

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05115

研究課題名(和文) 雷や雷雲での電子加速に由来する陽電子および中性子生成の検証

研究課題名(英文) Study of production mechanism of positron and neutrons in lightning and thunderclouds

研究代表者

土屋 晴文 (Tsuchiya, Harufumi)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員

研究者番号：70415230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、雷の発生や雷雲が上空を通過する時に、ガンマ線のみならず中性子や電子の反物質である陽電子がどのようにして生成されるのかを明かすことを目的としていた。そのため、冬に雷が頻発する日本海沿岸の柏崎刈羽原子力発電所構内において、雷や雷雲からの放射線の観測を実施してきた。2017年2月に発生した雷に伴い、発電所の構内に備えたわれわれの検出器が雷の発生から100 msほど続く強烈なガンマ線と陽電子の兆候を示す信号を捉えた。詳細な解析により、雷の中でガンマ線と大気中の窒素との間で光核反応と呼ばれる核反応が発生し、中性子や陽電子の起源となることを世界で初めて実証した。

研究成果の概要(英文)：How neutrons and positrons are produced in lightning and thunderclouds remains less understood. In order to investigate the production mechanism of neutrons and positrons, we have made radiation observations at the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant facing the coastal area of the Japan sea upto date. In association with lightning on 2017 February, our detectors installed at the power plant caught intense gamma-ray signals lasting for 100 ms. In addition, signals derived from neutrons and positrons were also detected. For the first time, this works revealed that neutrons and positrons both originate from photonuclear reactions occurring in lightning.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：粒子加速 放射線計測 雷 雷雲 ガンマ線 中性子 陽電子 光核反応

### 1. 研究開始当初の背景

雷の発生や雷雲の通過に伴って、日本海沿岸や高山などに設置された観測装置により、高エネルギーガンマ線が観測されていた(文献①、②)。これは、雷や雷雲がもつ強力な電場(およそ数百 kV/m ほど)により電子が加速され、制動放射によって放射されたものと理解されていた。つまり、雷や雷雲が天然の粒子加速器であることが明らかになっていた。

こうした中、研究代表者らが立ち上げた Gamma Ray Observation of Winter Thundercloud (GROWTH) は 2012 年 1 月、ガンマ線に加えて、電子の反物質である陽電子が雷雲に付随して発生している可能性を示す観測結果を得た。具体的には、雷の発生後に数十秒ほど続く 511 keV の対消滅線を捉えており、このように長く続く対消滅線の発生メカニズムは、国際会議などで議論されたがなぞのままであった。また、高山の宇宙線観測装置によって、中性子が雷や雷雲に付随して生成されているという報告もなされていた。(文献③、④)。この中性子の生成に関して、理論的には 2 つのメカニズムが考えられていた。一つは、大気中の重陽子が加速され、DD 核融合反応を引き起こし、中性子を生み出すというものである ( $D+D \rightarrow n+{}^3\text{He}$ )。もう一つは、光核反応と呼ばれるもので、大気中の窒素と高エネルギーガンマ線との反応である  $[\gamma (>10.6 \text{ MeV}) + {}^{14}\text{N} \rightarrow n + {}^{13}\text{N}]$ 。しかしながら、いずれの中性子生成モデルが正しいのか観測的には不明のままであった。

### 2. 研究の目的

天然の加速器である雷や雷雲がどのようにして、ガンマ線の他に陽電子や中性子を生み出しているのかという近年、浮かび上がってきたなぞを解明することが目的である。具体的には、どのような仕組みで 511 keV 対消滅ラインが一分ほどと長く続くのかを検証する。また、近年の観測から 10 MeV を超えるガンマ線の存在は明らかであり、中性子の生成メカニズムとして光核反応が有力な候補であった。本研究においては、雷や雷雲中の中性子は光核反応で生成されるということを確認なものとするのも大きな目的の一つであった。

### 3. 研究の方法

2006 年より、雷や雷雲から放射される X 線やガンマ線を観測するため、日本海沿岸に位置する柏崎刈羽原子力発電所にて観測を行っている。実験開始当初より、光子の観測には、NaI や BGO シンチレーション検出器を用いてきた。本研究でも、発電所に設置した上記の検出器を備えたシステムを利用した。それに加えて近年、榎戸や湯浅が中心となって開発をしている小型観測システムを構内の 3 地点に導入した。また、柏崎刈羽原子力発電所のみならず、石川県の金沢大学や珠洲市などの日本海沿岸地域にも装置を設置し、観測を実施した。

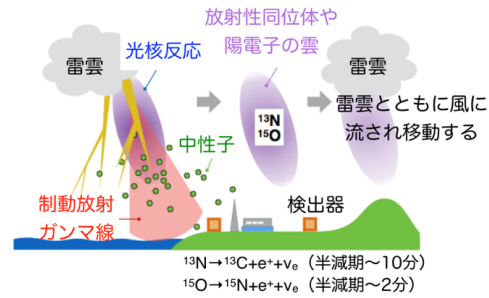


図 1: 光核反応に付随する放射性同位体や陽電の移動の様子

### 4. 研究成果

<雷発生時における中性子及び陽電子の生成メカニズムの解明>

2017 年 2 月、柏崎刈羽原子力発電所の沖合およそ 1 km で発生した雷に伴い、発電所に設置した 4 台の装置が数百 ms ほど続く強烈なガンマ線を観測した。加えて、雷の発生からおおよそ数十秒ほど遅れて 511 keV の対消滅線も観測した。得られた事象を統一的に理解するため、4 台の装置のデータを詳細に解析し、ガンマ線や中性子、陽電子の大気伝播や検出器応答を含むモンテカルロシミュレーションとの比較を行った。その結果、雷が光核反応を引き起こし、中性子や陽電子、放射性同位体を生成するという図 1 のような描像を得た。

上記の描像を具体的に説明すると、まず雷により発生した強烈な制動放射ガンマ線が大気中の窒素と光核反応を起こし、高速中性子を生成する。高速中性子は大気中で弾性散乱を繰り返すことで低エネルギーにまで減速される。その結果、大気中の窒素原子核に捕獲され、即発ガンマ線(最大 10.8 MeV)をはなつ。この即発ガンマ線が検出器で 100 ms ほどにわたり観測された。また、窒素との光核反応では窒素の不安定同位体である  ${}^{13}\text{N}$  も生成される(酸素では、 ${}^{15}\text{O}$  が生成される)。こうして生成された  ${}^{13}\text{N}$  を含む雲が風に流されて、検出器上空へとやって来る。 ${}^{13}\text{N}$  は約 10 分の半減期を持ち、ベータプラス崩壊して陽電子を放出する。この陽電子に由来する 511 keV が雷の後、雲の通過に相当する数十秒間にわたり我々の装置で観測された。以上により、中性子や陽電子の発生は雷が引き起こす光核反応に由来することを世界で初めて明かした。

<引用文献>

- ① T. Torii, M. Takeishi, T. Hosono, "Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity", J. Geophys. Res. 107, D17, 4324, 2002
- ② H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada et al., "Detection of high-energy gamma rays from winter thunderclouds", Phys. Rev. Lett. 99, 165002, 2007

③A. Chilingarian, A. Daryan, K. Arakelyan, A. Hovhannisyan, B. Mailyan et al., “Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays and neutrons”, Phys. Rev. D 82, 043009, 2010

④H. Tsuchiya, K. Hibino, K. Kawaet et al., “Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet”, Phys. Rev. D 85 092006 (2012)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, “Photonuclear reactions triggered by lightning discharge”, Nature 551, 481-484 (2017) 査読あり
2. D. Umemoto, H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, K. Nakazawa, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, T. Tamagawa, K. Makishima, “On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds”, Phys. Rev. E 93, 021201(R) (2016) 査読あり

[学会発表] (計 11 件)

1. 土屋 晴文, 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, 中野 俊男, 榎本 大悟, “日本海沿岸における冬の雷や雷雲に伴う放射線観測”, 原子力学会 (大阪大学吹田キャンパス) (2018)
2. 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”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) (2018)
3. 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”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) (2018)
4. 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”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学野田キャンパス) (2018)
5. Y. Wada, T. Enoto, Y. Furuta, K.

Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya and the GRTOWTH Collaboration, “Initial results from a multi-point mapping observation of thundercloud high-energy radiation in coastal area of Japan sea”, American Geophysical Union 2017 Fall meeting (Sanfrancisco, USA) (2017)

6. 榎本大悟, 土屋 晴文, 中澤知洋, 湯浅 孝行, 榎戸 輝揚, 牧島一夫, 古田禄大, 玉川徹, 伊藤伸泰, “GROWTH 実験 2014 年度データを用いた雷雲ガンマ線のイベント探索法の改善”, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学) (2017)
7. 榎本大悟, 土屋 晴文, 榎戸 輝揚, 湯浅 孝行, 古田禄大, 奥田和史, 和田有希, 玉川徹, 岡野真治, 川原田円, 北口貴雄, 岩田憲一, 加藤博, 国分紀秀, 牧島一夫, 中澤知洋, “GROWTH 実験: 10 年間の継続観測に基づく冬季雷雲由来ガンマ線の研究”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) (2017)
8. 古田禄大, 榎本大悟, 中澤知洋, 奥田和史, 和田有希, 榎戸 輝揚, 湯浅 孝行, 土屋 晴文, 牧島一夫, and the GROWTH collaboration, “GROWTH 実験: モンテカルロシミュレーションを用いた, 雷雲ガンマ線放射の広がり解釈”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) (2017)
9. 奥田和史, 中澤知洋, 古田禄大, 和田有希, 湯浅 孝行, 榎戸 輝揚, 鈴木寛大, 榎本大悟, 土屋 晴文, 牧島一夫, and the GROWTH collaboration, “GROWTH 実験: コリメーターを用いた, 雷雲由来ガンマ線の角度分布の測定”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) (2017)
10. 榎戸 輝揚, 和田有希, 湯浅 孝行, 中澤知洋, 土屋 晴文, 中野俊男, 奥田和史, 古田禄大, 榎本大悟, 牧島一夫, 鴨川仁, 瀧田正人, 米徳大輔, 澤野達哉, 渡會兼也, 米口一彦, 木村光一郎, 北野皓嗣, and the GROWTH collaboration, “雷雲電場による電子加速のガンマ線観測プロジェクト: 多地点体制への新展開”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) (2017)
11. 和田有希, 榎戸 輝揚, 湯浅 孝行, 中澤知洋, 土屋 晴文, 中野俊男, 奥田和史, 古田禄大, 榎本大悟, 牧島一夫, 鴨川仁, 瀧田正人, 米徳大輔, 澤野達哉, 渡會兼也, 米口一彦, 木村光一郎, 北野皓嗣, and the GROWTH collaboration, “雷雲電場による電子加速のガンマ線観測プロジェクト: 小型読み出し系の開発と北陸地方における多地点運用”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) (2017)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 晴文 (TSUCHIYA HARUFUMI)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器

研究センター・客員研究員

研究者番号：70415230

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

榎戸 輝陽 (ENOTO TERUAKI)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器  
研究センター・客員研究員

研究者番号：20748123

湯浅 考行 (YUASA TAKAYUKI)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器  
研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：10609176

(4) 研究協力者

( )