

20. Sep. 2019 @ JPS in Yamagata

# 多段階インフレーションによる原始ブラックホールタワー

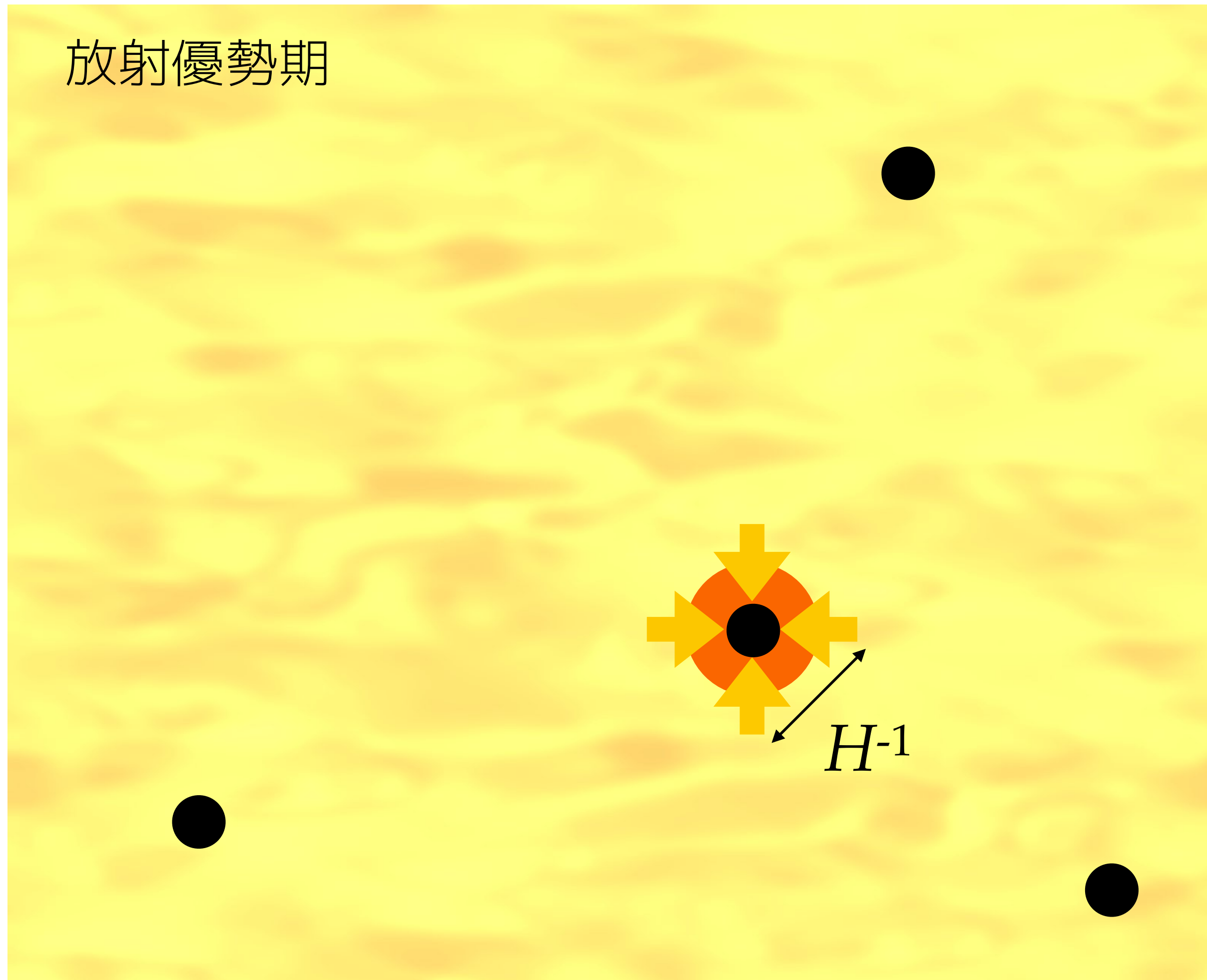


多田 祐一郎 (名古屋大学)

w/ 横山 修一郎 PRD **100**, no. 2, 023537 (2019)

# 原始ブラックホール Carr & Hawking 1974

放射優勢期



- PBH質量

$$\begin{aligned} M_{\text{PBH}} &\sim M_{\text{H}} = \frac{4\pi}{3} \rho H^{-3} = \frac{1}{2GH} \\ &\sim M_{\odot} \left( \frac{t_{\text{PBH}}}{10^{-5} \text{ s}} \right) \quad M_{\odot} \simeq 2 \times 10^{33} \text{ g} \\ &\sim M_{\odot} \left( \frac{k_{\text{PBH}}}{4 \text{ pc}^{-1}} \right)^{-2} \end{aligned}$$

$$M_{\text{Pl}} \simeq 2 \times 10^{-5} \text{ g} \lesssim M_{\text{PBH}} \lesssim 10^{15} M_{\odot}$$

# 原始ブラックホール Carr & Hawking 1974

放射優勢 - PBH質量

$$\begin{aligned}
 M_{\text{PBH}} &\sim M_{\text{H}} = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{H}} H^{-3} = \frac{1}{2GH} \\
 &\sim M_{\odot} \left( \frac{t_{\text{PBH}}}{10^{-5} \text{ s}} \right) \quad M_{\odot} \simeq 2 \times 10^{33} \text{ g} \\
 &\sim M_{\odot} \left( \frac{k_{\text{PBH}}}{4 \text{ pc}^{-1}} \right)^{-2}
 \end{aligned}$$

$$M_{\text{Pl}} \simeq 2 \times 10^{-5} \text{ g} \lesssim M_{\text{PBH}} \lesssim 10^{15} M_{\odot}$$

- 崩壊の閾値

$$\begin{aligned}
 \delta > \delta_{\text{th}} \simeq 0.4 & \quad \text{Musco, Miller, Rezzolla 2005, ...} \\
 & \quad \text{Harada, Yoo, Kohri 2013} \\
 \left( \text{cf. } \mathcal{R}_{\text{th}} \simeq \frac{9}{4} \delta_{\text{th}} \simeq 1 \right)
 \end{aligned}$$

- 希少さ

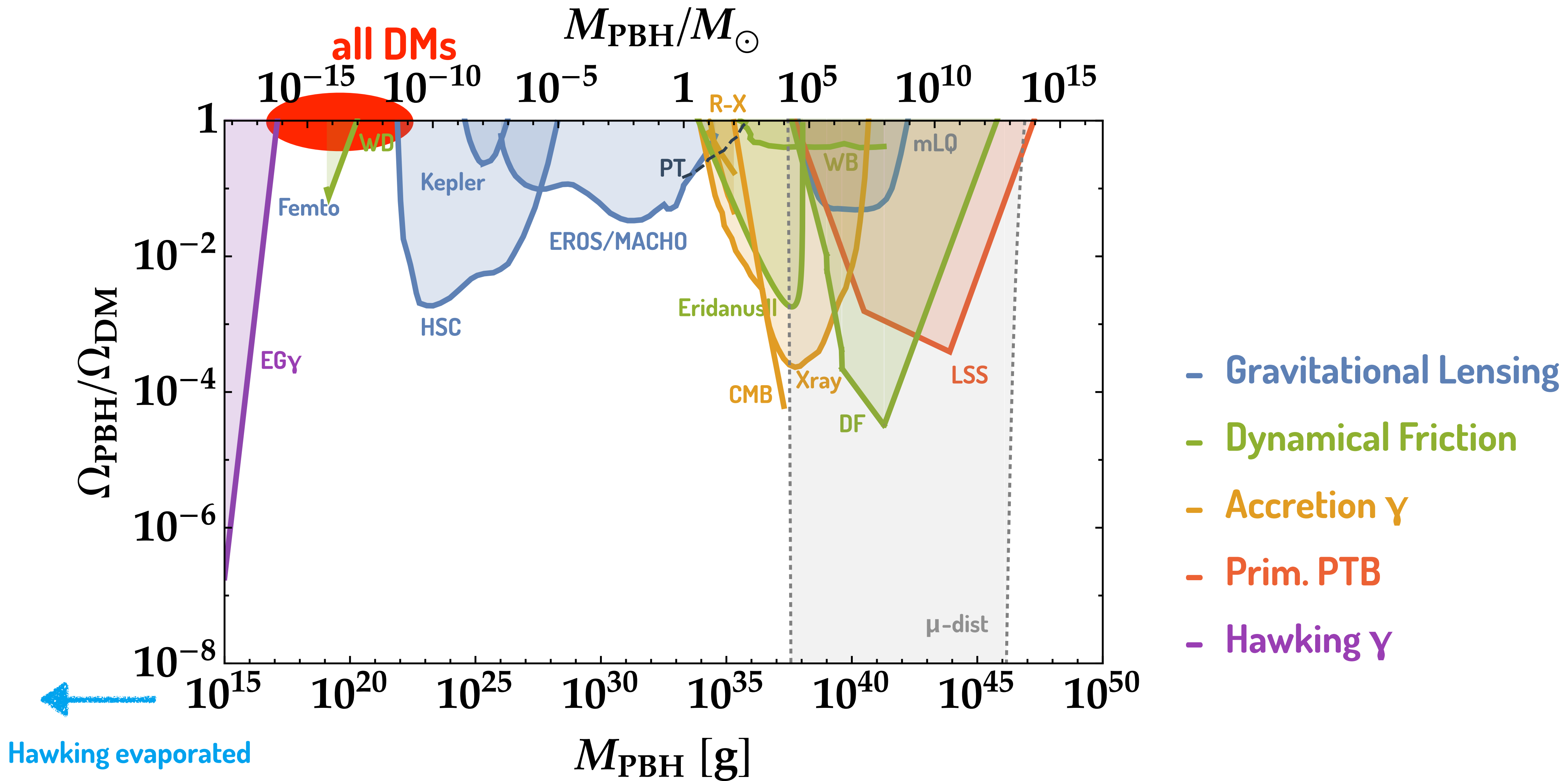
$$\frac{\Omega_{\text{PBH}}}{\Omega_{\text{DM}}} \sim \frac{\rho_{\text{PBH}} / \rho_{\text{R}}|_{\text{f}}}{7 \times 10^{-16}} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{10^{20} \text{ g}} \right)^{-1/2}$$

~ 10σ rarity

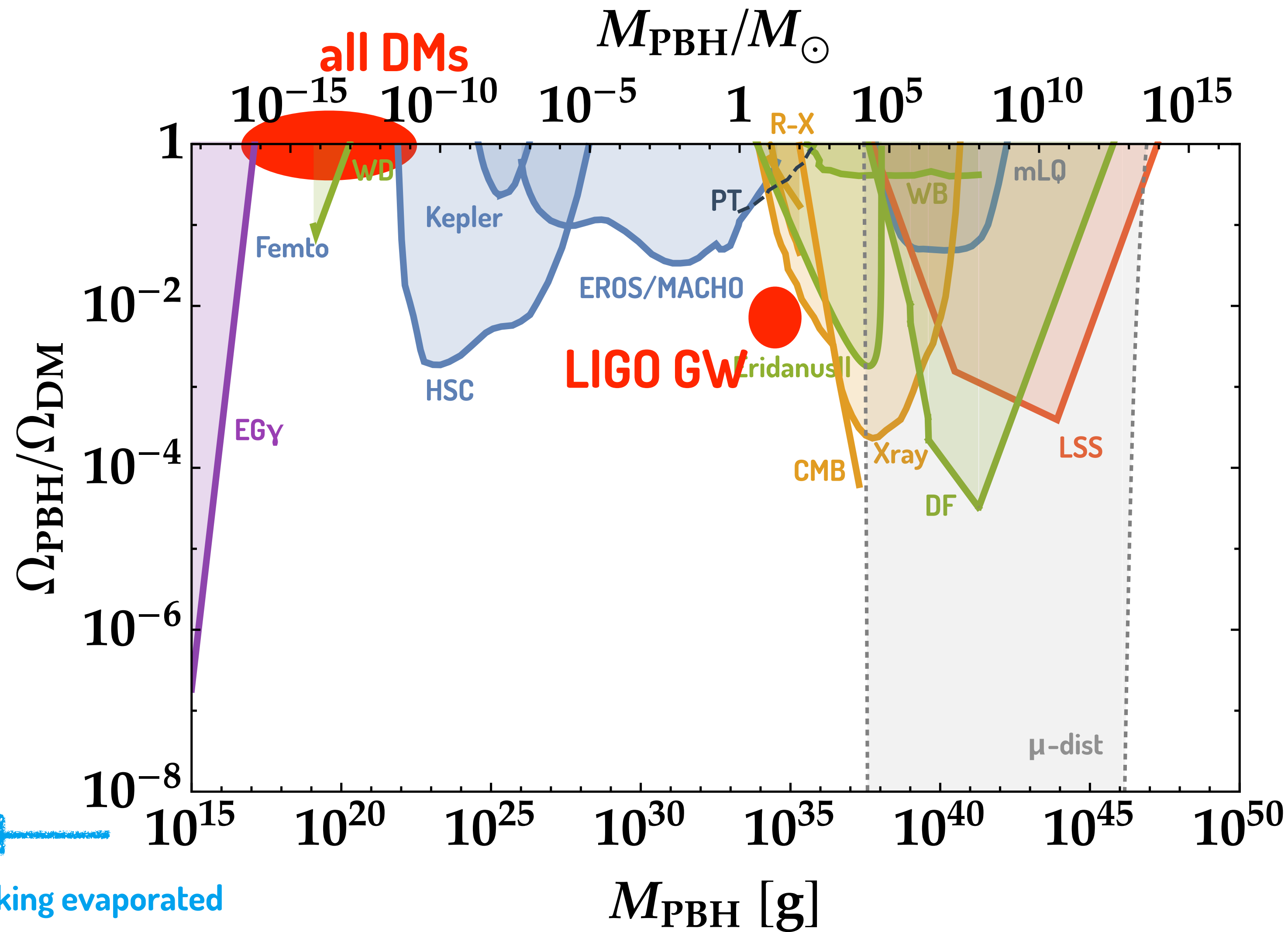
$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k_{\text{PBH}}) \sim \left( \frac{\mathcal{R}_{\text{th}}}{10} \right)^2 \simeq 10^{-2}$$

$$(\text{cf. } \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k_{\text{CMB}}) \simeq 2 \times 10^{-9})$$

# 観測的制限および動機



# 観測的制限および動機



通常よりやや重いBH

スピンなし

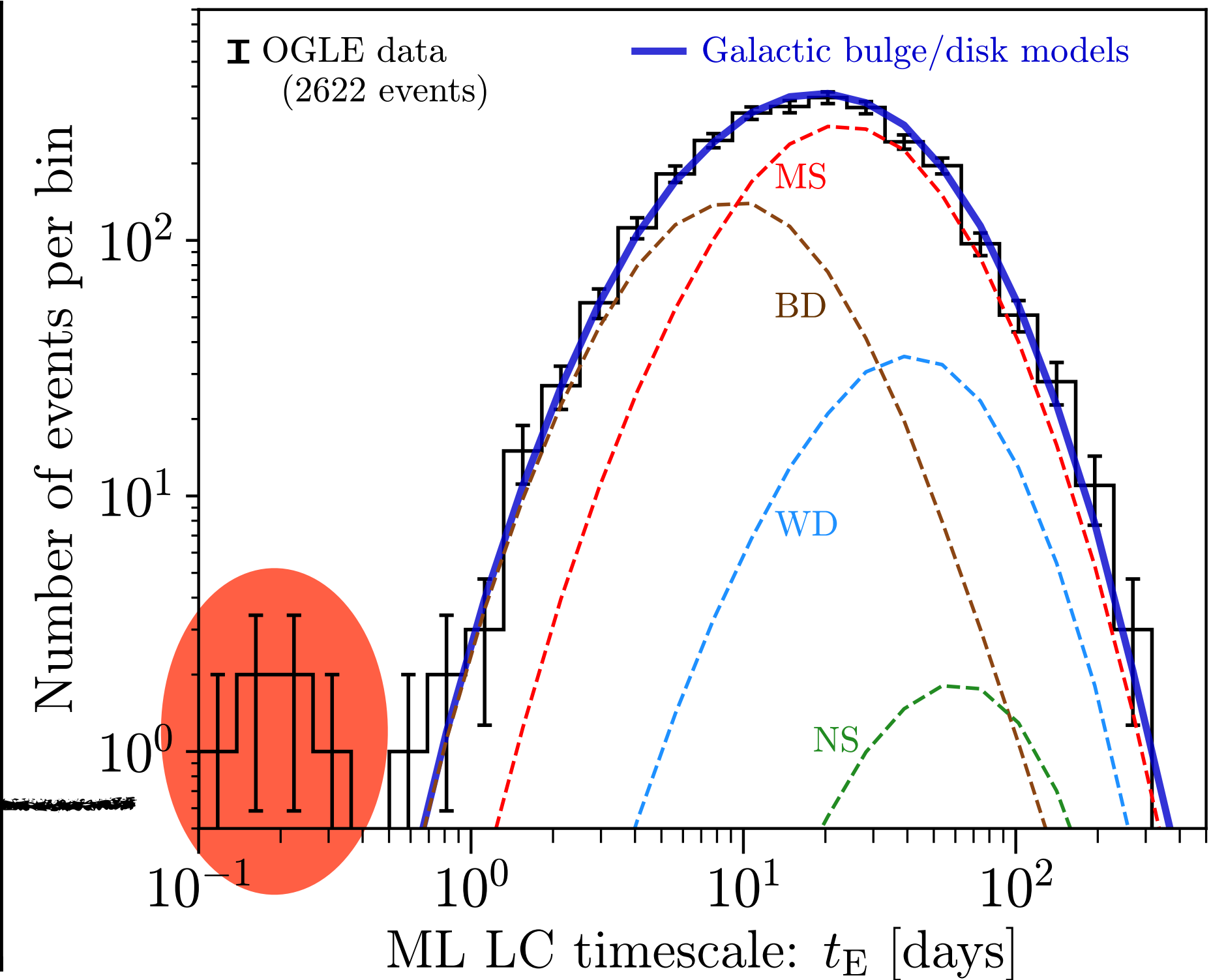
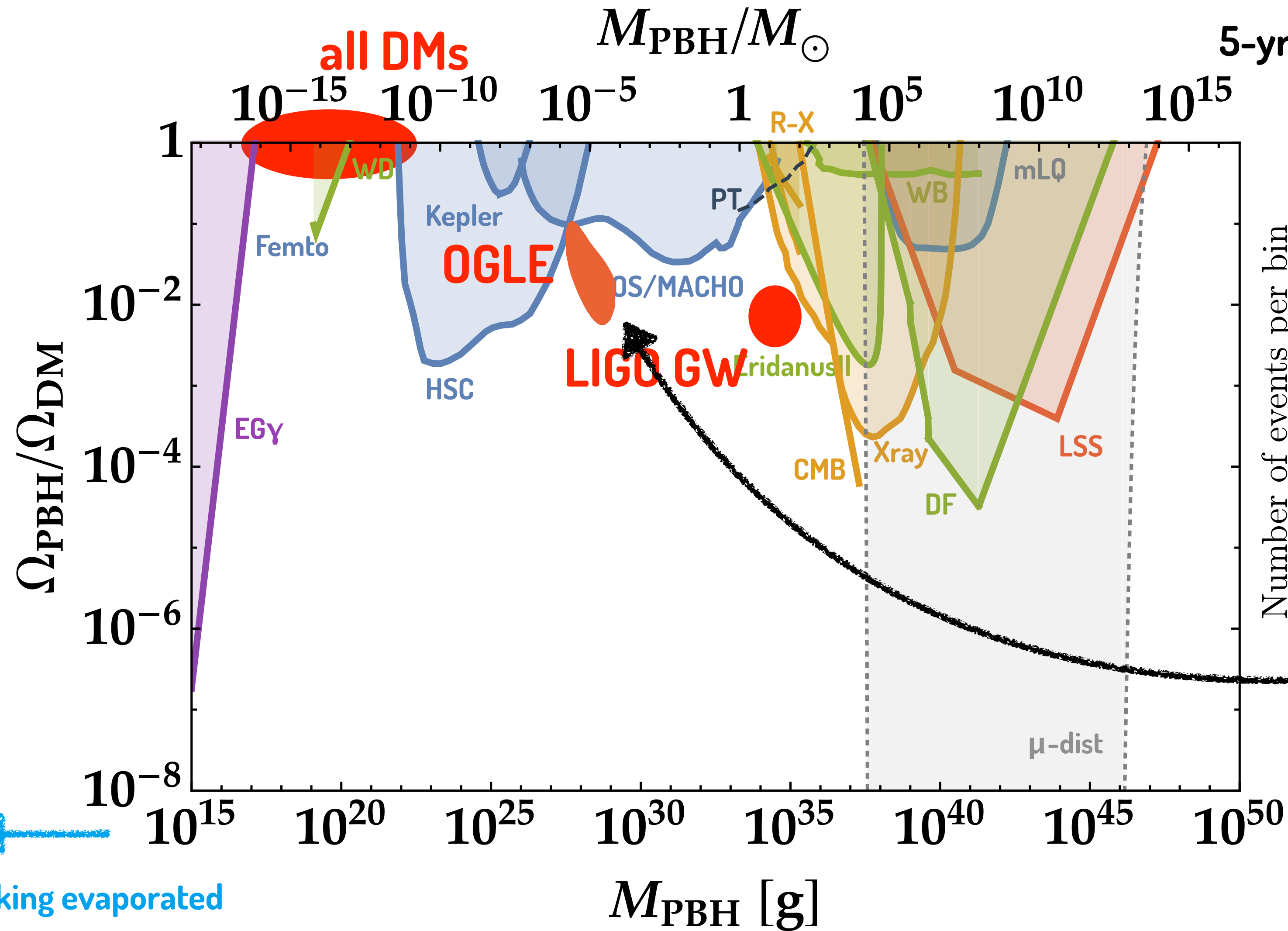
Event	$m_1/M_{\odot}$	$m_2/M_{\odot}$	$M/M_{\odot}$	$\chi_{\text{eff}}$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$

LIGO/Virgo 2018

# 観測的制限および動機

5-yr Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE)

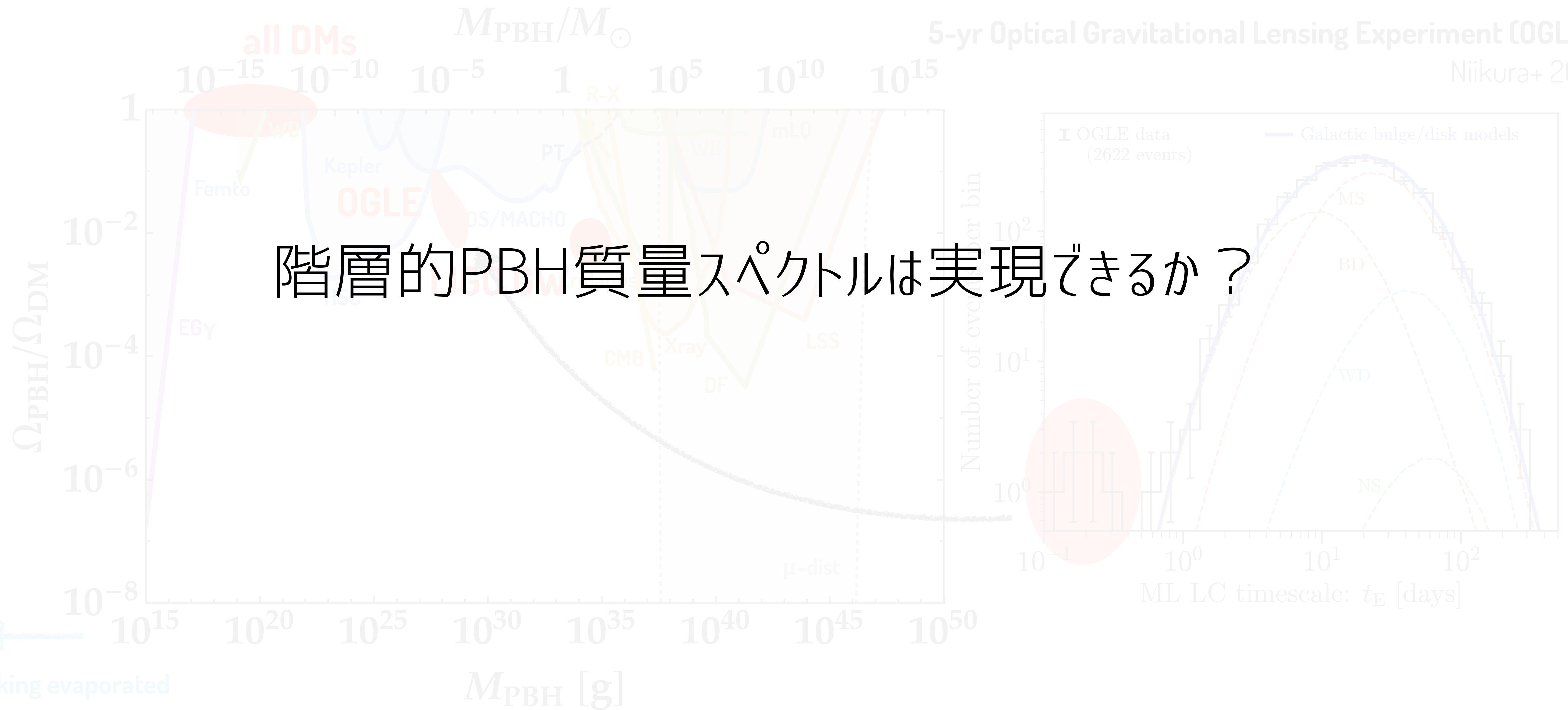
Niikura+ 2019



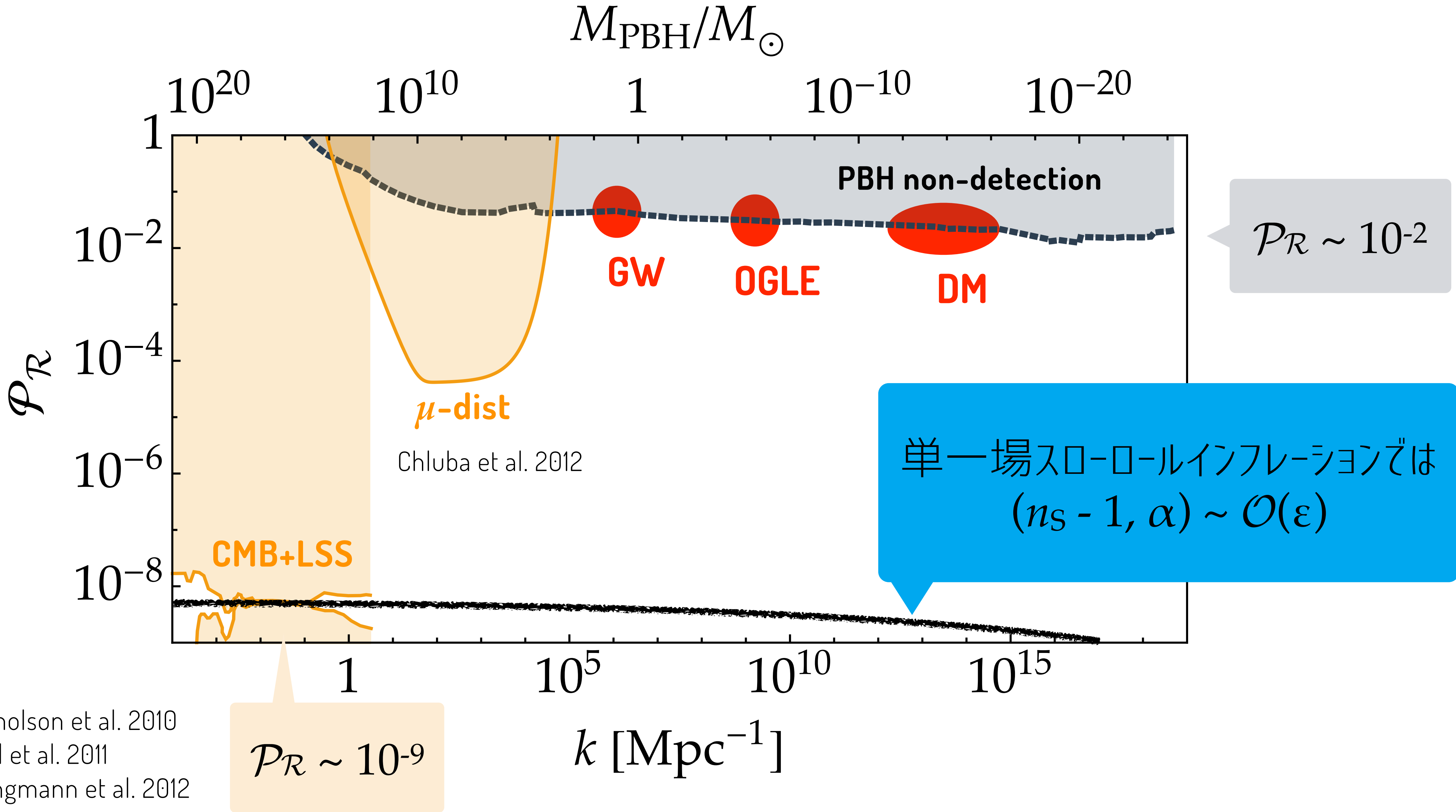
# 観測的制限および動機

5-yr Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE)

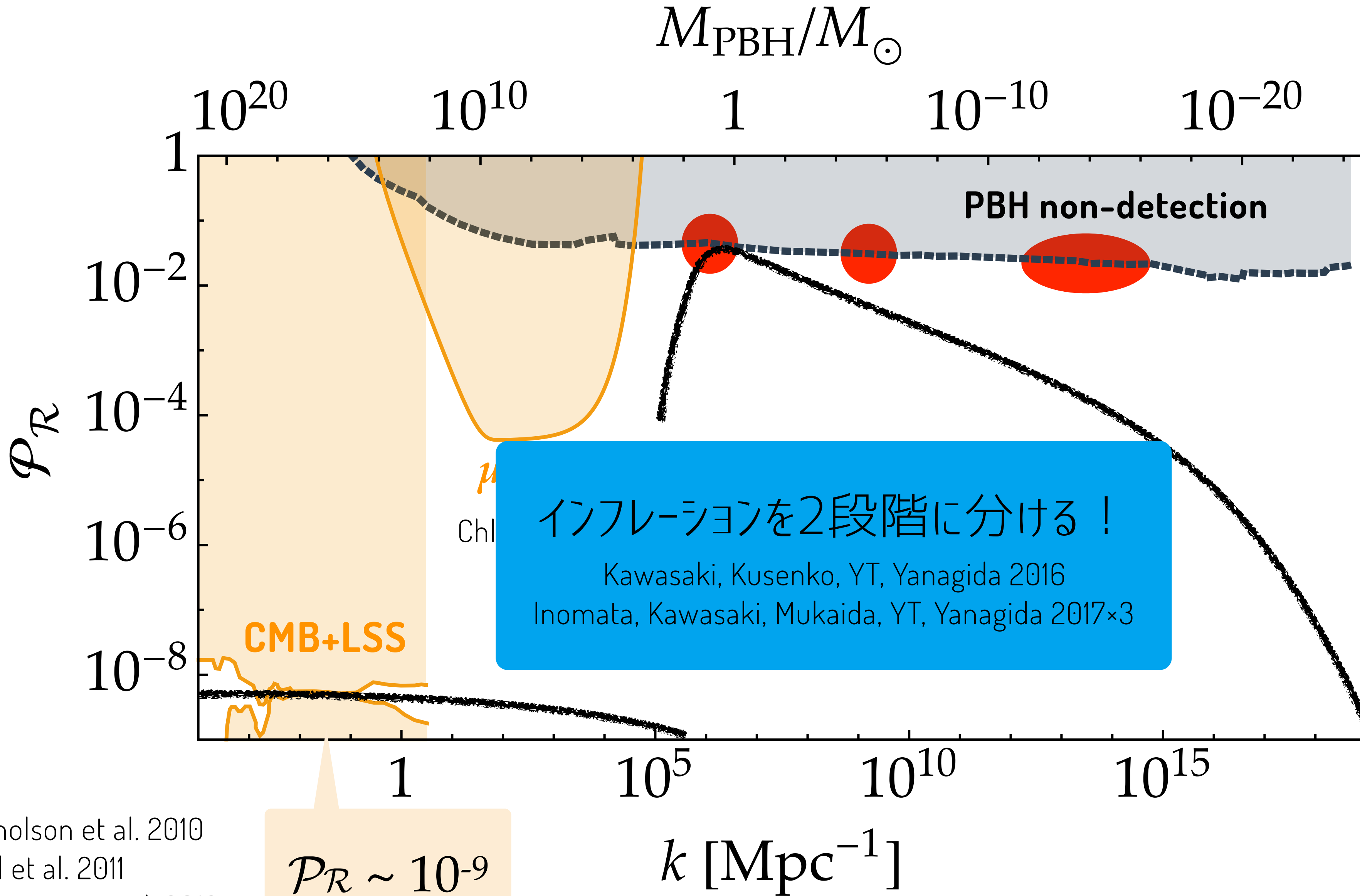
Niikura+ 2019



階層的PBH質量スペクトルは実現できるか？

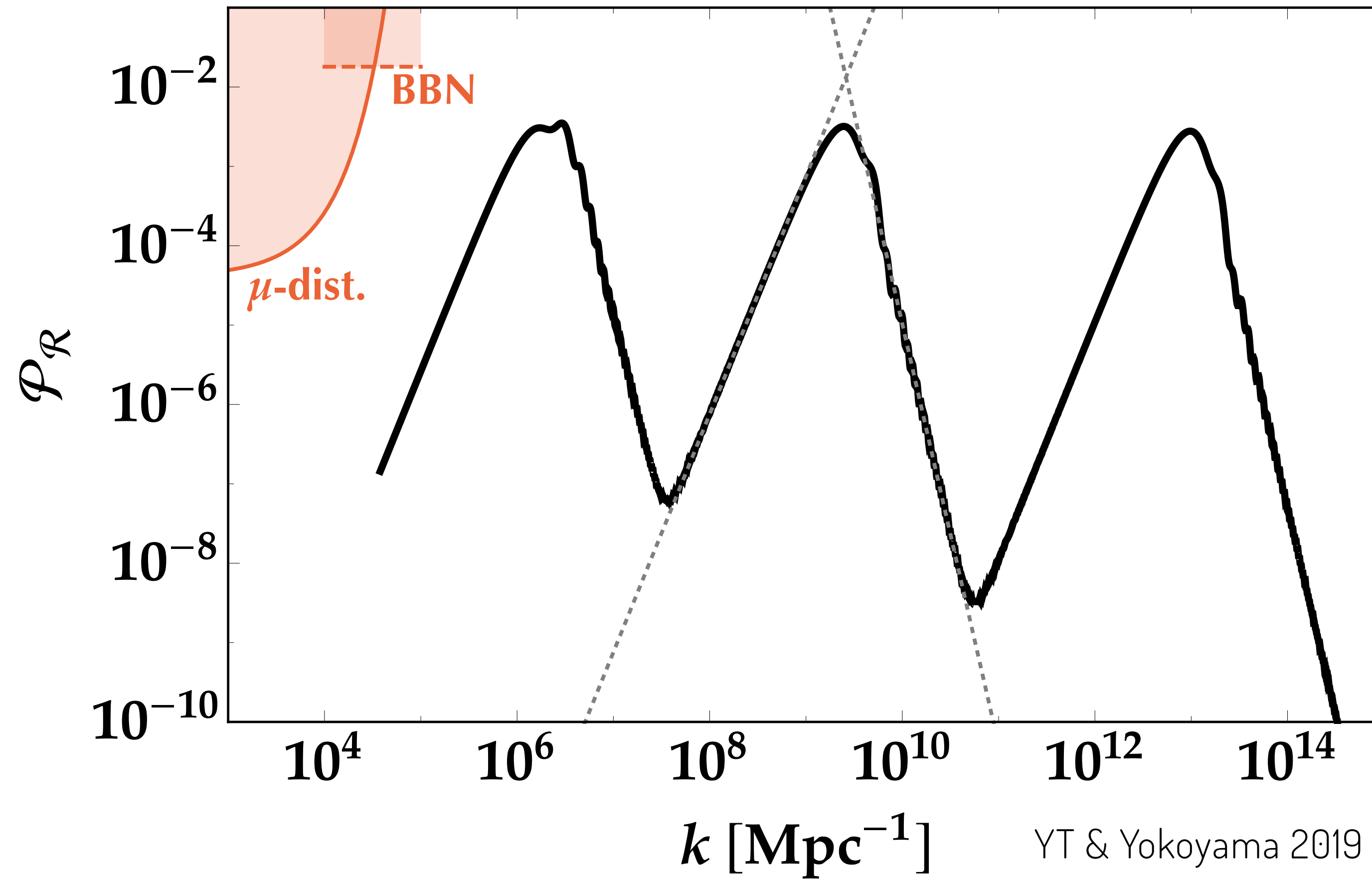






Nicholson et al. 2010  
 Bird et al. 2011  
 Bringmann et al. 2012

# 極端な例



- 4つの hilltop inflation

$$V_{\text{hill}} = \sum_{i=1}^4 V_{\text{hill},i} +$$

- 固定項

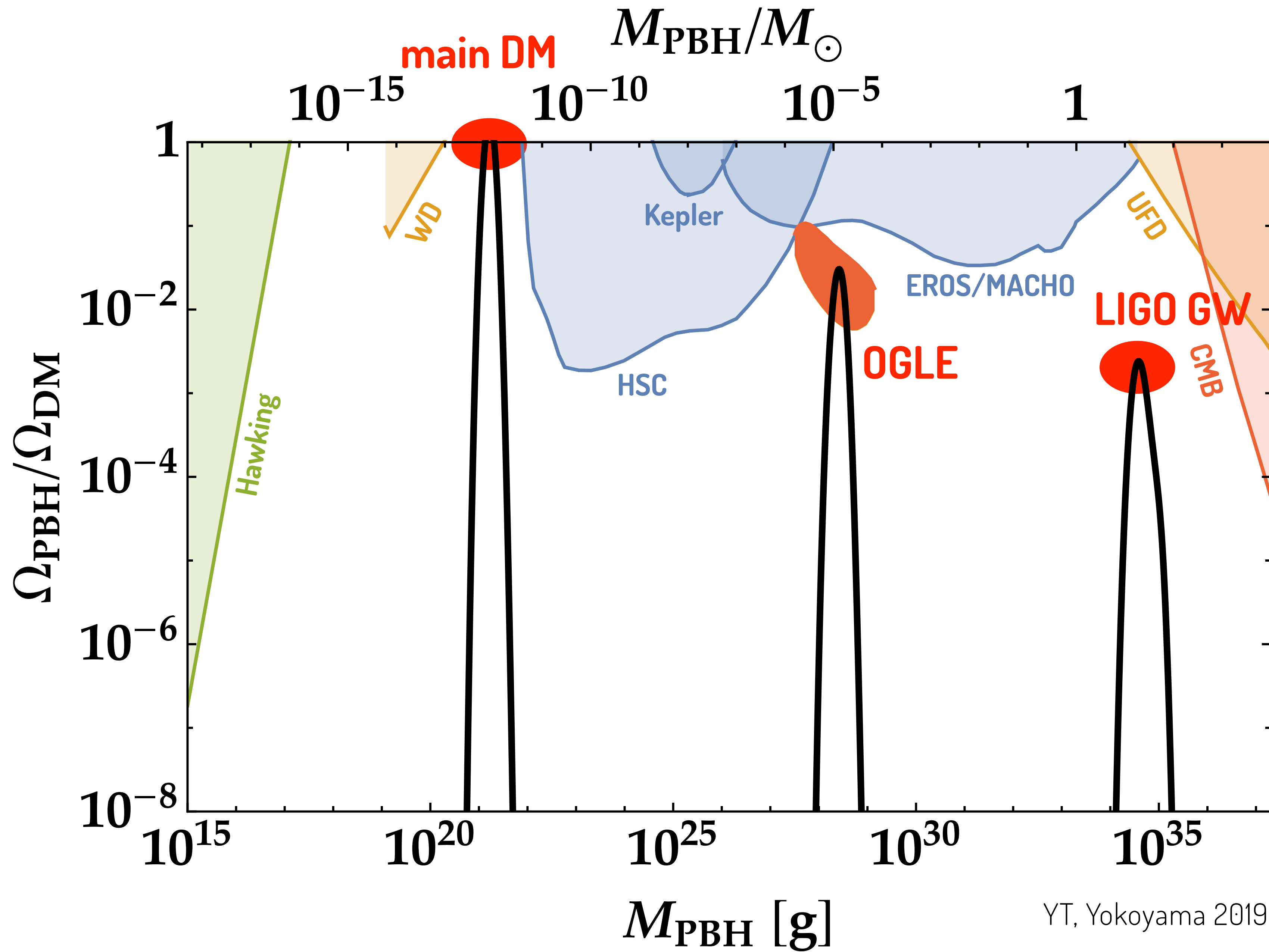
$$V_{\text{stab}} = \sum_{i \neq j} \frac{c_{ij}}{2} V_{\text{hill},i} \frac{\phi_j^2}{M_{\text{Pl}}^2}$$

- 段階- $i$  中:

$\phi_{i+1}$  をポテンシャル上に固定

-  $V_{\text{hill},i}$  の減衰後:

段階- $(i+1)$  が始まる



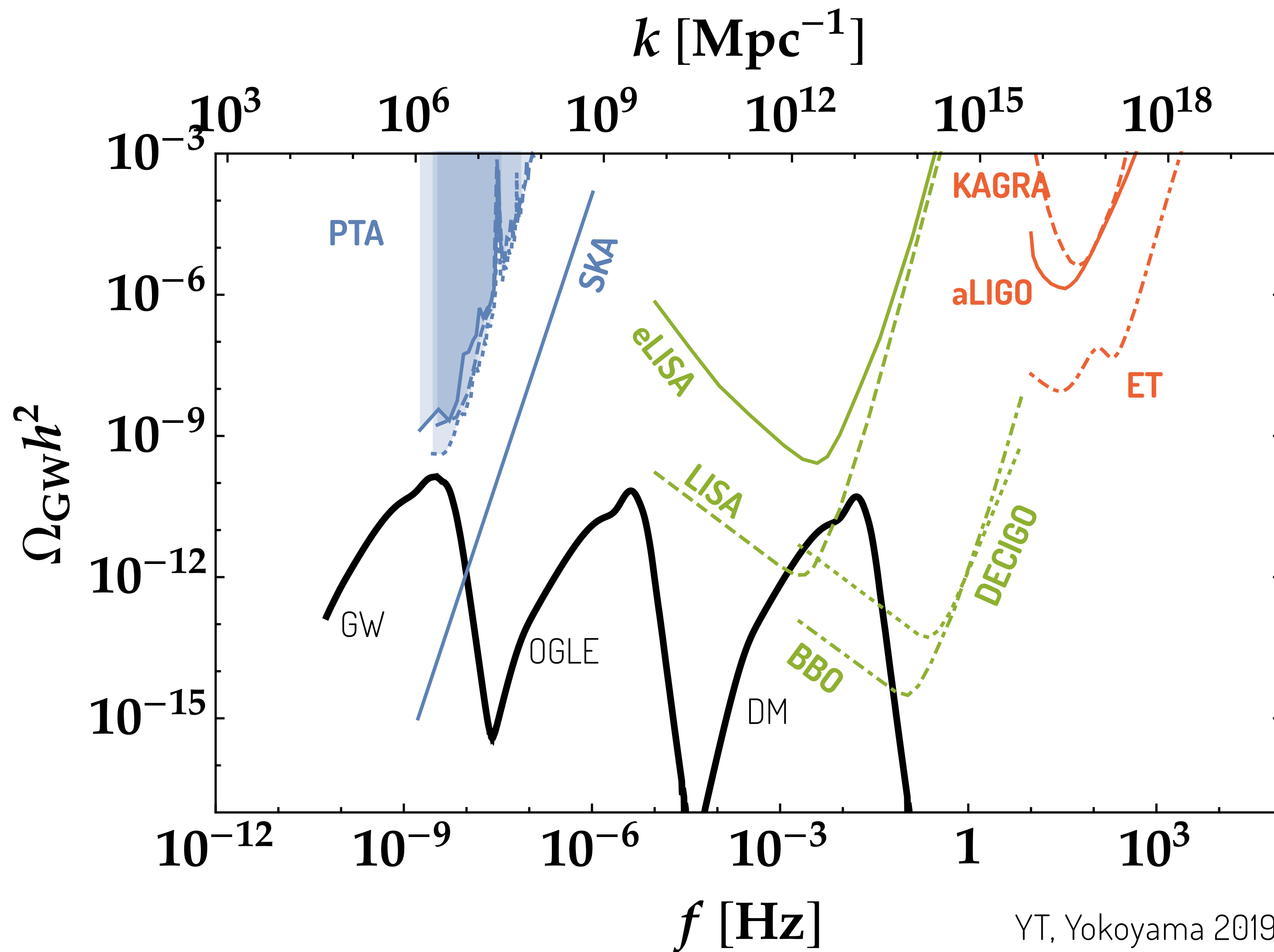
# クロスチェック

大きいスカラー（密度）ゆらぎ



摂動の2次でテンソルゆらぎ  
(背景重力波)

$$\Omega_{\text{GW}} h^2 \sim 10^{-9} \left( \frac{\mathcal{P}_{\mathcal{R}}}{10^{-2}} \right)^2$$



YT, Yokoyama 2019

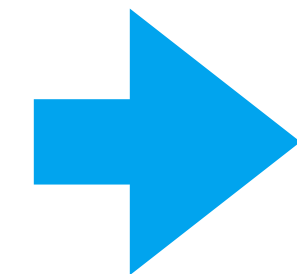
# 超弦理論への示唆？

dS swampland conjecture Ooguri & Vafa+ 2018

「UV 完備な EFT では dS 真空は安定にならない？」

$$\epsilon_V = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} \left( \frac{V''}{V} \right)^2 \gtrsim \mathcal{O}(1) \quad \text{or} \quad \eta_V = M_{\text{Pl}}^2 \frac{V'''}{V} \lesssim -\mathcal{O}(1)$$

各インフレーション相は長く続かない



多段階にして合わせて 60 e-folds

– CMB scale?

インフラトンがゆらぎを作るとすると

$$\text{Planck 2018} \quad -0.035 \times \frac{d \log \mathcal{P}_\zeta}{d \log k}(k_{\text{CMB}}) = n_s - 1 \simeq -6\epsilon_V + 2\eta_V$$

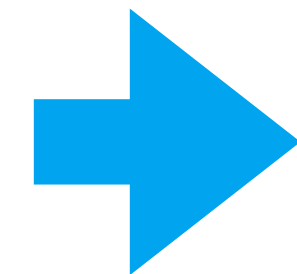
# 超弦理論への示唆？

dS swampland conjecture Ooguri & Vafa+ 2018

「UV 完備な EFT では dS 真空は安定にならない？」

$$\epsilon_V = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} \left( \frac{V''}{V} \right)^2 \gtrsim \mathcal{O}(1) \quad \text{or} \quad \eta_V = M_{\text{Pl}}^2 \frac{V'''}{V} \lesssim -\mathcal{O}(1)$$

各インフレーション相は長く続かない



多段階にして合わせて 60 e-folds

– CMB scale?

カーバトンなら Kogai, YT, Yokoyama in prep.

$$-0.035 \simeq \frac{d \log \mathcal{P}_\zeta}{d \log k}(k_{\text{CMB}}) = n_s - 1 \simeq -2\epsilon_V + \frac{2}{3} \frac{m_\sigma^2}{H^2}$$

Planck 2018

# 結論

- 観測的に興味深い PBH の質量範囲は階層的
- 多段階インフレーションなら階層的 PBH 質量スペクトルを実現できる
  - dS swampland conjecture は多段階インフレーションを支持？
  - インフラトンゆらぎでは CMB ゆらぎが厳しい
- 2次重力波でチェック可能