

論文審査の結果の要旨

氏名 小野 謙次

本論文は、コンパクト連星合体重力波(CBC)の振幅に強く影響を与える、距離と軌道傾斜角の決定の際に発生する、逆問題の正則化の問題について研究を行ったものである。

CBC 重力波の発生源までの距離や軌道傾斜角の正確な評価は、宇宙膨張則を決めるハッブル定数の決定や、発生源の天体物理学的研究に非常に重要であるが、観測データから重力波信号の振幅を決める際には悪条件問題と呼ばれる問題が存在して、正確な決定が難しくなる天球面上の領域が存在する。これは重力波信号と観測データを結びつける行列の行列式がゼロに近くなり、逆問題の結果が観測データのノイズに強く影響されて、正確な評価が困難になるという問題である。その問題の解決方法としては、正則化の手法が導入されている。

これは行列に付加的な項を足して正則化し逆行列を計算し、逆問題を解く方法である。このような問題は、画像解析の分野などでも用いられている手法であり、重力波データ解析にも導入されている。しかしながら、従来の研究では正

則化によって生じるパラメーター推定値のバイアスの評価を無視して行っていたという問題点があった。また、これまでは重力波信号として、波形が未知のバースト重力波のみ扱われており、CBC 重力波信号における正則化の研究は行われていなかった。本論文はコンパクト連星合体重力波信号の距離と軌道傾斜角の決定問題に、正則化の手法を初めて適用すると共に、正則化による決定されるパラメータ値の誤差が最も小さくなるように正則化パラメータの最適化を行うという、従来の研究では行われていなかった問題にも取り組んだというものである。

状況設定としては、LIGO2 台の検出器による検出を想定する。軌道傾斜角などが異なる 2 種類の CBC 重力波信号を想定し、それぞれの重力波について、逆問題の悪条件の強さが異なる天球面上の 10 箇所を選び重力波の到来方向とする。また、正則化のための行列としては、正則化パラメータに依存した 2 種類の行列を考える。そして、正則化パラメータを含んだ逆問題を解く。その際、正則化によって生じるバイアスが、悪条件によって引き起こされる誤差を超えないという拘束条件を課して、正則化パラメータの最適を行う。この手法は一般に、KKT 条件付きのラグランジュの未定乗数法と呼ばれるものである。

本論文ではこの最適な正則化パラメータを解析的に導くことに成功した。そのパラメータを用いることによって、距離と軌道傾斜角を求めて、決定精度を議論することができる。決定精度を統計的に議論するために本論文では、Nested sampling アルゴリズムを用いたベイズ推定の手法を用いて、誤差領域を決定した。

その結果、軌道傾斜角が大きい場合について、2つのうち1つの正則化行列の場合に、正則化パラメータを導入することで全天の約99%の領域で、2シグマの統計的誤差の範囲内に誤差が収まることが分かった。またこの場合には拘束条件を課すことでパラメータ決定精度が向上することも分かった。

一方で、軌道傾斜角がより小さい場合については、正則化パラメータを導入することで全天の約90%の領域で、2シグマの統計的誤差の範囲内に誤差が収まることが分かった。軌道傾斜角が小さい場合は、重力波のプラスモードとクロスモードの縮退により、軌道傾斜角の決定精度がもともと良くないという問題があり、それが1つめの場合との結果の差に表れたものと考えられる。

以上のように、CBC 重力波解析に正則化手法を適用して距離と決定精度の向上を議論した点と、正則化によって生じる誤差を考慮して正則化パラメータの

最適化を行った点は本論文において初めて行われたものであり、本論文の独自性・独創性は高いものと判断する。また、Nested Sampling によって誤差範囲を求めている点は、より単純な Fisher 行列による誤差評価に比べて本論文の結果の信頼性を高めるものであり、高く評価出来る。

本論文は7章からなり、1章はイントロダクション、2章は重力波についての基本事項のレビュー、3章は本論文で用いているベイズ統計によるパラメータ推定手法である Nested Sampling についてのレビュー、4章は逆問題における正則化の数学的な基礎に関するレビュー、5章は CBC 重力波解析における正則化方法の定式化、6章は LIGO2 台による CBC 重力波解析を想定した正則化の数値計算の説明とその結果、7章が結論となっている。

5章6章の内容は、端山和大氏との共同研究で行われたものであるが、論文提出者が主体となって基本的定式化と数値解析と結果のとりまとめをおこなったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、博士（理学）の学位を授与出来ると認める。