

高エネルギー粒子などによる大気発光現象の研究

著者	梶野 文義
雑誌名	甲南大学工学部・知能情報学部 私立大学等経常費補助金特別補助「大学間連携等による共同研究」成果報告集
巻	令和2年度
ページ	28-33
発行年	2022-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1260/00004060/

大学間連携等による共同研究報告書

高エネルギー粒子などによる大気発光現象の研究

1. 報告書作成年月日：2021年8月31日
2. 補助対象年度：2020年度（2020年4月1日～2021年3月31日）
3. 共同研究期間：2019年4月1日～2021年3月31日
4. 研究の目的：

宇宙で最高のエネルギーを持つ宇宙線は10の20乗電子ボルトものエネルギーを持っているが、このような粒子がどこでどのように作られ、どのように加速されているかは未解明の大きな問題である。また、この宇宙を構成しているものについて、我々が発見し理解している通常の物質はわずか5%で、残りは未発見の暗黒物質が27%、暗黒エネルギーが68%から成っていると考えられている。

これらの重要問題を解明するために、我々は、衛星上の望遠鏡により最高エネルギー宇宙線、高エネルギーニュートリノ、暗黒物質候補粒子などが大気中で発光する現象を観測する研究計画、米国ユタ州における地上実験や気球による高エネルギー宇宙線の研究計画であるJEM-EUSOプログラムや、米国ユタ州における暗黒物質候補粒子や太陽系外流星の研究計画であるDIMS実験計画、およびそれらに関連する研究計画を共同で推進する。

5. 研究組織

(1)研究代表者

研究代表者氏名：梶野文義

ローマ字氏名：Fumiyoshi Kajino

所属研究機関名：甲南大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号：50204392

(2)研究分担者

研究分担者氏名：戎崎俊一

ローマ字氏名：Toshikazu Ebisuzaki

所属研究機関名：理化学研究所

部局名：計算宇宙物理研究室

職名：主任研究員

研究者番号：10183021

研究分担者氏名：滝澤慶之

ローマ字氏名：Yoshiyuki Takizawa

所属研究機関名：理化学研究所

部局名：計算宇宙物理研究室

職名：専任研究員

研究者番号：70312246

6. 実施経過：(完了)

本研究では、衛星上の望遠鏡により最高エネルギー宇宙線、高エネルギーニュートリノ、暗黒物質候補粒子などが大気中で発光する現象を観測する研究計画を実現するために、国際宇宙ステーションに観測装置を搭載する Mini-EUSO、気球に観測装置を搭載する EUSO-Balloon、米国ユタ州に地上観測装置を設置する TA-EUSO という一連の JEM-EUSO プログラムを推進するとともに、米国ユタ州におけるマクロサイズ暗黒物質候補粒子や太陽系外流星体の研究計画である DIMS 実験、およびそれらに関連する研究計画を共同で推進してきた。

7. 研究成果：

① Mini-EUSO は国際宇宙ステーションから地球を紫外域で観測する望遠鏡である。この望遠鏡は JEM-EUSO 計画の一部であり、K-EUSO や POEMMA といった、宇宙からの超高エネルギー宇宙線の観測を主目的とした将来の大型宇宙ミッションへの道を開いている。Mini-EUSO は、 10^{21} eV 以上の超高エネルギー宇宙線によって発生した広範囲の大気シャワーや地上からレーザーで発生させた人工的なシャワーを検出することができる。その他の主な科学的目的は、Nuclearite やストレンジクォーク物質の探索、流星、隕石などの大気中の発光現象や海の生物発光の観測、および人工衛星やスペースデブリなどの観測である。

Mini-EUSO は、夜の地球を紫外域 (290~430nm) で、空間分解能約 6.3km、時間分解能約 1.5km で観測する。約 6.3km の空間分解能と 2.5 μ s の時間分解能で、夜間の地球を撮影する。2019 年 8 月 22 日にロシアのバイコヌール宇宙基地から打ち上げられたこの観測装置は、2 つのフレネルを用いた光学系をベースにしている。2 つのフレネルレンズを採用した光学系と、36 個のマルチアノード光電子増倍管で構成された焦点面を持っていて、それぞれ 64 チャンネル、合計 2304 チャンネルの単一光子計数感度を持ち、全体の視野角は 44° である。Mini-EUSO には、近赤外と可視領域の測定を補完する 2 つの補助カメラも搭載されている。運用開始から 5 ヶ月間で、流星や中間圏上部や熱圏下部で水平に広がる発光 Elves 等、様々な種類の大気中の発光現象が高時間分解能で観測された。(発表論文リスト 1, 2)

② 国際宇宙ステーション上の Mini-EUSO は 2019 年 10 月の最初のデータ取得以降、35 回以上のセッションが行われ、合計 52 時間の観測が行われた。検出器が観測しているのは夜間の地球を紫外域で観測し、多種多様なトランジェントソースを検出してきたが、そのすべてが モンテカルロ・シミュレーションによってモデル化されている。Mini-EUSO は、流星やスペースデブリを検出するためのシミュレーションを行い、将来の宇宙ミッションへの影響を推定した。

超高エネルギー宇宙線シャワーに対する Mini-EUSO の予想される応答も研究された。一次エネルギーの関数としての Mini-EUSO の効率曲線が推定され、宇宙線のエネルギー閾値は 10^{21}eV 以上とされた。ミッション中に検出されたいくつかの過渡現象の形態を宇宙線シミュレーションと比較し、宇宙線シャワーによるものである可能性を排除した。

また、検出器のエネルギー閾値を検証するために 検出器のエネルギー閾値を検証するために、地上に設置されたフラッシュャーのシステムがエンド・ツー・エンドの校正目的で使用されている。そこで JEM-EUSO のシミュレーションフレームワークにこのようなフラッシュャーのパラメータ化を実装して、このようなエネルギー源に対する検出器の応答を調べた。(発表論文リスト 3)

③ DIMS (Dark matter and Interstellar Meteoroid Study) は、マクロな暗黒物質や星間流星の探索を目的とした新しい実験である。Nuclearite は、安定した スtrenジクォーク物質の塊で、超重マクロ暗黒物質と考えられている。これは宇宙に存在する暗黒物質の重要な構成要素である可能性があり、銀河系内での典型的な速度は約 250km/s と予想されている。一方、太陽系の脱出速度を超える速度の星間流星が正面衝突した場合には 太陽系の脱出速度を超える速度の星間流星と太陽の周りを回る地球が正面衝突した場合、地心速度で 72km/s 以上になる。このような高速運動する粒子の探索の可能性を、広視野の超高感度 CMOS カメラを用いて検討する。これまでに得られたこのようなステレオカメラシステムを用いた流星イベントの観測データを基にして運動する Nuclearite と星間流星の観測可能な質量範囲と、この質量範囲における観測可能なフラックス限界を推定した。DIMS 実験の第一段階では広視野・高感度 CMOS カメラステーション 4 台を米国ユタ州テレスコープ・アレイ宇宙線実験場に建設する予定である。(発表論文リスト 4)

④ Nuclearite は、巨視的な暗黒物質の候補として考えられている奇妙なクォーク物質の集合体である。地球大気に衝突すると、空気分子との準弾性衝突を起こして黒体放射を放出し、流星のような大気発光現象を起こすと考えられている。しかし、流星との区別は、主にその高度、速度、輝線の進行方向によって行われる。例えば、銀河起源の Nuclearite は 250 km/s の速度を持つと予想されるが、地球大気で観測される流星は 72 km/s が限界である。星間流星の場合には、この値を超える可能性があるが、太陽近傍の恒星の速度分布を考慮すると、毎秒数キロメートル程度の差しかない。DIMS 実験は、広視野の高感度 CMOS カメラを用いて天空を観測することにより、このような高速で動く粒子を探索

することを目的としている。我々は、DIMS センサーのキャリブレーションを、視野内の星を対象としたアストロメトリックおよびフォトメトリック手法によって導き出し、達成された位置精度と感度レベルを評価した。Nuclearite と流星群の観測条件は大きく異なるため、DIMS のセットアップと解析パイプラインを最適化した。また、Nuclearite の質量と速度の異なるスペクトルを考慮する必要がある。そこで、大気中における Nuclearite のダイナミクスの変動を評価した。また、予備的な結果に基づいて、マクロの観測に制限を設ける上での DIMS システムの可能性を評価した。(発表論文リスト 5)

⑤ DIMS 実験システムは、米国ユタ州 Telescope Array 実験施設の CLF、BRM、TARA の各サイトに建設中である。DIMS 実験システムは約 20km 離れた場所に設置された 4 つの高感度カメラモジュールで構成されている。しかし、CLF サイトには電力会社からの電源供給がないため、自給自足の電源システムが必要となる。そこで、新たに太陽光発電システムを開発し、まずは日本で実験を行った。

また、DIMS 実験システムは毎晩長時間安定して稼働させる必要があるため、各サイトのカメラモジュール内の温度や湿度などの環境パラメータを監視・制御する必要がある。そこで我々は、カメラモジュールの環境監視・制御システムを開発した。(発表論文リスト 6)

8. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

[学会発表] (計 4 件)

発表論文リスト(2020 年度)

1. Mini-EUSO Mission to Study Earth UV Emissions on board the ISS

S. Bacholle, P. Barrillon, M. Battisti, A. Belov, M. Bertaina, F. Bisconti, C. Blaksley, S. Blin-Bondil, F. Cafagna, G. Cambiè, F. Capel, M. Casolino, M. Crisconio, I. Churilo, G. Cotto, C. de la Taille, A. Djakonow, T. Ebisuzaki, F. Fenu, A. Franceschi, C. Fuglesang, P. Gorodetzky, A. Haungs, F. Kajino, H. Kasuga, B. Khrenov, P. Klimov, S. Kochevasov, V. Kuznetsov, L. Marcelli, W. Marszał, M. Mignone, G. Mascetti, H. Miyamoto, A. Murashov, T. Napolitano, A. V. Olinto, H. Ohmori, G. Osteria, M. Panasyuk, M. Porfilio, A. Poroshin, E. Parizot, P. Picozza, L. W. Piotrowski, Z. Plebaniak, G. Prévôt, M. Przybylak, E. Reali, M. Ricci, N. Sakaki, K. Shinozaki, J. Szabelski, Y. Takizawa, S. Turriziani, M. Traïche, G. Valentini, S. Wada, L. Wiencke, I. Yashin, and A. Zuccaro-Marchi

The Astrophysical Journal Supplement Series, 253:36 (17pp), 2021. (査読あり)

<https://doi.org/10.3847/1538-4365/abd93d>

2. The Mini-EUSO telescope on board the International Space Station: Launch and first results
M. Casolino, D. Barghini, M. Battisti, A. Belov, M. Bertaina, F. Bisconti, C. Blaksley, K. Bolmgren, F. Cafagna, G. Cambiè, F. Capel, T. Ebisuzaki, F. Fenu, A. Franceschi, C. Fuglesang, A. Golzio, P. Gorodetzki, F. Kajino, H. Kasuga, P. Klimov, V. Kungel, M. Manfrin, L. Marcelli, W. Marszał, H. Miyamoto, M. Mignone, T. Napolitano, G. Osteria, E. Parizot, P. Picozza, L. W. Piotrowski, Z. Plebaniak, G. Prévôt, E. Reali, M. Ricci, N. Sakaki, K. Shinozaki, J. Szabelski, Y. Takizawa, S. Wada and L. Wiencke on behalf of the JEM–EUSO Collaboration
PoS(ICRC2021)354 (査読なし)
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.0354>
3. Simulation studies for the Mini-EUSO detector
H. Miyamoto, F. Fenu, D. Barghini, M. Battisti, A. Belov, M. Bertaina, F. Bisconti, R. Bonino, G. Cambie, F. Capel, M. Casolino, I. Churilo, T. Ebisuzaki, C. Fuglesang, A. Golzio, P. Gorodetzky, F. Kajino, P. Klimov, M. Manfrin, L. Marcelli, W. Marszał, M. Mignone, E. Parizot, P. Picozza, L.W. Piotrowski, Z. Plebaniak, G. Prévôt, E. Reali, M. Ricci, N. Sakaki, K. Shinozaki, G. Suino, J. Szabelski, Y. Takizawa on behalf of the JEM-EUSO Collaboration
PoS(ICRC2021)334 (査読なし)
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.0334>
4. DIMS Experiment for Dark Matter and Interstellar Meteoroid Study
S. Abe, M. Arahori, D. Barghini, M. Bertaina, M. Casolino, A. Cellino, C. Covault, T. Ebisuzaki, M. Endo, M. Fujioka, Y. Fujiwara, D. Gardiol, M. Hajdukova, M. Hasegawa, R. Ide, Y. Iwami, F. Kajino, M. Kasztelan, K. Kikuchi, S.-W. Kim, M. Kojro, J.N. Matthews, K. Nadamoto, I.H. Park, L.W. Piotrowski, H. Sagawa, K. Shinozaki, D. Shinto, J.S. Sidhu, G. Starkman, S. Tada, Y. Takizawa, Y. Tameda, S. Valenti and M. Vrabel
PoS(ICRC2021)554 (査読なし)
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.0554>
5. Characterization of the DIMS system based on astronomical meteor techniques for macroscopic dark matter search
D. Barghini, S. Valenti, S. Abe, M. Arahori, M. Bertaina, M. Casolino, A. Cellino, C. Covault, T. Ebisuzaki, Y. Fujiwara, D. Gardiol, M. Hajdukova, R. Ide, Y. Iwami, F. Kajino, S.-W. Kim, J.N. Matthews, K. Nadamoto, I.H. Park, L.W. Piotrowski, H. Sagawa, K. Shinozaki, D. Shinto, J.S. Sidhu, G. Starkman, S. Tada, Y. Takizawa and Y. Tameda on behalf of the DIMS Collaboration

PoS(ICRC2021)500 (査読なし)

DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.0500>

6. Solar Power Supply and Environmental Control System for DIMS Experiment

D. Shinto, Y. Iwami, M. Fujioka, Y. Tameda, K. Nadamoto, F. Kajino and K. Shinozaki on behalf of the DIMS Collaboration

PoS(ICRC2021)502 (査読なし)

DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.0502>

学会・研究会発表リスト (2020 年度)

1. DIMS 実験(高速飛翔暗黒物質と流星の探索)(2) : 現状と今後の計画

梶野文義, 井手隆心, 荒堀瑞穂, 多田沙知子, 灘本薫, 多米田裕一郎, 岩見祐吾, 神藤大輝, Bertaina Mario, Valenti Simone, Barghini Dario, 篠崎健児, Casolino Marco, 戎崎俊一, Piotrowski Lech, 滝澤慶之, 佐川宏行, Matthews John, Cellino Alberto, 阿部新助, Park Il, 他
日本物理学会, 2020 年 9 月

2. DIMS 実験(高速飛翔暗黒物質と流星の探索)(3) : 現状と今後の計画

梶野文義, 井手隆心, 荒堀瑞穂, 多田沙知子, 灘本薫, 多米田裕一郎, 岩見祐吾, 神藤大輝, Bertaina Mario, Valenti Simone, Barghini Dario, 篠崎健児, Casolino Marco, 戎崎俊一, 滝澤慶之, Piotrowski Lech, 佐川宏行, Matthews John, Cellino Alberto, 阿部新助, Park Il, 藤原康德 他
日本物理学会, 2021 年 3 月

3. DIMS 実験 : 高速飛翔するマクロサイズ暗黒物質と流星の探索

梶野文義

ダークマターの懇談会 2020 online (darKONline2020)

2020 年 9 月 8 日

4. DIMS project

F. Kajino

The 2nd DIMS Workshop, Online, Dec. 5, 2020