

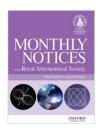
# 原始ブラックホール2021

須山 輝明

東京工業大学理学院

# 今年は原始ブラックホール50周年





Volume 152, Issue 1 April 1971

#### **Article Contents**

Summary

< Previous Next >

#### **Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass**



#### Stephen Hawking

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 152, Issue 1, April 1971, Pages 75–78, https://doi.org/10.1093/mnras/152.1.75

Published: 01 April 1971 Article history ▼











#### **Summary**

It is suggested that there may be a large number of gravitationally collapsed objects of mass  $10^{-5}$  g upwards which were formed as a result of fluctuations in the early Universe. They could carry an electric charge of up to  $\pm$  30 electron units. Such objects would produce distinctive tracks in bubble chambers and could form atoms with orbiting electrons or protons. A mass of  $10^{17}$  g of such objects could have accumulated at the centre of a star like the Sun. If such a star later became a neutron star there would be a steady accretion of matter by a central collapsed object which could eventually swallow up the whole star in about ten million years.



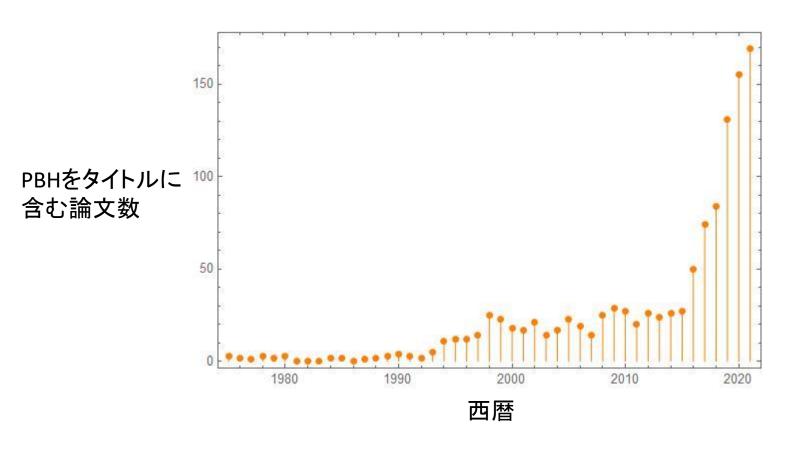
R

#### Relat

Web of

Google

# 原始BH(PBH)は市民権を得つつある

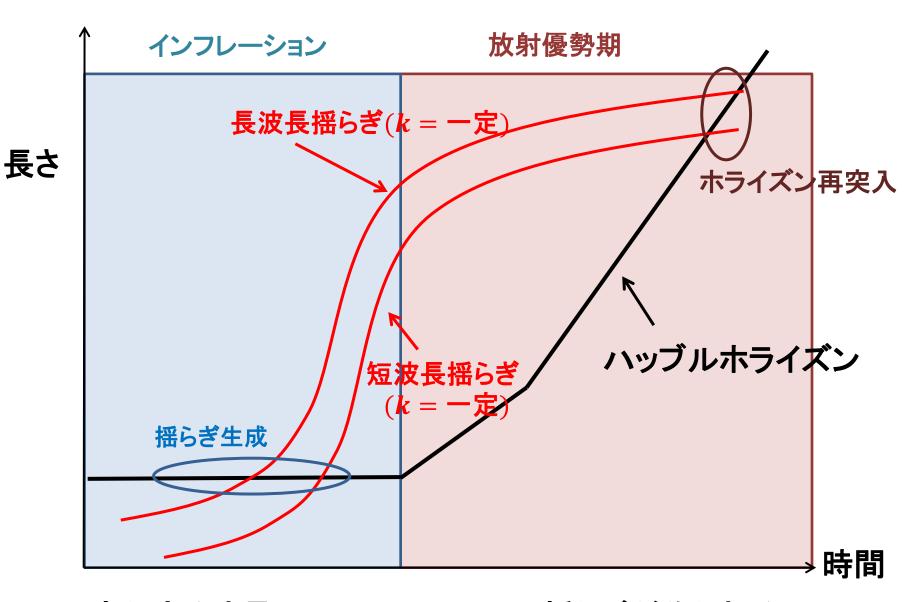


# なぜか?

• 連星BHからの重力波観測

• ダークマターの可能性

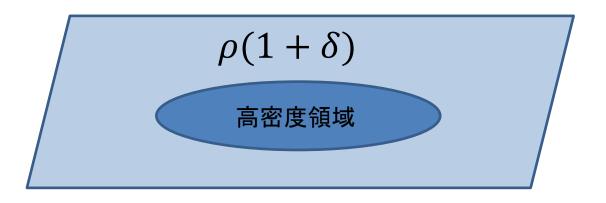
# PBHの基本的な性質



あらゆる波長 (1m ≤ λ ≤ Gpc)の揺らぎが作られる 短い波長の揺らぎから徐々にホライズン再突入

# PBH形成

#### ホライズン再突入直後(放射優勢期)



$$\delta > \delta_{\rm th}$$
ならば、BHが直接形成 ( $\delta_{\rm th} \simeq 0.8$ )

## PBHの質量

揺らぎの共動スケール(k)で決まる

ホライズン領域がそのまま重力崩壊するので、BH質量ニホライズン質量

$$M_{\mathrm{PBH}} \sim \frac{1}{GH} \sim 10 M_{\odot} \left(\frac{t}{0.1 \mathrm{ms}}\right) \sim 10 M_{\odot} \left(\frac{k}{1 \mathrm{pc}^{-1}}\right)^{-2}$$

PBH質量は恒星質量よりも(ずっと)小さくなり得る

興味ある質量域に対応する揺らぎの波長は、宇宙論的スケールよりもずっと短い(PBHはあってもよい)

## PBHの存在量

 $\delta_R$ :共動長さRでならした密度揺らぎ $(M_{BH} \propto R^2)$ 

$$\langle \delta_R^2 \rangle = \sigma^2(R) = \frac{16}{81} \int_0^\infty W^2(kR)(kR) \frac{4\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)d(\ln k)}{}$$
原始揺らぎのパワースペクトル 
$$\beta(M_{\mathrm{BH}}) \equiv \frac{\rho_{\mathrm{PBH}}}{\rho_{\mathrm{tot}}} = \int_{\delta_{\mathrm{th}}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(R)} \exp\left(-\frac{\delta_R^2}{2\sigma^2(R)}\right) d\delta_R \quad \mathsf{PBH}$$
の割合@PBH形成時

$$f_{PBH} \equiv \frac{\Omega_{PBH}}{\Omega_{DM}} \simeq 6 \times 10^7 \left(\frac{M_{BH}}{1M_{\odot}}\right)^{-\frac{1}{2}} \beta$$

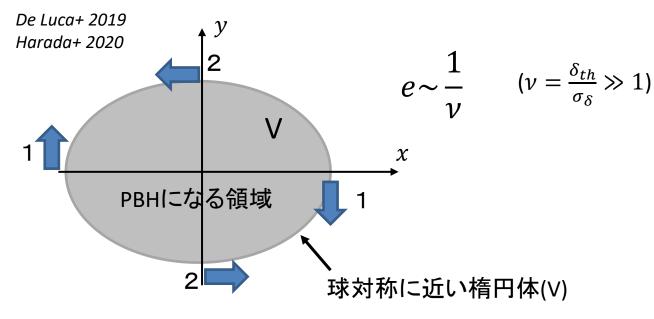
放射優勢期にPBHの濃度がどんどん大きくなる効果

#### f<sub>PBH</sub> ⇔ 原始パワースペクトル

 $\beta \ll 1$ : PBH形成は非常にレア(高 $\sigma$ ピークからのみ)

i.e. 宇宙初期ではPBHの平均間隔>>ハッブルホライゾン

#### PBH角運動量



$$J_i = \epsilon_{ijk} \bar{\rho} v_{,k\ell} \int_V x_j x_\ell = \epsilon_{ijk} \bar{\rho} v_{,k\ell} I_{j\ell}$$

- 完全球対称だと $\vec{J}=0$
- 速度シアの軸と慣性主軸が揃うと $\vec{J}=0$  揺らぎのパワースペクトルの幅が狭いと $v_{,ij} \propto \delta_{,ij}$ となるため、二つの軸が揃う

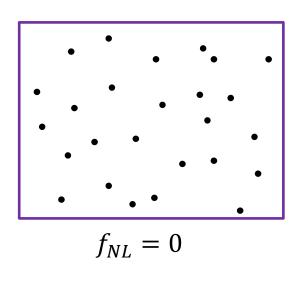
無次元Kerrパラメータ 
$$a = \frac{J}{M^2} \sim 10^{-3} - 10^{-2}$$

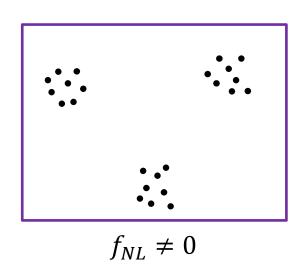
#### PBHはほぼ無回転

※放射優勢宇宙を仮定、ガウス揺らぎを仮定10

# PBH空間分布

ガウス揺らぎならば、ポアソン分布 局所型非ガウス揺らぎならば、クラスター分布





PBH2点相関関数は、原始揺らぎのtrispectrumに起因

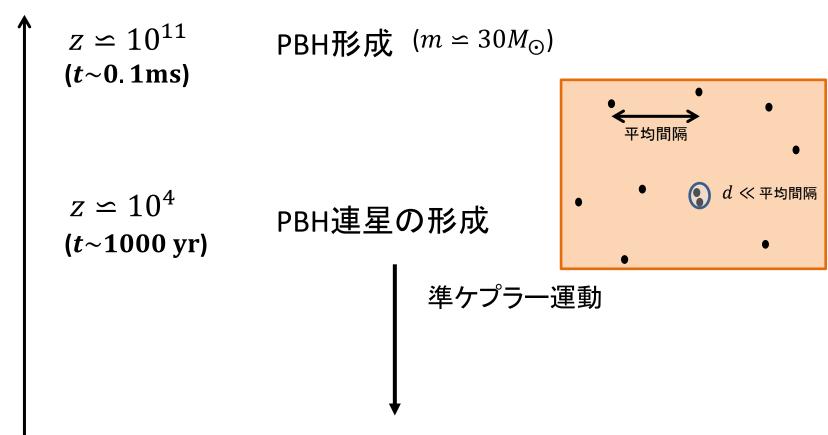
TS&Yokoyama 2019

# 1. PBHと重力波イベント

# PBHの連星形成

Nakamura+ 1998

redshift



$$z \simeq 0$$

原始BH連星の合体(LIGO)

※合体時刻は分布を持つ

#### PBH合体率

$$\frac{\mathrm{d}R_{\rm np}}{\mathrm{d}m_1\mathrm{d}m_2} \approx \frac{1.6\times 10^6}{\mathrm{Gpc^3yr}}\,f_{\rm PBH}^{\frac{53}{377}} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-\frac{34}{37}} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-\frac{32}{37}} \eta^{-\frac{34}{37}} S[\psi,f_{\rm PBH},M]\psi(m_1)\psi(m_2)$$
Hutsi+ 2020

$$M = m_1 + m_2, \qquad \eta = m_1 m_2 / M^2$$

$$f_{PBH} = \frac{\Omega_{PBH}}{\Omega_{DM}}$$
  $t_0$ : 宇宙年齢

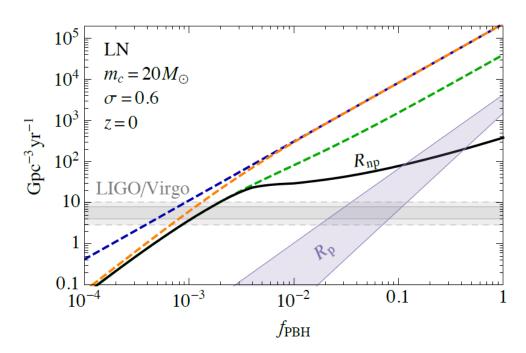
S: suppression factor (PBH連星形成後の他のPBHによる破壊効果)

 $\psi(m)$ : PBH質量関数

#### 合体率の特徴

- $f_{PBH} \ll 1$ ではSのM依存性はなくなる。この場合、合体率は質量関数とは無関係に $M^{-\frac{32}{37}}$ に比例する。 Kocsis+2017
- 合体率は質量関数とは無関係にt<sup>-34</sup>/<sub>37</sub>に比例する。

### PBH合体率



Hutsi+ 2020

Log normalタイプの質量関数を仮定

$$\psi(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \ln^2\left(\frac{m}{m_c}\right)\right)$$
 $m_c$ ,  $\sigma$ が自由パラメータ

 $f_{PBH} \sim 10^{-3}$ であれば、PBH連星合体でLIGOの合体率を説明可能

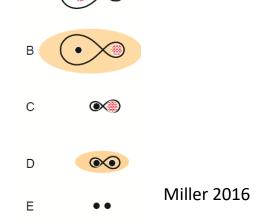
重力波観測だけから、恒星質量PBHがダークマターかどうかを 検証できるようになってきた

### 恒星質量PBHはあるのか?

#### BH連星合体のシナリオは多数ある

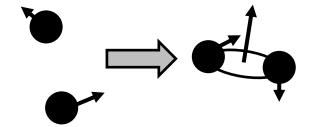
• Isolated field binary scenario:

Common envelope (CE), Stable mass transfer (SMT), chemically homogeneous (CH)



Dynamical scenario:Globular clusters (GC),

Nuclear star clusters (NSC) etc.

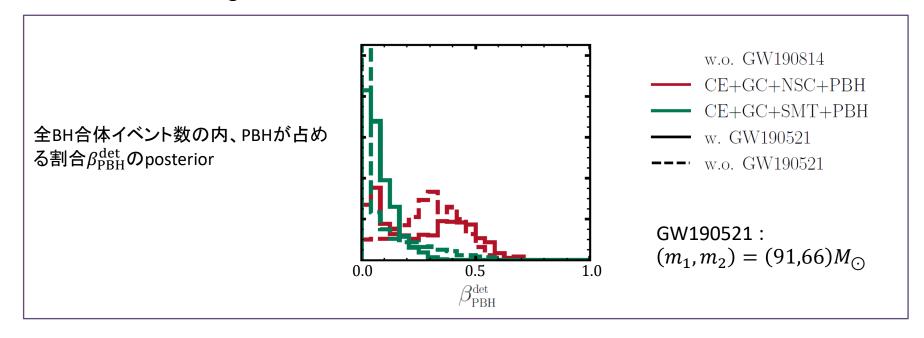


個々のシナリオごとに異なる合体率(質量依存性、時間依存性)を予言する 多数の合体イベントの統計から各シナリオの検証が可能になりつつある

他のシナリオも含めてPBHイベントがあるかどうかを判定しなければならない

#### O3aデータの解析 Franciolini+ 2021

PBH質量関数は、log normalタイプを仮定



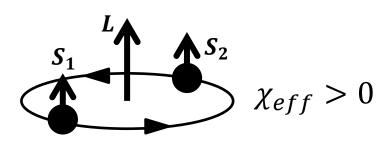
全ての合体イベントをPBHで説明するのは好まれない (基本的には重いBHイベントにPBHが寄与する)

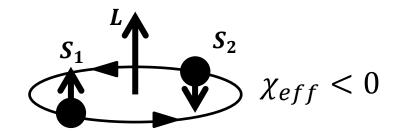
PBHが好まれるかどうかは他のどのシナリオ(特にSMT)を 含めるかに依存する

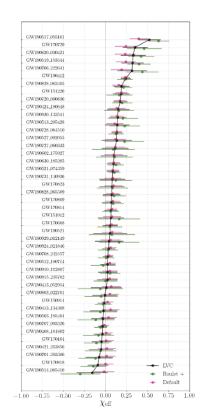
(ただし個々のシナリオの理論不定性はかなり大きいことに注意が必要)

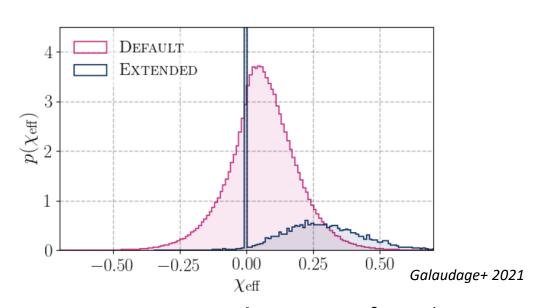
# BHスピン分布(O3)

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{c}{GM} \left( \frac{S_1}{m_1} + \frac{S_2}{m_2} \right) \cdot \frac{L}{|\mathbf{L}|} \qquad -1 \le \chi_{eff} \le 1$$









70~90%のBH連星はスピンゼロ?

#### 恒星質量PBHはあるのか?

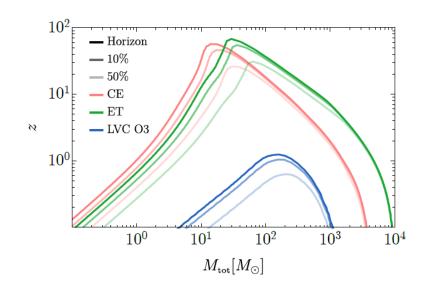
# Smoking gunはvery high-z eventを見るのみ

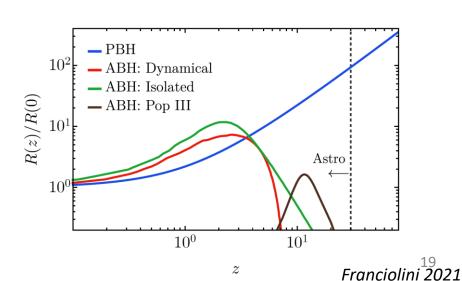
Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes 8

Takashi Nakamura, Masaki Ando, Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano ☒, Kazunari Eda, Shuichi Sato, Mitsuru Musha, Tomotada Akutsu, Takahiro Tanaka, Naoki Seto ... Show more

*Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2016, Issue 9, September 2016, 093E01, https://doi.org/10.1093/ptep/ptw127

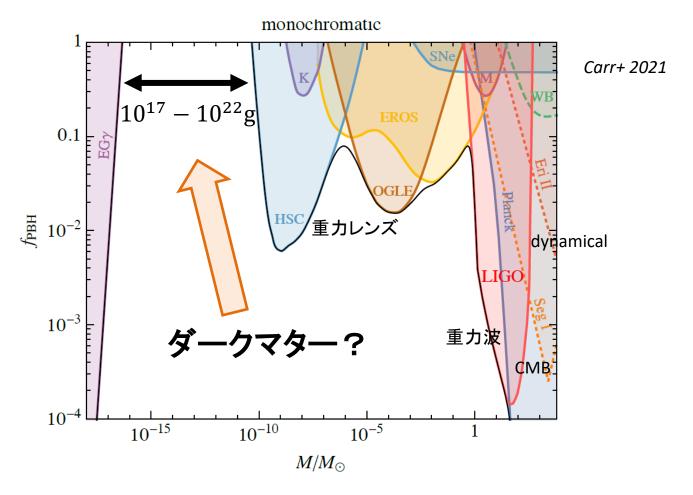
Published: 17 September 2016 Article history ▼





# 2. PBHとダークマター

### PBH存在量の制限

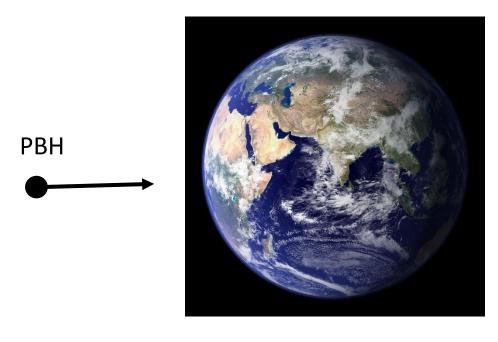


ダークマターはミニBH $(10^{17} - 10^{22}g)$ かもしれない

どうやって検証するか?

#### PBH通過による地震

Khriplovich+ 2008

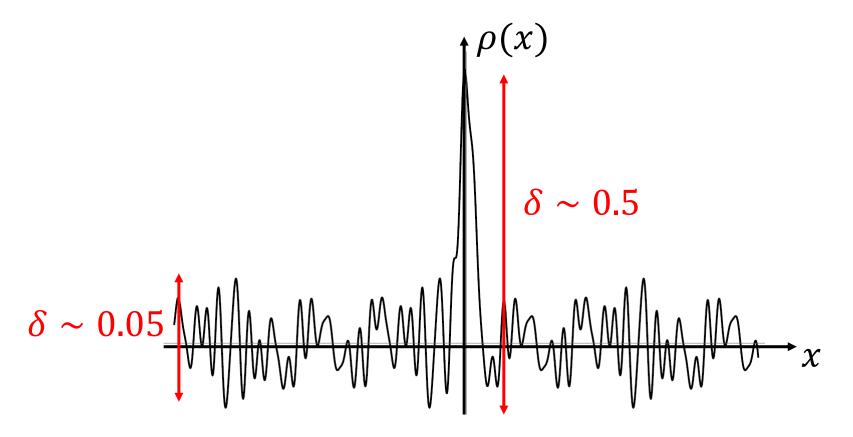


エネルギー~10<sup>24</sup>J ※東日本大震災~10<sup>18</sup>J

Collision rate  $\sim 10^{-14}/\text{yr}$ 

## 2次的背景重力波によるPBHの検証

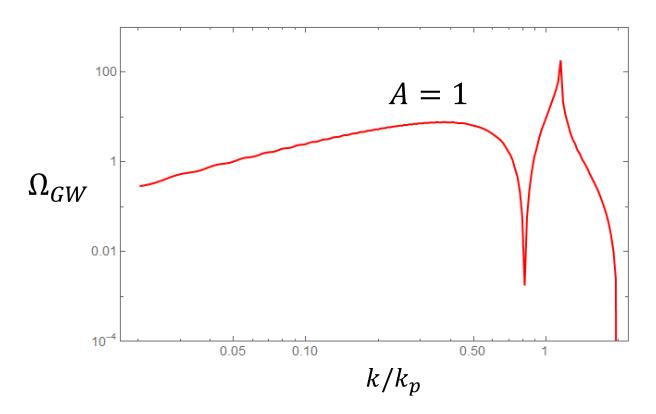
Saito, Yokoyama 2008



PBHは、高σピークのみから生じる

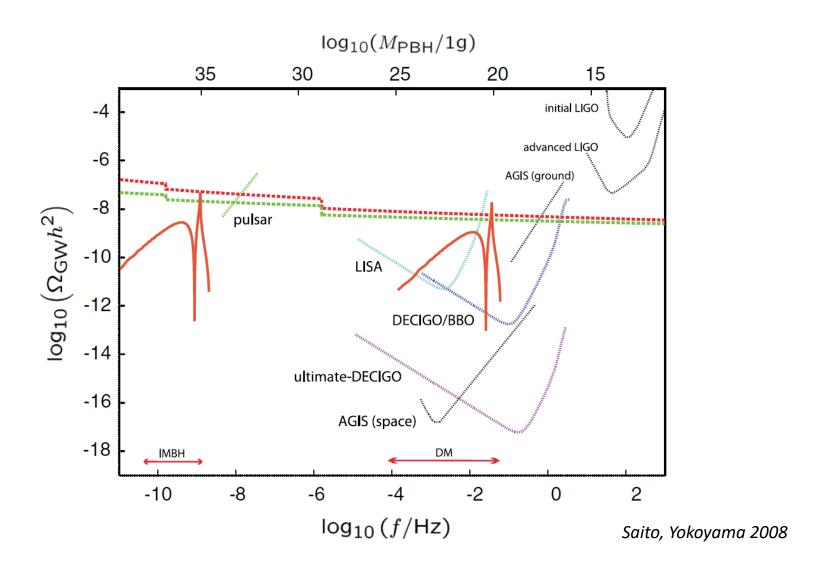
それでも他の場所の原始揺らぎもそこそこ大きい振幅を持つ 2次摂動の効果で背景重力波が生成される

$$\mathcal{P}_{\Psi}(k) = \mathcal{A} \ \delta(\ln(k/k_p))$$

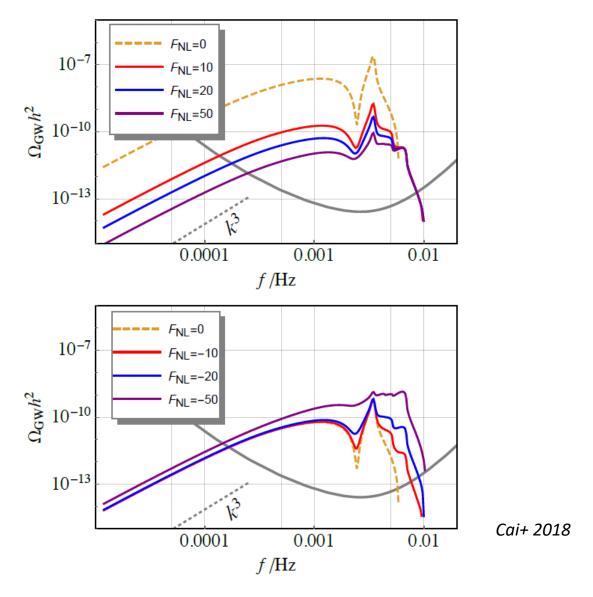


### $k \sim k_p$ 付近の重力波が(ホライズン再突入時に)作られる

$$f_{\text{GW}} = 0.03 \text{ Hz} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{10^{20} \text{ g}}\right)^{-1/2} \left(\frac{g_{*p}}{106.75}\right)^{-1/12}$$



# LISA/DECIGOでPBHダークマターが検証できる

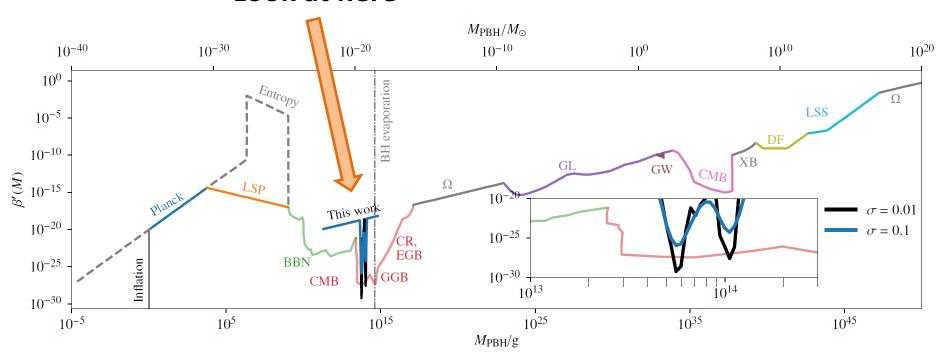


非ガウス的な原始揺らぎでもPBHダークマターを 検証できる

## LIGOデータ(O2)による軽いPBH(~ 10<sup>14</sup>g)の検証

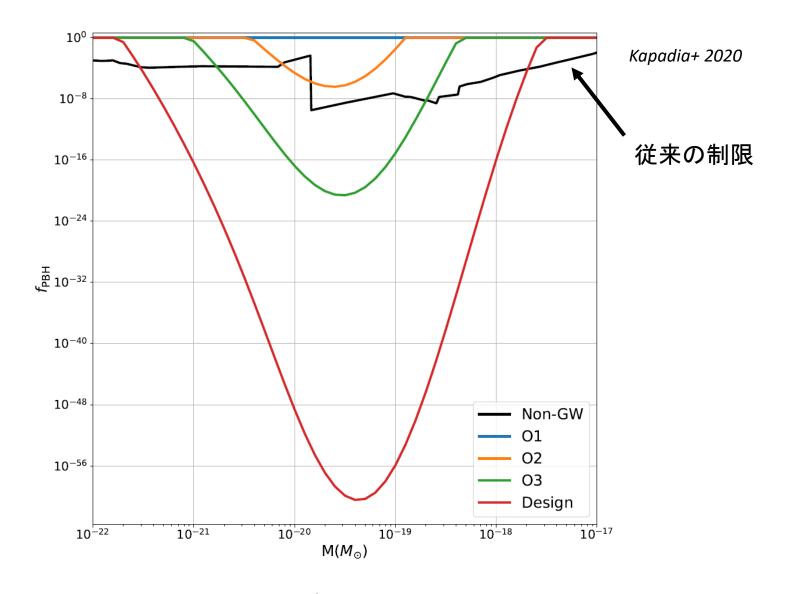
Kapadia+ 2020

#### Look at here



Hawking放射に基づかない制限

宇宙初期に軽いPBHが存在した可能性を強く制限



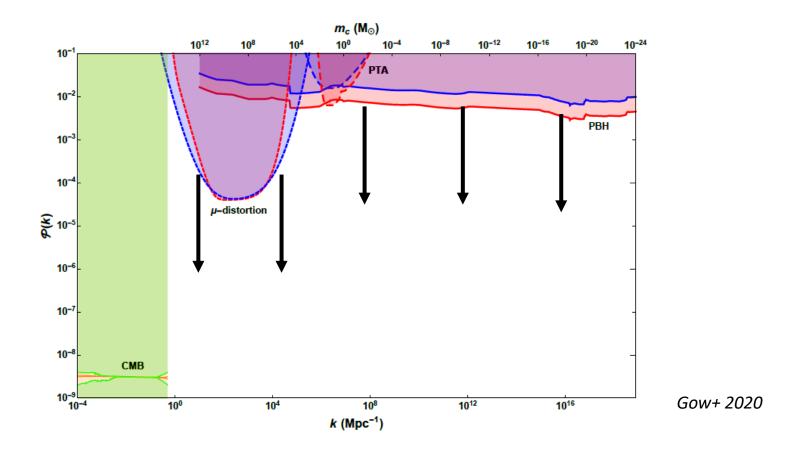
将来、背景重力波のシグナルの非検出によって、 $10^{-21}M_{\odot}\sim 10^{-18}M_{\odot}$ のPBHをほぼ完全に棄却できる

まとめ

PBHが大きな盛り上がりを見せている

重力波観測からPBHを検証できるようになりつつある

### 原始パワースペクトルの観測的制限

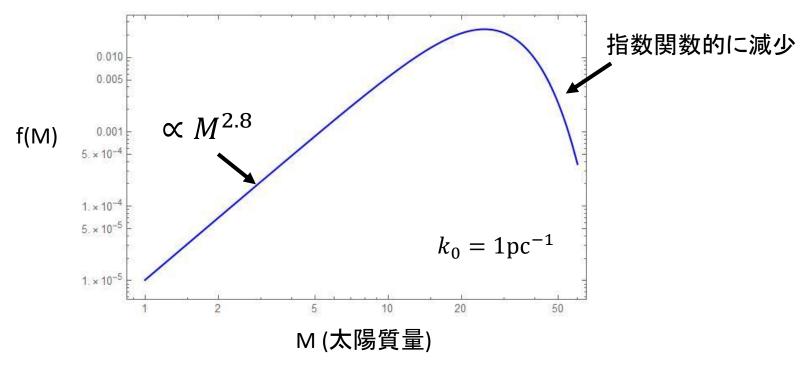


小スケール $(k \ge Mpc^{-1})$ では緩い上限があるのみ

※PBH存在量の観測制限から

#### PBH質量は、密度揺らぎの振幅δに依存する

$$M = M_H (\delta - \delta_{th})^{\gamma} \quad (\gamma = 0.36)$$



32

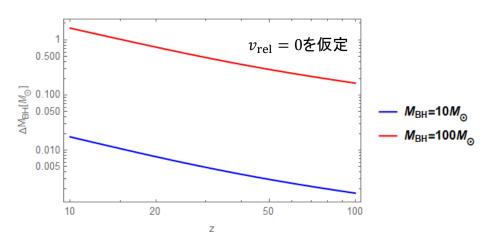
冪2.8よりも急速に低質量側で質量関数が減少していれば、 PBHは棄却される

## 降着による質量成長

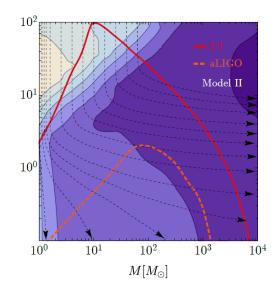
Bondi降着率 
$$\dot{M}_{\mathrm{B}}=4\pi\lambda m_{H}n_{\mathrm{gas}}v_{\mathrm{eff}}r_{\mathrm{B}}^{2}$$

$$v_{
m eff} = \sqrt{v_{
m rel}^2 + c_s^2}$$
  $r_{
m B} \equiv rac{M}{v_{
m eff}^2}$ 

$$r_{\mathrm{B}} \equiv rac{M}{v_{\mathrm{off}}^2}$$



PBHへのバリオンガスの降着による質量成長は高々1%程度



※PBH周りにダークマターが集積することで降着率が大幅に 増大すれば、質量成長は無視できない

Francilioni 2021

# ミニBH ( $m=10^{22}$ g)の性質

小惑星程度の質量



ジューノ

サイズはDNA程度



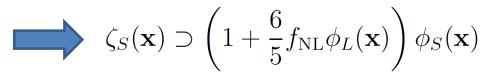
個数密度は太陽系近傍で~(100AU)<sup>-3</sup>

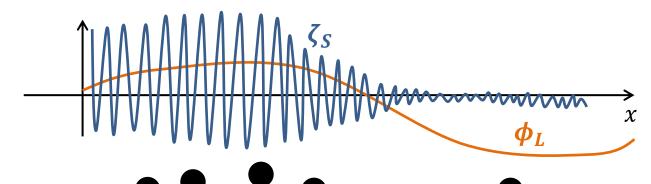
PBH形成はホライズンスケールで起こるので、超ホライズンモード自体は PBH形成には関与しない

ガウス揺らぎならば、PBHの空間分布はポアソン分布に従う

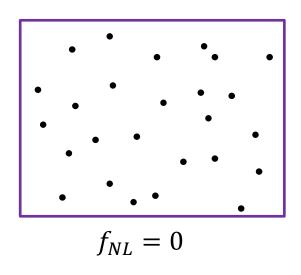
局所型非ガウス揺らぎならば、クラスター分布する

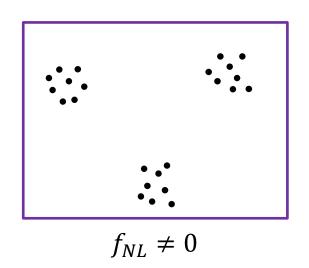
$$\zeta(\mathbf{x}) = \zeta_g(\mathbf{x}) + \frac{3}{5} f_{\rm NL} \zeta_g^2(\mathbf{x})$$
  $\zeta_g$ : ガウシアン 
$$\zeta_g = \phi_L + \phi_S$$
  $\phi_L$ : 長波長モード  $\phi_S$ : 短波長モード(PBHスケール)





## PBH空間分布





#### PBH2点相関関数

PBHの各ハッブルパッチでの存在量は、その場所での $\sigma^2(R) = \langle \delta_R^2(x) \rangle$ で決まる

$$\xi_{PBH}(r) = \frac{\langle \delta^2(x)\delta^2(y)\rangle}{\langle \delta^2(x)\rangle^2} - 1 = \nu^4 \tau_{NL} \xi_R(r) \qquad (\tau_{NL} = \frac{36}{25} f_{NL}^2)$$
TS&Yokoyama 2019

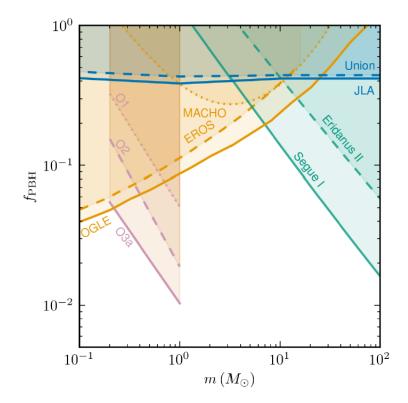
原始揺らぎのtrispectrumがあれば、PBHはクラスター分布する。

### Sub-solar PBHの探索(another direction)

恒星の重力崩壊からsub-solar質量のBHは形成しない

#### Sub-solar質量のBHが見つかれば、それはPBHのsmoking gun

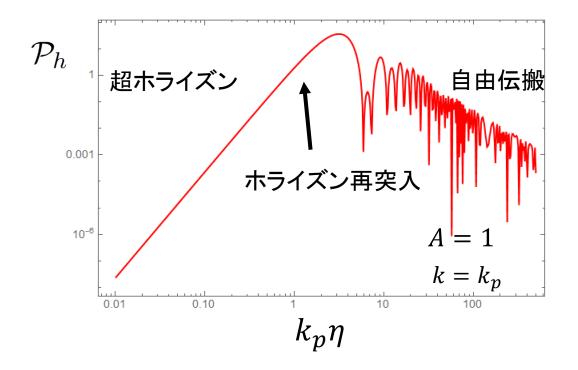
LV collaborationが探索した結果、そのようなイベントは見つからなかった



LVC, 2109.12197

例: monochromatic power spectrum ( $k=k_p$ )

$$\mathcal{P}_{\Psi}(k) = \mathcal{A} \ \delta(\ln(k/k_p))$$



重力波の生成は主にホライズン再突入あたりで起こる