

## 論文内容の要旨

論文題目 Search for low-frequency gravitational waves using  
a superconducting magnetically-levitated torsion antenna

(超伝導磁気浮上型ねじれアンテナを用いた低周波重力波の探索)

氏名 石徹白 晃治

重力波とは光速で伝搬する時空の歪みである。その存在は、一般相対性理論の帰結として、Einsteinにより約90年前に予言された。すでに重力波の存在は間接的にTaylorとHulseにより証明されている。彼らは、長期間にわたり連星中性子星系の軌道周期を観測し、その減少率が重力波の放出によると仮定したときの理論的な予言との一致を示したのである。この功績により、彼らは1993年にノーベル物理学賞を受賞した。しかし、現在までのところ、重力波の直接検出に成功した例は無い。これは、重力波と物質との相互作用が非常に小さいためである。一方で、その相互作用の小ささにより、重力波を天文学に応用することで、通常の光では見る事のできない星のコアのダイナミクスや晴れ上がり以前の宇宙の様子を直接観測できると考えられている。そのために、重力波の直接検出は一般相対性理論の検証になるだけでなく、重力波を用いた新しい天文学(重力波天文学)を開拓することになる。

重力波のなかでも、特に低周波(1 mHz - 1 Hz)の重力波は我々の宇宙に対する理解を劇的に深める可能性がある。この周波数帯域では、初期宇宙における宇宙自身に起因する重力波や中間質量または超巨大ブラックホールに起因する重力波が予言されている。これらを精密に調べることで、晴れ上がり以前の宇宙の様子、銀河形成におけるブラックホールの役割や超巨大ブラックホール形成のメカニズムなどを解明できると考えられている。

しかしながら、現在のところ低周波(1 mHz - 1 Hz)に感度を持つ重力波検出器は存在しない。いくつかの宇宙空間を利用した低周波重力波検出器が提案されているが、宇宙重力波検出器には多数のリスクが付きまとう問題がある。例えば、打ち上げの失敗や、一度打ち上げた後のチューニングの難しさ、太陽風や宇宙線に起因する電氣的トラブルなどである。さらに、宇宙重力波検出器は現実問題として稼働時間が非常に制限される。そのために、我々は地上で低周波に感度を持つ重力波検出器の開発が重要であると考えられる。

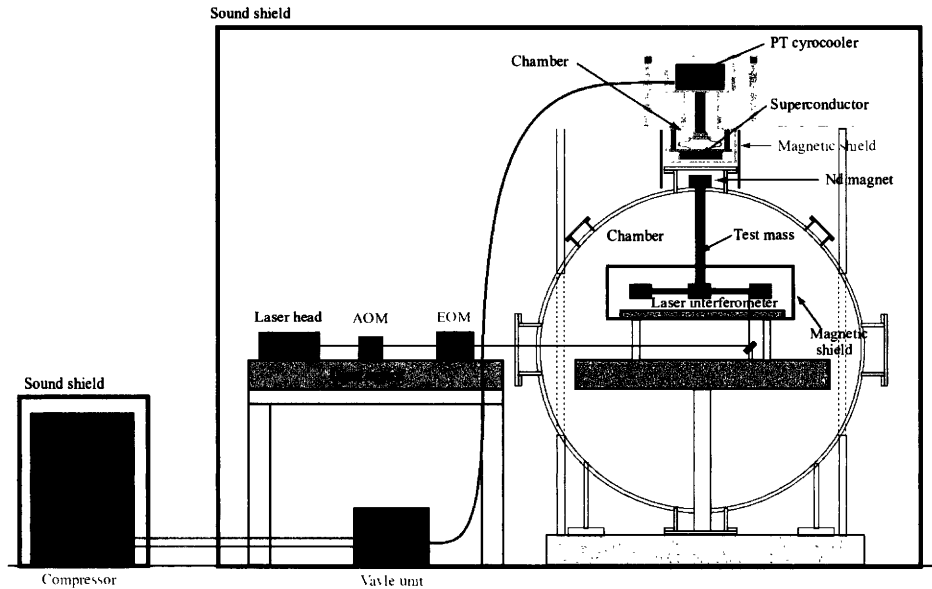


図 1: プロトタイプアンテナの概要

このような背景のもと、我々は超伝導磁気浮上で非接触支持されたねじれ振り子を利用した新しい地上低周波重力波検出器 (超伝導磁気浮上型ねじれアンテナ) を提案した。ねじれ振り子とは、力の精密測定分野で広く使われている装置であり、試験質量とそれを支持する機構からなっている。このねじれ振り子で、重力波による潮汐力を測定するのが我々の考えである。特に、重力波への高い感度を持たすために長い棒状試験質量を用いる。通常のねじれ振り子では、力 (トルク) に対する分解能は、系が有限の熱浴に接しているに起因する熱雑音で制限される。この熱雑音の大きさは、揺動散逸定理より、支持系の機械損失に依存することがわかっている。そこで、我々は超伝導磁気浮上型で棒状の試験質量を非接触支持する。この超伝導磁気浮上により、長くて重い (重力波の感度が高い) 棒状試験質量を、小さい損失 (小さい熱雑音レベル) で支持することが可能となる。試験質量としてアルミニウム製の長さ 10 m, 質量 8 kg の円柱を使用することで、0.1 Hz で  $10^{-18} \text{ Hz}^{-1/2}$  の雑音レベルを期待できる。この雑音レベルは本格的な宇宙重力波検出器と比べると 1 桁悪いが、宇宙重力波検出器と比べて長期間の観測運転が可能である。そのために、重力波天文学を実践する上ではより有利である。

上記アンテナを用いると数 10 Mpc 以内にある中間-巨大質量ブラックホール起源の重力波を検出できる。また、低周波には特異なパルサーの存在が知られている。そのようなパルサーからの重力波を検出、また振幅上限値を求めることで、パルサーの物理や極限状態における状態方程式に関する新たな知見を得ることができる。さらに、アンテナ 2 台で 1 年間程度の観測運転を行えば、 $h_0^2 \Omega_{\text{gw}} = 3 \times 10^{-6}$  程度のエネルギーを持つ宇宙背景重力波を信号雑音比 5 で検出できる。ここで  $h_0$  は規格化されたハッブル定数、 $\Omega_{\text{gw}}$  は宇宙の臨界密度エネルギー密度  $\rho_c$  で規格化された重力波のエネルギー密度である。この性能があれば、重力波が検出できない場合でも、 ${}^4\text{He}$  の存在比率による '間接的' な上限値  $6 \times 10^{-6}$  と比べて、様々

な宇宙論モデルに対して2倍程度厳しい制限を'直接的'に与えることができる。また、間接的な制限に影響されない天文的起源の背景重力波に制限を与えることができる。この制限を利用して、第一世代天体の形成率などに対する制限も得られる。

このような豊かな可能性を持つ超伝導磁気浮上型ねじれアンテナであるが、コア技術である超伝導磁気浮上が重力波探索のような精密計測へ応用された例は無い。そこで、我々は東京大学本郷キャンパスにおいて、プロトタイプアンテナを開発した、またそのプロトタイプアンテナを用いて世界に先駆けた低周波 (0.1 - 1 Hz) 重力波の探索を行った。プロトタイプアンテナの目的は、超伝導磁気浮上型ねじれアンテナの原理的な有効性や将来性を実証することである。そのために、1. 超伝導磁気浮上で非接触支持された棒状試験質量の力学特性の測定、2. デザイン雑音レベルでの動作の検証、を行った。

実際に開発したプロトタイプアンテナの概要は図1にまとめられている。超伝導磁気浮上により非接触支持された逆T型の棒状試験質量 (質量: 133 g, 横長さ: 20 cm) が重力波により回転する効果をレーザー干渉計で測定する構成になっている。超伝導磁気浮上は、試験質量の上部に取り付けられた永久 (ネオジウム) 磁石とその上に置かれた超伝導体の相互作用で実現されている。

力学的特性 (回転自由度のダンピング定数とバネ定数) を棒状試験質量 (質量 131 g) の自由減衰から測定した。結果、それぞれ  $1.2 \pm 0.7 \times 10^{-8}$  Nms/rad と  $3.6 \pm 2.1 \times 10^{-7}$  Nm/rad であった。これらの値は、50 g 程度の負荷を与えた時のタングステンワイヤーとほぼ同じ程度である。このことは、通常のワイヤーでは難しい小さいダンピング定数と大きい支持力を両立できたことを示している。現在のダンピング定数は残留ガスの影響で制限されていると考えられる。ただし、渦電流のダンピングに与える影響も完全には否定できない。バネ定数は共振周波数 5 mHz に対応しており、我々の観測帯域 0.1 - 1 Hz から考えると十分な値である。全体を組み合わせた後、我々はプロトタイプアンテナを磁場カップリング雑音と地面振動雑音で制限されるデザイン雑音レベルで動作させることに成功した (図2)。これらの結果は、我々の提案する超伝導磁気浮上型ねじれアンテナの原理的な有効性、将来性を示すものである。今後は、現実的な雑音 (磁場カップリング雑音と地面振動雑音) の抑圧の実験的検証へ進むことができる。

現時点で、低周波数帯 (0.1 - 1 Hz) で感度を持つ重力波検出器は本プロトタイプアンテナのみである。そこで、我々は2009年夏に観測運転を行い、観測データのなかから連続かつ安定している320分のデータを用いて、PSR J2144-3933 起源の連続重力波と 0.2 Hz のバンド幅 10 mHz で背景重力波の探索を行った。PSR J2144-3933 は周期 8.51 秒というデスラインを超える周期を持ちながら、電波を放出する特異パルサーの一つである。残念ながら、我々の探索では有意な重力波信号を検出できなかった。そこで、連続重力波の振幅と背景重力波のエネルギー密度の上限値を評価した。PSR J2144-3933 起源の連続重力波の振幅に関して、頻度主義的の上限値  $2.8 \times 10^{-9}$  とベイズの上限値  $8.4 \times 10^{-10}$  を得た。背景重力波に関しては、 $h_0^2 \Omega_{\text{gw}} = 8.1 \times 10^{17}$  という頻度主義的の上限値を与えた (図3)。また、上記の上限値はすべて信頼度 95% である。これらの結果は、他の周波数や他のパルサーで得られた上限値と比較すると必ずしも良い値でないが、今までとは相補的な情報を我々に与えてくれる。

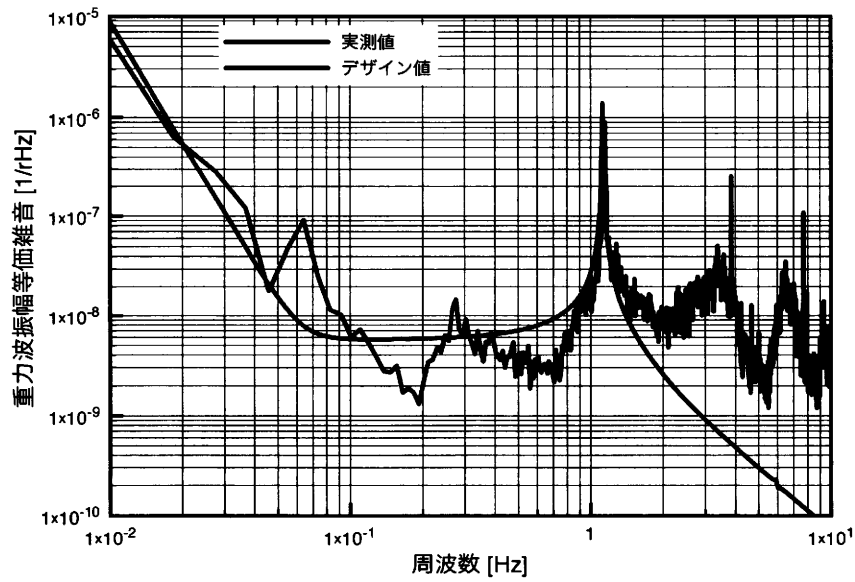


図 2: 動作試験の結果: 実測した重力波振幅等価雑音とデザインレベルの一致.

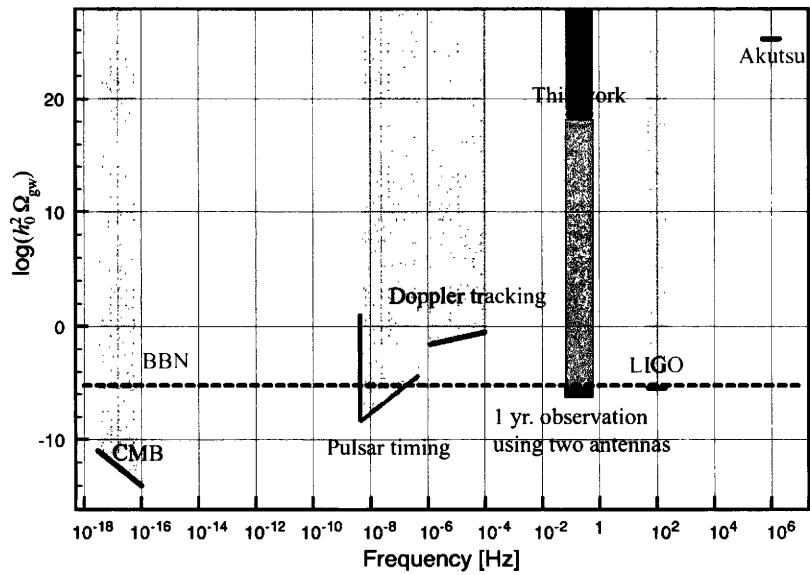


図 3: 宇宙の臨界密度で規格化されたエネルギー密度に対する今までの棄却領域 (水色) と本研究における新しい制限 (赤線) と棄却領域 (薄い赤). また, 制限 (緑線) と棄却領域 (薄緑) は 10 m の巨大アンテナを 2 台使うことを考えた最終目標値である.