅費にするようにと金を渡し、プリンストンに行ってアインシュタインに説明するように勧めました。こうして、1936年4月17日にマンデル氏はプリンストンを訪れ、アインシュタインと面会しました。

こうしてやって来たマンデル氏を、アインシュタインは快く迎え入れ、熱心に話を聞きました。

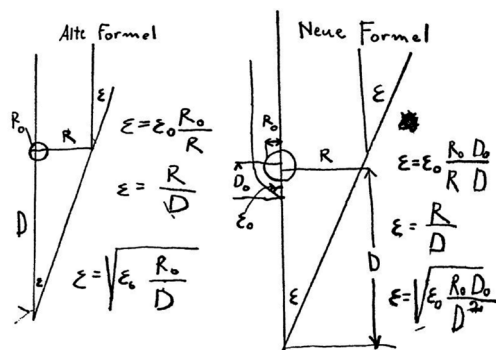


図1 マンドル氏による重力レンズのスケッチ²⁾。左は、最初のもので、右はアインシュタインの修正後。

© Einstein Archives, The Hebrew University Jerusalem

マンデル氏とアインシュタインの会合は、数回行われたようで手紙のやり取りも数回行われました。アインシュタインは、マンデル氏の使った式の一部誤りを見つけましたが、彼のアイデアの基本的な部分つまり、二つの星が視線上に重なり「食」の状態になったとき、手前の星の重力によってリング状の像ができることと、「増光」することの2点が正しいことを確認しました。マンデル氏のアイデアは、アインシュタインによってお墨付きを得たこととなります。これに力を得たマンデル氏は、論文を発表しようとする。しかし、どこの雑誌からも良い返事は来ませんでした。アインシュタインは、恐竜の絶滅などの話は止めにして、重力レンズの計算結果のみを論文にするように助言しました。しかし、もはや自力で論文を発表するのは無理と判断したマンデル氏は、計算結果を公表するようにアインシュタインに依頼しました。アインシュタインは、あまり乗り気ではありませんでした。実際、リング状の像は地球から観測するにはあまりに小さく、観測は絶望的と思われました。また、増光のほうも実際に観測できる機会は、ほとんどないと思われました。しかし、マンデル氏の熱意に負けて、アインシュタインは計算結果を公表することを決意しま

す。かくして、重力レンズの論文は1936年12月4日のScience誌に掲載されました。

2. 重力レンズの発見

アインシュタインの論文が出るとすぐに、遠方の銀河による重力レンズが観測できるかもしれないと考えた天文学者ツヴィッキーが、探索を試みました。しかし発見できませんでした。その後重力レンズは長い空白の時代を迎えます。理論的な研究は行われていましたが、当時の観測技術ではまだ重力レンズの観測は難しかったのです。転機が訪れたのは、20世紀も終わりに近づいてからです。1979年、近接した二つのクエーサーのように見えていたものが、実際には一つのクエーサーが手前の銀河の重力レンズ効果で分離した像となって見えているのが発見⁴⁾されました。これが、重力レンズの最初の発見とされています。しかし、これは遠方の銀河による空間的に広がりを持った重力レンズで、マンドル・アインシュタインによる星などの点状の天体による重力レンズとは少し異なります。では、マンドル・アインシュタインの重力レンズは、どうなったのでしょうか？

アインシュタインの論文にある重力レンズは、リング状の像（アインシュタイン・リング）と増光（マイクロレンズ）です。アインシュタイン・リングは観測されたのでしょうか？ アインシュタイン自身は、“Of course, there is no hope of observing this phenomenon directly. (もちろん、この現象を直接観測することは絶望的である)”と書いています。星による重力レンズ効果で生じたアインシュタイン・リング、または分離した像を撮像する可能性については、これまで何人かの人によって議論^{5), 6)}されています。しかし、期待されるアインシュタイン・リングの半径は、1ミリ秒以下でVLTIなど現在最高の光学干渉計をもってしても困難とされています。今後も、大規模な光学干渉計による観測が宇宙から可能にな

るまでは難しそうです。一方、遠方の銀河や銀河団の重力レンズ効果で生じるアインシュタイン・リングは、ハッブル宇宙望遠鏡でいくつか観測されています。これは、銀河や銀河団の質量は非常に大きいため、大きなアインシュタイン・リングを生じることによります。

では、もう一つの重力レンズ効果である増光（マイクロレンズ）はどうでしょうか？ アインシュタインは、これについても“Therefore, there is no great chance of observing this phenomenon, even if dazzling by the light of the much nearer star B is disregarded. (それゆえ、ずっと近いほうの星Bの光による幻惑が仮に無視できたとしても、この現象を観測するような絶好の機会はありませんでしょう)”と言っています。実際、このような増光が特定の星に起きる確率は、だいたい100万分の1くらいとされています。しかし、不可能と思われたこの現象が、観測技術の進歩により毎年1,000個以上も発見されるようになりました。原理は簡単です。仮に1億個の星を観測すれば、100万分の1の現象も100個くらい起きていて良いというわけです。当初は軍事技術として開発され、冷戦終了後天文観測用に広く使われることになったCCD撮像素子が、これを可能にしました。そして、アインシュタインの心配した手前の星（以後レンズ天体と呼びます）の光による幻惑は、杞憂でした。実際にレンズ効果を起こす天体は、大部分が暗い低質量のM型矮星だったのです。これは、低質量の星の数は太陽程度の質量の星より圧倒的に多いことによります。

たくさん星を観測して、マイクロレンズ事象を発見する方法は、当時暗黒物質の候補と考えられていた褐色矮星を探す方法として、1986年にパチェンスキーによって提案⁷⁾されました。この頃すでに、銀河の回転曲線などから、銀河の外側のハローの部分には、直接観測にはかからないが、大量の質量が存在することが明らかになっていました。こうした「見えない物質」を暗黒物質



と呼んでいたわけです。水素核融合反応を起こさない低質量の褐色矮星のような星は、有力な候補の一つに上げられていました。褐色矮星は、小さいながらも質量があるので重力レンズ効果を引き起こすと考えられました。マゼラン雲やアンドロメダ銀河のような近傍の銀河の星をたくさん観測すれば、銀河ハローの暗黒物質を構成する光を発しないこうした天体 (Massive Compact Halo Object) を略して MACHO と呼ばれていました) によって、増光現象が起きるはずだというわけです。

パチェンスキー自身は、まさか本当に観測をする人が現れるとは思わなかったようですが、何と三つのグループが観測に参入しました。アメリカ・オーストラリア共同の MACHO グループ、フランスの EROS グループ、ポーランドの OGLE グループです。この種の観測は、とにかくたくさんの星をモニターして増光現象を見つければ良いわけです。増光期間は、だいたい数十日程度と期待されました。この目的に、大口径の望遠鏡は必ずしも必要ではありません。時代遅れの 1 m クラスの望遠鏡に大きな CCD カメラを取り付けて、マゼラン雲全体を毎晩 1 回撮像し、計算機で画像解析して光度曲線を求める手法が使われました。もちろん、この観測は簡単ではありませんでし

た。観測される星には、かなりの数の変光星が含まれています。マイクロレンズ事象のような、怪しげな増光を繰り返すマゼラン雲の変光星に悩まされながらの観測でした。しかし、これら三つのグループはほぼ同時に最初のマイクロレンズ事象⁸⁾⁻¹⁰⁾を発見しました (図2)。MACHO と EROS は、大マゼラン雲で、OGLE グループは、バルジ (われわれの銀河の中心付近) での発見でした。こうして、MACHO は暗黒物質の最有力候補に躍り出ました。

はなばなしいデビューを飾ったマイクロレンズですが、ほどなく状況は暗転することになります。マイクロレンズ観測から得られた MACHO の数は、暗黒物質から期待される数を大幅に下回っていたのです。このため、MACHO は暗黒物質の候補から脱落し、EROS, MACHO の両グループは、相次いで観測中止を表明してマイクロレンズ観測から撤退しました。世間の関心も薄れ、マイクロレンズは冬の時代を迎えます。このピンチを救ったのは、マイクロレンズ法による太陽系外惑星の発見です。これにつきましては、第 3 章に述べることにして、その前に世界を驚かせた日本のアマチュアによる発見について述べます。

先に述べたとおり、マイクロレンズ事象は起きる確率が低い希な現象です。そのため、マイクロレンズ観測は、できるだけたくさんの星をモニターする必要があります。観測は、専ら星の密集した領域で行われます。例えば、バルジ、大小マゼラン雲、アンドロメダ銀河などです。こうした、星の密集領域から外れたところでは、マイクロレンズ事象は、まず起きないと考えられていました。理由は、モニターできる星の数が減ることと、マイクロレンズ効果を引き起こす「レンズ天体」の数も減ってしまうからです。しかし、この常識を覆す発見が、日本の誇るアマチュア天文家によってなされました。

2006年10月31日、アマチュア天文家の多胡昭

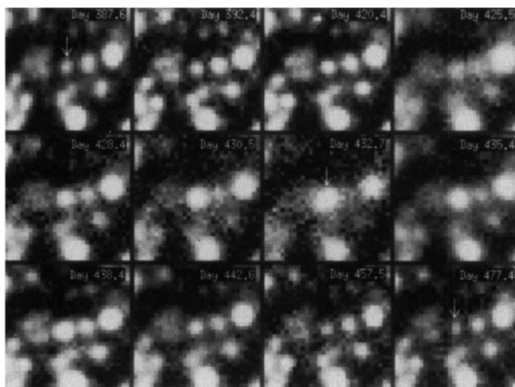


図2 MACHO グループが発見した最初のマイクロレンズ事象⁹⁾。中央の星がいったん増光し、再び元の明るさに戻っている。

彦さんはデジカメで撮影したカシオペア座付近の写真の中から、見慣れない星を発見しました。同じ日に多胡さんとは独立に、桜井さんも同じ星を発見しました。しかし、この星は全く新しい天体ではなく、普段11等くらいの星が、発見時には4.5等ほど増光していたのです。発見は、直ちに世界中に配信され、各地で追観測が行われ、スペクトルも取られました。ところが、その結果は驚くべきものでした。通常、このように突然明るくなる星は、新星などが考えられます。しかし、この星のスペクトルは、ベガなどと同じ普通のA型星のスペクトルで、新星に特有の輝線はありませんでした。ということは、普通のA型星がスペクトルを変えないまま数十倍にも増光したことになります。そこで、これは重力マイクロレンズではないかという疑いが浮上し、マイクロレンズ観測を行っている我々MOA (Microlensing Observations in Astrophysics)の略、日本・ニュージーランド共同研究)グループのところに相談がもちかけられました。

ちょうど、秋の晴天が続く時期だったので、多くのアマチュアがカシオペア付近の写真を撮っていました。当時名古屋大学の大学院生だった福井暁彦さん(現・岡山天体物理観測所)が、デジカメ画像の解析を行いました。さらに国内のスペクトル観測とアメリカ変光星協会(AAVSO)のアマチュアによる測光データおよびガンマ線バーストなどの突発天体観測用の広視野望遠鏡ASASのデータを加えて分析し、このイベントが紛れもないマイクロレンズ事象であることを確認¹¹⁾しました(図3)。しかし、こうした明るい近傍の星(この場合約1 kpc)でマイクロレンズ事象が起きる確率は、極めて低いはずで、実際には、こうした事象が全天のどこかで起きる割合は、数十年に1回くらいで、起きてもおかしくなさそうですが、実際に発見される確率まで考えると、ほとんど奇跡というレベルです。多胡さん、桜井さんの観察眼には、敬服する以外ありません。

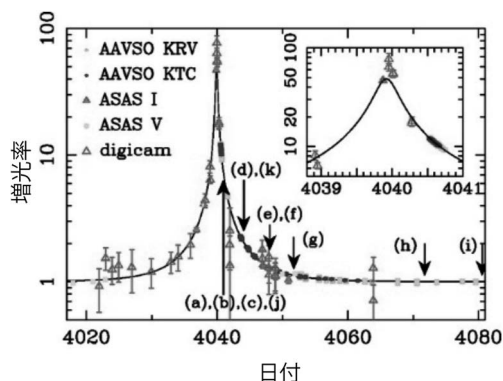


図3 多胡事象の光度曲線¹¹⁾。マイクロレンズ特有の前後対称の光度曲線になっている。

3. 太陽系外惑星の発見

1990年代に始まった太陽系外惑星の発見については、みなさんよくご存じかと思います。1992年にパルサータイミング法による最初の太陽系外惑星の発見がなされ、つづいて1995年には、視線速度法による「普通の星」を周る太陽系外惑星が発見されました。その後続々と発見が続き、これまでにすでに3,000個以上の惑星が発見されています。マイクロレンズ法では、これまでに約50個の惑星が発見されています。「たったの50個か」と言う人もいますが、実は侮れない特徴をもっています。ここでは、この手法の原理と特長、その発見とアマチュアの活躍について述べてみたいと思います。

マイクロレンズ効果を利用して太陽系外惑星を発見するという手法は、1991年にマオとパチェンスキーによって考案¹²⁾されました。通常、単一の星によるマイクロレンズ事象は、ピークの前後で対称な光度曲線になります。しかし、レンズ天体が惑星を伴っていた場合、主星によるレンズ効果と惑星によるレンズ効果が合成されます。これは、一見二つのマイクロレンズ事象の光度曲線の単純な重ね合わせになりそうに思えます。しかし、実際には光線が包絡線のように折り重なり、コースティック(火線)と呼ばれる線に沿っ

て増光率が非常に大きくなる現象が起きます。この複雑な増光パターンを検出して惑星を発見しようというのが、この手法です。

さて、この方法の特徴ですが、彼らの言葉を借りれば「この方法は難しい。しかし絶望的ではない。実際、これまで提案されたどの手法と比べても、太陽系外惑星の存在を証明する簡単で信頼できる方法かもしれない。」ということになります。つまり、マイクロレンズ事象の発見はたいへんだが、いったん見つかってしまうと、その後の追観測に特殊な機材は必要なく、比較的容易に惑星を見つけることができるということになります。特殊なコロナグラフを必要とする直接撮像や、高分解能の分光器を必要とする視線速度法とは対照的です。

そして、特にアインシュタイン・リングの近傍に居る惑星に特に感度が高く、ほとんど地球質量まで発見できることも特徴として挙げられます。これは、主星の重力レンズによって生じた二つの像が、アインシュタイン・リングの内側と外側をそれぞれ半周するのですが、その経路上に惑星が居るとそのレンズ効果による歪み（アノマリー）が光度曲線に現れるからです。運さえよければ、地球質量でも十分に観測可能なアノマリーが現れることがわかりました。バルジのマイクロレンズ事象のアインシュタイン・リングの半径は、だいたい1-4天文単位くらいです。この距離は、太陽系では小惑星帯のあたりですが、主星の多くがM型矮星なので木星型の巨大惑星の形成領域になります。視線速度法やトランジット法が、専ら主星に近接した惑星に感度があるのと好対照です。

しかし、この方法はやはり難しく、最初の発見まで10年以上かかりました。これは、確率的に起こりにくいという問題のほかに、解析が難しく間違いなく惑星であることを証明するのに手間取ったという面もあります。マイクロレンズ法による最初の太陽系外惑星¹³⁾は、2003年に起きた

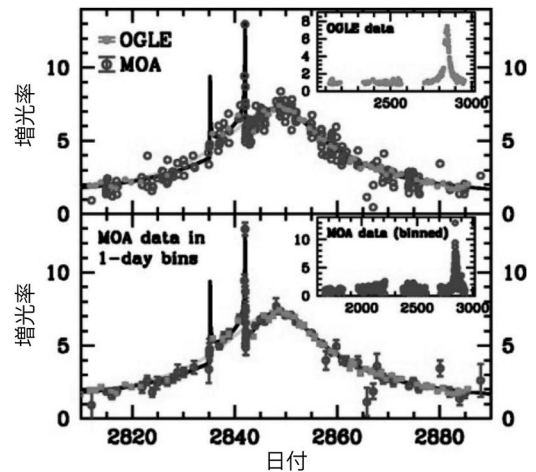


図4 最初に発見されたマイクロレンズ惑星事象¹³⁾。OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53の光度曲線。コースティック通過に伴う鋭い二つのピークが見える。

事象でMOAおよびOGLEグループによって発見されました(図4)。このとき、MOAの新望遠鏡はまだ建設中で、古い61 cm望遠鏡による成果でした。つづいて、2005年にはマイクロレンズ法によって5.5地球質量の惑星¹⁴⁾が発見され、地球よりちょっと大きいという「スーパーアース」という言葉をはやらせることになりました。これは、MOAの1.8 m新望遠鏡による最初の成果となりました。

そして、マイクロレンズ法の成功は、アマチュアにも太陽系外惑星発見のチャンスをもたらしました。これには、マイクロレンズ観測の二つの戦略が大きく関係しています。一つ目は、「マイクロレンズ帝国主義」とも言うべき世界的な観測網の必要性です。2005年には、MOAの新望遠鏡も観測を開始し、OGLEとMOAでそれぞれ毎年数百個のマイクロレンズ事象をバルジ付近に発見するようになってきました。しかし、チリで観測を行っているOGLEグループと、ニュージーランドで観測を行っているMOAグループだけでは、24時間バルジを監視することはできません。当然、観測できない時間帯のアノマリーは見逃す



図5 アマチュアとの交流. 左から Grant Christie, Ian Bond (MOA), Jennie McCormick, Phillip Yock (MOA) の各氏.

ことになります. 悪天候の場合も同じです. かつて、「太陽の沈むことのない〇〇帝国」というのがありました, われわれは「バルジの沈むことのないマイクロレンズ観測網」を必要としたわけです.

もう一つの重要な戦略は、「高増光率の戦略」¹⁵⁾と呼ばれているものです. これは, 増光率の高い事象のピーク付近を集中的に観測するというものです. 重力レンズで生じる二つの像は, 高増光率のピーク付近では大きく三日月形に膨れ上がるので, 惑星をヒットする確率が高くなるというわけです. 増光率が100倍ならば, 像の面積も100倍になります. しかも, 普段暗い星でも5等級くらい明るくなっているので, アマチュアの小望遠鏡でも観測しやすくなります. 事象の数は, 増光率にはほぼ反比例して少なくなります, 実際に1,000倍以上増光した事象もあります.

かくして, バルジの観測に適した南半球を中心に, マイクロレンズ事象の世界的な追観測網が複数結成されました. アマチュアの観測も可能な事象が含まれているので, ニュージーランド, オーストラリア, 南アフリカ, タヒチなどのアマチュアも参入しました. 南天にあるバルジの観測は, 日本からは困難ですが, ニュージーランドでは Jennie McCormick 氏や Grant Christie 氏, William H. Allen 氏などのアマチュアが活躍中で, われわれとの交流も行われています (図5). これまでマイクロレンズ法で発見された太陽系外惑

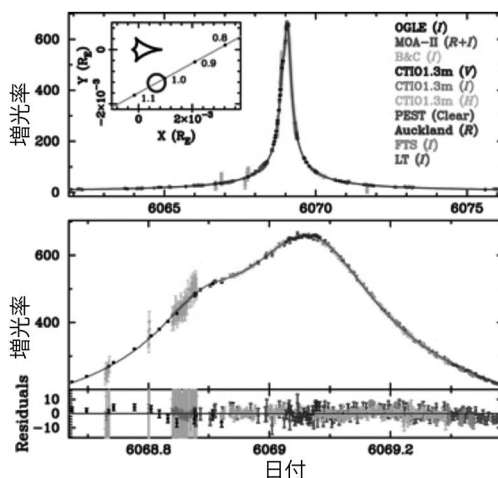


図6 アマチュアの貢献したマイクロレンズ法による惑星事象 OGLE-2012-BLG-0563¹⁶⁾. 高増光率事象のピーク付近にアノーマリーが現れた.

星の多くに, 彼らが貢献しています (図6).

4. ま と め

多くの読者にとって, 意外な展開だったかと思います. 80年前, アマチュア科学者ルディ・マンドル氏によって提唱された重力レンズは, 今日太陽系外惑星発見に活用され, 多くの成果を上げています. また, 彼のアイデアによる星のような点状天体による重力レンズ効果は, 小口径望遠鏡でも観測可能であり, 多胡さんたちによるまばらな領域での重力レンズ発見や, 太陽系外惑星の発見などでアマチュアが活躍しています.

謝 辞

この記事を書くにあたって, オークランド大学の P. A. M. Yock 先生から情報・写真などの提供を受けました. 紙上を借りて感謝いたします. また, 初稿に対してコメントをいただいた名古屋大学名誉教授の村木先生に感謝いたします.



参考文献

- 1) Einstein A., 1936, Science 84, 506
- 2) Jürgen R., Tilman S., 2000, MAX-PLANCK K-INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTS GESCHICHTE, Preprint 160, <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Preprints/P160.PDF>
- 3) Siegfried T., 2015, Science News, <https://www.science-news.org/blog/context/amateur-who-helped-einstein-see-light>
- 4) Walsh D., Carswell R. F., Weymann, R. J., 1979, Nature 279, 381
- 5) Delplancke F., Górski K. M., Richichi A., 2001, A&A 375, 701
- 6) Rattenbury N. J., Mao S., 2006, MNRAS 365, 792
- 7) Paczyński B., 1986, ApJ 304, 1
- 8) Udalski A., et al., 1993, AcA 43, 289
- 9) Alcock C., et al., 1993, Nature 365, 621
- 10) Aubourg E., et al., 1993, Nature 365, 623
- 11) Fukui A., et al., 2007, ApJ 670, 423
- 12) Mao S., Paczyński B., 1991, ApJ 374, L37
- 13) Bond I. A., et al., 2004, ApJ 606, L115
- 14) Beaulieu J. P., et al., 2006, Nature 439, 437
- 15) Griest K., Safizadeh N., 1998, ApJ 500, 37
- 16) Fukui A., et al., 2015, ApJ 809, 74

Gravitational Lensing and Amateurs

Fumio ABE

Institute for Space-Terrestrial Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: About 80 years ago, gravitational lensing was introduced by Rudi Mandl, an amateur scientist. Now, gravitational lensing is applied to finding extrasolar planets. In this research, amateurs in southern hemisphere are contributing to observe gravitational events. Here, I review the history of gravitational lensing and the contributions of amateurs.