

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 金山 雅人
学位 博士 (理学)
学位記番号 新大博 (理) 第 66 号
学位授与の日付 平成 27 年 9 月 24 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
博士論文名 Hilbert-Huang 変換を用いたバースト的重力波の解析

論文審査委員 主査 教授・大原 謙一
副査 教授・宮田 等
副査 准教授・浅賀 岳彦
副査 教授・小池 裕司
副査 准教授・西 亮一

博士論文の要旨

本申請論文の研究内容は、重力波観測装置による観測データから重力波信号を取り出し、その重力波の性質を明らかにする、重力波データ解析に関するものである。日本では、大型低温重力波観測装置 KAGRA が、米国の LIGO、イタリア-フランスの Virgo と並んで建設中である。LIGO は 2015 年後半に、Virgo は 2016 年に観測開始を予定している。KAGRA は、2015 年 12 月に初期バージョンを稼働させ、2017 年度から本格的な観測を予定している。

宇宙からの重力波の源として最も有力なのは、コンパクト連星の合体である。これは、中性子星やブラックホールの二重星が重力波を出しながら徐々に接近していき、最後に衝突・合体する現象である。中性子星や恒星質量程度のブラックホールからなる連星合体で、合体直前までに放射される重力波はよく研究されており、その波形は解析的に精度よく予測されている。したがって、この重力波のデータ解析では、予測された波形と観測データの相関を取ることで重力波をとらえるという、マッチド・フィルター法の適用が効率的である。いっぽう、連星中性子星の合体後や大質量のブラックホール連星の合体、あるいは、別の重力波源として有望な超新星爆発、ガンマ線バーストからの信号は、持続時間が数十ミリ秒程度と非常に短い、あるいは、爆発メカニズムに不定性が大きいなどのため、放射される重力波の波形を正確に予測できないなどの理由により、マッチド・フィルター法を用いるのが困難である。したがって、このようなバースト的重力波のデータ解析には、別の手法を用いる必要がある。

バースト的重力波の解析には、これまで、短時間フーリエ変換やウェーブレット変換や用いた方法が提唱されているが、決定的なものは見つかっていない。そこで、申請者は、地球物理学、生物物理学、医学などの分野で、時系列データや画像解析に対する新しい解析方法として提唱されている Hilbert-Huang 変換 (HHT) を重力波データ解析に適用する方法の研究を行ってきた。一般に、バースト的重力波の解析では、大きなノイズの中の重力波を取り出すために、時系列データに含まれる振動成分の振幅と振動数の時間変化を捉えることが重要である。しかし、従来の方法では、フーリエ変換の不確定性原理のため、これらの時間変化を精度よく求めることが困難である。いっぽう、HHT には、このような不確定性原理がないため、精度よい解析を可能とすることが期待できる。

HHT では、まず、解析する信号を Empirical Mode Decomposition (EMD) により、局所的に異なる周波数帯を持った複数の信号(Intrinsic Mode Function = IMF)に分解する。さらに、各 IMF に対して Hilbert 変換を用いて、瞬時振幅と瞬時周波数を求めて、時間・周波数、時間・振幅解析を行う。ここで重要なことは、EMD は、経験則に基づいた適用型 (adaptive)モード分解を行うため、計算の中に含まれるパラメータを、解析する時系列データの性質に応じて適切に決定することが必要ということである。

申請者は、まず、バースト的重力波の最も単純なモデルである sine-Gaussian 信号とホワイト・ノイズを用いて最適パラメータの推定法を明らかにした。一般に、単純な EMD では、mode mixing という現象により、解析精度が非常に悪くなることがある。mode mixing とは、ひとつの IMF に複数の周波数帯が混在する、あるいは、同じ周波数帯の信号が複数の IMF に分離するという現象である。これを解決するために、ensemble EMD (EEMD)という方法が提唱されている。EEMDでは、解析する時系列データに小さな white noise を人工的に付加して EMD を実行する。異なる white noise を用いて、多数回これを繰り返し、IMF の ensemble を作った後、その ensemble 平均を取るというものである。申請者は、重力波のデータ解析でも、一般に EEMD が必要不可欠であることを明らかにした。

さらに、バースト重力波探査のためのアラートシステムの構築について詳しく考察した。ここでは、EEMD によって得られた IMF の振幅について、信号が含まれる場合と信号が含まれずに noise だけの場合の違いから、重力波信号が含まれるかどうかを推定しようというものである。同様の手法として、短時間フーリエ変換やウェーブレット変換を用いたものが提唱されているが、HHT を用いることにより、より精度のよいシステムの構築が可能であることを明らかにした。これは、重力波観測と電磁波やニュートリノによる天体観測を連携して天体観測を行う、マルチメッセンジャー観測につながる重要な成果である。

また、連星中性子星の合体の際の重力波に対して、HHT 法の適用についても検討した。連星中性子星の合体直前の重力波解析では、マッチド・フィルター法が最適であることが明らかになっているが、合体後の複雑な重力波波形に対して、HHT 法を用いて、時間・振幅、時間・周波数解析を行うものである。中性子星の合体後、最終的にブラックホールが形成される前に、超大質量中性子星が一時的にできるか、できたと場合それがどの程度持続するかは、中性子星物質の状態方程式に依存している。この中性子星物質の状態方程式の決定は、天体物理学だけでなく原子核物理学の研究においても非常に重要なものである。申請者は、連星中性子星の合体に関する数値相対論のシミュレーションによって得られた、様々な波形データを用いて、HHT 法による解析を行い、中性子星物質の状態方程式に対して精度よく制限を与えることが可能であるということを明らかにした。

審査結果の要旨

このように申請論文の研究内容は、レーザー干渉計を用いた重力波探査の研究の進展に新境地を開くとともに、将来の重力波を用いた天体観測である重力波天文学の実現に向けて重要な成果を含んだものであり、学術的にも価値の高い内容である。

特に、HHT 法という信号解析の新しい手法をいち早く重力波データ解析に適用するという意欲的な研究である。最初に、HHT 法が実際に重力波のデータ解析に応用できるのかを明らかにするために、HHT に含まれる最適パラメータの推定という地道な研究から始めて、実際の重力波探査や重力波天文学の推進のための重要なアイデアを提唱するものとなっている。これらは、高いオリジナリティを持ちながら、着実に研究を進めてきた成果である。この手法を用いた研究としては、世界で最も進んだ研究を行っており、今後の進展が大いに期待される。

よって、本申請論文は、博士 (理学) の学位論文として十分値するものと判定した。