Angular correlation as a novel probe of supermassive primordial black holes

T. Shinohara, T. Suyama, T. Takahashi, 2103.13692

篠原拓見（佐賀大学）

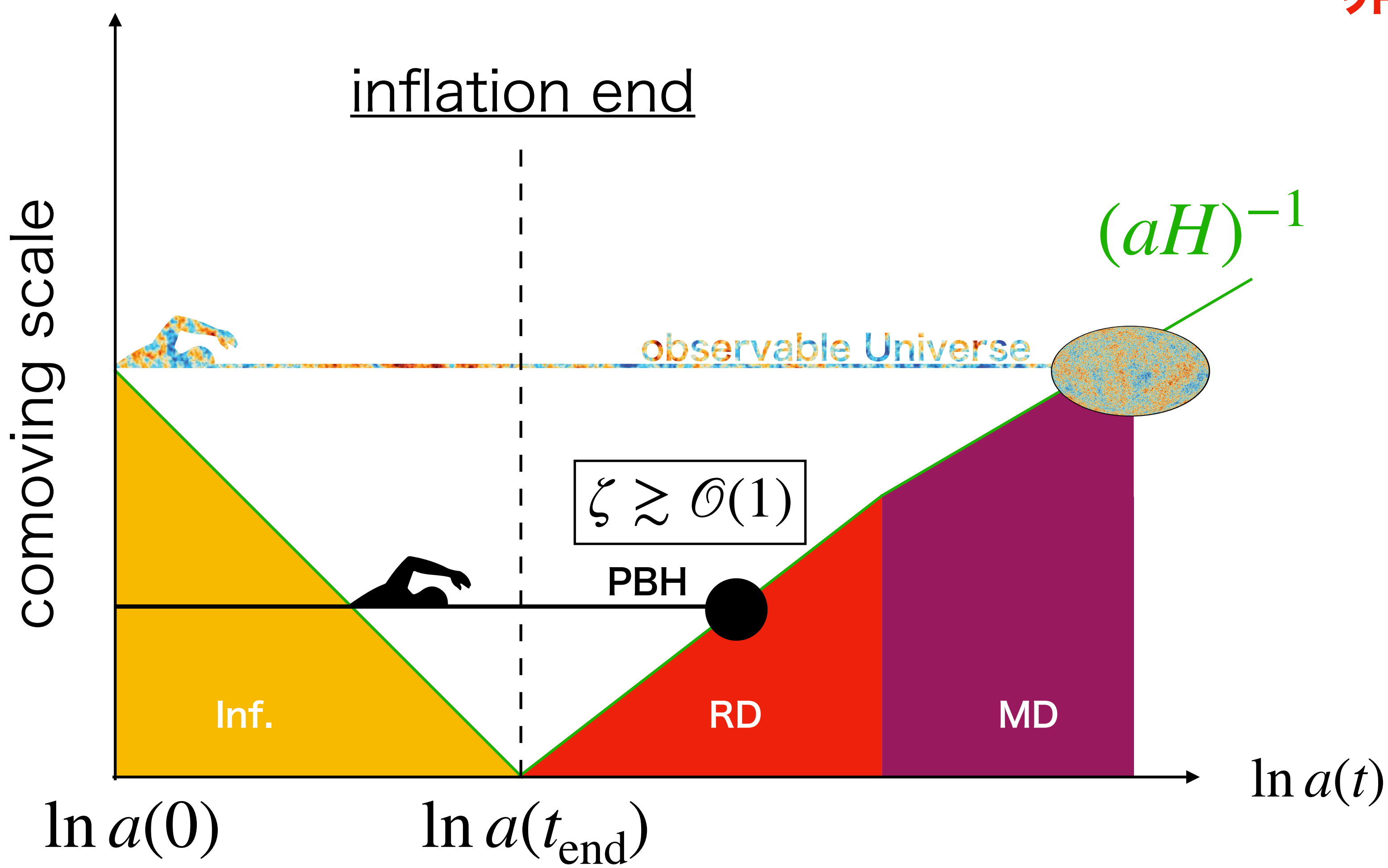
[in collab.：須山輝明（東京工業大学）、高橋智（佐賀大学）]

第10回観測的宇宙論ワークショップ

導入

- 原始ブラックホール (primordial black hole : PBH)
  - 形成時期が宇宙の極初期(⋘ 宇宙の晴れ上がり)
  - いろんな質量を持てる (⇐ 観測で制限)
  - small-scale(≈ horizon scale)における$\underline{\mathcal{O}(1)\text{以上の曲率ゆらぎ}\zeta}$が種

非常にレア



https://apod.nasa.gov/apod/ap180722.html

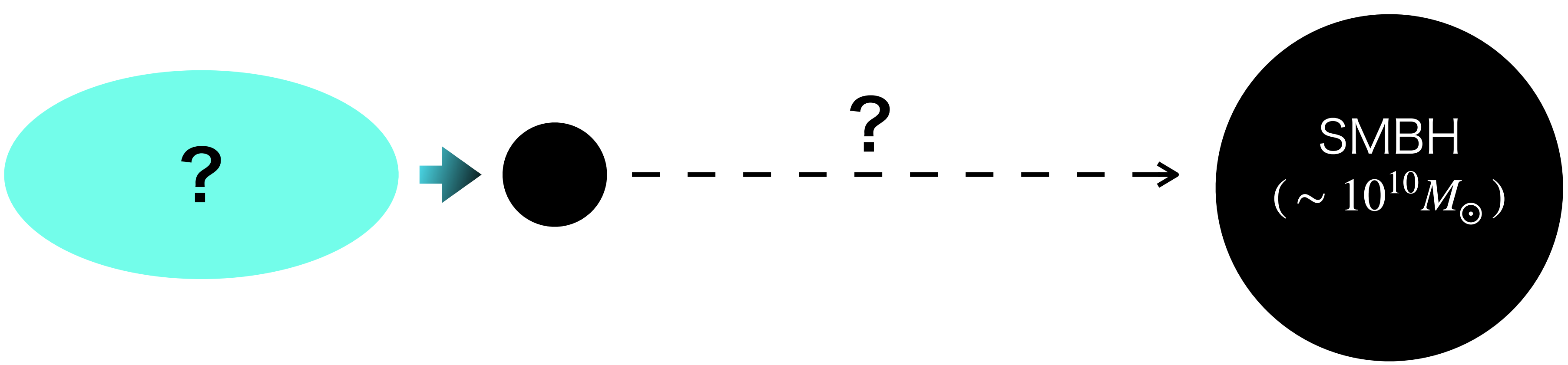
導入

- 高赤方偏移のクェーサー

($5 \lesssim z \lesssim 7$)　　非常に明るい

$\Longrightarrow$ 超巨大ブラックホール(SMBH)の降着
($10^7 M_\odot$ – $10^{10} M_\odot$)　**標準的**

$\sim 10^{10} M_\odot$ at $z \sim 7$ …… どうやって作るか？
(宇宙年齢~8億年)



導入

・そういえば、、、

PBH …… 「宇宙初期で作られる」、「いろんな質量を持てる」

$\Longrightarrow$ **Pop IIIよりも重い種** or **SMBHそのもの**

$$(10^4 M_\odot \lesssim M_{\mathrm{PBH}} \lesssim 10^{10} M_\odot)$$

$$\boxed{\zeta \gtrsim \mathcal{O}(1)}$$

導入

・やりたいこと

⇒ SMBHのPBH起源説検証

・やったこと

⇒ PBHの角度相関関数を評価

(検証のための道具)

Supermassive PBHs生成モデル

・流れ

1. 興味 $\Longrightarrow$ 高赤方偏移のSMBH

2. PBH質量 $\Longrightarrow$ $10^4 M_\odot \lesssim M_{\rm PBH} \lesssim 10^{10} M_\odot$

3. 観測制限 $\Longrightarrow$ CMBスペクトルのμ-distortion

4. モデル設定 $\Longrightarrow$

5. 解析 $\Longrightarrow$

Supermassive PBHs生成モデル

・流れ

1. 興味 $\Longrightarrow$ 高赤方偏移のSMBH

2. PBH質量 $\Longrightarrow$ $10^4 M_\odot \lesssim M_{\rm PBH} \lesssim 10^{10} M_\odot$

3. 観測制限 $\Longrightarrow$ CMBスペクトルのμ-distortion

化学ポテンシャル

4. モデル設定 $\Longrightarrow$

$\Longrightarrow$ (Planck分布 $\mapsto$ Bose-Einstein分布)

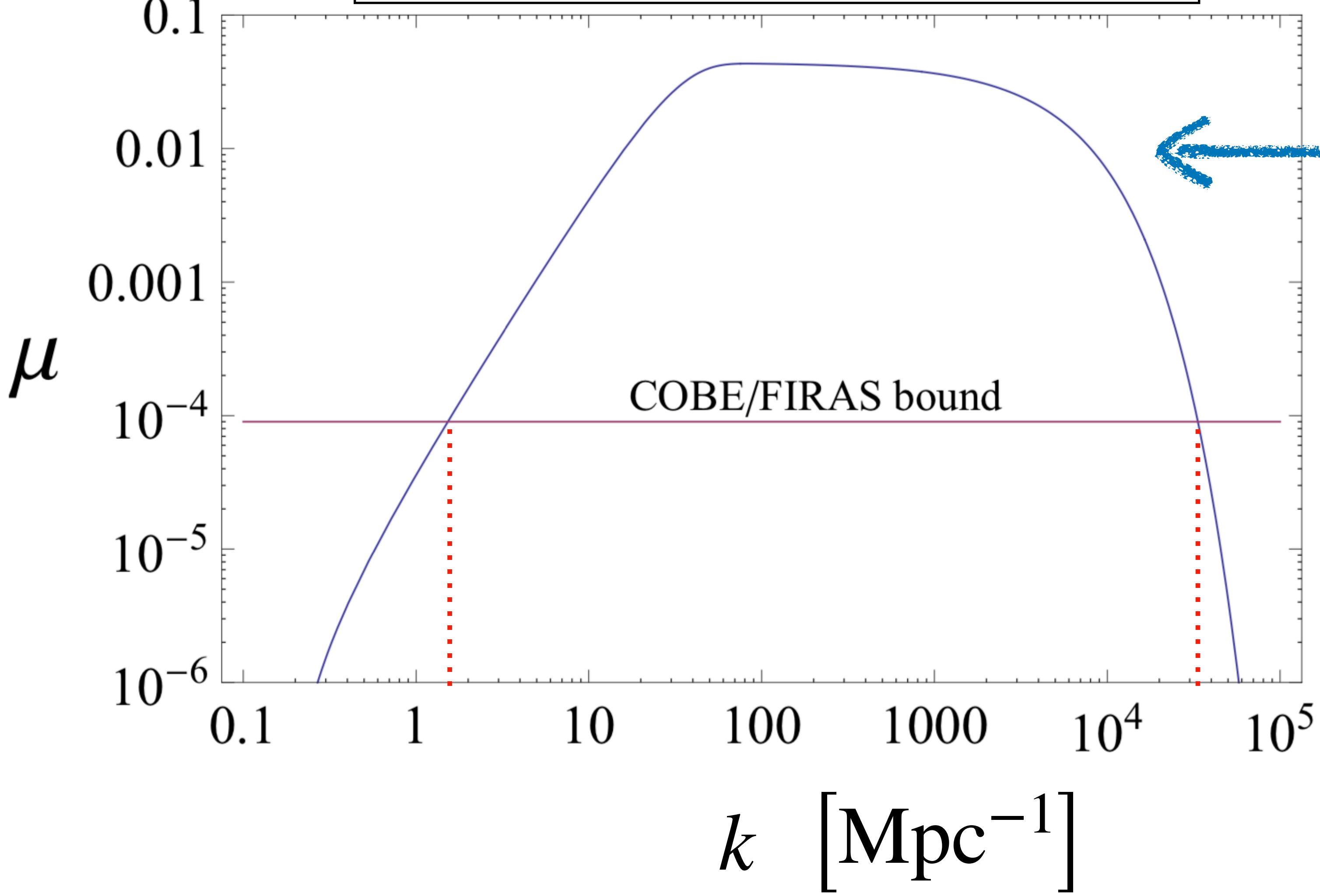
5. 解析 $\Longrightarrow$

Supermassive PBHs生成モデル

・宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のμ-distortionからの制限

μ …… 化学ポテンシャル

K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, 1405.5999



Gaussian曲率ゆらぎから生成されるμ

J. Chluba, et al. 1203.2681

CMB観測から与えられるμの上限

$$\mu \lesssim 9 \times 10^{-5} \qquad (2\sigma)$$

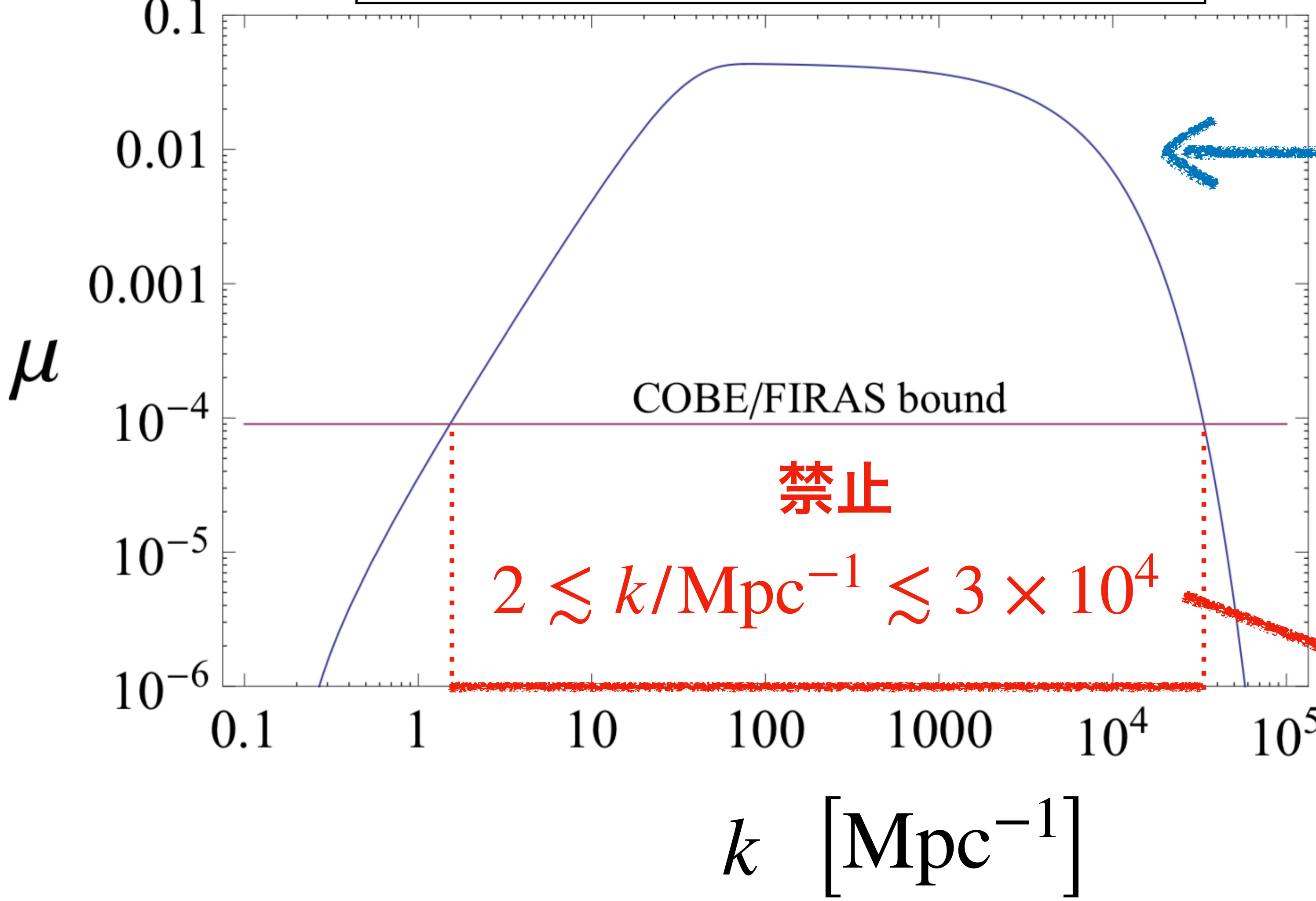
D. J. Fixsen, et al. 9605054

Supermassive PBHs生成モデル

・宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のμ-distortionからの制限

μ …… 化学ポテンシャル

K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, 1405.5999



Gaussian曲率ゆらぎから生成されるμ

J. Chluba, et al. 1203.2681

CMB観測から与えられるμの上限

$\mu \lesssim 9\times10^{-5}$ (2σ)

D. J. Fixsen, et al. 9605054

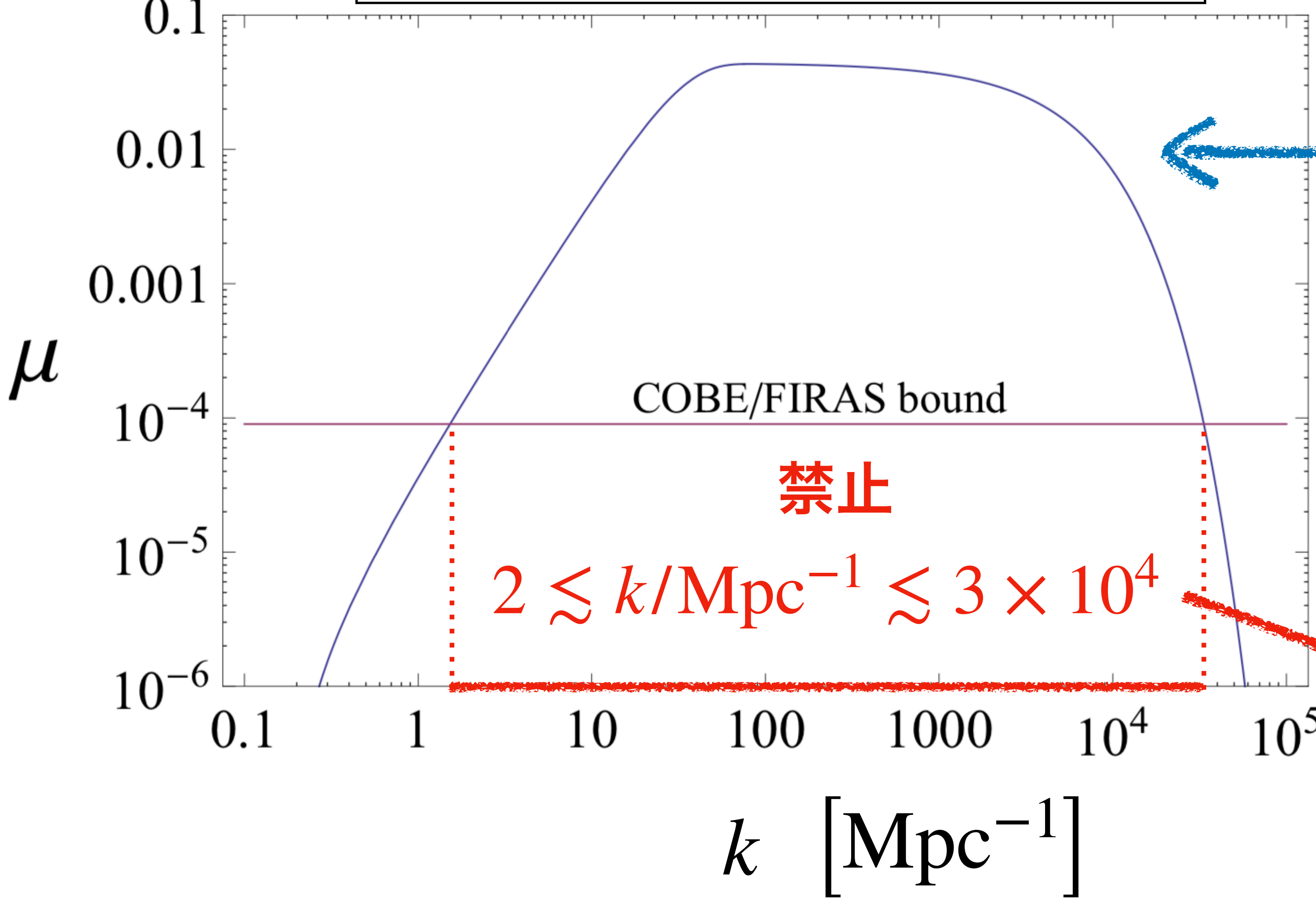
$10^4 \lesssim M_{\mathrm{PBH}}/M_\odot \lesssim 10^{13}$ 禁止

Supermassive PBHs生成モデル

・宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のμ-distortionからの制限

μ …… 化学ポテンシャル

K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, 1405.5999



Gaussian曲率ゆらぎから生成されるμ

J. Chluba, et al. 1203.2681

CMB観測から与えられるμの上限

$\mu \lesssim 9 \times 10^{-5} \qquad (2\sigma)$

D. J. Fixsen, et al. 9605054

$10^4 \lesssim M_{\mathrm{PBH}}/M_\odot \lesssim 10^{13}$ **禁止**

SMBHを説明する質量： $\cancel{10^4 M_\odot - 10^{10} M_\odot}$

Gaussian曲率ゆらぎ起源のSM-PBH形成シナリオは排除される !!

Supermassive PBHs生成モデル

・Gaussian曲率ゆらぎがダメなら…

⇒ non-Gaussian曲率ゆらぎ

(e. g., $f_{\rm NL}$, $g_{\rm NL}$, $\tau_{\rm NL}$)

highly non-Gaussianなら
制限回避

既存のSM-PBH生成モデル

- T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, 1609.02245
- F. Hasegawa & M. Kawasaki, 1711.0090
- M. Kawasaki & K. Murai, 1907.02273
- N. Kitajima, F. Takahashi, 2006.13137

⋮

<u>共通する特徴</u>

- spectator field(inflatonとは異なる軽い自由スカラー場)の導入
- superhorizonのspectator fieldがinflation中に確率的運動
- non-Gaussian曲率ゆらぎ $\gtrsim \mathcal{O}(1)$ or ≈ 0 (大抵0)

踏襲する

Supermassive PBHs生成モデル

- spectator fieldの導入
  (inflatonとは異なる軽い自由スカラー場)

⇒ **small-, large-scaleのモードが相関を持つ**タイプのnon-Gaussian
(e.g., local-type)

形成されるPBHがクラスタリング

T. Suyama and S. Yokoyama, 1906.049582

S. Young and C. T. Byrnes, 1503.01505

Y. Tada and S. Yokoyama, 1502.01124

相関関数を評価

Supermassive PBHs生成モデル

・Gaussian曲率ゆらぎがダメなら…

⇒ non-Gaussian曲率ゆらぎ

(e. g., $f_{\rm NL}$, $g_{\rm NL}$, $\tau_{\rm NL}$)

highly non-Gaussianなら制限回避

既存のSM-PBH生成モデル

- T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, 1609.02245
- F. Hasegawa & M. Kawasaki, 1711.0090
- M. Kawasaki & K. Murai, 1907.02273
- N. Kitajima, F. Takahashi, 2006.13137
- ⋮

共通する特徴

- spectator field(inflatonとは異なる軽い自由スカラー場)の導入
- superhorizonのspectator fieldがinflation中に確率的変動
- non-Gaussian曲率ゆらぎ $\gtrsim \mathcal{O}(1)$ or ≈ 0 (大抵0)

踏襲する

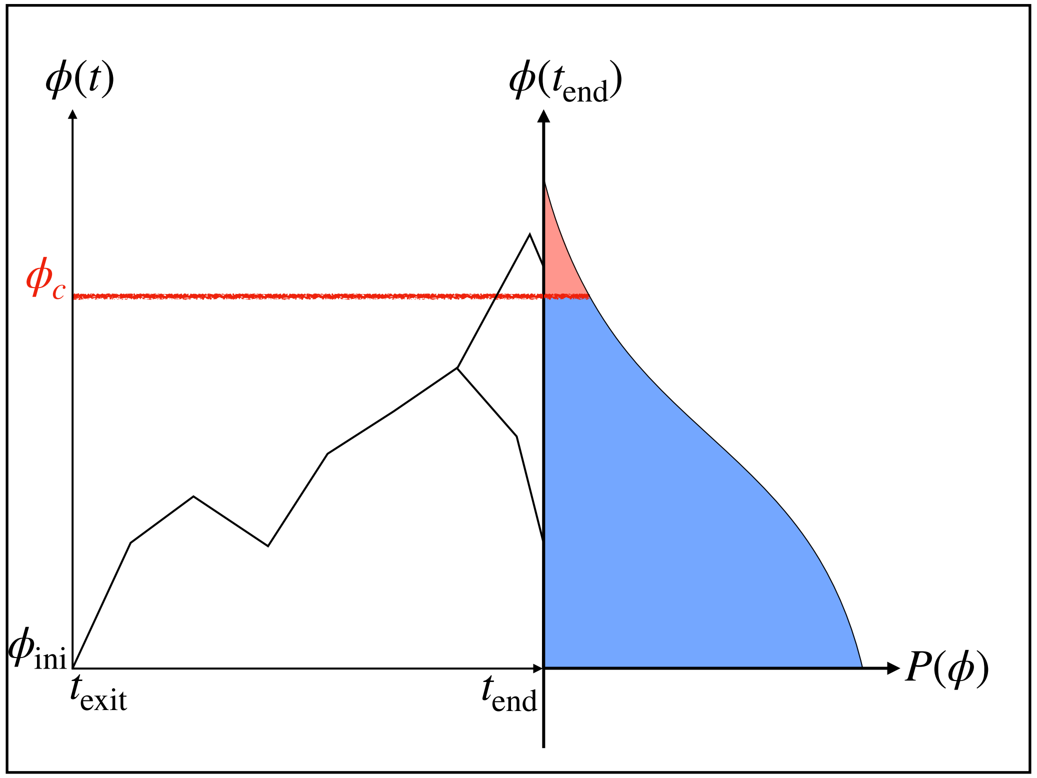
Supermassive PBHs生成モデル

- superhorizonのspectator fieldがinflation中に確率的変動

⟹ **Langevin equation (確率的運動を記述)**

$$\dot{\phi}(t) = \underbrace{-\frac{m^2}{3H}\phi(t)}_{\text{古典的な運動}} + \underbrace{\xi(t)}_{\text{確率的な運動 (Gaussian noise)}}$$

ϕ **の確率分布関数 = Gaussian**



(ϕ_c …… 曲率ゆらぎ生成についての閾値)

Supermassive PBHs生成モデル

・Gaussian曲率ゆらぎがダメなら…

⇒ non-Gaussian曲率ゆらぎ

(e. g., $f_{\rm NL}$, $g_{\rm NL}$, $\tau_{\rm NL}$)

highly non-Gaussianなら
制限回避

既存のSM-PBH生成モデル

- T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, 1609.02245
- F. Hasegawa & M. Kawasaki, 1711.0090
- M. Kawasaki & K. Murai, 1907.02273
- N. Kitajima, F. Takahashi, 2006.13137

⋮

共通する特徴

- spectator field(inflatonとは異なる軽い自由スカラー場)の導入
- superhorizonのspectator fieldがinflation中に確率的変動
- non-Gaussian曲率ゆらぎ $\gtrsim \mathcal{O}(1)$ or ≈ 0 (大抵0)

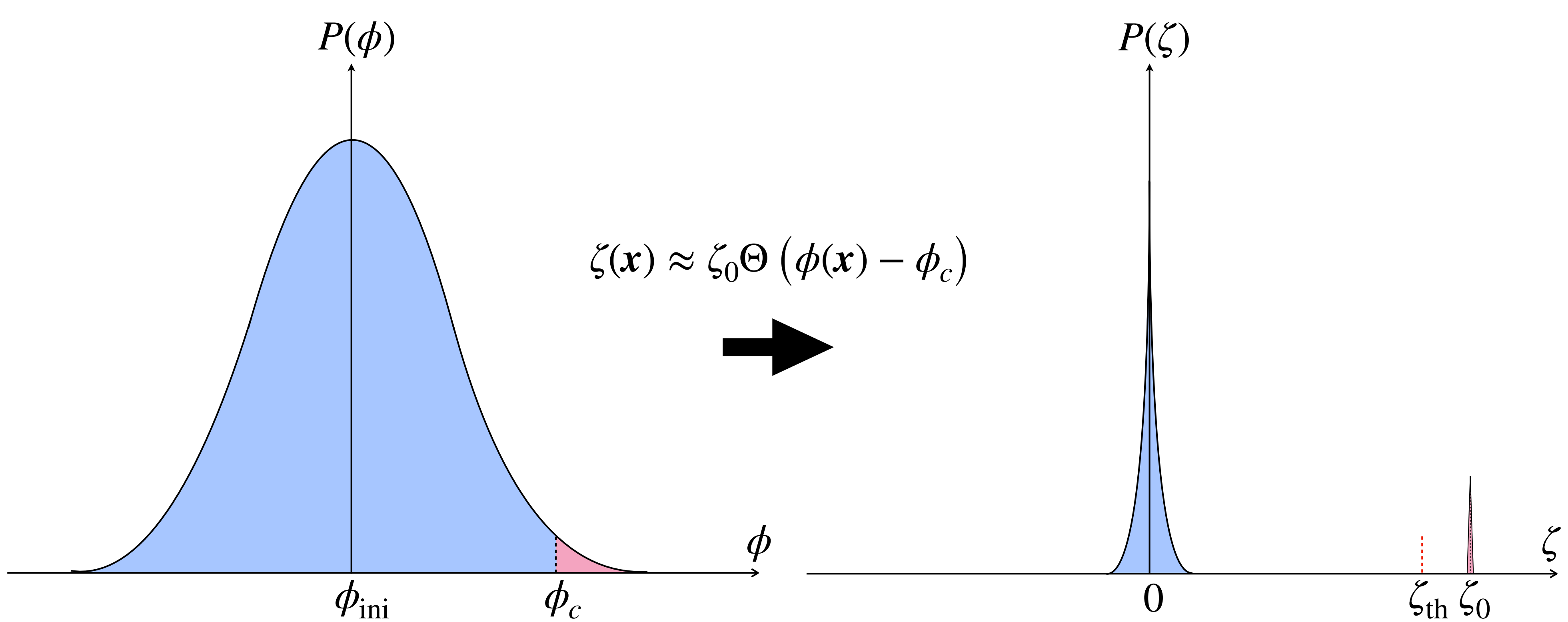
踏襲する

Supermassive PBHs生成モデル

- non-Gaussian曲率ゆらぎ $\gtrsim \mathcal{O}(1)$ or ≈ 0 (大抵0)

$$\zeta(\boldsymbol{x}) \approx \boxed{\zeta_0}\,\Theta\left(\phi(\boldsymbol{x}) - \phi_{\rm c}\right) = \begin{cases} \zeta_0 & (\phi \geq \phi_{\rm c}) \\ 0 & (\phi < \phi_{\rm c}) \end{cases}$$

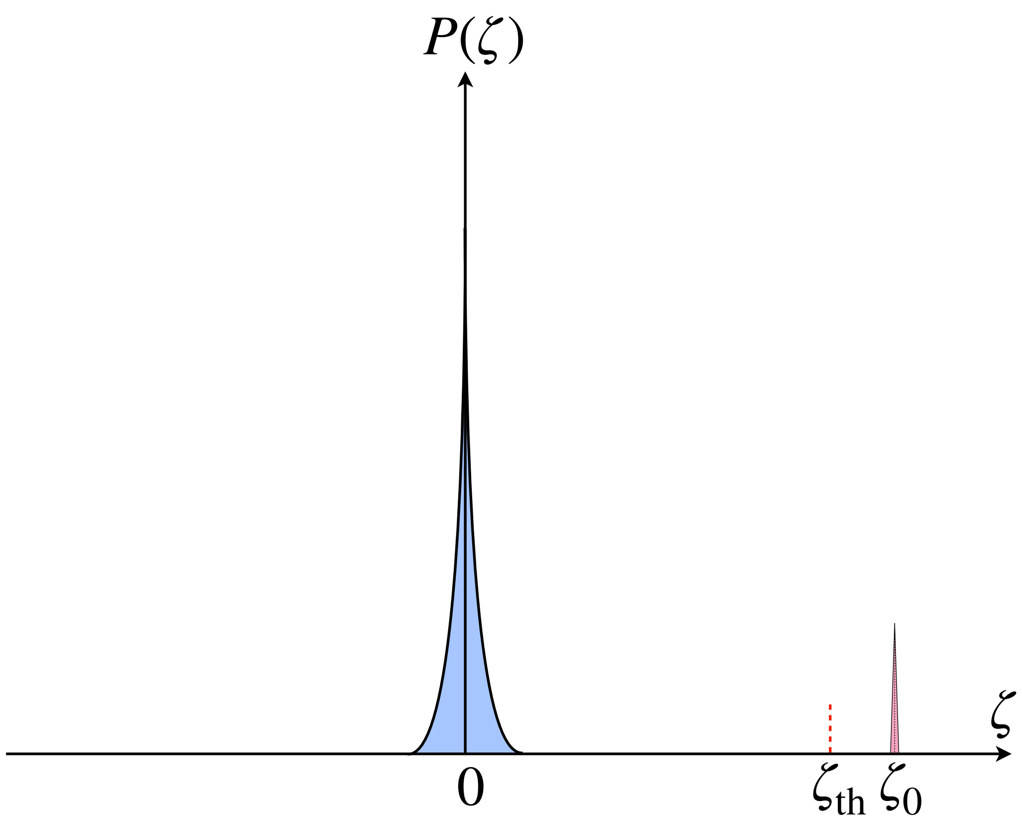
$\geq \zeta_{\rm th}$

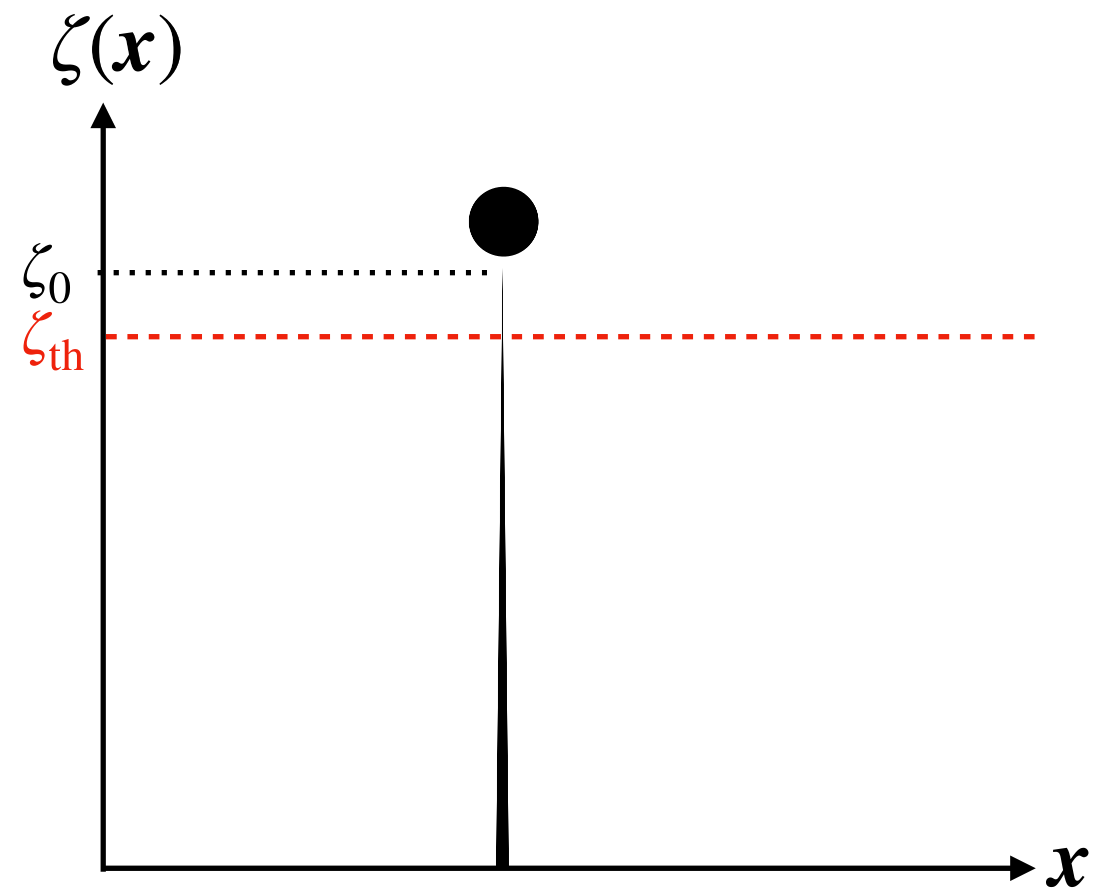


spectator field **curvature perturbations**

Supermassive PBHs生成モデル

- non-Gaussian曲率ゆらぎ $\gtrsim \mathcal{O}(1)$ or ≈ 0 (大抵0)





PBH形成が起きない領域 : $\zeta \approx 0$ $\Longrightarrow$ μの生成が抑制 $\Longrightarrow$ 制限回避！

Supermassive PBHs生成モデル

・Gaussian曲率ゆらぎがダメなら…

⇒ non-Gaussian曲率ゆらぎ
(e. g., $f_{\rm NL}$, $g_{\rm NL}$, $\tau_{\rm NL}$)

highly non-Gaussianなら
制限回避

既存のSM-PBH生成モデル

- T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, 1609.02245
- F. Hasegawa & M. Kawasaki, 1711.0090
- M. Kawasaki & K. Murai, 1907.02273
- N. Kitajima, F. Takahashi, 2006.13137

⋮

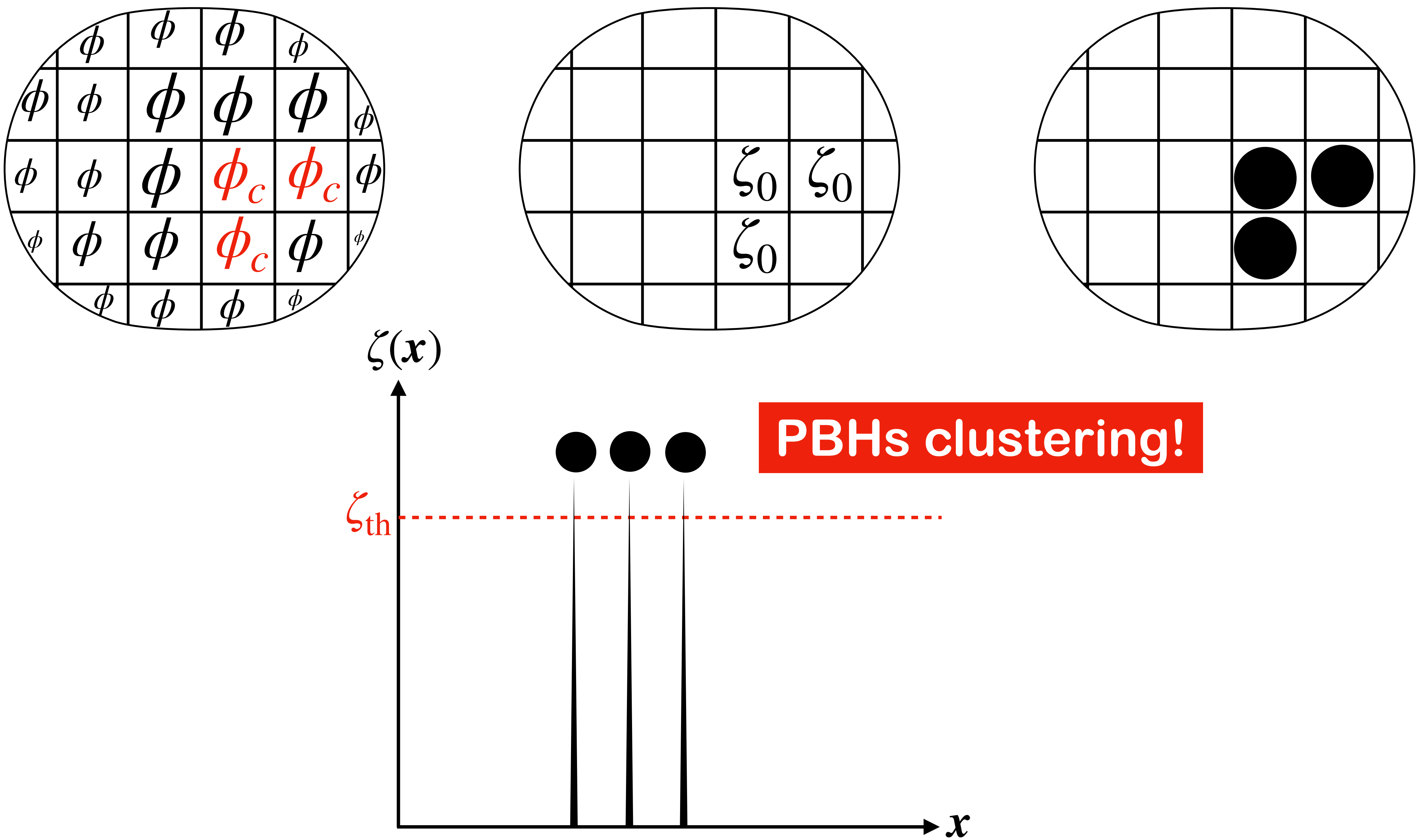
共通する特徴

- spectator field(inflatonとは異なる軽い自由スカラー場)の導入
- superhorizonのspectator fieldがinflation中に確率的変動
- non-Gaussian曲率ゆらぎ $\gtrsim \mathcal{O}(1)$ or ≈ 0 (大抵0)

踏襲する

Supermassive PBHs生成モデル

$$\xi_\phi(r) \equiv \left\langle \left(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_1) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_1)\right)\left(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_2) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_2)\right) \right\rangle > 0$$



Supermassive PBHs生成モデル

・流れ

1. 興味 ⇒ 高赤方偏移のSMBH

2. PBH質量 ⇒ $10^4 M_\odot \lesssim M_{\rm PBH} \lesssim 10^{10} M_\odot$

3. 観測制限 ⇒ CMBスペクトルのμ-distortion

4. モデル設定 ⇒ non-Gaussian曲率ゆらぎ生成

5. 解析 ⇒ クラスタリング性を評価 by 2点相関関数

PBHの2点相関関数

spectator fieldの2点相関関数

cut-off

$$\xi_\phi(r) \equiv \Big\langle \big(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_1) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_1)\big)\big(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_2) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_2)\big) \Big\rangle = \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{{\rm d}k}{k} \frac{\sin(kr)}{kr} \mathscr{P}_\phi(k)$$

spectator fieldの無次元パワースペクトル

$$\mathscr{P}_\phi(k) \equiv \frac{k^3}{2\pi^2} P_\phi(k) = \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{k}{k_{\rm end}}\right)^{c_I}, \qquad c_I \equiv \frac{2m^2}{3H_I^2}, \qquad 0 \leq c_I \ll \frac{2}{3}$$

(horizon scale at $t_{\rm end}$ ⋯⋯ $k_{\rm end} = a_{\rm end} H_I$)　　(スカラー場の軽さ)

spectator fieldのvariance

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{{\rm d}k}{k} \left(\frac{k}{k_{\rm end}}\right)^{c_I} = c_I^{-1} \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \left[\left(\frac{k_{\rm max}}{k_{\rm end}}\right)^{c_I} - \left(\frac{k_{\rm min}}{k_{\rm end}}\right)^{c_I}\right]$$

PBHの2点相関関数

- $k_{\rm min}, k_{\rm max}$?

（興味あるクラスタリングの最大スケール）　　（PBH形成に寄与するモード）

observable Universe $<\ k\ <$ supermassive PBH scale

$$\Updownarrow \qquad\qquad \Updownarrow$$

$$\boxed{k_{\rm min} = H_0}$$

$$k_{\rm max}(M_{\rm PBH}) \approx 1.3 \times 10^4 \left(\frac{g_{*,f}}{10.75}\right)^{-1/12} \left(\frac{M_{\rm PBH}}{10^4 M_\odot}\right)^{-1/2} {\rm Mpc}^{-1}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\begin{array}{l} M_{\rm PBH} = 10^{10} M_\odot \ \longleftrightarrow\ k_{\rm max} = 10\ {\rm Mpc}^{-1} \\ M_{\rm PBH} = 10^4 M_\odot \ \longleftrightarrow\ k_{\rm max} = 10^4\ {\rm Mpc}^{-1} \end{array}}$$

PBHの2点相関関数

spectator fieldの2点相関関数

cut-off

$$\xi_\phi(r) \equiv \left\langle \left(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_1) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_1)\right)\left(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_2) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_2)\right)\right\rangle = \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{{\rm d}k}{k} \frac{\sin(kr)}{kr} \mathscr{P}_\phi(k)$$

spectator fieldの無次元パワースペクトル

$$\mathscr{P}_\phi(k) \equiv \frac{k^3}{2\pi^2} P_\phi(k) = \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{k}{k_{\rm end}}\right)^{c_I}, \qquad c_I \equiv \frac{2m^2}{3H_I^2}, \qquad 0 \le c_I \ll \frac{2}{3}$$

(horizon scale at $t_{\rm end}$ ⋯⋯ $k_{\rm end} = a_{\rm end} H_I$)　(スカラー場の軽さ)

spectator fieldのvariance

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{{\rm d}k}{k} \left(\frac{k}{k_{\rm end}}\right)^{c_I} = c_I^{-1} \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \left[\left(\frac{k_{\rm max}}{k_{\rm end}}\right)^{c_I} - \left(\frac{k_{\rm min}}{k_{\rm end}}\right)^{c_I}\right]$$

PBHの2点相関関数

spectator fieldの2点相関関数

cut-off

$$\xi_\phi(r) \equiv \left\langle \left(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_1) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_1)\right)\left(\phi(t_{\rm end}, \boldsymbol{x}_2) - \phi(t_{\rm ini}, \boldsymbol{x}_2)\right) \right\rangle = \boxed{\int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{{\rm d}k}{k} \frac{\sin(kr)}{kr} \mathscr{P}_\phi(k)}$$

spectator fieldの無次元パワースペクトル

$$\mathscr{P}_\phi(k) \equiv \frac{k^3}{2\pi^2} P_\phi(k) = \boxed{\left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{k}{k_{\rm end}}\right)^{c_I}}, \qquad c_I \equiv \frac{2m^2}{3H_I^2}, \qquad 0 \le c_I \ll \frac{2}{3}$$

(horizon scale at $t_{\rm end}$ …… $k_{\rm end} = a_{\rm end} H_I$) (スカラー場の軽さ)

spectator fieldのvariance

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{{\rm d}k}{k} \left(\frac{k}{k_{\rm end}}\right)^{c_I} = \boxed{c_I^{-1} \left(\frac{H_I}{2\pi}\right)^2 \left[\left(\frac{k_{\rm max}}{k_{\rm end}}\right)^{c_I} - \left(\frac{k_{\rm min}}{k_{\rm end}}\right)^{c_I}\right]}$$

$$\boxed{\epsilon(r) \equiv \frac{\xi_\phi(r)}{\sigma_\phi^2} = \frac{c_I}{(k_{\rm max})^{c_I} - (k_{\rm min})^{c_I}} \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{dk}{k} k^{c_I} \frac{\sin(kr)}{kr} \le 1}$$

PBHの2点相関関数

・PBHの2点相関関数の定義

$$\boxed{\xi_{\mathrm{PBH}}(|\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2|) \equiv \frac{P_2(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2)}{P_1^2(\boldsymbol{x})} - 1}$$

＝ クラスタリングを判定する量！　　$r \equiv |\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2|$

- $\xi_{\mathrm{PBH}}(r) > 0$ $\cdots\cdots$ r のスケールでクラスタリング
- $\xi_{\mathrm{PBH}}(r) = 0$ $\cdots\cdots$ r のスケールで一様分布
- $-1 \leq \xi_{\mathrm{PBH}}(r) < 0$ $\cdots\cdots$ r のスケールではボイド領域

PBHの2点相関関数

- PBHの2点相関関数の導出

(PBH formation is a very very rare event : $\phi_c \gg \sigma_\phi$)

$$P_1(\boldsymbol{x}) = \int [D\phi]\ P[\phi] \int_{\phi_c}^{\infty} d\alpha\ \delta_D\big(\phi(\boldsymbol{x}) - \alpha\big) \quad \overset{\nu \gg 1}{\approx} \quad \frac{e^{-\nu^2/2}}{\sqrt{2\pi}\ \nu}$$

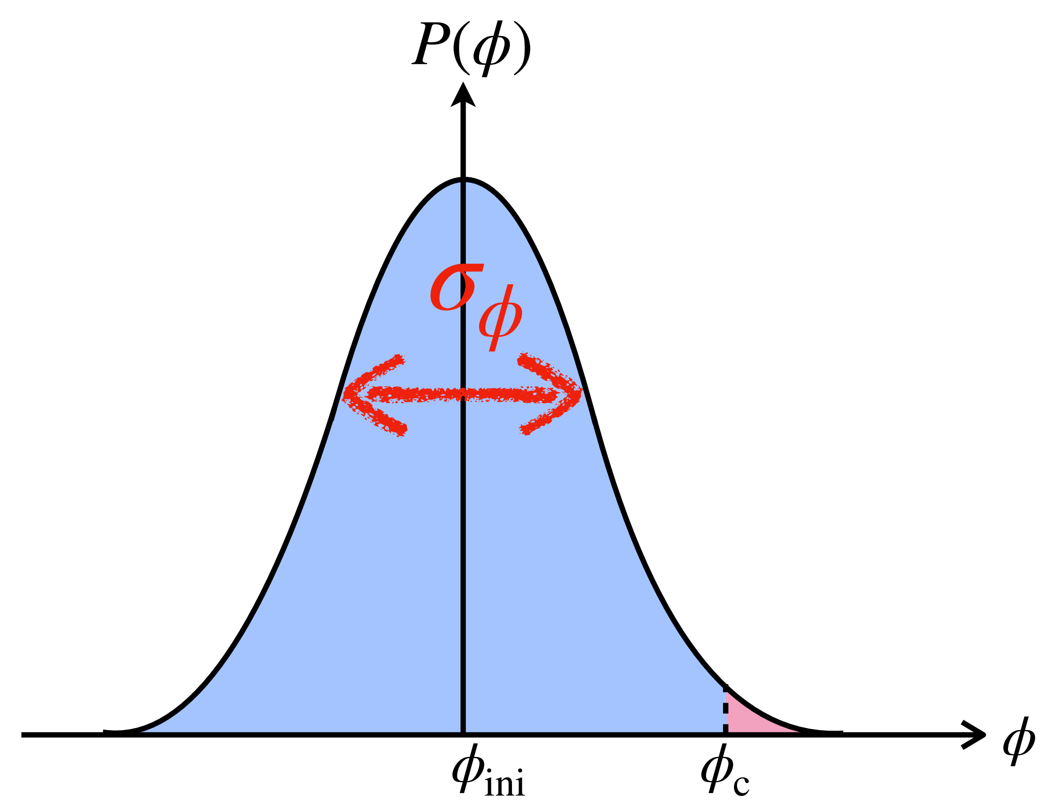
Gaussian PDF

$$P_2(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2) = \int [D\phi]\ P[\phi] \int_{\phi_c}^{\infty} d\alpha_1\ \delta_D\big(\phi(\boldsymbol{x}_1) - \alpha_1\big) \int_{\phi_c}^{\infty} d\alpha_2\ \delta_D\big(\phi(\boldsymbol{x}_2) - \alpha_2\big)$$

$$\approx \frac{1}{2\pi\nu^2} \frac{\big(1 + \epsilon(r)\big)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{1 - \epsilon(r)}} \exp\left(- \frac{\nu^2}{1 + \epsilon(r)} \right)$$

Where

$$\nu \equiv \frac{\phi_c}{\sigma_\phi}, \qquad \epsilon(r) \equiv \frac{\xi_\phi(r)}{\sigma_\phi^2} \leq 1$$



PBHの2点相関関数

・PBHの2点相関関数の導出

$$P_2(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2) \overset{\nu \gg 1}{\approx} \frac{1}{2\pi\nu^2} \frac{\left(1+\epsilon(r)\right)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{1-\epsilon(r)}} \exp\left(-\frac{\nu^2}{1+\epsilon(r)}\right)$$

$$\xi_{\mathrm{PBH}}(|\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2|) \equiv \frac{P_2(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2)}{P_1^2(\boldsymbol{x})} - 1$$

$$P_1(\boldsymbol{x}) \overset{\nu \gg 1}{\approx} \frac{e^{-\nu^2/2}}{\sqrt{2\pi}\,\nu}$$

$$\boxed{\therefore \quad \xi_{\mathrm{PBH}}(r) \approx \frac{\left(1+\epsilon(r)\right)^{3/2}}{\sqrt{1-\epsilon(r)}} \exp\left(\frac{\boxed{\nu^2}\epsilon(r)}{1+\epsilon(r)}\right) - 1}$$

⟹ highly non-Gaussian由来の非常にレアなobjectに対して一般的に成り立つ

⟹ νに指数関数的に依存: 必然的に高度なクラスタリングが起こる

PBHの2点相関関数

- $\nu \equiv \dfrac{\phi_c}{\sigma_\phi}$?

$\Longrightarrow$ (Energy fraction of PBHs) = (One-point probability of PBHs)

(at formation time)

観測量

$$\beta(M_{\rm PBH}) \equiv \left.\frac{\rho_{\rm PBH}}{\rho_{\rm total}}\right|_{\rm formation} \sim 10^{-22}\left(\frac{g_{*,f}}{10.75}\right)^{1/4}\left(\frac{M_{\rm PBH}}{10^4 M_\odot}\right)^{3/2}\left(\frac{\boxed{\bar{n}_{\rm PBH}}}{\rm Gpc^{-3}}\right),$$

$$P_1(\boldsymbol{x}) \overset{\nu\gg1}{\approx} \frac{e^{-\nu^2/2}}{\sqrt{2\pi}\,\nu}$$

仮定: (形成時のPBHs) = (high-zで観測されてる全てのSMBH)

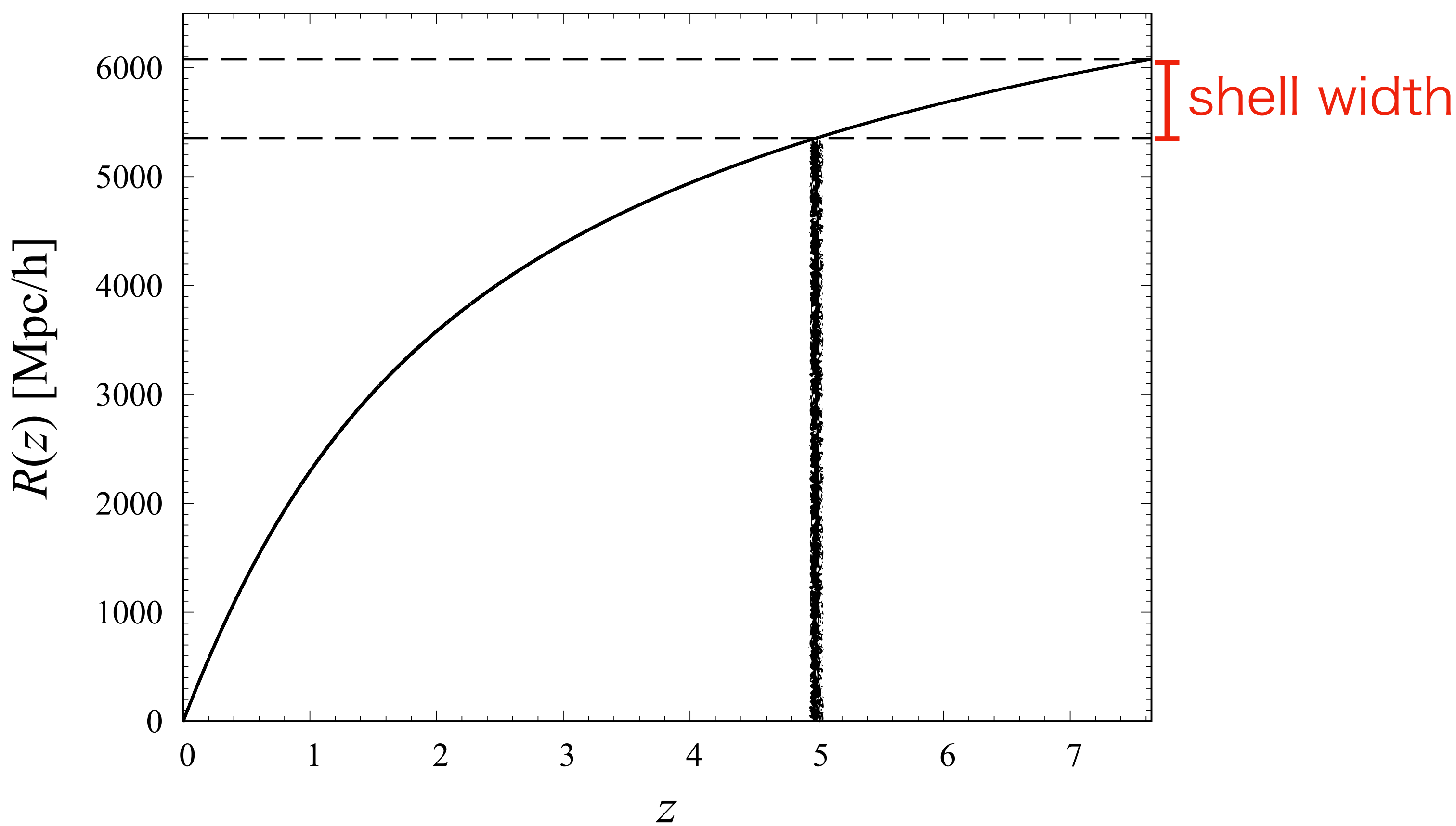
$$M_{\rm PBH} = 10^{10} M_\odot \longleftrightarrow \beta = 10^{-13} \longleftrightarrow \nu = 7.4$$

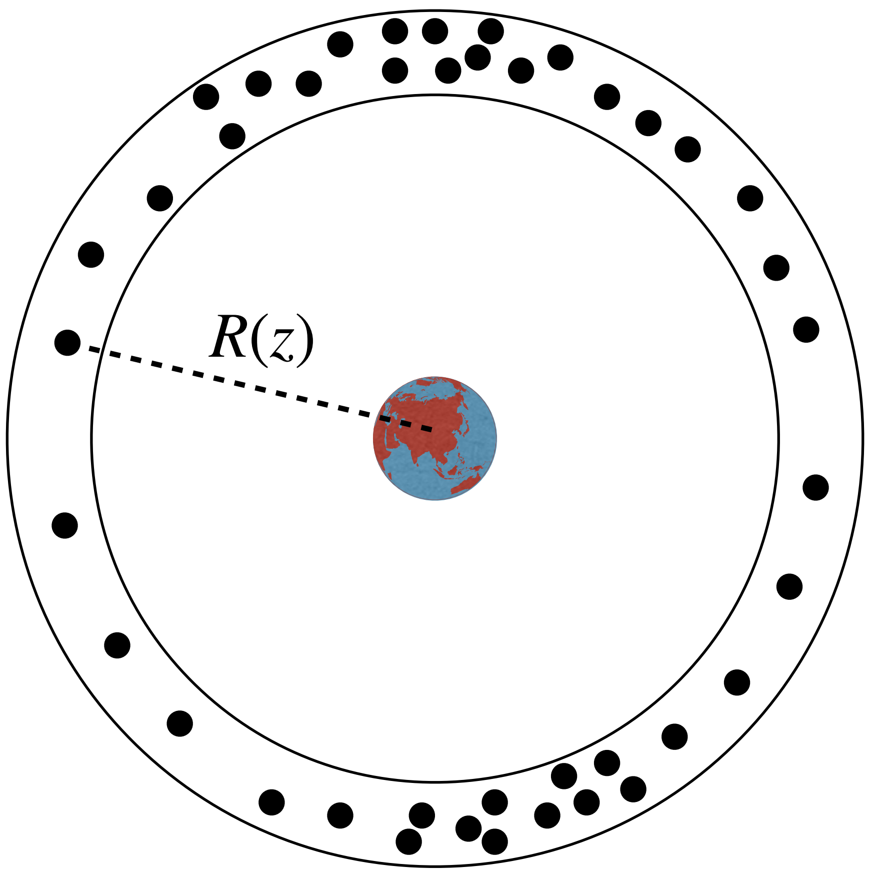
$$M_{\rm PBH} = 10^{4} M_\odot \longleftrightarrow \beta = 10^{-22} \longleftrightarrow \nu = 9.7$$

PBHの角度相関関数

興味あるSMBHは薄い球殻内で分布 (in the comoving coordinates)

$(z = 5 - 7.642)$





$$\xi_{\mathrm{PBH}}(z_1, z_2, \theta) \mapsto w_{\mathrm{PBH}}(\theta)$$ …… 角度相関関数

(in 3D space) (on celestial plane)

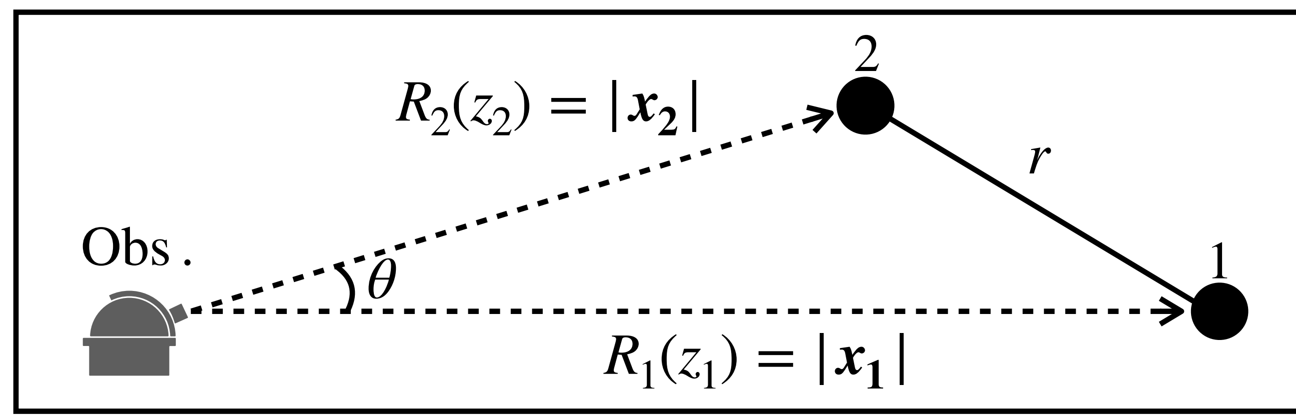
PBHの角度相関関数

window function depending on redshift of interest

$$\boxed{w_{\rm PBH}(\theta) = \int_0^\infty dR_1 \int_0^\infty dR_2\ g(R_1)\, g(R_2)\, W(R_1)\, W(R_2)\ \xi_{\rm PBH}(R_1, R_2, \theta)}$$

Weight function for line of sight

$$g(R) \equiv \frac{R^2}{\int_0^\infty dR'\ W(R')R'^2}$$



Comoving distance to SMBHs for ΛCDM

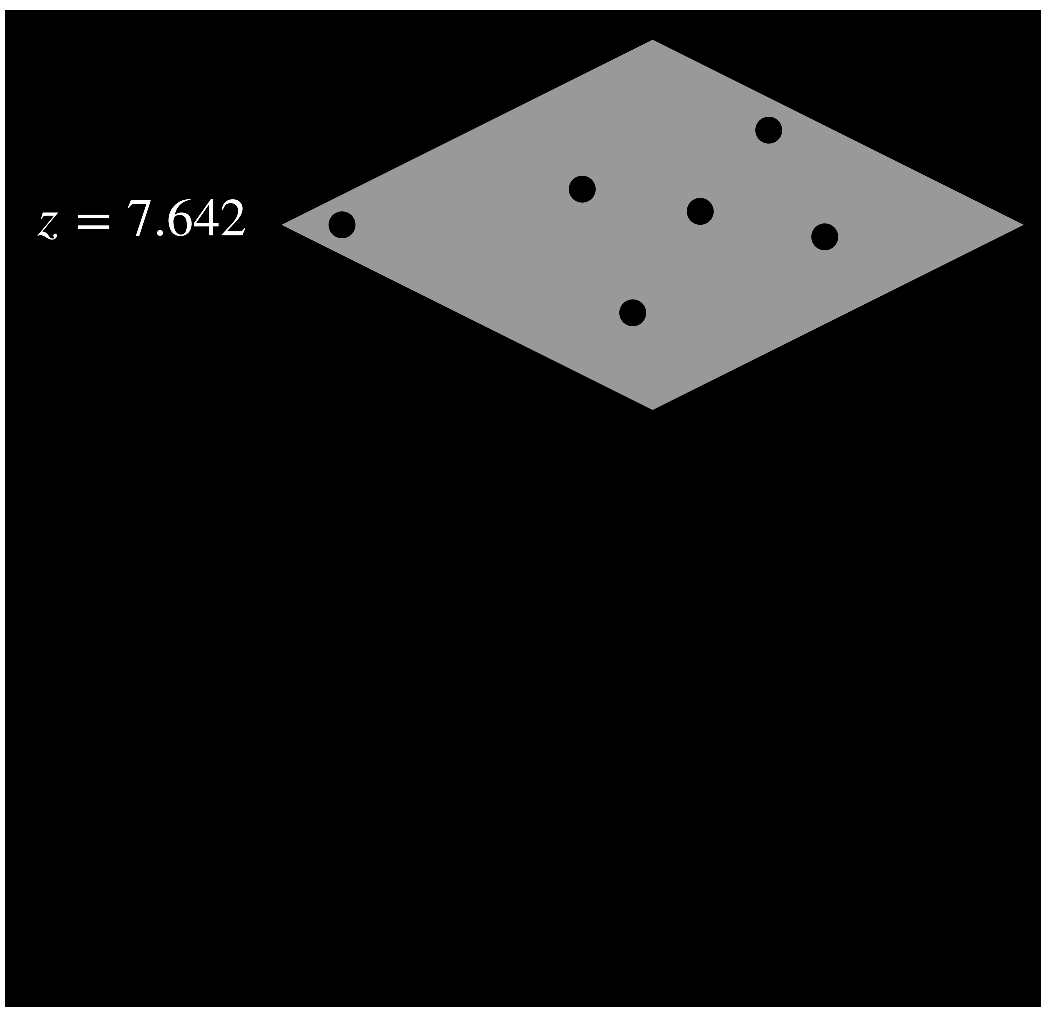
$$R_i(z_i) = \int_0^{z_i} \frac{dz}{H(z)} = \int_0^{z_i} \frac{dz}{H_0\sqrt{\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

PBHの角度相関関数

・**Two types of window function**

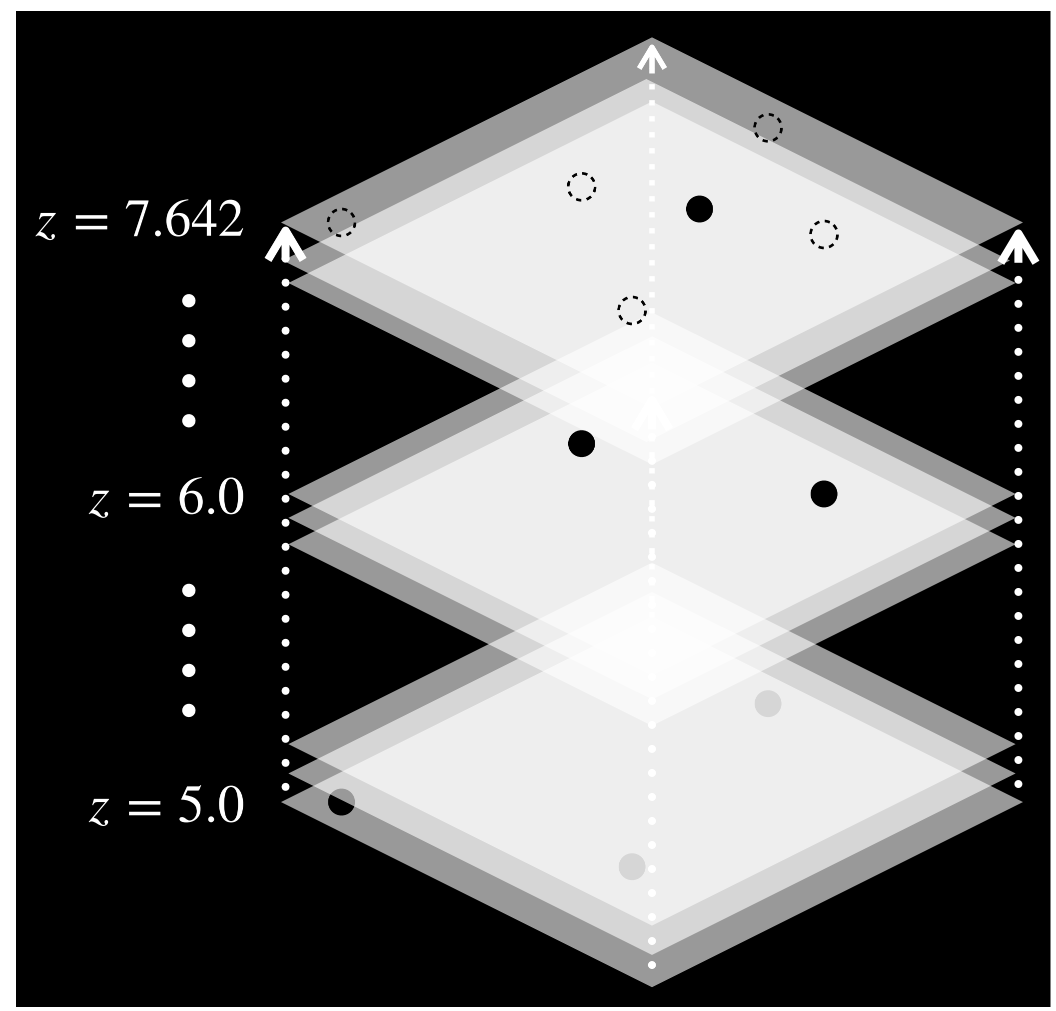
Delta function type ※ simple case

$$W(z_i) = \delta_D(z_i - z)$$



Top-hat type ※ realistic case

$$W(z_i) = \begin{cases} 1 & (\ z_{\rm low} \le z \le z_{\rm high}\ ) \\ 0 & (\text{others}) \end{cases}$$



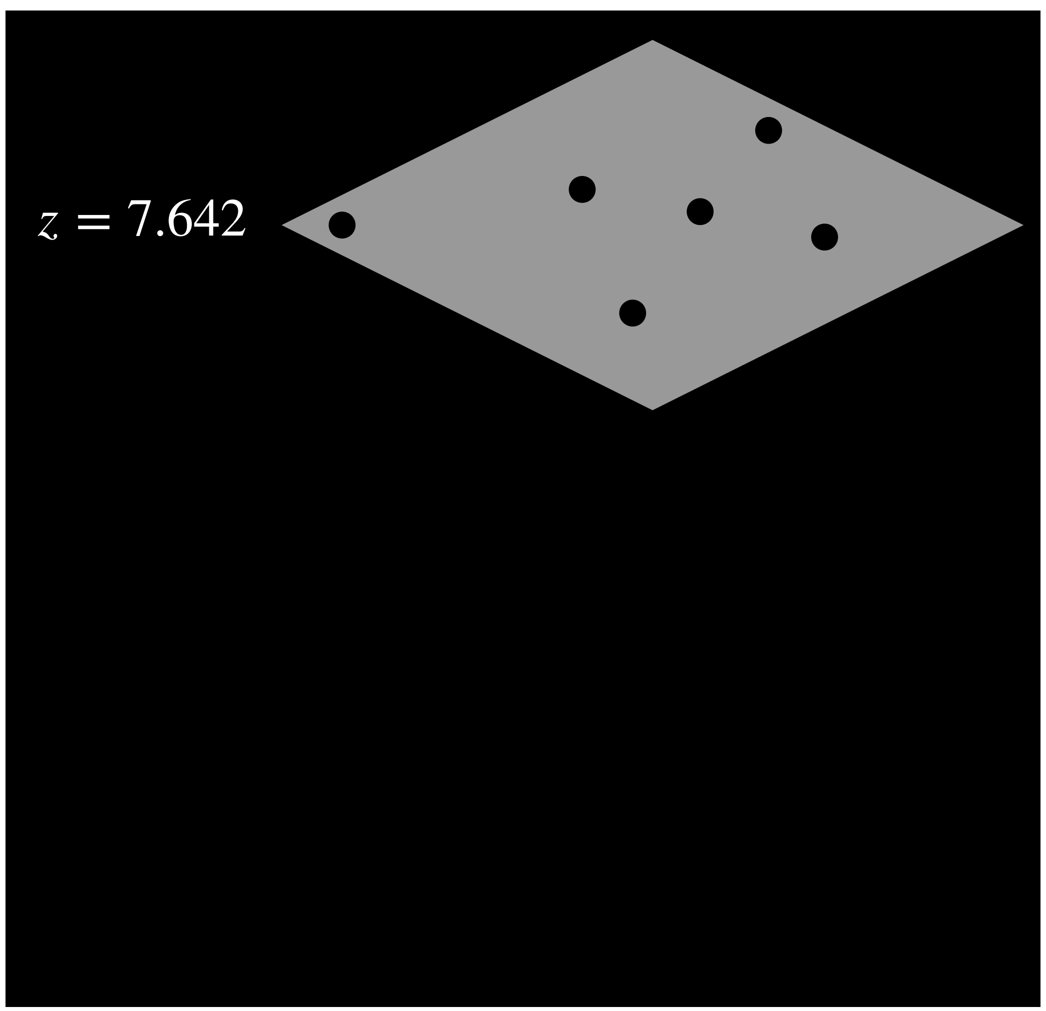
PBHの角度相関関数

・**PBH angular correlation function**

Delta function type ※ simple case

$$w_{\rm PBH}(\theta) = \xi_{\rm PBH}(r_*) = \xi_{\rm PBH}(R_*, \theta)$$

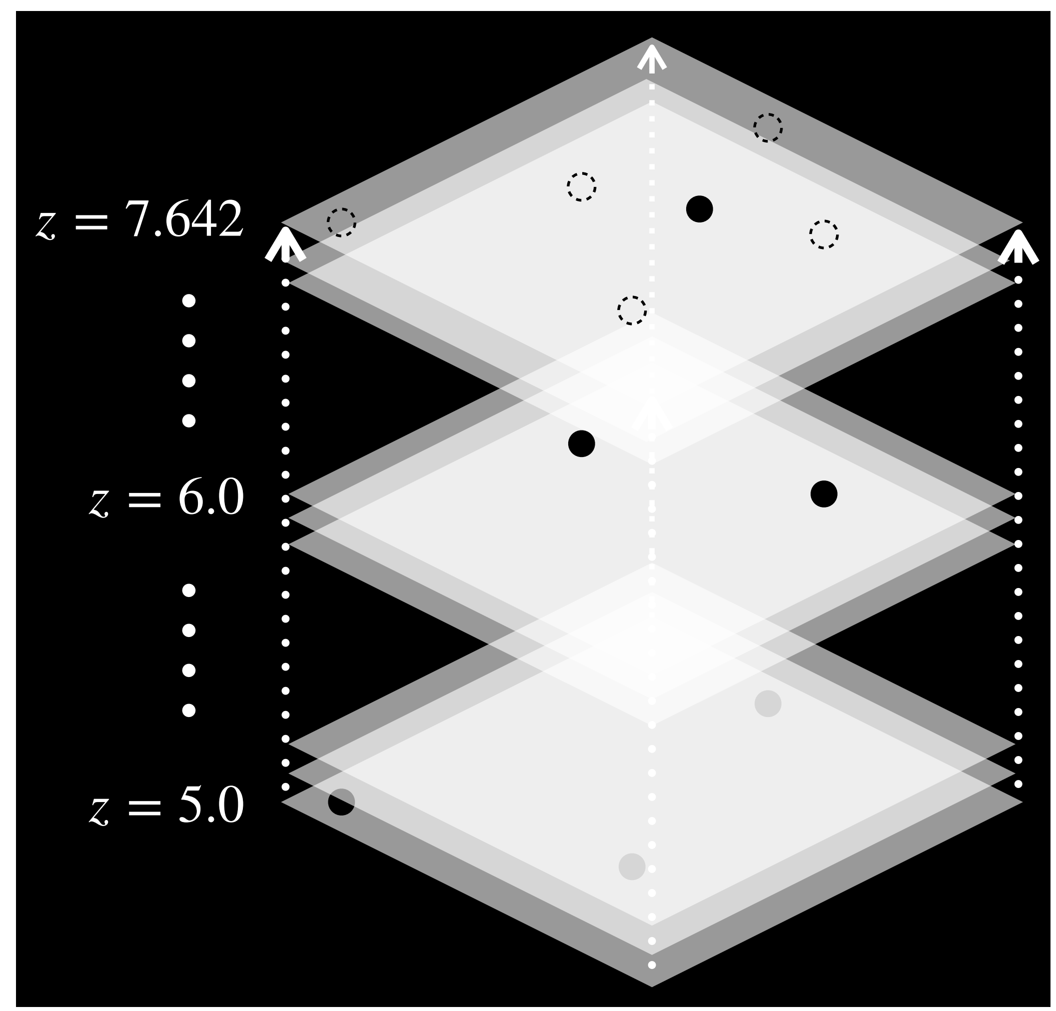
$$r_* = 2R_* \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$



Top-hat type ※ realistic case

$$w_{\rm PBH}(\theta) = \int_{R_{\rm low}}^{R_{\rm high}} dR_1 \int_{R_{\rm low}}^{R_{\rm high}} dR_2 \; g(R_1)\, g(R_2)\, \xi_{\rm PBH}(R_1, R_2, \theta)$$

$$g(R) \equiv \frac{3R^2}{R_{\rm high}^3 - R_{\rm low}^3}, \qquad R_i = R_i(z_i)$$



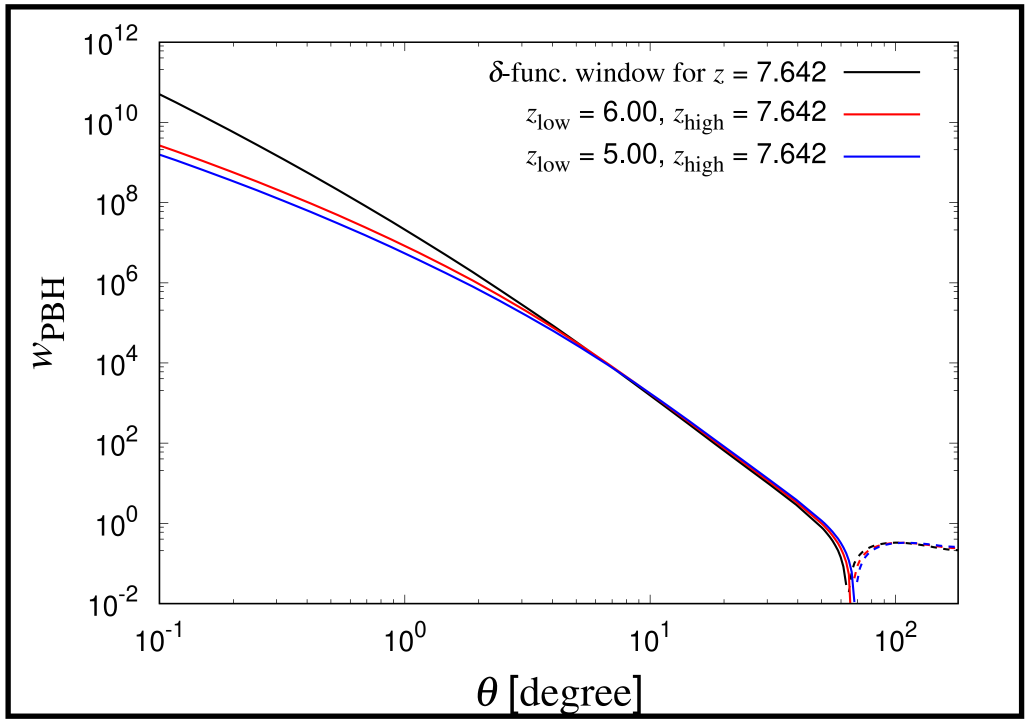
- **PBH two-point correlation function**

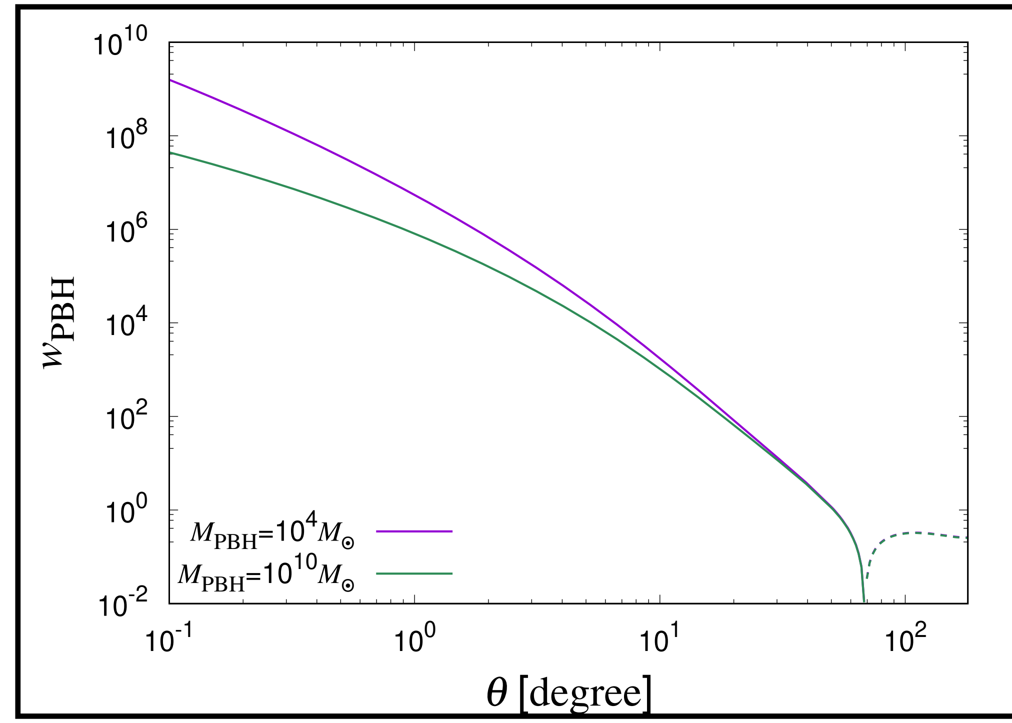
$$\boxed{\xi_{\rm PBH}(r) \approx \frac{\left(1+\epsilon(r)\right)^{3/2}}{\sqrt{1-\epsilon(r)}} \exp\left(\frac{\nu^2\epsilon(r)}{1+\epsilon(r)}\right) - 1\,, \qquad \epsilon(r) \equiv \frac{\xi_\phi(r)}{\sigma_\phi^2} = \frac{c_I}{(k_{\rm max})^{c_I} - (k_{\rm min})^{c_I}} \int_{k_{\rm min}}^{k_{\rm max}} \frac{dk}{k}\, k^{c_I} \frac{\sin(kr)}{kr}}$$

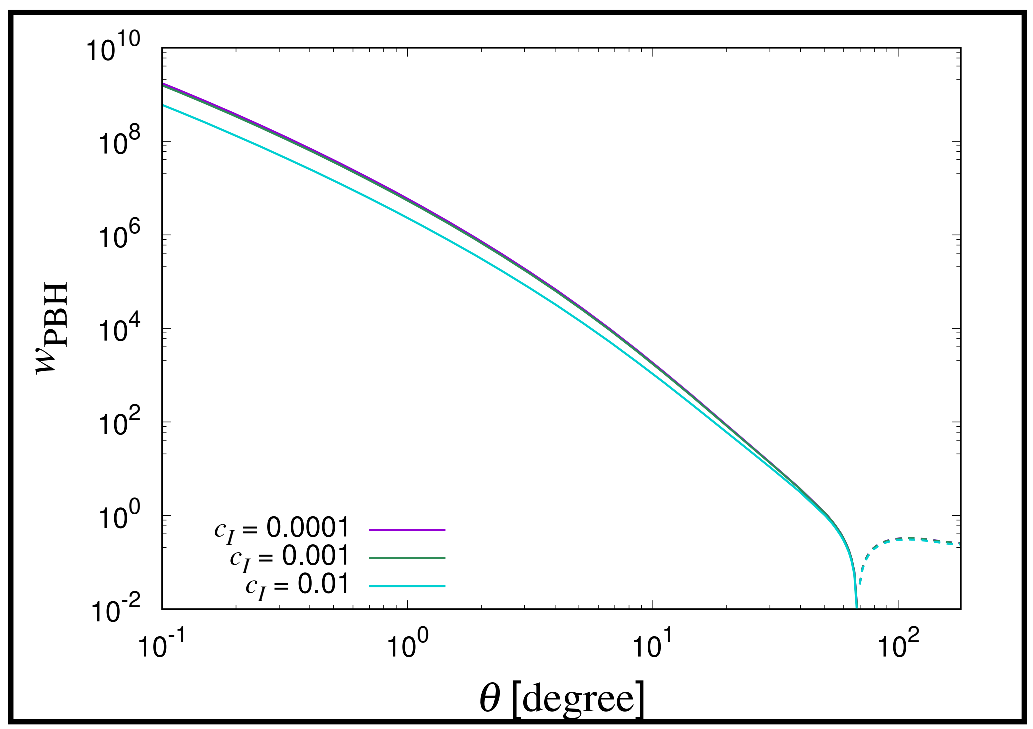
$$\boxed{k_{\rm min} = H_0}$$

$$\boxed{\begin{aligned} M_{\rm PBH} &= 10^{10} M_\odot \longleftrightarrow k_{\rm max} = 10\ {\rm Mpc}^{-1} \longleftrightarrow \nu = 7.4 \\ M_{\rm PBH} &= 10^{4} M_\odot \longleftrightarrow k_{\rm max} = 10^4\ {\rm Mpc}^{-1} \longleftrightarrow \nu = 9.7 \end{aligned}}$$

結果



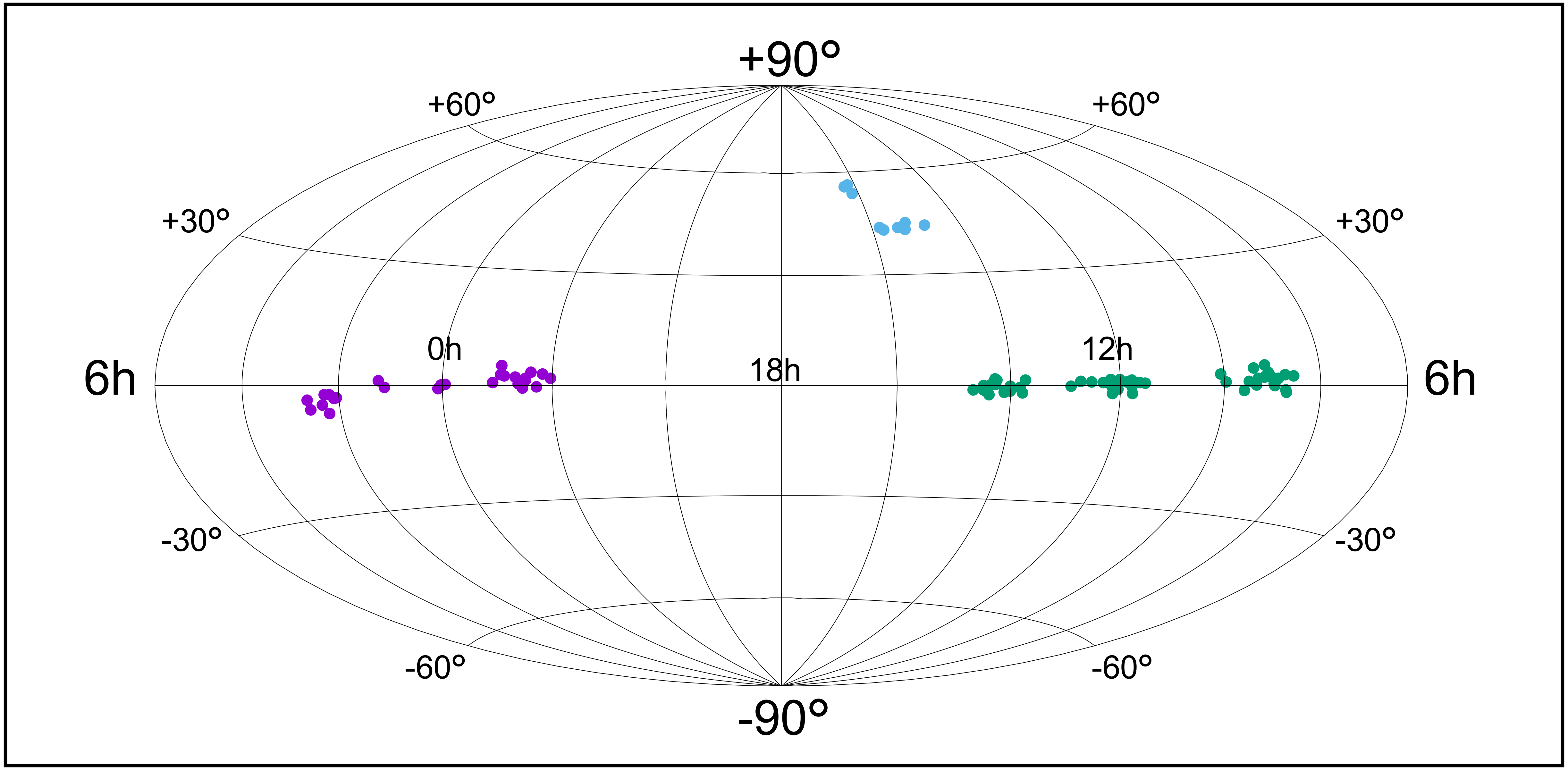




Very highly clustering property is almost independent of free parameters!

☆ 今後の展望

Quasars at $6 \lesssim z \lesssim 7$ by Hyper Supreme Cam (HSC)



Y. Matsuoka, et al, 1603.02281, 1704.05854, 1803.01861, 1908.07910

Prediction vs Observation !!

まとめ

PBHはhigh-zのSMBHを
原理的に説明可能

μ-distortionからの制限

⟹ Gaussianゆらぎ起源禁止
⟹ non-GaussianゆらぎOK
⟹ クラスタリングが起きる

クラスタリング性を
角度相関関数で定量解析

⟹ 極めて高度にクラスタリング

vs 観測データ

⟹ SM-PBHモデルをテスト!!