

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 (2)、玉川 徹 (1)

理研における所属研究室名:

(1) 仁科加速器科学研究センター 高エネルギー宇宙物理研究室

(2) 開拓研究本部 榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム

## 1. 本課題の研究の背景、目的

近年の研究により、雷や雷雲の強電場領域において、電子が数十 MeV という相対論的なエネルギーまで加速され、その制動放射が宇宙軌道上の人工衛星や航空機、気球、そして地上のガンマ線検出器などで観測されている。濃密な大気中においては、荷電粒子は電離損失などですぐに減速し、高いエネルギーを獲得することは一般に難しい。雷や雷雲はまさに天然の加速器として振る舞っていることが観測的に明らかになりつつあるが、一方でその加速メカニズムには未解明な点が多い。

我々は冬に北陸地方の日本海沿岸で発生する雷を対象に、地上でのガンマ線観測 Gamma-ray Observation of Winter Thunderclouds 実験を 2006 年より行っている。2015 年には複数台の可搬型ガンマ線検出器で雷を観測するマッピング観測を開始し、これまで石川県金沢市、新潟県柏崎市を中心に 20 台以上の検出器を設置し、観測ネットワークを構築している。

マッピング観測によって、雷雲内部の強電場領域で電子が加速され、その制動放射が数十秒から数分に渡って観測されるロングバーストや、雷放電によって加速された電子の制動放射が大気中で光核反応を起こすことによって発生するショートバーストなどを捉えてきた。これら地上における高エネルギー現象の観測例は段々と積み重なりつつあるが、一方で電子加速そのものの性質を調べるには、大気中での減衰を解く必要がある。本課題は、雷放電や雷雲が生み出した相対論的電子やその二次粒子の大気中における振る舞いをモンテカルロ・シミュレーションで計算し、実際の観測結果と比較することで、電子加速メカニズムを探ることが目的である。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究では、欧州原子核研究機構の開発する粒子輸送シミュレーションフレームワーク GEANT4 を用いて、電子および光子の飛跡を計算した。シミュレーション内で 5 km 立方の空間を準備し、その中に地球大気の実装した。初期粒子として、雷雲で加速された電子のスペクトルを仮定し、任意の高度から下向きに発生させた。電子およびそ

の二次粒子（主に制動放射の光子）を追跡し、地上に到達した際の粒子の種別、エネルギー、運動量ベクトル、到達位置などを記録した。これらの情報から、地上で観測されるガンマ線のエネルギースペクトルや地上での空間分布のモデルを作成し、実際の観測結果と比較した。計算は HOKUSAI GreatWave および BigWaterfall の超並列演算システム (GWMP/C/BWMP/C) で行った。

## 3. 結果

2018 年 1 月 10 日午前 3 時ごろ、石川県金沢市内に設置していた 2 台の検出器がほぼ同時に、1 分間ほど継続するロングバーストを検出した。ロングバーストは上空を吹く風によって雷雲とともに移動し、2 台の検出器の上空を通過していったと考えられる。風下に設置していた検出器が検出している最中に、ロングバーストは雷放電によって途絶した。さらに同時に、2 台の検出器でショートバーストを観測した。ロングバーストの雷放電による途絶とショートバーストの発生を同時に捉えたのは初めてである。

このときのガンマ線のカウントレートの時間変動を図 1 に示す。またエネルギースペクトルを図 2 に示す。これらのカウントレートの時間変動とエネルギースペクトルは、GEANT4 によって計算した地上でのガンマ線のフラックス・スペクトルのモデルと比較した。その結果、電子は高度 400 m よりも上空で加速され、また電子の加速領域は半径 150 m の柱上で説明できた。このとき、毎秒  $3.7 \times 10^{12}$  個の電子 (1 MeV 以上) が生成されていた。

ロングバーストにおいて提唱されている電場加速メカニズム (相対論的電子なだれ増幅モデル) では、その種電子として宇宙線に由来する電子成分が寄与するのではと考えられている。一方で推定された電子の発生レートでは、宇宙線の電子成分を種として生成できると考えられる量を上回っており、単純な加速モデルでは説明できない。したがって、陽電子や光子といった 2 次粒子が電場を逆流し、加速の上流に種電子を供給し、自立的に電場加速を継続させる相対論的フィードバックモデルなどが働いている可能性が指摘できる。

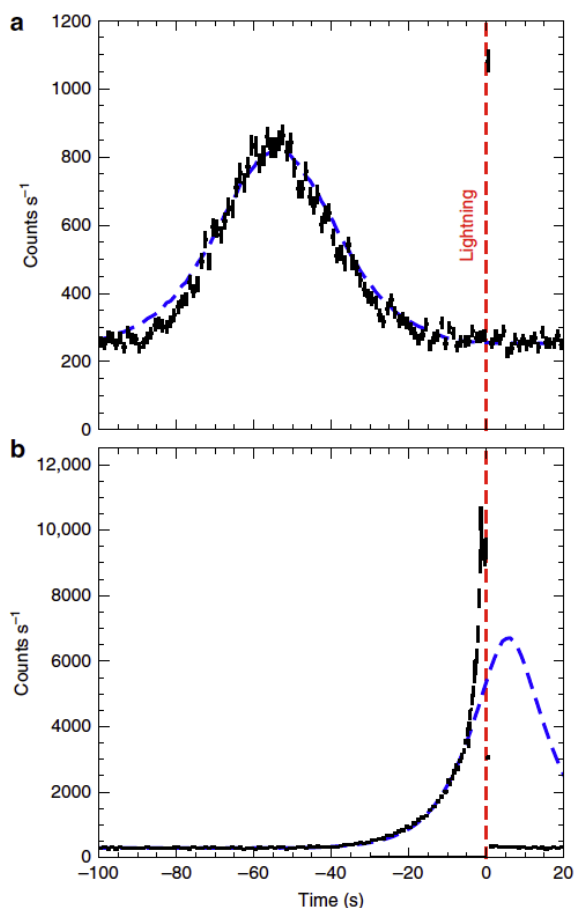


図1: 金沢市内の2台の検出器で得られたガンマ線カウントの時間変動。時刻の原点はロングバーストの途絶およびショートバーストを引き起こした雷放電の発生時刻。上のパネルが風上の検出器に対応する。シミュレーションによって得られたモデルは青の点線で示している。

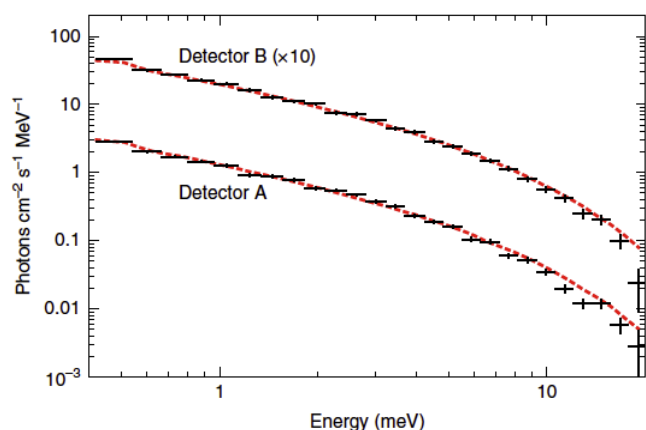


図2: ロングバーストのエネルギースペクトル。検出器Aが風上に位置する検出器。検出器Bのデータはみやすさのため10倍してある。シミュレーションによって得られたモデルは赤の点線で示している。

#### 4. まとめ

金沢市に設置した2台の検出器によって観測したロングバ

ーストを、HOKUSAIの超並列演算システムを用いたモンテカルロ・シミュレーションで作成したモデルと比較し、加速領域の高度や発生した電子数の推定などを行った。この結果はロングバーストを複数台の検出器で有意に検出したことと、大気中における電子や光子の伝搬過程を計算してモデルを作成することのできる高速なコンピューティング環境によって、初めて実現できた。

#### 5. 今後の計画・展望

今後もさらに地上のガンマ線検出器の台数を増やす予定であり、このような複数台でのロングバーストの同時観測の事例が増えると考えられる。個々の事例についてモンテカルロ・シミュレーションを援用した解析により、大気中での電子の加速メカニズムの解明につながる結果が得られると考えている。今回の結果では電場加速による電子のスペクトルを仮定し、シミュレーションの初期粒子とした。将来的には電場そのものを大気ジオメトリに実装して電場加速そのものもシミュレーションし、その結果を観測データと比較したり、さらには気象の観測データとシミュレーションとのデータ同化により得られる雷雲内の電場モデルを粒子輸送シミュレーションに実装する、といった発展が期待できる。

## 2019年度 利用研究成果リスト

### 【雑誌に受理された論文】

1. Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm”, *Physical Review Letters*, 123, 061103 (2019)
2. Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, Y. Furuta, T. Yuasa, K. Nakazawa, T. Morimoto, M. Sato, T. Matsumoto, D. Yonetoku, T. Sawano, H. Sakai, M. Kamogawa, T. Ushio, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash”, *Communications Physics*, 2, 67 (2019)

### 【口頭発表】

3. Y. Wada, T. Enoto, Y. Nakamura, Y. Furuta, T. Yuasa, K. Nakazawa, T. Morimoto, M. Sato, T. Matsumoto, D. Yonetoku, T. Sawano, H. Sakai, M. Kamogawa, T. Ushio, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Simultaneous detection of gamma-ray glow and downward terrestrial gamma-ray flash”, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2019
4. 和田有希, 「高エネルギー大気物理学における Geant4 -検出器応答から大気中における粒子輸送と光核反応まで-」, Geant4 初心者講習会・研究会, 京都大学, 2019年11月
5. 和田有希, 榎戸輝揚, 松元崇弘, 中澤知洋, 古田禄大, 湯浅孝行, 土屋晴文, 米徳大輔, 澤野達哉, 牧島一夫, 鴨川仁, 中村佳敬, 森本健志, 佐藤光輝, 酒井英男, 南戸秀仁, 牛尾知雄, 「冬季雷における高エネルギー現象の観測プロジェクトの進展」, 日本地球惑星科学連合 2019年大会, 幕張メッセ, 2019年5月

### 【ポスター発表】

6. Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Downward Terrestrial Gamma-ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm”, *The Cosmos at High Energies: Exploring Extreme Physics Through Novel Instrumentation*, Kavli IPMU, Japan, October 2019 (Poster)
7. Y. Wada, T. Enoto, K. Nakazawa, Y. Furuta, T. Yuasa, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Matsumoto, K. Makishima, H. Tsuchiya, “Estimated Number of Avalanche Electrons in a Downward TGF during Winter Thunderstorms”, EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 2019 (Poster)

### 【その他(著書、プレスリリースなど)】

8. プレスリリース:「金沢市の高校で捉えた放射線バーストで雷発生の瞬間に迫る」(2019年6月)