

---

# 重力波天体の多様な観測による 宇宙物理学の新展開

---

領域番号：2402

平成24年度～平成28年度  
科学研究費助成事業（科学研究費補助金）  
（新学術領域研究（研究領域提案型））  
研究成果報告書

平成30年3月

領域代表者 中村 卓史  
京都大学・名誉教授

はしがき

新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」は、2012年度に採択され、2016年度に終了予定でしたが、aLIGOとaVirgoが2017年8月25日まで、O2(Observing Run 2)を実施していたので、予算の一部を繰り越して、2017年度も光・赤外・X線・ニュートリノfollow-up観測、データ解析と理論研究を継続していました。文科省による事後評価のヒアリングが2017年9月8日にありましたが、初めての連星中性子星の合体(GW170817)は、解禁日が9月16日であったため、MOUでの約束で、最終ヒアリングではGW170817のことは「噂によると最近大発見があった。」としか入れることができませんでした。従って、文科省による最終評価「A (研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があった)」には、GW170817は含まれていません。

取りまとめ予算で作ったこの報告集には、最初の申請書から最終報告書と2017年8月に開催した取りまとめシンポジウムでの計画研究の報告のスライドを入れました。この領域のメンバーが、歴史的な重力波物理学・天文学の開始時期に如何にして奮闘したかを読み取っていただければ幸いです。もっと詳しい資料は領域のホームページ[www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/gwastro/](http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/gwastro/)に公開しています。また、高校生以上向けの無料の電子本「最後の1秒間」も、同じホームページでdownloadできます。これらの、文書が、いろんな分野で何かの、お役に立てれば幸いです。

2018年3月吉日      領域代表者・京都大学名誉教授 中村卓史

## 目次

1. 研究組織	1
2. 交付決定額（配分額）	8
3. 研究発表（論文リスト）	9
4. 文科省最終評価	53
5. 領域計画申請書	55
6. 採択ヒアリングのスライド	80
7. 中間報告書	95
8. 中間ヒアリングのスライド	120
9. 最終報告書	143
10. 最終ヒアリングのスライド	173
11. とりまとめシンポジウム(2017年8月)より計画研究のスライド	
(1) A01	193
(2) A02	209
(3) A03	235
(4) A04	255
(5) A05	274

## 研究組織

### 計画研究

領域代表者 中村卓史 (京都大学・名誉教授)

#### (総括班)「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開の総括的研究」

研究代表者 中村卓史 (京都大学・名誉教授)  
研究分担者 神田展行 (大阪市立大学・大学院理学研究科・教授)  
研究分担者 河合誠之 (東京工業大学・大学院理工学研究科・教授)  
研究分担者 吉田道利 (広島大学・宇宙科学センター・教授)  
研究分担者 ヴァギンズ・マーク (東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授)  
研究分担者 田中貴浩 (京都大学・基礎物理学研究所・教授)  
連携研究者 梶田隆章 (東京大学・宇宙線研究所・教授)  
連携研究者 佐々木節 (京都大学・基礎物理学研究所・教授)  
連携研究者 坪野公夫 (東京大学・理学系研究科・教授)  
連携研究者 伊藤好孝 (名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授)  
連携研究者 渡部潤一 (国立天文台・天文情報センター 教授)

#### (A01 班)「重力波天体からの X 線・ $\gamma$ 線放射の探索」

研究代表者 河合誠之 (東京工業大学・大学院理工学研究科・教授)  
研究分担者 谷津陽一 (東京工業大学・大学院理工学研究科・助教)  
研究分担者 冨田 洋 (宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任開発員)  
研究分担者 三原建弘 (独立行政法人理化学研究所・前任研究員 X 線天文学)  
連携研究者 常深 博 (大阪大学・理学研究科・教授)  
連携研究者 上野史郎 (宇宙航空研究開発機構・研究員)  
連携研究者 吉田篤正 (青山学院大学・理工学部・教授)  
連携研究者 根来 均 (日本大学・理工学部・准教授)  
連携研究者 上田佳宏 (京都大学・理学研究科・准教授)

(A02 班)「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」

研究代表	吉田道利	(広島大学・宇宙科学センター・教授)
研究分担者	太田耕司	(京都大学・理学研究科・教授)
研究分担者	柳澤顕史	(国立天文台・岡山天体物理観測所・助教)
研究分担者	本原顕太郎	(東京大学・理学系研究科・准教授)
連携研究者	土居守	(東京大学・理学系研究科・教授)
連携研究者	川端弘治	(広島大学・宇宙科学センター・准教授)
連携研究者	永山貴宏	(名古屋大学・理学研究科・特任助教)
連携研究者	藤澤健太	(山口大学・時間学研究所・教授)

(A03 班)「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」

研究代表	ヴァギンズ・マーク	(東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授)
研究分担者	小汐由介	(東京大学・助教)
連携研究者	中畑雅行	(東京大学・教授)
連携研究者	作田 誠	(岡山大学・教授)
連携研究者	竹内康雄	(神戸大学・教授)
連携研究者	石野宏和	(岡山大学・准教授)
連携研究者	岸本康宏	(東京大学・准教授)
連携研究者	関谷洋之	(東京大学・助教)

(A04 班)「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」

研究代表	神田展行	(大阪市立大学・大学院理学研究科・教授)
研究分担者	田越秀行	(大阪大学・大学院理学研究科・助教)
研究分担者	高橋弘毅	(山梨英和大学・人間文化学部人間文化学科・准教授)
研究分担者	大原謙一	(新潟大学・自然科学系・教授)
研究分担者	伊藤洋介	(東京大学・大学院理学研究科・特任助教)
連携研究者	端山和大	(国立天文台・重力波プロジェクト推進室・研

究員)

連携研究者 新谷昌人 (東京大学・地震研究所観測開発基盤センター・准教授)

連携研究者 辰巳大輔 (国立天文台・光赤外研究部・助教)

(A05 班) 「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

研究代表者 田中貴浩 (京都大学・基礎物理学研究所・教授)

研究分担者 中村卓史 (京都大学大学院理学研究科)

研究分担者 山田章一 (早稲田大学先進理工学部)

研究分担者 瀬戸直樹 (京都大学大学院理学研究科)

研究分担者 井岡邦仁 (大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所)

連携研究者

連携研究者 川崎雅裕 (京大宇宙線研究所)

連携研究者 横山順一 (東京大学大学院理学系研究科)

連携研究者 柴田大 (京都大学基礎物理学研究所)

連携研究者 固武慶 (国立天文台理論研究部)

## 公募研究

(平成25-26年度)

「重力波と電磁波の同時検出を目指した全天監視型 X 線撮像検出器の開発」

研究代表者 米徳大輔 (金沢大学,数物科学系,准教授)

「天文観測用高感度 CMOS センサの開発」

研究代表者 酒向重行 (東京大学,理学(系)研究科(研究院),助教)

「新しいミリ波サブミリ波観測技術によるガンマ線バースト初期残光の探索」

研究代表者 田村陽一 (東京大学,理学(系)研究科(研究院),助教)

「広視野望遠鏡を利用した重力波天体の光学観測」

研究代表者 阿部文雄 (名古屋大学,太陽地球環境研究所,准教授)

「特殊減光フィルタを用いた近赤外線で明るい重力波源の観測」

研究代表者 永山貴宏 (鹿児島大学,理工学研究科,准教授)

「超高頻度サーベイ観測による短時間突発天体の検出」

研究代表者 田中雅臣 (国立天文台,理論研究部,助教)

「KamLAND による近傍超新星爆発の観測」

研究代表者 石徹白晃治 (東北大学,ニュートリノ科学研究センター,助教)

「ガドリニウムの熱中性子吸収反応でのガンマ線の相関測定」

研究代表者 作田誠 (岡山大学,自然科学研究科,教授)

「非ガウスノイズを取り入れた重力波データ解析方法の研究」

研究代表者 横山順一 (東京大学,理学(系)研究科(研究院),教授)

「重力波に関する新知見を導き出す超高精度解析技術とその高速計算組み込み技術の開発」

研究代表者 廣林茂樹 (富山大学,大学院理工学研究部(工学),教授)

「低温干渉計型重力波検出器における突発性雑音低減」

研究代表者 辰巳大輔 (国立天文台,光赤外研究部,助教)

「強い重力場での修正重力理論の検証に向けた理論的研究」

研究代表者 須山輝明 (東京大学,理学(系)研究科(研究院),助教)

「ブラックホール-磁場中性子星合体に関する数値的研究」

研究代表者 木内建太 (京都大学,基礎物理学研究所,研究員)

「ニュートリノ駆動型超新星爆発からの重力波」

研究代表者 諏訪雄大 (京都大学,基礎物理学研究所,准教授)

「コンパクト天体連星合体における質量放出と R 過程元素合成による電磁波放射」

研究代表者 関口雄一郎 (京都大学,基礎物理学研究所,研究員)

「マグネター星震学に向けた基礎理論」

研究代表者 小嶋康史 (広島大学,理学(系)研究科(研究院),教授)



(平成27-28年度)

「高感度軟ガンマ線観測による重力波天体キロノバでの重元素合成の探査」

研究代表者 寺田幸功 (埼玉大学,理工学研究科,准教授)

「超小型衛星の複眼配置で展開する重力波対応天体のX線撮像による同定」

研究代表者 米徳大輔 (金沢大学,数物科学系,教授)

「重力波天体の即時精密X線分光観測に向けた基盤構築」

研究代表者 山田真也 (首都大学東京,理工学研究科,助教)

「可視光同時撮像による重力波天体の同定と出現環境の研究」

研究代表者 土居守 (東京大学,大学院理学系研究科(理学部),教授)

「MOAIII1.8m望遠鏡による重力波天体の追観測」

研究代表者 阿部文雄 (名古屋大学,宇宙地球環境研究所,准教授)

「多様な時間スケールを持つ突発電波天体の観測」

研究代表者 新沼浩太郎 (山口大学,創成科学研究科,准教授)

「重力波源の可視光対応天体探査」

研究代表者 田中雅臣 (国立天文台,理論研究部,助教)

「ブラックホール準固有振動がもたらす重力波の観測」

研究代表者 宗宮健太郎 (東京工業大学,理学院,准教授)

「超解析精度技術を応用した重力波の解析システムの開発とその評価に関する研究」

研究代表者 廣林茂樹 (富山大学,大学院理工学研究部(工学),教授)

「重力波データ解析における統計的方法論の整備」

研究代表者 間野修平 (統計数理研究所,数理・推論研究系,准教授)

「重力波検出器を用いた重力相互作用におけるパリティ破れの探索に向けた理論的研究」

研究代表者 浅田秀樹 (弘前大学,理工学研究科,教授)

「巨大ブラックホールの起源の理論的研究」

研究代表者 細川隆史 (東京大学,大学院理学系研究科(理学部),助教)

「修正重力理論におけるコンパクト天体からの重力波」

研究代表者 須山輝明 (東京大学,大学院理学系研究科(理学部),助教)

「コンパクト天体連星合体における r 過程元素合成と電磁波放射」

研究代表者 関口雄一郎 (東邦大学,理学部,講師)

「傾斜したスピンを持つブラックホールと磁場中性子星合体に関する数値的研究」

研究代表者 木内建太 (京都大学,基礎物理学研究所,特定研究員)

「3次元シミュレーションを用いた超新星からの重力波放出の予言」

研究代表者 滝脇知也 (国立天文台,理論研究部,助教)

交付決定額（配分額）

	合計	直接経費	間接経費
平成 24 年度	151,200,000 円	45,360,000 円	196,560,000 円
平成 25 年度	185,800,000 円	55,740,000 円	241,540,000 円
平成 26 年度	175,400,000 円	52,620,000 円	228,020,000 円
平成 27 年度	144,800,000 円	43,440,000 円	188,240,000 円
平成 28 年度	141,300,000 円	42,390,000 円	183,690,000 円
総計	798,500,000 円	239,550,000 円	1,038,050,000 円

論文リスト

1. Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya; Suwa, Yudai; Nakano, Wakana Iwakami; Kawagoe, Shio; Masada, Youhei and Fujimoto, Shin-ichiro, "Multimessengers from core-collapse supernovae: multidimensionality as a key to bridge theory and observation", *Adv. Astron.*, 2012 (2012) 428757
2. Kei Kotake, Tomoya Takiwaki, Yudai Suwa, Wakana Iwakami Nakano, Shio Kawagoe, Youhei Masada, and Shin-ichiro Fujimoto, "Multimessengers from core-collapse supernovae: multidimensionality as a key to bridge theory and observation", *Advances in Astronomy*, 2012 (2012) 428757
3. Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Yudai Suwa, "Three-dimensional Hydrodynamic Core-Collapse Supernova Simulations for an 11.2  $M_{\odot}$  Star with Spectral Neutrino Transport", *Astrophys. J.*, 749 (2012) 98
4. Horiuchi, Shunsaku; Murase, Kohta; Ioka, Kunihito and Meszaros, Peter, "The survival of nuclei in jets associated with core-collapse supernovae and gamma-ray bursts", *Astrophys. J.*, 753 (2012) 69
5. Hiroki Nagakura, Yudai Suwa, and Kunihito Ioka, "Population III Gamma-Ray Bursts and Breakout Criteria for Accretion-Powered Jets", *Astrophys. J.*, 754 (2012) 85
6. Hayashida, M., Kawabata, K. S., Yoshida, M., 他 90 名, "The Structure and Emission Model of the Relativistic Jet in the Quasar 3C 279 Inferred from Radio to High-energy gamma-Ray Observations in 2008-2010", *Astrophys. J.*, 754 (2012) 114
7. Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya and Harikae, Seiji, "Gravitational Wave Signatures of Hyperaccreting Collapsar Disks", *Astrophys. J.*, 755 (2012) 84
8. Nakauchi, Daisuke; Suwa, Yudai; Sakamoto, Takanori; Kashiyama, Kazumi and Nakamura, Takashi, "Long Duration X-Ray Flash and X-Ray Rich Gamma Ray Burst from Low Mass Population III Star", *Astrophys. J.*, 759 (2012) 128
9. Daisuke Nakauchi, Yudai Suwa, Takanori Sakamoto, Kazumi Kashiyama, and Takashi Nakamura, "Long Duration X-Ray Flash and X-Ray Rich Gamma-Ray Bursts from Low-mass Population III Star", *Astrophys. J.*, 759 (2012) 128
10. Urata, Y., Tsai, P. P., Huang, K., Morokuma, T., Yasuda, N., Tanaka, M., Motohara, K., Hayashi, M., Kashikawa, N., Ly, C., and Malkan, M. A., "Unusual Long and Luminous Optical Transient in the Subaru Deep Field", *Astrophys. J.*, 760 (2012) L11
11. Ajith, P. and others, "The NINJA-2 catalog of hybrid post-Newtonian/numerical-relativity waveforms for non-precessing black-hole binaries", *Class. Quant. Grav.*, 29 (2012) 124001
12. Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, "Gravitational waves and neutrino emission and effects of hyperons in binary neutron star mergers", *Class. Quant. Grav.*, 29 (2012) 124003
13. Yuta Okada, Nobuyuki Kanda, Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi and Hirotaka Takahashi, "The cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves : Numerical study for point spread function", *Journal of Physics : Conference Series*, 363 (2012) 012040-1 ~ 9
14. X. Cao, T. Uchida, S. Hirobayashi, C. Chong, A. Morosawa, K. Totsuka, T. Suzuki, "Non-harmonic analysis applied to optical coherence tomography imaging", *Jpn. J. Appl. Phys.*

51, 022503, pp.1-8, 51 (2012) 1-8

15. Kohri, Kazunori; Ohira, Yutaka and Ioka, Kunihito, "Gamma-ray flare and absorption in Crab Nebula: Lovely TeV-PeV astrophysics", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 424 (2012) 2249
16. M. Vagins, "Detection of Supernova Neutrinos", *Nuclear Physics Proceedings Supplement*, 229-232 (2012) 325(6pp)
17. Inoue, Yoshiyuki and Ioka, Kunihito, "Upper Limit on the Cosmological Gamma-ray Background", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 023003
18. Seto, Naoki and Kyutoku, Koutarou, "Geometrical Aspects on Parameter estimation of stochastic gravitational wave background: beyond the Fisher analysis", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 042002
19. K. Bays et. al. (Super-Kamiokande collaboration), "Supernova relic neutrino search at Super-Kamiokande", *Phys. Rev. D*, 85 (2012) 052007-1-15
20. Matthew Lake, Teruaki Suyama, "The evolution of FLRW spacetime after the birth of a cosmic string", *Phys. Rev. D*, 85 (2012) 1,13
21. Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Black hole perturbation in non-dynamical and dynamical Chern-Simons gravity", *Phys. Rev. D*, 85 (2012) 1,14
22. Teruaki Suyama, Yuki Watanabe, Masahide Yamaguchi, "Fully non-linear equivalence of  $\delta N$  and covariant formalisms", *Phys. Rev. D*, 85 (2012) 1,5
23. Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations I: the odd-parity sector", *Phys. Rev. D*, 85 (2012) 1,8
24. Shijun Yoshida, Kenta Kiuchi, and Masaru Shibata, "Stably stratified magnetized stars in general relativity", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 44012
25. Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, "Three dimensional evolution of differentially rotating magnetized neutron stars", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 64008
26. Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Consequences of a stochastic approach to the conformal invariance of inflationary correlators", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 1,10
27. Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Self-accelerating Solutions in Massive Gravity on Isotropic Reference Metric", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 1,4
28. Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Metric perturbation from inflationary magnetic field and generic bound on inflation models", *Phys. Rev. D*, 86 (2012) 1,7
29. Yagi, Kent; Yunes, Nicolas and Tanaka, Takahiro, "Gravitational Waves from Quasi-Circular Black Hole Binaries in Dynamical Chern-Simons Gravity", *Phys. Rev. Lett.*, 109 (2012) 251105
30. Kei Kotake, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Tomoya Takiwaki, Takami Kuroda, Yudai Suwa, and Hiroki Nagakura, "Core-Collapse Supernovae as Supercomputing Science: a status report toward 6D simulations with exact Boltzmann neutrino transport in full general relativity", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2012 (2012) 01A301

31. Kotake, Kei; Sumiyoshi, Kohsuke; Yamada, Shoichi; Takiwaki, Tomoya; Kuroda, Takami; Suwa, Yudai and Nagakura, Hiroki, "Core-Collapse Supernovae as Supercomputing Science: a status report toward 6D simulations with exact Boltzmann neutrino transport in full general relativity", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2012 (2012) 01A301
32. Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, "Current Status of Numerical-Relativity Simulations in Kyoto", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 01A304 (2012)
33. 後藤かをり, 参沢匡将, 下川哲矢, 広林茂樹, "ビット形式の情報提示方法による NIRS を用いた文字入力支援システムに関する検討", *電気学会論文誌 E*, vol. 132, no. 10, pp.328–336, 132 (2012) 328–336
34. 参沢匡将, 後藤かをり, 下川哲矢, 広林茂樹, "NIRS を用いた未知情報判別に関する検討", *電気学会論文誌 E*, vol. 132, no. 10, pp.348–354, 132 (2012) 348–354
35. 参沢 匡将, 後藤 かをり, 高野 慎也, 広林 茂樹, "ロボット制御のための NIRS-based BCI の開発", *電気学会論文誌 E*, vol. 132, no. 10, pp.355–361, 132 (2012) 355–361
36. Hirotaka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, "On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves", *Advances in Adaptive Data Analysis*, 5 (2013) 1350010-1-20
37. Kains, N., Street, R. A., Choi, J.-Y., Han, C., Udalski, A., Almeida, L. A., Jablonski, F., Tristram, P. J., Jørgensen, U. G., Szymański, M. K., Kubiak, M., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Poleski, R., Kozłowski, S., Pietrukowicz, P., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., Skowron, J., Alsubai, K. A., Bozza, V., Browne, P., Burgdorf, M. J., Calchi Novati, S., Dodds, P., Dominik, M., Dreizler, S., Fang, X.-S., Grundahl, F., Gu, C.-H., Hardis, S., Harpsøe, K., Hessman, F. V., Hinse, T. C., Hornstrup, A., Hundertmark, M., Jessen-Hansen, J., Kerins, E., Liebig, C., Lund, M., Lundkvist, M., Mancini, L., Mathiasen, M., Penny, M. T., Rahvar, S., Ricci, D., Sahu, K. C., Scarpetta, G., Skottfelt, J., Snodgrass, C., Southworth, J., Surdej, J., Tregloan-Reed, J., Wambsganss, J., Wertz, O., Bajek, D., Bramich, D. M., Horne, K., Ipatov, S., Steele, I. A., Tsapras, Y., Abe, F., Bennett, D. P., Bond, I. A., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Furusawa, K., Itow, Y., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Miyake, N., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N., Saito, T., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Suzuki, K., Sweatman, W. L., Takino, S., Wada, K., Yock, P. C. M., Allen, W., Batista, V., Chung, S.-J., Christie, G., DePoy, D. L., Drummond, J., Gaudi, B. S., Gould, A., Henderson, C., Jung, Y.-K., Koo, J.-R., Lee, C.-U., McCormick, J., McGregor, D., Muñoz, J. A., Natusch, T., Ngan, H., Park, H., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Yee, J., Albrow, M. D., Bachelet, E., Beaulieu, J.-P., Brilliant, S., Caldwell, J. A. R., Cassan, A., Cole, A., Corrales, E., Coutures, Ch., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Fouqué, P., Greenhill, J., Kane, S. R., Kubas, D., Marquette, J.-B., Martin, R., Meintjes, P., Menzies, J., Pollard, K. R., Williams, A., Wouters, D., Zub, M., "A giant planet beyond the snow line in microlensing event OGLE-2011-BLG-0251", *Astron. Astrophys.*, 552 (2013) id.A70,1-10
38. Nakazato, Ken'ichiro; Sumiyoshi, Kohsuke and Yamada, Shoichi, "Stellar Core Collapse with Hadron-Quark Phase Transition", *Astron. Astrophys.*, 558 (2013) A50
39. "Tamura, Y., Tatamitani, Y., Takahashi, S., Horigome, O., Maekawa, J.,
40. Kohno, K., Sakai, T., Taniguchi, A.", "A New "Off-point-less" Method for Mm/submm Spectroscopy with a Frequency-Modulating Local Oscillator", *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* (ed. Kawabe, R. ¥ & Yamamoto, S.), 476 (2013) 401-402
41. Inoue, Susumu and others, "Gamma-Ray Burst Science in the Era of the Cherenkov

Telescope Array", *Astropart. Phys.*, 43 (2013) 252-275

42. Sawai, Hidetomo; Yamada, Shoichi; Kotake, Kei and Suzuki, Hideyuki, "Effects of Resistivity on Magnetized Core-Collapse Supernovae", *Astrophys. J.*, 764 (2013) 10
43. Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Tobias Fischer, Matthias Liebendoerfer, and Katsuhiko Sato, "On the Importance of the Equation of State for the Neutrino-driven Supernova Explosion Mechanism", *Astrophys. J.*, 764 (2013) 99
44. Nagakura, Hiroki; Yamamoto, Yu and Yamada, Shoichi, "Semi-dynamical approach to the shock revival in core-collapse supernovae", *Astrophys. J.*, 765 (2013) 123
45. Gandhi, P., Yamanaka, M., Tanaka, M., Nozawa, T., Kawabata, K. S., Saviane, I., Maeda, K., Moriya, T. J., Hattori, T., Sasada, M., and Itoh, R., "SN 2009js at the Crossroads between Normal and Subluminous Type IIP Supernovae: Optical and Mid-infrared Evolution", *Astrophys. J.*, 767 (2013) 166
46. Bersten, M. C., Tanaka, M., Tominaga, N., Benvenuto, O. G., Nomoto, K., "Early UV/Optical Emission of The Type Ib SN 2008D", *Astrophys. J.*, 767 (2013) 143 (9pp)
47. Gandhi, P., Yamanaka, M., Tanaka, M., Nozawa, T., Kawabata, K. S., Saviane, I., Maeda, K., Moriya, T. J., Hattori, T., Sasada, M., Itoh, R., "SN 2009js at the crossroads between normal and subluminous Type IIP supernovae: optical and mid-infrared evolution", *Astrophys. J.*, 767 (2013) 166 (15pp)
48. Choi, J.-Y., Han, C., Udalski, A., Sumi, T., Gaudi, B. S., Gould, A., Bennett, D. P., Dominik, M., Beaulieu, J.-P., Tsapras, Y., Bozza, V., Abe, F., Bond, I. A., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Furusawa, K., Itow, Y., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Miyake, N., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, T., Sullivan, D. J., Suzuki, K., Sweatman, W. L., Suzuki, D., Takino, S., Tristram, P. J., Wada, K., Yock, P. C. M., Szymański, M. K., Kubiak, M., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Skowron, J., Kozłowski, S., Poleski, R., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Almeida, L. A., DePoy, D. L., Dong, Subo, Gorbikov, E., Jablonski, F., Henderson, C. B., Hwang, K.-H., Janczak, J., Jung, Y.-K., Kaspi, S., Lee, C.-U., Malamud, U., Maoz, D., McGregor, D., Muñoz, J. A., Park, B.-G., Park, H., Pogge, R. W., Shvartzvald, Y., Shin, I.-G., Yee, J. C., Alsubai, K. A., Browne, P., Burgdorf, M. J., Calchi Novati, S., Dodds, P., Fang, X.-S., Finet, F., Glittrup, M., Grundahl, F., Gu, S.-H., Hardis, S., Harpsøe, K., Hinse, T. C., Hornstrup, A., Hundertmark, M., Jessen-Hansen, J., Jørgensen, U. G., Kains, N., Kerins, E., Liebig, C., Lund, M. N., Lundkvist, M., Maier, G., Mancini, L., Mathiasen, M., Penny, M. T., Rahvar, S., Ricci, D., Scarpetta, G., Skottfelt, J., Snodgrass, C., Southworth, J., Surdej, J., Tregloan-Reed, J., Wambsganss, J., Wertz, O., Zimmer, F., MiNDSTEp Consortium, The Albrow, M. D., Bachelet, E., Batista, V., Brilliant, S., Cassan, A., Cole, A. A., Coutures, C., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Fouqué, P., Greenhill, J., Kubas, D., Marquette, J.-B., Menzies, J. W., Sahu, K. C., Zub, M., Bramich, D. M., Horne, K., Steele, I. A., Street, R. A., "Microlensing Discovery of a Population of Very Tight, Very Low Mass Binary Brown Dwarfs", *Astrophys. J.*, 768 (2013) id. 129,1-7
49. Yee, J. C., Hung, L.-W., Bond, I. A., Allen, W., Monard, L. A. G., Albrow, M. D., Fouqué, P., Dominik, M., Tsapras, Y., Udalski, A., Gould, A., Zellem, R., Bos, M., Christie, G. W., DePoy, D. L., Dong, Subo, Drummond, J., Gaudi, B. S., Gorbikov, E., Han, C., Kaspi, S., Klein, N., Lee, C.-U., Maoz, D., McCormick, J., Moorhouse, D., Natusch, T., Nola, M., Park, B.-G., Pogge, R. W., Polishook, D., Shporer, A., Shvartzvald, Y., Skowron, J., Thornley, G., Abe, F., Bennett, D. P., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Furusawa, K., Harris, P., Itow, Y., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Miyake, N., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, T., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Sweatman, W. L., Tristram, P. J., Wada, K., Yock, P. C. M., Szymański, M. K., Soszyński, I., Kubiak,

- M., Poleski, R., Ulaczyk, K., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, Ł., Bachelet, E., Batista, V., Beatty, T. G., Beaulieu, J.-P., Bennett, C. S., Bowens-Rubin, R., Brilliant, S., Caldwell, J. A. R., Cassan, A., Cole, A. A., Corrales, E., Coutures, C., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Greenhill, J., Henderson, C. B., Kubas, D., Marquette, J.-B., Martin, R., Menzies, J. W., Shappee, B., Williams, A., Wouters, D., van Saders, J., Zub, M., Street, R. A., Horne, K., Bramich, D. M., Steele, I. A., Alsubai, K. A., Bozza, V., Browne, P., Burgdorf, M. J., Calchi Novati, S., Dodds, P., Finet, F., Gerner, T., Hardis, S., Harpsøe, K., Hessman, F. V., Hinse, T. C., Hundertmark, M., Jørgensen, U. G., Kains, N., Kerins, E., Liebig, C., Mancini, L., Mathiasen, M., Penny, M. T., Proft, S., Rahvar, S., Ricci, D., Sahu, K. C., Scarpetta, G., Schäfer, S., Schönebeck, F., Snodgrass, C., Southworth, J., Surdej, J., Wambsganss, J., MiNDSTEp Consortium, The., "MOA-2010-BLG-311: A Planetary Candidate below the Threshold of Reliable Detection", *Astrophys. J.*, 769 (2013) id. 77, 1-13
50. Kashiyama, Kazumi; Nakauchi, Daisuke; Suwa, Yudai; Yajima, Hidenobu and Nakamura, Takashi, "Luminous supernova-like UV/optical/infrared transients associated with ultra-long gamma-ray bursts from metal-poor blue supergiants", *Astrophys. J.*, 770 (2013) 8
  51. Kazumi Kashiyama, Daisuke Nakauchi, Yudai Suwa, Hidenobu Yajima, and Takashi Nakamura, "Luminous Supernova-like UV/Optical/Infrared Transients Associated with Ultra-long Gamma-Ray Bursts from Metal-poor Blue Supergiants", *Astrophys. J.*, 770 (2013) 8
  52. Sawai, Hidetomo; Yamada, Shoichi and Suzuki, Hideyuki, "Global Simulations of Magnetorotational Instability in The Collapsed Core of A Massive Star", *Astrophys. J.*, 770 (2013) L19
  53. Kartaltepe, J., Sanders, D. B., Treister, E., Hasinger, G., Akiyama, M., Ohta, K., Ueda, Y., Bongiorno, A., Brandt, W. N., 他 15 名, "A Comparative Analysis of Virial Black Hole Mass Estimates of Moderate-luminosity Active Galactic Nuclei Using Subaru/FMOS", *Astrophys. J.*, 771 (2013) 64
  54. Takaki, K., Kawabata, K. S., Yoshida, M., 他 15 名, "A Luminous and Fast-expanding Type Ib Supernova SN 2012au", *Astrophys. J.*, 772 (2013) L17
  55. Furusawa, Shun; Nagakura, Hiroki; Sumiyoshi, Kohsuke and Yamada, Shoichi, "The influence of inelastic neutrino reactions with light nuclei on the standing accretion shock instability in core-collapse supernovae", *Astrophys. J.*, 774 (2013) 78
  56. Tanaka, M. & Hotokezaka, K. , "Radiative Transfer Simulations of Neutron Star Merger Ejecta", *Astrophys. J.*, 775 (2013) 113 (16pp)
  57. Kashiyama, Kazumi; Ioka, Kunihito and Mészáros, Peter, "Cosmological Fast Radio Bursts from Binary White Dwarf Mergers", *Astrophys. J.*, 776 (2013) L39
  58. Kazumi Kashiyama, Kunihito Ioka, Peter Mészáros,, "Cosmological Fast Radio Bursts from Binary White Dwarf Mergers,", *Astrophys. J.*, 776 (2013) L39
  59. Mizuta, Akira and Ioka, Kunihito, "Opening Angles of Collapsar Jets", *Astrophys. J.*, 777 (2013) 162
  60. Nakauchi, Daisuke; Kashiyama, Kazumi; Suwa, Yudai and Nakamura, Takashi, "Blue Supergiant Model for Ultra-Long Gamma-Ray Burst with Superluminous-Supernova-Like Bump", *Astrophys. J.*, 778 (2013) 67



61. Daisuke Nakauchi, Kazumi Kashiyama, Yudai Suwa, and Takashi Nakamura, "Blue Supergiant Model for Ultra-Long Gamma-Ray Burst with Superluminous-Supernova-Like Bump", *Astrophys. J.*, 778 (2013) 67
62. Sumi, T., Bennett, D. P., Bond, I. A., Abe, F., Botzler, C. S., Fukui, A., Furusawa, K., Itow, Y., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N., Saito, To., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Sweatman, W. L., Tristram, P. J., Wada, K., Yock, P. C. M., "The Microlensing Event Rate and Optical Depth toward the Galactic Bulge from MOA-II", *Astrophys. J.*, 778 (2013) id. 150,1-15
63. Han, C., Jung, Y. K., Udalski, A., Sumi, T., Gaudi, B. S., Gould, A., Bennett, D. P., Tsapras, Y., Szymański, M. K., Kubiak, M., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Skowron, J., Kozłowski, S., Poleski, R., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Abe, F., Bond, I. A., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Furusawa, K., Harris, P., Itow, Y., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sullivan, D. J., Sweatman, W. L., Suzuki, D., Tristram, P. J., Wada, K., Yock, P. C. M., Batista, V., Christie, G., Choi, J.-Y., DePoy, D. L., Dong, Subo, Hwang, K.-H., Kavka, A., Lee, C.-U., Monard, L. A. G., Natusch, T., Ngan, H., Park, H., Pogge, R. W., Porritt, I., Shin, I.-G., Tan, T. G., Yee, J. C., Alsubai, K. A., Bozza, V., Bramich, D. M., Browne, P., Dominik, M., Horne, K., Hundertmark, M., Ipatov, S., Kains, N., Liebig, C., Snodgrass, C., Steele, I. A., Street, R. A., "Microlensing Discovery of a Tight, Low-mass-ratio Planetary-mass Object around an Old Field Brown Dwarf", *Astrophys. J.*, 778 (2013) id. 38,1-6
64. Hwang, K.-H., Choi, J.-Y., Bond, I. A., Sumi, T., Han, C., Gaudi, B. S., Gould, A., Bozza, V., Beaulieu, J.-P., Tsapras, Y., Abe, F., Bennett, D. P., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Fukunaga, D., Harris, P., Itow, Y., Koshimoto, N., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Namba, S., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sullivan, D. J., Sweatman, W. L., Suzuki, D., Tristram, P. J., Wada, K., Yamai, N., Yock, P. C. M., Yonehara, A., de Almeida, L. Andrade, DePoy, D. L., Dong, Subo, Jablonski, F., Jung, Y. K., Kavka, A., Lee, C.-U., Park, H., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Yee, J. C., Albrow, M. D., Bachelet, E., Batista, V., Brilliant, S., Caldwell, J. A. R., Cassan, A., Cole, A., Corrales, E., Coutures, Ch., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Fouqué, P., Greenhill, J., Jørgensen, U. G., Kane, S. R., Kubas, D., Marquette, J.-B., Martin, R., Meintjes, P., Menzies, J., Pollard, K. R., Williams, A., Wouters, D., Bramich, D. M., Dominik, M., Horne, K., Browne, P., Hundertmark, M., Ipatov, S., Kains, N., Snodgrass, C., Steele, I. A., Street, R. A., "Interpretation of a Short-term Anomaly in the Gravitational Microlensing Event MOA-2012-BLG-486", *Astrophys. J.*, 778 (2013) id. 55,1-6
65. Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Masaomi Tanaka, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Shinya Wanajo, "Progenitor Models of the Electromagnetic Transient Associated with the Short Gamma Ray Burst 130603B", *Astrophys. J.*, 778 (2013) L16
66. Furusawa, K., Udalski, A., Sumi, T., Bennett, D. P., Bond, I. A., Gould, A., Jørgensen, U. G., Snodgrass, C., Dominis Prester, D., Albrow, M. D., Abe, F., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Harris, P., Itow, Y., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Miyake, N., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Sweatman, W. L., Tristram, P. J., Wada, K., Yock, P. C. M., Szymański, M. K., Soszyński, I., Kubiak, M., Poleski, R., Ulaczyk, K., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, Ł., Choi, J.-Y., Christie, G. W., DePoy, D. L., Dong, Subo, Drummond, J., Gaudi, B. S., Han, C., Hung, L.-W., Hwang, K.-H., Lee, C.-U., McCormick, J., Moorhouse, D., Natusch, T., Nola, M., Ofek, E., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Skowron, J., Thornley, G., Yee, J. C., Alsubai, K. A., Bozza, V., Browne, P., Burgdorf, M. J., Calchi Novati, S., Dodds, P., Dominik, M., Finet, F., Gerner, T., Hardis, S., Harpsøe, K., Hinse, T. C., Hundertmark, M., Kains, N., Kerins, E., Liebig, C., Mancini, L., Mathiasen, M., Penny, M. T., Proft, S., Rahvar, S., Ricci, D., Scarpetta, G., Schäfer,

- S.,Schönebeck, F.,Southworth, J.,Surdej, J.,Wambsganss, J.,MiNDSTEp Consortium, The,Street, R. A.,Bramich, D. M.,Steele, I. A.,Tsapras, Y.,Horne, K.,Donatowicz, J.,Sahu, K. C.,Bachelet, E.,Batista, V.,Beatty, T. G.,Beaulieu, J.-P.,Bennett, C. S.,Black, C.,Bowens-Rubin, R.,Brillant, S.,Caldwell, J. A. R.,Cassan, A.,Cole, A. A.,Corrales, E.,Coutures, C.,Dieters, S.,Fouqué, P.,Greenhill, J.,Henderson, C. B.,Kubas, D.,Marquette, J.-B.,Martin, R.,Menzies, J. W.,Shappee, B.,Williams, A.,Wouters, D.,van Saders, J.,Zellem, R.,Zub, M., "MOA-2010-BLG-328Lb: A Sub-Neptune Orbiting very Late M Dwarf?", *Astrophys. J.*, 779 (2013) id. 91,1-12
67. S. Adams, C. Kochanek, J. Beacom, M. Vagins, K. Stanek, "Observing the Next Galactic Supernova", *Astrophys. J.*, 778,2 (2013) 164(15pp)
  68. Takaki, K., Kawabata, K. S., Yamanaka, M., Maeda, K., Tanaka, M., Akitaya, H., Fukazawa, Y., Itoh, R., Kinugasa, K., Moritani, Y., Ohsugi, T., Sasada, M., Uemura, M., Ueno, I., Ui, T., Urano, T., Yoshida, M., Nomoto, K., "A Luminous and Fast-Expanding Type Ib Supernova SN 2012au", *Astrophys. J. Letters*, 772 (2013) L17 (6pp)
  69. Takekoshi, T., Tamura, Y., Minamidani, T., Kohno, K., Oogi, T., Sorai, K., Habe, A., Ezawa, H., Oshima, T., Scott, K. S., Austermann, J. E., Komugi, S., Tosaki, T., Mizuno, N., Muller, E., Kawamura, A., Onishi, T., Fukui, Y., Matsuo, H., Aretxaga, I., Hughes, D. H., Kawabe, R., Wilson, G. W., Yun, M. S., "Detection of an Ultra-bright Submillimeter Galaxy behind the Small Magellanic Cloud", *Astrophys. J. Letters*, 774 (2013) 30-35
  70. Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Masaomi Tanaka, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, and Shinya Wanajo, "Progenitor models of the electromagnetic transient associated with the short GRB 130603B", *Astrophys. J. Letters*, 778 (2013) L16
  71. Nakazato, Ken'ichiro; Sumiyoshi, Kohsuke; Suzuki, Hideyuki; Totani, Tomonori; Umeda, Hideyuki and Yamada, Shoichi, "Supernova Neutrino Light Curves and Spectra for Various Progenitor Stars: From Core Collapse to Proto-neutron Star Cooling", *Astrophys. J. Suppl.*, 205 (2013) 2
  72. Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Cosmic string passage through the Earth and consequent global earthquake", *Astrophys.Space Sci.*, 348 (2013) 565569
  73. Tanaka, Takahiro and Urakawa, Yuko, "Loops in inflationary correlation functions", *Class. Quant. Grav.*, 30 (2013) 233001
  74. T. Ueda, K. Fujii, S. Hirobayashi, T. Yoshizawa, T. Misawa, "Motion analysis using 3D high-resolution frequency analysis", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 8, pp. 2946-2959, 22 (2013) 2946-2959
  75. M. Hasegawa, T. Kako, S. Hirobayashi, T. Misawa, T. Yoshizawa, Y. Inazumi, "Image inpainting on the basis of spectral structure from 2-D nonharmonic analysis", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 8, pp. 3008-3017, 22 (2013) 3008-3017
  76. R. Nakada, Y. Hasegawa, S. Hirobayashi, T. Yoshizawa, T. Misawa, J. Suzuki, "Wide-area sound-control system for reducing reverberation using power envelope inverse filtering", *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E96-A, no.7, pp.1509-1517, E96-A (2013) 1509-1517
  77. Adrian-Martinez, S. et al (including K. Hayama), "A first search for coincident gravitational waves and high energy neutrinos using LIGO, Virgo and ANTARES data from 2007", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 6 (2013) 008-1,008-19

78. Garriga, Jaume; Kanno, Sugumi and Tanaka, Takahiro, "Rest frame of bubble nucleation", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1306 (2013) 034
79. Teruaki Suyama, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Shuichiro Yokoyama, "Implications of Planck results for models with local type non-Gaussianity", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1306 (2013) 1,18
80. Teruaki Suyama, Shuichiro Yokoyama, "Statistics of general functions of a Gaussian field -- application to non-Gaussianity from preheating", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1306 (2013) 1,28
81. Ringeval, Christophe; Suyama, Teruaki and Yokoyama, Jun'ichi, "Magneto-reheating constraints from curvature perturbations", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1309 (2013) 020
82. Christophe Ringeval, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Magneto-reheating constraints from curvature perturbations", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1309 (2013) 1,18
83. S. Matsui, S.Hirobayashia, T. Misawaa, M. Furukawa, "Visualizing the periods of stock prices using non-harmonic, analysis of the NASDAQ composite index since 1985", *Journal of Reviews on Global Economics*, vol. 2, 142-157, 2 (2013) 142-157
84. Yudai Suwa, "Neutrino acceleration by bulk matter motion and explosion mechanism of gamma-ray bursts", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 428 (2013) 2443-2449
85. Seto, Naoki, "Analyses on a Relativistic Hierarchical Resonance with the Hamiltonian Approach", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 430 (2013) 558
86. Tsutsui, Ryo; Nakamura, Daisuke Yonetoku Takashi; Takahashi, Keitaro and Morihara, Yoshiyuki, "Possible existence of Ep-Lp and Ep-Eiso correlations for Short Gamma-Ray Bursts with a factor 10 to 100 dimmer than those for Long Gamma-Ray Bursts", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 431 (2013) 1398
87. Abe, Fumio, Airey, Charlotte, Barnard, Ellen, Baudry, Julie, Botzler, Christine, Douchin, Dimitri, Freeman, Matthew, Larsen, Patricia, Niemiec, Anna, Perrott, Yvette, Philpott, Lydia, Rattenbury, Nicholas, Yock, Philip,, "Extending the planetary mass function to Earth mass by microlensing at moderately high magnification", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 431 (2013) ,2975-2985
88. Tsutsui, Ryo; Yonetoku, Daisuke; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Morihara, Yoshiyuki, "Possible existence of the Ep-Lp and Ep-Eiso correlations for short gamma-ray bursts with a factor 5-100 dimmer than those for long gamma-ray bursts", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 431 (2013) 1398 - 1404
89. Mazzali, P. A., Walker, E. S., Pian, E., Tanaka, M. , Corsi, A., Hattori, T., Gal-Yam, A. , "The very energetic, broad-lined type Ic Supernova 2010ah (PTF10bzf) in the context of GRB/SNe", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 432 (2013) 2463-3473
90. Tanaka, M., Moriya, T. J., & Yoshida, N. , "Detectability of High-Redshift Superluminous Supernovae with Upcoming Optical and Near-Infrared Surveys - II. Beyond z=6", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 435 (2013) 2483-2493
91. Aasi, J. et al.(including K. Hayama), "Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light", *Nature Photonics*, 7 (2013) 613-619
92. T. Uchida, S. Hirobayashi, T. Misawa, T. Yoshizawa, C. Chong, A. Morosawa, K. Totsuka, T. Suzuki, "Non-uniform non-harmonic analysis method development and verification of applicability to swept source optical coherence tomography", *NOLTA*, vol. 4, no. 2. pp.

172-182, 4 (2013) 172-182

93. Buyukcizmeci, N. and others, "A comparative study of statistical models for nuclear equation of state of stellar matter", Nucl. Phys., A907 (2013) 13-54
94. Isoyama, Soichiro; Fujita, Ryuichi; Sago, Norichika; Tagoshi, Hideyuki and Tanaka, Takahiro, "Impact of the second-order self-forces on the dephasing of the gravitational waves from quasicircular extreme mass-ratio inspirals", Phys. Rev. D, 87 (2013) 024010
95. Korai, Yusuke and Tanaka, Takahiro, "Quantum field theory in the flat chart of de Sitter space", Phys. Rev. D, 87 (2013) 024013
96. Hayasaki, Kimitake; Yagi, Kent; Tanaka, Takahiro and Mineshige, Shin, "Gravitational wave diagnosis of a circumbinary disk", Phys. Rev. D, 87 (2013) 044051
97. Yagi, Kent; Stein, Leo C.; Yunes, Nicolas and Tanaka, Takahiro, "Isolated and Binary Neutron Stars in Dynamical Chern-Simons Gravity", Phys. Rev. D, 87 (2013) 084058
98. Watanabe, Yuki and Yokoyama, Jun'ichi, "Gravitational modulated reheating and non-Gaussianity in supergravity  $R^2$  inflation", Phys. Rev. D, 87 (2013) 103524
99. K Hayama and A. Nishizawa, "Model-independent test of gravity with a network of ground-based gravitational-wave detectors", Phys. Rev. D, 87 (2013) 062003-1, 062003-11
100. Kent Yagi, Leo C. Stein, Nicolas Yunes, Takahiro Tanaka,, "Isolated and Binary Neutron Stars in Dynamical Chern-Simons Gravity", Phys. Rev. D, 87 (2013) 084058, Erratum: Phys. Rev. D93(2016)089909
101. Kyutoku, Koutarou; Ioka, Kunihito and Shibata, Masaru, "Anisotropic mass ejection from black hole-neutron star binaries: Diversity of electromagnetic counterparts", Phys. Rev. D, 88 (2013) 041503
102. Koutarou Kyutoku, Kunihito Ioka, Masaru Shibata,, "Anisotropic mass ejection from black hole-neutron star binaries: Diversity of electromagnetic counterparts," Phys. Rev. D, 88 (2013) 41503
103. Nishizawa, Atsushi and Hayama, Kazuhiro, "Probing for massive stochastic gravitational-wave background with a detector network", Phys. Rev. D, 88 (2013) 064005
104. Kamada, Kohei; Kobayashi, Tsutomu; Kunimitsu, Taro; Yamaguchi, Masahide and Yokoyama, Jun'ichi, "Graceful exit from Higgs  $G$  inflation", Phys. Rev. D, 88 (2013) 123518
105. Aasi, J. et al.(including K. Hayama), "Parameter estimation for compact binary coalescence signals with the first generation gravitational-wave detector network", Phys. Rev. D, 88 (2013) 062001-1,062001-23
106. A. Nishizawa, K. Hayama, "Probing for massive stochastic gravitational-wave background with a detector network", Phys. Rev. D, 88 (2013) 064005-1, 064005-13
107. Aasi, J. et al.(including K. Hayama), "Directed search for continuous gravitational waves from the Galactic center", Phys. Rev. D, 88 (2013) 102002-1,102002-12
108. Aasi, J. et al.(including K. Hayama), "Search for long-lived gravitational-wave transients coincident with long gamma-ray bursts", Phys. Rev. D, 88 (2013) 18,37

109. Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Hirotada Okawa, Yu-ichiro Sekiguchi, Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, "The mass ejection from the merger of binary neutron stars", *Phys. Rev. D* , 87 (2013) 24001
110. Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, "Impact of the second-order self-forces on the dephasing of the gravitational waves from quasicircular extreme mass-ratio inspirals ", *Phys. Rev. D* , 87 (2013) 24010
111. Jerome Martin, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Ultra Slow-Roll Inflation and the non-Gaussianity Consistency Relation", *Phys. Rev. D* , 87 (2013) 1,10
112. Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Takayuki Muranushi, Y-ichiro Sekiguchi, Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, "Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform", *Phys. Rev. D* , 88 (2013) 44026
113. K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, "New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark-Matter Minispikes", *Phys. Rev. Lett.*, 110 (2013) 221101-1-5
114. Seto, Naoki, "Highly Eccentric Kozai Mechanism and Gravitational-Wave Observation for Neutron Star Binaries", *Phys. Rev. Lett.*, 111 (2013) 061106
115. Naoki Seto., "Highly Eccentric Kozai Mechanism and Gravitational-Wave Observation for Neutron Star Binaries,", *Phys. Rev. Lett.*, 111 (2013) 61106
116. Murase, Kohta and Ioka, Kunihito, "TeV–PeV Neutrinos from Low-Power Gamma-Ray Burst Jets inside Stars", *Phys. Rev. Lett.*, 111 (2013) 121102
117. Kohta Murase, Kunihito Ioka., "TeV–PeV Neutrinos from Low-Power Gamma-Ray Burst Jets inside Stars,", *Phys. Rev. Lett.*, 111 (2013) 121102
118. M. Kaneyama, K. Oohara, Y. Hiranuma, H. Takahashi and J. B. Camp, "Excess power method with the Hilbert-Huang transform in search for gravitational wave signals", *Proceedings of the Twenty-Second Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (2013)*, in press. (2013) in press.
119. Isoyama, Soichiro; Fujita, Ryuichi; Nakano, Hiroyuki; Sago, Norichika and Tanaka, Takahiro, "Evolution of the Carter constant for resonant inspirals into a Kerr black hole: I. The scalar case", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2013 (2013) 063E01
120. Kanno, Sugumi; Sasaki, Misao and Tanaka, Takahiro, "A viable explanation of the CMB dipolar statistical anisotropy", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2013 (2013) 111E01
121. Tanaka, Takahiro and Urakawa, Yuko, "Strong restriction on inflationary vacua from the local gauge invariance II: Infrared regularity and absence of secular growth in the Euclidean vacuum", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2013 (2013) 063E02
122. 鈴木淳也, 守井清吾, 篠原寛明, 広林茂樹, "移動する音源によるアルファベット形状の提示", *映像メディア学会誌*, vol. 67, no. 12, pp.J441-J447, 67 (2013) J441-J447
123. 守井清吾, 石井雅博, 鈴木淳也, 川原茂敬, 広林茂樹, "点字ディスプレイを用いた触図システムにおけるペン・指先入力の比較", *映像メディア学会誌*, vol. 67, no. 12, pp.J448-J454, 67 (2013) J448-J454
124. 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", *山梨科学アカデミー会報*, 36 (2013) 25-33

125. I.Ou, Y.Yamada, T.Yano, T.Mori, T.Kayano, M.Sakuda, A.Kimura, and H.Harada, "Measurement of the energy, multiplicity and angular correlation of gamma-rays from the thermal neutron capture reaction Gd(n,gamma) using ANNRI", AIP Conference Proceedings, 1594 (2014) 351-356
126. Aasi, J. et al.(including K. Hayama), "First Searches for Optical Counterparts to Gravitational-wave Candidate Events", ApJ Suppl, 211 (2014) 7,30
127. Melandri, A., Pian, E., D'Elia, V., D'Avanzo, P., et al., "Diversity of GRB energetics vs. SN homogeneity: supernova 2013cq associated with the gamma-ray burst 130427A", Astron. Astrophys., 567 (2014) A29 (9pp)
128. Masaomi Tanaka, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, "Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers", Astrophys. J., 780 (2014) 31
129. Masaomi Tanaka, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, "Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers", Astrophys. J., 780 (2014) 31
130. Sawai, Hidetomo and Yamada, Shoichi, "Influence of Magnetorotational Instability on Neutrino Heating: A New Mechanism for Weakly Magnetized Core-Collapse Supernovae", Astrophys. J., 784 (2014) L10
131. Nagakura, Hiroki; Hotokezaka, Kenta; Sekiguchi, Yuichiro; Shibata, Masaru and Ioka, Kunihito, "Jet Collimation in the Ejecta of Double Neutron Star Mergers: A New Canonical Picture of Short Gamma-Ray Bursts", Astrophys. J., 784 (2014) L28
132. Bennett, D. P., Batista, V., Bond, I. A., Bennett, C. S., Suzuki, D., Beaulieu, J.-P., Udalski, A., Donatowicz, J., Bozza, V., Abe, F., Botzler, C. S., Freeman, M., Fukunaga, D., Fukui, A., Itow, Y., Koshimoto, N., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Namba, S., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, T., Sullivan, D. J., Sumi, T., Sweatman, W. L., Tristram, P. J., Tsurumi, N., Wada, K., Yock, P. C. M., Albrow, M. D., Bachelet, E., Brillant, S., Caldwell, J. A. R., Cassan, A., Cole, A. A., Corrales, E., Coutures, C., Dieters, S., Dominis Prester, D., Fouqué, P., Greenhill, J., Horne, K., Koo, J.-R., Kubas, D., Marquette, J.-B., Martin, R., Menzies, J. W., Sahu, K. C., Wambsganss, J., Williams, A., Zub, M., Choi, J. Y., DePoy, D. L., Dong, Subo, Gaudi, B. S., Gould, A., Han, C., Henderson, C. B., McGregor, D., Lee, C.-U., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Yee, J. C., Szymański, M. K., Skowron, J., Poleski, R., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Kubiak, M., Pietrukowicz, P., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Ulaczyk, K., Tsapras, Y., Street, R. A., Dominik, M., Bramich, D. M., Browne, P., Hundertmark, M., Kains, N., Snodgrass, C., Steele, I. A., Dekany, I., Gonzalez, O. A., Heyrovský, D., Kandori, R., Kerins, E., Lucas, P. W., Minniti, D., Nagayama, T., Rejkuba, M., Robin, A. C., Saito, R., "MOA-2011-BLG-262Lb: A Sub-Earth-Mass Moon Orbiting a Gas Giant Primary or a High Velocity Planetary System in the Galactic Bulge", Astrophys. J., 785 (2014) id. 155,1-13
133. Iwakami, Wakana; Nagakura, Hiroki and Yamada, Shoichi, "Parametric Study of Flow Patterns behind the Standing Accretion Shock Wave for Core-Collapse Supernovae", Astrophys. J., 786 (2014) 118
134. Park, H., Han, C., Gould, A., Udalski, A., Sumi, T., Fouqué, P., Choi, J.-Y., Christie, G., Depoy, D. L., Dong, Subo, Gaudi, B. S., Hwang, K.-H., Jung, Y. K., Kavka, A., Lee, C.-U., Monard, L. A. G., Natusch, T., Ngan, H., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Yee, J. C., Szymański, M. K., Kubiak, M., Soszyński, I., Pietrzyński, G., Poleski, R., Ulaczyk, K., Pietrukowicz, P., Kozłowski, S., Skowron, J., Wyrzykowski, Ł., Abe, F., Bennett, D. P., Bond, I. A., Botzler, C. S., Chote, P., Freeman, M., Fukui, A., Fukunaga, D., Harris, P., Itow, Y., Koshimoto, N., Ling, C.

- H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Namba, S.,Ohnishi, K.,Rattenbury, N. J.,Saito, To.,Sullivan, D. J.,Sweatman, W. L.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Wada, K.,Yamai, N.,Yock, P. C. M.,Yonehara, A., "OGLE-2012-BLG-0455/MOA-2012-BLG-206: Microlensing Event with Ambiguity in Planetary Interpretations Caused by Incomplete Coverage of Planetary Signal", *Astrophys. J.*, 787 (2014) id. 71,1-6
135. Yonetoku, Daisuke; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Toyanago, Asuka and Sawano, Tatsuya, "Short Gamma-Ray Burst Formation Rate from BATSE data using  $E_p$ - $L_p$  correlation and the minimum gravitational-wave event rate of coalescing compact binary", *Astrophys. J.*, 789 (2014) 65
136. Yonetoku, Daisuke; Nakamura, Takashi; Sawano, Tatsuya; Takahashi, Keitaro; Toyanago, Asuka, "Short Gamma-Ray Burst Formation Rate from BATSE Data Using  $E_p$ - $L_p$  Correlation and the Minimum Gravitational-wave Event Rate of a Coalescing Compact Binary", *Astrophys. J.*, 789 (2014) 65 - 69
137. Shinya Wanajo, Yuichiro Sekiguchi, Nobuya Nishimura, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, "Production of all the r-process nuclides in the dynamical ejecta of neutron star mergers", *Astrophys. J.*, 789 (2014) L39
138. Takami, Hajime; Nozawa, Takaya and Ioka, Kunihito, "Dust formation in macronovae", *Astrophys. J.*, 789 (2014) L6
139. Daisuke Yonetoku, Takashi Nakamura, Keitaro Takahashi, Asuka Toyanago, Tatsuya Sawano,, "Short Gamma-Ray Burst Formation Rate from BATSE data using  $E_p$ - $L_p$  correlation and the minimum gravitational-wave event rate of coalescing compact binary," *Astrophys. J.*, 789 (2014) no.1, 65
140. J. D. Kaplan, C. D. Ott, E. P. O'Connor, K. Kiuchi, L. Roberts and M. Duez, "The Influence of Thermal Pressure on Equilibrium Models of Hypermassive Neutron Star Merger Remnants", *Astrophys. J.*, 790 (2014) 19
141. Yee, J. C.,Han, C.,Gould, A.,Skowron, J.,Bond, I. A.,Udalski, A.,Hundertmark, M.,Monard, L. A. G.,Porritt, I.,Nelson, P.,Bozza, V.,Albrow, M. D.,Choi, J.-Y.,Christie, G. W.,DePoy, D. L.,Gaudi, B. S.,Hwang, K.-H.,Jung, Y. K.,Lee, C.-U.,McCormick, J.,Natusch, T.,Ngan, H.,Park, H.,Pogge, R. W.,Shin, I.-G.,Tan, T.-G.,Abe, F.,Bennett, D. P.,Botzler, C. S.,Freeman, M.,Fukui, A.,Fukunaga, D.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Larsen, P.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Namba, S.,Ohnishi, K.,Philpott, L.,Rattenbury, N. J.,Saito, To.,Sullivan, D. J.,Sumi, T.,Sweatman, W. L.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Tsurumi, N.,Wada, K.,Yamai, N.,Yock, P. C. M.,Yonehara, A.,Szymański, M. K.,Ulaczyk, K.,Kozłowski, S.,Poleski, R.,Wyrzykowski, Ł,Kubiak, M.,Pietrukowicz, P.,Pietrzyński, G.,Soszyński, I.,Bramich, D. M.,Browne, P.,Figuera Jaimes, R.,Horne, K.,Ipatov, S.,Kains, N.,Snodgrass, C.,Steele, I. A.,Street, R.,Tsapras, Y., "MOA-2013-BLG-220Lb: Massive Planetary Companion to Galactic-disk Host", *Astrophys. J.*, 790 (2014) id. 14,1-7
142. Hirai, Ryosuke; Sawai, Hidetomo and Yamada, Shoichi, "The Outcome of Supernovae in Massive Binaries; Removed Mass, and its Separation Dependence", *Astrophys. J.*, 792 (2014) 66
143. Ishiguro, Masateru,Kuroda, Daisuke,Hasegawa, Sunao,Kim, Myung-Jin,Choi, Young-Jun,Moskovitz, Nicholas,Abe, Shinsuke,Pan, Kang-Sian,Takahashi, Jun,Takagi, Yuhei,Arai, Akira,Tokimasa, Noritaka,Hsieh, Henry H.,Thomas-Osip, Joanna E.,Osip, David J.,Abe, Masanao,Yoshikawa, Makoto,Urakawa, Seitaro,Hanayama, Hidekazu,Sekiguchi, Tomohiko,Wada, Kohei,Sumi, Takahiro,Tristram, Paul J.,Furusawa, Kei,Abe, Fumio,Fukui, Akihiko,Nagayama, Takahiro,Warjurkar, Dhanraj

- S.,Rau, Arne,Greiner, Jochen,Schady, Patricia,Knust, Fabian,Usui, Fumihiko,Müller, Thomas G., "Optical Properties of (162173) 1999 JU3: In Preparation for the JAXA Hayabusa 2 Sample Return Mission", *Astrophys. J.*, 792 (2014) id. 74,1-9
144. Takahashi, Kazuya and Yamada, Shoichi, "Linear analysis on the growth of non-spherical perturbations in supersonic accretion flows", *Astrophys. J.*, 794 (2014) 162
145. Henderson, C. B.,Park, H.,Sumi, T.,Udalski, A.,Gould, A.,Tsapras, Y.,Han, C.,Gaudi, B. S.,Bozza, V.,Abe, F.,Bennett, D. P.,Bond, I. A.,Botzler, C. S.,Freeman, M.,Fukui, A.,Fukunaga, D.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Namba, S.,Ohnishi, K.,Rattenbury, N. J.,Saito, To,Sullivan, D. J.,Suzuki, D.,Sweatman, W. L.,Tristram, P. J.,Tsurumi, N.,Wada, K.,Yamai, N.,Yock, P. C. M.,Yonehara, A.,Szymański, M. K.,Kubiak, M.,Pietrzyński, G.,Soszyński, I.,Skowron, J.,Kozłowski, S.,Poleski, R.,Ulaczyk, K.,Wyrzykowski, Ł.,Pietrukowicz, P.,Almeida, L. A.,Bos, M.,Choi, J.-Y.,Christie, G. W.,Depoy, D. L.,Dong, S.,Friedmann, M.,Hwang, K.-H.,Jablonski, F.,Jung, Y. K.,Kaspi, S.,Lee, C.-U.,Maoz, D.,McCormick, J.,Moorhouse, D.,Natusch, T.,Ngan, H.,Pogge, R. W.,Shin, I.-G.,Shvartzvald, Y.,Tan, T.-G.,Thornley, G.,Yee, J. C.,Allan, A.,Bramich, D. M.,Browne, P.,Dominik, M.,Horne, K.,Hundertmark, M.,Figuera Jaimés, R.,Kains, N.,Snodgrass, C.,Steele, I. A.,Street, R. A., "Candidate Gravitational Microlensing Events for Future Direct Lens Imaging", *Astrophys. J.*, 794 (2014) id. 71,1-11
146. Nakamura, Takashi; Kashiyama, Kazumi; Nakauchi, Daisuke; Suwa, Yudai; Sakamoto, Takanori and Kawai, Nobuyuki, "Soft X-ray Extended Emissions of Short Gamma-Ray Bursts as Electromagnetic Counterparts of Compact Binary Mergers: Possible Origin and Detectability", *Astrophys. J.*, 796 (2014) 13
147. Yoichi Tamura, Toshiki Saito, Takeshi G. Tsuru, Hiroyuki Uchida, Daisuke Iono, Min S. Yun, Daniel Espada, Ryohei Kawabe, "Serendipitous ALMA detection of a distant CO-emitting X-ray bright galaxy", *Astrophys. J. Letters*, 781 (2014) 39-43
148. Yamanaka, M., Maeda, K., Kawabata, M., Tanaka, M., Takaki, K., Ueno, I., Masumoto, K., Kawabata, K. S., Itoh, R., Moritani, Y., Akitaya, H., Arai, A., Honda, S., Nishiyama, K., Kabashima, F., Matsumoto, K., Nogami, D., Yoshida, Y. , "Early-phase photometry and spectroscopy of transitional Type Ia SN 2012ht: Direct constraint on the rise time", *Astrophys. J. Letters*, 782 (2014) L35 (6pp)
149. Hiroki Nagakura, Kenta Hotokezaka, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, "Jet Collimation in the Ejecta of Double Neutron Star Mergers: A New Canonical Picture of Short Gamma-Ray Burst", *Astrophys. J. Letters*, 784 (2014) L28
150. Shibata, S., Tominaga, N., Tanaka, M., "Random walks and effective optical depth in relativistic flow", *Astrophys. J. Letters*, 787 (2014) L4 (5pp)
151. Shinya Wanajo, Yuichiro Sekiguchi, Nobuya Nishimura, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata, "Production of All the r-process Nuclides in the Dynamical Ejecta of Neutron Star Mergers", *Astrophys. J. Letters*, 789 (2014) L39
152. Tanaka, M., Morokuma, T., Itoh, R. et al., "Discovery of Dramatic Optical Variability in SDSS J1100+4421: A Peculiar Radio-Loud Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy?", *Astrophys. J. Letters*, 793 (2014) L26 (6pp)
153. Kawabata, K. S., Akitaya, H., Yamanaka, M., et al., "Optical and Near-Infrared Polarimetry of Highly Reddened Type Ia Supernova 2014J: Peculiar Properties of Dust in M82", *Astrophys. J. Letters*, 795 (2014) L4 (5pp)



154. Kazuhiro Hayama in Aasi,J. et al, "Gravitational Waves from Known Pulsars: Results from the Initial Detector Era", *Astrophys. J. Letters*, Volume 785, Issue 2, (2014) article id. 119, 18 pp.
155. Nagakura, Hiroki; Sumiyoshi, Kohsuke and Yamada, Shoichi, "Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars I. special relativistic treatments", *Astrophys. J. Suppl.*, 214 (2014) 16
156. Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada,, "Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars I. special relativistic treatments," *Astrophys. J. Suppl.*, 214 (2014) 16
157. Hinder, Ian and others, "Error-analysis and comparison to analytical models of numerical waveforms produced by the NRAR Collaboration", *Class. Quant. Grav.*, 31 (2014) 025012
158. D. Friedrich, M. Nakano, H. Kawamura, Y Yamanaka, S. Hirobayashi, S. Kawamura, "Juggled interferometer for the detection of gravitational waves around 0.1-10Hz", *Class. Quant. Grav.*, 31 (2014)
159. Kazuhiro Hayama in Aasi,J. et al, "Application of a Hough search for continuous gravitational waves on data from the fifth LIGO science run", *Class. Quant. Grav.*, Volume 31, Issue 8, (2014) article id. 085014
160. Tobias Fischer, Matthias Hempel, Irina Sagert, Yudai Suwa, and Juergen Schaffner-Bielich, "Symmetry energy impact in simulations of core-collapse supernovae", *Eur. Phys. J. A*, 50 (2014) 46
161. Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka Takahashi, Yuta Hiranuma, Takashi Wakamatsu, Jordan B. Camp, "Towards constructing an Alert System with the Hilbert-Huang Transform -Search for signals in noisy data-", *Innovative Computing, Information and Control, Express Letters Part B : Applications*, 5 (2014) 285-292
162. Yamashita, Yasuho; De Felice, Antonio and Tanaka, Takahiro, "Appearance of Boulware–Deser ghost in bigravity with doubly coupled matter", *Int. J. Mod. Phys., D*23 (2014) 1443003
163. M. Furukawa, S. Hirobayashi, T. Misawa, "A Study on the “Flexibility” of Information Systems (Part 3): MIS Flexibility Planning Scheme for IT/Business Strategy Alignment", *International Journal of Business and Management*; Vol. 9, No. 6, pp. 88-97, 2014, 9 (2014) 88-97
164. T. Misawa, T. Shimokawa, S. Hirobayashi, "Possibility for predicting the evaluation of product price in the prefrontal cortex : A NIRS, study", *International Journal of Engineering and Innovative Technology* vol.4 , no.3, pp. 153–160, 4 (2014) 153–160
165. T. Misawa, T. Shimokawa, S. Hirobayashi, "A Near-Infrared Spectroscopy Study on the Classification of Multiple Cognitive Tasks", *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, vol.4 , no.4, pp. 103–115, 4 (2014) 103-115
166. T. Misawa, T. Shimokawa, S. Hirobayashi, "NIRS-Based Brain-Computer Interface for Cursor Control Using Mental Concentration Measured, in the Prefrontal Cortex", *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, vol.4 , no.4, pp. 153–160, 4 (2014) 153-160
167. Nakama, Tomohiro; Harada, Tomohiro; Polnarev, A. G. and Yokoyama, Jun'ichi,

- "Identifying the most crucial parameters of the initial curvature profile for primordial black hole formation", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1401 (2014) 037
168. Fröb, Markus B.; Garriga, Jaume; Kanno, Sugumi; Sasaki, Misao; Soda, Jiro; Tanaka, Takahiro and Vilenkin, Alexander, "Schwinger effect in de Sitter space", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1404 (2014) 009
169. Kawasaki, Masahiro and Yokoyama, Shuichiro, "Compensation for large tensor modes with iso-curvature perturbations in CMB anisotropies", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1405 (2014) 046
170. Yamashita, Yasuho and Tanaka, Takahiro, "Mapping the ghost free bigravity into braneworld setup", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1406 (2014) 004
171. De Felice, Antonio; Gümrükçüoğlu, A. Emir; Mukohyama, Shinji; Tanahashi, Norihiro and Tanaka, Takahiro, "Viable cosmology in bimetric theory", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1406 (2014) 037
172. Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, "Reconstructing  $f(R)$  modified gravity with dark energy parametrization", *Journal of Physics: Conference Series*, 490 (2014) 012087-1-4
173. Iwa Ou, Takatomi Yano, Yoshiyuki Yamada, Takaaki Mori, Tsubasa Kayano, Makoto Sakuda, Atsushi Kimura, and Hideo Harada, "Measurement of the Energy, Multiplicity and Angular Correlation of Gamma-rays from the Thermal Neutron Capture Reaction  $Gd(n,\gamma)$ ", *JPS Conference Proceedings*, 1 (2014) 013053-1-6
174. Hirotaka Yuzurihara, Nobuyuki Kanda, "Detectability and parameter estimation of gravitational waves from cosmic string with ground-based detectors", *JPS Conference proceedings*, JPSCP.1.013117 (2014) 013117 (4 pages)
175. Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., Hatsukade, B., Scott, K. S., Kubo, M., Yamada, T., Ivison, R. J., Cybulski, R., Aretxaga, I., Austermann, J., Hughes, D. H., Ezawa, H., Hayashino, T., Ikarashi, S., Iono, D., Kawabe, R., Matsuda, Y., Matsuo, H., Nakanishi, K., Oshima, T., Perera, T., Takata, T., Wilson, G. W., Yun, M. S., "AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 440 (2014) 3462-3478
176. Kyutoku, Koutarou and Seto, Naoki, "Pre-merger localization of eccentric compact binary coalescences with second-generation gravitational-wave detector networks", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 441 (2014) 1934-1942
177. Kinugawa, Tomoya; Inayoshi, Kohei; Hotokezaka, Kenta; Nakauchi, Daisuke and Nakamura, Takashi, "Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 442 (2014) 2963-2992
178. Tomoya Kinugawa, Kohei Inayoshi, Kenta Hotokezaka, Daisuke Nakauchi, Takashi Nakamura, "Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 442 (2014) 2963-2992
179. Mazzali, P. A., MacFadyen, A., Woosley, S., Pian, E., Tanaka, M. , "An upper limit to the energy of gamma-ray bursts indicates that GRB/SNe are powered by magnetars", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 443 (2014) 67-71
180. Horiuchi, Shunsaku; Nakamura, Ko; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei and Tanaka, Masaomi, "The red supergiant and supernova rate problems: implications for core-collapse supernova physics", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 445 (2014) L99

181. Horiuchi, S., Nakamura, K., Takiwaki, T., Kotake, K., Tanaka, M. , "The red supergiant and supernova rate problems: implications for core-collapse supernova physics", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 445 (2014) L99-L103
182. Hatsukade, B., Ohta, K., Endo, A., Nakanishi, K., Tamura, Y., Hashimoto, T., and Kohno, K., "Two gamma-ray bursts from dusty regions with little molecular gas", *Nature*, 510 (2014) 247
183. Nishizawa, Atsushi and Motohashi, Hayato, "Constraint on reheating after  $R$  inflation from gravitational waves", *Phys. Rev. D*, 9 (2014) 063541
184. Takami, Hajime; Kyutoku, Koutarou and Ioka, Kunihiro, "High-Energy Radiation from Remnants of Neutron Star Binary Mergers", *Phys. Rev. D*, 89 (2014) 063006
185. Miyamoto, Yuhei; Motohashi, Hayato; Suyama, Teruaki and Yokoyama, Jun'ichi, "Langevin description of gauged scalar fields in a thermal bath", *Phys. Rev. D*, 89 (2014) 085037
186. Nishizawa, Atsushi and Nakamura, Takashi, "Measuring Speed of Gravitational Waves by Observations of Photons and Neutrinos from Compact Binary Mergers and Supernovae", *Phys. Rev. D*, 90 (2014) 044048
187. K. G. Arun, Hideyuki Tagoshi, Chandra Kant Mishra, Archana Pai, "Synergy of short gamma ray burst and gravitational wave observations: Constraining the inclination angle of the binary and possible implications for off-axis GRBs", *Phys. Rev. D*, 90, Issue 2, (2014) 024060. (9 pages)
188. Hideyuki Tagoshi, Chandra Kant Mishra, Archana Pai, K. G. Arun, "Parameter estimation of neutron star-black hole binaries using an advanced gravitational-wave detector network: Effects of the full post-Newtonian waveform", *Phys. Rev. D*, 90, Issue 2, (2014) 024053. (26 pages)
189. Yasumichi Sano and Hideyuki Tagoshi, "Gravitational field of a Schwarzschild black hole and a rotating mass ring", *Phys. Rev. D*, 90, Issue 4, (2014) 044043. (15 pages)
190. Pisin Chen, Teruaki Suyama, "Constraining primordial magnetic fields by CMB photon-graviton conversion", *Phys. Rev. D* , 88 (2014) 1,6
191. Masaru Shibata, Hiroki Nagakura, Yuichiro Sekiguchi, and Shoich Yamada, "Conservative form of Boltzmann's equation in general relativity", *Phys. Rev. D* , 89 (2014) 084073
192. Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations II: the even-parity sector", *Phys. Rev. D* , 89 (2014) 1,12
193. Yuhei Miyamoto, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Langevin description of gauged scalar fields in a thermal bath", *Phys. Rev. D* , 89 (2014) 1,13
194. Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, and Tomohide Wada, "High resolution numerical-relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars", *Phys. Rev. D* , 90 (2014) 041502
195. Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Tomohide Wada, "High resolution numerical-relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars", *Phys. Rev. D* , 90 (2014) 41502

196. Teruaki Suyama, Yi-Peng Wu, Jun'ichi Yokoyama, "Primordial black holes from temporally enhanced curvature perturbation", *Phys. Rev. D* , 90 (2014) 1,11
197. Kazunori Kohri, Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, "Testing scenarios of primordial black holes being the seeds of supermassive black holes by ultracompact minihalos and CMB  $\mu$ -distortions", *Phys. Rev. D* , 90 (2014) 1,14
198. Eda, Kazunari; Shoda, Ayaka; Itoh, Yousuke; Ando, Masaki, "Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas", *Phys. Rev. D* , Volume 90, Issue 6, id.064039 (14 pages) (2014) 064039-1 - 064039-16
199. Isoyama, Soichiro; Barack, Leor; Dolan, Sam R.; Le Tiec, Alexandre; Nakano, Hiroyuki; Shah, Abhay G.; Tanaka, Takahiro and Warburton, Niels, "Gravitational Self-Force Correction to the Innermost Stable Circular Equatorial Orbit of a Kerr Black Hole", *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 161101
200. Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Reheating the universe once more -- the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales", *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 1,3
201. Kazuhiro Hayama in Aasi, J. et al, "Constraints on Cosmic Strings from the LIGO-Virgo Gravitational-Wave Detectors", *Phys. Rev. Lett.*, Volume 112, Issue 13, (2014) id.131101
202. T. Yakamoto, N. Kanda, CLIO Collaboration and KAGRA Collaboration, "Calibration and reconstruction in time-series of strain of gravitational wave detector", *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference, JPSCP.1.013119* (2014) 013119-1, 013119-4
203. Jun'ichi Yokoyama, "Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises I. Locally optimal statistic", *Proceedings of the Japan Academy ser B*, 90 (2014) 422-432
204. Yonetoku, Daisuke; Mihara, Tatehiro; Sawano, Tatsuya; Ikeda, Hirokazu; Harayama, Atsushi; Takata, Shunsuke; Yoshida, Kazuki; Seta, Hiroki; Toyonago, Asuka; Kagawa, Yasuaki; et al., "High-z gamma-ray bursts for unraveling the dark ages mission HiZ-GUNDAM", *Proceedings of the SPIE*, 9144 (2014) 91442S, 12 pp
205. Kojima, Yasufumi; Kato, Yugo E., "Numerical simulation of oscillating magnetospheres with resistive electrodynamics", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2 (2014) id.023E01
206. De Felice, Antonio; Nakamura, Takashi and Tanaka, Takahiro, "Possible existence of viable models of bi-gravity with detectable graviton oscillations by gravitational wave detectors", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2014 (2014) 043E01
207. Antonio De Felice, Takashi Nakamura, Takahiro Tanaka,, "Possible existence of viable models of bi-gravity with detectable graviton oscillations by gravitational wave detectors," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2014 (2014) 430
208. Ioka, Kunihto and Murase, Kohta, "IceCube PeV–EeV neutrinos and secret interactions of neutrinos", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2014 (2014) 061E01
209. Tanaka, Takahiro and Urakawa, Yuko, "Strong restriction on inflationary vacua from the local gauge invariance III: Infrared regularity of graviton loops", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2014 (2014) 073E01
210. Yohsuke Takamori, Hirotada Okawa, Makoto Takamoto, and Yudai Suwa, "An alternative numerical method for the stationary pulsar magnetosphere", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 66 (2014) 25

211. Totani, T., Aoki, K., Hattori, T., Kosugi, G., Niino, Y., Hashimoto, T., Kawai, N., Ohta, K., Sakamoto, T., and Yamada, T., "Probing intergalactic neutral hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at  $z = 5.913$ ", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 66 (2014) 63
212. Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., et al., "Kiso Supernova Survey (KISS): Survey Strategy", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 66 (2014) 114 (16pp)
213. Gould, A., Udalski, A., Shin, I.-G., Porritt, I., Skowron, J., Han, C., Yee, J. C., Kozłowski, S., Choi, J.-Y., Poleski, R., Wyrzykowski, Ł., Ulaczyk, K., Pietrukowicz, P., Mróz, P., Szymański, M. K., Kubiak, M., Soszyński, I., Pietrzyński, G., Gaudi, B. S., Christie, G. W., Drummond, J., McCormick, J., Natusch, T., Ngan, H., Tan, T.-G., Albrow, M., DePoy, D. L., Hwang, K.-H., Jung, Y. K., Lee, C.-U., Park, H., Pogge, R. W., Abe, F., Bennett, D. P., Bond, I. A., Botzler, C. S., Freeman, M., Fukui, A., Fukunaga, D., Itow, Y., Koshimoto, N., Larsen, P., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Namba, S., Ohnishi, K., Philpott, L., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Tristram, P. J., Tsurumi, N., Wada, K., Yamai, N., Yock, P. C. M., Yonehara, A., Shvartzvald, Y., Maoz, D., Kaspi, S., Friedmann, M., "A terrestrial planet in a  $\sim 1$ -AU orbit around one member of a  $\sim 15$ -AU binary", *Science*, 345 (2014) ,46-49
214. Daisuke YONETOKU, Tatsuya SAWANO, Shunsuke TAKATA, Kazuki YOSHIDA, Hiroki SETA, Asuka TOYANAGO, Yudai WAKASHIMA, Hajime YONEMOCHI, and Hirokazu IKEDA, "Establish of Gravitational Wave Astronomy with Gamma-Ray Burst and X-ray Transient Monitor", *UNISEC Takumi Journal*, 5 (2014) 19 - 27
215. 三野哲志, 参沢匡将, 広林茂樹, "前頭前野の計測による集中時の脳活動を用いたカーソルコントロールのための EEG-Based Brain-Computer Interface の開発, ", *電子情報通信学会*, vol.J97-D, no.3 pp.496-506, J97-D (2014) 496-506
216. Kuncarayakti, H., Maeda, K., Bersten, M. C., Folatelli, G., Morrell, N., Hsiao, E. Y., Gonzalez-Gaitan, S., Anderson, J. P., Hamuy, M., de Jaeger, T., Gutierrez, C. P., and Kawabata, K. S., "Nebular phase observations of the Type-Ib supernova iPTF13bvn favour a binary progenitor", *Astron. Astrophys.*, 579 (2015) A95
217. Ranc, C., Cassan, A., Albrow, M. D., Kubas, D., Bond, I. A., Batista, V., Beaulieu, J.-P., Bennett, D. P., Dominik, M., Dong, Subo, Fouqué, P., Gould, A., Greenhill, J., Jørgensen, U. G., Kains, N., Menzies, J., Sumi, T., Bachelet, E., Coutures, C., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Gaudi, B. S., Han, C., Hundertmark, M., Horne, K., Kane, S. R., Lee, C.-U., Marquette, J.-B., Park, B.-G., Pollard, K. R., Sahu, K. C., Street, R., Tsapras, Y., Wambsganss, J., Williams, A., Zub, M., Abe, F., Fukui, A., Itow, Y., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N., Saito, To., Sullivan, D. J., Sweatman, W. L., Tristram, P. J., Yock, P. C. M., Yonehara, A., "MOA-2007-BLG-197: Exploring the brown dwarf desert", *Astron. Astrophys.*, 580 (2015) id.A125,1-16
218. H.Zhang et. al. (Super-Kamiokande collaboration), "Supernova Relic Neutrino search with neutron tagging at Super-Kamiokande-IV", *Astropart. Phys.*, 60 (2015) 41-46
219. Jung, Y. K., Udalski, A., Sumi, T., Han, C., Gould, A., Skowron, J., Kozłowski, S., Poleski, R., Wyrzykowski, Ł., Szymański, M. K., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Ulaczyk, K., Pietrukowicz, P., Mróz, P., Kubiak, M., Abe, F., Bennett, D. P., Bond, I. A., Botzler, C. S., Freeman, M., Fukui, A., Fukunaga, D., Itow, Y., Koshimoto, N., Larsen, P., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Namba, S., Ohnishi, K., Philpott, L., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Tristram, P. J., Tsurumi, N., Wada, K., Yamai, N., Yock, P. C. M., Yonehara, A., Albrow, M., Choi, J.-Y., DePoy, D. L., Gaudi, B. S., Hwang, K.-H., Lee, C.-U., Park, H., Owen, S., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Yee, J. C., "OGLE-2013-BLG-0102LA,B: Microlensing Binary with Components at Star/Brown Dwarf and Brown

- Dwarf/Planet Boundaries", *Astrophys. J.*, 798 (2015) id. 123,1-7
220. Masada, Youhei; Takiwaki, Tomoya and Kotake, Kei, "Magnetohydrodynamic Turbulence Powered by Magnetorotational Instability in Nascent Proto-Neutron Stars", *Astrophys. J.*, 798 (2015) L22
221. Freeman, M.,Philpott, L. C.,Abe, F.,Albrow, M. D.,Bennett, D. P.,Bond, I. A.,Botzler, C. S.,Bray, J. C.,Cherrie, J. M.,Christie, G. W.,Dionnet, Z.,Gould, A.,Han, C.,Heyrovský, D.,McCormick, J. M.,Moorhouse, D. M.,Muraki, Y.,Natusch, T.,Rattenbury, N. J.,Skowron, J.,Sumi, T.,Suzuki, D.,Tan, T.-G.,Tristram, P. J.,Yock, P. C. M., "Can the Masses of Isolated Planetary-mass Gravitational Lenses be Measured by Terrestrial Parallax?", *Astrophys. J.*, 799 (2015) id. 181,1-12
222. Kisaka, Shota; Ioka, Kunihito and Takami, Hajime, "Energy Sources and Light Curves of Macronovae", *Astrophys. J.*, 802 (2015) 119
223. Yuan, Qiang and Ioka, Kunihito, "Testing the millisecond pulsar scenario of the Galactic center gamma-ray excess with very high energy gamma-rays", *Astrophys. J.*, 802 (2015) 124
224. Calchi Novati, S.,Gould, A.,Udalski, A.,Menzies, J. W.,Bond, I. A.,Shvartzvald, Y.,Street, R. A.,Hundertmark, M.,Beichman, C. A.,Yee, J. C.,Carey, S.,Poleski, R.,Skowron, J.,Kozłowski, S.,Mróz, P.,Pietrukowicz, P.,Pietrzyński, G.,Szymański, M. K.,Soszyński, I.,Ulaczyk, K.,Wyrzykowski, Ł.,Albrow, M.,Beaulieu, J. P.,Caldwell, J. A. R.,Cassan, A.,Coutures, C.,Danielski, C.,Dominis Prester, D.,Donatowicz, J.,Lončarić K.,McDougall, A.,Morales, J. C.,Ranc, C.,Zhu, W.,Abe, F.,Barry, R. K.,Bennett, D. P.,Bhattacharya, A.,Fukunaga, D.,Inayama, K.,Koshimoto, N.,Namba, S.,Sumi, T.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Wakiyama, Y.,Yonehara, A.,Maoz, D.,Kaspi, S.,Friedmann, M.,Wise Group,Bachelet, E.,Figuera Jaimes, R.,Bramich, D. M.,Tsapras, Y.,Horne, K.,Snodgrass, C.,Wambsganss, J.,Steele, I. A.,Kains, N.,Bozza, V.,Dominik, M.,Jørgensen, U. G.,Alsubai, K. A.,Ciceri, S.,D'Ago, G.,Haugbølle, T.,Hessman, F. V.,Hinse, T. C.,Juncher, D.,Korhonen, H.,Mancini, L.,Popovas, A.,Rabus, M.,Rahvar, S.,Scarpetta, G.,Schmidt, R. W.,Skottfelt, J.,Southworth, J.,Starkey, D.,Surdej, J.,Wertz, O.,Zarucki, M.,MiNDSTeP Consortium,Gaudi, B. S.,Pogge, R. W.,DePoy, D. L., "Pathway to the Galactic Distribution of Planets: Combined Spitzer and Ground-Based Microlens Parallax Measurements of 21 Single-Lens Events", *Astrophys. J.*, 804 (2015) id. 20,1-25
225. Skowron, J.,Shin, I.-G.,Udalski, A.,Han, C.,Sumi, T.,Shvartzvald, Y.,Gould, A.,Dominis Prester, D.,Street, R. A.,Jørgensen, U. G.,Bennett, D. P.,Bozza, V.,Szymański, M. K.,Kubiak, M.,Pietrzyński, G.,Soszyński, I.,Poleski, R.,Kozłowski, S.,Pietrukowicz, P.,Ulaczyk, K.,Wyrzykowski, Ł.,Abe, F.,Bhattacharya, A.,Bond, I. A.,Botzler, C. S.,Freeman, M.,Fukui, A.,Fukunaga, D.,Itow, Y.,Ling, C. H.,Koshimoto, N.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Namba, S.,Ohnishi, K.,Philpott, L. C.,Rattenbury, N.,Saito, T.,Sullivan, D. J.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Yock, P. C. M.,Maoz, D.,Kaspi, S.,Friedmann, M.,Wise Group,Almeida, L. A.,Batista, V.,Christie, G.,Choi, J.-Y.,DePoy, D. L.,Gaudi, B. S.,Henderson, C.,Hwang, K.-H.,Jablonski, F.,Jung, Y. K.,Lee, C.-U.,McCormick, J.,Natusch, T.,Ngan, H.,Park, H.,Pogge, R. W.,Yee, J. C.,Albrow, M. D.,Bachelet, E.,Beaulieu, J.-P.,Brillant, S.,Caldwell, J. A. R.,Cassan, A.,Cole, A.,Corrales, E.,Coutures, Ch.,Dieters, S.,Donatowicz, J.,Fouqué, P.,Greenhill, J.,Kains, N.,Kane, S. R.,Kubas, D.,Marquette, J.-B.,Martin, R.,Menzies, J.,Pollard, K. R.,Ranc, C.,Sahu, K. C.,Wambsganss, J.,Williams, A.,Wouters, D.,Tsapras, Y.,Bramich, D. M.,Horne, K.,Hundertmark, M.,Snodgrass, C.,Steele, I. A.,Alsubai, K. A.,Browne, P.,Burgdorf, M. J.,Calchi Novati, S.,Dodds, P.,Dominik, M.,Dreizler, S.,Fang, X.-S.,Gu, C.-H.,Hardis,Harpsoe, K.,Hessman, F. V.,Hinse, T. C.,Hornstrup, A.,Jessen-Hansen, J.,Kerins, E.,Liebig, C.,Lund, M.,Lundkvist, M.,Mancini, L.,Mathiasen, M.,Penny, M.

- T.,Rahvar, S.,Ricci, D.,Scarpetta, G.,Skottfelt, J.,Southworth, J.,Surdej, J.,Tregloan-Reed, J.,Wertz, O.,MiNDSTEp Consortium,, "OGLE-2011-BLG-0265Lb: A Jovian Microlensing Planet Orbiting an M Dwarf", *Astrophys. J.*, 804 (2015) id. 33,1-12
226. Jeong, J.,Park, H.,Han, C.,Gould, A.,Udalski, A.,Szymański, M. K.,Pietrzyński, G.,Soszyński, I.,Poleski, R.,Ulaczyk, K.,Wyrzykowski, Ł.,Abe, F.,Bennett, D. P.,Bond, I. A.,Botzler, C. S.,Freeman, M.,Fukui, A.,Fukunaga, D.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Namba, S.,Ohnishi, K.,Rattenbury, N. J.,Saito, To.,Sullivan, D. J.,Sweatman, W. L.,Sumi, T.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Tsurumi, N.,Wada, K.,Yamai, N.,Yock, P. C. M.,Yonehara, A.,Albrow, M. D.,Batista, V.,Beaulieu, J.-P.,Caldwell, J. A. R.,Cassan, A.,Cole, A.,Coutures, C.,Dieters, S.,Dominik, M.,Dominis Prester, D.,Donatowicz, J.,Fouqué, P.,Greenhill, J.,Hoffman, M.,Huber, M.,Jørgensen, U. G.,Kane, S. R.,Kubas, D.,Martin, R.,Marquette, J.-B.,Menzies, J.,Pitrou, C.,Pollard, K.,Sahu, K. C.,Vinter, C.,Wambsganss, J.,Williams, A.,Allen, W.,Bolt, G.,Choi, J.-Y.,Christie, G. W.,DePoy, D. L.,Drummond, J.,Gaudi, B. S.,Hwang, K.-H.,Jung, Y. K.,Lee, C.-U.,Mallia, F.,Maoz, D.,Maury, A.,McCormick, J.,Monard, L. A. G.,Moorhouse, D.,Natusch, T.,Ofek, E. O.,Park, B.-G.,Pogge, R. W.,Santalo, R.,Shin, I.-G.,Thornley, G.,Yee, J. C.,Bramich, D. M.,Burgdorf, M.,Horne, K.,Hundertmark, M.,Kains, N.,Snodgrass, C.,Steele, I.,Street, R.,Tsapras, Y.,, "Reanalyses of Anomalous Gravitational Microlensing Events in the OGLE-III Early Warning System Database with Combined Data", *Astrophys. J.*, 804 (2015) id. 38,1-11
227. Kisaka, Shota and Ioka, Kunihito, "Long-Lasting Black-Hole Jets in Short Gamma-Ray Bursts", *Astrophys. J.*, 804 (2015) L16
228. Kohta Murase, Kazumi Kashiyama, Kenta Kiuchi, Imre Bartos, "Gamma-ray and hard X-ray emission from pulsar-aided supernovae as a probe of particle acceleration in embryonic pulsar wind nebulae", *Astrophys. J.*, 805 (2015) 82
229. Nakauchi, Daisuke; Kashiyama, Kazumi; Nagakura, Hiroki; Suwa, Yudai and Nakamura, Takashi, "Optical Synchrotron Precursors of Radio Hypernovae", *Astrophys. J.*, 805 (2015) 164
230. Hirai, Ryosuke and Yamada, Shoichi, "Possible Signatures of Ejecta-Companion Interaction in iPTF 13bvn", *Astrophys. J.*, 805 (2015) 170
231. K. Asakura et al.,, "STUDY OF ELECTRON ANTI-NEUTRINOS ASSOCIATED WITH GAMMA-RAY BURSTS USING KamLAND", *Astrophys. J.*, 806 (2015) 86
232. Yamanaka, M., Kawabata, K. S., Yanagisawa, K., Yoshida, M., 他 29 名, "OISTER Optical and Near-Infrared Observations of Type Iax Supernova 2012Z", *Astrophys. J.*, 806 (2015) 191
233. Hashimoto, T., Perley, D. A., Ohta, K., Aoki, K., Tanaka, I., Niino, Y., Yabe, K., and Kawai, N., "The Star Formation Rate and Metallicity of the Host Galaxy of the Dark GRB 080325 at  $z=1.78$ ", *Astrophys. J.*, 806 (2015) 250
234. Yamanaka, M., Maeda, K., Kawabata, K. S., Tanaka, M., et al. , "OISTER Optical and Near-Infrared Observations of Type Iax Supernova 2012Z", *Astrophys. J.*, 806 (2015) 191 (14pp)
235. Maeda, K., Hattori, T., Milisavljevic, D., et al., "Type IIb Supernova 2013df Entering Into An Interaction Phase: A Link between the Progenitor and the Mass Loss", *Astrophys. J.*, 807 (2015) 35 (10pp)
236. Kato, Chinami; Azari, Milad Delfan; Yamada, Shoichi; Takahashi, Koh; Umeda,

- Hideyuki; Yoshida, Takashi and Ishidoshiro, Koji, "Pre-supernova neutrino emissions from O Ne cores in the progenitors of core-collapse supernovae: are they distinguishable from those of Fe cores?", *Astrophys. J.*, 808 (2015) 168
237. Tamura, Y., Kawabe, R., Shimajiri, Y., Tsukagoshi, T., Nakajima, Y., Oasa, Y., Wilner, D. J., Chandler, C. J., Saigo, K., Tomida, K., Yun, M. S., Taniguchi, A., Kohno, K., Hatsukade, B., Aretxaga, I., Austermann, J. E., Dickman, R., Ezawa, H., Goss, W. M., Hayashi, M., Hughes, D. H., Hiramatsu, M., Inutsuka, S., Ogasawara, R., Ohashi, N., Oshima, T., Scott, K. S., Wilson, G. W., "Extremely Bright Submillimeter Galaxies beyond the Lupus-I Star-forming Region", *Astrophys. J.*, 808 (2015) 121-134
238. Katsuda, S., Mori, K., Maeda, K., Tanaka, M., Koyama, K., Tsunemi, H., Nakajima, H., Maeda, Y., Ozaki, M., Petre, R., "Kepler's Supernova: An Overluminous Type Ia Event Interacting with a Massive Circumstellar Medium at a Very Late Phase", *Astrophys. J.*, 808 (2015) 49 (14pp)
239. Fukui, A., Gould, A., Sumi, T., Bennett, D. P., Bond, I. A., Han, C., Suzuki, D., Beaulieu, J.-P., Batista, V., Udalski, A., Street, R. A., Tsapras, Y., Hundertmark, M., Abe, F., Bhattacharya, A., Freeman, M., Itow, Y., Ling, C. H., Koshimoto, N., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Ohnishi, K., Philpott, L. C., Rattenbury, N., Saito, T., Sullivan, D. J., Tristram, P. J., Yonehara, A., Choi, J.-Y., Christie, G. W., DePoy, D. L., Dong, Subo, Drummond, J., Gaudi, B. S., Hwang, K.-H., Kavka, A., Lee, C.-U., McCormick, J., Natusch, T., Ngan, H., Park, H., Pogge, R. W., Shin, I.-G., Tan, T.-G., Yee, J. C., Szymański, M. K., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Poleski, R., Kozłowski, S., Pietrukowicz, P., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., Bramich, D. M., Browne, P., Dominik, M., Horne, K., Ipatov, S., Kains, N., Snodgrass, C., Steele, I. A., "OGLE-2012-BLG-0563Lb: A Saturn-mass Planet around an M Dwarf with the Mass Constrained by Subaru AO Imaging", *Astrophys. J.*, 809 (2015) id. 74,1-16
240. Kisaka, Shota; Ioka, Kunihito and Nakamura, Takashi, "Isotropic Detectable X-ray Counterparts to Gravitational Waves from Neutron Star Binary Mergers", *Astrophys. J.*, 809 (2015) L8
241. Matsumoto, Tatsuya; Nakauchi, Daisuke; Ioka, Kunihito; Heger, Alexander and Nakamura, Takashi, "Can Direct Collapse Black Holes Launch Gamma-ray Bursts and Grow to Supermassive Black Holes?", *Astrophys. J.*, 810 (2015) 64
242. Tatsuya Matsumoto, Daisuke Nakauchi, Kunihito Ioka, Alexander Heger, Takashi Nakamura., "Can Direct Collapse Black Holes Launch Gamma-ray Bursts and Grow to Supermassive Black Holes?," *Astrophys. J.*, 810 (2015) 64
243. Sho Fujibayashi, Takashi Yoshida, and Yuichiro Sekiguchi, "Nucleosynthesis in Neutrino-driven Winds in Hypernovae", *Astrophys. J.*, 810 (2015) 115
244. Nishimura, Nobuya; Takiwaki, Tomoya; Thielemann, Friedrich-Karl, "The r-process Nucleosynthesis in the Various Jet-like Explosions of Magnetorotational Core-collapse Supernovae", *Astrophys. J.*, 810 (2015) id. 109, 23 pp
245. Kagawa, Yasuaki; Yonetoku, Daisuke; Sawano, Tatsuya; Toyonago, Asuka; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Kashiyama, Kazumi and Ioka, Kunihito, "X-raying extended emission and rapid decay of short gamma-ray bursts", *Astrophys. J.*, 811 (2015) 4
246. Kagawa, Yasuaki; Yonetoku, Daisuke; Sawano, Tatsuya; Toyonago, Asuka; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Kashiyama, Kazumi; Ioka, Kunihito, "X-Raying Extended Emission and Rapid Decay of Short Gamma-Ray Bursts", *Astrophys. J.*, 811 (2015)



247. 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", *Astrophys. J.*, 811 (2015)
248. Bachelet, E.,Bramich, D. M.,Han, C.,Greenhill, J.,Street, R. A.,Gould, A.,D'Ago, G.,AlSubai, K.,Dominik, M.,Figuera Jaimes, R.,Horne, K.,Hundertmark, M.,Kains, N.,Snodgrass, C.,Steele, I. A.,Tsapras, Y.,Albrow, M. D.,Batista, V.,Beaulieu, J.-P.,Bennett, D. P.,Brillant, S.,Caldwell, J. A. R.,Cassan, A.,Cole, A.,Coutures, C.,Dieters, S.,Dominis Prester, D.,Donatowicz, J.,Fouqué, P.,Hill, K.,Marquette, J.-B.,Menzies, J.,Pere, C.,Ranc, C.,Wambsganss, J.,Warren, D.,de Almeida, L. Andrade,Choi, J.-Y.,DePoy, D. L.,Dong, S.,Hung, L.-W.,Hwang, K.-H.,Jablonski, F.,Jung, Y. K.,Kaspi, S.,Klein, N.,Lee, C.-U.,Maoz, D.,Muñoz, J. A.,Nataf, D.,Park, H.,Pogge, R. W.,Polishook, D.,Shin, I.-G.,Shporer, A.,Yee, J. C.,Abe, F.,Bhattacharya, A.,Bond, I. A.,Botzler, C. S.,Freeman, M.,Fukui, A.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Ohnishi, K.,Philpott, L. C.,Rattenbury, N.,Saito, To.,Sullivan, D. J.,Sumi, T.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Yonehara, A.,Bozza, V.,Calchi Novati, S.,Ciceri, S.,Galianni, P.,Gu, S.-H.,Harpsoe, K.,Hinse, T. C.,Jørgensen, U. G.,Juncher, D.,Korhonen, H.,Mancini, L.,Melchiorre, C.,Popovas, A.,Postiglione, A.,Rabus, M.,Rahvar, S.,Schmidt, R. W.,Scarpetta, G.,Skottfelt, J.,Southworth, John,Stabile, An.,Surdej, J.,Wang, X.-B.,Wertz, O., "Red Noise Versus Planetary Interpretations in the Microlensing Event Ogle-2013-BLG-446", *Astrophys. J.*, 812 (2015) id. 136,1-11
249. Zhu, Wei,Gould, Andrew,Beichman, Charles,Calchi Novati, Sebastiano,Carey, Sean,Gaudi, B. Scott,Henderson, Calen B.,Penny, Matthew,Shvartzvald, Yossi,Yee, Jennifer C.,Udalski, A.,Poleski, R.,Skowron, J.,Kozlowski, S.,Mróz, P.,Pietrukowicz, P.,Pietrzyński, G.,Szymański, M. K.,Soszyński, I.,Ulaczyk, K.,Wyrzykowski, Ł.,Abe, F.,Barry, R. K.,Bennett, D. P.,Bhattacharya, A.,Bond, I. A.,Freeman, M.,Fukui, A.,Hirao, Y.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Ling, H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Nagakane, M.,Ohnishi, K.,Saito, To.,Sullivan, D. J.,Sumi, T.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Rattenbury, N.,Wakiyama, Y.,Yonehara, A.,Maoz, D.,Kaspi, S.,Friedmann, M.,The Wise Group., "Planet Sensitivity from Combined Ground- and Space-based Microlensing Observations", *Astrophys. J.*, 814 (2015) id. 129,1-10
250. "Umehata, H., Tamura, Y., Kohno, K., Ivison, R. J., Alexander, D. M.,
251. Geach, J. E., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Ikarashi, S., Kato, Y., Izumi, T., Kawabe, R., Kubo, M., Lee, M., Lehmer, B., Makiya, R., Matsuda, Y., Nakanishi, K., Saito, T., Smail, I., Yamada, T., Yamaguchi, Y., Yun, M.", "ALMA Deep Field in SSA22: A Concentration of Dusty Starbursts in a  $z = 3.09$  Protocluster Core", *Astrophys. J. Letters*, 815 (2015) 8-13
252. Kimura, Masashi; Ishihara, Hideki; Matsuno, Ken and Tanaka, Takahiro, "A simple diagnosis of non-smoothness of black hole horizon: Curvature singularity at horizons in extremal Kaluza-Klein black holes", *Class. Quant. Grav.*, 32 (2015) 015005
253. Aasi,J. et al , "Characterization of the LIGO detectors during their sixth science run ", *Class. Quant. Grav.*, 32 (2015) 115012-1—115012-30
254. L. M. Magro, "EGADS approaching GADZOOKS!", *EPJ Web Conf.*, 95 (2015) 4041 1-6
255. Toshiaki Ono, Tomohito Suzuki, Naomasa Fushimi, Kei Yamada, Hideki Asada, "Application of Sturm's theorem to marginal stable circular orbits of a test body in spherically symmetric and static spacetimes", *Europhysics Letters*, 111 (2015) 30008(6pages)

256. Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Yukitsugu Sasaki, Hiroataka 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
257. Kunimitsu, Taro; Suyama, Teruaki; Watanabe, Yuki and Yokoyama, Jun'ichi, "Large tensor mode, field range bound and consistency in generalized G-inflation", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1508 (2015) 044
258. Taro Kunimitsu, Teruaki Suyama, Yuki Watanabe, Jun'ichi Yokoyama, "Large tensor mode, field range bound and consistency in generalized G-inflation", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1508 (2015) 1,28
259. Ansoldi, S. and Tanaka, T., "Tunnelling with wormhole creation", *J. Exp. Theor. Phys.*, 120 (2015) 460-469
260. H. Kamijo, S. Morii, W. Yamaguchi, N. Toyooka, M. Tada-Umezaki, S. Hirobayashi, "Creating an Adaptive Technology Using a Cheminformatics System to Read Aloud Chemical Compound Names for People with Visual Disabilities", *Journal of Chemical Education*, vol. 93, pp. 496-503, 2015, 93 (2015) 496-503
261. Emparan, Roberto; Shiromizu, Tetsuya; Suzuki, Ryotaku; Tanabe, Kentaro and Tanaka, Takahiro, "Effective theory of Black Holes in the 1/D expansion", *Journal of High Energy Physics*, 06 (2015) 159
262. Maeda, K., Nozawa, T., Nagao, T., and Motohara, K., "Constraining the amount of circumstellar matter and dust around Type Ia supernovae through near-infrared echoes", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 452 (2015) 3281
263. Sakurai, Y., Hosokawa, T., Yoshida, N., & Yorke, H. W., "Formation of primordial supermassive stars by burst accretion", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 452 (2015) 755-764
264. "MOA-2010-BLG-353Lb: a possible Saturn revealed", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 454 (2015) 946-951
265. Rattenbury, N. J., Bennett, D. P., Sumi, T., Koshimoto, N., Bond, I. A., Udalski, A., Abe, F., Bhattacharya, A., Freeman, M., Fukui, A., Itow, Y., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Ohnishi, K., Saito, T., Sharan, A., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Tristram, P. J., Kozłowski, S., Mróz, P., Pietrukowicz, P., Pietrzyński, G., Poleski, R., Skowron, D., Skowron, J., Soszyński, I., Szymański, M. K., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., "MOA-2010-BLG-353Lb: a possible Saturn revealed", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 454 (2015) 946-951
266. T. Uchida, Y. Inuzuka, M. Hasegawa, S. Hirobayashi, T. Misawa, "Numerical simulation validation of nonuniform, nonharmonic analysis of spectral-domain optical coherence tomography", *Optical Engineering*, vol. 54, no. 3, 033108 (12 pages), 54 (2015) 42747
267. Narikawa, Tatsuya; Ueno, Koh; Tagoshi, Hideyuki; Tanaka, Takahiro; Kanda, Nobuyuki and Nakamura, Takashi, "Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations", *Phys. Rev. D*, 91 (2015) 062007
268. Tatsuya Narikawa, Koh Ueno, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, "Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations", *Phys. Rev. D*, 91 (2015) 62007
269. Nishizawa, Atsushi and Seto, Naoki, "Search for an emission line of a gravitational wave background", *Phys. Rev. D*, 91 (2015) 122001

270. Kyutoku, Koutarou; Ioka, Kunihito; Okawa, Hirotada; Shibata, Masaru and Taniguchi, Keisuke, "Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries", Phys. Rev. D, 92 (2015) 044028
271. Nakano, Hiroyuki; Tanaka, Takahiro and Nakamura, Takashi, "Possible golden events for ringdown gravitational waves", Phys. Rev. D, 92 (2015) 064003
272. Kawanaka, Norita and Ioka, Kunihito, "Neutrino Flavor Ratios Modified by Cosmic Ray Secondary Acceleration", Phys. Rev. D, 92 (2015) 085047
273. Chen, Pisin; Suyama, Teruaki and Yokoyama, Jun'ichi, "Spontaneous scalarization: asymmetron as dark matter", Phys. Rev. D, 92 (2015) 124016
274. Kei Yamada, Hideki Asada, "Nonchaotic evolution of triangular configuration due to gravitational radiation reaction in the three-body problem ", Phys. Rev. D, 93 (2015) 084027(8pages)
275. Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata, "Dynamical mass ejection from binary neutron star mergers: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", Phys. Rev. D , 91 (2015) 064059
276. Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Kyutoku Koutarou, Masaru Shibata, "The dynamical mass ejection from binary neutron star mergers: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", Phys. Rev. D , 91 (2015) 64059
277. Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, "Third order equations of motion and the Ostrogradsky instability", Phys. Rev. D , 91 (2015) 1,5
278. Ono, Kenji; Eda, Kazunari; Itoh, Yousuke, "New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves", Phys. Rev. D , 91 (2015) 84032/1-8
279. Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi, Tomohide Wada, "High-resolution magnetohydrodynamics simulation of black hole-neutron star merger: Mass ejection and short gamma-ray burst", Phys. Rev. D , 92 (2015) 64034
280. Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi, and Tomohide Wada, "High-resolution magnetohydrodynamics simulation of black hole-neutron star merger: Mass ejection and short gamma-ray burst", Phys. Rev. D , 92 (2015) 064034
281. K.Hayama, T. Kuroda, T. Takiwaki, K. Kotake, "Coherent network analysis of gravitational waves from three-dimensional core-collapse supernova models", Phys. Rev. D , 92 (2015) 122001
282. Kenta Kiuchi, Pablo Cerda-Duran, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, "Efficient magnetic-field amplification due to the Kelvin-Helmholtz instability in binary neutron star mergers", Phys. Rev. D , 92 (2015) 124034
283. Kenta Kiuchi, Pablo Cerdá-Durán, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, "Efficient magnetic-field amplification due to the Kelvin-Helmholtz instability in binary neutron star mergers", Phys. Rev. D , 92 (2015) 124034
284. Pisin Chen, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Spontaneous-scalarization-induced dark matter and variation of the gravitational constant", Phys. Rev. D , 92 (2015) 1,15
285. Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, "Primordial black holes as a novel probe of

- primordial gravitational waves", *Phys. Rev. D* , 92 (2015) 1,6
286. Kazuhiro Hayama in Aasi,J. et al, "Searching for stochastic gravitational waves using data from the two colocated LIGO Hanford detectors", *Phys. Rev. D* , 91, Issue 2, (2015) id.022003
287. Tatsuya Narikawa, Koh Ueno, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, "Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations", *Phys. Rev. D* , 91, Issue 6, 062007 (2015) (14 pages) (2015)
288. Kazunari Eda, Yousuke Itoh, Sachiko Kuroyanagi, and Joseph Silk, "Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes", *Phys. Rev. D* , Volume 91, Issue 4, id.044045 (16 pages) (2015) 44045-1 - 044045-16
289. K. Abe et. al. (Super-Kamiokande collaboration), "Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2015 (2015) 053C02-1-35
290. Konishi, M., Motohara, K., 他 36 名, "ANIR: Atacama near-infrared camera for the 1.0 m miniTAO telescope", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 67 (2015) 4
291. Uemura, M., Kawabata, K. S., Ikeda, S., and Maeda, K., "Variable selection for modeling the absolute magnitude at maximum of Type Ia supernovae", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 67 (2015) 55
292. Nakamura, Ko; Takiwaki, Tomoya; Kuroda, Takami and Kotake, Kei, "Systematic Features of Axisymmetric Neutrino-Driven Core-Collapse Supernova Models in Multiple Progenitors", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 67 (2015) 107
293. Tamura, Y., Oguri, M., Iono, D., Hatsukade, B., Matsuda, Y., Hayashi, M., "High-resolution ALMA observations of SDP.81. I. The innermost mass profile of the lensing elliptical galaxy probed by 30 milli-arcsecond images", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 67 (2015) 72-78
294. "Hatsukade, B., Tamura, Y., Iono, D., Matsuda, Y., Hayashi, M.,
295. Oguri, M.", "High-resolution ALMA observations of SDP.81. II. Molecular clump properties of a lensed submillimeter galaxy at  $z = 3.042$ ", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 67 (2015) 93-99
296. 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
297. F. Hosotani, Y. Inuzuka, M. Hasegawa, S. Hirobayashi, T. Misawa, "Image denoising with Edge-preserving and segmentation based on Mask NHA", *Transactions on Image Processing*, vol. 24, no. 12, pp. 6025-6033, 2015, 24 (2015) 6025-6033
298. Daisuke YONETOKU, Tatsuya SAWANO, Shunsuke TAKATA, Kazuki YOSHIDA, Hiroki SETA, Asuka TOYANAGO, Yudai WAKASHIMA, Hajime YONEMOCHI, and Hirokazu IKEDA, "Transient X-ray Sky Monitor Aboard a Micro Satellite for Gravitational Wave Astronomy", *UNISEC Takumi Journal*, (2015) in print
299. 参沢匡将, 松田淳平, 広林茂樹, "BCIのための様々な運動イメージの単一試行複数状態識別", *電気学会論文誌 E*, vol. 135, no. 7, pp239-245 , 135 (2015) 239-245

300. 松田淳平, 参沢匡将, 広林茂樹, "高分解能周波数解析法を用いた ASSR-based BCI のための基礎的研究", 電気学会論文誌 E, vol. 135, no. 7, pp253-254, (2015) 235-254
301. 参沢匡将, 下川哲矢, 広林茂樹, "NIRS を用いた音声聴取者の感情判別に関する研究", 電気学会論文誌 E, vol.135, no.7, pp.255.256, (2015) 255-256
302. Tanaka, M., "Kilonova/Macronova Emission from Compact Binary Mergers", *Advances in Astronomy*, 2016 (2016) 6341974
303. Bennett, D. P., Rhee, S. H., Udalski, A., Gould, A., Tsapras, Y., Kubas, D., Bond, I. A., Greenhill, J., Cassan, A., Rattenbury, N. J., Boyajian, T. S., Luhn, J., Penny, M. T., Anderson, J., Abe, F., Bhattacharya, A., Botzler, C. S., Donachie, M., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Ohnishi, K., Oyokawa, H., Perrott, Y. C., Saito, T., Sharan, A., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Tristram, P. J., Yonehara, A., Yock, P. C. M., Szymański, M. K., Soszyński, I., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, L., Allen, W., DePoy, D., Gal-Yam, A., Gaudi, B. S., Han, C., Monard, I. A. G., Ofek, E., Pogge, R. W., Street, R. A., Bramich, D. M., Dominik, M., Horne, K., Snodgrass, C., Steele, I. A., Albrow, M. D., Bachelet, E., Batista, V., Beaulieu, J.-P., Brilliant, S., Caldwell, J. A. R., Cole, A., Coutures, C., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Fouqué, P., Hundertmark, M., Jørgensen, U. G., Kains, N., Kane, S. R., Marquette, J.-B., Menzies, J., Pollard, K. R., Ranc, C., Sahu, K. C., Wambsganss, J., Williams, A., Zub, M., "The First Circumbinary Planet Found by Microlensing: OGLE-2007-BLG-349L(AB)c", *Astron. J.*, 152 (2016) id. 125,1-14
304. Bhattacharya, A., Bennett, D. P., Bond, I. A., Sumi, T., Udalski, A., Street, R., Tsapras, Y., Abe, F., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Ohnishi, K., Rattenbury, N., Saito, T., Sharan, A., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Tristram, P. J., Skowron, J., Szymański, M. K., Soszyński, I., Poleski, R., Mróz, P., Kozłowski, S., Pietrukowicz, P., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, L., Bachelet, E., Bramich, D. M., D'Ago, G., Dominik, M., Figuera Jaimes, R., Horne, K., Hundertmark, M., Kains, N., Menzies, J., Schmidt, R., Snodgrass, C., Steele, I. A., Wambsganss, J., "Discovery of a Gas Giant Planet in Microlensing Event OGLE-2014-BLG-1760", *Astron. J.*, 152 (2016) id. 140,1-11
305. Suwa, Yudai; Yamada, Shoichi; Takiwaki, Tomoya and Kotake, Kei, "The criterion of supernova explosion revisited: the mass accretion history", *Astrophys. J.*, 816 (2016) 43
306. Maeda, K., Tajitsu, A., Kawabata, K. S., Foley, R., Honda, S., Moritani, Y., Tanaka, M., Hashimoto, O., Ishigaki, M., Simon, J.D., Phillips, M. M., Yamanaka, M., Nogami, D., Arai, A., Aoki, W., Nomoto, K., Milisavljevic, D., Mazzali, P. A., Soderberg, A. M., Schramm, M., Sato, B., Harakawa, H., Morrell, N., Arimoto N., "Sodium Absorption Systems towards SN Ia 2014J Originate on Interstellar Scales", *Astrophys. J.*, 816 (2016) 57 (17pp)
307. Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, Imre Bartos, Kenta Kiuchi, Raffaella Margutti, "Multi-messenger search for rapidly-rotating strongly-magnetized newborn neutron stars in striped-envelope supernovae", *Astrophys. J.*, 818 (2016) 94
308. Sho Fujibayashi, Takashi Yoshida, and Yuichiro Sekiguchi, "Alpha-constrained QSE Nucleosynthesis in High-entropy and Fast-expanding Material", *Astrophys. J.*, 818 (2016) 96
309. Kisaka, Shota; Ioka, Kunihito and Nakar, Ehud, "X-ray-powered macronovae", *Astrophys. J.*, 818 (2016) 104

310. Yamamoto, Yu and Yamada, Shoichi, "SYSTEMATIC STUDIES OF SHOCK REVIVAL AND THE SUBSEQUENT EVOLUTIONS IN CORE-COLLAPSE SUPERNOVAE WITH PARAMETRIC PROGENITOR MODELS", *Astrophys. J.*, 818 (2016) 165
311. Shota Kisaka, Kunihito Ioka, Ehud Nakar., "X-ray-powered macronovae", *Astrophys. J.*, 818 (2016) no.2, 104
312. Tanaka, M., Tominaga, N., Morokuma, T., Yasuda, N., Furusawa, H., Baklanov, P. V., Blinnikov, S. I., Moriya, T. J., Doi, M., Jiang, J., Kato, T., Kikuchi, Y., Kuncarayakti, H., Nagao, T., Nomoto, K., & Taniguchi, Y., "Rapidly Rising Transients from Subaru Hyper Suprime-Cam Transient Survey", *Astrophys. J.*, 819 (2016) 5 (15pp)
313. Street, R. A., Udalski, A., Calchi Novati, S., Hundertmark, M. P. G., Zhu, W., Gould, A., Yee, J., Tsapras, Y., Bennett, D. P., RoboNet Project, The Consortium, MiNDSTEp, Jørgensen, U. G., Dominik, M., Andersen, M. I., Bachelet, E., Bozza, V., Bramich, D. M., Burgdorf, M. J., Cassan, A., Ciceri, S., D'Ago, G., Dong, Subo, Evans, D. F., Gu, Sheng-hong, Harkonnen, H., Hinse, T. C., Horne, Keith, Figuera Jaimes, R., Kains, N., Kerins, E., Korhonen, H., Kuffmeier, M., Mancini, L., Menzies, J., Mao, S., Peixinho, N., Popovas, A., Rabus, M., Rahvar, S., Ranc, C., Tronsgaard Rasmussen, R., Scarpetta, G., Schmidt, R., Skottfelt, J., Snodgrass, C., Southworth, J., Steele, I. A., Surdej, J., Unda-Sanzana, E., Verma, P., von Essen, C., Wambsganss, J., Wang, Yi-Bo., Wertz, O., OGLE Project, The Poleski, R., Pawlak, M., Szymański, M. K., Skowron, J., Mróz, P., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Ulaczyk, K., Spitzer Team, Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Gaudi, B. S., Henderson, C. B., Pogge, R. W., Shvartzvald, Y., Abe, F., Asakura, Y., Bhattacharya, A., Bond, I. A., Donachie, M., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Inayama, K., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Nishioka, T., Ohnishi, K., Oyokawa, H., Rattenbury, N., Saito, To., Sharan, A., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Tristram, J., Wakiyama, Y., Yonehara, A., KMTNet Modeling Team, Han, C., Choi, J.-Y., Park, H., Jung, Y. K., Shin, I.-G., "Spitzer Parallax of OGLE-2015-BLG-0966: A Cold Neptune in the Galactic Disk", *Astrophys. J.*, 819 (2016) id. 93,1-12
314. Skowron, J., Udalski, A., Poleski, R., Kozłowski, S., Szymański, M. K., Wyrzykowski, Ł., Ulaczyk, K., Pietrukowicz, P., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Abe, F., Bennett, D. P., Bhattacharya, A., Bond, I. A., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Itow, Y., Koshimoto, N., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Ohnishi, K., Rattenbury, N., Saito, To., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Tristram, P. J., Yonehara, A., Dominik, M., Jørgensen, U. G., Bozza, V., Harpsøe, K., Hundertmark, M., Skottfelt, J., "MOA-2011-BLG-028Lb: A Neptune-mass Microlensing Planet in the Galactic Bulge", *Astrophys. J.*, 820 (2016) id. 4,1-13
315. Bozza, V., Shvartzvald, Y., Udalski, A., Calchi Novati, S., Bond, I. A., Han, C., Hundertmark, M., Poleski, R., Pawlak, M., Szymański, M. K., Skowron, J., Mróz, P., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Soszyński, I., Ulaczyk, K., OGLE Group, and, Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Fausnaugh, M., Gaudi, B. S., Gould, A., Henderson, C. B., Pogge, R. W., Wibking, B., Yee, J. C., Zhu, W., Spitzer Team, Abe, F., Asakura, Y., Barry, R. K., Bennett, D. P., Bhattacharya, A., Donachie, M., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Inayama, K., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Nishioka, T., Ohnishi, K., Oyokawa, H., Rattenbury, N., Saito, To., Sharan, A., Sullivan, D. J., Sumi, T., Suzuki, D., Tristram, P. J., Wakiyama, Y., Yonehara, A., MOA Group, Choi, J.-Y., Park, H., Jung, Y. K., Shin, I.-G., Albrow, M. D., Park, B.-G., Kim, S.-L., Lee, C.-U., Cha, S.-M., Kim, D.-J., Lee, Y., KMTNet Group, Dominik, M., Jørgensen, U. G., Andersen, M. I., Bramich, D. M., Burgdorf, M. J., Ciceri, S., D'Ago, G., Evans, D. F., Figuera Jaimes, R., Gu, S.-H., Hinse, T. C., Kains, N., Kerins, E., Korhonen, H., Kuffmeier, M., Mancini, L., Popovas, A., Rabus,

- M.,Rahvar, S.,Rasmussen, R. T.,Scarpetta, G.,Skottfelt, J.,Snodgrass, C.,Southworth, J.,Surdej, J.,Unda-Sanzana, E.,von Essen, C.,Wang, Y.-B.,Wertz, O.,MiNDSTEp,Maoz, D.,Friedmann, M.,Kaspi, S.,Wise Group,, "Spitzer Observations of OGLE-2015-BLG-1212 Reveal a New Path toward Breaking Strong Microlens Degeneracies", *Astrophys. J.*, 820 (2016) id. 79,1-10
316. Tanaka, Y. T., Itoh, R., Kawabata, K. S., Yoshida, M., 他 38 名, "No Evidence of Intrinsic Optical/Near-infrared Linear Polarization for V404 Cygni during Its Bright Outburst in 2015: Broadband Modeling and Constraint on Jet Parameters", *Astrophys. J.*, 823 (2016) 35
317. Terada Y., Maeda K., Fukazawa Y., Bamba A., Ueda Y., Katsuda S., Enoto T., Takahashi T., Tamagawa T., Reopke F. K., Summa A., Diehl R., "Measurements of the Soft Gamma-Ray Emission from SN2014J with Suzaku", *Astrophys. J.*, 823 (2016) article id. 43, 10 pp.
318. Hosokawa,T., Hirano,S., Kuiper,R., Yorke,H.W., Omukai,K., & Yoshida,N., "Formation of Massive Primordial Stars: Intermittent UV Feedback with Episodic Mass Accretion", *Astrophys. J.*, 824 (2016) 119, 26pp.
319. Hirao, Y.,Udalski, A.,Sumi, T.,Bennett, D. P.,Bond, I. A.,Rattenbury, N.,Suzuki, D.,Koshimoto, N.,Abe, F.,Asakura, Y.,Bhattacharya, A.,Freeman, M.,Fukui, A.,Itow, Y.,Li, M. C. A.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Matsuo, T.,Muraki, Y.,Nagakane, M.,Ohnishi, K.,Oyokawa, H.,Saito, To.,Sharan, A.,Shibai, H.,Sullivan, D. J.,Tristram, P. J.,Yonehara, A.,Poleski, R.,Skowron, J.,Mróz, P.,Szymański, M. K.,Kozłowski, S.,Pietrukowicz, P.,Soszyński, I.,Wyrzykowski, Ł,Ulaczyk, K.,, "OGLE-2012-BLG-0724Lb: A Saturn-mass Planet around an M Dwarf", *Astrophys. J.*, 824 (2016) id. 139,1-8
320. Beaulieu, J.-P.,Bennett, D. P.,Batista, V.,Fukui, A.,Marquette, J.-B.,Brillant, S.,Cole, A. A.,Rogers, L. A.,Sumi, T.,Abe, F.,Bhattacharya, A.,Koshimoto, N.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Han, C.,Gould, A.,Pogge, R.,Yee, J.,, "Revisiting the Microlensing Event OGLE 2012-BLG-0026: A Solar Mass Star with Two Cold Giant Planets", *Astrophys. J.*, 824 (2016) id. 83,1-6
321. Kawaguchi, K., Kyutoku, K., Shibata, M., Tanaka, M. , "Models of Kilonova/macronova emission from black hole-neutron star mergers", *Astrophys. J.*, 825 (2016) 52 (12pp)
322. Sumi, T.,Udalski, A.,Bennett, D. P.,Gould, A.,Poleski, R.,Bond, I. A.,Skowron, J.,Rattenbury, N.,Pogge, R. W.,Bensby, T.,Beaulieu, J. P.,Marquette, J. B.,Batista, V.,Brillant, S.,Abe, F.,Asakura, Y.,Bhattacharya, A.,Donachie, M.,Freeman, M.,Fukui, A.,Hirao, Y.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Li, M. C. A.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Nagakane, M.,Ohnishi, K.,Oyokawa, H.,Saito, To.,Sharan, A.,Sullivan, D. J.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Yonehara, A.,Szymański, M. K.,Ulaczyk, K.,Kozłowski, S.,Wyrzykowski, Ł,Kubiak, M.,Pietrukowicz, P.,Pietrzyński, G.,Soszyński, I.,Han, C.,Jung, Y.-K.,Shin, I.-G.,Lee, C.-U.,, "The First Neptune Analog or Super-Earth with a Neptune-like Orbit: MOA-2013-BLG-605Lb", *Astrophys. J.*, 825 (2016) id. 112,1-23
323. Katsuda, S., Tanaka, M., Morokuma, T., Fesen, R., Milisavljevic, D. , "Constraining the Age and Distance of the Galactic Supernova Remnant G156.2+5.7 by H-alpha Expansion Measurements", *Astrophys. J.*, 826 (2016) 108 (9pp)
324. Abbott, B. P., Singer, L., Yoshida, M., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., 他 1568 名 , "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914", *Astrophys. J.*, 826 (2016) L13

325. Kuroda, Takami; Kotake, Kei and Takiwaki, Tomoya, "A new Gravitational-wave Signature From Standing Accretion Shock Instability in Supernovae", *Astrophys. J.*, 829 (2016) L14
326. Takahashi, Kazuya; Iwakami, Wakana; Yamamoto, Yu and Yamada, Shoichi, "Links between the shock instability in core-collapse supernovae and asymmetric accretions of envelopes", *Astrophys. J.*, 831 (2016) 75
327. Shvartzvald, Y., Li, Z., Udalski, A., Gould, A., Sumi, T., Street, R. A., Calchi Novati, S., Hundertmark, M., Bozza, V., Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Drummond, J., Fausnaugh, M., Gaudi, B. S., Henderson, C. B., Tan, T. G., Wibking, B., Pogge, R. W., Yee, J. C., Zhu, W. (Spitzer Team, Tsapras, Y., Bachelet, E., Dominik, M., Bramich, D. M., Cassan, A., Figuera Jaimes, R., Horne, K., Ranc, C., Schmidt, R., Snodgrass, C., Wambsganss, J., Steele, I. A., Menzies, J., Mao, S., (RoboNet, Poleski, R., Pawlak, M., Szymański, M. K., Skowron, J., Mróz, P., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Soszyński, I., Ulaczyk, K., (OGLE Group, Abe, F., Asakura, Y., Barry, R. K., Bennett, D. P., Bhattacharya, A., Bond, I. A., Freeman, M., Hirao, Y., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Fukui, A., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Nishioka, T., Ohnishi, K., Oyokawa, H., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sharan, A., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Tristram, P. J., Yonehara, A., (MOA Group, Jørgensen, U. G., Burgdorf, M. J., Ciceri, S., D'Ago, G., Evans, D. F., Hinse, T. C., Kains, N., Kerins, E., Korhonen, H., Mancini, L., Popovas, A., Rabus, M., Rahvar, S., Scarpetta, G., Skottfelt, J., Southworth, J., Peixinho, N., Verma, P., (MiNDSTEp, Sbarufatti, B., Kennea, J. A., Gehrels, N., (Swift, "The First Simultaneous Microlensing Observations by Two Space Telescopes: Spitzer and Swift Reveal a Brown Dwarf in Event OGLE-2015-BLG-1319", *Astrophys. J.*, 831 (2016) id. 183,1-11
328. Katsuda, S., Maeda, K., Bamba, A., Terada, Y., Fukazawa, Y., Kawabata, K., Ohno, M., Sugawara, Y., Tsuboi, Y., and Immler, S., "Two Distinct-absorption X-Ray Components from Type II<sub>n</sub> Supernovae: Evidence for Asphericity in the Circumstellar Medium", *Astrophys. J.*, 832 (2016) 194
329. Chon, S., Hirano, S., Hosokawa, T., & Yoshida, N., "Cosmological Simulations of Early Black Hole Formation: Halo Mergers, Tidal Disruption, and the Conditions for Direct Collapse", *Astrophys. J.*, 832 (2016) 134, 22pp.
330. S. Shibata, E. Watanabe, Y. Yatsu, T. Enoto, A. Bamba, "X-ray and Rotational Luminosity Correlation and Magnetic Heating of the Radio Pulsars", *Astrophys. J.*, 833 (2016) 59, 14pp
331. Suzuki, D., Bennett, D. P., Sumi, T., Bond, I. A., Rogers, L. A., Abe, F., Asakura, Y., Bhattacharya, A., Donachie, M., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M. C. A., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Muraki, Y., Nagakane, M., Onishi, K., Oyokawa, H., Rattenbury, N., Saito, To., Sharan, A., Shibai, H., Sullivan, D. J., Tristram, P. J., Yonehara, A., "The Exoplanet Mass-ratio Function from the MOA-II Survey: Discovery of a Break and Likely Peak at a Neptune Mass", *Astrophys. J.*, 833 (2016) id. 145,1-26
332. Umeda, H., Hosokawa, T., Omukai, K., & Yoshida, N., "The Final Fates of Accreting Supermassive Stars", *Astrophys. J.*, 834 (2016) L34, 5pp.
333. Hitomi Collaboration, Shinya Yamada, "Hitomi constraints on the 3.5 keV line in the Perseus galaxy cluster", *Astrophys. J.*, 837 (2016) 15-23
334. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R. X., Adya, V. B., Affeldt, C., Agathos, M., Agatsuma,



K.,Aggarwal, N.,Aguiar, O. D.,Aiello, L.,Ain, A.,Ajith, P.,Allen, B.,Allocca, A.,Altin, P.  
 A.,Anderson, S. B.,Anderson, W. G.,Arai, K.,Araya, M. C.,Arceneaux, C. C.,Areeda, J.  
 S.,Arnaud, N.,Arun, K. G.,Ascenzi, S.,Ashton, G.,Ast, M.,Aston, S. M.,Astone,  
 P.,Aufmuth, P.,Aulbert, C.,Babak, S.,Bacon, P.,Bader, M. K. M.,Baker, P. T.,Baldaccini,  
 F.,Ballardin, G.,Ballmer, S. W.,Barayoga, J. C.,Barclay, S. E.,Barish, B. C.,Barker,  
 D.,Barone, F.,Barr, B.,Barsotti, L.,Barsuglia, M.,Barta, D.,Barthelmy, S.,Bartlett,  
 J.,Bartos, I.,Bassiri, R.,Basti, A.,Batch, J. C.,Baune, C.,Bavigadda, V.,Bazzan,  
 M.,Behnke, B.,Bejger, M.,Bell, A. S.,Bell, C. J.,Berger, B. K.,Bergman, J.,Bergmann,  
 G.,Berry, C. P. L.,Bersanetti, D.,Bertolini, A.,Betzwiesser, J.,Bhagwat, S.,Bhandare,  
 R.,Bilenko, I. A.,Billingsley, G.,Birch, J.,Birney, R.,Biscans, S.,Bisht, A.,Bitossi,  
 M.,Biwer, C.,Bizouard, M. A.,Blackburn, J. K.,Blair, C. D.,Blair, D. G.,Blair, R.  
 M.,Bloemen, S.,Bock, O.,Bodiya, T. P.,Boer, M.,Bogaert, G.,Bogan, C.,Bohe, A.,Bojtos,  
 P.,Bond, C.,Bondu, F.,Bonnand, R.,Boom, B. A.,Bork, R.,Boschi, V.,Bose, S.,Bouffanais,  
 Y.,Bozzi, A.,Bradaschia, C.,Brady, P. R.,Braginsky, V. B.,Branchesi, M.,Brau, J. E.,Briant,  
 T.,Brillet, A.,Brinkmann, M.,Brisson, V.,Brockkill, P.,Brooks, A. F.,Brown, D. A.,Brown, D.  
 D.,Brown, N. M.,Buchanan, C. C.,Buikema, A.,Bulik, T.,Bulten, H. J.,Buonanno,  
 A.,Buskulic, D.,Buy, C.,Byer, R. L.,Cadonati, L.,Cagnoli, G.,Cahillane, C.,Bustillo, J.  
 C.,Callister, T.,Calloni, E.,Camp, J. B.,Cannon, K. C.,Cao, J.,Capano, C. D.,Capocasa,  
 E.,Carbognani, F.,Caride, S.,Diaz, J. C.,Casentini, C.,Caudill, S.,Cavagliá, M.,Cavalier,  
 F.,Cavalieri, R.,Cella, G.,Cepeda, C. B.,Baiardi, L. C.,Cerretani, G.,Cesarini,  
 E.,Chakraborty, R.,Chalermongsak, T.,Chamberlin, S. J.,Chan, M.,Chao, S.,Charlton,  
 P.,Chassande-Mottin, E.,Chen, H. Y.,Chen, Y.,Cheng, C.,Chincarini, A.,Chiummo,  
 A.,Cho, H. S.,Cho, M.,Chow, J. H.,Christensen, N.,Chu, Q.,Chua, S.,Chung, S.,Ciani,  
 G.,Clara, F.,Clark, J. A.,Cleva, F.,Coccia, E.,Cohadon, P.-F.,Colla, A.,Collette, C.  
 G.,Cominsky, L.,Constancio, M., Jr.,Conte, A.,Conti, L.,Cook, D.,Corbitt, T. R.,Cornish,  
 N.,Corsi, A.,Cortese, S.,Costa, C. A.,Coughlin, M. W.,Coughlin, S. B.,Coulon, J.-  
 P.,Countryman, S. T.,Couvares, P.,Cowan, E. E.,Coward, D. M.,Coward, M. J.,Coyne, D.  
 C.,Coyne, R.,Craig, K.,Creighton, J. D. E.,Cripe, J.,Crowder, S. G.,Cumming,  
 A.,Cunningham, L.,Cuoco, E.,Dal Canton, T.,Danilishin, S. L.,D'Antonio, S.,Danzmann,  
 K.,Darman, N. S.,Dattilo, V.,Dave, I.,Daveloza, H. P.,Davier, M.,Davies, G. S.,Daw, E.  
 J.,Day, R.,DeBra, D.,Debreczeni, G.,Degallaix, J.,De Laurentis, M.,Deléglise, S.,Del  
 Pozzo, W.,Denker, T.,Dent, T.,Dereli, H.,Dergachev, V.,DeRosa, R. T.,De Rosa, R.,DeSalvo,  
 R.,Dhurandhar, S.,Díaz, M. C.,Di Fiore, L.,Di Giovanni, M.,Di Lieto, A.,Di Pace, S.,Di  
 Palma, I.,Di Virgilio, A.,Dojcinovski, G.,Dolique, V.,Donovan, F.,Dooley, K. L.,Doravari,  
 S.,Douglas, R.,Downes, T. P.,Drago, M.,Drever, R. W. P.,Driggers, J. C.,Du, Z.,Ducrot,  
 M.,Dwyer, S. E.,Edo, T. B.,Edwards, M. C.,Effler, A.,Eggenstein, H.-B.,Ehrens,  
 P.,Eichholz, J.,Eikenberry, S. S.,Engels, W.,Essick, R. C.,Etzel, T.,Evans, M.,Evans, T.  
 M.,Everett, R.,Factourovich, M.,Fafone, V.,Fair, H.,Fairhurst, S.,Fan, X.,Fang,  
 Q.,Farinon, S.,Farr, B.,Farr, W. M.,Favata, M.,Fays, M.,Fehrmann, H.,Fejer, M.  
 M.,Ferrante, I.,Ferreira, E. C.,Ferrini, F.,Fidecaro, F.,Fiori, I.,Fiorucci, D.,Fisher, R.  
 P.,Flaminio, R.,Fletcher, M.,Fournier, J.-D.,Franco, S.,Frasca, S.,Frasconi, F.,Frei,  
 Z.,Freise, A.,Frey, R.,Frey, V.,Fricke, T. T.,Fritschel, P.,Frolov, V. V.,Fulda, P.,Fyffe,  
 M.,Gabbard, H. A. G.,Gair, J. R.,Gammaitoni, L.,Gaonkar, S. G.,Garufi, F.,Gatto,  
 A.,Gaur, G.,Gehrels, N.,Gemme, G.,Gendre, B.,Genin, E.,Gennai, A.,George, J.,Gergely,  
 L.,Germain, V.,Ghosh, A.,Ghosh, S.,Giaime, J. A.,Giardina, K. D.,Giazotto, A.,Gill,  
 K.,Glaefke, A.,Goetz, E.,Goetz, R.,Gondan, L.,González, G.,Castro, J. M. G.,Gopakumar,  
 A.,Gordon, N. A.,Gorodetsky, M. L.,Gossan, S. E.,Gosselin, M.,Gouaty, R.,Graef, C.,Graff,  
 P. B.,Granata, M.,Grant, A.,Gras, S.,Gray, C.,Greco, G.,Green, A. C.,Groot, P.,Grote,  
 H.,Grunewald, S.,Guidi, G. M.,Guo, X.,Gupta, A.,Gupta, M. K.,Gushwa, K. E.,Gustafson,  
 E. K.,Gustafson, R.,Hacker, J. J.,Hall, B. R.,Hall, E. D.,Hammond, G.,Haney, M.,Hanke,  
 M. M.,Hanks, J.,Hanna, C.,Hannam, M. D.,Hanson, J.,Hardwick, T.,Haris, K.,Harms,  
 J.,Harry, G. M.,Harry, I. W.,Hart, M. J.,Hartman, M. T.,Haster, C.-J.,Haughian,  
 K.,Heidmann, A.,Heintze, M. C.,Heitmann, H.,Hello, P.,Hemming, G.,Hendry, M.,Heng,  
 I. S.,Hennig, J.,Heptonstall, A. W.,Heurs, M.,Hild, S.,Hoak, D.,Hodge, K. A.,Hofman,

D.,Hollitt, S. E.,Holt, K.,Holz, D. E.,Hopkins, P.,Hosken, D. J.,Hough, J.,Houston, E. A.,Howell, E. J.,Hu, Y. M.,Huang, S.,Huerta, E. A.,Huet, D.,Hughey, B.,Husa, S.,Huttner, S. H.,Huynh-Dinh, T.,Idrissy, A.,Indik, N.,Ingram, D. R.,Inta, R.,Isa, H. N.,Isac, J.-M.,Isi, M.,Islas, G.,Isogai, T.,Iyer, B. R.,Izumi, K.,Jacqmin, T.,Jang, H.,Jani, K.,Jaranowski, P.,Jawahar, S.,Jiménez-Forteza, F.,Johnson, W. W.,Jones, D. I.,Jones, R.,Jonker, R. J. G.,Ju, L.,Kalaghatgi, C. V.,Kalogera, V.,Kandhasamy, S.,Kang, G.,Kanner, J. B.,Karki, S.,Kasprzack, M.,Katsavounidis, E.,Katzman, W.,Kaufer, S.,Kaur, T.,Kawabe, K.,Kawazoe, F.,Kéfélian, F.,Kehl, M. S.,Keitel, D.,Kelley, D. B.,Kells, W.,Kennedy, R.,Key, J. S.,Khalaidovski, A.,Khalili, F. Y.,Khan, I.,Khan, S.,Khan, Z.,Khazanov, E. A.,Kijbunchoo, N.,Kim, C.,Kim, J.,Kim, K.,Kim, N.,Kim, N.,Kim, Y.-M.,King, E. J.,King, P. J.,Kinzel, D. L.,Kissel, J. S.,Kleybolte, L.,Klimenko, S.,Koehlenbeck, S. M.,Kokeyama, K.,Koley, S.,Kondrashov, V.,Kontos, A.,Korobko, M.,Korth, W. Z.,Kowalska, I.,Kozak, D. B.,Kringel, V.,Królak, A.,Krueger, C.,Kuehn, G.,Kumar, P.,Kuo, L.,Kutynia, A.,Lackey, B. D.,Landry, M.,Lange, J.,Lantz, B.,Lasky, P. D.,Lazzarini, A.,Lazzaro, C.,Leaci, P.,Leavey, S.,Lebigot, E. O.,Lee, C. H.,Lee, H. K.,Lee, H. M.,Lee, K.,Lenon, A.,Leonardi, M.,Leong, J. R.,Leroy, N.,Letendre, N.,Levin, Y.,Levine, B. M.,Li, T. G. F.,Libson, A.,Littenberg, T. B.,Lockerbie, N. A.,Logue, J.,Lombardi, A. L.,Lord, J. E.,Lorenzini, M.,Loriette, V.,Lormand, M.,Losurdo, G.,Lough, J. D.,Lück, H.,Lundgren, A. P.,Luo, J.,Lynch, R.,Ma, Y.,MacDonald, T.,Machenschalk, B.,MacInnis, M.,Macleod, D. M.,Magaña-Sandoval, F.,Magee, R. M.,Mageswaran, M.,Majorana, E.,Maksimovic, I.,Malvezzi, V.,Man, N.,Mandel, I.,Mandic, V.,Mangano, V.,Mansell, G. L.,Manske, M.,Mantovani, M.,Marchesoni, F.,Marion, F.,Márka, S.,Márka, Z.,Markosyan, A. S.,Maros, E.,Martelli, F.,Martellini, L.,Martin, I. W.,Martin, R. M.,Martynov, D. V.,Marx, J. N.,Mason, K.,Masserot, A.,Massinger, T. J.,Masso-Reid, M.,Matichard, F.,Matone, L.,Mavalvala, N.,Mazumder, N.,Mazzolo, G.,McCarthy, R.,McClelland, D. E.,McCormick, S.,McGuire, S. C.,McIntyre, G.,McIver, J.,McManus, D. J.,McWilliams, S. T.,Meacher, D.,Meadors, G. D.,Meidam, J.,Melatos, A.,Mendell, G.,Mendoza-Gandara, D.,Mercer, R. A.,Merilh, E.,Merzougui, M.,Meshkov, S.,Messenger, C.,Messick, C.,Meyers, P. M.,Mezzani, F.,Miao, H.,Michel, C.,Middleton, H.,Mikhailov, E. E.,Milano, L.,Miller, J.,Millhouse, M.,Minenkov, Y.,Ming, J.,Mirshekari, S.,Mishra, C.,Mitra, S.,Mitrofanov, V. P.,Mitselmakher, G.,Mittleman, R.,Moggi, A.,Mohan, M.,Mohapatra, S. R. P.,Montani, M.,Moore, B. C.,Moore, C. J.,Moraru, D.,Moreno, G.,Morriss, S. R.,Mossavi, K.,Mours, B.,Mow-Lowry, C. M.,Mueller, C. L.,Mueller, G.,Muir, A. W.,Mukherjee, A.,Mukherjee, D.,Mukherjee, S.,Mukund, N.,Mullavey, A.,Munch, J.,Murphy, D. J.,Murray, P. G.,Mytidis, A.,Nardicchia, I.,Naticchioni, L.,Nayak, R. K.,Necula, V.,Nedkova, K.,Nelemans, G.,Neri, M.,Neunzert, A.,Newton, G.,Nguyen, T. T.,Nielsen, A. B.,Nissanke, S.,Nitz, A.,Nocera, F.,Nolting, D.,Normandin, M. E. N.,Nuttall, L. K.,Oberling, J.,Ochsner, E.,O'Dell, J.,Oelker, E.,Ogin, G. H.,Oh, J. J.,Oh, S. H.,Ohme, F.,Oliver, M.,Oppermann, P.,Oram, R. J.,O'Reilly, B.,O'Shaughnessy, R.,Ottaway, D. J.,Ottens, R. S.,Overmier, H.,Owen, B. J.,Pai, A.,Pai, S. A.,Palamos, J. R.,Palashov, O.,Palliyaguru, N.,Palomba, C.,Pal-Singh, A.,Pan, H.,Pankow, C.,Pannarale, F.,Pant, B. C.,Paoletti, F.,Paoli, A.,Papa, M. A.,Paris, H. R.,Parker, W.,Pascucci, D.,Pasqualetti, A.,Passaquieti, R.,Passuello, D.,Patricelli, B.,Patrick, Z.,Pearlstone, B. L.,Pedraza, M.,Pedurand, R.,Pekowsky, L.,Pele, A.,Penn, S.,Perreca, A.,Phelps, M.,Piccinni, O.,Pichot, M.,Piergiovanni, F.,Pierro, V.,Pilliant, G.,Pinard, L.,Pinto, I. M.,Pitkin, M.,Poggiani, R.,Popolizio, P.,Post, A.,Powell, J.,Prasad, J.,Predoi, V.,Premachandra, S. S.,Prestegard, T.,Price, L. R.,Prijetelj, M.,Principe, M.,Privitera, S.,Prodi, G. A.,Prokhorov, L.,Puncken, O.,Punturo, M.,Puppo, P.,Pürerer, M.,Qi, H.,Qin, J.,Quetschke, V.,Quintero, E. A.,Quitow-James, R.,Raab, F. J.,Rabeling, D. S.,Radkins, H.,Raffai, P.,Raja, S.,Rakhmanov, M.,Rapagnani, P.,Raymond, V.,Razzano, M.,Re, V.,Read, J.,Reed, C. M.,Regimbau, T.,Rei, L.,Reid, S.,Reitze, D. H.,Rew, H.,Reyes, S. D.,Ricci, F.,Riles, K.,Robertson, N. A.,Robie, R.,Robinet, F.,Rocchi, A.,Rolland, L.,Rollins, J. G.,Roma, V. J.,Romano, R.,Romanov, G.,Romie, J. H.,Rosińska, D.,Rowan, S.,Rüdiger, A.,Ruggi, P.,Ryan, K.,Sachdev, S.,Sadecki, T.,Sadeghian, L.,Salconi, L.,Saleem, M.,Salemi,

F., Samajdar, A., Sammut, L., Sanchez, E. J., Sandberg, V., Sandeen, B., Sanders, J. R., Sassolas, B., Sathyaprakash, B. S., Saulson, P. R., Sauter, O., Savage, R. L., Sawadsky, A., Schale, P., Schilling, R., Schmidt, J., Schmidt, P., Schnabel, R., Schofield, R. M. S., Schönbeck, A., Schreiber, E., Schuette, D., Schutz, B. F., Scott, J., Scott, S. M., Sellers, D., Sentenac, D., Sequino, V., Sergeev, A., Serna, G., Setyawati, Y., Sevigny, A., Shaddock, D. A., Shah, S., Shahriar, M. S., Shaltev, M., Shao, Z., Shapiro, B., Shawhan, P., Sheperd, A., Shoemaker, D. H., Shoemaker, D. M., Siellez, K., Siemens, X., Sigg, D., Silva, A. D., Simakov, D., Singer, A., Singh, A., Singh, R., Singhal, A., Sintès, A. M., Slagmolen, B. J. J., Smith, J. R., Smith, N. D., Smith, R. J. E., Son, E. J., Sorazu, B., Sorrentino, F., Souradeep, T., Srivastava, A. K., Staley, A., Steinke, M., Steinlechner, J., Steinlechner, S., Steinmeyer, D., Stephens, B. C., Stone, R., Strain, K. A., Straniero, N., Stratta, G., Strauss, N. A., Strigin, S., Sturani, R., Stuver, A. L., Summerscales, T. Z., Sun, L., Sutton, P. J., Swinkels, B. L., SzczepaŁzyk, M. J., Tacca, M., Talukder, D., Tanner, D. B., Tápai, M., Tarabrin, S. P., Taracchini, A., Taylor, R., Theeg, T., Thirugnanasambandam, M. P., Thomas, E. G., Thomas, M., Thomas, P., Thorne, K. A., Thorne, K. S., Thrane, E., Tiwari, S., Tiwari, V., Tokmakov, K. V., Tomlinson, C., Tonelli, M., Torres, C. V., Torrie, C. I., Töyrä, D., Travasso, F., Traylor, G., Trifirò, D., Tringali, M. C., Trozzo, L., Tse, M., Turconi, M., Tuyenbayev, D., Ugolini, D., Unnikrishnan, C. S., Urban, A. L., Usman, S. A., Vahlbruch, H., Vajente, G., Valdes, G., van Bakel, N., van Beuzekom, M., van den Brand, J. F. J., Van Den Broeck, C., Vander-Hyde, D. C., van der Schaaf, L., van Heijningen, J. V., van Veggel, A. A., Vardaro, M., Vass, S., Vasúth, M., Vaulin, R., Vecchio, A., Vedovato, G., Veitch, J., Veitch, P. J., Venkateswara, K., Verkindt, D., Vetrano, F., Viceré, A., Vinciguerra, S., Vine, D. J., Vinet, J.-Y., Vitale, S., Vo, T., Vocca, H., Vorvick, C., Voss, D., Vouden, W. D., Vyatchanin, S. P., Wade, A. R., Wade, L. E., Wade, M., Walker, M., Wallace, L., Walsh, S., Wang, G., Wang, H., Wang, M., Wang, X., Wang, Y., Ward, R. L., Warner, J., Was, M., Weaver, B., Wei, L.-W., Weinert, M., Weinstein, A. J., Weiss, R., Welborn, T., Wen, L., Weßls, P., Westphal, T., Wette, K., Whelan, J. T., White, D. J., Whiting, B. F., Williams, R. D., Williamson, A. R., Willis, J. L., Willke, B., Wimmer, M. H., Winkler, W., Wipf, C. C., Wittel, H., Woan, G., Worden, J., Wright, J. L., Wu, G., Yablon, J., Yam, W., Yamamoto, H., Yancey, C. C., Yap, M. J., Yu, H., Yvert, M., Zadrożny, A., Zangrando, L., Zanolin, M., Zendri, J.-P., Zevin, M., Zhang, F., Zhang, L., Zhang, M., Zhang, Y., Zhao, C., Zhou, M., Zhou, Z., Zhu, X. J., Zucker, M. E., Zuraw, S. E., Zweizig, J., Allison, J., Bannister, K., Bell, M. E., Chatterjee, S., Chippendale, A. P., Edwards, P. G., Harvey-Smith, L., Heywood, Ian, Hotan, A., Indermuehle, B., Marvil, J., McConnell, D., Murphy, T., Popping, A., Reynolds, J., Sault, R. J., Voronkov, M. A., Whiting, M. T., Castro-Tirado, A. J., Cunniffe, R., Jelínek, M., Tello, J. C., Oates, S. R., Hu, Y.-D., Kubánek, P., Guziy, S., Castellón, A., García-Cerezo, A., Muñoz, V. F., Pérez del Pulgar, C., Castillo-Carrión, S., Castro Cerón, J. M., Hudec, R., Caballero-García, M. D., Páta, P., Vitek, S., Adame, J. A., König, S., Rendón, F., Mateo Sanguino, T. de J., Fernández-Muñoz, R., Yock, P. C., Rattenbury, N., Allen, W. H., Querel, R., Jeong, S., Park, I. H., Bai, J., Cui, Ch., Fan, Y., Wang, Ch., Hiriart, D., Lee, W. H., Claret, A., Sánchez-Ramírez, R., Pandey, S. B., Mediavilla, T., Sabau-Graziati, L., Abbott, T. M. C., Abdalla, F. B., Allam, S., Annis, J., Armstrong, R., Benoit-Lévy, A., Berger, E., Bernstein, R. A., Bertin, E., Brout, D., Buckley-Geer, E., Burke, D. L., Capozzi, D., Carretero, J., Castander, F. J., Chornock, R., Cowperthwaite, P. S., Crocce, M., Cunha, C. E., D'Andrea, C. B., da Costa, L. N., Desai, S., Diehl, H. T., Dietrich, J. P., Doctor, Z., Drlica-Wagner, A., Drout, M. R., Eifler, T. F., Estrada, J., Evrard, A. E., Fernandez, E., Finley, D. A., Flaugher, B., Foley, R. J., Fong, W.-F., Fosalba, P., Fox, D. B., Frieman, J., Fryer, C. L., Gaztanaga, E., Gerdes, D. W., Goldstein, D. A., Gruen, D., Gruendl, R. A., Gutierrez, G., Herner, K., Honscheid, K., James, D. J., Johnson, M. D., Johnson, M. W. G., Karliner, I., Kasen, D., Kent, S., Kessler, R., Kim, A. G., Kind, M. C., Kuehn, K., Kuropatkin, N., Lahav, O., Li, T. S., Lima, M., Lin, H., Maia, M. A. G., Margutti, R., Marriner, J., Martini, P., Matheson, T., Melchior, P., Metzger, B. D., Miller, C. J., Miquel, R., Neilsen, E., Nichol, R. C., Nord, B., Nugent, P., Ogando, R., Petravick, D., Plazas, A. A., Quataert, E., Roe, N., Romer, A. K., Roodman,

A.,Rosell, A. C.,Rykoff, E. S.,Sako, M.,Sanchez, E.,Scarpine, V.,Schindler, R.,Schubnell, M.,Scolnic, D.,Sevilla-Noarbe, I.,Sheldon, E.,Smith, N.,Smith, R. C.,Soares-Santos, M.,Sobreira, F.,Stebbins, A.,Suchyta, E.,Swanson, M. E. C.,Tarle, G.,Thaler, J.,Thomas, D.,Thomas, R. C.,Tucker, D. L.,Vikram, V.,Walker, A. R.,Wechsler, R. H.,Wester, W.,Yanny, B.,Zhang, Y.,Zuntz, J.,Dark Energy Survey,Connaughton, V.,Burns, E.,Goldstein, A.,Briggs, M. S.,Zhang, B.-B.,Hui, C. M.,Jenke, P.,Wilson-Hodge, C. A.,Bhat, P. N.,Bissaldi, E.,Cleveland, W.,Fitzpatrick, G.,Giles, M. M.,Gibby, M. H.,Greiner, J.,von Kienlin, A.,Kippen, R. M.,McBreen, S.,Mailyan, B.,Meegan, C. A.,Paciesas, W. S.,Preece, R. D.,Roberts, O.,Sparke, L.,Stanbro, M.,Toelge, K.,Veres, P.,Yu, H.-F.,Blackburn, L.,Ackermann, M.,Ajello, M.,Albert, A.,Anderson, B.,Atwood, W. B.,Axelsson, M.,Baldini, L.,Barbiellini, G.,Bastieri, D.,Bellazzini, R.,Bissaldi, E.,Blandford, R. D.,Bloom, E. D.,Bonino, R.,Bottacini, E.,Brandt, T. J.,Bruel, P.,Buson, S.,Caliandro, G. A.,Cameron, R. A.,Caragiulo, M.,Caraveo, P. A.,Cavazzuti, E.,Charles, E.,Chekhtman, A.,Chiang, J.,Chiaro, G.,Ciprini, S.,Cohen-Tanugi, J.,Cominsky, L. R.,Costanza, F.,Cuoco, A.,D'Ammando, F.,de Palma, F.,Desiante, R.,Digel, S. W.,Di Lalla, N.,Di Mauro, M.,Di Venere, L.,Domínguez, A.,Drell, P. S.,Dubois, R.,Favuzzi, C.,Ferrara, E. C.,Franckowiak, A.,Fukazawa, Y.,Funk, S.,Fusco, P.,Gargano, F.,Gasparri, D.,Giglietto, N.,Giommi, P.,Giordano, F.,Giroletti, M.,Glanzman, T.,Godfrey, G.,Gomez-Vargas, G. A.,Green, D.,Grenier, I. A.,Grove, J. E.,Guiriec, S.,Hadasch, D.,Harding, A. K.,Hays, E.,Hewitt, J. W.,Hill, A. B.,Horan, D.,Jogler, T.,Jóhannesson, G.,Johnson, A. S.,Kensei, S.,Kocevski, D.,Kuss, M.,La Mura, G.,Larsson, S.,Latronico, L.,Li, J.,Li, L.,Longo, F.,Loparco, F.,Lovellette, M. N.,Lubrano, P.,Magill, J.,Maldera, S.,Manfreda, A.,Marelli, M.,Mayer, M.,Mazziotta, M. N.,McEnery, J. E.,Meyer, M.,Michelson, P. F.,Mirabal, N.,Mizuno, T.,Moiseev, A. A.,Monzani, M. E.,Moretti, E.,Morselli, A.,Moskalenko, I. V.,Negro, M.,Nuss, E.,Ohsugi, T.,Omodei, N.,Orienti, M.,Orlando, E.,Ormes, J. F.,Paneque, D.,Perkins, J. S.,Pesce-Rollins, M.,Piron, F.,Pivato, G.,Porter, T. A.,Racusin, J. L.,Rainò, S.,Rando, R.,Razzaque, S.,Reimer, A.,Reimer, O.,Salvetti, D.,Saz Parkinson, P. M.,Sgrò, C.,Simone, D.,Siskind, E. J.,Spada, F.,Spandre, G.,Spinelli, P.,Suson, D. J.,Tajima, H.,Thayer, J. B.,Thompson, D. J.,Tibaldo, L.,Torres, D. F.,Troja, E.,Uchiyama, Y.,Venters, T. M.,Vianello, G.,Wood, K. S.,Wood, M.,Zhu, S.,Zimmer, S.,Brocato, E.,Cappellaro, E.,Covino, S.,Grado, A.,Nicastro, L.,Palazzi, E.,Pian, E.,Amati, L.,Antonelli, L. A.,Capaccioli, M.,D'Avanzo, P.,D'Elia, V.,Getman, F.,Giuffrida, G.,Iannicola, G.,Limatola, L.,Lisi, M.,Marinoni, S.,Marrese, P.,Melandri, A.,Piranomonte, S.,Possenti, A.,Pulone, L.,Rossi, A.,Stamerra, A.,Stella, L.,Testa, V.,Tomasella, L.,Yang, S.,GRAvitational Wave Inaf TeAm (GRAWITA),Bazzano, A.,Bozzo, E.,Brandt, S.,Courvoisier, T. J.-L.,Ferrigno, C.,Hanlon, L.,Kuulkers, E.,Laurent, P.,Mereghetti, S.,Roques, J. P.,Savchenko, V.,Ubertini, P.,Kasliwal, M. M.,Singer, L. P.,Cao, Y.,Duggan, G.,Kulkarni, S. R.,Bhalerao, V.,Miller, A. A.,Barlow, T.,Bellm, E.,Manulis, I.,Rana, J.,Laher, R.,Masci, F.,Surace, J.,Rebbapragada, U.,Cook, D.,Van Sistine, A.,Sesar, B.,Perley, D.,Ferreti, R.,Prince, T.,Kendrick, R.,Horesh, A.,Hurley, K.,Golenetskii, S. V.,Aptekar, R. L.,Frederiks, D. D.,Svinkin, D. S.,Rau, A.,von Kienlin, A.,Zhang, X.,Smith, D. M.,Cline, T.,Krimm, H.,InterPlanetary Network,Abe, F.,Doi, M.,Fujisawa, K.,Kawabata, K. S.,Morokuma, T.,Motohara, K.,Tanaka, M.,Ohta, K.,Yanagisawa, K.,Yoshida, M.,Baltay, C.,Rabinowitz, D.,Ellman, N.,Rostami, S.,La Silla-QUEST Survey,Bersier, D. F.,Bode, M. F.,Collins, C. A.,Copperwheat, C. M.,Darnley, M. J.,Galloway, D. K.,Gomboc, A.,Kobayashi, S.,Mazzali, P.,Mundell, C. G.,Piascik, A. S.,Pollacco, Don,Steele, I. A.,Ulaczyk, K.,Broderick, J. W.,Fender, R. P.,Jonker, P. G.,Rowlinson, A.,Stappers, B. W.,Wijers, R. A. M. J.,Lipunov, V.,Gorbovskey, E.,Tyurina, N.,Kornilov, V.,Balanutsa, P.,Kuznetsov, A.,Buckley, D.,Rebolo, R.,Serracart, M.,Israelian, G.,Budnev, N. M.,Gress, O.,Ivanov, K.,Polshuk, V.,Tlatov, A.,Yurkov, V.,Kawai, N.,Serino, M.,Negoro, H.,Nakahira, S.,Mihara, T.,Tomida, H.,Ueno, S.,Tsunemi, H.,Matsuoka, M.,Croft, S.,Feng, L.,Franzen, T. M. O.,Gaensler, B. M.,Johnston-Hollitt, M.,Kaplan, D. L.,Morales, M. F.,Tingay, S. J.,Wayth, R. B.,Williams, A.,Smartt, S. J.,Chambers, K. C.,Smith, K. W.,Huber, M. E.,Young, D. R.,Wright, D.

- E.,Schultz, A.,Denneau, L.,Flewelling, H.,Magnier, E. A.,Primak, N.,Rest, A.,Sherstyuk, A.,Stalder, B.,Stubbs, C. W.,Tonry, J.,Waters, C.,Willman, M.,Olivares E., F.,Campbell, H.,Kotak, R.,Sollerman, J.,Smith, M.,Dennefeld, M.,Anderson, J. P.,Botticella, M. T.,Chen, T.-W.,Della Valle, M.,Elias-Rosa, N.,Fraser, M.,Inserra, C.,Kankare, E.,Kupfer, T.,Harmanen, J.,Galbany, L.,Le Guillou, L.,Lyman, J. D.,Maguire, K.,Mitra, A.,Nicholl, M.,Razza, A.,Terreran, G.,Valenti, S.,Gal-Yam, A., $\text{\AA}$ liek, A., $\text{\AA}$ ioek, M.,Mankiewicz, L.,Opiela, R.,Zaremba, M.,Żarnecki, A. F.,Onken, C. A.,Scalzo, R. A.,Schmidt, B. P.,Wolf, C.,Yuan, F.,Evans, P. A.,Kennea, J. A.,Burrows, D. N.,Campana, S.,Cenko, S. B.,Giommi, P.,Marshall, F. E.,Nousek, J.,O'Brien, P.,Osborne, J. P.,Palmer, D.,Perri, M.,Siegel, M.,Tagliaferri, G.,Klotz, A.,Turpin, D.,Laugier, R.,Beroiz, M.,Peñuela, T.,Macri, L. M.,Oelkers, R. J.,Lambas, D. G.,Vrech, R.,Cabral, J.,Colazo, C.,Dominguez, M.,Sanchez, B.,Gurovich, S.,Lares, M.,Marshall, J. L.,DePoy, D. L.,Padilla, N.,Pereyra, N. A.,Benacquista, M.,Tanvir, N. R.,Wiersema, K.,Levan, A. J.,Steeghs, D.,Hjorth, J.,Fynbo, J. P. U.,Malesani, D.,Milvang-Jensen, B.,Watson, D.,Irwin, M.,Fernandez, C. G.,McMahon, R. G.,Banerji, M.,Gonzalez-Solares, E.,Schulze, S.,de Ugarte Postigo, A.,Thoene, C. C.,Cano, Z.,Rosswog, S., "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914", *Astrophys. J. Letters*, 826 (2016) id. L13,1-8
335. Kuroda, Takami; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya, "A New Gravitational-wave Signature from Standing Accretion Shock Instability in Supernovae", *Astrophys. J. Letters*, 829 (2016) id. L14, 6 pp
336. K. Abe et. al. (Super-Kamiokande collaboration), "Search for neutrinos in Super-Kamiokande associated with gravitational-wave events GW150914 and GW151226", *Astrophys. J. Letters*, 830 (2016) L11
337. Abbott, B. P., Singer, L., Yoshida, M., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., 他 1568 名, "Supplement: ``Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914" (2016, ApJL, 826, L13)", *Astrophys. J. Letters Supplement Series*, 225 (2016) 8
338. Kuroda, Takami; Takiwaki, Tomoya and Kotake, Kei, "A New Multi-Energy Neutrino Radiation-Hydrodynamics Code in Full General Relativity and Its Application to Gravitational Collapse of Massive Stars", *Astrophys. J. Suppl.*, 222 (2016) 20
339. Yukitsugu Sasaki on behalf of the KAGRA collaboration, "Environmental Monitoring System in KAGRA", *ICIC Express Letters Part B : Applications*, 7 (11) (2016) 2331-2338
340. HEATES Collaboration,Shinya Yamada, "Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 27 (2016) 1-4
341. Masaya Hasegawa, Kazuki Sakashita, Kousei Uchikoshi, Shigeki Hirobayashi, Tadanobu Misawa, "Removal of salt-and-pepper noise using a high-precision frequency analysis approach", *IEICE transactions on information and systems* (in press), (2016)
342. Maeda K., Terada Y., "Progenitors of type Ia supernovae", *International Journal of Modern Physics D*, 25 (2016) id. 1630024
343. Yamashita, Yasuho and Tanaka, Takahiro, "Bigravity from gradient expansion", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1605 (2016) 011
344. Tanaka, Takahiro and Urakawa, Yuko, "Conservation of  $\zeta$  with radiative corrections from heavy field", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1606 (2016) 020
345. Hayato Motohashi, Karim Noui, Teruaki Suyama, Masahide Yamaguchi, David Langlois,

- "Healthy degenerate theories with higher derivatives", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1607 (2016) 1,29
346. Sakakihara, Yuki and Tanaka, Takahiro, "Primordial fluctuations from inflation in dRGT bimetric theory of gravity", *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 1609 (2016) 033
347. Shinya Yamada, DIOS Collaboration, "Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)", *JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS*, 184 (2016) 688-693
348. Dongbao Jia, Tadanobu Misawa, Mamoru Takamatsu, Shigeki Hirobayashi, "The optimum colour temperature for lighting of Japanese-style gardens in summer and winter", *Lighting research and technology* (in press), (2016)
349. Kumar, B., Pandey, S. B., Eswaraiah, C., and Kawabata, K. S., "Broad-band polarimetric investigation of the Type II-plateau supernova 2013ej", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 456 (2016) 3157
350. Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda, 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", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 456 (2016) no.1, 1093-1114,
351. Shvartzvald, Y., Maoz, D., Udalski, A., Sumi, T., Friedmann, M., Kaspi, S., Poleski, R., Szymański, M. K., Skowron, J., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Mróz, P., Pietrukowicz, P., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Ulaczyk, K., Abe, F., Barry, R. K., Bennett, D. P., Bhattacharya, A., Bond, I. A., Freeman, M., Inayama, K., Itow, Y., Koshimoto, N., Ling, C. H., Masuda, K., Fukui, A., Matsubara, Y., Muraki, Y., Ohnishi, K., Rattenbury, N. J., Saito, To., Sullivan, D. J., Suzuki, D., Tristram, P. J., Wakiyama, Y., Yonehara, A.,, "The frequency of snowline-region planets from four years of OGLE-MOA-Wise second-generation microlensing", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 457 (2016) ,4089-4113
352. Sakurai, Y., Vorobyov, E. I., Hosokawa, T., Yoshida, N., Omukai, K., & Yorke, H. W., "Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disc instability and radiative feedback efficiency", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 459 (2016) 1137-1145
353. Hotokezaka K., Wanajo S., Tanaka M., Bamba A., Terada Y., Piran T., "Radioactive decay products in neutron star merger ejecta: heating efficiency and  $\gamma$ -ray emission", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 459 (2016) 35-43
354. Seto, Naoki, "Prospects of eLISA for Detecting Galactic Binary Black Holes Similar to GW150914", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 460 (2016) L1-L4
355. Nakamura, K., Horiuchi, S., Tanaka, M., Hayama, K., Takiwaki, T., & Kotake, K., "Multi-messenger signals of long-term core-collapse supernova simulations : synergetic observation strategies", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 461 (2016) 23296-3313
356. Nakamura, Ko; Horiuchi, Shunsaku; Tanaka, Masaomi; Hayama, Kazuhiro; Takiwaki, Tomoya and Kotake, Kei, "Multimessenger signals of long-term core-collapse supernova simulations: synergetic observation strategies", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 461 (2016) 3296-3313
357. Y. Inoue, Y.T. Tanaka, N. Isobe, "Binary black hole merger rates inferred from luminosity function of ultra-luminous X-ray sources", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 461 (2016) 4329-4334

358. Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei and Suwa, Yudai, "Three-dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae: finding a neutrino-powered explosion aided by non-axisymmetric flows", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 461 (2016) L112-L116
359. Nakamura, Ko; Horiuchi, Shunsaku; Tanaka, Masaomi; Hayama, Kazuhiro; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei, "Multimessenger signals of long-term core-collapse supernova simulations: synergetic observation strategies", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 461 (2016) p.3296-3313
360. Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Suwa, Yudai, "Three-dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae: finding a neutrino-powered explosion aided by non-axisymmetric flows", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 461 (2016) p.L112-L116
361. Hitomi Collaboration, "The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster", *Nature*, 535 (2016) 117-121
362. Jin, Z. P., Hotokezaka, K., Li, X., Tanaka, M., D'Avanzo, P., Fan, Y. Z., Covino, S., Wei, D. M., Piran, T. , "The 050709 macronova and the GRB/macronova connection", *Nature Communications*, 7 (2016) 12898
363. Nakamura, Takashi; Nakano, Hiroyuki and Tanaka, Takahiro, "Detecting quasinormal modes of binary black hole mergers with second-generation gravitational-wave detectors", *Phys. Rev. D*, 93 (2016) 044048
364. Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka 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
365. Kimura, Rampei; Tanaka, Takahiro; Yamamoto, Kazuhiro and Yamashita, Yasuho, "Constraint on ghost-free bigravity from gravitational Cherenkov radiation", *Phys. Rev. D*, 94 (2016) 064059
366. Toshiaki Ono, Tomohito Suzuki, Hideki Asada, "Nonradial stability of marginal stable circular orbits in stationary axisymmetric spacetimes ", *Phys. Rev. D*, 94 (2016) 064042(6pages)
367. Asahi Ishihara, Yusuke Suzuki, Toshiaki Ono, Takao Kitamura, Hideki Asada, "Gravitational bending angle of light for finite distance and the Gauss-Bonnet theorem ", *Phys. Rev. D*, 94 (2016) 084015(9pages)
368. Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, "Measurability of the tidal deformability by gravitational waves from coalescing binary neutron stars", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 064082
369. 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
370. Yamamoto K, Hayama K, Mano S, Itoh Y, Kanda N, "Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise.", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 082005
371. Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Keisuke Taniguchi, "Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 124046
372. Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Keisuke

- Taniguchi, "Dynamical mass ejection from the merger of axymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 124064
373. Kazufumi Takahashi, Teruaki Suyama, Tsutomu Kobayashi, "Universal instability of hairy black holes in Lovelock-Galileon theories in D dimensions", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 1,9
374. Hiromu Ogawa, Tsutomu Kobayashi, Teruaki Suyama, "Instability of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 1,9
375. Y. Zhang et al. (Super-Kamiokande collaboration), "First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV", *Phys. Rev. D* , 93 (2016) 12004-1-12
376. Masaru Shibata, Yuichiro Sekiguchi, Haruki Uchida, and Hideyuki Umeda, "Gravitational waves from supermassive stars collapsing to a supermassive black hole", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 021501
377. Yuzurihara H, Hayama K, Mano S, Verkindt D, Kanda N, "Unveiling linearly and nonlinearly correlated signals between gravitational wave detectors and environmental monitors.", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 042004
378. Hiroataka Yuzurihara, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Didier Verkindt, and Nobuyuki Kanda, ""Unveiling linearly and nonlinearly correlated signals between gravitational
379. wave detectors and environmental monitors""", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 042004-1-042004-7
380. Nami Uchikata, Shijun Yoshida and Paolo Pani, "Tidal deformability and I-Love-Q relations for gravastars with polytropic thin shells", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 064015-1 -- 064015-18
381. Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama, "Supermassive black holes formed by direct collapse of inflationary perturbations", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 1,15
382. Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, "Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves. II: Detailed analysis", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 1,20
383. Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, Kazufumi Takahashi, "Fundamental theorem on gauge fixing at the action level", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) 1,21
384. Sotani, Hajime; Takiwaki, Tomoya, "Gravitational wave asteroseismology with protoneutron stars", *Phys. Rev. D* , 94 (2016) id.044043
385. Hayama, Kazuhiro; Kuroda, Takami; Nakamura, Ko and Yamada, Shoichi, "Circular Polarizations of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae: A Clear Indication of Rapid Rotation", *Phys. Rev. Lett.*, 116 (2016) 151102
386. Kazuhiro Hayama, Takami Kuroda, Ko Nakamura, Shoichi Yamada,, "Circular Polarizations of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae: A Clear Indication of Rapid Rotation," , *Phys. Rev. Lett.*, 116 (2016) 151102
387. Sasaki, Misao; Suyama, Teruaki; Tanaka, Takahiro and Yokoyama, Shuichiro, "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914", *Phys. Rev. Lett.*, 117 (2016) 061101



388. Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuichiro Yokoyama,, "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914", Phys. Rev. Lett., 117 (2016) 061101 ,
389. Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuichiro Yokoyama, "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914", Phys. Rev. Lett., 117 (2016) 1,5
390. H. Sekiya, "The Super-Kamiokande Gadolinium Project", Proceedings of Science, PoS(ICHEP2016) (2016) 982
391. Kitagawa, Y., Yamagata, Y., Morita, S.-y., Motohara, K., Ozaki, S., Takahashi, H., Konishi, M., Kato, N. M., Kobayakawa, Y., Terao, Y., Ohashi, H., "Fabrication of a wide-field NIR integral field unit for SWIMS using ultra-precision cutting", Proceedings of SPIE, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, 9912 (2016) ID:991225
392. Sako, S., Osawa, R., Takahashi, H., Kikuchi, Y., Doi, M., Kobayashi, N., Aoki, T., Arimatsu, K., Ichiki, M., Ikeda, S., Ita, Y., Kasuga, T., Kawakita, H., Kokubo, M., Maehara, H., Matsunaga, N., Mito, H., Mitsuda, K., Miyata, T., Mori, K., Mori, Y., Morii, M., Morokuma, T., Motohara, K., Nakada, Y., Osawa, K., Okumura, S.-i., Onozato, H., Sarugaku, Y., Sato, M., Shigeyama, T., Soyano, T., Tanaka, M., Taniguchi, Y., Tanikawa, A., Tarusawa, K., Tominaga, N., Totani, T., Urakawa, S., Usui, F., Watanabe, J., Yamaguchi, J., Yoshikawa, M., "Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide-field CMOS camera", Proceedings of SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, 9908 (2016) ID:99083P
393. Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., Terao, Y., Ohashi, H., Aoki, T., Doi, M., Kamizuka, T., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Mori, K., Ohsawa, R., Okada, K., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Uchiyama, M. S., Koshida, S., Asano, K., Tateuchi, K., Uchiyama, M., Todo, S., Yoshii, Y., "NIR camera and spectrograph SWIMS for TAO 6.5m telescope: overview and development status", Proceedings of SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, 9908 (2016) ID:99083U
394. Kamizuka, T., Miyata, T., Sako, S., Ohsawa, R., Okada, K., Uchiyama, M. S., Mori, K., Yamaguchi, J., Asano, K., Uchiyama, M., Sakon, I., Onaka, T., Katata, H., Hasegawa, S., Usui, F., Takato, N., Aoki, T., Doi, M., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., Kohno, K., Konishi, M., Minezaki, T., Morokuma, T., Motohara, K., Ohashi, H., Soyano, T., Takahashi, H., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Terao, Y., Yoshii, Y., "Development status of the mid-infrared two-field camera and spectrograph MIMIZUKU for the TAO 6.5-m Telescope", Proceedings of SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, 9908 (2016) ID:99083W
395. Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Miyata, T., Motohara, K., Kawara, K., Tanaka, M., Minezaki, T., Sako, S., Morokuma, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Takahashi, H., Konishi, M., Kamizuka, T., Kato, N., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Handa, T., Koshida, S., Bronfman, L., Ruiz, M. T., Hamuy, M., Garay, G., "The University of Tokyo Atacama Observatory 6.5m telescope: project overview and current status", Proceedings of SPIE, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 9906 (2016) ID:99060R
396. Konishi, M., Sako, S., Uchida, T., Araya, R., Kim, K., Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Miyata, T., Motohara, K., Tanaka, M., Minezaki, T., Morokuma, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Kato, N., Kamizuka, T., Takahashi, H., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., "The University of Tokyo Atacama Observatory 6.5m Telescope: enclosure design and wind analysis", Proceedings of SPIE, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 9906 (2016)

ID:99062M

397. Takahashi, H., Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Miyata, T., Motohara, K., Tanaka, M., Minezaki, T., Morokuma, T., Sako, S., Tamura, Y., Tanabe, T., Konishi, M., Kamizuka, T., Kato, N., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., "The University of Tokyo Atacama Observatory 6.5m Telescope: design of mirror coating system and its performances", Proceedings of SPIE, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 9906 (2016) ID:99064Q
398. Terao, Y., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., Ohashi, H., Tateuchi, K., Todo, S., "NIR camera and spectrograph SWIMS for TAO 6.5m telescope: array control system and its performance", Proceedings of SPIE, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII, 9915 (2016) ID:99151W
399. Ohsawa, R., Sako, S., Takahashi, H., Kikuchi, Y., Doi, M., Kobayashi, N., Aoki, T., Arimatsu, K., Ichiki, M., Ikeda, S., Ita, Y., Kasuga, T., Kawakita, H., Kokubo, M., Maehara, H., Matsunaga, N., Mito, H., Mitsuda, K., Miyata, T., Mori, K., Mori, Y., Morii, M., Morokuma, T., Motohara, K., Nakada, Y., Okumura, S.-i., Onozato, H., Osawa, K., Sarugaku, Y., Sato, M., Shigeyama, T., Soyano, T., Tanaka, M., Taniguchi, Y., Tanikawa, A., Tarusawa, K., Tominaga, N., Totani, T., Urakawa, S., Usui, F., Watanabe, J., Yamaguchi, J., Yoshikawa, M., "Development of a real-time data processing system for a prototype of the Tomo-e Gozen wide field CMOS camera", Proceedings of SPIE, Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV, 9913 (2016) ID:991339
400. 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 ser B, 92 (2016) 336-345
401. Yoshida, Kazuki; Yonetoku, Daisuke; Sawano, Tatsuya; Ikeda, Hirokazu; Harayama, Atsushi; Arimoto, Makoto; Kagawa, Yasuaki; Ina, Masao; Hatori, Satoshi; Kume, Kyo; Mizushima, Satoshi; Hasegawa, Takashi, "Development of wide-field low-energy x-ray imaging detectors for HiZ-GUNDAM", Proceedings of the SPIE, 9905 (2016) 99050M,11pp
402. Takahiro Nagayama, "A local attenuation filter for accurate photometry of near-infrared bright stars", Proceedings of the SPIE, 9912 (2016) id. 991237 6 pp.
403. 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", Prog. Theor. Exp. Phys., 1 (2016) 011F01/1-8
404. HEATES Collaboration, Shinya Yamada, "First application of superconducting transition-edge sensor microcalorimeters to hadronic atom X-ray spectroscopy", Prog. Theor. Exp. Phys., 9 (2016) 1-9
405. Kohri, Kazunori; Ioka, Kunihito; Fujita, Yutaka and Yamazaki, Ryo, "Can we explain AMS-02 antiproton and positron excesses simultaneously by nearby supernovae without pulsars or dark matter?", Prog. Theor. Exp. Phys., 2016 (2016) 021E01
406. Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura., "Possible confirmation of the existence of the ergoregion by the Kerr quasinormal mode in gravitational waves from a Population III massive black hole binary", Prog. Theor. Exp. Phys., 2016 (2016) 310
407. Nair, Remya; Jhingan, Sanjay and Tanaka, Takahiro, "Synergy between ground and space based gravitational wave detectors for estimation of binary coalescence parameters", Prog. Theor. Exp. Phys., 2016 (2016) 053E01

408. Nakano, Hiroyuki; Sago, Norichika; Tanaka, Takahiro and Nakamura, Takashi, "Estimate of the radius responsible for quasinormal modes in the extreme Kerr limit and asymptotic behavior of the Sasaki–Nakamura transformation", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2016 (2016) 083E01
409. Nakamura, Takashi and others, "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) 093E01
410. Takashi Nakamura, Masaki Ando, Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Kazunari Eda, Shuichi Sato Mitsuru Musha, Tomotada Akutsu, Takahiro Tanaka, Naoki Seto., "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) 930
411. "T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, H. Nakano,
412. K. Eda, S. Sato, M. Musha, T. Akutsu, T. Tanaka,
413. N. Seto, N. Kanda, and Y. Itoh", ""Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or
414. cosmological origin of GW150914-like binary black
415. holes"" *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2016 (2016) 93E01
416. Kinugawa, Tomoya; Nakano, Hiroyuki and Nakamura, Takashi, "Gravitational wave quasinormal mode from Population III massive black hole binaries in various models of population synthesis", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2016 (2016) 103E01
417. Nakano, Hiroyuki; Nakamura, Takashi and Tanaka, Takahiro, "The detection of quasinormal mode with  $a/M = 0.95$  would prove a sphere 99% soaking in the ergoregion of the Kerr space-time", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2016 (2016) 031E02
418. 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)
419. Yamanaka, M., Maeda, K., Tanaka, M., Tominaga, N., Kawabata, K. S., Yoshida, M., 他 31 名, "OISTER optical and near-infrared observations of the super-Chandrasekhar supernova candidate SN 2012dn: Dust emission from the circumstellar shell", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 68 (2016) 68
420. Morii, M., Ikeda, S., Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., Ishiguro, K., Yamato, J., Ueda, N., Suzuki, N., Yasuda, N., Yoshida, N. , "Machine-learning Selection of Optical Transients in Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 68 (2016) 104 (8pp)
421. Imatani, Ritsuko; Tomida, Hiroshi; Nakahira, Satoshi; Kimura, Masashi; Sakamoto, Takanori; Arimoto, Makoto; Morooka, Yoshitaka; Yonetoku, Daisuke; Kawai, Nobuyuki; Tsunemi, Hiroshi, "Soft X-ray observation of the prompt emission of GRB 100418A", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 68 (2016) 29 - 35
422. Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Yasuda, N., Furusawa, H., Taniguchi, Y., Kato, T., Jiang, J., Kuncarayakti, H., Morokuma-Matsui, K., Ikeda, H., Blinnikov, S., Nomoto, K., Kokubo, M., Doi, M. , "An Effective Selection Method for Low-Mass Active Black Holes and First Spectroscopic Identification", *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 68 (2016) 40 (10pp)

423. Asai, Kazumi; Mihara, Tatehiro; Mastuoka, Masaru; Sugizaki, Mutsumi, "Hard-tail emission in the soft state of LMXBs and their relation to the neutron star magnetic field", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) 50pp1-14
424. Kawamuro, T., Ueda, Y., Shidatsu, M., Hori, T., Kawai, N., Negoro, H., Mihara, T., "Hard X-ray luminosity function of tidal disruption events: First results from the MAXI extragalactic survey", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) 58-1 - 58-17
425. Yamanaka, M., Maeda, K., Tanaka, M., et al., "OISTER Optical and Near-Infrared Observations of the Super-Chandrasekhar Supernova Candidate SN 2012dn: Dust Emission from the Circumstellar Shell", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) 68 (24pp)
426. Y. Tsuboi, K. Yamazaki, Y. Sugawara, A. Kawagoe, S. Kaneto, R. Iizuka, T. Matsumura, S. Nakahira, M. Higa, M. Matsuoka, M. Sugizaki, Y. Ueda, N. Kawai, M. Morii, M. Serino, T. Mihara, H. Tomida, S. Ueno, H. Negoro, A. Daikyujii, K. Ebisawa, S. Eguchi, K. Hiroi, M. Ishikawa, N. Isobe, K. Kawasaki, M. Kimura, H. Kitayama, M. Kohama, T. Kotani, Y. E. Nakagawa, M. Nakajima, H. Ozawa, M. Shidatsu, T. Sootome, K. Sugimori, F. Suwa, H. Tsunemi, R. Usui, T. Yamamoto, K. Yamaoka, A. Yoshida, "Large X-ray flares on stars detected with MAXI/GSC: A universal correlation between the duration of a flare and its X-ray luminosity", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) 90-1 - 90-20
427. Tsuboi, Y., Yamazaki, K., Sugawara, Y., Kawagoe, A., Kaneto, S., Iizuka, R., Matsumura, T., Nakahira, S., Higa, M., Matsuoka, M., Sugizaki, M., Ueda, Y., Kawai, N., Morii, M., Serino, M., Mihara, T., Tomida, H., Ueno, S., Negoro, H., Daikyujii, A., Ebisawa, K., Eguchi, S., Hiroi, K., Ishikawa, M., Isobe, N., Kawasaki, K., Kimura, M., Kitayama, H., Kohama, M., Kotani, T., Nakagawa, Y. E., Nakajima, M., Ozawa, H., Shidatsu, M., Sootome, T., Sugimori, K., Suwa, F., Tsunemi, H., Usui, R., Yamamoto, T., Yamaoka, K., Yoshida, A., "Large X-ray flares on stars detected with MAXI/GSC: A universal correlation between the duration of a flare and its X-ray luminosity", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) 90-1 - 90-20
428. N. Isobe, T. Kawamuro, S. Oyabu, T. Nakagawa, S. Baba, K. Yano, Y. Ueda, Y. Toba, "X-ray and infrared diagnostics of nearby active galactic nuclei with MAXI and AKARI", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) 98-1 - 98-15
429. Morokuma, T., Tanaka, M., Asakura, Y., Abe, F., Tristram, P. J., Utsumi, Y., Doi, M., Fujisawa, K., Itoh, R., Itoh, Y., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kuroda, D., Matsubayashi, K., Motohara, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Ohta, K., Saito, Y., Tamura, Y., Tominaga, N., Uemura, M., Yanagisawa, K., Yatsu, Y., Yoshida, M., "J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) ID:L9
430. Takeda S., Bamba A., Terada Y., Tashiro M. S., Katsuda S., Yamazaki R. Ohira Y., Iwakiri W., "Suzaku observations of the hard X-ray spectrum of Vela Jr. (SNR RX J0852.0-4622)", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) id.S10 11 pp.
431. Bamba A., Sawada M. Nakano Y. Terada Y., Hewitt J., Petre R., Angelini L., "New identification of the mixed-morphology supernova remnant G298.6-0.0 with possible gamma-ray association", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) id.S5 6 pp.
432. Morokuma, T., Tanaka, M., Doi, M., Fujisawa, K., Kawabata, K. S., Yoshida, M., Ohta, K., 他 18 名, "J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 68 (2016) L9
433. Henderson, Calen B., Poleski, Radoslaw, Penny, Matthew, Street, Rachel A., Bennett, David P., Hogg, David W., Gaudi, B. Scott, K2 Campaign 9 Microlensing Science Team, Zhu,

- W.,Barclay, T.,Barentsen, G.,Howell, S. B.,Mullally, F.,Udalski, A.,Szymański, M. K.,Skowron, J.,Mróz, P.,Kozłowski, S.,Wyrzykowski, Ł.,Pietrukowicz, P.,Soszyński, I.,Ulaczyk, K.,Pawlak, M.,OGLE Project, The,Sumi, T.,Abe, F.,Asakura, Y.,Barry, R. K.,Bhattacharya, A.,Bond, I. A.,Donachie, M.,Freeman, M.,Fukui, A.,Hirao, Y.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Li, M. C. A.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Nagakane, M.,Ohnishi, K.,Oyokawa, H.,Rattenbury, N.,Saito, To.,Sharan, A.,Sullivan, D. J.,Tristram, P. J.,Yonehara, A.,Bachelet, E.,Bramich, D. M.,Cassan, A.,Dominik, M.,Figuera Jaimes, R.,Horne, K.,Hundertmark, M.,Mao, S.,Ranc, C.,Schmidt, R.,Snodgrass, C.,Steele, I. A.,Tsapras, Y.,Wambsganss, J.,RoboNet Project, The,Bozza, V.,Burgdorf, M. J.,Jørgensen, U. G.,Calchi Novati, S.,Ciceri, S.,D'Ago, G.,Evans, D. F.,Hessman, F. V.,Hinse, T. C.,Husser, T.-O.,Mancini, L.,Popovas, A.,Rabus, M.,Rahvar, S.,Scarpetta, G.,Skottfelt, J.,Southworth, J.,Unda-Sanzana, E.,The MiNDSTeP Team,Bryson, S. T.,Caldwell, D. A.,Haas, M. R.,Larson, K.,McCalmont, K.,Packard, M.,Peterson, C.,Putnam, D.,Reedy, L.,Ross, S.,Van Cleve, J. E.,K2C9 Engineering Team,Akeson, R.,Batista, V.,Beaulieu, J.-P.,Beichman, C. A.,Bryden, G.,Ciardi, D.,Cole, A.,Coutures, C.,Foreman-Mackey, D.,Fouqué, P.,Friedmann, M.,Gelino, C.,Kaspi, S.,Kerins, E.,Korhonen, H.,Lang, D.,Lee, C.-H.,Lineweaver, C. H.,Maoz, D.,Marquette, J.-B.,Mogavero, F.,Morales, J. C.,Nataf, D.,Pogge, R. W.,Santerne, A.,Shvartzvald, Y.,Suzuki, D.,Tamura, M.,Tisserand, P.,Wang, D., "Campaign 9 of the K2 Mission: Observational Parameters, Scientific Drivers, and Community Involvement for a Simultaneous Space- and Ground-based Microlensing Survey", *Publ. Astron. Soc. Jpn*, 128 (2016) 124401, 1-22
434. Sako, Shigeyuki; Osawa, Ryou; Takahashi, Hidenori; Kikuchi, Yuki; Doi, Mamoru; Kobayashi, Naoto; Aoki, Tsutomu; Arimatsu, Ko; Ichiki, Makoto; Ikeda, Shiro; Ita, Yoshifusa; Kasuga, Toshihiro; Kawakita, Hideyo; Kokubo, Mitsuru; Maehara, Hiroyuki; Matsunaga, Noriyuki; Mito, Hiroyuki; Mitsuda, Kazuma; Miyata, Takashi; Mori, Kiyoshi; Mori, Yuki; Morii, Mikio; Morokuma, Tomoki; Motohara, Kentaro; Nakada, Yoshikazu; Osawa, Kentaro; Okumura, Shin-ichiro; Onozato, Hiroki; Sarugaku, Yuki; Sato, Mikiya; Shigeyama, Toshikazu; Soyano, Takao; Tanaka, Masaomi; Taniguchi, Yuki; Tanikawa, Ataru; Tarusawa, Ken'ichi; Tominaga, Nozomu; Totani, Tomonori; Urakawa, Seitaro; Usui, Fumihiko; Watanabe, Junichi; Yamaguchi, Jumpei; Yoshikawa, Makoto, "Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide-field CMOS camera", *SPIE*, 9908 (2016)
435. 有元 誠, "あなたもできるデジカメ天文学(書評)", *天文月報*, 109 巻 6 号 (2016) 431
436. 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
437. Kipp Cannon, 端山和大, 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
438. Koshimoto, N.,Udalski, A.,Beaulieu, J. P.,Sumi, T.,Bennett, D. P.,Bond, I. A.,Rattenbury, N.,Fukui, A.,Batista, V.,Marquette, J. B.,Brillant, S.,and,Abe, F.,Asakura, Y.,Bhattacharya, A.,Donachie, M.,Freeman, M.,Hirao, Y.,Itow, Y.,Li, M. C. A.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Matsuo, T.,Muraki, Y.,Nagakane, M.,Ohnishi, K.,Oyokawa, H.,Saito, To.,Sharan, A.,Shibai, H.,Sullivan, D. J.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Yonehara, A.,Kozłowski, S.,Pietrukowicz, P.,Poleski, R.,Skowron, J.,Soszyński, I.,Szymański, M. K.,Ulaczyk, K.,Wyrzykowski, Ł., "OGLE-2012-BLG-0950Lb: The First Planet Mass Measurement from Only Microlens Parallax and Lens Flux", *Astron. J.*, 153 (2017) id. 1,1-15
439. Jung, Y. K.,Udalski, A.,Yee, J. C.,Sumi, T.,Gould, A.,Han, C.,Albrow, M. D.,Lee, C.-U.,Kim, S.-L.,Chung, S.-J.,Hwang, K.-H.,Ryu, Y.-H.,Shin, I.-G.,Zhu, W.,Cha, S.-M.,Kim,

- D.-J.,Lee, Y.,Park, B.-G.,Pogge, R. W.,Pietrukowicz, P.,Kozłowski, S.,Poleski, R.,Skowron, J.,Mróz, P.,Szymański, M. K.,Soszyński, I.,Pawlak, M.,Ulaczyk, K.,Abe, F.,Bennett, D. P.,Barry, R.,Bond, I. A.,Asakura, Y.,Bhattacharya, A.,Donachie, M.,Freeman, M.,Fukui, A.,Hirao, Y.,Itow, Y.,Koshimoto, N.,Li, M. C. A.,Ling, C. H.,Masuda, K.,Matsubara, Y.,Muraki, Y.,Nagakane, M.,Oyokawa, H.,Rattenbury, N. J.,Sharan, A.,Sullivan, D. J.,Suzuki, D.,Tristram, P. J.,Yamada, T.,Yamada, T.,Yonehara, A.,, "Binary Source Microlensing Event OGLE-2016-BLG-0733: Interpretation of a Long-term Asymmetric Perturbation", *Astron. J.*, 153 (2017) id. 129,1-7
440. Nishimura, N.; Sawai, H.; Takiwaki, T.; Yamada, S. and Thielemann, Friedrich-Karl, "The intermediate r-process in core-collapse supernovae driven by the magneto-rotational instability", *Astrophys. J.*, 836 (2017) L21
441. Yamanaka, M., Nakaoka, T., Tanaka, M., Maeda, K., Yoshida, M., 他 36 名, "Broad-lined Supernova 2016coi with a Helium Envelope", *Astrophys. J.*, 837 (2017) 1
442. Tanaka, M., Maeda, K., Mazzali, P. A., Kawabata, K. S., and Nomoto, K., "Three-dimensional Explosion Geometry of Stripped-envelope Core-collapse Supernovae. II. Modeling of Polarization", *Astrophys. J.*, 837 (2017) 105
443. 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
444. Nishimura, N.; Sawai, H.; Takiwaki, T.; Yamada, S.; Thielemann, F.-K., "The Intermediate r-process in Core-collapse Supernovae Driven by the Magneto-rotational Instability", *Astrophys. J. Letters*, 836 (2017) id. L21, 6 pp.
445. Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hirotaka Takahashi, "Analysis of the real gravitational wave data GW150914 with the Hilbert-Huang transform", *ICIC Express Letters*, 11(1) (2017) 45-52
446. Kanno, Sugumi; Sasaki, Misao and Tanaka, Takahiro, "Vacuum State of the Dirac Field in de Sitter Space and Entanglement Entropy", *Journal of High Energy Physics*, 03 (2017) 068
447. Takanashi, N., Doi, M., Yasuda, N., Kuncarayakti, H., Konishi, K., Schneider, D. P., Cinabro, D., and Marriner, J., "Photometric properties of intermediate-redshift Type Ia supernovae observed by the Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 465 (2017) 1274
448. Nakauchi,D., Hosokawa,T., Omukai,K., Saio,H., & Nomoto,K., "Do stellar winds prevent the formation of supermassive stars by accretion?", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 465 (2017) 5016-5025
449. Sugimura, K., Hosokawa, T., Yajima, H., & Omukai, K., "Rapid Black Hole Growth under Anisotropic Radiation Feedback", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 印刷中 (2017) 印刷中
450. Furusawa, Shun; Sumiyoshi, Kohsuke; Yamada, Shoichi and Suzuki, Hideyuki, "Supernova equations of state including full nuclear ensemble with in-medium effects", *Nucl. Phys.*, A957 (2017) 188-207
451. Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Hideyuki Suzuki,, "Supernova equations of state including full nuclear ensemble with in-medium effects,", *Nucl.Phys. A*, 957 (2017)

452. Asahi Ishihara, Yusuke Suzuki, Toshiaki Ono, Hideki Asada, "Finite-distance corrections to the gravitational bending angle of light in the strong deflection limit ", Phys. Rev. D, 95 (2017) 044017(7pages)
453. 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
454. Marasu Shibata, Kenta Kiuchi, and Yuichiro Sekiguchi, "General relativistic viscous hydrodynamics of differentially rotating neutron stars", Phys. Rev. D , 95 (2017) 083005
455. Kazufumi Takahashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, Tsutomu Kobayashi, "General invertible transformation and physical degrees of freedom", Phys. Rev. D , 95 (2017) 1,12
456. Kazufumi Takahashi, Teruaki Suyama, "Linear perturbation analysis of hairy black holes in shift-symmetric Horndeski theories I : odd-parity perturbations", Phys. Rev. D , 95 (2017) 1,8
457. Seto, Naoki and Kyutoku, Koutarou, "Forecasting Tidal Disruption Events for Binary Black Holes with an Outer Tertiary", Phys. Rev. Lett., 118 (2017) 151101
458. Naoki Seto, Koutarou Kyutoku, "Forecasting Tidal Disruption Events by Binary Black Hole Roulettes", Phys. Rev. Lett., 118 (2017) 151101
459. Hori, T., Ueda, Y., Shidatsu, M., et al., "The MAXI/GSC catalog in the low Galactic-latitude sky", Proceedings of "7 years of MAXI: monitoring X-ray transients", (2017) 27-28
460. Yoshida, M., Utsumi, Y., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., 他 33 名, "J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226", Publ. Astron. Soc. Jpn, 69 (2017) 9
461. Yoshida, Michitoshi, Utsumi, Yousuke, Tominaga, Nozomu, Morokuma, Tomoki, Tanaka, Masaomi, Asakura, Yuichiro, Matsubayashi, Kazuya, Ohta, Kouji, Abe, Fumio, Chimasu, Sho, Furusawa, Hisanori, Itoh, Ryosuke, Itoh, Yoichi, Kanda, Yuka, Kawabata, Koji S., Kawabata, Miho, Koshida, Shintaro, Koshimoto, Naoki, Kuroda, Daisuke, Moritani, Yuki, Motohara, Kentaro, Murata, Katsuhiko L., Nagayama, Takahiro, Nakaoka, Tatsuya, Nakata, Fumiaki, Nishioka, Tsubasa, Saito, Yoshihiko, Terai, Tsuyoshi, Tristram, Paul J., Yanagisawa, Kenshi, Yasuda, Naoki, Doi, Mamoru, Fujisawa, Kenta, Kawachi, Akiko, Kawai, Nobuyuki, Tamura, Yoichi, Uemura, Makoto, Yatsu, Yoichi, "J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226\*", Publ. Astron. Soc. Jpn, 69 (2017) id.9 12 pp, 1-12
462. Matsushita, M.; Yatsu, Y.; Arimoto, M.; Matunaga, S. et al., "Hardware Development and In-orbit Demonstration of the Electrical Power System for High-powered Microsatellite TSUBAME", Transactions of the JSASS, 60 (2017) 2, p.109-115
463. 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

平成29年度「新学術領域研究（研究領域提案型）」事後評価に係る公表用資料

領域番号	2402	領域略称名	重力波天体
研究領域名	重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開		
研究期間	平成24年度～平成28年度		
領域代表者名 (所属等)	中村 卓史(京都大学・大学院理学研究科・名誉教授)		
領域代表者 からの報告	<p><u>(1) 研究領域の目的及び意義</u></p> <p>重力波とは宇宙空間を光速で進む潮汐力の波で、101年前にアインシュタインが一般相対性理論に基づいて預言した。その存在は連星系をなす電波パルサーの公転周期が重力波放出のため減少する率が、アインシュタインの預言と一致するのを、ハルスとテイラーが確認し、間接的な証明がなされた(1993年ノーベル物理学賞)。しかし、連星パルサーが重力波放出によって最後に合体するときに放射される振動数が10Hzから10kHzの重力波が直接観測されたわけではない。2000年頃からこのような重力波の直接観測の実現を目指して1辺の長さが4kmにもなるL字型のレーザー干渉計を米国、イタリア、フランス、日本で開発し、2016年には連星中性子星合体からの重力波を検出する感度が期待された。連星中性子星合体では重力波だけではなく、ガンマ線・X線や光・赤外線さらにはニュートリノが放射される可能性がある。そのためには重力波の到来方向に望遠鏡を向けて観測を始める必要がある。そこで、①ガンマ線・X線②光学・赤外線③ニュートリノ観測④データ解析の4つの計画研究を設けた。これと⑤理論の計画研究で我が国での万全な体制を構築した。</p>		
	<p><u>(2) 研究成果の概要</u></p> <p>最初に稼働を始めたのは米国の4kmx4kmの2台のレーザー干渉計だったので、本領域は米国と協定を結んで、重力波の検出時間と方向の情報を得て追観測をする体制をとった。米国は2016.2.13に、太陽質量の約30倍の2つのブラックホール連星の合体に伴う重力波を2015.9.14に検出したと発表した。世界中の研究者にとってこれは連星中性子星ではないのと、ブラックホール候補の質量の2倍くらいあるので意外であったが、本領域が2015年6月に開催した国際会議中に宇宙で最初にできた星からは30倍の太陽質量程度のブラックホール連星が形成され、現在、合体することを領域代表者等が発表し、会議のまとめでも9月から始まる観測で検出されるのではないかと大変注目された。発見を報じた論文中でも、驚くぐらいに本領域の予言に一致すると取り上げられた。2017.1.4にも同様のブラックホール連星合体が検出されたので、まぐれ当たりの予言ではない。ガンマ線・X線・光・赤外線・ニュートリノの追観測を実行したが、何も検出できなかった。ブラックホールの場合、重力波以外が検出されないのは不思議ではないが、追観測が可能であることを実証した。データ解析も日本の装置の試験運転で、解析等が予定通り進むことを確認した。</p>		



<p>科学研究費補助金審査部会 における所見</p>	<p>A (研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があった)</p>
	<p>本研究領域は、本研究領域の設定目的に向かい、重力波のデータ解析システムの整備および解析手法の確立や理論研究との連携体制の構築を行うなど、重力波研究の基盤構築を行った。特に、重力波の世界初検出に先立って、大質量ブラックホール連星からの重力波放出を理論から予言したことは高く評価できる。</p> <p>本研究領域で開発を行った X 線観測装置 WF-MAXI が衛星搭載への採用に至らなかったことや政治的理由によりチベット望遠鏡が稼働までたどり着かなかったことなどによる影響があったが、これらを踏まえた今後の対応方策の検討は進んでおり、新学術領域の形成に至る重要な前進があったと評価でき、研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があったと認められる。</p> <p>研究成果として、重力波対応天体からの可視光/赤外線放射強度の上限を抑えるなど顕著な成果も見られた。また、ガドリニウム追加によるニュートリノ検出感度を向上させたことなどは、今後の観測に大きなインパクトを与えると期待される。</p> <p>一方で、領域組織における若手研究者や外国人研究者の参画については、この分野における更なる発展のために、人材育成や国際展開に向けた一層の取組が期待される。</p>

平成24年度 (2012年度) 新学術領域研究 (研究領域提案型) 領域計画書

平成23年11月 7日  
2版

審査希望区分	<input type="checkbox"/> 人文・社会系 <input checked="" type="checkbox"/> 理工系 ● 数物系科学 ○ 化学 ○ 工学 <input type="checkbox"/> 生物系		整理番号	理工020	
	仮領域番号	N8AS3	領域略称名	重力波天体	
応募領域名	重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開				
英訳名	New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources				
領域代表者 氏名	(フリガナ)	ナカムラ タカシ			
	(漢字等)	中村 卓史			
所属研究機関	京都大学				
部 局	理学 (系) 研究科 (研究院)	職	教授		
応募領域の 研究概要	<p>米国、欧州と日本の大型干渉計型重力波検出器は2016年にも、連星中性子星の合体等からの重力波を直接観測する情勢である。重力波形と発生源の同定から、一般相対論的に強い重力場での物理現象を究めるのが本領域の目的である。そのために①ガンマ線バースト等の重力波天体からのX線・ガンマ線放射を探索する。②光赤外・電波での対応事象を探索するために探索ネットワークを構築する。③神岡鉱山内の水チェレンコフ検出器を改造して、重力波信号とニュートリノ信号の同時観測が可能となるようにする。④電磁波・ニュートリノ等との多様な同時観測が可能になるように、重力波イベント速報体制をつくる。⑤新重力波源候補も含めて予想される重力波波形並びに電磁波・ニュートリノの対応事象の理論的研究を行う。以上の5つの計画研究を密接に推進して、目前に迫った重力波観測の時代に、宇宙物理学の新展開を期す。</p>				
(1) 関連研究分野(細目)	細目番号	4301	(2) 関連研究分野(細目)	細目番号	4201
	分野	数物系科学	分野	数物系科学	
	分科	物理学	分科	天文学	
	細目	素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理	細目	天文学	
研究の対象	<input type="checkbox"/> (1) 既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの。 <input checked="" type="checkbox"/> (2) 異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、当該研究領域の発展を目指すもの。 <input type="checkbox"/> (3) 多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの。 <input checked="" type="checkbox"/> (4) 当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの。 <input type="checkbox"/> (5) 学術の国際的趨勢等の観点から見て重要であるが、我が国において立ち遅れており、当該領域の進展に格段の配慮を必要とするもの。				

## 研究組織

番号	研究区分	研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属研究機関 部局 職	構成 員数
001	総括班	重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の展開の総括的研究	平成24年度～平成28年度	80155837 中村 卓史	京都大学 理学（系）研究科（研究院） 教授	11 人
002	研究項目A01 計画研究	重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索	平成24年度～平成28年度	80195031 河合 誠之	東京工業大学 理工学研究科 教授	9 人
003	研究項目A02 計画研究	天体重力波の光学赤外線対応現象の探索	平成24年度～平成28年度	90270446 吉田 道利	広島大学 宇宙科学センター 教授	8 人
004	研究項目A03 計画研究	超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究	平成24年度～平成28年度	90509902 ヴァギンズ マーク	東京大学 数物連携宇宙研究機構 特任教授	8 人
005	研究項目A04 計画研究	多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究	平成24年度～平成28年度	50251484 神田 展行	大阪市立大学 理学（系）研究科（研究院） 教授	8 人
006	研究項目A05 計画研究	重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究	平成24年度～平成28年度	40281117 田中 貴浩	京都大学 基礎物理学研究所 教授	9 人

研究経費【単位：千円】

研究区分			平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	合計 [千円]
<b>計画研究</b>								
001	総括班	中村 卓史	9,600	8,000	13,500	9,400	13,500	54,000
002	研究項目 A01	河合 誠之	65,000	97,000	37,000	42,000	32,000	273,000
003	研究項目 A02	吉田 道利	42,200	67,200	56,600	31,100	27,100	224,200
004	研究項目 A03	ヴァギンズ マーク	23,000	22,000	28,000	25,000	25,000	123,000
005	研究項目 A04	神田 展行	13,500	45,800	90,800	75,800	80,800	306,700
006	研究項目 A05	田中 貴浩	24,000	31,700	31,500	31,100	31,100	149,400
<b>小 計</b>			177,300	271,700	257,400	214,400	209,500	1,130,300
<b>公募研究</b>								
<b>小 計</b>			-	28,000	28,000	28,000	28,000	112,000
<b>採択目安件数</b>			-	15	15	15	15	
<b>内 訳</b>			-	5x3600, 10x1000	5x3600, 10x1000	5x3600, 10x1000	5x3600, 10x1000	
<b>合 計</b>			177,300	299,700	285,400	242,400	237,500	1,242,300

領域代表者	住所	606-8502 京都市左京区北白川追分町	
	電話番号	075-753-3831	
	Fax番号	075-753-3886	
	Email	takashi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp	
事務担当者	氏名	(フリガナ)	カンダ ノブユキ
		(漢字等)	神田 展行
	所属研究機関	大阪市立大学	
	部 局	理学（系）研究科（研究院）	
	職	教授	
	住所	558-8585 大阪市住吉区3-3-138	
	電話番号	06-6605-2648	
	Fax番号	06-6605-2648	
	Email	kanda@sci.osaka-cu.ac.jp	
関連研究分野 研究者	氏名	所属研究機関 部局 職	現在の専門 連絡先電話番号 Email
	観山 正見	国立天文台  台長	理論天文学  0422-34-3738  director-general@nao.ac.jp
	植田 憲一	電気通信大学  レーザー新世代研究センター  所長	量子エレクトロニクス  0424-43-5701  ueda@ils.uec.ac.jp
	前田 恵一	早稲田大学  理工学術院  教授	重力物理学・宇宙論  03-5286-3442  maeda@waseda.jp

## 1 領域の目的等

## (1) 目的

**重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開**

～目前に迫った重力波観測の時代に、他の観測との連携体制を構築し、新しい宇宙物理学を開く～

**1. 重力波は存在する !!**

重力波はアインシュタインが一般相対性理論にもとづいて理論的にその存在を予言した。重力波とは光速で重力の潮汐力の効果が伝わる波である。観測的には連星中性子星である電波パルサー PSR1913+16 の軌道周期(約 28000 秒)が 1 年間に 76.94 マイクロ秒短くなることがハルスとテーラーによる電波観測により確かめられることにより 1989 年に重力波の存在が証明された。一般相対性理論によると、連星のように加速度運動している系は重力波を放出してエネルギーを失い、連星間の距離が短くなるとともに公転周期が短くなる。PSR1913+16 の場合、一般相対性理論による理論値と観測値との差は実に僅か 0.1% であった。1993 年にハルスとテーラーはこの業績によってノーベル物理学賞を受賞した。

**2. しかし重力波の伝搬と振幅(時空の歪み)はまだ実験的に確かめられていない !!**

PSR1913+16 により重力波の生成が一般相対論の予言通りであることが確かめられはしたが、重力波が理論通りに宇宙空間を伝搬することは確かめられてはいない。すなわち、連星中性子星 PSR1913+16 から放出されているはずの約 14000 秒周期(=公転周期/2)の重力波による時空の歪みが直接検出された訳ではなく、波動としての位相の伝搬速度や振幅も確かめられていない。このことは一般相対性理論の検証の上で重要なポイントである。宇宙ニュートリノの観測を例にとると、地下実験で検出される太陽ニュートリノが太陽内部核反応の理論の予言値の半分しかないことがニュートリノ振動という大発見を導いた。重力波の場合も宇宙空間での伝搬が理論通りでなければ、ニュートリノ振動のように新しい物理学のフロンティアが現れ、その学術的な意味は測りしれない。一方、重力波が検出されれば、連星中性子星合体や超新星爆発などの破局的な天体現象や、ブラックホールが生成される現場の観測が可能になる。これは、今までの観測手法では深部を見ることができなかった強い重力場で一般相対性理論に支配された天体現象について、宇宙物理学の研究の新しい局面を開くと期待される。

**3. 本格的な重力波観測の時代の幕開けは目前 !!**

米国の LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) と仏・伊連合による Virgo 等のレーザー干渉計は現在、距離約 6000 万光年での連星中性子星の合体からの重力波を検出可能であるが、その検出確率は 300 年に 1 回程度でありこのままでは重力波の直接観測は期待できない。そこで、LIGO と Virgo は 2015 年を目途に検出可能な重力波の振幅を 1 桁下げ、2016 年には連星中性子星の合体からの重力波を年間 10 イベント程度の検出率で観測を開始する予定である。我が国では「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(LCGT = Large Cryogenic Gravitational wave Telescope)計画」は腕の長さ 3 km のトンネルを神岡鉱山で掘削し、2013 年から 2014 年にかけて常温で観測をしたのち、2014 年から低温鏡により感度高度化を進めて 2016 年を目途に LIGO や Virgo と同程度の感度に達する予定である。

**4. 領域の構成は？**

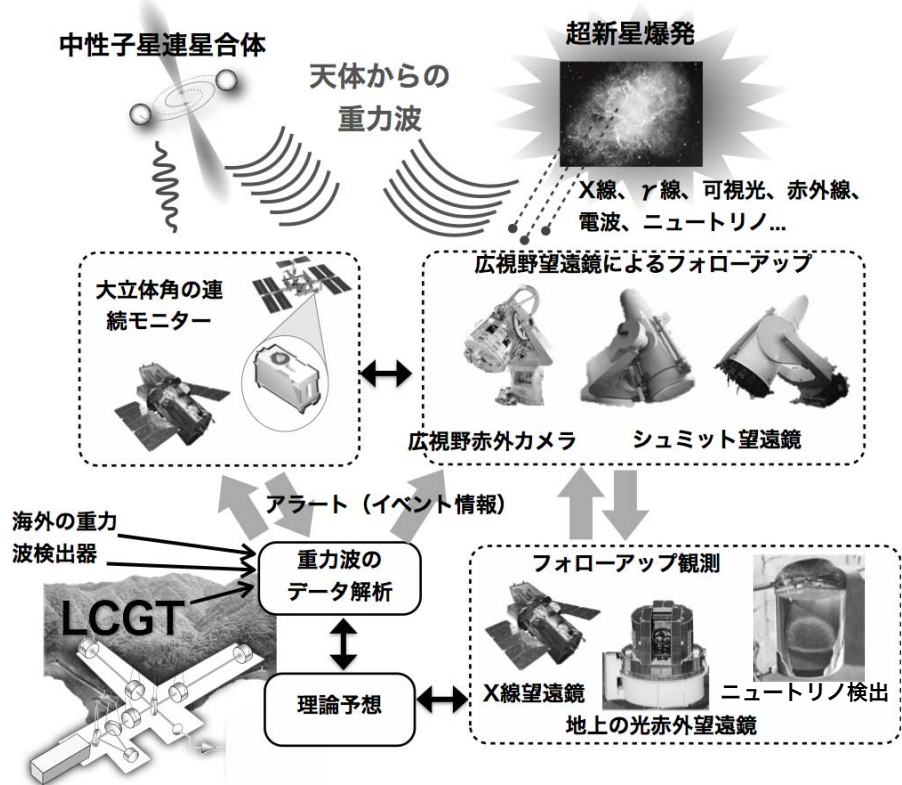
計画研究は A01-A05 までの 5 つからなる。その内 3 つは電磁波とニュートリノの観測研究であり、後 2 つはデータ解析と理論の研究である。A01 では、重力波天体のガンマ線・X 線放射を観測するために①大立体角 X 線観測装置を開発するとともに②既存の観測衛星を用いて重力波源候補天体現象の観測研究を行う。A02 では、A01 とともに密接に連携して重力波源の可視・赤外線・電波観測をするため①可視赤外線広視野観測システムの構築②全地球的観測網の整備③電波観測による重力波天体を含

目的 (つづき)

む激変天体の観測体制の整備を行う。A03では、ベテルギウスからアンドロメダ銀河までで起きる超新星爆発に伴うニュートリノ事象に感度を持つ検出器の開発を行う。A04はデータ解析で、理論が与えたテンプレートと観測データを高速で比較して重力波源と波形を突き止めることにより、到来方向の速報をA01とA02に出し追跡観測を促す。また、ガンマ線、X線、可視・赤外線、ニュートリノ観測との比較を可能にする重力波のデータ解析もする。A05は重力波の源・波形の理論で、すでに候補となっている波源の詳しい研究以外にも全く新しい波源を考えるのも課題である。

5. 何が宇宙物理学の新展開となりそうか？

まず、2016年にも重力波が観測されることが全く新しい局面である。次に、重力波源が何でどういう現象が起きているのかを明らかにするには重力波以外の電磁波やニュートリノの観測データが欠かせない。すなわち、重力波の研究者が電磁波の天文学やニュートリノ天文学の研究者と密接な関係を持つことになり、領域として大きな広がり期待できるのが今までと比べて全く新しい。2つの例を挙げよう。連星中性子星の合体は継続時間の短いショートガンマ線バーストの候補



でもある。しかし電磁波観測だけでは、その他の候補も含めて本当の起源が何かは、ほとんどわかっていないというのが現状である。重力波が発生した場所でショートガンマ線バーストが起こっているのが分かれば、ショートガンマ線バーストは連星中性子星の合体だと確認できるとともに、電磁波の時間変化と重力波の発生時間との比較からガンマ線バーストの理解が飛躍的に進む。もう一つの例は我々の銀河中で起こる超新星爆発である。もし発生すれば、重力波、電波からガンマ線に至るあらゆる電磁波帯、及びニュートリノの同時観測が期待でき、未だによくわかっていない超新星爆発のメカニズムを明らかに出来る可能性が高い。領域の構想を全体表示すると右上の図のようになる。

6. 重力波観測実験と本領域の関係

重力波観測実験は検出装置本体の建設が主である。一方、重力波天体の重力波以外の多様な観測並びに理論研究を行うのがこの領域の主な課題である。本研究はそのための多様な観測装置の開発や運用を進める。また重力波の観測データ取得そのものは LCGT 計画で実行されるが、本領域で必要とされるイベント速報データ解析は LCGT 計画の範囲外である。つまり、本領域は学問的には LCGT と密接な関係を持つが予算的には LCGT とは完全に独立な研究組織である。

## (2) 応募領域に関連する国内・国外の研究動向等

日本の LCGT 計画や海外の重力波検出実験の進展により、2016 年頃には天体からの重力波の観測が期待される。

日本では大型レーザー干渉計実験 LCGT が 2010 年より建設開始された。また、同等の性能をもち、協力して検出のネットワークを形成できる競合する計画が世界中数カ所で進行中であり、それらは重力波以外の多様な観測との連携を進めつつある。日本国内において一刻も早く本領域の研究を活性化させることが国外の研究動向に伍してゆくために必要である。

### 重力波観測の動向

(国内) 我々の申請の中核となるのは、建設が開始される大型低温重力波望遠鏡 (LCGT 計画) である。この計画は神岡鉱山の地下に、片腕 3km の基線長をもつ大型レーザー干渉計を設置し、その鏡を低温 (20K) に冷却することによって、6 億光年以上遠方の中性子星連星や、300 万光年程度遠方の超新星爆発によって生じる重力波を捉えるものである。LCGT の感度は後述の米国 LIGO 計画や、仏伊の Virgo 計画と同等であり、観測開始すれば同程度の統計量の重力波イベントが捉えられる。LCGT の感度の良い方向は国外の検出器のそれと相補的であり、全天をくまなく探索する上で重要視される。また、重力波の到来方向を時間差で決定するために、地球上で設置場所の離れた LCGT は国際的な検出器ネットワークの一翼を担うことを期待されている。

LCGT の観測データについては、解析のための計算機資源の確保や、本領域の推進による知見と経験を有する人材の育成が急務である。

(国外) 米国の LIGO 計画および仏伊の Virgo 計画は LCGT と同じく km 級のレーザー干渉計で、すでに観測実績を持っている。LIGO では 6 回におよぶ観測実験を行い、中性子星連星合体重力波の検出レンジは 6 千万光年前後、即ち「おとめ座銀河団」に達している。しかしイベント数は検出できる体積=レンジの 3 乗に比例するため、これでも十分な感度とは言えず、年間数~数十イベントを得るには、“advance” と称す装置の高感度化が必要である。LIGO や Virgo はレーザー光や鏡を改良して、LCGT と同じく 6~9 億光年の検出レンジを達成すべく 2011 年始めには改修に入り、2016 年頃から高感度観測をおこなう予定である。したがって、**2016 年ごろから、LCGT を含む重力波検出器の国際ネットワーク観測網が稼働し、重力波イベントの本格的な観測がおこなわれる。**その際本領域の研究が観測の実現と物理研究の成果を確立するために重要な役割を担うと期待される。

### 重力波と電磁波やニュートリノ観測との協力の動向

(国内) 重力波観測と相補的な関係にある可視光、X 線、 $\gamma$  線、ニュートリノなどの観測と、重力波検出実験の同時観測については、日本では実際の研究があまり進んでいなかった。この理由の一つは、LCGT 以前の検出器 (たとえば TAMA300) は十分な頻度のイベント数が期待されず、これらの観測と共同して進めるに足りなかったことも挙げられる。しかしながら、中性子星連星の合体や超新星爆発は、従来からの電磁波やニュートリノによって観測でき、重力波とあわせて観測することによって、このような天体现象を究明することが期待されている。日本が実績をもつ X 線・ $\gamma$  線天体観測と重力波研究が結びつくことが強く望まれる。LCGT の建設場所はニュートリノ観測装置である Super-Kamiokande と同じ神岡鉱山の地下であり、もし幸運にも重力波とニュートリノの同時観測がなされれば、日本がこの領域においてすばらしい成果をあげることができる。また、地上設置の電磁波 (可視光、赤外、電波) 観測は、重力波源の天体やホスト銀河を同定するために不可欠である。地



応募領域に関連する国内・国外の研究動向等（つづき）

上設置の望遠鏡については、複数の検出器が異なる経度地域、北半球／南半球にあることが、全天を観測する上で非常に重要である。

(国外) LIGO や Virgo 実験では、海外の電磁波観測、X 線・ $\gamma$  線バースト観測衛星や、ニュートリノ観測実験 (IceCube) との間で同時観測が既に試行されている。重力波イベントをトリガーとした天体探索のパイプラインも生まれ、試行されている。ただし、重力波イベントが見つかっていないために、同時観測の成功例もまだ得られてはいない。

**重力波の理論的研究の動向**

理論研究では、数値相対論の成果を取り入れたりして、TAMA 実験が建設開始された 15 年前からかなり進歩している。観測した波形から重力波源の物理 (内部の構造や運動の様子など) をどこまで究明できるかが天体重力波の研究の醍醐味であるが、これは理論の予想する重力波形があって成り立つ研究である。この点については国内で大きな進歩が見られ、海外の進展に勝るとも劣らない。しかし、後述の重力波源が同時に放射する電磁波や素粒子については、それらと重力波を同時に駆使して得られる知見についてのより高度な研究が待たれる。実際に重力波と電磁波やニュートリノの同時観測が実現することにより、この領域が発展すると期待される。

**(3) 準備状況等**

LCGT などの検出実験の進展に望んで、我々は重力波の理論やデータ解析について継続的に準備してきた。重力波源の理論研究と観測データ解析では、3 年ほど前から毎週 TV 会議等を用いて、関係研究者でのセミナーをおこなってきた。この分野では TAMA 実験の解析や、TAMA と国外の LIGO や共鳴型重力波アンテナとの同時観測解析をおこなったこともあり、日本の研究グループは重力波検出のための基礎的経験を有している。これらに関する学会発表なども多数ある。

さらに本領域申請においては、重力波と相補的な観測となる、X 線・ $\gamma$  線、可視光・赤外光 (電波も含む)、ニュートリノの各観測の計画研究が準備された。これらの観測の研究者と重力波研究者が十分に相談し、内容を検討した。本領域の構成は、重力波以外の観測実験の開発も大きな比重をもつことが特徴である。また全ての計画研究は、重力波源天体を同定・解明するという目標を共通として強く結びついている。異なる観測手段の計画研究が重力波天体を軸として相乗効果を産むのが新領域としての企図でもある。

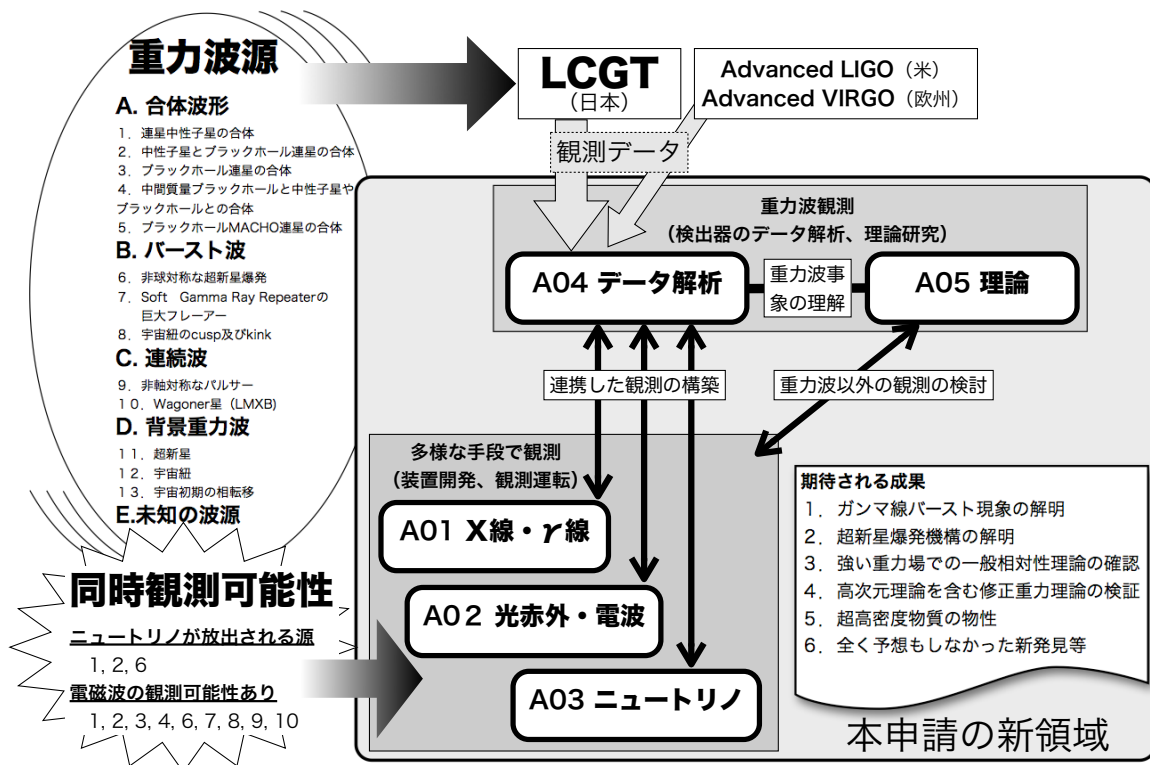
今までにおこなった関連テーマの申請では、新学術領域研究 (研究領域提案型) に平成 23 年度「天体からの重力波検出で開く物理学のフロンティア」、平成 22 年度「極限光技術で探る時空の姿」、および平成 21 年度「重力波天文学創成のためのサイエンスと技術の実証」がある。重力波観測実験の進展に応じて、平成 23 年度は X 線・ $\gamma$  線の計画研究やニュートリノ観測との連携を含んだ申請を行い、そのサイエンスの重要性や、重力波研究者と他の観測分野の研究者を連携した組織の準備が評価された。しかし、低温鏡のテストベンチや重力波干渉計の将来技術開発の計画研究が入っていたので、LCGT 本計画との区別が明確でない部分があるなどの指摘があった。今回の申請では、重力波実験の進行状況と直接関わるのはデータ解析のみであり、多様な観測の計画研究で構成している。このように、LCGT 本計画とは独立性を明確にしている。

## 2 領域推進の計画・方法

### (1) 領域推進の計画の概要

#### 基本的な研究戦略

天体起源の重力波の検出をいち早く実現し、重力波とX・ $\gamma$ 線、光学やニュートリノ観測との同時観測を確立すること、そして、重力波源についての物理学を研究することが目的である。下図に示すような各計画研究の位置づけで、組織的な領域を形成する。研究期間の前半は、多様な観測のための装置開発、データ解析システムの構築、同時観測を視野に入れた重力波源の理論研究を進める。期間の中ほどから後半にかけては、LCGTほかの観測にあわせて、同時イベントの探索や解析を行う。



#### 領域における具体的な研究内容

##### 計画研究 A01 重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索

(平成24年度) 軟X線カメラと硬X線モニターから構成される大立体角バーストモニターのシステム設計を行う。軟X線カメラSLCと、硬X線モニターHXMもそれぞれ、機械的・電気的設計を開始する。並行して、MAXI、Swift等によるガンマ線バースト、恒星潮汐破壊など突発天体現象の観測によって、重力波天体検出のための予備研究を進める。

(平成25年度以降) 軟X線カメラは、筐体、冷却系も含めて試作を行い、大フォーマットX線CCDカメラを実現させる。広い天域からのバースト検出・位置決定のために用いる符号化マスクの設計と位置決定アルゴリズムと機上での実装も開発する。機上計算機ネットワークの試作も進める。さらに稼働中のMAXIも用いて、重力波や他手段との連携システムの開発を進める。

##### 計画研究 A02 天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築

(平成24年度) 木曾1m望遠鏡の高精度化、岡山91cm赤外線望遠鏡制御系の改造、50cm広視野ロボット望遠鏡に搭載する広視野可視三色同時カメラの開発を行う。並行して電波観測と連携した突発天体観測ネットワークを整備する。

領域推進の計画の概要（つづき）

（平成 25 年度以降）50cm 広視野ロボット望遠鏡の海外設置を中心に、引き続き突発天体の光赤外・電波観測ネットワークの整備を行う。開発・整備したシステムは順次観測に投入し、重力波源候補天体の観測的研究を推進する。

**計画研究 A03 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究**

（平成 24 年度）ガドリニウムを用いた開発用実験装置（EGADS）を、超新星爆発ニュートリノ検出装置に改良する。不感時間を無くした新たな電子回路装置を導入し、極めて近傍の超新星爆発に対応させる。さらに GPS 時間を記録し、ハード・ソフト両面でトリガーシステムを改良することで、正確な超新星爆発ニュートリノデータ取得を可能にする。

（平成 25 年度以降）前年度で開発した EGADS 検出器の較正をレーザーシステムおよび Am/Be 放射線源を用いて行う。また、超新星爆発ニュートリノ事象を捕獲するための純化装置の開発を行う。高精度な原子時計を導入し、多様な観測間における時間精度をチェックする。トリガーシステムの改良を適宜行い、より高い処理能力を持たせる。

**計画研究 A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究**

（平成 24 年度）LCGT データおよび国際重力波検出器ネットワークのデータ解析を想定し、予報・速報性について有利な解析のグランドデザインを検討する。具体的なデータフロー、解析手法、計算フローのより効率的な配置などを決定する。データ解析のライブラリ群を整備し、基礎的な解析用計算機環境を準備する。

（平成 25 年度以降）観測データの解析準備を進める。3 年目以降には、LCGT などの観測データを処理できるように、計算機と記憶装置を準備する。また、計画研究 A01, A02 と連携して、干渉計データの較正（重力波信号相当（時系列、周波数領域とも）への換算）や非ガウス・非定常雑音についての評価を行う。これらをイベント探索解析に実装する。

**計画研究 A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究**

（平成 24 年度）1) 様々な重力波源の探査と重力波波形の解明（中村） 2) 超新星を中心とした物理（山田） 3) 新しい重力波観測・データ解析法の提案（瀬戸） 4) その他の観測手段との同時観測から得られる物理（井岡） 相対論の検証、及び、宇宙論的観点からの重力波研究（田中）について () 内の代表者・分担者を中心にポストドクを雇用しプロジェクト的に取り組む。

（平成 25 年度以降）24 年度と変わらないが、さらに、広く重力波物理学を発掘するため、公募研究も活用し広範な分野の研究会や連絡会を組織する。

**各計画研究の必要性及び計画研究間での有機的連携を図るための具体的方法**

領域の最大の目的である重力波天体の同時観測そのものが、各計画研究の有機的な連携によって成り立つ。それには各観測の実験上の特性や情報の相互理解や、連携観測の戦略的な最適化が必要である。そのために重力波源についての理論的な予想も欠かせない。すなわちサイエンスの上で計画研究を有機的に連携させる動機と研究内容が存在する。

また、重力波と同時に、A01, A02, A03 の計画研究の全てまたはいくつかで観測が可能となる。それぞれの観測は重力波天体の異なる局面（たとえば天体の中心部と外層、イベントの初期と数日後、など）の情報をもたらすのであって、多様な観測手段を揃えることで天体のより豊かな描像を得られる。しかしそれぞれの観測手段には特化した装置の開発が必要であり、そのためにこれらの計画研究を策定する。重力波源を探索し、観測情報を解析する計画研究 A04 は領域の中核として必須であるし、これらの観測がもたらすサイエンスを研究する A05 も不可欠である。

（2）各計画研究（総括班を除く）の研究組織及び研究内容の概要

研究課題名 重力波天体からのX線・γ線放射の探索 (A01)

研究組織 研究者数9名（研究分担者3名、連携研究者5名）

研究代表者: 河合 誠之 (東京工業大学大学院理工学研究科・教授・宇宙物理学・全体の統括、広視野突発天体観測システムの開発・運用)

研究分担者: 谷津 陽一 (東京工業大学大学院理工学研究科・助教・X線・ガンマ線天文学実験・衛星用硬X線大立体角カメラ開発)

富田 洋 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・主任開発員・X線天文学・軟X線大立体角カメラの開発)

三原 建弘 (独立行政法人理化学研究所・前任研究員・X線天文学・符号化マスク)

連携研究者: 常深 博 (大阪大学理学研究科・教授・X線天文学・軟X線大立体角カメラの開発)

上野 史郎 (宇宙航空研究開発機構・研究員・宇宙物理学・スターセンサー、バス部)

吉田 篤正 (青山学院大学理工学部・教授・宇宙物理学・ガンマ線分光器)

根来 均 (日本大学理工学部・准教授・宇宙物理学・データ処理)

上田 佳宏 (京都大学理学研究科・准教授・宇宙物理学・ブラックホール天体の観測研究)

研究内容 重力波を発生する爆発的な現象では、バースト的なX線・γ線および持続するX線残光が放射されると推測される。これらを捉えて重力波源を同定し、物理機構を明らかにするため以下の研究を実施する。(1) 大立体角X線監視装置の開発: 重力波放射が期待されるガンマ線バースト、超新星等からの突発的X線放射や残光を検出し、位置決定と広帯域光度曲線・スペクトル取得を行う装置を開発する。開発済みのMAXI/SSCおよび超小型衛星搭載用GRB検出器を発展させた軟X線大立体角カメラと硬X線モニター装置を小型衛星または宇宙ステーションに搭載することを目指す。(2) 重力波源候補天体現象の観測研究: 一部のガンマ線バーストの原因は、中性子星連星合体と考えられている。また、超新星爆発も重力波源候補である。これらに加え、関連の深いX線連星や超新星残骸などを他の班と連携観測し、天体重力波の物理を研究する。

研究課題名 天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築 (A02)

研究組織 研究者数8名（研究分担者3名、連携研究者4名）

研究代表者: 吉田道利 (広島大宇宙科学センター・教授・光赤外天文学・計画推進、システム構築)

研究分担者: 太田耕司 (京大理学研究科・教授・銀河天文学・中口径光学望遠鏡による分光観測)

柳澤顕史 (国立天文台岡山・助教・赤外線天文学・突発天体の広視野赤外線観測)

本原顕太郎 (京大理学研究科・准教授・光赤外天文学・広視野観測装置の開発と運用)

連携研究者: 土居守 (京大理学研究科・教授・光赤外天文学・木曾観測所による広視野変光天体観)

川端弘治 (広島大宇宙科学センター・准教授・恒星物理学・突発天体の偏光分光観測)

永山貴宏 (名古屋大理学研究科・特任助教・赤外線天文学・広視野赤外線観測)

藤澤健太 (山口大時間学研究所・教授・電波天文学・重力波候補天体の電波観測)

研究内容 重力波の放出源を特定し、その放射メカニズムに迫ることを目指し、突発激変天体の光赤外・電波観測ネットワークを構築する。重力波との同時検出および即時フォローアップ観測を行うために、以下のような観測装置開発およびシステム構築を行う。これらをフルに活用し、計画研究A1とも密接に連携して、重力波源として有力視されているガンマ線バースト、超新星、中性子星などの観測研究を推進する。(1) 可視赤外線広視野観測システムの構築: 木曾1mシュミットカメラ用の超広視野CMOSセンサーの開発、岡山91cm広視野赤外線望遠鏡の自動化、京大3.8m望遠鏡に搭載する面分光器開発を中心に、超大量画像データから変動天体を自動的に検出・測光する解析パイプラインの開発を進める。(2) 可視赤外線の全地球的観測網の整備: 中国西域部への50cm広視野ロボット望遠鏡を設置し、木曾、岡山、広島などの国内観測所と東大アタカマ望遠鏡、名大南アフリカ望遠鏡などを結んだ全地球的突発激変天体観測網を整備する。(3) 電波観測による激変天体のフォローアップ観測体制の整備: 野辺山観測所、山口大電波望遠鏡などを用いた連携観測体制を整える。

## （2）各計画研究（総括班を除く）の研究組織及び研究内容の概要

研究課題名 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究 (A03)

研究組織 研究者数8名（研究分担者1名、連携研究者6名）

研究代表者: ヴァギンズ マーク (東京大学・特任教授・天体素粒子物理・研究の総括)

研究分担者: 小汐 由介 (東京大学・助教・天体素粒子物理・データ取得)

連携研究者: 中畑 雅行 (東京大学・教授・天体素粒子物理・テストタンク運転)

作田 誠 (岡山大学・教授・天体素粒子物理・中性子・ガンマ線評価)

竹内 康雄 (神戸大学・教授・素粒子物理学実験・放射線不純物測定)

石野 宏和 (岡山大学・准教授・天体素粒子物理・透過率測定)

岸本 康宏 (東京大学・准教授・天体素粒子物理・キャリブレーション)

関谷 洋之 (東京大学・助教・天体素粒子物理・純水循環装置)

研究内容 大質量星の進化の最終過程においてコアの重力崩壊により起こる超新星爆発は、宇宙で起こる最も重要な現象の一つである。特にヘリウムより重い元素は、超新星爆発によってのみ星から放出あるいは生成され、星の形成や生命の誕生にも重要な寄与をすると考えられている。重力崩壊型超新星爆発においては、その爆発エネルギーの99%がニュートリノによって星から放出されると考えられており、ニュートリノによる超新星観測は爆発の熱過程を探ることができる。現在、高精度な重力波観測装置の開発が進められており、近い将来、超新星爆発における重力波の放出と、ニュートリノや電磁波の放出との相関を観測することで、そのメカニズムを完全に理解することが期待できる。本研究では、ガドリニウムを溶解した水チェレンコフ検出器調査開発用の実験装置 (EGADS) を、世界で最も先進的な超新星爆発観測装置に改造する。本研究により開発された先進的な技術は、将来の大型水チェレンコフ検出器においても応用することが可能である。本研究で、ベテルギウスからアンドロメダまで、近傍から遠方までの超新星爆発ニュートリノ事象に感度を持つ検出器の開発を行い、多様な超新星観測において、高精度なニュートリノデータを加える。

研究課題名 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究 (A04)

研究組織 研究者数8名（研究分担者5名、連携研究者2名）

研究代表者: 神田 展行 (大阪市立大学理学研究科・教授・重力波実験物理学・計画推進・実験データ解析)

研究分担者: 田越 秀行 (大阪大学理学研究科・助教・宇宙物理学・データ解析手法とコード開発)

高橋 弘毅 (山梨英和大学人間文化学部・講師・宇宙物理学・データ解析手法の開発)

大原 謙一 (新潟大学自然科学系・教授・宇宙物理学理論・新解析手法とその高速計算手法の開発)

伊藤 洋介 (東北大学理学研究科・助教・重力波天文学・連続重力波データ解析手法)

端山 和太 (国立天文台重力波プロジェクト推進室・研究員・観測的重力波天文学・バースト重力波解析)

連携研究者: 新谷 昌人 (東京大学地震研究所・准教授・地球計測学・データへの地球物理学的解析応用)

辰巳 大輔 (国立天文台光赤外研究部・助教・重力波天文学・重力波観測データ校正)

研究内容 短時間にデータを処理して重力波の検出情報をすばやく速報する可能性について、および重力波波源の情報を引き出すためのデータ解析について研究を行う。それらを活かした、日本の LCGT と海外の重力波検出器のデータを用いる重力波検出速報のための解析システムを構築する。計画研究 A01,A02,A03 と連携することにより多様な天体の観測情報を総合して重力波源のすばやい特定を目指し、計画研究 A05 と連携してより優れた解析手法や天体内部を探るための解析を研究する。中性子星連星では重力波は合体以前から放出され、原理的には合体の”予報”すら可能である。しかし十分な信頼性で速報をだすには、観測データのフローや理論波形についての詳細な再検討が必要であり、挑戦的課題である。また多様な観測を組み合わせ、より正確に重力波源天体の方向を決定したり、多くの情報を引き出すために有効な手法を開発する。海外の重力波観測の解析と国際協力を進めつつも、独自に開発する内容で日本の LCGT 検出器の優位性向上に寄与する。また、時系列データの解析に地震を始めとする地球物理学的解析手法の応用も検討する。

(2) 各計画研究（総括班を除く）の研究組織及び研究内容の概要

研究課題名 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究 (A05)

研究組織 研究者数9名（研究分担者4名、連携研究者4名）

研究代表者: 田中貴浩（京都大学基礎物理学研究所・教授・宇宙物理学・計画研究全般の組織化と宇宙論的  
重力波源の研究）

研究分担者: 中村卓史（京都大学大学院理学研究科・教授・宇宙物理学・様々な重力波源の研究）  
山田章一（早稲田大学先進理工学部・教授・宇宙物理学・超新星爆発の物理の研究）  
瀬戸直樹（京都大学大学院理学研究科・助教・宇宙物理学・重力波源およびデータ解析法の研究）  
井岡邦仁（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・准教授・  
高エネルギー宇宙物理学・重力波源と同時観測の理論的研究）

連携研究者: 川崎雅裕（東京大学宇宙線研究所・教授・宇宙論・宇宙論的な重力波源の研究）  
横山順一（東京大学大学院理学系研究科・教授・宇宙物理学・宇宙論的な重力波源の研究）  
柴田大（京都大学基礎物理学研究所・教授・宇宙物理学・数値相対論による重力波形の提供）  
固武慶（国立天文台理論研究部・助教・宇宙物理学・超新星爆発の物理と波形の研究）

研究内容 重力波天文学の創生期にあたり、重力波物理を最大限に引き出すための理論的研究の推進  
と、幅広い研究ネットワークの強化を目的とする。3つの研究の柱を示す。(1) 電磁波等による同時  
観測の可能性、得られる物理、可能な重力波源の探究: $\gamma$ 線バーストや超新星などの重力波源からの  
電磁波やニュートリノによる放射の詳細を予想し、同時観測可能な観測手段の提案も目指す。加え  
て、得られる物理をより鮮明にする。(2) データ解析との連携:大規模数値計算にもとづき様々な効  
果を含めた重力波波形の理論予想を進める。加えて、データ解析の手法 / 検出効率の最適化、波形  
予測の不定性について吟味する。また、重力波観測の物理的解釈を総合的、組織的におこなう。(3)  
重力波関連研究全般の活性化:JGRG 国際ワークショップをさらに活性化し、関連分野の研究会を組  
織する。

### (3) 公募研究の役割

本研究領域は重力波源についての天体物理学の最前線である。そのための方法として、重力波は言うまでもなく、電磁波やニュートリノなど、多様多彩な観測手段との連携を加えて新しい領域を開拓しようという先駆的な研究である。したがって、新しいアイデアの研究や、計画研究に内包していない萌芽的な観測や理論のアイデアなどがあれば積極的に加えてゆきたい。また重力波観測を駆使した天体物理学の研究領域に関係する研究者を増やし、日本の本分野の研究を活性化させ、国際競争力を高めたい。そのため、公募研究の役割は極めて重要である。

重力波検出は現在まだ成されておらず、観測実験としてはまだまだ未成熟な部分がある。天体起源の重力波を同定するためには、重力波検出や解析の開発は言うまでもなく、相補的な情報をもたらす可能性のある天体観測も加えて、広範な分野の研究者からの参加を期待したい。そのため、すべての計画研究の分野で公募研究を実施する。そして、それぞれの計画研究の内容と関連性の高いものだけでなく、相補的となるような研究テーマの提案を期待している。

また黎明期にある重力波天文学は、新しいアイデアや、完成させるために多くの試行錯誤が必要であろう。したがって、計画研究で実施する内容とは少し距離があっても、自由な空気の中で研究者の独自のひらめきやアイデアを試す場を設けることで、本研究分野にさらに大きな広がりが見られることを期待し、より多くの研究者が参画できる体制を確保したい。

実施方法としては、平成 25 年度より 2 年間、27 年度より最終年度までの 2 年間の 2 期に分けて募集し、それぞれ、15件程度を採択する予定である。予算は、年間の総額で 2,800 万円（1 件あたり年間 1,000 千円～3,600 千円程度を目安）を計上する。

### (4) 研究支援活動の必要性

本研究領域においては、研究活動に必要な設備・装置などを各計画研究において購入・製作する予定である。

計画研究 A01, A02, A03 は、観測装置の開発が含まれる。重力波観測の方向決定精度は、その波長が長いために、可視光や X 線に比較して原理的に劣る。そのため、重力波イベントに対応する天体を見いだすには、大立体角（広視野）の観測装置やセンサの開発が不可欠である。また重力波観測と相補う精度のニュートリノ検出の開発も望まれる。

計画研究 A04 は観測データを扱うが、日本の LCGT だけでなく国内外のからデータを利用する必要がある。また重力波以外の観測情報も利用する。そのためのデータ保存・処理能力を有する装置が必要である。

研究計画 A05 における研究会や、各計画研究における研究員雇用を企画している。これらは、黎明期にある本領域において若手育成という役割を担っている。支援活動の有無がこの分野における今後の日本の研究成果に大きく影響する。

本研究においては、重力波観測実験については直接に検出装置に関わる予算を含まない。建設中の LCGT 計画本体とは独立な研究計画としての支援活動の必要性がある。

### 3 領域マネジメント

#### (1) 総括班の役割、研究組織及び活動内容

総括班は領域代表者を研究代表者、計画研究の代表者を研究分担者とし、関連の研究者5名を連携研究者として組織する。研究分担者の内1名が事務局担当者である。総括班は、各計画研究の間や LCGT など関連の研究組織との調整を行い、領域全体の研究方針の策定などを行う。また、総括班のもとに運営委員会を設置し、領域運営の実務にあたる。月に1度程度、運営委員会を開催して研究の進捗状況の確認などを行う。運営委員会のメンバーは、総括班のメンバーを中心に選出する。

総括班メンバー 研究者数11名（研究分担者5名、連携研究者5名）

研究代表者: 中村 卓史 (京都大学大学院理学研究科・教授・宇宙物理学・全体の総括)  
 研究分担者: 神田 展行 (大阪市立大学大学院理学研究科・教授・重力波実験物理学・事務局担当)  
                   河合 誠之 (東京工業大学大学院理工学研究科・教授・宇宙物理学・研究推進)  
                   吉田 道利 (広島大学宇宙科学センター・教授・光学赤外線天文学・研究推進)  
                   ヴァギンズ マーク (東京大学数物連携宇宙研究機構・特任教授・天体素粒子物理・研究推進)  
                   田中 貴浩 (京都大学基礎物理学研究所・教授・宇宙物理学・研究推進)  
 連携研究者: 梶田 隆章 (東京大学宇宙線研究所・教授・宇宙線・評価担当)  
                   佐々木 節 (京都大学基礎物理学研究所・教授・相対論・宇宙論・評価担当)  
                   坪野 公夫 (東京大学大学院理学系研究科・教授・実験相対論・評価担当)  
                   伊藤 好孝 (名古屋大学太陽地球環境研究所・教授・宇宙線物理学・評価担当)  
                   渡部 潤一 (国立天文台天文情報センター・教授・惑星科学・光赤外線天文学・評価担当、広報)

総括班の活動内容を以下に示す。

1. 領域の全体的な研究方針の策定：大目標（重力波天体の多様な観測）をすみやかに達成するように全体の方針を策定する。また国内外の研究動向にすみやかに対応する。
2. 領域の進行状況のチェック：月例の運営委員会にて、逐次各計画の進行状況を把握する。また、TV会議、メール、web(wiki, blog)等を利用して情報交換に努める。全ての総括班メンバーは、これらの情報を共有する。
3. 計画研究間の企画・調整：年度ごとに、各計画研究の方針も確認し、全体および他の計画研究との整合性を保つよう努める。また運営委員会で継続的に調整する。
4. 研究成果の発表に関する支援：
  - ・国際会議および国内会議の主催
  - ・海外での国際会議への研究者の派遣
  - ・ホームページの立ち上げと更新・維持などを行う。
5. その他の研究支援・国際共同研究、国際協力に関する策定・支援：海外の関連する研究との情報交換や協力関係を検討し、必要なものを進める。



## (2) 領域代表者の領域推進に当たってのビジョン及びマネジメント実績

### 1) 領域推進の考え方

米国のLIGOと仏・伊連合によるVirgo等のレーザー干渉計は2016年に確実に重力波を検出する。一方、我が国の重力波の実験的研究では1988年の最初は10名程度の実験家のみであったが、レーザーの研究者、素粒子実験等の研究者が加わり今や数十名規模のグループとなり、LCGTを建設して2016年にはLIGOに追いつこうとしている。さて、LIGO,VIRGOとLCGTで検出される重力波の方向決定精度は数度であるので、ガンマ線、X線、光・赤外線やニュートリノの同時観測が重力波源の研究には必須である。このためには、重力波を中心に天文学関係やニュートリノ実験の研究者を含んださらに大きな研究集団を組織することが必要である。この点に最も注意をして領域を推進する。過去の経験から領域としての一体感を持つには、定期的な報告会の開催が効果的である。昔と違って移動して行く必要は必ずしもないのでTV会議での全体会議を1カ月に1回程度行いたい。それから、重力波の研究はこれから、息が長いのでポストドクを採用することで若手の育成に努める必要がある。また、国民の税金を使って研究をしているわけだから、市民向けの講演会等も企画したいと考えている。

### 2) マネジメント実績

#### ア) 我が国のレーザー干渉計型重力波検出器の組織的な研究開始時の領域代表者

中村(今回の領域代表者で理論家)は、1988年京大基礎物理学研究所の研究会「重力波天文学」を提案して9月に開催した。そこで、「6億円規模の重点領域を申請する。」と言う方針を決定した。重点領域「重力波天文学」(代表中村)は研究期間1991-1994年で採用された。重点領域では4つの実験の計画研究と1つの理論の計画研究を設定した。重点領域では毎月1回、1日をかけての報告会を順番に各機関の場所で行い、最新の進展を報告し問題点を議論しあった。その結果、異なる実験グループが有機的に結びつき、事後審査で高い評価を得る結果を出せた。重点領域の成功はトップダウンの新プロ「重力波天文学」(代表古在:1995-2001年)に繋がり腕の長さが300mのレーザー干渉計TAMA300の建設運転がなされた。TAMA300は約2年間にわたって世界最高感度を保持した。

#### イ) 新プロ「重力波天文学」(代表古在:1995-2001年)では理論関係のリーダー

#### ウ) LCGTの基礎実験を行った、特定領域「重力波研究の新展開」(代表坪野:2002-2005)においては理論の計画研究代表者

#### エ) JGWC(Japan Gravitational Wave Committee)の設立

2006年には、重力波関係の将来計画を議論する組織としてJGWC(Japan Gravitational Wave Committee)を設立した。メンバーは我が国で重力波を実験的に研究している研究機関の教授、准教授、助教の大半と理論家の一部からなっている。現在は中村が委員長である。この組織も今回さらに天文学やニュートリノ実験の関係者を加えたものに拡大したい。

#### オ) 特定領域「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」(代表河合:2007-2010)の理論の計画研究の代表者

## 4 研究経費

## (1) 研究期間との関連性を含めた研究経費の必要性

計画研究 A01 重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索

本計画研究では、1年目後半以降に研究員を2名雇用し、衛星搭載用大立体角X線検出器の開発に携わらせる。そのため人件費を計上してある。研究期間中に、軟X線大立体角カメラを開発し、プロトモデルの性能試験を実施するため、最初の2年間に集中してカメラの構成部品の調達を行うので、物品費は前半に必要となる。一方、機上コンピューターのソフトウェアの開発と性能試験に関わる費用は全期間にわたり、特に後半に多く必要となる。

## 計画研究 A02 天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築

研究期間の前半で、突発激変天体の光赤外広視野観測システムと、全地球的観測システムの整備を行う。このために、望遠鏡・観測装置の整備・開発費(含CCDカメラ)、制御・解析計算機等が必要となる。システムを順次整備しつつ、電波観測所と連携して重力波源候補天体である、突発激変天体の観測研究を実施する。研究期間後半には大量データの解析処理を効率よく進めるための計算機およびソフトウェアの整備を進める。

計画研究 A03 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究 重力波天体の多様な観測において成果を挙げるためには、超新星爆発ニュートリノの検出性能をできるだけ高めることが必要である。本研究では現存するガドリニウムを用いた開発用実験装置(EGADS)を、超新星爆発からの重力波信号との相関を確実に観測できるニュートリノ検出器に改造する。まず平成24年度は、最も近傍の超新星爆発においても全ての事象を精度良く記録するために、最新の電子回路および計算機、GPS装置を導入する。続いて平成25年度には検出器の精密な較正と運用に必要な機器が必要である。平成26年度以降では、多様な観測間の基準時間の精度を高めるため原子時計を導入し、さらに計算機を増強することでデータ処理能力を高める。

## 計画研究 A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究

本計画研究では、2年目以降に研究員を5、6名雇用し、データ解析の計算機システム構築および解析手法の開発と実装に携わらせる。そのため謝金を計上してある。また、3年目にLCGTほか重力波検出器の観測データが得られるので、これを蓄積し、解析するための計算機システムを3年目を中心に、またデータ量増加と処理能力の増強を4、5年目に想定して予算計上してある。

計画研究 A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究 多くの予算を旅費と謝金等に当てている。旅費は代表者、分担者、及び、本計画研究で雇用を予定するポスドク研究員が国内海外での国際会議、共同研究に参画する上で必要な額(700万円/年)に加えて、研究会開催の為の費用360万円/年を計上している。この研究会開催の為の費用は、本計画研究がより広範な研究者ネットワークの形成によって成功するために必要不可欠である。謝金等の大部分は本計画研究でポスドク研究員(3名)を雇用する目的に使用される。これらのポスドク研究員には、本計画研究における鍵となるプロジェクト、(1)電磁波等による同時観測の可能性と、得られる物理、可能な重力波源の探究と(2)データ解析との連携、及び(3)数値シミュレーションを代表者、分担者、及び、連携研究者と密に議論をしながら進める役割を担う。設備備品として挙げているコンピュータは実質的には非常に消耗品であるため、どれだけのコンピュータを購入するかを事前に計画することは難しいが、研究環境を維持するために最小限必要と予想される額を各年度計上した。

(2) 各計画研究の費目別内訳及び主要な設備備品費

【総括班 (X00)】 (単位：千円)

	24年度	25年度	26年度	27年度	28年度	合計
設備備品費	1,000	0	0	0	0	1,000
消耗品費	1,000	500	1,000	1,000	1,000	4,500
旅費 国内	1,500	1,500	3,000	1,500	3,000	10,500
海外	1,000	600	1,500	1,000	1,500	5,600
謝金等	3,600	4,400	5,500	4,400	5,500	23,400
その他	1,500	1,000	2,500	1,500	2,500	9,000
合計	9,600	8,000	13,500	9,400	13,500	54,000

【重力波天体からのX線・γ線放射の探索 (A01)】 (単位：千円)

	24年度	25年度	26年度	27年度	28年度	合計
設備備品費	20,000	70,000	6,000	6,000	3,000	105,000
消耗品費	29,000	5,000	5,000	5,000	3,000	47,000
旅費 国内	1,000	1,500	1,500	1,500	1,500	7,000
海外	1,500	2,000	2,000	2,000	2,000	9,500
謝金等	6,000	11,000	11,000	11,000	11,000	50,000
その他	7,500	7,500	11,500	16,500	11,500	54,500
合計	65,000	97,000	37,000	42,000	32,000	273,000

年度	費目 / 装置名	数量	予定価格	設置予定機関など
24	機械式冷凍機 SRS2110・住友重機	1	10000	JAXA
	SpW ボードシマフジ	1	1000	東工大
	高電圧印加電流計 Keithley 237	1	1400	東工大
	データ解析用計算機 PowerEdgeR910・Dell	1	1240	理研
	NAS ストレージ PowerMaster S8847, 48TB	2	1124	理研
25	CCD データ処理装置三菱重工	1	10000	JAXA
	カメラボディ堀口鉄工	1	50000	JAXA
	APD 信号処理回路 IDEAS	1	10000	東工大
26	APD 信号処理回路 IDEAS・VATA462	1	5000	東工大
	SpW ボードシマフジ	1	1000	JAXA
27	データ解析用計算機 PowerEdgeR910・Dell	2	2480	東工大
	NAS ストレージ PowerMaster S8847, 48TB	2	1124	東工大
	SpW ボードシマフジ	1	1000	JAXA
28	NAS ストレージ PowerMaster S8847, 48TB	2	1124	JAXA
	NAS ストレージ PowerMaster S8847, 48TB	2	1124	理研

(2) 各計画研究の費目別内訳及び主要な設備備品費

【天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築 (A02)】 (単位：千円)

	24年度	25年度	26年度	27年度	28年度	合計
設備備品費	25,000	40,200	20,300	6,500	2,100	94,100
消耗品費	5,600	7,000	8,000	8,000	8,000	36,600
旅費 国内	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	8,000
海外	2,500	3,500	3,500	2,500	2,900	14,900
謝金等	7,000	12,000	12,000	12,000	12,000	55,000
その他	500	2,900	11,200	500	500	15,600
合計	42,200	67,200	56,600	31,100	27,100	224,200

年度	費目 / 装置名	数量	予定価格	設置予定機関など
24	高性能エンコーダーハイデンハイン・RCN827N	1	3500	東京大学
	カメラ制御用計算機ぶらっとホーム・TR2X-4U/A-GP	1	1150	国立天文台
	CCDカメラ Apogee U430	2	12600	広島大学
	2度角フラットナーレンズ特注品	1	1500	東京大学
25	CMOS制御ボード特注品	1	3000	東京大学
	CMOS制御用計算機 Dell・PowerEdgeT710	1	1300	東京大学
	データ解析用計算機ぶらっとホーム・TR2X-4U/A-GP	1	1150	国立天文台
	50cm 広視野望遠鏡特注品	1	30000	広島大学
26	データ格納ストレージぶらっとホーム・RPI-1000SS16FC/C3US	1	1100	国立天文台
	データ格納ストレージぶらっとホーム・RPI-1000SS16FC/C3US	1	1100	広島大学
	望遠鏡ドームニッシンドーム 6m	1	7000	広島大学
	CCDカメラ Apogee U430	1	6300	広島大学
	CMOS格納デューワー特注品	1	2000	東京大学
27	データ解析用計算機ぶらっとホーム・TR2X-4U/A-GP	1	1150	広島大学
	データ解析用計算機ぶらっとホーム・TR2X-4U/A-GP	1	1150	東京大学
28	データ格納用ストレージぶらっとホーム・RPI-1000SS16FC/C3US	1	1100	広島大学

【超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究 (A03)】 (単位：千円)

	24年度	25年度	26年度	27年度	28年度	合計
設備備品費	14,000	11,000	8,000	1,000	1,000	35,000
消耗品費	2,000	2,000	11,000	11,000	11,000	37,000
旅費 国内	500	500	500	700	700	2,900
海外	2,500	2,500	2,500	3,300	3,300	14,100
謝金等	3,000	5,000	5,000	8,000	8,000	29,000
その他	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	5,000
合計	23,000	22,000	28,000	25,000	25,000	123,000

年度	費目 / 装置名	数量	予定価格	設置予定機関など
24	GPSモジュール1ナノ秒精度、モトローラ	1	2000	東京大学
	QBEE電子回路不感時間無しのデータ取得、岩通	250	10000	東京大学
	計算機100ギガフロップ、PSSC Labs	1	2000	東京大学
25	レーザー装置波長337nm, Spectraphysics	1	4000	東京大学
	Am/Be放射線源100マイクロキュリー、QSA Global	1	2000	東京大学
	フィルター装置5ton/時で処理、Hoffland	1	5000	東京大学
26	原子時計1E-12精度、Symmetricom	1	8000	東京大学
27	計算機20コア、PSSC labs	20	1000	東京大学
28	計算機20コア、PSSC labs	20	1000	東京大学

(2) 各計画研究の費目別内訳及び主要な設備備品費

【多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究 (A04)】 (単位：千円)

	24年度	25年度	26年度	27年度	28年度	合計
設備備品費	6,000	5,000	45,000	30,000	35,000	121,000
消耗品費	3,000	2,000	6,000	6,000	6,000	23,000
旅費						
国内	1,000	1,000	1,500	1,500	1,500	6,500
海外	1,500	2,600	3,100	3,100	3,100	13,400
謝金等	1,000	34,200	34,200	34,200	34,200	137,800
その他	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	5,000
合計	13,500	45,800	90,800	75,800	80,800	306,700

年度	費目 / 装置名	数量	予定価格	設置予定機関など
24	ワークステーション RC 社 Viento G Fermi Editon	6	3768	阪市大、阪大
25	ラップトップコンピュータ MacBook	6	1500	各分担者
26	解析用クラスター管理ノード富士通 PRIMERGY RX300 S6	2	2600	阪市大、阪大
	解析用クラスター計算ノード 富士通 PRIMERGY BX900 S1/S2	18	15192	阪市大、阪大
	ディスク装置富士通 ETERNUS DX80	4	12400	阪市大、阪大
27	NAS ストレージ JSC 社 NL3S-4U, 48TB	10	19850	阪市大、阪大
	ワークステーション RC 社 Viento G Fermi Editon	2	1256	新潟大、山梨英和大
28	解析用クラスター計算機 RC 社 ServerCalm III, 48core	2	8598	阪市大、阪大
	解析用クラスター計算ノード 富士通 PRIMERGY BX900 S1/S2	10	8440	阪市大、阪大

【重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究 (A05)】 (単位：千円)

	24年度	25年度	26年度	27年度	28年度	合計
設備備品費	1,600	1,300	1,100	700	700	5,400
消耗品費	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000
旅費						
国内	5,800	5,800	5,800	5,800	5,800	29,000
海外	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	24,000
謝金等	9,300	18,300	18,300	18,300	18,300	82,500
その他	500	500	500	500	500	2,500
合計	24,000	31,700	31,500	31,100	31,100	149,400

年度	費目 / 装置名	数量	予定価格	設置予定機関など
24	コンピュータ DEL XPS スタンダード	5	750	代表者及び各分担者
	ラップトップコンピュータ Let's note F	3	840	代表者・中村
25	コンピュータ DEL XPS スタンダード	3	450	代表者・中村
	ラップトップコンピュータ Let's note B10	3	750	代表者・瀬戸・井岡
26	ラップトップコンピュータ Let's note B10	4	1000	各分担者
27	コンピュータ DEL XPS スタンダード	2	300	中村・山田
	ラップトップコンピュータ Let's note B10	1	250	代表者
28	コンピュータ DEL XPS スタンダード	2	300	瀬戸・井岡
	ラップトップコンピュータ Let's note B10	1	250	代表者

## 5 主要研究業績

### (1) 領域代表者

#### 論文発表

1. “The improved Ep-TL-Lp diagram and a robust regression method”, R. Tsutsui, T. Nakamura, D. Yonetoku, T. Murakami, Y. Morihara, and K. Takahashi, Publ. Astron. Soc. Japan 63 (2011) 741-753 (査読有)
2. “Probing Early Cosmic Magnetic Fields through Pair Echos from High-Redshift GRBs”, Keitaro Takahashi, Susume Inoue, Kiyomoto Ichiki and Takashi Nakamura, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 410 (2011) 2741-2748 (査読有)
3. “DECIGO and DECIGO pathfinder”, M. Ando, S. Kawamura, N. Seto and T. Nakamura et al., Classical and Quantum Gravity, 27(2010), 084010 (査読有)
4. “Possible Origins of Dispersion of the Peak Energy–Brightness Correlations of Gamma-Ray Bursts”, D. Yonetoku, T. Murakami, R. Tsutsui, T. Nakamura, Y. Morihara, and K. Takahashi, Publ. Astron. Soc. Japan 62 (2010) 1495-1507 (査読有)
5. “The Japanese Space Gravitational Wave Antenna: DECIGO”, S. Kawamura, M. Ando, N. Seto, S. Sato, T. Nakamura et al., Classical and Quantum Gravity, 28(2011), 094011 (査読有)
6. “Cosmological constraints from calibrated Yonetoku and Amati relation suggest fundamental plane of gamma-ray bursts” \*Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Yoshiki Kodama, Keitaro Takahashi Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 8(2009), 15 (査読有)
7. “Statistical Properties of Gamma-Ray Burst Polarization” \*Toma Kenji, Sakamoto Takanori, Zhang Bing, Hill Joanne E., McConnell Mark L., Bloser Peter F., Yamazaki Ryo, Ioka Kunihito, Nakamura Takashi, Astrophys.J. 698 (2009) 1042-1053 (査読有)
8. “Constraints on  $w_0$  and  $w_a$  of dark energy from high-redshift gamma-ray bursts” \*Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Sachiko Tanabe, Yoshiki Kodama, Keitaro Takahashi Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 394 (2009) L31-L35 (査読有)
9. “Gamma-Ray Bursts in  $1.8 < z < 5.6$  Suggest that the Time Variation of the Dark Energy is Small” \*Yoshiki Kodama, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Sachiko Tanabe, Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 391 (2008) L1-L4 (査読有)
10. “High-energy cosmic-ray nuclei from high- and low-luminosity gamma-ray bursts and implications for multimessenger astronomy” \*Kohta Murase, Kunihito Ioka, Shigehiro Nagataki, Takashi Nakamura, Phys.Rev. D78 (2008) 023005 (査読有)
11. “Redshift-dependent lag-luminosity relation in 565 BATSE gamma-ray bursts” \*Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Sachiko Tanabe, Yoshiki Kodama Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 386 (2008) L33-L37 (査読有)
12. “Probing the Efficiency of Electron Acceleration in Collisionless Shocks through the Radio Polarimetry of Gamma-Ray Burst Afterglows” \*Kenji Toma, Kunihito Ioka, Takashi Nakamura, Astrophys.J. 673 (2008) L123-L126 (査読有)
13. “A Null Test of the Cosmological Constant” \*T. Chiba and T. Nakamura, Prog. Theor. Phys. 115(2007)815-819 (査読有)

#### 招待講演

1. “Frontier of All-Wavelength Gravitational Wave Astronomy” (CPT2006 :New Horizons of Optical Devices and Systems, January 2006 Tokyo Japan)
2. “Neutron Stars, Black Holes and High density Equation of State” (YKIS06 November 2006 Kyoto Japan)
3. “How the study of laser interferometer gravitational wave detectors in Japan started?” (20th General Relativity and Gravitation in Japan, September 2010 Kyoto Japan)

### (2) 各計画研究の研究代表者及び研究分担者

#### 【重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索 (A01)】

研究代表者：河合誠之 / 研究分担者：谷津陽一、冨田洋、三原建弘

1. “Relativistic jet activity from the tidal disruption of a star by a massive black hole”, Burrows, D. N.; Kennea, J. A.; Kawai, N. (33 番目); Negoro, H. (62 番目); Ueda, Y. (70 番目) 他 (全 57 名) Nature, Volume 476, pp. 421-424 (2011) (査読有)

2. “A Large X-ray Flare from a Single Weak-lined T Tauri Star TWA-7 Detected with MAXI GSC”: Uzawa, A., Y. Tsuboi, N. Kawai (5 番目), M. Matsuoka, T. Mihara (10 番目), H. Tomida (11 番目), Y. Ueda (12 番目), M. Sugizaki, S. Ueno (14 番目), H. Negoro (28 番目), Tsunemi (34 番目), A. Yoshida (38 番目) 他 (全 38 名), Publications of the Astronomical Society of Japan, in press, arXiv:1108.5897 (2011) (査読有)
3. “The First MAXI/GSC Catalog in the High Galactic-Latitude Sky”: Hiroi, K., Y. Ueda, N. Isobe, N. Kawai (7 番目), H. Tsunemi (8 番目), T. Mihara (10 番目), H. Negoro (21 番目), H. Tomida (28 番目), S. Ueno (30 番目), A. Yoshida (34 番目) 他 (全 34 名) Publications of the Astronomical Society of Japan, in press, arXiv:1108.5516 (2011) (査読有)
4. “Peculiarly Narrow SED of GRB 090926B with MAXI and Fermi/GBM”: Serino, M., A. Yoshida (2 番目), N. Kawai (3 番目), Y. E. Nakagawa, Y. Ueda (5 番目), T. Mihara (6 番目), H. Negoro (19 番目), H. Tomida (26 番目), H. Tsunemi (28 番目), S. Ueno (29 番目) 他 (全 34 名) Publications of the Astronomical Society of Japan, in press, arXiv:1107.4844 (2011) (査読有)
5. “Gas Slit Camera (GSC) onboard MAXI on ISS”: Mihara, T., M. Nakajima, M. Sugizaki, H. Tomida (8 番目), S. Ueno (9 番目), N. Kawai (10 番目), A. Yoshida (13 番目), H. Negoro (16 番目) 他 (全 19 名), Publications of the Astronomical Society of Japan, in press, arXiv:1103.4224 (2011) (査読有)
6. “In-Orbit Performance of MAXI Gas Slit Camera (GSC) on ISS”: Sugizaki, M., T. Mihara (2 番目), H. Tomida (7 番目), S. Ueno (8 番目), N. Kawai (9 番目), A. Yoshida (14 番目), H. Negoro (16 番目), Y. Ueda (19 番目), and H. Tsunemi (20 番目) 他 (全 20 名), Publications of the Astronomical Society of Japan, in press, arXiv:1102.0891 (2011) (査読有)
7. “MAXI GSC Observations of a Spectral State Transition in the Black Hole Candidate XTE J1752-223”: Nakahira, S., Y. Ueda (4 番目), H. Negoro (5 番目), N. Kawai (7 番目), H. Tsunemi (9 番目), T. Mihara (19 番目), H. Tomida (28 番目), S. Ueno (29 番目), A. Yoshida (31 番目) 他 (全 31 名) Publications of the Astronomical Society of Japan 62 L27 (2010)
8. “Bright X-Ray Flares from the BL Lac Object Markarian 421, Detected with MAXI in 2010 January and February”, N.Isobe, K. Sugimori, Y., N. Kawai (3 番目) Y. Ueda (4 番目), H. Negoro (5 番目), ..., T. Mihara (16 番目), H. Tomida (25 番目), H. Tsunemi (26 番目), S. Ueno (27 番目), ... A. Yoshida (30 番目) 他全 31 名 PASJ Vol.62 55 (2010) (査読有)
9. “The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images”, M. Matsuoka, K. Kawasaki, S. Ueno (3 番目), H. Tomida (4 番目), T. Mihara (9 番目), H. Tsunemi (13 番目), N. Kawai (15 番目), A. Yoshida (18 番目), H. Negoro (19 番目), Y. Ueda (21 番目), 他 22 名 PASJ vol61 999 (2009) (査読有)
10. “Spectral-Lag Relations in GRB Pulses Detected with HETE-2”: Arimoto, M., N. Kawai (2 番目), K. Asano, A. Yoshida (11 番目), 他 (全 35 名) Publications of the Astronomical Society of Japan 62 487-499 (2010)
11. “Fermi Observations of GRB 090510: A Short-Hard Gamma-ray Burst with an Additional, Hard Power-law Component from 10 keV TO GeV Energies”, Ackermann, M., Asano, K., Nobuyuki Kawai 他 (全 179 名、78 番目), The Astrophysical Journal, Vol. 716, pp. 1178-1190, 2010 (査読有)
12. “In-orbit performance of avalanche photodiode as radiation detector on board the picosatellite Cute-1.7+APDII”, J.Kataoka, T.Toizumi, T.Nakamori, Y. Yatsu (4 番目), N. Kawai (9 番目), 他 (全 19 名), Journal of Geophysical Research, Volume 115, Issue A5, 2010.

**【天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築 (A02)】**

研究代表者：吉田道利 / 研究分担者：太田耕司、柳澤顕史、本原顕太郎

1. “Photometric observations of 107P/Wilson-Harrington”, Urakawa, S., Okumura, S.-I., Nishiyama, K., Sakamoto, T., Takahashi, N., Abe, S., Ishiguro, M., Kitazato, K., Kuroda, D., Hasegawa, S., Ohta, K., Kawai, N., Shimizu, Y., Nagayama, S., Yanagisawa, K., Yoshida, M. and Yoshikawa, M., ICARUS, 215, 17-26 (2011) (査読有)
2. “Photopolarimetric Monitoring of Blazars in the Optical and Near-Infrared Bands with the Kanata Telescope. I. Correlations between Flux, Color, and Polarization”, Ikejiri, Y., Uemura, M., Sasada, M., Ito, R., Yamanaka, M., Sakimoto, K., Arai, A., Fukazawa, Y., Ohsugi, T., Kawabata, K. S., Yoshida, M., Sato, S. and Kino, M., Pub. Astron. Soc. Japan, 63, 639-, (2011) (査読有)

3. “Prominent Polarized Flares of the Blazars AO 0235+164 and PKS 1510-089”, Sasada, M., Uemura, M., Fukazawa, Y., Kawabata, K. S., Ikejiri, Y., Itoh, R., Yamanaka, M., Sakimoto, K., Ohsugi, T., Yoshida, M., Sato, S. and Kino, M., Pub. Astron. Soc. Japan, 63, 489-, (2011) (査読有)
4. “Spectropolarimetry of the Superwind Filaments of the Starburst Galaxy M 82: Kinematics of Dust Outflow”, Yoshida, M., Kawabata, Koji S., and Ohshima, Y., Pub. Astron. Soc. Japan, 63, 493-, (2011) (査読有)
5. “Optical behavior of GRB 061121 around its X-Ray shallow decay phase”, Uehara, T., Uemura, M., Arai, A., Yamazaki, R., Kawabata, K. S., Ohno, M., Fukazawa, Y., Ohsugi, T., Yoshida, M., Sato, S. and Kino, M., Astron. Astrophys., 526, A92+, (2011) (査読有)
6. “A Dozen New Galaxies Caught in the Act: Gas Stripping and Extended Emission Line Regions in the Coma Cluster”, Yagi, M., Yoshida, M., Komiyama, Y., Kashikawa, N., Furusawa, H., Okamura, S., Graham, A. W., Miller, N. A., Carter, D., Mobasher, B. and Jogee, S., Astron. J. 140, 1814-1829, (2010) (査読有)
7. “GRB 090313 and the Origin of Optical Peaks in Gamma-ray Burst Light Curves: Implications for Lorentz Factors and Radio Flares”, Melandri, A., Kobayashi, S., Mundell, C. G., Guidorzi, C., de Ugarte Postigo, A., Pooley, G., Yoshida, M., Bersier, D., Castro-Tirado, A. J., Jelinek, M., Gomboc, A., Gorosabel, J., Kubanek, P., Bremer, M., Winters, J. M., Steele, I. A., de Gregorio-Monsalvo, I., Smith, R. J., Garc’ia-Appadoo, D., Sota, A. and Lundgren, A., Astrophys. J., 723, 1331-1342, (2010) (査読有)
8. “Statistics of 207 Ly-alpha Emitters at a Redshift Near 7: Constraints on Reionization and Galaxy Formation Models”, Ouchi, M., Shimasaku, K., Furusawa, H., Saito, T., Yoshida, M., Akiyama, M., Ono, Y., Yamada, T., Ota, K., Kashikawa, N., Iye, M., Kodama, T., Okamura, S., Simpson, C. and Yoshida, M., Astrophys. J., 723, 869-894, (2010) (査読有)
9. “Early Spectroscopy of the 2010 Outburst of U Scorpii”, Yamanaka, M., Uemura, M., Kawabata, K. S., Fujii, M., Tanabe, K., Imamura, K., Komatsu, T., Arai, A., Sasada, M., Itoh, R., Harao, T., Kunitomi, N., Nagae, O., Nose, M., Ohsugi, T., Okushima, T., Sakimoto, K. and Yoshida, M., Pub. Astron. Soc. Japan, 62, L37-L41, (2010) (査読有)
10. “An H $\alpha$  search for overdense regions at  $z = 2.23$ ”, Matsuda, Y., Smail, I., Geach, J. E., Best, P. N., Sobral, D., Tanaka, I., Nakata, F., Ohta, K., Kurk, J., Iwata, I., Bielby, R., Wardlow, J. L., Bower, R. G., Ivison, R. J., Kodama, T., Yamada, T., Mawatari, K. and Casali, M., MNRAS, 416, 2041-2059 (2011) (査読有)  
Hashimoto, T., Ohta, K., Aoki, K., Tanaka, I., Yabe, K., Kawai, N., Aoki, W., Furusawa, H., Hattori, T., Iye, M., Kawabata, K. S., Kobayashi, N., Komiyama, Y., Kosugi, G., Minowa, Y., Mizumoto, Y., Niino, Y., Nomoto, K., Noumaru, J., Ogasawara, R., Pyo, T.-S., Sakamoto, T., Sekiguchi, K., Shirasaki, Y., Suzuki, M., Tajitsu, A., Takata, T., Tamagawa, T., Terada, H., Totani, T., Watanabe, J., Yamada, T. and Yoshida, A., Astrophys. J. 719, 378-384 (2010) (査読有)
11. “Spatially extended [P II] 1.188 $\mu\text{m}$  and [Fe II] 1.257 $\mu\text{m}$  emission lines in a nearby Seyfert galaxy NGC 1068 observed with OAO/ISLE.”, Hashimoto, T., Nagao, T., Yanagisawa, K., Matsuoka, K. and Araki, N., Publ. Astron. Soc. Japan, 63, L7-L11 (2011) (査読有)  
J053234+624755”, Imada, A., Henden, A., Kato, T., Moritani, Y., Sumiyoshi, M., Tanada, S., Omodaka, T., Ishioka, R., Uemura, M., Yanagisawa, K. and Nogami, D., Publ. Astron. Soc. Japan, 61, L17+ (2009) (査読有)
12. “Spitzer Space Telescope Constraint on the Stellar Mass of a  $z = 6.96$  Ly $\alpha$  Emitter”, Ota, K., Ly, C., Malkan, M. A., Motohara, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Morokuma, T., Iye, M., Kashikawa, N. and Hattori, T., Publ. Astron. Soc. Japan, 62, 1167-1175 (2010) (査読有)  
Supernovae”, Maeda, K., Taubenberger, S., Sollerman, J., Mazzali, P. A., Leloudas, G., Nomoto, K., and Motohara, K., Astrophys. J. 708, 1703-1715 (2010) (査読有)

**【超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究 (A03)】**

研究代表者：ヴァギンズ マーク / 研究分担者：小汐由介

1. “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計4 1 1名、アルファベット順) Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 041801 (査読有)
2. “Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計1 2 4名、各研究機関毎のアルファベット順) Phys.Rev. D83 (2011) 052010 (査読有)
3. “Study of solar and other unknown anti-neutrino fluxes with Borexino at LNGS”, Y.Koshio (計8 6名、アルファベット順), Phys.Lett.B696 (2011) 191 (査読有)



4. “Atmospheric neutrino oscillation analysis with subleading effects in Super-Kamiokande I, II and III”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 1 9 名、各研究機関毎のアルファベット順) Phys.Rev. D81 (2010) 092004 (査読有)
5. “Observation of geo-neutrinos”, Y.Koshio (計 8 9 名、アルファベット順), Phys.Lett.B687 (2010) 299 (査読有)
6. “Search for astrophysical neutrino point sources at Super-Kamiokande”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 1 9 名、各研究機関毎のアルファベット順) Astrophys.J. 704 (2009) 503-512 (査読有)
7. “Search for Neutrinos from GRB 080319B at Super-Kamiokande”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 1 9 名、各研究機関毎のアルファベット順) Astrophys.J. 697 (2009) 730-734 (査読有)
8. “First study of Neutron Tagging with a water Cherenkov detector”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 3 0 名、各研究機関毎のアルファベット順) Astropart.Phys.31(2009) 320-328 (査読有)
9. “Study of TeV Neutrinos with upward showering muons in Super-Kamiokande”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 3 6 名、各研究機関毎のアルファベット順), Astropart.Phys. 29 (2008) 42-54 (査読有)
10. “Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-II”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 4 5 名、各研究機関毎のアルファベット順) Phys.Rev. D78 (2008) 032002 (査読有)
11. “Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande”, M.R.Vagins, Y.Koshio, (計 1 4 3 名、各研究機関毎のアルファベット順) Astrophys.J. 669 (2007) 519-524 (査読有)
12. “Antineutrino Spectroscopy with Large Water Cerenkov Detctors”, J.F.Beacom and M.R.Vagins, Phys.Rev.Lett. 93 (2004) 171101 (査読有)

**【多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究 (A04)】**

研究代表者：神田展行 / 研究分担者：田越秀行、高橋弘毅、大原謙一、伊藤洋介、端山和夫

1. “The cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves”, Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi, Yuta Okada, Nobuyuki Kanda, and Hiroataka Takahashi, Phys Rev D (2011) accepted (査読有)
2. “First observational upper limit on gravitational wave backgrounds at 0.2 Hz with a torsion-bar antenna”, Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hiroataka Takahashi, Kenshi Okada, Nobuyuki Matsumoto, Wataru Kokuyama, Nobuyuki Kanda, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono, Phys Rev Letter 106, 161101 (2011) (査読有)
3. “Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals II – the Alart System of Gravitational Wave Search –”, K. Oohara, J. B. Camp, Y. Hiranuma, A. Stroerer and H. Takahashi, Proc. of the Twenty-first Workshop of General Relativity and Gravitation in Japan (2011), in press.
4. “Prospects for true calorimetry on Kerr black holes in core-collapse supernovae and mergers”, Maurice H.P.M. van Putten, Nobuyuki Kanda, Hideyuki Tagoshi, Daisuke Tatsumi, Fujimoto Masa-Katsu and Massimo Della Valle, Phys Rev D 83, 044046 (2011) (査読有)
5. “Secondarily-induced gravitational wave background in modified gravity”, Masaaki Morita, Hiroataka Takahashi, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 229, 012054 (2010). (査読有)
6. “DECIGO and DECIGO pathfinder”, Masaki Ando, Nobuyuki Kanda(10 番目), Akito Araya(16 番目), Kazuhiro Hayama(30 番目), Yousuke Itoh(46 番目), Kenichi Oohara(95 番目), Hideyuki Tagoshi(111 番目), Hiroataka Takahashi(118 番目) et al (計 140 名), Class. Quantum Grav. 27 084010 (2010) (査読有)
7. “Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals”, Yuta Hiranuma, Makoto Saito, Masamoto Saito, Ken-ichi Oohara, Hiroataka Takahashi, Alexander Stroerer, L. Blackburn and Jordan B. Camp, Proc. of the Twentieth Workshop of General Relativity and Gravitation in Japan (2010), pp.164-167.
8. “Detecting gravitational waves from inspiraling binaries with a network of geographically separated detectors: Coherent versus coincident strategies”, Himan Mukhopadhyay, Hideyuki Tagoshi, Sanjeev Dhurandhar, and Nobuyuki Kanda, Phys Rev D 80, 123019 (2009) (査読有)
9. “An Efficient Numerical Method for Computing Gravitational Waves Induced by a Particle Moving on Eccentric Inclined Orbits around a Kerr Black Hole”, Ryuichi Fujita, Wataru Hikida and Hideyuki Tagoshi, Prog. Theor. Phys. 121, 843-874 (2009) (査読有)

10. “Template banks to search for compact binaries with spinning components in gravitational wave data”, Chris Van Den Broeck, Duncan A. Brown, Thomas Cokelaer, Ian Harry, Gareth Jones, B.S. Sathyaprakash, Hideyuki Tagoshi, Hiroataka Takahashi, Phys. Rev. D 80, 024009 (2009) (査読有)
11. “Search of S3 LIGO data for gravitational wave signals from spinning black hole and neutron star binary inspirals”, B. Abbott et al. , H.Takahashi(362 番目), (The LIGO Scientific Collaboration) (計 429 名), Physical Review D, Vol. 78 042002 (2008). (査読有)
12. “Search for continuous gravitational waves from PSR J0835-4510 using CLIO data” Tomomi Akutsu, Masaki Ando, Tomiyoshi Haruyama, Nobuyuki Kanda, Kazuaki Kuroda, Sinji Miyoki, Masatake Ohashi, Yoshio Saito, Nobuaki Sato, Takakazu Shintomi, Toshikazu Suzuki, Hideyuki Tagoshi, Hiroataka Takahashi, Daisuke Tatsumi , Souichi Telada, Takayuki Tomaru, Takashi Uchiyama, Akira Yamamoto and Kazuhiro Yamamoto, Class. Quantum Grav. 25 (2008) 184013 (10pp) (査読有)

**【重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究 (A05)】**

研究代表者：田中貴浩 / 研究分担者：中村卓史、山田章一、瀬戸直樹、井岡邦仁

1. “Stability of Schwarzschild-like solutions in  $f(R,G)$  gravity models.”, Antonio De Felice, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Phys.Rev.D83:104035,2011 (査読有)
2. “Probing the size of extra dimension with gravitational wave astronomy.”, Kent Yagi , Norihiro Tanahashi, Takahiro Tanaka, Published in Phys.Rev.D83:084036,2011 (査読有)
3. “IR divergence does not affect the gauge-invariant curvature perturbation.”, Yuko Urakawa, Takahiro Tanaka, Phys.Rev.D82:121301,2010. (査読有)
4. “DECIGO/BBO as a probe to constrain alternative theories of gravity.”, Kent Yagi, Takahiro Tanaka, Prog. Theor. Phys. 123,1069-1078,2010 (査読有)
5. “Constraining alternative theories of gravity by gravitational waves from precessing eccentric compact binaries with LISA.”, Kent Yagi, Takahiro Tanaka, Phys.Rev.D81:064008,2010, Erratum-ibid.D81:109902,2010. (査読有)
6. “Inevitable ghost and the degrees of freedom in  $f(R,G)$  gravity.”, Antonio De Felice, Takahiro Tanaka, Prog. Theor. Phys. 124:503-515,2010. (査読有)
7. “Use of delta N formalism - Difficulties in generating large local-type non-Gaussianity during inflation -.”, Takahiro Tanaka, Teruaki Suyama, Shuichiro Yokoyama, Class.Quant.Grav.27:124003,2010. (査読有)
8. “Evolution of non-thermal emission from shell associated with AGN jets. ”, Hiroataka Ito, Motoki Kino, Nozomu Kawakatu, Shoichi Yamada, Astrophys.J.730, 120,2011.(査読有)
9. “Jet propagations, breakouts and photospheric emissions in collapsing massive progenitors of long duration gamma ray bursts.”, Hiroki Nagakura, Hiroataka Ito, Kenta Kiuchi, Shoichi Yamada, Astrophys.J.731, 80, 2011. (査読有)
10. “Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries.”, Kent Yagi, Naoki Seto, Phys. Rev. D83: 044011, 2011. (査読有)
11. “Relativistic Astrophysics with Resonant Multiple Inspirals.”, Naoki Seto, Takayuki Muto, Phys.Rev.D81:103004, 2010. (査読有)
12. “Is the PAMELA anomaly caused by supernova explosions near the Earth?”, Yutaka Fujita, Kazunori Kohri, Ryo Yamazaki, Kunihito Ioka, Phys. Rev. D80, 063003, 2009 (査読有)

**(3) 各計画研究の連携研究者**

**【天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築 (A02)】**

1. “A massive star origin for an unusual helium-rich supernova in an elliptical galaxy”, Kawabata, K. S., Maeda, K., Nomoto, K., Taubenberger, S., Tanaka, M., Deng, J., Pian, E., Hattori, T. and Itagaki, K., Nature, 465, 326-328 (2010) (査読有)

**【超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究 (A03)】**

1. “Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A”, M.Nakahata (計 2 3 名、各研究機関毎のアルファベット順) Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1490-1493 (査読有)

# 重力波天体の多様な観測による 宇宙物理学の新展開

2012年5月16日

領域代表  
京都大学大学院理学研究科  
中村卓史

1

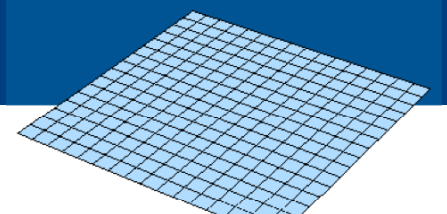
## 重力波とは何か？

- ➡ 一般相対論によると物体は周りの時間と空間(時空)を歪める。
- ➡ その物体が **加速度運動** をすると時空の歪みが光速で波として伝わる
- ➡ これが **重力波** である。

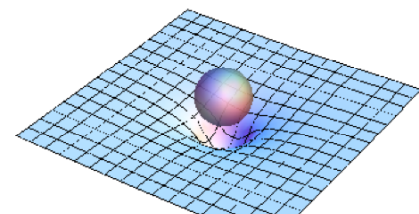
まだ直接検出はされていない！！

**何故？** 重力は最も弱い力(陽子間の重力/電気力= $10^{-36}$ )  
⇒発生しにくい。検出も困難

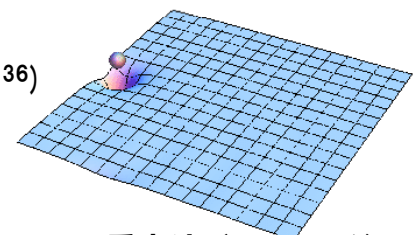
**しかし** 重力波は**2016年頃**に  
ほぼ**確実に**直接観測される



平坦な時空



歪んだ時空



重力波(イメージ)

2

# 何故確実か？ 解答①:大型レーザー干渉計が建設・改造中

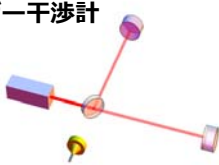
LIGO: Hanford, WA (米国)



LIGO: Livingston, LA (米国)



レーザー干渉計



VIRGO (仏伊)



GEO(英独)



# 何故確実か？ 解答②:重力波検出の特徴からイベント数予言が可能

**2016年を目途に10倍程度感度改善  
最低年間10イベント程度が期待!**

## 1. 感度の3乗でイベントが増加

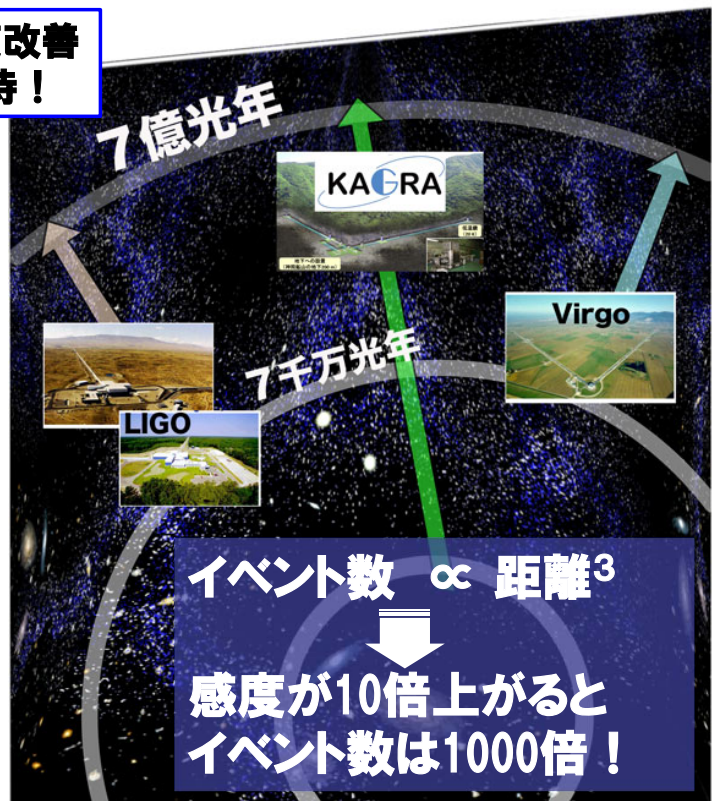
重力波検出器の感度  
 $\propto$  観測可能な距離

イベント数  $\propto$  観測可能な体積  
 $\propto$  距離<sup>3</sup>  $\propto$  感度<sup>3</sup>

## 2. 重力波の遠方への伝搬

重力相互作用は弱い故、  
重力波は一旦発生すると  
物質を透過し、遠方まで届く

短所が長所

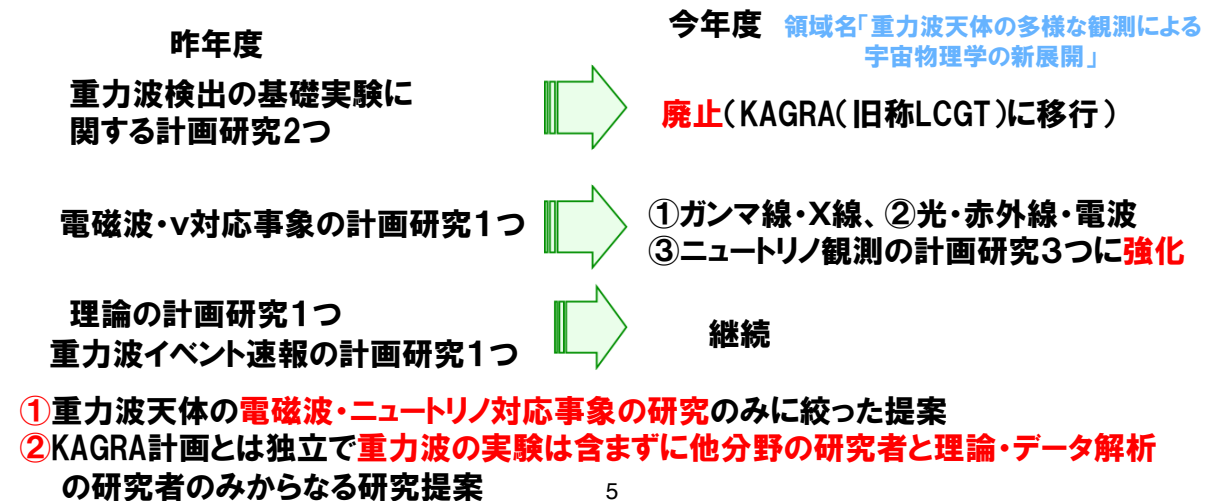


領域代表者：中村 卓史 (京都大学・理学(系) 研究科(研究院)・教授)

### 昨年度領域名「天体からの重力波検出で開く物理学のフロンティア」

(審査結果の所見)

本研究領域は、我が国が独自の低温化技術を利用した重力波検出器 LCGT による高度重力波観測と電磁波やニュートリノ観測ネットワーク及び重力波天文学の理論研究を結び付けた提案で、**どちらも研究テーマとして重要**である。重力波研究の国内のリーダーが**重力波天文学を取りまとめてきた実績を基礎に、他分野の研究者を取り込んで研究推進を行うための適切な体制が提案されている**。しかし、事業総額が 100 億円を超える、最先端研究基盤事業である「大型低温重力波望遠鏡の整備」事業は、まさに始まったばかりであり、**まずはその事業に専念すべきである。提案は LCGT 計画の補足もしくはスピードアップが目的の感があり、新学術領域研究の趣旨に照らしてふさわしい領域提案であるかやや疑問が残る。若手の育成や研究成果発信の方法についてはもっと具体的工夫があるとよいつの意見があった。**



## 領域の目的と必要性

**2016年 重力波イベントが見つかり始める**

**重力波天体の方向は、重力波のみでは角度にして**数度**の範囲でしかわからない**  
 (この中には、星は約10万個、銀河は約1000個ある。)

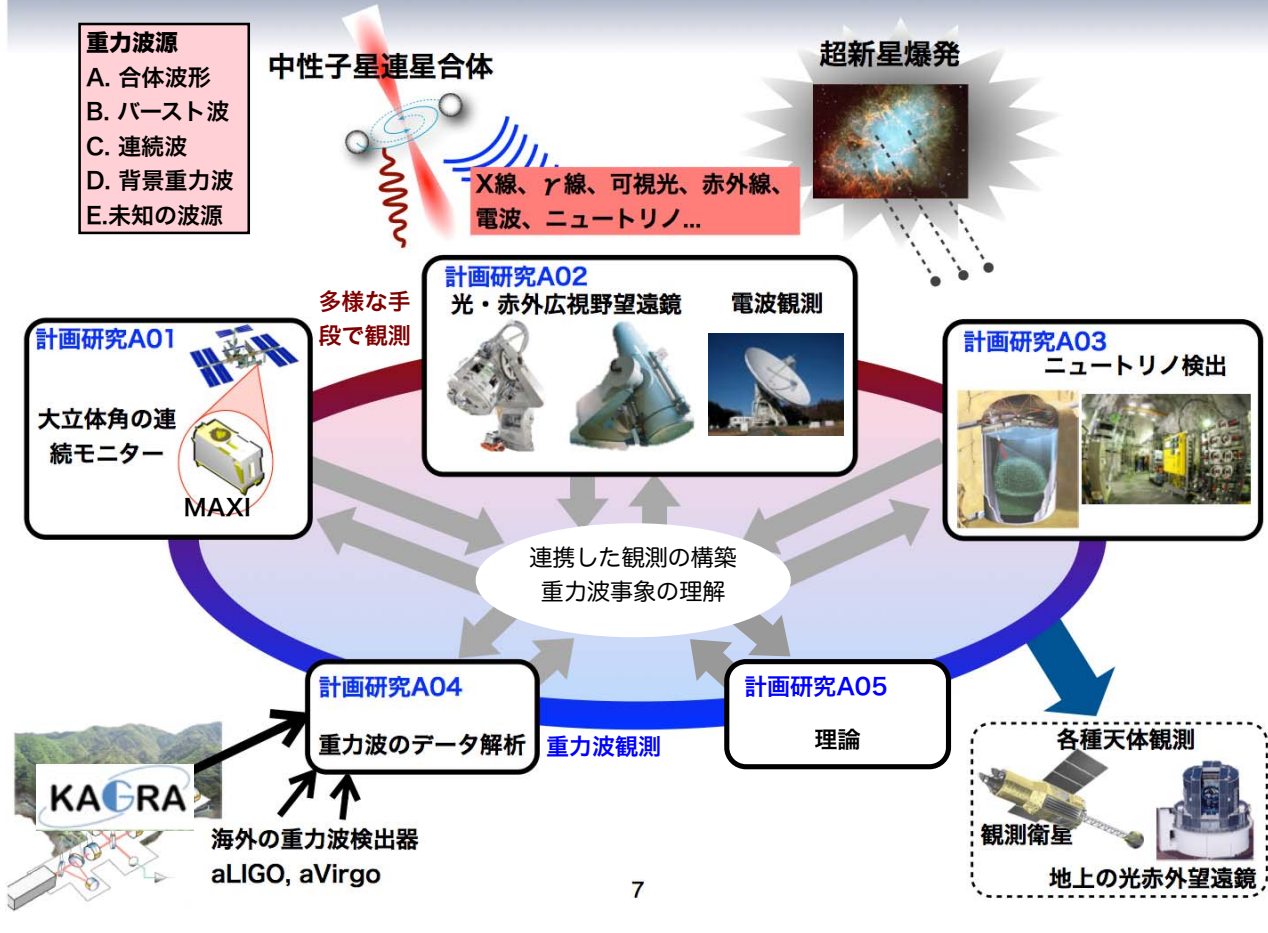
**他の観測手段で、どの星、またはどの銀河が重力波源か**決める必要**がある。**

**重力波強い⇒加速度大⇒密度が高い⇒温度が高い⇒ニュートリノ・電磁波が放出される**

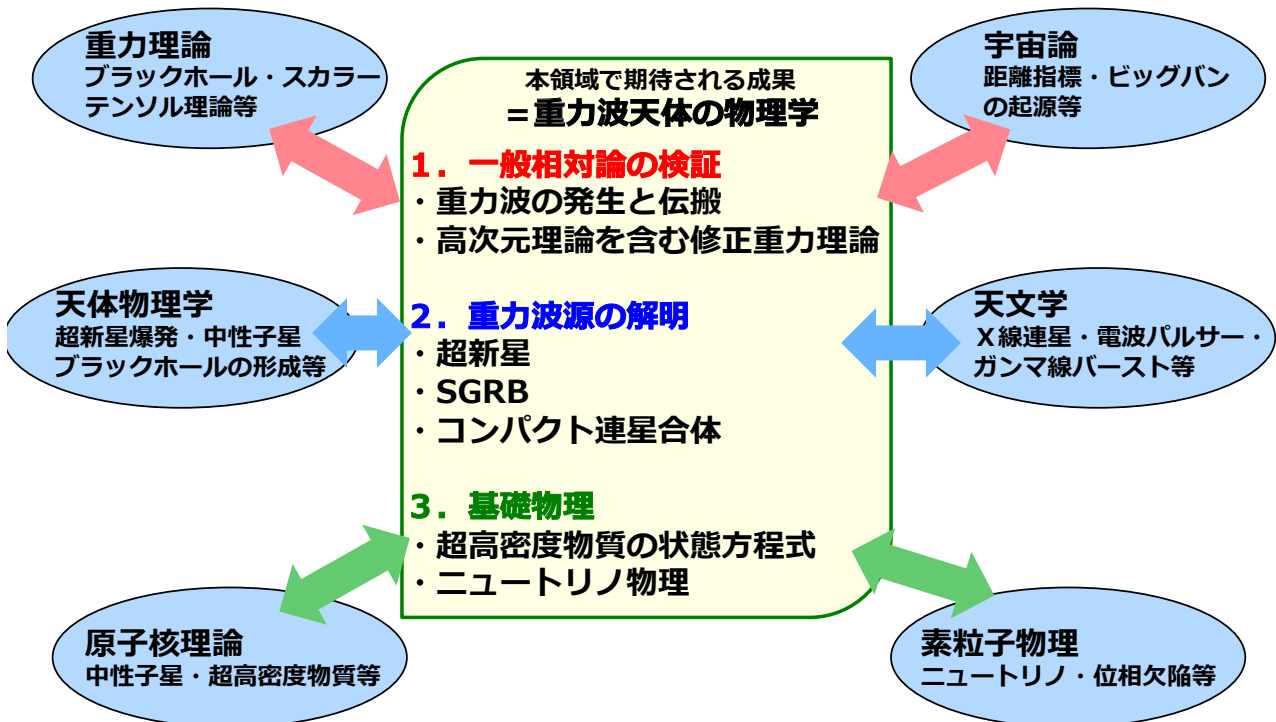


**両者は相対論の検証等の**基礎物理学の進展**に必要**  
**両者を用いて初めて**宇宙物理学の新展開**が可能となる**

本領域は重力波検出とは**相補的な研究** **予算・組織はKAGRA本体とは独立**



## 期待される成果と領域の広がり



### 具体例のシミュレーション

#### ①連星中性子星の合体時、領域のシステマティックな対応方針

Step 1 計画研究A04が重力波天体の位置を**数度の誤差**で速報



Step 2 計画研究A01がガンマ線・X線観測をして位置を**角度0.1度程度**で決定



Step 3 計画研究A02が光・赤外観測をして位置を**角度1秒程度**で決定  
計画研究A03はν放出のcheck



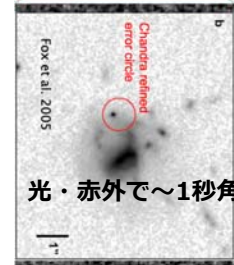
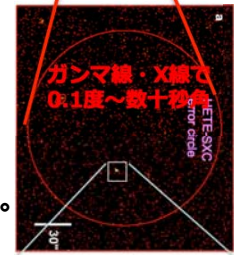
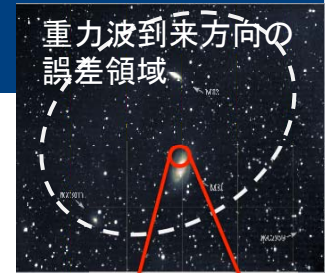
Step 4 計画研究A02が母銀河を定め、その距離を決定。  
重力波から得られる距離と**比較する**。距離が同じなら相対論の検証。  
もし違えば大発見



Step 5 計画研究A01、A02が電波も含めて電磁波での追観測をして  
**ガンマ線バーストの性質**を調べる。



Step 6 理論を含む領域全体  
**100年前のアインシュタインの予言は正しかったか？**



### 具体例のシミュレーション

#### ②距離3千光年で超新星が起こった時の領域のシステマティック対応法

Step 1 計画研究A03がニュートリノで重力波天体の位置を**数度の誤差**で速報



Step 2 計画研究A04は重力波放出をcheck  
yes ⇒ **超新星が非球対称爆発**  
no ⇒ **スタンダード理論の反例**。



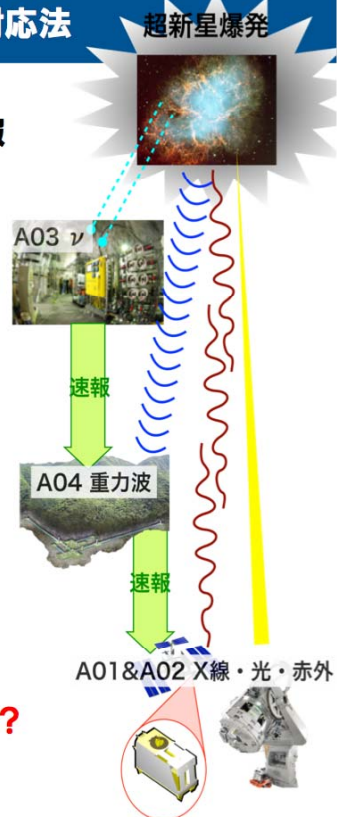
Step 3 計画研究A01,A02がX線・光・赤外観測をして  
**超新星爆発の性質**を調べる



Step 4 計画研究A03とA04は**ニュートリノと重力波**  
**放射時間の相関解析**



Step 5 理論を含む領域全体  
**我々人間・地球の起源となる物質は如何にして生まれたか？**



# 全体スケジュール



	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>A01</b> 重力波天体からのX線・γ線放射の探索	WF-MAXI: 試作品開発 MAXI、すざく、Swift等の衛星を用いて、GRB、中性子連星、ブラックホールの研究		WF-MAXI: 搭載品開発 観測装置・ソフトウェア、観測計画に反映		重力波観測フォローアップ	
<b>A02</b> 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索	岡山赤外カメラ自動観測化 木曾シュミット望遠鏡整備	GRBフォローアップシステムの整備、京大面分光装置開発	中国に広視野望遠鏡、木曾シュミット6度カメライnstall	重力波観測フォローアップの試験観測	重力波観測フォローアップ開始	
<b>A03</b> 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究	200t R&D データ収集系アップグレード、超新星ニュートリノ検出器の計画		他の観測との正確な時刻同期	観測 遠い超新星についてもより良い感度をもつためのオンライン計算の継続的な改良		
<b>A04</b> 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究	探索解析システムの開発 GRID環境の構築		本機導入 解析ソフトウェア実装	観測データ転送、 重力波探索	パイプライン解析の調整、 速報システム整備	
<b>A05</b> 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究	幅広い理論研究の連携の強化。最適な同時観測、データ解析の体制の改善に向けた理論的知見の発展と整理。重力波波形予測の整備。		重力波観測とその他のブロープによる同時観測に向けた更なる理論的研究の推進。幅広い理論研究の連携の強化。			
<b>KAGRA計画</b>	建設			常温観測 <b>iKAGRA</b>	低温化へ bKAGRA	
海外の重力波検出実験 advanced LIGO advanced Virgo	インストール		装置調整		観測開始	

## 領域のセールスポイント:

1. **重力波、ニュートリノ、ガンマ線、X線、光・赤外線、電波を使って**

**Multi Messenger Astrophysicsを単一のグループで実行する。**

2. **A01 ガンマ線バーストの研究等の世界的な実績**

3. **A02 日本と言う経度の有利さと、世界各地の我が国の望遠鏡群**

4. **A03 Gdで反ニュートリノを確定できる世界初の超新星ニュートリノ検出器**

5. **A04 TAMA300 以来の重力波データ解析の10年以上の研究実績**

6. **A05 ポストニュートン重力波形、数値相対論、超新星爆発理論等で世界的な研究実績**



## 人材育成と国民への成果の発信

### 重力波天体の分野は21世紀に大発展する重要な領域

- ① 我が国に必要な**人材を育成**する
  - ・若手向け分野横断的な勉強会を定期開催。
  - ・研究員の雇用
- ② 研究成果を**国民に発信**する
  - ・ホームページの充実
  - ・一般科学雑誌への執筆
  - ・中学生・高校生・大学生・市民向け講演会の開催
  - ・データ解析への市民参加の検討

13

## 結 論

重力波観測の時代の幕開けは**2016年**に迫っている。

**ガンマ線、X線、光・赤外線、電波、ニュートリノによる同時観測は不可欠**

我が国の持てる力を結集して**フォローアップ観測体制を早急に構築**する

**100年前のアインシュタインの予言は正しかったか？  
我々人間・地球の起源となる物質は如何にして生まれたか？  
等の疑問に答える。**

**宇宙論、素粒子物理学、原子核物理学等の基礎物理の進展**

**全く新しい宇宙の窓が開く！！ 新しい科学の世界が見える！！**

14

各計画研究毎の説明・補足資料

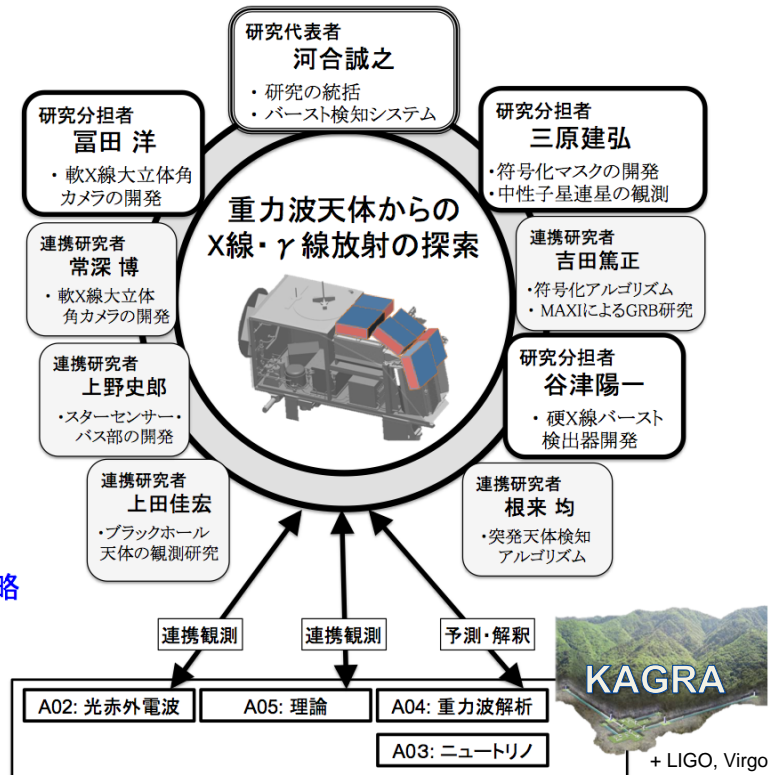
計画研究 A01 : 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

**広天域突発X線監視装置 (WF-MAXI)を開発**

- 突発天体が最も目立って輝くX線・γ線領域を監視
- MAXI, ASTRO-H, TSUBAMEなどの技術資産、経験を継承して迅速に開発

**重力波源候補天体の観測研究**

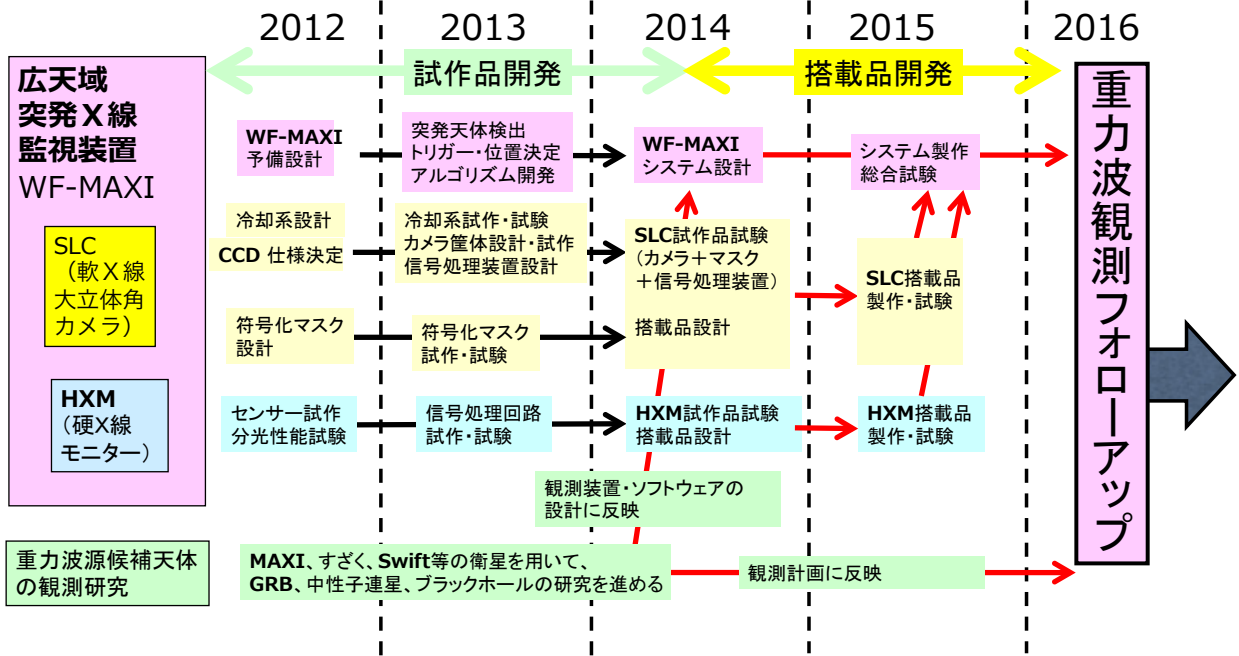
- ガンマ線バースト、超新星、ブラックホール連星などの重力波源候補天体を研究
- 観測装置の設計に反映
- 重力波フォローアップ観測戦略の基礎



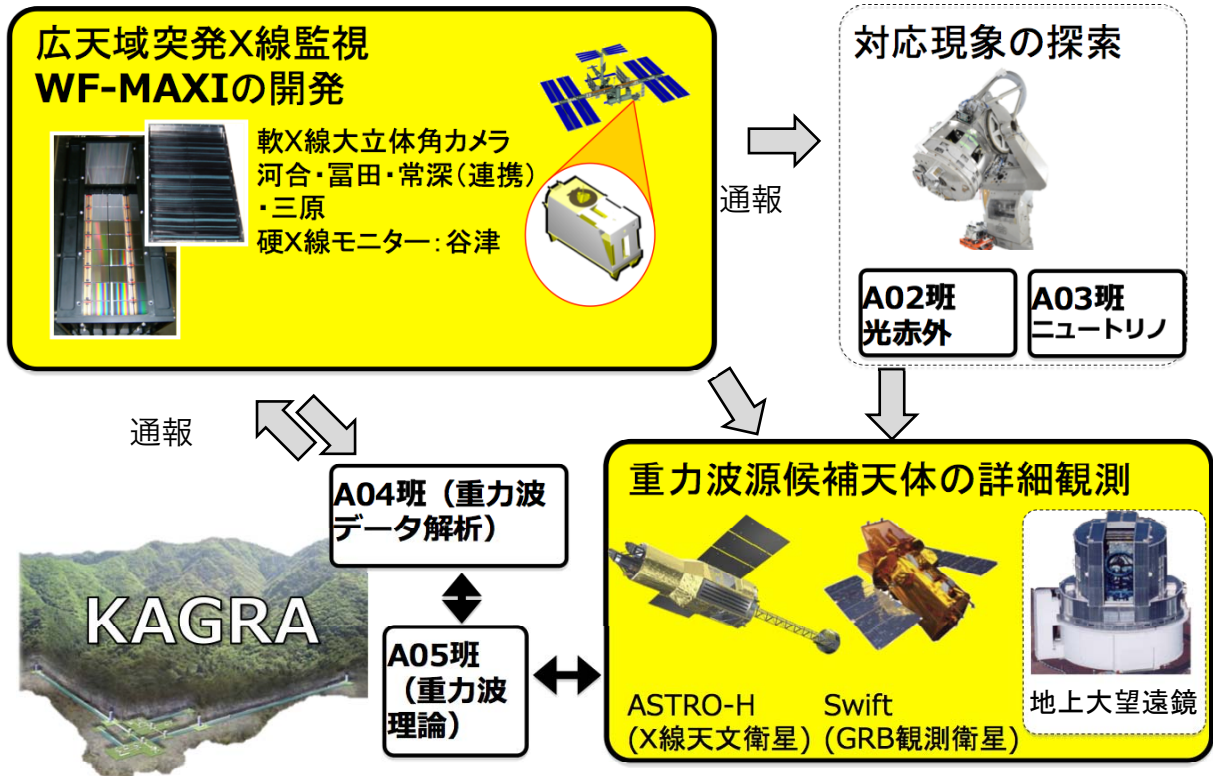
# 計画研究 A01 : 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

## 進行スケジュール

- 2016頃 KAGRA, aLIGO, aVirgoの稼働時に観測開始を目指す



# 計画研究 A01 : 重力波天体からのX線・γ線放射の探索



# 計画研究 A02 : 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

突発激変天体の光赤外・電波観測ネットワークを構築し、重力波源を特定する！

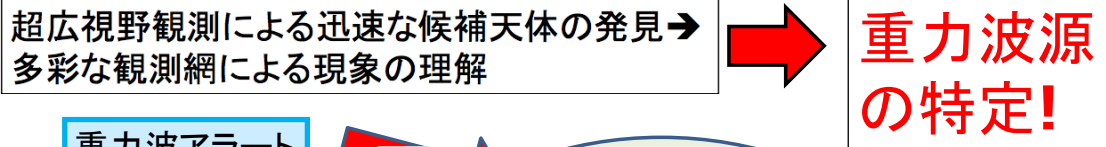
- 光赤外線広視野観測システムの構築
- 光赤外線の全地球的観測網の整備
- 電波観測による激変天体のフォローアップ体制の整備

**KAGRA**および国際重力波観測システムとの連携

- 重力波アラートに対応した即時観測システムの開発
- より広く、から、より詳しくへ

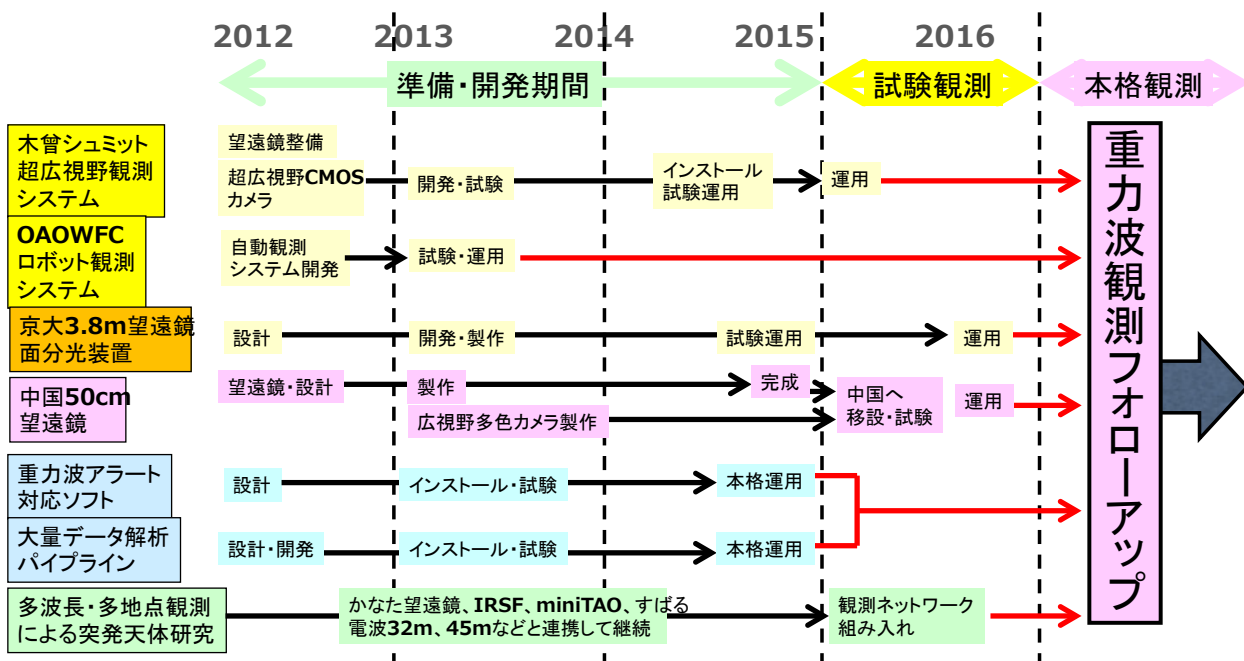
広視野撮像 → 多波長観測(光、赤外、電波) → 多モード観測(分光、偏光)

# 計画研究 A02 : 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索



## 計画研究 A02 : 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

進行スケジュール 2015年iKAGRA観測までに観測ネットワークの基礎を構築



21

## 計画研究 A03 : 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究

### 超新星ニュートリノと重力波の同時観測の特長

- 重力崩壊の瞬間をつぶさに捉える(t=0の瞬間をどちらも観測)
- ニュートリノも重力波も超新星から地球に届くまで、まったく信号の減衰がない。(ダストなどの物質も信号に影響しない。)
- 銀河中心も含め、銀河全体を観測できる。

### 超新星ニュートリノの情報を最大限にするにはどうするか？

- 超近傍超新星の感度をあげる(スーパーカミオカンデではデータ読み出しの限界で十分なデータを取ることができない。)
- 中性子を同時計測することにより、ニュートリノの種類を同定する。

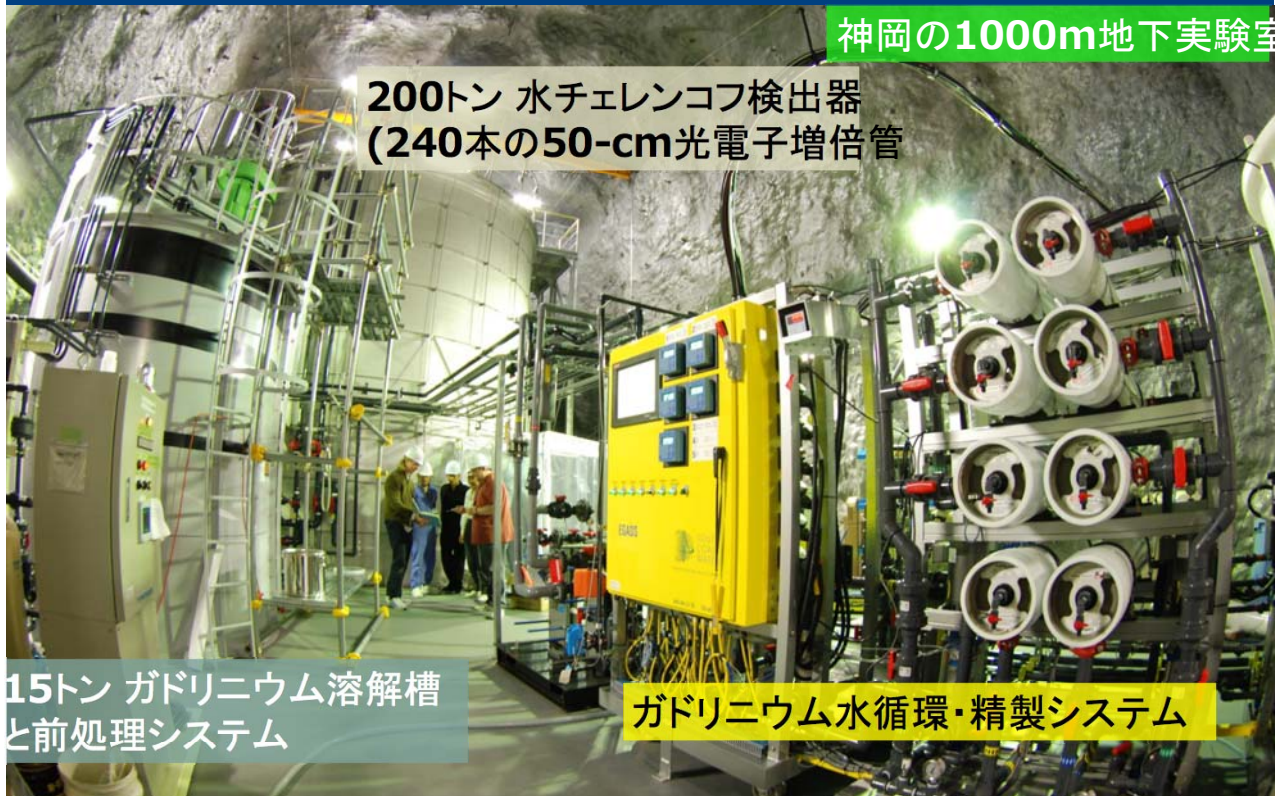
既存の開発研究用実験装置を世界で最も高性能の超新星ニュートリノ観測装置に作り変え、以下の信号を期待。

3,690  $\nu$  事象 @ 3,000光年

369,000  $\nu$  事象 @ 300光年

22

## EGADS開発研究実験施設 @ 神岡



神岡の1000m地下実験室

200トン 水チェレンコフ検出器  
(240本の50-cm光電子増倍管)15トン ガドリニウム溶解槽  
と前処理システム

ガドリニウム水循環・精製システム

## 計画研究 A04 : 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究

### KAGRAおよび国際重力波観測網データから天体イベントを抽出、速報！

- 遅延時間の少ないデータ転送、処理の開発
- 突発的な重力波イベントの探索：  
連星合体、超新星バースト、ブラックホール準固有振動など

### A05と協力:解析手法開発や重力波源のサイエンス

### 重力波観測速報システムの構築

- 重力波観測とほかの多様な天体観測との連携
- 天体観測網とのイベントデータ交換、同時イベントの探索

### A01, A02, A03 と協力：同時性、フォローアップ観測により 重力波源の正体に迫る

### 日本の重力波データ解析の拠点形成

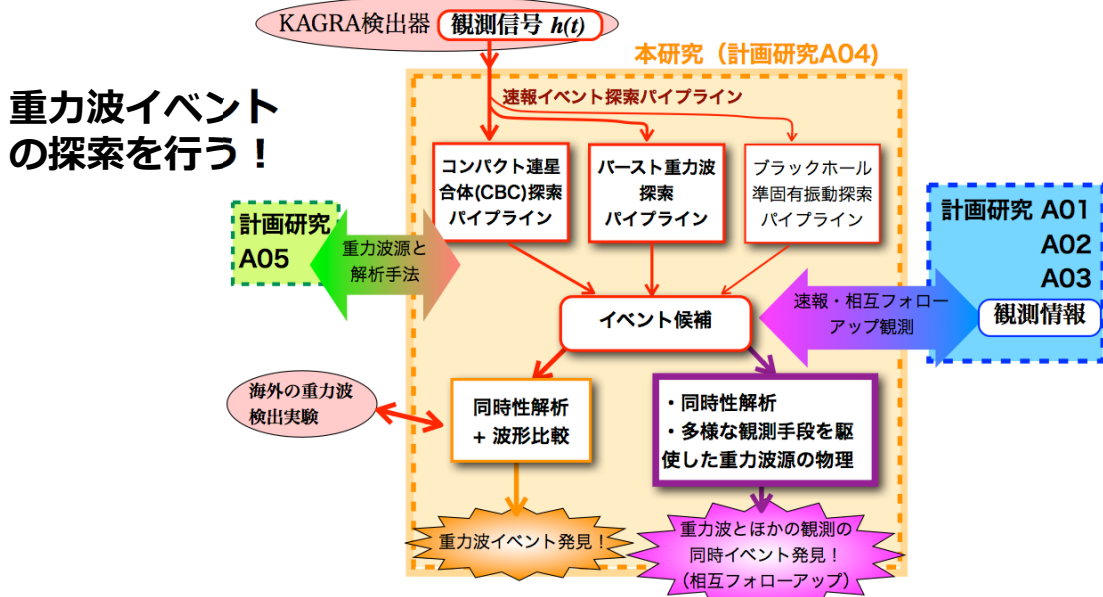
- KAGRAや国際観測網データの解析

### 速報性が要求されるイベントに特化、 多様な観測に連携する成果を目指す！

- 人材(若手)育成

# 計画研究 A04 : 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究

- ・ 重力波データの解析
- ・ 多様な観測との連携
- ・ 人材育成

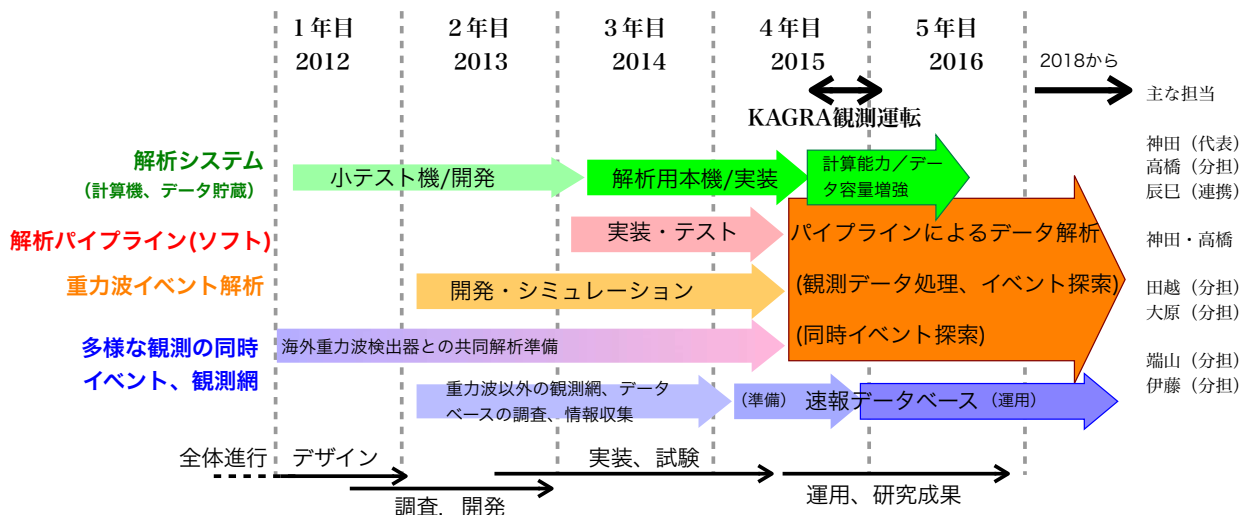


参考 : KAGRAの主データ保管と主解析システムは、本研究計画は含まない。  
本計画は、KAGRAを含む国際重力波観測網のなかで、速報性のある解析、観測網との連携を行う。

# 計画研究 A04 : 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究

## 進行スケジュール

- ・ 2015 iKAGRA 観測
  - ・ 2016頃 aLIGO, aVirgoの稼働
- これらが進行の一里塚になる



## 計画研究A05：重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

### 理論の3本柱

- **電磁波での同時観測可能な波源の探究**  
強度やスペクトル、頻度の予想  
**同時観測可能な観測手段の提案**  
ガンマ線バーストなどの個々の具体的天体現象を想定した際の重力波同時観測の意義
- **データ解析との連携**  
重力波テンプレートの推定  
**天体物理的効果**  
**新物理的な効果/解析の手法を含めたテンプレートバンク**  
**検出効率の最適化の提案とロバストさの確認**  
観測された重力波信号の物理的解釈  
**大規模シミュレーションとの比較**  
**電磁波での同時観測の解釈**
- **重力波関連研究全般**  
全ての宇宙物理研究は重力波物理の解明に通じる

27

## 計画研究A05：重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

### 研究グループ

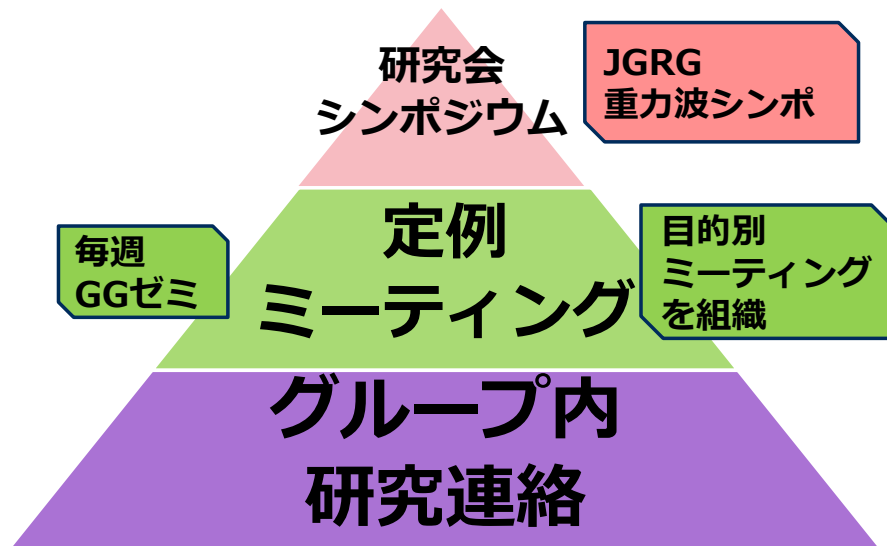
- **コンパクト連星合体、**  
数値相対論とポストニュートン  
潮汐力の影響、ejectaや磁場による電磁波放射の観測可能性
- **超新星爆発**  
シミュレーションによる波形の予測と現実的なテンプレートの作成  
観測された際の物理的情報の引き出し (核物質の物理)
- **データ解析との連携**  
ガンマ線バーストやSoft  $\gamma$ -ray repeater、マグネター  
同時観測のmain targetとして重要
- **パルサー、中性子星の振動**  
新しく生まれた中性子星、扁平度のある中性子星、r-mode  
(Cas-A)、質量降着するlow mass X-線連星からの連続重力波
- **重力波観測による基礎物理法則へのアプローチ**  
宇宙ひも、背景重力波、修正重力理論

28



## 計画研究A05：重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

### 研究の進め方



領域略称名：重力波天体

領域番号：2402

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成26年6月

領域代表者 (京都大学大学院・理学研究科・教授・中村卓史)

# 目 次

## 研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	2
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	4
3. 研究の進展状況	6
4. 若手研究者の育成に関する取組状況	9
5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	10
6. 総括班評価者による評価	11
7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	17
9. 今後の研究領域の推進方策	22
10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画	24

## 研究領域全体に係る事項

### 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

～目前に迫った重力波観測の時代に、他の観測との連携体制を構築し、新しい宇宙物理学を開く～

#### 1. 重力波は存在する！！

重力波はアインシュタインが一般相対性理論にもとづいて理論的にその存在を予言した。重力波とは光速で重力の潮汐力の効果が伝わる波である。観測的には連星中性子星である電波パルサーPSR1913+16の軌道周期(約28000秒)が1年間に76.94マイクロ秒短くなることが電波観測により確かめられたことにより重力波の存在が証明された。一般相対性理論によると、連星のように加速度運動している系は重力波を放出してエネルギーを失い、連星間の距離が短くなるとともに公転周期が短くなる。PSR1913+16の場合、一般相対性理論による理論値と観測値との差は実に僅か0.1%であった。1993年にハルスとテラーはこの業績によってノーベル物理学賞を受賞した。

#### 2. しかし、重力波の伝搬と振幅（時空の歪み）はまだ実験的に確かめられていない！！

PSR1913+16により重力波の生成が一般相対論の予言通りであることが確かめられはしたが、重力波が理論通りに宇宙空間を伝搬することは確かめられてはいない。すなわち、連星中性子星PSR1913+16から放出されているはずの約14000秒周期(=公転周期/2)の重力波による時空の歪みが直接検出された訳ではなく、波動としての位相の伝搬速度や振幅も確かめられていない。このことは一般相対性理論の検証の上で重要なポイントである。宇宙ニュートリノの観測を例にとると、地下実験で検出される太陽ニュートリノが太陽内部核反応の理論の予言値の半分しかないことがニュートリノ振動という大発見を導いた。重力波の場合も宇宙空間での伝搬が理論通りでなければ、ニュートリノ振動のように新しい物理学のフロンティアが現れ、その学術的な意味は測りしれない。一方、重力波が検出されれば、連星中性子星合体や超新星爆発などの破局的な天体現象や、ブラックホールが生成される現場の観測が可能になる。これは、今までの観測手法では深部を見ることができなかった強い重力場で一般相対性理論に支配された天体現象について、宇宙物理学の研究の新しい局面を開くと期待される。

#### 3. 本格的な重力波観測の時代の幕開けは目前！！

米国のLIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)と仏・伊連合によるVirgoのレーザー干渉計は距離約6000万光年での連星中性子星の合体からの重力波を検出可能なレベルに達したが、この感度では検出確率は300年に1回程度であり重力波の直接観測は期待できなかった。そこで、LIGOとVirgoは装置の改良を実施中で2015年から、改良型の感度向上と観測を繰り返し、検出可能な重力波の振幅を1桁下げることを目指している。そして、2019年(Virgoは2020年)には連星中性子星の合体からの重力波を年間10イベント程度の検出率で観測を開始する予定である。我が国では「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」は腕の長さ3kmのトンネルを神岡鉱山で2014年3月に掘削を終え、2015年12月には一旦常温で観測した後、2016年から低温鏡により感度高度化を進めて2017年から2018年を目途にLIGOやVirgoと同程度の感度に達する予定である。

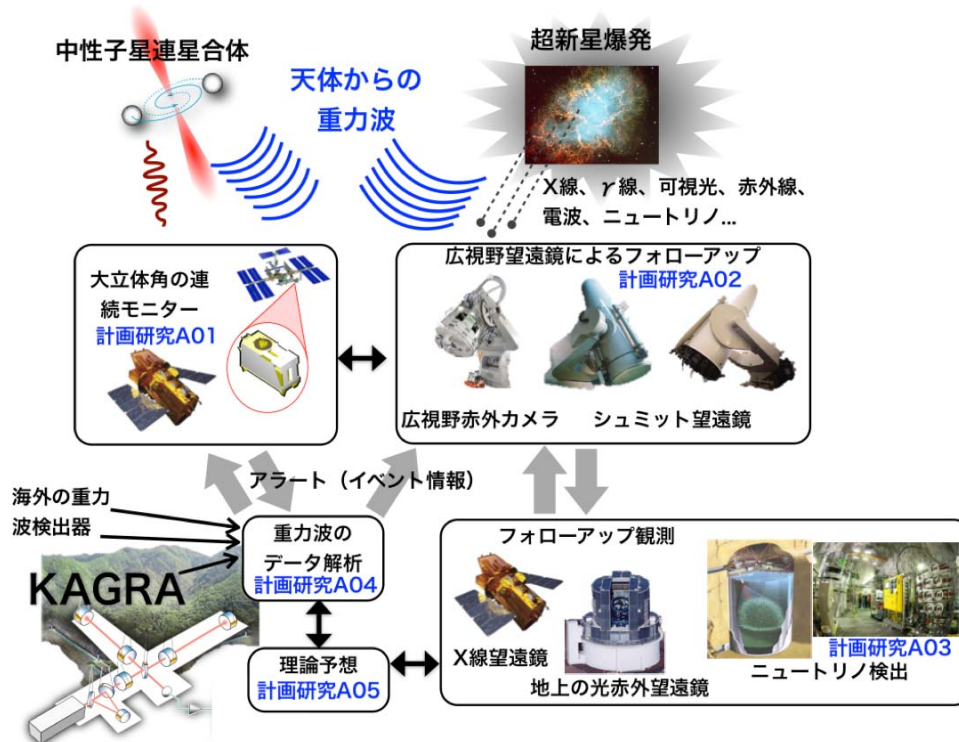
#### 4. 領域の構成は？

計画研究はA01-A05までの5つからなる。その内3つは電磁波とニュートリノの観測研究であり、後2つはデータ解析と理論の研究である。A01では、重力波天体のガンマ線・X線放射を観測するために①大立体角X線観測装置を開発するとともに②既存の観測衛星を用いて重力波源候補天体現象の観測研究を行う。A02では、A01とも密接に連携して重力波源の可視・赤外線・電波観測をするため①可視赤外線広視野観測システムの構築②全地球的観測網の整備③電波観測による重力波天体を含む激変天体の観測体制の整備を行う。A03では、

ペテルギウスからアンドロメダ銀河までで起きる超新星爆発に伴うニュートリノ事象に感度を持つ検出器の開発を行う。A04 はデータ解析で、理論が与えたテンプレートと観測データを高速で比較して重力波源と波形を突き止めることにより、到来方向の速報をA01 と A02 に出し追跡観測を促す。また、ガンマ線、X線、可視・赤外線、ニュートリノ観測との比較を可能にする重力波のデータ解析もする。A05 は重力波の源・波形の理論で、すでに候補となっている波源の詳しい研究以外にも全く新しい波源を考えるのも課題である。

### 5. 何が宇宙物理学の新展開となりそうか？

まず、最も早い場合には 2015 年にも重力波が観測されることが全く新しい局面である。次に、重力波源が何でどういう現象が起こっているのかを明らかにするには重力波以外の電磁波やニュートリノの観測データが欠かせない。すなわち、重力波の研究者が電磁波の天文学やニュートリノ天文学の研究者と密接な関係を持つことになり、領域として大きな広がり期待できるのが今までと比べて全く新しい。2つの例を挙げよう。連星中性子星の合体は継続時間の短いショートガンマ線バーストの候補でもある。しかし電磁波観測だけでは、その他の候補も含めて本当の起源が何かは、ほとんどわかっていないというのが現状である。重力波が発生した場所でショートガンマ線バーストが起こっているのが分かれば、ショートガンマ線バーストは連星中性子星の合体だと確認できるとともに、電磁波の時間変化と重力波の発生時間との比較からガンマ線バーストの理解が飛躍的に進む。もう一つの例は我々の銀河中で起こる超新星爆発である。もし発生すれば、重力波、電波からガンマ線に至るあらゆる電磁波帯、及びニュートリノの同時観測が期待でき、未だによくわかっていない超新星爆発のメカニズムを明らかに出来る可能性が高い。領域の構想を全体表示すると以下の図のようになる。



### 6. 重力波観測実験と本領域の関係

重力波観測実験は検出装置本体の建設が主である。一方、重力波天体の重力波以外の多様な観測並びに理論研究を行うのがこの領域の主な課題である。本研究はそのための多様な観測装置の開発や運用を進める。また重力波の観測データ取得そのものは KAGRA 計画で実行されるが、本領域で必要とされるイベント速報データ解析は KAGRA 計画の範囲外である。つまり、本領域は学問的には KAGRA と密接な関係を持つが予算的には KAGRA とは完全に独立な研究組織である。

## 2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

項目毎の公募研究も含めた研究組織は以下のようになっている

### X00 総括班

**研究代表者:** 中村 卓史 京都大学大学院理学研究科・教授・宇宙物理学・全体の総括  
**研究分担者:** 神田 展行 大阪市立大学大学院理学研究科・教授・重力波実験物理学・事務局担当・計画研究 A04 代表者  
 河合 誠之 東京工業大学大学院理工学研究科・教授・宇宙物理学・計画研究 A01 代表者  
 吉田 道利 広島大学宇宙科学センター・教授・光学赤外線天文学・計画研究 A02 代表者  
 ヴァギンズ マーク 東京大学数物連携宇宙研究機構・特任教授・天体素粒子物理・計画研究 A03 代表者  
 田中 貴浩 京都大学大学院理学研究科・教授・宇宙物理学・計画研究 A05 代表者  
**連携研究者:** 梶田 隆章 東京大学宇宙線研究所・教授・宇宙線・評価担当  
 佐々木 節 京都大学基礎物理学研究所・教授・相対論・宇宙論・評価担当  
 坪野 公夫 東京大学大学院理学系研究科・名誉教授・実験相対論・評価担当  
 伊藤 好孝 名古屋大学太陽地球環境研究所・教授・宇宙線物理学・評価担当  
 渡部 潤一 国立天文台天文情報センター・教授・惑星科学・光赤外線天文学・評価担当、広報

### A01 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

**研究代表者:** 河合 誠之 東京工業大学理工学研究科・教授・全体の統括、広視野突発天体観測システムの開発・運用  
**研究分担者:** 谷津 陽一 東京工業大学・助教・X線・ガンマ線天文学実験・衛星用硬X線大立体角カメラの開発  
 富田 洋 宇宙科学研究所・主任開発員・X線天文学・軟X線大立体角カメラの開発  
 三原 建弘 理化学研究所・専任研究員・X線天文学・符号化マスク  
 坂本 貴紀 青山学院大学理工学部・助教・宇宙物理学・検出器の応答関数、MAXIを用いたGRBの研究  
**連携研究者:** 常深 博 大阪大学理学研究科・教授・X線天文学・軟X線大立体角カメラの開発  
 上野 史郎 宇宙航空研究開発機構・主任開発員・宇宙物理学・スターセンサー、バス部  
 吉田 篤正 青山学院大学理工学部・教授・宇宙物理学・ガンマ線分光器  
 根来 均 日本大学理工学部・教授・宇宙物理学・データ処理  
 上田 佳宏 京都大学理学研究科・准教授・宇宙物理学・ブラックホール天体の観測研究  
 海老沢 研 宇宙航空研究開発機構・教授・宇宙物理学・観測アーカイブ  
 幸村 孝由 東京理科大学理工学部・准教授・宇宙物理学・軟X線大立体角カメラの開発  
**公募研究:** 米徳 大輔 金沢大学理学部・准教授・重力波と電磁波の同時検出を目指した全天監視型X線撮像検出器

### A02 天体重力波の光赤外・電波対応事象探索ネットワークの構築

**研究代表者:** 吉田 道利 広島大宇宙科学センター・教授・光赤外天文学・計画推進、システム構築  
 太田 耕司 京都大理学研究科・教授・銀河天文学・中口径光学望遠鏡による分光観測  
 柳澤 顕史 国立天文台岡山・助教・赤外線天文学・突発天体の広視野赤外線観測  
 本原顕太郎 東京大理学研究科・准教授・光赤外天文学・広視野観測装置の開発と運用  
**連携研究者:** 土居 守 東京大理学研究科・教授・光赤外天文学・木曾観測所による広視野変光天体観  
 川端 弘治 広島大宇宙科学センター・准教授・恒星物理学・突発天体の偏光分光観測  
 永山 貴宏 名古屋大理学研究科・特任助教・赤外線天文学・広視野赤外線観測  
 藤澤 健太 山口大時間学研究所・教授・電波天文学・重力波候補天体の電波観測  
**公募研究:** 酒向 重行 東京大理学研究科・助教・天文観測用高感度CMOSセンサの開発  
 田村 陽一 東京大理学研究科・助教・ミリ波サブミリ波観測技術によるγ線バースト初期残光の探索  
 阿部 文雄 名古屋大理学研究科・准教授・広視野望遠鏡を利用した重力波天体の光学観測  
 永山 貴宏 名古屋大理学研究科・助教・特殊減光フィルタを用いた近赤外線での明るい重力波源の観測  
 田中 雅臣 国立天文台・助教・超高頻度サーベイ観測による短時間突発天体の検出

### A03 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究

**研究代表者:** ヴァギンズ マーク 東京大学・特任教授・天体素粒子物理・研究の総括  
**研究分担者:** 小汐 由介 岡山大学・准教授・天体素粒子物理・データ取得  
**連携研究者:** 中畑 雅行 東京大学・教授・天体素粒子物理・テストタンク運転  
 作田 誠 岡山大学・教授・天体素粒子物理・中性子・ガンマ線評価  
 竹内 康雄 神戸大学・教授・素粒子物理学実験・放射線不純物測定  
 石野 宏和 岡山大学・准教授・天体素粒子物理・透過率測定  
 岸本 康宏 東京大学・准教授・天体素粒子物理・キャリブレーション

関谷 洋之 東京大学・助教・天体素粒子物理・純水循環装置  
 公募研究：石徹白晃治 東北大学・助教・K a m L A N Dによる近傍超新星爆発の観測  
 作田 誠 岡山大学・教授・ガドリニウムの熱中性子吸収反応でのガンマ線の相関測定

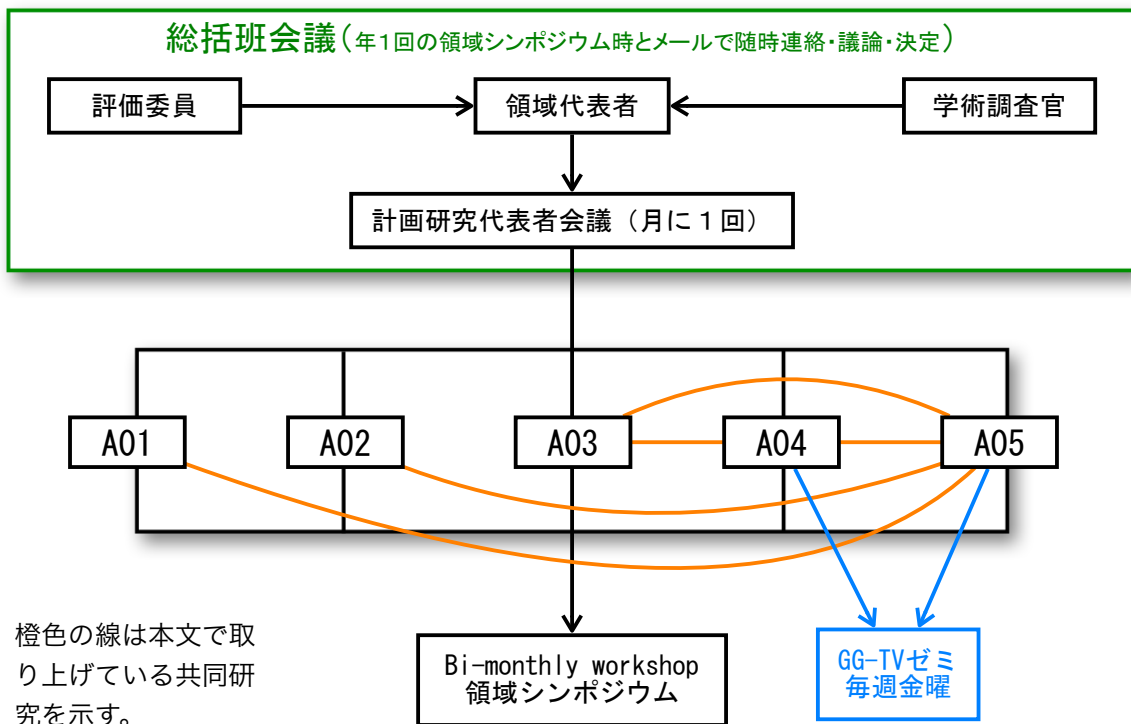
**A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究**

研究代表者：神田 展行 大阪市立大学理学研究科・教授・重力波実験物理学・計画推進・実験データ解析  
 研究分担者：田越 秀行 大阪大学理学研究科・助教・宇宙物理学・データ解析手法とコード開発  
 高橋 弘毅 長岡技術科学大学工学部・准教授・宇宙物理学・データ解析手法の開発  
 大原 謙一 新潟大学自然科学系・教授・宇宙物理学理論・新解析手法とその高速計算手法の開発  
 伊藤 洋介 東京大学理学系研究科・特任助教・重力波天文学・連続重力波データ解析手法  
 連携研究者：新谷 昌人 東京大学地震研究所・准教授・地球計測学・データへの地球物理学的解析応用  
 辰巳 大輔 国立天文台光赤外研究部・助教・重力波観測データ校正  
 公募研究：横山 順一 東京大学・ビッグバンセンター・教授・非ガウスノイズを取り入れた重力波データ解析方法の研究  
 廣林 茂樹 富山大学・工学部・教授・重力波に関する新知見を導き出す超高精度解析技術と高速計算組み込み技術  
 辰巳 大輔 国立天文台光赤外研究部・助教・低温干渉計型重力波検出器における突発性雑音低減

**A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究**

研究代表者：田中 貴浩 京都大学大学院理学研究科・教授・宇宙物理学・計画研究全般の組織化と宇宙論的重力波源の研究  
 研究分担者：中村 卓史 京都大学大学院理学研究科・教授・宇宙物理学・様々な重力波源の研究  
 山田 章一 早稲田大学先進理工学部・教授・宇宙物理学・超新星爆発の物理の研究  
 瀬戸 直樹 京都大学大学院理学研究科・助教・宇宙物理学・重力波源およびデータ解析法の研究  
 井岡 邦仁 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・准教授・重力波源と同時観測の理論的研究  
 連携研究者：川崎 雅裕 東京大学宇宙線研究所・教授・宇宙論・宇宙論的な重力波源の研究  
 横山 順一 東京大学・ビッグバンセンター・教授・宇宙論的な重力波源の研究  
 柴田 大 京都大学基礎物理学研究所・教授・宇宙物理学・数値相対論による重力波形の提供  
 固武 慶 福岡大学・准教授・宇宙物理学・超新星爆発の物理と波形の研究  
 公募研究：須山 輝明 東京大学・ビッグバンセンター・助教・強い重力場での修正重力理論の検証に向けた理論的研究  
 木内 建太 京都大学基礎物理学研究所・特定助教・ブラックホール磁場中性子星合体に関する数値的研究  
 諏訪 雄大 京都大学基礎物理学研究所・准教授・ニュートリノ駆動型超新星爆発からの重力波  
 関口 雄一郎 京都大学基礎物理学研究所・特定助教・コンパクト天体連星合体における r 過程元素合成の研究  
 小嶋 康史 広島大学・理学部・教授・マグネター星震学に向けた基礎理論

**新学術領域「重力波天体」組織図**

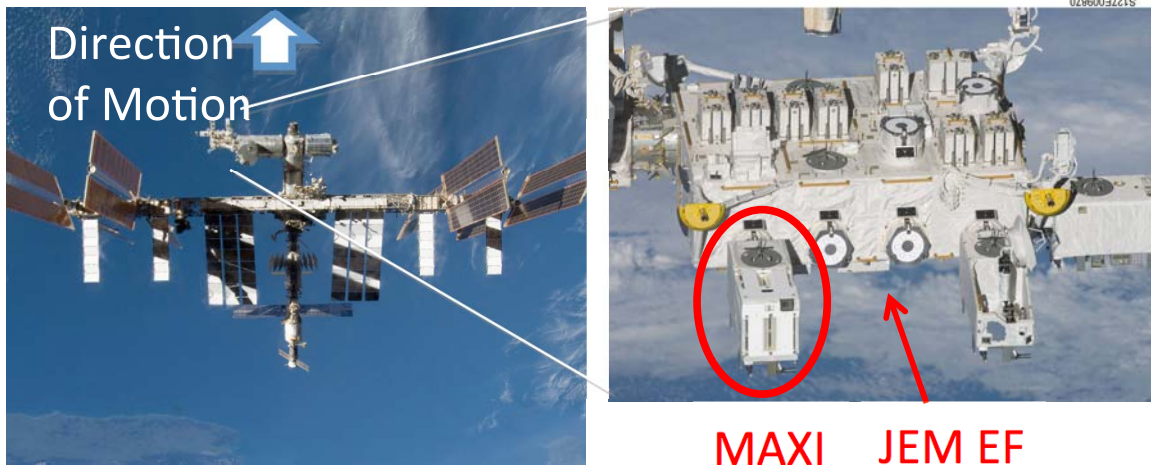


### 3. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究毎に整理する〕（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在どこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究毎に記述してください。

各計画研究はほぼ予定とおりに進んでいる。それぞれの計画研究における主な進展を以下に述べる。

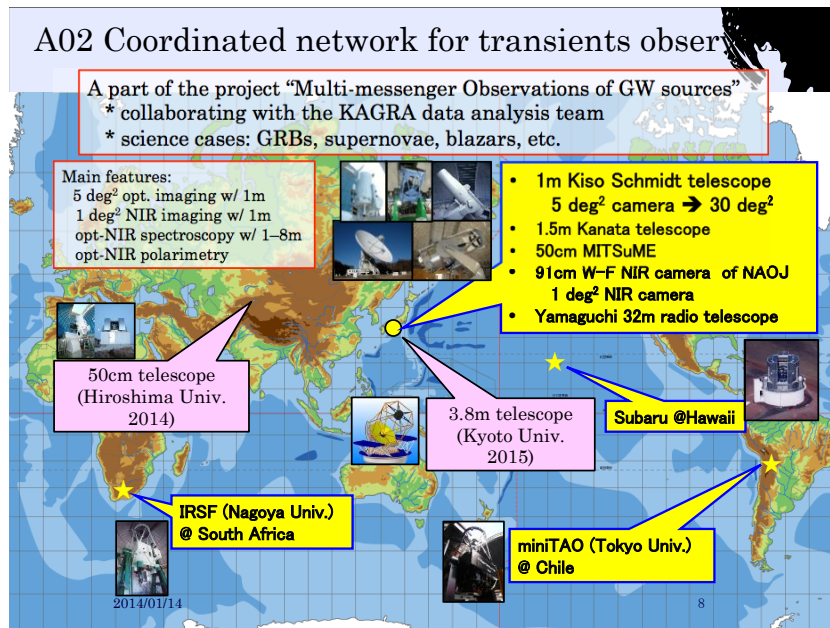
- 1) 最も有望な重力波源であるショートガンマ線バーストはジェット状の放射である事が分かっており、多くの場合はジェットを横から観測する事になる。従って観測できるのは10keV以下のX線放射であるが、重力波によって決まる源の位置は数十平方度の広範囲に渡っているため、広視野のX線望遠鏡が必須である。現在ISS(国際宇宙ステーション)に取り付けられているMAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)があるが、全天の2%しかcover出来ないため、もっと視野の広いWF(Wide Field)-MAXIを提案するため、ミッションの検討と機器の開発(予備設計と試作)を計画研究A01で行って来た。その結果、十分な準備が整ったため、宇宙科学研究所の小規模プロジェクトの公募に対してISSミッションとして提案を行った。WFM-AXIは全天の25%を常に観測する。0.7-10keVの領域で $2 \cdot 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (積分時間100秒、 $5\sigma$ )の感度をもつため、重力波が検出できる範囲内の短いGRBに付随する軟X線放射のfollow-up観測が可能となる。なお、ISSは2024年までの運用が米国から要請されている。下の図はISSおよびMAXIが取り付けられたJEM EF(日本実験棟「きぼう」)の船外実験プラットフォームの地球周回軌道上の写真である。



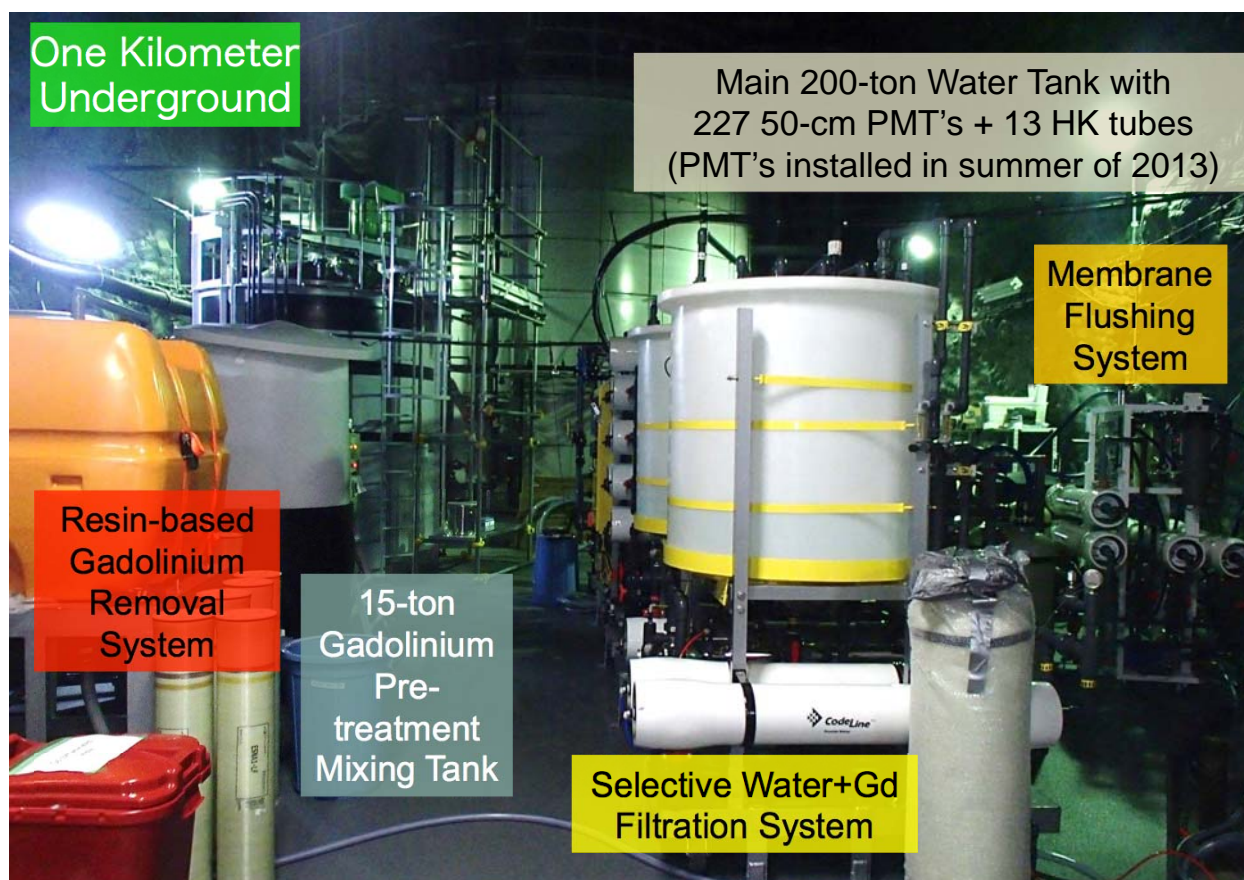
- 2) WFMAXIの位置決定精度は $0.1^\circ$ 程度であるので、光学望遠鏡をその方向に向けて重力波天体のさらに詳細な情報を得ると言うのが、本領域の大きなシナリオである。そのため、(1)「木曾1mシュミットカメラ用の超広視野CMOSセンサの開発、岡山91cm広視野赤外線望遠鏡の自動化、京大3.8m望遠鏡に搭載する面分光器開発を中心に、超大量画像データから変動天体を自動的に検出・測光する解析パイプラインの開発を進める。(2)可視赤外線の全地球的観測網の整備：中国西域部への50cm広視野ロボット望遠鏡を設置し、木曾、岡山、広島などの国内観測所と東大アタカマ望遠鏡、名大南アフリカ望遠鏡などを結んだ全地球的突発激変天体観測網を整備する。(3)電波観測による激変天体のフォローアップ観測体制の整備：野辺山観測所、山口大電波望遠鏡などを用いた連携観測体制を整える。」というのが当初の計画であった。これは、現在ほぼ目的を達成しており、次ページで示すように、全地球的な観測体制の構築が70%程度は完成した。



## A02 Coordinated network for transients obser

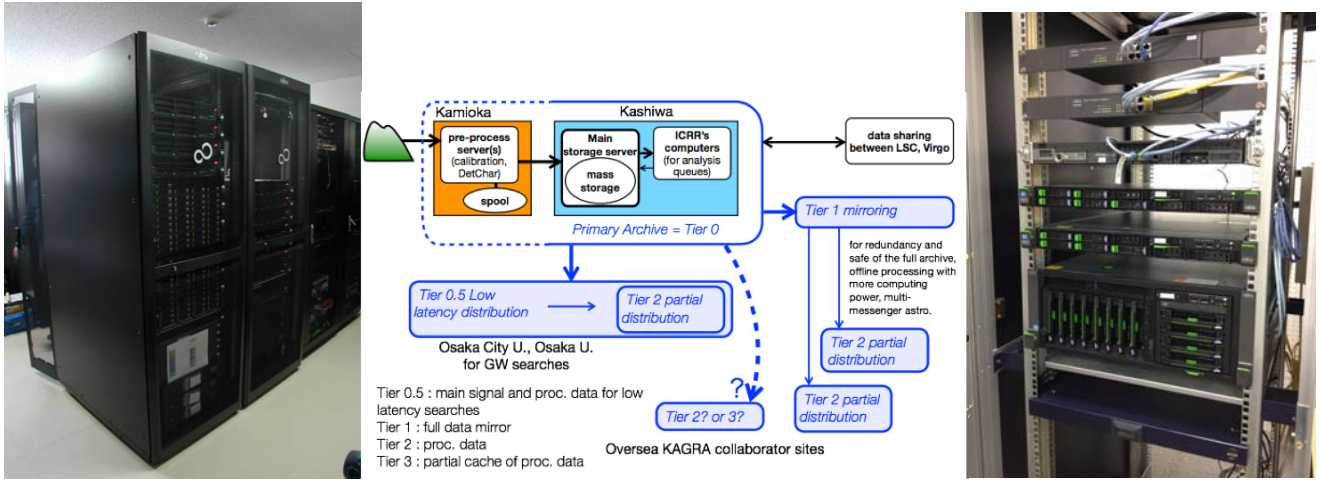


- 3) 超新星爆発に伴う重力波とニュートリノの検出も本領域の重要なターゲットである。特にニュートリノに関しては神岡鉱山内にある 200t の水チェレンコフ検出器に Gd を 0.1% 混入する EGADS(Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems)で反ニュートリノを判別できる世界初のニュートリノ検出器として2年間運転することが大きな目標の一つであった。2014年6月現在、Gd を封入する事に成功して、既に運転を開始している。下図は Gd ニュートリノ検出器の全景で、現在いつでもイベントを速報できる。



The EGADS Detector Facility @ Kamioka; November 28<sup>th</sup>, 2012

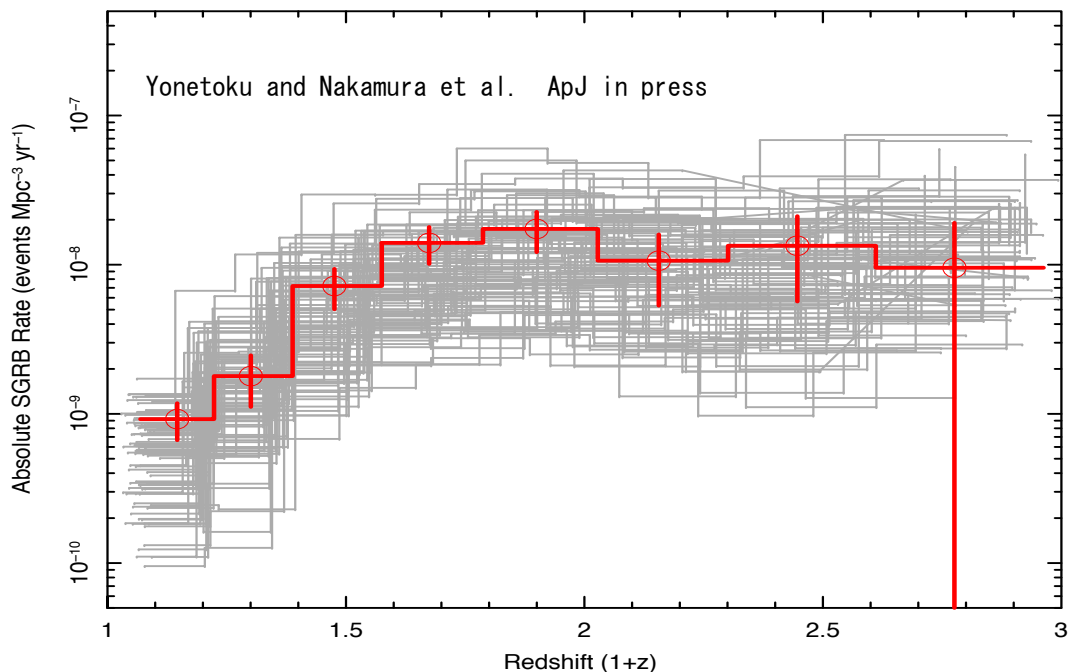
4) データ解析では、KAGRA で取得したデータを主に大阪市立大学と阪大で chirp signal search のような Low Latency なものを解析する。現在、解析ソフトウェアの構築が進んでいる。下図右は、KAGRA 実験からのデータの受け取り側の計算機となる計画研究 A04 のものである。これを中核にして、研究計画の後半で計算能力とデータ保管量を、観測データに対応する規模に増強する。全体の flow は下の図の中央のようになる。左は 2014 年 2 月に完成した iKAGRA 用の神岡の Data System である。



5) 理論の計画研究 (A05) では計画していた課題以外に他の計画研究や公募研究との共同研究が 6 件出て来ている。その 1 例として以下に示すのは A01 の公募研究との共同研究で、最も有力な重力波源であるショートガンマ線バーストの発生率の観測データに基づく推定で、KAGRA で少なくとも

$$3.8^{+1.8}_{-2.2}(146^{+71}_{-83}) \text{ events } y^{-1} \text{ for NS-NS (NS-BH) binary, respectively, by KAGRA}$$

という event rate が期待できることが分かった。現実にはこの 4 倍くらいと期待できる。



横軸は宇宙の赤方偏移、縦軸はショートガンマ線バーストの発生率。灰色の線は誤差を考慮に入れた 100 のモンテカルロシミュレーションである。

**4. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ程度）** 領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

- 1) 本領域の大きな特徴としては計画研究の代表者の一人が日本語を話さない外国人のため総括班会議、代表者会議、bi-monthly workshop、シンポジウム等の会議の公用語は英語となっており、これは若手の教育にもなっている。
- 2) 領域シンポジウムに若手によるセッションを設けた。趣旨は重力波の研究はこれから先が長いので、将来を担う自覚と、これまでの指導者に汚染されない形で全く新しいアイデア・試みを促す為である。45歳を超える研究者は質疑にも参加しないと言うルールも作った。2012年度の第1回シンポジウムでは、英語での発表に慣れていないことを考慮し、スライドが英語であれば日本語による発表も認めたが、2013年度にはすべての発表が英語になった。まだ質疑応答は日本語であるが、明らかな進歩が見られた。2014年度のシンポジウムでは質疑も英語になる事を期待したい。
- 3) 大学院生・ポスドクの研究会・学会・国際会議での研究発表を推奨しており、それらの延べの数は293件である。
- 4) この新学術領域では異なる分野の研究者がスタッフだけで60名参加しているので、それぞれの院生の成長を促す為に2ヶ月に1回の頻度でbi-monthly workshopを開催して院生・ポスドクの参加を促している。テーマは毎回、各計画研究が回り持ちで受け持ち、その計画研究の内容のみならず、他の関連する計画研究の研究発表や周辺分野の研究発表もあり、院生の研究範囲を広げるのも大きな目的である。これらの試みからノーベル賞級のアイデアが生まれる事を期待している。
- 5) 理論とデータ解析グループでは毎週金曜10時半からGGゼミ(Gravitational wave and Gravitation seminar)をTV会議として開催している。内容は最新の論文の速報、個人の研究発表と議論等である。参加機関は、京都大学、大阪市立大学、大阪大学、広島大学、東京大学、九州大学等である。院生、ポスドクも参加でき、自分の大学の研究室とは全く異なる教員が沢山いるので、初歩的な事の質問もできて、その場で答えを貰える。これも、この分野の若手育成に寄与している。
- 6) データ解析の分担者の長岡科学技術大学准教授高橋弘毅が「重力波初検出及び重力波天文学創成に向けたデータ解析法の研究」に対して山梨科学アカデミー奨励賞を2013年6月4日に受賞した。本研究で採用しているポスドクの中野寛之が2013年11月7日に Outstanding Presentation Award Gold Prize (JGRG23)、田中貴浩の大学院生の山下康穂が、2013年6月に京都大学竹越賞、中村卓史の大学院生の衣川智弥は京都大学理学部グローバルGCOE poster awardを2013年2月13日に、公募研究に採択された関口雄一郎が2013年3月20日に日本物理学会若手奨励賞を受賞した。新沼浩太郎と杉山孝一郎は2013年9月4日にAsia-Pacific Radio Science Conference, YOUNG SCIENTIST AWARDを、木村匡志は(学振受入れ：田中貴浩)アジア太平洋研究会 "Gravitation and Cosmology"で2013年2月に優秀プレゼンテーション賞を受賞した。
- 7) 2013年度にポスドクで採用した本橋隼人と西澤篤志は海外学振研究員に採用され、現在海外で活躍している。
- 8) 2012年8月から2014年5月までに新たに職を得た若手の数は7名である。(京都大学基礎物理学研究所准教授、名古屋大学大学院理学研究科特任助教、ウィスコンシン大学ミルウォーキー校PD研究員、理化学研究所PD研究員、日本学術振興会 海外特別研究員3名)
- 9) 2013年2月20日—22日には、国立天文台にて、データ解析グループがKAGRAデータ解析スクールを開催しデータ解析の仕方を他分野の大学院生を含む60名程度の参加者に教えた。また2013年9月27日から28日には「データ解析スクール」を東大で開催し60名程度の参加があった。これらは、他分野の若手も含めた若手育成に寄与している。

## 5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

A01 の主な研究費使途は、広天域突発天体監視装置 WF-MAXI のバス部設計（予備検討）、軟 X 線広天域カメラの観測素子 (CCD)、カメラ筐体および回路部試作、硬 X 線モニターの検出器構造・熱設計と APD 読み出し専用 VLSI の試作、さらにこれら試作品の試験環境構築である。これによって、現在試作品の性能試験を進めており、次年度以降の詳細設計に反映させる。

A02 では、海外（中国を想定）に設置する 50cm ロボット望遠鏡の鏡筒と架台を購入し、日本国内（広島大学）における立ち上げ調整を行っている。また、この望遠鏡に装着する可視三色同時カメラ用の CCD カメラを購入し、50cm 望遠鏡に装着して基礎試験観測を行っている。迅速な重力波天体フォローアップを実現するため、木曾観測所シュミット望遠鏡の制御系を更新した。

A03： 近傍超新星爆発ニュートリノ検出に必要な高速電子回路(QBEE)の開発を行ない、必要な周辺機器も合わせて購入した。現在、EGADS 検出器への導入に必要なソフトウェア開発を行っている。

A04： 重力波データ解析システムの基盤となる計算機設備を整備した。2 拠点間でのVPN(仮想プライベートネットワーク)接続とリソース管理により、継ぎ目のない仮想的に一体化した環境を構築した。このシステムは将来的にはKAGRAの観測データを直接受け取る。データ保管量と計算能力の増強は3年目以降に行う。

領域全体での研究員雇用は、初年度に6名、2年目および3年目はそれぞれ14名である。これらの研究員は、計画研究 A04 においては、海外に比べて不足している重力波データ解析のマンパワーを補い、本分野の日本の若手育成に重要な役割を担っている。計画研究 A01 では、PD 研究員を2名雇用し、それぞれ重力波源の X 線対応天体監視のための WF-MAXI の開発と、現行の観測装置 MAXI、Fermi および地上望遠鏡を用いた観測研究に従事している。また、ポスドクの中野寛之は 2013 年 11 月 7 日に Outstanding Presentation Award Gold Prize (JGRG23)を受賞した。2013 年度にポスドクで採用した本橋隼人と西澤篤志は海外学振研究員に採用され、現在海外で活躍している。これらの若い研究員自身の研究や、触発された大学院生の研究参加も今まで以上に積極的になり、領域の研究活動の活性化に多いに役立っている。

また、総括班では事務補佐のために1名の秘書を雇用している。領域の研究会やシンポジウムのために年間のべ100件程度の出張事務処理などを行い、領域の円滑な運営に役立っている。

## 6. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 計画研究 A01 の評価（評価担当 伊藤好孝）

A01 では重力波源となりえる突発天体について、MAXI を中心とした X 線・ $\gamma$  線広視野観測が順調に進んでおり、多数の X 線新星や短時間トランジェントが発見されるなど成果があがっている。ガンマ線バースト、極超新星といった重力波源となる天体現象について特筆すべき成果が上がっており、これらの知見は本領域が開催する研究会において領域内の研究者に共有されている。現行の MAXI を増強する WF-MAXI の準備研究として、構造体筐体や観測機器の配置において具体的な検討が行なわれており、最もクリティカルな点として熱制御を見だし、ミッション成立をほぼ確認できるデザインを得ている。CCD チップなどの各コンポーネントについても、これまでの経験の蓄積をうまく生かしながら順調に開発が進んでおり、試作品のテスト段階にいたっている。H26 年度に予定される熱設計の実証などと合わせ、準備研究に一定のめどが立つだろうと評価される。一方で、本領域の重要な特色となるマルチメッセンジャー天体物理学の確立のために、重力波解析チームとの双方向連携や他波長観測チームへの位置提供など、iKAGARA 及び他観測との組織的な連携体制の確立に向けたマイルストーンの提示や、MAXI から WF-MAXI への具体的な移行ロードマップなどは、今後の進展が期待される部分である。また、本領域は一般天文愛好家にも広く興味を持たれる題材であるため、将来の重力波研究の人材確保のためにも積極的なアウトリーチが望まれる。

### 計画研究 A02 の評価（評価担当 渡部潤一）

順調に建設が進む KAGRA をはじめ、国際的に重力波の検出は現実味を帯びている。そのような状況の中、重力波が検出され、その方向が大まかに定まった場合、国際的に光学赤外線や電波によって、重力波源天体を同定し、また追跡観測することで、その正体を探り、全容を解明することは天文学側の寄与として非常に重要である。本研究は、想定される重力波の検出に呼応し、わが国での緊急観測態勢および追跡観測網の整備を目指すものである。

研究グループは、これまでのガンマ線バーストに呼応する観測・追跡網を参考にしつつ、一方でガンマ線に比べても決定位置精度が低いことが想定される点を鑑み、広視野撮像観測という日本の光・赤外線天文学のお家芸を駆使し、天文学では極めて斬新な CMOS センサーを活用した広視野撮像装置の開発を進めている。これは世界的にも例がなくユニークな方向性として高く評価できる。これに対応する形で、岡山の広視野近赤外線カメラ、そして岡山に設置が予定される 3.8m 新望遠鏡用の面分光装置、さらにアジア地区のネットワークを生かして、中国に設置予定の 50cm 望遠鏡と三色同時カメラの開発などを並行し、順調に進めている。手薄になりがちなソフト開発（重力波アラート対応システム、大量データ解析パイプライン）の開発や、関連する国内の望遠鏡のネットワークを通じての観測網を整備し、海外関係機関と協定書を結ぶなど、すべての面において順調に進んでいることは、きわめて高く評価してよい。

今後は、本研究で開発してきた、それぞれの望遠鏡・観測装置の定常的な運用にむけての性能向上と試験などを行うと共に、重力波の擬似的な検出をシミュレーションを行い、築き上げたネットワークが実際にうまく稼働するかどうか、そして観測データが有効に得られるかどうかの確認を行い、将来の検出に備える点を重視した方向で、引き続き努力を望みたい。

### 計画研究 A03 の評価（評価担当 梶田隆章）

重力波を発生する最有力候補天体現象としては連星中性子星の合体と共に超新星爆発が想定されている。計画研究 A03 においては銀河系内の超新星爆発が起こった際に、重力波とニュートリノの同時観測を目指して研究を着実に進めている。現在までガドリニウムを溶かした 200 トンの水チェレンコフ測定器の電子回路については、東北の大地震の影響で製造が遅れていること、また水槽中に想定していなかった材料が使われていて、

その交換が必要であるなど、多少の遅れと問題はあるものの、ソフトウェアなどのその他の準備は順調に進行しており、概ね想定される範囲内で計画が進行していると評価される。重力波測定器 KAGRA の初期運転が 2015 年の末頃に予想されており、それに間に合うように 200 トンの測定器を準備する必要があるが、この点に関しては困難があるとは考えられない。また、超新星爆発ニュートリノを検出後 1 秒で警報を出せることは multi-messenger astronomy の観点からは非常に重要であり、是非 A01, A02, A04 などの計画研究班と密接な協力のもと、事前の試験を繰り返して確実なシステムとして整備していただきたい。なお、超新星の警報の際に、単にニュートリノが来たという警報のみならず、方向の情報を送ることが重要であろう。方向の情報がなくとも光学望遠鏡等がフォローアップ観測を行うことができない。水チェレンコフ検出器ではニュートリノ-電子散乱事象を用いて方向を決めることになるが、その際は反応の断面積が大きくまた反応の結果出てくる陽電子が等方的である反電子ニュートリノと陽子の準弾性散乱が大きなバックグラウンドとなる。しかしガドリニウムを溶かした水チェレンコフ検出器ではこのバックグラウンドが 90% 除去できる（し、このことは既に研究されていると理解している）ので、もしまだ整備されていないならば、方向決定についてもリアルタイムで行うシステムを開発し、その情報を瞬時に送れるようにしていくべきではないだろうか？

#### 計画研究 A04 の評価（評価担当 坪野公夫）

計画研究 A04 の主目的は、1. 重力波のデータ解析体制の構築とその運用、2. 他の観測手段との連携体制の確立、である。これにより、本領域の中核テーマとなる「重力波事象」の検出を担うと同時に、各研究計画を横断する形で重力波データからのサイエンスの抽出を図ろうとしている。

##### 1. 重力波のデータ解析体制

本研究の前半では、重力波を探索するための解析パイプラインの構築が重要な課題である。パイプラインは「コンパクト連星合体探索パイプライン」、「バースト重力波探索パイプライン」、「ブラックホール準固有振動探索パイプライン」の 3 つに分かれている。各パイプラインのソフトウェア開発に関しては、データ解析に関与する 20 名程度のグループによる調査、検討、コード作成が実行されており、おおむね予定通りに進んでいると思われる。また、解析ハードシステムの開発も同時に進められており、テスト機の導入、開発環境のテストなどが実施された。また、KAGRA サイトと解析拠点間の高速かつ安全なデータ転送に関しては、VPN（仮想プライベートネットワーク）導入によって問題が解決される見込みが立った。以上のシステム開発に関しては、計画の 3 年目以降のシステム実装およびそれを用いた実際のデータ解析への一応のめどが立ったと判断される。データ解析で最も重要な課題は、人的体制の強化である。これについても過去の解析チームが数人だった時代に比べると、今や格段の拡大強化が実現されている。しかし、欧米のチームに比べるとまだまだ弱小であり、今後もメンバーの拡充およびレベルアップへ向けた一層の努力が望まれる。

##### 2. 他の観測手段との連携体制の確立

他の計画研究および公募研究との横断的な研究開発も進んでいる。理論も含めた横断的な研究から生まれた一つの知見の例として、重力波とニュートリノの時間的前後により超新星爆発のコアの回転の有無を検証できることが示されたことがあげられる。このほか、他の観測手段との同時観測・フォローアップ観測のための連携体制確立の準備も進んでいる。2015 年 12 月の KAGRA の最初の観測のデータ処理に向けて、全体的には当初の計画通り準備が進んでいると判断される。今後、周辺領域との連携も含めて、重力波サイエンス抽出のための確かな研究基盤が確立されることを期待する。

#### 計画研究 A05 の評価（評価担当 佐々木節）

観測データから最大限に情報を引き出すために、既知の重力波源のさらなる詳細な理論的研究に加え、全く新しい重力波源の可能性を追求し、重力波天文学を創成することが目的である。以下はその進展状況である。

##### 1) 様々な重力波源の探査と重力波波形の解明

最も重要な重力波源と考えられている連星中性子星の合体は、ショートガンマ線バースト(SGRB)に対応している可能性がある。この仮説に基づき最近の SGRB のデータを解析すると、連星中性子星合体の頻度は最低でも年間4イベント、検出されていない SGRB の数を考慮すると実際はその4倍程度になることを明らかにした。また重力波波形の位相進化に深刻な影響を及ぼす、共鳴軌道をまたぐ際の軌道の進化を正しく記述する定式化に成功した。これらは重力波検出の初期段階で極めて重要な役割を果たす成果である。

#### 2) 超新星を中心とした物理

重力崩壊型超新星の爆発機構の一つの可能性として磁気回転不安定性による爆発機構に着目し、高分解能シミュレーションを実行した結果、磁気回転不安定性が本質ではなく、磁場による角運動量輸送でニュートリノ加熱時間が長くなることが本質的である可能性を発見した。

#### 3) 新しい重力波観測・データ解析法の提案

重力波のデータ解析におけるパラメータ空間上で最尤値のもつ幾何学的特性に注目した解析手法の研究を進め、背景重力波の相関解析の新しい手法を開発した。

#### 4) 他の観測手段との同時観測から得られる物理

連星中性子星の合体に伴うマクロノバと呼ばれる現象に関して、放出物質が周りの星間物質と衝突して輝く場合の放射のスペクトルを電波からガンマ線まで求めた。また、その際、ジェットが放出物質を突き破ってガンマ線バーストとなる可能性を示した。

#### 5) 相対論の検証、及び、宇宙論的観点からの重力波研究

宇宙論では重力理論の修正による宇宙の加速膨張の説明の追求がなされてきている。そうした修正重力の一つとして注目されている理論が、太陽系観測と無矛盾であることを指摘し、さらに、そのモデルではニュートリノ振動に類似の重力波振動と呼ぶべき現象が起こることを示した。

以上のように、本計画研究の各小分野で、重要な成果が着々と上がっており、順調に研究が進んでいる。

## 7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理する〕

（3 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

### 計画研究 A01

A01 計画研究班では、重力波源の X 線対応天体監視のための新しい観測装置の開発と、現在稼働中のミッション（MAXI、Fermi 等）による重力波源関連天体の観測の 2 面から研究を進めている。

#### （1）広天域突発天体監視装置の開発

5 年以内に観測を開始する KAGRA、Advanced LIGO などの次世代重力波望遠鏡が検出する重力波天体現象の X 線対応天体を探索し、その位置を決定するため、広天域 X 線短時間突発天体監視装置 Wide Field MAXI (WF-MAXI)の開発を開始した。早期の運用開始が可能な ISS（国際宇宙ステーション）搭載を想定した開発を行っている。主検出器である SLC（軟 X 線大天域カメラ）は、CCD と符号化マスクを組み合わせたカメラ 4 台によって 0.7—10keV のエネルギー範囲で常に全天の 25%の天域を監視し、突発的な X 線放射源を検出してその位置を精度 0.1 度以下で決定することができる。CCD は ASTRO-H のために開発された素子にパッケージなどの改良を加えた物で試作品を製作中である。カメラ筐体と信号処理回路も MAXI/SSC の開発経験を生かして設計、試作し、宇宙環境での CCD 冷却性能の試験を行っている。副検出器である HXM（硬 X 線モニター）は常に SLC と同じ天域をカバーし、10keV を超える硬 X 線から 1MeV $\gamma$  線までのエネルギー帯域でのスペクトルと強度変動を測定する。シンチレーターを APD（アヴァランシェ・フォトダイオード）で読み出す検出器は超小型衛星用に初めて我々が開発し、ASTRO-H にも採用されているが、HXM のためには、さらに専用の信号処理用 VLSI を開発して、現在、試作品の性能を試験している。ISS に搭載するための基盤であるバス部も、構造と電力、熱制御に関する基本的な設計検討を行って成立性を確認し、平成 26 年に JAXA 宇宙科学研究所の小規模プロジェクトに ISS 搭載ミッションとして応募した。

#### （2）重力波関連天体現象の観測研究

宇宙ステーション「きぼう」船外モジュールに搭載された全天 X 線監視装置“MAXI”を用いて、突発的現象の監視を行い、重力波発生源と関連の深い天体であるガンマ線バースト、超新星、X 線連星、中性子星連星等の研究を行った。“はくちょう座スーパーバブル”の MAXI による観測で、これが「極超新星」である可能性を示唆する結果を得たり、MAXI と海外の衛星、地上望遠鏡との協力による観測史上最大級のガンマ線バーストの観測などの成果を得た。また、MAXI によって LIGO/VIRGO による重力波の X 線対応天体を探索するための、協定を進めた。

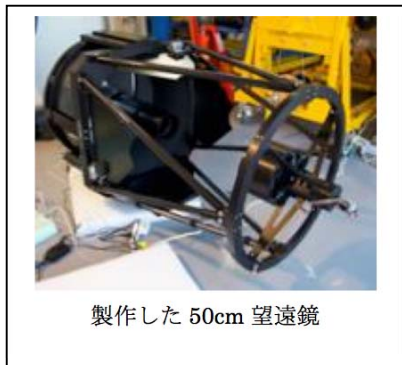
公募研究では、将来の衛星搭載を目指し、符号化マスクと組み合わせた X 線撮像検出器の開発として、シリコンストリップ検出器の試作と、それから 1.5 keV X 線でも読み出せる高増幅率集積回路の設計試作を行った。

### 計画研究 A02

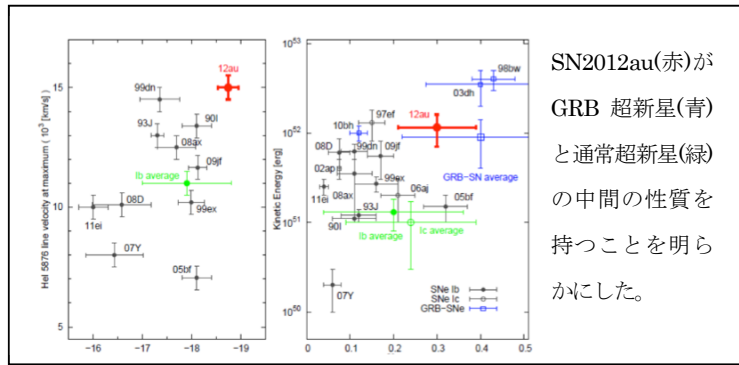
計画研究 A02 では、重力波天体の即時フォローアップ体制の構築に向けて、基礎的機能の整備と開発を行っている。超広視野近赤外線カメラ OAOWFC 及びそのデータ解析システムの整備(SPIE2014 で発表)、木曾観測所 1.05m シュミット望遠鏡の駆動系の更新を行い、即時観測体制を整備した。超広視野 CMOS カメラ、面分光システムの基礎実験を進めた。50cm 望遠鏡を製作した（下左図）。この望遠鏡に搭載する可視三色同時カメラの製作を行った。また、50cm 望遠鏡の設置サイト候補地であるチベット阿里地区のサイト調査を行った。

こうした開発と並行して重力波対応天体候補として期待される各種突発天体の観測的研究を進めた。主なトピックスとして、超新星爆発時期の正確な推定(ApJ, 782, L35 (2014))、超新星によるダスト形成過程の解明(ApJ, 776, 1 (2013))、ガンマ線バーストを伴う超新星と通常の超新星を繋ぐミッシングリンク天体の発見(ApJ, 772, L17 (2013):下右図)などがある。





製作した 50cm 望遠鏡



SN2012au(赤)が GRB 超新星(青)と通常超新星(緑)の中間の性質を持つことを明らかにした。

また、本計画研究が中心となり、我が国の重力波天体追跡ネットワーク J-GEM を立ち上げ、LIGO/Virgo グループとの重力波対応天体追跡観測に関する協定書 (MOU) を結んだ。

#### 公募研究

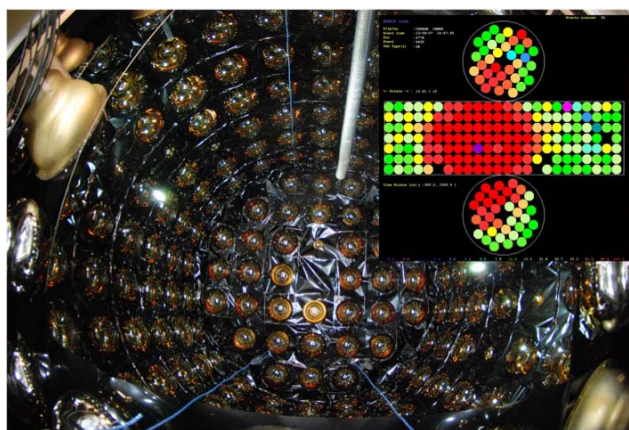
本會観測所シュミット望遠鏡を用いて年間約 100 晩の超新星サーベイ観測を行い、年間約 40 天体の超新星(+超新星候補天体)を発見した。また、重力波検出後のサーベイ戦略を決定するため、連星中性子星合体における詳細な輻射輸送シミュレーションを行い(研究計画 A05 との共同研究)、重力波の検出後に期待される可視赤外放射の性質(明るさ、継続時間、スペクトル)を明らかにした(ApJ, 789, 31 (2014), ApJ, 775, 113 (2013))。

#### 計画研究 A03

研究計画 A03 では、ガドリニウム水チェレンコフ検出器 EGADS を用いた超新星爆発ニュートリノの観測を研究課題としている。これまでに検出器開発は完了し、基本データの取得にも成功している。(下図) 今後は、計画の後半に向けて、特にベテルギウスなど極近傍の超新星爆発ニュートリノの観測に対応できる電子回路の導入が中心課題となるが、電子回路の開発および納入はすでに完了しており、現在は対応するソフトウェアの開発を進めている。この研究においては2名の研究員を雇用し、大学院生を含む若手研究者にも活躍の場を与えている。

領域内の共同研究としては、計画研究 A04, A05 と協力して、超新星爆発からのニュートリノと重力波の相関研究を進めている。(後述 A04 の項)

公募研究に関しては、まずガドリニウム原子核による中性子捕獲反応により発生するガンマ線スペクトルの測定に成功しており、また KamLAND 検出器における近傍超新星爆発の予知についても研究が進んでいる。今後はこれらの結果を計画研究にフィードバックさせる予定である。



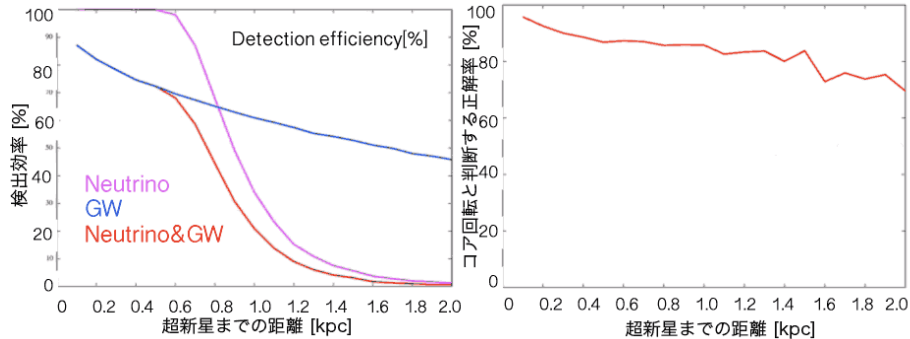
完成した検出器内部と取得した宇宙線事象

#### 研究計画 A04

研究計画 A04 は、重力波実験の観測データの解析を研究し、計画後半では実際に KAGRA の観測データを解析、イベント探索をすることを目的としている。現在までのところ、データ解析のために、計算機環境を整備しながらソフトウェア開発を順調に進めている。KAGARI と呼称するソフトウェアライブラリを構築中で、連星合体、

バースト重力波、連続波についての作業が進んでいる。また 2013 年度から 4 名の研究員を雇用し、大学院生など 20 名程度を組織して若手の育成も進んでいる。

超新星爆発からの重力波を想定した研究では、領域内の他の計画研究 A03, A05 および公募研究で協力している。特徴的な重力波放出と、中性子化バーストによりニュートリノの時間的集中が期待できるコアバウンスに着目し、重力波とニュートリノの時間的前後により、コアの回転の有無を検証できることを示した（下図）。



また A04 に関連する公募研究と連携した研究会を 2013 年 6 月に開いた。公募研究では、時間—周波数空間での信号の扱いについての研究や、非ガウス雑音についての理論、実験両面からの取り組みがなされ、重力波の解析にフィードバックが期待できる。

#### 計画研究 A05

- ショートガンマ線バースト(SGRB)に関して、ピークエネルギーと最高光度の間に強い相関を発見した。この関係を用いて BATSE の約 100 の SGRB イベントの赤方偏移を見積もり、SGRB が NS-NS 連星の場合に重力波イベントレートを年間 4 イベント以上、SGRB が BH-NS 連星の場合は約 150 イベントと推定した。これは確実な重力波検出を示唆する。(ApJ accepted)
  - BH-BH 連星の生成機構は明らかでない。金属汚染のない初代星の連星進化を考えることで、重力波イベントレートで年間 140 程度という評価を得た。連星 BH 合体で生じる BH は重く、準固有振動の検出ができ、科学的に大きな成果が期待される。(MNRAS accepted)
  - 二つの計量をもつ重力理論が既存の観測と矛盾せずニュートリノ振動に類似の重力波振動と呼ぶべき現象が起こることを示した。(PTEP 2014, 043E01(2014)) A04 と連携して観測可能性と手法に関する研究を進めている。
  - 連星中性子星合体における放出物質が周りの星間物質と衝突した際の放射スペクトルを電波からガンマ線まで求めた。(PRD, 89, 063006 (2014))また、放出物質以外のジェット成分が放出物質を突き破る際に細く絞られガンマ線バーストになれることを示した。(ApJL 784, L28 (2014))
  - 重力崩壊型超新星の爆発は、近年、数値計算でも再現されつつある。爆発の機構の基礎的理解として、ニュートリノ加熱による停滞衝撃波の復活を、定常近似で準解析的にモデル化することに成功し、爆発に至る条件を明らかにした。(ApJ 771, 27(2013))
  - 重力波のデータ解析におけるパラメータ空間上で最尤値のもつ幾何学的特性に注目した解析手法を展開し、背景重力波の相関解析の新しい手法を開発した。(PRD86, 042002 (2012))
- また、公募研究より以下の成果があげられる。
- 京を用いた高精度の 3 次元数値計算で、ニュートリノ加熱による重力崩壊型超新星爆発が起こることを明らかにし、プレスリリースをおこなった。(ApJ 786(2) 83(2014)) 重力波波形とニュートリノフラックスを読み取り、計画研究 A03, A04 と連携して同時観測の手法の研究も進めている。

## 8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年次をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 主な論文（計画研究）

1. Daisuke Yonetoku, Takashi Nakamura, Tatsuya Sawano, Keitaro Takahashi and Asuka Toyanago, “Short Gamma Ray Burst Formation Rate from BATSE data using  $E_p-L_p$  correlation and the minimum gravitational wave event rate of coalescing compact binary”, *Astrophys.J.* (in press) , (2014), 査読有
2. Tomoya Kinugawa, Kohei Inayoshi, Kenta Hotokezaka, Daisuke Nakauchi and Takashi Nakamura, “Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave”, *MNRA* (in press) ,(2014), 査読有
3. De Felice, A., Nakamura, T., Tanaka, T., “Possible existence of viable models of bi-gravity with detectable graviton oscillations by gravitational wave detectors”, *PTEP*, (2014), 043E01, 査読有
4. Maselli, A.; Melandri, A.; Nava, L.; Mundell, C. G.; Kawai, N.; Campana, S.; Covino, S.; Cummings, J. R.; Cusumano, G.; Evans, P. A.; Ghirlanda, G.; Ghisellini, G.; Guidorzi, C.; Kobayashi, S.; Kuin, P.; La Parola, V.; Mangano, V.; Oates, S.; Sakamoto, T.; Serino, M.; Virgili, F.; Zhang, B.-B.; Barthelmy, S.; Beardmore, A.; Bernardini, M. G.; Bersier, D.; Burrows, D.; Calderone, G.; Capalbi, M.; Chiang, J.; D'Avanzo, P.; D'Elia, V.; De Pasquale, M.; Fugazza, D.; Gehrels, N.; Gomboc, A.; Harrison, R.; Hanayama, H.; Japelj, J.; Kennea, J.; Kopac, D.; Kouveliotou, C.; Kuroda, D.; Levan, A.; Malesani, D.; Marshall, F.; Nousek, J.; O'Brien, P.; Osborne, J. P.; Pagani, C.; Page, K. L.; Page, M.; Perri, M.; Pritchard, T.; Romano, P.; Saito, Y.; Sbarufatti, B.; Salvaterra, R.; Steele, I.; Tanvir, N.; Vianello, G.; Weigand, B.; Wiersema, K.; Yatsu, Y.; Yoshii, T.; Tagliaferri, G., “GRB 130427A: A Nearby Ordinary Monster”, *Science*, 343, (2014), 48-51, 査読有
5. Yamanaka, M., Maeda, K., Kawabata, M., Tanaka, M., Takaki, K., Ueno, I., Masumoto, K., Kawabata, K.~S., Itoh, R., Moritani, Y., Akitaya, H., Arai, A., Honda, S., Nishiyama, K., Kabashima, F., Matsumoto, K., Nogami, D., and Yoshida, M., “Early-phase Photometry and Spectroscopy of Transitional Type Ia SN 2012ht: Direct Constraint on the Rise Time”, *The Astrophysical Journal*, 782, 2, (2014), L35, 査読有
6. Hirotaka Yuzurihara, Nobuyuki Kanda, “Detectability and parameter estimation of gravitational waves from cosmic string with ground-based detectors”, *JPS Conference proceedings*, JPSCP.1.013117, (2014), 013117 (4 pages), 査読有
7. T.Yakamoto, N. Kanda, CLIO Collaboration and KAGRA Collaboration, “Calibration and reconstruction in time-series of strain of gravitational wave detector”, *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference*, JPSCP.1.013119, (2014), 013119-1, 013119-4, 査読有
8. Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka Takahashi, Yuta Hiranuma, Takashi Wakamatsu, Jordan B. Camp, “Towards constructing an Alert System with the Hilbert-Huang Transform -Search for signals in noisy data-“, *Innovative Computing, Information and Control, Express Letters Part B : Applications*, 5, (2014), 285-292, 査読有
9. Masaaki Morita, Hirotaka Takahashi, “Reconstructing  $f(R)$  modified gravity with dark energy parametrization”, *Journal of Physics: Conference Series*, 490, (2014), 012087-1-4, 査読有
10. Sakamoto, T.; Troja, E.; Aoki, K.; Guiriec, N.Kawai et al., “Identifying the Location in the Host Galaxy of the Short GRB 111117A with the Chandra Subarcsecond Position”, *The Astrophysical Journal*, 766, (2013), 41- 53, 査読有
11. Yatsu, Yoichi; Asano, Katsuaki; Kawai, Nobuyuki; Yano, Yuki; Nakamori, Takeshi, “Spatially Resolved Spectroscopy of a Pulsar Wind Nebula in MSH 15-56”, *The Astrophysical Journal*, 773, (2013), 25 (14 pages), 査読有

12. Maeda, K., Nozawa, T., Sahu, D.~K., Minowa, Y., Motohara, K., Ueno, I., Folatelli, G., Pyo, T.-S., Kitagawa, Y., Kawabata, K.~S., Anupama, G.~C., Kozasa, T., Moriya, T.~J., Yamanaka, M., Nomoto, K., Bersten, M., Quimby, R., and Iye, M., “Properties of Newly Formed Dust Grains in the Luminous Type II<sub>n</sub> Supernova 2010jl”, *The Astrophysical Journal*, 776, 1, (2013), 5 (16pp), 査読有
13. Takaki, K., Kawabata, K.~S., Yamanaka, M., Maeda, K., Tanaka, M., Akitaya, H., Fukazawa, Y., Itoh, R., Kinugasa, K., Moritani, Y., Ohsugi, T., Sasada, M., Uemura, M., Ueno, I., Ui, T., Urano, T., Yoshida, M., and Nomoto, K., “A Luminous and Fast-expanding Type Ib Supernova SN 2012au”, *The Astrophysical Journal*, 772, 2, (2013), L17, 査読有
14. Gandhi, P., Yamanaka, M., Tanaka, M., Nozawa, T., Kawabata, K.~S., Saviane, I., Maeda, K., Moriya, T.~J., Hattori, T., Sasada, M., and Itoh, R., “SN 2009js at the Crossroads between Normal and Subluminous Type IIP Supernovae: Optical and Mid-infrared Evolution”, *The Astrophysical Journal*, 767, (2013), 166 (15pages), 査読有
15. S. Adams, C. Kochanek, J. Beacom, M. Vagins, K. Stanek, “Observing the Next Galactic Supernova”, *The Astrophysical Journal*, 778, 2, (2013), 164 (15 pp), 査読有
16. Hiroataka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, “On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves, Advances in Adaptive Data Analysis”, 5, (2013), 1350010-1-20, 査読有
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」, 山梨科学アカデミー会報, 36, (2013), 25-33, 査読無
18. K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, “New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark-Matter Minispike”, *Physical Review Letters*, 110, (2013), 221101-1-5, 査読有
19. Tsutsui, Ryo; Yonetoku, Daisuke; Nakamura, Takashi; Takahashi, Keitaro; Morihara, Yoshiyuki, “Possible existence of the  $E_p$ - $L_p$  and  $E_p$ -Eiso correlations for short gamma-ray bursts with a factor 5-100 dimmer than those for long gamma-ray bursts”, *MNRAS*, 431, (2013), 1394-1404, 査読有
20. Tsutsui, Ryo; Nakamura, Takashi; Yonetoku, Daisuke; Takahashi, Keitaro; Morihara, Yoshiyuki, “Identifying Subclasses of Long Gamma-Ray Bursts with Cumulative Light-Curve Morphology of Prompt Emissions”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, (2013), 3-13, 査読有
21. Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, “Impact of the second order self-forces on the dephasing of the gravitational waves from quasi-circular extreme mass-ratio inspirals”, *Phys. Rev. D*, 87, (2013), 024010 1-14, 査読有
22. Sugumi Kanno, Misao Sasaki, Takahiro Tanaka, “A viable explanation of the CMB dipolar statistical anisotropy”, *PTEP*, 2013 11, (2013), 111E01 (6 ページ), 査読有
23. Takahiro Tanaka, Yuko Urakawa, “Loops in inflationary correlation functions”, *Class. Quant. Grav.*, 30, (2013), 233001 (40 ページ), 査読有
24. Jaume Garriga, Sugumi Kanno, Takahiro Tanaka, “Rest frame of bubble nucleation”, *JCAP*, 1306, (2013), 034 (26 ページ), 査読有
25. Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Takahiro Tanaka, “Evolution of the Carter constant for resonant inspirals into a Kerr black hole: I. The scalar case”, *PTEP*, 2013 6, (2013), 063E01 (23 ページ), 査読有
26. Kent Yagi, Leo C. Stein, Nicolas Yunes, Takahiro Tanaka, “Isolated and Binary Neutron Stars in Dynamical Chern-Simons Gravity”, *Phys. Rev.*, D87, (2013), 84058 (27 ページ), 査読有
27. K. Kashiyama, D. Nakauchi, Y. Suwa, H. Yajima, T. Nakamura, “Luminous supernova-like UV/optical/infrared transients associated with ultra-long gamma-ray bursts from metal-poor blue supergiants”, *Astrophys. J.* 770(2013) :8-16 査読有
28. Nakauchi, D., Kashiyama, K., Suwa, Y., Nakamura, T., “Blue Supergiant Model for Ultra-long Gamma-Ray Burst with Superluminous-supernova-like Bump”, *Astrophys. J.* 778(2013) 67-88 査読有

29. Takahiro Tanaka, Yuko Urakawa, “Strong restriction on inflationary vacua from the local gauge invariance II: Infrared regularity and absence of secular growth in the Euclidean vacuum”, PTEP, 2013 6, (2013), 063E02 (30 ページ), 査読有
30. Kataoka, J.; Yatsu, Y.; Kawai et al., “Toward Identifying the Unassociated Gamma-Ray Source 1FGL J1311.7- 3429 with X-Ray and Optical Observations”, The Astrophysical Journal, 757, (2012), 176- 185, 査読有
31. Yagi, M., Komiyama, Y. and Yoshida, M., “Candidates of H $\alpha$  Emitting Regions in the Magellanic Stream IV Cloud”, The Astrophysical Journal Letters, 749, (2012), L2-L6, 査読有
32. Uehara, T., Toma, K., Yoshida, M., et al., “GRB 091208B: First Detection of the Optical Polarization in Early Forward Shock Emission of a Gamma-Ray Burst Afterglow”, The Astrophysical Journal Letters, 752, (2012), L6- L10, 査読有
33. M. Vagins, “Detection of Supernova Neutrinos”, Nuclear Physics Proceedings Supplement, 229- 232, (2012), 325- 331, 査読有
34. Yuta Okada, Nobuyuki Kanda, Sanjeev Dhurandhar, Hideyuki Tagoshi and Hiroataka Takahashi, “The cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves : Numerical study for point spread function”, Journal of Physics : Conference Series, 363, (2012), 012040- 1- 9, 査読有
35. Nobuyuki Kanda and the LCGT collaboration, “LCGT and the global network of gravitational wave detectors”, Proceedings of 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting., 1, (2012), 27- 32, 査読無
36. Nakauchi, Daisuke; Suwa, Yudai; Sakamoto, Takanori; Kashiyama, Kazumi; Nakamura, Takashi, “Long-duration X-Ray Flash and X-Ray-rich Gamma-Ray Bursts from Low-mass Population III Stars”, Astrrophys. J., 759, (2012), 128-137, 査読有
37. Kent Yagi, Nicolas Yunes, Takahiro Tanaka, “Gravitational Waves from Quasi-Circular Black Hole Binaries in Dynamical Chern-Simons Gravity”, Phys.Rev.Lett., 109, (2012), 251105 1- 5, 査読有

#### 主な論文 (公募研究)

1. Iwa Ou, Yoshiyuki Yamada, Takatomi Yano, Takaaki Mori, Tsubasa Kayano, Makoto Sakuda, Atsushi Kimura, and Hideo Harada, “Measurement of the Energy, Multiplicity and Angular Correlation of Gamma-rays from the Thermal Neutron Capture Reaction Gd(n,gamma) Using JPARC-ANNRI”, AIP Conf. Proc., 1594, (2014), 352-356, 査読有
2. Tsutomu Kobayashi, Hayato Motohashi, Teruaki Suyama, “Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations. II. The even-parity sector”, Physical Review D, 89, (2014), 41651, 査読有
3. Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Masaomi Tanaka, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Shinya Wanajo, “Progenitor Models of the Electromagnetic Transient Associated with the Short Gamma Ray Burst 130603B”, The Astrophysical Journal, 778, (2014), L16-1, L16-5, 査読有
4. Suzuki, D., et al., “MOA-2008-BLG-379Lb: A Massive Planet from a High Magnification Event with a Faint Source”, The Astrophysical Journal, 780, (2014), 123, 1-9, 査読有
5. Tanaka, M., Hotokezaka, K., Kyutoku, K., Wanajo, S., Kiuchi, K., Sekiguchi, Y., & Shibata, M., “Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers”, The Astrophysical Journal, 780, (2014), 31 (9pp), 査読有
6. T. Takiwaki, K. Kotake, and Y. Suwa, “A Comparison of Two- and Three-dimensional Neutrino-hydrodynamics simulations of Core-collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, 786, (2014), 83, 1-8, 査読有
7. Tamura, Y., Saito, T., Tsuru, T. G., Uchida, H., Iono, D., Yun, M. S., Espada, D., Kawabe, R., “Serendipitous ALMA Detection of a Distant CO-emitting X-Ray Bright Galaxy”, The Astrophysical Journal Letters, 781, (2014), 39-43, 査読有
8. Kojima, Yasufumi; Kato, Yugo E, “Numerical simulation of oscillating magnetospheres with resistive electrodynamics”, , 2, (2014), id.023E01, 査読有
9. Wanajo et al., “Nucleosynthesis in the ejecta of neutron star mergers”, AIP Conference

- Proceedings, 1594, (2014), 266271, 査読無
10. Daisuke Yonetoku, Tatsuya Sawano, Shunsuke Takata, Kazuki Yoshida, Hiroki Seta, Asuka Toyonago, Yudai Wakashima, Hajime Yonemochi, and Hirokazu Ikeda, "Establish of Gravitational Wave Astronomy with Gamma-Ray Burst and X-ray Transient Monitor", UNISEC Space Takumi Journal, 5, (2014), 19-27, 査読有
  11. Abe, Fumio, et al., "Extending the planetary mass function to Earth mass by microlensing at moderately high magnification", MNRAS, 431, (2013), 2975-2985, 査読有
  12. Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Takayuki Muranushi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, "Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform", Phys.Rev.D, 88, (2013), 044026-1, 044026-30, 査読有
  13. Eda, Kazunari and Itoh, Yousuke and Kuroyanagi, Sachiko and Silk, Joseph, "New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark Matter minispikes", Physical Review Letters, 110, (2013), 221101(1-4pages), 査読有
  14. Y. Suwa, T. Takiwaki, K. Kotake, T. Fischer, M. Liebendoerfer, and K. Sato, "On the Importance of the Equation of State for the Neutrino-driven Supernova Explosions", The Astrophysical Journal, 764, (2013), 99, 1--19, 査読有
  15. Tanaka, M. & Hotokezaka, K., "Radiative Transfer Simulations of Neutron Star Merger Ejecta", The Astrophysical Journal, 775, (2013), 113 (16pp), 査読有
  16. T. Ueda, K. Fujii, S. Hirobayashi, T. Yoshizawa, T. Misawa, "Motion Analysis Using 3D High-Resolution Frequency Analysis", IEEE Transactions on Image Processing, 22, (2013), 2946-2959, 査読有
  17. M. Hasegawa, T. Kako, S. Hirobayashi, T. Misawa, T. Yoshizawa, Y. Inazumi, "Image inpainting on the Basis of Spectral Structure from 2-D Nonharmonic Analysis", IEEE Transactions on Image Processing, 22, (2013), 3008-3017, 査読有
  18. Tamura, Y., Tatamitani, Y., Takahashi, S., Horigome, O., Maekawa, J., Kohno, K., Sakai, T., Taniguchi, A., "A New "Off-point-less" Method for Mm/submm Spectroscopy with a Frequency-Modulating Local Oscillator", Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 476, (2013), 401-402, 査読無

#### 国内学会発表。

2012年 計画研究 64件, 2013年 計画研究 178件、 公募研究 58件

#### 国際会議発表。

2012年 計画研究 32件, 2013年 計画研究 105件、 公募研究 48件

#### 領域ホームページ

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

計画研究 A03 [http://www.ipmu.jp/webfm\\_send/555](http://www.ipmu.jp/webfm_send/555)

計画研究 A04 <https://yukimura.hep.osaka-cu.ac.jp/wiki/projects/>

計画研究 A05 <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~juryokuha/>

#### 主催シンポジウムなど ( ) は登録参加者数

第2回領域シンポジウム 2014年1月13~15日 東京工業大学 (78名)

第1回領域シンポジウム 2013年3月1, 2日 大阪市立大学 (87名)

キックオフミーティング 8月28日 11:00~17:30 京都大学基礎物理学研究所 (55名)

## 領域研究会

第6回 2014年4月15日 9:00~13:00 Kavli IPMU-カブリ数物連携宇宙研究機構、ほかTV  
会議によるリモート会場

第5回 2013年10月19日 10:00~17:00 大阪市立大学、ほかTV 会議によるリモート会場  
(42名)

第4回 2013年7月26日 10:30~17:00 京都大学基礎物理学研究所、ほかTV 会議によるリ  
モート会場 (59名)

第3回 2013年5月24日 10:30~17:00 東京工業大学 (67名)

第2回 2012年12月27、28日 広島大学、および東広島天文台見学 (48名)

第1回 2012年10月21日 9:00~16:00 富山大学、および東大宇宙線研究所神岡実験施設見  
学 (43名)

KAGRA データ解析スクール @ NAOJ 2013 日時：2013年2月20-22日

場所：国立天文台すばる棟大セミナー室 (約60名)

## 受賞

計画研究 9件、 公募研究 6件

特に大きな賞としては、理論の計画研究代表者の田中貴浩と連携研究者の柴田大が国際一般相対論と重力学会(I SGRG)のフェローにSchutz, Ellis, Newman等の世界的に有名な学者と共に選出されたことが挙げられる。領域代表者の中村卓史が国際一般相対論と重力学会(ISGRG)の国際委員に選出された。さらに、データ解析の分担者の高橋弘毅が山梨科学アカデミー奨励賞を受賞した。連携研究者の横山順一は井上學術賞を、公募研究に採択された関口雄一郎が日本物理学会若手奨励賞を受賞した事等が挙げられる。本研究で採用しているポスドクの中野寛之が2013年11月7日に Outstanding Presentation Award Gold Prize (JGRG23)、田中貴浩の大学院生の山下康穂が、2013年6月に京都大学竹越賞、中村卓史の大学院生の衣川智弥は京都大学理学部グローバルGCOE poster awardを2013年2月13日に、公募研究に採択された関口雄一郎が2013年3月20日に日本物理学会若手奨励賞を受賞した。新沼浩太郎と杉山孝一郎は2013年9月4日にAsia-Pacific Radio Science Conference, YOUNG SCIENTIST AWARD を、木村匡志は(学振受入れ：田中貴浩)アジア太平洋研究会 "Gravitation and Cosmology"で2013年2月に優秀プレゼンテーション賞を受賞した。

## 一般向けアウトリーチ

市民講演	計画研究	15件、	公募研究	10件
一般向け雑誌	計画研究	7件、	公募研究	2件
新聞記事	計画研究	8件		
出張授業	計画研究	6件、	公募研究	1件

## 9. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募班での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

- 1) 総括班の指導・助言の下で5ページのような組織で領域を今後も運営して行く方針である。総括班の中の計画研究代表者からなる代表者会議を毎月第1金曜日の9時から開催し、領域の各研究計画の進行状況の check、予算使用状況についての検討、bi-monthly に行う各計画研究が回り持ちで行う1日から2日間のTV会議または face to face での workshop の内容の検討を行う。2014年度の第1回は既に4月14日にIPMUで行った。また、年に1回の領域シンポジウムについては2014年度には広島大学、2015年度はIPMU、2016年度は京都大学で行う事を決めている。領域シンポジウムには総括班の評価委員、学術調査官の出席もお願いして、有益な助言をもとめる。すでに、述べたようにこれらの会議での公用語は英語である。
- 2) KAGRAのトンネル掘削は2014年3月に予定通り終了したので、2015年12月に常温で1ヶ月運転することになっている。この期間はまさに、本領域の目標の実現可能性があるときであるので、いかなる体制をとるか、今年度から総括班として検討を進めたい。KAGRAグループとの密接な連絡を今まで以上に維持する。
- 3) 2年に1回開かれるGWPAW(Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop)の次回は日本で開かれる事が昨年インドでのGWPAWで決定された。Scientific Organizing Committeeの委員長は領域代表者の中村卓史、現地組織委員長は計画研究代表者の神田展行が選出された。従って、本領域として総員体制でGWPAW in Japanの準備を行う。GWPAWは可能な限り予算的にも26年度に行いたい、Scientific Organizing Committeeの議論によっては27年度になることが起こり得るので、その場合は26年度の総括班の予算の一部を27年度に繰越す可能性がある。
- 4) 年に1回のシンポジウムは、26年度は広島大学で、27年度はIPMUで28年度は京大で行う事を決めている。内容・方法等についての詳細は総括班で検討するが、今年度同様、会議の公用語は英語とし、若手のセッションも設ける。また、公募研究の研究代表者にも必ず発表をしてもらおう。シンポジウムは2ヶ月に1回のbi-monthly workshopとは異なり、face to faceで行うことにし、その為の旅費は確保する。
- 5) 事務局は今まで通り大阪市立大学に置き、専属の秘書を雇うので、その為の費用が必要である。
- 6) 現在、異なった計画研究間ないしは、計画研究と公募研究、または公募研究間の共同研究が7つ程ある。これらは、既に学会で発表をしたり、論文を投稿中であつたりするが、このような共同研究の数を2倍以上に増やし、領域としての広がりを持たせるようにする。
- 7) データ解析スクールのような若手養成活動も続けることにし、今まで通り総括班で費用の一部を負担する。
- 8) 毎週金曜の10時半から行っている理論とデータ解析グループのTV会議の合同セミナーは継続する。これは大学院生やポスドク等の若手育成にも役立っているので続ける。
- 9) 計画研究A01では今までに開発したWF-MAXI搭載観測装置(軟X線大天域カメラと硬X線モニター)の試作品の性能試験を進め、熱的条件を確定して搭載品の詳細設計に反映させる。WF-MAXIの今回の公募の搭載採用はJAXAでの財政状況等に左右されるが、今年度採用されない場合も、次回のチャンス、あるいは、米国との協力によるISS搭載や、衛星の相乗りも含めて、開発は継続する。また、



iKAGRA や海外の LIGO/VIRGO の運転開始後は、現行の MAXI による重力波に対応 X 線突発天体の探査を行う。

1 0) 計画研究 A02 内の各サブプロジェクトで開発中のシステムにつき、完成したものから順次試験観測・試験運用を行っていき、平成 27 年度末には本格運用に移行することを目指す。こうした新規開発装置と既存の国内望遠鏡群を用いて、多波長・多地点観測による突発天体研究を継続していく。特に、Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡の GBM アラートに対応した追跡観測を実施し、位置決定誤差の大きなアラートに対応した電磁波対応天体の検出システム、大量データ解析パイプラインの整備と充実を図る。また、LIGO/Virgo と結んだ MOU を基に、新規開発装置群を重力波天体追跡ネットワーク J-GEM に順次組み込み、平成 27 年度からは LIGO/Virgo からの重力波アラートに対応したフォローアップ観測を開始する。平成 28 年度には、さらに iKAGRA からの重力波アラートを受けて、J-GEM によってフォローアップ観測を実施し、重力波天体の電磁波対応現象の世界初の検出を目指す。

1 1) 計画研究 A03 では、EGADS 検出器における超新星爆発ニュートリノ検出の鍵となる電子回路の導入を本年度中に行う。その後、リアルタイムでの信号の再構成ツールの開発を行い、超新星爆発ニュートリノが検出器に到達して 1 秒以内に自動で他の観測装置に知らせるシステムを平成 27 年度までに完成させる。

1 2) 計画研究 A04 では、後半は、いよいよ 2015 年末に予定されている KAGRA 実験の最初の観測データを解析する。そのため、特に 3、4 年目において、計算能力とデータ貯蔵容量を整備し、KAGRA 運転開始に備える必要が有る。100TB 程度のデータ容量と、探索当初に必要な計算能力をもつよう、初年度に導入した計算機システムを増強する。また、最終年度には解析の進展やパイプラインの改良に合わせて、計算能力を増強する。最初の観測において必須の探索パイプラインは、「コンパクト連星合体（とくに中性子星の質量範囲）」、および「バースト重力波」を対象とするものである。3 年目には、それまでに開発した解析パイプラインの実装や試験をおこなう。検出器自体が最初の観測から優れた感度をもてるかは難しい点であるが、KAGRA のデータについて典型的な重力波探索がなされ、上限値や性能評価に結びつく解析結果を出すことは大変重要である。もちろん、地球に近い場所でイベントが発生する幸運な可能性も無いわけではない。また、重力波速報の技術的な整備、すなわち、速報データベースの作成、データ形式、配送の仕組み、実際に配送する計算機サーバーの動作、などをおこなう。これは同時観測や相互フォローアップを目的とする、領域内の他の計画研究との横断的な事項である。公募研究においては、検出器雑音についてや観測速報の知見を活かす研究があり得る。また、大量のデータ処理についての数学的なアプローチの研究なども、本領域に相乗的な効果をもたらしてくれると期待する。

1 3) A05 は以下のように研究代表者と( )内の分担者が中心となり推進する。a) 様々な重力波源の探査と重力波波形の解明(中村):多様な現象を視野に新しい重力波源の可能性を見出す。数値相対論に関しては連携研究者(柴田)が参加する。b) 超新星爆発の物理(山田):重力波とニュートリノの同時観測から爆発機構を連携研究者(固武)と協力し研究する。より精密なシミュレーションで、首尾一貫した予言を行う。c) 他の観測手段との同時観測から得られる物理(井岡):様々な重力波源に対して、同時観測可能な電磁・ニュートリノ放射の可能性について徹底的に議論を詰める。d) 新しい重力波観測・データ解析法の提案(瀬戸):データ解析の手法を確立し、実際のデータ解析に応用し、A04 と協力し先駆的成果を発信する準備をする。e) 宇宙論・修正重力理論の観点からの重力波研究(田中):修正重力理論が重力波波形に与える影響、宇宙初期の重力波源を連携研究者(横山,川崎)とともに明らかにする。

研究の連携強化のため、定例テレビ会議を引き続き行う。新しい物理のあらゆる可能性を検討するため研究会を開催・支援する。合宿を企画しテーマを絞り課題に取り組む。

**10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画（研究代表者の変更は真にやむを得ない場合に限る）（2～5 ページ程度）【非公開】※本欄に記載の計画研究については、全て3年度目の審査の対象となります。**

領域内の計画研究の研究代表者の交替や組織体制に大幅な変更がある場合（新しく計画研究を追加する場合や既存の計画研究を廃止する場合、領域全体の交付予定額の範囲内で各計画研究の研究経費を変更する場合（計画研究に係る経費を減額し、公募研究に係る経費を増額する場合等））には必ず記入してください。その際、以下の点を含めてください。

- ・計画研究を追加する場合は、追加の必要性、その計画研究が領域内で果たす役割、他の計画研究への影響等
- ・計画研究を廃止する場合は、廃止の理由、当該計画研究を廃止しても領域として支障がないことの説明等
- ・研究代表者の交替の場合は、交替の必要性、新旧の研究組織の異なる点（組織構成、領域内で果たす役割等）、新たに研究代表者になろうとする者が、旧研究代表者に替わって研究を実施できることの根拠、妥当性及びその者の研究業績等
- ・計画研究に係る経費と公募研究に係る経費の額の変更については、その必要性、1 回目の公募研究の応募・採択状況等（公募研究に係る経費を減額して計画研究に係る経費を増額する変更は真にやむを得ない場合に限る。また、公募研究の規模に係る最低基準を下回らないこと。）
- ・以上の各変更に伴う他の計画研究の研究経費の変更及びその妥当性等

（該当しない）

# 「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」の中間報告

2014年9月5日

領域代表  
京都大学大学院理学研究科  
中村卓史

1

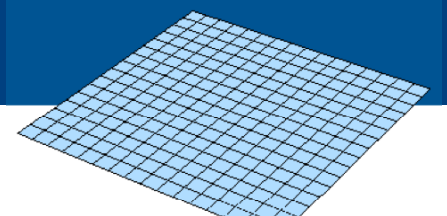
## 重力波とは何か？

- ➡ 一般相対論によると物体は周りの時間と空間(時空)を歪める。
- ➡ その物体が **加速度運動**をすると時空の歪みが光速で波として伝わる
- ➡ これが **重力波**である。

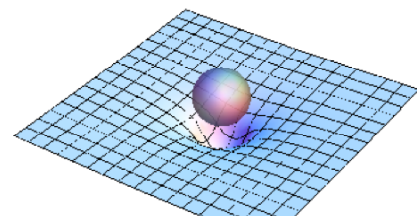
まだ直接検出はされていない！！

**何故？** 重力は最も弱い力(陽子間の重力/電気力= $10^{-36}$ )  
⇒発生しにくい。検出も困難

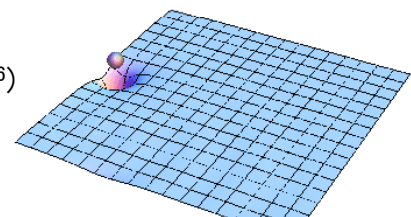
**しかし** 重力波は**2016年頃**に  
ほぼ**確実に**直接観測される



平坦な時空



歪んだ時空



重力波(イメージ)

2

## 何故確実か？ 解答①:大型レーザー干渉計が建設・改造中



## それで、どうなったか？

- 1) KAGRAは2014年3月に3 kmx 2のトンネルの掘削を終了した。2015年12月には**iKAGRAで常温での運転**をし、その後20Kの低温鏡による**bKAGRA**に移行し2017年度には設計感度に達する予定である。東日本大震災による1年の遅れは仕方がないが、国際的な競争の観点からはこの遅れは大きい。しかし、**iKAGRAで大発見**があるかもしれない。
- 2) adv LIGOは順調に進んでいる。adv Virgoは少し遅れているが、確実に進んでいる。X線観測の**計画研究A01**と光・赤外観測の**A02**は**LIGO/VirgoとMOU**を結び**2015年から**は、重力波が観測された場合、その時間と位置情報を受け取る事になっており、**follow up観測**を実施できる。なお、adv LIGOの連星中性子星合体に対する検出距離は現在**7000万光年**であるが、2015年には**2.4億光年**、~2016年には**3.9億光年**、2019年には**7億光年**に達する予定である。

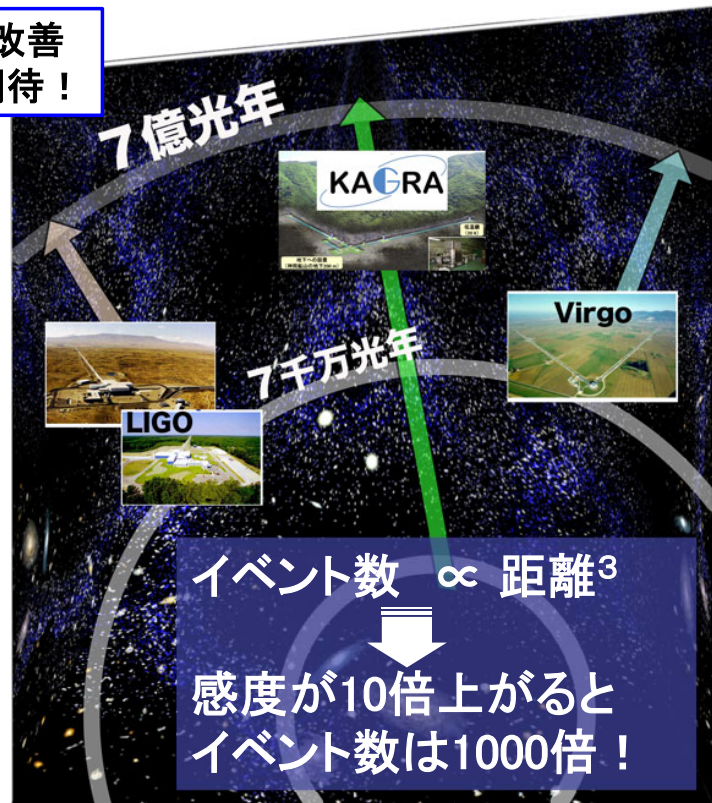
## 何故確実か？ 解答②: 重力波検出の特徴からイベント数予言が可能

2016年を目途に6倍程度感度改善  
最低年間2-3イベント程度が期待！

## 感度の3乗でイベントが増加

重力波検出器の感度  
 $\propto$  観測可能な距離  
 イベント数  $\propto$  観測可能な体積  
 $\propto$  距離<sup>3</sup>  $\propto$  感度<sup>3</sup>

つまり、adv LIGOの重力波検出確率は2015年には現在の**64倍**、  
 ~2016年には現在の**216倍**、  
 2019年には現在の**1000倍**に達する予定である。**KAGRAも2017年**にはadv LIGOに追いつく。Adv VirgoはLIGOに少し遅れる進捗と予想できる。

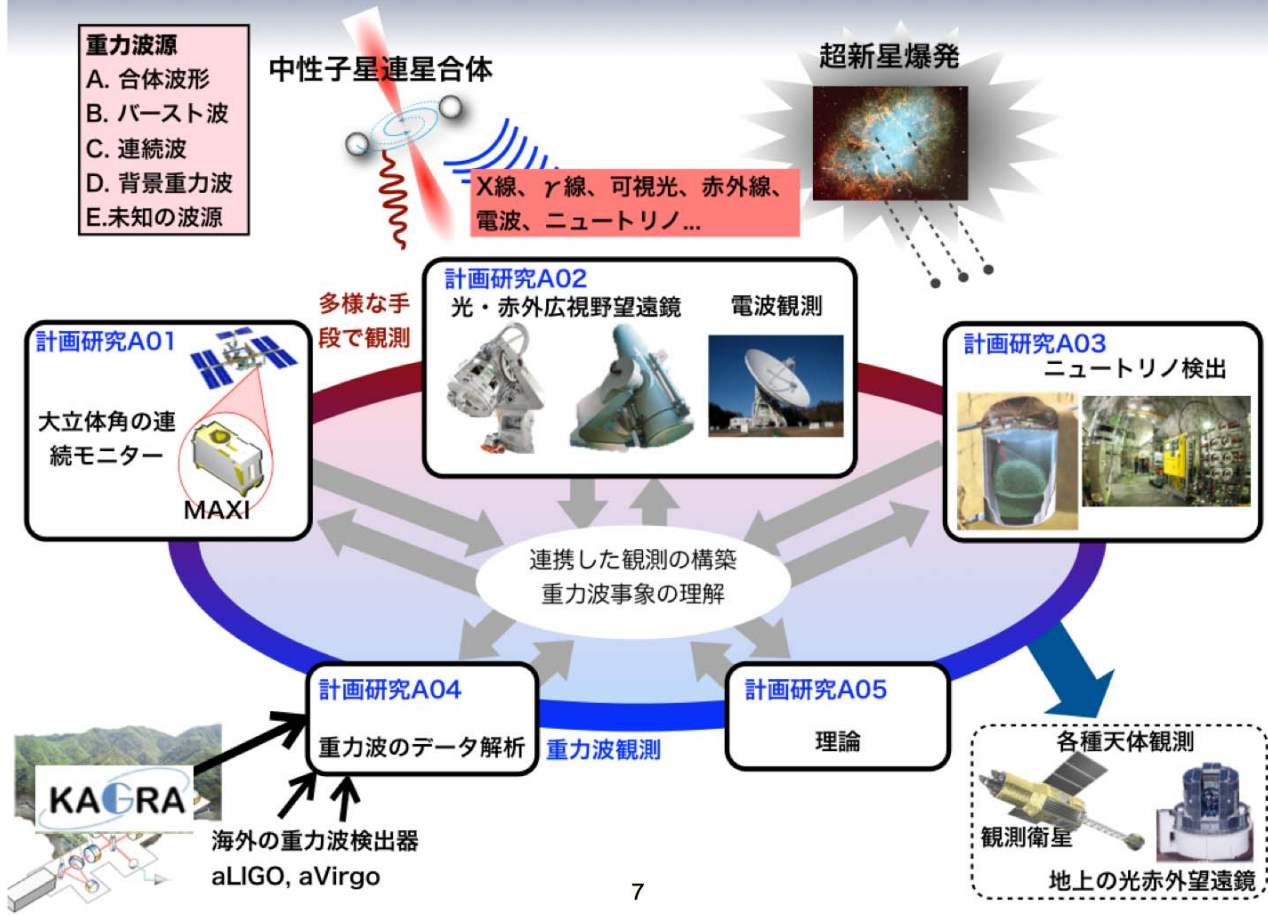


5

## 領域の目的と必要性

- 1) 重力波天体は高密度・超高温であると考えられるので、必然的に電磁波やニュートリノを同時に放出すると考えられている。したがって、電磁波とニュートリノの**同時観測は必須である**。その体制の構築をし、実際に同時観測を実施するのが目的である。**データ解析と理論**は、重力波源の波形を予測し、それに基づいて重力波からの情報を解析し、結果の理論的な説明をするためにこれ又必須の要素である。
- 2) 本中間報告では、この目的に対して①**何がどこまで**達成され、②**これから何をしよう**としているのかを報告する。

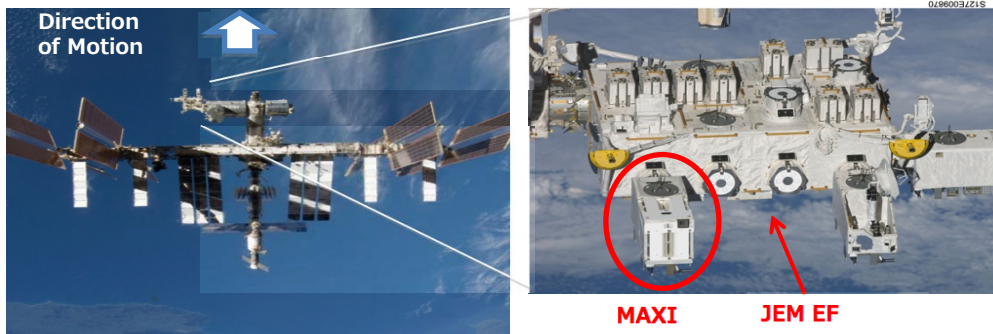
6



## 計画研究A01 重力波天体からのX線・γ線放射の探索に関する研究

最も有望なのは10keV以下のX線放射である。重力波によって決まる源の位置は数十平方度の広範囲に渡っているので、広視野のX線望遠鏡が必須である。

ISS(International Space Station)に取り付けられたMAXI(Monitor of All-sky X-ray Image)は90分で全天の80%を観測できる。LIGO/VirgoとMOUを締結したので、2015年からfollow-up 観測が実施できる。下の図はISSおよびMAXIが取り付けられたJEM EF (日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム)の地球周回軌道上の写真である。



さらに、全天の20%を常時観測できるWF(Wide Field)-MAXIのミッションの検討と機器の開発を行って来た。現在、宇宙科学研究所の小規模ミッションの公募に応募中である。

## A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### 主な成果

#### WF-MAXIの予備設計と部分試作:

- ISSミッションとしての成立性の検討、提案
- HXM用のASICの新規開発

#### MAXIによる“極”超新星（ハイパーノバ）の痕跡の発見

- 木村公 (JAXA) ほか。JAXAプレス発表 (2013年2月)
- ““Is the Cygnus Superbubble a Hypernova Remnant?”  
M.Kimura, H.Tsunemi, H.Tomida et al. PASJ 65, 14 (2013)

#### 新星爆発の瞬間の観測に成功

- 森井幹雄、三原建弘 (理研) ほか。理研プレス発表 (2013年11月)
- “Extraordinary Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744 as an Ignition of a Nova on a Very Massive O-Ne White Dwarf” M. Morii, H. Tomida, M. Kimura et al. ApJ 779, 118 (2013)

#### 受賞等

- 谷津陽一 (東工大) 平成 26 年度「東工大挑戦的研究賞」  
「突発天体のための超小型 X 線偏光計観測衛星の開発」

9

## A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### 今後の研究計画

#### LIGO/Virgo重力波現象の追跡観測

- LIGO/Virgo 電磁波フォローアップコンソーシアムの一員として、  
**共同研究を2015年から開始。**

#### 突発天体検出ミッションの開発:

- 本年度にWF-MAXI検出器 (SLCとHXM) の試作モデル性能評価
- 2014年末の NASA Explorer 公募ミッションに参加 観測装置の提供の可能性を協議中

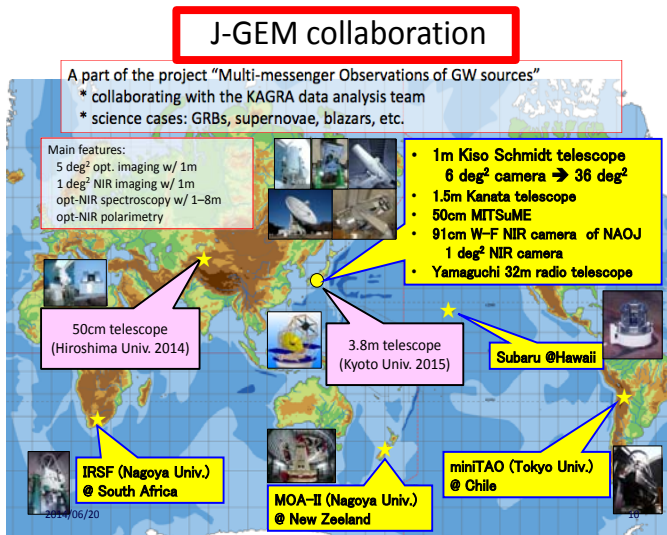
#### 突発天体のX線・ガンマ線による観測の推進

- 位置決定・速報システムの改良
- MAXI、Suzaku、Fermi** を用いた超新星、ブラックホール、中性子星、ブラックホール連星、ガンマ線バースト等
- A02と連携した突発天体観測推進

10

## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

光学望遠鏡により重力波天体のさらに詳細な情報を得ると言うのが、本領域の大きなシナリオである。(1)「木曾1mシュミットカメラ用の超広視野CMOSセンサの開発、岡山91cm広視野赤外線望遠鏡の自動化、京大3.8m望遠鏡に搭載する面分光器開発を行う。(2)可視赤外線の全地球的観測網の整備：中国西域部への50cm広視野ロボット望遠鏡を設置し、木曾、岡山、広島などの国内観測所とハワイのすばる望遠鏡、東大アタカマ望遠鏡、



ニュージーランドMOAII, 南アフリカ望遠鏡など結んだ全地球的突発激変天体観測網を整備する。これは、現在ほぼ**70%は目的を達成**しており、全地球的な観測体制の構築が完成しつつある。また、**LIGO/VirgoとMOU**を結んだので、重力波が検出されたら、その時間と位置情報を得て直ちに、follow-up観測が可能な体制がほぼ出来つつある。重力波源の方向が**昼間**の場所からは、**観測できない**ので、全地球的な観測体制は必須である。

## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

## 主な成果

- 中国50cm望遠鏡・架台の製作と、観測装置(広視野3色同時撮像カメラ)の開発

50cm望遠鏡に設置した3色同時カメラ (左)  
3色同時カメラの筐体 (右)



- 極超新星と通常の超新星をつなぐミッシングリンク超新星の観測的同定

"A Luminous and Fast-expanding Type Ib Supernova SN 2012au", Takaki, K. et al., ApJL, 772, L17 (2013)

- 重力波源の光学赤外線対応現象に関する理論的研究(公募研究・A05との連携研究)

"Radiative Transfer Simulations for Neutron Star Merger Ejecta", Tanaka, M. & Hotokezaka, K., ApJ, 775, 113 (2013)  
"Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers", Tanaka, M., et al., ApJ, 780, 31 (2014)



## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### 今後の計画

#### LIGO/Virgoイベントの追跡観測

- ・ **この領域**が主導して作った**J-GEM**(Japanese collaboration for Gravitational wave ElectroMagnetic follow up observation)とLIGO/Virgo電磁波フォローアップコンソーシアムとの**共同観測を2015年度から開始**

#### 光学赤外線電波追跡観測ネットワークの構築と観測運用

- ・ 超広視野CMOSカメラの開発と試験観測(~2016年度)
- ・ OAOWFCの観測開始(2015年度)
- ・ 面分光装置の188cm望遠鏡での観測開始(2015年度)
- ・ 中国50cm望遠鏡の設置(2015年度)・観測開始(2016年度)
- ・ 山口大32m電波望遠鏡、ASTEサブミリ望遠鏡による観測体制構築(~2016年度)
- ・ 重力波アラート受信・データ解析システム構築(2015年度)

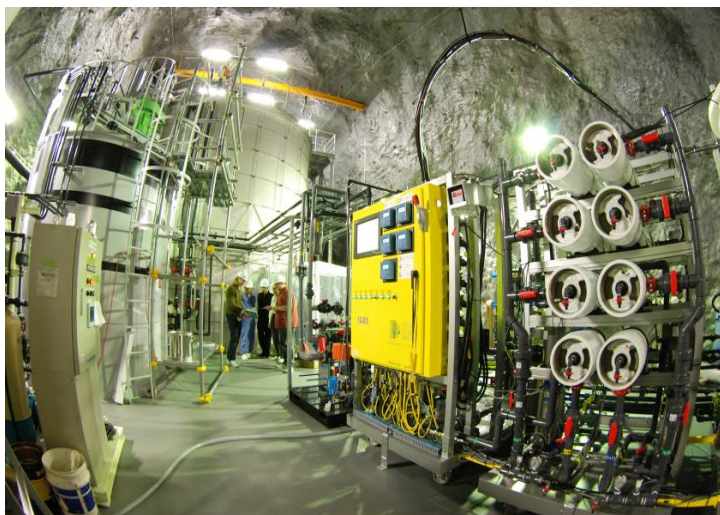
#### 突発天体の多波長多地点連携観測の推進

- ・ GBMを用いた広視野追跡システムによる重力波天体同定・追跡システムの試験と、ショートGRBの観測
- ・ A01と連携した突発天体観測推進
- ・ KISS(木曾超新星探索)プロジェクトの推進

13

## 計画研究A03 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究

超新星爆発に伴う重力波とニュートリノの検出も**本領域の重要なターゲット**である。特にニュートリノに関しては神岡鉱山内にある200tの水チェレンコフ検出器にGdを0.1%混入するEGADS(Evaluating Gadlinium's Action on Detector Systems)を反ニュートリノを判別できる世界初のニュートリノ検出器として2年間運転することが大きな目標の一つであった。下図はGdニュートリノ検出器の全景である。2014年3月にはGd 0.02%を溶解し**予備運転**を行ない、

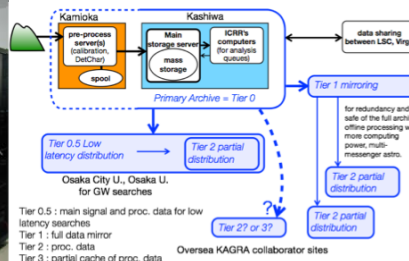


反ニュートリノ判別に決定的な中性子捕獲信号が予測通り得られていることを確認した。現在は検出器の改良を行っており2014年10月より**運転**予定である。再開後はいつでもイベントを速報できる。**速報**があり次第**計画研究A01**と**計画研究A02**が**追観測**を実施できる。この体制は重力波の検出の可否とは全く独立に実行できる。

14

## 計画研究A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究

データ解析では、KAGRAで取得したデータを主に**大阪市立大学と阪大**で chirp signal search のような比較的**データ量の少ないものを解析**する。現在、解析ソフトウェアの構築が進んでいる。下図右は、KAGRA実験からのデータの受け取り側の計算機となる**計画研究A04**のものである。これを中核にして、研究計画の後半で計算能力とデータ保管量を、観測データに対応する規模に増強する。全体の**flow**は下の図の中央のようになる。左は2014年2月に完成した**iKAGRA用の神岡のData System**である



15

## 計画研究A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

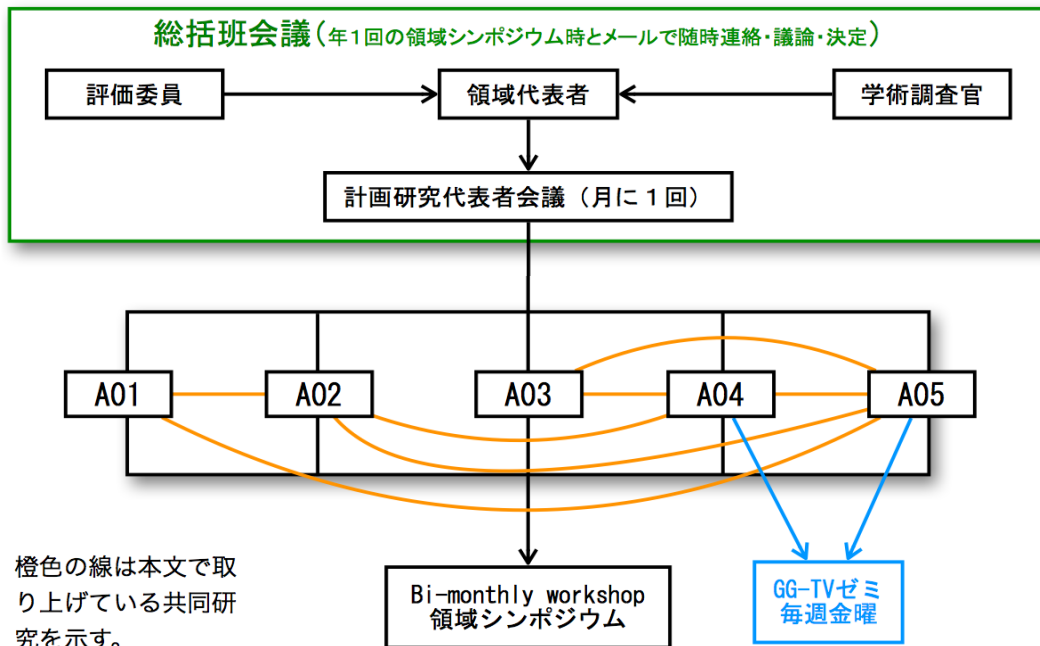
既に**数多くの成果**が出ている。それらを列挙すると

- 1) SGRB(Short Gamma Ray Burst)の観測データを解析することにより、連星中性子星ならKAGRAは年間**最低4イベント**、もし中性子星-ブラックホール連星なら**年間150イベント**重力波を観測する事がわかった。これは**A01との共同研究**である。(ApJ 789, 65(2014))
- 2) 金属汚染のない宇宙で最初にできる星から質量が太陽質量の30倍位の重いブラックホール連星が大量にできる可能性が解った。連星ブラックホールの合体からの重力波をKAGRAは**年間140イベント**程度観測できる。固有有振動数は200Hz程度になり、アインシュタイン理論の強い重力場での可否が判明する。現在詳細な検出可能性を**A03との共同研究**で進めている。(MNRAS 442, 2963(2014))
- 3) 質量ゼロと質量のある2つのgraviton(重力波)があるbi-gravity理論において、宇宙論的観測や太陽系内観測と矛盾しないパラメータ領域がある事を示した。その結果、ニュートリノ振動のような**graviton振動**や chirp signalが時間的に逆になる**inverse chirp現象**が起きて、観測に掛かる可能性を示した。現在、**A04と共同**でKAGRAで、どのパラメータ範囲なら検証可能なのかを調べている。(PTEP 2014, 043E01(2014))
- 4) 超新星爆発の磁気回転不安定性による爆発機構を高分解能数値シミュレーションで調べた結果、磁場で輸送された角運動量の効果でニュートリノ加熱時間が長くなり、爆発が起こる可能性があることを突き止めた。**A03,A04とも共同**して超新星爆発時に得られる重力波とニュートリノの時間変動の相関から超新星爆発のメカニズムを解明する方法を調べ、非回転起源か回転起源かは決められる事が解った。(ApJ 786 83(2014))
- 5) 連星中性子星のシミュレーションで太陽質量の~10%の中性子物質が光速の~20%の速度で放出されることを示した。放出物質はgold等のいわゆるr-process元素を作る事が期待されると同時に星間物質とも衝突して、電波からX線までの**種々の波長帯で電磁放射**をする事が解った。**A01,A02の追観測**に重要なデータを与える事が出来た。実際、2013/6/3の起きたSGRBでは、予想されるような光学領域の電磁波が観測された。(PRD 89, 0630062(2014), ApJL 784, L28(2014))
- 6) 重力波の速度が光速と異なる場合、連星中性子星の合体では**相対誤差~10<sup>-16</sup>**まで決定できる新しい方法を発見した。これは、今までに知られていた方法より10桁程度精度が高い。(PRD 90, 044048 (2014))

16

# 領域の体制(公用語は英語)

新学術領域「重力波天体」組織図



橙色の線は本文で取り上げている共同研究を示す。

総括班会議、代表者会議、Bi-Monthly workshop、領域シンポでの公用語は英語

## 全体スケジュール(予定より早まった)



	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>A01</b> 重力波天体からのX線・γ線放射の探索	WF-MAXI: 試作品開発 MAXI, すざく, Swift等の衛星を用いて、GRB、中性子連星、ブラックホールの研究		WF-MAXI: 搭載品開発 観測装置・ソフトウェア、観測計画に反映		重力波観測フォローアップ	
<b>A02</b> 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索	岡山赤外カメラ自動観測化 木曾シュミット望遠鏡整備	GRBフォローアップシステムの整備、京大面分光装置開発	中国に広視野望遠鏡、木曾シュミット6度カメラインストール	重力波観測フォローアップの試験観測	重力波観測フォローアップ開始	
<b>A03</b> 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究	200t R&D データ収集系アップグレード、超新星ニュートリノ検出器の計画	検出器更正 長期観測への準備	他の観測との正確な時刻同期	観測 遠い超新星についてもより良い感度をもつためのオンライン計算の継続的な改良		
<b>A04</b> 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究	探索解析システムの開発 GRID環境の構築		本機導入 解析ソフトウェア実装	観測データ転送、重力波探索	パイプライン解析の調整、速報システム整備	
<b>A05</b> 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究	幅広い理論研究の連携の強化。最適な同時観測、データ解析の体制の改善に向けた理論的知見の発展と整理。重力波波形予測の整備。		重力波観測とその他のブロープによる同時観測に向けた更なる理論的研究の推進。幅広い理論研究の連携の強化。			
<b>KAGRA計画</b>	建設			常温観測 iKAGRA	低温化へ bKAGRA	
海外の重力波検出実験 advanced LIGO advanced Virgo	インストール		装置調整		観測開始	

## 人材育成と国民への成果の発信

### 重力波天体の分野は21世紀に大発展する重要な領域

- ① 研究成果を国民に発信する
- ・ホームページの充実
  - ・一般科学雑誌への執筆
  - ・中学生・高校生・大学生・市民向け講演会の開催
  - ・データ解析への市民参加の検討

#### 実績

- 1) ホームページは領域全体と各計画研究の計6件
- 2) 市民講演は25件
- 3) 一般向け雑誌は9件
- 4) 新聞記事は8件
- 5) 出張授業は7件

- ② 我が国で必要な人材を育成する
- ・若手向け分野横断的な勉強会を定期開催。
  - ・研究員の雇用

## それで人材育成の実績は？

- 1) シンポで**若手セッション**を設けた。1年目はスライドは**英語**、発表は日本語。2年目は発表も**英語**、質疑応答は日本語。今年は**両方とも英語**を期待。
- 2) 大学院生・ポスドクの研究会・学会・国際会議での発表は延べ**293回**。
- 3) **2ヶ月に1回のBi-Monthly workshop**。違う分野の研究の理解の場を提供。大学院生・ポスドクに積極的に参加して研究範囲を広げるように指導している。ノーベル賞級の**アイデア**が出てくる事を期待している。
- 4) 国立天文台と東大で、**KAGRAデータ解析スクール**を開催しデータ解析の仕方を**他分野の大学院生**を含むそれぞれ60名**延べ120名**の参加者に教えた。他分野の若手も含めた**若手育成**に寄与している。
- 5) 毎週金曜10時半から**GGゼミ**(Gravitational wave and Gravitation seminar)を**TV会議**として開催している。**京大、大阪市大、阪大、広島大、東大、九大**等である。院生、ポスドクも参加でき、自分の大学の研究室とは全く異なる教員が沢山いるので、初歩的な事の質問もできて、その場で答えを貰える。これも、この分野の**若手育成**に寄与している。
- 6) 2012年8月から2014年5月までに新たに職を得た**若手の数は7名**である。京都大学基礎物理学研究所准教授、名古屋大学大学院理学研究科特任助教、ウィスコンシン大学ミルウォーキー校PD研究員、理化学研究所PD研究員、日本学術振興会 海外特別研究員 3名
- 7) **若手の受賞**が相次いだ。
  - ①長岡科学技術大学准教授高橋弘毅が山梨科学アカデミー奨励賞(2013/6/4)
  - ②ポスドクの中野寛之がJGRG23でOutstanding Presentation Award Gold Prize (2013/11/7)
  - ③大学院生の山下泰泰、京都大学竹越賞(2013/6)
  - ④大学院生の衣川智弥は京都大学理学部グローバルGCOE poster award。(2013/2/13)
  - ⑤特定助教の関口雄一郎が日本物理学会若手奨励賞(2013/3/20)
  - ⑥新沼浩太郎と杉山孝一郎はAsia-Pacific Radio Science Conference, YOUNG SCIENTIST AWARD(2013/9/4)
  - ⑦谷津陽一(東工大)平成26年度「東工大挑戦的研究賞」「突発天体のための超小型 X 線偏光計観測衛星の開発」
  - ⑧PD学振の木村匡志はアジア太平洋研究会 “Gravitation and Cosmology”で優秀プレゼンテーション賞(2013/2)

## ポスドクは役に立っているか？

- ① 領域全体での研究員雇用は、初年度に6名、2年目および3年目はそれぞれ**14名**である。
- ② 計画研究A01では2名雇用。それぞれ重力波源のX線対応天体監視のための**WF-MAXIの開発**と、現行の観測装置**MAXI**、**Fermi**および**地上望遠鏡**を用いた観測研究に従事している。
- ③ 計画研究A02では4名雇用、それぞれ**50cmロボット望遠鏡**、**miniTAO**による観測の実行、**91cm望遠鏡**のシステム開発、**データ処理**に欠かせない。
- ④ 計画研究A03では2名雇用。それぞれ、Gd検出器の**不純物の除去**、**検出器の校正**に従事している。
- ⑤ 計画研究A04では4名を雇用。それぞれ**異なる重力波源**のデータ解析を担当し、これまで海外に比べて脆弱だった**マンパワー**を補い、本分野の日本の若手育成に重要な役割を担っている。
- ⑥ 計画研究A05では3名を雇用。それぞれ**異なる重力波源の理論**を担当。2013年度にポスドクで採用した本橋隼人と西澤篤志は海外学振研究員に採用され、現在海外で活躍している。
- ⑦ **このような実績から鑑みて、ポスドクなしでは領域の目標達成に困難が生じると考えられる。**

## 結 論

- ① **計画研究A01**では、現有のMAXIに加えて全天の20%のsoft X線源を常時観測可能なWF-MAXIの基礎開発が進み、ISSに搭載を**提案中**である。
- ② **計画研究A02**では、我が国の全世界的な光赤外観測ネットワークJ-GEM Collaborationを設立し全地球的突発激変天体観測網の70%は整備が出来た。
- ③ X線観測と光赤外観測の計画研究A01とA02は**LIGO/Virgo**と**MOU**を結んだので、**2015年からfollow-up観測を実施できる。**
- ④ **計画研究A03**で開発して来た超新星からの反ニュートリノを検出可能な世界初の水チェレンコフ検出器(200t)は**2014年10月から稼働を始める。**
- ⑤ iKAGRAは2015年12月に運転をする。その時のデータを解析できる**計画研究A04**の体制が出来つつある。
- ⑥ 理論の**計画研究A05**では、新しい重力波源、新しい重力波の性質の予言、対応X線・光学事象の予想が進み、他の**計画研究A01,A02,A03,A04**との共同研究で重力波データが出て来た時の対応を詰めている。

100年前の**アインシュタイン**の予言は正しかったか？ **我々人間・地球の起源となる物質は如何にして生まれたか？** → **全く新しい宇宙の窓が開く！！** → **新しい科学の世界が見える！！**

## 補足資料 1 公募研究リスト

### 平成25 - 26年度 公募研究採択課題一覧

A01 金沢大学	米徳大輔	重力波と電磁波の同時検出を目指した全天監視型X線撮像検出器の開発
A02 東京大学	酒向重行	天文観測用高感度CMOSセンサの開発
A02 東京大学	田村陽一	新しいミリ波サブミリ波観測技術によるガンマ線バースト初期残光の探索
A02 名古屋大学	阿部文雄	広視野望遠鏡を利用した重力波天体の光学観測
A02 名古屋大学	永山貴宏	特殊減光フィルタを用いた近赤外線での明るい重力波源の観測
A02 国立天文台	田中雅臣	超高頻度サーベイ観測による短時間突発天体の検出
A03 東北大学	石徹白晃治	KamLANDによる近傍超新星爆発の観測
A03 岡山大学	作田 誠	ガドリニウムの熱中性子吸収反応でのガンマ線の相関測定
A04 東京大学	横山順一	非ガウスノイズを取り入れた重力波データ解析方法の研究
A04 富山大学	廣林茂樹	重力波に関する新知見を導き出す超高精度解析技術とその高速計算組み込み技術の開発
A04 国立天文台	辰巳大輔	低温干渉計型重力波検出器における突発性雑音低減
A05 東京大学	須山輝明	強い重力場での修正重力理論の検証に向けた理論的研究
A05 京都大学	木内建太	ブラックホール-磁場中性子星合体に関する数値的研究
A05 京都大学	諏訪雄大	ニュートリノ駆動型超新星爆発からの重力波
A05 京都大学	関口雄一郎	コンパクト天体連星合体における質量放出とR過程元素合成による電磁波放射
A05 広島大学	小島康史	マグネター星震学に向けた基礎理論

23

## 補足資料 2 領域の研究会・セミナー・会議

### 領域シンポジウム (毎年開催)

- (キックオフミーティング 京大 2012/8/28)
- 第1回(H24年度)大阪市大 2013/3/1-2
- 第2回(H25年度)東工大 2014/1/13-15

### 領域研究会 (隔月)

各計画研究代表機関が主催を順に担当  
各計画研究に集中した話題  
他の計画研究などから関連する話題  
装置の見学等  
領域全体の研究交流

- 2012/10/20 @東大宇宙線件 (神岡・富山)
- 2012/12/27-28 @広島大
- 2013/5/24 @東工大
- 2013/7/26 @京大基研
- 2013/10/19 @大阪市大
- 2014/4/15 @Kavli IPMU-カブリ数物連携宇宙研究機構
- 2014/8/4 @広島大

### そのほか領域内の研究会など

- 初年度～2年度で、累計67回

### 運営委員会 (毎月)

24

## 補足資料3 成果発表・受賞など

### 国内学会発表

- 2012年 計画研究 64件
- 2013年 計画研究 178件、公募研究 58件

### 国際会議発表

- 2012年 計画研究 32件
- 2013年 計画研究 105件、公募研究 48件

### 一般向けアウトリーチ

- 市民講演 計画研究 15件、公募研究 10件
- 一般向け雑誌 計画研究 7件、公募研究 2件
- 新聞記事 計画研究 8件
- 出張授業 計画研究 6件、公募研究 1件

## 補足資料4 受賞など

受賞 賞の名称	受賞者名など
2013年度 Asia-Pacific Radio Science Conference, YOUNG SCIENTIST AWARD	新沼浩太郎、杉山孝一郎
山梨科学アカデミー奨励賞	高橋弘毅氏(長岡技術科学大学)
アジア太平洋研究会 "Gravitation and Cosmology 2013"優秀プレゼンテーション	木村匡志(学振受入れ: 田中貴浩)
第3回(平成25年度)京大物理学研究科竹腰賞	山下泰穂(田中貴浩の指導する大学院生)
日本物理学会論文賞	横山順一(山口昌英、小林努と共同)
東京大学理学系研究科研究奨励賞	枝和成(横山順一の指導する大学院生)
Outstanding Presentation Award Gold Prize (JGRG23)	中野寛之(本計画研究PD研究員)
修士課程 最優秀賞	王岩
数理物理学専攻・物理科学講座・研究科長賞	王岩
第6回(平成25年度)宇宙科学奨励賞	米徳大輔
東京大学理学系研究科研究奨励賞	枝和成
井上学術賞	横山順一
国際一般相対論と重力学会 (ISGRG) フェロー	田中貴浩
国際一般相対論と重力学会 (ISGRG) フェロー	柴田大
2013年度日本天文学会改文研究報告論文賞	Matsuoka, Masaru; 他
若手の採用、昇進等	
ウィスコンシン大学ミルウォーキー校PD研究員に採用	久徳浩太郎(井岡邦仁の共同研究者)
理化学研究所PD研究員に採用	水田晃(井岡邦仁の共同研究者)
京都大学基礎物理学研究所 准教授に採用	Antonio De Felice(田中貴浩、中村卓史の共同研究者)
H25 日本学術振興会 海外特別研究員に採用	本橋隼人(本計画研究PD研究員)
H25 日本学術振興会 海外特別研究員に採用	西澤篤志(本計画研究PD研究員)
H25 日本学術振興会 海外特別研究員に採用	磯山総一郎(田中貴浩の共同研究者)
H25 日本学術振興会 海外特別研究員に採用	浦川優子(田中貴浩の共同研究者)
名古屋大学 大学院理学研究科 特任助教に採用	谷津陽一(東工大)
26年度「東工大挑戦的研究賞」	
基礎物理学研究所が重力波物理学関連の共同利用活動の充実を目的とした 所内センター「重力波物理学研究センター」を発足	田中貴浩、中村卓史、柴田大などが参加
KAGRAデータ解析スクール	於ける国立天文台

黄色は若手

## 補足資料5 若手の育成

### ポスドク、特任助教など研究員雇用

計画研究	年度				
	2012	2013	2014	2015	2016
A01	1	2	2		
A02	2	3	4		
A03	0	1	1		
A04	1	4	4		
A05	2	4	3		
計	6	14	14		

### 院生・ポスドクの研究会出席数

	年度				
	2012(7月以降)	2013	2014	2015	2016
計画研究関連	84	179	未集計		
公募研究関連	3	27	未集計		

#### そのほか：

- ・ 領域シンポジウム「若手セッション」
- ・ KAGRA データ解析スクール @ NAOJ 2013 日時：2013年2月20-22日  
場所：国立天文台すばる棟大セミナー室 (約60名)

27

## 補足資料 A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### これまでの達成状況

#### 広天域突発X線天体監視装置 (WF-MAXI)の開発：

- ・ 検出器の予備設計と部分試作を実施
  - ・ 軟X線広天域カメラ (SLC) 用のCCD素子を設計、試作
  - ・ SLC 実験室モデルによって熱成立性を試験
  - ・ 硬X線モニター(HXM)用にAPDに特化した信号処理ASICを開発・製造
  - ・ HXM実験室モデルの性能を試験
- ・ ISS搭載ミッションとして、予備的な設計検討を実施
  - ・ JAXA宇宙研へ小規模ミッション提案書提出

#### 突発天体のX線・ガンマ線による観測の推進

- ・ MAXIによる全天X線観測の推進位置決定・速報システムの改良
  - ・ 極超新星の痕跡の発見、新星の着火の世界初の観測など
- ・ Fermi衛星のガンマ線バーストグループにて監視作業を分担

#### LIGO/Virgo重力波現象の追跡観測

- ・ MAXIチームが LIGO/Virgo と覚え書きを交わし、電磁波フォローアップコンソーシアムに参加。

28



## 補足資料 A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### 今後の研究計画

#### 突発天体検出ミッションの開発：

- 本年度にWF-MAXI検出器 (SLCとHXM) の試作モデル性能評価
- 2014年末の NASA Explorer 公募ミッションに参加  
観測装置の提供の可能性を協議中

#### 突発天体のX線・ガンマ線による観測の推進

- 位置決定・速報システムの改良
- MAXI、Suzaku、Fermi を用いた超新星、ブラックホール、中性子星、ブラックホール連星、ガンマ線バースト等
- A02と連携した突発天体観測推進

#### LIGO/Virgo重力波現象の追跡観測

- LIGO/Virgo 電磁波フォローアップコンソーシアムの一員として、共同研究 (2015年から開始)

## A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### 主な成果

#### WF-MAXIの予備設計と部分試作：

- ISSミッションとしての成立性の検討、提案
- HXM用のASICの新規開発

#### MAXIによる“極”超新星 (ハイパーノバ) の痕跡の発見

- 木村公 (JAXA) ほか。JAXAプレス発表 (2013年2月)
- ““Is the Cygnus Superbubble a Hypernova Remnant?” M.Kimura, H.Tsunemi, H.Tomida et al. PASJ 65, 14 (2013)

#### 新星爆発の瞬間の観測に成功

- 森井幹雄、三原建弘 (理研) ほか。理研プレス発表 (2013年11月)
- “Extraordinary Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744 as an Ignition of a Nova on a Very Massive O-Ne White Dwarf” M. Morii, H. Tomida, M. Kimura et al. ApJ 779, 118 (2013)

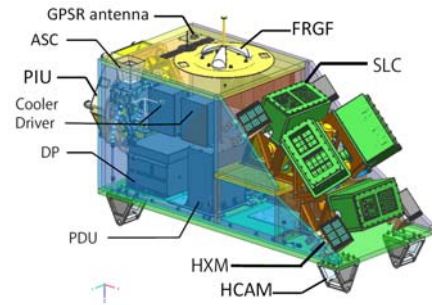
#### 受賞等

- 谷津陽一 (東工大) 平成 26 年度「東工大挑戦的研究賞」  
「突発天体のための超小型 X 線偏光計観測衛星の開発」

## 補足資料 計画研究 A01 : 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

### 広天域突発X線天体監視装置 (WF-MAXI)を開発

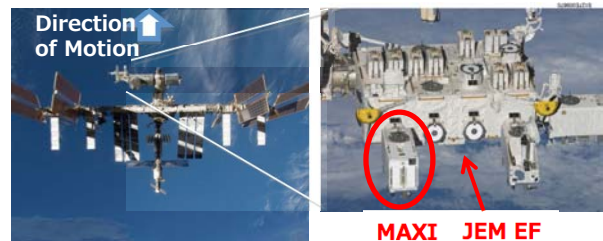
- 突発天体が最も目立って輝く軟X線・γ線バンドで広い天域を監視
- 重力波と同時に発生するX線突発天体の検出・位置速報



開発中の短時間X線トランジェント監視装置 WF-MAXI

### 重力波源候補天体の観測研究

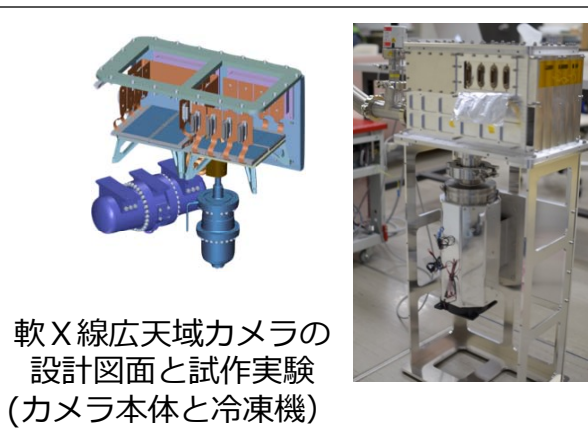
- 宇宙ステーション搭載全天X線監視装置 MAXIによる突発天体の監視
- 重力波フォローアップ態勢の整備
  - 欧米の重力波望遠鏡(Advanced-LIGO, Virgo)と覚書交換
- ガンマ線バースト、超新星、ブラックホール連星などの重力波源候補天体を研究



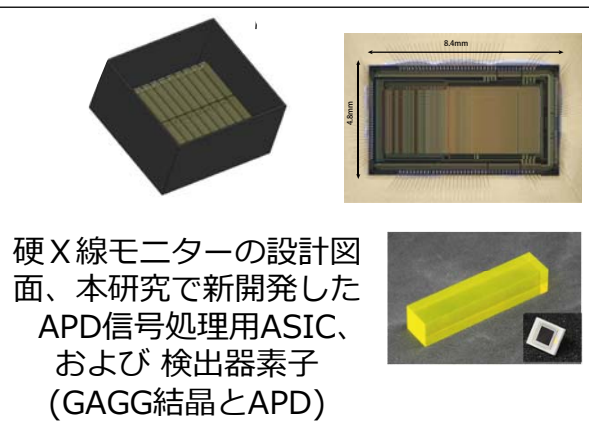
## 補足資料 A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### 広天域突発X線天体監視装置 (WF-MAXI)の開発

- KAGRA等の本格稼働時の観測開始を目指し、MAXI、ASTRO-Hで開発された技術を活用して迅速に開発
- 今までに観測装置の試作とミッション全体の予備設計を実施
- 宇宙研小規模ミッションに提案中



軟X線広天域カメラの設計図面と試作実験 (カメラ本体と冷凍機)

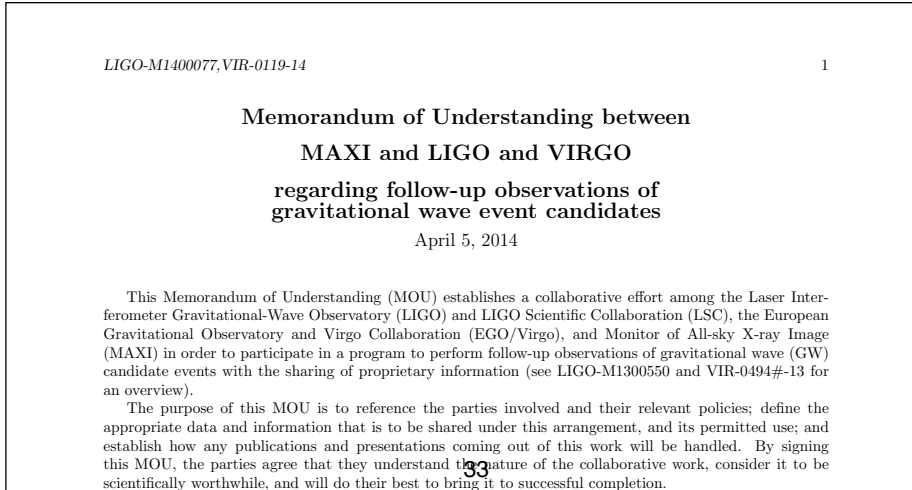


硬X線モニターの設計図面、本研究で新開発したAPD信号処理用ASIC、および検出器素子 (GAGG結晶とAPD)

## 補足資料 A01: 重力波天体からのX線・ガンマ線放射の探索

### 全天X線監視装置 MAXI を用いた重力波天体の観測

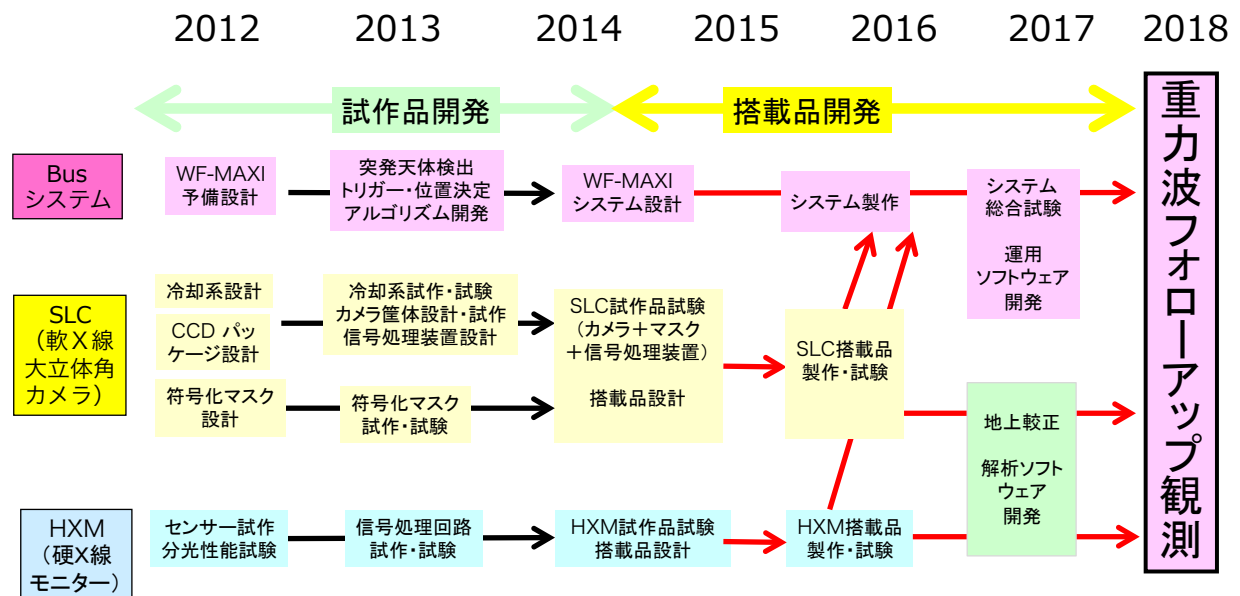
- 中性子星、ブラックホール連星、ガンマ線バースト等の重力波源と関連する天体の観測
- 突発X線源の検出・位置決定・速報システムの改良
- 重力波現象追跡観測に関する LIGO, VIRGOとの覚書締結



## 補足資料 計画研究 A01 : 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

### WF-MAXIの開発

- KAGRAをはじめとする次世代重力波望遠鏡の本格稼働時に観測開始を目指す



## 補足資料 A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### これまでの達成状況

#### 光学赤外線電波追跡観測ネットワークの構築→70%

- ・ 木曾シュミット望遠鏡駆動系改修→終了 高速安定駆動達成
- ・ 超広視野CMOSカメラの開発→CMOS試験終了
- ・ OAOWFCの開発→光学系調整終了
- ・ 岡山3.8m新望遠鏡用面分光装置の開発→面分光ユニット完成
- ・ 中国50cm望遠鏡の開発→望遠鏡・架台・観測装置完成
- ・ 大量データ解析パイプラインの開発→木曾2KCCDカメラ用パイプライン、すばるHyperSuprimeCam用パイプライン完成

#### 望遠鏡ネットワークを用いた観測研究

- ・ 木曾Supernova Survey KISSプロジェクト推進→16個の超新星発見、新種の低光度AGN発見
- ・ 突発天体(超新星、GRB、ブレーザー、etc)観測推進→16本の査読論文(関連研究を合わせると64本)

#### 世界の他の重力波検出器グループとの共同研究

- ・ LIGO/Virgo国際共同研究の電磁波フォローアップコンソーシアムに参加→J-GEM(Japanese Collaboration for Gravitational-Wave Electro-Magnetic Follow-up Observation)立ち上げ・LIGO/VirgoとMOU

## 補足資料 A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### これからの計画

#### 光学赤外線電波追跡観測ネットワークの構築と観測運用

- ・ 超広視野CMOSカメラの開発と試験観測(~2016年度)
- ・ OAOWFCの観測開始(2015年度)
- ・ 面分光装置の188cm望遠鏡での観測開始(2015年度)
- ・ 中国50cm望遠鏡の設置(2015年度)・観測開始(2016年度)
- ・ 山口大32m電波望遠鏡、ASTEサブミリ望遠鏡による観測体制構築(~2016年度)
- ・ 重力波アラート受信・データ解析システム構築(2015年度)

#### 突発天体の多波長多地点連携観測の推進

- ・ GBMを用いた広視野追跡システムによる重力波天体同定・追跡システムの試験と、ショートGRBの観測
- ・ A01と連携した突発天体観測推進
- ・ KISSプロジェクトの推進

#### LIGO/Virgoイベントの追跡観測

- ・ J-GEMとLIGO/Virgo電磁波フォローアップコンソーシアムとの共同観測(2015年度から開始)

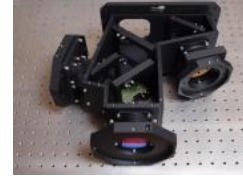
## 補足資料 A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### 主な成果

- 中国50cm望遠鏡・架台の製作と、観測装置(広視野3色同時撮像カメラ)の開発

50cm望遠鏡に設置した3色同時カメラ (左)

3色同時カメラの筐体 (右)



- 極超新星と通常の超新星をつなぐミッシングリンク超新星の観測的同定

“A Luminous and Fast-expanding Type Ib Supernova SN 2012au”, Takaki, K. et al., ApJL, 772, L17 (2013)

- 重力波源の光学赤外線対応現象に関する理論的研究(公募研究・A05との連携研究)

“Radiative Transfer Simulations for Neutron Star Merger Ejecta”, Tanaka, M. & Hotokezaka, K., ApJ, 775, 113 (2013)

“Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers”, Tanaka, M., et al., ApJ, 780, 31 (2014)

## 補足資料 計画研究 A03 :超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究

### Special features of SN neutrinos and GW's

- Provide image of core collapse itself (identical  $t=0$ )
- Only supernova messengers which travel without attenuation to Earth (dust does not affect signal)
- Guaranteed full-galaxy coverage

### What is required for maximum SN $\nu$ information?

- Sensitivity to nearby explosions (closes gap in Super-Kamiokande's galactic SN  $\nu$  coverage)
- Deconvolution of neutrino flavors via efficient neutron tagging

By converting an existing R&D facility into the world's most advanced SN  $\nu$  detector, we expect to collect

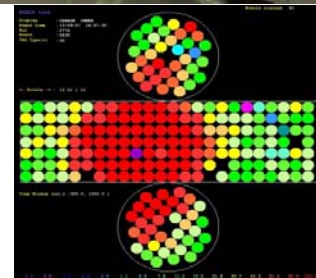
**3,690  $\nu$  events @ 3,000 light-years**  
**369,000  $\nu$  events @ 300 light-years**

## 補足資料 A03: EGADS Detector Has Been Built and Operated

EGADS experimental hall  
in Kamioka mine



Inside of EGADS tank during PMT installation;  
August 2013.



Event display of cosmic ray muon;  
September 2013.

## 補足資料 A03: Notable Recent Publication

### Astrophysical Journal, 778 (2013) 164

#### OBSERVING THE NEXT GALACTIC SUPERNOVA

SCOTT M. ADAMS<sup>1</sup>, C.S. KOCHANEK<sup>1,2</sup>, JOHN F. BEACOM<sup>1,2,3</sup>, MARK R. VAGINS<sup>4,5</sup>, & K.Z. STANEK<sup>1,2</sup>

*Draft version November 1, 2013*

#### ABSTRACT

No supernova in the Milky Way has been observed since the invention of the optical telescope, instruments for other wavelengths, neutrino detectors, or gravitational wave observatories. It would be a tragedy to miss the opportunity to fully characterize the next one. To aid preparations for its observations, we model the distance, extinction, and magnitude probability distributions of a successful Galactic core-collapse supernova (ccSN), its shock breakout radiation, and its massive star progenitor. We find, at very high probability ( $\simeq 100\%$ ), that the next Galactic supernova will easily be detectable in the near-IR and that near-IR photometry of the progenitor star very likely ( $\simeq 92\%$ ) already exists in the 2MASS survey. Most ccSNe (98%) will be easily observed in the optical, but a significant fraction (43%) will lack observations of the progenitor due to a combination of survey sensitivity and confusion. If neutrino detection experiments can quickly disseminate a likely position ( $\sim 3^\circ$ ), we show that a modestly priced IR camera system can probably detect the shock breakout radiation pulse even in daytime (64% for the cheapest design). Neutrino experiments should seriously consider adding such systems, both for their scientific return and as an added and internal layer of protection against false triggers. We find that shock breakouts from failed ccSNe of red supergiants may be more observable than those of successful SNe due to their lower radiation temperatures. We review the process by which neutrinos from a Galactic core-collapse supernova would be detected and announced. We provide new information on the EGADS system and its potential for providing instant neutrino alerts. We also discuss the distance, extinction, and magnitude probability distributions for the next Galactic Type Ia supernova. Based on our modeled observability, we find a Galactic core-collapse supernova rate of  $3.2^{+7.3}_{-2.6}$  per century and a Galactic Type Ia supernova rate of  $1.4^{+1.4}_{-0.8}$  per century for a total Galactic supernova rate of  $4.6^{+7.4}_{-2.7}$  per century is needed to account for the SNe observed over the last millennium, which implies a Galactic star formation rate of  $3.6^{+8.3}_{-3.0} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ .

# 補足資料 計画研究A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」 重力波探索パイプラインの構築

KAGRAの最初の観測運転(2015年12月)に向けて  
重力波観測データを処理し、イベントを探索するためのソフトウェア、データ配送の準備が進んでいる。

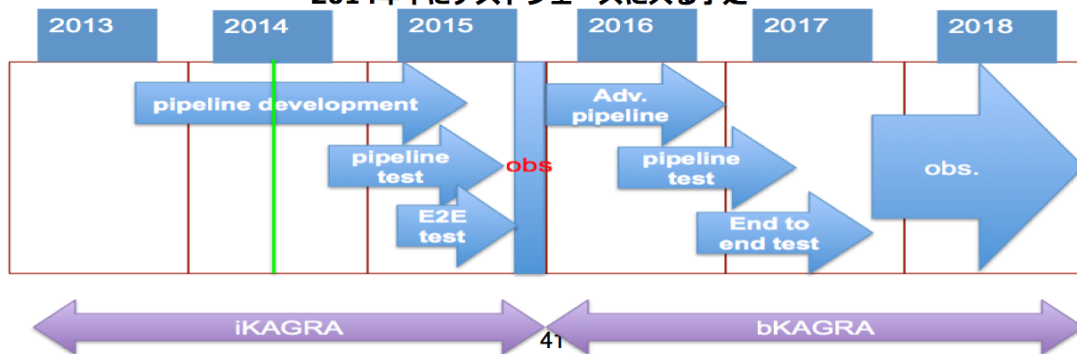
- KAGALI ソフトウェアライブラリの開発
- 各重力波に対応したパイプライン開発  
コンパクト連星合体、バースト波、連続波

人的体制の強化が進んだ

- ポストク 4名 (2013年度より)
- 若手院生の参加増加  
現在、KAGRAの解析グループは26名(内3名外国人)

新学術で「速報解析用」計算機の構築

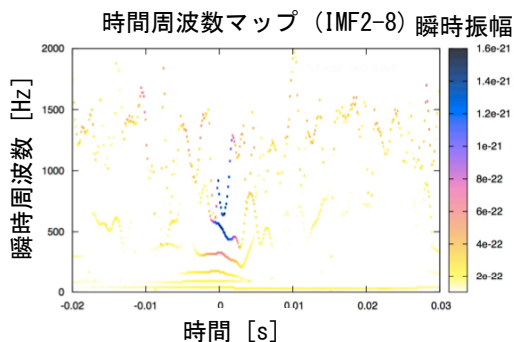
## パイプラインのスケジュール 2014年中にテストフェーズに入る予定



# 補足資料 計画研究A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」 重力波解析の技術開発、サイエンス

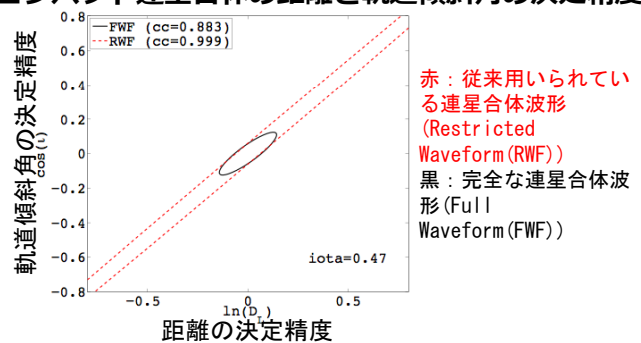
- 速報のための高速処理、時系列マッチドフィルター
- 連星合体の重力波源パラメーター（質量、距離、軌道傾斜角等）の精度の良い推定
- オンライン解析による検出器状態の診断
- Hilbert-Huang変換を用いた解析手法の開発

超新星爆発からの重力波の  
Hilbert-Huang変換の例



高解像度の時間-周波数解析を実現

## コンパクト連星合体の距離と軌道傾斜角の決定精度



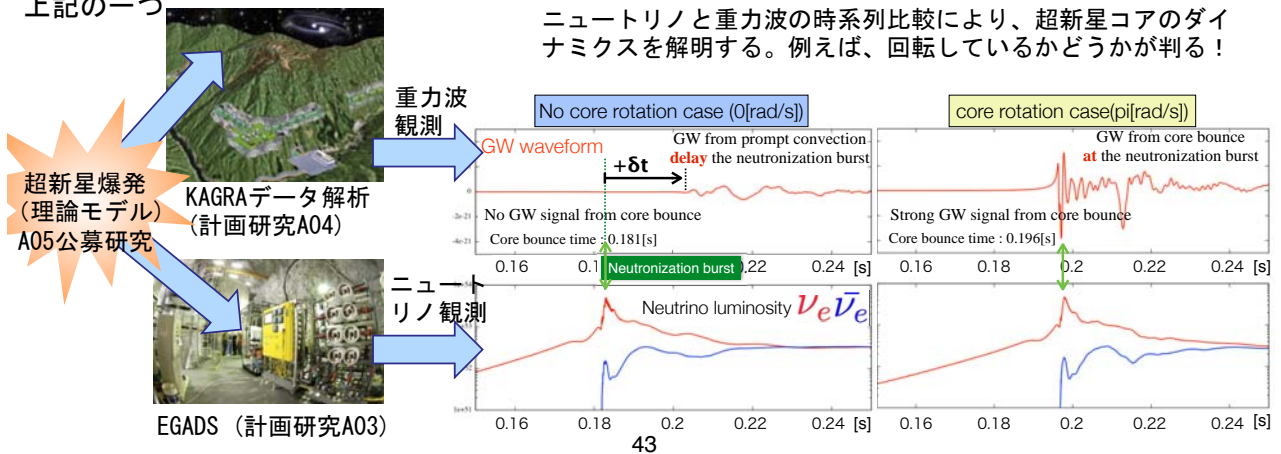
完全な波形を用いることで決定精度が改善

Tagoshi, Mishra, Pai, Arun, Phys. Rev. D 90, 024053 (2014)  
Arun, Tagoshi, Mishra, Pai, Phys. Rev. D 90, 024060 (2014)

## 計画研究A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」 他の計画研究,公募研究との横断的研究

- A03-A04-A05 : 超新星爆発のニュートリノと重力波
- A04-A05 : 連星合体波形による重力理論の検証
- A04-A05 : Pop III 連星起源の重力波検出の検討
- A02-A04 : 観測速報についての検討
- A02-A04 : 超新星候補天体と検出可能性の検討
- A04公募 : 非ガウス性雑音関連 (2件)
- A04公募 : 超高精度解析技術

上記の一つ



## 補足資料 計画研究A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

### A05計画研究のこれまで成果抜粋

- **ショートガンマ線バースト**  
ショートガンマ線バースト(SGRB)に関して、ピークエネルギーと最高光度の間に強い相関を発見した。この関係を用いてBATSEの約100のSGRBイベントの赤方偏移を見積もり、SGRBがNS-NS連星の場合に重力波イベントレートを年間4イベント以上、SGRBがBH-NS連星の場合は約150イベントと推定した。これは確実な重力波検出を示唆する。(ApJ 789, 65(2014))
- **BH-BH連星の生成機構**  
BH-BH連星の生成機構は明らかでない。金属汚染のない初代星の連星進化を考えることで、重力波イベントレートで年間140程度という評価を得た。連星BH合体で生じるBHは重く、準固有振動の検出でき、科学的に大きな成果が期待される。(MNRAS 442, 2963(2014))
- **重力波振動**  
二つの計量をもつ重力理論が既存の観測と矛盾せず、ニュートリノ振動に類似の重力波振動現象が起こることを示した。(PTEP 2014, 043E01(2014)) また、A04と連携して観測可能性を明らかにした。
- **重力崩壊型超新星の爆発**  
重力崩壊型超新星の爆発は、近年、数値計算でも再現されつつある。爆発の機構の基礎的理解として、ニュートリノ加熱による停滞衝撃波の復活を、定常近似で準解析的にモデル化することに成功し、爆発に至る条件を明らかにした。(ApJ 771, 27(2013))  
公募研究より、京を用いた高精度の3次元数値計算で、ニュートリノ加熱による重力崩壊型超新星爆発が起こることを明らかにし、プレスリリースをおこなった。(ApJ 786(2) 83(2014)) 重力波波形とニュートリノ信号を読み取り、計画研究A03, A04と連携して同時観測の手法の研究も進めている。
- **背景重力波の相関解析の新手法**  
重力波のデータ解析におけるパラメータ空間上で最尤値のもつ幾何学的特性に注目した解析手法を展開し、背景重力波の相関解析の新しい手法を開発した。(PRD86, 042002 (2012))
- **連星中性子星合体からの電磁波**  
連星中性子星合体からの放出物質が周りの星間物質と衝突した際の放射スペクトルを電波からガンマ線まで求めた。(PRD, 89, 063006 (2014)) また、放出物質以外のジェット成分が放出物質を突き破る際に細く絞られガンマ線バーストになれることを示した。(ApJL 784, L28 (2014))



## 補足資料 計画研究A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

### A05計画研究の今後の計画

- 以下のように研究代表者と( )内の分担者が中心となり推進する。
  - a) 重力波源の探査と波形の解明(中村):多様な現象を視野に新しい重力波源の可能性を見出す。
  - b) 超新星爆発の物理(山田):重力波とニュートリノの同時観測から爆発機構を連携研究者(固武)と協力し研究する。より精密なシミュレーションで、首尾一貫した予言を行う。
  - c) 同時観測から得られる物理(井岡):様々な重力波源に対して、同時観測可能な電磁・ニュートリノ放射の可能性について徹底的に議論を詰める。
  - d) 新しいデータ解析法(瀬戸):データ解析の手法を確立し、実際のデータ解析に応用し、A04と協力し先駆的成果を発信する準備をする。
  - e) 宇宙論・修正重力への広がり(田中):修正重力理論が重力波波形に与える影響、宇宙初期の重力波源を明らかにする。
- 研究の連携強化のため、A04と共同で定例テレビ会議を引き続き行う。  
毎週金曜日10:30~12:00
- 新しい物理のあらゆる可能性を検討するため研究会を開催・支援する。
  - 2014.11 “JGRG24” (協賛)
  - 2015.2 “コンパクト連星の合体と電磁波対応天体” (協賛)
  - 2015.3 “International School on Gravitational Wave Physics”
  - 2015.6 “18<sup>th</sup> Capra meeting on Radiation Reaction in GR”
- 合宿を企画しテーマを絞り課題に取り組む。  
2015.1に予定

45

## 補足資料 計画研究A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

### A05の特記事項

- プロジェクト的な研究に加えて、毎週の定例のテレビ会議ゼミを計画研究A04と共同でおこなってきた。その回数は2012年度7月以降で14回、2013年度は29回になる。
- その他にも多数の研究会を主催、共催してきた。
  - 1) RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION, JGRG22 (東京大学, 2012年11月12日-16日) (協賛)
  - 2) Gravity and Cosmology 2012 (京大基研, 2012年11月18日-12月22日) (協賛)
  - 3) 計画研究A05合宿 (KKR塾海, 2013年1月7日-1月9日) (発表ファイル付きプログラム)
  - 4) 研究会「コンパクト連星の合体と電磁波対応天体」(京大基研, 2013年2月14日-2月15日) (協賛)
  - 5) Long-term workshop on gravitational waves and numerical relativity (京大基研, 2013年5月19日-6月22日) (協賛)
  - 6) Asia Pacific School/Workshop on Gravitation and Cosmology 2013 (The Ocean Suites Jeju Hotel, 2013年2月19日-2月22日) (協賛)
  - 7) 基礎物理学研究所 市民講演会「宇宙を探る」(京大基研, 2013年3月17日)
  - 8) 関西相対論・宇宙論合同セミナー(京大, 2013年7月20日)
  - 9) 第12回DECIGOワークショップ(東大, 2013年10月27日) (協賛)
  - 10) The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (弘前大, 2013年11月5日-11月8日) (共催)
  - 11) New Perspectives on Cosmology (APCTP, Pohang, Korea, 2013年11月25日-11月29日) (共催)
  - 12) 2014 Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation and Cosmology (Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, 2014年2月17日-2月21日) (共催)
  - 13) A04/05 合同合宿 (KKR城崎玄武, 2014年2月22日-2月24日)
- 代表者、分担者、連携研究者の授賞：授賞
  - (1) 井上学術賞(2013.2) 横山順一, (2)国際一般相対論と重力学会 (ISGRG) フェロー(2013.7)田中貴浩, (3) ISGRGフェロー(2013.7) 柴田大, (4)日本物理学会論文賞(2014.3) 横山順一(山口昌英、小林努と共同)
- 「重力波物理学研究センター」が発足  
2013年5月に基礎物理学研究所が重力波物理学関連の共同利用活動の充実を目的とした 所内センター「重力波物理学研究センター」が発足し、本計画研究から田中貴浩、中村卓史、柴田大などが参加している。
- 若手派遣  
海外の研究会との共催を通じて、院生やPDの若手研究者を2012年度に3名、2013年度に10名、海外へ派遣した。
- 本計画研究で雇用されたPD研究員  
本計画研究で雇用した研究員は6名になる。うち2名は海外学振、1名は研究員のポジションを獲得している。なお、残り3名は現在雇用中である。

46

領域略称名：重力波天体  
領域番号：2402

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成29年6月

領域代表者 (京都大学・名誉教授・中村 卓史)

## 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究領域の設定目的の達成度	8
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	12
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	13
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	16
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	20
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	27
11. 総括班評価者による評価	28

**研究組織** (総括：総括班，計画：総括班以外の計画研究，公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	240103001 重力波天体の多様な観測 による宇宙物理学の新展 開の総括的研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	中村 卓史	京都大学・名誉教授	11
A01 計画	24013002 重力波天体の X 線・ $\gamma$ 線放射の探索	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	河合 誠之	東京工業大学・理工学研究科・教授	9
A02 計画	24013003 天体重力波の光学赤外 線対応現象の探索	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	吉田 道利	広島大学・宇宙科学センター・教授	8
A03 計画	24013004 超新星爆発によるニュ ートリノ信号と重力波 信号の相関の研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	ヴァギンス マーク	東京大学・数物連携宇宙研究機構・ 特任教授	8
A04 計画	24013005 多様な観測に連携する 重力波探索データ解析 の研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	神田 展行	大阪市立大学・理学研究科・教授	8
A05 計画	24013006 重力波天体の多様な観 測に向けた理論的研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	田中 貴浩	京都大学・理学研究科・教授	9
統括・支援・計画研究 計 6 件					
A01 公募	25103507 重力波と電磁波の同時 検出を目指した全天監 視型 X 線撮像検出器の 開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	米徳 大輔	金沢大学, 数物科学系, 准教授	1
A02 公募	25103502 天文観測用高感度 CMOS センサの開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	酒向 重行	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 助教	2
A02 公募	25103503 新しいミリ波サブミリ 波観測技術によるガン マ線バースト初期残光 の探索	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	田村 陽一	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 助教	4

A02 公募	25103508 広視野望遠鏡を利用し た重力波天体の光学観 測	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	阿部 文雄	名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 准教授	4
A02 公募	25103509 特殊減光フィルタを用 いた近赤外線で明るい 重力波源の観測	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	永山 貴宏	鹿児島大学, 理工学研究科, 准教授	1
A02 公募	25103515 超高頻度サーベイ観測 による短時間突発天体 の検出	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	田中 雅臣	国立天文台, 理論研究部, 助教	1
A03 公募	25103501 KamLAND による近傍 超新星爆発の観測	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	石徹白 晃治	東北大学, ニュートリノ科学研究セ ンター, 助教	1
A03 公募	25103513 ガドリニウムの熱中性 子吸収反応でのガンマ 線の相関測定	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	作田 誠	岡山大学, 自然科学研究科, 教授	3
A04 公募	25103504 非ガウスノイズを取り 入れた重力波データ解 析方法の研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	横山 順一	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 教授	2
A04 公募	25103506 重力波に関する新知見 を導き出す超高精度解 析技術とその高速計算 組み込み技術の開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	廣林 茂樹	富山大学, 大学院理工学研究部(工 学), 教授	1
A04 公募	25103516 低温干渉計型重力波検 出器における突発性雑 音低減	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	辰巳 大輔	国立天文台, 光赤外研究部, 助教	3
A05 公募	25103505 強い重力場での修正重 力理論の検証に向けた 理論的研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	須山 輝明	東京大学, 理学(系)研究科(研究院), 助教	1
A05 公募	25103510 ブラックホールー磁場 中性子星合体に関する 数値的研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	木内 建太	京都大学, 基礎物理学研究所, 研究 員	1

A05 公募	25103511 ニュートリノ駆動型超 新星爆発からの重力波	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	諏訪 雄大	京都大学, 基礎物理学研究所, 准教授	2
A05 公募	25103512 コンパクト天体連星合 体における質量放出と R 過程元素合成による 電磁波放射	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	関口 雄一郎	京都大学, 基礎物理学研究所, 研究 員	1
A05 公募	25103514 マグネター星震学に向 けた基礎理論	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	小畠 康史	広島大学, 理学(系)研究科(研究院), 教授	1
A01 公募	15H00773 高感度軟ガンマ線観測 による重力波天体キロ ノバでの重元素合成の 探査	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	寺田 幸功	埼玉大学, 理工学研究科, 准教授	6
A01 公募	15H00780 超小型衛星の複眼配置 で展開する重力波対応 天体の X 線撮像による 同定	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	米徳 大輔	金沢大学, 数物科学系, 教授	1
A01 公募	15H00785 重力波天体の即時精密 X 線分光観測に向けた 基盤構築	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山田 真也	首都大学東京, 理工学研究科, 助教	1
A02 公募	15H00774 可視光同時撮像による 重力波天体の同定と出 現環境の研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	土居 守	東京大学, 大学院理学系研究科(理 学部), 教授	2
A02 公募	15H00781 MOA II 1.8m 望遠鏡に よる重力波天体の追観 測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	阿部 文雄	名古屋大学, 宇宙地球環境研究所, 准教授	4
A02 公募	15H00784 多様な時間スケールを 持つ突発電波天体の観 測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	新沼 浩太郎	山口大学, 創成科学研究科, 准教授	7
A02 公募	15H00788 重力波源の可視光対応 天体探査	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	田中 雅臣	国立天文台, 理論研究部, 助教	1

A04 公募	15H00778 ブラックホール準固有 振動がもたらす重力波 の観測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	宗宮 健太郎	東京工業大学, 理学院, 准教授	1
A04 公募	15H00779 超解析精度技術を応用 した重力波の解析シス テムの開発とその評価 に関する研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	廣林 茂樹	富山大学, 大学院理工学研究部(工 学), 教授	2
A04 公募	15H00787 重力波データ解析にお ける統計的方法論の整 備	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	間野 修平	統計数理研究所, 数理・推論研究系, 准教授	2
A05 公募	15H00772 重力波検出器を用いた 重力相互作用における パリティ破れの探索に 向けた理論的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	浅田 秀樹	弘前大学, 理工学研究科, 教授	1
A05 公募	15H00776 巨大ブラックホールの 起源の理論的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	細川 隆史	東京大学, 大学院理学系研究科(理 学部), 助教	3
A05 公募	15H00777 修正重力理論における コンパクト天体からの 重力波	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	須山 輝明	東京大学, 大学院理学系研究科(理 学部), 助教	1
A05 公募	15H00782 コンパクト天体連星合 体における r 過程元素 合成と電磁波放射	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	関口 雄一郎	東邦大学, 理学部, 講師	1
A05 公募	15H00783 傾斜したスピンを持つ ブラックホールと磁場 中性子星合体に関する 数値的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	木内 建太	京都大学, 基礎物理学研究所, 特定 研究員	1
A05 公募	15H00789 3次元シミュレーショ ンを用いた超新星から の重力波放出の予言	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	滝脇 知也	国立天文台, 理論研究部, 助教	1
公募研究 計 32 件					

## 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

応募時には以下のような全体構想であったが、後で述べるように実際に本領域の期間中の2015年9月14日に、**世界初の重力波の直接観測**がなされたので、**今読み返すと隔世の感**があるとともに**我々の構想に基づく予想が極めて正しかった**ことを証明している。

応募時の全体構想をなるべく**文章をそのまま**で以下のように紹介する。領域は目前に迫った重力波観測の時代に、**他の観測との連携体制を構築し、新しい宇宙物理学**を開くことを全体構想としていた。

**その根拠は以下の3点であった。**

### 1. 重力波は存在する!

重力波はアインシュタインが一般相対性理論にもとづいて理論的にその存在を予言した。重力波とは光速で重力による潮汐力の効果が伝わる波である。観測的には連星中性子星の電波パルサー PSR1913+16 の軌道周期 (約28000秒)が1年間に76.94マイクロ秒短くなることがハルスとテーラーによる電波観測により確かめられたことにより1989年に重力波の存在が証明された。一般相対性理論によると、連星のように加速度運動している系は重力波を放出してエネルギーを失い、連星間の距離が短くなるとともに公転周期が短くなる。PSR1913+16 の場合、一般相対性理論による理論値と観測値との差は実に僅か 0.1%であった。1993年にハルスとテーラーはこの業績によってノーベル物理学賞を受賞した。

### 2 しかし重力波の伝搬と振幅(時空の歪み)はまだ実験的に確かめられていない!

PSR1913+16により重力波の生成が一般相対論の予言通りであることが確かめられはしたが、重力波が理論通りに宇宙空間を伝搬することは確かめられてはいない。すなわち、連星中性子星 PSR1913+16から放出されているはずの約 14000秒周期(=公転周期/2)の重力波による時空の歪みが直接検出された訳ではなく、波動としての位相の伝搬速度や振幅も確かめられていない。このことは一般相対性理論の検証の上で重要なポイントである。宇宙ニュートリノの観測を例にとると、地下実験で検出される太陽ニュートリノが太陽内部核反応の理論の予言値の半分しかないことがニュートリノ振動という大発見を導いた。重力波の場合も宇宙空間での伝搬が理論通りでなければ、ニュートリノ振動のように新しい物理学のフロンティアが現れ、その学術的な意味は測りしれない。一方、重力波が検出されれば、連星中性子星合体や超新星爆発などの破局的な天体現象や、ブラックホールが生成される現場の観測が可能になる。今までの観測手法では深部を見ることができなかった強い重力場で一般相対性理論に支配された天体現象について、宇宙物理学の研究の新しい局面を開くと期待される。



### 3.本格的な重力波観測の時代の幕開けは目前!

米国の LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) と仏・伊連合による Virgo 等のレーザー干渉計は現在、距離約 6000万光年での連星中性子星の合体からの重力波を検出可能であるが、その検出確率は 300年に1回程度でありこのままでは重力波の直接観測は期待できない。そこで、LIGO と Virgoは2015年を目途に検出可能な重力波の振幅を1桁下げ、2016年には連星中性子星の合体からの重力波を年間10イベント程度の検出率で観測を開始する予定である。我が国では「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(LCGT = Large Cryogenic Gravitational wave Telescope)計画」は腕の長さ3 kmのトンネルを神岡鉱山で掘削し、2013年から2014年にかけて常温で観測をしたのち、2014年から低温鏡により感度高度化を進めて 2016年を目途に LIGOや Virgoと同程度の感度に達する予定である。

#### 上の3点を根拠にして5つの計画研究からなる領域を構成した。

A01では、重力波天体のガンマ線・X線放射を観測するために大立体角X線観測装置を開発するとともに既存の観測衛星を用いて重力波源候補天体現象の観測研究を行う。A02では、A01とも密接に連携して重力波源の可視・赤外線・電波観測をするため可視赤外線広視野観測システムの構築、全地球的観測網の整備、電波観測による重力波天体を含む激変天体の観測体制の整備を行う。A03では、ベテルギウスからアンドロメダ銀河までで起きる超新星爆発に伴うニュートリノ事象に感度を持つ検出器の開発を行う。A04 はデータ解析で、理論が与えたテンプレートと観測データを高速で比較して重力波源と波形を突き止めることにより、到来方向の速報をA01とA02に出し追跡観測を促す。また、ガンマ線、X線、可視・赤外線、ニュートリノ 観測との比較を可能にする重力波のデータ解析もする。A05 は重力波の源・波形の理論で、すでに候補となっている波源の詳しい研究以外にも**全く新しい波源**を考えるのも課題である。

#### この体制で以下のような成果を約束した。

米国、欧州と日本の大型干渉計型重力波検出器は 2016 年にも、連星中性子星の合体等からの重力波を直接観測する情勢である。重力波形と発生源の同定から、一般相対論的に強い重力場での物理現象を究めるのが本領域の目的である。そのために 1)ガンマ線バースト等の**重力波天体からの X 線・ガンマ線放射**を探索する。2)**光赤外・電波での対応事象**を探索するために**探索ネットワーク**を構築する。3)神岡鉱山内の水チェレンコフ検出器を改造して、**重力波信号とニュートリノ信号の同時観測**が可能となるようにする。4)電磁波・ニュートリノ等との多様な同時観測が可能になるように、**重力波イベント速報体制**をつくる。5)**新重力波源候補**も含めて予想される重力波波形並びに電磁波・ニュートリノの対応事象の理論的研究を行う。以上の計画研究を密接に推進して、**目前に迫った重力波観測の時代に、宇宙物理学の新展開を期す。**

## 2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

### 人類初検出の重力波イベントの予言的中：

2016年2月13日にaLIGOは人類初の重力波の直接観測に2015年9月14日に成功したと発表した。重力波源は2つの太陽質量の30倍程度のブラックホール連星の合体に伴うものでありGW150914と呼ばれるが、質量がブラックホール候補のX線星の2倍以上あるのでほとんどの研究者には予想外であり、意外であった。しかし本領域が2015年6月に大阪で開催した国際会議で領域代表者等が宇宙で最初にできた初代星では、典型的な質量が太陽質量の30倍程度のブラックホール連星が形成され、それが現在合体すると主張し、aLIGOの2015年9月からの観測で検出されると予言した。この予言は会議の総括セッションでも大変注目された。予言はまさに的中したが、GW150914と同様のブラックホール連星の合体は2017年1月4日にも検出されたので、まぐれ当たりの予言ではないと思われる。

### 国際的重力波の追観測への貢献：

計画研究A01とA02では予定を1年早めて2015年からaLIGOとの協定(MOU)の下で追観測を実施した。2016年11月から始まったaLIGOの2回目の観測とA01/A02の追観測は予算を繰り越して現時点(2017/6/7)でも実施中である。引き続き大きな成果を期待したい。またA03も発見された重力波イベントに付随する事象の探索を行った。

### KAGRAのデータ解析と理論への貢献：

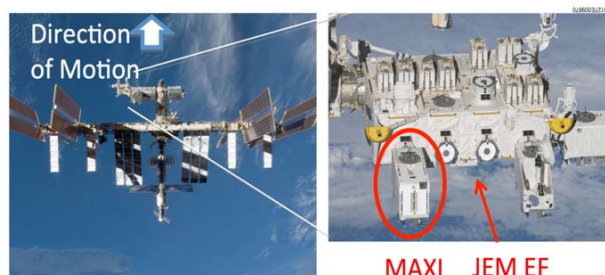
A04では日本のKAGRA実験のデータ受信と解析を達成した。A05では上述の重力波源の予想を始め最前線の研究を推進した。

以上のように、領域全体として当初の設定目的を十分に達成し、一部では予想を上回る成果を得た。

### 計画研究A01「重力波天体からのX線・γ線放射の探索」

目的は、中性子星連星合体や超新星などの天体現象において重力波にほぼ同期して出現するX線・ガンマ線対応天体を探索することと、重力波発生に関わる天体である中性子星、ブラックホール、およびガンマ線バーストを多様な手段で観測することによって、宇宙における重力波発生の物理的過程や発生源となる天体の起源を明らかにすることである。LIGO-Virgo Science Collaborationと覚書を結んでLIGOから重力波発生の速報を受け取り、ISS上で全天X線監視装置MAXIおよびCALETガンマ線バーストモニターCGBMにより対応するX線・ガンマ線源を探索し、複数のイベントに対して上限値を得た。LIGO 01で検出された重力波はブラックホールの合体のため、電磁波放射が検出されなかったことは意外ではないが、本研究によって開発した重力波源の大きな誤差領域から新X線源を迅速に探索するシステムは、今後、重力波望遠鏡の感度が向上して中性子星連星合体が検出された場合に活用される。また、突発的な重力波のX線対応天体をより効率良く検出するための軟X線大立体角カメラを主要観測装置とするWF-MAXIの概念検討と実験室モデル開発を行い、ISS搭載ミッションとしての解を得て概念検討書、システム仕様書等を完成させ、本計画研究としての目標を達成した。この計画は平成26年に宇宙科学研究所小規模ミッション公募に応募したが、不採択となったため設計を見直し（中間評価指摘事項への対応）、共用バスを用いて低コストを実現した結果、平成27年の再応募では宇宙理学委員会の審査でプロジェクト化が推薦された。一方、ブラックホール連星、中性子星の観測研究においてはMAXI, Swift, Fermi等を用いた実施をし、多数の新天体の発見と同定、GRBの観測などを国際コミュニティに速報するとともに、データを公開し、解析結果を学術誌に発表した。

公募研究では、重力波対応X線突発天体探索を目的として、X線撮像観測器の開発、性能検証、超小型衛星搭載の開発、連星中性子星で合成された重元素からの核ガンマ線の推定、数値計算を用いた将来の高感度ガンマ線検出器の概念設計、重力波天体のX線精密分

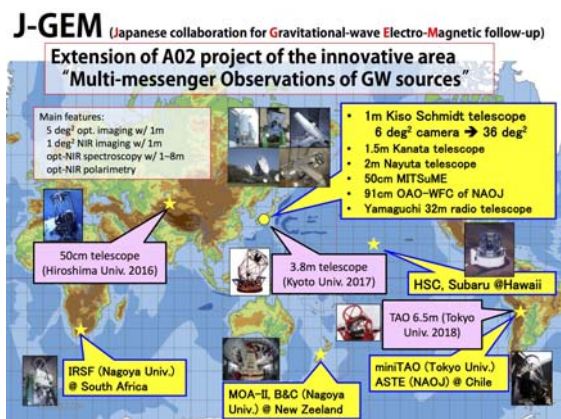


ISSおよびMAXIが取り付けられたJEM EF（日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム）の地球周回軌道上の写真。MAXIはISSの軌道周期92分ごとに全天のX線源を走査・探索する。

光、突発天体観測、精密分光などの研究が行われた。

### 計画研究 A02 「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」

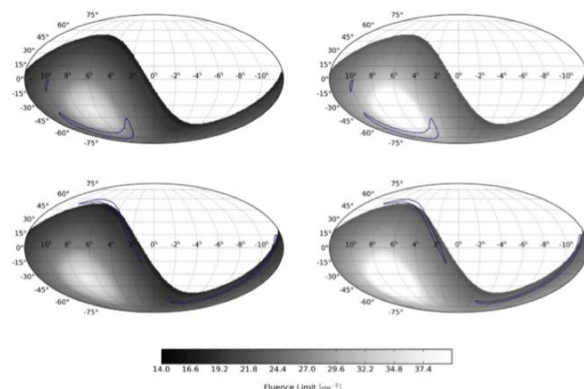
A02 では、重力波の光赤外・電波対応現象を探索するための探索ネットワークの構築を目指した。そのために、(1)木曾観測所シュミット望遠鏡に搭載する超広視野 CMOS カメラ Tomo-e の開発、(2)国立天文台岡山天体物理観測所の 91cm 望遠鏡を改造し、近赤外線広視野カメラ OAOWFC の開発および運用、(3)岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡および建設中の 3.8m 望遠鏡用の面分光装置の開発、(4)50cm ロボット望遠鏡および可視三色同時カメラの開発と中国・チベットへの設置、の 4 つの装置開発計画を進めることにより、広視野撮像・分光、多波長観測、他地域観測網の整備を行うこととした。同時に、世界に散らばる日本の望遠鏡群の協調による探索ネットワークを作り、世界の重力波検出器からのアラートを受けて即時追跡観測が行えるシステムを構築する計画であった。



装置開発計画の(2)および(3)については完全にその目的を達成し、いずれも現在は開発が終了して定常運用状態となっている。装置計画(1)については、Tomo-e のプロトタイプ製作および試験観測・定常運用に成功し、CMOS カメラの天文応用に大きな可能性を拓くとともに、実機製作への基礎開発をすべて終了することができた。装置計画(4)では、望遠鏡+観測装置をチベットの観測サイトまで運搬・仮設置するところまで完了した。仮設置時に行った試験観測により、国内設置の 1m 望遠鏡に匹敵する感度を達成していることを確認した。ただし、主に中国の国内事情により、平成 26 年度よりチベットへの入国が著しく制限された状況が続いており、望遠鏡の本格設置にまでは至っていない。一方、A02 が中心となって構築した重力波の電磁波対応現象探索のための地上観測施設ネットワーク J-GEM (Japanese network of Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up observations) は、米欧の重力波望遠鏡、LIGO および Virgo の合同研究チームと研究協定 (MoU) を結び (平成 26 年 4 月 5 日)、LIGO・Virgo の初期運用 (01) における重力波検出に対応して、実際に電磁波追跡を行うことに成功した。LIGO による人類初の重力波検出である GW150914 および 2 番目の重力波イベント GW151226 について、電磁波探索観測を実施した。GW151226 では、すばる望遠鏡も駆使しておよそ 1000 平方度に及ぶ天域を探索した。LIGO の二回目の定常運用 (02) でも探索観測を継続した。01 での二つの追跡観測結果については査読論文として発表した。実際に複数の重力波イベントの追跡探索観測を実施できたことは、計画立案当初に目指したレベルを大きく超えた成果である。装置計画の達成度合いに若干の遅れが見られるが、それにはメーカーの素子製作遅れ、政治的事情などやむを得ない事情が絡んでおり、「重力波イベントの電磁波探索を実施する」という大目標を達成したことと合わせて、計画研究 A02 の目標はほぼ達成されたと言えることができる。

### 計画研究 A03 「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」

計画研究 A03 では、神岡鉱山内に設置された既存の水チェレンコフ検出器を、近傍で超新星爆発が起こった時に、重力波との相関信号を検出できるように世界最先端の超新星ニュートリノ検出器に改造することであった。スーパーカミオカンデ近くの地下 1000m に設置された 200 トン水チェレンコフ検出器は、もともとはガドリニウム塩を水チェレンコフ検出器に溶解する効果を研究するための調査開発用テスト検出器として設計された。ガドリニウムはニュートリノ反応によって発生した中性子を高い効率で検出できることから、様々な物理目的に対して有効である。特に超新星ニュートリノに対しては、電子ニュートリノ事象と反電子ニュートリノ事象を弁別できることから、超新星爆発メカニズムの解明にとって重要な情報を与える。2014 年 10 月より EGADS 検出器は満水状態になり、段階的に硫酸ガドリニウムを溶解した。2015 年 4 月には目標であった 0.2% の導入に成功し、この時点で EGADS 検出器は世界初の



スーパーカミオカンデにおける 1.6GeV-100PeV エネルギー領域の 90% C.L. Fluence limit。単位は [cm<sup>-2</sup>]。GW150914(上段), GW151226(下段), ニュートリノ信号 (左)、反ニュートリノ信号 (右)

ガドリニウム水チェレンコフ検出器として運用を開始した。検出器は高精度で校正され、データ取得は中断することなく1日24時間行われており、近傍で超新星爆発が起こることを待っている状態にある。以上の通り、EGADSを最先端の超新星ニュートリノ検出器に改造し、安定運用するという当初の目的は達成された。またLIGOによる重力波イベントGW150914およびGW151226については、スーパーカミオカンデを用いてニュートリノ信号との相関解析を行った。信号は検出されなかったが、3.5MeVから100PeVに渡る広いエネルギー領域において、上限値を与えた。公募研究では、超新星爆発前兆ニュートリノの研究、ガドリニウムのガンマ線生成の実験が行われた。

#### 計画研究 A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」

A04では、日本における重力波検出実験KAGRAのデータ解析を推進し、実際の観測データを解析することが第1の目的であった。また同時に、電磁波やニュートリノ観測との連携、若手研究者の育成等も含んでの体制づくり、そして、重力波天体事象のサイエンスについての研究も掲げられた。これらの目的は概ね達成できたと言える。重力波データ解析の推進については、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の観測データの解析も実行された。実際の重力波事象のデータ解析の機会、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、我々も間髪を入れずにそれを解析し、発表の翌日には独自に重力波波形を抽出した。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が試みられた。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A04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、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。また多数の解説や一般向けの説明にも大いに活躍した。これらの挑戦的な試みは、A04で雇った若手研究員も積極的に取り組んだ。データ解析に携わる若手（ポスドク、大学院生）も増え、人材育成面でも順調であったと言える。



A04で導入した計算システム。仮想プライベートネットワークでKAGRAデータ転送系と連結。

公募研究では、非ガウス性雑音の扱いについての数理的な取り扱いについての研究、突発的な雑音の源について実験的な研究、新しい信号の解析手法を重力波波形に用いる研究が進められた。こうした研究は、物理学と工学や情報学との融合的な研究でもある。

#### 計画研究 A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

A05では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という認識にたち、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った。具体的には5つの重点項目を立てて取り組んだが5の研究成果に説明するように、それぞれに特筆すべき成果を挙げた。特に、30太陽質量のブラックホールからなる連星が初代星を起源とする連星進化の計算によって、もっとも観測されやすい重力波源である可能性があることを指摘した論文は、LIGOチームによるGW150914の起源を議論した論文においても驚くべき観測との一致であると引用されている。総査読付き発表論文数は100を越えており、その中には、引用数が既に100を越えるものもあり、引用数が50を超えるものは7件ある(spines)。

また、採用したPDは現時点で全員研究活動を続けており、うち3名は准教授(1)、特任助教(2)の職を得ることに成功した。加えて、計画研究A05では毎年合宿を開き、計画研究全体の裾野を広げることにつとめてきた。合宿はA04などの他の計画研究と合同で開かれることもしばしばあり、研究成果に示すように複数のデータ解析や観測の計画研究との共同研究による論文の発表にも繋がった。また、多数の国際研究会の主催、共催を通じて重力波周辺分野の理論研究推進に貢献した。

### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

計画研究 A01 の MAXI による観測において、軌道上の観測装置の経年変化が生じたが、週三回のチーム TV 会議および 1～2 ヶ月ごとに行われる対面チーム会議で観測装置の状態と観測結果への影響を検討し、比例計数管に印加する電圧の調整と較正データの更新を随時行って、X 線源の位置決定など科学的成果への影響を最小限にとどめた。A01 の広天域軟 X 線監視装置 WF-MAXI の開発においては、ISS 搭載ミッションとして概念設計の検討を実施して、JAXA 宇宙科学研究所の小規模プロジェクト公募に平成 26 年 2 月に応募したが、重力波の検出発表 2 年前に行われた宇宙理学委員会の審査において、重力波対応天体探索は高リスクである一方、確実に期待される成果に対しては費用が高すぎる（資金上限は年度あたり 10 億円という制限に対して約 40 億円/5 年）ことを大きな理由として採択にいたらなかった。これに対しては、この公募後に開発された ISS 共用バスを活用して低コスト化した設計を実施し、翌平成 27 年に総額 10 億円未満の枠で再度小規模プロジェクトに応募し、宇宙理学委員会の審査の結果プロジェクト化が推薦され、本研究の目的であるミッション開発（概念検討と観測装置の試作・評価まで）は達成した。（当初計画から、搭載品詳細設計・製作・ミッション実施は本研究の成果に基づき、本研究の枠外の JAXA 資金で実施することを想定）

計画研究 A02 においては、超広視野 CMOS カメラ Tomo-e の開発に当たって、CMOS センサを供給するメーカーにセンサ開発の遅れが生じた。Tomo-e で使用するセンサは一般販売品と異なるため開発コストもかかり、当初予定よりも装置開発に遅れとコスト増が生じた。そこで、まず 8 個のセンサによるプロトタイプを製作し、読み出し回路やソフトウェア開発を前倒するとともに、プロトタイプによる試験観測・定常運用で性能の洗い出しをして実機開発に繋げる方策を取った。また、50cm ロボット望遠鏡については、平成 26 年度より中国側の政治事情により、チベットへの外国人の入境が著しく制限される事態が生じて望遠鏡・装置の搬入・設置が大幅に遅れた。これについては中国国家天文台や紫金山天文台、および日本大使館とも協力してチベット政府への交渉を続け、ようやく平成 28 年 9 月に望遠鏡・装置をチベットの観測サイトに仮設置するところまでこぎつけた。その後、また入境許可が出ない状況が続いている。

#### 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

##### <審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

（採択時の審査結果においては、特に指摘を受けた事項はない。）

##### <中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

計画研究 A01 においては、中間審査において「WF-MAXI が国際宇宙ステーション搭載不採択となり、計画の見直しが必要」との指摘を受けた。この指摘の対象になったミッション提案は、平成 25 年末に発出された JAXA 宇宙科学研究所の小規模プロジェクト公募の資金区分 A（総額数十億円以下、各年度 10 億円未満）に応募したものだが、重力波検出が公表される 2 年前の平成 26 年に行われた宇宙理学委員会の審査において、重力波対応天体探索は高リスクである一方、確実に期待される成果に対しては費用（約 40 億円/5 年）が高すぎることを大きな理由として採択にいたらなかった。これに対しては、この公募後に開発された ISS 共用バスを活用して低コスト化した設計を実施し、平成 27 年に資金区分 B（総額 10 億円未満）枠で再度小規模プロジェクトに応募し、宇宙理学委員会の審査の結果プロジェクト化が推薦され、本研究の当初目的であるミッション開発（概念検討と観測装置の試作・評価）を一応達成した。

ただし、宇宙科学研究所全体のプログラム見直しの中で結局は 10 億円近い規模の新規プロジェクトの実施は困難になり、WF-MAXI プロジェクト化は見送られ、小規模プロジェクトの公募自体平成 27 年度には発出されなかった。平成 28 年度の JAXA「小規模計画」公募では総費用上限が 2 億円へと大幅に引き下げられたため、WF-MAXI を再度提案することは諦め、MAXI が発見した天体を同じ ISS に搭載予定 NASA のミッション NICER が追跡するという OHMAN (Onboard Hookup of MAXI-NICER) を代わりに提案し、現在審査を受けている。このように所期性能をもつ常時広天域 X 線監視ミッションを新たに JAXA のプログラムで実施することが困難になったため、本研究で開発した軟 X 線カメラと硬 X 線モニターの海外ミッションでの搭載機会を探るとともに、重力波対応高エネルギー放射探索という目標を超小型衛星で実現するために観測域を紫外線に変更してミッション成立性を検討した。その概念設計案は平成 28 年度衛星設計コンテストにおいて大賞を獲得した。

中間審査では計画研究 A02 に関して、装置開発の遅れが指摘された。これは主に、(1) 50cm ロボット望遠鏡の中国チベットへの設置、(2) 木曾超広視野 CMOS カメラの開発遅延、の二項目についてであった。

(1) については、望遠鏡・装置は平成 26 年度には完成しており日本での試験は終了していたが、平成 26 年 9 月よりチベットへの外国人の入境規則が厳格化したため、遅延が生じたものである。中国国家天文台や日本大使館などを通じて交渉を重ね、望遠鏡・装置については平成 28 年 3 月にチベット・阿里に輸送することができた。さらに平成 28 年 6 月にはチベット・ラサまでは入境が許可され、チベット科学技術庁への協力要請をした。この結果、平成 28 年 9 月にチベット・阿里に入境が許可され、阿里サイトにある中国国家天文台ドームへの望遠鏡の仮設置をして、ファーストライトを迎えることができた。この後、またチベットへの入境許可が停止される事態が続いているが、交渉の結果、平成 29 年度秋に入境できる見込みとなった。この時にドーム設置と望遠鏡の本格設置を行い事業が完成する。そのために平成 28 年度の補助金の一部を繰り越した。

(2) については、メーカー側の都合により CMOS センサの開発・納入が遅れ、また当初予想よりもセンサ価格が高額となったため遅延が生じたが、予算の範囲内で 8 個のセンサを使ったプロトタイプ製作を行った。この製作過程で、実機の筐体、センサ配置機構、読み出しシステム、解析ソフトウェア、データマネジメントシステムなどを完成することができた。プロトタイプを用いた試験観測・定常運用にも成功し、性能評価と問題点の洗い出しを行うことができ、予算面の手当さえあればすぐに実機製作にかかるところまで到達した。平成 28 年度からは別予算の獲得を通じて実機製作にかかっている。

## 5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）【研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する】

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

### 計画研究関連

**(A01)** 全天 X 線監視装置 MAXI により、太陽質量の約 30 倍のブラックホール 2 個の合体によって生じた重力波イベント GW150914 に対する X 線対応天体の探索を行った。LIGO による誤差領域を 90% 以上カバーしたが、新しい X 線源は検出されず、上限値を得た。この上限値は、将来、LIGO あるいは KAGRA によって検出される中性子星連星の合体が予想されるように短いガンマ線バーストを伴えば、“Extended X-ray Emission”を検出するのに十分な感度に相当する。

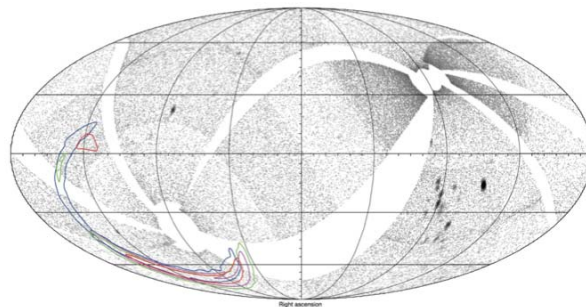
広天域を覆う視野で重力波対応 X 線放射を監視するミッション WF-MAXI のミッション設計検討を実施し、概念検討書等を完成させた。その主観測装置となる軟 X 線大立体角カメラ SLC を開発し、試作品を製作した。またこのために新規開発した CCD 素子の宇宙利用に関わる性能評価を行った。副観測装置である硬 X 線モニター HXM も信号処理 ASIC を新規開発して試作品を製作し、性能評価を実施した。

MAXI による突発天体の監視からは、新種の大光度軟 X 線新星 MAXI J0155-744、観測史上最上位の強さを持つ GRB130427A の観測、MAXI カタログ、新しいブラックホール連星の発見などの成果を上げた。

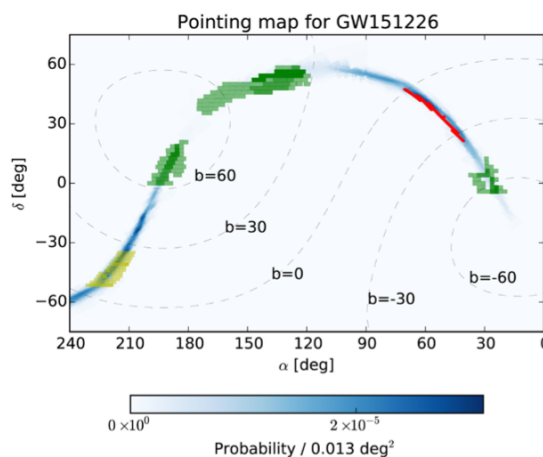
**(A02)** 平成 28 年 9 月に 50cm ロボット望遠鏡を中国・チベットに仮設置し、現地でのファーストライトおよび試験観測に成功した。平成 27 年 11 月に木曾超広視野 CMOS カメラ Tomo-e のプロトタイプが完成し、木曾観測所にて 3 ヶ月に渡る試験観測を実施した。平成 27 年 4 月に面分光装置が完成し、岡山天体物理観測所にて共同利用観測を実施、ショートガンマ線バーストの追跡観測を試みた。平成 27 年 3 月に赤外線広視野カメラ OAOWFC が完成し定常運用に入った。平成 25 年 4 月に J-GEM を結成し、平成 26 年 4 月に重力波検出器 LIGO および Virgo の開発チームと研究協力協定を交わし、LIGO、Virgo の検出した重力波イベントに対して電磁波追跡観測を実施する国際フォローアップチームの一員となった。その後、平成 26 年 9 月に開始された LIGO の第一定常運用

(01) において、人類初の重力波の直接検出である GW150914、および、それに続く GW151226 の二つのイベントについて、J-GEM を駆使した光赤外線フォローアップ観測を実施した (図)。これらの試みは重力波フォローアップへの重要な貢献と認められ、Abbott et al. (2016a), Abbott et al. (2016b), Morokuma et al. (2016), Yoshida et al. (2017) の 4 つの論文として発表された。特に GW151226 においては、1000 平方度に及ぶ領域を観測し、すばる望遠鏡による観測領域は I バンドで 24 等に到達する深さで観測することに成功し、このイベントに関しては世界で最も深いデータを得ることができた。

**(A03)** 世界で最も先進的な水チェレンコフ型超新星ニュートリノ検出器を開発し、継続的に運用してきた。特に水純化システムは絶えず改善を続け、それによりスーパーカミオカンデの超純水と同等の透明度を達成した。(図) このことは超新星ニュートリノの検出を高い効率で行うことを可能にする。水の透明度の向上は水チェレンコフ検出器の成功の鍵のため、その影響は EGADS だけに止まらない。実際、本研究により達成した EGADS 実験の結果に基づいて、2015 年 6 月にスーパーカミオカンデ実験でのガドリニウムの充填



GW1509146 発生後の 90 分間 (ISS の軌道 1 周回) で得られた MAXI による全天画像。天球図内の左下の等高線は LIGO による誤差領域を表す。



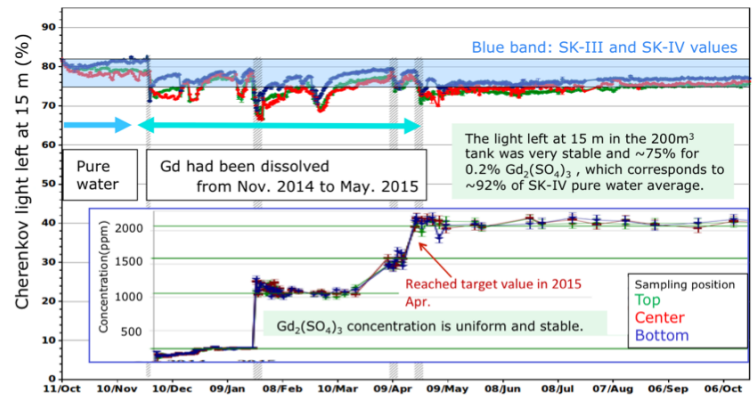
GW151226 の位置確率分布 (青色。濃い青ほど確率が高い)。横軸は赤経、縦軸は赤緯。J-GEM 共同研究によって、木曾シュミット望遠鏡 (緑)、すばる望遠鏡 (赤)、MOA-II 望遠鏡 (黄色) を用いて合計 1000 平方度に及ぶ範囲のフォローアップ観測に成功した。

が正式に承認された。

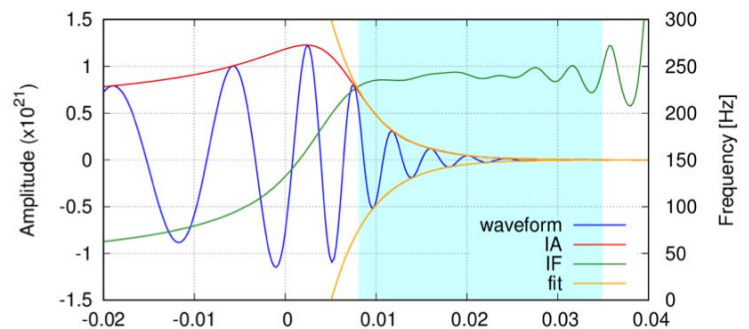
**(A04)** 重力波観測データの低遅延解析システムを構築した。KAGRA の観測データを低遅延(〜3 秒)で転送するシステムを構築し、2016 年 3 月〜4 月に行われた KAGRA の最初の観測運転以降、実際にデータの連続転送を行っている。またこの解析システムは、重力波探索解析を実行する環境としても機能している。日本独自の解析ライブラリの開発や、国内の数機関に分かれた計画研究のメンバーが効率的に共同研究できるような仮想ネットワーク化環境なども構築した。データ解析の若手研究者も育成した。これらを通じて、日本の重力波データ解析の中核として機能できたことは大きな成果である。重力波の初観測に関しては、LIGO 実験の公開した重力波観測データを解析し、我々の新しい解析手法の実際のイベントへの適用(K. Sakai et al. (2016))などの成果も得られた。重力波検出器データのガウス性(T. Yamamoto et al, 2016)や多チャンネル関連の解析(H. Yuzurihara et al, 2016)では、情報学(統計学)の公募研究者とも協力した研究がなされた。

**(A05)** 5つの重点項目を立てて取り組んだ。それぞれにおける、大きな成果を挙げると、

(1) 「様々な重力波源の探査と重力波波形の解明」については、初代星起源の 30 太陽質量ブラックホール(BH)連星の存在を連星進化のモデル計算にもとづき予言した。この成果は LIGO チームによる GW150914 の起源を議論した論文のなかで、右に引用したように特別な扱いで紹介された。また、将来の宇宙重力波アンテナをもちいることで、そのような BH 連星の起源が明らかにできることを示した。また、最初の重力波イベントである GW150914 が原始 BH である可能性について、無理のない原始 BH 起源の連星形成のシナリオにもとづいても、既存の宇宙背景放射の観測などと矛盾しないことを示し、Phys. Rev. Lett. 誌の Editor's suggestion に選ばれた(A05: 田中と公募研究: 須山らの共同研究)。(2) 「超新星爆発の物理」に関しては、ボルツマン方程式を差分化してニュートリノ輸送を数値的に解くコードの開発を行い、爆発する軸対称超新星モデルを構築した。特に、慣性系と物質の局所静止系をハイブリッドに扱い、相対論的効果を全て近似なしに扱う方法を新たに提案した。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することを明らかにした。(3) 「電磁波等との同時観測から得られる物理」に関しては中性子星連星合体時に、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。加えて、ニュートリノ放射、粒子加速に関する様々な可能性を検討した。(4) 「新しい重力波観測・データ解析法の提案」に関しては、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、重力波観測による残留離心率の観測可能性を指摘した。(5) 「宇宙論・修正重力理論の観点からの重力波研究」においては、近年注目されている質量を持つ重力子が存在するがゴースト不安定性を生じず、宇宙論的なシナリオとしても整合的な双重力理論において、重力波振動という現象が起こることを発見し、そのようなモデルが他の観測と矛盾しないことを示した。



EGADS における水の透明度。縦軸は 15m での減衰率を表す。青いバンドはスーパーカミオカンデ純水での測定値。EGADS がスーパーカミオカンデの透明度を実現していることを表す。挿入図はガドリニウムの濃度を示す。



GW150914 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(IA)といった量で波形を評価する。

separations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties



## 公募研究関連

(A01) 公募研究 25103507 では、重力波対応 X 線突発天体探索を目的として、シリコン・ストリップ素子を用いた X 線撮像観測器の開発を行い、試作品を製作して撮像性能を検証した。これを発展させて公募研究 15H00780 において超小型衛星搭載のための開発を進めた。公募研究 15H00773 では連星中性子星で合成された重元素からの核ガンマ線の推定を完了させ、300 キロ電子ボルト以上の軟ガンマ線帯域が合成元素の直接的証拠を検出できる帯域だと同定した。「ひとみ」による軟ガンマ線観測は実現しなかったが、数値計算を用いた将来の高感度ガンマ線検出器の概念設計に着手した。公募研究 15H00785 では重力波天体の X 線精密分光のため、計画中の DIOS 衛星のファスト-リポインティング機能の概念設計を行い、突発天体観測のための低コスト双方向通信実現可能性を確認し、現行のイリジウム衛星を用いた運用シミュレーションも行った。並行して、精密分光に向けた超電導検出器の高レート耐性をビームラインで実験して測定し、数 kHz のレートまで処理できることがわかった。

(A02) Tomo-e のプロトタイプ製作および試験観測・定常運用に関して、カメラには公募研究 25103502 によって開発された高速読み出しシステムが応用されている。

公募研究 25103515 では中性子星合体からの放出物質における輻射輸送シミュレーションを行い、光赤外放射の明るさの予想を観測チームに提供した。

(A03) 公募研究 25103501 では、KamLAND において近傍超新星爆発へ備えたデータ取得系の改良を行なった。近傍天体に限れば KamLAND は超新星爆発以前の核燃焼段階からのニュートリノを検出可能であることを定量的に示すことにも成功した。また公募研究 25103503 では、J-PARC/MLF の熱中性子ビームと高精度エネルギー分解能をもつ Ge 検出器群 (ANNRI) を用い、35 億個の Gd 熱中性子捕獲反応の  $\gamma$  線データを取得し、0.2 MeV から 9.0 MeV に渡る  $\gamma$  線のエネルギー分布の導出に成功した。

(A04) 公募研究 25103504 では非ガウス性雑音の扱いについての理論的、数学的な取り扱いについて新しい提案がなされた。また 25103516 では突発的な雑音の源について実験的な方法での同定や扱いについて研究された。これらの知見は観測データの雑音評価について有用なものである。25103506, 15H00779 では非調和解析 (NHA) と呼ばれる信号の解析手法を重力波波形の解析に用いることが検討された。15H00787 ではデータ解析に統計学の応用が研究された。こうした研究は、物理学と工学や情報学との融合的な研究である。また 15H00778 ではブラックホール準固有振動からの重力波の解析研究が進められた。

(A05) 短いガンマ線バースト (SGRBs) の残光におけるジェットブレイクの観測は、ジェットが 10 度以下の小さな開き角を有することを示している。連星中性子星合体による質量を数値解析し、噴出質量が太陽質量の 0.01 倍であれば、閉じ込められ、必要な開き角を実現することを明らかにした。また、解析の結果は、失敗した SGRB、または、低輝度の新しいタイプのイベントの集団が存在することを示唆している (公募研究 25103512, 15H00782, 15H00783)。連星ブラックホール合体による重力波事象は、原始ブラックホール (PBH) の合体によって説明できることを指摘した。PBH がダークマターの一部を構成するだけで、期待される PBH 合体率を説明可能であり、このシナリオが宇宙マイクロ波背景スペクトル歪みによって、近い将来に検証可能であることを示した (公募研究 15H00777)。

## (領域内の共同研究、横断的な研究、分野を融合した研究)

A05, A04 の共同研究では、種族 III 星起源の理論計算の KAGRA での観測可能性を、最終的な重力波検出器の感度では年間約 100 イベントくらいになることを示した。これはすでに見つかった aLIGO による観測と無矛盾である。また、ショートガンマ線バーストに Yonetoku 関係式を適用することで中性子星合体レートを見積もることで、aLIGO や KAGRA で観測される可能性が十分に高いことを示す論文、双重力理論における重力波振動が aLIGO や KAGRA による重力波観測によって見つかる可能性のあるパラメータ領域が実際に存在することを示す論文 (T. Narikawa, et al, 2014) などを発表した。超新星爆発に関して、ニュートリノ検出 (A03)、重力波 (A04)、超新星の理論 (A05) が協力した。ニュートリノ検出と重力波バースト波形のタイミングを比較することで、超新星のコアの回転の有無が判断できる (T. Yokozawa et al, 2015) という可能性を示した。電磁波観測である A01, A02 と A04 の間で重力波アラートについての技術的な相談については A04, A05 から数名が J-GEM に参加して助言をしている。

公募研究などを通じて行われた分野を融合する研究では、広視野カメラの開発において天文学と精密工学 (Kitagawa, Y., et al., 2016)、時系列信号処理について情報学と物理学 (M. Kaneyama et al, 2013, 2014 他)、雑音信号の統計的扱いについてやはり情報学と物理学 (T. Yamamoto et al., 2016, H. Yuzurihara et al., 2016)、X 線天体に関して天文学と重力波物理理論 (D. Yonetoku et al., 2013, 2014, 2015) といった成果が学術論文となった。

## 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 主な論文：計画研究

- ▲Matsushita, M.; Yatsu, Y.; Arimoto, M.; Matunaga, S. et al., "Hardware Development and In-orbit Demonstration of the Electrical Power System for High-powered Micro-satellite TSUBAME", Transactions of the JSASS 60 (2017) 2, p.109-115, DOI:10.2322/tjsass.60.109, 査読有
- ▲Yamanaka, M., Nakaoka, T., Tanaka, M., Maeda, K., Yoshida, M., 他 36 名 "Broad-lined Supernova 2016coi with a Helium Envelope", The Astrophysical Journal 837 (2017) 1, DOI:10.3847/1538-4357/aa5f57, 査読有
- ▲Yoshida, M., Utsumi, Y., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., 他 33 名, "J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226", Publications of the Astronomical Society of Japan 69 (2017) 9, DOI:10.1093/pasj/psw113, 査読有
- ▲\*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
- ◎▲\*Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hirotaka Takahashi, "Analysis of the real gravitational wave data GW150914 with the Hilbert-Huang transform", ICIC Express Letters II(I) (2017) 45-52 査読有
- ▲\*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, DOI:10.3847/1538-4357/835/2/276, 査読有
- ▲\*Naoki Seto, Koutarou Kyutoku, "Forecasting Tidal Disruption Events by Binary Black Hole Roulettes", Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 151101, DOI:10.1103/PhysRevLett.118.151101, 査読有
- ▲\*Maselli, A., Kawai, N., Sakamoto, T., Serino, M., Yatsu, Y., Yoshii, T., et al., "GRB 130427A: A Nearby Ordinary Monster", Science, 343, (2014), 48-51, DOI:10.1126/science.1242279 査読有
- ▲\*Morii, M., Tomida, H., Kimura, M., Negoro, H., Serino, M., Kawai, N., Mihara, T., Sugizaki, M., Sakamoto, T., Tsunemi, H., Ueda, Y., Ueno, S., Yoshida, A., et al., "Extraordinary Luminous Soft X-Ray Transient MAXI J0158-744 as an Ignition of a Nova on a Very Massive O-Ne White Dwarf", The Astrophysical Journal, 779 (2013), 118-13 pp. DOI:10.1088/0004-637X/779/2/118, 査読有
- ▲\*Negoro, H., Serino, Motoko, Kawai, N., Mihara, T., Tomida, H., Ueno, S., Sakamoto, T., Tsunemi, H., Ueda, Y., Yoshida, A., Matsuoka, M. et al., "The MAXI/GSC Nova-Alert System and results of its first 68 months", Publications of the Astronomical Society of Japan, 68 (2016), S1-24 pp. DOI:10.1093/pasj/psw016, 査読有
- ▲\*Serino, M., Sakamoto, T., Kawai, N., Yoshida, A., Mihara, T., Negoro, H., Tomida, H., Tsunemi, H., Ueda, Y., Ueno, S., et al., "MAXI observations of gamma-ray bursts", Publications of the Astronomical Society of Japan, 66 (2014), 8714, DOI: 10.1093/pasj/psu063, 査読有
- ▲\*Hiroi, K., Ueda, Y., Kawai, N., Matsuoka, M., Mihara, T., Negoro, H., Sakamoto, T., Tomida, H., Tsuboi, Y., Tsunemi, H., Ueno, S., Yoshida, A., et al., "The 37 Month MAXI/GSC Source Catalog of the High Galactic-Latitude Sky", The Astrophysical Journal Supplement, 207, 36-12 pp. (2013), DOI:10.1088/0067-0049/207/2/36 査読有
- ▲\*Kawai, Nobuyuki, Tomida, Hiroshi; Yatsu, Yoichi; Mihara, Tatehiro; Ueno, Shiro; Kimura, Masashi; Arimoto, Makoto; Serino, Motoko; Sakamoto, Takanori; Tsunemi, Hiroshi; Kohmura, Takayoshi; Negoro, Hitoshi; Ueda, Yoshihiro; Morii, Mikio; Tsuboi, Yoko; Ebisawa, Ken; Yoshida, Atsumasa, "Wide-field MAXI: soft x-ray transient monitor on the ISS", Proceedings of the SPIE, 9144, 91442P-9pp. (2014), DOI:10.1117/12.2057188 査読無
- ◎▲Kitagawa, Y., Yamagata, Y., Morita, S.-y., Motohara, K., Ozaki, S., Takahashi, H., Konishi, M., Kato, N. M., Kobayakawa, Y., Terao, Y., Ohashi, H., "Fabrication of a wide-field NIR integral field unit for SWIMS using ultra-precision cutting", Proceedings of SPIE, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II 9912 (2016) ID:991225, DOI:10.1117/12.2231931, 査読無
- ▲Kumar, B., Pandey, S. B., Eswaraiah, C., and Kawabata, K. S. "Broad-band polarimetric investigation of the Type II-plateau supernova 2013ej", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 456 (2016) 3157, DOI:10.1093/mnras/stv2720, 査読有
- ▲Morokuma, T., Tanaka, M., Doi, M., Fujisawa, K., Kawabata, K. S., Yoshida, M., Ohta, K., 他 18 名, "J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914", Publications of the Astronomical Society of Japan 68 (2016) L9, DOI:10.1093/pasj/psw061, 査読有
- ▲Abbott, B. P., \*Singer, L., Yoshida, M., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., Kawai, N.; Negoro, H.; Mihara, T.; Tomida, H., Ueno, S., 他 1563 名, "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914", The Astrophysical Journal 826 (2016) L13, DOI:10.3847/2041-8205/826/1/L13, 査読有
- ▲Abbott, B. P., \*Singer, L., Yoshida, M., Ohta, K., Motohara, K., Yanagisawa, K., Kawai, N.; Negoro, H.; Mihara, T.; Tomida, H., Ueno, S., 他 1563 名, "Supplement: Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914 (2016, ApJL, 826, L13)", The Astrophysical Journal Supplement Series 225 (2016) 8, DOI:10.3847/0067-0049/225/1/8, 査読有
- ▲K. Abe, \*Yusuke Koshio, et. al. (Super-Kamiokande collaboration), "Search for neutrinos in Super-Kamiokande associated with gravitational-wave events GW150914 and GW151226", The astrophysical journal, letters 830 (2016) L11, DOI:10.3847/2041-8205/830/1/L11, 査読有
- ▲\*H. Sekiya, "The Super-Kamiokande Gadolinium Project", Proceedings of Science PoS(ICHEP2016) (2016) 982 査読有
- ◎▲Kipp Cannon, 端山和夫, \*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
- ◎▲\*Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka 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:10.1103/PhysRevD.93.123010, 査読有
23. ©▲\*Takahiro Yamamoto, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Yousuke Itoh, and Nobuyuki Kanda, "Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise", Phys. Rev. D93 (2016) 082005, DOI:10.1103/PhysRevD.93.082005, 査読有
  24. ©▲\*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, DOI:10.1103/PhysRevD.94.042004, 査読有
  25. ▲Kazuhiro Hayama, \*Takami Kuroda, Ko Nakamura, Shoichi Yamada, "Circular Polarizations of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae: A Clear Indication of Rapid Rotation", Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 151102, DOI:10.1103/PhysRevLett.116.151102, 査読有
  26. ▲\*Tomoya Kinugawa, Hiroyuki Nakano, Takashi Nakamura, "Possible confirmation of the existence of the ergoregion by the Kerr quasinormal mode in gravitational waves from a Population III massive black hole binary", PTEP 2016 (2016) 310, DOI:10.1093/ptep/ptw012, 査読有
  27. ▲Takashi Nakamura, Masaki Ando, Tomoya Kinugawa, \*Hiroyuki Nakano, Kazunari Eda, Shuichi Sato Mitsuru Musha, Tomotada Akutsu, Takahiro Tanaka, Naoki Seto, "Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes", PTEP 2016 (2016) 930, DOI:10.1093/ptep/ptw127, 査読有
  28. ▲\*Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda, 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", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 456 (2016) no.1, 1093-1114, DOI:10.1093/mnras/stv2624, 査読有
  29. ▲\*Y. Zhang et al. (Super-Kamiokande collaboration), "First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV", Physical Review D 93 (2016) 12004-1-12, DOI:10.1103/Phys.RevD.93.012004, 査読有
  30. ▲\*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, DOI:10.1093/ptep/ptv179, 査読有
  31. ▲Konishi, M., Motohara, K., 他 36 名, "ANIR: Atacama near-infrared camera for the 1.0 m miniTAO telescope", Publications of the Astronomical Society of Japan 67 (2015) 4, DOI:10.1093/pasj/psu148, 査読有
  32. ▲Maeda, K., Nozawa, T., Nagao, T., and Motohara, K., "Constraining the amount of circumstellar matter and dust around Type Ia supernovae through near-infrared echoes", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 452 (2015) 3281, DOI:10.1093/mnras/stv1498, 査読有
  33. ▲Kuncarayakti, H., Maeda, K., Bersten, M. C., Folatelli, G., Morrell, N., Hsiao, E. Y., Gonzalez-Gaitan, S., Anderson, J. P., Hamuy, M., de Jaeger, T., Gutierrez, C. P., and Kawabata, K. S., "Nebular phase observations of the Type-Ib supernova iPTF13bvn favour a binary progenitor", Astronomy and Astrophysics 579 (2015) A95, DOI:10.1051/0004-6361/201425604, 査読有
  34. ▲Yamanaka, M., Kawabata, K. S., Yanagisawa, K., Yoshida, M., 他 29 名, "OISTER Optical and Near-Infrared Observations of Type Ia Supernova 2012Z", The Astrophysical Journal 806 (2015) 191, DOI:10.1088/0004-637X/806/2/191, 査読有
  35. ▲\*L. M. Magro, "EGADS approaching GADZOOKS!", EPJ Web Conf. 95 (2015) 4041 1-6 査読有
  36. ▲\*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, DOI:10.1103/PhysRevD.91.084032, 査読有
  37. ▲\*T.Yokozawa, M.Asano, T.Kayano, Y.Suwa, N.Kanda, Y.Koshio, M.Vajins, "Probing the rotation of core-collapse supernova with a concurrent analysis of gravitational waves and neutrinos", The Astrophysical Journal 811 (2015) 86(12pp), DOI:10.1088/0004-637X/811/2/86, 査読有
  38. ▲\*Tatsuya Narikawa, Koh Ueno, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, "Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations", Phys. Rev. D 91 (2015) 62007, DOI:10.1103/PhysRevD.91.062007, 査読有
  39. ▲K. Abe, \*Masashi Yokoyama et. al. (Hyper-Kamiokande collaboration), "Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande", PTEP 2015 (2015) 053C02-1-35, DOI:10.1093/ptep/ptv061, 査読有
  40. ©▲\*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
  41. ▲Totani, T., Aoki, K., Hattori, T., Kosugi, G., Niino, Y., Hashimoto, T., Kawai, N., Ohta, K., Sakamoto, T., and Yamada, T., "Probing intergalactic neutral hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at z = 5.913", Publications of the Astronomical Society of Japan 66 (2014) 63, DOI:10.1093/pasj/psu032, 査読有
  42. ▲Hatsukade, B., Ohta, K., Endo, A., Nakanishi, K., Tamura, Y., Hashimoto, T., and Kohno, K., "Two gamma-ray bursts from dusty regions with little molecular gas", Nature 510 (2014) 247, DOI:10.1038/nature13325, 査読有
  43. ▲\*Hideyuki Tagoshi, Chandra Kant Mishra, Archana Pai, K. G. Arun, "Parameter estimation of neutron star-black hole binaries using an advanced gravitational-wave detector network: Effects of the full post-Newtonian waveform", Phys. Rev. D 90, Issue 2, (2014) 024053. (26 pages), DOI:10.1103/PhysRevD.90.024053, 査読有
  44. ▲\*Tomoya Kinugawa, Kohei Inayoshi, Kenta Hotokezaka, Daisuke Nakauchi, Takashi Nakamura, "Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 442 (2014) 2963-2992, DOI:10.1093/mnras/stu1022, 査読有
  45. ©▲\*Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hirotaka Takahashi, Yuta Hiranuma, Takashi Wakamatsu, Jordan B. Camp, "Towards constructing an Alert System with the Hilbert-Huang Transform -Search for signals in noisy data-", Innovative Computing, Information and Control, Express Letters Part B : Applications 5 (2014) 285-292 査読有
  46. ▲\*K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, "New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark-Matter Minispike", Physical Review Letters 110 (2013) 221101-1-5, DOI:10.1103/PhysRevLett.110.221101, 査読有
  47. ©▲\*Hirotaka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, "On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves", Advances in Adaptive Data Analysis 5 (2013) 1350010-1-20, DOI:10.1142/S1793536913500106, 査読有
  48. ▲\*Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Norichika Sago, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, "Impact of the second-order self-forces on the dephasing of the gravitational waves from quasicircular extreme mass-ratio inspirals", Physical Review D 87 (2013) 24010, DOI:10.1103/PhysRevD.87.024010, 査読有
  49. ▲Hayashida, M., Kawabata, K. S., Yoshida, M., 他 90 名, "The Structure and Emission Model of the Relativistic Jet in the Quasar 3C 279 Inferred from Radio to High-energy gamma-Ray Observations in 2008-2010", The Astrophysical Journal 754 (2012) 114, DOI:10.1088/0004-637X/754/2/114, 査読有

50. ▲\*M. Vagins, "Detection of Supernova Neutrinos", Nuclear Physics Proceedings Supplement 229–232 (2012) 325(6pp), DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2012.09.051, 査読有  
(他、計 425 件。内、査読有国際誌 324 件、査読無国際誌 40 件、査読有国内誌 35 件、査読無国内誌 26 件)

### 主な論文：公募研究

1. ▲Jung, Y. K. et al. (including Abe, F.), "Binary Source Microlensing Event OGLE-2016-BLG-0733: Interpretation of a Long-term Asymmetric Perturbation", The Astronomical Journal, 153 (2017) id. 129,1–7, DOI:10.3847/1538-3881/aa5d07, 査読有
2. ▲Asahi Ishihara, Yusuke Suzuki, Toshiaki Ono, Hideki Asada, "Finite-distance corrections to the gravitational bending angle of light in the strong deflection limit", Phys. Rev. D, 95 (2017) 044017(7pages), DOI:10.1103/PhysRevD.95.044017, 査読有
3. ▲Takahiro Nagayama, "A local attenuation filter for accurate photometry of near-infrared bright stars", Proceedings of the SPIE, 9912 (2016) id. 991237 6 pp., DOI:10.1117/12.2232593, 査読無
4. ▲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 ser B, 92 (2016) 336–345, DOI:10.2183/pjab.92.336, 査読有
5. ▲\*Sho Fujibayashi, Takashi Yoshida, and Yuichiro Sekiguchi, "Alpha-constrained QSE Nucleosynthesis in High-entropy and Fast-expanding Material", The Astrophysical Journal, 818 (2016) 96, DOI:10.3847/0004-637X/818/1/96, 査読有
6. ▲Chon, S., Hirano, S., Hosokawa, T., & Yoshida, N., "Cosmological Simulations of Early Black Hole Formation: Halo Mergers, Tidal Disruption, and the Conditions for Direct Collapse", The Astrophysical Journal, 832 (2016) 134, 22pp., DOI:10.3847/0004-637X/832/2/134, 査読有
7. ▲HEATES Collaboration, \*Tadashi Hashimoto, Shinya Yamada, "Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 27 (2016) 1–4, DOI:10.1109/TASC.2016.2646374, 査読有
8. ▲\*Maeda K., \*Terada Y., "Progenitors of type Ia supernovae", International Journal of Modern Physics D, 25 (2016) id. 1630024, DOI:10.1142/S021827181630024X, 査読無
9. ▲Sako, Shigeyuki, et al., Tomonori, Urakawa, Seitaro, Usui, Fumihiko, Watanabe, Junichi, Yamaguchi, Jumpei, Yoshikawa, Makoto, "Development of a prototype of the Tomo-e Gozen wide-field CMOS camera", SPIE, 9908 (2016) 0, DOI:10.1117/12.2231259, 査読無
10. ▲Misao Sasaki, \*Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuichiro Yokoyama, "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914", Physical Review Letters, 117 (2016) 1,5, DOI:10.1103/PhysRevLett.117.061101, 査読有
11. ▲\*Sotani, Hajime, Takiwaki, Tomoya, "Gravitational wave asteroseismology with protoneutron stars", Physical Review D, 94 (2016) id.044043, DOI:10.1103/PhysRevD.94.044043, 査読有
12. ▲Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Yasuda, N., Furusawa, H., Taniguchi, Y., Kato, T., Jiang, J., Kuncarayakti, H., Morokuma-Matsui, K., Ikeda, H., Blinnikov, S., Nomoto, K., Kokubo, M., Doi, M., "An Effective Selection Method for Low-Mass Active Black Holes and First Spectroscopic Identification", Publications of the Astronomical Society of Japan, 68 (2016) 40 (10pp), DOI:10.1093/pasj/psw033, 査読有
13. ▲\*Yoshida, Kazuki, Yonetoku, Daisuke, Sawano, Tatsuya, Ikeda, Hirokazu, Harayama, Atsushi, Arimoto, Makoto, Kagawa, Yasuaki, Ina, Masao, Hatori, Satoshi, Kume, Kyo, Mizushima, Satoshi, Hasegawa, Takashi, "Development of wide-field low-energy x-ray imaging detectors for HiZ-GUNDAM", Proceedings of the SPIE, 9905 (2016) 99050M, 11pp, DOI:10.1117/12.2231370, 査読無
14. ▲\*Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Keisuke Taniguchi, "Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", PRD, 93 (2016) 124046, DOI:10.1103/PhysRevD.93.124046, 査読有
15. ▲Masaya Hasegawa, Kazuki Sakashita, Kousei Uchikoshi, \*Shigeki Hirobayashi, Tadanobu Misawa, "Removal of salt-and-pepper noise using a high-precision frequency analysis approach", IEICE transactions on information and systems (in press), Vol. E100-D, No. 5, pp. 1097–1105 (2017) 査読有
16. ©▲\*Kagawa, Yasuaki, Yonetoku, Daisuke, Sawano, Tatsuya, Toyanago, Asuka, Nakamura, Takashi, Takahashi, Keitaro, Kashiyama, Kazumi, Ioka, Kunihito, "X-Raying Extended Emission and Rapid Decay of Short Gamma-Ray Bursts", The Astrophysical Journal, 811 (2015) 42836, DOI:10.1088/0004-637X/811/1/4, 査読有
17. ▲\*Jun'ichi Yokoyama, "Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises I. Locally optimal statistic", Proceedings of the Japan Academy ser B, 90 (2014) 422–432, DOI:10.2183/pjab.90.422, 査読有
18. ▲\*Hiroki Nagakura, Kenta Hotokezaka, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, "Jet Collimation in the Ejecta of Double Neutron Star Mergers: A New Canonical Picture of Short Gamma-Ray Burst", The Astrophysical Journal Letters, 784 (2014) L28, DOI:10.1088/2041-8205/784/2/L28, 査読有
19. ▲\*Iwa Ou, Takatomi Yano, Yoshiyuki Yamada, Takaaki Mori, Tsubasa Kayano, Makoto Sakuda, Atsushi Kimura, and Hideo Harada, "Measurement of the Energy, Multiplicity and Angular Correlation of Gamma-rays from the Thermal Neutron Capture Reaction Gd(n,gamma)", JPS Conference Proceedings, 1 (2014) 013053–1–6, DOI:10.7566/JSPSC.1.013053, 査読有
20. ▲Kojima, Yasufumi, Kato, Yugo E., "Numerical simulation of oscillating magnetospheres with resistive electrodynamics", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2 (2014) id.023E01, DOI:10.1093/ptep/ptu014, 査読有
21. ▲\*Yohsuke Takamori, Hirokazu Okawa, Makoto Takamoto, and Yudai Suwa, "An alternative numerical method for the stationary pulsar magnetosphere", Publ. Astron. Soc. Japan, 66 (2014) 25, DOI:10.1093/pasj/pst026, 査読有
22. ▲Umehata, H., Tamura, Y., et al., "AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 440 (2014) 3462–3478, DOI:10.1093/mnras/stu447, 査読有
23. ©▲\*Yonetoku, Daisuke, Nakamura, Takashi, Sawano, Tatsuya, Takahashi, Keitaro, Toyanago, Asuka, "Short Gamma-Ray Burst Formation Rate from BATSE Data Using Ep-Lp Correlation and the Minimum Gravitational-wave Event Rate of a Coalescing Compact Binary", The Astrophysical Journal, 789 (2014) 65–69, DOI:10.1088/0004-637X/789/1/65, 査読有
24. ▲\*Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Tomohide Wada, "High resolution numerical-relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars", PRD, 90 (2014) 41502, DOI:10.1103/PhysRevD.90.041502, 査読有
25. ©▲\*Tsutsui, Ryo, Yonetoku, Daisuke, Nakamura, Takashi, Takahashi, Keitaro, Morihara, Yoshiyuki, "Possible existence of the Ep-Lp and Ep-Eiso correlations for short gamma-ray bursts with a factor 5–100 dimmer than those for long gamma-ray bursts", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 431 (2013) 1398–1404, DOI:10.1093/mnras/stt262, 査読有
26. ▲K. Asakura (including \*K. Ishidoshiro) et al., "STUDY OF ELECTRON ANTI-NEUTRINOS ASSOCIATED WITH GAMMA-RAY BURSTS USING KAMLAND", The Astrophysical Journal 806 (2015) 86, DOI:10.1088/0004-637X/806/1/87, 査読有  
(他、計 156 件。内、査読有国際誌 148 件、査読無国際誌 2 件、査読有国内誌 6 件、査読無国内誌 0 件)

## 主な著書・雑誌記事など

- ・ 山田章一 「超新星」 日本評論社 2017年 279頁
- ・ 田中雅臣 「星が「死ぬ」とはどういうことか」 ベレ出版 2015年 202頁
- ・ 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, 210-211, 2016年
- ・ 神田展行 「重力波の発見：一般相対性理論の100年後の証明」 パリティ Vol. 31, No. 6, 40-42, 2016年
- ・ 梶田隆章, 田越秀行 「重力（観測）-KAGRA 稼働と重力波実測へ向けて-」 数理科学 605巻 39-44, 2013年
- ・ 田中貴浩, 「一般相対論, その世紀と現在」 パリティ, 2015年度(12回連載)

## 国内学会発表

2012年 計画研究 10件 2013年 計画研究 39件/公募研究 19件 2014年 計画研究 42件/公募研究 42件  
2015年 計画研究 44件/公募研究 48件 2016年 計画研究 81件/公募研究 67件

## 国際会議発表

2012年 計画研究 14件 2013年 計画研究 68件/公募研究 19件 2014年 計画研究 47件/公募研究 18件  
2015年 計画研究 71件/公募研究 26件 2016年 計画研究 92件/公募研究 47件

## 国際研究集会の主催

- ・ RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION, JGRG22, 東京大学, 2012/11/12-16
- ・ Gravity and Cosmology 2012, 京大基研, 2012/11/18-12/22
- ・ Asia Pacific School/Workshop on Gravitation and Cosmology 2013, The Ocean Suites Jeju Hotel, 2013/2/19-22
- ・ Long-term workshop on gravitational waves and numerical relativity, 京大基研, 2013/5/19-6/22
- ・ The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 弘前大, 2013/11/5-8
- ・ New Perspectives on Cosmology, APCTP, Pohang, Korea, 2013/11/25-29
- ・ 2014 Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation and Cosmology, Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, 2014/2/17-21
- ・ The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, the University of Tokyo, 2014/11/10-14
- ・ The 3rd Workshop on Large Aperture Millimeter/Submillimeter Telescopes in the ALMA Era (LSTWS2015), 国立天文台, 2015/3/10-11
- ・ International School of Gravitational Physics, Kyoto, 2015 (, 京大基研, 2015/3/25-28
- ・ Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW) 2017, 大阪市 (大阪国際会議場), 2015/6/17-20
- ・ Molecule-type workshop on "Radiation Reaction in General Relativity", 京大基研, 2015/6/22-7/10
- ・ Numazu Workshop 2015: Challenges of modeling supernovae with nuclear data, Mishima, Shizuoka, Japan, 2015/9/1-4
- ・ The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG25), 京大基研, 2015/12/7-11
- ・ The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG26), Osaka City University, 2016/10/24-28
- ・ Workshop on Supernova at Hyper-Kamiokande, 東京大学・小柴ホール, 2017/2/12-13

## 領域シンポジウム・研究会

- ・ 領域シンポジウム (各年度に1回づつ計5回開催、参加者数80~110名)
- ・ 領域研究会 (計14回開催、参加者数40~60名)
- ・ 新学術3領域(重力波天体・地下素核研究・中性子星核物質)合同シンポジウム「多面的アプローチで解きあかす宇宙と天体」 7月24-25日 於 東北大
- ・ 計画研究 A05 合宿 2013年1月7日-1月9日 KKR 熱海
- ・ 「コンパクト連星の合体と電磁波対応天体」 2013年2月14日-2月15日 京大基研
- ・ 第12回 DECIGO ワークショップ 2013年10月27日 東大
- ・ A04/05 Joint Camp 2014年2月22日-2月24日 KKR 城崎玄武
- ・ 第13回 DECIGO ワークショップ 2014年10月26日 京大
- ・ A04/05 Joint Camp 2015年1月8日-10日 瀬波温泉
- ・ コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域 2015年2月12日-14日 京大基研
- ・ A05 Camp 2016年1月7日-9日 KKR 伊豆長岡千歳荘
- ・ A05 Camp 2017年1月7日-9日 湖邸滋びわこクラブ

## 一般向けアウトリーチ

- ・ 一般相対性理論100年記念講演会(計15会場, のべ2500名)
- ・ 日本物理学会 市民科学講演会 (中村, 神田ほか)
- ・ 一般・高校生・大学生向け解説 web(電子本) 中村卓史

## 7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

### 計画研究の関係

計画研究は、重力波天体が放射すると期待する電磁波（X線、ガンマ線：A01、可視光、赤外線、電波：A02）、ニュートリノ（A03）を観測する計画と、重力波観測データそのものから事象を探索する計画（A04）、そしてそれらの理論的研究を行う計画（A05）から構成した。これらの各研究と、横断的な研究を進めてきた。

重力波天体について、その事象を捉えるには、まず、

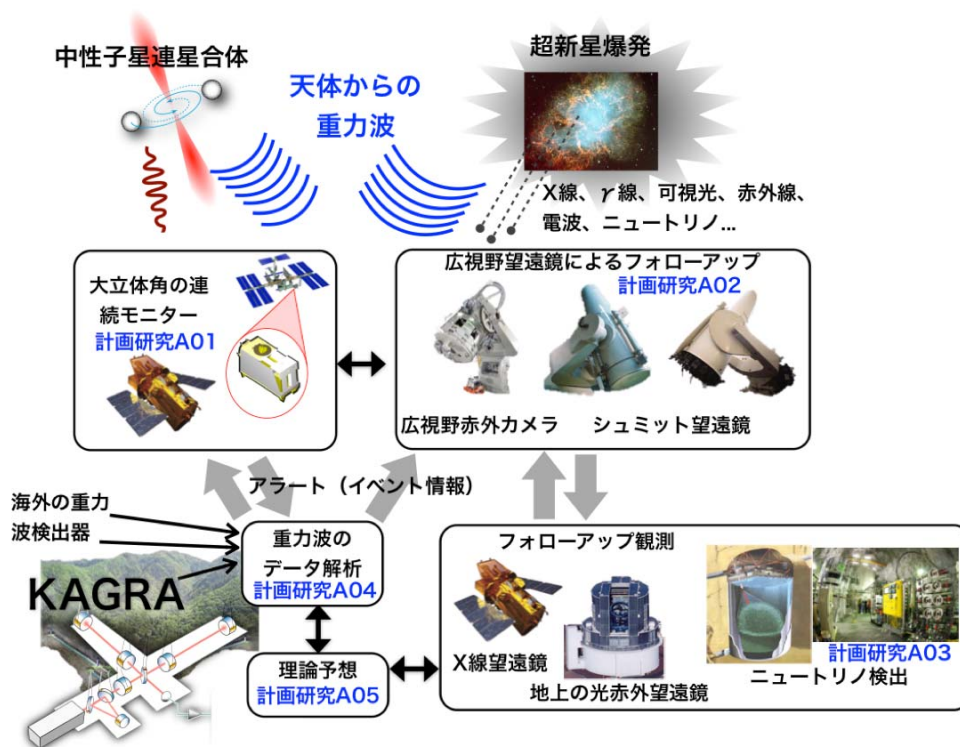
[1] 重力波観測データの素早い解析

が必要である。しかし重力波検出で示唆される到来方向は精度が低く、どのようにして追観測に結びつけるかが本領域の研究組織の構成に強く関わっている。すなわち、到来方向決定精度が低い重力波源を特定するには、以下の二つのステップが必要である。

[2] 常時監視：大天域を常に監視し重力波と同期して発生する電磁波現象を待ち受ける

[3] 即応観測：高感度の望遠鏡で重力波到来方向を直ちに観測する

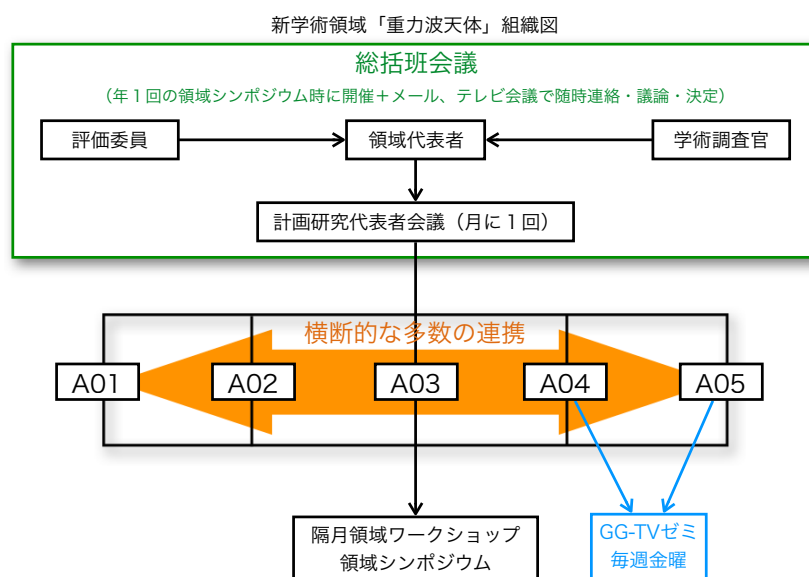
まず X 線領域が、（特に中性子星を含む連星の合体による）重力波発生に対応して明るい突発現象が期待されるとともに、適切な感度で大天域を監視することが技術的に可能である。この X 線での常時監視[1]を行うのが計画研究 A01 の最も重要な目標で、対応天体が検出されれば、A02 班の地上望遠鏡による即応観測へ結びつけることができる。一方、新たな突発 X 線源が出現したときに、重力波観測単独での有意検出レベル以下の信号（A04）、あるいは地上光学観測（A02）、ニュートリノ（A03）等にも対応する信号を探索し、総合的に有意性が認められるイベントを探すことも可能になる。[1]のために、LIGO との覚書にもとづき、重力波検出報告への対応観測の結果は、他のグループと共有している。また A04 では日本の重力波検出実験 KAGRA と連携している。これらのすべての根拠となるのが A05 による理論研究である。下図にこの概念を示す。



## 総括班・運営体制と、計画研究間の協力関係

総括班では研究は行わず、組織としての領域の有機的な機能を推進するのが主な仕事である。具体的には総括班の研究実施計画は以下の通りであった。まず、大阪市立大学に事務局を設置した。専属の秘書を雇い、パソコン関連ソフト、TV会議システム等を購入した。24年8月末には領域のkickoff会議を京大で開催し、領域の全体的な研究方針を策定した。重力波天体の多様な観測という大目標をすみやかに達成するように全体の方針を策定した。また国内外の研究動向にすみやかに対応した。領域の進行状況のチェックとしては、月例の代表者会議にて、逐次各計画の進行状況を把握した。2-3ヶ月に一度は各計画研究に関連したテーマで1-2日間のシンポジウムを開催し、face to face または TV 会議で領域内の全てのメンバーの情報交換に努めた。計画研究間の企画・調整を行い、各計画研究の方針も確認し、全体および他の計画研究との整合性を保つよう努めた。研究成果の発表に関する支援としては、領域シンポを毎年開催した。また、海外での国際会議への研究者の派遣、ホームページの立ち上げと更新・維持などを行った。その他の研究支援・国際共同研究、国際協力に関する策定・支援としては、海外の関連する研究との情報交換や協力関係を検討し、LIGO との MOU 等必要なものを進めた。予算としては TV 会議システムの備品費、旅費、秘書の雇用の費用と消耗品費が主なものであった。研究の進展の自己評価のために連携研究者を中心とした評価委員会を設置し、毎年の領域シンポ中に開催した。

また総括班では、一般向けの活動も組織的におこなった。1915年11月25日にアインシュタインが現在使われているアインシュタイン方程式に到達した。そこで領域代表者は一般相対性理論誕生100周年を記念して全国で市民講演会を開くことを領域内ならびにJGWCという国内の一般相対論のコミュニティに提案した。費用を節約するため会場は大学の講義室、講師謝金なしのボランティアベース、旅費が必要な講師には旅費のみを領域が援助するという形で行った。ポスターは基礎物理学研究所に作成していただき、学会や一般向け雑誌などを通じて全国的に宣伝をおこなった。会場は全国15箇所、延参加人数は2500人であった。各地の新聞でも取り上げられ、大変盛況であった。ホームページは現在も、<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/Gmunu100/> にあり、講演会の写真や記録を保存している。



## 計画研究、公募研究の連携状況

上述の隔月領域研究会、毎年の領域シンポジウムでは、計画研究だけでなく公募研究も参加し、多数の発表が行われた。また、計画研究 A04 と 05 では合同で合宿形式のセミナーを毎年行い、これには関連する公募研究も多数参加した。その結果として、多くの共著論文が書かれ、分野を融合する研究論文も15件に上る。

## 8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

**(A01)** 経費は主に以下の三つに費やされた。1)研究員の雇用。MAXIの観測運用・データ解析、及びWF-MAXIの観測装置開発に貢献した。2)WF-MAXI開発。システムの設計検討、カスタマイズしたCCD素子や信号処理ASIC、及び観測装置試作品(軟X線カメラSLCと硬X線線モニターHXM)試作。3)MAXIのデータ解析用計算機とデータ保存装置。開発されたMAXIの重力波対応天体探索システムによって、GW150914等の重力波イベントに対する探索を実施した。今後の重力波イベントに対しても効率的に探索を行い、重力波天文学コミュニティに迅速に結果を通報する仕組みを構築した。WF-MAXIはISSミッションとしてプロジェクト化に至っていないが、開発したSLCとHXMは様々な性能評価を行っており、機会があれば短時間で搭載提案できるように準備している。

**(A02)** 冷却CCDカメラ、天体望遠鏡、赤道儀、三色同時撮像装置、NAS装置は、50cmロボット望遠鏡およびその観測装置の構成物品であり、日本で組立調整を行って、中国チベット阿里サイトに仮設置されており、中国国家天文に保管を依頼している。平成29年9月に本格設置して観測を開始する予定である。コンピューター、データストレージ、フィルターは国立天文台岡山天体物理観測所にて広視野赤外線カメラにおいて使用されている。光ファイバーは京都大学が面分光装置を開発するために購入し、現在は岡山天体物理観測所で使用されている。東京大学ではTomo-eを開発するための研究員を雇用した。平成26、27年度は臨時に開発要員として研究員を雇用した。京都大学では面分光ユニットを開発し観測を実施するための研究員を雇用した。広島大学で50cmロボット望遠鏡開発のための特任助教を雇用した。また、岡山天体物理観測所で広視野赤外線カメラ開発のための研究補助員を雇用した。

**(A03)** 経費は主に以下の3点に費やされた。1)EGADS検出器における水純化システム 2)線源や光源など検出器校正に必要な装置 3)デッドタイムフリーの電子回路。1)により、ガドリニウムを溶解した水が、スーパーカミオカンデの超純水と同レベルという予想以上に高い透明度を達成した。2)により、中性子検出効率は86%と測定され、予測値と非常に良い一致をみた。3)の開発はすでに終了しており、H29の繰越経費を用いてEGADS検出器に導入する予定である。

**(A04)** KAGRA実験の観測データを蓄積、解析するための計算機システム、および若手研究員の雇用のための費用に大きく用いられた。計算機システムは、データの安全性やA04メンバーが自由な開発環境で作業できるようにした仮想プライベートネットワークを導入した。計算能力やデータ容量は、研究の進行とKAGRAの運転に合わせて順次増強され、最終的には数ヶ月のKAGRAデータの蓄積に十分な288TiBの容量、760コアのCPUを有する。これによって、KAGRAのデータ解析を最低限保証できた。若手研究員は、2年目以降は常時4名、計7名を雇用した。そのうち1名は東京大学宇宙線研究所の特任助教、3名は学術振興会PD研究員、博士を取得した大学院生1名も東京大学宇宙線研究所の研究員に採用された。このように本分野の若手の育成に大いに貢献した。

**(A05)** 研究経費の主な使途は研究員の雇用である。合計で8名の研究員を雇用したが、その後も皆、研究職に就いている。特に、中野寛之は龍谷大・准教授に就職、西澤篤志は名古屋大学KMI・特任助教、野沢真人は京都大学基礎物理学研究所特任助教のポジションを得た。その他の支出の多くは、研究会の開催と海外からの招聘である。研究集会件数は主催、共催を合わせると22件(うち、国際研究集会13件)である。海外からの招聘は述べ10名以上になる。100万円規模の計算機を4台購入し、数値コード開発に用いた。

**(総括班)** 総括班では研究会開催のための旅費と、領域の事務のために秘書を雇用した。開催した研究会は、領域全体によるものだけでも20回と、領域の活性化に大いに役立った。また旅費圓場などで国内開催にかかわった国際研究集会も13件ある。



・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
24	X線 CCD (2個)	S12937-C700(X)-G1	1	13,965,000	13,965,000	宇宙航空研究開発機構
	冷却 CCD カメラ	APOGEE 社 ALTA U42-MB-HC	2	6,998,250	13,996,500	広島大学
	エレクトロニクスモジュール	岩通計測 (株) 特製	1	8,400,000	8,400,000	東京大学
	重力波データ解析システム	富士通 RX350S7, RX200S7 ほか一式	2	3,301,200	6,602,400	大阪市立大学、大阪大学
25	CCD カメラ設計・試作	特注品	1	15,435,000	15,435,000	宇宙航空研究開発機構
	X線 CCD	S12937-C700(X)-G2	2	4,987,500	9,975,000	宇宙航空研究開発機構
	広視野 X線 CCD カメラ	特注品	1	3,996,000	3,996,000	宇宙航空研究開発機構
	天体望遠鏡	口径 50cm リッチークレチアン光学系 田中光化学工業	1	9,993,900	9,993,900	広島大学
	赤道儀	60EL 赤道儀 昭和機械製作所	1	7,843,500	7,843,500	広島大学
	観測装置	可視三色カメラ筐体	1	3,500,000	3,500,000	広島大学
26	重力波データ解析計算機増設システム	PRIMAGY RC2540M1 x7 ほか	1	13,489,200	13,489,200	大阪市立大学
	重力波データ解析計算機増設ハードウェア	PRIMAGY RX2540M1 x6 ほか	1	9,838,800	9,838,800	大阪大学
	コンピュータ	HPC システムズ社製ハイパフォーマンスコンピュータ	2	1,350,000	2,700,000	京都大学基礎物理学研究所
	重力波検出器診断用計算機	RC Server Calm III	1	2,222,640	2,222,640	大阪市立大学
27	重力波計算機ストレージ装置増設	144TiB RAID, 富士通 ETERNUS DX100	2	6,912,000	13,824,000	大阪市立大学
	重力波データ解析計算機増設追加ノード	E5-2630v3, 富士通 RX2540 M1	2	2,095,200	4,190,400	大阪市立大学
	重力波データ解析サーバ増設	PRIMAGY RX250 M2 x6, SH1580ATD	2	9,423,000	18,846,000	大阪市立大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

**【平成24年度】**

・旅費

総括班：600万円。領域開始にあたってのキックオフ会議、隔月での研究会、毎年開催する領域シンポジウムに使用した。

・人件費・謝金

総括班：185万円領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A05:人件費のうち約550万円、研究員を雇用開始し集中的な研究をスタートさせた。

・その他

計画研究 A02:広視野赤外線カメラ OAOWFC のドーム改修を行った。

**【平成25年度】**

・旅費

総括班：310万円。隔月での研究会、毎年開催する領域シンポジウムに使用した。

・人件費・謝金

総括班：230万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A04:計4名の若手研究員（博士研究員3名、特任助教1名）を雇用（計1968万円）  
計画研究 A05:人件費のうち約1100万円、主に研究員を雇用し集中的な研究を推進した。

・その他

計画研究 A02:広視野赤外線カメラ OAOWFC の制御ソフトウェアの開発を行った。

**【平成26年度】**

・旅費

総括班：国際会議 GWPAW(Gravitational Wave Physics and Astronomy, 重力波物理と天文ワークショップ)を開催予定であったが、諸般の事情により開催を翌年度の2015年6月とした。そのため、海外からの招待講演者の旅費として300万円繰越した。(実際の執行はH27年度)  
毎年開催する領域シンポジウム、定例研究会の参加者旅費に360万円を使用した。

・人件費・謝金

総括班：230万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A04:計4名の若手研究員（博士研究員3名、特任助教1名）を雇用（計1964万円）  
計画研究 A05:人件費のうち約1300万円、研究員を雇用し集中的な研究を推進した。

・その他

計画研究 A04：計算機システムにおける、導入費用（システムエンジニアの作業など）とメンテナンス費用。  
計画研究 A02:50cm ロボット望遠鏡付属部品の一部を中国に輸送した。

**【平成27年度】**

・旅費

総括班：345万円。隔月での研究会、毎年開催する領域シンポジウムに使用した。

・人件費・謝金

総括班：230万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を1名雇用した。  
計画研究 A04:計4名の若手研究員（博士研究員3名、特任助教1名）を雇用（計1777万円、年度途中で特任助教が他機関へ転出のため、前年度よりやや少ない額）  
計画研究 A05:人件費のうち約1400万円、研究員を雇用し集中的な研究を推進した

・その他

計画研究 A04： 計算機システムにおける、導入費用（システムエンジニアの作業など）とメンテナンス費用。

計画研究 A02：50cm ロボット望遠鏡および観測装置の中国への輸送を行った。

【平成 28 年度】

・旅費

計画研究 A04： 国際会議 GPPAW2016 へ 10 名派遣。350 万円

・人件費・謝金

総括班：230 万円。領域の事務のために事務局（大阪市立大学）にて秘書を 1 名雇用した。

計画研究 A04：計 4 名の若手研究員（博士研究員 4 名）を雇用（計 1897 万円）

計画研究 A05： 人件費のうち約 1300 万円、研究員を雇用し集中的な研究を推進した。

・その他

計画研究 A04： 計算機システムにおける、導入費用（システムエンジニアの作業など）とメンテナンス費用。

（3）最終年度（平成 28 年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

A01 では、共用バスを用いて国際宇宙ステーション（ISS）に搭載する軟 X 線カメラを開発してきたが、H28 年度に発出された JAXA の小規模プロジェクトの公募では予算枠が大幅削減にされており、ISS 搭載の可能性が事実上閉ざされた。そのため、予算を繰越しして海外ミッションなどの新たな搭載機会にすぐに対応できるように、より広い熱環境での動作の検証、低電力動作、あるいは超小型衛星に搭載するためのミッション要求の見直しなど、新たな設計の検討を行うこととした。また、LIGO O2 重力波観測が当初の予定よりもずれ込んで開始が 2016 年末まで遅れ、2017 年夏まで観測が行われることになったため、MAXI などによる重力波対応 X 線天体の探索も、LIGO のスケジュールに合わせて実施する。

A02 では、平成 28 年度中に、50cm ロボット望遠鏡の中国チベット阿里サイトへの本格設置を行って初期調整・試験観測を行って本格観測を開始する予定であった。しかし、平成 26 年 9 月より外国人のチベットへの入境許可が厳格化して、入境申請が通らなくなった。中国国家天文台、在中国日本大使館などを通じて交渉した結果、平成 28 年 9 月ようやく入境して望遠鏡の仮設置を行ったが、また入境申請が拒否され、平成 28 年度中に望遠鏡の本格設置を行うことが不可能となった。その後、平成 29 年 9 月頃に入境が許可される見込みが出てきたため、望遠鏡設置費用およびそのための渡航費用として研究費の繰越しを行った。

A03 では、2014 年 5 月の EGADS タンクの建設の際、構造支持ワイヤが錆びるアクシデントが発生した。これは納入されたワイヤが、我々が発注したステンレス鋼でなく、鉄製のものであったためであり、その原因はワイヤの製造元と代理店間のミスコミュニケーションによるものである。そのため 2014 年 6 月から 11 月まで実験を中断し、錆を除去する必要があった。除去後、実験の運転が再開されたが、プロジェクトのスケジュール全体が半年以上遅れてしまった。それ以降は、実験は予定通り進んでおり、H27 年度には EGADS タンクに目標の 0.2%硫酸ガドリニウムの充填に成功した。水質は予想以上に高く、検出器は過去 2 年間、安定して稼働している。しかし H26 年度の遅延はそのまま継続しており、H28 年度を目標とした一部の支出を H29 年度に行う必要があった。主な目的は、DAQ エレクトロニクス、オンライン計算機、水システムのアップグレードである。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

人類初検出された重力波イベントは GW150914(2015 年 9 月 14 日に発見された、GW(Gravitational wave: 重力波))と呼ばれ、太陽質量の 30 倍程度のブラックホール連星であるが、**本領域では理論の計画研究がすでに 2014 年に宇宙で最初にできた初代星起源を予言**して、GW150914 **に見事に一致した**。この事実は、LIGO の GW150914 の発見論文でも大きく引用され高く評価された。また最終年度には、別の起源の可能性として、宇宙初期の密度揺らぎに伴う原始ブラックホール説を提案し、ダークマターの新しい候補にもなり得るので、世界的に注目されている。また、星団系でのブラックホール合体説も提案された。世界的にも多くの起源説が唱えられているが、どの説が正しいかは、ブラックホールの自転角運動量の分布と赤方偏移分布の決定が必須であり、我が国の将来計画 DECIGO(DECi hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)のような 0.1Hz 帯の宇宙重力波干渉計の建設が必須となった。これらの進展はこの領域の名に相応しい「**宇宙物理の新展開**」である。

A01 班の行っている全天 X 線監視装置 MAXI の観測結果は、既知天体の強度に関しては毎日リアルタイムで光度曲線を更新して Web サイトで全世界に公開しているうえに、天空の任意の座標・時期に対して対話的にスペクトルや光度曲線を作成できるオンデマンド解析システムも MAXI のウェブサイト開設した。その結果、全世界の天文コミュニティに広く利用されて、MAXI の装置を開設した論文 Matsuoka, M. et al. "The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-sky X-Ray Images", Publ. Astron. Soc. Japan 61, 999 (2009)は 2013 年日本天文学会欧文研究報告論文賞を 2014 年 3 月に受賞し、230 件を超える引用は現在もさらに伸びつつある。また、2016 年には米国宇宙航行学会・宇宙科学振興会 “ISS Research and Development Award on Innovation in Earth and Space Science” を MAXI チームが受賞し、A01 分担者の三原が代表して授与式に出席した。

世界の重力波フォローアップ観測チームの中で、J-GEM は最も組織化されたチームであると LIGO チームから高く評価されている。GW151226 のフォローアップ観測では、すばる望遠鏡を用いて他のフォローアップチームの観測より 1.5~2 等級深い追跡観測（約 24 等級）を行うことに成功し、重力波の可視対応現象の研究に大きな貢献をした。

超広視野 CMOS カメラ Tomo-e の開発は、低雑音・広視野の CMOS センサを初めて天文学に応用したもので、超広視野・高頻度観測という、これまでの天文学では実現の難しかった新しい分野を切り開いていく可能性を示し、**時間軸天文学に大きな影響を与えた**。

東京大学木曾観測所シュミット望遠鏡を用いた突発天体の広視野探査では、取得されたデータを即時にウェブ上に公開し、**市民が突発天体の発見に関われる仕組みを構築**した。実際に小中学生、高校生からアマチュア天文家まで 30 名程度が参加し、市民が発見した 17 個の超新星を連名で国際天文学連合に報告している。この取り組みはオープンサイエンスの例として 2015 年 8 月 23 日の日本経済新聞に掲載されたほか、参加者から史上最年少での超新星発見がなされたことから、中日新聞(2015 年 3 月 4 日)や The Japan Times (2015 年 3 月 13 日)に取り上げられた。

本研究により成功した先端技術を用いた超新星ニュートリノ検出器は、次世代の同様の検出器に対しても大きな影響を与えることになった。例えば**スーパーカミオカンデは、今後、本研究で開発された技術を用いて同様の改造がなされることが決定**した。また、将来的には、現在提案されているハイパーカミオカンデなどのプロジェクトでも同様の技術が用いられることが検討されている。

重力波実験 KAGRA のデータ解析は、**本領域の A04 が中心となって推進**してきた。結果的に、今日、日本で重力波観測データでの研究が継続できているのは、**本領域の貢献が多大**である。初検出された重力波の公開データも解析し、我々によって新しい手法を用いた論文が出版された。

さらに、総括班でも一般向けにも有益な活動をおこなった。**領域代表が執筆した電子本「最後の 1 秒間」**(A4 75 ページ)や重力波の音などを web に無料で公開した。開設以来の約半年で web ページに 9000 回以上のアクセス、電子本 pdf に 2200 回以上のダウンロードがあり、一般市民、報道関係者らに多く閲覧されている。

一般向け講演会では、日本物理学会における市民講演会（2016 年 9 月・宮崎市・中村(領域代表)、2016 年 3 月・仙台市・神田(A04 代表))、市民講演会「西宮湯川記念科学セミナー」(2017 年 1 月・西宮市・中村)も行った。2015 年 10 月~2016 年 3 月にかけては、「**一般相対性理論誕生 100 年記念市民講演会**」を日本中の計 15 カ所で開催した。この講演会には延べ 2500 名が参加した。

## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

A01で雇用した研究員のうち、1名が早稲田大学講師、1名がJAXAの別プロジェクトの研究開発員に採用された。また、任期付き助教（青山学院大学）であった分担者の坂本が准教授（青山学院大学、2017年4月）に採用・昇任した。

A02で雇用した研究員は、2名が別の科研費研究員として広島大学で採用され、2名が機関研究員として国立天文台および東京大学で採用された。平成26、27年度に臨時雇用した研究員は、それぞれ、技術補佐員、特任研究員として東京大学で雇用された。

A03で雇用した研究員のうち、1名（スペイン人）が東大宇宙線研究所の特任助教に採用された。またこれまでに3人（アメリカ人、日本人、スペイン人）の大学院生が博士号を取得している。以上の通り、本研究は国際的な規模での若手研究者の成長に貢献している。

A04では雇用した研究員のうち、1名が研究機関の特任研究員に、2名が学術振興会研究員（国内）、1名が学術振興会研究員（海外）に採用された。また本研究の中で博士論文を書いた学生の内、1名が研究機関の研究員に新たに雇用された。修士論文においては計5名が学内（東大、長岡技科大、大阪市大）における優秀者の表彰を受けている。また採択時点で助教（大阪大学）であった田越が准教授（大阪市大、2015年4月～）に採用・昇任した。

A05では、合計で8名の研究員を雇用したが、その後も皆、研究職に就いている。特に、中野寛之は龍谷大・准教授に就職、西澤篤志は名古屋大学 KMI・特任助教のポジションを得た。

公募研究関連でも、代表者の昇任などがある。例えば、金沢大学・米徳は、最初に公募研究に採択された時点では准教授であったが、2016年1月に教授に昇任した。

## 11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

各研究分野ごとに、総括班評価担当者によるコメントを記す。

### 計画研究 A01「重力波天体からのX線・γ線放射の探索」

（評価者：伊藤好孝・名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授）

X線・γ線観測との連携観測を目指すA01班については、全天X線観測装置MAXIによりGW150914のX線追観測が行われ、X線源は見つからなかったものの近い将来の中性子連星合体からの信号探索体制が整備された事は評価できる。MAXIについては、他の様々な成果も上げている。もうひとつの目的であるWF-MAXIの開発については、大立体角X線カメラの要素開発やシステム仕様書作成など成果を上げたものの、国際宇宙ステーション搭載不採用を受けて当初計画の変更を余儀なくされた事は残念である。代替案となるOHMAN計画や紫外線超小型観測衛星の提案、また公募研究で成果を上げた様々なX線追観測のアイデアについて継続的に検討を続け、X線・ガンマ線による連携観測体制をさら強化して行くことが望まれる。

### 計画研究 A02「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」

（評価者：渡部潤一・国立天文台天文情報センター・教授）

順調に稼働を開始したKAGRAによって、今後の国際的に重力波の発生源の特定は現実味を帯びつつある。そのような状況下、国際的に光学赤外線や電波によって、重力波源天体を同定し、また追跡観測することで、その全容を解明することはきわめて重要である。本研究では、想定される重力波の検出に呼応し、わが国での緊急観測態勢および追跡観測網の整備を目指したもので、時宜を得た整備がなされている。計画研究の吉田グループ（A02）は、これまでのガンマ線バーストに呼応する観測・追跡網を参考にしながらも、ガンマ線に比べても決定位置精度が低いことが想定される点を鑑みて、広視野撮像観測という日本の光・赤外線天文学のお家芸を駆使している。特に、天文学では極めて斬新なCMOSセンサーを活用した広視野撮像装置の開発を公募研究（酒向ら）とともに進め、その観測頻度を上げて高い時間分解能で観測する手法（田中ら）を開発した。これらは世界的にも例がなくユニークな方向性として高く評価できる。これに対応した形で、岡山や鹿児島（永山ら）の広視野近赤外線カメラ、ミリ波サブミリ波での検出の可能性の検討（田村ら）、さらにアジア地区のネットワークを生かして、中国に設置予定の50cm望遠鏡と三色同時カメラの開発を遂行し、また同じ経度帯に存在する名古屋大学のニュージーランドにある望遠鏡などでの観測態勢を整えた。手薄になりがちなソフト開発（重力波アラート対応システム、大量データ解析パイプライン）の開発や、関連する国内の望遠鏡のネットワークを通じての観測網を整備し、海外関係機関と協定書を結ぶなど、すべての面において順調に進んだことは、きわめて高く評価してよい。今後は、本研究で得た装置やノウハウを実際の重力波の検出に合わせ、適用して新しい天文学が開けることを望む。

### 計画研究 A03「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」

（評価者：梶田隆章・東京大学宇宙線研究所・教授）

本計画研究の大きな目標は、神岡鉱山内に設置された既存の200トンの水チェレンコフ検出器を、近傍で超新星爆発が起こった時に、重力波との相関信号を検出できるよう世界最先端の超新星ニュートリノ検出器に改造することであった。特に、ニュートリノ反応と、反ニュートリノ反応の区別を行い、超新星爆発メカニズムの解明に貢献することが求められた。この目的の達成のために、0.2%の硫酸ガドリニウムを水中に溶解させ、反電子ニュートリノ反応（反電子ニュートリノ+陽子→陽電子+中性子）で発生した中性子をガドリニウムに吸収させ、その際に出る合計8MeVのガンマ線を検出する測定器とすることを目指した。この中でも特に困難が予想されたのが、硫酸ガドリニウムを溶解させつつ、水の純度を保って、高い透過率を維持することである。この困難を克服するためには、水中から硫酸ガドリニウム以外の不純物を全て取り除きつつ、硫酸ガドリニウムを残す必要があり、通常の純水装置では不可能である。このことを純水装置への多くの工夫によって成し遂げたことは、誠に素晴らしく、非常に高く評価される。更にその後は水チェレンコフ装置を運転し続け、近傍超新星爆発起源のニュートリノの探索を連続して行っていること、また、本計画研究で達成された技術が、より大きなスーパーカミオカンデでも利用されることが承認されたことも、本計画研究の成果として高く評価される。なお、LIGOによる重力波イベントGW150914およびGW151226において、ニュートリノ信号は観測されなかったものの、スーパーカミオカンデを用いて重力波とニュートリノ信号との相関解析を行ったことは、今後の重力波とニュートリノの共同観測の第一歩となるもので、評価されるべきである。

#### 計画研究 A04 「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」

(評価者：坪野公夫・東京大学・名誉教授)

計画研究 A04 の主目的は、1. 重力波のデータ解析体制の構築とその運用、2. 他の観測手段との連携体制の確立、である。これにより、本領域の中核テーマとなる「重力波事象」の検出を担うと同時に、各研究計画を横断する形で重力波データからのサイエンスの抽出を図ろうとしている。

##### 1. 重力波のデータ解析体制

重力波データ解析の推進については、ソフトウェアおよびハードウェア両面からの研究開発が必要であった。まずソフトウェアについては、日本の研究者が主体となったデータ解析ライブラリ KAGALI の第 1 版が作成されるなど、着実な進歩が見られた。ハードウェアに関しては、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 トンネル坑内から各解析拠点まで連続転送することに成功するなど、実戦に耐えうるシステムの構築がなされた。KAGRA の実際の観測データが処理され、重力波事象の探索が実行されたことは、ハード、ソフトを含めたデータ解析体制全体の構築とその運用が実現されたことを示している。また、LIGO が初検出した重力波イベント GW150914 の公開データを発表直後に解析し、信号波形を正しく抽出できたことは、幸運とは言えデータ解析の実力を示すできごとであった。

KAGRA の初観測や LIGO の重力波初検出の機会をとらえた本グループによる重力波研究の一般への普及活動は注目されるべきであり、これにより一般の人たちが重力波を正しく認識することに広く貢献した。

これからの課題としては、KAGRA の検出感度が initial LIGO レベルに到達するまではまだ時間がかかることがある。それまでの間のデータ解析グループの活動維持の方策を今後検討する必要があると思われる。

##### 2. 他の観測手段との連携体制の確立

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、修正重力理論と重力波検出など、他の計画研究と横断した取り組みもなされた。このほか、他の観測手段との同時観測・フォローアップ観測のための連携体制確立の準備も進んでいるが、これが本格的に動き始めるまでにはもう少し時間がかかると思われる。

#### 計画研究 A05 「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」

(評価者：佐々木節・京都大学基礎物理学研究所・教授)

理論研究においては、計画研究 A05 班の当初の目標は十分に達成している。特に、LIGO が発見した 30 太陽質量のブラックホール連星を初代星形成論から LIGO の発見以前に予言していたことは素晴らしい。また、同連星がインフレーション宇宙を起源とする原始ブラックホール連星である可能性を指摘し、宇宙論的にも電磁波観測と重力波観測の連携の重要性を明らかにしたことや、修正重力理論の検証に関して、重力子振動を起こす理論への新たな観測的制限を導出したことも特筆に値する。他にも、ニュートリノ輸送の高精度数値コードの開発や、中性子星連星の合体時に起こる電磁波対応天体の一連の研究で世界をリードする成果を上げている。計画研究との連携や公募研究における優れた成果としては、ショートガンマ線バーストの重力波源としての性質の明確化やニュートリノ輸送計算の高精度化による超新星爆発の重力波源としての定量化などがあげられる。若手育成も順調に進み、大学院生が中心となった共著論文も数多く発表されている。研究会の主催やサポートを通して関連分野の若手の育成にも大きく貢献をした。また、計画研究 A05 班で雇用した博士研究員は、全員次の研究職を得ており、内 2 名は任期なしの教員ポストに採用されている。

新学術領域研究(研究領域提案型)  
「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」

2017年9月8日

京都大学大学院理学研究科  
領域代表: 中村卓史

1

## 領域の構成

### 領域代表

中村卓史 (京都大学)

### 計画研究

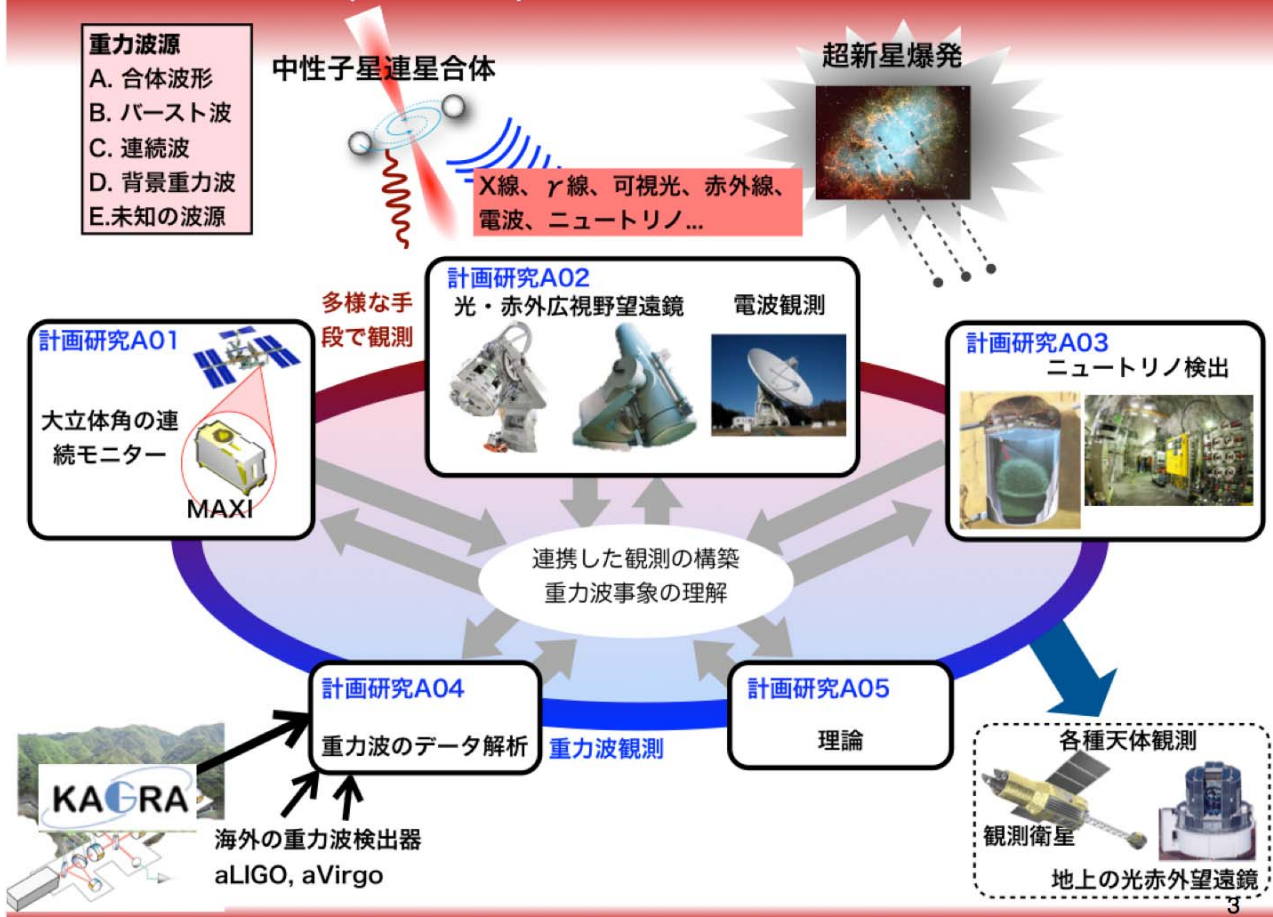
- A01「重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索」  
代表: 河合誠之 (東京工業大学)
- A02「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」  
代表: 吉田道利 (広島大学、現国立天文台)
- A03「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」  
代表: Mark Vagins (東京大学IPMU)
- A04「多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究」  
代表: 神田展行 (大阪市立大学)
- A05「重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究」  
代表: 田中貴浩 (京都大学)

### 総括班

- X00「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開の総括的研究」  
代表: 中村卓史 (京都大学)

2





## 重力波の観測装置の稼働状況

### 1) aLIGO

**O1 (Observing run 1) 2015/9-2016/1**

- 感度：最終感度の約1/3
- 成果：連星ブラックホールの合体が2イベント
- A01、A02はMOUに基づき追観測を実施

### 2) aLIGO-Virgo

**O2 2016/12-2017/8**

- 感度：最終感度の1/6-1/2
- 成果：2017/1/4に30太陽質量－20太陽質量のブラックホールの合体。それ以降にも重力波を検出したというアナウンスはあるが、詳細は未発表。A01とA02はLIGOとMOUを結んでいて追観測を2017/8/25まで実施していた。
- 巷には、大発見があったという噂が流れている。

### 3) KAGRAは2016/3-4月に常温で運転。

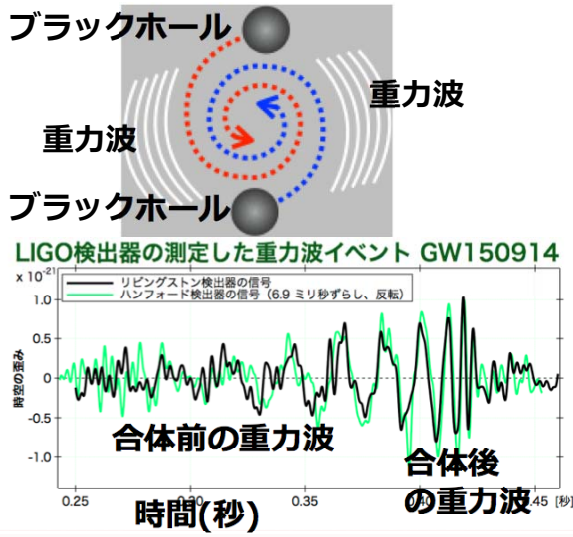
- A04はデータの転送に成功し、データ解析も実行した。

# 人類初検出の重力波イベント(GW150914)の予言的中

## 宇宙で最初に出来た星起源の30-30太陽質量のブラックホール連星の合体

- 2014年に領域代表者と衣川ら4人の大学院生の共同研究で予言
- 2015年6月に本領域が主催したGWPAW2015でも9月に見つかりと予言。
- LIGOの発見論文中では予言された通常の倍以上の質量の値と観測値が驚くべき一致をすると評価された。

Ap.J.Letters, 818:L22(2016)



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 818:L22 (15pp), 2016 February 20  
© 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/2041-8205/818/2/L22

ASTROPHYSICAL IMPLICATIONS OF THE BINARY BLACK HOLE MERGER GW150914

B. P. ABBOTT<sup>1</sup>, R. ABBOTT<sup>1</sup>, T. D. ABBOTT<sup>2</sup>, M. R. ABERNATHY<sup>1</sup>, F. ACERNESE<sup>3,4</sup>, K. ACKLEY<sup>5</sup>, C. ADAMS<sup>6</sup>, T. ADAMS<sup>7</sup>, P. ADESSO<sup>8</sup>, R. X. ADHIKARI<sup>1</sup>, V. B. ADYA<sup>9</sup>, C. AFFELDT<sup>8</sup>, M. AGATHOS<sup>9</sup>, K. AGATSUMA<sup>9</sup>, N. AGGARWAL<sup>10</sup>, O. D. AGUIAR<sup>11</sup>,

On the extreme low-metallicity end, it has been proposed that BBH formation is also possible in the case of stellar binaries at zero metallicity (Population III [PopIII] stars; see Belczynski et al. 2004; Kinugawa et al. 2014). The predictions from these studies are even more uncertain, since we have no observational constraints on the properties of first-generation stellar binaries (e.g., mass function, mass ratios, orbital separations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties

5

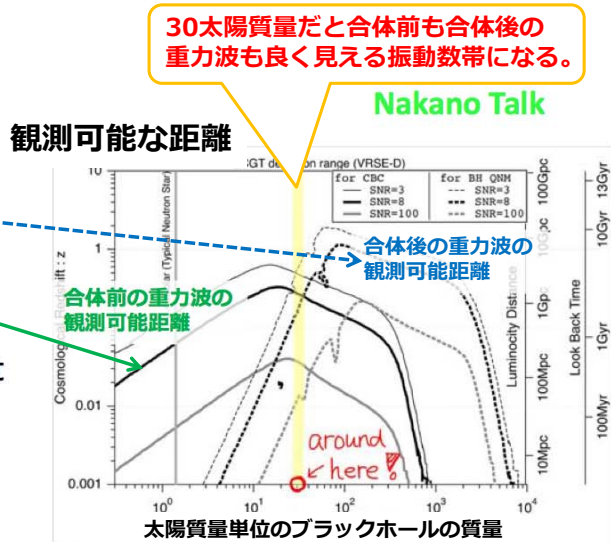
## 30 + 30 solar mass BHs

Interesting target for three reasons:

Inspiral and ringdown phases have roughly equal SNRs, so provides good test of GR

宇宙で最初に出来た星  
If population III stars (formed at redshifts 5-10) exist, these might be a substantial fraction.

Perhaps we will detect several of them in the first aLIGO data run O1, this September!



Bruce Allenによる、大阪で我々が主催したGWPAW2015(6月)のまとめの1枚。30太陽質量x2はKinugawa et al. 2014に基づいている。我々は事前にぴったりの予言をしている。

Osaka 20.6.201

検出器の性能の上でも、30太陽質量x2は、合体前の波形と、合体後のブラックホール準固有振動の両方の観測が可能であると我々は指摘していた。

## 質問事項 2

2015年6月に30太陽質量のブラックホール連星の合体の可能性がA05により指摘された。これを受けて、A01-A04において重力波発見に先立った新たな研究を模索する動きはあったのか説明していただきたい。

### 回答

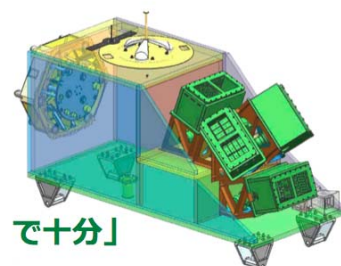
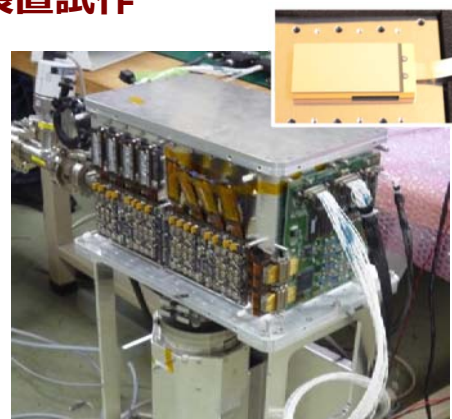
- 1) GW150914のような30-30太陽質量のブラックホール連星合体では、合体前、合体中、合体後の3つの重力波の解析が重要であるが、合体後の減衰振動は重力が最も強いところでの性質の情報を持って来るので、アインシュタイン理論の正否を決定すると期待されていた。A04では減衰振動の解析法の検討を始めて、Hilbert-Huang変換を用いて、合体中と合体後の区別する方法を提案した。その結果、aLIGOの解析より精度の良い結果を出せるようになった。しかし、アインシュタイン理論の正否を結論づけるのにはGW150914より、もっとSNの大きいイベントが必要であることがわかった。
- 2) 電磁波とニュートリノ放出はブラックホール合体では期待薄であるが、自然は人類を超越している可能性もあるので、A01,A02, A03では、GW150914等の4つの連星ブラックホール合体の追観測を実施した。A05は合体後に星間物質がブラックホールに落下して太陽光度の1000万倍くらいの電磁波が出る可能性も指摘していたが、これは追観測の士気を上げた。

7

## 計画研究 A01 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

### 目標 1 : WF-MAXIの予備設計・搭載装置試作

- 軟X線大立体角カメラ (SLC)
  - 専用CCDを開発、性能評価
  - 目標性能を達成・放射線耐性を評価
  - カメラ筐体、信号電子回路を試作
  - ISS固有の熱設計、高速読出しを実現
- 硬X線モニター(HXM)
  - 検出器(GAGGシンチ+APD) 試作
  - 信号処理 ASICを開発
  - 2回のリビジョンで目標性能を達成
- ISAS「小規模」カテゴリーに応募
  - 2014: SLC4台+HXMで応募 (総予算 ~40億円)
  - 不採択「重力波を検出する確率は高くない、費用対効果要検討」
  - 2015: 共通バス採用、SLC1台で応募(~10億円)
  - プロジェクト化推薦 (宇宙理学委員会)
  - 不採択 (ISAS審査) 「ASTROSAT (印 2015打上) で十分」



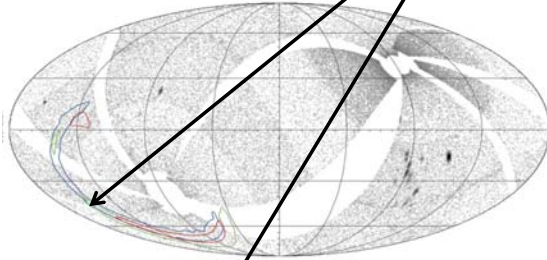
8

## A01 重力波天体からのX線・γ線放射の探索

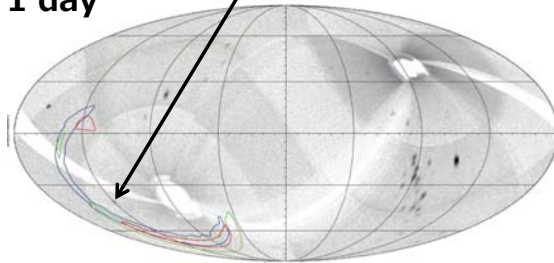
### GW150914 への MAXI の観測

- 発生直後の一周および1日でのX線全天マップと重力波誤差領域 (等高線)

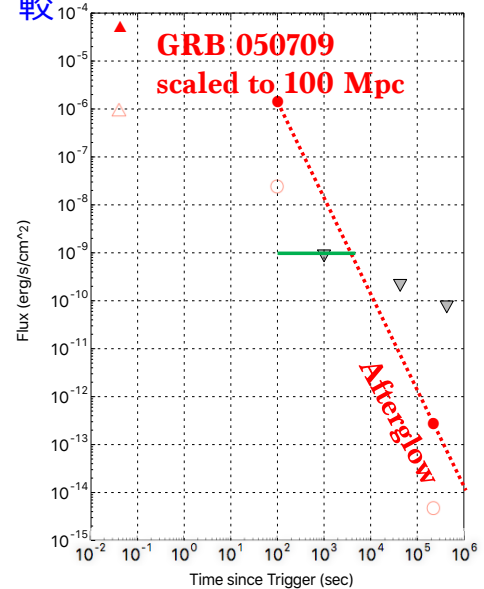
1 scan (≤ 92 min)



1 day



- MAXIによる上限値(▼) と LIGO検出圏内の継続時間が短いGRBの予想X線強度(●)の比較

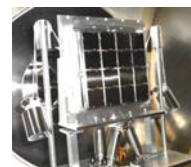


9

## 質問事項 1

X線・ガンマ線での**広視野モニター観測の将来計画**は結局どのように見直すことにしたのか。また、X線観測装置の今後をどのように考えているのか、将来像を説明いただきたい。

- ISAS「小規模計画」での実現は困難 (質問事項3への回答を参照)
- 方針：国内外の他ミッションへの協力を通じて実現
  - “HiZ-GUNDAM” (日本：GRB・GW対応天体追跡観測)  
JAXA小型衛星に再応募予定 (目標：2018採択、2022～打上)  
X線広視野モニター (本領域公募研究で開発) を搭載
  - “Einstein Probe” (中国：軟X線広視野モニター衛星)  
2022打上を目指して概念設計・試作実施中  
本研究メンバーに検出器開発協力要請
- 他の提案にも参加
  - “THESEUS” ESA 中型衛星提案(2016)に参加、本年末に採否決定
  - “eXTP” 中国-欧州ミッション、X線広視野モニターチームに参加



Einstein Probe 試作品

10

## 質問事項 3

WF-MAXI に関して、プロトモデルの開発などをしたものの、採択には至らなかったことは残念である。その後、規模を縮小しての提案になっているが、現状での見通しはどうか説明いただきたい。

- 計画研究予算による実施目標は達成

搭載装置の開発・試作・評価を実施

ミッションの予備設計実施・ISAS公募にISS搭載を2回提案

- 今後のISAS「小規模計画」への応募は断念

一公募予算規模の縮小 (総額数十億円以下→総額2億円未満)

- 2015年提案(当初の1/4 縮小~10億円)でも実現不可能

- 一方、競合ミッションの進行、新技術の出現

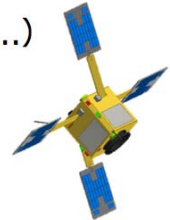
- (Lobster Eye光学系、CMOS撮像素子、超小型衛星バス、...)

- 対応1：他ミッションへの協力 (→質問事項1)

- 対応2：超小型衛星による科学目標の実現

“Hibari” 50 kg級超小型衛星による紫外線突発天体探索

2016衛星設計コンテスト大賞・2017より基盤A+若手Aで開発



11

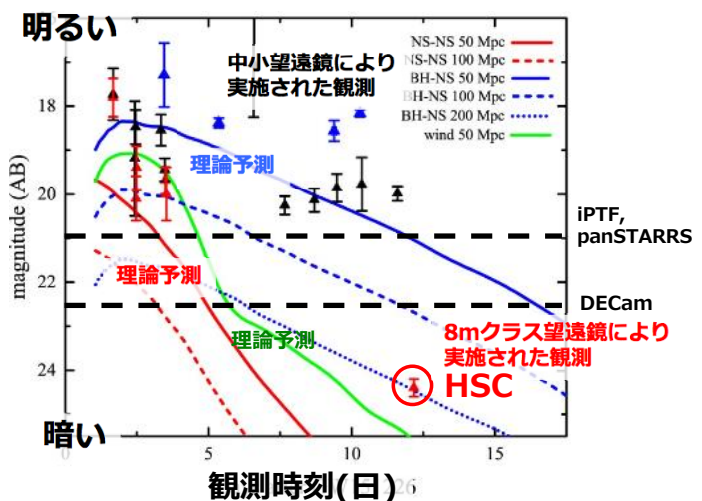
## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### J-GEMによる重力波源の追跡観測

- J-GEM(Japanese collaboration for Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up)の組織化

- GW151226

すばるHSCにより世界で行われた追跡観測の中で最も深い観測を実施。  
→ 60~100平方度の広視野では世界の競合チームのどこよりも暗い信号をキャッチできることを証明した。



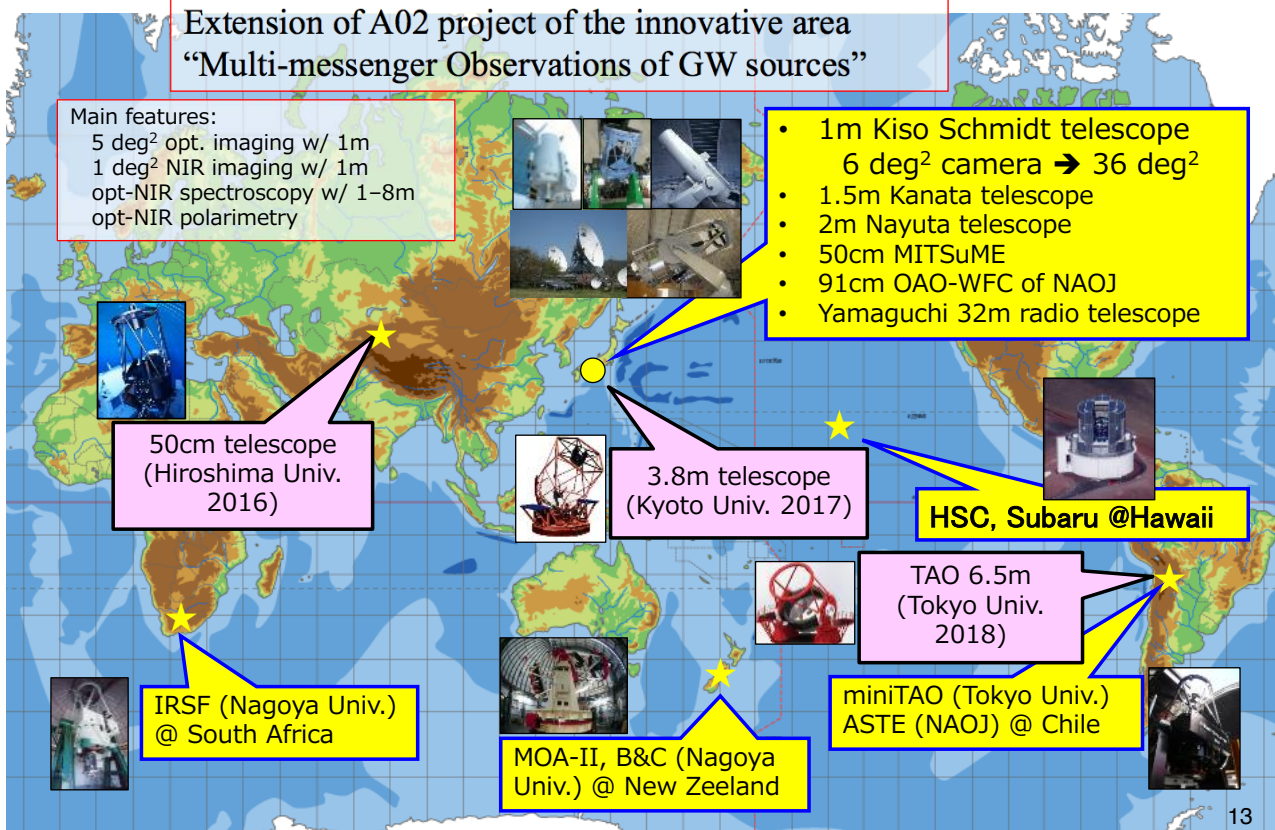
J-GEMによるGW151226の追跡観測結果：

横軸は重力波発生からの時間(日)、縦軸は等級。三角点はJ-GEMの様々な望遠鏡による限界等級を示す。HSCは重力波発生後12日で観測しているが、24等より暗い限界等級であり、世界の他のチームの限界(黒破線)よりもずっと深いことが分かる。青赤緑の線は中性子星合体の理論光度曲線。

12

# J-GEM (Japanese collaboration for Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up)

Extension of A02 project of the innovative area  
“Multi-messenger Observations of GW sources”



## 質問事項 4

チベットに仮設置した望遠鏡の本格設置は、政治的要因で遅れているようだが、現在も入境許可が 出していない状況の中、今後の見通しについて説明いただきたい。また、開発したハードウェアによる これまでの成果について説明していただきたい。

### 中国チベット・50cm望遠鏡の状況と今後

#### ● 現在 (2017/8) の状況

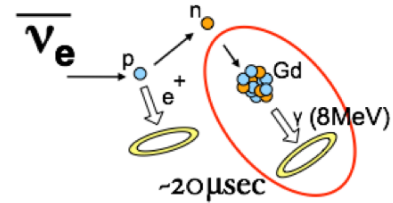
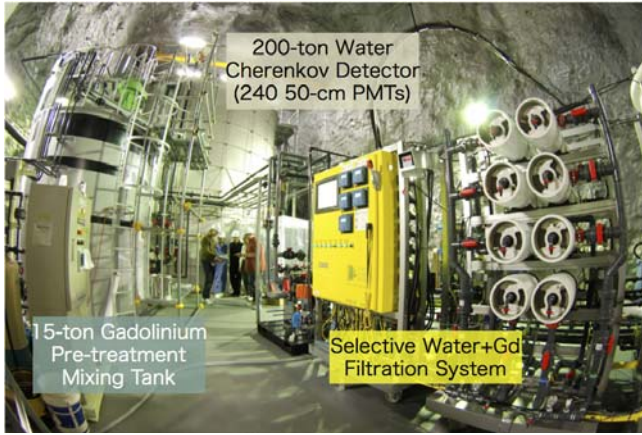
- 2016年9月9日にチベット現地に望遠鏡・観測装置一式を中国所有ドームの中に仮設置し、試験観測を実施した。
- 試験観測の結果、望遠鏡+観測装置の光学性能が設計通りであることを確認した。また、チベットサイトのシーイングが1秒角を切っていることを確認、大気透過率と合わせて、50cm望遠鏡の限界等級が日本国内の1m望遠鏡に相当することが分かった。科学観測はまだ行っていない。
- 2016年10月以降、ドーム設置と望遠鏡の本格設置・定常運用開始を目指してチベット入境を試みているが、当局の許可が得られていない。

#### ● 今後の見通しと方策

- 2017年9月後半～10月にチベット入境が許可される見通し → 約3週間の滞在でドーム・望遠鏡設置を行う。
- 中国・紫金山天文台から博士留学生が広島大学に来ており、研究の一部として本50cm望遠鏡に関する開発も行っている。今後も日本人のチベット入境が困難なことが予想されるが、本留学生(紫金山天文台職員)が帰国後に望遠鏡調整・運用の中心となってプロジェクトを継続していくことを計画している。新しい新学術(田中代表)での活躍を期待できる。

## 計画研究A03: 超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究:

スーパーカミオカンデと同じ神岡地下1000mにある200トンガドリニウム水チェレンコフ検出器



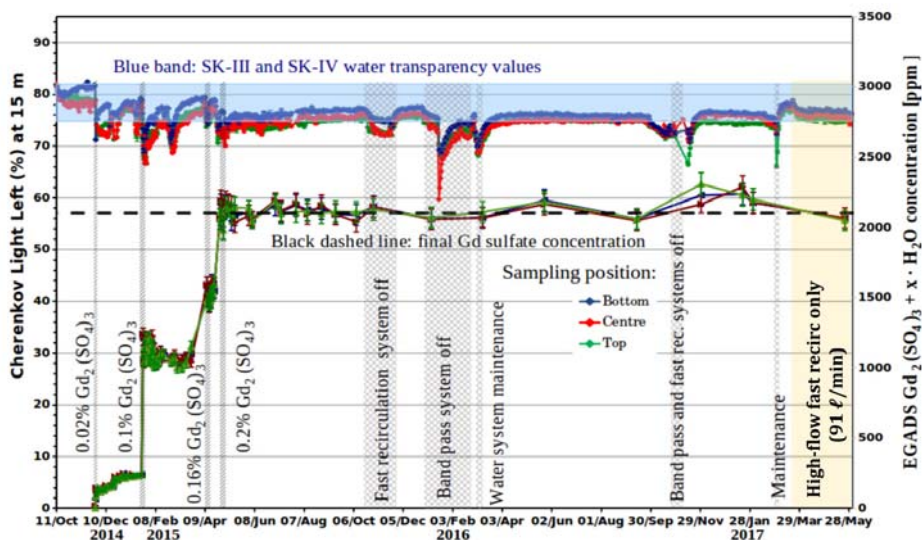
- 遅延同時計測によりニュートリノと反ニュートリノを区別
- ニュートリノは到来方向も測定
- ベテルギウスで超新星爆発が起これば約80000事象を観測
- 新電子回路の導入により検出効率向上

いつ超新星爆発が起ころとも良い状態で観測継続中!



## Super-K Gd プロジェクトが正式決定!

EGADSを使ってガドリニウム水の透明度を測定



- 純水と比べて遜色ない透明度を達成
- この研究成果によりスーパーカミオカンデにガドリニウムを導入するプロジェクトSuper-K Gd が正式に決定した。
- 過去の超新星爆発によるニュートリノの発見が期待される。

## 計画研究A04

### 多様な観測に連携する重力波観測データ解析の研究

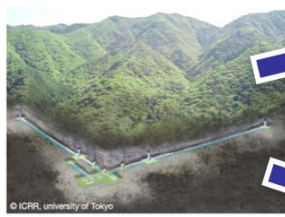
#### KAGRAデータのリアルタイム転送を達成

- KAGRA実験サイト (岐阜県神岡鉱山内) →大阪市大設置のクラスタコンピュータへ転送

平均遅延時間 3秒で連続データ転送を達成!

転送ソフトウェアは自分たちで開発  
1年半以上 (現在も継続中) の安定運転  
VPN(仮想プライベートネットワーク)による安全で一体化した環境

#### 低遅延解析へのマイルストーンを達成!



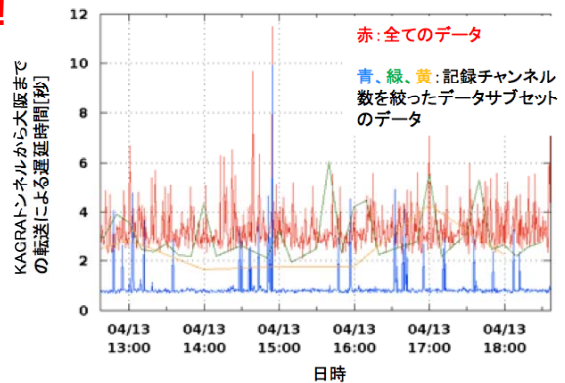
KAGRA サイト  
(地下トンネル)  
岐阜県神岡鉱山



東大宇宙線  
研(柏)



大阪市大=計画研究A04



KAGRA→大阪市大のデータ転送時間

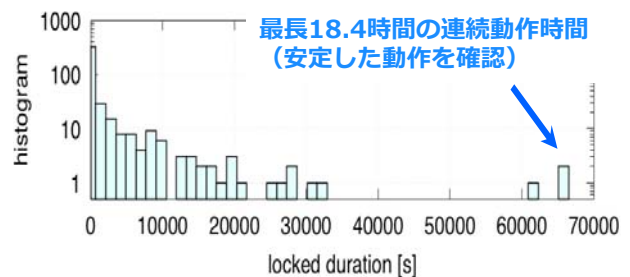
## 計画研究A04

### 多様な観測に連携する重力波観測データ解析の研究

#### 重力波検出器データを解析を実行

2016年のKAGRAの試験運転データを解析

- コンパクト連星合体探索
- 超新星等が起源のバースト波
- パルサーからの連続波
- 装置の評価となる雑音の解析



KAGRAの2016年4月試験運転のロック時間 (レーザー干渉計動作時間) ヒストグラム

#### 初検出イベントの解析

- LIGOオープンデータの利用

#### 日本の重力波解析の体制づくりと若手養成

- 代表者・分担者の機関を中心に成功



## 計画研究A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

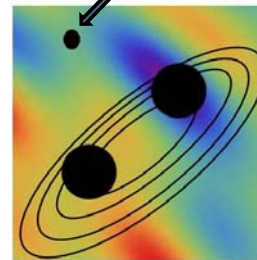
**初期宇宙の密度揺らぎの大きいところで30太陽質量のブラックホールが形成される可能性があることを示した。ダークマターになる可能性あり。**

- Primordial black hole scenario for the gravitational wave event GW150914 (M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama)

- Phys. Rev. Lett. のEditors' Suggestionに選ばれる

- 宇宙初期にブラックホールが形成されるシナリオにおける自然な分布にもとづき、30太陽質量程度のブラックホール連星合体イベントの発生率を始めて評価し、GW150914などからの発生率を説明し、宇宙背景放射の黒体放射からのずれの観測と無矛盾であることを示した。

3体目による摂動が正面衝突を避ける



ランダムな空間分布から近傍のBH同士が連星を組み、宇宙年齢かけて合体する。

19

## 領域の活動、研究者の活性化

### 多数の若手を育成

1. 全ての研究会、シンポジウムで英語を用いた。また、若手特別セッションを設けた。
2. 研究職に就職したのは22名  
雇用したポスドクで、就職できなかった者も大半は任期付きの別のポストについて研究を続けている。
3. 国際研究集会は国内開催13件、海外開催3件。  
多くの、院生、ポスドクが口頭、ポスター発表を経験した。
4. 査読あり国際雑誌論文数は472編
5. 各種受賞は16件。昇任3件。



国際会議 GWPAW 2015, 於大阪  
(重力波の物理と天文についての国際会議)

20

## アウトリーチ、重力波初観測ニュース関連

### 重力波初観測への対応

- LIGOの発表(2016年2月) 対応  
新聞、テレビなどの報道に  
答えた解説など
- 一般向けの講演会多数
- 解説記事多数



毎日新聞  
web記事より。  
LIGOの  
初観測プレ  
スリリース  
を即座に解  
説するA04  
のメンバ

### 一般市民や高校生向けの解説

- 一般相対性理論誕生100年記念講演会  
全国15会場、のべ2500名参加
- 高校生向け無料の電子本と解説web  
中村領域代表による一般向け解説  
ダウンロード数 2868件(9/4現在)



一般相対  
性理論誕  
生100年記  
念講演会  
ポスター

21

## まとめ

### A01

- 予定を1年早めてLIGOの追観測をMAXI、CALETを用いて3年にわたり実行。LIGO O2の成果が期待される。
- WF-MAXIに必要な予備設計・搭載装置試作に成功。今後は質問事項で答えたようにいろいろな手段を用いて活動をする予定である。

### A02

- 予定を1年早めてLIGOの追観測を3年にわたり実行。また、世界的にも評価の高い光・赤外観測網を結成し運営した。
- LIGO O2で、大きな成果が今から出るかもしれない。

### A03

- 世界初の反ニュートリノを識別できる観測装置を2年半運転して、LIGOとの共同観測を実施した。
- SKにGdを来年から封入することも、今回の成果をもとにして決定された。

### A04

- KAGRAデータの高速かつ安定な連続転送を達成し、またそのデータで重力波探索解析を実行した。KAGRAが感度を達成すればイベントを見つけることができる。
- LIGOの初観測データで独自開発の手法を試験。

### A05

- 宇宙で最初に出来た星起源の30太陽質量のブラックホール連星を予言し、LIGOで検出された。
- また、初期宇宙の高振幅揺らぎ起源の30-30太陽質量のブラックホール連星を予言した。
- どちらが正しいかは0.1Hz帯の宇宙重力波干渉計(DECIGO)の建設が必要なが明らかになった。

**重力波初観測の時期にふさわしい研究テーマを推進し、  
日本の研究の観測時代への橋頭堡となる素晴らしい成果が得られた。**

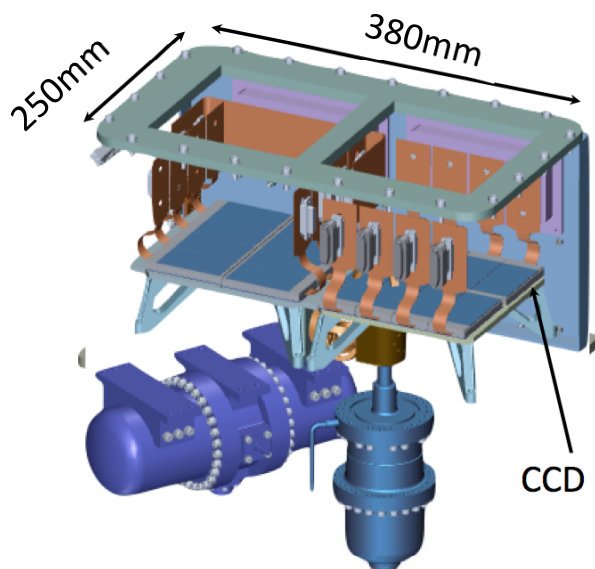
22

## 補足資料

23

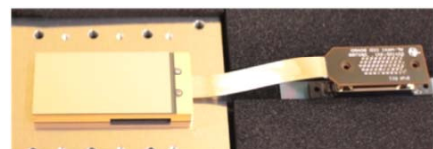
A01 重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索

## SLC (軟X線大立体角カメラ)



mechanical cooler

- 質量 ~25kg (w/o compressor)
- 試作品を科研費で開発、カメラ+冷凍機試作試験中
- 符合化マスク: 位置決定性能シミュレーション、パターン試作
- CCDピクセルとマスクの平行確保
- 熱設計 (24°C 流体による冷却—冷凍機—CCD -100 C (TBD))
  - 冷凍機を使わない放射冷却も検討
- 専用CCD (ASTRO-H SXI技術継承)



24

A01 重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索

## 目標2: 重力波対応天体の観測

- MAXI - LIGO/VirgoチームとMOU締結

GW150914, GW151226 重力波源誤差領域全域の追跡観測をX線領域で唯一実施、上限値測定

- 将来の中性子星合体重力波に対するの価値を実証
- 予想よりも早く実現
- LIGO-O2 (2016/11~2017/8)に年度繰越で参加

- MAXIによる重力波関連天体の観測

GRB および 短時間X線トランジェントの観測  
新ブラックホールの発見

ほぼ1年に一個の割合で発見

銀河系のブラックホールの数の推定へ

X線連星のアウトバースト、状態遷移の観測

中性子星やブラックホールへの降着過程の解明

中性子星の回転の変化→質量と半径への制限

ブラックホールの質量推定

25

## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

## 設定目的の達成度

- 光学赤外線追跡観測ネットワークの構築

4つの装置開発の達成度: 80%

木曾超広視野カメラTomoe 80%

岡山広視野赤外線カメラ OAO-WFC 90%

京大3.8m用面分光システム 100%

中国50cm望遠鏡 70%



Tomoeプロトタイプ

- 望遠鏡ネットワークを用いた重力波源の追跡観測

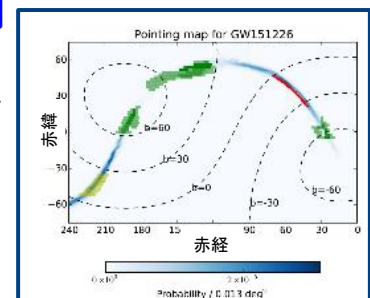
LIGO/Virgo国際共同研究の電磁波フォローアップコンソーシアムに参加→J-GEM立ち上げ(15機関・10望遠鏡が参加)

J-GEMによりLIGOが検出した重力波源の追跡観測に成功→当初計画以上の成果 達成度: 100%以上

GW150914 24平方度サーベイ+銀河観測

GW151226 1000平方度サーベイ+銀河観測

←すばる望遠鏡HSCにより世界一の深さ(24等級)で追跡観測に成功



J-GEMのサーベイ領域  
緑:木曾、赤:すばるHSC、黄:MOA

青はLIGOの重力波観測で推定する到来方向。青の濃いところほど可能性が大きい。

26

## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### 主な研究成果

- LIGOによる重力波源の追跡観測
  - GW150914 : 人類初の重力波直接検出  
Abbott, et al. *ApJL*, **826**, L13 (2016); Abbot, et al. 2016, *ApJS*, **225**, 8 (2016); Morokuma, et al. *PASJ*, **68**, 9 (2016)
  - GW151226 : 二番目の重力波検出  
Yoshida, et al. *PASJ*, **69**, 9 (2017); Utsumi, et al. *PASJ* submitted (2017)
- 重力波源追跡のための観測装置開発
  - 超広視野カメラTomoeのプロトタイプ完成・試験観測成功 (2015)
  - 広視野赤外カメラOAO-WFC完成・定常運用開始 (2015)
  - 面分光システム完成・定常運用開始 (2015)
  - 中国50cm望遠鏡完成・チベット設置 (2016)
- 重力波源の光学対応天体に関連する理論的・観測的研究
  - 中性子星合体による電磁波放射の理論的研究 (Tanaka, et al. 2014他)
  - 極超新星と超新星のミッシングリンク天体の発見 (Takaki et al. 2013)
  - 超チャンドラセカール質量のIa型超新星発見 (Yamanaka, et al. 2016)

27

## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

### 中国チベット・50cm望遠鏡の状況と今後

- 現在 (2017/8) の状況
  - ・ 2016年9月9日にチベット現地に望遠鏡・観測装置一式を中国所有ドームの中に仮設置し、試験観測を実施した。
  - ・ 試験観測の結果、望遠鏡+観測装置の光学性能が設計通りであることを確認した。また、チベットサイトのシーイングが1秒角を切っていることを確認、大気透過率と合わせて、50cm望遠鏡の限界等級が日本国内の1m望遠鏡に相当することが分かった。科学観測はまだ行っていない。
  - ・ 2016年10月以降、ドーム設置と望遠鏡の本格設置・定常運用開始を目指してチベット入境を試みているが、当局の許可が得られていない。
- 今後の見通しと方策
  - ・ 2017年9月後半～10月にチベット入境が許可される見通し → 約3週間の滞在でドーム・望遠鏡設置を行う。
  - ・ 中国・紫金山天文台から博士留学生が広島大学に来ており、研究の一部として本50cm望遠鏡に関する開発も行っている。今後も日本人のチベット入境が困難なことが予想されるが、本留学生(紫金山天文台職員)が帰国後に望遠鏡調整・運用の中心となってプロジェクトを継続していくことを計画している。

28

## A02 天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

- 50cm望遠鏡のチベット・阿里サイトへ設置 (2016/9)



チベット・阿里サイト



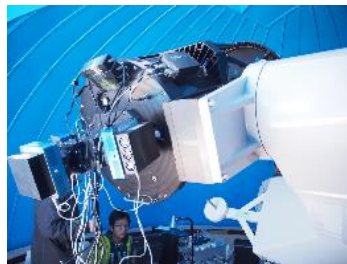
望遠鏡を仮設置したドーム



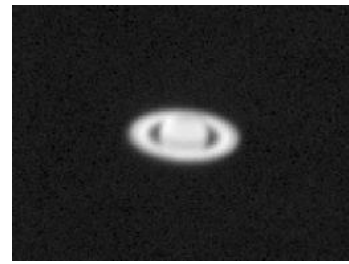
望遠鏡設置の様子



設置された望遠鏡



試験観測の様子

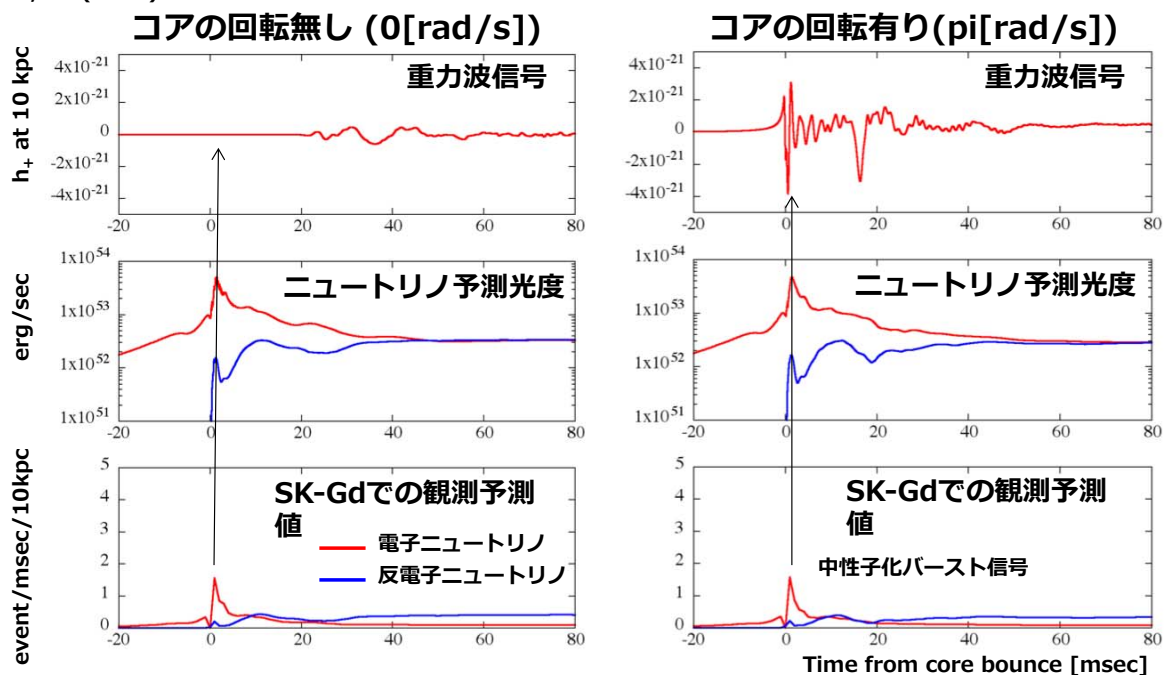


試験観測で得られた土星の紫外線画像

## 計画研究 A03)

### 超新星爆発における重力波信号とニュートリノ信号の相関

ApJ 811, 86 (2015)



ニュートリノ信号と重力波信号からコアの回転の有無がわかる

# GW150914とGW151226におけるSKでのニュートリノ探索

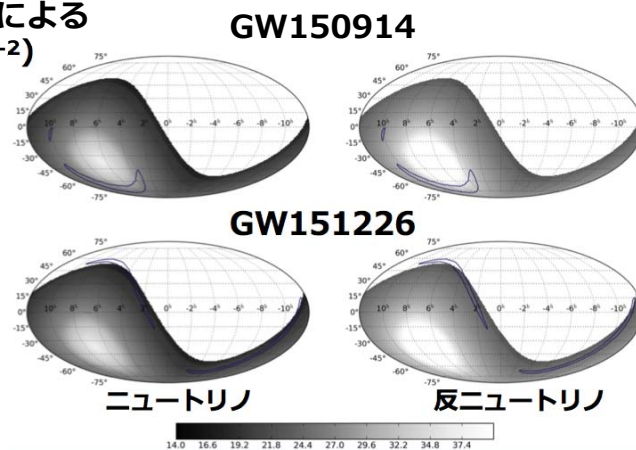
## 信号はなかった

ApJL 830, L11(6pp) (2016)

最も探索感度の高い上向きミュ-事象により見積もった  
ニュートリノ放出エネルギー上限値

- GW150914 < (1-6) × 10<sup>55</sup> erg
- GW151226 < (2-7) × 10<sup>55</sup> erg

フルエンスの到来方向による  
90% C.L. 上限値 (cm<sup>-2</sup>)



## 計画研究A04

### 多様な観測に連携する重力波観測データ解析の研究

#### データ保管・解析用クラスターシステム

計画研究の進行と重力波観測実験の状況に沿って順次増強した。

- 760コアのCPU
- 総計304TBのデータ容量

日本の重力波データ解析を支える重要な  
計算機資源として活躍



大阪市大に設置した低遅延のイベント探索用Linuxクラスタ計算機

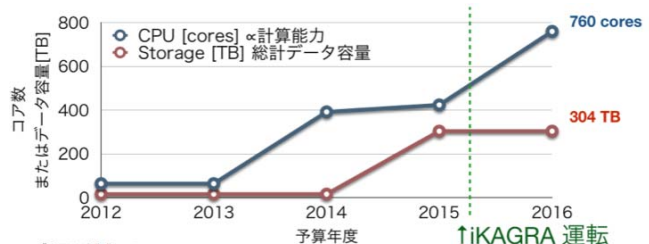
#### 解析ソフトウェアライブラリ "KAGALI" の開発

- [KAGRA Algorithmic Library](#)

独自の解析手法の開発に連動して必要。

ブラックボックスのない、完全に理解できる環境を開発。

若手を含む多人数の解析環境の提供としても役立っている。



## 計画研究A04

## 多様な観測に連携する重力波観測データ解析の研究

## ● KAGRA解析スクール

大学生、大学院生を対象に5回開催。

A04メンバーが中心に講師や演習を担当。

総括班からも補助。

受講した学部生の中から、重力波分野へ進学者がいる。



33

## 計画研究A04

## 多様な観測に連携する重力波観測データ解析の研究

## 新しい解析手法の開発

- ヒルベルト-ファン変換(Hilbert-Huang Transform, HHT)
- 非調和解析(Non-Harmonic Analysis, NHA)

## 時間一周波数空間での新しい解析手法の応用

画像解析(医療(がん診断)や工業製品検査など)でも用いられている新しい手法

HHT解析では、初観測イベントGW150914波形について、独自の手法で波形後半のブラックホール準固有振動のパラメーター(質量、スピン)を求めた。

- 非ガウス雑音モデルの新しい数学的取り扱い
- 実データ分布を用いて非ガウス統計的評価
- 非線形相関解析  
米国LIGO実験のオープンデータを有効活用

## 重力波のサイエンス

- 世界初観測の重力波イベントに新しい解析手法を適用した(下図HHT,NHA)
- 連星合体波形を用いた一般相対論を超えた重力理論の検証
- ブラックホール準固有振動解析の研究
- 大質量ブラックホール連星の起源を明らかにするための解析の研究(A05と共同)
- 超新星爆発の解明のための解析の研究(A03,A05と共同)

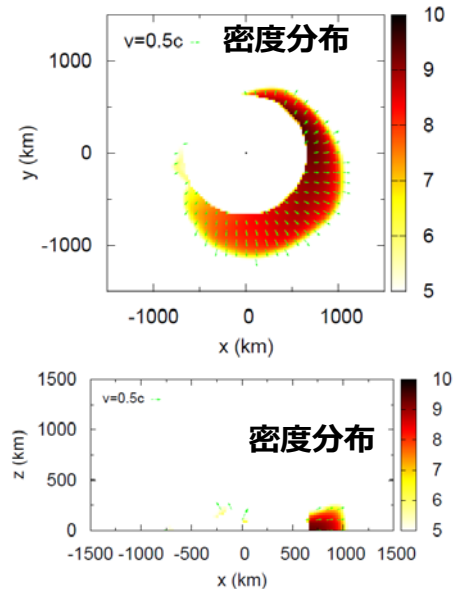
34



## 計画研究A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

**ブラックホールー中性子星合体からの質量放出は非等方的になることを示した。一方、連星中性子星の合体では、等方的で相対論的な質量放出を伴うことを示した。**

- Anisotropic mass ejection from black hole-neutron star binaries: Diversity of electromagnetic counterparts  
K. Kyutoku, K. Ioka, M. Shibata  
Phys. Rev. D88 (2013) 041503
- X-ray-powered macronovae  
S. Kisaka, K Ioka, E. Nakar
- 非等方的な質量放出は観測者の角度による放射の多様性を生むことを示した。
- 相対論的な質量放出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。



35

## 計画研究A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

**様々な重力波源の探査と重力波波形の解明 (担当：中村)：**

- 初代星起源の30太陽質量BH連星の存在を予言し、GW150914の起源を論じたLIGO論文において、非常によく観測を説明すると述べられている。
- BH合体からの準固有振動から、BH時空のホライズン近くを明らかにできることをGW150914以前に指摘した。
- 将来の宇宙重力波アンテナB-DECIGOにより、イベントの赤方偏移分布がもとまり、ブラックホール連星の起源を明白にできることを明らかにした。
- 既存の観測と無矛盾でGW150914を説明する原始BHシナリオを示した。
- ショートガンマ線バーストの観測からSGRBの10%がNS-BHならKAGRA等の重力波検出器で年間70イベント程度観測される事を示した。

**超新星爆発の物理 (担当：山田)：**

- ニュートリノ輸送を記述するボルツマン方程式を近似なしに解き、爆発する軸対称モデルを発表した。
- 核密度以下で統計平衡状態にある多核子が扱える現実的な状態方程式を独自に構築し、電子捕獲率のより正確な計算を可能にした。
- ニュートリノ輸送を近似的に扱い3次元計算をおこない、高速自転するコアを持つ超新星爆発からの重力波の円偏向観測からコアの回転の証拠が得られることを明らかにした。

36

## 計画研究A05 重力波天体の多様な観測に向けた理論的研究

### 電磁波等との同時観測から得られる物理 (担当：井岡)：

- BH・中性子星合体からの質量放出は非等方的になるのに対し、連星中性子星の合体では、等方的で相対論的な質量放出をとまなうことを示した。
- ガンマ線バーストのジェットが周囲の物質を突き抜けて、ジェットが周囲の物質によって絞られる可能性があることを初めて指摘した。
- 放出物質の中心天体へのフォールバックにより、ジェットが長期間持続可能であることを示した。
- 暗いガンマ線バーストが、高エネルギーニュートリノ源になる可能性を指摘した。

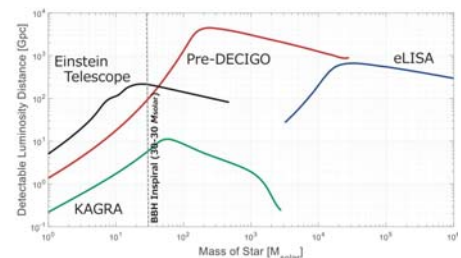
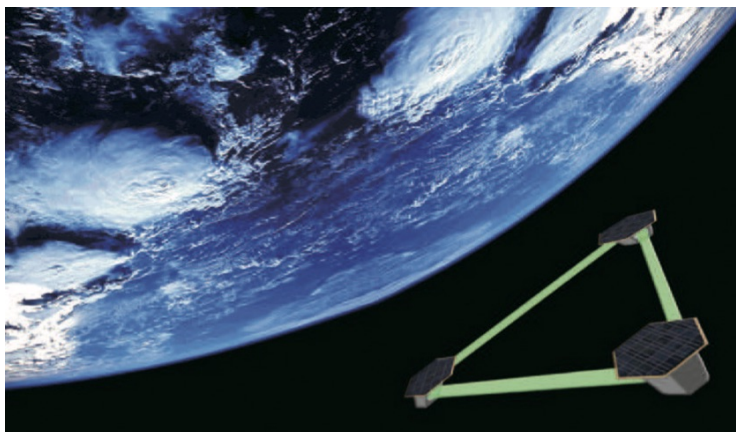
### 新しい重力波観測・データ解析法の提案 (担当：瀬戸)：

- 楕円軌道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、標準的な軌道平均法の問題点を明らかにした。その結果、地上干渉計の重力波観測における残留離心率が大きくなる可能性を指摘した。
- 電磁波対応天体探査に、楕円連星の重力波解析を行う利点を指摘した。

### 宇宙論・修正重力理論の観点からの重力波研究 (担当：田中)：

- 高階微分が存在する重力理論におけるコンパクト連星からの重力波波形の進化を明らかにし、理論に制限がつけられることを示した。
- 既存の観測と無矛盾な双重力理論で、重力波振動が起こることを発見し、観測可能なパラメータ領域の存在を明らかにした。

## Pre-DECIGO(DECi hertz laser Interferometer Gravitational wave Observatory)

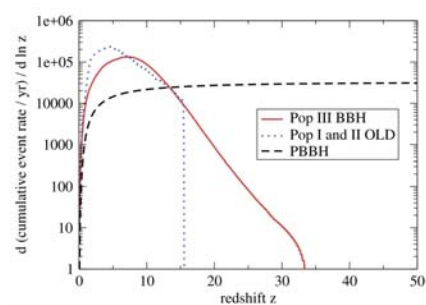
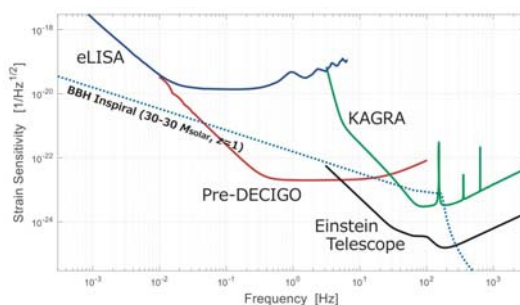


PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 00(00) (16 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/ptw127

**Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes**

Takashi Nakamura<sup>1</sup>, Masaki Ando<sup>2,3,4</sup>, Tomoya Kinugawa<sup>5</sup>, Hiroyuki Nakano<sup>1,6</sup>, Kazumari Eda<sup>1,6</sup>, Shuichi Sato<sup>7</sup>, Mitsuru Musha<sup>8</sup>, Tomotada Akutsu<sup>9</sup>, Takahiro Tanaka<sup>1,8</sup>, Naoki Seto<sup>1</sup>, Nobuyuki Kanda<sup>9</sup> and Youusuke Itoh<sup>8</sup>

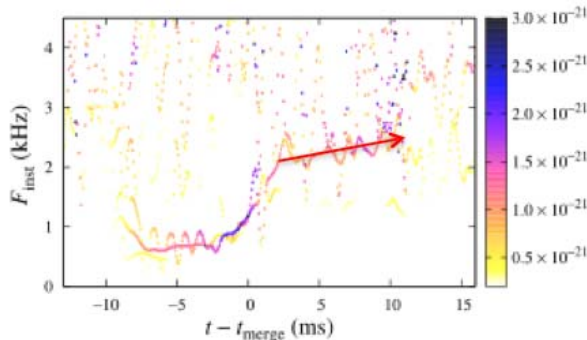


## 融合研究論文

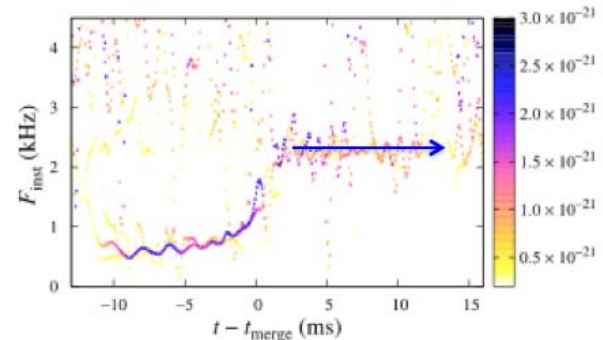
### 情報学と物理学

- ヒルベルト-ファン変換(Hilbert-Huang Transform, HHT)
- 非調和解析(Non-Harmonic Analysis, NHA)

情報分野で提案された新しい解析技術を重力波に応用。これらの手法は医療（撮像データからのガンの発見など）や工業製品検査などでも使われている。



Hyperon EOS (H135)



Standard nuclear matter (Shen EOS (S15))

Phys. Rev. D93, 123010 (2016). HHTによる、数値相対論重力波波形の比較解析。中性子星の状態方程式の違いが、HHT解析によって重力波波形に見て取れる。

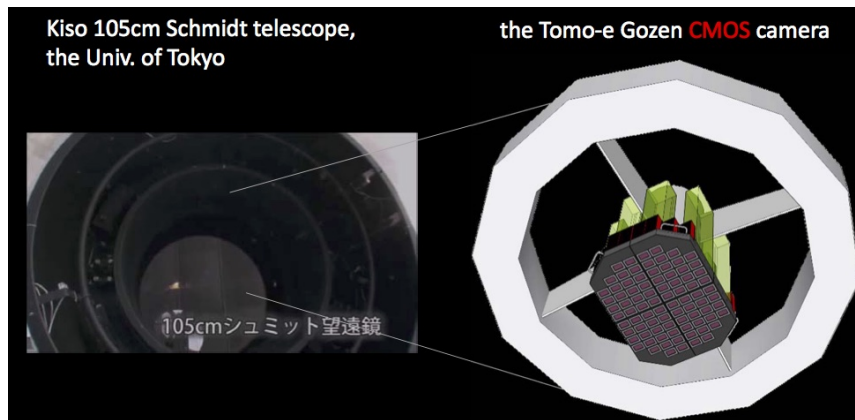
## 融合研究論文

### 天文学と精密光学

- 木曾超広視野高速カメラTomo-e Gozen の開発  
大面積・高性能のCMOS撮像素子（キヤノン）  
+シュミット望遠鏡

広視野かつ高速読出の可能な天体探索を可能に

CMOS: 各画素ごとに読み出し回路を備えたイメージング検出器。読み出し時に電荷転送を伴うCCDに比べて迅速な信号読み出しが可能。



CMOSの使用により

- 1秒以下の読み出しが可能となり短時間の変動現象を追えるようになった。
- CMOSは常温で動作 → 大規模な冷却装置が不要。安価・軽量かつ巨大なカメラを製作できるようになった。



## A01 重力波天体からのX線・ $\gamma$ 線放射の探索 Search for X/gamma radiation from GW sources

代表 河合誠之 (東工大)  
Nobuyuki Kawai (Tokyo Tech)

1

## Goals

- **Development of X-ray monitor covering large solid angle of the sky ( $> 1$  str) “WF-MAXI”**
  - to detect prompt X-ray emission from catastrophic GW events and produce alerts for follow-up observations
  - Prototype developed; two proposals submitted
- **Observational study of GW candidate sources**
  - to understand physics of possible GW sources: supernovae and compact objects
  - MOU with LIGO/Virgo – Follow-up LV-O1,O2
  - MAXI observations of BH, NS, GRBs

2

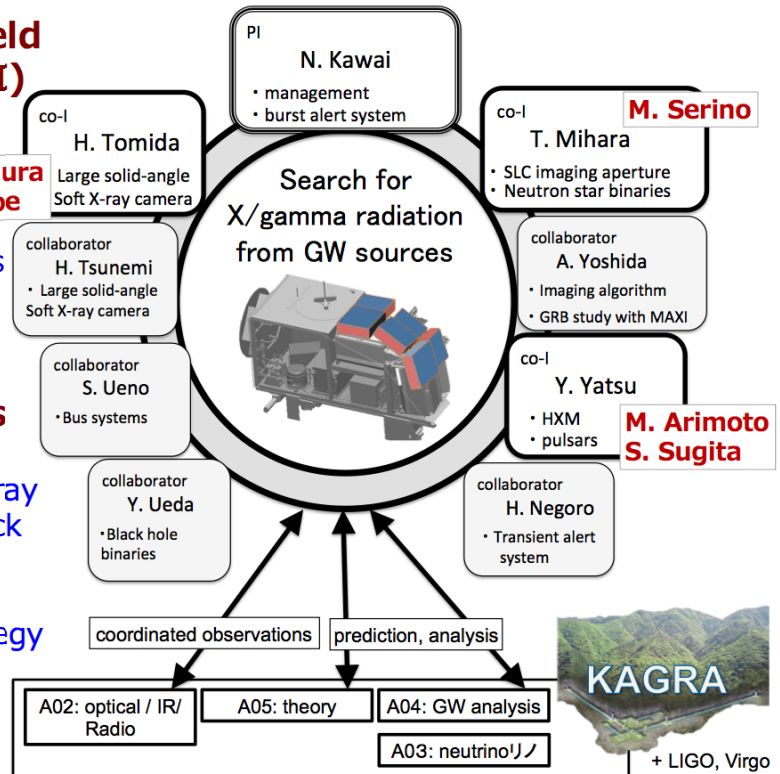
# Program A01 : Search for X/γ radiation from GW sources

## Development of Wide-field X-ray Monitor (WF-MAXI)

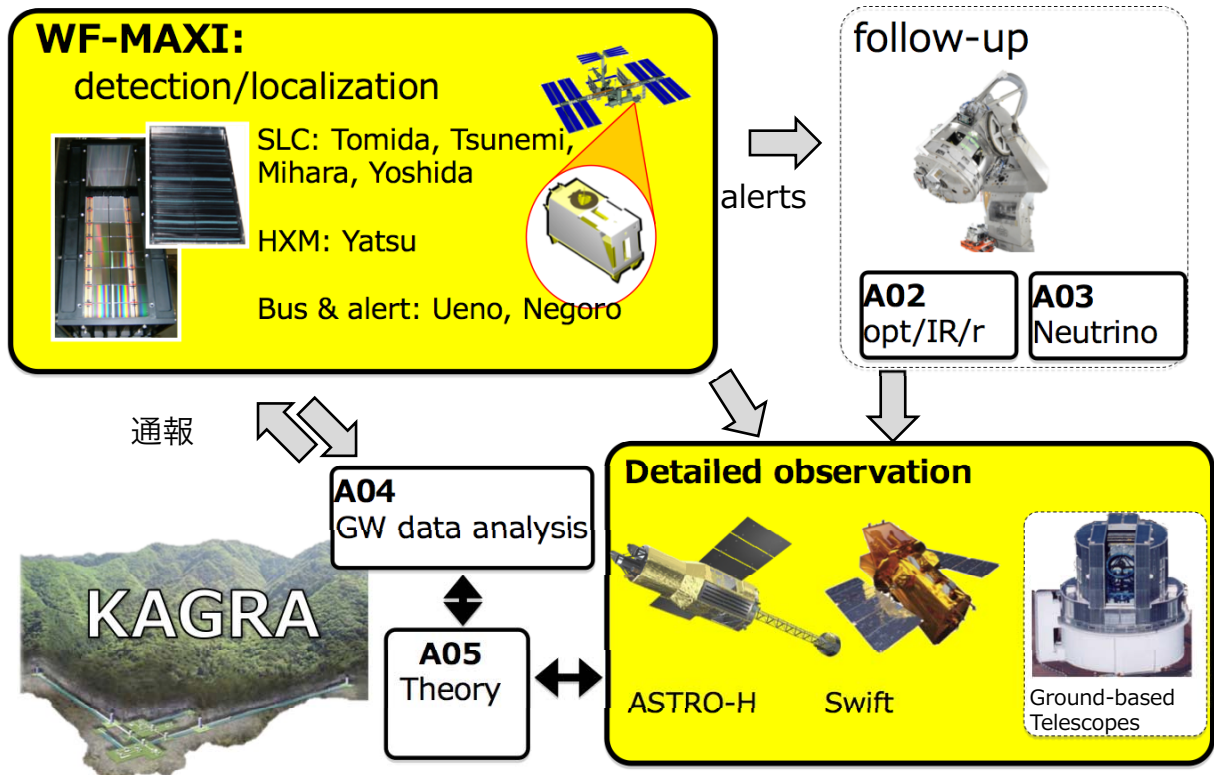
- Monitor X/gamma-ray band where transient sources are most prominent
- Heritage of HETE-2, MAXI, ASTRO-H, TSUBAME enables rapid development

## Observational study of GW source candidates

- Observations of GW source candidates such as gamma-ray bursts, supernovae, and black hole binaries
- help design of instruments
- basis for GW follow-up strategy



# Program A01 : Search for X/γ radiation from GW sources



## X-ray detection Strategy

- “off-axis” short GRB
  - off-axis X-ray flash of short prompt emission
  - soft extended emission (less beamed)
- Supernova shock breakout
  - possibly luminous in soft X-ray band
    - cf. MAXI J0158-744: nova shock

## Talks from A01

- **Overview**
- **WF-MAXI**
  - Project plans and status
  - Instrument Development
    - Soft X-Ray Large Solid Angle Camera
    - Hard X-Ray Monitor (**Yatsu and Arimoto**)
- **MAXI**
  - Overview and highlights (**Mihara**)
  - Alert System for Transient searches (**Negoro**)
  - Results on GW counterpart searches (**Sugita**)
- **CALET** – overview and highlights (**Yoshida**)



# WF-MAXI

**Platform:** ISS JEM (“Kibo”) exposed facility

**goals:** Survey, localization, and notification of short (<1s ~ 1 hour) X-ray transients

**Field of view:**  $\approx 1-1.5$  str

**Instruments:** Soft X-ray L.S. Camera (SLC: 0.7–10 keV)  
Hard X-ray monitor (HXM: 30-200 keV)

**sensitivity:** 1 Crab/1s, 50mCrab/30 s (SLC)

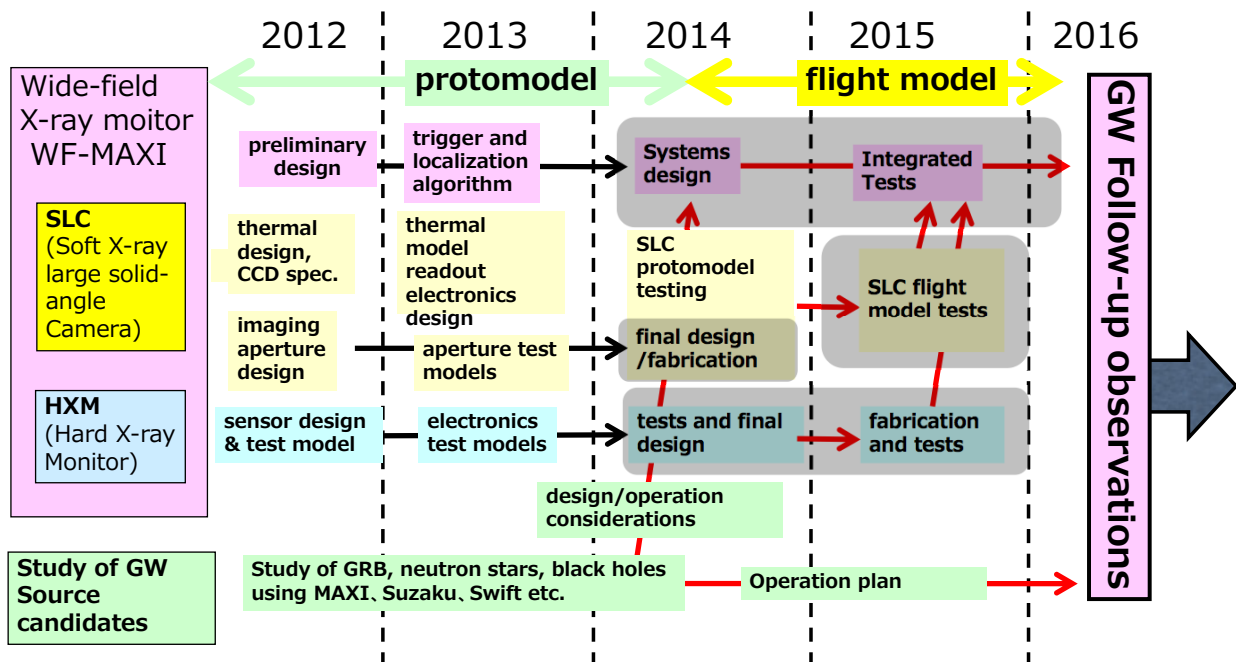
**Positional accuracy:**  $<0.1^\circ$  (goal:  $1'$ )

7

## Program A01 : Search for X/ $\gamma$ radiation from GW sources

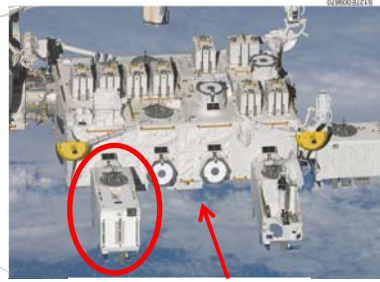
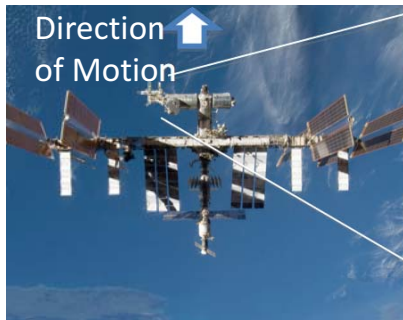
### Schedule (as of August 2012)

- Aim for coordinated observations with KAGRA, aLIGO, aVirgo in 2016

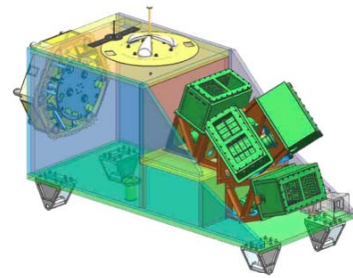


# “Wide-Field MAXI” on ISS

N. Kawai + WF-MAXI Team



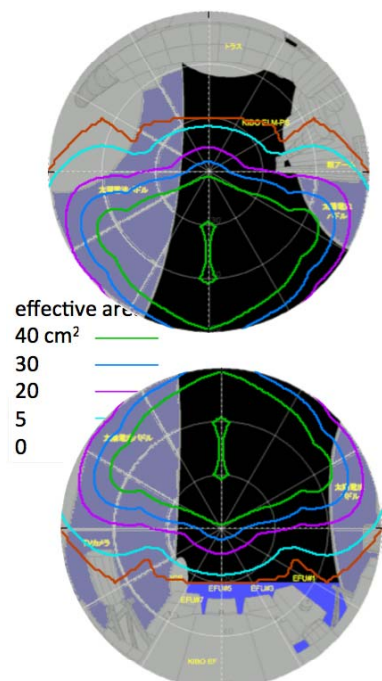
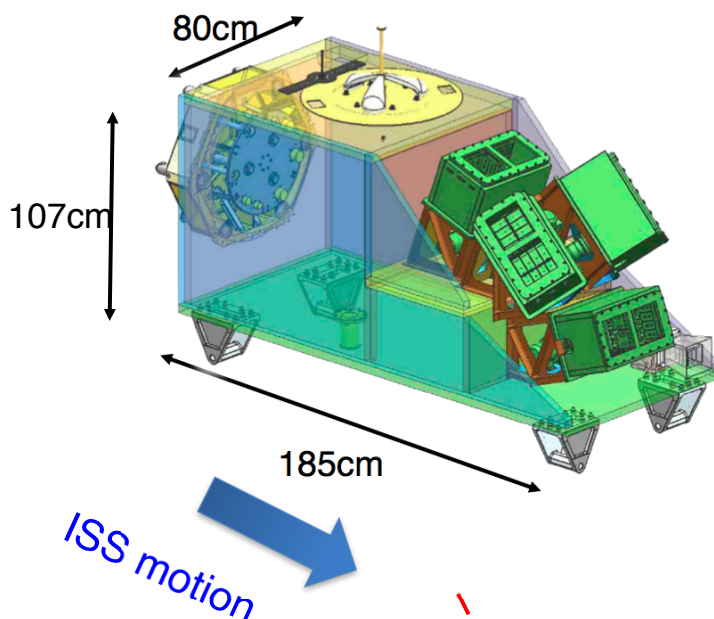
MAXI JEM EF



<b>goals</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Counterparts for GW sources (adv. LIGO/VIRGO, KAGRA)</li> <li>• First large-sky monitor for short soft X-ray transients</li> </ul>
<b>field of view</b>	≈ <b>20% of the sky</b> (covers 80% sky in 92 min)
<b>Instruments</b>	Soft X-ray Large Solid Angle Camera (SLC: <b>0.7–10 keV</b> ) Hard X-ray Monitor (HXM: <b>20 keV–1 MeV</b> )
<b>sensitivity</b>	50 mCrab /30 s (SLC)
<b>pos. accuracy</b>	0.1°
<b>platform</b>	ISS/JEM (Selection in 2014, operation 2018–)

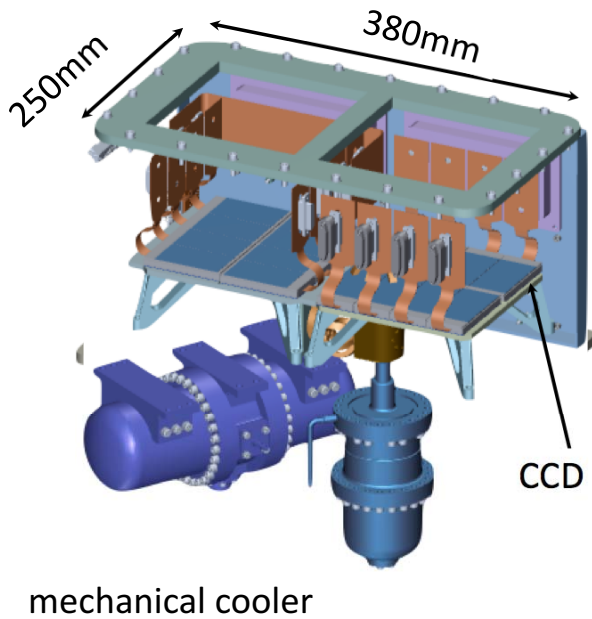
# WF-MAXI proposed in Feb 2014

Field of View  $\approx \pi$  str

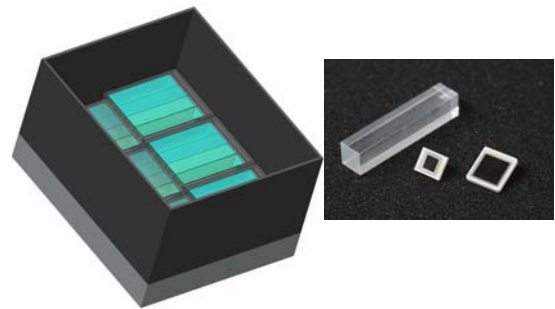




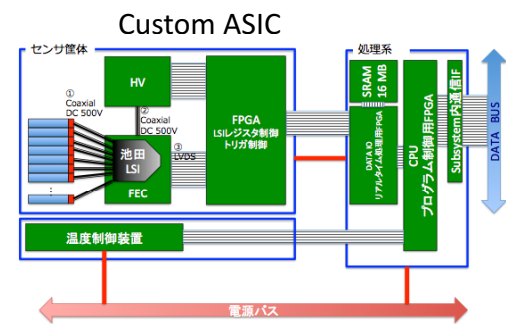
# Soft-X-ray Large-Solid-Angle Camera



# Hard X-ray Monitor

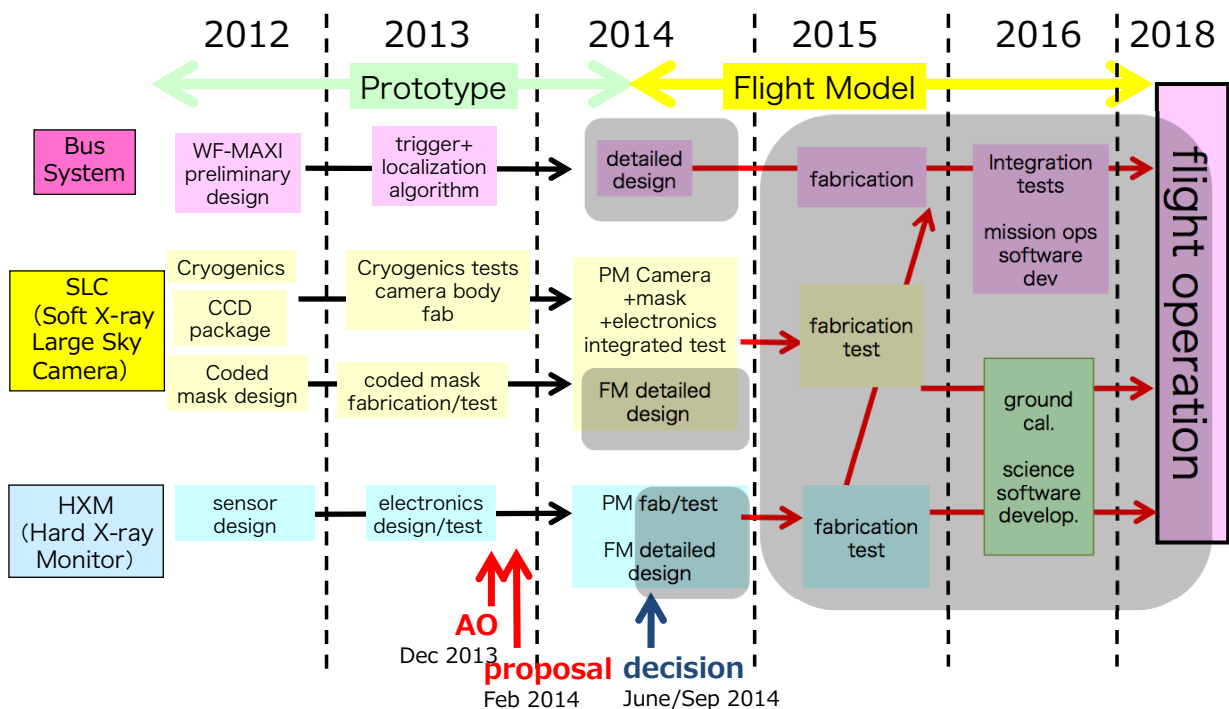


CsI + APD x 32 ch array



# WF-MAXI Development Schedule

(as of November 2013)



# WF-MAXI evaluation

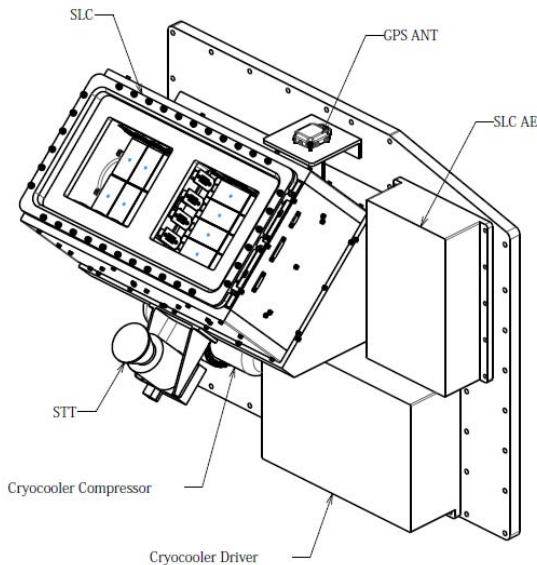
- Application for ISAS Small Project (Feb 2014)  
 → Not selected by Advisory committee for Space Science

- (3)
  - Extra-success (GW counterpart) has high science value
  - Sky coverage 20% x Observing efficiency 50% → 10 % coverage
  - Chance of finding GW counterpart is low; high risk
  - should compare the chance/cost with that by ground observation alone
- (4)
  - Future plan of the High Energy Astrophysics community is yet to be decided, and the position of this project is unclear.
  - However, GW has high priority in Cosmic Ray community.
  - Therefore it may be better to re-define it as a Cosmic Ray mission
- (5)
  - Selection committee considers the science output is not sufficient to justify its total cost (5 bn JPY) , and asked the proposer to find a way to reduce the cost
  - Cost reduction results in less probability to achieve the extra-success.

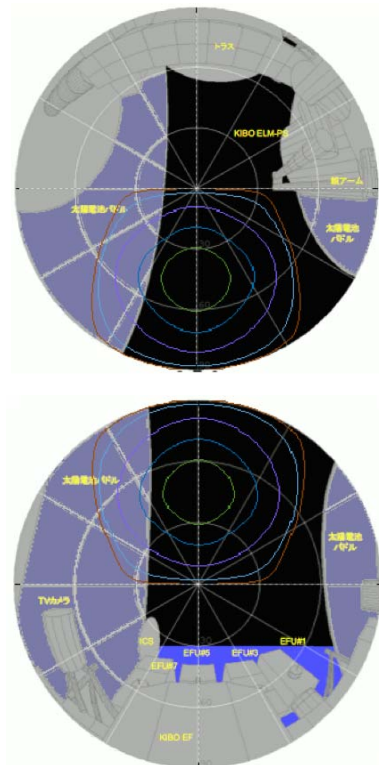
13

# WF-MAXI on iSEEP

- Accommodation design under way
- only one SLC (was 4 SLCs and 4 HXMs)
- Reduction of field of view by factor  $\approx 2$ .



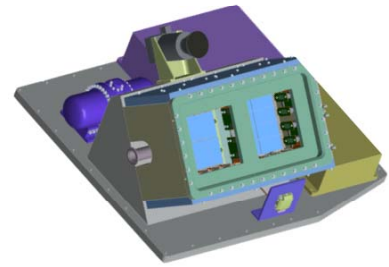
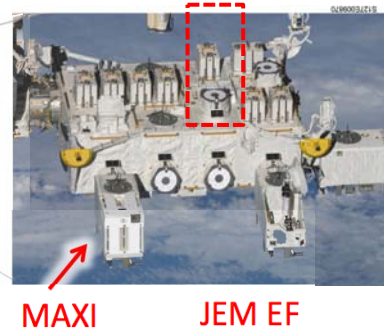
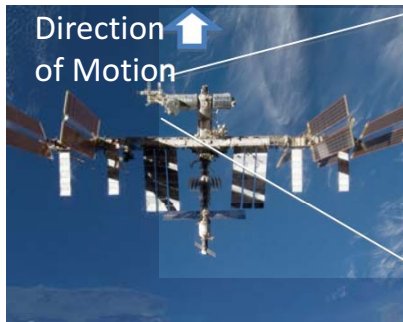
Proposed for JAXA/ISAS small project  
 Budget < 1 billion JPY (Feb 2015)



14

# “iSEEP” Wide-Field MAXI

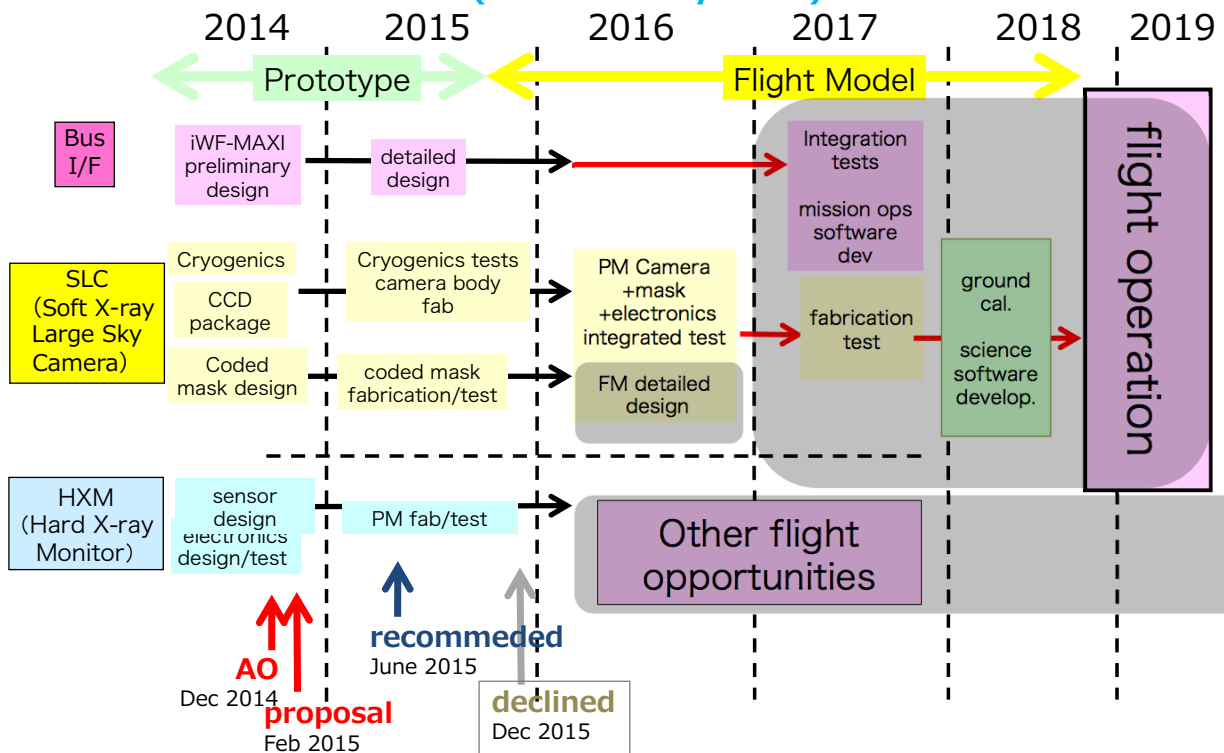
Proposed Feb 2015



<b>goals</b>	Localization/notification of X-ray transients GW counterparts, black hole binaries, GRBs ...
<b>field of view</b>	≈ <b>10% of the sky</b> (covers 80% sky in 92 min) (← was 25%)
<b>Instruments</b>	Soft X-ray Large Solid Angle Camera (SLC: <b>0.7–10 keV</b> ) (no HXM)
<b>sensitivity</b>	50 mCrab /100 s (SLC)
<b>pos. accuracy</b>	0.1°
<b>platform</b>	ISS/JEM (Selection in 2015, operation 2019–)

## iWF-MAXI Development Schedule

(as of January 2015)



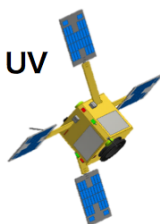
# iWF-MAXI proposal

- Proposal as a “Small-size Project” to ISAS in February 2015.
- **RECOMMENDED for implementation as an ISAS project** by ISAS Steering Committee for Space Science in June 2015.
- Not selected by ISAS/JAXA project in December 2015
  - “Most of science goals of iWF-MAXI can be achieved by ASTROSAT…” — not true
  - ASTROSAT SSM not designed for short duration transients, not sensitive below 2 keV, no continuous ground contact for alerts

17

# iWF-MAXI status

- **SLC**
  - Prototype (body + CCD + electronics) fabricated, under testing
  - Customized CCD chip fabricated and tested for radiation
  - Thermal properties studied (incl. coded mask and iSEEP interface)
- **HXM**
  - Prototype (body + scintillator+ electronics) fabricated, under testing
  - Signal readout ASIC designed/tested
- **2016 Call for Small Project** (Oct 2016)  
budget limit < 200 million JPY 😞
  - ISAS budget too tight for projects on ISS
- **Seeking for alternative options**
  - International missions
  - Microsatellite -- too small for X-ray? → UV



18

# MOU with LIGO and Virgo

LIGO-M1400077,VIR-0119-14

1

## Memorandum of Understanding between MAXI and LIGO and VIRGO regarding follow-up observations of gravitational wave event candidates

April 5, 2014

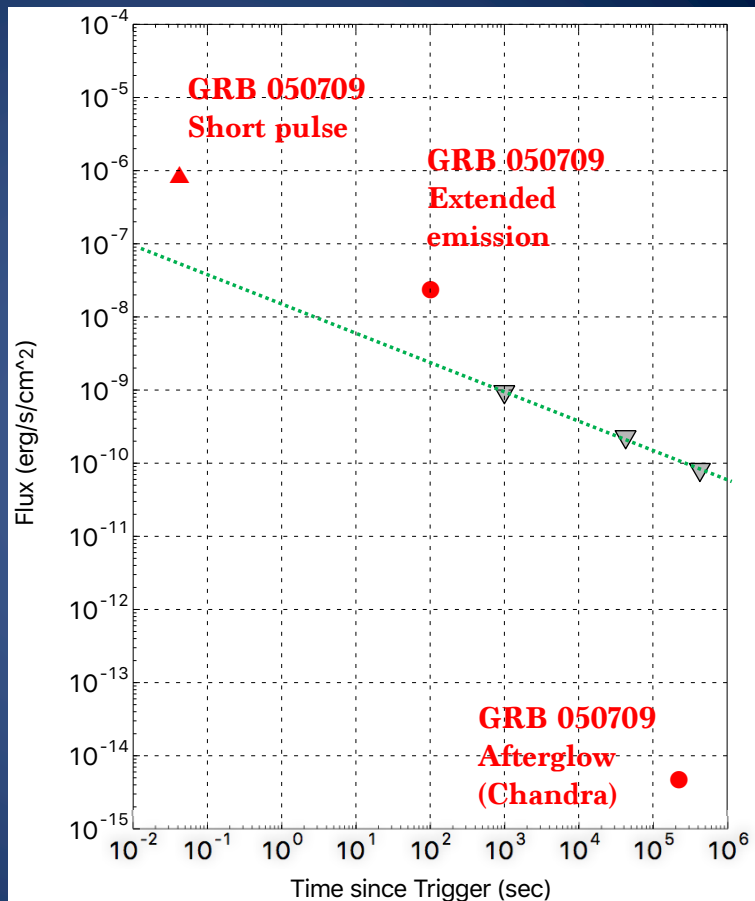
This Memorandum of Understanding (MOU) establishes a collaborative effort among the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) and LIGO Scientific Collaboration (LSC), the European Gravitational Observatory and Virgo Collaboration (EGO/Virgo), and Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) in order to participate in a program to perform follow-up observations of gravitational wave (GW) candidate events with the sharing of proprietary information (see LIGO-M1300550 and VIR-0494#-13 for an overview).

The purpose of this MOU is to reference the parties involved and their relevant policies; define the appropriate data and information that is to be shared under this arrangement, and its permitted use; and establish how any publications and presentations coming out of this work will be handled. By signing this MOU, the parties agree that they understand the nature of the collaborative work, consider it to be scientifically worthwhile, and will do their best to bring it to successful completion.

19

## MAXI sensitivity for SGRB in GW range

MAXI could easily detect “short pulse” and “soft extended emission” of GRB 050709



# SLC on WF-MAXI

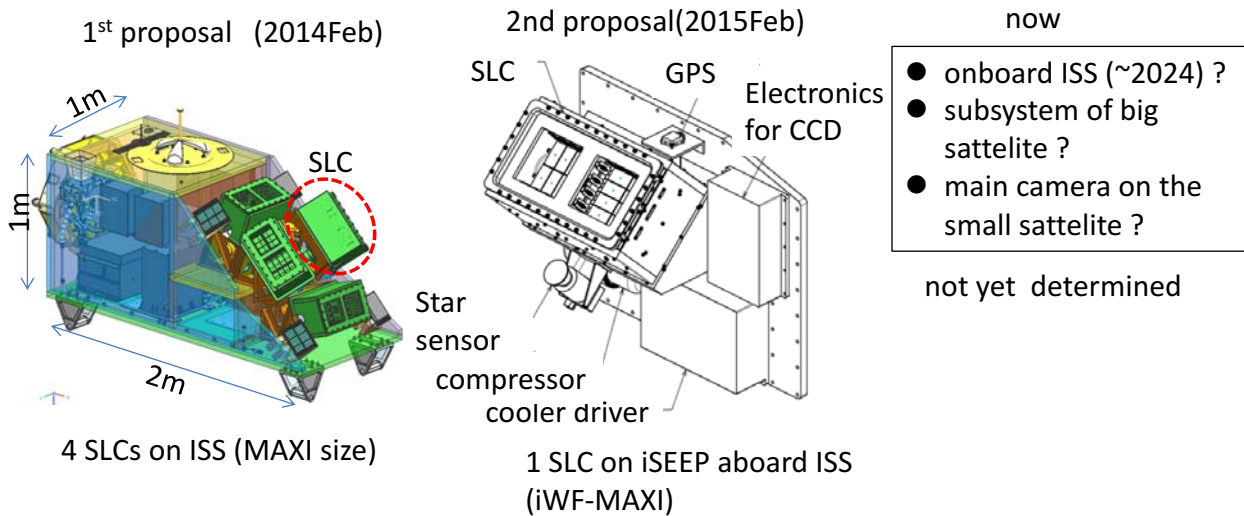
SLC ( **S**oft X-ray **L**arge solid angle **C**amera )

- ◆ wide FoV : > 10% of the entire sky
  - Coded mask
- ◆ sensitivity at soft X-ray band : 0.7-10keV
  - X-ray CCD array for detector. We can detect 0.1Crab source with 5 sigma in 100sec observation
- ◆ position determination : < 0.2°
  - 2sets (X- and Y- camera) of 1-d coded mask

heritages of previous missions are utilized for SLC

- MAXI/SSC → readout electronics, driver electronics
- ASTRO-H / SXI → CCD, camera body design, drive pattern (u-code)
- HETE2 → optics (coded mask)

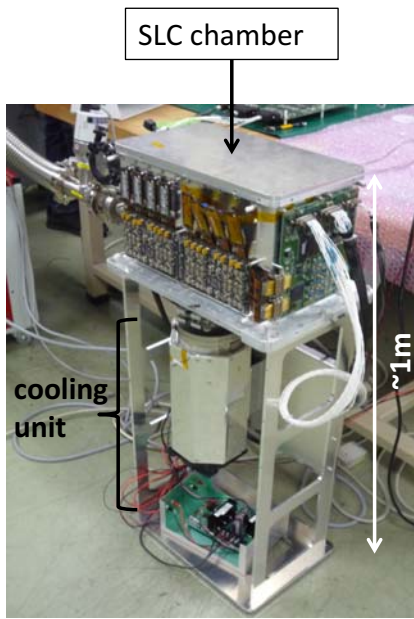
## history of WF-MAXI mission design



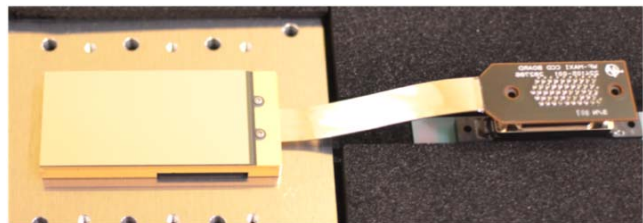
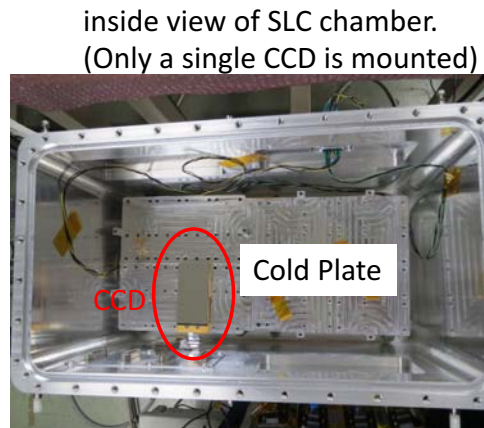
SLC has been developed as a wide-field soft X-ray camera with high flexibility

- CCD drive pattern can be changed easily with u-code
- Stirling cooler can be change into Peltier Cooler

# SLC test model



SLC test model with twinbird cooler. In the space, a lid is replaced with coded mask.



CCD optimized for WF-MAXI fabricated by HPK 2048(H) x 3664(V) BI FFT X-ray-CCD

# Hamamatsu Scientific CCDs

MAXI(2009)  
Hayabusa(2003)  
Kaguya(2007)

N-channel CCDs  
(2000s)



Subaru/HSC(2013)

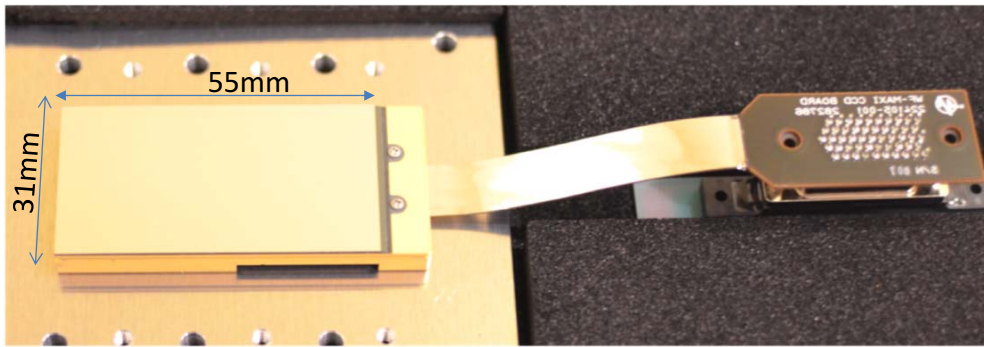
60mm

Hitomi(ASTROH)/SXI  
(2016)

WF-MAXI/SLC(20??)

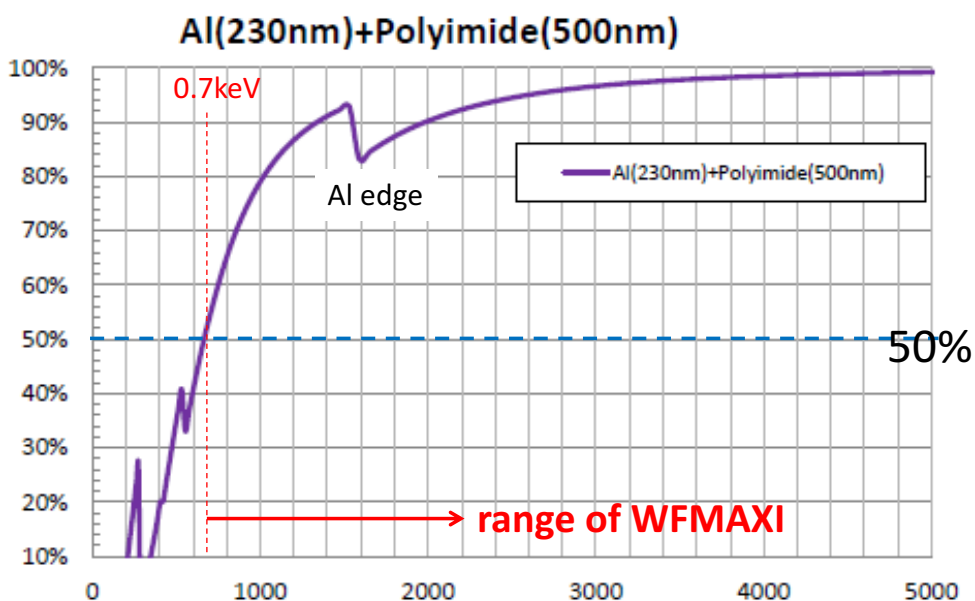
P-channel CCDs (2010--)

# X-ray CCD for WF-MAXI/SLC



- X-ray CCD optimized for WF-MAXI was fabricated by HPK
- Pixel number : 2048(H) x 3664(V)
- Pixel size : 15x15um
- Back illumination (high sensitivity for soft X-ray, tolerant for micrometeorite)
- 200um depletion layer (high sensitivity for hard X-ray)
- Full frame transfer (no storage region)
- Aluminum coating for optical block (but coating process must be updated due to the pin-hole issue)
- New package (changed from Hitomi/SXI for the higher yield)
- Notch structure in the charge transfer channel (rad-hard)
- Low dark current (surface-process was changed from Hitomi/SXI)
- Flexible cable was newly developed

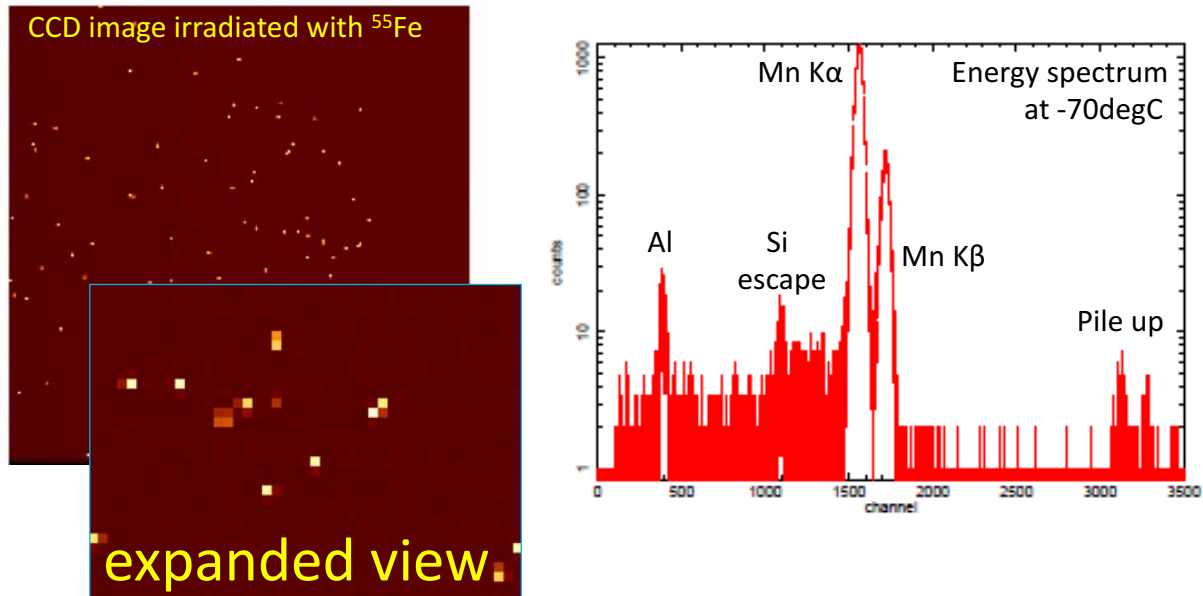
## Transmittance at low energy X-ray



Detection efficiency is >50% for 0.7-10keV



# X-ray Spectrum of WF-MAXI CCD

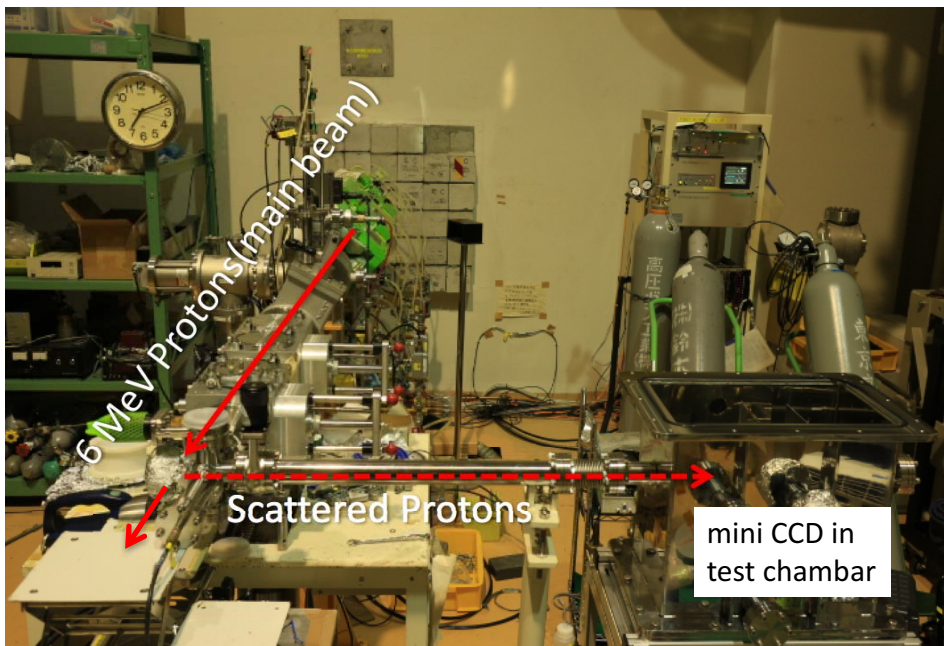


Energy resolution is  $\sim 180\text{eV}$  @  $5.9\text{keV}$  (comparable with Hitomi/SXI)



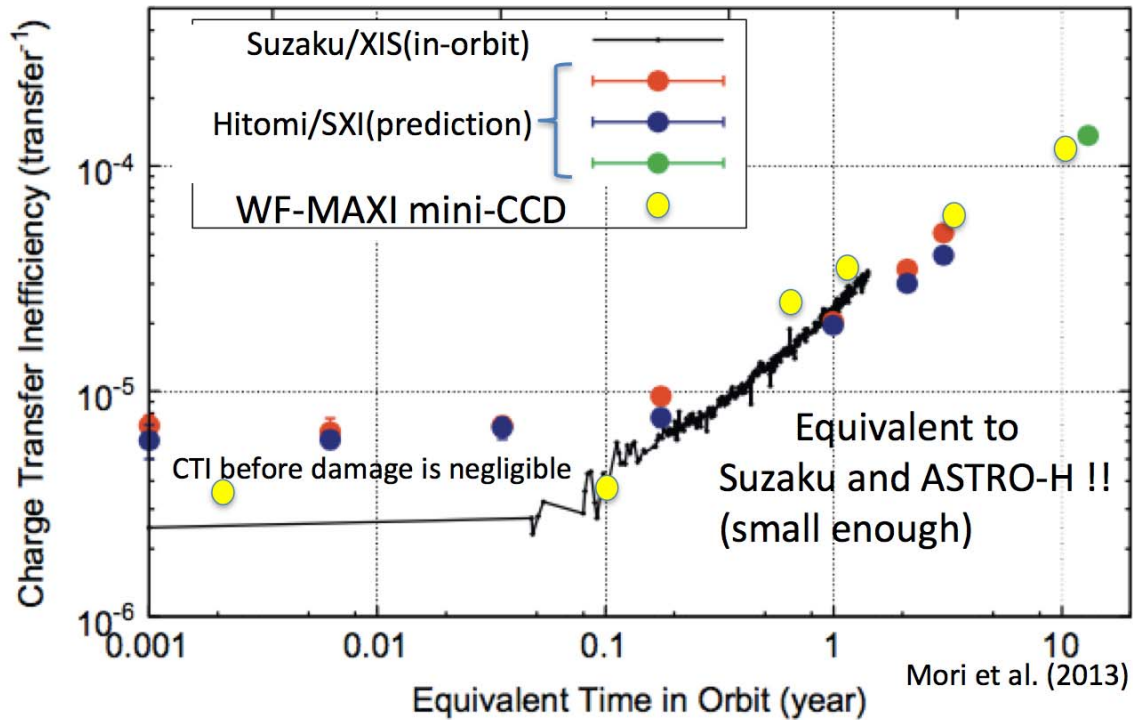
- few single pixel event (pixel size of WF-MAXI CCD is small )
- binning parameter must be adjusted
- But enough for WF-MAXI (no requirement for energy resolution)

# Radiation damage test



- HIMAC, heavy ion medical accelerator in Japan.
- Protons scattered by thin foil were irradiated into CCD
  - Initial proton energy:  $6\text{ MeV}$ , Intensity:  $70\mu\text{A}$ - $400\mu\text{A}$

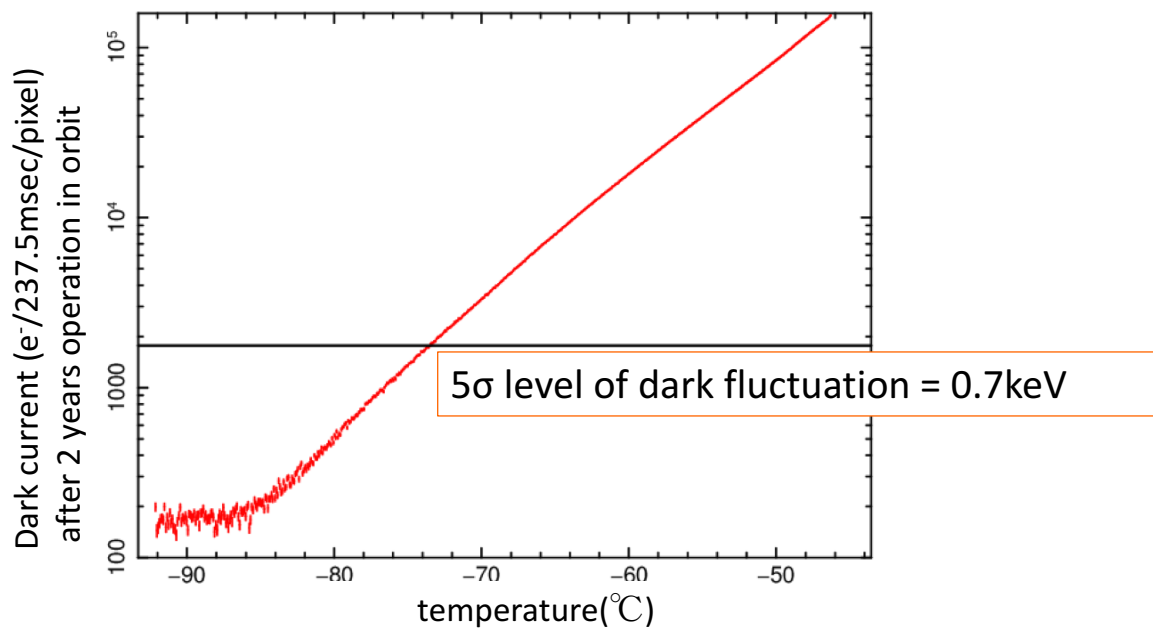
## Charge Transfer Inefficiency (CTI)



note : CTI cannot be measured in orbit with SLC (CTI correction is not applicable)

9

## Dark Current (temperature dependency)



-74°C or lower temp is required even in the optimistic case  
=> mechanical cooler or large radiator is needed

12

# SLC Final Results

- Customized CCD w/package developed
  - Satisfactory X-ray performance verified
  - Radiation hardness tested
    - operating temperature/life time defined
- Camera prototype designed and developed
  - Thermal design studied for ISS orbit
  - Coded mask prototype developed
  - Special signal read-out electronics developed
- Operation constraints and performance studied with simulations

# Summary of the research of the A02 sub-project

**Michitoshi Yoshida (Hiroshima Univ.)**

**On behalf of the A02 subproject**

**Kentaro Motohara (Univ. of Tokyo), Kenshi  
Yanagisawa (OAO, NAOJ), Koji Ohta (Kyoto Univ.) ,**

**Koji S. Kawabata (Hiroshima), Mamoru Doi  
(Tokyo), Takahiro Nagayama (Kagoshima), and  
Kenta Fujisawa (Yamaguchi)**

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

1

## Introduction

2017/08/24

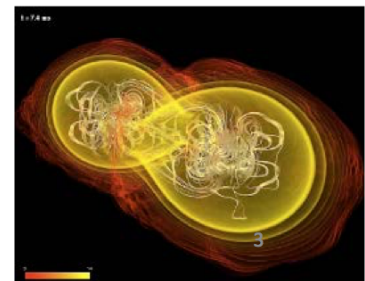
GW Symposium @ Kyoto

2

# Importance of EM follow-up of GW events

EM identification may provide

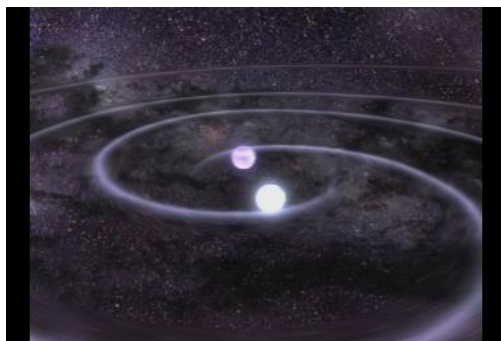
- Where it comes from,
  - Accurate localization
  - Accurate distance
  - Their environments (where it is in a galaxy, which type of galaxy, metallicity, density, etc.)
- Information of the accompanying physics and progenitors
  - Equation of state of neutron star
  - Physics of explosion associated with GW
  - r-process nucleosynthesis



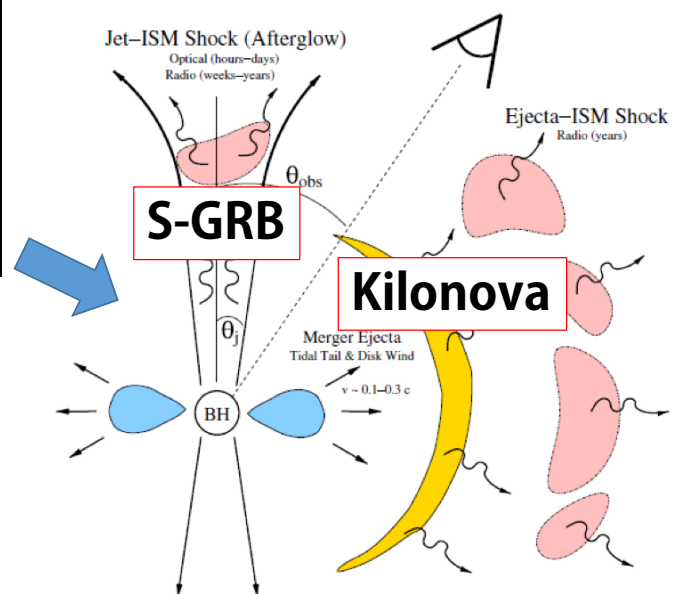
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

## Searching for EM counterparts is crucial for understanding the nature of GW sources



The most promising GW sources → NS-NS merger



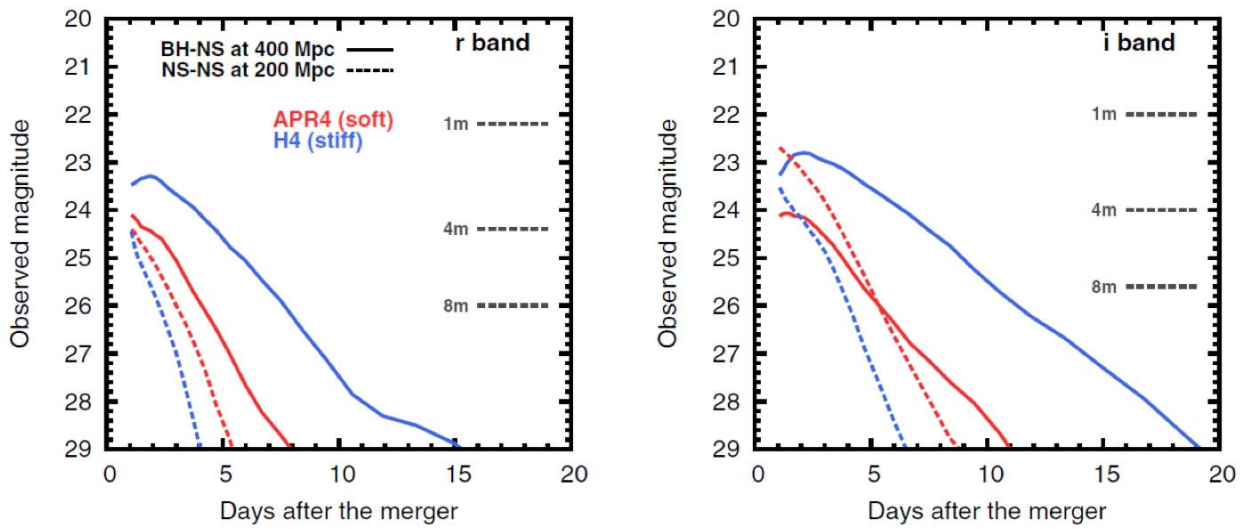
Metzger & Berger 2012

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

4

# Light curve models of kilonova (Tanaka+ 2014)



**BH-NS merger @ 400Mpc**  
**NS-NS merger @ 200Mpc**

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

5

# Sub-project A02

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

6

# Goals of the sub-project A02

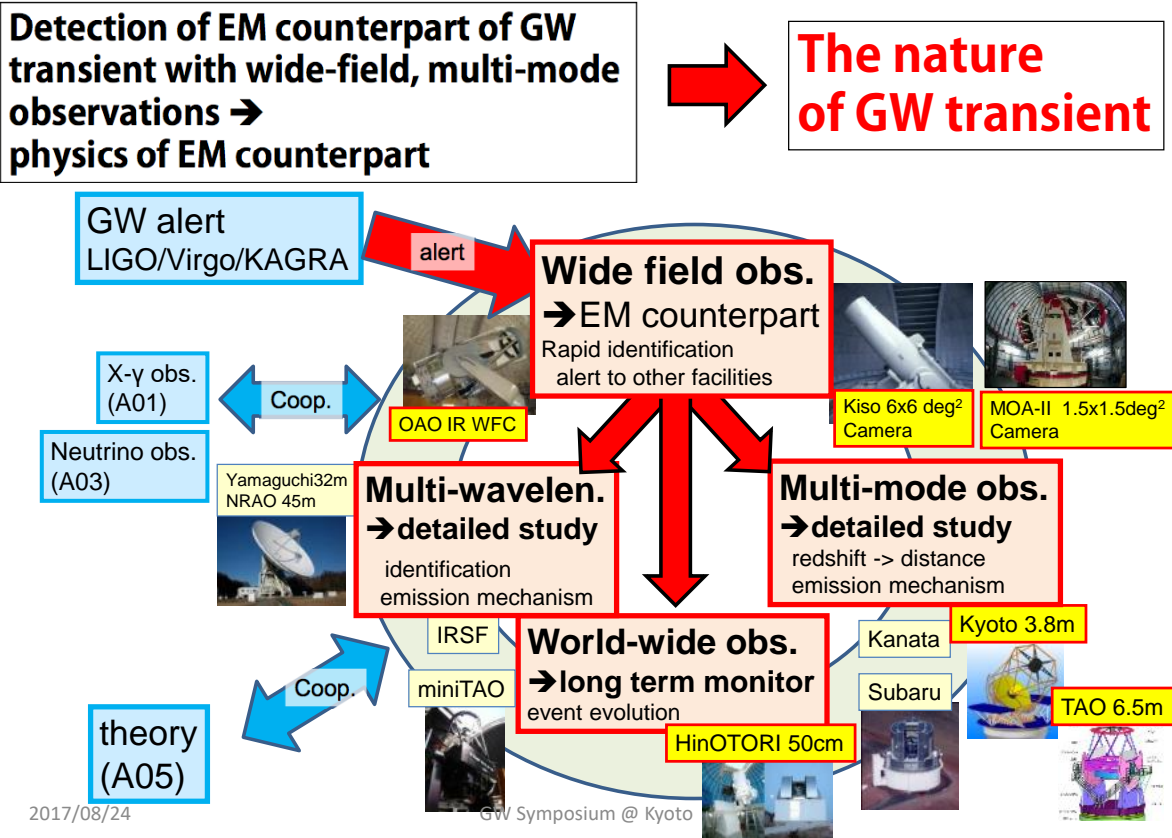
- **Develop an optical-infrared-radio observation network for GW transient follow-up**
  1. Kiso wide-field camera (Tomo-e)
  2. OAO-WFC (wide-field infrared camera)
  3. IFU for the spectrograph of Kyoto 3.8m telescope
  4. 50cm robotic telescope in Tibet
  5. Establish a transient observation network by utilizing existing facilities: Subaru, Mini-TAO, IRSF, Kanata, Yamaguchi 32m radio tel., etc.

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

7

## Schematic overview of A02 project

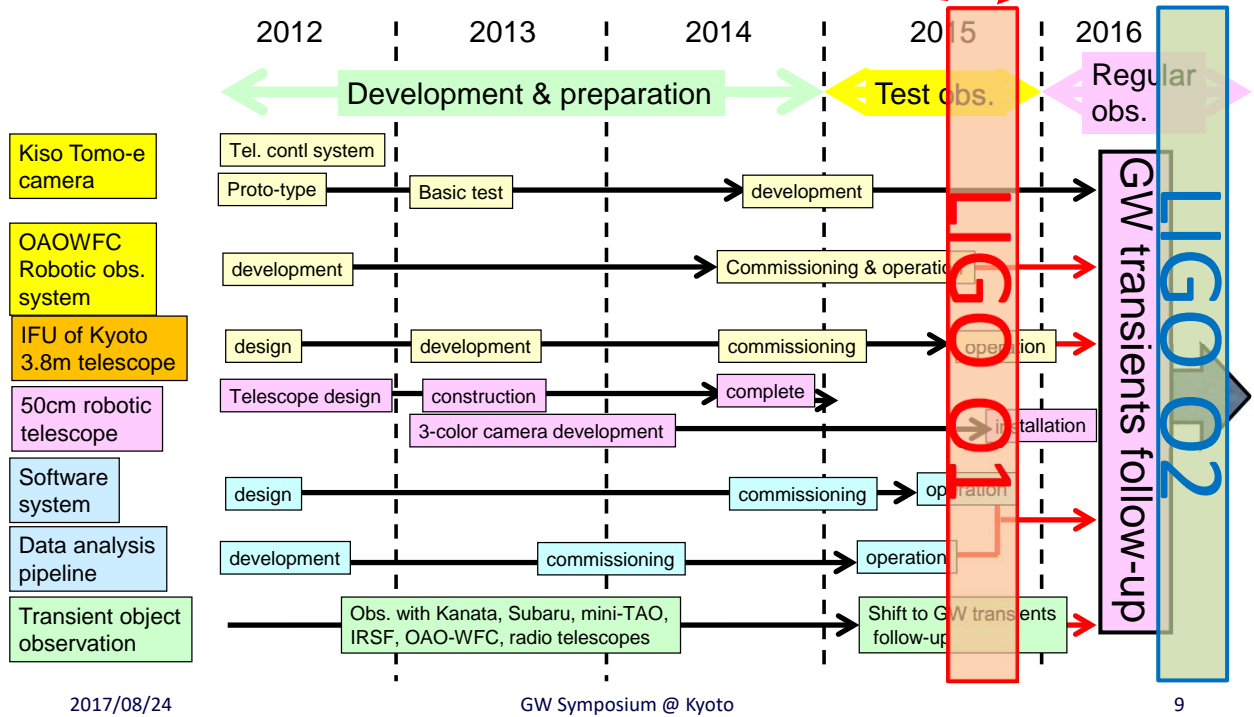


# Project schedule

GW150914

GW151226


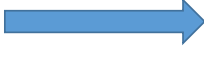
Construct the base of optical - radio follow-up observations of EM counterparts of GW transients until 2016



# What we achieved



# 1. Summary of A02/Univ. Tokyo

- Development of Tomoe-Gozen CMOS imager
  - Next-Gen WFC for Kiso 1m Schmidt telescope
  - Prototype development with Shingakujutsu
  - Funded for full camera / under development (next slide)
- KWFC (Current WFC for Kiso)
  - Carried out follow-ups for LIGO O1/O2 Events
- LISS (High sensitivity optical spectrograph) 
  - Available as a PI Instrument at Nishiharima Observatory
- Development of TAO 6.5m Telescope 
  - Scheduled to see the first light on 2019
  - The telescope now being preassembled in Harima
  - Two facility instruments almost completed

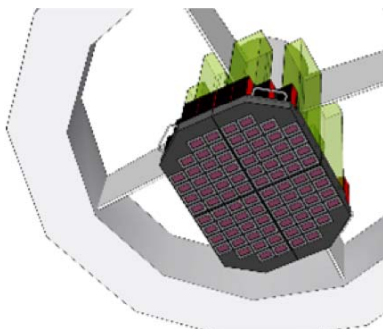


2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

## Kiso wide-field camera Tomo-e : wide field CMOS imager

- Wide Field CMOS Camera for Kiso 1.05m
  - 20 deg<sup>2</sup> in  $\varphi$  9degree
  - Scheduled to see the first light on Aug. 2018
- Prototype Tomo-e saw the First Light in Dec. 2015



84 chips of CANON high-sensitivity CMOS sensors



2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

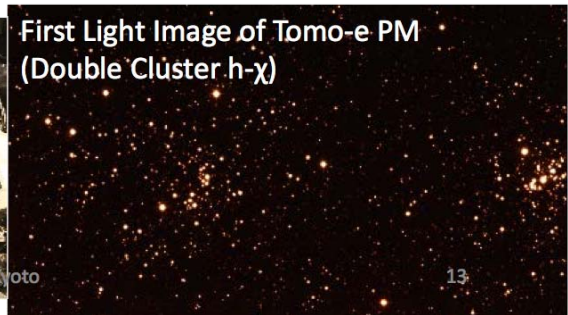
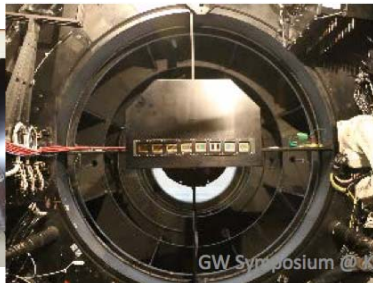
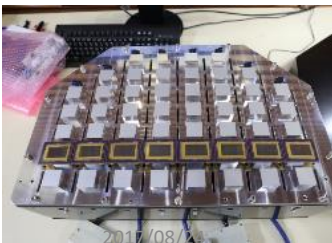
12

# Development of Tomo-e Prototype

- Started with 1-chip CMOS camera (provided by Canon) at Kiso (2013)

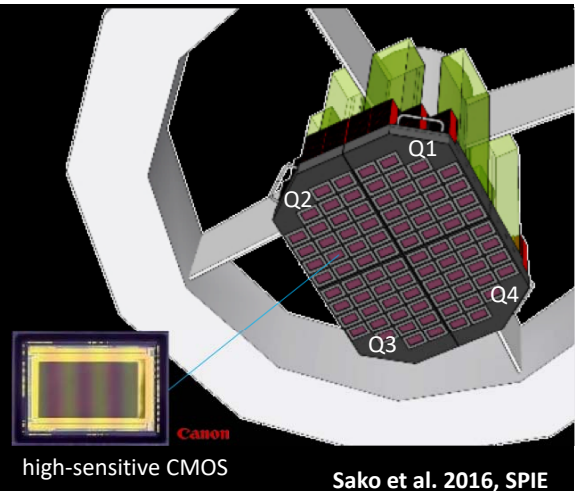


- 5-chip Prototype (2013-2015)
  - 2015/12 First Light



## Kiso observatory, the University of Tokyo the Tomo-e Gozen

- Telescope: Kiso 105-cm wide-field Schmidt
- Field of view: 20 deg<sup>2</sup> in  $\phi$ 9 deg
- Image sensors: 84 chips of CMOS
- Data acquisition rate: 2 fps (max)
- Data production rate: 30 TB/night (max)



- Development Status
  - All 84 CMOS sensors procured
  - Data pipeline analysis system for 30TB/night under construction
- Schedule
  - 2018/1 : First Light with a single-quadrant (Q1 : 21 sensors)
  - 2018/4 : Science run with Q1
  - 2018/8 : Science run with Q1+2
  - 2018/10 : Science run with Q1+2+3
  - 2019/1 : Science run with Full Camera



Camera body of Tomo-e



Data analysis system

2017/08/2019/1 : Science run with Full Camera @ Kyoto

## 2. OAOWFC

### Okayama Astrophysical Observatory Wide Field Camera



OAOWFC



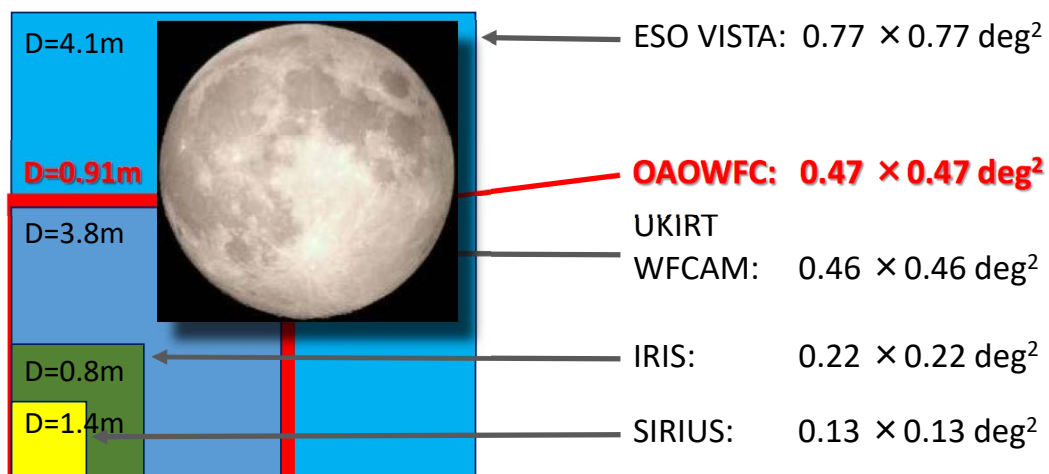
0.48 deg.

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

15

## Comparison FOVs: NIR imagers



**OAOWFC' s FOV is one of the largest in the world.**

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

16

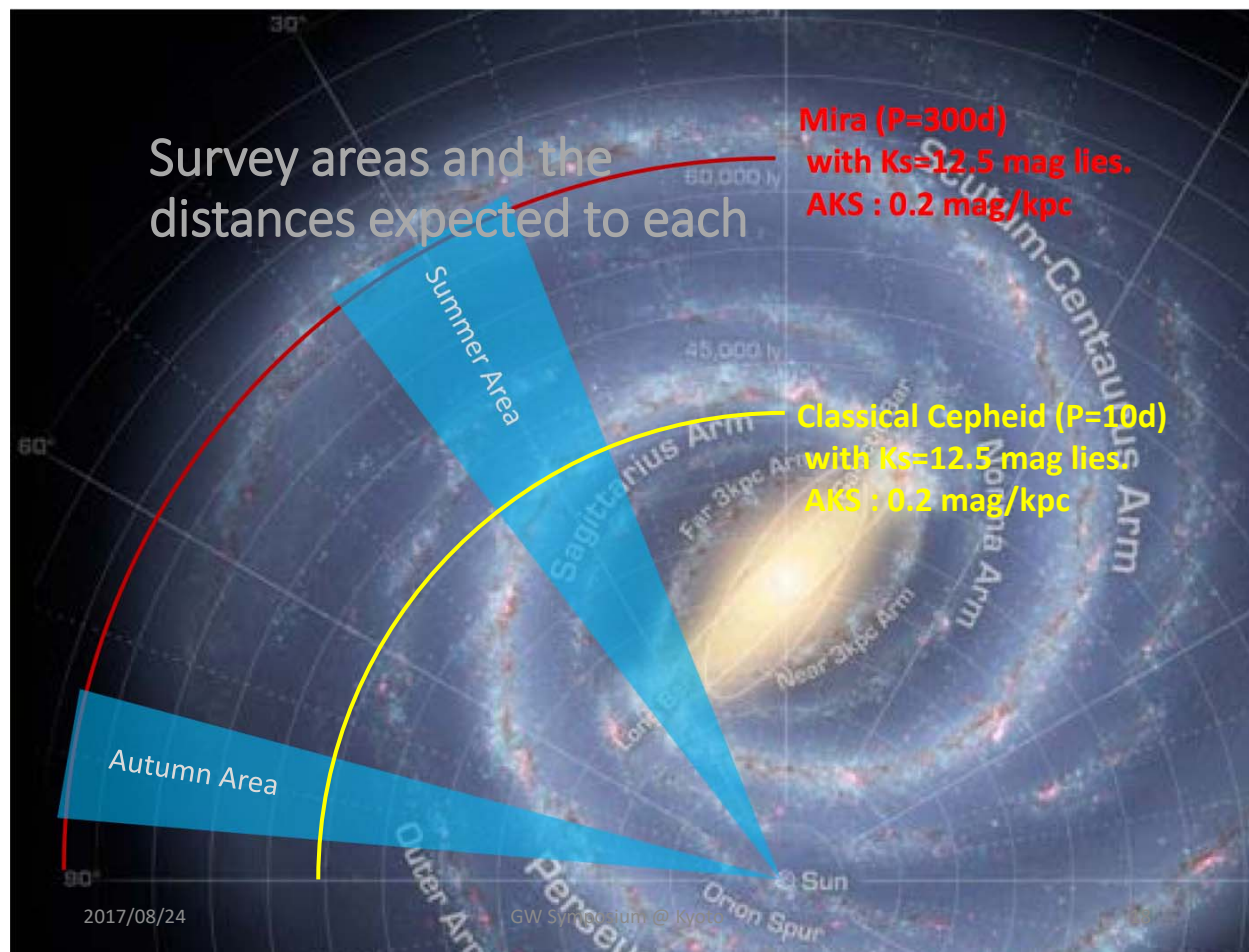
# OAOWFC: Regular observations

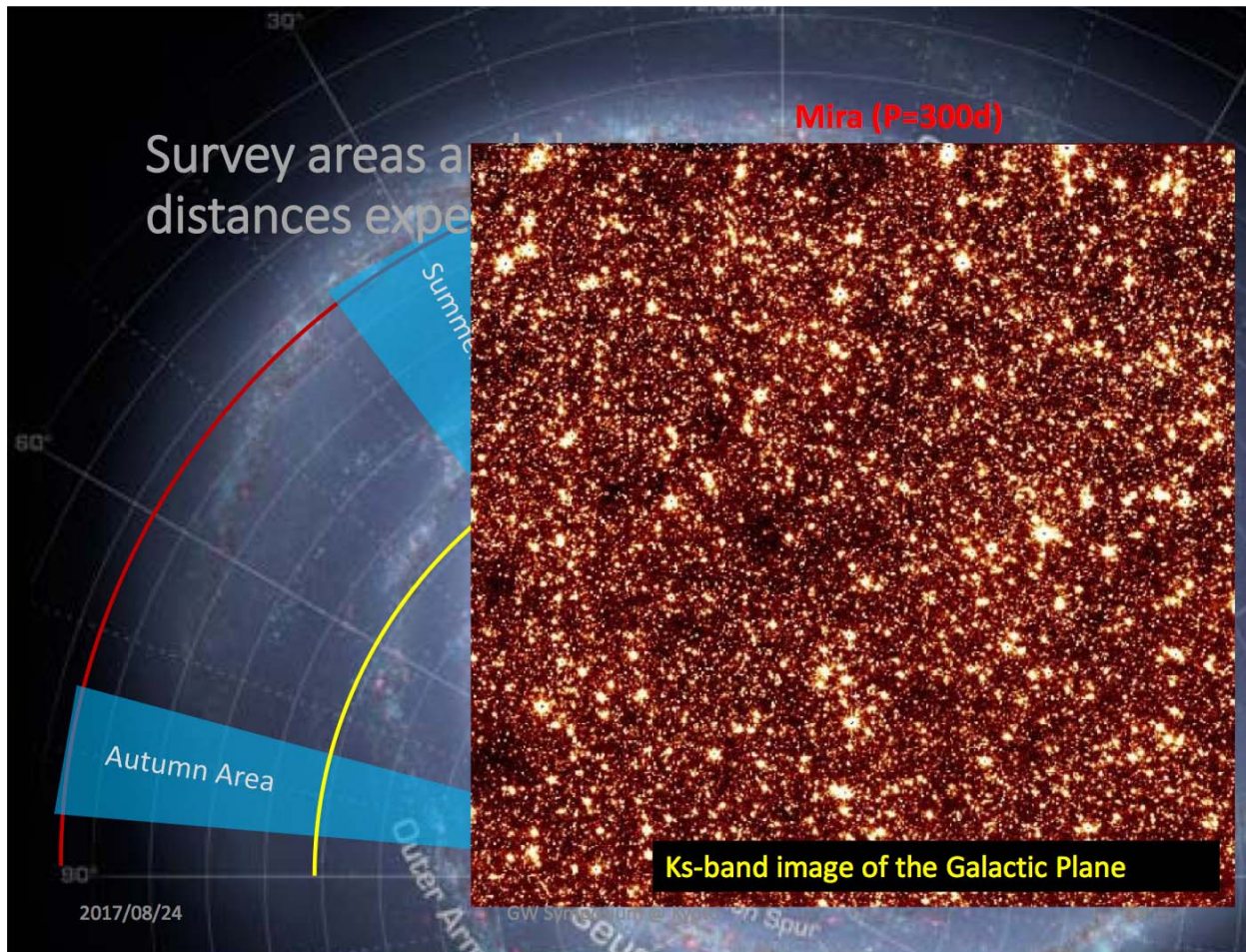
- **Monitor the Galactic Plane in the Ks-band to search for variability.**
  - Miras ... Distribution of old stars
  - Cepheids ... Distribution of young stars
- **Two Survey Areas (50 deg<sup>2</sup>)**
  - Summer Area: 30 deg<sup>2</sup>, toward near-end of the Galactic Bar.
  - Autumn Area: 20 deg<sup>2</sup>, toward Cygnus
  - 10 sec × 8 frames for each field, Ks=12.5<sup>mag</sup> reached.
- **Photometry pipeline**
  - Based on PSF fitting with PSFEx + SExtractor.
  - Photometric accuracy of 2% is confirmed.

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

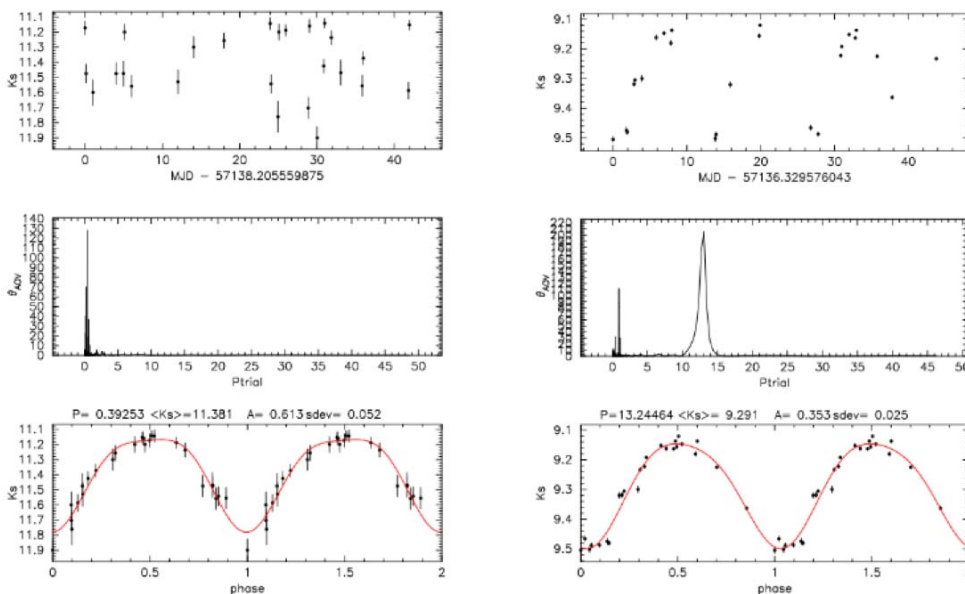
17





# OAOWFC: Newly found variable stars

3,000 variable stars (RR Lyrae, Cepheids, LPVs, irregulars) brighter than  $K_s=12.5^{\text{mag}}$  were discovered.



# GW EM counterpart follow up observations

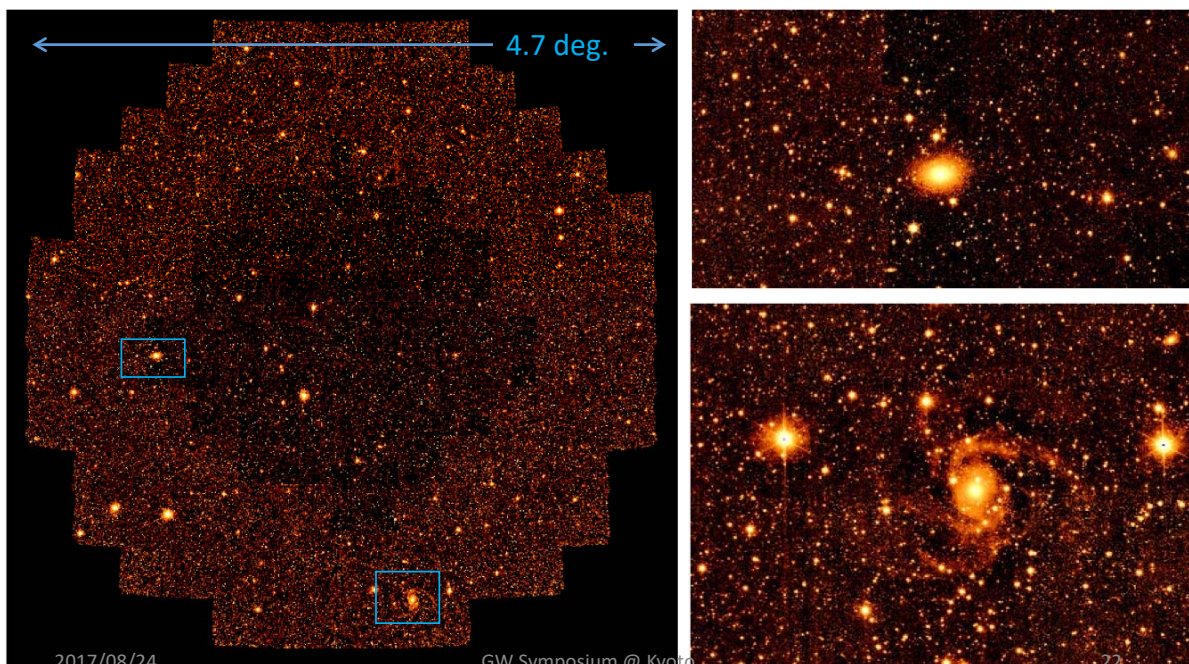
- **Observations (2015-10-23 to date)**
  - Nearby Galaxies targeted observations
  - Total number of
    - Observed nights: 27
    - Observed areas: 422
  - Amount of exposures: 113.9 hours
- **Limiting Magnitude**
  - $J=17.9^{\text{mag}}$  (S/N=5, AB) with 15<sup>min</sup> exposure
  - Reached almost identical limit with 2MASS
- **Results**
  - NO EM candidate has been found.

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

21

# OAOWFC: Mapping observation for a GW source



2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

22

# 3. IFU for the spectrograph of Kyoto 3.8m telescope

Aim:

- prompt optical spectroscopy **w/ IFU** on the Okayama 188 cm and the future 3.8 m telescope
- targets
  - **short GRBs** of which positional accuracy is less than  $\sim 10\text{-}20$  arcsec
  - **optical counterpart candidates of GW sources**
- spectroscopy of SNe, galaxies, etc can also be possible

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

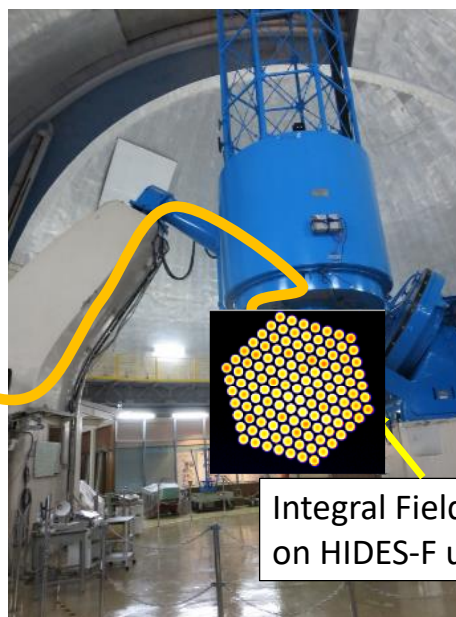
23

## KOOLS-IFU on 188cm telescope

- FoV of IFU:  $\sim 30''$
- FoV of a fibre:  $\sim 2'' \times 127$  fibres
- Wavelength coverage : 5020-8830A
- Spectral resolution : 600-850
- Limiting mag (30min,  $10\sigma$ ): 18.7 AB



Optical spectrograph: KOOLS



188cm telescope

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

24

# ToO obs of GW candidates w/KOOLS-IFU on 188cm

- **GW151226**

A possible counterpart by MASTER

=> very faint and no significant data

(MASTER report may not be correct)

Yoshida et al. PASJ 69, 9 (2017)

- **Another alert (not LVT151012)**

A possible counterpart by QUEST

=> no significant data

turned out to be a false alert (GW) (;\_;) )

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

25

# KOOLS-IFU at new 3.8m telescope



New Spec:

Fov 15"  $\phi$ , 0.9" (fibre)

Grism No.2  $\lambda$   $\lambda$  5800-9100A

R~850-1600

Scheduled to start from Aug 2018

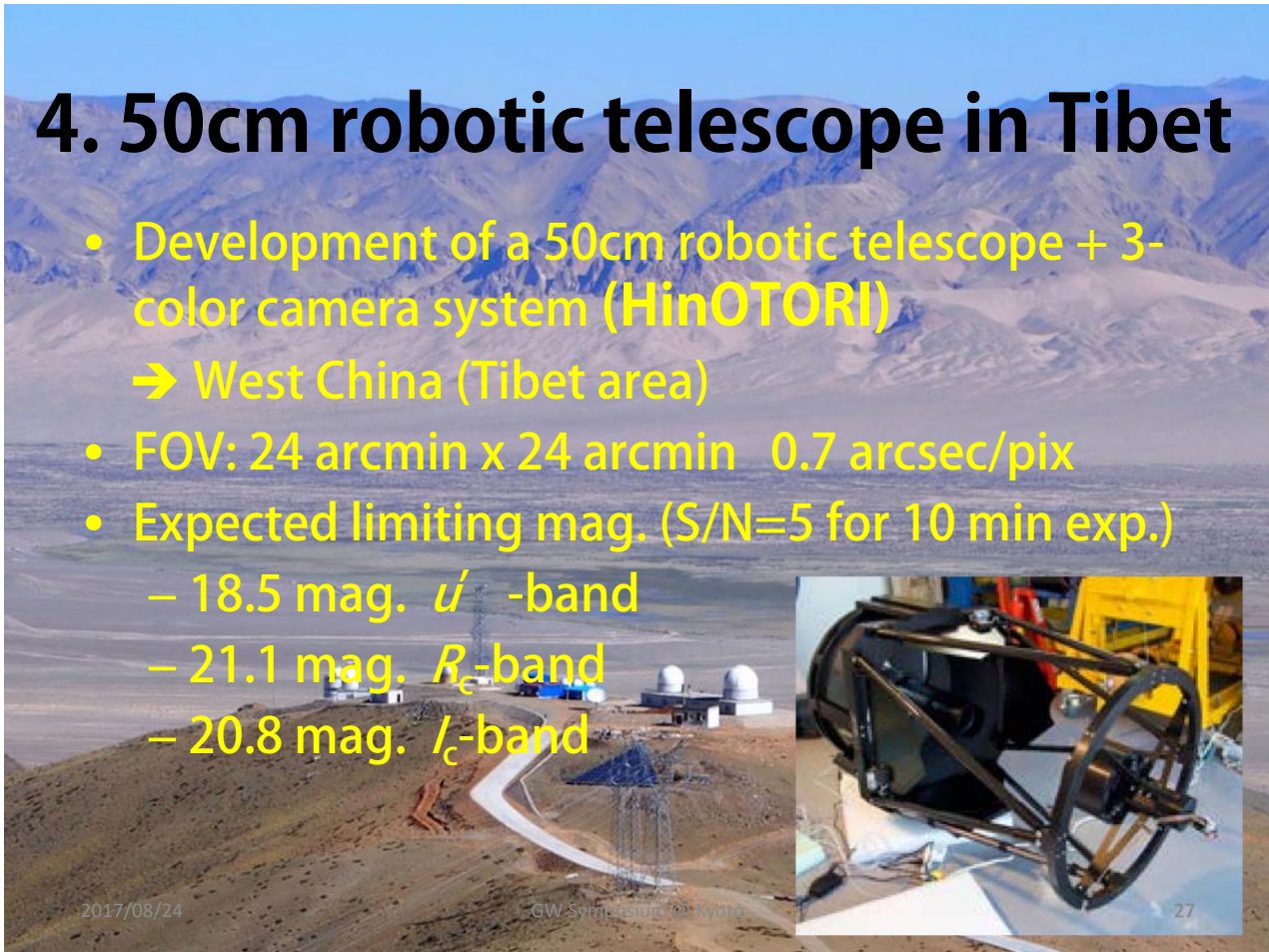


w/up-graded CCD (Hama-phot FDCCD)



# 4. 50cm robotic telescope in Tibet

- Development of a 50cm robotic telescope + 3-color camera system (**HinOTORI**)
  - West China (Tibet area)
- FOV: 24 arcmin x 24 arcmin 0.7 arcsec/pix
- Expected limiting mag. (S/N=5 for 10 min exp.)
  - 18.5 mag.  $u'$ -band
  - 21.1 mag.  $R_c$ -band
  - 20.8 mag.  $I_c$ -band



2017/08/24

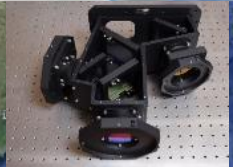
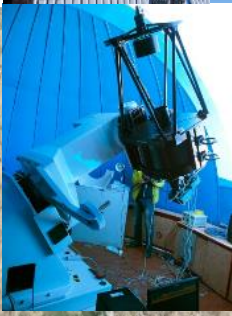
GW Symposium @ Kyoto

27

## Current status of HinOTORI

The telescope reached at the Ali site and installed in a dome of NAOC on Sep. 7 2016.

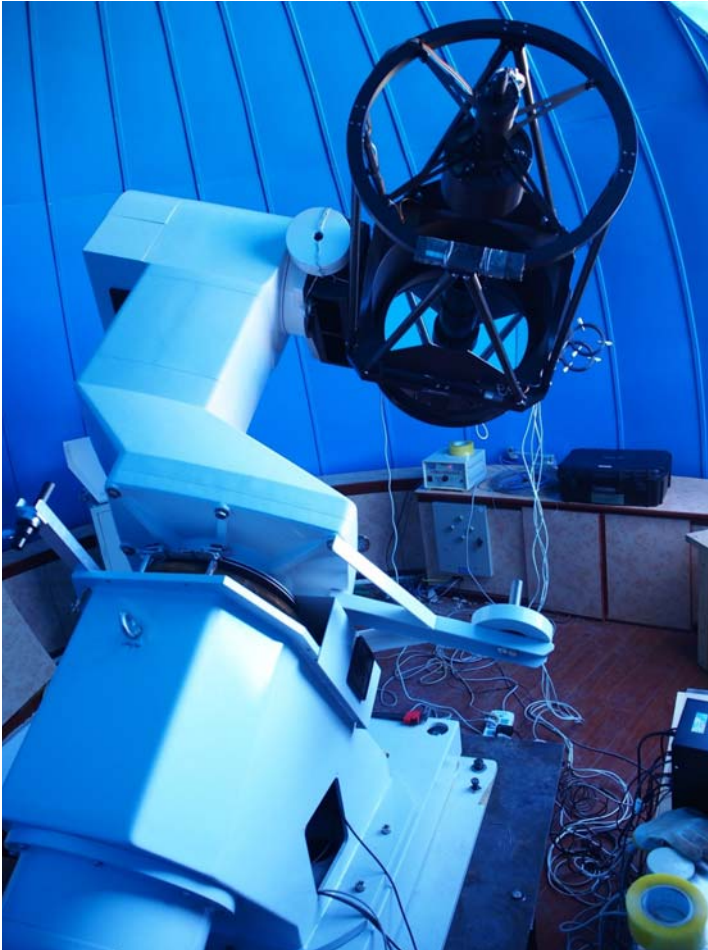
- We plan to visit Ali in 2017
- Full commissioning



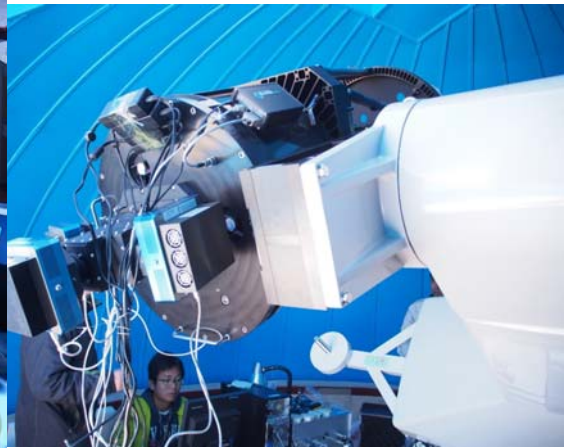
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

28



**HinOTORI telescope  
at Ali site  
(2016 Sep.)**



## **5. Establish a transient observation network by utilizing existing facilities**

- **J-GEM: Japanese collaboration for Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up observation**

- **Purpose:**

- Electro-magnetic follow-up of gravitational wave transients detected by advanced GW detectors (LIGO, Virgo and KAGRA)

# Members of J-GEM

- M. Yoshida (PI), M. Tanaka, H. Nagai, Aoki, W. (NAOJ)
- Y. Utsumi, K. S. Kawabata, M. Uemura, D. Nagashima (Hiroshima Univ.)
- N. Yasuda (IPMU, Univ. of Tokyo)
- H. Tagoshi (ICRR, Univ. of Tokyo)
- K. Motohara, M. Doi, T. Morokuma, Y. Tamura, R. Osawa, S. Sako, T. Shigeyama (Univ. of Tokyo)
- N. Kawai, Y. Saito, Y. Yatsu, R. Itoh (Tokyo Inst. of Tech.)
- Y. Sekiguchi (Toho Univ.)
- F. Abe, Y. Asakura (Nagoya Univ.)
- K. Ohta, T. Tanaka, N. Seto, T. Nakamura (Kyoto Univ.)
- N. Kanda (Osaka City Univ.)
- N. Tominaga (Konan Univ.)
- Y. Itoh, T. Saito, S. Baar, S. Honda (Hyogo Pref. Univ.)
- K. Yanagisawa, D. Kuroda, K. Matsubayashi (OAO, NAOJ)
- K. Fujisawa (Yamaguchi Univ.)
- T. Nagayama (Kagoshima Univ.)

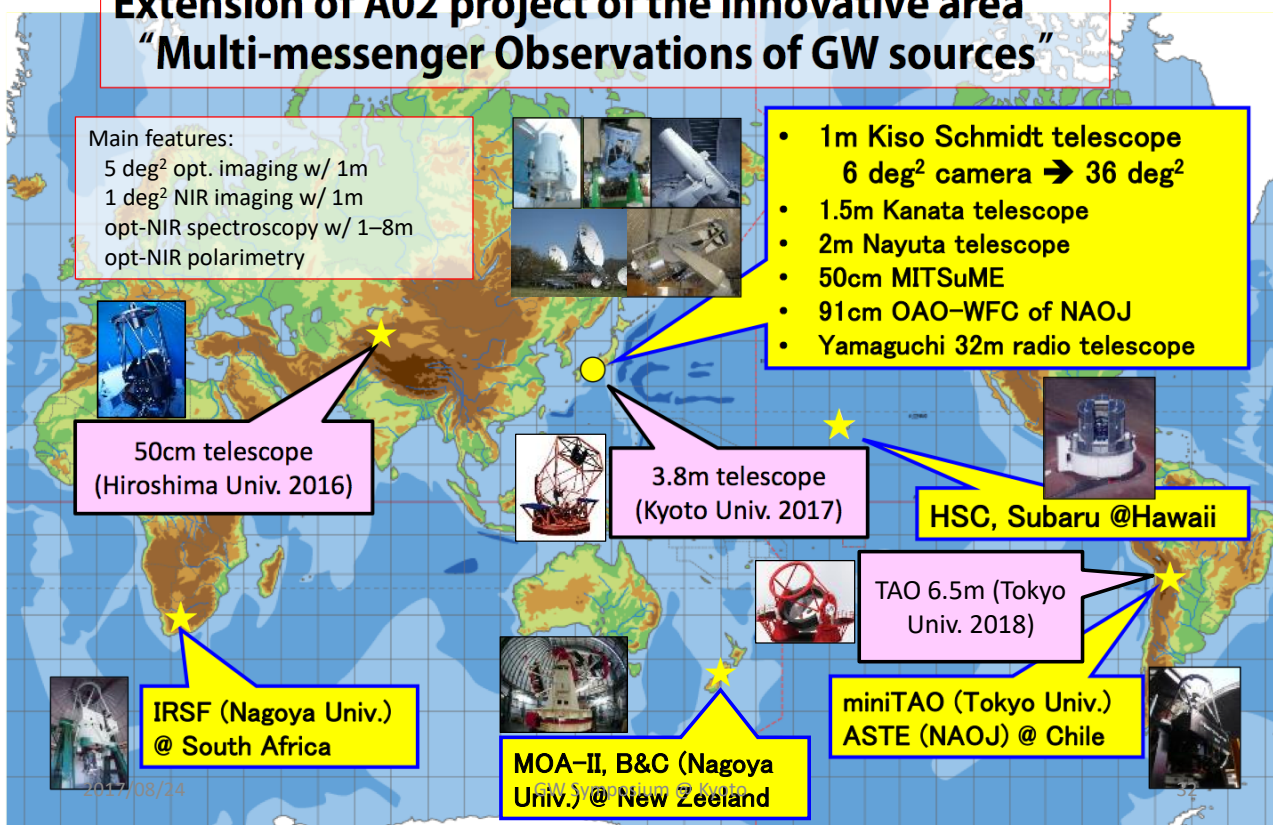
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

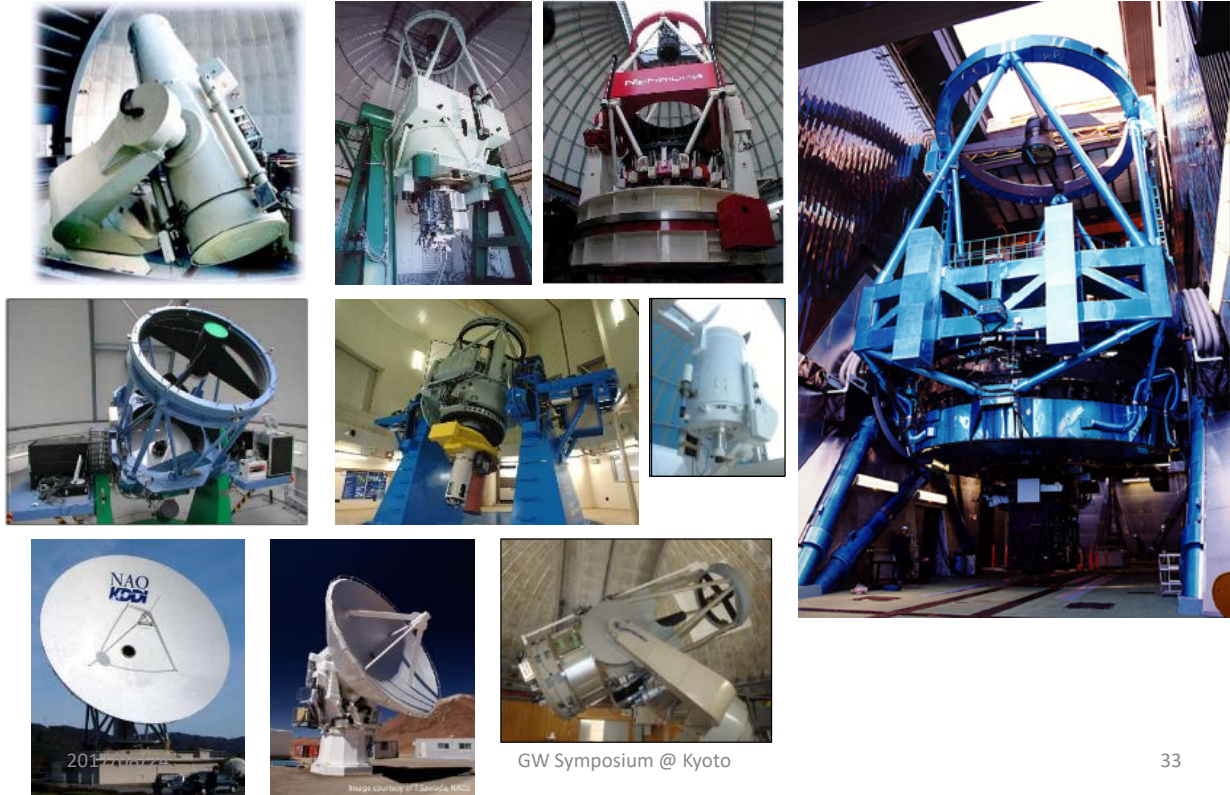
31

## J-GEM (Japanese collaboration for Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up)

Extension of A02 project of the innovative area  
"Multi-messenger Observations of GW sources"



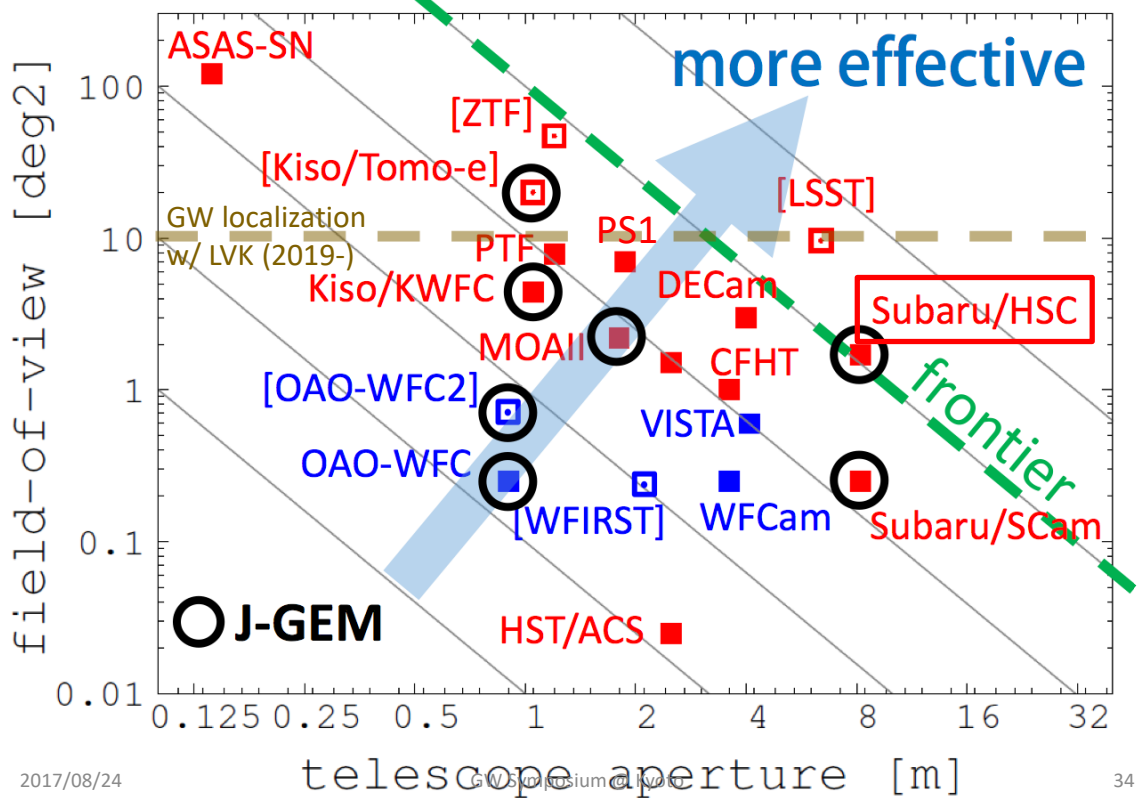
# Telescopes currently joining J-GEM



33

# Optical infrared wide field facilities in the world

optical: red infrared: blue [ ]: future plans



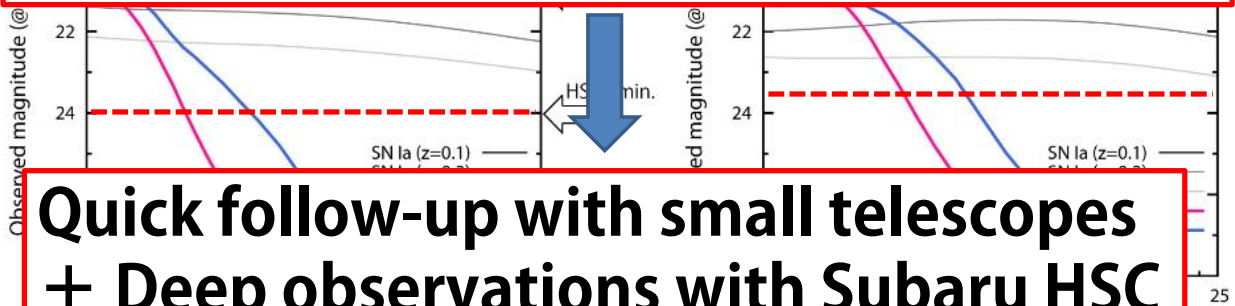
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

34

# Expected light curve of kilonova @ 100Mpc (Tanaka+ 2014)

Detectable with 1-m class telescopes within 1 – 2 days after merger  
 HSC can follow the light curve for 1 – 2 weeks



Quick follow-up with small telescopes + Deep observations with Subaru HSC

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

35

## Follow-up observation strategy of J-GEM

- Blind survey
  - 10 deg<sup>2</sup> – 100 deg<sup>2</sup> blind survey within GW error area
  - **KWFC, MOA-II** and **Subaru HSC**
  - 1 color or 2 colors with short exp-time (1 – 3 min) survey



- Targeted observation
  - Select target galaxies using nearby galaxy catalogs
  - **Kanata, Nayuta, MOA-II, IRSF, OAO-WFC, Subaru FOCAS, MOIRCS** and **MITSuME**
  - 1 color with ~10 min exp-time per one galaxy



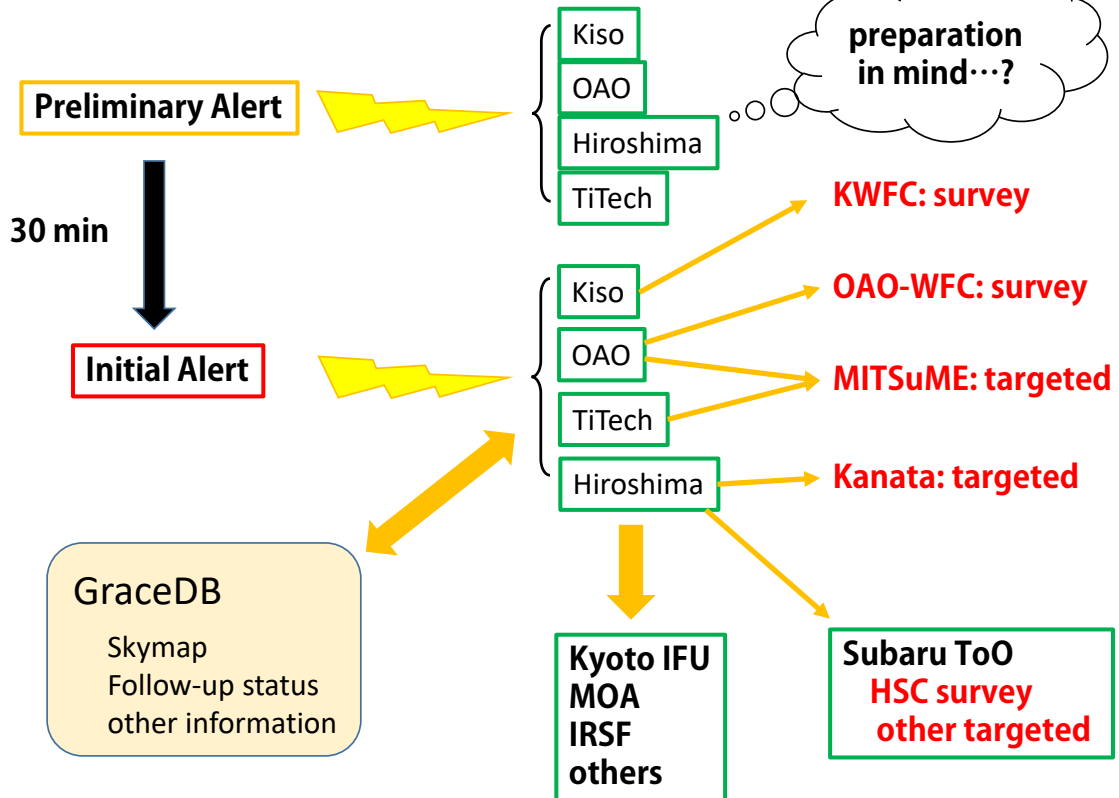
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

36

# LIGO, Virgo, KAGRA

# J-GEM



2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

37

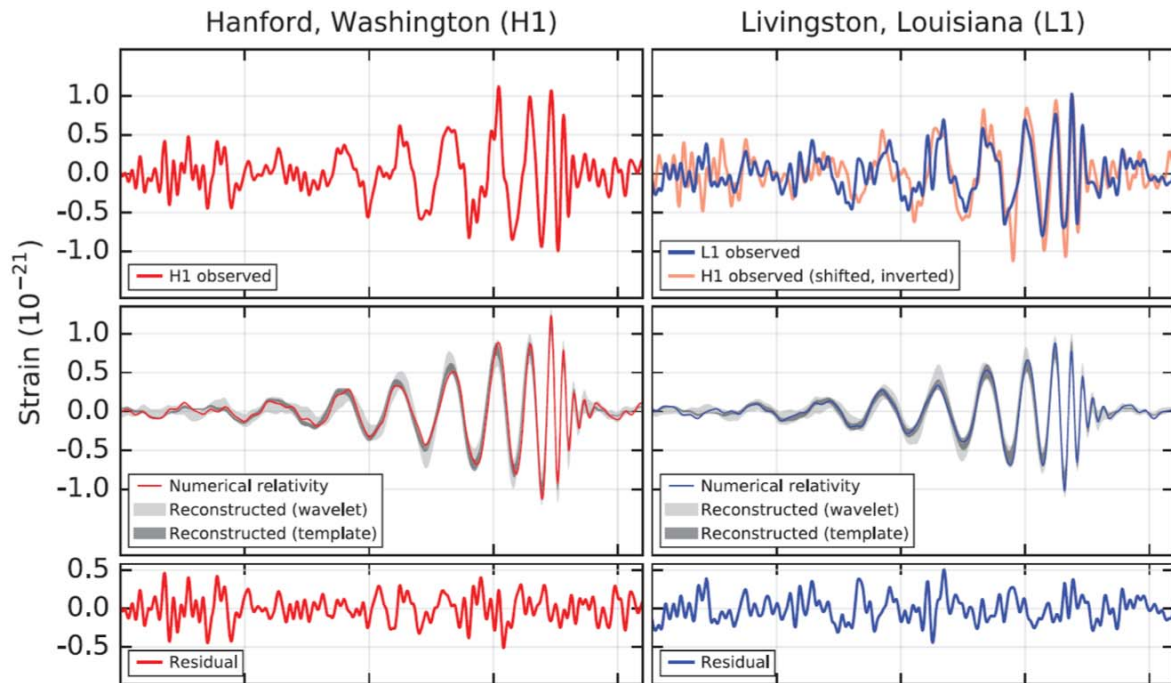
# Follow-up observations for GW sources

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

38

# GW150914



**36M<sub>☉</sub> BH + 29M<sub>☉</sub> BH → 64M<sub>☉</sub> BH at 410Mpc**

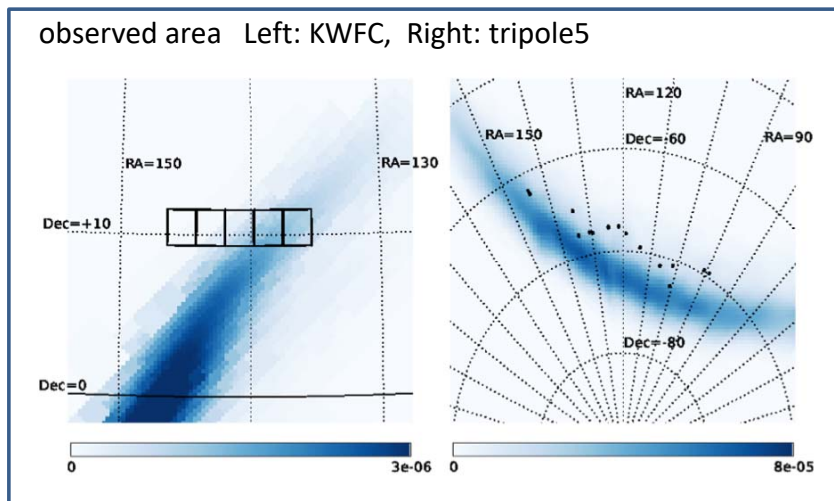
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

39

## Follow-up observations of GW150914

- KWFC on 105 cm Schmidt telescope at Kiso observatory → 24 deg<sup>2</sup>
  - tripole5 on the B&C 61cm telescope in New Zealand → 18 nearby galaxies
- Observation dates: September 18 - 26, 2015



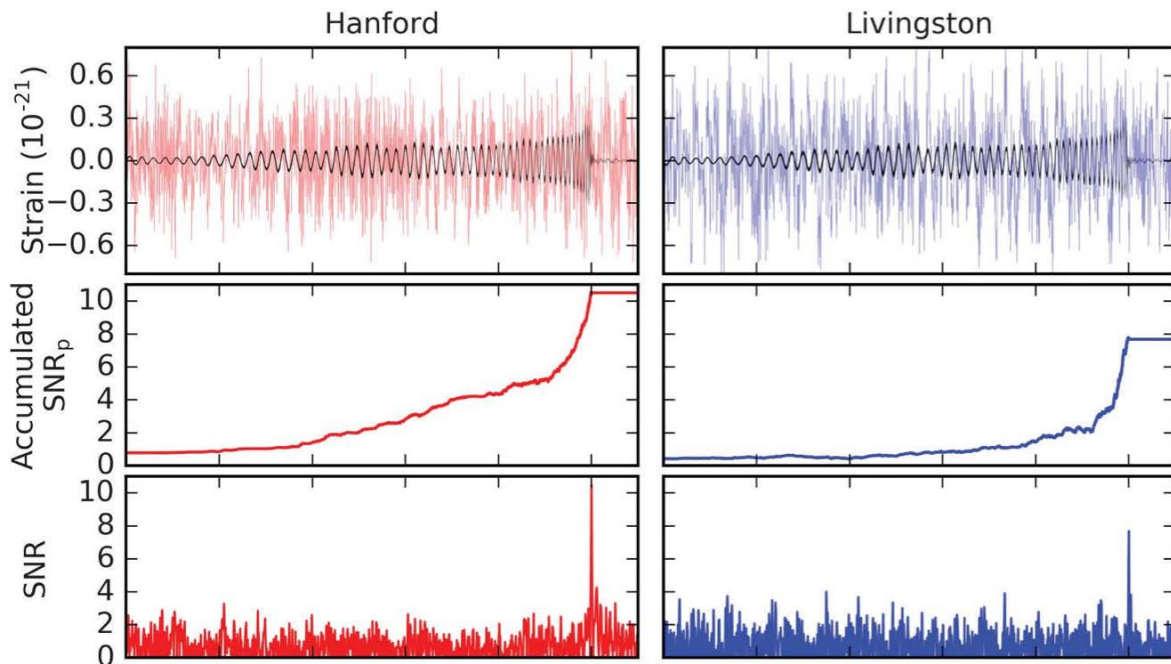
**Limiting magnitudes:**  
 KWFC 18.9 – 19.2 mag. for *I*-band  
 tripole5 *g*: 18.9 mag. *r*: 18.7mag. *i*: 18.3 mag

**No EM counterpart was detected**

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto → Morokuma, T., et al., 2016, PASJ, 68, L9

# GW151226



14.2 $M_{\odot}$  BH + 7.5 $M_{\odot}$  BH  $\rightarrow$  20.8 $M_{\odot}$  BH at 440Mpc

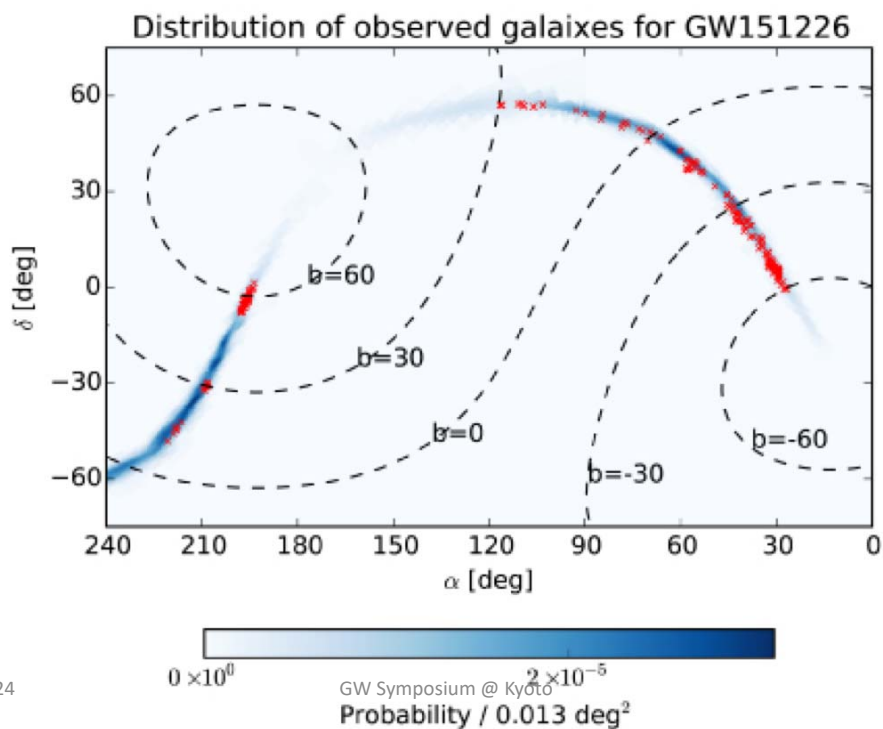
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

41

## Targeted survey $\rightarrow$ 238 galaxies

Nayuta/MINT, Kanata/HONIR, TIT-OAO50cm/MITSuME (opt),  
 OAO91cm/OAO-WFC, IRSFF/SIRIUS (NIR)



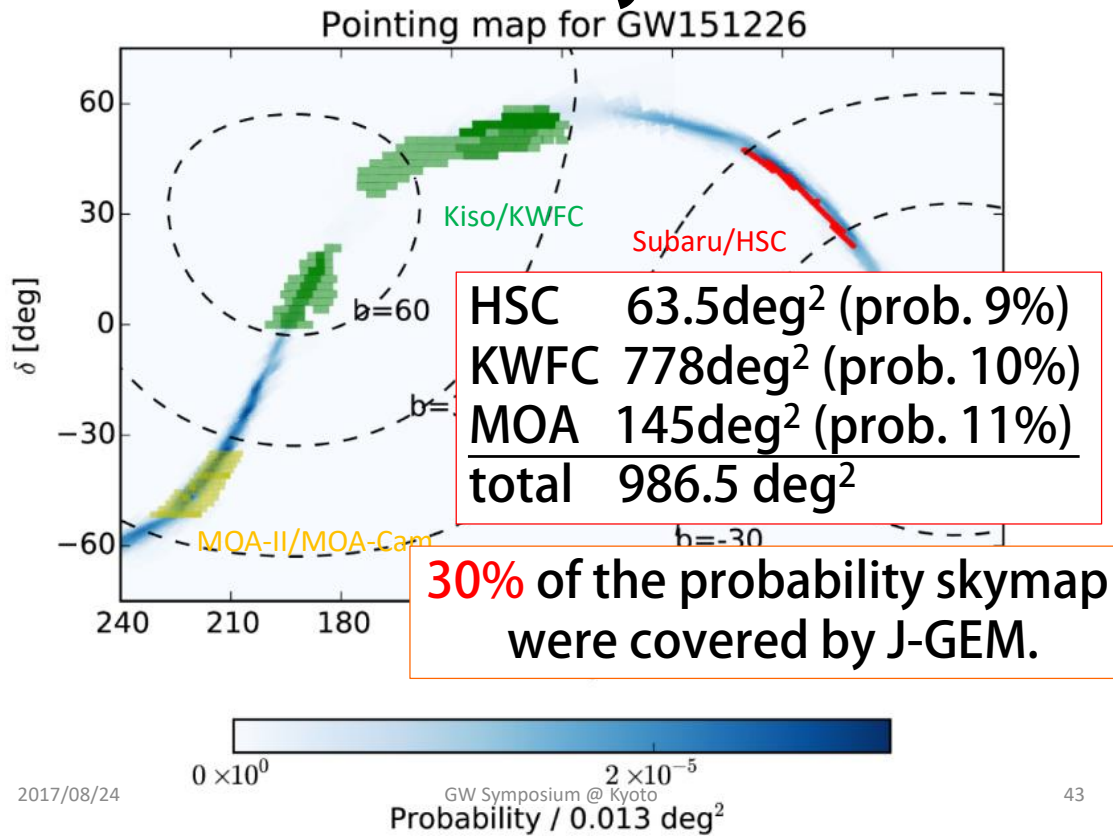
2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

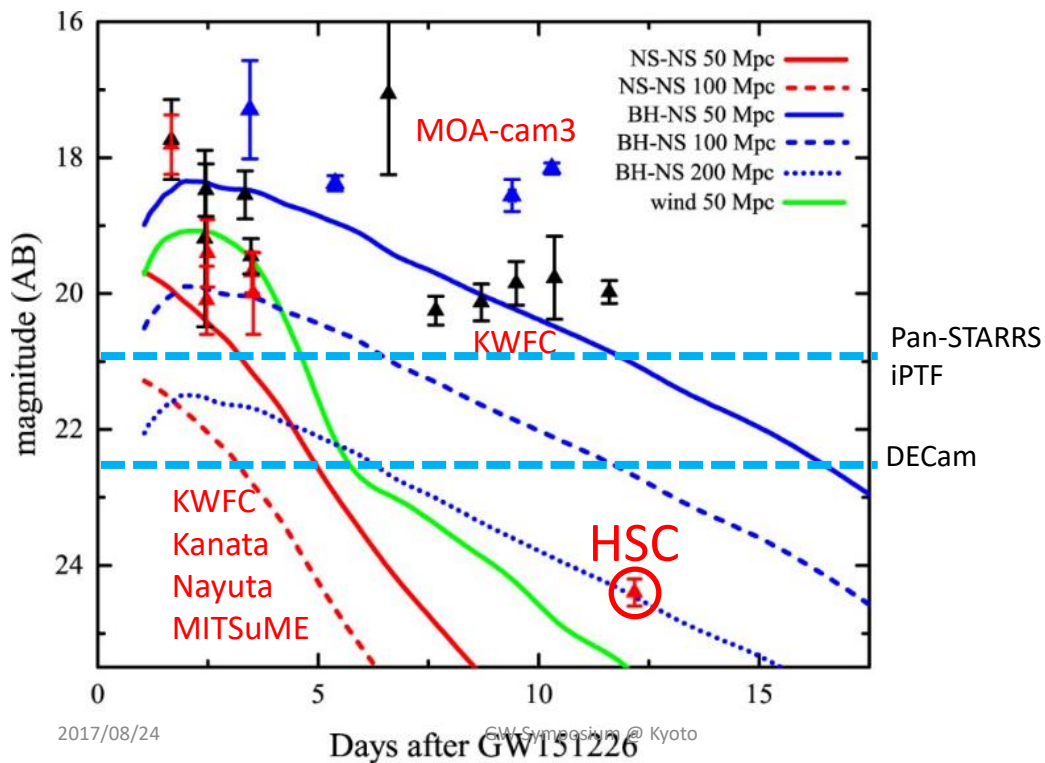
42



# Wide Field Survey



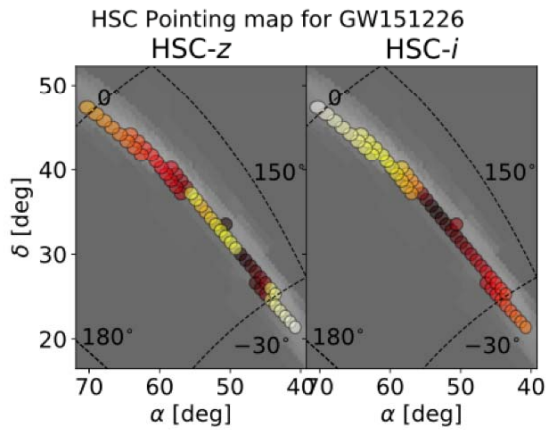
## Limiting mag. of the J-GEM follow-ups with kilonova models



## A Challenge to Identify an Optical Counterpart of the Gravitational Wave Event GW151226 with Hyper Suprime-Cam\*

Yousuke UTSUMI<sup>1</sup>, Nozomu TOMINAGA<sup>2,3</sup>, Masaomi TANAKA<sup>4</sup>, Tomoki MOROKUMA<sup>5</sup>, Michitoshi YOSHIDA<sup>6</sup>, François FINET<sup>6</sup>, Hisanori FURUSAWA<sup>4</sup>, Koji S. KAWABATA<sup>1</sup>, Wei LIU<sup>1,7</sup>, Kazuya MATSUBAYASHI<sup>8</sup>, Yuki MORITANI<sup>3</sup>, Kentaro MOTOHARA<sup>5</sup>, Fumiaki NAKATA<sup>6</sup>, Kouji OHTA<sup>9</sup>, Tsuyoshi TERAI<sup>6</sup>, Makoto UEMURA<sup>1</sup>, Naoki YASUDA<sup>3</sup> and on behalf of the J-GEM collaboration

Utsumi+ submitted !!

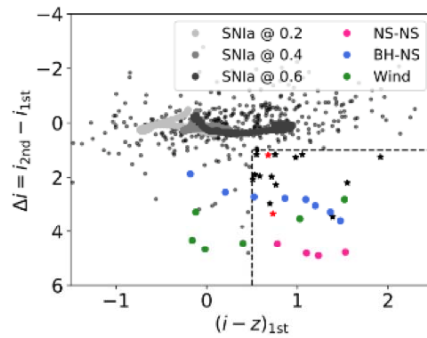


1744 transients identified from 63.5deg<sup>2</sup> imaging with i and z-band in a half night

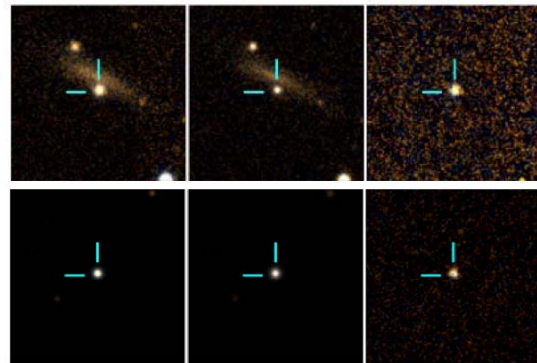
Rapid decline, color cut, association with a galaxy can be used for identification

45

## Decline and color property of OT



## Example of contaminations



# Two papers were published and one paper submitted.

Publications of the Astronomical Society of Japan Advance Access published December 5, 2016



Publ. Astron. Soc. Japan (2016) 68 (4), L9 (1–6)  
doi: 10.1093/pasj/psw061  
Advance Access Publication Date: 2016 June 26  
Letter



Publ. Astron. Soc. Japan (2016) 00 (0), 1–12  
doi: 10.1093/pasj/psw113  
Advance Access Publication Date: 2016 0



Letter

## J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914

Tomoki MOROKUMA<sup>1,\*</sup>, Masaomi TANAKA<sup>2</sup>, Yuichiro ASAKURA<sup>3</sup>, Fumio ABE<sup>3</sup>, Paul J. TRISTRAM<sup>4</sup>, Yousuke UTSUMI<sup>5</sup>, Mamoru DOI<sup>1</sup>, Kenta FUJISAWA<sup>6</sup>, Ryosuke ITOH<sup>7</sup>, Yoichi ITOH<sup>8</sup>, Koji S. KAWABATA<sup>5</sup>, Nobuyuki KAWAI<sup>9</sup>, Daisuke KURODA<sup>10</sup>, Kazuya MATSUBAYASHI<sup>11</sup>, Kentaro MOTOHARA<sup>1</sup>, Katsuhiro L. MURATA<sup>12</sup>, Takahiro NAGAYAMA<sup>13</sup>, Kouji OHTA<sup>11</sup>, Yoshihiko SAITO<sup>9</sup>, Yoichi TAMURA<sup>1</sup>, Nozomu TOMINAGA<sup>14,15</sup>, Makoto UEMURA<sup>5</sup>, Kenshi YANAGISAWA<sup>10</sup>, Yoichi YATSU<sup>9</sup>, and Michitoshi YOSHIDA<sup>5</sup>

## J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226\*

Michitoshi YOSHIDA<sup>1,1</sup>, Yousuke UTSUMI<sup>1</sup>, Nozomu TOMINAGA<sup>2,3</sup>, Tomoki MOROKUMA<sup>4,5</sup>, Masaomi TANAKA<sup>5,3</sup>, Yuichiro ASAKURA<sup>6</sup>, Kazuya MATSUBAYASHI<sup>7</sup>, Kouji OHTA<sup>7</sup>, Fumio ABE<sup>6</sup>, Sho CHIMASU<sup>8</sup>, Hisanori FURUSAWA<sup>5</sup>, Ryosuke ITOH<sup>9,10</sup>, Yoichi ITOH<sup>11</sup>, Yuka KANDA<sup>9</sup>, Koji S. KAWABATA<sup>1</sup>, Miho KAWABATA<sup>9</sup>, Shintaro KOSHIDA<sup>12</sup>, Naoki KOSHIMOTO<sup>13</sup>, Daisuke KURODA<sup>14</sup>, Yuki MORITANI<sup>3</sup>, Kentaro MOTOHARA<sup>4</sup>, Katsuhiro L. MURATA<sup>10</sup>, Takahiro NAGAYAMA<sup>10</sup>, Tatsuya NAKAOKA<sup>9</sup>, Fumiaki NAKATA<sup>12</sup>, Tsubasa NISHIOKA<sup>17</sup>, Yoshihiko SAITO<sup>10</sup>, Tsuyoshi TERAI<sup>12</sup>, Paul J. TRISTRAM<sup>18</sup>, Kenshi YANAGISAWA<sup>14</sup>, Naoki YASUDA<sup>3</sup>, Mamoru DOI<sup>4,19</sup>, Kenta FUJISAWA<sup>20</sup>, Akiko KAWACHI<sup>8</sup>, Nobuyuki KAWAI<sup>10</sup>, Yoichi TAMURA<sup>4</sup>, Makoto UEMURA<sup>1</sup> and Yoichi YATSU<sup>10</sup>

## A Challenge to Identify an Optical Counterpart of the Gravitational Wave Event GW151226 with Hyper Suprime-Cam\*

Yousuke UTSUMI<sup>1</sup>, Nozomu TOMINAGA<sup>2,3</sup>, Masaomi TANAKA<sup>4</sup>, Tomoki MOROKUMA<sup>5</sup>, Michitoshi YOSHIDA<sup>6</sup>, François FINET<sup>6</sup>, Hisanori FURUSAWA<sup>4</sup>, Koji S. KAWABATA<sup>1</sup>, Wei LIU<sup>1,7</sup>, Kazuya MATSUBAYASHI<sup>8</sup>, Yuki MORITANI<sup>3</sup>, Kentaro MOTOHARA<sup>5</sup>, Fumiaki NAKATA<sup>6</sup>, Kouji OHTA<sup>9</sup>, Tsuyoshi TERAI<sup>6</sup>, Makoto UEMURA<sup>1</sup>, Naoki YASUDA<sup>3</sup> and on behalf of the J-GEM collaboration

46

**We tried to do follow-up of GW170104 as well, but the condition was very bad and had no significant results.**

**We have performed follow-up observations for several (more than 2, but less than 10) GW events other than GW150914 and GW151226.**

47

# Summary

# Achievement of A02

- **Develop an optical-infrared-radio observation network for GW transient follow-up**
  1. **Kiso wide-field Camera (Tomo-e) → 80 %**
    - Proto-type camera (8 detectors) was completed and tested.
  2. **OAQ-WFC (wide-field infrared camera) → 90 %**
    - Regular operation with 0.5 deg camera started.
  3. **IFU for the spectrograph of Kyoto 3.8m telescope → 100 %**
    - The hardware was completed. Regular operation started
  4. **50cm robotic telescope in Tibet → 70 %**
    - The telescope was temporally installed at Tibet.
  5. **Establish a transient observation network by utilizing existing facilities → >100 %**
    - Two GW follow-up observations done with J-GEM.

2017/08/24

**Total achievement >90 %**

## Summary

- **Instrumentations of A02 have been done well.**
- **We organized an extended A02 collaboration, J-GEM for GW follow-up and exchanged MOU with the LIGO/Virgo collaboration**
- **Regular follow-up observation started in Sep. 2015 → J-GEM conducted follow-up observations for GW150914 and GW151226 → We learned much from these experiences.**
- **J-GEM is ready for O2 of LIGO started from the end of this November → A few GW alerts are expected by the end of next March.**

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

50

# Sad news

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

51

## **A member of J-GEM, Mr. Yuichiro Asakura (朝倉悠一朗さん) passed away on August 18 (age 26).**

- He was a graduate student (D1) of Nagoya University. He were working very hard in observations and data reduction of MOA-II and B&C telescope data for GW follow-up. We expected that he will be a main member of J-GEM who can lead the project in the future. We miss him.
- We express our deep condolences. May his soul be in peace.

2017/08/24

GW Symposium @ Kyoto

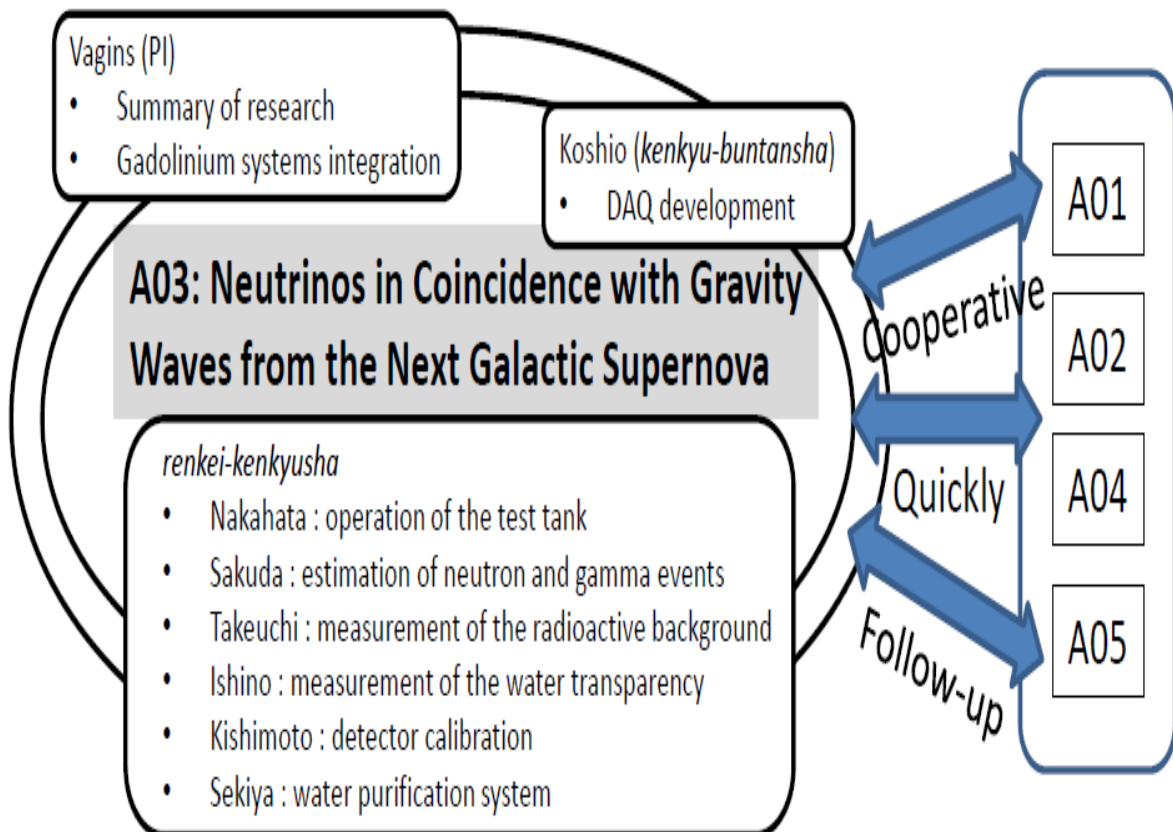
52

# A03 Neutrino Group Accomplishments



Mark Vagins  
Kavli IPMU, UTokyo

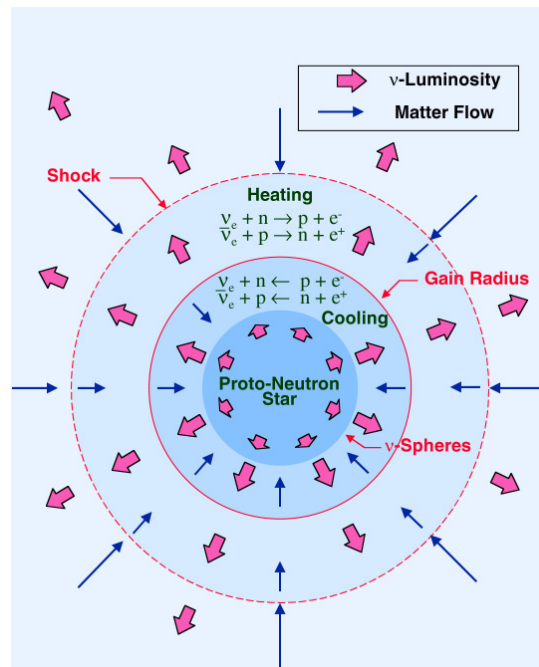
Multi-Messenger Kakenhi Closeout Symposium  
Kyoto August 25, 2017



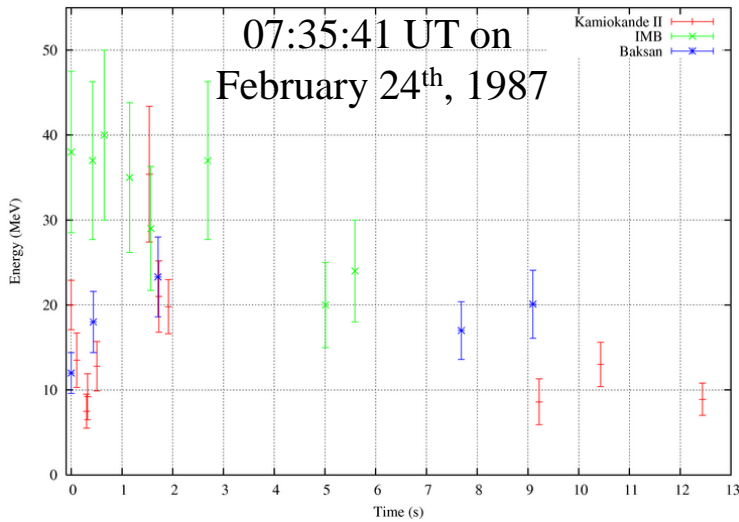
- Special features of SN neutrinos and GW's
  - Provide image of core collapse itself (identical  $t=0$ )
  - Only supernova messengers which travel without attenuation to Earth (dust does not affect signal)
  - Full-galaxy coverage
- What is required for maximum SN  $\nu$  information?
  - Full sensitivity to very nearby explosions (close gap in Super-Kamiokande's galactic SN  $\nu$  coverage)
  - Deconvolution of neutrino flavors via neutron tags
  - Ultrafast alert generation to aid other observations

A core-collapse supernova is a nearly perfect “neutrino bomb”.

Within ten seconds of collapse it releases >98% of its huge energy (equal to  $\sim 10^{46}$  H-bombs/second since the beginning of the universe) as neutrinos.



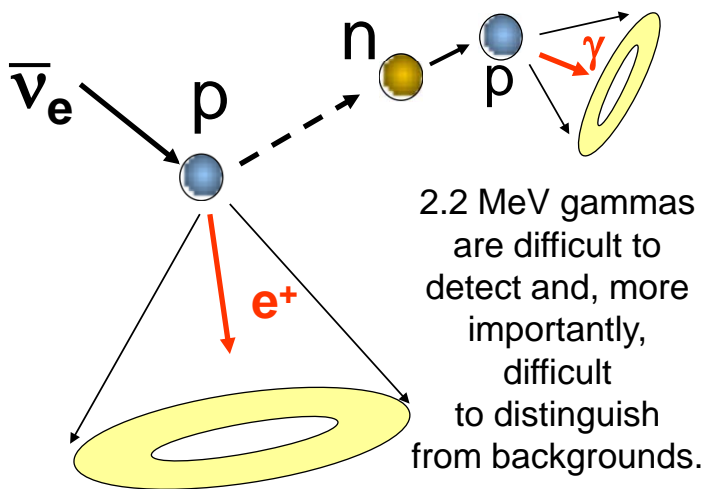
Neutrinos, along with gravitational waves, provide the only possible windows into core collapses' inner dynamics.



One paper every 10 days... for 30 years!

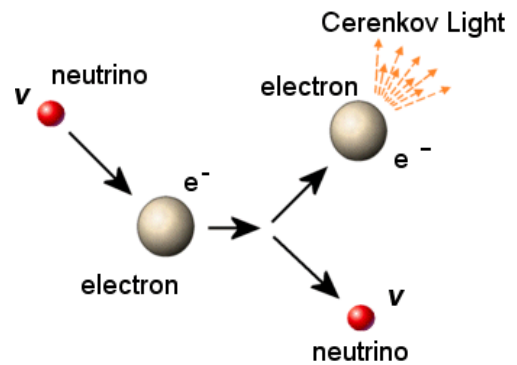
### Inverse Beta Decay

(~80% of events → dominant, but challenging to uniquely identify)

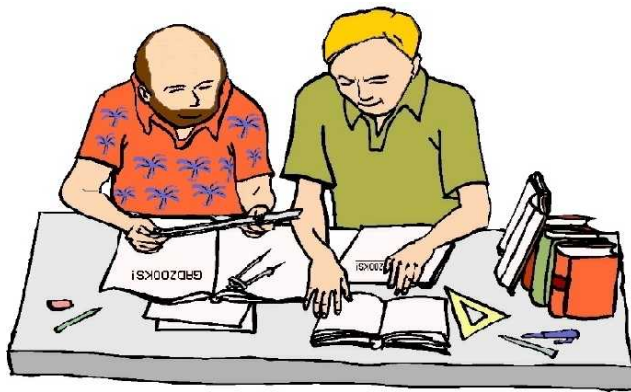


### Elastic Scattering

(~3% → directional)







石の上にも三年



石の上にも十三年！

With the goal of seeing more supernova neutrinos, theorist John Beacom and I wrote the original **GADZOOKS!**

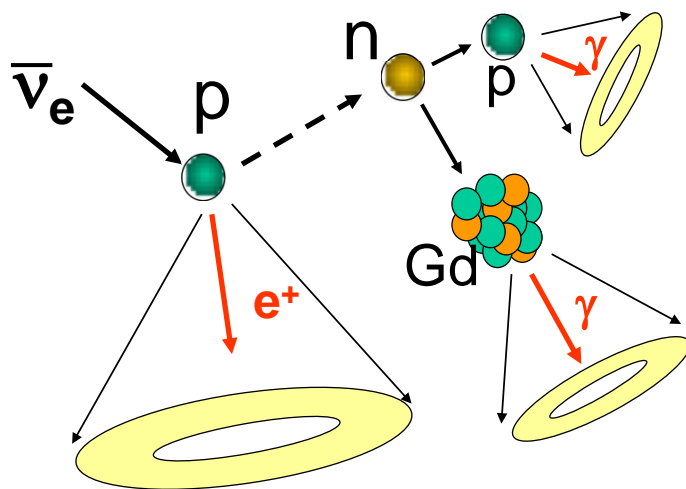
(**G**adolinium **A**ntineutrino **D**etector **Z**ealously **O**utperforming **O**ld **K**amiokande, **S**uper!) paper.

It proposed loading big WC detectors, specifically Super-K, with water soluble gadolinium, and evaluated the physics potential and backgrounds of a giant antineutrino detector.

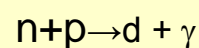
[Beacom and Vagins, *Phys. Rev. Lett.*, **93**:171101, 2004]

(297 citations → one every 16 days for thirteen years)

## Inverse Beta Decay with 0.1% Gadolinium

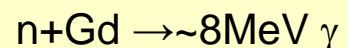


Possibility 1: 10% or less



2.2 MeV  $\gamma$ -ray

Possibility 2: 90% or more

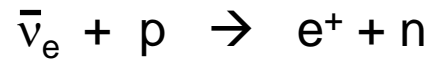
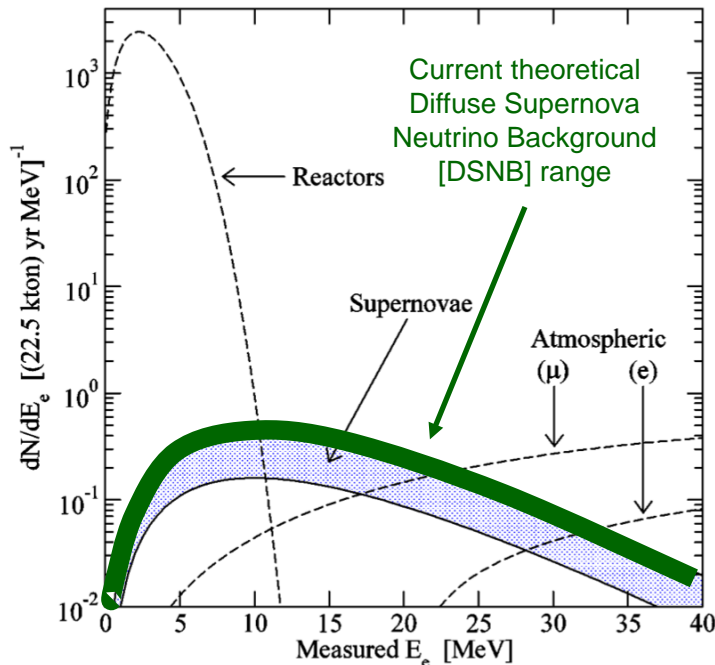


$\Delta T = \sim 30 \mu\text{sec}$

$\bar{\nu}_e$  can be positively identified by delayed coincidence.

**Even a single coincident pair + GW → Supernova!**

Here's what the coincident signals in Super-K with  $\text{GdCl}_3$  or  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$  will look like (energy resolution is applied):



spatial and temporal separation between prompt  $e^+$  Cherenkov light and delayed Gd neutron capture gamma cascade:

$$\lambda \sim 4\text{cm}, \tau \sim 30\mu\text{s}$$

→ A few clean events/yr in Super-K with Gd

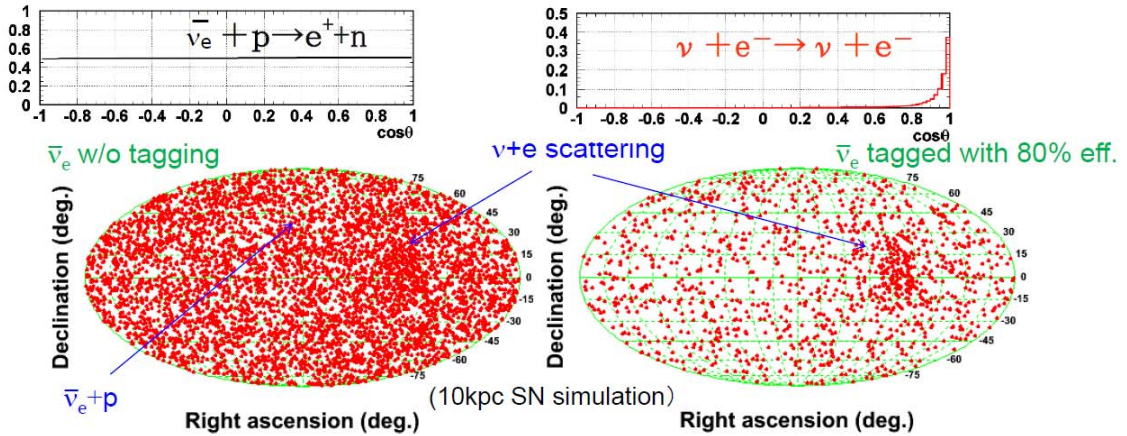
In the case of a galactic supernova, having  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$  in Super-K will provide many important benefits:

- Allows the exact  $\bar{\nu}_e$  flux, energy spectrum, and time profile to be determined via the extraction of a tagged, pure sample of inverse beta events.
- Instantly identifies a burst as genuine via “Gd heartbeat”.
- Doubles the ES pointing accuracy. Error circle cut by 75%.
- Helps to identify the other neutrino signals, especially the weak neutronization burst of  $\nu_e$ .
- Enables a search for very late time black hole formation.
- Provides for very early warning of the most spectacular, nearby explosions so we can be sure not to miss them.

# Supernovas and Gd loading:

## Not only for DSNB

- If  $\bar{\nu}_e$  can be tagged, directional events ( $\nu+e$  scattering events) are enhanced.  
Pointing accuracy should be improved. For 10kpc SN  $\sim 5^\circ \rightarrow \sim 3^\circ$  (@90% C.L.)



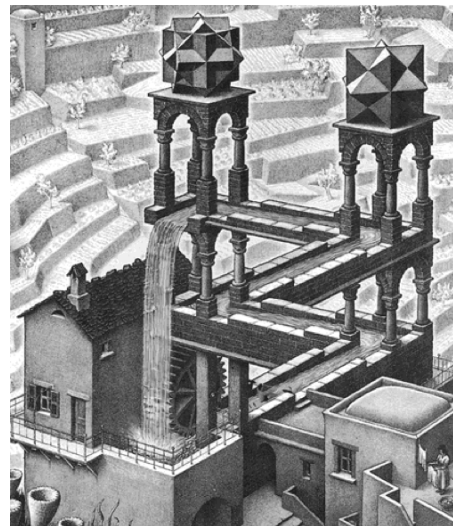
- Sensitive to  $\bar{\nu}_e$  of Si burning phase. 800~2000 events/day for pre-supernova at 200pc

[H. Sekiya @ NEUTRINO 2016 in London]

## The Essential Magic Trick

→ We must keep the water in any Gd-loaded detector perfectly clean...  
*without removing the dissolved Gd.*

→ I've developed a new technology:  
"Molecular Band-Pass Filtration"  
Staged nanofiltration selectively  
retains Gd while removing impurities.



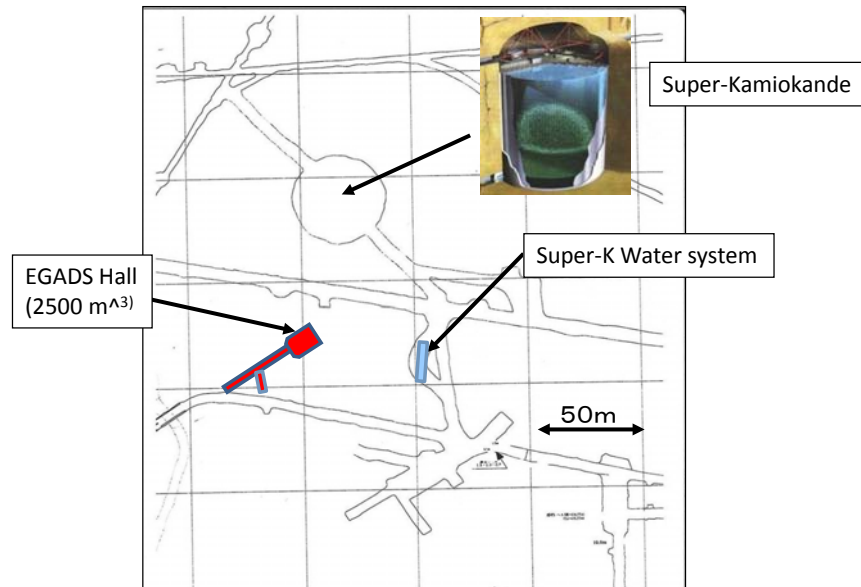
Amazingly, the darn thing works! →

This technology will support a variety of applications, such as:

- Supernova neutrino and proton decay searches
- Remote detection of clandestine fissile material production
- Efficient generation of clean drinking water without electricity

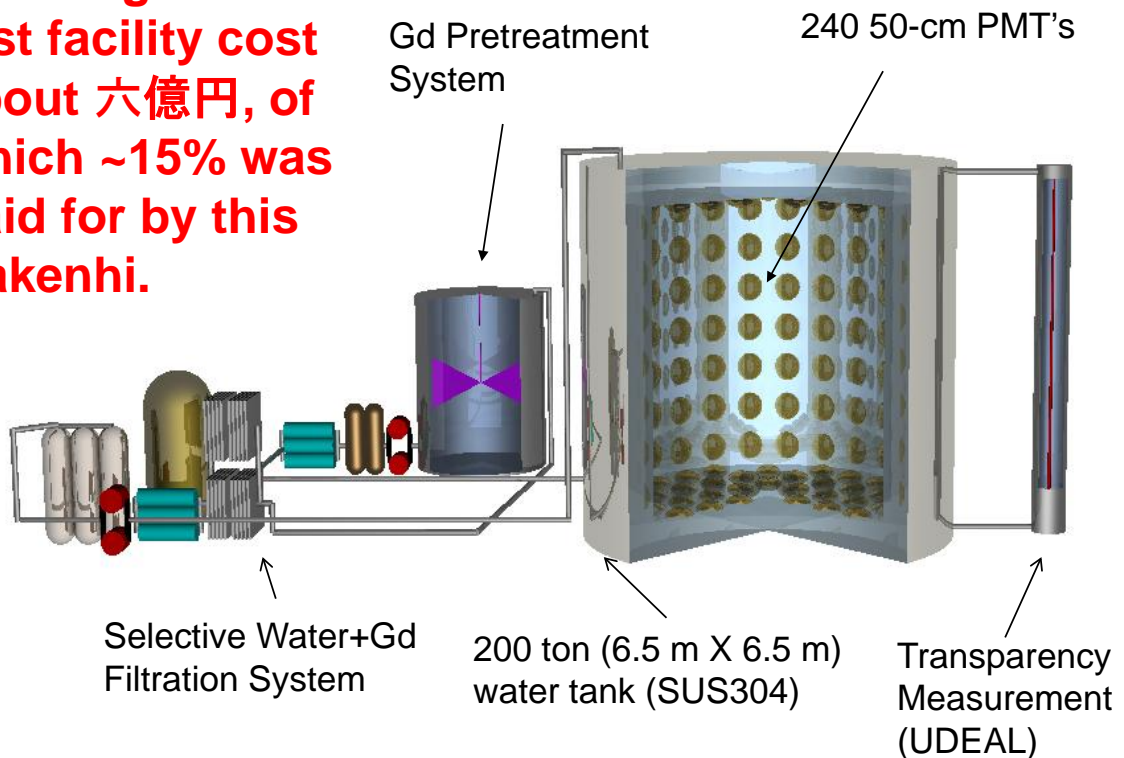
To confirm that Gd loading will work in Super-K, a dedicated Gd test facility was built in the Kamioka mine, complete with its own water filtration system, 50-cm PMT's, and DAQ electronics.

**This 200 ton-scale R&D project is called **EGADS** – Evaluating **G**adolinium's **A**ction on **D**etector **S**ystems.**



## EGADS Facility

**This large-scale test facility cost about 六億円, of which ~15% was paid for by this Kakenhi.**





Worldwide, over \$10,000,000 dollars (not counting salaries) has been spent developing and proving the viability of the Gd-in-water concept.

Adding gadolinium to water Cherenkov detectors can greatly improve their SN sensitivity.

<b>E</b> valuating		<b>E</b> mploying
<b>G</b> adolinium's		<b>G</b> adolinium to
<b>A</b> ction on	➔	<b>A</b> utonomously
<b>D</b> etector		<b>D</b> etect
<b>S</b> ystems		<b>S</b> upernovas

This multimessenger Kakenhi supported the conversion (via upgraded electronics, realtime event reconstruction, etc) of a gadolinium R&D facility into the world's most advanced water-based supernova neutrino detector.

What has been learned will be applied to Gd-loading Super-K.



~70,000  $\nu$  events  
@ Betelgeuse

~30  $\nu$  events  
@ G.C.

Our target: send out  
announcement  
within one second  
of the SN neutrino  
burst's arrival in EGADS!

#### OBSERVING THE NEXT GALACTIC SUPERNOVA

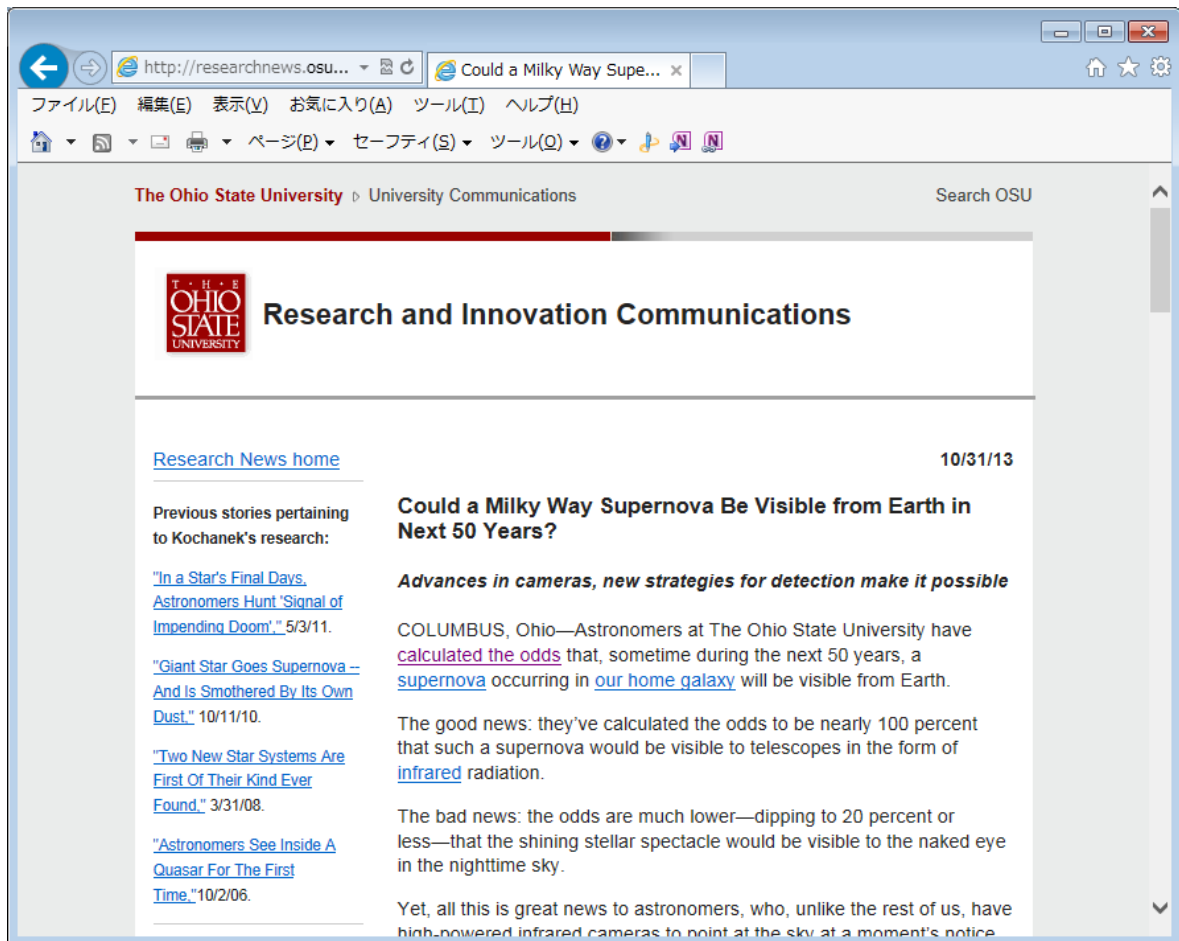
SCOTT M. ADAMS<sup>1</sup>, C.S. KOCHANEK<sup>1,2</sup>, JOHN F. BEACOM<sup>1,2,3</sup>, MARK R. VAGINS<sup>4,5</sup>, & K.Z. STANEK<sup>1,2</sup>  
*Draft version November 1, 2013*

#### ABSTRACT

No supernova in the Milky Way has been observed since the invention of the optical telescope, instruments for other wavelengths, neutrino detectors, or gravitational wave observatories. It would be a tragedy to miss the opportunity to fully characterize the next one. To aid preparations for its observations, we model the distance, extinction, and magnitude probability distributions of a successful Galactic core-collapse supernova (ccSN), its shock breakout radiation, and its massive star progenitor. We find, at very high probability ( $\simeq 100\%$ ), that the next Galactic supernova will easily be detectable in the near-IR and that near-IR photometry of the progenitor star very likely ( $\simeq 92\%$ ) already exists in the 2MASS survey. Most ccSNe (98%) will be easily observed in the optical, but a significant fraction (43%) will lack observations of the progenitor due to a combination of survey sensitivity and confusion. If neutrino detection experiments can quickly disseminate a likely position ( $\sim 3^\circ$ ), we show that a modestly priced IR camera system can probably detect the shock breakout radiation pulse even in daytime (64% for the cheapest design). Neutrino experiments should seriously consider adding such systems, both for their scientific return and as an added and internal layer of protection against false triggers. We find that shock breakouts from failed ccSNe of red supergiants may be more observable than those of successful SNe due to their lower radiation temperatures. We review the process by which neutrinos from a Galactic core-collapse supernova would be detected and announced. We provide new information on the EGADS system and its potential for providing instant neutrino alerts. We also discuss the distance, extinction, and magnitude probability distributions for the next Galactic Type Ia supernova. Based on our modeled observability, we find a Galactic core-collapse supernova rate of  $3.2_{-2.6}^{+7.3}$  per century and a Galactic Type Ia supernova rate of  $1.4_{-0.8}^{+1.4}$  per century for a total Galactic supernova rate of  $4.6_{-2.7}^{+7.4}$  per century is needed to account for the SNe observed over the last millennium, which implies a Galactic star formation rate of  $3.6_{-3.0}^{+8.3} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ .

arXiv:1306.0559v2

[Astrophys.J. 778 \(2013\) 164](#)



OSU put out the press release on October 31<sup>st</sup>, 2013:  
<http://researchnews.osu.edu/archive/supernova50.htm>

The story was rapidly picked up by about 60 major websites including UPI, Nova Now, reddit.com, slashdot, and Red Orbit, and was announced on Nova's official Twitter feed.

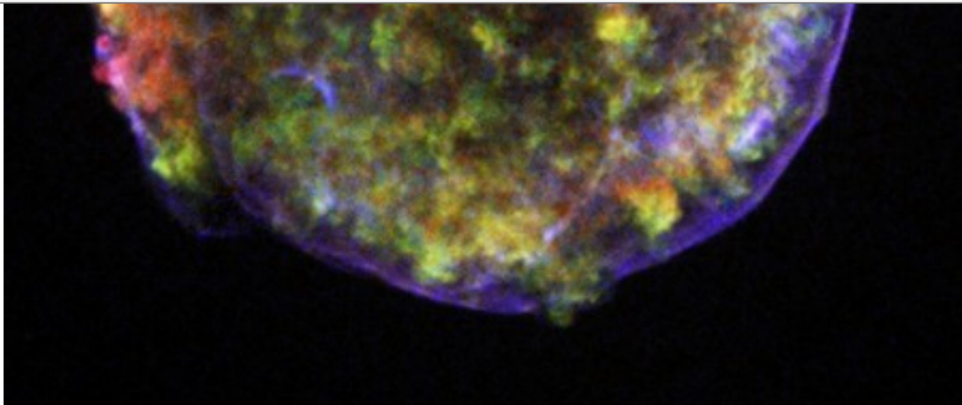
By November 5<sup>th</sup>, 2013, by adding up the sites that report traffic statistics, over 30,000,000 people had clicked through and were learning about our work!

➔ The public are really interested in supernovas! ⬅

http://guardianlv.com/201: Supernova Has 100 Per...

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(I) ヘルプ(H)

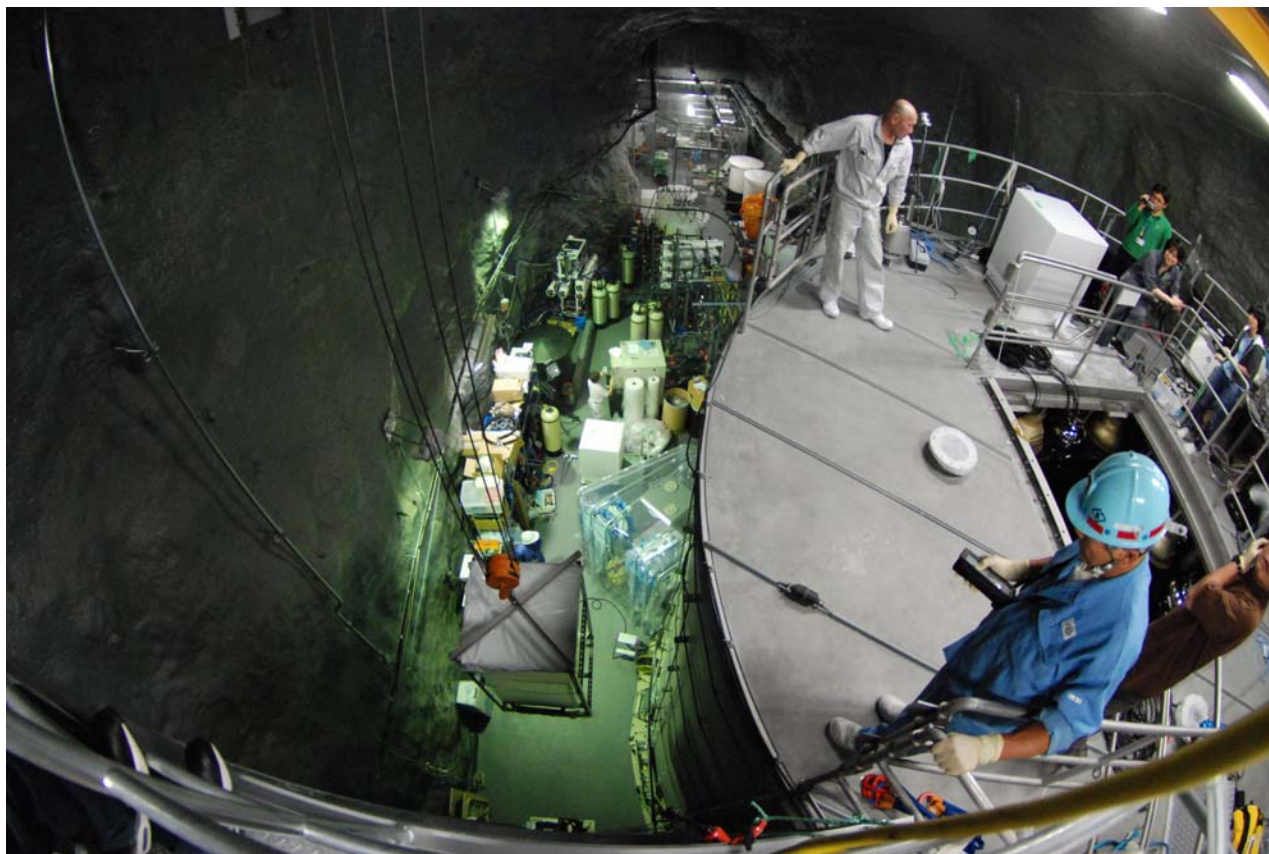
ページ(P) セーフティ(S) ツール(Q)



Getting the chance to see a star go supernova in the Milky Way will reveal a lot of information about what happens in such cases, and some prevailing theories about what happens might be proven to be wrong.

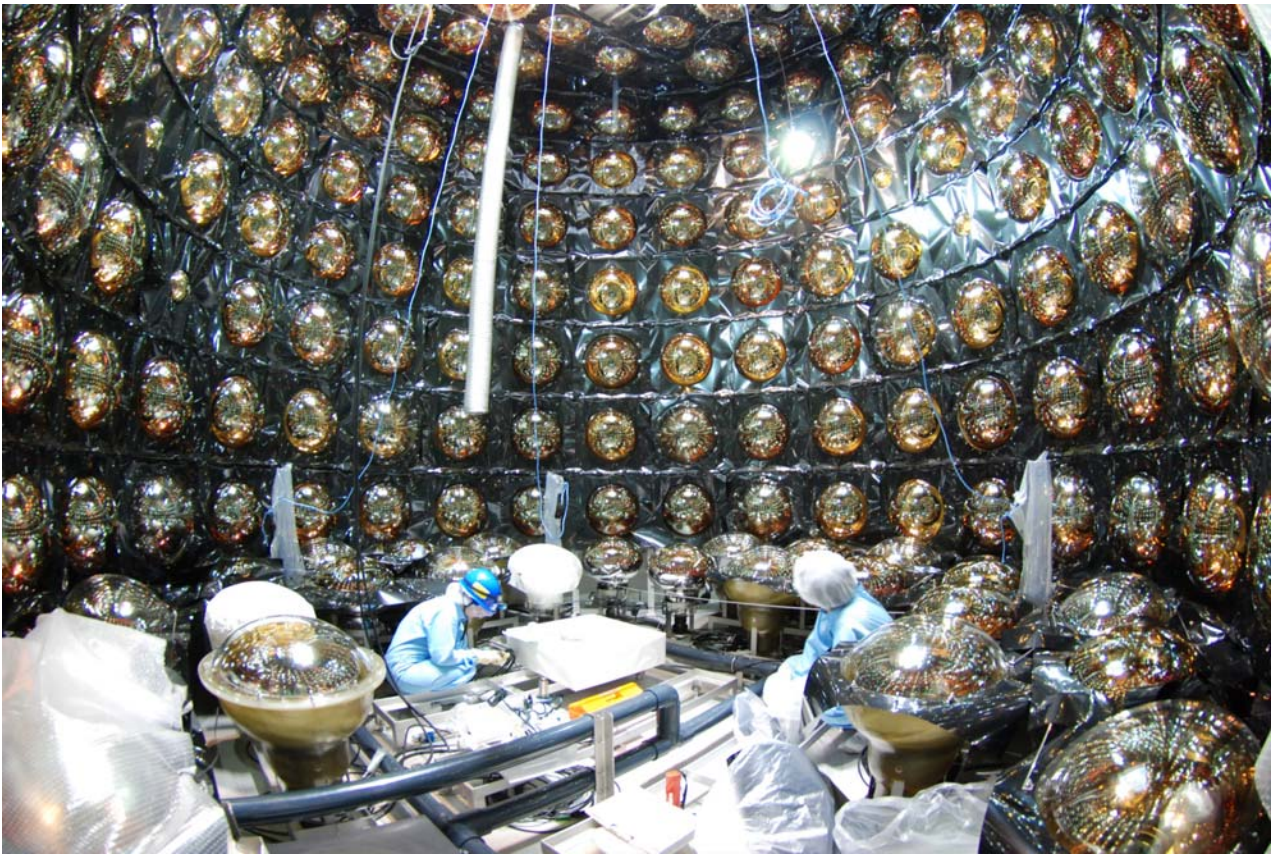
According to Ohio State doctoral student Scott Adams, a supernova within our own galaxy “happens only once or twice a century.” The gravitational wave detectors and neutrino detectors astronomers currently have are only able to measure neutrinos released within our own galaxy.

Super-sensitive neutrino detectors such as the one in Japan or EGADS (a new gadolinium-infused one), upon detecting neutrinos, will issue alerts. They will even tell astronomers which direction the neutrinos are coming from.

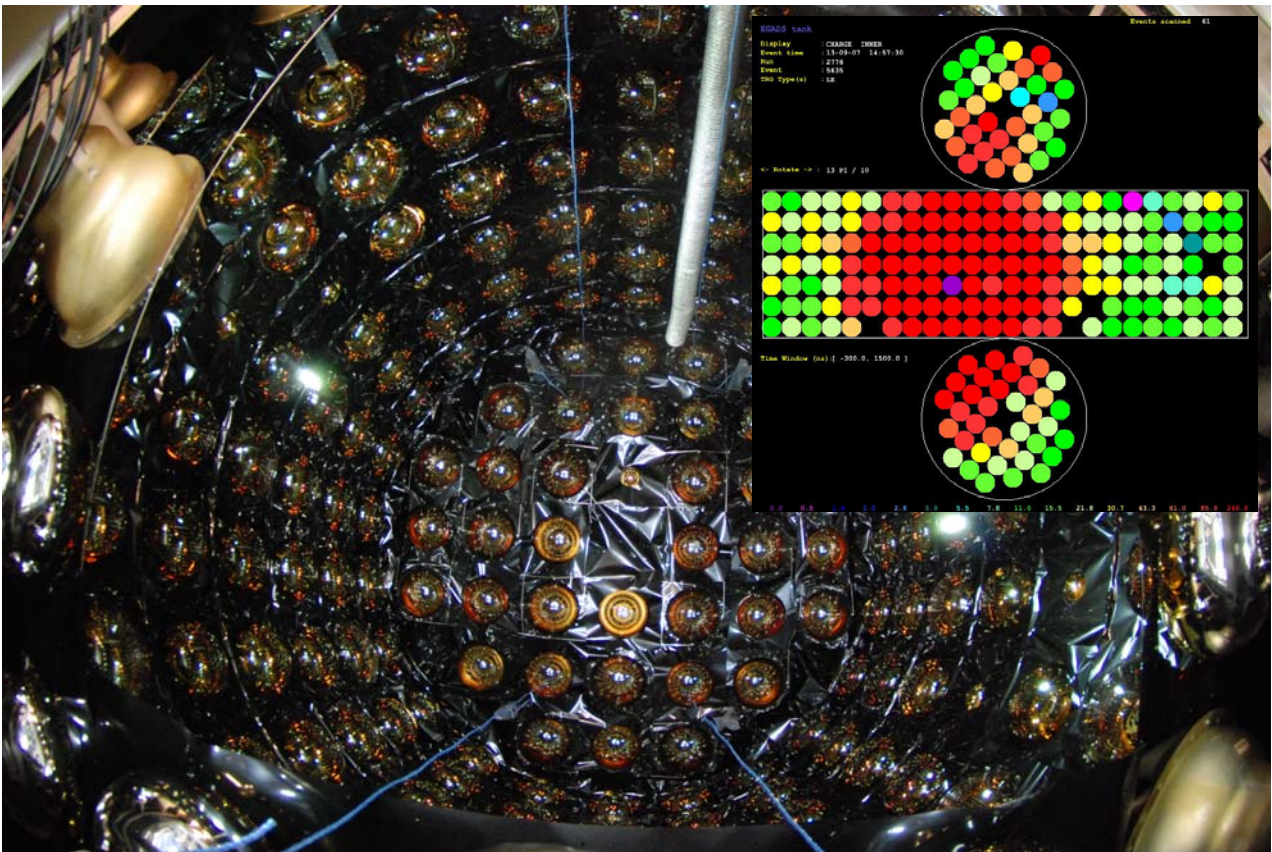


**EGADS PMT installation; August 2013**



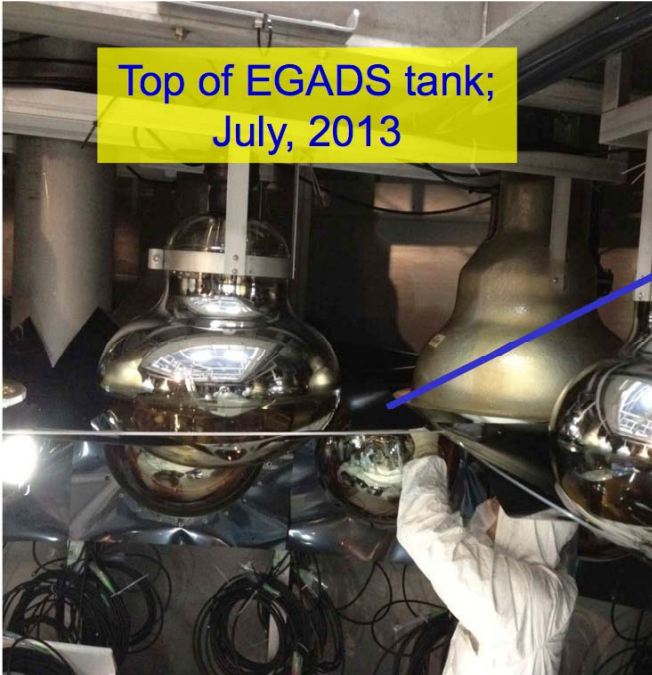


**Working Inside the EGADS Tank; August 2013**



**Looking Down Into the Completed EGADS Detector; August 2013**

**Insert: Event Display of a Downward-Going Cosmic Ray Muon**



May, 2014

We've had just one little problem...



*A trusted Japanese vendor had assured us this structural wire was 304 stainless steel based on the manufacturing company's claims, but it most certainly was not. Rust went everywhere inside the tank!*

*This wire also has a core made of Nylon 6: not designed for water.*

## The road to recovery

Having discovered this problem in April 2014, we then spent the next five months cleaning up the EGADS detector.



## The road to recovery



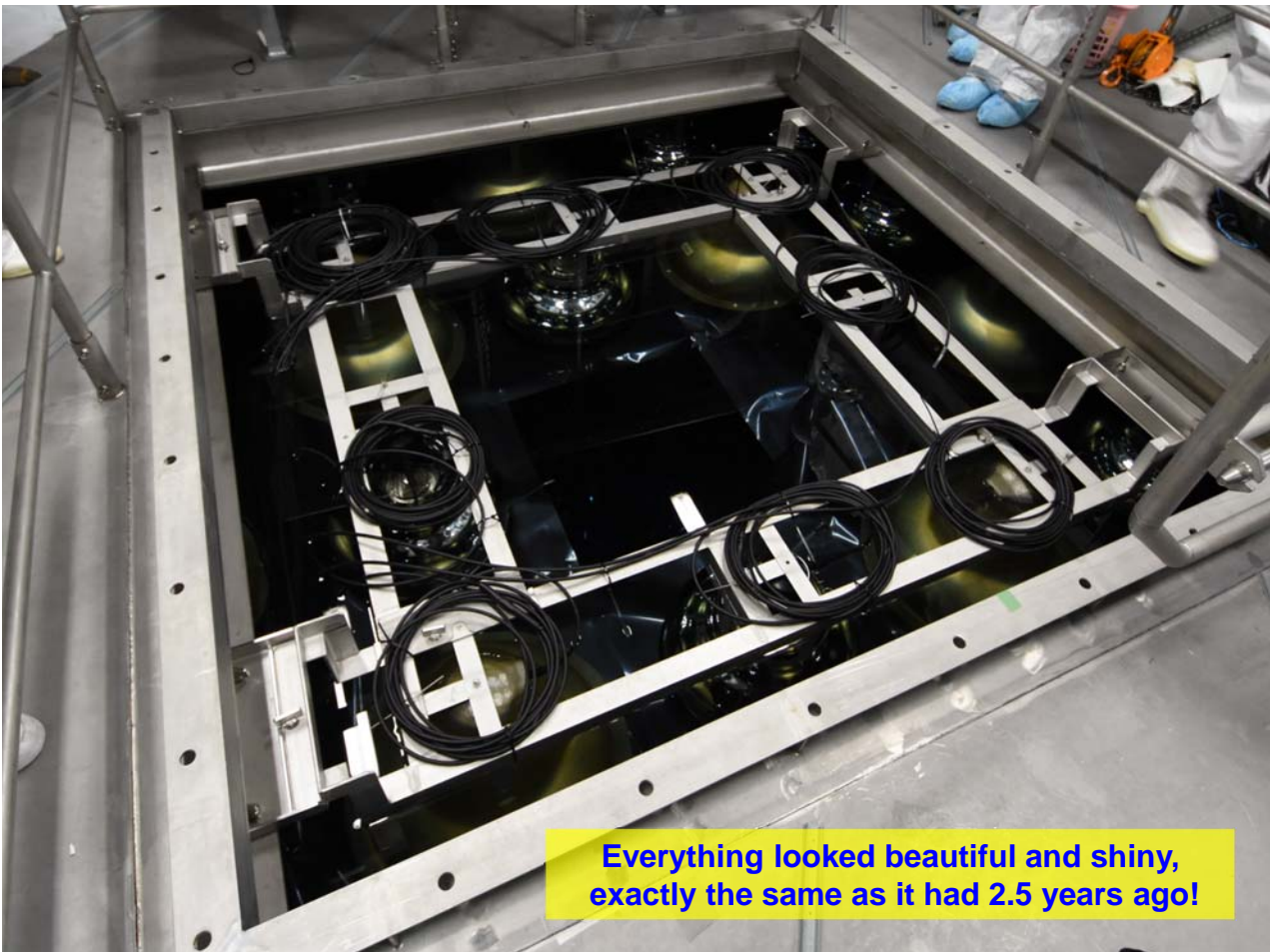
Sept. 18, 2014







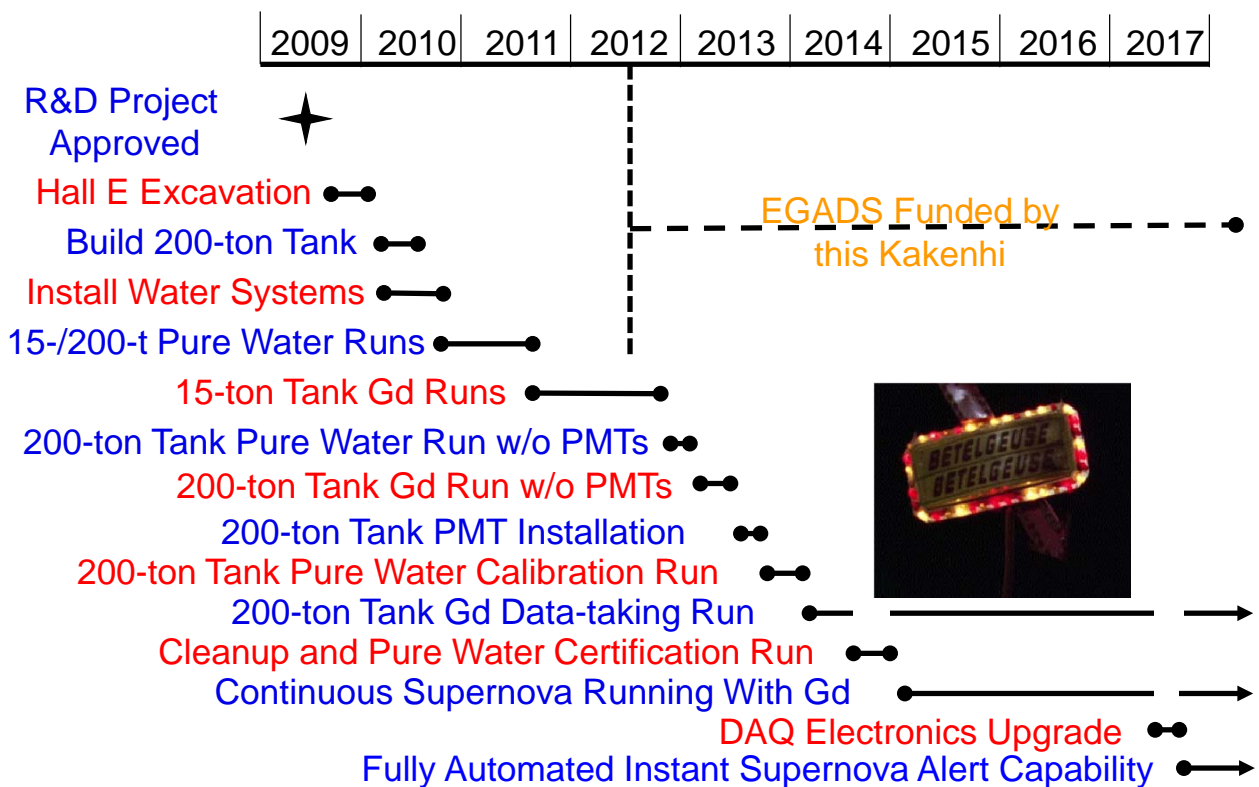
**On May 16<sup>th</sup>, 2017, we opened the EGADS 200-ton tank to recover an 8-inch photodetector. This was to be our first look inside since October 2014.**



**Everything looked beautiful and shiny, exactly the same as it had 2.5 years ago!**



## An EGADS timeline:

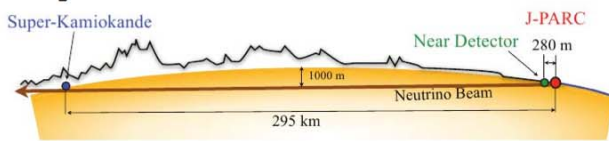


After years of testing and study  
 – culminating in these powerful EGADS results –  
 no technical showstoppers have been encountered. And so...

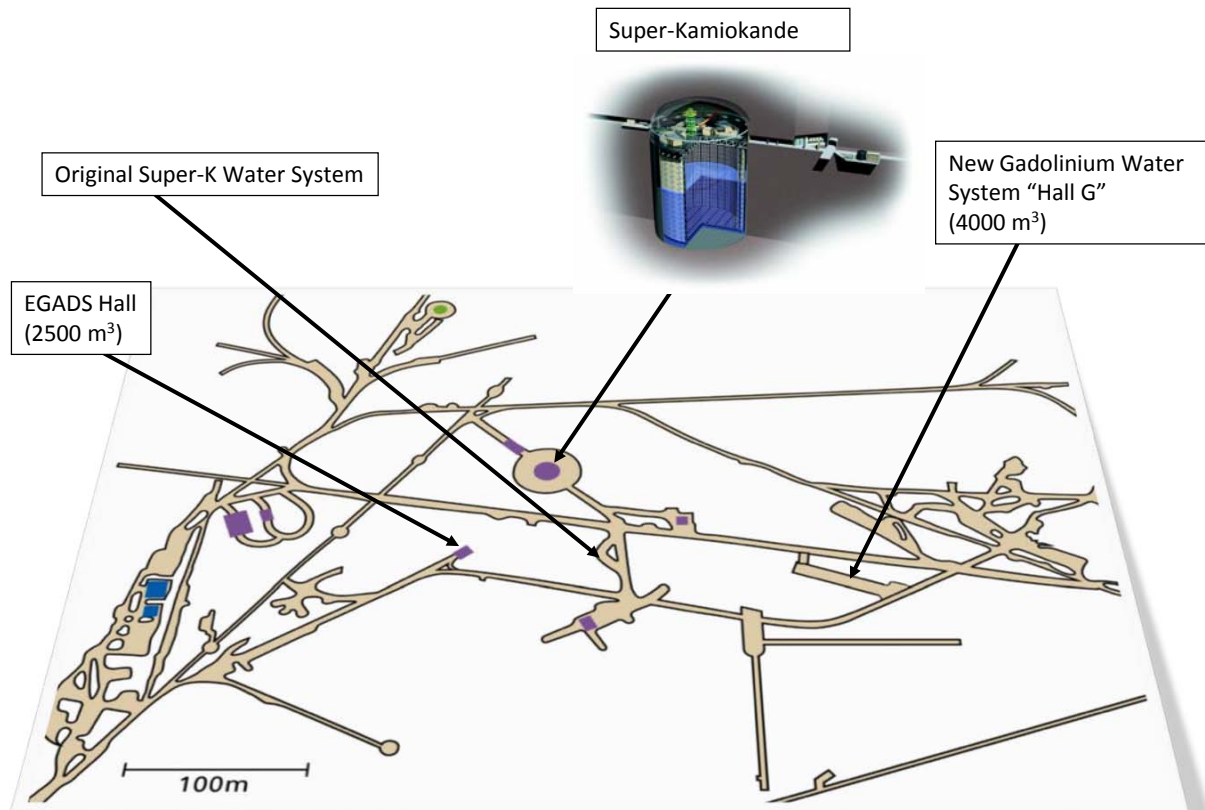
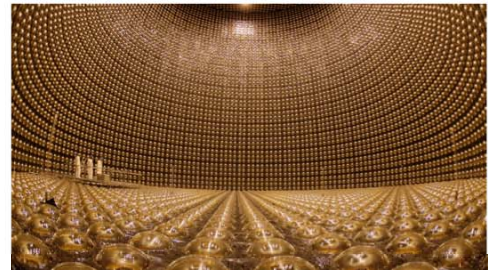
June 27, 2015: The Super-Kamiokande Collaboration approved the addition of gadolinium to the detector, pending discussions with T2K.



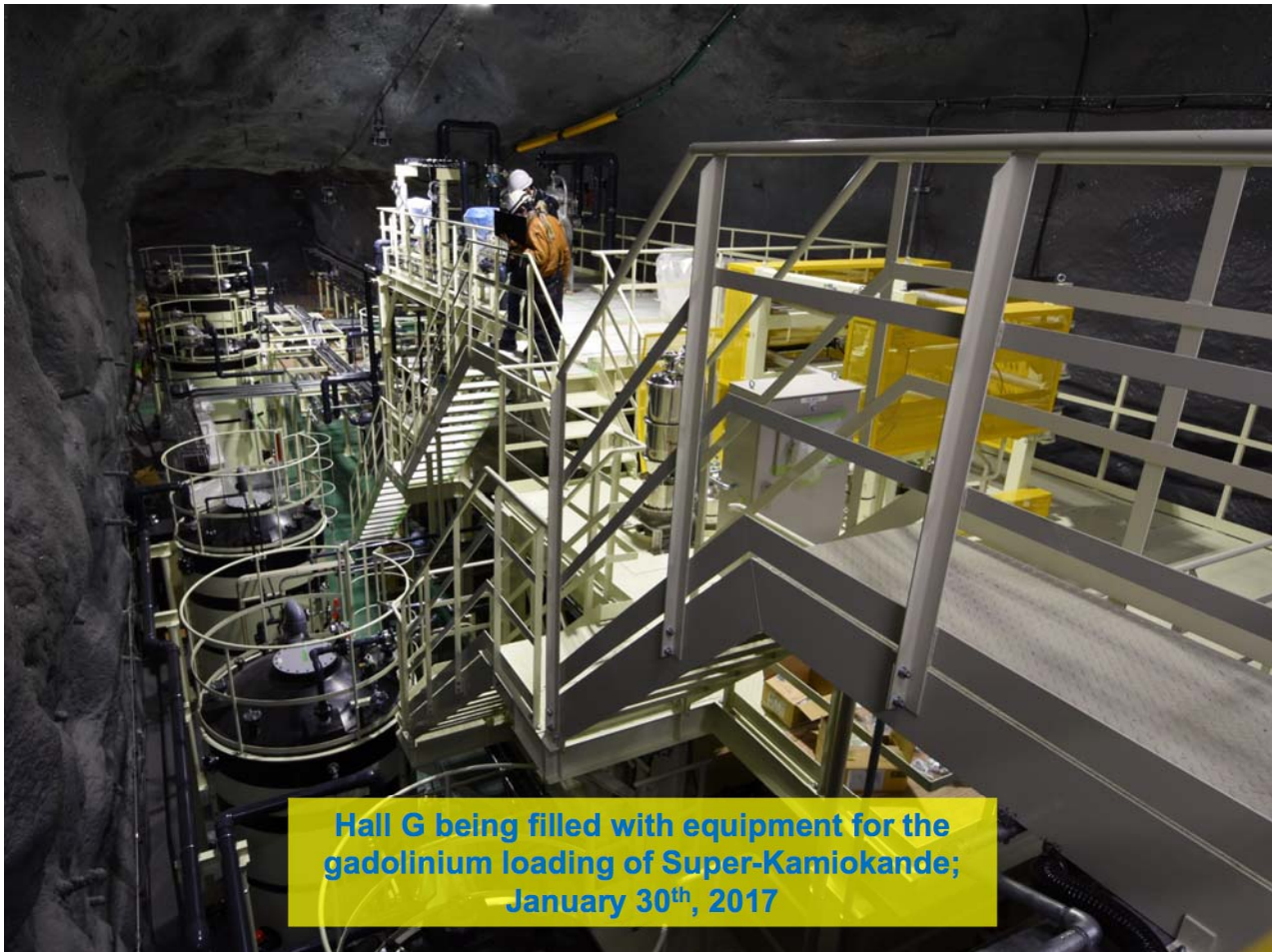
January 30, 2016: The T2K Collaboration approved addition of gadolinium to Super-Kamiokande, with the precise timing to be jointly determined based on the needs of both projects.



July 26, 2017: The official start time of draining the SK tank to prepare for Gd loading is decided to be June 1, 2018.

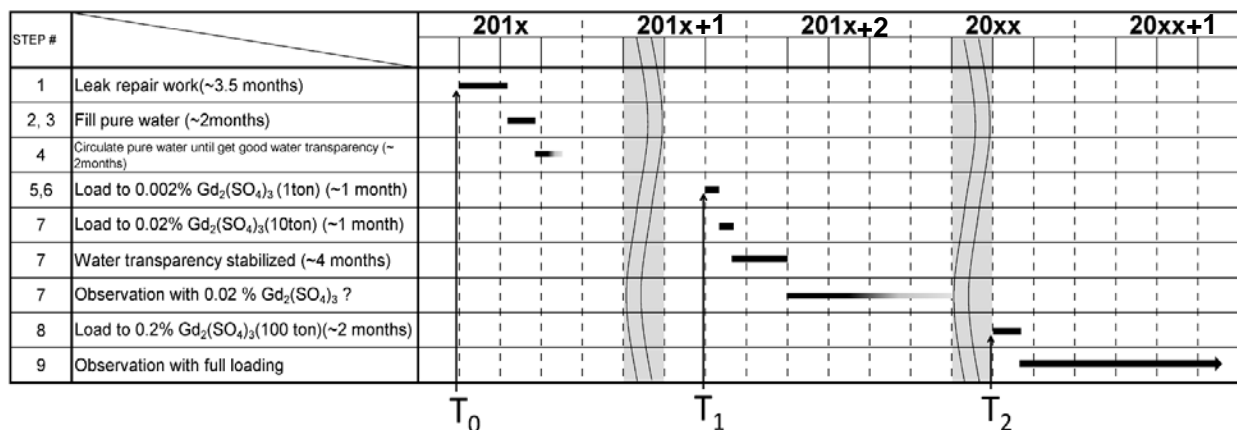


**The Kamioka Observatory in the Mozumi Mine**



## Timeline for Gadolinium in Super-Kamiokande

It is now official that  $x=8$



$T_0$  = June 1<sup>st</sup>, 2018: Start refurbishment of SK detector

$T_1$  = Add first gadolinium sulfate (0.000% -> 0.002% → 0.020%)

$T_2$  = Full loading of gadolinium sulfate (0.20%)



## **A03 Neutrino Group Accomplishments**

→ Since April 2015, EGADS has been fully loaded with the target goal of 0.2% (390.6 kg) of  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ , and operating as the world's most advanced water-based supernova neutrino detector.

→ The detector is now live ~100% of the time with complete Milky Way coverage for neutrinos from core collapse supernova explosions. With upgraded DAQ, fully automated alerts should go live within the year.

→ Based on the A03 group's work with EGADS, both the Super-K and T2K Collaborations have formally approved the plan to add Gd to Super-K. The in-tank work will start on June 1<sup>st</sup>, 2018, with the first Gd being dissolved in the refurbished detector as early as 2019.

→ EGADS's proven, Gd-capable water systems are already being scaled up for use in Super-Kamiokande. A large new underground space ("Hall G") has been prepared and is rapidly being filled with equipment in anticipation of the Gd loading of Super-K.

→ EGADS will continue to run as an advanced technology supernova neutrino detector, certainly until SK is also Gd-loaded and collecting DSNB data for the next Innovative Area Kakenhi.

Summary of A04 :

"Research on Data Analysis of Gravitational Wave Searches Link up with Various Observations"

N.Kanda (Osaka City U.)  
on behalf of A04 group

for KAGRA results, on behalf of KAGRA collaboration  
2017/8/25

1

## Organization: A04 Members

### Core staffs

- N.Kanda (Osaka City U.) : Leader, project, computer system construction
- H.Tagoshi (Osaka City U.) : Pipeline coordinate, compact binary coalescence search
- K.Oohara (Niigata U.) : Software and hardware coordinate, Hilbert-Huang Transform (HHT).
- H.Takahashi (Nagaoka U. Tech.) : HHT, grid data transfer
- Y.Itoh (RESCEU, U. Tokyo) : Continuous wave search, grid

### Cooperative researchers

- A.Araya (Earthquake R.I, U.Tokyo) : Time series analysis
- D.Tatsumi (NAOJ) : non-gauss noise

### Post-docs

- K.Hayama (Osaka City U.) : Burst pipeline, GW detector characterization → moved to ICRR at 2016.3
- K.Ueno (Osaka U. → Osaka City U.) : Low latency pipeline for CBC → moved to UWM at 2016.4
- T.Narikawa (Osaka U. → Osaka City U.) : CBC analysis, Bi-gravity and testing GR with GW
- M.Kaneyama (Osaka City U.) : HHT, transient searches, determination of sky location
- N.Uchikata (Osaka City U.) : BH quasi-normal mode, ring down waveform study
- S.Tsuchida (Osaka City U.) : Dark matter on a laser interferometer, Burst waveform search

### Post-docs (JSPS PD)

- T.Yokozawa (Osaka City U.) : Burst pipeline, GW-nu, KAGRA hardware injection

### Students of KAGRA data group

- Y.Hiranuma, H.Yamamoto(→ICRR), H.Yuzurihara, K.Eda, K.Tanaka, K.Ono, T.Wakamatsu, A.Miyamoto, M.Nakano, K.Miyake, K.Sakai, Y.Sasaki, S.Ueki, T.Kaji, Y.Kitaoka

(H.27-28)

K.Somiya (Titech) : “ブラックホール準固有振動がもたらす重力波の観測”

S.Hirobayashi (Toyama U.): “超解析精度技術を応用した重力波の解析システムの開発とその評価に関する研究”

S.Mano (ISM) : “重力波データ解析における統計的方法論の整備”

(H25-26)

J.Yokoyama (Tokyo U.): “非ガウスノイズを取り入れた重力波データ解析方法の研究”

S.Hirobayashi (Toyama U.): “重力波に関する新知見を導き出す超高精度解析技術とその高速計算組み込み技術の開発”

D.Tasumi (NAOJ): “低温干渉計型重力波検出器における突発性雑音低減”

## Main target of A04 group

### Low latency GW event analysis

- Construction of data analysis environment  
computer hardware  
our own software
- Achieve quick data transfer from KAGRA
- Construct GW search pipeline

### Various studies on GW and its sources

- GW events may give us knowledges: origin of its sources, physics on strong gravity field, etc.

**Organize GW analysis group in Japan, especially with a focus on human resources (i.e. young researchers!)**

A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究  
Research on Data Analysis of Gravitational Wave Searches Link up with Various Observations

科研費  
KAKENHI

# Milestones

## Construction of Data Analysis System

- Data Transfer and Storage
- Calculation Power

## Low Latency Search

- Develop Event Search Pipelines
- Alert System

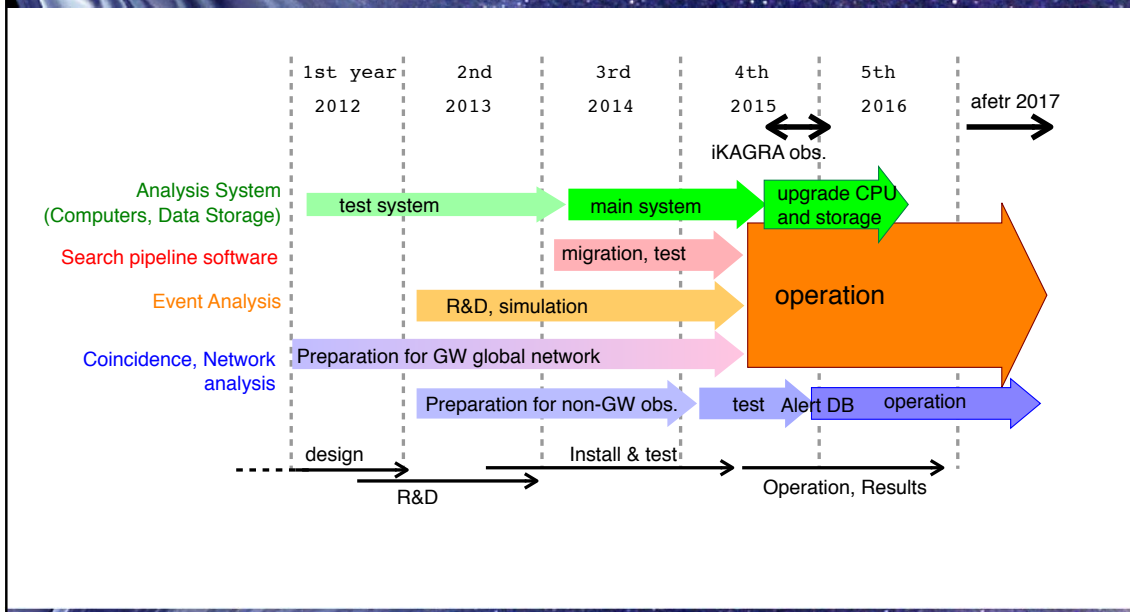
## Analysis for More Knowledge of GW Sources

- with GW
- *with non-GW obs.*

A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究  
Research on Data Analysis of Gravitational Wave Searches Link up with Various Observations

科研費  
KAKENHI

# Schedule of A04 Research Group



2012

KAGRA tunnel excavation started at May.

2013

2014

KAGRA tunnel excavation finished.

iKAGRA data transfer system hardware

2015

GWPAW2015 at Osaka

LIGO O1

Discovery of GW from BBH

2016

GW150914 was opened.

iKAGRA test run (KAGRA's first run)

2017

LIGO O2 , Virgo joint O2 in August

A04 topics

- introduce 1st computing system and VPN connection

- 4 post-docs are employed.

- "boot camp"

- KAGALI coding style guide

- Upgrade of computers for iKAGRA

- iKAGRA data transfer

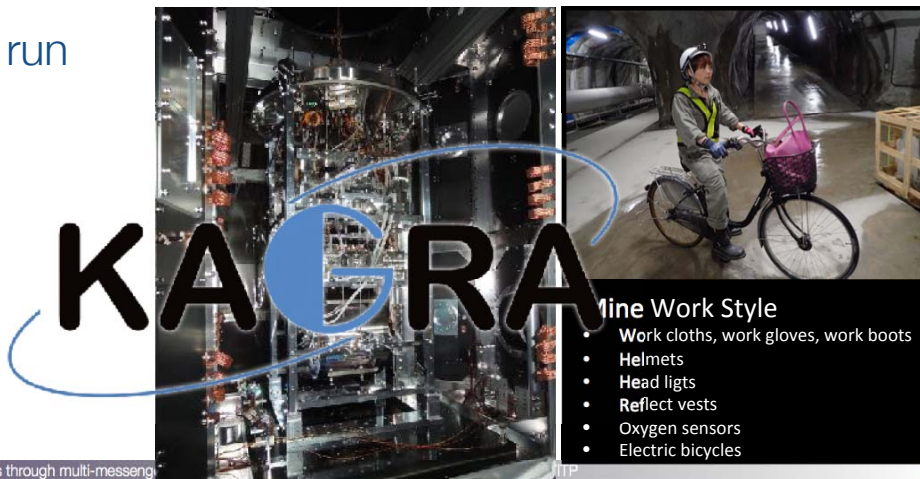
- GW searches and studies using iKAGRA data

# KAGRA

A04 is not completely included in KAGRA, but KAGRA's progress have been most important boundary for A04.

- Construction of 1st term of site, facility of KAGRA had completed.

- iKAGRA test run



### Safe Work Style

- Work cloths, work gloves, work boots
- Helmets
- Head lights
- Reflect vests
- Oxygen sensors
- Electric bicycles

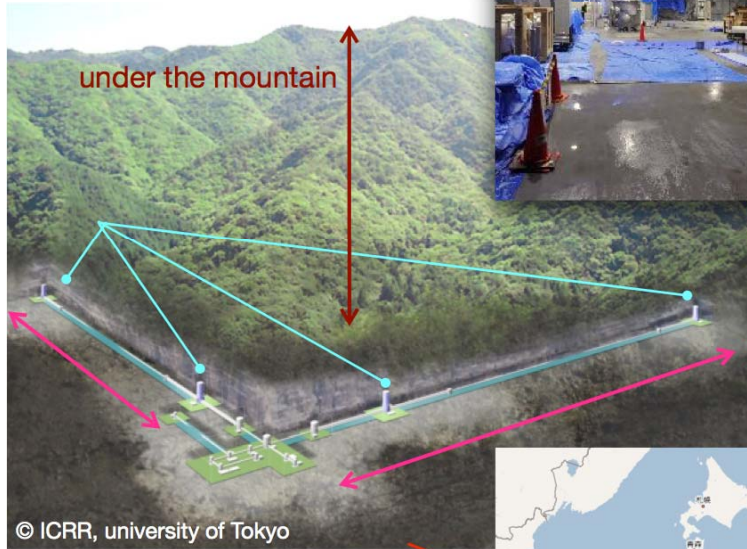
# KAGRA



~280 persons (>80 affiliations)

- ▶ Underground
  - ▶ Kamioka mine
  - ▶ **Silent and Stable**
- ▶ Cryogenic mirror
  - ▶ 20K
  - ▶ **Sapphire substrate**
- ▶ 3km baseline

- ▶ Schedule
  - ▶ 2010 : Construction start
  - ▶ early 2016 : 1st operation in normal temperature
  - ▶ early 2018 : cryogenic operation



© ICRR, university of Tokyo



Tilt: 1/300

★ Water drain point

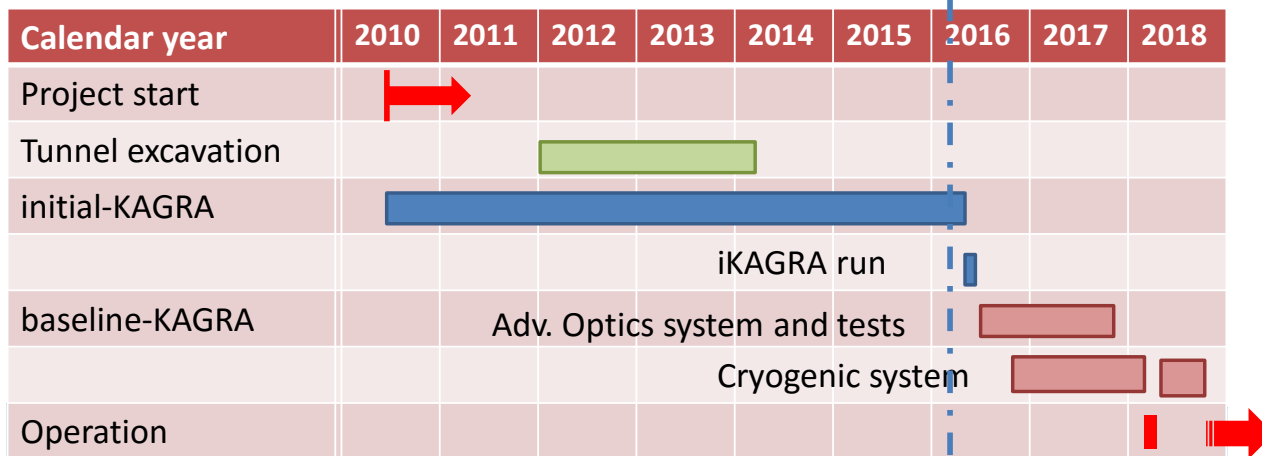
### Location of Center (BS)

- latitude: 36.41°N, longitude: 137.31°
- Y arm direction: 28.31 deg. from the North.
- Height from the sea level : about 372m.
- 2 entrances for the experiment room.
- Center, Xend, Yend are inside more than 200m from the surface of the mountain.
- Tunnel floor is tilted by 1/300 for natural water drainage.
- Height of the Xend: 382.095m.
- Height of the Yend: 362.928m.

3 470m

by T.Uchiyama

# Schedule



## iKAGRA

- We had test run at March and April 2016.

## bKAGRA

- Advanced optics and cryogenic system are in progress.

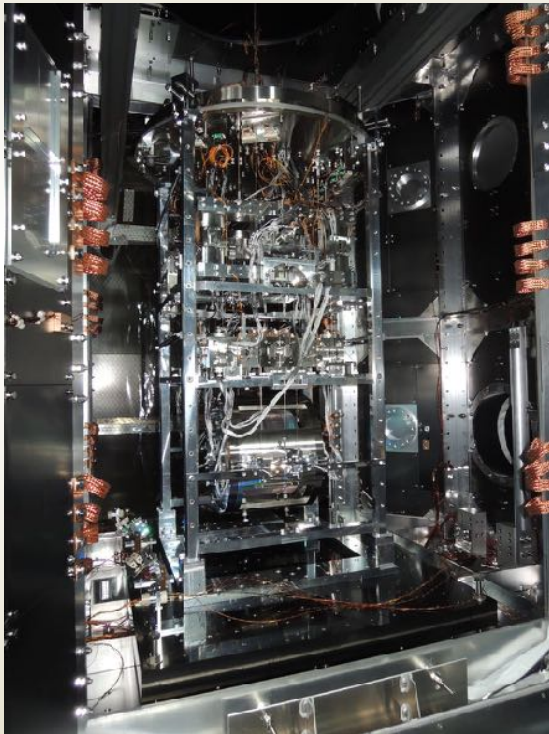
- Cryogenic operation ~end of FY2017

11



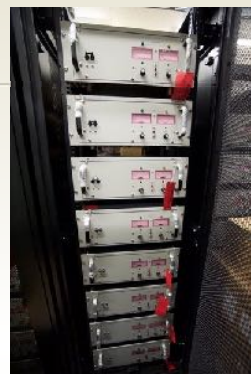
# Cryo-Payload

Cryo-Payload installed,  
Also sapphire test bulk is cooling-down ~15K.

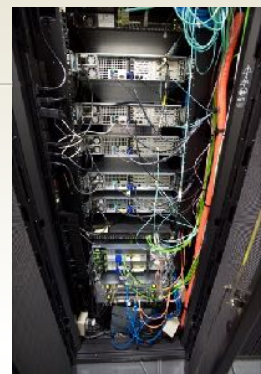


13

# Electronics hut



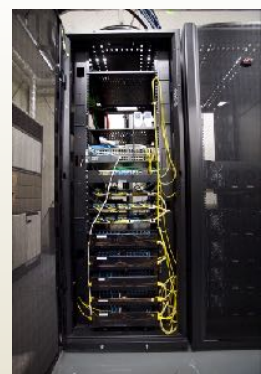
DC power supply



frame writer -> transfer



I/O interface



Fiber connection from/to the surface

The electronics and computer hut  
inside the KAGRA tunnel

14



# Control room

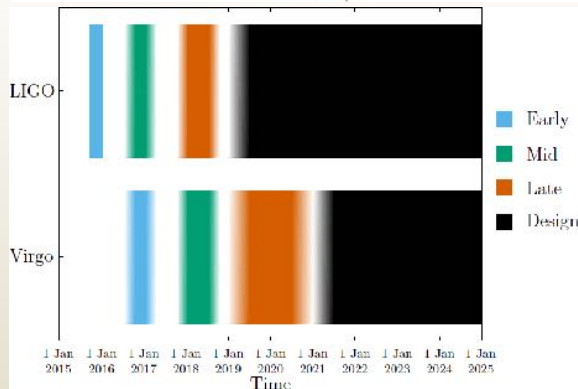
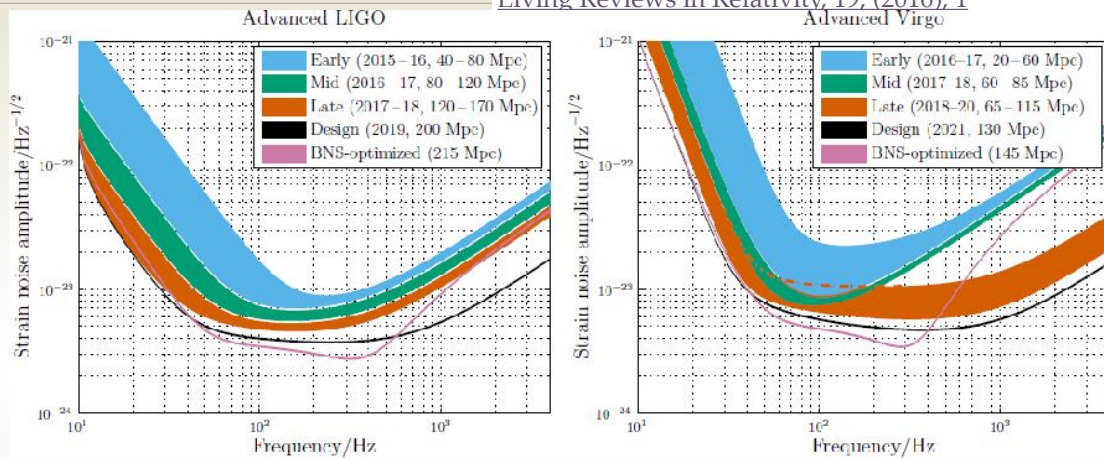
Control room, surface building at Kamioka



Spool data system in next room

# Observation Scenario

Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo  
 Living Reviews in Relativity, 19, (2016), 1  
 Advanced Virgo



(In next update of this documents. KAGRA will appear in these figures.)

KAGRA had first test run at the early spring 2016!

### Period

1st run: Mar.25 - Mar.31, 2016

2nd run: Apr.11 - Apr.25, 2016

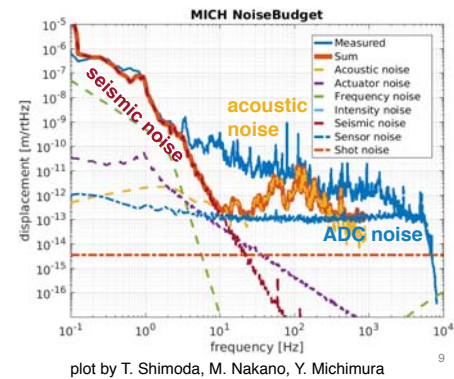
### 3km Michelson interferometer

In this test run, we did not insist on the sensitivity itself, but the 'end-to-end' of the system achieved its operation.

We also had observational/expert 'shifts' during the operation.

- limited by **seismic noise** below  $\sim 4$  Hz, **acoustic/fan noise** at around 100 Hz, **ADC noise** above  $\sim 3$  kHz
- $\sim 3e-15$  /rtHz @ 100 Hz
- $\sim 4.2$  pc for 1.4M-1.4M NS-NS (0.77 pc for 1st run)

## Sensitivity



## Construction of GW analysis

### Computing system

### Low latency data transfer

### KAGRA data

full data :  $\sim 46$  TB from March 2016 to August 2017

$h(t)$  : 756GB of iKAGRA strain data

### Event search pipelines

CBC

Burst

Continuous

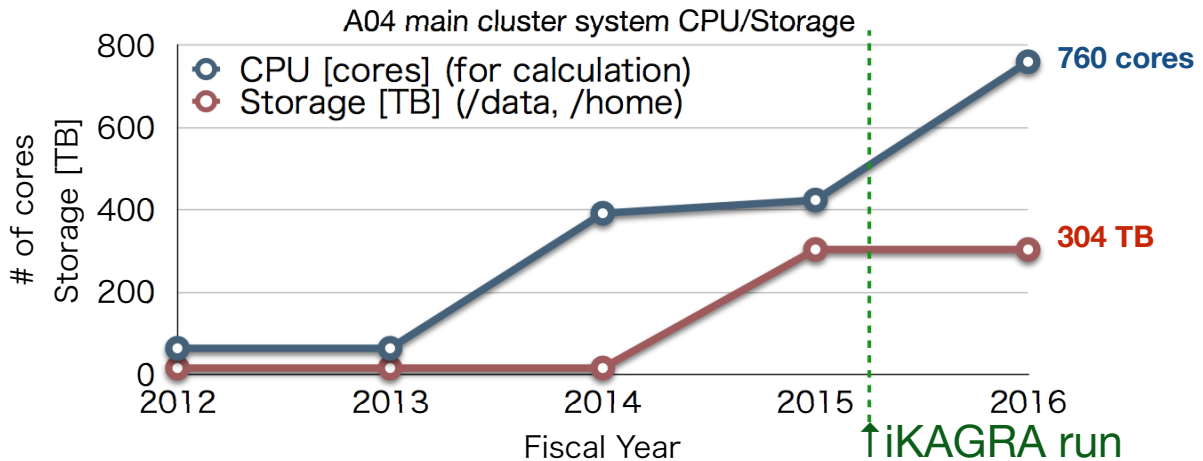
### KAGALI (Software library)

### Alert system

## We introduce VPN for A04 clusters

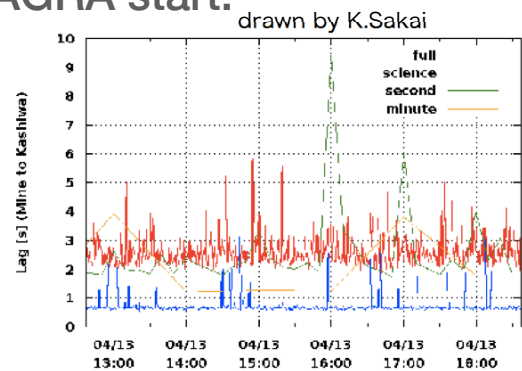
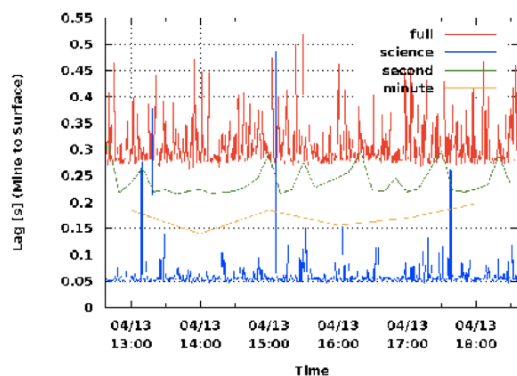
- unified environment between collaborator sites
- redundant system

The idea and test results of VPN were feedback to KAGRA data system.



## Low latency data transfer

KAGRA data transfer has been working since February 2016, just before iKAGRA start.



KAGRA tunnel → surface building → Kashiwa/Osaka

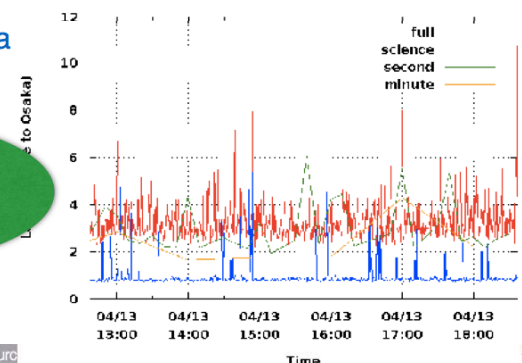
Transfer latency for full data

Tunnel → surface

Tunnel → ICRF Kashiwa: ~2.5 sec

Tunnel → Osaka City U.: ~3 sec

3sec from KAGRA to A04 cluster





iKAGRA data that derived from the digital control system of KAGRA were transferred from the tunnel (interferometer site) to

ICRR Kashiwa campus of U of Tokyo (in real time)

Osaka City University (in real time)

Academia Sinica at Taiwan (full/continuous mirroring)

KISTI at Korea (iKAGRA data mirroring)

RESCEU Tokyo U. (processed data set of calibrated signal)

Niigata U. (proc data)

Nagaoka U. of Technology (proc data)

## Event searches

### Compact Binary Coalescence

→ Tagoshi's talk

### Burst GW

### Continuous Wave

→ Itoh's talk

### Novel method

Hiibert-Huang Transformation (HHT)

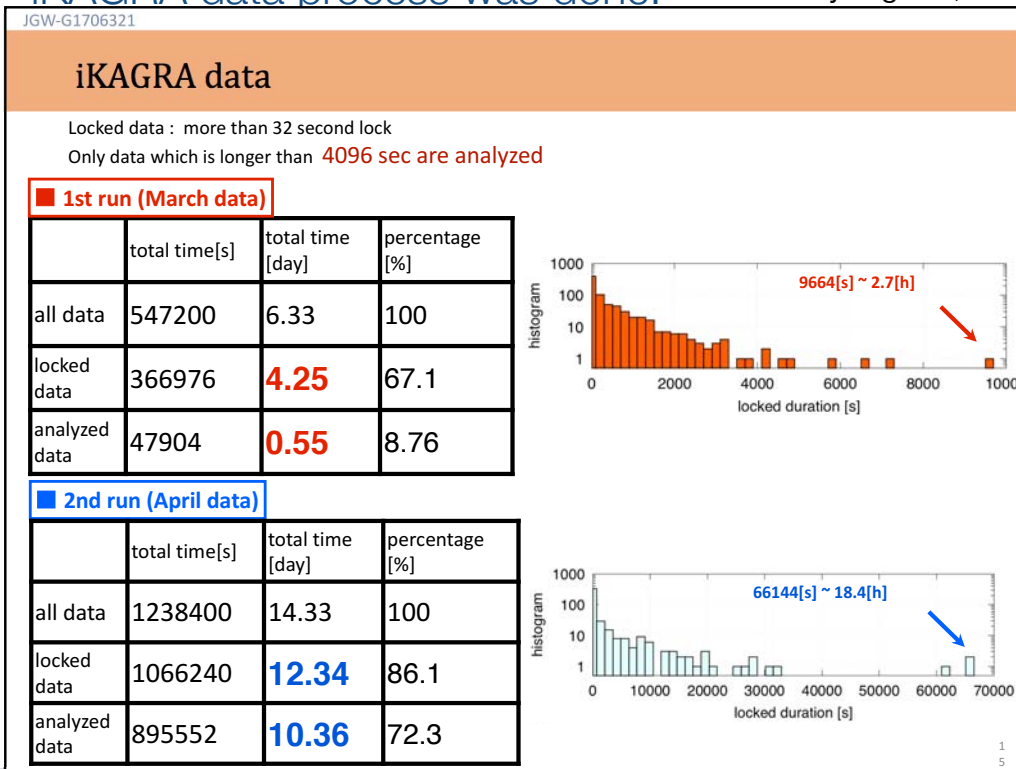
→ Takahashi's talk

Non-Harmonic Analysis

→ Dongbao's talk

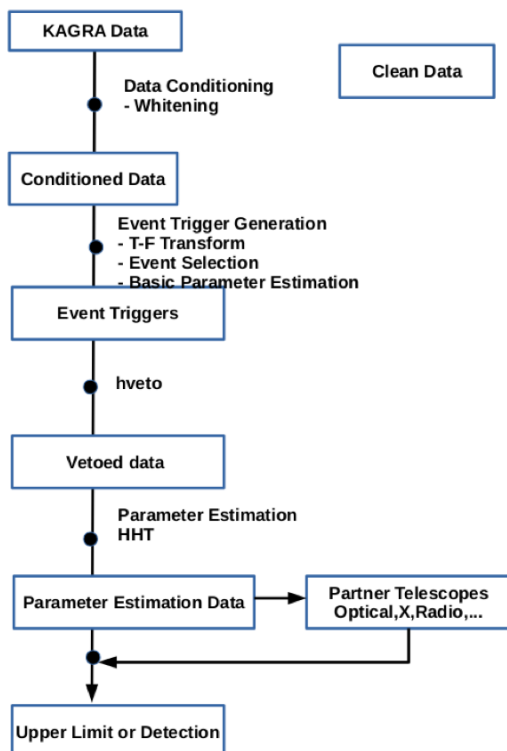
## iKAGRA data process was done.

by Tagoshi, Yuzurihara

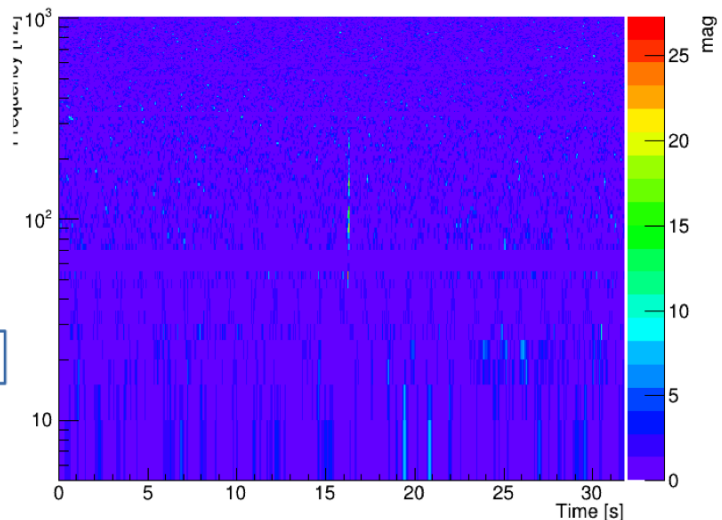


## Burst GW pipeline

Figures by K.Hayama



Example of Event Trigger  
pixelSNR spectrogram



Main search pipeline has been implemented.

The pipeline is now used for characterization of KAGRA as a glitch monitor.

For iKAGRA burst search

event trigger generation has been finished.

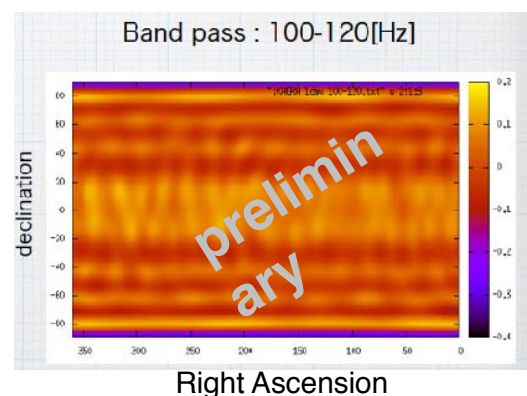
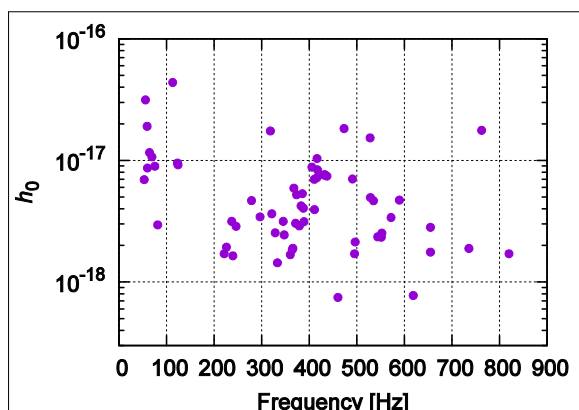
Vetoing glitch events and setting upper limit is in progress.

viewgraph by Itoh

## Continuous wave search Summary

Y. Itoh, N. Kanda, D. Tatsumi, K. Eda\*, K. Tanaka, M. Toritani\*

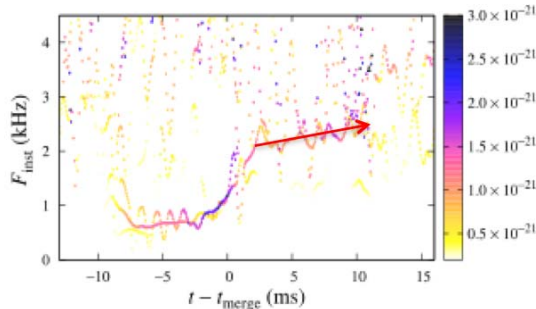
- **iKAGRA known pulsar search was conducted:** LAL-based. TOBA analysis results using the same pipeline was published.
- **100 times faster radiometer code has been developed:** Application to iKAGRA data was conducted.



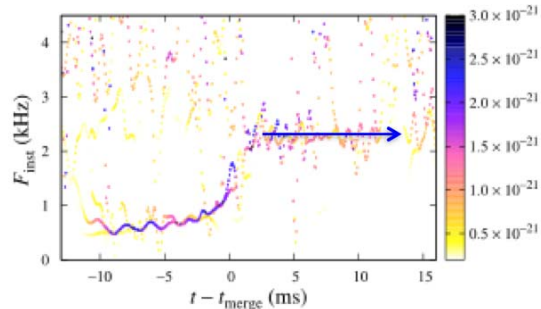
# GWs from binary neutron star merger

M. Kaneyama, K. Oohara, H. Takahashi, Y. Sekiguchi, H. Tagoshi, M. Shibata,  
 Phys. Rev. D93, 123010 (2016). as collaboration of A04 and A05.

The structure of the signal are clearly appear in HHT mat (T-F map).



Hyperon EOS (H135)



Standard nuclear matter (Shen EOS (S15))

- Numerical relativity revealed that GWs in the post-merger phase depend greatly on EOS of the NS matter.
- We can distinguish the EOS from the evolution of IF in the post-merger phase for  $\text{SNR} \sim 6$ , which corresponds to  $\sim 10 \text{ Mpc}$  for Advanced-LIGO.

17/08/22

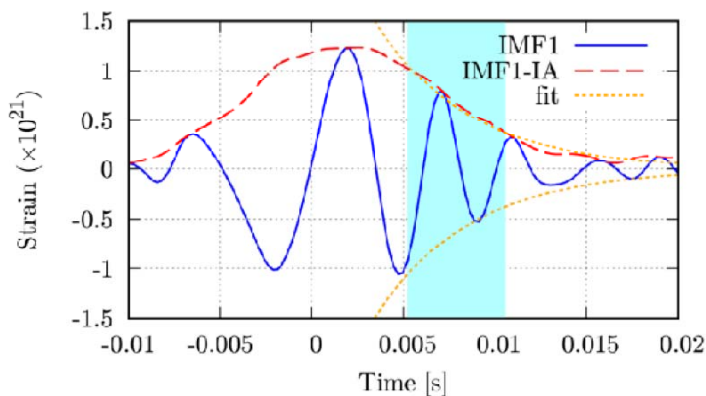
Symposium on GW Astronomy @ YITP

27

## Parameter estimation of the QNM with HHT

K. Sakai, K. Oohara, H. Nakano, M. Kaneyama, H. Takahashi,  
 accepted for publication in Phys. Rev. D. as collaboration of A04 and A05

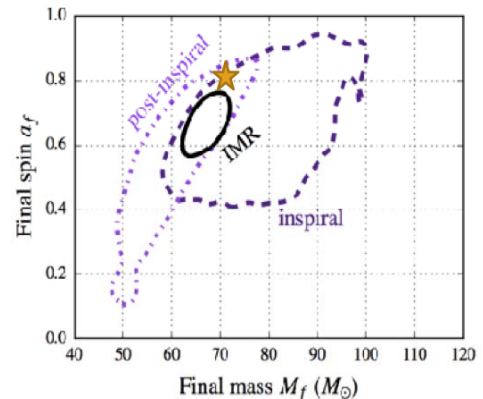
### GW150914 case



$t_0/\text{ms}$	rem. spin	rem. mass/ $M_{\text{sun}}$
5.223	$0.8151^{+0.092}_{-0.096}$	$71.65^{+0.77}_{-0.75}$

assuming  $(l, m, n) = (2, 2, 0)$ ,  $z = 0.09$ .

cf.) result by LIGO and Virgo



Although there are some systematic errors, the results are **consistent** with those given by LIGO and Virgo and a **reasonable starting time** is estimated.

17/08/22

Symposium on GW Astronomy @ YITP

28

## Introduction

### **KAGALI: KAGRA Algorithmic Library**

- KAGALI
  - a data analysis library that KAGRA data analysis subsystem is developing
- KAGALI-Apps:
  - a data analysis application software packages build upon KAGALI, LALSuite and libraries developed by Virgo.
- For KAGRA data analysis, we will use any of available software including KAGALI, LALSuite, Virgo software, and so on.

2017/8/25

4

## Testing GR

T.Narikawa

Advanced ground-based gravitational-wave detector's potential to model-independently test gravitational theory

Narikawa & Tagoshi, arXiv:1601.07691

## Study on BH Quasi-Normal Mode (Ringdown waveform)

N.Uchikata

Matched filter for ringdown waveform



**GW and neutrino coincidence analysis on supernovae**

A03+A04+A05 'SKE' in Koshio-san's talk.

T.Yokozawa et al., ApJ., 811, 86 (12pp) 2015

**Population III stars may form heavy BH-BH binary and will be detect GW from them**

A05 + A04

Possible scenario of GW150914 type BBH events

**We may possibly observe ringdown GW from dynamical formation of massive BH**

A05 + A04

Another possibility of massive BH events

H.Shinkai et al., ApJ. Vol. 835, Num. 2

**Alert of GW events**

A01+A02+A04+A05

Nakamura, Tagoshi, Kanda joined J-GEM.

We (A04) are planning to upload KAGRA test alert to GRACE-DB.

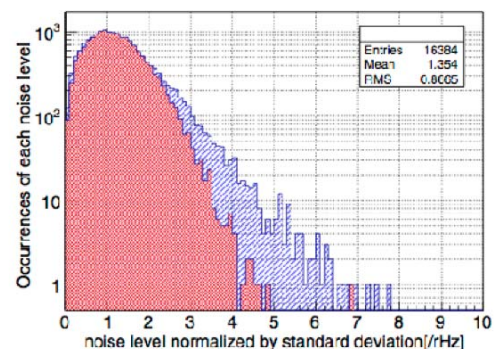
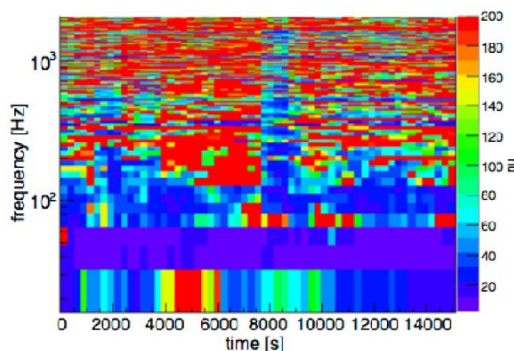
**Burst signal search is also constructing for KAGRA pipeline.**

**Detector Characterization is closely related analysis of burst identification.**

**Non-Gauss noise treatment**

Phys.Rev. D 93, 082005 (2016), Takahiro Yamamoto et al., "Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise"

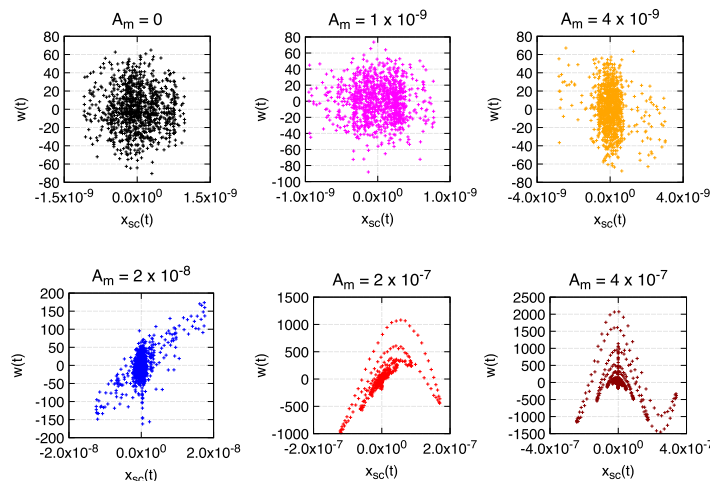
- Evaluate (parameterize) non-gaussianity quantitatively using student-t distribution model
- Using LIGO open data



### Correlation analysis between detector channels

Phys. Rev. D 94, 042004, Hiroataka Yuzurihara, et al., “Unveiling linearly and nonlinearly correlated signals between gravitational wave detectors and environmental monitors”

- Advanced study of the correlation of GW channel and environmental channels
- Employ maximal information coefficient (MIC) method
- Employ the model of Virgo’s well-studies case



Symposium on "New development in astrophysics through multi-messenger observations of gravitational wave sources", 2017/8/24-6, YITP

### Impact of BBH

At kick-off in 2012, many of us are expected NS-NS. We don't have observational fact about BH-BH yet at that time.

However, real events of BBH received...

Is it accident ?

No, it may be inevitable, because...

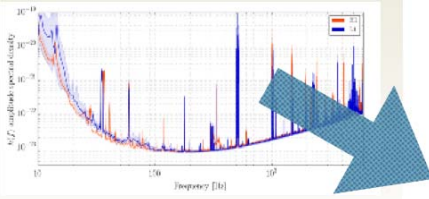
- 1) certainly, BBH exist.
- 2) detector window open for BBH.



Symposium on "New development in astrophysics through multi-messenger observations of gravitational wave sources", 2017/8/24-6, YITP

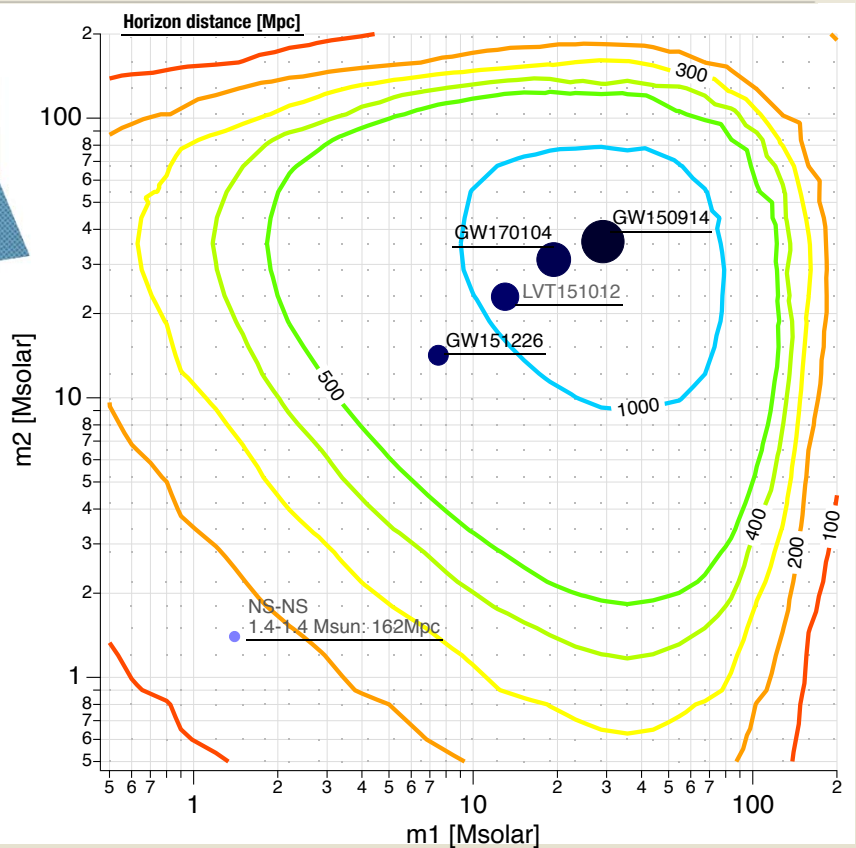
# Window as a function of binary masses

Example : LIGO O1



Detector opens window for particular mass ranges.

(In another word, this might have a 'bias'... We need much more events and improvement of detectors.)



35

## Growth of young researchers



### Post-docs

Total 7 peoples worked as A04 post-docs.

### Thesis

Doctor : 5 (and more 2 will finish soon.)

Master : 12

### KAGRA data analysis school

RESCEU 2012/9/3-5

NAOJ 2013/2/20-22

RESCEU 2013/9/27-28

RESCEU 2014/4/18-19

Osaka U 2014/11/23-24

**Kanda's scoring:**

**Well succeeded.**

**Good. (But it may growth several times, when KAGRA get real GW signal.)**

A04 多様な観測に連携する重力波探索データ解析の研究  
Research on Data Analysis of Gravitational Wave Searches Link up with Various Observations

科研費  
KAKENHI

## Milestones

### Construction of Data Analysis System

- Data Transfer and Storage
- Calculation Power

### Low Latency Search

- Develop Event Search Pipelines
- Alert System

### Analysis for More Knowledge of GW Sources

- with GW
- *with non-GW obs.*

Kanda's scoring:

90% achieved (-10% is  
'very short chunk data')  
Achieved

70% (-30% is 'automation')

10% (We studied, but not  
implemented.)

# Summary report of A05 subgroup ～Theory Group～

Theoretical study for astrophysics through  
multi-messenger observations  
of gravitational wave sources

Takahiro Tanaka (Kyoto-u)

## Group members

分担者 Buntansha

中村卓史 京都大学大学院理学研究科

Takashi Nakamura

山田章一 早稲田大学先進理工学部

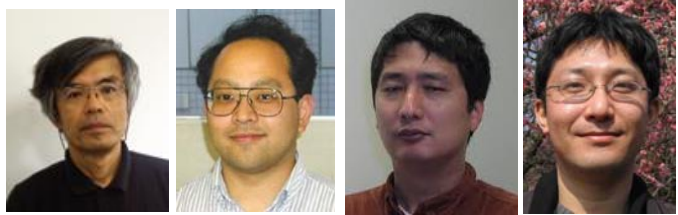
Shoichi Yamada

瀬戸直樹 京都大学大学院理学研究科

Naoki Seto

井岡邦仁 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所

Kunihito Ioka



連携研究者 Renkei

川崎雅裕 東京大学宇宙線研究所

Masahiro Kawasaki

横山順一 京都大学大学院理学系研究科

Jun'ichi Yokoyama

柴田大 京都大学基礎物理学研究所

Masaru Shibata

固武慶 国立天文台理論研究部

Kei Kotake



8 PD researchers

Hideyuki Nakano, Yuki Sakakihara, Masato Nozawa,  
Shota Kisaka, Kotaro Fujisawa, Hidetomo Sawai,  
Atsushi Nishizawa, Hayato Motohashi

# Organization

5 key projects

- a) Discovering new gravitational wave sources and making templates. (Nakamura)
- b) Physics of supernovae (Yamada)
- c) Physics obtained from simultaneous observation (Ioka)
- d) Proposal to data analysis (Seto)
- e) Connection to cosmology and gravity (Tanaka)

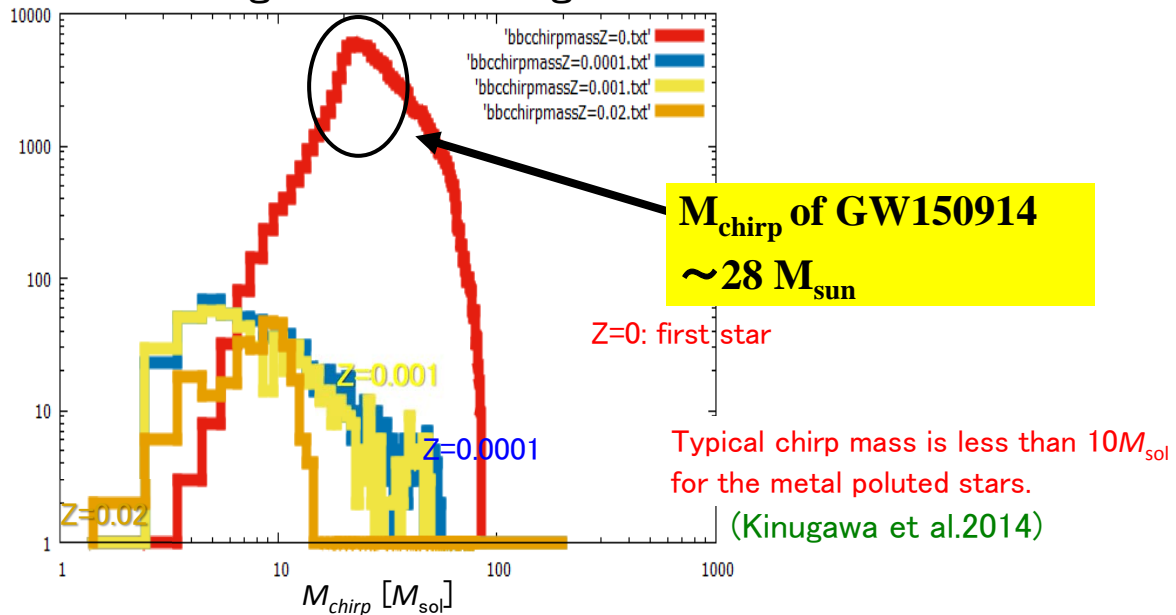
## ASTROPHYSICAL IMPLICATIONS OF THE BINARY BLACK HOLE MERGER GW150914 *ApJ* 818:L22 (2016)

rations). However, if one assumes that the properties of PopIII massive binaries are not very different from binary populations in the local Universe (admittedly a considerable extrapolation), then recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby Universe (Kinugawa et al. 2014). This is in contrast to the predicted mass properties of low (as opposed to zero) metallicity populations, which show broader distributions (Belczynski et al. 2015).

It was mentioned that the fact that the first detection was  $30M_{\text{sol}}$  BH binary agrees astonishingly well with the prediction based on pop.III star origin scenario discussed in the paper by Kinugawa et al.

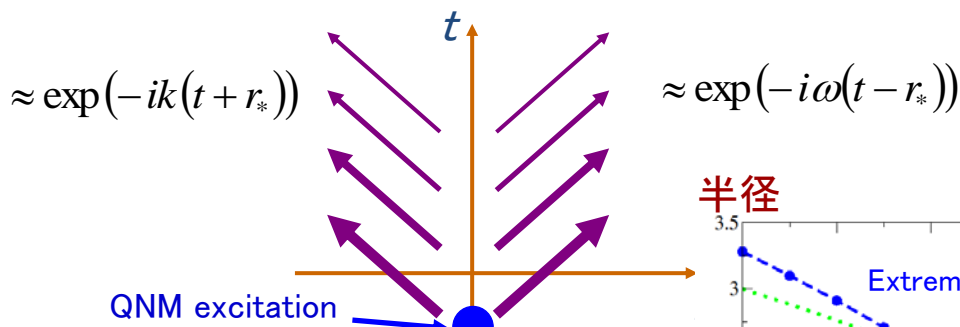
(Modified from the slide of Kinugawa-kun)

Chirp mass  $M_{chirp} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$  distribution of binaries that merge within the age of the universe out of  $10^6$ .



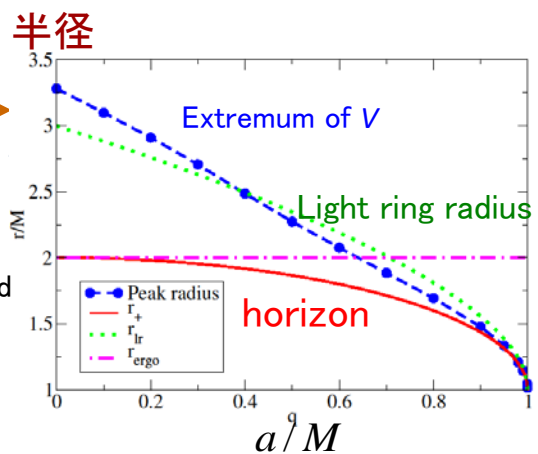
Moreover, it was pointed out before GW150914 that the quasi-normal mode oscillation expected from the coalescence of  $30M_{sun}$  BHs is at the very appropriate frequency band and therefore we can clarify the BH spacetime up to near the horizon. (MNRAS 456 (2016) 1093)

### How deeply we can see BH spacetime by observing QNMs?



- QNM frequencies can be rather accurately obtain by WKB approximation (Schutz & Will, ApJ, 291 (1985))
- But breakdown of WKB approx. is necessary to find a solution connecting in-going and out-going waves.
- The breakdown of WKB approx. occurs at around the extremum of the effective potential  $V$ .
- In WKB approx. the behavior of  $V$  around the extremum determines the QNMs
- The position of the extremum of the potential  $V$  will give an approximate answer to the above question.

(Nakamura et al., Phys.Rev. D93 (2016))



(Nakamura, Nakano, arXiv:1602.02385)

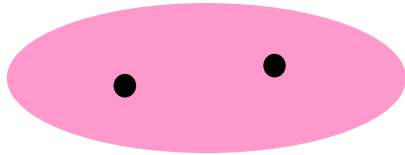
# Alternative scenario of $30M_{\text{sun}}$ BH binary formation

Primordial black hole scenario for the gravitational wave event  
GW150914

selected as PRL Editors' Suggestion

Misao Sasaki<sup>a</sup>, Teruaki Suyama<sup>b</sup>, Takahiro Tanaka<sup>c</sup>, and Shuichiro Yokoyama<sup>d</sup>

Assume random distribution of primordial BHs



Eventually during rad-dominant era,  
Local BH pair energy density  
> radiation energy density



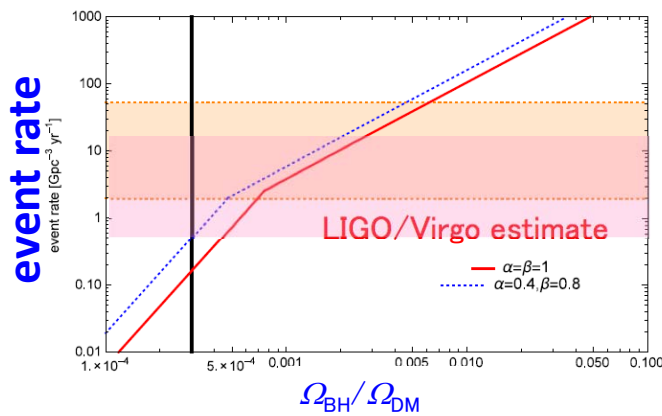
The pair will form a binary



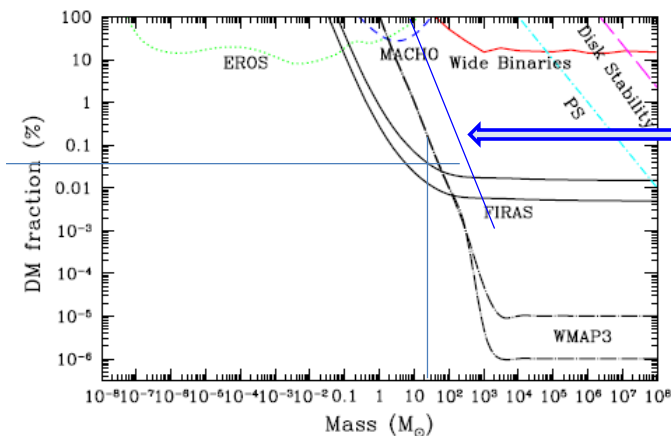
The closest third body gives a torque to give  
angular momentum to the binary

Relative initial positions of BHs  $\Leftrightarrow$  Semi-major axis:  $a$   
Eccentricity:  $e$

BH distribution  $\Rightarrow (a, e)$  distribution  $\Rightarrow$  distribution of merging time



This primordial BBH formation scenario is consistent with the constraint from CMB distortion.



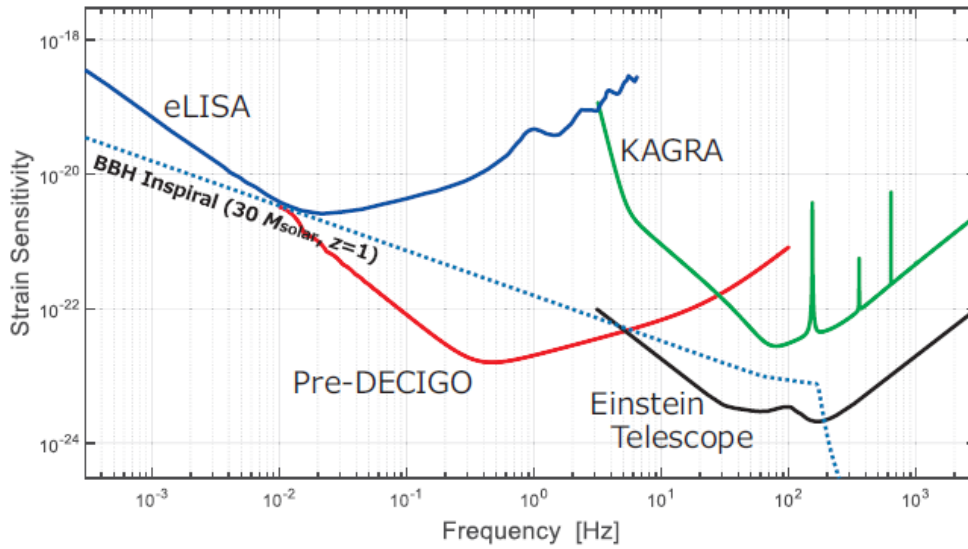
(Ricotti, Ostriker, Mack 2008)

CMB distortion constraint may have a large uncertainty (1612.05644) because of the dependence on the accretion model, but significant improvement of the constraint is expected in future.



# Re-definition of the Pre-DECIGO mission

(arXiv:1607.00897)



$$h_c = 1.89 \times 10^{-21} (1+z)^{5/6} \left(\frac{M_c}{26.1 M_\odot}\right)^{5/6} \left(\frac{\nu}{0.1 \text{ Hz}}\right)^{-1/6} \left(\frac{d_L(z)}{1 \text{ Gpc}}\right)^{-1} \propto (1+z)^{-1/6}$$

for  $z \gg 1$

30 $M_{\text{sun}}$  BBH is detectable even at  $z=30$

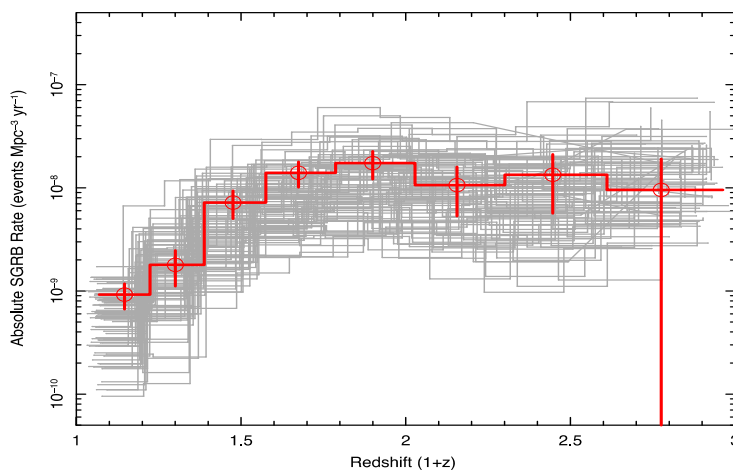
⇒ Formation scenarios are distinguishable using redshift distribution

Sky position can be determined well in advance before merger.

10

They used 72 bright BATSE SGRB data and Yonetoku correlation to estimate the minimum event rate of SGRB to obtain

$$\rho_{\text{SGRB}}(\hat{0}) = 6.3_{-3.9}^{+3.1} \times 10^{-10} \text{ events Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$



Red line: estimated event rate of SGRB as a function of redshift  $z$ .

Grey line: 100 Monte Carlo simulation

Yonetoku et al.  
arXiv:1402.5463

This is translated to the minimum GW event rate of

$$3.8_{-2.2}^{+1.8} (146_{-83}^{+71}) \text{ events yr}^{-1} \text{ for NS-NS (NS-BH) binary, respectively, by KAGRA}$$

Real event rate would be four times larger. Since range of NS-BH is 3.4 times larger than NS-NS, if 10% of SGRB is from NS-BH, event rate will be 70 events  $\text{yr}^{-1}$ .

# Organization

5 key projects

- a) Discovering new gravitational wave sources and making templates. (Nakamura)
- b) Physics of supernovae (Yamada)
- c) Physics obtained from simultaneous observation (Ioka)
- d) Proposal to data analysis (Seto)
- e) Connection to cosmology and gravity (Tanaka)

## PPE framework to examine gravity modification in GW data

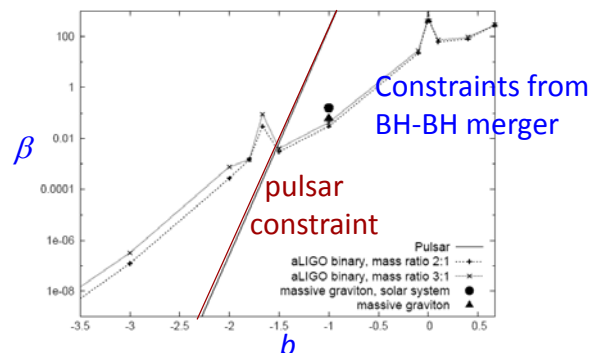
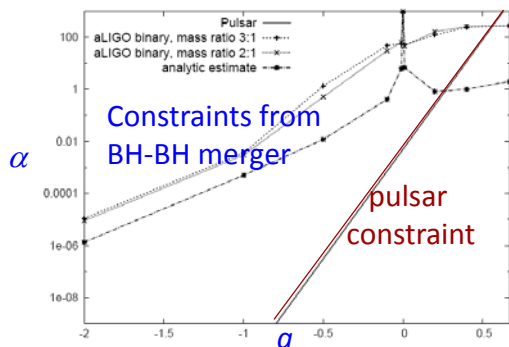
$$h(f) \approx A f^{-7/6} e^{i\Psi(f)}$$

Wave form for Quasi-circular orbits

$$\begin{cases} A(f) \rightarrow \left( 1 + \sum_i \alpha_i u^i \right) A_{GR}(f) \\ \Psi(f) \rightarrow \left( \Psi_{GW}(f) + \sum_i \beta_i u^i \right) \end{cases}$$

Theory	$a$	$\alpha$	$b$	$\beta$
Brans-Dicke [9, 10, 14-16]	-	0	-7/3	$\beta$
Parity-Violation [22, 34-37]	1	$\alpha$	0	-
Variable $G(t)$ [38]	-8/3	$\alpha$	-13/3	$\beta$
Massive Graviton [8-14]	-	0	-1	$\beta$
Quadratic Curvature [23, 44]	-	0	-1/3	$\beta$
Extra Dimensions [45]	-	0	-13/3	$\beta$
Dynamical Chern-Simons [46]	+3	$\alpha$	+4/3	$\beta$

(Yunes & Pretorius (2009))



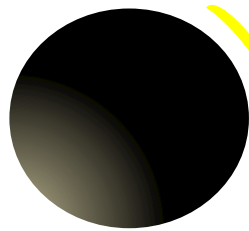
(Cornish et al. (2010))

$12M_{\odot}$ BH- $6M_{\odot}$ BH and  $12M_{\odot}$ BH- $6M_{\odot}$ BH mergers

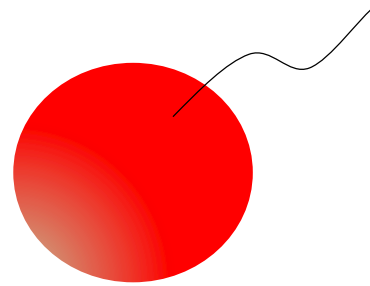
We have more variations of gravity model which can or cannot be covered by this framework

## Scalar-tensor theory

BH no hair



Turu-turu



NS can have a scalar hair

Einstein dilaton Gauss-Bonnet, Chern-Simons gravity

$$S \supset \frac{\alpha}{G_N} \int d^4x \sqrt{-g} \theta \left( \begin{array}{c} R_{GB} \\ *RR \end{array} \right) - \frac{1}{2G_N} \int d^4x \sqrt{-g} [(\partial\theta)^2 + 2V(\theta)]$$

$\theta \times$  (higher curvature)

$$R_{GB} = R^2 - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R^{\alpha\beta}{}_{\mu\nu}R^{\mu\nu}{}_{\alpha\beta} \quad *RR = \varepsilon^{\alpha\beta}{}_{\sigma\chi} R^{\sigma\chi}{}_{\mu\nu}R^{\mu\nu}{}_{\alpha\beta}$$

- For constant  $\theta$ , these higher curvature terms are topological invariant. Hence, no effect on EOM.
- Higher derivative becomes effective only in strong field  
=> consistent with existing observations

## Hairy BH – bold NS

- NS in EDGB do not have any scalar monopole charge.

$$\square\theta \approx "R^2" \Rightarrow Q = \int d^3x "R^2" = \frac{1}{T} \int d^4x "R^2"$$

topological invariant, which vanishes on topologically trivial spacetime.

- By contrast, BH solutions in EDGB have scalar monopole.

EDGB: monopole charge  $\Rightarrow$  dipole radiation (-1PN order)

CS: dipole charge  $\propto$  spin  $\Rightarrow$  2PN order

Detectability of the modification has been examined.

(Yagi, Stein, Yunes, Tanaka (2012))

# Observational bounds

- EDGB

Cassini  $\alpha_{EDGB}^{1/2} < 1.3 \times 10^{12} \text{ cm}$  (Amendola, Charmousis, Davis (2007))

Low mass X-ray binary, A0620-00

$\alpha_{EDGB}^{1/2} < 1.9 \times 10^5 \text{ cm}$  (Yagi, arXiv:1204.4524)

Future Ground-based GW observation SNR=20, 6Msol+12Msol Even if we see deviation in the current observation, it is out of the validity.

$\alpha_{EDGB}^{1/2} < 4 \times 10^5 \text{ cm}$  (Yagi, Stein, Yunes, TT, arXiv:1110.5950)  
(See also Yagi, Stein, Yunes, arXiv:1510.02152)

- CS

Gravity Probe B, LAGEOS (Ali-Haimoud, Chen (2011))

$\alpha_{CS}^{1/2} < 10^{13} \text{ cm}$

Ground GW observation with favorable spin alignment:  
100Mpc,  $a \sim 0.8M$

Unfortunately, the BH spins are not so clear in the current GW data.

$\alpha_{CS}^{1/2} < 10^{6-7} \text{ cm}$  (Yagi, Yunes, TT, arXiv:1208.5102)

## Graviton Oscillation in viable model of bi-gravity

Antonio De Felice and Takashi Nakamura, Takahiro Tanaka arXiv:1304.3920

Narikawa, Tatsuya and Ueno, Koh and Tagoshi, Hideyuki and Tanaka, Takahiro and Kanda, Nobuyuki and Nakamura, Takashi arXiv: 1412.8074

Is there possibility that graviton disappear during its propagation over cosmological distance?

Our results are

- 1) Recently proposed dRGT Bi-gravity model, which is free from ghost instability, has a viable cosmological solutions.
- 2) GR behavior is recovered in the solar system test owing to non-linear effect.
- 3) One massless graviton + one massive graviton appear, and they mix with each other like  $\nu$ -oscillation.

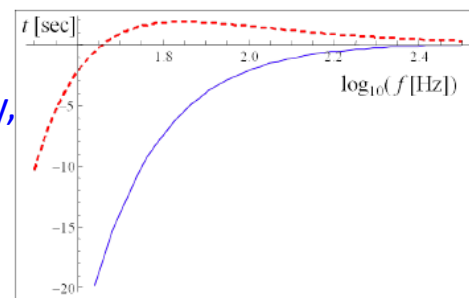
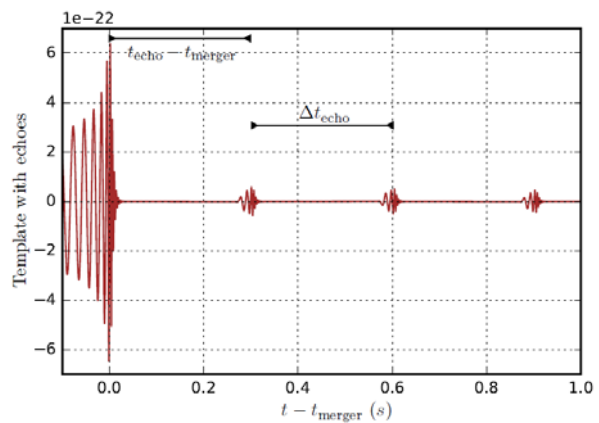
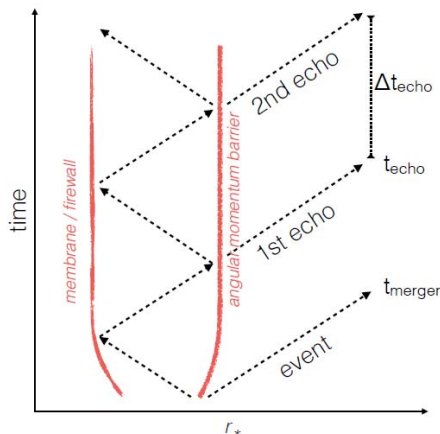


FIG. 3: The arrival time as functions of the frequency  $f$  for respective modes for  $1.4M_{\odot} + 1.4M_{\odot}$  binary inspiral with  $\kappa_c^2 = 100$ ,  $D = 300 \text{ Mpc}$ ,  $H = 67.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_0 = 0.315$  and  $\lambda_{\mu} = 0.001 \text{ pc}$ . The blue solid curve is for the first mode, while the dashed red one for the second mode.

### Implications

We may find graviton oscillations, phenomena similar to  $\nu$  oscillations. Waveform difference appears only for specific frequency, but there exists some parameter range tested using GWs.

# On BH Echoes



- 1) Reflecting boundary at the Planck distance from the horizon
- 2) Slowly decaying echoes with predicted  $\Delta t_{\text{echos}}$
- 3) Same waveform is assumed to repeat.

$\Rightarrow 3\sigma$  detection of GW echoes???

(Abedi et al, arXiv:1612.00266)

We proposed a better way of analysis, and actual data analysis is on-going.

Nakano et al, PTEP 2017 (2017) 071E01 [arXiv:1704.07175]

19

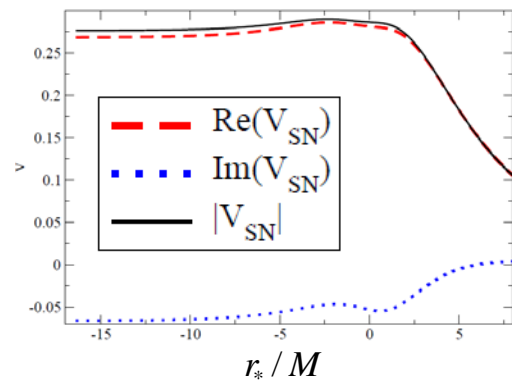
## Perturbation Equation of Kerr BH (Sasaki-Nakamura)

We focus on the dominant mode  $l=m=2$

$$\frac{d^2 Y}{dr_*^2} + V_{SN} Y = 0$$

$$Y = \begin{cases} \exp(-i\omega r_*) & (r_* \rightarrow \infty) \\ Y_{up} \exp(-ikr_*) + Y_{down} \exp(ikr_*) & (r_* \rightarrow -\infty) \end{cases}$$

$$\frac{F_{up}}{F_{down}} = C \frac{|Y_{up}|^2}{|Y_{down}|^2} \quad C \neq 1 \text{ for } (a \neq 0) \text{ since } V_{SN} \text{ is not real}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Reflection rate :} \\ \sqrt{R(f)} = \sqrt{C} \frac{|Y_{up}|}{|Y_{down}|} \\ \text{Phase shift :} \\ \phi(f) = \arg\left(\frac{Y_{up}}{Y_{down}}\right)? \\ \text{depend on the frequency } f. \end{array} \right.$$

$\phi$  can be approximated by a linear fn.

$\Leftrightarrow$  Time interval between echoes and overall phase



20

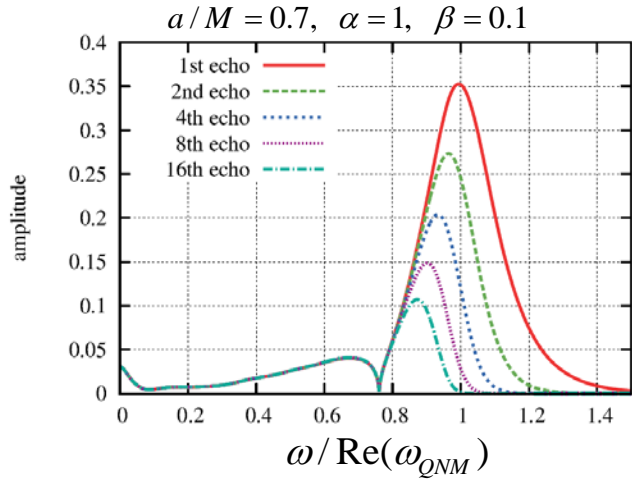
Wave form model

Truncated QNM echoes:

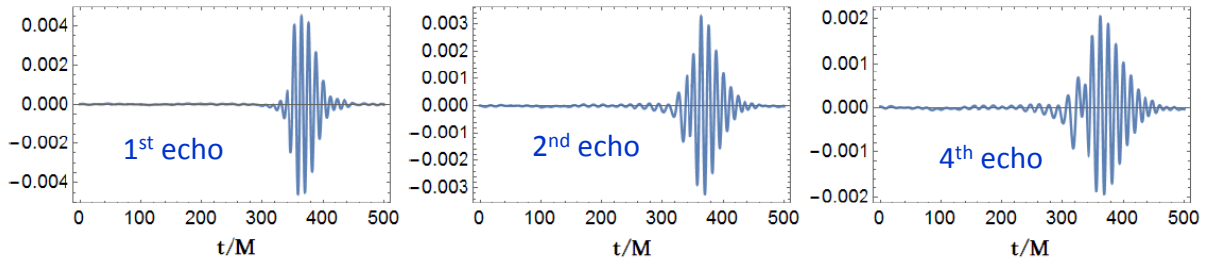
$$\tilde{h}_n(f) = \exp[-i(2\pi f\Delta t + \phi(f))(n-1)] \times \sqrt{R(f)}^{n-1} \sqrt{1-R(f)} \tilde{h}(f)$$

$$h(t) \approx \exp[-i\omega_{QNM} \tilde{t}]$$

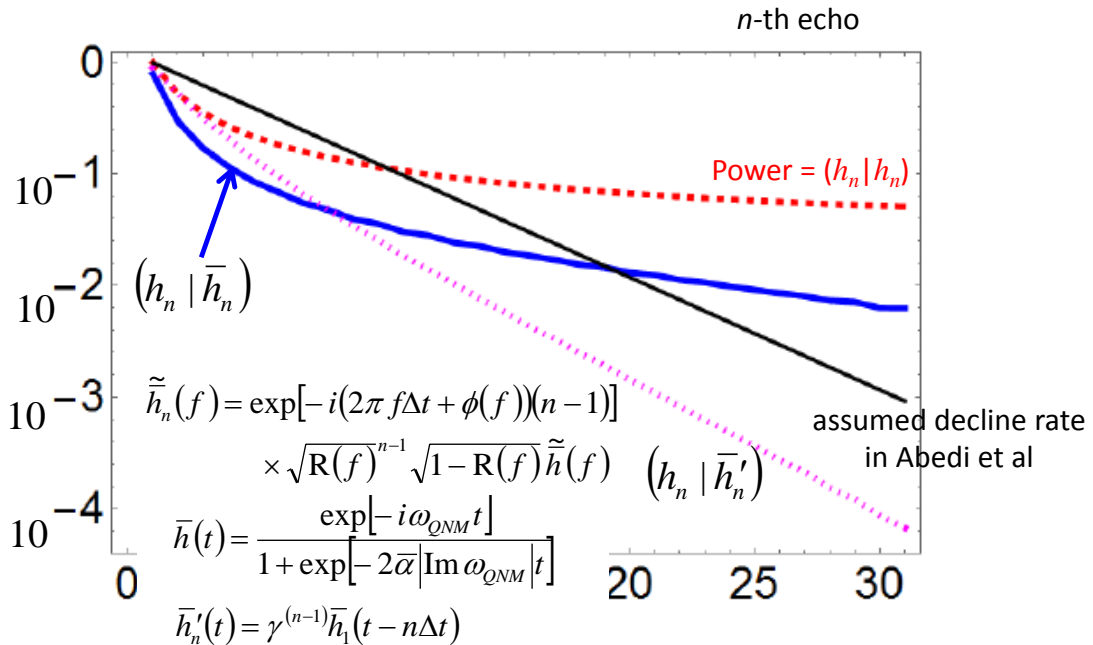
$$\tilde{t} = \int^t \frac{dt}{1 + \exp[-2\alpha |\text{Im} \omega_{QNM}| t]}$$



Wave form is actually changing



21



There is a gain caused by using correct reflection rate, though it's not so large. ( ^ o ^ )

$$\frac{\sum_n (h_n | \bar{h}_n)}{\sqrt{\sum_n (h_n | h_n) \sum_n (\bar{h}_n | \bar{h}_n)}} = 0.729$$

$$\frac{\sum_n (h_n | \bar{h}'_n)}{\sqrt{\sum_n (h_n | h_n) \sum_n (\bar{h}'_n | \bar{h}'_n)}} = 0.662$$

22

# Short summary for GR tests

Gravitational wave observations are going to open a new window to test gravity theory.

Binary coalescence is a source suitable for the test of GR.

For some modifications of gravity, dedicated analyses are necessary.

Graviton oscillation

Small mass scalar

Spontaneous scalarization

BH echoes

⋮

## Organization

5 key projects

a) Discovering new gravitational wave sources and making templates. (Nakamura)

b) Physics of supernovae (Yamada)

⇒ Yamada-san's talk

c) Physics obtained from simultaneous observation (Ioka)

d) Proposal to data analysis (Seto)

e) Connection to cosmology and gravity (Tanaka)

- We developed a code to numerically solve the Boltzmann equation describing neutrino transport. In particular, we propose a new method to treat the global inertial system and the inertial system of matter simultaneously to take into account all relativistic effects without approximation. (Astrophys. J. Suppl. 214 (2014) no.2, 16 )
- By the general relativistic 3-D simulation, although the treatment of neutrino transport is approximate, gravitational waves from the rotating single arm formed by the growth of hydrodynamic instability in the core rotating at high speed is calculated. Based on that, it was demonstrated that coherent network analysis can reveal circular polarization using 4 GW detectors including KAGRA for SNe within the Milky Way Galaxy and it can be used as evidence of core rotation. (Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 151102)
- We have independently built an equation of state for more realistic supernova explosion calculation. As a result, it became possible to handle a large number of nuclear species in a statistical equilibrium state below the nuclear density and more accurate estimation of the electron capture rate became possible . (Nucl.Phys. A957 (2017) 188)

## Organization

5 key projects

- a) Discovering new gravitational wave sources and making templates. (Nakamura)
- b) Physics of supernovae (Yamada)
- c) **Physics obtained from simultaneous observation (Ioka)**  
⇒ Ioka-san's talk
- d) Proposal to data analysis (Seto)
- e) Connection to cosmology and gravity (Tanaka)



- It was shown that mass emission from NS-BH binaries is anisotropic, while mass emission from NS binaries is rather isotropic. In the latter case, radiation (from radio to X-ray) from the shock waves sweeping ISM was evaluated. (Phys. Rev. D88 (2013) 041503)
- Dark gamma ray burst was discussed as a source of high energy neutrino observed by IceCube experiment. We first examined the particle acceleration in the remnants of the  $r$ -process element and showed that the acceleration efficiency is very low. (Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 121102)
- There was a quest whether a jet emitted from the central engine of GRB could come out, when released matter is surrounding. We showed that the jet can penetrate the surrounding material and the jet can be even collimated. It was also shown that owing to the fall-back the jet can be sustained for a long time, which can be thought naturally as an energy source of macro-novae. We also pointed out the possibility of dust formation in the ejecta, which has a big influence on the feature of macro-novae. We also calculated high energy emission from the remnant of binary NS mergers. (Astrophys.J. 784 (2014) L28)

## Organization

5 key projects

- a) Discovering new gravitational wave sources and making templates. (Nakamura)
- b) Physics of supernovae (Yamada)
- c) Physics obtained from simultaneous observation (Ioka)
- d) Proposal to data analysis (Seto)  
⇒ Seto-san's poster
- e) Connection to cosmology and gravity (Tanaka)

- For the hierarchical orbital resonance where the relativistic perihelion advance plays an important role, we identified the resonance state which is greatly different from the well-known average motion resonance, and characterized the evolution. For elliptical binary systems, we studied the orbital evolution by directly solving three body problem, clarifying the drawback of the orbital average method, and showed that the remaining eccentricity at the time of gravitational wave observation could be greater than was expected. In addition, we pointed out the advantage of searching for gravitational waves from eccentric binaries for the early detection of the electromagnetic counterparts. (Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 061106 , MNRAS 441 (2014) 1934)
- In response to the report of GW 150914 and GW 151226, we examined what kind of knowledge can be obtained by using a space interferometer such as LISA for such black hole binaries. (MNRAS 460 (2016) L1, 462 (2016) 2177)

## Organization

### ① 公募研究(Koubo kenkyu)

### ② Organizing/supporting workshops

- [RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION, JGRG22](#) (東京大学, 2012年11月12日-16日) (協賛)
- [Gravity and Cosmology 2012](#) (京大基研, 2012年11月18日-12月22日) (協賛)
- [計画研究A05合宿](#) (KKR熱海, 2013年1月7日-1月9日) ([発表ファイル付きプログラム](#))
- 研究会「コンパクト連星の合体と電磁波対応天体」(京大基研, 2013年2月14日-2月15日) (協賛)
- [Long-term workshop on gravitational waves and numerical relativity](#) (京大基研, 2013年5月19日-6月22日) (協賛)
- [Asia Pacific School/Workshop on Gravitation and Cosmology 2013](#) (The Ocean Suites Jeju Hotel, 2013年2月19日-2月22日) (協賛)
- [基礎物理学研究所 市民講演会「宇宙を探る」](#) (京大基研, 2013年3月17日)
- [関西相対論・宇宙論合同セミナー](#) (京大, 2013年7月20日)
- [第12回DECIGOワークショップ](#) (東大, 2013年10月27日) (協賛)
- [The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan](#) (弘前大, 2013年11月5日-11月8日) (共催)
- [New Perspectives on Cosmology](#) (APCTP, Pohang, Korea, 2013年11月25日-11月29日) (共催)
- [2014 Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation and Cosmology](#) (Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, 2014年2月17日-2月21日) (共催)
- [A04/05 Joint Camp](#) (KKR城崎玄武, 2014年2月22日-2月24日)
- [関西相対論・宇宙論合同セミナー](#) (京大, 2014年6月29日)
- [第13回DECIGOワークショップ](#) (京大, 2014年10月26日) (協賛)
- [The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation \(JGRG24\)](#) (Kavli IPMU, the University of Tokyo, 2014年11月10日-11月14日) (協賛)
- [A04/05 Joint Camp](#) (瀬波温泉, 2015年1月8日-10日)
- [コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域](#) (京大基研, 2015年2月12日-14日) (協賛)
- [International School of Gravitational Physics, Kyoto, 2015](#) (京大基研, 2015年3月25日-28日) (協賛)
- [Molecule-type workshop on "Radiation Reaction in General Relativity"](#) (京大基研, 2015年6月22日-7月10日) (共催)
- [Numazu Workshop 2015: Challenges of modeling supernovae with nuclear data](#) (Mishima, Shizuoka, Japan, 2015年9月1日-4日) (共催)
- [関西相対論・宇宙論合同セミナー](#) (京大, 2015年8月1日)
- [The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan \(JGRG25\)](#) (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, 2015年12月7日-11日) (協賛)
- [A05 Camp](#) (KKR伊豆長岡千歳荘, 2016年1月7日-9日)
- [The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation \(JGRG26\)](#) (Osaka City University, 2016年10月24日-10月28日) (協賛)
- [Symposium on "New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources"](#) (YITP, Kyoto University, 2016年12月26日-12月28日)
- [A05 Camp](#) (湖邸滋びわこクラブ, 2017年1月7日-9日)

### ③ Regular TV conference (Friday AM10:30-12:00)