

平成 26 年 4 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740160

研究課題名(和文)高エントロピーの大質量星中心核の重力崩壊とガンマ線バースト

研究課題名(英文)Collapse of higher-entropy stellar core and long gamma-ray bursts

研究代表者

関口 雄一郎 (Sekiguchi, Yuichiro)

京都大学・基礎物理学研究所・研究員

研究者番号：50531779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：大質量星中心核の重力崩壊の結果形成される、ブラックホールと降着円盤からなる系はその起源が未解明である宇宙最大規模の爆発現象、ガンマ線バーストの中心動力源の候補として有力視されている。最新の観測と恒星進化理論に基づき、高エントロピー中心核の重力崩壊がガンマ線バーストを起こすという独自の仮説を立て、そのもとで、重力崩壊によってブラックホールが形成される過程を数値相対論シミュレーションによって理論的に精査した。その結果、この仮説に基づけばガンマ線バーストを起こすことが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The central engine of long-duration gamma-ray bursts has not been clarified yet. A system composed of a black hole and an accretion torus is promising candidate of their engine. Based on the latest observations and theoretical evolution models of massive stellar cores, I developed a hypothesis that the progenitor star of gamma-ray bursts should have higher entropy than ordinary supernova. By performing numerical relativity simulations, I studied the collapse of the higher entropy cores and clarified the dynamics of the black hole formation. Based on the simulation results, I showed that the properties of long-duration gamma-ray bursts can be explained if the progenitor core has higher entropy as I assumed in the hypothesis.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学 宇宙物理 ガンマ線バースト

1. 研究開始当初の背景

本申請課題の対象であるガンマ線バーストの中心動力源は未解明であるが、ブラックホールと降着円盤からなる系は、最も効率的な重力束縛エネルギーの転換装置であり、ガンマ線バーストの莫大なエネルギー放射を説明しうる中心動力源として以前より注目されてきた。2003年に観測されたガンマ線バースト GRB030329 の残光中に、超新星爆発のスペクトル成分が発見され、少なくとも一部のガンマ線バーストは大質量星の重力崩壊に付随して起こることが明らかとなり、ブラックホールと降着円盤からなる系がガンマ線バーストの中心動力源として有力視されていた。

ガンマ線バーストに付随する超新星爆発の多くは Ic 型であるため、重力崩壊直前の恒星は水素層とヘリウム層を失っている。通常の恒星進化理論では、これらの外層は星風によって吹き飛ばされたと考えられていた。しかしこの場合には、外層を失うと同時に角運動量も失うため、降着円盤が形成されるほど十分な角運動量を保持できないという問題が生じる。問題を回避するべく様々なモデルが提唱されたが、その全てに共通するのは、ガンマ線バーストを起こしうる中心核は、通常の超新星爆発を起こす大質量星の中心核に比べて高いエントロピーを持つということである。そこで本研究は、高エントロピーの中心核の重力崩壊がガンマ線バーストを起こすという仮説をたてて研究を進めた。

高エントロピーの中心核の重力崩壊を理論的に取り扱うためには、微視的物理過程を考慮した多次元の一般相対論の数値シミュレーション(数値相対論)が必要となる。なぜならば、重力崩壊で実現する超高密度・高温環境下における物質の熱力学特性こそがブラックホール形成過程や降着円盤のダイナミクスを決め、さらには高密度のために冷却源としてニュートリノが重要となるからである。

研究開始時点において、シミュレーションコードの開発競争が行われていたが、申請者は世界に先駆けて重要となる微視的過程を全て組み入れた数値相対論コードを開発した(Sekiguchi, 2010, *Class. Quant. Grav.*, 27, 114107; Sekiguchi, *Prog. Theor. Phys.*, 2010, 124, 331)。本申請課題では、開発した計算コードを用いてシミュレーションが行われる。

2. 研究の目的

これまでの中心動力源に関する研究により、ガンマ線バーストを起こす有力なシナリオとして、降着円盤から放射されたニュートリノの対消滅による電子陽電子プラズマの生成、およびブランドフォード・ズニャック過程によるポインティングフラックス

生成が有力されていた。

本申請課題では、高エントロピー中心核がガンマ線バーストの前駆天体であるという仮説に基づいて、重要となる微視的物理過程を考慮に入れた数値相対論シミュレーションを行い、ブラックホールと降着円盤からなる系の形成過程・構造を明らかにし、上記

の中心動力源モデルがガンマ線バーストの示す高いエネルギー放射率及び時間変動を説明できるかどうかを明確にし、その検証を行った。さらに、仮説に適合する範囲内で初期条件を系統的に変えてシミュレーションを行うことで、どのような条件のもとで、ガンマ線バーストを生成しうるブラックホールと降着円盤の系が形成されるのかを明らかにすることを目的とした。

シナリオを検証するためには、形成される降着円盤の質量、幾何学的・熱力学的構造を明らかにし、ガンマ線バーストを説明しうる高いニュートリノ対消滅率が達成されるかどうかを調べる必要がある。さらに、降着円盤の進化を追い、ガンマ線プロファイルが示す激しい時間変動を説明する機構を探索する必要がある。一方、シナリオの場合、ブラックホールの回転エネルギーがそのエネルギー源であるため、重力崩壊の結果形成されるブラックホールのスピンのような値を持つのか、シミュレーションによって自己完結的に明らかにする必要がある。

3. 研究の方法

開発した数値相対論コードを用いて、高エントロピーの中心核の重力崩壊に対する数値相対論シミュレーションを行った。初期条件として、エントロピーと回転をパラメータとして系統的に変化させた近似的モデル(Nakazato et al. 2007)、及び恒星進化の理論計算に基づくモデル(Umeda & Nomoto 2008)を採用した。

解くべき基礎方程式はアインシュタイン方程式、一般相対論的流体力学方程式、ニュートリノ場の運動方程式及びレプトン数の保存則である。微視的物理過程として、有限温度の核物質方程式(Shen et al., 1998, *Nucl. Phys. A* 637, 435)、電子陽電子捕獲反応(Fuller et al., 1985, *ApJ*, 293, 1)、電子陽電子対消滅反応(Cooperstein et al., 1987, *ApJ*, 309, 653)、プラズモン崩壊(Ruffert et al., 1996, *A&A*, 311, 352)、ニュートリノ制動放射(Burrows et al., 2006, *Nucl. Phys. A* 777, 356)を組み込んだ。

重力崩壊中には系の特徴的なスケールが中心核の半径(数千 km)からブラックホールの半径(数 km)にまで変化する。そこで崩壊する中心領域にスコープを当てるように計算格子を張りかえながらシミュレーションを行い、さらに非一様計算格子を採用した。ブラックホール形成後は、特異点回避技法を用いて計算を継続した。

シミュレーションは国立天文台 CfCA、大阪大学 RCNP、京都大学基礎物理学研究所のスーパーコンピュータを利用して行われた。

崩壊後ブラックホールと降着円盤からなる系が形成されるまで時間発展を追い、ブラックホールの質量・スピン、及び降着円盤の幾何学的・熱力学的構造計算し、ガンマ線バーストを起こしうる系が形成されるパラメータを明らかにし、ブラックホール質量・スピンの時間進化、降着円盤のダイナミクスを明らかにするとともに、ガンマ線バーストの示す時間変動と比較した。

4. 研究成果

初期条件として高いエントロピーを持つ大質量中心核の近似的モデルを採用した場合の結果について、以下のような重力崩壊の様相が明らかとなった。

中心核は重元素の光分解反応および電子捕獲反応によって不安定化し、重力崩壊をはじめ。初期条件において、中心核は主として電子の縮退圧によって支えられているが、重力崩壊中にガス圧が支配的となるため、弱いバウンスを起こし衝撃波が発生する。衝撃波は非常に弱いため、重力崩壊を止めるには至らず降着衝撃波となり、中心核は重力崩壊を続ける。中心核の質量が十分に重いため、重力崩壊の結果中心核は原始中性子星を形成することなく、直ちにブラックホールへと重力崩壊する。

ブラックホール形成後の進化は中心核が初期に持つ角運動量に強く依存する。回転が弱い場合には中心核を構成する物質はほぼすべてブラックホールへと飲み込まれ、ブラックホールの周囲に降着円盤は形成されない。一方、回転が強い場合にはブラックホール形成後、その周囲に幾何学的に厚い降着円盤（トラス）が直ちに形成され、 10^{54} erg/s もの高光度のニュートリノを放射する。さらに、回転が中程度の場合は以下のような興味深いダイナミクスを示す（図1参照）。すなわち、幾何学的に薄い円盤が初めに形成されるが、やがて角運動量の大きい物質が降着するにつれ、幾何学的に厚いトラスへと遷移し、高光度のニュートリノを放射するようになる。

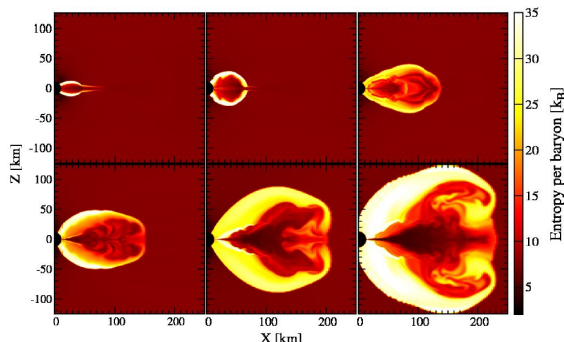


図1: 子午面におけるエントロピーのコントラスト

この過程では、降着円盤の熱力学状態が、ニュートリノに対して光学的に厚くなることで効いており、その結果ニュートリノによるエネルギーの輸送効率が下がり、円盤内に衝撃波に伴う熱エネルギーが蓄えられ、トラスへと遷移する。

降着円盤内では降着流による衝撃波、対流不安定が絶えず発生する。大質量星の重力崩壊によってブラックホールと降着円盤が形成される過程が従来考えられていたような静的なものではなく、極めて動的なものであることが初めて明らかにされた。

衝撃波生成による効率的な運動エネルギーの散逸はガンマ線バーストの示す高いエネルギーを、また流体不安定に伴って質量降着率及びニュートリノ光度が示す激しい時間変動は、ガンマ線バーストの示す時間変動をそれぞれ説明可能であることが明らかとなった。

また、ガンマ線バーストの動力源として、従来の研究結果が、ニュートリノの対消滅による電子陽電子プラズマの生成とブランドフォード・ズニャック過程によるポインティングフラック生成のうち、後者を支持するのに対し、高エントロピー中心核を親星とする仮説に基づいた場合、ニュートリノ対消滅でも十分なエネルギーが生成可能であることを示した。

初期条件として恒星進化理論に基づくモデルを採用した場合について得られた結果は以下のとおりである。

中心核の質量がブラックホール形成の閾値よりも小さいため、重力崩壊の結果原始中性子星を形成してバウンスを起こし、衝撃波が形成される。その後の進化は回転に依存する。

中心核の回転が速い場合(図2参照)には、生成された衝撃波面の構造がトラス上に歪む。そのため、中心核外層から降着する流体は、いわゆる斜め衝撃波を経て衝撃波面でその流れを変え、原始中性子星の極付近に集約され、そこで衝撃波が発生する。その結果、原始中性子星の極付近は衝撃波加熱による

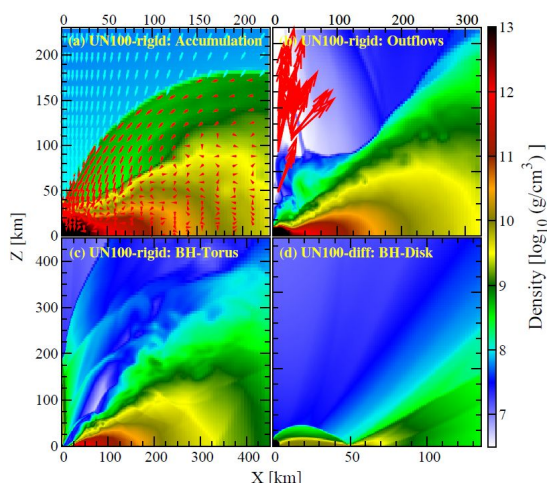


図2: 子午面における密度のコントラスト

過熱状態となる。やがて降着流のラム圧が下がるにつれ、過熱状態にある原始中性子星の極付近からアウトフローが形成される。これは従来知られていなかった現象であり、高エネルギー天体現象との関連について興味を持たれるところである。

外層物質の降着により、原始中性子星は最終的にブラックホールへと重力崩壊し、ブラックホールの周りにトーラスが形成される。トーラスでは対流はケルビンヘルムホルツ不安定などの流体不安定が駆動され、系は極めて動的な挙動を示す。すなわち、初期条件として高いエントロピーを持つ大質量中心核の近似的モデルを採用した際に見られた動的なブラックホール形成過程とその後の進化は、近似的モデルを採用したことによるものではなく、現実的な問題設定のもとでも見られる普遍的なものであることが明らかとなった。

ガンマ線バーストの示す莫大なエネルギーと激しい時間変動を説明するために必要な、衝撃波形成、アウトフローや流体不安定の形成には、中心核が高エントロピーを持っていることが重要であることを述べておく。

一方、中心核の回転が弱い場合には、衝撃波面はそれほど大きくは歪まず、上記に見られたような様相を示さない。すなわち、従来議論されてきたように、高エントロピーとともに、高速回転もガンマ線バーストの中心動力源にとって本質的であると考えられる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

1. Masaru Shibata, Kenta Kiuchi, [Yuichiro Sekiguchi](#), and Yudai Suwa, "Truncated Moment Formalism for Radiation Hydrodynamics in Numerical Relativity" *Progress of Theoretical Physics*, 125, 1255 (2011)
2. [Yuichiro Sekiguchi](#) and Masaru Shibata, "Formation of black hole and accretion disk in collapsar" *Astrophysical Journal*, 737, 6 (2011)
3. [Yuichiro Sekiguchi](#), Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata, "Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars" *Physical Review Letters* 107 051102 (2011)
4. [Yuichiro Sekiguchi](#) "Collapse of rotating very massive stellar core to a black hole and a disk" *Journal of Physics: Conference Series*, 314, 012076 (2011)
5. [Yuichiro Sekiguchi](#), Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata, "Effects of hyperons in binary neutron star mergers" *Physical Review Letters* 107 211101 (2011)
6. Masaru Shibata and [Yuichiro Sekiguchi](#) "Radiation Magnetohydrodynamics for Black Hole-Torus System in Full General Relativity: A Step toward Physical Simulation" *Progress of Theoretical Physics* 127, 535 (2012)
7. [Yuichiro Sekiguchi](#), Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata, "Current Status of Numerical-Relativity Simulations in Kyoto" *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 01 A304 (2012)
8. Kenta Kiuchi, [Yuichiro Sekiguchi](#), Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata "Gravitational waves, neutrino emissions and effects of hyperons in binary neutron star mergers" *Classical and Quantum Gravity* 29, 124003 (2012)
9. Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Hirotsugu Okawa, [Yuichiro Sekiguchi](#), Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi "The mass ejection from the merger of binary neutron stars" *Physical Review D* 87, 024001 (2013)
10. Hiroyuki Takahashi, Ken Ohsuga, [Yuichiro Sekiguchi](#), Tsuyoshi Inoue, Kengo Tomida "Explicit-Implicit Scheme for Relativistic Radiation Hydrodynamics" *The Astrophysical Journal*, 764, 122 (2013)
11. Masaru Shibata, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and [Yuichiro Sekiguchi](#) "Physical Simulations for the Merger of Binary Neutron Stars in General Relativity" *ASP Conference Proceedings*, Vol. 453, pp.161 (2012)
12. Kenta Kiuchi, [Yuichiro Sekiguchi](#), Koutarou Kyutoku, and Masaru Shibata "Gravitational Waves and Neutrino Emissions from the Merger of Binary Neutron Stars" *ASP Conference Series*, Vol. 459, pp. 85 (2012)
13. Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Takayuki Muranushi, [Yuichiro Sekiguchi](#), Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi "Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform" *Physical Review D* 88, 044026 (2013)
14. 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" *The Astrophysical Journal Letters*, 778 L16 (2013)
15. Masaomi Tanaka, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, [Yuichiro Sekiguchi](#), and Masaru Shibata "Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers" *The Astrophysical Journal*, 780, 31 (2014)
16. 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, L28 (2014)
17. Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Kenta Hotokezaka, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata
"Magnetized Binary Neutron Star Merger Simulations"
Astronomical Society of the Pacific, 474, 84 (2013)

[学会発表](計 34 件)

1. Yuichiro Sekiguchi (Invited Lecture)
"Introduction to 3+1 and BSSN formulation in numerical relativity", 2011 International School on Numerical Relativity and Gravitation, APCTP, Pohang, Korea, 2011年7月27-29日
2. 関口雄一郎, 木内建太, 久徳浩太郎, 柴田大,
"Gravitational Waves and Neutrino Emission from the Merger of Binary Neutron Stars", 2011年日本物理学会秋季大会, 弘前大, 2011年9月16-19日
3. 関口雄一郎
"種族 星コアの重力崩壊によるブラックホール降着円盤系の形成と進化", 日本天文学会 2011年秋季年会, 鹿児島大学, 2011年9月19-22日
4. Yuichiro Sekiguchi
"Effects of hyperons in binary neutron star mergers", The 21th workshop on General relativity and Gravitation in Japan, Tohoku University, 2011年9月26-29日
5. Yuichiro Sekiguchi (Invited Talk)
"Implementation of nuclear-theory based EOS and neutrino physics in numerical relativity simulations", WCU special lectures of EoS in Numerical Relativity
Hangyang University, Seoul, Korea, 2011年10月12-13日
6. 関口雄一郎 (招待講演)
"数値相対論シミュレーション", 第24回理論懇シンポジウム, 国立天文台, 2011年11月5-7日
7. Yuichiro Sekiguchi
"Black Hole Formation in Stellar Core Collapse", Black Holes: New Horizons, Banff centre, Canada, 2011年11月20-25日
8. 関口雄一郎
"Effects of Hyperons in Binary Neutron Star Merger", 素核宇融合による計算基礎物理学の進展 ミクロとマクロのかけ橋の構築, 合歓の里, 2011年12月3-5日
9. 関口雄一郎 (招待講演)
"大質量星の重力崩壊におけるブラックホール形成", 超新星爆発と数値シミュレーション, 京都大学基礎物理学研究所, 2011年12月26-28日
10. 関口雄一郎 (招待講演)
"Central Engine of GRBs: Progenitors, Models, and Simulations", ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙, 東京工業大, 2012年2月6-8日
11. 関口雄一郎

- "ブラックホールを作る: 大質量星の重力崩壊の数値相対論シミュレーションの現状報告", HPCI戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム, 秋葉原コンベンションホール, 2012年3月8日
12. Yuichiro Sekiguchi
"Formation and Evolution of Black Hole and Accretion Disk in Collapse of Massive Stellar Cores", Formations of Compact Objects: from the cradle to the grave, Waseda University, 2012年3月9日
 13. Yuichiro Sekiguchi
"Formation and Evolution of Black Hole and Accretion Disk in Collapse of Massive Stellar Cores", IAU Symposium 279, Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Hotel Nikko Senhime Monogatari, Nikko, Japan, 2012年3月12-16日
 14. 関口雄一郎
"BH-Disk系の一般相対論的ν輻射磁気流体力学シミュレーション", 日本天文学会 2012年春季年会, 龍谷大学, 2012年3月19-22日
 15. 関口雄一郎
"Effects of Hyperons in Binary Neutron Star Merger", 日本物理学会第67回年次大会, 関西学院大学, 2012年3月24-27日
 16. Yuichiro Sekiguchi (Invited Talk)
"Neutrino vs. Magnetic driven jet", Connecting the Electromagnetic and Gravitational Wave Skies in the Era of Advanced LIGO, Princeton University, 2012年4月30日-5月4日
 17. Yuichiro Sekiguchi (Invited)
"Implementation of nuclear-theory based EOS and neutrino physics in numerical relativity simulations", KISTI workshop, Pusan, Korea, 2012年7月12-14日
 18. 関口雄一郎, 柴田大
"大質量星重力崩壊の一般相対論的ニュートリノ輻射輸送シミュレーション", 日本物理学会2012年秋季大会, 京都産業大学, 2012年9月11-14日
 19. 関口雄一郎
"NSEに基づく電子捕獲反応率を用いた大質量星の重力崩壊", 日本天文学会 2012年秋季年会, 大分大学, 2012年9月19-21日
 20. Yuichiro Sekiguchi
"General relativistic neutrino-radiation (magneto-) hydrodynamics simulations: Formulations and applications", Conference on Computational Physics, Nichii Gakkan, 2012年10月14-18日
 21. 関口雄一郎
"大質量星の重力崩壊と線バースト", 線バースト研究会, 石川県文教会館, 2012年11月28-30日
 22. 関口雄一郎
"一般相対論的 輻射流体シミュレーション", 第25回理論懇シンポジウム: 計算宇宙物理学の新展開, つくばエポカル, 2012年12月22-24日
 23. Yuichiro Sekiguchi
"Radiation-Hydrodynamics Simulations in

Numerical Relativity", YKIS2013 Gravitational Waves, Yukawa Institute for Theoretical Physics, 2013年6月3-7日

24. Yuichiro Sekiguchi

"General Relativistic Neutrino Radiation Hydrodynamics Simulations: Formulations and Applications", 20th International Conference on General Relativity and Gravitation, Uniwersytet Warszawski, Warsaw, Poland, 2013年7月7-13日

25. Yuichiro Sekiguchi (Invited Talk)

"Electromagnetic counterparts of compact binary mergers", KAGRA face to face meeting, University of Toyama, 2013年8月1-3日

26. Yuichiro Sekiguchi (Invited Lecture)

"Foundations of numerical hydrodynamics", 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves, APCTP, Pohang, Korea, 2013年8月3-10日

27. Yuichiro Sekiguchi (Invited Talk)

"Binary Neutron Star Merger in Numerical Relativity: current status and future prospect" 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves, APCTP, Pohang, Korea, 2013年8月3-10日

28. 関口雄一郎

"コンパクト天体連星合体シミュレーションに向けた一般相対論的ニュートリノ輻射流体コードの開発(1)", 日本天文学会2013年秋季年会東北大学、2013年9月10-12日

29. 関口雄一郎 (基調講演)

"天文シミュレーションにおける状態方程式" 日本物理学会2013年秋季大会 高知大学 2013年9月20-23日

30. 関口雄一郎

"Radiation-Hydrodynamics simulations in Kyoto group", MICRA2013 ETC*, Trento, Italy 2013年9月22-27日

31. Yuichiro Sekiguchi

"Neutrinos and Gravitational Waves from GRBs", Supernovae and Gamma-Ray Bursts in Kyoto 2013 Yukawa Institute for Theoretical Physics, 2013年10月14日-11月15日

32. Yuichiro Sekiguchi

"Binary neutron star merger with a 'soft' equation of state and r-process" CoCoNuT Meeting 2013 Observatoire de Paris-Meudon, Paris, 2013年12月4-6日

33. Yuichiro Sekiguchi

"Binary Neutron Star Merger and Equation of State", JUSTIPEN-JUSEIPEN Workshop Riken, Japan, 2013年12月9-12日

34. 関口雄一郎

"連星中性子星の合体とR過程元素合成" 新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会, 鳴子温泉 旅館すがわら, 2013年12月19-21日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関口雄一郎(京都大学基礎物理学研究所)

研究者番号: 50531779

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: