
宇宙共振型重力波望遠鏡

安東 正樹 (東京大学 理学系研究科)

ポスト特定領域研究会議 (2005年07月30日)

イントロダクション (1)

- 概要と目的 -

● 宇宙共振型重力波望遠鏡

人工衛星に共振型重力波検出器を搭載

人工衛星の回転周波数と検出器の共振周波数を同期

➡ 低周波数帯の重力波を観測

2kgのAI製アンテナ (小型衛星に搭載できるもの) で

感度: $h \sim 10^{-18}$ (1年間の観測)

観測周波数帯: DC - 10Hz 程度

➡ 過去の観測結果を3-4桁上回る感度

観測ターゲット

連星からの連続重力波 (MBH連星, BH連星, NS連星, WD連星 等)

バックグラウンド重力波 (MBH連星, インフレーション起源 等)

バースト重力波 (BH連星合体, BH準固有振動)

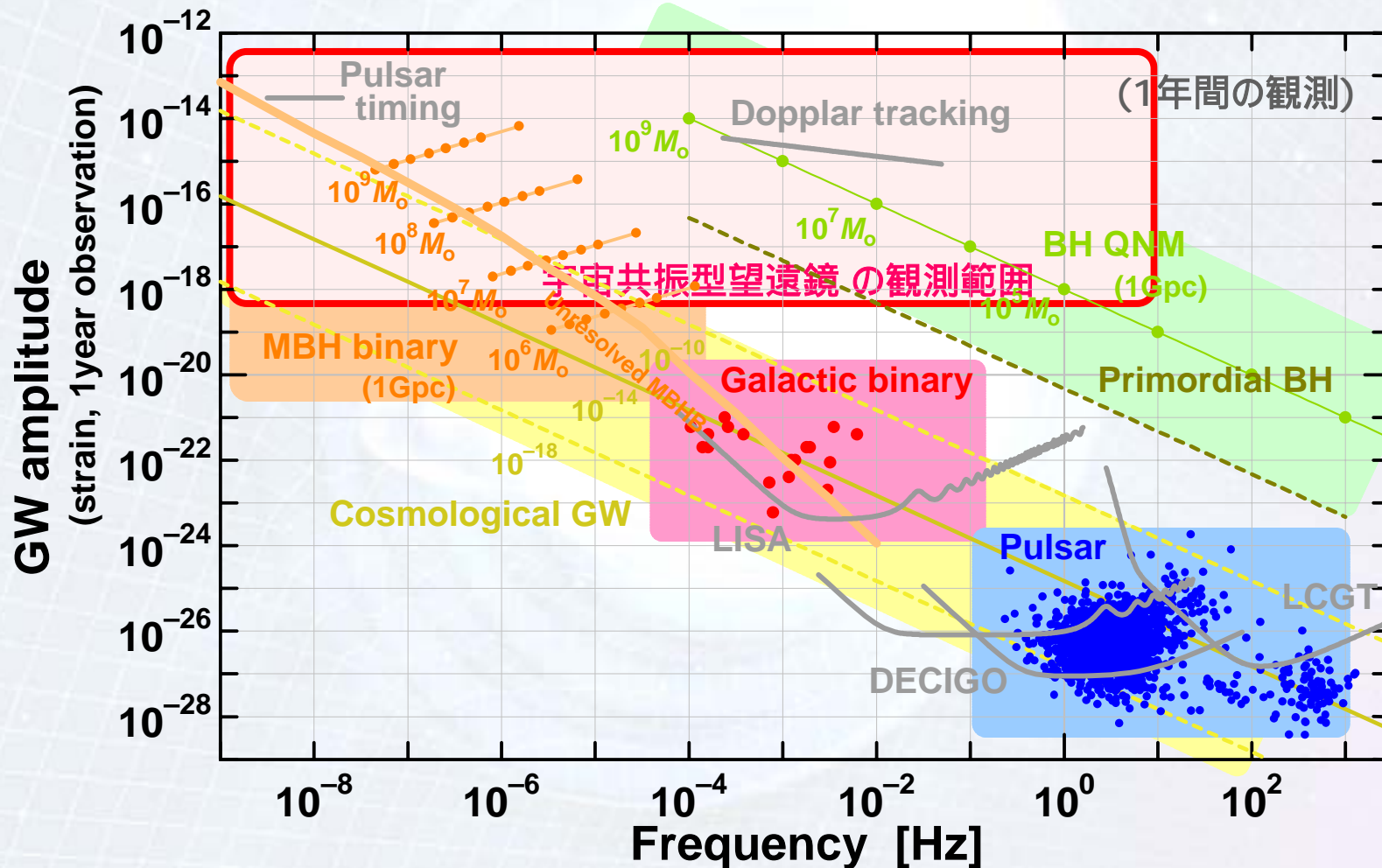
➡ これまでに行なわれた事のない観測
他ではできない観測

ができる

イントロダクション (2)

- 感度と観測ターゲット -

● 重力波検出器の感度と主な重力波源



宇宙共振型望遠鏡 (1)

- 望遠鏡概要 -

● 宇宙共振型重力波望遠鏡

共振型重力波検出器

重力波による潮汐力を検出
弾性体の共振周波数で高い感度をもつ

人工衛星に搭載し、衛星ごと回転させる

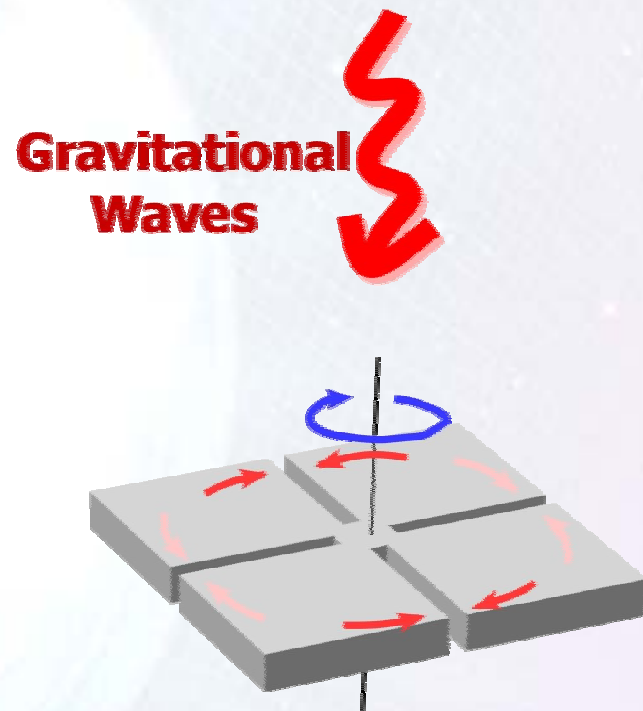
低周波数帯の重力波による潮汐力が
回転周波数 $\times 2$ の周波数に
アップコンバートされる

➡ (回転周波数 $\times 2$) - (アンテナの共振周波数)
の周波数を持つ重力波を観測できる

人工衛星での回転

回転による振動がない
地球重力の影響を受けにくい
観測ターゲットを (比較的) 自由に選択できる

➡ これまでにない重力波観測手法



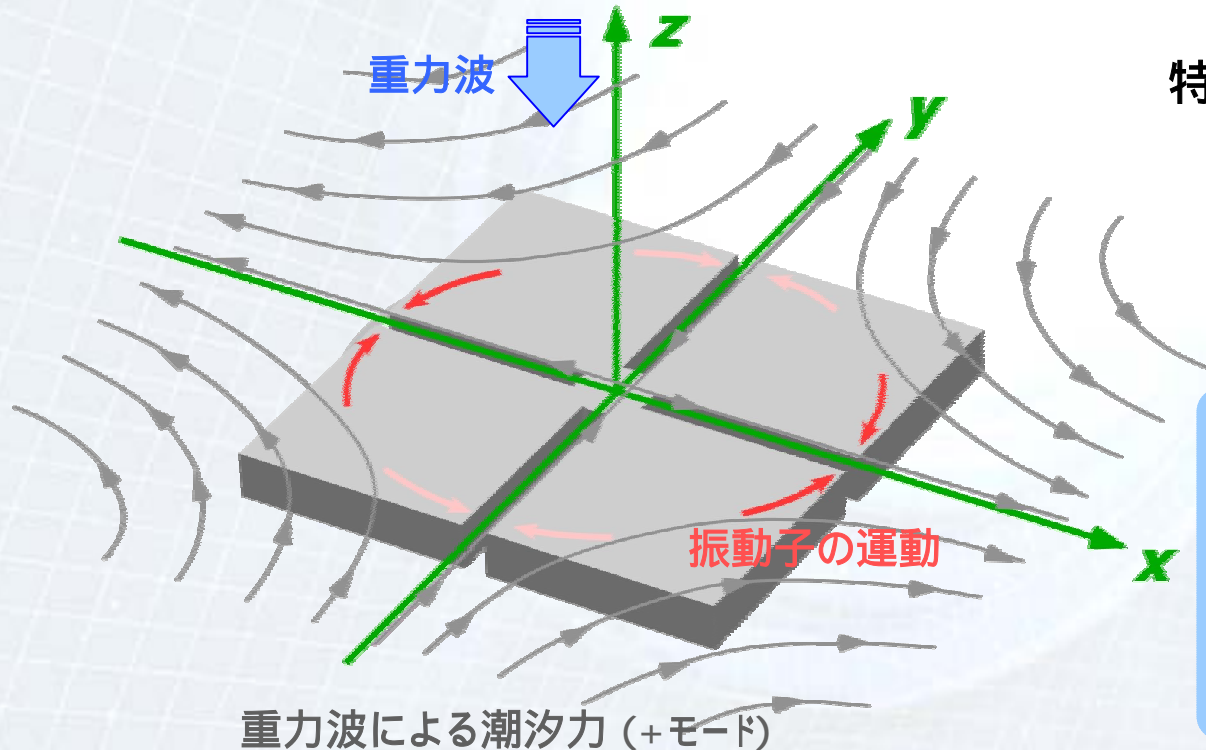
小型衛星でのパラメータ
アンテナ共振周波数 : 10Hz
アンテナ質量 : 2kg
衛星回転 : 5回転/sec

宇宙共振型望遠鏡 (2)

- 四重極アンテナ -

● 四重極アンテナ

4つの振動子で構成されたディスクアンテナ
重力波による潮汐力 (四重極) に感度を持つ



特徴:

比較的低い共振周波数
観測用の振動モードが分離
他自由度は硬い

小型アンテナでのパラメータ

材質: アルミニウム

サイズ: 100 x 100 x 20 (mm)

アンテナ質量: 2kg

共振周波数: 10Hz

Q値: 10^6

宇宙共振型望遠鏡 (3)

- 重力波への感度 -

● 重力波への感度

運動方程式 (振動子一つについて)

$$\underbrace{\frac{2}{3}ML^2}_{\text{換算質量}} \left(\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{\theta} + \omega_0^2\theta \right) = \underbrace{-\frac{1}{4}ML^2\ddot{h}_+}_{\text{重力波による力}}$$

θ : 回転角, M : 振動子の質量
 ω_0 : 共振角周波数, Q : Q値



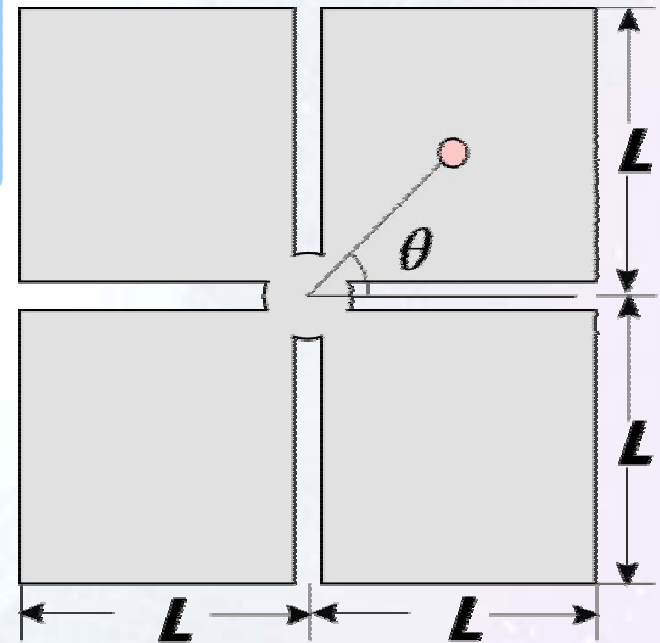
フーリエ変換して整理

$$|\tilde{\theta}(\omega_0)| = \frac{3}{8}Q \times |\tilde{h}_+(\omega_0)| \quad (\text{共振周波数での応答})$$

小型アンテナでは...

(100 x 100 x 20 アルミニウム,
共振周波数 : 10Hz, Q値 : 10⁶)

$$\theta = 3.8 \times 10^5 h_+$$



宇宙共振型望遠鏡 (4)

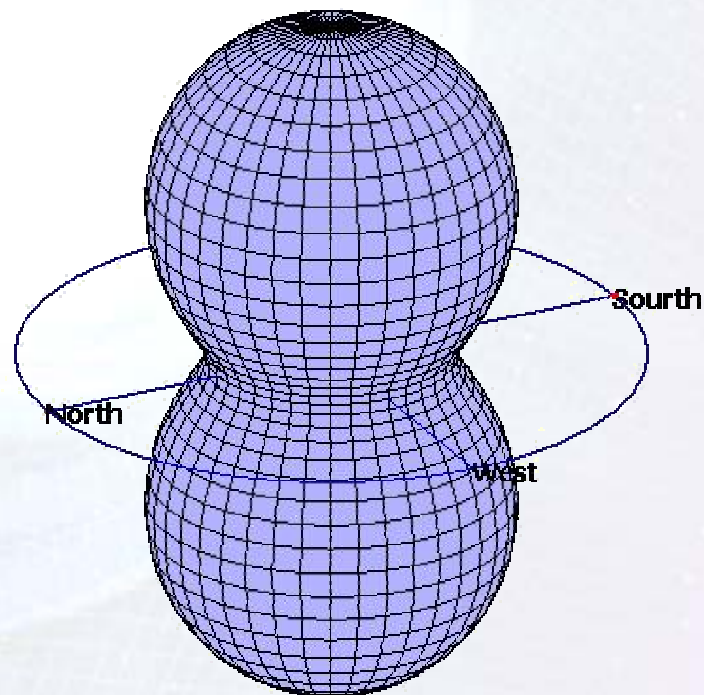
- 指向性 -

● 指向性

干渉計型重力波検出器とほぼ同じ
2つの独立な信号 (h_+ , h_x に対応) が得られる



回転軸方向で最大
回転軸と垂直な方向で最小
(軸方向の 1/8, 無偏波の場合)



宇宙共振型望遠鏡 (5)

- 雑音源 -

● 感度を制限する雑音

回転に同期しない雑音

- ➡ 振動子の熱雑音
- ➡ センサ (トランスデューサ) の雑音
- 衛星の振動

回転に同期する雑音

- ➡ 天体の重力場の影響
- 地磁気の影響
- 太陽風の影響
- 衛星に起因する重力, 電磁力
- 非一様回転の影響

宇宙共振型望遠鏡 (6)

- 熱雑音 -

● 熱雑音

振動子に働く熱揺動力に起因する雑音
原理的な感度限界を与える
温度, Q値, アンテナの形状に依存

熱揺動力 (揺動散逸定理より)

$$\langle f_T^2(\omega) \rangle = \frac{4\mu\omega_0^2 k_B T}{\omega Q}$$



$$\tilde{h}_{\text{thermal}} = 8 \sqrt{\frac{2k_B T}{3QML^2\omega_0^3}}$$

μ : 換算質量,
 k_B : 振動子の質量, T : 温度
 ω_0 : 共振角周波数, Q : Q値

重力波による
外力と比較

小型アンテナでは...

$$\tilde{h}_{\text{thermal}} = 5.7 \times 10^{-15} [1/\text{Hz}^{1/2}]$$

⇨ 1年間 ($t = 3.2 \times 10^7$ sec) の観測で

$$h_{\text{thermal}} = 2 \times 10^{-18}$$

宇宙共振型望遠鏡 (7)

- トランスデューサ -

● センサの雑音

熱振動レベルより良い感度である必要がある

小型アンテナでは...

$$\tilde{x}_{\text{thermal}} = 4.2 \times 10^{-10} \text{ [m/Hz}^{1/2}\text{]}$$



それほど厳しい要求ではない

ただし...

安全係数は必要

高感度 → より広帯域

	感度	制御	アライメント	考慮すべき事項
ファブリ・ペロー共振器	◎	必須	精度が必要	安定なレーザー光源
マイケルソン干渉計	◎	あった方が 良い	そこそこ 精度が必要	レーザー光源
静電型トランスデューサ	○	必要なし	そこそこ 精度が必要	静電場の影響
シャドウセンサー	△	必要なし	厳しくない	
フォトセンサー	△	必要なし	厳しくない	

宇宙共振型望遠鏡 (8)

- 天体の潮汐力の影響 -

● 重力場の影響

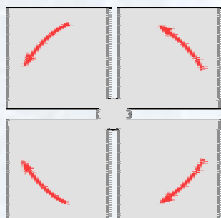
重力場によるアンテナの変形

(重力源がアンテナ平面内にある場合)

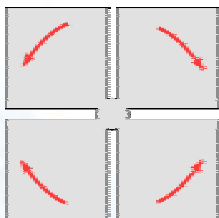
アンテナの微小体積に働く回転力

$$f \simeq \frac{GM_s \rho}{r^2} \frac{y}{R} \left(1 - 3 \frac{x}{r} \right)$$

引力の効果



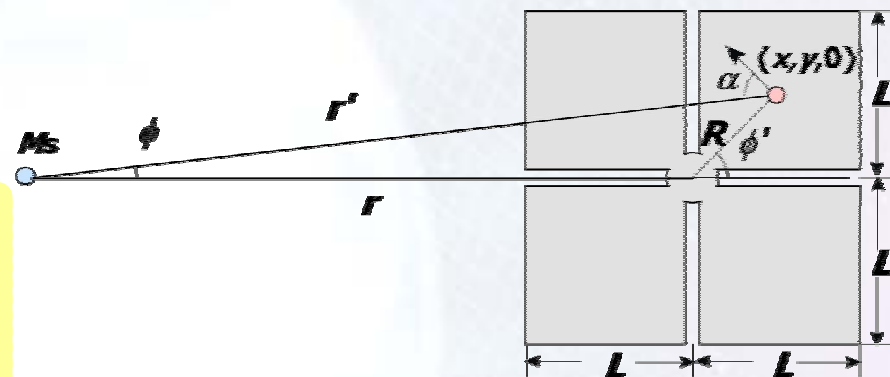
潮汐力の効果



潮汐力による影響 (重力波振幅換算)

$$h_{\text{tidal}} = \frac{3GM_s}{r^3 \omega_0^2}$$

(アンテナの形状に依存しない)



数値を代入すると...

$$h_{\text{earth}} = 6.6 \times 10^{-12}$$

$$h_{\text{sun}} = 3.0 \times 10^{-17}$$

地球からの距離: 3.6×10^4 km
(静止衛星軌道高度)

太陽からの距離: 1.5×10^{11} km

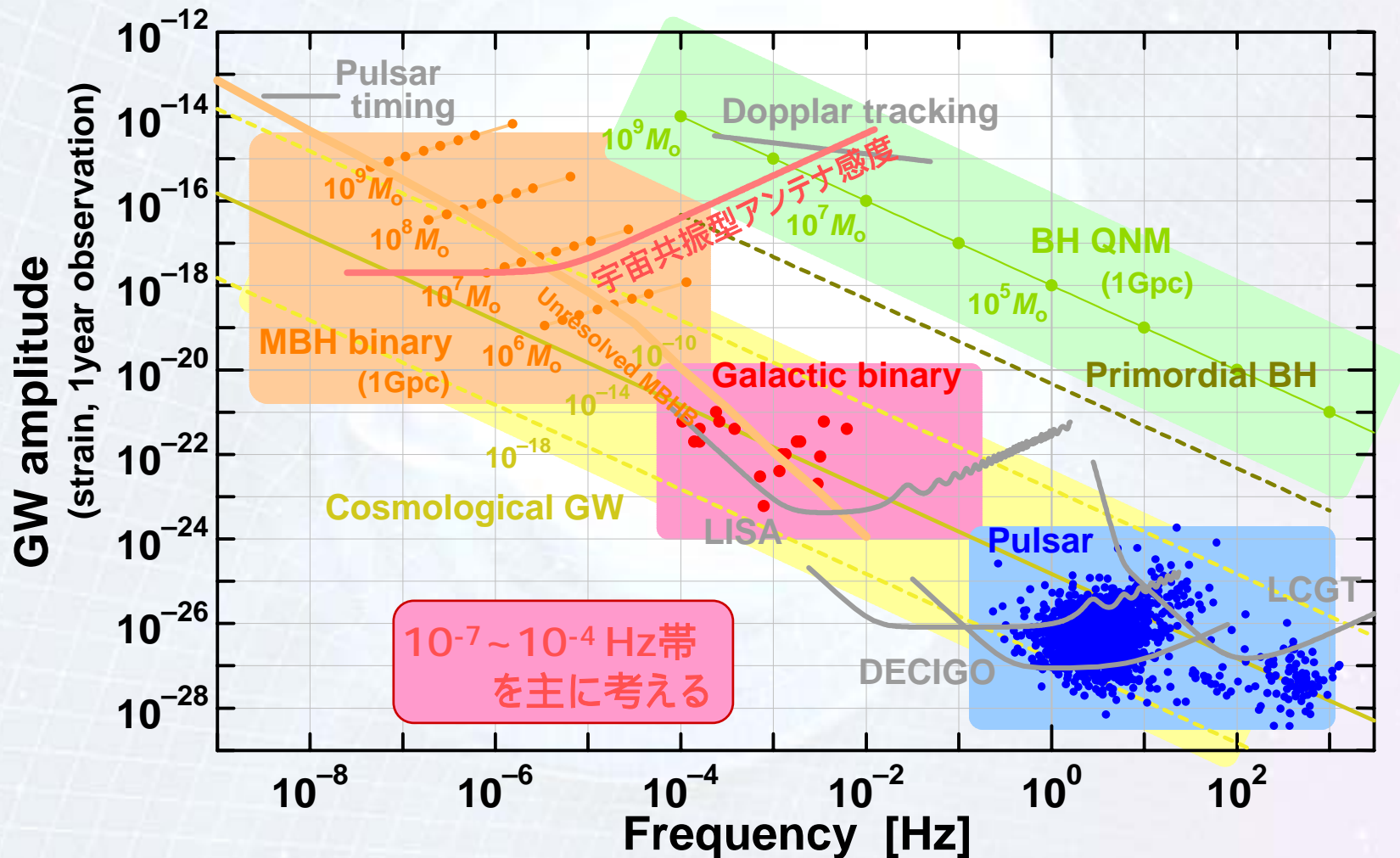
⇒ 影響を避ける工夫

軌道, 衛星スピン軸方向
データ解析

観測ターゲット (1)

- 概要 -

- 観測対象：連続重力波, バックグラウンド重力波, バースト重力波



観測ターゲット (2)

- 連続重力波 -

● 連続重力波

SMBH連星からの重力波

$$h \sim 10^{-14} \cdot x^{-1} \left(\frac{m_1}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{m_2}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{1 \text{ Gpc}}{r} \right)$$

$$f = 6.4 \times 10^{-4} \cdot x^{-\frac{3}{2}} \left(\frac{10^8 M_\odot}{m_t} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ [Hz]}$$

ここで、合体までの時間:

$$t_c = 9.7 \cdot x^4 \left(\frac{10^8 M_\odot}{m_1} \right) \left(\frac{10^8 M_\odot}{m_2} \right) \left(\frac{10^8 M_\odot}{m_t} \right) \text{ [sec]}$$



合体1年前で

$m_1 = m_2 = 10^8 M_{\text{sun}}$ のとき

$$h \sim 2.0 \times 10^{-16}$$

$$f \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ Hz}$$

合体イベントは

1event/year が期待できる



合体100年前以内のもの:
100個程度ある

BH準固有振動からの重力波

$$h \sim 10^{-15} \left(\frac{m}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{1 \text{ Gpc}}{r} \right)$$

$$f \sim 10^{-3} \left(\frac{10^8 M_\odot}{m} \right) \text{ [Hz]}$$



$m = 10^8 M_{\text{sun}}$ のとき

$$h \sim 10^{-15}$$

$$f \sim 10^{-3} \text{ Hz}$$

観測ターゲット (3)

- バックグラウンド重力波 -

● バックグラウンド重力波

宇宙論的バックグラウンド重力波

$$h_c = 1.5 \times 10^{-20} \sqrt{\Omega_g} \left(\frac{100}{f} \right)$$

Ω_g : 宇宙が開いているか閉じているかを定める臨界的パラメータと, 周波数 f の重力波エネルギー密度の比



$\Omega_g \sim 10^{-14}$ のとき

$h \sim 1.5 \times 10^{-18}$

$f \sim 1.0 \times 10^{-7}$ Hz

インフレーションによる重力波

相転移の際の重力波

宇宙ひもからの重力波

重力波背景輻射

連星からの重力波によるバックグラウンド

MBH連星

$$h_c \sim 10^{-16} \left(\frac{f}{10^6 \mu\text{Hz}} \right)^{-2/3}$$



十分検出可能

その他もろもろ (1)

- 衛星軌道の選択 -

●人工衛星軌道の選択

地球重力場による雑音 (回転にコヒーレントな雑音) を避けることが重要

観測ターゲットも考慮

ラグランジュ点

地球から十分離れている

→ 地球重力場の影響を、ほぼ無視できる

回転軸：ほぼ任意に選ぶ事ができる

地球周回軌道 (1)

回転軸：地球方向を向く

→ 地球重力場の影響を受けにくい

観測点：軌道面方向を走査

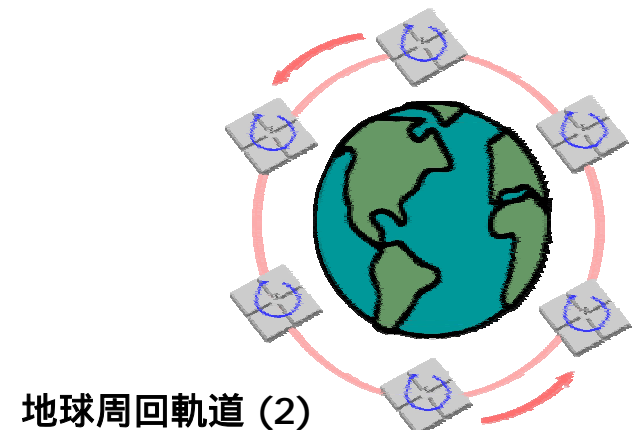
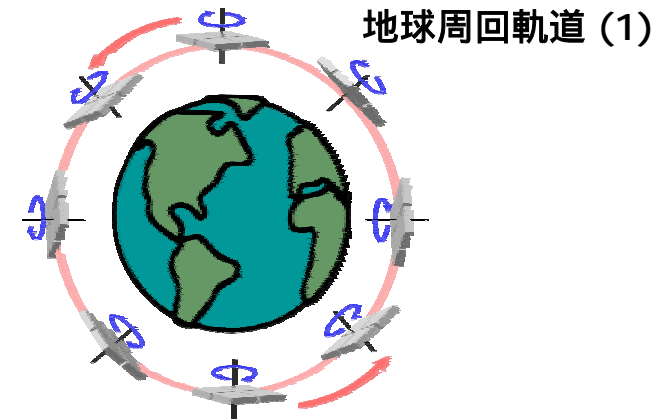
太陽電池パネルをどう付けるか

地球周回軌道 (2)

回転軸：周回軌道面に垂直

→ 地球重力場の影響は後から除去

観測点：同じ方向を観測



その他もろもろ (2)

- データ処理 -

● データ処理の流れ

1. 与えられた回転数分 (例: 1000回転) のデータを取り出す
2. 10Hz成分をロックイン検波
2位相検波: \cos 成分 $\rightarrow x$, \sin 成分 $\rightarrow y$
3. 上記を繰り返し、 x , y の時系列データを得る
4. データの補正
衛星のドップラー効果
天体重力場の影響など
5. データ解析
連続波解析 (フーリエ解析)
チャープ波解析 (マッチド・フィルタリング)
バースト波解析 (非定常成分の取り出し)
バックグラウンド重力波解析
波源パラメータ (位置, 偏波) の再構築

その他もろもろ (3)

- 形状の工夫 -

● 形状の工夫

円筒状

衛星への収容がしやすい (?)
感度はやや劣る

環状

円周部に質量を集中
→ 同じ質量で感度を向上

集中マス状

棒の先端にマスを取り付ける
同じ質量での感度は良い
構造が弱く、バランスがとりにくい

トーションアンテナ

高いQ値を実現しやすい
構造が弱くなり易い

.... などなど, 工夫の余地はある

その他もろもろ (4)

- 将来の拡張 -

● 望遠鏡の改良

大型化による感度の向上

サイズ: 10倍 → 1000 x 1000 x 200 (mm)

アンテナ質量: 2t

共振周波数: 10倍 → 100Hz

Q値: 100倍 → 10^8

温度: 低温化 → 4K



$$\tilde{h}_{\text{thermal}} = 1.3 \times 10^{-20} [1/\text{Hz}^{1/2}]$$

1年間 ($t = 3.2 \times 10^7$ sec) の観測で

$$h_{\text{thermal}} = 1.2 \times 10^{-24}$$

複数台による観測

望遠鏡雑音とバックグラウンド重力波の区別

感度の向上

角度分解能の向上 → 重力波源の位置の特定, 全天マッピング

フェイク信号の除去

まとめと結論

● 宇宙共振型重力波望遠鏡

人工衛星に共振型重力波検出器を搭載

➡ 低周波数帯の重力波を観測

2kgのAI製アンテナ (小型衛星に搭載できるもの) で
感度: $h \sim 10^{-18}$ (1年間の観測)
観測周波数帯: DC – 10Hz 程度

➡ 過去の観測結果を3-4桁上回る感度

観測ターゲット: 主に大質量ブラックホール

連星からの連続重力波 (MBH連星, BH連星, NS連星, WD連星 等)

バックグラウンド重力波 (MBH連星, インフレーション起源 等)

バースト重力波 (MBH連星合体, MBH準固有振動)

➡ これまでに行なわれた事のない観測,
他ではできない観測 ができる

かつ 技術的には十分実現可能

おわり

終