

低周波重力波検出器の開発 II



安東 正樹, 穀山 渉, 久徳 浩太郎, 石徹白 晃治, 坪野 公夫
(東京大学 理学系研究科)
高森 昭光 (東京大学 地震研究所)

目次

低周波数重力波とその検出

背景 --- 低周波数帯の重力波観測

ねじれ型重力波検出器

磁気浮上型検出器 実験

永久磁石 磁気浮上実験

超伝導磁石 磁気浮上実験

まとめ



低周波数重力波 とその検出

ねじれ型重力波検出器 (1)

● 低周波数の重力波観測

これまでに考えられている検出器

地上重力波検出器 (レーザー干渉計)

振り子によって自由質点を実現
試験マス間の距離変化をレーザー光で測定



振り子の共振周波数 ($\sim 1\text{Hz}$)
以下では、原理的に
感度が (ほとんど) ない

宇宙重力波検出器

原理的には、自由質点の実現可能
地球の重力場勾配雑音を避けることができる



実現するのは大変
(労力, 時間, 費用 ...)



地上での低周波重力波検出器

ねじれ型振り子を利用した重力波検出器

棒状の試験マスの回転変動を測定
回転方向に関しては、共振周波数を下げ易い



低周波数帯まで
感度を持たせることができる

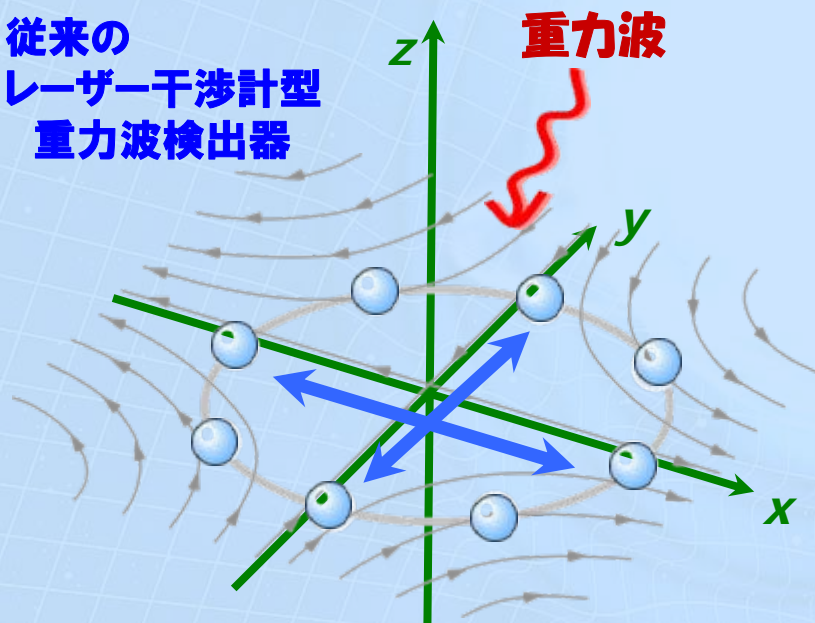
ねじれ型重力波検出器 (2)

● 重力波検出原理

重力波の効果

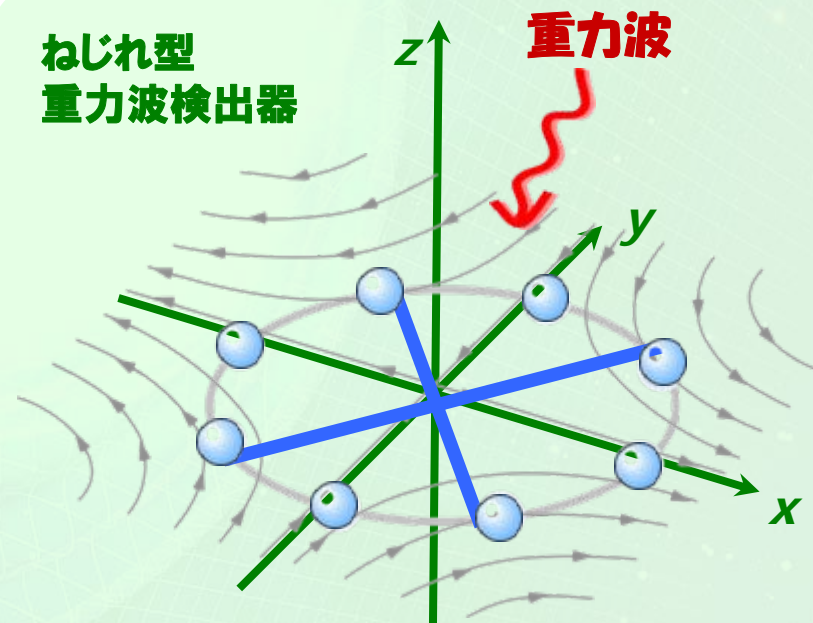
自由質点間の距離の変化, 物体への潮汐力
横波, 四重極特性 (直交する方向で差動に変動)
2つの偏光 (+モード, xモード)

従来の
レーザー干渉計型
重力波検出器



直交する2方向の
差動距離変化を検出

ねじれ型
重力波検出器



直交する2方向の
角度変化を検出

ねじれ型重力波検出器 (3)

ねじれ型重力波検出器

試験マスの回転変動をレーザー干渉計で測定

レーザー光源

安定な固体レーザー光源 (Nd:YAG)
外部共振器による周波数安定化

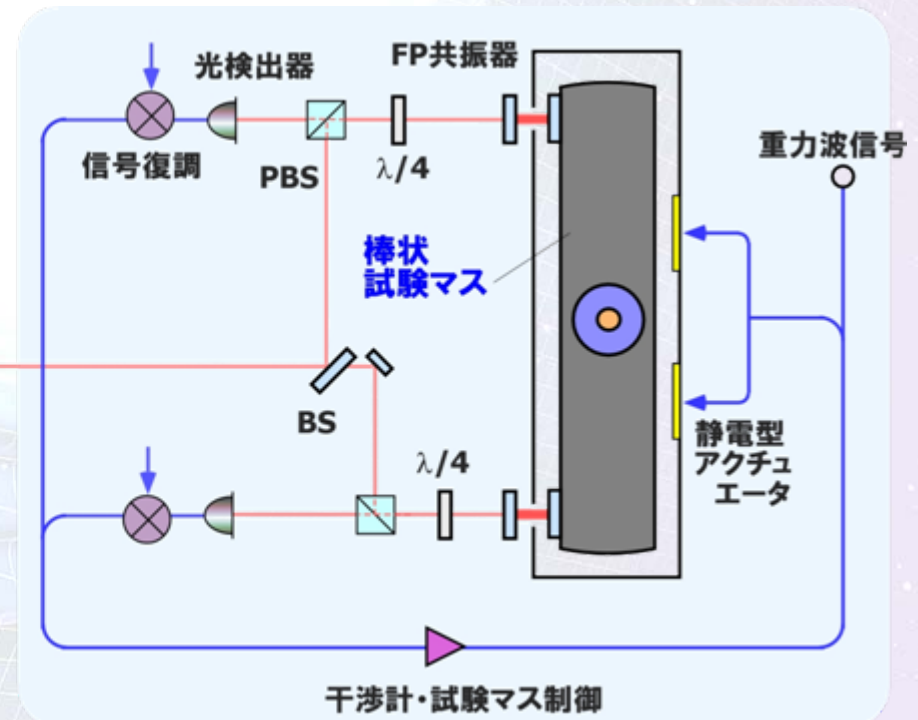
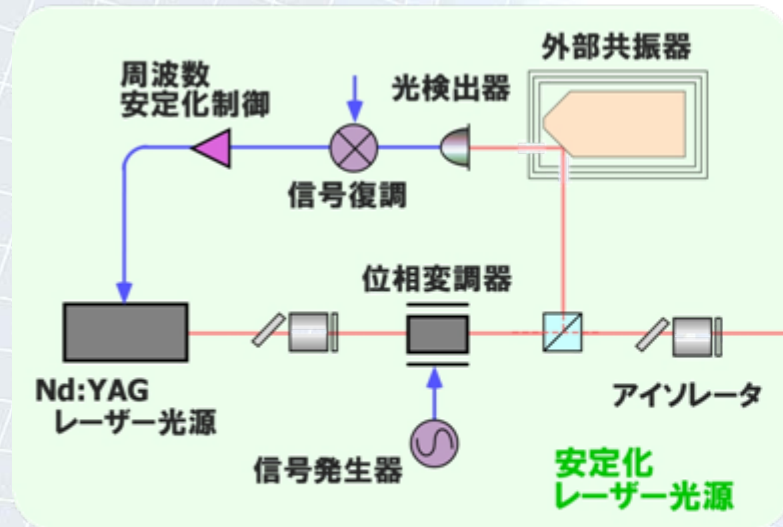
干渉計

短基線長 (~1cm) のFP共振器
試験マス両端の差動変位を測定

試験マス

棒状, 水平面内で回転
支持法: 小さな復元力,

低機械損失, 低摩擦 が重要
→ 1本ワイヤー懸架, 磁気浮上支持



2セット (直交する向きに配置)
の差動回転を観測

ねじれ型重力波検出器 (4)

● 重力波に対する感度

試験マス長 : 20m, 質量 : 10kg

光源 : 1064nm, 100mW

共振器長 : 1cm, フィネス : 100

鏡Q値 : 10^5 , 支持系損失 : 10^{-10}

温度 : 293K

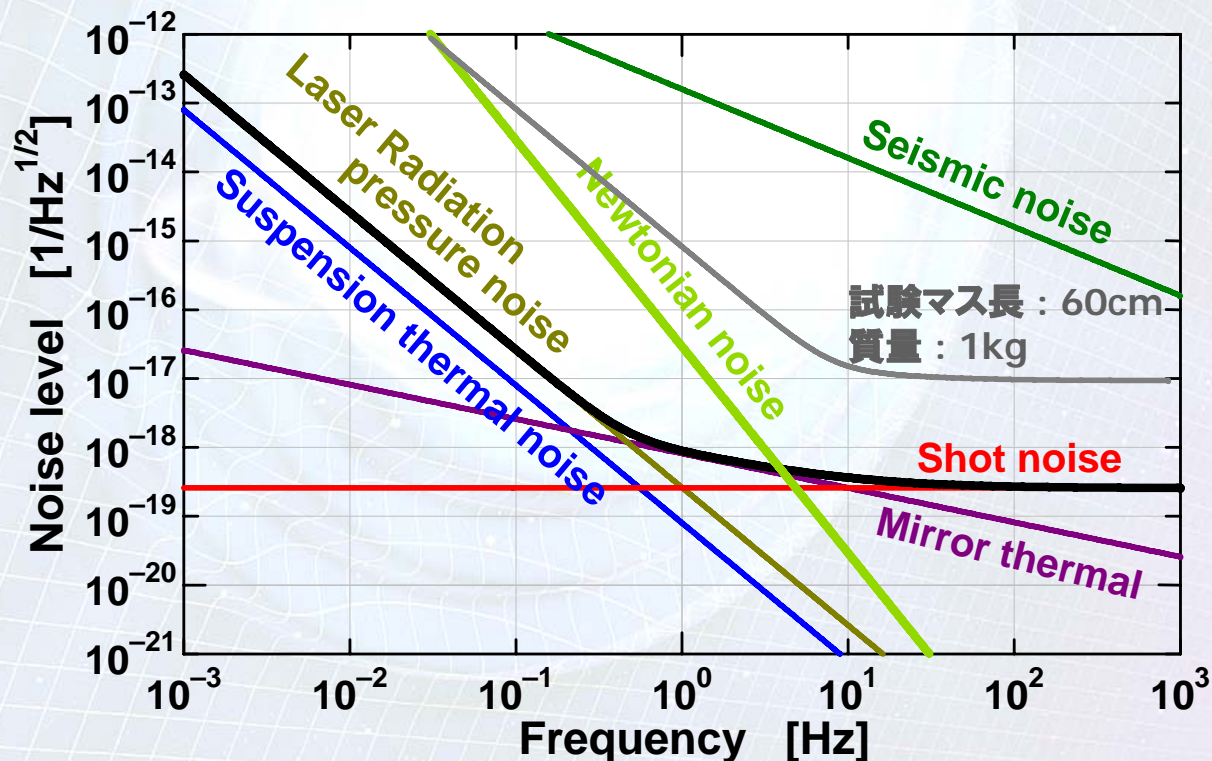
光源周波数雑音 $< 10\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$, CMRR > 100

強度雑音 $< 10^{-7}/\text{Hz}^{1/2}$, RMS変動 $< 10^{-12}\text{m}$

回転地面振動雑音

~ 差動回転を計測 (元の 1/100)

重力場勾配雑音 - 地面振動起因



ねじれ型重力波検出器 (5)

●ターゲットとなり得る重力波源

BH準固有振動からの重力波

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

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

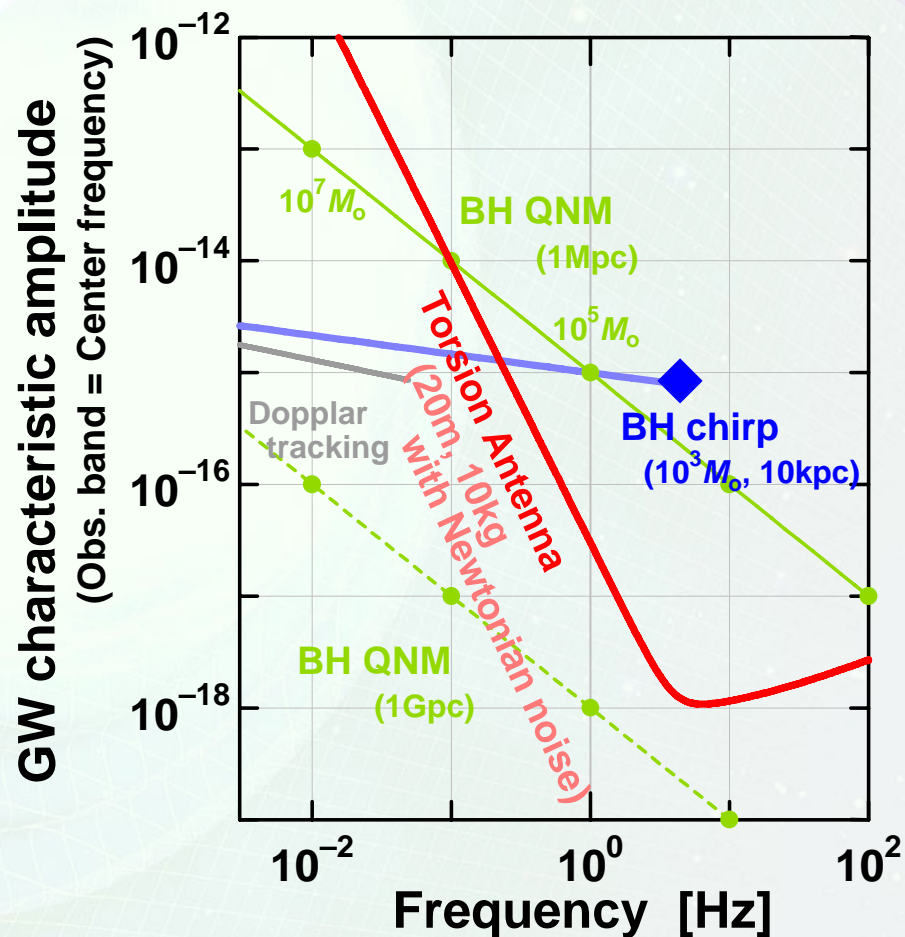
$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 1 \text{ Hz}$
 距離 1Mpc, $m = 10^5 M_{\text{sun}}$

中間質量ブラックホール合体

$$h \sim 10^{-15} \left(\frac{m_c}{10^3 M_{\odot}} \right)^{5/6} \left(\frac{1 \text{ Hz}}{f} \right)^{1/6} \left(\frac{10 \text{ kpc}}{r} \right)$$

$$f \sim 4 \left(\frac{10^3 M_{\odot}}{m_t} \right) \text{ [Hz]}$$

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 4 \text{ Hz}$
 距離 10kpc, $m = 10^3 M_{\text{sun}}$



ねじれ型重力波検出器 (6)

● 試験マスの支持法

要求

- 共振周波数を下げたい → 小さい復元力
- 熱雑音の影響を避ける → 小さいエネルギー損失
- 微小回転を測定する → 小さい摩擦力
- 十分な耐荷重

ねじれ振り子

- 1本のワイヤーで懸架する
- さまざまな実績がある

重力定数の測定 (Cavendish 1798), 重力逆二乗則の検証,
カシミール力の測定, 衛星用スラスターの力測定, LISAの雑音測定, ...

数mHzの共振周波数は実現可能

回転以外の自由度にも敏感

LISA test facility

L. Carbone et al,
COG 22 (2005) S509

- チタンマス (金コート)
- 40mm 中空立方体
(壁の厚さ 2mm)
→ m ~ 80 g
- タングステンファイバー
1m, 直径 25 μ m

Q ~ 3000, f_0 ~ 2mHz

磁気浮上支持

磁気的な力で非接触支持

原理的には復元力が無い → 低周波数で重力波の観測が可能
ワイヤーの摩擦力, 機械損失が無い ← → 磁気摩擦・損失はあり得る

回転以外の自由度は、比較的硬い

微小計測への利用は、これまであまり研究されていない

超伝導重力計: 現在, 世界最高感度をもつ



本研究で
開発する

磁気浮上実験

2つのタイプのプロトタイプ試験

- (1) 永久磁石磁気浮上
- (2) 超伝導磁気浮上

磁気浮上実験 (1)

● 永久磁石磁気浮上実験

棒状マスを
永久磁石によって磁気浮上する実験

目的:

磁気浮上系の安定性の検証
地面振動等の影響
カップリングの大きさの測定

➡ **ねじれ型重力波検出器
の可能性を探る**

概要:

1つの試験マスを浮上保持

試験マス: アルミニウム製, 約450g

鉛直方向, 回転方向の2自由度を制御

制御帯域 ~ 10Hz前後

他の自由度は永久磁石による復元力を利用
大気中での実験 (簡単な風除け)

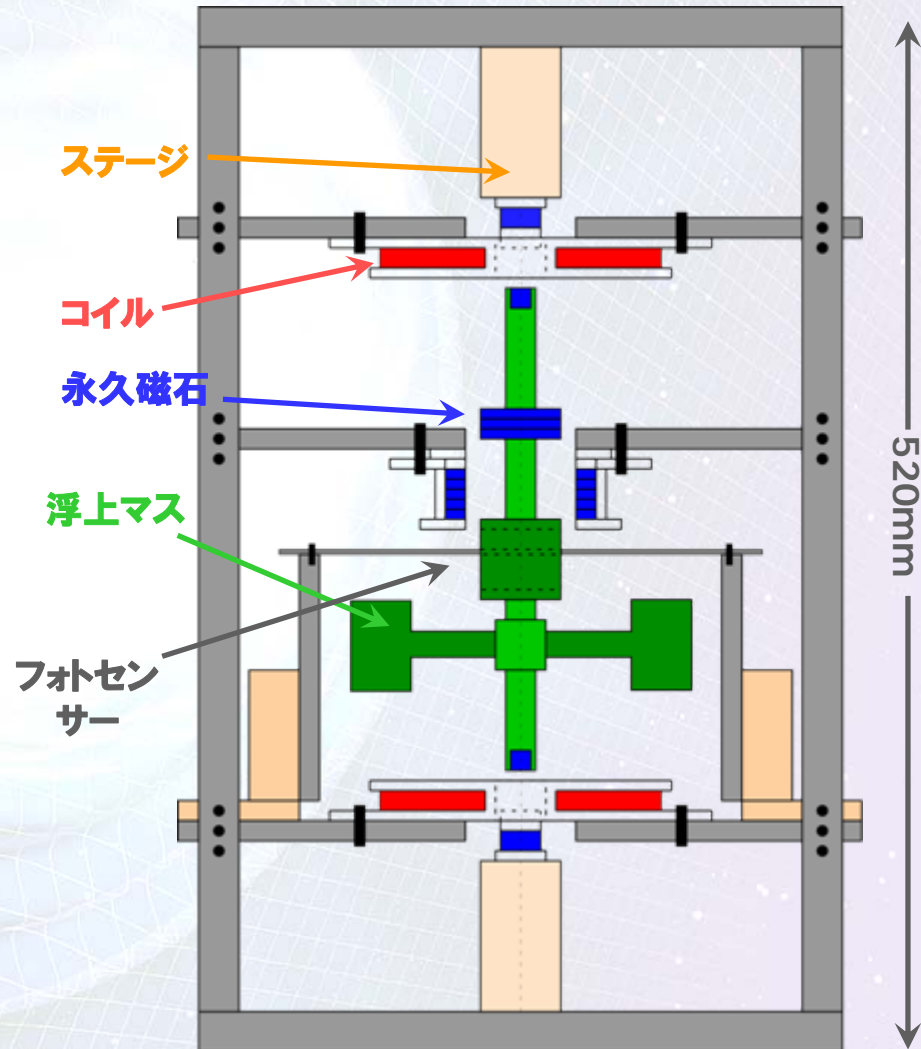
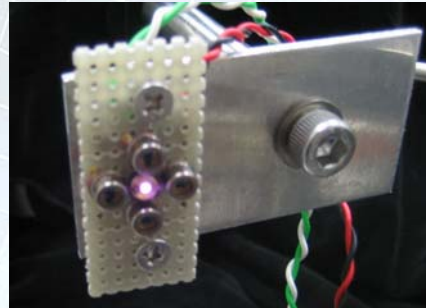


図: 鞍山, 久徳
改訂: 安東

磁気浮上実験 (2)

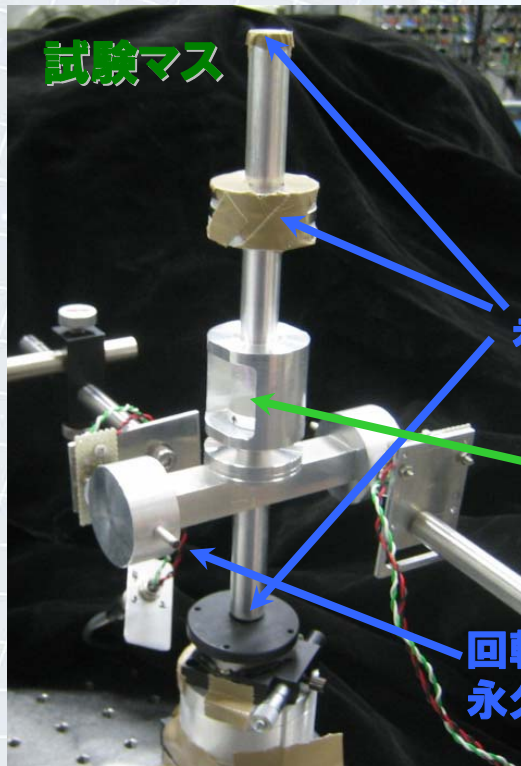
● 実験装置



フォトセンサー

LED+4PDs

→ 角度変動からのカップリングを低減
鉛直方向 1つ, 回転方向 2つ を使用

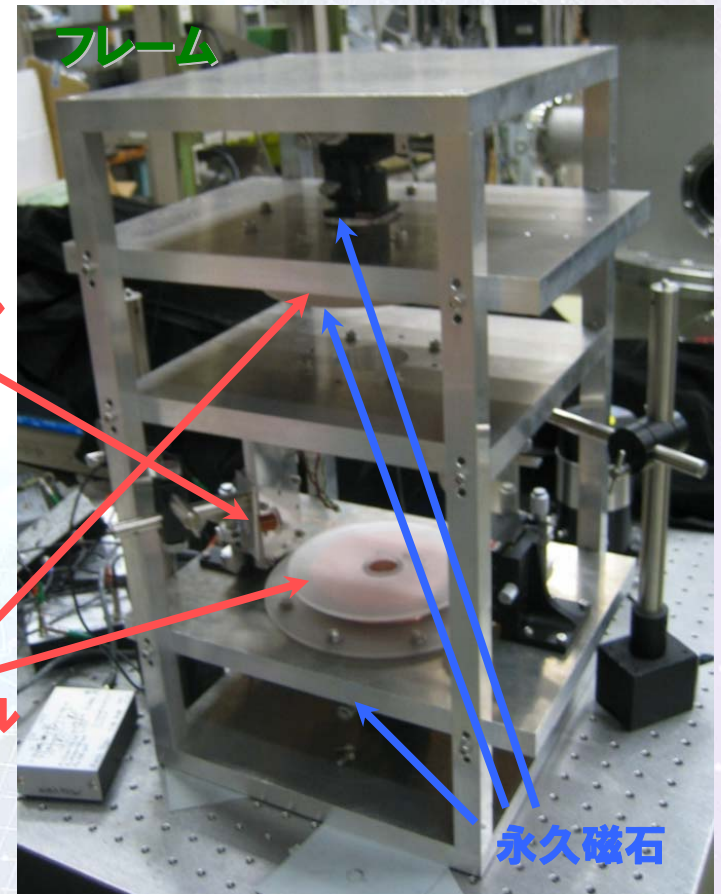


試験マス

永久磁石

鏡

回転制御用
永久磁石



フレーム

回転方向
制御用コイル

鉛直方向
制御用コイル

永久磁石

磁気浮上実験 (3)

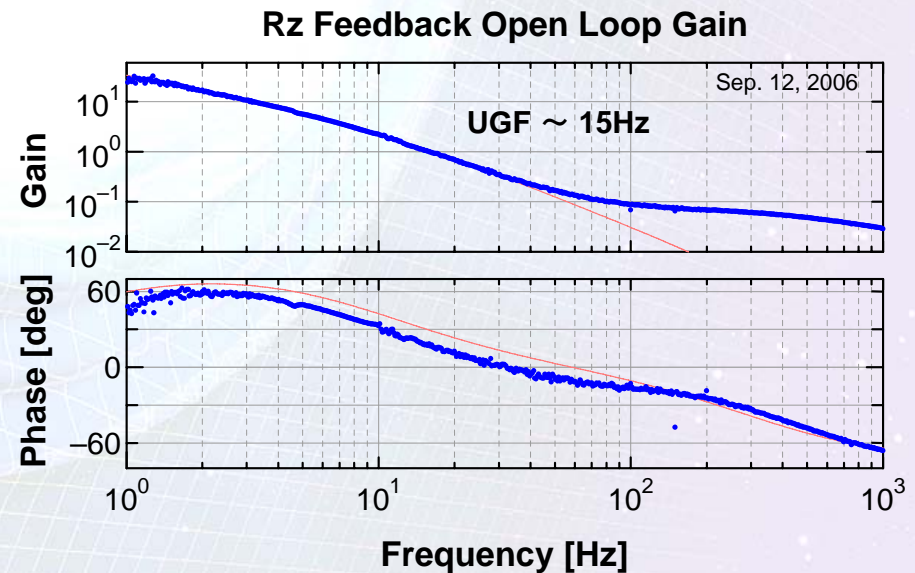
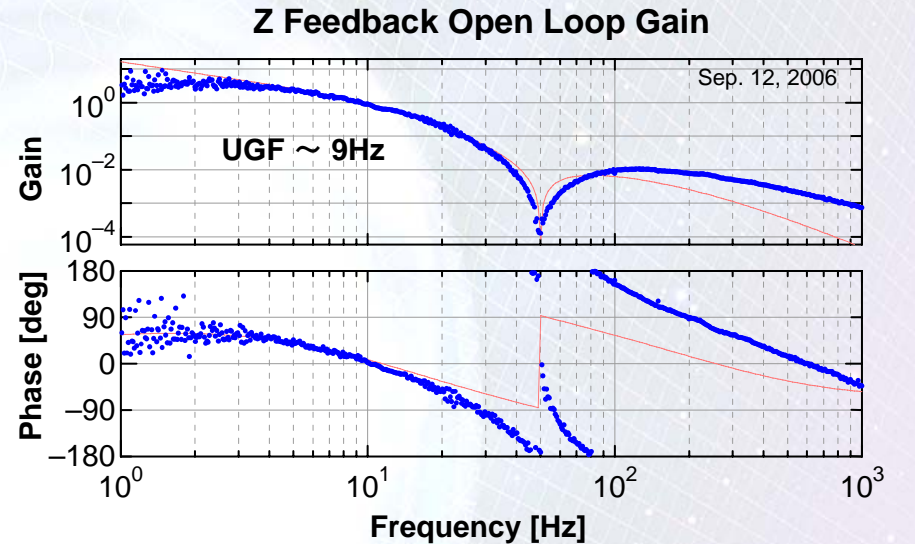
● 制御系設計

鉛直方向制御

UGF ~ 9Hz
1Hzでのゲイン ~ 20dB
50Hzにノッチ
→ ACラインの除去

回転方向制御

UGF ~ 15Hz
1Hzでのゲイン ~ 30dB



磁気浮上実験 (4)

● 実験結果

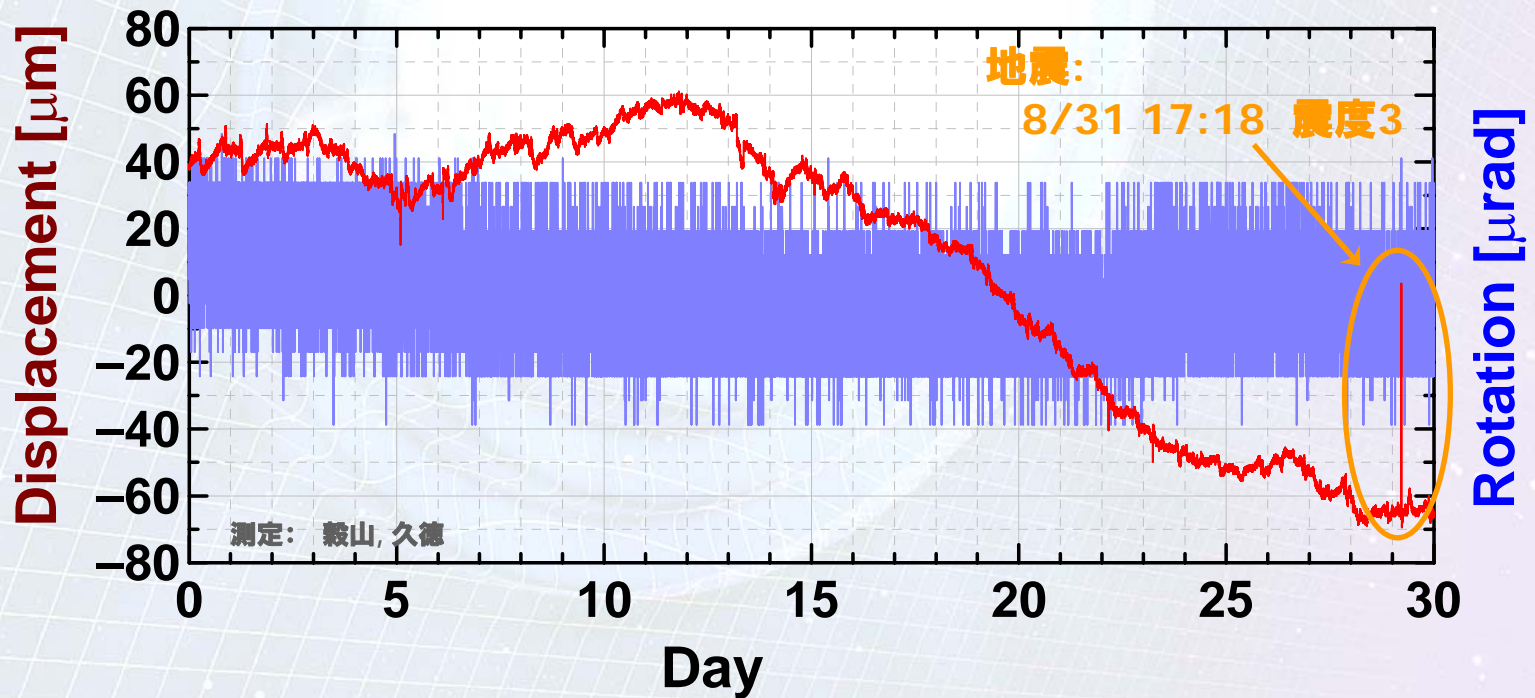
制御によって安定な磁気浮上を実現

30日間の連続動作

誤差信号の評価

鉛直方向変動 : $\pm 60 \mu\text{m}$ 程度

回転方向変動 : $\pm 20 \mu\text{rad}$ 程度 (測定系の雑音で制限)



磁気浮上実験 (5)

● 地震波形データ

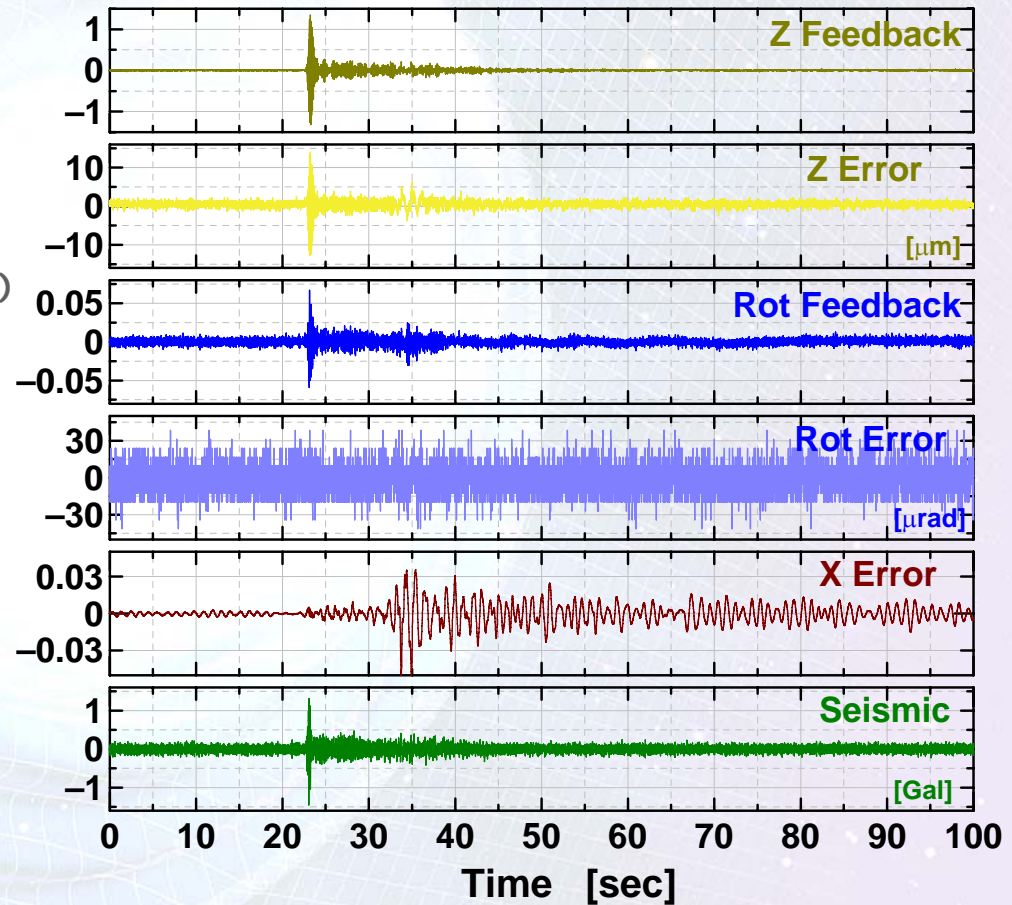
2006年 9月8日 7:51

震源: 千葉県北西部

深さ80km, M3.5

大きさ: 東京都23区で 震度1

(地震発生から地震波到達までの時間 ~ 16sec)



各自由度で地震波を感知

水平面内並進方向 (無制御): やや遅れて変動

← 制御系のカップリングに起因か

磁気浮上実験 (6)

● 超伝導磁石による磁気浮上

超伝導ピン止め効果を利用した磁気浮上

特徴:

超伝導ピン止め効果を利用

→ 浮上のための制御が不要

耐荷重を大きくできる可能性

パルス管冷凍機を使用

冷凍機の振動に配慮

超伝導バルク体

Gd-Ba-Cu-O

Φ 60 mm, t 20 mm

臨界温度 92K

(70K程度で十分なピン止め)



本格的な
検出器として有望?

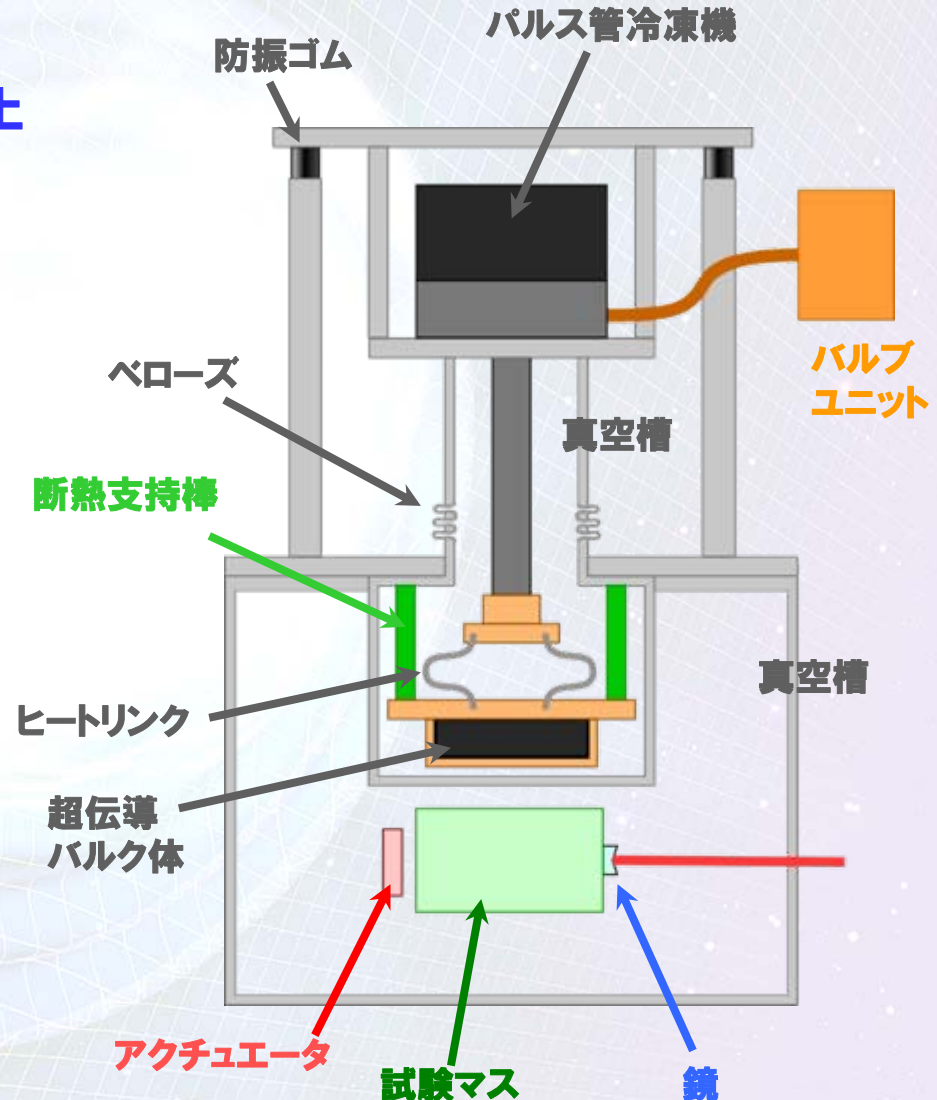
現状:

GM冷凍機タイプ (地震研より借用),

パルス管冷凍機タイプ

(メーカーより借用, 防振装置なし)

→ 大気中で評価試験



磁気浮上実験 (7)

● 超伝導磁石装置写真

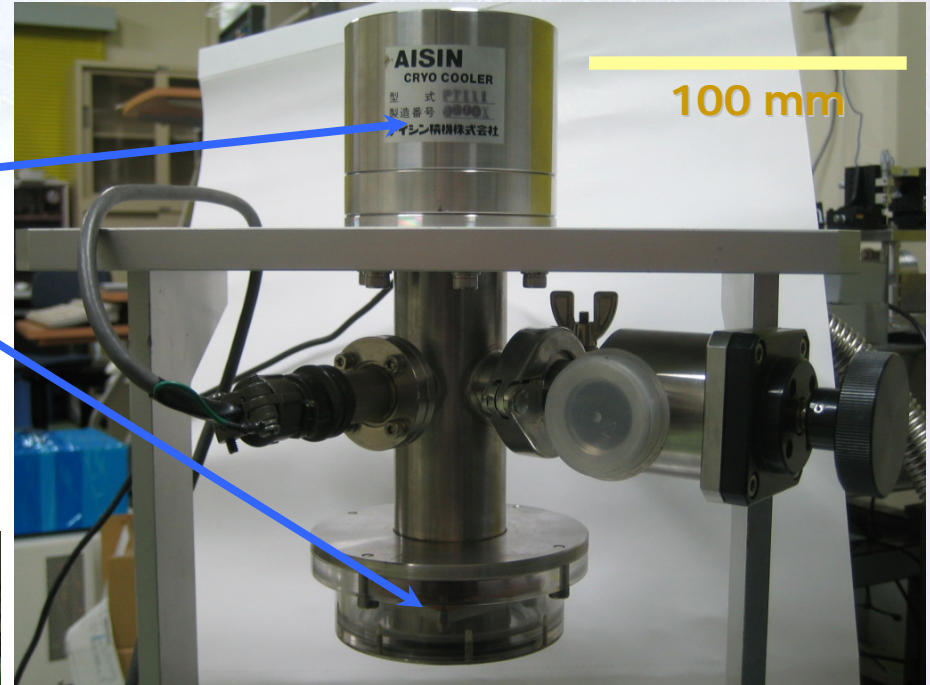
アイシン精機より
借用中のデモ機

パルス管冷凍機

超伝導バルク体

コンプレッサー

バルブユニット



ヒートリンクサンプル
無酸素銅
銀コーティング



磁気浮上実験 (8)

● 性能評価

最大耐荷重:

Φ 70 mm, t 18 mm のNd磁石を使用
→ 1.3kgw 以上の浮上力

磁気摩擦:

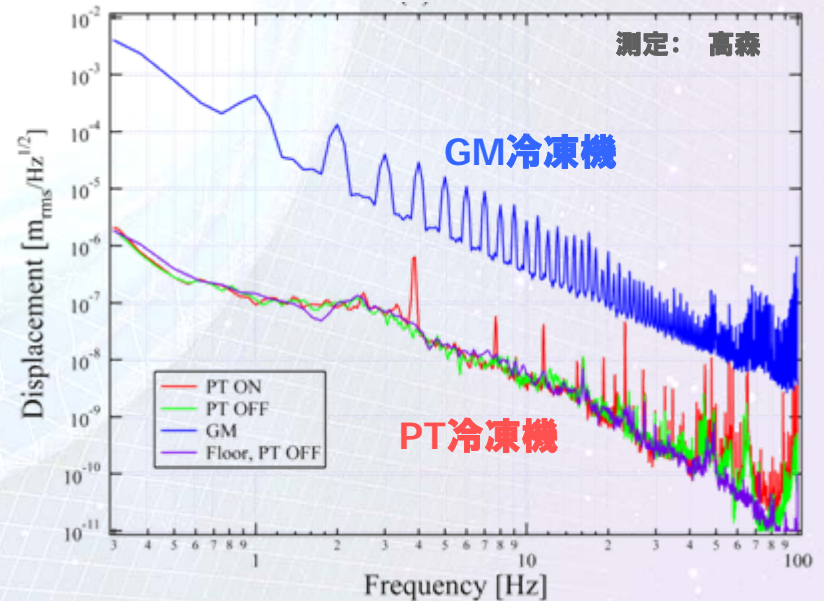
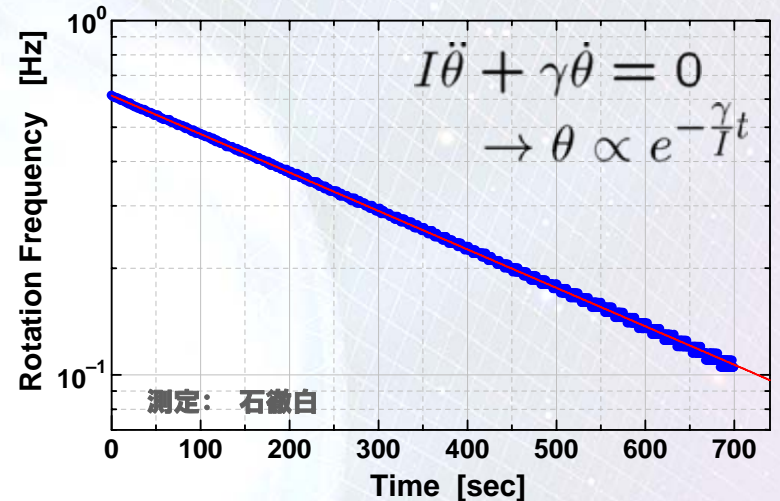
円柱形の浮上マスを回転
→ 回転運動の自由減衰を測定
(大気中での測定)

⇒ $\gamma = 1.5 \times 10^{-9}$ [N·m·s/rad]

(LISA試験用ねじれ振り子,
真空中 → $\gamma = 1.5 \times 10^{-10}$ [N·m·s/rad])

振動測定:

GM冷凍機タイプ, パルス管冷凍機タイプ
バルク直近の真空槽壁面で測定
→ パルス管冷凍機では、
地面振動レベル以下の振動レベル





まとめ

まとめ

●ねじれ型低周波数重力波検出器

低周波数帯には、振幅の大きな重力波がある

ねじれ型重力波検出器で観測可能

利点: 共振周波数を低くすることができる

→ 低周波数帯の重力波に感度を持つ

磁気浮上なら、摩擦・機械損失が無い

欠点: 実現できる基線長に限界がある

試験マスの帯電?, 外部磁場の影響?

長さ20m, 10kgの試験マスで

感度限界: $h \sim 10^{-18}$ 程度 (周波数帯 ~ 数Hz)

観測ターゲット:

MBH準固有振動, 中間質量BH合体

回転地面振動, 重力場勾配変動

磁気浮上実験

永久磁石を用いた装置

安定な浮上を実現 -- 30日以上連続動作

超伝導磁石を用いた装置

低雑音, 無制御での浮上を実現

耐荷重, 磁気摩擦の測定

今後の研究

● 今後の研究

永久磁石を用いた装置

真空中での動作, レーザー干渉計での変動測定

→ 感度・安定度の向上

超伝導磁石を用いた装置

防振に配慮した超伝導磁石装置が納品 ~ 9月中

耐荷重, 磁気摩擦の測定 (大気中)

→ 本格的な装置の設計



回転地面振動の測定と、防振

重力場勾配雑音の実測

検出器を2台製作し、差動変動を観測

応用

回転地面振動の観測装置

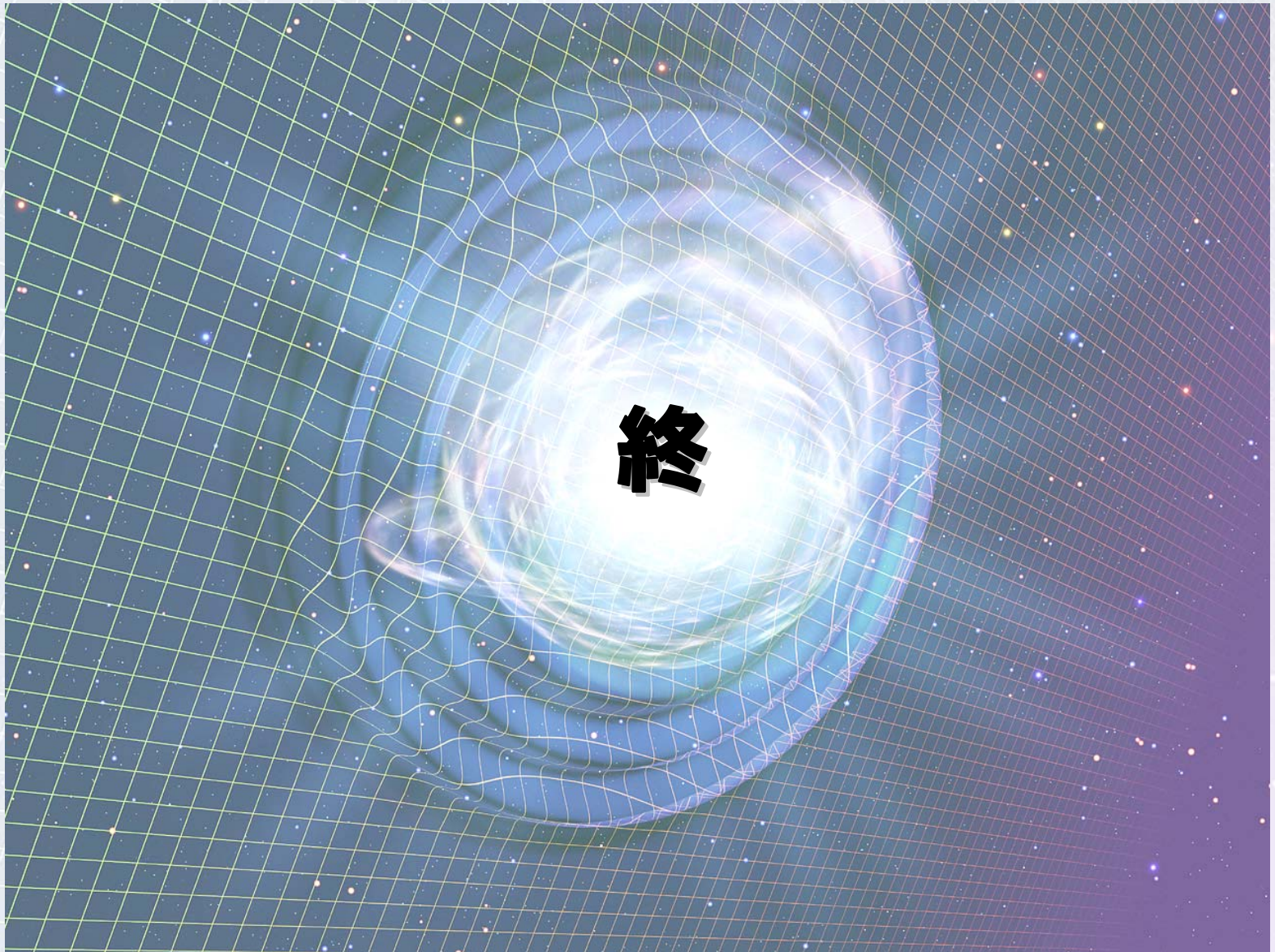
これまでに測られた例は無い, 上限値 10 nrad/s

弱い力の計測実験

重力定数の測定, 重力の逆2乗則の検証, カシミール力の測定

衛星ミッションでの力の雑音測定, 衛星スラスター評価

干渉計の量子雑音の研究



磁気浮上実験 (3)

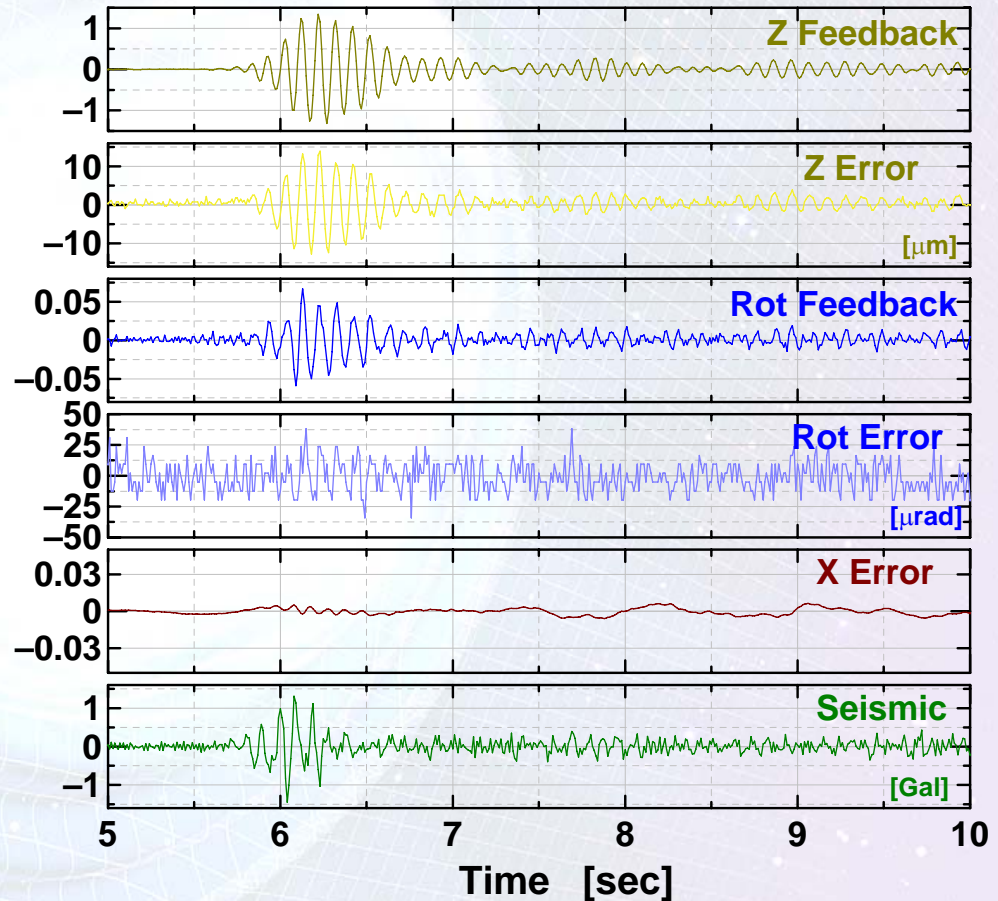
●地震波形データ

2006年 9月8日 7:51

震源: 千葉県北西部

深さ80km, M3.5

大きさ: 東京都23区で 震度1



各自由度で地震波を感知

水平面内並進方向 (無制御): やや遅れて変動

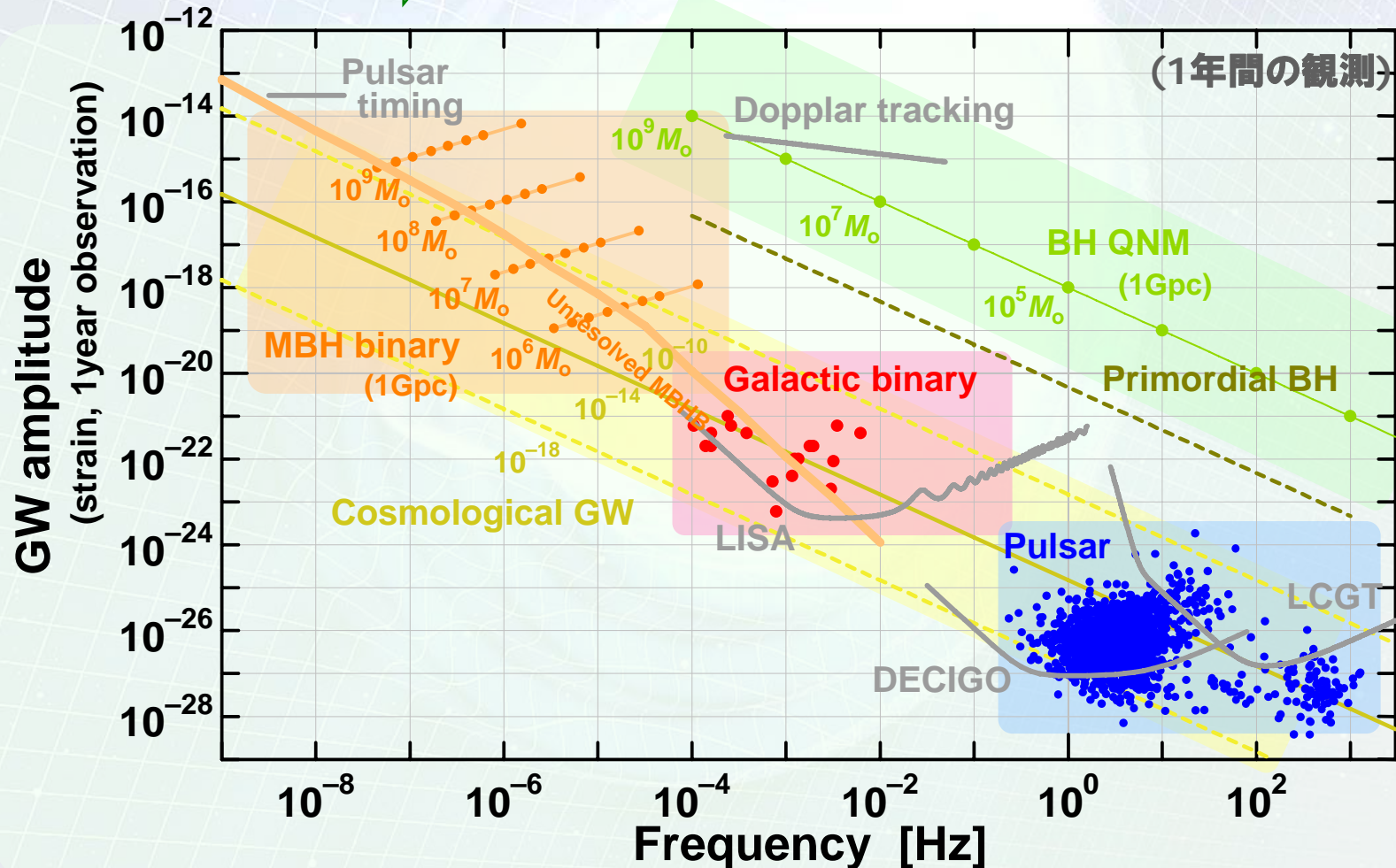
← 制御系のカップリングに起因か

低周波数重力波

● 重力波源

様々な周波数の重力波 ~ (系の運動速度)/(系のスケール)

⇒ 多様なスケールでの天文学・宇宙論



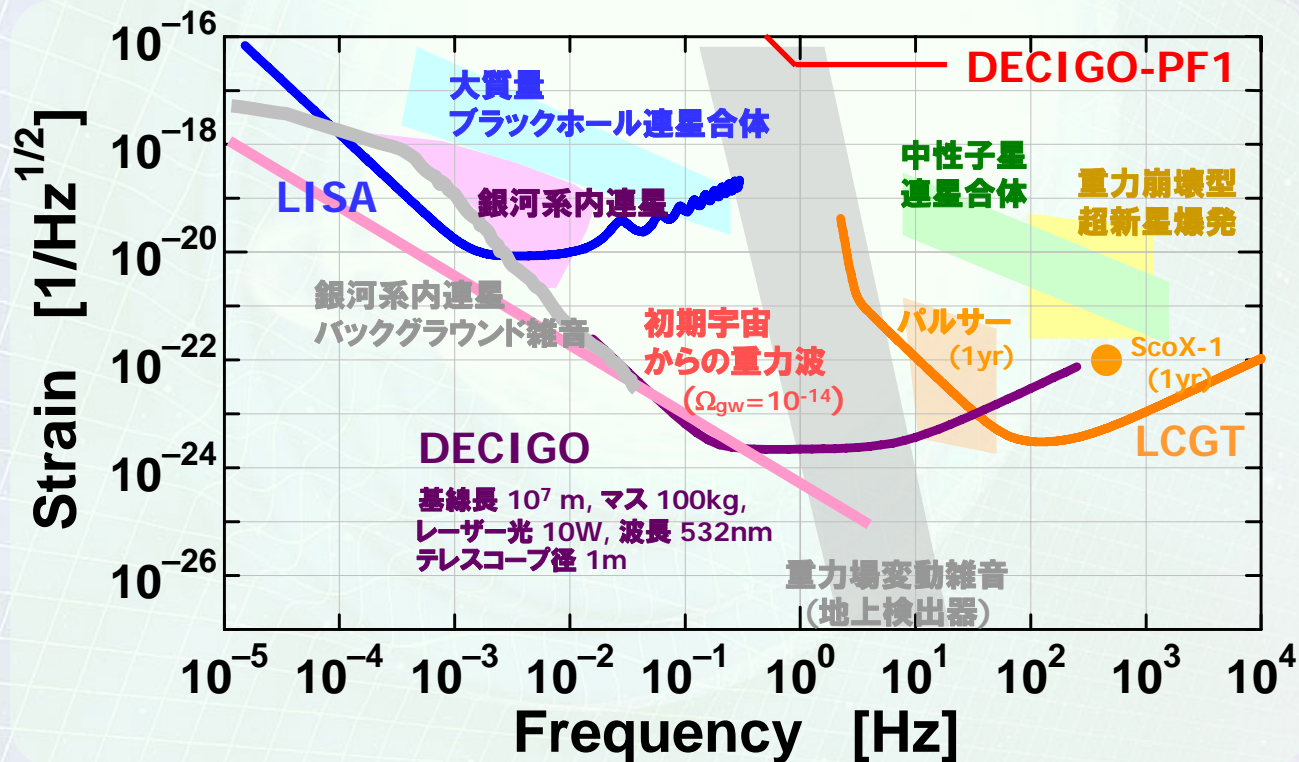
DECIGO-PF1 (6)

●他の重力波検出器との比較

本格的な将来計画と比較すると見劣りするが、過去のものよりはやや良い

ドップラートラッキング $h \sim 10^{-15}$ (10^{-4} - 10^{-2} Hz)

パルサータイミング $h \sim 10^{-14}$ (10^{-8} Hz)



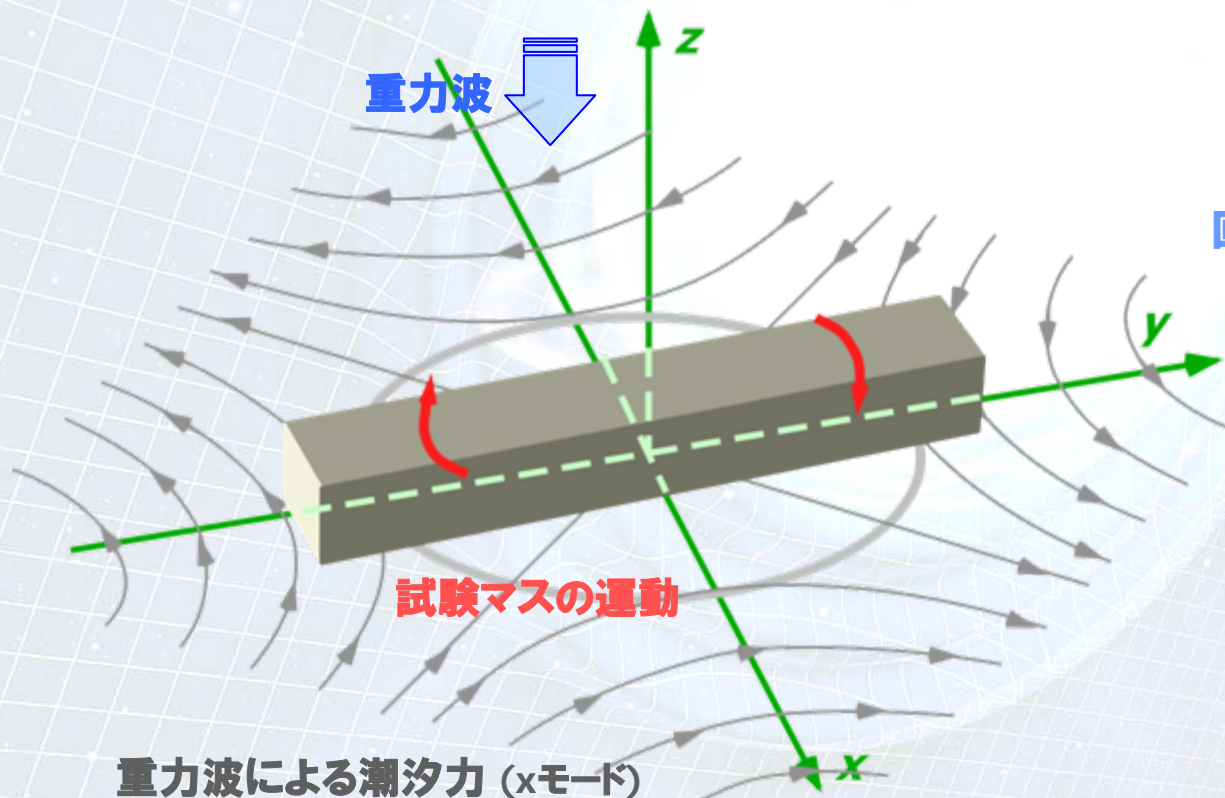
ねじれ型重力波検出器 (3)

●ねじれ型アンテナ

棒状の試験マスを使用する

重力波による潮汐力 (四重極) → 回転力

2つのマスを直交する方向に配置 → 重力波によって差動回転する



回転方向の自由度では、
共振周波数を下げ易い
(ねじれ振り子 ~ 1mHz)



低周波数帯まで
感度を持たせることができる

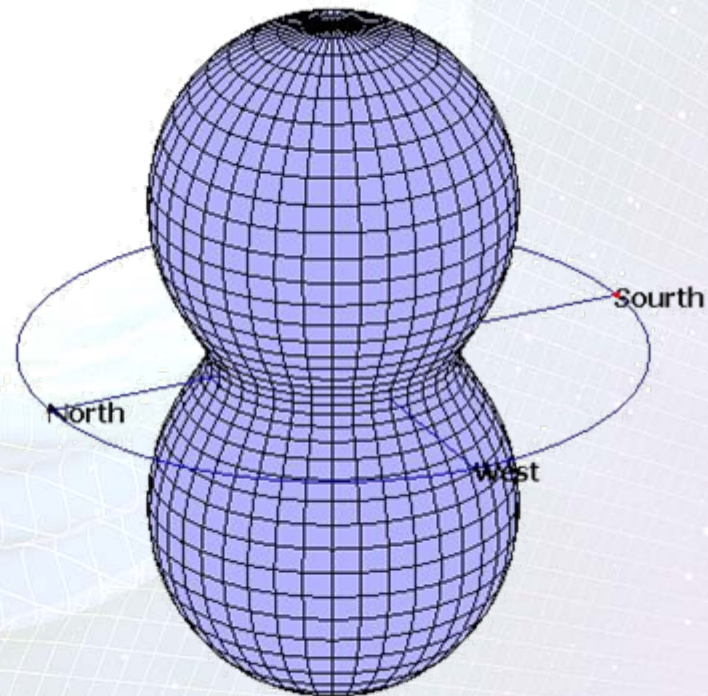
指向性

● 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)



低周波数重力波 (3)

●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決定す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

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