

Tokyo Woman's Christian University, 1<sup>st</sup>, July, 2022

# インフレーション宇宙における 原始ブラックホールと2次的重力波 の生成とその観測可能性

Kaz Kohri  
郡 和範



KEK

理論センター  
THEORY CENTER

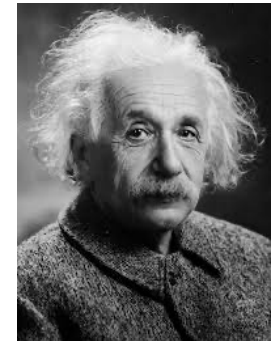
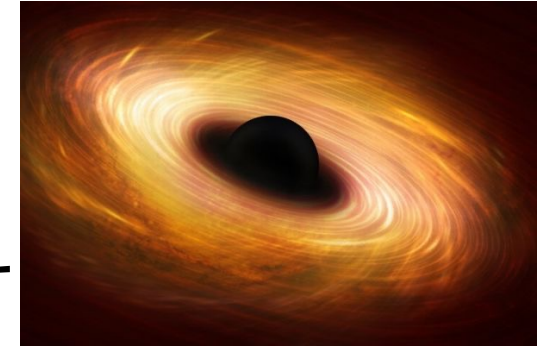


学部4年生のために (30分)

インフレーションと  
原始ブラックホール  
とは？

# ブラックホールとは

- 黒い穴ではなく、高密度の天体です
- 球に近い形をしているとされています
- 高密度であるため、周りの時空を曲げます (アインシュタインの一般相対性理論で計算)
- 光すら吸い込むほど、なんでも吸い込みます
- 質量の軽い原始ブラックホール( $10^{15}$ g以下)は蒸発します (ホーキング放射)

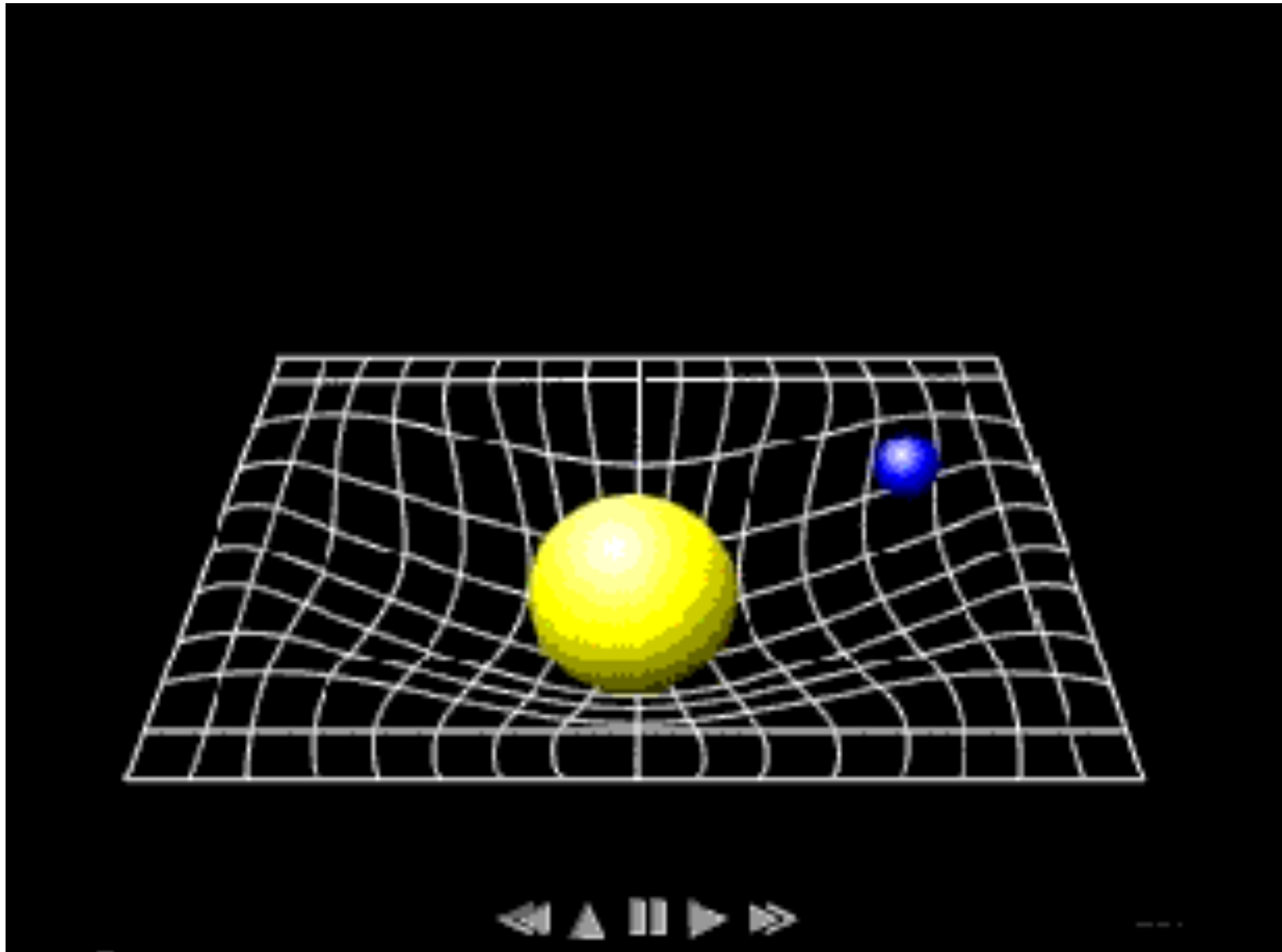


# はじめに

- 原始ブラックホールは、宇宙年齢約1秒以下の、宇宙の始まりに作られました。
- 恒星の死によりつくられる、従来のブラックホールとは起源が異なります。
- ダークマターの候補として原始ブラックホールは有力です。
- 近い将来、原始ブラックホールがダークマターであると暴かれる日がくると信じて、幅広い研究を進める必要があります。

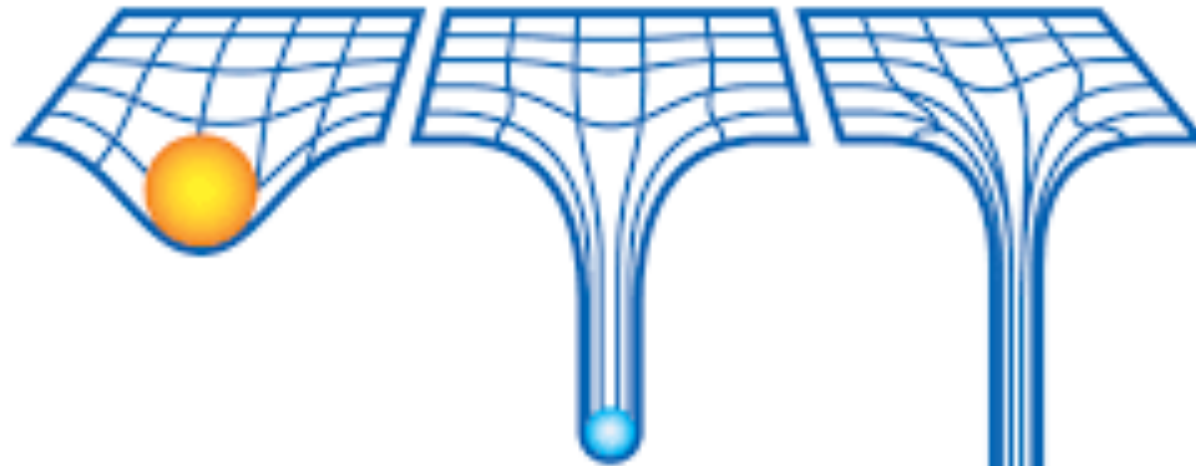
ブラックホールとは何か？

# 物質の周りの時空の曲がり方が 重力を生む



# 重い物質の周りの時空の曲がり

太陽    中性子星    ブラックホール(BH)



ニュートン重力

一般相対性理論

事象の地平線  
(イベントホライズン)

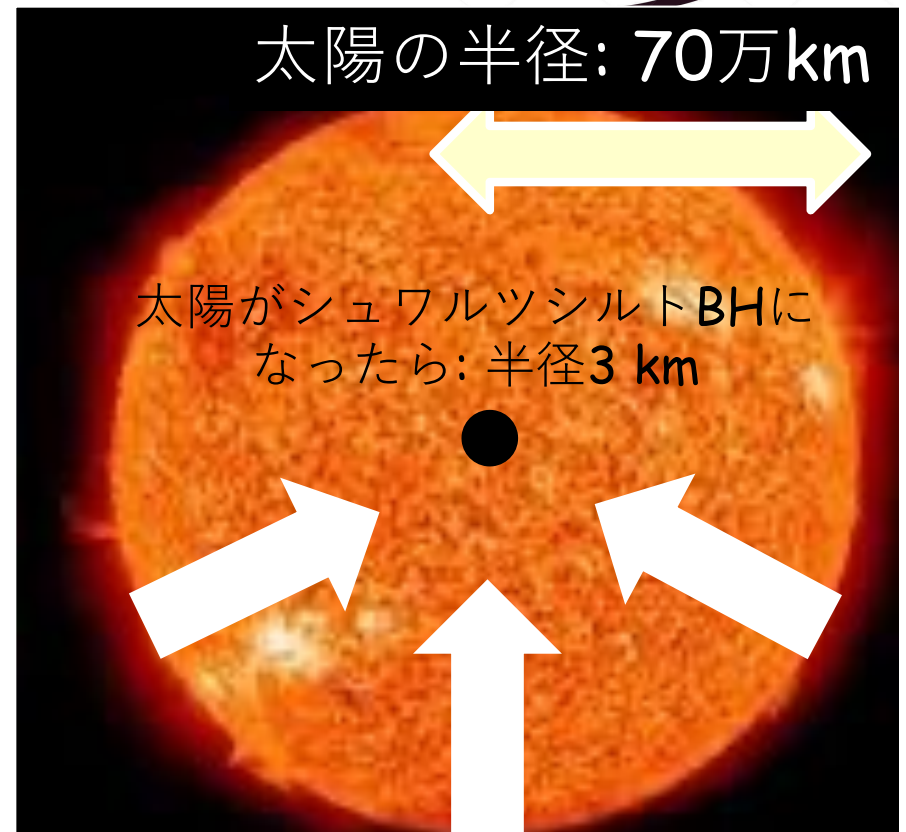
特異点 (シンギュラリティー)





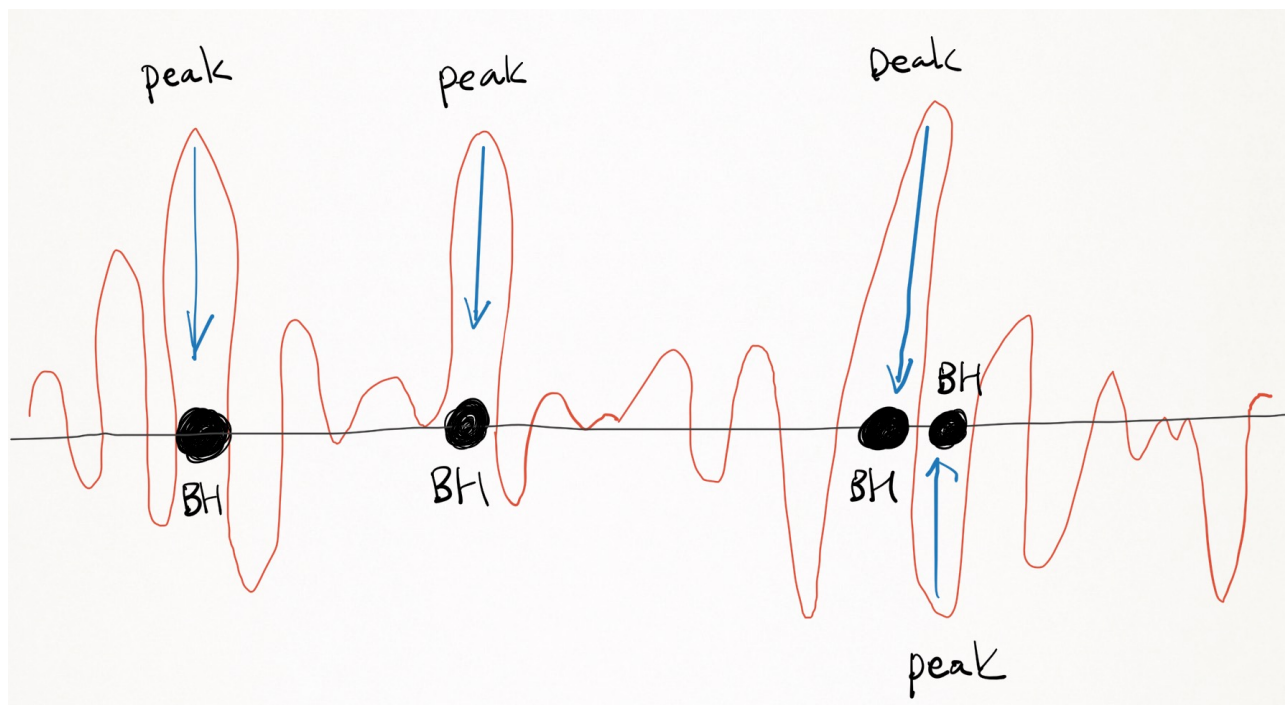
# ブラックホールは天体起源？

- 太陽より10倍以上重い星が超新星爆発
- 残ったものがブラックホール
- 近くのもの光でも吸い込む
- アインシュタイン方程式の答えの一つ



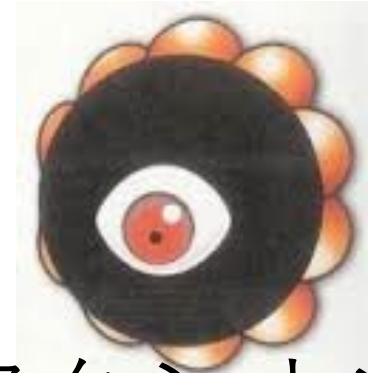
# 原始ブラックホール (インフレーション理論と関係)

- 宇宙初期に密度ゆらぎが存在 (インフレーション起源、宇宙年齢 $10^{-38}$ 秒以降に起こった)
- 密度ゆらぎの特別大きいところが潰れてブラックホールになる (宇宙年齢0.1秒以内)。
- 1グラム程度のミニブラックホールも作られる可能性



# DARK MATTER

- 見ることができない
- 正体もわからない



アクシオン



超対称性粒子  
(ニュートラリーノ x)



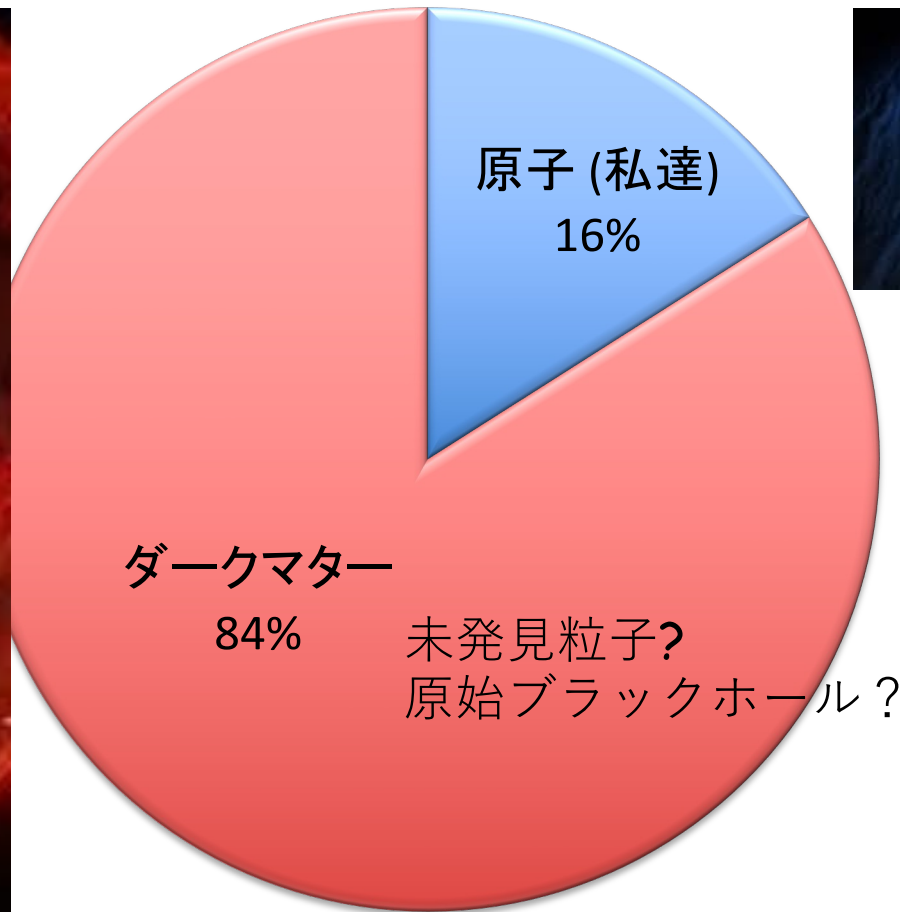
SCIENTISTS HOPE TO PROVE DARK MATTER SOON THE



原始ブラックホール

# 宇宙の物質のエネルギー

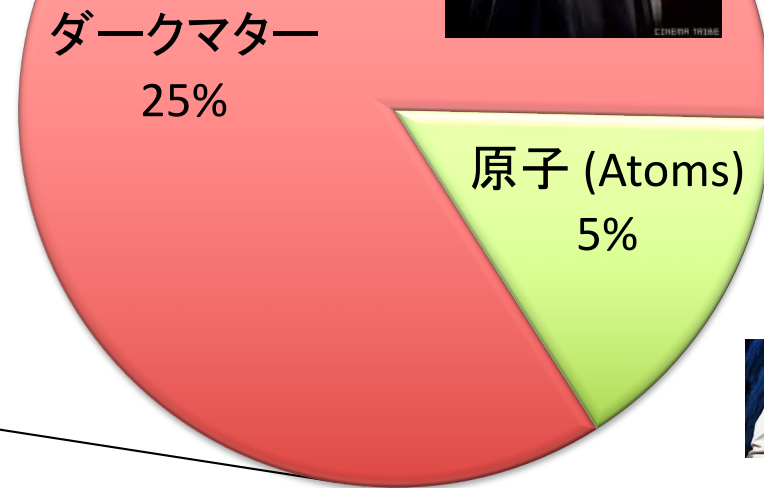
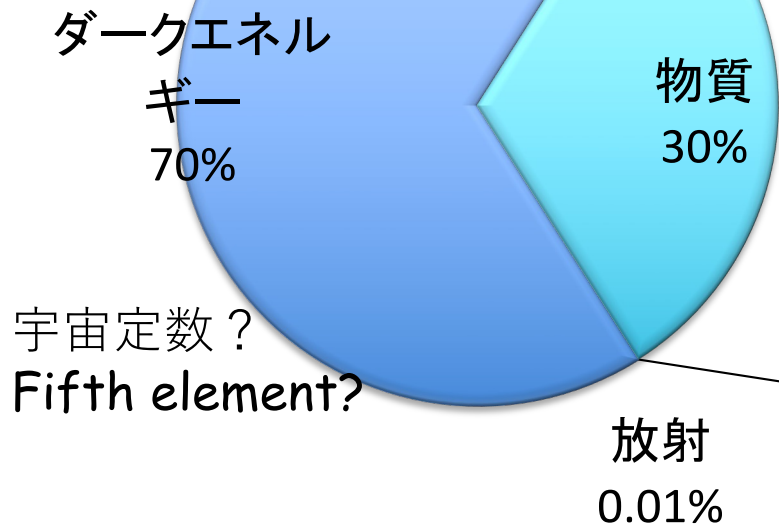
見える物質の5倍ある!



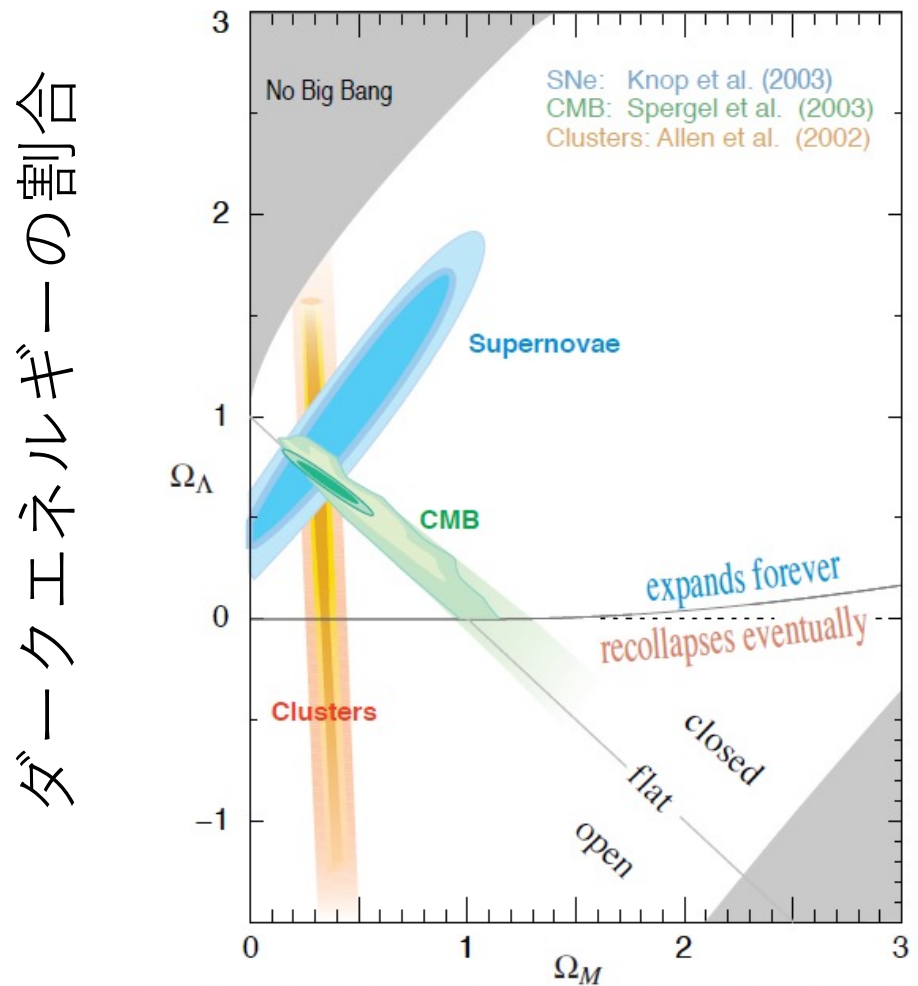
原子はバリオンとも呼ばれる

Planck Satellite experiments 2015

# 私達はマイノリティー



# ダークエネルギーと物質の割合 (1を100%とする)



ダークエネルギーの割合

物質(ダークマター+原子)の割合

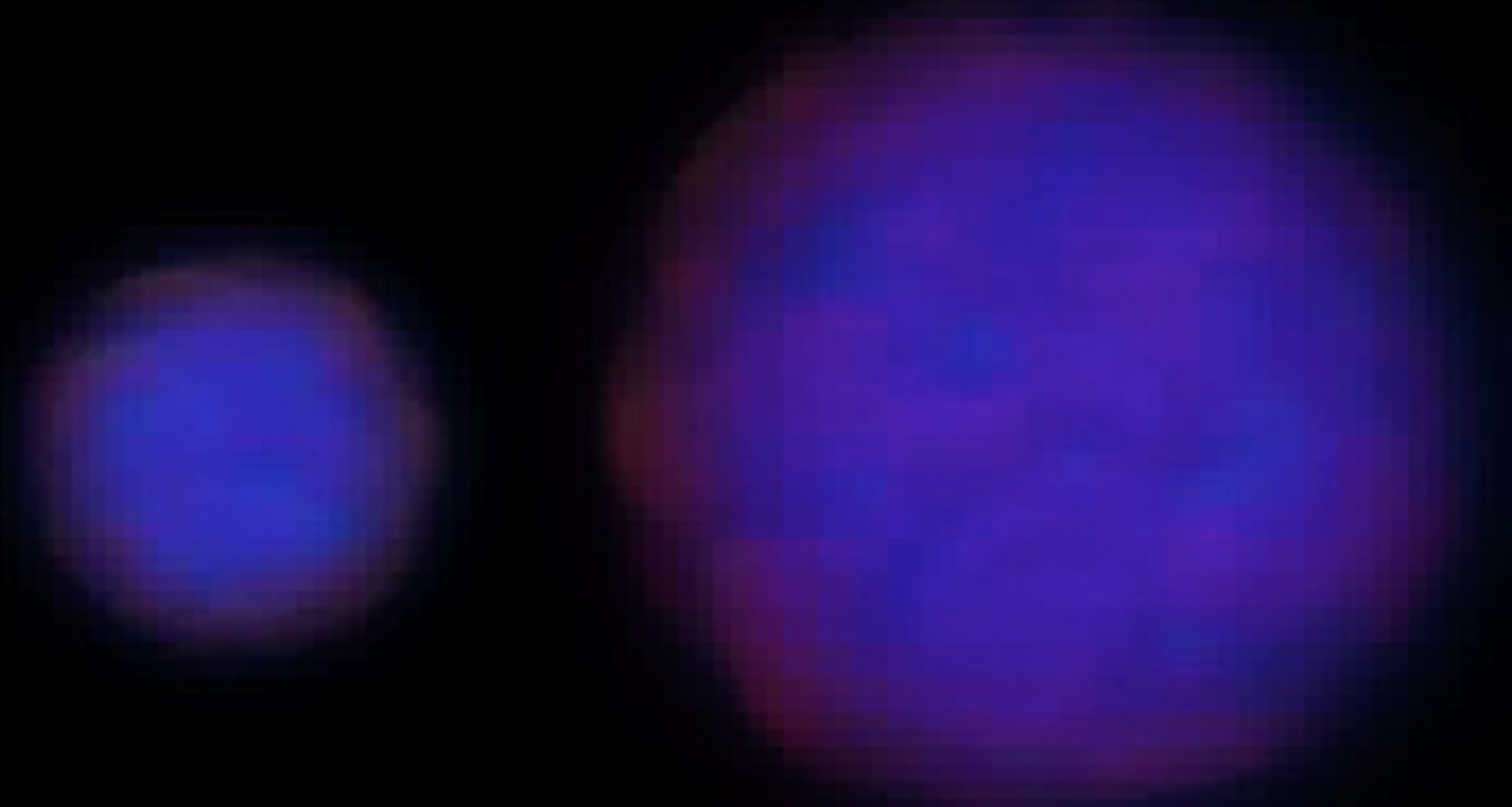
Riess et al (98), Lahav-Liddle PDG (09)

# ダークマターの性質

- 完全に見えない
- 回転する銀河をバラバラにしない
- 原子の5倍多い
- 宇宙膨張の膨張のスピードを遅らせている

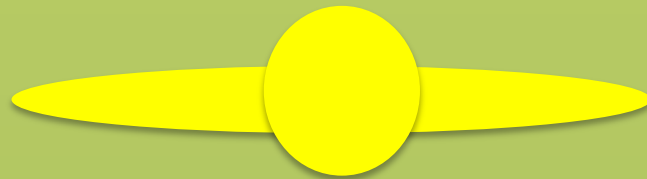


# 弾丸銀河団の衝突



# ダークマターのゆらぎが 銀河をつくるシナリオ

宇宙初期にダークマターのゆらぎが大きいところ  
がつぶれて銀河のハローが作られる



そのダークマターのハローに原子(バリオン)が落ち込んで銀河がつくられる

$$\frac{\rho_{DM}}{\rho_{baryon}} \sim 5$$

# ダークマターの候補は？

- 原始ブラックホール (PBH)

- ...

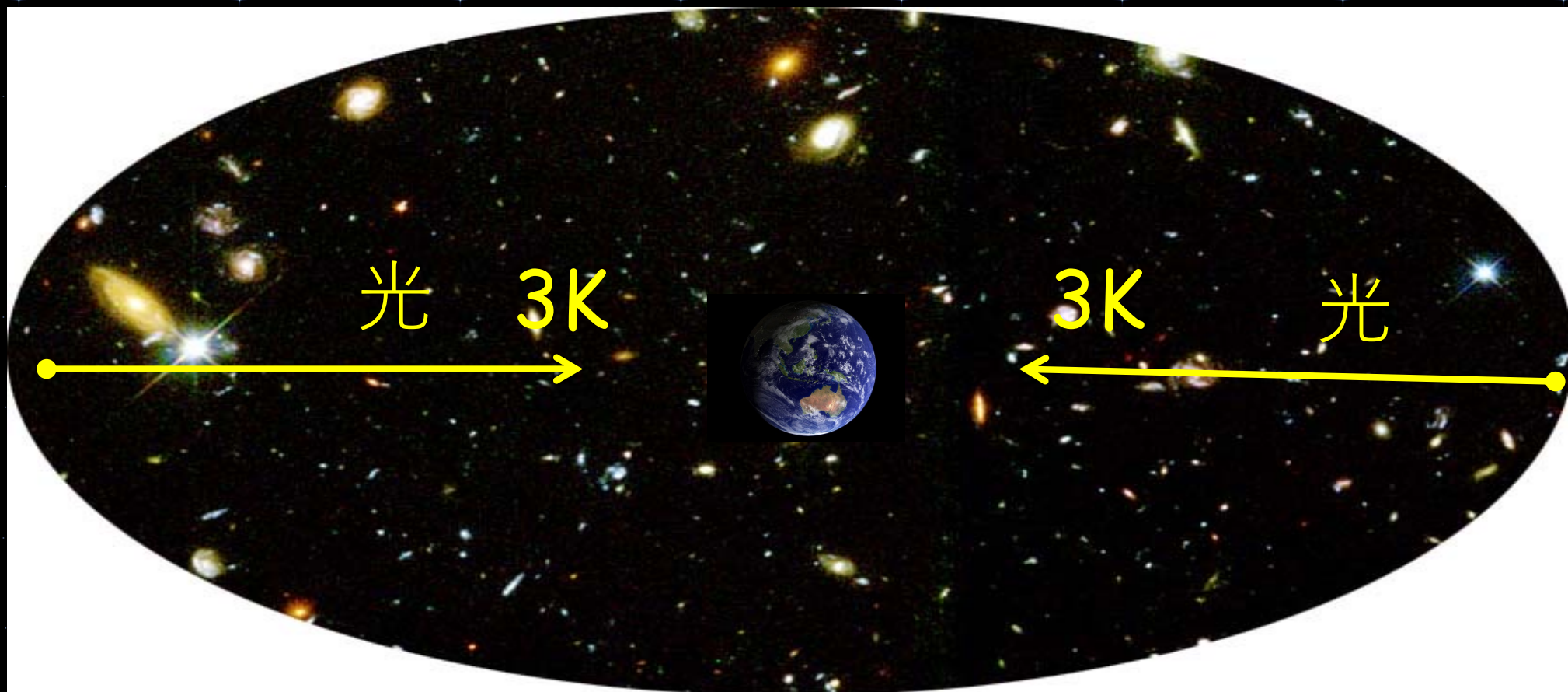
宇宙初期のインフレーションがつくる  
小さなスケールの大きな密度ゆらぎが  
潰れることによりにつくられる。

質量は $10^{17}$  g ( $10^{41}$  GeV)以上

どうやってつくられる？  
その量は？

インフレーションは、なぜ、  
必要なのでしょうか？

宇宙の端と端の  
温度は、同じ 3 K (ケルビン)



疑問 1 : 今、ようやく見えてきた、宇宙の端と端が、同じ温度なのは不思議！！！！

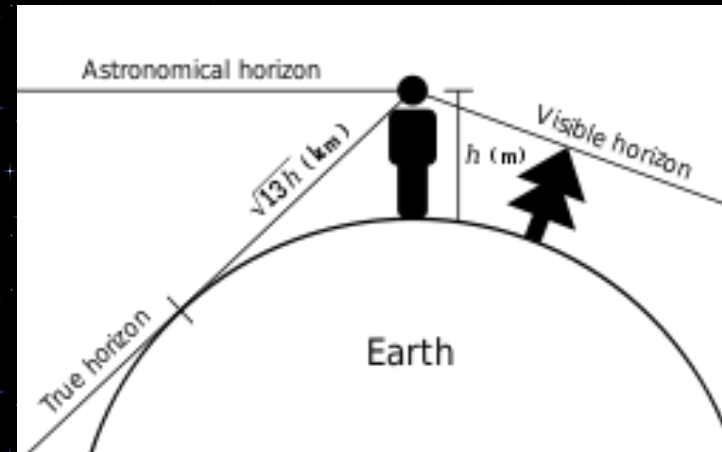
宇宙の地平線問題と呼ばれます

急激な膨張により  
光速をこえて同じ温度の場所  
が大きくな宇宙になった

インフレーションが必要



# 疑問 2 : 宇宙に端はあるの？

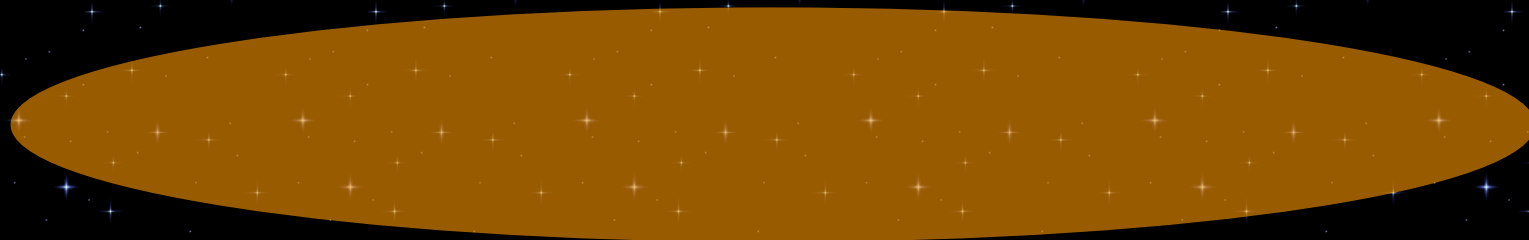


宇宙も地球のように丸まっているの？



始めに丸まっていたとしても、  
急激な膨張により、まっ平に  
なった

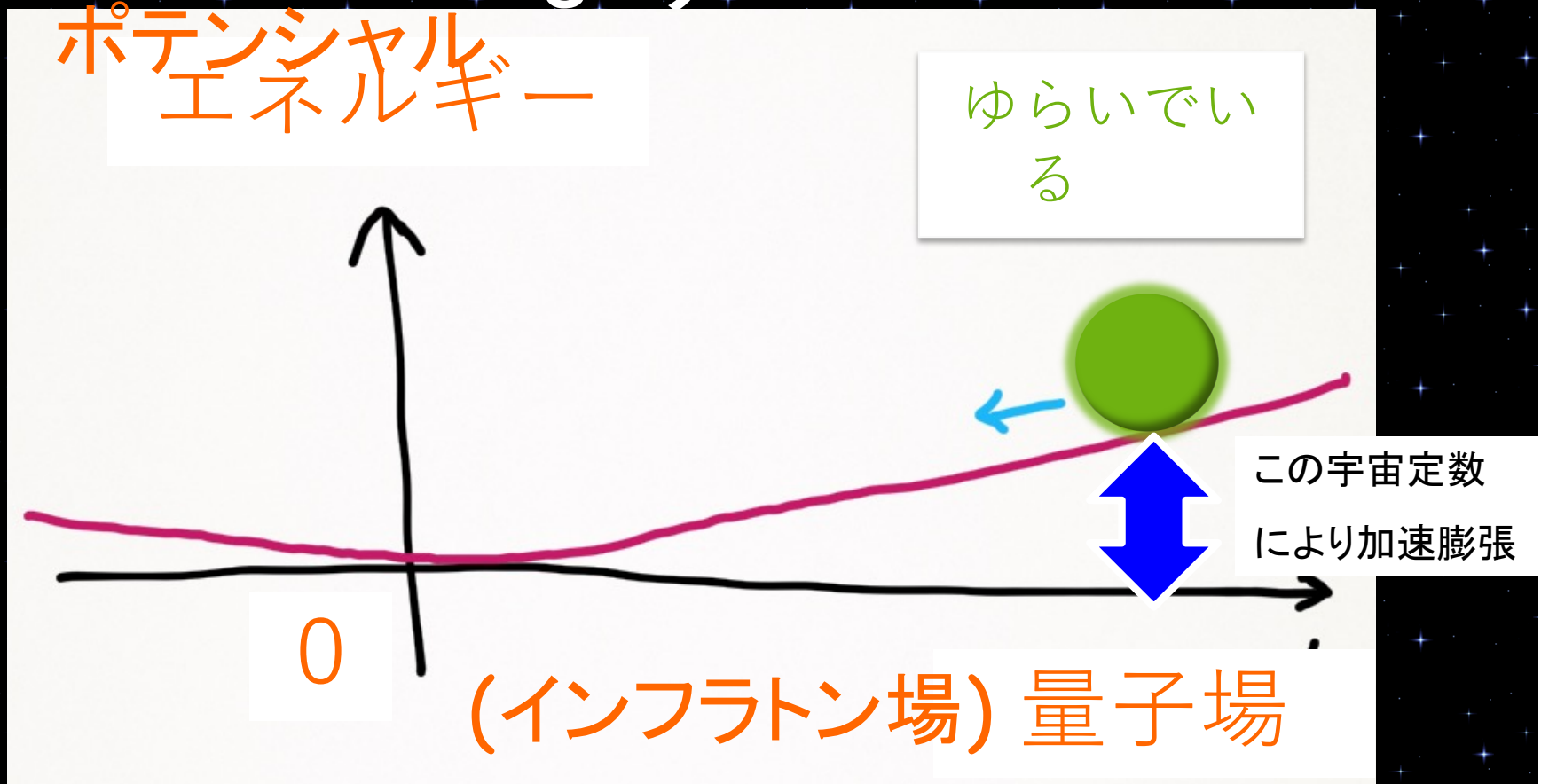
インフレーションが必要



疑問3：銀河をつくるための、ムラムラ(ゆらぎ)は、どうやって作るの？



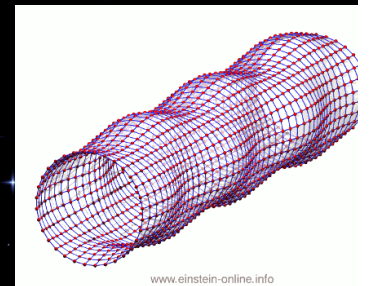
# インフレーションがゆらぎをつくり ます



膨張させ  
る

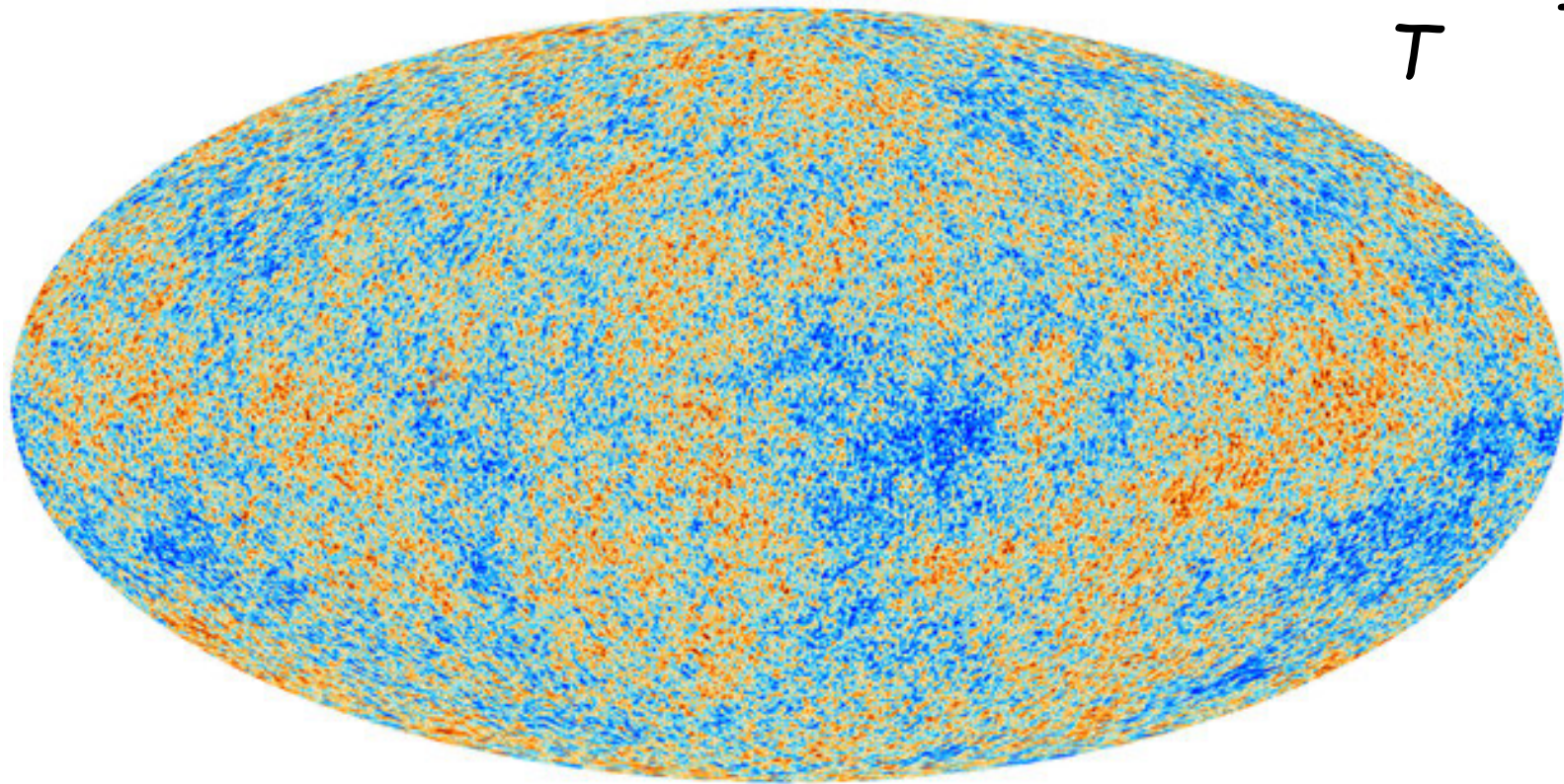


時空をゆら  
がせる



# 宇宙の温度のゆらぎ (10万分の1のゆらぎ)

$$\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



プランク衛星による観測

# $10^{-38}$ 秒の間に $10^{23}$ 倍の膨張とは？

- インフレーションで1cmのビー玉が、一瞬の間に銀河の大きさになる

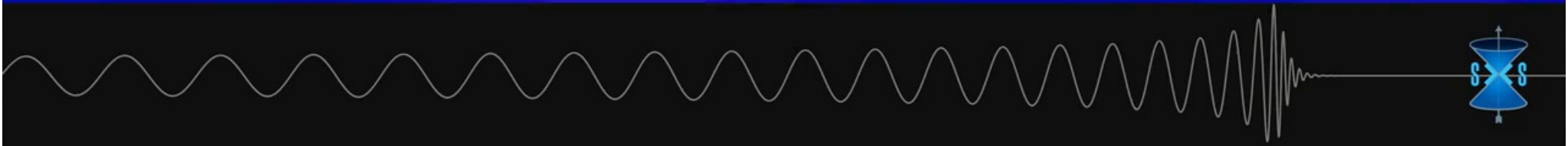
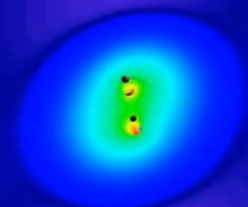


どうやって原始ブラックホールを  
捕まえるの？

# 双子の原始ブラックホールが衝突したときの重力波を捕まえる

<https://www.youtube.com/watch?v=1agm33iEAuo>

-0.76s



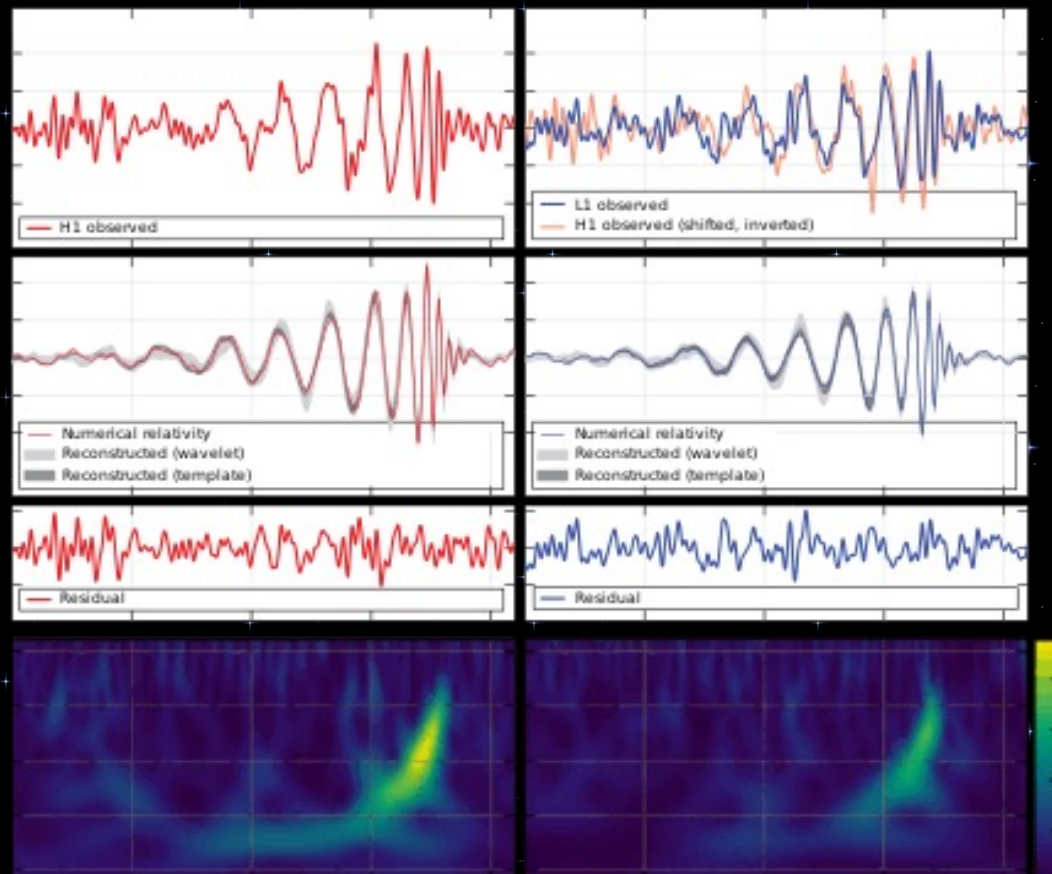
# aLIGO

Hanford, Washington



Livingston, Louisiana

frequency become higher and higher



Frequency in Hz



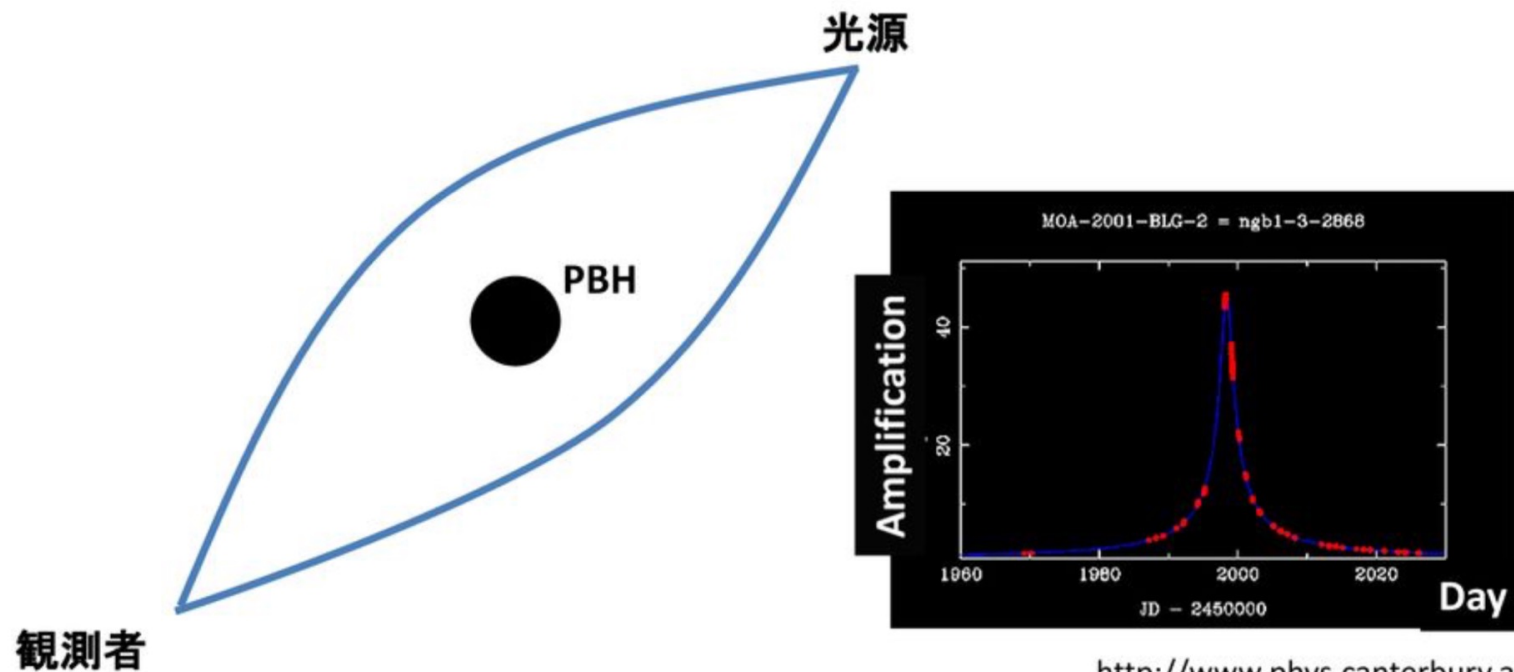
Amplitude is approximately  $10^{-15}$  cm ( 0.000000000000001 cm )

# 蒸発している途中のブラックホールを ガンマ線でみつける



フェルミガンマ線観測衛星

# 重力レンズ効果で、増光した光でみつける



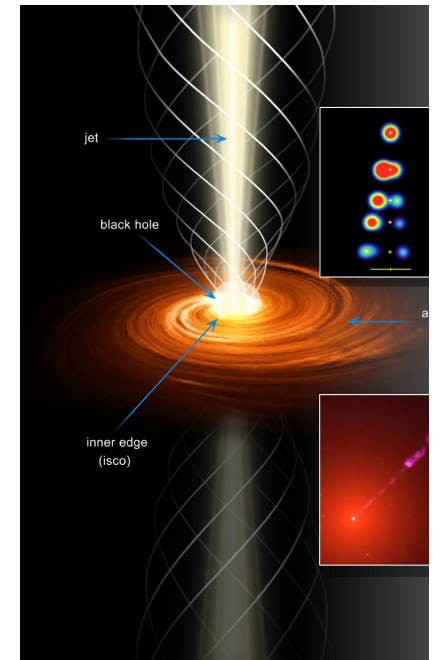
# CMB bound on PBHs by disk-accretion in the late MD epoch

Poulin, Serpico, Calore, Clesse, KK (2017)

- A non-spherical accretion disk (ADAF(slim) + Standard disk) around a PBH caused by an angular momentum emits radiation

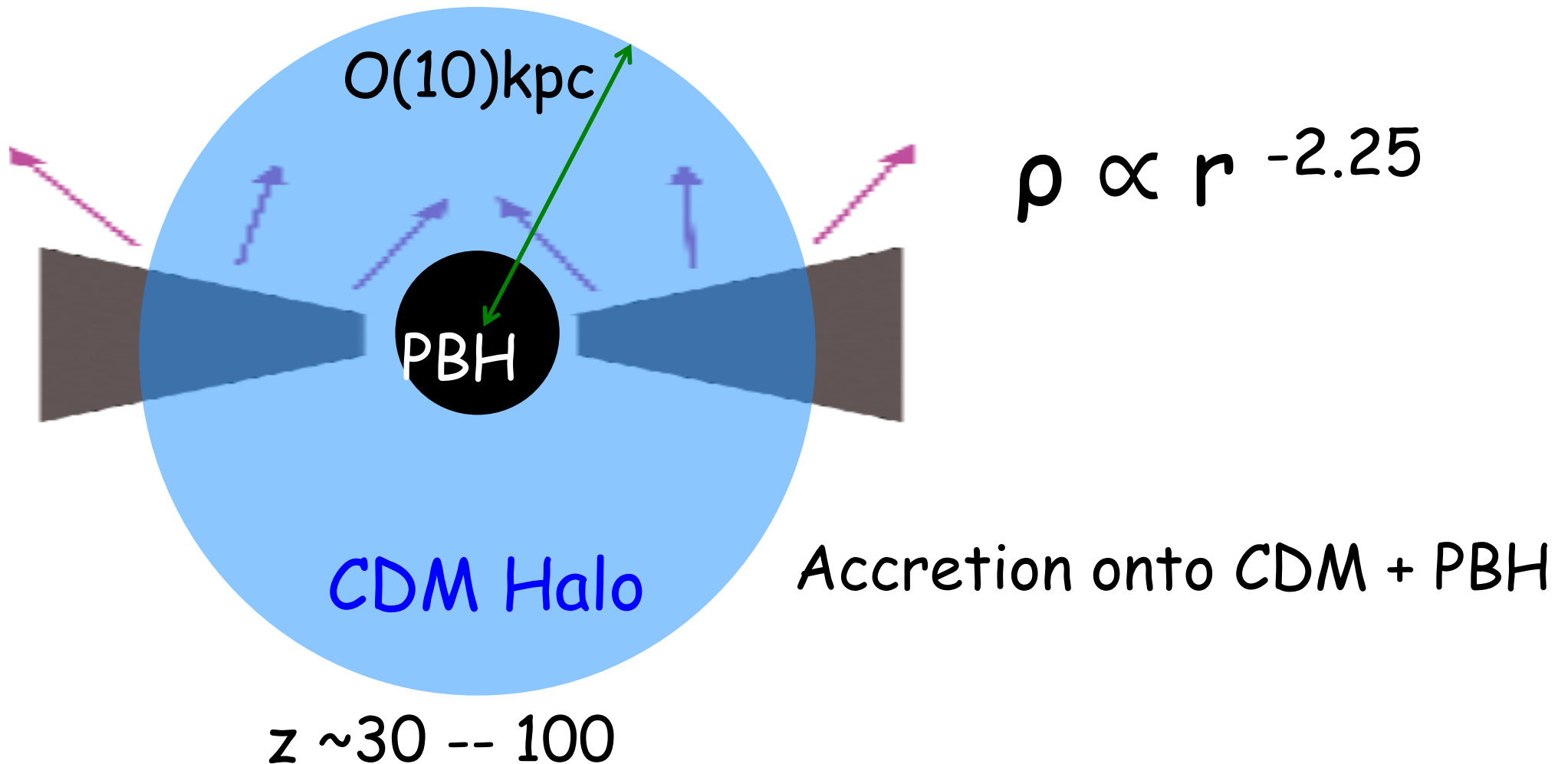
$$\dot{M}_{\text{HB}} \equiv 4\pi\lambda\rho_{\infty}v_{\text{eff}}r_{\text{HB}}^2 \equiv 4\pi\lambda\rho_{\infty}\frac{(GM)^2}{v_{\text{eff}}^3}$$
$$l \simeq \omega r_{\text{HB}}^2 \simeq \left(\frac{\delta\rho}{\rho} + \frac{\delta v}{v_{\text{eff}}}\right)v_{\text{eff}}r_{\text{HB}}$$

- CMB TT and EE can be modified
- From observations, we can constrain the number density of PBHs



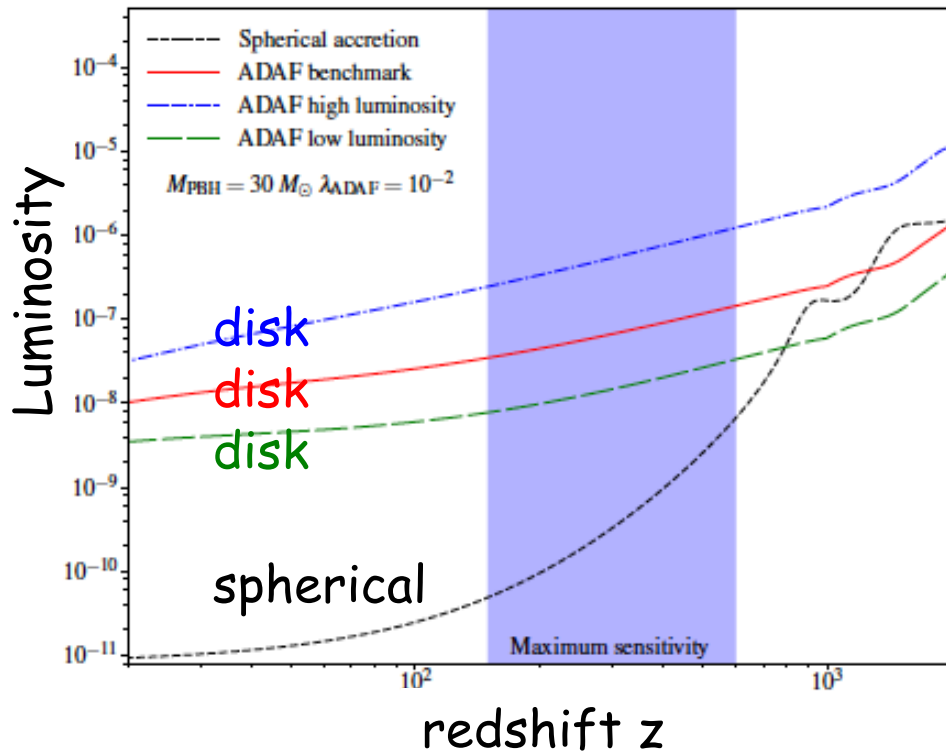
# Cosmological baryon accretion onto the PBH + CDM halo system

Poulin, Serpico, Inman, Kohri (2020)

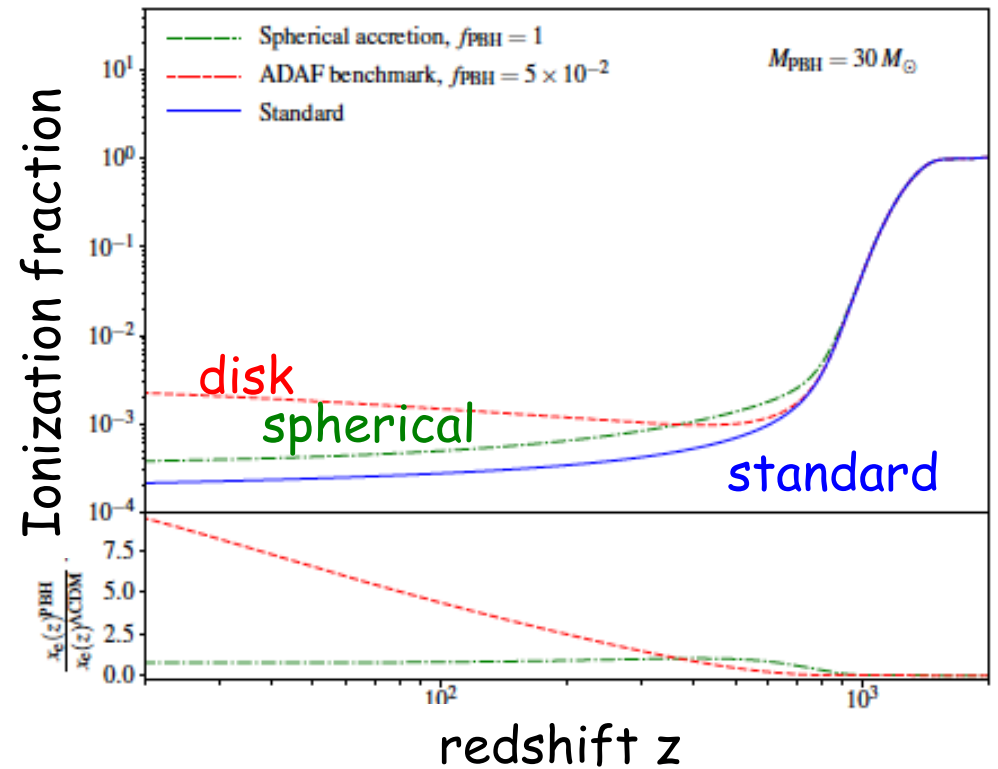


# Modified CMB anisotropy

Poulin, Serpico, Calore, Clesse, Kohri (2017)



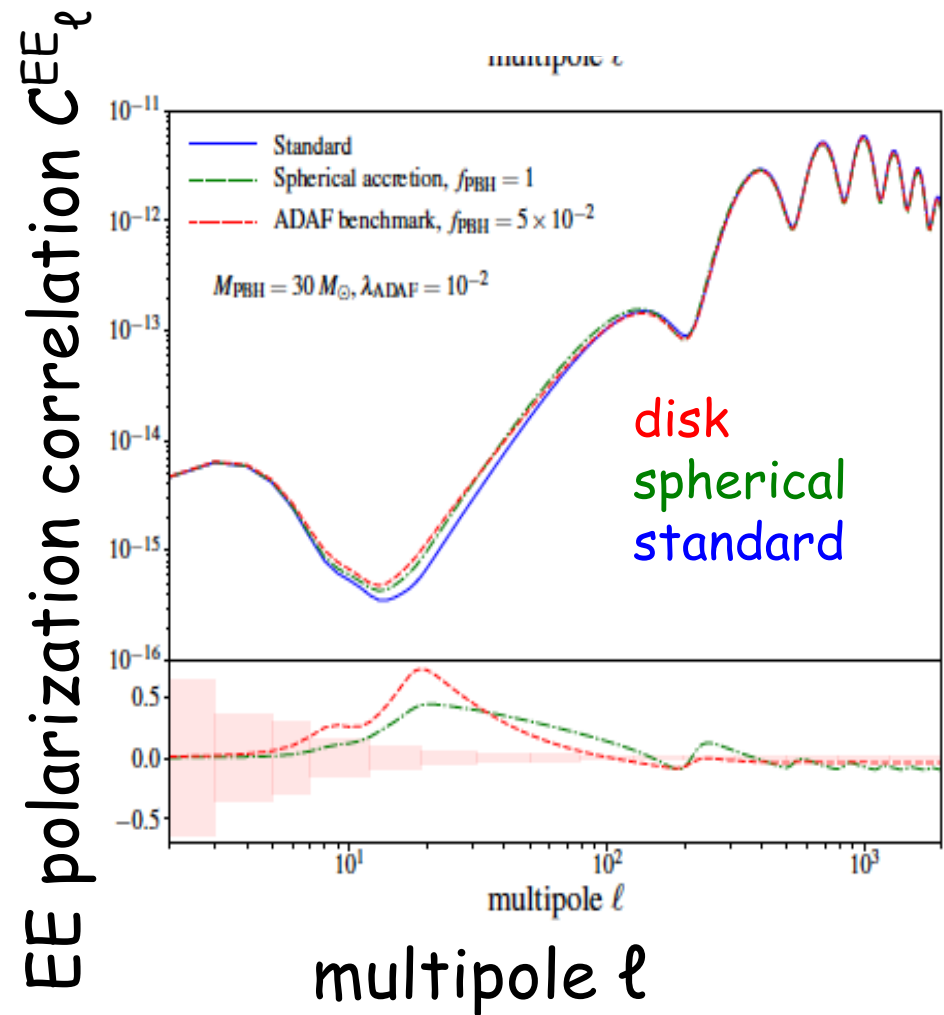
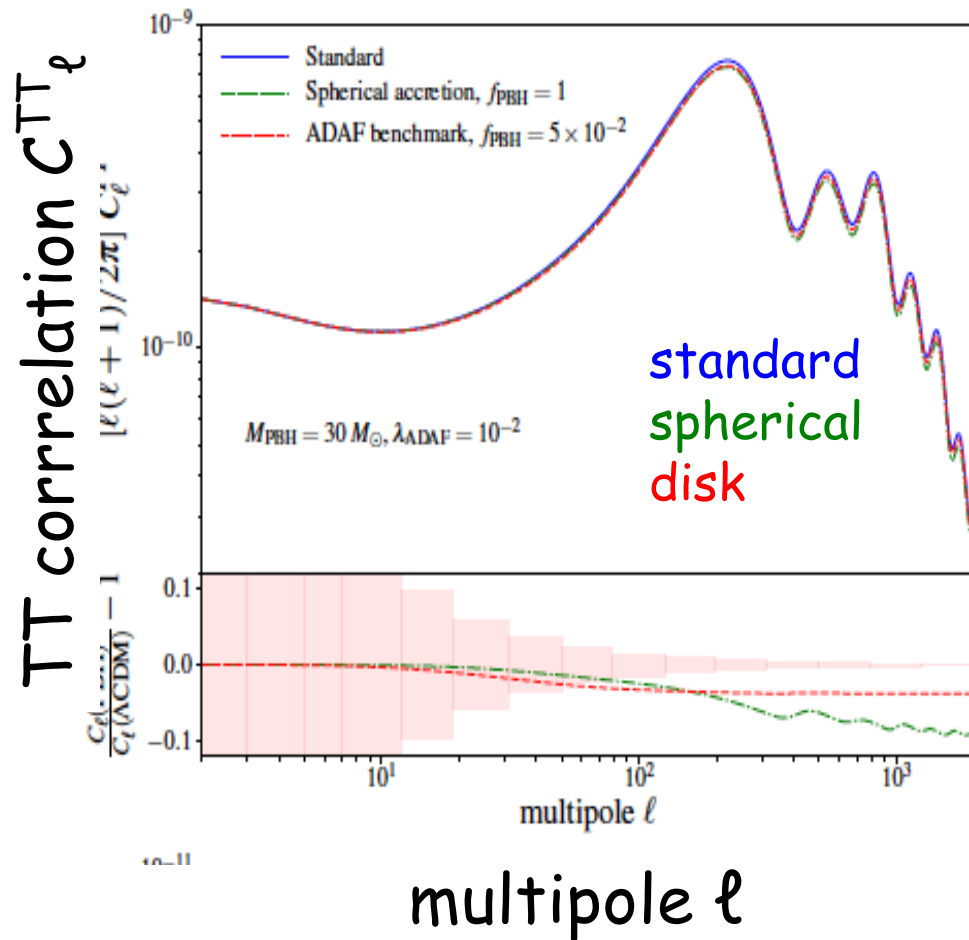
Luminosity



Ionization fraction

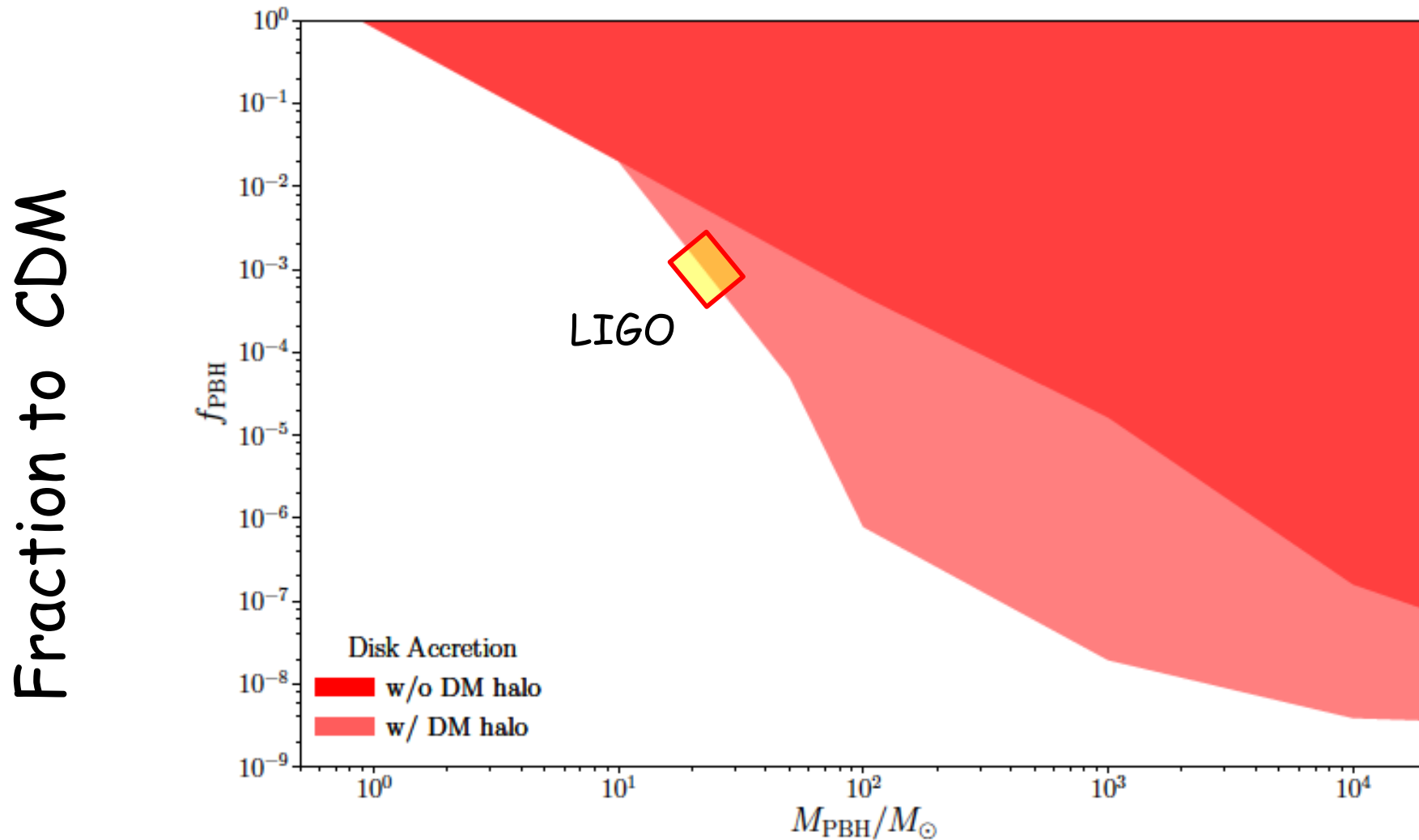
# Modified CMB anisotropy

Poulin, Serpico, Calore, Clesse, Kohri (2017)



# CMB bound by disk-accretion in the latest MD epoch

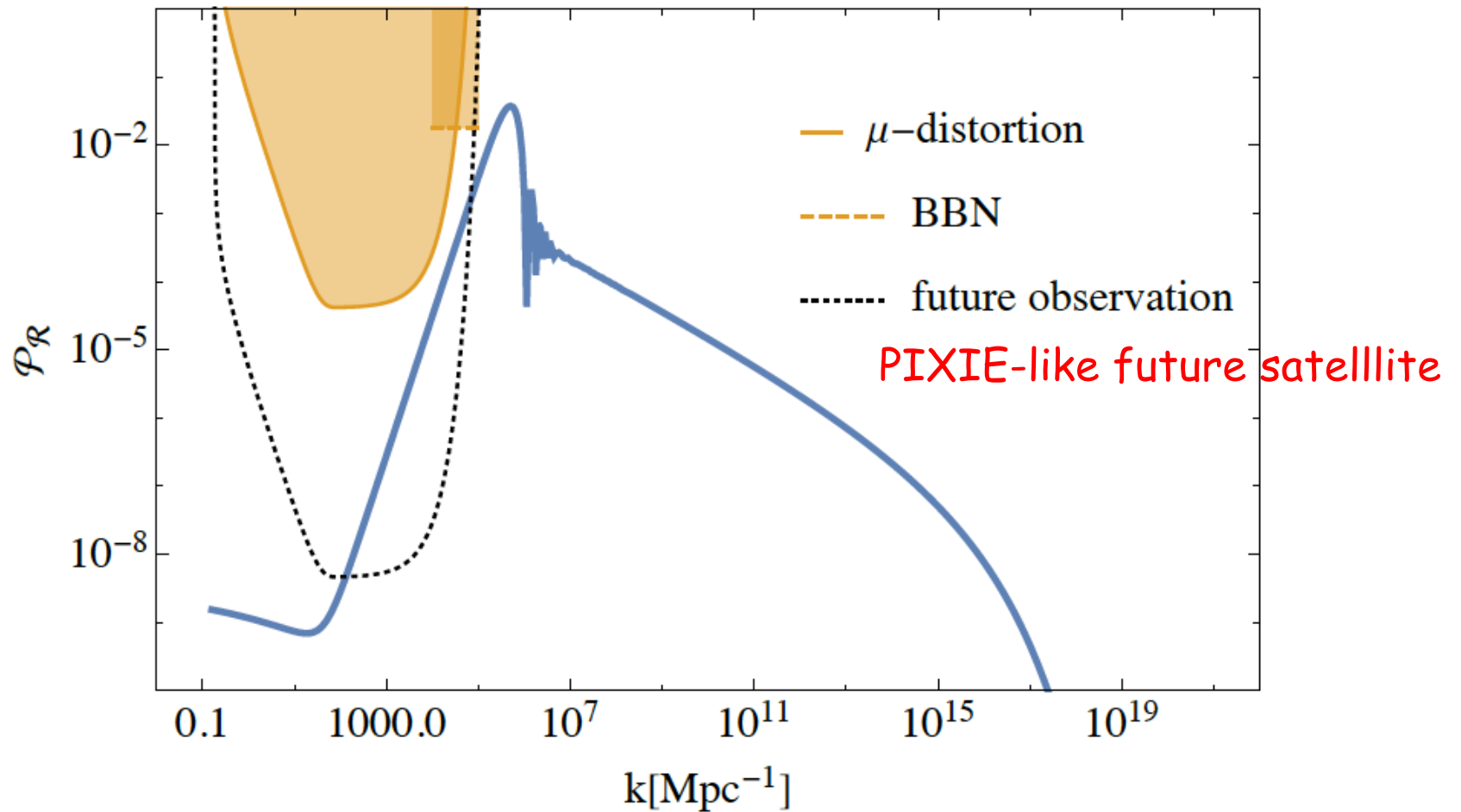
Poulin, Serpico, Inman, Kohri (2020)



# $\mu$ -distortion and acoustic reheating

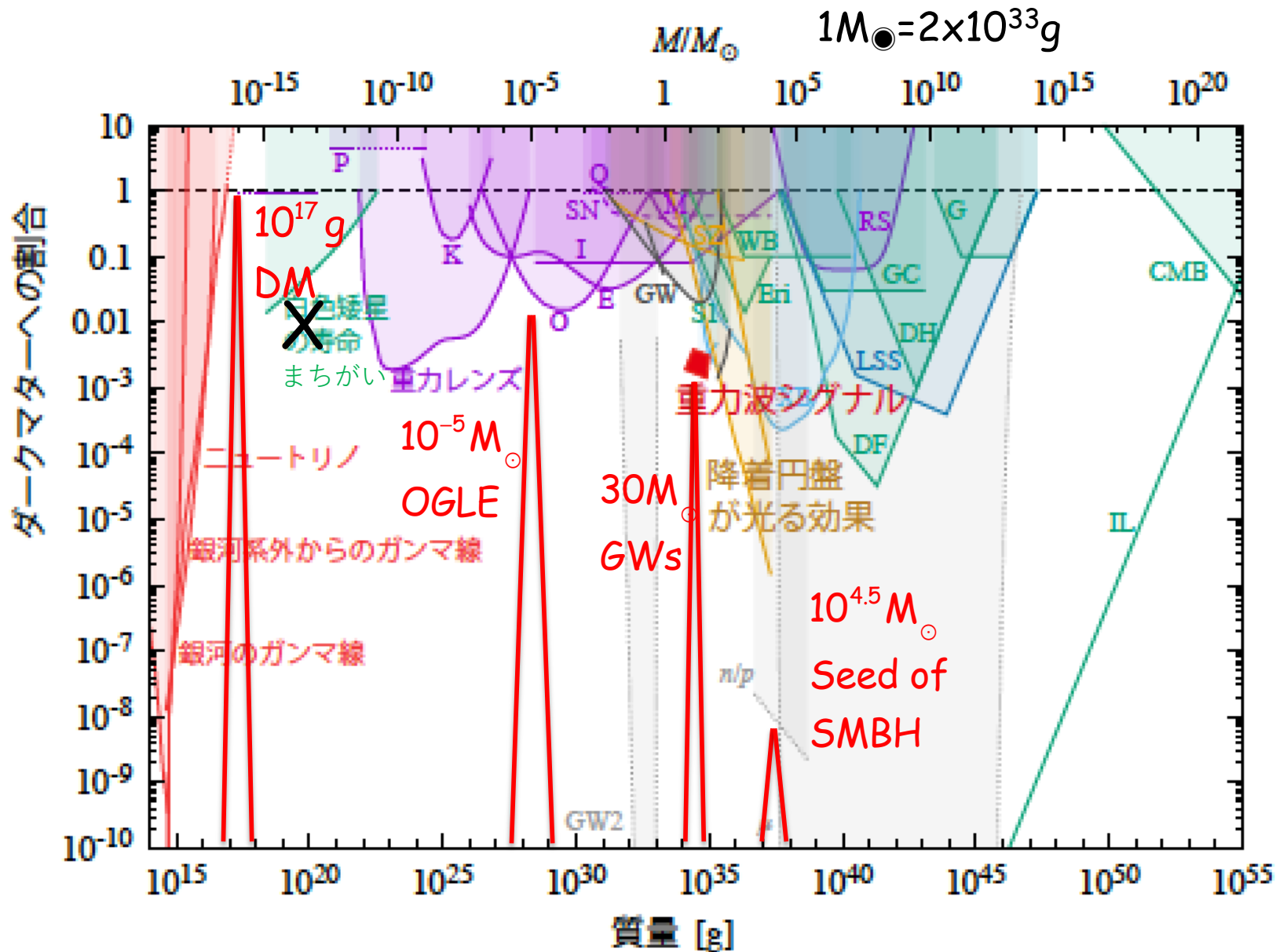
Kohri, Nakama, Suyama (2014)

Inomata, Kawasaki, Mukaida, Tada, Yanagida (2017)



# 原始ブラックホールへの観測的制限

Carr, Kohri, Sendouda, J.Yokoyama (2009)(2020)



修士2年生のために (15分)

原始ブラックホール

と

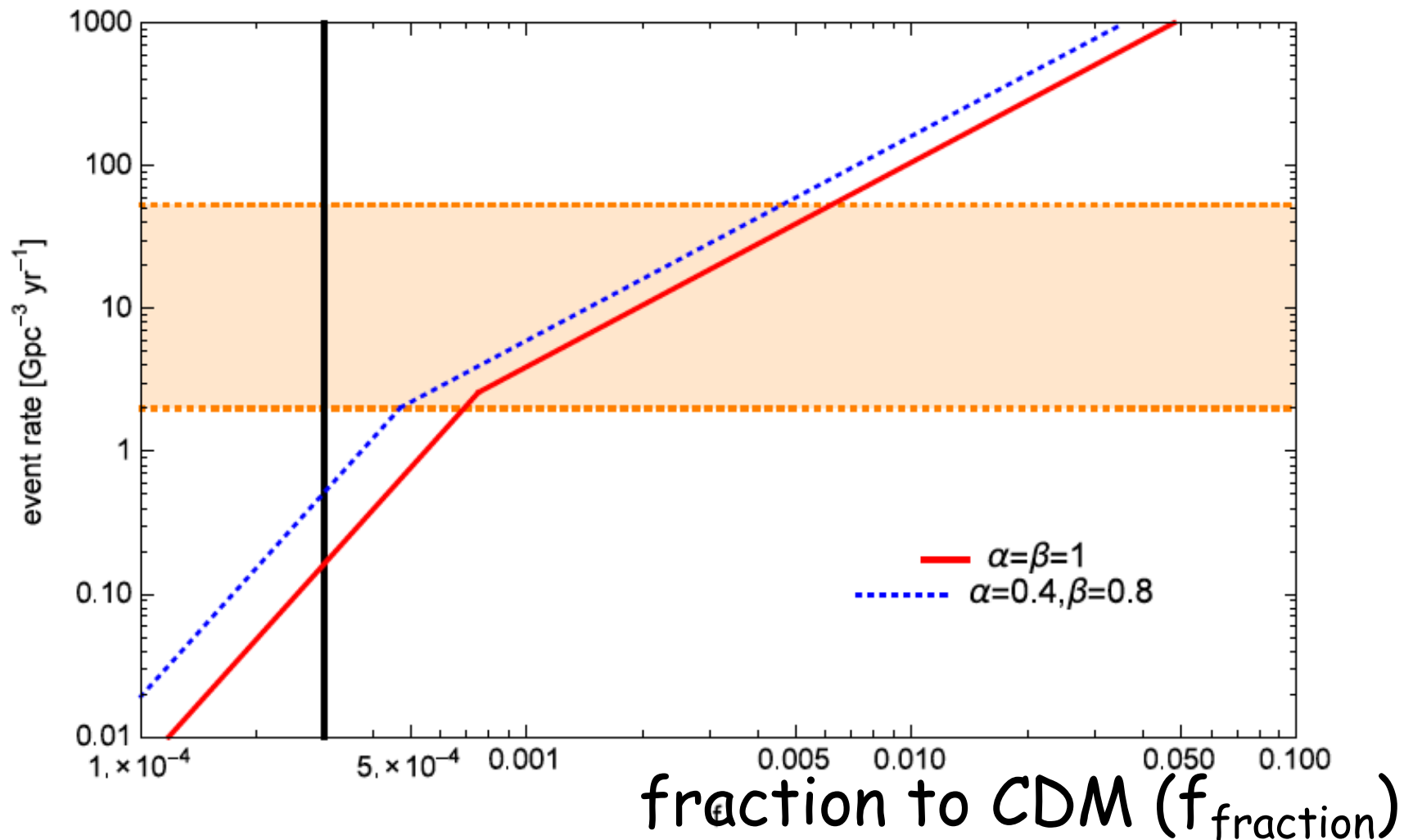
重力波実験

# GW150914 and its merger rates for 30 $M_{\text{solar}}$ masses BBH

M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka and S. Yokoyama (2016).

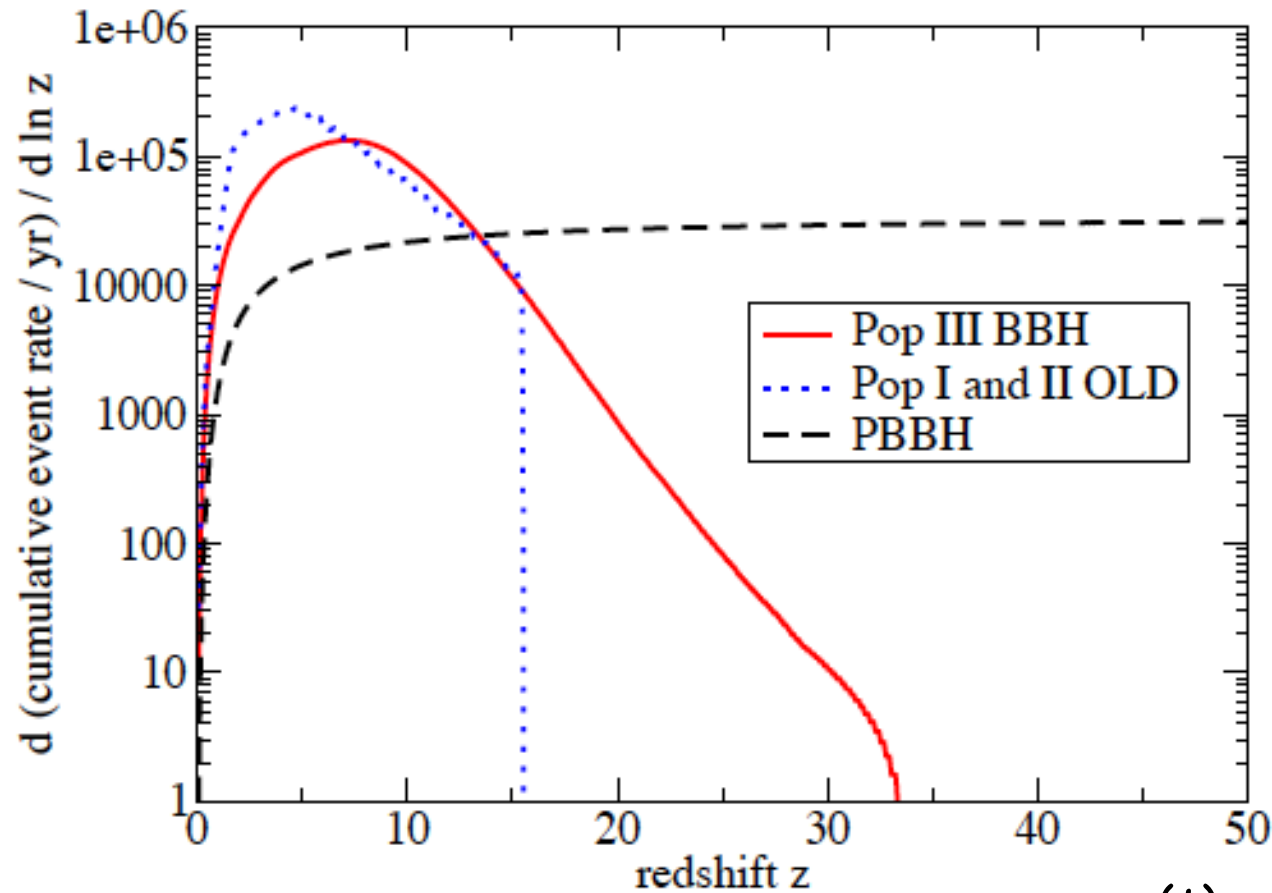
*A 3-body effect is important for the BBH formations*

Rate of GW150914



# DECIGO discriminates BPBHs from the normal BBHs

[Takashi Nakamura et al, arXiv:1607.00897 \[astro-ph.HE\]](https://arxiv.org/abs/1607.00897)



$$1/z \sim \frac{a(t)}{a(t_0)} \sim \left(t / 10\text{Gyr}\right)^{2/3}$$

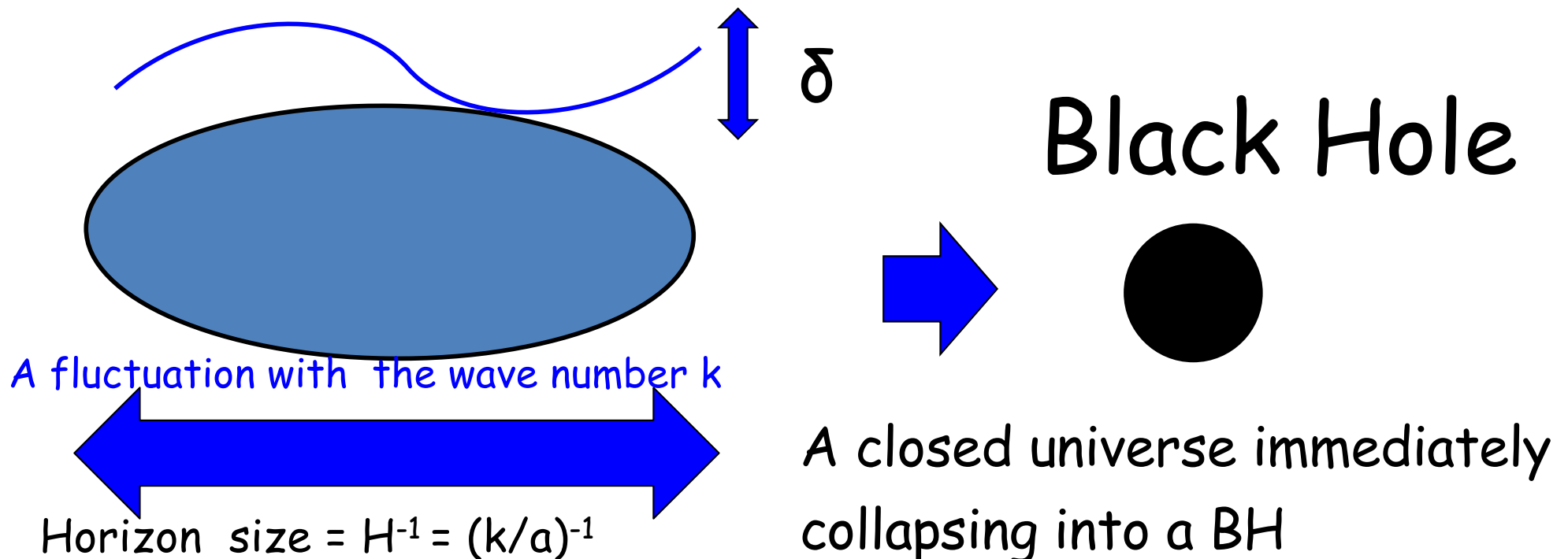
# Conditions for a PBH formation in Radiation dominated (RD) Universe

Zel'dovich and Novikov (1967), Hawking (1971), Carr (1975)

Harada, Yoo and KK (2013)

- Gravity could be stronger than pressure

$$\delta > \delta_c \sim p / \rho \sim c_s^2 = w = 1/3$$



# $P_\zeta(k)$ and PBH abundance $\beta(M)$

- Fraction of PBH to the total with Press Schechter formalism

For Peak Statistics,  
e.g., see Yoo, Harada, KK et al (2018)(2020)

$$\beta(M) \equiv \frac{\rho_{\text{PBH}}(M)}{\rho_{\text{tot}}} = \int_{\delta_{\text{th}}}^{\infty} d\delta \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) = \text{erfc}\left(\frac{\delta_{\text{th}}}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

$\delta_{\text{th}} \sim 1/3 - 0.5$

For analytical derivations, see Harada, Yoo, KK (2013)  $\sigma \sim \overline{\delta\rho/\rho}$   
0.43

- Relation between  $\beta$  and fluctuation  $\sigma$  (or  $\beta$  and  $\Omega$ )

$$\beta(M) \sim \text{erfc}\left(\frac{\delta_{\text{th}}}{\sqrt{2}\sigma}\right) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sigma}{\delta_{\text{th}}} \exp\left(-\frac{\delta_{\text{th}}^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$= 1.5 \times 10^{-18} \left(\frac{m_{\text{PBH}}}{10^{15} \text{ g}}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_{\text{PBH}} h^2}{0.1}\right)$$

$\sim P_\zeta$

# Typical quantities of PBHs in RD

- Mass (horizon mass =  $\rho(t_{\text{form}}) H(t_{\text{form}})^{-3}$ )

$$M_{\text{PBH}} \sim \rho (H_{\text{form}}^{-1})^3 \sim M_{\text{pl}}^2 t_{\text{form}} \sim \frac{M_{\text{pl}}^3}{T_{\text{form}}^2} \sim 10^{15} \text{g} \left( \frac{T_{\text{form}}}{3 \times 10^8 \text{GeV}} \right)^{-2} \sim 5 \times 10^4 M_{\odot} \left( \frac{T_{\text{form}}}{\text{MeV}} \right)^{-2}$$

- Lifetime

$$\tau_{\text{PBH}} \sim \frac{M_{\text{PBH}}^3}{M_{\text{pl}}^4} \sim 4 \times 10^{17} \text{sec} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{10^{15} \text{g}} \right)^3 \sim 1 \text{sec} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{10^9 \text{g}} \right)^3$$

- Hawking Temperature

$$T_{\text{PBH}} \sim \frac{M_{\text{pl}}^2}{M_{\text{PBH}}} \sim 10 \text{MeV} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{10^{15} \text{g}} \right)^{-1} \sim 2 \times 10^{-9} \text{K} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{30 M_{\odot}} \right)^{-1}$$

- Wave number of horizon length

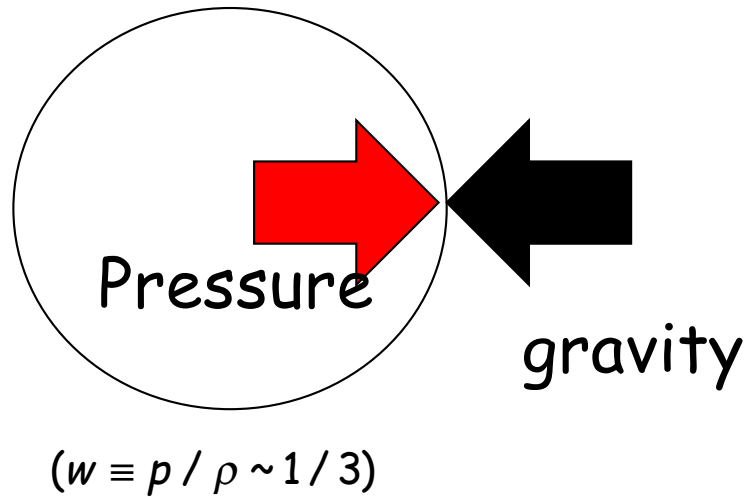
$$k = aH \sim 10^5 \text{Mpc}^{-1} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{5 \times 10^4 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \sim 10^5 \text{Mpc}^{-1} \left( \frac{T_{\text{form}}}{\text{MeV}} \right)^{+1}$$

- Fraction to CDM

$$f_{\text{fraction}} \equiv \frac{\Omega_{\text{PBH}}}{\Omega_{\text{CDM}}} \sim \left( \frac{\beta}{10^{-18}} \right) \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{10^{15} \text{g}} \right)^{-1/2} \sim \left( \frac{\beta}{10^{-8}} \right) \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{30 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \sim 10^8 \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{30 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \sqrt{P_{\delta}} \exp \left[ -\frac{1}{18 P_{\delta}} \right]$$

# Features of PBH formations in RD

- Spherical due to radiation pressure



- Negligible evolutions of density perturbations
- Quite a small angular momentum

See, T.Chiba and S.Yokoyama, 2017

De Luca et al, 2019

Minxi He and Suyama, 2019

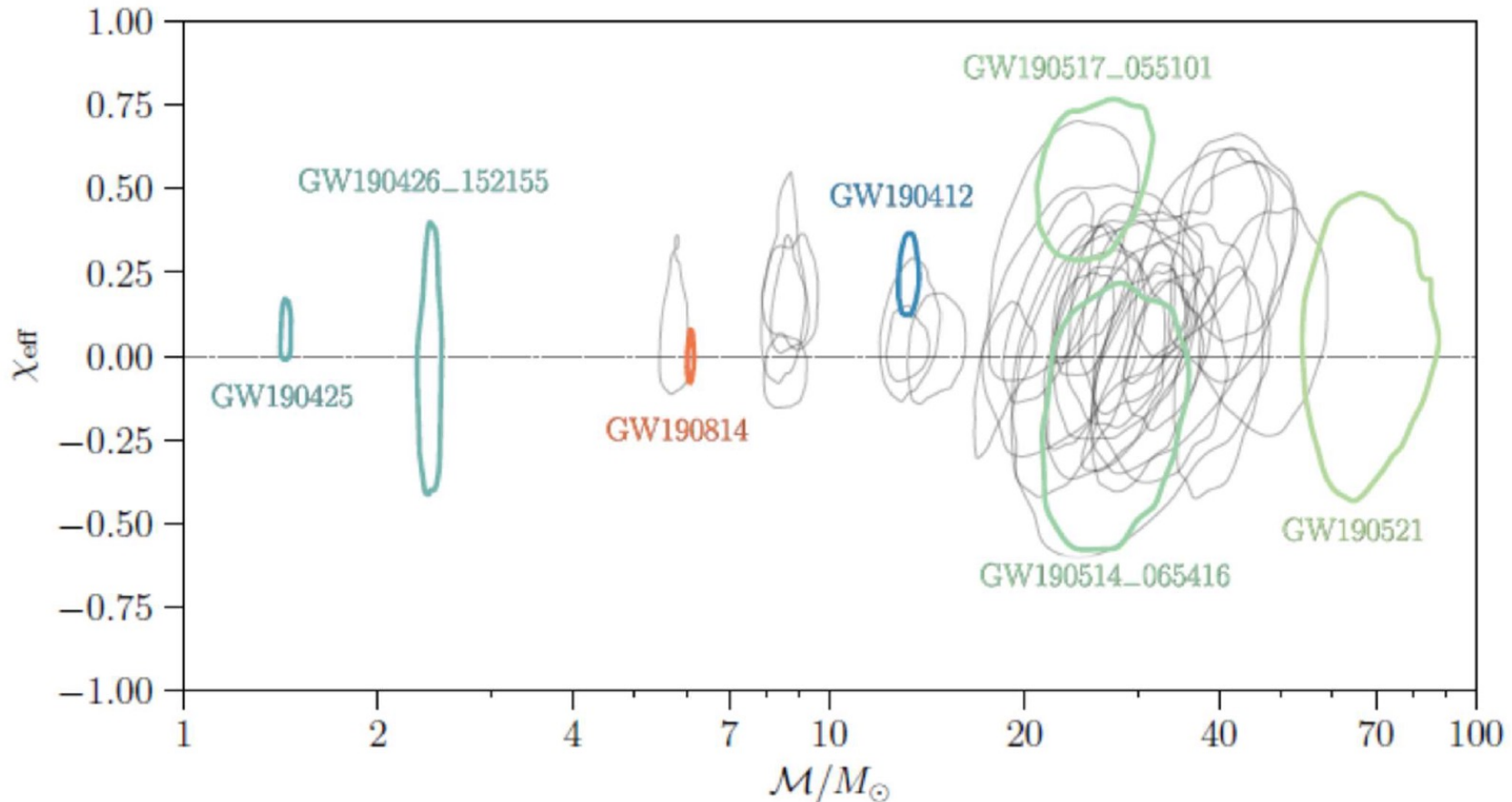
Harada, Yoo, Kohri, Koga and Monobe, 2020

(dimensionless Kerr parameter)

$$\sqrt{\langle a_*^2 \rangle} \simeq 6.5 \times 10^{-4} \left( \frac{M}{M_H} \right)^{-1/3}$$

# Effective inspiral spin parameter of the observed BHs

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{m_1 \chi_1 \cos \theta_1 + m_2 \chi_2 \cos \theta_2}{m_1 + m_2}$$



Credible region contours for all candidate events in the plane of chirp mass  $\mathcal{M}$  and effective inspiral spin  $\chi_{\text{eff}}$ . Each contour represents the 90% credible region for a different event. We highlighted the previously published candidate events (cf. Fig.~\ref{fig:mtotqpost}), as well as \protect\NAME{GW190517A} and \protect\NAME{GW190514A}, which have the highest probabilities of having the largest and smallest  $\chi_{\text{eff}}$  respectively.

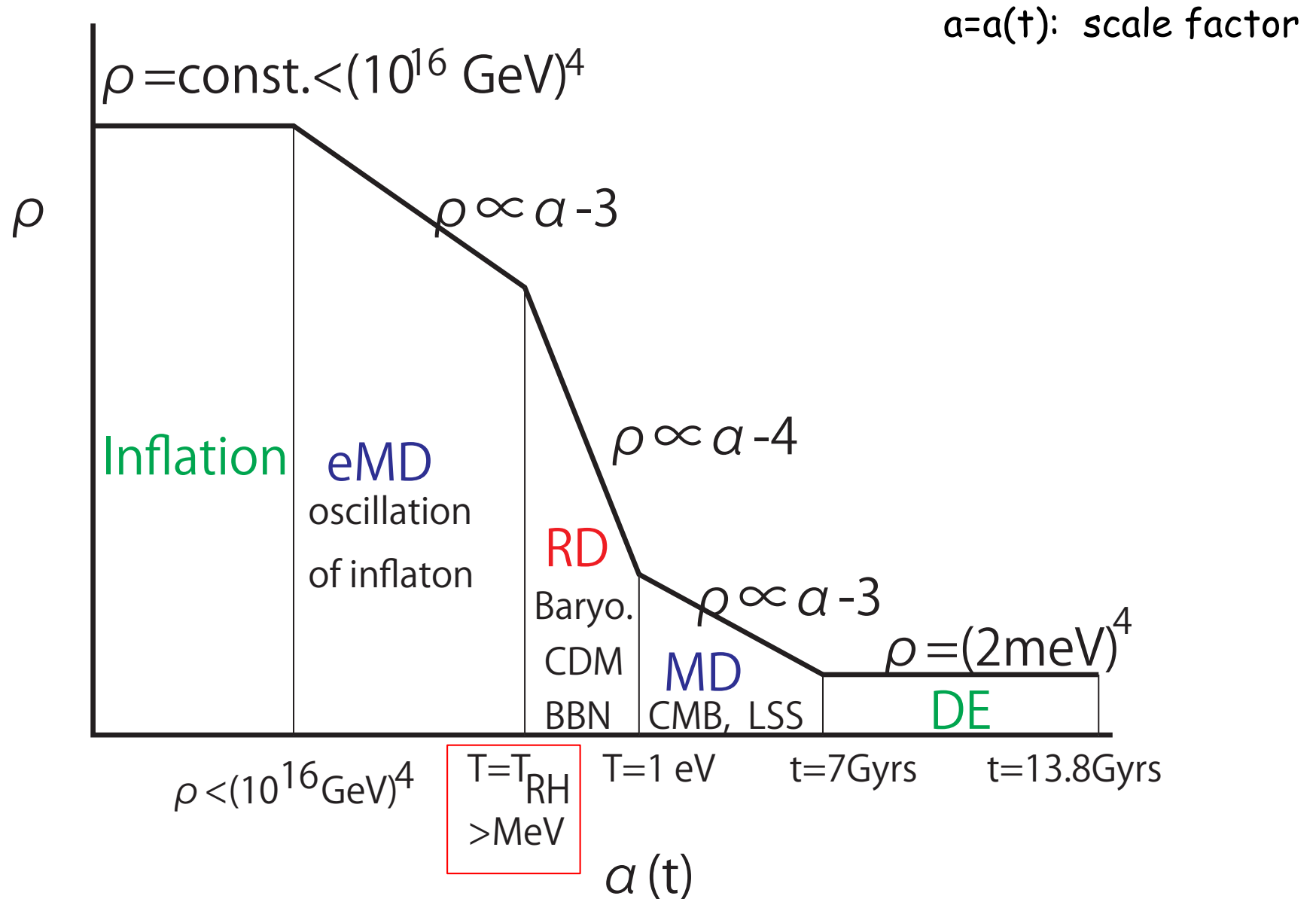
研究者のために (15分)

原始ブラックホール

と

2次重力波

# Cosmic history of energy density



# PBH formation at the (early) matter dominated (MD) Universe

Polnarev and Khlopov (1982)

Harada, Yoo, KK, Nakao, Jhingan (2016)

1. **Pressure is negligible**, which could induce an immediate collapse and producing more PBHs?
2. **Density perturbations can evolve**, which produces non-spherical objects and cannot be enclosed by the horizon. That means less PBHs can be produced?

# Matter Domination

- Three radius in Lagrangian coordinate  $q_i$

$$r_1 = (a - \alpha b)q_1$$

Zel'dovich Approximation

$$r_2 = (a - \beta b)q_2$$

$$r_3 = (a - \gamma b)q_3$$

- Eccentricity  $e^2 = 1 - \left(\frac{r_2(t_c)}{r_3(t_c)}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha - \gamma}\right)^2$

- Hoop with 2<sup>nd</sup> Elliptic function  $E(x)$

$$\mathcal{C} = 16 \left(1 - \frac{\gamma}{\alpha}\right) E \left( \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha - \gamma}\right)^2} \right) r_f$$

- Hoop conjecture for PBH production

$$\mathcal{C} \lesssim 2\pi r_g$$

# Abundance of PBHs formed in MD

- Probability distribution by peak statistics (BBKS)

Doroshkevich (1970)

$$\begin{aligned}
 & w(\alpha, \beta, \gamma) d\alpha d\beta d\gamma \\
 &= -\frac{27}{8\sqrt{5}\pi\sigma_3^6} \exp \left[ -\frac{1}{10\sigma_3^2} (\alpha + \beta + \gamma)^2 - \frac{1}{4\sigma_3^2} \{(\alpha - \beta)^2 + (\beta - \gamma)^2 + (\gamma - \alpha)^2\} \right] \\
 & \cdot (\alpha - \beta)(\beta - \gamma)(\gamma - \alpha) d\alpha d\beta d\gamma.
 \end{aligned}$$

$\sigma_H = \sqrt{5}\sigma_3$

- Probability

$$\beta_0 = \int_0^\infty d\alpha \int_{-\infty}^\alpha d\beta \int_{-\infty}^\beta d\gamma \theta(1 - h(\alpha, \beta, \gamma)) w(\alpha, \beta, \gamma)$$

$$h(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{2}{\pi} \frac{\alpha - \gamma}{\alpha^2} E \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha - \beta}{\alpha - \gamma} \right)^2} \right)$$

$h(\alpha, \beta, \gamma) := C/(2\pi r_g)$

# Angular momentum produced by perturbations

Harada, Yoo, KK, nad Nakao (2017)

- Angular momentum

1<sup>st</sup> order effects  
for nonspherical V

2<sup>nd</sup> order effects

$$\mathbf{L}_c = \int_{a^3V} \rho \mathbf{r} \times \mathbf{v} d^3\mathbf{r} = \rho_0 a^4 \left( \int_V \mathbf{x} \times \mathbf{u} d^3\mathbf{x} + \int_V \mathbf{x} \delta \times \mathbf{u} d^3\mathbf{x} \right)$$

- Density perturbation  $\delta$

- (Peculiar) Velocity perturbation

$$\mathbf{u} := a D\mathbf{x}/Dt$$

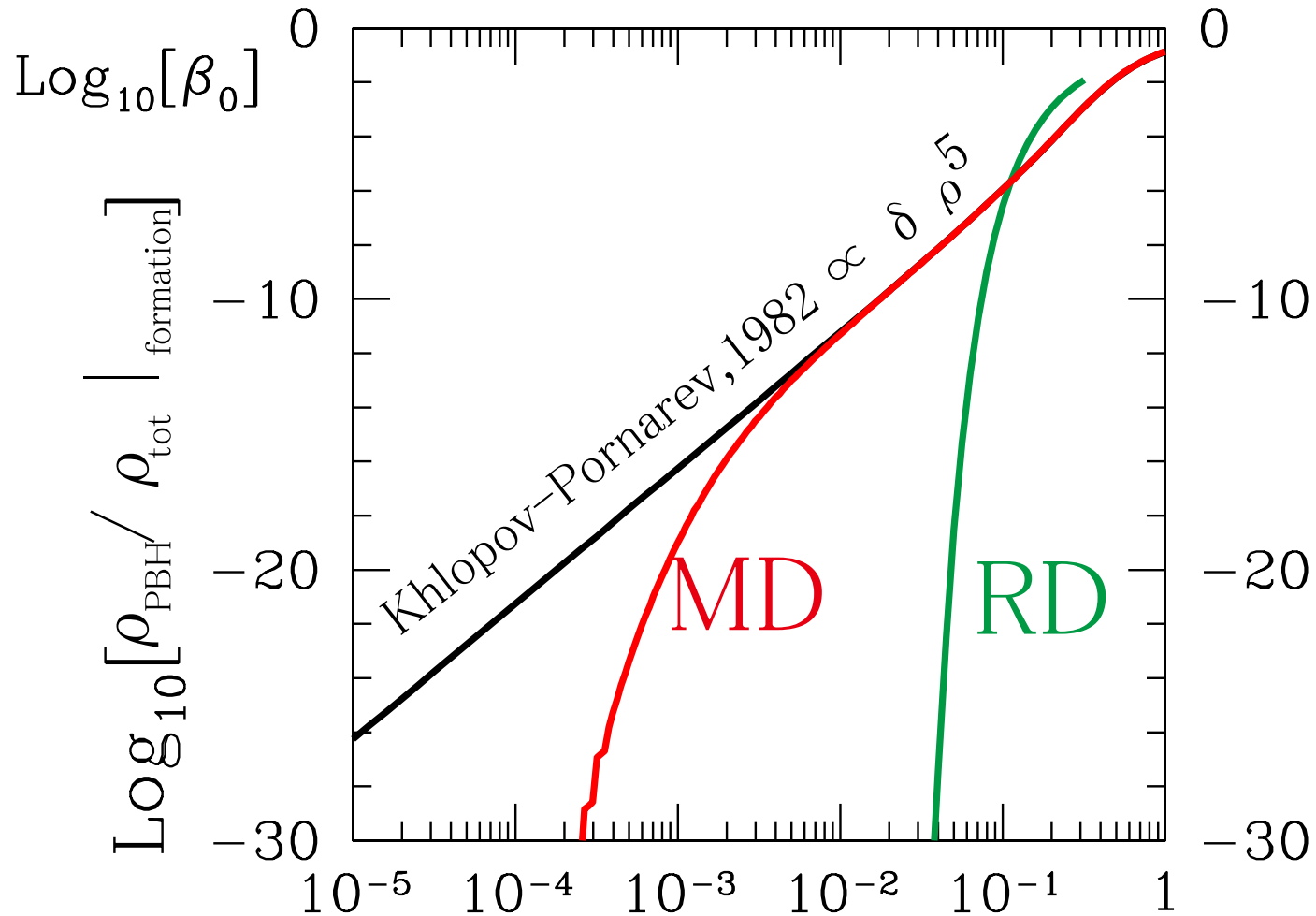
$$\mathbf{u}_1 = -\frac{t}{a} \nabla \psi_1$$

- Potential perturbation

$$\psi := \Psi - \Psi_0$$

# Beta in matter-domination

Harada, Yoo, KK, Nakao (2017)

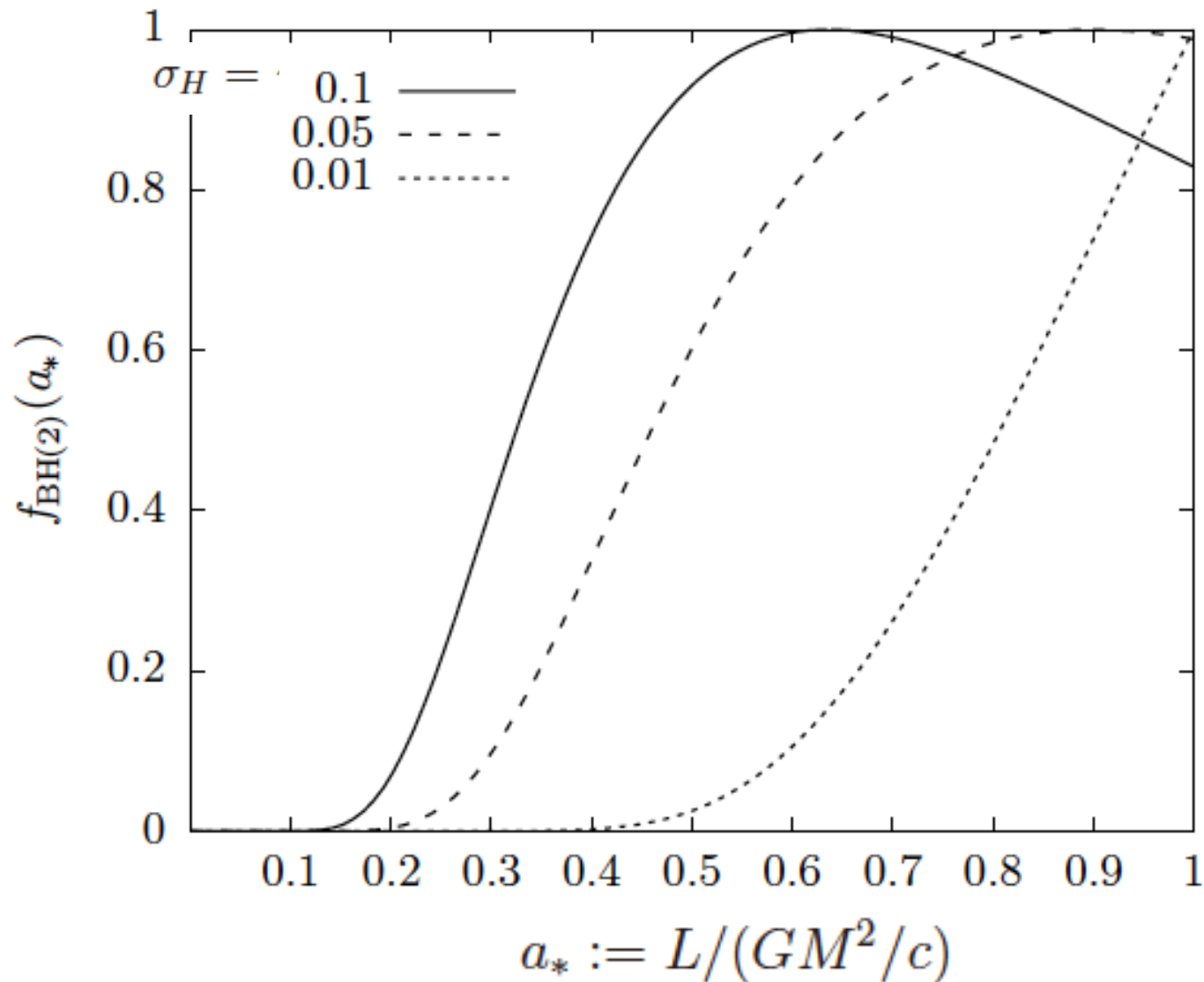


$$\sigma_H = \sqrt{5}\sigma_3 = \delta \rho / \rho$$

# Spin distribution

More highly-spinning halos cannot collapse into PBHs, which means that the PBHs produced tend to have high spins in MD

Harada, Yoo, KK, Nakao (2017)



# Secondary gravitational wave induced from large curvature perturbation ( $P_\zeta \gg r$ ) at small scales

K. N. Ananda, C. Clarkson, and D. Wands, 2006

D. Baumann, P. J. Steinhardt, K. Takahashi and K. Ichiki, 2007

R. Saito and J. Yokoyama, 2008

KK and T. Terada, 2018

R.-G. Cai, S. Pi, and M. Sasaki, 2019

- Power spectrum of the tensor mode

$$\langle h_{\mathbf{k}}^r(\eta) h_{\mathbf{k}'}^s(\eta) \rangle = \frac{2\pi^2}{k^3} \mathcal{P}_h(k, \eta) \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \delta^{rs}, \quad h_{ij}(\mathbf{x}, \eta) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^{3/2}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} [h_{\mathbf{k}}^+(\eta) e_{ij}^+(\mathbf{k}) + h_{\mathbf{k}}^\times(\eta) e_{ij}^\times(\mathbf{k})]$$

- Omega parameter well inside the horizon

$$\Omega_{\text{GW}}(k, \eta) = \frac{1}{3} \left( \frac{k}{\mathcal{H}} \right)^2 \mathcal{P}_h(k, \eta).$$

- Substituting the solution into this

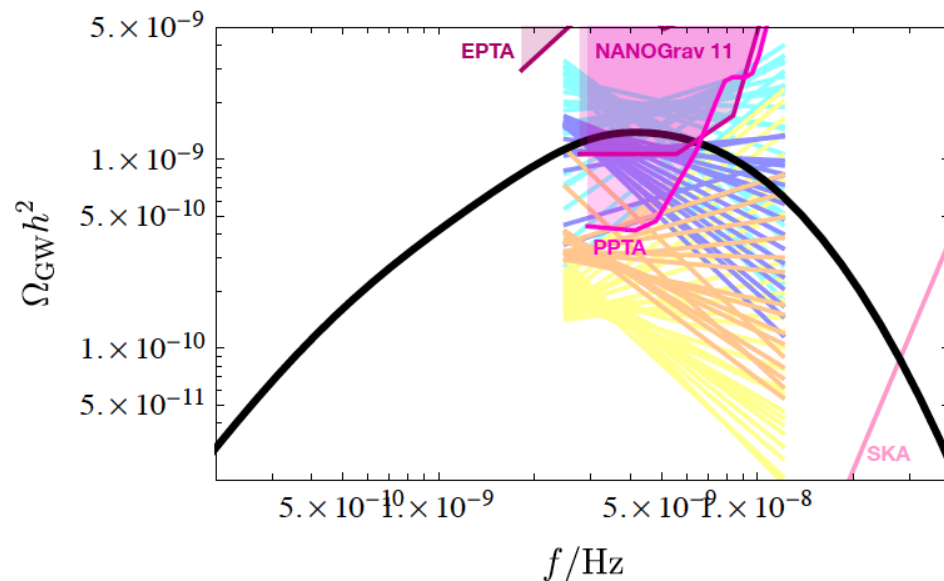
$$\Omega_{\text{GW},c}(f) = \frac{1}{12} \left( \frac{f}{2\pi aH} \right)^2 \int_0^\infty dt \int_{-1}^1 ds \left[ \frac{t(t+2)(s^2-1)}{(t+s+1)(t-s+1)} \right]^2 \times \overline{I^2(t, s, k\eta_c)} \mathcal{P}_\zeta \left( \frac{(t+s+1)f}{4\pi} \right) \mathcal{P}_\zeta \left( \frac{(t-s+1)f}{4\pi} \right)$$

# Large $P_\zeta$ at $k \sim 10^7 \text{Mpc}^{-1}$ produces both GWs at nHz and $O(1) M_\odot$ PBHs

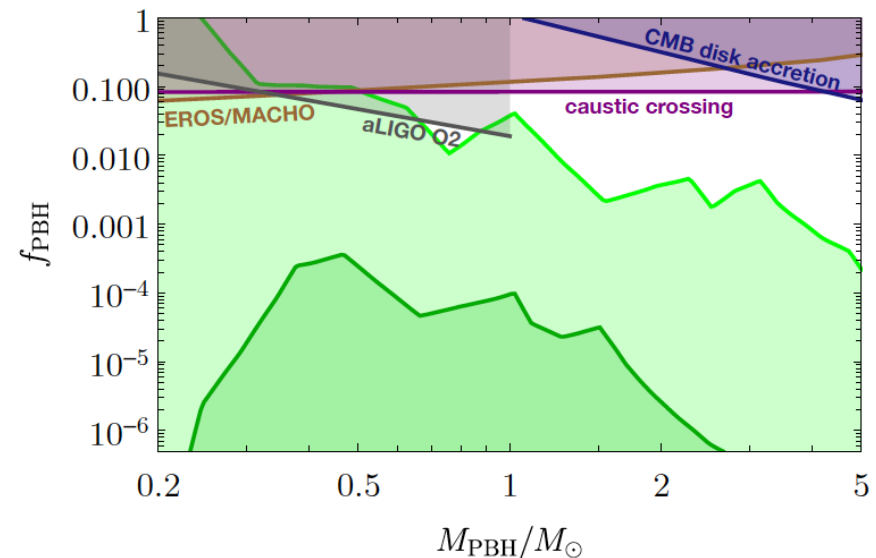
R.Saito and J.Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 161101

K. Kohri and T. Terada, arXiv:arXiv:2009.11853

$$M_{\text{PBH}} \sim O(1)M_\odot \left( \frac{k}{10^7 \text{Mpc}^{-1}} \right)^{-2} \sim O(1)M_\odot \left( \frac{5 \times 10^{-9} \text{Hz}}{f} \right)^2$$



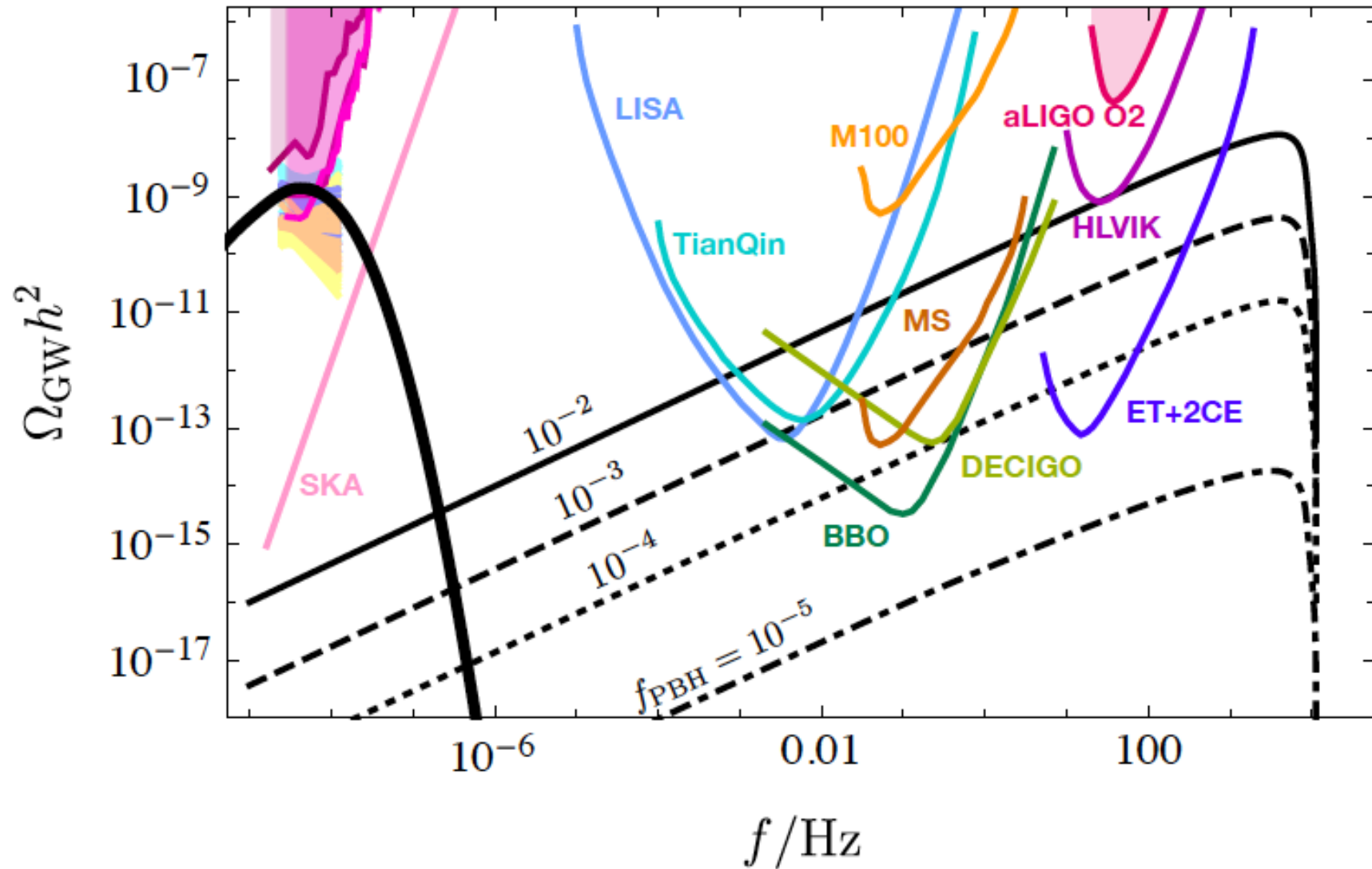
GWs at nHz



PBHs of  $O(1) M_\odot$

# NANOGrav12.5yr and solar mass PBHs

K. Kohri and T. Terada, arXiv:arXiv:2009.11853



# 2<sup>nd</sup> order GWs enhanced at a sudden transition from MD to RD

Inomata, Kohri, Nakama, Terada, Phys. Rev. D 100, 043532 (2019),  
arXiv:1904.12879

$$\overline{\mathcal{P}_h(\eta, k)} \sim \iint f^2(u, v, \bar{x}, x_R)$$

$$f(u, v, \bar{x}, x_R) = \frac{3(2(5+3w)\Phi(u\bar{x})\Phi(v\bar{x}) + 4\mathcal{H}^{-1}(\Phi'(u\bar{x})\Phi(v\bar{x}) + \Phi(u\bar{x})\Phi'(v\bar{x})) + 4\mathcal{H}^{-2}\Phi'(u\bar{x})\Phi'(v\bar{x}))}{25(1+w)}$$

- Enhancement at  $T_R$

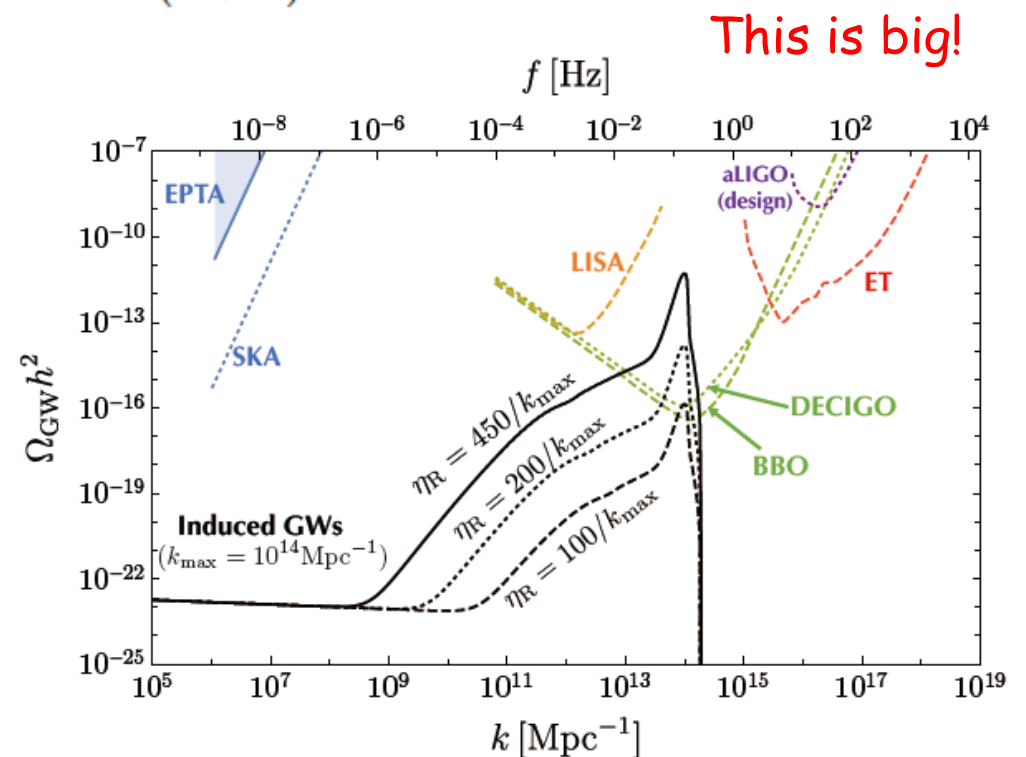
$$\mathcal{H}^{-2}\Phi'\Phi' \sim (k\eta_R)^2\Phi^2 \gg \Phi^2$$

Amplitude should be less than unity  
The transition occurs in a finite time

Poltergeist

mechanism for gravitational wave production

Logo by ©Takahiro Terada



# Summary

- PBHs can be also produced both in the **early radiation and matter dominated Universe**
- Binary PBHs with  $O(10) M_{\odot}$  are good candidates for **LIGO/Virgo** events
- PBHs can be dark matter for  $M = 10^{17} \text{ g} - 10^{23} \text{ g}$
- The **NANOGrav 12.5yr** data can be fitted by secondary GWs induced by large curvature perturbation, which could have produced PBHs with  $O(1) M_{\odot}$  simultaneously
- We will be able to distinguish a model of PBH formations from others by future observations such **DECIGO/BBO** and so on.



Aquarius simulation