

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05639
研究課題名：重力波宇宙物理学の包括的研究

研究代表者氏名（ローマ字）：横山順一（YOKOYAMA Junichi）
所属研究機関・部局・職：東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：50212303

研究の概要：

本研究は、米国のLIGOや欧州のVirgoに引き続いてわが国のKAGRAによって重力波を検出し、重力波宇宙物理学を包括的に推進しようというもので、具体的には、①独立成分解析を用いた新しいノイズ除去によりKAGRAによる重力波の早期初検出を目指すとともに、②重力波によって発見されたブラックホールの起源、③連星中性子星合体後のキロノバの物理過程と重元素の生成量等を明らかにします。

研究分野：宇宙物理学、重力波物理学、宇宙論、天体物理学

キーワード：重力波、データ解析、ブラックホール、連星中性子星、キロノバ、重元素の起源

1. 研究開始当初の背景

米国のLIGOや欧州のVirgoによってブラックホールや連星中性子星合体からの重力波が続々と検出され、重力波宇宙物理学の時代が幕を開けました。わが国のKAGRAも感度を向上させながら国際共同観測網に加わる準備を進めています。KAGRAによって一日も早く重力波の初検出を成し遂げることが急務となっています。また、これまで予想もされていなかった多数の重いブラックホールの正体が何であるのか、とくにその起源が通常天体の重力崩壊によるものなのか、あるいは初期宇宙に生成した原始ブラックホールなのかを明らかにすることが課題となっています。さらに、マルチメッセンジャー観測を用いて連星中性子星合体の諸過程を基礎物理学に基づいて明らかにし、その最終生成物である金銀などの重元素の生成過程と生成量を明らかにすることが、私たちの住む物質世界の成り立ちを問う上で重要な課題となっています。

2. 研究の目的

本研究計画は、このような状況下で以下の三つを目的とする研究に取り組み、重力波宇宙物理学の上述の課題を解決することを目的とします。

目的Ⅰ 独立成分解析によるKAGRAデータ解析

本格稼働するKAGRAにおいて、レーザー干渉計で重力波信号を表すストレインチャンネルのデータだけでなく、各種環境モニターの情報を用いた独立成分解析によるデータ解析を行い、データ解析を困難にする原因となっている非ガウスノイズを効率的に除去し、KAGRAデータにおける信号・ノイズ比（SN比）の向上を果たします。これによってKAGRAによる重力波の早期初検出を目指すと共に、世界三極四台の共同観測に実質的な貢献を果たし、重力波の偏極モード数を測定することによってアインシュタインの一般相対論を検証します。

目的Ⅱ 重力波によって発見されたブラックホールの起源の解明

重力波観測によって多数発見された太陽質量の数倍から数十倍程度のブラックホールの正体が天体起源なのか、初期宇宙起源の原始ブラックホールなのかを、後者の当否を原始ブラックホールを生成する大振幅密度ゆらぎから同時に生成される長波長重力波背景放射の観測を用いて明らかにすることによって決着させます。

目的Ⅲ マルチメッセンジャー宇宙物理による連星中性子星合体の諸過程と重元素の起源の解明

連星中性子星合体はキロノバという電磁波対応天体をとめない、その光度曲線はrプロセス元素合成で生成した重元素の β 崩壊によって説明可能と考えられています。ここでは、その素過程を数値相対論によるダイナミクス解析と同時に解き、観測と照合することにより、最終的に生成する重元素量を求めます。また、矮小銀河内の星のスペクトル観測を行い、その結果と比較することによって重元素のどれだけが連星中性子星合体によって生成したのかを明らかにします。

3. 研究の方法

方法Ⅰ 地面振動計や防振系の各段階に設置された加速度計、光挺子、音響モニター、電気ノイズ計、磁場計などの環境モニターの情報をストレインチャンネルと共に独立成分解析にかけ、非ガウスノイズを効率的に除去し、KAGRAの感度向上を図ります。LIGO, Virgoとの共同観測においては、これらの発見する重力波信号から推定されるKAGRAの受信信号を独立成分解析のもう一つのチャンネルとして追加し、その分離と同定を行います。

方法Ⅱ 特定のスケールに大振幅を持つ密度ゆらぎの任意のスペクトルを与えた時生成する原始ブラックホールの質量分布関数を適切に定式化し、同時にその密度ゆらぎの高次相互作用で生成する重力波背景放射のスペクトルを計算してパルサータイミングアレイによる周期擾乱の観測と比較することにより、

太陽質量の数～数十倍のブラックホールが原始ブラックホールとして生成し得るかを明らかにします。
方法Ⅲ 連星中性子星合体の後原子の輝線によって輝くキロノバ星雲期において、その放射過程を局所熱平衡を仮定せずに解き、またそのダイナミクスを数値相対論によって解き、その結果をスペクトルの観測と比較することにより、連星中性子星合体で生成される重元素量を明らかにします。観測家の協力を得て木曾観測所に設置された広視野高速掃天観測システム Tomo-e カメラを用いてより早い時期での追観測を行い、より多くの情報を得ることを目指します。

4. これまでの成果

成果Ⅰ KAGRA の O3GK の観測データに、各チャンネルが線形関係を持つ通常の独立成分解析を実装し、ノイズが低減されることを示しました。また、各チャンネルが任意の非線形関係で結びついた一般的な状況で独立成分解析を行えるマスター方程式の導出に成功し、それを下に複数のチャンネルの非線形結合を許した状況での解析を行い、環境モニターと同じ周波数のノイズだけでなくサイドバンドも除去できることを示しました。

成果Ⅱ 原始ブラックホールの質量分布関数については初期ゆらぎを 14 個の統計変数によって特徴付ければ一般的な解析が可能であることを示し、それに基づいた計算を進めています。一方、パルサーの周期擾乱が有意な値を持つことが観測的に指摘されたので、別方法による原始ブラックホール説棄却の方策を検討し、密度ゆらぎの生成論における高次量子効果に着目しました。必要な定式化を行い、準備として一般的なべき乗スペクトルに応用したところ、予想外に大きな高次量子効果が働くことを見だし、非ガウス性パラメータに強い制限が得られました。

成果Ⅲ 既存の原子コードを用いて r 過程元素の一つであるネオジムのエネルギー準位、放射遷移率、再結合定数、衝突断面積などを計算し、これに基づいて、キロノバ星雲期のエジェクタの温度、電離度とネオジムからの放射スペクトルを求めました。またこの理論計算を参考にして、原子データベースからラインリストを作成し、中間赤外のキロノバ星雲期のスペクトルを計算し、GW170817 のスピッツァー宇宙望遠鏡による観測結果と比較を行いました。また、大質量星末期の質量放出現象のモデル化とその後の重力崩壊による爆発現象に与える影響を記述し、観測と比較できるモデルを構築しました。

5. 今後の計画

計画Ⅰ KAGRA が第四期共同観測 O4 において重力波の初検出を果たせるよう、これまでに開発した独立成分解析の新手法をさらに拡張し、各モニターチャンネルのさまざまな非線形結合を取り入れてノイズの低減を実現します。その下でリアルタイムコンパクト連星合体解析パイプライン GstLAL を、本研究計画で導入した計算機クラスターにおいて常時実行し、LIGO と Virgo の観測データを援用して KAGRA による初検出を目指します。

計画Ⅱ 密度ゆらぎ生成論の高次量子効果のこれまでの研究成果を、原始ブラックホールを生成するようなスペクトルを予言するインフレーションモデルに適用し、宇宙マイクロ波背景放射で観測される大スケールゆらぎの観測と比較することにより、重力波によって見つかったブラックホールが原始ブラックホールたり得るか否かを明らかにします。また、引き続き原始ブラックホールの質量分布関数を初期ゆらぎのスペクトルによって与える一般公式の導出に取り組み、これを完成させます。

計画Ⅲ キロノバ星雲期が非熱平衡状態にあることを正しく取り入れた定式化を行い、それを数値相対論におけるマルチゾーン計算に実装し、本研究計画で導入した計算機クラスターによって計算を実行します。その結果と観測を比較することにより、この過程で生成する重元素量を正しく求めます。矮小銀河内の星のスペクトル観測を行い、以上の結果と比較することにより、恒星内元素合成では生成しない鉄より重い元素のうちのどれだけが連星中性子星合体によって生成したかを明らかにします。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- ◇ J. Kristiano, J. Yokoyama “Why must primordial non-Gaussianity be very small?” Phys. Rev. Lett. 128(2022)061301
- ◇ B.J. Carr, Y. Sendouda, K. Kohri, and J. Yokoyama “Constraints on primordial black holes”, Rept. Prog. Phys. 84(2021)116902
- ◇ T. Washimi, T. Yokozawa, T. Tanaka, Y. Itoh, J. Kume, and J. Yokoyama “Method for environmental noise estimation via injection tests for ground-based gravitational wave detectors” Class.Quant.Grav. 38 (2021) 125005
- ◇ K.Cannon, et al. GstLAL: A software framework for gravitational wave discovery. SoftwareX, 14(2021) 100680.
- ◇ K. Hotokezaka et al., “Nebular emission from lanthanide-rich ejecta of neutron star”, MNRAS, 506, 5863, 2021
- ◇ Tsuna, Daichi; Kashiya, Kazumi; Shigeyama, Toshikazu, “AT 2018lqh: Black Hole Born from a Rotating Star?”, The Astrophysical Journal Letters, Volume 922, Issue 2, id.L34, 6pp.

7. ホームページ等

本研究計画 : <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/gw.html>

成果Ⅱに関連したプレスリリース : <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2022/7768/>