

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20368

研究課題名（和文）大気チェレンコフ望遠鏡で拓くガンマ線バーストの物理

研究課題名（英文）Study of Gamma-Ray Bursts with Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes

研究代表者

須田 祐介（Suda, Yusuke）

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・助教

研究者番号：70910321

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：大気チェレンコフ望遠鏡MAGICで検出に成功したガンマ線バーストGRB 201216Cのデータについて低エネルギーに特化した解析を行い、sub-TeVガンマ線を含む多波長観測データがシンクロトロン自己コンプトン放射機構で自然に説明できることを明らかにし論文化した。MAGICがガンマ線放射の兆候を捉えた比較的暗いIGRB 201015Aについてもデータ解析を行い論文化を進めた。次世代ガンマ線天文台CTAの大口径望遠鏡の初号基LST-1とMAGICによる同時観測のための解析パイプラインを構築し、MAGIC (LST-1)単体観測と比べ30% (40%)暗い天体まで検出できることを示し論文化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線バーストの研究は2019年のMAGICによるTeVガンマ線放射の発見により新たな局面を迎えたが、TeV帯域でガンマ線バーストの検出に成功した例は数例しかないため、その放射機構については未解明な点が多い。そのため本成果により新たなサンプルが加えられた意義は大きい。また、低エネルギー側に強いMAGICの性能を活かしたGRB 201216Cの検出成功は、その後継ともいえるLSTのGRB観測に大いに期待できる成果である。MAGICとLST-1の同時解析の確立は、これを用いた今後の高感度観測はもちろん、CTA時代における複眼観測に向けたパスファインダーの役割を果たす上で重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：We have studied gamma-ray bursts (GRBs) observed by the MAGIC telescopes. A dedicated low-energy analysis was performed on the GRB 201216C data observed by MAGIC. We found that the observed multi-wavelength data, including sub-TeV data, can be naturally explained by a synchrotron self-Compton emission mechanism, and we published a paper on this finding. The MAGIC data analysis of GRB 201015A, in which MAGIC observed a hint of gamma-ray emission, was completed, and a paper is in preparation. To further improve sensitivity, we established an analysis pipeline for joint observations with MAGIC and the Large-Sized Telescope prototype (LST-1) for the Cherenkov Telescope Array Observatory. It was found that the joint observations have the capability to detect sources that are 30% (40%) weaker compared to MAGIC (LST-1) mono observations. We published a paper reporting the performance of the joint observations.

研究分野：ガンマ線天文学

キーワード：ガンマ線バースト 残光 シンクロトロン自己コンプトン放射 超高エネルギーガンマ線 大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC CTA LST

## 1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト (GRB) は 1960 年代に発見されてから 2018 年まで、電波から GeV ガンマ線帯域の電磁波観測により研究されてきた宇宙で最も激しい爆発現象である。爆発時の激しい光度変動期間である即時放射は主に人工衛星による X 線から MeV ガンマ線帯域において観測されるが、継続時間が長くても数百秒であるため視野の狭い他の望遠鏡による即時放射の追観測は基本的には難しい。一方で即時放射後の長期に渡って単調な光度減少を示す残光放射については、追観測が容易で電波から GeV ガンマ線帯域に至る多波長データを得ることができ、GRB の物理の中で最も理解が進んでいる。これまでの観測により残光は GRB が生成する相対論的ジェットとそれを取り囲む物質による衝突に由来し、衝突によりジェットの運動エネルギーの一部が電子と磁場に渡され、電子がシンクロトロン放射したものであると考えられていた。しかし、2013 年の宇宙 GeV ガンマ線望遠鏡 Fermi-LAT による GRB 130427A の残光観測から数十 GeV の光子が見つかった。これはシンクロトロン放射では説明が困難であるため、シンクロトロン放射による光子が電子により逆コンプトン散乱され、より高いエネルギーの光子を生成するというシンクロトロン自己コンプトン放射機構 (SSC) が検討されたが、Fermi-LAT で得られた光子統計の少なさから理論モデルへの強い制限は得られなかった。

この状況を変えたのが 2019 年の大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) MAGIC による GRB 190114C からの TeV ガンマ線放射の発見である。IACT は Fermi-LAT と比べ視野が遥かに限られる一方で高エネルギーガンマ線に高い感度を持つ。本研究代表者を含む MAGIC 解析チームの精力的なデータ解析により得られた初の TeV ガンマ線データを含む多波長モデリングから、この GRB の残光放射スペクトルは SSC 放射機構で自然に説明できることが判明した。モデルから得られた物理パラメータはこれまでの即時放射の継続期間が長い GRB (long GRB) のものと同程度の値を示し、SSC は long GRB の残光における普遍的な成分である可能性が示唆された。これまで、この GRB の他に別 IACT である H.E.S.S. が 2 件の GRB の検出に成功したのみで、上で述べた示唆を系統的に議論するため、IACT による更なる GRB の検出が必要であるというのが GRB 研究者間の共通認識であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は GRB 190114C の残光観測から見えてきたシンクロトロン自己コンプトン放射機構が GRB 残光の普遍的な性質であるのか、あるいは別の機構も存在するのかについて調べることである。そのため、本研究では MAGIC で新たに観測した 2 つの long GRB のデータを用いた観測的研究を行った。具体的には MAGIC が検出に成功した 2 例目の GRB である GRB 201216C のデータとガンマ線放射の兆候を捉えた GRB 201015A のデータ解析を行った。また、更なる感度向上に向けて次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡の初号基 LST-1 と MAGIC による同時観測のための解析パイプラインの開発を行い、GRB の検出数の向上を目指した。

## 3. 研究の方法

まず MAGIC で観測した 2 つの GRB のデータ解析について述べる。1 つ目の GRB 201216C は赤方偏移パラメータが 1.1 で発生した GRB で、IACT で検出した最遠方の天体である。そのため、数 100 GeV 以上のガンマ線は銀河系外背景光による吸収を強く受けてしまう。そこで、数 100 GeV 以下の低エネルギーに特化した解析手法を用いた。その上でモンテカルロシミュレーションに基づきカットパラメータの最適化を施した。多波長データを用いた残光放射のモデリングは MAGIC 内の理論家により行われた。2 つ目の GRB 201015A は、MAGIC が発見した明るい GRB 190114C と同等の赤方偏移パラメータを持つが等方換算エネルギーが 3 桁も低く、比較的暗い long GRB であり MAGIC にとってチャレンジングな天体と言える。本研究代表者はこの天体のプロジェクトリーダーとして MAGIC データ解析を率いた。観測条件は月明かりもなく天頂角も比較的小さい好条件であったため、低エネルギーガンマ線に特化した解析が有効であると考え、解析を実行したが改善は見られなかった。そこで MAGIC の標準解析にもどりモンテカルロシミュレーションに基づく解析カットパラメータの最適化を施した解析を行った。多波長モデリングについては MAGIC 外の理論家に協力を依頼した。

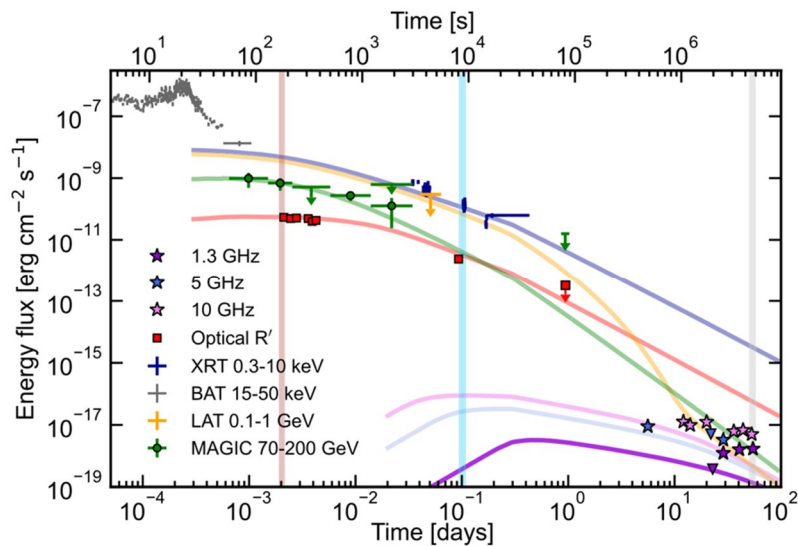
CTA LST-1 望遠鏡は MAGIC 望遠鏡 2 台と同じ観測サイト (スペイン領カナリア諸島ラ・パルマ島) に建設され (下図) 3 台での同時観測が可能である。本研究代表者はこの同時解析に必要な解析パイプラインの構築を国際研究チームのまとめ役の一人として進め、モンテカルロシミュレーションの開発などを推進した。



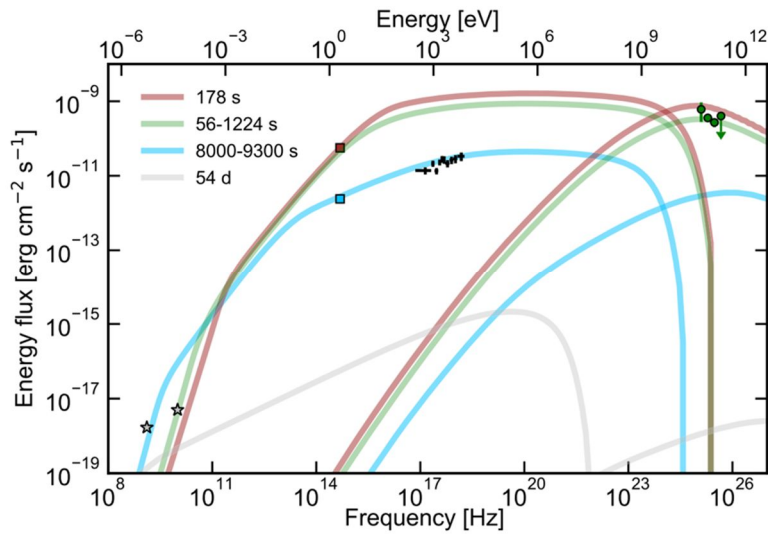
MAGIC 望遠鏡と CTA LST-1 望遠鏡

#### 4. 研究成果

GRB 201216C について、バーストから 56 秒後から観測した MAGIC データを用い、エネルギースペクトルを再構成した結果、power-law 関数でデータ点をよく再現できた。銀河系外背景光による吸収を補正した intrinsic なスペクトルのベキは  $50 \text{ GeV}$  以上で  $-3.15 \pm 0.70$  (stat. only) と評価した。バーストから 56 秒後から 40 分後までの期間では光度は power-law に従って単調に減少していき、そのベキ指数は  $-0.62 \pm 0.04$  であった。電波、可視光、X 線、GeV ガンマ線(上限値のみ)と MAGIC の sub-TeV ガンマ線のデータを用い残光放射のモデリングを行ったところ、観測データは SSC 放射機構で自然に説明できることがわかった(下図)。このときジェットが突き進む周囲の物質の密度分布 ( $R^{-s}$ ,  $R$  は爆心地点から衝撃波面までの距離)として、一様密度の場合 ( $s=0$ ) と星風的な場合 ( $s=2$ ) でモデリングが行われたが、一様密度の場合には解が得られず、星風的な場合を強く示唆する結果となった。これは実際、long GRB では期待される密度分布であり、これまでの TeV ガンマ線を伴う GRB では一様密度が好まれていたことは異なる結果である。一方で、電波観測を説明する上で SSC 以外の成分を考える必要があることがわかった。本研究代表者は MAGIC データ解析を他研究者と担当し、これらの成果を責任著者の一人として Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌から論文発表し、イタリア・ナポリで開かれた TeVPA2023 において口頭発表した。



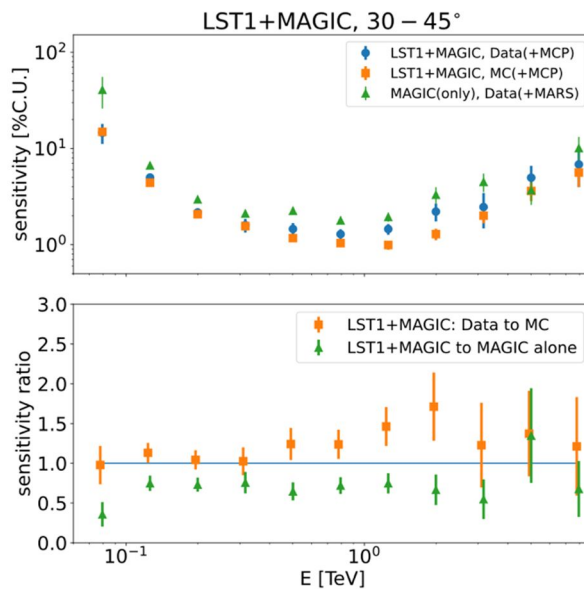
GRB 201216C の多波長光度曲線



GRB 201216C の多波長エネルギースペクトル (緑点が MAGIC データ)

GRB 201015A の MAGIC データ解析において解析カットパラメータの最適化を施した解析を完了し、他波長のデータを用いたモデリングを完了した。当初はこの GRB のみで論文化を予定していたが、別の比較的暗い GRB の観測結果と合わせることで放射機構についてより深い議論が可能である考え、2つの GRB の観測についての論文化を進めた。GRB 201015A のデータ解析の結果を国際会議 TeVPA2021 や国内学会において口頭発表した。

MAGIC と LST-1 の同時解析パイプラインは本事業期間に完成し、ガンマ線天文学の標準光源であるかに星雲の同時観測データからその性能を評価した。その結果、MAGIC (LST-1) 単体観測に比べ 30% (40%) 暗い天体まで検出できることが明らかになった (下図)。本研究代表者はこれらの成果を責任著者の一人として Astronomy & Astrophysics 誌から論文発表し、オーストリア・ウィーンで開かれた国際会議 TAUP2023 において口頭発表した。この同時解析はまもなく幕が開ける CTA 時代における複眼観測のパスファインダーともいえる。本研究代表者と他 3 名の共同研究者は同時解析パイプライン構築への貢献が認められ、MAGIC コラボレーションより Florian Goebel Prize 2023 を受賞した。



MAGIC と LST-1 の同時観測における感度曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 H. Abe, ..., Y. Suda et al.	4. 巻 527
2. 論文標題 MAGIC detection of GRB 201216C at $z = 1.1$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5856 ~ 5867
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stad2958	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Abe, ..., Y. Suda et al.	4. 巻 680
2. 論文標題 Performance of the joint LST-1 and MAGIC observations evaluated with Crab Nebula data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A66 ~ A66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202346927	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 須田祐介、今澤遼、大谷恵生ら、他 CTA LST project、MAGIC Collaboration
2. 発表標題 CTA-LST初号基とMAGICによるTeVガンマ線同時観測のための解析手法の開発
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Suda on behalf of the MAGIC Collaboration
2. 発表標題 Recent highlights of very-high-energy gamma-ray observations by the MAGIC telescopes
3. 学会等名 International Conference on the Physics of the Two Infinities（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Suda on behalf of the MAGIC Collaboration
2. 発表標題 MAGIC observations of gamma-ray bursts
3. 学会等名 TeV Particle Astrophysics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須田祐介 他 MAGIC Collaboration
2. 発表標題 MAGIC 報告 80: GRB 201015AとGRB 201216Cの観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺内健太、窪秀利、野崎誠也、岡知彦、浅野勝晃、深見哲志、Daniela Hadasch、稲田知大、小林志鳳、Daniel Mazin、野田浩司、大谷恵生、齋藤隆之、櫻井駿介、Marcel Strzys、高橋光成、武石隆治、手嶋政廣、Ievgen Vovk、櫛田淳子、西嶋恭司、須田祐介、The MAGIC Collaboration
2. 発表標題 MAGIC 望遠鏡によるGRB 201015AとGRB 201216Cの観測
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷恵生、阿部正太郎、阿部日向、稲田知大、今澤遼、岩村由樹、大石理子、岡知彦、岡崎奈緒、奥村暁、折戸玲子、片桐秀明、櫛田淳子、窪秀利、郡司修一、小林志鳳、齋藤隆之、櫻井駿介、須田祐介ら 他 CTA LST プロジェクト
2. 発表標題 CTA 報告 184: CTA 大口径望遠鏡初号機とMAGIC 望遠鏡の同時イベント解析手法の研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷恵生、阿部正太郎、阿部日向、稲田知大、今澤遼、岩村由樹、大石理子、岡知彦、奥村暁、折戸玲子、片桐秀明、櫛田淳子、窪秀利、郡司修一、小林志鳳、齋藤隆之、櫻井駿介、須田祐介ら 他 CTA LST プロジェクト、MAGIC コラボレーション
2. 発表標題 CTA 報告 192: CTA 大口径望遠鏡初号機とMAGIC 望遠鏡の同時イベント解析手法の研究 (2)
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Suda, A. Berti, F. Di Pierro, Y. Ohtani, J. Sitarek, E. Visentin on behalf of the CTA-LST Project and the MAGIC Collaboration
2. 発表標題 Performance of the joint observations with CTA LST-1 and MAGIC
3. 学会等名 XVIII International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics 2023 (TAUP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Suda, A. Berti, S. Fukami, S. Loporchio, L. Nava, K. Noda, K. Asano, Z. Bosnjak, F. Longo on behalf of the MAGIC Collaboration, A. Gomboc, N. Jordana-Mitjans, A. Melandri, C. Mundell, M. Shrestha, and I. Steele
2. 発表標題 Observation of sub-TeV gamma-ray emission from GRB 201216C at redshift 1.1
3. 学会等名 TeV Particle Astrophysics 2023 (TeVPA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	MPI for Physics			
スペイン	IFAE			
イタリア	INAF	INFN	U. Trieste	他2機関
クロアチア	U. Zagreb			
ポーランド	U. Lodz			