

課題名 (タイトル) : 大気中における陽電子の散乱シミュレーションによる対消滅ガンマ線の検証

利用者氏名 :

○和田 有希
榎戸 輝揚
玉川 徹

理研での所属研究室名 :

仁科加速器研究センター
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

近年の地上観測、あるいは軌道上のガンマ線衛星による観測から、雷雲や雷放電の強電場領域で電子が数十 MeV まで加速され、制動放射ガンマ線を放出していることが明らかになっている (e.g. Fishman et al. 1994, Torii et al. 2002, Tsuchiya et al. 2007)。我々は京都大学、東京大学、日本原子力研究開発機構ほかと協力し、冬季雷からのガンマ線放射の観測から電場加速メカニズムの解明を目的とした GROWTH (Gamma Ray Observation of Winter Thundercloud) 実験を 2006 年より継続している。

本課題では GROWTH 実験の一環として放射線の大气伝搬シミュレーションを実行し、取得された放射線の観測データとの比較を行うことで雷活動に伴う放射線の大气中での反応を理解し、その反応量を定量的に評価することが目的である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

2017 年 2 月 6 日に新潟県の東京電力柏崎刈羽原子力発電所構内に設置した 4 台の放射線検出器が、発電所付近で落雷に同期して放射線量の増大を観測した。この観測では落雷から 50 ms の間、大気中における中性子捕獲による脱励起ガンマ線の兆候が検出され、さらに落雷から 1 分間にわたって陽電子の対消滅輝線が検出された。これは雷放電で加速された電子からの制動放射ガンマ線が、大気中で光核反応 $^{14}\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}\text{N} + n$ を起こした証拠と考えられる。そこでこの仮説を検証するため、次のシミュレーションを実行した。

- ・ 窒素 14 による中性子捕獲反応の脱励起ガンマ線を大気中で発生させ、検出器に到達するまでの大气伝搬をシミュレーションし、観測

で得られたエネルギースペクトルと比較することで、中性子捕獲反応の仮説が正しいかを検証する。

- ・ 大気中で陽電子を発生させて検出器に到達するまでの大气伝搬シミュレーションを行い、観測された対消滅線のフラックスと比較することで陽電子の総発生量を推定し、光核反応の反応量を評価する。

実際の計算はモンテカルロ・シミュレーション・フレームワーク Geant4 を用いて行い、GreatWave MPC および BigWaterfall MPC 上で実行した。

3. 結果

(1) 中性子捕獲反応のシミュレーション

実際の観測データとシミュレーションとの比較を図 1 に示す。大気中の窒素 14 による中性子捕獲反応に加え、検出器周辺に存在するアルミニウム 27 とケイ素 28 による捕獲反応、ガンマ線検出器に用いた BGO シンチレータに含まれる Ge の捕獲反応による脱励起ガンマ線をシミュレーションで発生させた。その結果、観測されたスペクトルに見られる 7-10 MeV での急峻なカットオフや 6 MeV までの連続成分を再現できた。このことから、最初の 50 ms 間に観測されたガンマ線は、大気中や検出器周辺、シンチレータそのものによる中性子捕獲反応の脱励起ガンマ線と結論付けられ、落雷によって中性子が発生したことが示された。更に陽電子の対消滅輝線を観測していることから、雷によって光核反応 $^{14}\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}\text{N} + n$ が生じていることを示した。

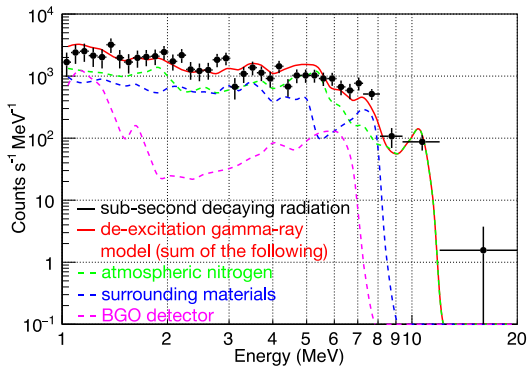


図 1：放射線検出器で得られたガンマ線スペクトルと中性子捕獲反応からの脱励起ガンマ線のシミュレーションとの比較。

(2) 対消滅ガンマ線のシミュレーション

ジオメトリとして、放電路の典型的な広がり・長さをもつ直径 200 m、高さ 1 km の円筒形を仮定し、そのジオメトリ内で窒素 13 がベータプラス崩壊した際の陽電子の大気伝搬をシミュレーションした。実際の観測されたスペクトルと、円筒形のジオメトリの底面と地面との距離を変化させながらシミュレーションしたスペクトルを図 2 に示す。ジオメトリの底面が地面から 80 m 浮いている場合、0.511 MeV の対消滅輝線およびその大気中でのコンプトン散乱による連続成分をシミュレーションで再現することができた。この時の陽電子の総発生量を参照し、光核反応によって 4×10^{12} 個の中性子および陽電子が生成されたと結論づけた。

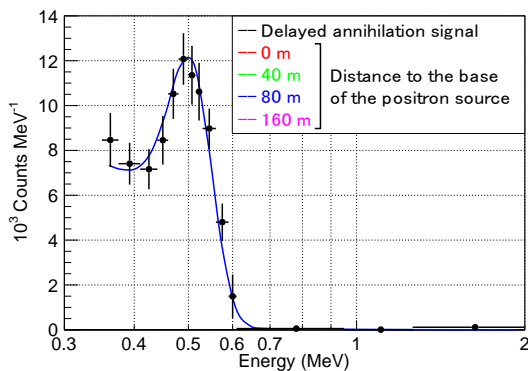


図 2：対消滅ガンマ線スペクトルの観測とシミュレーションの比較。

4. まとめ

- Geant4 モンテカルロ・シミュレーション・フレームワークを用いて陽電子・ガンマ線の大気電場シミュレーションを行った。

- 雷に同期して 50 ms の間に観測されたガンマ線のスペクトルは大気中の窒素や検出器周辺、検出器そのものに含まれる物質による中性子捕獲反応の脱励起ガンマ線で再現できた。このことから雷が光核反応 $^{14}\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}\text{N} + \text{n}$ を誘発していることが示された。
- 雷から 1 分間にわたり観測された陽電子の対消滅ガンマ線のスペクトルをシミュレーションで再現することで、光核反応によって 4×10^{12} 個の中性子および陽電子が生成されたことを示した。

5. 今後の計画・展望

今回のシミュレーションでは中性子捕獲反応による脱励起ガンマ線を発生させたが、最終的には光核反応によって生成された高速中性子の大気伝搬、あるいは光核反応そのものをシミュレーションで発生させることを検討している。来年度は中性子の大気中での反応がシミュレーション・コードで正しく実装されているかを検証し、複数箇所で同時検出された中性子の観測データとシミュレーションを比較することで、光核反応が雷のどこで発生していたかを明らかにする予定である。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto and H. Tsuchiya, “Photonuclear reactions triggered by lightning discharge”, Nature, 551, 481–484 (2017)

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Y. Wada, T. Enoto, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, “Initial results from a multi-point mapping observation of thundercloud high-energy radiation in coastal area of Japan sea”, AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017 年 12 月

和田有希, 可搬型検出器による雷雲由来の電子加速と高エネルギー現象の多地点観測, 東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会, 東京大学宇宙線研究所, 2017 年 12 月

榎戸輝揚, 和田有希, 古田禄大, 中澤知洋, 湯浅孝行, 奥田和史, 牧島一夫, 佐藤光輝, 佐藤陽祐, 中野俊男, 榎本大悟, 土屋晴文, 「雷雲ガンマ線の観測プロジェクトと雷での光核反応の検出」, 日本物理学会 年次大会 2018, 東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月

和田有希, 古田禄大, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 湯浅孝行, 奥田和史, 牧島一夫, 佐藤光輝, 佐藤陽祐, 中野俊男, 榎本大悟, 土屋晴文, 「落雷による光核反応の発見: 地上観測による中性子と陽電子の検出」, 日本物理学会 年次大会 2018, 東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月

古田禄大, 和田有希, 榎戸輝揚, 中澤知洋, 湯浅孝行, 奥田和史, 牧島一夫, 佐藤光輝, 佐藤陽祐, 中野俊男, 榎本大悟, 土屋晴文, 「落雷による光核反応の発見: シミュレーションによるデータ解釈」, 日本物理学会 年次大会 2018, 東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月

中澤知洋, 古田禄大, 和田有希, 榎戸輝揚, 湯浅孝行, 奥田和史, 牧島一夫, 佐藤光輝, 佐藤陽祐, 中野俊男, 榎本大悟, 土屋晴文, 「地上と宇宙から探る雷放電に同期する突発ガンマ線観測への取り組み」, 日本天文学会 2018 春季年会, 千葉大学西千葉キャンパス, 2018 年 3 月

【その他 (プレスリリース、学術会議以外の一般向けの講演など)】

(プレスリリース) 「雷が反物質の雲をつくる - 雷の原子核反応を陽電子と中性子で説明 -」, 京都大学, 東京大学, 理化学研究所, 日本原子力研究開発機構, 北海道大学, 名古屋大学, 2017 年 11 月 23 日

(講演) 榎戸輝揚, 「カミナリが反物質の雲をつくる?! ~大発見! 雷の意外な能力~」, 雷サミット 17, 山形県鶴岡市, 2018 年 1 月