

# 低周波重力波検出器 Torsion-bar Antenna

東京大学大学院 理学系研究科 正田亜八香

## 1. Abstract

低周波数帯の重力波には、中間質量ブラックホール連星や背景重力波などといった興味深い重力波源が存在するにも関わらず、現在の検出器開発の主流である地上レーザー干渉計では観測が難しいとされている。そのため、宇宙空間にレーザー干渉計を構築する衛星計画も考案されているが、複数の衛星を使い大規模なプロジェクトである為、莫大な時間や予算がかかる事が問題となる。そこで我々は地上で低周波重力波を観測できる新たな検出器 Torsion-bar Antenna (TOBA)を開発した。

現在までに小型のプロトタイプ TOBA が作られており、1台での低周波重力波探査はなされている。今回は、東京大学と京都大学にそれぞれ1台ずつ設置されたプロトタイプ TOBA を用いて、初めての同時観測、及び背景重力波をターゲットとした相関解析を行い、その結果、背景重力波に対する上限値を得た。これは、TOBA による背景重力波探査の新たな可能性を示すものと考えられる。

## 2. Introduction

現在までに、我々人類は電磁波を用いて宇宙を観測してきた。一方、近年では電磁波に代わる新しい手段で宇宙を観測しようという試みが広まっている。そのうちの一つが重力波である。

重力波とは光速で伝搬する時空の歪みであり、激しい質量分布の変化によって発生する。電磁波が電荷分布変化の情報を与えるのに対し、重力波は質量分布変化の情報をもたらす。星の内部の情報なども得ることができる。主な観測対象としては、中性子連星、ブラックホール連星、超新星爆発からの重力波や、背景重力波などがある。この中でも特に興味深い重力波源としてブラックホール連星からの重力波や、背景重力波が挙げられる。

ブラックホールは電磁波では直接観測することができず、まだ謎の多い天体のひとつである。重力波によってブラックホール連星が観測できれば、ブラックホールの進化の過程や銀河形成論の謎を解き明かす事が出来ると期待されている。

また、背景重力波はインフレーションや相転移の時に生じた重力波である。この背景重力波は、宇宙マイクロ波背景放射より更に昔、宇宙誕生から約  $10^{-35}$  秒後の宇宙の姿を映し出すもので、電磁波ではとらえる事のできない宇宙の姿を明らかにするものである。

これらの重力波は低周波であるという特徴がある。しかし、現在建設計画の進んでいる LCGT<sup>[1]</sup>や、アメリカの LIGO<sup>[2]</sup>、イタリアの Virgo<sup>[3]</sup>といった地上のレーザー干渉計型重力波検出器では低周波には良い感度を持たず、検出が難しい。これは主に、レーザー干渉計で用いる鏡は振り子のように懸架して地面振動からのノイズを防ぐが、振り子の共振周波数以下の低周波ではこの防振ができない事が大きな原因となっている。そこで地面振動を避け、レーザー干渉計の基線長を更に長くできるよう考えられたのが、宇宙間重力波望遠

鏡の LISA や DECIGO である。これらは宇宙間に計 3 基の衛星を打ち上げ、それぞれの衛星間で干渉計を構築する事で重力波をとらえる。しかし、複数の衛星を打ち上げなければならない事もあり、非常に大規模な計画となっており、莫大な予算や時間、人手がかかる。また、一度打ち上げてしまうとアップデートや修理が困難であることも問題となる。

そこで、地上で低周波重力波をとらえる事ができないかと考えられたのが、ねじれ振り子型重力波検出器 Torsion-bar Antenna (TOBA)<sup>[4]</sup>である。

## 2. Torsion-bar Antenna (TOBA)

TOBA は、レーザー干渉計とは違った原理を用いた重力波検出器である。レーザー干渉計は、重力波による空間の歪みを基線長(ビームスプリッターから鏡までの長さ)の変動という形でとらえるのに対し、ねじれ振り子型検出器では、重力波からの潮汐力で自由質点が回転する性質を用いる。

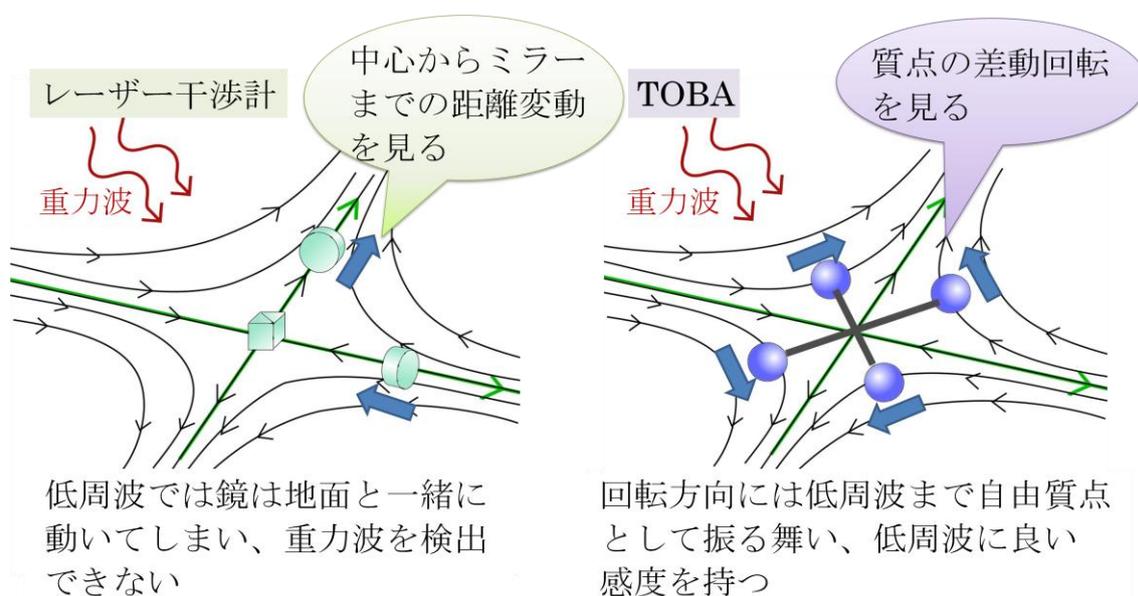


図 1: レーザー干渉計型重力波検出器と、ねじれ振り子型重力波検出器の原理の違い

棒状のテストマス(重力波に応答する物体)が自由に回転できるように中心で懸架し、このテストマスの回転をマイケルソン干渉計などで読み取ることで、重力波を検出することができる。従って、レーザー干渉計ではミラーが並進方向に自由に動かなければならないのに対し、この場合はテストマスが回転方向に自由であれば良い事になる。回転方向のねじれの共振周波数は並進方向の共振周波数に比べ非常に低い(~mHz)為、0.1 - 1.0 Hz 程度の低周波数帯であっても地面振動を防振する事が可能となり、低周波に良い感度を持つ。

この周波数帯での重力波に対するテストマスの応答は、重力波の振幅を  $h(f)$ 、テストマスの回転角を  $\theta(f)$  とすると、

$$\theta(f) \propto h(f)$$

となる。回転角の読み取りは棒状テストマスの両端の動きを読み取る事で行う為、テスト

マスの長さが長ければ長い程、回転角に対する感度が良いという事になる。更に、テストマスを2本用意し直交に設置すれば、2つのテストマスは重力波に対して差動に回転するため、同相ノイズを除去する事が出来、より良い感度での観測ができる。

将来的には表 1 の様なスペックで、図 2 のような感度を持つ検出器を開発する事を目標としている。

棒状テストマスの長さ	~10 m
棒状テストマスの温度	~4 K
回転読み取り系	10 W レーザー Fabry-Perot 干渉計を構築

表 1: TOBA の最終的なスペック (例)

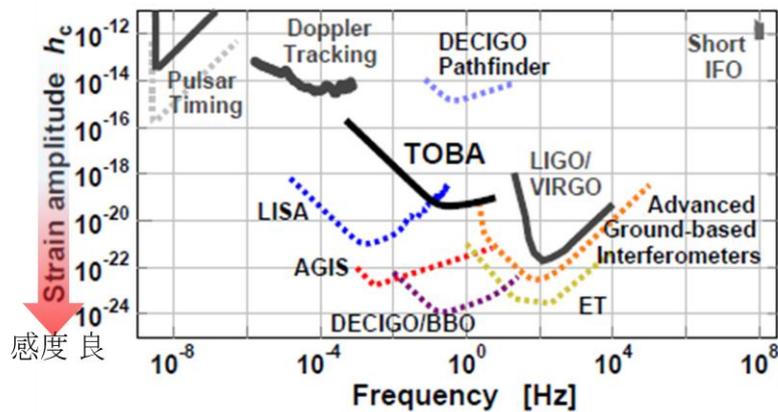


図 2: 最終的な TOBA の目標感度

この目標感度が達成できれば、 $10^4$  ソーラーマス程度の中間質量ブラックホール連星なら光学距離にして  $10^4$  Mpc (約 326 億光年)以内、つまり宇宙のほぼ全域が観測可能であると見積もられている。また、この TOBA を 2 台用いて 1 年間同時観測を行えば、背景重力波に対し、理論的な上限値(ビッグバン元素合成理論から導き出される上限値)より厳しい上限値を設ける事ができる。

このように、TOBA は様々なサイエンスが期待できながら、LCGT や DECIGO などの計画に比べ比較的小規模な実験である。DECIGO より迅速に計画を進める事で、TOBA の観測結果を DECIGO 計画へフィードバックでき、更なる重力波天文学の発展へ繋げる事ができると期待されている。

### 3. プロトタイプ TOBA

現在、以上の様な計画が進められているが、比較的小規模とはいえ、10 m のテストマスを安定に懸架し、極低温まで冷却するのは難しい。そこで、現在までに小型のプロトタイプが開発されている。この装置の概念図は図 3 のようになっている。

小型のプロトタイプは長さ 20 cm の棒状テストマスをを用い、マイケルソン型干渉計を用

いて回転をモニターしている。低温への冷却は行っていない。また、特徴的な技術としてテストマスの懸架に超伝導のピン止め効果を用いている。これにより、強い浮上力を持ちながら回転方向の散逸を非常に少なくする事が可能となっている。

テストマスは図 4 のようになっており、棒の上部には超伝導磁気浮上用のマグネットがとりつけられている。また、テストマスの両端にはマイケルソン干渉計用のミラーがとりつけられており、これによってテストマスの回転を、干渉計の腕の長さの差動変化として測定する事ができる。

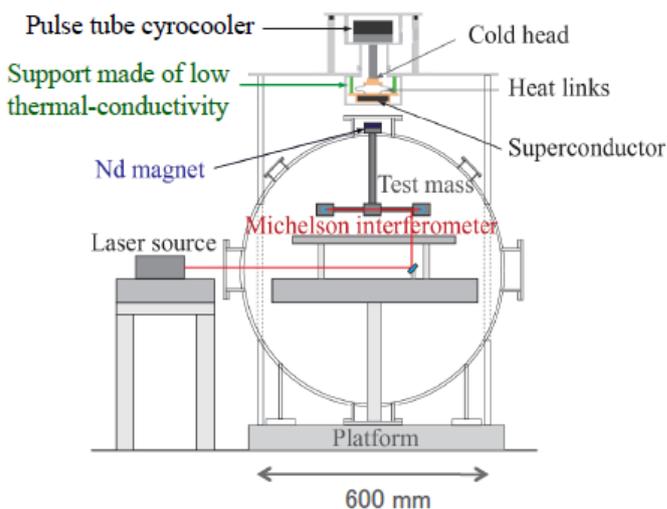


図 3: prototype TOBA の概念図

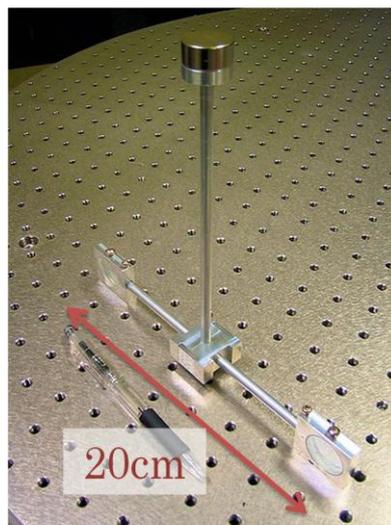


図 4: 使用されたテストマス

#### 4. 同時観測

我々は、このプロトタイプ TOBA を用いた初めての同時観測を行った。場所は東京大学の本郷キャンパスと、京都大学の北部キャンパスの 2 か所である。2 点間の距離はおよそ 370 km 離れていて、テストマスの方角は双方とも南北を向いている。この状況下では、重力波に対する 2 台のプロトタイプ TOBA の応答はほぼ等しくなる。

観測日時は 2011 年 3 月 11 日の 1:00 AM — 9:00 AM であり、観測時の平均ノイズスペクトルは図 5 のようになっている。この時の感度は、高周波では地面振動、低周波では磁場からのノイズで制限されている。

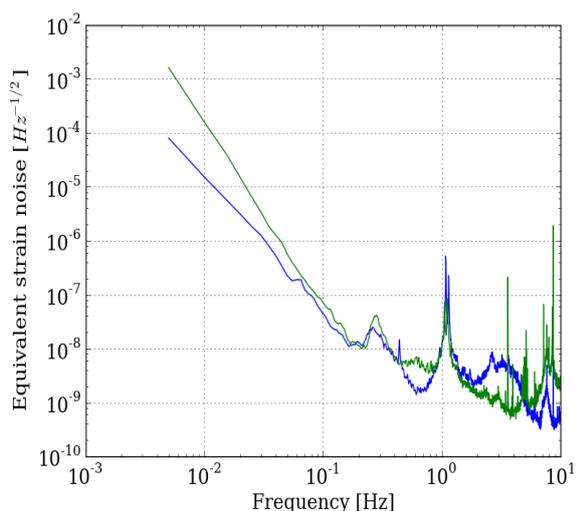


図 5: 観測時のノイズレベル

## 5. 相関解析・解析結果

4で測定した結果を用いて、背景重力波をターゲットに相関解析を行った。相関解析とは、2つの検出器からの信号の相関関数をとる解析手法である。これにより、相関のないノイズ成分を除去し、同時に2つの検出器にやってくる筈の重力波の信号を効率的に取り出す事ができる。

今回は、背景重力波をターゲットとして、この手法を用いて同時観測のデータを解析した。その結果、背景重力波の信号は検出されず、背景重力波に対して

$$\Omega_{gw} < 1.7 \times 10^{19}$$

という上限値が得られた。この時の他の結果との比較は図6に示す。

この結果は、prototype TOBA 1台での解析結果よりも悪いものとなった。この原因としては、以前の観測では見られなかった、0.3 Hz 付近のピークが挙げられる。これは micro seismic noise (主に海の波などを原因とする低周波の地面振動) と非常に似た特徴を示している。このピークが以前より大きくなったのは、観測を行った日時が東日本大震災の直前であった事もあり、観測中に前震が多発している事が原因ではないかと予想される。

従って、より良い結果を得る為には、データをとりなおす必要があると考えられる。

## 6. まとめと今後の展望

以上の様に、我々は新型の低周波重力波検出器 TOBA のプロトタイプを開発し、これら2台を用いて、背景重力波をターゲットとした同時観測、及び相関解析を行った。しかし、その結果、重力波信号は検出されず、1台での解析結果より悪い、 $\Omega_{gw} < 1.7 \times 10^{19}$  という上限値を得た。解析結果が悪くなった原因は、地震による地面振動の悪化ではないかと予想されるため、今後、より静かな日に再観測を行う予定である。

また、この再観測の際には、テストマスのアップグレードなども考慮し、更なる感度向上を目指す予定である。

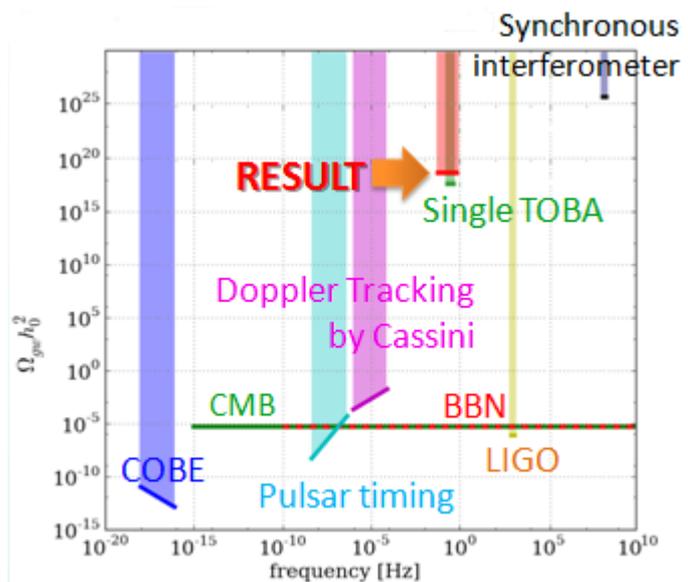


図 6: 今回の解析結果と、他の結果との比較