

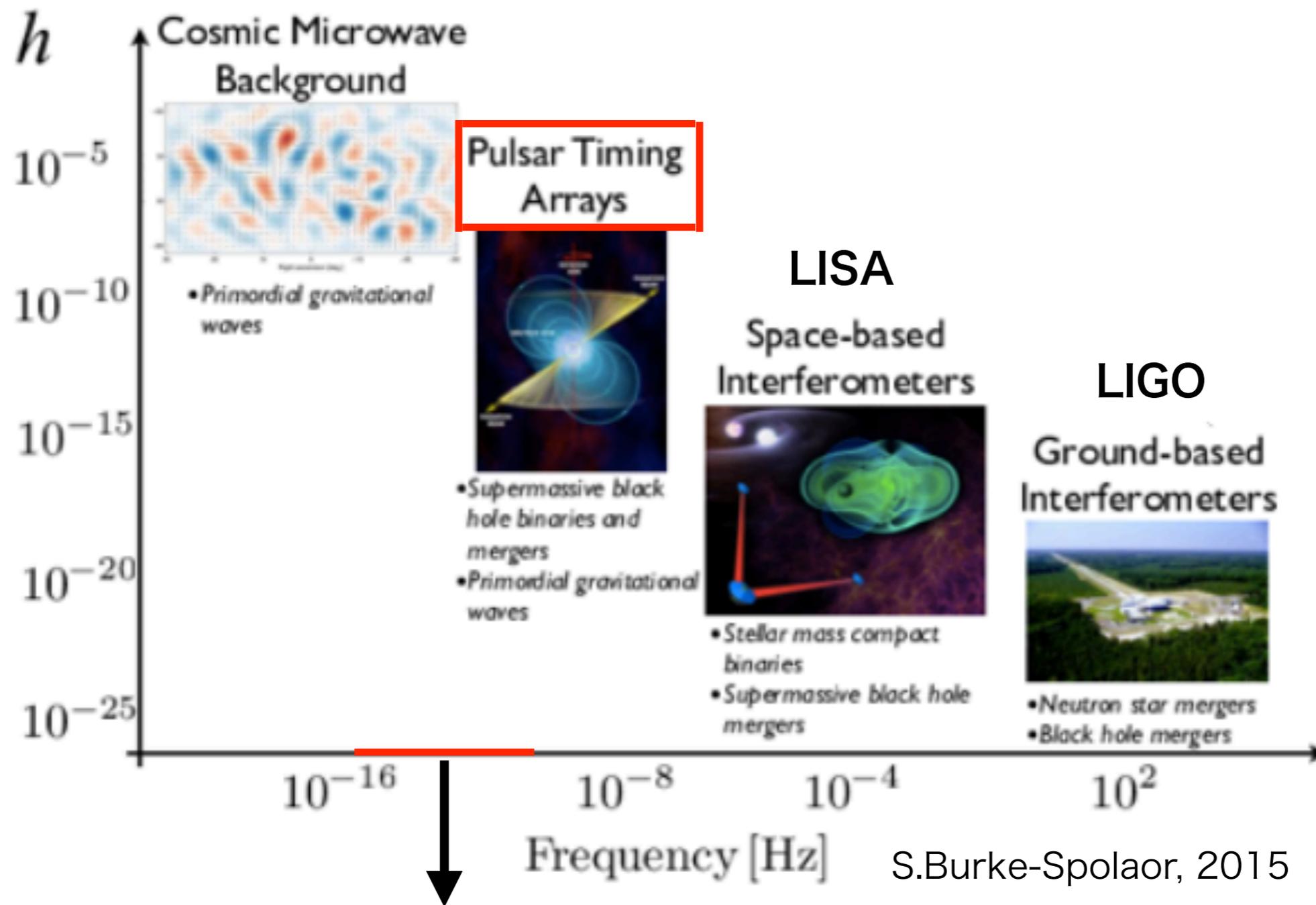
パルサーのスピンダウン率を用いた 超低周波重力波の検出可能性

熊本大学 M1 久野晋之介

Outline

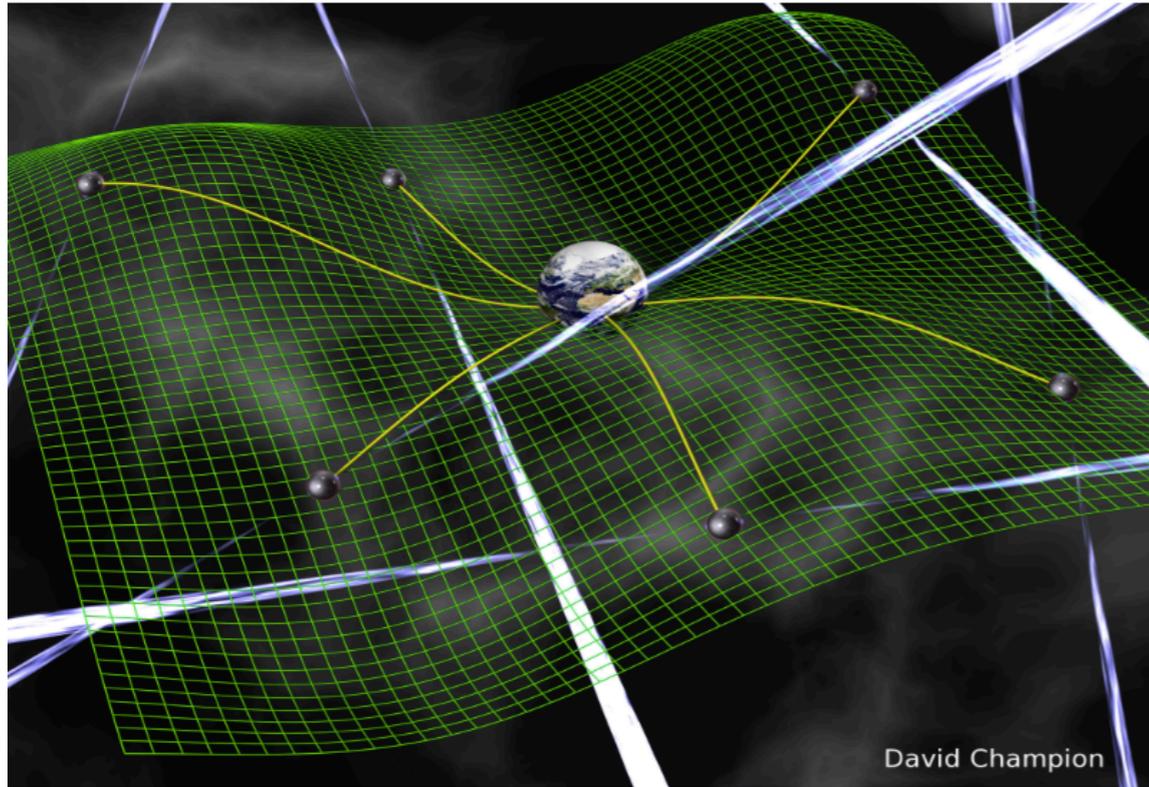
1. 重力波源とその観測手法
2. パルサータイミングアレイ
3. スピンダウン率を用いた検出法
4. シミュレーション
5. 結果
6. まとめ

1. 重力波源とその観測手法



新検出方法の周波数帯

2. パルサータイミングアレイ



PTA image (NRAO)

重力波が存在すると

- パルスの伝搬経路が歪む
- 重力波がない場合の予測とパルスの到来時刻との間にずれが生じる

このずれをシグナルとして観測する手法をパルサータイミングアレイと呼ぶ

• Timing residual

$$r_{GW}(t) = \sum_{A=+,\times} F^A(\hat{\Omega}, \hat{p}) \int^t \Delta h_A(t', \hat{\Omega}, \theta) dt'$$

$\Delta h_A(t', \hat{\Omega}, \theta) = h_A(t, \hat{\Omega}, \theta) - h_A(t_p, \hat{\Omega}, \theta)$: 地球とパルサーの位置での振幅の差

$\hat{\Omega}, \hat{p}$: 重力波の伝搬方向とパルサーの方向

$t_p = t - \tau = t - L/c(1 + \hat{\Omega} \cdot \hat{p})$: パルサーから地球までのパルスの伝搬時間

PTAの観測周波数帯は $\text{nHz} \sim \mu\text{Hz}$ (観測期間と観測頻度で決まる)

軌道半径milli-pcの超大質量ブラックホール連星からの重力波がこの周波数に相当する ← 連星進化の最終段階

この段階では二つの超大質量ブラックホールは重力波放出のみで合体に至る

→ しかし、合体までの時間はハッブル時間を超える

→ “the final parsec problem”

超大質量ブラックホール連星の初期段階の様子が知りたい!



Josh Valenzuela/University of New Mexico

3. スピンドアウン率を用いた検出法

$$r_p = \frac{1}{2} \frac{\dot{p}}{p} t^2 \quad \text{パルサーのスピンドアウンによる timing residual}$$

→ 超低周波重力波はパルサーのパラメータフィッティングにおけるスピンドアウンに吸収されてしまう

p : パルス周期

\dot{p} : 観測されたスピンドアウン率

\dot{p}_0 : 本来のスピンドアウン率

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

・ 先行研究

重力波の周波数が $\gtrsim 10^{-13}$ Hz の場合 pulsar term はランダムノイズ

$$\Delta h_A(t', \hat{\Omega}, \theta) = h_A(t, \hat{\Omega}, \theta) - h_A(t_p, \hat{\Omega}, \theta) = h_A(t, \hat{\Omega}, \theta)$$

Earth term Pulsar term

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

・ 本研究

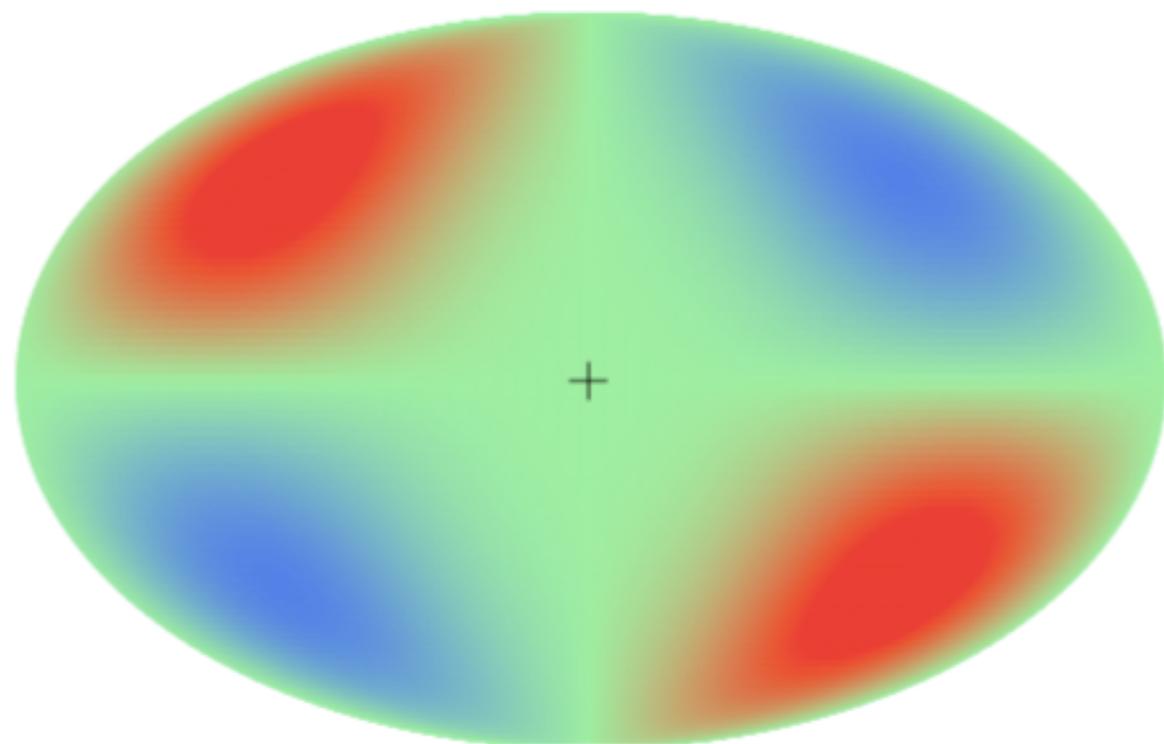
pulsar term \neq ランダムノイズ

$$\Delta h_A(t, \hat{\Omega}) = \dot{h}_A t (1 - e^{2i\pi f_{GW} \tau})$$

$$\alpha(\hat{\Omega}, \hat{p}, \theta) = \frac{1}{2} \sum_{A=+, \times} \frac{\hat{p}_i \hat{p}_j}{1 + \hat{\Omega} \cdot \hat{p}} (1 - e^{2\pi i f_{GW} \tau}) \dot{h}_A$$

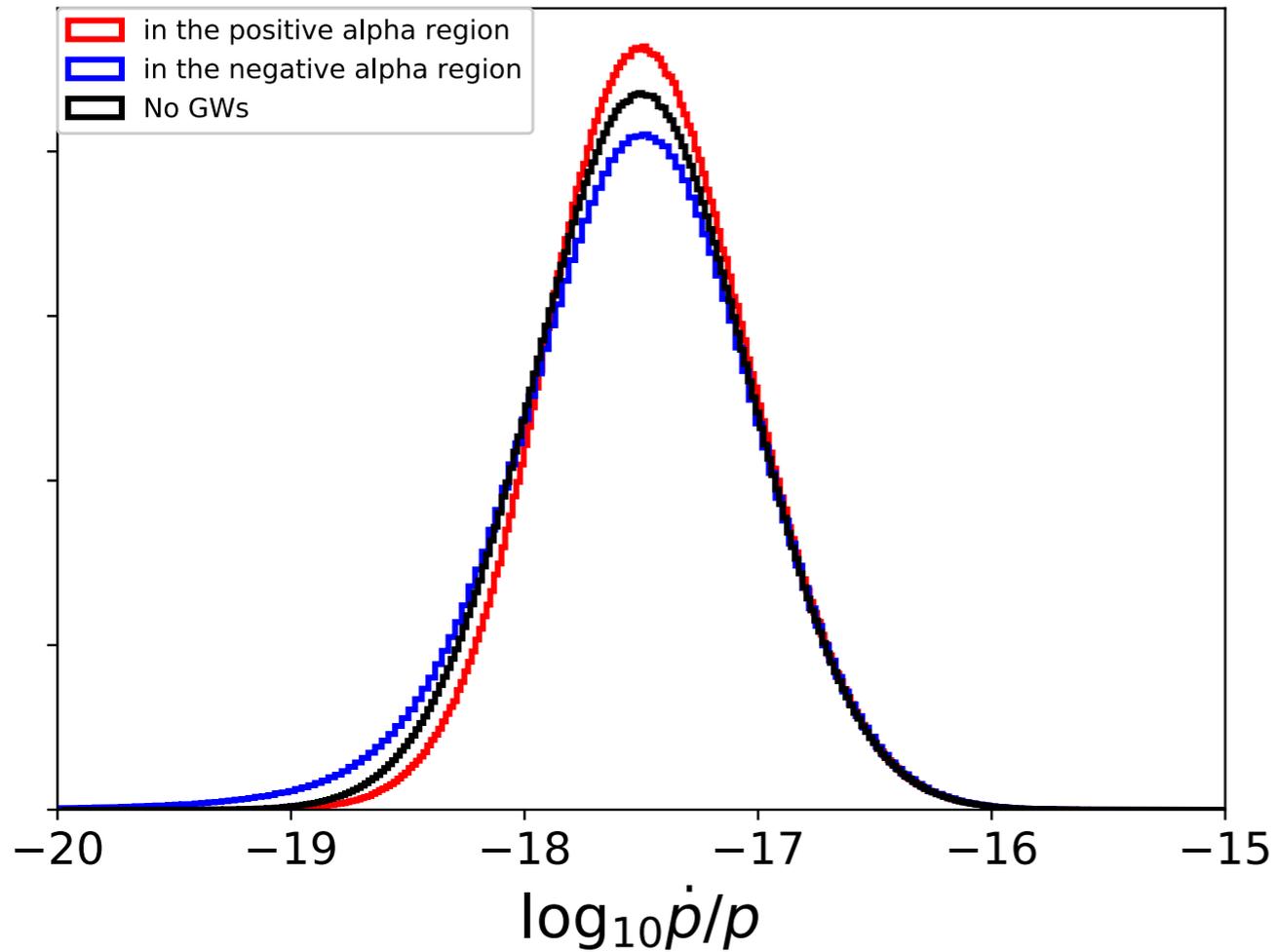
$$\dot{h}_+ = \dot{h} \cos \theta, \dot{h}_\times = \dot{h} \sin \theta \quad \theta : \text{重力波の偏光角}$$

パルサーまでの距離Lを考えるためのモデルを用いる



バイアスファクターの概略図

赤、青の領域はそれぞれ正、負の領域
この2つの領域でのスピンドウン率の分布
の比較をする



歪度(skewness)

$$S_{\alpha+(-)} = \frac{1}{\sigma_{+(-)}^3 N_{+(-)}} \sum_i^{N_{+(-)}} \left(\log_{10} \left(\frac{\dot{p}}{p} \right)_i - \mu_{+(-)} \right)^3$$

グラフの左右非対称性を表す統計量

$\mu_{+(-)}$: 平均

$\sigma_{+(-)}$: 標準偏差

$\dot{h}_A = 10^{-17} \text{s}^{-1}$ での $\log_{10} \frac{\dot{p}}{p}$ のヒストグラムの概略図

歪度の差が統計誤差以上であれば重力波の検出が可能となる

4. Simulation

1. ミリ秒パルサーの分布モデル

$$\rho(r) = 4.1 \left(\frac{r}{R_{\odot}} \right)^{1.9} \exp \left(-5 \left[\frac{r - R_{\odot}}{R_{\odot}} \right] \right) : \text{動径方向} \quad (\text{Lorimer et al. 2006})$$

$$N(z) = 0.75 \exp \left(-\frac{|z|}{0.83} \right) : z \text{軸方向}$$

方位角はランダムに与える

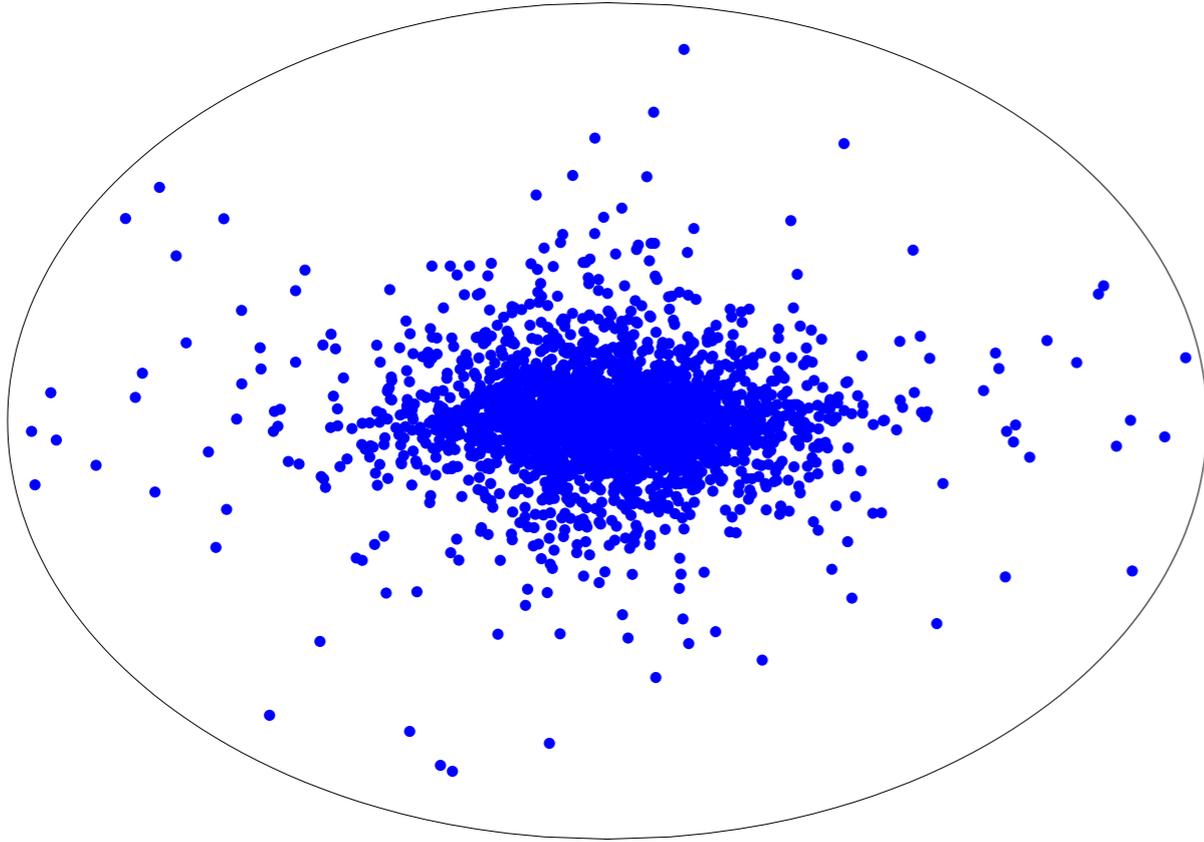
白色矮星との連星のみを考える

2. $\log_{10} \frac{\dot{p}}{p}$ は平均-17.5、分散0.21のガウス分布に従うと仮定

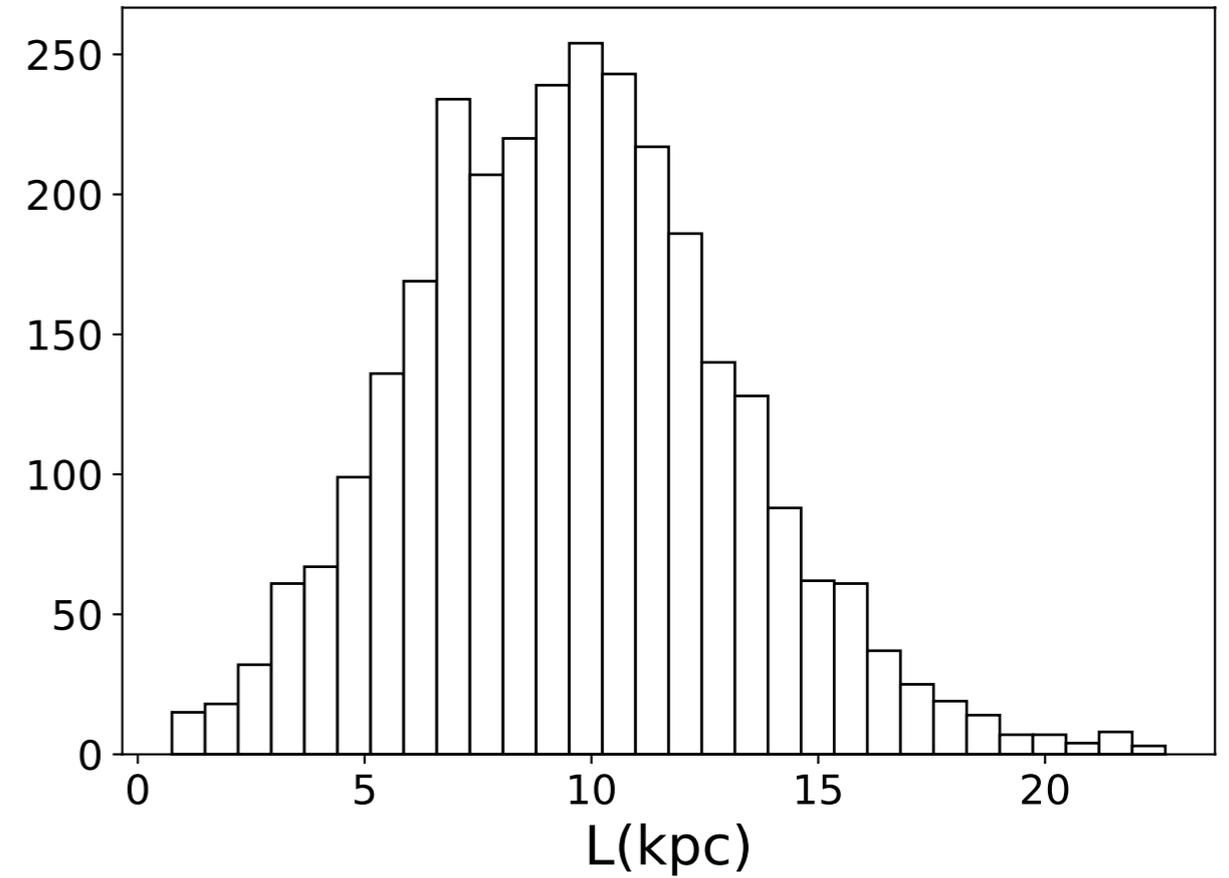
3. α のうち90%が 10^{-18} を超えない様な範囲で考える

4. 周波数や偏光を変えて、歪度の差の確率分布を求める

モデルを用いた3000個のミリ秒パルサーの分布



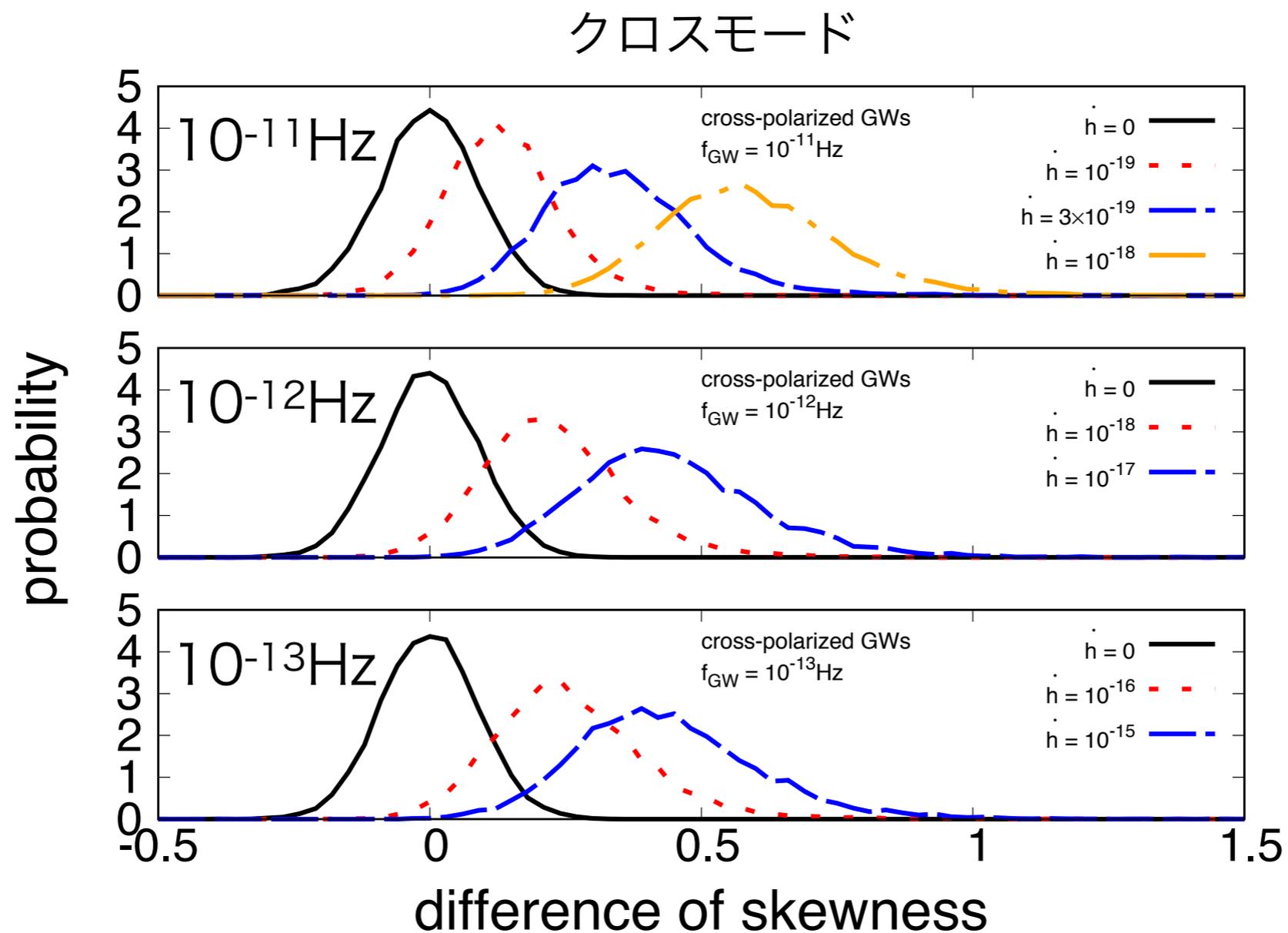
地球からパルサーまでの距離L



- 銀河面に集中している
- 実際の観測とよく一致

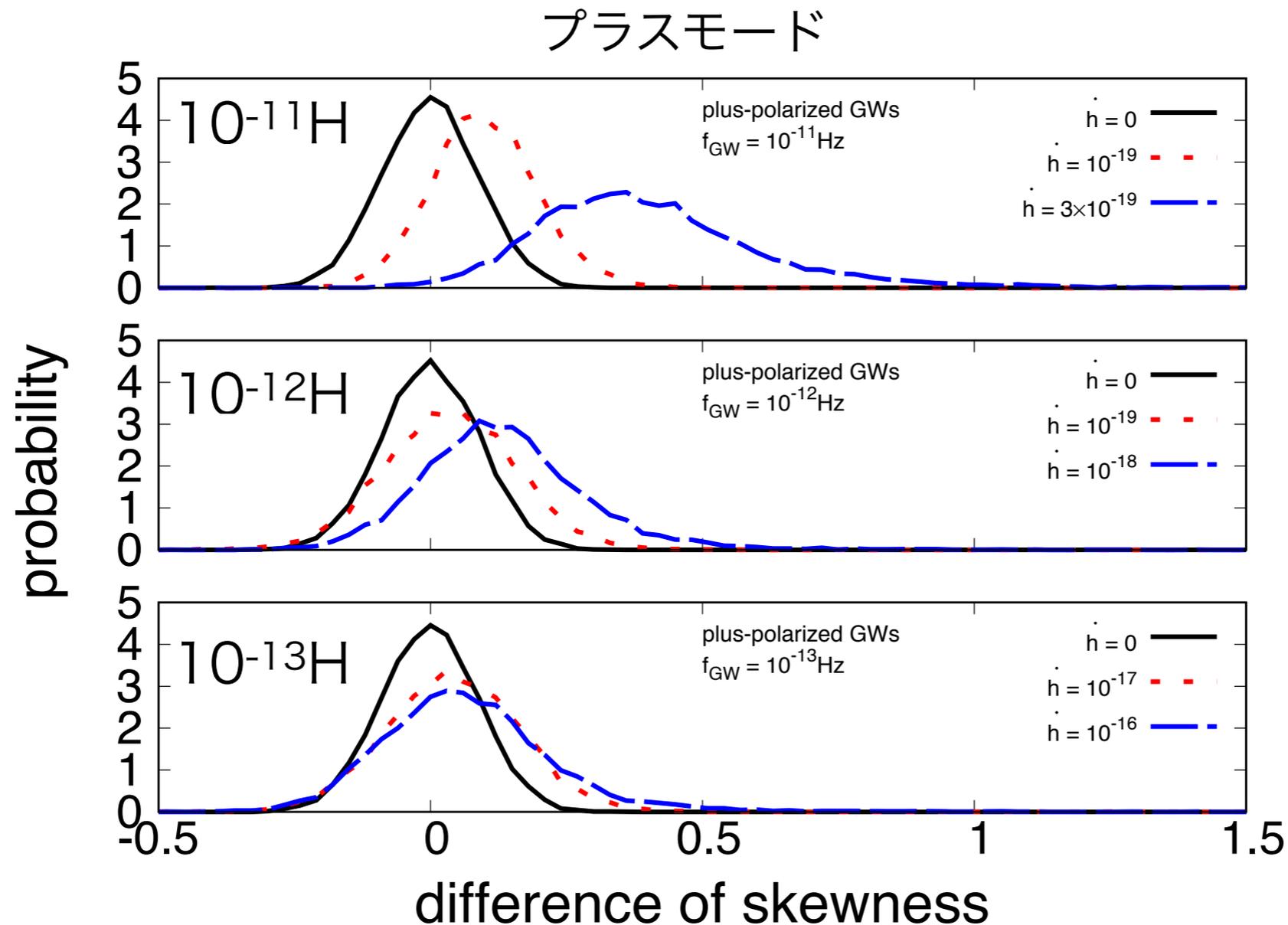
5. 結果

歪度の差の確率分布。黒線は重力波がない場合を表す。



- 低周波になるにつれて感度は下がる

歪度の差の確率分布。黒線は重力波がない場合を表す。



- ・ クロスモードと同様に低周波になるにつれて、感度は下がる。
- ・ 一方、歪度の差が統計誤差以上となる様な \dot{h} は存在しない
→ パルサーが $\alpha > 0$ の領域に偏っているため

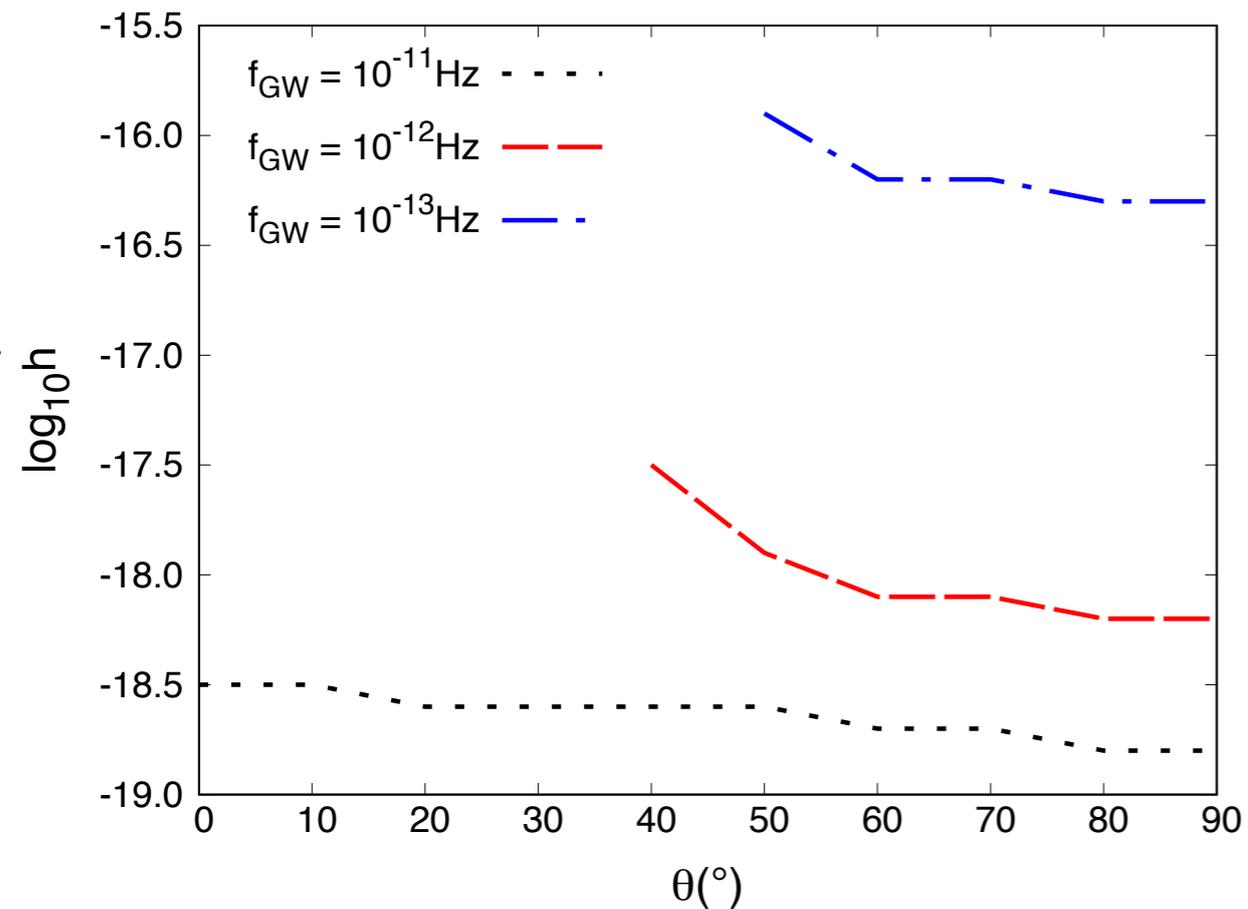
$$\int_{S_c}^{\infty} P(S, \dot{h} = 0) dS = 0.05$$

を満たす様な \dot{h} を持つ重力波を検出可能なものとする。

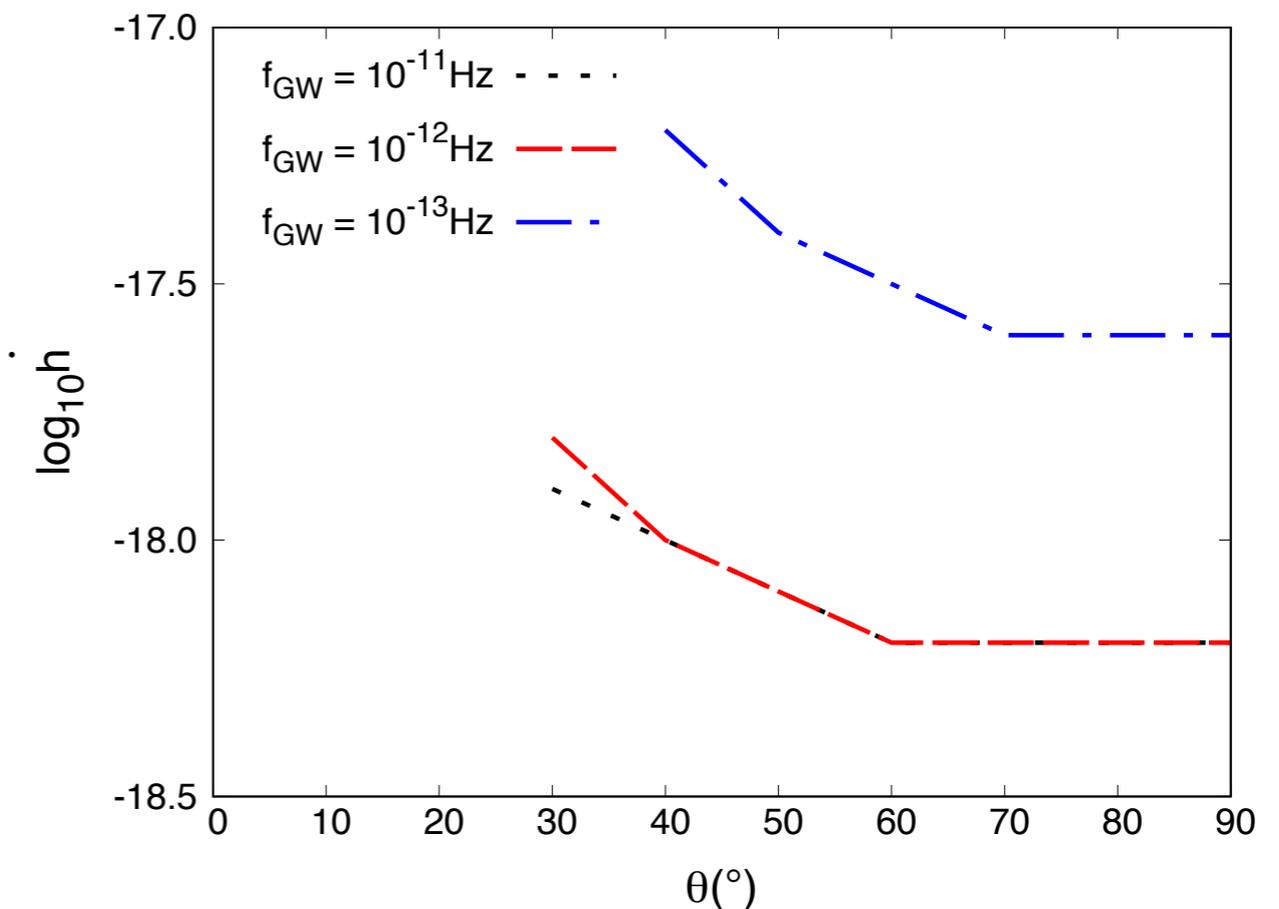
$$\int_{S_c}^{\infty} P(S, \dot{h}) dS \geq 0.9$$

横軸を偏光角、縦軸を \dot{h} の対数をとったものでプロット

波源：銀河中心方向



波源：M87



- 10^{-11} Hzで両者の振る舞いが異なる
- 銀河中心方向の方が感度が良い

6. まとめ

- パルサーのrealisticな分布を用いることで、重力波の周波数や偏光に対する依存性を考慮し、感度を見積もることができた。
- 本研究ではミリ秒パルサー3000個を用いてシミュレーションを行った。これはSKA2 surveyによって発見されることが期待される個数である。
- SKA時代の到来により、パルサーを用いた重力波検出が大いに期待される。