# 捩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)



※PRL 105, 161101 (2010) 物理学会誌 2010年12月号

# 安東 正樹 (京都大学 理学研究科)



# イントロダクション 捩じれ型重力波望遠鏡 (TOBA) 回転TOBA プロトタイプ実験 まとめ

# イントロダクション

All the second second

YEAR CONTRACTOR AND A DRIVE TO A

n an gran the constant and a single print and grant and grant and a single print and a single print and a single print const

背景と動機



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。

# 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



# LCGT and DECIGO





# 捩じれ型重力波望遠鏡 (TOBA: Torsion-Bar Antenna)

捩じれ型アンテナ概略



8

# 2つの棒状試験マスを配置 ショカ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



歪み観測と捩じれ観測



# 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 **Torsion Detector Detect differential rotation** 

差動歪み変動  $h \sim rac{\delta L}{T}$ 

差動捩じれ変動  $h \sim \delta heta \sim rac{\delta L}{L}$ 

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 ~1Hz)

長い基線長が取れる →信号の増大,高い感度 捩じれ観測 (TOBA)

試験マスの捩じれ変動観測周波数 10mHz-1Hz



試験マス: 捩じれ振子で懸架 (共振周波数 ~1mHz)

長基線は必要ない → シンプルな構成, 外乱除去

重力波に対する応答



### 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

$$\widetilde{ heta}(\omega) = rac{1}{2} lpha \widetilde{h}_{ imes}(\omega) \quad {}^{(\omega \gg \omega_0)}$$

 $\alpha$  : shape factor, between 0 to 1 Dumbbell  $\rightarrow \alpha = 1$ Dimension less, Independent of matter density Bar rotation Tidal force by x-mode GW

**GWs** 

差動捩じれの観測



12

2つの棒状試験マスの差動捩じれの観測 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<sup>5</sup>, Temp: 4K Support Loss : 10<sup>-10</sup>

Laser Freq. noise <  $10Hz/Hz^{1/2}$ , Freq. Noise CMRR>100 Intensity noise <  $10^{-7}/Hz^{1/2}$ , Bar residual RMS motion <  $10^{-12}$  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現象からの重力波 10 Gpcまで観測可能 ( $\sim 10^5 M_{\odot}$ , SNR = 5)







観測可能な 背景重力波の エネルギー密度比 $\Omega_{
m gw} \sim 10^{-7}$ (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)



# 回転TOBA

The second s

10,000,000,000,000,000,000

and the first of the state of t

# 回転TOBA



# 超低周波数帯 (~10<sup>-8</sup> – 10<sup>-4</sup> Hz) を狙う Detector全体を回転させる →重力波信号の変調観測



重力波に対する応答



### 棒状試験マス回転の運動方程式

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

: Moment of Inertia

 $q^{ij}$ : Dynamic quadrupole moment

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

> 超低周波数  $(\omega_g)$ の重力波が 高い周波数  $(2\omega_{rot})$ 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ても良い。

# 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.



 (f) Angular accelerations of rotating bars ["Heterodyne detector"; see Braginsky, Zel'dovich, and Rudenko (1969)]

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

S.Owa, et al., 'Cryogenic Detector for Gravitational Radiation from the Crab Pulsar' Proceedings of the fourth Mercel Grossmann Meeting on General Relativity (1986).



回転 TOBAの 感度



#### 回転周波数 5x10-5 Hz の場合の感度曲線



# プロトタイプ開発

States of Sound States

THE REPORT OF A PARTY OF A PARTY

プロトタイプ



#### 2つの地上装置、1つの衛星搭載モジュール



# 実験装置の全体構成



マイケルソン干渉計 試験マス両端の差動変動 (回転) 測定 光源: Nd:YAGレーザー 波長 1064nm, 出力 50mW

#### 超伝導体バルク

直径 600mm, 厚さ 20mm Gd<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> : 70.9% Gd<sub>2</sub>Ba<sub>1</sub>Cu<sub>1</sub>O<sub>7</sub> : 19.2% 転移温度 ~92K

パルス管冷凍機 最低到達温度 ~40K バルブユニット分離 → 低振動化 柔軟ヒートリンクによる防振

**棒状ねじれ秤** 長さ200mm程度











# SWIM搭載モジュール



Sensor module to demonstrate SpW communication Observation of gravitational waves (10<sup>-7</sup> /Hz<sup>1/2</sup>) 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<sup>-9</sup> m/Hz<sup>1/2</sup> 6 PSs to monitor mass motion Coil Used for test-mass position control Max current ~100m/











#### SWIM-地上同時観測運転

 ・2回実施
 2010年 6月17日 データ長 SWIM地球1周回分 (100分強) SWIM + 地上装置 (東京)
 7月15日 データ長 SWIM地球2周回分 (200分強) SWIM + 地上装置2台 (東京・京都)

同時観測運転

・衛星姿勢:スピン安定,銀河中心方向を指向

・検出器間の相対位置・姿勢が時間変化する系での観測。
 ・SWIMのデータも無事DL済み。

#### 地上同時観測

・上記の他, 2回実施 --- 7月19日, 9月4日(各5時間).

・1-2桁良い感度での観測運転 (~10-7 Hz<sup>1/2</sup>)

・主な観測対象: 0.1Hz付近の背景重力波.

(これまでにきちんとした観測例は無い)

# 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







#### 東京の装置

・Squeezed Film Damping効果の測定実験を並行して進める.

# 京都の装置 ・重力法則検証実験を並行して進める。

#### 同時観測データ

・地上観測データ

→ 0.1Hz付近の背景重力波の検出 (もしくは上限値の設定)に向けてデータ解析進行中.



まとめ



新しい方式による重力波望遠鏡 (TOBA) を提案 → 低周波数帯 (~10<sup>-8</sup> – 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現象まで観測可能. 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.





The second s

1475 28-298-5



実験装置全景





光学系



#### Nd:YAG**レーザー光源** 波長 1064nm, 出力 500mW

### マイケルソン干渉計 試験マス両端の差動変動 (回転) 測定





# 超伝導体·冷凍機



超伝導体バルク 直径 600mm, 厚さ 20mm Gd<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> : 70.9% Gd<sub>2</sub>Ba<sub>1</sub>Cu<sub>1</sub>O<sub>7</sub> : 19.2% 転移温度 ~92K

パルス管冷凍機

最低到達温度~40K バルブユニット分離による低振動化 柔軟ヒートリンクによる防振

超伝導体バルク







#### 防振用ヒートリンク 銅線 (銀コーティング)



# 超伝導体・冷凍機の振動





DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



# 初期宇宙の観測





# SWIMによる実証とDPF



#### DPFミッション部 信号処理・搭載機器のプロトタイプとしての役割

SpC2中央処理計算機デジタルボード機器制御デジタルボードAD/DAボード信号取得,制御用アナログボードセンサモジュール試験マスモジュール,センサ/アクチュエータ

SWIM - 動作実証が主な目的 信号処理・制御系の実証 センサ感度は重要視していない



# SWIMによる実証とDPF



SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

#### DPF**衛星のプロトタイプとしての役割** SpC2 小型衛星標準バス (通信・信号処理, 電源制御) Snm DPF**ミツション部 (デジタル制御ボード, AD/DAコンバータ, センサモジュール**)



# DPF技術開発



## 信号処理·制御

SpaceWire/SpaceCube SDS-1/SWIM 1/23**打上げ → 宇宙実証試験** 

➡ 東京大学,京都大学 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

#### SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000 (64bit, 33MHz) System Memory: 2MB Flash Memory 4MB Burst SRAM 4MB Asynch. SRAM Data Recorder: 1GB SDRAM 1GB Flash Memory SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171 Weight: 1.9 kg Power: 7W





#### SWIM $\mu\nu$ : User Module



Processor test board GW+Acc. sensor FPGA board DAC 16bit x 8 ch ADC 16bit x 4 ch → 32 ch by MPX Torsion Antenna x2 ~47g test mass

Data Rate : 380kbps Size: 124 x 224 x 174 Weight: 3.5 kg Power: ~7W

# SWIM<sub>µv</sub> センサーモジュール

# 超小型重力波検出器 SpW 通信の宇宙実証のためのセンサーモジュール 将来の宇宙重力波望遠鏡のための最初のステップ

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<sup>-9</sup> m/Hz<sup>1/2</sup> 6 PSs to monitor mass motion Coil

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









на сталина и начала сталина и начала сталина и начала стали и начала стали и начала стали и тали и начала стали

# SWIMµv 軌道上実証



SWIM In-orbit operation

Test mass controlled

Error signal → zero Damped oscillation (in pitch DoF) Free oscillation in x and y DoF Signal injection → OL trans. Fn.

Operation: May 12, 2009 Downlink: ~ a week



# SWIM運用



#### 月1回のペースで順調に運用中

伝達関数測定, DC gain測定 衛星3軸制御時のスペクトル測定

# 6月より観測を計画中



温度変動



試験マス周囲の温度変動要求値 1 x 10<sup>-3</sup> K/Hz<sup>1/2</sup>

⇒ 多重の輻射シールド 大きな熱浴,熱伝導の良い材質

SWIMモジュール (SDS-1搭載) での温度変動実測結果

> サバイバルヒータでのON/OFF制御 SWIMでは温度制御はしていない

DPFの要求値を
 ほぼ満たす結果
 (ADC雑音による測定限界)





DECIGOパスファインダー



DECIGO DECIGOのための最初の前哨衛星 DECIGO:基線長 1000kmの編隊飛行 → DPF 1機の衛星(基線長30cm干渉計) 350kg級 小型衛星 地球周回軌道(高度 500km)

DECIGOの主要技術の宇宙実証 レーザー干渉計,安定化レーザー光源, ドラッグフリーシステム、データ取得と解析



# DPFの目指す科学的成果



# 宇宙・地球の観測



### 地球重力場観測



#### 1mm程度のジオイド高 分解能での地球重力 場観測. ・ 地球環境モニタ



# 先端科学技術の確立









□〉宇宙環境利用の新しい可能性

**DPFの観測対象** 



我々の銀河系内の ブラックホール 合体現象からの重力波 DPFの観測周波数 (0.1-1Hz) 中間質量ブラックホール (質量 10<sup>3</sup>-4x10<sup>5</sup> M<sub>sun</sub>)が対象 最大100kpcの距離まで観測可能 □ 銀河中心BH, 球状星団中のBH の形成メカニズムに対する知見 他の手段では観測が困難

→ これまでにない観測結果となる





DPFの観測距離



# DPF**のブラックホール** 合体現象 への観測可能距離

#### DPF**の観測可能距離** ~ 銀河中心をカバー (100kpc, SNR>5)



重力波交流会 (2011年1月14日)