

令和 2 年 4 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05858・19K21043

研究課題名(和文)チェレンコフ望遠鏡アレイ国際共同実験による突発天体の研究

研究課題名(英文)Observation of transient objects with the Cherenkov Telescope Array telescopes

研究代表者

野田 浩司(Noda, Koji)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：00816837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：チェレンコフ望遠鏡アレイ(CTA)国際共同実験において、ガンマ線バーストなどの宇宙で突発的に起こる天体現象を即座に観測し、その性質を理解することを大目的とした。CTAの大口径望遠鏡(LST)を20秒以内にあらゆる天体に向けて観測を始めるには、高出力の電源システムが必要となる。本研究ではまず、同電源システムの監視・管理システムを整備し、望遠鏡の安定運用を達成し、無事にかに星雲からのガンマ線信号を期待通りに得た。また、LSTのモデルであり、同じ観測地で稼働中のMAGIC望遠鏡を用いて、ガンマ線バーストからのテラ電子ボルト以上の高エネルギーガンマ線を初検出し、ガンマ線放射機構への知見を得た。

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素性は長らく謎に包まれていたが、今世紀に入り研究が活発化し、メガ電子ボルトのガンマ線やエックス線、さらに長い(エネルギーの低い)波長領域での理解が進んだ。しかしギガ電子ボルト以上のガンマ線放射については、放射機構は謎のままであり、テラ電子ボルトに至っては未発見であった。本研究はこれを突破する初の発見となり、そのインパクトは非常に大きい。本成果はMAGIC望遠鏡によってなされたが、CTA LSTは言わばMAGICのアップグレード版であり、MAGICでの発見が今後LSTに引き継がれ強力に進むことは疑いがない。その意味でLSTを安定運用につなげた本研究の成果も同様に重要である。

研究成果の概要(英文)：We aim to observe and understand transient objects in the Universe, such as gamma-ray bursts, using telescopes in an international collaborative project, Cherenkov Telescope Array. CTA Large Size Telescope (LST) requires a special high-power supply system in order to point to any object in the sky and start to observe it within 20 seconds. In this program we first developed and deployed a monitoring and alerting systems of the power supply system, and achieved a stable operation, leading to obtaining gamma-ray signals from Crab Nebula as expected. In parallel, using MAGIC telescopes, which are the model of LSTs and are located at the same observational site as LST, we finally discovered gamma rays with energies beyond teraelectronvolt from a gamma-ray burst, and have obtained an insight into its gamma-ray emission mechanism.

研究分野：高エネルギーガンマ線天文学

キーワード：高エネルギーガンマ線 突発天体 ガンマ線バースト チェレンコフ望遠鏡 電源システム

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト (以下 GRB) は、1960 年代に米国の軍事衛星により発見された、宇宙で突発的に短時間起こる爆発現象である。GRB 本体は X 線からメガ電子ボルト (MeV) ガンマ線で 0.1 秒から数百秒程度続く閃光であり、即時放射と呼ばれる。その後減衰しながら数日間以上続く「残光」成分が多波長で観測されている。20 世紀のうちには、GRB は天の川銀河の外のいたるところで起きているとわかったが、その由来は未知であった。今世紀に研究が活発化し、人工衛星のガンマ線・X 線観測で方向を特定し、可視光や電波で残光を追尾観測することで、距離などの測定が可能となり理解が進んだ。GRB は即時放射の継続時間で大きく 2 つの種族に分けられ、継続時間の長い種族は大質量星の死と関係があると考えられるようになった。一方継続時間の短い種族は、中性子星連星の合体がその由来の有力候補であり、この説は 2017 年の重力波同時観測により確度を増したが、依然確定はしていない。また放射機構についても、残光はシンクロトロン放射が確実視されている一方、即時放射はまだ明らかになっていない。これを解明する大きな手がかりが、より高エネルギーのガンマ線放射である。2008 年打上げの Fermi 衛星により、ギガ電子ボルト (GeV) 以上のガンマ線放射の存在が確定し、即時放射から数百秒ほど遅れて来ることが多いとわかったが、その機構は謎であった。2013 年の GRB からは即時放射 4 分後に 95 GeV ガンマ線が検出された。これを残光シンクロトロン放射で説明するのは厳しいが、検出数が少なく、代替となる放射機構は確定しなかった。

100 GeV からテラ電子ボルト (TeV) のエネルギーのガンマ線は、大気チェレンコフ望遠鏡の範疇である。その検出面積は人工衛星に比べ 4 桁以上も大きいため、GRB を観測できれば検出統計量は圧倒的に大きいと期待されていた。しかし一方で、チェレンコフ望遠鏡は地上追尾型なので、人工衛星などのアラートを受け取ってから即座に望遠鏡を向け直して観測を開始しないことには、GRB などの短時間現象を検出できない。よって望遠鏡を軽量化し高速駆動することが鍵となる。また GRB は宇宙論的距離にあり、ガンマ線が宇宙を伝播する間に別の光子 (Extragalactic Background Light, EBL) と反応して減衰することが知られている。この EBL による減衰はガンマ線エネルギーが高いほど大きいため、できるだけ低エネルギーを目指し、数十 GeV に感度を持つ大型大気チェレンコフ望遠鏡が GRB 観測には最適である。このコンセプトは今世紀初頭に MAGIC 望遠鏡として現実化し、15 年以上に渡って観測が続けられてきたが、GRB は検出されなかった。本研究が始まった 2018 年 10 月の時点では、チェレンコフ望遠鏡の次世代計画であるチェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array, CTA) の大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST) の 1 号基建設がまさに終わり、試運転を迎える状況であった。MAGIC は観測を続けていたものの、どちらが先に GRB を初検出するかという意味では、MAGIC をアップグレードした LST での検出が当然期待される状態であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、GRB などの宇宙で突発的に起きる天体の理解である。これらの天体種族が一体何なのか、その放射の仕組み、お互いに関係しているのかの理解が本質的な問いとなる。前項で述べたような GRB の放射機構への理解を深めるだけでなく、高エネルギーニュートリノ放射や重力波起源天体など別の突発天体の理解への足がかりとし、天体種族間の関係を総合的に明らかにするのが、突発天体物理の大目標である。

高エネルギーニュートリノ実験は今世紀に本格化し、2013 年の IceCube 実験による宇宙からの事象検出で花開いた。MAGIC では、2017 年にニュートリノ放射の方向からの高エネルギーガンマ線を初検出し、この天体はジェットが地球を向いた活動銀河核、ブレイザーであった。しかし IceCube ニュートリノのエネルギースペクトルは、従来の活動銀河核モデルでは単純に説明できず、モデルの修正が必須である。ニュートリノ放射を GRB で説明する可能性も議論されてきているが、今まで観測されている GRB 種族では IceCube ニュートリノを説明できないことが確実視されている。GRB になり損ねた天体がガンマ線を出さずにニュートリノのみ放射するなど、必要となる新しいモデルの観測的証拠を捉えることが強く求められている。

本研究計画申請時には、これらの物理目的を達成する望遠鏡を「CTA」としていた。これは前述の背景に基づくものであるが、当然、使用する望遠鏡はあくまでも手段である。特に CTA LST は MAGIC をモデルとして発展させた望遠鏡であり、観測地 (スペイン・ラパルマ島) をも共有している (右写真)。よって MAGIC で重要な物理成果が得られれば、これを CTA LST への前触れとみなすのは自然である。MAGIC による観測で必要とわかった技術・戦略を CTA LST に採り入れることで、CTA LST での目的達成がより近づく。

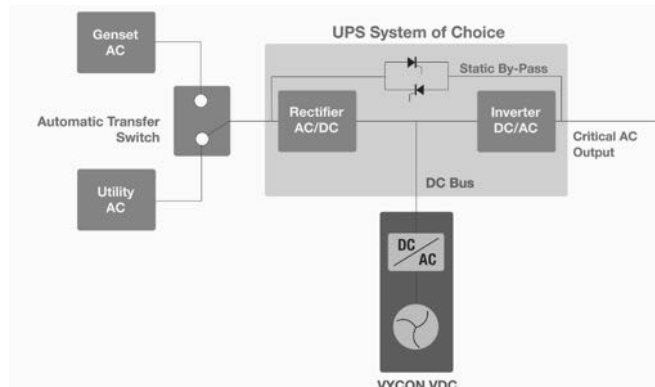


MAGIC 望遠鏡と CTA 大口径望遠鏡

3. 研究の方法

(1) 大口径望遠鏡 電源システム監視

前述のように、大口径の大気チェレンコフ望遠鏡を使って GRB を観測するためには、望遠鏡駆動の高速化が鍵となる。MAGIC 望遠鏡は 30 秒以内に全天のあらゆる方向に向けることが可能だが、CTA LST はこれを発展させ、20 秒以内を目標性能としている。このためには、望遠鏡の駆動部モーター等をそのように開発するだけでなく、駆動部に供給する大容量・大電力の電源が必要となる。この項目は CTA 日本グループの貢献により開発が進み、2018 年 4 月には LST 4 台分のシステムが観測地に設置された。右にその概略図を示す。左側は外部電力への接続部であり、停電時には発電機に自動的に切り替えが行われる。右側が望遠鏡への電源供給部である。通常運転時には 22 kW 程度の電力が継続的に必要だが、望遠鏡の高速回転時には最大 400 kW が 10 秒間ほど必要となる。これを実現するために、伝統的なバッテリー UPS ではなく、真空中で高速回転する 2 つのフライホイールに電力を保持する機構を採用している。この機構は UPS (右上) とフライホイール (右下) に分けられ、別の企業から購入したものを、あとで統合して設置した。



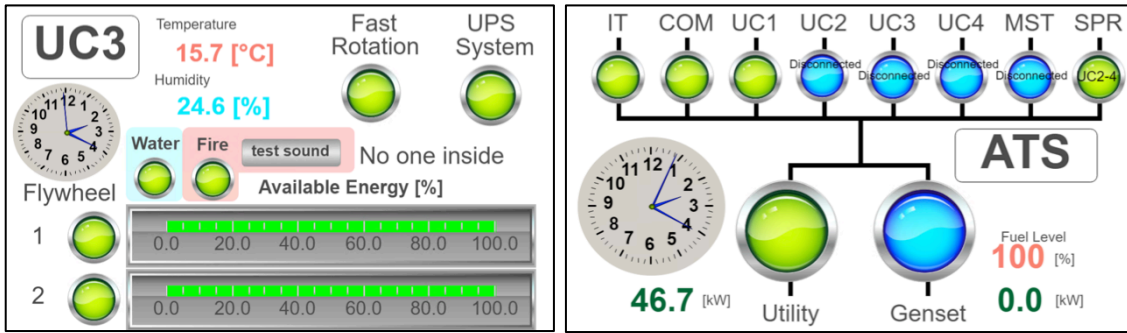
LST 高速回転用 電源システム概略図

この電源システムには未解決点が 2 つあった。UPS とフライホイールが別々に実装されたため、片方に問題が生じてもう一方がそれを完全には知らない状態になってしまう。よって両者を常に監視してステータス (状態) 信号を駆動部に送信する仕組みを追加実装する必要があった。またこの電源システムには、CTA で採用された通信規格 OPCUA が実装されておらず、このままでは他のシステムや観測所と統合できなかった。これら 2 点を解決して、LST 望遠鏡システムに組み込まれた電源サブシステムとして完成すべく、下図のような Programmable Logic Controller (PLC、和名：シーケンサ) を新たに設置し、そのソフトウェアの開発を行った。メンテナンスを容易にするため、各デバイスに使われているのと同じメーカー (WAGO) の PLC を使用した。

この PLC では、まず UPS やフライホイールなどの各デバイスの情報を読み込み、これを使って電源システム全体としての状態信号を作った。これをデジタル信号として出力し、直にケーブルを介して、電源システムが入るコンテナから隣にある望遠鏡駆動部のコンテナに接続、そこにある PLC に入力する。これにより、望遠鏡が高速回転を行ってよい状態かどうか常に自動判別可能になった (インターロックと呼ばれる)。インターロックは他のデバイスの状態を知るのに使われており、例えば望遠鏡に近づくためのフェンスが開いたら望遠鏡を緊急停止するなど、安全に望遠鏡を運用する上で欠かせない仕組みである。ここに電源システムを組み込むことに成功した。また同じ PLC を使い、状態信号を常に OPCUA 規格で Ethernet 上に晒す (publish する) ようにした。今後の他システムの進捗状況に応じて、状態の情報に上の階層から OPCUA 規格を介してアクセスし、観測所として統合する作業が必要となるが、その準備が整った。最後に、使用した PLC には内部の様々な信号を Web GUI で簡易にモニターできるようにする WebVisu という特徴がある。PLC 選定・購入した当初は、OPCUA 通信による制御用 GUI が早期に完成すると想定していたため、この有用性に気づいていなかったが、制御用 GUI の遅れが確定した段階で早々に開発方針を切り替え、独自に GUI を整備する方針にした。次頁にその GUI の例を示す。まず左側の図が望遠鏡ごとの電源システムの監視用である。左上に基本情報があり、高温時や漏水モニターや火災報知器が作動した際にはアラームを出す。下が 2 つのフライホイールの状態であり、これらが一定以上の電力を保持しつつ、右上の「UPS System」が問題なく動作していれば、最終的にその左 (画面の上やや右) にある「Fast Rotation」が許可されることとなる。右側の図は外部電力に接続している Automatic Transition System の監視用であり、接続状態と使用電力が表示されている。停電時 (Utility がオフ) には発電機 (Genset) が稼働し、発電量とガソリン残量が表示される。このような監視機能を整備することで、望遠鏡を安定して運用できるようになった。



PLC (WAGO PFC200)

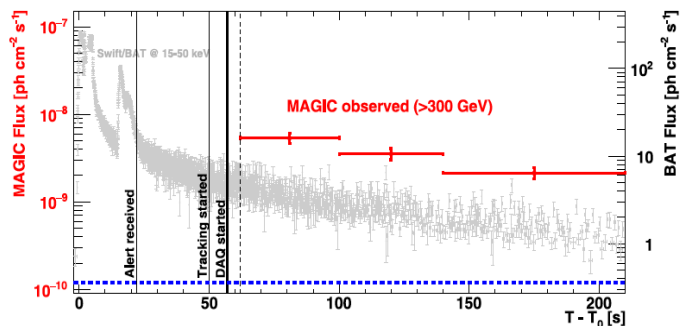


電源システム監視用の Graphical User Interface (GUI) の例

(2) MAGIC 望遠鏡を使った GRB 観測

同時並行して、同観測地にある MAGIC 望遠鏡を用いた観測が行われた。GRB などの突発天体はいつ起こるかかわからないため、人工衛星からのアラートを自動的に解析して、望遠鏡の方向を変更しつつ観測モードを自動的に変更する仕組みが共同研究者によって構築されていた。また突発天体は観測条件を選ばないため、天候があまり良くない状況や月光が明るい状況で取得したデータの解析に精通していることが重要である。本研究代表者は、これらのデータ解析における主導権を取れるよう、2013 年のブレーザー Mrk501 データ解析において、LIDAR 設備を使った大気透明度の補正を初めて導入した論文を出版した (2015 年)。また 2016 年からは、月光下で取得されたデータの解析エキスパートとしての役割を前任者から引き継いでいた。

本研究計画開始の 3 ヶ月半後、2019 年 1 月 14 日に MAGIC 望遠鏡によってチェレンコフ望遠鏡による初めての GRB 検出が報告された。本研究代表者は本 GRB 190114C 観測時の電話シフト担当だった。GRB 衛星 Swift からのアラートは GRB 発生の 22 秒後に全世界に配信され、MAGIC はその受信後 28 秒で望遠鏡を GRB の方向へ向けて観測を開始し、その数秒後にはデータ取得を始めた。本観測は想定していた通り月光下に行われたため、データ取得が安定するまでに数秒を要した。この部分のデータ解析にはエキスパートの知識が必要となる。本研究代表者はエキスパートとしてデータ解析チームリーダーを務め、この非標準データ解析を率いた。結果、GRB 発生の 62 秒後からのデータを救い出すことに成功した (下図)。この GRB 開始数十秒は、しばしば即時放射の途中、あるいは即時放射から残光への遷移中という、物理的に重要な時期である。この観測成果はチェレンコフ望遠鏡の高速回転、それに続く素早いデータ取得開始が GRB 観測に非常に重要であると示しており、MAGIC 望遠鏡や CTA LST のコンセプトの正しさがついに確認された。得られた物理成果の詳細は 4. (2) で述べる。

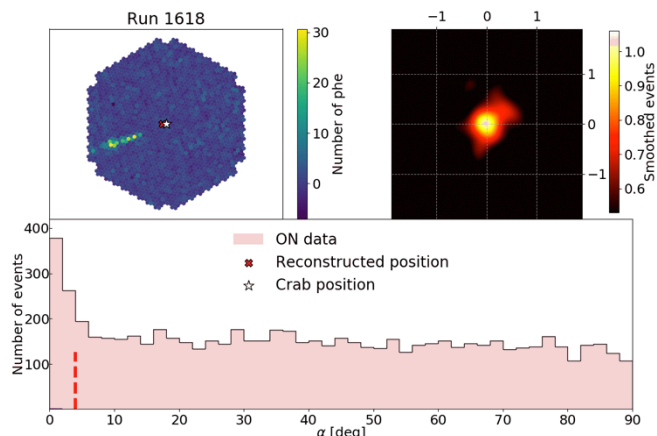


MAGIC による GRB 190114C 初期光度曲線

4. 研究成果

(1) CTA LST 1 号基の安定運用

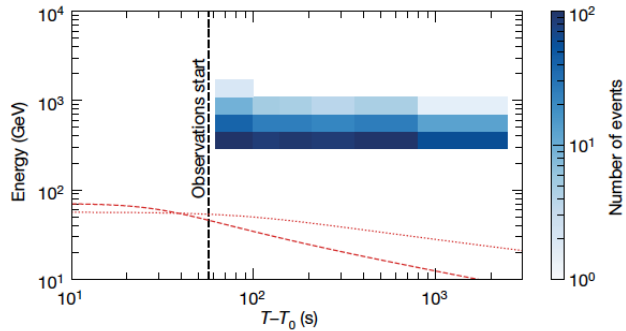
CTA LST の 1 号基は 2019 年から試運転観測を開始した。この間、試運転観測シフトだけでなく各サブシステムの担当者が入れ替わり現地に渡航し担当箇所の改善を行った。本研究代表者は電源システムだけでなく光学系や望遠鏡追尾補正の担当者でもあるため、現地に複数回渡航した。その結果、2019 年末には標準光源であるかに星雲 (冬季にのみ観測可能) からのガンマ線検出に成功した (右図)。2020 年 1 月から安定観測用のシフトを常駐させた安定観測モードに入っている。この成果は国内学会などで公表された (2020 年 4 月現在、コロナウィルスの影響により観測は中止している)。



CTA LST1 号基によるかに星雲観測

(2) MAGIC による GRB 190114C 解析結果

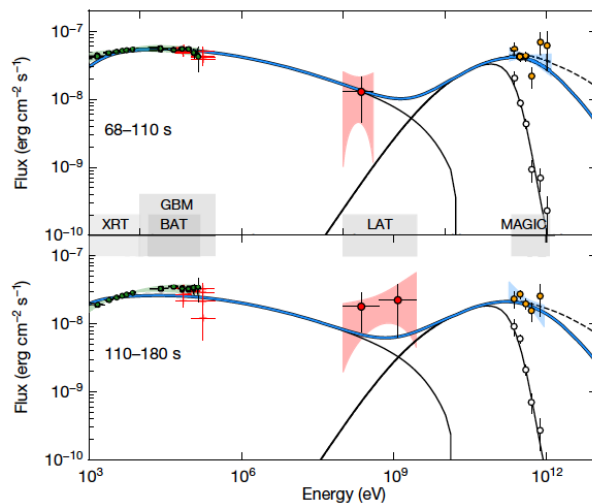
次に、MAGIC の GRB190114C 検出からわかったことを述べる。MAGIC による 0.3 - 1 TeV ガンマ線の光度曲線は観測開始当初から単調減衰し、スペクトルのべきも一定と無矛盾であった。他の波長の結果とも比べたところ、MAGIC が検出したガンマ線は (1 分以内の観測開始だったが) すべて残光由来と結論された。エネルギー流量は X 線や GeV ガンマ線の 3 割程度であり、高エネルギーガンマ線が GRB エネルギーの大きな部分を運んでいると判明したため、エネルギー総量の議論に修正が必要となった。エネルギースペクトルを導くには EBL による減衰と検出器の応答を考慮した補正・再構成が必要である。補正後スペクトルは 0.2 - 1 TeV に渡って単純なべき則でよく表される。1.1 TeV 以上のガンマ線の検出優位度は 2.5 標準偏差に達し、GRB からの初めての TeV ガンマ線検出を主張できることとなった。ガンマ線のエネルギーを GRB 発生からの時間に対して描いたのが右図である。同図には、残光のシンクロトロン放射から予想されるガンマ線の最高エネルギーの時間発展を重ねて描いている。このように、今回検出されたガンマ線は残光シンクロトロン放射で説明することが不可能であり、別の放射機構を要求する。以上の結果は、Nature 誌に出版され、本研究代表者は責任著者の一人としてすべてのプロットのデータ解析を行い、共同研究者と共に論文執筆を行った。



GRB 190114C エネルギー vs. 時間

上記のデータ解析結果を受けて、他の多波長観測結果と合わせてガンマ線放射モデルを議論

した別の論文が、共同研究者によって同時に Nature 誌に出版された。モデルを示す線と重ねた多波長スペクトルを右図に示す。ここでは X 線以下の低エネルギー放射をシンクロトロン放射で説明する一方、GeV 以上のガンマ線放射を逆コンプトン散乱で説明しており、その種光子として最も単純なシンクロトロン放射を仮定している (Synchrotron Self-Compton モデル)。これを見るとわかるように、GeV ガンマ線 (LAT) だけでは、2 成分が混在し検出の不定性も大きいため確実なことが言えない。今回の MAGIC 観測により、2 つ目の成分の存在が確定し、確かな議論が可能になったことが見て取れる。



GRB 190114C 多波長エネルギースペクトル

(3) 今後の展望

本研究により CTA LST を用いた GRB などの突発天体観測に様々な面で進歩があった。ハードウェアとしては、望遠鏡の高速回転が安定して可能になり、全方向に 20 秒以内に向けられるようになった。カメラなどの試運転とかに星雲の観測により、望遠鏡に十分な感度があると確認された。これらを組み合わせ、MAGIC より好条件の観測が可能となる。ソフトウェアについては、本研究代表者を含めたチームが望遠鏡制御系を開発中であり近々完成する。同時に別の共同研究者によってデータ解析法の開発が進んでおり、支障はない。今後期待される物理成果としては、GRB 190114C のような残光観測もあるが、やはり未検出の即時放射の理解が非常に重要であろう。これを達成する上で MAGIC より高速に回転可能な CTA LST が果たす役割は大きい。また上図を見ればわかるように、今回の MAGIC 観測は 200 GeV 以上の EBL 減衰の大きいエネルギー領域であった (白丸が EBL 減衰後の観測されたガンマ線、橙がその補正後)。LST 2 号基が稼働し始めれば感度エネルギーが 20-30 GeV まで下がり EBL 減衰を防ぐことができる (青線と黒線が重なる領域に入る)。これにより、逆コンプトン散乱による放射のスペクトルピークを捉えられるだけでなく、より遠くの GRB を検出できるようになって検出数が年間数個まで増える。観測数が増えれば、高エネルギー放射が GRB に共通した特徴なのかがわかり、GRB に限らず星の死に対する一般的理解がさらに深まると期待される。

また上記の特徴を用いれば、CTA LST では様々な突発天体の物理が可能となる。ニュートリノ放射天体は GRB などのガンマ線天体に関係している可能性があり、また重力波観測も short GRB との関わりが大きい。これらはマルチメッセンジャー天文学かつ時間領域天文学という、重要な新しい学際的な研究分野として発展していくと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 MAGIC Collaboration	4. 巻 575
2. 論文標題 Teraelectronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 455 ~ 458
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-019-1750-x	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MAGIC Collaboration et al.	4. 巻 575
2. 論文標題 Observation of inverse Compton emission from a long γ -ray burst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 459 ~ 463
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41586-019-1754-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 野田浩司 他MAGIC Collaboration
2. 発表標題 MAGIC報告71: GRB 190114Cからの TeVガンマ線の発見
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Noda for MAGIC Collaboration
2. 発表標題 Discovery of VHE gamma rays from GRB 190114C
3. 学会等名 TAUP 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Noda for MAGIC Collaboration
2. 発表標題 Discovery of VHE gamma rays from GRB 190114C
3. 学会等名 Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田浩司 他CTA Consortium
2. 発表標題 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告(17)
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎誠也 他CTA Consortium
2. 発表標題 CTA報告160: CTA大口径望遠鏡初号機のモノ解析 現状
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久門拓、野田浩司、手嶋政廣、齋藤隆之 他 CTA共同研究者
2. 発表標題 CTA報告154: CTA大口径望遠鏡高速回転電源システムの開発試験
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----