

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：34506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740157

研究課題名(和文) 超新星爆発・ガンマ線バーストの輻射流体計算と遠方宇宙・初期宇宙観測への応用

研究課題名(英文) Radiation hydrodynamics calculation of supernovae and gamma-ray bursts and its application to the distant and/or early Universe

研究代表者

富永 望 (Tominaga, Nozomu)

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号：00550279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、超新星爆発・ガンマ線バーストの輻射流体・元素合成計算を行い遠方宇宙・初期宇宙観測への応用することを目的としていた。研究成果は、1. 超新星爆発における元素合成計算および多波長輻射流体計算と観測を用いた超新星モデルの制限、2. 相対論的輻射輸送計算コードの構築、に大別され、それぞれ、初期世代星、ガンマ線バースト、超新星爆発という観測と比較可能な理論モデルの構築、本研究の中で最も困難と考えていた相対論的多次元輻射輸送計算コードの開発、に成功した。このことは、世界初の相対論的輻射流体計算の実現および多様な観測による超新星爆発の爆発機構の包括的な制限に向けて重要なステップとなった。

研究成果の概要(英文)：I performed radiative transfer, radiation hydrodynamics, and nucleosynthesis calculations of supernovae and gamma-ray bursts and applied these results to observational studies of the distant and/or early Universe. The achievements are (1) construction of supernova model for various observations of extremely metal-poor stars and present-day peculiar supernovae with nucleosynthesis calculations and multicolor radiation hydrodynamics calculations, and (2) development of relativistic radiative transfer code, which was the most difficult compartment of this project. These will be important steps toward the development of relativistic radiation hydrodynamics code and comprehensive constraints on the explosion mechanism of supernovae and gamma-ray bursts.

研究分野：天体物理学

キーワード：超新星爆発 ガンマ線バースト 元素合成 第一世代星 非球対称爆発 可視光・赤外線観測

1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発は、銀河に匹敵する明るさで輝き、 10^{51} エルグ以上の莫大な運動エネルギーを持つ宇宙最大規模の爆発現象である。その起源は太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星であり、それらが一生の最期に重力崩壊を起こした末路である。超新星爆発は明るく遠方(赤方偏移 0.9 程度)まで観測可能であり、さらにその一部はより遠方(赤方偏移 8.2)でも観測可能なガンマ線バースト(ガンマ線で非常に明るい天体で相対論的ジェットを伴う)に付随しているため、遠方宇宙のプローブとなることが期待されている。その一方で、超新星爆発は宇宙における重元素(炭素、酸素、鉄といった重い元素)の主要な供給源であり、特に宇宙初期では他に重元素の供給源が存在せず、その化学進化に重要な役割を果たした。

このように超新星爆発・ガンマ線バーストは遠方宇宙の観測研究・初期宇宙の理解に対して重要な現象であるが、40年以上にわたる理論研究にも関わらず、超新星爆発・ガンマ線バーストの爆発機構は未だ解明されていない。一方で、超新星爆発、ガンマ線バースト、初期世代星の観測は年々増加している。そのため、ガンマ線バースト、超新星爆発、初期世代星という3つの観測を用いて超新星爆発の物理を導き出す研究が重要となってきた。

研究代表者は研究開始時には、特殊相対論的多次元流体元素合成計算コードを開発しガンマ線バーストの相対論的ジェットだけでなく非相対論的な超新星爆発を同時に取り扱うことを可能にし、相対論的ジェットの強さの違いによって初期世代星の元素組成とガンマ線バーストに付随した超新星爆発の明るさの多様性が同時に説明できることを示していた。また、研究代表者は、球対称多波長輻射流体計算を用いた研究を行い、超新星爆発のショックブレイクアウトという輻射と流体の相互作用が重要な現象の多波長光度曲線を求め、2008年に初めて報告された観測の再現に唯一成功していた。また、その結果に基づき、すばる望遠鏡などに対して具体的な観測提案を行っていた。

そこで、研究代表者のこれまでの研究に加えてガンマ線バーストからの輻射を取り扱うことが可能となれば、ガンマ線バースト、超新星爆発、初期世代星という3つの独立な観測と同時に比較可能な理論モデルが構築でき、爆発機構の解明および初期宇宙・遠方宇宙の観測研究の発展に多大な貢献が可能となる。ガンマ線バーストからの輻射を取り扱う際に問題となるのは、(1)ガンマ線バーストの輻射機構が不明であること、(2)相対論的多次元輻射流体計算が存在しないこと、であった。輻射機構について様々なアイデアが提案されているが、それらを区別するためには数値計算を用いて定量的に観測と比較しなければならぬ。研究開始当初までに特殊相

対論的多次元流体計算に基づき輻射を与える研究が行われていたものの、これらは輻射と流体の相互作用を無視していた。

2. 研究の目的

超新星爆発・ガンマ線バースト研究において最大の問題点は、超新星爆発・ガンマ線バーストの爆発機構およびガンマ線バーストの輻射機構が明らかでないことである。本研究では、多波長光子輸送計算コード・特殊相対論的多次元輻射流体元素合成計算コードの開発を行い、全ての観測を同時に再現可能な理論モデルを構築することを目的とした。これによって、観測を用いた超新星爆発・ガンマ線バーストの爆発機構およびガンマ線バーストの輻射機構に対する制限を可能にすることを目標とした。

(1) 特殊相対論的多次元多波長輻射流体元素合成計算の実現

ガンマ線バーストは非球対称かつ相対論的な現象であり、またガンマ線光度が非常に大きいことから、その輻射を考える際には輻射と流体の相互作用を考慮する必要がある。そこで、本研究は特殊相対論的多次元多波長輻射流体元素合成計算を実現する。具体的には、まず流体計算に基づき輻射に対する流体からの影響のみを考慮した多波長光子輸送計算コードを開発し、その後特殊相対論的多次元輻射輸送計算コードを開発する。

(2) 超新星爆発・ガンマ線バーストの統一モデルの構築と観測研究への展望

初期世代星の元素組成比から宇宙初期の超新星爆発の性質を制限することで、初期世代星の観測研究に基づいた超新星爆発・ガンマ線バーストの観測に対する理論予言を提出する。これにより、構築した理論モデルは初期世代星、ガンマ線バースト、超新星爆発という独立な観測と比較可能であり、理論モデルと観測との比較を通じて多様な観測から超新星爆発の爆発機構に制限を与える方法を提案する。

3. 研究の方法

これまで開発・運用を行ってきた特殊相対論的多次元流体元素合成計算コード、球対称多波長輻射流体計算コードを応用し発展させる。

輻射から流体へのフィードバックを考えず、逆コンプトン散乱などの流体から輻射への影響のみを取り入れた多波長光子輸送計算コードの開発を行う。研究代表者がこれまでに行った特殊相対論的多次元流体計算によって、相対論的ジェットが星中を伝播し星間空間に広がっていく際の密度構造の時間進化を用いて、具体的には、(1)他研究と同様に、提案されているガンマ線バーストの輻射機構に基づき光子の放射位置、放射スペクトルを仮定し、(2)時間進化する密度構造を背景として、光子の相対論的流体との相互作用をモンテカルロ法を用いて計算し、(3)ガ

ンマ線バーストの光度曲線・スペクトルの理論予言を提出する。

上の研究と並行して、コンプトン散乱の方向依存性を考慮した可変エディントンテンソルを用いた手法を適用し特殊相対論的多次元輻射輸送計算コードの開発を開始する。本研究ではグレイ近似を用いて白色光についてのコード開発を行うが、将来的な多波長化、金属による吸収などの素過程導入を視野に入れ、ローレンツ変換を用いた共動座標系での輻射輸送計算コードの開発を行う。

平成 24 年度以降には多波長光子輸送計算の観測との比較、論文化を行う。同時に、特殊相対論的多次元輻射輸送計算コードの開発を押し進め、コードの完成を待って甲南大学 PC クラスタにおいて小メッシュ数でのテスト計算を行う。本研究において最も難易度の高い部分と考えられ、もし、計算負荷が重すぎる場合には共動座標系での計算コードの開発から研究室座標系での計算コードの開発への変更も考慮する。

これらの研究と同時に、超新星爆発における元素合成計算も継続し、初期世代星やその他の観測を再現可能な超新星モデルを構築し、観測から支持された超新星モデルを実現するための超新星爆発・ガンマ線バーストの爆発機構の条件を提出する。これにより、これまで独立に取り扱われていたガンマ線バーストの観測(ガンマ線輝度・スペクトル)と超新星爆発の性質(輝度、爆発エネルギー、親星の質量、質量放出の割合など)の関係を明らかにする。

4. 研究成果

本研究課題では、超新星爆発・ガンマ線バーストの輻射流体計算コードを開発し遠方宇宙・初期宇宙観測への応用することを目的として研究活動を行った。研究成果は、1. 超新星爆発における元素合成計算と観測を用いた超新星モデルの制限、2. 多波長輻射流体計算を用いた超新星モデルの制限、3. 相対論的輻射輸送計算コードの構築、に大別され、それぞれ、1.および2.については、初期世代星、ガンマ線バースト、超新星爆発という観測と比較可能な理論モデルの構築、3.については、本研究の中で最も困難と考えていた相対論的多次元輻射輸送計算コードの開発、に成功している。このことは、世界初の相対論的輻射流体計算の実現および多様な観測による超新星爆発の爆発機構の包括的な制限に向けて、今後につながる重要なステップとなった。それぞれの具体的研究成果は以下の通りである。

1. 超新星爆発における元素合成計算と観測を用いた超新星モデルの制限

炭素過剰クエーサー吸収線系の起源の解明: 2010年にクエーサー吸収線系の組成の観測で、通常と異なり炭素過剰を示すクエーサー吸収線系が観測され、金属欠乏星の元素

組成と関係が指摘された。本研究により、炭素過剰は暗い超新星爆発によるものとして説明可能であり、そのほかの元素組成も説明できることを示した。これにより、遠方宇宙でも近傍と同様に暗い超新星爆発が発生し、それによる重元素汚染が起こっていることを示した。

宇宙初期の超巨大質量星のガンマ線バースト: 宇宙初期には太陽の500倍を超えるような超巨大質量星が形成され、その星は非常に明るいガンマ線バーストを引き起こすと提案されている。そこで、そのような爆発における元素合成計算を行い、超巨大質量星のガンマ線バーストが宇宙の化学進化に寄与するほどの数が起こってはいけなことを明らかにした。

金属欠乏星 BD+44°493 の元素組成の起源: 非常に明るい金属欠乏星 BD+44°493 の詳細な元素組成を測定・提出し、その元素組成を再現する超新星爆発の理論モデルを構築することで、炭素過剰な金属欠乏星の起源として暗い超新星爆発が最も有力であることを示した。この結果は初期宇宙においても現在の宇宙と同様に暗い超新星爆発が起こっていたことを示し、初期宇宙においても暗い超新星爆発の寄与を考慮する必要があることを示した。

2. 多波長輻射流体計算を用いた超新星モデルの制限

激しい質量放出を経験した赤色巨星の超新星爆発: 近年、赤色巨星のまま超新星爆発を起こす星の質量には上限があることが提案されており、それを説明するために激しい質量放出が起こるという提案がなされている。本研究では、そのような激しい質量放出を経験した赤色巨星の光度曲線は通常のII-P型超新星爆発ではなく、非常に青く明るくなることを示した。また、その光度曲線は超新星爆発 2009kf の光度曲線を説明できることを示した。

非正常質量放出による非常に明るい超新星爆発の分散の説明: 近年、星の進化段階で非正常な質量放出が提案されている。本研究では、非正常な質量放出の違いによって、非常に明るい超新星爆発に細いスペクトル線が見えるかどうかという違いを説明できることが明らかとなった。

非常に明るい超新星爆発 2006gy の起源: 多波長輻射流体計算を用いて、非常に明るかった超新星爆発 2006gy の多色光度曲線を再現し、その起源が非常に濃い星周物質と超新星爆発放出物質の衝突であることを明らかにした。

Ib型超新星爆発 2008D の初期の紫外可視光光度曲線の起源: Ib型超新星爆発 2008D はショックブレイクアウト後の光度曲線があまり暗くならず、その起源について星周物質中のショックブレイクアウトだったためである、ということが提案されていた。本研

究では、輻射流体計算を行い新たにジェット状の爆発によって放射性元素ニッケル 56 が外層に混合する、というモデルでもその観測の特徴が再現できることを示した。

電子捕獲型超新星の光度曲線：電子捕獲型超新星は球対称爆発を起こすことが唯一理論的に示されている超新星爆発である。本研究では、電子捕獲型超新星の理論計算の結果に基づき、多波長輻射流体計算を用いて電子捕獲型超新星の多色光度曲線を初めて提出した。その結果は、過去にその元素組成から電子捕獲型超新星の超新星残骸であると提案されていた、かに星雲を形成した超新星 1054 の光度曲線を再現することを示した。

星風中で爆発する電子捕獲型超新星の光度曲線：平成 25 年度に行った電子捕獲型超新星の光度曲線の研究の拡張である。電子捕獲型超新星親星の質量放出について考慮することで、超新星 1054 の後期光度曲線が超新星放出物質と星周物質の相互作用によって説明できることを示した。

3 . 相対論的輻射流体計算コードの構築

モンテカルロ計算を用いたガンマ線バーストからの熱的放射：近年、ガンマ線バーストの即時放射において、熱的放射の重要性が注目を浴びている。逆コンプトン放射による光子のエネルギー変化を考慮に入れたモンテカルロ計算コードを開発した。開発したコードと既に開発している特殊相対論的流体計算コードを組み合わせて、大質量星中心部で形成された相対論的ジェットが親星を突き抜け、そこから放射された熱的光子がどのように観測されるかについて明らかにした。

相対論的流体中でのランダムウォーク過程と実質的な光学的深さの導出：相対論的流体中の輻射輸送には相対論的ビーミング効果や光学的深さの角度依存性等の相対論的效果を考慮に入れる必要がある。それらを考慮した相対論的流体中での光子の散乱回数に対する解析的な式や、有効光学的深さに対する相対論的な解析的表式を初めて導出した。その結果、有効光学的深さは、物質が静止しておりかつ散乱が支配的な場合には散乱に対する光学的深さと吸収に対する光学的深さの幾何平均となるが、相対論的流体中では吸収に対する光学的深さに比例するという事が分かった。

相対論的多次元輻射輸送計算コードの開発：球面調和関数を用いて非等方散乱を取り扱う SHDOM コードを元に、時間依存性、ローレンツ変換、コンプトン散乱を取り扱うことが可能な相対論的多次元輻射輸送計算コードを開発し、様々なテスト計算を行い計算コードの検証を行った。本計算コード開発にあたっての当初計画からの変更点は、多波長の取り扱いを可能としたことと研究室座標系を採用したことである。この結果を研究会「Gamma-Ray Bursts in the Multi-messenger

Era」 「XXVII Texas Symposium」 「GRB conference, Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013」にてその成果を発表した。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 25 件)

査読有り論文

1. Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Mori, K., Matsumoto, E., Kikuchi, Y., Shibata, T., Sako, S., Aoki, T., Doi, M., Kobayashi, N., Maehara, H., Matsunaga, N., Mito, H., Miyata, T., Nakada, Y., Soyano, T., Tarusawa, K., Miyazaki, S., Nakata, F., Okada, N., Sarugaku, Y., Richmond, M. W., Akitaya, H., Aldering, G., Arimatsu, K., Contreras, C., Horiuchi, T., Hsiao, E. Y., Itoh, R., Iwata, I., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kitagawa, Y., Kokubo, M., Kuroda, D., Mazzali, P., Misawa, T., Moritani, Y., Morrell, N., Okamoto, R., Pavlyuk, N., Phillips, M. M., Pian, E., Sahu, D., Saito, Y., Sano, K., Stritzinger, M. D., Tachibana, Y., Taddia, F., Takaki, K., Tateuchi, K., Tomita, A., Tsvetkov, D., Ui, T., Ukita, N., Urata, Y., Walker, E. S., and Yoshii, T., "Kiso Supernova Survey (KISS): Survey strategy", PASJ, 66, 114-(2014). 10.1093/pasj/psu105
2. Tanaka, M., Morokuma, T., Itoh, R., Akitaya, H., Tominaga, N., Saito, Y., Stawarz, ~~Ł~~, Tanaka, Y. T., Gandhi, P., Ali, G., Aoki, T., Contreras, C., Doi, M., Essam, A., Hamed, G., Hsiao, E. Y., Iwata, I., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kikuchi, Y., Kobayashi, N., Kuroda, D., Maehara, H., Matsumoto, E., Mazzali, P. A., Minezaki, T., Mito, H., Miyata, T., Miyazaki, S., Mori, K., Moritani, Y., Morokuma-Matsui, K., Morrell, N., Nagao, T., Nakada, Y., Nakata, F., Noma, C., Ohsuga, K., Okada, N., Phillips, M. M., Pian, E., Richmond, M. W., Sahu, D., Sako, S., Sarugaku, Y., Shibata, T., Soyano, T., Stritzinger, M. D., Tachibana, Y., Taddia, F., Takaki, K., Takey, A., Tarusawa, K., Ui, T., Ukita, N., Urata, Y., Walker, E. S., and Yoshii, T., "Discovery of Dramatic Optical Variability in SDSS J1100+4421: A Peculiar Radio-loud Narrow-line Seyfert 1 Galaxy?", ApJ, 793, L26-(2014).

- 10.1088/2041-8205/793/2/L26
3. Ishigaki, M. N., Tominaga, N., Kobayashi, C., and Nomoto, K., "Faint Population III Supernovae as the Origin of the Most Iron-poor Stars", *ApJ*, 792, L32-(2014).
10.1088/2041-8205/792/2/L32
 4. Susa, H., Hasegawa, K., and Tominaga, N., "The Mass Spectrum of the First Stars", *ApJ*, 792, 32-(2014).
10.1088/0004-637X/792/1/32
 5. Moriya, T. J., Tominaga, N., Langer, N., Nomoto, K., Blinnikov, S. I., and Sorokina, E. I., "Electron-capture supernovae exploding within their progenitor wind", *A&A*, 569, A57-(2014).
10.1051/0004-6361/201424264
 6. Aoki, W., Tominaga, N., Beers, T. C., Honda, S., and Lee, Y. S., "A chemical signature of first-generation very massive stars", *Sci*, 345, 912-915 (2014). 10.1126/science.1252633
 7. Shibata, S., Tominaga, N., and Tanaka, M., "Random Walks and Effective Optical Depth in Relativistic Flow", *ApJ*, 787, L4-(2014).
10.1088/2041-8205/787/1/L4
 8. Kobayashi, C., Ishigaki, M. N., Tominaga, N., and Nomoto, K., "The Origin of Low $[\alpha/\text{Fe}]$ Ratios in Extremely Metal-poor Stars", *ApJ*, 785, L5-(2014).
10.1088/2041-8205/785/1/L5
 9. Tominaga, N., Iwamoto, N., and Nomoto, K., "Abundance Profiling of Extremely Metal-poor Stars and Supernova Properties in the Early Universe", *ApJ*, 785, 98-(2014).
10.1088/0004-637X/785/2/98
 10. Nomoto, K., Kobayashi, C., and Tominaga, N., "Nucleosynthesis in Stars and the Chemical Enrichment of Galaxies", *ARA&A*, 51, 457-509 (2013).
10.1146/annurev-astro-082812-140956
 11. Ito, H., Aoki, W., Beers, T. C., Tominaga, N., Honda, S., and Carollo, D., "Chemical Analysis of the Ninth Magnitude Carbon-enhanced Metal-poor Star BD+44°493", *ApJ*, 773, 33-(2013).
10.1088/0004-637X/773/1/33
 12. Tominaga, N., Blinnikov, S. I., and Nomoto, K., "Supernova Explosions of Super-asymptotic Giant Branch Stars: Multicolor Light Curves of Electron-capture Supernovae", *ApJ*, 771, L12-(2013).
10.1088/2041-8205/771/1/L12
 13. Bersten, M. C., Tanaka, M., Tominaga, N., Benvenuto, O. G., and Nomoto, K., "Early Ultraviolet/Optical Emission of The Type Ib SN 2008D", *ApJ*, 767, 143-(2013).
10.1088/0004-637X/767/2/143
 14. Moriya, T. J., Blinnikov, S. I., Tominaga, N., Yoshida, N., Tanaka, M., Maeda, K., and Nomoto, K., "Light-curve modelling of superluminous supernova 2006gy: collision between supernova ejecta and a dense circumstellar medium", *MNRAS*, 428, 1020-1035 (2013).
10.1093/mnras/sts075
 15. Moriya, T., Tominaga, N., Blinnikov, S. I., Baklanov, P. V., and Sorokina, E. I., "Erratum: Supernovae from red supergiants with extensive mass loss", *MNRAS*, 424, 2400-2400 (2012).
10.1111/j.1365-2966.2012.20884.x
 16. Moriya, T. J. and Tominaga, N., "Diversity of Luminous Supernovae from Non-steady Mass Loss", *ApJ*, 747, 118-(2012).
10.1088/0004-637X/747/2/118
 17. Moriya, T., Tominaga, N., Blinnikov, S. I., Baklanov, P. V., and Sorokina, E. I., "Supernovae from red supergiants with extensive mass loss", *MNRAS*, 415, 199-213 (2011).
10.1111/j.1365-2966.2011.18689.x
 18. Kobayashi, C., Tominaga, N., and Nomoto, K., "Chemical Enrichment in the Carbon-enhanced Damped Ly α System by Population III Supernovae", *ApJ*, 730, L14-(2011).
10.1088/2041-8205/730/2/L14
- 査読無論文
19. Tominaga, N., Morokuma, T., Tanaka, M., Yasuda, N., Furusawa, H., Jiang, J., Okabe, N., Futamase, T., Miyazaki, S., Moriya, T. J., Noumaru, J., Schubert, K., and Takata, T., "Supernova candidates discovered with Subaru/Hyper Suprime-Cam", *ATel*, 6763, 1-(2014).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ATel.6763...1T>
 20. Tominaga, N., Morokuma, T., Tanaka, M., Yasuda, N., Furusawa, H., Jiang, J., Miyazaki, S., Moriya, T. J., Noumaru, J., Schubert, K., and Takata, T., "First supernova candidates discovered with Subaru/Hyper Suprime-Cam", *ATel*, 6291, 1-(2014).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ATel.6291...1T>
 21. Tominaga, N., Matsumoto, E., Shibata, T., Tsvetkov, D., Pavlyuk, N., Takeishi, M., Takahashi, K., Morokuma, T., Tanaka, M., Ukita, N., and Iwata,

- I., "Supernova 2014bo", CBET, 3898, 1-(2014).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014CBET.3898...1T>
22. Tominaga, N., Iwamoto, N., and Nomoto, K., "Distribution of supernova properties in the early universe", AIPC, 1594, 52-57 (2014).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014AIPC.1594...52T>
23. Tominaga, N., "Nucleosynthetic constraints on gamma-ray bursts and supernovae", AIPC, 1484, 169-174 (2012).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012AIPC.1484..169T>
24. Tominaga, N., Morokuma, T., and Blinnikov, S. I., "High-z core-collapse supernova survey with shock breakout", AIPC, 1480, 214-217 (2012).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012AIPC.1480..214T>
25. Tominaga, N., "Nucleosynthesis in Gamma-Ray Bursts and Supernovae: Constraints of Extremely Metal-Poor Stars", ASPC, 458, 47-(2012).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012ASPC..458...47T>

〔学会発表〕(計 8 件)

1. Tominaga, N., Shibata, S., Blinnikov, S., "Development of a multidimensional relativistic radiative transfer code", Gamma-Ray Bursts in the Multi-messenger Era, 2014年06月16日~2014年06月19日, パリ (フランス)
2. 富永望、柴田三四郎、Sergei I. Blinnikov, "相対論的多次元輻射輸送計算コードの開発", 日本天文学会2014年春季年会, 2014年03月21日, 三鷹・東京
3. Tominaga, N., Shibata, S., Blinnikov, S., "Development of a multidimensional relativistic radiative transfer code", XXVII Texas Symposium, 2013年12月09日, アメリカ・ダラス
4. Tominaga, N., Shibata, S., Blinnikov, S., "Development of a multidimensional relativistic radiative transfer code", GRB conference, Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013, 2013年11月11日~2013年11月15日, 京都
5. Tominaga, N., "Multicolor light curves of electron-capture supernovae", SN conference, Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013,

2013年10月31日, 京都

6. Tominaga, N., "Wide-field transient searches: the impact of new discoveries on theory", The 2nd PANDA Symposium (招待講演), 2013年04月25日, 中国・西安
7. Shibata, S., & Tominaga, N., "Monte Carlo Simulation of Thermal Radiation from Relativistic Media", Gamma-Ray Bursts 2012 Conference -GRB2012, 2012/5/7~2012/5/11, Munich, Germany
8. Tominaga, N., "Shock Breakout of Type II Plateau Supernova", IAU Symposium 279, 2012/3/12 栃木・日光

〔その他〕

ホームページ等

<http://tpweb2.phys.konan-u.ac.jp/~tominaga/>

<http://tpweb2.phys.konan-u.ac.jp/~tominaga/HSC-SN/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

富永 望 (TOMINAGA, N.ozomu)

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号：00550279