

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25870893

研究課題名(和文)クェーサーマイクロレンズ現象を利用した銀河系外惑星の探索

研究課題名(英文)Extra-galactic planet search via quasar microlensing

研究代表者

米原 厚憲 (YONEHARA, Atsunori)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：10454472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：クェーサーマイクロレンズ現象を利用した、新たな銀河系外惑星の探査手法を確立するための研究を行った。

理論的研究としては、惑星成分を考慮したクェーサーマイクロレンズ現象を計算するための専用計算機の整備を行った。また特殊な計算コードの基礎部分を作成し、精度・計算効率ともに、十分なスペックにあることを確認した。

観測的研究としては、所属する研究機関での観測・データ解析を実施したが、解析手法の確立を行ったのみで、実際には十分な精度を持つデータが得られないことが判明した。そこで、他の観測所で精度の良い観測データを取得するための戦略の構築と、過去のモニタリングデータをもとにした観測提案を行った。

研究成果の概要(英文)：We have try to investigate a new method to detect extra-galactic planets via quasar microlensing.

On theoretical side, we have constructed a specialized computer to calculate quasar microlensing light curves including planets component as lenses. Further, we have developed an essential part of a numerical code to calculate the light curves, and checked that the code shows enough accuracy and efficiency for the numerical calculations.

On observational side, we have observed several lensed quasars by our university observatory, and have analyse the data. We have learned proper way to analyse the data, but have not succeeded to extract quasar microlensing signal with enough accuracy for further data analysis. Thus, as a next step, we have constructed a new strategy to take data with enough accuracy at other observatory, and submit an observation proposal with a triggering threshold based on previous monitoring data.

研究分野：重力レンズ天文学

キーワード：クェーサー マイクロレンズ現象 系外惑星探査

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星が1995年に発見されて以来、太陽系外惑星探査の手法は飛躍的に進歩し、既に1000個をゆうに越す数の太陽系外惑星が実際に発見されている。多数の太陽系外惑星が発見されていることから、現時点で既に恒星1つあたりの惑星数をはじめとした、統計的な議論まで盛んに行われている。そして、より信頼性の高い統計的性質を知るためには、適切にバイアスを取り扱うことはもちろんのこと、やはりより広い範囲で多様な太陽系外惑星を多数発見することが必要不可欠である。更に、統計的性質の普遍性や時間進化を明かにすることがすなわち、本当の意味で惑星形成を理解したことにつながるはずである。

しかしここに大きな問題点がある。これまでに最も多くの太陽系外惑星を発見してきたトランジット法は、惑星を有する恒星の明るさが検出効率を大きく左右するため、比較的太陽近傍にある太陽系外惑星しか発見できない。一方でマイクロレンズ法は、惑星やその惑星を有する恒星の明るさに強く依存しないため、太陽から最も遠く離れた太陽系外惑星の発見が期待できる手法である。しかしこのマイクロレンズ法であっても、その探査対象が銀河系バルジ付近までが探査領域であり、例えば現在計画中のEuclidやWFIRSTといった衛星による探査が実施されたとしても、探査領域が本質的に変わるわけではない。このことはすなわち、現段階での太陽系外惑星の探査はあくまで銀河系内のみに限られていることを意味している。

星形成や惑星形成の本質的な物理が宇宙全体で普遍的であると考えるのが自然であり、銀河系以外の銀河にも当然、惑星は存在するはずである。つまり宇宙には、銀河系外惑星が大量に存在しているはずである。これらの探査は、単に太陽系外惑星のサンプル数を増やすということに止まらない、重要な意義を持つと考えられる。なぜならば、銀河系内の太陽系外惑星を探査するということは、現在の銀河系内で実現されている環境の下での惑星の存在・形成・進化を議論している事に他ならないからである。ところが惑星形成には、形成環境におけるダスト存在量や化学組成との関係が示唆されている。銀河毎に、あるいは同じ銀河であってもその進化の段階毎に存在する惑星の統計的性質は異なることが期待される。加えて、浮遊惑星のような天体の起源を探る上でも時間進化は重要な意味を持つ。例えば浮遊惑星が惑星から剥離した惑星であるならば、時間を遡ることでそれらの存在量は少なくなるはずである。こういった問題点を解消し、惑星形成のシナリオをより高い信頼性を持って検証する唯一の方法は、現在想定される限界を越えて、銀河系外に存在する惑星を探査することである。

実際にマイクロレンズ現象の観測によっ

て、銀河系外の惑星発見の報告がいくつかなされているが、大マゼラン雲方向のマイクロレンズ現象と銀河スケールの重力レンズ現象を受けた多重像を持つクェーサーにおけるマイクロレンズ現象について、それぞれ1例ずつ候補が見つかっているのみである。これまで発見された太陽系外惑星と同等の信頼性での発見はおるか、系統的な探索も行われていないのが現状であった。

2. 研究の目的

これまでの限界を越え、銀河系外に存在する惑星の探査方法として、銀河スケールの重力レンズ現象を受けた多重像を持つクェーサーのマイクロレンズ現象の持つ可能性を吟味し、実際の観測可能性やクェーサーのモニタリング観測データの解析による銀河系外惑星の存在量の評価や今後の観測計画へと発展させてゆくことが本研究の目的であり、理論的側面と観測的側面を持つ研究となる。

銀河一般に惑星が存在するのであれば、銀河系バルジと同様の惑星によるマイクロレンズ現象は当然、その他の通常の銀河でも起きているはずである。しかし銀河系バルジと比較して圧倒的に遠くにあることから、惑星の存在によるシグナルは、その他の大多数の無関係な天体からの光に容易に埋もれてしまうことから、現段階での検出は現実的ではない。加えて、マイクロレンズ現象の起きる確率は100万分の1程度と低く、惑星由来のシグナルを検出可能な時間は1日以下と短いままであり、現在の観測体制や観測技術にとって、その検出は非現実的である。

一方で、多重像を持つクェーサーのマイクロレンズ現象を用いると、光源そのものがコンパクトなばかりでなく、他の恒星などと比べて圧倒的に明るいため、惑星由来の光度変動が他の天体からの光に埋もれにくいというメリットがある。また、マイクロレンズ現象自体はほぼ常に起きていること、比較的スケールの大きな現象になることから、惑星由来のシグナルは銀河バルジでの同様の現象と比べて1~2桁長い時間継続することが期待される。

これらのメリットが、どれだけ実際の観測を行う上で有効に働くのかについても、様々な観測的効果を考慮しながら、理論計算に基づく評価を行うこと、更にはこれまでのモニタリング観測データの解析から、実際に銀河系外惑星の存在量への制限をつけることも本研究の目標である。

3. 研究の方法

(1) 理論的な研究としては、銀河系外惑星を考慮したマイクロレンズ現象による光度変動を計算するための専用ハードウェアの整備と、その計算を実行するために適切かつ効率的な計算コードの開発を行う。なおこの計算コードは一般に、光線追跡と呼ばれる

比較的単純な計算を大量に実行する点が計算コードの核となっている。更に、実際にクェーサーマイクロレンズ現象が観測されている天体など、過去にモニタリング観測が行われた多重像を持つクェーサーを想定したパラメータのもとで、惑星成分を考慮してマイクロレンズ現象による増光パターンを生成する。多数の増光パターンを利用して期待される光度曲線を計算し、その統計的性質を明かにすることで、光度変動と惑星存在量の関係を導き出す。

(2) 観測的な研究としては、過去の観測データの解釈と新たな観測データの取得と解析と解析を行う必要がある。過去の観測データの解釈については、クェーサーのマイクロレンズ現象が実際に観測されている天体はもちろんのこと、潜在的にマイクロレンズ現象が起きていると考えられる多重像を持つクェーサー一般の過去の観測データを短い時間スケールの光度変動を探る観点で再度吟味する他、その光度曲線が示す統計的性質の中に惑星由来と解釈できる変動成分の有無について議論する。加えて新たな観測データの取得については、所属している研究機関の天文台を用いて、既にマイクロレンズ現象が実際に観測されている天体のモニタリング観測を行う。この天体のモニタリングデータは近年、リアルタイムで公開されるものが存在しておらず、自らデータ取得することそのものが重要となる。取得したデータを適切な手法によって解析を行うことで、光度変動を抽出する。最終的には、理論計算との比較・検討から、銀河系外惑星の存在量に制限をつけることを目指す。

4. 研究成果

(1) 理論計算用のハードウェアとして、GPGPUを実装した専用計算機を導入した。より効率的な計算の実行のため、最終的には予定していたGPGPUと同じスペックのものをもう1基実装して理論計算を実行可能な環境を整えた。次にGPGPUを用いた計算コードを作成するための専用言語CUDAの習得と、CUDAによる計算コードの作成を行った。動作確認を兼ねて、銀河バルジにおける太陽系外惑星探査の際に用いられる増光パターンの計算コードを作成、十分な計算精度が得られること、また実行時間が特殊なコーディングを行わない計算を、GPGPUを用いない状態で実行した場合に比べ、10分の1~100分の1程度に短縮されることを確認した。計算コードの開発自体は実際のクェーサーのマイクロレンズ現象の増光パターンを計算するまでには至らなかったが、本質的な違いは無くレンズ天体数を増やすことで計算は可能であるため、目的としていた理論計算を実行する直前の状態まで到達したと言える。

(2) 所属している機関での銀河バルジのマイクロレンズ現象、および、多重像を持つクェーサーのモニタリング観測、およびそのデ

ータ解析を実行した。その結果、銀河バルジのマイクロレンズ現象については、他のサーベイグループと同様の結果を得ることができた。しかし多重像を持つクェーサーについては、天体と光度変動の検出までは可能であるが、シーイングの悪さとバックグラウンドの高さによって非常に誤差の多い解析結果となることが判明した。独自のデータ取得については残念な結果になった一方で、データ解析手法については様々なテストを行うことができ、解析の手順をある程度確立することができた。次に、独自にデータを取得するために、他の観測所でのモニタリング観測の提案について検討を行い、現在観測プロポーザルを提出中である。これは、銀河系外惑星のシグナルが潜むかもしれないモニタリングデータの取得という意味の他に、光源の性質を観測的に明らかにするための基礎となる観測でもある。光度変動の特徴は、マイクロレンズ現象を引き起こすレンズ天体の特徴だけでなく、光源の性質にも依存するため、そもそも空間分解できない光源の性質をあらかじめ把握しておく必要がある。そのために、強い増光をとらえることが重要な役割を担っているため、強い増光を増光の早い段階でとらえ、より詳細な観測を可能にするための判断基準の確立なども行った。先の観測提案は、これらの判断基準も踏まえたものとなっている。以上に加えて、クェーサー本来の光度変動の統計的性質をもとに、マイクロレンズ現象由来の光度変動との分離や、マイクロレンズ現象の特徴を左右する銀河による大きいスケールでの重力レンズ現象のパラメータ推定を可能にする手法の開発を始めた。また、最終的な統計的議論を実行するためには、多数の多重像を持つクェーサーが必要になる事を見据えて、大規模サーベイにおける多重像を持つクェーサーの探査プロジェクトにも参加し、現在は高い効率でのクェーサー抽出手法の確立に向けた取り組みを行っている。

<引用文献>

- Mayor & Queloz, 1995, Nature, 378, 355
- Cassan et al., 2012, Nature, 481, 167
- Takeuchi & Ida, 2012, ApJ, 749, 89
- Sumi et al., 2011, Nature, 473, 349
- Colley & Schild, 2000, ApJ, 540, 104

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計5件)

米原 厚憲 ほか、Follow-up observation of microlensing at Kohyama Astronomical Observatory、From super-Earth to brown dwarfs: Who's who?, 2015年6月29日~7月3日、パリ(フランス)

米原 厚憲 ほか、Gravitational Lens Mapping of the Narrow Line Region in Quasars, Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing、2014年1月17日～21日、東京大学 Kavli IPMU (千葉県・柏市)

山井 直斗、米原 厚憲 ほか、神山天文台における重力マイクロレンズ現象のフォローアップ観測、日本天文学会2014年春季年会、2014年3月19日～22日、国際基督教大学(東京都・三鷹市)

米原 厚憲 ほか、Microlensing Observation at Kohyama Astronomical Observatory、18th Annual International Conference on Microlensing、2014年1月20日～23日、サンタバーバラ(アメリカ)

米原 厚憲、光度変動の統計的性質を利用したクェーサーマイクロレンズ現象の抽出、日本天文学会2013年秋季年会、2013年9月10日～12日、東北大学(宮城県・仙台市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米原 厚憲 (YONEHARA, Atsunori)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号： 10454472