

平成21年 5月15日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18740147

研究課題名（和文） ガンマ線バースト現象と無衝突衝撃波の物理

研究課題名（英文） Gamma-Ray Burst Phenomena and Collisionless Shock Physics

研究代表者

井岡 邦仁（IOKA KUNIHITO）

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

研究者番号：80402759

研究成果の概要：

ガンマ線バースト（以後 GRB）はブラックホールの形成と関係する宇宙最大の爆発現象である。本研究では宇宙一明るい GRB がどのように光っているのか、という基本的な問いを理論的に考察した。その結果、(1) GRB が 90%以上という異常に高い効率で光っていることが分かった。(2) 高効率を実現するモデル（衝撃波加速効率の時間変化モデルや電子陽電子モデル）をいくつか提唱し、(3) 高エネルギーガンマ線や宇宙線による検証法を提案した。(4) 新たに発見された暗い GRB に対しても理論モデル（中性子星からのジェットモデル）を立て、高エネルギーニュートリノ、宇宙線の量を評価した。(5) 衝撃波による粒子加速効率を測定する新しい方法（偏光を用いた方法）を提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	270,000	3,670,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理・宇宙線・理論天文学・ガンマ線バースト・衝撃波加速

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト（以後 GRB）とは宇宙のどこかで 1日に2, 3回ほど起こる、水素爆弾を10の30乗個ほど集めたぐらいの爆発である。200keV 程度のガンマ線が数秒ほどやってくるので GRB と呼ばれる。その明るさは宇宙で最も明るく、宇宙に存在する全ての星を足してやっとその明るさになるぐ

らいである。つまり GRB は宇宙で最も激しく明るい現象である。近年の急速な進展によって、どうやら重い星が死ぬ（おそらくブラックホールが中心に出来る）ときに GRB が起こるらしいということは分かってきたが、なぜ、どのように GRB になるのかは謎のままである。2004年11月に GRB 専用衛星 Swift が打ちあがり新しい結果を出し始めた。

2. 研究の目的

本研究ではGRBがどのようにして起こるのか、特にその放射機構を理論的に明らかにすることを旨とする。そして、その結果を用いて無衝突衝撃波における粒子加速の物理に制限を与える。また、他の分野、例えばGRBからの高エネルギー宇宙線の評価などに発展させる。

3. 研究の方法

先進の観測、特にSwift衛星の結果を用いた現象論的なアプローチを行う。これまで、GRBが受かってから残光（GRBの方向に残る、時間とともに冪的に暗くなる光）に他波長の望遠鏡を向けるために数千秒ほど要したが、Swift衛星はこの最初の三千秒を観測できる。最新の結果はどれも予想を覆しており、理論的解釈を与えることは重要である。特にエックス線の初期残光はしばらく暗くならない。これが無衝突衝撃波の物理による可能性を指摘し、光学や電波残光を用いて検証する。Swift衛星が非常に順調に結果を出してきたので第一原理的な理論研究ではなく、観測と結びついた理論研究に力を注いだ。

GRBの放射機構を明らかに出来れば、多岐にわたる発展が可能になる。例えばGRBからの高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、ガンマ線を評価できる。GRBは 10^{20} eVあたりの超高エネルギー宇宙線の源として有力視されており、その確認は必須である。GRBからのTeV-PeVニュートリノは完成間近であるIceCubeの重要なターゲットであり、GeVガンマ線は2006-7年に稼動するGLASTのほぼ確実な源であるといわれている。（現在、Fermi衛星として観測結果を出している。GeVガンマ線が観測され、議論されている。）

4. 研究成果

(1) GRB最初の三時間

ガンマ線バースト（GRB）は宇宙最大の爆発である。その最初の三時間が標準モデルを変更するほどの大問題であることを明確にしたことは、これまでの大きな成果の一つである。GRB最初の三時間の様子は、GRB専用衛星Swiftが2005年に打ちあがってはいじめて観測できるようになった。その結果、当初予想されていたよりもGRBは急激に暗くなった後、減光が弱まりダラダラと放射が続くことが分かった。我々は、この振る舞いの理論的意味を考察し、GRBの放射効率が90%以上という異常に高いものでなければならないことを示した。また、この問題を解決する一つの方法として、加速効率が時間変化するモデルを提案した。現在このモデルはGRBの最初の三時間を説明する一つのモデル

として議論されている。放射効率の問題は、次の(2)での考察にも繋がった。

(2) GRBの放射機構と電子陽電子

これまでのGRBの放射モデルでは、上記で示したほどの高い放射効率を実現するのは大変困難である。我々は、高い放射効率を実現するモデル（電子陽電子プラズマの不安定性による乱流モデル）を提唱し、GeVガンマ領域に青方変移した電子陽電子対の消滅線が現れることを予言した。これは最近打ち上ったFermi衛星の重要なターゲットになることは確実で、たとえ観測されなくてもそこからGRBジェットにどれくらい電子陽電子が含まれているのかを制限できることが分かった。これまで対生成カットオフだけを用いていたが、対消滅線を用いることによって制限がさらに強くなる。今後、実際の観測データを使って議論を進める必要がある。

(3) 暗いGRB

Swift衛星の観測から、非常に暗いGRBが存在し新たな種族を形成しているかもしれないことが分かってきた。我々はGRBと残光の性質を解析することで、このような暗いGRBもジェットで作られる可能性があることを示し、ジェットが非常に長時間滑らかに放出されていることから中心エンジンはブラックホールではなく中性子星である可能性を示した。また、頻度が通常のGRBよりも高いため高エネルギー背景ニュートリノに大きく寄与することを示した。これらの研究は、暗いGRBのモデルを提唱しただけでなく、暗いGRBの重要性を明らかにした点で評価されている。今後はFermi衛星でも暗いGRBが観測される可能性があるため、暗いGRBの高エネルギーガンマ線放射についても議論していく必要がある。

(4) GRBからの宇宙線

2007年、Auger実験が最高エネルギー宇宙線の非等方性に関する論文を発表し皆を驚かした。GRBも最高エネルギー宇宙線の有力な源の一つであり、GRBで最高エネルギー宇宙線が加速されているかどうかは、本研究テーマである無衝突衝撃波での粒子加速機構に対して重要な示唆を与える。また、Augerの結果は宇宙線が鉄などの重い原子核である可能性も示唆しており、GRBで鉄が加速できるかどうかを調べることは重要である。そこでGRB中での原子核の破壊プロセスを考慮して、最高エネルギー宇宙線の加速可能性を検討した。その結果、重い原子核は十分に生き残れるパラメータが存在することが分かり、それは我々が本研究で提案した非常に暗いGRBが起源であった場合に対応することが分かった。これは暗いGRBが今後の研究対

象として非常に面白いことを示唆する。

(5) 衝撃波における電子加速効率
GRB やその他の宇宙の高エネルギー現象の多くは、無衝突衝撃波によって加速された電子が放射することで輝いていると考えられている。衝撃波を起こす前は陽子がほとんどの運動エネルギーを担っているため、電子に渡されるエネルギーの割合が重要になる。この割合を第一原理から求めることは非常に難しい。そこで GRB の観測を使ってこの割合を求める方法を提案した。具体的には GRB の偏光を用いる。もし電子に加速されていない熱的な成分が存在すると GRB の偏光を消す働きをする。偏光減少が効き始める周波数を測定することによって無衝突衝撃波における電子の加速効率を求めることができることを示した。熱的な電子は放射をほとんどしないので観測が難しく、この方法は電子の加速効率を求めることのできる数少ない方法の一つとなっている。偏光減少の観測は、日本が力を入れているサブミリ波望遠鏡 ALMA の重要なターゲットの一つとなりうる。近い将来、実際の観測を用いて電子加速効率を求めることが必要である。

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 19 件) すべて査読有

- 1) K. Murase, K. Ioka, S. Nagataki, and T. Nakamura, High-energy cosmic-ray nuclei from high- and low-luminosity gamma-ray bursts and implications for multimessenger astronomy, *Physical Review D*, 78, 023005, 2008.
- 2) S. Okuzumi, K. Ioka, and M. Sakagami, Possible discovery of a nonlinear tail and second-order quasinormal modes in black hole ringdown, *Physical Review D*, 77, 124018, 2008.
- 3) K. Murase and K. Ioka, Closure Relations for e^{\pm} Pair Signatures in Gamma-Ray Bursts, *The Astrophysical Journal*, 676, 1123-1129, 2008.
- 4) K. Toma, K. Ioka, and T. Nakamura, Probing the Efficiency of Electron-Proton Coupling in Relativistic Collisionless Shocks through the Radio Polarimetry of Gamma-Ray Burst Afterglows, *The Astrophysical Journal*, 673, L123-L126, 2008.
- 5) K. Ioka, K. Murase, K. Toma, S. Nagataki, and T. Nakamura, Unstable GRB Photospheres and e^{\pm} Annihilation Lines, *The Astrophysical Journal*, 670,

L77-L80, 2007.

- 6) H. Nakano and K. Ioka, Second-order quasinormal mode of the Schwarzschild black hole, *Physical Review D*, 76, 084007, 2007.
- 7) Y. Urata, et al. (24 名中 9 番), Testing the External-Shock Model of Gamma-Ray Bursts Using the Late-Time Simultaneous Optical and X-Ray Afterglows, *The Astrophysical Journal*, 668, L95-L98, 2007.
- 8) K. Ioka and H. Nakano, Second- and higher-order quasinormal modes in binary black-hole mergers, *Physical Review D*, 76, 061503, 2007.
- 9) Y. Urata, et al. (19 名中 14 番), A Multiband Study of the Optically Dark GRB 051028, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59, L29-L33, 2007.
- 10) T. Akutsu, et al. (117 名中 23 番), Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000-2004, *Physical Review D*, 74, 122002(-1)-122002(-8), 2006.
- 11) 當真賢二、井岡邦仁、坂本貴紀、中村卓史, Low-Luminosity GRB 060218: A Collapsar Jet from a Neutron Star, Leaving a Magnetar as a Remnant?, *The Astrophysical Journal*, 659, 1420-1430, 2007.
- 12) K. Y. Huang, Y. Urata, P. H. Kuo, W. H. Ip, K. Ioka, et al. (22 名), Multi-color Shallow Decay and Chromatic Breaks in the GRB 050319 Optical Afterglow, *The Astrophysical Journal Letter*, 654, L25-L28, 2007.
- 13) 佐藤悟朗、山崎了、井岡邦仁、その他 (19 名), Swift Discovery of Gamma-Ray Bursts without Jet Break Feature in their X-Ray Afterglows, *The Astrophysical Journal*, 657, 359-366, 2007.
- 14) 村瀬孔大、井岡邦仁、當真賢二、長滝重博、中村卓史, High Energy Neutrinos and Cosmic-Rays from Low-Luminosity Gamma-Ray Bursts?, *The Astrophysical Journal*, 651, L5-L8, 2006.
- 15) 井岡邦仁、當真賢二、山崎了、中村卓史, Efficiency Crisis of Swift Gamma-Ray Bursts with Shallow X-ray Afterglows: Prior Activity or Time-Dependent Microphysics?, *Astronomy and Astrophysics*, 458, 7-12, 2006.
- 16) B. Abbott、その他, Joint LIGO and TAMA300 search for gravitational waves

- from inspiralling neutron star binaries, *Physical Review D*, 73, 102002(-1)-102002(-10), 2006.
- 17) Kawamura et al., The Japanese space gravitational wave antenna—DECIGO, *Classical and Quantum Gravity*, 23, S125-S131, 2006.
- 18) 山崎了、當真賢二、井岡邦仁、中村卓史, Tail emission of prompt gamma-ray burst jets, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 369, 311-316, 2006.
- 19) 當真賢二、井岡邦仁、山崎了、中村卓史, Shallow Decay of Early X-Ray Afterglows from Inhomogeneous Gamma-Ray Burst Jets, *The Astrophysical Journal*, 640, L139-L142, 2006.
- [学会発表] (計37件) 発表者: 井岡邦仁
- 1) 物理学会立教大学 2009年3月 「Gamma-ray bursts and cosmic-ray positrons」
 - 2) 天文学会大阪府立大学 2009年3月 「Cosmic-ray positrons from gamma-ray bursts」
 - 3) 「Gamma-Ray Burst」Italo-Japanese Mini Workshop 筑波大学 1/14-16 2009 口頭 (招待)
 - 4) 口頭「Gamma-ray burst remnants and cosmic-ray positrons」Electron workshop 早稲田大学 12/24 2008
 - 5) 口頭「Second-order quasinormal modes and distances to ringing black holes」1st International LISA-DECIGO workshop, Sagami-hara, JAXA 11/12-13 2008
 - 6) 口頭「Gamma-Ray Bursts and High Energy Astrophysics」UK-Japan Frontiers of Science (FoS) Symposium, Shonan Village Center, Kanagawa 10/4-6 2008 (招待)
 - 7) 口頭「Supernova and GRB remnants and their GeV-TeV gamma-ray emission」TeV Particle Astrophysics 2008, 北京(中国) 9/24-28 2008 (招待)
 - 8) 口頭「Unstable e[±] Photospheres and GRB Spectral Relations」2008 Nanjing GRB Conference、南京(中国)、2008年6月23-27日 (招待)
 - 9) 口頭「GRB remnants as TeV unidentified objects」TeV Unidentified Sources Workshop, ペンステート大学(USA) 6/4-5 2008 (招待)
 - 10) 物理学会山形大学 2008年9月 「GRB/Hypernova Remnants as TeV Unidentified Sources」
 - 11) 天文学会岡山理科大学 2008年9月 「GRB/Hypernova Remnants as TeV Unidentified Sources」
 - 12) 物理学会若手奨励賞受賞講演 近畿大学 2008年3月 「Off-Axis ガンマ線バーストの研究と発展」(招待)
 - 13) 天文学会岐阜大 2007年9月 「ガンマ線バーストの放射機構: 電子陽電子光球の不安定性」
 - 14) 天文学会東海大学 2007年3月 「Second-Order Quasi-Normal Mode of the Schwarzschild Black Hole」
 - 15) 天文学会北九州 2006年9月 「GRB 早期残光の多波長モデル」
 - 16) 天文学会和歌山大学 2006年3月 「ガンマ線バースト最初の三時間と efficiency crisis」
 - 17) セミナー 広島大学 2/20 2009 (招待) 「Cosmic-ray positrons from astrophysical sources」(招待)
 - 18) 研究会「重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学」東京大学 2/2-4 2009 (招待) 「A Gamma-Ray Burst/Pulsar for Cosmic-Ray Positrons」
 - 19) 研究会「初期宇宙と素粒子標準模型を超える物理」宇宙線研 12/8-9 2008 (招待) 「Gamma-ray bursts and cosmic-ray positrons」
 - 20) 特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第2回領域シンポジウム 国立天文台 11/27-29 2008 「GRB remnants and cosmic-ray positrons」
 - 21) 高原さん還暦祝賀会 高エネルギー宇宙物理学研究会 天橋立宮津ロイヤルホテル 11/14-16 2008 「GRB/Hypernova Remnants as Cosmic-Ray Positron Sources」
 - 22) 最新の天文学の普及をめざすワークショップ 広島大学 9/17 2008 (招待) 「ガンマ線バーストとブラックホール」
 - 23) 初代星・銀河形成研究会 甲南大学 9/9-10 2008 (招待) 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」
 - 24) 集中講義、立教大学、5/22-24 2008 「ガンマ線バースト」(招待)
 - 25) 第6回DECIGOワークショップ、国立天文台 4/16 2008 「Distance to Ringing BHs: New GW Astronomy and Gravity Test」
 - 26) 「ガンマ線バースト - review -」, 「ガンマ線バーストの高エネルギー放射」東京大学コロキウム, 東京大学, 2008年2月14日 (招待)
 - 27) 「WAMでできるGRBサイエンス」すざく衛星WAM検出器会議, 広島大学 東京リエゾンオフィス(田町), 2007年1月18日 (招待)

- 28) 「ガンマ線バーストの最近の話題」研究会 高エネルギー天体现象と粒子加速の理論, 大阪大学, 2007年12月21日~24日
- 29) 「ガンマ線バーストと高エネルギー宇宙物理」筑波大オープンコースウェア講義, 筑波大学, 2007年11月21日(招待)
- 30) 「ガンマ線バーストと最高エネルギー宇宙線」東京工業大学コロキウム, 東京工業大学, 2007年11月20日(招待)
- 31) 「GRBのCentral Engine – GWs from GRBs –」研究会 高エネルギー天体现象と重力波, 東京大学, 10月15日~10月17日(招待)
- 32) 「ガンマ線バーストと最高エネルギー宇宙線」大阪市立大学コロキウム, 大阪市立大学, 2007年10月26日(招待)
- 33) 「ガンマ線バーストと超新星」第8回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会・宇宙圏研究会共催, 青山学院大学・青山キャンパス, 2007年10月17日~10月19日(招待)
- 34) 「ガンマ線バーストの理論的混乱」基研研究会「ガンマ線バーストの新しいフロンティア」、京都大学基礎物理研究所、2007年1月16日~1月18日
- 35) 「Second-Order Quasi-Normal Mode of the Schwarzschild Black Hole」JGRG、新潟、2006年11月27日~12月1日
- 36) 「ガンマ線バーストの最近の進展」研究会「高エネルギー天体现象と粒子加速の理論」、大阪大学、2006年11月9日~11日
- 37) 「ガンマ線バーストの新しい謎」専攻向け談話会、東京工業大学、2006年7月26日(招待)

[図書] (計2件)

- ① シリーズ現代の天文学 第8巻 ブラックホールと高エネルギー現象 日本評論社 2007年、全244ページ(223-237ページ)、小山勝二・嶺重慎[編]
- ② 天文月報 2006年4月号「ガンマ線バーストの正体は何か?」社団法人 日本天文学会、220-222ページ

[その他]

ホームページ等

<http://research.kek.jp/people/ioka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井岡 邦仁 (IOKA KUNIHITO)

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

研究者番号：80402759