雷放電で拓く高エネルギー大気物理学

榎戸 輝揚 (京都大学 白眉センター/宇宙物理学教室)

2019年1月18日 (金) 15:30-16:40 神戸大学 CPS セミナー・談話会 (惑星科学研究センター・物理学専攻)

雷雲と雷が起こす
高エネルギー大気物理現象

1. 高エネルギー大気物理学の誕生
2. 雷雲からのガンマ線を探して
3. 雷が核反応を起こす!?
4. オープンサイエンスで挑む新しい研究

雷雲と雷が起こす
高エネルギー大気物理現象

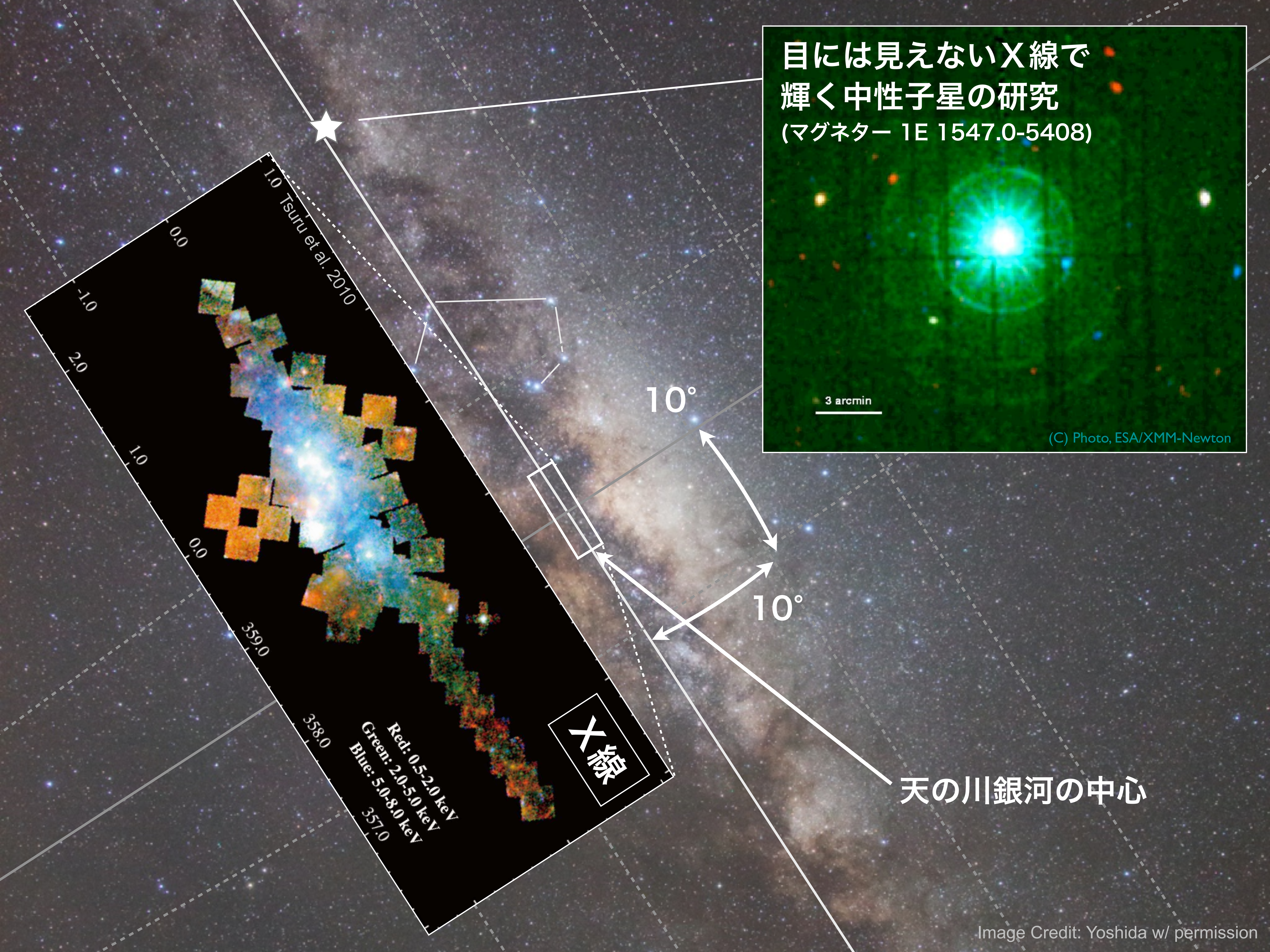
1. 高エネルギー大気物理学の誕生
2. 雷雲からのガンマ線を探して
3. 雷が核反応を起こす!?
4. オープンサイエンスで挑む新しい研究

Image Credit: Yoshida w/ permission

X線天文学者がなぜ雷を？

Enoto　Teruaki
榎戸 輝揚 (X線天文学者)

京都大学
白眉センター / 宇宙物理学教室


目には見えないX線で
輝く中性子星の研究
(マグネター 1E 1547.0-5408)
3 arcmin
(C) Photo, ESA/XMM-Newton
10°
10°
天の川銀河の中心
X線
Tsuru et al. 2010
Red: 0.5-2.0 keV
Green: 2.0-5.0 keV
Blue: 5.0-8.0 keV
Image Credit: Yoshida w/ permission

専門: 宇宙望遠鏡によるX線観測

研究者が観測だけでなく最先端の装置も開発！

Suzaku X-ray observatory (C) ISAS/JAXA

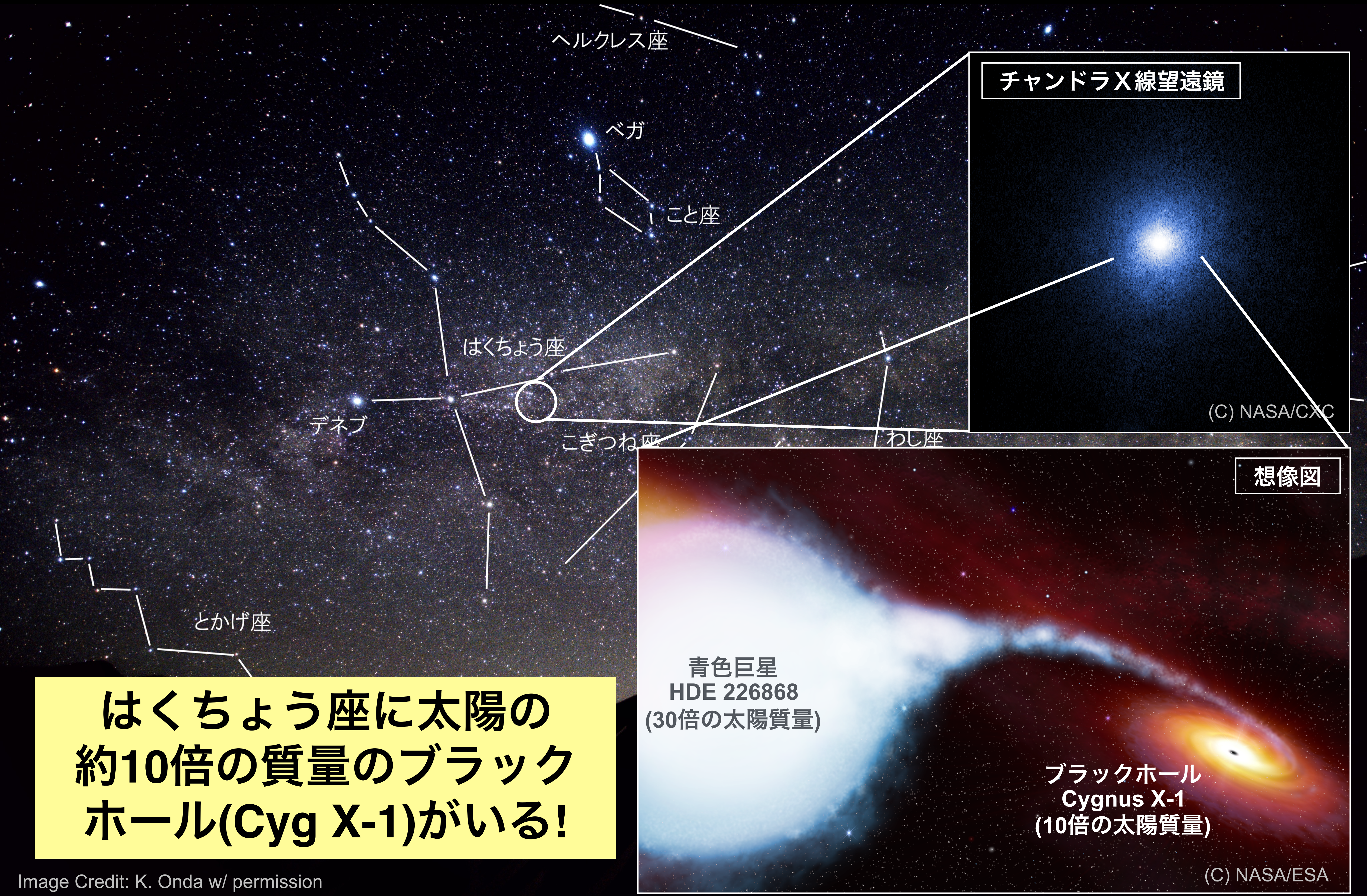
X線天文学で見える宇宙

Image Credit: K. Onda w/ permission

X線天文学で見える宇宙

Image Credit: K. Onda w/ permission

X線天文学で見える宇宙



はくちょう座に太陽の約10倍の質量のブラックホール(Cyg X-1)がいる!

Image Credit: K. Onda w/ permission

海外での武者修行: NASA プロジェクトで働く

NICER (Neutron star Interior ExploreR) のチームメンバー

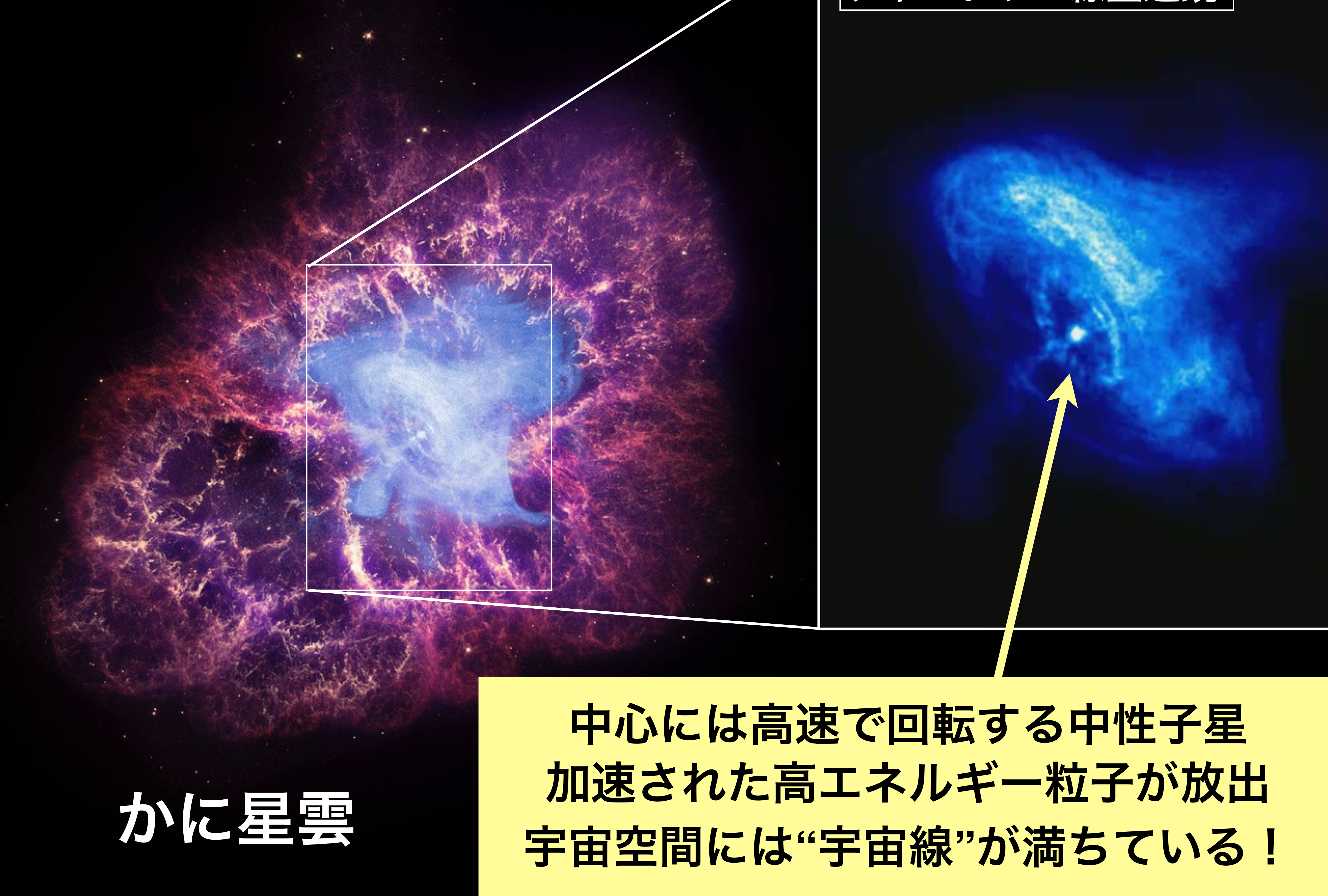
(c) NASA http://www.nasa.gov/press-release/goddard/2016/nasa-s-nicer-mission-arrives-at-kennedy-space-center

中性子星を観測するＸ線望遠鏡 NICER (ナイサー)

2017年6月に国際宇宙ステーションに搭載

NASA Johnson “Unlocking Secrets of Neutron Stars with NICER” YouTube
https://www.youtube.com/watch?v=IOEPDf2DYNM

X線で見る“激しい宇宙”

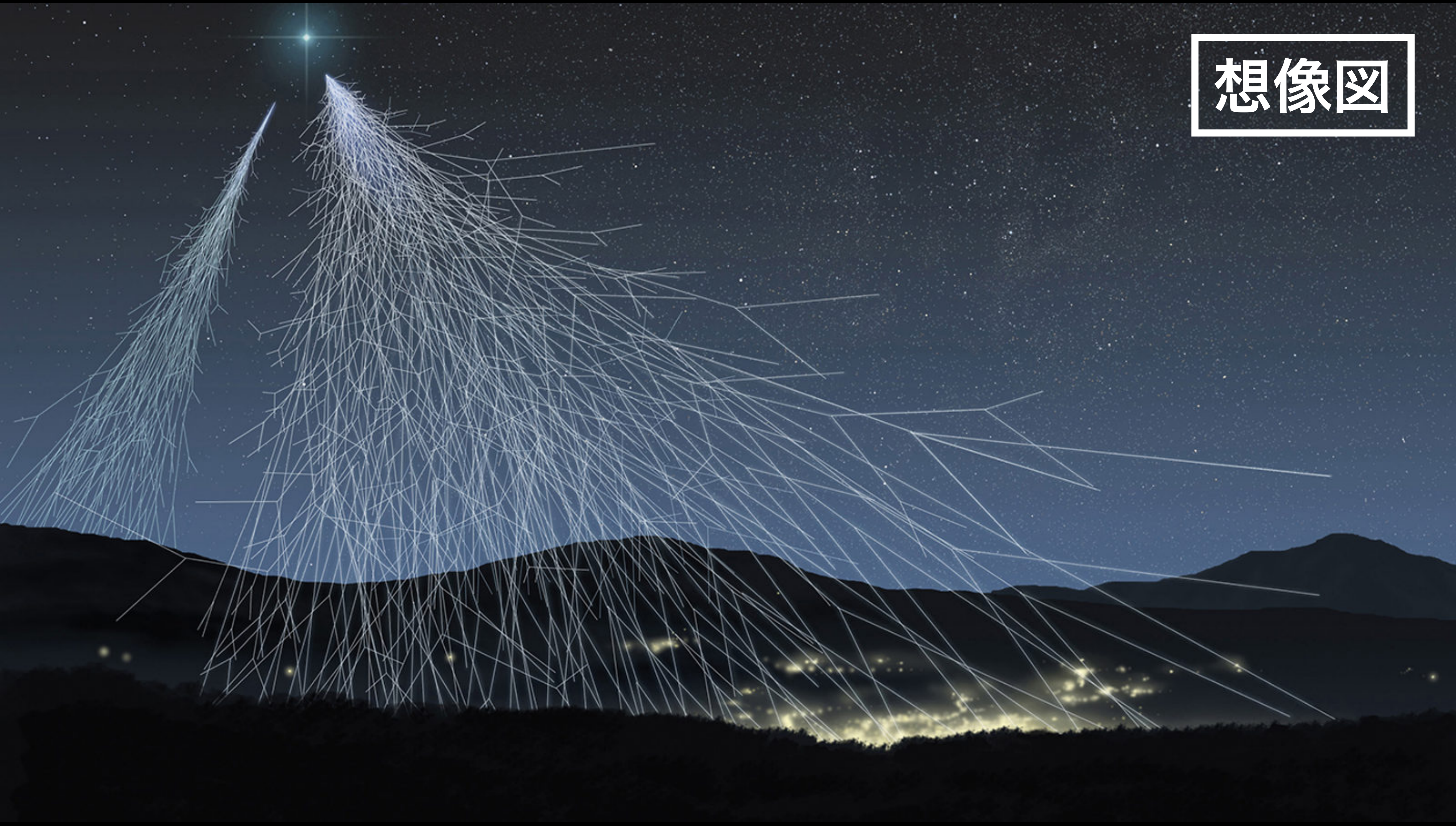


中心には高速で回転する中性子星
加速された高エネルギー粒子が放出
宇宙空間には“宇宙線”が満ちている！

Chandra, Hubble, and Spitzer image (NGC 1952)

宇宙線は地球にも降り注ぐ ⟶「宇宙の渚」

目に見えない宇宙線シャワーが降り注ぐ



https://www.symmetrymagazine.org/article/november-2014/auger-reveals-subtlety-in-cosmic-rays

カミナリ発生の謎！宇宙線がきっかけ？

カミナリの謎: 絶縁破壊の電場が観測されない

絶縁破壊電場: 0.5-3 MV/m (尖った針-平行平板)

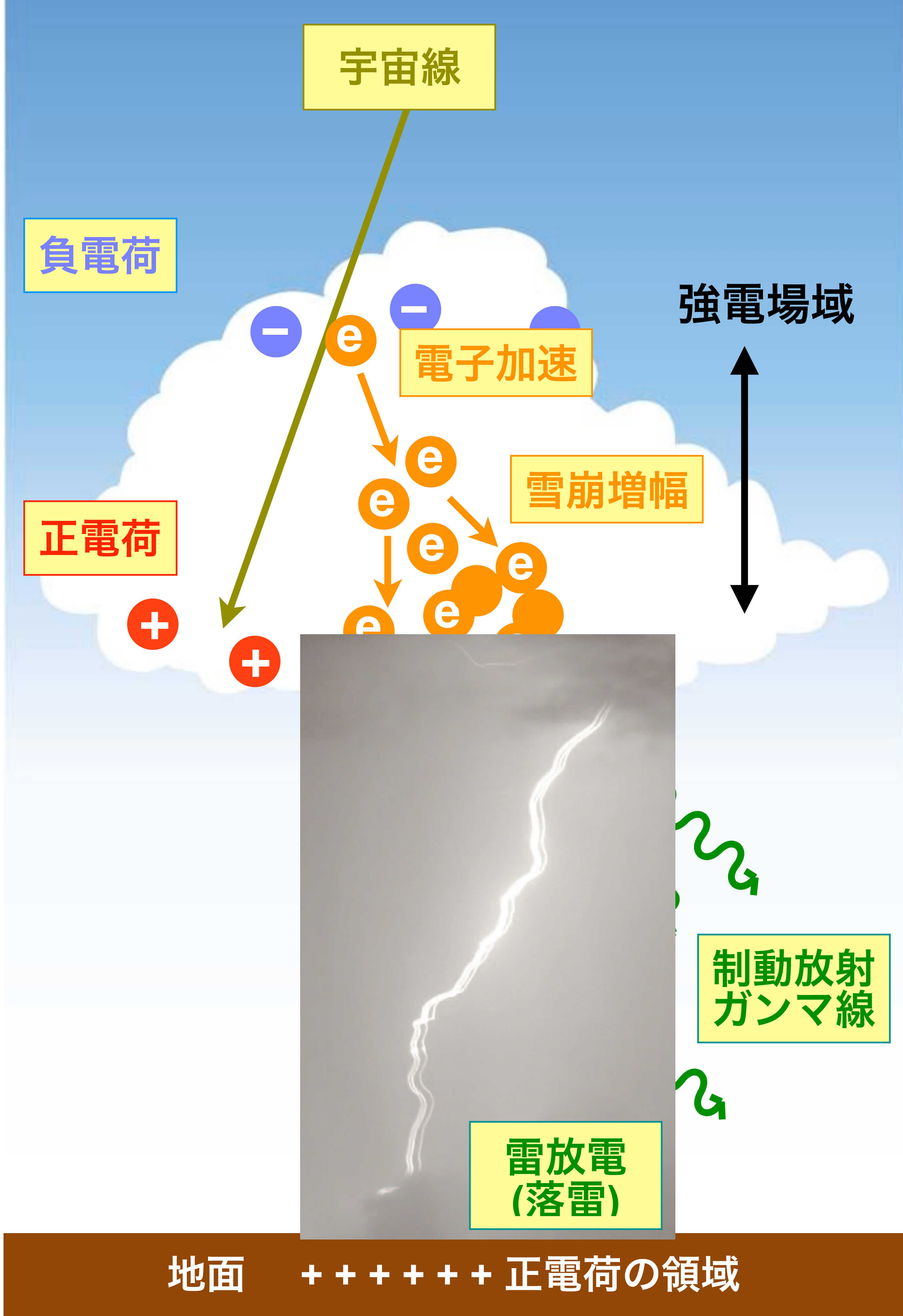
宇宙線が雷を起こす？

1. 宇宙線が高エネルギー粒子のシャワーが生じる。

2. この高エネルギー電子がきっかけになり、雷雲の中の強い電場により、大量の高エネルギーの加速電子が生成される（逃走電子の雪崩増幅）。

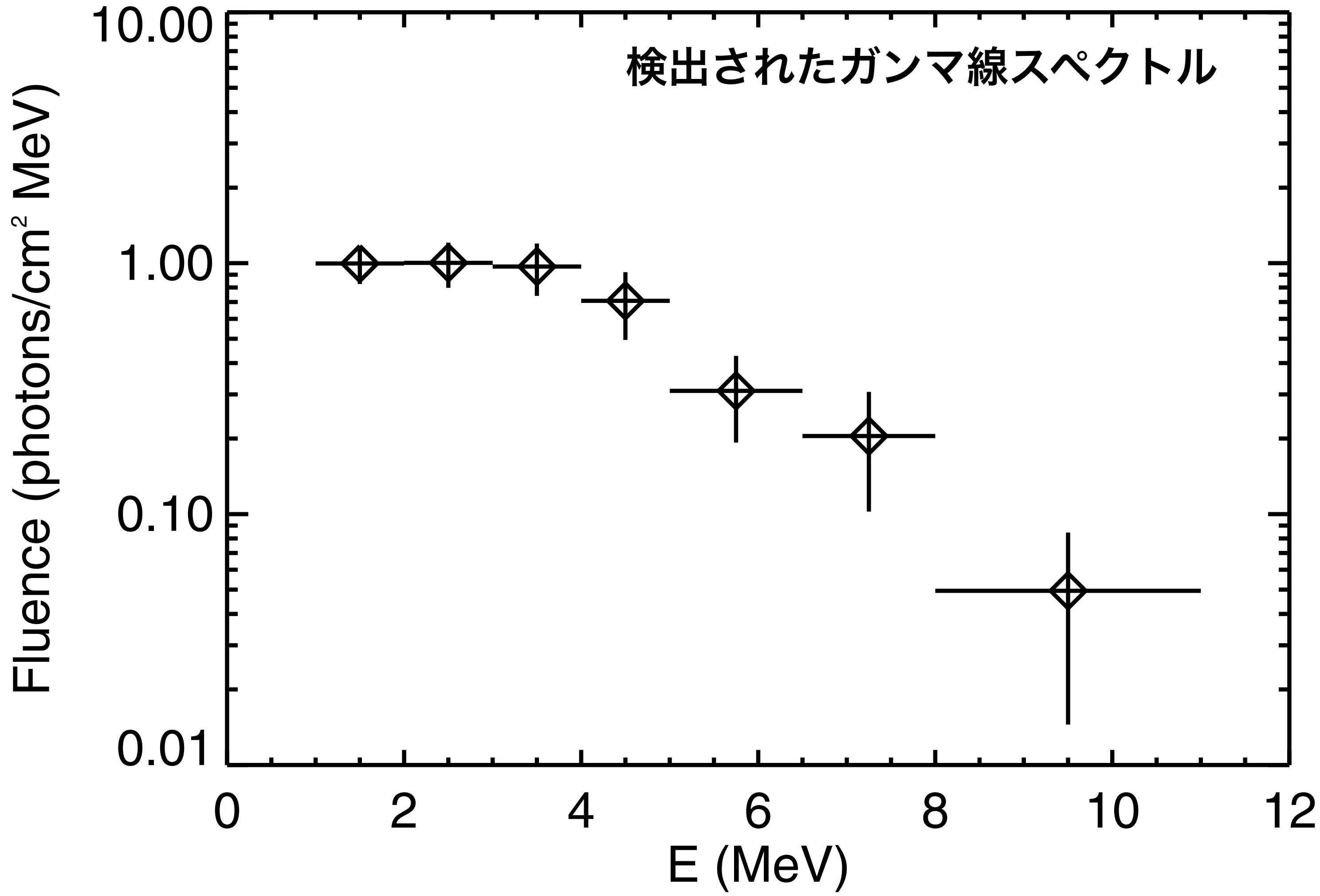
3. 加速された電子が階段状リーダーと呼ばれるイオン化した放電路を作る。大気にぶつかり制動放射ガンマ線が生じる

4. リーダーが地面に到達すると瞬間的に大電流が流れ、可視光で明るい雷光になる。

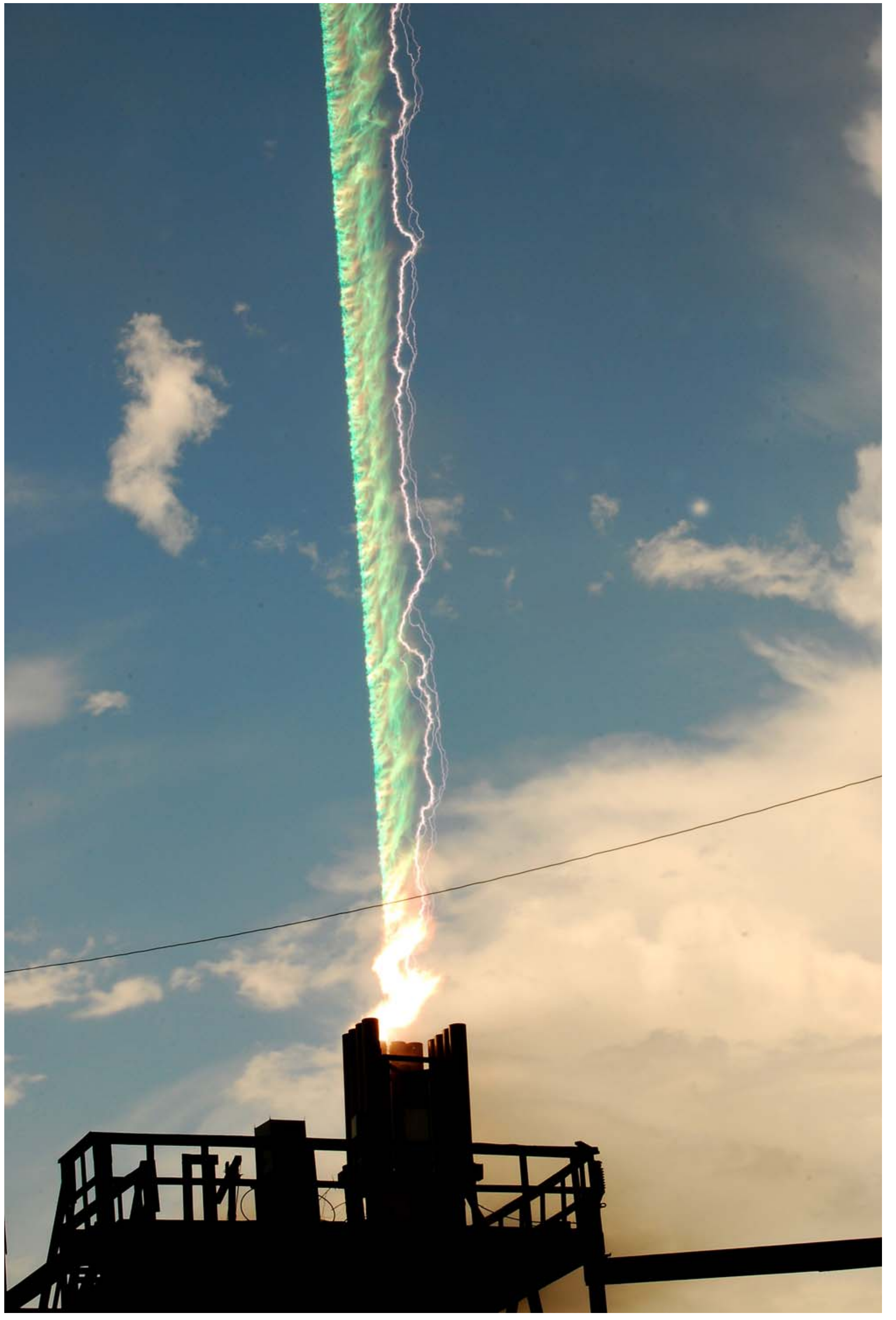


J.R.ドワイヤー「稲妻から出るX線を追え」
日経サイエンス2005年8月号

ロケット誘雷実験で雷からガンマ線が検出！

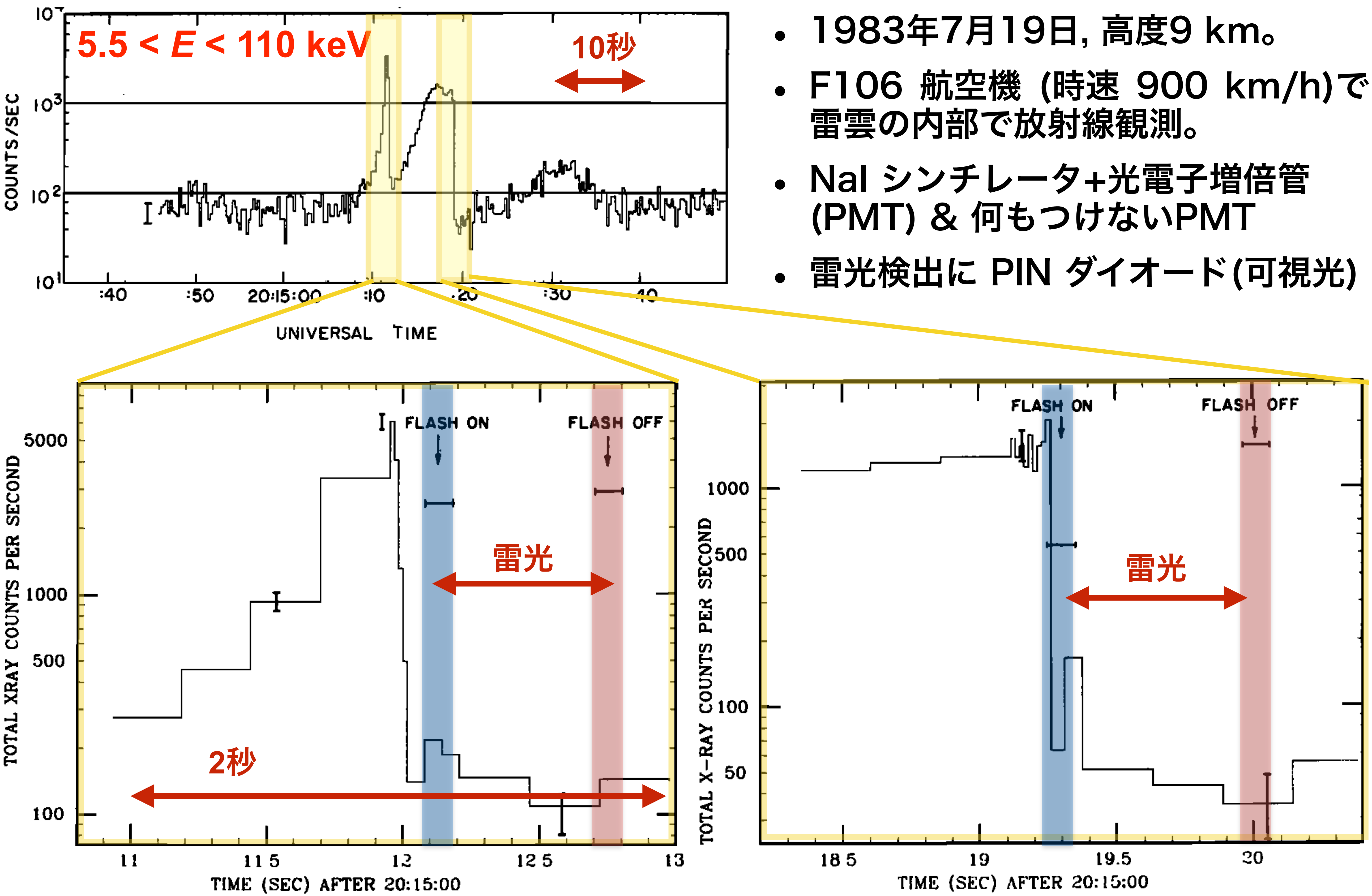


- 落雷点から 650 m に検出器 (NaI シンチレータ)
- X線は雷光(return stroke)より前 300 us 内
- 10 MeV まで伸びる制動放射スペクトル。
- 階段状リーダー(stepped leader)の先端部の強電場で電子加速?



Dwyer et al., Geophysical Research Letters, 2004
“A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning”

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”

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

- 天文衛星が地球から到来するガンマ線のバーストを宇宙から発見。
  地上で発生した雷と同期。
- 雷雲から宇宙に向かって駆け上がる電子の制動放射ガンマ線。
  ミリ秒と極めて短いが、10メガ電子ボルト以上の高いエネルギー。

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

RHESSI 衛星が観測したTGFの位置と雷の発生頻度

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

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

新分野「高エネルギー大気物理学」の誕生

雷雲と雷は「宇宙」と同じような未踏領域である
高エネルギーの粒子や光の観測が鍵のようだ！
宇宙物理学者が活躍できるフィールド？

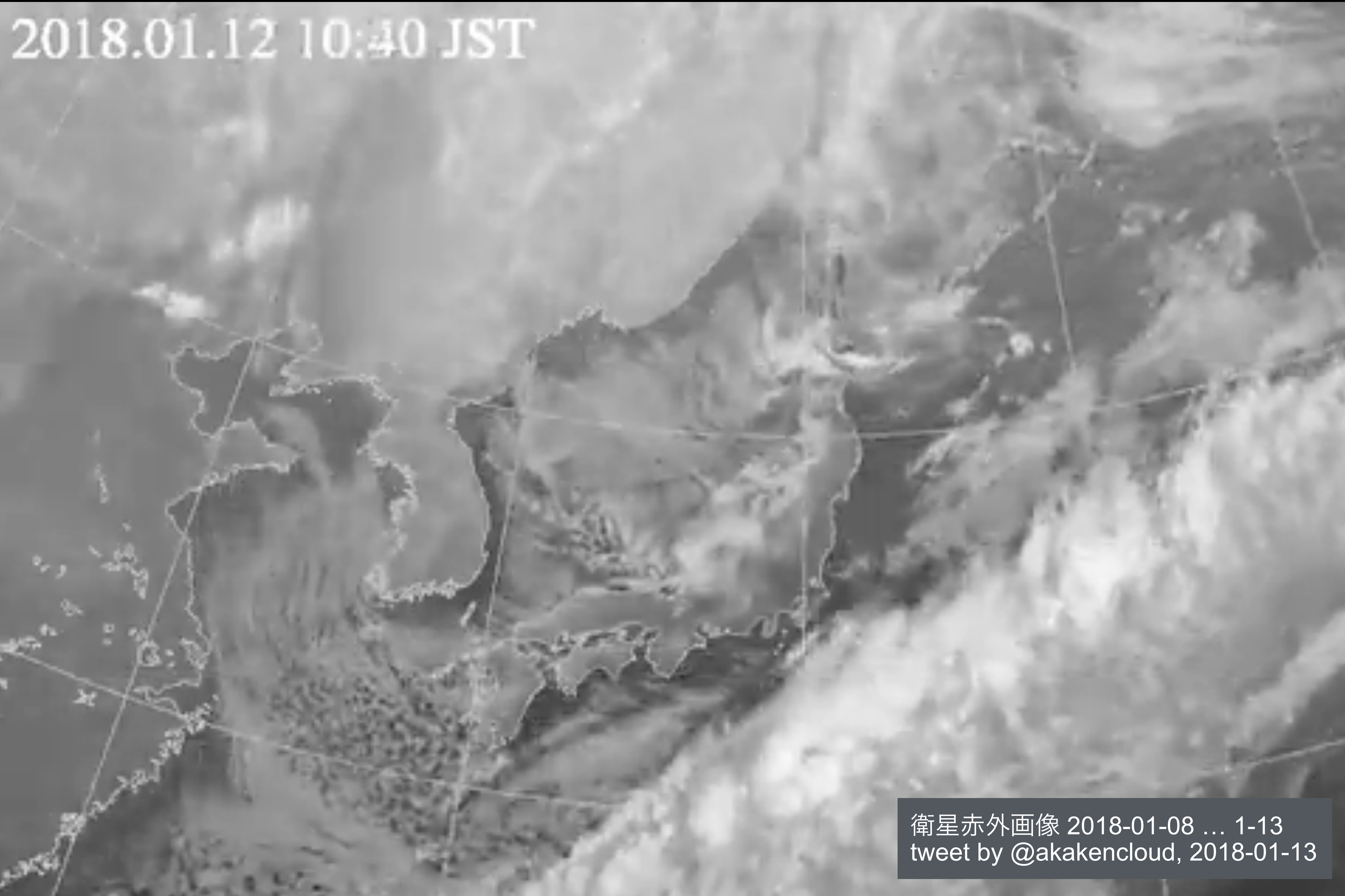
身近なカミナリには未解明の謎が多い！

Dustin Farrell “Transient” (vimeo) https://vimeo.com/245581179

雷雲と雷の高エネルギー大気物理学

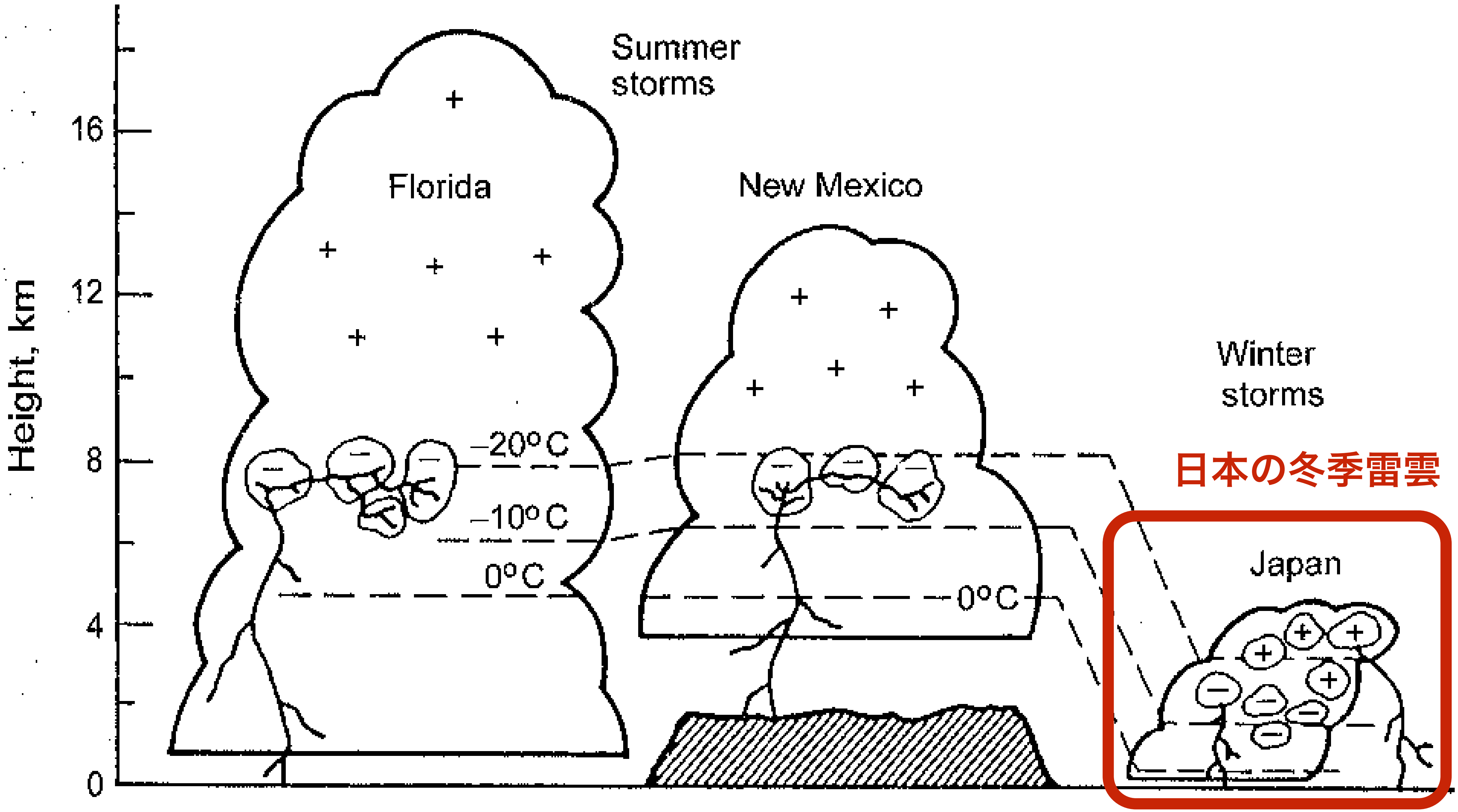
1. 高エネルギー大気物理学の誕生
2. 雷雲からのガンマ線を探して
3. 雷が核反応を起こす!?
4. オープンサイエンスで挑む新しい研究

日本海から到来する強力な冬季雷雲



衛星赤外画像 2018-01-08 … 1-13
tweet by @akakencloud, 2018-01-13

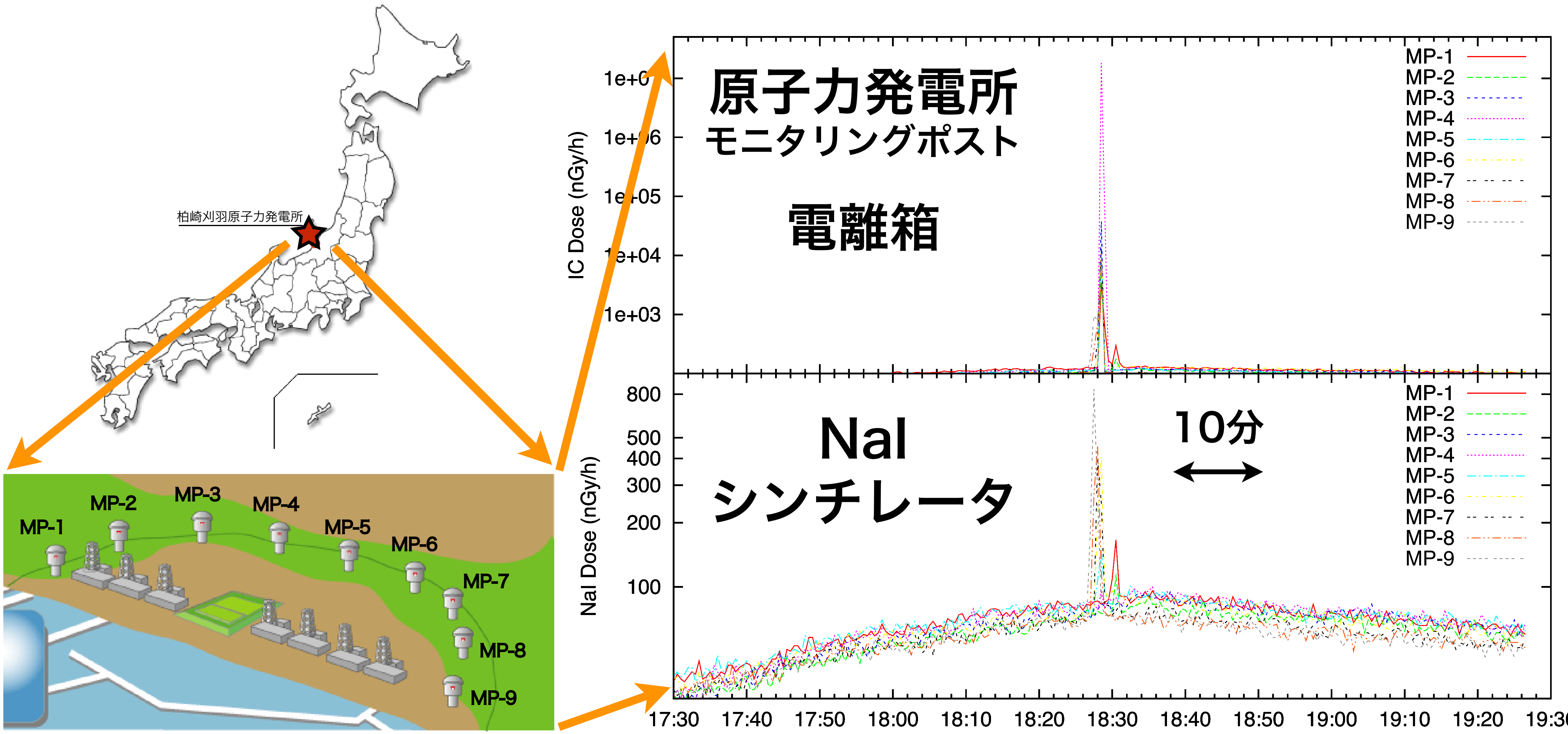
日本海から到来する強力な冬季雷雲



- 雲底が低い(<1km @ 厳冬期)
- 強力な落雷(10-1000倍)
- 上空にスプライトやエルブス
- 正極性放電が多い(~33 %)

(Rakov and Uman, 2003)

原発の放射線モニタリングが雷雲に反応？



日本海岸の原子力発電所のモニタリングポストで
冬季雷雲の到来時に放射線の増大が検出されていた

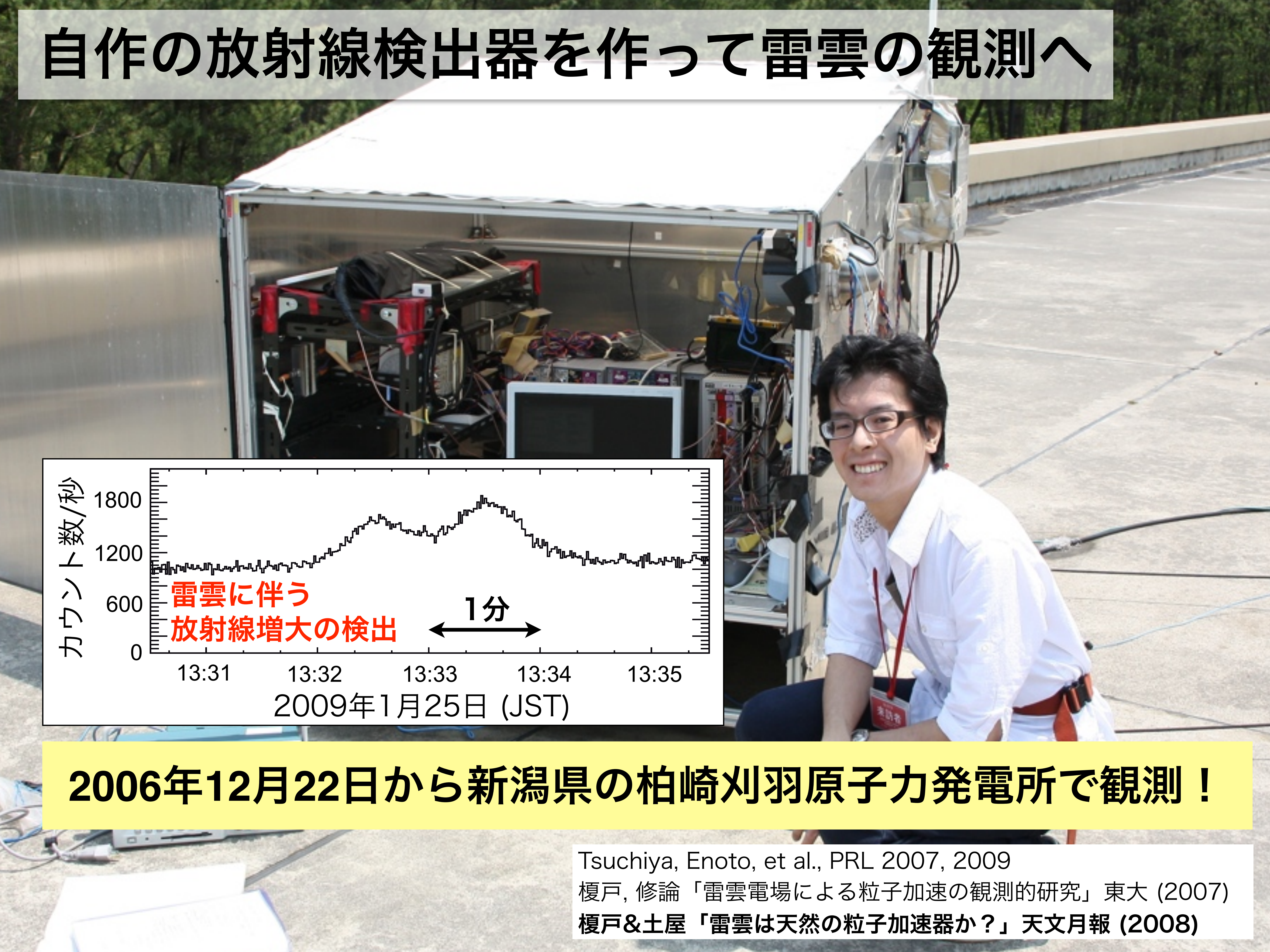
継続時間は数分。電子かガンマ線か、そのスペクトルが不明！

自作の放射線検出器を作って雷雲の観測へ

2006年12月22日から新潟県の柏崎刈羽原子力発電所で観測！

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)

自作の放射線検出器を作って雷雲の観測へ



2006年12月22日から新潟県の柏崎刈羽原子力発電所で観測！

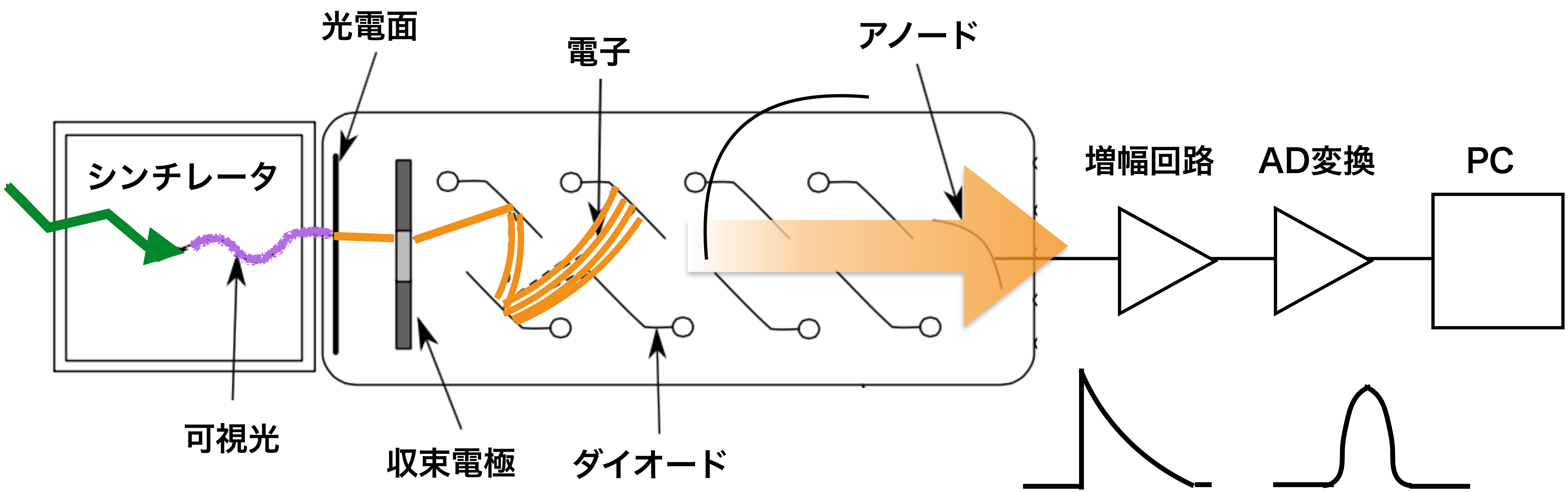
Tsuchiya, Enoto, et al., PRL 2007, 2009
榎戸, 修論「雷雲電場による粒子加速の観測的研究」東大 (2007)
榎戸&土屋「雷雲は天然の粒子加速器か？」天文月報 (2008)

ガンマ線を計測するには？

見えない粒子を「うまく」電気信号に変換し増幅して記録する

シンチレータ	光電子増倍管	信号増幅	記録

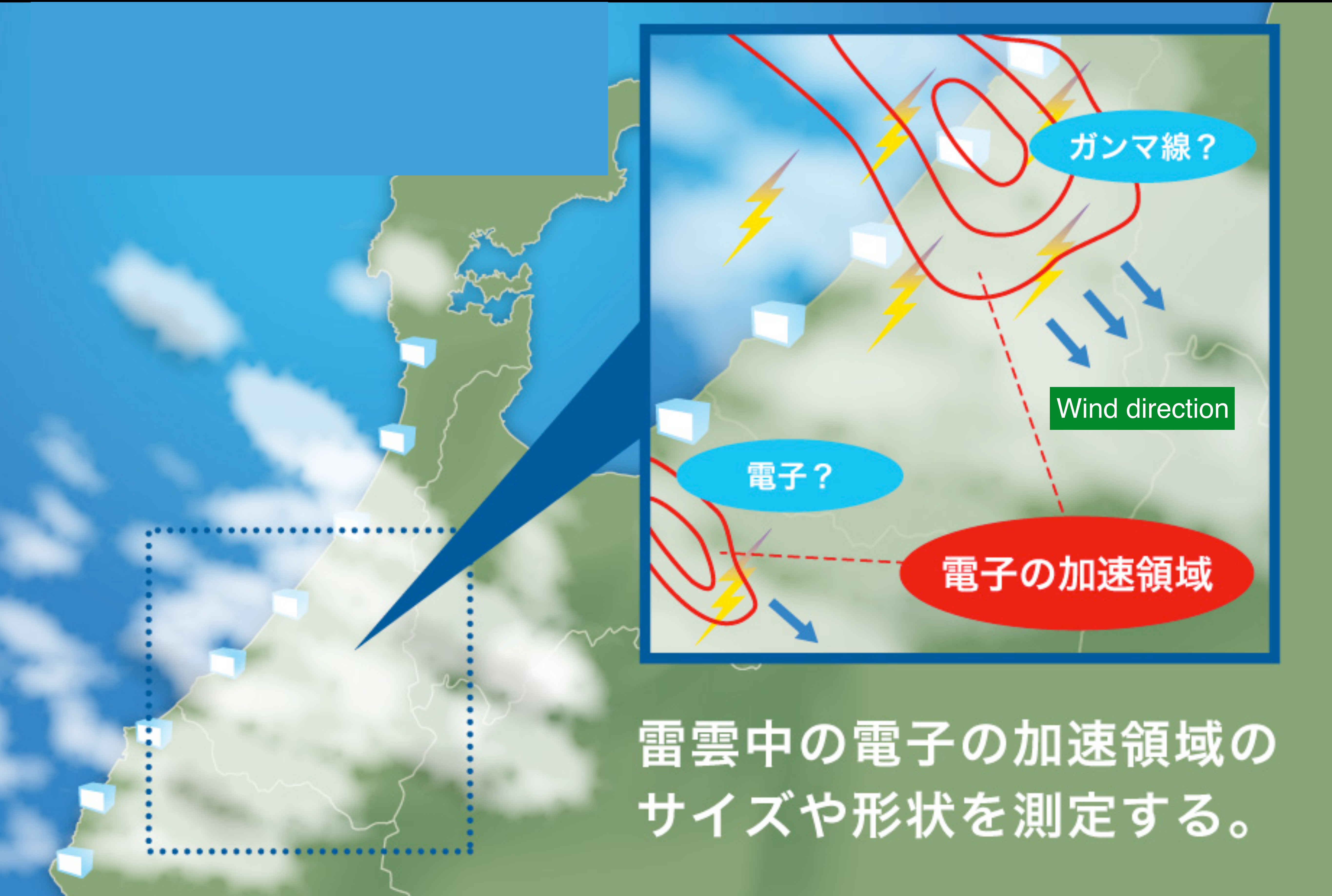
ガンマ線 ➡ 可視光 ➡ 電子(増幅して電流) ➡ 電圧 ➡ デジタル信号



「うまく」= 光と物質の相互作用 (光電吸収、コンプトン散乱)
個々のガンマ線を、時刻、エネルギー(電圧の強さ)として記録

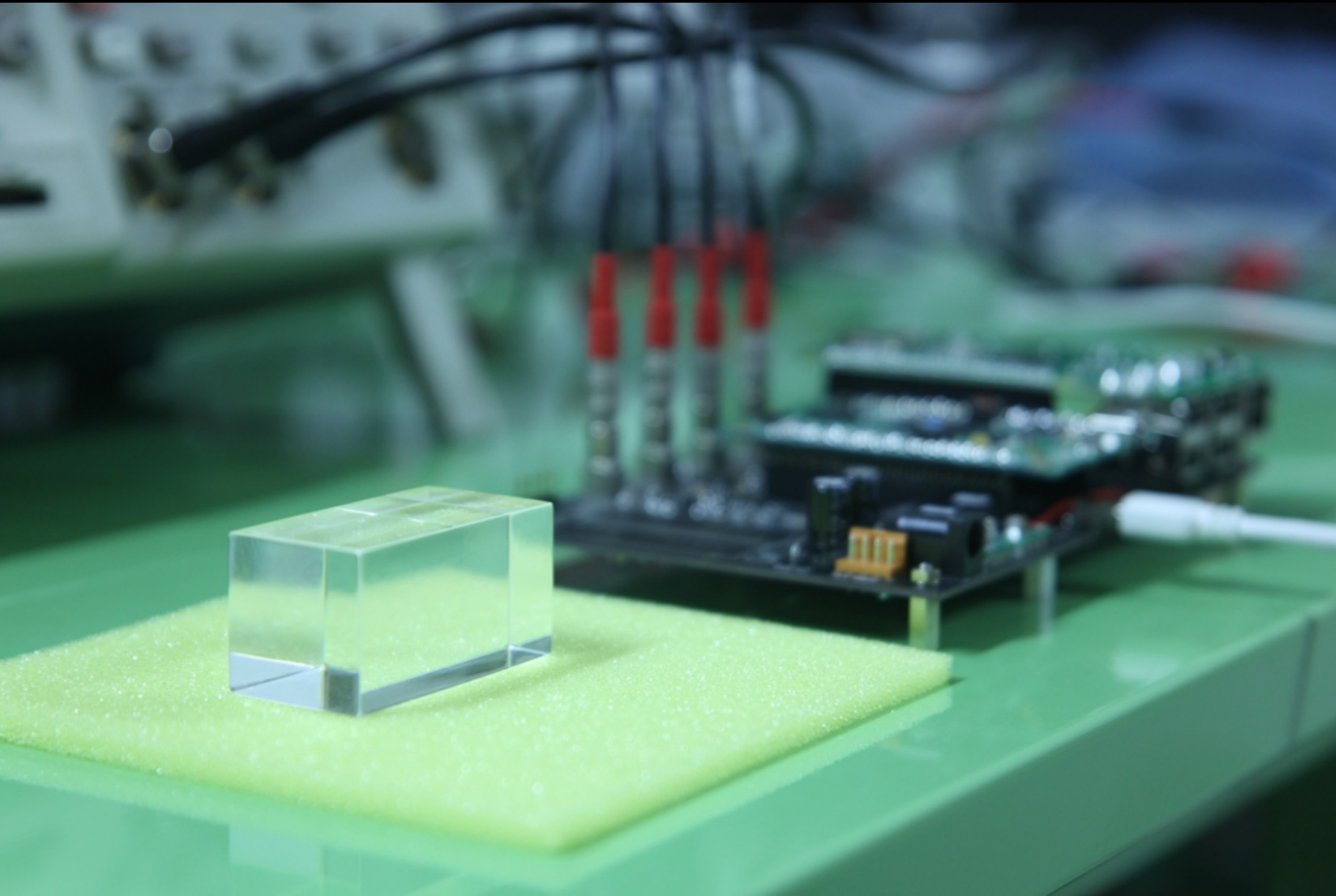
https://ja.wikipedia.org/wiki/光電子増倍管

能登半島で多地点マッピング観測を行いたい！



雷雲中の電子の加速領域の
サイズや形状を測定する。

ガンマ線を捕らえる結晶と読み出し系が高価...



研究費が必要

が…

科研費(科学研究費補助金)の提案は
採択されず…

学術系クラウドファンディングに挑戦！

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

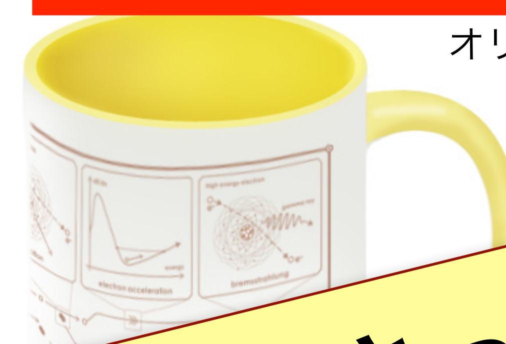
きんでいたことがあり、冬季の雷を思い出しま
興味深い研究だと思います。応援しています。

オリジナルリターンの準備

(協)アダチ・デザイン研究室

オリジナル T シャツ

マグカップ

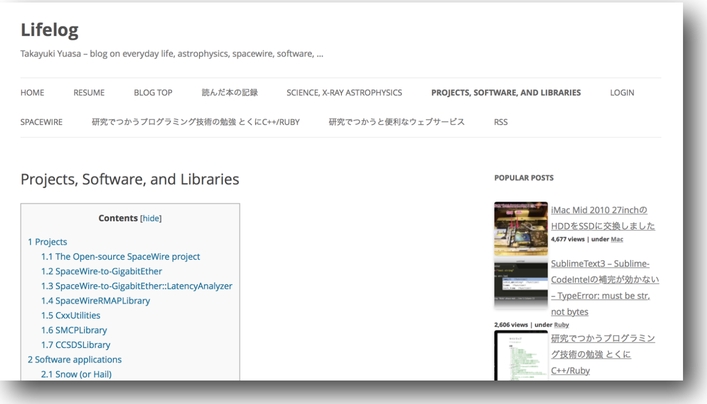


USB

サポートしてくださった皆様
ありがとうございました!!

オンラインでの宣伝

Twitter



Personal blog

academist

Facebook

Academist journal

オンラインでの反響

日本海沿岸に住んでいたことがあり、冬季の雷を思い出しました。
とても興味深い研究だと思います、応援しています。

お二人のプロジェクトを見て、久しぶりにとてもわくわくしました！今はささやかな資金貢献しか出来ませんが、私もいつか、自分の専門分野を通じて科学技術に貢献できるよう仕事頑張ろうと思いました。がんばってください！！

京大アカデミックデイでのプレゼンをYoutubeで見ましてこの研究を知りました。応援します。

達成おめでとうございます。先端の物理学の取り組みを研究者と市民の間で共有する模索に、敬意を表します。

電子の加速という科学の深い分野と落雷という日常の接点がとても興味深い研究だと思いました。今後も京都大学から多様な研究が発展していくようOBとして微力ながら協力させて頂きたいと思います。

オンラインでの反響

アカデミスト
サポーターサイトから

小さい頃、科学雑誌Newtonを読んで、漠然と宇宙に憧れたことを思い出しました。微力ではありますが、支援させて頂きたく存じます。頑張って下さい！

「市民の科学研究」というような文脈でチャレンジされていることにも感銘を受けました。科学は人類共通の財産とはいうものの、「人類って一体誰のことなんだ？」という疑問を常々感じていましたので、今回のプロジェクトはダイレクトに「人類とは貴方のことですよ」と言ってもらっているようで、何となく嬉しかったです。

電波と宇宙が好きなアマチュアです。紹介してくださる方がありプロジェクトを知り応援します。北陸には至近距離にウインドプロファイラが２基あるようですし、微細な気象条件も見ることができるのではないでしょうか？　多地点での観測を統合して解析する手法も面白いと感じました。

合計93通のメッセージをいただきました。

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

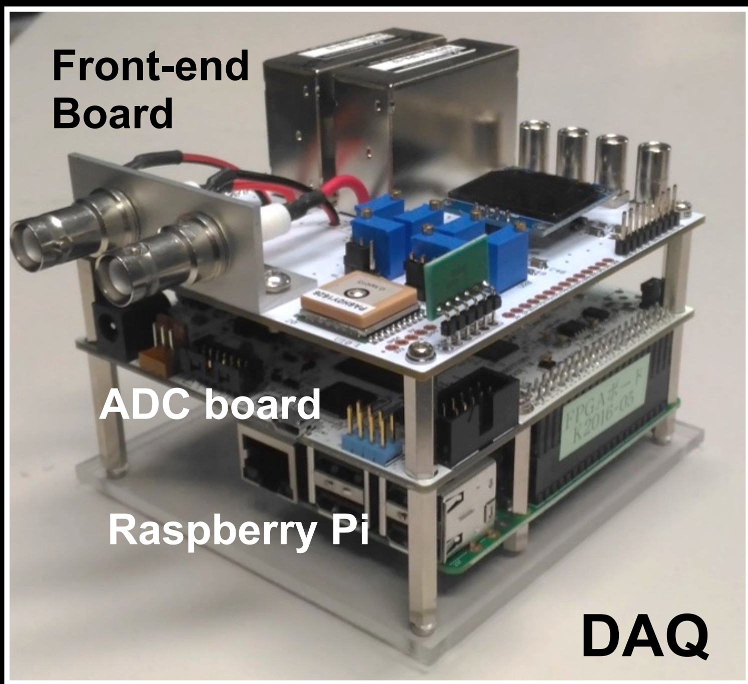
10,000円

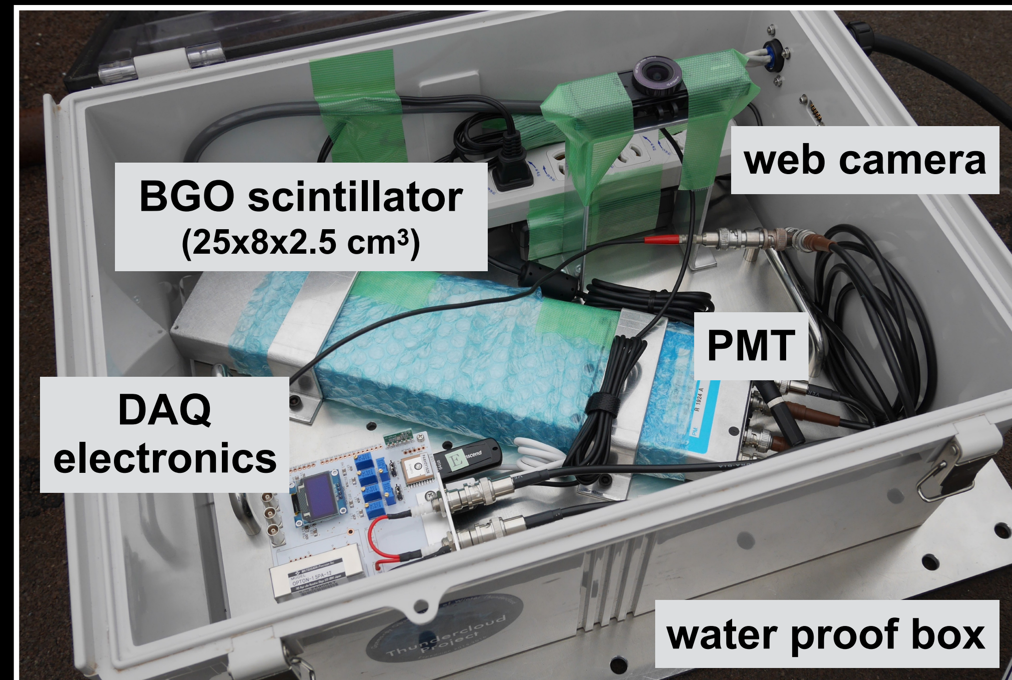
オリジナルデザイン・マグカップ

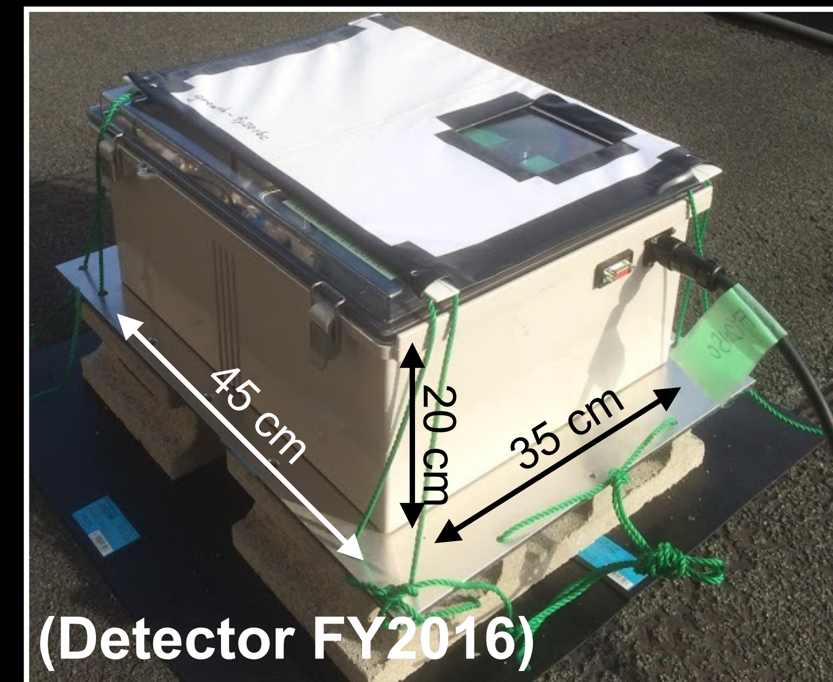
50,000円

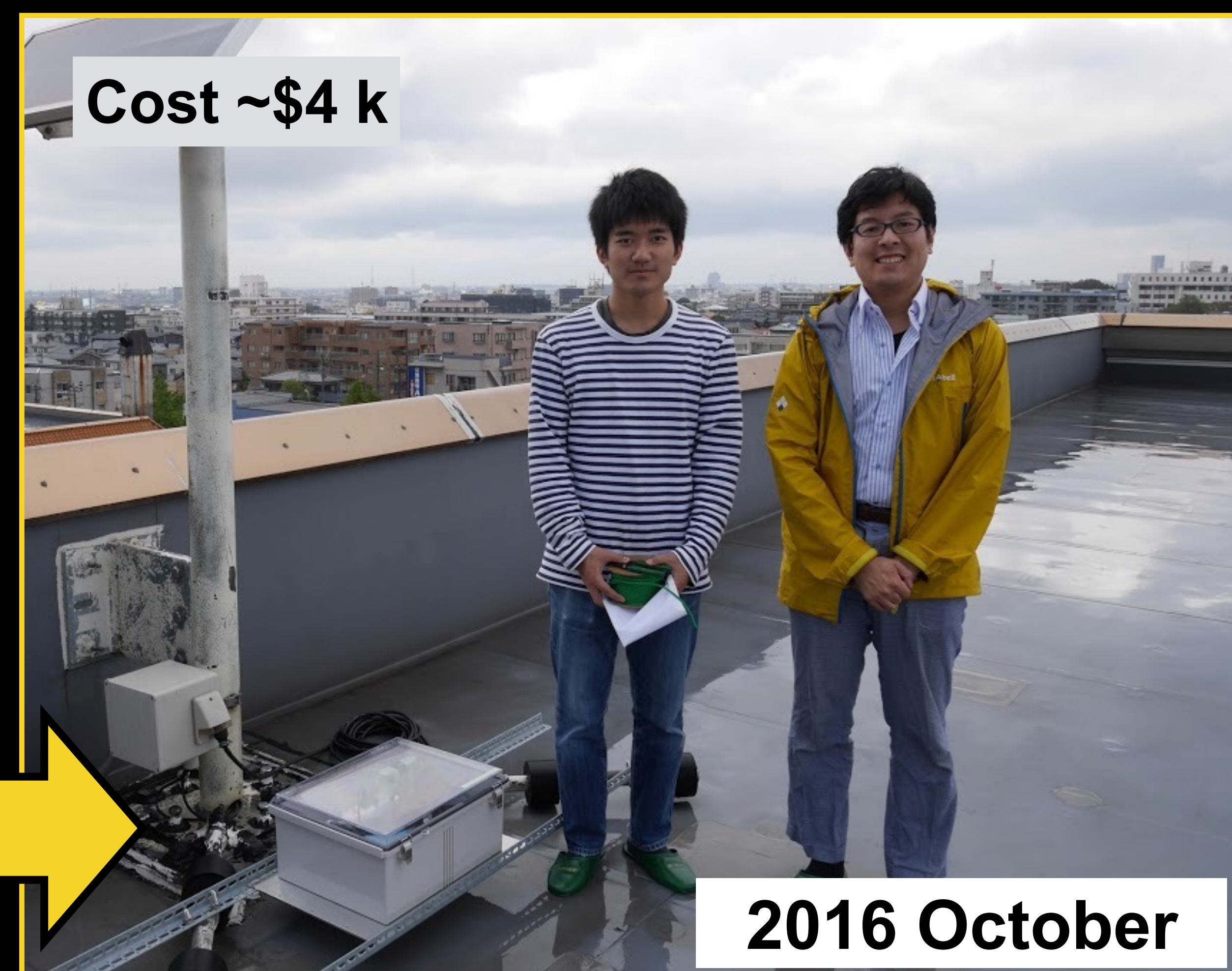
論文謝辞+特注USB

小型で安価な放射線の観測装置を開発！

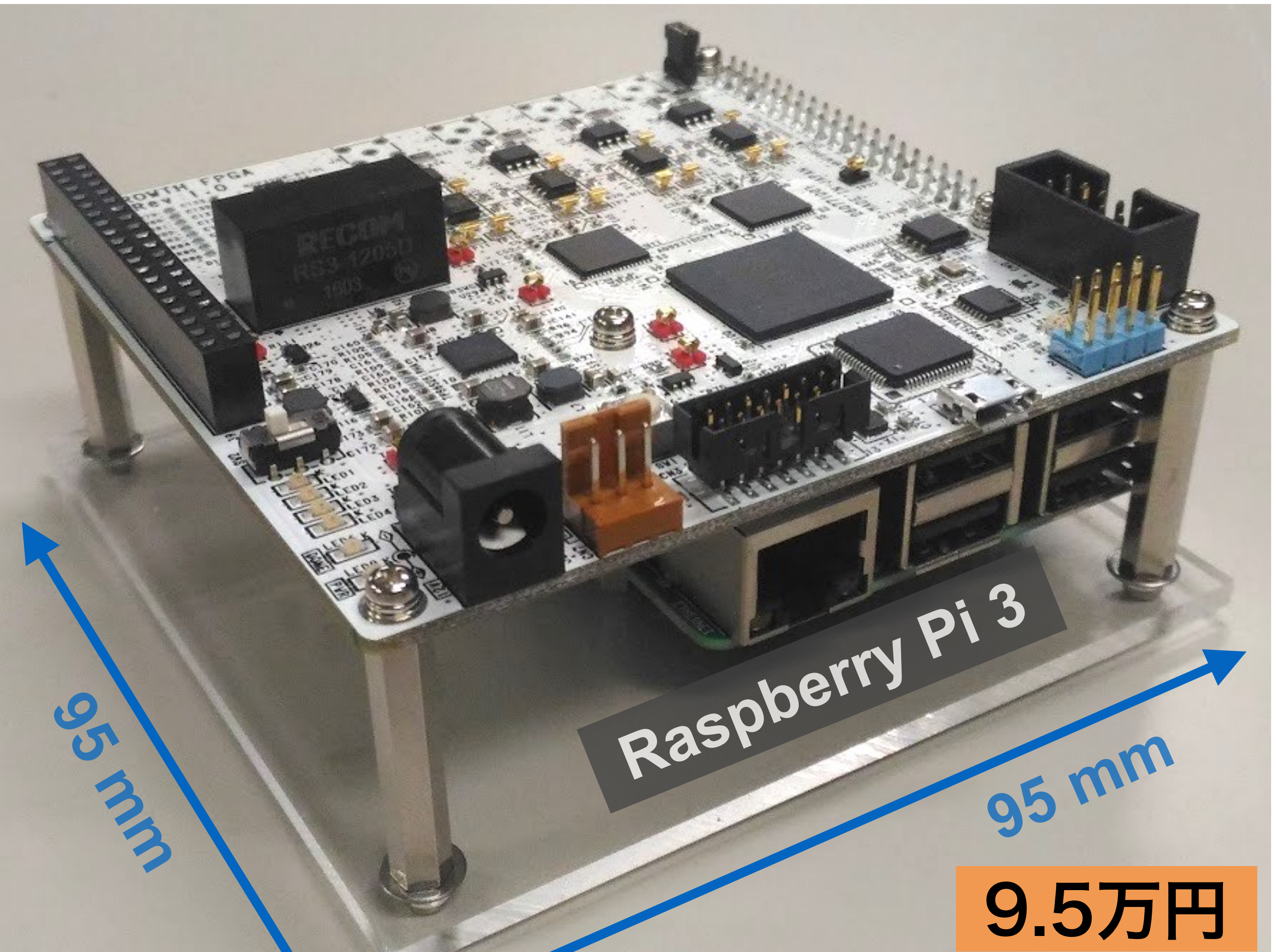








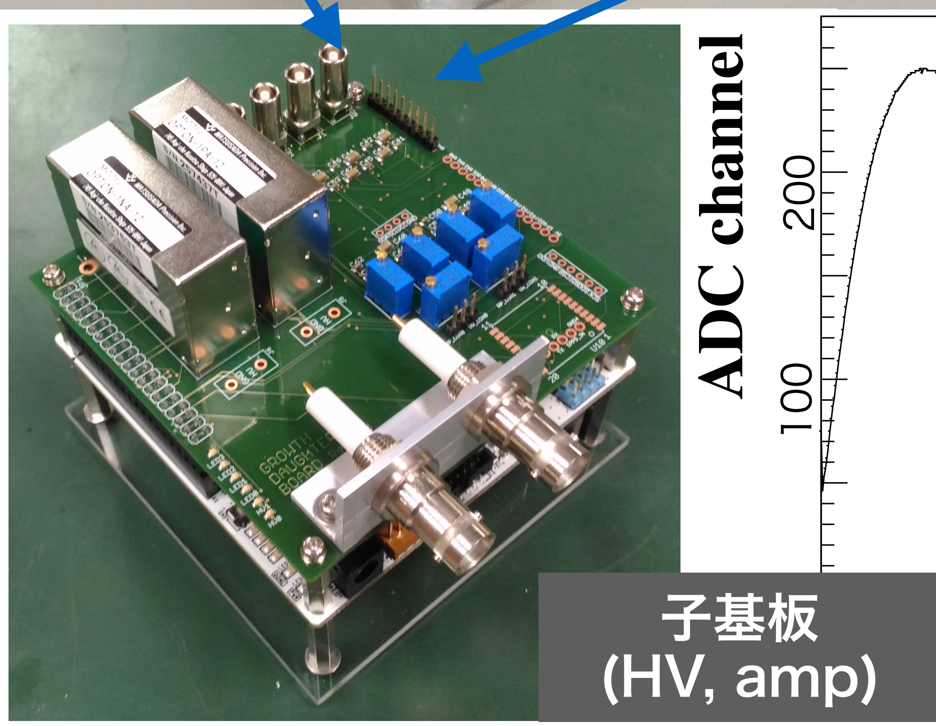
Raspberry Pi 駆動の小型で安価な放射線モニタ

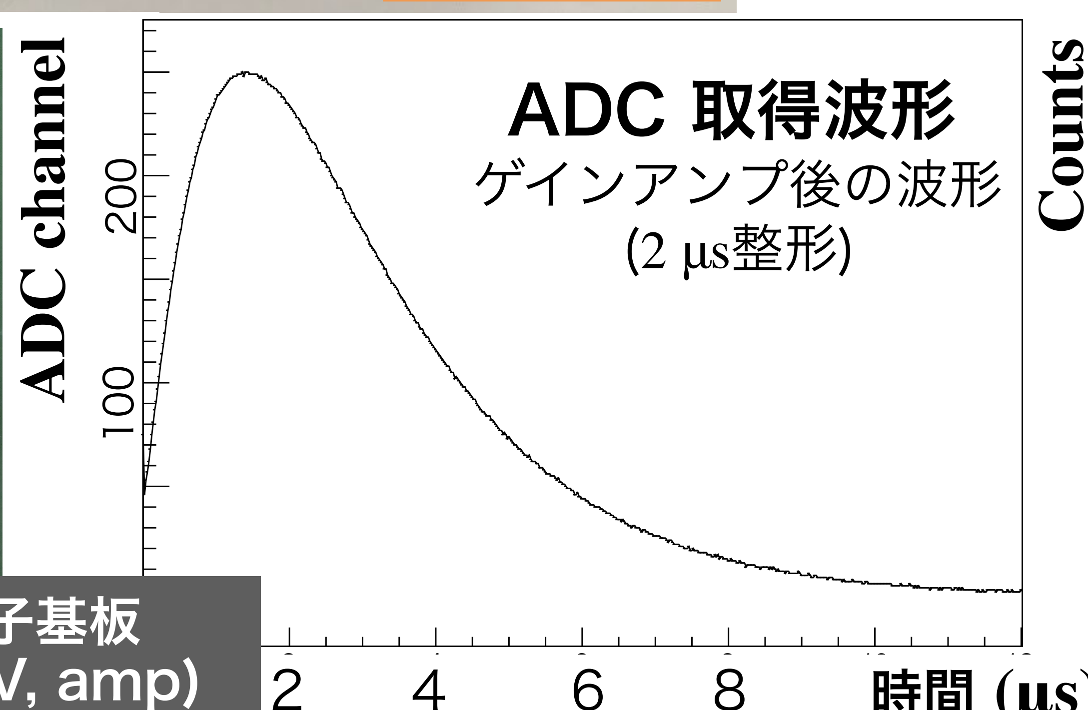


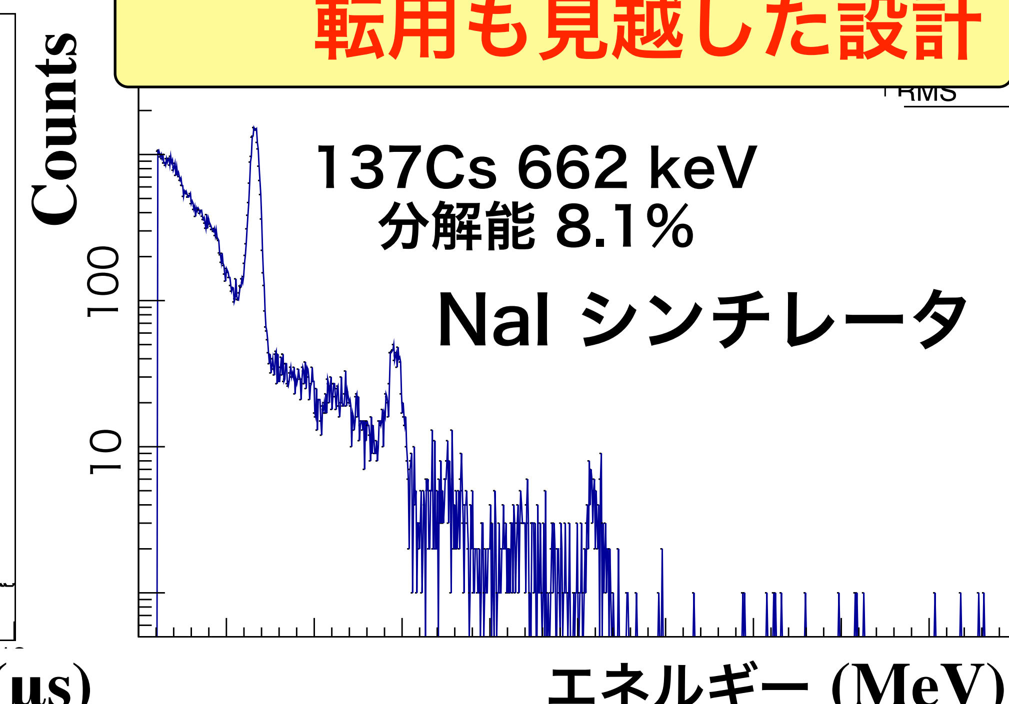
湯浅らとシマフジ電機で協力し FPGA/ADC ボードを開発

- 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

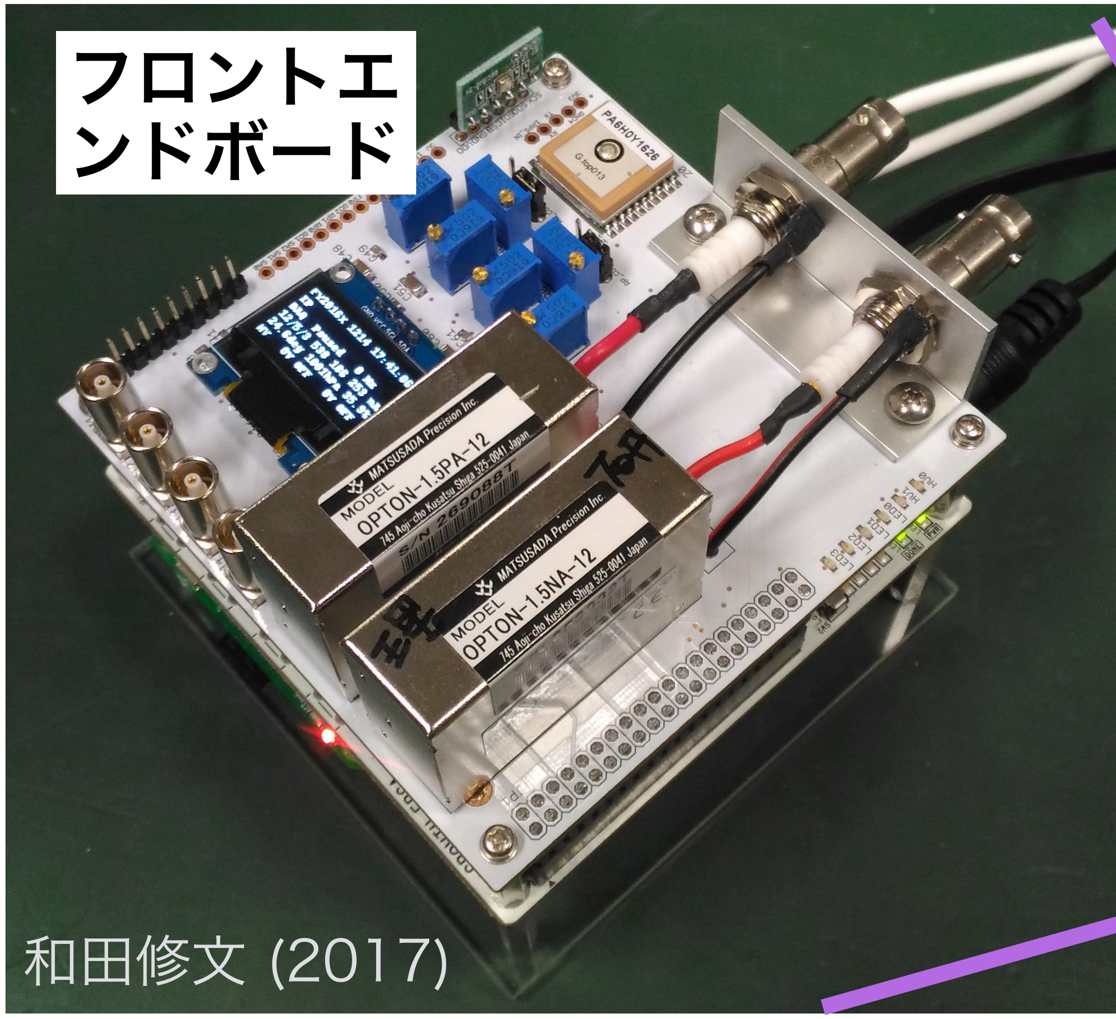
1U サイズ 小型衛星への 転用も見越した設計

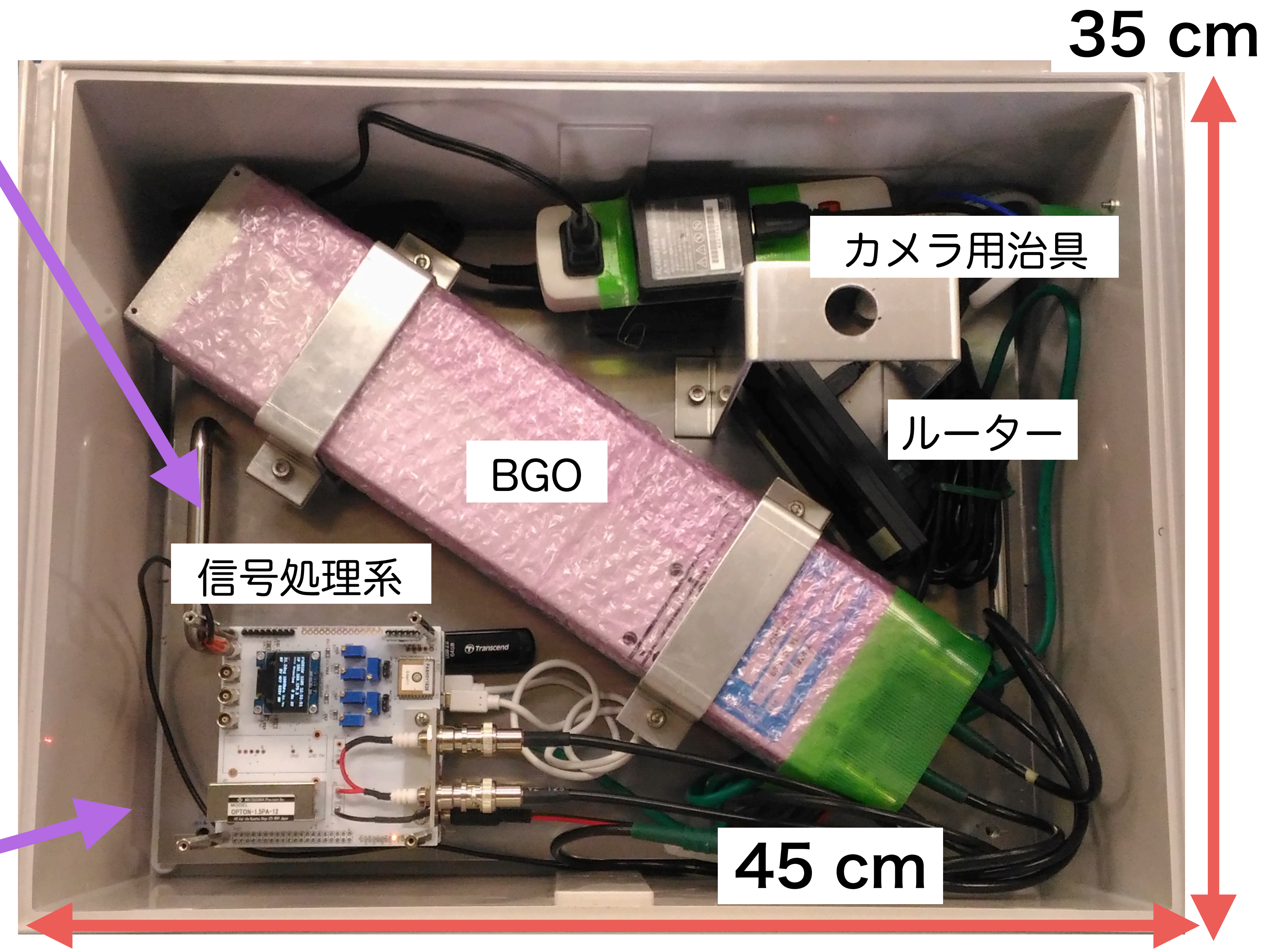






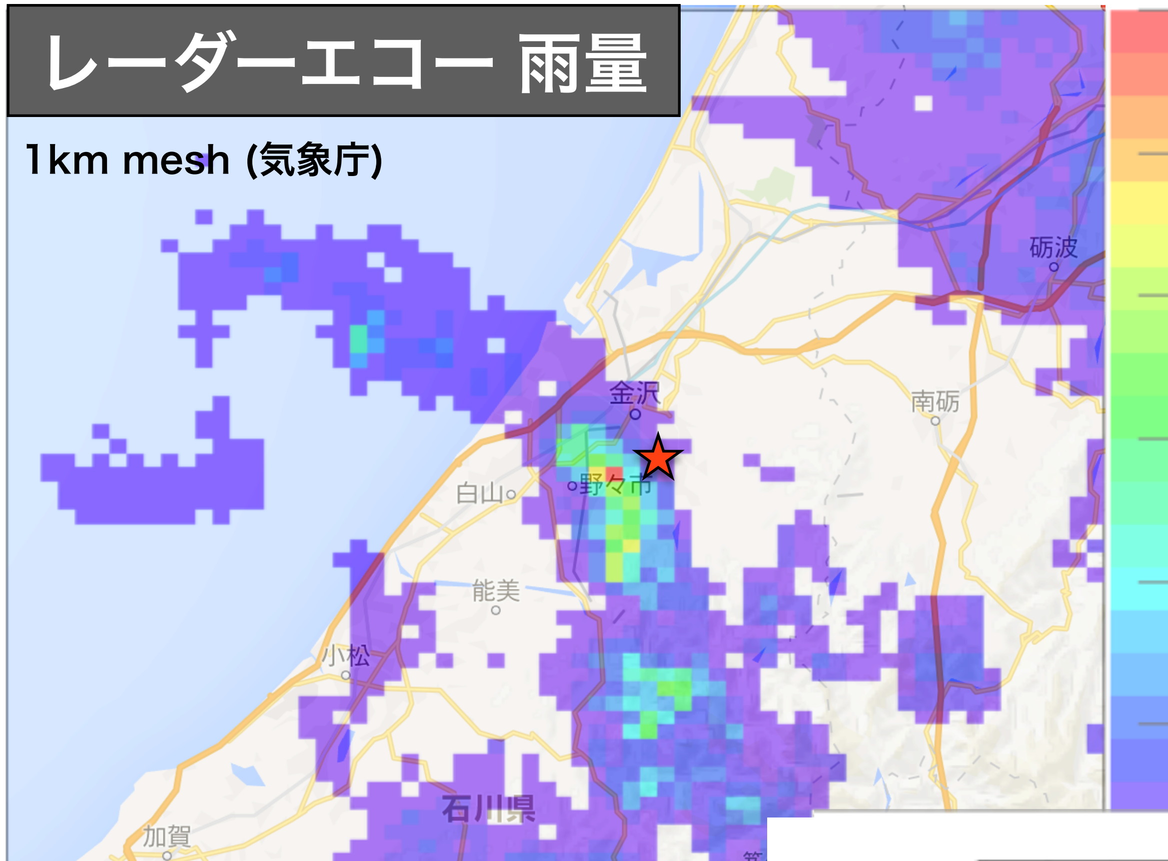
標準型の放射線観測装置の完成 (2016年度版)

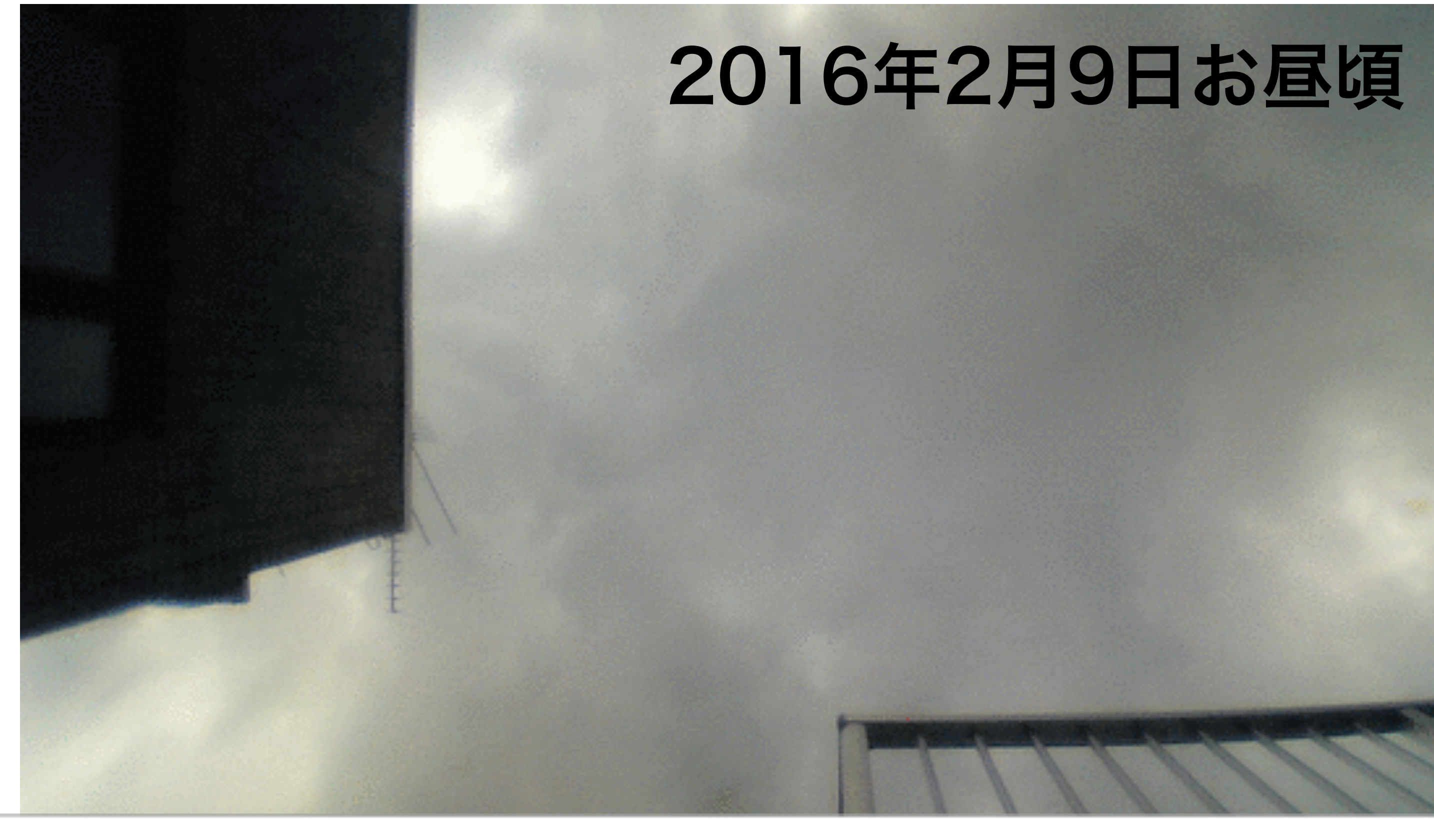


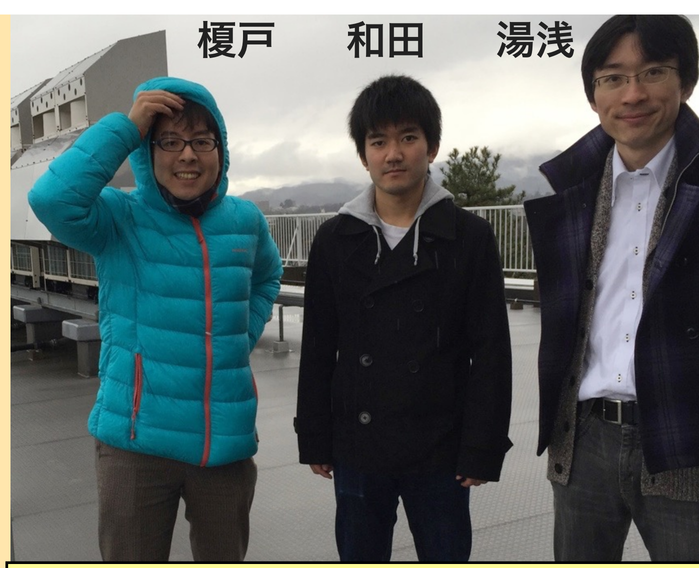


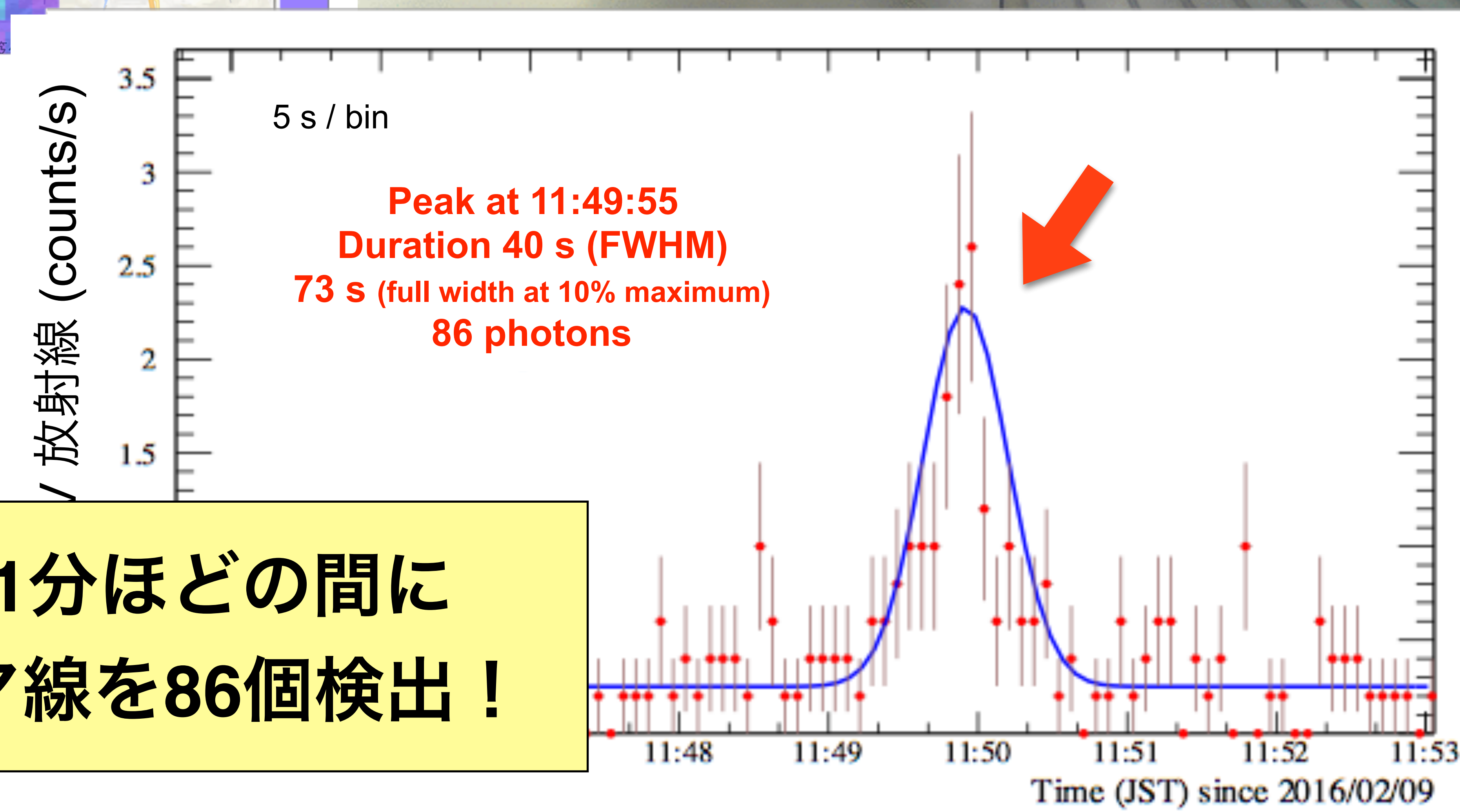
- BGOシンチレータ (80 x 25 x 250 mm^3)は 理研仁科センターから借用。
- ~0.5-8 MeV の放射線イベントごとに GPS時刻、エネルギー等を記録。
- フロントボード(子基板)を製作。HV, センサー, ゲイン, GPS ほかを搭載。
- 温度、気圧ほか環境データ、健康診断の情報も取得。M2X でリアルタイム監視。
- モバイル通信で遠隔操作 (ssh)、データ送信可。ただし、通信料で送信を制限。
- ウェブカメラで空の様子も記録。電場計はまだ配備していない（来年度へ）

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！

2015-17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

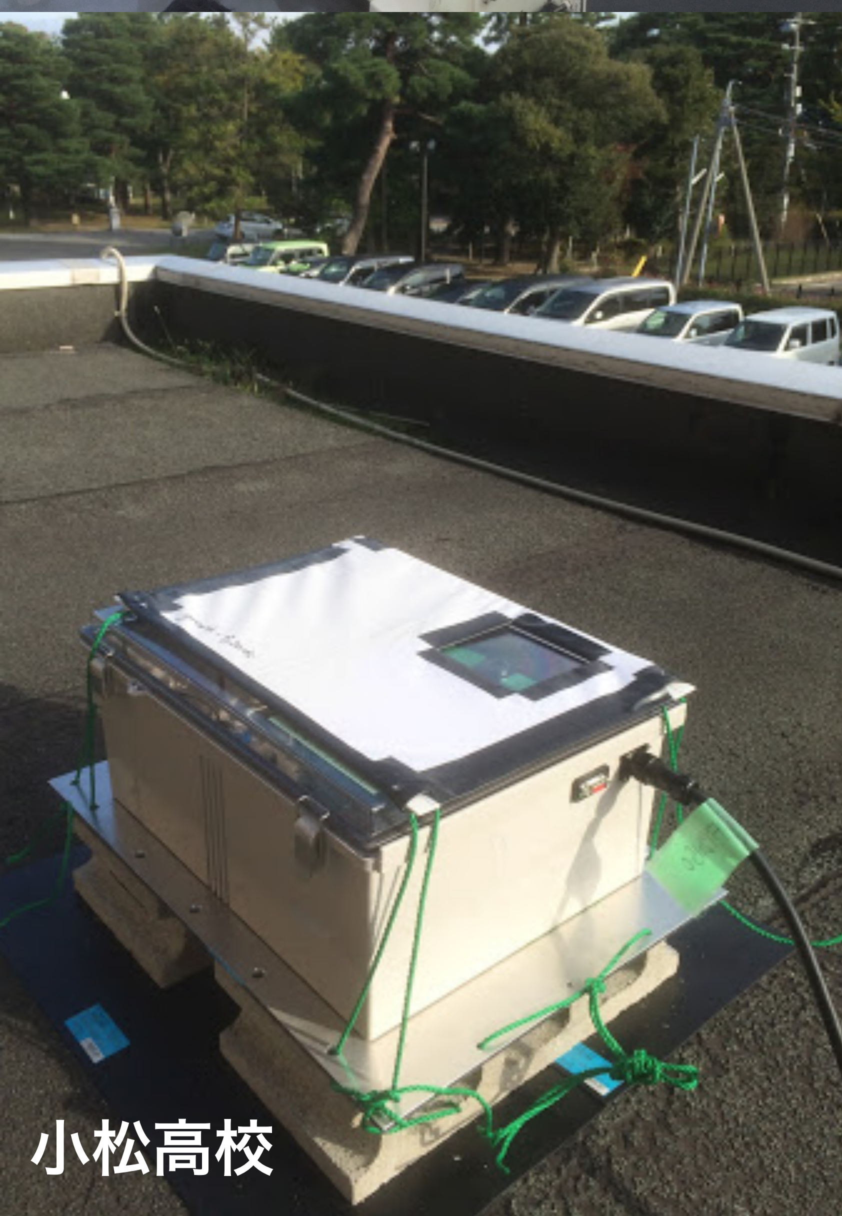
現地の高校に説明に伺って観測サイトを確保！

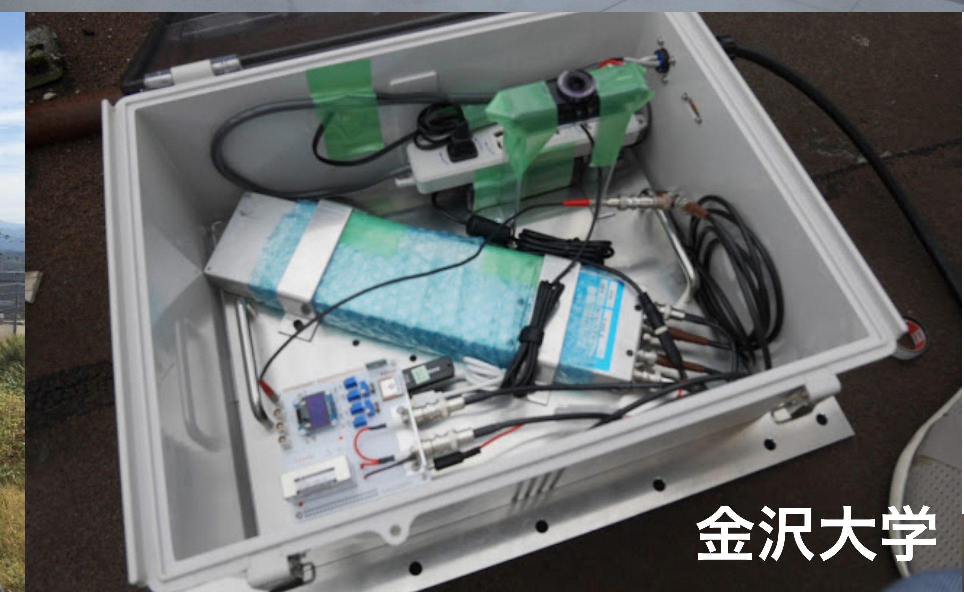
金沢大学

サイエンスヒルズこまつ

サイエンスヒルズこまつ

金沢~小松地域: 大学と高校ほか 8箇所に設置





乗鞍岳 宇宙線観測所(2,770 m)

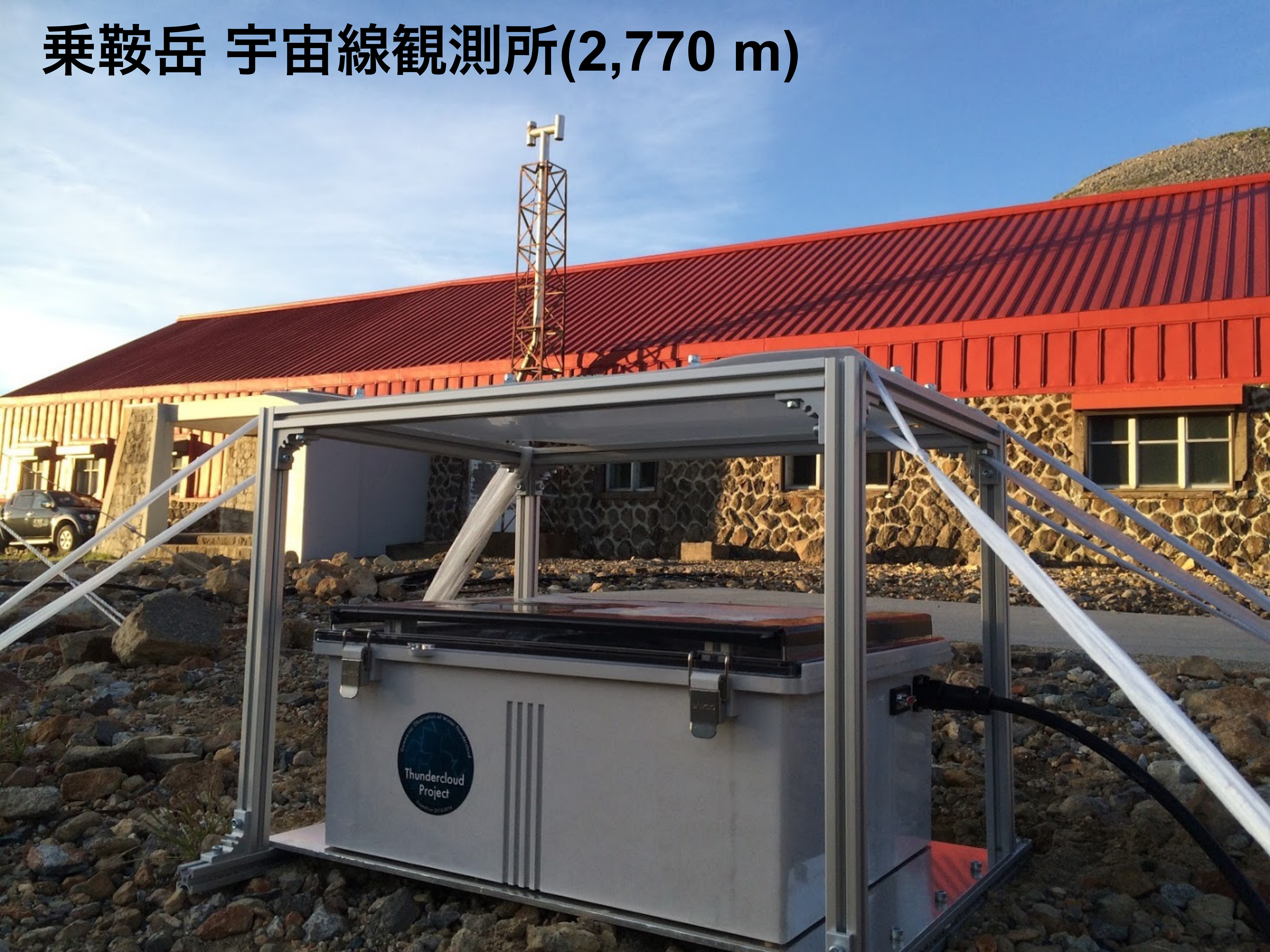
2016年7月11-12日に実施
1台を設置

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！

乗鞍岳 宇宙線観測所(2,770 m)



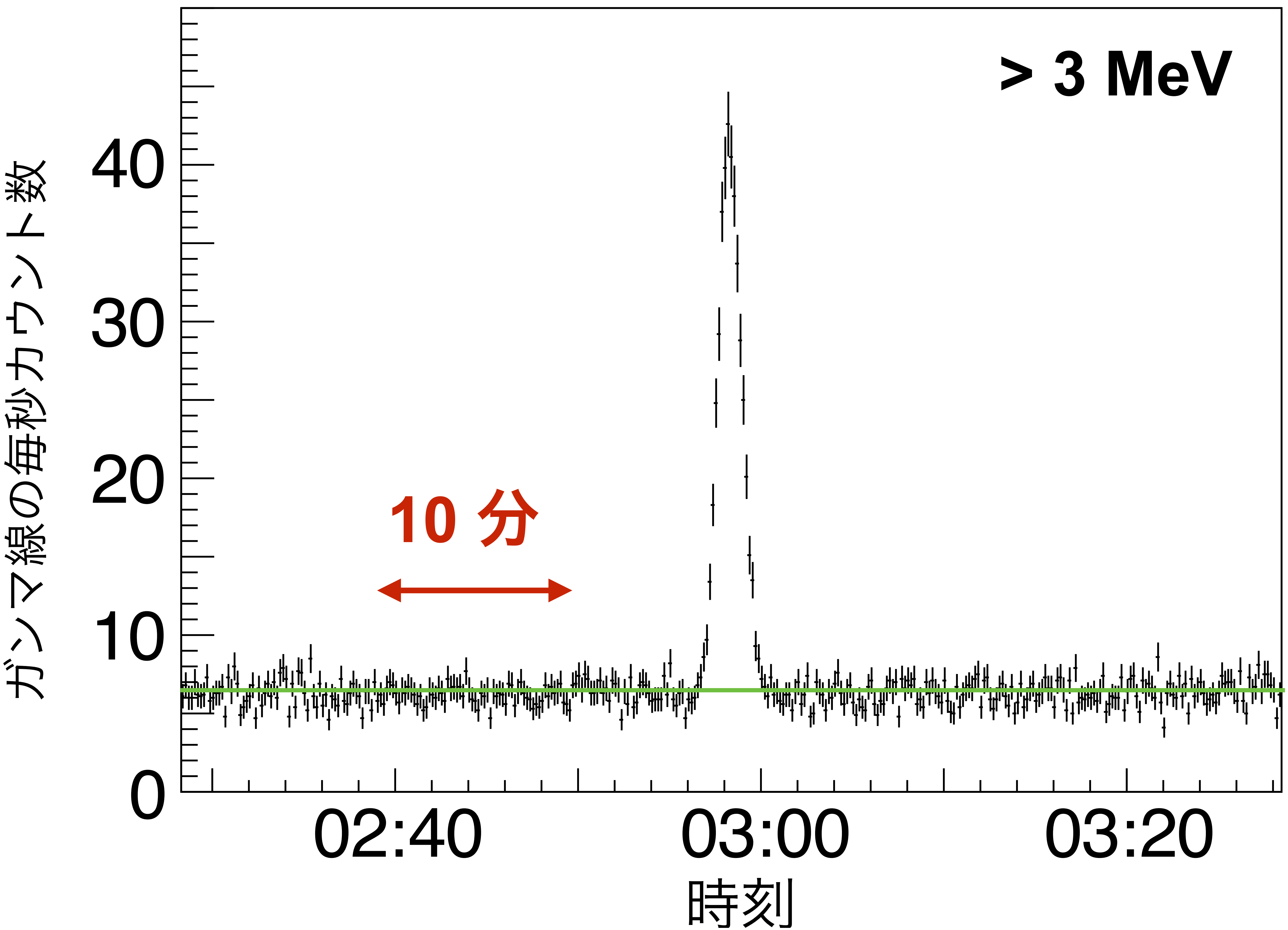
富士山山頂測候所 (3,775 m)

2016年7月15-16日に実施
2台を設置

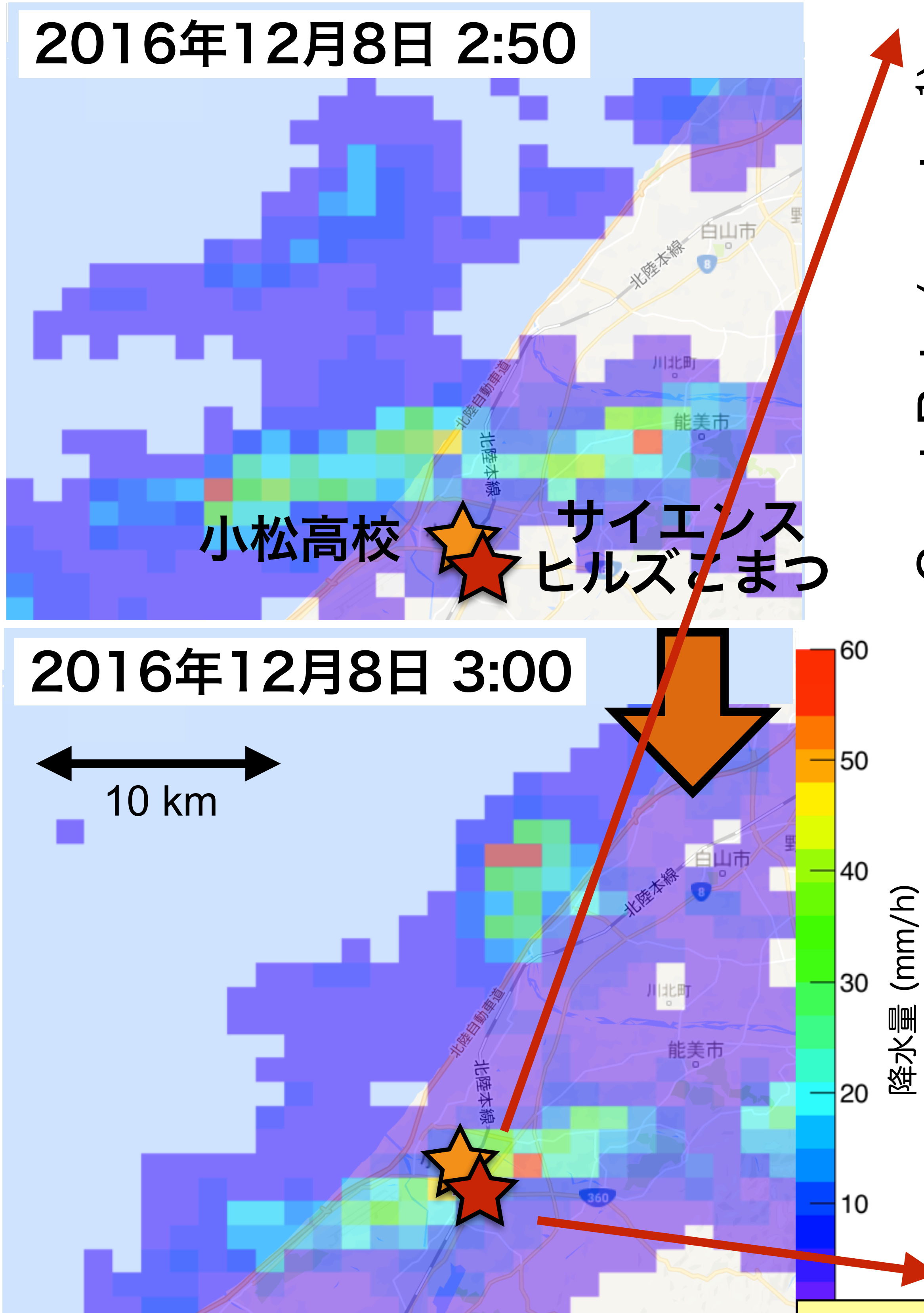
日本で最高度の放射線検出器@ドーム屋根裏
予想された宇宙線量の増大を確認

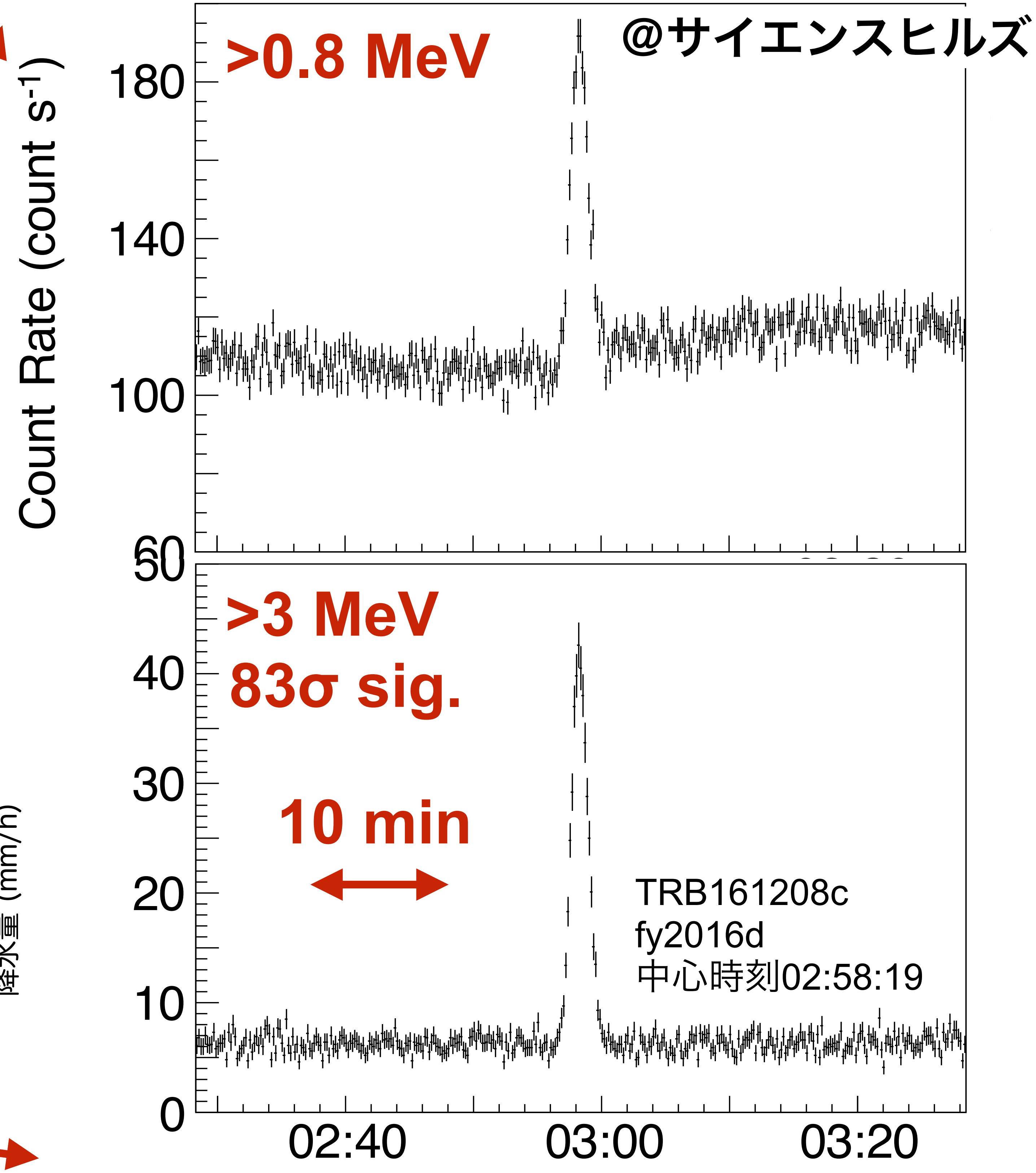
鴨川仁さん(学芸大)グループ、NPO富士山測候所を活用する会のみなさまのご支援、大変ありがとうございました！

小松で雷雲からの強力なガンマ線検出に成功！



小松で雷雲からの強力なガンマ線検出に成功！

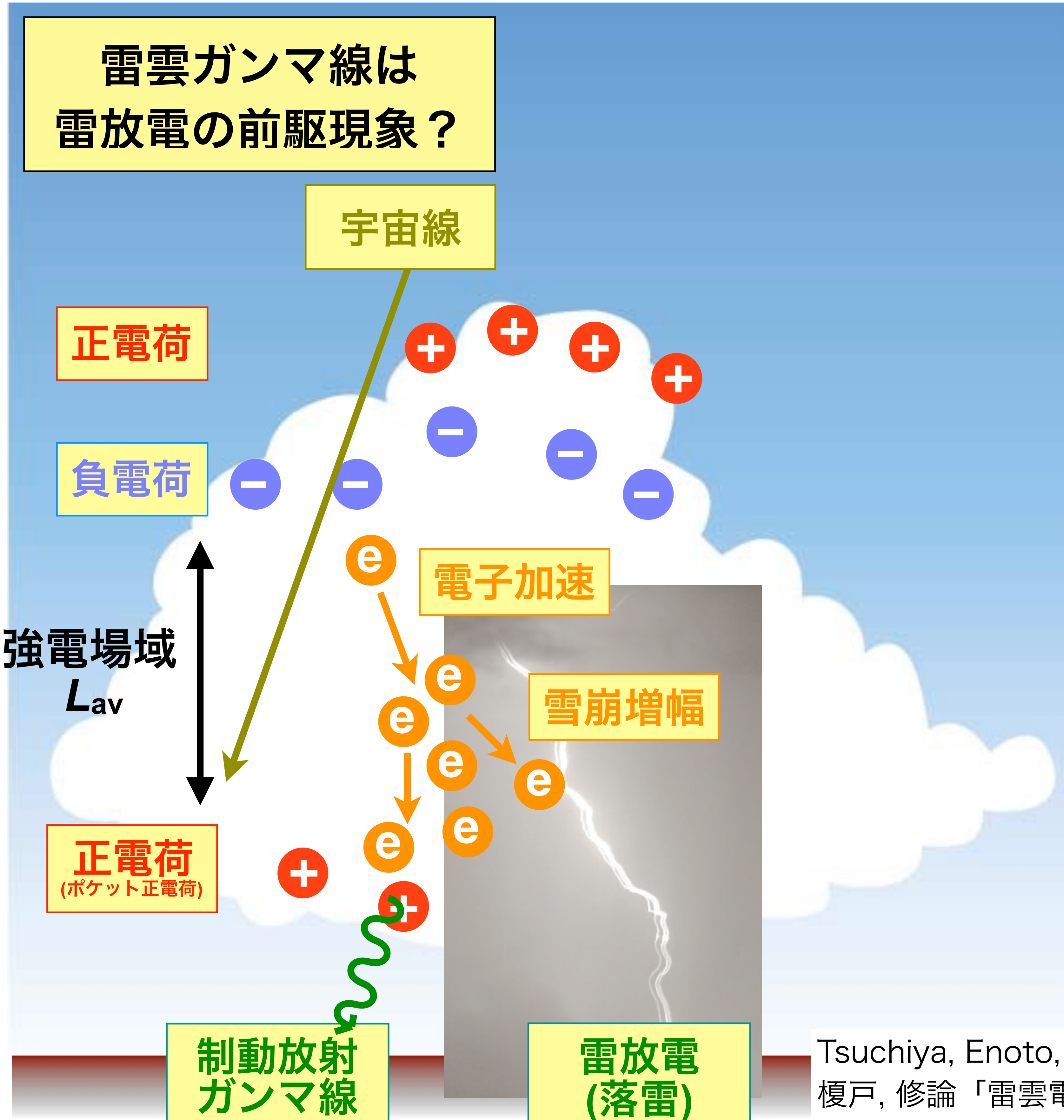




2016年12月8-9日にかけ4箇所で検出

和田有希 修士論文 (2017) 東京大学

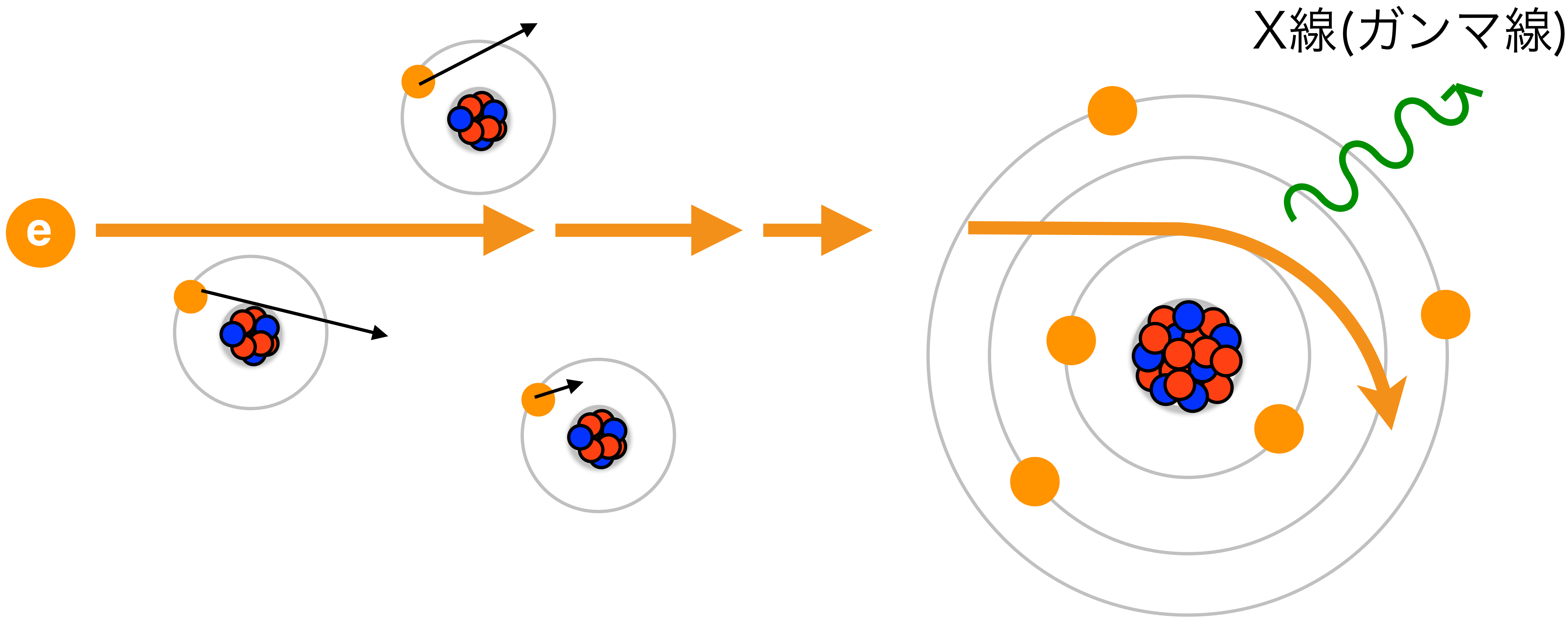
雷雲からガンマ線が発生する仕組み?



1. 宇宙線シャワーにより高エネルギー種電子が生成する。
2. 強電場内で逃走電子の雪崩増幅を生じる。
3. 逃走電子が大気分子と相互作用して制動放射ガンマ線を作る。
4. 加速電子が階段状リーダと呼ばれるイオン化した放電路を形成。
5. 階段状リーダが地上に達すると大電流が流れ空気が過熱されてリターンストロークという雷放電が起きる。

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)

電子の大気中の反応



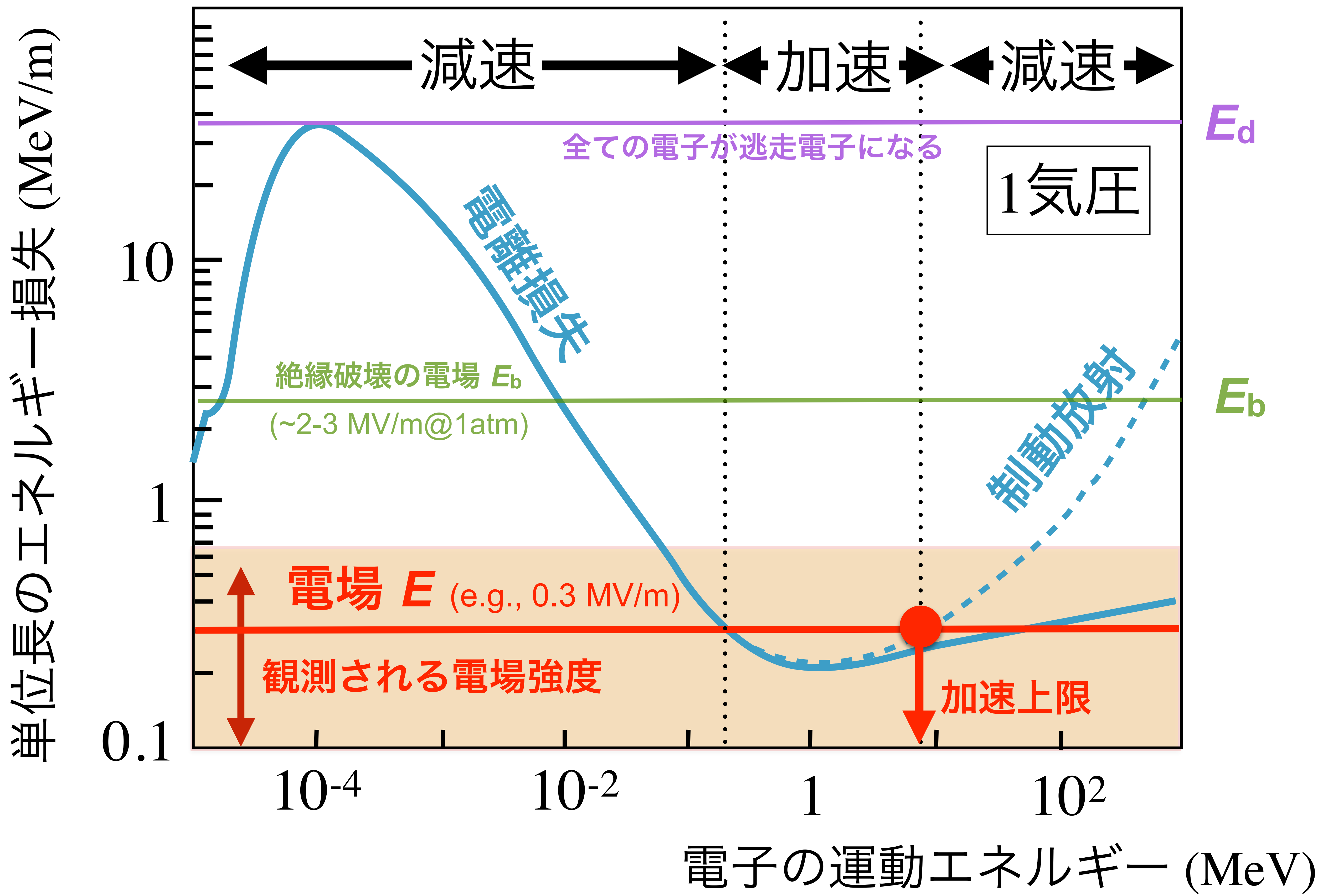
電離損失

高速の荷電粒子が物質中の
原子を励起や電離して
エネルギーを失う過程

制動放射

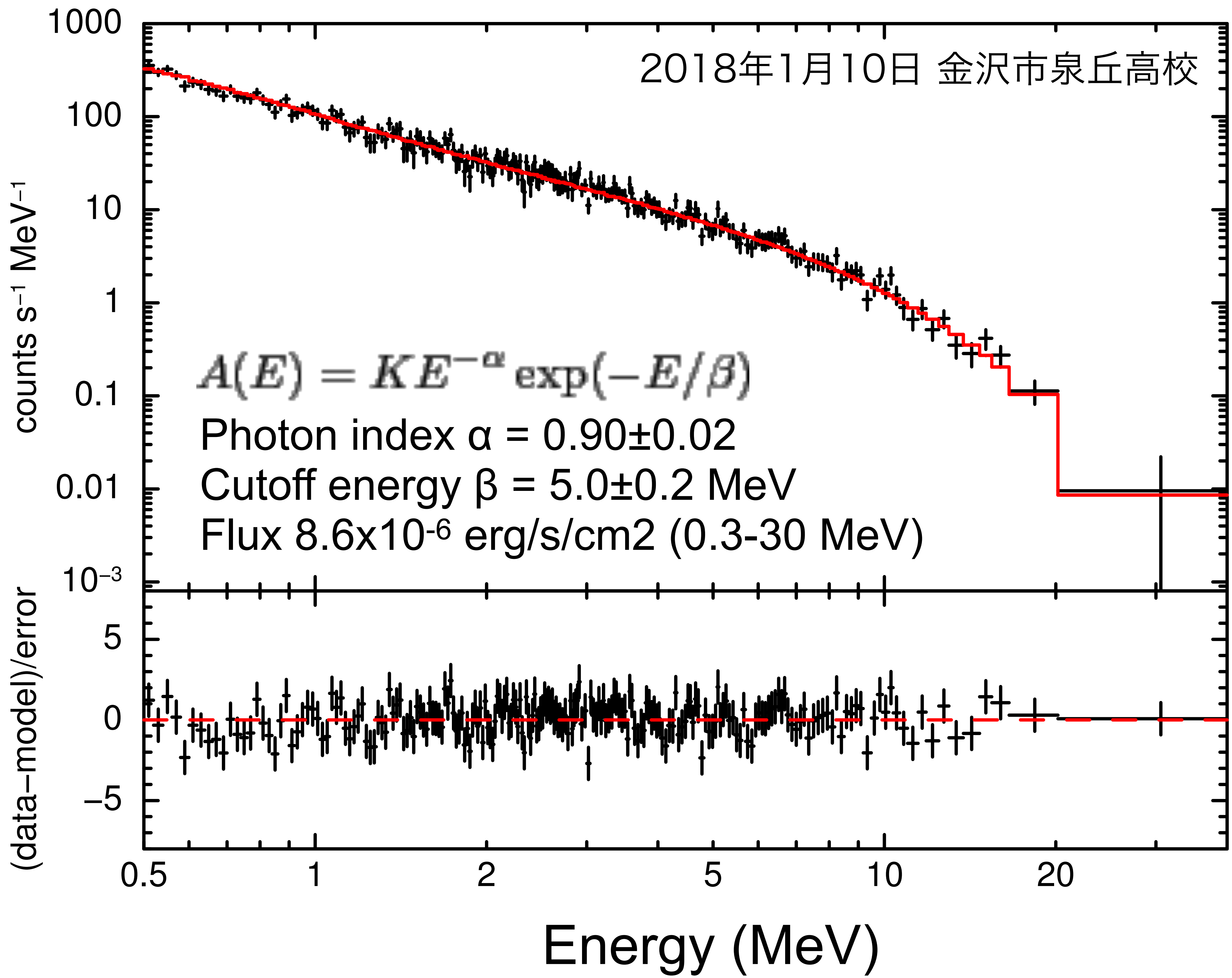
高速の荷電粒子が原子核の
電場によって曲げられて
X線(ガンマ線)を放射する過程

大気中の電子加速: 冬季雷雲と夏季高山



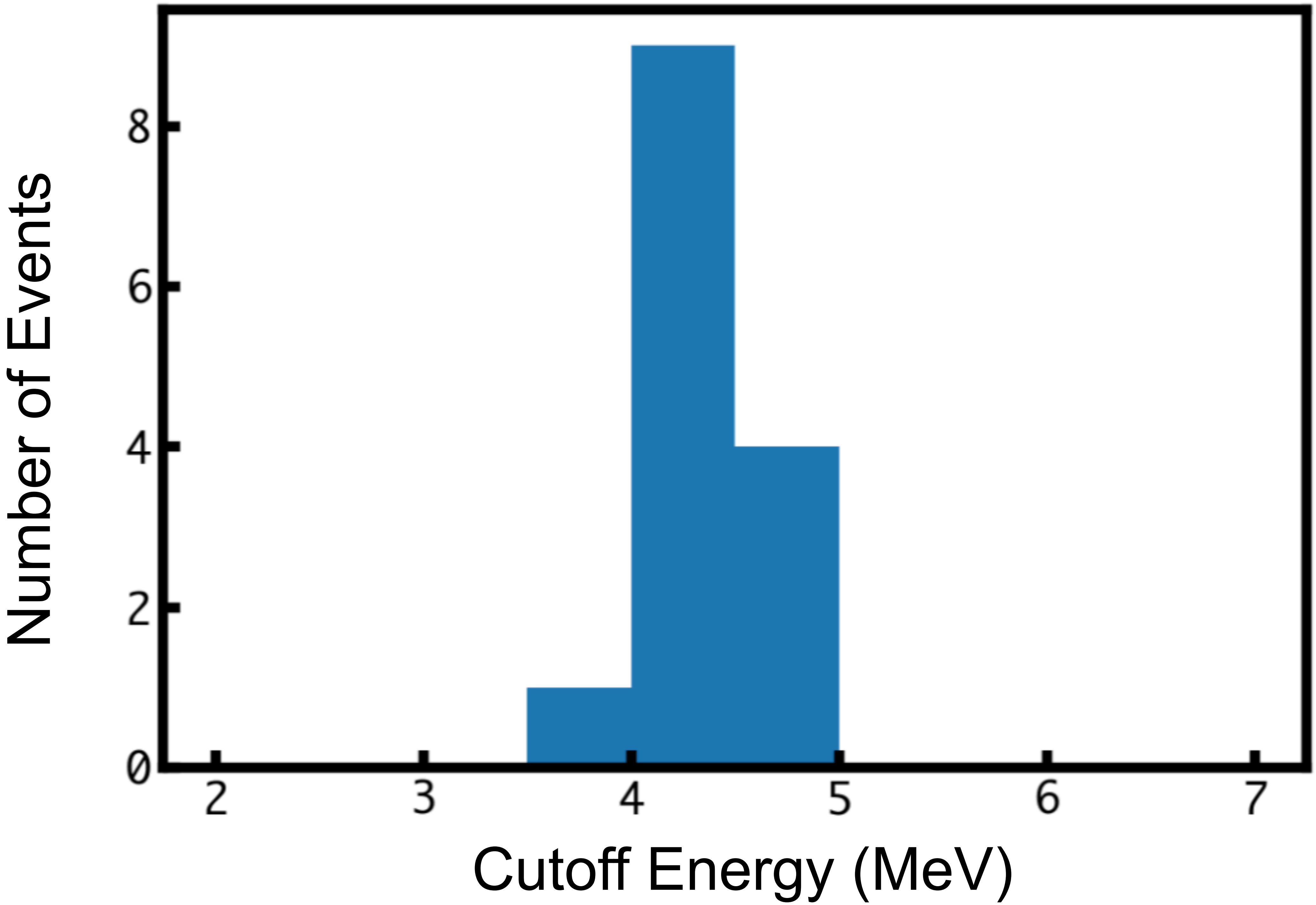
大気中の逃走電子なだれ増幅モデル (Gurevich et al., Phys. Lett. A, 165, 463, 1992)

雷雲からのガンマ線スペクトル



松元崇弘 修士論文 (2019) 東京大学

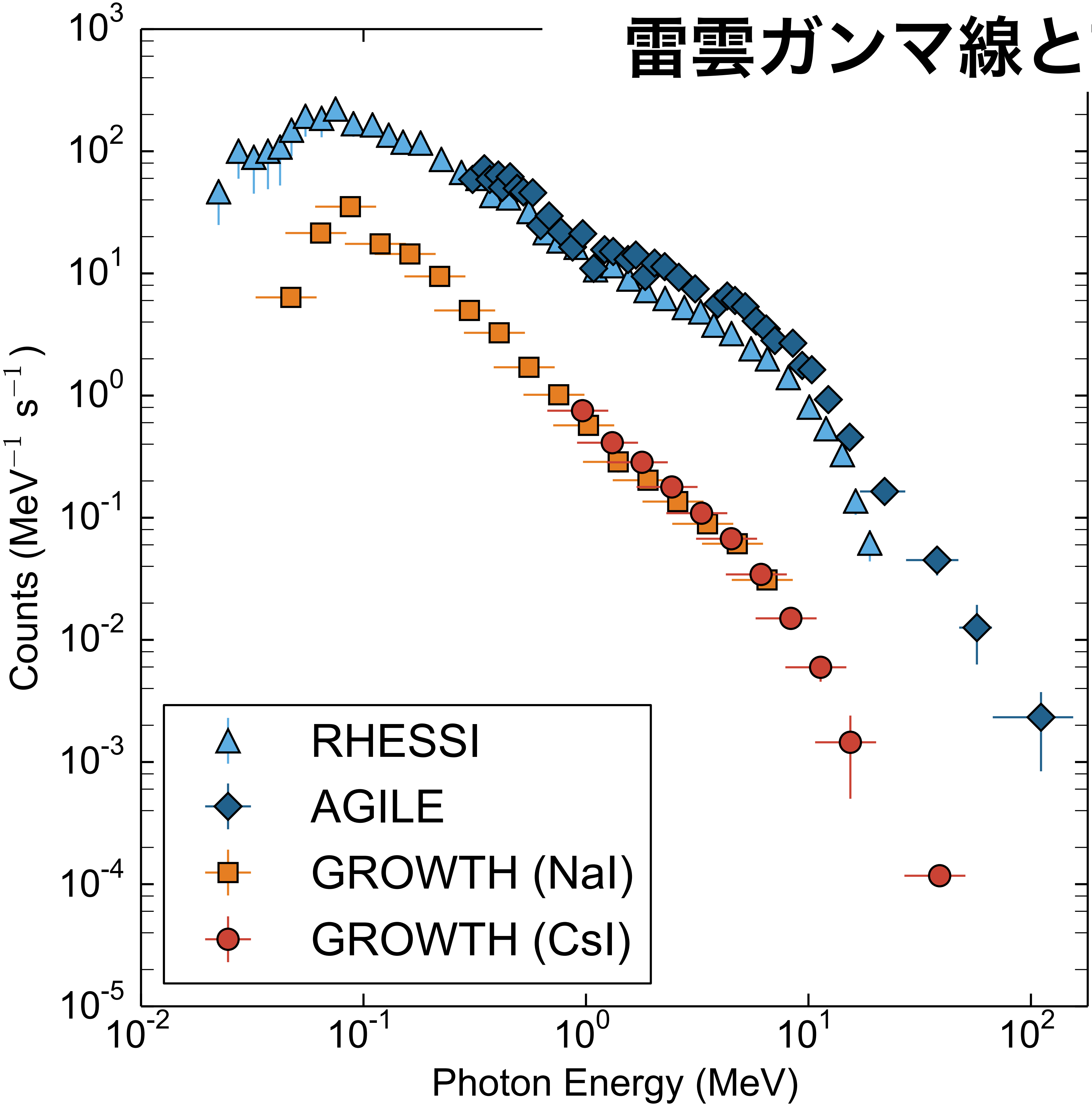
ガンマ線スペクトルのカットオフ・エネルギー



~4-5 MeV で折れ曲がる → 電子の加速上限と電場強度の情報

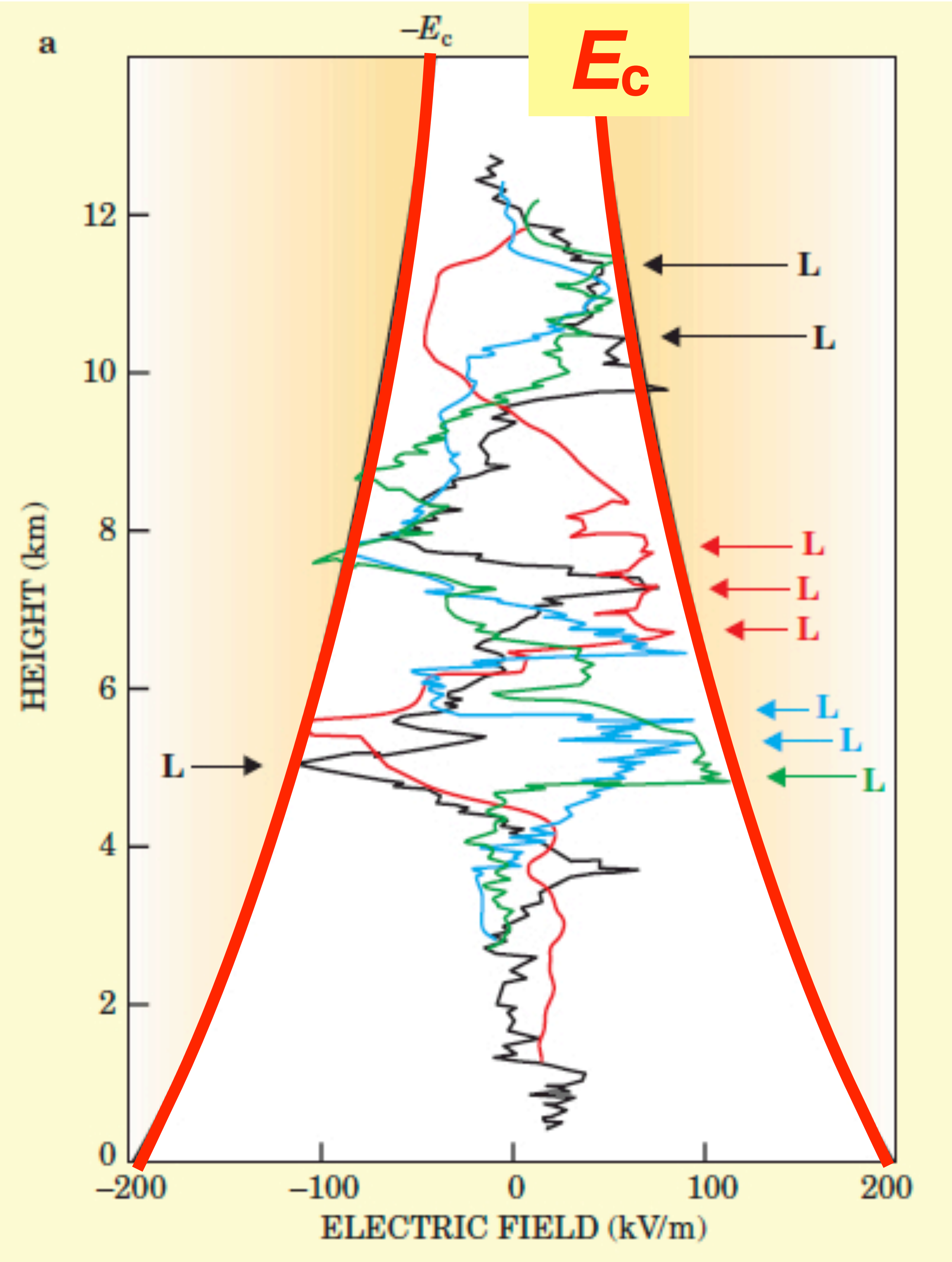
松元崇弘 修士論文 (2019) 東京大学

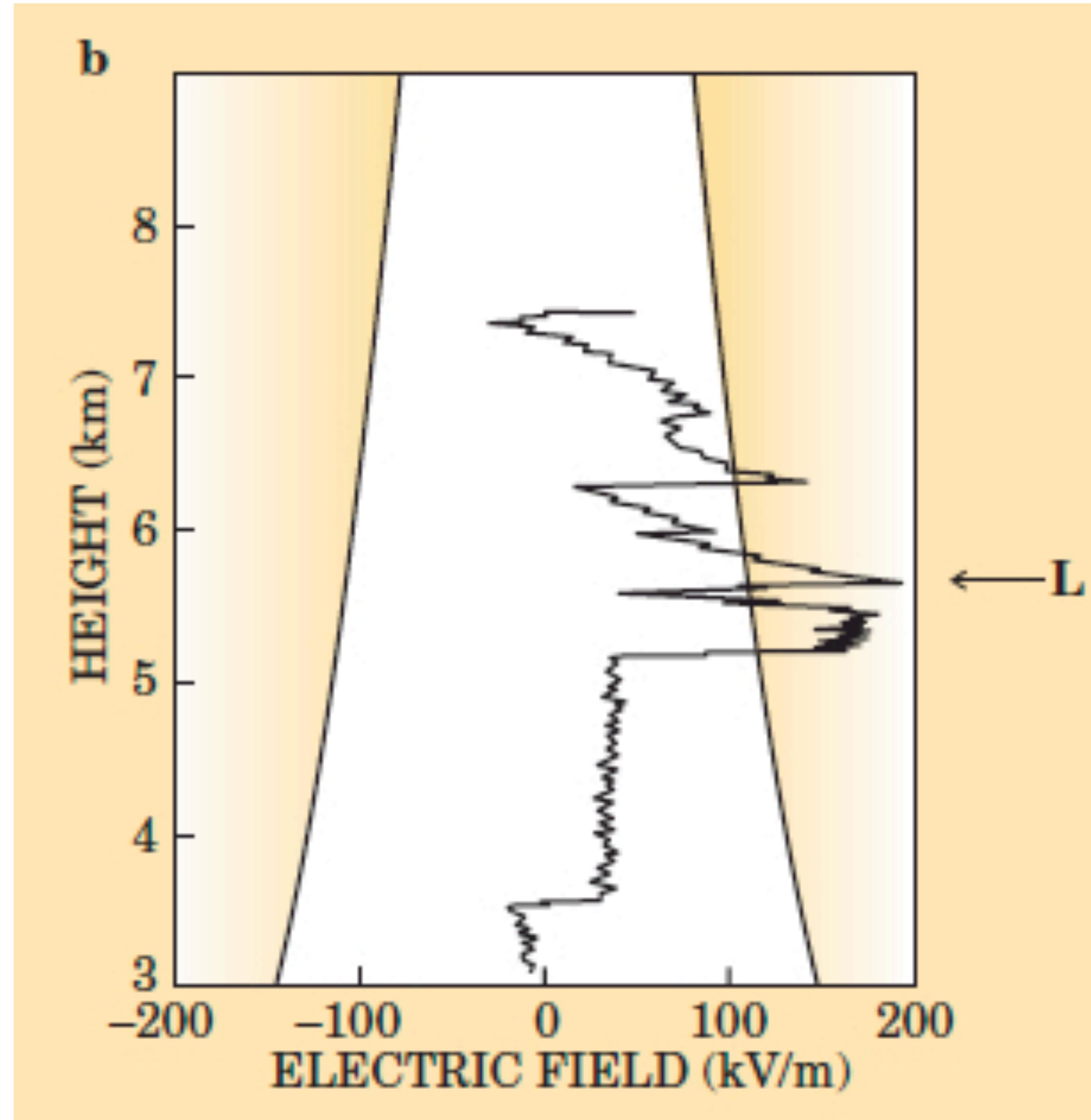
雷雲ガンマ線とTGF



Counts (MeV^{-1} s^{-1})
Photon Energy (MeV)
RHESSI
AGILE
GROWTH (NaI)
GROWTH (CsI)

雷雲内の電場の計測





典型的に電場 $E \sim$ 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 (Thunderstorm)

準定常的に維持される

雷放電 (Lightening)

短時間の放電現象

雷雲ではなく雷に関係する放射線イベントも検出...

雷雲と雷が起こす
高エネルギー大気物理現象

1. 高エネルギー大気物理学の誕生

2. 雷雲からのガンマ線を探して

3. 雷が核反応を起こす!?

4. オープンサイエンスで挑む新しい研究

雷での光核反応を観測的に示した論文

LETTER

doi:10.1038/nature24630

Photonuclear reactions triggered by lightning discharge

Teruaki Enoto[1], Yuuki Wada[2,3], Yoshihiro Furuta[2], Kazuhiro Nakazawa[2,4], Takayuki Yuasa[5], Kazufumi Okuda[2], Kazuo Makishima[6], Mitsuteru Sato[7], Yousuke Sato[8], Toshio Nakano[3], Daigo Umemoto[9] & Harufumi Tsuchiya[10]

Lightning and thunderclouds are natural particle accelerators[1]. Avalanches of relativistic runaway electrons, which develop in electric fields within thunderclouds[2,3], emit bremsstrahlung γ-rays. These γ-rays have been detected by ground-based observatories[4–9], by airborne detectors[10] and as terrestrial γ-ray flashes from space[10–14]. The energy of the γ-rays is sufficiently high that they can trigger atmospheric photonuclear reactions[10,15–19] that produce neutrons and eventually positrons via β^+ decay of the unstable radioactive isotopes, most notably ^{13}N, which is generated via $^{14}\mathrm{N}+\gamma\rightarrow{}^{13}\mathrm{N}+n$, where γ denotes a photon and n a neutron. However, this reaction has hitherto not been observed conclusively, despite increasing observational evidence of neutrons[7,20,21] and positrons[10,22] that are presumably derived from such reactions. Here we report ground-based
Durin
with a
monit
subseq
decay c
line em
minute. The observed decay timescale and spectral cutoff at about 10 megaelectronvolts of the γ-ray afterglow are well explained by de-excitation γ-rays from nuclei excited by neutron capture. The centre energy of the prolonged line emission corresponds to electron–positron annihilation, providing conclusive evidence of positrons being produced after the lightning.

With the aim of detecting γ-rays from powerful and low-altitude winter thunderclouds along the coast of the Sea of Japan, we have been operating radiation detectors since 2006[6,22,23] at the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power station in Niigata (see Methods section 'GROWTH collaboration'). On 6 February 2017, a p
discharges occurred at 08:34:06 UTC, 0.5–1.7 k
four radiation detectors (labelled 'A' to 'D', see
tion

英国物理学会(IOP) Physics World 誌による
Top 10 Breakthrough 2017 に選定される
(1位は NS-NS 重力波)

physicsworld
TOP 10
BREAKTHROUGH
2017

272 USERS

雷から「反物質」　身近な場所で発見、研究者も驚き：朝日新聞デジタル

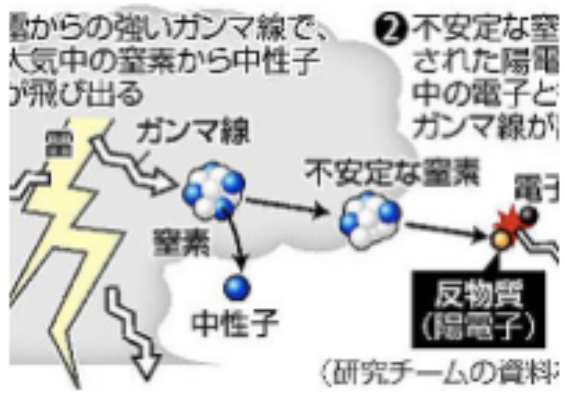
学び　2017/11/23 08:41

www.asahi.com

科学　あとで読む　science　宇宙

29 USERS

反物質の「陽電子」、雷から生成…証拠を発見：科学・IT：読売新聞（YOMIU...



学び　2017/11/23 08:36

www.yomiuri.co.jp

science　あとで読む　科学　物理

3 USERS

雷から「反物質」　身近な場所で発見、研究者も驚き：朝日新聞デジタル

雷鳴をとどろかせ、閃光（せんこう）を放つ雷。こうした雷によって、反物質が生成されていることがわかった（共同研究者で東京大大学院の和田有希さん提供）　物質と出合うと、光を放って消えてしまう不思議な性質を持つ「反物質」が...

学び　2017/11/23 08:25

www.asahi.com

weather　physics　science

3 USERS

雷による核反応を解明＝新潟でガンマ線検出、京大など：時事ドットコム

雷による核反応を解明＝新潟でガンマ線検出、京大など 雷で発生したガンマ線が大気中の窒素の原子核に当たって中性子や陽電子を生み出し、さらにガンマ線を発生させる反応を検出したと、京都大や東京大、北海道大などの研究チームが２...

学び　2017/11/23 08:22

www.jiji.com

原子核　雷　科学

3 USERS

アフリカ・シエラレオネにおけるエボラ研究

29 USERS

雷が大気中で核反応、反物質生む　京大など世界初観測：京都新聞

雷が大気中で核反応を引き起こし、自然界にほとんど存在しない反物質（陽電子）を生み出す現象を、京都大の榎戸輝揚特定准教授や東京大などの研究グループが突き止めた。世界初の観測成果として、英科学雑誌

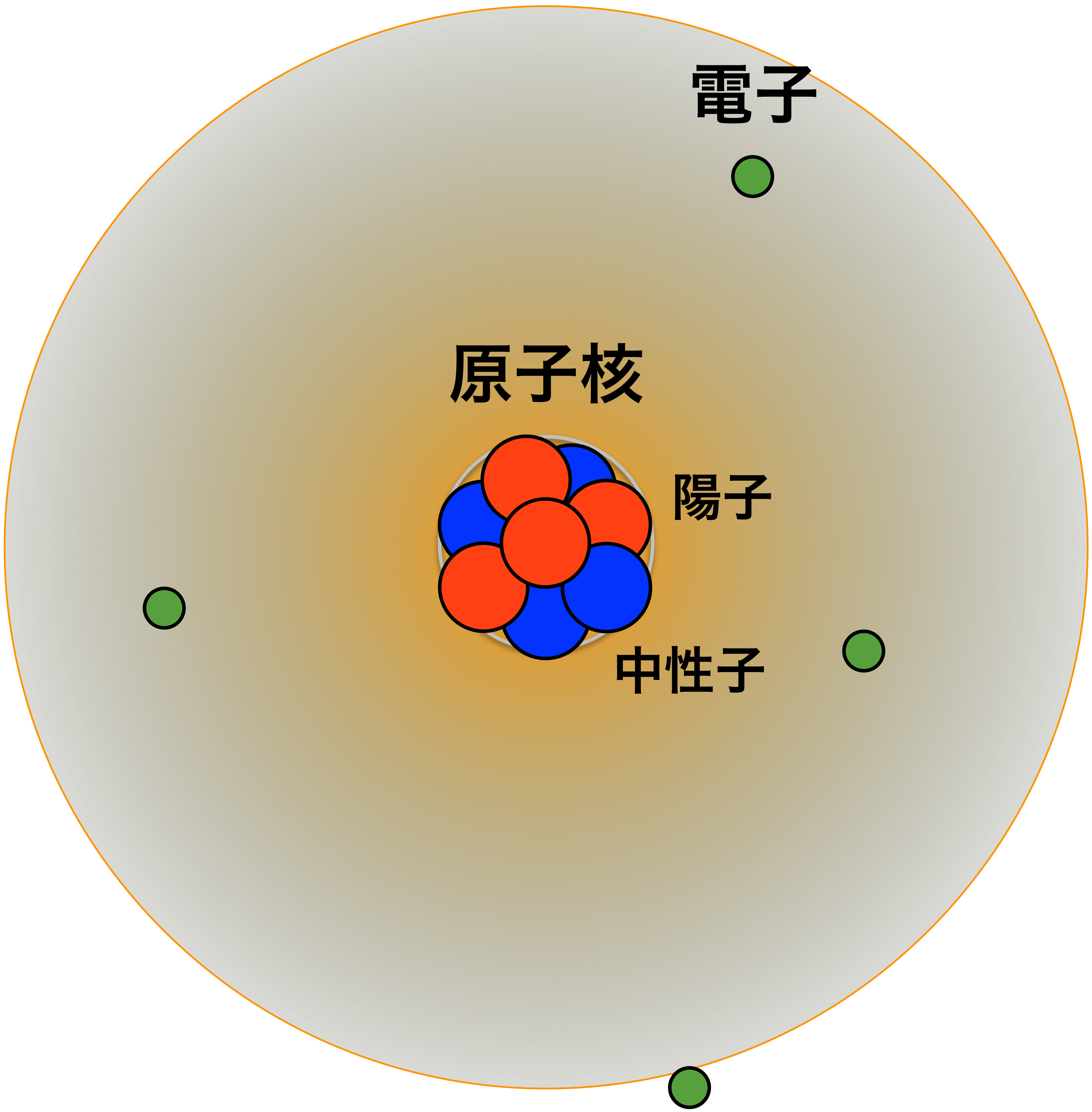
6 USERS

砂糖の有害性、業界団体が５０年隠す？　米研究者が調査（朝日新聞デジタル）...

350 USERS

砂糖の有害性、業界団体が５０年隠す？　米研究者が調査：朝日新聞デジタル

砂糖の取りすぎの有害性について指摘しようとした研究を、米国の砂糖業界が５０年前に打ち切り、結果を公表しなかった――。こんな経緯を明かした論文が２１日付の米科学誌「プロス・バイオロジー」（電子



電子
原子核
陽子
中性子

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

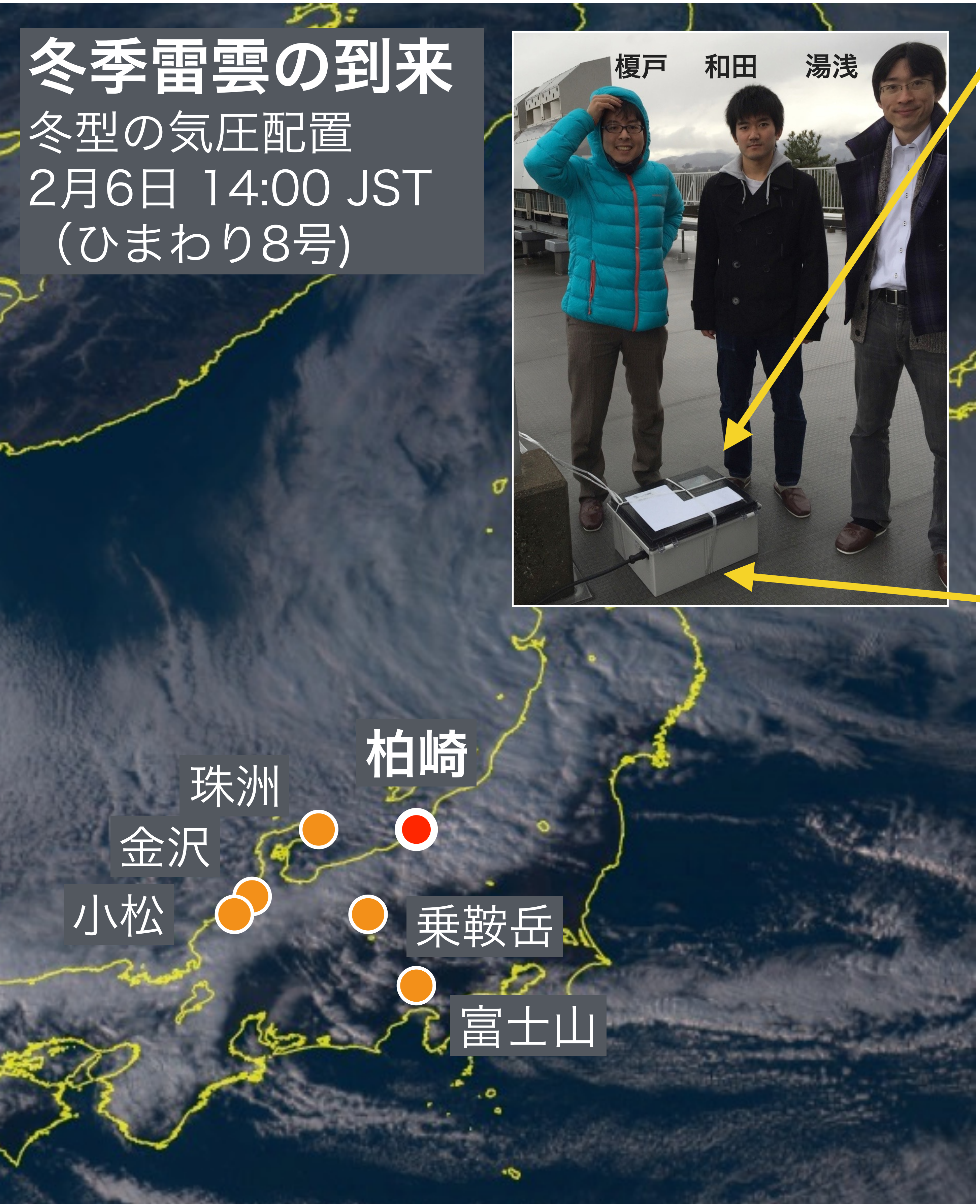
- 天文衛星が地球から到来するガンマ線のバーストを宇宙から発見。
  地上で発生した雷と同期。
- 雷雲から宇宙に向かって駆け上がる電子の制動放射ガンマ線。
  ミリ秒と極めて短いが、10メガ電子ボルト以上の高いエネルギー。

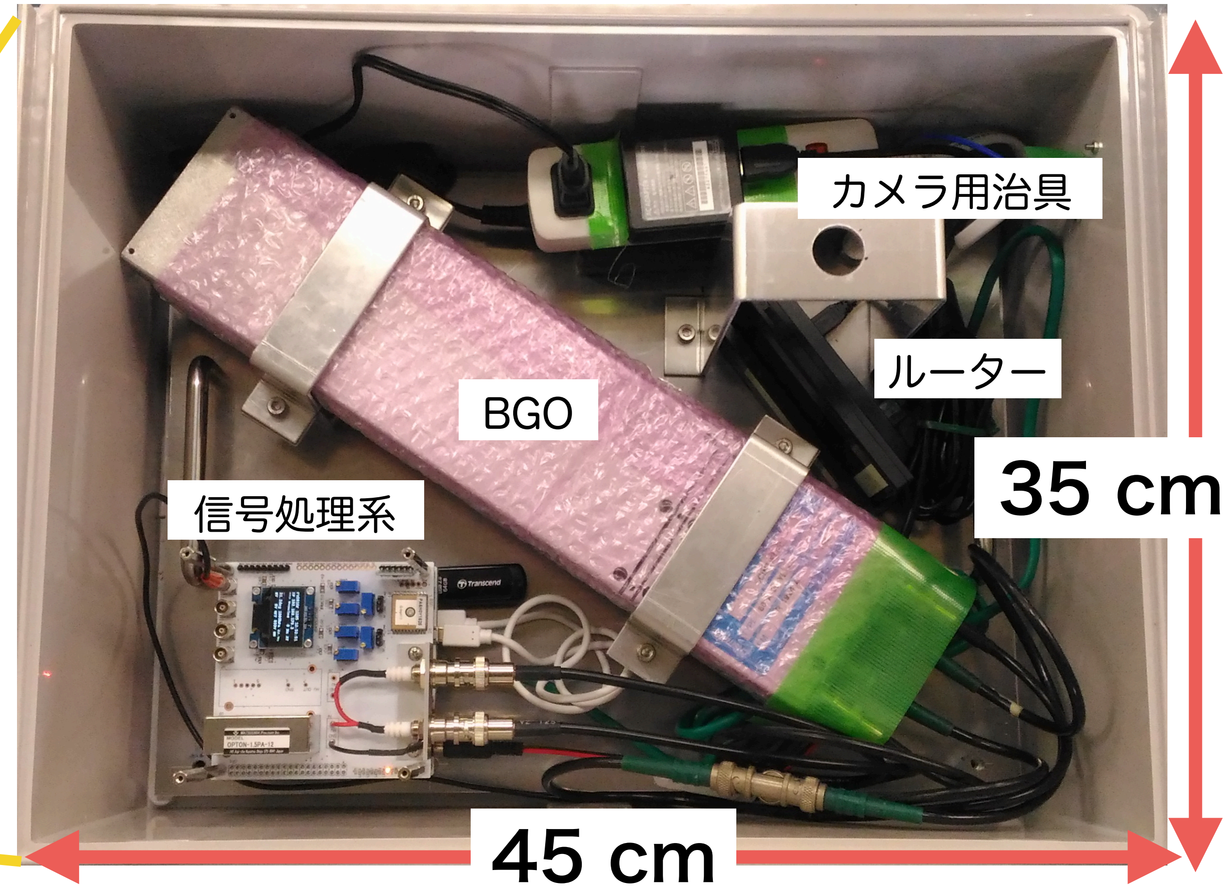
RHESSI 衛星が観測したTGFの位置と雷の発生頻度

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

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

日本海沿岸で多地点マッピング観測の実現へ





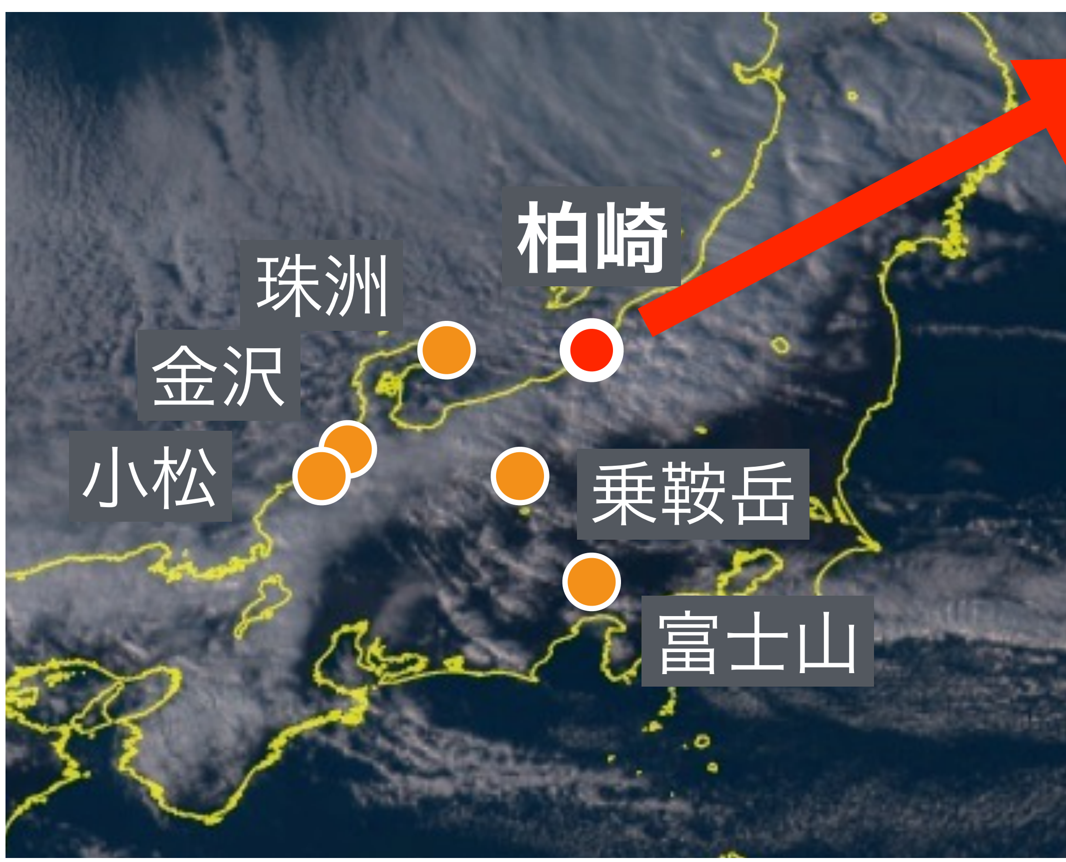
- 湯浅らを中心に小型で安価な信号処理回路を開発。
- 名刺サイズの小型コンピュータ Raspberry Piを使用。
- 持ち運びできる小型検出器が完成。
- 日本海沿岸の観測拠点に設置し、多地点マッピング観測を実現！

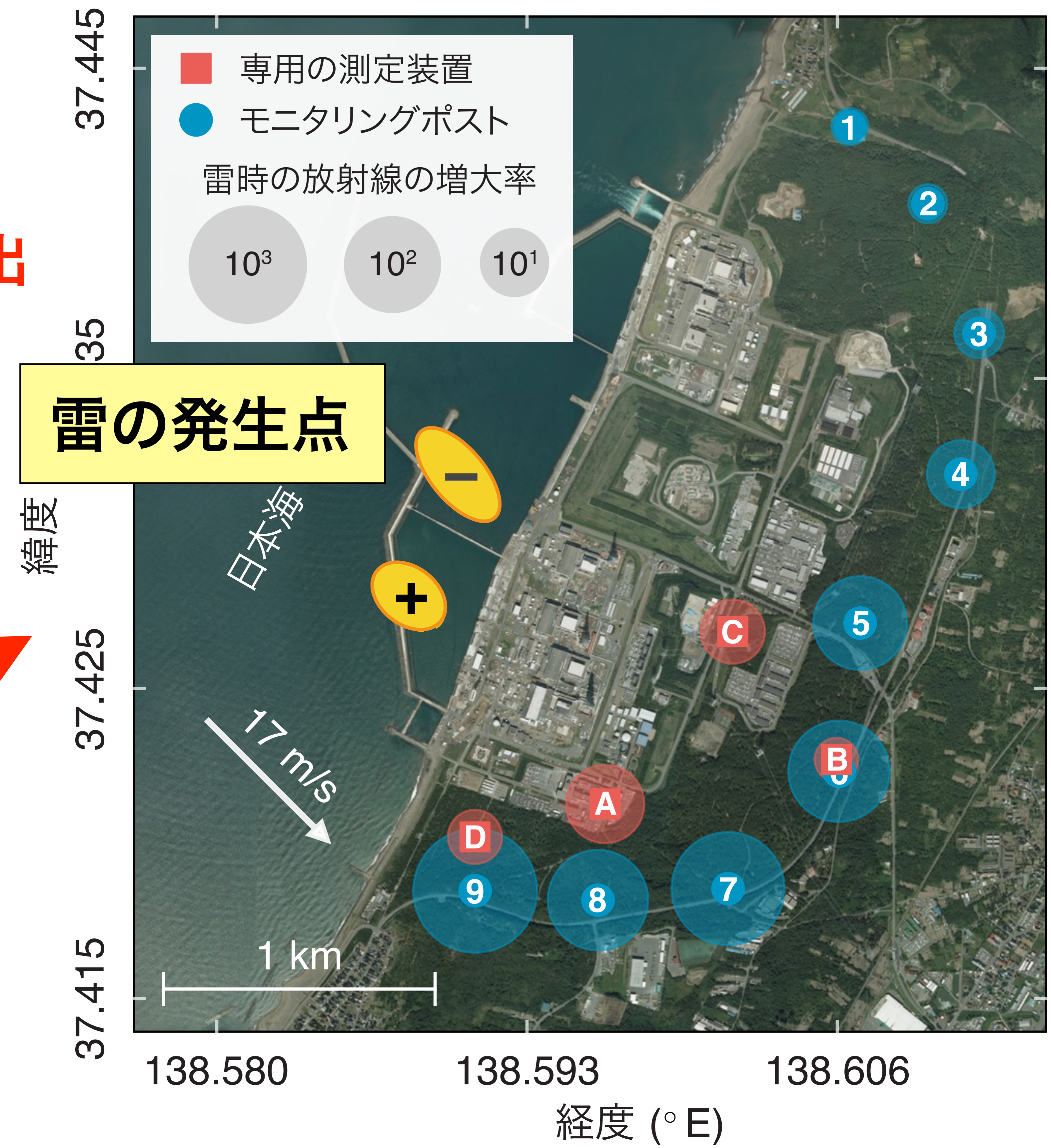
雷と同期したガンマ線バーストを検出

- 2017年2月6日 17:34:06 (日本時間) に柏崎で雷が発生。

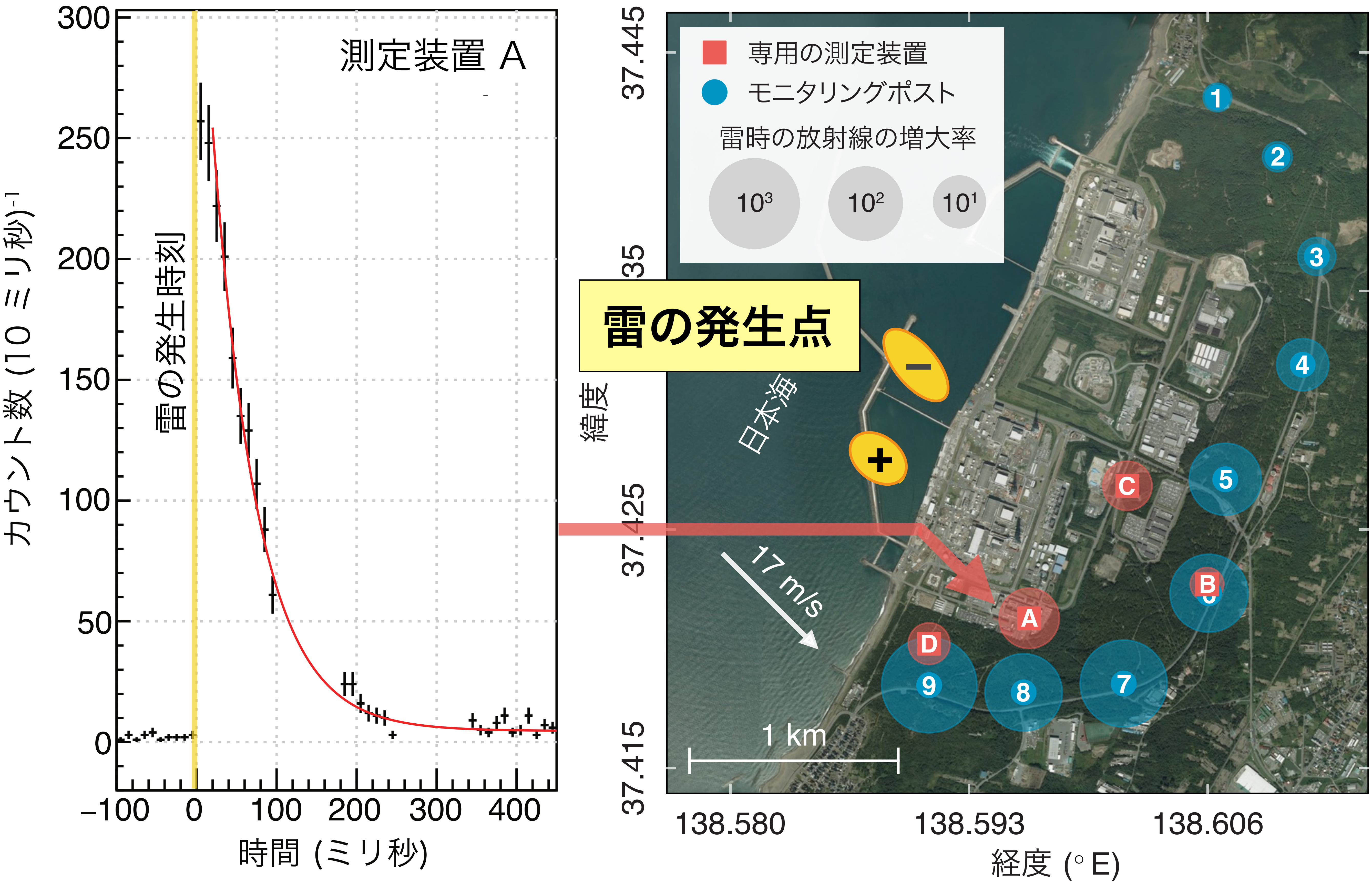
→ 放射線イベントを同時検出

- 雷観測ネットワーク (JLDN) に加え、佐藤ら (北大)の電波観測で雷の発生を確認。

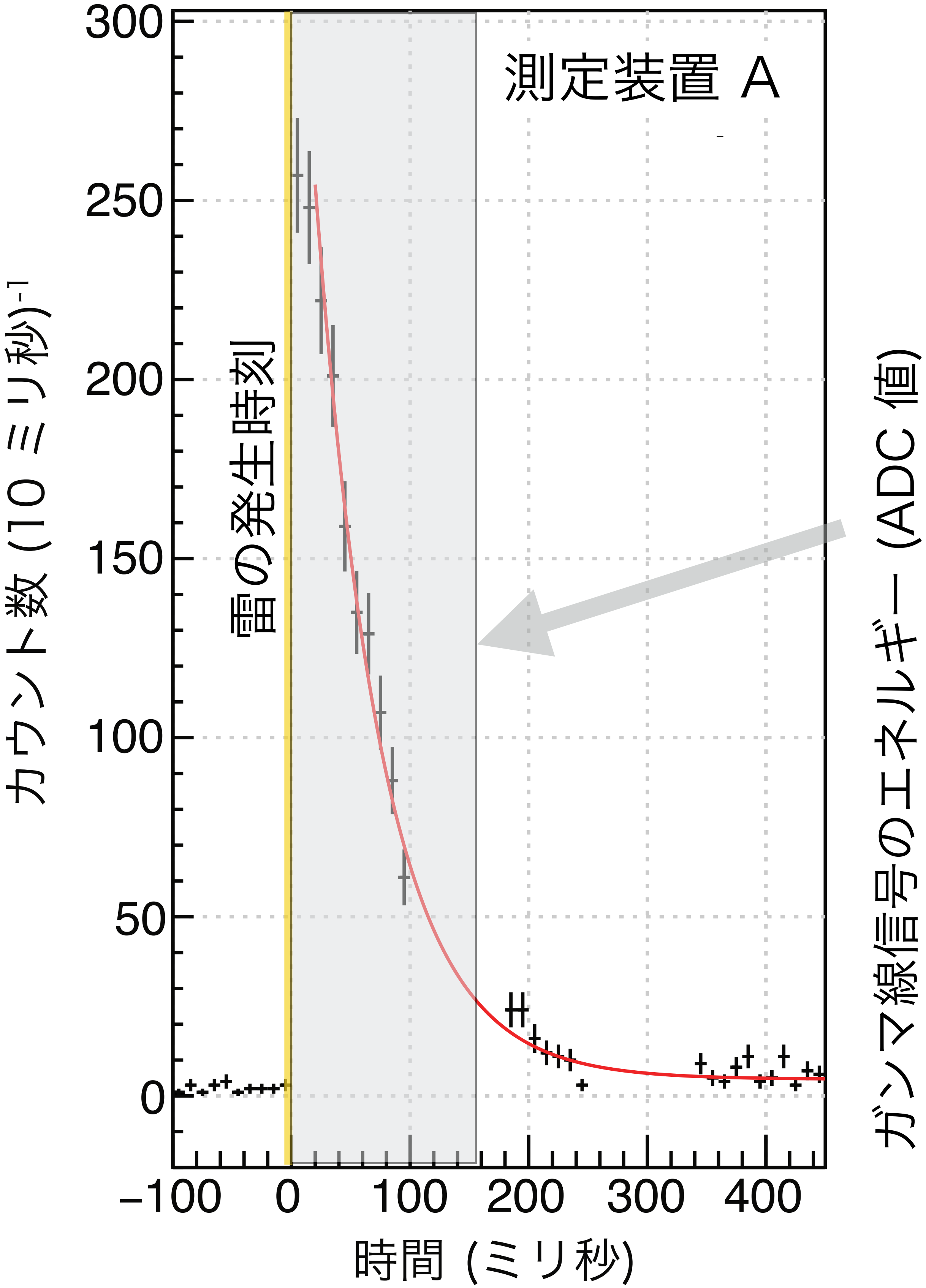


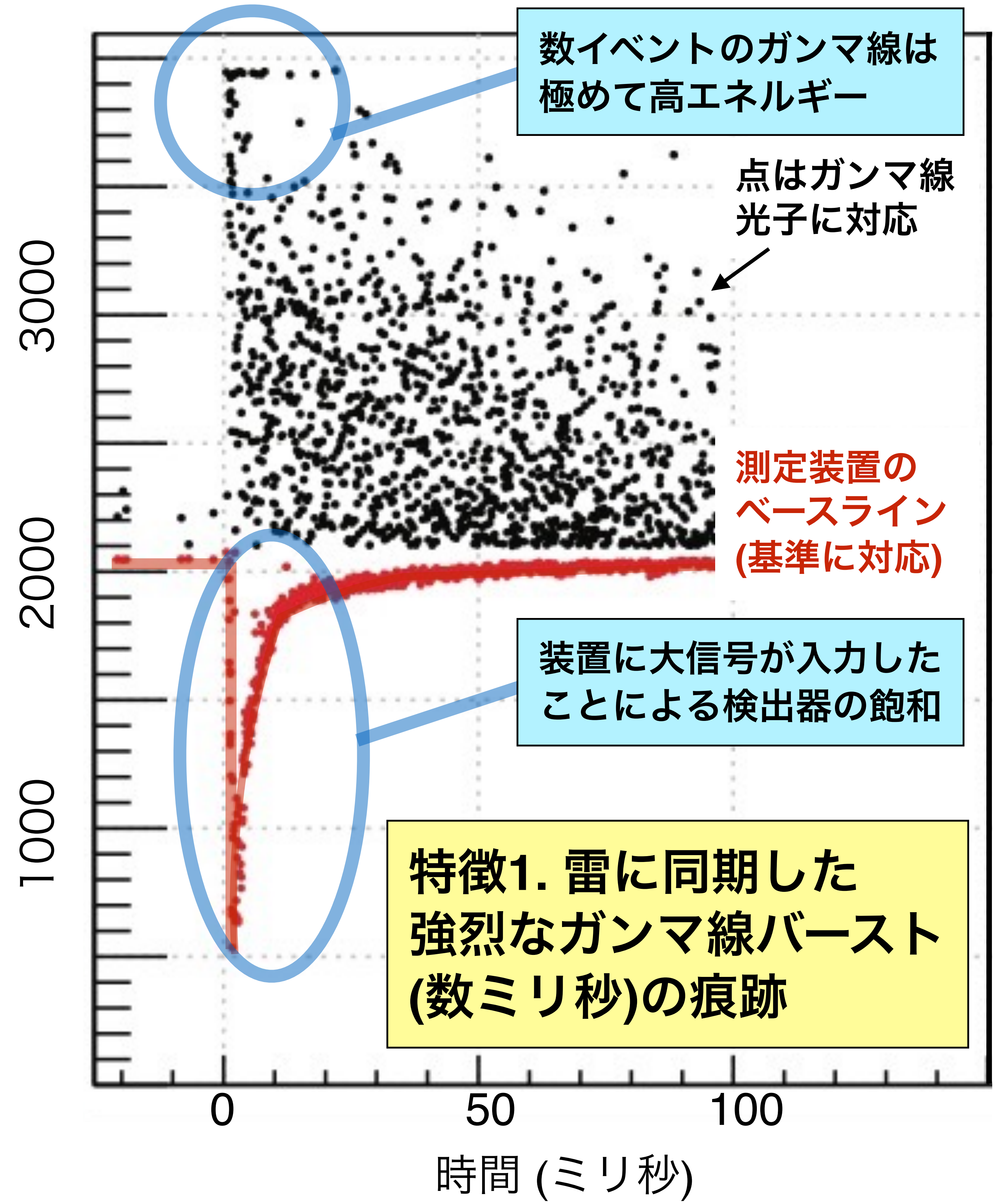


雷と同期したガンマ線バーストを検出

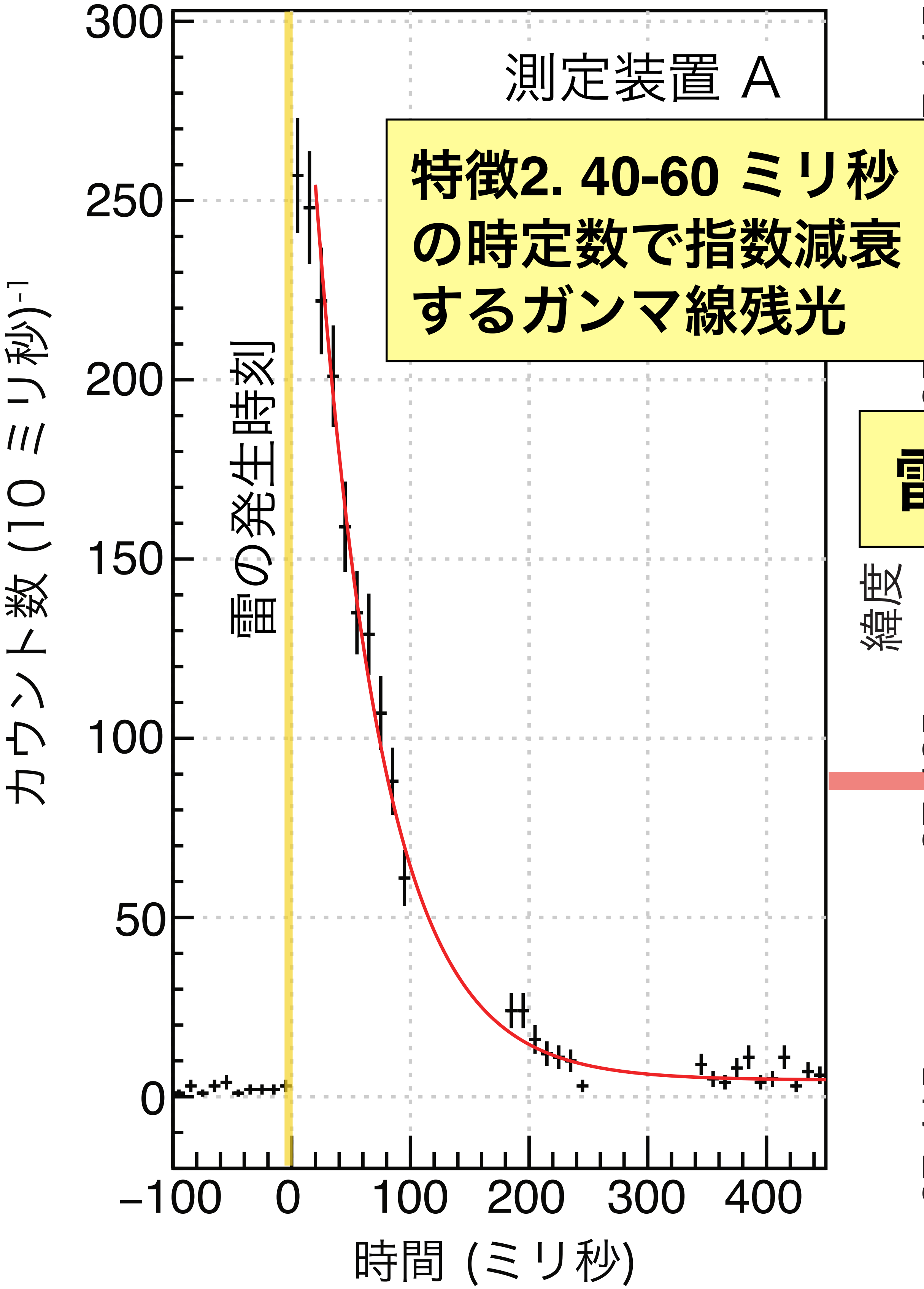


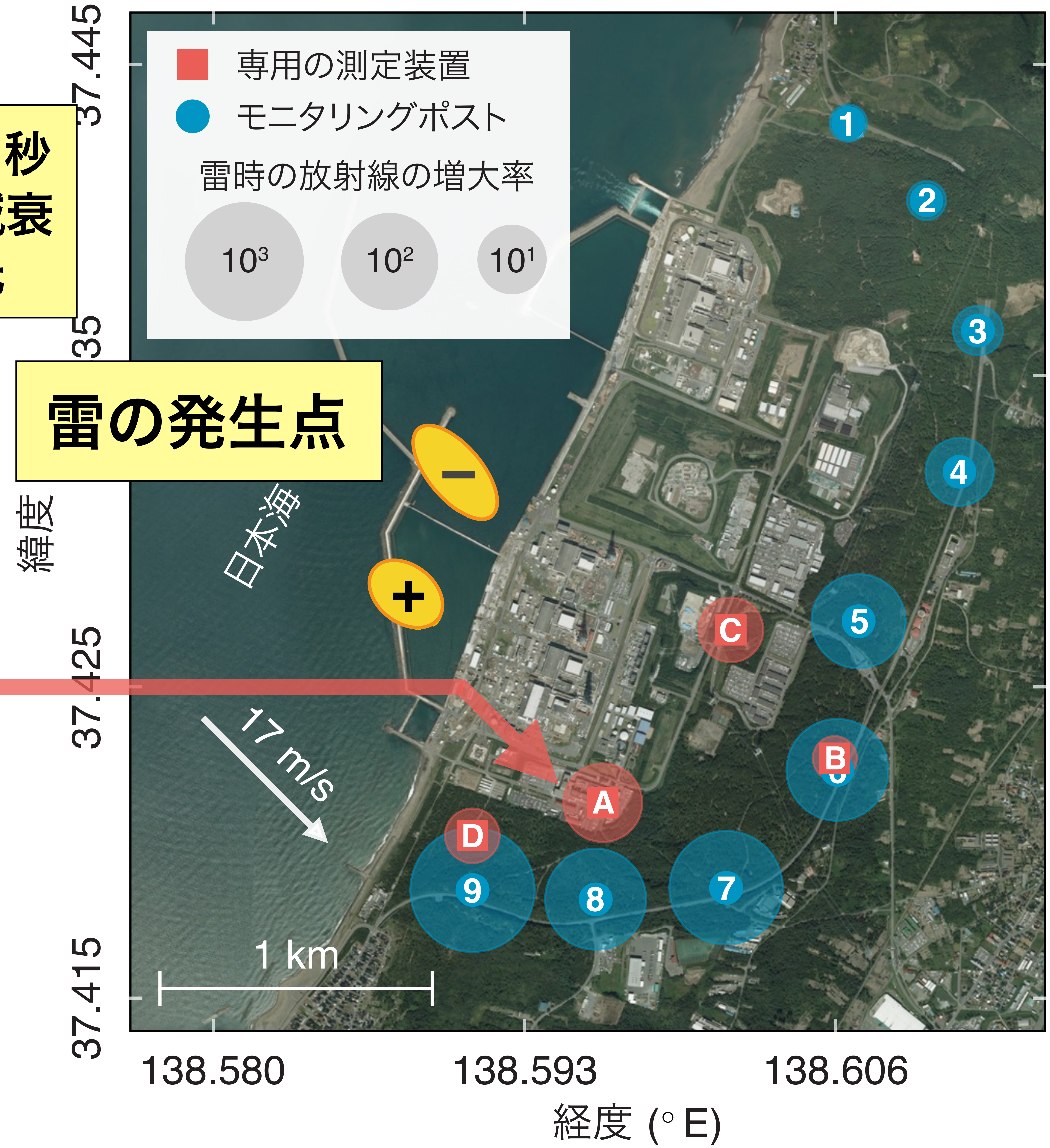
雷と同期したガンマ線バーストを検出



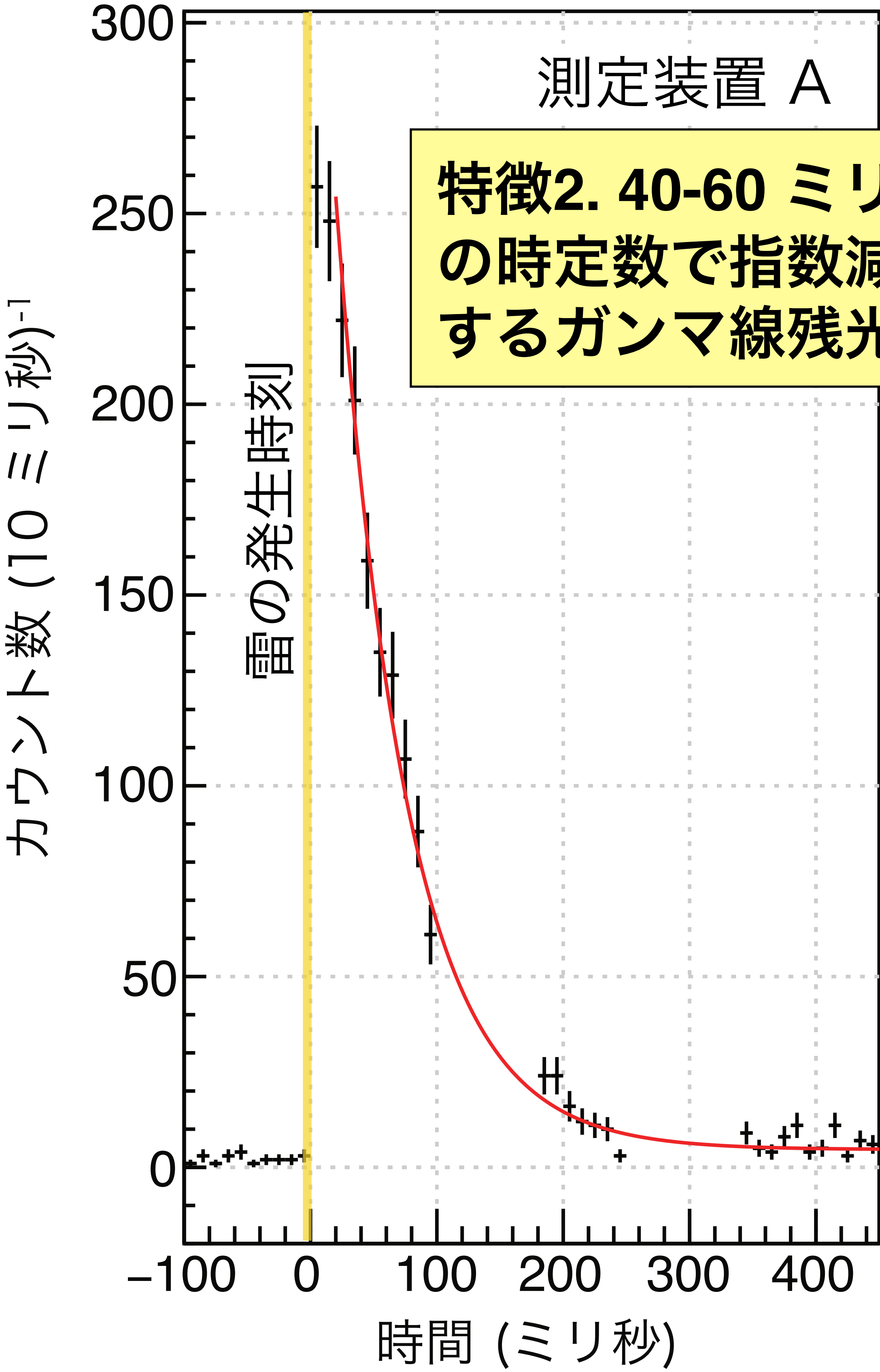


雷の直後に ~50 ミリ秒続くガンマ線残光

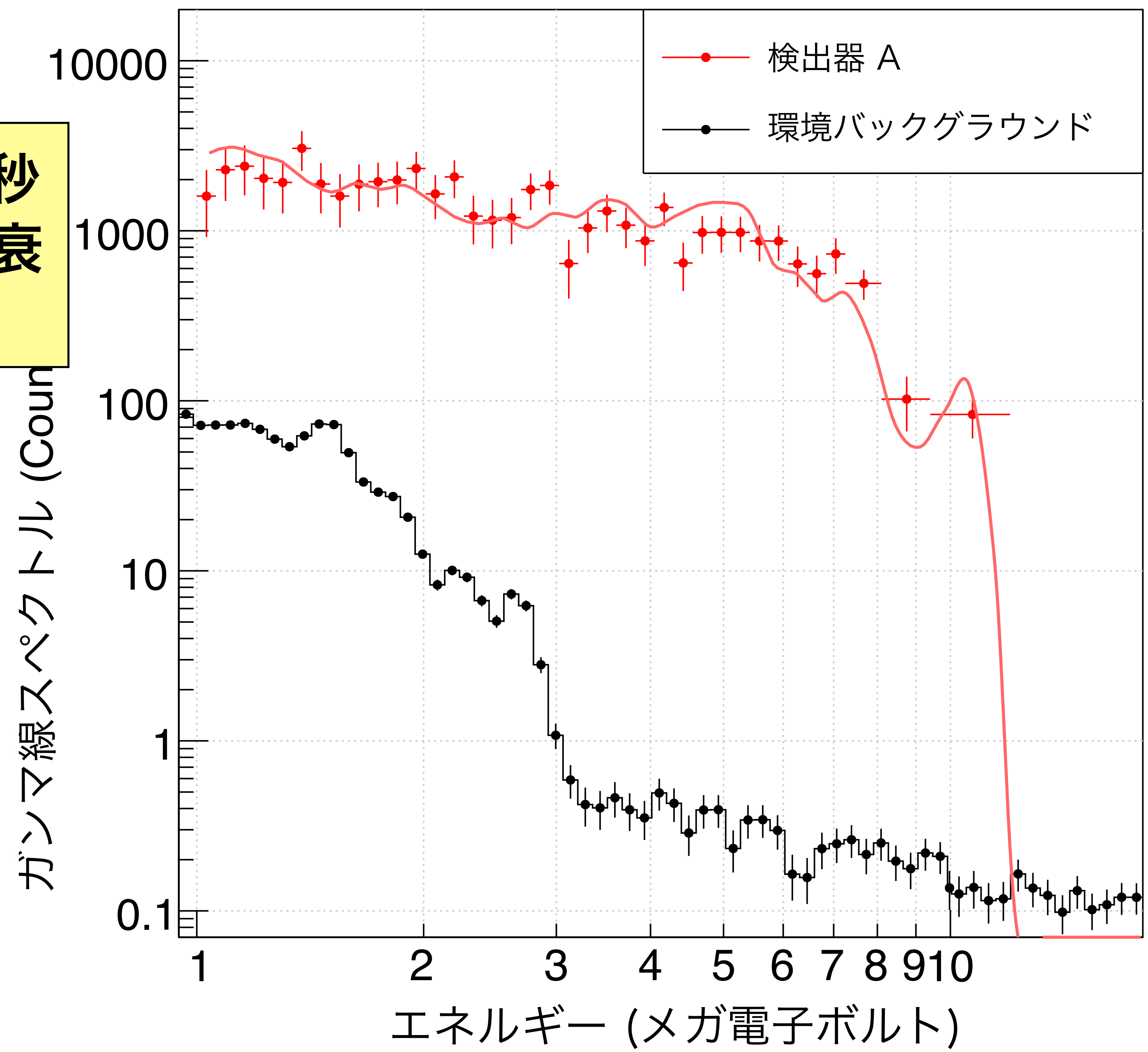




雷の直後に ~50 ミリ秒続くガンマ線のバースト

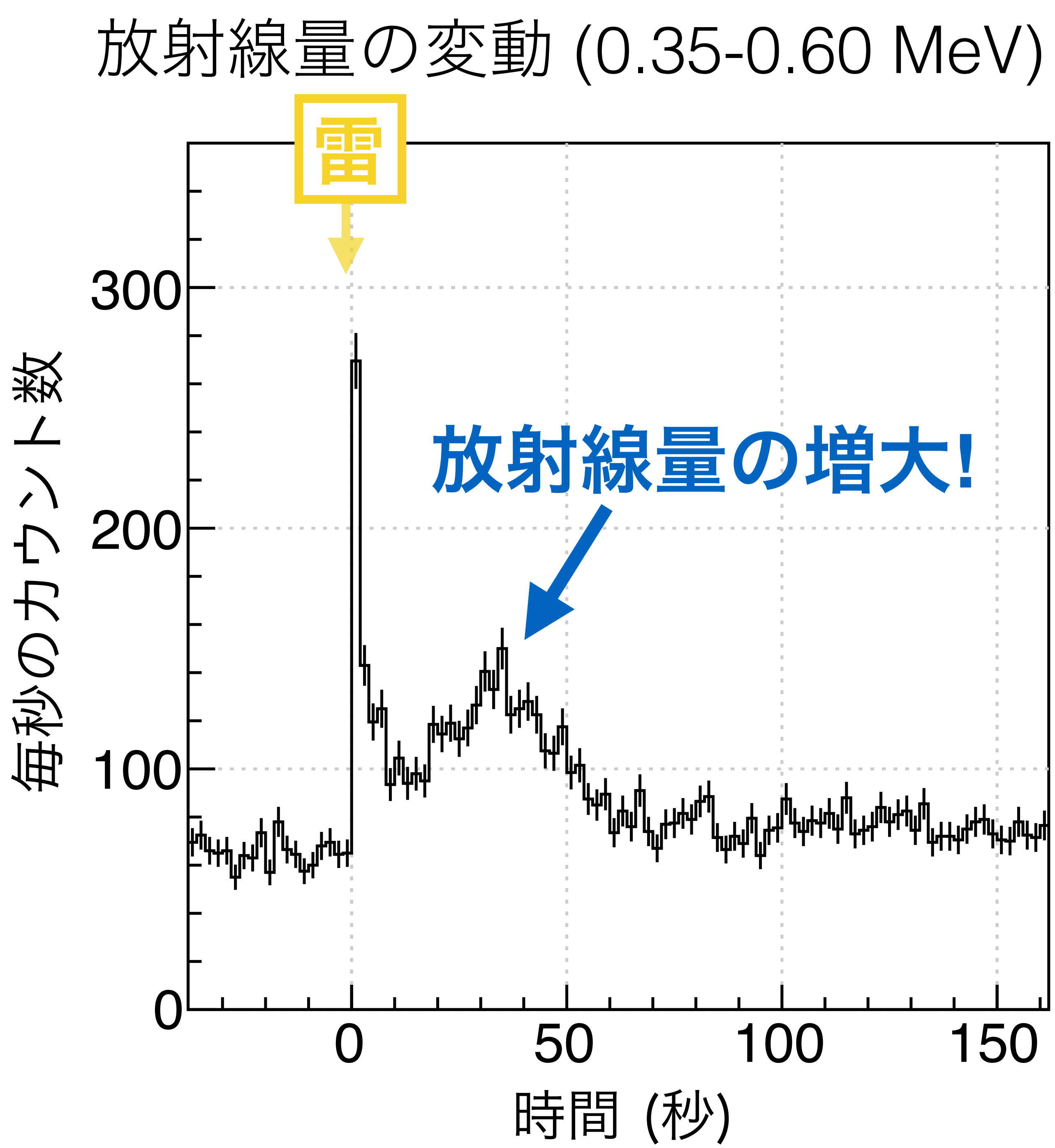


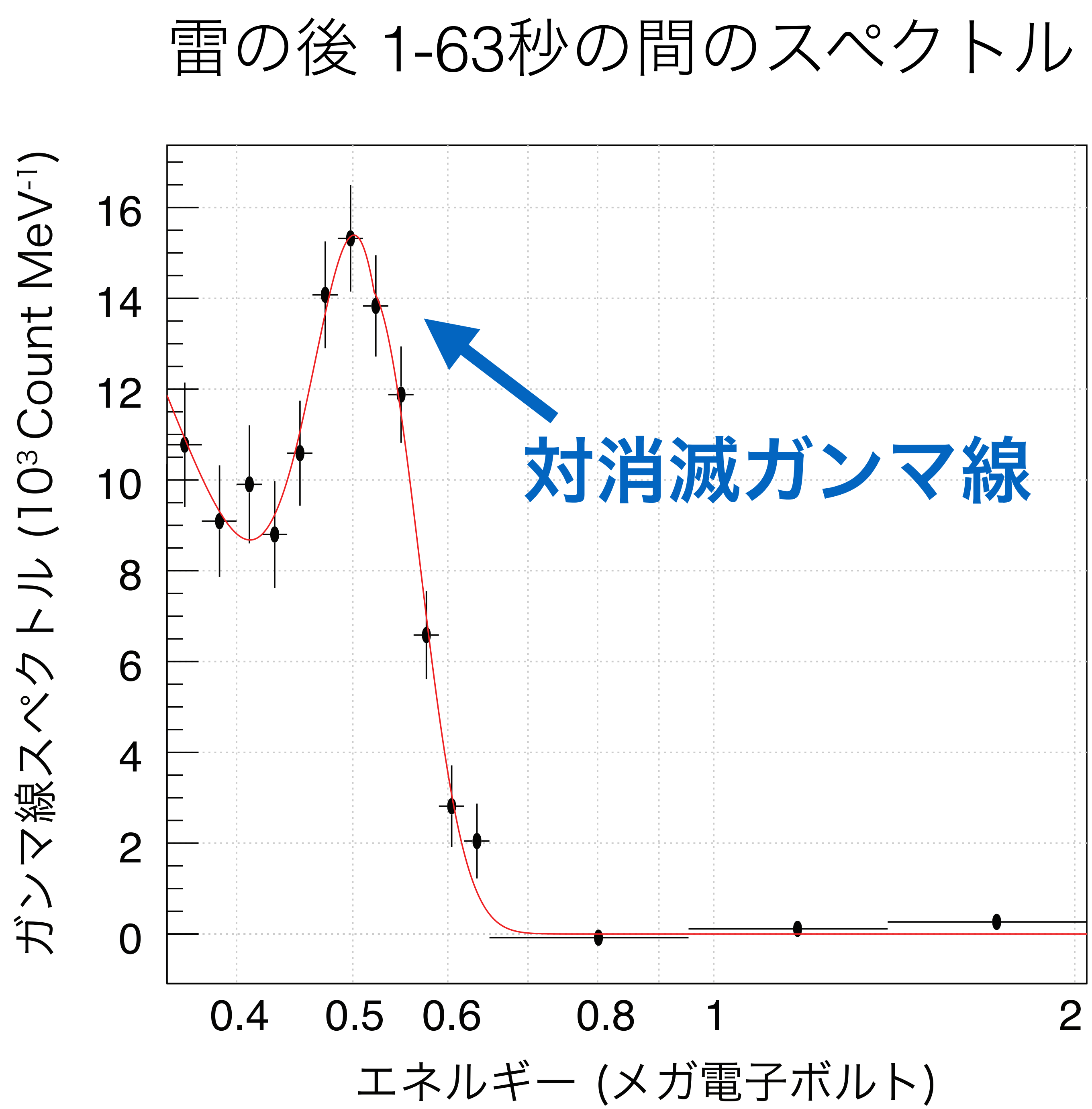
特徴2. 40-60 ミリ秒の時定数で指数減衰するガンマ線残光



特徴3. 約10メガ電子ボルトのエネルギーまで続く放射線の到来。

雷から 35秒 遅れて 0.511 MeV 対消滅線!?

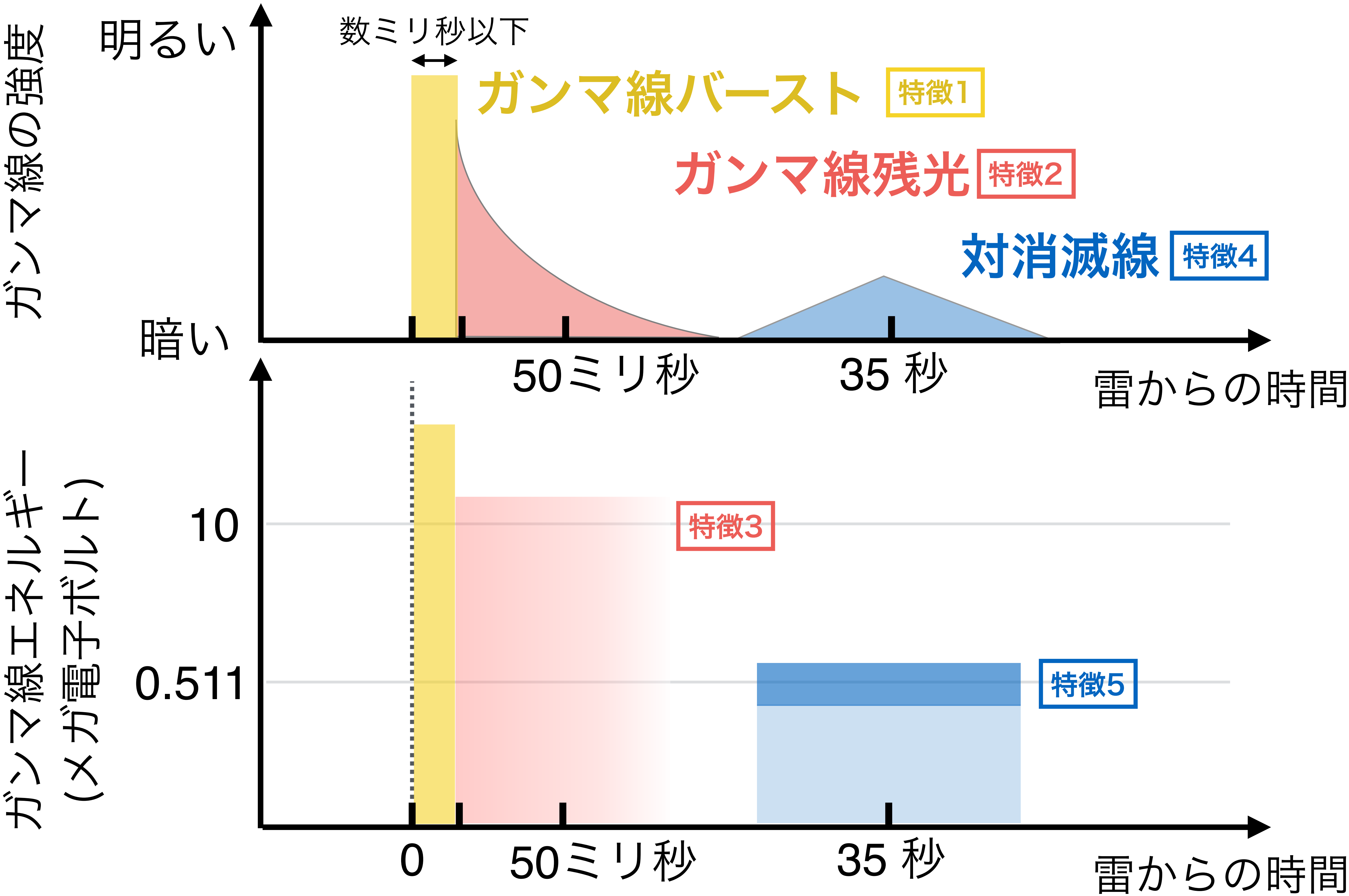




特徴4. およそ35秒ほど遅れて、雷の下流の検出器で放射線が増大!

特徴5. 高エネルギーガンマ線はなく対消滅ガンマ線のみが検出!

観測のまとめ (模式図)

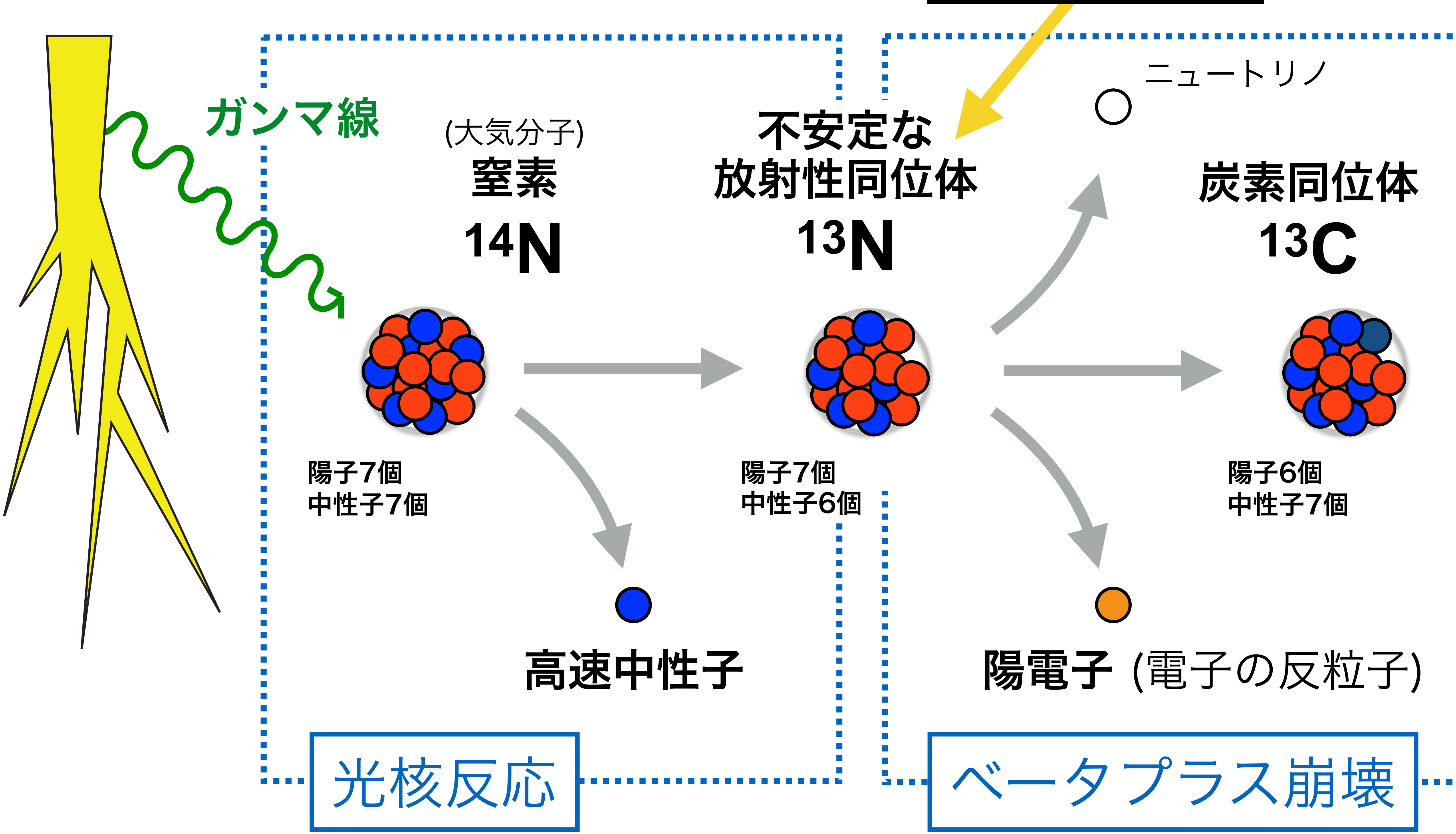


ガンマ線の強度
明るい
暗い
数ミリ秒以下
ガンマ線バースト
特徴1
ガンマ線残光
特徴2
対消滅線
特徴4
50ミリ秒
35 秒
雷からの時間
ガンマ線エネルギー
(メガ電子ボルト)
10
0.511
特徴3
特徴5
0
50ミリ秒
35 秒
雷からの時間

これらの現象は雷による光核反応として
全て統一的に解釈できることを解明した

雷ガンマ線による光核反応

半減期 10分



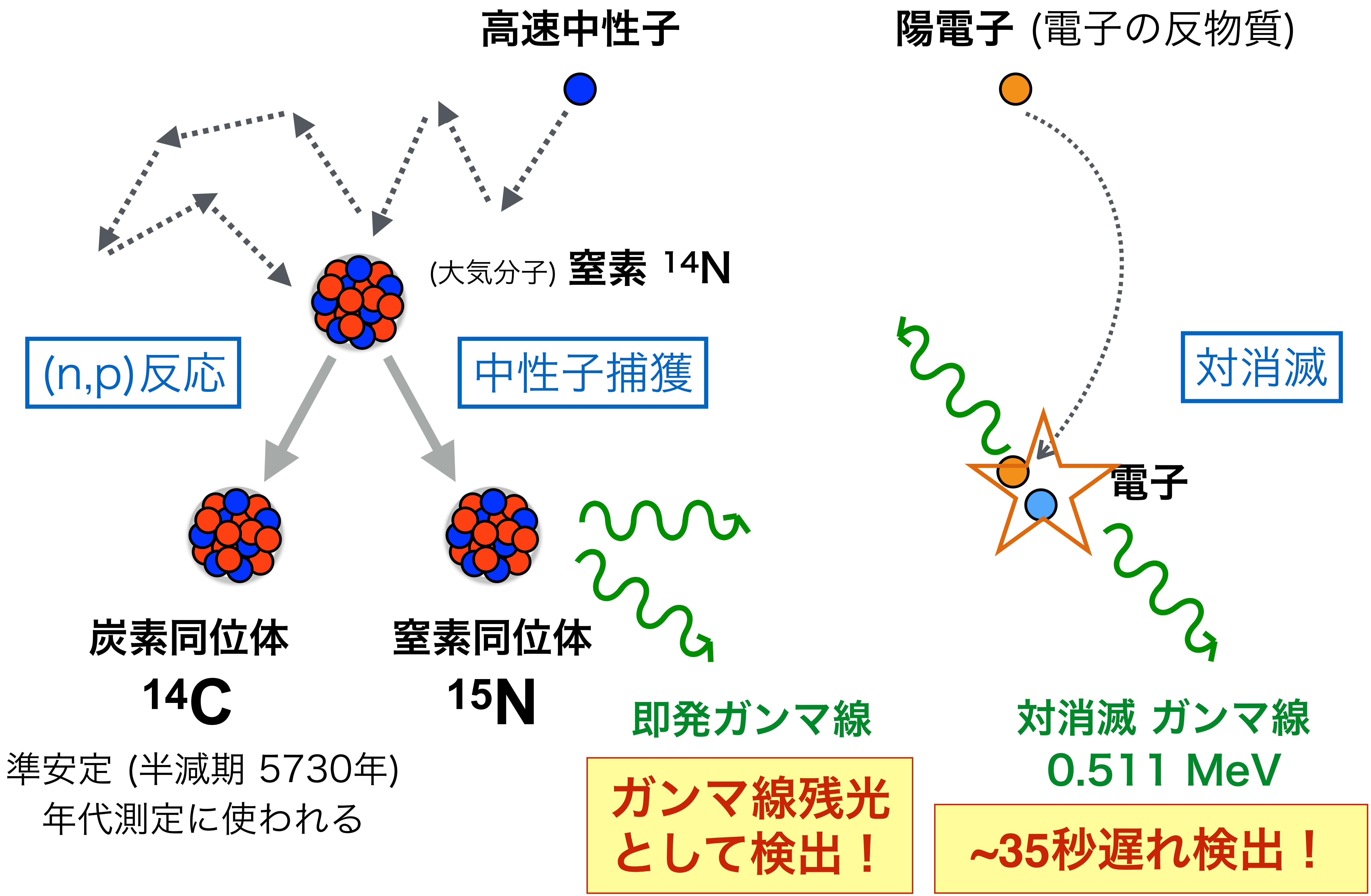
$\gamma + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}\mathrm{N} + \mathrm{n}$　　$^{13}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}\mathrm{C} + e^{+} + \nu$

光核反応：ガンマ線が窒素の原子核にぶつかって、中性子が１個外に飛び出してくる反応。中性子が１個減って、同位体になる。
ベータプラス崩壊：原子核の中の陽子１個が中性子に変わる反応。陽電子が１個、原子核の外に飛び出してくる。

高速中性子

陽電子 (電子の反粒子)

中性子と陽電子が残すガンマ線の痕跡

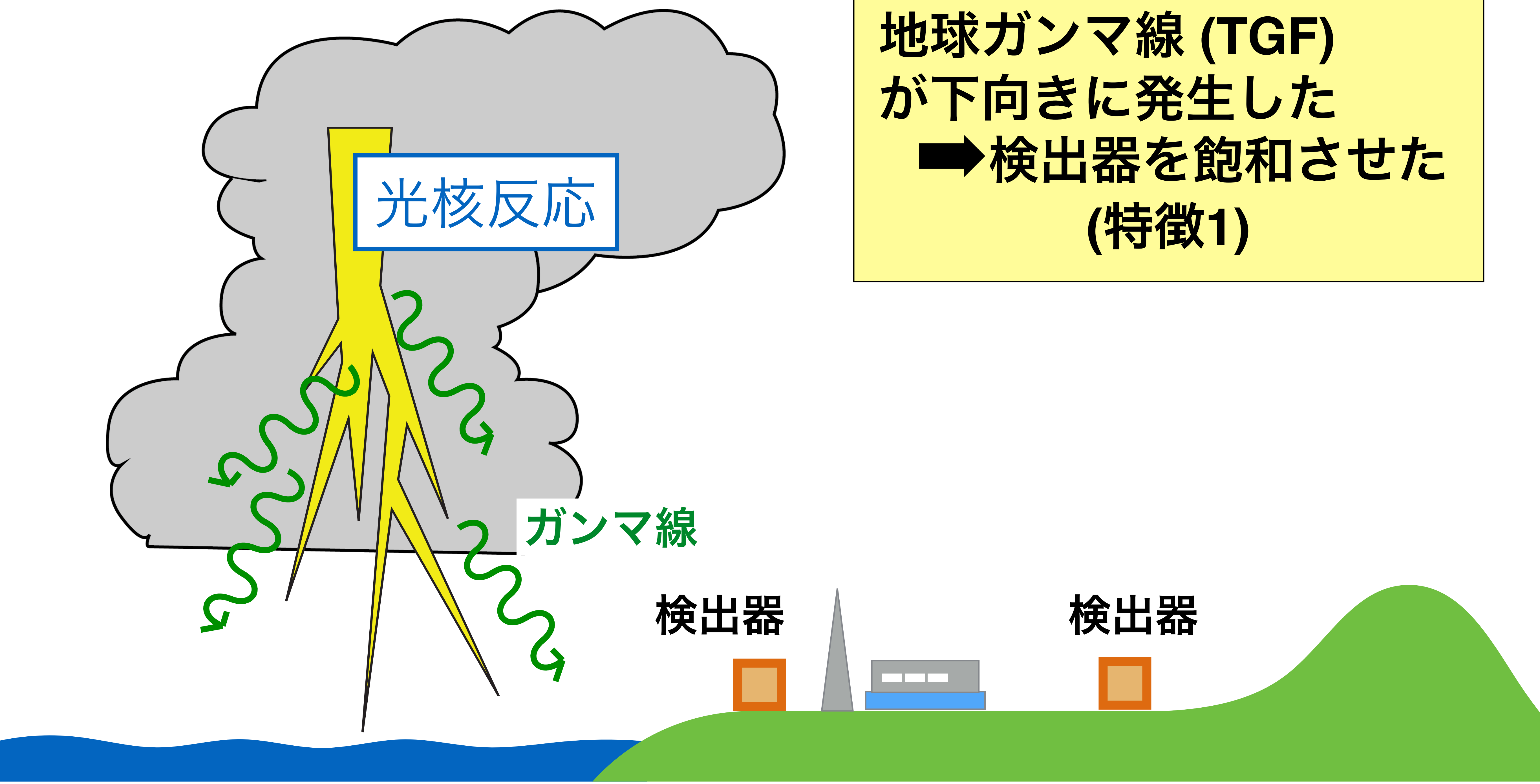


他の説明の可能性はないのか？

- 環境バックグラウンドの輝線を 0.511 MeV と誤認ではないのか？
  ➡ 高精度の較正で対消滅線エネルギーは、天然放射性核種 ^{208}Tl (0.583 MeV) や ^{214}Bi (0.609 MeV)と明確に区別できた。
- ガンマ線が窒素の原子核にぶつかる「光核反応」ではなく、大気中でのよく知られた「対生成」で陽電子を生成したのではないのか？
  ➡ 雷のガンマ線が「対生成」で陽電子を生成しても、あっという間に消えてしまうので、40秒もあとに対消滅線は作れない。
  なおフェルミ衛星が過去に観測した陽電子の兆候は「対生成」により生成されたものである。

雷に伴うガンマ線が大気中の窒素と起こす核反応を、生成物である「中性子」と「不安定な窒素同位体が放出する陽電子」という2つの明確な証拠で、世界で初めて観測的に解明した。

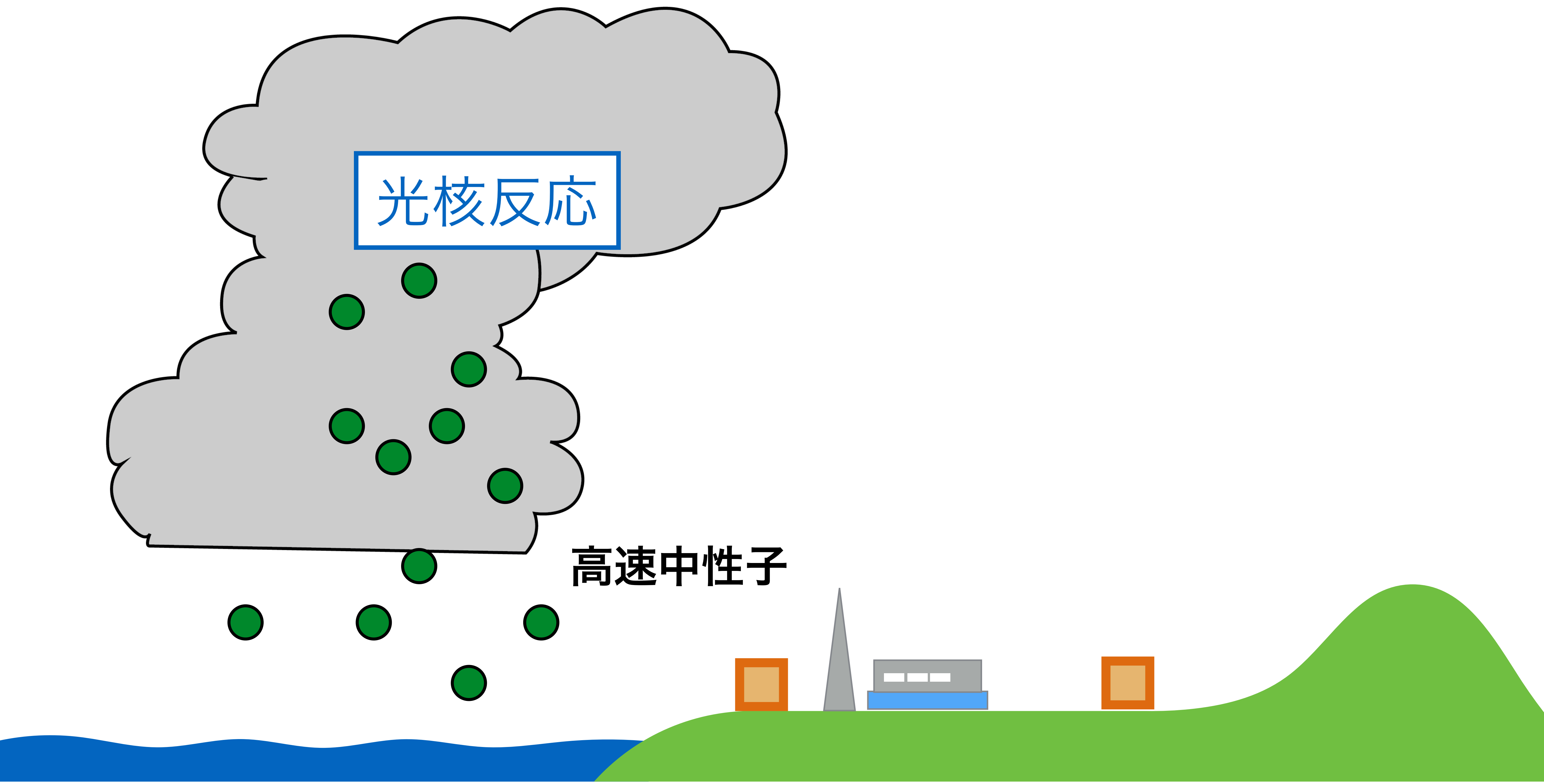
雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



地球ガンマ線 (TGF)
が下向きに発生した
➡検出器を飽和させた
(特徴1)

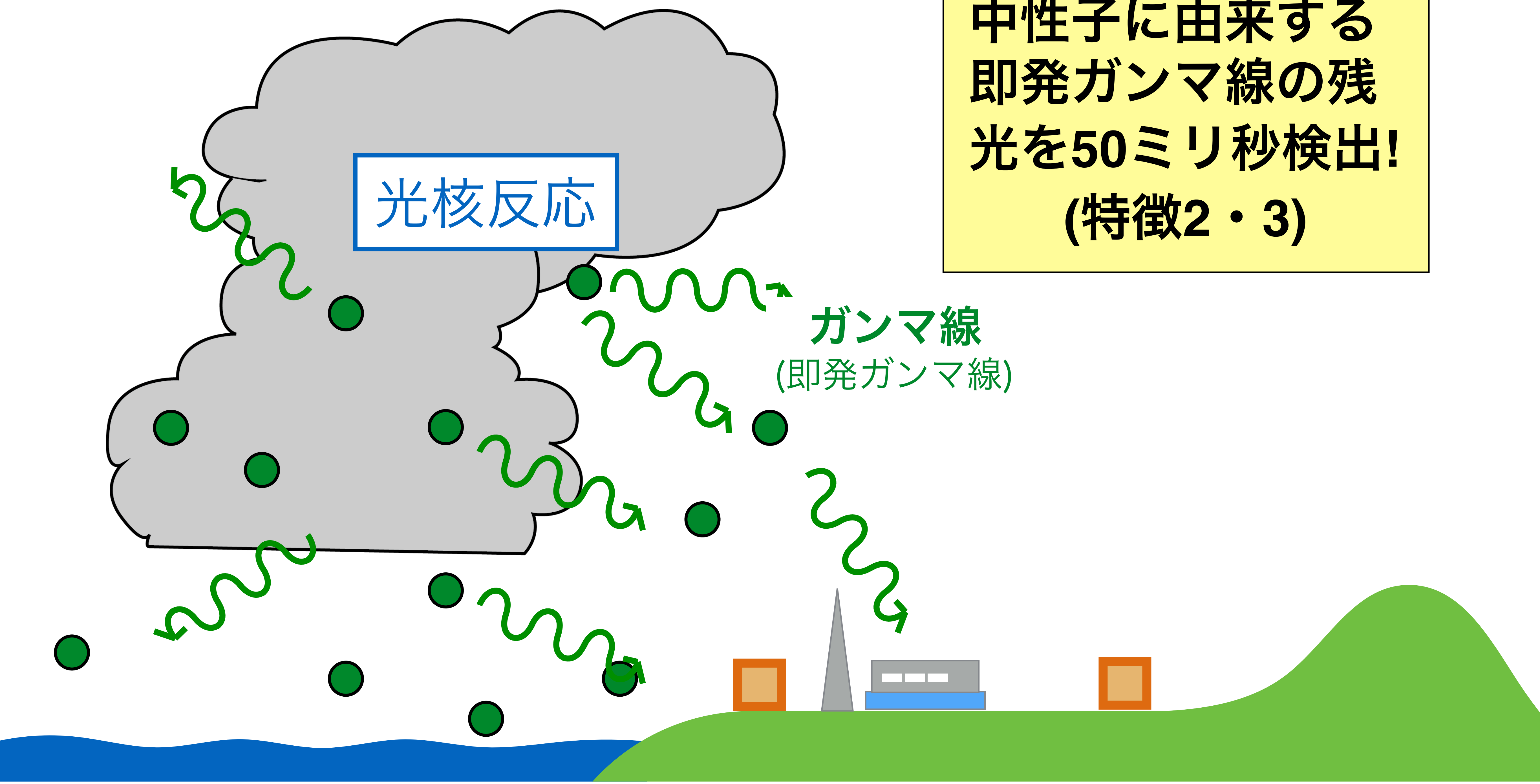
1. 雷が発生。雷からのガンマ線が大気窒素と衝突して光核反応を生じ、**高速中性子**と**窒素同位体**を発生させる。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



2. **中性子**は大気中で散乱を繰り返しエネルギーを失い広がる。
大気中の窒素原子核に吸収されて**即発ガンマ線**を放出する。

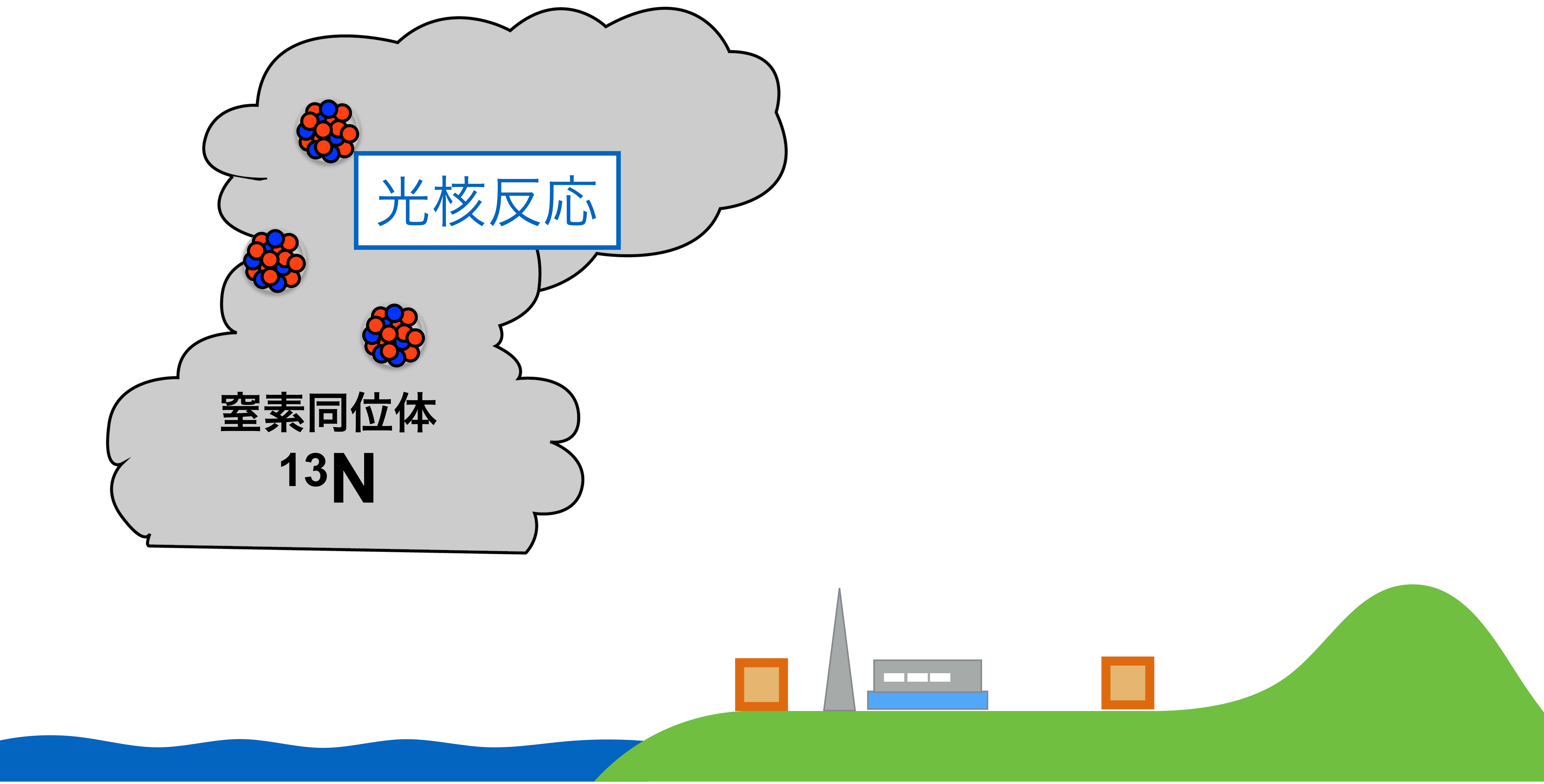
雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



中性子に由来する即発ガンマ線の残光を50ミリ秒検出!
(特徴2・3)

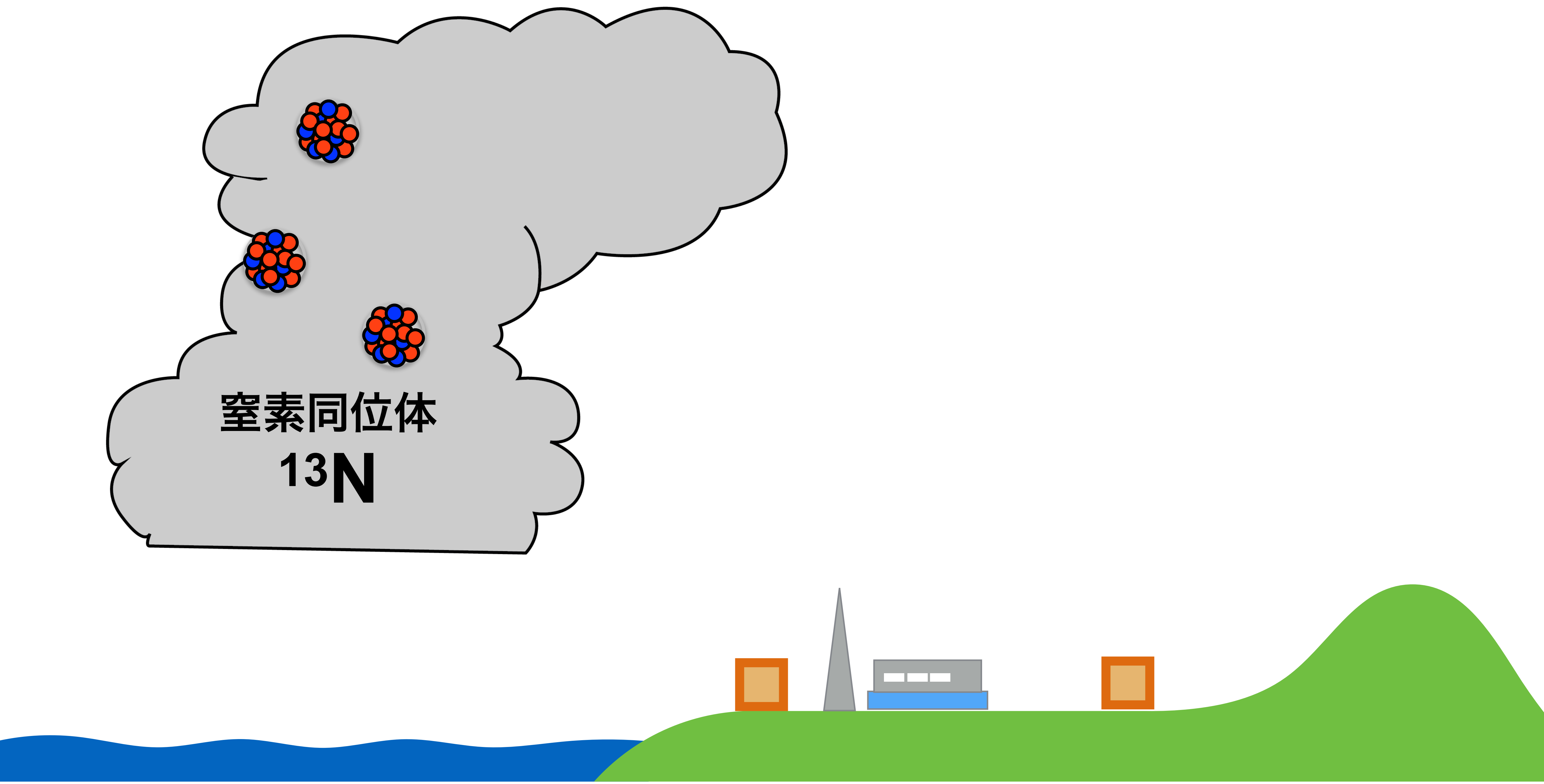
2. **中性子**は大気中で散乱を繰り返しエネルギーを失い広がる。大気中の窒素原子核に吸収されて**即発ガンマ線**を放出する。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



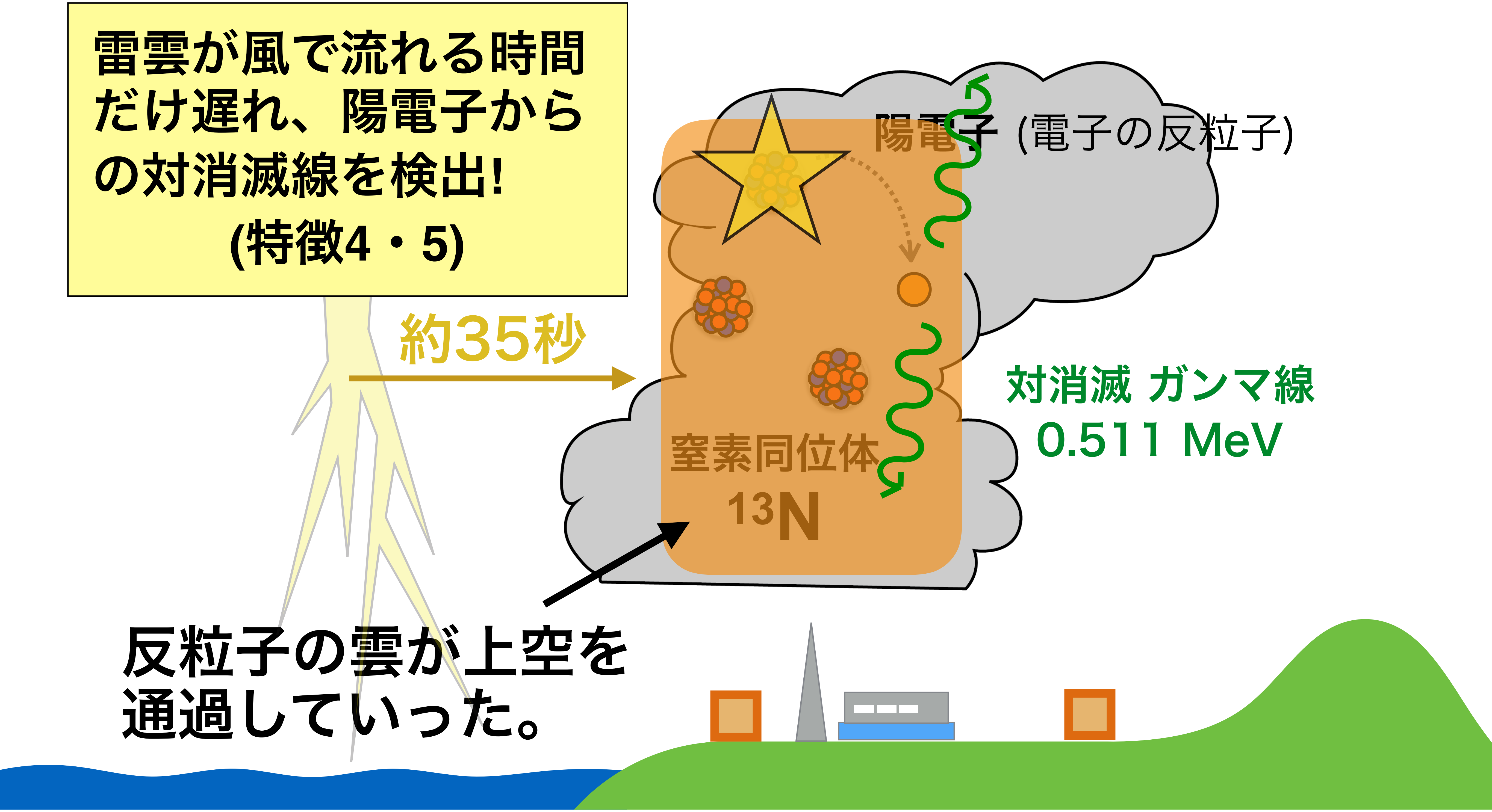
3. 光核反応で大気窒素は**不安定な同位体 ^{13}N** に変わる。雷雲とともに上空を移動する。なお、大気酸素から^{15}Oも生成される。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



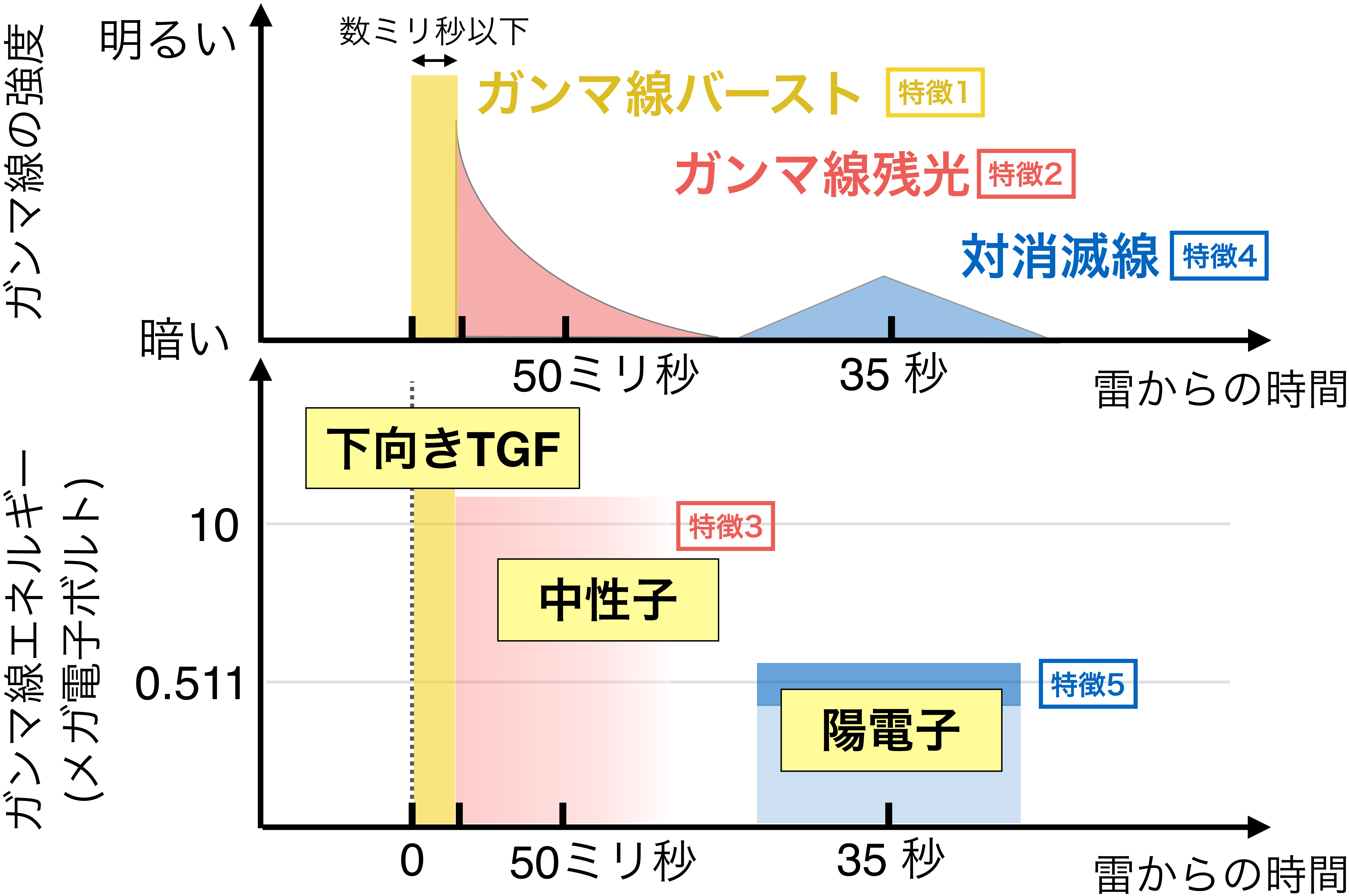
3. 光核反応で大気窒素は**不安定な同位体 ^{13}N** に変わる。雷雲とともに上空を移動する。なお、大気酸素から^{15}Oも生成される。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



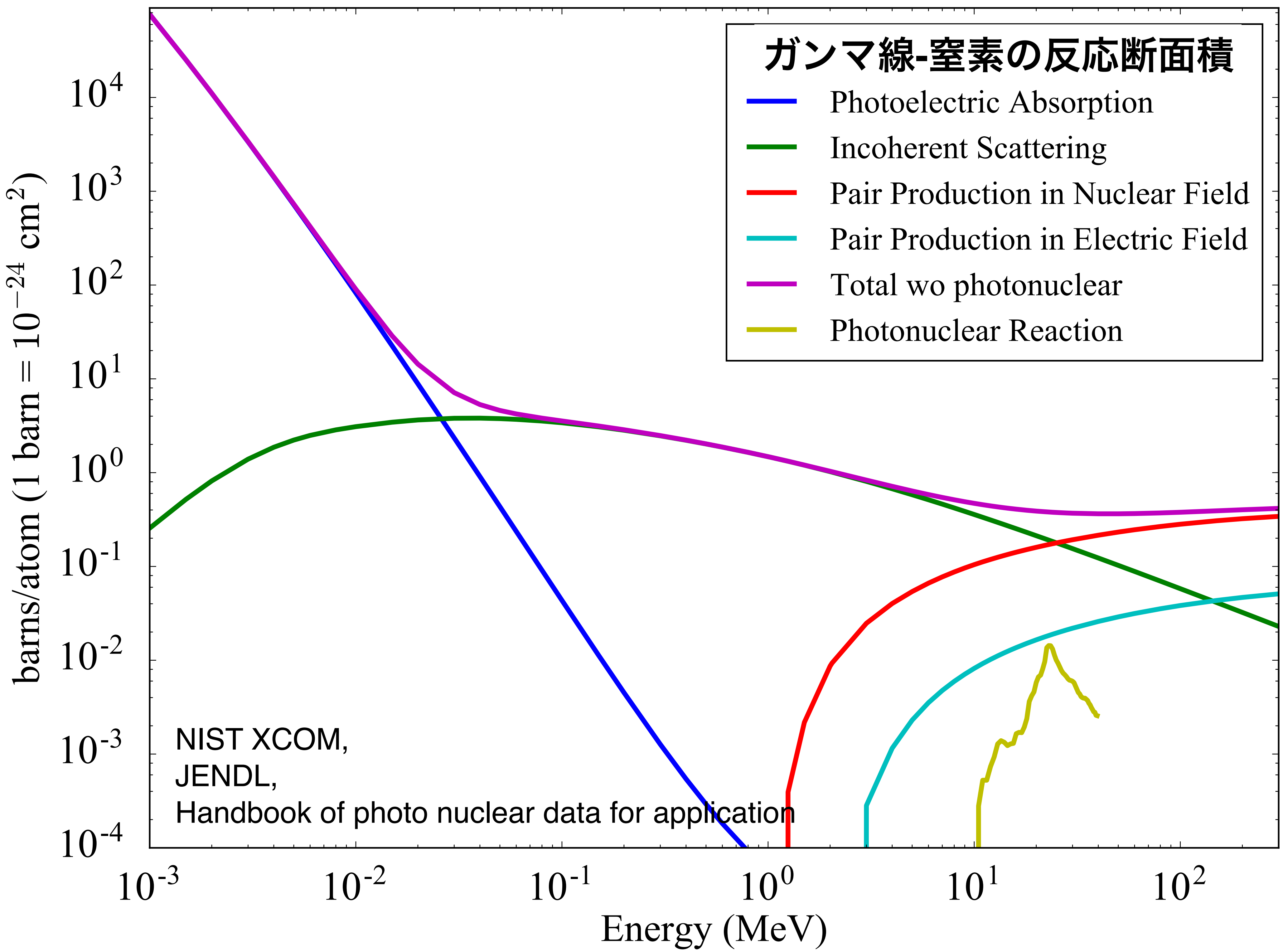
3. **不安定同位体 ^{13}N** は徐々に ^{13}C に壊変する(半減期約10 分)。
放出される陽電子が **0.511 MeV 対消滅線**を発生する。

観測のまとめ (模式図)



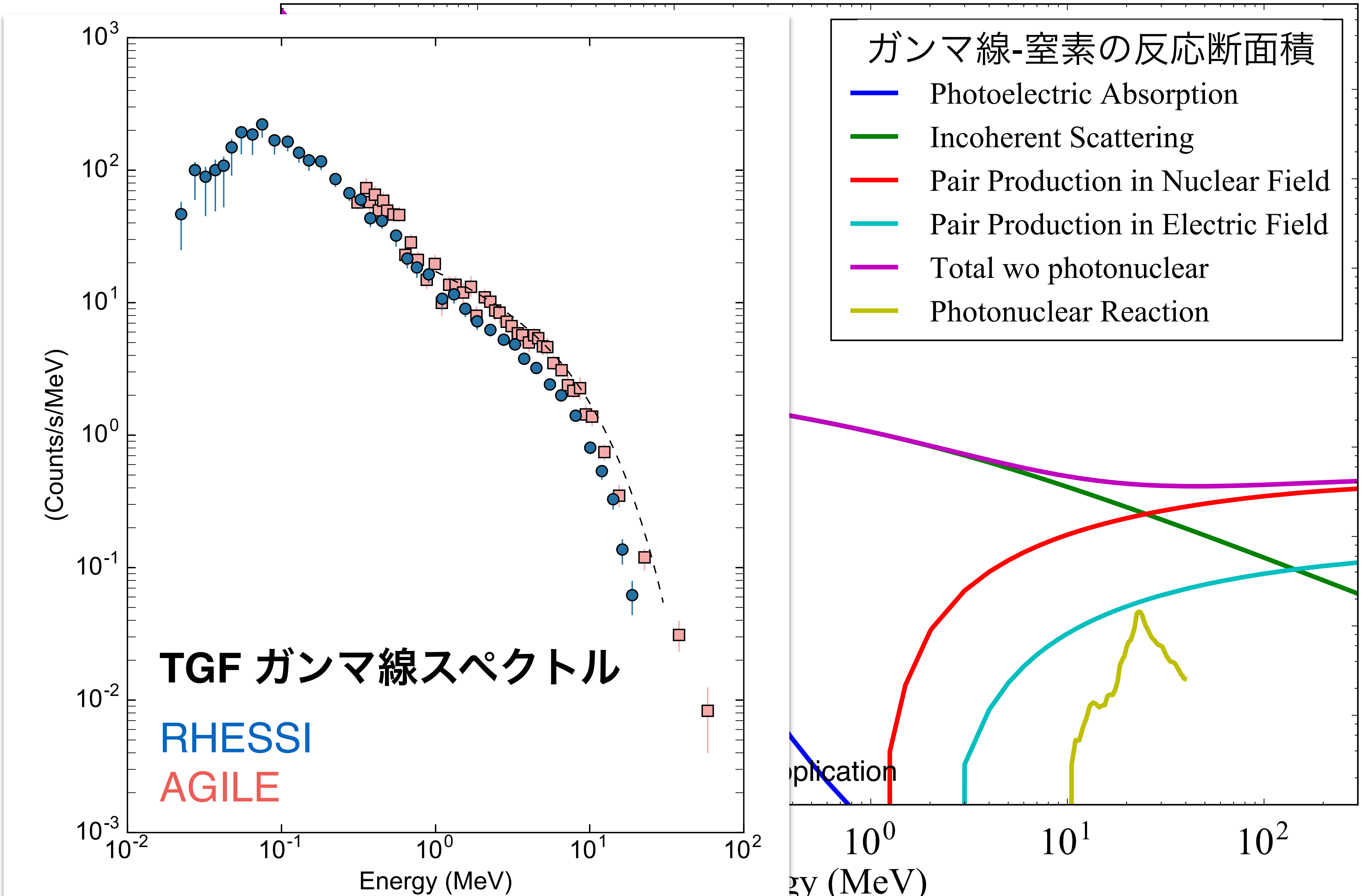
ガンマ線の強度
明るい
暗い
数ミリ秒以下
ガンマ線バースト
特徴1
ガンマ線残光
特徴2
対消滅線
特徴4
50ミリ秒
35 秒
雷からの時間
ガンマ線エネルギー
(メガ電子ボルト)
下向きTGF
10
特徴3
中性子
0.511
特徴5
陽電子
0
50ミリ秒
35 秒
雷からの時間

下向き TGF による光核反応 (特徴1: 強烈なガンマ線)



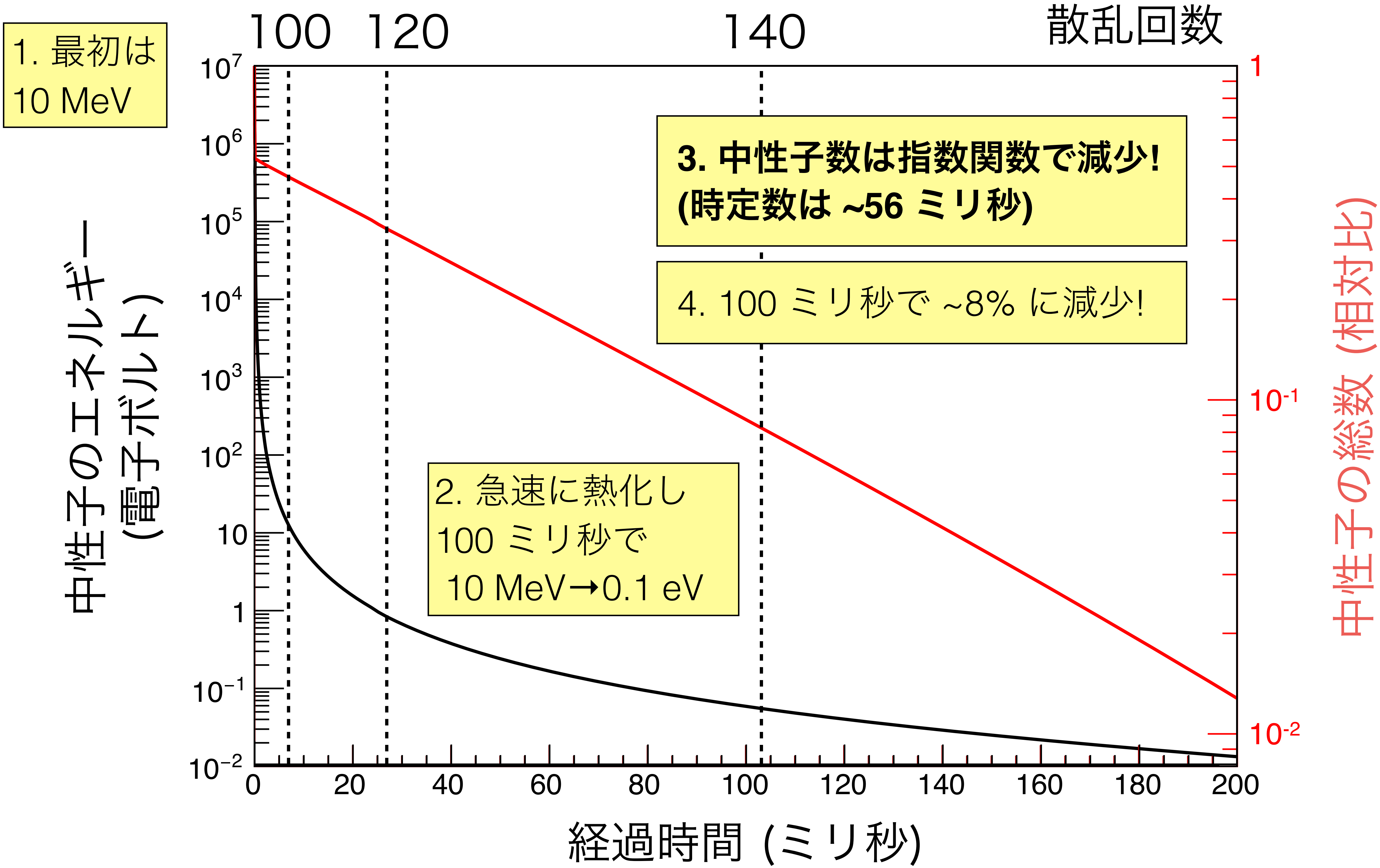
- >10 MeV ガンマ線で光核反応が発生。対生成の~1 桁ほど小さい断面積。
- TGF のエネルギースペクトルは 10 MeV 以上まで伸びている。

下向き TGF による光核反応 (特徴1: 強烈なガンマ線)



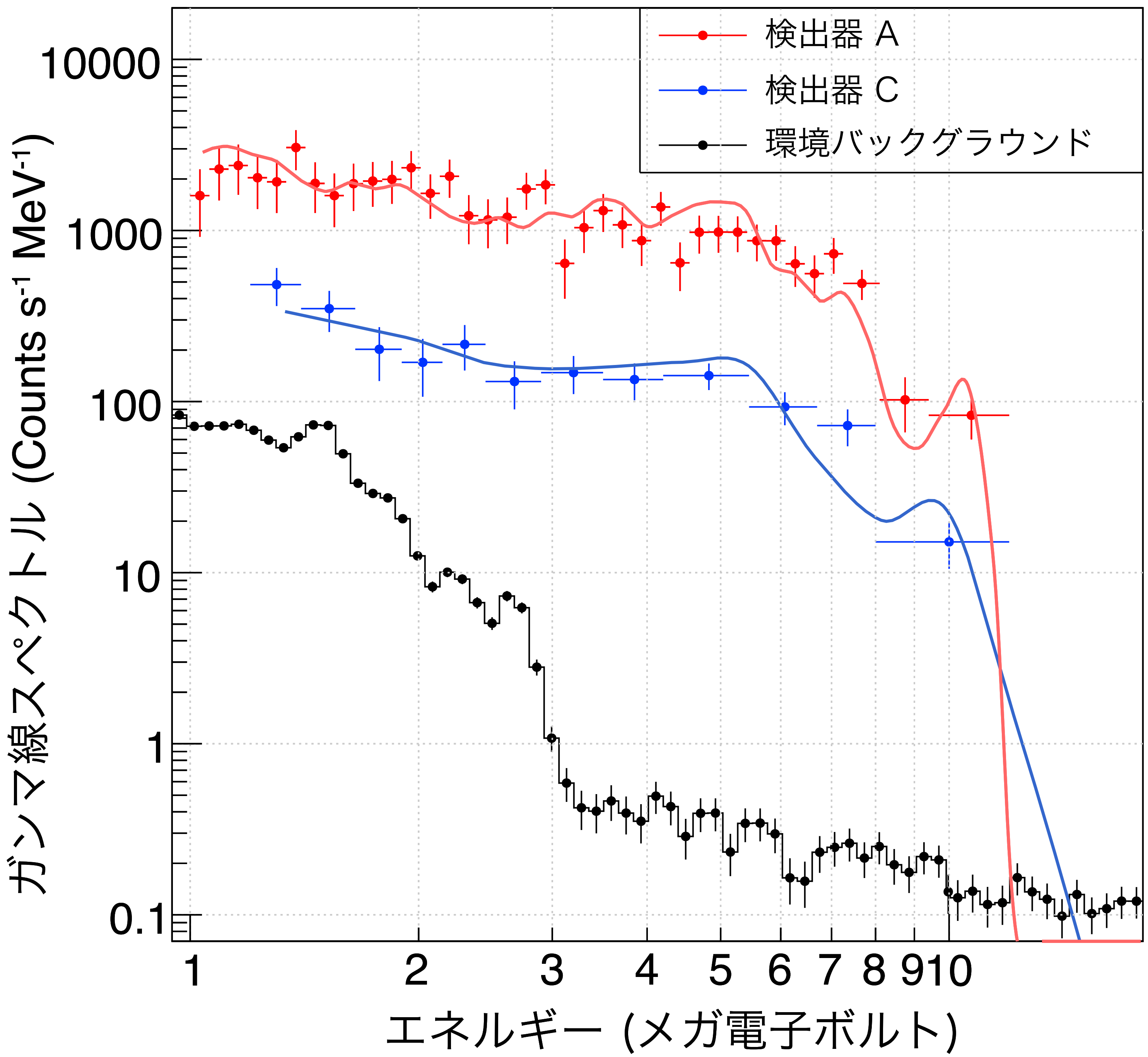
- >10 MeV ガンマ線で光核反応が発生。対生成の~1 桁ほど小さい断面積。
- TGF のエネルギースペクトルは 10 MeV 以上まで伸びている。

ガンマ線残光: 中性子の解釈 (特徴2: 時間変化)

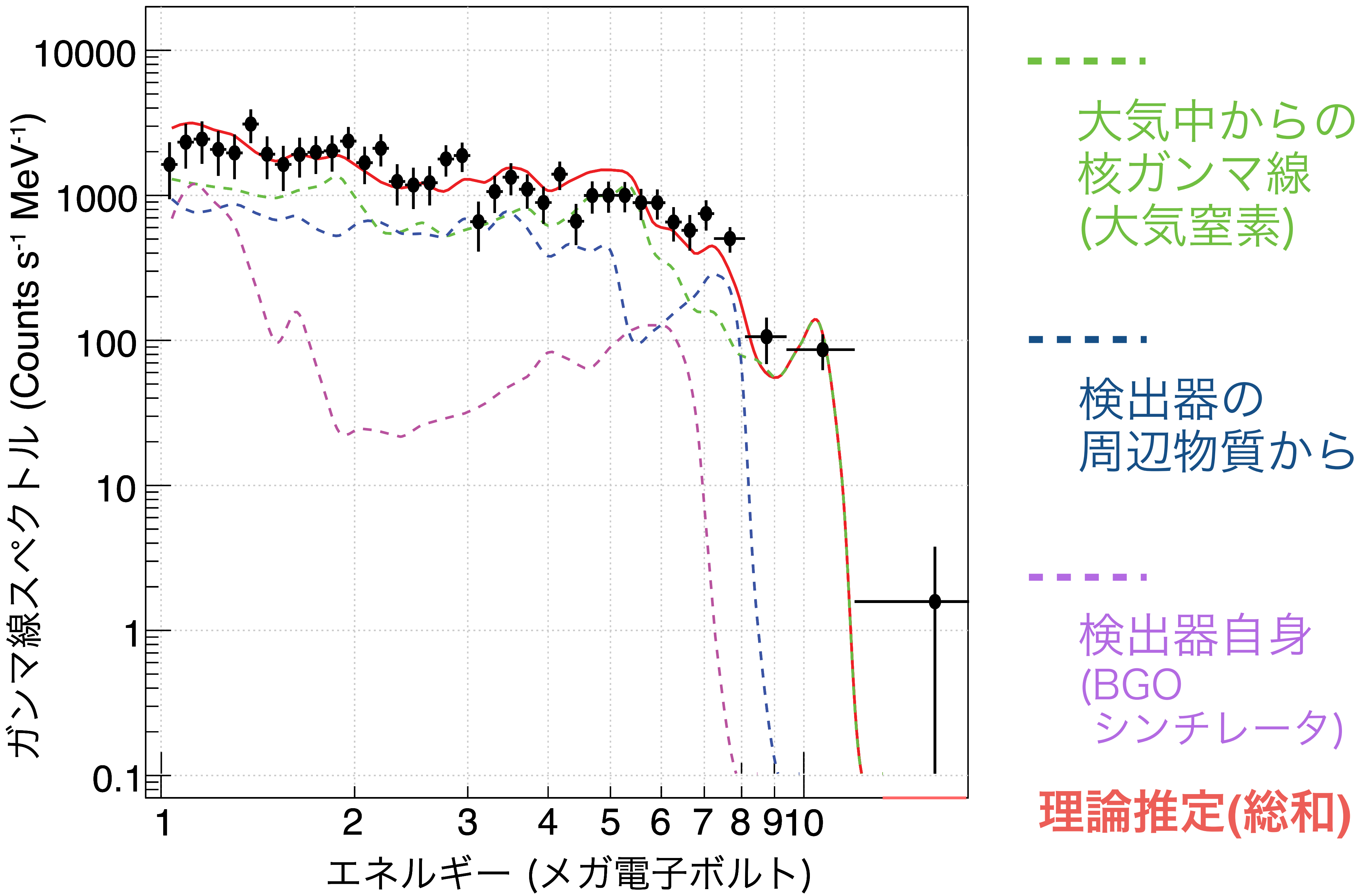


観測されたショートバーストの強度変化をバッチリ説明できる。

ガンマ線残光: 中性子の解釈 (特徴3:スペクトル)

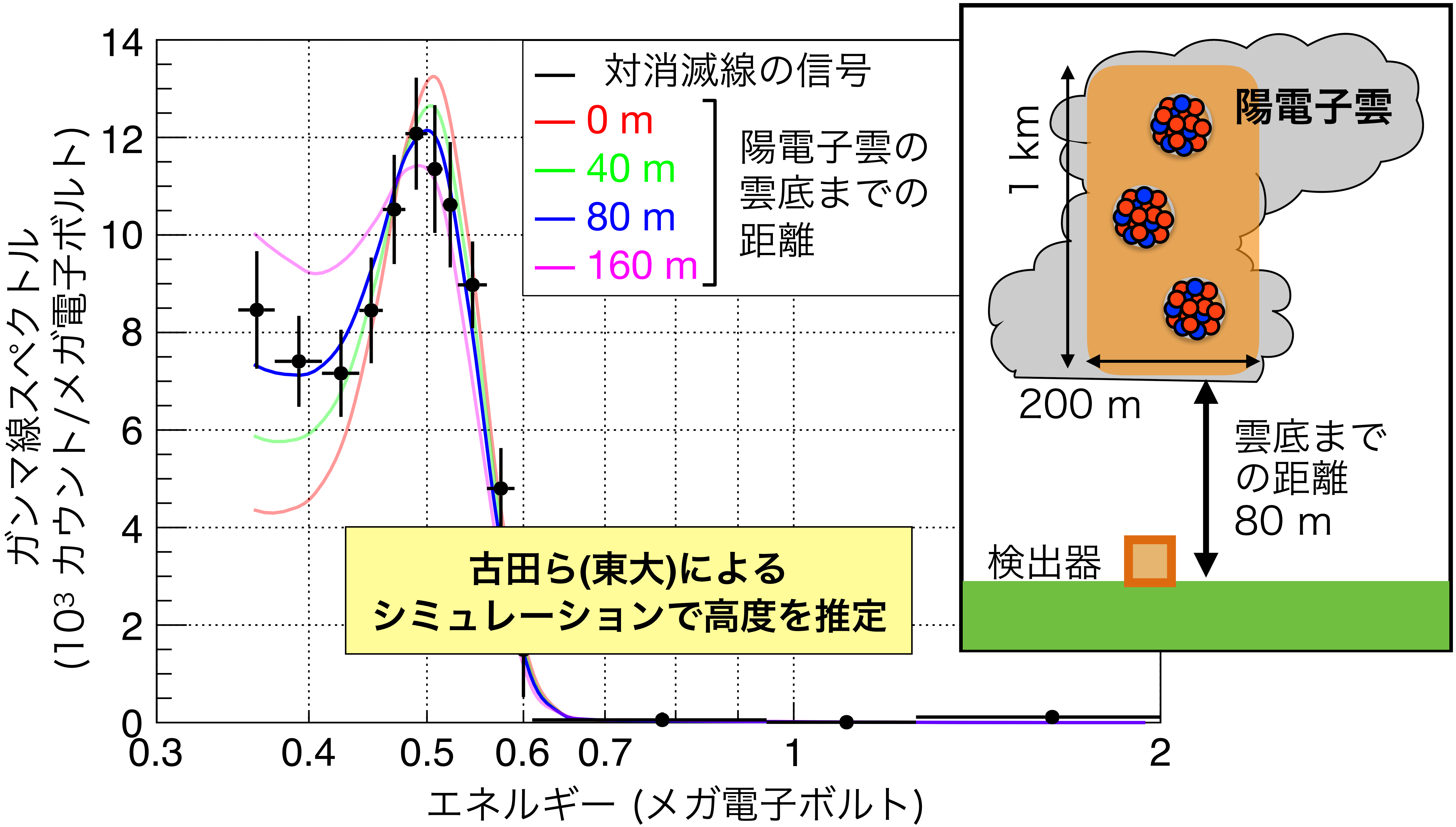


ガンマ線残光: 中性子の解釈 (特徴3:スペクトル)



物理シミュレーション(モンテカルロ)により、雷直後のバースト放射のガンマ線スペクトルを、中性子を吸収した大気窒素からの核ガンマ線や、検出器の周辺物質からの放射で説明できた。

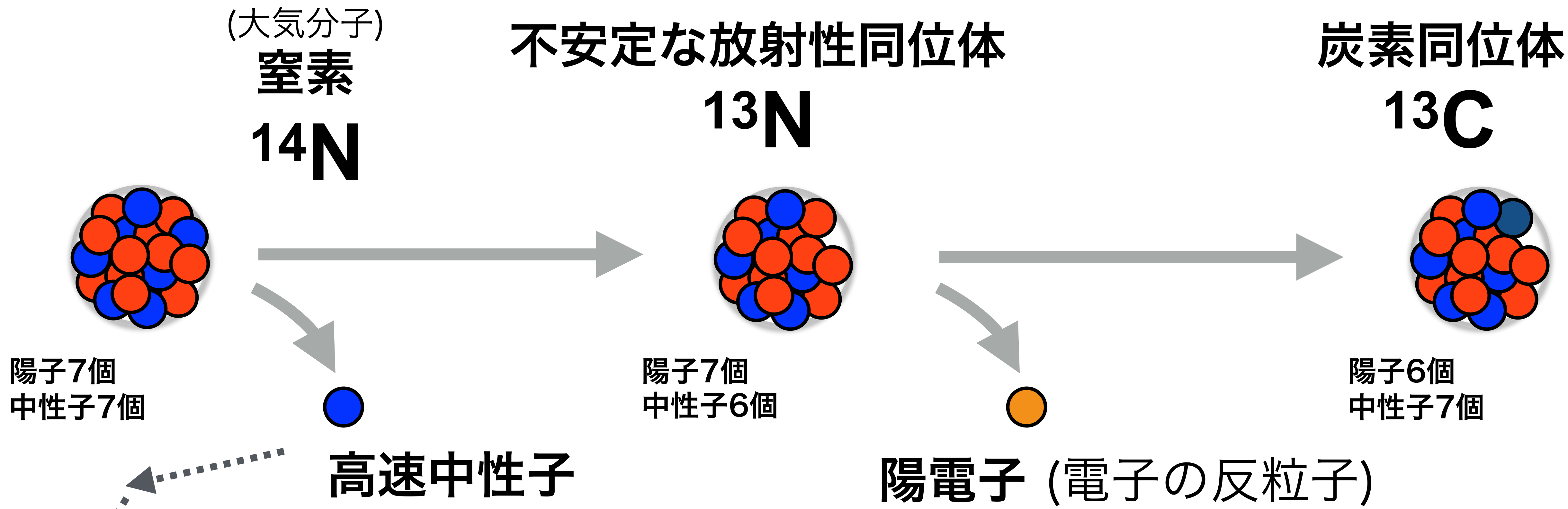
対消滅線の強度から光核反応の量を推定

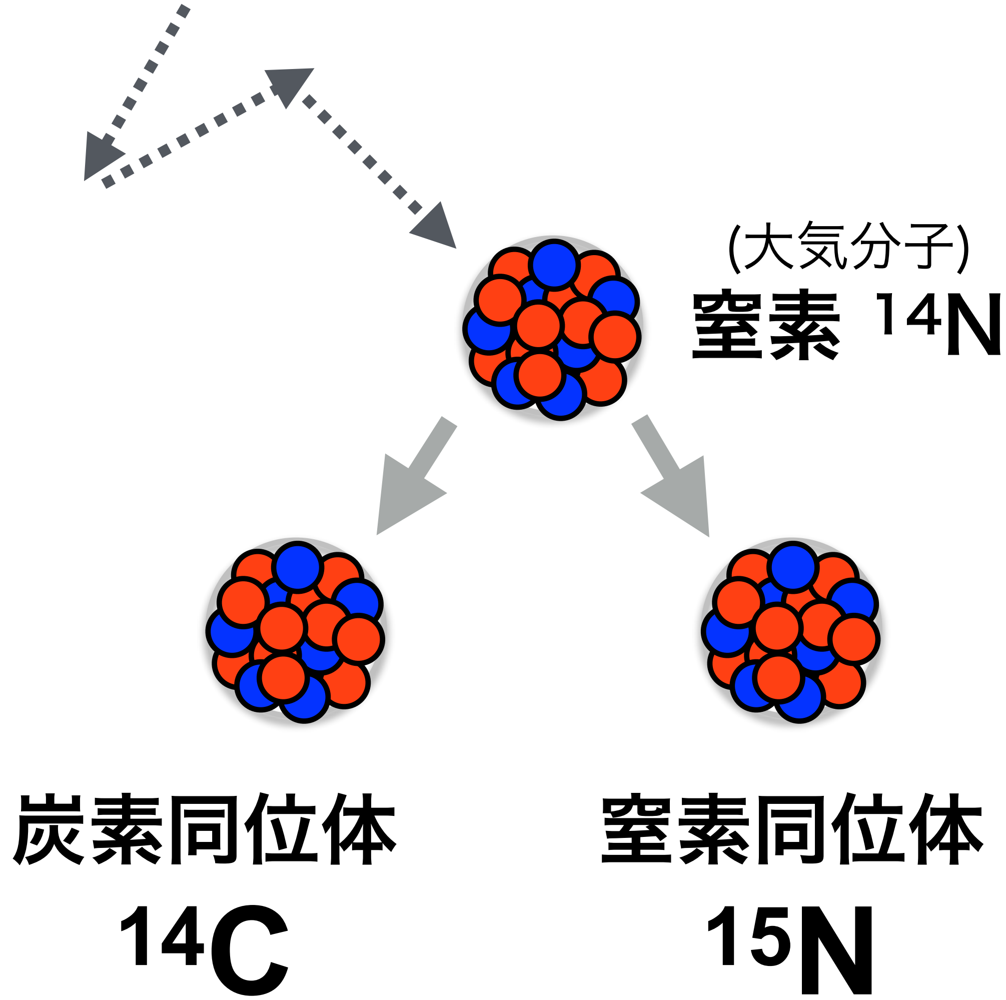


検出された陽電子の数やスペクトルから雲のサイズを想定すると、
光核反応は１発の雷で4×10^{12} 個発生。 →理論予想の10^{11-15} 個に合致。

これらの現象は雷による光核反応として
全て統一的に解釈できることを解明した

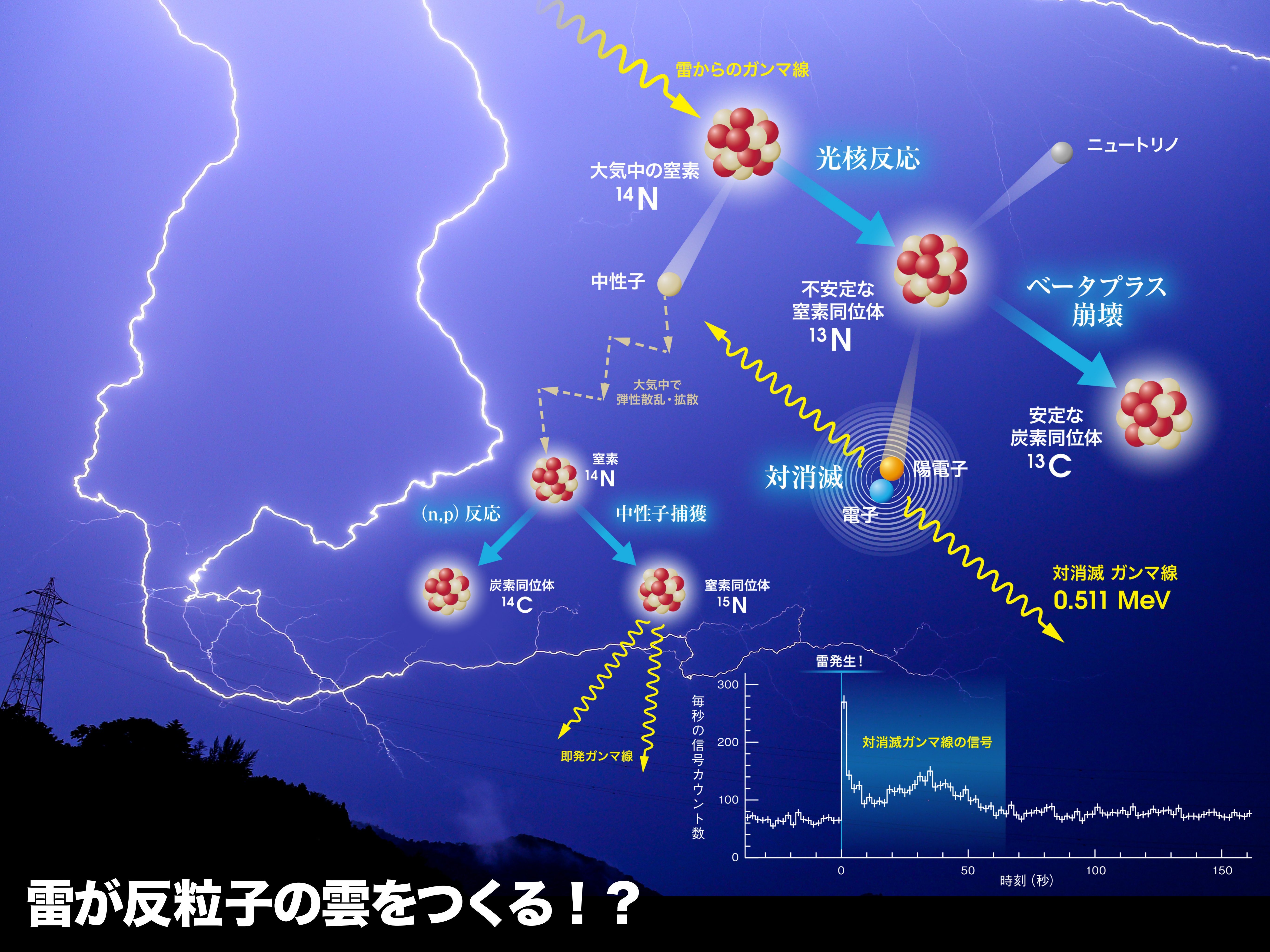
光核反応による窒素・炭素同位体の生成





- 光核反応によって窒素・炭素同位体 ^{13}N、^{15}N、^{13}C、^{14}Cが作られる。
- ^{14}C (半減期5,730年) は年代測定法で用いられる重要な同位体。

既知の生成経路と比較して
雷はどの程度寄与するのか？


雷からのガンマ線
大気中の窒素
14N
光核反応
ニュートリノ
中性子
不安定な
窒素同位体
13N
ベータプラス
崩壊
大気中で
弾性散乱・拡散
安定な
炭素同位体
13C
窒素
14N
対消滅
陽電子
電子
(n,p) 反応
中性子捕獲
炭素同位体
14C
窒素同位体
15N
対消滅 ガンマ線
0.511 MeV
即発ガンマ線
雷発生！
毎秒の信号カウント数
対消滅ガンマ線の信号
300
200
100
0
0
50
100
150
時刻（秒）
雷が反粒子の雲をつくる！？

nature INDEX

Home | News | Current Index | Annual tables

Top articles of Kyoto University
by Altmetric score in 2017

Home / Institution outputs / Kyoto University

Get more from the Nature **Index**, on each page take a tour of the available features.

Kyoto University
京都大学

Japan

Top articles by Altmetric score in current window

中性子星連星の
重力波の多波長観測
著者 (# of authors) 3529人

1540 **Multi-messenger Observations of a Binary Neutr**
Merger
The Astrophysical Journal Letters
2017-10-16

1123 **Photonuclear reactions triggered by lightning discharge**
Nature
2017-11-23

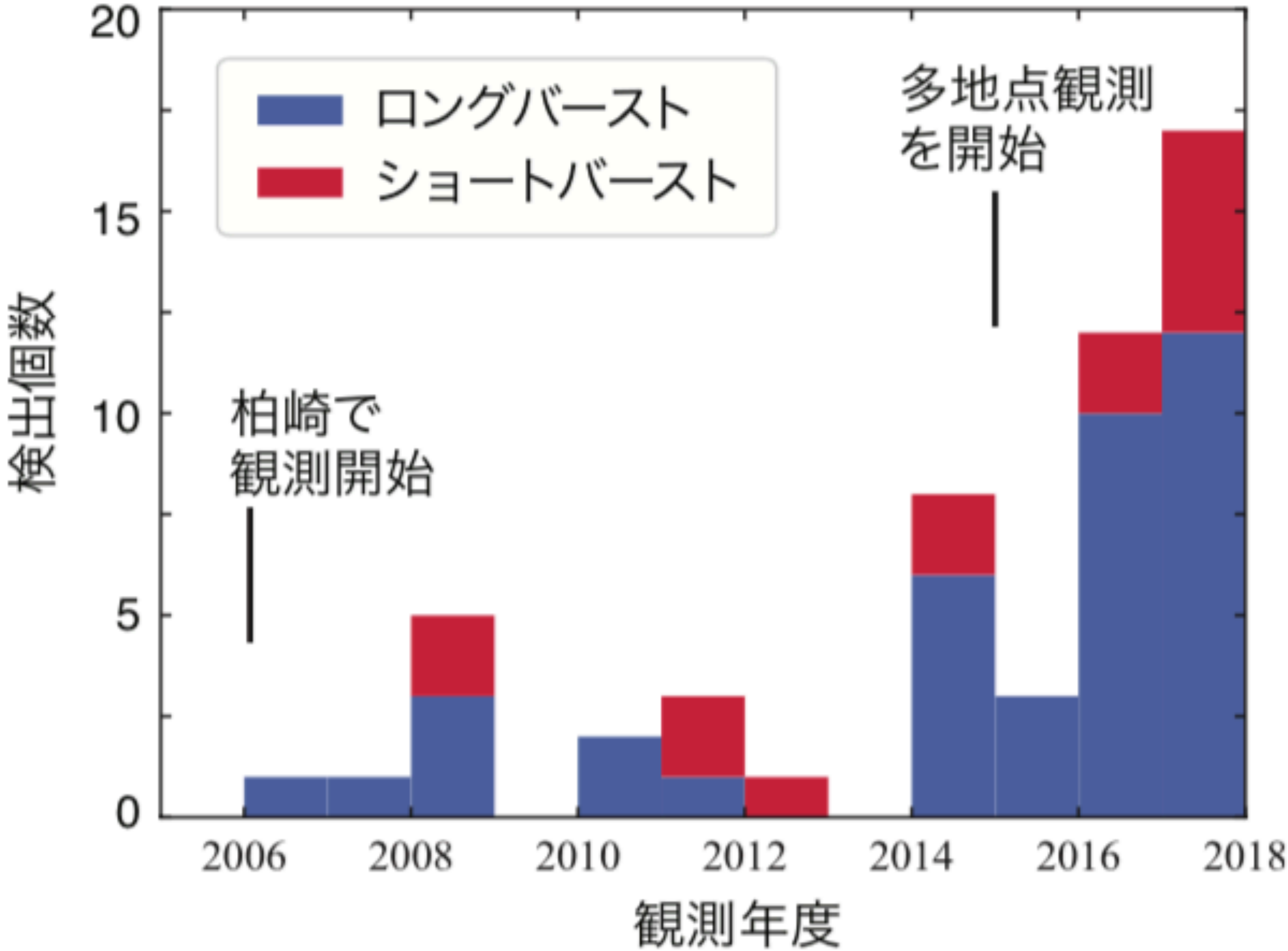
私達の結果
著者 12人

688 **Human iPS cell-derived dopaminergic neurons function in a primate Parkinson's disease model**
Nature
2017-08-31

511 **Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC**
Nature Physics
2017-08-14

LHC加速器での
ATLAS検出器
著者 2847人

地上観測での放射線イベント検出数



雷雲と雷が起こす
高エネルギー大気物理現象

1. 雷のナゾと宇宙線: 高エネルギー大気物理学

2. 雷雲からのガンマ線を探して

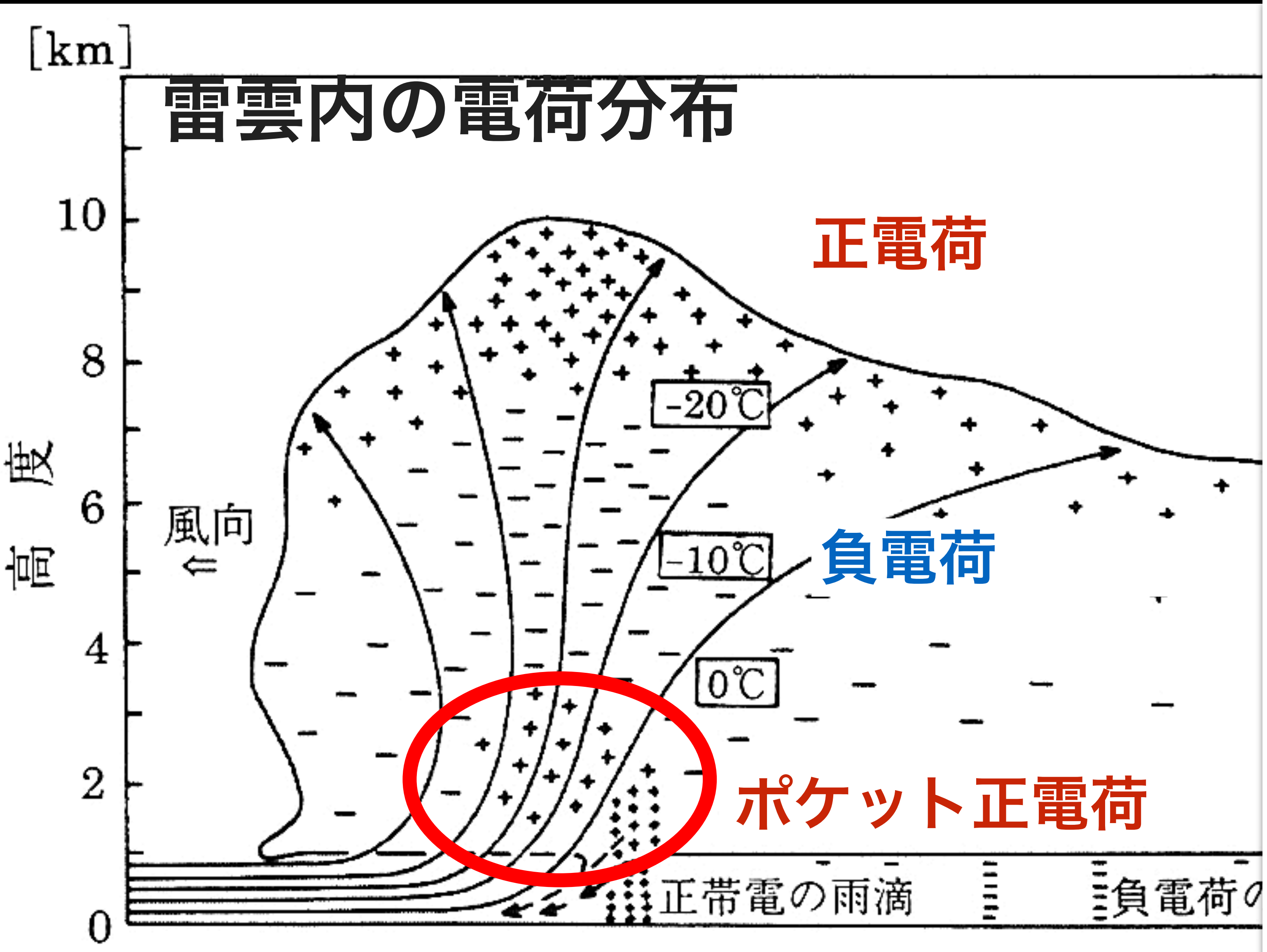
3. カミナリが反物質の雲を作る

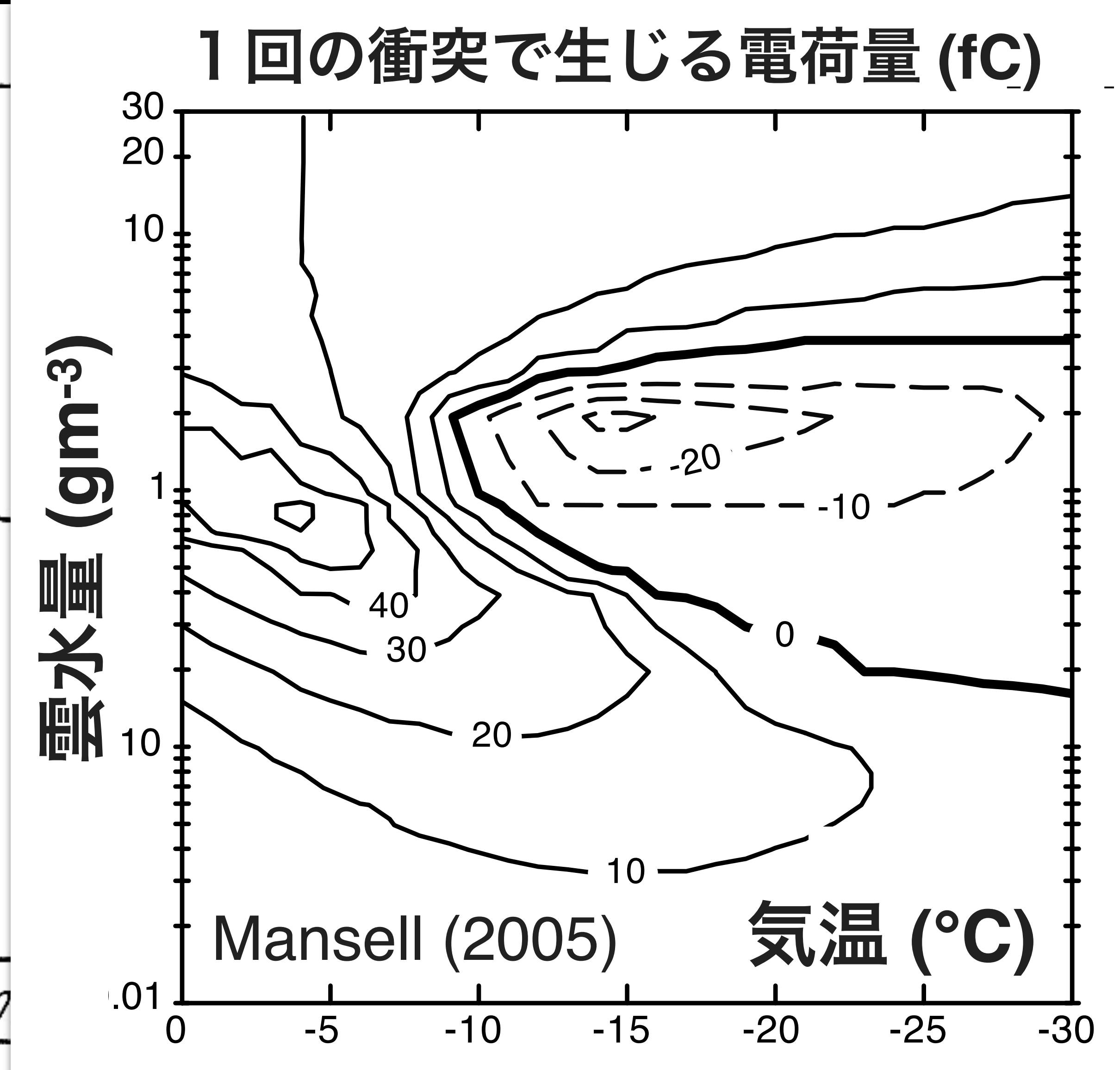
4. オープンサイエンスで新しい研究をつくる

次はどんな発見に
期待できるか？

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)



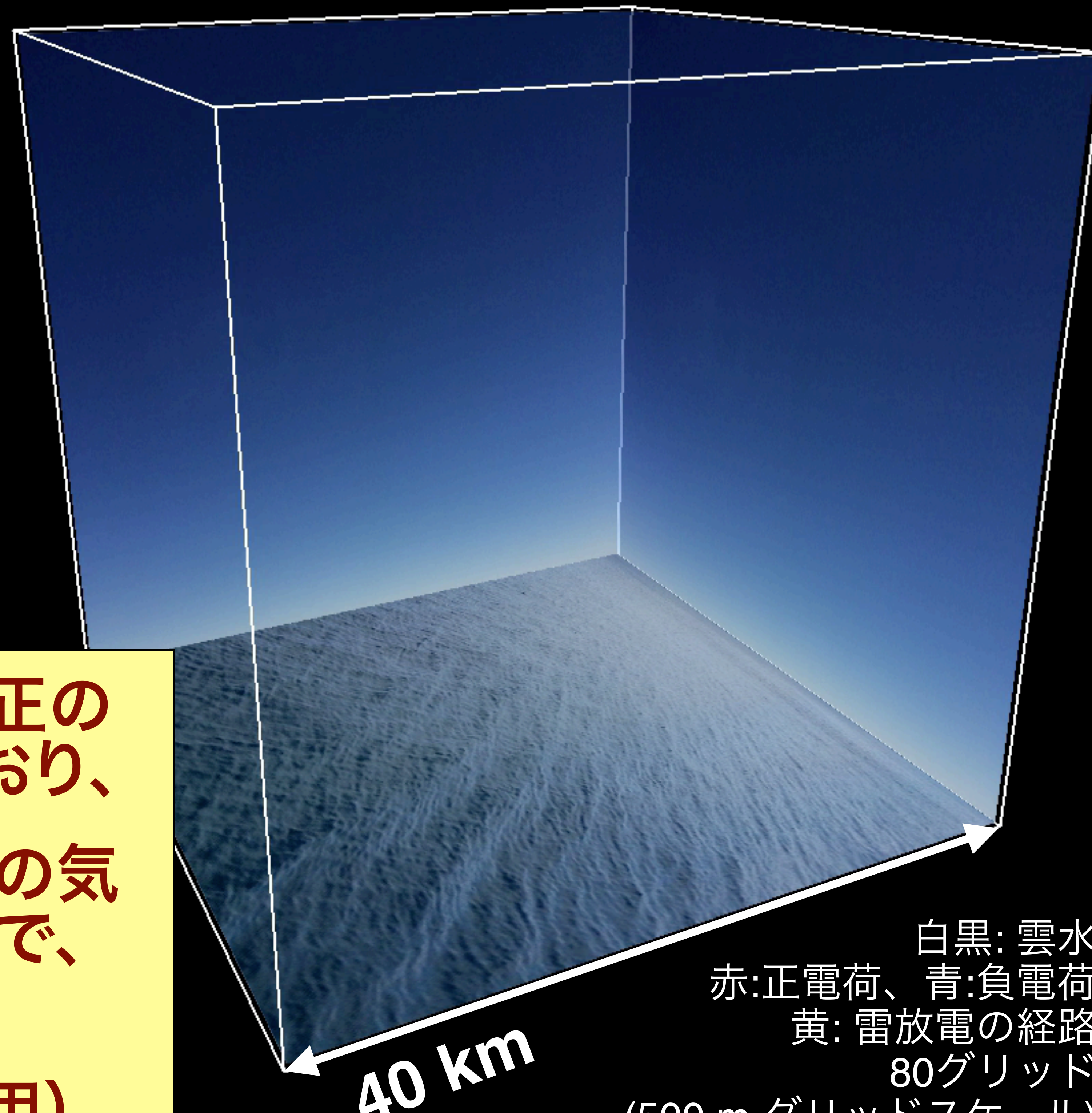


理研 AICS で開発中の大型計算機向け気象・気候ライブラリ SCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment) **に雷モデルを実装する、理研 AICS 佐藤陽祐さんとの共同研究へ**

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

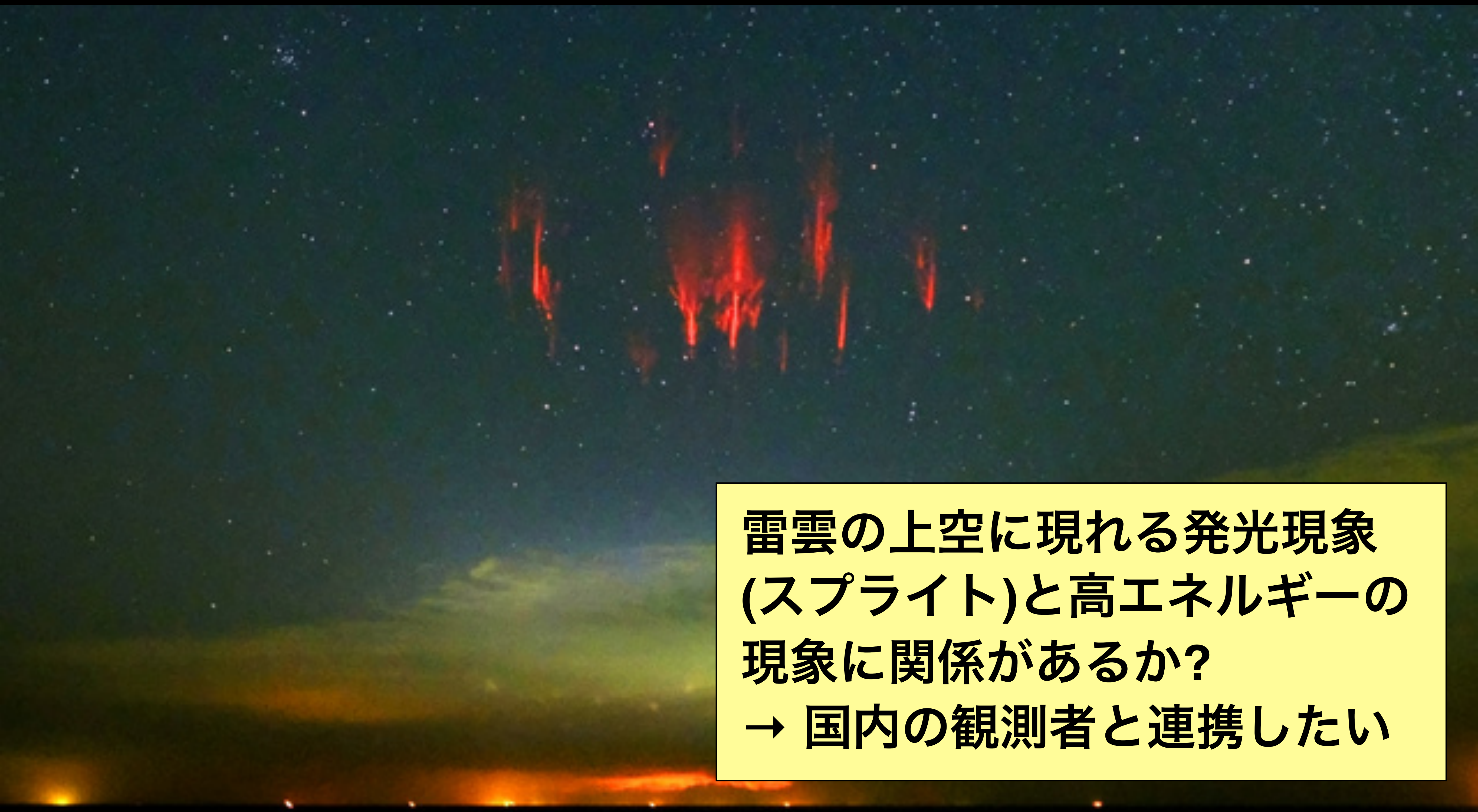
理想化実験によって、正負正の鉛直電荷構造を再現できており、

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）

雷雲の様々な謎：上空で起きる発光現象

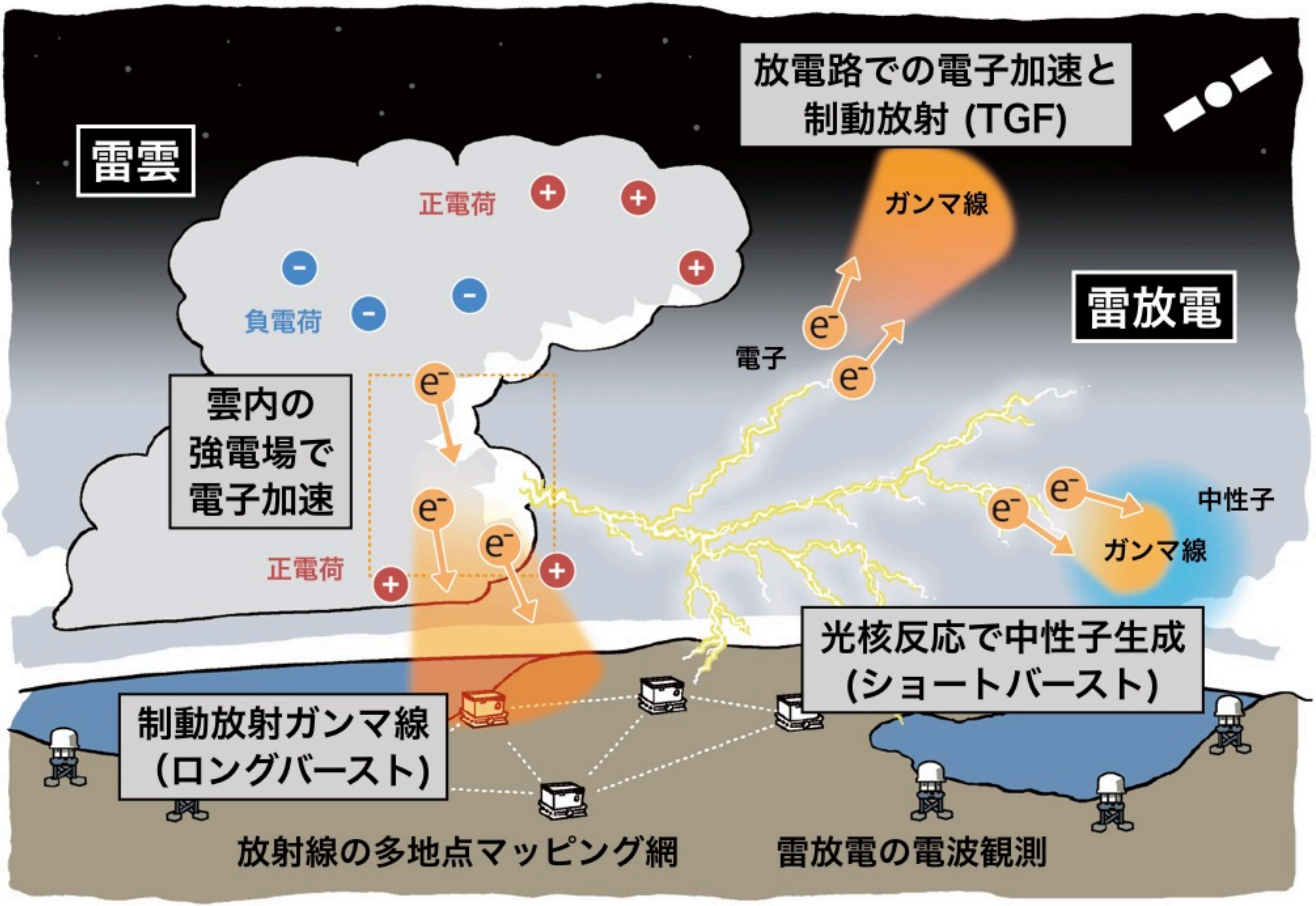
スプライト、エルブス、ブルージェット…
大航海時代に船乗りがみた不思議な発光を科学観測が捉えている



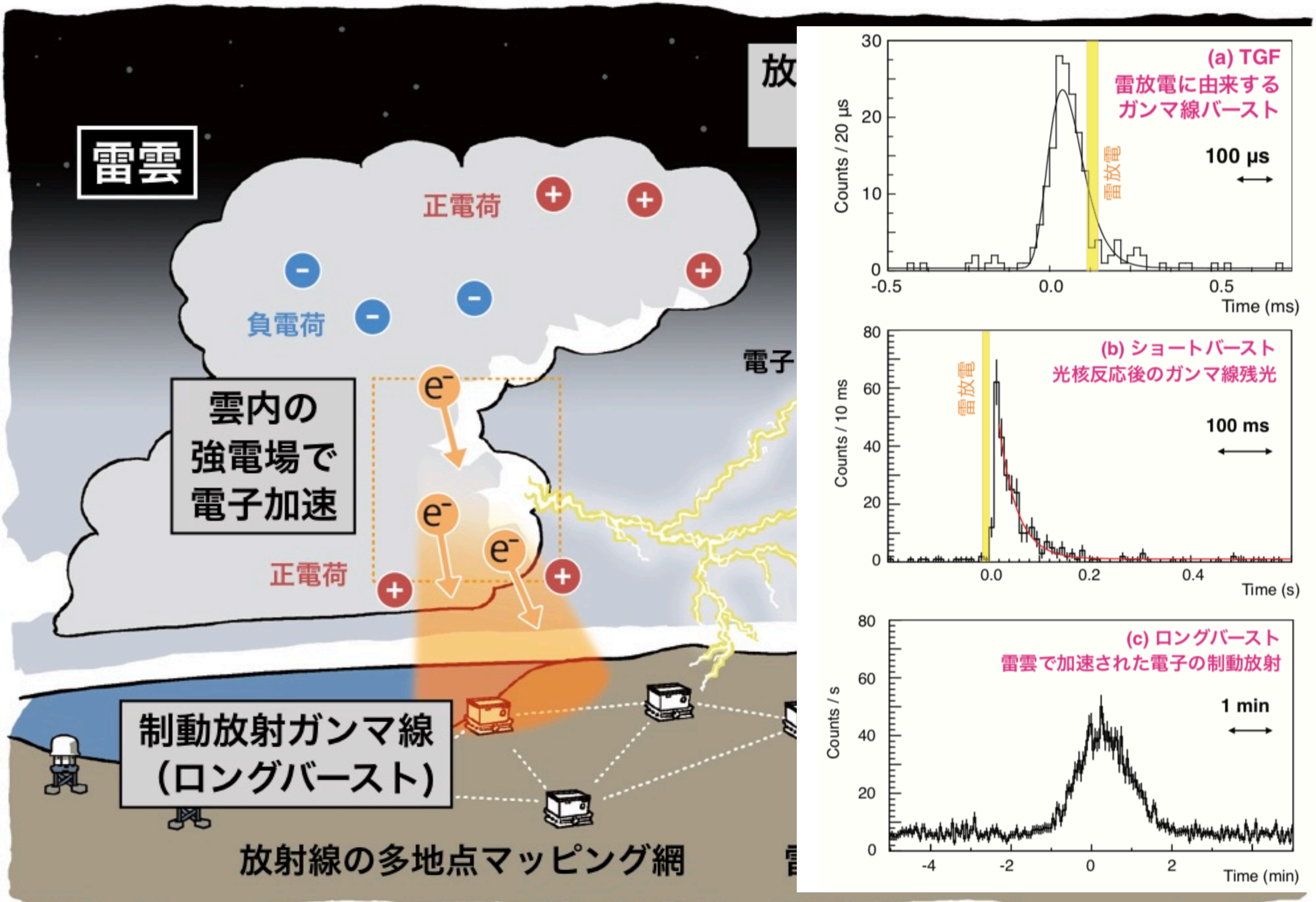
雷雲の上空に現れる発光現象(スプライト)と高エネルギーの現象に関係があるか?
→ 国内の観測者と連携したい

太平洋上の積乱雲の上に現れた赤い光「スプライト」武田康男さん撮影 [朝日新聞 2016年12月2日]

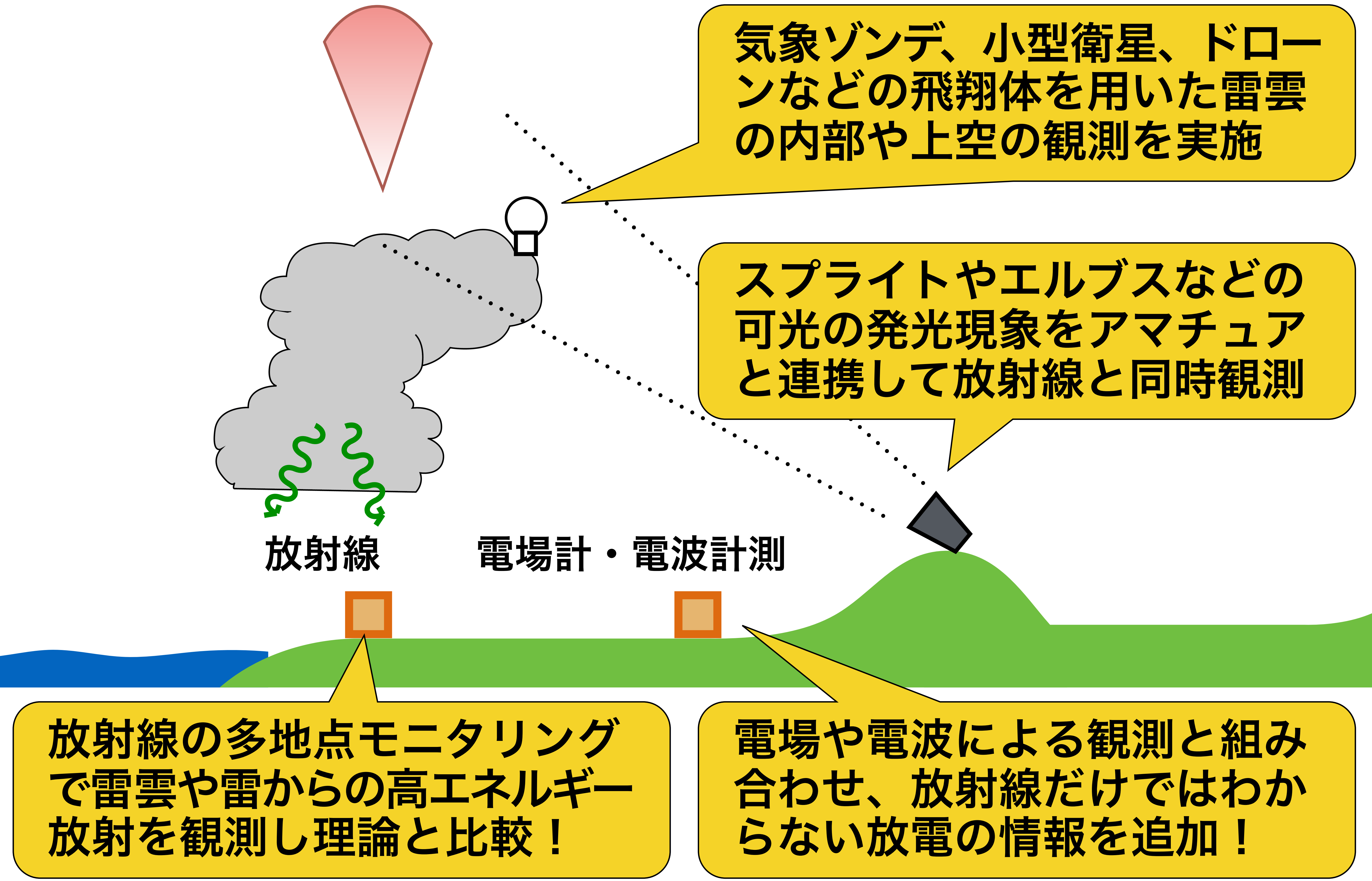
雷雲と雷放電の高エネルギー大気物理学の開拓



雷雲と雷放電の高エネルギー大気物理学の開拓



謎に満ちた冬季雷雲を狙う新しい観測体制？

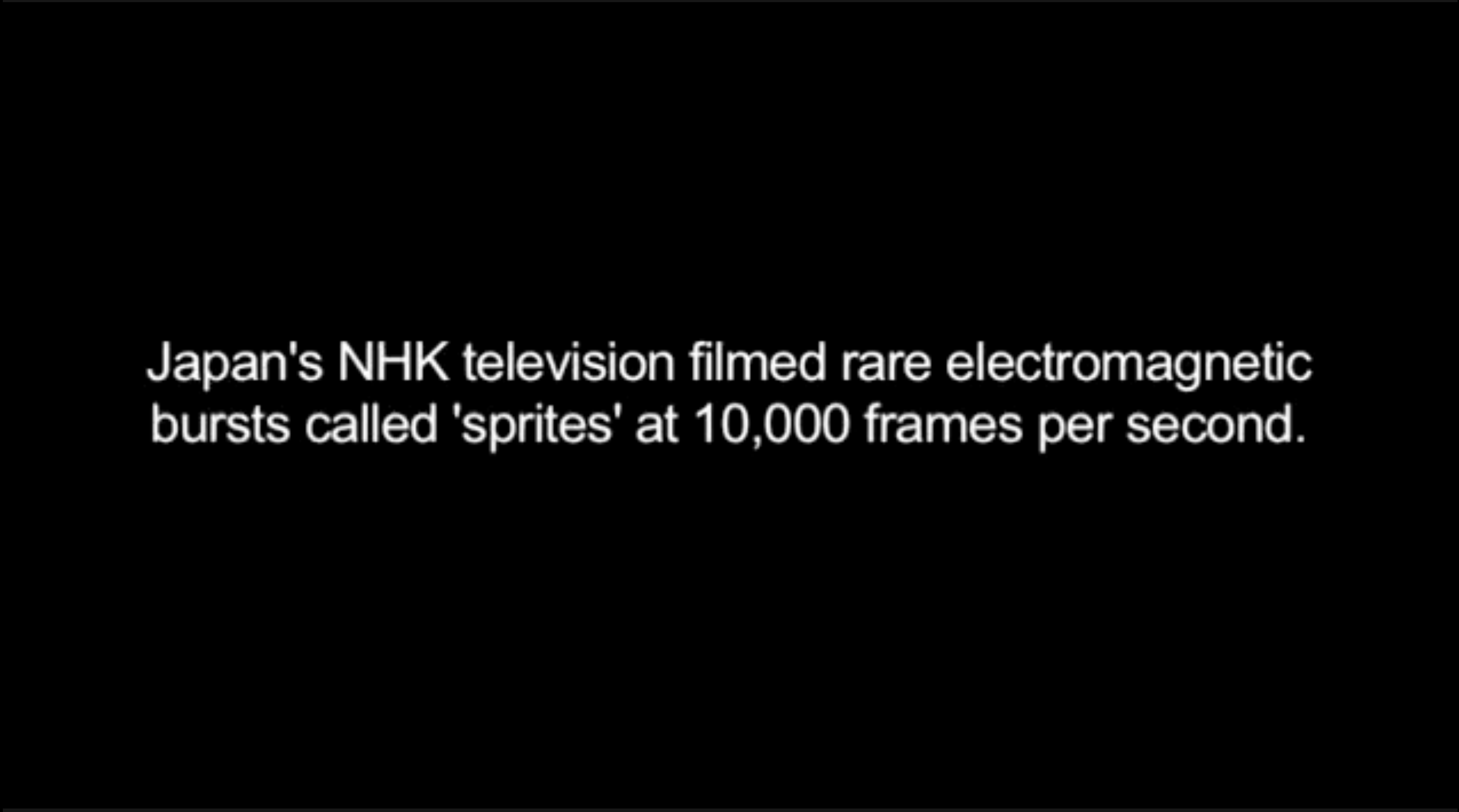


金沢市街地に観測網を市民連携で作りたい

金沢市街地に観測網を市民連携で作りたい

雷雲の様々な謎：上空で起きる発光現象

スプライト、エルブス、ブルージェット…
大航海時代に船乗りがみた不思議な発光を科学観測が捉えている



https://www.youtube.com/watch?v=rn0My2ivh2U

市民と連携したオープンサイエンス

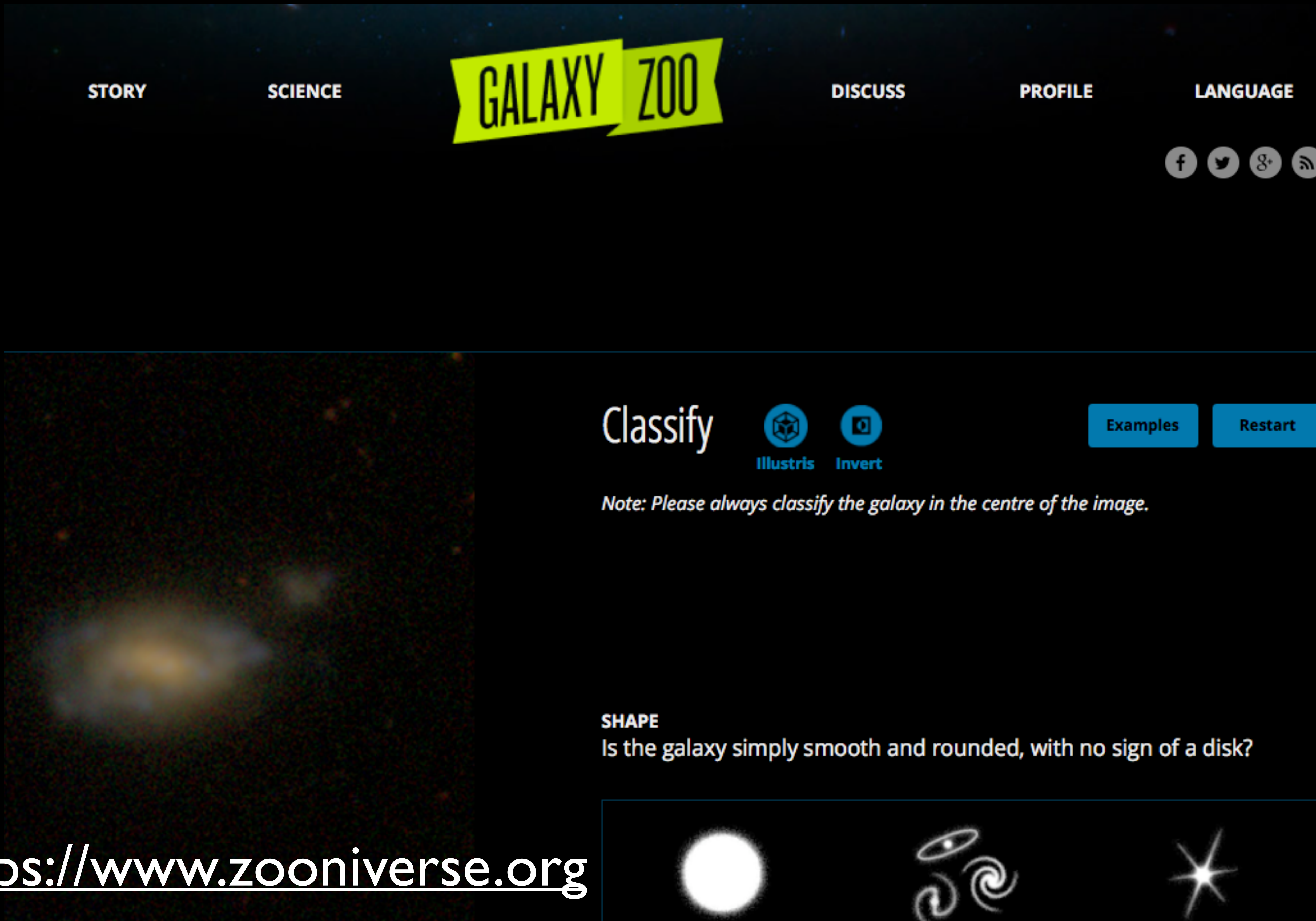
一般市民と連携したオープンサイエンスの試みをさらに拡大し、
多地点での放射線計測やデータの解析を市民科学者と協力して行う。

オープンサイエンスの
ワークショップを毎年開催

http://kyoto-open.science

クラウドソーシングで市民と歩む Zooniverse

例) 銀河の画像を分類する Galaxy Zoo プロジェクト

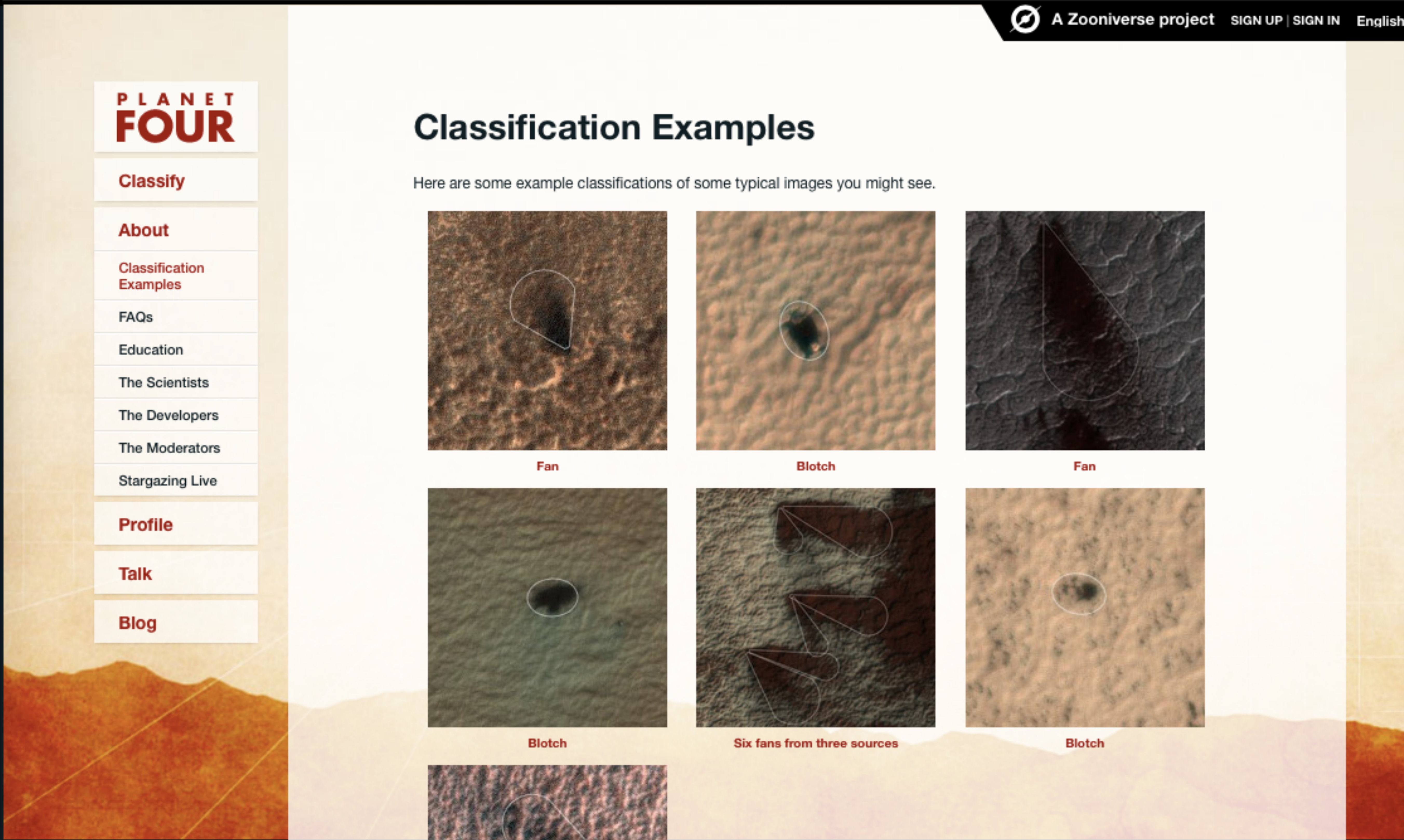


https://www.zooniverse.org

クラウドソーシングで市民と歩む Zooniverse

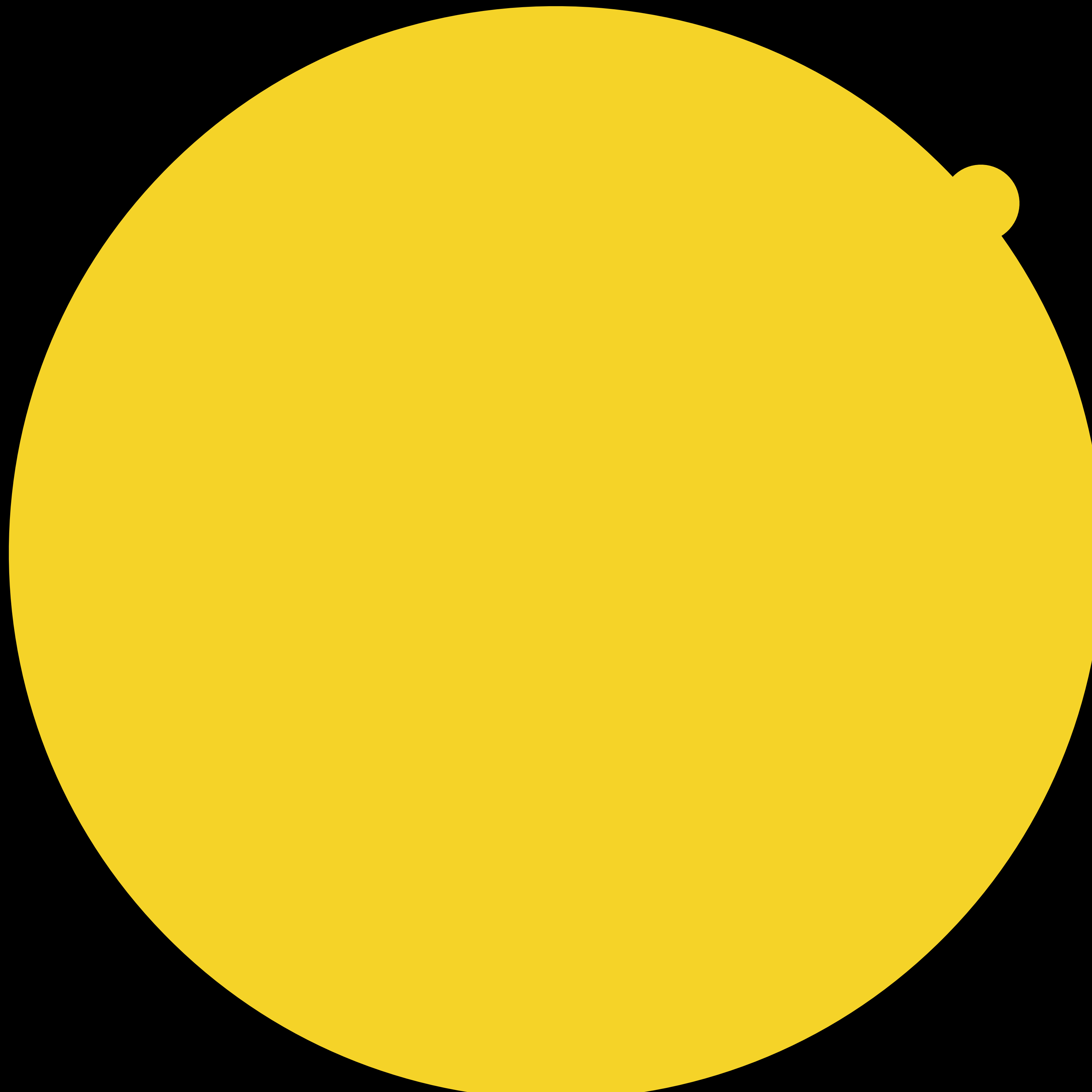
例) 火星の表面の模様を分類する PLANET FOUR プロジェクト

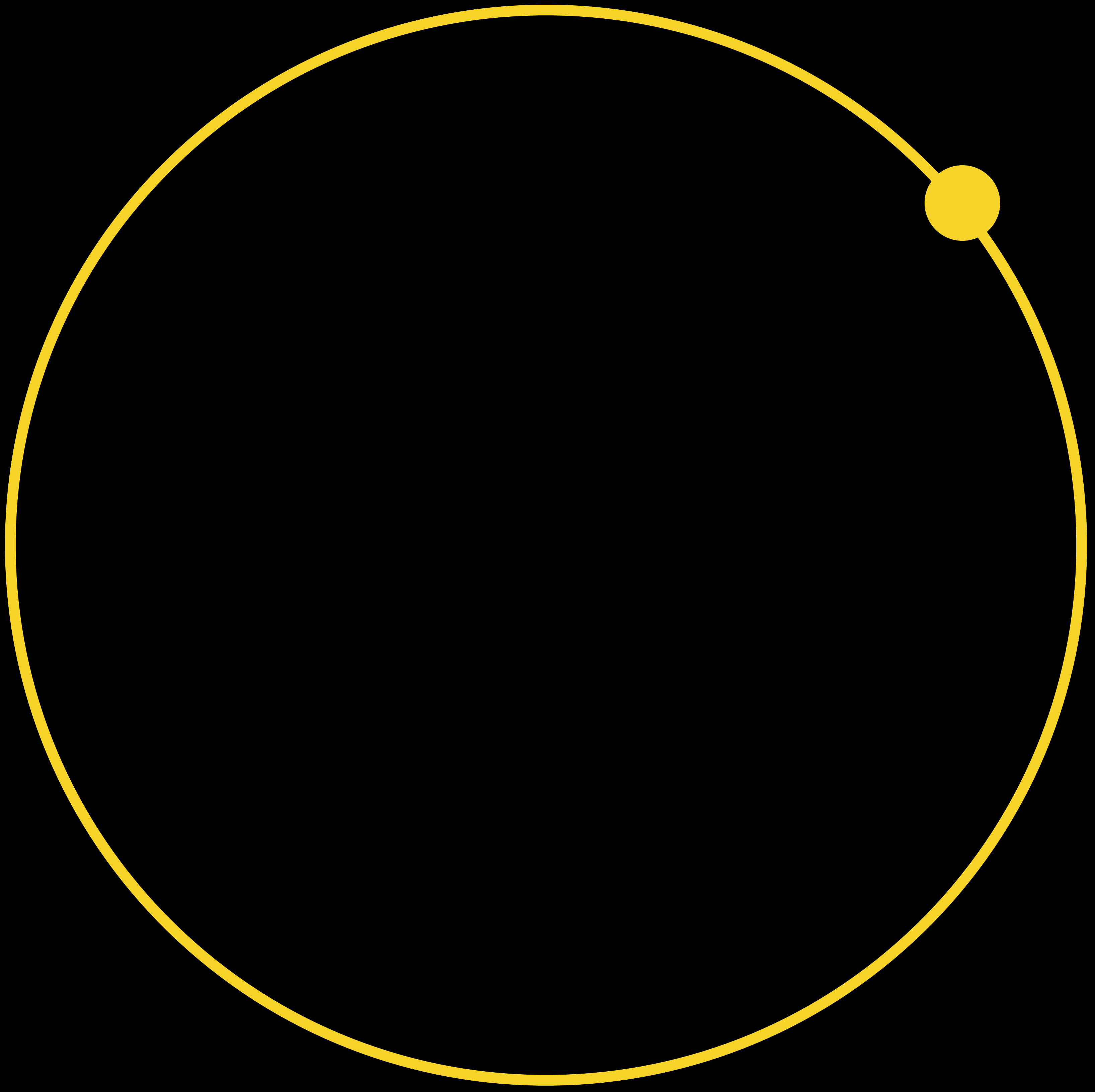
トニー・フェダー「市民参加型, クラウドソーシング的研究が大成果」パリティ2016年9月号



オープンサイエンス

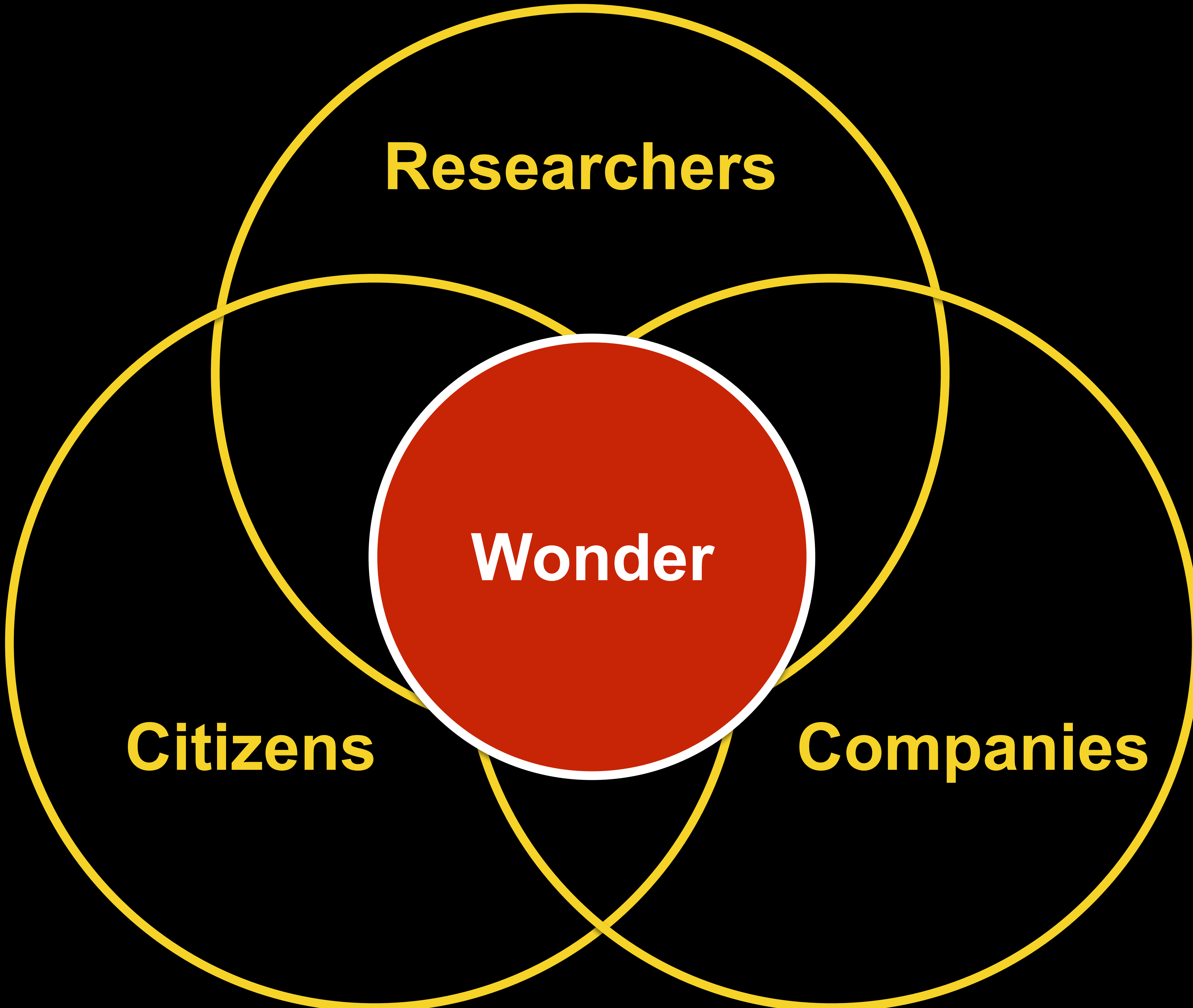
“Open Science”





異分野融合

"Collaboration"


Researchers
Wonder
Citizens
Companies

“Known Knowns, Known unknowns, and Unknown unknowns” (by D. Rumsfeld)

U.S. Department of Defence news briefing, February 12, 2002

我々はどんな時代に
生きているか？

SpaceX-11 ロケットの打ち上げ (2017年6月3日)

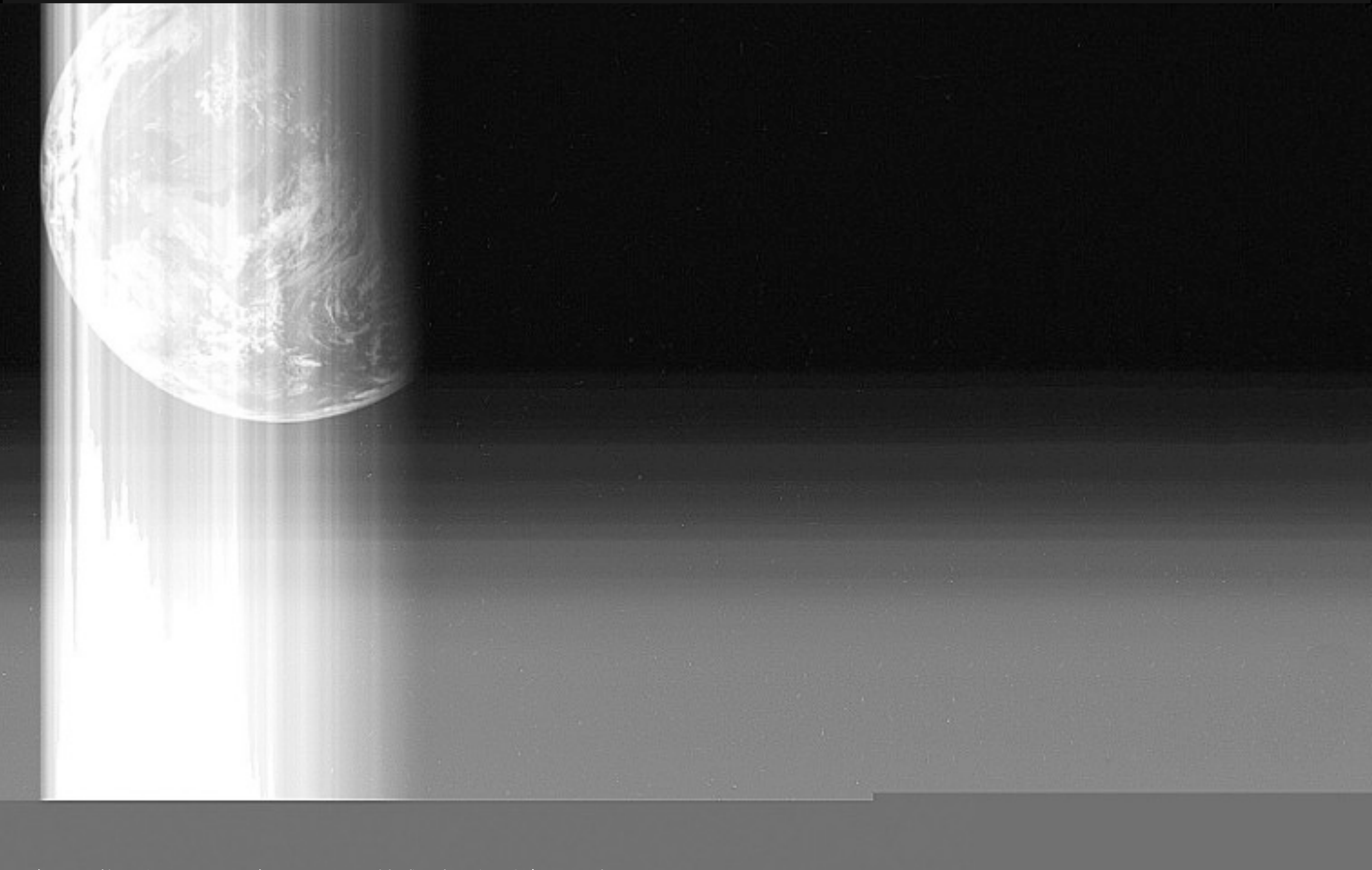
SpaceX-11 ロケットの打ち上げ (2017年6月3日)

SpaceX “CRS-11 Hosted Webcast” YouTube
https://www.youtube.com/watch?v=JuZBOUMsYws

小惑星探査機「はやぶさ」の帰還

NASA Team Captures Hayabusa Spacecraft Reentry
https://www.youtube.com/watch?v=gfYA4f-AIL0 (YouTube)

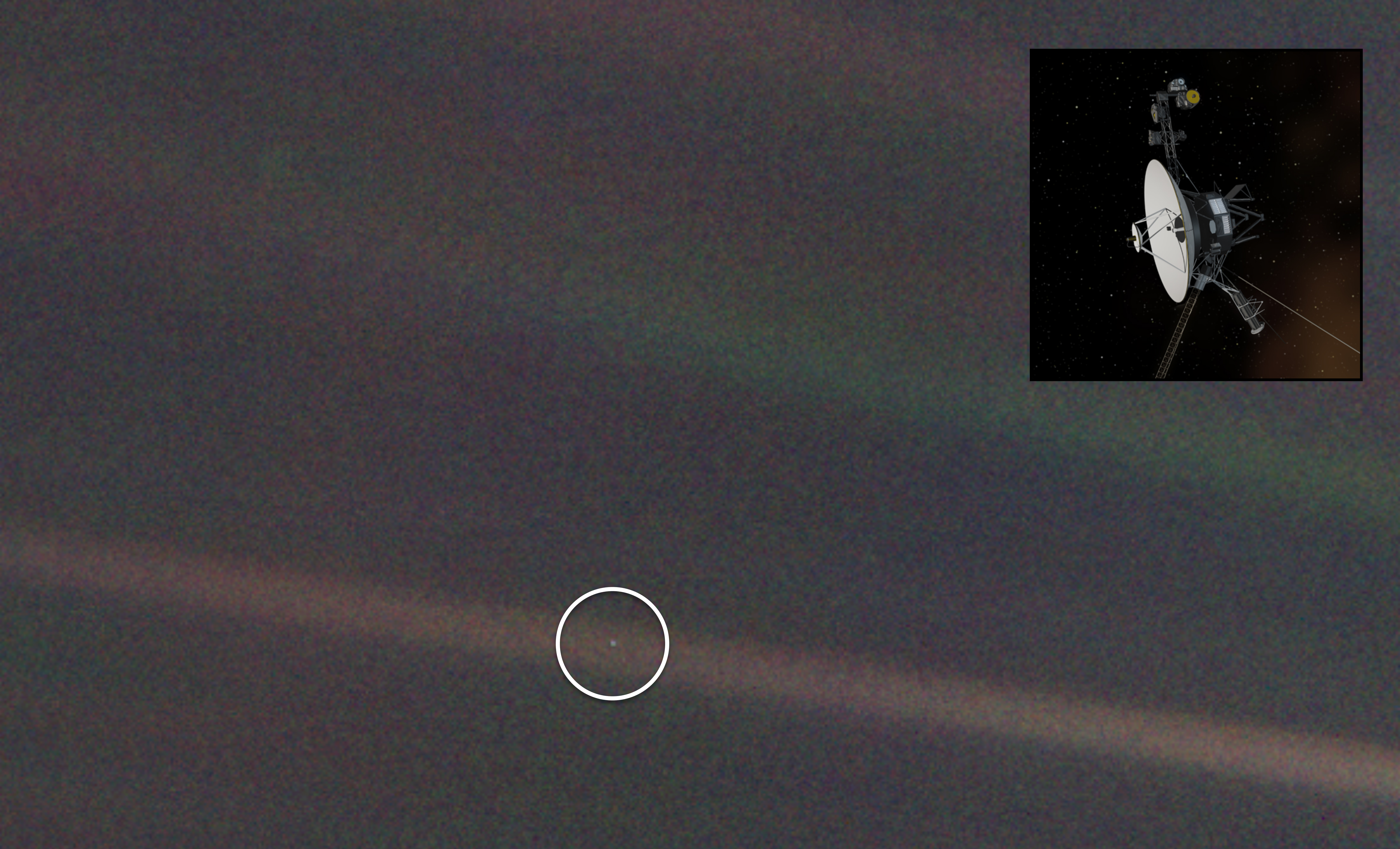
「はやぶさ」最後の写真



7年もの旅のあと、2010年6月13日に地球を撮影し大気圏に突入した。
地上に送信中に通信途絶したため、画像が途中から欠けている。

ペイル・ブルー・ドット (the Pale Blue Dot)

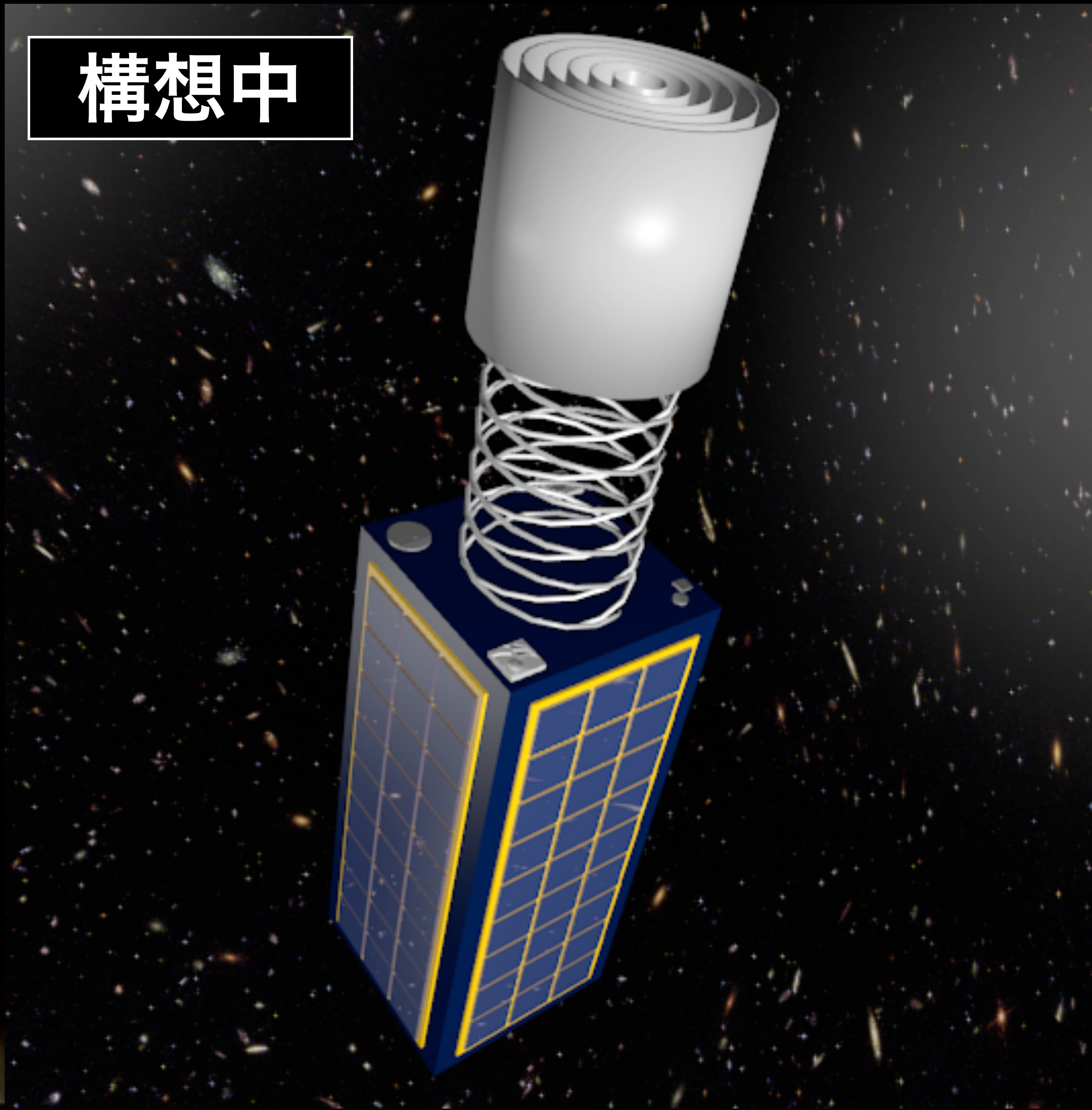
ボイジャー1号が1990年に約60億キロの彼方から撮影した地球の姿



(C) NASA/JPL http://solarsystem.nasa.gov/galleries/pale-blue-dot

民間の活力を活かした宇宙探査の時代へ

SpaceX Falcon 9, 2016.5.6 (C) C. Klassic



- 国家規模の大型衛星に対し、民間の小型衛星が活躍
- 宇宙の渚での天体観測、太陽系探査の新時代へ
- 雷雲と雷の観測で培った技術で再び宇宙へ

どうぞよろしく @teru_enoto

まとめ

- 雷雲と雷の高エネルギー大気物理学という分野が現れた。高エネルギー放射線の観測技術が鍵！
- 雷雲の中では宇宙線(?)から飛び出した電子が増幅・加速されガンマ線が地上に放射される。
- 雷は核反応を起こしうることを発見した。この反応で放射性同位体や陽電子、中性子が発生する。
- 市民と連携したオープンサイエンスで研究を進めたい。好奇心が人を結びつける鍵になる。