

## 課題名(タイトル):

## 高エネルギー粒子の大気伝搬シミュレーションによる雷や雷雲による粒子加速の研究

## 利用者氏名:

○和田 有希(1)、榎戸 輝揚(1)、玉川 徹(2)

## 理研における所属研究室名:

(1) 開拓研究本部 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム

(2) 開拓研究本部 玉川高エネルギー宇宙物理研究室

## 1. 本課題の研究の背景、目的

近年の観測的研究により、雷雲や雷放電から 10 MeV を超えるガンマ線が放出されていることが明らかとなった。これは雷雲や雷放電で生じる強電場が、濃密な大気中で電子を相対論的な速度まで加速することで生じる制動放射だと考えられている。しかし大気中で大量の電子が加速・増幅されるメカニズムは解明されておらず、またどのような雷雲・雷放電でこういった電子加速が生じるのかも明らかになっていない。また 10 MeV を超える光子は大気中の窒素や酸素の原子核と光核反応を引き起こすことができ、雷放電によって同位体生成が起きていることも明らかとなってきた (Enoto et al., Nature, 2017)。

我々は北陸地方で冬に発生する雷を対象とした、ガンマ線の地上観測 GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds) 実験を行っており、現在では石川県金沢市や新潟県柏崎市を中心に小型なガンマ線検出器を 10 台以上設置している。これらの充実した観測網により、雷雲から数分に渡ってガンマ線が放出される「ロングバースト」や、雷と同期して発生するミリ秒の「地球ガンマ線フラッシュ (TGF)」、さらに TGF による光核反応の副産物として生じる「ショートバースト」など、多様な時間スケールの現象を捉えることに成功している。本課題では、これらの観測データを定量的に評価するため、粒子の大気中における輸送過程を計算するモンテカルロ・シミュレーションを実行し、電子が加速された位置やその数を推定することを目的とする。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

本課題では欧州原子核研究機構の提供する粒子輸送計算フレームワーク GEANT4 を用いて、雷放電で加速された電子、およびその二次粒子や二次反応の課程を計算し、最終的に地上で観測される粒子フラックス・スペクトルの計算を行った。ジオメトリとして地上から高度 5 km までの大気

を模擬し、下向きに加速電子を発生させた。二次粒子の伝搬も計算し、最終的に地上に到達した粒子の種別、エネルギー、運動量ベクトル、一などを記録、さらに検出器応答を加味して実際の検出器で観測されたデータとの比較を行った。モンテカルロ・シミュレーションは Hokusai BigWaterfall の超並列演算システムにて実行した。

## 3. 結果

2017 年 2 月 6 日に新潟県柏崎市の柏崎刈羽原子力発電所で観測された地球ガンマ線フラッシュおよび光核反応によるショートバーストのデータを、本課題の計算で得られたモデルと比較を行った。観測データは光核反応で生成された中性子が大気中で熱化し、窒素原子核に捕獲された際の即発ガンマ線の成分と、光核反応で生成された陽子過剰核のベータプラス崩壊による陽電子の成分とに分かれる。それぞれの成分について独立のシミュレーションモデルを適用したところ、雷放電で発生した電子数はコンシステントな値となった。さらに地球ガンマ線フラッシュそのものの地上における吸収線量とシミュレーションモデルを比較した結果を加味することで、地球ガンマ線フラッシュは高度 1.4–2.7 km で、 $(0.5\text{--}2.5) \times 10^{19}$  個の電子を生成したことが明らかとなった。宇宙で観測される地球ガンマ線フラッシュは高度が 10 km から 15 km で生成されると推定されており、今回の地上観測による推定は有意に低高度である。これは北陸地方の冬季雷雲が夏季の雷雲に比べて低高度で発達することに起因すると考えられる。一方でその高度の違いにも関わらず、発生する電子数は宇宙で観測される地球ガンマ線フラッシュと同等かそれ以上であることが示唆された。一般に大気の密度が高いほうが電子の加速・増幅が困難であると考えられていることから、より密度の高い大気においても効率的に電子を加速するメカニズムが存在することが示唆される。

4. 今後の計画・展望

北陸地方の冬季雷は、大気中における高エネルギー現象を至近距離で観測することができる絶好のターゲットであり、1点のみでしか観測できない衛星観測と対比的に、地上に検出器を並べ、多地点観測を行うことができるのも大きな利点である。今後さらに増えていく観測データに対し、その定量評価や、現在提唱されている電子加速モデルを検証すべく、モンテカルロ・シミュレーションによるモデルとの比較を推進し、雷雲・雷放電における電子加速現象の全容を解明していく予定である。

2020年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, T. Yuasa, Y. Furuta, H. Odaka, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Photonuclear Reactions in Lightning: 2. Comparison Between Observation and Simulation Model”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD033194 (2020)

Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, H. Odaka, Y. Furuta, H. Tsuchiya, “Photonuclear Reactions in Lightning: 1. Verification and Modeling of Reaction and Propagation Processes”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD033193 (2020)

Y. Wada, K. Nakazawa, T. Enoto, Y. Furuta, T. Yuasa, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Photoneutron Detection in Lightning by Gadolinium Orthosilicate Scintillators”, *Physical Review D*, 101, 102007 (2020)