

# 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：2020年8月31日
2. 補助対象年度：2019年度（2019年4月1日～2020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)研究分担者

研究分担者氏名：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（8桁）：50204392

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（8桁）：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 (8 桁)：70312246

## 6. 実施経過：(継続中)

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：

①Nuclearite と奇妙なクォーク物質は、仮説的な超重粒子であり、宇宙の暗黒物質の重要な構成要素である可能性がある。その代表的な速度は銀河の自転速度に相当する約 220km/s であるが、恒星間を飛翔する流星体は、太陽系からの脱出速度と太陽の周りを回る地球の速度の和に相当する 72km/s 以上の地心速度を持っている。このような高速飛翔する粒子を、超高感度 CMOS カメラを用いて探索できる可能性を研究した。これまでに、ユタ州のテレスコープアレイ超高エネルギー宇宙線 (UHECR) 実験場などでステレオカメラシステムを用いて多くの流星を観測してきた。これらの観測結果を用いて、星間流星体に関して、観測可能な質量範囲とフラックスの限界を推定した。(発表論文リスト1)

②EUSO-Balloon ミッションは、約 1m<sup>2</sup> の屈折型フレネル光学系とプロトタイプ PDM を用いて設計・製作・飛行した。宇宙ベースの超高エネルギー宇宙線(UHECR)観測に向けて、2014 年 8 月には JEM-EUSO プログラムで初のパスファインダーミッションとして飛行中の計測を行った。8 時間の成層圏飛行の後、装置は安全に回収され、実験室での飛行後の校正が可能となった。

本研究では、GPS データ、飛行後の PDM 校正、レイトレースシミュレーションと合わせて、約 2.5 時間の観測データを解析した。得られた主な結果は、時間の関数としての正規化されたカウント率と、約 780km<sup>2</sup> の領域における地理座標上の分布である。急速な変動を伴う高いカウント率は、このような過剰なカウント率が局所的な人工光源によるものであることが示された。カウント率が最も低い

は、森林地帯の上空を飛行しているときであった。一般的に、紫外域の画像は DMSP 衛星で測定された可視光束の分布とよく一致していた。得られた画像を高解像度で表示することで、十数個のホットスポットが見つかり、空港、工場、鉱山などの地上施設に対応する光源が明確に識別された。また、EUSO-Balloon が晴天下で運用されていた暗所では、300-500nm 帯の約 310 光子  $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{ns}^{-1}$  が、シミュレーションと仮定した拡散光スペクトルにより実測データを説明するために推論された。本研究では、広視野大口径屈折フレネル光学系を用いた EUSO-Balloon 望遠鏡の撮像能力を実証した。これにより、拡散光の絶対強度を求めることを目的とした従来の気球実験と比較して、新たな補完的な情報を得ることができる。拡散光と局所光が UHECR 観測に与える影響についても議論できた。開発された解析手法は、UHECR 観測の背景となる紫外光の研究だけでなく、大気光科学への洞察を与えるために、他のパスマイnderや実宇宙ミッションで得られるデータにも適用することができる。これらのミッションでは、紫外線帯の夜地球のより広い範囲を測定し、撮像することが可能である。(発表論文リスト2)

- ③ 暗黒物質候補と太陽系外起源流星の探索・観測のために非常に高感度な CMOS カメラシステムを複数台用いて 2017 年から 2019 年に流星群や散在流星を兵庫県、石垣島、および米国ユタの 3 カ所で観測した。2019 年の観測データからは最高レベルの流星数が観測できたことを報告した。これらの結果は、これまでの他の観測と矛盾しないことも分かった。さらに、この装置は極地研の大型積分球を使って較正した結果も報告した。(学会・研究会発表リスト1)
- ④ 2017~2018 年に 4 回観測場所を変え、3 種類の高感度 CMOS カメラで多くの流星を 30~60fps の動画で観測した結果、星は 8-9 等まで、流星は 5 等程度まで観測できることが分かった。今後、これらの結果を太陽系外起源流星や Nuclearite および SQM の探索のための DIMS 計画に役立てる。(学会・研究会発表リスト2)
- ⑤ 太陽系外起源流星を探索するために複数の高感度 CMOS カメラをアメリカのユタ州テレスコープアレイサイトに設置し、散在流星を観測した。今回は 2018 年 9 月 7 日~11 日に 3 地点で観測した時の 3 つの観測システムの違いとそれぞれの観測データを示し、得られたデータの一部を解析することにより、各観測システムの等級分布や観測可能な限界質量を求め、太陽系外起源流星のフラックス限界の予想値を求めることができた。(学会・研究会発表リスト3)
- ⑥ 暗黒物質候補の探索実験は数多くなされているが未だ解明されていない。そこで我々は「宇宙は一体何からできているのか？」を明らかにすることを目的に、マクロサイズ暗黒物質候補物質と太陽系外起源の流星体の探索のための研究である DIMS 計画を開始した。本研究の科学目的、原理、観測装置、これまでの成果、今後の予定などを発表した。(学会・研究会発表リスト4)

⑦ The 1<sup>st</sup> DIMS Workshop を理研和光キャンパスで開催し、13名の発表があった。甲南大学からは3名の発表があった。(学会・研究会発表リスト5、6、7)

⑧ これまでに高感度 CMOS カメラで多くの流星を動画で観測できるシステムを試験した結果、流星は4-6等程度まで動画で観測できることが分かった。Macro Dark Matter や太陽系外流星の探索のための DIMS (Dark Matter and Interstellar Meteoroid Study) Project を開始した。2019年12月には、1st DIMS Workshop を理研で開催した。2020年3月には1台目のカメラボックスをユタに輸送して設置する予定であったが、コロナ感染の拡大で出張を直前に中止せざるを得なくなった。国際協力体制(日・米・伊・韓)を整備中である。(学会・研究会発表リスト8)

## 8. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

[学会発表] (計 8 件)

### 発表論文リスト(2019年度)

#### 1. Study for Moving Nuclearites and Interstellar Meteoroids using High Sensitivity CMOS Camera

F. Kajino, I. Ide, R. Ide, Y. Tameda, K. Shinozaki, M.E. Bertaina, A. Cellino, M. Casolino, T. Ebisuzaki, Y. Takizawa, L. Piotrowski, H. Sagawa, J.N. Matthews  
36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) 36, 525.

#### 2. Ultra-violet imaging of the night-time earth by EUSO-Balloon towards space-based ultra-high energy cosmic ray observations

G. Abdellaoui, ---, F. Kajino et al. (329 in all)

Astroparticle Physics

Volume 111, September 2019, Pages 54-71

<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.10.008>

### 学会・研究会発表リスト (2019年度)

#### 1. 高感度 CMOS カメラシステムによる高速飛翔暗黒物質と流星の探索

梶野文義, 井手隆心, 井出郁央, 多米田裕一郎, 篠崎健児, Bertaina Mario, Casolino Marco, 戎崎俊一, Piotrowski Lech, 滝澤慶之, 佐川宏行, Matthews John 他  
物理学会, 2019年9月

#### 2. 高感度 CMOS カメラによる太陽系外起源流星と暗黒物質候補物質の探索計画

梶野文義, 井手隆心, 井出郁央, 荒堀瑞穂, 多田沙知子, 灘本薫, 篠崎健児, M. Bertaina, A. Cellino, 多米田裕一郎, 岩見祐吾, M. Casolino, 戎崎俊一, 滝澤慶之, L. Piotrowski, 佐川宏行, J. Matthews

第 60 回 名古屋流星会議, 2019 年 8 月 24~25 日

<https://www.web-nms.com/ホーム/流星会議/名古屋流星会議-集録/>

3. 高感度 CMOS カメラによる太陽系外起源流星観測のための観測装置と予備観測結果

井手隆心, 井出郁央, 梶野文義, 多米田裕一郎, 篠崎健児, M. Bertaina, A. Cellino, M. Casolino, 戎崎俊一, 滝澤慶之, L. Piotrowski, 佐川宏行, J.N. Matthews

第 60 回 名古屋流星会議, 2019 年 8 月 24~25 日

<https://www.web-nms.com/ホーム/流星会議/名古屋流星会議-集録/>

4. DIMS - Dark Matter and Interstellar Meteoroid Study

F. Kajino

Invited Talk at Japanese and Italian Seminars on Cosmic Radiation and Interdisciplinary Space Science (JISCRISS-2)

RIKEN - 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198, Japan, December 2, 2019.

<http://jiscriiss2.to.infn.it/program.html>

5. DIMS project

F. Kajino

The 1st DIMS Workshop, RIKEN Wako Campus, Dec. 7, 2019

<https://www.dropbox.com/s/9ik1zvfkka8mgny/20191207-DIMS-Workshop-v2.pdf?dl=0>

6. Optical performance

M. Arahori

The 1st DIMS Workshop, RIKEN Wako Campus, Dec. 7, 2019

7. R. Ide

The 1st DIMS Workshop, RIKEN Wako Campus, Dec. 7, 2019

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

井手隆心, 荒堀瑞穂, 多田沙知子, 灘本薫, 梶野文義, 岩見祐吾, 多米田裕一郎, 篠崎健児, Bertaina Mario, Casolino Marco, 戎崎俊一, Piotrowski Lech, 滝澤慶之, 佐川宏行, Matthews John, Cellino Alberto, 阿部新助, Lee Kwangho, Park Il 他

物理学会, 2020 年 3 月