

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 9日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21684014

研究課題名（和文） 宇宙の加速器ガンマ線バーストと全粒子天文学

研究課題名（英文） Cosmic Accelerator Gamma-Ray Burst and Multi-Messenger Astronomy

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（和文）：宇宙一明るい爆発現象であるガンマ線バースト（GRB）は、宇宙最強の加速器である。GRB やそれと関連する中性子星からは光子以外のさまざまな粒子が放出されていると考えられる。我々はこれらが放出する高エネルギー宇宙線や高エネルギーガンマ線、ニュートリノ、重力波などの特徴を理論的に計算して、全粒子天文学の観測によって GRB の中心で生まれるブラックホールとジェットの謎およびエネルギーフロンティアに迫る基礎作りを行った。

研究成果の概要（英文）：Gamma-ray bursts (GRBs) are the brightest objects in the universe and the most powerful cosmic accelerators. GRBs and related neutron stars are thought to emit various particles other than photons. We theoretically calculate the features of high-energy cosmic rays, high-energy gamma rays, neutrinos and gravitational waves emitted by these sources, and lay the foundation for solving the mysteries of black holes and jets from the GRB central engine and also expanding the energy frontier.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
年度			
総計	20,200,000	6,060,000	26,260,000

研究分野：宇宙物理

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（理論）

1. 研究開始当初の背景

宇宙一明るい爆発現象であるガンマ線バースト（GRB）は、宇宙最強の加速器である。始動しはじめた地上の加速器 LHC や J-PARC と同様、GRB はさまざまな素粒子を生成する宇宙の素粒子ファクトリーとみなせる。一方、天体観測ではさまざまな粒子を捉える全粒子天文学が急成長している。

2. 研究の目的

本研究では、GRB がガンマ線以外にもどのような粒子を放出するのかを明らかにし、全粒子天文学の理論的基礎を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

地上の加速器同様、GRB からは光子以外のさまざまな粒子が放出されているはずであ

る。加速された核子そのまま飛び出せば宇宙線になり、粒子同士が衝突すれば電子やニュートリノおよびその反粒子なども生成される。ガンマ線バーストの観測から得られる物理状態を考察することで、これらの全粒子放射を理論的に計算する。そして、これらをさまざまな全粒子天文学の観測と比較したり、新たな予言をしたりすることで、GRB の中心エンジンの謎およびエネルギーフロンティアに迫る。

4. 研究成果

(1) 宇宙線の起源としての GRB :

2009 年に PAMELA 衛星が高エネルギー (10-100GeV 領域) の反粒子宇宙線 (特に陽電子) の超過を発見し、起源がダークマターなのか高エネルギー天体なのかで大問題になっている。我々は GRB やパルサーなどの高エネルギー天体を考え、宇宙線のスペクトルにあらわれるピークの幅から天体の寿命が推定でき、天体同定に有用であることを示した。また、超新星爆発 (ハドロ) 起源説も提唱し、このモデルでは 100GeV 以上に反陽子宇宙線の超過があらわれることを世界に先駆けて示した。その他、白色矮星パルサーが起源である可能性も初めて提唱した。また、電子宇宙線の観測によって、どのように宇宙線が超新星残骸から星間空間に逃げ出すのか、特にそのエネルギー依存性を調べることができることを初めて示した。さらに、ヘリウム宇宙線についても、スペクトルが陽子宇宙線と異なるという異常が見つかった。我々は宇宙線が元素の非一様な領域で作られる必要があることを初めて指摘し、そうであれば、宇宙線の逃避がエネルギー依存することと組み合わせれば自然と観測を説明できることを示した。また、ガンマ線バーストのジェットに鉄が混じっても壊されないパラメータ領域があることを示し、ガンマ線バーストが最高エネルギー宇宙線の起源である可能性を指摘した。

(2) GRB 残骸 :

銀河内で起こった GRB は超新星残骸に似た GRB 残骸を残す。我々は GRB 残骸の高エネルギースペクトル (特に TeV ガンマ線) を計算し、他波長の対応天体がはっきりしない謎の未同定 TeV 天体として観測されている可能性を提唱した。

(3) GRB からの高エネルギーガンマ線放射 :

GRB の残光における GeV-TeV の高エネルギーガンマ線放射を計算し、よく分かっていない GRB の開始時間に制限をつけられることを示した。予想される GeV-TeV 放射の遅延が Fermi

衛星によって発見された GeV 遅延である可能性を議論した。また、GeV ガンマ線の検出から、GRB を起こすジェットの速度が予想以上に高いことが分かり、問題になっている。そこで、速度を標準モデルよりも早くする物理機構を初めて提唱した。一方で、GRB のパルスの重ね合わせを考慮すると、もう少し速度が遅くても観測を説明できる可能性を示した。また、GeV ガンマ線の検出が、新たな問題、つまり GRB のジェットに含まれるバリオン量が fine-tuning されていなければならない点を初めて指摘した。この問題を解決するために、バリオンが全く含まれていなくても GRB を起こすことができる可能性を提唱した。この場合、ニュートリノが全くでないことになる。また、ガンマ線バーストからは GeV を超える非常に高エネルギーのガンマ線が放出されている可能性がある。高エネルギーガンマ線を捕えることができれば、ガンマ線バーストのローレンツ因子に制限を加えることができ、また、ガンマ線バーストで粒子加速がどのエネルギーまで起こっているのかを知ることができる。高エネルギーガンマ線は将来チェレンコフ望遠鏡群 (CTA) によって感度の良い観測が可能になる。そこで CTA によってガンマ線バーストから高エネルギーガンマ線が観測できるかどうかを検討した。その結果、年間数発ぐらい観測できる可能性があることを示した。また、ガンマ線背景放射の理論的上限を求め、観測がそれを破っている可能性を示唆した。近傍のガンマ線バーストなどの存在が示唆される。

(4) GRB の磁場の起源と偏光 :

GRB の偏光、特にその統計的な性質が、GRB の放射領域における磁場の構造や GRB の放射機構によって異なることを示し、これらを探ることができることを示した。また、GRB の放射領域では高速のアウトフロー同士が衝突を起こしていると考えられている。我々は、衝突中に乱流が発生し、磁場が増幅されることを示した。

(5) 宇宙最初の GRB

ガンマ線バーストが宇宙最初の星から生まれるかどうかという問題は、ガンマ線バーストで遠方宇宙を探るために重要な問題である。宇宙最初の星は外層が巨大である可能性があり、ジェットが外層を突き破れるかが問題になる。我々は宇宙最初の初代星がガンマ線バーストを起こすことができることを初めて示した。さらに、外層が中心に降着する時間が長い場合ジェットが長時間出続けて、外層を突き破れる可能性を数値的に示し、ジェットが星を突き破る条件を明らかにした。また、宇宙最初の初代星からの GRB の頻度を見積もった。特に、重元素は含まな

いが、他の初代星の光に影響された初代 GRB が大多数を占めることを初めて示した。

(6) GRB と重力波 :

GRB は連星中性子星の合体によって生じる可能性がある。我々は、連星が合体すると磁場がねじられアウトフローが四方に放出されることを数値的に示した。連星中性子星の合体は重力波のソースとして最も有力であり、我々の結果は、GRB のジェットが我々の方向を向いていなくても、重力波とともに電磁波放射が放射される可能性を示唆する。また、GRB の起源の候補でもある超強磁場中性子星の振動から放出される重力波によって、磁場の大きさや時間進化を測定できることを示した。

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)

以下すべて査読あり

- ① Upper limit on the cosmological gamma-ray background
Yoshiyuki Inoue and Kunihito Ioka
Physical Review D, vol. 86, 023003 [8p]
(2012) [arXiv:1206.2923]
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012PhRvD..86b3003I>
- ② The survival of nuclei in jets associated with core-collapse supernovae
Shunsaku Horiuchi, Kohta Murase, Kunihito Ioka, and Peter Meszaros
The Astrophysical Journal, Volume 753, 69 [14p] (2012) [arXiv:1203.0296]
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012ApJ...753...69H>
- ③ Gamma-ray flare and absorption in Crab Nebula: Lovely TeV--PeV astrophysics
Kazunori Kohri, Yutaka Ohira, and Kunihito Ioka
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 424, 2249-2254 (2012) [arXiv:1202.6439]
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012MNRAS.424.2249K>
- ④ Prospects for Detecting Gamma-Ray Bursts at Very High Energies with the Cherenkov Telescope Array
Jun Kakuwa, Kohta Murase, Kenji Toma, Susumu Inoue, Ryo Yamazaki, and Kunihito Ioka
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425, 514-526

(2012) [arXiv:1112.5940]

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012MNRAS.425..514K>

- ⑤ Population III Gamma-Ray Bursts and Breakout Criteria for Accretion-Powered Jets
Hiroki Nagakura, Yudai Suwa, and Kunihito Ioka,
The Astrophysical Journal, 754, 85 [21p]
(2012) [arXiv:1104.5691]
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1104.5691N>
- ⑥ Escape of cosmic-ray electrons from supernova remnants
Yutaka Ohira, Ryo Yamazaki, Norita Kawanaka, and Kunihito Ioka
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, 91-102 (2012) [arXiv:1106.1810]
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1106.18100>
- ⑦ Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy
M. Actis, et al.,
Experimental Astronomy, 32, 193-316 (2011) [arXiv:1008.3703],
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011ExA...32..193A>
- ⑧ Afterglow of a binary neutron star merger
Masaru Shibata, Yudai Suwa, Kenta Kiuchi, and Kunihito Ioka
The Astrophysical Journal Letters, 734, L36 [5p] (2011) [arXiv:1105.3302],
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...734L..36S>
- ⑨ Population III.1 and III.2 Gamma-Ray Bursts: Constraints on the Event Rate for Future Radio and X-ray Surveys
Rafael S de Souza, Naoki Yoshida, and Kunihito Ioka,
Astronomy and Astrophysics, 533, A32 [9p] (2011) [arXiv:1105.2395],
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011A%26A...533A..32D>
- ⑩ Magnetar Asteroseismology with Long-Term Gravitational Waves
Kazumi Kashiyama and Kunihito Ioka,
Physical Review D, 83, 081302 [5p] (2011) [arXiv:1102.4830],
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011PhRvD..83h1302K>
- ⑪ Gamma-Ray Burst without Baryonic and Magnetic Load?
Kunihito Ioka, Yutaka Ohira, Norita

- Kawakana, and Akira Mizuta, *Progress of Theoretical Physics*, 126, 555–564 (2011) [arXiv:1103.5746], <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011PThPh.126..555I>
- ⑫ Cosmic-ray Helium Hardening
Yutaka Ohira and Kunihito Ioka, *The Astrophysical Journal Letters*, 729, L13 [5p] (2011) [arXiv:1011.4405], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2011ApJ...729L..130>
- ⑬ TeV Electron Spectrum for Probing Cosmic-ray Escape from a Supernova Remnant
Norita Kawanaka, Kunihito Ioka, Yutaka Ohira, and Kazumi Kashiyama, *The Astrophysical Journal*, 729, 93 [7p] (2011) [arXiv:1009.1142], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2011ApJ...729...93K>
- ⑭ White dwarf pulsars as possible cosmic ray electron-positron factories
Kazumi Kashiyama, Kunihito Ioka, and Norita Kawanaka, *Physical Review D*, 83, 023002 [17p] (2011) [arXiv:1009.1141], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2011PhRvD..83b3002K>
- ⑮ Can Gamma-ray Burst Jets Break Out the First Stars?
Yudai Suwa and Kunihito Ioka, *The Astrophysical Journal*, 726, 107 [7p] (2011) [arXiv:1009.6001], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2011ApJ...726..107S>
- ⑯ Three-Dimensional Simulations of MHD Turbulence Behind Relativistic Shock Waves and Their Implications for GRBs
Tsuyoshi Inoue, Katsuaki Asano, and Kunihito Ioka, *The Astrophysical Journal*, 734, 77 [14p] (2011) [arXiv:1011.6350], <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...734...77I>
- ⑰ Very High Lorentz Factor Fireballs and Gamma-Ray Burst Spectra
Kunihito Ioka, *Progress of Theoretical Physics*, 124, 667–710 (2010) [arXiv:1006.3073], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2010PTPh.124..667I>
- ⑱ Can We Probe the Lorentz Factor of Gamma-ray Bursts from GeV–TeV Spectra Integrated Over Internal Shocks?
Junichi Aoi, Kohta Murase, Keitaro Takahashi, Kunihito Ioka, and Shigehiro Nagataki, *The Astrophysical Journal*, 722, 440–451 (2010) [arXiv:0904.4878], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2010ApJ...722..440A>
- ⑲ A Gamma-Ray Burst/Pulsar for Cosmic Ray Positrons with a Dark Matter-Like Spectrum
Kunihito Ioka, *Progress of Theoretical Physics*, 123, 743–755 (2010) [arXiv:0812.4851], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2010PTPh.123..743I>
- ⑳ High-energy emission as a test of the prior emission model for gamma-ray burst afterglows
Kohta Murase, Kenji Toma, Ryo Yamazaki, Shigehiro Nagataki, and Kunihito Ioka, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 402, L54–L58 (2010) [arXiv:0910.0232], <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010MNRAS.402L..54M>
21. Is Cosmic Ray Electron Excess from Pulsars Spiky or Smooth?: Continuous and Multiple Electron/Positron Injections
Norita Kawanaka, Kunihito Ioka, and Mihoko M. Nojiri, *The Astrophysical Journal*, 710, 958–963 (2010) [arXiv:0903.3782], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2010ApJ...710..958K>
22. Hypernova and Gamma-ray Burst Remnants as TeV Unidentified Sources
Kunihito Ioka and Peter Meszaros, *The Astrophysical Journal*, 709, 1337–1342 (2010) [arXiv:0901.0744], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2010ApJ...709.1337I>
23. Is the PAMELA anomaly caused by supernova explosions near the Earth?
Yutaka Fujita, Kazunori Kohri, Ryo Yamazaki, and Kunihito Ioka, *Physical Review D*, 80, 063003 [5p] (2009) [arXiv:0903.5298], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2009PhRvD..80f3003F>
24. Statistical Properties of Gamma-Ray Burst Polarization
Kenji Toma, Takanori Sakamoto, Bing Zhang, Joanne E. Hill, Mark L. McConnell, Peter F. Blaser, Ryo Yamazaki, Kunihito Ioka, and Takashi Nakamura, *The Astrophysical Journal*, 698, 1042–1053 (2009) [arXiv:0812.2483], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2009ApJ...698.1042T>
25. Time-Evolution of Peak Energy and

Luminosity Relation within Pulses for GRB 061007: Probing Fireball Dynamics Masanori Ohno, Kunihito Ioka, Kazutaka Yamaoka, Makoto Tashiro, Yasushi Fukazawa, and Yujin E. Nakagawa, Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, 201-211 (2009) [arXiv:0812.3737], <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2009PA SJ...61..2010>

[学会発表] (計 47 件)

- ①招待講演「Cosmic Ray Helium Hardening」
国際会議 TeV Particle Astrophysics 2012,
Mumbai, India, 12/10-14, 2012
- ②招待講演「Gamma-Ray Burst Breakouts」
国際会議 13th Marcel Grossmann Meeting
Stockholm, Sweden, 7/1-7, 2012
- ③招待講演「GRB Breakouts」
国際会議 Gamma-Ray Bursts in the Era of
Rapid Follow
Liverpool, UK, 6/18-22, 2012
- ④招待国際セミナー「Gamma-Ray Bursts,
Cosmic-Ray Origins, & Plasma Physics」
Oxford, UK, 6/15, 2012
- ⑤招待講演「Gamma-Ray Burst without
Baryonic and Magnetic Load?」
国際会議 Gamma Ray Bursts, their
progenitors and the role of thermal
emission
Les Houches (France), 10/2-7, 2011
- ⑥招待講演「Population III Gamma-Ray
Burst」
国際会議 Gamma Ray Bursts, their
progenitors and the role of thermal
emission
Les Houches (France), 10/2-7, 2011
- ⑦招待国際セミナー「Gamma-Ray Burst
without Baryon Load?」
Hebrew University, Israel, 6/12, 2011
- ⑧招待講演「TeV Electron and Helium for
probing Galactic Accelerators」
国際会議 Multi-Messenger Astronomy of
Cosmic Rays,
KIAA, Beijing, China, 4/11-14, 2011
- ⑨招待講演「高エネルギー宇宙物理学」
第 23 回 理論天文学宇宙物理学懇談会シン
ポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物
理学」,
京都大学基礎物理学研究所, 12/20-22,
2010
- ⑩招待講演「Gamma-Ray Burst (GRB) Science
with LST」
国際会議 CTA LST Workshop Meeting,
Cosener's House, Abington (UK), 11/7,
2010

- ⑪招待講演「Gravitational wave and high
energy phenomena」
国際会議 The 20th Workshop on General
Relativity and Gravitation (JGRG20),
YITP Kyoto Univ., 9/21-25, 2010
- ⑫招待講演「Multi Messenger Astronomy」
国際会議 Symposium on Scientific
Utilization of JEM Kibo on International
Space Station (ISS),
Suzuki Umetaro Hall, Wako, RIKEN (Japan),
4/27-28, 2010
- ⑬招待講演「Extreme Objects in the
Universe」
国際会議 Sokendai International
Symposium 2009,
湘南国際村, 12/15-17, 2009
- ⑭招待講演「Cosmic-Ray Positrons from
Astrophysical Sources: GRBs, Pulsars
and SNRs」
国際会議 The Energetic Cosmos: from
Suzaku to Astro-H,
Otaru, 6/29-7/2, 2009
- ⑮招待講演「Cosmic-Ray Positrons from
Astrophysical Sources: GRBs, Pulsars
and SNRs」
国際会議 GRB Physics,
KIAA, Peking University, Beijing
(China), 6/15-19, 2009
- ⑯物理学学会 招待講演 宇宙線・宇宙物理領
域, 素粒子論領域, 素粒子実験領域合同
シンポジウム「ダークマターと宇宙線」
甲南大学, 9/10-13, 2009
- ⑰招待講演「Cosmic-Ray Positrons from
Astrophysical Sources: GRBs, Pulsars
and SNRs」
国際会議 Physics of Relativistic Flows:
An observational view,
Nordita, Stockholm (Sweden), 6/1-2,
2009

[図書] (計 1 件)

- ①フェルミ・バブルから探る銀河系中心の過
去の活動性
片岡 淳・戸谷友則・井岡邦仁
天文月報 SKYLIGHT、9月号、2012

[その他]

ホームページ等
<http://research.kek.jp/people/ioka/index.html>

6. 研究組織

(1) 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