

日本SKAパルサー・突発天体研究会@鹿嶋

スピンドアウン率を用いた 超低周波重力波の新検出法

熊本大学 米丸直之

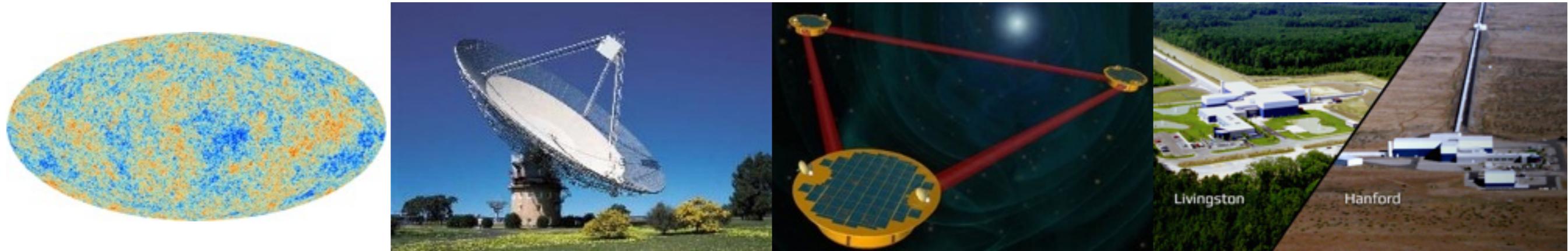
共同研究者：隈本宗輝、高橋慶太郎、黒柳幸子

構成

- ・ 導入
- ・ 検出原理
- ・ 感度のシミュレーション
- ・ 議論

導入

重力波天文学

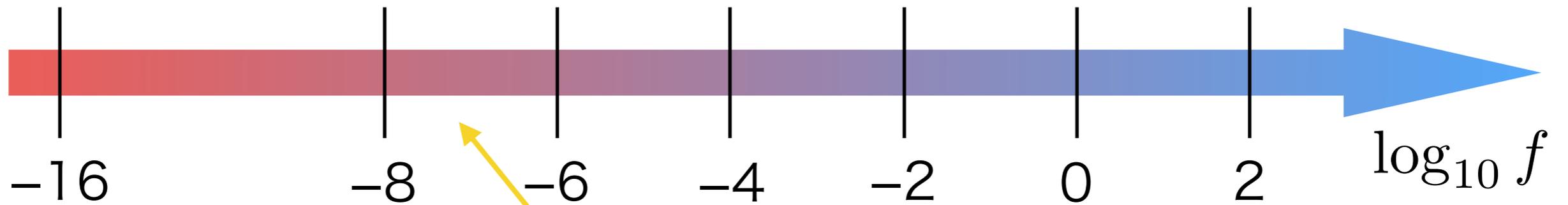


CMB

PTA

宇宙干渉計

地上干渉計



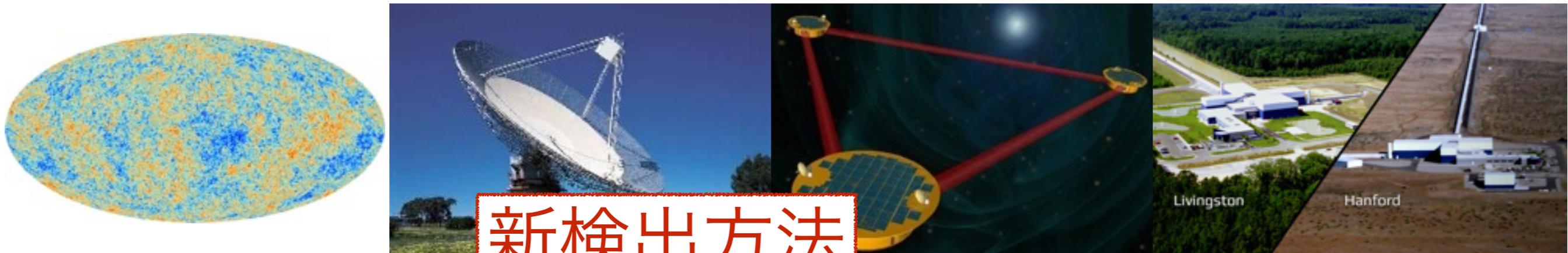
原始重力波

連星BH
& 宇宙ひも

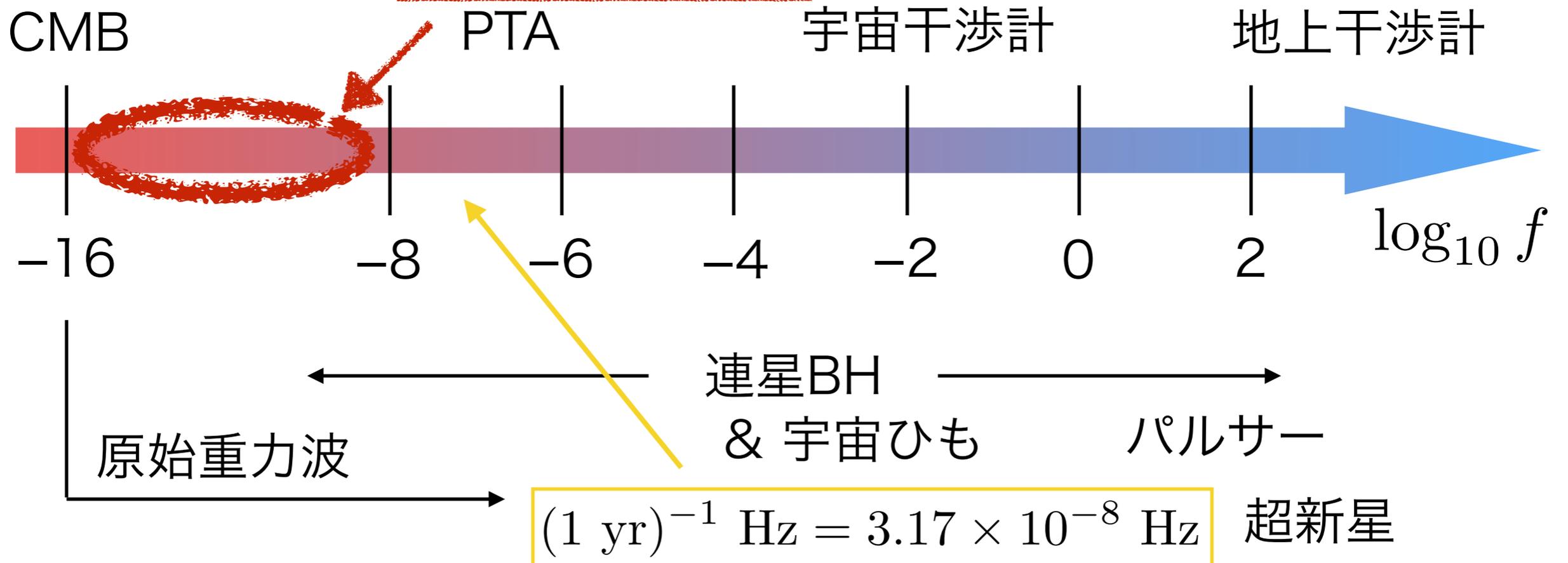
パルサー

$(1 \text{ yr})^{-1} \text{ Hz} = 3.17 \times 10^{-8} \text{ Hz}$ 超新星

重力波天文学

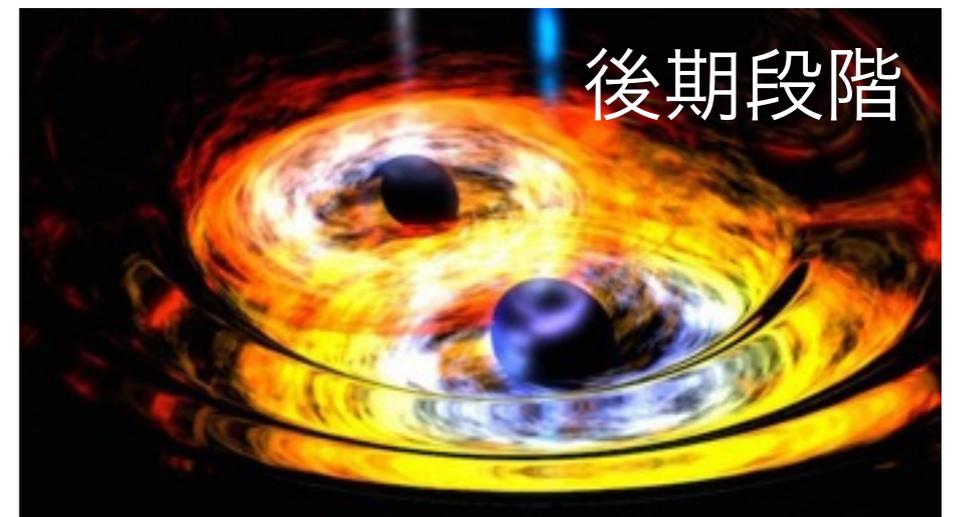
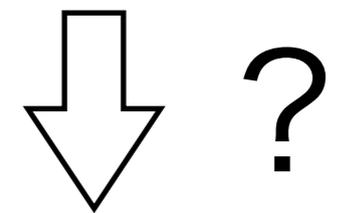


新検出方法



Final-pc problem

- ・ PTAのターゲット
進化の後期段階にあるSMBH連星
- ・ 連星進化の初期段階
ガス(摩擦) & 星(散乱)により
エネルギー、角運動量が引き抜かれる
- ・ 連星進化の中盤(~ 1pc)
連星周辺にガスや星は無い
- これ以降、軌道はどう縮むか?
→ pcスケールの観測は重要
⇒ 新検出方法



検出原理

検出原理

- ・ 既存のPTA …

周波数：重力波 \ll PTAの観測周波数帯

→ 重力波の振幅は時間に対し直線的に変化

⇒ スピンダウン率の補正として吸収され、検出できない…

- ・ スピンダウン率の補正

- 重力波により生じるtiming residual

$$r(t) = \frac{1}{2} \alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}) t^2 \quad \alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}) = \sum_{A=+, \times} F^A(\hat{\Omega}, \hat{p}) \dot{h}_A$$

- スピンダウン率の補正項

$$r_{\dot{p}} = \frac{1}{2} \frac{\dot{p}}{p} t^2$$

検出原理

- ・ 既存のPTA …

周波数：重力波 \ll PTAの観測周波数帯

→ 重力波の振幅は時間に対し直線的に変化

⇒ スピンダウン率の補正として吸収され、検出できない…

- ・ スピンダウン率の補正

- 重力波により生じるtiming residual

$$r(t) = \frac{1}{2} \alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}) t^2 \quad \alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}) = \sum_{A=+, \times} F^A(\hat{\Omega}, \hat{p}) \dot{h}_A$$

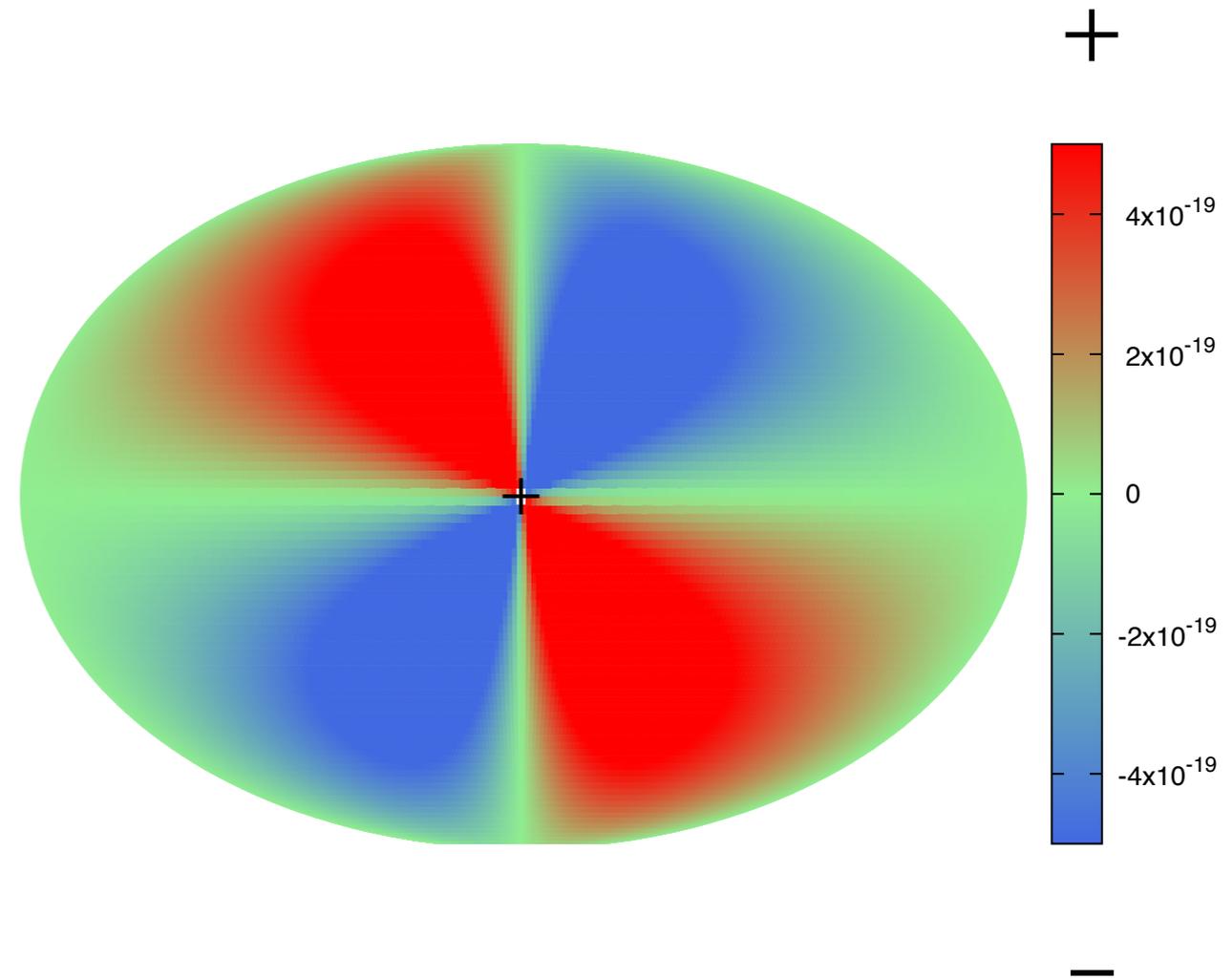
- スピンダウン率の補正項

$$r_{\dot{p}} = \frac{1}{2} \frac{\dot{p}}{p} t^2$$

- 補正後のスピンドウン率

$$\frac{\dot{p}}{p} = \frac{\dot{p}_0}{p} + \alpha(\hat{\Omega}, \hat{p})$$

- bias factor $\alpha(\hat{\Omega}, \hat{p})$
 - … 四重極パターンが見える
(Earth termのみの場合)



- 重力波が十分強い場合
 - スピンドウン率分布が異なる領域で異なる性質を持つ
 - 各領域の分布を比較する。
 - ⇒ 重力波の検出

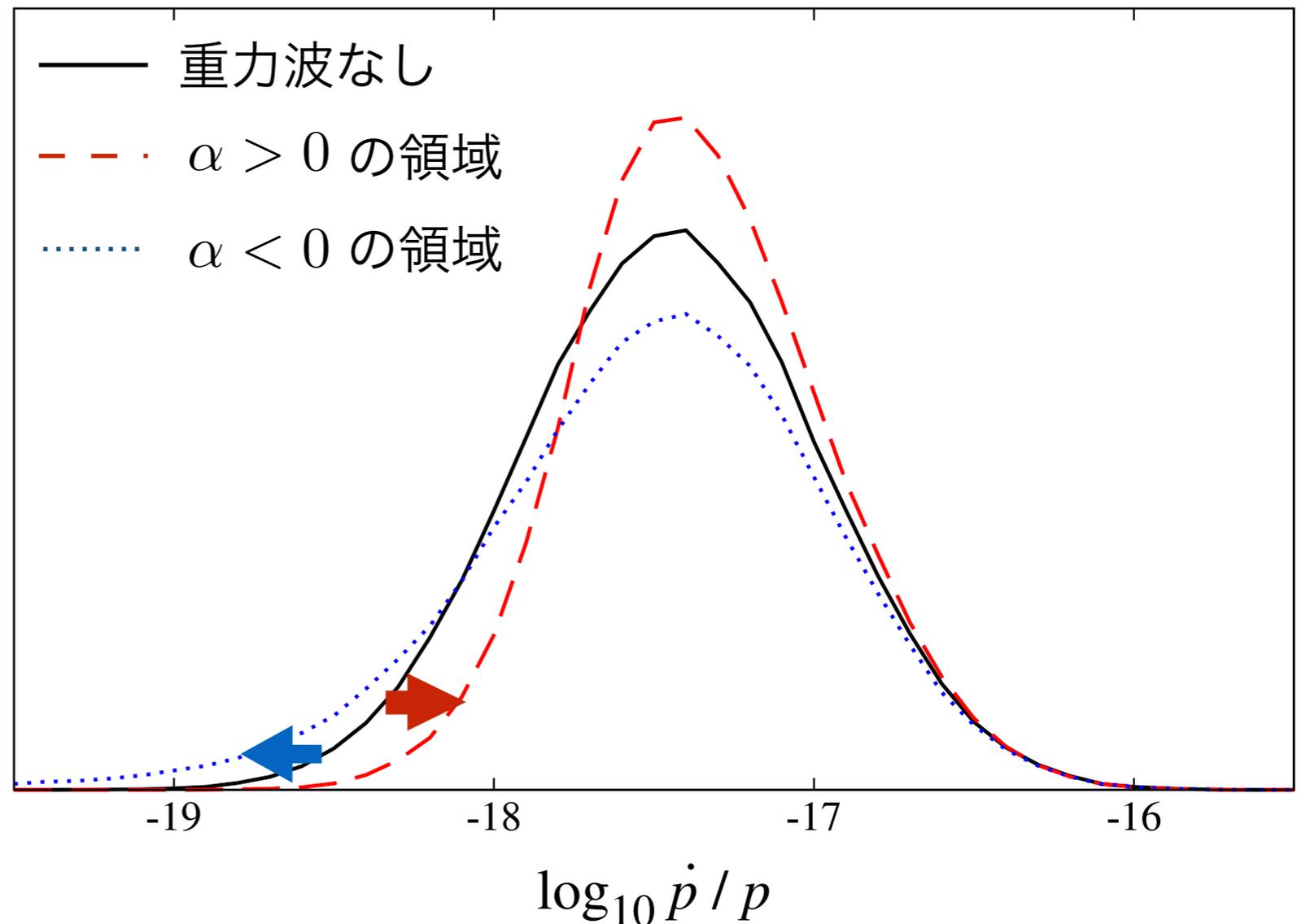
スピンドアウン率分布の歪度の差

- スピンドアウン率分布の変化の概略図

$\dot{h} = 10^{-18}$ の重力波を加えた場合

- 値の小さい部分 (図の左側) が重力波の影響を受ける。

- 2つの分布の違いを特徴づける量
→ 歪度



感度のシミュレーション

歪度の差のシミュレーション

・ × 実際に観測されるMSP → ○ mock MSP

・ MSPの位置 … 等方的

・ intrinsicな分布

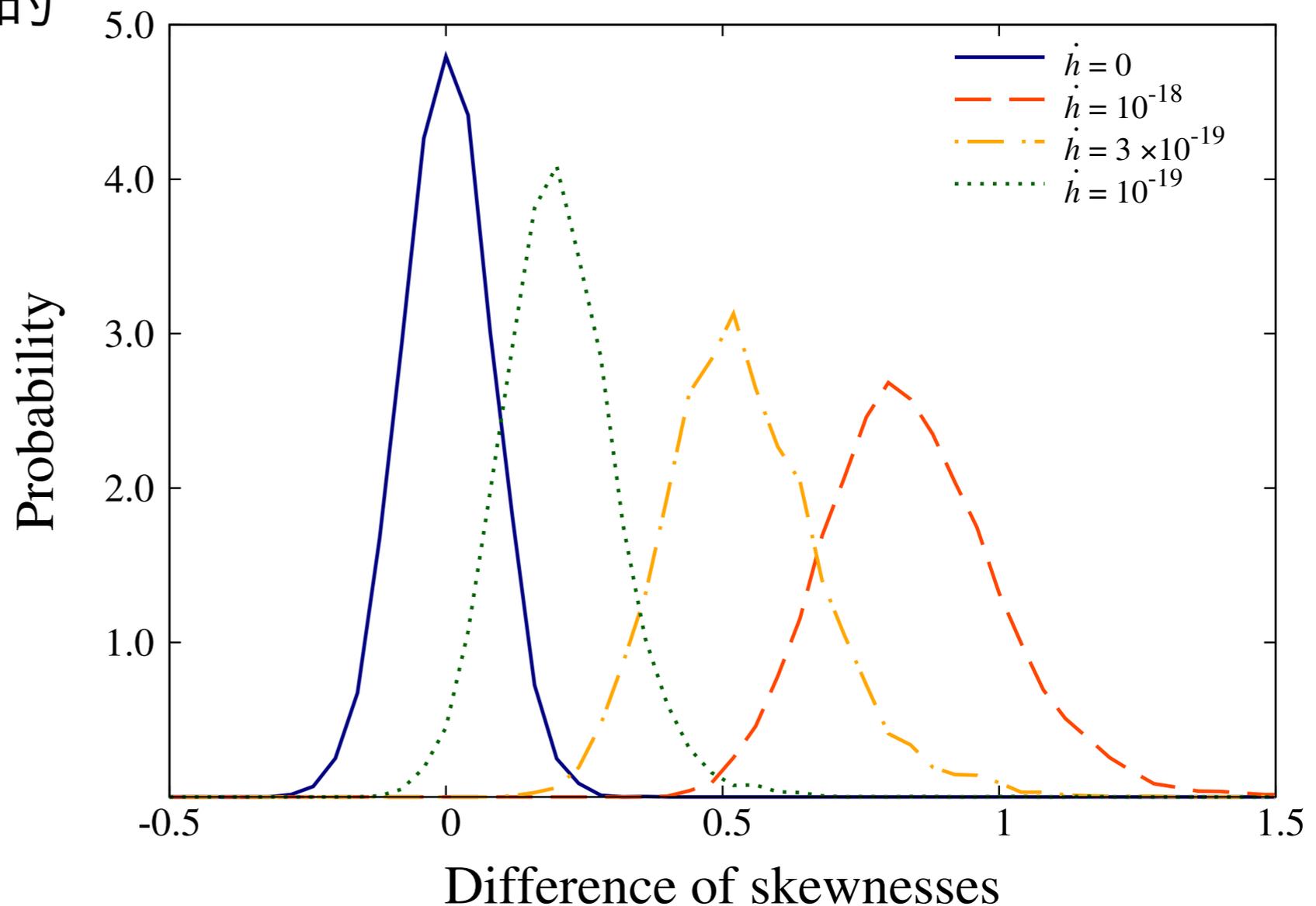
- 平均：-17.5

- 分散：0.21

のガウシアン

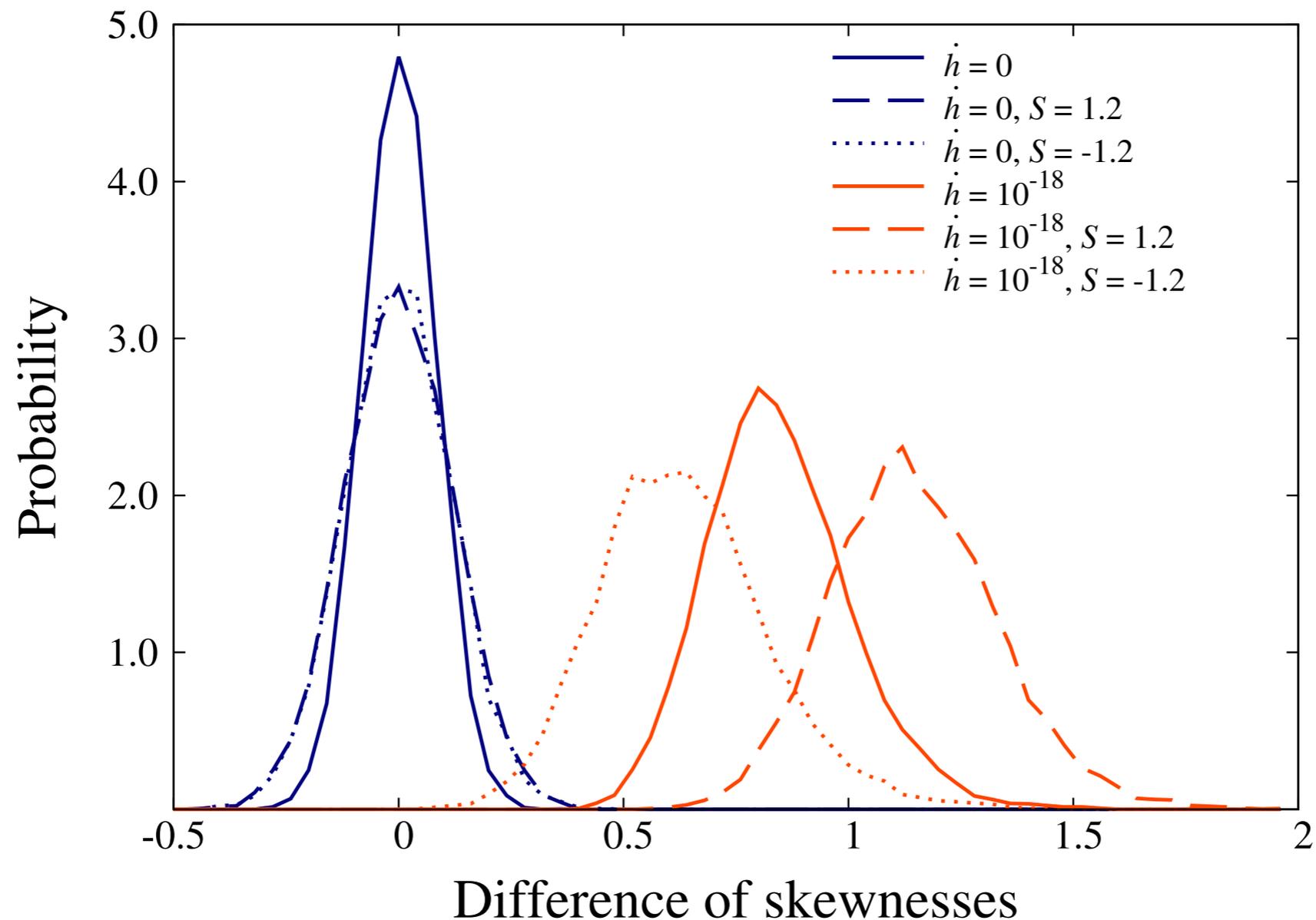
・ $\dot{h} \approx 3 \times 10^{-18}$

→ 検出可能



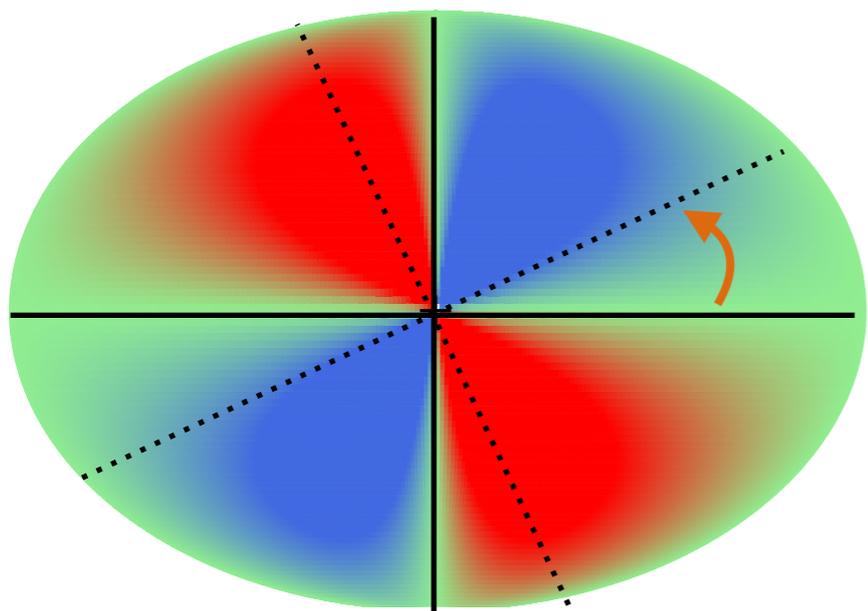
intrinsicな分布がもともとskewnessを持つ場合

- Jarque-Bera検定によると、
観測される分布はガウシアンでは無い

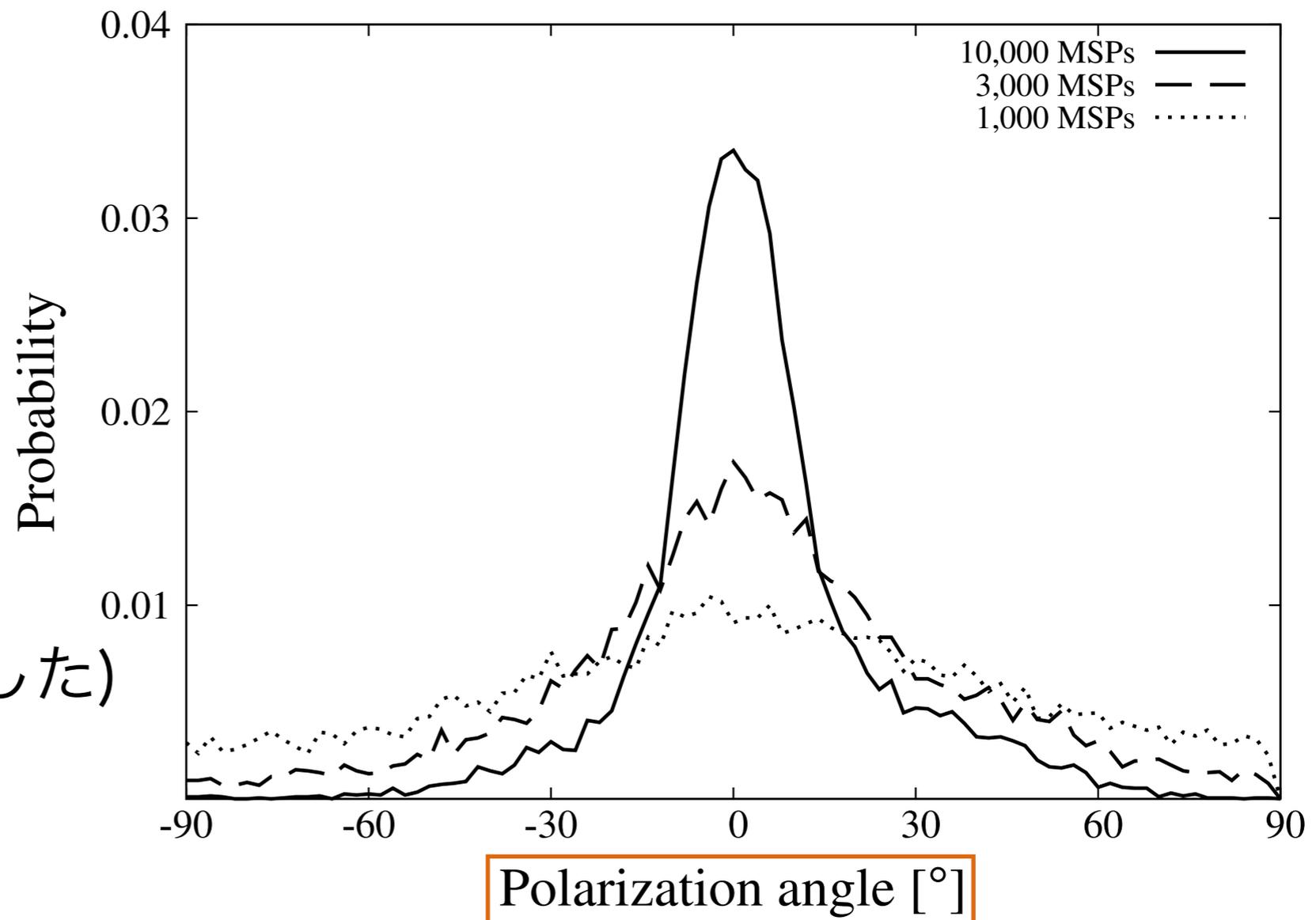


偏光角の決定精度

- 偏光角がずれる → 歪度の差は小さくなる



- 実線 … 正しい偏光
- 破線 … ずれた(仮定した)偏光



議論

波源がSMBH連星である場合

- ・ 波源が円軌道である場合

$$\dot{h}_A = -\frac{1}{2}\dot{h}_0 (\hat{r}_i \hat{u}_j + \hat{u}_i \hat{r}_j) e_{A,ij}$$

where

$$\dot{h}_0 = 2\pi f_{\text{GW}} h_0 \quad h_0 = \frac{2 (GM)^{5/3} (\pi f_{\text{GW}})^{2/3}}{c^4 R}$$

- ・ この手法で得られるのは \dot{h}_0
→ 振幅と周波数は縮退している
- ・ ただ、観測できる周波数帯は限られている。

観測周波数帯

- ・ 本来、 $\alpha \propto$ Earth term – pulsar term
$$\propto e^{-2i\pi f_{\text{GW}}t} (1 - e^{2i\pi f_{\text{GW}}\tau})$$

where τ : パルスの伝播時間

- ・ じゃあ、pulsar termを無視できるのは？
→ pulsar termがrandom noiseとして振る舞う場合
⇒ 2つのtermの位相差がある程度以上大きい場合

- ・ 観測周波数帯 : $\frac{10^{-13}}{\text{Hz}} - \frac{10^{-10}}{\text{Hz}}$

↓
↳ 振幅が直線的に振る舞う
pulsar termがrandom noiseとして振る舞う

観測周波数帯

- ・ 本来、 $\alpha \propto$ Earth term – ~~pulsar term~~
 $\propto e^{-2i\pi f_{\text{GW}}t} (1 - \cancel{e^{2i\pi f_{\text{GW}}\tau}})$

where τ : パルスの伝播時間

- ・ じゃあ、pulsar termを無視できるのは？
→ pulsar termがrandom noiseとして振る舞う場合
⇒ 2つのtermの位相差がある程度以上大きい場合

- ・ 観測周波数帯 : $\frac{10^{-13}}{\text{Hz}} - \frac{10^{-10}}{\text{Hz}}$

↓
↳ 振幅が直線的に振る舞う
pulsar termがrandom noiseとして振る舞う

軌道要素の制限

- ・ 偏光角

→ $\alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}) = 0$ の位置

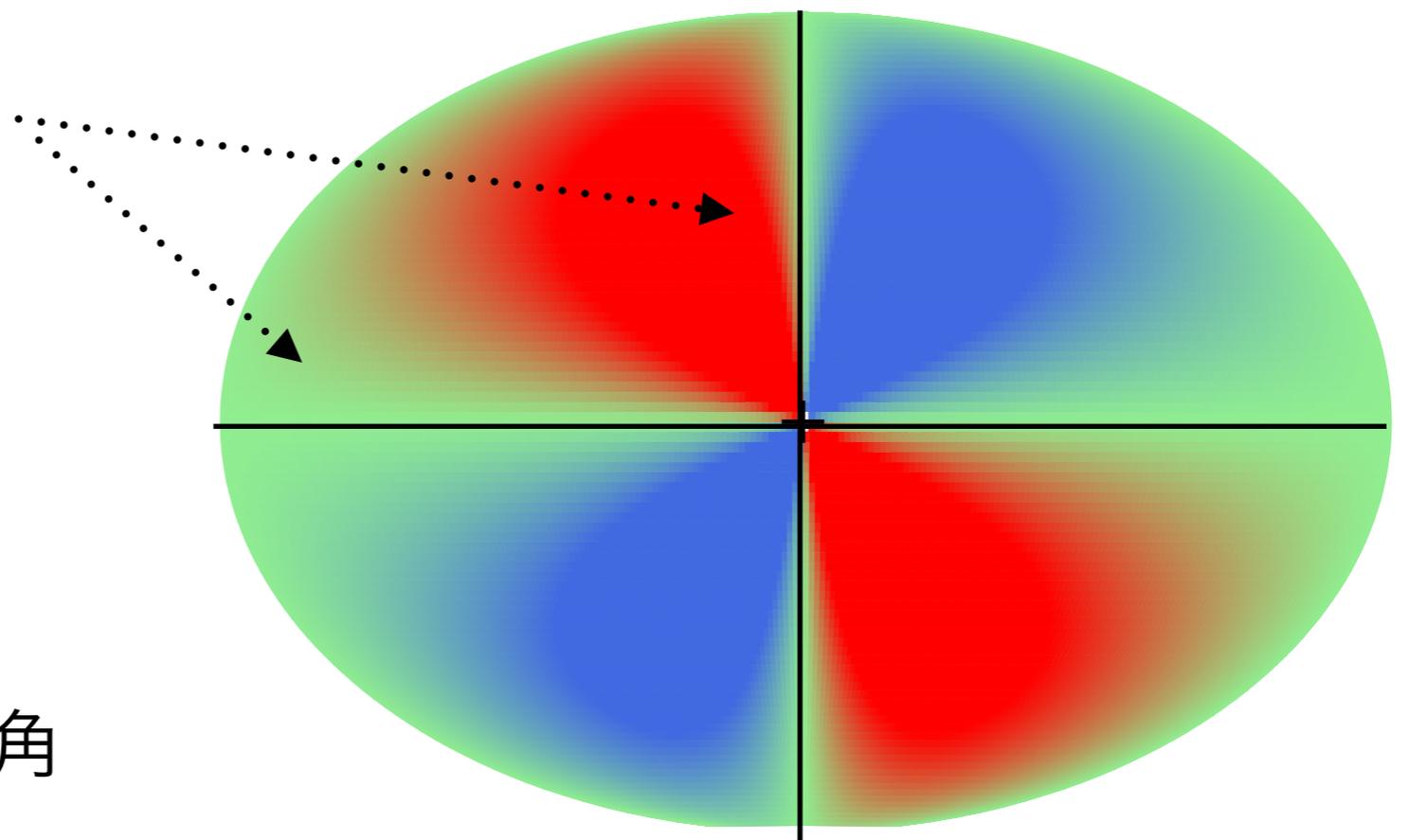
- ・ 軌道要素の関係式

- ι : 軌道傾斜角

- ϕ : 軌道位相

- λ : line of nodesと

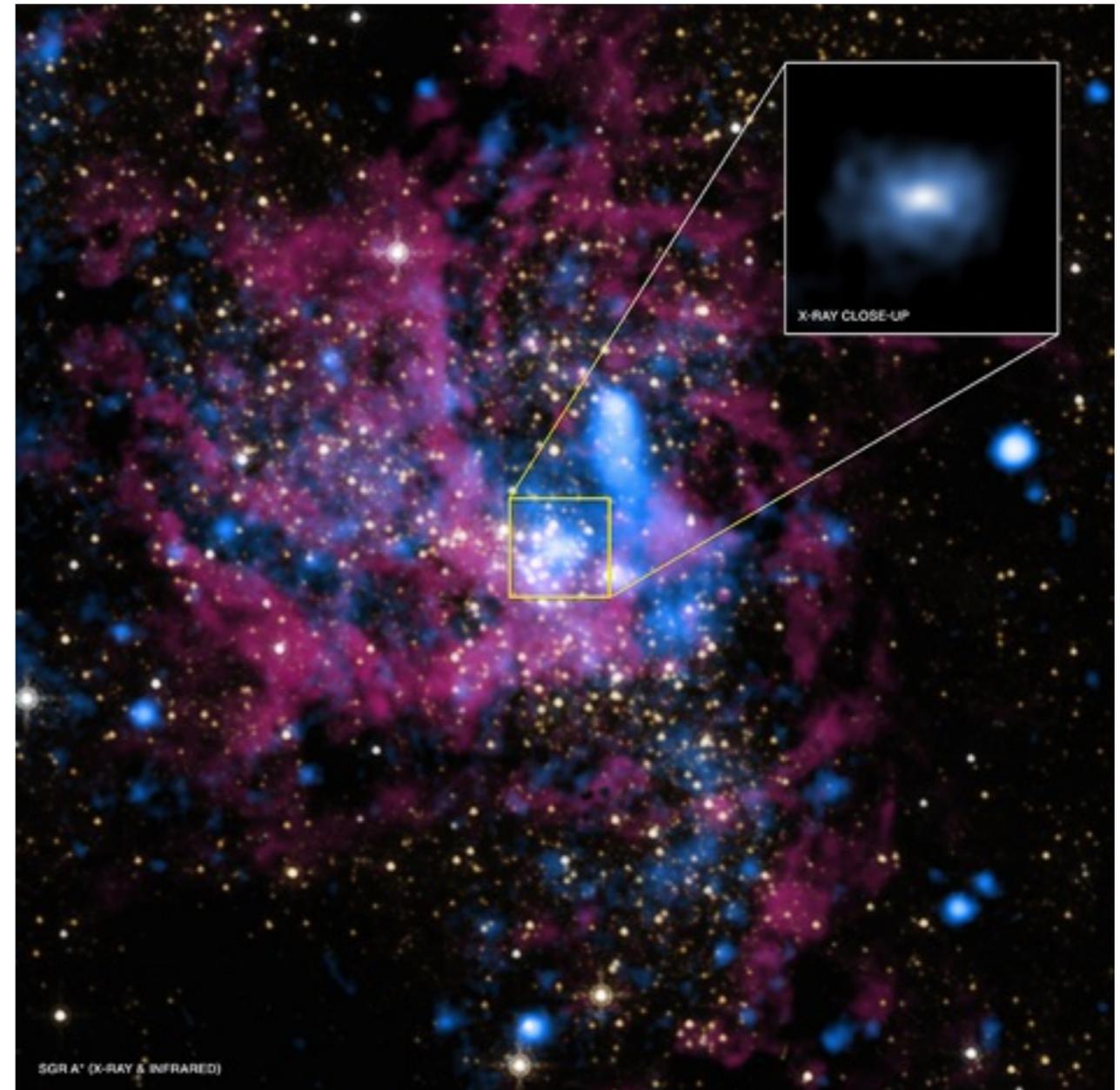
$\alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}) = 0$ のなす角



$$(1 + \cos^2 \iota) \sin 2\phi \cos 2\lambda - 2 \cos \iota \cos 2\phi \sin 2\lambda = 0$$

特定の波源：Sgr A*

- MSP：3,000個 → $\dot{h} = 3 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$ の重力波を検出可能
- Sgr A*
 - SMBHの質量： $4.0 \times 10^6 M_{\odot}$
 - 距離：7.9 kpc
 - $10^{15} M_{\odot}$ 以上の質量のSMBHと連星を形成している場合、
検出可能 at $(100 \text{ yr})^{-1} \text{ Hz}$



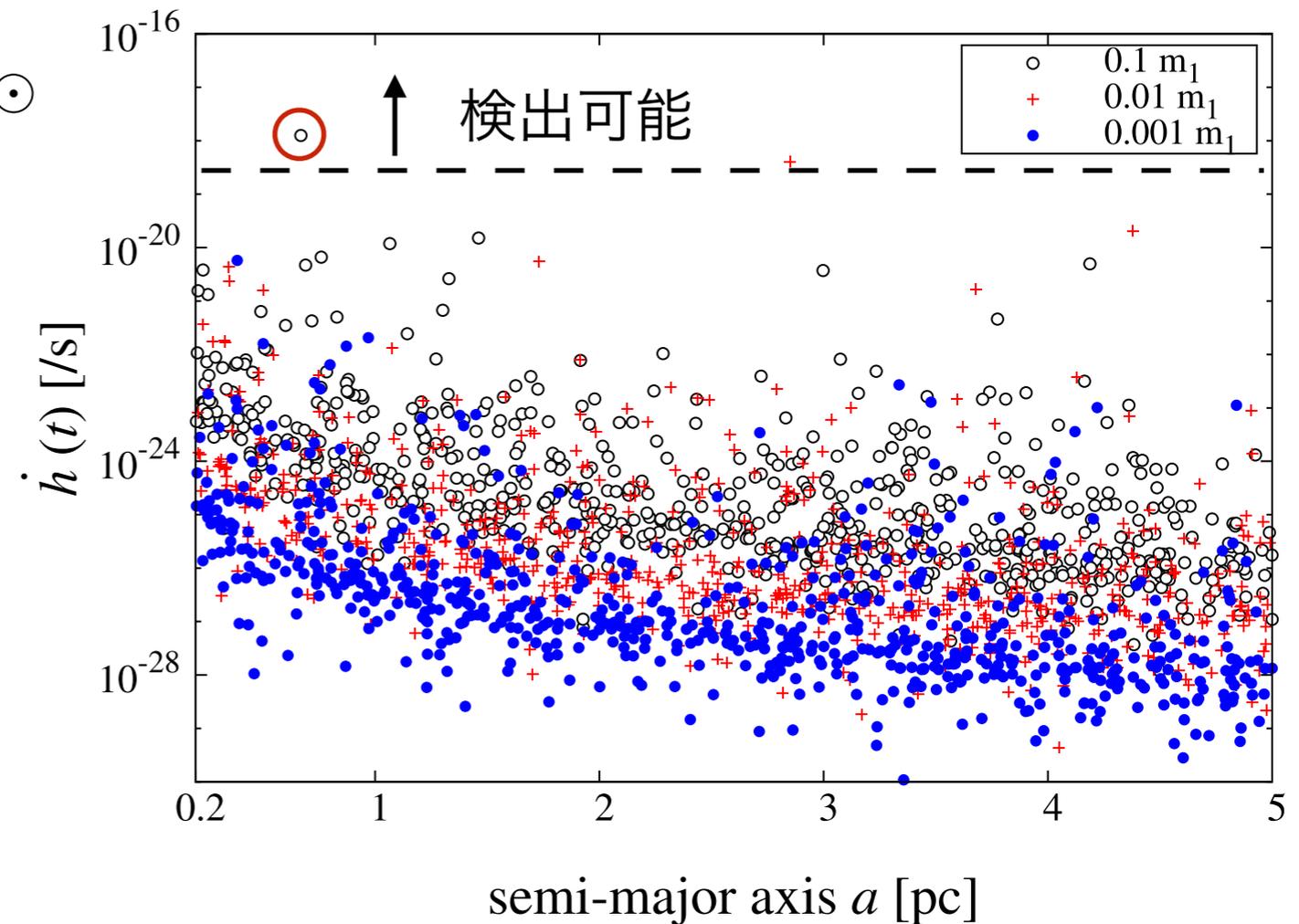
特定の波源：M87

- M87
 - SMBHの質量： $6.6 \times 10^9 M_{\odot}$
 - 距離：18.4 Mpc

- 検出の可能性
 - 伴星の質量： $6.6 \times 10^8 M_{\odot}$
 - 離心率：0.8 以上

- 右図：さまざまな軌道要素
に対する振幅の時間微分

… 軌道半径、離心率、位相、軌道傾斜角



in Yonemaru et al. (2016)

今後の課題

- ・ 実際に観測されるMSPを用いた制限
→ 現在、論文を執筆中
- Kumamoto, Yonemaru et al. in prep.
- ・ レフェリー曰く、
背景重力波も四重極パターンが現れる
→ 背景重力波に対する議論、考察
- ・ $\ll 10^{-13}$ Hz の重力波に対する感度のシミュレーション、制限
- ・ 重力波が強いと負のスピンダウン率が出現
- しかし、実際には1個しか無い → 制限

まとめ

- ・ 超低周波重力波に対する新検出方法
 - 超低周波重力波はスピンドウン率の補正として吸収されてしまう。
→ 赤と青それぞれの領域でスピンドウン率分布の特徴に違いが生じる。
- ・ 分布の違いを特徴づける量：歪度
→ 2つの領域間の歪度の差をシミュレーション
- ・ シミュレーションの結果、
 $\dot{h} = 3 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$ の重力波なら検出可能

