

小特集 原子・分子過程によって支配されるプラズマの複雑性と構造形成

4. 大気圏・電離圏における雷・放電現象の構造と素過程

4.2 雷雲 γ 線の生成と粒子加速

土屋晴文, 榎戸輝揚¹⁾

理化学研究所牧島宇宙放射線研究室, ¹⁾東京大学理学系研究科物理学専攻

(原稿受付: 2008年3月20日)

雷活動に伴い突発的で MeV 領域におよぶ放射線バーストが観測されている。これは雷活動の中で粒子が高エネルギーを獲得していることを推測させるが、その正体は、まだ十分には理解されていない。そこで、放射線の正体やその生成過程を明かすため、筆者らは新型の放射線観測装置に光・音・電場測定機能を加えたシステムを開発し、冬季雷が頻発する日本海側の柏崎刈羽原子力発電所構内で、2006年12月より雷活動からの放射線観測を続けている。本稿では、冬の雷雲がその強電場により電子を 10 MeV 以上に加速できる天然の粒子加速器であることを示した筆者らの観測例を中心に論じる。

Keywords:

γ -ray, particle acceleration, runaway electron, bremsstrahlung, thundercloud, lightning discharge

4.2.1 はじめに

近年、雷活動の中で衛星や地上の観測装置により、MeV 領域におよぶ γ 線などの高エネルギー放射線が観測されている。このことから、雷や雷雲が持つ強電場で電子が加速され、大気内において逃走電子が発生している可能性が示唆されている[1]。つまり、Wilson[2]の予言のとおり、雷や雷雲は電場加速器である証拠が集まってきている。しかしながら、その詳細な性能はよく理解されていない。ここで地球から宇宙に目を向けると、宇宙にもさまざまな粒子加速器がある。たとえば、太陽、超新星残骸やブラックホールなどのプラズマと磁場が相互作用している天体である。これらの天体が、いかにして最高で 10^{20} eV に達するエネルギーにまで宇宙線 (90% は陽子) を加速しているのかというテーマは、天文学上の大問題として今も残っており、その解明のため、筆者らも高山や地上の宇宙線観測装置、X線天文衛星などを駆使している。

現在、宇宙線の加速メカニズムとして電場による直接的な粒子加速は、衝撃波による粒子加速ほど論じられていない。それは、宇宙が大局的には電氣的に中性であることに加えて、宇宙観測では電場を測定することが難しいからである。しかし、宇宙の粒子加速器の内部では磁場とプラズマが相互に干渉し、局所的な電場が恒常的あるいは過渡的に発生しているはずである。ゆえに、宇宙の粒子加速器の中で電場が重要な役割を果たしていても不思議ではなく、電場加速を調べることで、宇宙の粒子加速器をより深く理解できるであろう。そこで、地球の雷活動を利用して、電場による粒子加速を詳細に検証する。これは宇宙線の加速

メカニズムの理解につながるだけでなく、いまでも謎が多い雷の発生メカニズムにも新たな知見をもたらすと期待される。

本稿では、雷活動に関わる粒子加速に焦点を当てる。4.2.2節では、雷活動からの放射線バーストが継続時間が極端に違う2種類あることを示す。いまだ両バーストを統一的に説明できる説はない。しかし、Gurevichら[1]が提唱した逃走電子雪崩モデルやそれから派生した説がバーストの発生メカニズムとして盛んに議論されているので、4.2.3節で雷雲での逃走電子雪崩モデルについて簡単に述べる。4.2.4節では、筆者らを含むグループが実際に柏崎刈羽原子力発電所構内で観測した 10 MeV を超える雷雲 γ 線の詳細について述べ、4.2.5節で観測結果を議論をする。最後に、われわれの実験から新たに変わったことを含め雷雲 γ 線観測の今後の展望を述べる。

4.2.2 雷活動に関連する2つのバースト

雷活動に関連するバーストは継続時間の違いで2種類に分類される。ここでは、それらの現象論的側面を紹介する。

(1)短時間バースト

1991年に宇宙からのX線や γ 線を検出するために打ち上げられたNASAのCompton Gamma Ray Observatory衛星に搭載されていたBurst And Transient Source Experiment (BATSE)が、地球の大気上層からミリ秒ほど継続し数百keVを超えるX線バーストを発見した[3]。さらに、2002年に打ち上げられた太陽観測衛星Reaven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)も、BATSEと同様

4. Structures and Dynamics of Lightning Discharges in Atmosphere and Ionosphere

4.2 High-Energy γ -Rays Associated with Particle Acceleration in Thunderclouds

TSUCHIYA Harufumi and ENOTO Teruaki

authors' e-mail: harufumi@crab.riken.jp, enoto@amalthea.phys.s.u-tokyo.ac.jp

に、そうした放射を今までに800例ほど捉えており、その中には10–20 MeVに達する γ 線も含まれる[4]。現在、こうした放射は Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF) と呼ばれている。

TGFが発見された当初より、TGFと雷放電との相関は指摘されていた。たとえば、BATSEが検出した少なくとも2つのTGFと放電から発する数百Hzから数十kHz帯の電波が時間的に同期していた[5]。さらに同様な電波観測により、RHESSIが捉えたTGFの中には正極性の落雷(正電荷が地表に落ちる)と相関しているものがあることが確かめられた[6]。正極性の落雷では、相対的に大気上層からその下にある雷雲に向かい強い電場がかかっていることを考えると、TGFは正極性の落雷に同期して電子が雷雲から大気上層部へと加速され、制動放射で発生させているというシナリオが思い浮かぶ。しかし、本当に正極性の落雷のみでTGFが発生するのかどうかは定かではない。さらに、スプライトやエルプスといった高高度での発光現象とTGFとの関連を示す証拠も皆無である。これらは、たとえば2008年度に日本から打ち上げ予定で、光・電波・ γ 線の同時観測ができるスプライト衛星がその理解を進めるだろう。

TGFに加えて、高山や地上でも雷放電と関連する放射線バーストが発見されている。Mooreら[7]は、ニューメキシコ州の高山で3例の負極性の落雷にともなうミリ秒ほど継続する >1 MeVの放射線バーストを観測した。電場や電流の測定によると、バーストは落雷の直前に雷雲から地上に向かい進展してくる負極性のステップリーダに同期していた。ここで、ステップリーダとは雷雲から伸びてくる電荷の道筋で、典型的に50 mほどの道筋が平均の速さ 10^5 ms $^{-1}$ で次々にできながら地上に向かってくる。そして、ステップリーダが地上へ達すると、雷放電が起こる。この自然の雷放電とは違い、Dwyerらは、導線ワイヤをつないだロケットを雷雲に打ち、人工的に引き起こした雷放電から数多くのX線バーストを観測した[8, 9]。ほとんどのバーストがステップリーダに同期してミリ秒ほど継続しており、Mooreらの結果と一致する。Dwyerらが捉えた光子のエネルギーは典型的には30–250 keVで、まれに10 MeVを超えた[10]。このようなバーストは、強電場が存在するリーダ先端部で電子が制動放射で発したと推測されている。

(2)長時間バースト

短時間バーストとは様相の異なる現象がおもに日本海沿岸で見つかっている。よく知られているように、日本海側は11月から1月の「ぶりおこし」などといわれる厳冬期に雷が頻発する。この冬季雷は、夏の雷に比べて、エネルギーが 10^2 – 10^3 倍ほど高く、正極性の落雷が多く、海拔1–3 kmの低高度で雷雲が発生するなどの特徴を持つ。このような冬季の雷活動にともない日本海側の原子力発電所構内にある放射線監視モニターで、数秒から数分と短時間バーストと比べると、極端に長いバーストが観測されることが鳥居ら[11]や山崎ら[12, 13]によって報告されていた。その最大エネルギーは3–5 MeVに達することから、放射線の正体は短時間バーストと同様に制動放射 γ 線であろうとされて

いたが、明示的な証拠はなかった。また長時間バーストは、短時間バーストのように雷放電の一連のプロセスに同期しないことがある。長時間バーストに関するこれら2つの事実は、それが雷放電のプロセスが作り出す瞬間的で過渡的な電場ではなく、たとえば雷雲がもつ準定常的な電場に相関している可能性を推測させる。

4.2.3 雷雲での逃走電子雪崩モデル

雷活動からのX線や γ 線が、仮にすべて電子の制動放射によるものとする、電子は1 MeV以上のエネルギーに加速されていなければならない。通常、雷放電に関わる温度は 10^3 – 10^4 Kほどで、電子が得る運動エネルギーは数eV程度である。実際に熱的なプロセスで電子に1 MeVを超えるエネルギーを与えるには 10^{10} K以上の温度が必要なので、何らかの非熱的なプロセス、おそらく電場で電子が加速されていると考えるのが自然であろう。そこで電場による加速を考えると、数eVの電子を1 MeV以上に加速するには、電場は1気圧での空気の絶縁破壊強度である 2 MVm $^{-1}$ ほどに達していなければならない。しかし、バルーンや航空機で測定された雷雲内の電場強度は典型的には50–100 kVm $^{-1}$ で、時に200–400 kVm $^{-1}$ になる程度である[14–16]。驚くことに、そのような状況でも雷が起こっていることが確かめられている。そこでX線の起源の解明はもちろん、絶縁破壊が雷を引き起こすという従来の概念との矛盾を解くために、Gurevichらは相対論的逃走電子雪崩(Relativistic Runaway Electron Avalanche: RREA)モデルを考案した[1]。

RREAモデルでは、電場の存在、電子雪崩を引き起こす最初の種電子とその雪崩が発達するためのある程度の距離が重要になる。ここでは、前者の2つを中心に話す。電場の重要性を示すのが図1である。この図から、電場がない状況では電子は低エネルギーになるほど電離損失で急速にエネルギーを失うことがわかる。また E_{th} (図1の水平な破線)以下の電場では、エネルギー損失に打ち勝つことができない。ここで、 E_{th} は電離損失と制動放射で電子が失うエネルギーをちょうど補える強さの電場で、1気圧の大気中ではおよそ200 kVm $^{-1}$ である。詳細なモンテカルロシミュレーションの結果[17]によると、実際に1気圧の大気中で逃走電子が発生する電場の大きさは E_{th} よりも高く、およそ280 kVm $^{-1}$ となる。これは、電子は電離損失や制動放射だけでなく、大気中の原子や分子を励起したり、原子核や電子と弾性散乱することでもエネルギーを失うからである。電離損失や制動放射を含めこれらのエネルギー損失過程は大気密度に比例するので、逃走電子発生の電場強度 E_c は、高度 z kmを用いて

$$E_c = 280 \times \exp(-z/8.4) \text{ kVm}^{-1} \quad (1)$$

となる。ここで、8.4 kmは大気密度のスケールハイトである。

次にRREAモデルでは、高いエネルギーの種電子の存在が不可欠である。種電子となるしきい値エネルギー K_{th} は、電子の電離損失を表すベータの式[18]と電場による外力が

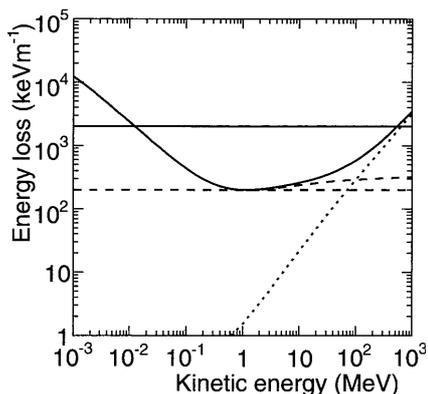


図1 1気圧の大気中における電子のエネルギー損失。実線のカーブは、電離損失と制動放射による損失を合わせたものを示す。破線と点線のカーブは、それぞれ電離損失と制動放射による損失である。実線の水平線は1気圧の空気の絶縁破壊電場に対応し、破線のそれは電離損失と制動放射による損失が、電場が供給するエネルギーに等しくなるところに対応する。

釣り合うとして求め、近似解は

$$K_{th} \sim 0.5m_e c^2 \times E/E_c \quad (2)$$

となる。ここで、 $m_e c^2$ は電子の質量、E は電場を示す。たとえば、 300 kV/m の電場では (図1 の 300 keV/m に対応)、およそ 270 keV となる。Gurevichらは、この逃走電子の種は大気中の2次宇宙線が電離損失で作る電子と考えた。この仮説が本当に正しいのかどうかは定かではない。この他にも、大気中のラドン崩壊に由来する電子が種となる可能性も議論されている。いずれにせよ、従来の絶縁破壊をもとにする考えでは観測されたX線の起源をうまく説明できないが、RREAモデルでは、現実的な電場でその起

源を説明できる。ただし、このモデルでは逃走電子は確かに発生するが、雷放電を引き起こすほどの逃走電子は生成されず、電荷の不安定性を生み出せないと指摘されている [17, 19]。

上記のRREAモデルの欠点を補ったモデルがDwyer [20, 21]によって提唱されている。これは、おもにコンプトン散乱で雪崩の発展とは反対向きに散乱されたX線や、電子対生成を通じて生成され電子とは逆向きに加速される陽電子が雪崩開始領域にさらなる電子を供給する、いわばフィードバック機構が働くとするモデルである。このフィードバック機構の結果、 km^3 のオーダの領域内にわたり電子雪崩が継続的に発生し、最終的な逃走電子の数は最初の雪崩発生から μ 秒オーダで、RREAモデルで予想される数よりも $10^9 - 10^{13}$ 倍も大きくなる [21]。ただし、このモデルでも最初の雪崩のトリガーとして、2次宇宙線やラドン崩壊による高エネルギー電子を仮定している。

4.2.4 雷雲γ線の観測

(1) 実験概要

筆者らを含むグループ“Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds (GROWTH)”は、従来の原子力発電所がもつ監視モニタに比べ放射線への感度が高く、荷電粒子と光子との判別、放射線の到来方向の推定や広いエネルギー領域の測定ができる新型の装置を開発した。そして、それに周囲の光・音・電場も同時に測る機能も加えて、柏崎刈羽原子力発電所構内で2006年末より観測を続けている。ここでも、雷活動に相関する放射線が実際に捉えられていたことが選択の理由である。

われわれのシステムは独立で相補的な2つの装置で構成され、原発内の建物の屋上に互いに10mほど離して置かれ

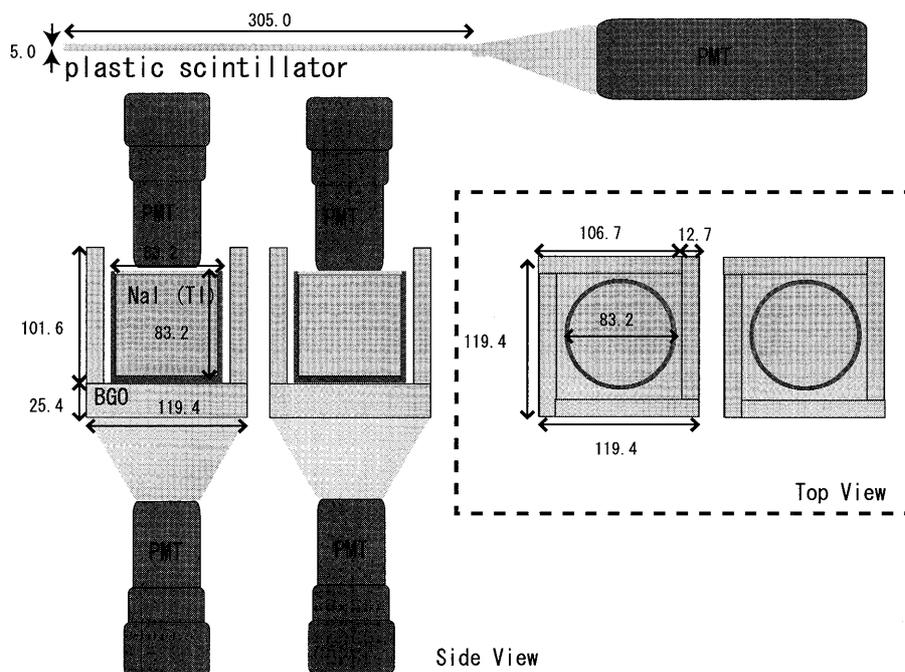


図2 Detector-Aの概観図。図中の数字は、すべてmm単位。PMTは、光電子増倍管を示す。

¹<http://ceres.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~enoto/researches/thunder/thunder.html>

ている。一方の装置 (Detector-A と呼ぶ) は直径と高さがともに 7.6 cm の 2 台の NaI シンチレーション検出器を放射線モニタとして用い、40 keV から 3 MeV のエネルギー範囲をカバーしている²。Detector-A の概観図を 図 2 に示す。Detector-A の詳細な性能は、実際にこの検出器を中心になって製作した榎戸輝揚氏の修士論文を参考にしてもらいたい[22]。ここでは重要なポイントのみ説明する。NaI の周囲を囲む井戸型の BGO シンチレータは、環境放射線や 2 次宇宙線を徹底的に除去するシールドである。また、これにより NaI に入射した放射線が上方から来たのかどうかを判断できる。さらに、上部にあるプラスチックシンチレータは、上方からの放射線が荷電粒子か光子かを判別する。ゆえに Detector-A は上方向からの光子に優れた感度をもつ指向性型検出器である。もう一方の装置 (Detector-B と呼ぶ) は全方向を観測し、より高いエネルギーの放射まで観測する。Detector-B には直径 7.6 cm の球形の NaI と CsI シンチレーション検出器が放射線モニタとして備えられ、NaI が 40 keV - 10 MeV を、CsI が 300 keV - 80 MeV をカバーする。

2008年3月までの観測で、10 MeV を超える γ 線バーストが 2007年1月7日の早朝と 2007年12月14日の深夜に観測された。その継続時間は、前者が 40 秒、後者が 70 秒ほどであり、どちらも長時間バーストに属する。さらに、光や電場の同時観測から、どちらの γ 線も雷放電にはまったく同期していないことがわかった。本稿では、すでに速報されている 2007年1月7日の現象[23, 24]を紹介する。

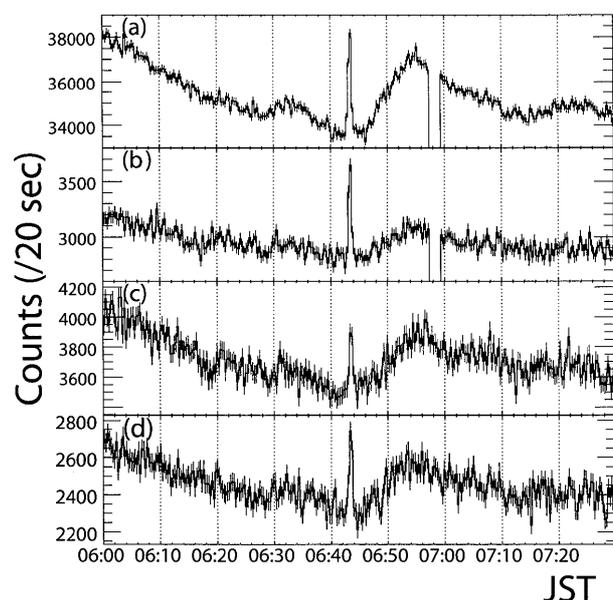


図 3 両システムの 4 つの無機シンチレータ検出器の 20 秒値カウント。横軸は日本時間。すべてのビンには 1σ の統計エラーがついている。(a) と (b) は、それぞれ Detector-A の BGO と NaI シンチレーション検出器の >40 keV のカウント。(c) と (d) は、それぞれ Detector-B の NaI の >40 keV と CsI の >300 keV のカウント。

(2) 2007年1月7日のイベント

2007年1月7日の未明より、日本の上空では非常に強い冬型の低気圧が発達していた。そのため日本海側の広い範囲で雷雲が発達しており、新潟沖を含め日本海側でエルブスなどの発光現象が観測されていた³。この日にわれわれの放射線検出器で得られた時間変動を 図 3 に示す。一見してわかる大きな変動は、降雨により地上付近のラドン濃度が増えたためである。この時間的に緩やかな変化とは明らかに振る舞いの違う信号が、日本時間 6 時 43 分ごろに観測された。

図 4 に放射線の変動と一緒に光と電場の変動も示す。両システムの 4 つの無機シンチレータ検出器の >3 MeV のエネルギー領域で、6 時 43 分 9 秒から 6 時 43 分 45 秒の 36 秒間に顕著なカウントの上昇を検出した (図 4 (a) と (b))。バックグラウンドを差し引いた信号は、Detector-A の 2 台の NaI 検出器で合わせて 129 ± 17 発、Detector-B の NaI と CsI の両検出器では 128 ± 13 発だった。Detector-A の BGO シールドを利用し、Detector-A で上方からの放射線のみを捉えたデータでも、統計的に有為な信号を観測した (図 4 (a) のグレーの線)。これはバーストが地面や横方向からではなく、BGO シールドに遮られない上方から来た証拠である。

Detector-A のプラスチックシンチレータで、バースト期間に顕著な上昇は見られない (図 4 (c))。この薄型プラスチックシンチレータは 1 MeV 以上の荷電粒子をほぼ

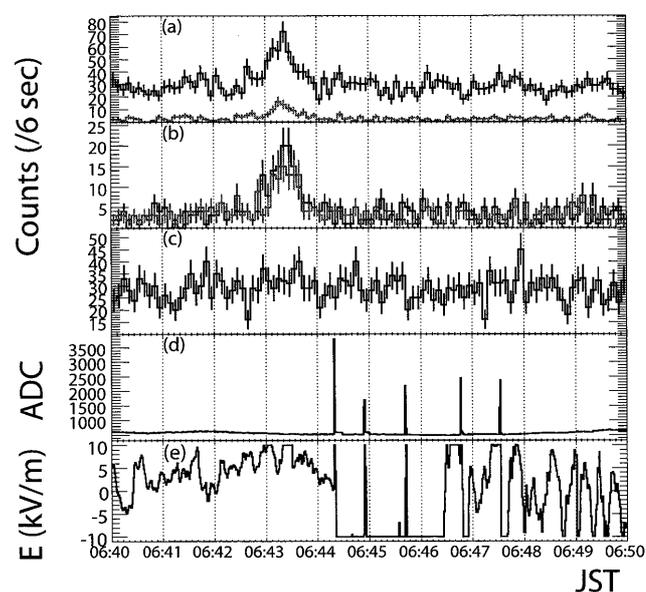


図 4 2007年1月7日 6 時 40 分から 6 時 50 分間の放射線検出器と環境モニタの時間変動。横軸は日本時間。(a) - (c) のパネルは 6 秒値のカウントで、各ビンには 1σ の統計エラーがついている。(a) Detector-A の 2 台の NaI 検出器を足し合わせた >3 MeV のカウント。黒線とグレー線は、それぞれ BGO とプラスチックシンチレータをシールドとして利用しないもの (黒) と利用したもの (グレー)。(b) Detector-B の NaI (黒) および CsI (グレー) 検出器の 3 - 10 MeV のカウント。(c) Detector-A の薄板状のプラスチックシンチレータの >1 MeV のカウント。(d) と (e) はそれぞれ光観測装置と電場観測装置の 1 秒値毎の出力。

²2007年10月より 10 MeV まで測定できる。

³<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=1277>

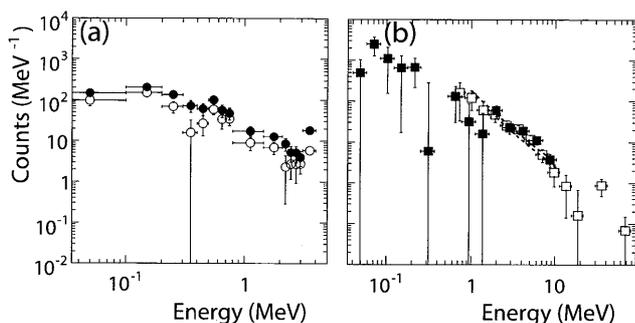


図5 バースト期間に両システムで得られた光子スペクトラム。両方も横軸は光子のエネルギーで、縦軸はカウント。各ビンのエラーは統計的な 1σ 。(a) Detector-AのNaIで得られたスペクトラム。黒および白丸は、それぞれBGOをシールドとして利用していないものとしたもの。(b) Detector-BのNaI(黒四角)とCsI(白四角)のスペクトラム。破線はベストフィットのモデルから予想されるライン。

100%で検出できる一方で、光子にはほとんど反応しない。ゆえにバーストは荷電粒子ではなく、おもに光子であることを示す。また信号の継続時間が40秒と長いこととプラスチックシンチレータはバースト期間を含めどの時間でも安定に動作していることから、バーストは電気的ノイズではない。

バースト開始から70秒後の6時44分18秒に光観測装置の出力が急激に上昇し、1秒以内にもとのレベルに戻っている(図4(d))。電場計の出力もバースト前には数 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ であったのが、光に同期して、 $>+10\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ から $<-10\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ へ変化している(図4(e))。電場が $\pm 10\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ で振り切れているのは、当時はその範囲のみ測定可能だったからである⁴。このような光や電場の急変は、雷放電に起因するものである。同様な考察で、その後も4回、雷放電が起こっている(図4(d)と(e))。これより、観測されたバーストは、それらの雷放電ではなく雷雲に付随する現象と認識できる。

バースト期間の36秒間に得られたスペクトラムからバックグラウンドを差し引いた光子スペクトラムを図5に示す。バックグラウンドは、バースト期間の前後10分のデータから見積もった。両システムで、 $>1\text{ MeV}$ の光子が顕著に観測されているのがわかる。Detector-Aは $>3\text{ MeV}$ はオーバーフローとして取り扱うので、スペクトラムの最終ビンに信号が集まっている(図5(a))。Detector-Bのスペクトラム(図5(b))を見ると、 10 MeV を超えて 15 MeV から 20 MeV 近くまで伸びている。Detector-Bを用いられわれの検出器の上に飛来した光子スペクトラムをベキ関数 $\alpha \times E^\beta$ ($\text{MeV}^{-1}\text{ m}^{-2}$)と仮定して、求めた。具体的には、仮定したベキ型のスペクトラムに検出器の光子に対する応答関数を畳み込んで、それを図5(b)のスペクトラムと比較し、 α と β の最適値を探した。その際には、NaIとCsI検出器に共通するエネルギー範囲の $600\text{ keV}-10\text{ MeV}$ のデータのみを使用した。その結果、 $\alpha = (2.0 \pm 0.4) \times 10^4\text{ MeV}^{-1}\text{ m}^{-2}$ 、 $\beta = -1.7 \pm 0.1$ となった。

⁴今は、 $\pm 100\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ まで測ることができる。

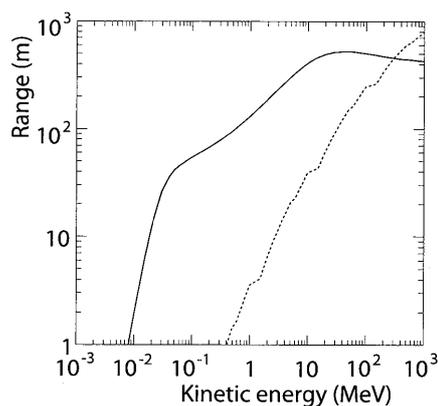


図6 1気圧の大気中の光子の減衰長(実線)と電子の飛程(破線)。光子の減衰長は、光電吸収、コンプトン散乱および電子対生成の質量吸収係数より得られ、電子の飛程は、図1で示される電離損失と制動放射による損失を元に計算。

4.2.5 議論

われわれは、2007年1月7日の早朝に雷放電の70秒前より、40秒間にわたり雷雲から 10 MeV を超える γ 線を観測することに成功した。このイベントは、われわれの装置だけでなく、柏崎刈羽原子力発電所構内の放射線監視モニターや周辺の新潟県放射線監視センターのいくつかの基地局でも観測されていた。さらには、 300 km ほど離れた福井県敦賀のもんじゅの監視モニターでも、違う時刻に高エネルギー γ 線が観測されており[25]、バーストの生成に関わる気候条件や雷雲の様子などを特定するために興味深い。

今回のバーストは、光子であった。長時間バーストに限れば、バーストが光子かどうか今までははっきりしていなかった。もちろん、そうでない現象もあるかもしれない。今回の観測では、プラスチックシンチレータがバースト時間の36秒間に統計的に有意な変動していないことが決め手となった。観測に加えて、バーストが光子であることを補完するため、図6を示す。この図から、 MeV 領域の光子は大気中を数百 m 、電子では数十 m 程度進めることがわかる。われわれの観測のみでは、発生源までの距離は決められない。だが、日本海側の冬の雷雲が夏の雷雲に比べて低高度で発達するといえども、発生源が装置から数十 m しか離れていないとは、極めて考えにくい。おそらく、発生源は数百 m から 1 km は離れていたであろう。このことから、今回のバーストが電子である可能性は低いと言わざるを得ない。

バーストが光子であるならば、それは制動放射で生成されたと考えるのが自然である。他の光子生成プロセスとして、たとえば電子と地球磁場(およそ 500 mG)との相互作用によるシンクロトロン放射や高エネルギー電子が 1 eV オーダの可視光と衝突して、光子にエネルギーを与える逆コンプトン散乱が考えられる。だが、どちらのプロセスも地球内で 10 MeV 以上の光子を生成するには、電子は数 GeV から 1 TeV という非常に高いエネルギーを持たなければならない。仮に雷雲中の電場強度が $300\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ とすると、電子を数 GeV まで加速させるには、電子は 10 km も走

らなければならない。それほどの準定常的な電場領域が雷雲中にあるのかどうかは実際定かではない。また、そもそも大気中では電子はそのエネルギーが 80 MeV を超えると、制動放射で急激にエネルギーを失う(図 1 参照)。制動放射によるエネルギー損失に打ち勝ち、電子を GeV 領域にまで加速するには、電場の大きさは空気の絶縁破壊強度以上に達しなければならず現実的ではない(図 1 参照)。

観測された光子は制動放射で生成されたとすれば、電子のエネルギーは少なくとも 10–20 MeV ほどである。このような相対論的電子の場合、相対論的ビーミング効果により、制動放射 γ 線は電子の進行方向前方の非常に狭い円錐の中に集中する。その円錐の開き角 θ は、電子のローレンツ因子 Γ を用いて $\theta \sim 1/\Gamma$ で、たとえば 10 MeV の電子では 3 度である。これを踏まえて、バーストのモデリングを試みる。一般に、冬の雷雲は鉛直方向の上方からプラス・マイナス・プラスの層の三極構造を持つことがある[26]。こうした雷雲の中を、たとえば宇宙線が通過し電離損失により電子を作り出す。あるいはラドン崩壊の電子でもよい。いずれにせよ、4.2.3 章で示したとおり、作られた電子で 300 keV を超えるものは、電場で地上(上空)方向へ加速され逃走電子となりその数を増やす。そして相対論的エネルギーの電子はビーミング効果により、円錐状の γ 線ビームを地上(上空)にはなす。そのため、 γ 線は地上(上空)の限られた狭い領域のみを照らす。ここで、雷雲は平均時速 10–50 km で移動するので、雷雲とともに γ 線ビームも移動する。まさに γ 線のサーチライトである。この γ 線ビームがわれわれの装置の上を通過したか、あるいははしをかすめたので、バーストが検出されたと考えられる。

考案したバーストモデルを元にバーストに寄与した電子の数とエネルギーを概算できる。検出器上での光子のスペクトラム $F_p(E_p) = 2.0 \times 10^4 E_p^{-1.7}$ (MeV $^{-1}$ m $^{-2}$) なので、1–10 MeV の光子の数 n_p は、 2.4×10^4 m $^{-2}$ となる。発生源での光子の数 N_p は、 n_p 、発生源までの距離 d と大気での減衰率 ϵ を用いて $N_p \sim n_p d^2 \epsilon \Delta\Omega$ となる。ここで、 $\Delta\Omega$ は γ 線ビームが作る円錐の立体角で、10 MeV の電子が作る円錐の立体角 8.6×10^{-3} を用いる。距離 d としては、300, 600, 1000 m を考え、 ϵ は 3 MeV の光子に対してそれぞれの距離で、0.3, 0.08, 0.01 となる。これらから $N_p \sim 10^8 (d/300\text{m})^2 (0.3/\epsilon)$ と見積もられる。これより、放射に寄与した 10 MeV 電子の数 N_e は、その電子が 3 MeV の光子を制動放射で生成する確率 η を用いて、

$$N_e = N_p/\eta \sim 10^{10} (d/300\text{m})^2 (0.3/\epsilon) \quad (3)$$

となる。ここで、電子は 50 m 走ると仮定し、 $\eta \sim 0.01$ となる[27]。したがって、電子の全エネルギーは

$$E_e = N_e \times 10 \text{ MeV} \sim 10^{-2} (d/300\text{m})^2 (0.3/\epsilon) \text{ J} \quad (4)$$

と見積もることができる。 E_e は、1 発の雷放電で消費されるエネルギー 10^7 – 10^9 J に比べると非常に小さく、エネルギー的にはこのモデルは実現可能であろう。ただし、ここではさまざまな仮定を導入して N_e や E_e を求めたので、かなりの不定性が概算値に含まれているだろう。したがっ

て、今後、概算値が桁で上下に変化する可能性はある。

4.2.6 まとめ

筆者らは、およそ 2 年間の日本海側での冬季雷活動からの放射線観測により、冬の雷雲が、少なくとも数十秒にわたり電子を 10–20 MeV のエネルギーに加速させることができる天然の粒子加速器であることを明らかにした。そして、相対論的電子のビーミング効果により雷雲からの γ 線は、地上の狭い領域を照らしながら雷雲とともに移動しているというモデルを考案した。このモデルから、バーストが非常に局所的なものと予想される。実際に、これまでの観測で原子力発電所構内の多地点にある放射線監視モニターでは放射線の上昇が見られたにもかかわらず、1 地点に置かれているわれわれの装置ではまったく上昇が見られないことがあった。今後、発電所構内かその周辺に複数台の装置を設置すれば、われわれのモデルが正しいかどうか判断できるだろう。

雷活動に相関した非熱的な放射が短時間バーストと長時間バーストに分類されることは、もはや疑いない。短時間バーストに関しては、アメリカを中心とするグループが観測的にも理論的にも精力的に取り組んでおり、理解が進んでいる。一方で、おもに日本海側の冬季に観測される長時間バーストに関しては、観測面でも理論面でもまだやるべきことが多い。今後は、放射のトリガーに関する問題と長時間バーストの原因と考えられる逃走電子がいかにして数十秒も生成されつづけるのかというトリガー後の素過程に関する問題を、われわれの地上での雷雲 γ 線の観測を含む多波長の同時観測で明らかにしていかなければならない。

最後に、GROWTH 実験は、牧島一夫東大教授(兼務理研主任研究員)を始め、山田真也、湯浅孝行、北口貴雄(以上東大理)、川原田円、岡野真治、加藤博(以上理研)、国分紀秀(JAXA/ISAS)、中村聡史(東京理大理)らとともに進められています。さらに柏崎羽羽原子力発電所放射線安全グループの協力もいただいております。ここに深く感謝いたします。また、自発的進化系研究という課題名で理化学研究所基礎科学研究、科研費基盤(S)No.18104004 および科研費若手(B)No.19740167 などからもサポートを受けております。

参考文献

- [1] A.V. Gurevich, G.M. Milikh and R. Roussel-Dupré, Phys. Lett. A, **165**, 463 (1992).
- [2] C.T.R. Wilson, Proc. Phys. Soc. London **37**, 32 (1925).
- [3] G.J. Fishman, P.N. Bhat, R. Mallozzi, J.M. Horack, T. Kosshut, C. Kouveliotou, G.N. Pendleton, C.A. Meegan, R.B. Wilson, W.S. Paciesas, S.J. Goodman and H.J. Christian, Science **264**, 1313 (1994).
- [4] D.M. Smith, L.I. Lopez, R.P. Lin and C.P. Barrington-Leigh, Science **307**, 1085 (2005).
- [5] U.S. Inan, S.C. Reising, G.J. Fishman and J.M. Horack, Geophys. Res. Lett. **23**, 1017 (1996).
- [6] S.A. Cummer, Y. Zhai, W. Hu, D.M. Smith, L.I. Lopez and M.A. Stanley, Geophys. Res. Lett. **32**, L08811 (2005).

- [7] C.B. Moore, K.B. Eack, G.D. Aulich and W. Rison, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2141 (2001).
- [8] J.R. Dwyer, M.A. Uman, H.K. Rassoul, M. Al-Dayeh, L. Caraway, K.J. Rambo, V. Corbin and B. Wright, *Science* **299**, 694 (2003).
- [9] J.R. Dwyer, H.K. Rassoul, M. Al-Dayeh, L. Caraway, B. Wright, A. Chrest, M.A. Uman, V.A. Rakov, K.J. Rambo, D.M. Jordan, J. Jerauld and C. Smyth, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L05118 (2004).
- [10] J.R. Dwyer, H.K. Rassoul, M. Al-Dayeh, L. Caraway, B. Wright, A. Chrest, M.A. Uman, V.A. Rakov, K.J. Rambo, D.M. Jordan and C. Smyth, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L05119 (2004).
- [11] T. Torii, M. Takeishi and T. Hosono, *J. Geophys. Res.* **107**, 4324 (2002).
- [12] 山崎興樹, 藤巻広司, 大高敏裕, 殿内重政: 新潟県保健環境科学研究所年報, 第17巻, 94 (2002).
- [13] 山崎興樹, 大高敏裕, 藤巻広司, 殿内重政: 新潟県放射線監視センター年報, 第1巻, 29 (2003).
- [14] K.B. Eack, W.H. Beasley, W.D. Rust, T.C. Marshall and M. Stolzenburg, *J. Geophys. Res.* **101**, 29637 (1996).
- [15] T.C. Marshall and M. Stolzenburg, *J. Geophys. Res.* **106**, 4757 (2001).
- [16] M. Stolzenburg, T.C. Marshall, W.D. Rust, E. Bruning, D. R. MacGorman and T. Hamlin, *Geophys. Res. Lett.* **34**, L04804 (2007).
- [17] J.R. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2055 (2003).
- [18] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (second edition) (John Wiley & Sons, Inc., N.Y. 1979) p.48.
- [19] J.R. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L12102 (2004).
- [20] J.R. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L20808 (2005).
- [21] J.R. Dwyer, *Phys. Plasmas* **14**, 042901 (2007).
- [22] 榎戸輝揚: 東京大学修士論文 (2006).
- [23] T. Enoto, H. Tsuchiya, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, S. Nakamura and K. Makishima, *30th Int. Cosmic Ray Conf. in press* (2007).
- [24] H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, S. Nakamura and K. Makishima, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 165002 (2007).
- [25] T. Torii, T. Sugita and Y. Muraki, *Proc. 30th Int. Cosmic Rays. Conf. in press* (2007).
- [26] N. Kitagawa and K. Michimoto, *J. Geophys. Res.* **99**, 10713 (1994).
- [27] B. Rossi, *High-Energy Particle* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1965) p.51.