

論文の内容の要旨

論文題目：

Spaceborne Rotating Torsion-Bar Antenna for
Low-Frequency Gravitational-Wave Observations
(回転式宇宙空間ねじれ型アンテナによる低周波重力波探査)

氏名： 穀山 涉

低周波重力波によるサイエンス

重力波とは、時空の歪みが波となって伝わる現象である。重力を表現する理論として現在広く信じられている一般相対性理論から予想されている。重力相互作用の弱さのためその直接検出は非常に難しく、2012年現在、直接検出がなされたとの報告はない。今後数年内には、現在世界で建設がすすむ大型レーザー干渉計型検出器によって、100～1000 Hz 帯の重力波が初検出されるだろうとの期待が高まっている。

一方、低周波数帯 (10^{-4} ～ 1 Hz 程度) にも、とても興味深い科学観測対象があると予想されている。例えば中間質量から巨大ブラックホールの連星合体を観測することによる銀河の進化過程の解明、質量比が大きな連星合体の観測による重力理論の検証、宇宙加速膨張の重力波による (電磁波によらない) 計測、宇宙背景重力波の直接検出によるインフレーションの物理モデルの決定、などといった電磁波では成しえない科学的成果が考えられている。しかし、残念ながらこの周波数帯では従来の地上レーザー干渉計重力波検出器では感度が十分でない。パルサーからの電波や宇宙マイクロ波背景放射を利用した低周波重力波観測も行われているが、周波数が 10^{-6} Hz 以下と、超低周波数帯しか観測できない。よってこの周波数帯での重力波探査はあまり進んでいないというのが現状である。

そのような、地上検出器では到達できない帯域の重力波へアプローチする方法として、三つの方向性が考えられる。一つは、宇宙空間に検出器を打ち上げるという方法である。宇宙空間は基線長を非常に長くできるため重力波に対する感度が向上し、大きな検出器雑音をもつ低周波帯の観測が可能となる。それとともに、地球上には地面の振動や重力場変動などといったノイズが存在するため、それらを避けられるという極めて大きな利点もある。実際に、レーザー干渉計スペースアンテナ (LISA) 計画といった宇宙空間重力波望遠鏡が提案・

検討されている。二つめは、地上検出器でも低周波数重力波に感度を持つように、検出法を工夫するという考え方である。後に述べるねじれ型アンテナ (TOBA) は、そのために提案された。三つめは、重力波の周波数変換である。低周波数の重力波を、一般に検出器ノイズの少ない高周波数帯での信号に変換することができれば、観測が容易になるというわけである。この方法は今回著者らが実現した回転 TOBA によって行われた、新規の手法である。

ねじれ型アンテナ：TOBA

ねじれ型アンテナ (Torsion-Bar Antenna, TOBA) とは、低周波重力波の探査を目的とした新しいタイプの重力波検出器である [Ando, *et al.* Physical Review Letters, 2010]。これはレーザー干渉計型や共振型の検出器とは異なり、重力波による潮汐力が剛体の回転変動として現れる効果を利用する。そのため、小型ながら低周波に感度のある検出器が実現できると期待されている。実際に実験室でのプロトタイプ検出器も開発されており、それを用いた 0.1 Hz 帯重力波の試験的観測も行われてきた [Ishidoshiro, *et al.* Physical Review Letters, 2011]。

回転 TOBA による周波数変換とその利点

TOBA は剛体の試験質量を用いているため、検出器全体を回転させることが可能である。このような装置を回転 TOBA と呼ぶ。著者らは、この回転 TOBA による重力波の周波数変換観測法を提案した。具体的には、検出器の回転によって重力波に見かけの周波数変調がかかり、非常に低い周波数の重力波が検出器にとっては回転周波数の二倍近くの周波数の信号として見えるというものである。周波数変換時の、信号に含まれる重力波の関係を示しているのが Figure 1 である。観測周波数は、検出器の回転周波数を ω_{rot} とすると、その 2 倍の周辺となる。この時、観測中心周波数 ($2\omega_{\text{rot}}$) より少し低い側には、Figure 1 の左側のように、円偏光が検出器の回転と揃う場合 (これをフォワードモードと呼んでいる) の重力波を受ける。一方少し高い側には、Figure 1 の右側のように、逆回転の円偏光の重力波 (これをリバースモードと呼ぶ) が入ってくる。重力波は通常はプラス、クロスの二つのモードで表されることが多いが、それらを基底変換したものが円偏光モードである。

この回転 TOBA がもつ、通常の重力波検出器にはない新しい利点は、以下の三点である。まずひとつは、前述したように周波数変換観測が可能となることである。周波数が低くなるにしたがい、一般に検出器の電気系や外乱雑音などさまざまなノイズが急激に大きくなる。さらに、支持系の共振周波数以下では検出器が重力波に応答しなくなる (自由質点系でなくなる) ため、重力波信号を高周波に変換できるというのは画期的な利点となる。加えて、回転周波数を変化させ観測信号帯域を自由に調整することで狭帯域ノイズを回避するという新たな手段も考えられる。

二つ目は、検出器から得られる重力波の情報が通常の検出器の二倍になるというものである。これは検出器信号のうち二つの周波数領域 (フォワードモード, リバースモードに対応する) を同じ重力波の観測帯域とするためであり、一台の検出器が二台分の観測をしていることに相当する。ここで、通常の重力波検出器一台は、電磁波観測に例えると「一つの検出素子」でしかない。つまり、複数台の同時観測を行わなければ指向性を持たせることが難し

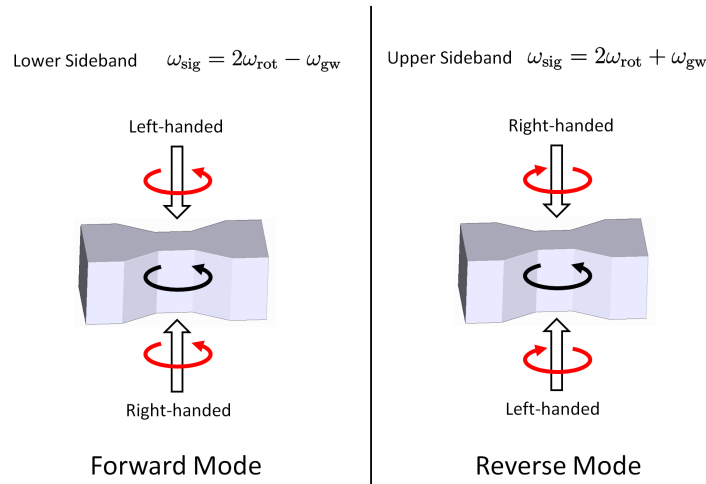


Figure. 1: Separation of two polarization modes using a rotating TOBA

く、波源の方向・強度・偏光を決められない。ところが、回転 TOBA の場合は、同じ情報量を得るために半分の台数で良くなるという利点を持つこととなる。

最後は、Figure. 1 で示されているように、直接円偏光重力波に対する感度をもっているという点である。これは、回転運動によって空間の回転対称性がやぶられているからであるともいえる。この性質を利用すれば、連星系からの重力波の円偏光を直接観測し、軌道パラメータ決定に用いることができるだろう。さらに、円偏光そのものの基礎物理的重要性も、理論的に予想されている。例えば、宇宙初期にパリティ対称性の破れが存在した場合、宇宙背景重力波の円偏光モードの一方にエネルギーが偏っていると予想されている。さらに、弦理論や量子重力理論などの効果で（現在の）重力相互作用がパリティ対称性を破っている場合、重力波の左右の円偏光に進行速度の違いがある可能性が指摘されている。

宇宙空間回転 TOBA による重力波観測

著者らは、 $\text{SWIM}_{\mu\nu}$ と呼ばれる小型の TOBA を製作し、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の開発した小型人工衛星 SDS-1 に搭載した。Figure 2 に $\text{SWIM}_{\mu\nu}$ とその内部の試験質量を、Figure 3 に SDS-1 衛星の写真を示す。衛星がスピン安定状態の時に観測を行うことで、 $\text{SWIM}_{\mu\nu}$ が回転 TOBA を実現した。2009 年 1 月に打ち上げられた $\text{SWIM}_{\mu\nu}$ は、1 年半に及ぶ運用に成功し、動作確認、制御状態への移行、ノイズレベルの測定、キャリブレーションなどを順次行った。2010 年 6 月と 7 月には、地球を延べ 3 周回するほどの時間（延べ 360 分間）の観測運転を実施した。観測時は衛星をスピン安定（回転の周波数は 46.5 mHz）させ、その回転軸は天の川銀河中心方向に指向させた。その際、機器から得た実験データが一部破損するというトラブルが発生したが、データ転送を工夫し修復措置を施すことで解決した。

観測データの統計的解析によって、宇宙背景重力波の臨界エネルギー密度に対する比 (Ω_{gw}) の、フォワード・リバース各モードについての上限值を算出した。解析にあたっては、頻度主義的上限值とベイズ的上限值の二種類の評価法を用いた。まず、統計誤差のみを考慮した

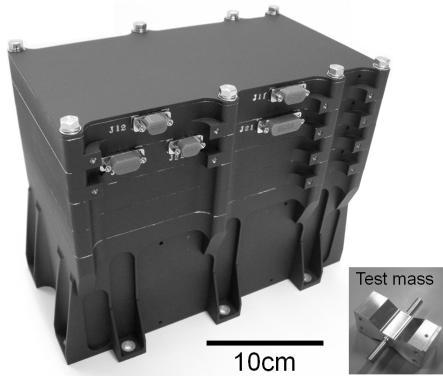


Figure. 2: SWIM_{μV} and the test mass

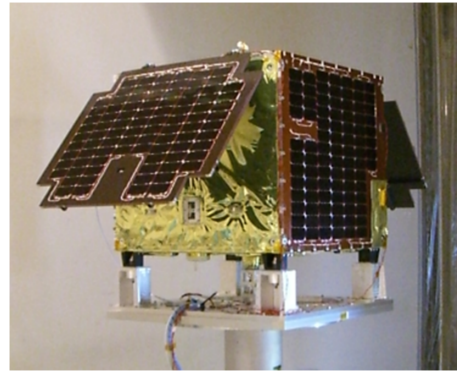


Figure. 3: SDS-1 satellite

95 %有意水準上限値（観測周波数 18 mHz, 帯域幅 4.5 mHz）を求めた。さらにこれを踏まえ、検出器の系統誤差が 200 %であるとした保守的上限值を算出した。良好な結果を得た頻度主義的手法を選択したところ、最終的な結果を $\Omega_{\text{gw}}^{\text{FW}} < 1.7 \times 10^{31}$ （フォワードモード）、 $\Omega_{\text{gw}}^{\text{RE}} < 3.1 \times 10^{30}$ （リバースモード）と得た。SWIM_{μV} は小型軽量な実証機であるため、他の観測法と比較すると感度が良いわけではない。しかし、この結果は円偏光モードについての背景重力波の上限值を定めた初めての例である。ここで、二つのモードに上限値の違いが生じているが、これはモードごとに検出器信号周波数が異なりノイズレベルに差があるからであって、違う振幅の重力波を検出しているわけではないということに留意する必要がある。

意義と今後の展開

宇宙空間における回転 TOBA を実現したことで、先述した低周波重力波観測へ向けた 3 つのアプローチ（宇宙空間検出器、TOBA、周波数変換）をいずれも実施したといえる。また、技術的な側面からも、SWIM_{μV} によって単体として初めての軌道上重力波検出器を製作・運用することができたと同時に、リソースの少ない小型衛星を用いた成果をあげられたという重要性がある。将来の展開として、全長 4m 程度の宇宙空間回転 TOBA（H-IIA ロケットのフェアリングに収まるサイズである）でノイズを十分に低減したものが実現すれば、 $10^4 \sim 10^7$ 太陽質量のブラックホール連星合体の観測などの科学的成果を得られると考えられる。このように、回転 TOBA が低周波重力波天文学の重要な手段の一つとなる可能性もある。今後 SWIM_{μV} の成果が、現在は困難である低周波重力波検出の最初の試みとして、発展していくことが期待される。

要約

「回転式ねじれ型アンテナ」という低周波重力波観測のための新しい手法を提案した。宇宙に小型装置を打ち上げ、その観測手法を適用した。これは、現在の検出器では困難な低周波重力波検出の試みの第一歩となったといえる。