

# すばる HSC マイクロレンズ探査による 原始ブラックホールの制限



新 倉 広 子

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: niikura@hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp

原始ブラックホールは巨視的なダークマターの有力候補であり、初期宇宙での生成が提唱されている天体である。本研究では、近傍巨大銀河であるアンドロメダ銀河（M31）の領域をすばる望遠鏡の広視野カメラ Hyper Suprime-Cam（HSC）でモニター観測し、原始ブラックホールが引き起こしうるマイクロレンズ現象と呼ばれる増光現象を探査した。本研究ではM31に対して190枚の約2分間隔の連続画像を取得し、恒星フレア、変光星などの短時間激変動天体を多数見つけた。一方で、マイクロレンズ現象の探査のために独自の変光イベントの分類手法を適用したが、マイクロレンズ現象の候補は一つにとどまった。本観測でのイベント検出感度をシミュレーションにより評価した結果、質量範囲が $10^{-11}$ – $10^{-6} M_{\odot}$ の原始ブラックホールの存在量に対して、今までで最も厳しい上限を課すことができた。

## 1. はじめに：ダークマター探査

我々の住んでいる天の川銀河には、可視物質より多くの未知の物質（ダークマター）が存在していることが知られている。加えて、ダークマターとして冷たい性質を仮定した宇宙の構造形成モデルは、観測される様々な宇宙の構造形成過程をうまく説明できるため、現在の宇宙論の標準的シナリオとなっている。しかしながら、ダークマターの正体の解明につながる有力な手がかりはいまだ見つかっておらず、現代物理学の未解決問題の一つとなっている<sup>1)</sup>。

ダークマターの正体の解明を目指した研究は理論と観測の両面から精力的になされており、Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) と呼ばれる素粒子の標準理論を超える未知の素粒子などが有力な候補として提唱されてきた。新粒子ダークマター候補を探す試みとしては、弾性散乱効果の直接探査実験や加速器による生成実験が

行われているが、現在までのところ正体解明にはつながっていない。そのため近年では新粒子の存在を必要としない、巨視的なダークマター候補が脚光を浴びつつある。

巨視的なダークマターの代表例として、Massive Compact Halo Objects (MACHOs) と呼ばれる、褐色矮星、ブラックホールのようなコンパクトな天体がダークマターを構成しているという説が検証されていた。しかしながら2000年代前半までに、MACHOsのような天体起源の物質（質量範囲 $10^{-2}$ – $10^2 M_{\odot}$ ）は、ダークマターハローの主要成分ではないことが観測で明らかとなった<sup>2), 3)</sup>。そのため巨視的なダークマター候補の探査はしばらく下火となっていたが、多波長観測が進展して探査可能性が拓けてくると、ふたたび観測的にも研究されるようになった。近年ではミニハローや原始ブラックホール (Primordial Black Hole; PBH) などのコンパクトなダークマター候補が注目されている。

本稿では巨視的なダークマターの候補である原始ブラックホールに焦点を当て、筆者らがすばる望遠鏡を用いて行なったPBH探査の詳細と、得られた示唆を紹介する。以下ではまずPBH探査の歴史を振り返り、PBHの理論的な性質と探査のモチベーションに触れてゆく。

### 1.1 原始ブラックホール (PBH)

PBHは1970年代にStephen Hawkingにより提唱され、初期宇宙での生成が预言されているブラックホールであり<sup>4)</sup>、長年ダークマターの候補の一つとして研究されている。有力な生成シナリオは、インフレーション期に作られたゆらぎの過密度領域が重力崩壊してブラックホールが形成される、というものである<sup>5)</sup>。輻射優勢期<sup>\*1</sup>の初期宇宙において、因果律を持ちうる領域内（ハッブル半径内）の輻射の量が多い場合（密度ゆらぎが大きい場合）、その領域は「閉じた」宇宙の進化史に従って膨張が止まり、収縮に転じて一点に重力崩壊する。この過程で、初期宇宙に大量に存在していた輻射のエネルギーから、ハッブル半径内の全エネルギーに対応する質量のブラックホールが生成される。このように形成された巨視的なブラックホールは、のちに非相対論的粒子のように振る舞うことになるため、ダークマターを構成することができる。このようにPBHダークマター仮説は、未知の素粒子を仮定することなしに、宇宙初期に存在したはずの大量の輻射からのダークマター生成を説明できる可能性があるため、魅力的なシナリオである。

PBHの特筆すべき性質に、熱的な輻射（ホーキング放射）により蒸発してしまう効果がある。この性質により軽いブラックホールほど早く蒸発するため、 $10^{-18} M_{\odot}$ 程度より軽いPBHは今日までに既に蒸発してしまったと考えられている。また、もう一つのPBHの特徴として、任意の質量をとりうる点が挙げられる。形成時刻によって

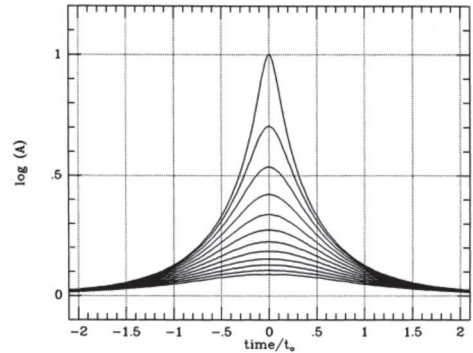
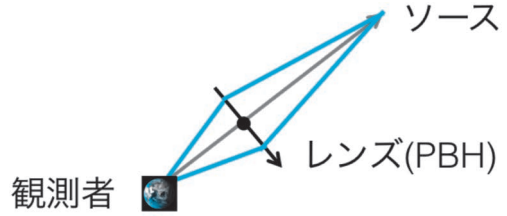


図1 (上) 重力マイクロレンズ効果の模式図。PBHがレンズの役割を果たし、ソース星からの光を曲げる。(下) 背景星のライトカーブのシミュレーション (Paczynski 1986<sup>6)</sup>より引用)。マイクロレンズによる増光の振幅は、ソース星がレンズ天体の視線上に近くなるほど大きくなる。

様々な質量をとる可能性が残されているため、今日までに蒸発していなければ任意の質量のPBHがダークマターとなりうる事が提唱されている。

### 1.2 PBH探査の歴史

PBHの存在可能性はこれまで多くの先行研究で議論されてきた。先駆的な探査手法として1986年にBohdan Paczyńskiにより提唱された重力マイクロレンズ効果という手法がある<sup>6),7)</sup>。図1に模式図を示す。一般相対性理論の预言から、背景星とPBHが視線方向に一直線に並ぶと、PBHのようなコンパクトな天体はレンズの役割を果たす。これにより、背景星(ソース)の明るさが増光される効果が生じる。この効果は重力レ

\*1 ダークマターなどの物質よりも、輻射のエネルギー密度が宇宙膨張の進化史を支配する時期。

ズ効果と呼ばれる。重力レンズ効果にはソース天体の虚像ができる効果もあるが、重力レンズにより生ずる像の離角が小さく、重力レンズの増光現象のみが受かるケースを、マイクロレンズ効果と呼ぶ。マイクロレンズ効果がPBHの探査手法として優れている点は、重力相互作用のみに依存する点である。このため、電磁相互作用を介した他のPBHの探査手法に比べると、不定性の小さな探査手法であると言える。

マイクロレンズ効果を活用したダークマター探査は、1990年代にMACHO, EROS, OGLEなどのサーベイグループが開始した。いずれのグループも独立にマイクロレンズイベントを多数検出したが、イベントレートの検証から、惑星質量から恒星程度の質量 ( $10^{-4}$ – $10^2 M_{\odot}$ ) のPBHはダークハローの1割以下しか占めないことが明らかとなった。その後、2000年代後半になると宇宙背景放射 (CMB) やガンマ線など多波長での探査が進展したことで、あらゆる質量のPBHの存在量の検証が行われるようになった<sup>\*2</sup>。マイクロレンズ観測についても、系外惑星探査を通じて観測が活発になり、Kepler衛星の観測からは新たに月質量程度 ( $10^{-8} M_{\odot}$ ) のPBHの存在量に対して制限がつけられた<sup>8)</sup>。しかしながら、いまだ質量範囲が  $10^{-14}$ – $10^{-9} M_{\odot}$  のPBHを厳密に探査した観測は存在せず、単一質量のPBHが全ダークマターを占める可能性が残されている<sup>\*3</sup>。次章より、実際にPBHの探査結果について述べるが、太陽質量以下のブラックホールのマイクロレンズを1個でも発見できれば、PBHの直接的な証拠になる<sup>\*4</sup>。そのようなブラックホールは、天体物理

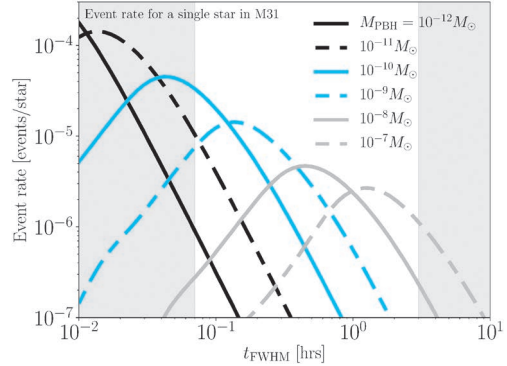


図2 M31にある1個の背景星を一晩観測したときのPBHによるマイクロレンズイベントレート (点源近似を仮定)。横軸はマイクロレンズのタイムスケール [hour] を表している。天の川銀河またはM31のハロー領域のダークマターが全て単一質量のPBHで構成されると仮定し、質量範囲が  $10^{-12}$ – $10^{-7} M_{\odot}$  のPBHによるマイクロレンズイベントレートを図示している。質量の軽いPBHの方がイベントのタイムスケールが短くなる傾向がある。

過程では生成できないからである。

## 2. すばるHSCでのPBH探査

### 2.1 極小ブラックホール探査に向けて

前述の通り、単一質量のPBHがダークハローの主成分となる可能性は、従来のPBH探査によってほとんどの質量領域で棄却されてしまった。その一方で、質量範囲が  $10^{-14}$ – $10^{-9} M_{\odot}$  のPBHについてはまだ探査されておらず、存在量に制限がついていなかった。そこで筆者らは、この未探査領域のPBHが引き起こしうるマイクロレンズイベントを狙った観測を計画した。

マイクロレンズイベントの持続期間はPBHの

<sup>\*2</sup> PBH蒸発による系外 $\gamma$ 線、 $\gamma$ 線バーストのフェムトレンズ (“Femto”), Kepler衛星によるマイクロレンズ観測 (“Kepler”), MACHO/EROS/OGLEのマイクロレンズ観測 (“EROS/MACHO”), PBHの降着の効果がCMB観測量に及ぼす影響 (“CMB”) が議論されている<sup>5)</sup>。「3. HSCによるPBH制限」で詳述する。

<sup>\*3</sup> 質量範囲が  $10^{-14}$ – $10^{-9} M_{\odot}$  のPBHについては中性子星捕獲による制限が提唱されているが、仮定を多く含む制限であり不定性が議論されている。CMBやガンマ線のフェムトレンジング (femtolensing) による制限についても不定性が議論されている<sup>9), 10)</sup>。

<sup>\*4</sup> 太陽質量のブラックホールはシュバルツシルト半径が約3 kmであり、地球質量程度のブラックホールで  $10^{-6} M_{\odot}$  で0.3 cm, 質量  $10^{-10} M_{\odot}$  で  $0.3 \mu\text{m}$  となる。

質量に依存し、イベントレートは背景星の数と、手前のダークマター密度に依存する。例として、我々の住む天の川銀河の隣の銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) の星を一晩モニターした場合に、期待されるPBHマイクロレンズのイベントレートを図2に示す。このシミュレーションの示唆によると、天の川銀河とM31のダークハローが全て  $10^{-9} M_{\odot}$  のPBHであると仮定した場合、マイクロレンズを一晩の観測で探査するには、最低でも  $10^5$  個オーダーの星を一晩中モニターする必要がある。また、 $10^{-9} M_{\odot}$  のPBHによるマイクロレンズイベントでは、背景星の明るさは約10分間のうちに増光して元の明るさに戻っていくため、10分以下の時間間隔で測光する必要がある。しかしながら、これほど多くの星を高頻度で測光するには、広域をカバーしつつ、かつ短時間の露光で深い画像を取得する観測が必要があり、これまでの観測では達成できていなかった<sup>8)</sup>。

筆者らは2014年に、当時最新のカメラであったすばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam (HSC) を活用することで、これらの軽いPBHの探査を計画した<sup>11)</sup>。HSCは未探査質量域のPBH探査で課題となっている「広域」での「深探査」に理想的な観測装置であった。例えば本研究では、観測対象としてM31のディスク領域を探査したが、HSCの広視野を活かすことで、1視野でディスク領域全体をカバーすることができる (図3)。また、すばる望遠鏡の高解像度の威力は凄まじく、90秒積分でもM31の星をr-bandで26等級まで検出することができる。これによりM31の非常に多くの星を同時にモニターすることが可能となり、PBHマイクロレンズイベントについても一晩の観測で高いイベントレートを達成できることが期待できた。北天のM31をターゲットとしてこのような観測を可能にする装置は世界に他にな

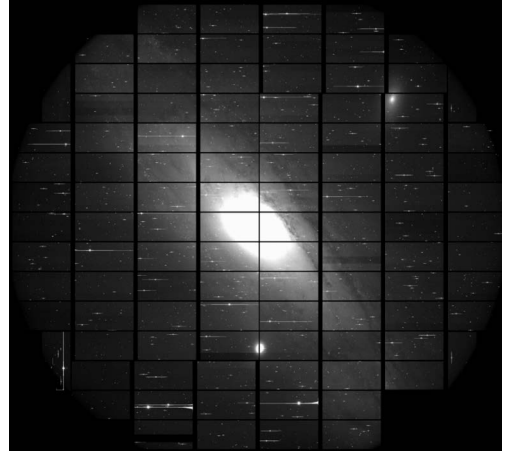


図3 HSCで撮影したM31中心部の画像。1視野でM31のディスクとバルジ領域をカバーしている。本研究ではこの画像を2分間隔で7時間取得することで、PBHによるマイクロレンズ探査を行った。

く、HSCは本研究に理想的な観測装置であったと言える。

## 2.2 HSC観測／差分画像解析

本観測はHSCのサーベイ観測が開始してすぐの2014年11月に行われた。天候にも恵まれて申し分ない観測条件であり、M31の中心領域を2分間隔の撮影して、一晩で約190枚の画像を取得することができた。その一方で、M31の領域は非常に星が込んでいる領域であることもあり、画像に写りこんだ膨大な数の星から変光イベントを検出することが大きな課題であった。HSCで撮ったM31の画像ではCCD1ピクセルに多数の星からのフラックスが重なっているため、変光天体の検出方法にはピクセルレンズ解析が必要であった<sup>\*5</sup>。そこで本研究では、星が混んだ領域での変光天体の検出に有効な手法である、差分画像法をすばるHSCのM31データに適用した<sup>13)</sup>。この手法は、一つの参照画像と、他の各時刻に取得した画像の差分をとって比較し、明るさが変動した天

\*5 M31でのマイクロレンズ探査としては2000年代にWeCAPPなどのプロジェクトがあった。Self-lensingによるイベントが多く生じる可能性が期待されていた一方で、解析の難しさや有限ソース効果などにより検出効率が低かったため、長らくマイクロレンズ探査は停止していたようである<sup>12)</sup>。

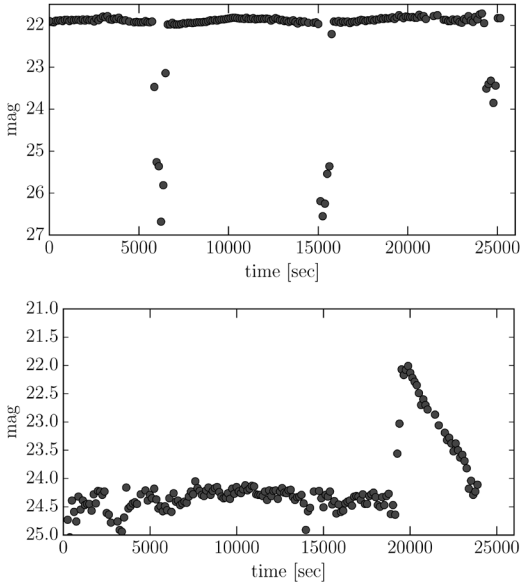


図4 2014年のM31観測で受かった変光天体のライトカーブの例。(上) 連星系(白色惑星と褐色矮星)と(下) 恒星フレアに相当するイベント。連星系、フレアともに各30イベント以上候補があり、一晩でも非常に多くの変光天体候補が受かった。

体のみを抽出するという方法である。変光がなければ二つの画像の差分をとるときに引き残りが生じず、変光天体があれば明るさの変動として現れる。このような明るさの変動が観測中に有意に検出された天体を変光天体の候補とした。

筆者らはHSCパイプライン上で差分画像法を繰り返して検証し、星が混んだM31の領域でも高い検出効率を達成した。差分画像法による変光天体検出の結果、HSCの1視野内でも1万個以上の変光イベント候補が受かった。図4に特徴的な変光イベントのライトカーブの例を示す。一晩の観測では7時間以内の変光しかトレースできていないが、恒星フレアや連星系など興味深い変光天体を多数検出することができた。

### 2.3 PBH候補の検出！？

前節で述べた通り、本観測により1万個以上の変光イベントを検出することができた。そこで次に、これらの変光イベントのライトカーブを用い

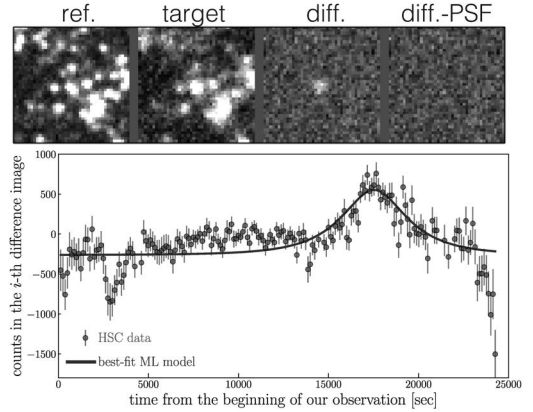


図5 本観測で唯一マイクロレンズ候補として残っているイベントのライトカーブ。上のパネルは候補イベント周りでの画像(左から、参照画像、ターゲット画像、差分画像、ベストフィットのPSFを差分画像から引いたときの引き残りの画像)。下のパネルは差分画像上でのライトカーブをマイクロレンズモデルでフィッティングした結果を示している。

て、マイクロレンズのイベントセレクションを行った。イベント検出フローは先行研究のKepler衛星のマイクロレンズ探査を参考にして、ライトカーブをフィッティングや画像のノイズなどの評価を行った<sup>8)</sup>。イベントセレクションの結果、ライトカーブがマイクロレンズの理論予言とよく合っているイベントは60イベント程残った。これらのイベントについて個々の画像を調べたところ、明るい星まわりに生じる光学系起源のスパイク状の構造や小惑星などが横切るときに、マイクロレンズとよく似た増光イベントを引き起こしていることが分かった。これらの偽イベントを目視で除外したところ、マイクロレンズ候補が一つ残る結果となった。図5にライトカーブを示す。候補イベントは非常に暗い天体(*r*-bandで24.5等級)であり、ライトカーブも雑音が大きめであるが、マイクロレンズの理論予言でよくフィッティングされている。この候補イベントについては2017年にHSCで追観測により変光の追検証を行ったが、有意な変光は検出されなかったため、マイ

クロレンズの候補イベントとして残している。

### 3. HSCによるPBH制限

前章の考察により、本観測ではマイクロレンズの候補イベントが一つしかなかった。しかしながら、実際には本物のイベントが画像のノイズに埋もれて受からなかった可能性も考えられる。そこで以下では考察として、ダークマターが全部PBHだと仮定したときの本観測でのイベント数の期待値を見積もった。

マイクロレンズイベント数に寄与するファクターは三つある。第1に、時間変動モニター観測の深さで検出できているM31星の数、第2に、マイクロレンズが実際に起こったときの検出効率、そして第3に、PBHがダークマターである場合のマイクロレンズのイベント期待数（イベントレート）である。このうち1, 2番目のファクターについては、観測データを用いて評価した。まず1番目のM31星の数については、HSCとハッブル望遠鏡の画像を比較して、M31の画像上で有意に検出されたピークの数から評価した。評価の結果、HSCの観測ではM31全部で約1億個の星が検出できていた。次に2番目の検出効率については、マイクロレンズのシミュレーションを行い、検出に用いたのと同じ条件を適用して検出できたイベントの割合を、複数のタイムスケールのイベントについて求めて評価した。

一方で、3番目のファクターとしては、PBHがダークマターハロー全てを構成する場合のマイクロレンズのイベントレートを見積もった。本観測でターゲットとしている非常に軽いPBHの場合には（最もシンプルな場合である）点源近似が成り立たず、波動効果と背景星が有限の大きさである効果（有限ソース効果）の二つの効果を考慮する必要があった。波動効果とは波動光学による効果で、PBHのシュバルツシルト半径が観測波長（本観測の場合はr-bandに相当する600 nm）よりも短い場合に、マイクロレンズによる増光が抑えら

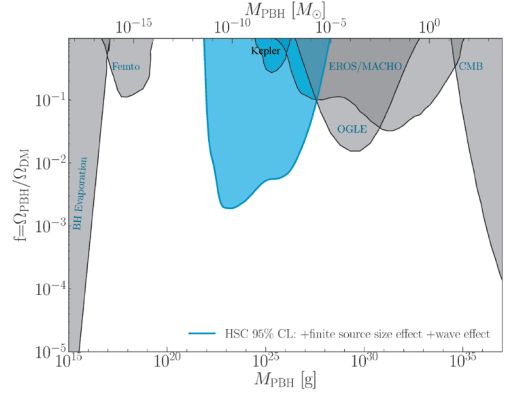


図6 本研究（すばるHSCでM31を一晩観測）により得られた、天の川銀河とM31のハロー領域のダークマターに対するPBHの存在量への制限（95%信頼区間の上限値、色塗りされたところは許されない領域）。 $10^{-11} M_{\odot}$ より軽いPBHによるマイクロレンズは、有限ソース効果と波動効果の影響を受けるため、本観測では感度はない。本制限（青色領域）は先行研究の制限（灰色領域、脚注\*2参照）に匹敵する強さで、一晩の観測で2年間のKepler衛星の観測よりも強い制限をつけることができた<sup>5), 17)</sup>。

れてしまう効果である<sup>14)</sup>。本観測では $10^{-7} M_{\odot}$ より軽いPBHが波動効果の影響を受けており、 $10^{-11} M_{\odot}$ より軽いPBHによるマイクロレンズ増光は、完全に抑制されてしまっていた<sup>15)</sup>。もう一方の有限ソース効果とは、PBHのアインシュタイン半径が背景星の大きさと同程度、または小さい場合にソース星の点源近似が成り立たず、増光がなまってしまう効果である<sup>16)</sup>。本観測では $10^{-7} M_{\odot}$ よりも軽いPBHが影響を受けて、マイクロレンズによる増光が検出されにくくなる効果を受けていた。

以上の効果を考慮して、一つしかイベントの候補が受からなかったという条件から、全ダークマターに対するPBHの割合を評価した。図6に本観測でつけたPBHの存在量に対する制限を示す。本観測でモニターできた星の数が1億個程度だったので、質量範囲が $10^{-11}$ - $10^{-6} M_{\odot}$ のPBHがダークマターである場合に期待されるイベント数は約

1000個だった。これにより、残った1個のイベントが本当のマイクロレンズ現象であっても、この質量域のPBHとダークマターの比は0.1%程度しか許されない、という結果となった。筆者らの観測による制限は従来の観測よりもイベントレートが高かったため、質量範囲が $10^{-9}$ - $10^{-6} M_{\odot}$ のPBHに対して、2年間のKepler衛星のマイクロレンズ探査(約10万個の星を使った)よりも強い制限をつけることができた。本観測では波動効果と有限ソース効果が強く作用するため $10^{-11} M_{\odot}$ より軽いPBHには感度がなかったが、質量範囲が $10^{-11}$ - $10^{-9} M_{\odot}$ のPBHにはじめて制限をつけることができた。

#### 4. まとめと将来の展望

本稿ではすばる望遠鏡の広視野カメラHSCを用いて、M31領域でPBHを探査した結果を述べた。一晩の観測でPBH候補は一つだけしか受からなかったが、本当であれば大発見と言える\*<sup>6</sup>。また、本観測によるイベントへの感度を評価した結果、質量範囲が $10^{-11}$ - $10^{-6} M_{\odot}$ のPBHに対して最も強い制限を得た。本制限は初期宇宙の構造形成シナリオの制限につながる結果であり、アクションのダークマター模型が作ると予言される、コンパクトな矮小ハローの存在数を制限できることが議論されている<sup>18)</sup>。

PBHの将来探査の指針としては大きく二つの方針が考えられる。一つ目の探査方針は、本研究で探査したよりも軽いPBH( $10^{-14}$ - $10^{-11} M_{\odot}$ )の検出を目指すというものである。前述の通り、 $10^{-11} M_{\odot}$ より軽いPBHをマイクロレンズを探査するには、有限ソース効果と波動効果を克服する必要がある。筆者らが行ったすばるHSCの観測では探査することができない。そのため可視光より短波長でなるべく遠くの天体を高頻度で観測する必要がある。このような観測を達成できる可能

性の例として、将来のX線衛星(e.g. Athena, Lynx)を用いた探査が考えられており<sup>19)</sup>、例えば小マゼラン雲のパルサーを高頻度で観測することで $10^{-14} M_{\odot}$ 程度の質量のPBHに有意な制限をつけられることが期待される<sup>20),21)</sup>。

もう一つの探査方針としては、今回のHSCの観測で探査したよりも重たいPBHを狙うというものである。上述したHSCの観測は1晩の観測であったが、月1回程度数年にわたってM31の観測を行うことで、 $1$ - $10 M_{\odot}$ 程度のPBHによるマイクロレンズイベントを探査できることが期待できる。大質量星(O, B型星)の重力崩壊から生成される天体物理的なブラックホールは、太陽質量の6倍程度よりも重いと考えられており<sup>22)</sup>、より質量の軽いブラックホールが見つければPBHの証拠となりうるため、大発見となる可能性がある。また、 $10 M_{\odot}$ 程度のブラックホールは、近年LIGOなどの重力波実験で連星系ブラックホールが多数観測されている興味深い質量域としても注目されている<sup>23),24)</sup>。例えばHSCでアンドロメダ銀河を毎月10分ずつ、5年以上継続して観測できたとすると、 $10 M_{\odot}$ 程度のPBHの存在量に対する制限を改善することができて、連星系ブラックホールの合体イベントレートから示唆されているブラックホールの存在量を検証することが可能となる。筆者のグループでも3年間の計画でM31領域でのマイクロレンズイベントの探査計画を提案しており、昨年度からすばるHSCを用いた観測が始動している。このHSC観測では多数の変光イベントの検出が期待されるため、今後ともすばらしい天候とエキサイティングな発見に恵まれることを期待したい。

#### 謝辞

本稿で紹介させていただいた研究は、筆者の博士論文の一部<sup>25)</sup>と査読論文<sup>26)</sup>に基づいています。

\*<sup>6</sup> 2.3節の記述の通り、本観測で唯一残ったマイクロレンズ候補イベントは非常に暗い天体( $r$ -bandで24.5等級)であった。2017年の追観測では変光イベントは受からなかったものの、更なる検証が望まれる。

本研究を進めるにあたって、日頃のご指導とサポートをいただいた高田昌広先生に深く感謝いたします。相原博昭先生には、すばるの研究を紹介していただいたことに感謝いたします。また、観測や解析の際にお世話になりました安田直樹先生、住貴宏先生と、共同研究者の皆様に感謝致します。最後に、いつも観測を支えてくださっているハワイ観測所の皆様、日々の研究生活でお世話になった皆様と、岡部信広先生、諸隈智貴先生をはじめとする編集部の皆様に御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 高田昌広, 2008, 天文月報, 101, 756
- 2) Alcock, C., et al., 2000, ApJ, 542, 281
- 3) Tisserand, P., et al., 2007, A&A, 469, 387
- 4) Hawking, S., 1971, MNRAS, 152, 75
- 5) Carr, B., et al., 2016, Phys. Rev. D, 94, 083504
- 6) Paczyński, B., 1986, ApJ, 304, 1
- 7) 住貴宏, 2017, 天文月報, 110, 688
- 8) Griest, K., et al., 2014, ApJ, 786, 158
- 9) Ali-Haïmoud, Y., & Kamionkowski, M., 2017, Phys. Rev. D, 95, 043534
- 10) Katz, A., et al., 2018, JCAP, 12, 005
- 11) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70S, 8
- 12) Riffeser, A., et al., 2001, A&A, 379, 362
- 13) Alard, C., & Lupton, R.H., 1998, ApJ, 503, 325
- 14) Nakamura, T.T., 1998, Phys. Rev. Letter, 80, 1138
- 15) Sugiyama, S., et al., 2019, arXiv: 1905.06066
- 16) Witt, H. J., & Mao, S., 1994, ApJ, 430, 505
- 17) Niikura, H., et al., 2019, Phys. Rev. D, 99, 083503
- 18) Fairbairn, M., et al., 2017, Phys. Rev. Letter, 119, 021101
- 19) Bai, Y., & Orlofsky, N., 2019, Phys. Rev. D, 99, 123019
- 20) Barcons, X., et al., 2015, JPCS, 610, 012008
- 21) Lynx Team Collaboration, et al., 2018, arXiv: 1809.09642
- 22) Wyrzykowski, L., & Mandel, I., 2019, arXiv: 1904.07789
- 23) Ali-Haïmoud, Y., et al., 2017, Phys. Rev. D, 96, 123523
- 24) Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), 2017, Phys. Rev. Letter, 119, 141101
- 25) 新倉広子, 2019, 博士論文 (東京大学)
- 26) Niikura, H., et al., 2019, Nature Astron., 3, 524

### Constraint on Primordial Black Holes from Microlensing Observation with Subaru HSC

Hiroko NIİKURA

*Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: We use the microlensing search results of stars in the Andromeda galaxy (M31) observed by the Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) to constrain primordial black holes (PBHs) that could exist in the Milky Way and M31 halo regions if PBHs make up dark matter even by some mass fraction. We found only one possible microlensing event, which was translated into most stringent upper bound on the abundance of PBHs in the mass range  $M_{\text{PBH}} = 10^{-11} - 10^{-6} M_{\odot}$ .