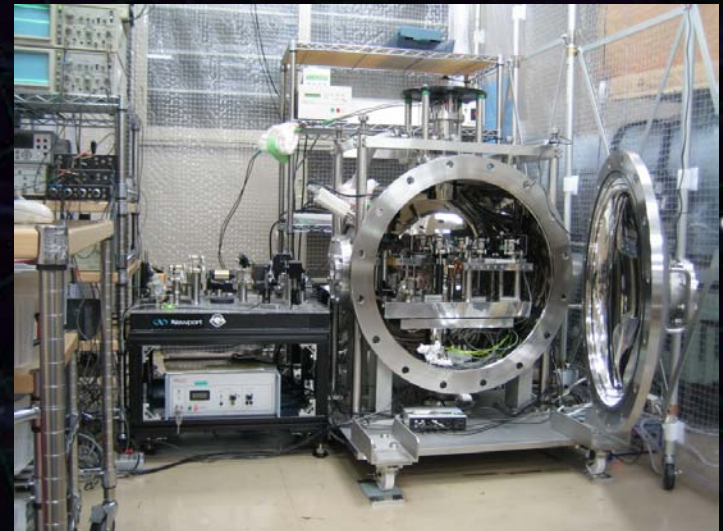


振じれ型重力波望遠鏡 TOBA: Torsion-Bar Antenna

1号機 (東京大学)



2号機 (京都大学)



※論文投稿中
物理学会誌掲載予定

安東 正樹 (京都大学 理学研究科)

中間発表会 (2010年8月25日, 天体核研究室)



イントロダクション

中間発表会 (2010年8月25日, 天体核研究室)

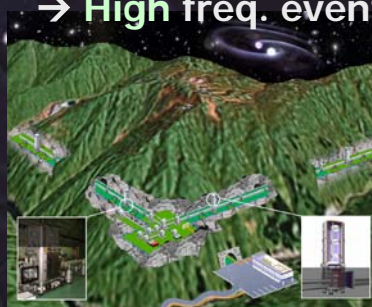
LCGT and DECIGO



Gravity (2009~)
Test of gravity ISL



LCGT (2017~)
Terrestrial Detector
→ High freq. events



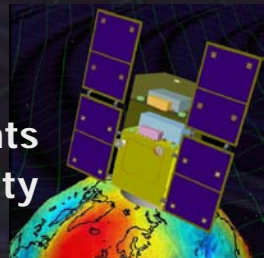
DECIGO (2027~)
Space observatory
→ Low freq. sources
Cosmology



TOBA (2005~)
Novel Detector configuration

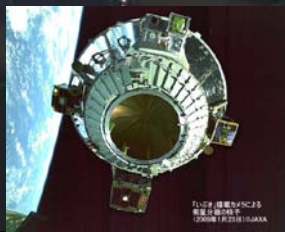


DPF (2015~)
Small Satellite
Galactic events
Earth's gravity



Pre-DECIGO (2021~)

SWIM (2009~)
First module in orbit

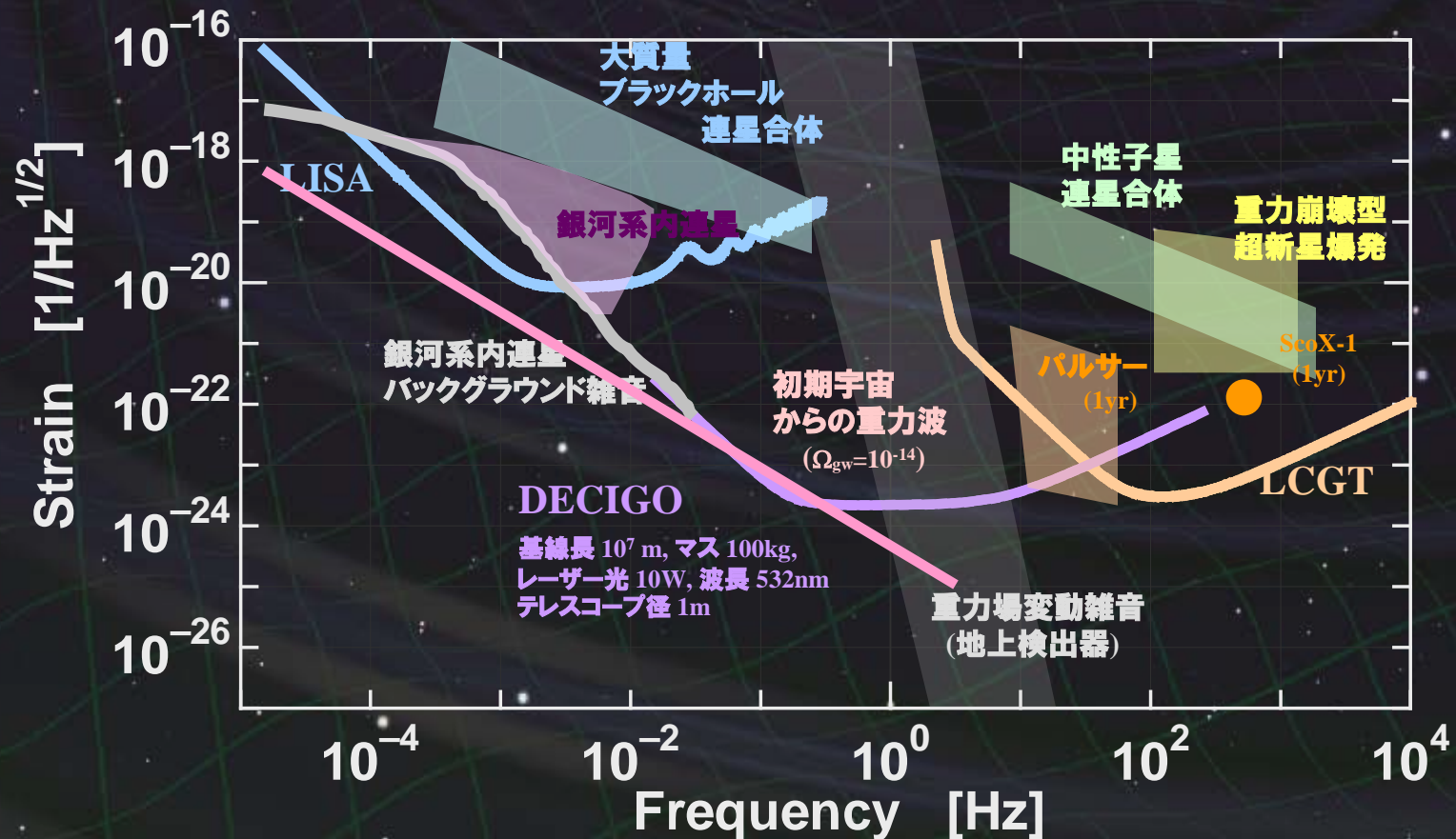


Satellite Gravity (?~)
Space observatory
→ Earth environment



観測周波数帯と観測対象

- 地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など
- DECIGO : 0.1 - 1Hz → 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波
- LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど



重力波の周波数：

波源の運動の時間スケールを反映

→ **さまざまな周波数帯での観測が望ましい。**

特に低周波数帯では

大きな重力波振幅, 定常的な重力波源 が期待できる。

地上望遠鏡では、低周波数帯の重力波観測は困難

- **検出器の原理的な限界。**
- **地面振動などの環境雑音。**

宇宙望遠鏡に行くのは、多大なリソースが必要。



新しい観測方式を提案する

地上でも低周波重力波を観測。

宇宙望遠鏡で独自の周波数帯を観測。



振じれ型重力波望遠鏡

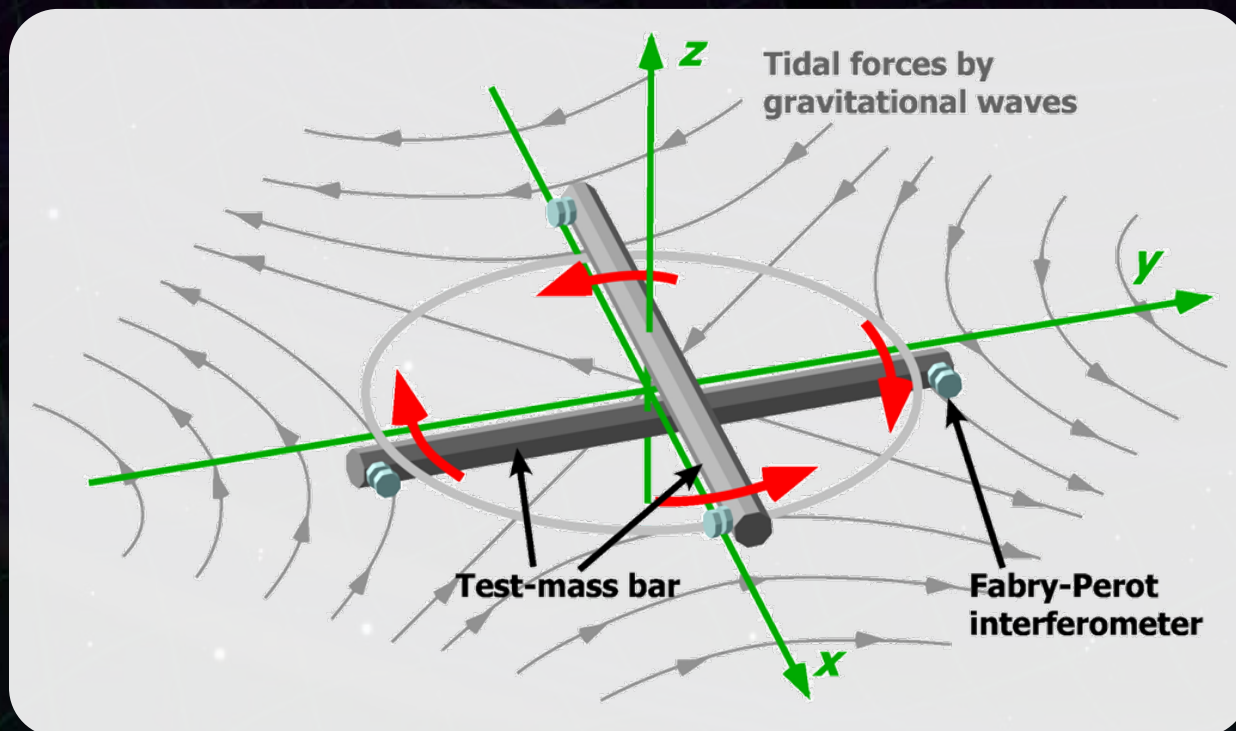
(TOBA: Torsion-Bar Antenna)

振じれ型アンテナ概略

2つの棒状試験マスを配置

⇒ 重力波による差動回転変動を検出

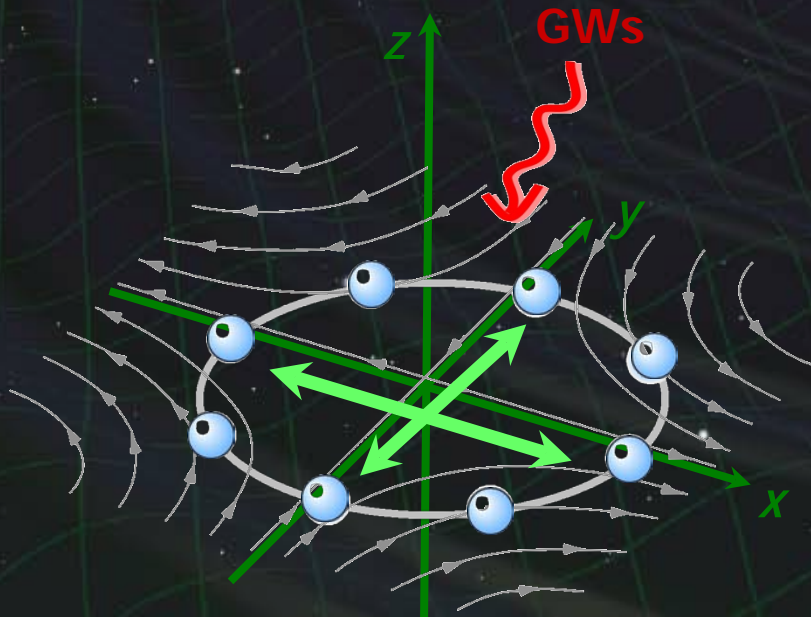
変動センサ: レーザー干渉計を用いる



歪み観測と振じれ観測

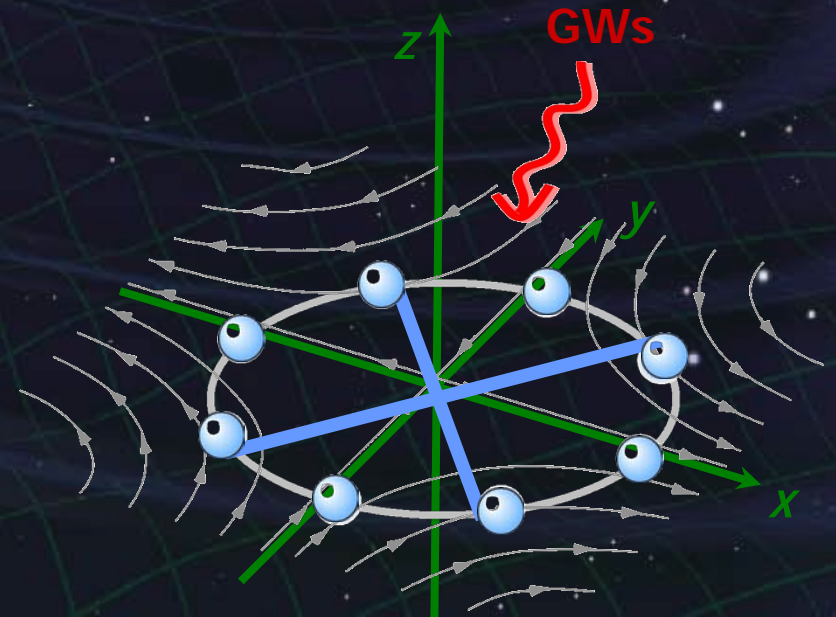
自由質点をレファレンスに、重力波による潮汐力変動を観測

Traditional IFO detector
Detect differential length change



差動歪み変動 $h \sim \frac{\delta L}{L}$

Torsion Detector
Detect differential rotation



差動振じれ変動 $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

方式の比較

歪み観測（通常のレーザー干渉計）

試験マス間の 基線長変動
観測周波数 10Hz-1kHz



試験マス： 振子で懸架
(共振周波数 $\sim 1\text{Hz}$)

長い基線長が取れる
→ 信号の増大, 高い感度

振じれ観測（TOBA）

試験マスの振じれ変動
観測周波数 10mHz-1Hz



試験マス： 振じれ振子で懸架
(共振周波数 $\sim 1\text{mHz}$)

長基線は必要ない
→ シンプルな構成, 外乱除去

棒状試験マス回転の運動方程式

$$I \left(\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta \right) = \frac{1}{4} q^{ij} \cdot \ddot{h}_{ij}(t)$$

I : Moment of Inertia

q^{ij} : Dynamic quadrupole moment

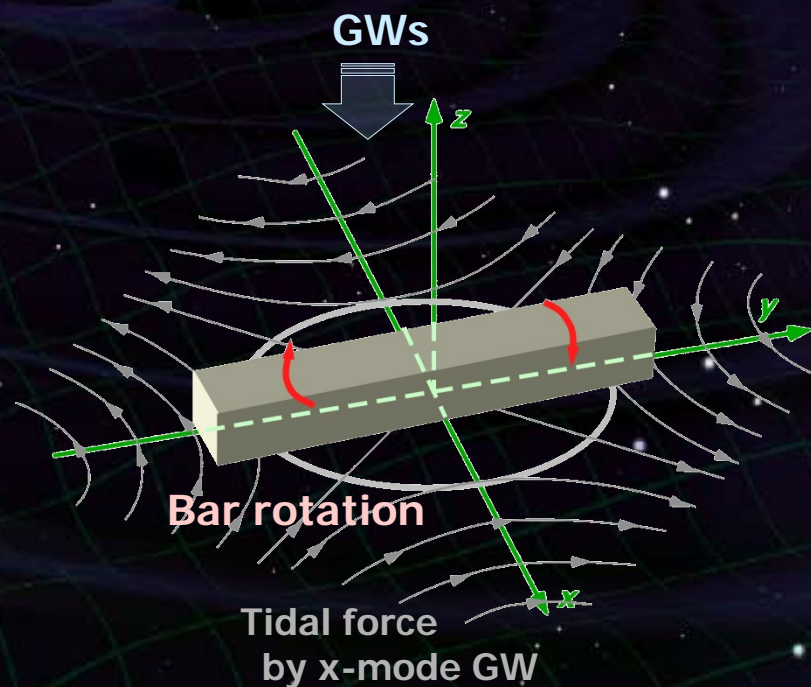
⇒
$$\tilde{\theta}(\omega) = \frac{1}{2} \alpha \tilde{h}_\times(\omega) \quad (\omega \gg \omega_0)$$

α : shape factor, between 0 to 1

Dumbbell → $\alpha = 1$

Dimension less,

Independent of matter density

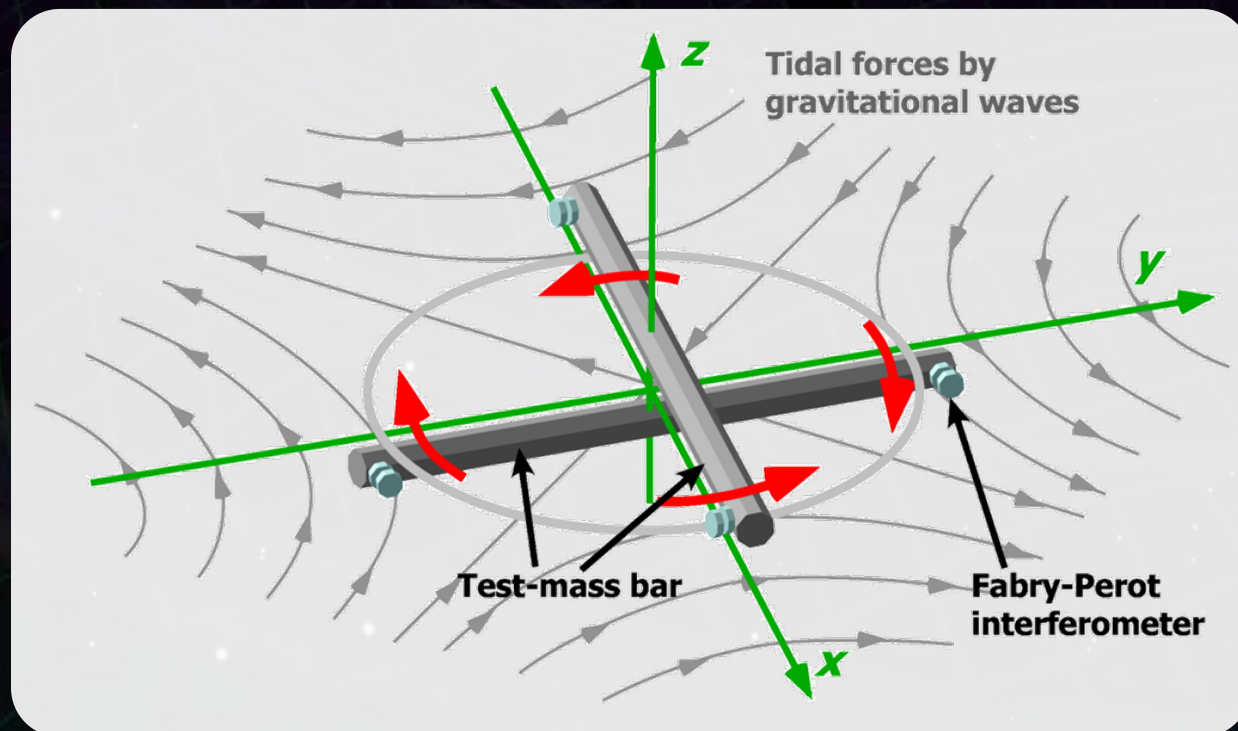


差動振じれの観測

2つの棒状試験マスの差動振じれの観測

⇒ 同相に働く 外乱変動の除去

変動センサ: レーザー干渉計を用いる

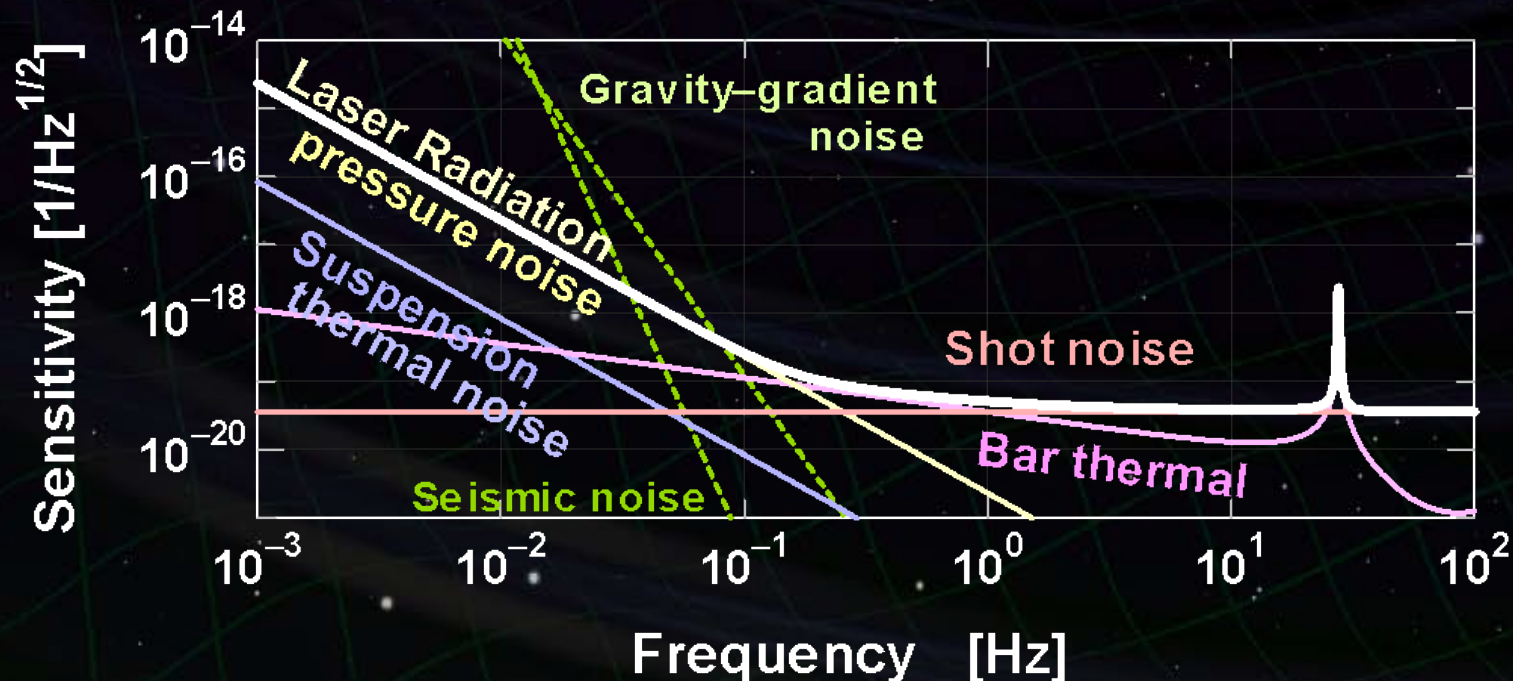


TOBAの感度 (例)

現実的なパラメータを仮定

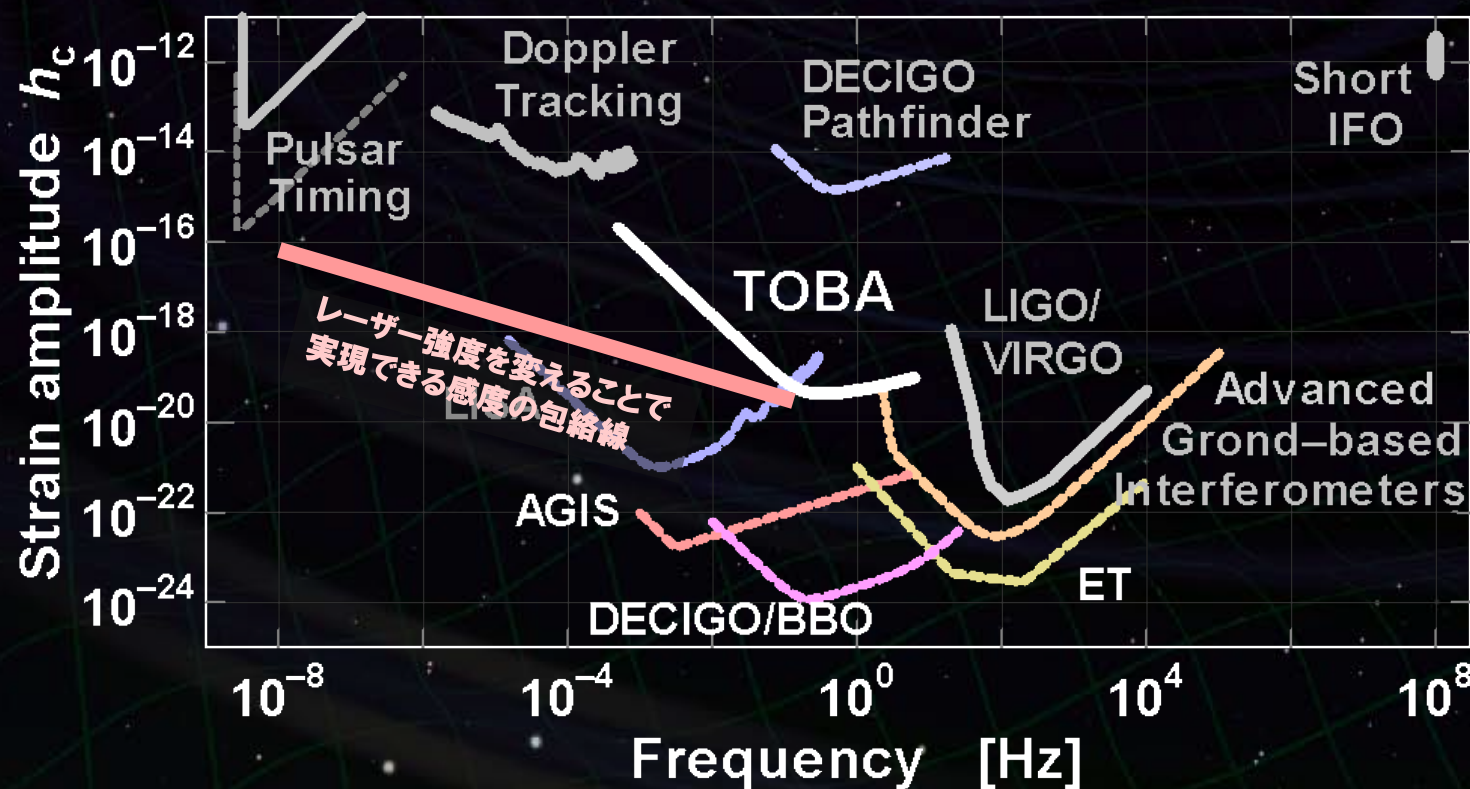
Bar length : 10m, Mass : 7600kg
Laser source : 1064nm, 10W
Cavity length : 1cm, Finesse : 100
Bar Q-value : 10^5 , Temp: 4K
Support Loss : 10^{-10}

Laser Freq. noise $< 10\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$,
Freq. Noise CMRR > 100
Intensity noise $< 10^{-7}/\text{Hz}^{1/2}$,
Bar residual RMS motion $< 10^{-12}\text{ m}$



他の観測器との比較

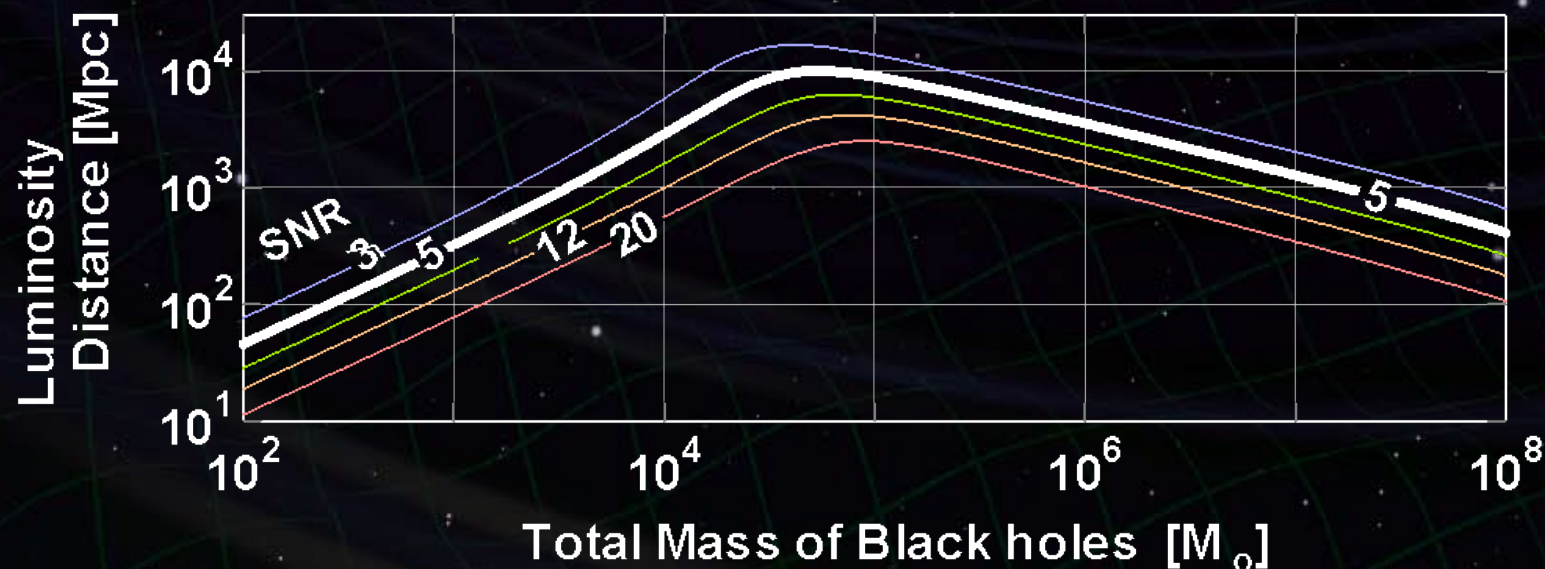
DECIGO/BBO 周波数帯 0.1Hz 付近で良い感度



観測可能距離

ブラックホール連星の合体现象からの重力波

⇒ 10Gpcまで観測可能 ($\sim 10^5 M_{\odot}$, SNR = 5)



Calculation by K.Yagi

背景重力波

観測可能な 背景重力波の
エネルギー密度比

$$\Omega_{\text{gw}} \sim 10^{-7}$$

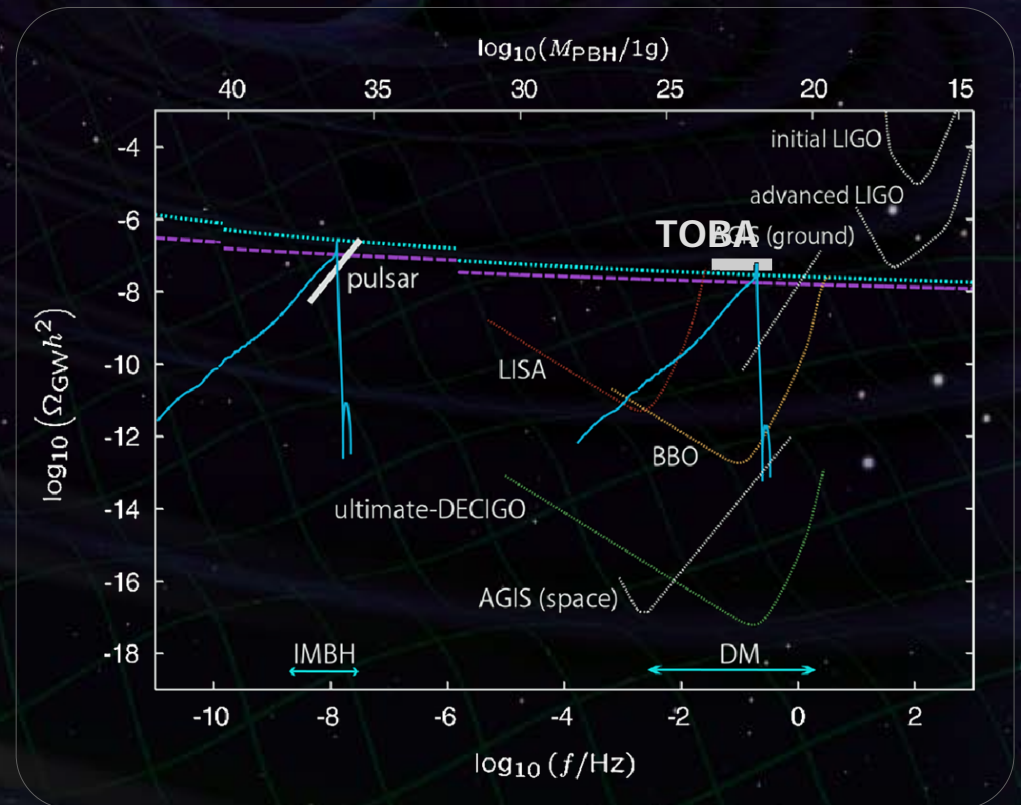
(1年間の観測)



BBN 上限値を超える

初期宇宙のテンソル
揺らぎ起因の重力波

R.Saito and J.Yokoyama,
PRL 102, 161101 (2009)





プロトタイプ開発

中間発表会 (2010年8月25日, 天体核研究室)

2つの地上装置, 1つの衛星搭載モジュール

ねじれ型重力波検出器A

(地球周回軌道, 2009年-)



質量 50g, 長さ 5cm
無重力浮上 + 制御
反射型フォトセンサ
スピン + 軌道運動

ねじれ型重力波検出器B

(東京大学, 2008年-)



質量 150g, 長さ 20cm
超電導磁気浮上 + 制御
レーザー干渉計
地上静置観測

ねじれ型重力波検出器C

(京都大学, 2010年-)



質量 340g, 長さ 25cm
超電導磁気浮上 + 制御
レーザー干渉計
地上静置観測

試験マス
変動検出
位置・姿勢

SWIM搭載モジュール

Sensor module to demonstrate SpW communication
Observation of gravitational waves (10^{-7} /Hz^{1/2})
Monitor the satellite environment as accelerometers

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass

~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control

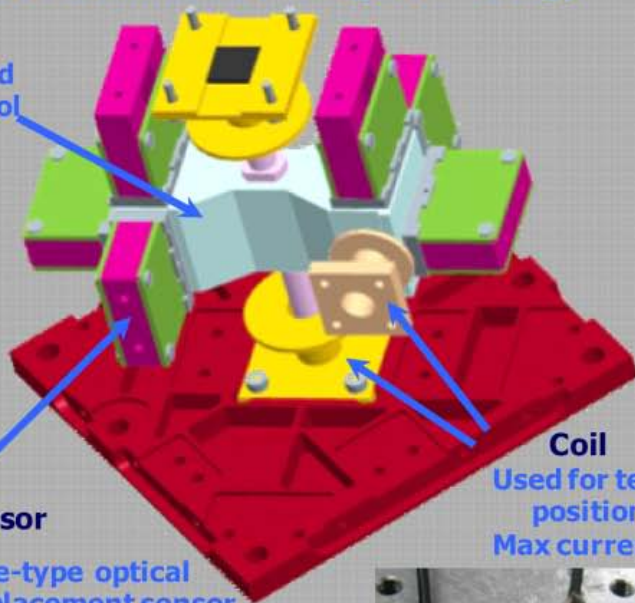


Photo sensor

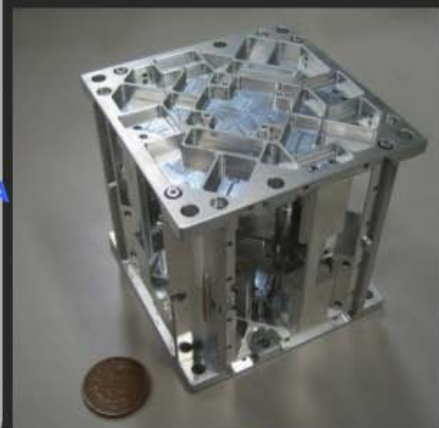
Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion



Coil
Used for test-mass position control
Max current ~100mA



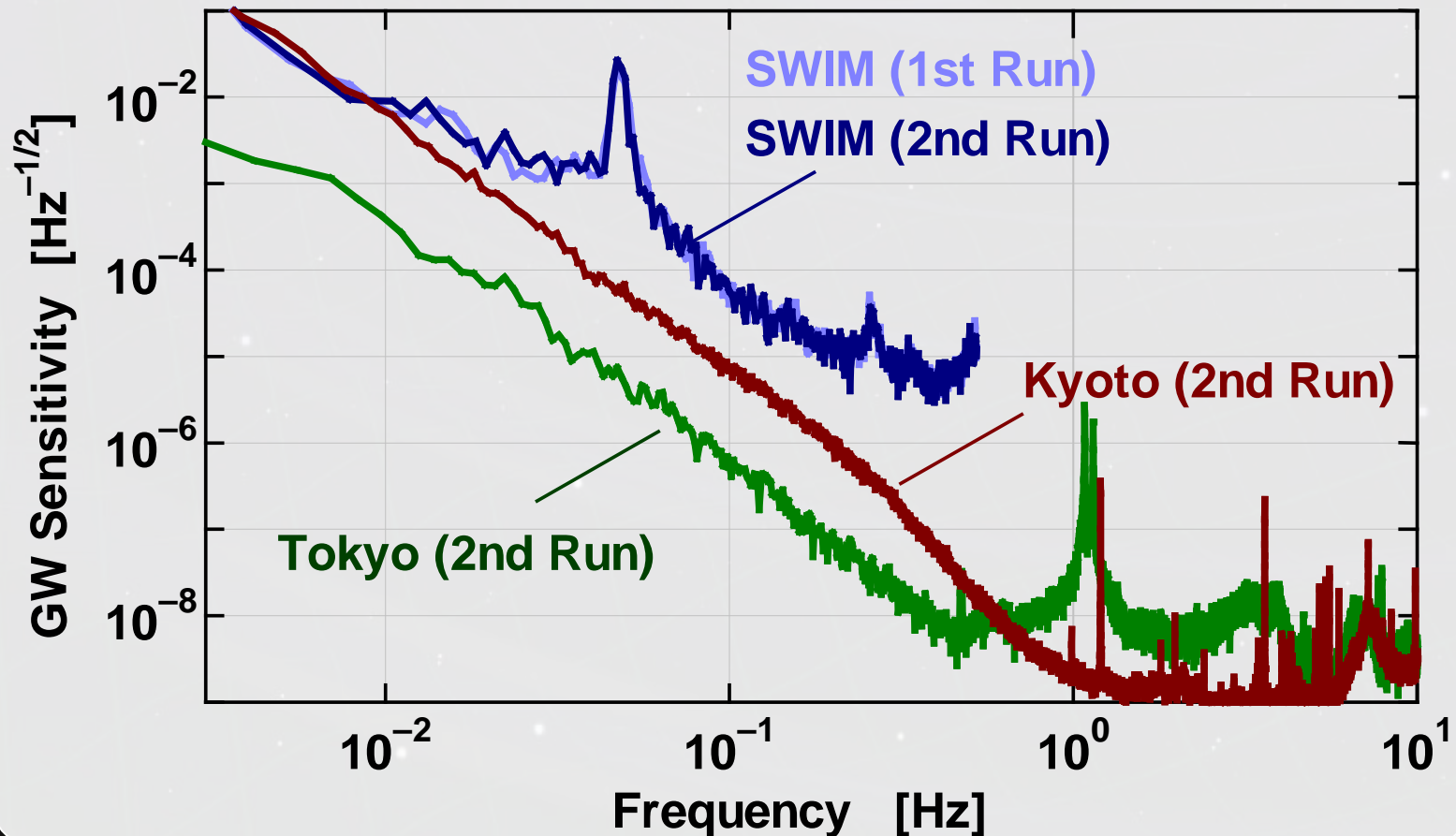
2 TAMs
in the frame



同時観測運転

2010年 6月17日, 7月15日

衛星搭載のSWIM と 地上装置 の同時観測





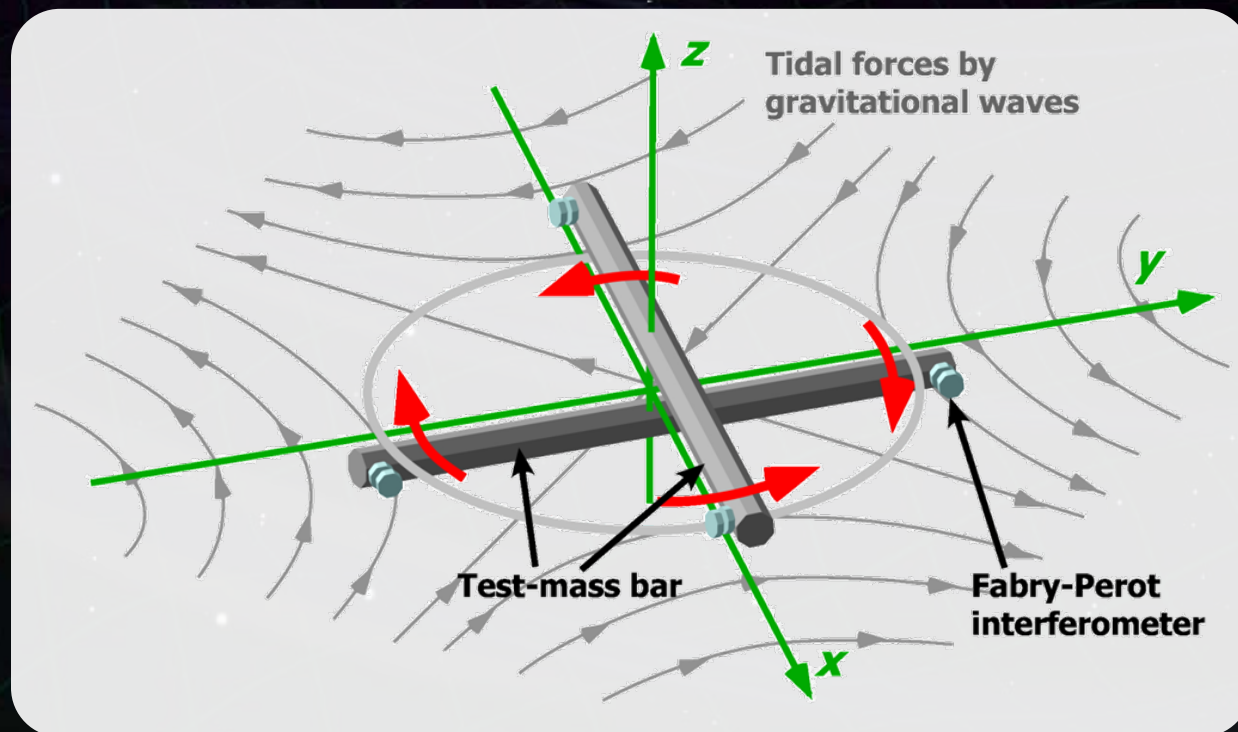
さらに手を加えた方式

中間発表会 (2010年8月25日, 天体核研究室)

超低周波数帯 ($\sim 10^{-8} - 10^{-4}$ Hz) を狙う

Detector全体を回転させる

→ 重力波信号の変調観測



棒状試験マス回転の運動方程式

$$I \left(\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta \right) = \frac{1}{4} q^{ij} \cdot \dot{h}_{ij}(t)$$

I : Moment of Inertia
 q^{ij} : Dynamic quadrupole moment

全体を
回転



$$\theta_{\text{diff}} \simeq \alpha \left(\frac{\omega_g}{2\omega_{\text{rot}}} \right)^2 \left[h_{\times} \cos(2\omega_{\text{rot}} t) + h_{+} \sin(2\omega_{\text{rot}} t) \right],$$

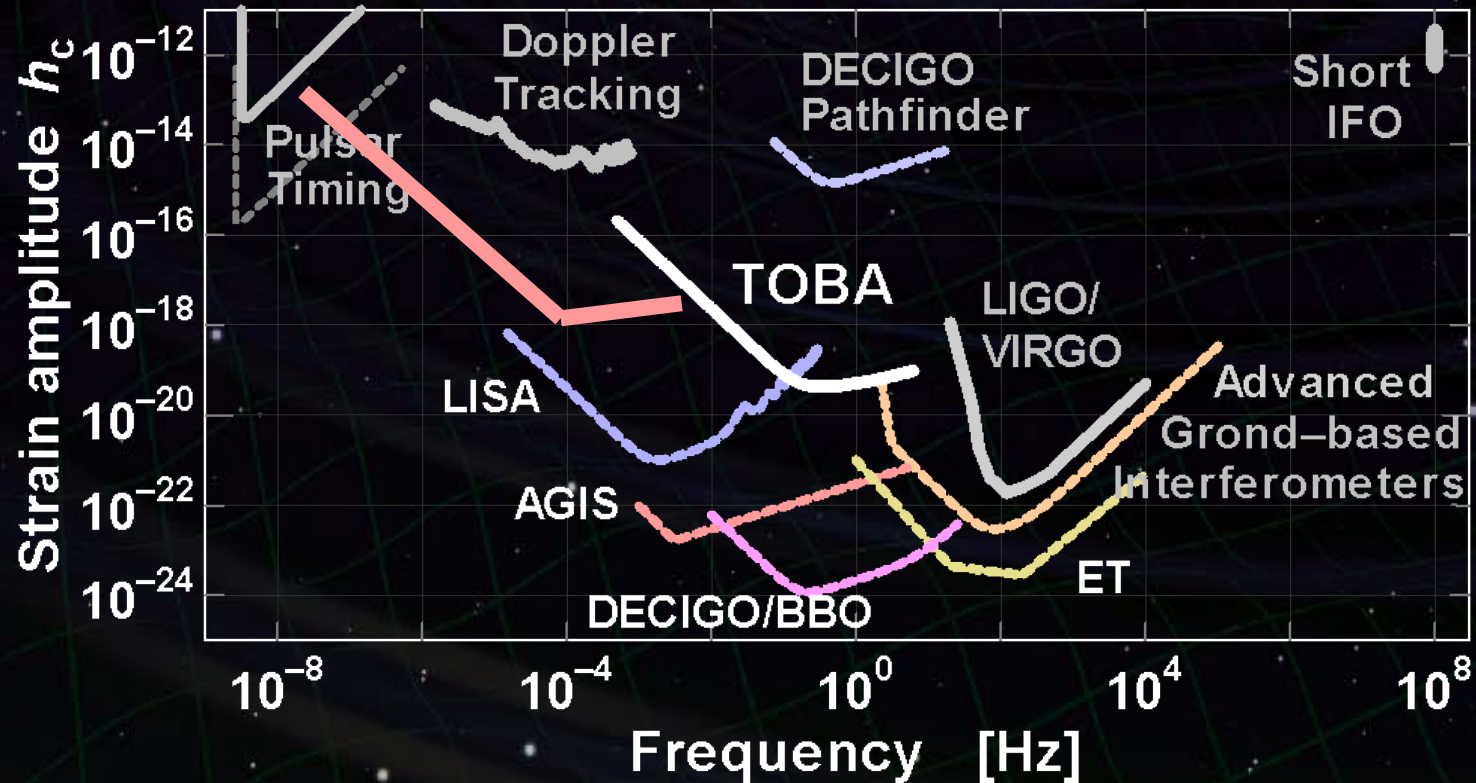
超低周波数 (ω_g) の重力波が
高い周波数 ($2\omega_{\text{rot}}$) 帯の信号にアップコンバートされる。

利点:

- 2つの偏波成分が分離できる。
- 高い周波数で観測可能 → 雑音・ドリフトの影響を避けやすい。
- 連続的な観測でなくとも良い。

回転TOBAの感度

回転周波数 5×10^{-5} Hz の場合の感度曲線





まとめ

中間発表会 (2010年8月25日, 天体核研究室)

新しい方式による重力波望遠鏡 (TOBA) を提案
→ 低周波数帯 ($\sim 10^{-8} - 1$ Hz) を地上/宇宙で観測.

比較的シンプルな構成だが、現実的なパラメータでも
10Gpc遠方のブラックホール連星合体现象まで観測可能.

プロトタイプ製作

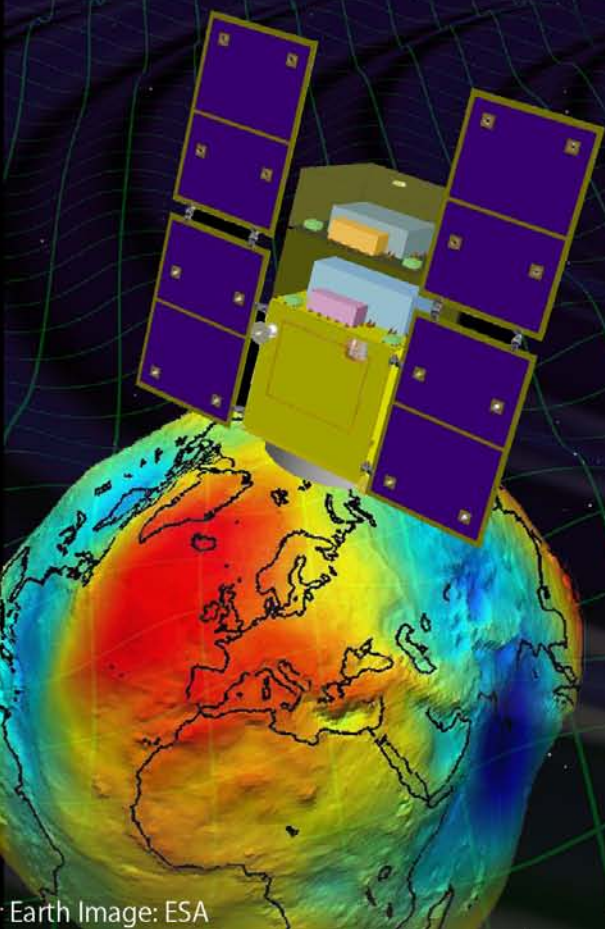
- 地上装置 2台, 衛星搭載モジュールSWIM
- 同時観測運転も行った.

実際に建設する??? → 今はその状況では無い.

構想を温めておけば、いいタイミングが来るかも.

場合によっては、一気に進む可能性も.

強力なサイエンス, 推進者, 技術面のブレークスルー.



Earth Image: ESA

終わり

Topic

• Homodyne detection

Ideas of :

Bar rotation by tidal acceleration by GW
Detection of Circularly polarized GWs
Heterodyne detection method

V.B.Braginsky, Ya.B.Zel'dovich, and V.N.Rudenko
Sov. Phys.- JETP Lett. 10 (1969) 280.

Being introduced in:

C.W.Misner, K.S.Thorne, J.A.Wheeler,
'Gravitation' W.H.Freedman (1973) pp.1016.

Observation with torsion antenna :
Cryogenic torsion antenna to observe
continuous GWs from Crab pulsar

S.Owa, et al.,

'Cryogenic Detector for Gravitational
Radiation from the Crab Pulsar'
Proceedings of the fourth Merzel Grossmann
Meeting on General Relativity (1986).

