## 雷雲電場による電子加速の ガンマ線観測コラボレーション

和田

湯浅

#### 「これは MeV 天文学の研究会では?」への答えは3つ

中澤

榎戸輝揚<sup>1</sup>,和田有希<sup>2</sup>,湯浅孝行<sup>3</sup>, 奥田和史<sup>2</sup>,古田禄大<sup>2</sup>,楳本大悟<sup>2</sup>, **中野俊男<sup>3</sup>,中澤知洋<sup>2</sup>,土屋晴文<sup>3</sup> ほか**1)京都大学 白眉センター/宇宙物理学教室
2)東京大学 物理学専攻, 3) 理化学研究所

奥田

古田

MeV ガンマ線天文学研究会 @ 京都大学益川ホール, 2017年2月28日 13:00- (25+5分) http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/conference/mev-astro/program.html

#### 自然界の粒子加速における電場の役割



#### 地上の放射線観測でも自然界の粒子加速の研究が可能

牧島, 日本物理学会誌 (2008); Makishima, Astronomische Nachrichten (1999)

#### 雷雲活動に伴う電子加速

- 一般に、密度が高く平均自由工程の長い
   大気中では高エネルギー電子の加速は難しい。
- ・ 雷雲活動/落雷に同期した放射線の観測例
  - 雷雲から (MacCarthy et al., 1985; Eack et al., 1996)
  - 自然の落雷から (Moore et al., 2001)
  - ロケット誘雷実験から (Dowyer et al, 2003)
  - 衛星軌道上での Terrestrial Gamma-ray Flashes (Fishman et al, 1998; Smith et al., 2004)
- ・ 雷雲内部/落雷時における電場による
   電子の相対論的加速の可能性。



Dwyer et al., 2003, Science

- 日本海側の冬季雷雲時に継続時間の長い(1~2分)の放射線の増大現象
   が観測されていた。(Yamasaki et al., 1998; Torii et al., 2002)
- 放射線の種類、スペクトル、継続時間、発生頻度などの観測が進む。

## 雷雲内の電子加速の観測的研究



## 大気中の電子加速: 冬季雷雲と夏季高山



大気中の逃走電子なだれ増幅モデル (Gurevich et al., Phys. Lett. A, 165, 463, 1992)

#### 雷雲内の電場の計測





#### 典型的に電場 *E*~0.05-0.1 MV/m まれに *E*>0.2 MV/m

強電場と宇宙線が雷放電トリガー?

Gurevich & Zybin (Phys. Today, May 2005) 気球実験 Eack et al, 1996, Marshall & Stolzenburg 2001

#### 雷雲内を航空機で測定! 雷放電の前に放射線!?



McCarthy & Parks, Geophysical Research Letters, 1985, "Further Observations of X-rays inside Thunderstorms"

## 修論〆切の数日前に雷雲ガンマ線を検出!?



#### 2007年1月6-7日に二つ目玉の 低気圧が合体し爆弾低気圧に!

2007年1月6日 9:00





(C) SonotaCo, http://sonotaco.jp/forum/

榎戸修論(2006); Tsuchiya, Enoto et al., PRL (2007)

## 雷雲からのガンマ線放射 (2007年の観測開始時)



図は、榎戸天文月報(2007)より 榎戸修論(2006); Tsuchiya, Enoto et al., PRL (2007)

## 長時間バーストのエネルギー評価(単地点観測)



- 相対論的な電子(>~1 MeV)からの放射は前方に鋭く集中する。θ~m<sub>e</sub>c<sup>2</sup>/T<sub>e</sub> = 3 deg (10 MeV 電子)
- 円錐状のガンマ線ビームと近似。

源までの距離 *d* = 350 m, 開き角 *θ* = 3 deg

- ・検出器の直上に到来した光子数(1-10 MeV)  $n_{\rm p} = 5 \times 10^4 \text{ (photons/m}^2\text{)}$
- 源での光子総数(1-10 MeV)

 $N_{\rm p}=d^2n_{\rm p}\epsilon^{-1}\Delta\Omega\sim 1.8\times 10^8$  (photons)

 $\epsilon:$  attenuation factor,  $\bigtriangleup \Omega$  : solid angle

• 電子の総エネルギー

 $E_{\rm e} = N_{\rm p}/\eta \times 10 \text{ MeV} \sim 0.03 \text{ J}$ n: bremsstrahlung efficiency

継続時間が数分の間のエネルギー総量 0.03 J は、single lightning である 10<sup>7-10</sup> J に比べ十分小さい。



200

100

0

Time (UT)

継続時間が数秒から数分

13:32:00

High energy  $\gamma$ )

10

0

13:31:00

おもに雷雲中で観測(冬季雷雲や高山)

13:33:00

13:34:00

13:35:00

- 雷雲内の電場での準安定な加速
- 10-20 MeVまで基本的に伸びている
- 放電とは基本的に無関係に生じている



継続時間がミリ秒やそれ以下

High energy  $\gamma$ )

05:46:00

自然あるいは人工の雷放電に同期

05:47:00

- 雷放電のリーダー段階で発生 •
- 典型的に数百keVまで、稀に20MeV

05:48:00

Time (UT)

05:50:00

05:49:00

衛星による大気上層での TGF 観測

放電そのもに同期?





#### 準定常的に維持される

短時間の放電現象

雷雲からの放射線の存在や性質は確率。その正体解明へ!

#### 雷放電 (Lightening)

#### 冬季雷雲マッピング観測への新展開

#### シベリア寒気団からの冷たい北西の季節風が、暖かく湿った日本海 を渡って積乱雲を発達。強力な落雷(10<sup>1-3</sup>倍)や低い雲底(<1 km)。



## 平成27年度: 学術系クラウドファンディング SNS を活用して、2ヶ月で100万円を目指す!





## 小型の観測装置の準備 (2015年度プロトタイプ)



放射線イベント測定:時刻,エネルギー • 無機シンチレータ: ~0.5-8 MeV 帯域 ・ プラシン: 荷電粒子(宇宙線等)の弁別 ・~30 byte/event, 波形25MHzサンプル データ取得システムの開発(湯浅ほか) ・専用フロントエンドボードの独自開発 ・ FPGA+Raspberry Piの DAQ システム 温度などの複数の環境データも集積 ウェブカメラで上空の様子を記録 モバイル通信で遠隔操作・データ送信 14-15年度で段階的にバージョンアップ • 製作費用~40万円 (シンチレータ含む)

多地点測定システムの開発は順調に進捗中



## 平成27年度: 高校の屋上で観測、金沢で初検出



## 2015-16年にかけての観測網の構築



和田有希修士論文 (2017) 東京大学より抜粋

(c) Google, ZENRIN, DATA SIO, NOAA, US Navy, NGA, GEBCO, Landsat

## Raspberry Pi 駆動の小型で安価な放射線モニタ



#### 標準型の観測装置の完成 (2016年度版)



- •BGOシンチレータ (80 x 25 x 250 mm<sup>3</sup>)は 理研仁科センターから借用。
- •~0.5-8 MeV の放射線イベントごとに GPS時刻、エネルギー等を記録。
- •フロントボード(子基板)を製作。HV, センサー, ゲイン, GPS ほかを搭載。
- ・温度、気圧ほか環境データ、健康診断の情報も取得。M2X でリアルタイム監視。
- モバイル通信で遠隔操作 (ssh)、データ送信可。ただし、通信料で送信を制限。
- ウェブカメラで空の様子も記録。電場計はまだ配備していない(来年度へ)

## 【1】乗鞍岳 宇宙線観測所(2,770 m)への設置

#### 2016年7月11-12日に実施 1台を設置







電源ケーブル埋設を手伝ってくれた 東大の古川健人君,松元崇弘君 瀧田所長はじめ、観測所みなさん には大変お世話になりました。 どうもありがとうございました!

設置作業中の和田君

## 【2】富士山山頂測候所 (3,775 m)への設置

富士山特別地域

#### 2016年7月15-16日に実施 2台を設置

日本で最高度の放射線検出器@ドーム屋根裏 予想された宇宙線量の増大を確認

鴨川仁さん(学芸大)グループ、NPO富士山 測候所を活用する会のみなさまのご支援、 大変ありがとうございました!

## 【3】 金沢~小松の大学と高校 5箇所に設置

#### 2016年9月10-14日に実施 5台を設置

#### 米徳さん(金沢大学)はじめ各高校の 先生のご協力、ありがとうございました

サイエンスヒルズこまつ ひととものづくり科学館

金沢大学付属高校

泉丘高校 (出前授業も!)

小松高校

金沢市 泉丘高校の屋上

#### 金沢~小松域で雷雲ガンマ線の観測に成功!



#### 金沢~小松域で雷雲ガンマ線の観測に成功!



10

Ω

-200

-100

0

Time from Event Center (second)

同一雷雲のガンマ線放射

を2地点で観測に成功!

100

200

- 継続時間(FWHM)は、サイエンスヒルズ(90±2) 秒)と小松高校(97±7秒)で一致する。
- ・サイエンスヒルズは112秒ほど小松高校に対し て遅れて増光していた。
- 気象レーダーのマップから推測される雲の移動 速度~740 m/分での移動と考えて矛盾しない。

和田有希 修士論文 (2017) 東京大学

金沢~小松域で雷雲ガンマ線の観測に成功!



ガンマ線は~15 MeV 近くまで検出できた。単一べきではなく、折れ曲がりあり。

カウントが高い時期に「べき」が硬くなる傾向。古田君(東大)による Geant4 による制動放射シミュレーションの結果と定性的に一致している。

#### 和田有希 修士論文 (2017) 東京大学

## ショートバースト現象も検出@柏崎(新潟)



## ガンマ線の照射域サイズと明るさの相関@柏崎

柏崎のモニタリングポストと我々の専用検出器を合わせて、ガンマ線の照射域 サイズを計測している。例えば、2014年12月2日の明るいイベント(従来の~20 倍の明るさ)では、南北に 1 km, 東西に 0.7 km ほどの楕円形と推測。

![](_page_27_Figure_2.jpeg)

#### **雷雲ガンマ線観測と数値気象シミュレーション** 氷床電荷の分離機構<sup>(1)</sup>により、雲が電極構造を持ち、電場が生じる。 放射線の観測との比較へ。(1)氷があられと衝突して、弾んんだ際にあられ表面と氷の 表面で電荷が移動し、あられ、氷がそれぞれ正または負に帯電する機構 (Takahashi 1978)

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

理研 AICS で開発中の大型計算機向け気象・気候ライブラリ SCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment) に雷モデルを実装する、理研 AICS 佐藤陽祐さんとの共同研究へ

![](_page_29_Picture_0.jpeg)

![](_page_29_Picture_1.jpeg)

白黒:雲水

80グリッド

赤:正電荷、青:負電荷

(500 m グ<u>リッド</u>スケール)

40 km

黄: 雷放電の経路

(C)RIKEN AICS

SCALE-TH の実装(佐藤さん)により、電荷3極構造と放電を再現

- •電荷分離機構
- ・電荷の移動
- ・電場の計算
- ・放電の機構
  - ある電場強度の閾値
     (100-200 kV/m)を超
     えたら放電開始

理想化実験によって、正負正の 鉛直電荷構造を再現できており、 今後は、現実の地形や実際の気 象状況を取り込む現実実験で、

雷雲ガンマ線との比較へ (Genat4, CORSIKA も使用)

#### 地球ガンマ線フラッシュ (Terrestrial Gamma-ray Flash)

90年代以降に、天文衛星に搭載された放射線検出器が、 地球方向から到来するガンマ線のフラッシュを観測した。

- ・継続時間は 1-10 ms ほどで、エネルギー ~2 MeV で 20 MeV まで伸びる
- ・発生場所から、雷雲活動に関連することを示唆

![](_page_30_Picture_4.jpeg)

![](_page_30_Figure_5.jpeg)

Fisherman et al., Science (1994); Smith et al., Science (2005)

80.000 64.000 48.000 32.000 16.000 8.000 4.000 2.000 1.000 0.500

> 0.250 0.125 0.062 0.031 0.016

0.008

#### 地球ガンマ線フラッシュ (Terrestrial Gamma-ray Flash)

- 当初は大気上層の可視光発光(エルブスやスプライト)に関係するとも考えられたが、最近までの観測により雷雲の直上で起きている可能性が示唆
- ・ 雷雲上空を駆け上がる電子からの制動放射ガンマ線?

![](_page_31_Picture_3.jpeg)

![](_page_32_Figure_0.jpeg)

## 小型衛星 SPRITE-SAT (雷神/RISING)

- ・ 雷電波とTGFの同時観測を狙う東北大学が主導の H-IIA ピギーバック小型衛星。
- 50 cm 立方, 重量 50 kg, 最大電力 17 W, 太陽同期軌道 (660 km, 98 deg)
- 観測装置
  - 可視光観測 (LSI/WFC): 東北大理
  - 電波観測 (VLF): 東北大理/スタンフォード
  - ガンマ線観測 (TGC): 宇宙研/東大理

![](_page_33_Picture_7.jpeg)

#### **Terrestrial Gamma-ray Counter (TGC)**

・Csl 結晶シンチレータ(5x5x1.38 cm, .0.17 kg) を4個/台搭載

アバランシェフォトダイオード HPK S8664 (APD,受光面 1x1 cm<sup>2</sup>)

- ・バーストデータをリングバッファに蓄積 (260 us ビン, 132+400 ms)
- ・150 keV 2.8 MeV の 4帯域のガンマ線ライトカーブを取得
- ・2台のTGCで合計 2.6 kg & 0.72 W の低消費電力の観測装置を達成

![](_page_34_Figure_6.jpeg)

## TGC 製作の様子 / 榎戸は博士課程

attat 115

222

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

# 2009年に打ち上げられるも、電源系の問題で装置の電源投入に至らず。。

# 地上観測の経験をもとに小型化 ➡ドローンによる観測? ➡係留気球による観測? ➡小型衛星向けモジュール化?

#### **SPRITE-SAT (RISING)**

「いぶき」搭載カメラによる 衛星分離の様子 (2009年1月23日)©JAXA

http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/SPRITE-SAT/index\_e.html

#### まとめ: 雷雲ガンマ線の観測 金沢小松の多地点モニタリングへの展開

1. 小型分散型の観測網の構築

![](_page_37_Picture_2.jpeg)

Raspberry Pi 駆動の FPGA/ADC ボードと、前段回路を搭載し たフロントエンドボードを開発し、小型安価な放射線システムを 用意した。小松、金沢、能登の高校等と協力し観測網を整備した

- 2. 金沢~小松、柏崎において新システムでの雷雲放射線の検出
   2015年度には3例の雷雲ガンマ線(ロングバースト)を検出し、2016
   年度に4例のイベントが見つかった。さらに柏崎では2016年度に
   雷放電に関連するショートバーストを2例検出した。
- 3. 数値気象シミュレーションの連携と今後の研究方針

今後は雷雲ガンマ線を観測した当日の気象環境を数値気象シミュ レーションで模擬し、大気内の放射線モンテカルロシミュレーショ ンと雷雲ガンマ線の観測結果と合わせた研究を進めたい。

→ 小型モジュール化して飛翔体による観測につなげたい

# 天然放射性核種

#### 3つの種類に分類される

1. 原始放射性核種 (壊変系列をなす)

半減期が長く、太陽系ができた約45億年前から消えずに生き残っ た、放射性元素を親とする放射壊変系列に属するもの。<sup>238</sup>U (半減 期 45億年) を親とするウラン系列核種、 <sup>232</sup>Th (半減期140億年) を親とするトリウム系列核種など。

2. 原始放射性核種 (壊変系列をなさない)

<sup>40</sup>K (半減期 12.7億年)のように、放射壊変系列に属さない長寿命の核種。全カリウム中に 0.0117% ほど存在する。他にルビジウム87 (<sup>87</sup>Rb, 半減期475億年)などがある。

3. 誘導放射性核種

宇宙線と高層大気中での原子核(窒素、酸素、アルゴンなど)が核反応(破砕反応)を起こしたり、その際の中性子が二次的な反応を起こして生じる核種 (<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>Cなど)。現在も生成されている。

![](_page_40_Figure_0.jpeg)

#### 雷雲ガンマ線の照射域のサイズ@柏崎

![](_page_41_Figure_1.jpeg)