

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02086

研究課題名（和文）宇宙ガンマ線観測による銀河中心におけるダークマター探査

研究課題名（英文）Search for Dark Matter in Galactic Center with Cosmic Gamma-ray Observations

研究代表者

田島 宏康 (Tajima, Hiroyasu)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：80222107

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 30,700,000円

研究成果の概要（和文）：銀河中心付近の暗黒物質探査においては、拡散背景ガンマ線が主要なバックグラウンドとなるため、その原因となる星間媒質の密度をダストの熱放射、温度、光学的厚みから系統的に導出する方法の検証や、我々の開発した画像処理ソフトウェアによる新規ガンマ線天体候補の検出により、背景ガンマ線の不定性の低減した。並行して、次世代ガンマ線観測装置であるCTAに採用する新型光センサーの欠点であったクロストーク特性を保護樹脂をなくすことで改良し、さらに今後は遅延クロストークと呼ばれる現象の抑制による性能向上に目途をつけた。また、高密度の光センサーの信号を処理できる集積回路を開発し、試作機による観測で性能を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は宇宙のエネルギーの4分の1をしめ、宇宙の構造形成に重要な役割を果たしている。しかし、その正体はまだわかっておらず、宇宙物理学上の最重要な課題の一つである。本研究では、暗黒物質を検出する有力な方法の一つであるガンマ線観測のデータ解析手法の改良によって暗黒物質検出感度の向上を目指している。さらに、現在稼働中のガンマ線観測装置では検出できない重い暗黒物質探査のため開発中である次世代のガンマ線観測装置に使用する新型光センサーの改良によって、の暗黒物質検出感度向上に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Galactic diffuse gamma rays are the main background for the dark matter searches near the Galactic center. We have improved uncertainties of the galactic diffuse background by verifying the modeling the interstellar medium using dust radiance, opacity and temperature data and identifying several undetected gamma-ray objects by our image restoration software. In parallel, we have improved the crosstalk problem of the novel photon sensor for the next generation gamma-ray instrument, CTA. We found further improvement may be possible by reducing delayed crosstalk. We also successfully developed integrated circuits to process signals from dense photon sensor and verified the performance by test observations using prototype telescope.

研究分野：宇宙線

キーワード：ダークマター ガンマ線 宇宙線 光検出器 半導体検出器 放射線

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在素粒子物理学と宇宙論においては、暗黒エネルギーや暗黒物質といった暗黒成分が宇宙のエネルギーの 96%を占めているという新しいパラダイムを築きつつある。しかし、暗黒エネルギーや暗黒物質の正体については多くが未知であり、新しい理論体系を構築するための十分な情報がない状態である。本研究では、暗黒成分の約 1/4 を占める暗黒物質を検出し、その質量や空間分布を測定することを究極の目標とする。

暗黒物質は、暗黒エネルギーを除く宇宙の全物質の 80%を占め、銀河や銀河群およびそれらを含む宇宙の大規模構造の形成とその歴史を理解する上で、その正体を解明することが不可欠である。これまで宇宙マイクロ波背景放射やバリオン音響振動の測定から、暗黒物質の速度は非相対論的である「冷たい」暗黒物質であることが要求され、ニュートリノなどは不適合であることがわかっている。そのような条件を満たす暗黒物質としては、褐色矮星やブラックホールを含む Massive Astrophysical Compact Halo Object (MACHO)や電磁相互作用をしない素粒子である Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)が有力候補と考えられる。しかし、MACHO はマイクロレンズ法の探索による制限からほとんどの質量領域で十分な量が存在しないことがわかっている。一方、WIMP はビッグバン初期の熱平衡状態から残存した粒子であると考えられるが、その場合現存する暗黒物質のエネルギー密度からその質量や対消滅断面積に強い制限が存在する。最近の有力な素粒子理論である超対称性理論や余剰次元理論で期待される新粒子の質量や対消滅断面積の範囲が上記の熱的残存 WIMP の範囲と良く一致しており、数十桁に及び可能性を考えるとその一致は奇跡的であることから WIMP が暗黒物質の最有力候補と考えられている。

WIMP 探索には、我々の回りに存在する WIMP と原子核の弾性散乱による信号を検出する直接探査と、宇宙に存在する WIMP が対消滅して生成されるガンマ線を観測する間接探査が有力な方法である。直接探査の感度は弾性散乱断面積に、間接探査の感度は対消滅断面積に依存するため、WIMP を予言する理論の定数において異なる位相空間を探索することになり、両者は相補的な性格を持つ。ただし、ガンマ線観測による間接探査では、熱的残存 WIMP の仮説から直接予言される対消滅断面積を測定(または制限)でき、制限が予言値を下回る場合はその質量領域の WIMP を排除できることが利点である。

2008年に打ち上げたフェルミ・ガンマ線観測衛星は、熱的残存 WIMP 仮説の対消滅断面積から期待されるガンマ線強度に十分な検出感度を有するため、間接探査が大きく前進している。図 1(b)に示す通り、最新の矮小楕円銀河(銀河系の伴銀河で暗黒物質の存在比が大きい)観測では、約 $100 \text{ GeV}/c^2$ までの質量領域で対消滅断面積の上限値が熱的残存 WIMP 仮説の予言値を下回っており、その領域での WIMP の存在を排除している。一方、銀河中心領域において暗黒物質に期待される空間分布をもつ「Galactic Center Excess」と呼ばれる数 GeV にピークを持つスペクトル成分がいくつかの論文 (Hooper & Slatyer 2013; Huang et al. 2013; Daylan et al. 2014; Macias & Gordon 2013; Abazajian et al. 2014) で報告され、注目を集めている。それらが WIMP の信号であり b クォーク対が主に生成されると仮定すると、図 1(b)の楕円で示すように $30\sim 40 \text{ GeV}/c^2$ の質量と熱的残存 WIMP 仮説の予言値に近い対消滅断面積をもち、前述の矮小楕円銀河の上限値と矛盾する傾向にあるためである。ただし、研究代表者のグループを含むフェルミ衛星チームの解析では、スペクトル成分にピーク構造が見られていない。この違いは、ガンマ線強度の 75%を占める背景拡散ガンマ線放射のモデルと未検出のガンマ線源(検出済みのガンマ線源の強度は 10%程度)に起因すると考えらる。「Galactic Center Excess」の寄与が 10%程度であることを考えると、これらの成分のより精密な決定が喫緊の課題となってきている。

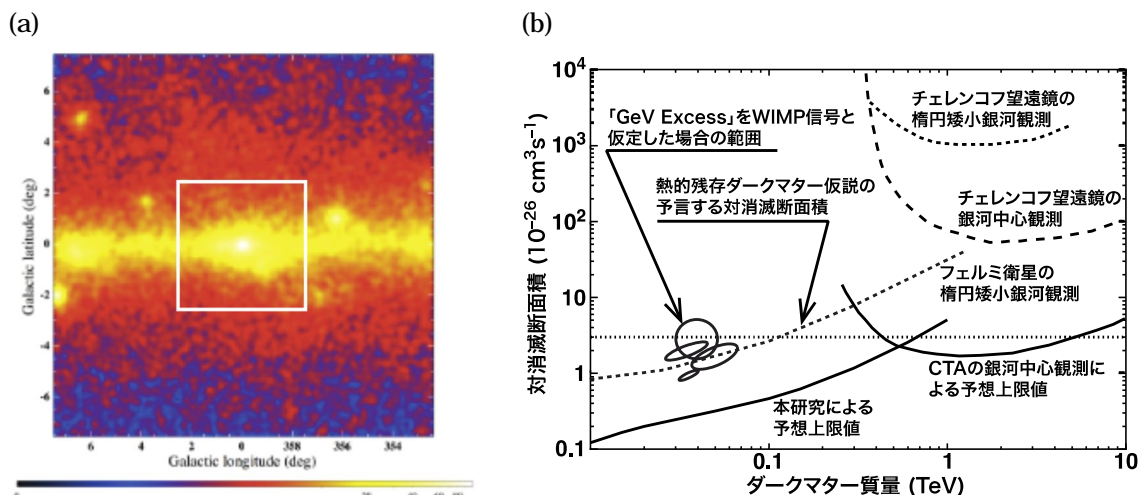


図 1: (a) 銀河中心 ± 7.5 度の領域のガンマ線強度分布。白い四角で囲まれた領域が本研究での解析範囲。(b) 宇宙ガンマ線観測による申請時の WIMP 検出感度と本研究の予想感度。CTA の予想上限値は、本研究で達成できる上限値ではなく、CTA の望遠鏡が全て揃った場合の上限値。

2. 研究の目的

ガンマ線観測による銀河中心領域の WIMP 探査における不定性の最大の要因となっている背景拡散ガンマ線放射と未検出のガンマ線源に関して、新しい解析手法を導入による精密な決定を可能にし、熱的残存 WIMP 仮説から予言される WIMP の対消滅断面積である $\langle\sigma v\rangle\sim 3\times 10^{-26}\text{ cm}^3/\text{s}$ 以下の検出感度を約 $10\text{--}800\text{ GeV}/c^2$ の範囲で実現することで、「Galactic Center Excess」の有無に決着をつける。

一方、TeV 以上の質量領域での WIMP 探査を可能にするためには、フェルミ衛星より高エネルギーのガンマ線を高感度で観測可能な装置が必要となる。Cherenkov Telescope Array (CTA) では、地上チェレンコフ望遠鏡を多数配置して銀河中心を集中的に観測することで、必要となる感度を実現する。CTA 開発の鍵は、焦点面に設置するチェレンコフ・カメラの光検出効率を改善し、より小さな望遠鏡で同じ観測エネルギー範囲を実現することである。これにより費用削減を通して望遠鏡の台数の増加を可能にし、感度の向上に寄与する。最近開発された半導体光検出素子は、従来の光電子増倍管と比較して 2 倍近い光検出効率を実現し、ガンマ線源検出感度を 30% 以上改善することができる。そこで、研究期間内に半導体光検出素子を採用した新型望遠鏡のプロトタイプを国際協力で 2 台製作し性能を検証する。

3. 研究の方法

これまで「Galactic Center Excess」で報告のあった銀河中心周辺の WIMP の対消滅で生成されるガンマ線の有無を検証するためには、この領域のガンマ線強度の約 75% を占める背景の銀河系内拡散ガンマ線放射や未検出のガンマ線源(検出済みのガンマ線源の強度は 10% 程度)の寄与を精密に決定することが鍵となる。

背景拡散ガンマ線放射は、主として宇宙線核子と星間媒質の相互作用(ガンマ線強度の約 45%) や宇宙線電子と背景放射の相互作用(ガンマ線強度の約 30%) によって生成されるが、宇宙線核子や電子の銀河中心周辺の空間分布はまだ測定されておらず、伝播モデルから推定しているにすぎない。本研究では、星間媒質の研究で世界をリードする研究者によって測定された精密な星間媒質分布とガンマ線強度の相関を解析することで、宇宙線核子と星間媒質の相互作用によるガンマ線の強度分布を他の成分から分離する。さらに、未検出のガンマ線源に関しては、我々の開発した画像処理法により銀河中心周辺のガンマ線源をより詳細に分離することに成功しており、混入を削減する目的は付いている。また、これらのガンマ線源は宇宙線電子の起源でもあるため、宇宙線電子の空間分布をより精密化することにも寄与する。

この解析は計算機パワーが要求されるため、本研究では図 1(a)の白い四角の領域で示される銀河中心 ± 2.5 度の領域を解析する。その結果、図 1(b)に示すような暗黒物質検出感度を実現できる見込みである。

並行して推進する将来の地上チェレンコフ望遠鏡 CTA 用の新型チェレンコフ・カメラ開発では、半導体の光電子増倍素子(SiPM)を採用し光検出効率を 2 倍近く改善する。それにより望遠鏡の面積が削減できることから、その費用削減分を望遠鏡数の増加に充てることで、30% 以上の WIMP 検出感度向上が期待できる。この新型カメラは、 $5.4\times 5.4\text{ cm}^2$ の面積に 64 ピクセルを高密度に配列するカメラモジュール 32 個で構成されるが、その ns オーダーの高速な信号を読み出すには、専用の高速波形記録集積回路が必要となる。研究代表者が開発を進めてきた高速波形記録集積回路は、16 チャンネルの信号処理が可能で、トリガー回路やデジタル化回路も内蔵するため、少数の電子部品だけでカメラを構成でき、費用の削減と信頼性の向上を可能とする。この新型カメラの採用によって CTA で達成できる検出感度を実証するため、32 個のカメラモジュールからなるプロトタイプを 2 台試作し、試作望遠鏡に搭載して試験観測することで性能を検証する。

4. 研究成果

【銀河中心近傍での暗黒物質探査】

銀河中心付近の暗黒物質探査においては、星間媒質と宇宙線の相互作用による拡散ガンマ線が主要なバックグラウンドとなる。これまで、星間媒質の密度分布は、電波観測による原子状水素と一酸化炭素の密度分布から推測していたが、推測に用いる変換係数が環境に依存するため、別の測定による補正が必要となるなど、十分な精度や一様性を確保する上で問題が多かった。

本研究では、マイクロ波観測衛星 Planck の全天サーベイで得られたダストの熱放射、温度、光学的厚みから星間媒質の密度を系統的に導出する方法を検証するため、MBM、ペガサスおよびカメレオンと呼ばれる領域において、Planck の観測結果から推定される星間媒質の密度とフェルミ衛星の観測で得られた拡散ガンマ線の放射強度を比較した。その結果、Planck の観測結果から推定される星間媒質の密度は、拡散ガンマ線の放射強度との比例関係において、従来の方法より良い結果が得られることを確認した。ただし、比例係数がダスト温度に依存する結果も得られており、さらに広範なダスト温度領域における比例関係の検証が必要となっている。

銀河中心近傍の暗黒物質探査においては、背景放射の不定性のもう一つの主要因でなる未検出のガンマ線天体に関する研究を進めた。我々の画像処理ソフトウェアで検出器の分解能の効果を逆積み込みすることで、新しいガンマ線天体を検出した実績があるが、銀河中心近傍では、拡散ガンマ線の強度が高いため、点源の検出が困難となっている。そこで、我々の画像処理ソフ

トウェアに既知の拡散ガンマ線の強度分布を取り込めるようにソフトウェアを改良した。試験解析で数個の新しいガンマ線天体候補を見つけ、この手法の有用性を検証できた。

図 2(a)に銀河中心近傍のガンマ線超過スペクトルを示す。これまでの研究より超過は少なめであるが、ガンマ線超過があることは、ほぼ確実である。未検出のガンマ線天体による寄与の可能性が高い。図 2(b)にこれから得られる対消滅断面積の上限値を示す。モデルの不定性や未検出のガンマ線天体の寄与をさらに低減する必要がある。

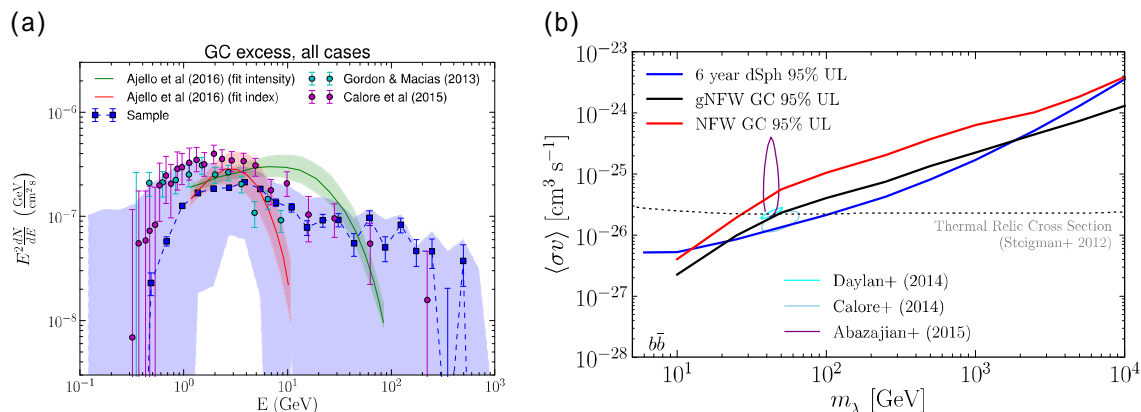


図 2: (a) 銀河中心近傍のガンマ線超過スペクトル。青いデータ点が本研究における解析結果。薄紫のバンドは拡散ガンマ線放射のモデル依存性を示す。(b) 黒線や赤線で本研究における WIMP 対消滅断面積の上限値。

【次世代ガンマ線観測装置の開発】

現在稼働中のガンマ線観測装置であるフェルミ衛星のデータ解析と並行して、次世代のガンマ線観測装置となる Cherenkov Telescope Array (CTA) で使用する半導体光電子増倍素子 (SiPM) の開発を推進した。SiPM では、クロストークとよぶ現象によって入射光子数より大きな光子数を出力してしまう欠点があり、その結果、光子数の少ない夜光などによる背景事象をガンマ線シャワーの現象と間違えてしまうことが問題となる。夜光による背景信号の頻度が高い CTA では、クロストークによる偶発的トリガーが性能低下の原因となるため、光検出効率 (PDE) を維持しながらクロストークを抑制した SiPM の開発が主要な課題となっている。特に、クロストークを極力抑制するため、動作電圧を下げると光検出効率が低下してしまうため、動作電圧の最適化も必要となる。

CTA に使用する SiPM の開発においては、クロストークが保護樹脂を介して発生することに着目し、図 3 に示す通り、保護樹脂の厚さが SiPM の増幅素子の大きさと比較して非常に薄いか、逆に厚いほどクロストークを低減できることを測定によって発見した。非常に薄い場合は、クロストークの元となる光子が増幅セルに反射で戻るために、クロストークが抑制される。保護樹脂が厚い場合は、反射した光子が SiPM の外に出てしまうためにクロストークが抑制される。しかし、その場合は、近接する SiPM にクロストークが発生する可能性がある。実際に、図 4(a) に示す通り、保護樹脂が厚いほど近接ピクセルへのクロストークが増加し、クロストークの合計はほぼ保存されることを、測定によって明らかにした。したがって、クロストークを低減するために保護樹脂をなくす方向 (素子上の非常に薄い保護膜は維持) で開発を進めることにした。さらにクロストークを低減するため、保護樹脂のない SiPM 素子のクロストークの特性を詳細に測定した結果、遅延クロストークの発生率が比較的大きいことが判明した。また、遅延クロストークの保護膜の厚さに対する依存性を測定したところ、図 4(b) に示すように遅延クロストークの確率が保護樹脂の有無に依存しないことを確認した。これは、遅延クロストークが保護膜を介さずに伝播していることを証明している。また、保護樹脂のない SiPM で観測されるクロストークは、遅延が短く元の信号と分離できない遅延クロストーク事象が普通のクロストークとして認識されていることで説明できることをつきとめた。今後は、遅延クロストークの低減によって、SiPM のさらなる性能向上が期待できる。

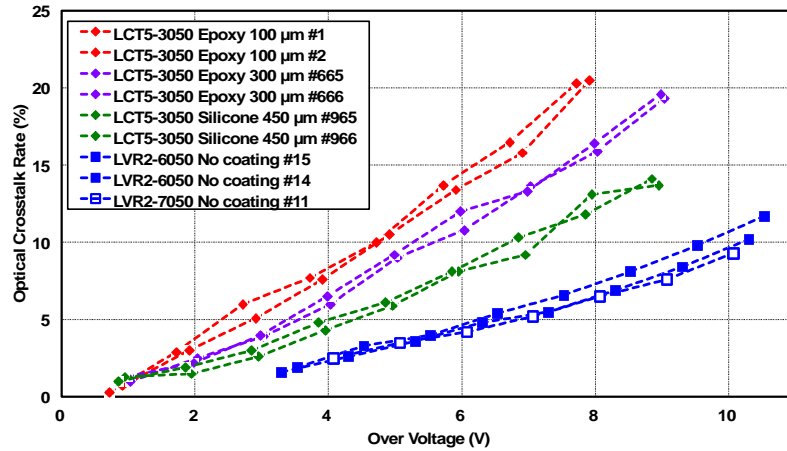


図3: クロストーク確率の印加電圧依存性。保護樹脂がない場合か、厚くなるほどクロストークが抑制される。

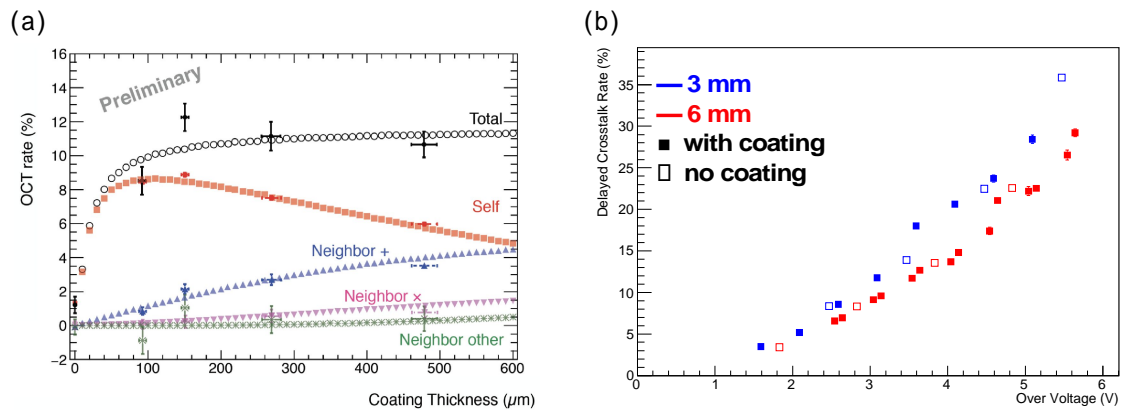


図4: (a) SiPMの近接ピクセルへのクロストークの保護樹脂厚依存性。保護樹脂を厚くすると、素子内のクロストークは減少するが、近接する素子へのクロストークが増大し、合計はほぼ一定となる。保護樹脂が非常に薄い場合は、クロストークが抑制される。(b)遅延クロストーク確率の印加電圧依存性。保護樹脂の有無にほぼ依存しないことがわかる。

SiPMの性能向上と並行して、高密度に配置されるSiPMの信号を処理するための集積回路を開発した。本研究以前の開発で、波形記録回路とデジタル化回路に関しては所定の性能を達成していたが、トリガー回路に関しては波形記録時のコントロール信号の干渉による性能劣化を確認していた。そのため、本研究では、波形記録回路とトリガー回路を独立の集積回路として製造し、十分な性能を確保した。これらの信号処理回路を採用したカメラの試作機を製作し、試験観測を実施した。その結果、図5に示す通り宇宙線による空気シャワーを観測し、SiPMを搭載したカメラが十分な性能を有することを検証した。

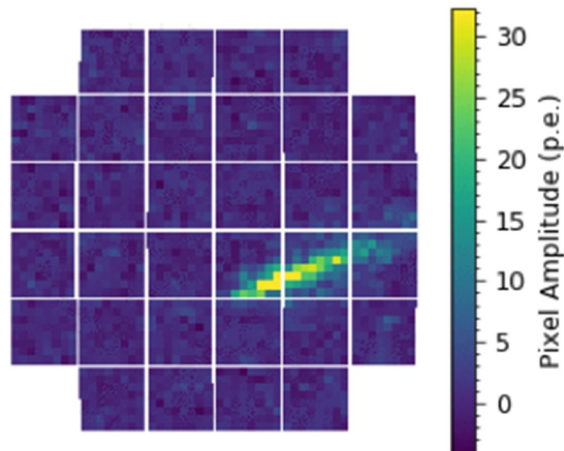


図5: SiPM搭載チェレンコフ望遠鏡試作機によって撮像された空気シャワーの画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hayashi Katsuhiro, Mizuno Tsunefumi, Fukui Yasuo, Okamoto Ryuji, Yamamoto Hiroaki, Hidaka Naoya, Okumura Akira, Tajima Hiroyasu, Sano Hidetoshi	4. 巻 884
2. 論文標題 Fermi-LAT γ -Ray Study of the Interstellar Medium and Cosmic Rays in the Chamaeleon Molecular Cloud Complex: A Look at the Dark Gas as Optically Thick H I	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 130 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4351	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
1. 著者名 Mizuno T., Abdollahi S., Fukui Y., Hayashi K., Koyama T., Okumura A., Tajima H., Yamamoto H.	4. 巻 890
2. 論文標題 Study of the Cosmic Rays and Interstellar Medium in Local H I Clouds Using Fermi-LAT Gamma-Ray Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 120 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6a99	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
1. 著者名 Zorn J., et al.	4. 巻 904
2. 論文標題 Characterisation and testing of CHEC-M?A camera prototype for the small-sized telescopes of the Cherenkov telescope array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 44 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.06.078	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
1. 著者名 Okumura Akira, Asano Akira, Furuta Kazuhiro, Hidaka Naoya, Nakamura Yuki, Tajima Hiroyasu, Zenin Anatolii	4. 巻 PD18
2. 論文標題 Development of a UV-Transparent Lens Array for Enlarging the Effective Area of Multichannel SiPMs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18)	6. 最初と最後の頁 id.011009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.27.011009	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 Nakamura Yuki, Okumura Akira, Tajima Hiroyasu, Yamane Nobuhito, Zenin Anatolii	4. 巻 PD18
2. 論文標題 Characterization of SiPM Optical Crosstalk and Its Dependence on the Protection-Window Thickness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18)	6. 最初と最後の頁 id.011003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSCP.27.011003	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 Asano A., Berge D., Bonanno G., Bryan M., Gebhardt B., Grillo A., Hidaka N., Kachru P., Lapington J., Leach S., Nakamura Y., Okumura A., Romeo G., Ross D., Stephan M., Tajima H., Timpanaro M.C., White R., Yamane N., Zink A.	4. 巻 912
2. 論文標題 Evaluation of silicon photomultipliers for dual-mirror Small-Sized Telescopes of Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 177 ~ 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.017	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 Ackermann M., et al., (The Fermi LAT Collaboration)	4. 巻 840
2. 論文標題 TheFermiGalactic Center GeV Excess and Implications for Dark Matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 43 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa6cab	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

1. 著者名 Albert A., Funk S., Katagiri H., Kawashima T., Murphy M., Okumura A., Quagliani R., Sapozhnikov L., Shigenaka A., Tajima H., Tibaldo L., Vandenbroucke J., Varner G., Wu T.	4. 巻 92
2. 論文標題 TARGET?5: A new multi-channel digitizer with triggering capabilities for gamma-ray atmospheric Cherenkov telescopes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 49 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2017.05.003	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

1. 著者名 Acerro, F. et al.	4. 巻 223
2. 論文標題 Development of the Model of Galactic Interstellar Emission for Standard Point-source Analysis of Fermi Large Area Telescope Data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 article id. 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/833/2/278	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

1. 著者名 Mizuno, T.; Abdollahi, S.; Fukui, Y.; Hayashi, K.; Okumura, A.; Tajima, H.; Yamamoto, H.	4. 巻 833
2. 論文標題 Quantifying the Interstellar Medium and Cosmic Rays in the MBM 53, 54, and 55 Molecular Clouds and the Pegasus Loop Using Fermi-LAT Gamma-ray Observations	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 article id. 278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0067-0049/223/2/26	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

1. 著者名 Ackermann, M. et. al.	4. 巻 115
2. 論文標題 Searching for Dark Matter Annihilation from Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies with Six Years of Fermi Large Area Telescope Data	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 id. 231301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.115.231301	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

1. 著者名 Ackermann, M. et. al.	4. 巻 90
2. 論文標題 Limits on dark matter annihilation signals from the Fermi LAT 4-year measurement of the isotropic gamma-ray background	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 id. 008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2015/09/008	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

1. 著者名 Ackermann, M. et. al.	4. 巻 91
2. 論文標題 Updated search for spectral lines from Galactic dark matter interactions with pass 8 data from the Fermi Large Area Telescope	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id. 122002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.91.122002	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23件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Anatolii Zenin
2. 発表標題 Evaluation of a multi-channel silicon photomultiplier with a light concentrator for Medium-Sized Telescopes of Cherenkov Telescope Array
3. 学会等名 SiPM workshop: from fundamental research to industrial applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nakamura
2. 発表標題 Characterization of SiPM Optical Crosstalk and its Resin Thickness Dependence
3. 学会等名 Photon Detector 18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Okumura
2. 発表標題 Development of a UV-transparent Lens Array Enlarging the Effective Area of Multi-channel SiPMs
3. 学会等名 Photon Detector 18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Suppression of SiPM Optical Crosstalk
3. 学会等名 KEK Photosensor/Scintillator Workshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 次世代ガンマ線望遠鏡CTA用SiPMの低クロストーク化
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Anatolii Zenin
2. 発表標題 Feasibility study on a future CTA upgrade of PMT camera pixels with silicon photomultipliers
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Suppressing Optical Cross Talk in Silicon Photomultipliers
3. 学会等名 ICASiPM (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 次世代ガンマ線望遠鏡CTA用SiPMの最適化
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 CTA報告127：ガンマ線望遠鏡CTAにおけるSiPMの多チャンネル同時較正システムの確立と検証
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥村 暁
2. 発表標題 Schwarzschild-Couder 光学系を用いたCTA 小・中口径望遠鏡の開発
3. 学会等名 日本天文学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々井義矩
2. 発表標題 CTA報告135：CTA 小口径望遠鏡のトリガー性能の最適化
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 CTA報告136：ガンマ線望遠鏡CTAにおけるSiPMの多チャンネル同時較正手法の実機検証
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 CTA報告113：Schwarzschild-Couder光学系を用いた小・中口径望遠鏡の開発
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山根暢仁
2. 発表標題 次世代チェレンコフ望遠鏡CTA計画の小口径望遠鏡カメラに用いる光検出器の選定に向けた半導体光電子増倍素子の特性評価
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 水野恒史
2. 発表標題 フェルミ衛星によるMBM 53-55分子雲・Pegasus Loop領域における星間ガスと宇宙線の研究
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日高直哉
2. 発表標題 Fermi衛星とPlanck衛星によるOrion領域における星間ガスの研究
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山根暢仁
2. 発表標題 次世代ガンマ線望遠鏡CTAのためのSiPMの開発とその性能評価
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 CTA報告121：ガンマ線望遠鏡CTAにおけるSiPMの多チャンネル同時較正
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 朝野彰
2. 発表標題 CTA計画用SiPMの光検出効率向上に向けたレンズアレイの開発
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 重中西
2. 発表標題 次世代ガンマ線望遠鏡CTAにおける波形記録回路TARGETの時間応答較正手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 PPD/SiPMの開発動向と活用例
3. 学会等名 日本物理学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山根暢仁
2. 発表標題 次世代チェレンコフ望遠鏡CTA計画の小口径望遠鏡カメラに向けた半導体光電子増倍素子の特性評価
3. 学会等名 日本物理学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐藤雄太
2. 発表標題 半導体光検出器を用いたCTA小口径望遠鏡焦点面カメラのシミュレーションによる性能評価
3. 学会等名 日本物理学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2016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
研究協力者	奥村 亮 (Okumura Akira) (90645011)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師 (13901)	
研究協力者	水野 恒史 (Mizuno Tsunefumi) (20403579)	広島大学・宇宙科学センター・准教授 (15401)	