

原始ブラックホールの観測的探査

杉山 素直

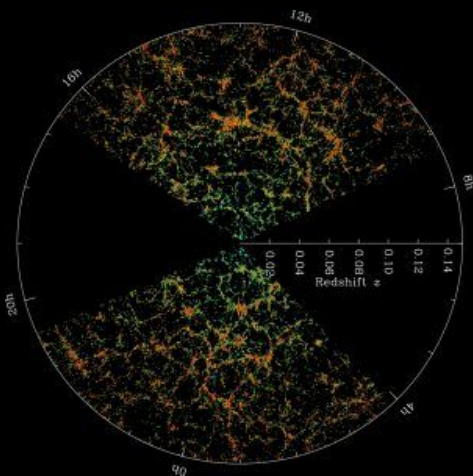
(東京大学 / Kavli IPMU 特任研究員)

[arxiv: 2602.05840](https://arxiv.org/abs/2602.05840)

共同研究者: M. Takada (IPMU), N. Yasuda (IPMU), T. Ohgami (NAOJ),
F. Naokawa (Tohoku), A. Kusenko (UCLA), N. Tominaga (NAOJ)

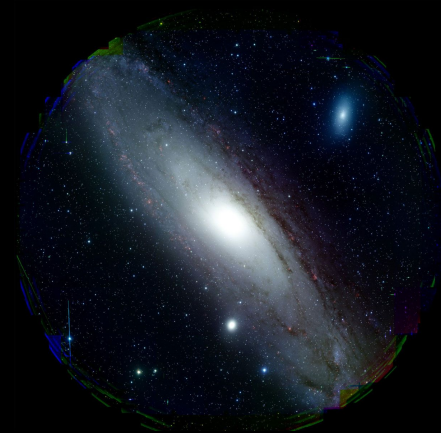
軽く自己紹介: すばる望遠鏡を使った宇宙論・宇宙物理

重力レンズ



宇宙の大規模構造

→ 暗黒物質・暗黒エネルギー・宇宙の歴史



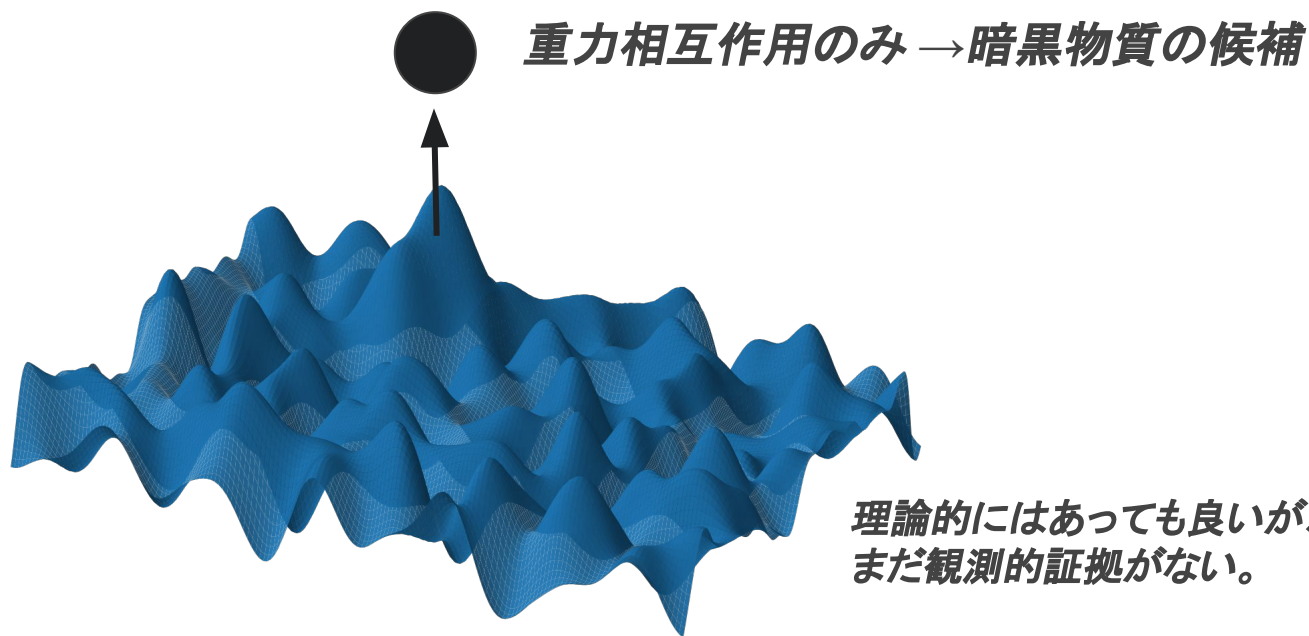
アンドロメダ銀河のモニタリング

→ 暗黒物質探査

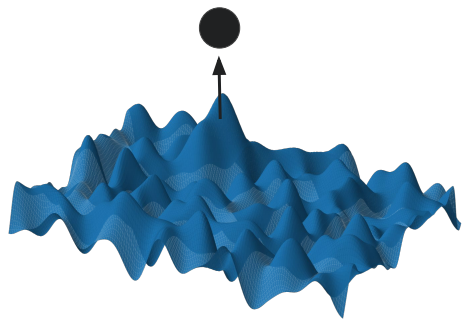
(今日のテーマ)

原始ブラックホール / Primordial Black Hole (PBH)

初期宇宙において、大きな**原始密度揺らぎ**が地平線に入る時に形成されるブラックホール



原始ブラックホール / Primordial Black Hole (PBH)



Primordial Black Holes (PBH)

- 初期宇宙の原始密度揺らぎ (<1秒)
- 質量: $M_{PBH} = 10^{-5}g - 100M_{\odot}$
- 暗黒物質 (Dark Matter: DM) 候補

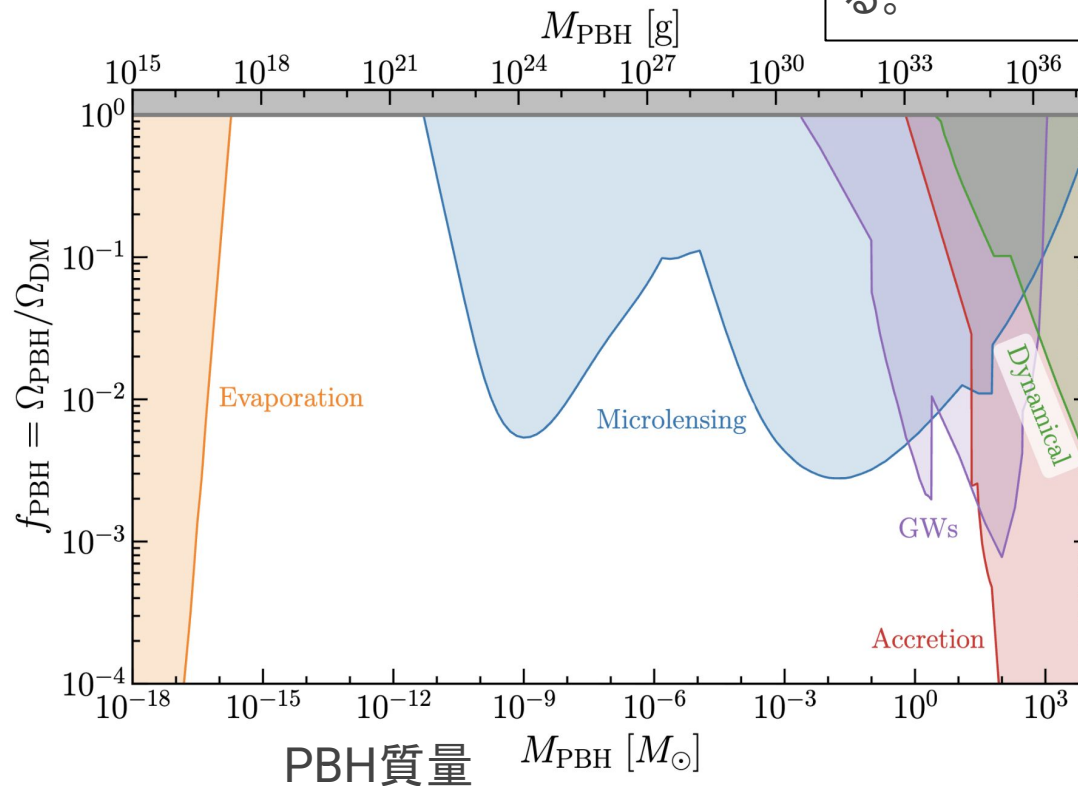
天体物理的なブラックホール

- 大質量性のコアの重力崩壊 ($M_{*} \geq 30M_{\odot}$)
- 質量: $M_{BH} \geq 5M_{\odot}$

PBHの存在量の観測的制限の現状

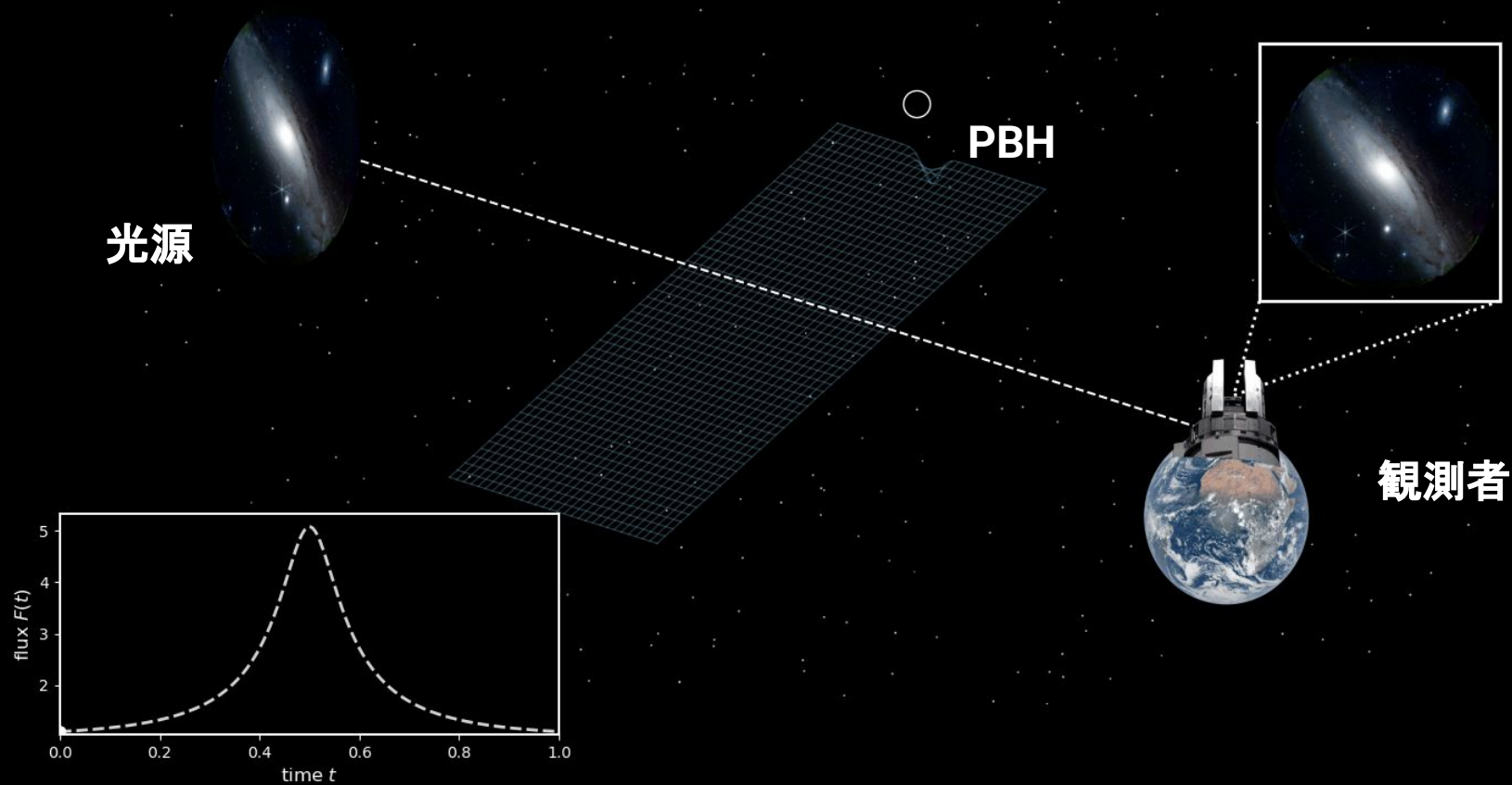
観測的証拠がないという事実から、存在量に上限をつけることができる。

PBH存在量
(暗黒物質比)

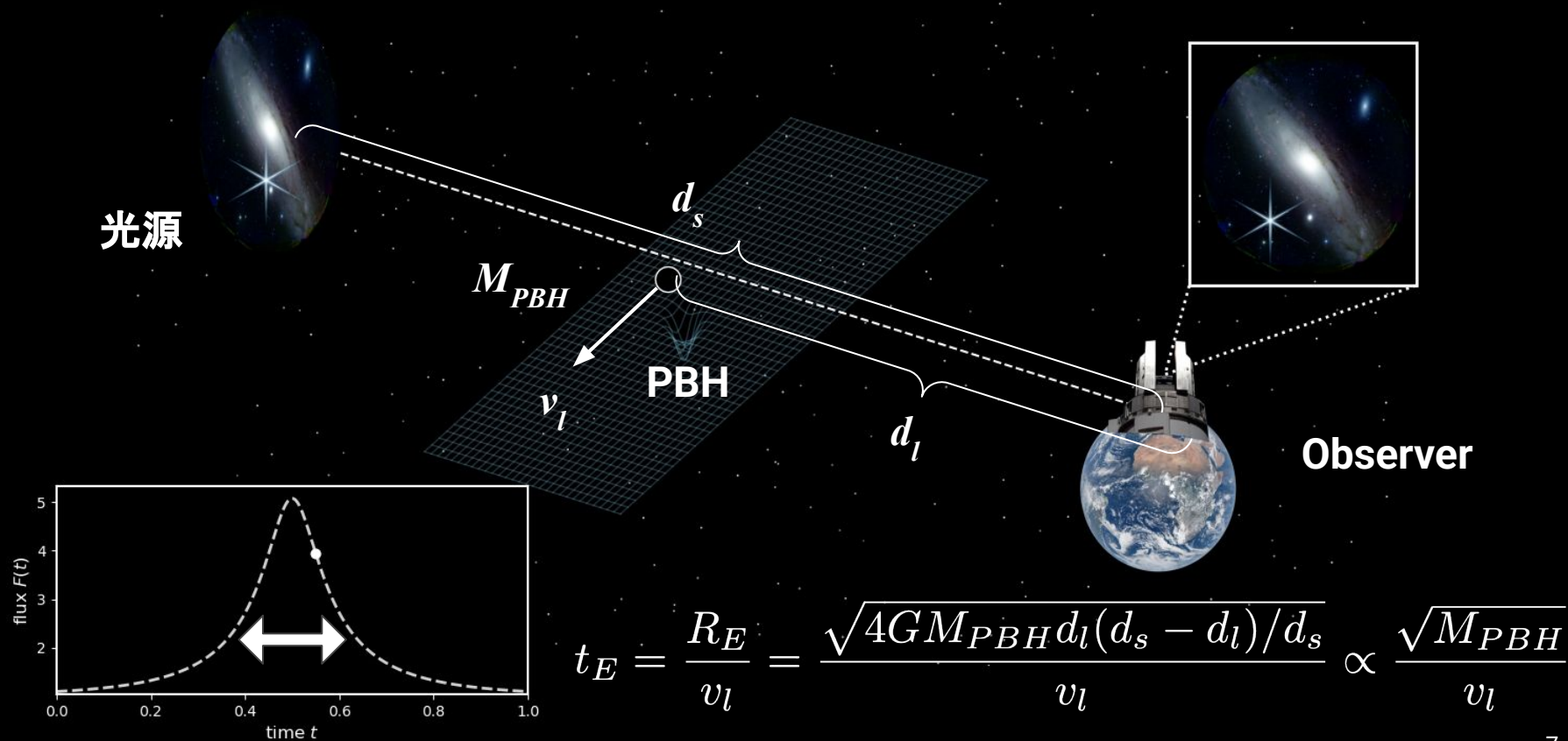


[Green & Kavanagh 2020](#) and [PBHbounds](#)

マイクロレンズズ (Microlensing)



マイクロレンズズ (Microlensing)



今日話すこと

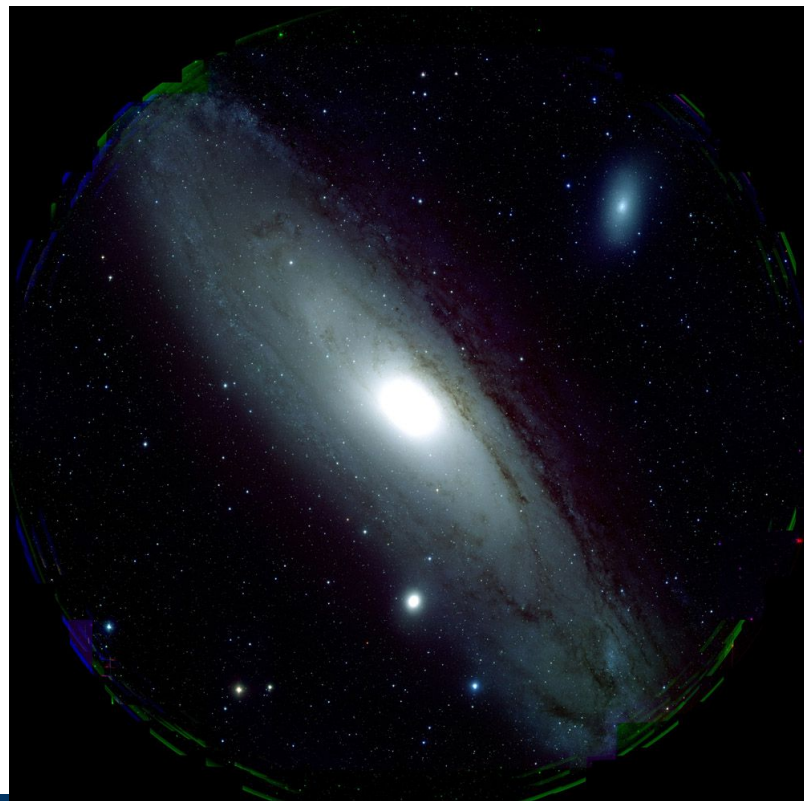
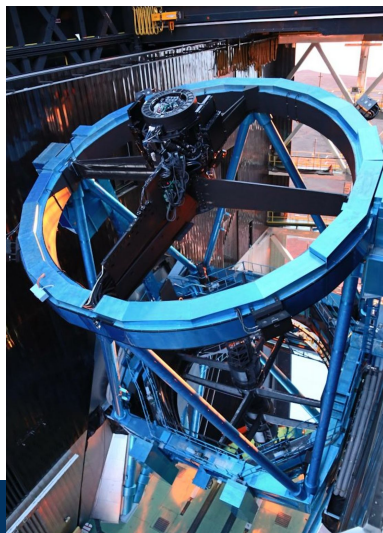
1. **すばる望遠鏡+ハイパーシュプリームカムによる M31観測**
観測方法、質量スケール、時間スケール
2. **データ解析**
イベント検出、イベント選択
3. **解釈**
PBHの質量関数への示唆
4. **結論**
最近の議論、他の観測結果

すばるハイパーシュプリームカムによる M31 (アンドロメダ銀河) 観測

すばるHyper Suprime-Cam (HSC)

M31(アンドロメダ銀河)の中の星のモニター観測

- 8.2mの主鏡
- シーシングサイズ = 0.6秒
- 視野直径 = 1.5度
→ **80M個もの** M31銀河の中の星を同時に観測！



M31 microlensing probes PBHs in the Milky Way and M31 halos

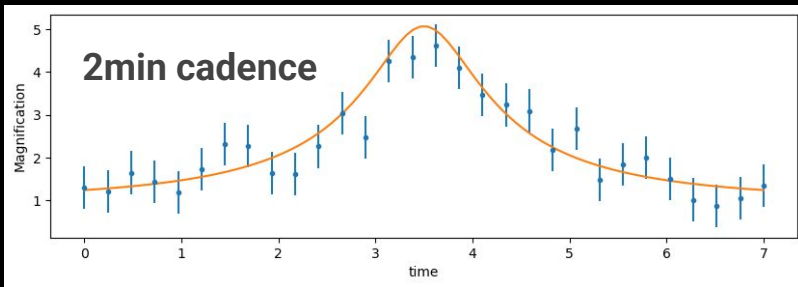
Time scale

$$t_E \simeq 34 \text{ min} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{10^{-8} M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{100 \text{ kpc}} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{200 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

MW DM halo

$d_s = 770 \text{ kpc}$

M31 DM halo



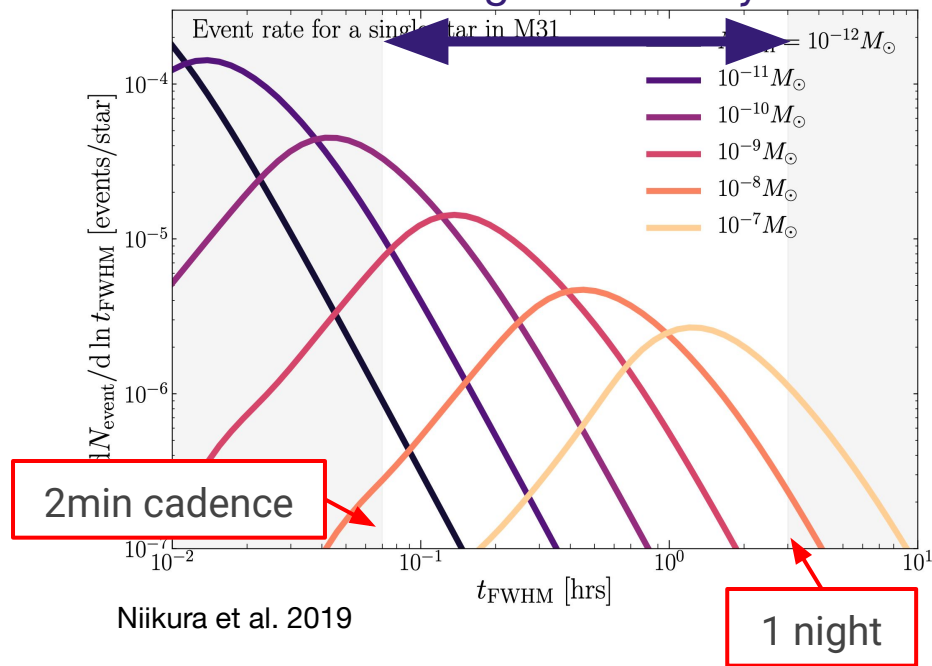
Geometry + halo model
→ expected event rate

$$\frac{d\Gamma}{dt_E} \sim \sum_{h=\text{MW}, \text{M31}} \int d\mathbf{x} d\mathbf{v} \frac{\rho_h(\mathbf{x})}{M_{\text{PBH}}} f_h(\mathbf{v})$$

イベントレート

時間スケール = 質量スケール

HSC 1 night sensitivity

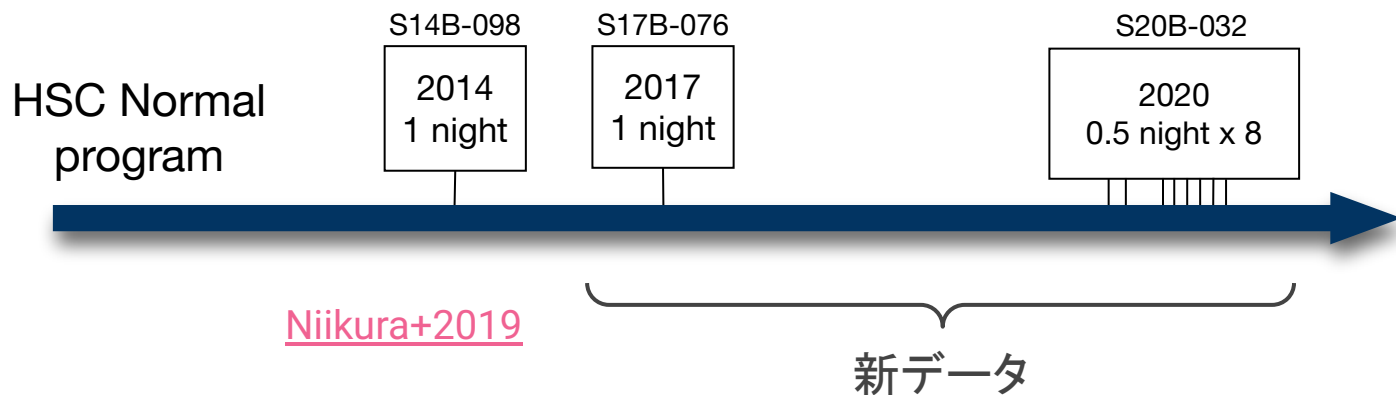


イベント数の期待値

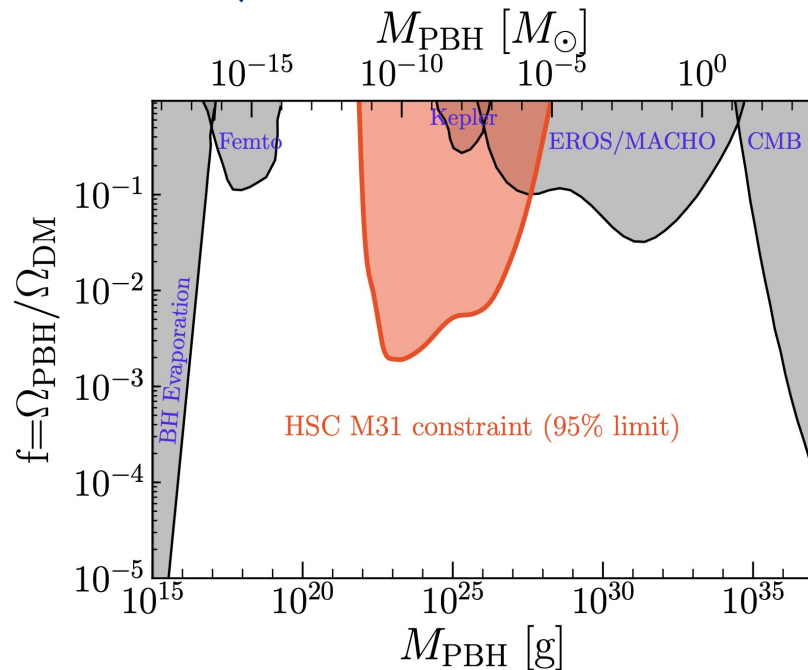
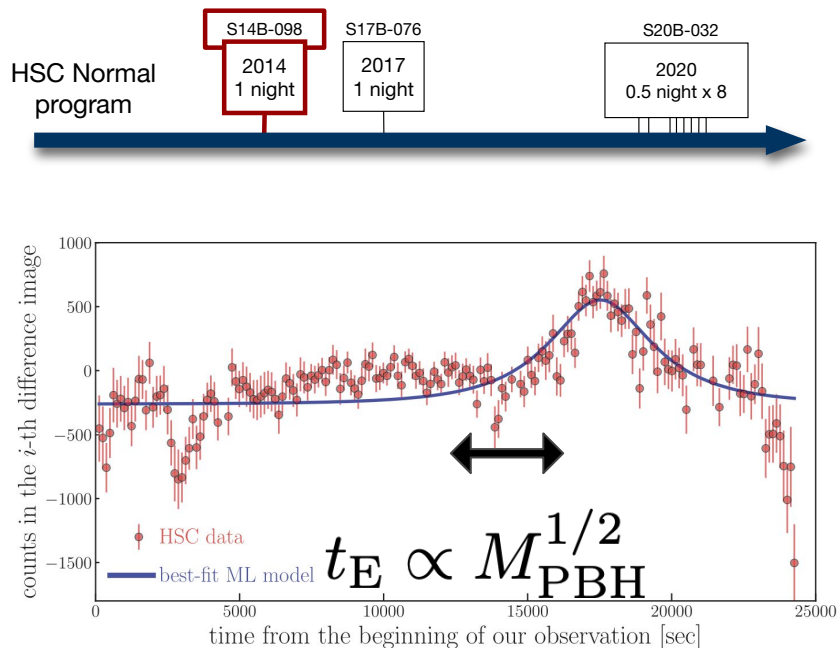
$$N_{\text{exp}} = \underbrace{N_s}_{\text{星の数}} \times \underbrace{t_{\text{obs}}}_{\text{観測時間}} \times \int dt_E \underbrace{\frac{d\Gamma}{dt_E}}_{\text{時間スケールごとのイベントレート}} \underbrace{\epsilon(t_E)}_{\text{検出効率}}$$

$$t_E \simeq 34 \text{ min} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{10^{-8} M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{100 \text{ kpc}} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{200 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

すばるHSC観測



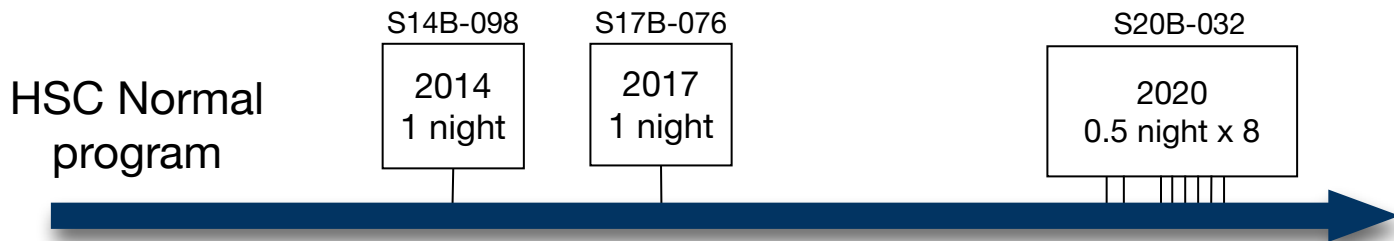
2014データの結果 (Niikura+2019)



$$f_{\text{PBH}} \equiv \frac{\Omega_{\text{PBH}}}{\Omega_{\text{DM}}} < \frac{N_{\text{obs}}}{N_{\text{exp}}} \sim \frac{1}{10^3}$$

Niikura+2019

新データ

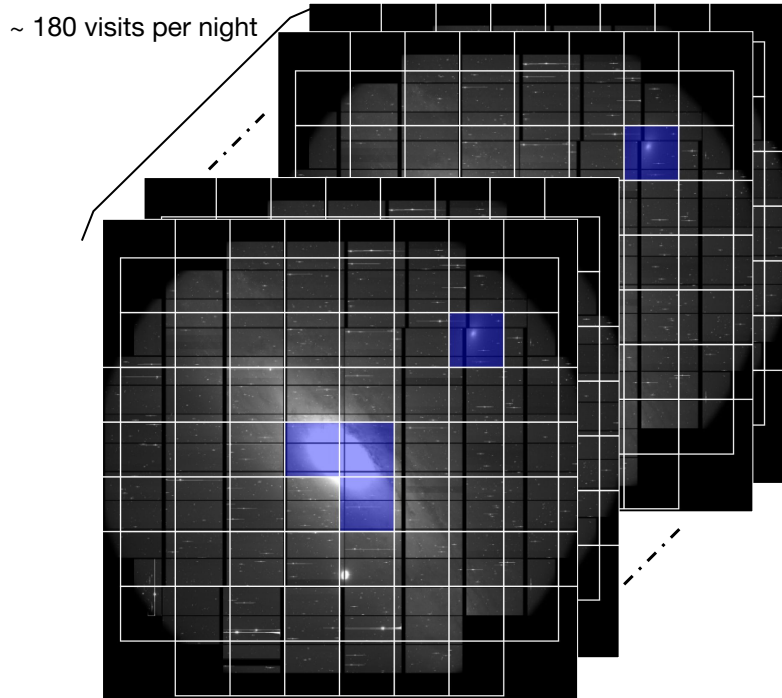


Date	Nights	Filter	Images	T_{eff}	PSF
2014-11-24	1.0	r	189	6.4	0.68
2017-09-20	1.0	$r2$	215	7.1	0.86
2020-10-21	0.5	$r2$	152	5.0	0.80
2020-10-22	0.5	$r2$	156	5.2	0.84
2020-11-11	0.5	$r2$	56	1.8	1.13
2020-11-12	0.5	$r2$	126	4.1	1.38
2020-11-14	0.5	$r2$	152	5.1	0.80
2020-11-16	0.5	$r2$	0	0.0	—
2020-11-18	0.5	$r2$	34	0.0	—
2020-11-20	0.5	$r2$	140	4.6	1.08

- 悪天候のため2晩は観測なし
- 2夜 + 6半夜
- **5夜** で良い観測条件
(PSF～画像のクオリティ)

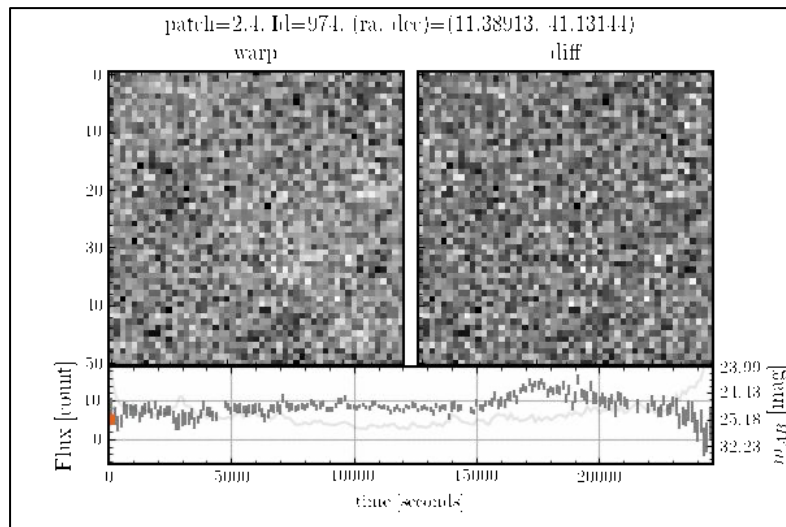
PSF= point spread function.

画像データからイベント検出



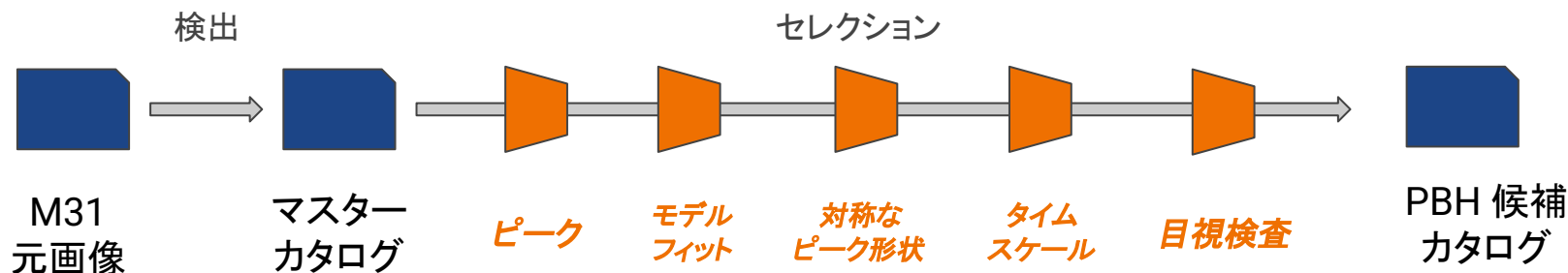
90 sec exposure + 30 sec readout = 2 min cadence

- M31領域は星が混んでおり個々の星は分解して見えない。
- 差分画像 (Alard & Lupton1998)
 - 質の良い画像を足し合わせて参照画像を作成
 - 各時刻の画像から参照画像を引き算する
 - 変光していれば差分画像上に残差として現れる。



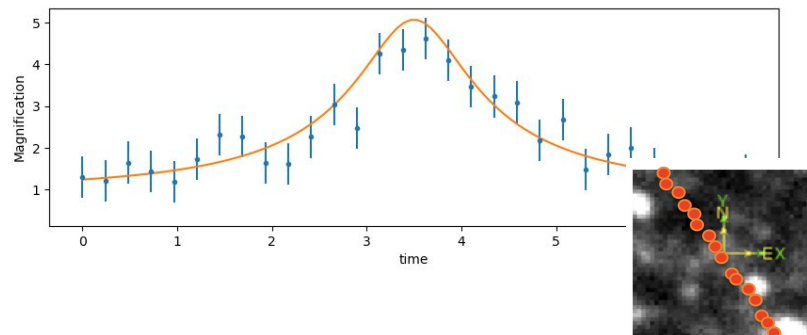
データ解析 イベント選択

非マイクロレンズ現象の除去



イベント選択；候補イベントは以下の性質を満たすべき

- 明らかなピーク(not ノイズ)
- 対称なピーク形状(マイクロレンズ)
- goodness-of-fit
- タイムスケール(長すぎず、短すぎず)



目視検査の例

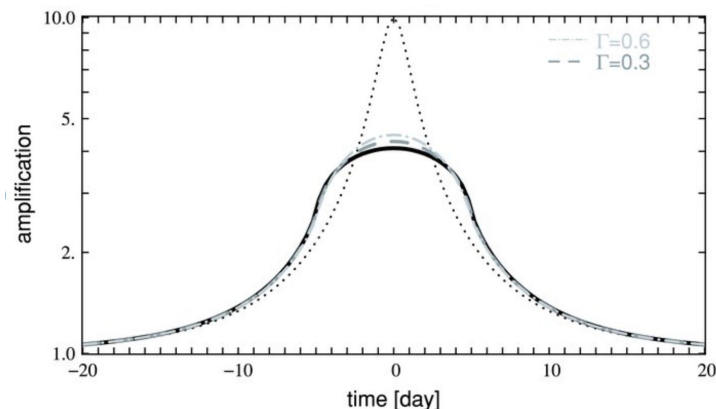
有限光源サイズ効果

我々が考えている軽いPBHでは、アインシュタイン半径が、光源の見かけの大きさと同程度になることがある。

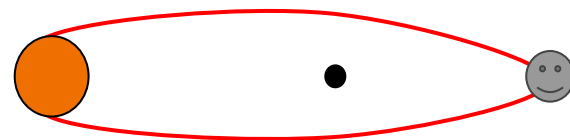
$$\rho = \frac{\theta_s}{\theta_E}$$

光源が有限の大きさを持つとマイクロレンズのピークが広がってピーク高が減る。

有限光源サイズ効果を見無視すると、フィットが悪くなり、本当のマイクロレンズ候補イベントを見逃す可能性がある。



$$A_{\text{finite}}(u) = \int d^2\vec{x} A_{\text{point}}(\vec{x}) S(\vec{x} + u)$$



イベント選択の結果

マスター
カタログ

PBH候補
カタログ

ID	master	bump	mlc2	mlc2i	mlc2o	mlc2il	mlc2ir	mlc2ol	mlc2or	asym	scorr	scorrs	ntscale	amax	mlsig	mlvs	mlnrpt
2014-11-24	7281	5139	1135	938	911	878	819	814	783	391	72	70	57	53	38	25	5
2017-09-20	6199	4554	1060	962	907	877	837	821	800	287	142	59	50	44	18	18	7
2020-10-21	3636	3348	361	218	206	205	196	196	195	13	5	5	3	3	0	0	0
2020-10-22	1582	1561	66	52	47	44	41	40	38	18	1	1	1	1	0	0	0
2020-11-11	348	274	16	16	15	12	11	11	11	2	0	0	0	0	0	0	0
2020-11-12	2029	1581	202	185	185	180	154	154	154	23	18	18	0	0	0	0	0
2020-11-14	2446	1959	359	343	326	312	278	270	261	38	23	22	18	17	8	7	0
2020-11-20	1714	1241	260	223	215	205	165	164	164	15	4	4	1	1	0	0	0

goodness-of-fit

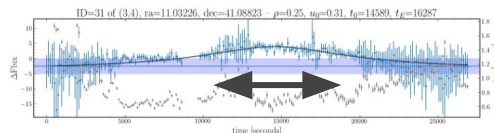
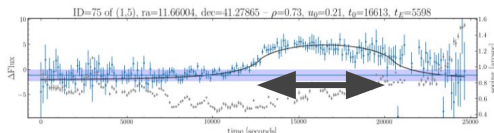
観測条件との相関なし

他の観測日で
似たような変動がない

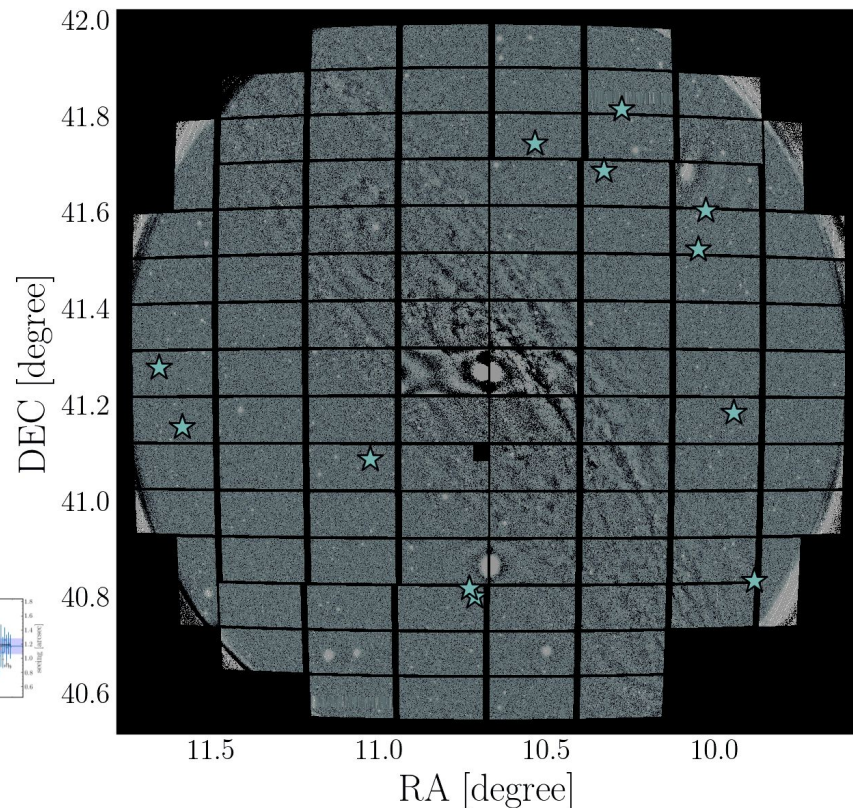
有限光源サイズ効果→ 真のイベントを高確率で拾える。
→ しかし同時にコンタミも増加
→ 非マイクロレンズを除くためにイベント選択を行った。

12個のマイクロレンズの候補イベント

ID	significance		ML params					
	master/patch/objid	mlsig	dof	f_0	u_0	t_0	t_E	ρ
† 2014-11-24/1,5/75	2486.89	189		-0.43	0.21	16613.35	5598.13	0.73
† 2014-11-24/4,2/63	3085.37	189		-0.50	0.85	16430.47	8654.20	0.93
2014-11-24/6,7/168	1453.65	189		-0.33	0.05	16172.20	10218.13	0.33
2014-11-24/6,7/169	1281.99	189		-0.27	0.68	15587.25	5763.05	0.83
2014-11-24/7,6/96	1335.64	189		-0.32	0.48	16223.85	5374.24	0.77
2017-09-20/1,4/46	1092.90	214		-0.45	0.87	16060.40	3632.56	0.52
2017-09-20/3,4/31	1488.64	214		-0.50	0.31	14589.27	16286.60	0.25
2017-09-20/4,2/9	1461.36	214		-0.50	0.46	4088.65	4814.50	0.42
† 2017-09-20/5,7/45	2210.57	213		-0.41	0.74	14173.11	7451.41	0.92
2017-09-20/7,4/36	1121.77	214		-0.45	0.47	14942.25	10821.83	0.57
2017-09-20/7,6/26	1728.40	214		-0.43	0.39	15833.30	12398.83	0.40
† 2017-09-20/8,2/119	2467.61	125		-0.22	0.74	15436.09	9623.68	0.78

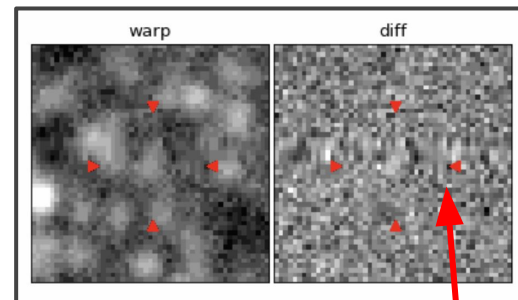
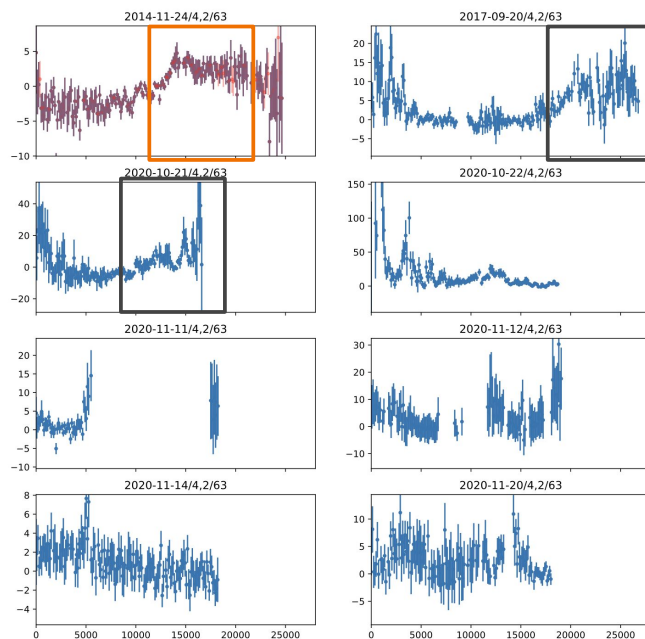
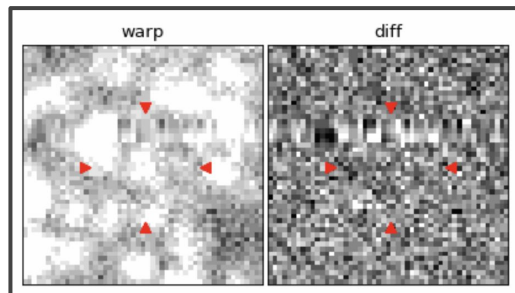
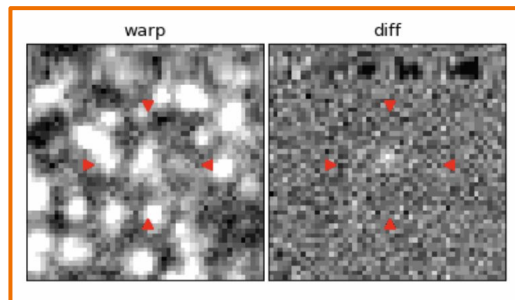


$$M_{\text{PBH}} \sim M_{\text{lunar}} - M_{\text{earth}}$$



周期的変動のテスト

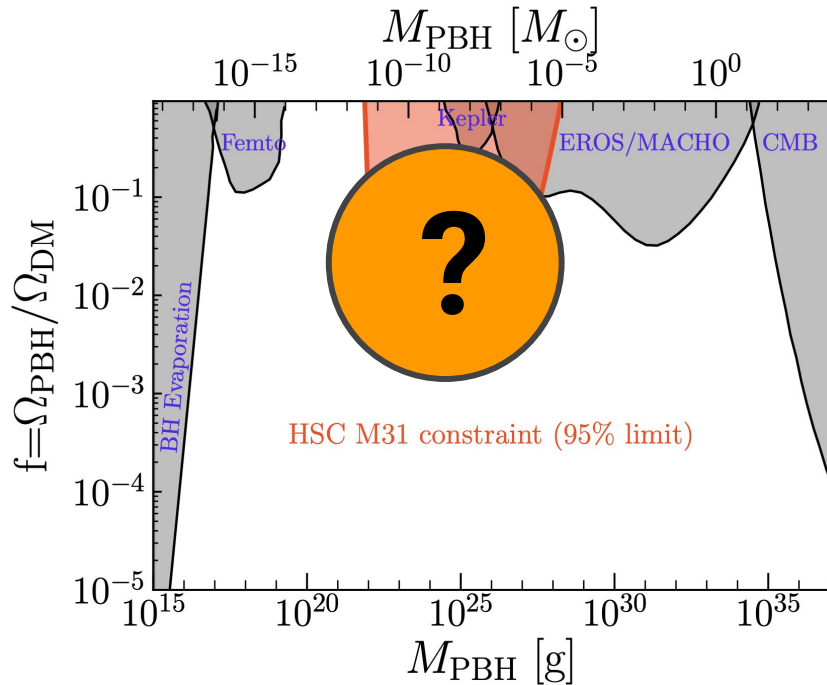
マイクロレンズは一回きりのイベント(同じレンズ天体は 2度マイクロレンズを起こさない)。複数回変動が見えればそれはマイクロレンズではない。



注意

1. 明らかな周期変動 → 除外
2. 人工的なresidualがあるような場合は、真の変動ではないため除外しない。

What is the implication for PBH mass function?



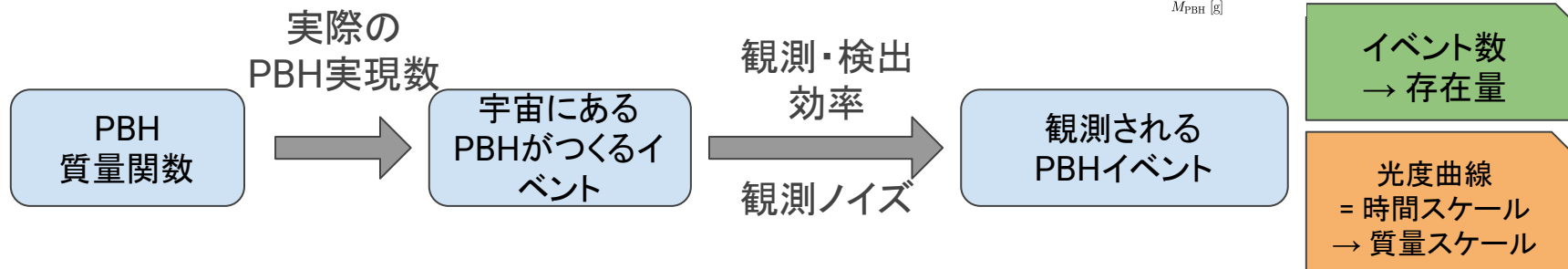
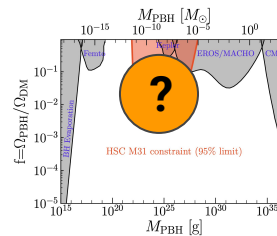
作業仮説と物理的制限

- **PBHの存在量**
仮定: 12候補イベントがPBHである
- **PBHの存在量と質量スケール**
仮定: 12候補イベントがPBHである
- **PBH存在量の上限**
仮定: 12候補イベントが偽陽性 (not PBH)

解釈

12個のマイクロレンズ候補イベントから
PBHの性質について言えること。

PBH質量関数への示唆



階層ベイズ 解析: 以下を同時に考慮できる。

- 実現するイベントのランダム性
- 観測・検出効率
- データに含まれる観測ノイズ

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(\{d_j^n\}, \{N_{\text{obs},n}\} | \lambda) \\
 = \mathcal{L}_{\text{Po}}(\{N_{\text{obs},n}\} | \lambda) \times \mathcal{L}_{\text{LC}}(\{d_j^n\} | \lambda)
 \end{aligned}$$

ポアソン
光度曲線

→ (イベント数) x (光度曲線の形状) = (PBH存在量) x (質量スケール)

PBH仮説

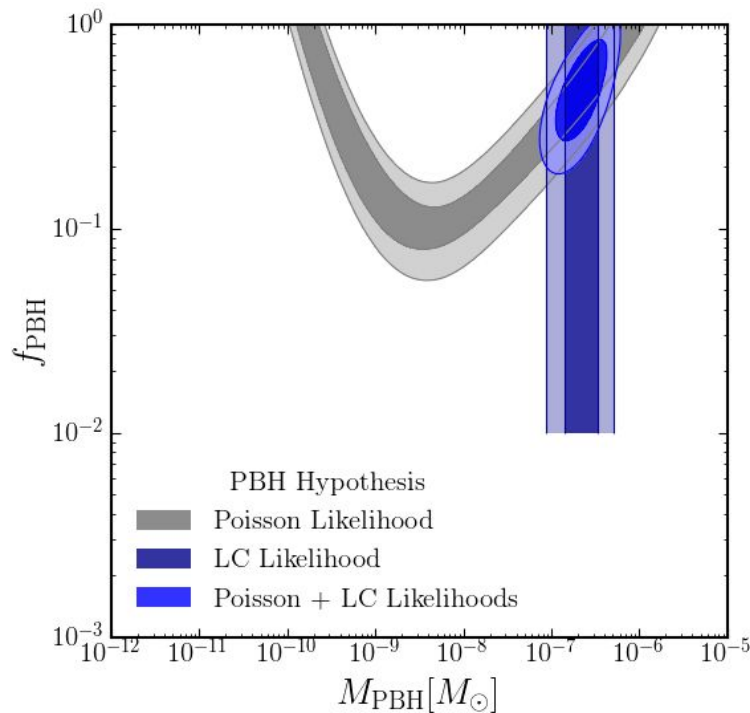
残った12個のイベントが全てPBHだとする作業仮説。

階層ベイズモデル (Mandel+2019)を使って、イベント頻度のポアソン統計と観測光度曲線の尤度を組み合わせる。

$$\mathcal{L}_{\text{Po}}(\{N_{\text{obs},n}\}|\lambda) = \prod_{n=1}^8 P_{\text{Po}}(N_{\text{obs},n}|N_{\text{exp},n}(\lambda))$$

$$\mathcal{L}_{\text{LC}}(\mathbf{d}_j^n|\lambda) = \frac{\int dd \int d\theta P(\mathbf{d}_j^n|\theta) \frac{d\Gamma}{dd d\theta}(\lambda)}{\int dd \int d\theta \epsilon_{\text{eff}}^n(\theta) \frac{d\Gamma}{dd d\theta}(\lambda)}$$

←PBH質量関数を与えられた時の光度曲線の尤度 (λ = 質量 & 存在量)



非PBH仮説

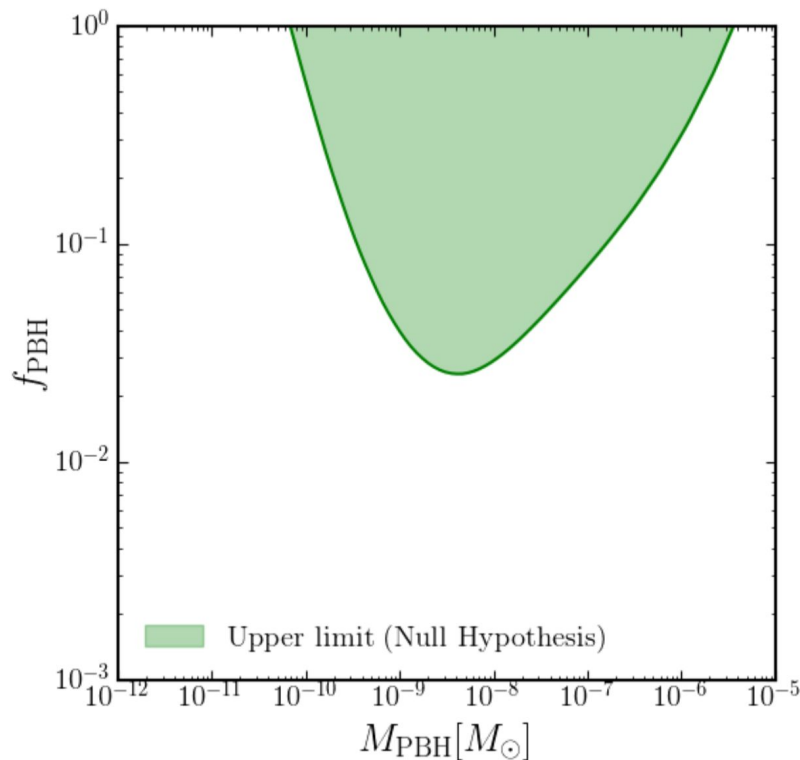
残ったイベントは全て偽陽性だとする仮説。褐色矮星やその他の変動天体による変光の可能性がこの場合に該当する。

$$\mathcal{L}_{\text{Po}}(\{N_{\text{obs},n}\}|\lambda) = \prod_{n=1}^8 P_{\text{Po}}(N_{\text{obs},n}|N_{\text{exp},n}(\lambda))$$

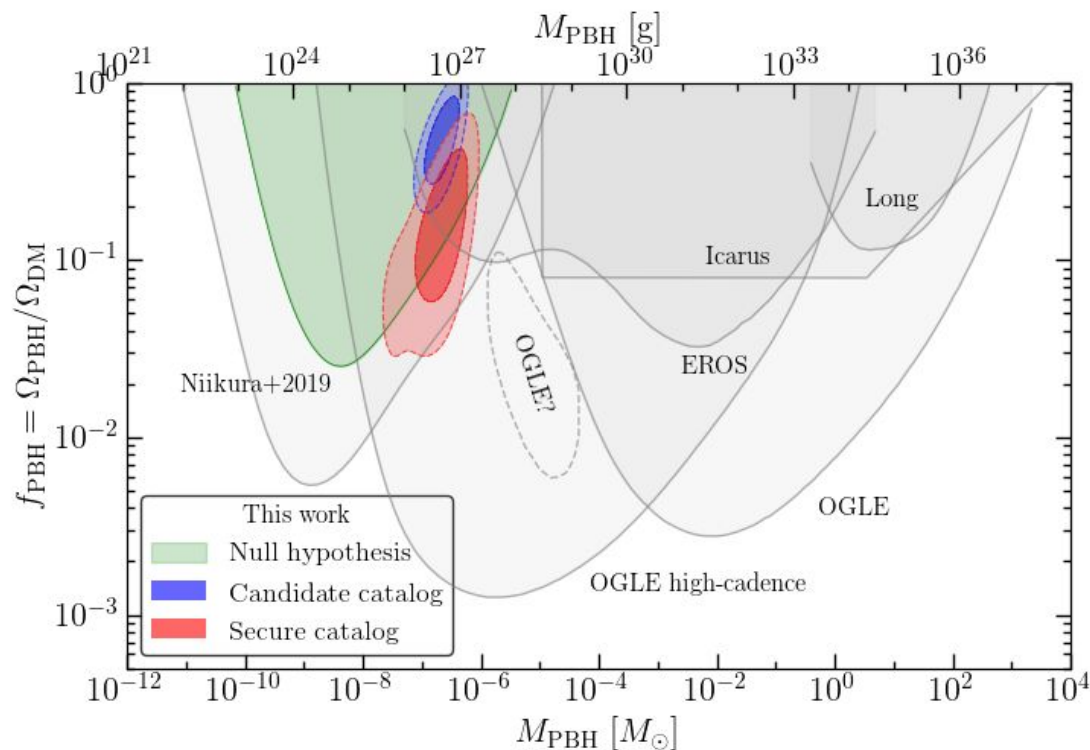
$$N_{\text{obs},n} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$N_{\text{exp}}(\lambda) = N_s T_{\text{obs}} \int d\hat{t} \frac{d\Gamma}{d\hat{t}}(\lambda)$$

$$\lambda = \{f_{\text{PBH}}, M_{\text{PBH}}\}$$



他観測との比較



HSCの結果はOGLE high cadenceの結果と合わない。

([Mroz+2024](#), LMC/SMC).

MOA-II は地球質量程度のマイクロレンズを報告している。

([Sumi+2023](#), 9 years, $t_E < 0.5$ days).

AMPMサーベイによるPhoebeは我々の質量に近い ([Key+2026](#), LMC ($t_E \sim 1$ hour)).

HSCの候補天体のマイクロレンズ以外の可能性

- 除外できなかった変光天体
- 浮遊惑星(頻度的に考えにくい)

本当にPBHなのか？

別グループによる独立再解析

 > astro-ph > arXiv:2604.00111

Search
Help |

Astrophysics > Cosmology and Nongalactic Astrophysics

[Submitted on 31 Mar 2026]

Eppur non si trovano Vol. 2: No Planetary-mass Primordial Black Holes toward the Andromeda Galaxy

Przemek Mróz, Andrzej Udalski

「それでも見つからない」

A recent preprint by Sugiyama et al. reported the discovery of twelve candidates for short-timescale (less than one day) gravitational microlensing events based on high-cadence photometric observations of the Andromeda Galaxy (M31) using the Subaru Hyper Suprime-Cam. These detections were attributed to a large population of planetary-mass primordial black holes (PBHs) that could account for the entirety of the dark matter in the Milky Way and M31 halos. However, these results are in clear tension with previous searches for short-timescale microlensing events toward the Magellanic Clouds, such as those by

OGLEのグループが我々の HSCデータ(公開済み)を、彼らの OGLE内部で開発したパイプラインで解析

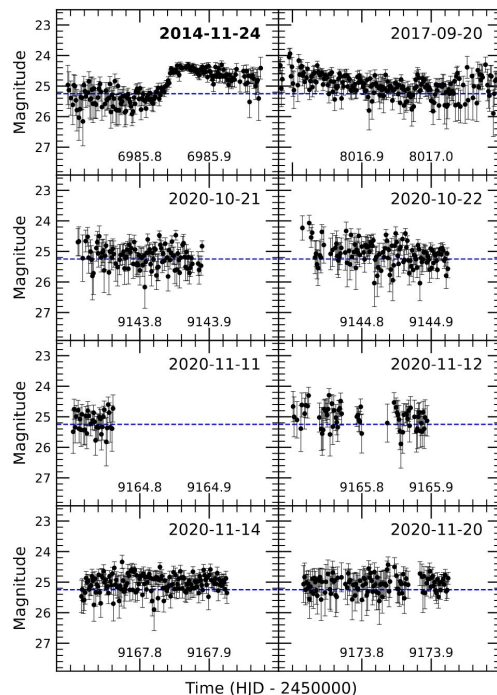
Mar 31, 2026 (2 months after our paper)

Mroz & Udalski'sの解釈

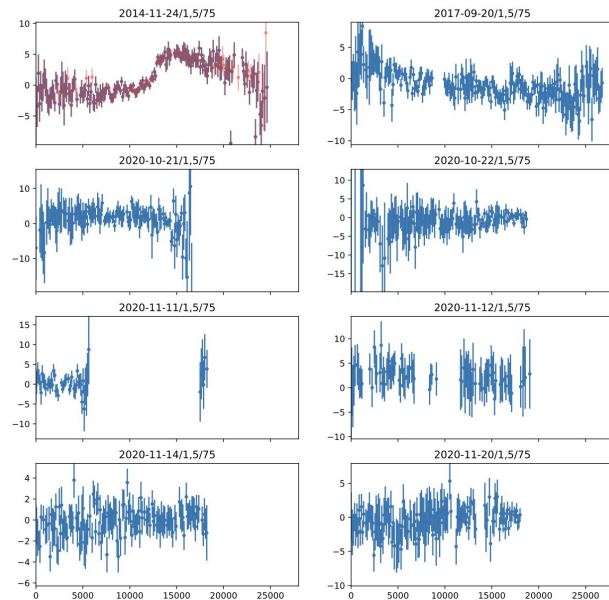
- 1食連星
- 1変光天体(おそらく Cepheid)
- 10 RR Lyrae星 (星の脈動)

彼らのパイプラインで得た光度曲線は、ピーク周りの非対称性がより顕著。

Candidate #01 (M31_3.46.11208) on eight observing nights



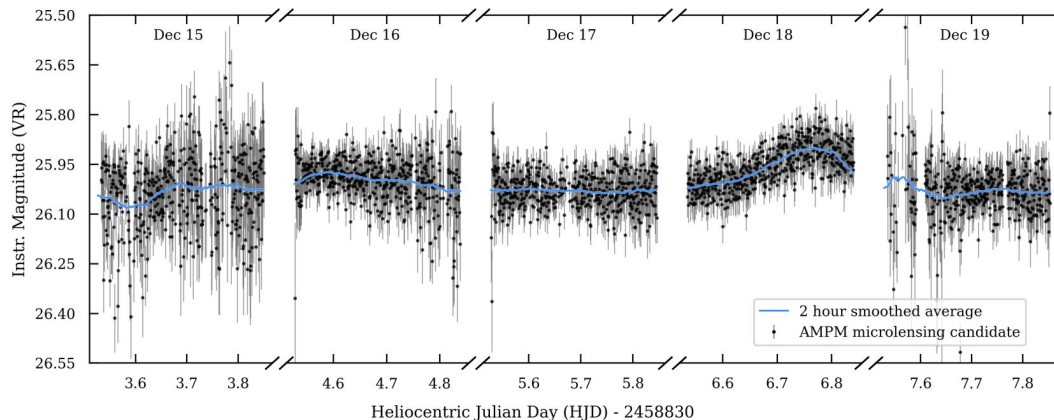
Mroz & Udalski 2026



Sugiyama+2026

DECam (米国)でも同様のイベントが報告されている

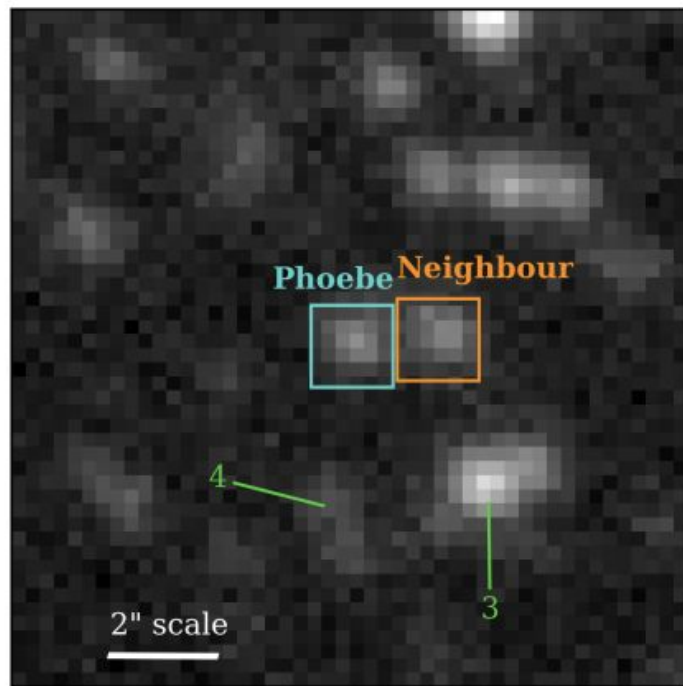
Key+2026



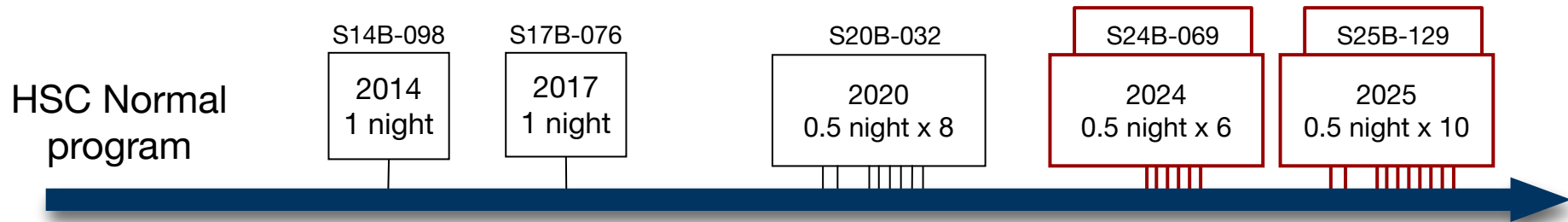
AMPMサーベイ

- DECam, 5晩, 50秒ケイデンス
- 大マゼラン雲 LMC (OGLE観測と同じ)
- 1つのマイクロレンズ候補を報告 (月質量の3倍), Phoebeと命名

これもまたUdalski & Mrozが再解析して変光星であると主張している。



HSC 観測の追加データ



2024と2025の新データを使って、Mroz & Udalskiの主張を検証中 (RR Lyrae解釈の妥当性).

結論と展望

[arxiv: 2602.05840](https://arxiv.org/abs/2602.05840)

- 合計8夜のデータを解析した(2014, 2017, 2020)
 - 12 マイクロレンズの候補イベント
 - PBHなら、 $M_{\text{PBH}} \sim 10^{-7} M_{\text{sun}}$ (月～地球質量), $f_{\text{PBH}} \sim 10^{-1}$
 - 変光天体の可能性が指摘されている。2024, 2025の新データで検証中
 - *HSCはpowerful*
- 将来の方向性
 - 観測: 他波長観測 / 好観測条件 / 長観測時間
 - 手法: イベント選択の検証 / 観測効率の推定の高精度化
 - 深い変光天体カタログの作成