

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540305

研究課題名(和文)ガンマ線バーストの火の玉光球モデルによる米徳関係式の起源の研究

研究課題名(英文) Study of Yonetoku Relation of Gamma Ray Burst by fire model

研究代表者

中村 卓史 (nakamura, takashi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80155837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：継続時間の長いガンマ線バーストLGRBのみに成立すると考えられていた米徳関係式が継続時間の短いSGRBに対しても成立する事を発見した。この関係式の相関係数は0.98で偶然に成立する確率は10万分の1程度である。この関係式を使い、72個の明るいSGRBの赤方偏移を決定して、SGRBの発生率が地球の近傍で最低年間Mpc立方内で1000万分の1である事を導いた。SGRBは我が国のKAGRA等の重力波の検出器の最重要なターゲットで、上のSGRBの発生率を元に、重力波の検出数が最低でも年間4イベント程度、多い場合は600イベント程度期待出来る事を予想できた。そして、早ければ2015年にも検出される。

研究成果の概要(英文)：Although Yonetoku relation for GRB (Gamma Ray Burst) has been thought to be applied only for Long GRB, we found that it holds also for Short GRB. The correlation coefficient and the chance probability of this new relation are 0.98 and one part of hundred thousand, respectively. Applying this new correlation to bright 72 SGRBs detected by BATSE, the birth rate of SGRB near the earth is found to be one event/Mpc cubic per year. SGRB is one of the most plausible gravitational wave sources for Japanese KAGRA, LIGO and Virgo. From this event rate of SGRBs, we expect at least 4 gravitational events per year in the pessimistic case while 600 events per year in the optimistic case. Therefore gravitational wave might be observed in 2015 for the earliest case.

研究分野：相対論的天体物理学

キーワード：ガンマ線バースト 米徳関係式 Short GRB 重力波源

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト(GRB)とは、大凡 100 億光年の宇宙論的な距離から光子のエネルギーが 250keV 程度のガンマ線が到来する現象であり、年間 1000 イベントくらいある。GRB には継続時間が 2 秒以下の Short GRB (SGRB)と継続時間が 2 秒から 100 秒までの Long GRB (LGRB)の 2 種類がある。LGRB には超新星爆発を伴うものがあり、水素とヘリウムの外層も失った Wolf-Rayet 星が Black Hole (BH)になる過程で起こると信じられているが、その詳細は確定していない。一方の SGRB は Neutron Star (NS) 連星や NS-BH 連星の合体説が有力であるが、その決定的な証拠はまだない状態である。重力波が SGRB に伴って検出されれば、Smoking Gun となるが、それが可能になるのは 2015 年以降である。

2. 研究の目的

GRB のスペクトルは Band スペクトルと呼ばれる折れ曲がったパワー則で良く記述出来る。2004 年に代表者の中村は金沢大学の米徳らと LGRB に対して光度の最大値 L_p と全時間積分したスペクトルから決まる光子のピークエネルギー E_p の間に $L_p \propto E_p^2$ という米徳関係式と後に呼ばれるようになった関係があることを発見した(現在この論文の被引用回数は 333 である)。2004 年の論文当時ではわずか 10 程度しか赤方変移の決まったガンマ線バーストしかなかった。しかし、2010 年になると赤方偏移が決まったガンマ線バーストの数が 100 程度に増えた。そこで、以前から検討課題になっていた、米徳関係式の赤方偏移依存性と観測 flux 依存性を調べることが可能になった。その結果、米徳関係式には弱いけれども赤方偏移依存性があることが判明した。それでは、米徳関係式は使えないのかと言うとそうではない。光度の最大値を決めるのに観測系で 1 秒のビンを使っていた。しかし、これでは高赤方偏移の宇宙膨張に対する静止系では短い時間のビンを使っていることになる。ガンマ線バーストは一般に時間変動が大きいので短い時間ビンを使う程、光度の最大値は大きいことになる。つまり、光度の最大値を観測者系ではなく、静止系でビンを決めたものにすれば米徳関

係式の赤方変移依存性が消えることが予想できる。このようにして米徳関係式には進化効果も selection 効果もほとんどない GRB 固有の性質であることが判明した。また、LGRB に対しては各時間毎にも米徳関係式が成立していそうであることが Ghirlanda, Nava & Ghisellini によって発見された。これらの事実から、基本的には SGRB と LGRB は同じ放射機構ではないかという示唆が生まれたが、それを関係式として具体的に示す必要がある。また、LGRB は大質量星の重力崩壊で SGRB は連星中性子星等の合体ではないかと信じられているが、これを確認する為にも米徳関係式のさらに詳細な研究が必要であり、それがこの研究課題の主な目的である。

3. 研究の方法

基本的にはデータ解析も用いるものの、代表者が行う理論的な研究である。もちろん、代表者の主催する京都大学物理学教室天体核研究室の大学院生との共同研究や 2004 年に発見された米徳関係式以来、共同研究をしている金沢大学の米徳准教授とその大学院生との共同研究も重要である。

4. 研究成果

SGRB については米徳関係式が、成立しないと考えられていたが、論文で、2012 年までに赤方偏移と E_p の決まった 8 つの SGRB を解析した結果、SGRB も米徳関係式を満たす事がわかった。それまでは、LGRB の中で継続時間の短い GRB を SGRB と扱っていたのが問題だった。 $L_p \propto E_p^2$ という関係は成立するが、同じ E_p に対しては SGRB の方が 5 倍位暗い事が判明した。新しい、SGRB の米徳関係式の相関係数は 0.98 で偶然にこれが成立する確率は 1.5×10^{-5} である。米徳関係式が LGRB と SGRB の両方で成立するという事は、LGRB と SGRB が物理的に似たメカニズムで発生すること強く示唆する。また、同時に、関係式の大きさに違いがある事は、米徳関係式の理解に極めて重要な結果である。その原因としては、中心に LGRB にも SGRB にも存在していると考えられる BH の質量の差が考えられる。

SGRB の発生率は赤方偏移が決まったものが少ない為にはっきりしなかった。しかし、BATSE という衛星は 1990-2000 年の間に約 800 イベントもの SGRB を検出している。そこで、で述べた SGRB に対する米徳関係式を使うと赤方偏移を決める事が出来る事に着目した。論文では、具体的には光子数が多くて、 E_p を精度良く決められる 72 個の SGRB

の赤方偏移を決定する事に成功した。これに基づき、SGRB の発生率を推定した。その結果、現在、地球の近傍での最小の発生率が 1.15×10^{-7} イベント $\text{Mpc}^{-3}/\text{年}$ である事が解った。SGRB は NS-NS や NS-BH の合体ではないかと言われているので、2015-2019 年頃までには我が国 KAGRA 等の第 2 世代重力波干渉計がその重力波を検出し SGRB の起源を明らかにする可能性がある。SGRB は開き角 6 度位のジェットと考えられているので、KAGRA 等は SGRB が NS-NS の合体の場合、最低年間 4 イベント、また NS-BH の場合は年間 160 イベント程 SGRB からの重力波を検出すると期待出来る事が判明した。明るい SGRB だけを解析の対象にしているの、暗いのも入れると実際にはこの 4 倍程度の NS-NS なら年間 16 イベント程度、NS-BH の場合は 600 イベント位の検出が期待される。NS-BH は NS-NS より質量が大きいので遠くても重力波が検出可能なのが重要で、SGRB のほんの 10% が NS-BH でもイベント率は年間 70 イベント位になり、2015 年にも検出される可能性が出て来た。

2012 年頃から、継続時間が極めて長く 10^4 秒程度までになる GRB が見つかりだし、Ultra-Long GRB (ULGRB) という新しいクラスが SGRB と LGRB に加わる事が明らかになった。極めて興味深い事に、GRB121027A という ULGRB は LGRB の米徳関係式に従う。論文、[http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/759/2/128](#) では、ULGRB が金属量が少なく、水素の外層を質量放出で失わない、いわゆる青色超巨星起源説を提案した。この場合、最外層の自由落下時間が丁度継続時間の 10^4 秒程度になる。また、中心の BH から発生したジェットが作る熱いコクーンが、10 日後位から普通の超新星の 100 倍位明るい Super Luminous 超新星を起こす事も明らかにした。この予想は観測事実の公表の前であったが、信じられないくらいに観測と一致する事がわかり、[http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/770/1/8](#) や [http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/67](#) の大きな国際会議で発表し注目された。

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 9 件)

R. Tsutsui, T. Nakamura, D. Yonetoku and K. Takahashi, Improved Ep-TL-Lp Diagram and a Robust Regression method, PASJ, 査読有, 63, 2011, pp741-753, <http://dx.doi.org/10.1093/pasj/63.4.741>

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, MNRAS, 査読有, 431, 2013, 1394-1404, DOI:10.1093/mnras/stt262

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, PASJ 査読有, 65, 2013, 3-14, <http://dx.doi.org/10.1093/pasj/65.1.3>

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, Astrophys. J, 査読有, 759, 2012, 128-137, <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/759/2/128>

K. Kashiyama, D. Nakauchi, Y. Suwa, H. Yajima, T. Nakamura, Luminous supernova-like UV/optical/infrared transients associated ultra-long gamma-ray bursts from metal-poor blue supergiant, Astrophys. J, 査読有, 770, 2013, 8-16, <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/770/1/8>

D. Nakauchi, K. Kashiyama, Y. Suwa, T. Nakamura, Blue Supergiant Model for Ultra-long Gamma-Ray Burst with Superluminous-supernova-like Bump, Astrophys. J, 査読有, 778, 2013, 67-88, <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/67>

Daisuke Yonetoku, Takashi Nakamura, Tatsuya Sawano, Keitaro Takahashi and Asuka Toyonago, 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, 査読有, 789, 2014, 65-70, <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/789/1/65>

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, MNRAS, 査読有、442、2014、2963-2992 doi: 10.1093/mnras/stu1022

Nakamura, Takashi; Kashiyama, Kazumi; Nakauchi, Daisuke; Suwa, Yudai; Sakamoto, Takanori; 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, 査読有、796、2014、13-23、<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/796/1/13>

〔学会発表〕(計 11 件)

R. Tsutsui, T. Nakamura, D. Yonetoku and K. Takahashi, 長いガンマ線バーストの新しい分類法、日本天文学会、2012年3月21日、京都大学、京都市

Ryo Tsutsui, Takashi Nakamura, Daisuke Yonetoku, Keitaro Takahashi, Are gamma-ray bursts as precise distance indicators as Type Ia Supernovae?, The Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation, and Relativistic Field Theory(招待講演)、2012年07月01日、Stockholm大学、Sweden

筒井亮、中村卓史、米徳大輔、高橋慶太郎、ガンマ線バーストはIa型超新星のように精度のよい標準光源となりうるのか?、日本天文学会 2012年秋季年会、2012年09月19日、大分大学、大分市

仲内大翼、坂本、諏訪、榎山、中村卓史、低質量種族III星が起こすガンマ線バーストの特徴とその観測可能性、日本天文学会2012年秋季年会、2012年09月20日、大分大学

D. Nakauchi, K. Kashiyama, Y. Suwa, T. Sakamoto, H. Yajima and T. Nakamura, Ultra Long Duration Gamma-Ray Bursts from Population III Stars and Their

Prospected Counterpart, Huntsville GRB symposium2013、2013年04月12日、Nashville, Tennessee, NASA USA

D. Nakauchi, K. Kashiyama, Y. Suwa and T. Nakamura, Blue Supergiant Model for Ultra- Long Gamma- Ray Burst with Superluminous- SN- like Bump、27th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics、2013年12月10日、Dallas, Texas 大学、USA

仲内大翼、榎山和己、諏訪雄大、中村卓史、Ultra- Long Gamma- Ray Burst の青色超巨星起源シナリオ、日本天文学会、2013年09月13日、東北大学(仙台市)

D. Nakauchi, K. Kashiyama, Y. Suwa and T. Nakamura, Blue Supergiant Model for Ultra- Long Gamma- Ray Burst with Superluminous- SN- like Bump、Supernovae and Gamma- Ray Bursts、日本物理学会、2013年11月14日、京都大学、京都市

仲内大翼、榎山和己、長倉洋樹、諏訪雄大、中村卓史、Probing Relativistic Supernova Explosions with Multi-Band Synchrotron Emission、日本天文学会、2014年 9月11日、山形大学、山形市

鳥屋子あすか、米徳大輔、澤野達哉、中村卓史、重力波源としての短時間ガンマ線バーストの発生率、日本天文学会、2014年 9月11日、山形大学、山形市

鳥屋子あすか、米徳大輔、澤野達哉、中村卓史、重力波源としてのShort GRB発生頻度の研究、日本物理学会、2014年 9月18日、佐賀大学、佐賀市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 卓史 (NAKAMURA Takashi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：80155837

