

パルサータイミングを 使った重力波検出

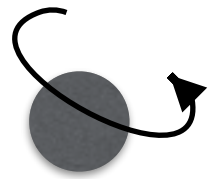
黒柳 幸子（名古屋大学）

2018/1/5

日本SKAパルサー・突発天体研究会

パルサータイミング法

ミリ秒パルサー



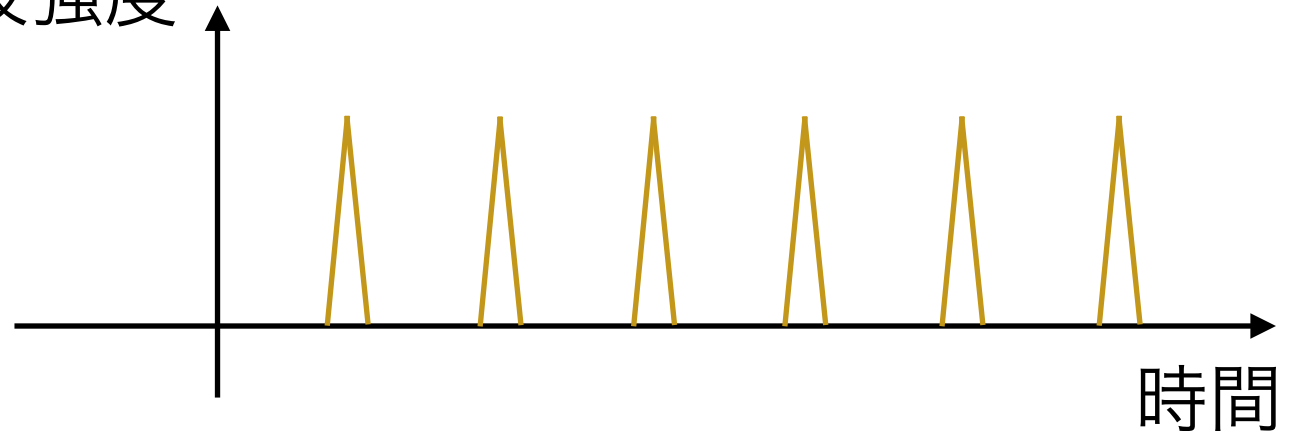
一定周期の電波パルス



地球



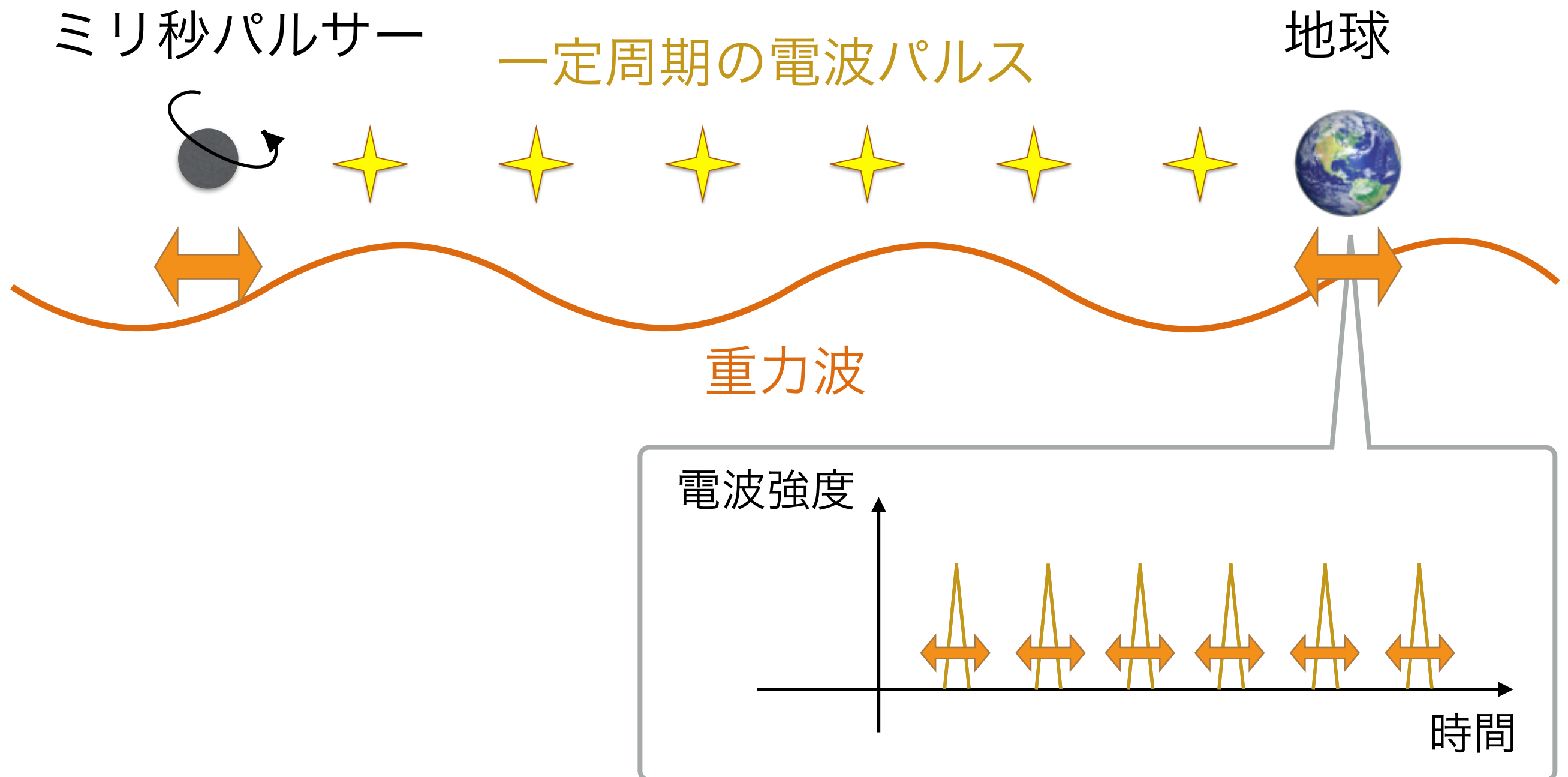
電波強度



パルサータイミング法

パルサーまでの距離 > 100光年

→ 観測できる周波数 $\propto (\text{観測時間})^{-1} \sim 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{Hz}$



観測法

Parks Pulsar Timing Arrayの場合

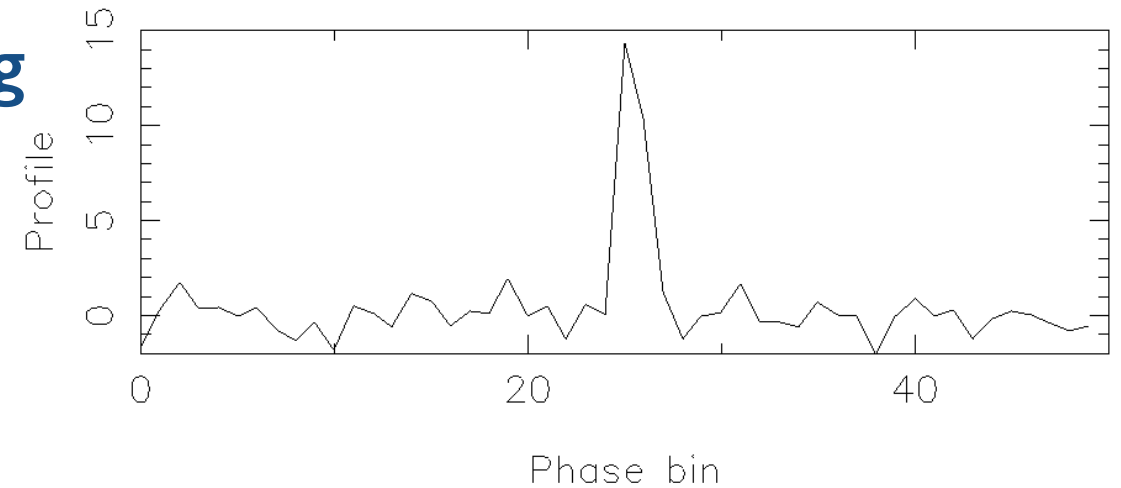
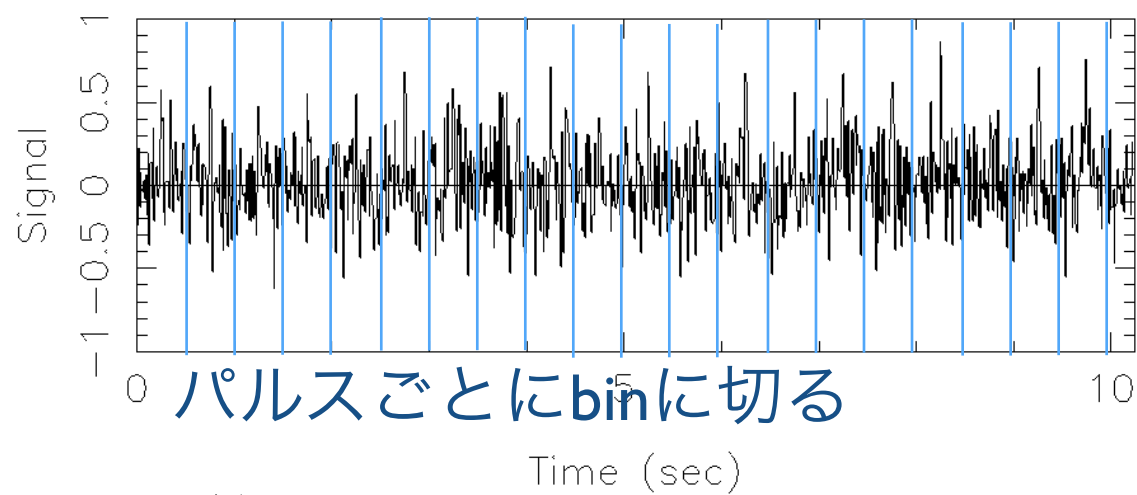
～ 20個程度のパルサーを

2週間おきに1時間ずつ観測

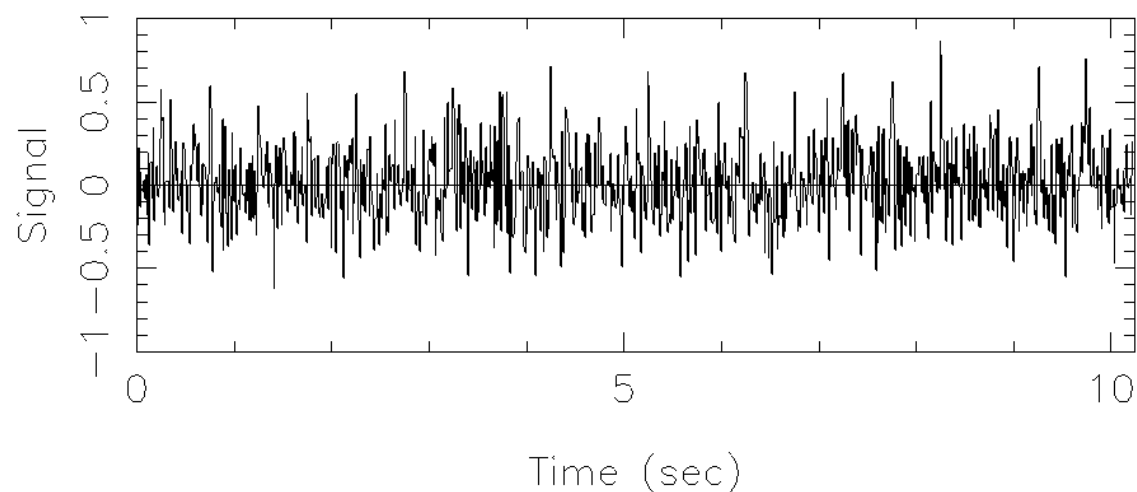


各binを足し合わせ

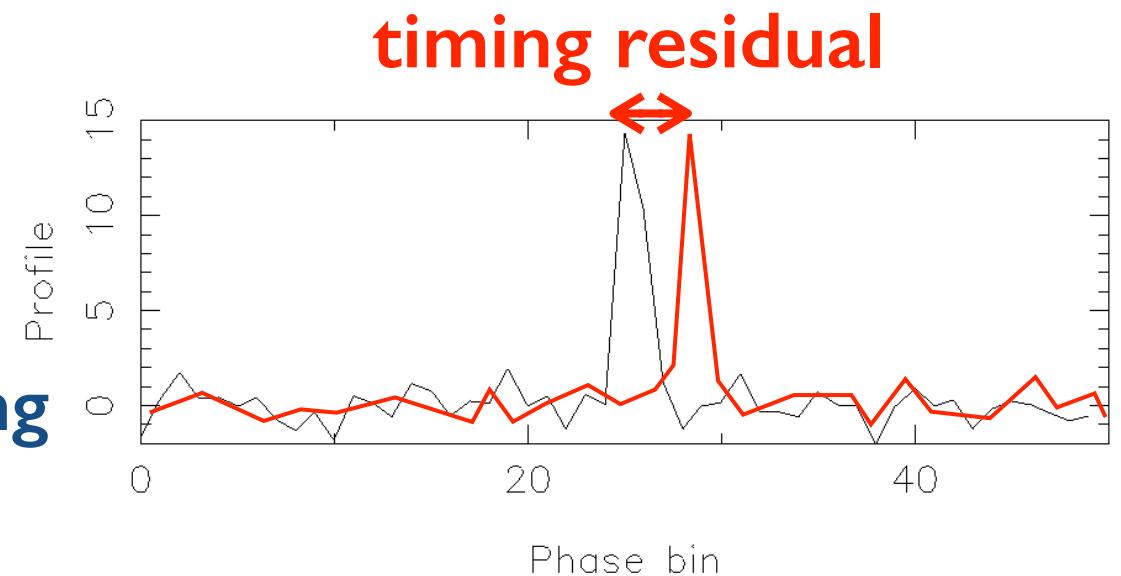
folding



2週間後



folding

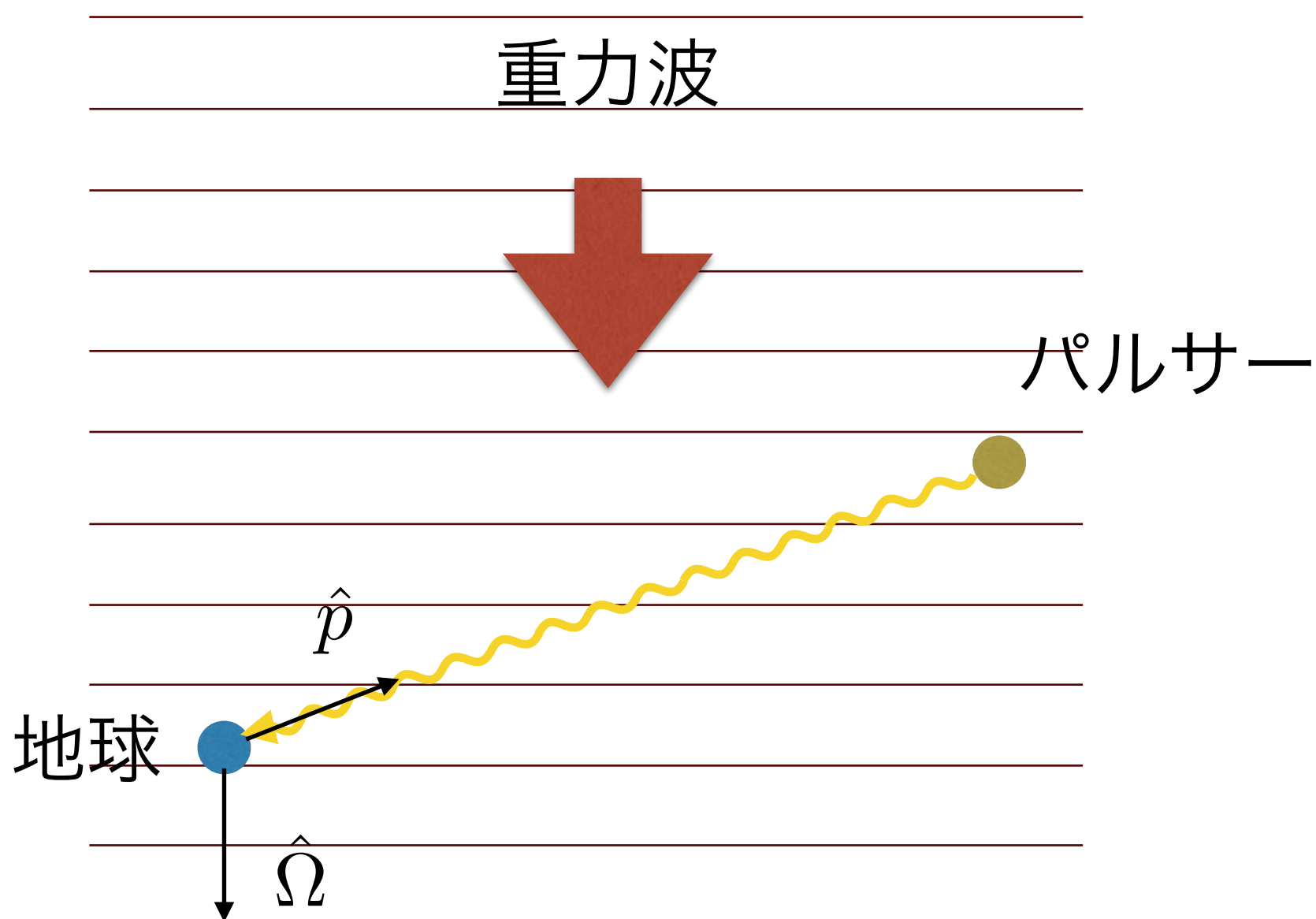


観測量

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

重力波の影響: $r_{\text{GW}}(t) = \sum_{A=+, \times} F^A(\hat{\Omega}, \hat{p}) \int^t \Delta h_A(t', \hat{\Omega}) dt'$

A: 重力波の偏光 h: 重力波の振幅

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

パルサーの位置 $\hat{p}$

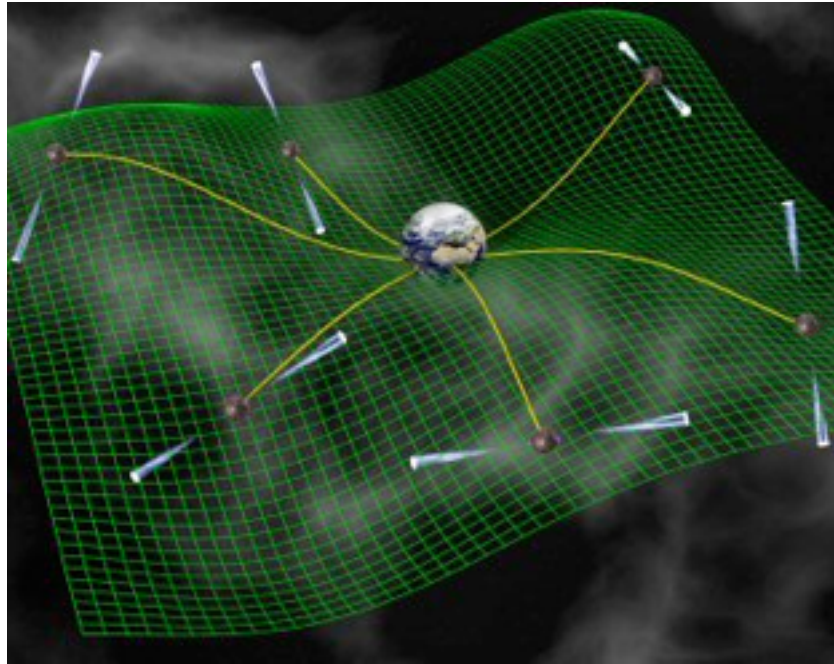
重力波の方向 $\hat{\Omega}$

重力波偏光の角度 $e_{ij}^A(\hat{\Omega})$

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

- 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

複数間パルサーの相関



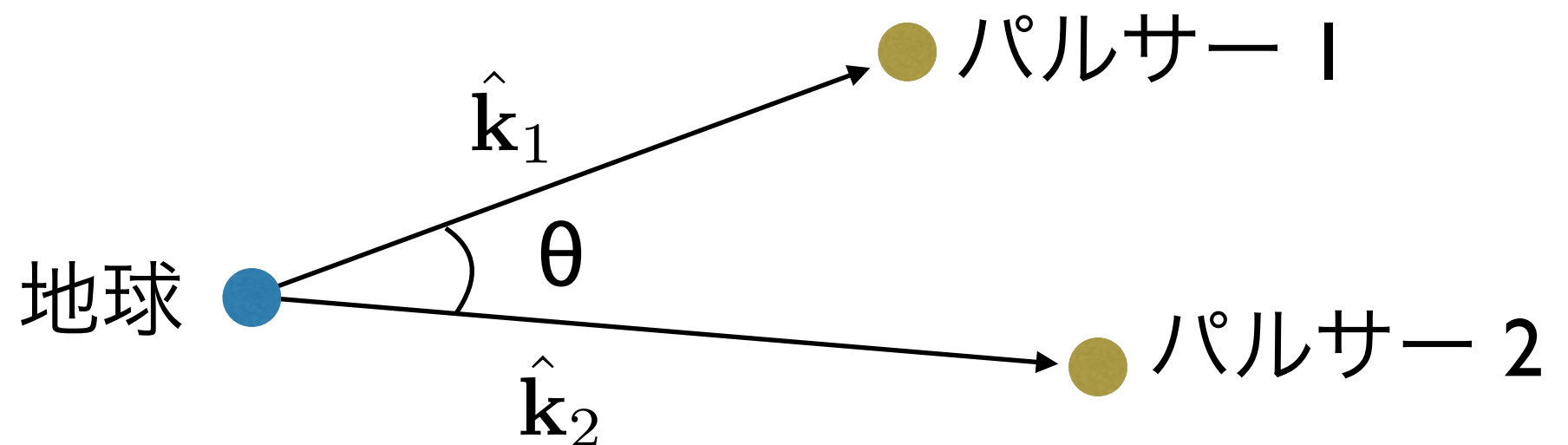
パルサー同士の相関をとって

重力波の四重極パターンを取り出す操作を行う

→ pulsar termの不定性や個々のパルサー固有の
周期の変動を取り除くことができる

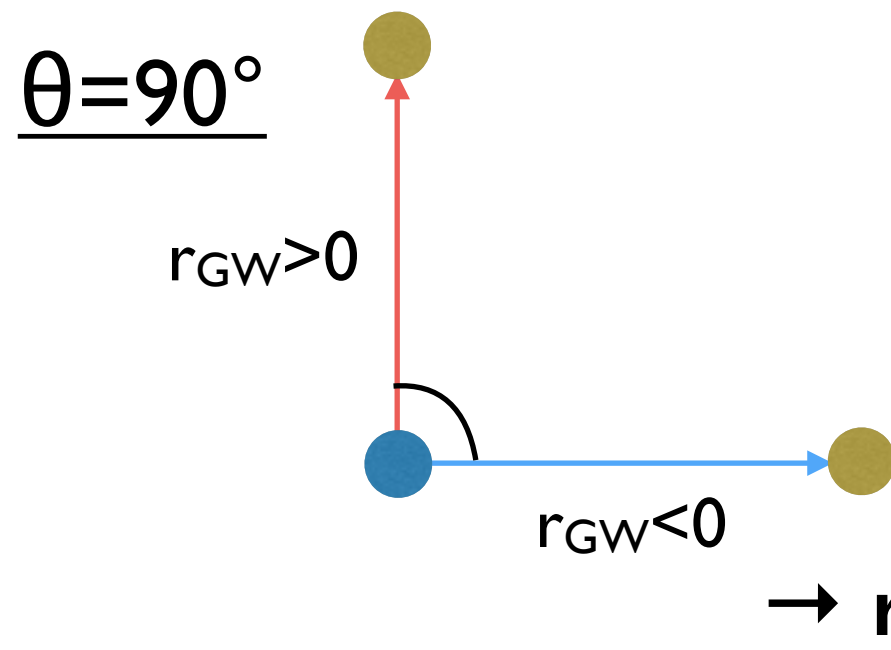
i: 時間の足し合わせ

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



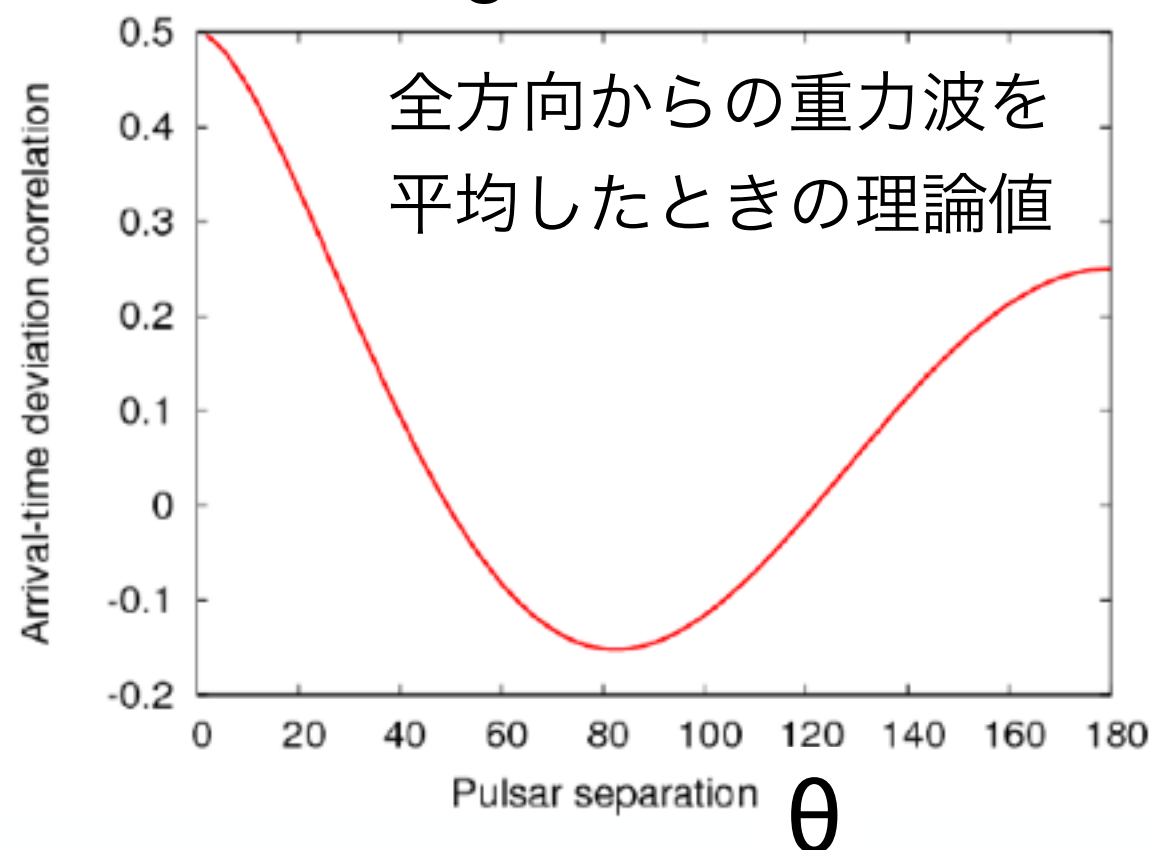
重力波による四重極が生み出す相関の傾向

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

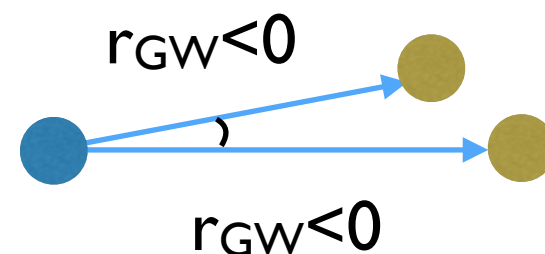


背景重力波の場合

Hellings & Down curve



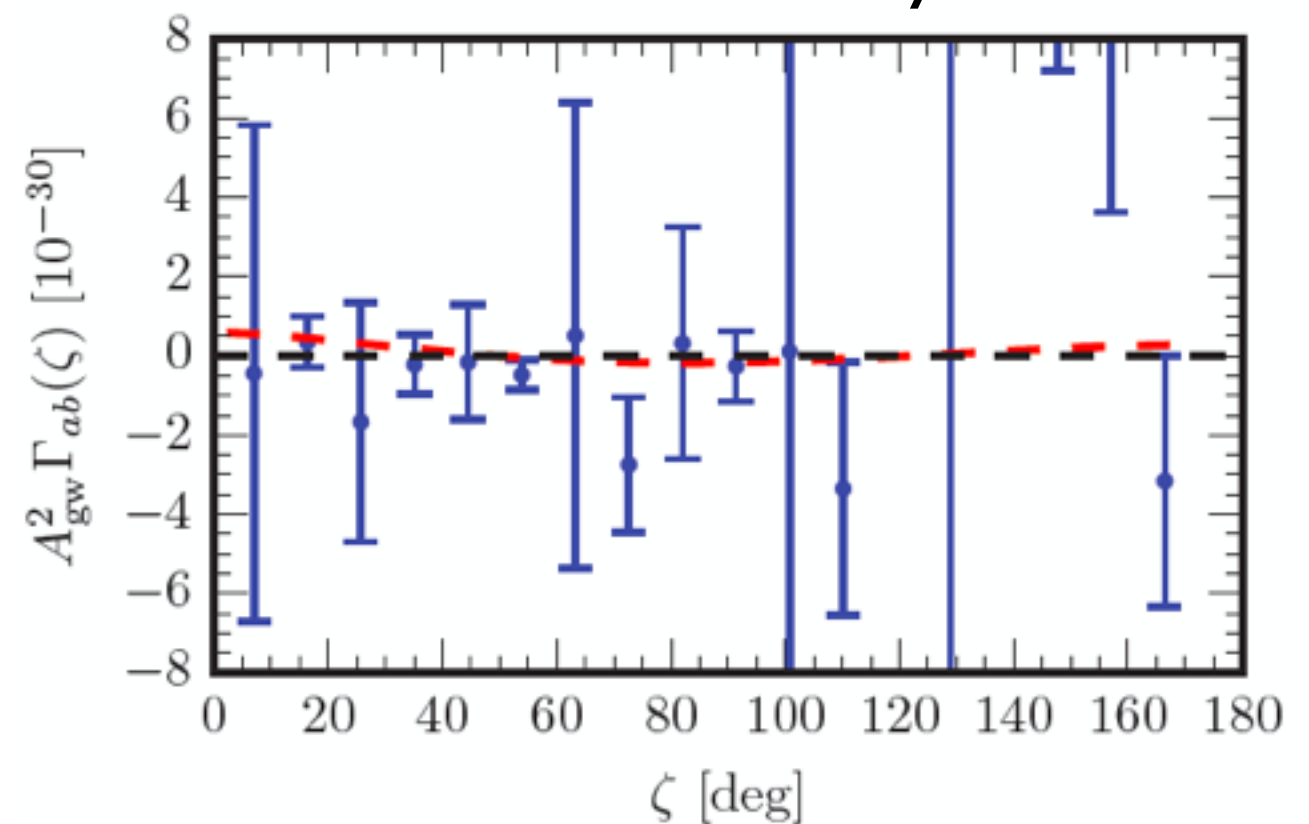
$\theta \sim 0^\circ$



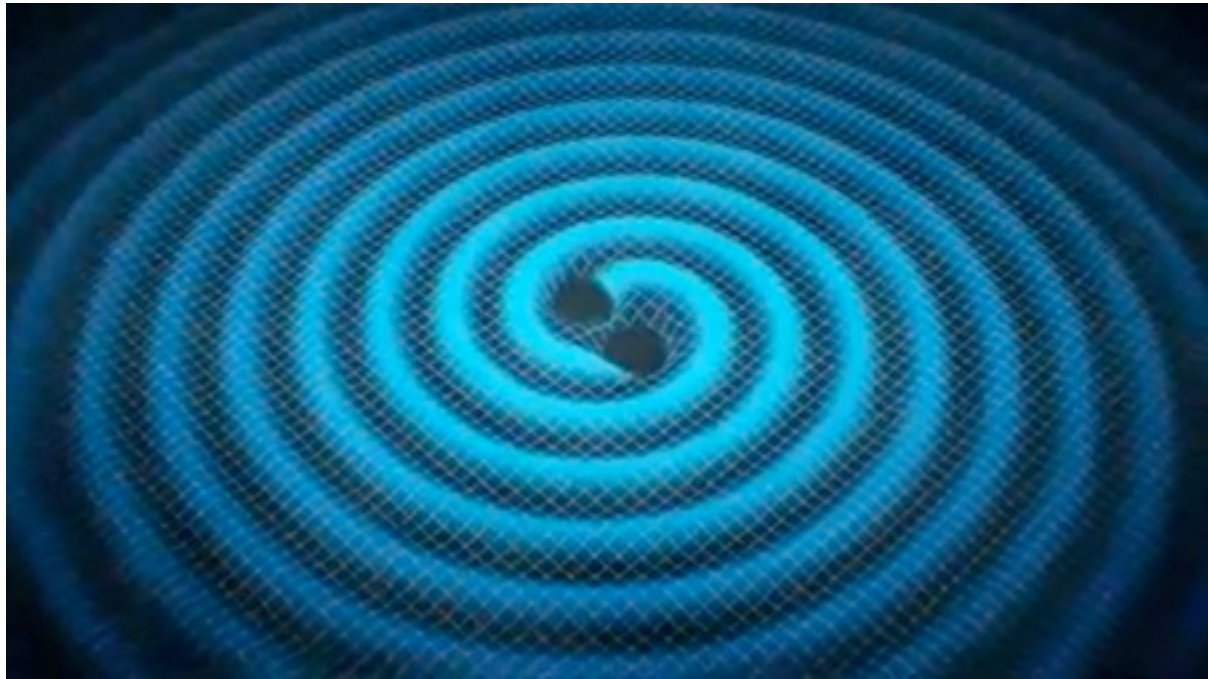
$\rightarrow r(\theta) > 0$



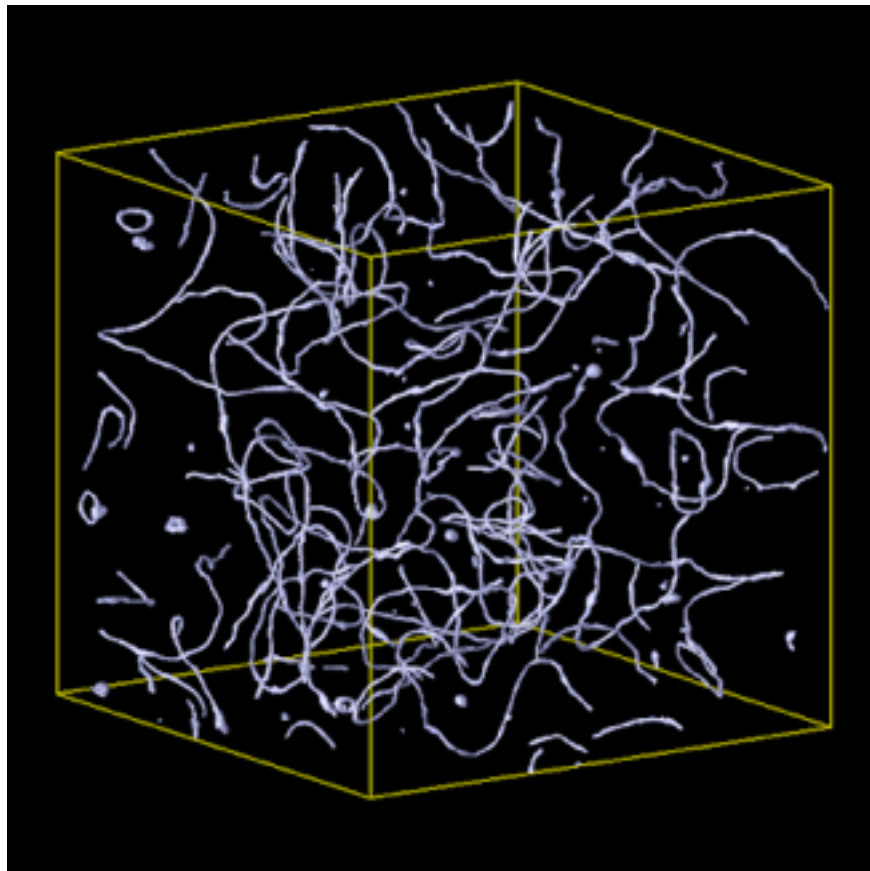
NANOGrav 9yr



パルサータイミングで探れるもの



超大質量ブラックホール連星

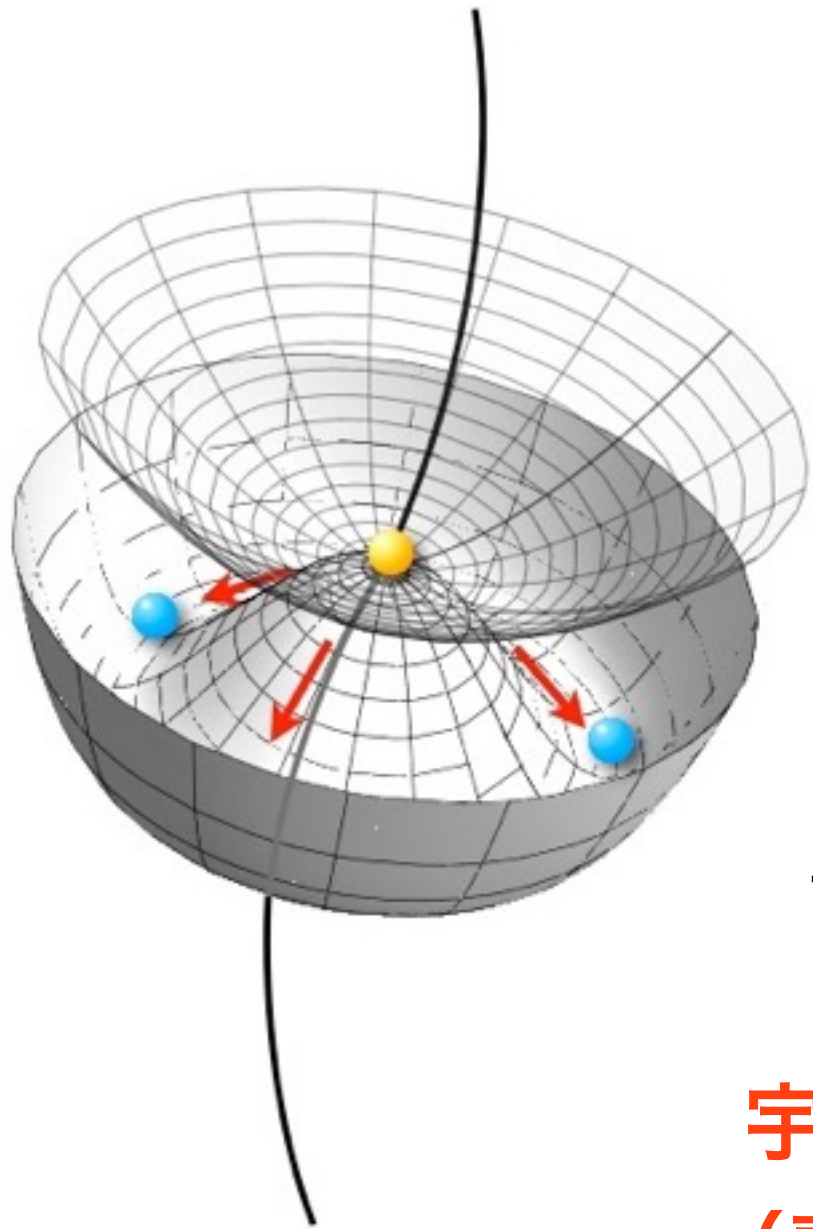


宇宙ひも

宇宙ひも？

(Cosmic string)

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

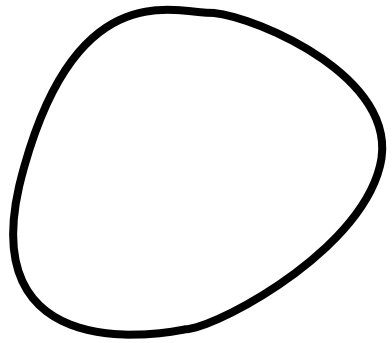
宇宙ひもの存在を探ることで初期宇宙物理
(素粒子物理、超弦理論) の解明につながる

宇宙ひも？

(Cosmic string)

宇宙空間を漂う高エネルギーの重く長く速いひも

infinite string



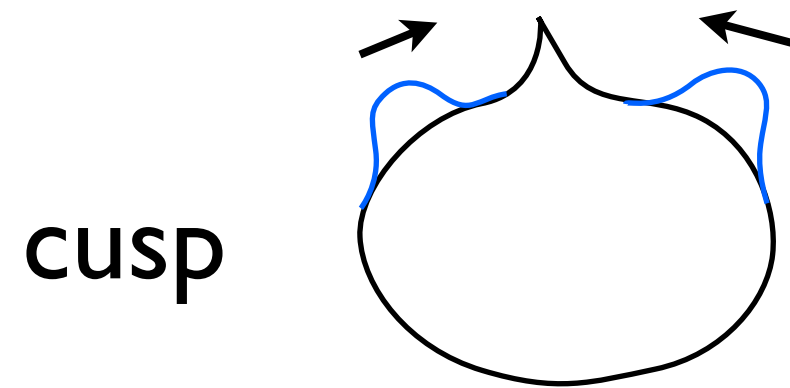
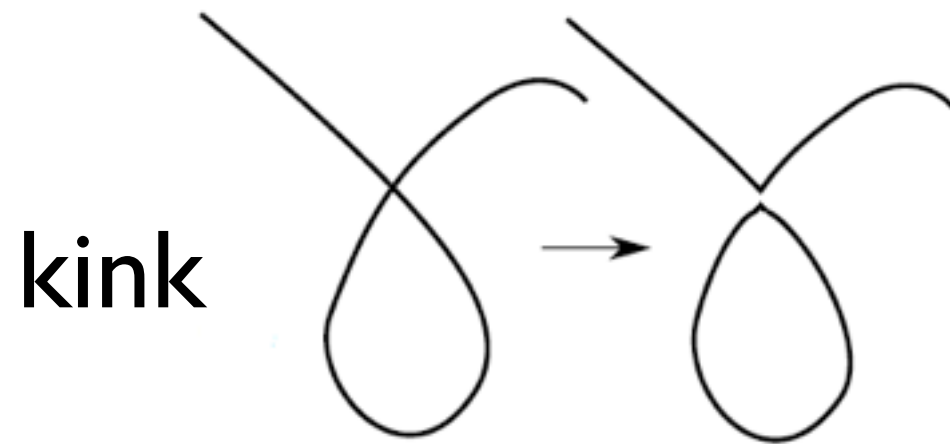
loop

- ・無限の長さを持つ (=端点がない)
- ・ループになったりもする
- ・非常に重い (1cmあたり 10^{18} kg、富士山1000個分！)

→ 重力波で探しやすい！

宇宙ひもからの重力波

kinkやcuspと呼ばれる特異点構造から放出される



infinite string	多	少
loop	少	多

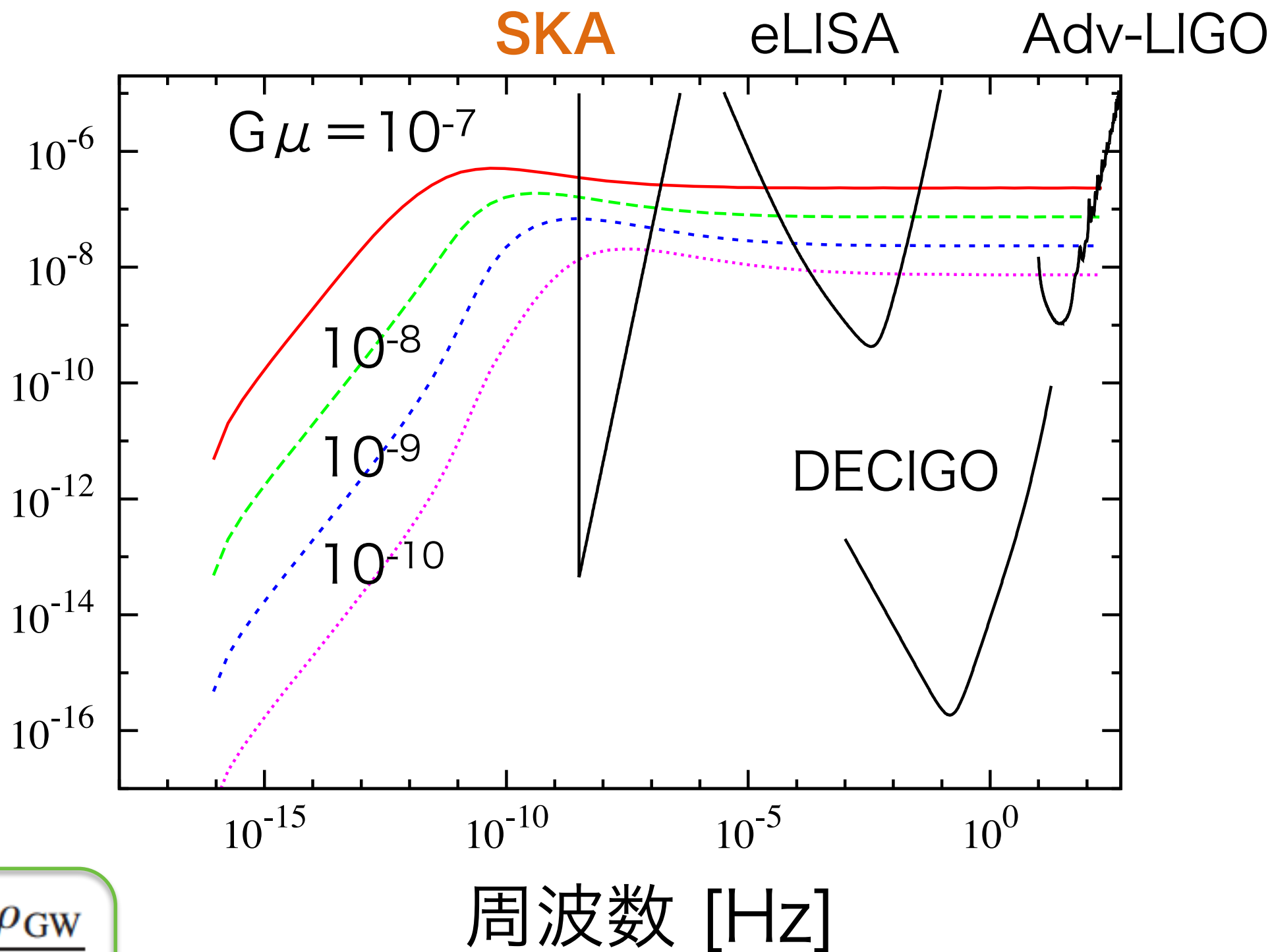
→ 重なり合って背景重力波に

loop上の

cusp起源の重力波

線密度 ($G\mu$) 依存性

背景重力波の強度 Ω_{GW}



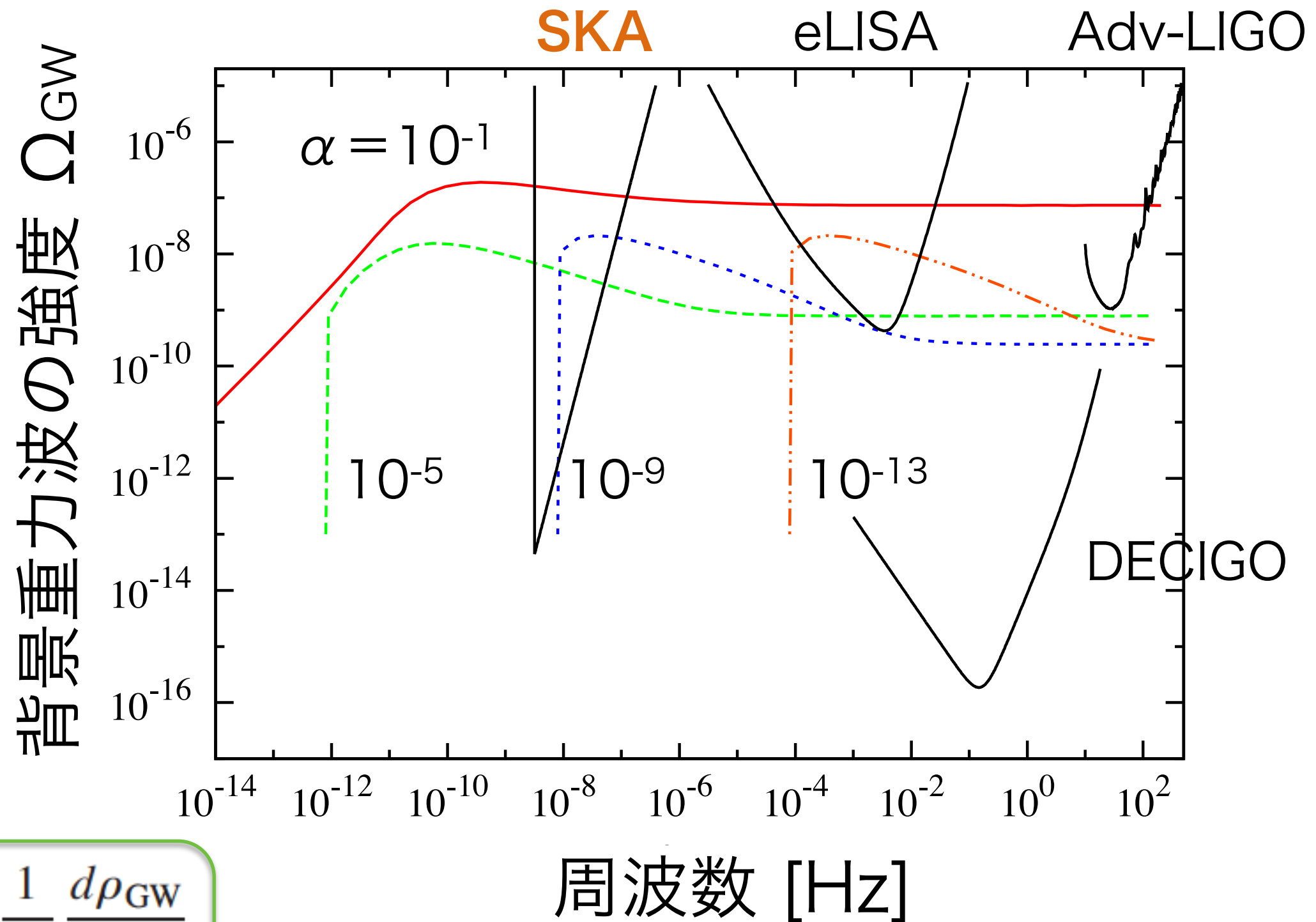
$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k}$$

$$\alpha = 10^{-1}, \quad p = 1$$

loop上の

cusp起源の重力波

初期ループサイズ (α) 依存性

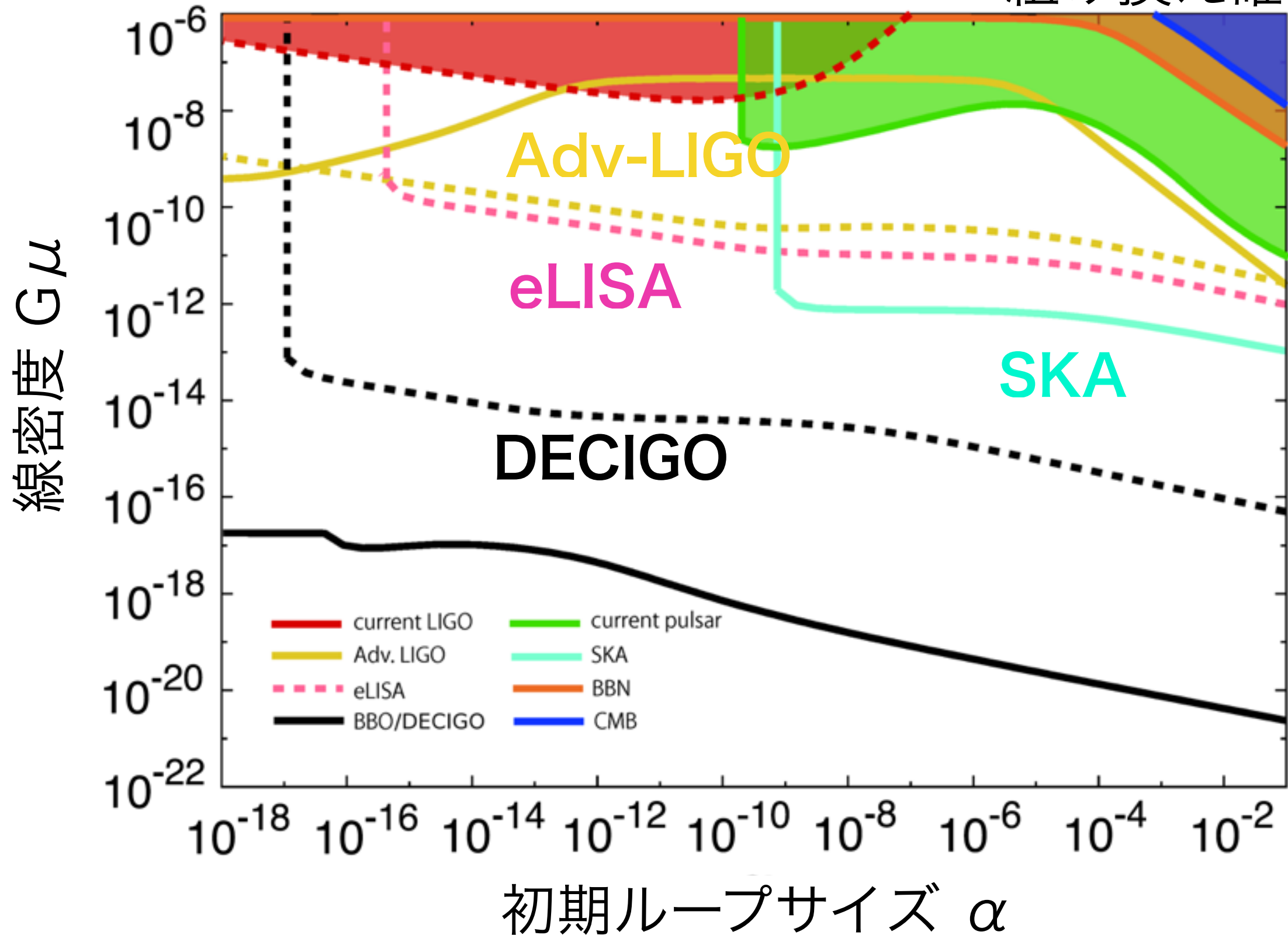


$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k}$$

$$G\mu = 10^{-8}, \quad p=1$$

観測で探れる宇宙ひものパラメータスペース

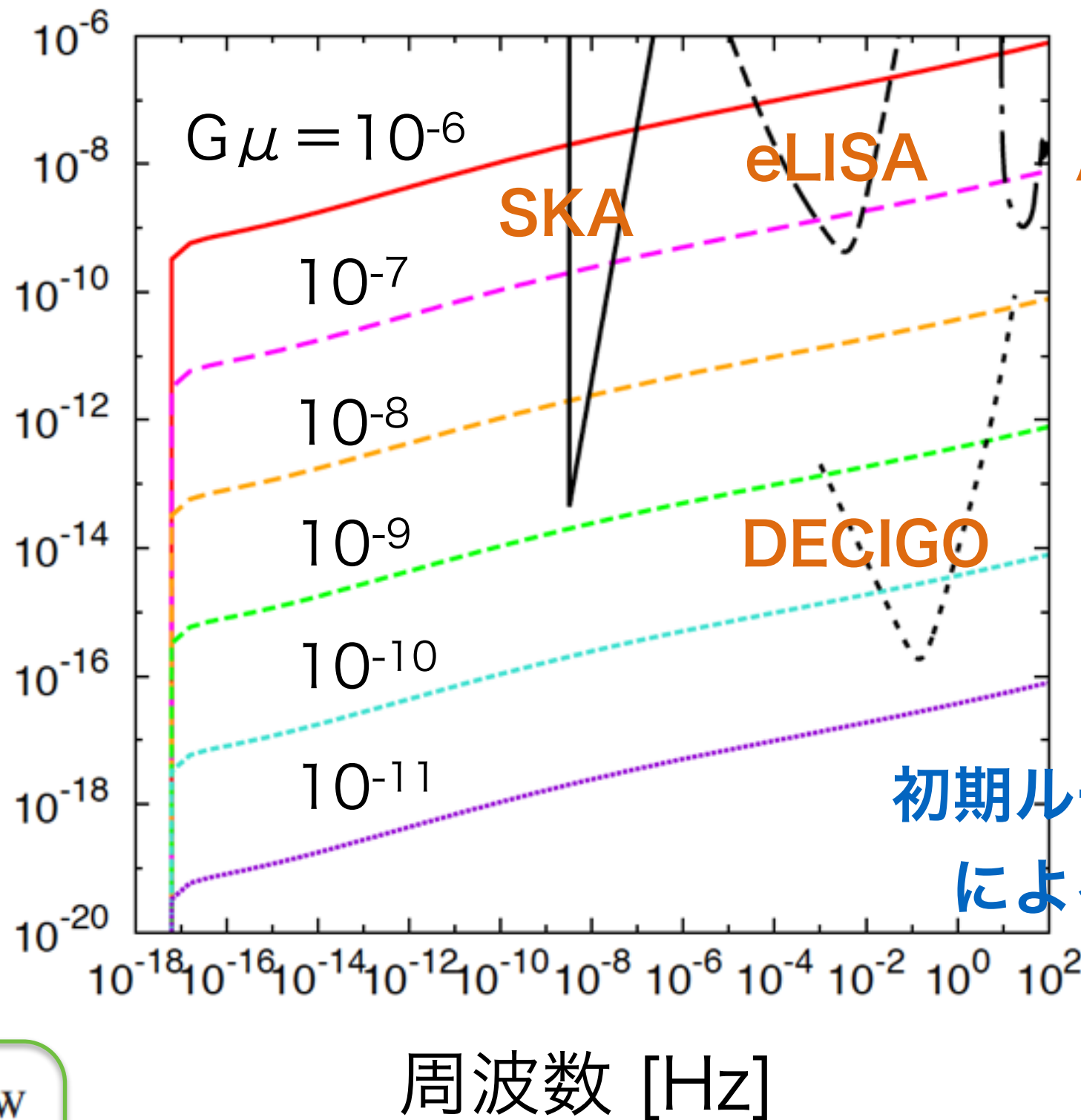
組み換え確率 $p=1$



infinite string上の

kink起源の重力波

背景重力波の強度 Ω_{GW}



$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k}$$

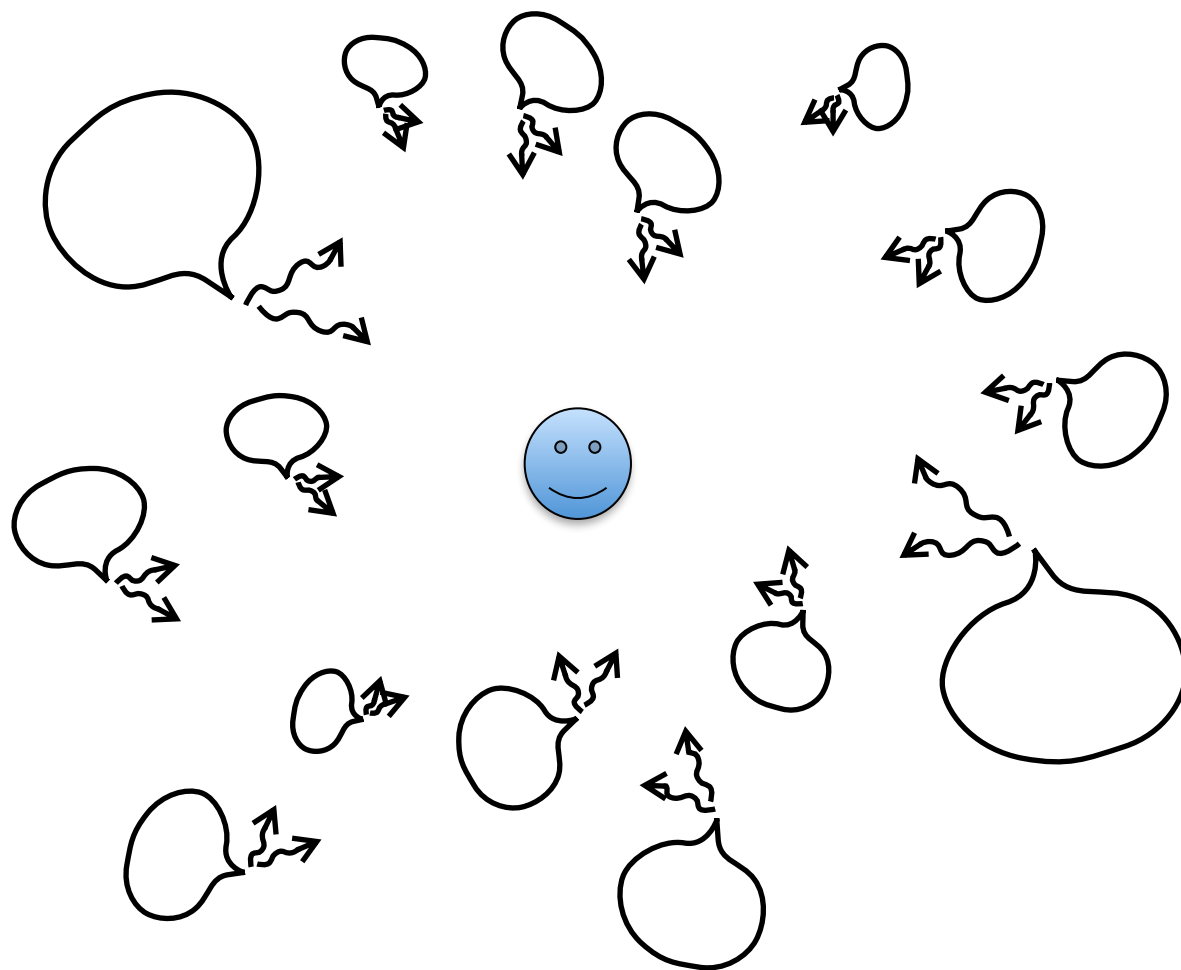
初期ループサイズ (α)
による不定性がない

非等方な背景重力波

ループの初期サイズ： α

α ：大 = 寿命長

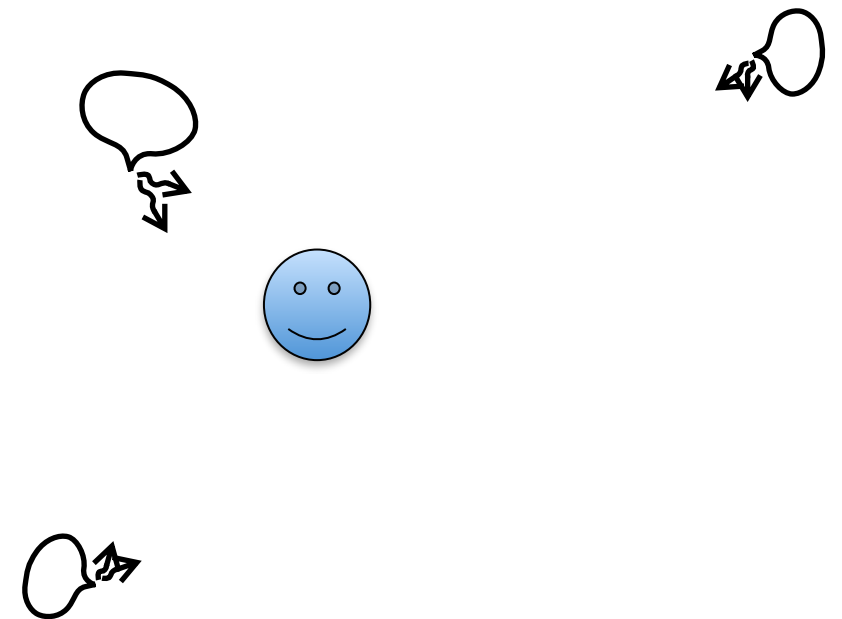
ループは作られたあと
しばらく残っている



→ 等方

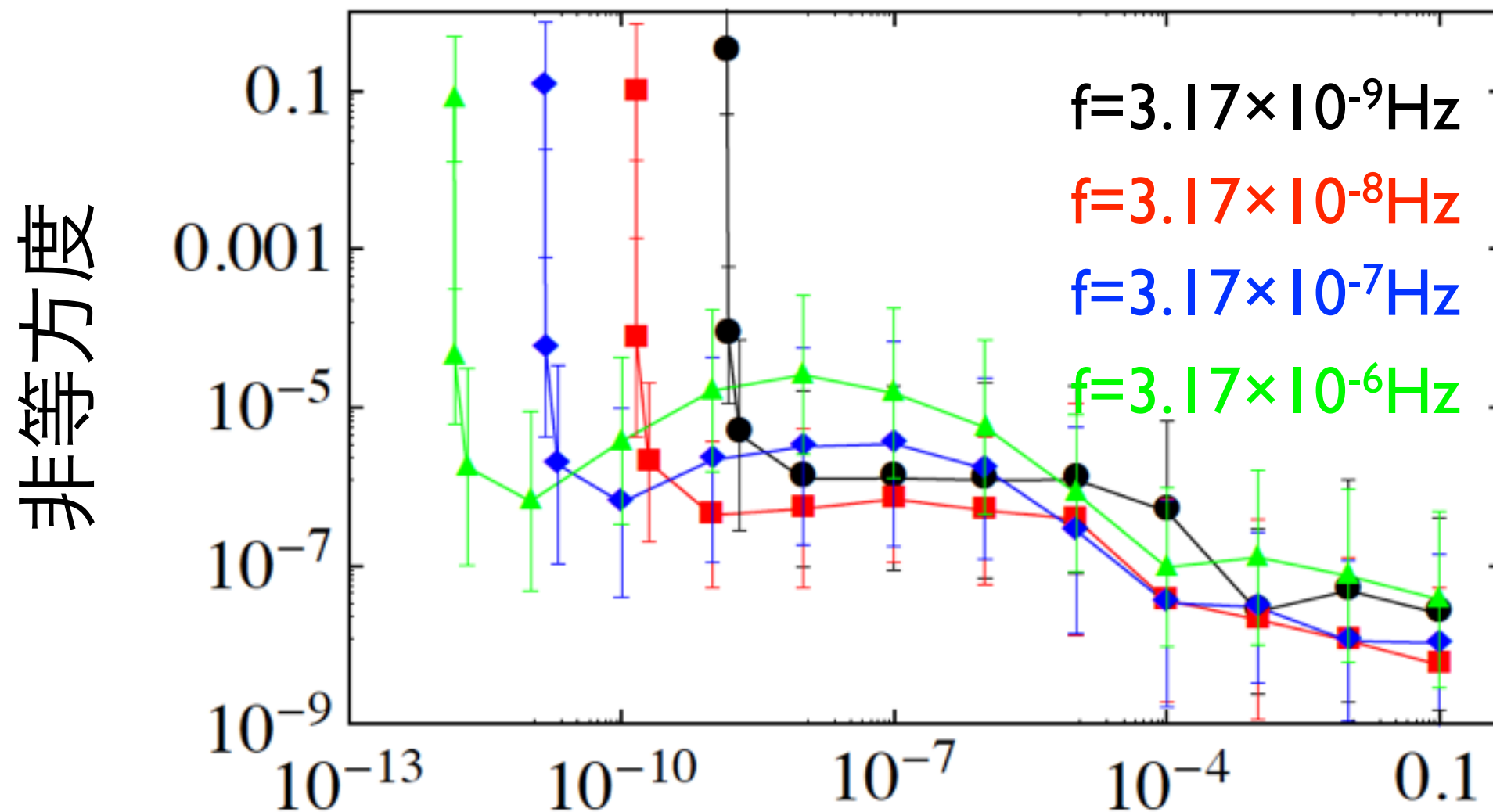
α ：小 = 寿命短

ループは重力波を出してすぐ
消えてしまう



→ 非等方

非等方度



初期ループサイズ α

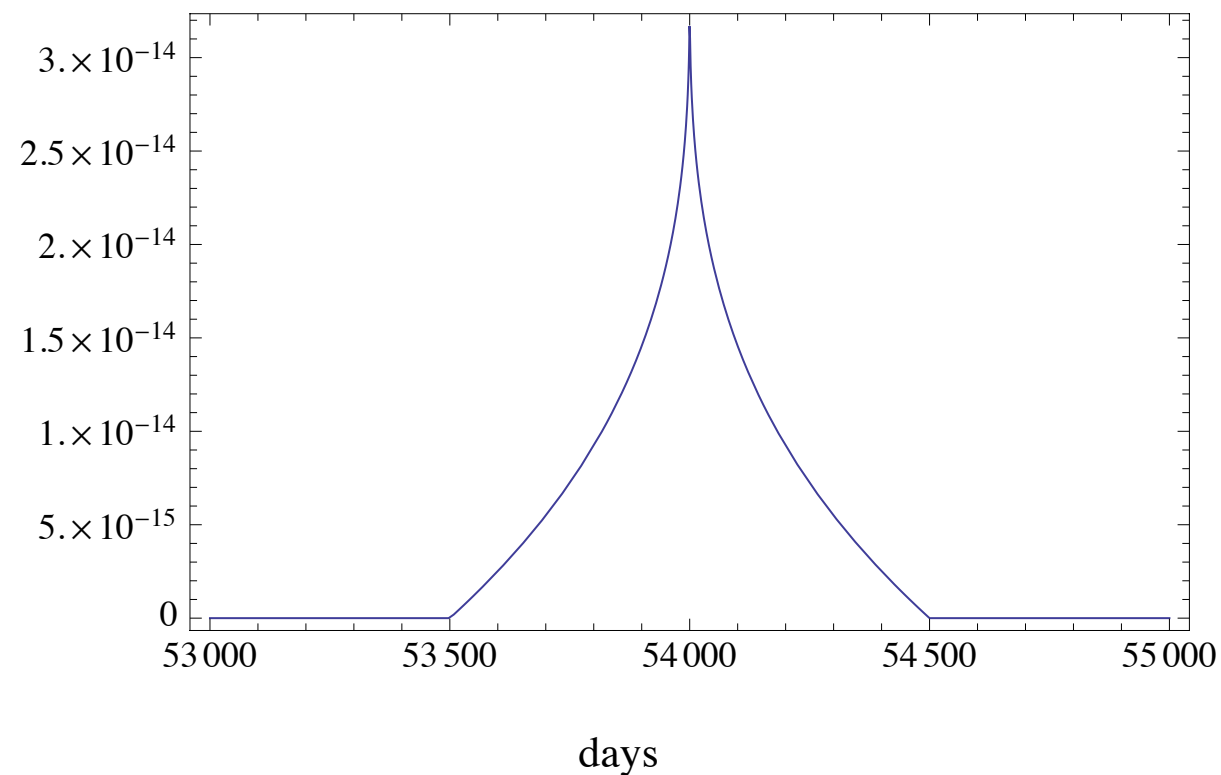
観測する周波数を変えることで異なる α の値を探ることができる

→ 宇宙ひもの進化の情報を引き出せる

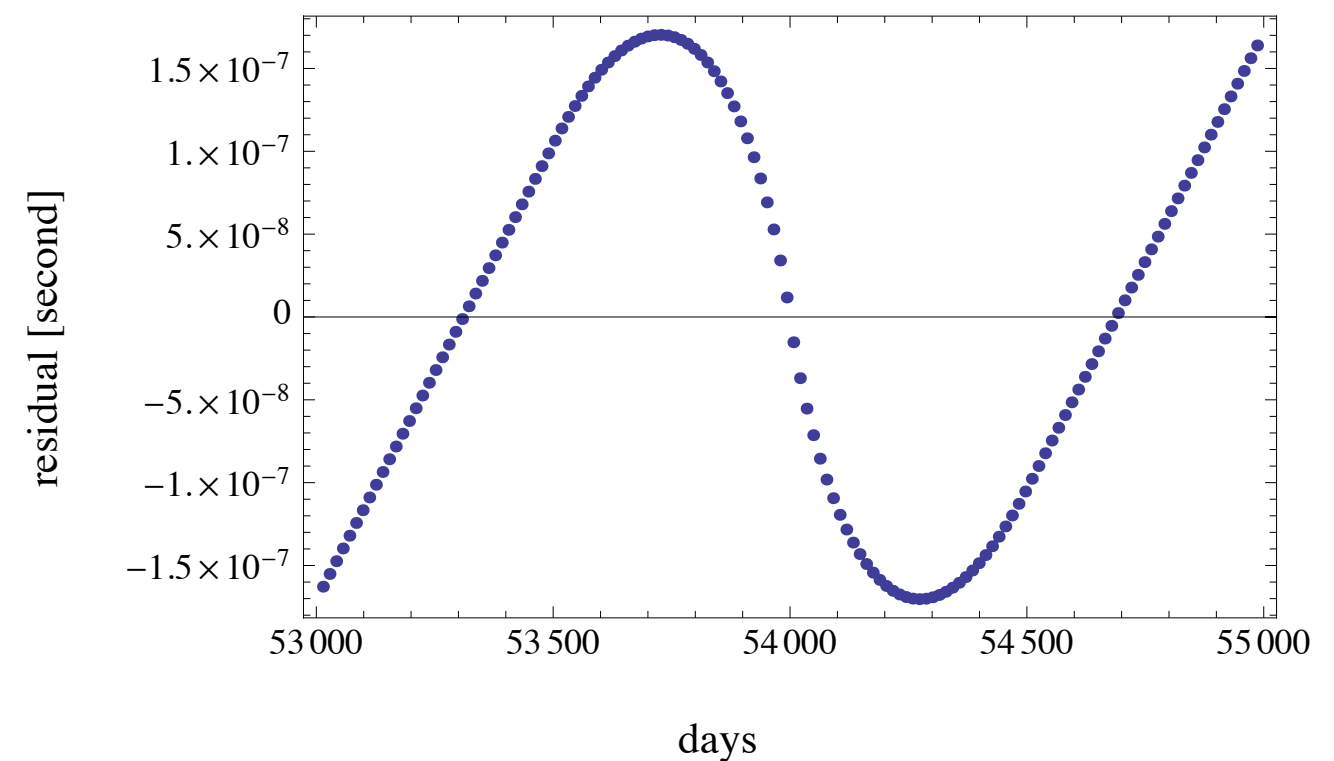
宇宙ひもバースト重力波探索

with 米丸くん
& PPTA

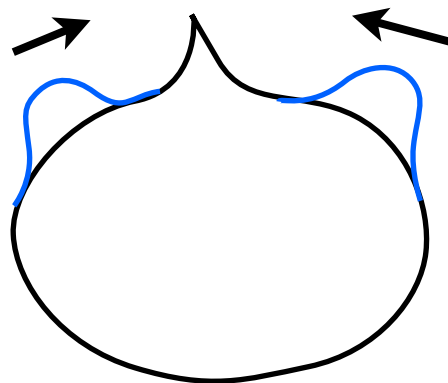
cusplからの重力波バーストの波形 h



パルサータイミングでの観測量 r_{GW}

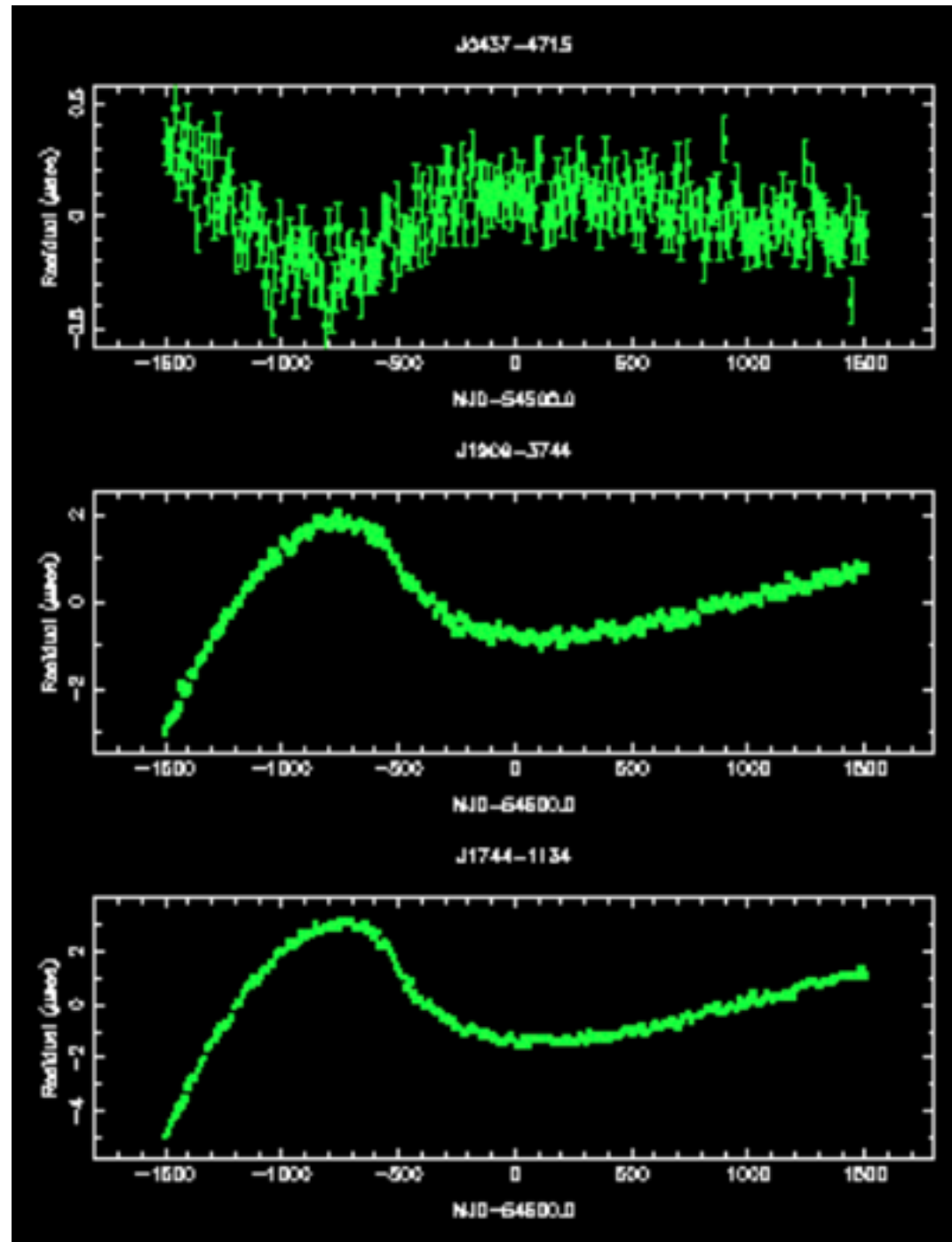


ループのサイズ
 $\propto$ 重力波の波長

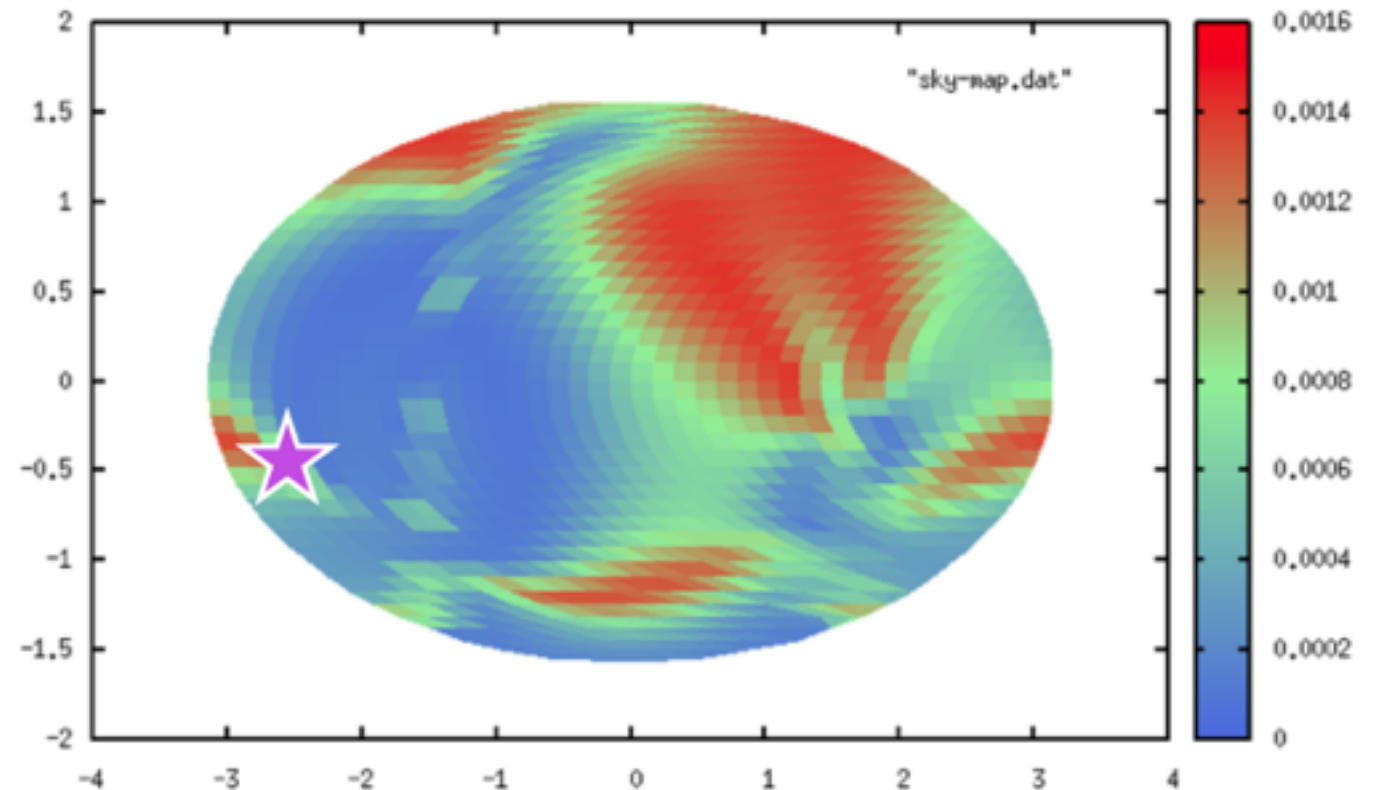


シミュレーション by 米丸くん

各パルサーでの r_{GW}



四重極分布を探すことで位置を推定



今後やること

何を持って検出とするか？

→ ノイズの特性を調べた上で
Detection statisticsを決める

→ 最終的にPPTAの実際のデータを使
って制限をつけたい

まとめ

パルサータイミングを使って
低周波数帯の重力波を検出できる

→ 宇宙ひも検証の強力な観測手段

- ・ 幅広いパラメータ領域を探るにはcusp、kink起源の両者の重力波を探るのが良い。
- ・ 重力波の非等方性の情報も宇宙ひもの進化の様子を知るのに使えそう。
- ・ PPTAと一緒に宇宙ひも重力波バーストを探すためのプロジェクトを進行中。