

各報道機関文教担当記者 殿

フェルミ衛星とスウィフト衛星が 新たな高エネルギー天文学を切り拓く

—未知の高エネルギーガンマ線の放射メカニズム解明に大きく前進—

金沢大学理工研究域数物科学系の有元誠助教およびアメリカ航空宇宙局（NASA）を含む国際共同研究グループは、フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡衛星（フェルミ衛星）（※1）およびニール・ゲーレルス・スウィフト衛星（スウィフト衛星）（※2）を用いて、人類史上「最も高いエネルギー」のガンマ線を放出するガンマ線バーストを捉えることに成功しました。また、このガンマ線バーストの爆発現象は、同時に大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC（※3）によっても同時観測されており、これら3つのコラボレーション観測の実現により、これまで謎に包まれていたガンマ線放射のメカニズムの起源に強く迫る成果を導き出すことができました（図1）。

ガンマ線バーストは初めてその現象が発見されてから 50 年近く経過していますが、いまだにガンマ線バーストから放たれる高エネルギーガンマ線の放射起源は明らかにされていませんでした。その理由として、高エネルギーのガンマ線が放出される時間が数 100 秒から数 1000 秒程度と短いことに加え、その爆発がどこで起きるか分からないことから、観測結果が極めて乏しいということが挙げられます。

今回観測したガンマ線バーストでは、フェルミ衛星およびスウィフト衛星が同時に X 線およびガンマ線の放射を捉えました。そしてフェルミ衛星が、従来から予想される古典的な放射成分だけでは説明できない未知の高エネルギー超過成分の兆候を発見しました。さらに、ガンマ線バーストの発生直後から MAGIC がこの未知の超高エネルギーガンマ線を捉えることに成功し、これらの観測データを全て紡ぎ上げることで、未知の高エネルギー超過成分の起源に極めて強い制限を付けることに初めて成功しました。

ガンマ線バーストから生じる高エネルギー現象は、未解明の点がまだ多く残されています。今回の観測がもたらした成果は、これまでのガンマ線バーストの放射メカニズムの理解を大きく前進させるものであり、同様の観測を今後さらに実現していくことにより、未解明のガンマ線バーストの物理的描像が明らかになることが期待されます。

本研究成果は、2019年11月20日18時（英国時間）に英国科学誌『*Nature*』にタイトル「*Observation of inverse Compton emission from a long γ -ray burst*」として掲載されました。

なお、東京大学宇宙線研究所のMAGICチームによる超高エネルギーガンマ線の検出に関する詳細な内容については、同誌にタイトル「*Teraelectronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C*」として同時掲載されています（東京大学宇宙線研究所プレスリリース「地上のチェレンコフ望遠鏡がガンマ線バーストの信号を初観測～誕生直後のブラックホールから過去最高エネルギーの TeV ガンマ線放射を確認～」（掲載 URL：<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/beta/191121.html>））。

また、フェルミ衛星およびスウィフト衛星が検出した X 線とガンマ線の振る舞いの詳細な内容については、米国天文学会の運営する科学誌『*Astrophysical Journal*』に受理され、2019年9月23日（協定世界時）にプレプリントがオンライン掲載されました。

【研究の背景】

ガンマ線バーストは、今からおよそ 50 年前に初めて天文学者によって発見され、現在に至るまでさまざまな人工衛星や地上望遠鏡で観測が行われてきました。ガンマ線バーストは、その名が示す通り、短時間に天空の一点から爆発的にガンマ線が降り注ぐ宇宙最大の爆発現象です。全天で1日1回程度の頻度で起きていますが、天空のどこで起きるかは予測不可能です。これまでの過去の観測や研究から、太陽よりもずっと重い星が燃え尽きたときに、その星がガンマ線バーストとして爆発すると考えられています。そのとき、星の中心核はつぶれてブラックホールとなり、そこからジェットと呼ばれるプラズマ流が光速に近い速度で射出されます(図2)。このジェットが星の外層を貫いて、宇宙空間に飛び出した後、このジェットからガンマ線が激しく放たれ、その放射時間は典型的にはおよそ数秒から数100秒程度になることが知られています。そしてその後、ジェットは、宇宙空間内を漂う星間物質と相互作用することで、電波からガンマ線に至る幅広い波長で光り続けます。前述の爆発的な閃光とは異なり、ほのかに光ることから「残光」とも呼ばれます。この残光は、ジェット内部に生じた磁場に高エネルギーの電子がらせん状に巻きつくことで生じる「シンクロトロン放射(※4, 図3左)」と考えられており、これがガンマ線バーストから放たれるX線やガンマ線などの電磁放射を説明する定説と考えられていました。しかし、過去のコンプトンガンマ線観測衛星やフェルミ衛星の観測から、いくつかの明るいガンマ線バーストには、このシンクロトロン放射機構では説明できない未知の高エネルギー成分が存在していることが指摘されており、この起源は謎に包まれていました。

【研究成果の概要】

2019年1月14日20時57分3秒(国際標準時)に、フェルミ衛星とスウィフト衛星が同時に、南天の星座の一つであるろ座の方向から45億光年の遠方より到来するX線およびガンマ線を検出しました。このガンマ線バーストはGRB 190114C(※5)と名付けられ、ガンマ線の到来方向は衛星の機上で直ちに同定されました。そして、この位置情報はアラートとして世界中の天文学者に速報として即時に通知され、その速報にいち早く応答したのが、MAGICです。MAGICは、バースト発生後のわずか50秒後にGRB 190114Cの発生方向にポインティングし、その観測に成功しました。

フェルミ衛星は高いエネルギーのガンマ線を捉えることができるのが特徴で、その検出したガンマ線の最高エネルギーはおよそ200億電子ボルト(※6)でした。有元助教らが主導するフェルミ衛星チームが一丸となって解析を進めたところ、そのような高エネルギー放射は、ガンマ線バーストの典型的な放射メカニズムであるシンクロトロン放射機構では説明できないことが分かり、未知の高エネルギー超過成分の存在が示唆されます(図4)。さらに、ここでMAGICの観測が重要な役割を果たします。MAGICは1兆電子ボルトにまで及ぶ超高エネルギーのガンマ線放射を捉え、特にシンクロトロン放射の限界エネルギーを超える1000個近くの光子が検出されました。よって、このMAGICの観測から、フェルミ衛星が示唆した超過成分の存在が決定付けられたこととなります。さらに、スウィフト衛星、フェルミ衛星およびMAGICのデータを紡ぎ上げることで、1000電子ボルトから1兆電子ボルトの9桁に及ぶ極めて広い帯域の観測(※7)が実

現しました。

これらのデータを詳細に解析したところ、最も有力な候補として、「逆コンプトン散乱 (※8, 図3右)」と呼ばれるプロセスが、未知の高エネルギー放射成分を説明できることが分かりました。逆コンプトン散乱は、ジェットの内側に存在する高エネルギーの電子が、低いエネルギーの X 線およびガンマ線をたたき上げることで超高エネルギーのガンマ線が生じるというプロセスです。これまで理論的なアプローチでは、逆コンプトン散乱がガンマ線バーストの高エネルギーガンマ線放射に寄与すると提唱されていましたが、観測によって実証したのは本研究が初めてとなります。これにより、謎に包まれたガンマ線バーストの放射メカニズムに対する理解を飛躍的に前進させたといえます。

【今後の展開】

GRB 190114C では、光速に近い速度で運動する極限状態のジェットからガンマ線が放たれており、物質の極限状態の物理現象を探る上で GRB 190114C の観測は格好の素材といえます。一方、ガンマ線バーストで起きる物理現象は多様性に満ちていると考えられており、今回と同じような爆発現象が、他のガンマ線バーストでも同様に起きるとは言い切れません。したがって、今後同様のコラボレーション観測を継続していくことで観測サンプルを増やし、ガンマ線バーストから放たれるガンマ線がどのような物理状態やプロセスで発生していくのかを検証していく必要があります。

また、スウィフト衛星、フェルミ衛星および MAGIC のどれが欠けても今回の研究成果を達成することはできませんでした。現在、スウィフト衛星やフェルミ衛星は健全に稼働しており、今後のさらなる活躍が期待されています。しかし、双方の衛星とも打ち上げから 10 年以上が経過しており、徐々に寿命を迎えつつあるのも事実です。したがって、次の 10 年間での活用を目指した新しい衛星を用いた観測が重要であり、これに向けて金沢大学では独自の新しい人工衛星の開発を進めています。

本研究は、日本学術振興会卓越研究員事業「X 線・ γ 線で明らかにする重力波候補天体ガンマ線バーストの起源」(研究代表者：有元誠)、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究(研究領域提案型)「重力波物理学・天文学：創世記」(17H06362)(領域代表者：京都大学理学研究科教授・田中貴浩)、金沢大学先魁プロジェクト 2018「宇宙・素粒子研究の融合によるマルチメッセンジャー天文学の推進」(プロジェクト代表者：金沢大学理工研究域数物科学系教授・米徳大輔)、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、JAXA 宇宙科学研究所等の支援を受けて実施されました。

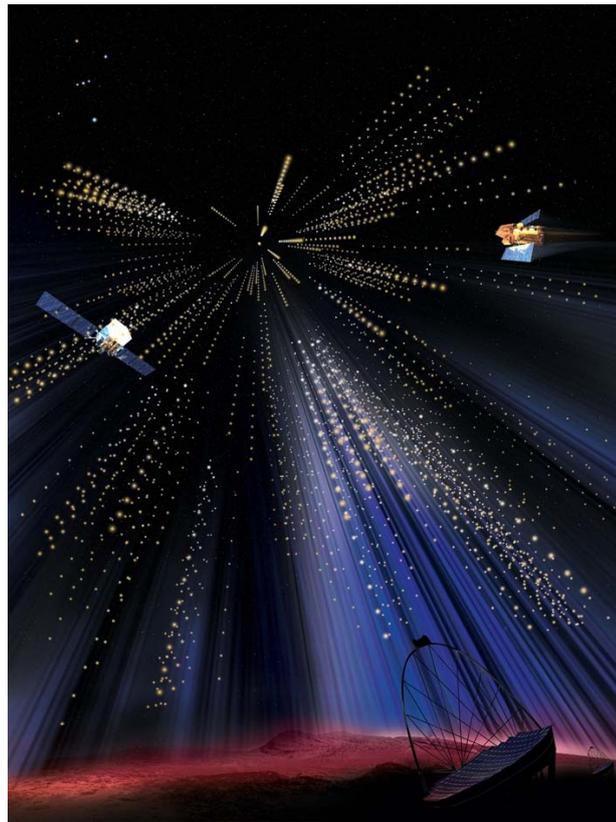


図 1. フェルミ衛星 (左), スウィフト衛星 (右), MAGIC (下) が, GRB190114C からの X 線およびガンマ線の放射を同時に検出するイメージ図 ((C) NASA)

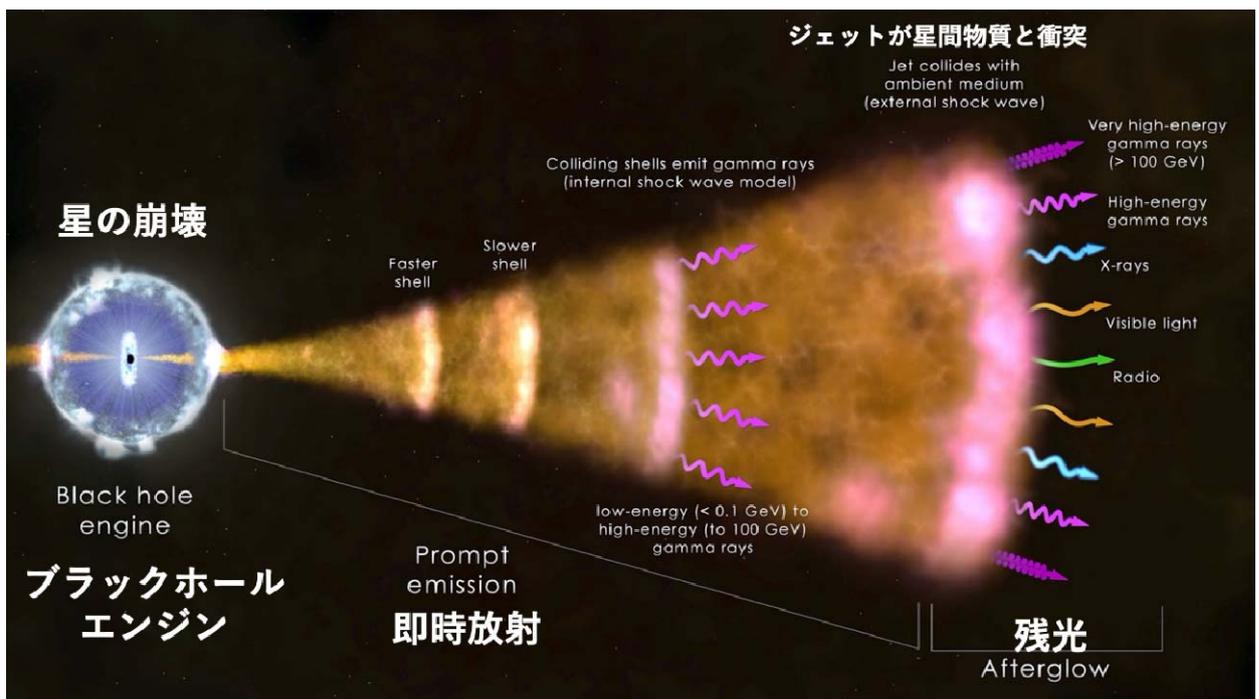


図 2. ガンマ線バーストの電磁放射の予想図

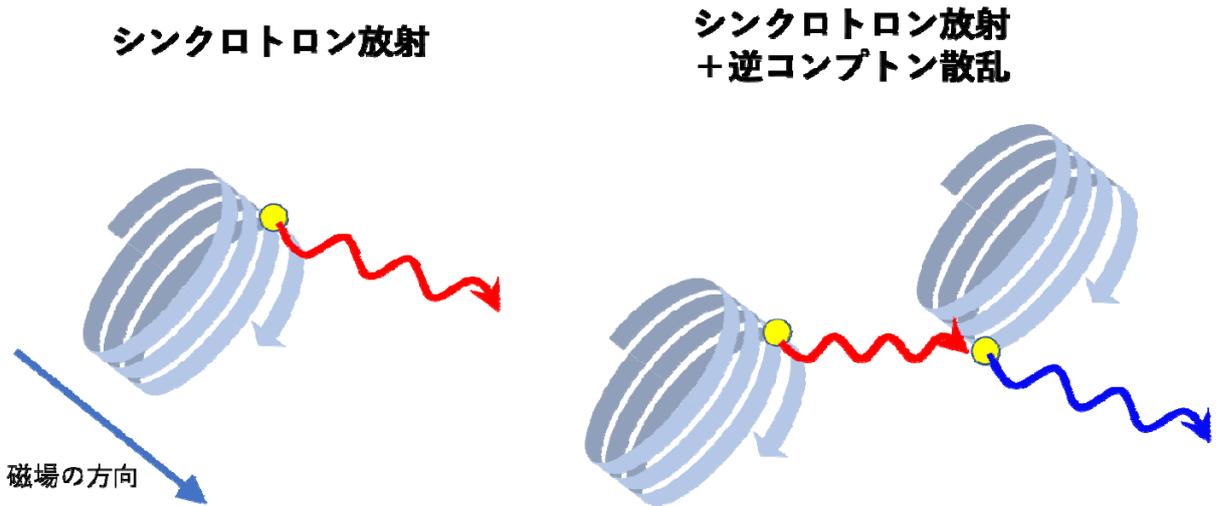


図 3. シンクロトロン放射（左）と逆コンプトン散乱（右）のイメージ図。

GRB 190114C で観測された超高エネルギーガンマ線は、シンクロトロン放射が逆コンプトン散乱によって、さらに高いエネルギーの光子へたたき上げられる物理プロセスによって生じたことが明らかになった。

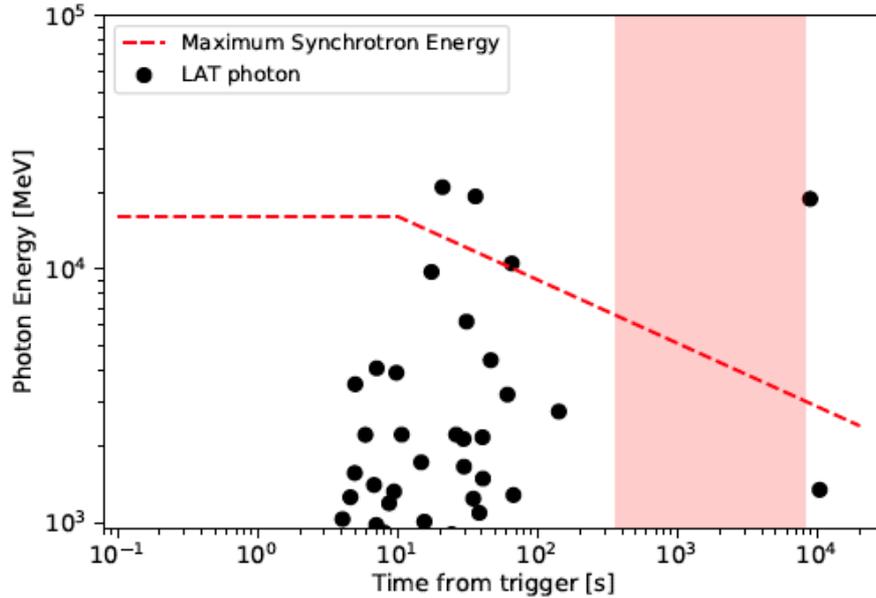


図 4. GRB 190114C から検出されたガンマ線エネルギーの時間分布

黒点が実際に検出された値であり、点線が従来のシンクロトロン放射モデルから予想される最大エネルギーを示す。よって、この点線より上に来る黒点は、シンクロトロン放射では説明できず別の物理メカニズムが必要とされる。

【掲載論文】

①

雑誌名 : *Nature*

論文名 : Observation of inverse Compton emission from a long γ -ray burst

著者名 : MAGIC Collaboration, P. Veres, et al.
(MAGIC コラボレーション, P. ヴェレス 他)

掲載日時 : 2019 年 11 月 20 日 18 時 (英国時間) にオンライン版に掲載

DOI : 10.1038/s41586-019-1754-6

②

雑誌名 : *Astrophysical Journal*

論文名 : Fermi and Swift observations of GRB 190114C: Tracing the evolution of high-energy emission from prompt to afterglow

(フェルミ衛星とスウィフト衛星による GRB 190114C の観測:即時放射から残光への高エネルギー放射の進化を辿って)

著者名 : M. Ajello, M. Arimoto, M. Axelsson et al.
(M. アヘロ, 有元誠, M. アクセルソン 他)

掲載日時 : 2019 年 9 月 23 日 (協定世界時) にプレプリントがオンラインに掲載

URL : <https://arxiv.org/abs/1909.10605>

【用語解説】

※1 フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡衛星 (フェルミ衛星)

日米欧の国際チームで開発された高エネルギーガンマ線観測用天文衛星であり, 2008 年に打ち上げられた。全天をサーベイしながら, 広い天域を常に監視している。日本のフェルミ衛星チームは, 金沢大学に加え, 広島大学, 東京工業大学, 東京大学, 名古屋大学, 早稲田大学, 茨城大学, 京都大学, 理化学研究所, 立教大学, 青山学院大学, 山形大学, 美星天文台の研究者で構成されている。

※2 ニール・ゲーレルス・スウィフト衛星 (スウィフト衛星)

米英伊が中心となって開発したガンマ線バースト観測用天文衛星であり、2004年に打ち上げられた。フェルミ衛星が高エネルギーガンマ線帯域をカバーするのに対し、スウィフト衛星は低いエネルギー帯域（主に X 線）をカバーする。突発天体の方向決定力に優れているのが特徴で、地上望遠鏡によるガンマ線バーストの迅速な追観測を行う上で、非常に重要な役割を担っている。

※3 大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC

MAGIC は Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope の略。非常に高いエネルギーのガンマ線を捉えることができる地上望遠鏡。超高エネルギーガンマ線が地球の大気と相互作用して生じるチェレンコフ放射を観測する。観測サイトはスペイン・カナリア諸島のラ・パルマ島に位置しており、東京大学を含む国際チームで開発および観測が行われている。

※4 シンクロトロン放射

磁場中を運動する高エネルギー電子が、磁場中で円運動またはらせん運動をするとき、軌道中心方向の加速度を受けて電磁波を放射する現象または放射する電磁波。

※5 GRB190114C

ガンマ線バースト (GRB) は、その爆発が起きた日にちを基に名付けられる。今回は、2019年1月14日に起きたため、GRB190114C となった。なお、文字列最後の C は、その日の3番目に起きたバーストであることから、アルファベットの3番目の C を用いるという規則から割り当てられている。

※6 電子ボルト

エネルギーの単位の一つ。例えば、身近にある可視光の光子のエネルギーはおよそ 2 電子ボルトである。100 から 1000 電子ボルト以上の電磁波を X 線と呼び、さらにエネルギーが高い 10 万電子ボルト以上の電磁波をガンマ線と呼ぶ。

※7 広い帯域の観測

GRB190114C の観測では、バースト発生からおよそ 1 万秒後から電波望遠鏡による観測も行われており、それらを含めると 17 桁という前人未到の観測が行われた。

※8 逆コンプトン散乱

天体の放射機構の一つであり、運動する電子が光子を散乱することで、光子にエネルギーを与え、元より高いエネルギーの光子が生成される過程。

【本件に関するお問い合わせ先】

■ 研究内容に関すること

金沢大学理工研究域数物科学系 助教

有元 誠（ありもと まこと）

TEL : 076-265-2541

E-mail : arimoto@se.kanazawa-u.ac.jp

■ 広報担当

金沢大学総務部広報室広報係

嘉信 由紀（かしん ゆき）

TEL : 076-264-5024

E-mail : koho@adm.kanazawa-u.ac.jp

金沢大学理工系事務部総務課総務係

大根 沙智恵（おおね さちえ）

TEL : 076-234-6952

E-mail : s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp