

DECIGO によるスカラー・ベクトル 背景重力波の探査

国立天文台 理論研究部
西澤篤志

with 樽家篤史、川村静児、阪上雅昭

2009年9月10日-13日 物理学会
@ 甲南大学岡本キャンパス



動機

観測的に宇宙が加速膨張している事が明らかになり、近年、数々の修正重力理論や余剰次元理論が提案されている。

Brans-Dicke 理論、 $f(R)$ 重力、ブレーンシナリオ等

重力理論を変更した時の重力波への影響

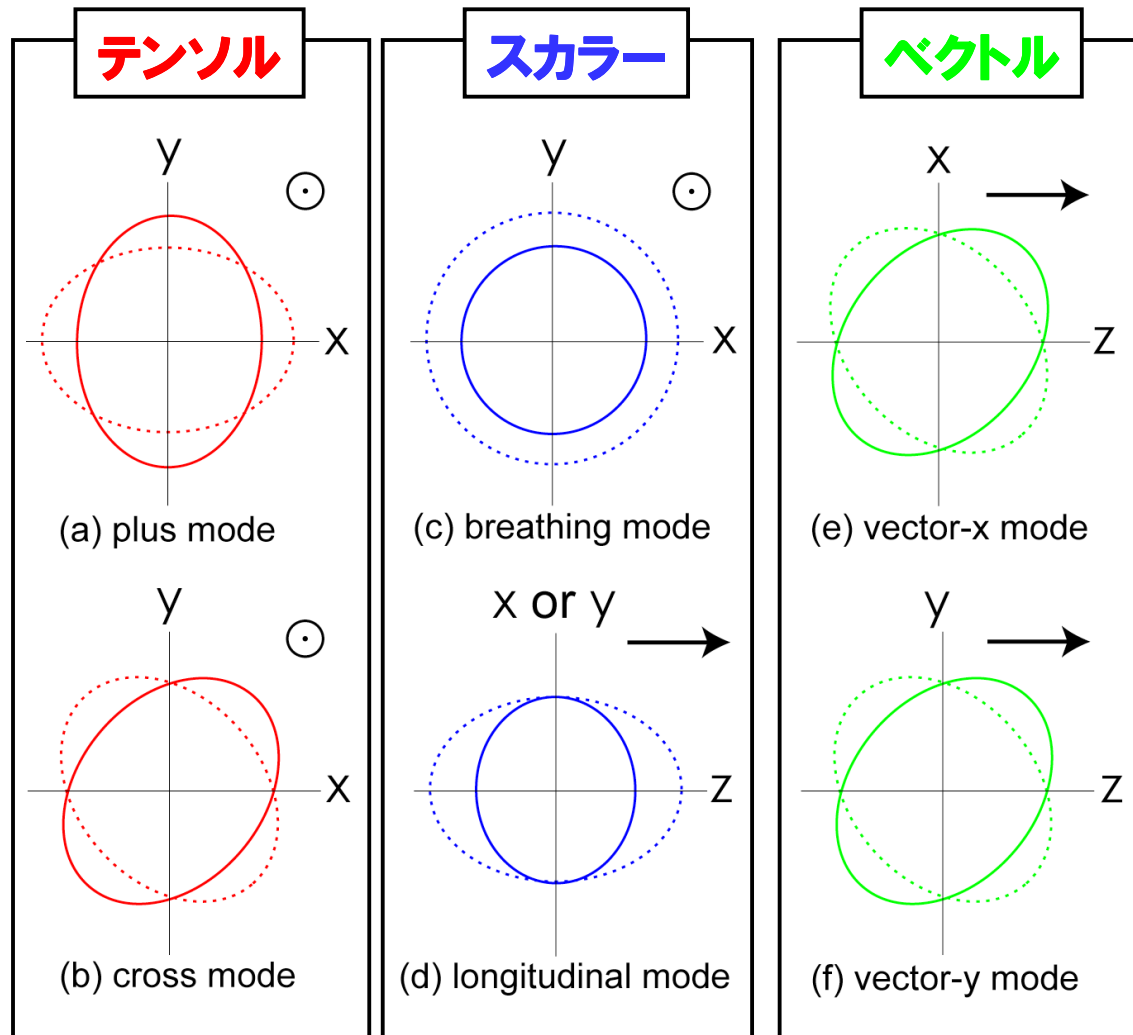
1. 重力子の質量
2. 生成される重力波の位相のずれ
3. $+$, \times 以外の偏極モード

➡ 重力波観測による重力理論の検証（制限）が可能

本講演では、重力理論の検証を目的とし、特に偏極モードに着目する

重力波偏極モードの定義

一般の計量重力理論では3次元空間において、最大6つの偏極モードが許される。 [Eardley et al. 1973, Will 1993]



背景重力波の偏極モード

背景重力波とは

- ランダムな位相を持つ多数の重力波の重ね合わせ
- 主に、初期宇宙において生成され、現在の宇宙に背景波として存在する
- インフレーション等の初期宇宙の物理を直接的に調べる事の出来る唯一の手段

偏極モード

テンソル、ベクトル、スカラーの3つを考えればよい。

$$\begin{aligned}\Omega_{\text{gw}}^T &\equiv \Omega_{\text{gw}}^+ + \Omega_{\text{gw}}^\times && (\Omega_{\text{gw}}^+ = \Omega_{\text{gw}}^\times), \\ \Omega_{\text{gw}}^V &\equiv \Omega_{\text{gw}}^x + \Omega_{\text{gw}}^y && (\Omega_{\text{gw}}^x = \Omega_{\text{gw}}^y), \\ \Omega_{\text{gw}}^S &\equiv \Omega_{\text{gw}}^b + \Omega_{\text{gw}}^\ell = \Omega_{\text{gw}}^b (1 + \kappa).\end{aligned}$$

仮定

κ → 理論モデルに依存するパラメータ

これまでの研究

前回の学会では、**地上の重力波検出器**を用いた偏極モードの分離について報告した。 [AN et al. 2009]

- **レーザー干渉型重力波検出器はスカラー・ベクトル偏極モードに感度があるのか？**

偏極モード毎に検出器の角度応答関数は異なるが、感度はテンソルモードとほぼ同程度。

- **偏極モードを分離して検出できるのか？ どれくらいの感度で？**

観測したい重力波の1波長程度以上離れた3台の独立な検出器があれば、分離可能（地上検出器はほぼ最適配置になっている）。感度はテンソルモードと同じオーダー。

本講演では、**スペース重力波検出器 DECIGO (BBO)** を用いて、偏極モードの分離について考える。

モード分離の方法

複数台の検出器を用いて相関解析を行い、モード分離をする

ある周波数での
相関信号

$$\begin{aligned} Z_{IJ}(f) &\equiv \frac{20\pi^2}{3H_0^2 T} |f|^3 \langle \tilde{s}_I^*(f) \tilde{s}_J(f) \rangle \\ &= \Omega_{\text{gw}}^T \gamma_{IJ}^T(f) + \Omega_{\text{gw}}^V \gamma_{IJ}^V(f) + \xi \Omega_{\text{gw}}^S \gamma_{IJ}^S(f) \end{aligned}$$



$$\begin{pmatrix} Z_{12} \\ Z_{23} \\ Z_{31} \end{pmatrix} = \Pi \begin{pmatrix} \Omega_{\text{gw}}^T \\ \Omega_{\text{gw}}^V \\ \xi \Omega_{\text{gw}}^S \end{pmatrix} \quad \Pi \equiv \begin{pmatrix} \gamma_{12}^T & \gamma_{12}^V & \gamma_{12}^S \\ \gamma_{23}^T & \gamma_{23}^V & \gamma_{23}^S \\ \gamma_{31}^T & \gamma_{31}^V & \gamma_{31}^S \end{pmatrix}$$

原理的には、3つの検出器によりモードの分離が可能



モード分離

$$\begin{pmatrix} \Omega_{\text{gw}}^T \\ \Omega_{\text{gw}}^V \\ \xi \Omega_{\text{gw}}^S \end{pmatrix} = \Pi^{-1} \begin{pmatrix} Z_{12} \\ Z_{23} \\ Z_{31} \end{pmatrix}$$

実際、分離可能かどうかは
 $\det \Pi$ に依存

モード分離が出来ない場合

$$\Pi \equiv \begin{pmatrix} T & V & S \\ \gamma_{12}^T & \gamma_{12}^V & \gamma_{12}^S \\ \gamma_{23}^T & \gamma_{23}^V & \gamma_{23}^S \\ \gamma_{31}^T & \gamma_{31}^V & \gamma_{31}^S \end{pmatrix}$$

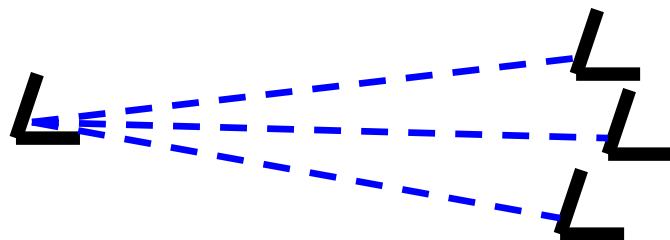
行または列が縮退する場合はダメ。

偏極モードが縮退する場合

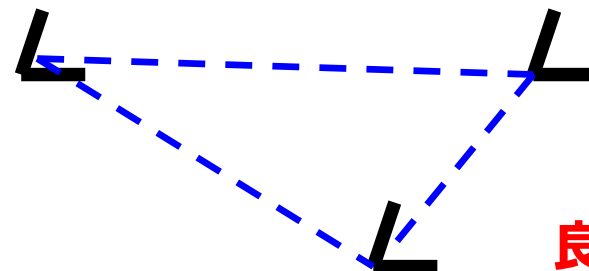
検出器間で重力波の位相が変化しないとモードの見分けがつかない。

➡ 少なくとも重力波の一波長分は離す必要がある
(DECIGO の場合、アーム長の~100 倍以上)

検出器配置が幾何学的に縮退する場合



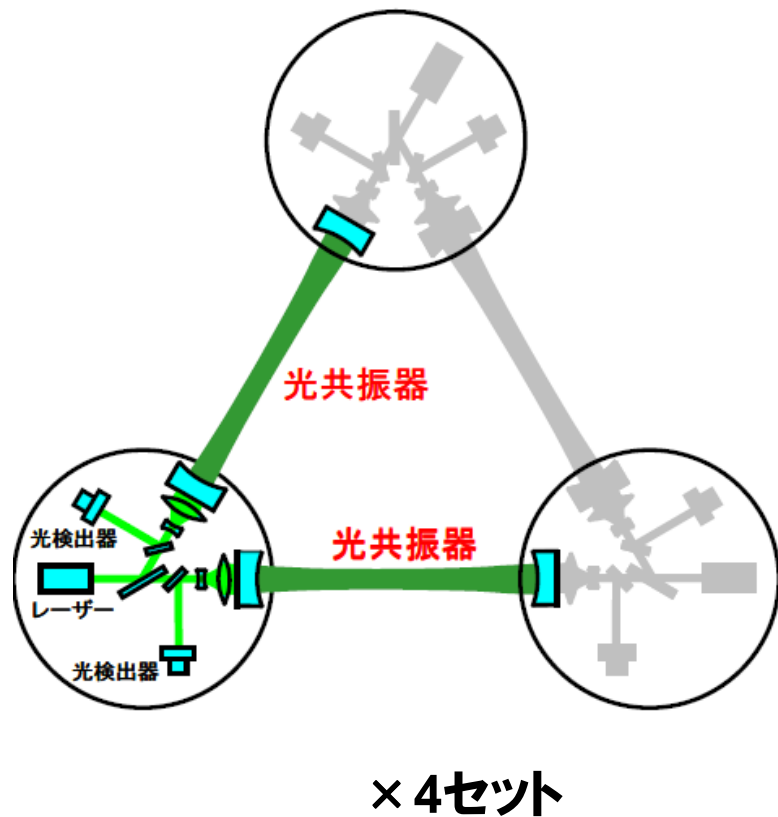
悪い例



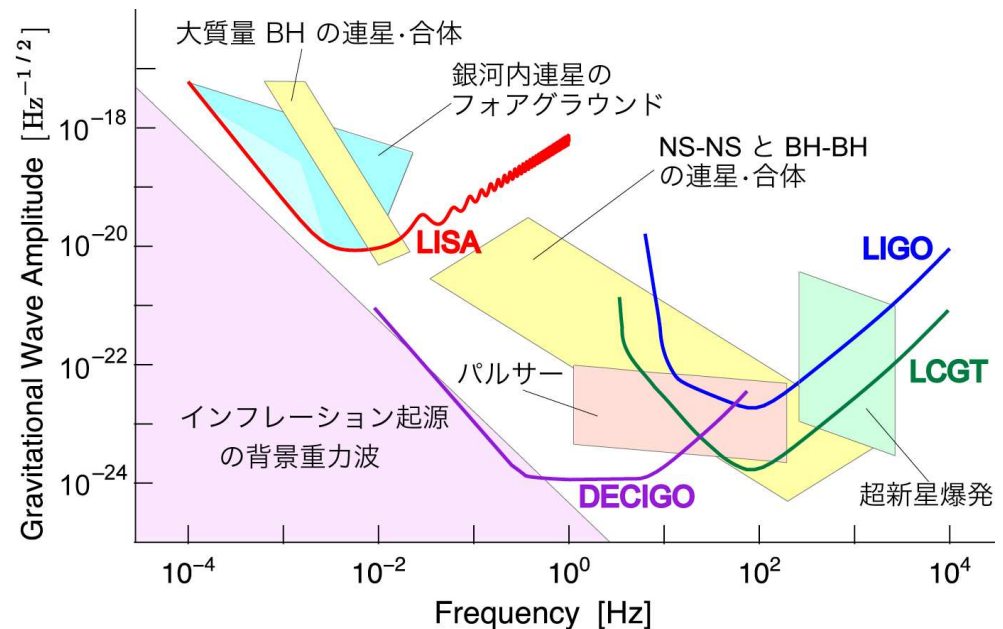
良い例

DECIGO

Deci-hertz Interferometer
Gravitational wave **O**bservatory

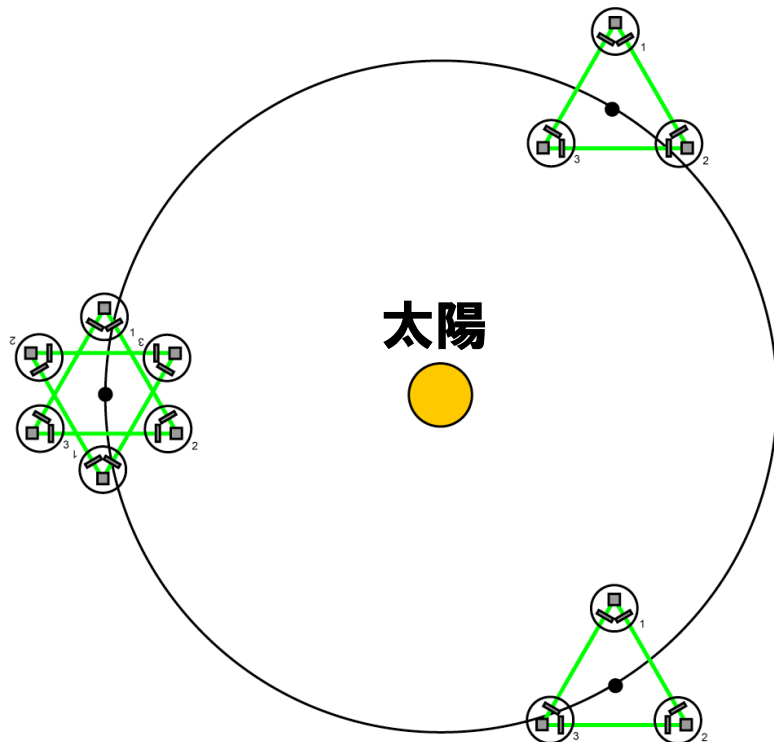


- differential Fabry-Perot type
- 1クラスターに干渉計3台
- アーム長: 1000 km
- フィネス: 10
- 中間質量 BH の連星、
 中性子星連星、
 インフレーション起源の背景重力波



モード分離のための検出器配置

地球公転軌道上に
4つのクラスター



DECIGO のターゲット重力波

$$0.1 \text{ Hz} \quad \longleftrightarrow \quad \lambda = 3 \times 10^6 \text{ km} \approx \frac{1}{50} \text{ AU}$$

➤ クラスター2つ (星型配置)

距離が近すぎる

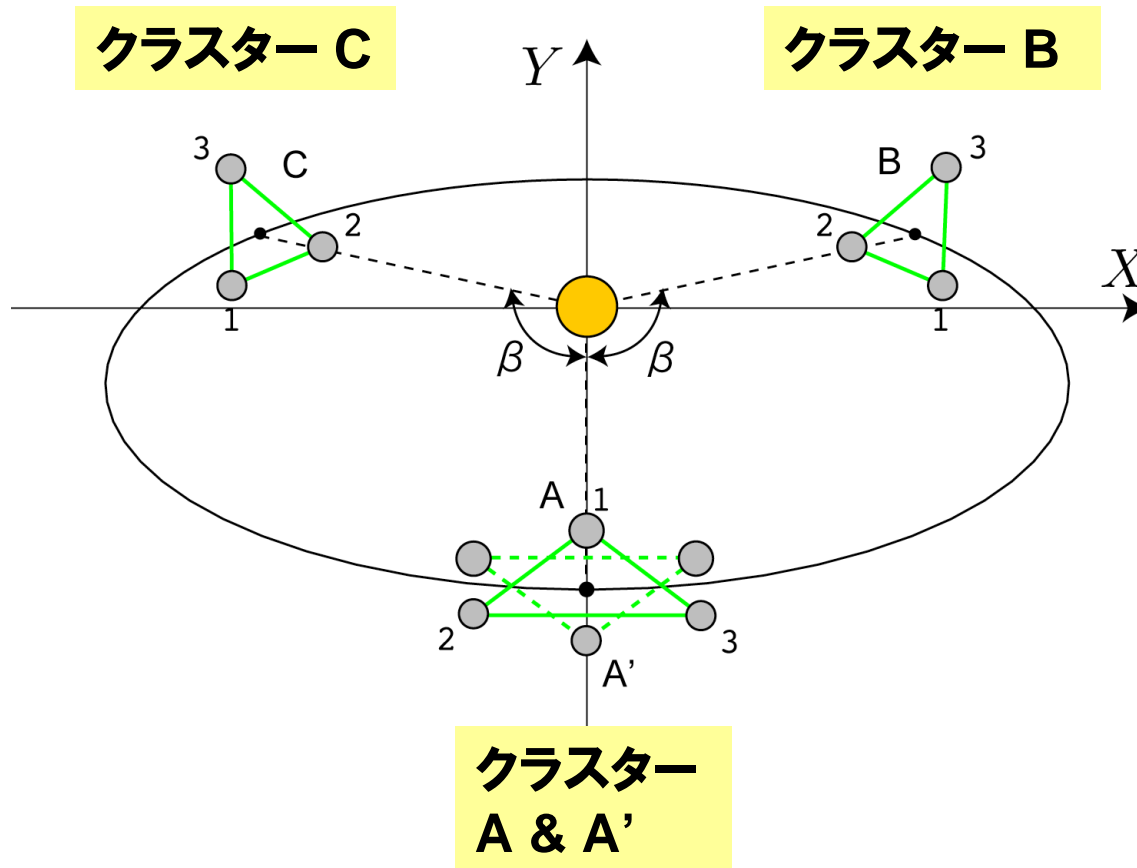
独立な相関信号は2つしか取れない。
2つの偏極モードのみ分離可能。

➤ クラスター4つ

距離がやや遠い

独立な相関信号は3つ以上
3つ全ての偏極モードを分離可能

分離に用いる相関信号



レコード盤軌道の4つの
クラスターを仮定。

相関信号

(AA', AB, AC, BC,
A'B, A'C) $\times 9$
= 54 リンク

内部回転のパラメータに
ついては最適化

パラメータ β

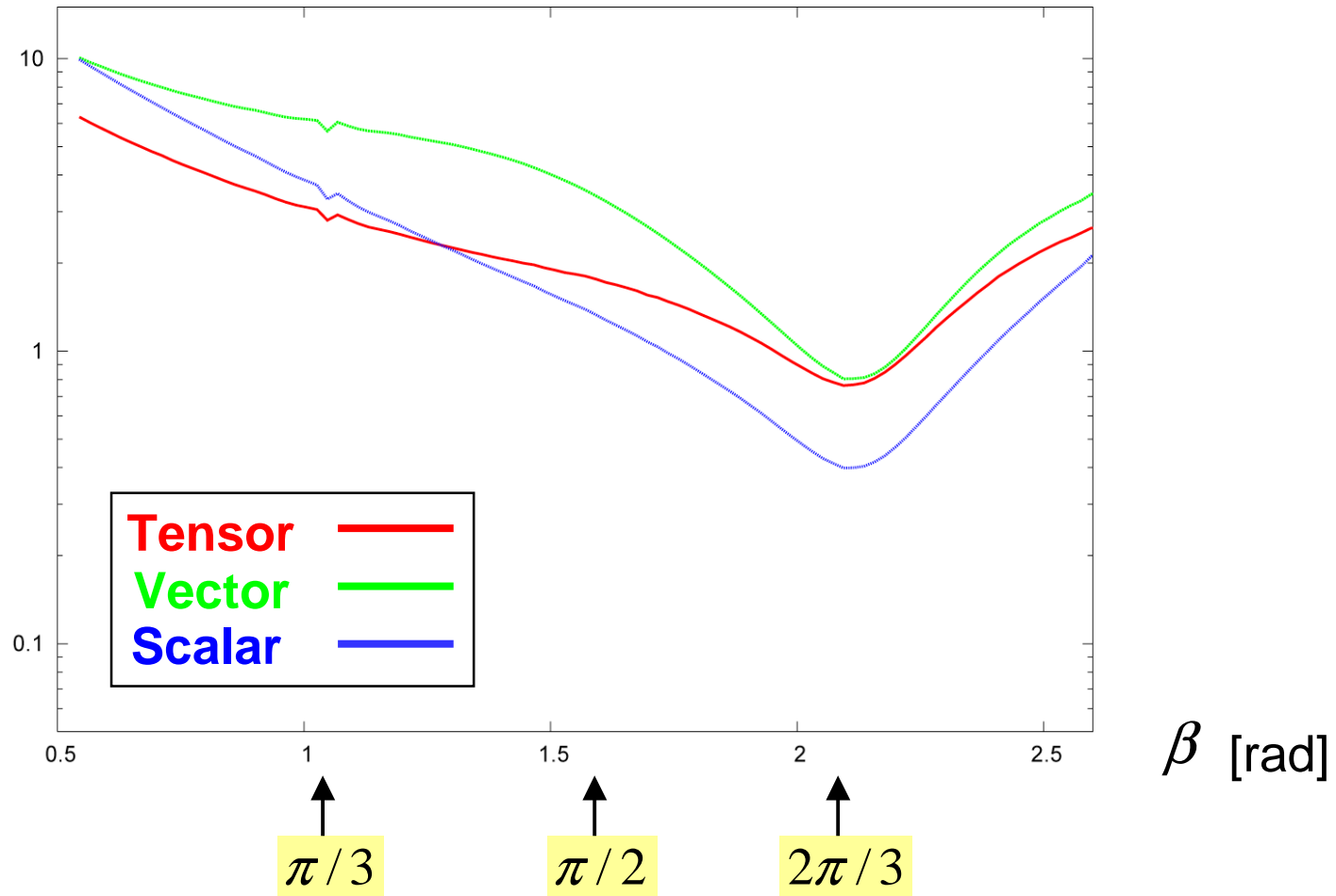
(DECIGO のデフォルト
では $\beta = 2\pi/3$)

SNR

$$h_0^2 \Omega_{\text{gw}} = 10^{-14}$$

T = 3 yr

に対する
SNR



検出器間距離は遠いが、相関信号の数で SNR を稼げる

DECIGO のサイエンスとして

デフォルト DECIGO での相関解析 (星型配置)

クラスター A と A' で相関をとる。

$h_0^2 \Omega_{\text{gw}} \sim 10^{-16}$ が検出可能 (ただし、偏極モードは区別出来ない)

角度分解能

角度分解能 $\sim \frac{\lambda}{D}$ \rightarrow クラスタ B, C はなるべく離して置きたい

スカラー・ベクトル背景重力波

DECIGO のデフォルトのサイエンスは維持しつつ、
クラスター B, C を有効利用



$\beta = \pi/3 \sim \pi/2$ の場合、 $h_0^2 \Omega_{\text{gw}} \sim 10^{-14}$

まとめ

- 重力波偏極モードの観測により、修正重力理論のモデルに依存しない検証が可能
- クラスタ B, C も用いれば、テンソル・ベクトル・スカラーの3モードが分離可能
- スカラー・ベクトル背景重力波への感度 $h_0^2 \Omega_{\text{gw}} \sim 10^{-14}$
- しかも、DECIGO デフォルトのサイエンスは全く犠牲にしない
- その他の検出器配置の可能性

Overlap reduction 関数の
時間変化を利用する場合

[Seto 2007]

