

## 論文の内容の要旨

# Development of a High-Angular-Resolution Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation (低周波重力波観測のための高角度分解能望遠鏡の開発)

氏名：正田 亜八香

本研究では、低周波数帯における重力波天文学の実現に向けた、高角度分解能重力波検出器の開発、及びこれを用いた観測を行った。

重力波とは、光速で伝搬する時空の歪みであり、中性子星連星やブラックホール連星の合体、超新星爆発などといった大きな質量を持つ天体の加速度的な激しい運動によって多く放出される。これらからの重力波をとらえる事で、電磁波では観測することのできない天体の半径やスピン、天体の内部の情報などを得る事ができると期待されている。その他にも、背景重力波などといった宇宙誕生直後の空間の揺らぎに起因する重力波の存在も予言されており、重力波の観測は天文学・宇宙論の双方の発展にとって非常に重要である。しかし、重力波はパルサーの公転周期の観測からその存在が間接的には証明されているものの、その影響の小ささ故に未だ直接観測には至っていない。

現在、重力波直接検出のために世界各地で大型の重力波検出器が開発されている。その主流はレーザー干渉計型重力波検出器であり、重力波のもたらす空間の歪みによって生じる干渉計の光路長変動をとらえようとしている。これらの代表としてアメリカの LIGO やヨーロッパの Virgo が挙げられる。また、日本でも KAGRA と呼ばれるレーザー干渉計型重力波検出器が建設されており、これらによって重力波の初検出が間近に迫っていると期待されている。これらレーザー干渉計は、地面振動や重力による束縛のため低周波数帯には感度を持たず、約 10 Hz 以上に感度を持つ。そのため中性子星連星合体や超新星爆発からの重力波を主な観測対象としている。一方、重力波に

よって様々な天体を観測し、重力波天文学を発展させるためには、様々な周波数帯で観測を行う事が重要である。例えば、中間質量・大質量のブラックホール連星からの重力波や、背景重力波は低周波数帯で大きな振幅を持つと考えられている。これらの重力波を捉える為に、Pulsar Timing や Doppler Tracking といったパルサー信号や衛星との通信を用いた方法で重力波の観測が試みられている他、現在 LISA や DECIGO といった宇宙空間でレーザー干渉計を構築する手法が提案されている。しかし、このような衛星ミッションは非常に大きな計画であるため、時間やコストがかかるほか、アップデートや修理が困難といった問題も生じる。

そこで我々は、地上で低周波重力波を捉えるため、Torsion-Bar Antenna (TOBA) と呼ばれるねじれ振り子型重力波検出器の開発を行っている。TOBA は直行する 2 本の棒状のテストマスを持ち、このテストマスが重力波からの潮汐力を受けて回転することを用いて重力波を検出する。ねじれ振り子の共振周波数は数 mHz 程度と非常に低いため、1 Hz 付近でもテストマスが自由質点としてはたらく、地上でも低周波重力波に対して感度を持つ事が大きな特徴である。1 Hz 付近における TOBA の主な観測対象は 1000  $M_{\odot}$  程度の質量を持つ中間質量ブラックホール連星の合体や、背景重力波である。例えば 10 m スケールの大型のテストマスを用意し、低温技術によって技術によって熱雑音を低減したうえ、その角度変動を高感度の Fabry-Perot 干渉計を用いて読み取る事ができれば、約 10 Gpc

先の中間質量ブラックホール連星の合体が観測できると期待されている。更に、検出器 2 台を用いて 1 年間の同時観測を行えば、ビッグバン元素合成から予言される理論的な制限値を超える上限値を定める事ができると期待されている。しかし、このような高感度の検出器は非常に高度な技術を複数必要とし、一度に実現するのは難しい。そこで、これまでに最初のステップとして TOBA の小型プロトタイプが開発されており、これによって原理検証、及び初観測が行われた。

そこで本研究では、最初のプロトタイプの次のステップとして、高感度化に必要な様々な技術のう

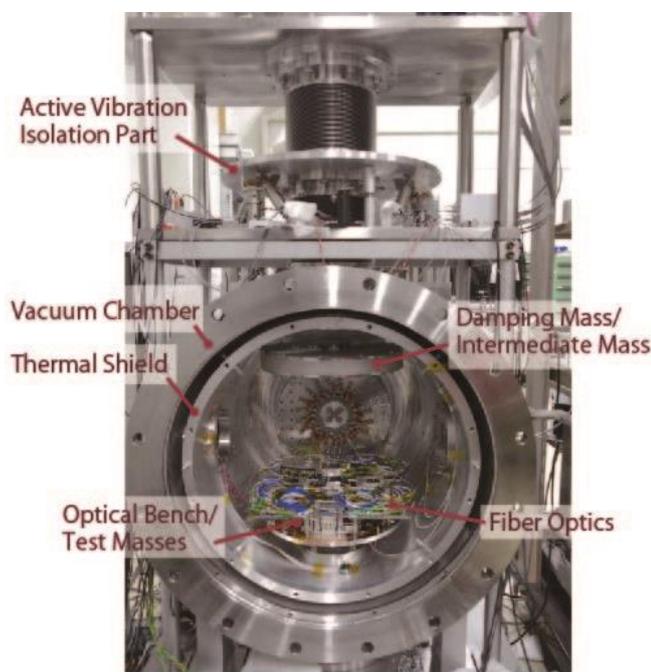


図 1 : 開発した検出器の写真。真空タンクの内部にはテストマスとセンサー・アクチュエータの乗ったオプティカル・ベンチが懸架されている。真空槽の上部には AVIT が設置され、低周波における地面振動の雑音を低減している。

ちの一部を検証する第二世代実証試験検出器：Phase-II TOBA の開発を行った。(図 1) Phase-II TOBA の主眼は、初号機で感度を制限していた地面振動雑音の低減、及びマルチ・アウトプットシステムと呼ばれる新観測手法の確立である。

マルチ・アウトプットシステムとは、1 台の検出器から 3 つの独立な重力波信号を同時に取り出す手法である。(図 2) 従来の TOBA では

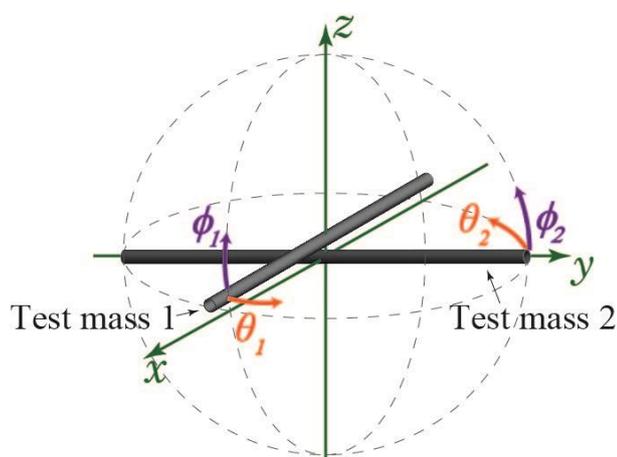


図 2 : 棒状テストマスの重力波による回転。従来は水平方向の差動回転  $\theta_1 - \theta_2$  のみを信号としていたが、本研究では  $\phi_1, \phi_2$  も新たな信号として導入された。

水平方向の回転のみをモニターして重力波検出を試みていた。この時、信号は主に上下方向から来た重力波に対して感度を持っている。一方、水平方向からやってきた重力波はテストマスを垂直方向に回転させる事に着目し、2 本のテストマスの垂直平面上の回転もそれぞれ同時にモニターすることで、更に 2 つの独立な信号が得られる事を発見した。この 2 つの信号は従来では感度の低かった方向にも感度を持つため、重力波検出が期待される頻度：event rate を約 1.7 倍向上させる事ができる。また、これら 3 つの信号は重力波源の方向によって応答が異なるため、重力波源の波源方向決定精度も向上させることができる。重力波検出器は元来アンテナの指向性が弱いため、従来の検出器では離れた 3 台の検出器で同時に重力波を検出しなければ重力波源の方向を決定できなかったものが、マルチ・アウトプット TOBA を用いれば 2 台だけで重力波源方向を決定できる。1 台だけでも波源を 8 つの候補に絞り込むことが可能となり、電磁波とのフォローアップ観測によって波源天体が特定できる可能性が高まる。このように、この手法は将来 TOBA を用いて重力波天文学を展開する際に、非常に重要な役割を果たす事が期待される。Phase-II TOBA では実際にテストマスの垂直回転も水平回転の信号を同時に取得することに成功し、その手法を確立した。

更に、Phase-II TOBA では地面振動雑音を低減するための技術を新たに導入した。一つはセンサーやアクチュエータを設置するオプティカル・ベンチをテストマスと同様振り子として懸架する事でセンサーやアクチュエータの防振を行い、1~10 Hz 帯の地面振動雑音の低減に成功した。

また、1 Hz 周辺の低周波数帯で防振を行うため、能動防振装置 Active Vibration Isolation Table (AVIT)を開発した。振り子などを用いた受動的な防振システムでは共振周波数が 1 Hz 付近にあるため、低周波数帯の防振は難しい。そこで本研究では

AVITを導入した。AVITは6本のピエゾ素子で支えられたテーブルになっていて、ピエゾ素子に与える電圧によって6全自由度にテーブルを動かす事ができる。ここではテーブルの上に置かれた地震計の信号をキャンセルするようにピエゾ素子にフィードバックをかける事で能動的にテーブルを防振する。これによって、1 Hzで約10倍の防振比を実現し、Phase-II TOBAの感度も向上させることに成功した。

他にも、2本のテストマスの重心の位置が同じになるように懸架系を設計し、2本のテストマスの回転の差分を取ることでどの程度同相雑音除去が有効かを評価し、1 Hz以下の低周波数帯において約5倍感度が向上することを確認するなど、特に振り子の特性について詳細な評価を行った。

これらによって得られた検出器の感度が図3である。1~10 Hzにおいてこれまでのプロトタイプより約100倍感度が向上している。

このようにして開発した重力波検出器Phase-II TOBAを用いて、1日間の観測も行った。観測では24時間以上にわたって制御システムが止まることなく動作し、検出器の安定性も確認できた。我々はここで得られた観測データを用いて、**matched filtering**と呼ばれるデータ解析手法による中間質量ブラックホール連星からの重力波探査を行った。今回は200  $M_{\odot}$ の質量をもつ中間質量ブラックホール連星についてのみ探査を行ったが、結果重力波信号は検出されず、200  $M_{\odot}$ の中間質量ブラックホール連星は $1.2 \times 10^{-4} \text{pc}$ 以内には存在しないとする観測的上限值を設けた。これによって我々は、200  $M_{\odot}$ 以上の連星からの重力波の世界初探査を行った。

以上のように、我々はPhase-II TOBAにおいて低周波重力波を観測・天文学を行うための検出器を開発した。これは重力波検出に必要な感度には達成していないものの、TOBAを用いた重力波天文学の創生に必要な技術検証・新手法の導入に成功している。

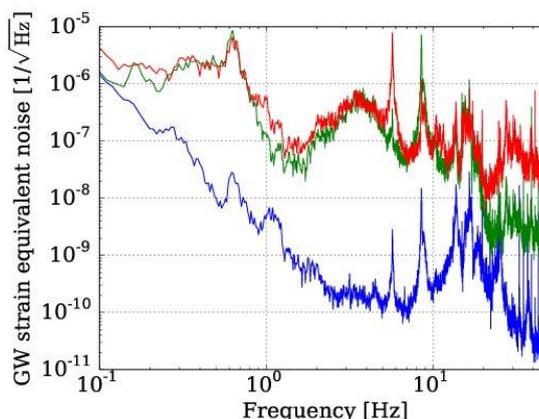


図1: Phase-II TOBAにおいて得られたノイズレベル。青線が水平方向の回転におけるノイズレベルで、赤・緑が垂直方向の回転におけるノイズレベルである。