

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：24402

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24103005

研究課題名(和文)多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究

研究課題名(英文)Research on Data Analysis of Gravitational Wave Searches Link up with Various Observations

研究代表者

神田 展行(KANDA, Nobuyuki)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50251484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 196,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、日本の重力波検出実験KAGRAの観測データを解析し、重力波イベントを探索することを第1の目的とした。そして、重力波のイベント速報の提供や連携に有効な解析を研究し、電磁放射やニュートリノなどの多様な天体観測に連携し、同時観測に貢献した。これらを通して、重力波の発見とサイエンスを追求し、また日本の重力波データ解析の若手マンパワーを養成した。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to analyze observational data of gravitational wave detection experiment KAGRA in Japan and to search for gravitational wave events. We also contributed to simultaneous/follow-up observations by collaborating with various astronomical observations such as electromagnetic radiation and neutrinos. Through them, we pursued the discovery and science of gravitational waves, and trained young human resources for gravity wave data analysis in Japan.

研究分野：重力波実験物理学

キーワード：重力波観測 コンパクト連星合体 ブラックホール 超新星 宇宙物理 一般相対性理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力波観測が間近に迫っていた

重力波の検出・観測は、アインシュタインが一般相対論で重力波を予言して以来の悲願であるが、日本でも大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 実験 (旧称 LCGT) が 2010 年度より建設開始され、本研究の期間内に初期段階での運転が予定されていた。また、米国の LIGO 計画、伊・仏の Virgo 計画も高感度化が進行中であった。そして、KAGRA と海外の実験が本格的な観測に入る 2016 年後半から 2018 年頃に、世界的な重力波観測ネットワークが構成されると期待されていた。

(2) 重力波天体が多様な天体観測に結びつくことへの展望

重力波の検出・観測は、動的 (非定常) で強い重力場に関する一般相対論の検証につながる重要な基礎物理学の課題である。そして、KAGRA 実験が観測をめざす重力波源は、中性子星やブラックホールからなるコンパクト連星の合体、超新星爆発といった高エネルギー天体現象であり、 γ 線、X線、赤外・可視光、ニュートリノなどでも強い源となることが期待されている。すなわち、重力波観測と従来からの天体観測の同時イベント探索や相互フォローアップにより、高エネルギー天体現象の正体について新しい知見が得られると期待されてきた。

(3) 日本の KAGRA 実験への期待

そのために、日本の KAGRA 実験の観測データを確実に処理・解析し、国際的な共同解析を行う必要があった。さらに、重力波観測が、その他の天体観測との間で迅速な情報交換を行う事も、関連分野から広く期待を受けていた。

上記は開始当初の状況であるが、その後、実際に、LIGO が 2015 年 9 月に人類最初となる重力波の直接観測を達成し、KAGRA も 2016 年 4.5 月に最初の試験運転を行なった。まさに本研究は、学術的背景の時宜にかなったものであることが、これらの事実からも明らかであり、その成果も日本の本分野にとって重要なものとなった。

2. 研究の目的

本研究では、

(1) 日本の重力波検出実験 KAGRA の観測データを解析し、重力波イベントを探索することを第 1 の目的とした。

重力波のイベント速報の提供や連携に有効な解析を研究し、電磁放射やニュートリノなどの多様な天体観測に連携し、同時観測に貢献する。海外の重力波実験との共同解析も推進する。

そして、

(2) KAGRA とこうした相補的な多様な観測を通して、重力波の発見とサイエンスを追求すること、さらに、

(3) 日本の重力波データ解析の若手マンパワーを養成することを重要な目標とした。

また特に KAGRA 実験が開始され 2015 年に最初の観測データが予定されていたことをふまえて推進した。

重力波イベントを探索するには、データ解析によって特徴的な波形を膨大な雑音のなかから特定・抽出することが必要である。そのために特化した計算を実行するプログラムの開発が必要である。重力波波形は、重力波を発生する天体の性質と、強い重力場における物理が決定する。したがって一般相対論の理論的知見が必要である。また、重力波観測器、すなわちレーザー干渉計の雑音は、装置のさまざまな部分や熱雑音や光量子にかかわる性質などに起因し、その理解には実験物理学的な経験や基本的な物理学の知識を必要とする。装置固有の挙動も存在し、KAGRA のデータを解析するには、我々自身でパイプライン (ソフトウェア) を構築する必要があった。また、実際に KAGRA の観測が行われれば、そのデータを我々の構築したパイプラインに渡して処理する必要がある。データの転送・保管も重要となる。これらを実現するのが、本研究の目的であった。

一方で、このような人数が必要な"重力波データ解析"について、本研究の発足当時は必ずしもマンパワーが十分ではなかった。とくに、重力波のサイエンスで様々なテーマを推進して実りのある領域とするには、若手研究者が不足していた。このため、本計画研究では若手育成も大事な目的であった。

3. 研究の方法

(1) 初年度は小型のテスト機を導入し解析システムの開発から開始した。研究代表者、分担者らで協調作業をおこなうため、ネットワークを介して 2 組の Linux 計算機クラスタ複数のコンピューターを統合的に使用できるように、仮想プライベートネットワークで連結した計算機環境を構築した。この計算機環境は、年度ごとに段階的に増強して、最終的には KAGRA の観測データを保管し、イベント探索解析パイプラインの実行に十分な環境となった。

(2) 探索解析パイプライン (ソフトウェア) についても構築作業を進めた。多人数で作業をするためにバージョン管理システム (git) を導入し、またコーディング指針をまとめるなど、後々まで有効なフレームワークを目指した。その結果として、KAGALI (KAGRA Algorithmic Library) という独自のライブラリの構築が作成された。KAGALI は 2017 年現在、KAGRA のデータ解析の骨組みとして使われ、改良を続けている。

(3) 若手研究者の養成のために、計画 2 年目から 4 名の研究員を 4 年間雇用した (内 1 名は初年度末から雇用)。これらの研究員は、解析パイプラインの作成に参加しつつも、それぞれに独自のデータ解析も推進し、本研究計画全体としてのサイエンスの広がりにも貢献した。

4. 研究成果

前述の本研究の大きな目標、すなわち日本における重力波検出実験のデータ解析を推進すること、実際の観測データを解析すること、重力波天体事象のサイエンスについての研究、若手研究者の育成等も含んでの体制づくりは概ね達成できた。

(1)重力波観測データ解析システムの構築

Linux クラスタ計算機システムを構築し、VPN（仮装プライベートネットワーク）環境下で運用を実施した。このVPNは計画の3年目にはKAGRAのデータ転送網と連結し、安全かつ速やかにデータを受け取る仕組みを達成した。最終的に、760コアのCPUと304TBのデータ容量を有し、本研究の目指す短時間(low latency)での重力波探索計算に必要な計算能力をもたせた。2015年3-4月に行われたKAGRAの観測データを、岐阜県神岡のKAGRAトンネル坑内から3秒間の遅延で連続転送に成功し、その後本領域の研究期間終了後もデータ転送は継続している。また、日本の研究者が主体となったデータ解析ライブラリKAGALIも第1版が作成された。KAGRAの実際の観測データが処理された。



図：構築した計算システム

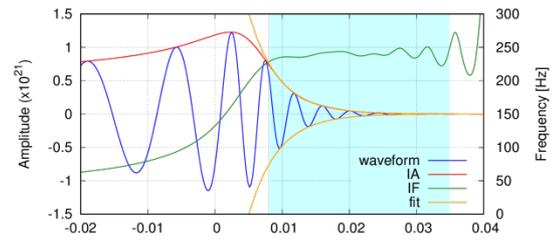
(2)重力波データの様々な解析

探索パイプラインの開発と並行して行われた様々な研究のうち、いくつかを列記する。

①実際の重力波事象のデータ解析の機会
は、米国LIGOの初観測によってもたらされた。LIGOは初観測事象GW150914の発表と同時にその観測データを公開した。本研究でも、間髪を入れずにそのデータを解析し、発表の翌日には公開データを用いて重力波波形を抽出した。本研究におけるLIGO公開データを用いた研究は、単純な探索にとどまらず、新しい時間-周波数解析手法を用いてのブラックホール準固有振動などの解析や、重力波源パラメータ決定精度の検討など、さまざまなことが試みら

れた。下図は、ヒルベルト=ハン変換で重力波合体波形を解析した例である。

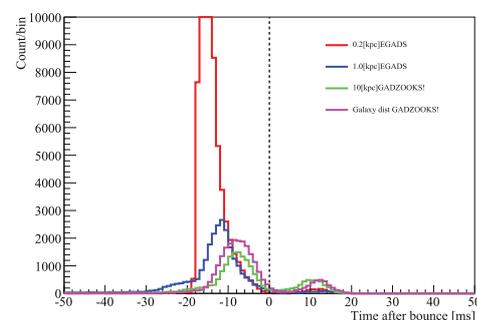
(K.Sakai, et al., 2017)



図：GW150914相当の数値相対論波形をヒルベルト=ハン変換で解析した例。瞬時振幅(IA), 瞬時周波数(IF)といった量で波形を評価する。

本領域の期間内に期待通りに重力波が検出され、そのデータを本研究が検証できたのは予想以上の成果であり、単なる探索実行を超えて、データ解析でどのようにして重力波イベントのサイエンスを引き出すかの研究も進んだと言える。また重力波データ解析について本研究のメンバーのもつ知識や経験は、多数の解説や一般向けの説明にも大いに活躍した。

②ニュートリノと重力波を用いた超新星爆発イベントの研究も行った。銀河系内での超新星爆発の場合、KAGRAでのバースト重力波検出と、同時に水チェレンコフ検出器によるニュートリノ検出が期待できる。我々の研究では、領域内の他の計画研究（ニュートリノ検出、理論研究）と協力し、重力波とニュートリノの両方を放出する理論モデルを用い、重力波検出器とニュートリノ検出器それぞれの応答時系列でシミュレーションした。その結果ジュールかとニュートリノの検出タイミングを比較することにより、超新星コアの回転の有無を判断できる可能性を示した。



図：超新星爆発シミュレーションにおける、重力波とニュートリノの検出時間差の予想 (Yokozawa, et al., ApJ.811:86(2015))

③コンパクト連星合体からの重力の探索パイプラインについての開発が具体化した。またコンパクト連星合体については、短時間での解析を想定した時系列マッチドフィ

ルターの研究や、修正重力理論の検証についての研究を行った。(T.Narikawa, et al., PRD91(2015))

④重力波検出器であるレーザー干渉計雑音のガウス性と定常性は、重力波イベント探索について重要な雑音の性質である。これを定常評価することは検出器の実際のデータを扱う上非常に重要である。student-t関数を取り込んでガウス分布からのずれを定量化し、LIGOの公開データを評価した。(T.Yamamoto, et al., PRD 93(2016))

⑤レーザー干渉計の雑音について、主観小信号とそのほかの補助的信号との間での非線形相関を定量的に扱う研究を行った。(H.Yuzurihara, et al., PRD94(2016))

これらの重力波検出器の雑音の性質の定量的評価の研究では、情報学(統計学)の公募研究者とも協力して研究が推進された。

⑥種族 III 星は初期に金属をほとんど持たない星で、宇宙の初期で形成されたと考えられている。そこに起源をもつ 30 太陽質量前後の大型ブラックホールの連星合体からの重力波の可能性が、同新学術領域の計画研究 A05 の研究によって指摘された。本研究ではそれと連携して、が KAGRA や LIGO で観測できる可能性について研究した。その結果、最終感度では年間 100 イベント以上が観測される可能性があり、米国 LIGO の最初の観測でも得られる可能性を予言した(T. Kinugawa, et al., MNRAS 456(2016))。この結果は 2015 年 6 月の国際会議ではすでに発表されていたが、LIGO による初観測イベントの質量がまさにこの予想とぴったりだったため、非常に注目された。

⑦Hilbert-Huang 変換は、波形解析の新しい手段として注目されている。本研究のメンバーによっても応用が試みられ、代表的なものとしては連星合体波形の解析に用いた Phys. Rev. D, 93 (2016) 123010 が挙げられる。

(3)若手育成の面では、最終的に、4 年間で本計画研究が雇用した計 7 人の若手研究者から、2017 年 3 月時点でそのうち計 4 名と、大学院生の 1 名が他機関や学振の研究員に採用され、本分野の研究者となっている。

また、期間中に行った多数の一般向け講演などを通じての広報活動の結果、本分野を志して問い合わせる大学生も増えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 6 件)

1. Hisa-aki Shinkai, Nobuyuki Kanda, Toshikazu Ebisuzaki, Gravitational waves from merging intermediate-mass black holes : II Event rates at ground-based detectors, *Astrophys. J.*, Vol. 835, No. 2 (2017) 276, 10.3847/1538-4357/835/2/276, 査読有

2. 神田展行, 重力波事象と電磁波による同時観測・追観測への期待, *天文月報*, Vol. 110, No. 1 (2017) 6-13, 査読無

3. Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda and Takashi Nakamura, The detection rate of inspiral and quasi-normal modes of Population III binary black holes which can confirm or refute the general relativity in the strong gravity region, *MNRAS*, 456 (2016) 1093-1114, 10.1093/mnras/stv2624, 査読有

4. Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, Kazunari Eda, Kodai Tejima, Yoichi Aso, and Yousuke Itoh, Ground-based low-frequency gravitational-wave detector with multiple outputs, *Phys. Rev. D*, 95 (2017) 82004, doi.org/10.1103/PhysRevD.95.082004, 査読有

5. Takahiro Yamamoto, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Yousuke Itoh, and Nobuyuki Kanda, Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise, *Phys. Rev. D*, 93 (2016) 082005, dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.082005, 査読有

6. Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hiroataka Takahashi, Yuichiro Sekiguchi, Hideyuki Tagoshi, and Masaru Shibata, Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform, *Phys. Rev. D*, 93 (2016) 123010, doi.org/10.1103/PhysRevD.93.123010, 査読有

7. Yukitsugu Sasaki on behalf of the KAGRA collaboration, Environmental Monitoring System in KAGRA, *ICIC Express Letters Part B : Applications*, 7 (11) (2016) 2331-2338, 査読有

8. Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hiroataka Takahashi, Analysis of the real gravitational wave data GW150914 with the Hilbert-Huang transform, *ICIC Express Letters*, 11(1) (2017) 45-52, 査読有

9. Kipp Cannon, 端山和太, 伊藤洋介, 高橋弘毅, 重力波の初検出と情報処理技術-LIGO と KAGRA で活用されている情報処理技術, *情報処理*, 57 (5) (2016) 428-433, 査読無

10. T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, H. Nakano, K. Eda, S. Sato, M. Musha, T. Akutsu, T. Tanaka, N. Seto, N. Kanda, and Y. Itoh, "Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2016 (2016) 93E01, doi.org/10.1093/ptep/ptw127, 査読有

11. Soichiro MORISAKI, Jun'ichi YOKOYAMA, Kazunari EDA, Yousuke ITOH, Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises II. Independent component analysis, *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 92 (2016) 336-345, doi.org/10.2183/pjab.92.336, 査読有

12. 田越秀行, 中村卓史, 重力波の初の直接検出とその意義, *日本物理学会誌*, Vol. 71, No. 4 (2016) 210-211, 査読無

13. Tatsuya Narikawa, Hideyuki Tagoshi, The potential of advanced ground-based gravitational wave detectors to detect generic deviations from

- general relativity, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 093E02 (2016), 10.1093/ptep/ptw126, 査読有
14. Nami Uchikata, Shijun Yoshida and Paolo Pani, Tidal deformability and I-Love-Q relations for gravastars with polytropic thin shells, *Physical Review D*, 94 (2016) 064015–1 064015–18, 10.1103/PhysRevD.94.064015, 査読有
 15. Hirotaka Yuzurihara, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Didier Verkindt, and Nobuyuki Kanda, “Unveiling linearly and nonlinearly correlated signals between gravitational wave detectors and environmental monitors”, *Physical Review D*, 94 (2016) 042004–1–042004–7, 10.1103/PhysRevD.94.042004, 査読有
 16. Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda and Takashi Nakamura, The detection rate of inspiral and quasi-normal modes of Population III binary black holes which can confirm or refute the general relativity in the strong gravity region, *MNRAS*, 456 (2016) 1093–1114, 10.1093/mnras/stv2624, 査読有
 17. Eda, Kazunari; Shoda, Ayaka; Kuwahara, Yuya; Itoh, Yousuke; Ando, Masaki, All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6–7 Hz band with a torsion-bar antenna, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 1 (2016) 011F01/1–8, dx.doi.org/10.1093/ptep/ptv179, 査読有
 18. Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Yukitsugu Sasaki, Hirotaka Takahashi, Jordan B. Camp, On Completeness and Orthogonality of Intrinsic Mode Functions to Search for Gravitational Waves, *ICIC Express Letters Part B : Applications*, Vol. 6 No. 2 (2015) pp. 343–349, 査読有
 19. T. Yokozawa, M. Asano, T. Kayano, Y. Suwa, N. Kanda, Y. Koshio, M. Vagins, Probing the rotation of core-collapse supernova with a concurrent analysis of gravitational waves and neutrinos, *The Astrophysical Journal*, 811 (2015), 10.1088/0004-637X/811/2/86, 査読有
 20. T. Yokozawa, M. Asano, T. Kayano, Y. Suwa, N. Kanda, Y. Koshio, M. Vagins, Probing Explosion Mechanism of Supernova Using Both Gravitational Waves and Neutrinos with Realistic Detector Response, *MG14 proceedings*, in production (2015), 査読無
 21. Tatsuya Narikawa, Model-independently testing gravitational theory with gravitational-wave observations, *JGRC25 proceeding*, in production (2015), 査読無
 22. Miyamoto, T. Kinugawa, T. Nakamura, N. Kanda, Discrimination of Pop III Stars by Detection of GWs from Binary Black Hole Coalescences, 14th Marcel Grossmann Meeting (MG14) proceedings, in production (2015), 査読無
 23. K. Hayama, T. Kuroda, T. Takiwaki, K. Kotake, Coherent network analysis of gravitational waves from three-dimensional core-collapse supernova models, *Physical Review D*, 92 (2015) 122001, dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.122001, 査読有
 24. Aasi, J. et al, Characterization of the LIGO detectors during their sixth science run, *Classical and Quantum Gravity*, 32 (2015) 115012–1–115012–30, 10.1088/0264-9381/32/11/115012, 査読有
 25. Aasi, J et al, Searching for stochastic gravitational waves using data from the two colocated LIGO Hanford detectors, *Physical Review D*, 91 (2015) 022003–1–022003–1–22, 10.1103/PhysRevD.91.022003, 査読有
 26. Nobuyuki Kanda on behalf of the KAGRA collaboration, Status of KAGRA –construction, commissioning and data distribution toward the first operation in 2015–, 14th Marcel Grossmann Meeting (MG14) proceedings, in production (2015), 査読無
 27. Eda, Kazunari; Ono, Kenji; Itoh, Yousuke, Determination of mass of an isolated neutron star using continuous gravitational waves with two frequency modes: an effect of a misalignment angle, *The proceedings of the 11th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (AMALDI11)*, arXiv e-print (arXiv:1511.00358), TBD (2015) TBD, TBD, 査読有
 28. Ono, Kenji; Eda, Kazunari; Itoh, Yousuke, New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves, *Physical Review D*, 91 (2015) 84032/1–8, dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.91.084032, 査読有 (他 2 8 件)
- [学会発表] (計 3 3 8 件)
- 招待講演などの内、主なもののみを記す。
1. 伊藤羊介, 重力波実験・データ解析, 理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム, 2013/12/25–27, 数物連携宇宙研究機構(千葉県・柏市), 招待講演
 2. 神田展行, KAGRA collaboration, Status of Gravitational Wave Observations and Physics of GW Sources with Multi-messenger, マルチメッセンジャー研究会, 2017/3/2, 千葉大学(千葉県・千葉市), 招待講演
 3. 神田展行, KAGRA collaboration, Gravitational Wave Observation : Recent Progress and Status, 第9回 Fundamental Physics using Atoms, 2017/1/10, 京都大学桂キャンパス(京都府・京都市), 招待講演
 4. 神田展行, 重力波天体の検出について Recent Progress and Status of Gravitational Wave Detection, 第7回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ, 2016/11/21, 京都大学(京都府・京都市), 招待講演
 5. Nobuyuki Kanda, KAGRA collaboration, Status and Future of KAGRA, The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2016/10/26, Osaka City University, Osaka (Osaka-hu), 招待講演
 6. 伊藤羊介, GW150914 の観測, 日本天文学会秋季年会, 2016/9/15, 愛媛大学(愛媛県・松山市), 基調講演
 7. Ken-ichi Oohara (on behalf of KAGRA DAS), Sources of Gravitational Waves and Searches for Gravitational Waves with KAGRA, Taiwan-Japan Workshop on KAGRA, 2015/12/23, National Tsing Hua University, Hsinchu(Taiwan), 招待講演

8. Nobuyuki Kanda on behalf of the KAGRA collaboration, Multi-messenger observation prospect of KAGRA, Taiwan-Japan Workshop on KAGRA, 2015/12/23, National Tsing Hua University, (Hsinchu, Taiwan), 招待講演
9. Ken-ichi Oohara (on behalf of KAGRA DAS and DMG), KAGRA Data Analysis and Data Management, The 25th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), 2015/12/7, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市), 招待講演
10. 田越秀行, 重力波による宇宙の観測とデータ解析, 統計力学学会連合大会, 2015/9/6, 岡山大学(岡山県・岡山市), 招待講演
11. Nobuyuki Kanda on behalf of the KAGRA collaboration, Status of KAGRA -construction and commissioning toward the first operation in 2015-, 14th Marcel Grossmann Meeting, 2015/7/13, Rome (Italy), 招待講演
12. Hideyuki Tagoshi, Preparation for the gravitational wave observation with KAGRA, 18th Capra Meeting on Radiation Reaction in General Relativity, 2015/6/29, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市), 招待講演
13. Nobuyuki Kanda, KAGRA collaboration, KAGRA and the Global Network of Gravitational Wave Detectors - Construction Status and Prospects for GW Astronomy with Data Sharing Era -, 21st International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics CHEP2015, 2015/4/14, OIST, Okinawa(Japan), 招待講演
14. Nobuyuki Kanda, KAGRA collab., KAGRA : Construction Status in Summer 2014 & its Science on SNe and GRBs, Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2014, 2014/8/25-27, 理化学研究所(埼玉県・和光市), 招待講演
15. Yousuke Itoh, Status of KAGRA and gravitational wave astronomy (Invited), 2nd International Workshop on Theoretical and Computational Physics, 2014/7/29, Buon Ma Thuot (Vietnam), 招待講演
16. 伊藤洋介, 重力波で探る巨大ブラックホールの物理量 (招待講演), 活動銀河核ワークショップ ~2020年代への展望~, 2014/4/23, 国立天文台(東京都・三鷹市), 招待講演
17. 高橋弘毅, 重力波初検出および重力波天文学創成に向けたデータ解析方法の研究, 公益社団法人山梨科学アカデミー交流大会, 2013/11/25, ベルクラシック甲府(山梨県・甲府市), 招待講演

[図書] (計6件)

1. 神田展行, パリティ, 「重力波の発見:一般相対性理論の100年後の証明」, Vol. 31, No. 6, 40-42, (2016),
2. 神田展行, パリティ, 「初観測された重力波が開いた宇宙への新しい窓」, Vol. 31, No. 10, 14-18, (2016)
3. 田越秀行, パリティ, 「重力波天文学の幕開け」, Vol. 31, No. 10, 19-24, (2016),
4. Kipp Cannon, 端山和夫, 伊藤洋介, 高橋弘毅, 日経テクノロジーonline, 「重力波の初検出と情報処理技術 - LIGO と KAGRA で活用されている情報処理技術

」, (2016/5/23),

5. 伊藤洋介, 自動車技術, 「重力波の直接検出成功と日本の重力波望遠鏡KAGRA」, Vol. 70, (2016),
6. 梶田隆章, 田越秀行, 数理科学, 「重力(観測) - KAGRA稼働と重力波実測へ向けて」, 605巻, 39-44, (2013),

[その他]

ホームページ等

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/gwastro/A04.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 展行 (KANDA, Nobuyuki)
 大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号: 5 0 2 5 1 4 8 4

(2) 研究分担者

田越 秀行 (TAGOSHI, Hideyuki)
 大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号: 3 0 3 1 1 7 6 5

大原 謙一 (Oohara, Ken-ichi)
 新潟大学・自然科学系・教授
 研究者番号: 0 0 1 8 3 7 6 5

高橋 弘毅 (TAKAHASHI, Hirotaka)
 長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 4 0 4 1 9 6 9 3

伊藤 洋介 (ITOH, Yousuke)
 東京大学・大学院理学系研究科・助教
 研究者番号: 6 0 4 4 3 9 8 3

(3) 連携研究者

新谷 昌人 (ARAYA, Akito)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号: 3 0 2 7 2 5 0 3

辰巳 大輔 (TATSUMI, Daisuke)
 国立天文台・光赤外研究部・助教
 研究者番号: 7 0 3 3 3 2 7 6

(4) 研究協力者

無し