

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和2（2020）年度 研究進捗評価用〕

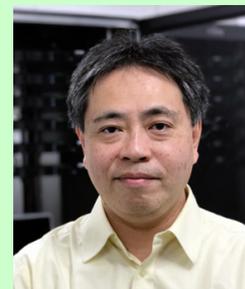
平成29年度採択分
令和2年3月31日現在

重力波観測時代に臨む較正標準化とデータ解析高精度化
Calibration Standard and High-Precision Data Analysis
toward the Observational Era of Gravitational Waves

課題番号：17H06133

神田 展行 (KANDA NOBUYUKI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

2015年の初観測以来、天体起源の重力波が次々と観測されている。本研究では、重力波観測実験における正確な信号較正（キャリブレーション）、重力波の時系列波形の精度の良い再現、そして正確さを生かしたデータ解析に取り組む。これらによって重力波や天体のサイエンスを解明することを目指している。

研究分野：数物系科学

キーワード：重力波観測、相対性理論、データ解析、レーザー干渉計、宇宙物理学

1. 研究開始当初の背景

重力波の直接検出・観測は長らく物理学の課題であった。観測を目指して、米国のLIGO（レーザー干渉計重力波観測所）、欧州のVirgo、日本のKAGRAが推進されていた。これらはいずれも3~4kmの2つの光路をもつ大型レーザー干渉計であり、光の干渉によって時空の歪みを精密に測定する。

2015年9月に初観測された重力波は、太陽質量の20~30倍程度のブラックホール連星合体を源とするものであり、連星ブラックホールとしても人類初めての観測であった。このような重たいブラックホール連星合体からの重力波観測は、物理学者ならびに天文学者に大きな驚きと関心をもって迎えられ、新たな問題を提起した。天体物理学的にはこのような重たいブラックホールの起源についての問題、また物理学の立場においてはブラックホールの合体という強重力場での現象における基礎物理学的な問題などが大いに関心を向けられた。

これらのサイエンスを究明するにはいくつかの鍵があるが、重要なのは測定される重力波の波形の正確さである。

一方で、現在（2020年3月）、最も感度が良いLIGOは時空の歪み h について $h \sim 10^{-24} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ の感度を有し、ブラックホール連星であれば1ギガパーセック（32億光年）程度の遠方からの重力波をも捉えうる。現在の観測では週に1回程度の頻度で重力波イベントが観測される。2020年2月後半には、KAGRAも観測運転状態を開始し、本格的な重力波の観

測時代が近い将来に実現する。新しいサイエンスに取り組むには、重力波観測やそのデータ解析もいっそうの精密さを増してゆくことが必要である。

2. 研究の目的

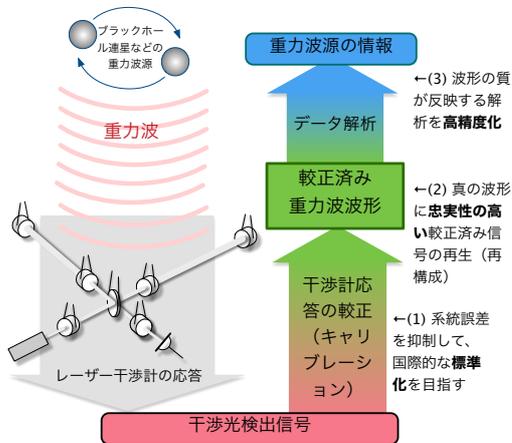
ところが、重力波検出器の較正は簡単ではない。人工的な較正源がなく、複雑で高感度の検出器の応答を補正して時系列信号を再現・再構築しなければならない。例えば、重力波の振幅を絶対値において5%間違えると、体積あたりの重力波源存在率については16%もの誤差になってしまう。あるいは国際的な観測網においては検出器間の系統的なズレが方向推定に誤差を生じさせる。

そこで我々は、重力波の波形を制度よく決めること、それらを活かしたデータ解析の高精度化を計るために、以下の3つの点を中心に取り組むことにした。

(1) 重力波検出器の較正標準化（キャリブレーター開発）：標準較正されたレーザー光源を変位励起源に用いた“フォトンキャリブレーター”の開発を行う。そして海外実験と協力し、技術情報や参照光源を利用して、国際的に通用する較正の標準化を目指す。絶対値の系統誤差について1%以内での標準化が目標である。

(2) 重力波信号の時系列波形 $h(t)$ の忠実性の高い再構成：較正ハードウェアの精度に耐える、真の重力波波形に忠実性の高い時系列信号再構成を行うソフトウェアを開発し、実際の観測について較正済みデータを作成する。

(3) 正確さを生かしたデータ解析の高精度化：データ解析を高精度化して、解析結果への較正誤差の正確な反映、一般相対論検証や中性子星状態方程式といった波形精度を要求する解析の定量的評価、精度の解析で可能なサイエンスを研究する。



3. 研究の方法

我々は、日本の重力波観測実験 KAGRA を中心にしつつ、米国 LIGO、欧州 Virgo 実験とも協力しながら研究を進めている。フォトンキャリブレーターの開発では、本体は KAGRA に設置した。一方で、変位励起するためのレーザー光強度の較正のために、米国 LIGO サイトに強度を測定する光学積分球を持ち込んで同一実験環境で比較し、相互較正を行っている。重力波較正信号 $h(t)$ は、イベント探索や各種解析のために時系列で生成（再構築）する。また、重力波天体現象に対する電磁波の追観測のために、数秒程度の短時間の遅れでリアルタイムに、なおかつ高精度で出力する“パイプライン”と呼称する計算プログラムを開発した。このパイプラインから出力される時系列の波形が観測データとなる。さらに生成された時系列波形信号の管理、転送と保管、国際観測網との共有を行っている。重力波の観測が急速に進展した結果、測定データを可及的速やかに観測網で共有することが求められている。またデータの管理や、サイエンスで利用できるように扱うことは、本研究にとって重要なゴールの一つである。そして、国際観測網のデータを用いて解析を開発する。重力波のデータ解析にはイベントの性質によっていくつかの手法に大別される。それらの中でも特に信号の較正や系統誤差が関与するテーマを中心に進めている。

4. これまでの成果

フォトンキャリブレーターのハードウェアインストールを行い、KAGRA のコミッショニング中の運転において較正用の励起を主干涉信号にて確認した。その測定結果を重力波信号の再構成における伝達関数の補正に用

い、時系列波形を生成するパイプラインが動作した。また積分球を準備してレーザー光強度の較正できるシステムを作成した。米国 LIGO の積分球と同じレーザー光を測定して、相対誤差を打ち消すように修正値を決定した。さらに時系列データ波形を国際観測網の低遅延データ共有に接続し、KAGRA のデータを連続的に送信するとともに、LIGO, Virgo の低遅延データを受け取る仕組みを構築した。

5. 今後の計画

国際観測網のデータを受け取ることで、本研究の後半は、いよいよ実際の重力波波形を用いたデータ解析を推進してゆく。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- [1] "Dark matter signals on a laser interferometer", Satoshi Tsuchida, Nobuyuki Kanda, Yousuke Itoh, Masaki Mori, Phys. Rev. D, 101, (2019), 23005 査読有
- [2] "First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA", KAGRA collaboration, Class. Quant. Grav., 36, (2019), Issue 16, 165008 査読有
- [3] "Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory", T. Akutsu et al. (KAGRA collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys., (2018), 013F01 査読有
- [4] 「大型低温重力波望遠鏡 KAGRA におけるデータ自動転送システムの開発と性能評価」, 酒井一樹, 神田展行, 太原謙二, 山本尚弘, 宮川治, 佐々木幸次, 植木聡史, 高橋弘毅, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J101-B No. 9, (2018), 818-827 査読有
- [5] "Improving the absolute accuracy of the gravitational wave detectors by combining the photon pressure and gravity field calibrators", Yuki Inoue, Sadakazu Haino, Nobuyuki Kanda, Yujiro Ogawa, Toshikazu Suzuki, Takayuki Tomaru, Takahiro Yamanmoto, and Takaaki Yokozaawa, Phys. Rev. D, 98, (2018), 22005 査読有
- [6] "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", Abbott B. P., et.al (Nobuyuki Kanda, ほか共著者数 3614 名), ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848, Vol.2 (2017) 査読有
- [7] "How to confirm the existence of population III stars by observations of gravitational waves", Akinobu Miyamoto, Tomoya Kinugawa, Takashi Nakamura, and Nobuyuki Kanda, Phys. Rev. D, 96, (2017), 64025 査読有

7. ホームページ等

<https://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp>