雷からの突発ガンマ線観測に向けた検出器システムの高速化

久富章平*1、中澤知洋*1、辻結菜*1、榎戸輝揚*2、湯浅孝行*3、土屋晴文*4、和田有希*4 (*1:名古屋大学、*2:京都大学、*3:理化学研究所、*4東京大学)

Abstract

近年の研究で、雷と同期して突発ガンマ線(Terrestrial Gamma ray Flush: TGF)と呼ばれる高エネルギー(< 10 MeV)かつ短い継続時間(< 100 μs)のガンマ線が発生することが分 かった。TGF発生の仕組みはまだ分かっておらず、高精度観測が必要である。本研究では、TGFを有効に検出するため、アナログ回路の高速化を行い、結果としてイベン トサンプル時間を1/10(20 μs -> 2 μs)に短縮した。現在、改良した検出器をスカイツリーに展開しており、夏季雲からのTGF検出を目指している。また、本検出器は冬季に 落雷頻度の高い石川県金沢市にて、TGFのマッピング観測のための検出器の一つとして運用する予定である。

Introduction

1. 雷ガンマ線と粒子加速

雷雲から落雷と相関した、100 µs程度の継続時間で到来する高エネルギーガンマ線 (<20 MeV)が近年多く観測されている。このガンマ線は、突発ガンマ線(Terrestrial Gamma ray Flush: TGF)と呼ばれる。雷雲中には、準静電場機構があると考えられて いたが[1]、TGFのように僅かな時間内に高エネルギーまで加速される粒子加速の仕 組みは、まだ詳細には分かってはいない。衝撃波加速が良く論じられる宇宙におい

て、電場による加速についての 議論は少なく、雷雲中での粒子 加速メカニズムの解明は宇宙物理 学的にも重要である。また、冒頭 述べたようにTGFは、落雷による 放電の3-30 kHzの低周波数帯 (Very Low Frequency : VLF)において、 TGFと相関があり[2]、TGFの発生の 仕組みが解明されれば、落雷の発生 原因の理解につながりうる。



Method & Result

イベントサンプル時間を短くするため、フロントエンドカードのアナログ回路を高速 化することを試みた。回路シミュレーションソフトLTSpiceを用いて、フロントエンド カードの回路素子の値を変え、高速化を行った。



2. 雷雲中での粒子加速のモデル

現在は、Gurevichの提唱する相対論的電子逃走モデル(Relativistic Runaway Electron Avalanche: RREA)が基本的なメカニズムと言われているが、TGFの光度や時間変動を 説明できておらず、他にも何らかの物理が働いていると考えられる。[3]RREAモデル とは、雷雲中の電子が強電場により加速されある一定まで加速された電子が空気分 子とぶつかり、雪崩式に増幅していくモデルである。この加速された自由電子によ る制動放射がTGFであると考えられている。しかし、TGFは強力なガンマ線であり、 アナログ検出器がサチュレーションしてしまい正確なフラックスなどはまだ分かっ ていない。[4]フラックスが分かっていないため、雷雲中での加速領域のサイズなど も不明瞭であり、高精度観測が必要である。



上記回路図で、赤四角で囲んだ素子の値を変化させ、時定数rを早くした。 本研究では、Ch1をTGF直接検出用回路段、ch2を熱中性子検出用回路段とした。

・実際の高速化後の波形の様子

アナログ回路の高速化前後で1Vの負のテストパルスを入力し、実際の出力波形を見た



図5 ch1の波形(左) ch2の波形(右)

図6 検出器の

実際の写真

図5より、 $\tau_{ch1}/\tau_{ch0} = 0.7/2.5 \sim 1/4$ $\tau_{ch2}/\tau_{ch0} = 0.15/2.5 \sim 1/17$

よって、各**ch**でそれぞれ **1/4 , 1/17**の 時定数の高速化を達成した。

また、本研究では、アナログ回路の高速化に加えて、 検出器の可搬性を高めるために小型化を行った。 結果として、従来よりも床面積を ~ 1/1.8 (900 cm² / ³⁰⁰ 1600 cm²)に縮小することが出来た。

3. 雷ガンマ線検出器

雷ガンマ線観測で使用する検出器は、センサ系は、シンチレーション検出器機構 を用いている。シンチレータは、TGF直接検出用にBGOシンチレータを、TGFと大 気分子との光核反応由来の熱中性子検出用のLiドープ(EJ-270)のプラスチックシン チレータを用いており、光電子増倍管(R11265U 200)を光センサとして用いている。 信号処理系は、理化学研究所の湯浅氏が開発したDAQシステムを用いている。 DAQシステムは、フロントエンドカードとFPGA/ADCボードからなる。このボード には、12bit 2chのADCチップAD9231が2枚搭載されており、50 MHzの波形サンプリ ングが可能である。[5]

センサ系 信号処理系(DAQシステム) BGOシンチ PMT 立方体 ADC プラシンチ PMT 2インチ PMT 月筒形



PMT PMT

Observation & analysis

・観測状況

夏季に雷雲からどれだけのガンマ線イベントが発生するのかを観測により調べることが装置展開の目的である。 製作した検出器は、夏季に落雷頻度の高い東京スカイ ツリーに8/9~9/27までの期間で展開した。測定デー タは小型PC(Raspberry Pi3)をインターネットに接続し、 東京大学の和田氏のサーバーを経由して得ている。



図7 スカイツリー晴天時の写真

・データ解析

フランクリンジャパンの落雷情報のデータを 見ると、以下の日々がスカイツリー付近にて 落雷が発生している模様であった。

図8の日時のデータから光度曲線を作成し、 Introduction 1に示したTGFによる急激な増光と 減衰が見られないか調べた。(TGFは、高エネル ギー光子が多く発生するので、3 MeV以上で の光度曲線も作成した。

現時点では、解析の結果有意にTGFとみられる信号は なかった。今後より詳細に確かめていく予定である。



図8 落雷情報データマップ





図3 検出器システムのブロック図(左)、DAQシステムの実際の写真(右) 1段目がフロントエンドカード,2段目:FPGA/ADCボード,3段目:ラズパイ3

Purpose

現在のDAQシステムに用いているADCは、50 MHzで波形サンプリングするので、1サ ンプルあたり20 nsかかる。現在は、トリガーをかけて1000 サンプルするので1つのガ ンマ線イベントあたり、20 μsのdead timeが生じる。

TGFの継続時間は、100μs程度なので、イベントを有効に観測するため イベントサンプル時間を短くしたい。目標は20μs->2μs



Future work

本研究で改良した検出器は、これまでも雷雲によるガンマ線イベントの計測が行われ てきた石川県金沢市に、雷雲中の加速領域のサイズや移動速度の解明のためのマッピ ング観測用の検出器の一つとして運用される予定である。 また、冬季雲からのTGFの検出の頻度も調べ、夏季雲の場合と比較する。

reference
1] C.T.R. Wilson, Proc. Phys. Soc. London 37, 32 (1925).
[3] Joseph R. Dwyer · David M. Smith · Steven A. Cummer Space Sci Rev 173:133–196 (2012)
[5] 和田有希 修士論文 東京大学(2017)
[2] U.S. Inan, S.C. Reising, G.J.Fishman and J.M. Horack, Geophys. Res. Lett. 23, 1017 (1996).
[4] Y. Wada,1, 2 T. Enoto,3 K. Nakazawa,4 Y. Furuta,5 T. Yuasa,6 Y. Nakamura,7 T. Morimoto,8 T. Matsumoto,1 K. Makishima,1, 2, 9 and H. Tsuchiya1 Physical Review Letters (2019)