

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

Wideband observation of radio pulsars towards detection of low-frequency gravitational waves

低周波重力波の検出へ向けた電波パルサーの広帯域観測

熊本大学大学院自然科学教育部 理学専攻 物理科学コース

(主任指導 高橋 慶太郎 教授)

論文提出者 喜久永 智之介

主論文要旨

2015年に米国のレーザー干渉計 LIGO によって、重力波が初めて検出された。この重力波の波源は恒星質量程度のブラックホール連星(以下、BH)であり、これは 100 Hz-10 kHz の周波数に対応する。一方で、宇宙には太陽の 倍以上の質量を持つ超大質量BH(以下、SMBH)が存在する。この SMBH から成る連星の場合、nHz- μ Hz の低周波重力波が放射されると考えられており、これは LIGO のようなレーザー干渉計の観測周波数帯に対応していない。恒星質量程度の BH は、恒星の超新星爆発により形成されることが知られているが、SMBH の形成過程については未だ謎が多い。そのため、これらから放射される重力波の検出により SMBH の進化に関する情報が得られると期待されている。この低周波重力波の検出法として、Pulsar Timing Array(PTA)という手法が存在する。PTA はパルサーと呼ばれる天体を時計として用いることで重力波検出を目指す。パルサーは周期的なパルスとして観測される天体であり、安定した周期でパルスが観測できる。ミリ秒スケールのパルス周期をもつミリ秒パルサーは特にパルス周期が安定しており、このパルスが到来する時刻を正確に予測することができる。しかし、重力波以外のメカニズムでパルスの到着時刻が予測とずれることも観測されており、このようなずれの解明や、パルスを放射するメカニズムの理解が今後の重力波検出に重要となる。本論文では、来たる低周波重力波天文学時代へ向けて、パルス到着時刻のノイズの理解を目指したパルサーの電波観測研究について記述する。第 2 章では、現行の PTA の観測結果から予想される超低周波重力波への制限を利用し、楕円軌道超大質量ブラックホール(Supermassive Blackhole, SMBH)連星へ与えられる制約について議論する。非常に安定したパルス周期をもつミリ秒パルサーは、PTA による低周波重力波(nHz - μ Hz)検出へ利用される。低周波重力波の主な波源は、サブ pc スケールの軌道半径をもつ SMBH 連星である。一方で、それよりも前の段階の pc スケールの軌道半径をもつ SMBH 連星は、現行の PTA では検出できない nHz 以下の超低周波重力波を放射す

る。この段階の SMBH 連星は、周囲のガスや星との相互作用で 0.9 以上の高い離心率を獲得する傾向にある。本節では、PTA の感度曲線を拡張し、単一の楕円軌道 SMBH 連星からの超低周波重力波に対して制限を与える手法を展開する。楕円軌道連星からの重力波は高調波成分を持つため、円軌道連星からの重力波とは全く異なる波形を持つ。さらに、我々は NANOGrav11 年データセットの解析結果を利用して、この制限を近傍の SMBH の仮想的な伴星へ適用した。その結果、M87 中心の SMBH の仮想的な伴星に対して、離心率 0.9、軌道長半径 1pc、近点において質量比 0.16 以上の SMBH 連星は存在し得ないことを示した。第 3 章では、パルサータイミング観測におけるジッターノイズ測定について記述する。高精度なパルサータイミング観測において、パルス到着時刻の精度はジッターノイズによって制限される。そのため、ジッターノイズの大きさについて系統的な特徴を調査しておくことは PTA の重力波検出において重要である。また、ジッターノイズ自体もパルサー磁気圏の環境を反映しており、本節では、Indian PTA の観測プロジェクトで得られた低周波広帯域データから、最も明るいミリ秒パルサーである PSR J0437-4715 のジッターノイズの測定結果について報告する。我々は選定した全ての観測において、巨大メートル波電波望遠鏡(uGMRT)の Band 3 (300-500 MHz)と Band 5 (1260 – 1460 MHz)の両方でジッターノイズを測定できた。Band 3 の帯域における PSR J0437-4715 のジッターノイズ測定は世界初であり、Band 5 は先行研究とよく一致していた。さらに、我々は 300 – 500 MHz においてジッターノイズの周波数依存性を調査した。その結果、ジッターノイズが高周波ほど大きくなっていることを示した。この傾向は、先行研究で示された高周波ほどジッターノイズが小さくなる傾向と逆であり、先行研究との間の周波数にジッターノイズのターンオーバーがあることを示唆している。uGMRT の Band 4 (550 – 750 MHz)や、Square Kilometre Array のような将来の高性能な望遠鏡の観測により、このターンオーバーについて詳細に調べることができるだろう。また、我々は高精度な分散量度(Dispersion Measure, DM)測定にジッターノイズが与える影響についても調査した。我々は、短い観測時間では、ジッターノイズにより DM の精度が制限されることを示した。この制限は、パルサーごとにジッターノイズを軽減できる最適な観測時間を決めることで克服できるだろう。

第 4 章では、PSR J1107-5907 の超広帯域観測について記述する。PSR J1107-5907 は、パルス周期 0.25 秒のパルサーであるが、明るさが 1000 倍以上の状態へランダムに遷移することが報告されている。我々は、Parkes 電波望遠鏡(Murriyang)に搭載された Ultra Wideband Low-frequency receiver (704 – 4032 MHz)を用いて PSR J1107-5907 を観測した。平均パルス解析からは、回転量度(RM)がパルス位相で極端に変化していることが判明した。RM の変化は、円偏波強度が最も強く、直線偏波角が急激に変化している位相で起きていた。これはパルサー磁気圏の伝播で偏光角が変化したことを示唆している。また我々は、単一パルスデータの取得にも成功した。PSR J1107-5907 の単一パルスは平均パルスから著しく変化しており、波形・周波数依存性・偏波特性の全てにおいて多様な性質を示していた。一部のパルスはマグネターや高速電波バーストとの類似性があり、これらの高エネルギー天体の起源を解明する手がかりになる可能性がある。