

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287051

研究課題名(和文) PeV 天体から探る高エネルギー宇宙の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical Study of High-Energy Universe through PeV Sources

研究代表者

井岡 邦仁 (Ioka, Kunihito)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：80402759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：光子以外の粒子を用いて宇宙を観測するマルチメッセンジャー天文学がついに本格的に始まった。研究期間中に(1)重力波の初の検出(2)高エネルギーニュートリノ観測の躍進(3)陽電子・反陽子・ヘリウム宇宙線の観測の進展があった。この中で様々な理論的貢献を行った。特に(a)重力波 GW170817 に付随したガンマ線バーストのoff-axis jetモデルの提唱(b)ニュートリノの相互作用への制限(c)宇宙線スペクトルの折れ曲がり元素の空間的非一様性に拠るとする我々の化学的非一様モデルの発展、を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

21世紀になって宇宙の観測は全く新しい時代に入った。光子以外の粒子も用いて宇宙を観測するマルチメッセンジャー天文学がついに本格的に始まり、宇宙の全く新しい極限的な姿が見えてきたのである。この中で、宇宙で何が起きているのかを異なる粒子の観測から統一的に理解するために、理論モデルの構築は必須である。我々の主な貢献は、宇宙物理に於ける大問題である、宇宙最光度であるガンマ線バーストの起源、高エネルギーニュートリノ源の正体、宇宙線の起源、に迫るための代表的な理論モデルを提唱したことである。

研究成果の概要(英文)：Multi-messenger astronomy that observes the universe using particles in addition to photons has finally begun with a full-fledged scale. During the grant period, there are (1) the first detection of gravitational waves (2) rapid growth in high energy neutrino events (3) progress in observations of positron, antiproton and helium cosmic rays. In these circumstances, I made various theoretical contributions. In particular, (a) proposal of an off-axis jet model of the gamma-ray burst associated with the gravitational wave GW170817 (b) limitations on neutrino interactions (c) development of our chemically-inhomogeneous model in which the cosmic-ray spectrum bends due to the spatial non-uniformity of the elements.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙物理 高エネルギー天体 宇宙線 ニュートリノ 理論天文学

1. 研究開始当初の背景

20 世紀に天文学がさまざまな波長、特に GeV (= 10^9 eV; ギガエレクトロンボルト) から TeV (= 10^{12} eV) へと高エネルギーに発展したことによって、宇宙では我々の想像を遥かに超えるような高エネルギー現象が至るところで起こっていることが分かってきた。人類が加速器 LHC で作り出せる 1000 万倍以上のエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線や、太陽が一生かかって出すエネルギーを数秒で放出する宇宙一明るいガンマ線バーストなど、その起源や進化が謎の天体で満ちている。

宇宙の高エネルギー現象は、ボトムアップ的な粒子加速、あるいは仮説ではあるがトップダウン的なダークマター(未知の重粒子)の対消滅・崩壊を通じて起こる。前者の粒子加速は、衝撃波や磁気圏などでマクロなエネルギーが少数の粒子に集中する過程であるが、その源はブラックホール、中性子星、白色矮星といった強重力・強磁場・高密度天体からのジェット・アウトフロー等である。その理解は、近年の観測・理論で大きく進んだが、具体的な起源や機構の多くは未解明である。宇宙線、ジェットそしてダークマターの起源・機構は宇宙物理学最大の謎の一つなのである。

2. 研究の目的

宇宙にはブラックホールからのジェットや超新星残骸の衝撃波など、地上の加速器を遥かに超える高エネルギー現象が普遍的に存在する。これらは、極限天体における高エネルギー粒子(宇宙線)の加速、あるいはダークマターの対消滅・崩壊から生じるが、その起源や機構は大きな謎である。観測が多波長から多粒子へ発展することでその謎に大きく迫ろうとしている今、さまざまなフロンティアが PeV (= 10^{15} eV) エネルギーで丁度重なっている。本研究では、PeV 天体の多粒子的全貌、特にニュートリノ・宇宙線の放射・伝搬を明らかにし、高エネルギー宇宙理論の一里塚を築く。同時に PeV 天体を用いた宇宙論を創成する。これらは高エネルギー宇宙を用いた素粒子・原子核物理の基盤となる。

3. 研究の方法

PeV 天体の多粒子的な全貌を理論的に明らかにするために、(1) PeV 天体での粒子加速とニュートリノ (2) PeV 天体からの宇宙線と伝搬 (3) PeV 天体を道具として用いた宇宙論、を三本柱にして問題に迫る。ここで互いの関係性に注意し相乗効果を最大化する。ガンマ線バーストからのニュートリノや宇宙線ヘリウム・電子・陽電子などのこれまでの研究を応用する手堅い研究と、電波バーストの分散度を用いた宇宙論など新しい境界領域に踏み込む挑戦的な研究を平行して行う。本研究は多分野にわたるので、これまで毎年行ってきた研究会・スクールを継続し、海外の研究拠点との人的交流を増やして情報交換する。このような運営と論文作成を両立させるために、研究支援者を一名雇用する。

4. 研究成果

天体起源と考えられる PeV ニュートリノがついに発見された。PeV ニュートリノが発見されたということは、天体から我々までニュートリノが飛来できたことを意味する。天体と我々の間は完全に真空ではなく、ビッグバンの後に残された宇宙ニュートリノ背景放射が存在している。もしニュートリノとニュートリノの間の相互作用の断面積が十分に大きければ、PeV ニュートリノは背景ニュートリノと相互作用して、我々まで届かないはずである。それゆえ、ニュートリノが観測されたという事実は、ニュートリノ間の相互作用に制限を加えることになる。そこで我々はニュートリノ間の相互作用に新たな制限を加え、さらに、ある相互作用の場合、ニュートリノが低エネルギーにカスケードして、逆に今回の観測を説明できる可能性を示した。

ショートガンマ線バーストは PeV 天体の有力候補である。ショートガンマ線バーストの有力な起源は連星中性子星の合体である。連星中性子星の合体によりブラックホールと降着円盤が形成され、ジェットが放出されると考えられている。ジェットは衝撃波を形成し、衝撃波を粒子が行ったり来たりすると、PeV を超えて粒子加速することが可能になる。一方、最近の数値計算によると、連星中性子星の合体で、一部の物質が外側に飛ばされることが分かってきた。放出物質があると、ガンマ線バーストを起こすために、ジェットは其中を貫く必要がある。我々は、ジェットが放出物質を貫く間に絞られて細くなることを初めて指摘し、ショートガンマ線バーストのジェットを絞る新しい機構を提唱した。これまで、ショートガンマ線バーストの周りには何もないのでジェットをどう絞るのか謎であったが、合体時の放出物質が鍵となることが分かった。

連星中性子星の合体からの飛散物質の中に非常に速度の速い成分が含まれることを初めて指摘した。この結果は最初の連星中性子星合体イベント GW170817 の理論的解釈において非常に

重要な役割を果たした。

ブラックホール・中性子星合体からの動的質量放出の性質を調べた。

反陽子宇宙線の新しい観測が AMS-02 実験より発表された。その結果はまさに以前我々が予言していたスペクトルと見るからに一致していた。今回の新しい結果を受けて、我々のモデルを再度検証してみた。具体的には、反陽子宇宙線と電子・陽電子宇宙線のスペクトルを同時に同じソース、近傍で起こった超新星爆発、で説明できるかどうかを調べた。この超新星爆発モデルでは、超新星残骸で加速された宇宙線が近傍の分子雲と pp 相互作用をして、反陽子宇宙線と陽電子宇宙線を同時に生成する。反陽子と陽電子の比は pp 反応の素過程で決まっているが、観測された比を見事に説明する。この結果は、100 万年前に近くで超新星爆発が起こったことを示唆し、パルサーやダークマターなど他のソースがなくても構わないことを意味する。

銀河中心方向から飛来するガンマ線放射の中に起源の分からない超過が見られることが Fermi によって発見された。その有力な起源の一つとしてまだ発見されていないミリ秒パルサーがある。その説を確認するために、パルサーが放出する電子陽電子による逆コンプトン散乱による超高エネルギーガンマ線を観測すればいいと言うことを初めて指摘した。その後の観測によって、我々の予想通りの観測がなされている。

GeV から PeV に伸びる宇宙線のスペクトルを AMS-02 実験が精密に観測し、ヘリウムと炭素のスペクトルが水素のスペクトルよりもハードであること、ヘリウムと炭素のスペクトルは同じであること、また、どれもが 200GeV に折れ曲がりがあること、が分かった。それらを説明するには、宇宙線がスーパーバブルのコアのような化学的に非一様な環境で加速されたと考える必要があることを議論した。

最初の重力波イベント GW 150914 のような連星ブラックホールが銀河系にも存在していると考えられる。それらは連星合体後、高速回転するブラックホールになるが、回転エネルギーをジェットを通じて開放する。そのエネルギーは高エネルギー粒子となる可能性があり、銀河系内で観測されている高エネルギー天体と関係している可能性があることを初めて指摘した。

連星中性子星による初めての重力波イベント GW 170817 についての off-axis モデルについての論文を書いた。連星中性子星の合体がショートガンマ線バーストの起源かどうかという問題は 40 年を超える長年の大問題である。GW 170817 ではショートガンマ線バースト GW170817A が観測されたが、通常のガンマ線バーストより何桁も暗く、これが本当に通常のショートガンマ線バーストかどうかは問題になっている。我々は、通常のショートガンマ線バーストのジェットを横から見ると観測されているように暗くなることを示し、GRB 170817A をちょうどよく説明できることを示した。他にも、ジェットが飛散物質中を伝搬するときに見えるコクーンからの放射が光赤外で見えているマクロノバ(キロノバ)の初期の放射に寄与する可能性や、残光への寄与などを、早い段階で発表することができた。

連星中性子星の合体後、飛散物質中をジェットが伝搬するが、ジェットで加速された陽子が飛散物質やガンマ線と相互作用することによってパイオンを作り、その崩壊によって高エネルギーニュートリノが生まれる可能性がある。その放射を GW 170817 の場合に計算し、IceCube 等で観測可能かどうかを議論した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 30 件)

全て査読あり

1. Kimura, Shigeo S.; Murase, Kohta; Bartos, Imre; Ioka, Kunihito; Heng, Ik Siang; Mészáros, Peter, Physical Review D, 98, 043020 [12p] (2018) [arXiv:1805.11613]
DOI: 10.1103/PhysRevD.98.043020
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018PhRvD..98d3020K/>
2. Kisaka, Shota; Ioka, Kunihito; Kashiya, Kazumi; Nakamura, Takashi
The Astrophysical Journal, 867, 39 [11p] (2018) [arXiv:1711.00243]
DOI: 10.3847/1538-4357/aae30a
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...867...39K>
3. Murase, Kohta; Toomey, Michael W.; Fang, Ke; Oikonomou, Foteini; Kimura, Shigeo S.; Hotokezaka, Kenta; Kashiya, Kazumi; Ioka, Kunihito; Meszaros, Peter

- The Astrophysical Journal, 854, 60 [13p] (2018) [arXiv:1710.10757]
DOI: 10.3847/1538-4357/aaa48a
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...854..60M>
4. Ioka, Kunihito; Nakamura, Takashi
Progress of Theoretical and Experimental Physics, 043E02 [25p] (2018)
DOI: 10.1093/ptep/pty036
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2018PTEP.2018d3E02I>
 5. Kisaka, Shota; Ioka, Kunihito; Sakamoto, Takanori
The Astrophysical Journal, 846, 142 [17p] (2017) [arXiv:1707.00675]
DOI: 10.3847/1538-4357/aa8775
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...846..142K>
 6. Ioka, Kunihito; Matsumoto, Tatsuya; Teraki, Yuto; Kashiyama, Kazumi; Murase, Kohta
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 470, 3332-3345 (2017)
DOI: 10.1093/mnras/stx1337
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2017MNRAS.470.3332I>
 7. Ioka, Kunihito; Hotokezaka, Kenta; Piran, Tsvi
The Astrophysical Journal, 833, 110 [10p] (2016) [arXiv:1608.02938]
DOI: 10.3847/1538-4357/833/1/110
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...833..110I>
 8. Kyutoku, Koutarou; Ioka, Kunihito
The Astrophysical Journal, 827, 83 [5p] (2016) [arXiv:1603.00467]
DOI: 10.3847/0004-637X/827/1/83
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...827...83K>
 9. Kisaka, Shota; Ioka, Kunihito; Nakar, Ehud
The Astrophysical Journal, 818, 104 [8p] (2016) [arXiv:1508.05093]
DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/104
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...818..104K>
 10. Shota Kisaka, Kunihito Ioka, Takashi Nakamura
The Astrophysical Journal, 809, L8 [5p] (2015) [arXiv:1506.02030]
DOI: 10.1088/2041-8205/809/1/L8
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...809L...8K>
 11. Ohira, Yutaka; Kawanaka, Norita; Ioka, Kunihito
Physical Review D, 93, 083001 [7p] (2016) [arXiv:1506.01196]
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.083001
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016PhRvD..93h3001O>
 12. Kohri, Kazunori; Ioka, Kunihito; Fujita, Yutaka; Yamazaki, Ryo
Progress of Theoretical and Experimental Physics, 021E01 [8p] (2016)
DOI: 10.1093/ptep/ptv193
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016PTEP.2016b1E01K>
 13. Norita Kawanaka, Kunihito Ioka
Physical Review D, 92, 085047 [14p] (2015) [arXiv:1504.03417]
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.085047
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015PhRvD..92h5047K>
 14. Shota Kisaka, Kunihito Ioka
The Astrophysical Journal Letters, 804, L16 [6p] (2015) [arXiv:1503.06791]
DOI: 10.1088/2041-8205/804/1/L16
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...804L..16K>
 15. Kyutoku, Koutarou; Ioka, Kunihito; Okawa, Hirotada; Shibata, Masaru; Taniguchi, Keisuke
Physical Review D, 92, 044028 [37p] (2015) [arXiv:1502.05402]

DOI: 10.1103/PhysRevD.92.044028
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015PhRvD..92d4028K>

16. Qiang Yuan, [Kunihito Ioka](#)
The Astrophysical Journal, 802, 124 [6p] (2015) [arXiv:1411.4363]
DOI: 10.1088/0004-637X/802/2/124
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...802..124Y>
17. Kisaka, Shota; [Ioka, Kunihito](#); Takami, Hajime
The Astrophysical Journal, 802, 119 [18p] (2015) [arXiv:1410.0966]
DOI: 10.1088/0004-637X/802/2/119
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...802..119K>
18. [Ioka, Kunihito](#); Murase, Kohta
Progress of Theoretical and Experimental Physics, 061E01 [7p] (2014)
DOI: 10.1093/ptep/ptu090
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014PTEP.2014f1E01I>
19. Nagakura, Hiroki; Hotokezaka, Kenta; Sekiguchi, Yuichiro; Shibata, Masaru; [Ioka, Kunihito](#)
Astrophysical Journal Letters, 784, L28 [5p] (2014) [arXiv:1403.0956]
DOI: 10.1088/2041-8205/784/2/L28
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...784L..28N>

[学会発表](計 61 件)

1. 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム
主題：いよいよ始まる CTA 実験 - 高エネルギー宇宙物理学新時代の幕開け - Frontier of High Energy Astrophysics with The Cherenkov Telescope Array
招待講演「Study of Black Holes and Multi-Messenger Astronomy with CTA」30 min
九州大学 伊都キャンパス, 3/14-17, 2019
2. 天文学会 特別セッション(連星中性子星合体 GW170817)
招待講演「コンパクト連星合体からの電磁波現象の理論」35 min
千葉大学 西千葉キャンパス, 3/14-17, 2018
3. 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム
主題：宇宙線直接観測の成果と展望 Results and prospects from direct observation of cosmic rays
招待講演「宇宙線観測と天体物理学 Astrophysics and cosmic ray observation」25 min
大阪大学 豊中キャンパス, 3/17-20, 2017
4. 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域シンポジウム
主題：一般相対性理論 100 年の歩み
招待講演「ブラックホールと高エネルギー宇宙」25+5 min
大阪市立大学 杉本キャンパス, 9/25-28, 2015
5. 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域, 素粒子論領域合同シンポジウム
主題：超高エネルギーガンマ線天文学と Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画
TeV gamma-ray astronomy and the Cherenkov Telescope Array (CTA) project
招待講演「CTA で迫る物理」25 min
早稲田大学 早稲田キャンパス, 3/21-24, 2015
6. 招待講演「Electromagnetic Counterparts to Gravitational Waves and Gamma-Ray Burst Jets」
Second international workshop: Particles, Gravitation and the Universe
Conference hall, Vietnam national space centre (VNSC), Vietnam academy of science and technology (VAST), Hanoi, 12/10-15, 2018
7. 招待講演「Jet in Electromagnetic Counterparts to GW170817?」
The 3rd PANDA Symposium on Time Domain Astronomy and first results from Insight-HXMT
Chengdu, China, 6/18-22, 2018

招待講演「Interpreting GW170817 and the Electromagnetic Counterparts as a Short Gamma-Ray Burst」

Penn State, State College, USA, 2/9, 2018

8. 招待講演「Interpreting GW170817 and the Electromagnetic Counterparts as a Short Gamma-Ray Burst」

CosPA 2017

YITP, Kyoto, Japan, 12/11-15, 2017

9. 招待講演「Gamma-Rays and Afterglow from a Short Duration Gamma-Ray Burst Jets」

KITP Conference: GW170817: The First Double Neutron Star Merger

KITP, Santa Barbara, USA, 12/5-8, 2017

10. 招待講演「Multi-Messenger Approaches to Galactic PeVatrons」

国際会議 Beyond a PeV: Particle acceleration to extreme energies in cosmic sources

Paris, France, 9/13-16, 2016

11. 招待講演「Black Hole Systems as Multi-Messenger Sources」

国際会議 IAU sympo 324: New Frontiers in Black Hole Astrophysics

Ljubljana, Slovenia, 9/12-16, 2016

12. 招待講演「Bright Side of the AMS-02 Results」

国際会議 Dark Side of the Universe

YITP, Japan, 12/14-18, 2015

13. 招待講演「Unveiling the Origin of High-Energy Neutrinos」

国際会議 Korean Physics Society Meeting

Gwangju, Korea, 10/22-24, 2014

14. 招待講演「Population III and Explosion Models」

国際会議 40th COSPAR

Moscow, Russia, 8/2-8/10, 2014

15. 招待講演「高エネルギーニュートリノ宇宙物理」

CRC タウンミーティング

名古屋大学, 7/12, 2014

〔図書〕(計 2 件)

1. 重力波と同時観測されたガンマ線バーストの正体は？

井岡邦仁

日本物理学会誌 小特集、73 巻 9 号、2018

2. 数理科学 サイエンス社 2014 年 9 月号 No.615 [7p] 特集:「重力の謎と魅力」 - 身近で謎の多い存在 -

「多彩な天体現象と重力」井岡邦仁

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kunihi to.ioka/>

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。