

重力波宇宙論の展望

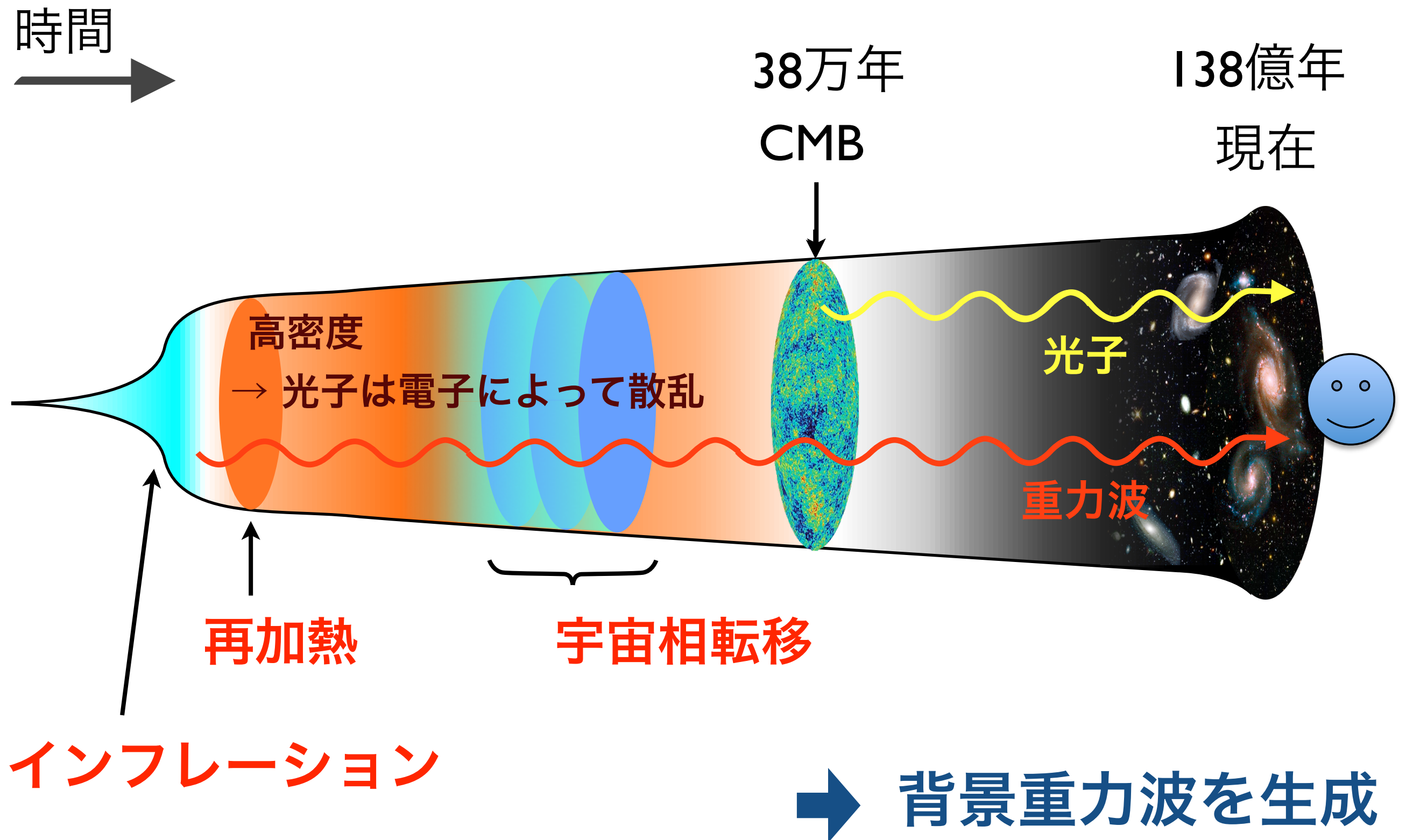
黒柳 幸子

(IFT Madrid / 名古屋大学)

日本物理学会 第77回年次大会 シンポジウム

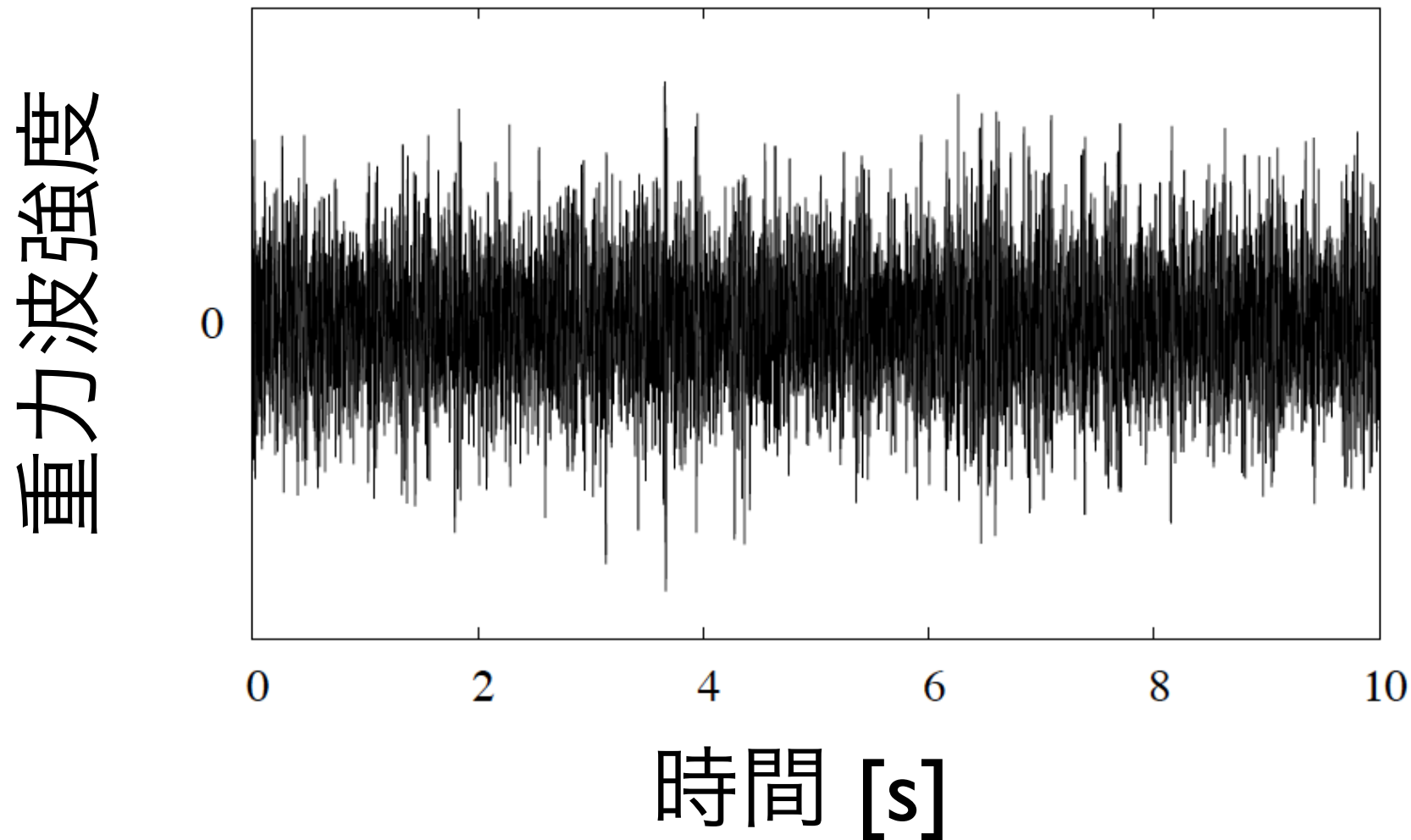
2022年3月18日

重力波実験の究極の目標： 重力波で初期宇宙を観測したい！



背景重力波とは？

波形



宇宙のあらゆる方向に、連続して存在する、
ランダムな波形の重力波 → ノイズと区別が難しい

背景重力波の検出



Cross Correlation

検出器 1

$$s_1(t) = h(t) + n_1(t)$$

検出器 2

$$s_2(t) = h(t) + n_2(t)$$

$$\langle S \rangle = \int_{-T/2}^{T/2} dt \langle s_1(t) s_2(t) \rangle$$

$$= \int_{-T/2}^{T/2} dt \langle h^2(t) + \underbrace{h(t)n_2(t) + n_1(t)h(t) + n_1(t)n_2(t)}_{\text{相関なし} \rightarrow 0} \rangle$$

$$= \int_{-T/2}^{T/2} dt \langle \underline{h^2(t)} \rangle$$

重力波信号だけが残る

s: シグナル

h: 重力波信号

n: 検出機ノイズ

(同じ場所の検出器を仮定)

世界の重力波検出機

LIGO-India (2026-7?)

KAGRA (2020)

Advanced-LIGO (2015)

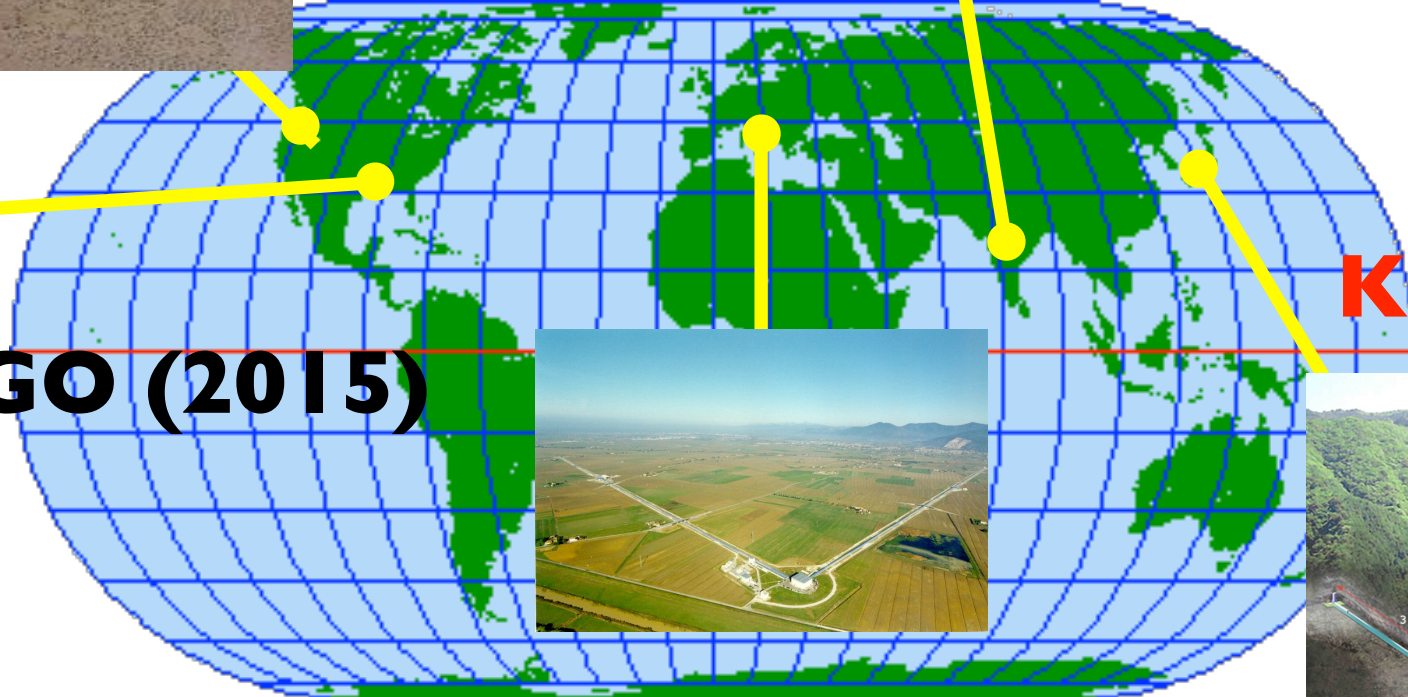
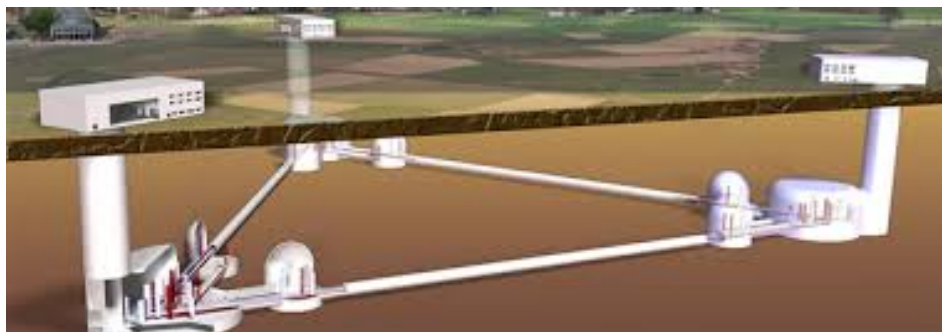
Advanced-VIRGO (2017)

将来計画

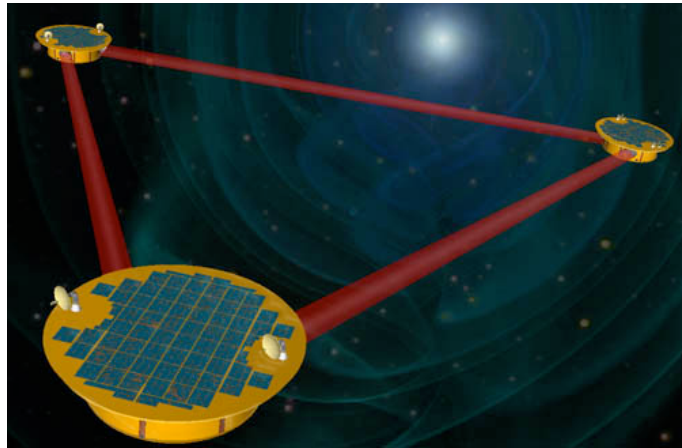
LIGO A+, Voyager (2020')

Cosmic explorer (2030')

Einstein Telescope



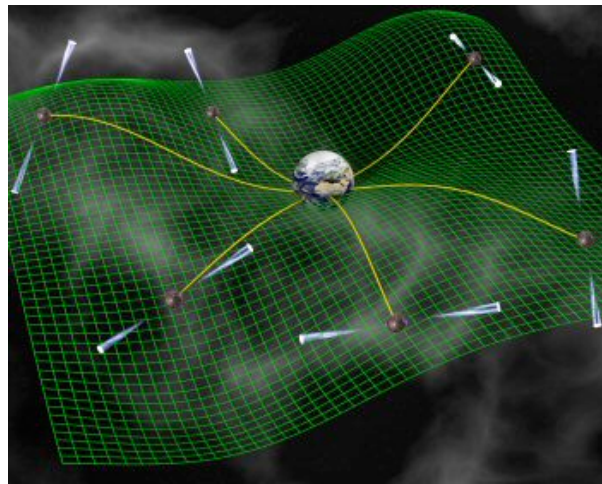
他にも様々



衛星

LISA, TianQin, Taiji

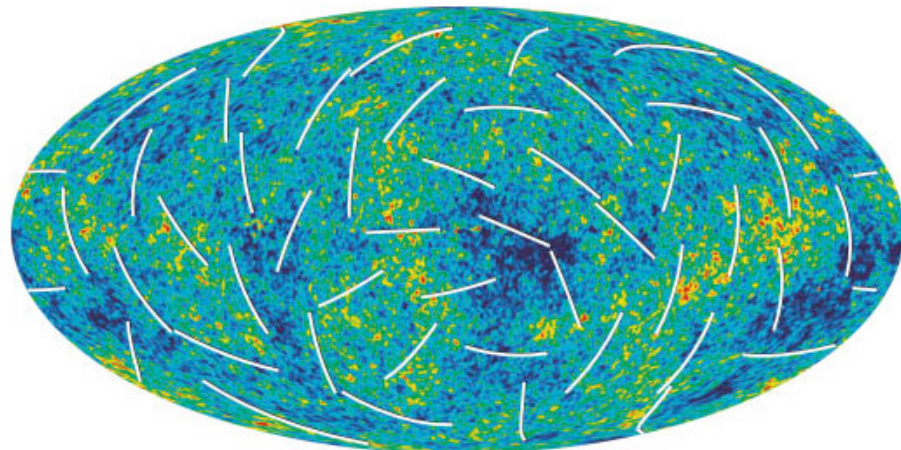
B-DECIGO, DECIGO



パルサータイミング

NANOGrav, EPTA, PPTA

SKA

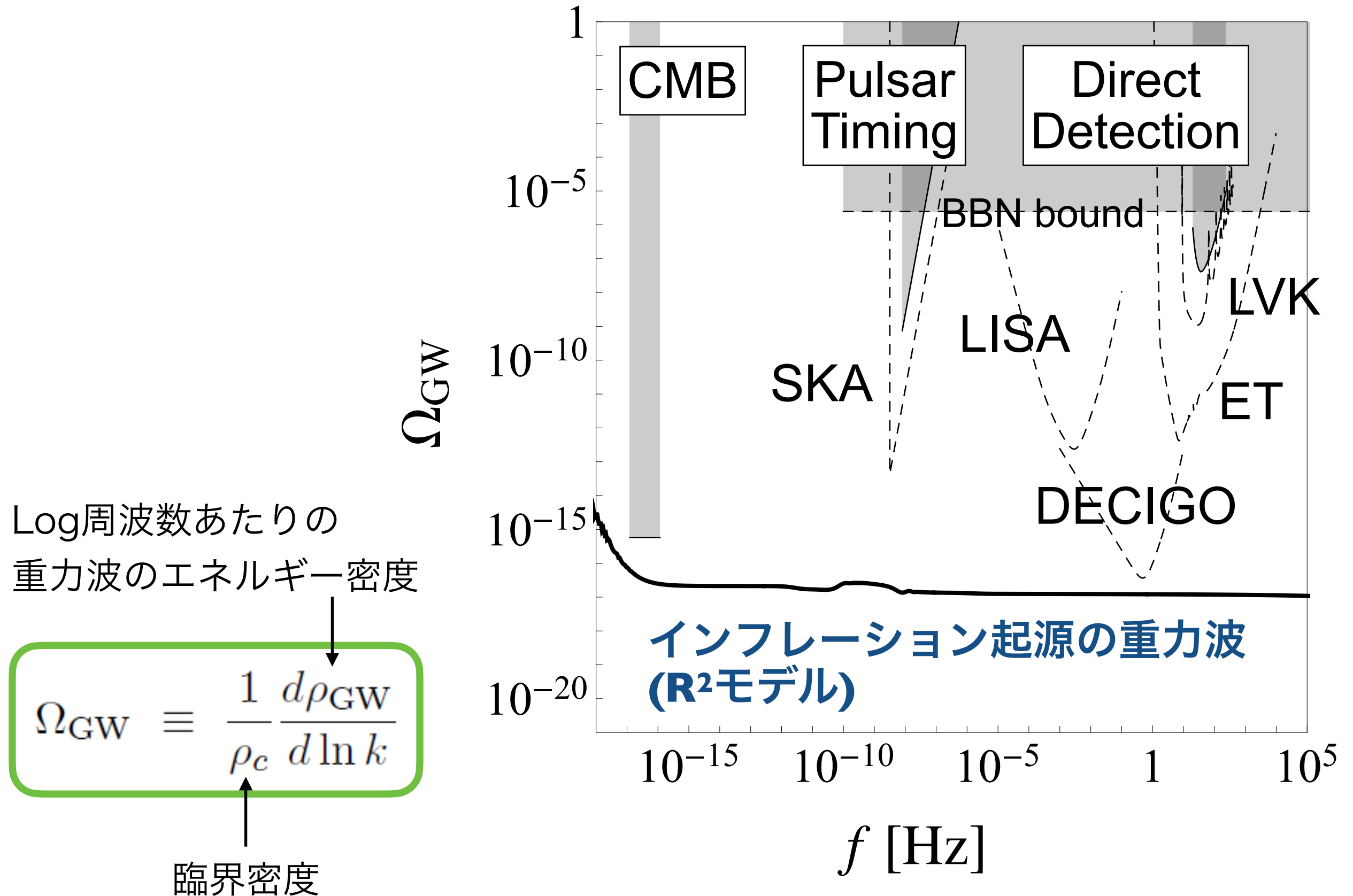


Bモード偏光

Ground-based experiments

LiteBIRD

重力波スペクトルと各種実験の感度曲線



重力波の生成

重力波の運動方程式

$$\ddot{h}_{ij} + 3H\dot{h}_{ij} - \frac{1}{a^2}\nabla^2 h_{ij} = 16\pi G\Pi_{ij}$$

1. 初期条件として存在

- インフレーション
→ 時空の量子揺らぎ

2. 非等方圧項を介して生成

- 再加熱 (preheating)
→ 物質の急激な生成
- 宇宙相転移
→ バブル同士の衝突
- 宇宙ひも
→ 重いひもの運動

重力波の生成

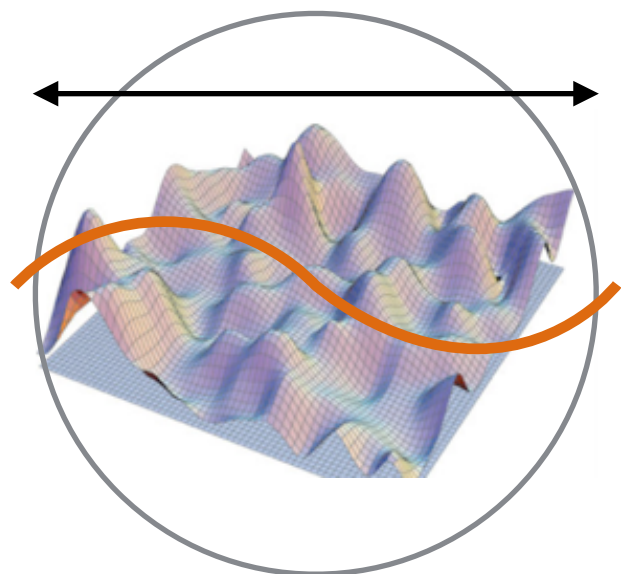
重力波の運動方程式

$$\ddot{h}_{ij} + 3H\dot{h}_{ij} - \frac{1}{a^2}\nabla^2 h_{ij} = 16\pi G\Pi_{ij}$$

$\lambda_{\text{GW}} < \text{ホライズンサイズ}$

$$\rightarrow f/a < H$$

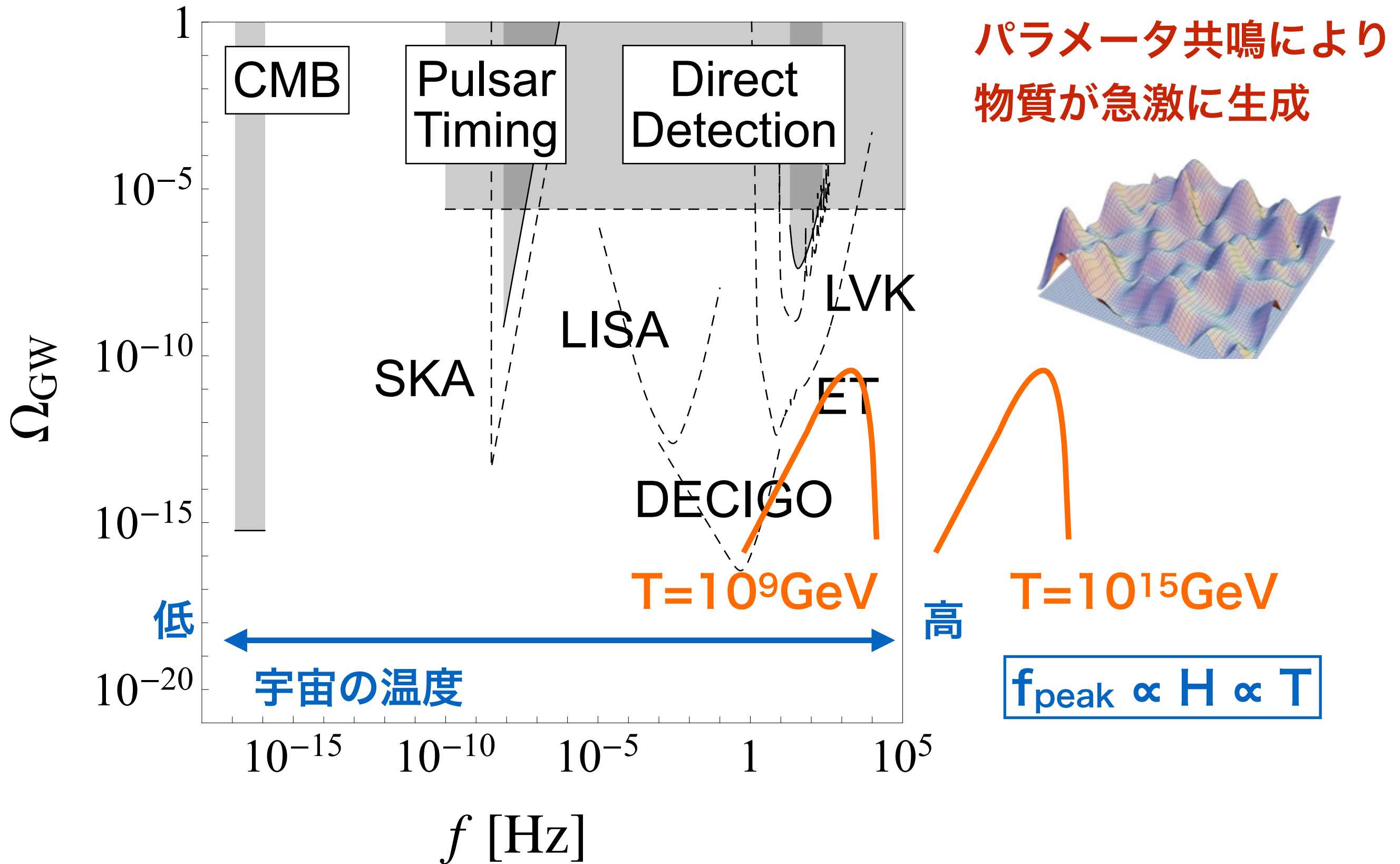
= 因果関係を持てる範囲



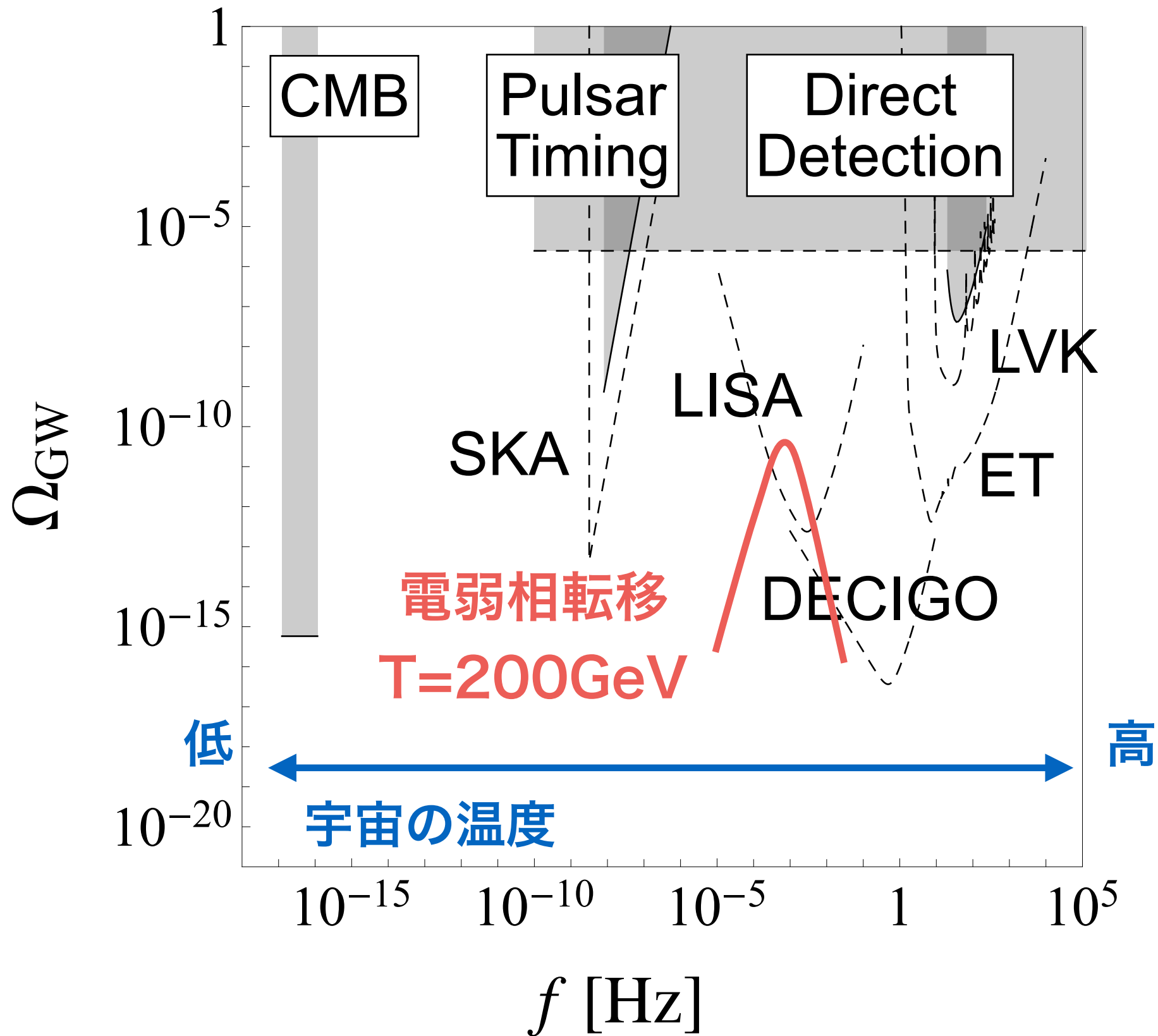
2. 非等方圧項を介して生成

- **再加熱 (preheating)**
→ 物質の急激な生成
- **宇宙相転移**
→ バブル同士の衝突
- **宇宙ひも**
→ 重いひもの運動

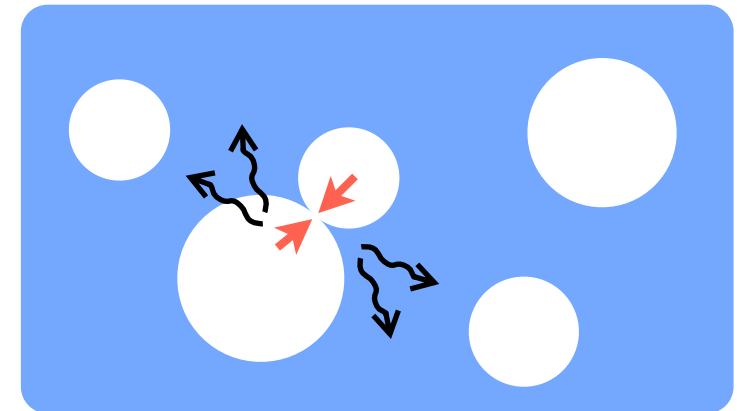
宇宙再加熱 (preheating)



宇宙相転移

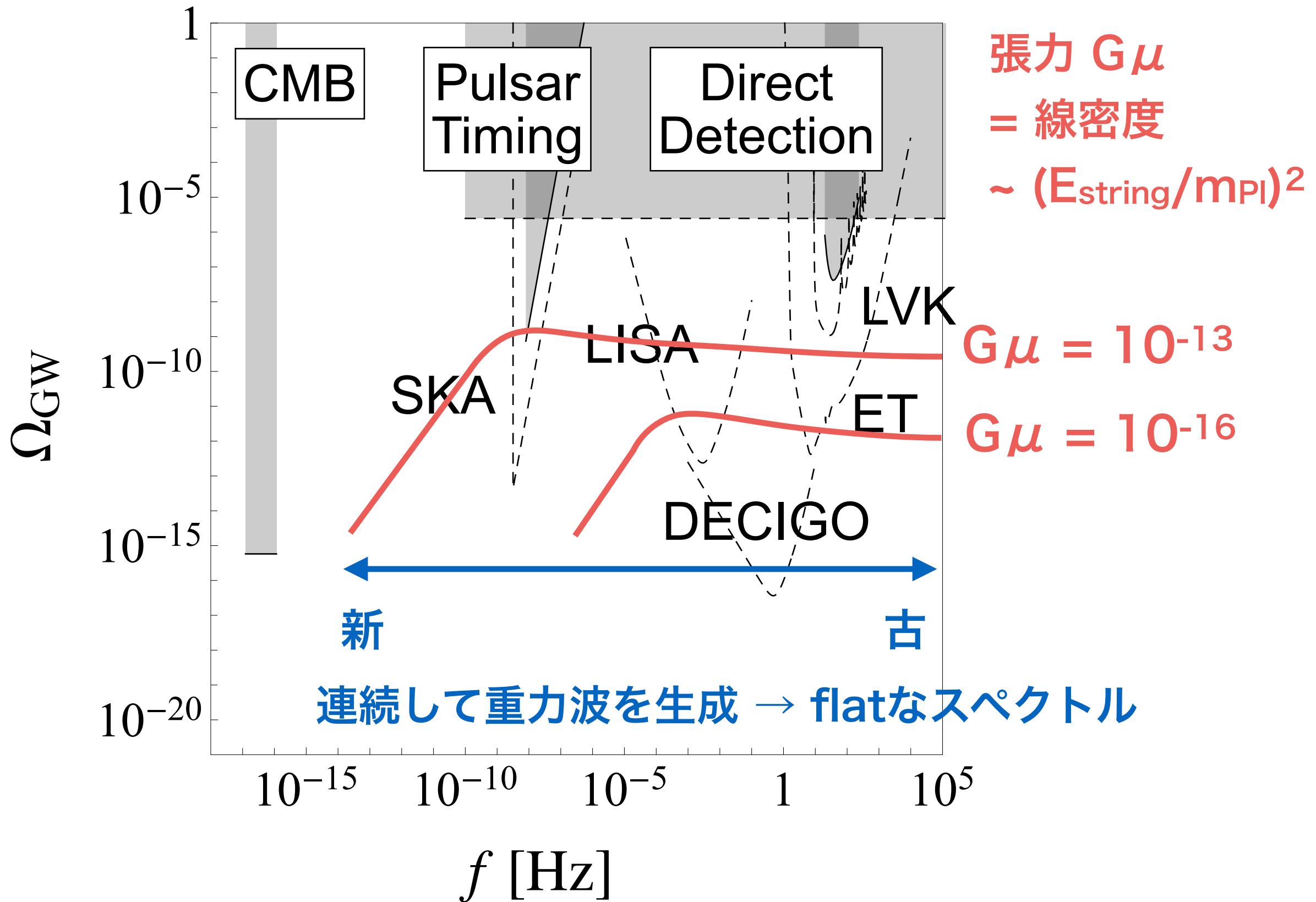


一次相転移の場合
バブルが生成

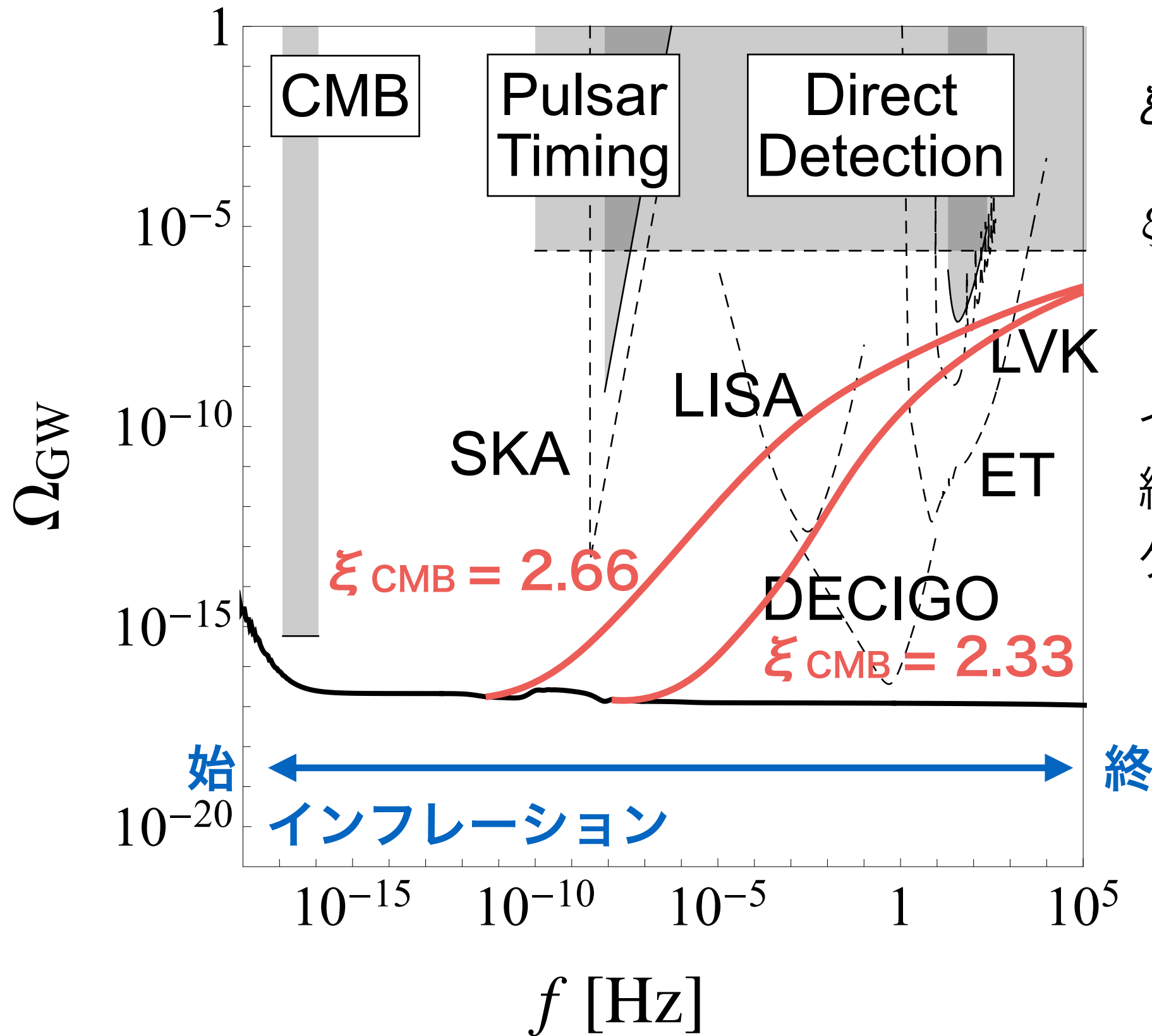


$$f_{\text{peak}} \propto H \propto T$$

宇宙ひも (ループ上のcusp)



インフレーション中のゲージ場



ξ : 相互作用の強さ

$$\xi \equiv \frac{\dot{\phi}}{2fH}$$

インフレーションの
終わりにかけて
ゲージ場が増幅

個人的

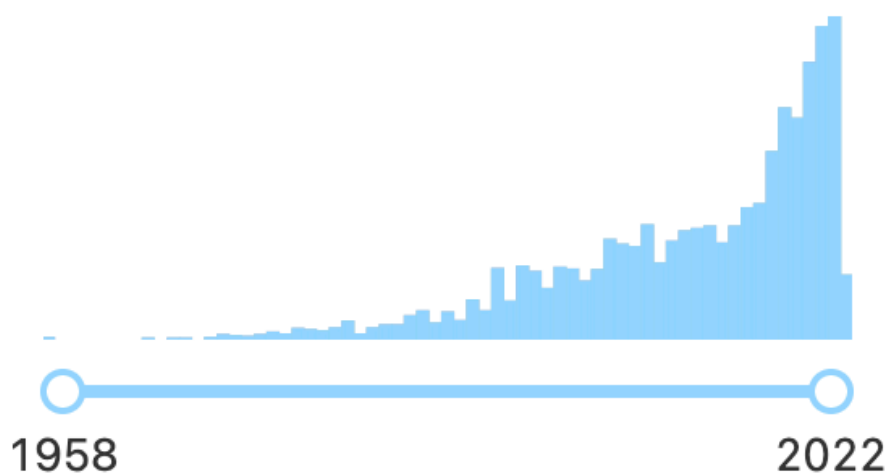
重力波宇宙論の展望

- ・ 新しいイベントが続々と検出
- ・ 将来計画が本格的に動き出した
- ・ 重力波サイエンスの未来は明るい

iNSPIRE^{HEP}

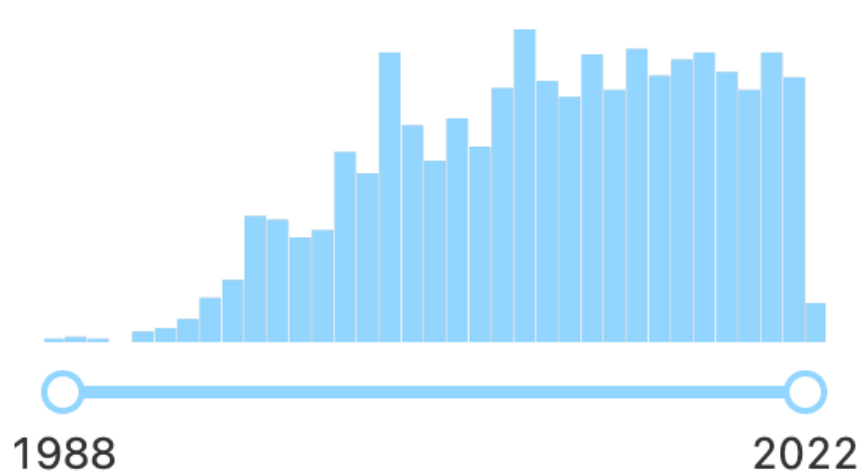
f t gravitational wave

Date of paper



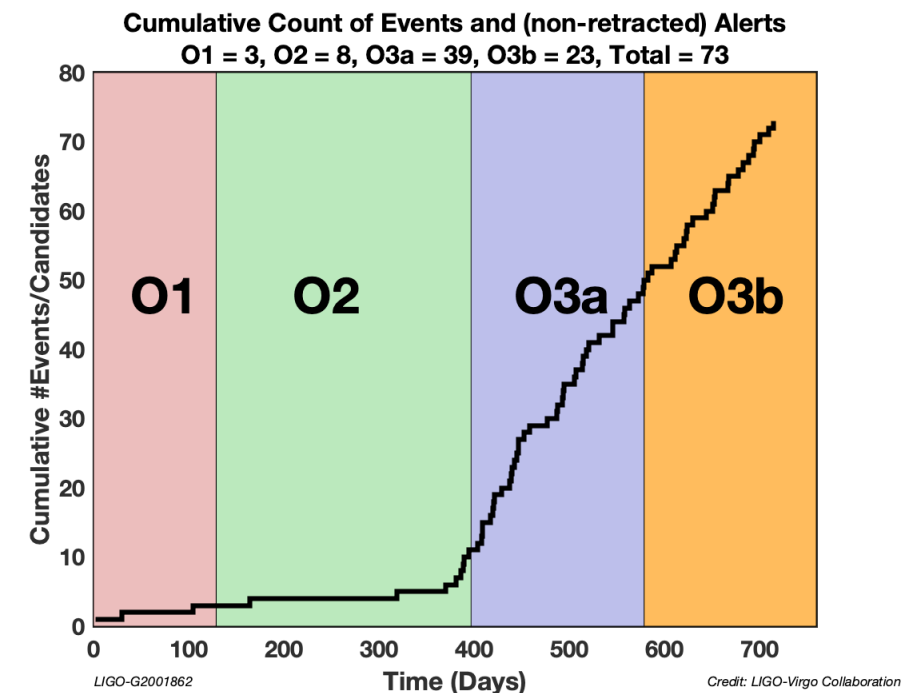
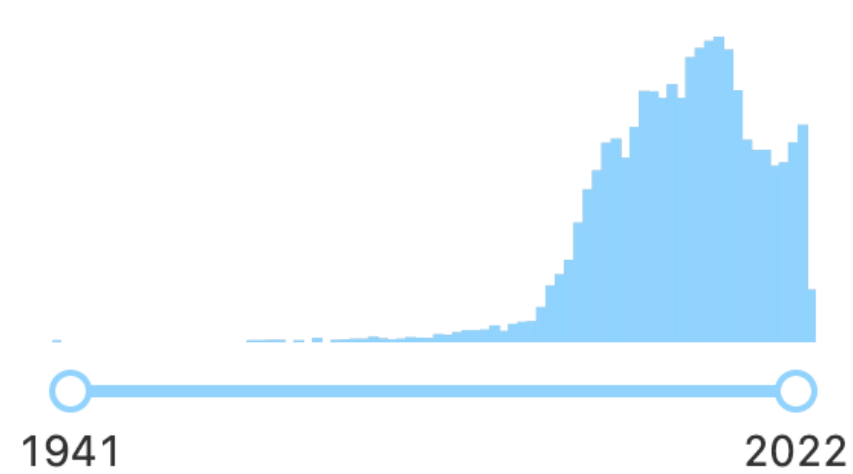
f t CMB

Date of paper



f t galaxy

Date of paper



背景重力波を使って本気で重力波宇宙論をやりたいなら
そろそろ**天体起源の重力波が作るforeground**を
真剣に考えた方がいいのでは…

背景重力波の生成機構

天体起源

$$\Delta T < f^{-1}$$

イベント同士の時間間隔が短いと
重なり合って区別できなくなる

- ブラックホール連星
- 中性子星連星
- 白色矮星連星
- 超新星爆発

etc...

宇宙論的起源

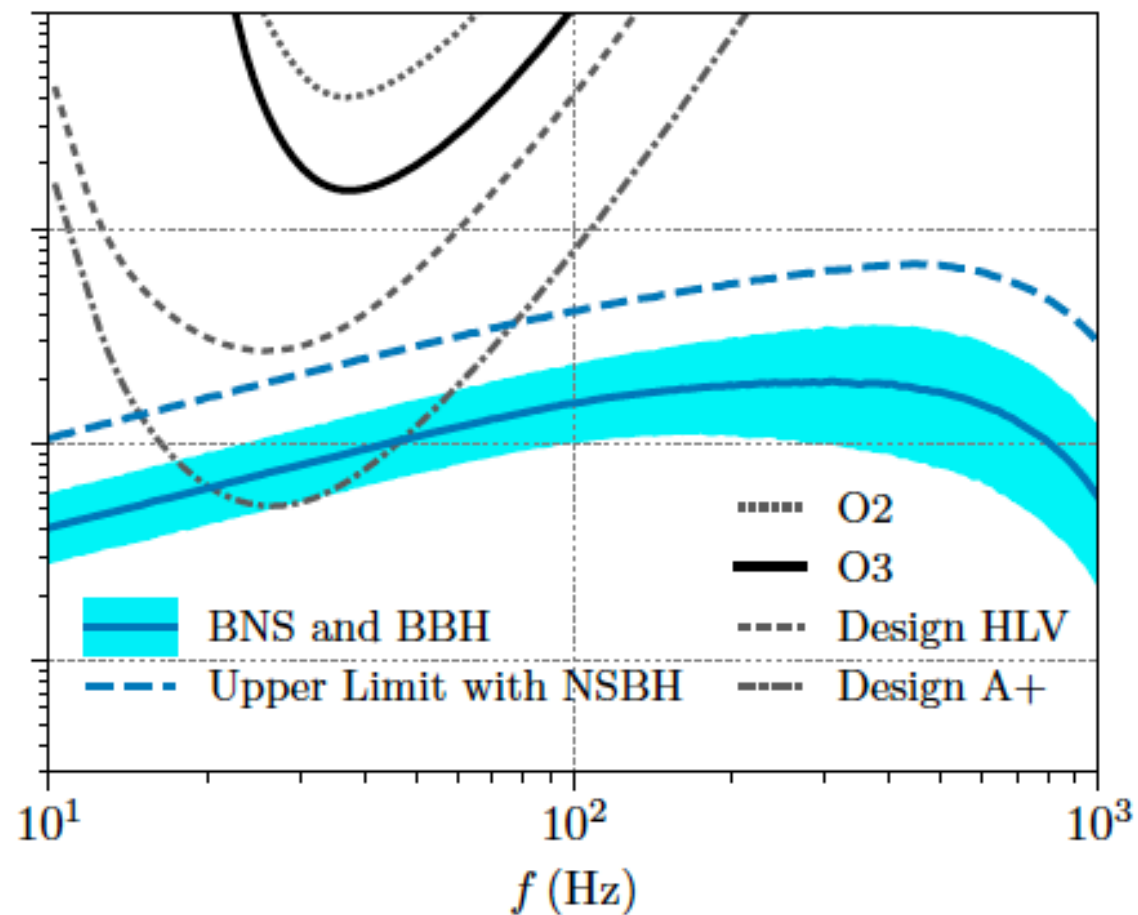
初期宇宙に生成

- インフレーション
- 再加熱 (preheating)
- 相転移
- 宇宙ひも

etc...

天体起源の前景放射

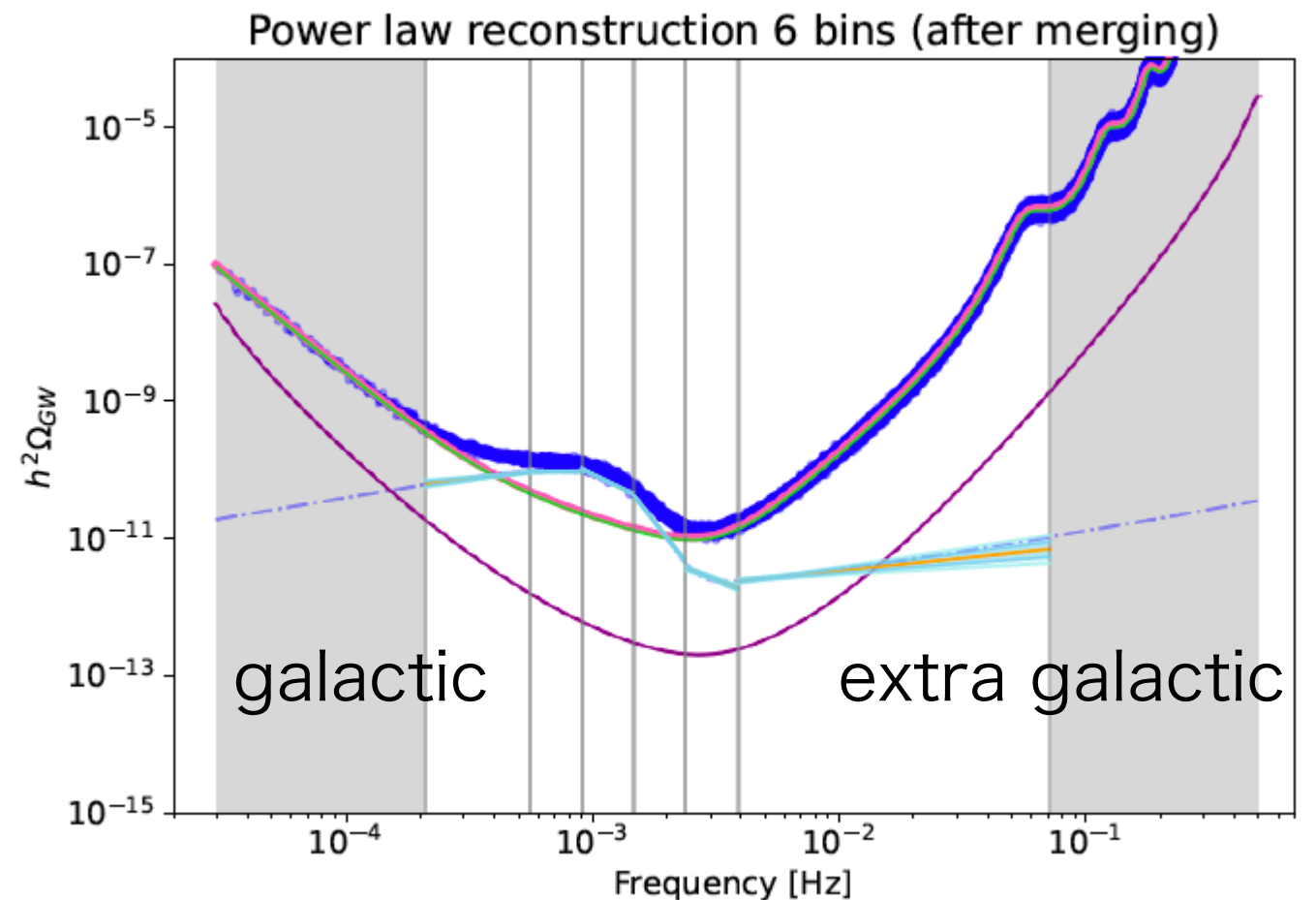
Foreground @ LVK



**BBH & BNS
(+ NSBH?)**

LVK collaboration, PRD 104, 022004 (2021)

Foreground @ LISA



**Galactic white dwarf binary
+ extra galactic BBH & BNS**

R. Flauger et al, JCAP 01, 059 (2021)

前景放射除去の方法

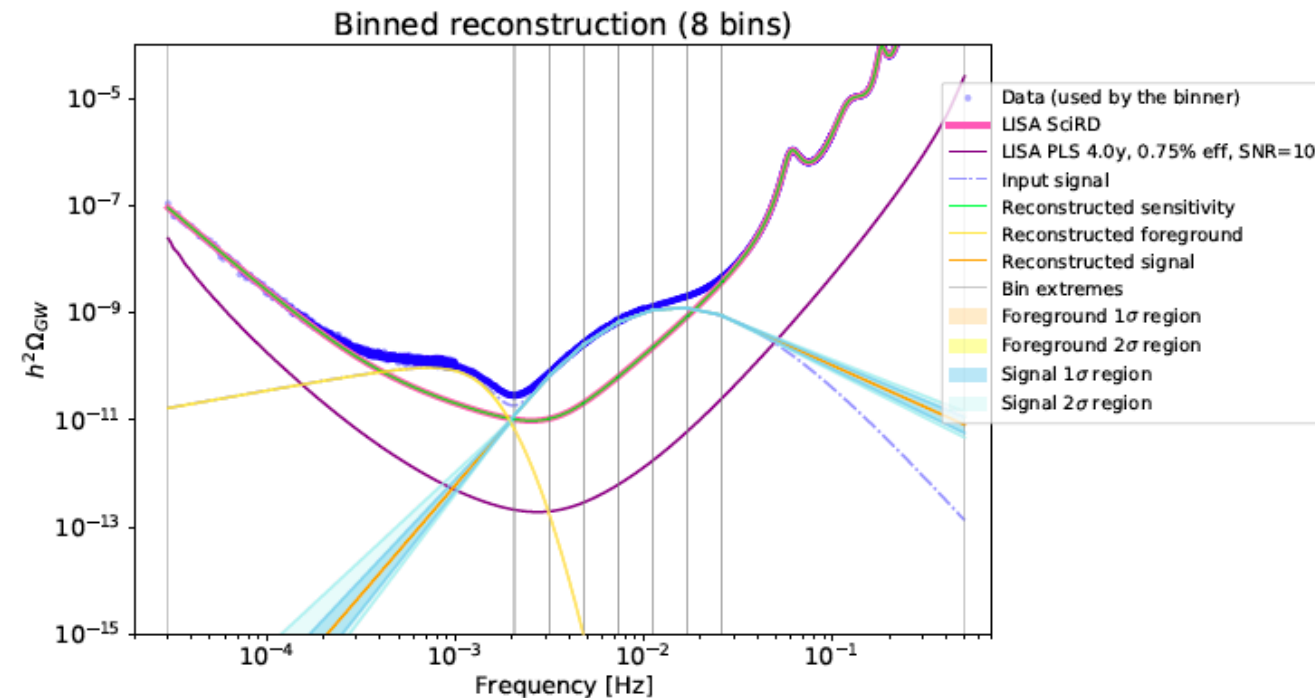
1. スペクトルの形の情報を使う

ある程度スペクトルの形が
わかっているのでテンプレートを使って
シグナルと一緒にフィット

R. Flauger et al, JCAP 01, 059 (2021)

テンプレートフリーでやる方法も

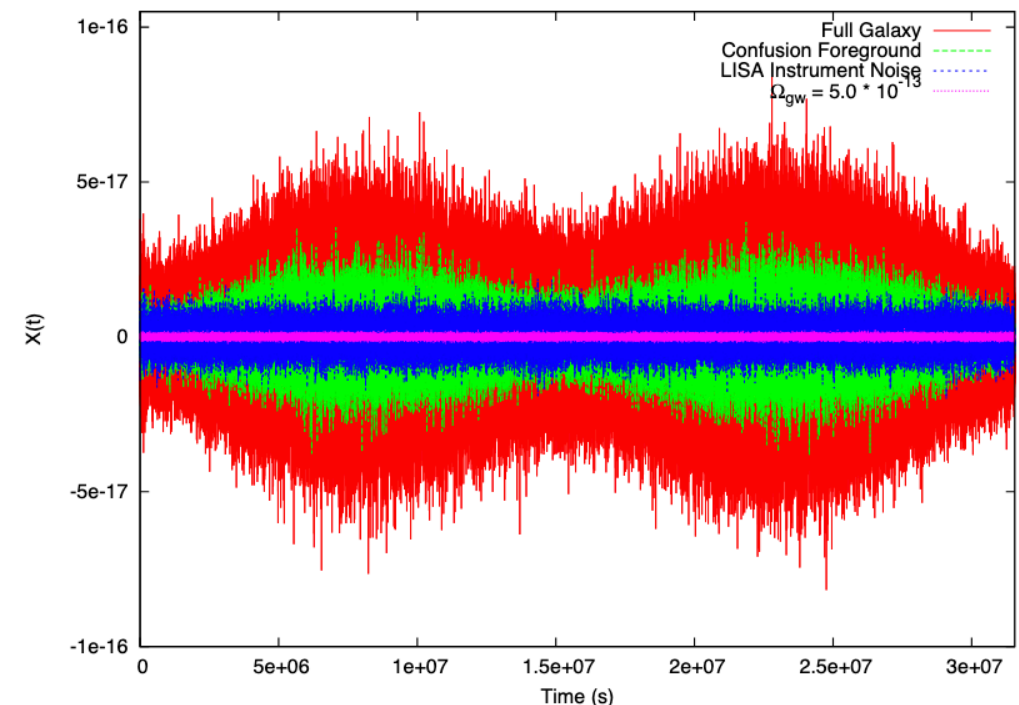
M. Pieroni, E. Barausse, JCAP 07, 021 (2020)



2. 非等方性の情報を使う (Galactic foregroundの場合)

LISA: 太陽周りを公転して見る方向が
変わるので、重力波に非等方性があると
強度が一年かけて変化

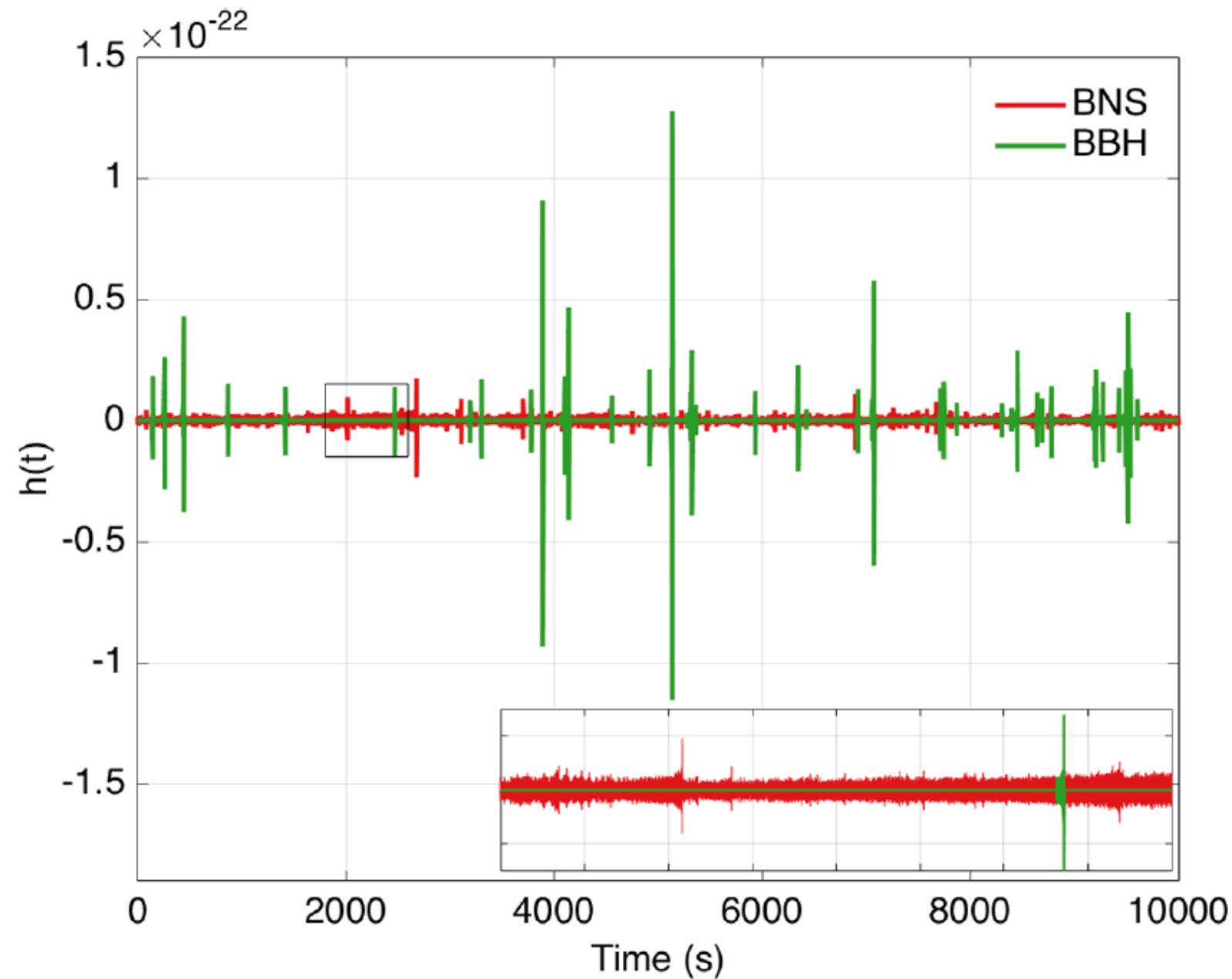
M. R. Adams and N. J. Cornish,
Phys. Rev. D89, 022001 (2014)



3. 非ガウス性を使う

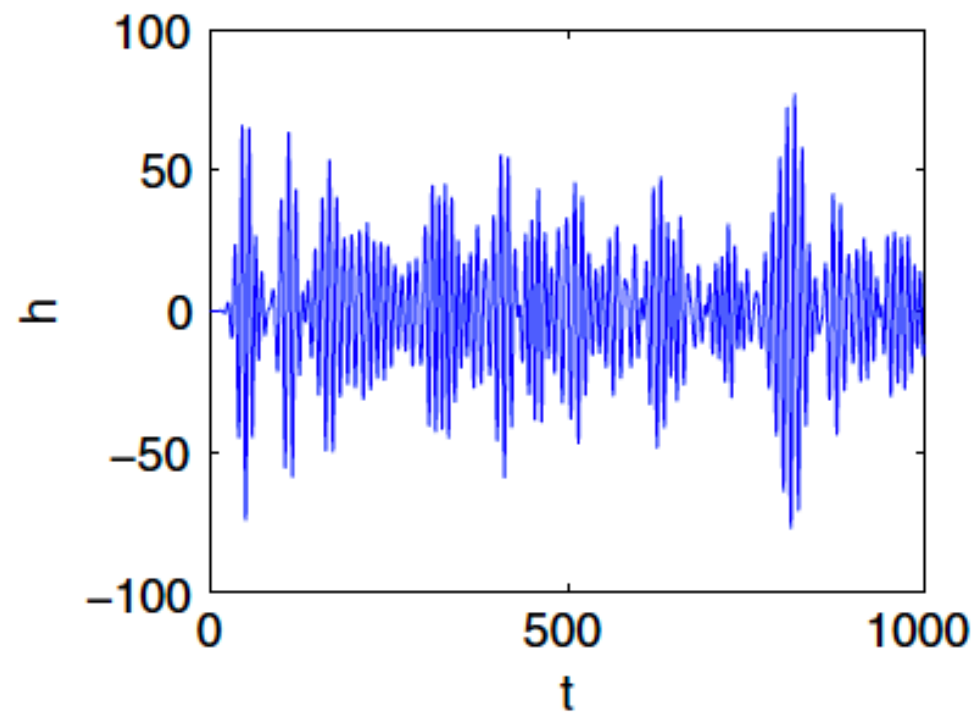
Foreground @ LVK

ブラックホール連星イベントは重なり合っていない
→ Popcorn background

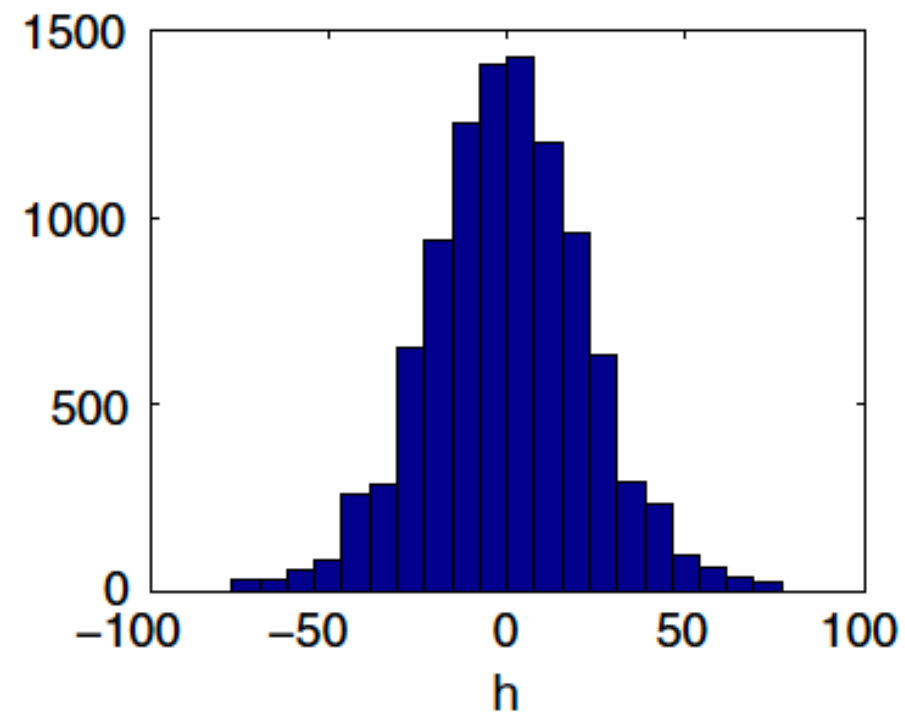


Popcorn = 非ガウス性

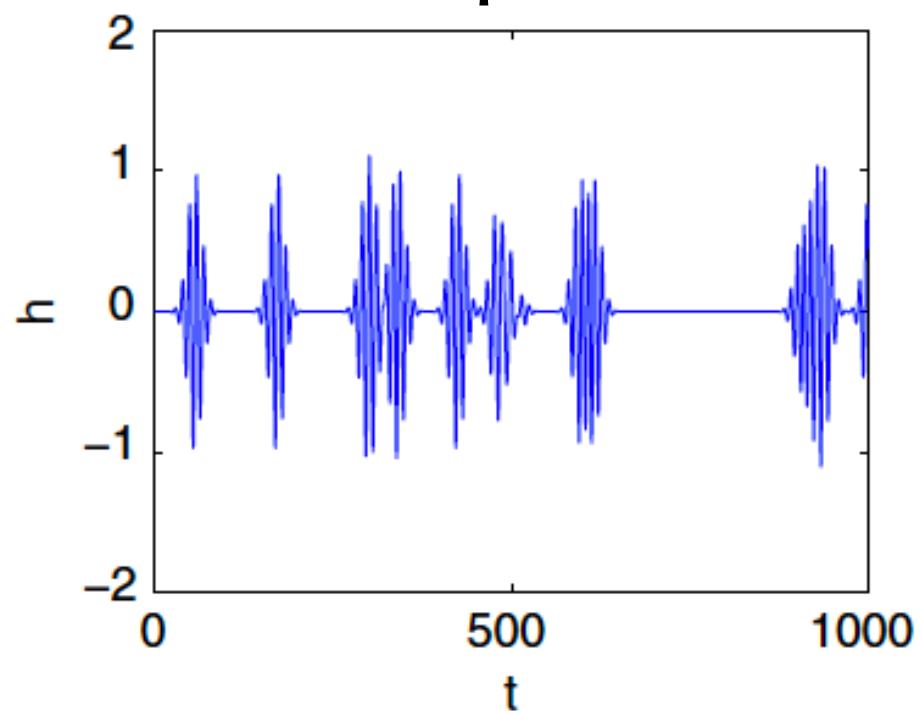
Continuous



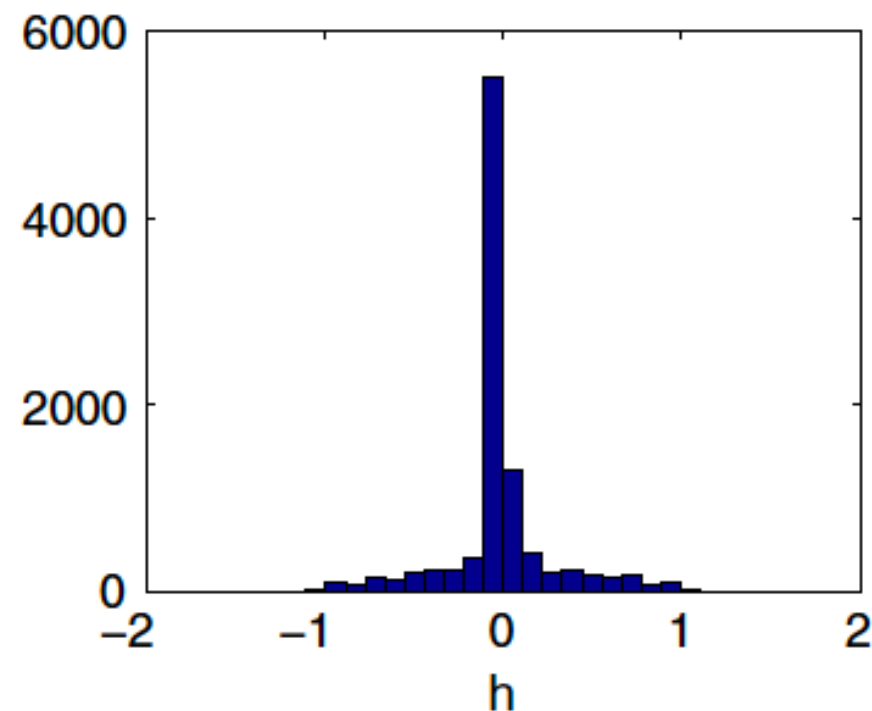
Gaussian



Popcorn

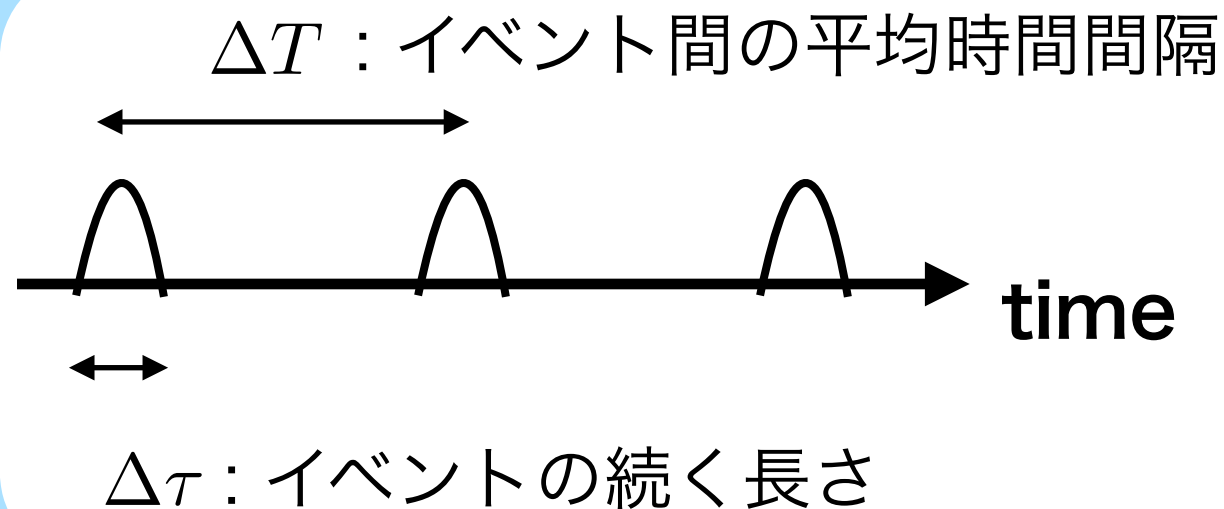


Non-Gaussian



Duty Cycle

popcorn背景重力波を特徴づける量



$$\text{Duty Cycle} \equiv \frac{\Delta\tau}{\Delta T}$$

$DC \gg 1$ イベントが重なり合う

$DC \ll 1$ 重なり合わない

BBHの場合

$$\frac{dD}{df} = \int dz \frac{dR}{dz} \frac{d\bar{\tau}}{df}$$

$$\Delta T \sim \left(\frac{dR}{dz} \right)^{-1} \quad \Delta\tau \sim \frac{d\bar{\tau}}{df} = \frac{5}{96\pi^{8/3}} (G\mathcal{M}_c^z)^{-5/3} f^{-11/3}$$

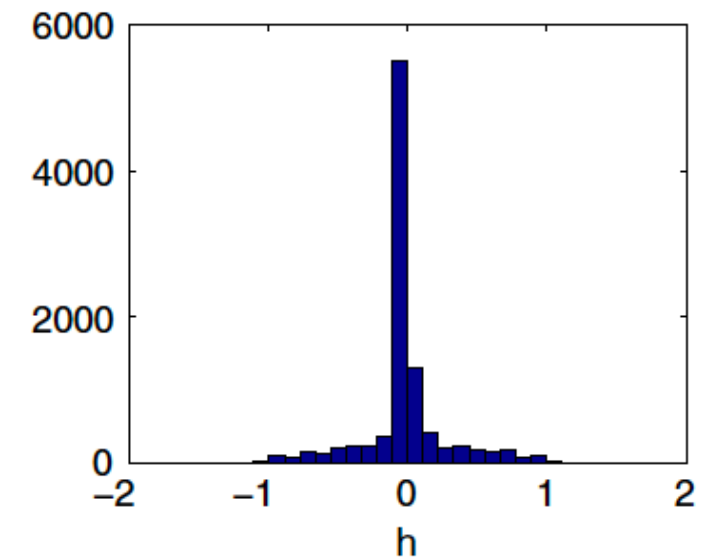
Total duty cycle	$\xi = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} df \frac{dD}{df}$	$\xi \gg 1$	連続的
		$\xi \ll 1$	popcorn的

Popcorn背景重力波の検出

1. LVK stochastic: CCI (Cross-Correlation search for Intermittent backgrounds)

重力波の分布

$$p(s) = \underbrace{\xi \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha} \exp\left[-\frac{s^2}{2\alpha^2}\right]}_{\text{シグナルのあるときはGaussian}} + \underbrace{(1-\xi)\delta(s)}_{\text{ないときはデルタ関数 (s=0)}}$$



シグナルのあるときはGaussian

ないときはデルタ関数 (s=0)

Optimal detection statistics

$$\Lambda_{\text{ML}}^{\text{NG}}(h) = \max_{0 < \xi \leq 1} \max_{\alpha > 0} \max_{\sigma_1 \geq 0} \max_{\sigma_2 \geq 0} \prod_{k=1}^N \left\{ \frac{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 \xi}{\sqrt{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \alpha^2 + \sigma_2^2 \alpha^2}} \exp \left[\frac{\left(\frac{h_1^k}{\sigma_1^2} + \frac{h_2^k}{\sigma_2^2} \right)^2}{2 \left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\alpha^2} \right)} - \frac{(h_1^k)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(h_2^k)^2}{2\sigma_2^2} + 1 \right] + \frac{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2}{\sigma_1 \sigma_2} (1-\xi) \exp \left[-\frac{(h_1^k)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(h_2^k)^2}{2\sigma_2^2} + 1 \right] \right\}$$

参考：通常のcross correlationのdetection statistics $\Lambda_{\text{CC}}(h) = \frac{\hat{\alpha}^2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2}$

Popcorn背景重力波の検出

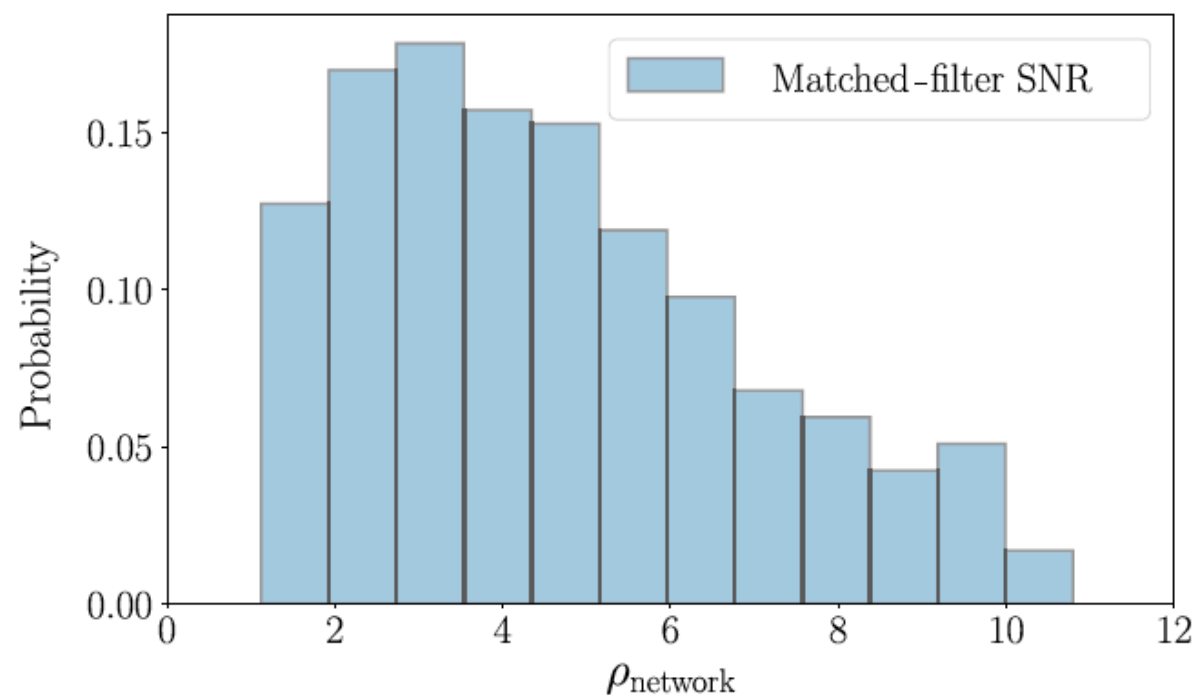
1. LVK stochastic: CCI (Cross-Correlation search for Intermittent backgrounds)
2. Smith & Thrane (2018): Deterministic method

手順 1. データを4秒ごとに区切る

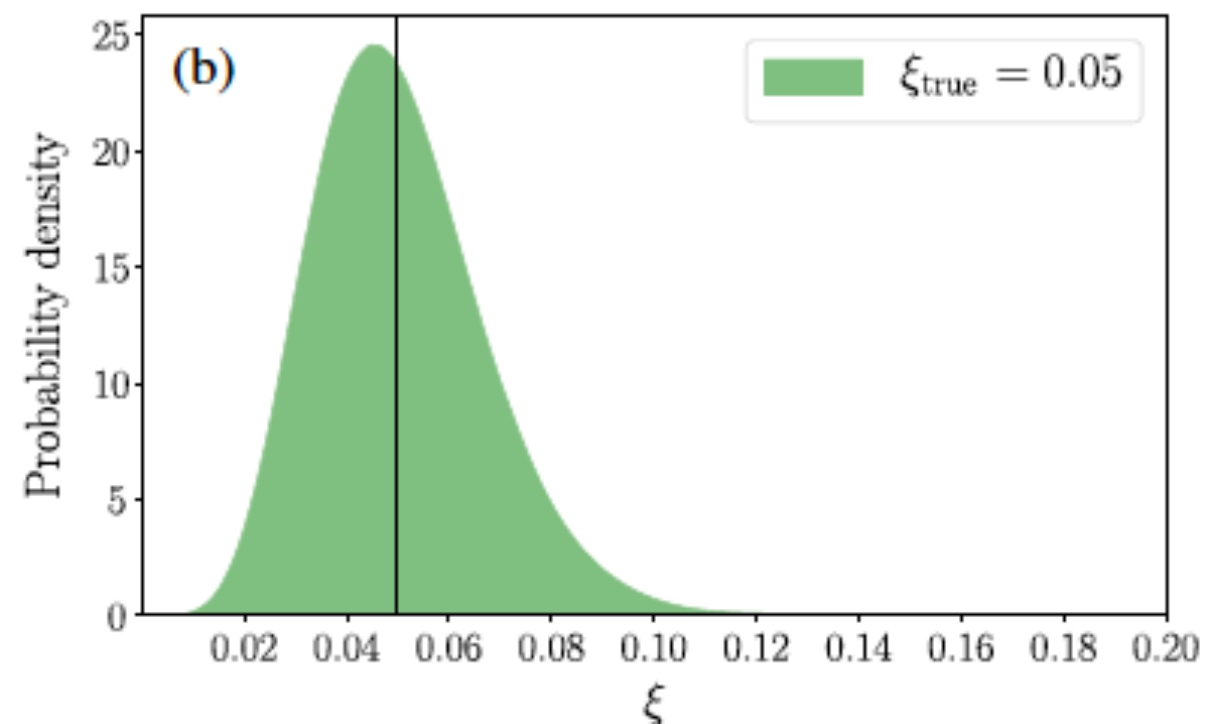
手順 2. 各セグメントでBBHのテンプレートサーチ行う

手順 3. sub-thresholdイベントを統計的に処理してduty cycleを計算

sub-thresholdイベントの分布

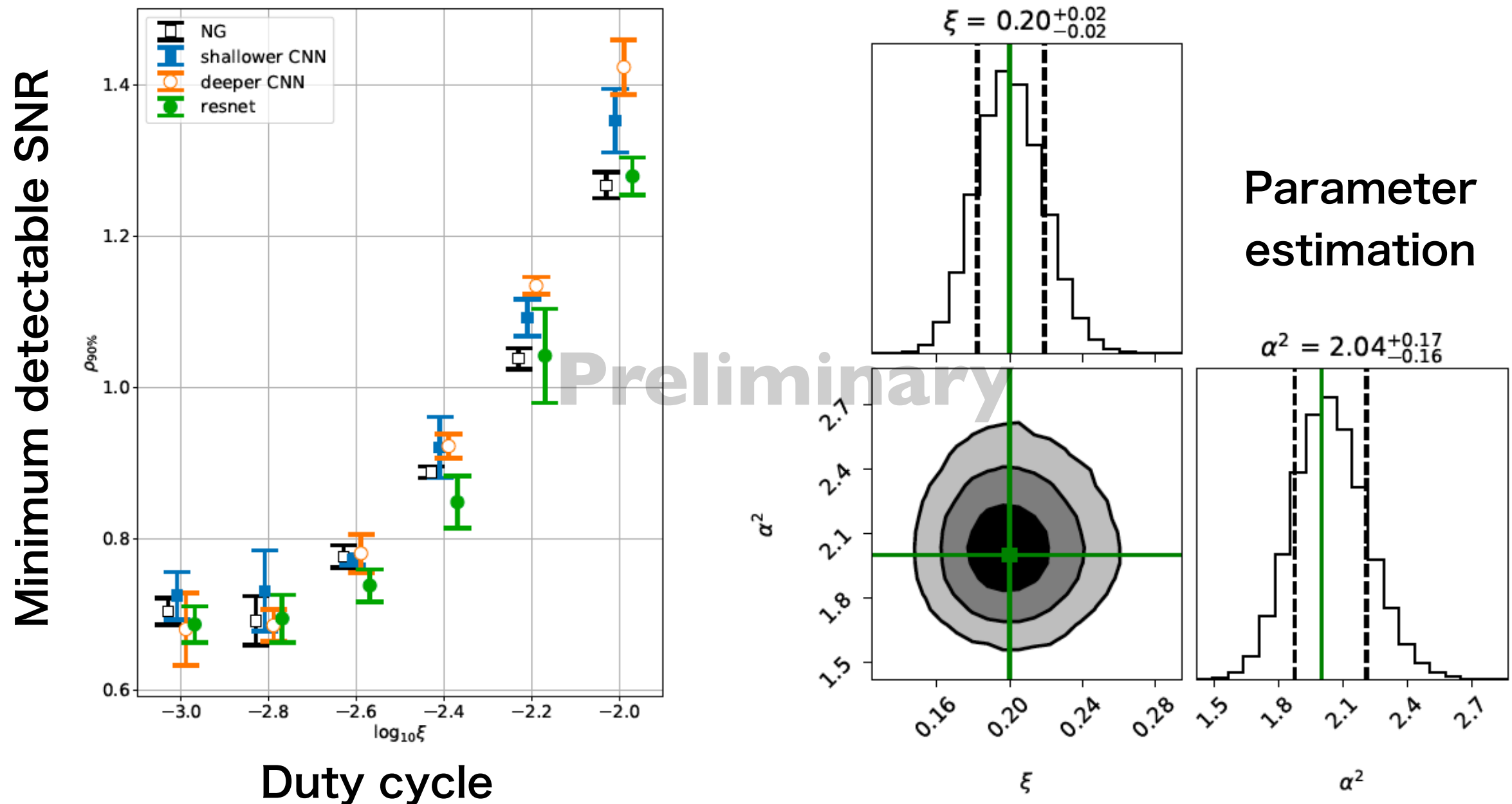


duty cycleのposterior分布



Popcorn背景重力波の検出

1. LVK stochastic: CCI (Cross-Correlation search for Intermittent backgrounds)
2. Smith & Thrane (2018): Deterministic method
3. KAGRA stochastic: Machine Learning

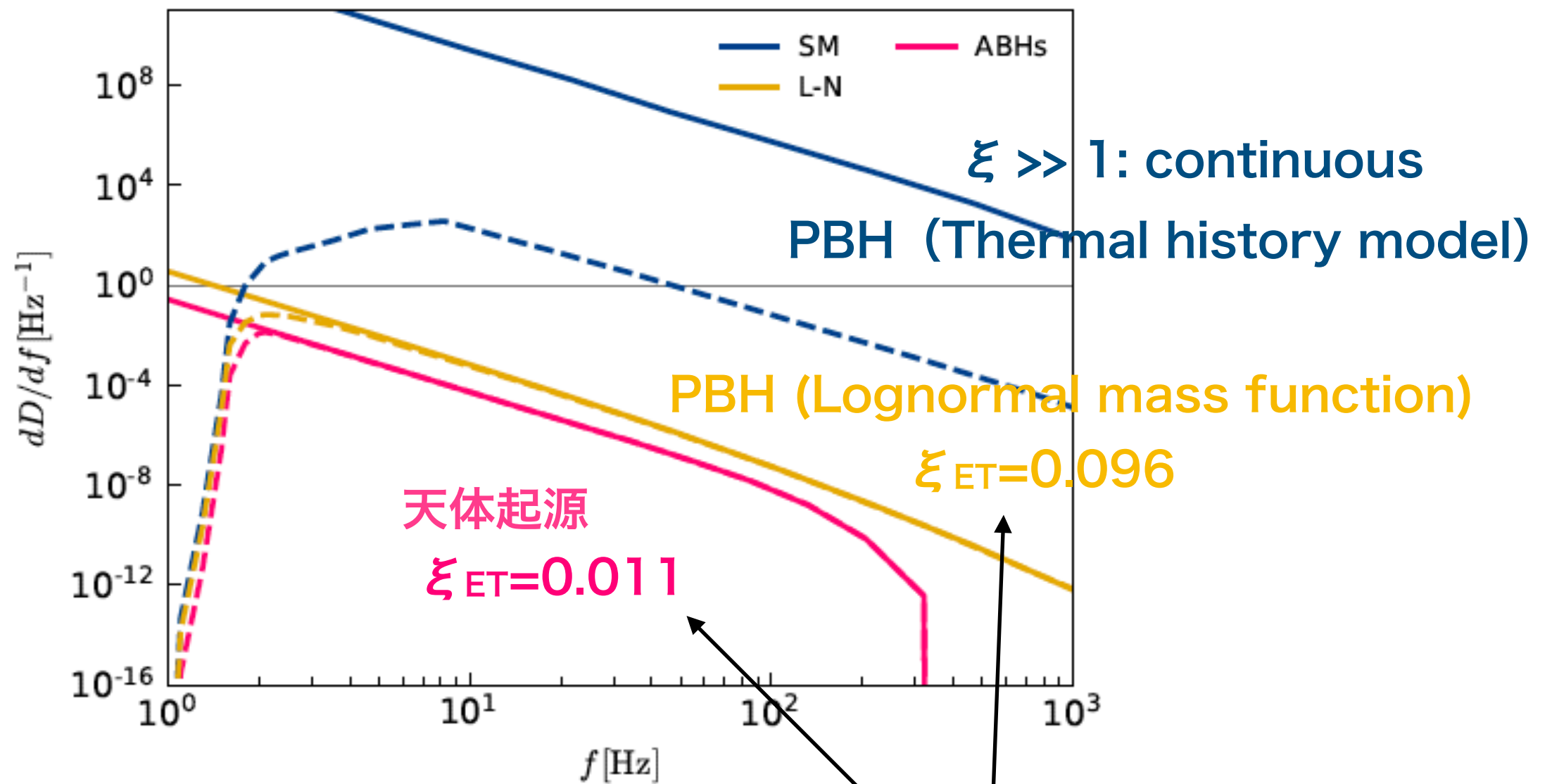


paper in preparation with **Takahiro Yamamoto** and **Guo Chin Liu**

ブラックホールの起源にも言及できるかも？

直線: 検出できないイベントも全て数えたDuty Cycle

破線: ETでSNR>1のイベントを数えたDuty Cycle



ほぼ $O(10)$ の違い

→ 観測で区別できるかも

まとめ

重力波は初期宇宙を直接観測する唯一の手段

- 初期宇宙に重力波を生成する機構は様々
- 初期宇宙の歴史をたどるためには幅広い周波数帯での重力波観測が大事
- 感度が上がれば天体起源の前景放射が見えてくる
- 初期宇宙を観測するには前景放射との分離が課題に
- もちろん前景放射から引き出せる物理も（例: PBH vs ABH）

今後也要注目！