

2012年度 芝浦工業大学大学院

修 士 論 文

題目：『雷や雷雲からの放射線の観測と解析』

専 攻 理工学研究科（修士課程） 電気電子情報工学専攻

学籍番号 MA11025

ふりがな いわた けんいち

氏 名 岩田 憲一

指導教員 久保田 あや

目 次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	雷からの放射線観測実験と本研究の目的	2
2.1	雷からの X 線/ γ 線の検出	2
2.2	雷や雷雲活動に伴う粒子加速	4
2.2.1	雷雲の発生メカニズム	4
2.2.2	雷の発生メカニズムと短時間バースト	5
2.3	GROWTH 実験	6
2.3.1	実験の目的	6
2.3.2	過去の実験結果と長時間バースト	6
2.4	雷雲中での粒子加速 Runaway electron モデル	9
2.5	冬季雷の特徴と観測事例	9
2.6	雷雲上空の発光現象と Terrestrial Gamma-Ray Flush	12
2.7	本研究の目的	14
第 3 章	柏崎刈羽原子力発電所での放射線観測実験	15
3.1	実験概要	15
3.2	シンチレーション検出器	15
3.3	実験手法	16
3.4	実験結果	16
第 4 章	データ解析について	18
4.1	解析手法	18
4.1.1	使用したソフトウェア	18
4.2	環境放射線	18
4.3	解析結果	18
4.3.1	それぞれのライトカーブ	18
4.3.2	それぞれのスペクトル	27
4.4	2010 年 12 月 30 日のイベント	33
4.4.1	雷との時間的關係	33
4.4.2	放射範囲の時間的移り変わり	35
第 5 章	まとめと考察	37

第1章 はじめに

図 1.1 は宇宙に存在するいくつかの粒子加速現象を整理したものであり、加速と磁場、系のスケールが結びつけられている。この vBL の積の形はあたかも誘導電場の式のようなものであるが、これまで電場による直接の粒子加速現象は自然界ではほとんど見つかっていない。それは電気的中性を保つために電場が遮蔽されてしまい、宇宙では局所的に強い電場が存在する事しか許されないためである。このため宇宙の粒子加速において電場が観測的に重要になる系は、太陽フレアや衝撃波面内の大振幅電場などに限られ、遠方の天体からの電場の効果を見いだす事は簡単ではない。

この観点において雷や雷雲中での粒子加速は、地上で比較的容易に観測できる希有な電場加速の実験場である。雷雲活動による粒子加速の可能性は、1925年に C.T.Wilson が指摘して以来研究が行われている。放射線の計測技術が発達した近年になり、自然雷からの硬 X 線放射の検出に成功し [2]、CGRO 衛星 (Compton Gamma Ray Observatory) に地球からの γ 線バースト現象である TGF (Terrestrial Gamma Ray Flashes) が見つかるなど [3]、急激に面白い展開が進んでいる。

宇宙の観点から見た本研究のキーワードが粒子加速であるのに対して、地球的な視点で見ると、地球上で毎秒 100 回生じていながら、実は未だによくわかっていない落雷のメカニズムに迫るといえる。例えば、空気中で絶縁破壊を起こす事のできる電場強度は 3 MV/m であるのに対し、実際に雷雲内で観測される電場強度は 0.2 MV/m でしかない。これは空気の密度が薄い事によって絶縁破壊強度が低下することを差し引いても明らかに小さい。このことと、雷からの X 線や γ 線が観測されているという事実から、雷雲中の強い電場により電子がなだれ的に発生するというモデルが活発に議論されている。また、落雷の際に階段状に伸びるリーダ (ステップトリダ) とよばれる導電路の形成過程も具体的な仕組みは謎のままである。

このような展開の中で、90 年代に入って雷雲上空で発生するスプライトやエルブスといった高高度での発光現象の研究が進み、アメリカではロケットを用いて人工的に雷を誘発して、そこからの γ 線のスペクトルを調べる試みが行われている [4]。一方、日本では日本海側でよく見られる冬季雷の X 線や γ 線による観測が行われている。冬季雷は他にノルウェー東海岸と五大湖周辺という世界で 3 カ所でしか見られない稀な現象ということと相まってデータの蓄積量が少なく、未だに解明されていない点が多く存在する面白いテーマである。

本論文では 2009 年以降に得られたデータを中心とした解析、及び解析結果からの考察について述べる。

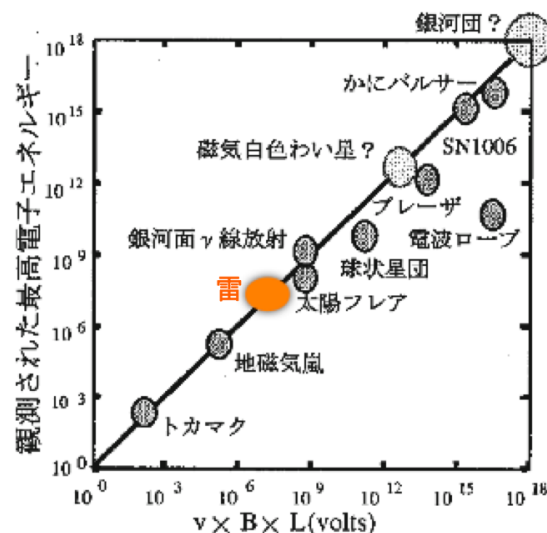


図 1.1: 宇宙における粒子加速を誘導電場と電子の最高エネルギーで見た図 [1]

第2章 雷からの放射線観測実験と本研究の目的

2.1 雷からの X 線/ γ 線の検出

低速の電子が関与する通常の放電では紫外線までしか放射されないが、逃走電子による絶縁破壊野場合は電子が相対論的エネルギーまで加速されるので、制動放射 X 線が放射される。そこで、落雷からの X 線を観測しようという試みが長らく行われてきた。しかし、100keV ほどの X 線の大气中での飛程は数百 m 以内でしかない上に、時間的にごく短い現象であり、雷雲という電氣的ノイズの多い観測環境も影響して検出は難しかった。

1980 年代に Parks, McCarthy らのチームが航空機に検出器を搭載することで雷雲内での観測に成功した。そのときの結果を図 2.1 に示す。X 線の発生源は特定できていないものの、電場との関連性が示唆された。

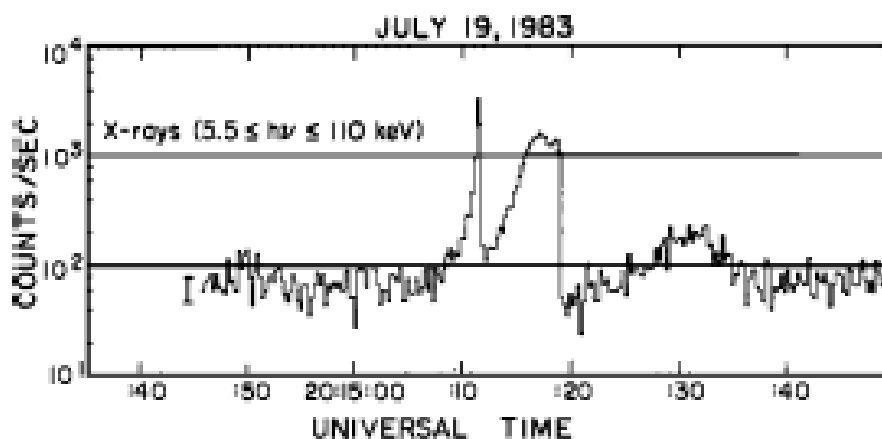


図 2.1: 航空機による雷雲内での直接観測 [6]

さらに、Eack らは NaI シンチレータと電場強度計を搭載した気球を雷雲に向けて飛ばし、1 MeV 電子の高度 4 km での粒子加速が起きる breakdown 電圧 100 kV/m を超える高電界領域において、30-120 keV のエネルギーで 1-2 桁低い線量の増大が見られる事を発見した。X 線強度の上昇は 1 分ほどで雷放電より前に出現し、放電とともに低下しており、シンチレータをつけない光電子増倍管のみのノイズ弁別用システムでは線量の増大は見られていない。

雷雲内の大規模電場ではなく落雷と X 線との直接関係が見つかったのは、Morre らによる高い山の山頂での NaI シンチレータを用いた観測 [7] からである。NaI シンチレータを山頂においたところ、極めて至近の 34、44m 離れた地点への落雷時に、図 2.2 に示すような 15 keV-2 MeV のエネルギーを持つ X 線と、200 keV 以上のエネルギーを持つ電子の到来を確認した。これらはステップトリグダと同期しており、リターンストロークとともに消えるという結果であった。

これらの観測結果の他にも、北コーカサスの Carpet air shower array において、2002 年夏から初秋にかけて地上付近の電場が 2 kV/m となる雷雲活動時に、落雷直前での二次宇宙線の増大が

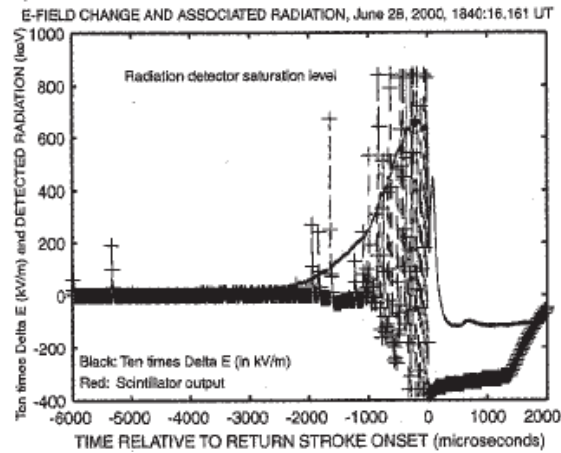


図 2.2: 高山の山頂での自然雷からの放射線観測事例 [7]

観測されている。

このような研究の進展の中で、アメリカではロケット誘雷を利用して X 線や γ 線を計測する試みが行われている (図 2.3)。



図 2.3: フロリダでのロケット誘雷実験 [8]

フロリダの国際雷研究試験センター上空に雷雲が発生し、地上での電場強度が数千 V/m に達すると、一方を地面につないだアラミド繊維皮膜導線が取り付けられた長さ 1 m のロケットを発射する。ロケットが高度 700 m に達するとロケット先端の電場が強まり、上に向かってリーダが進展する。ここでは、自然雷におけるステップトリーダの役割をロケットと導線が果たしていることになる。高温の導線が蒸発した後、ダートリーダが自然雷と同様に導線をたどって発生する。ダートリーダから図 2.4 にあるように X 線が検出されている。X 線はステップトリーダの場合にはリターンストロークの 1 msec ほど前、ダートリーダの場合には数 10 μ sec 後に終わる。X 線は 1 μ sec 以下の継続時間で極めて強いバーストとして到来し、ステップトリーダのステップと同期した X 線バーストであると考えられている。

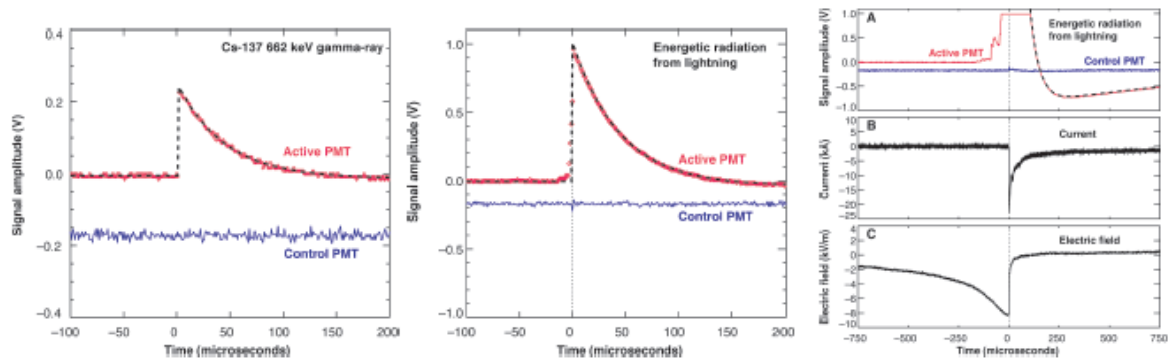


図 2.4: フロリダでのロケット誘雷実験での X 線検出の例 [8]

2.2 雷や雷雲活動に伴う粒子加速

2.2.1 雷雲の発生メカニズム

本節では雷雲の発生メカニズムを文献 [5]、[10] に基づき簡単に説明する。

図 2.5 に成熟期の雷雲の電荷分布を模式的に示した。この図のように雷雲の電荷分布は一般的に三極構造となり、雷雲の上部が正、中部から下部にかけてが負、そして融解層 (0°C 層) 直下の小領域が正に帯電する。雲中でこのような三極構造を取る理由は長年にわたって論争が続いており、さまざまな機構が提案されてきた。この中で有力とされている「着氷電離分離機構 [12]」は、 0°C 以下に過冷却された水滴中であられと氷晶が衝突する際に電荷が分離する事に注目した仮説である。 -10°C 以下の低温雲中で過冷却水滴が豊富な場合には、あられは負に帯電し氷晶は正に帯電する。正に帯電した氷晶は小さく軽いため上昇気流によって上部へ運ばれ、一方で負に帯電したあられは重力により雲の中を落下していくので、雲の上部は正に帯電し中部から下部にかけて負に帯電する。雲の中でより地表に近く温度が -10°C より高い場合には帯電が逆転し、あられは正に氷晶は負に帯電するため、融解層直下に小さな正領域が形成される。

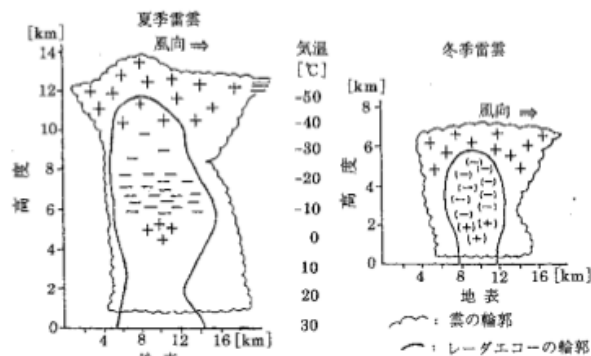


図 2.5: 気温を共通の縦軸とした時の夏と冬の雷雲の構造 [11]

2.2.2 雷の発生メカニズムと短時間バースト

従来、雷とは雷雲と地面との間で電界が強まり、大気の絶縁を破壊する事で発生すると考えられていた。ところが、大気の絶縁を破壊するような強さの電界はほとんど観測されていない。また絶縁を破壊するほどの電界に達しなくても雷が起ることがたびたび報告されていた。このことを説明する仮説が2つ提唱されている。一つは高電界は実際に存在しているが局所的であるため観測に失敗しているという仮説である。もう一つの仮説として、絶縁破壊を引き起こすほどの高電界は存在せず、雷が宇宙線に起因しているという説がある。本研究は二つ目の仮説についての検証を大きな目的の一つとする。

宇宙線は、星が死ぬときに起こる爆発(超新星爆発)やブラックホールから吹き出る宇宙ジェットという現象などにより作られると考えられている。そうした宇宙線は地球に到来し、地球大気中の窒素または酸素と衝突し、多数の高エネルギー粒子を生成する。この2次的な粒子が偶然に雷雲中の空気分子に衝突して別の高エネルギー粒子を弾き出す。こうした電子は、雷雲中の電界によって加速され、ほかの空気分子と衝突しながら、次々と電子を再生産し、電子なだれを誘発する。そうしたなだれ電子も加速され、雷雲の中を走り抜ける間に制動放射によって γ 線を放射しながら地表へ向かっていき、地表へ到達すると電子が通った道を遡るように大電流が流れる。これが雷である。このときの様子を図 2.6 に、また図 2.7 にこの様子を捉えたときのデータを示した。このとき放出される γ 線は雷と同期した短いピークを示すので短時間バーストと呼ばれている。また、このモデルを逃走電子雪崩モデル [13] と呼び、生成された多数の電子によって落雷が誘発されると考えられている。

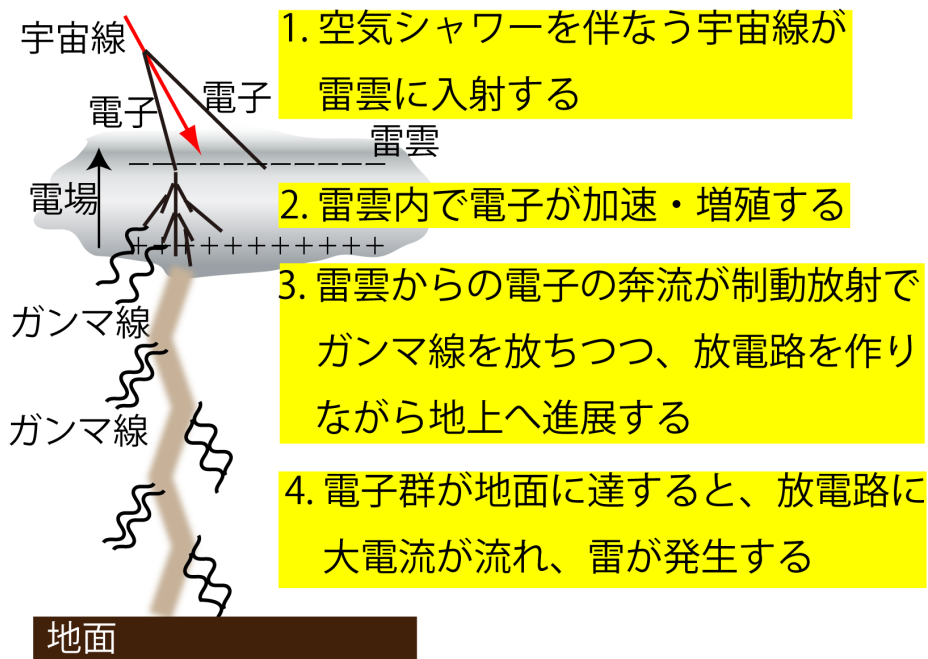


図 2.6: 雷の発生メカニズム

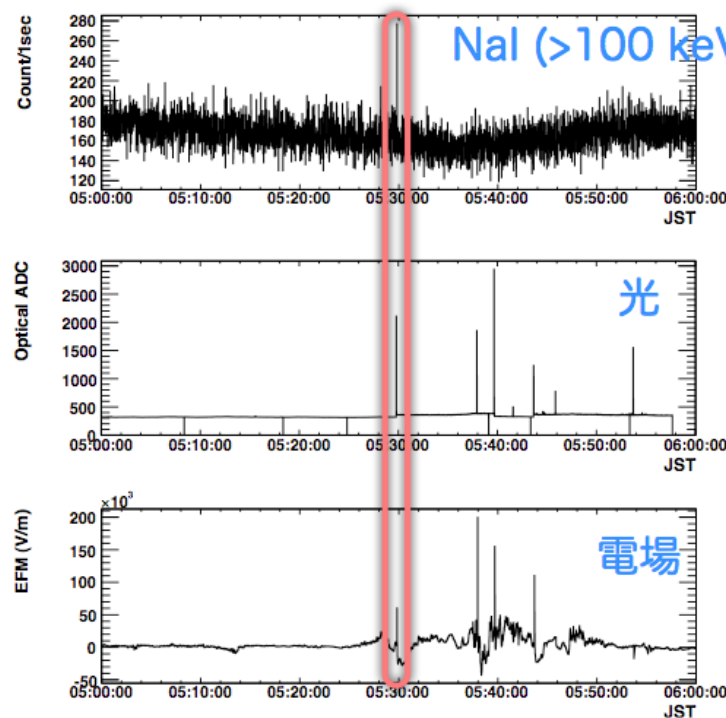


図 2.7: 短時間バーストの様子

2.3 GROWTH 実験

2.3.1 実験の目的

近年、自然雷から X 線や γ 線の検出が報告されていた。この報告は雷雲内の電場によって相対論的なエネルギー領域まで加速された電子が制動放射ではなかったという可能性が指摘されていた。この実例として、冬のある時期に柏崎刈羽原子力発電所周辺に設置された放射線監視モニタ (モニタリングポスト、MP) が雷活動に同期した一時的な放射線量の増大が報告されている。この増大を感知したモニタリングポストは放射線量を監視するために原子力発電所を囲むように 9 台設置されている (§3.3 図 3.2 参照)。しかしこのモニタリングポストは放射線量の監視を目的とするため、時間分解能が 30 秒で、1 秒以下の現象である雷との時間的關係を調べるためには不十分である。そのためこの現象をより詳しく観測するためには、時間分解能が高く詳細に観測できる機器が必要となる。

本実験では冬の日本海沿岸でよく見られる冬季雷を観測する。冬季雷は冬の日本海沿岸以外ではノルウェーの西海岸、北米の五大湖周辺で見られるのみ [15] で、世界的に見ても非常に珍しい現象である。そのため冬季雷からの放射線を詳細に観測した例はないと言えるほどに少ない。これを観測するために理研と東大を中心とした GROWTH (Gamma-ray Observation of Winter Thunderclouds) 実験チームが観測器を製作し、雷や雷雲からの放射線観測実験を開始した。

2.3.2 過去の実験結果と長時間バースト

2007 年 1 月 7 日の早朝に、研究グループはラドンなどの放射性核種の影響による長い時間変化とは明らかに異なる突発的な放射線の増加を観測した [22]。図 2.8 はそのときの検出器の出力で

ある。X線や γ 線検出器では6時43分から40秒程続く顕著な増加があるのに対し、 γ 線/粒子分別機では明らかな増加がないことから、この放射線が電子ではなく γ 線であることを表している。また図2.8上のパネルの観測データは、横や下から来る γ 線をシールドしている検出器の出力なので、 γ 線が上方からきているといえる。さらに光や電界観測装置のデータから、雷が実際に光ったのは、 γ 線の検出から約70秒後で、その後4回雷が発生している。しかし、いずれの雷でもそれらに同期して発生しているような放射線の増加は全く見られなかったため、観測した γ 線は、雷そのものではなく、雷雲に関連したものと研究グループは考えた。これから研究グループは、情報の雷雲からの γ 線が来ていることを初めて明かしただけでなく、 γ 線と周囲の光や電界との詳細な関係も同時に得る事ができた。

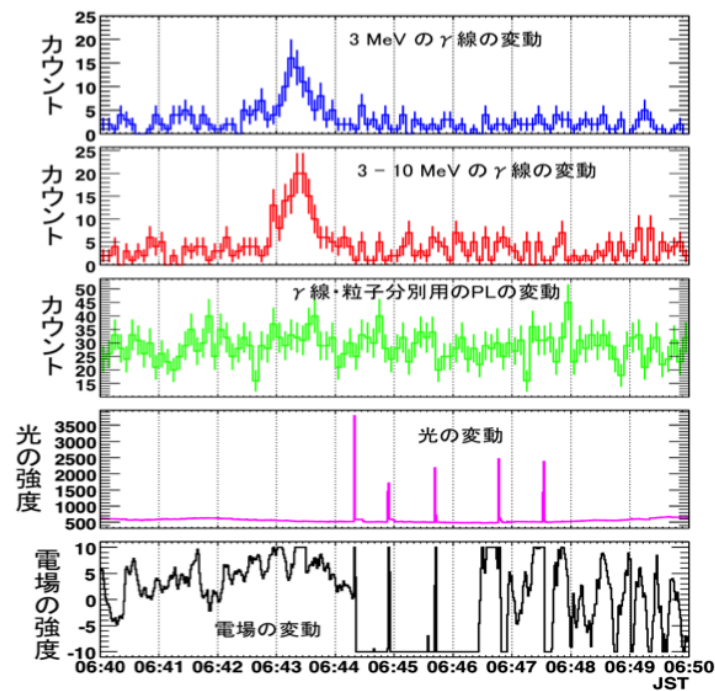


図 2.8: 過去の実験結果 [22] 上から順に (1)40keV から 3MeV の NaI シンチレータの出力時間変化 (2)(1) と同様だが 3MeV から 10MeV (3) プラスチックシンチレータの出力時間変化 (4) 光検出器の出力時間変化 (5) 電場計の出力時間変化

この雷と同期しない長いバーストの事を長時間バーストと呼んでいる。これは図 2.9 のように雷雲に宇宙線が入射し、それが雷雲の電場によって加速された電子が制動放射によって放射線を放出していると推定されている。また短時間バーストとは違い、雷雲が冬の日本海沿岸や夏の山岳部にある場合にしか感知されていない。長時間バーストの観測例はまだ少なく、その詳細をより理解するために、観測例を増やす事が急務となっている。

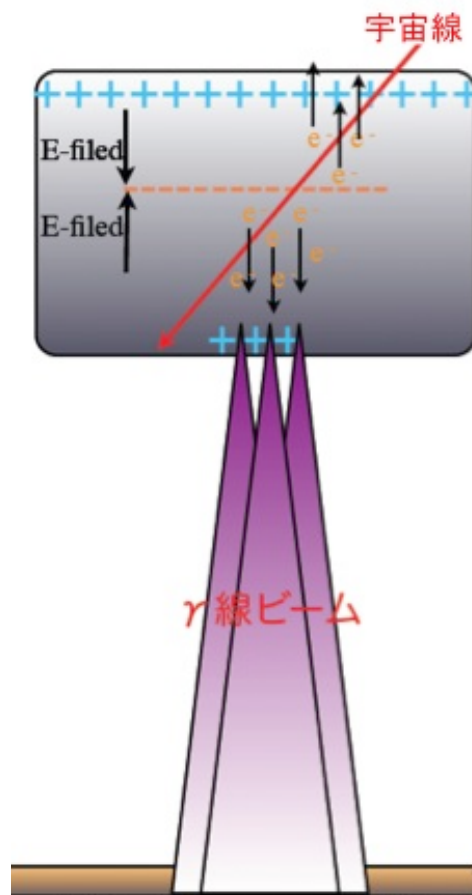


図 2.9: 長時間バースト発生の様子

2.4 雷雲中での粒子加速 Runaway electron モデル

常温常圧の乾燥空気中では、絶縁破壊を起こすために必要な電場の大きさは、平行平板電極の場合に 3×10^6 V/m であり、尖った電極の場合でも 5×10^5 V/m ほどである。これに対して雷雲の中で実際に観測される電場の強さは 2×10^5 V/m を超える事はなく、放電がどのように始まるかには謎が残っていると言える。この問題に対して、1992 年に提案された Gurevich, Milikh らによる「相対論的逃走電子雪崩 (Relativistic Runaway Electron Avalanche) モデル」[13] を用いれば、必要な電場を 1.5×10^5 V/m まで下げることが出来、観測事実と一致する理論を作る事が出来る。このモデルでは宇宙線や原子核崩壊等による高エネルギー粒子と空気分子の衝突によって 10 keV 以上の電子が生じ、これが種となって電子のなだれの増幅が複数回行われるというものである。他のモデルとは事なり、このモデルでは十分な量の逃走電子を生成でき、かつ観測される電場強度で実現できるという点が重要である。

2.5 冬季雷の特徴と観測事例

図 2.10 は日本の夏季および冬季における雷日（雷光や雷鳴が記録された日）の典型的な発生件数を表している。夏季は関東平野などで頻繁に雷が発生しているのに対し、冬季には日本海側においての発生が目立つ。この日本海側の冬季雷は、シベリア寒気団からの冷たい季節風が比較的暖かく湿った日本海の、特に暖流である対馬海流の上を通る際に、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降雪と雷活動を生じさせた結果である。冬季雷は世界的に見てもノルウェー西海岸やアメリカ五大湖から東海岸でしか見られない珍しい現象で、夏季雷と比べていくつかの特徴を持っている。そのひとつは、図 2.11 のように夏季雷雲が 8-16km の高度であるのに対して、冬には 4-6km と低く、厳冬期には 1km 以下となる高度である。もうひとつの特徴は、日本海側ではまれにスーパーボルトと呼ばれる極めて大きなエネルギーをもった雷が発生する事がある。日本海側では落雷の電荷が 100 - 1000 C という観測例が存在しそのエネルギーは中和電荷の二乗に比例するため、エネルギーは 10^4 - 10^6 倍ほどにもなる。

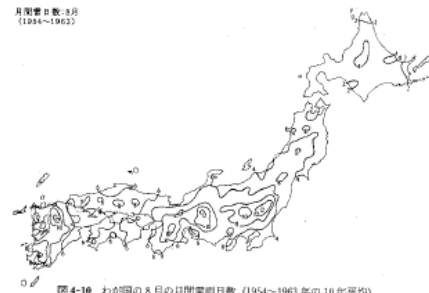


図 2.10: 日本における夏季および冬季の雷発生件数 [5]

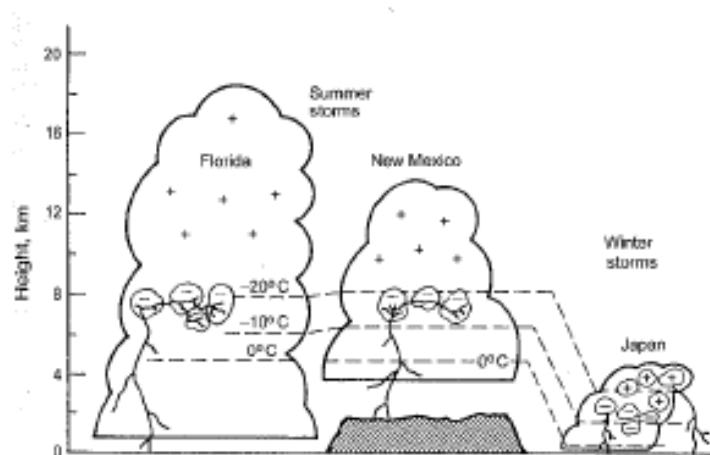


図 2.11: 雷雲の典型的な高度 [14]

冬季雷が発生する日本海側には複数の原子力発電所が設置されており、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、モニタリングポストが設置され定常的に稼働している。これらのモニタリングポストでは、冬季雷雲の活動時に一時的な線量の増大が記録されてきた [16]。例えば、新潟県にある柏崎刈羽原子力発電所の 2 inch x 2 inch NaI シンチレータと 14 リットルアルゴン加圧型電離箱 (IC) の 10 分値変動の結果を図 2.12 に示す。短寿命ラドン崩壊生成物からの緩やかな変動の上に、1 点ピークが見られる事がわかる。打点間隔 30 秒のより詳しい記録では数分でピークに達しているため、数十秒の短い時間での変動であると考えられている。左図の 1 点ピークを含む 1 時間積分のスペクトルから、その前のバックグラウンドと考えられる 1 時間分の積分スペクトルを引いたスペクトルでは、天然放射線各種からの放射が少ない 3-5 MeV での計数の増加が見られるため、雷活動に伴う制動放射 X 線ではないかと考えられている。

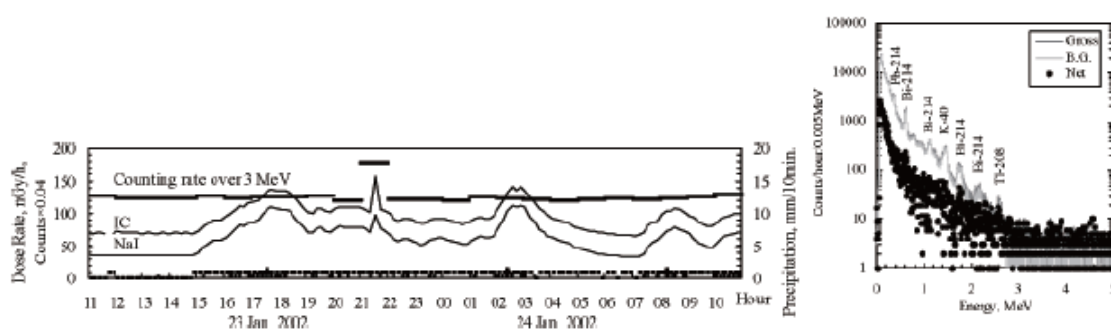


図 2.12: 柏崎刈羽原子力発電所の NaI シンチレータと加圧型電離箱 (IC) における観測例 [16]

このような現象は、福井県の「もんじゅ」原子力発電所でも報告されている [17]。たとえば 1997 年 1 月 29 日の観測例では、構内の 5 基、構外の 1 基の計 6 基の環境モニタリングポストにおいて、NaI 検出器や熱ルミネセンス線量計 (TLD) の指示値上昇が記録された。どちらの検出器も電磁的ノイズを受けにくく、設置場所による上昇開始のズレも見つかっているため、雷雲に由来する可能性が極めて高いことが指摘されている。特に屋上設置の TLDの方が外壁側面の TLDよりも線量が高い値を示しているため、上方からの放射の可能性が大きい。これらを踏まえて、鳥居建男氏は EGS4 および GEANT4 を使ったモンテカルロシミュレーションを用い、雷雲内の 3 極構造の電場構造を仮定して、高エネルギー電子、陽電子、光子を入射させた場合の電子加速と制動放射線の発生を検討した [18]。その結果、電子、陽電子、光子のいずれの場合でも、地表に向けて降下する間に光子と電子が相互作用で平衡状態に達するため、高度 1 km 付近の高い電場領域において光子のフラックスが上昇することを示した。

原子力発電所におけるこのような観測例は、もともとが環境モニタリングの一環として行われた物であるため、時間分解能も 30 秒程度と継続時間を仔細に調べられない場合も多く、また調べられる場合にも小さなバーストが複数回起きたのか、連続的な変動が続いていたのかの判断ができないという点が不十分であった。本論文はこれらをより高い時間分解能で、粒子弁別を行う工夫を施して行った。

2.6 雷雲上空の発光現象と Terrestrial Gamma-Ray Flush

1990年代に入ってから、地上、航空機、スペースシャトルなどの観測によって、スプライトやエルブスといった雷雲上空での発光現象が次々と見つかってきた。加えて、X線天体観測の目的で打ち上げられたX線衛星CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) や太陽観測衛星RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) といったX線衛星が、宇宙線起源ではない極めて短時間のガンマ線のバーストが地球方向へ来ている事を発見し、落雷や雷雲上空の発光現象との関係が議論されている。

図 2.13 にあるような雷雲上空の発光現象は、いずれも雷放電に伴って中間圏、熱圏(電離圏)で起こる現象で、発光色、高度、機構による分類がなされている。雷雲の雲頂から上空に伸びる青く光る細い円錐ビーム状の発光現象はブルージェット (blue jet) と呼ばれ、放電時間は 200-300 msec ほどである。中間圏で高度 90 km ほどまで達する赤く発光する円柱はレッドスプライト (red sprites) で、継続時間が数 msec で発生タイミングが強力な正極性放電と一致すると報告されている。エルブス (elves) は強力な落雷に同期して上部中間圏から下部熱圏で赤いリング状に広がる現象である。このような雷雲上空の放電発光メカニズムは議論されているところではあるが、落雷の際に強力な電磁パルスが上方に伝搬し、電離圏下部で反射された際の電場によって加速された電子が大気の絶縁破壊を引き起こすという仮説や、地上の落雷時に見られるような強い電場で電子加速と絶縁破壊を伴う先端部 (ストリーマ) が同時に複数形成されている可能性などが指摘されている。

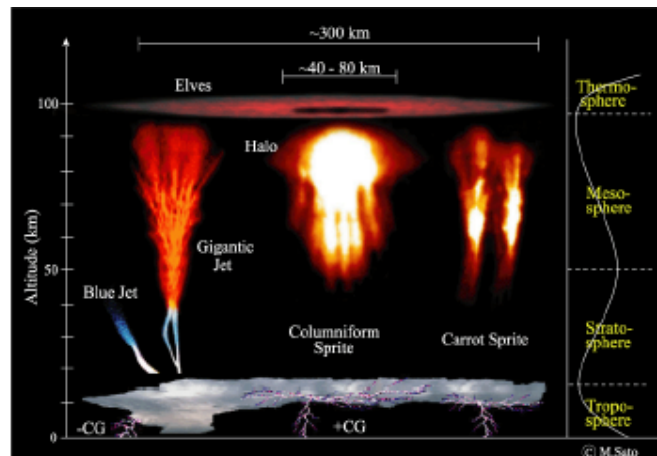


図 2.13: 雷雲上空での発光現象 [東北大学福西研究室 HP]

地球ガンマ線放射 Terrestrial Gamma-Ray Flushes(TGFs) は、CGRO に搭載された BATSE (Burst And Transient Source Experiment) が、図 2.14 のような地球方向からのきわめて継続時間の短いガンマ線のバーストを見つけたもので、9 年間のうちに 76 回のイベントを検出した。平均的な継続時間は 10msec 以下であり、1MeV 以上の光子が検出され雷雲電場によって加速された逃走電子による制動放射であると考えられた [19]。これは地上で起こる自然現象として最もエネルギーが高いものといえる。

その後、RHESSI が一ヶ月に 10-20 イベントという、これまでに考えられてきた以上の頻度で TGFs を検出し、例えば図 2.15 右のように TGFs のエネルギーは高いものでは 10-20 MeV まで伸びている事を明らかにした。簡単な制動放射を仮定すると加速された電子が持っている運動エネルギーは 20-40 MeV にもなり、ピーミングしていないならば一日に 50 個ほどの TGFs が発生している事になる。図 2.15 左下のように TGFs が検出された箇所と雷の観測された地域を合わ

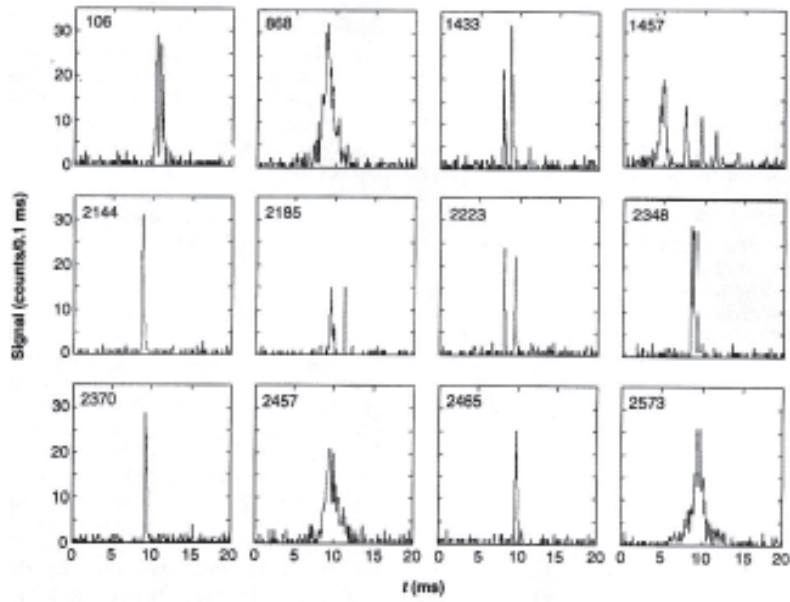


図 2.14: BATSE/CGRO で観測された TGFs [19]

せてみると、中央アフリカなど雷の多発する地域と強く相関している事が見て取れる。

雷雲上空の発光現象、TGFs、そして地上での雷雲からの放射線との関係は、本論文の主要なテーマではないものの、地球上で起きる電子の加速現象という点で一致しており、主要テーマである地上での観測との関連性が存在する可能性はある。

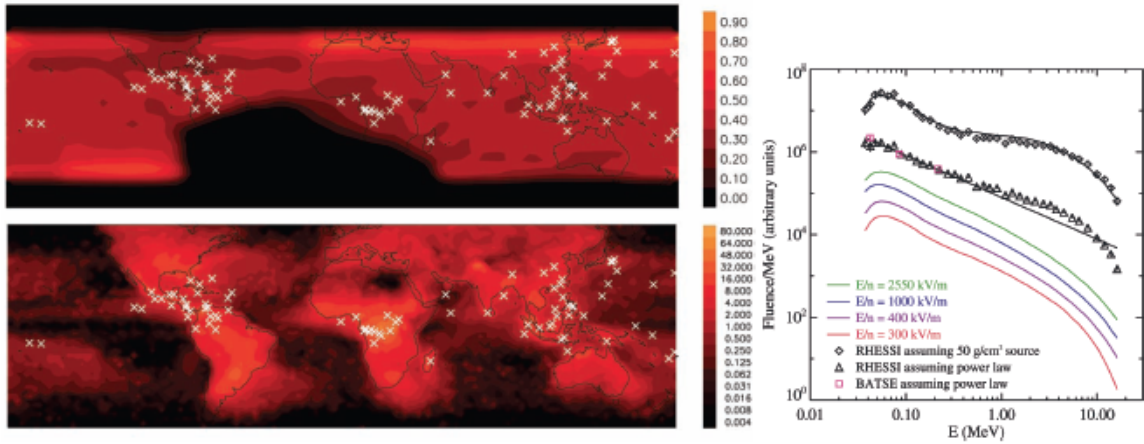


図 2.15: (左図) TGFs が記録された際の RHESSI の位置。上は TGFs が全球に広がっていると仮定したときの分布、下は雷の発生頻度と合わせて表示している [20]。(右図) RHESSI や BATSE で観測されたスペクトルの例 [21]

2.7 本研究の目的

§ 2.3.2 で述べた過去の実験結果 [22] から、 γ 線は雷からでなく雷雲から来ていると推定されている。この仮説を検証するべく研究チームでは新たに放射線検出器を製作し、既存の装置から約 900 m 離して設置した。その結果、2010 年 12 月 30 日にガンマ線放射の終了と落雷が同期するという特異なイベントが得られた。本研究ではこのイベントを中心として過去のデータの解析を行い、雷雲内での電場による粒子加速現象がどのような素過程を経ておこっているのかを解明する。

第3章 柏崎刈羽原子力発電所での放射線観測実験

3.1 実験概要

本実験では、雷雲や雷という突発現象を捉える必要があるため、屋外で長期に安定して動作する自立型の観測環境が必要となる。そのため、X線/ γ 線センサーのみならず、装置を収納する観測小屋、周囲の環境情報をモニタする環境センサー群、データの蓄積系も必要になる。実験が開始された2006年当時から設置されている観測器daq0と2009年から設置されている観測器daq1について本章でまとめる。

3.2 シンチレーション検出器

放射線(高エネルギー光子及び荷電粒子)がある種の物質中を通過すると、そのエネルギーは物質中の電子を励起し、電子が基底状態に戻る時にそのエネルギーの一部が光として放出される。この現象をシンチレーション、放出光をシンチレーション光、物質をシンチレータという。シンチレーション光の光子数が入射放射線のエネルギーに比例するというシンチレータの性質を利用することで放射線を測定する。シンチレータに使用される物質は、有機シンチレータと無機シンチレータに大別できるが、ここでは本実験で使用した無機シンチレータに限って述べる。

表3.1にGROWTH実験で使用した無機シンチレータをまとめた。無機シンチレータは、NaIやCsIなどの無機結晶を利用したシンチレータである。無機シンチレータのシンチレーション過程は、シンチレータの材料の結晶格子で決まるエネルギー状態に依存する。シンチレータ物質では、電子は図3.1のような離散的なエネルギー帯を持つ。下方のエネルギー帯は価電子帯と呼ばれ、電子は格子上の位置に束縛されている。一方、上方のエネルギー帯は伝導帯電子と呼ばれ、電子は結晶内を自由に移動できるエネルギーを持っている。これらの間に禁制帯と呼ばれるエネルギーギャップがあり、純粋な結晶では電子はこのギャップ中に存在できない。放射線がシンチレータに入射すると、電子は放射線と相互作用を起こしエネルギーを吸収することで、価電子帯から伝導帯へと励起する。純粋な光学結晶中では、励起した電子が光子を放出して価電子帯へ遷移することは稀である。また、遷移が起きると禁制帯の幅のエネルギーを持った光子が放出されるが、このエネルギーは大きすぎるので可視光にはならない。そこで、活性化物質を少量加えることにより、図3.1のように禁制帯の間に新しいエネルギー準位を形成する。このエネルギーギャップは禁制帯のエネルギーギャップよりも小さいため、この遷移は可視光となり放射される。

表 3.1: GROWTH 実験で使用した無機シンチレータの特性 [24]

物質	比重	有効 原子番号	最大放出波長 [nm]	減衰時定数 [μ s]	全光吸収率 [photons/keV]	100keV ガンマ線の 平均吸収距離 [mm]
NaI(Tl)	3.67	50	415	0.23	38	1.77
CsI(Tl)	4.51	54	540	1.0	52	0.9
BGO	7.13	75	505	0.30	8.2	0.55

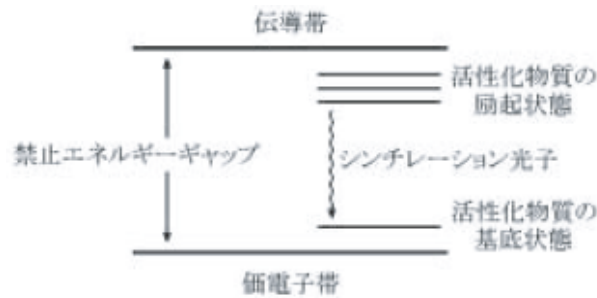


図 3.1: 無機シンチレータのエネルギー帯構造 [24]

3.3 実験手法

GROWTH 実験で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、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。柏崎刈羽原子力発電所を実験場所を選んだのは、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ためである。

図 3.2 に柏崎刈羽原子力発電所の航空写真を示した。図中の青丸は原子力発電所が設置した放射線監視モニタ、橙色の四角は我々実験チームが製作し設置した検出器である。実験を開始した2006年12月より設置されている検出器を DAQ0、2010年12月から設置されている検出器を DAQ1 と呼称している。これらは約780m 離して設置しており、周囲の監視モニタのデータと合わせて見る事で γ 線の放射範囲が時間的にどのようにして移動していったかを見る事が出来るようになっている。

3.4 実験結果

図 3.3 に GROWTH 実験で得られた全ての長時間バーストの3MeV 以上のライトカーブを示す。図の横軸はバーストの前後5分、計10分間を示している。また図中の2008年9月20日のイベントは乗鞍岳にある宇宙線観測所での観測結果であるため、厳密には GROWTH 実験による結果ではないが併記した。

これを見るとバーストのピーク値はおおよそ30~50 カウントであり、継続時間は長くとも数分程度であることがわかる。しかし2010年12月30日のイベントではバーストのピークが200 近くまで伸びているという特徴があった。また、雷との関連性でも特徴がみられたため、このイベントを中心に解析を行った。

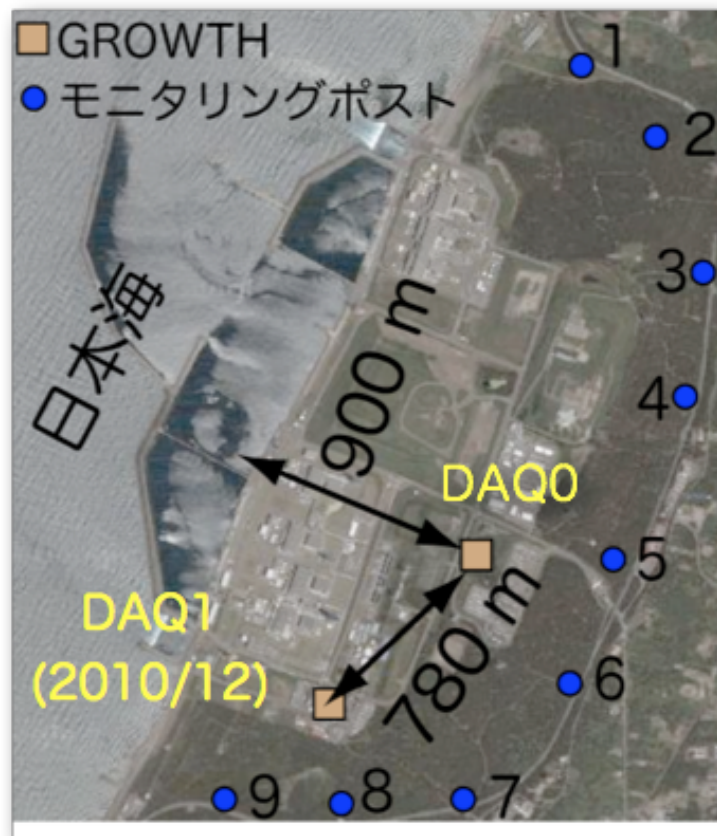


図 3.2: 柏崎刈羽原子力発電所の航空写真 (Google Map より)

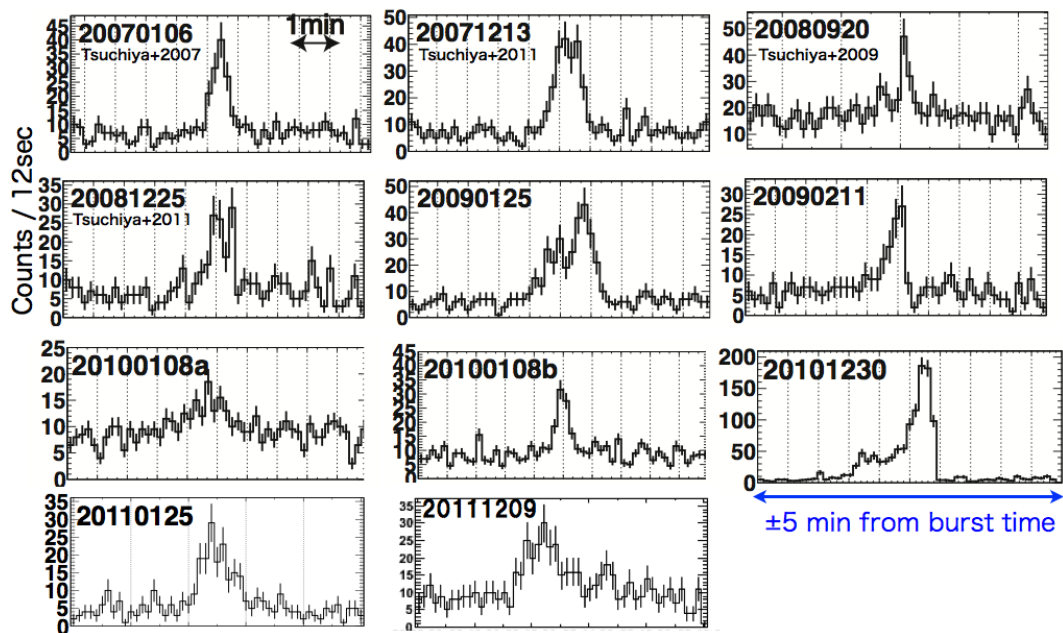


図 3.3: GROWTH 実験によって得られた全ての長時間バースト

第4章 データ解析について

4.1 解析手法

4.1.1 使用したソフトウェア

解析には ROOT と呼ばれるソフトを使用した。ROOT¹とは CERN（欧州合同素粒子原子核研究機構）で開発されている解析ソフトで、主に高エネルギー物理分野において使用されている。その特徴として、C++で記述されており、使用者が独自にマクロを組むことが可能な点や、ソースファイルが完全に公開されていることなどがある。

4.2 環境放射線

検出器にはバックグラウンドとして常に環境放射線が入射する。環境放射線とは自然に存在する放射線のことで、主に地中にあるウランや大気中に浮かんでいるラドン等の放射性娘核種、核爆発によって地上に付着したセシウム、そして宇宙線などである。

雨が降ると大気中に浮かんでいるラドンが落ちてくるため、一時的に放射線量が増大する。雷はほとんどの場合に雨を伴うため、解析を行う際には雷由来ではなく雨による放射線量の増大に注意しなければならない。

4.3 解析結果

4.3.1 それぞれのライトカーブ

実験開始後、daq0 で得られたイベントのライトカーブを以下の図 4.1 - 4.6 に、daq1 で得られたライトカーブを図 4.7、に示す。図はバーストの前後 15 分間であり、横軸は世界時間、縦軸は光子のカウント数である。

¹<http://root.cern.ch/drupal/>

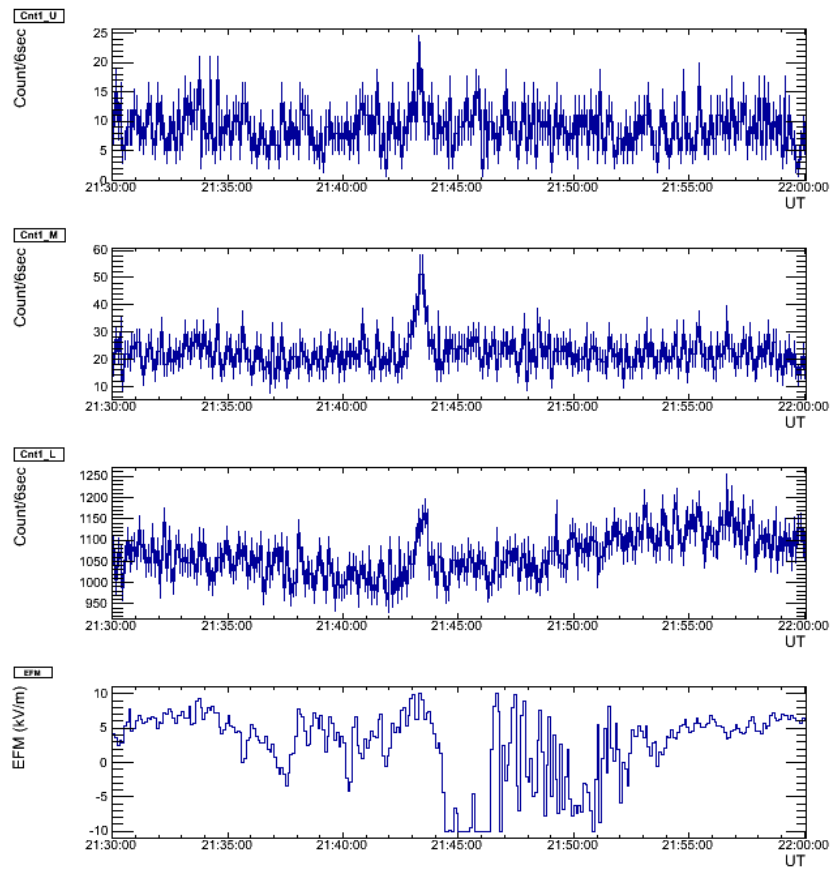


図 4.1: daq0 による 2007 年 1 月 6 日のイベントを含む 30 分間のライトカーブ。上から順に、10MeV 以上のカウント数、3MeV 以上のカウント数、40keV 以上のカウント数、電場計の出力である。

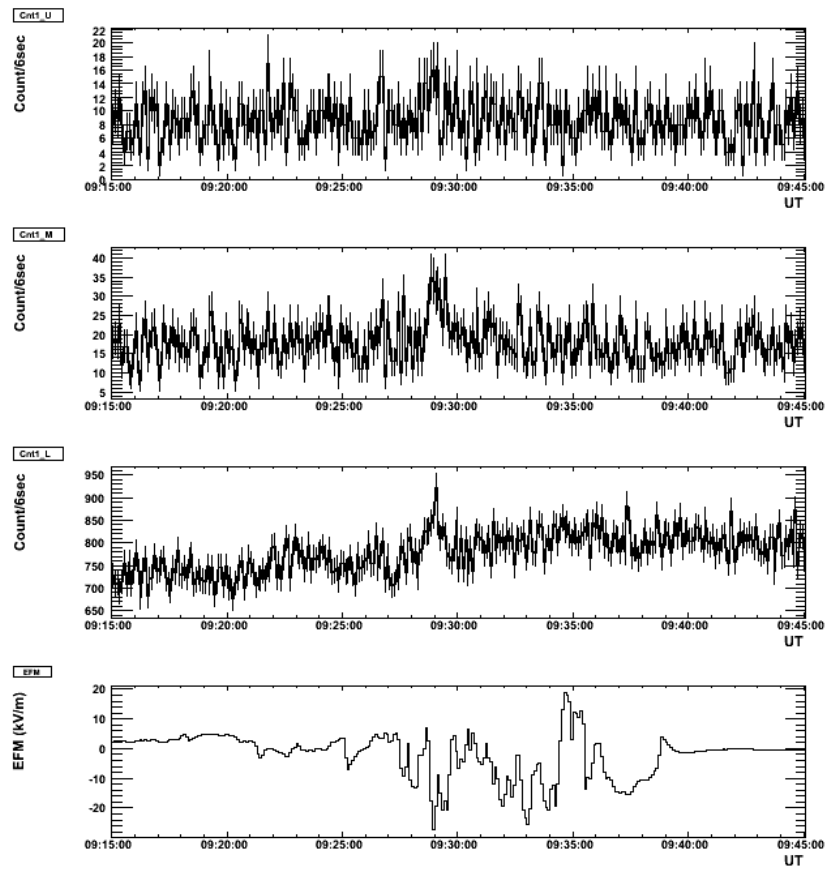


図 4.2: daq0 による 2008 年 12 月 25 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。

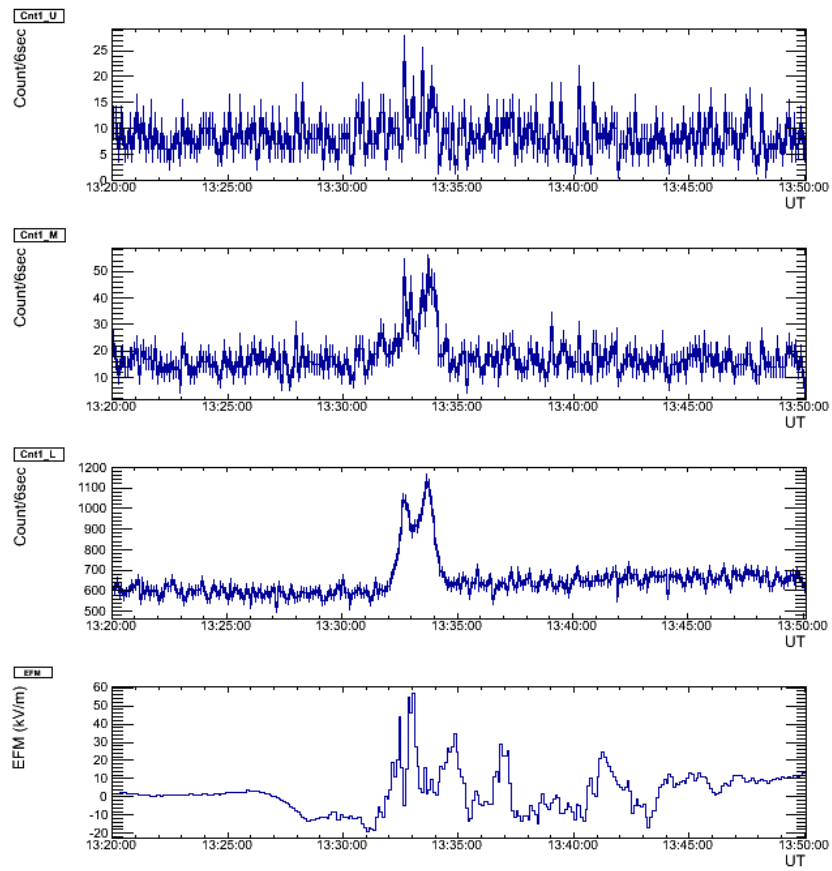


図 4.3: daq0 による 2009 年 1 月 25 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。

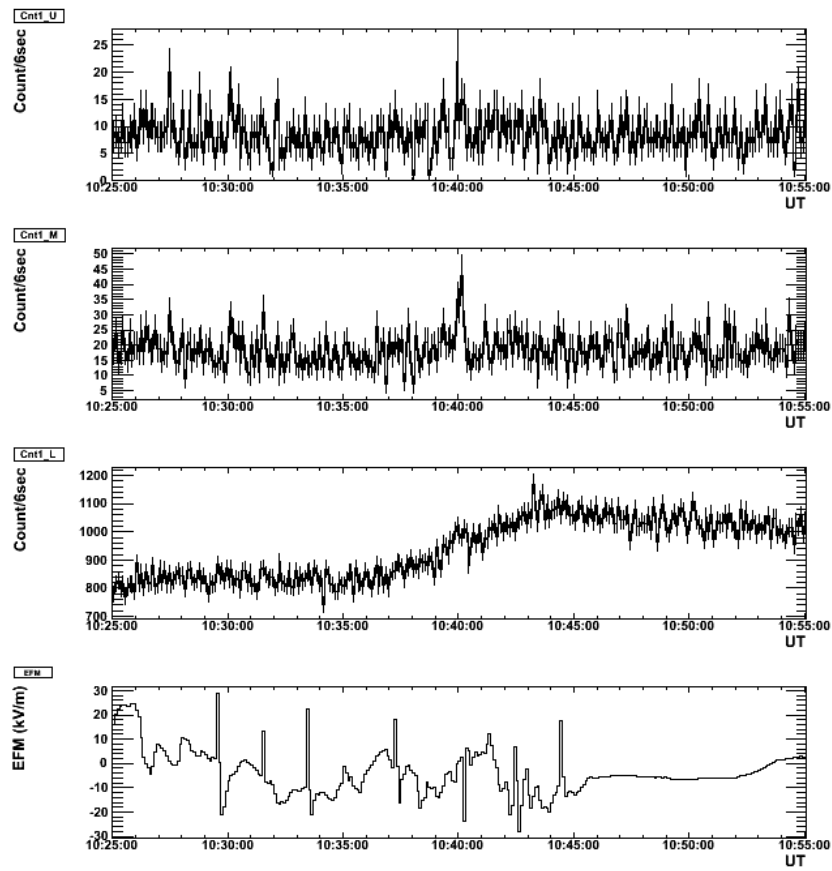


図 4.4: daq0 による 2009 年 2 月 11 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。

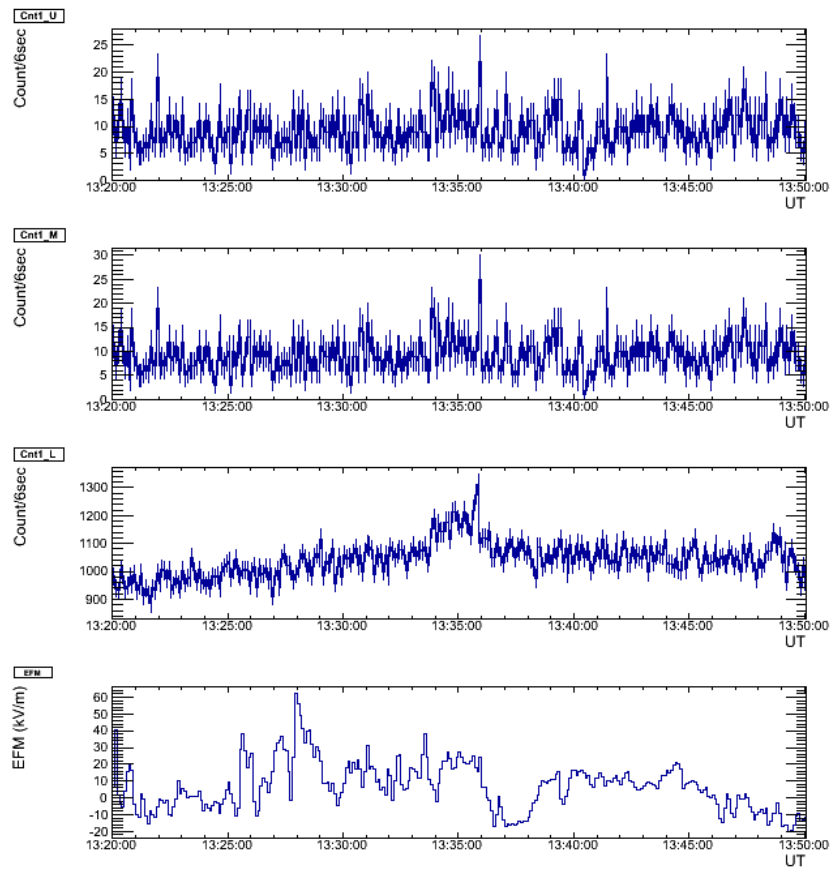


図 4.5: daq0 による 2010 年 12 月 30 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。

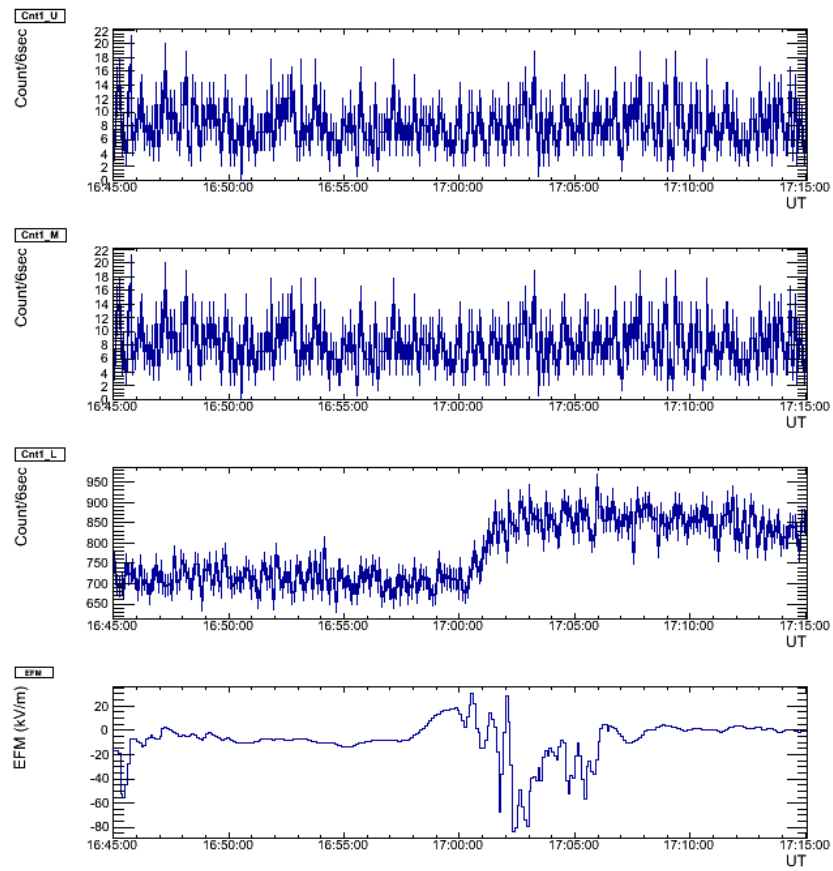


図 4.6: daq0 による 2011 年 1 月 25 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。

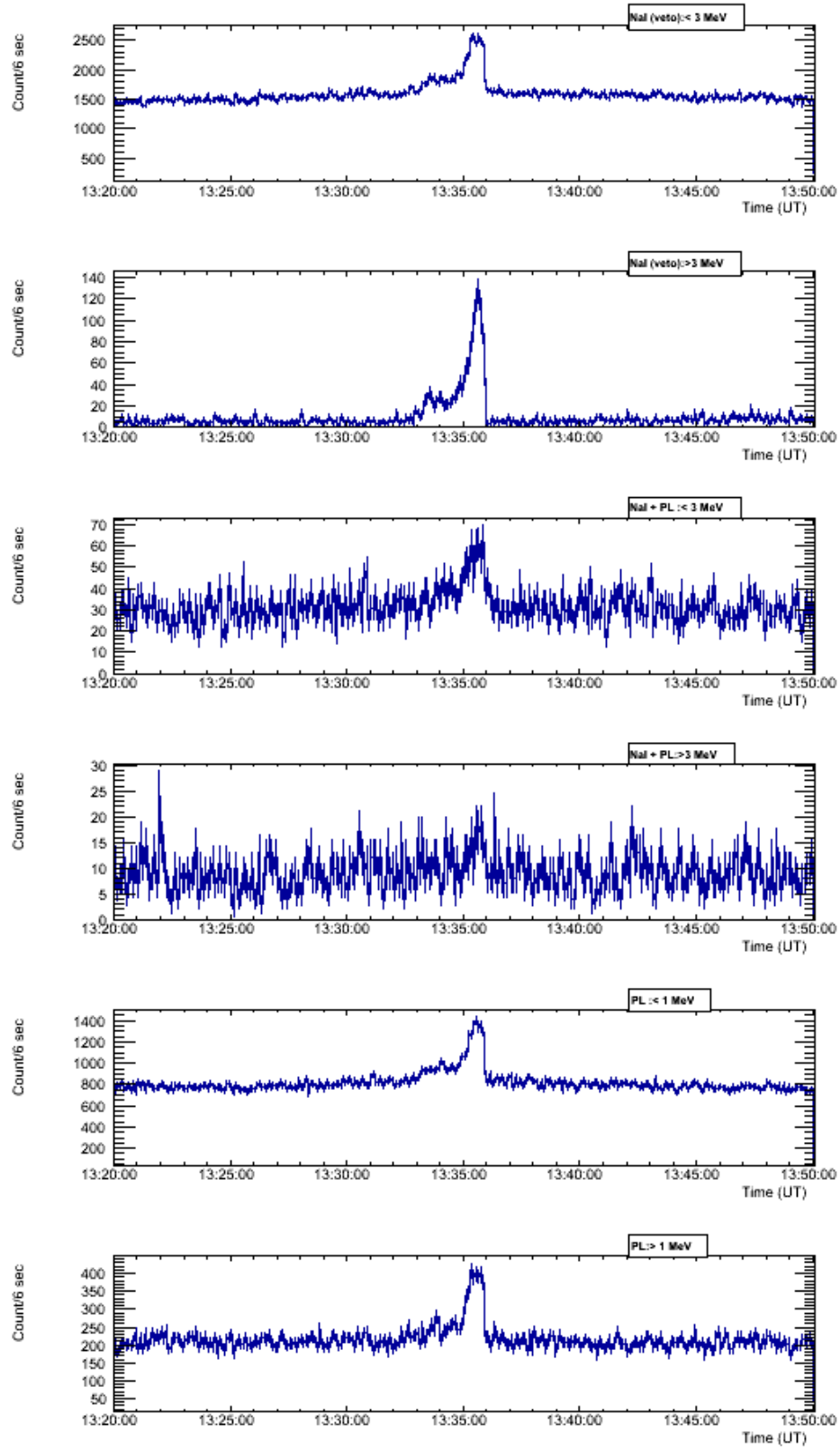


図 4.7: daq1 による 2010 年 12 月 30 日のイベントのライトカーブ

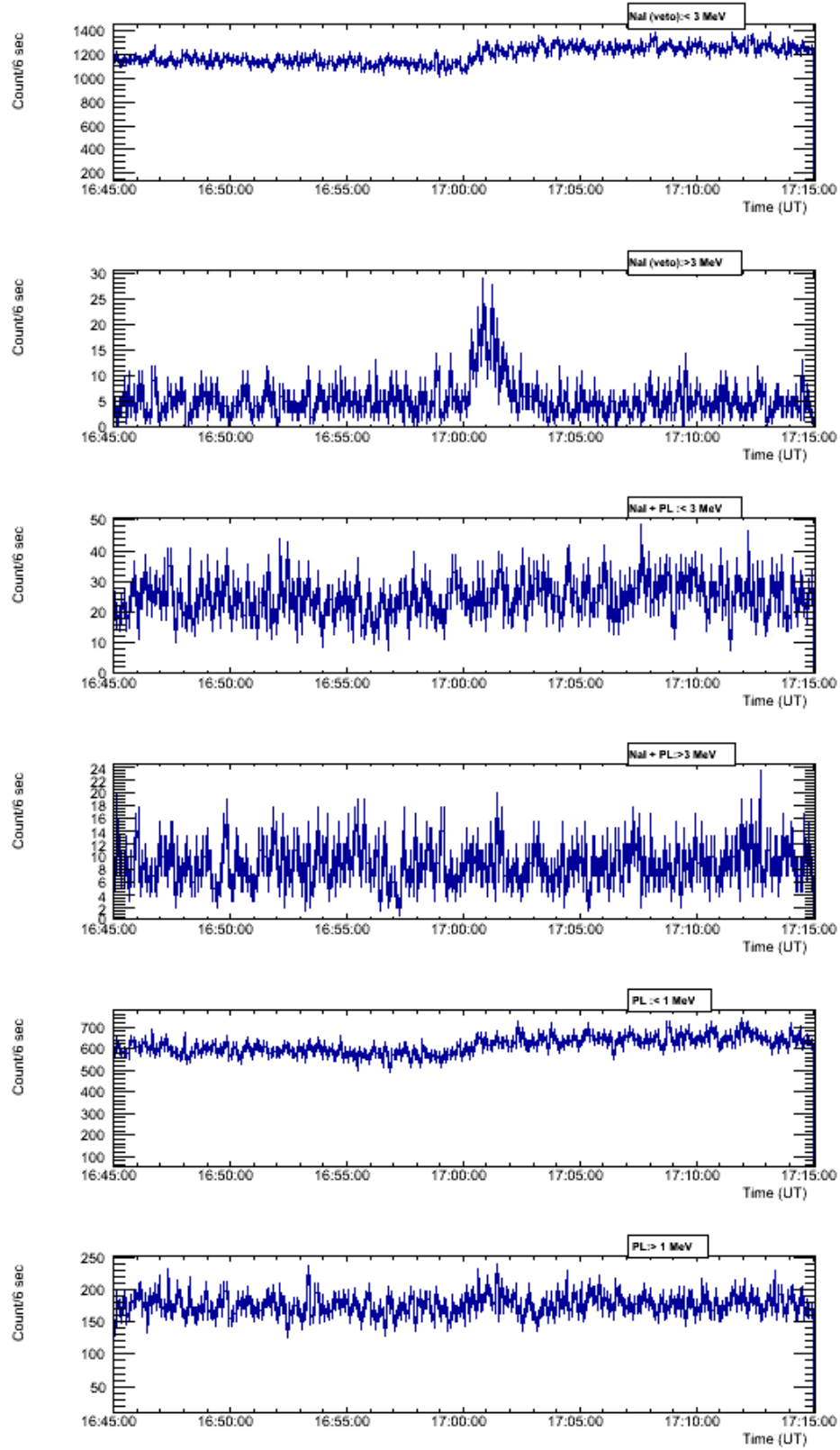


図 4.8: daq1 による 2011 年 1 月 25 日のイベントのライトカーブ

4.3.2 それぞれのスペクトル

図 4.12～ 4.21 に長時間バーストのスペクトルを示す。スペクトルの取得期間は 4.3.1 節のライトカーブより決定し、表 4.1 の通りである。また、バックグラウンドはイベント後、イベント継続時間と同じだけの期間をとった。

これらのスペクトルから環境放射線が多く含まれる 3MeV 以下の領域ではイベント由来の γ 線が検出できていない事もあるが、環境放射線のなくなる 3MeV 以上の領域では明確な γ 線の増大を感知することができている。また、イベントの最高エネルギーは概ね 10MeV 程度であった。

表 4.1: 長時間バーストの開始時間と終了時間 [24]

日付	開始時間	終了時間	継続時間 [s]
2007 年 1 月 6 日	21:42:57	21:43:56	59
2007 年 12 月 13 日	15:59:23	16:00:59	83
2008 年 12 月 25 日	9:28:35	9:29:35	60
2009 年 1 月 25 日	13:32:05	13:34:17	132
2009 年 2 月 11 日	10:39:05	10:39:53	48
2010 年 12 月 30 日	13:33:12	13:35:55	163

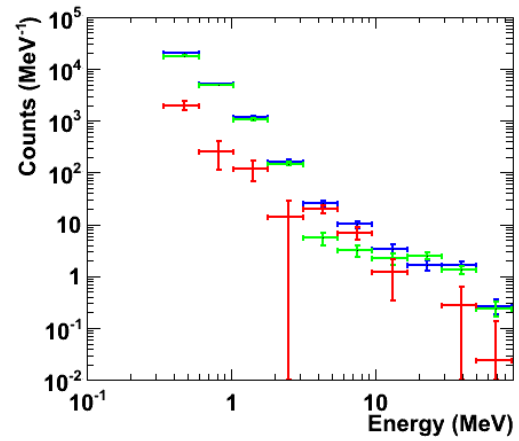
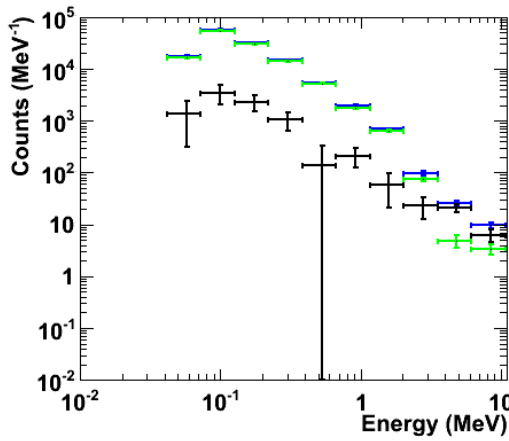


図 4.9: 2007 年 1 月 6 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青: イベント期間のレータによるスペクトル 青: イベント期間のス
スペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル ペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 赤:
黒: イベント中のスペクトルからバックグラウン イベント中のスペクトルからバックグラウンドを
ドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル 引いた雷雲由来と思われるスペクトル

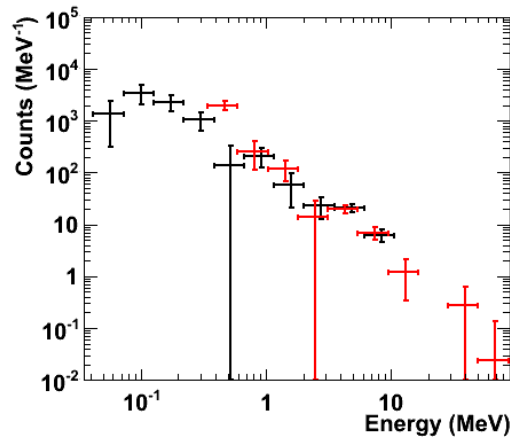


図 4.11: 2007 年 1 月 6 日のイベントのスペクトル 黒: NaI シンチレータのバックグラウンドを
差し引いたスペクトル 赤: CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル

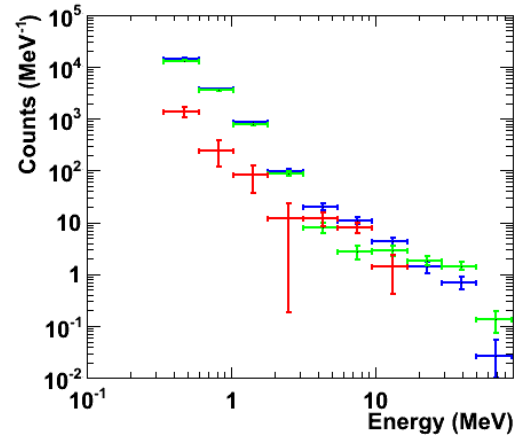
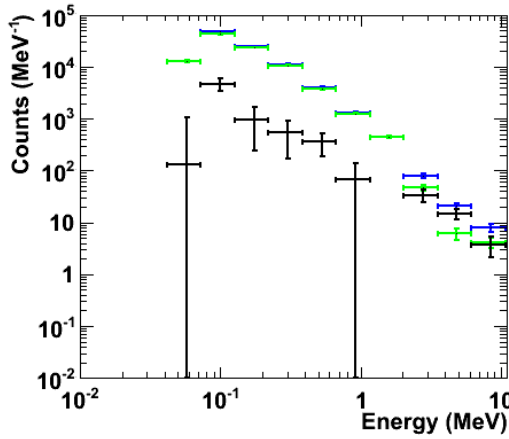


図 4.12: 2008 年 12 月 25 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青: イベント期間のスペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 黒: イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル

図 4.13: 2008 年 12 月 25 日のイベント CsI シンチレータによるスペクトル 青: イベント期間のスペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 赤: イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル

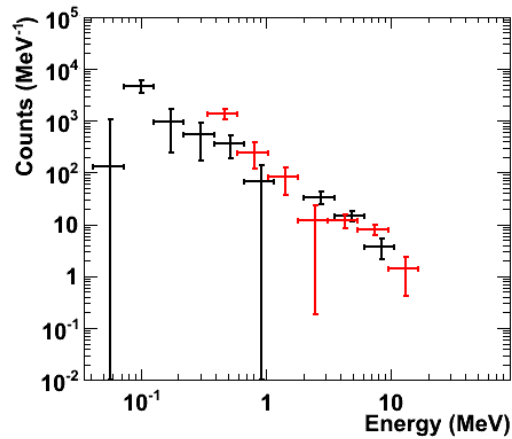


図 4.14: 2008 年 12 月 25 日のイベントのスペクトル 黒: NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤: CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル

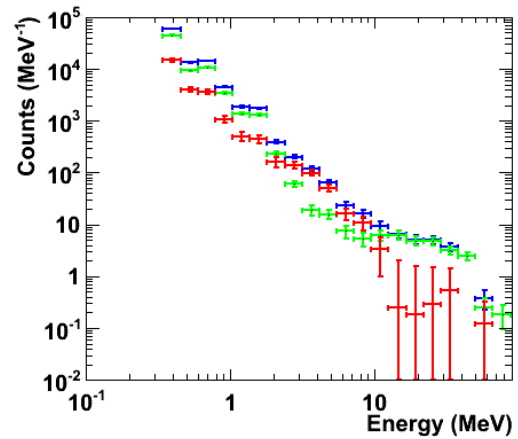
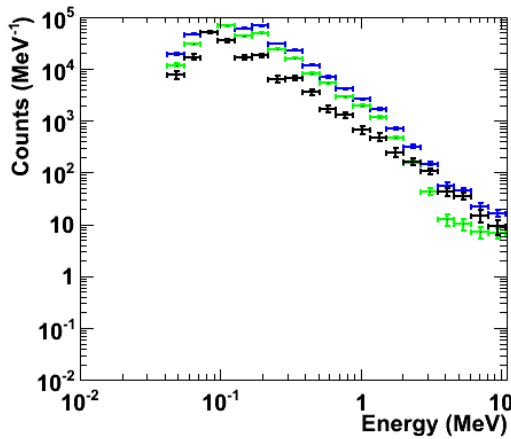


図 4.15: 2009 年 1 月 25 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青: イベント期間のレータによるスペクトル 青: イベント期間のス
スペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 赤:
黒: イベント中のスペクトルからバックグラウンド イベント中のスペクトルからバックグラウンドを
ドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル 引いた雷雲由来と思われるスペクトル

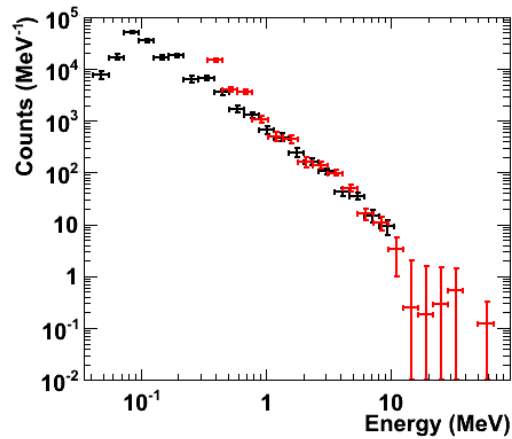


図 4.17: 2009 年 1 月 25 日のイベントのスペクトル 黒: NaI シンチレータのバックグラウンドを
差し引いたスペクトル 赤: CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル

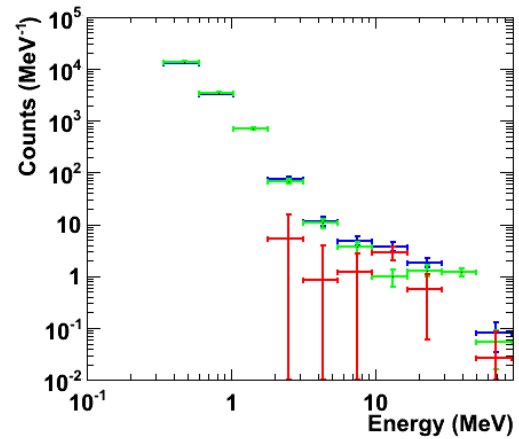
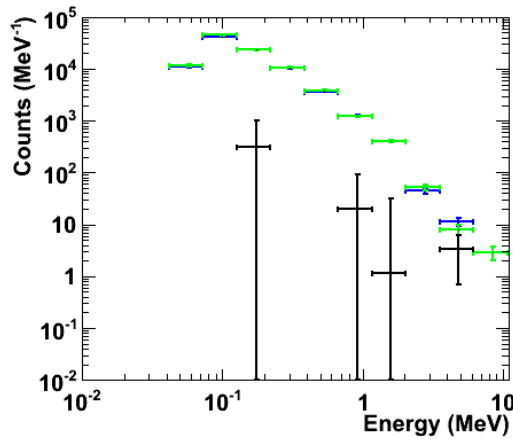


図 4.18: 2009 年 2 月 11 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青: イベント期間のスペクトル (のスペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 緑: バックグラウンドスペクトル 赤: イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル 引いた雷雲由来と思われるスペクトル

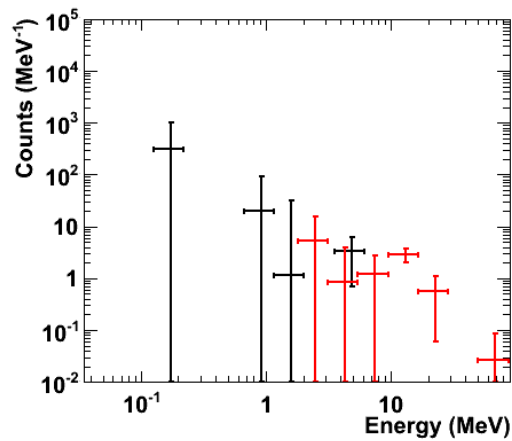


図 4.20: 2009 年 2 月 11 日のイベントのスペクトル 黒: NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤: CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル

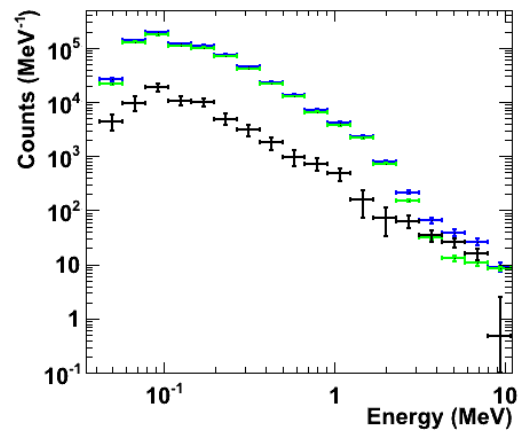


図 4.21: 2010 年 12 月 30 日のイベントのスペクトル 黒: NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤: CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル

4.4 2010 年 12 月 30 日のイベント

4.4.1 雷との時間的關係

図 4.22 に 2010 年 12 月 30 日のイベントからのライトカーブを示す。過去の長時間バーストでは γ 線のカウント数は徐々に増大し、また徐々に減少していくという傾向を示していたが、このイベントでは 13:35:55 に 1 秒未満という短い時間でカウント数が減少している。他の環境監視モニタのデータから、この瞬間に雷が発生している事がわかった。

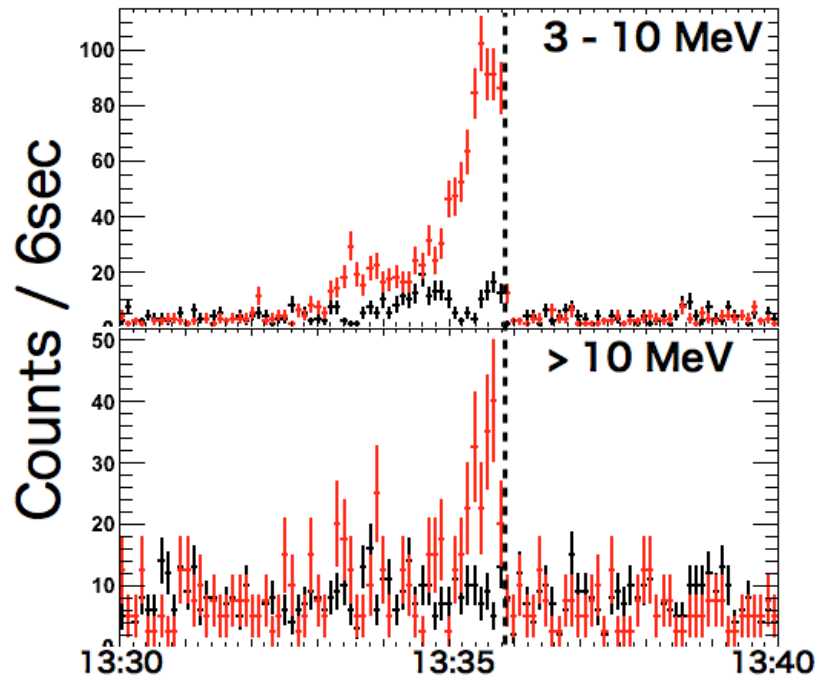


図 4.22: 2010 年 12 月 30 日のイベントの前後 5 分間のライトカーブ。黒が daq0、赤が daq1 の出力であり、図上が 3-10MeV での放射、図下が 10MeV 以上での放射である。中央の破線は雷の発生時間を表している。

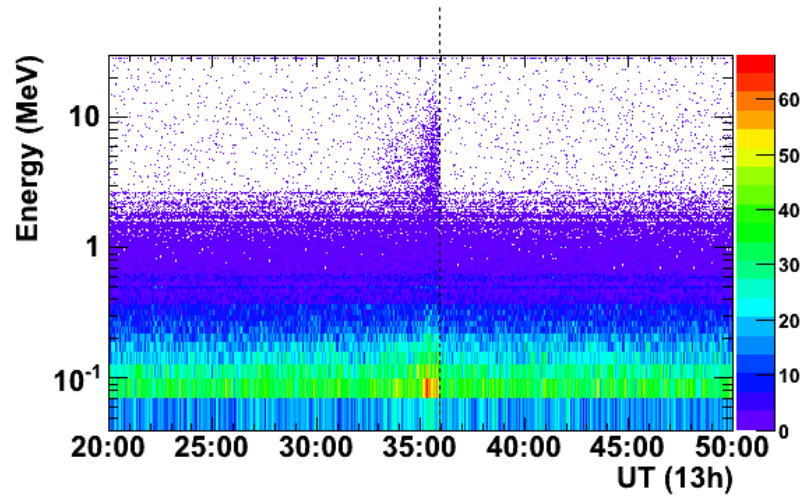


図 4.23: 2010 年 12 月 30 日のイベントで daq1 の NaI シンチレータの出力を時間と光子 1 つのエネルギーごとに分布したもの。図中央の点線は雷の発生時間を表している。

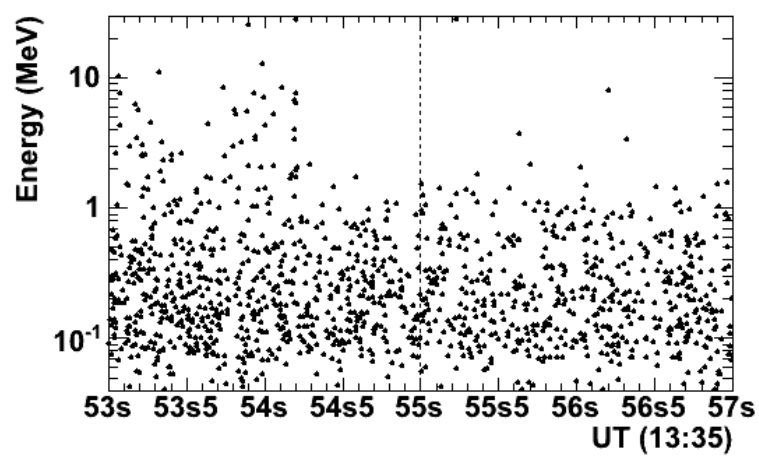


図 4.24: 図 4.23 を雷の発生時間周りで拡大したもの

4.4.2 放射範囲の時間的移り変わり

図 4.25 に 2010 年 12 月 30 日のイベントの我々の検出器 daq0,1 と、9 台のモニタリングポスト (MP) からのライトカーブを示す。時間変動に着目すると、まず MP9 と daq1 でカウントの増大が始まり、その後に MP7、8 や daq0 で増大が起こっている。これはまさに γ 線放射領域が雷雲の移動とともに移動していつているのを示している。加えて、雷が発生すると同時にイベントが終了する様は我々の検出器だけでなく MP 側でも感知されていた。また反応があった検出器とは離れた位置にある MP1、2、3 では増大が見られないことから、 γ 線の放射領域がそれほど大きくない事も分かる。

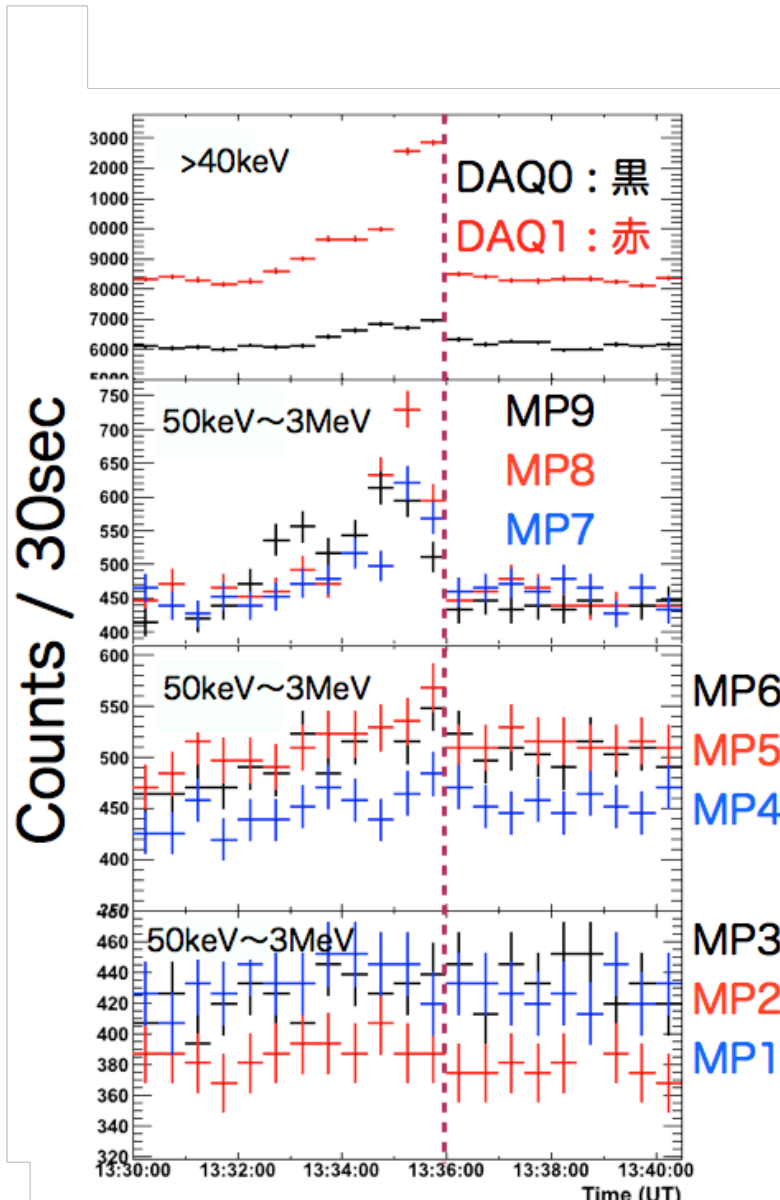


図 4.25: 2010 年 12 月 30 日のイベントの我々の検出器とモニタリングポスト (MP) のライトカーブ。中央の点線は雷の発生した時間 13:35:55(UT) を表す。

図 4.26 に 2010 年 12 月 30 日のイベントの全ての検出器のカウンルの時間的移り変わりを示した。こちらでも図 4.25 と同様にまず MP9 と daq1 でカウンルの増大が始まり、その後に MP7、8 や daq0 で増大が起こっていることがわかる。

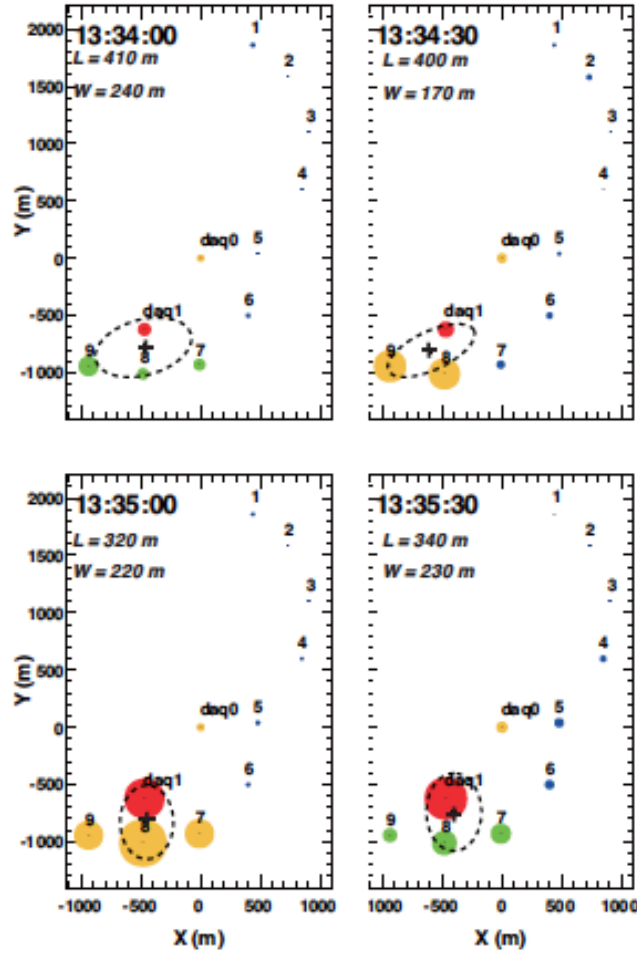


図 4.26: 2010 年 12 月 30 日のイベントの検出器毎のカウンル数の増加を分布したもの。円の大きさはカウンルの増加数を、円の色は統計的優位性を示す (青: 2σ 以下、緑: $2-5\sigma$ 、橙: $5-10\sigma$ 、赤: 10σ 以上)。

第5章 まとめと考察

理化学研究所で行われている雷や雷雲からの放射線の観測実験に 2010 年より参加し、短時間バーストを 2 例、長時間バーストを 3 例観測する事に成功した。

スペクトル解析の結果から、装置に入射した γ 線は最大 10 - 20 MeV のエネルギーを持っていた。このことから、 γ 線は $>20\text{MeV}$ の電子による制動放射によって生成されたと考えられる。他に γ 線の生成プロセスとしてシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱が考えられるが、どちらのプロセスも 10~20 MeV の γ 線を生成するには、元となる電子のエネルギーが数 GeV~1TeV 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を典型的に観測される $300\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 程度とすると、電子はその電場中を 10 km 走る必要がある。それほど大きさを持つ準定常的な電場領域が雷雲中にあるかどうかは定かではない。また、そもそも大気中では電子はそのエネルギーが 80MeV を超えると、制動放射によって急激にエネルギーを失う。制動放射の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、電場強度が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。よって γ 線の生成は制動放射によると考えるのが自然である。

また落雷と同期してイベントが終わるという特異な特徴を持った 2010 年 12 月 30 日のイベントの解析を行った。これはまさに雷雲中の電場によって粒子が加速され、加速された粒子からの制動放射によってガンマ線を放射しており、落雷によって粒子を加速していた電場領域が破壊された、あるいは極端に弱まったことを如実に示していると考えられる。

謝辞

卒業研究を進める上で、本当にたくさんの方々にお世話になりました。この場を持ちまして感謝の意を示したいと思います。

理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室に研修生として受け入れてくださった玉川先生を始め研究室の皆様、本当にありがとうございました。特に直接の指導をしていただいた土屋先生ありがとうございます。土屋先生には回路の基本的な所から観測結果の解析まで幅広い指導をしていただきました。加藤様にはハード面の詳しい部分や、作製した回路の間違った部分のご指摘をいただきありがとうございました。また、研究者として第一線で活躍されている皆様方と一緒に過ごさせて頂いた1年間はとても有意義なものでした。「研究者とはどんな生活を送っているのか」ということを間近で拝見でき、大学に残っていては決してできない経験をすることができました。

研究所で研究する上で、東京理科大学の皆様にはいろいろとお世話になりました。本当にありがとうございました。

最後になりましたが久保田先生には理化学研究所玉川高エネルギー宇宙物理研究室をご紹介いただき貴重な経験を積む機会を与えていただきました。それだけではなく、研究についての心得など助言をいただき、深く感謝します。

関連図書

- [1] K. Makishima. Energy non-equipartition processes in the Universe. *Astronomische Nachrichten*, 320:163, 1999.
- [2] C. B. Moore, K. B. Eack, G. D. Aulich, and W. Rison. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. *Geophys. Res. Lett.*, 28:2141-2144, June 2001. doi: 10.1029/2001GL013140.
- [3] G. J. Fishman, P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciesas, S. J. Goodman, and H. J. Christian. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin. *Science*, 264:1313, May 1994.
- [4] J. R. Dwyer, M. A. Uman, H. K. Rassoul, M. Al-Dayeh, M. A. Uman, H. K. Rassoul, M. Al-Dayeh, L. Caraway, J. Jerauld, V. A. Rakov, D. M. Jordan, K. J. Rambo, V. Corbin, and B. Wright. Energetic Radiation Produced During Rocket-Triggered Lightning. *Science*, 299:694-697, January 2003. doi: 10.1126/science.1078940.
- [5] 北川信一郎. 雷と雷雲の科学. 森北出版株式会社, 1st edition, 2001.
- [6] M. McCarthy, G. K. Parks, *Geophys. Res. Lett.* 12, 393 - 396, 1985
- [7] C. B. Moore, K. B. Eack, G. D. Aulich, and W. Rison. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. *Geophys. Res. Lett.*, 28:2141-2144, June 2001. doi: 10.1029/2001GL013140.
- [8] 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. A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *Geophys. Res. Lett.*, 31:5119+, March 2004. doi: 10.1029/2003GL018771.
- [9] J. R. Dwyer. Implications of x-ray emission from lightning. *Geophys. Res. Lett.*, 31:12102, June 2004. doi: 10.1029/2004GL019795.
- [10] 大野久雄. 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, 1st edition, 2001.
- [11] 北川信一郎. 日本海側沿岸の冬季雷雲の気象学的特徴. *天気*, 43:89, 1996.
- [12] Takahashi, T., Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, 35, 1536-1548, 1978
- [13] Gurevich et al. *Phys. Lett. A* 165, 463, 1992
- [14] V. A. Rakov and M. A. Uman. *Lightning Physics and Effects*. Cambridge, 2003.
- [15] 道本光一郎, 冬季雷の科学, コロナ社, 1998
- [16] 山崎興樹, 大高敏裕, 藤巻広司, and 殿内重政. 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+, 2003.
- [17] T. Torii, M. Takeishi, and T. Hosono. Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 107: 2-1, September 2002. doi: 10.1029/2001JD000938.

-
- [18] T. Torii, M. Takeishi, and T. Hosono. Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 107: 2-1, September 2002. doi: 10.1029/2001JD000938.
- [19] G. J. Fishman, P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciesas, S. J. Goodman, and H. J. Christian. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin. *Science*, 264:1313-+, May 1994.
- [20] D. M. Smith, L. I. Lopez, R. P. Lin, and C. P. Barrington-Leigh. Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV. *Science*, 307:1085-1088, February 2005. doi: 10.1126/science.1107466.
- [21] J. R. Dwyer and D. M. Smith. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2:22804-+, November 2005. doi: 10.1029/2005GL023848.
- [22] 榎戸輝揚 修士論文 (東京大学) 2007
- [23] 菅野雄太 卒業論文 (芝浦工業大学) 2009
- [24] Glenn F. Knoll, 木村逸朗, 坂井英次 訳, 放射線ハンドブック (第3版), 日刊工業新聞社, 2001

表 目 次

3.1	GROWTH 実験で使用了無機シンチレータの特性 [24]	15
4.1	長時間バーストの開始時間と終了時間 [24]	27

目 次

1.1	宇宙における粒子加速を誘導電場と電子の最高エネルギーで見た図 [1]	1
2.1	航空機による雷雲内での直接観測 [6]	2
2.2	高山の山頂での自然雷からの放射線観測事例 [7]	3
2.3	フロリダでのロケット誘雷実験 [8]	3
2.4	フロリダでのロケット誘雷実験での X 線検出の例 [8]	4
2.5	気温を共通の縦軸とした時の夏と冬の雷雲の構造 [11]	4
2.6	雷の発生メカニズム	5
2.7	短時間バーストの様子	6
2.8	過去の実験結果 [22] 上から順に (1)40keV から 3MeV の NaI シンチレータの出力時間変化 (2)(1) と同様だが 3MeV から 10MeV (3) プラスチックシンチレータの出力時間変化 (4) 光検出器の出力時間変化 (5) 電場計の出力時間変化	7
2.9	長時間バースト発生の様子	8
2.10	日本における夏季および冬季の雷発生件数 [5]	10
2.11	雷雲の典型的な高度 [14]	10
2.12	柏崎刈羽原子力発電所の NaI シンチレータと加圧型電離箱 (IC) における観測例 [16]	11
2.13	雷雲上空での発光現象 [東北大学福西研究室 HP]	12
2.14	BATSE/CGRO で観測された TGFs [19]	13
2.15	(左図) TGFs が記録された際の RHESSI の位置。上は TGFs が全球に広がっていると仮定したときの分布、下は雷の発生頻度と合わせて表示している [20]。(右図) RHESSI や BATSE で観測されたスペクトルの例 [21]	13
3.1	無機シンチレータのエネルギー帯構造 [24]	16
3.2	柏崎刈羽原子力発電所の航空写真 (Google Map より)	17
3.3	GROWTH 実験によって得られた全ての長時間バースト	17
4.1	daq0 による 2007 年 1 月 6 日のイベントを含む 30 分間のライトカーブ。上から順に、10MeV 以上のカウント数、3MeV 以上のカウント数、40keV 以上のカウント数、電場計の出力である。	19
4.2	daq0 による 2008 年 12 月 25 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。	20
4.3	daq0 による 2009 年 1 月 25 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。	21
4.4	daq0 による 2009 年 2 月 11 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。	22
4.5	daq0 による 2010 年 12 月 30 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。	23
4.6	daq0 による 2011 年 1 月 25 日のイベントのライトカーブで図 4.1 と同様。	24
4.7	daq1 による 2010 年 12 月 30 日のイベントのライトカーブ	25
4.8	daq1 による 2011 年 1 月 25 日のイベントのライトカーブ	26

4.9	2007 年 1 月 6 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 黒：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	28
4.10	2007 年 1 月 6 日のイベント CsI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 赤：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	28
4.11	2007 年 1 月 6 日のイベントのスペクトル 黒：NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤：CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル	28
4.12	2008 年 12 月 25 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 黒：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	29
4.13	2008 年 12 月 25 日のイベント CsI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 赤：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	29
4.14	2008 年 12 月 25 日のイベントのスペクトル 黒：NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤：CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル	29
4.15	2009 年 1 月 25 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 黒：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	30
4.16	2009 年 1 月 25 日のイベント CsI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 赤：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	30
4.17	2009 年 1 月 25 日のイベントのスペクトル 黒：NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤：CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル	30
4.18	2009 年 2 月 11 日のイベントの NaI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間 (のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 黒：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	31
4.19	2009 年 2 月 11 日のイベント CsI シンチレータによるスペクトル 青：イベント期間のスペクトル 緑：バックグラウンドスペクトル 赤：イベント中のスペクトルからバックグラウンドを引いた雷雲由来と思われるスペクトル	31
4.20	2009 年 2 月 11 日のイベントのスペクトル 黒：NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤：CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル	31
4.21	2010 年 12 月 30 日のイベントのスペクトル 黒：NaI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル 赤：CsI シンチレータのバックグラウンドを差し引いたスペクトル	32
4.22	2010 年 12 月 30 日のイベントの前後 5 分間のライトカーブ。黒が daq0、赤が daq1 の出力であり、図上が 3-10MeV での放射、図下が 10MeV 以上での放射である。中央の破線は雷の発生時間を表している。	33
4.23	2010 年 12 月 30 日のイベントで daq1 の NaI シンチレータの出力を時間と光子 1 つのエネルギーごとに分布したもの。図中央の点線は雷の発生時間を表している。 .	34

4.24	図 4.23 を雷の発生時間周りで拡大したもの	34
4.25	2010 年 12 月 30 日のイベントの我々の検出器とモニタリングポスト (MP) のライトカーブ。中央の点線は雷の発生した時間 13:35:55(UT) を表す。	35
4.26	2010 年 12 月 30 日のイベントの検出器毎のカウント数の増加を分布したもの。円の大きさはカウントの増加数を、円の色は統計的優位性を示す (青： 2σ 以下、緑： $2-5\sigma$ 、橙： $5-10\sigma$ 、赤： 10σ 以上)。	36