

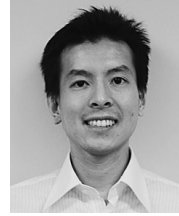
雷雲は天然の粒子加速器か？

榎戸 輝 揚

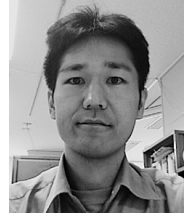
〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程

〒170-0002 東京都文京区 7-3-1〉

e-mail: enoto@amalthea.phys.s.u-tokyo.ac.jp



榎戸輝揚



土屋晴文

土 屋 晴 文

〈理化学研究所牧島宇宙放射線研究室基礎科学特別研究員 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: harufumi@crab.riken.jp

近年、雷雲や雷放電に伴う強電場によって、MeV 領域に至る相対論的電子が生じていることが明らかになりつつある。日本では北陸沿岸の冬季雷雲に同期した放射線量増大の報告例があるが、放射線の種類や継続時間、スペクトルなどが未解明のまま残されていた。この現象を解明するため、新潟県において雷雲放射線の観測を目的とする GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter THunderclouds) 実験を始めた。2年間の冬季観測のうち、上空に巨大な低気圧が発生していた日に、数十秒の継続時間で～10 MeV に達するガンマ線が上空から到来する現象を2例、観測に成功した。これは、雷雲内の強電場領域において相対論的な逃走電子のなだれ増幅が発生し、加速された電子からの制動放射ガンマ線と推定され、意外にも身近な雷雲において粒子加速が生じていることがわかってきた¹⁾。

1. 雷雲での粒子加速

天文学の常識でいえば、X線やガンマ線といった高エネルギー光子は、太陽を除けば、ブラックホールや中性子星、超新星残骸、ガンマ線バーストといった地球から遠く離れた天体からやってくると思われている。このX線やガンマ線を調べることで、宇宙において高エネルギーの粒子がどのような機構で加速されているかという粒子加速の問題にも迫ることができると考えられている。

宇宙遠方からのガンマ線バーストを検出するために打ち上げられた CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) 衛星には BATSE (Burst And Transient Source Experiment) 検出器が搭載されていた。1990年代の始め、意外なことに、このBATSEは宇宙からではなく、「地球の」大気上層

からミリ秒オーダーの継続時間をもったガンマ線のバーストが到来している現象を発見し、Terrestrial Gamma-Ray Flash (TGF) と名づけた²⁾。9年間に75イベントを検出し、どうやら雷雲活動に同期しているということが明らかになってきた。ごく最近になって、このような雷雲や雷放電という身近な現象においても、その強電場により粒子加速が起きている証拠が集まりつつあり、BATSEの観測のみならず、地上観測においてもいくつかの示唆がある。

1980年代に Parks と MacCarthy らのチームが、航空機による雷雲内の観測で電場に相関して放射線の増大を検出し³⁾、90年代には Eack らが雷雲に向けて気球を飛ばし、雷放電より1分ほど前からエネルギー 30–120 keV の放射線量が1–2桁近く増大することを発見した⁴⁾。一方、地表面での

観測においても、自然落雷に同期して継続時間 1-2 ミリ秒で 1 MeV を超える放射線が検出された高山の観測例もわずかながらある⁵⁾。こういった結果に刺激され、フロリダではロケット誘雷実験が 2000 年代に始まった。落雷に同期した継続時間 1 マイクロ秒以下の 20-250 keV の X 線バースト⁶⁾や、落雷の直前に継続時間 300 マイクロ秒で 10 MeV に達するガンマ線が検出されている⁷⁾。

こういった観測例では、雷雲の電場により電子が相対論的に加速され、制動放射されたガンマ線や加速電子そのものが検出されていると考えられている。地球のごく表面の厚い大気の中で、自然現象が電子を MeV 領域まで加速しているということ自体が純粋に驚きであり、宇宙における粒子加速を考えるうえでも面白いと言える。宇宙空間では電気的中性を保つために電場が遮蔽されてしまい、大規模な電場は存在しにくいと考えられるものの、たとえば回転駆動型パルサーでの加速には、誘導電場が重要な役割を果たしていることは疑いない。粒子加速の観点からも、特に衝突の大きい大気中での直接の電場による加速である点で、興味深いテストケースと言える。

実は日本においても、北陸の冬季雷雲に伴って放射線を検出したという報告がある。日本海側には複数の原子力発電所あり、施設からの予期しない放射性物質の放出や周囲への影響を監視するため、放射線モニタリングポストが定常的に稼働している。この放射線モニタリングポストが、「雪おろし」あるいは「ぶりおこし」と呼ばれる冬季雷が発生する晩秋から冬にかけて、雷雲活動時に放射線量が増大する例を報告してきた^{8),9)}。年に数回ほどではあるが、複数のモニタリングポストが、数十秒から数分にわたり MeV に達するエネルギーをもった放射線の増大を検出した。雷雲活動に由来する放射線ではないかと言われていたが、まだよくわかっていなかった。

このような雷雲に伴う放射線の増大は、世界的にもあまり例がない。これは、冬季雷雲が日本の

ほかにはノルウェー西海岸や北アメリカ五大湖から東海岸などでしか見られない、世界的に珍しい気象的特徴を備えているからだろう。冬季には、シベリア寒気団からの冷たい北西の季節風が、比較的暖かく湿った日本海の上空で水蒸気を補給しつつ積乱雲を発達させ、日本列島にぶつかって冬季の雷雲が生じる。夏季雷雲が 8-16 km の高度であるのに対して、この冬季雷雲の高度は 4-6 km と低く、厳冬期には 1 km 以下になることが特徴として知られている。冬季雷雲で生じる雷は夏の雷に比べて強力で、正極性の放電（正電荷が地上に落ちる）が多く、その割合は 33% から場合によっては 50% を超える。そして、雷雲上空にエルブスやスプライトと呼ばれる、近年発見された可視光の発光現象が多く観測されるのも、冬季雷雲の珍しい特徴である。

強力な冬期の落雷は、雷雲に関係して高エネルギー現象が生じていることを期待させ、もし生じていれば、雷雲高度が低いことから、発生した放射線が厚い大気中でも地表まで届きやすいだろう。雷雲に同期した放射線の増大は大変に魅力的なテーマであるが、この放射線の種類、スペクトル、継続時間、発生条件などには不明な点が数多く残されていた。

2. 雷雲放射線の地上観測

冬季雷雲に伴う放射線が実際に到来しているのか、もし到来しているならどのような放射線なのか、さらにどんなスペクトルなのか調べたい。そこで、原子力発電所で従来用いられた放射線モニターに比べ感度が高く、粒子判別機能や高い時間分解能をもつ放射線の観測装置を設計、製作し、東京電力さんの協力のもと新潟県柏崎刈羽原子力発電所(図 1)の構内に設置した。装置の製作と観測は、東京大学の宇宙 X 線観測を行っているメンバーと理化学研究所の宇宙線観測を行っているメンバーが中心になって進め、GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter THunderclouds)

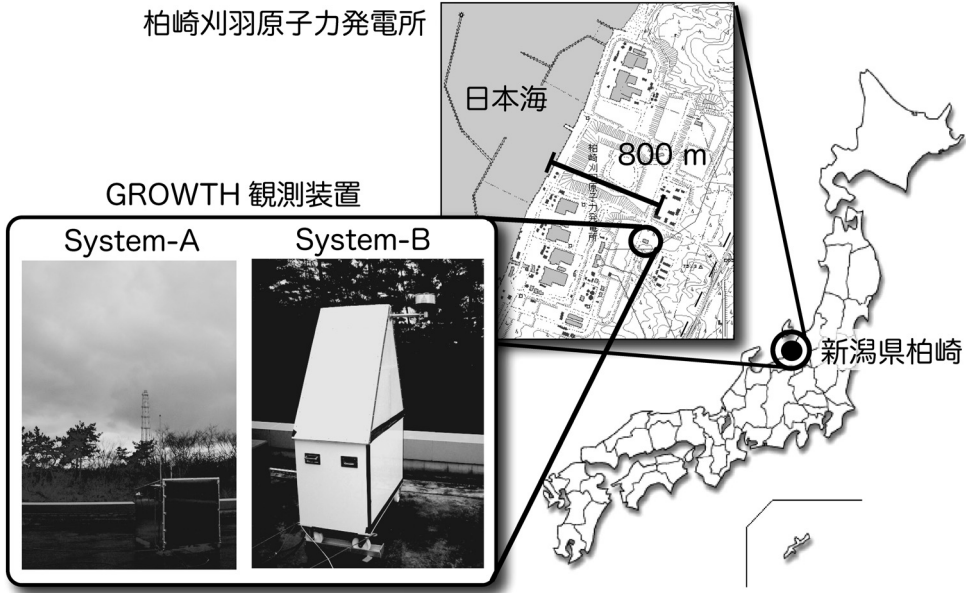


図1 観測を行っている柏崎刈羽原子力発電所の位置と観測小屋の写真。

実験と名づけられている。東大と理研において設計製作された相補的な2台の観測装置を、以下それぞれ System-A と System-B (図1) と呼ぶ。

System-A は、地表面からの環境放射線を低減して上空方向に感度をもたせ、40 keV-3.3 MeV (2007年度からは10 MeVまで)の放射線を、1イベントごとに到来時刻とそのエネルギーを記録する。図2左には System-A の断面図を示した。メインの放射線検出器は円柱状 NaI シンチレーターで、その周りを井戸型の BGO のシンチレーターが囲った。これは、X線天文衛星「すざく」に搭載されている硬 X線検出器の設計を応用している。 ^{40}K や ^{208}Tl に由来するエネルギー 3 MeV 以下の環境放射線は、主に地表方向から検出器に混入するので、井戸型の BGO シンチレーターでパッシブにシールドし、さらに BGO 自身の放射線信号も読み出してアクティブシールドとしても利用することで、BGO でコンプトン散乱された後に NaI で混入して検出された環境放射線は、反同時計数で除去できる。これにより、主に上空方向への感度が高くなる。大気中では電子よりもガ

ンマ線のほうが遠くまで到達できるので、地表では主にガンマ線が検出できると想像される。そこで、メインの検出器は結晶シンチレーターにしているが、さらに、到来した放射線がガンマ線か、電子などの荷電粒子かを判別するため、荷電粒子に特に感度のあるプラスチックシンチレーターを上部に配置して電子成分を選別する。

System-B は、球状の NaI および CsI シンチレーター、球状プラスチックシンチレーターを配置し、全方位に感度をもつ。反同時計数は行わず、40 keV-100 MeV の放射線について、6 秒積分スペクトルと 1 秒ごとのカウントレートを記録する。

これら放射線の検出器に加え、System-A には可視光、音、温度、湿度を検出できる環境センサー群が、System-B には電場計、気圧計が設置され、周囲の環境変動も併せて記録する。

観測装置は、2006年の12月中旬に観測地への設置した。日本海に面した原子力発電所の、海岸から 800 m ほど内陸に入った環境管理棟の2階にクレーンで持ち上げ、降雨、降雪、地震対策を

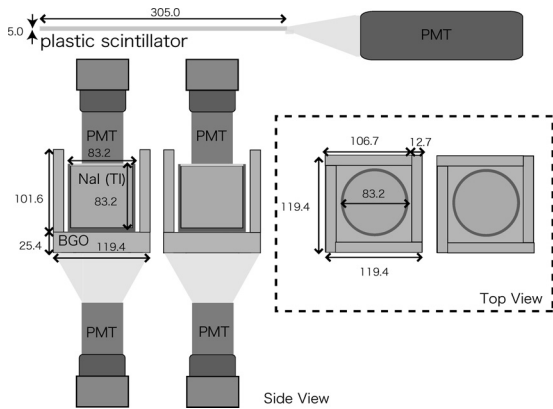


図2 (左) System-A の放射線検出部の断面図と上面図. 単位は mm. (右) System-A の井戸型 BGO シンチレーターの製作過程.

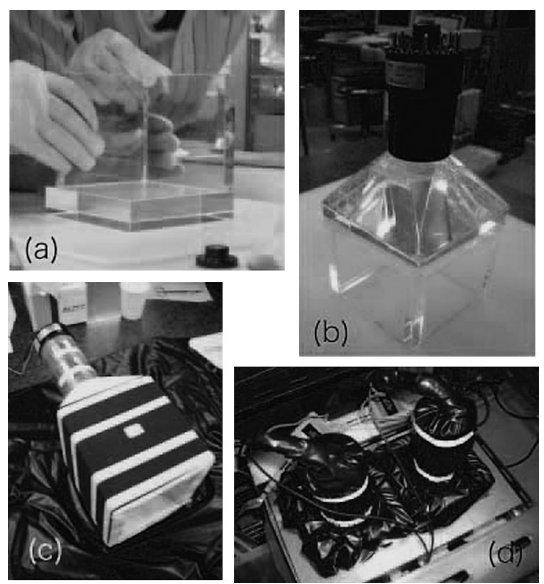


図2 (右) System-A の井戸型 BGO シンチレーターの製作過程.

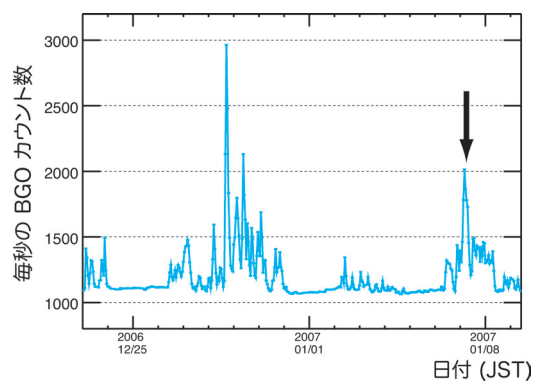


図3 観測開始から2週間にわたる System-A の BGO シールドシンチレーターの毎秒のカウント数. 矢印は雷雲ガンマ線の観測に成功した時刻.

施した上で観測を開始した。現在まで、二度の冬季（2006/12/22-2007/8/6, 2007/10/22-現在）にわたって観測を続けている。

図3に、観測を開始した2006年12月23日から約17日間の System-A の NaI, BGO, プラスチックシンチレーターの毎秒のカウント数を示した。降雨や降雪に伴ってレートが2倍近くに上昇

しているのは、地面から放出され降水とともに地上に落ちてきた、ラドン娘核種からの環境放射線の影響であり、特徴的な核ガンマ線をもつスペクトルとおおよそ数時間程度の緩やかな変動から、環境放射線だと判別できる。

3. 雷雲ガンマ線の検出

観測を開始してから2週間ほど経った2007年1月6日から7日にかけて、日本海上空で二つ目の低気圧が合体し、巨大な爆弾低気圧が形成され激しい雷雲活動が生じていた（図4上）。また、未明には雷雲の上空に、エルプスやスプライトなどの可視光の発光現象も報告されていた。放射線量の変動をよく調べていくと、この1月7日の未明に、降水に伴うラドンなどの環境放射線とは明らかに時間変動の異なる、継続時間の短い放射線の増大現象が見つかった。この時刻を拡大し、System-A と System-B の合計四つの独立なシンチレーターのカウント数の変動を示したものが図4下である。ゆっくりとした変動は降雨降雪に伴い大気中から降下したラドンなどの環境放射線で

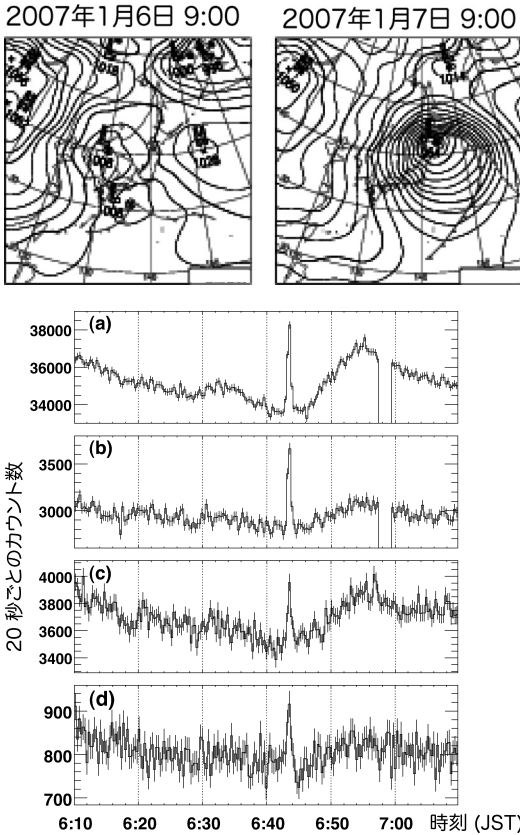


図4 2007/1/7に検出された雷雲ガンマ線. (上) 2007年1月6日から1月7日にかけての天気図(気象庁のウェブページより). (下) 2007年1月7日の雷雲ガンマ線現象の放射線カウント数. (a) System-AのBGOシールドシンチレーターの40 keV以上のカウント数. (b) System-AのNaIシンチレーターの40 keV以上のカウント数. (c) System-BのNaIシンチレーターの40 keV以上のカウント数. (d) System-BのCsIシンチレーターの600 keV以上のカウント数.

あるが、6:40 (JST) 付近には ~40 秒間にわたって四つのどのシンチレーターにも統計的に有意な放射線の増大が生じていた. 図5には放射線のカウント数に加えて、環境センサーの変動も示しており、放射線増大のピークから70秒ほど遅れて、可視光センサーと電場計がスパイク状の信号を5回ほど検出し、雷放電の雷光と電場変動を検出したと考えられる.

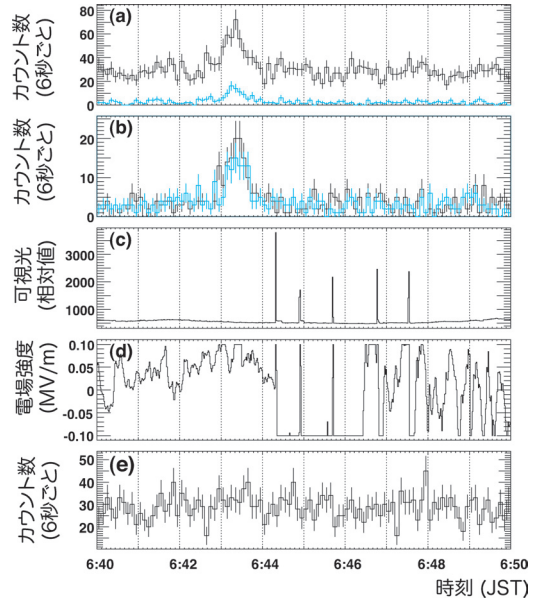


図5 2007年1月7日の放射線カウント数と環境放射線センサーの変動. (a) System-AのNaIの3 MeV以上のカウント数(黒)とBGOシールドシンチレーターにより反同時計数を行った場合のカウント数(青). (b) System-BのNaIおよびCsIシンチレーターのカウント数をそれぞれ黒と青で示した. エネルギー帯域は3-10 MeV. (c) 可視光センサーの強度. (d) 電場強度. (e) 荷電粒子に感度のあるプラスチェックシンチレーターのカウント数.

放射線信号の短期変動を電気的なノイズと区別するため、System-Aにはシンチレーターを取り付けていない光電子増倍管だけの測定系も、参照用に用意しておいた. この放射線の増大時に、参照用の測定系からは有意な信号は検出されおらず、電気的なノイズではない. またSystem-Aにおいて、NaIとシールドBGOのカウント増分の比は、地表面からの環境放射線で増大する場合に比べて2倍ほど多く、この増大は放射線が主に上空方向から到来したことを示している. さらに図5に示したように、荷電粒子に感度のあるプラスチェックシンチレーターがカウントの増大を示していないため、電子ではなくガンマ線が到来してい

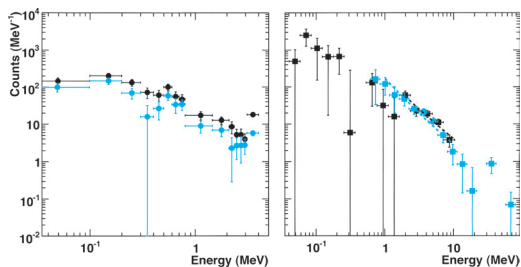


図6 2007年1月7日の雷雲ガンマ線現象のスペクトルを System-A (左), -B (右) について示した. (左) System-A で反同時計数をかけないとき (黒) と反同時計数をかけたとき (青). (右) System-B の NaI (黒) と CsI (青) のスペクトル.

ると結論できる.

この ~40 秒にわたるガンマ線のスペクトルから、前後の 10 分間のデータをバックグラウンドとして引き算したものを、図6に示した. 増加分のスペクトルは 10 MeV まで達しており、環境放射線に特有のライン構造が見えないことから、環境放射線とは異なる現象である. 0.6-10 MeV をべき関数でフィットしたときには、光子指数 $\Gamma = -1.7 \pm 0.1$ という硬いスペクトルで、とくに 3 MeV 以上で System-A, -B を合わせて ~270 個ほどのガンマ線を検出できた. 3月まで観測が続けたが、同様な例はなかった. 1月7日は、この冬でもっとも強い冬型になった時期の一つで、しかも明け方には強い雷雲活動が実際に起きていた. よって、検出したガンマ線は雷雲からのものと結論できる.

翌年の 2007 年度の冬季観測においても、2007 年 12 月 14 日に、さらにもう 1 例の雷雲ガンマ線の検出に成功した. 天気図は 2006 年度の現象に似て、日本海で二つの低気圧が合体して巨大な低気圧が生じていた. 継続時間は ~66 秒間であり、やはり 10 MeV 近くまで達するスペクトルであった. 雷放電も可視光センサー、音センサー、電場計などにより記録されていて、ガンマ線の到来よりも 130 秒ほど先に生じていた. これら 2 例から

判断すると、ガンマ線の放射は落雷に同期するよというより、雷雲そのものに起因するようと思われる. この 12 月 14 日の例では、原子力発電所構内の環境放射線モニタリングポストのうち、私たちの検出器に近く東側に位置している 2 台については、数分ほど遅れて放射線の増大を記録しているので、雷雲の移動に従ってガンマ線の放射領域が移動していると考えて矛盾ない.

4. 相対論的な逃走電子のなだれ増幅

今回検出された、10 MeV にも達するガンマ線の発生メカニズムは、どのようなものが考えられるのか. 高エネルギー電子からの典型的なガンマ線の発生過程としては、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱、制動放射などが考えられる. 今回の場合、0.4 ガウス程度の地磁気中を運動する電子からのシンクロトロン放射や、1 eV 程度の可視光と電子が衝突して逆コンプトン散乱されるのだとすると、どちらの場合も電子が数 GeV から 1 TeV というすさまじいエネルギーをもたねばならず、現実的ではない. 制動放射であれば、MeV 程度の相対論的なエネルギーをもつ電子が、MeV 以下の制動放射ガンマ線を出すことが可能である. 典型的な星間空間に比べ地球大気では、シンクロトロン放射に効く磁場のエネルギー密度は ~ 10^{12} 倍、逆コンプトン放射に効く光子のエネルギー密度は ~ 10^6 倍必要であるのに対し、制動放射に効くターゲット物質の密度は、~ 10^{19} 倍にもなる. よって宇宙では非熱的な制動放射が目立たないのに対し、大気中ではそれが卓越することが自然である. したがって、MeV 領域のエネルギーをもつ非熱的な電子の加速機構が存在しなくてはならない.

そこで私たちが検討しているのは 1992 年に Gurevich らによって雷雲中での粒子加速を説明するため提唱された「相対論的な逃走電子のなだれ増幅 (Relativistic Runaway Electron Avalanche)」という機構である^{10), 11)}. 図7は 1 気圧の大気での

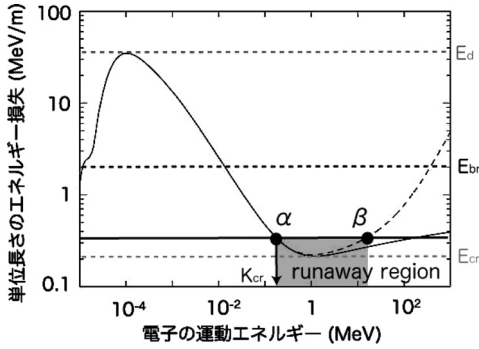


図7 1気圧の大気中の電子のエネルギー損失。実線は電離損失のみのとき、破線は制動放射も考慮したとき（文献13より）。

電子のエネルギー損失で、電離損失（実線）は2 MeV以下で効き、制動放射によるエネルギー損失（破線）が高エネルギー側で支配的になる。たとえば、電場が存在しない場合には1 MeVの電子は電離損失によって大気中を3 mほどしか飛ぶことができない。一方、エネルギー損失よりも大きな電場が存在する場合には、強電場が電子を加速できる。

1気圧の空気の絶縁破壊を起こすために必要な電場 E_{br} は $E_{br} \sim 2 \text{ MV/m}$ ほどである。実際に雷雲内で計測されている典型的な電場の強さは $0.05\text{--}0.1 \text{ MV/m}$ 程度で^{4), 12)}、絶縁破壊を起こすほどの強い電場には桁で足りない。エネルギー損失が最小になる最小電離損失に対応する $E_{cr} \sim 0.2 \text{ MV/m}$ を超える電場であれば、まれに観測された例も存在する¹⁴⁾。そこで仮に、この E_{cr} をわずかに超える電場 E が存在する場合を考える。

$$E > E_{cr} = 0.22 \left(\frac{P}{1 \text{ atm}} \right) \text{ MeV/m} \quad (1)$$

P は気圧で、気圧が低いほど小さい電場でも条件を満たすことできる。

この電場による加速とエネルギー損失曲線は二つの交点をもち（図中 α, β ）、この二つの α, β の間のエネルギーをもつ種電子は電場方向に加速されて逃走電子になる。この種電子のエネルギー K

は、 α の点に対応するエネルギー K_c を超える

$$K > K_c = \frac{1}{2} m_e c^2 \left(\frac{E_{cr}}{E} \right) \quad (2)$$

というエネルギーをもたなくてはいけない*1。ここに、 $m_e c^2$ は電子の静止質量エネルギーであり、たとえば、1気圧中で $E = 0.3 \text{ MV/m}$ では、170 keV を超える種電子になる。大気中の通常の電子は種電子になりえないが、宇宙線や天然放射性元素に由来する高エネルギー電子であれば、種電子を供給できると考えられる。

α から出発した電子は加速され、曲線上を右に動くが、それにつれて電離損失も減るので、ますます加速される。しかし相対論的な平衡解 β に達すると、今度は制動放射が上回り、加速が効かなくなってしまう。よって α と β の間が、「逃走加速」の起きる領域である。これら逃走電子が大気分子を電離して二次電子を生成し、そのうち速度が遅い二次電子は減速してしまうが、電場方向に十分な速度をもつ二次電子は電場により加速されて同じく逃走電子となり、 β に向かう。この過程がアバランシェ（なだれ）増幅で繰り返されつつ高エネルギー電子が生成される。なお、アバランシェ増幅で十分な量の加速電子が作られるためには、典型的には数十 m の加速領域が必要であると考えられる。

5. 観測結果の解釈

この粒子加速のメカニズムが、実際の私たちの観測の中でどのように働いていたのか？

図8のように発達した冬季雷雲では上昇気流によって電荷分離が生じ、鉛直方向に正負で横に広がった三極の電荷構造をもつと言われる¹⁵⁾。雷雲下部に形成されるポケット正電荷と負電荷層の間には強い電場領域が生成されると考えられており、この領域に式(1)の条件を満たす強い電場が生じていたとする。特に、私たちが雷雲ガンマ線を観測した両日はどちらも爆弾低気圧が生じて気

*1 ここでは簡単のため、この領域でエネルギー損失がエネルギーに比例すると仮定している。

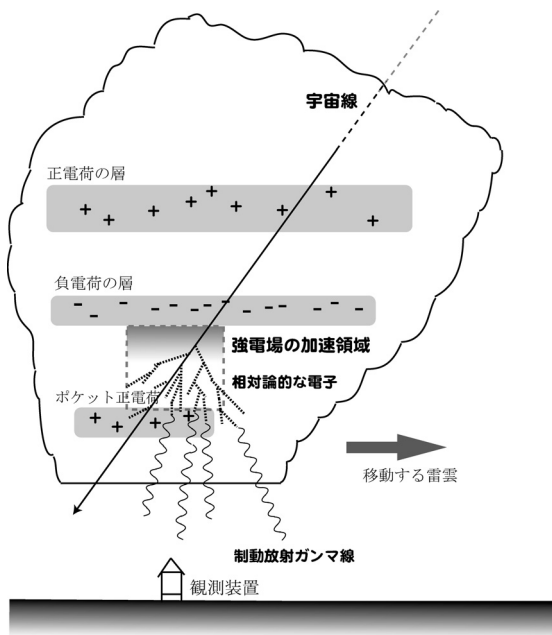


図8 雷雲ガンマ線の発生メカニズムの想像図.

圧が下がっており、式 (1) の臨界電場 E_{cr} は下がっている。

この強電場領域で、宇宙線による大気分子電離された電子か、天然放射性元素の β 崩壊による電子が、式 (2) を満たす種電子として供給されると、前述の相対論的な逃走電子のなだれ増幅が生じ、相対論的な平衡解 β まで加速され、高エネルギー電子を生じる。ここで生成された多数の電子が大気中で制動放射ガンマ線を生成すれば、10 MeV のガンマ線はコンプトン散乱の平均自由行程が数十 m なので、散乱を繰り返しつつも地上まで到達する。このような強電場な領域が現れる気象条件のもとでは、その前後で雷放電が数多く観測されるというのも矛盾はない。

電場方向に加速された相対論的電子は運動方向に集中してガンマ線を放射し (たとえば 10 MeV 電子では $\theta < m_e c^2 / \epsilon \sim 3^\circ$ 以内に集中する)、限られた領域に指向性をもって放射されている可能性がある。とすれば、雷雲が典型的に毎分数百 m で東方向へ移動する際、ガンマ線の放射領域もサー

チライトのように移動し、たまたま検出器の上空を通過したのかもしれない。このように考えると、すべての雷雲からガンマ線が検出できているわけではないことも、説明がつくだろう。

私たちが検出したガンマ線から雷雲内で生成された電子のエネルギーを見積もってみる。2007年1月7日の雷雲ガンマ線を例にとると、検出器直上でのガンマ線スペクトルは $F(E_\gamma) = 2.0 \times E_\gamma^{-1.7}$ (photon/MeV/m²) 程度であったので、1-10 MeV のガンマ線の個数は、 $\sim 2.4 \times 10^4 \text{ m}^{-2}$ である。先に述べたサーチライトのような放射領域を考え、発生点までの距離が 300 m であれば、大気での減衰率と制動放射ガンマ線の放出率を妥当な範囲で仮定し、雷雲内での相対論的電子の個数に戻すと、 $N_e \sim 10^{10}$ 個程度となる。対応する相対論的電子のエネルギーは、発生源までの距離 300 m と仮定するとおよそ $E_e \sim 0.01 \text{ J}$ 程度であり、1 km では 3 J 程度となる。一発の雷放電で放出されるエネルギー 10^{7-9} J より桁で小さく、エネルギー的には十分収支があう。もちろん仮定に不定性が大きいので、今後議論を深めていきたい。

このように雷雲ガンマ線は、雷雲内での強電場領域における逃走電子のなだれ増幅で生じた、相対論的電子からの制動放射ガンマ線と解釈できそうである。今後の問題は、分オーダーの長い継続時間がどのように維持されているのか、という点である。一つの宇宙線による、なだれ増幅のプロセスはすぐに終わってしまうため、今回観測した継続時間の長い加速を持続する機構を考えなくてはいけない。そのためには、移動する雷雲の放射領域の広がりほどの程度かを、小型の検出器を並べたマッピング観測や、気球や飛行機による雷雲内部や上空での観測で明らかにしていきたいところである。さらに、逃走電子のなだれ増幅の種類 (トリガー) が、本当に二次宇宙線なのか、あるいは天然放射性元素の β 崩壊などに起因するものかも考えていきたい。

雷雲ガンマ線の観測は、地球物理学的には雷放

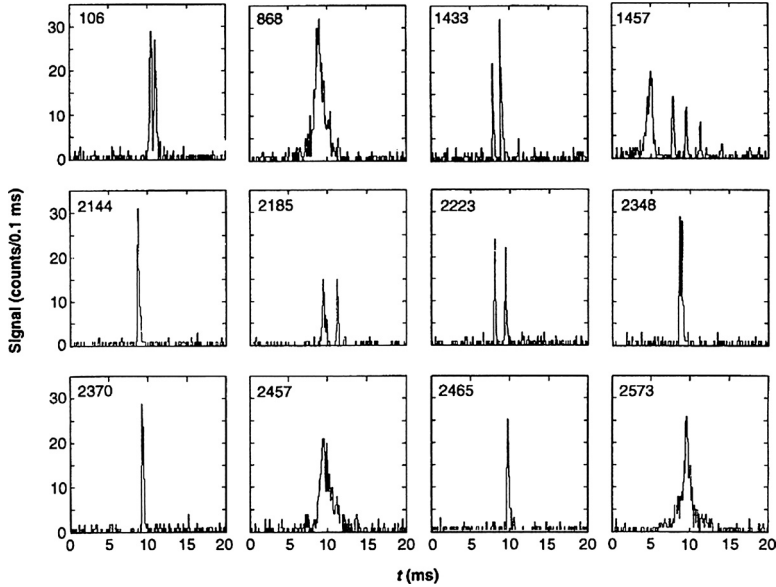


図9 BATSE で検出された Terrestrial Gamma-ray Flash のライトカーブ (文献2より)。

電がどのようにして起こるかといった疑問に通じ、宇宙線物理学としては宇宙線と雷雲などの地球現象との関係、高エネルギー天文学とは粒子加速などでつながっており、学際的なアプローチが行われてきている。宇宙でのより遠く、より大きな粒子加速を考える一方で、実は身近に取り残されている思いもよらない粒子加速が存在することに自然の奥深さを感じてしまう。

6. 地球ガンマ線の衛星観測

この記事の最後に、本稿のはじめに述べた雷雲活動に由来するらしいガンマ線 (TGF) の衛星観測の話に戻ってみたい。BATSE による観測の後、太陽観測衛星 RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) が 760 個近い TGF を検出し、硬いべきをもった 20 MeV に達するスペクトルと雷雲活動の活発な地域と TGF の相関を明らかにしている¹⁶⁾。これら TGF のいくつかは ELF/VLF 帯 (数百 Hz-数十 kHz) の電波と同期しているものも報告され、正極性の落雷との相関も報告されている^{17), 18)}。そのため、衛星軌道上で

検出される TGF は、正極性の落雷の発生によって電子が大気上層へ駆け上がり、このときの制動放射ガンマ線であるというシナリオが提案されている。

TGF が実際にどのような雷放電と同期しているのかはまだよくわかっていないため、可視光や電波での雷放電と TGF の同時観測がきわめて重要な手がかりとなる。そこでこれを目的の一つとして、2008 年度には東北大学の小型宇宙衛星 Sprite-SAT が打ち上げ予定である。Sprite-SAT には可視光の CMOS/CCD カメラ、VLF 帯の観測機器に加えて、TGF を主目的とした小型ガンマ線検出器 Terrestrial Gamma-ray Counter (TGC) が搭載予定である。このガンマ線検出器は、100 keV から数 MeV のエネルギーにおいて 4 帯域のカウントを 250 マイクロ秒で取得する仕様になっており、TGF の同期検出に期待がもたれている。この検出器は今まさに、私たち東京大学の研究室と宇宙科学研究所において製作を行い、振動試験などの衛星試験を進めている最中である。

謝 辞

本稿の GROWTH 実験は東京大学大学院理学系研究科物理学専攻における修士論文をもとにしており、牧島一夫先生の丁寧な指導に心からお礼申し上げます。柏崎での実験を行うきっかけを作ってくださった岡野眞治さん、原子力発電所での観測結果についてたびたびアドバイスをいただきました鳥居建男さんにもたいへんお世話になりました。この実験装置の製作設置においては、研究室の後輩である山田真也氏、湯浅孝行氏にそれぞれ環境センサー群と電源モジュールの製作をお願いし、現地での設置においても理研の加藤 博さんとともに一緒に作業を行いました。短期で装置を組み上げるうえで、このみなさんの協力なくしてはできず、本当にありがとうございました。また、装置の設計にあたっては、X線天文衛星「すざく」の硬 X線検出器の経験をもとに、国分紀秀氏、川原田 円氏、北口貴雄氏からさまざまなアドバイスをいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

また、Sprite-SAT 搭載の小型ガンマ線検出器については、宇宙研の高島 健氏、三谷烈史氏、および東大の中澤知洋氏、上田 剛氏との共同研究であり、高橋幸弘氏に代表される東北大学の Sprite-SAT のメンバーとともに、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S., Yuasa T., Maki-shima K., et al., 2007, Phys. Rev. Lett. 99, 165002
- 2) Fishman G. J., et al., 1994, Science 264, 1313
- 3) MacCarthy M., Parks G. K., 1985, Geophys. Res. Lett. 12(6), 393
- 4) Eack B., et al., 1996, J. Geophys. Res. 101(D23), 29637
- 5) Moore C. B., et al., 2001, Geophys. Res. Lett. 28, 2141
- 6) Dwyer J. R., et al., 2003, Science 299, 694
- 7) Dwyer J. R., et al., 2004, Geophys. Res. Lett. 31, L05119
- 8) Torii T., et al., 2002, J. Geophys. Res. 107, 4324
- 9) 山崎興樹ほか, 2003, 「冬季雷雲活動時に観測される

空間線量率の一時的上昇の特徴」, 新潟県放射線監視センター年報 1, 29

- 10) Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R., 1992, Phys. Lett. A 165, 463
- 11) Gurevich A. V., Zybin K. P., 2005, Physics Today, May
- 12) Marshall T. C., Stolzenburg M., 2001, J. Geophys. Res. 106, 4757
- 13) Dwyer J. R., 2004, Geophys. Res. Lett. 31, L12102
- 14) Stolzenburg M., et al., 2007, Geophys. Res. Lett. 34, L048404
- 15) Kitagawa N., Michimoto K., 1994, J. Geophys. Res. 99, 10713
- 16) Smith D. M., et al., 2005, Science 307, 1085
- 17) Inan U. S., et al., 1996, Geophys. Res. Lett. 23, 1017
- 18) Cummer S. A., et al., 2005, Geophys. Res. Lett. 32, L08811

Detection of Gamma-Rays from Winter Thunderclouds along the Coast of Japan Sea

Teruaki ENOTO

Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Harufumi TSUCHIYA

Cosmic Radiation Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Recently, there is a possibility that electrons are accelerated to relativistic velocities in the electric fields of thunderclouds and/or natural lightning. Along the coastal area of Japan Sea, some dose increases associated with winter thunderclouds have been reported, but the mechanism is still unknown due to lack of detailed information on the types of radiation, short-term intensity variations, and the energy spectra. In order to investigate those phenomena in further detail, we started "GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds) collaboration." Our new system, installed at the coastal area of Japan Sea, has been successfully operated since 2006. We observed two intense dose increases, with a duration around 1 minutes, associated with winter thunderclouds. The measurement clearly revealed that the increase is caused by high energy gamma-rays with a hard spectrum extending up to 10 MeV.