

論文の内容の要旨

Constraining primordial black holes with gravitational microlensing effect

(重力マイクロレンズ観測による原始ブラックホールの制限)

氏名 新倉 広子

本研究の背景と目的

様々な観測が宇宙の各スケールの階層構造、またあらゆる空間が暗黒物質で占められていることを示唆しているが、その正体は分かっていない。暗黒物質の有力な候補として、宇宙初期に生成され得る原始ブラックホール (primordial black hole: PBH) があり、その観測的検証が強く望まれている。本博士論文では、天の川銀河の空間に存在し得る PBH が引き起こす背景星への重力レンズマイクロレンズ増光効果を探索し、PBH が暗黒物質であるシナリオを定量的に検証した。重力レンズ効果は、電磁波では直接見えない天体であっても、重力のみでその存在を検証可能であり、PBH の検証には最も強力な手法である。本論文ではまず、(I) アンドロメダ銀河のすばる Hyper Suprime-Cam のデータを用い、 $[10^{-11}, 10^{-6}]M_{\odot}$ の質量範囲にある PBH の存在量にこれまでにない厳しい上限を課した。次に (II) 天の川銀河バルジ方向の Optical Gravitational Lens Experiment (OGLE) のデータを用いて、木星質量級の PBH の存在量に最も厳しい上限を得ることに成功し、また OGLE の極端に短いタイムスケールのイベントが地球質量程度の PBH で自然に説明できることを示した。

(I) すばる HSC による M31 領域での PBH 探査

(I) の研究では、アンドロメダ銀河 (M31) 領域でのマイクロレンズイベントの探査を行なった。 $10^{-9}M_{\odot}$ 程度の軽い PBH はこれまで観測による検証がなされておらず、銀河系の暗黒物質全部を占める可能性が残されている。ターゲットとなる重力マイクロレンズイベントのタイムスケールは 30 分程度であり、イベントの検出には数分程度の頻度で多くの星の測光する高コストの観測が必要である。そこで本研究では、すばる望遠鏡の超広視野カメラである Hyper Suprime-Cam

(HSC) で 2 分間隔でデータを取得し、M31 の円盤およびハロー領域の多数の星 (約 1 億個弱の星) を活用したマイクロレンズイベント探査に取り組んだ。これまで 2014 年と 2017 年に約 7 時間ずつの観測を行い、時間変動天体の解析手法の確立に取り組んだ。本観測はすばる HSC の独自性 (視野、大口径) を最大限活用した観測となっており、フレア星や連星などの短時間変光を示す天体を 1 万個以上検出することができた。また、得られたデータに対してマイクロレンズ解析を行い、 $M_{\text{PBH}} = [10^{-11}, 10^{-6}]M_{\odot}$ の PBH の存在量に対して、今までで最も強い制限を得ることに成功した。

(II) 天の川銀河バルジ方向の観測による PBH の制限

(II) の研究では、(I) の研究よりもタイムスケールの長い、つまり質量の重い PBH によるマイクロレンズの検証を行なった。本研究では、Optical Gravitational Lens Experiment (OGLE) グループが銀河系バルジ領域を 5 年間探査して得た 2622 個のマイクロレンズイベントを用いて、PBH の存在量に制限をつけることを試みた。OGLE のグループが検出した天体のうち、大半は銀河系の円盤とバルジ領域にある天体物理的な起源のコンパクト天体 (褐色矮星、主系列星、白色矮星、中性子星、ブラックホール) のみで説明できることが先行研究で議論されている。一方で銀河ハローの暗黒物質が PBH で構成されていると仮定すると、より多くのマイクロレンズイベントが予言され、先行研究の結論と矛盾する可能性がある。そこで本研究は OGLE グループの銀河バルジ領域のマイクロレンズの結果を用い、銀河ハロー内の PBH が生じうるマイクロレンズイベントの性質を精査し、 $M_{\text{PBH}} = [10^{-6}, 10^{-3}]M_{\odot}$ の PBH の存在量に対して今までで最も強い制限を得た。また、OGLE のデータで示唆される極端にタイムスケールが短い 6 イベントが地球質量程度の PBH が暗黒物質の 1% 程度を占めるモデルで自然に説明出来ることを示した。これは PBH の初検出の可能性があり、今後の追観測が強く望まれる。

本研究結果とその意義

本博士論文では PBH ダークマター仮説を観測的に検証し、8 桁もの範囲の PBH の存在量に対して最も強い制限をつけた。本研究で得られた PBH の存在量に対する制限は、インフレーションモデルなど初期宇宙理論モデルへの示唆を与えるだけでなく、アクシオン暗黒物質モデルが予言するミニハローの存在量などの他のダークマター候補の検証にもインパクトを与える結果となっている。(I) の M31 の観測では有力なマイクロレンズイベント候補を見つけており、本当であれば発見と言える。また、(II) の研究で得られた地球質量程度の PBH の性質は、存在し得る PBH の性質について得られた初めての示唆であり、今後の観測的な PBH の存在検証が重要となる。