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

「これは MeV 天文学の研究会では？」への答えは３つ

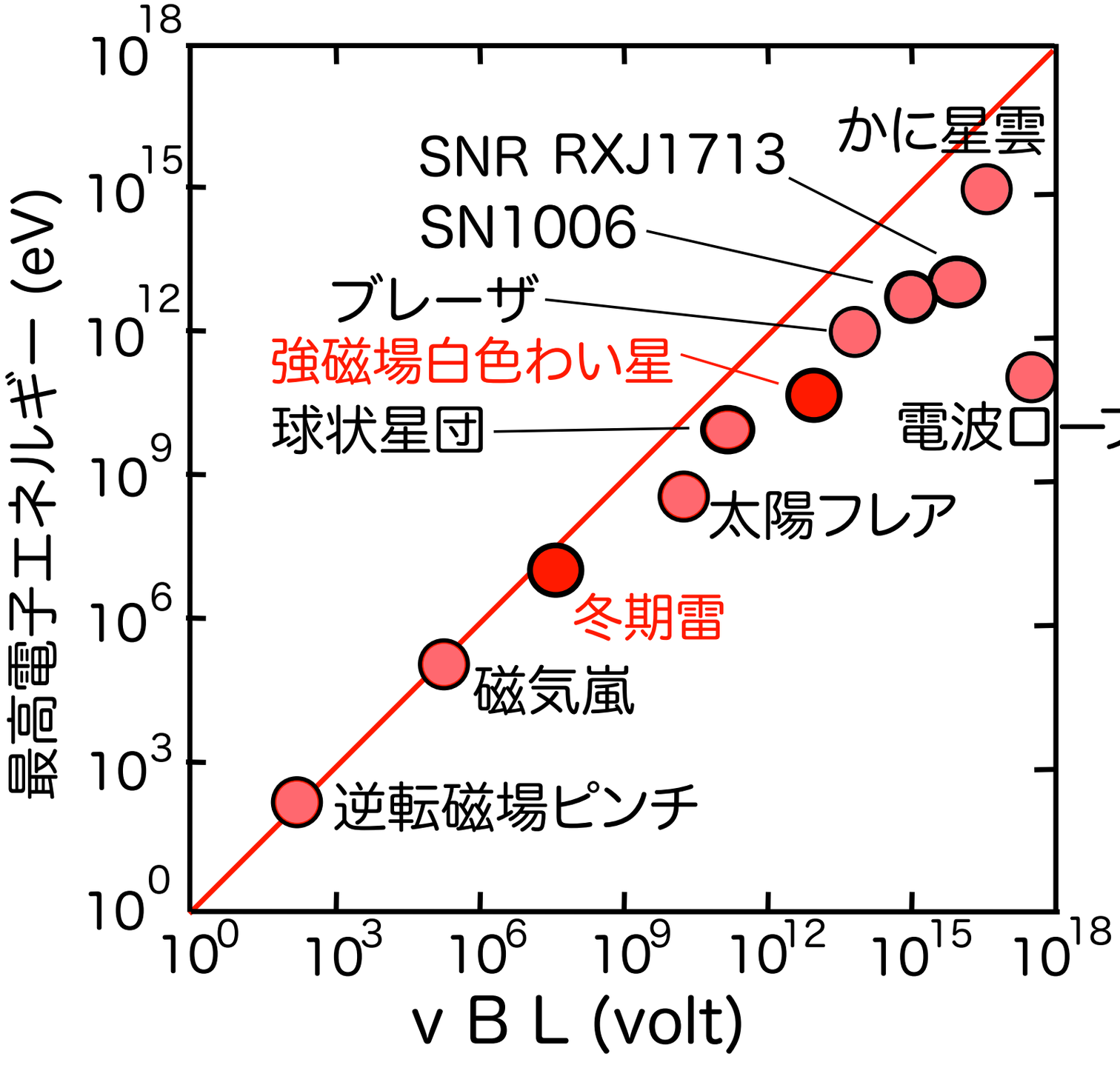


榎戸輝揚[1], 和田有希[2], 湯浅孝行[3],
奥田和史[2], 古田禄大[2], 楳本大悟[2],
中野俊男[3], 中澤知洋[2], 土屋晴文[3] ほか

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

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



電子加速のスケーリング則

$E_{max} = (1\sim10^{-3})\ v\ B\ L$

E_{max}: 宇宙のいろいろな加速現場で測定、または推定された電子の最高エネルギー

v: 系の代表的な速度

B: 代表的な磁場強度

L: 系の特徴的なスケール

1. 相対論的電子のラーマー半径 $\propto E/B$ が系のスケールLより小さく電子が加速領域に閉じ込められる
2. 部分系のバルク運動に伴う誘導起電力とも解釈

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

雷雲ガンマ線は
雷放電の前駆現象？

宇宙線

正電荷

負電荷

強電場域
L_{av}

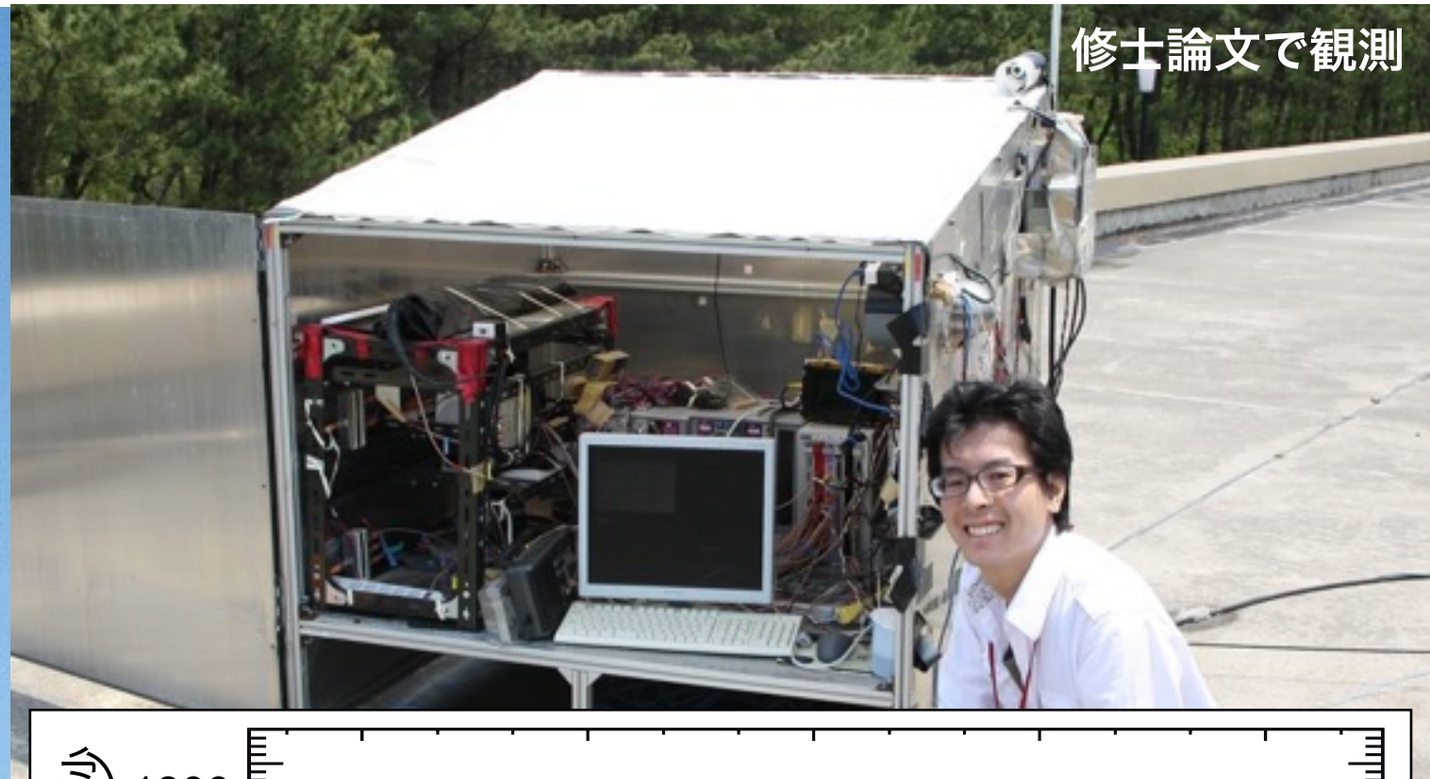
電子加速

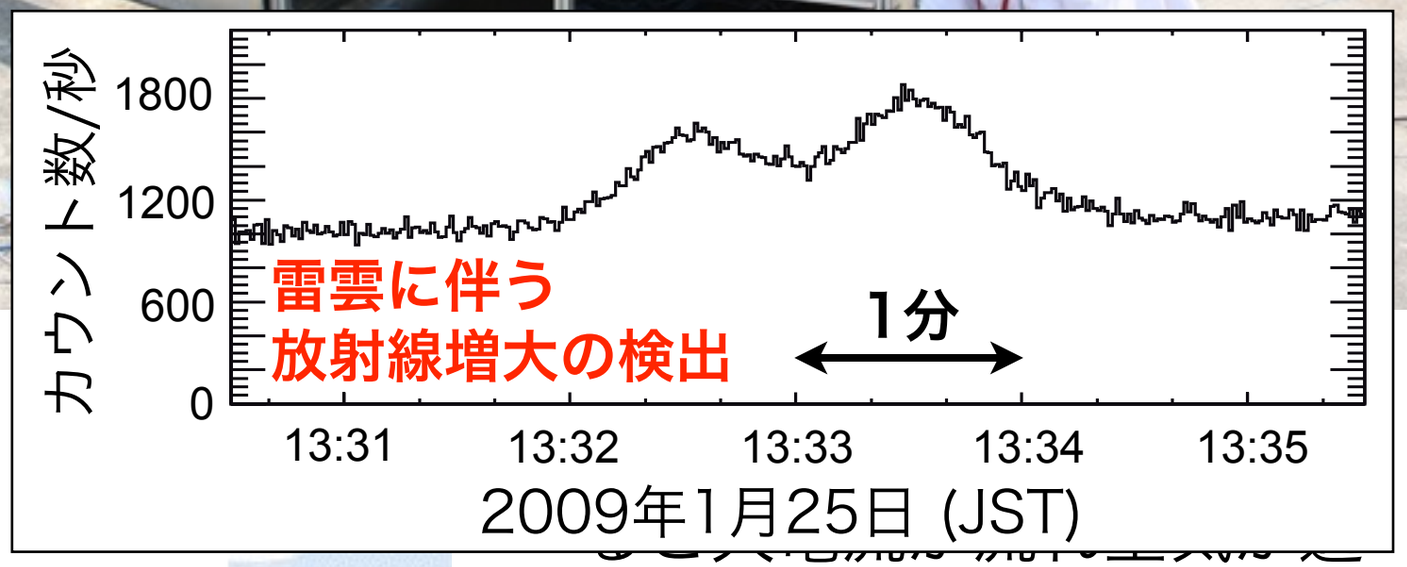
雪崩増幅

正電荷
(ポケット正電荷)

制動放射
ガンマ線

雷放電
(落雷)

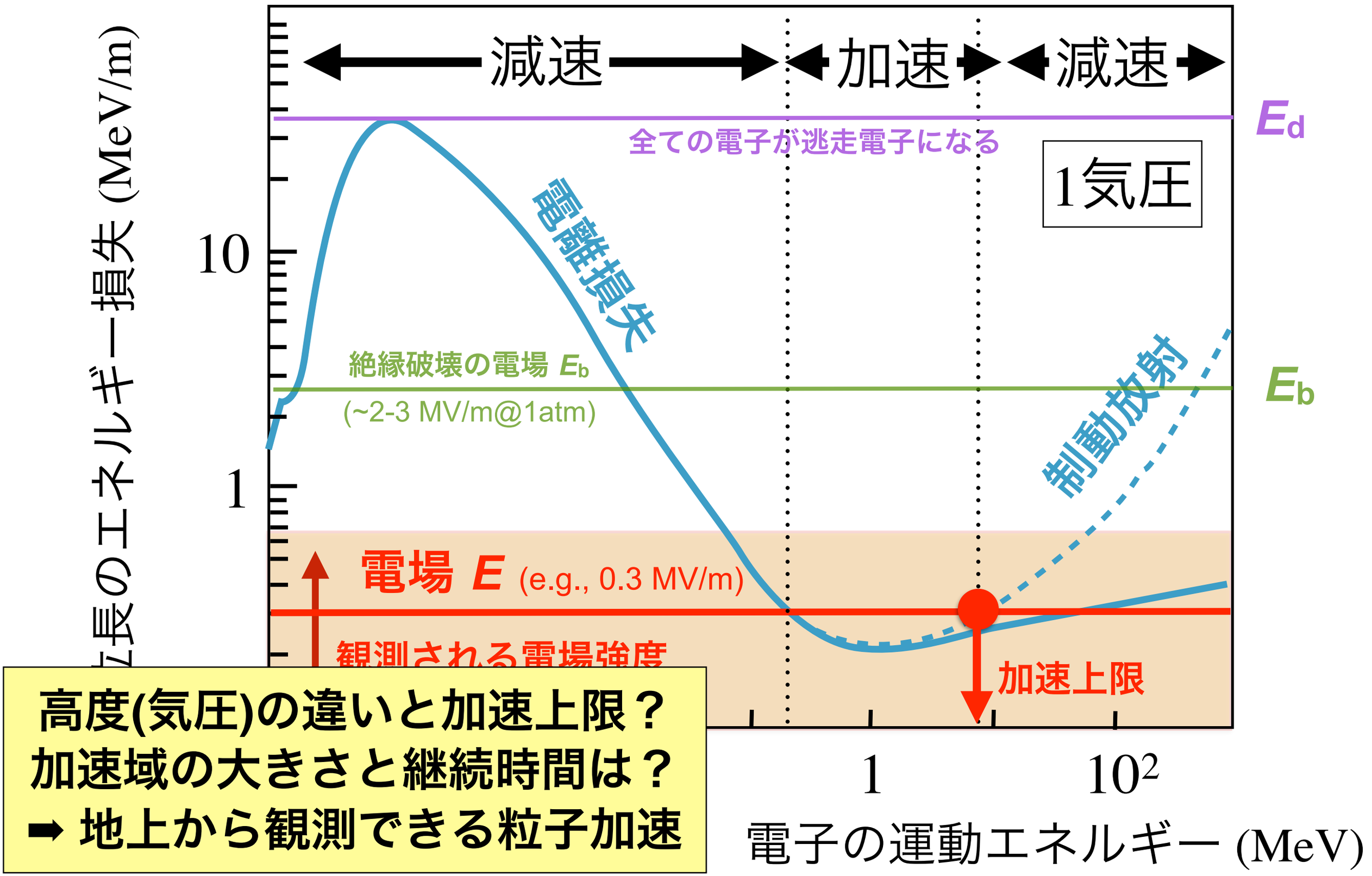




柏崎刈羽原発での定点観測から
雷雲電場による電子加速を観測

Tsuchiya, Enoto, et al., PRL 2007, 2009
榎戸, 修論「雷雲電場による粒子加速の観測的研究」東大 (2007)
榎戸&土屋「雷雲は天然の粒子加速器か？」天文月報 (2008)

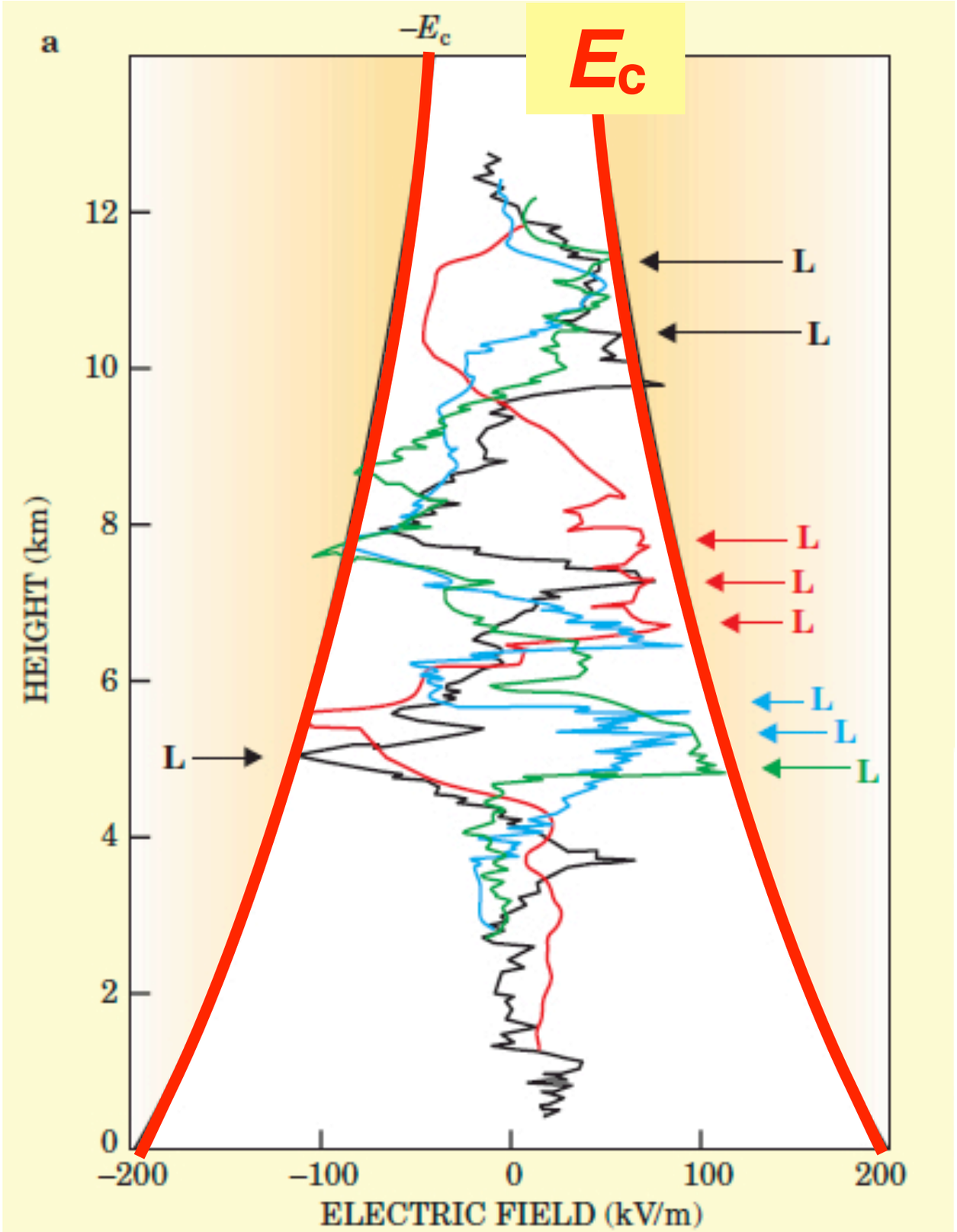
大気中の電子加速: 冬季雷雲と夏季高山

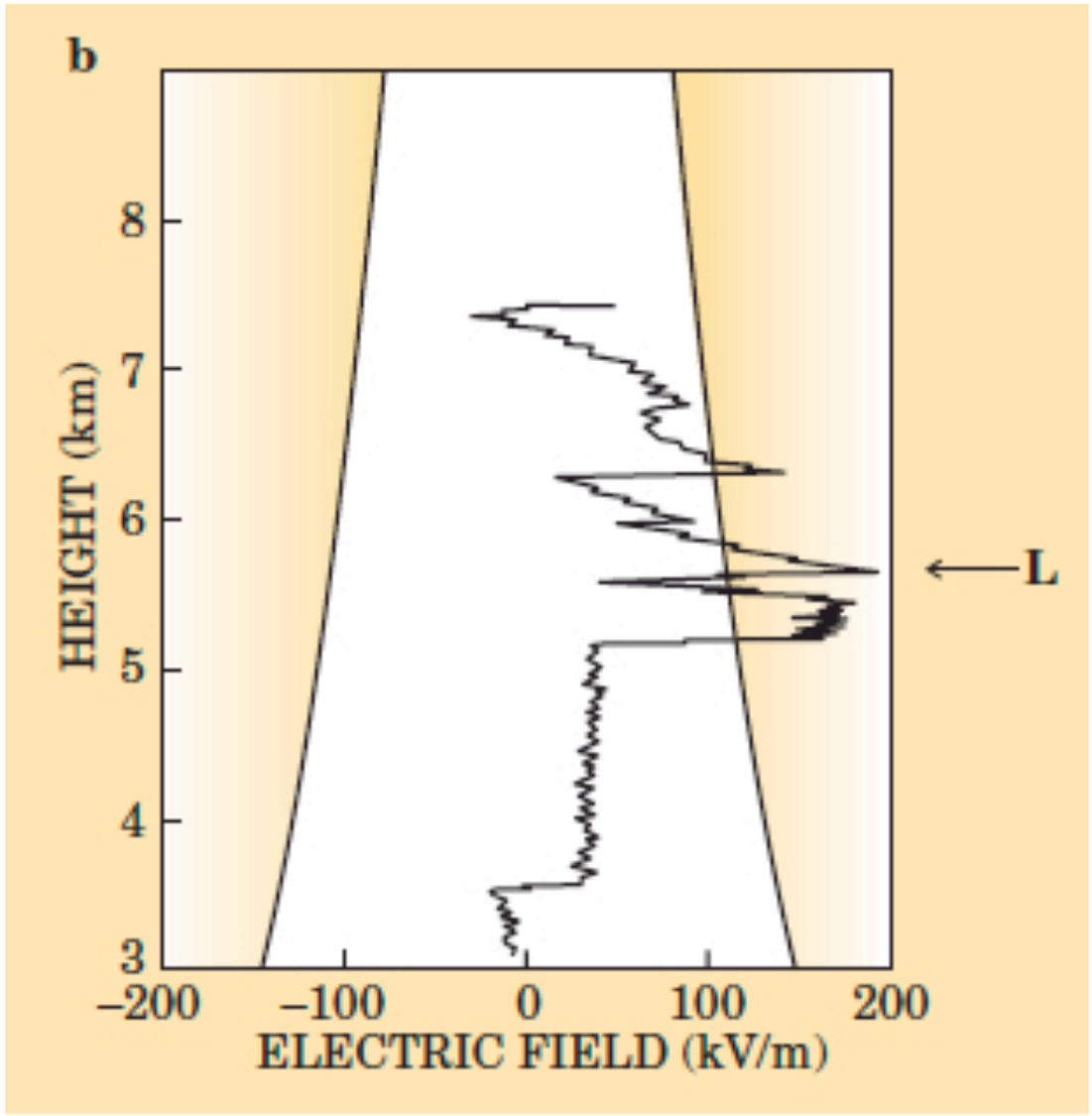


高度(気圧)の違いと加速上限？
加速域の大きさと継続時間は？
➡ 地上から観測できる粒子加速

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



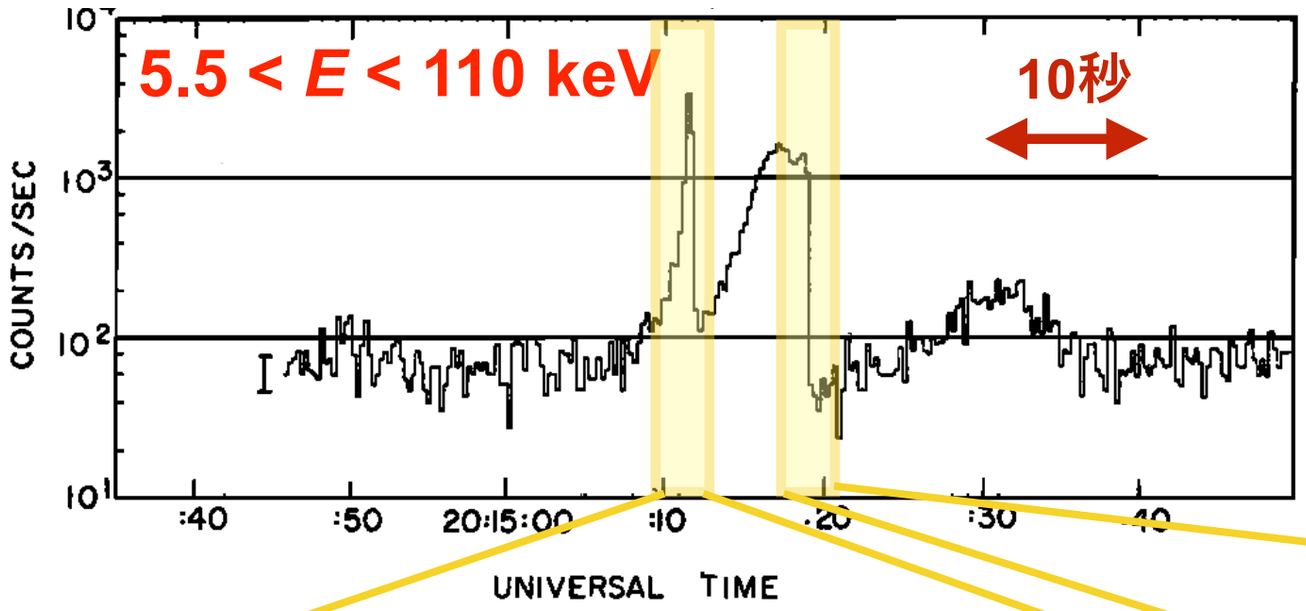


典型的に電場 E ~ 0.05-0.1 MV/m
まれに E > 0.2 MV/m

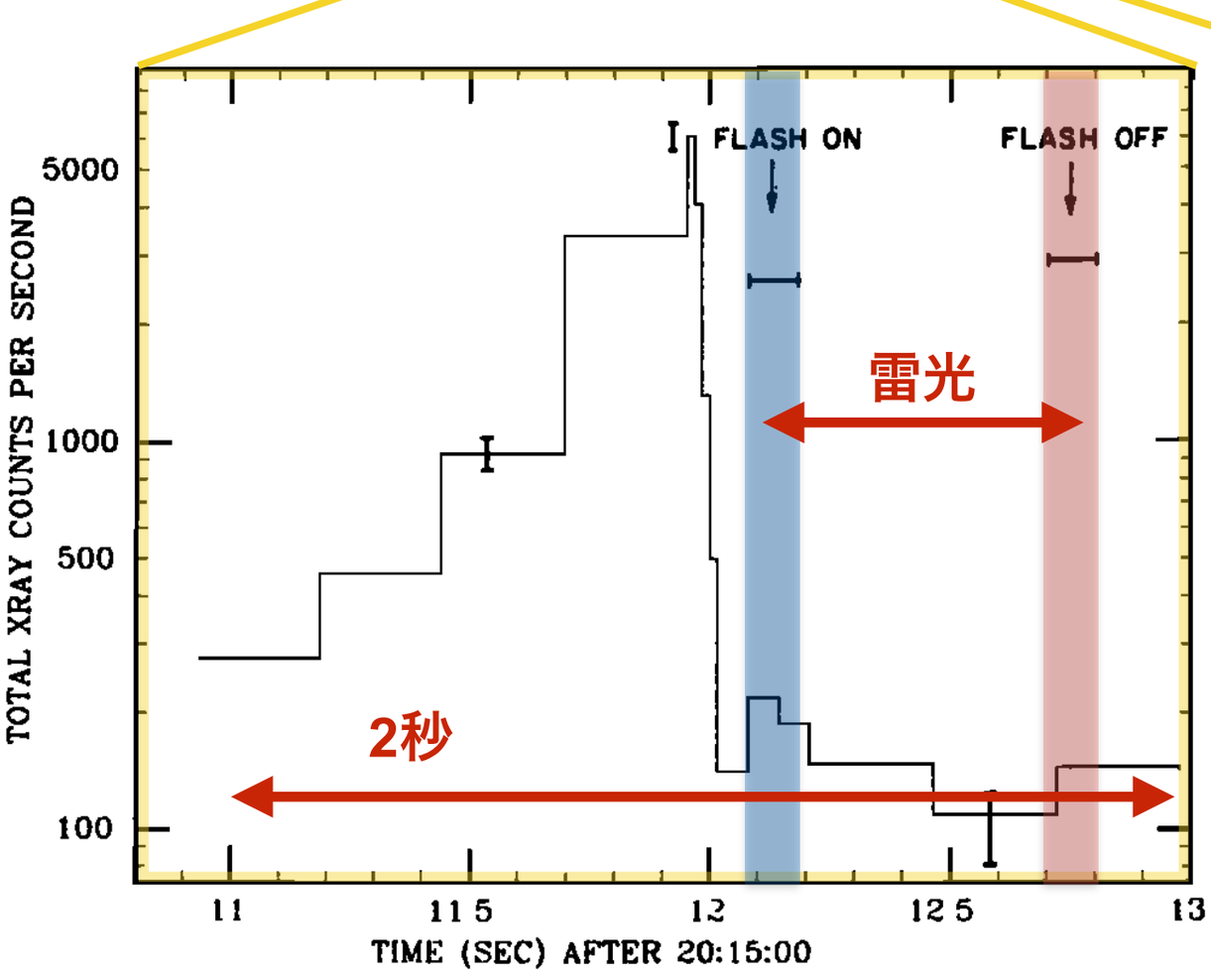
強電場と宇宙線が雷放電トリガー？

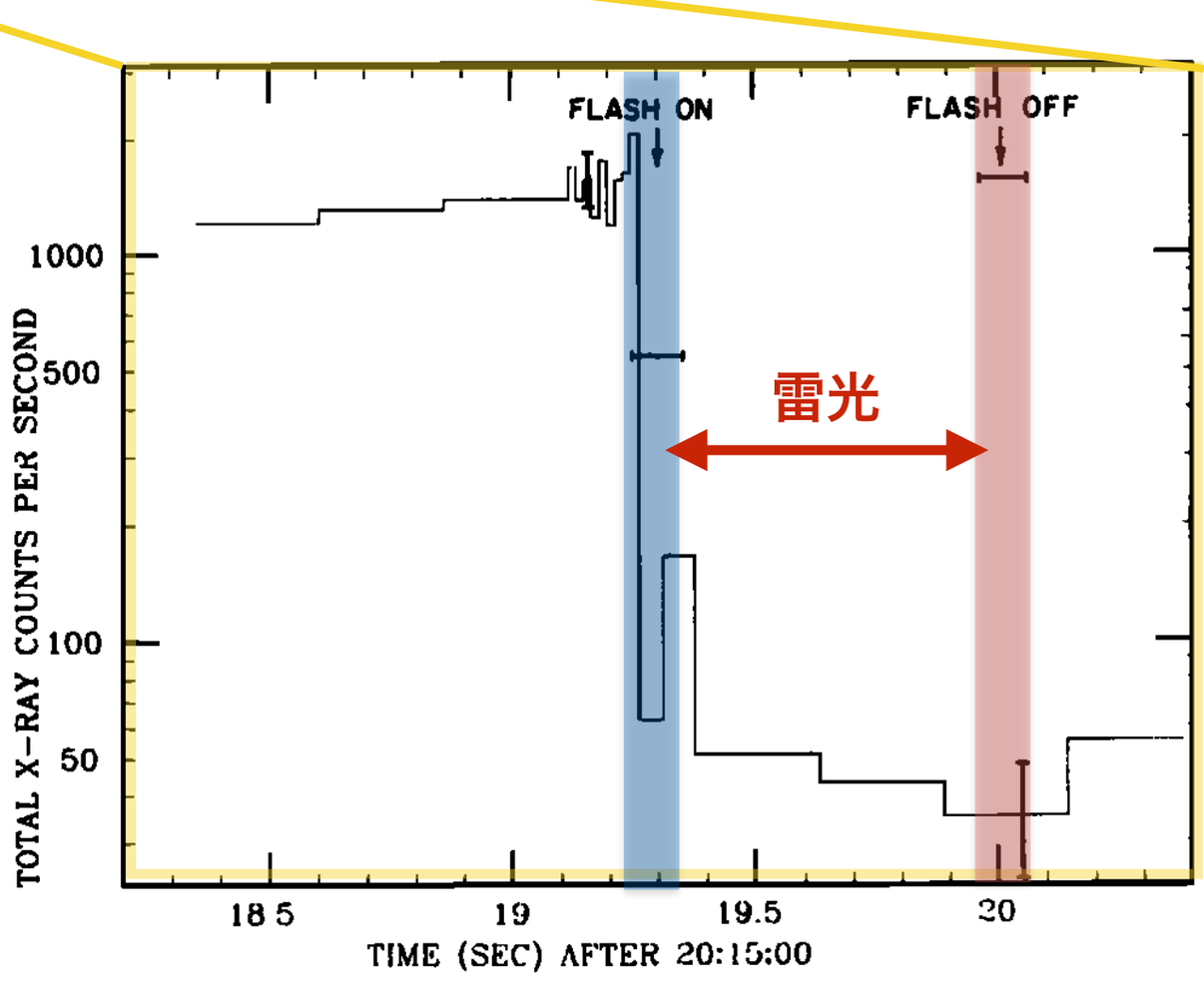
Gurevich & Zybin (Phys. Today, May 2005)
気球実験 Eack et al, 1996, Marshall & Stolzenburg 2001

雷雲内を航空機で測定! 雷放電の前に放射線!?



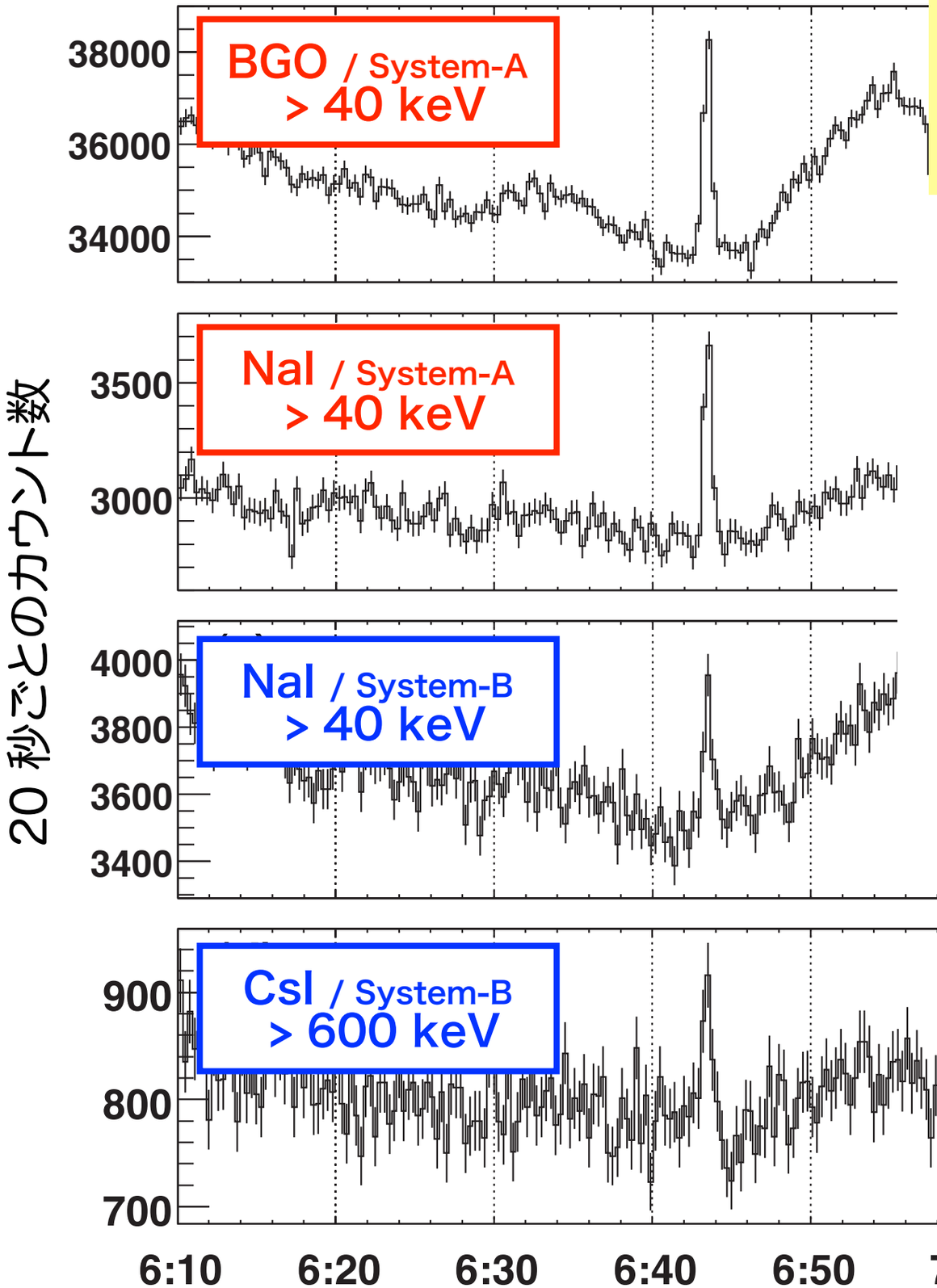
- 1983年7月19日, 高度9 km。
- F106 航空機 (時速 900 km/h)で雷雲の内部で放射線観測。
- NaI シンチレータ+光電子増倍管 (PMT) & 何もつけないPMT
- 雷光検出に PIN ダイオード(可視光)





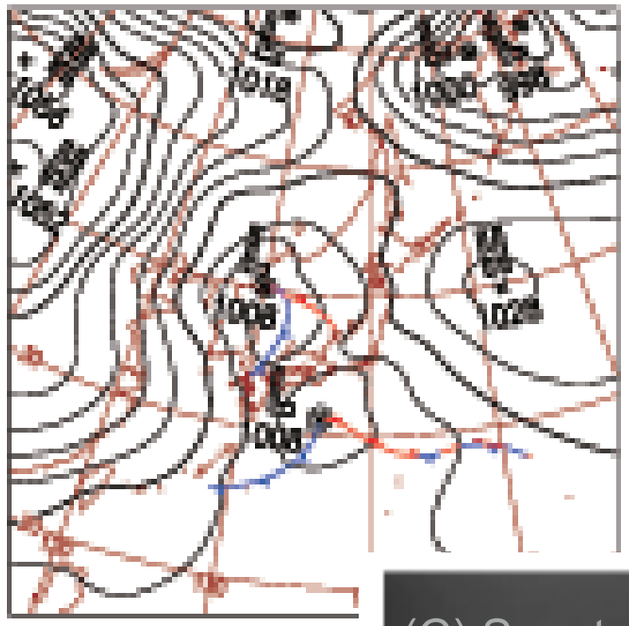
McCarthy & Parks, Geophysical Research Letters, 1985, “Further Observations of X-rays inside Thunderstorms”

修論〆切の数日前に雷雲ガンマ線を検出!?

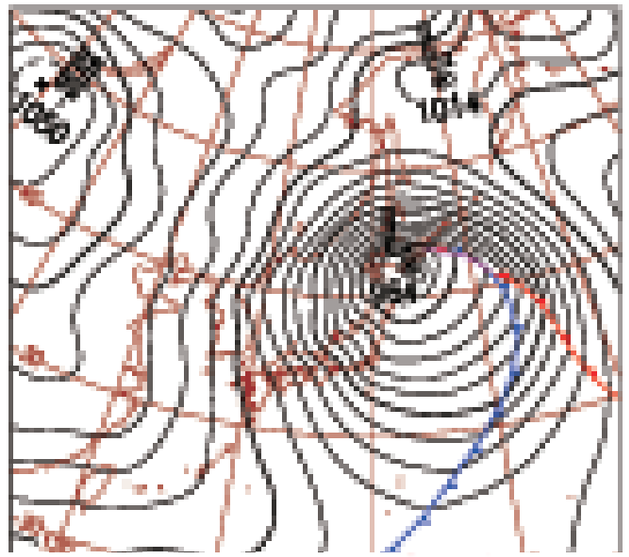


2007年1月6-7日に二つ目玉の低気圧が合体し爆弾低気圧に！

2007年1月6日 9:00



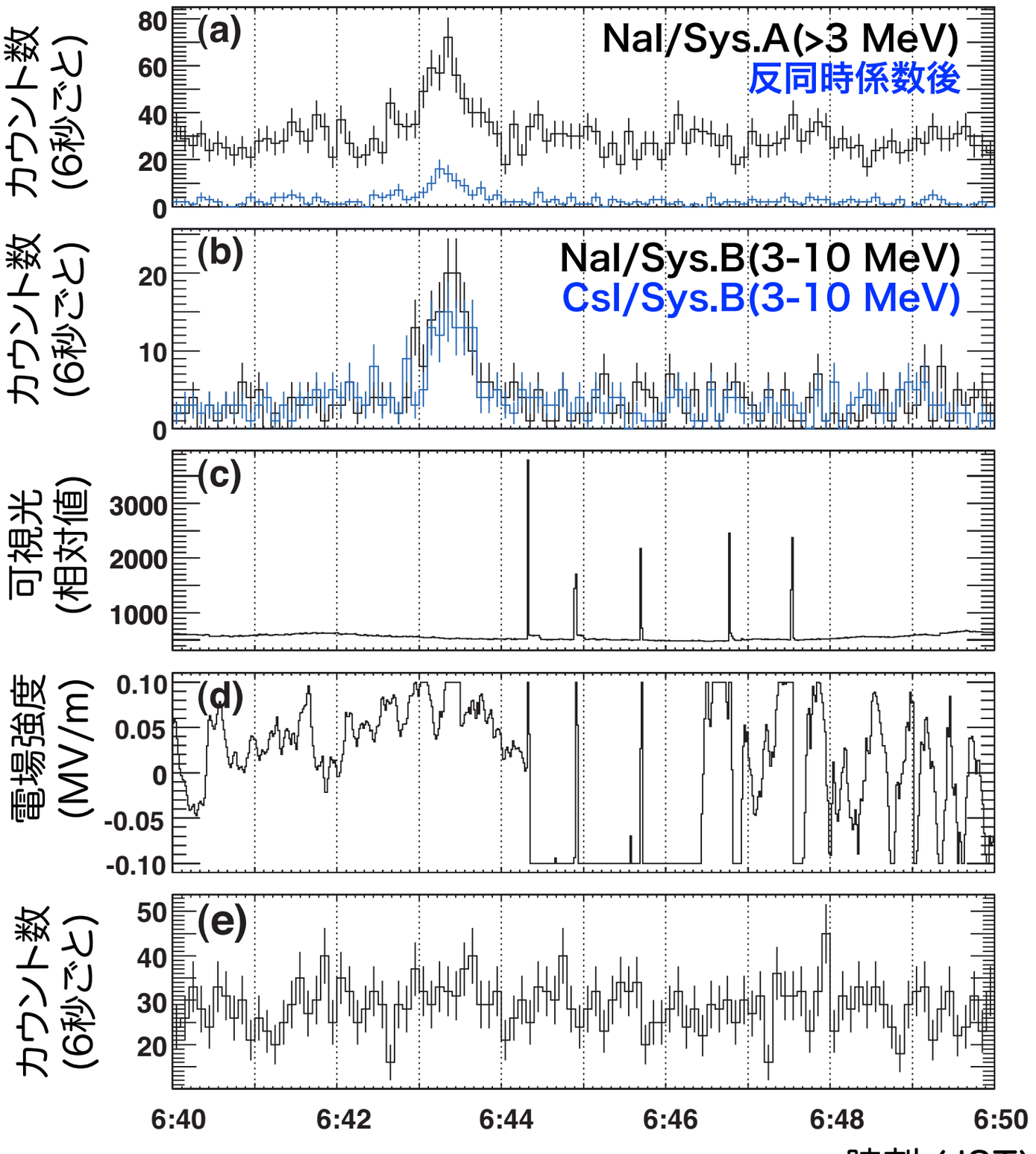
2007年1月7日 9:00

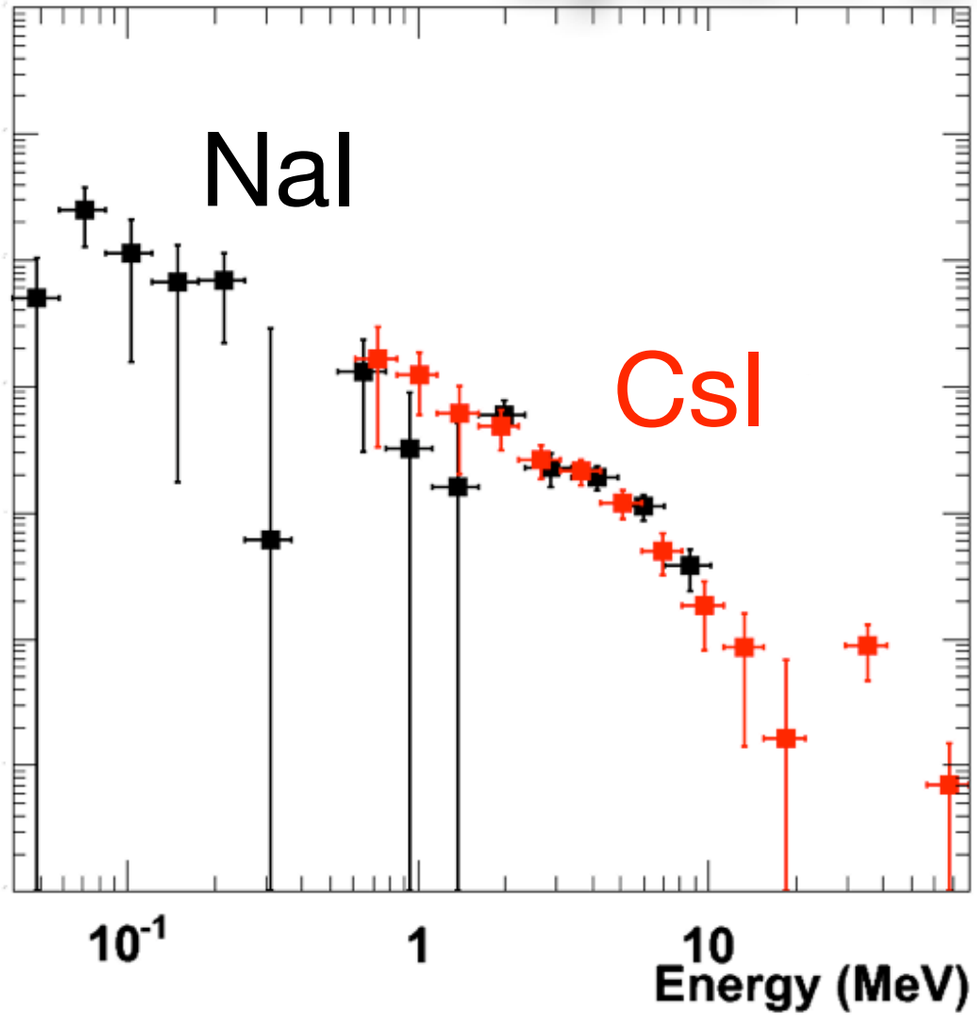




榎戸修論(2006); Tsuchiya, Enoto et al., PRL (2007)

雷雲からのガンマ線放射 (2007年の観測開始時)

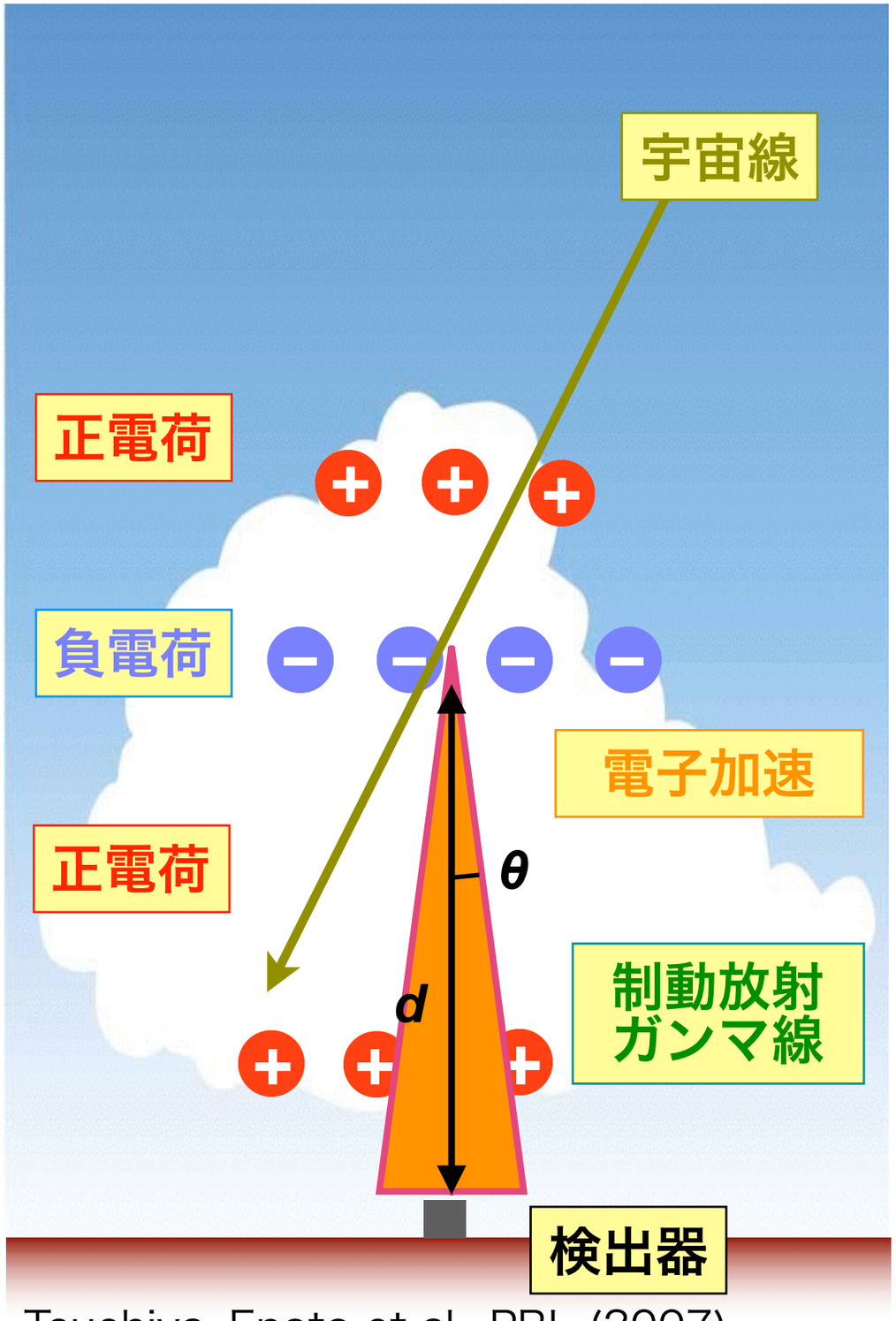




継続時間 ~36秒にわたり
10 MeV に達する
ガンマ線が上空から到来
(直後に雷放電が発生)

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）



Tsuchiya, Enoto et al., PRL (2007)

- 相対論的な電子(>~ 1 MeV)からの放射は前方に鋭く集中する。$\theta \sim m_e c^2/T_e = 3$ 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 $\theta = 3$ deg
- **検出器の直上に到来した光子数(1-10 MeV)**

  $n_p = 5\times10^4$ (photons/m^2)
- **源での光子総数(1-10 MeV)**

  $N_p = d^2 n_p \varepsilon^{-1} \triangle\Omega \sim 1.8\times10^8$ (photons)

  ε: attenuation factor, $\triangle\Omega$: solid angle
- **電子の総エネルギー**

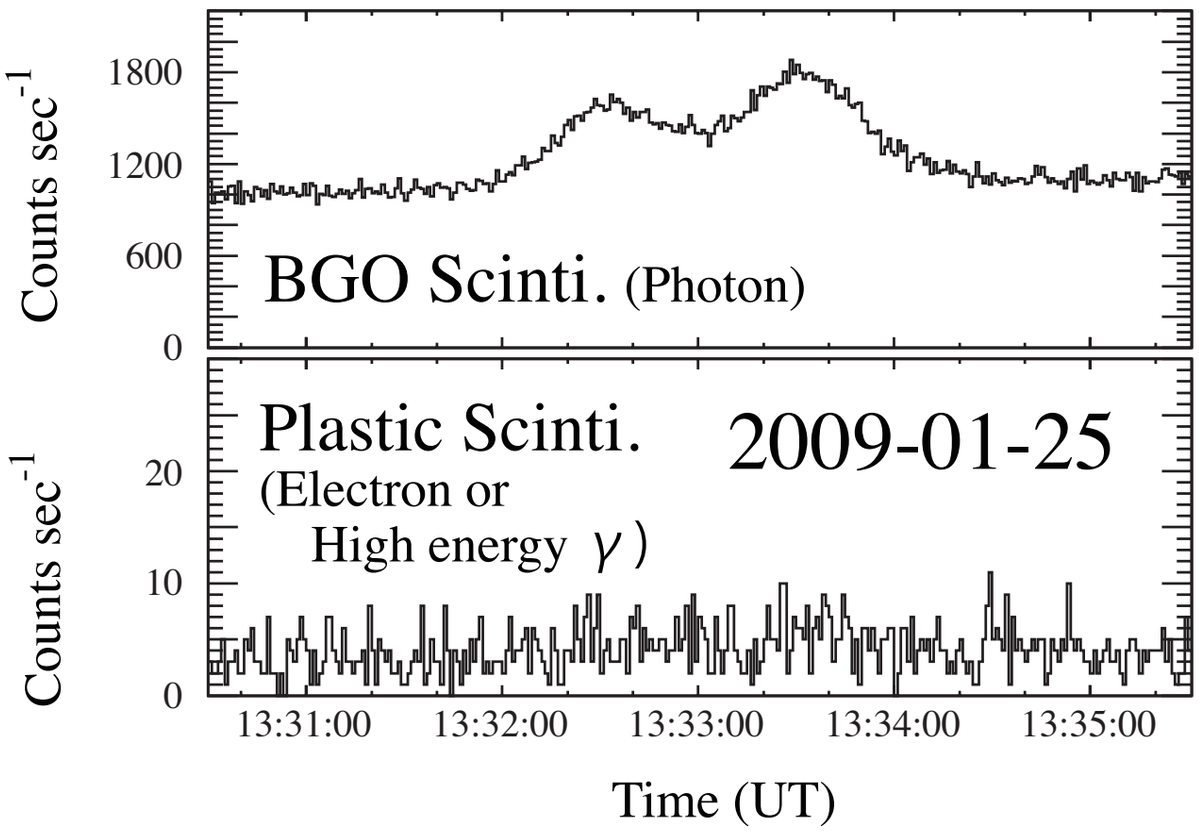
  $E_e = N_p/\eta \times 10$ MeV ~ 0.03 J

  η: 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 $10^{7\text{-}10}$ J に比べ十分小さい。

観測例の蓄積 (8年間で12例以上を検出)

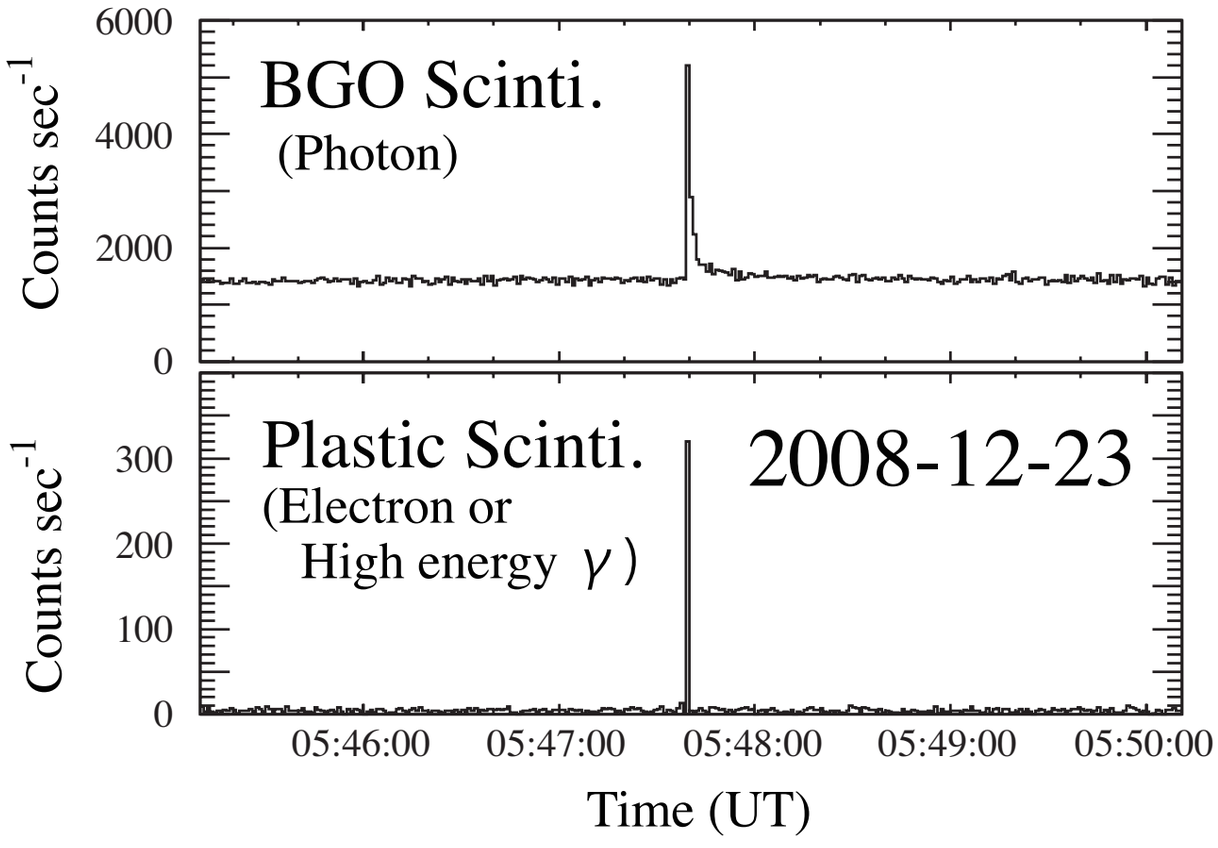
長時間バースト



- **継続時間が数秒から数分**
- **おもに雷雲中で観測（冬季雷雲や高山）**
  - 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**

➡ 放電の前駆現象？

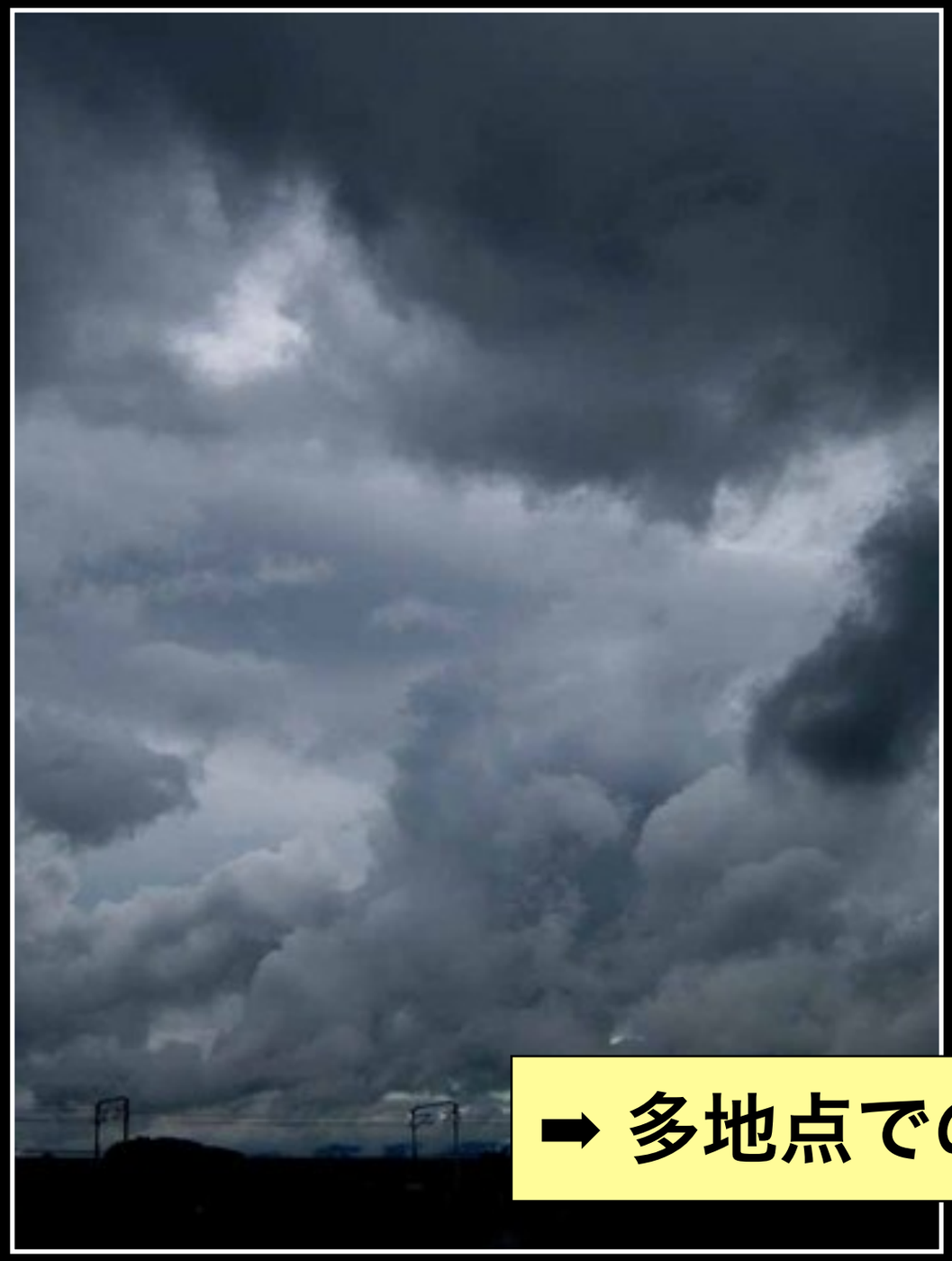
短時間バースト



- **継続時間がミリ秒やそれ以下**
- **自然あるいは人工の雷放電に同期**
  - 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
- **衛星による大気上層での TGF 観測**

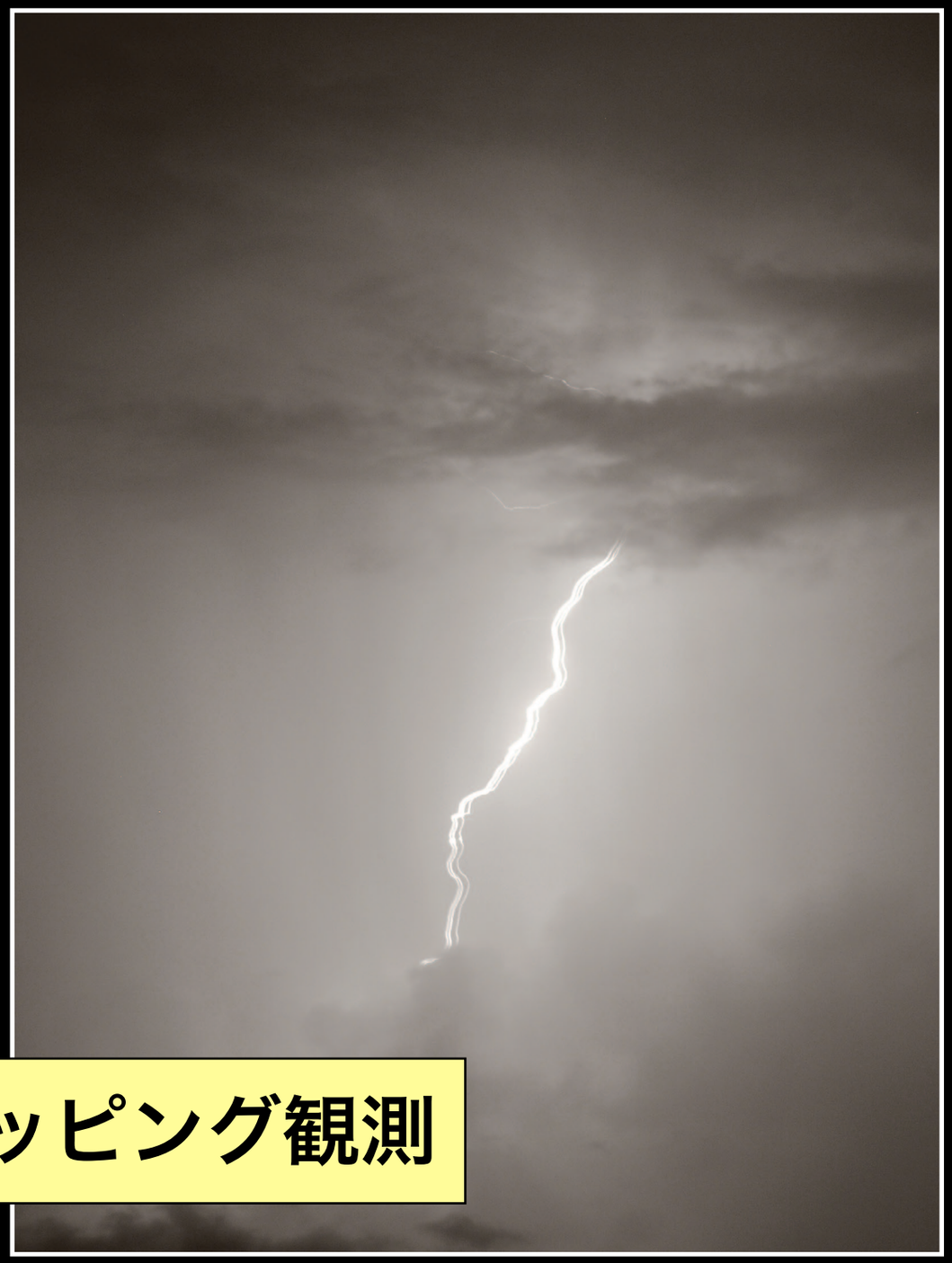
➡ 放電そのもに同期？

雷雲 (Thunderstorm)



準定常的に維持される

雷放電 (Lightening)



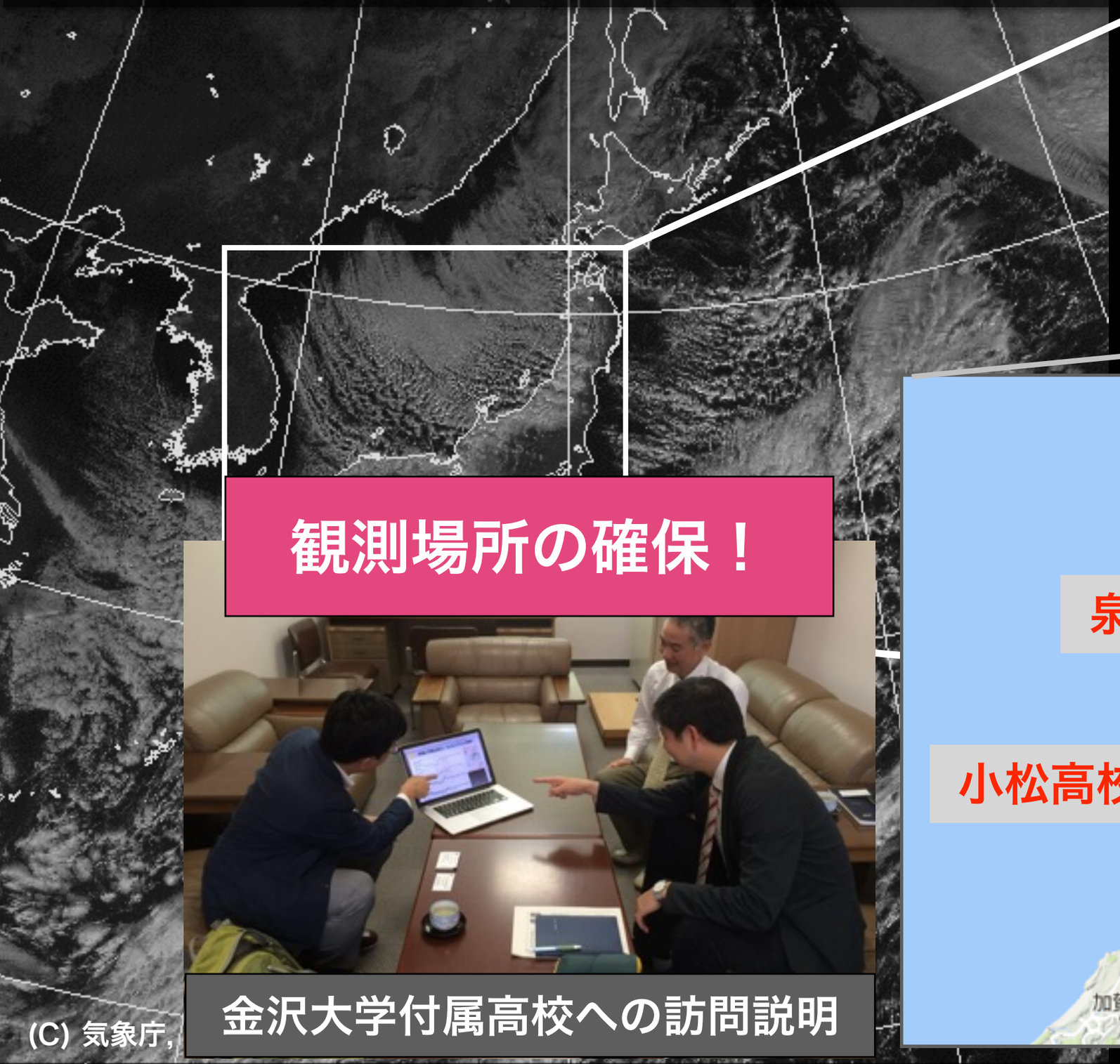
短時間の放電現象

➡ 多地点でのマッピング観測

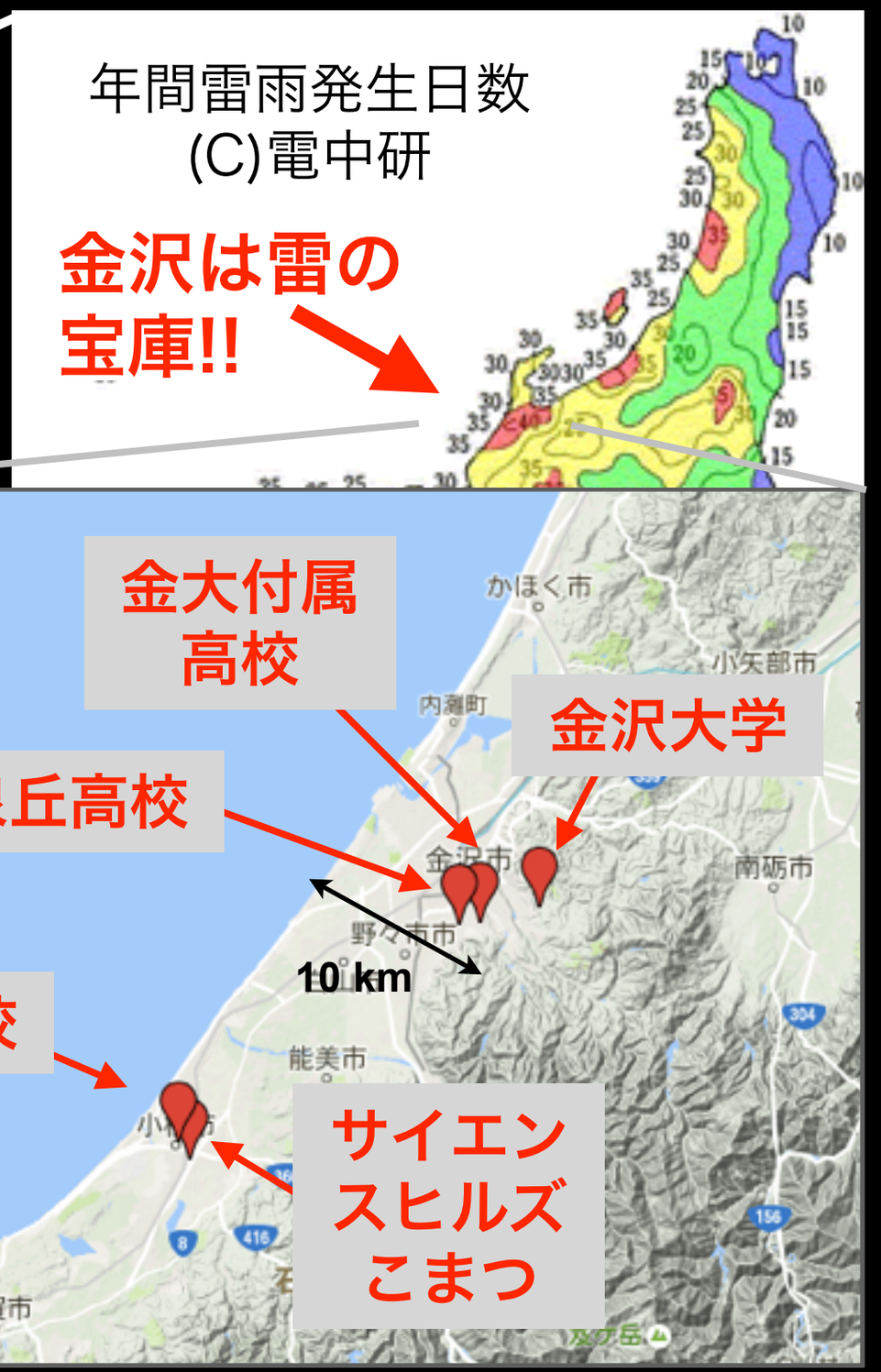
雷雲からの放射線の存在や性質は確率。その正体解明へ！

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$^{1-3}$倍)や低い雲底(<1 km)。



(C) 気象庁,



観測場所の確保！

金沢大学付属高校への訪問説明

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!

学術系クラウドファンディングサイト「academist (アカデミスト)」



電源コンセントの
設置に大いに活用

注んでいたことがあり、冬季の雷を思い出しま
興味深い研究だと思います。応援しています。

オリジナルリターンの準備

(協)アダチ・デザイン研究室







**サポートしてくださった皆様
ありがとうございました!!**

1,000円

気合いの入った研究紹介



5,000円

オリジナルデザイン・Tシャツ



10,000円

オリジナルデザイン・マグカップ

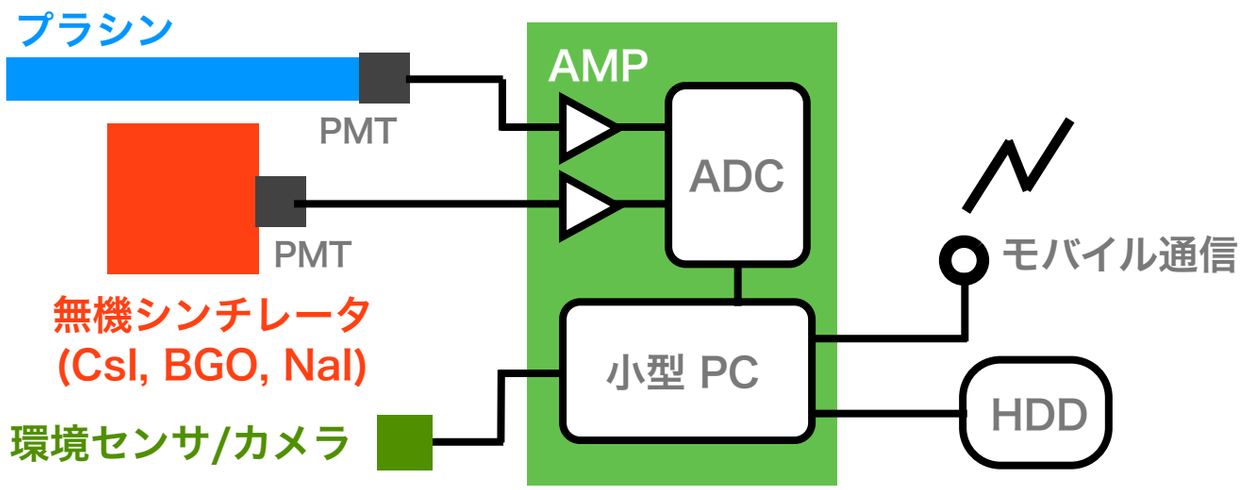


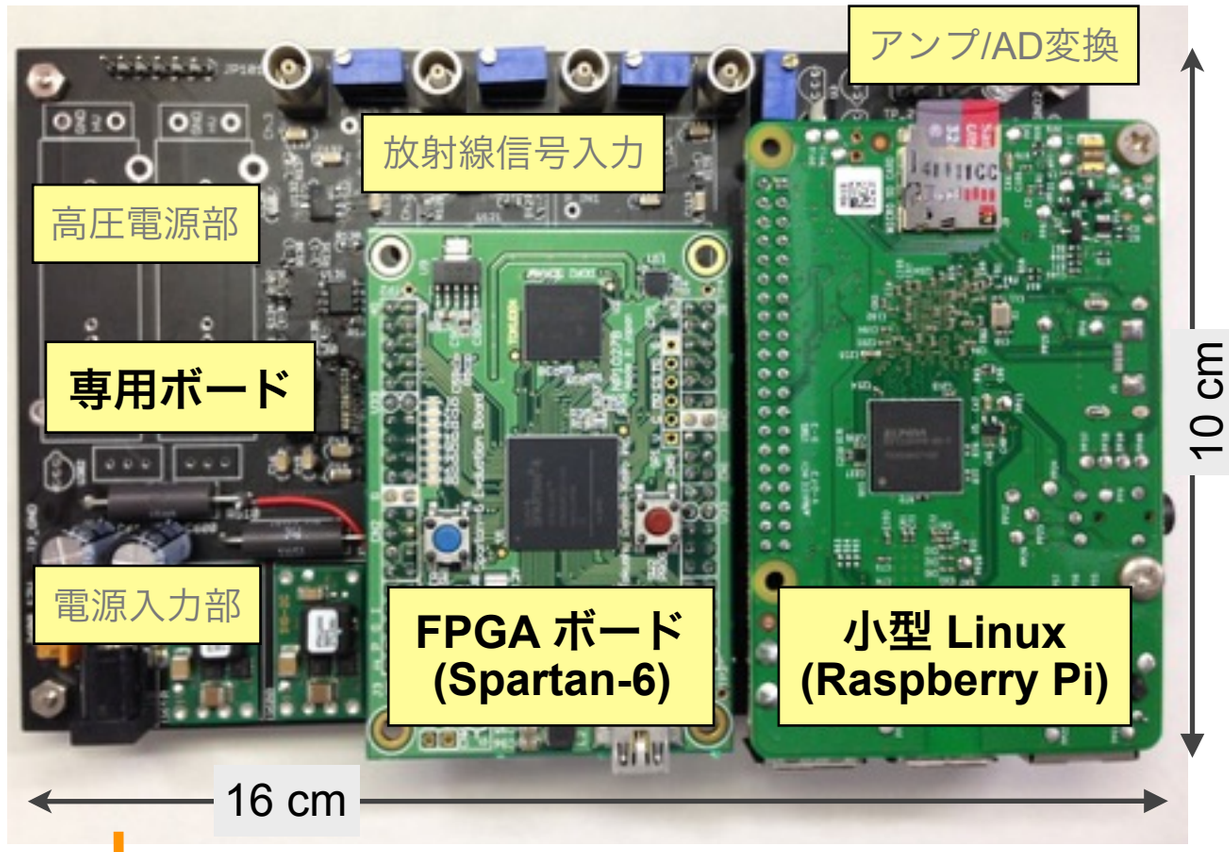
50,000円

論文謝辞+特注USB

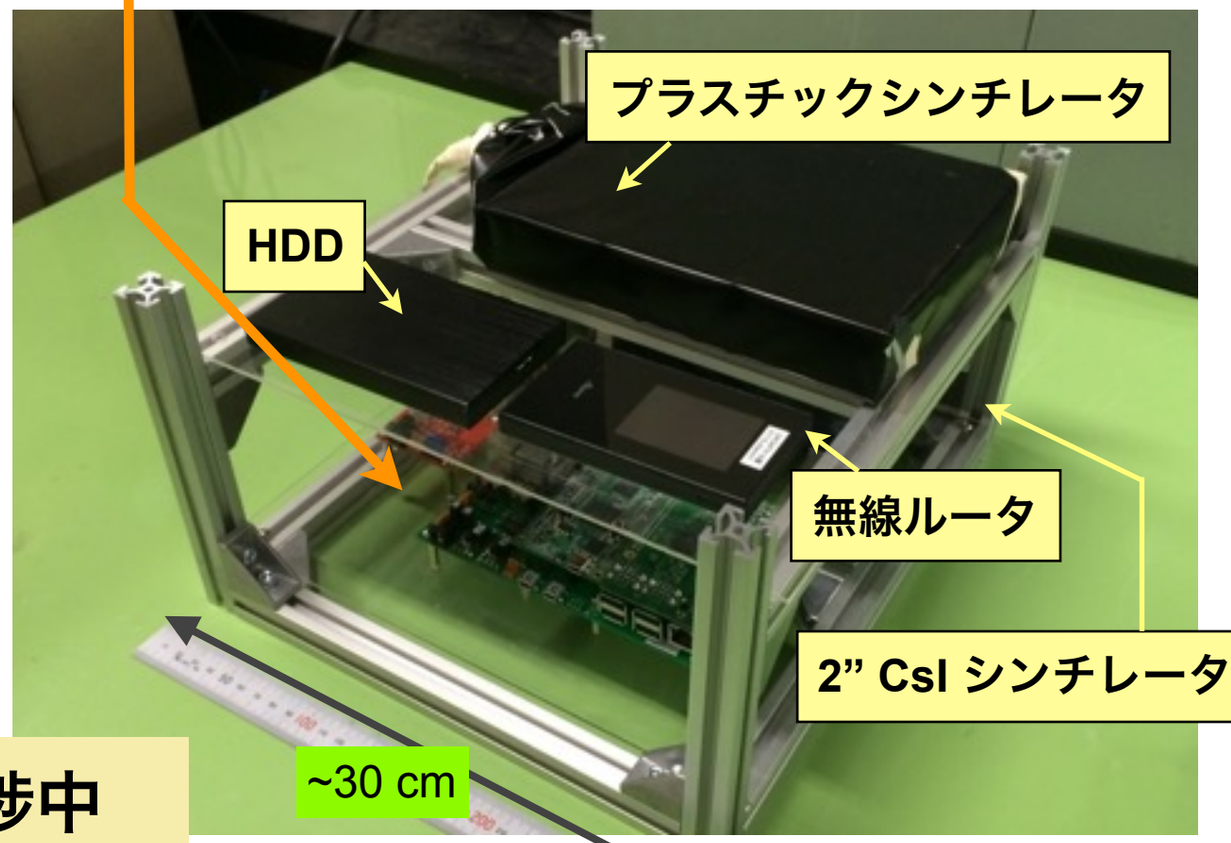


小型の観測装置の準備 (2015年度プロトタイプ)



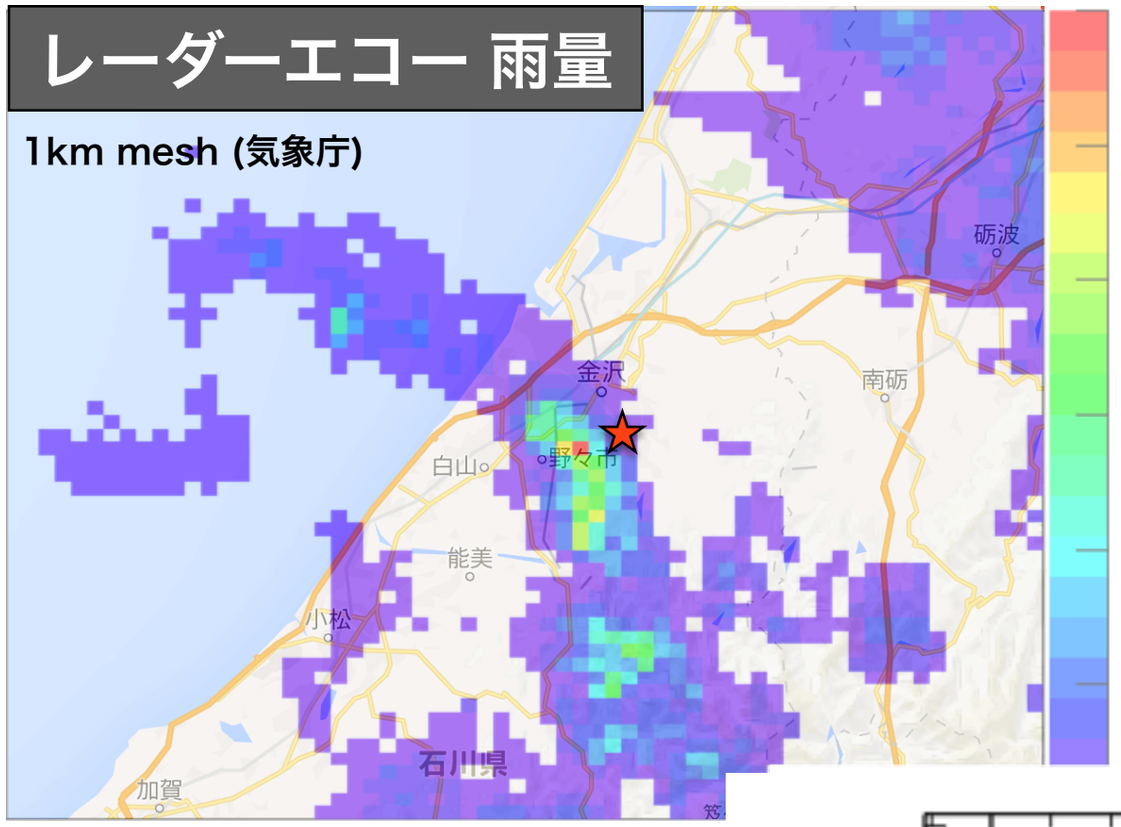


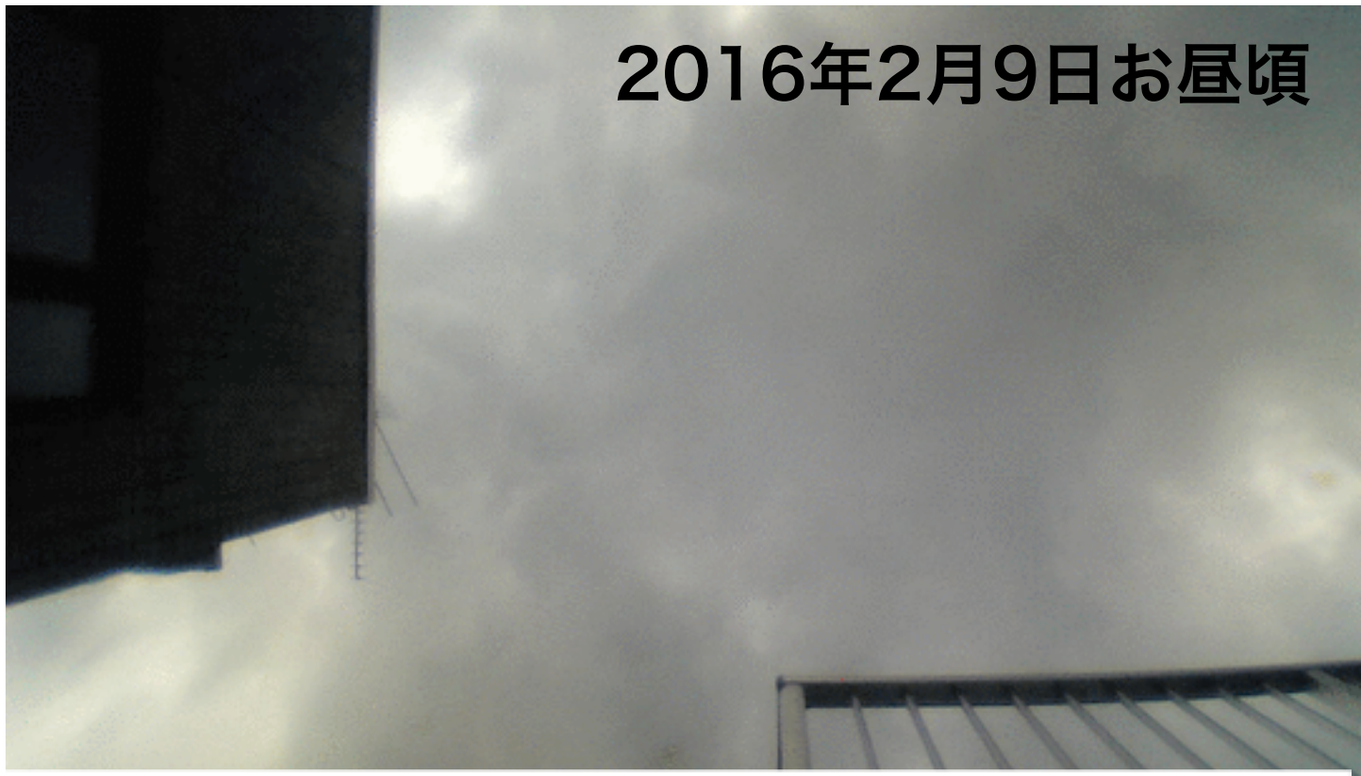
- **放射線イベント測定: 時刻, エネルギー**
  - 無機シンチレータ: ~0.5-8 MeV 帯域
  - プラシン: **荷電粒子(宇宙線等)の弁別**
  - ~30 byte/event, 波形25MHzサンプル
- **データ取得システムの開発（湯浅ほか）**
  - 専用フロントエンドボードの独自開発
  - FPGA+Raspberry Pi の DAQ システム
  - 温度などの複数の環境データも集積
  - ウェブカメラで上空の様子を記録
  - モバイル通信で遠隔操作・データ送信
- 14-15年度で段階的にバージョンアップ
- 製作費用 ~40万円 (シンチレー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



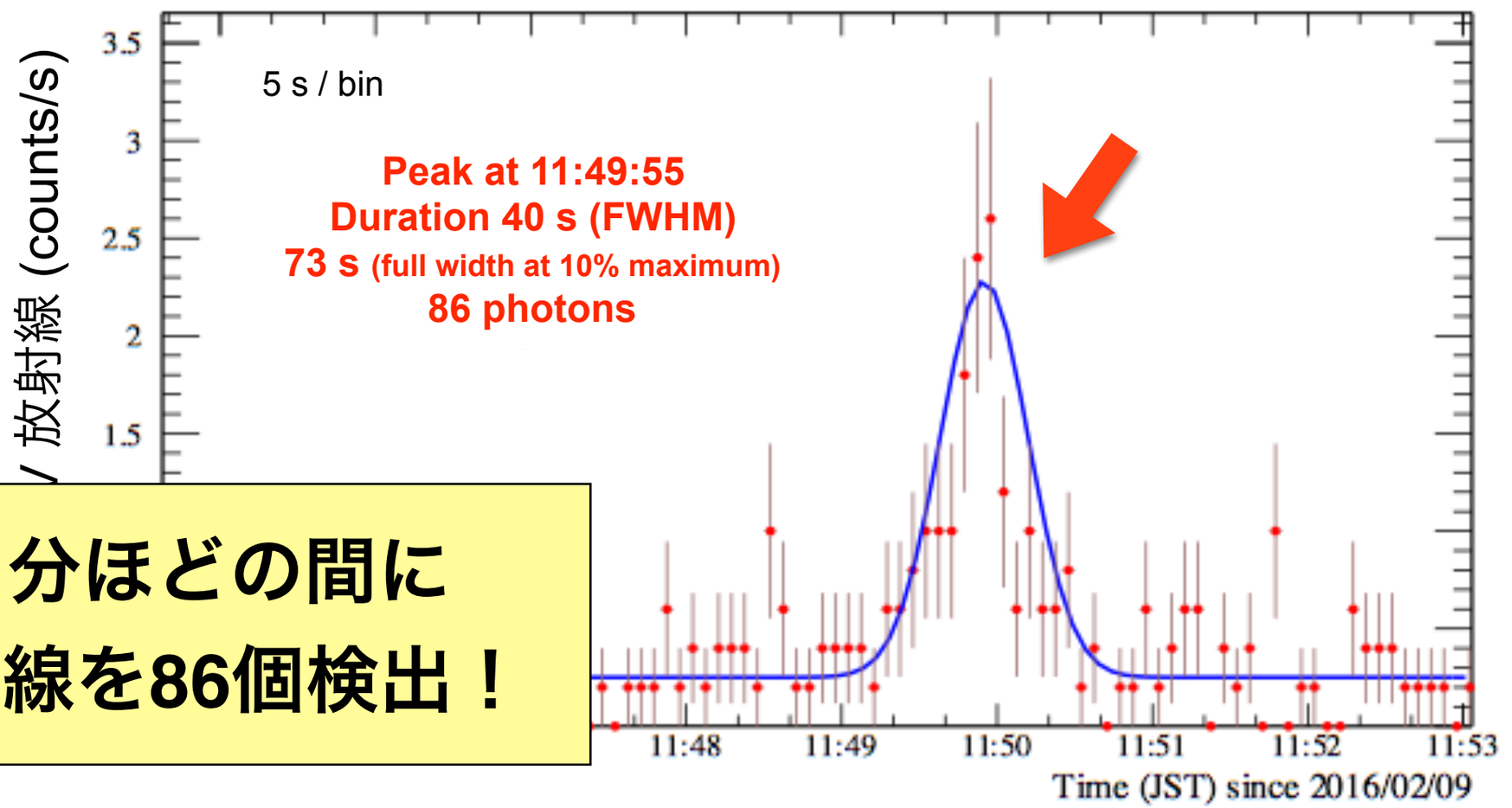
多地点測定システムの開発は順調に進捗中

平成27年度: 高校の屋上で観測、 金沢で初検出









11:50分頃に約1分ほどの間に
雷雲からのガンマ線を86個検出！

2015-16年にかけての観測網の構築

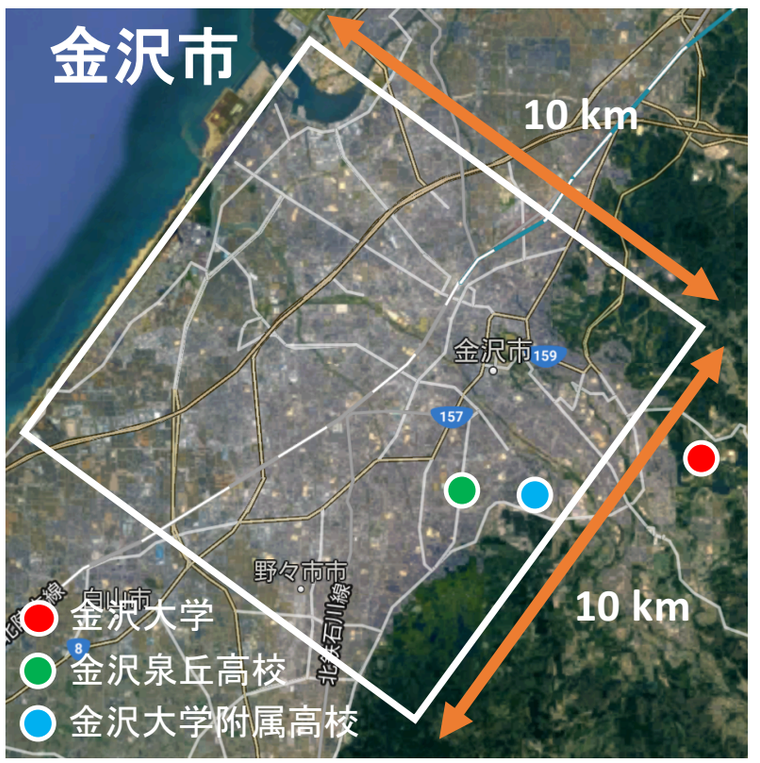


(c) Google, SK telecom, Zenrin, Data SIO, NOAA, Hydrographic Association, L



(c) Google, Data Japan Hydrographic Association

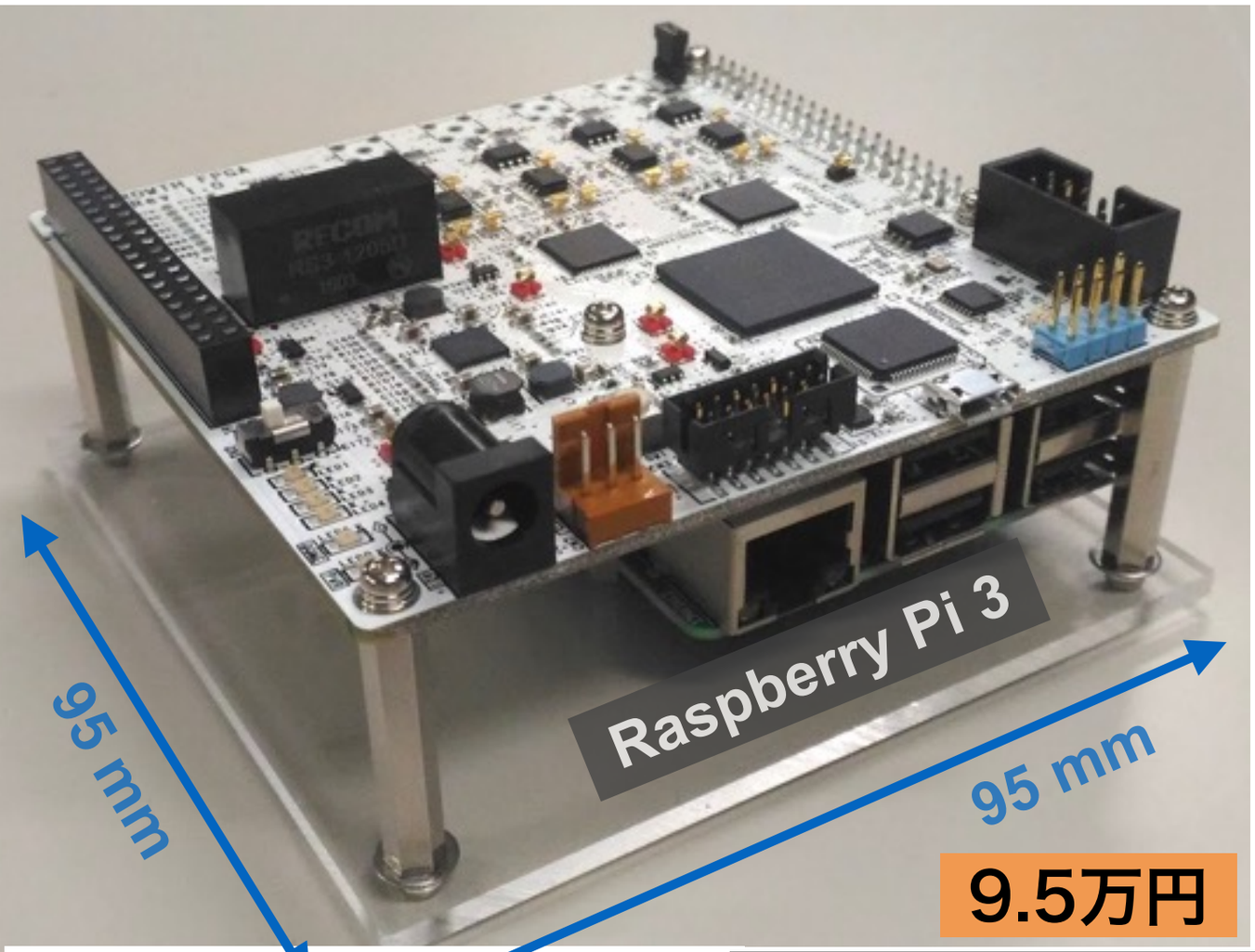




(c) Google, ZENRIN, DATA SIO, NOAA, US Navy, NGA, GEBCO, Landsat

和田有希 修士論文 (2017) 東京大学より抜粋

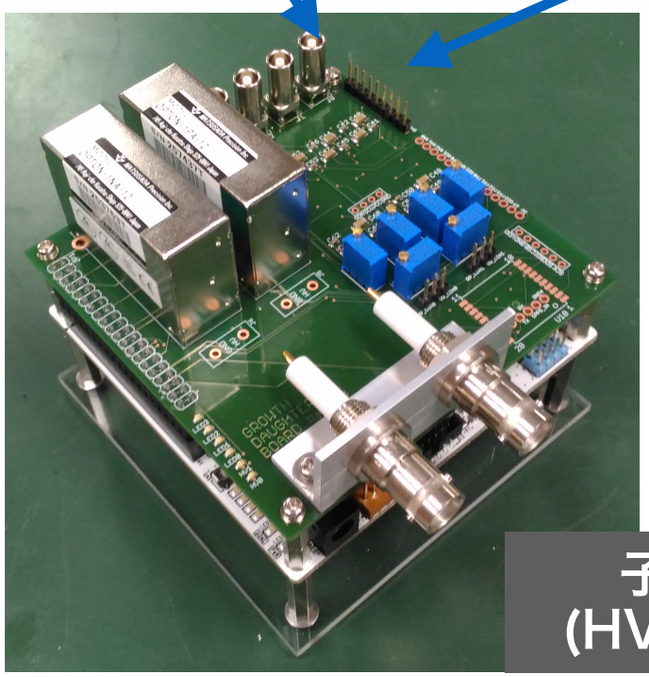
Raspberry Pi 駆動の小型で安価な放射線モニタ

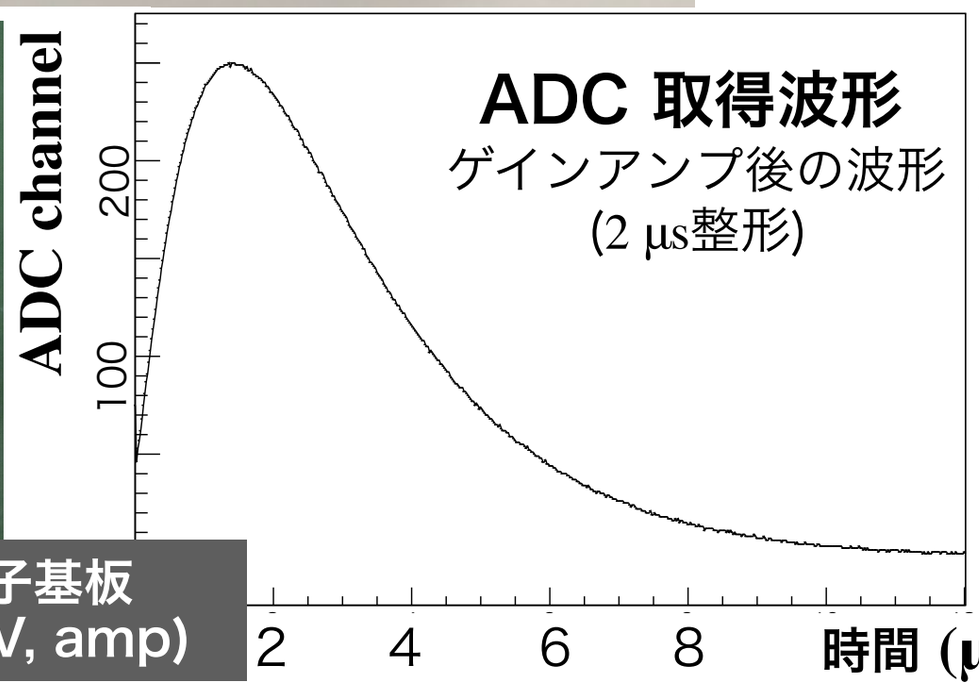


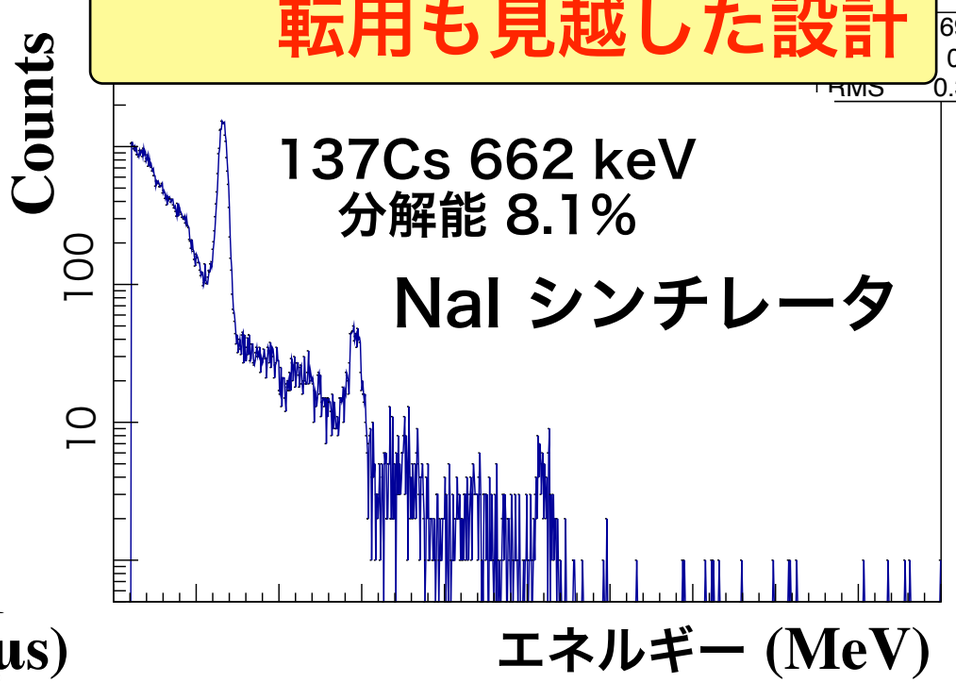
湯浅らとシマフジ電機で協力し FPGA/ADC ボードを開発

- DC 12 V 駆動
- ADC 入力 : ±5V, 50 Ω
- 50 MHz サンプル 12 bit ADC 4ch
- Raspberry Pi / Mac から制御可能
- SpareWire 端子も搭載
- 拡張コネクタで小基板を接続可
- 単体での消費電力 5 W
- 95 x 95 mm

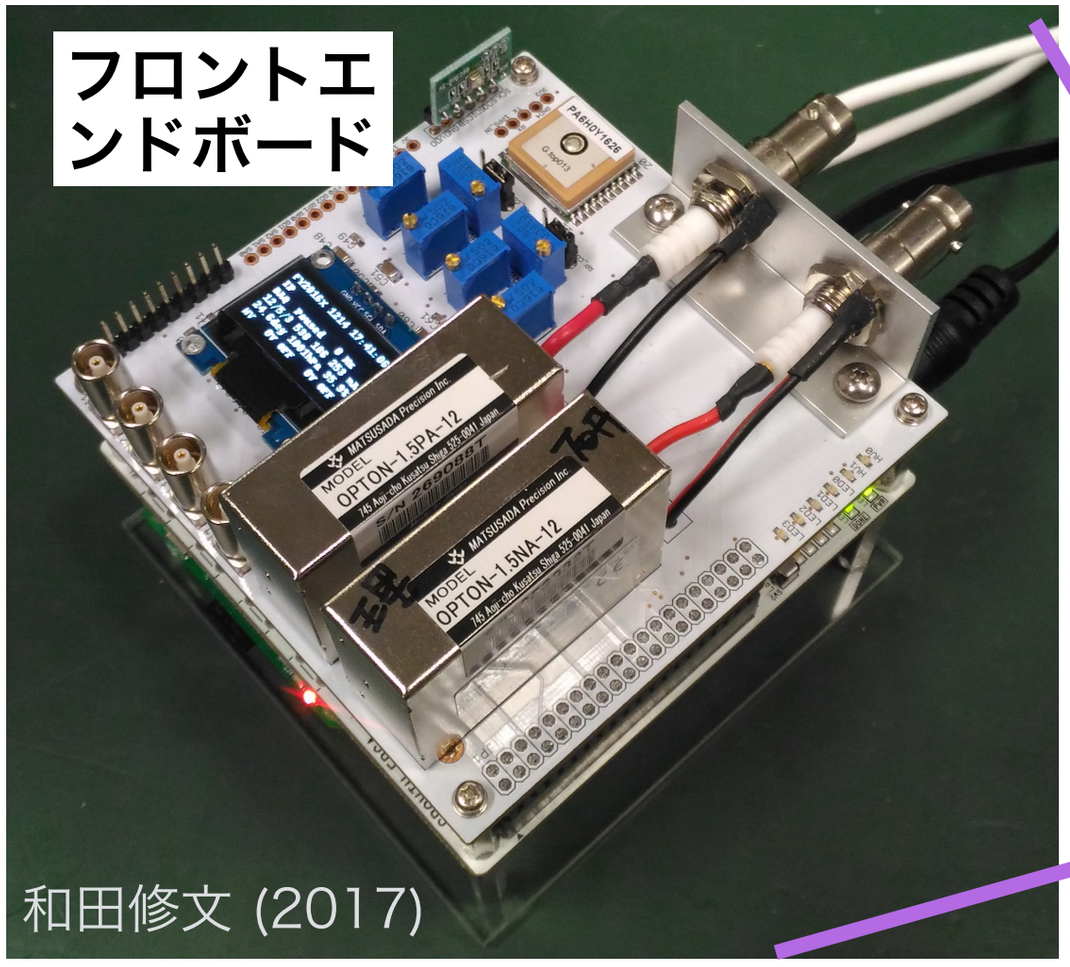
1U サイズ 小型衛星への転用も見越した設計

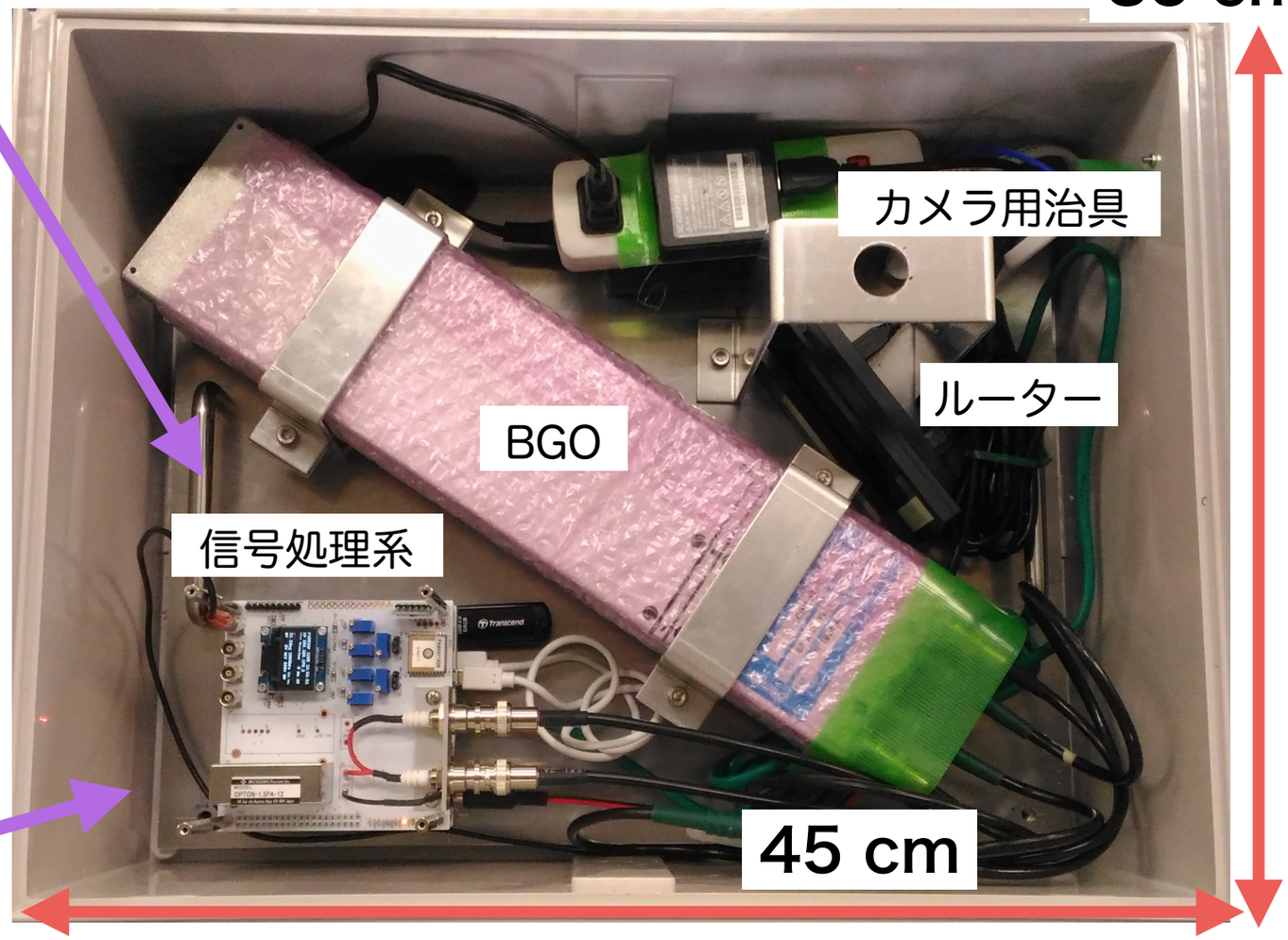






標準型の観測装置の完成 (2016年度版)

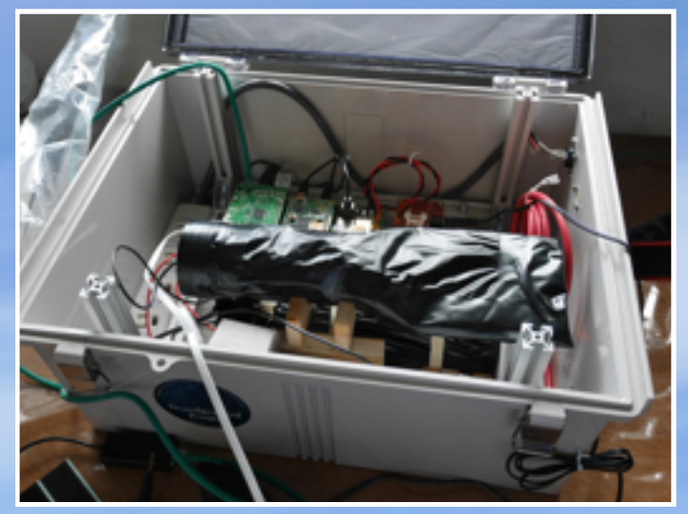




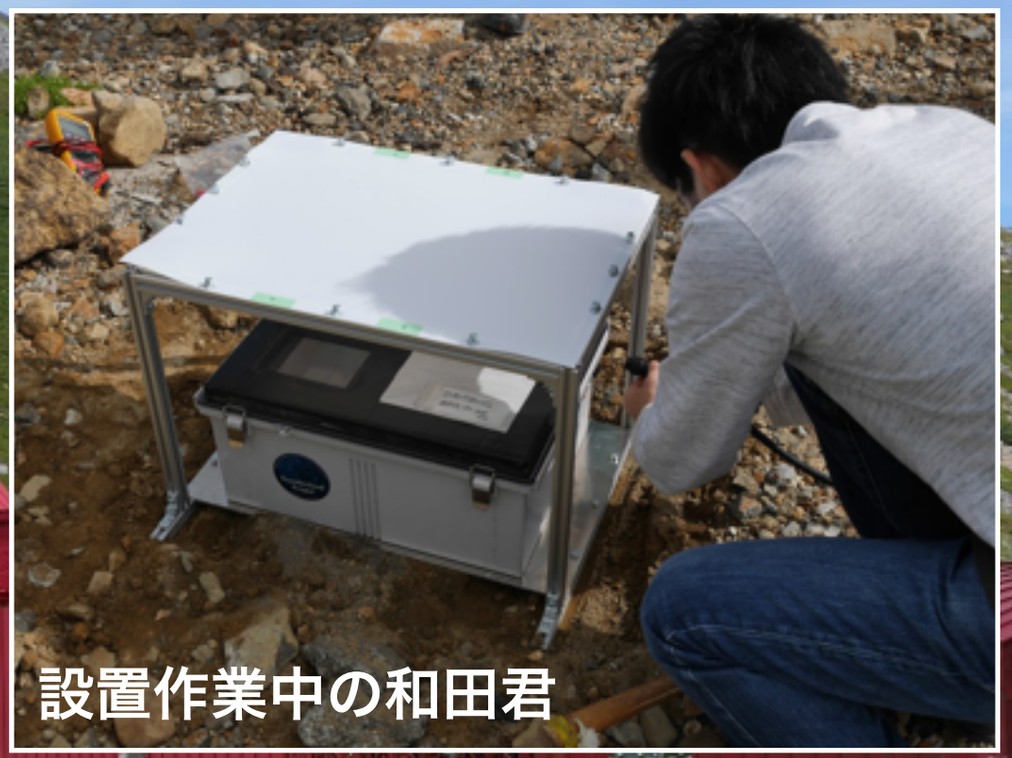
- BGOシンチレータ (80 x 25 x 250 mm^3)は 理研仁科センターから借用。
- ~0.5-8 MeV の放射線イベントごとに GPS時刻、エネルギー等を記録。
- フロントボード(子基板)を製作。HV, センサー, ゲイン, GPS ほかを搭載。
- 温度、気圧ほか環境データ、健康診断の情報も取得。M2X でリアルタイム監視。
- モバイル通信で遠隔操作 (ssh)、データ送信可。ただし、通信料で送信を制限。
- ウェブカメラで空の様子も記録。電場計はまだ配備していない（来年度へ）

【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



コロナ観測所にも
置きたいなぁ



設置作業中の和田君



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！

【2】富士山山頂測候所 (3,775 m)への設置

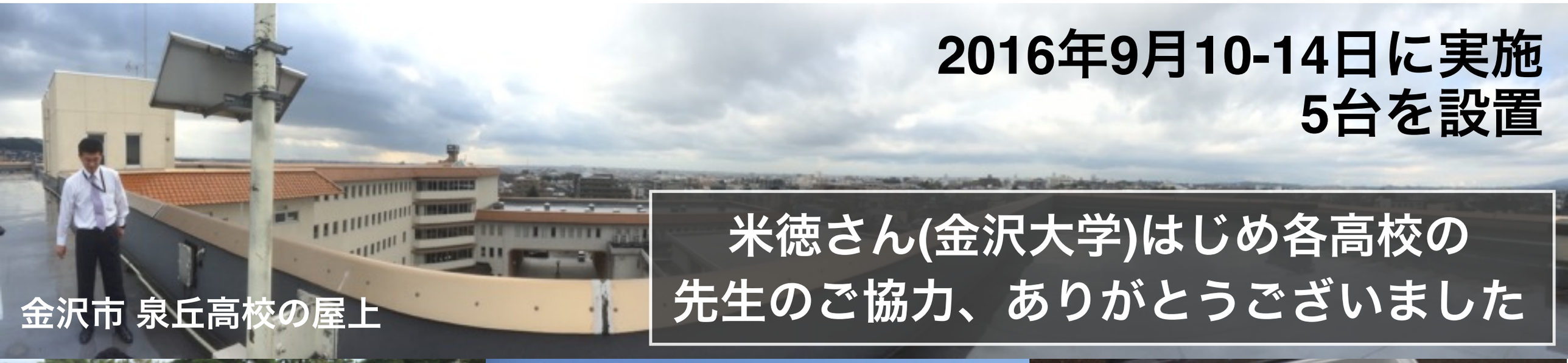
2016年7月15-16日に実施
2台を設置



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

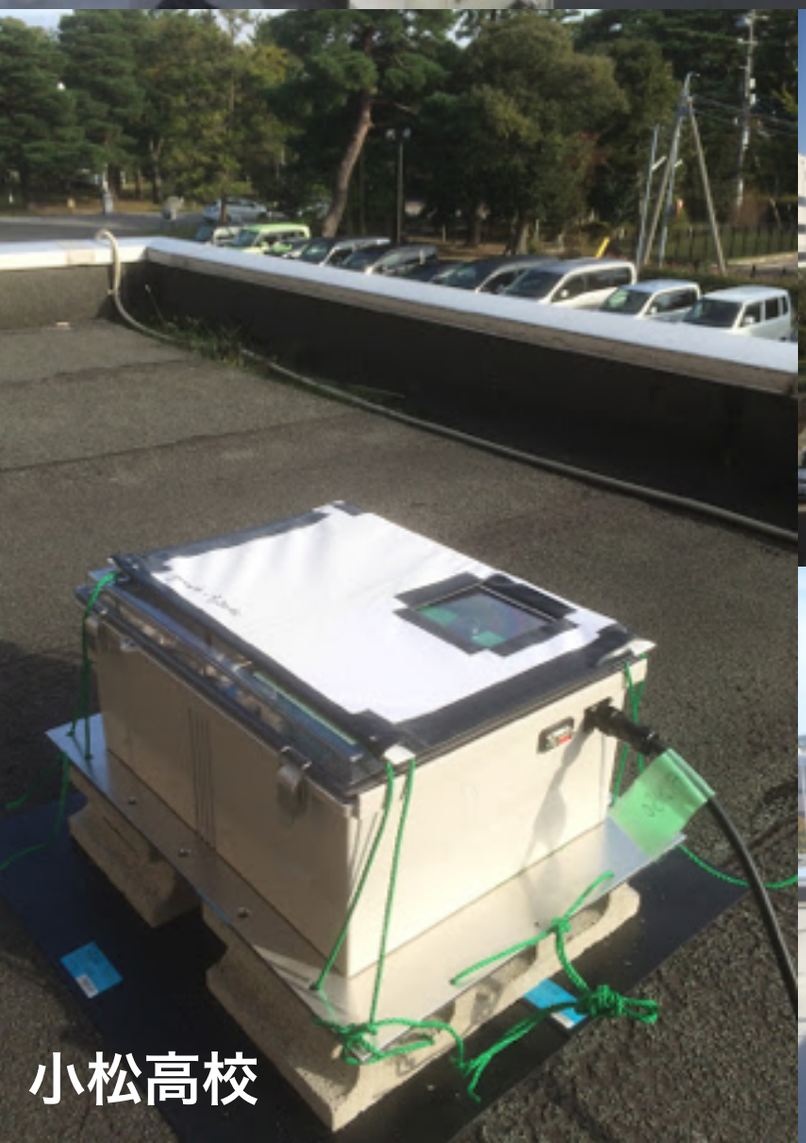
鴨川仁さん(学芸大)グループ、NPO富士山測候所を活用する会のみなさまのご支援、大変ありがとうございました！

【3】金沢~小松の大学と高校 5箇所に設置

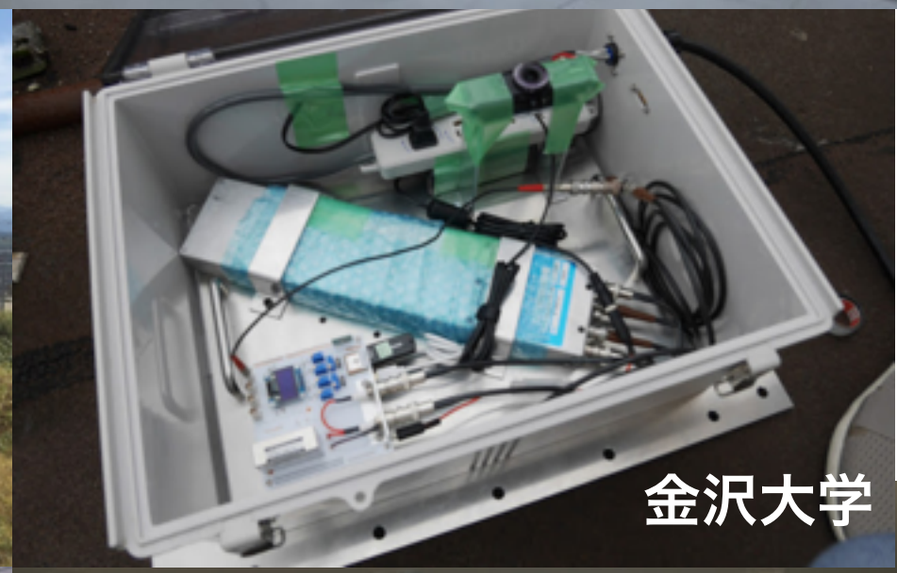


2016年9月10-14日に実施
5台を設置

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



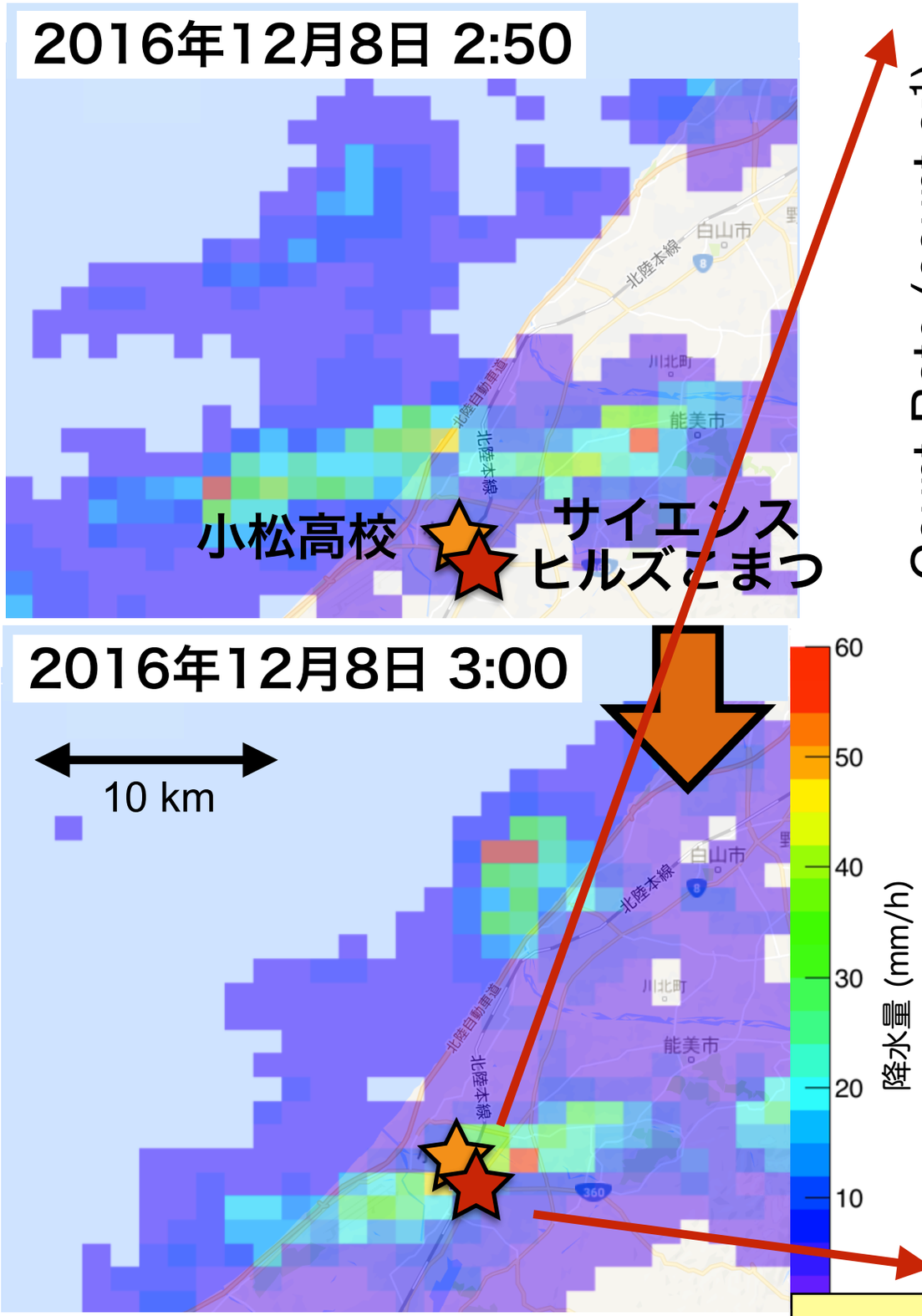


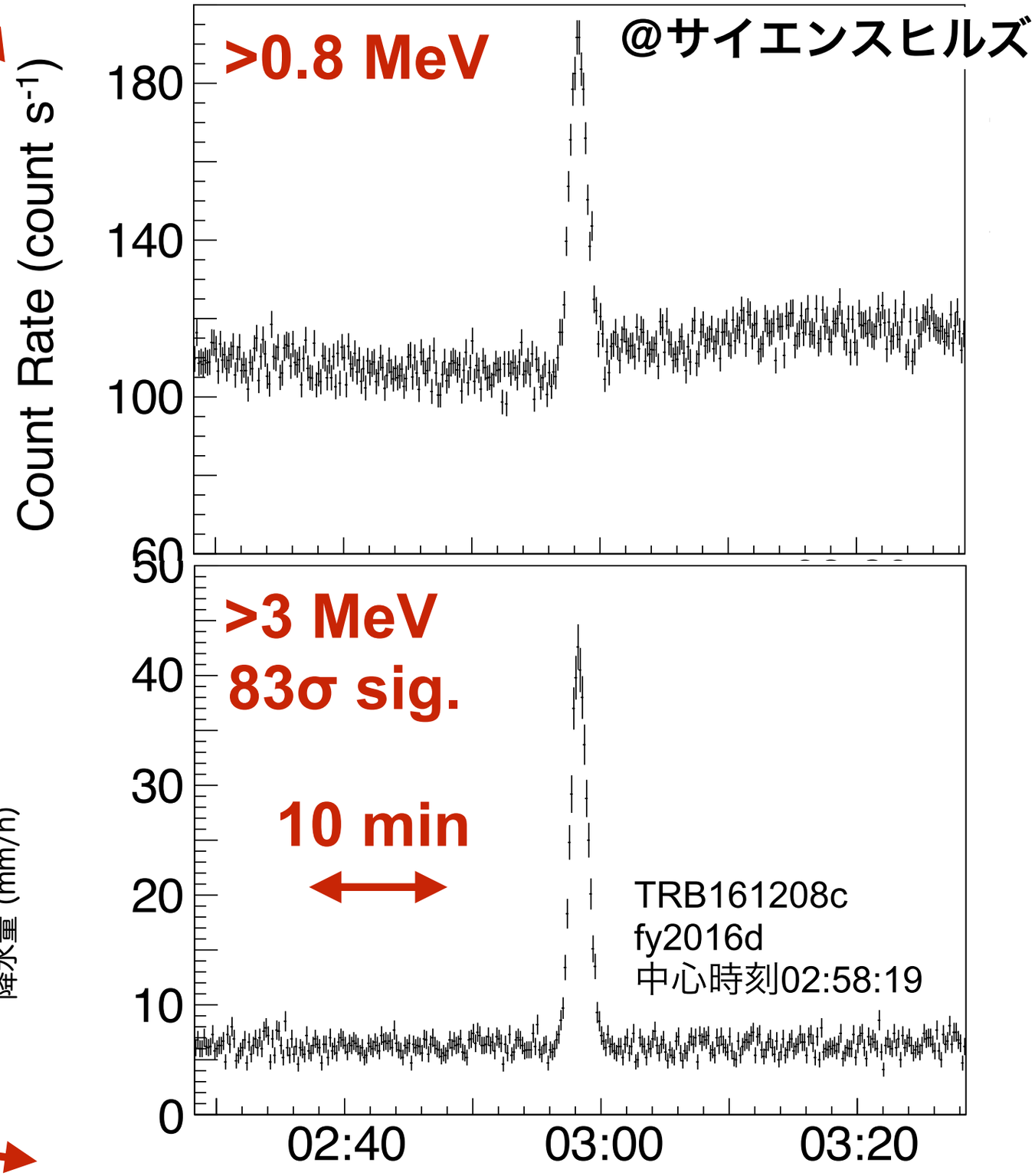






金沢~小松域で雷雲ガンマ線の観測に成功！

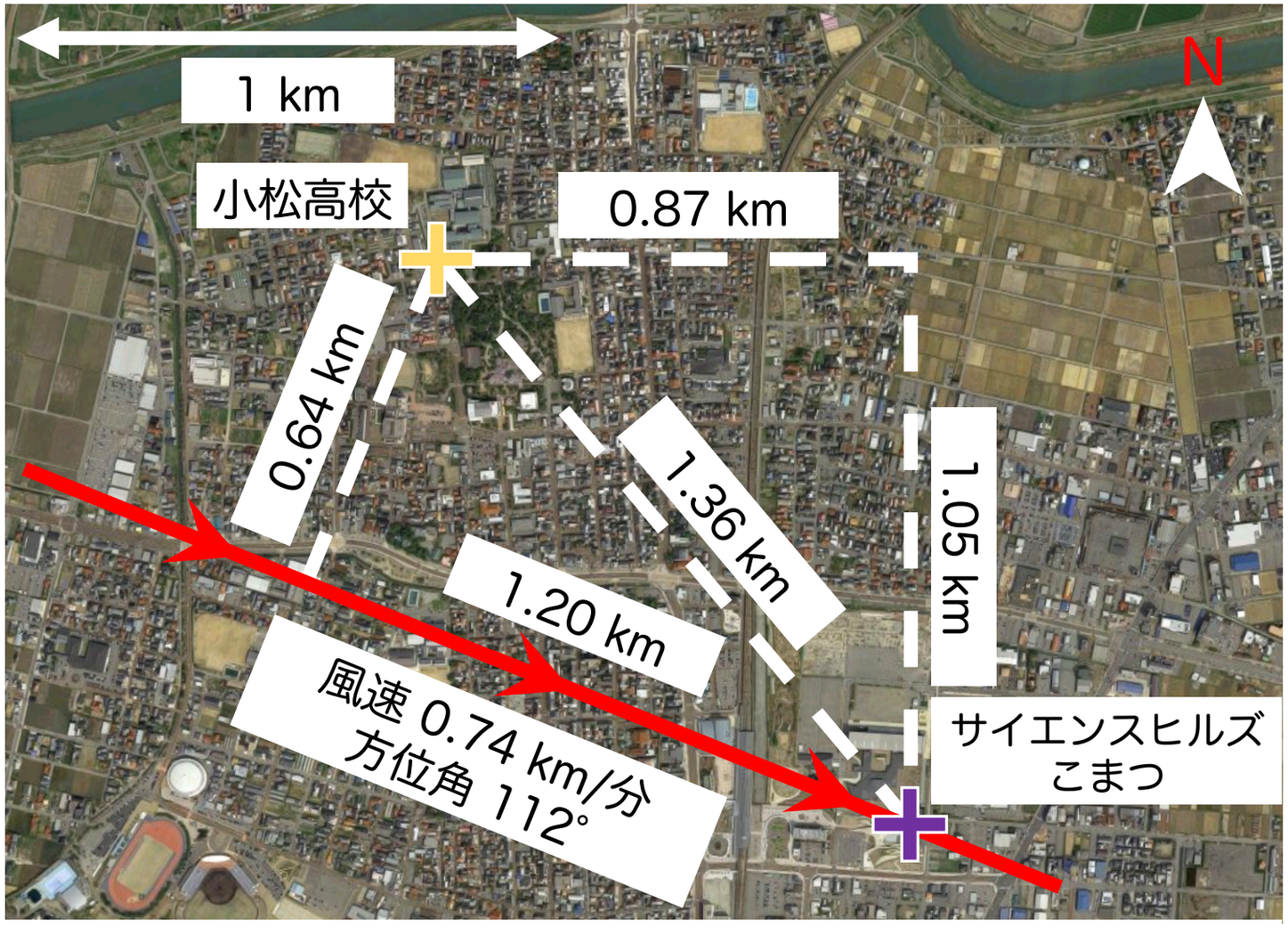




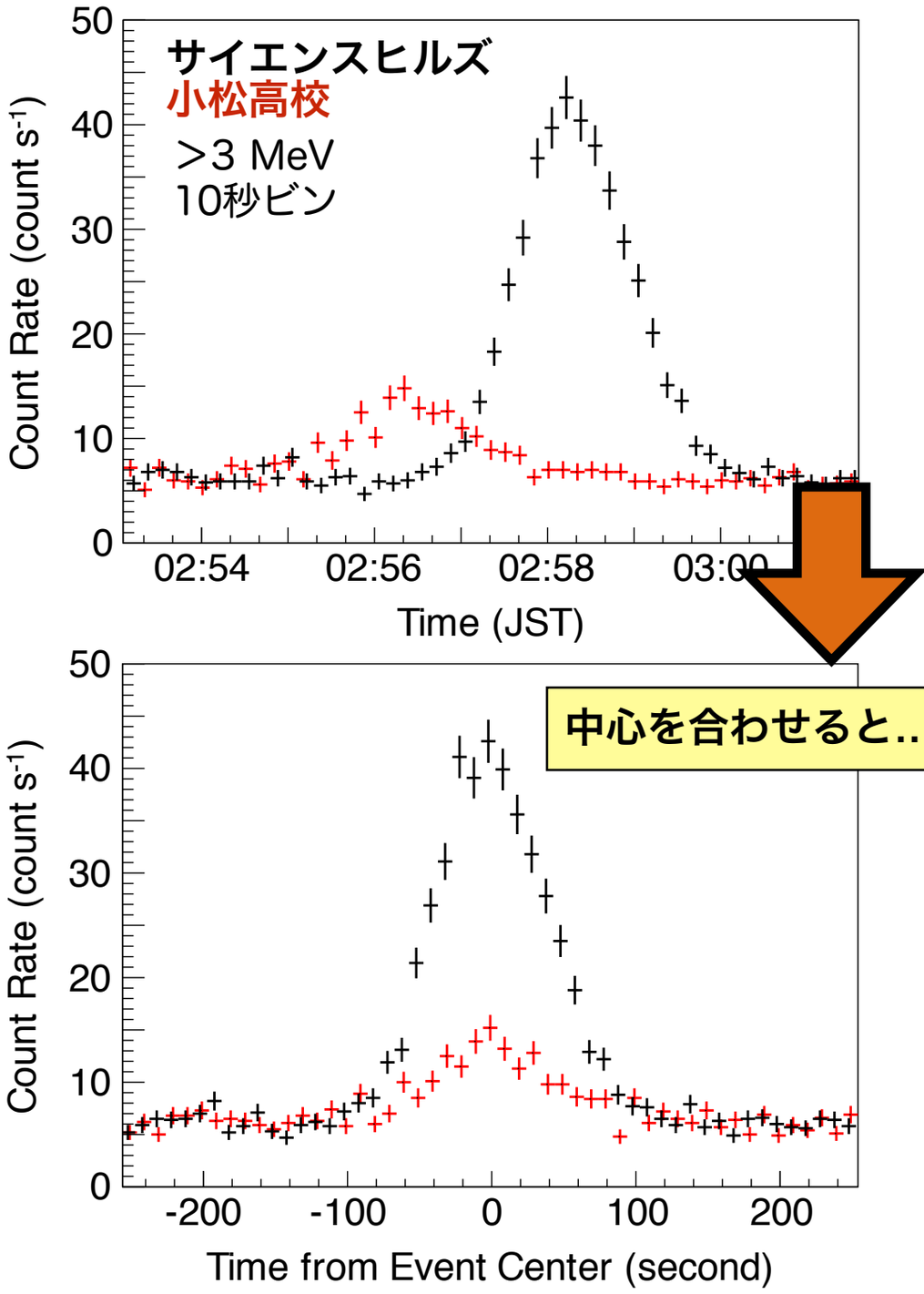
2016年12月8-9日にかけ4箇所で検出

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！



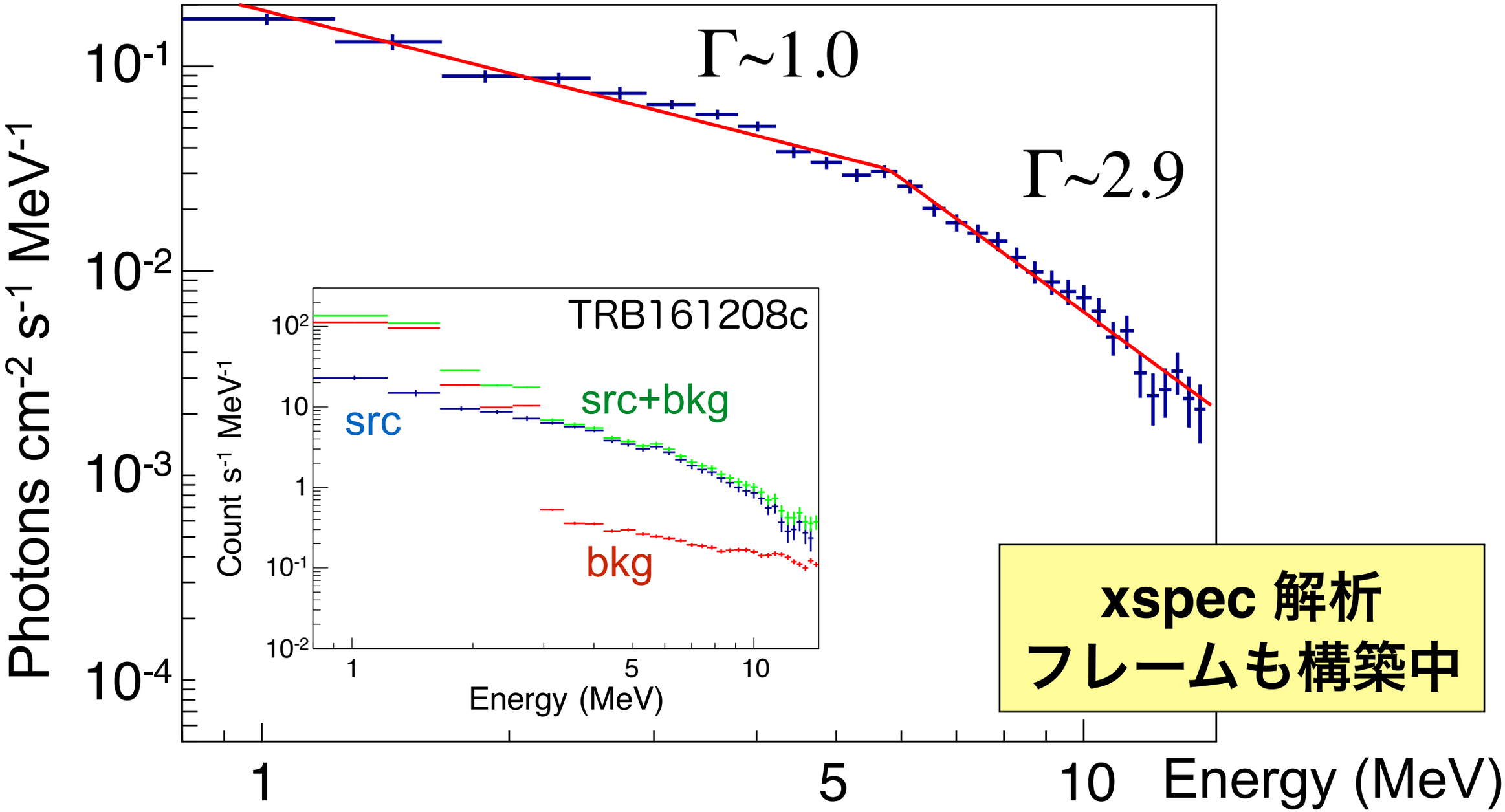
- 継続時間(FWHM)は、サイエンスヒルズ(90±2秒)と小松高校(97±7秒)で一致する。
- サイエンスヒルズは112秒ほど小松高校に対して遅れて増光していた。
- 気象レーダーのマップから推測される雲の移動速度 ~740 m/分での移動と考えて矛盾しない。



同一雷雲のガンマ線放射を２地点で観測に成功！

和田有希 修士論文 (2017) 東京大学

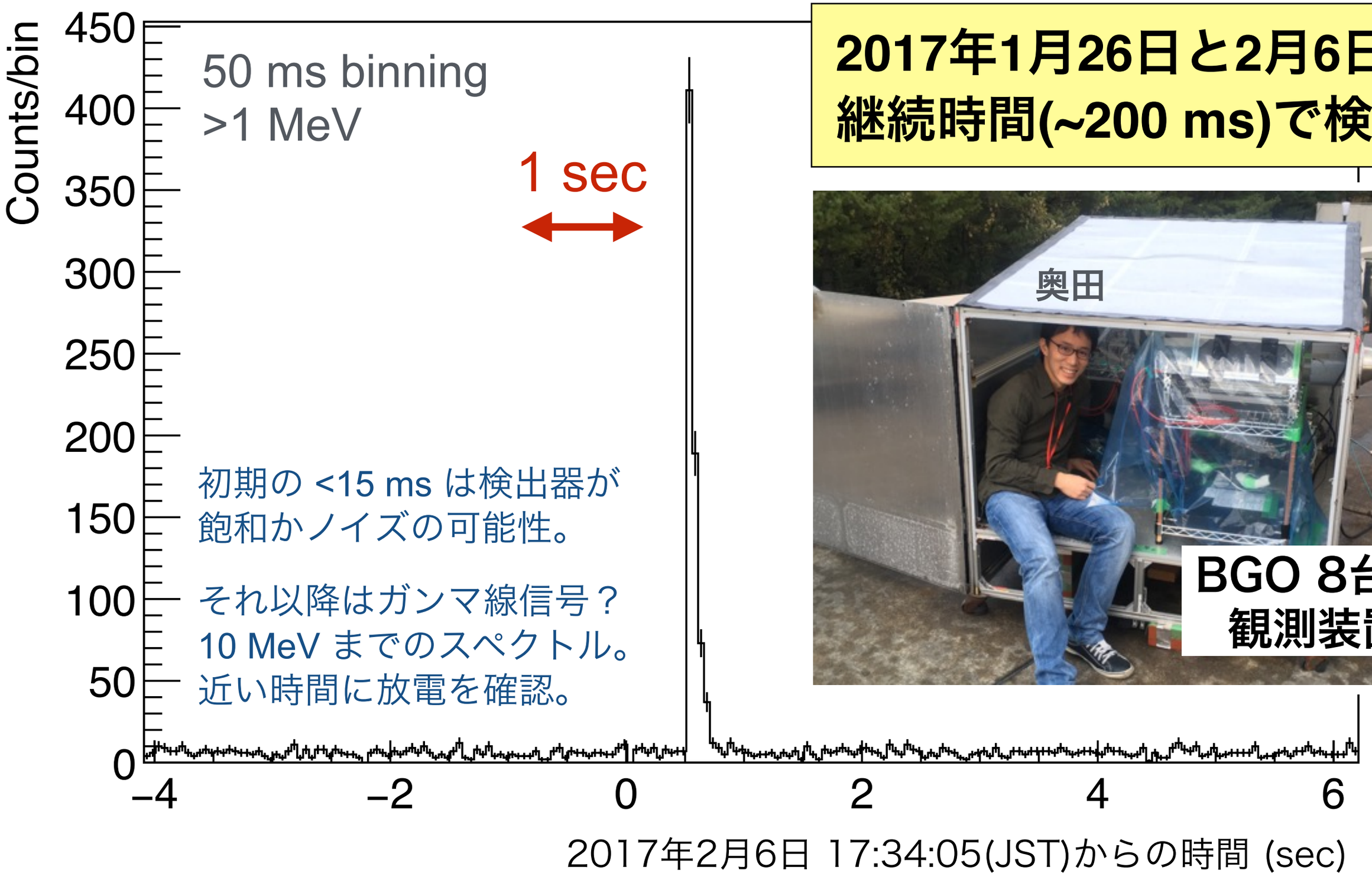
金沢~小松域で雷雲ガンマ線の観測に成功！



- 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)



2017年1月26日と2月6日に継続時間(~200 ms)で検出!

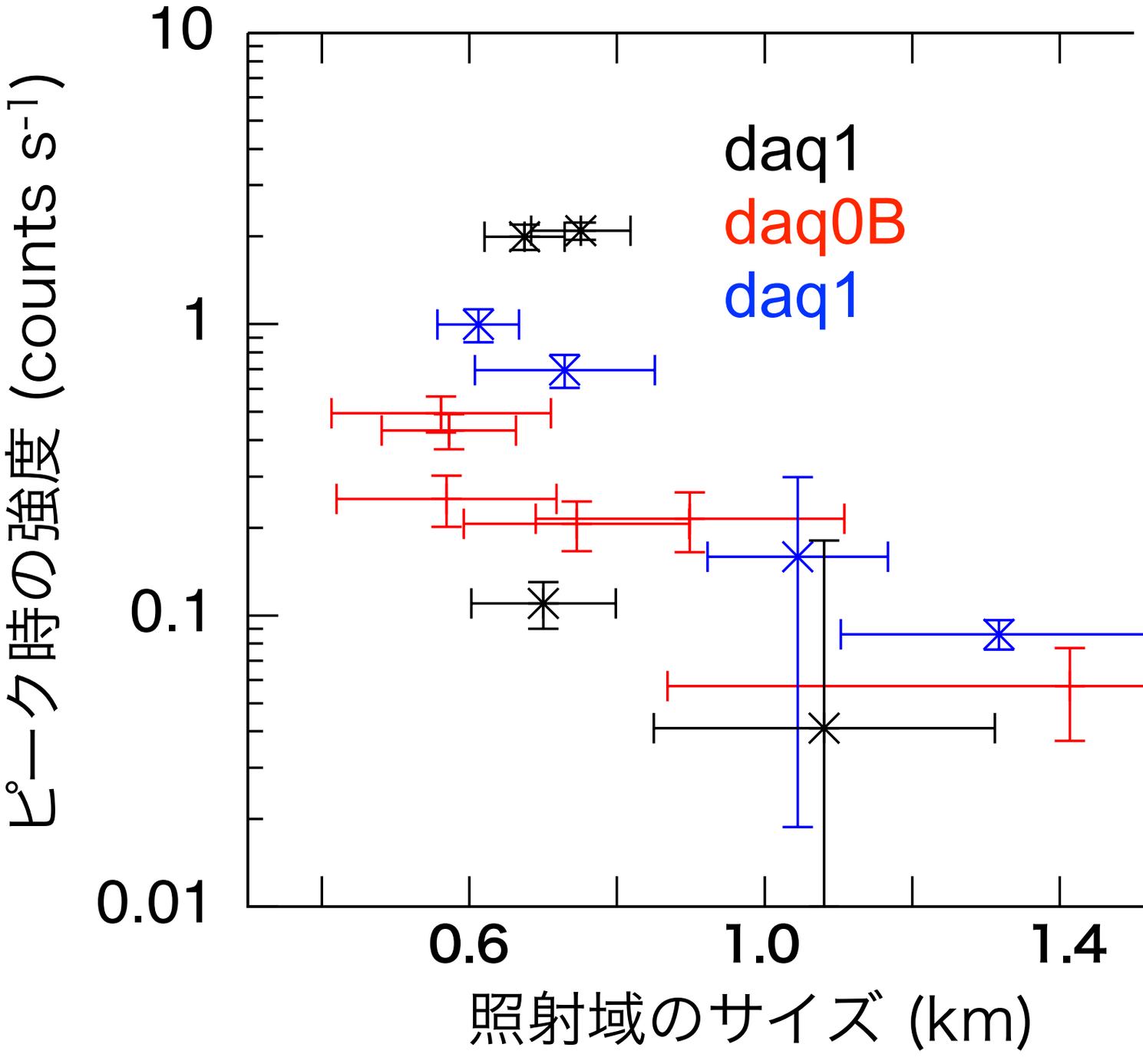


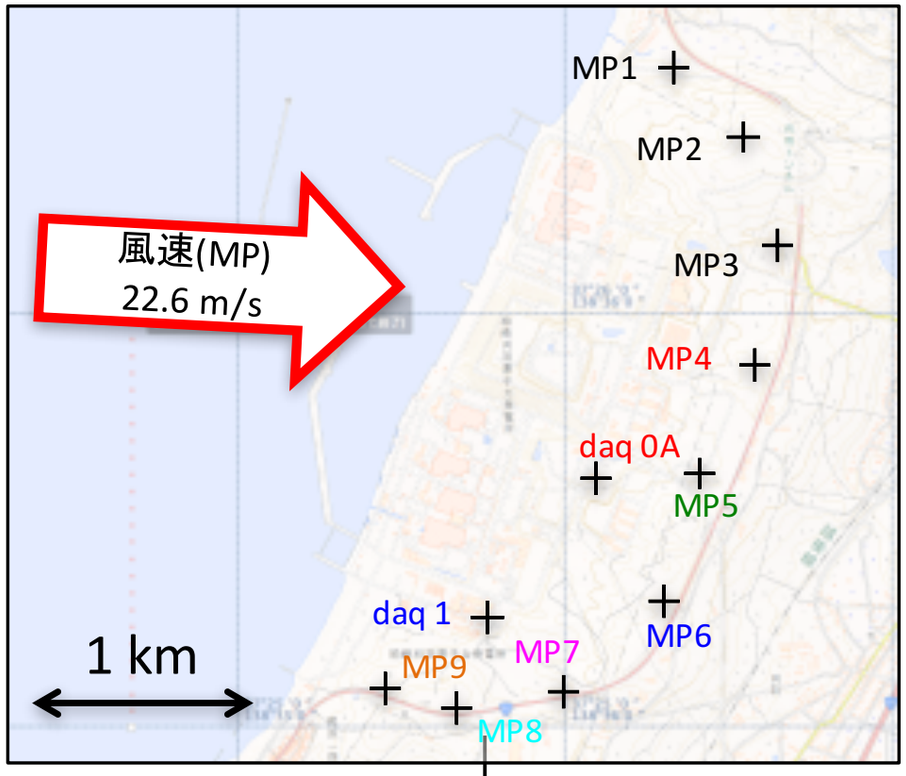
➡ 放電に同期したガンマ線？

奥田和史 修士論文 (2017) 東京大学

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。





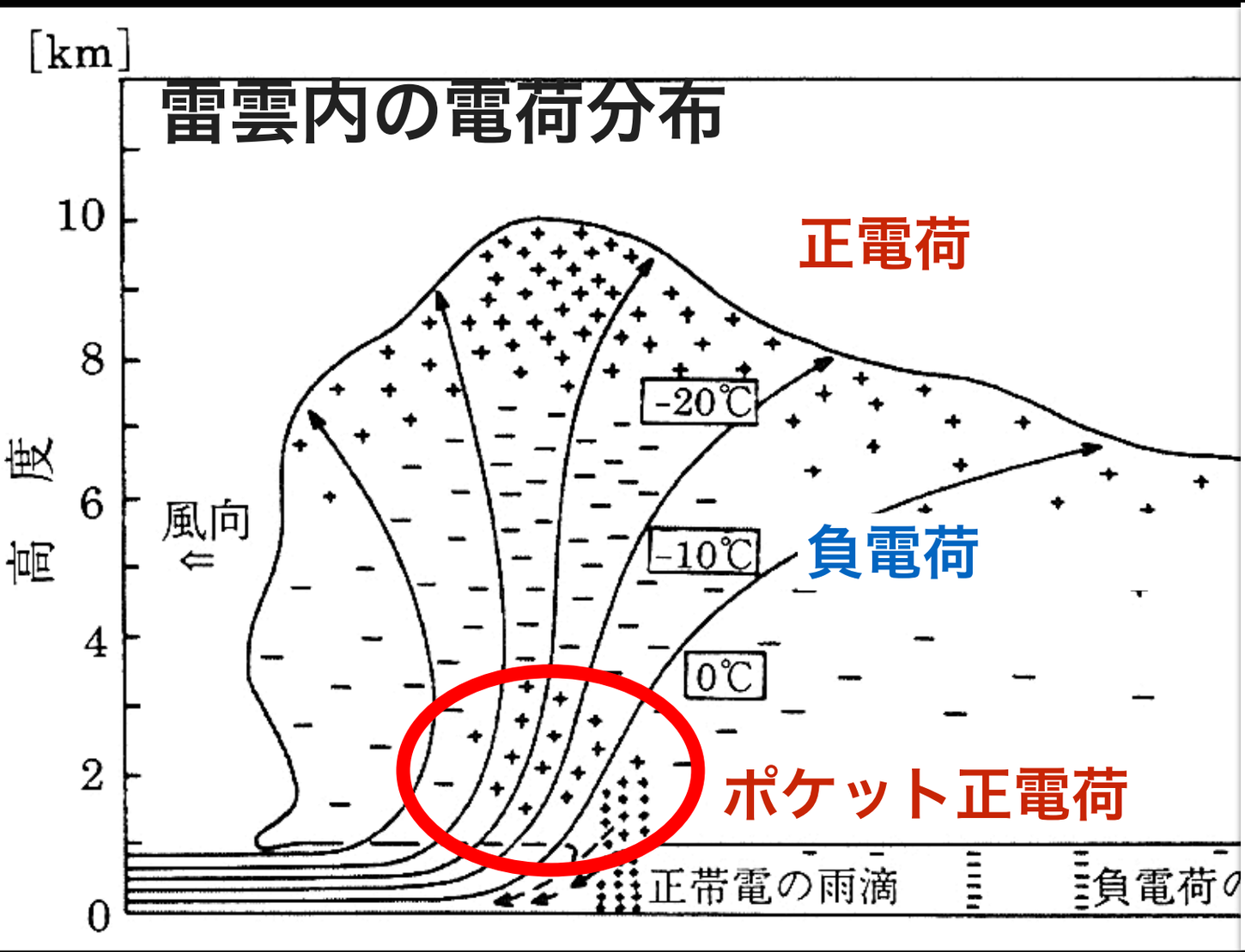
照射域が小さいイベントほど、ピーク強度が強いという相関が見える

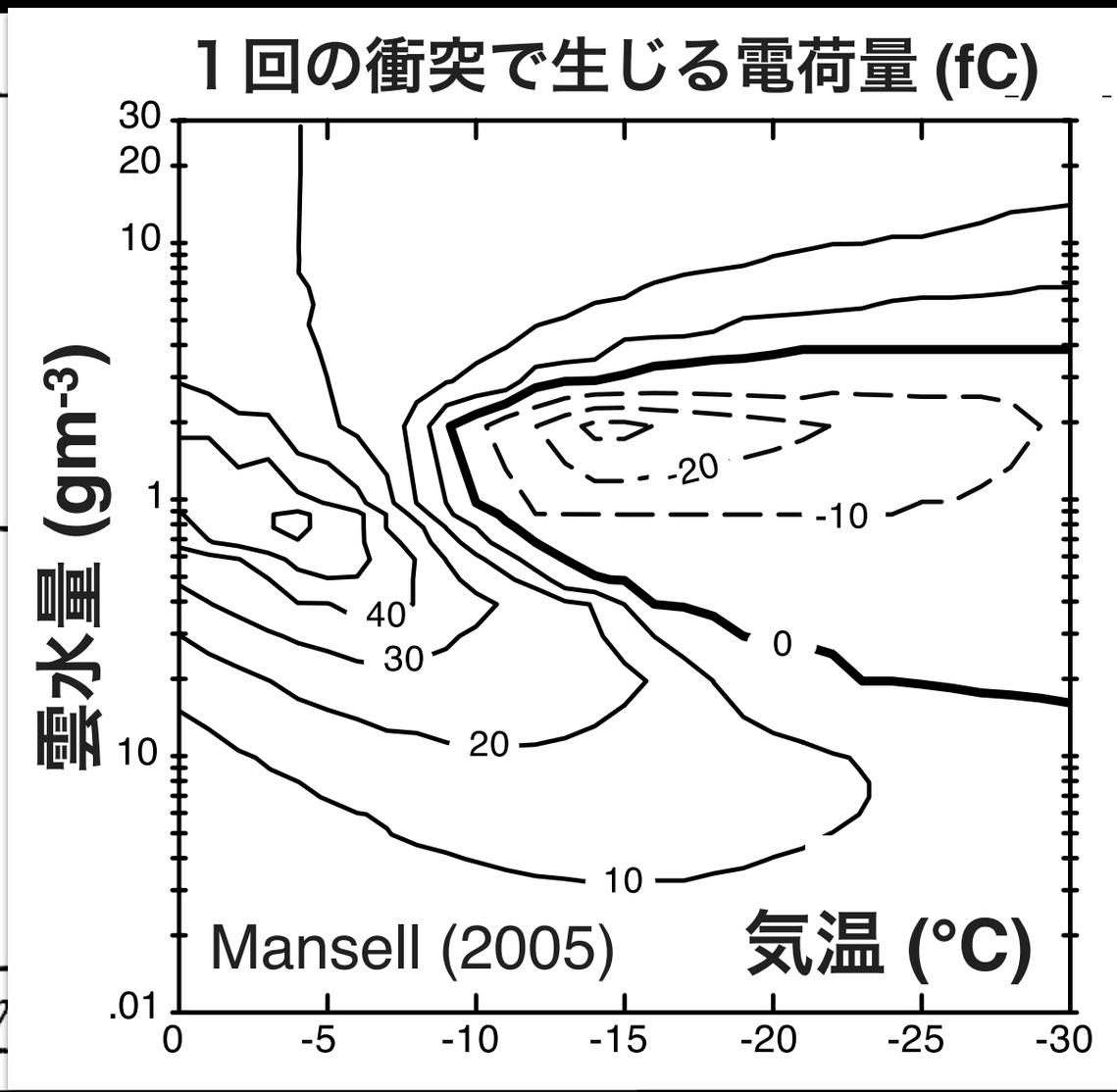
楳本大悟 博士論文 (2017) 東京大学

照射域は継続時間と気象レーダーの風速の推測から求めた東西方向の FWHM で表記

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(1)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)



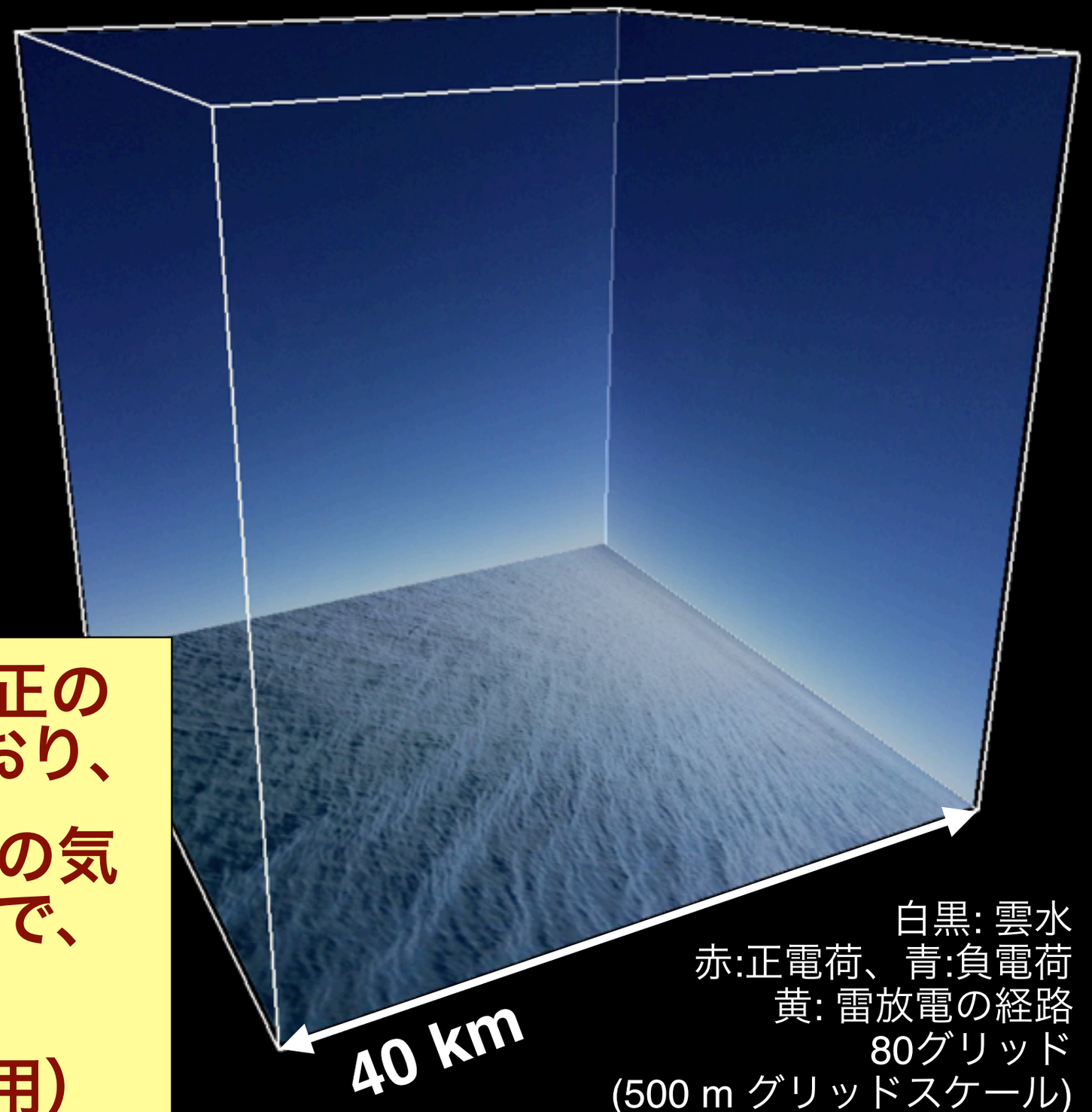


理研 AICS で開発中の大型計算機向け気象・気候ライブラリ
SCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment)
に雷モデルを実装する、理研 AICS 佐藤陽祐さんとの共同研究へ

雷数値気象シミュレーション研究の進捗

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



白黒: 雲水
赤:正電荷、青:負電荷
黄: 雷放電の経路
80グリッド
(500 m グリッドスケール)
(C)RIKEN AICS

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、

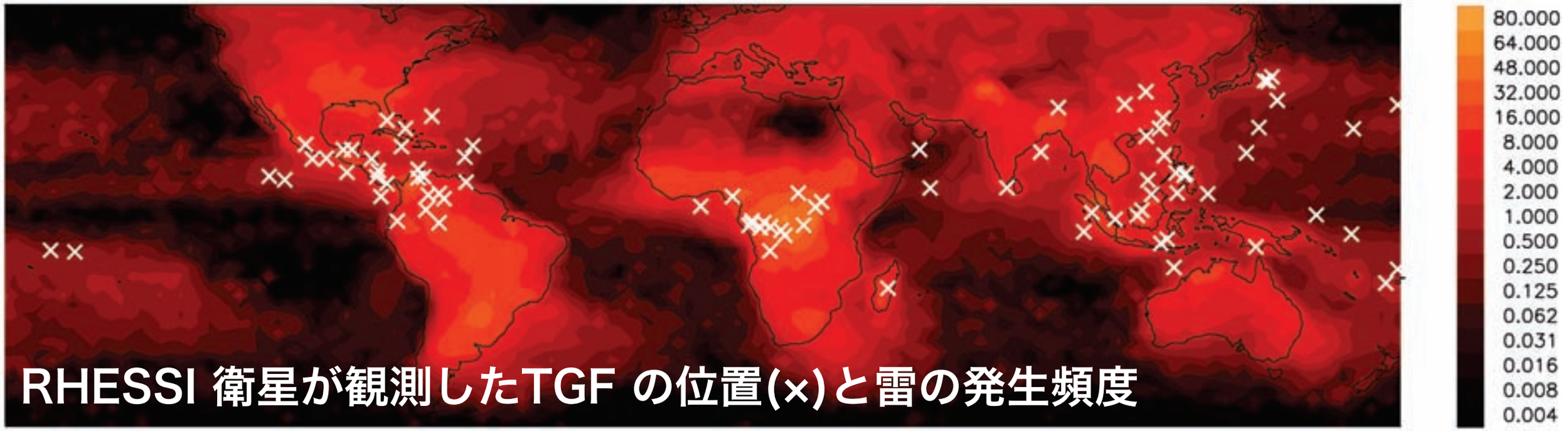
今後は、現実の地形や実際の気象状況を取り込む現実実験で、

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



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

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？

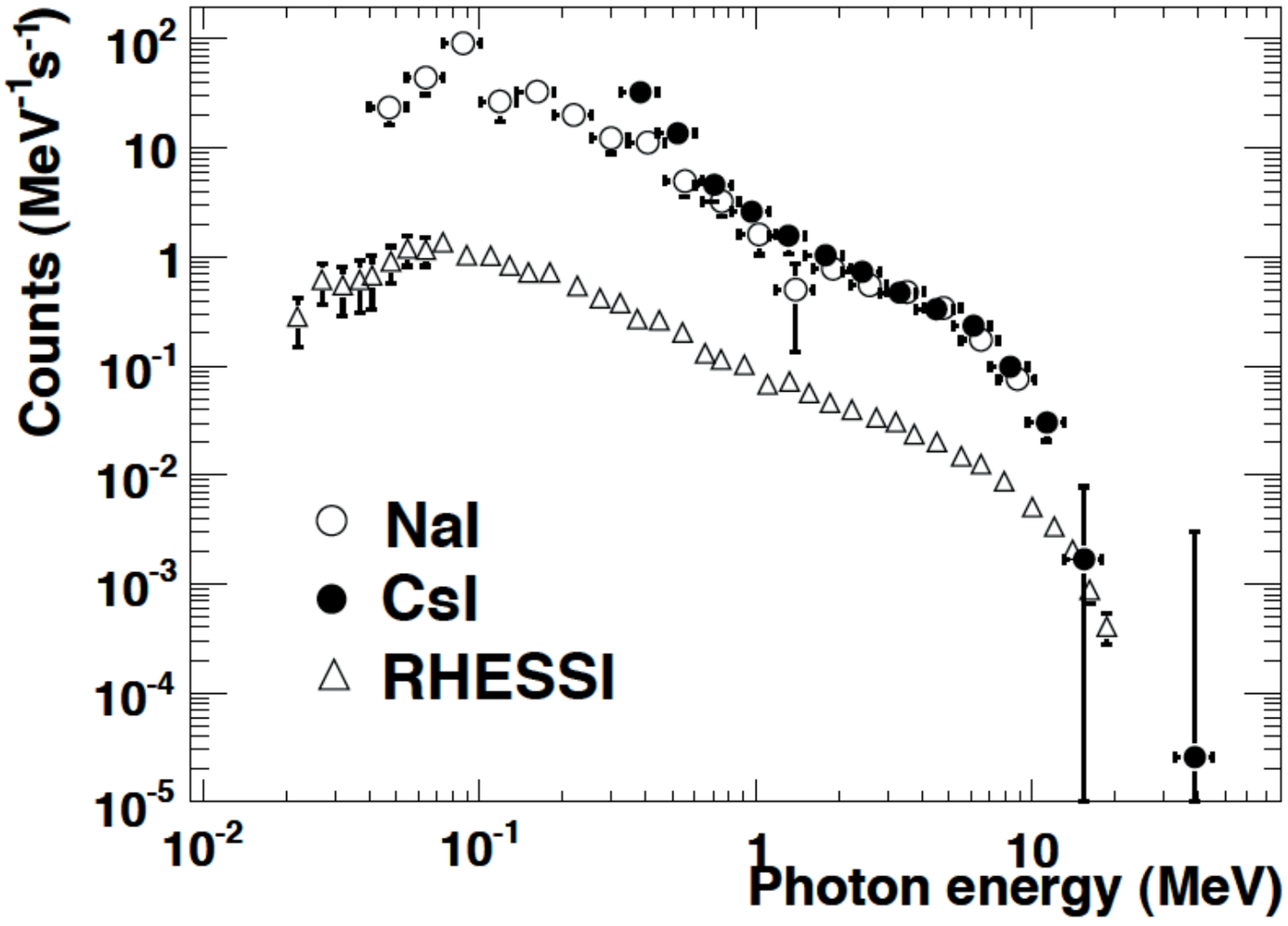


最近は Fermi で 650個/年,
AGILE で~1200個/月の検出

https://svs.gsfc.nasa.gov/10706

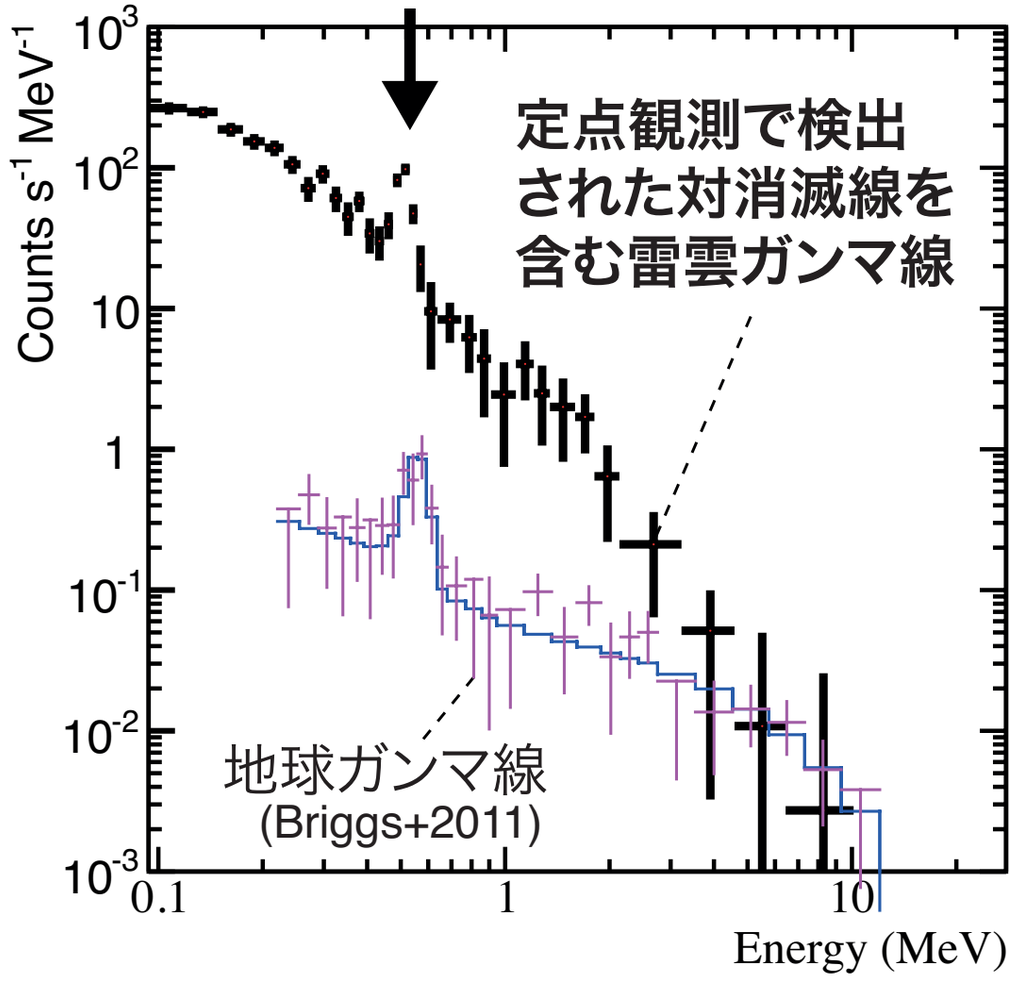
雷雲ガンマ線と地球ガンマ線フラッシュの比較

雷雲ガンマ線 vs. TGF



- 289個の TGF の加算スペクトル（縦軸は規格化; Dwyer & Smith 2005)
- 柏崎での検出と衛星軌道上での放射線スペクトルを比較→ほぼ同じ電子加速上限
- ~7 MeV の折れ曲がりは逃走電子の平均エネルギーに対応か？(検出器補正は必要)

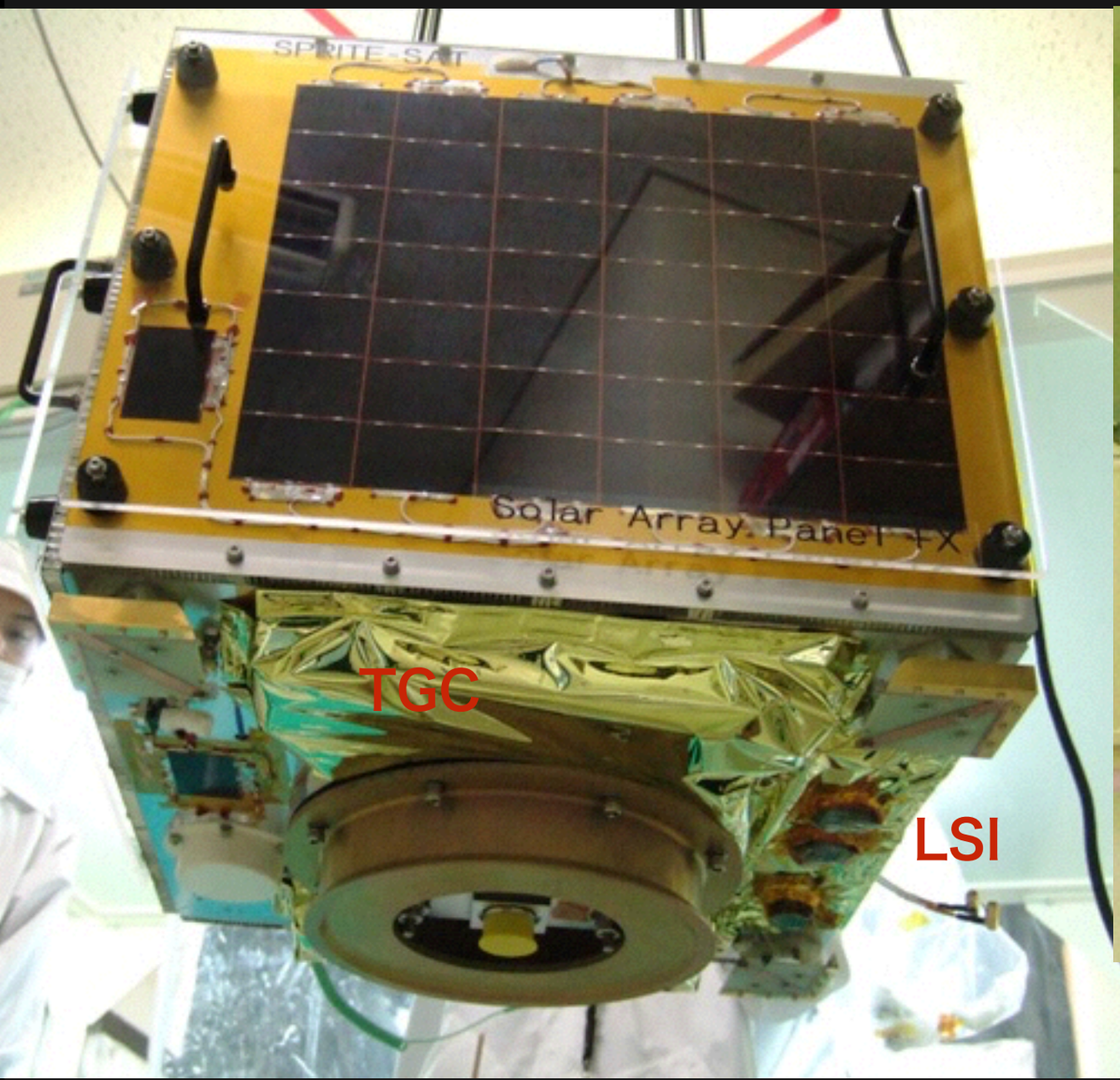
511 keV イベント !?



- TGF で511 keV輝線の検出 (Briggs et al., 2011)
- 柏崎の観測では 2012年1月13日に雷放電の直後に 511 keV 輝線を 610±80 カウント捉えた。電子-陽電子の対消滅線と解釈 (Umemoto et al., 2016)

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

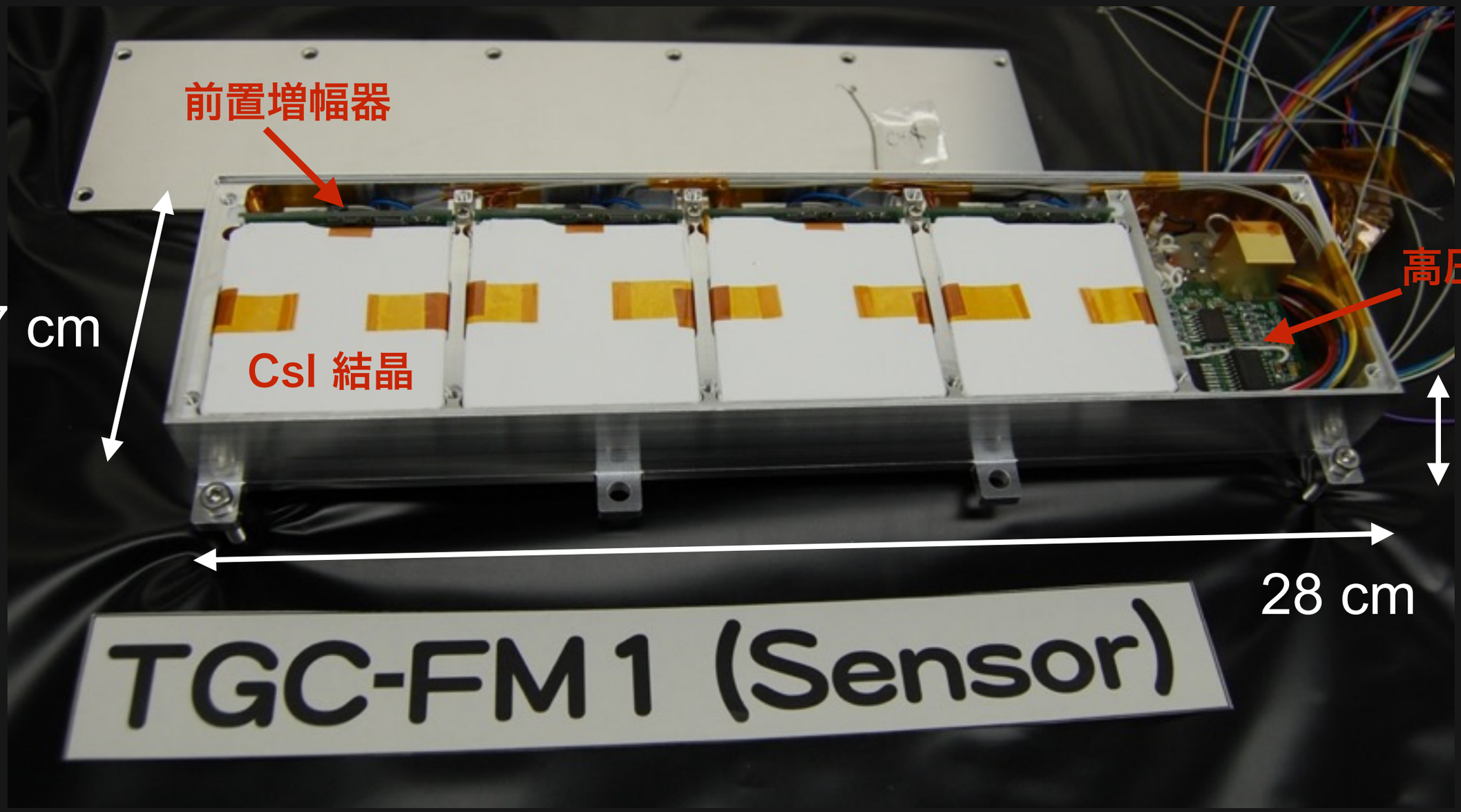




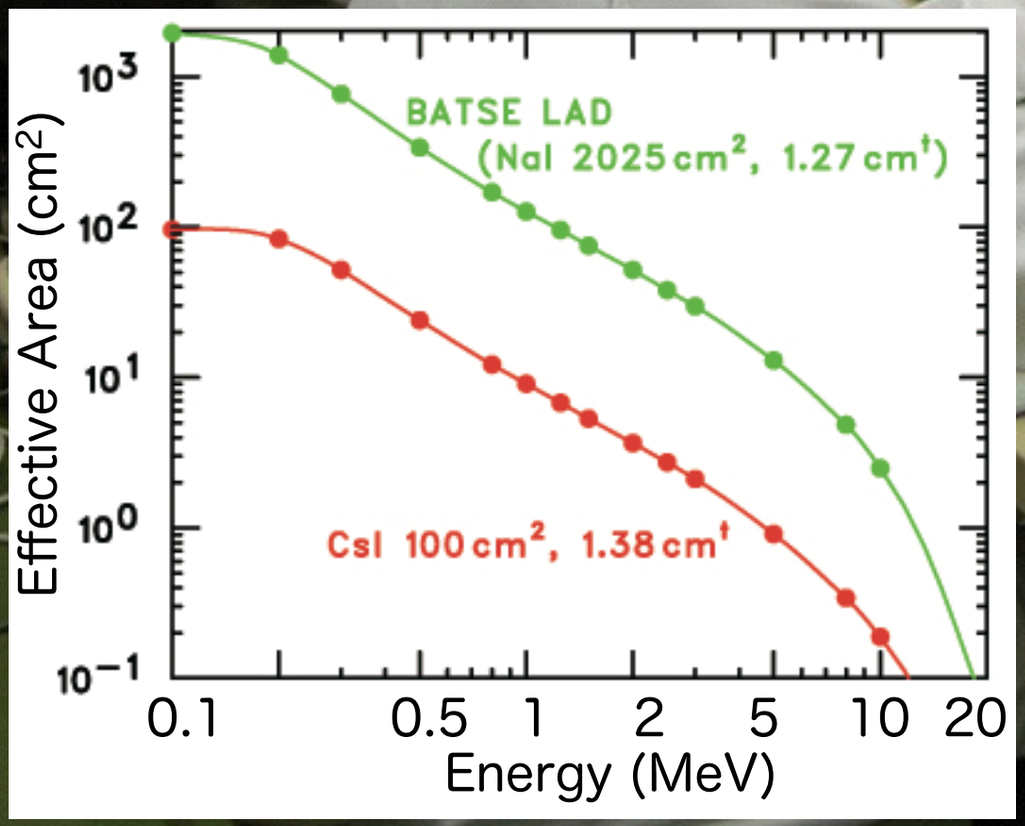
http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/SPRITE-SAT/index_e.html

Terrestrial Gamma-ray Counter (TGC)

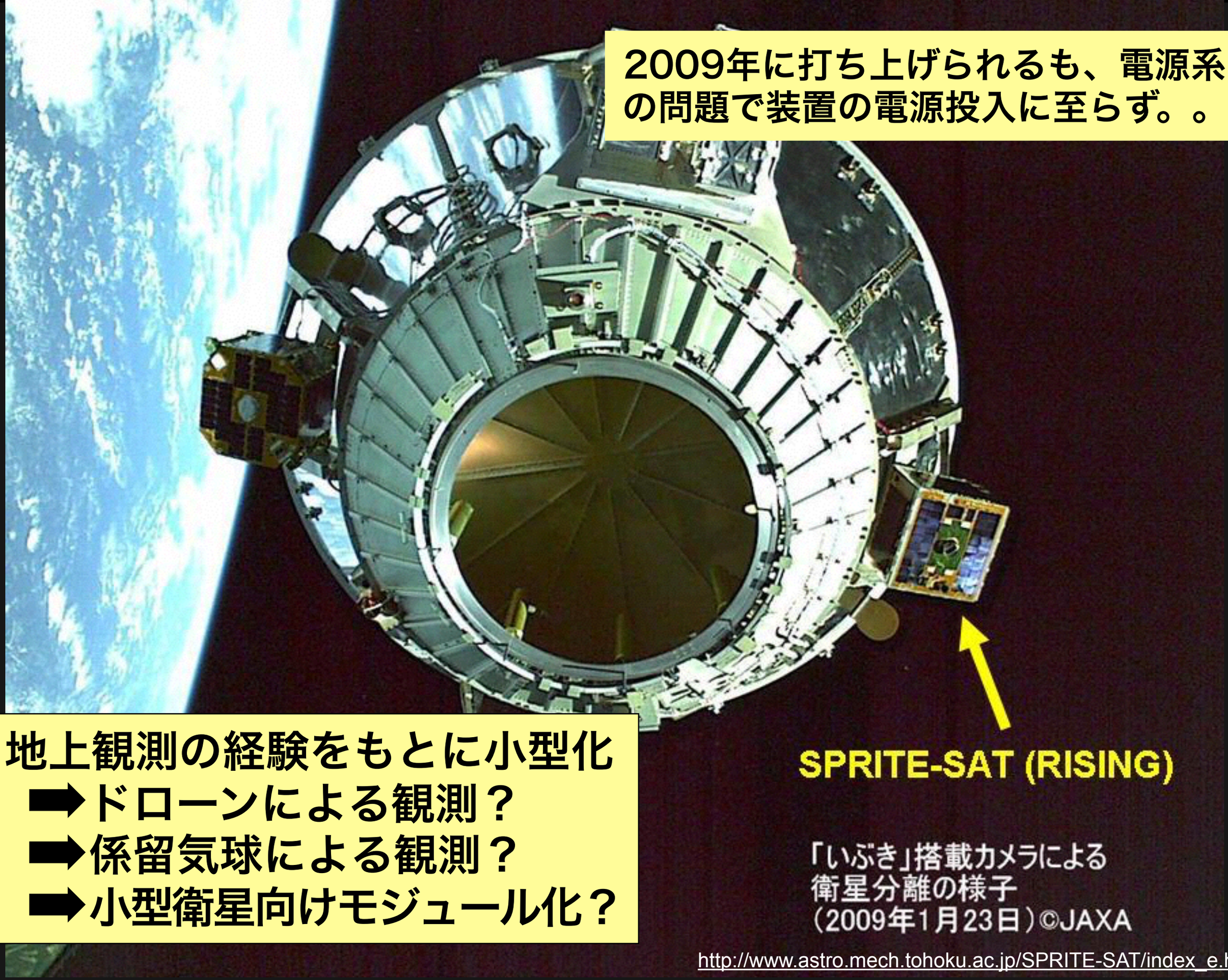
- CsI 結晶シンチレータ(5x5x1.38 cm, .0.17 kg) を4個/台搭載
- アバランシェフォトダイオード HPK S8664 (APD,受光面 1x1 cm^2)
- バーストデータをリングバッファに蓄積 (260 us ビン, 132+400 ms)
- 150 keV - 2.8 MeV の 4帯域のガンマ線ライトカーブを取得
- 2台のTGCで合計 2.6 kg & 0.72 W の低消費電力の観測装置を達成



TGC 製作の様子 / 榎戸は博士課程



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。。



「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

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？

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

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。^{238}U (半減期 45億年) を親とするウラン系列核種、 ^{232}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)

^{40}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 (^{87}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 (^{3}H, ^{14}Cなど)。現在も生成されている。

天然放射性核種: ウラン系列

半減期が地球年(約45億年)と同度で現在でも生き残っている

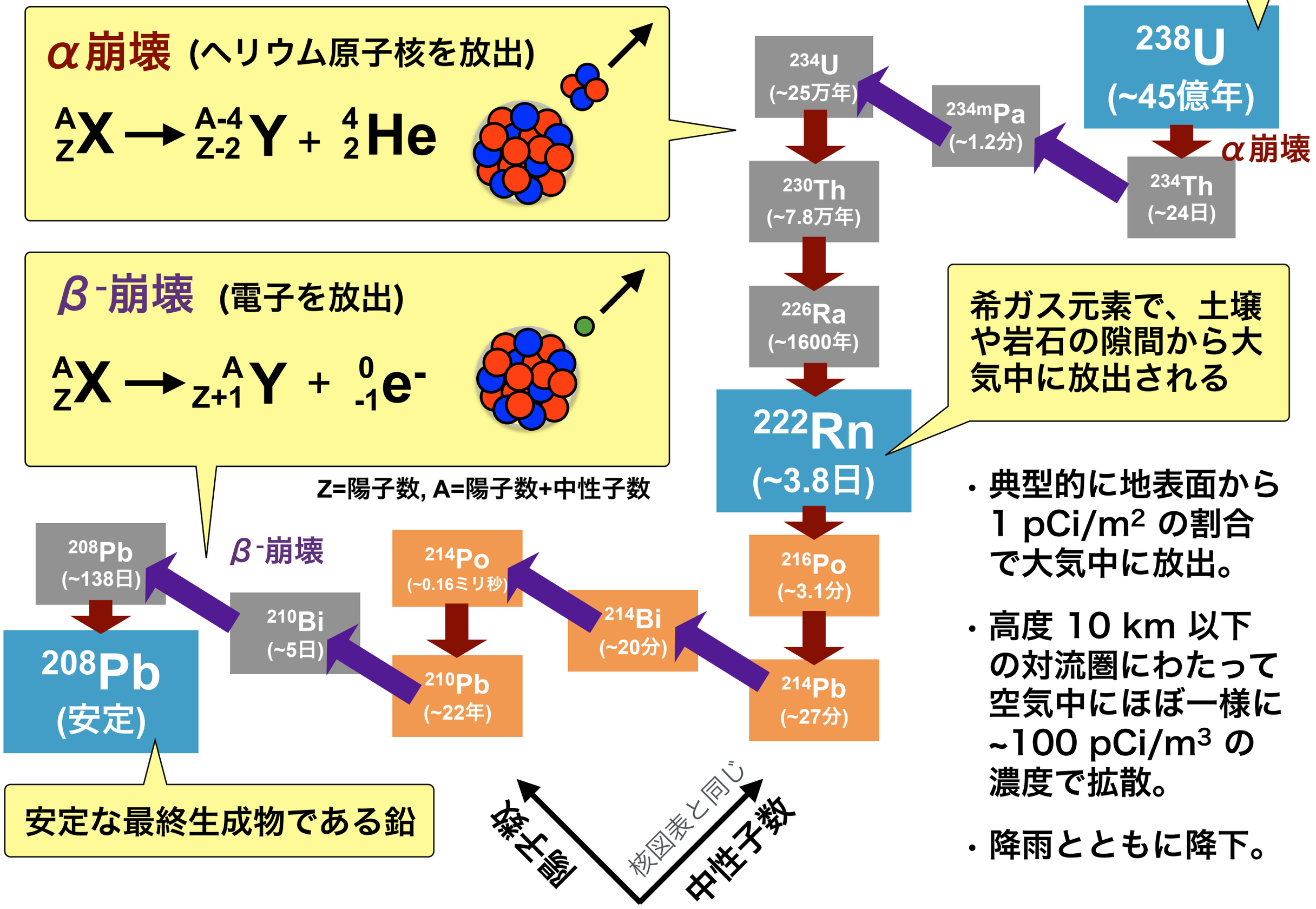
α崩壊 (ヘリウム原子核を放出)

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

β⁻崩壊 (電子を放出)

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^{-}$$

Z=陽子数, A=陽子数+中性子数

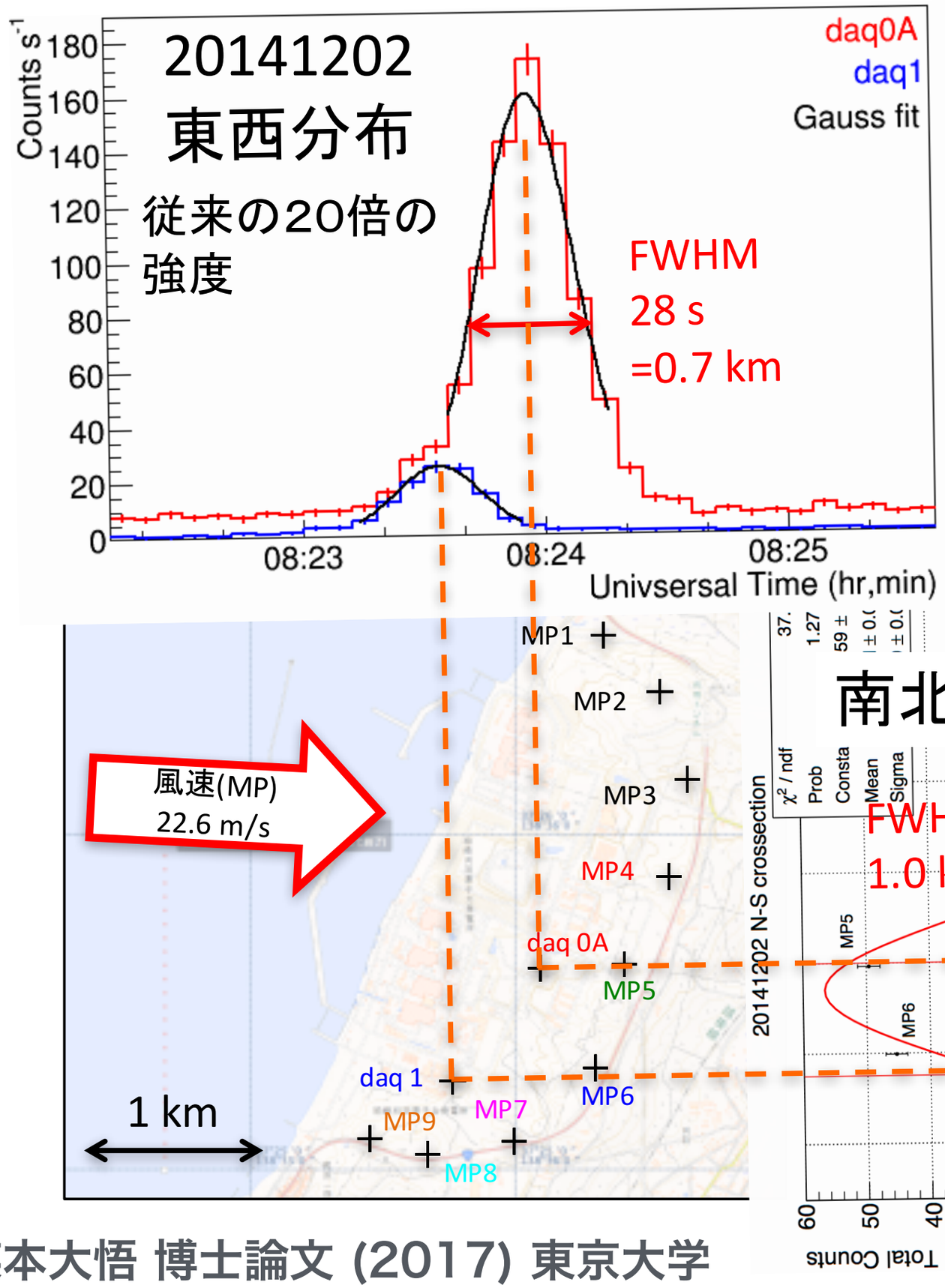


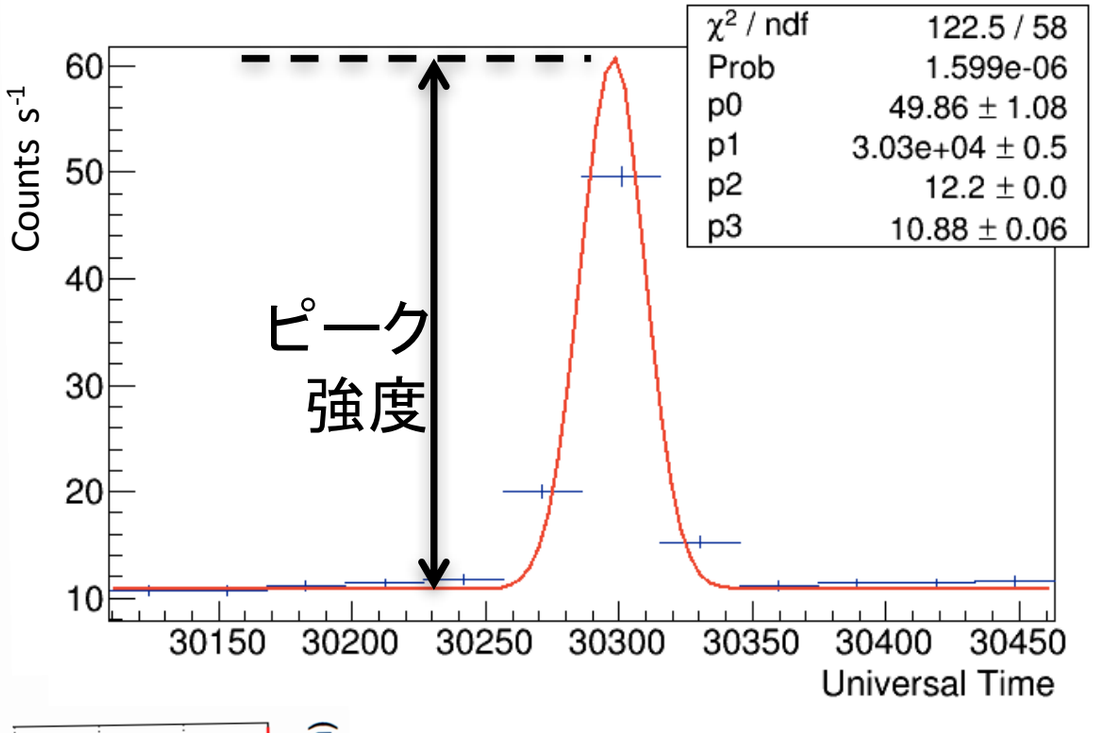
希ガス元素で、土壌や岩石の隙間から大気中に放出される

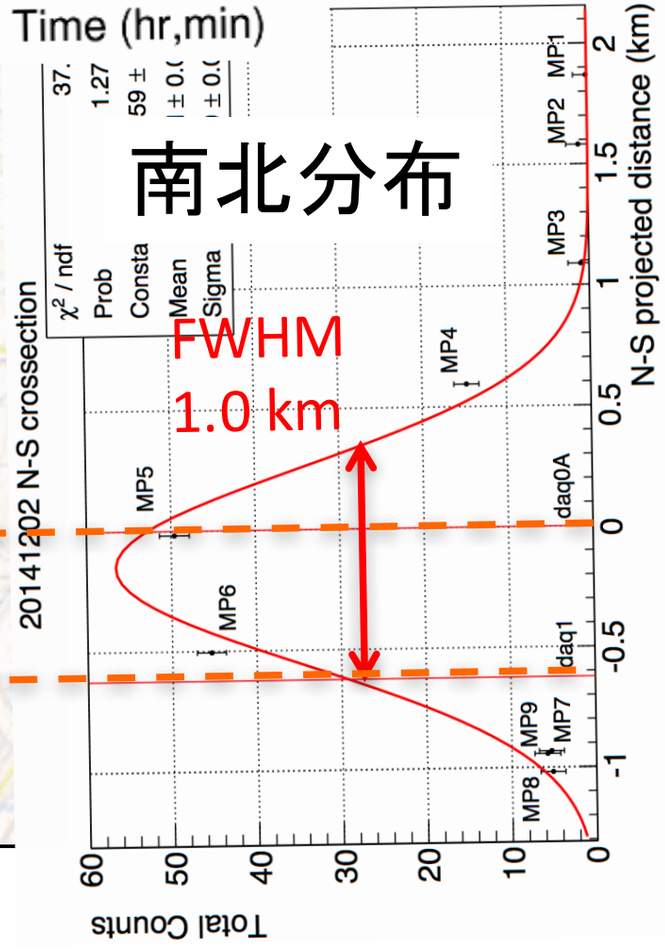
- 典型的に地表面から 1 pCi/m² の割合で大気中に放出。
- 高度 10 km 以下の対流圏にわたって空気中にほぼ一様に ~100 pCi/m³ の濃度で拡散。
- 降雨とともに降下。

安定な最終生成物である鉛

雷雲ガンマ線の照射域のサイズ@柏崎

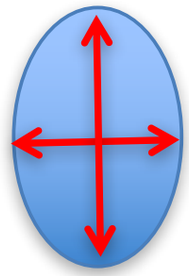






新たに分かったこと

- 照射域は南北に長い楕円であった
  0.7×1.0 km



22.6 m/s で移動

土屋et al.では~600 mとは推定したが、風向と風速を使って断面プロファイルを得た点が新しい

棟本大悟 博士論文 (2017) 東京大学