

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740183

研究課題名(和文)ステレオ観測による雷雲からのガンマ線発生モデルの検証

研究課題名(英文)Study of a thundercloud gamma-ray production model via multiple detectors

研究代表者

土屋 晴文(Tsuchiya, Harufumi)

独立行政法人理化学研究所・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)：日本海側の冬の雷や雷雲からガンマ線が観測されている。Gamma-Ray Observations of Winter Thunderclouds (GROWTH)実験では、2006年より柏崎刈羽原子力発電所の構内に、放射線検出器と、光や電場を測定する装置を備えてガンマ線の観測を続けており、雷や雷雲は電子を10 MeV以上に加速できることを明かした。本研究では、BGOシンチレータで構成された検出器を新たに導入して、ガンマ線事象の検出数を向上させた。加えて、雷雲から1分にわたり511 keVの陽電子の対消滅線が放射されていることを明かし、雷雲が大量の陽電子を生成しているかもしれないことを示した。

研究成果の概要(英文)：Gamma rays derived from winter thunderstorms have been observed at the coastal area of the Japan Sea. Gamma-Ray Observations of Winter Thunderclouds (GROWTH) experiment has successfully operated gamma-ray measurement at the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant, revealing that lightning and thunderclouds can accelerate electrons to 10 MeV or higher. The present study installed a new detector consisting of BGO scintillators, increased the number of gamma-ray events to be detected. In addition, GROWTH for the first time observed 511 keV annihilation lines lasting around 60 s, implying that thunderclouds may produce a large flux of positrons.

研究分野：数物系科学

キーワード：粒子加速 雷 雷雲 ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

NASA の衛星や海外の地上や高山の観測装置により、雷を起源とする継続時間の短い(一秒以下)硬 X 線や 100 MeV に達するようなガンマ線が検出されていた(文献)。一方、冬の雷活動にともなって、日本海側にある原子力発電所の放射線監視モニタでも、放射線の増大が観測されていた(文献)。雷由来の X 線やガンマ線と違って、監視モニタで観測される放射線には、継続時間が一分以上と長いものが頻りに観測されていた。継続時間から見て、雷に由来したものと考えるに、冬の日本海側で観測される放射線の詳細は不明のままであった。本科研費の研究代表者である土屋を含む理研と東大のグループは、放射線監視モニタで冬に頻りに観測される継続時間の長い放射線は、電子が雷雲のもつ強い電場で加速され、制動放射で発した X 線やガンマ線であろうと推測した。こうして、雷や雷雲という身近な自然をターゲットに、従来の雷研究にはなかった宇宙物理的な観点と手法を適用し、宇宙では観測の難しい電場加速の詳細を探ることができるという着想を得た。

上記の着想を得て、本研究代表者の土屋を含むグループは 2006 年、Gamma-Ray Observations of Winter Thundercloud (GROWTH)を立ち上げた。そして、従来の放射線監視モニタでは不可能だった、放射線の粒子種や到来方向を測定できる新しい検出器を製作し、2006 年 12 月に柏崎刈羽原子力発電所に設置し、冬季の連続観測を開始した。その結果、10 MeV に達するガンマ線が、雷雲から数十秒にわたり放射されていることをはじめて突き止め(文献)、雷雲ガンマ線はサーチライトのように地上の狭い領域を照らしながら雷雲とともに移動することを明かした(文献)。こうした発見を成し遂げ、GROWTH は本科研費の開始までに 8 例の雷雲ガンマ線イベントを取得し、雷雲から発生するガンマ線の存在を確実にした。

GROWTH による日本海側での地上観測では、電子加速の結果発生する制動放射ガンマ線が観測されていた。一方、高山の観測では、加速された電子そのものが観測されたり(文献)、中性子が検出された兆候も見せる事例があったりするなど(文献)、雷や雷雲に伴う新たな高エネルギー現象の側面が浮上していた。

2. 研究の目的

本研究を開始するまでに実施された GROWTH の観測の結果、雷のみならず雷雲そのものが天然の粒子加速器であることが判明した。ところが、雷雲中にある加速領域の空間構造やその詳細な時間発展は不明のままであった。それ故、雷雲が有する電場加速器としての性能には、なぞが多く残っていた。加えて、多くの雷雲ガンマ線イベントでは、雷雲ガンマ線と雷はまったく無関係に見

えた。ところが、観測されるイベントの中には雷と相関を示すようなイベントもあり、雷雲ガンマ線と雷との関係に関するなぞも残っていた。

上記のような粒子加速のなぞと雷雲ガンマ線と雷との関連のなぞを明かすことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

2006 年より、雷や雷雲から発せられる X 線やガンマ線を観測するため、日本海沿岸にある柏崎刈羽原子力発電所にて実験を行っている。実験開始当初より、光子の観測には、NaI、CsI、BGO シンチレーション検出器を用いてきた。本研究においても、それらの検出器とともに、新たに感度を増大し、荒い方向の測定を可能にするため、BGO シンチレータで構成された検出器を新たに製作・設置した。これらの放射線検出器とともに、雷との相関を知るため、光検出器や電場測定器といった環境モニタも使用した。

放射線検出器と環境モニタのデータとともに、柏崎刈羽原発の職員の方の協力を頂き、東電が敷地内にもつ 9 台のモニタリングポストのデータもイベントが発生した時には提供して頂いている。

4. 研究成果

(1) 511 keV ガンマ線の地上での初観測

2012 年の冬季、3 例の雷からのガンマ線イベントを取得した。そのうちの一例では、雷の発生後、1 分にわたり継続する 511 keV の電子・陽電子対消滅ラインを観測した(図 1, Umemoto, Tsuchiya et al, PRL 査読中)。解析の結果、観測された 511 keV 線は検出器由来ではないことがわかった。また、雷そのものの継続時間に比べると長く続いており、雷に由来するものでもない。Fermi 衛星がミリ秒ほど続く雷由来と考えられる 511 keV ラインを観測していたが、衛星や地上で 1 分にわたる事象例はない。この事象を国際会議(AGU2013)や物理学会で公表し、さまざまな研究者と議論した。その結果、たとえば、雷の発生後に雷雲内で電場による電子の加速が始まり、制動放射ガンマ線が放射される。

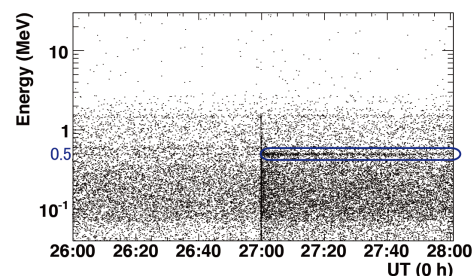


図 1: 511 keV ラインの観測例。光子のエネルギー(縦軸)と時間との関係。雷の発生(27:00)から一分ほど 511 keV 付近の光子が到来している様子がわかる(楕円で囲んでいる辺り)。

その放射されるガンマ線源を見込む検出器の角度が大きかったため、ピーミングした電子の制動放射に埋もれることなく等方的に発せられる 511 keV を受けやすかったなどと考えられるが、511 keV ラインを 1 分も放射し続けるメカニズムは、いまだ確定していない。

(2) 新検出器による雷雲ガンマ線イベントの検出感度の向上

2014 年度には、新タイプの検出器を設置した。主検出器は、4 本の直方体の BGO シンチレータである。それらの周囲を上空の放射線に特化した感度を持たせるため、井戸型の BGO シールドで覆っている。特徴的なことは、イベント時に 4 本の BGO 直方体シンチレータのそれぞれと BGO シールドとの信号強度を比べることにより、観測したガンマ線の方角を推定できることである。

新検出器と既存の装置を稼働させ、2014 年度の冬季観測を行ったところ、8 例の雷雲ガンマ線イベントを新検出器で捉えることに成功した。従来の観測装置では、5 例のイベントを得た。従来、1 冬季観測では、平均 3 例ほどのイベント取得であったことを考えると、2014 年度には倍以上に増えたことになる。当然、今シーズンは、雷雲の発生を多く促す要因があったという気象的条件が整っていたことも考えられる。ただ一方で、BGO 検出器という感度のよい装置を設置したことで、これまで取り逃がしていたイベントを取得することができたという理由も考えられる。

<引用文献>

J.R. Dwyer, H.K. Rassoul, M.Al-Dayeh, L. Caraway, B. Wright et al., “Measurements of x-ray emission from rocket-triggered lightning”, *Geophys. Res. Lett.* 31, L05118, 2004

M. Tavani, M. Marisaldi, C. Labanti, F. Fuschino, A. Argan et al., “Terrestrial Gamma-Ray Flashes as Powerful Particle Accelerators”, *Phys. Rev. Lett.* 106, 018501, 2011

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

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

H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, K. Nakazawa et al., “Long-duration gamma ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms”, *J. Geophys. Res.* 116, D09133, 2011

H. Tsuchiya, T. Enoto, T. Torii, K. Nakazawa, T. Yuasa et al., “Observation of an energetic radiation burst from Mountain-Top thunderclouds”, *Phys. Rev. Lett.* 102, 255003, 2009

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

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 3 件)

H. Tsuchiya, T. Enoto, K. Iwata, S. Yamada, T. Yuasa, et al. (13 名中、1 番目), “Sudden termination of high-energy γ rays detected from thunderclouds before lightning”, 査読有, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* 47, 28, 2014 (URL: <http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/APR047/pdf/xxviii.pdf>)

H. Tsuchiya, T. Enoto, K. Iwata, S. Yamada, T. Yuasa, et al. (13 名中、1 番目), “Hardening and termination of long-duration gamma rays detected prior to lightning”, 査読有, *Phys. Rev. Lett.* 111, 015001, 2013 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.015001>)

H. Tsuchiya, K. Hibino, K. Kawata, N. Hotta, N. Tateyama, et al. (22 名中、1 番目), “Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet”, 査読有, *Phys. Rev. D* 85, 092006, 2012 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.092006>)

[学会発表](計 8 件)

GRWOTH 実験 1: 2014 年末に新規設置した雷雲ガンマ線検出器と初期成果、榎本大悟、土屋晴文、湯浅孝行、中澤知洋、榎戸輝揚、古田禄大、山田真也、牧島一夫、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学(東京都・新宿区)2015 年 3 月 22 日

GROWTH 実験 2: 2014-2015 冬に観測された雷由来ガンマ線の詳細解析、古田禄大、榎本大悟、土屋晴文、湯浅孝行、中澤知洋、榎戸輝揚、山田真也、牧島一夫、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学(東京都・新宿区)2015 年 3 月 22 日

GROWTH 実験の最前線 2012 年に検出された対消滅線について」榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、湯浅孝行、山田真也、

中澤知洋, 牧島一夫、(招待講演)、宇宙線研究所共同利用研究会「次の10年の宇宙線研究」、東京大学宇宙線研究所(千葉県・柏市)2014年11月7日

雷や雷雲での粒子加速と高エネルギー現象 - GROWTH や高山観測 -, 土屋晴文、招待講演、宇宙線研究所共同利用研究会「次の10年の宇宙線研究」、東大宇宙線研(千葉県・柏市)2014年11月7日

GROWTH 実験で2012年に検出された北陸冬季雷雲からの対消滅線, 榎本大悟、土屋晴文、榎戸輝揚、湯浅孝行、山田真也、中澤知洋、牧島一夫、日本物理学会第69回年次大会、佐賀大学(佐賀県・佐賀市), 2014年10月19日

2012年以降の日本海沿岸の冬季雷雲からの粒子線観測, 榎本大悟, 土屋晴文, 榎戸輝揚, 山田真也, 湯浅孝行, 他8名, 日本物理学会第69回年次大会、東海大学(神奈川県・平塚市), 2014年3月30日

Observations of radiation bursts from winter thunderclouds and lightning over the Japan sea coast, D. Umemoto, H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa et al., American Geophysical Union 2013、サンフランシスコ(USA), 2013年12月10日

2012年中における日本海沿岸の冬季雷雲からのガンマ線観測, 榎本大悟, 土屋晴文, 榎戸輝揚, 山田真也, 湯浅孝行, 他9名, 日本物理学会2013年秋季大会、高知大学(高知県・高知市), 2013年9月21日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 晴文 (TSUCHIYA, Harufumi)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員

研究者番号: 70415230

(4) 研究協力者

榎戸 輝揚 (ENOTO, Teruaki)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・訪問研究員

研究者番号: 20748123

榎本 大悟 (UMEMOTO, Daigo)

東京大学大学院・理学系研究科・D2