

パルサータイミングアレイの紹介

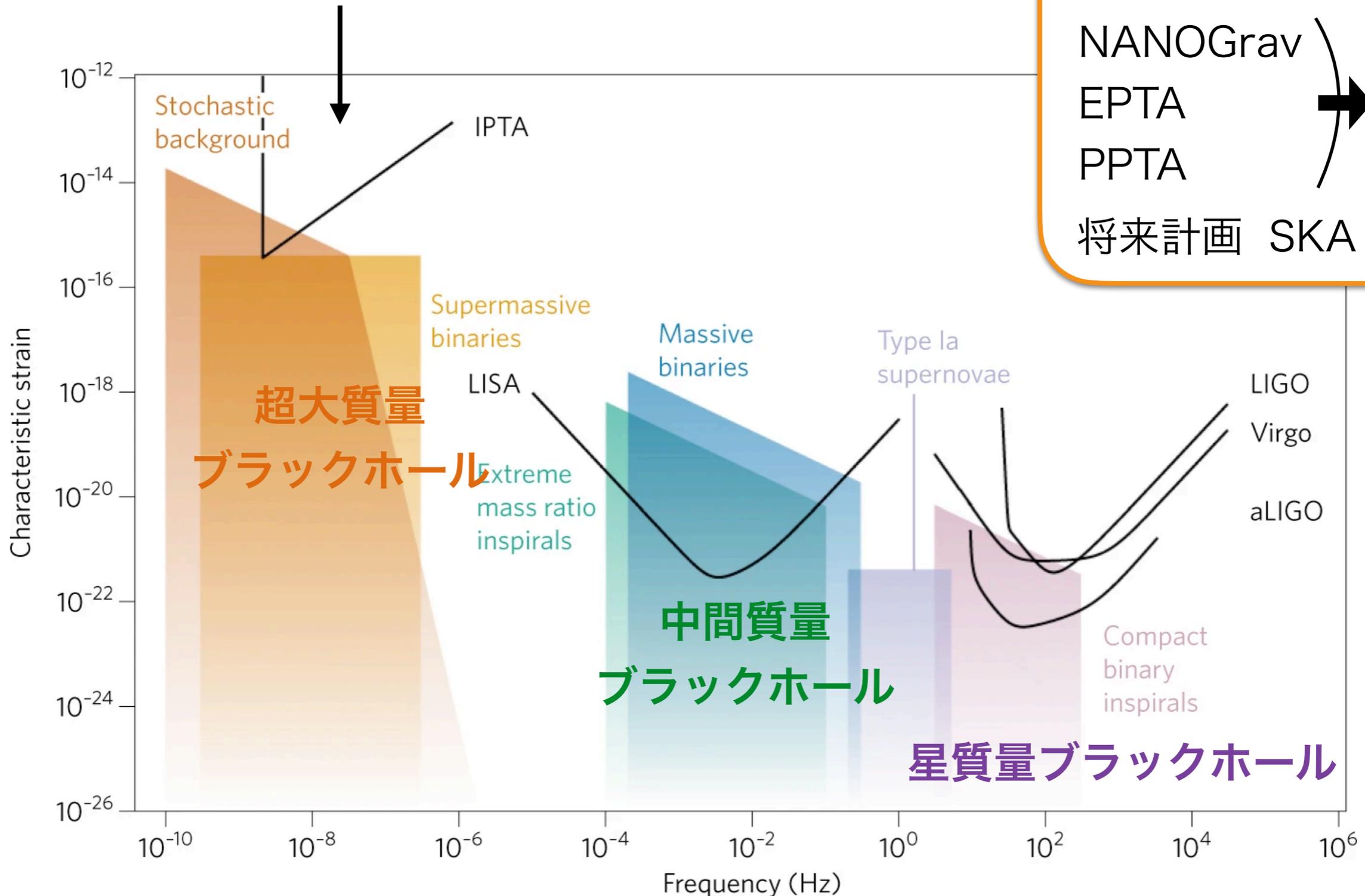
黒柳 幸子

(IFT Madrid/ 名古屋大学)

22/2/2022@素粒子と重力波

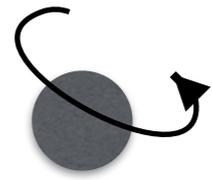
パルサータイミング

10⁻⁸ ~ 10⁻⁹ Hzの低周波重力波を検証できる



パルサータイミング法

ミリ秒パルサー



一定周期の電波パルス

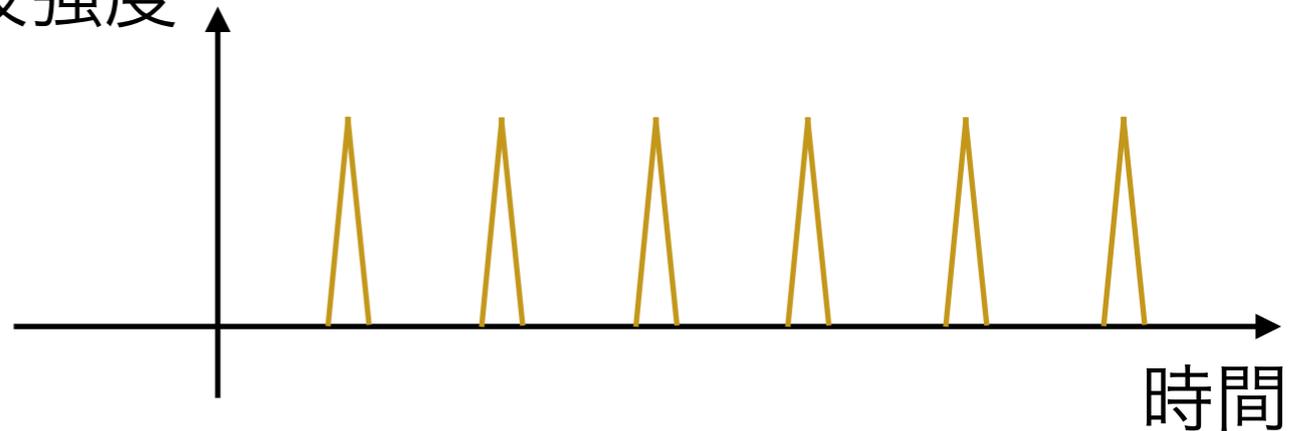


地球



電波望遠鏡

電波強度



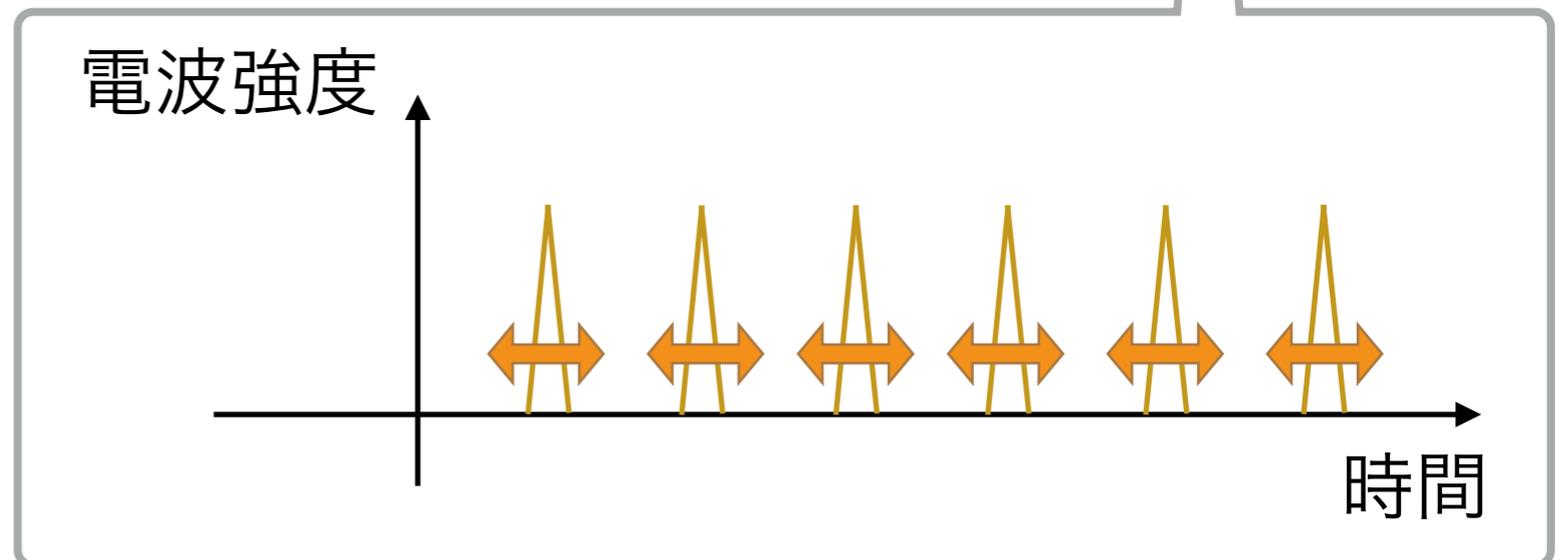
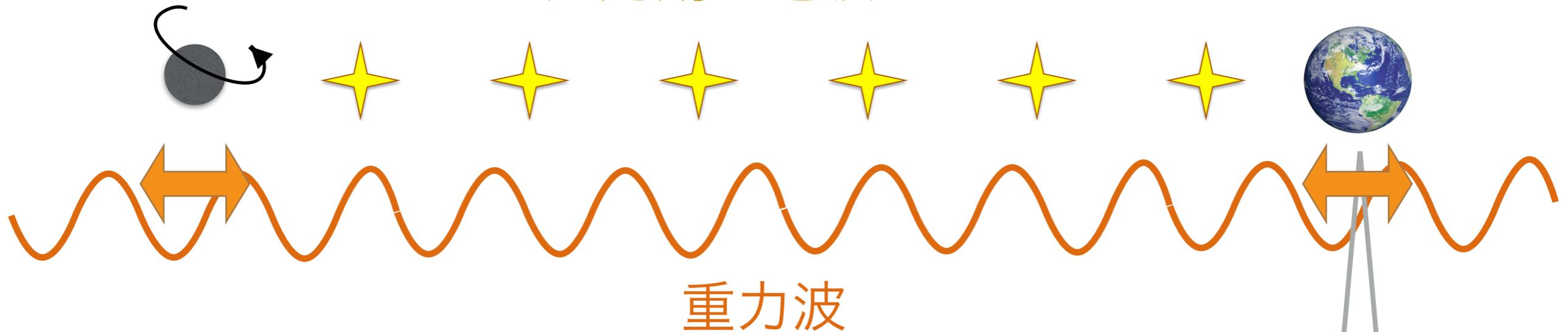
時間

パルサータイミング法

ミリ秒パルサー

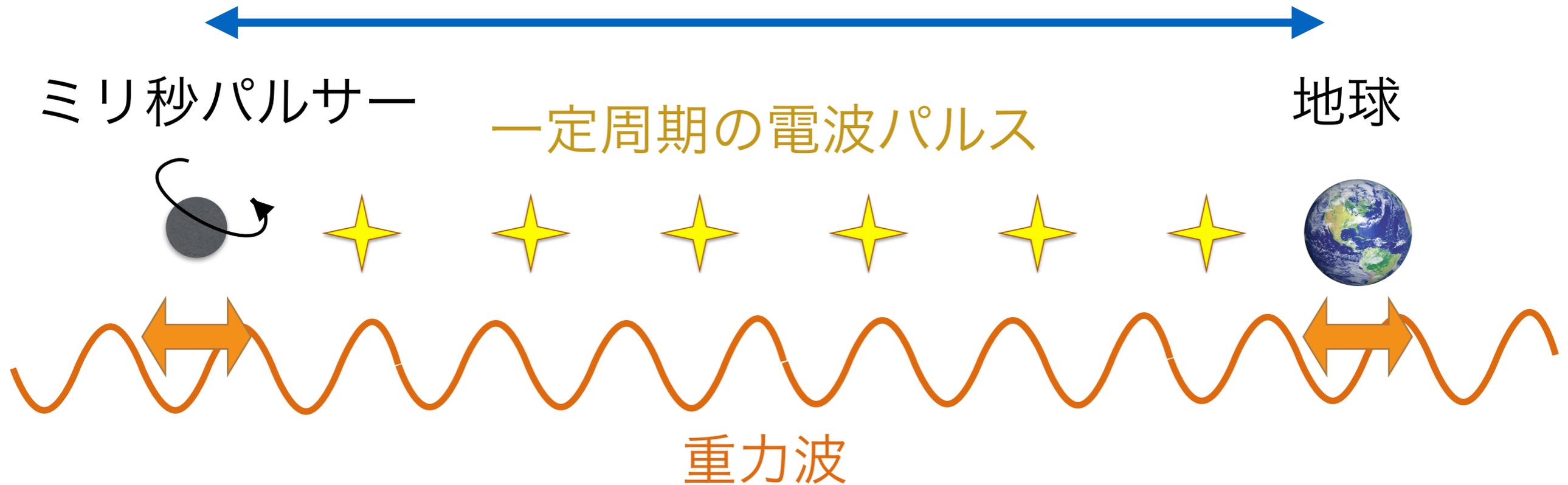
一定周期の電波パルス

地球



パルサータイミング法

パルサーまでの距離 = $O(10^2-10^3 \text{ 光年}) \gg$ 重力波の波長



観測時間に対応する波長より大きな波長の重力波は検出できない

→ 観測できる周波数 $\sim c / \text{観測時間} \sim 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ Hz}$

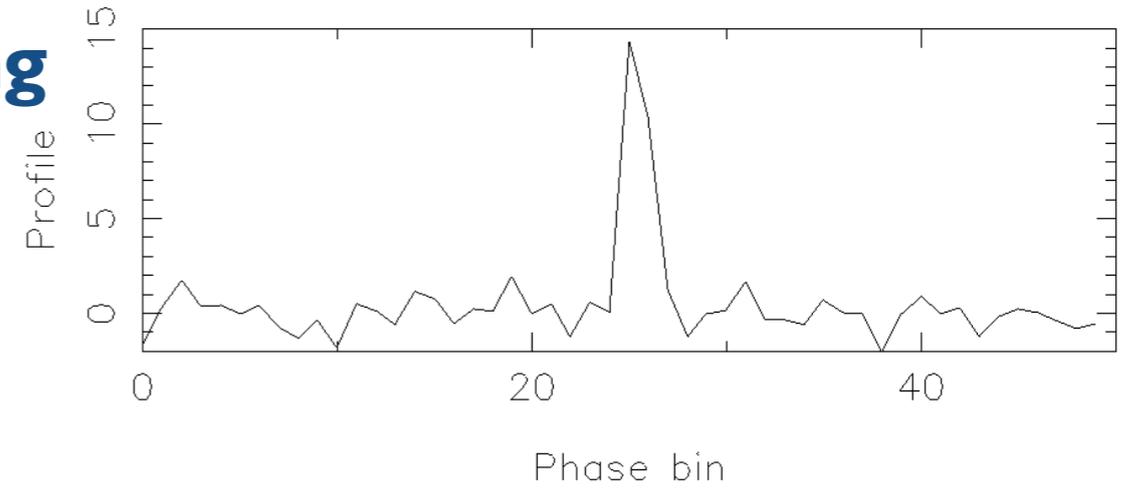
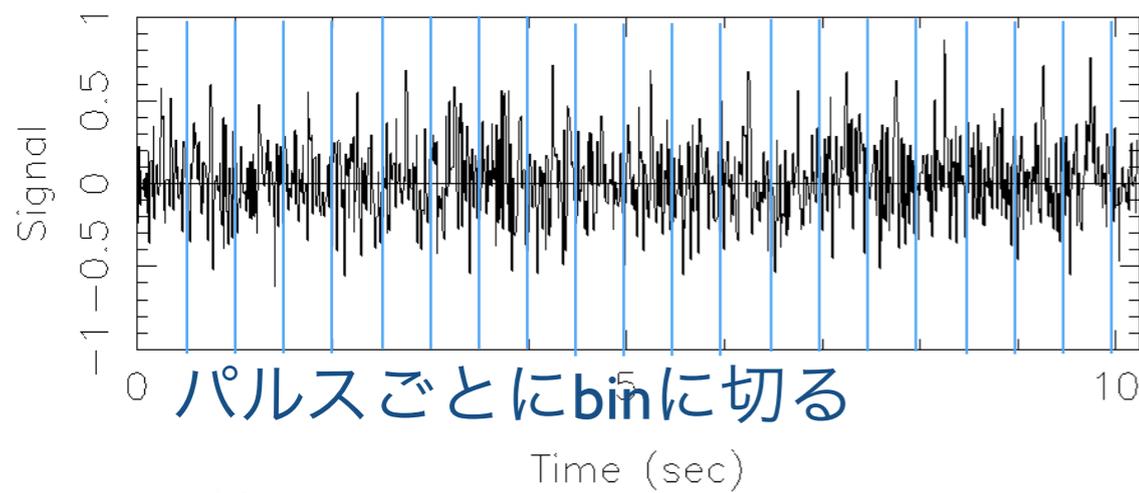
観測法

Parks Pulsar Timing Arrayの場合

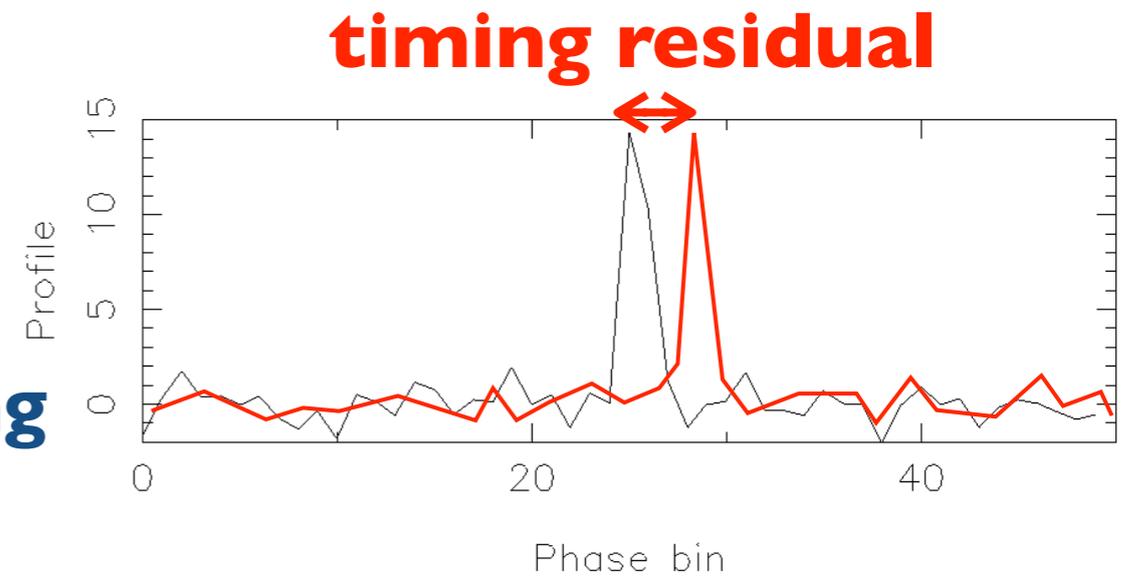
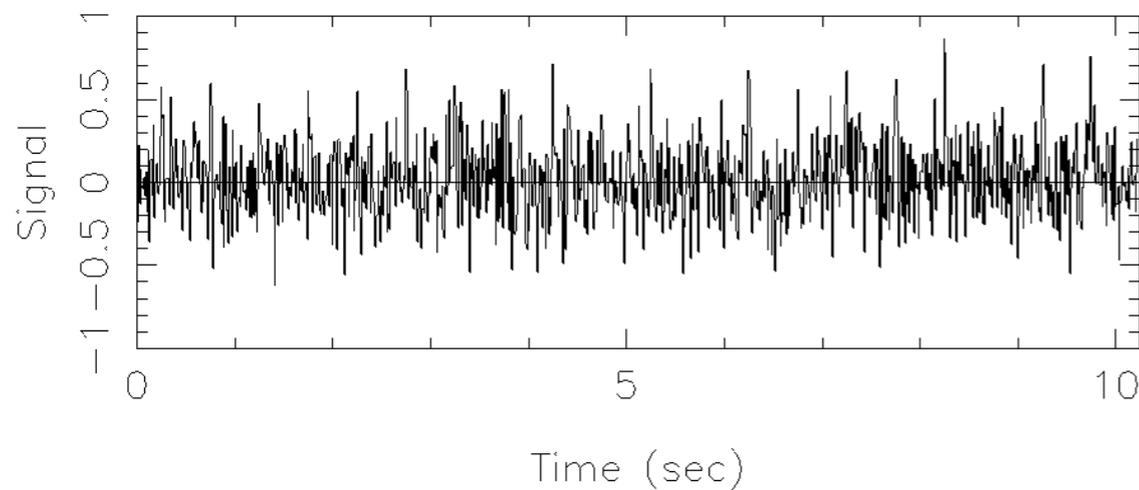
~ 20個程度のパルサーを
2週間おきに1時間ずつ観測



各binを足し合わせ



2週間後

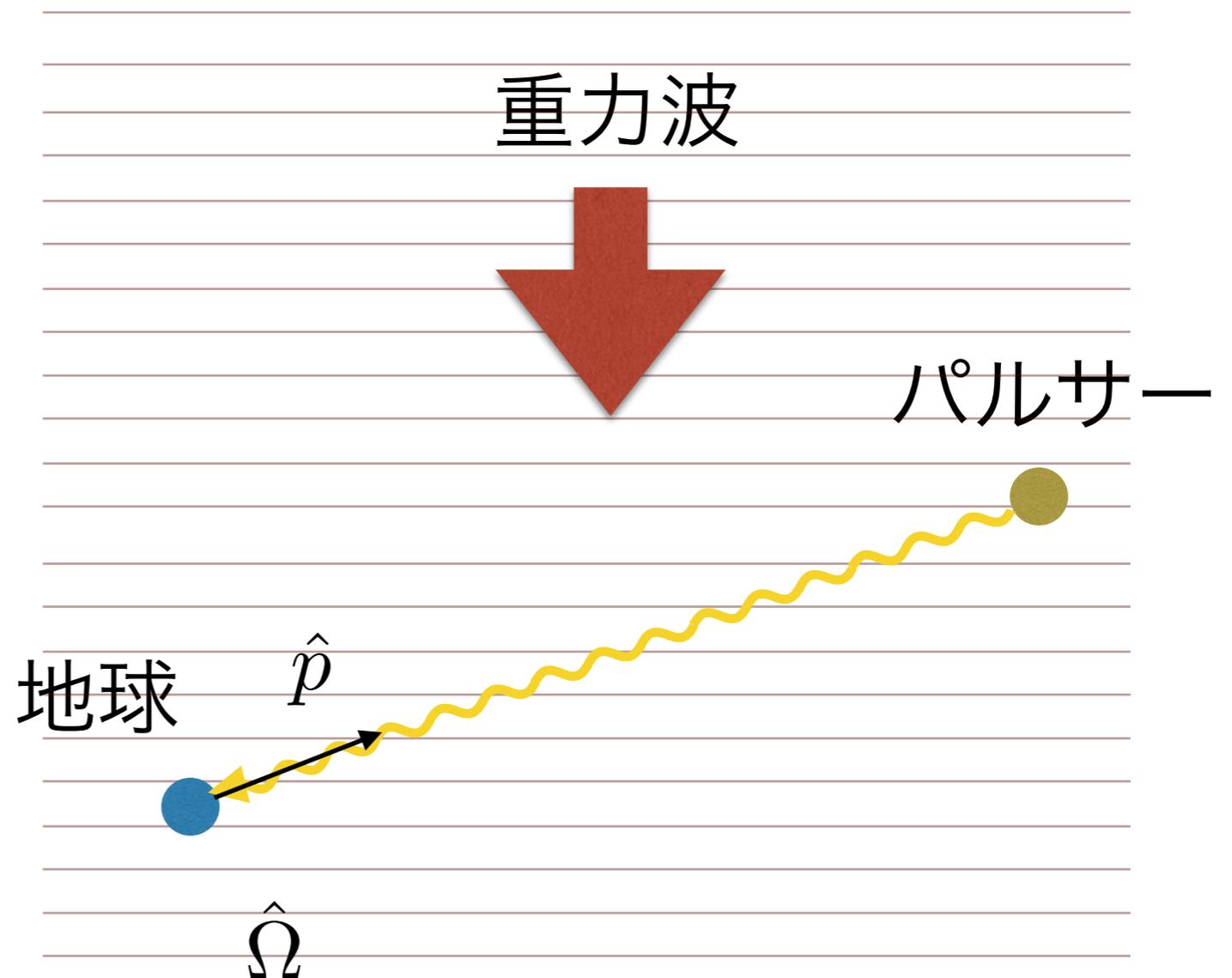


観測量

Timing residual: $r_{\text{GW}}(t) = \int^t dt' \frac{\Delta p}{p}$ p : 重力波による周期のずれ

重力波の影響：

測地線方程式を
光の軌道に沿って
積分すると得られる



重力波の影響

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

A: 重力波の偏光

Antenna pattern (重力波への応答)

$$F^A(\hat{\Omega}, \hat{p}) = \frac{1}{2} \frac{\hat{p}^i \hat{p}^j}{1 + \hat{\Omega} \cdot \hat{p}} e_{ij}^A(\hat{\Omega})$$

パルサーの位置 \hat{p}

重力波の方向 $\hat{\Omega}$

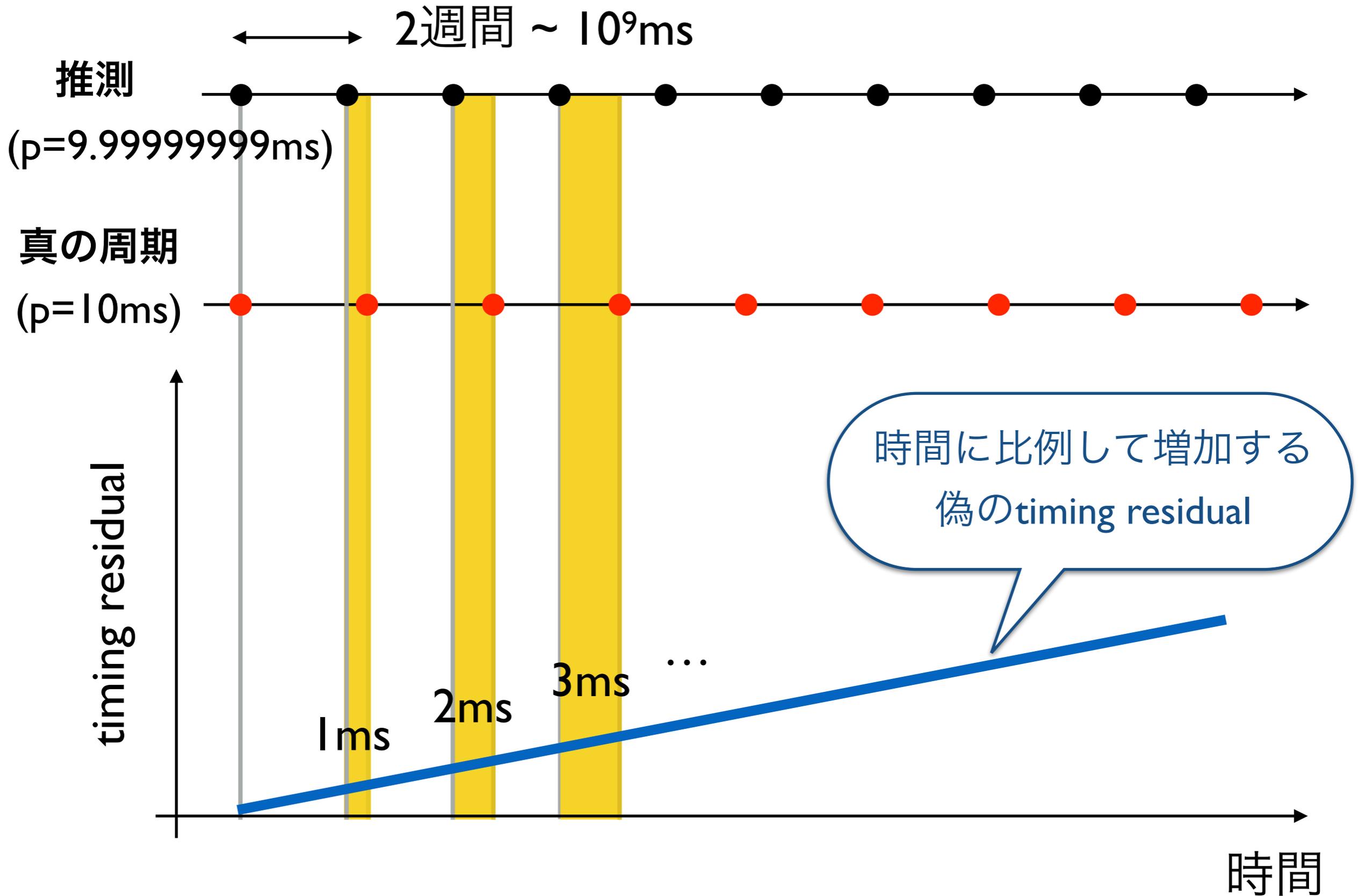
重力波偏光の角度 $e_{ij}^A(\hat{\Omega})$

重力波の振幅

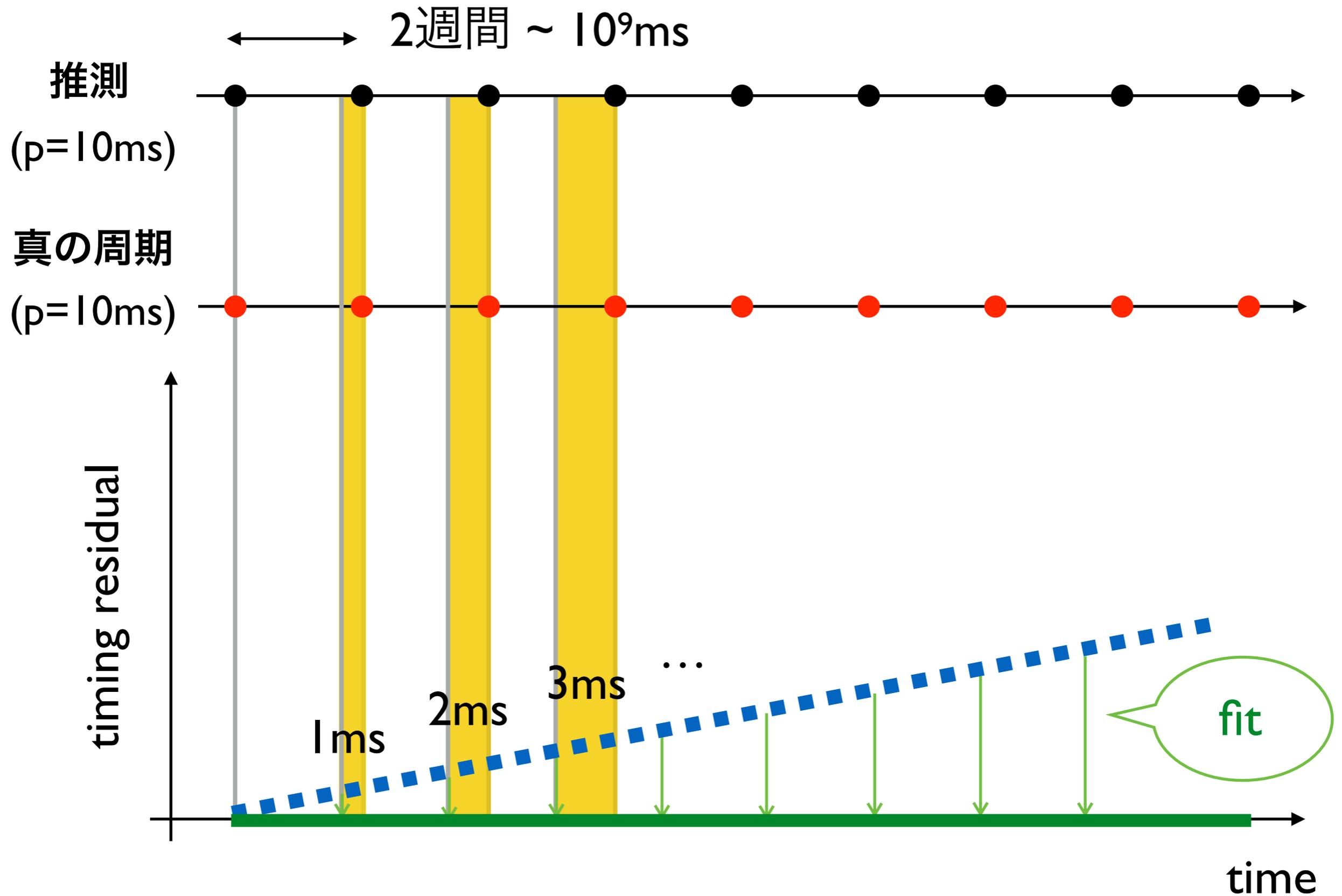
$$\Delta h_A(t, \hat{\Omega}) = \underbrace{h_A(t, \hat{\Omega})}_{\text{earth term}} - \underbrace{h_A(t_p, \hat{\Omega})}_{\text{pulsar term}}$$

- パルサーまでの距離が正確に測られていれば計算できる量。
- そうでなければパルサーごとに違う値をとるランダムなノイズになる。
- 異なるパルサーとの相関をとれば影響を減らせる

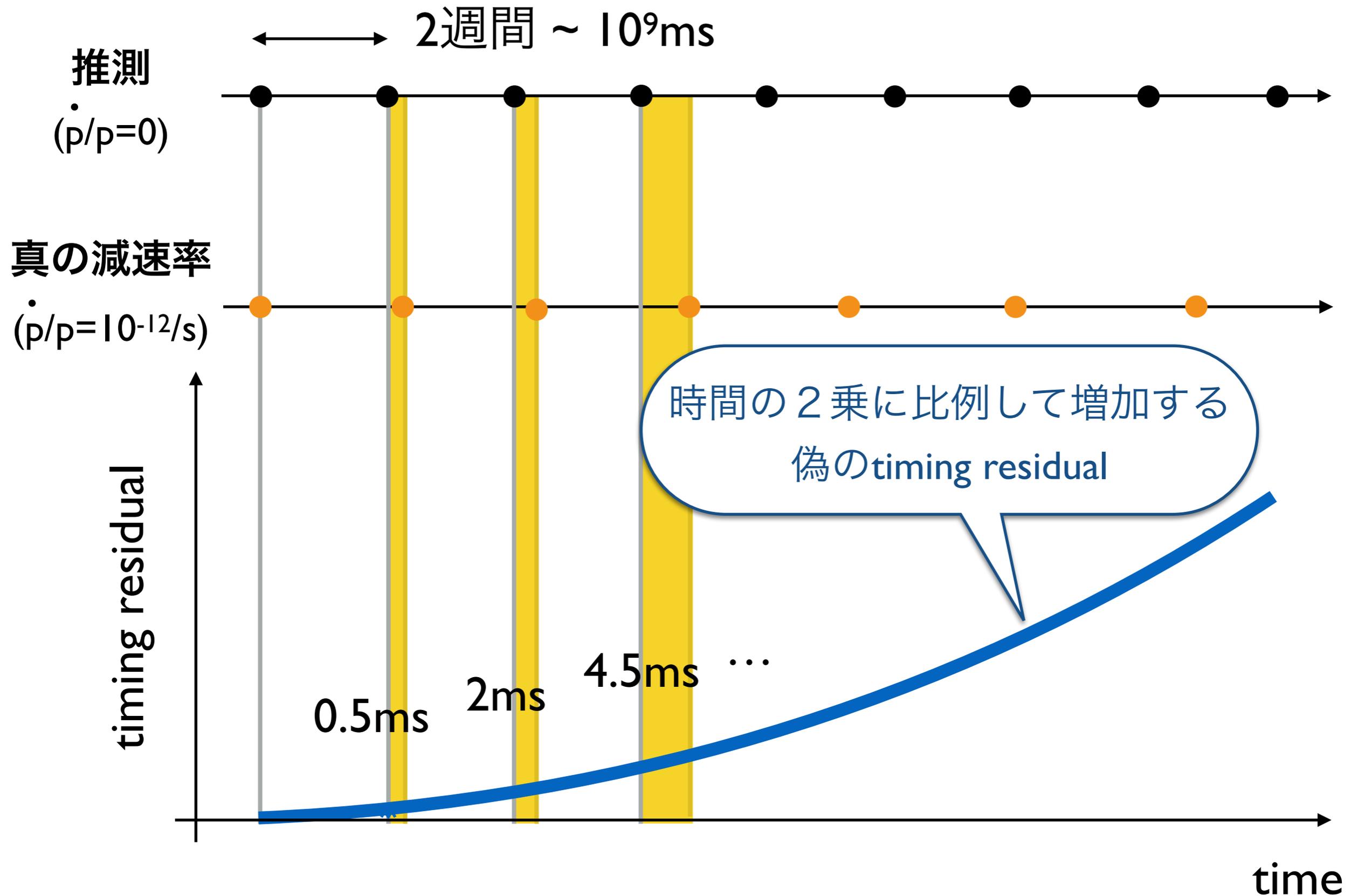
パルサーの周期を間違えると...



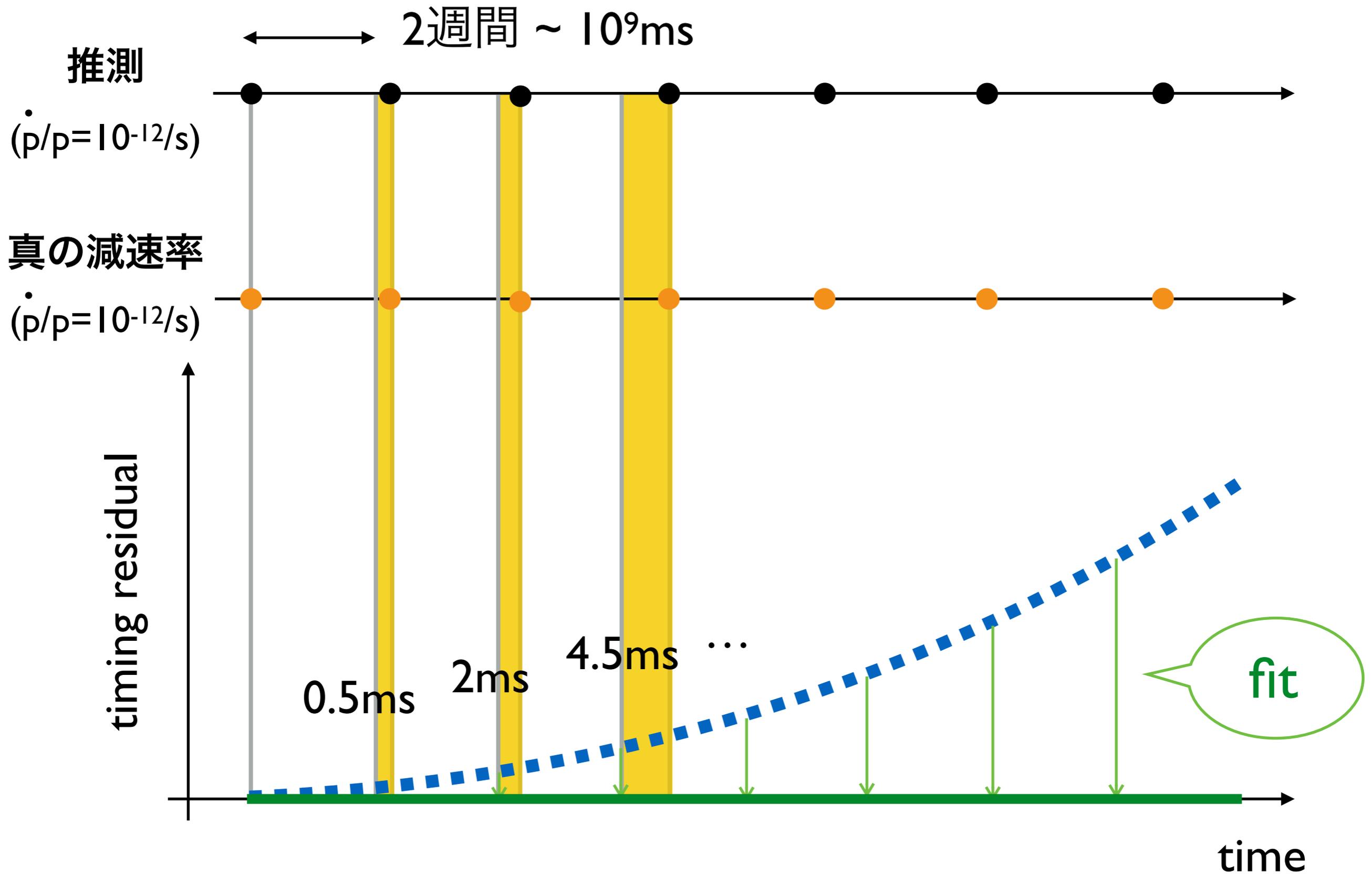
推測値を補正



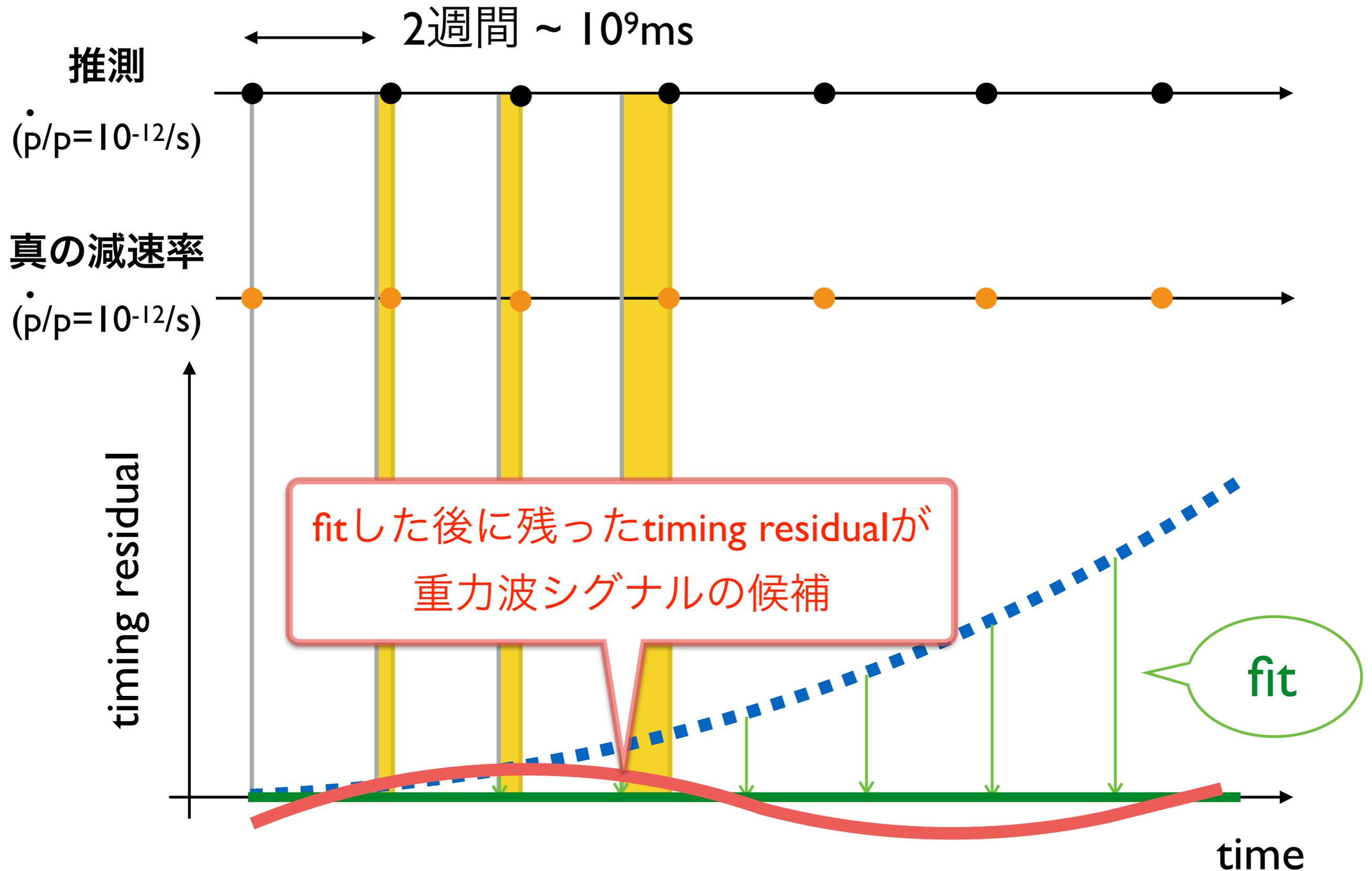
パルサーのスピン減速率を間違えると...



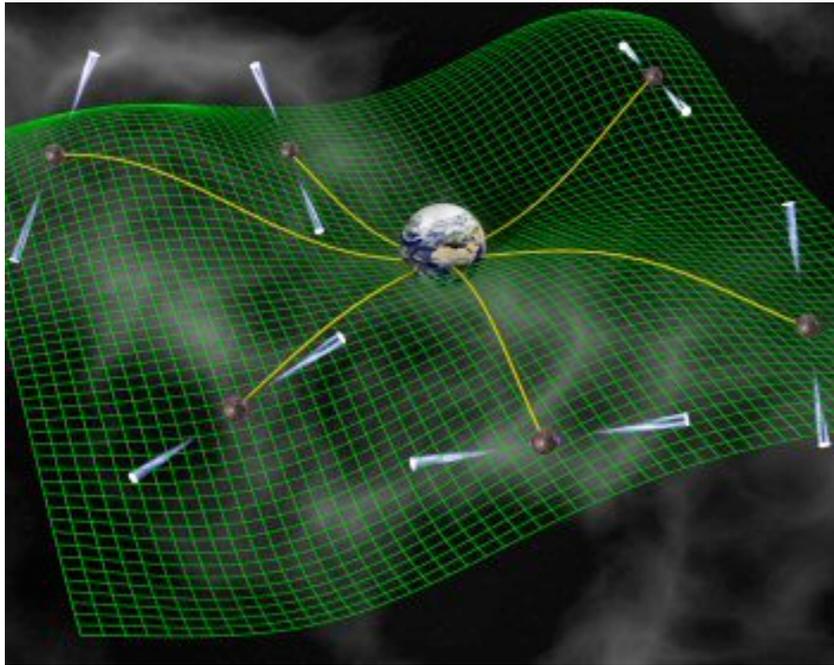
推測値を補正



時間の1乗、2乗に比例する成分は取り除かれる



複数間パルサーの相関

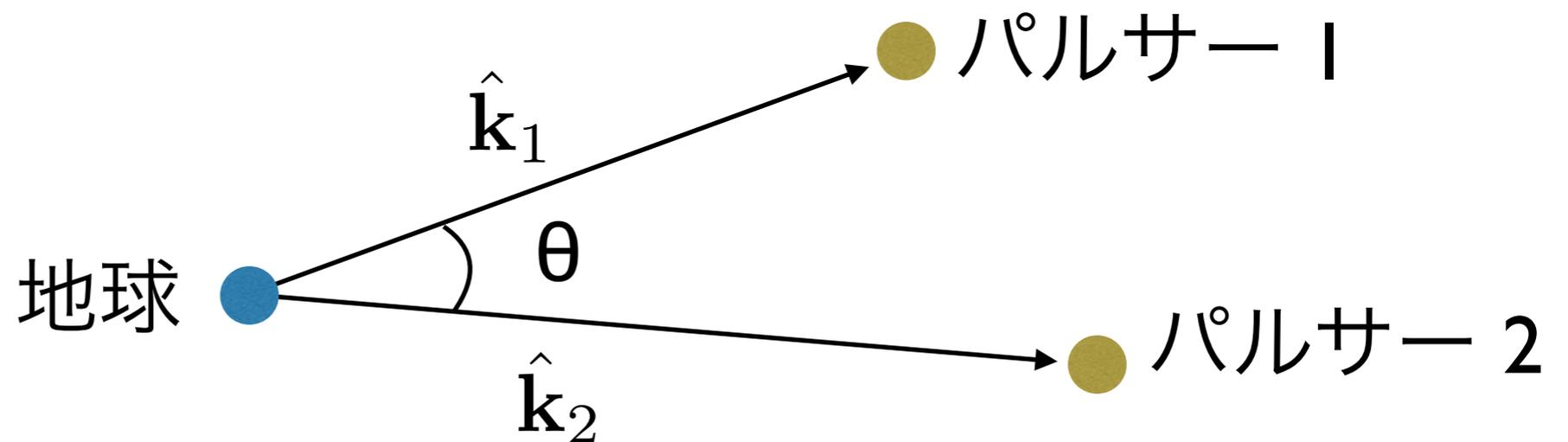


パルサー同士の相関をとって
重力波の四重極パターンを見る

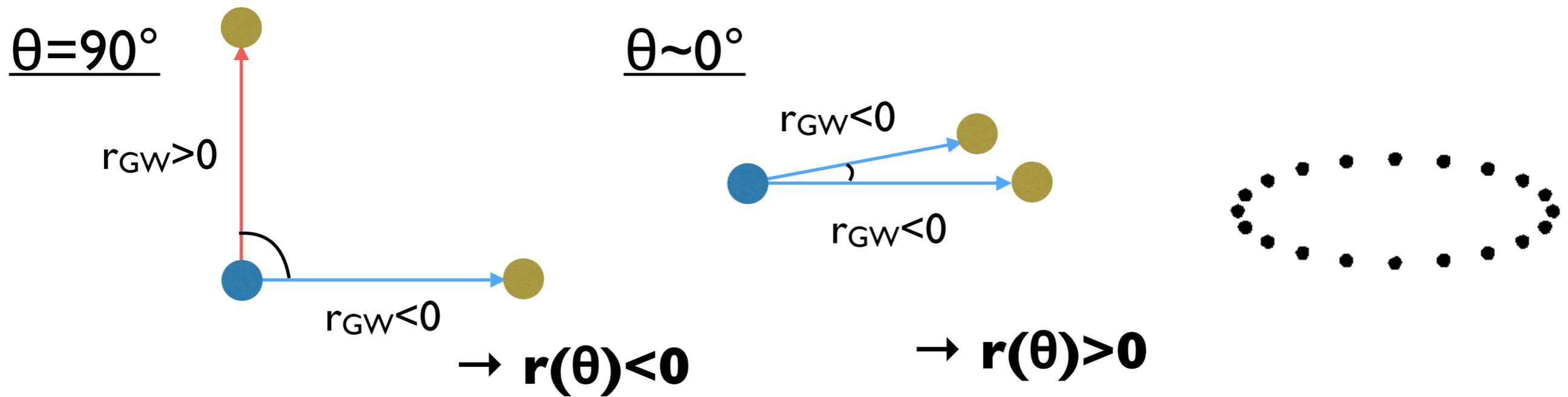
→ pulsar termやパルサー固有のノイズ源は
相関がないので取り除くことができる

$$r(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_{\text{GW}}(t_i, \hat{\mathbf{k}}_1) r_{\text{GW}}(t_i, \hat{\mathbf{k}}_2)$$

i: 時間の足し合わせ



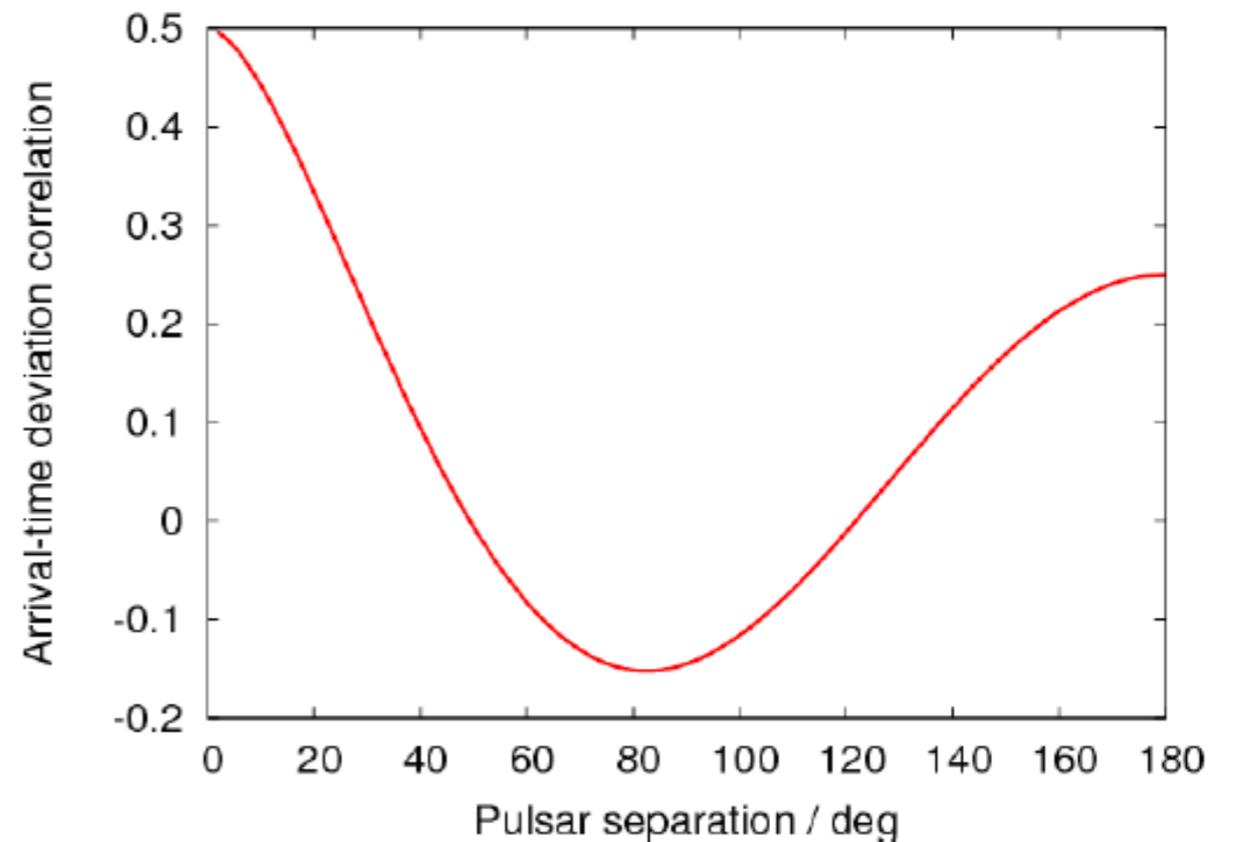
重力波の四重極パターン



背景重力波の場合

Hellings & Down curve

全方向からの重力波の影響を
積分したときの相関値

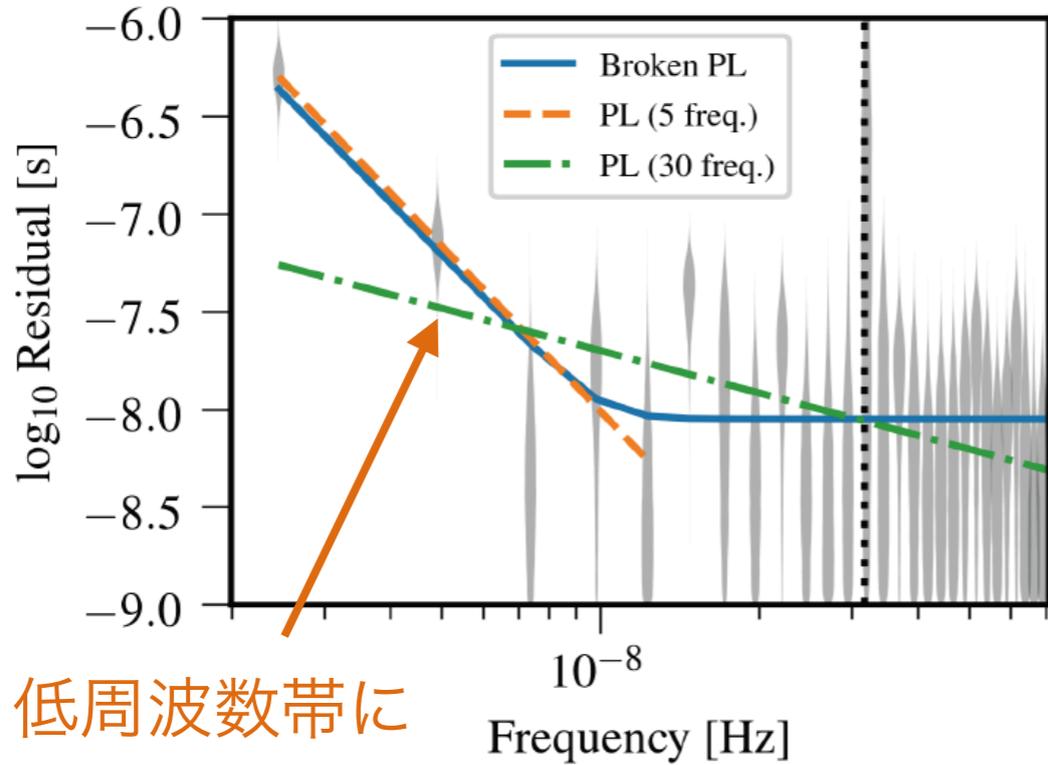


パルサー間の角度 θ

NANOGrav 12.5year

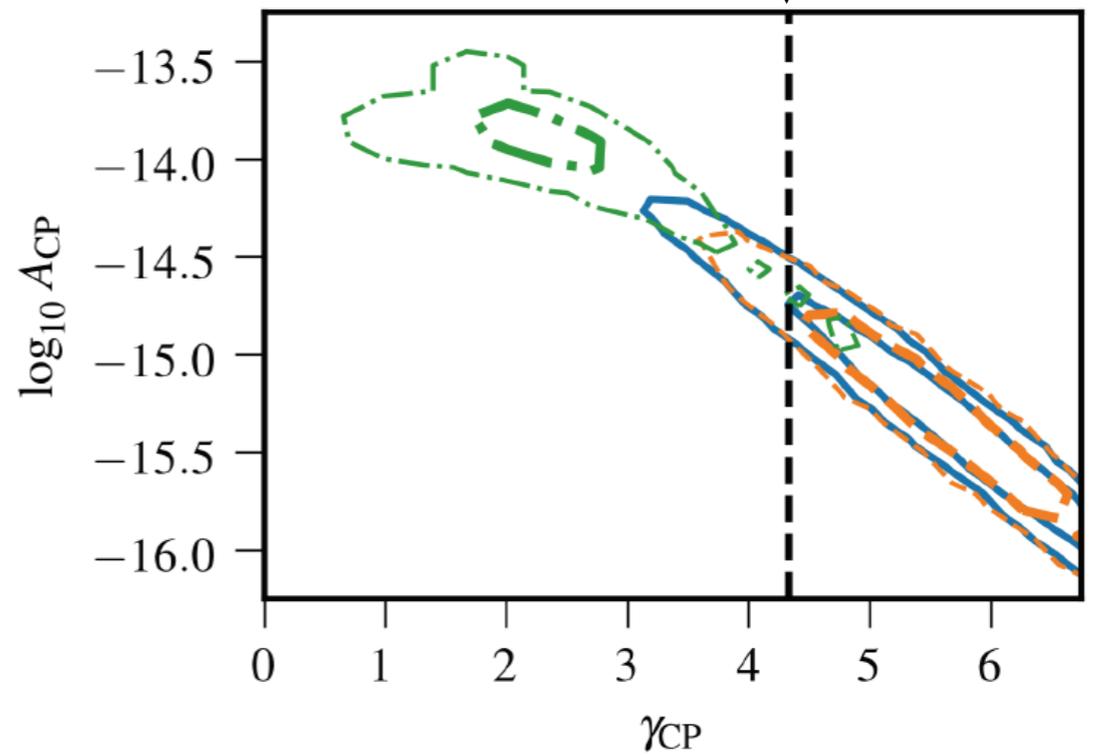
Arzoumanian et al., ApJ , 905, L34 (2020)

SMBH $\gamma=13/3$

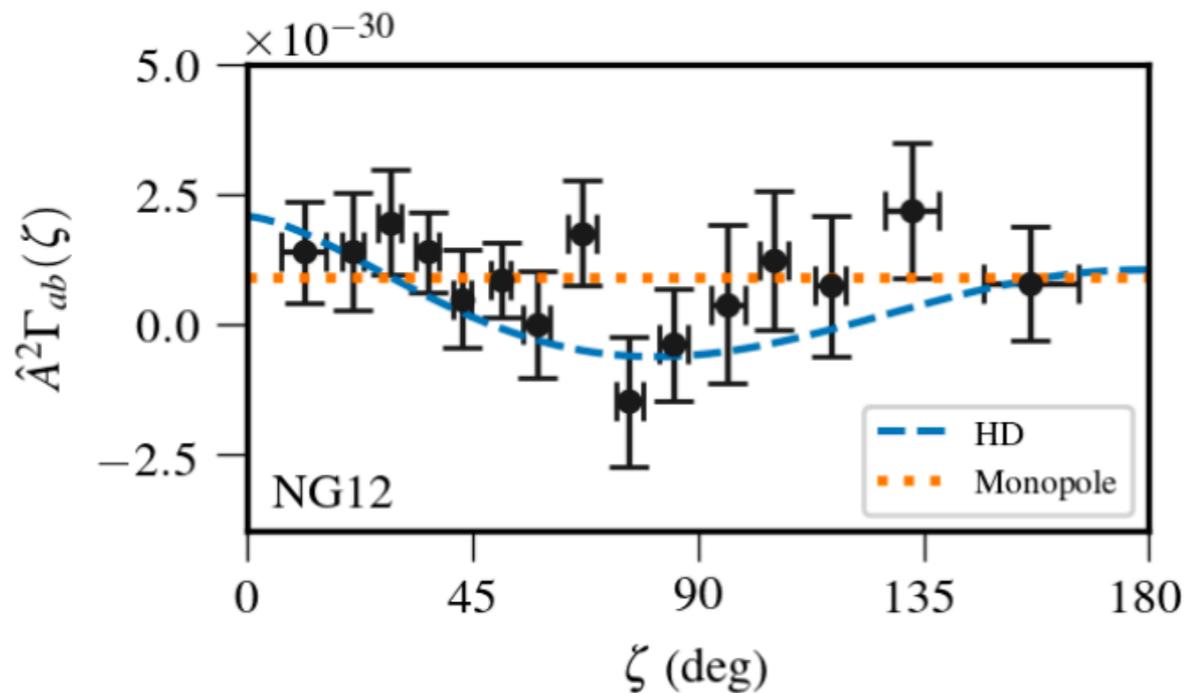


低周波数帯に
シグナル?

スペクトルの強度



スペクトルの冪

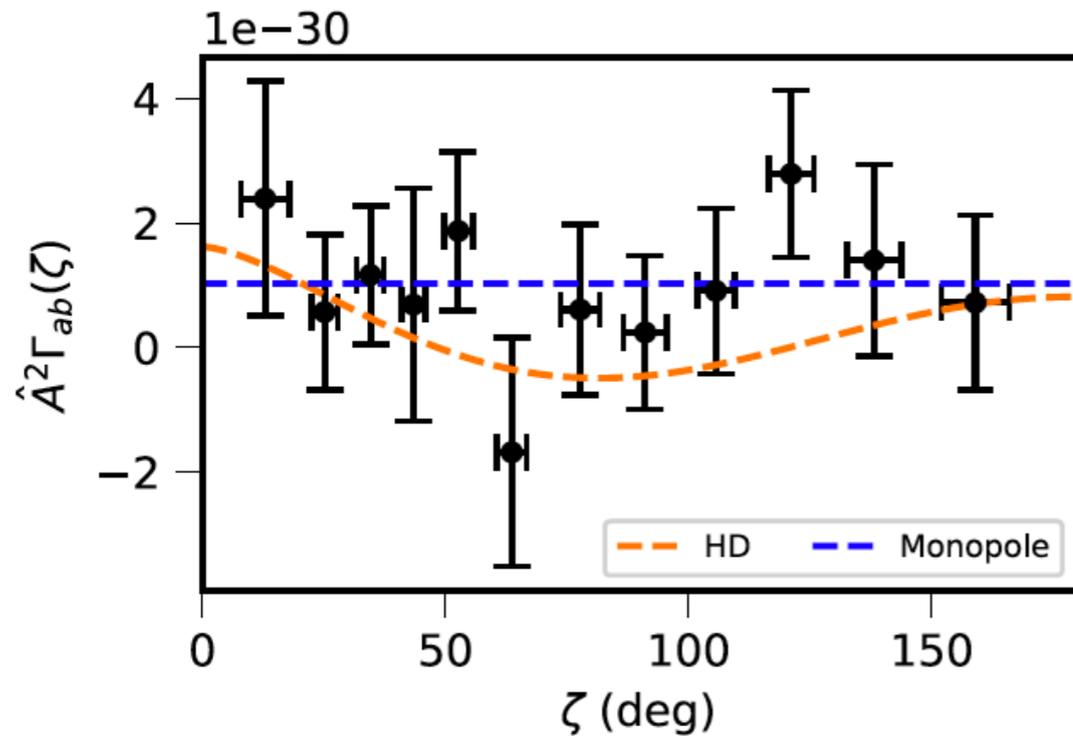
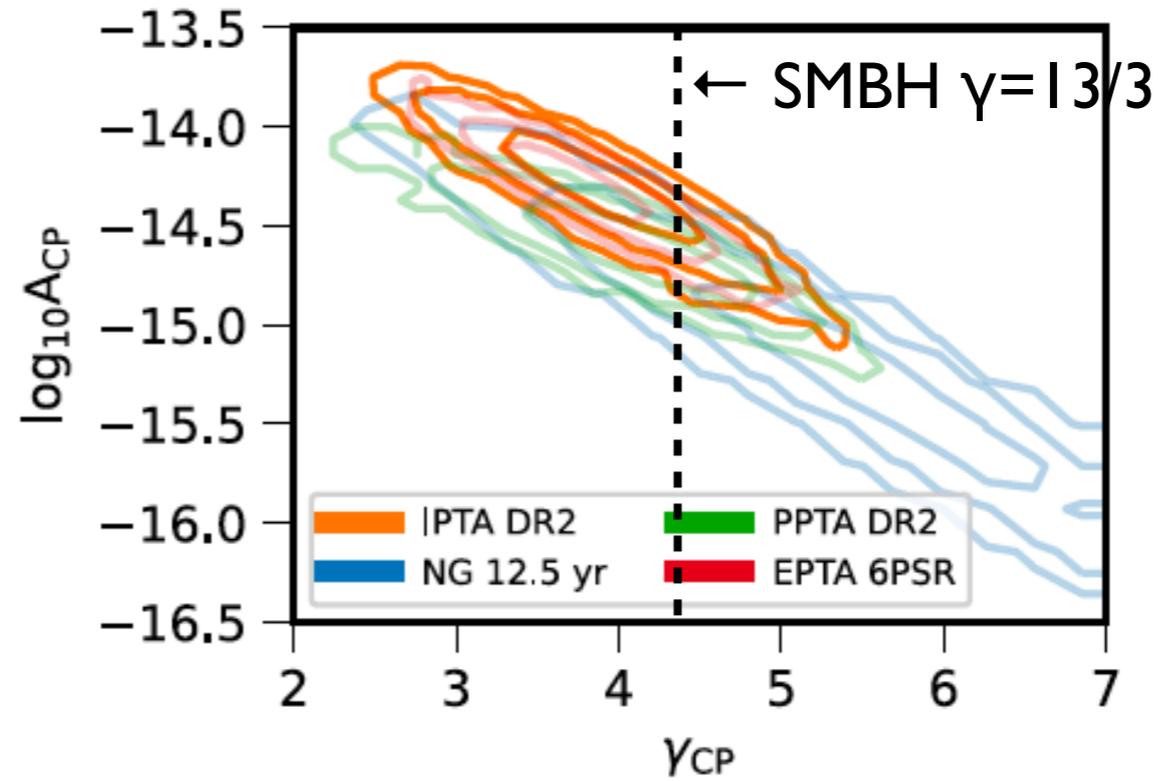
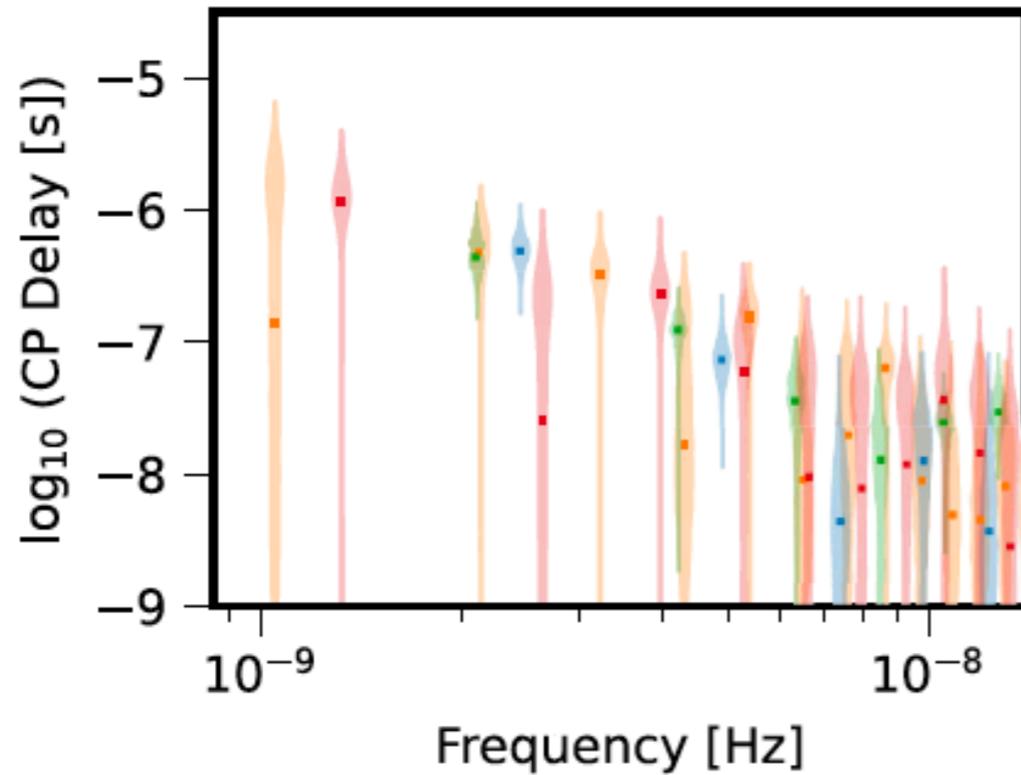


Hellings & Down curve

→ 重力波と断定できる強い証拠はなし

最新結果：IPTA

Antoniadis et al., MNRAS 510, 4873–4887 (2022)



パルサー間に共通する低周波信号はあるものの
重力波と断定できる強い証拠はなし

宇宙ひもからの重力波バースト探索

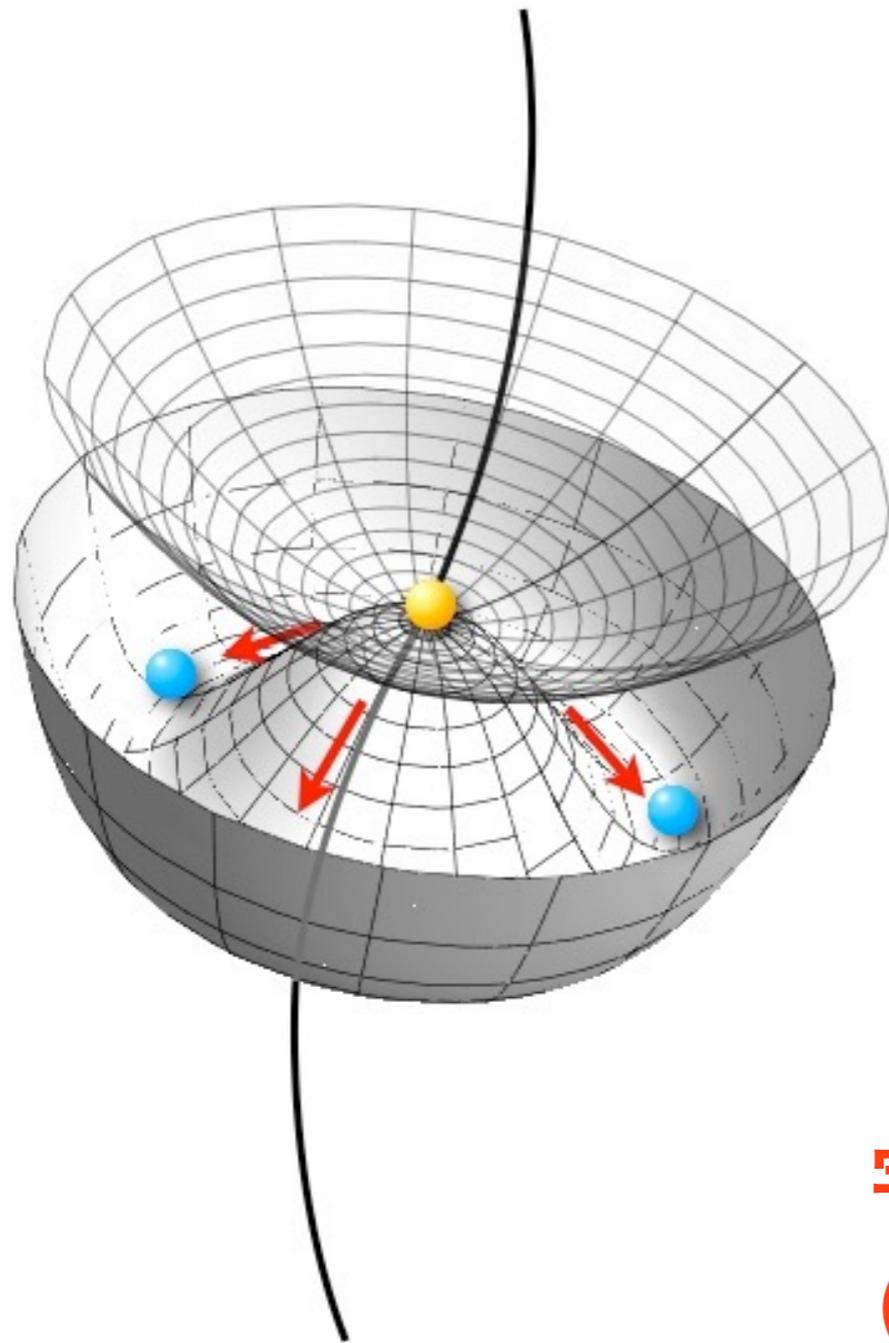
Yonemaru et al.

”Searching for gravitational wave bursts from cosmic string cusps with the Parkes Pulsar Timing Array”

MNRAS, 501, 1, 701–712 (2021), arXiv:2011.13490

宇宙ひも

宇宙空間を漂う高エネルギーの重く長く速いひも



生成機構

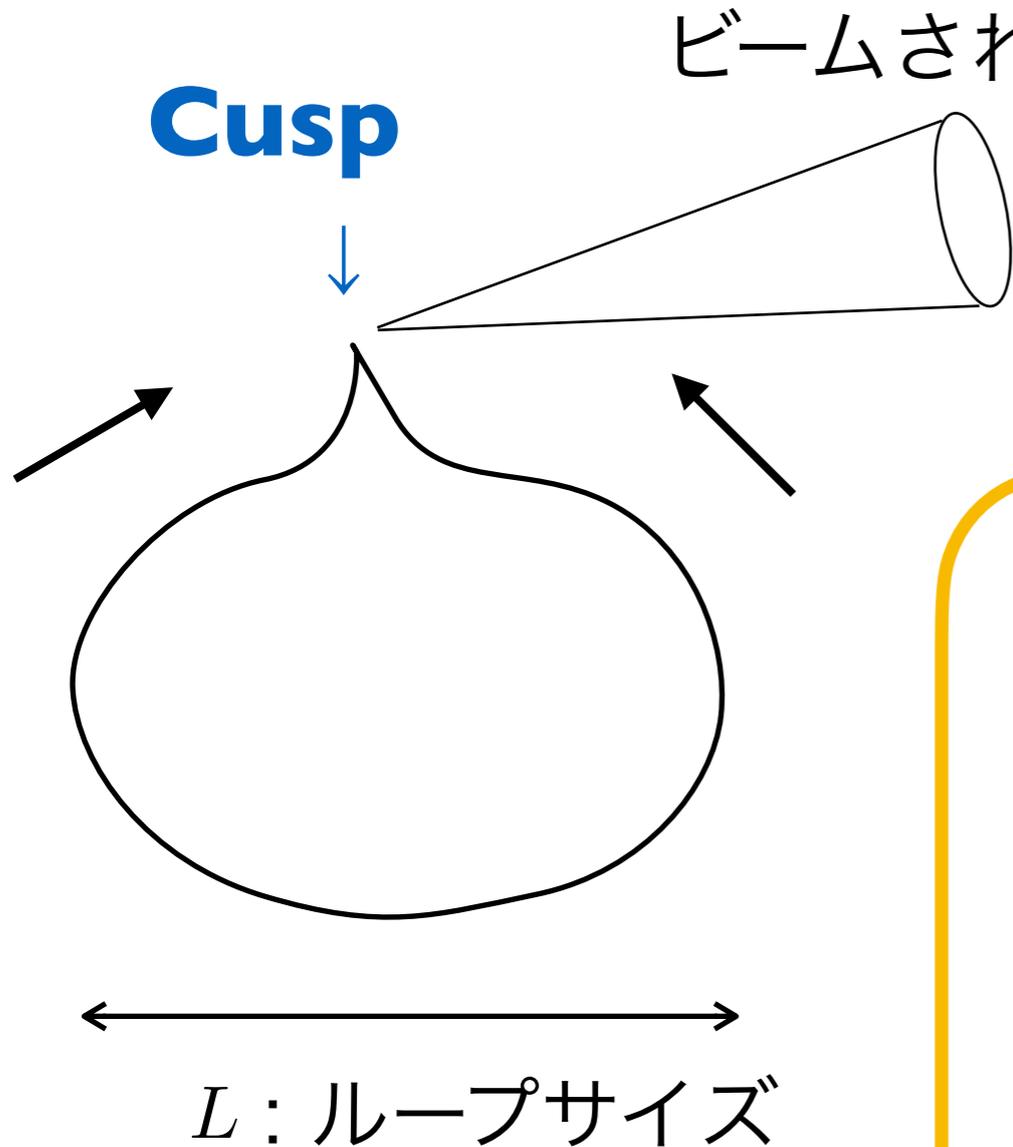
- 宇宙相転移
- 超弦由来のインフレーション

→ 高エネルギーな場所がひも状に残る

**宇宙ひもの存在を探ることで初期宇宙物理
(素粒子物理、超弦理論) の解明につながる**

宇宙ひもからの重力波

宇宙ひも上のCuspと呼ばれる特異点から強い重力波が放たれる



Damour & Vilenkin, PRD 64, 064008 (2001)

重力波強度 (in Fourier space)

$$\tilde{h}(f) = \frac{G\mu L}{[(1+z)fL]^{1/3} r(z) f}$$

$G\mu$: tension = 線密度

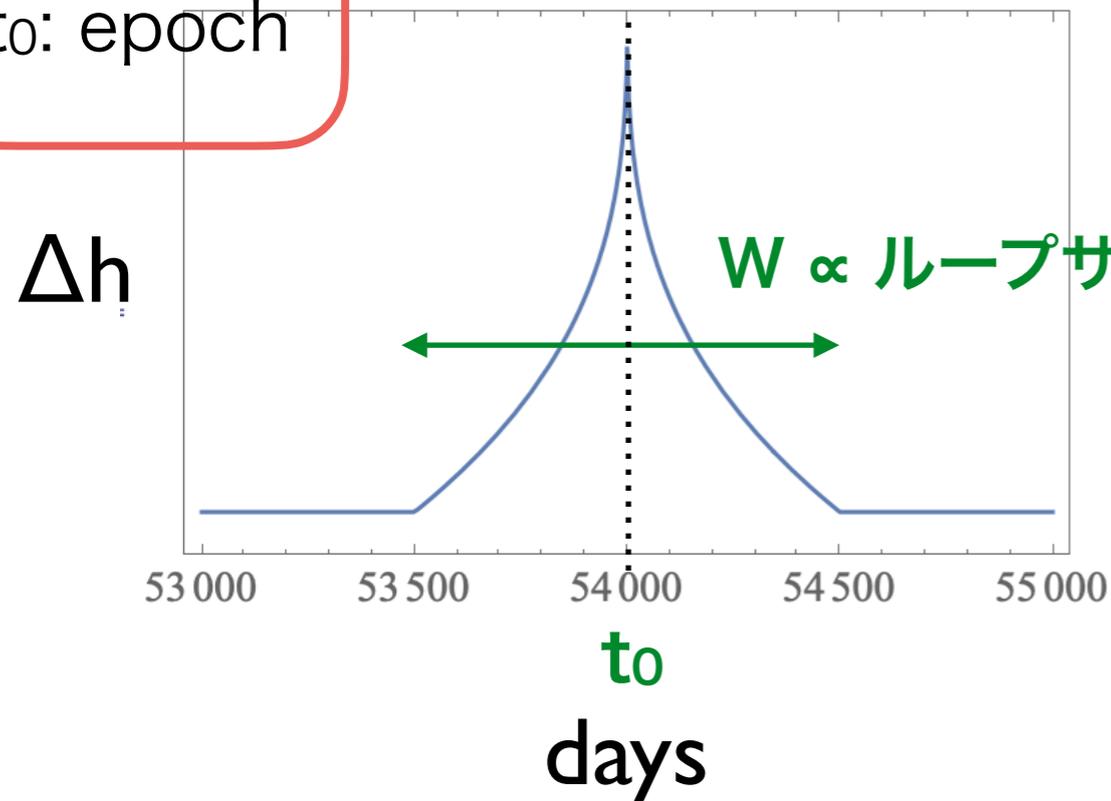
$r(z)$: 重力波源までの距離

観測量：Timing residual

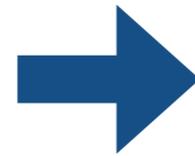
$$\text{Timing residual: } r_{\text{GW}}(t) = \sum_{A=+, \times} F^A(\hat{\Omega}, \hat{p}) \int^t \Delta h_A(t', \hat{\Omega}) dt'$$

パラメータ
W: width
to: epoch

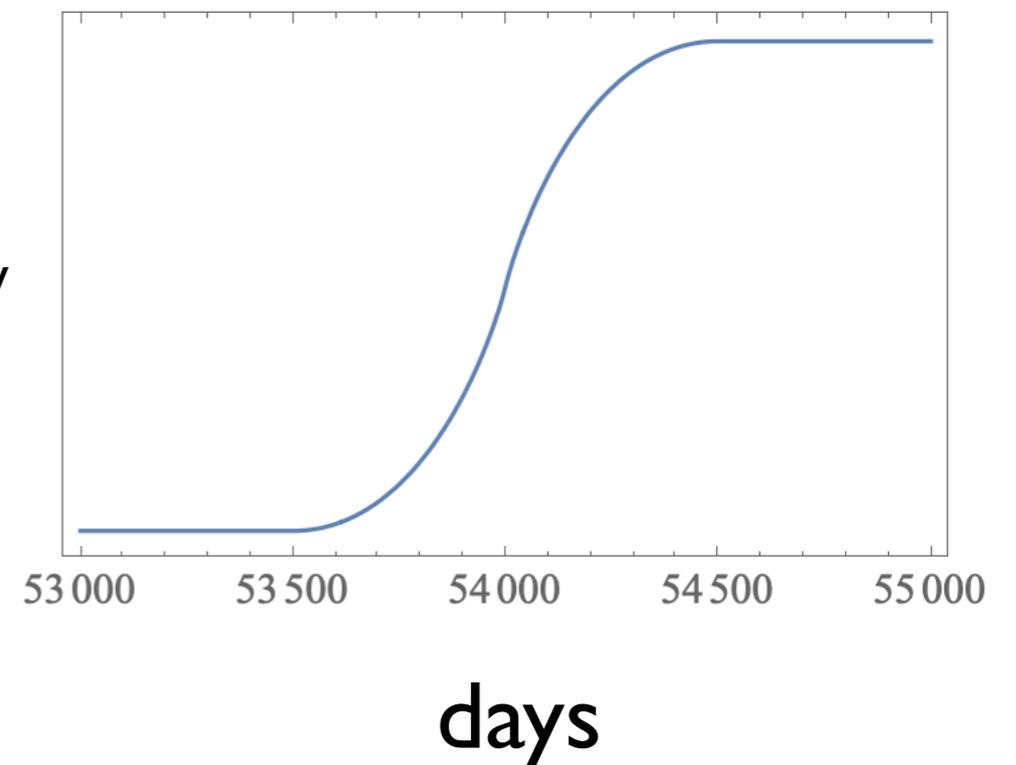
重力波の波形



時間積分



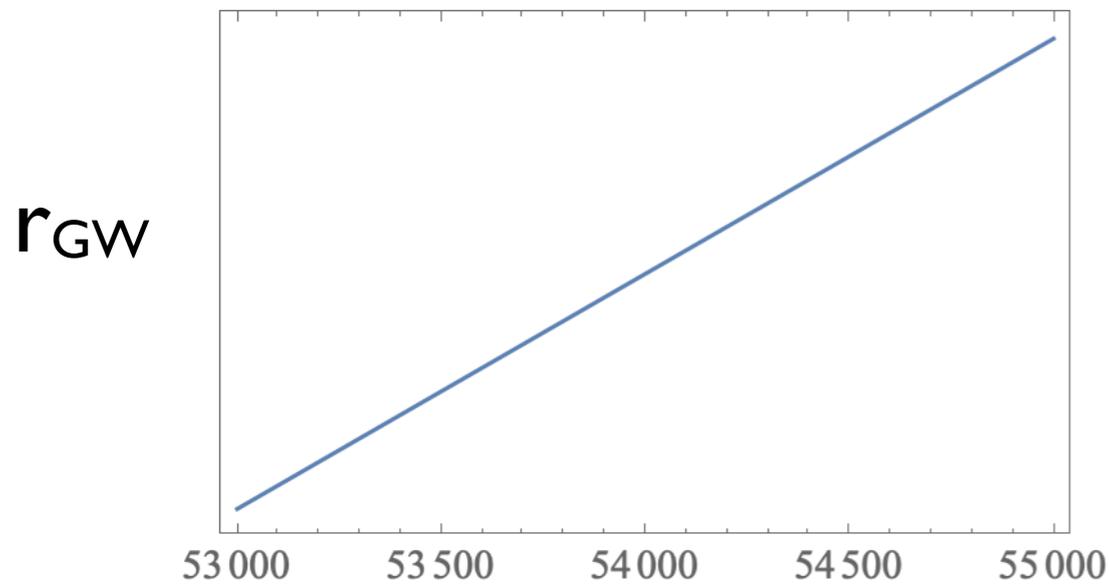
Timing residual



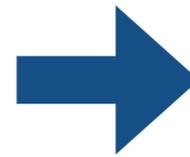
補正の影響

パルス周期を間違った場合

補正前

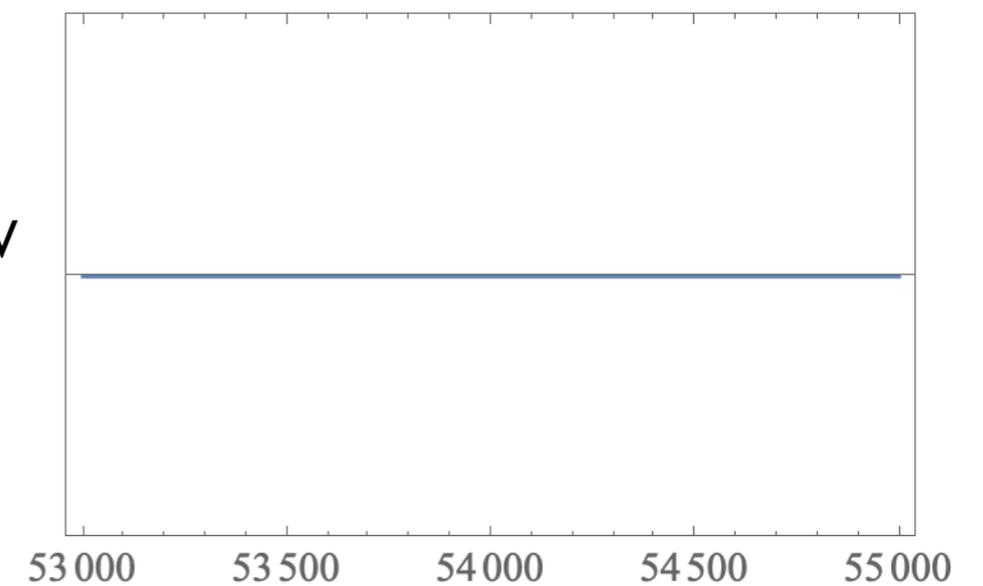


Post-fit

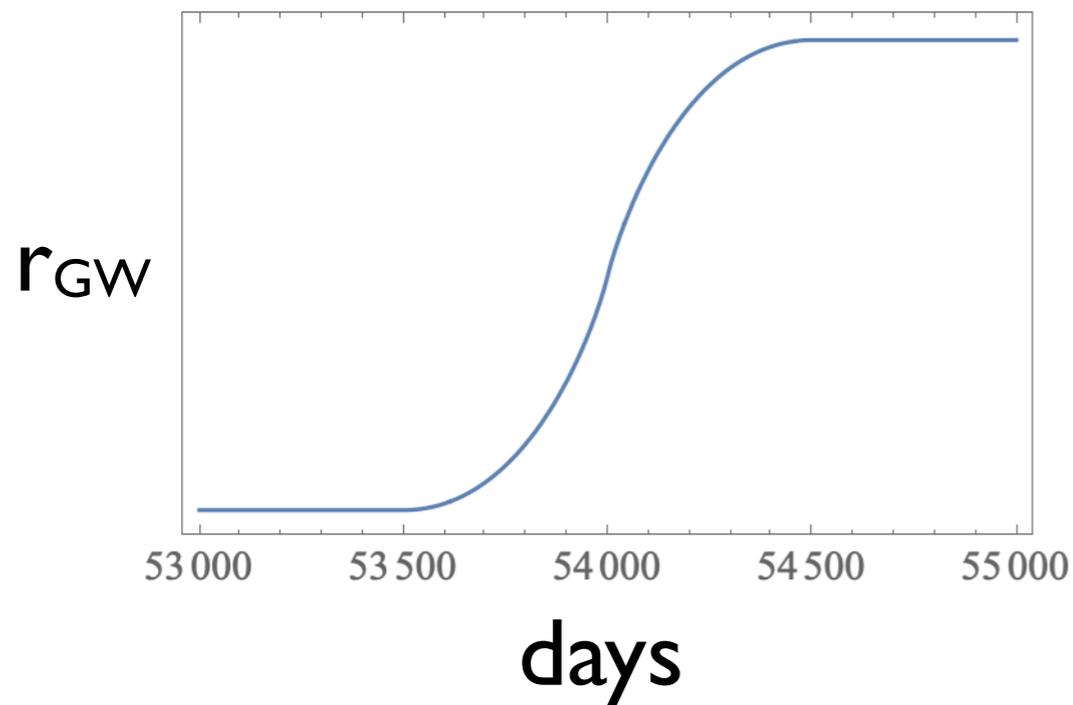


r_{GW}

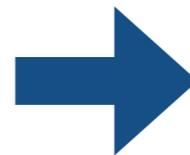
補正後



宇宙ひものシグナル

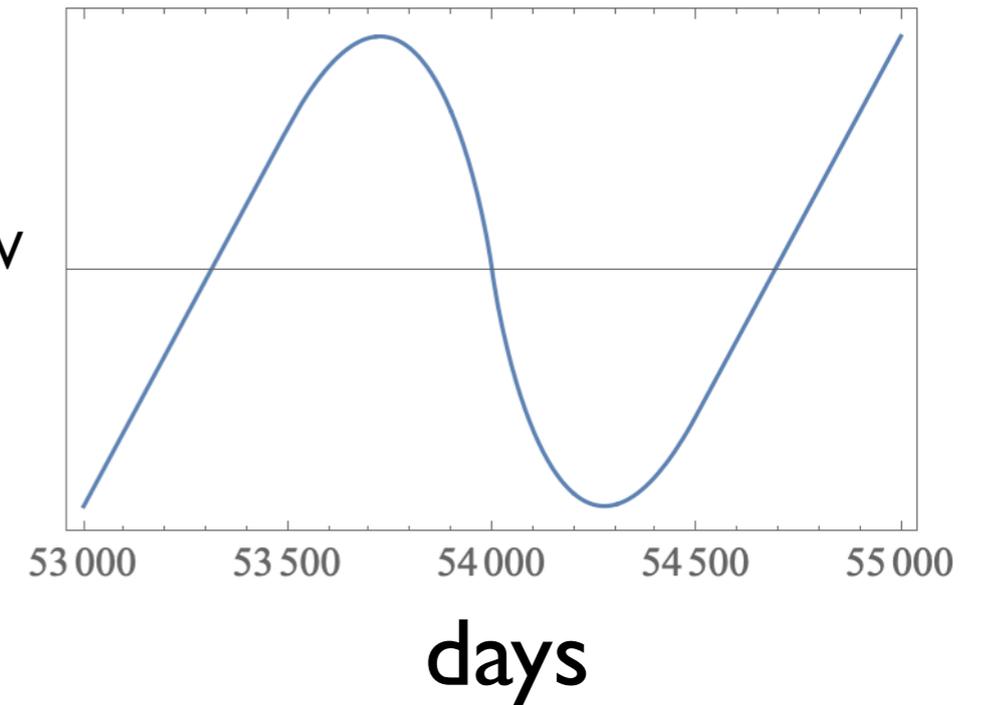


Post-fit



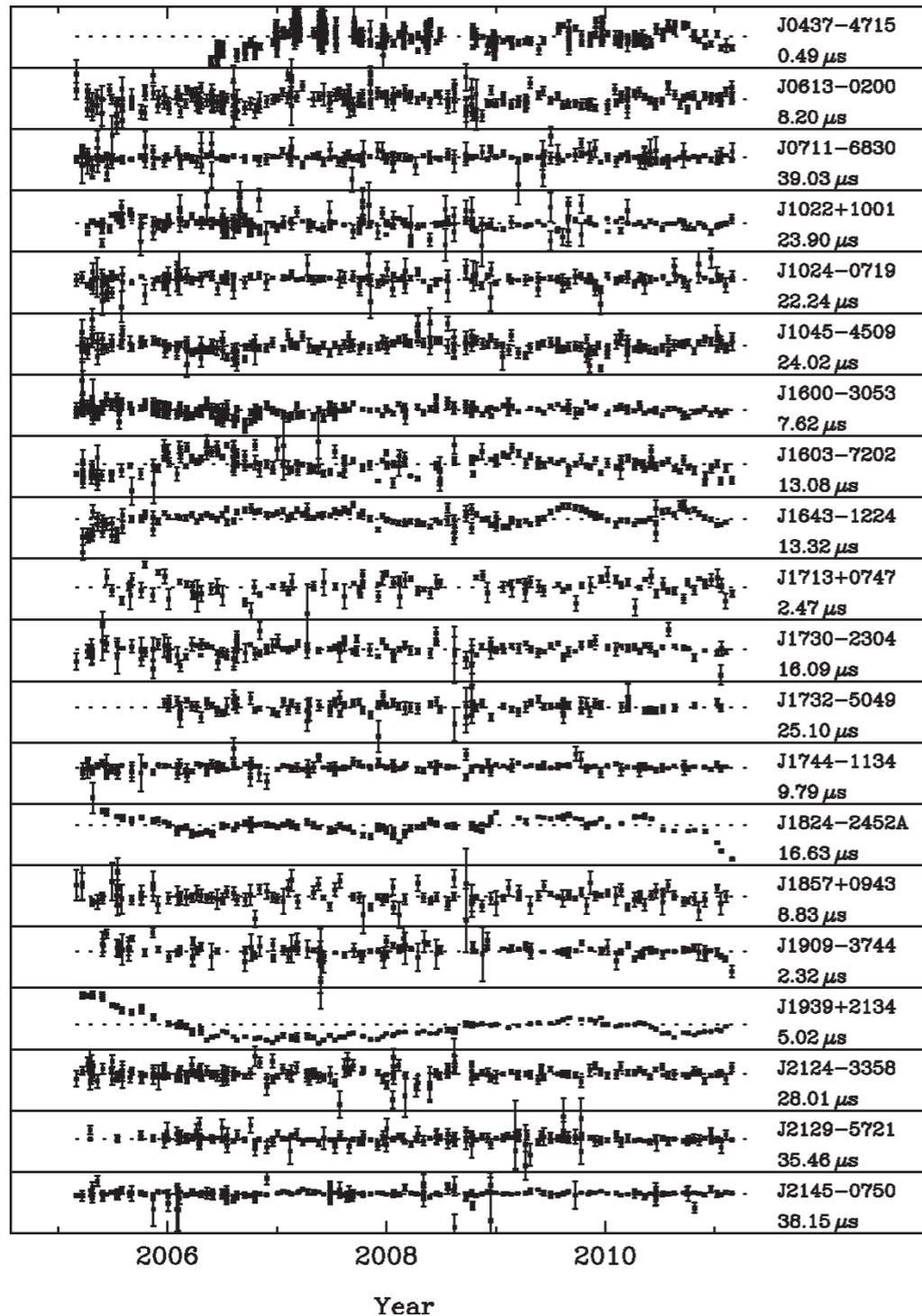
r_{GW}

補正後

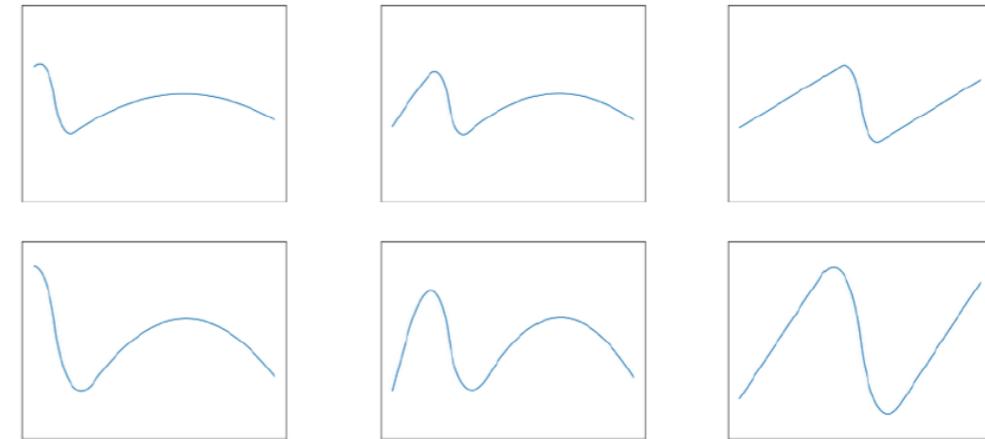


探索の手順

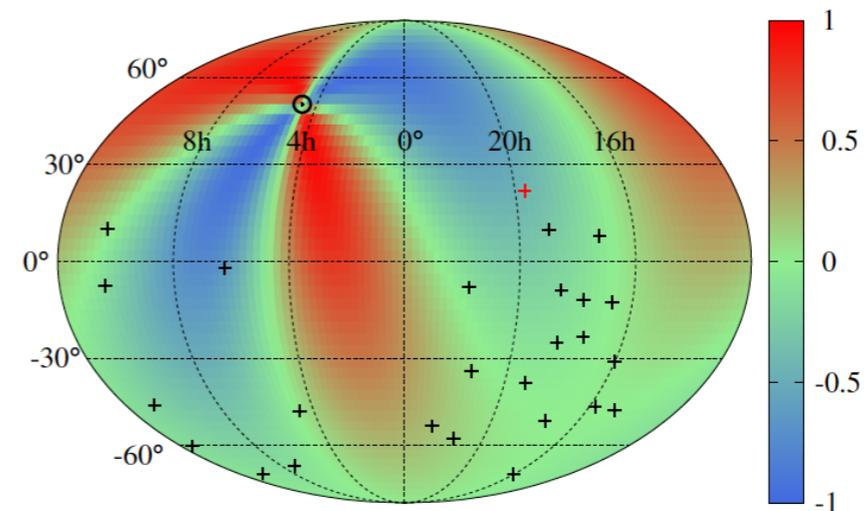
データ (Parkes PTA DR2)



テンプレート



四重極モーメントを探す

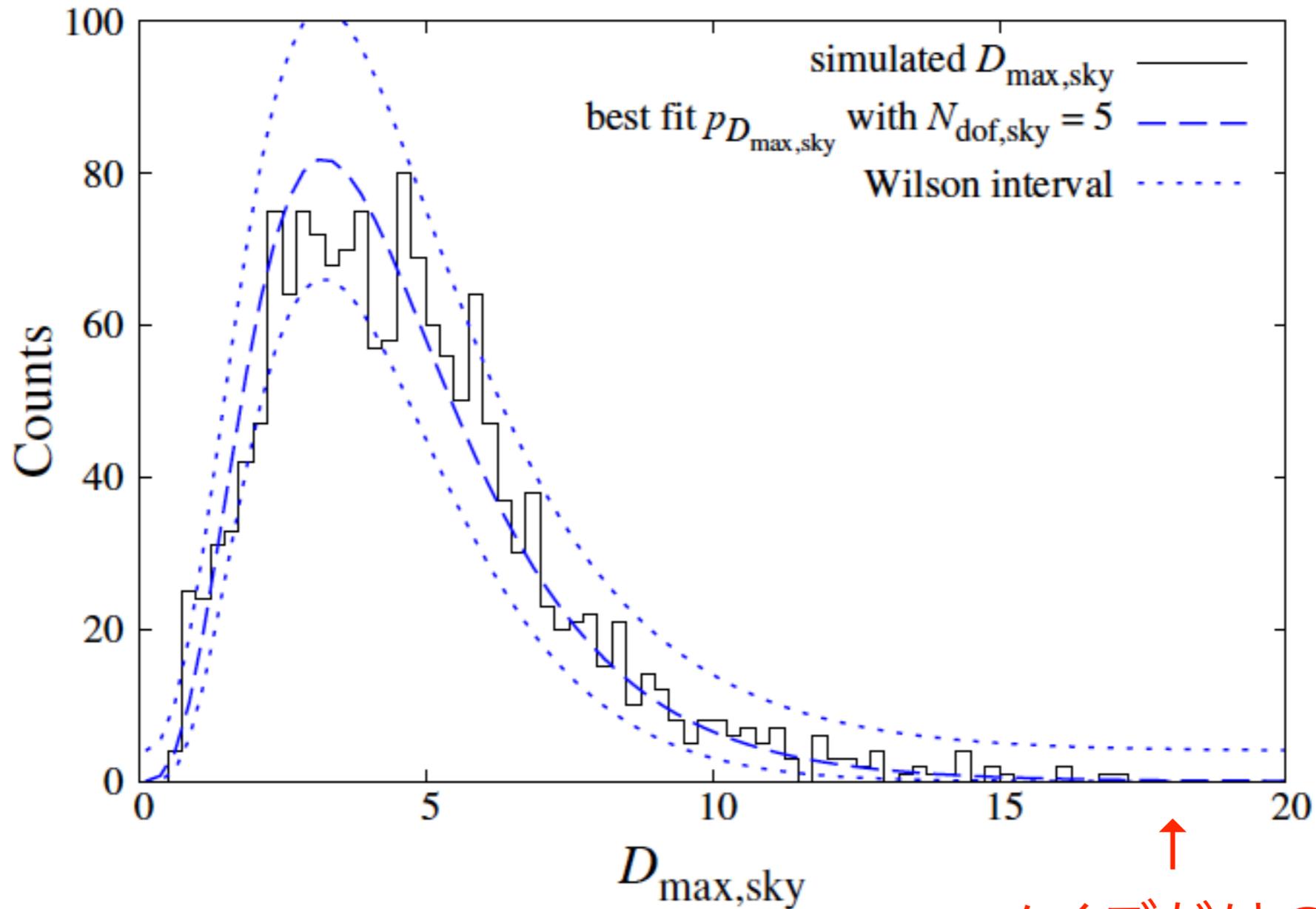


Detection statistics: $D = \mathbf{A}^t \mathbf{C}_0^{-1} \mathbf{A}$

amplitude $\mathbf{A} = [A_1; A_2]$ covariance matrix

シミュレーション

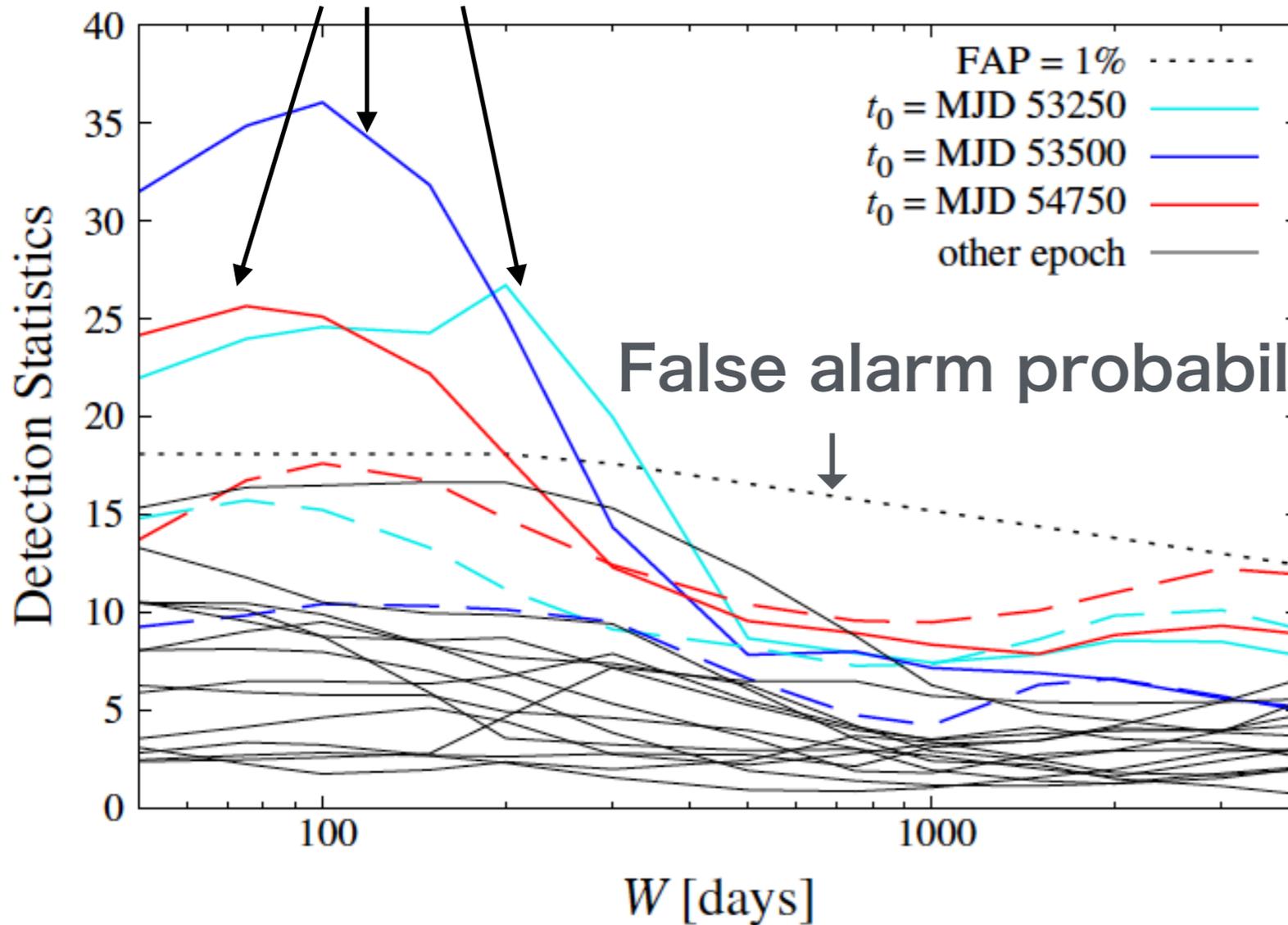
重力波シグナルなしのシミュレーションを100回走らせて
Dの最大値をプロット



↑
ノイズだけのデータでも
D ~ 17-18 はありうる

結果

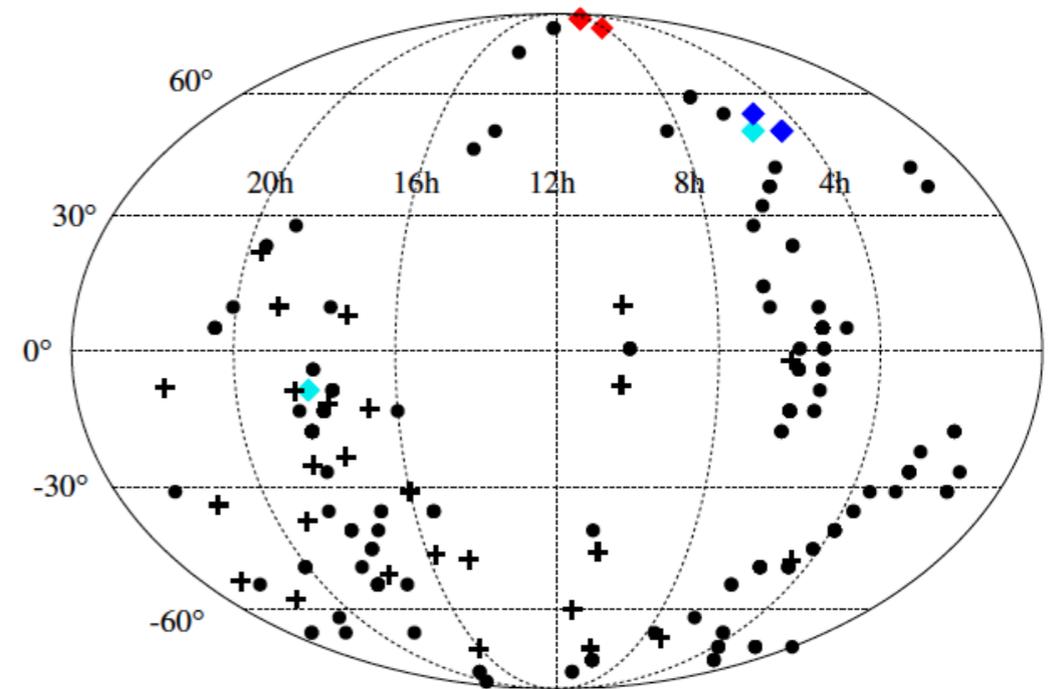
重力波シグナル？



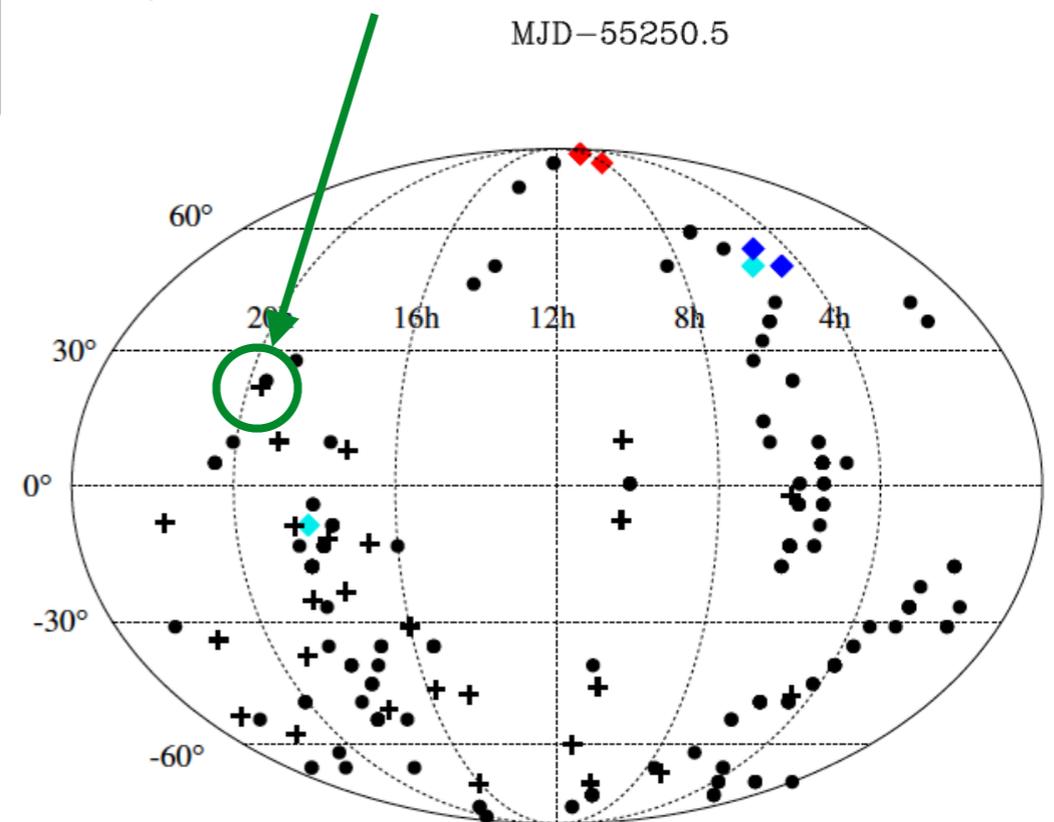
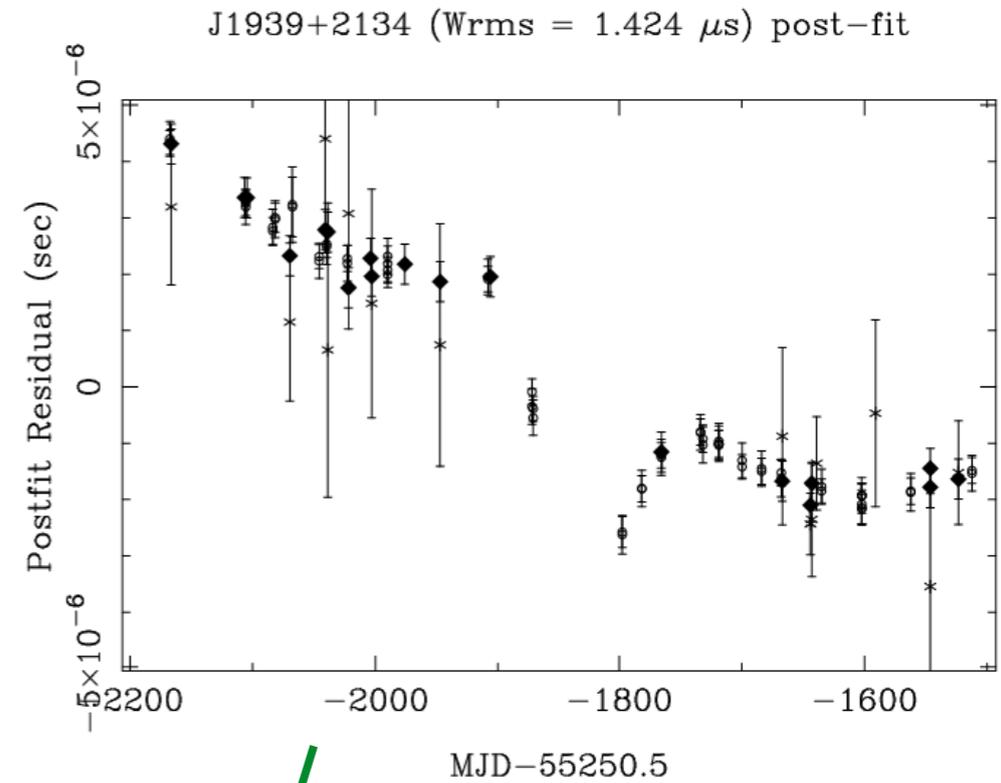
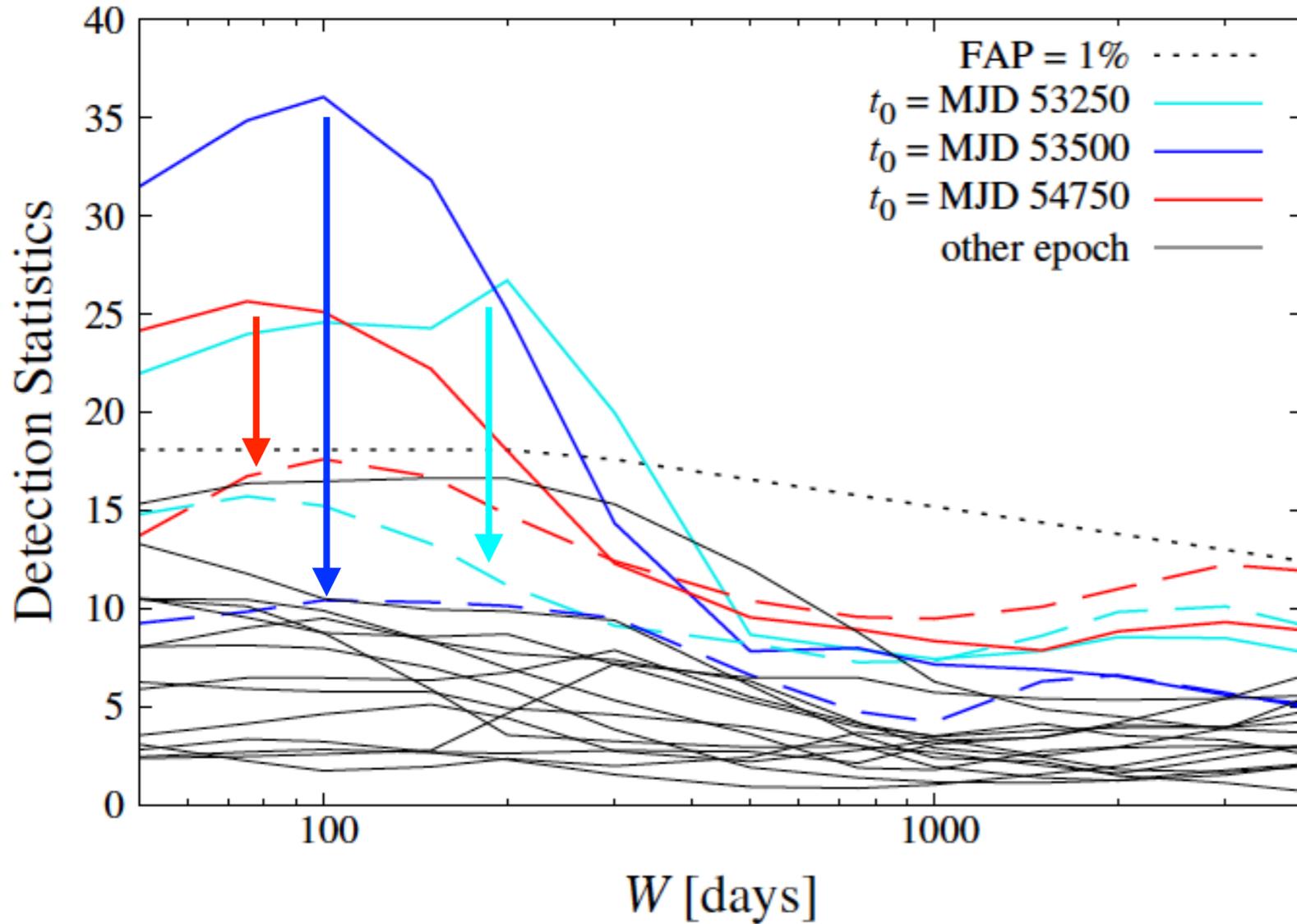
False alarm probability = 1%

- D_{\max} の位置
- + パルサーの位置
- ◆ $t_0 = \text{MJD } 53250$
- ◆ $t_0 = \text{MJD } 53500$
- ◆ $t_0 = \text{MJD } 54750$

↑ Wを変えながらサーチして
Dの最大値をプロット

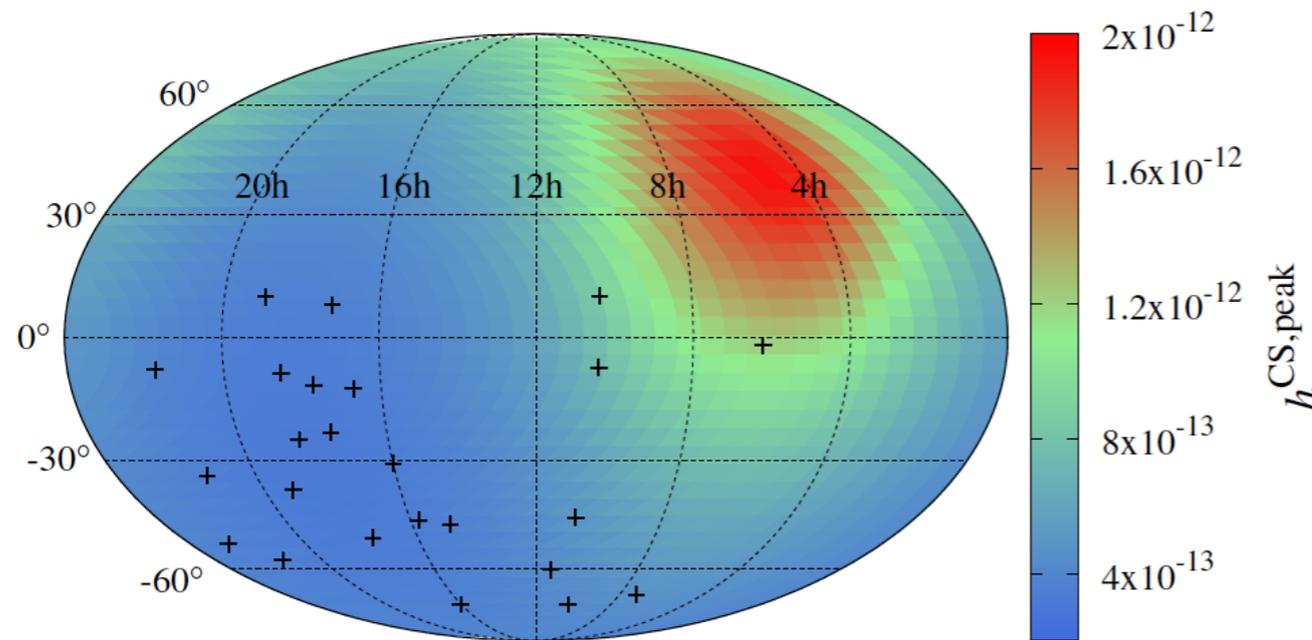


結果



ノイズのモデリングが難しいことで知られる
PSR J1939+2134 と **J0437-4715** を除くと
重力波らしきイベントはなし

重力波強度への制限

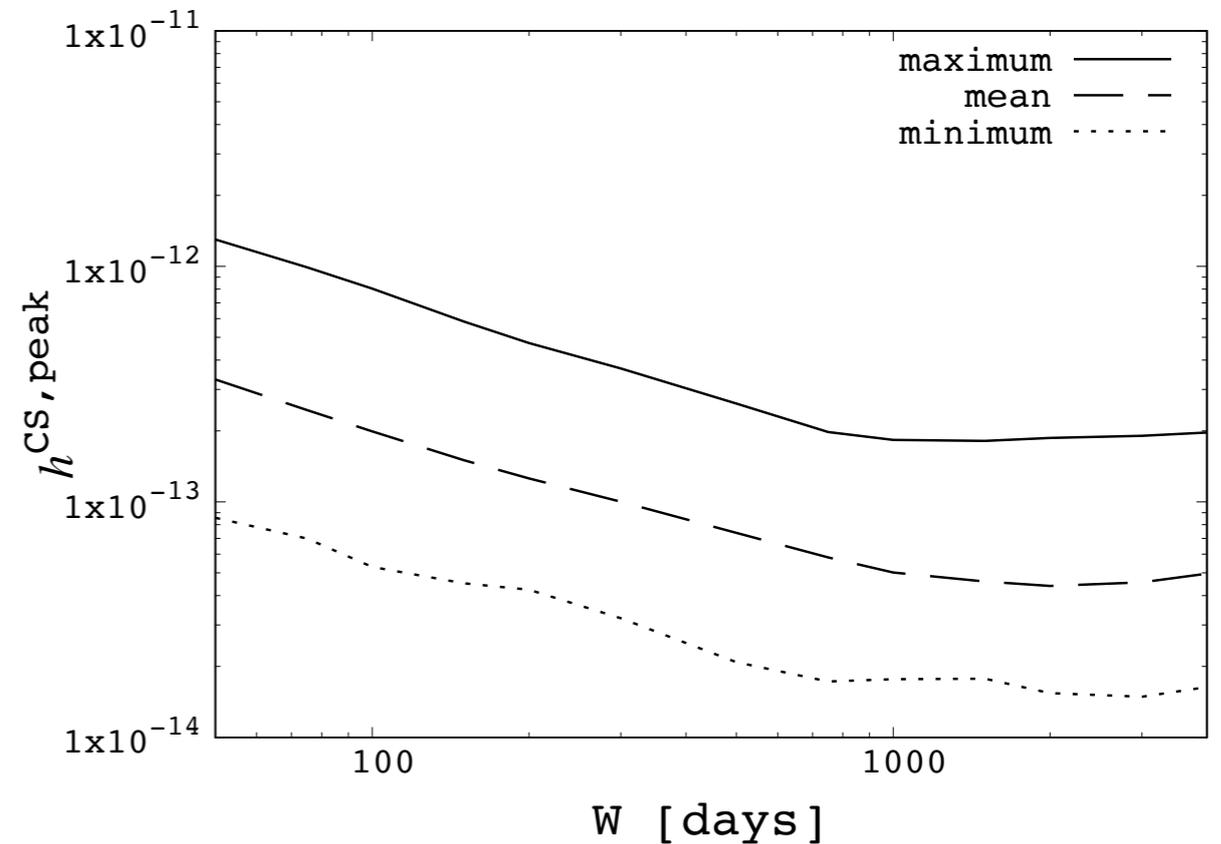


感度マップ

$t_0 = \text{MJD } 54750$

$W = 100 \text{ days}$

重力波の上限
(天球上の場所に依って変動)



重力波強度 (in Fourier space)

$$\tilde{h}(f) = \frac{G\mu L}{[(1+z)fL]^{1/3} r(z) f}$$

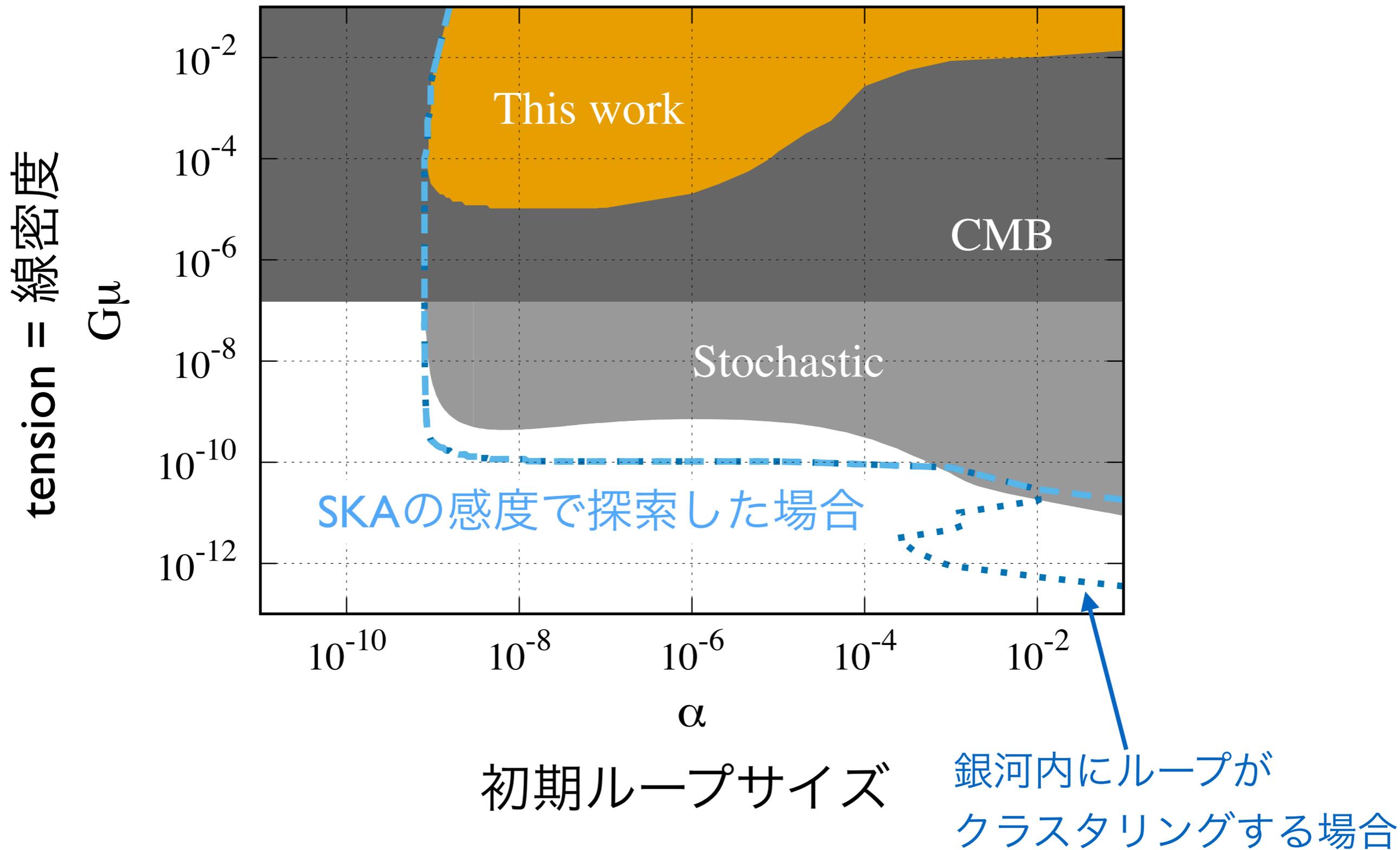
$G\mu$: tension = 線密度

$r(z)$: 重力波源までの距離

→ h への制限を宇宙ひもパラメータへの制限に変換できる

ループの分布モデルから平均距離を求められる
パラメータ: 初期ループサイズ $L_{ini} = \alpha H^{-1}$

宇宙ひもへの制限



まとめ

パルサータイミング：nHz帯の低周波重力波を検証できる

- NANOGravに続き、EPTA, PPTA, IPTAでもパルサー間に共通する低周波信号が見えている。
- 重力波であることを断定するには、Hellings & Down curveを、より良い精度で検証する必要がある。

宇宙ひも：初期宇宙に生成された可能性のある位相欠陥

- PPTA DR2のデータを使って宇宙ひもから放出される重力波バーストを探索したが、統計的に優位なイベントは見つからず。
- 宇宙ひもパラメータへの制限は、他の観測より弱いものの、これまでになかった近傍宇宙ひもの独立な検証である。