

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

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：24103006

研究課題名（和文）重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study toward multi-messenger observations of gravitational wave sources

研究代表者

田中 貴浩（Tanaka, Takahiro）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40281117

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 114,600,000円

研究成果の概要（和文）：初代星起源の30太陽質量ブラックホール(BH)連星の存在を予言した。宇宙重力波アンテナで、BH連星の起源が明らかできると示した。GW150914が原始BHである可能性を示した。ニュートリノ輸送を解くコードを開発し、爆発する軸対称超新星モデルを示した。中性子星を含む連星合体における質量放出を調べ、電磁波放射やニュートリノ放射、粒子加速に関する様々な可能性を議論した。古在機構による連星進化における軌道平均法の問題点を示し、残留離心率の観測可能性を指摘した。双重力理論における重力波振動を発見し、観測可能性を示した。

合宿、市民講演会、多数の国際研究会の主催、共催で重力波周辺分野の研究推進に貢献した。

研究成果の概要（英文）：We predicted the existence of 30 solar mass black hole (BH) binaries of the population III star origin. We showed that the origin of BH binaries can be clarified by the space gravitational wave antenna. We showed the possibility that GW 150914 is primordial BHs. We developed a code to solve the neutrino transport and showed axially symmetric supernova models that explode. We investigated the mass ejection from binary coalescence that includes a neutron star and discussed various possibilities of electromagnetic or neutrino radiation and particle acceleration. We showed the shortcoming of orbital average method in binary evolution due to Kozai mechanism and pointed out that residual eccentricity can be large. We found the existence of the graviton oscillations in bi-metric gravity and showed its observability.

We organized and co-hosted camps, public lectures and numerous international workshops, to promote the field of gravitational wave physics.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙物理学 重力波 ブラックホール ガンマ線バースト 中性子星 修正重力 超新星 連星進化

1. 研究開始当初の背景

「最先端研究基盤事業」に選定された「宇宙線研究所の大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) 計画」は 2015 年に iKAGRA としての初期観測を目指していた。また米欧の LIGO, Virgo も 2016 年には改善された感度 (= 距離 9 億光年での連星中性子星の合体を検出可能) に達する予定とされていた。重力波が検出されれば、**強い重力場での一般相対性理論の確認。修正重力理論の検証。超高密度物質の物性。ガンマ線バースト現象の解明。超新星爆発機構の解明等**の理論的にも未解決な物理学・天文学に関する重要な成果が期待される。さらに、**予想もしない現象が重力波で発見されれば全く新しい物理学のフロンティア**が開け、人類が未知の領域に入る。

2. 研究の目的

重力波観測から成果を出すために理論家の果たす役割は今まで以上に重要である。そのため、我が国に於ける重力波の理論的研究での最強のメンバーを集め、既存の重力波源の詳しい理論的研究に加え、全く新しい重力波源の追求をおこなう。具体的には以下の**4つの柱の下に組織的に進める**：

(1)電磁波等による同時観測の可能性の探究: 様々な重力波源に対して、重力波と同時に放出される電磁波やニュートリノの性質を明らかにする。

(2)データ解析との連携: 同時観測に対応できる迅速なデータ解析法を確立する。また、理論の新しい進展を反映させたデータ解析法を提案する。

(3)広い視野での重力波関連研究全般の推進: 広い分野をカバーする重力波に関する理論的研究の研究ネットワークを組織し強化する。

(4)若手研究者の育成: 重力波の研究の将来を見据え研究者の育成を組織的に行う。研究成果の公表については、計画研究のホームページを作成し、わかりやすく研究の進展を記事にする。また、領域全体で企画する市民講演会等で、成果を発信する。

3. 研究の方法

研究代表者が全体を統括した上で、以下のように役割を分担し、担当者を中心に**プロジェクト的に取り組む**。

(1) 様々な重力波源の探査と重力波波形の解明 (担当: 中村): 重力波検出には波形の理論予測が不可欠である。近年の数値相対論の進展等を取り入れ、データ解析に使える波形予測等を行う。

(2) 超新星爆発の物理 (担当: 山田): 超新

星爆発のメカニズムの理解は、様々な不安定性の発見で急速に進展し、重力波物理における重要性が増している。また、予想されるニュートリノの光度曲線も求める。

(3) 電磁波等との同時観測から得られる物理 (担当: 井岡): まずは考えられる重力波源の中で電磁波やニュートリノの同時観測の可能性を網羅的に吟味し放射の強度やスペクトルの時間変化等を明らかにする。計画研究 A01-03 との連携が重要となる。

(4) 新しい重力波観測・データ解析法の提案 (担当: 瀬戸): 計画研究 A04 とも連携し、電磁波等での同時観測に向けた迅速な解析手法の開発を目指す

(5) 宇宙論・修正重力理論の観点からの重力波研究 (担当: 田中): 超弦理論等の物理の基本法則の理解の進展に対して重力波観測が果たせる可能性を明らかにする。

上のプロジェクトに加えて、広い視野での重力波関連研究全般を推進するために、公募研究、幅広い分野の人を集めた形の研究会、全国規模の定例のテレビ会議等を利用する。

4. 研究成果

(1)に関しては、特筆すべき成果として、初代星を起源とする連星形成から 30 太陽質量のブラックホール連星の存在を予言し、それが実際に観測されたことが挙げられる。LIGO の GW150914 の起源を論じた論文においても、このイベントからの重力波検出と非常によく符合していると述べられている。加えて、初代星から期待される 30 太陽質量のブラックホールの合体からの準固有振動が、KAGRA 等に最適な観測帯域に対応し、ブラックホール時空のホライズン近くまでを明らかにできることを GW150914 以前に指摘した。

また、GW150914 のようなブラックホール連星の合体後の準固有振動を確かめるには準固有振動だけで 35 以上の SNR が必要であり、ET や CE のような第 3 世代の地上重力波干渉計が必要であることが判った。一方で、将来の宇宙重力波アンテナである B-DECIGO によって、イベントの赤方偏移分布がもとまり、このようなブラックホール連星の起源を明白にすることが可能であることも明らかにした。

加えて、MACHO が原始ブラックホールであるとするシナリオを援用し、GW150914 が原始ブラックホールである可能性がこれまでの観測からは否定されないことを示した。

重力波源として有力視されているショートガンマ線バースト (SGRB) についてスペクトルのピークエネルギーと最高光度に関係式がある事を発見した。これを用いると赤方偏移の決まっていない BATSE の 900 イベント程度の大量の SGRB の赤方偏移が決まり、SGRB の発生率を見積もった結果 SGRB の

10%がNS-BHならKAGRA等の重力波検出器で年間70イベントくらい観測される事がわかった。

(2)に関しては、ニュートリノ輸送を記述するボルツマン方程式を差分化し数値的に解くコードの開発を行い、爆発する軸対称モデルを発表した。特に、慣性系と物質の局所静止系をハイブリッドに扱い、相対論的效果を全て近似なしに扱う方法を新たに提案した。また、より現実的な超新星爆発計算のための状態方程式を独自に構築した。これにより核密度以下で統計平衡状態にある多数の原子核が扱えるようになり、電子捕獲率のより正確な推定が可能となった。一方、ニュートリノ輸送に近似はあるものの一般相対論的かつ3次元のシミュレーション結果に基づき、高速自転するコアにおける流体力学不安定性の成長で形成される回転する1本腕からの重力波を計算し、coherent network analysisにより、天の川銀河内であればKAGRAを含む4台の第2世代重力波検出器を用いることで円偏向を検出でき、コアの回転の証拠と示ることを明らかにした。また、親星における乱流が衝撃波復活に与える影響を線形解析により明らかにした。さらに磁場がある場合、爆発は磁気回転不安定性により増幅した磁場のストレスにより起こるのではなく、磁場で輸送された角運動量により増幅されたニュートリノ加熱により起こる可能性を初めて指摘し、合わせて r 過程に与える影響も明らかにした。

(3)に関しては、第一に中性子星連星の合体時に起こる電磁波対応天体に関する一連の研究がある。まず合体時に、ブラックホール・中性子星合体からの質量放出は非等方的であることを示した。一方、連星中性子星の合体では、等方的な質量放出に加え、相対論的な物質が全方向に放出されることを示し、それが星間物質を掃く時にできる衝撃波からの放射を電波からX線にわたって求めた。コンパクト連星の合体はガンマ線バーストの起源として有力であるが、周囲に放出物質があると中心天体から放出されるジェットが出て来れるのかどうかという問題があった。我々はジェットが周囲の物質を突き抜けて、場合によってはジェットが周囲の物質によって絞られる可能性を初めて指摘した。放出物質は中心天体にフォールバックし、中心天体からのジェットを長期間可能にすることも示した。このようなブラックホールエンジンは、ガンマ線バースト・連星中性子星の合体の後に輝く巨新星(マクロノバ・キロノバ)のエネルギー源として自然に考えられることを提案した。また、ばらまかれる物質からダストが形成される可能性を初めて指摘し、巨新星に大きな影響を与えることを示した。最後に残る中性子星連星残骸からの高エネルギー放射も計算した。

第二に、電磁波以外のシグナルに関する研究がある。重力波天体であるガンマ線バース

トの中で、特に暗いガンマ線バーストが、IceCube 実験で観測された高エネルギーニュートリノの源になる可能性を論じた。また、 r 過程元素の残骸での粒子加速を初めて考察し、加速効率が非常に低いことを示した。

第三としては、その他の重力波源による新たな突発天体の可能性を提案した。特に、白色矮星連星の合体が、近年発見された高速電波バーストの源である可能性や、超大質量ブラックホールを形成する超大質量星の崩壊時にガンマ線バーストジェットが放出される可能性や、それによって形成されるコクーンのブレイクアウトが非常に明るい超新星のように観測されることを指摘した。

(4)に関しては、重力波のデータ解析におけるモデルパラメータ空間上で最尤値を持つ幾何学的特性(極値や鞍点)を取り扱うための解析的手法を展開し、背景重力波の相関解析に適用した。また、相対論的近点移動が重要な役割を果たす階層的な軌道共鳴に対して、通常平均運動共鳴と大きく異なる共鳴状態を特定し、その進化の特徴を明らかにした。楕円軌道を持つコンパクト連星について、古在機構による進化過程を直接3体計算で調べ、これまで多用されてきた軌道平均法の問題点を明らかにするとともに、地上干渉計の重力波帯における残留離心率が想定されていたよりも大きくなる可能性があることを指摘した。さらに、電磁波対応天体の早期探査において、楕円連星の重力波解析を行う利点を指摘した。また、干渉計ネットワークによる信号解析において、重力波の偏光状態の影響を摂動的に取り入れる新たな解析的定式化を構築し、重力波観測に関連する諸量(軌道傾斜角分布等)を簡便かつ精度良く評価する方法を提案した。最終年度はLIGO-VirgoグループによるGW150914、GW151226検出の報告を受けて、このようなブラックホール連星に対しLISAをはじめとするスペース干渉計を用いることでどのような知見が得られるかを検討した。

(5)に関しては高階微分が存在する重力理論においてはブラックホールの無毛定理が成立せず、ブラックホールがスカラー電荷を持ちえることを示し、コンパクト連星からの重力波波形の進化を明らかにし、重力波観測で理論に制限がつけられることを示した。

近年注目されている重力子が質量を持つ可能性において、重力子を2つに拡張した双重力理論は一般座標変換不変性を保つ上に、宇宙論的なシナリオとの整合性の点でも問題がない。この宇宙モデルにおいて、重力波振動という現象が起こることを発見した。これは重力波振幅が伝播の効果で変化する理論で整合的な初めての例を与えていると考えられる。重力波振動に関してより具体的な観測可能性について調べ、観測可能なパラメータ領域の存在を明らかにした。重力子振動を起こす双重力理論において重力子チェレンコフ放射によるモデルの制限を始めて導

びくなどの成果を挙げた。

また、将来の宇宙重力波アンテナと地上の重力波干渉計を組み合わせることによって、修正重力理論への制限が予想以上に強くつけることができることを指摘した。

以上に加えて、合宿の主催や、市民講演会の開催に加え、JGRG 他多数の国際研究会の主催、共催を行い、重力波周辺分野の日本国内の研究の推進に貢献した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 119 件)

全て査読あり

1. Supernova equations of state including full nuclear ensemble with in-medium effects, Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Hideyuki Suzuki, Nucl.Phys. A957 (2017) 188-207 DOI:10.1016/j.nuclphysa.2016.09.002
2. Forecasting Tidal Disruption Events by Binary Black Hole Roulettes, Naoki Seto, Koutarou Kyutoku, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 151101 DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151101
3. Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, Takashi Nakamura, Masaki Ando, Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Kazunari Eda, Shuichi Sato, Mitsuru Musha, Tomotada Akutsu, Takahiro Tanaka, Naoki Seto, PTEP 2016 (2016) 093E01, DOI:10.1093/ptep/ptw127
4. Constraint on ghost-free bigravity from gravitational Cherenkov radiation, Rampei Kimura, Takahiro Tanaka, Kazuhiro Yamamoto, Yasuho Yamashita, Phys.Rev. D94 (2016) 064059 DOI: 10.1103/PhysRevD.94.064059
5. Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914 Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuichiro Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 061101 DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.061101
6. Synergy between ground and space based gravitational wave detectors for estimation of binary coalescence parameters, Remya Nair, Sanjay Jhingan, Takahiro Tanaka, PTEP 2016 (2016) 053E01 DOI: 10.1093/ptep/ptw043
7. 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, Tomoya Kinugawa,

Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 456 (2016) no.1, 1093-1114 DOI: 10.1093/mnras/stv2624

8. Possible confirmation of the existence of the ergoregion by the Kerr quasinormal mode in gravitational waves from a Population III massive black hole binary, Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura, PTEP 2016 (2016) 031E01 DOI: 10.1093/ptep/ptw012

9. How close can we approach the event horizon of the Kerr black hole from the detection of gravitational quasinormal modes?, Takashi Nakamura, Hiroyuki Nakano, PTEP 2016 (2016) 041E01 DOI: 10.1093/ptep/ptw026

10. Links between the shock instability in core-collapse supernovae and asymmetric accretions of envelopes, Kazuya Takahashi, Wakana Iwakami, Yu Yamamoto, Shoichi Yamada, Astrophys. J. 831 (2016) 75 DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/75

11. Circular Polarizations of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae: A Clear Indication of Rapid Rotation, Kazuhiro Hayama, Takami Kuroda, Ko Nakamura, Shoichi Yamada, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 151102 DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.151102

12. X-ray-powered macronovae Shota Kisaka, Kunihito Ioka, Ehud Nakar, Astrophys.J. 818 (2016) no.2, 104 DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/104

13. Concise estimate of the expected number of detections for stellar-mass binary black holes by eLISA, Koutarou Kyutoku, Naoki Seto, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 462 (2016) 2177-2183 DOI: 10.1093/mnras/stw1767

14. Prospects of eLISA for Detecting Galactic Binary Black Holes Similar to GW150914, Naoki Seto, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 460 (2016) L1-L4 DOI: 10.1093/mnrasl/slw060

15. Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations, Tatsuya Narikawa, Koh Ueno, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, Phys. Rev. D91 (2015) 062007 DOI: 10.1103/PhysRevD.91.062007

16. Can Direct Collapse Black Holes Launch Gamma-ray Bursts and Grow to Supermassive Black Holes?, Tatsuya Matsumoto, Daisuke Nakauchi, Kunihito Ioka, Alexander Heger, Takashi Nakamura, Astrophys. J. 810 (2015) 64 DOI: 10.1088/0004-637X/810/1/64

17. Possible existence of viable models of bi-gravity with detectable graviton oscillations by gravitational wave detectors, Antonio De Felice, Takashi Nakamura, Takahiro Tanaka, PTEP 2014 (2014) 043E01
DOI: 10.1093/ptep/ptu024

18. Appearance of Boulware–Deser ghost in bigravity with doubly coupled matter, Yasuho Yamashita, Antonio De Felice, Takahiro Tanaka, Int.J.Mod.Phys. D23 (2014) 1443003
DOI: 10.1142/S0218271814430032

19. Short Gamma-Ray Burst Formation Rate from BATSE data using E_p – L_p – E_p – L_p correlation and the minimum gravitational-wave event rate of coalescing compact binary, Daisuke Yonetoku, Takashi Nakamura, Keitaro Takahashi, Asuka Toyonago, Tatsuya Sawano, Astrophys. J. 789 (2014) no.1, 65
DOI: 10.1088/0004-637X/789/1/65

20. Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars I. special relativistic treatments, Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Astrophys. J. Suppl. 214 (2014) 16
DOI: 10.1088/0067-0049/214/2/16

21. Influence of Magnetorotational Instability on Neutrino Heating: A New Mechanism for Weakly Magnetized Core-Collapse Supernovae, Hidetomo Sawai, Shoichi Yamada, Astrophys. J. 784 (2014) L10
DOI: 10.1088/2041-8205/784/1/L10

22. Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave, Tomoya Kinugawa, Kohei Inayoshi, Kenta Hotokezaka, Daisuke Nakauchi, Takashi Nakamura, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 442 (2014) 2963-2992
DOI: 10.1093/mnras/stu1022

23. Isolated and Binary Neutron Stars in Dynamical Chern-Simons Gravity, Kent Yagi, Leo C. Stein, Nicolas Yunes, Takahiro Tanaka, Phys. Rev. D87 (2013) 084058, Erratum: Phys. Rev. D93 (2016) 089909
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.084058, 10.1103/PhysRevD.93.089909

24. Anisotropic mass ejection from black hole-neutron star binaries: Diversity of electromagnetic counterparts, Koutarou Kyutoku, Kunihito Ioka, Masaru Shibata, Phys. Rev. D88 (2013) 041503
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.041503

25. Cosmological Fast Radio Bursts from Binary White Dwarf Mergers, Kazumi Kashiyama, Kunihito Ioka, Peter Mészáros, Astrophys. J. 776 (2013) L39

DOI: 10.1088/2041-8205/776/2/L39

26. TeV–PeV Neutrinos from Low-Power Gamma-Ray Burst Jets inside Stars, Kohta Murase, Kunihito Ioka, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 121102
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.121102

27. Pre-merger localization of eccentric compact binary coalescences with second-generation gravitational-wave detector networks, Koutarou Kyutoku, Naoki Seto, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 441 (2014) 1934-1942
DOI: 10.1093/mnras/stu698

28. Highly Eccentric Kozai Mechanism and Gravitational-Wave Observation for Neutron Star Binaries, Naoki Seto, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 061106
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.061106

〔学会発表〕(計 139 件)

1. Takahiro Tanaka, Testing gravity theory by gravitational waves, UTQuest WS5 (招待講演, 国際学会) 2016年12月12日～15日, 京都大学基礎物理学研究所(京都市)
2. Takahiro Tanaka, Impact of gravitational wave detection and its perspective, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016 (招待講演) 2016年11月28日～30日山代温泉 ゆのくに天祥 (石川県加賀市)
3. Takahiro Tanaka, Gravitational waves as a new probe of physics, ILC夏の合宿2016 (招待講演) 2016年7月23日～26日, いくし園 (岩手県一関市)
4. 井岡邦仁, Astrophysical Problems in the Gravitational Wave Era, 新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -」(招待講演) 2017年03月8日～10日, KEK(つくば市)
5. 井岡邦仁, Multi-Messenger Approaches to Galactic PeVatrons, Beyond a PeV: Particle acceleration to extreme energies in cosmic sources (招待講演, 国際学会) 2016年9月13日～16日, Paris, France
6. 井岡邦仁, Black Hole Systems as Multi-Messenger Sources, IAU sympo 324: New Frontiers in Black Hole Astrophysics (招待講演, 国際学会) 2016年9月12日～16日 Ljubljana (Slovenia)
7. Takahiro Tanaka, 重力波で探る修正重力, 第4回観測的宇宙論ワークショップ (招待講演) 2015年11月18日～20日, 基礎物理学研究所 京都大学(京都市)
8. Takahiro Tanaka, Testing Modified gravity and gravitational waves, Hot Topics in General Relativity and Gravitation (招待講演, 国際学会) 2015年8月9日～8月15日, Quy Nhon, Vietnam
9. Takahiro Tanaka, Graviton Oscillation in a viable bigravity model, "One Hundred

Years of Strong Gravity" workshop, (招待講演, 国際学会) 2015年6月10日~12日, Lisbon, Portugal

10. Takashi Nakamura, Some topics of Gravitational waves and available Physics from them, JGRG25 (招待講演, 国際学会) 2015年12月9日, YITP, Japan

11. Kunihito Ioka, ブラックホールと高エネルギー宇宙, 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム (招待講演) 2015年9月25日~28日, 大阪市立大学 杉本キャンパス(大阪市)

12. Kunihito Ioka, Bright Side of the AMS-02 Results, Dark Side of the Universe (招待講演, 国際学会) 2015年12月14日~18日, YITP, Kyoto, Japan

13. 山田章一, Core-Collapse Supernova Theory: the current status and future prospects, Symposium on 「Quarks to Universe in Computational Science」 奈良春日野国際フォーラム 「基調講演」 2015年11月6日, 奈良市

14. 田中貴浩, 重力波物理学, 高宇連シンポジウム (招待講演), 2015年3月9日~11日, 広島大学(東広島市)

15. 山田章一, 超新星爆発メカニズムモデルの最近の進展, 第70回日本物理学会 (招待講演) 2015年3月21日~24日早稲田大学

16. 井岡邦仁, ガンマ線バースト・高速電波バースト研究の現状, 宇宙論との関係, 初代星・初代銀河研究会 (招待講演) 2015年1月19日~21日, 東北大学 (仙台市)

17. 井岡邦仁, Unveiling the Origin of High-Energy Neutrinos, Korean Physics Society Meeting (招待講演, 国際学会), 2014年10月22日~24日, Gwangju, Korea

18. 井岡邦仁, Population III and Explosion Models, 40th COSPAR (招待講演, 国際学会) 2014年8月2日~10日, Moscow, Russia

19. 田中貴浩, How about modified propagation of Gravitational waves?, Gravitational Wave Tests of Alternative Theories of Gravity in the Advanced Detector Era (招待講演, 国際学会) 2013年4月5日~7日, Montana State university, USA

20. 山田章一, My Personal Overview of Core-Collapse Supernovae Theory, Multi-Messenger from Core-Collapse Supernovae (招待講演) 2013年12月3日 福岡大学(福岡市)

21. 井岡邦仁, 重力波の対応天体, 天文学会 (招待講演) 2014年3月19日~22日, 国際基督教大学(三鷹市)

22. 井岡邦仁, SKAと重力 - パルサーによる重力波直接観測と重力理論検証, 宇宙電波懇談会シンポジウム2013 (招待講演) 2013年12月18日~19日, 国立天文台三鷹

23. 瀬戸直樹, Overview of gravitational wave astronomy, Astrophysical Gravity Wave Symposium: Topical Review on

KAGRA project (招待講演) 2013年07月31日, 富山大学(富山市)

〔図書〕(計5件)

1. 山田章一, 日本評論社, 超新星 (2017) 279頁

2. 小玉英雄 井岡邦仁 郡和範, 共立出版, KEK 物理学シリーズ 3. 宇宙物理学, (2014) 291頁

3. 糸山浩司 南部陽一郎 横山順一 川合光, 京都大学学術出版会, 宇宙と素粒子のなりたち (2013) 168頁

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~juryokuha/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 貴浩 (Takahiro Tanaka)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号: 40281117

(2)研究分担者

中村 卓史 (Takashi Nakamura)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号: 80155837

山田 章一 (Shoichi Yamada)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 80251403

井岡 邦仁 (Kunihito Ioka)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号: 80402759

瀬戸 直樹 (Naoki Seto)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号: 80462191

(3)連携研究者

川崎 雅裕 (Masahiro Kawasaki)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号: 50202031

横山 順一 (Jun'ichi Yokoyama)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 50212303

柴田 大 (Masaru Shibata)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号: 80252576

固武 慶 (Kei Kotake)

福岡大学, 理学部, 准教授

研究者番号: 20435506

(4)研究協力者

諏訪 雄大 (Yudai Suwa)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号: 40610811