

雷が反物質の雲をつくる!?

雷の原子核反応を陽電子と中性子で解明

発表論文

論文タイトル: “Photonuclear reactions triggered by lightning discharge”

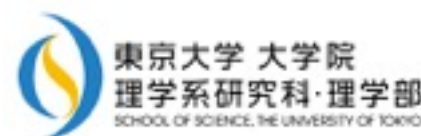
著者: T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda,
K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya

雑誌名: Nature, 2017年11月23日付 (印刷版)

DOI 番号: 10.1038/nature24630

所属機関

京都大学, 東京大学, 理化学研究所, 原子力機構, 北海道大学, 名古屋大学
雷雲プロジェクト (GROWTH Collaboration)



北海道大学

academist

2017年11月21日(火曜) 15:00 記者説明会

本研究の概要

- 冬季の日本海沿岸で発生した雷と同期して、強烈なガンマ線のバーストを観測した。さらに1分後、雷を起こした雷雲が上空を通過する際に、陽電子 (電子の反物質) からの対消滅ガンマ線を検出した。
- 雷に伴う強力なガンマ線が大気中の窒素と核反応を起こすことを、核反応の生成物である「中性子」と「窒素の放射性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。
- 本研究は学術系クラウドファンディングの支援も受け、一般市民も研究に参加するオープンサイエンスのアプローチを取り入れている。そのような研究から、世界最先端の成果を出せることを示した。

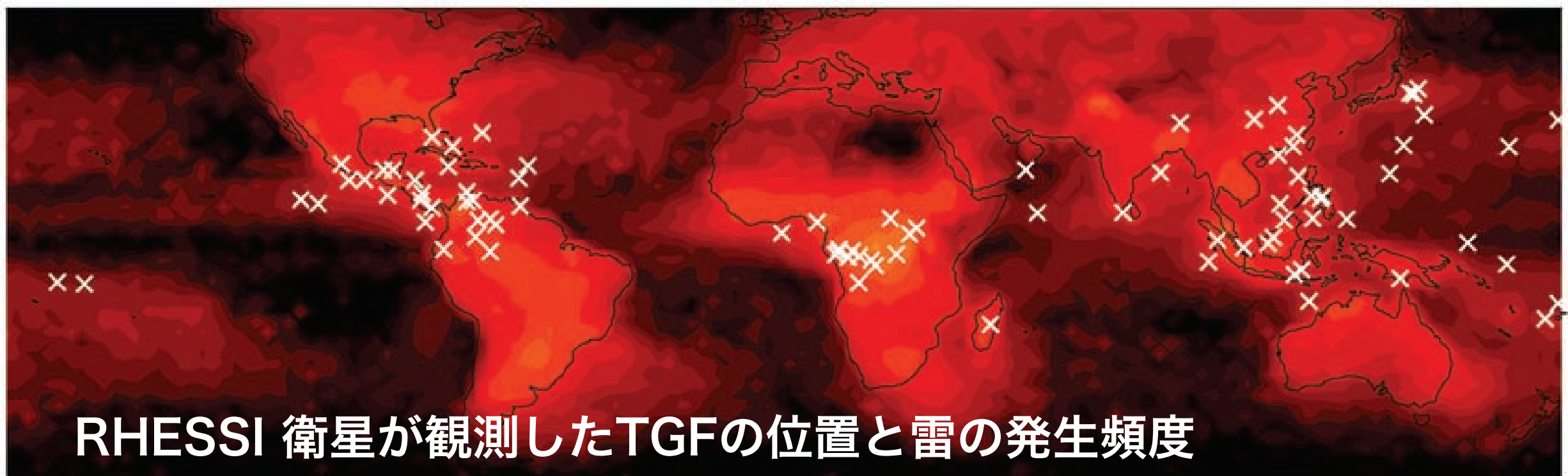


雷がもたらす高エネルギー放射線

高エネルギー大気物理学

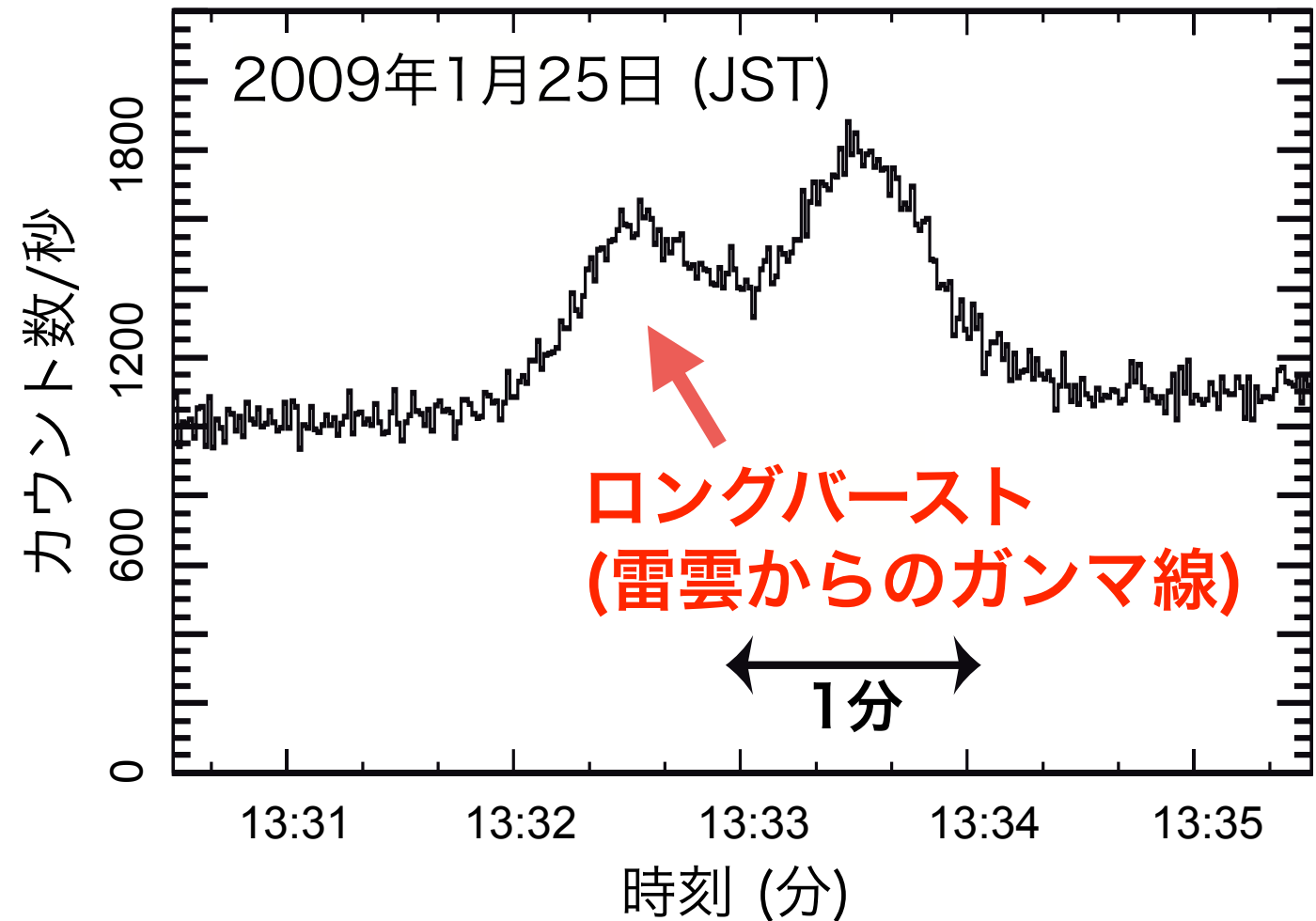
地球ガンマ線フラッシュ (Terrestrial Gamma-ray Flash)

- 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、10メガ電子ボルト以上の高いエネルギー。



日本での雷雲や雷の高エネルギー放射線の観測

柏崎での実験風景



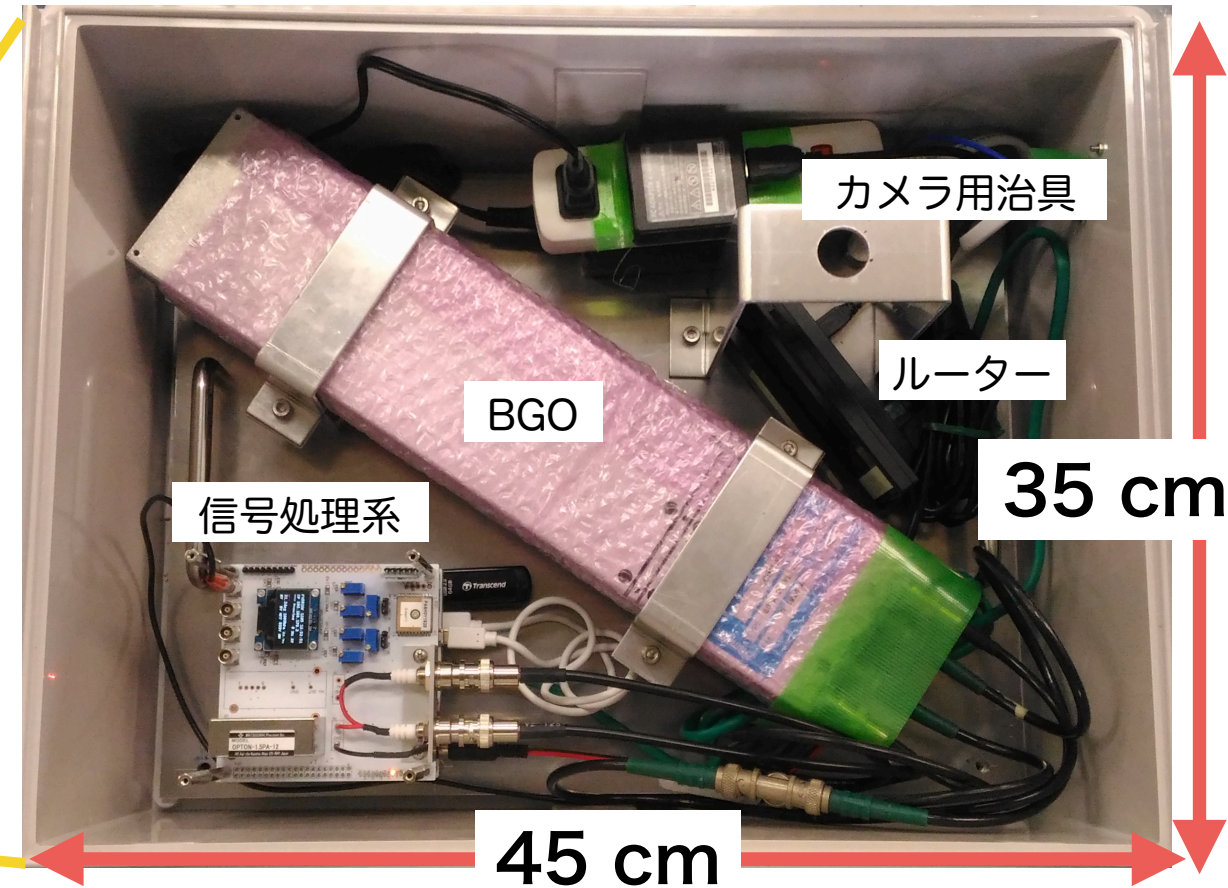
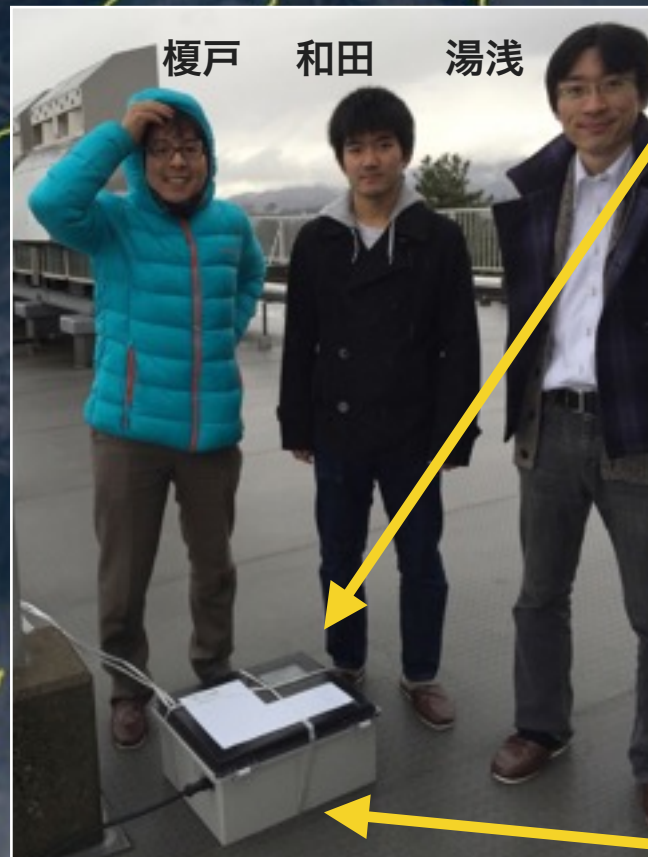
- 日本海沿岸の冬季雷雲は世界的に見ても強力な雷と雷雲の観測場所。
- 土屋、榎戸らを中心に新潟県柏崎で2006年より放射線測定器を設置・運用。
- 雷や雷雲そのものからのガンマ線を20例以上観測。(Tsuchiya, Enoto et al., PRL, 2007)

観測拠点を増やした次世代の多地点マッピング観測へ向け、
榎戸 (京大)・湯浅 (理研)らで小型検出器プロジェクトを始動！

日本海沿岸で多地点マッピング観測の実現へ

冬季雷雲の到来

冬型の気圧配置
2月6日 14:00 JST
(ひまわり8号)



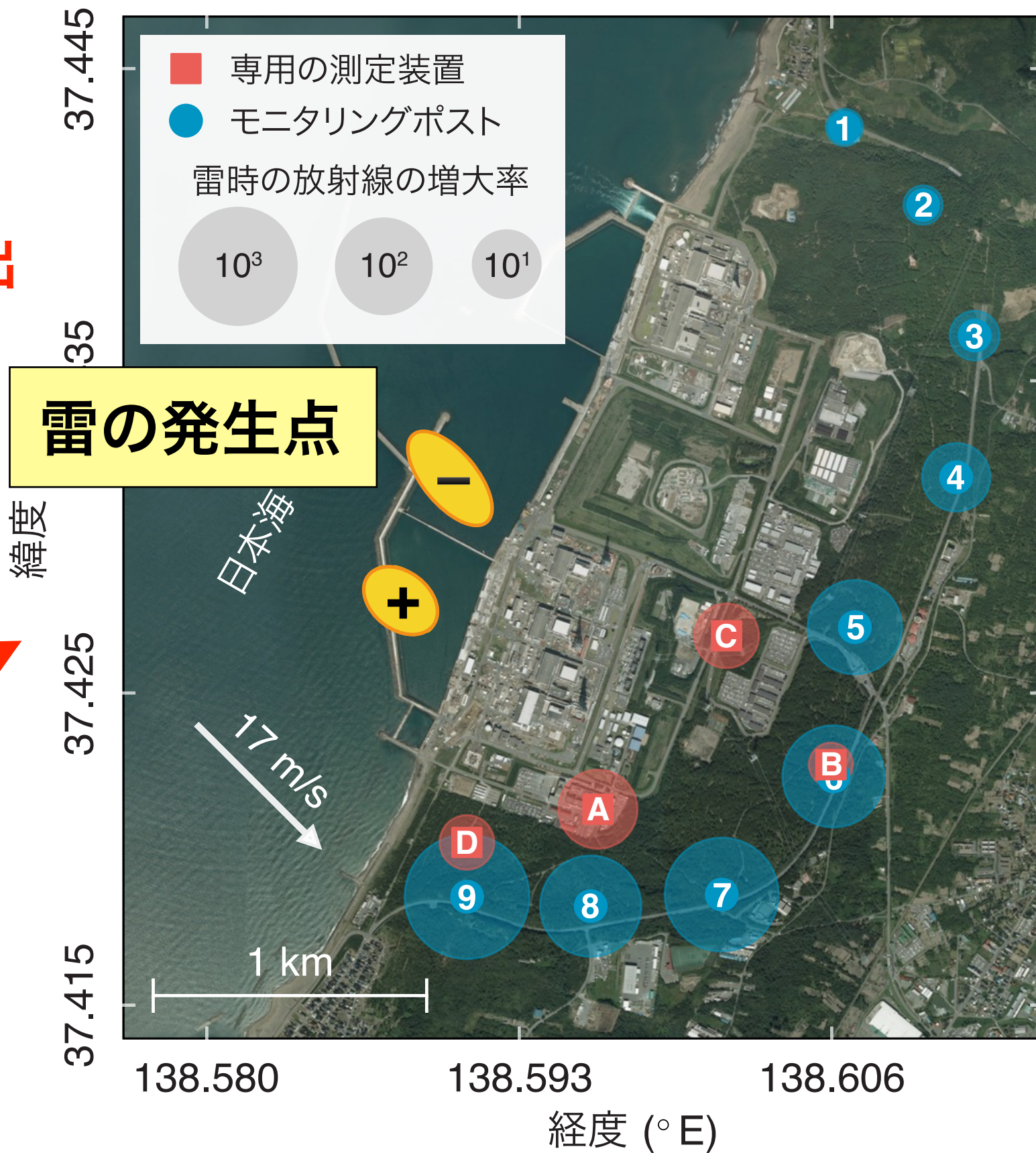
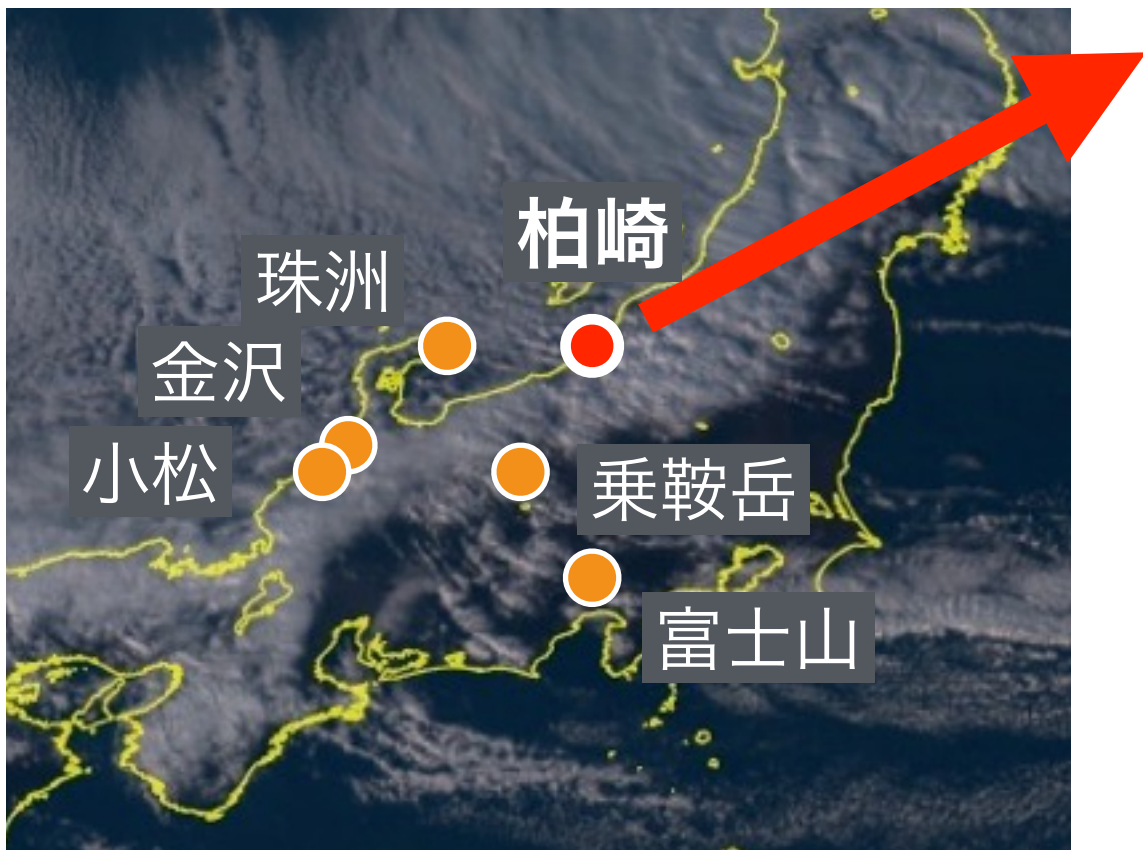
- 湯浅らを中心に小型で安価な信号処理回路を開発。
- 名刺サイズの小型コンピュータ Raspberry Piを使用。
- 持ち運びできる小型検出器が完成。
- 日本海沿岸の観測拠点に設置し、多地点マッピング観測を実現！

雷と同期したガンマ線バーストを検出

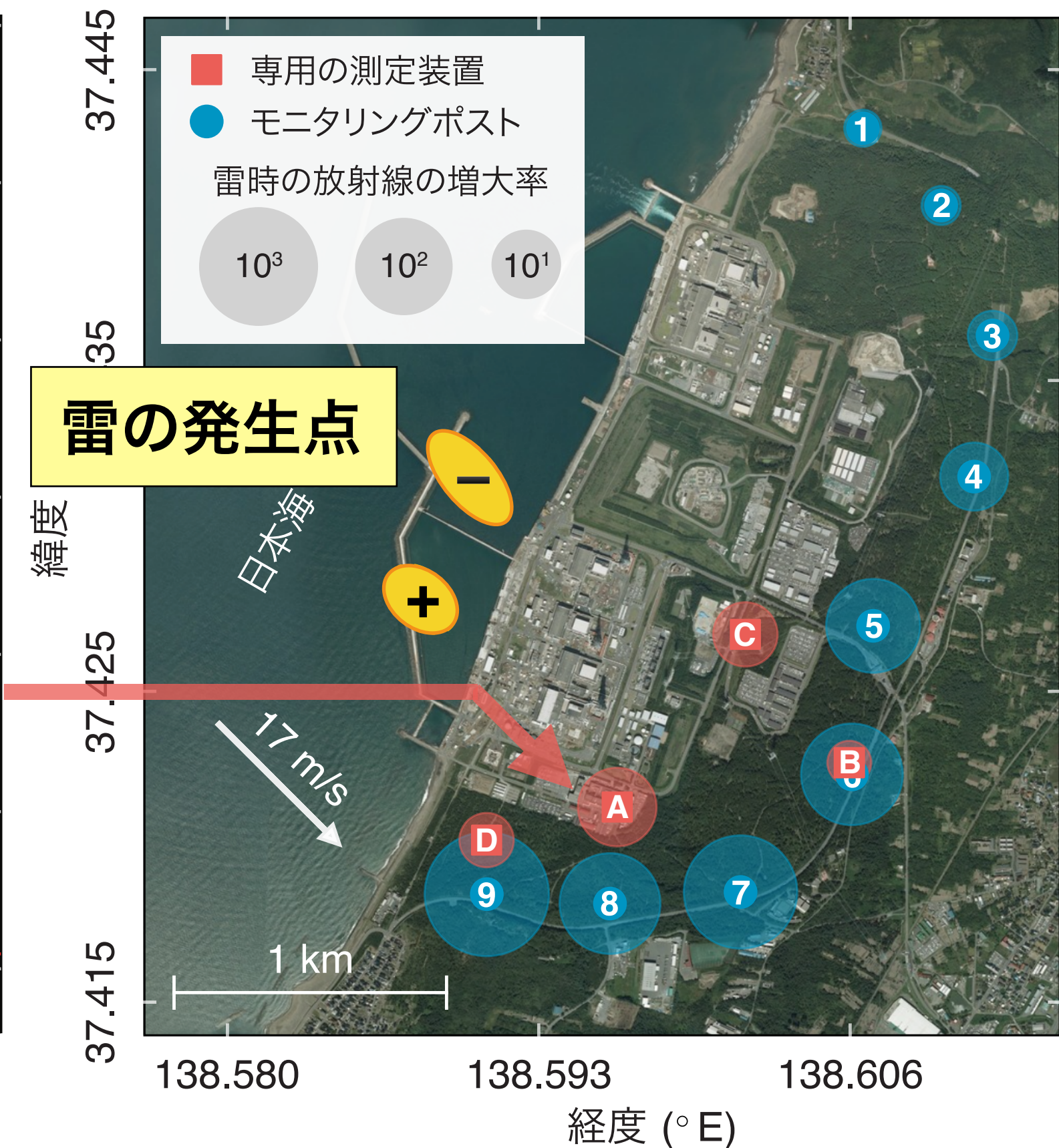
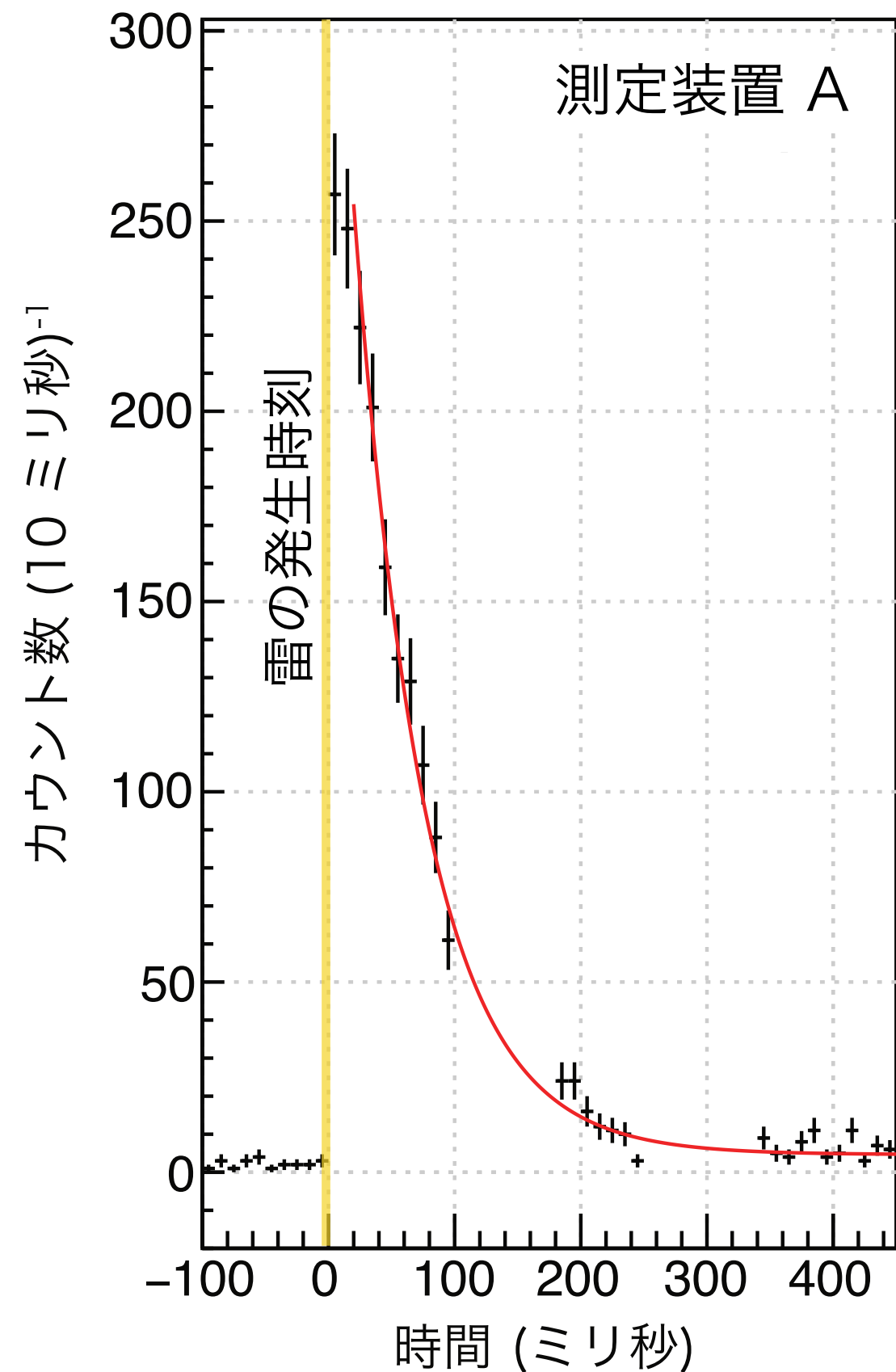
- 2017年2月6日 17:34:06 (日本時間) に柏崎で雷が発生。

→ 放射線イベントを同時検出

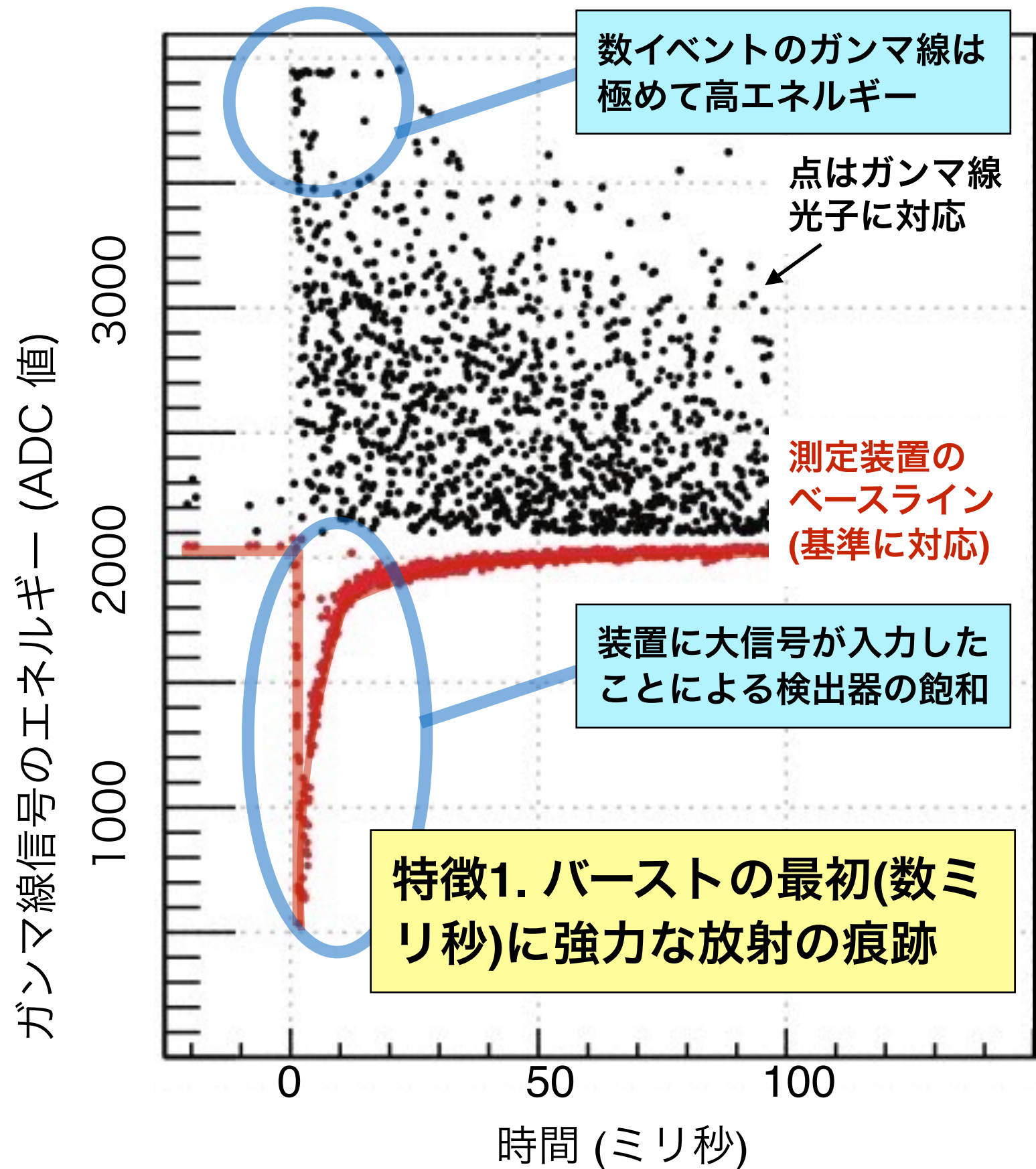
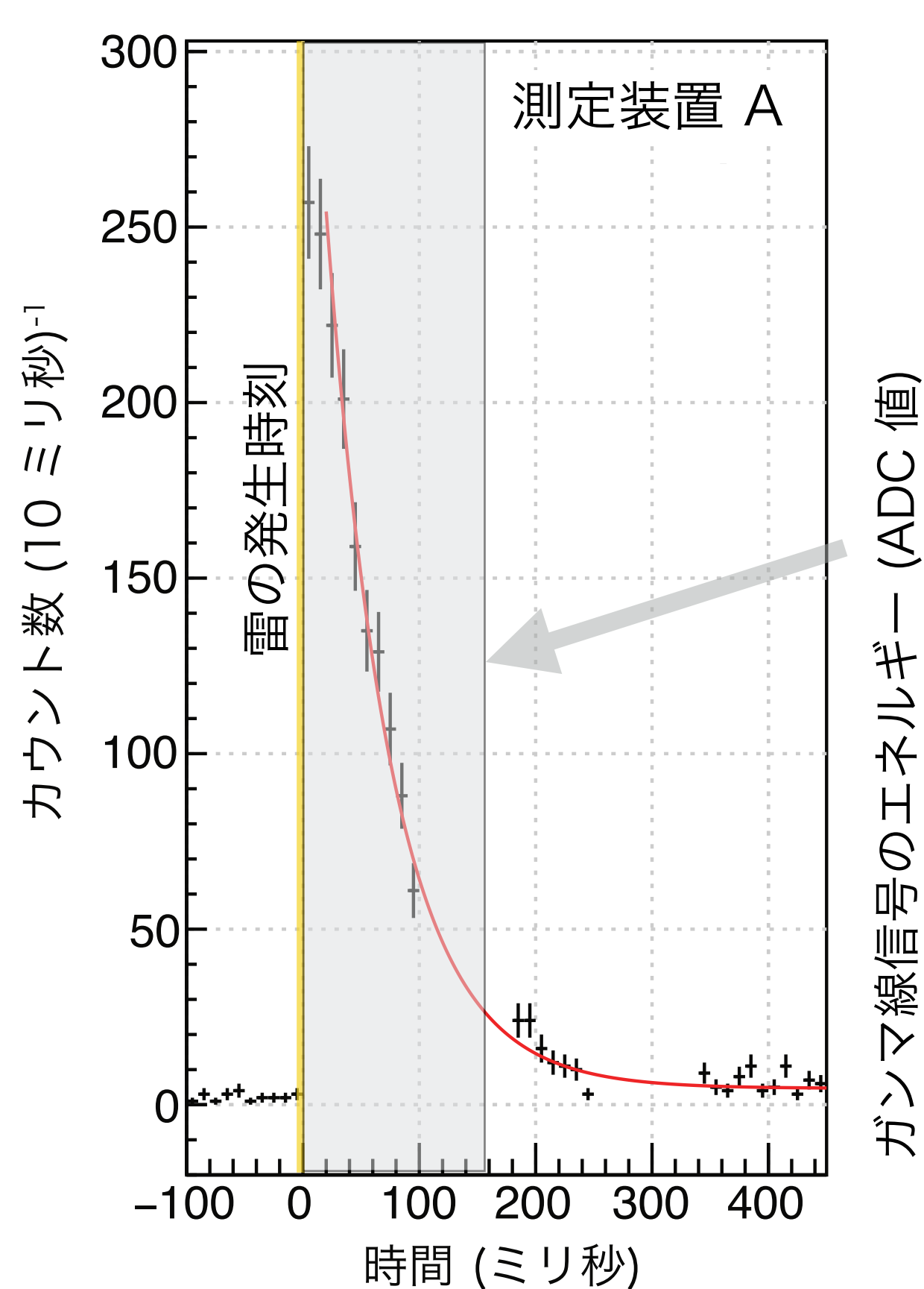
- 雷観測ネットワーク (JLDN) に加え、佐藤ら (北大) の電波観測で雷の発生を確認。



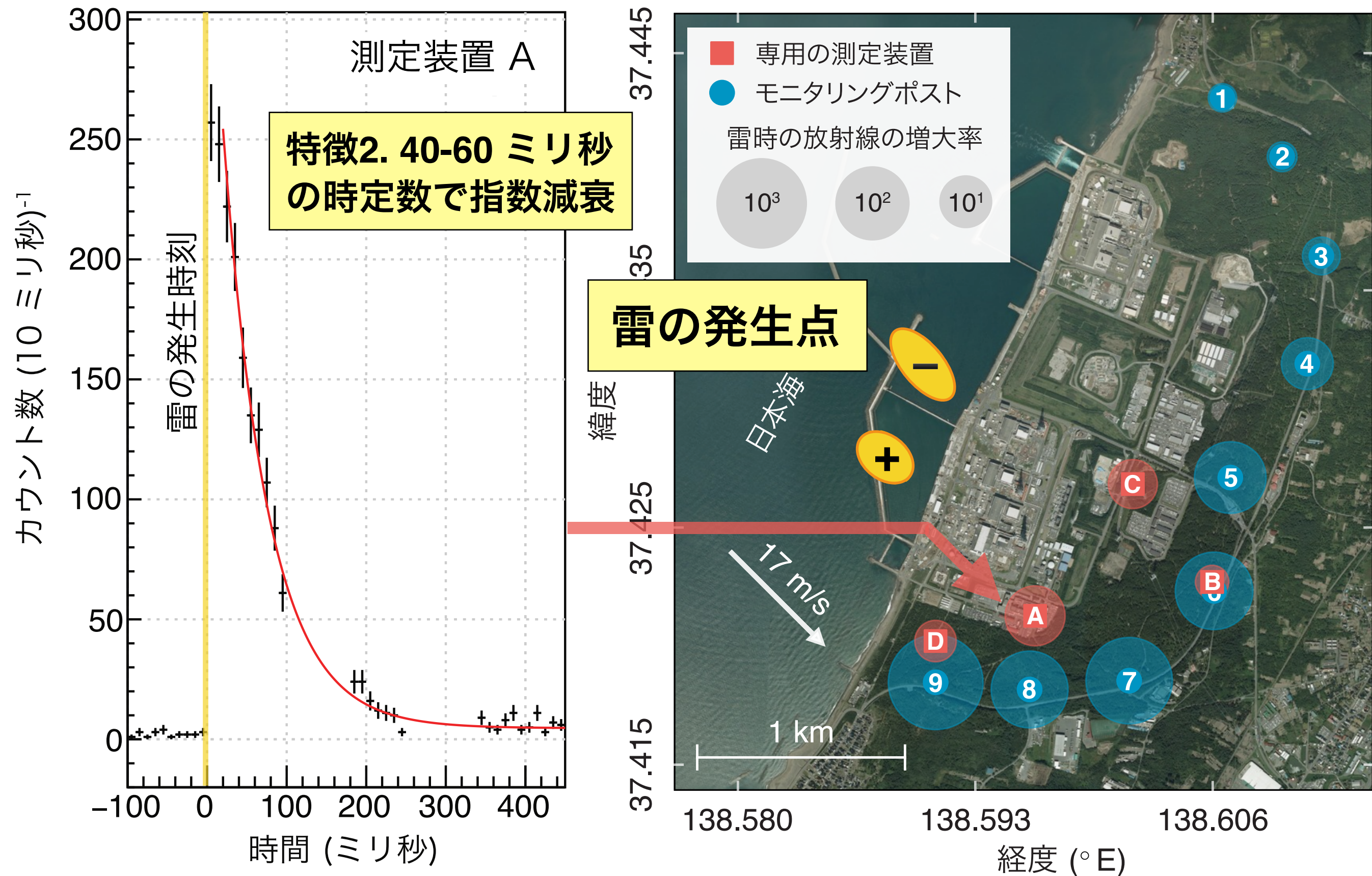
雷と同期したガンマ線バーストを検出



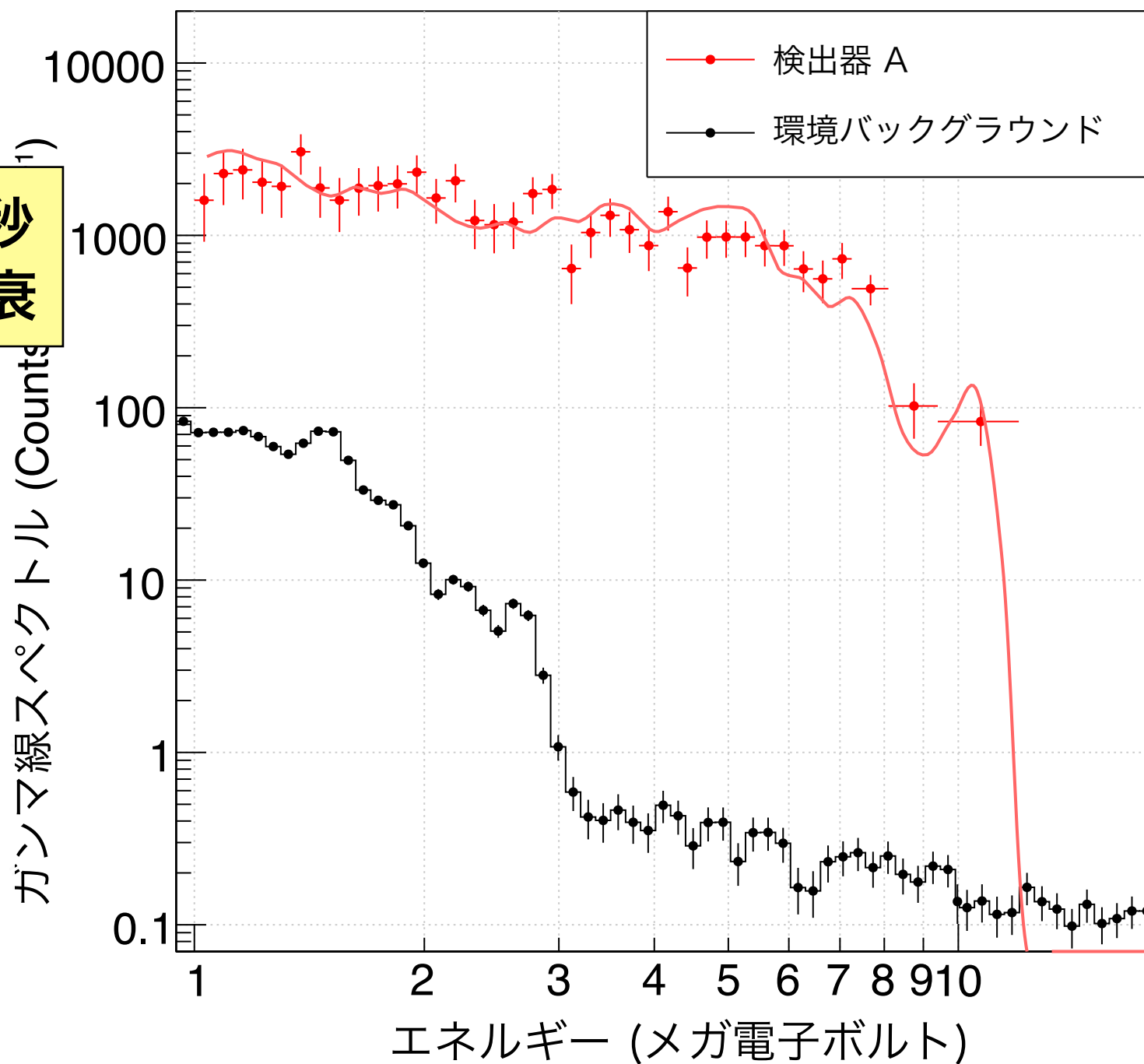
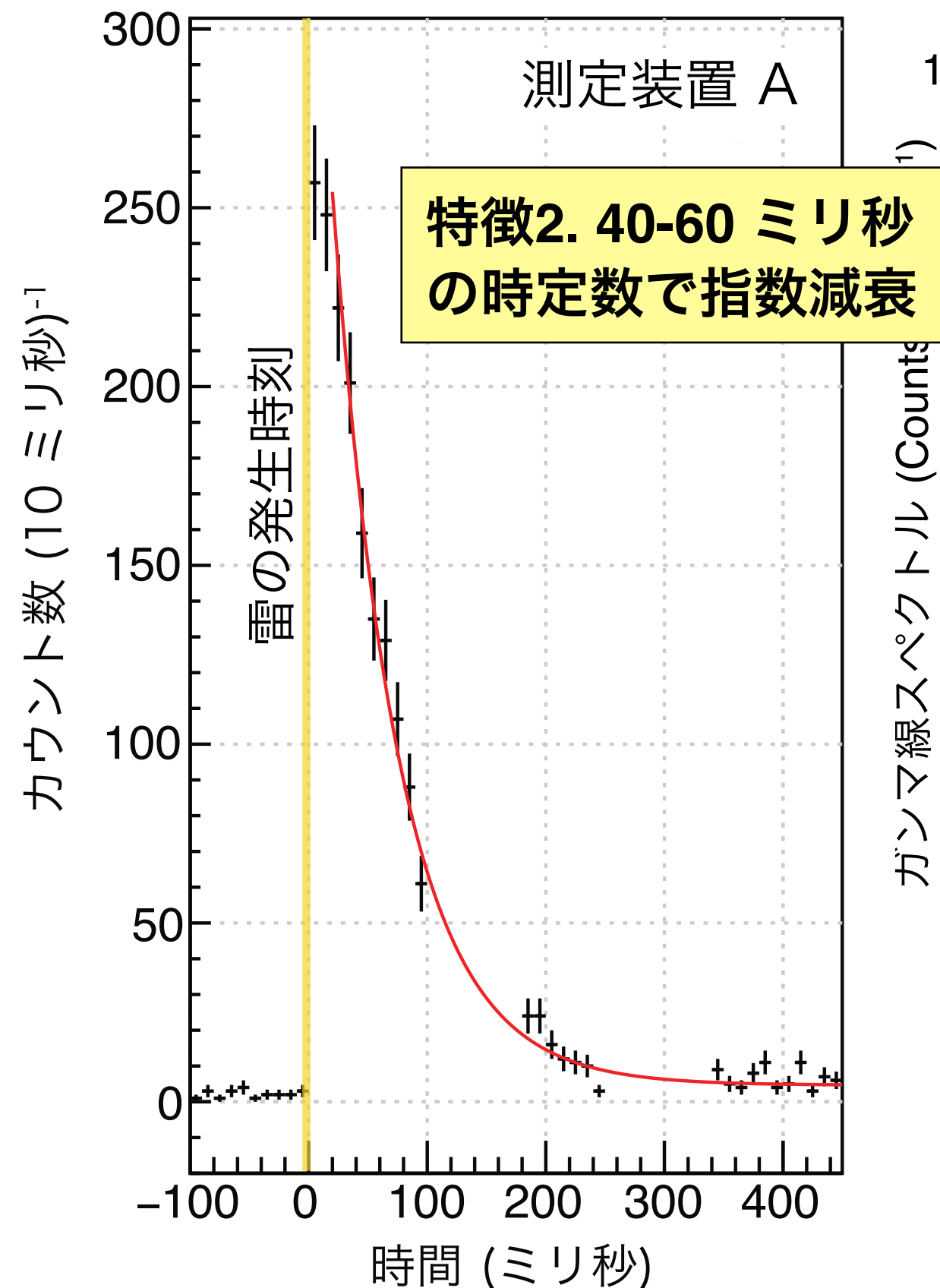
バースト放射のごく初期をよく調べると...



雷の直後に ~50 ミリ秒続くガンマ線のバースト



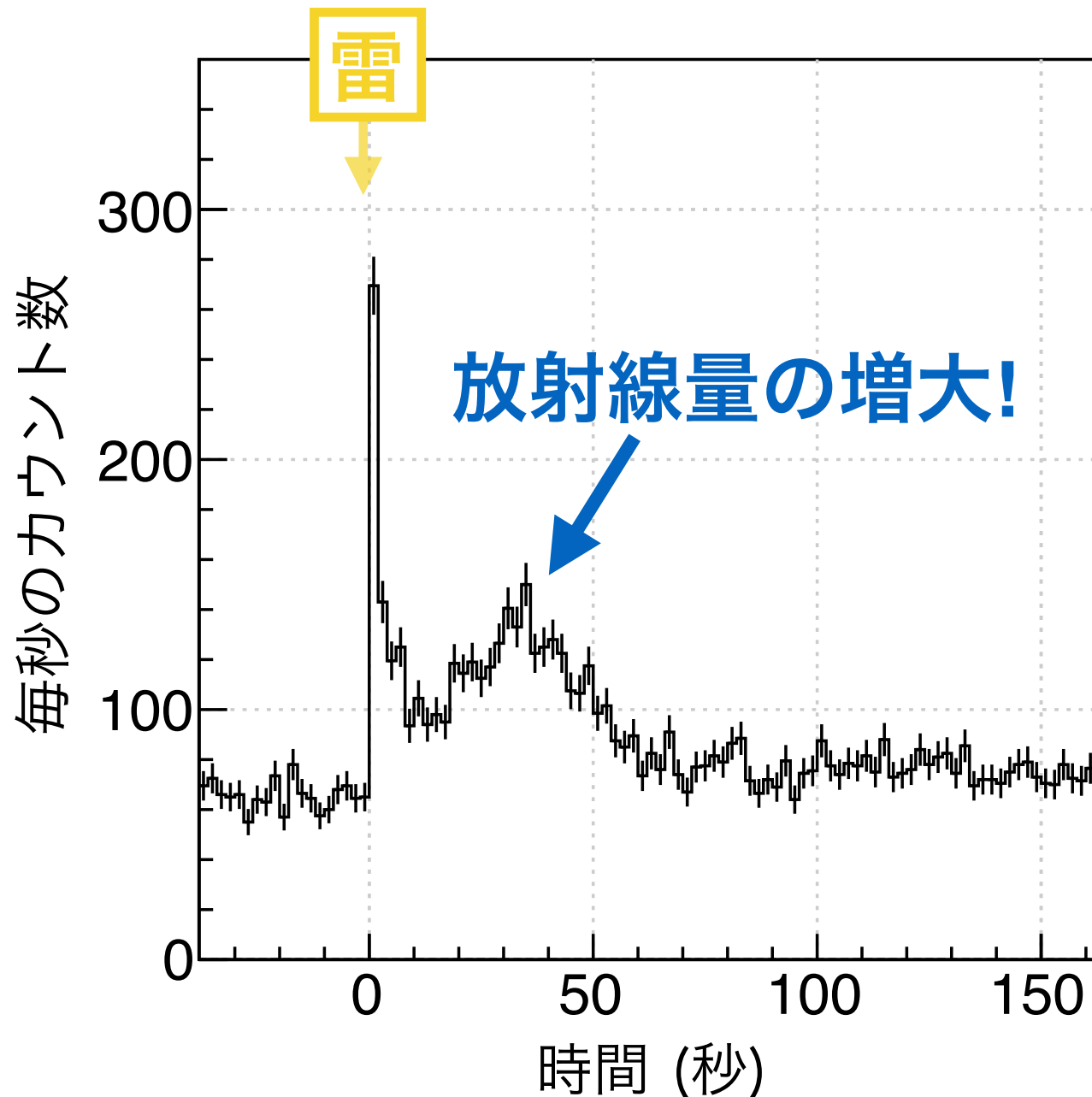
雷の直後に ~50 ミリ秒続くガンマ線のバースト



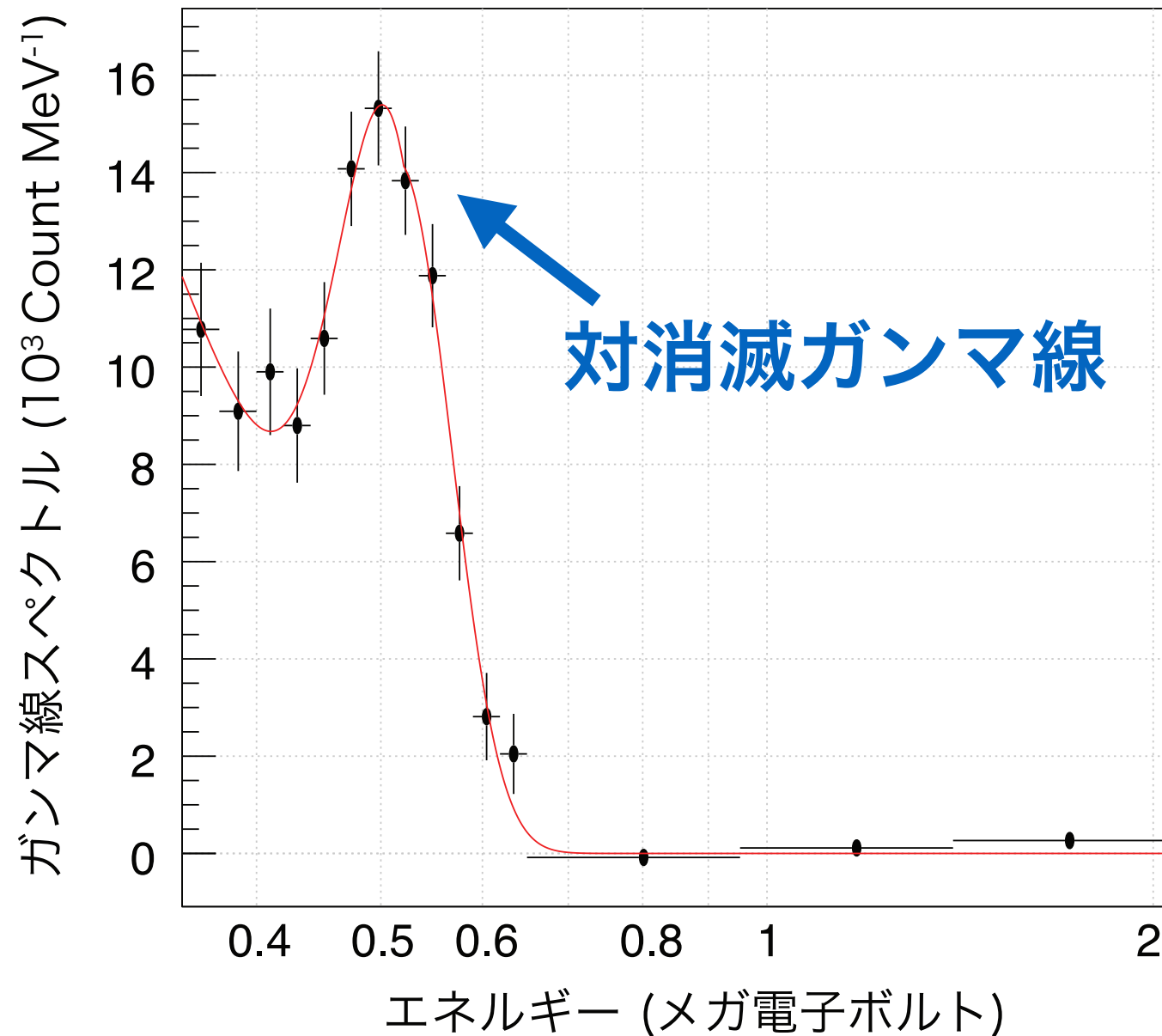
特徴3. 約10メガ電子ボルトのエネルギーまで続く放射線の到来。

雷から 35秒 遅れて 0.511 MeV 対消滅線!?

放射線量の変動 (0.35-0.60 MeV)



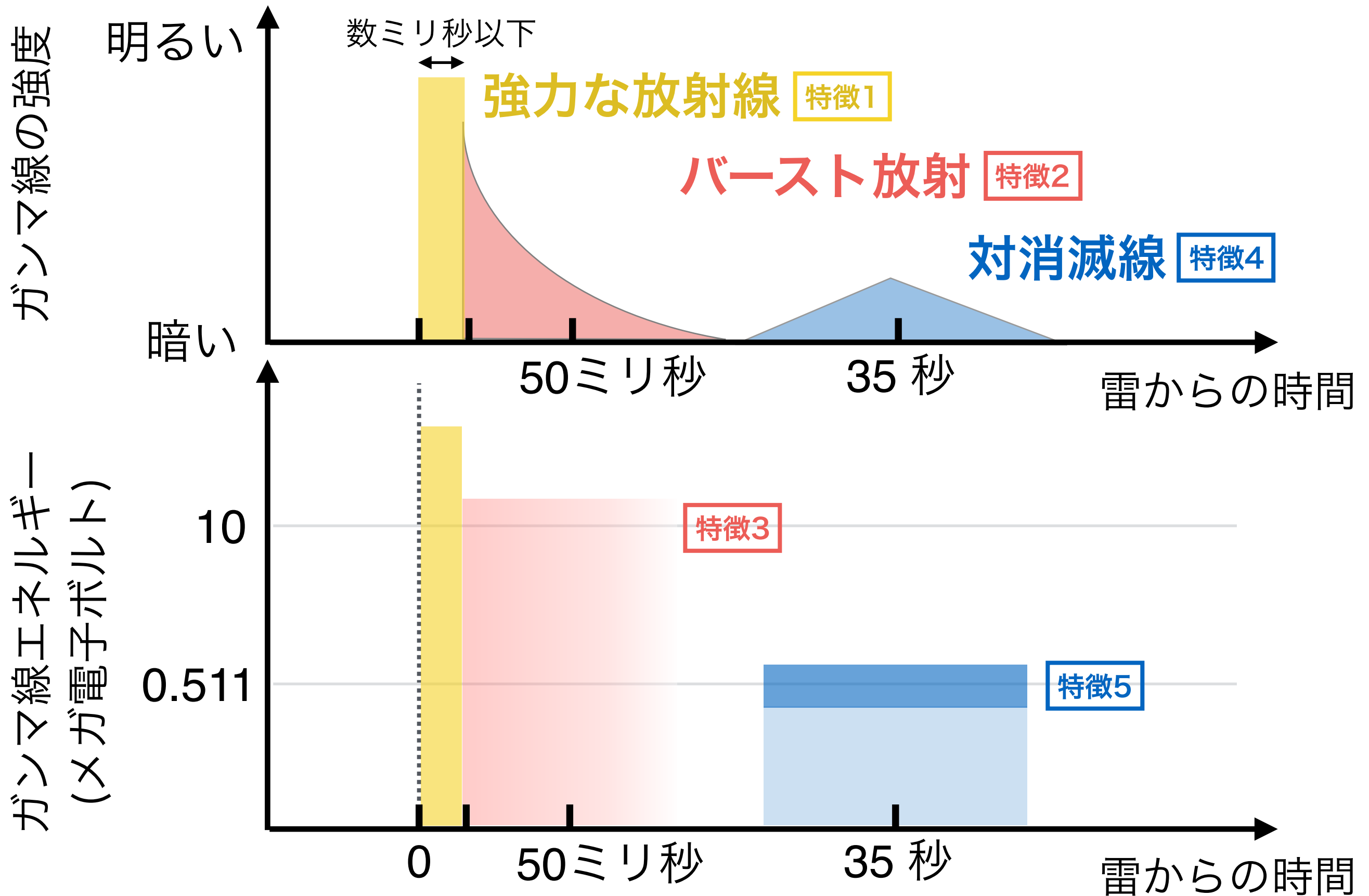
雷の後 1-63秒の間のスペクトル



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!

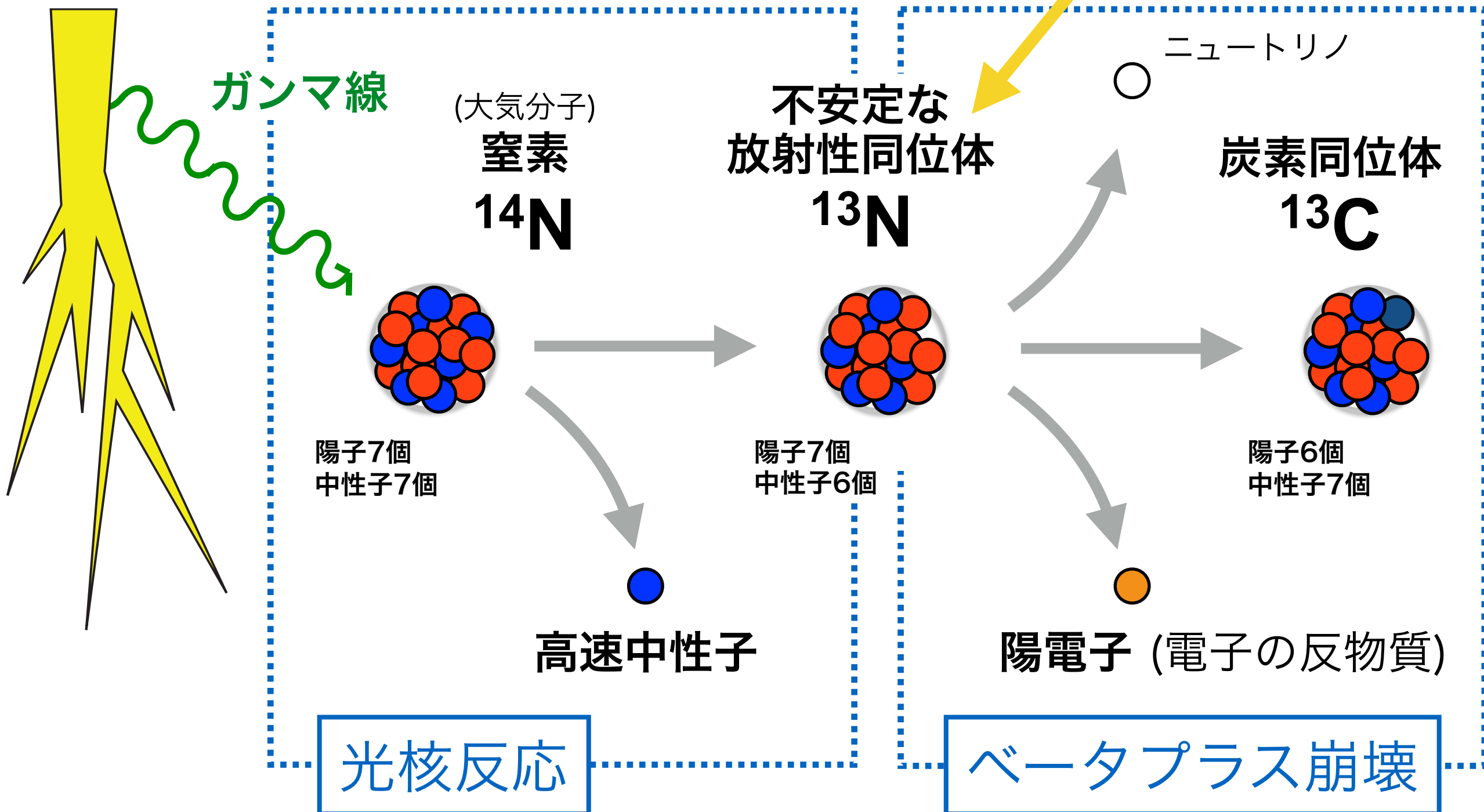
観測のまとめ (模式図)



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



光核反応

ベータプラス崩壊



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



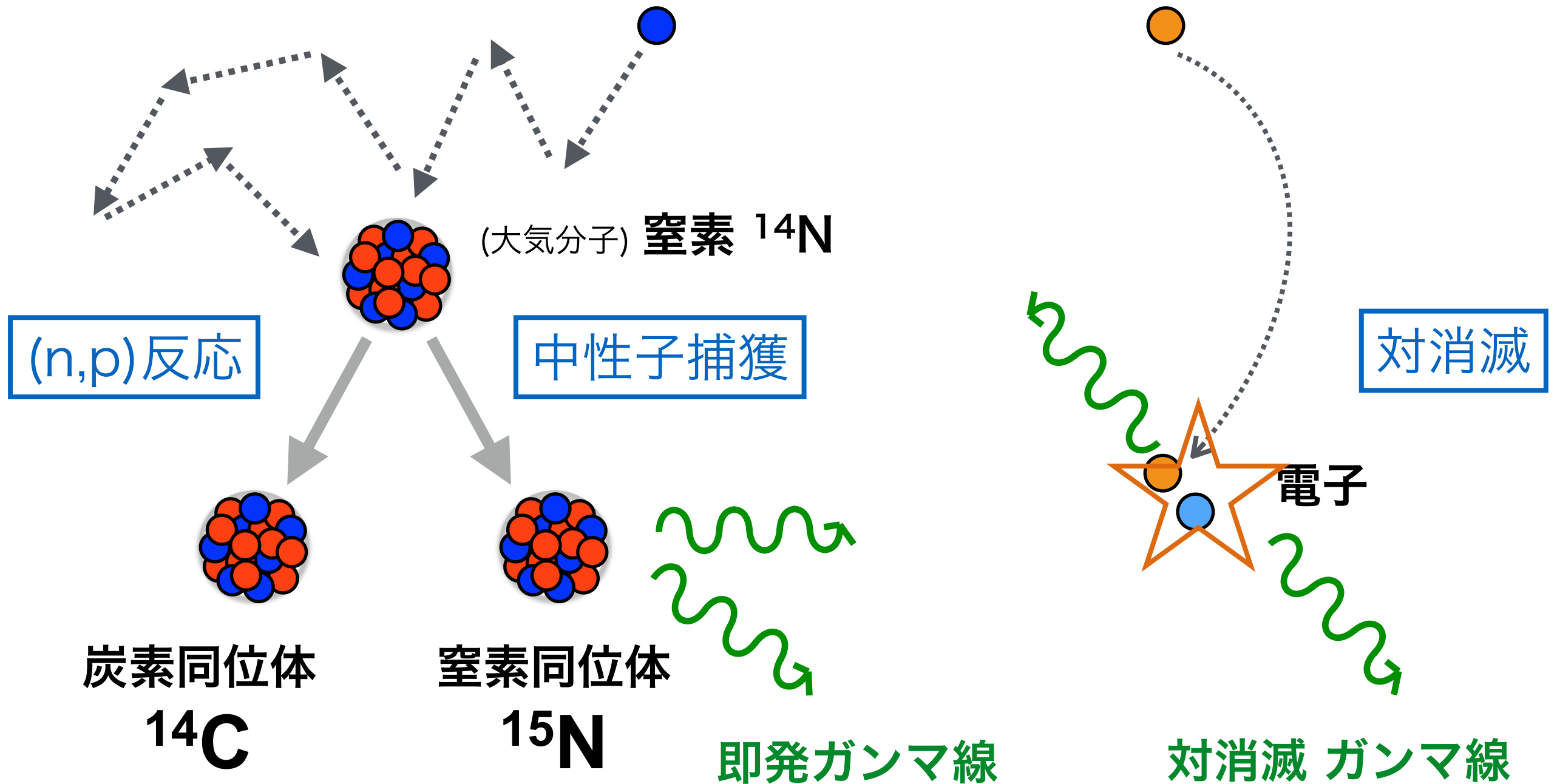
陽電子 (電子の反物質)



中性子と陽電子が残すガンマ線の痕跡

高速中性子

陽電子 (電子の反物質)



準安定 (半減期 5730年)
年代測定に使われる

検出!

検出!

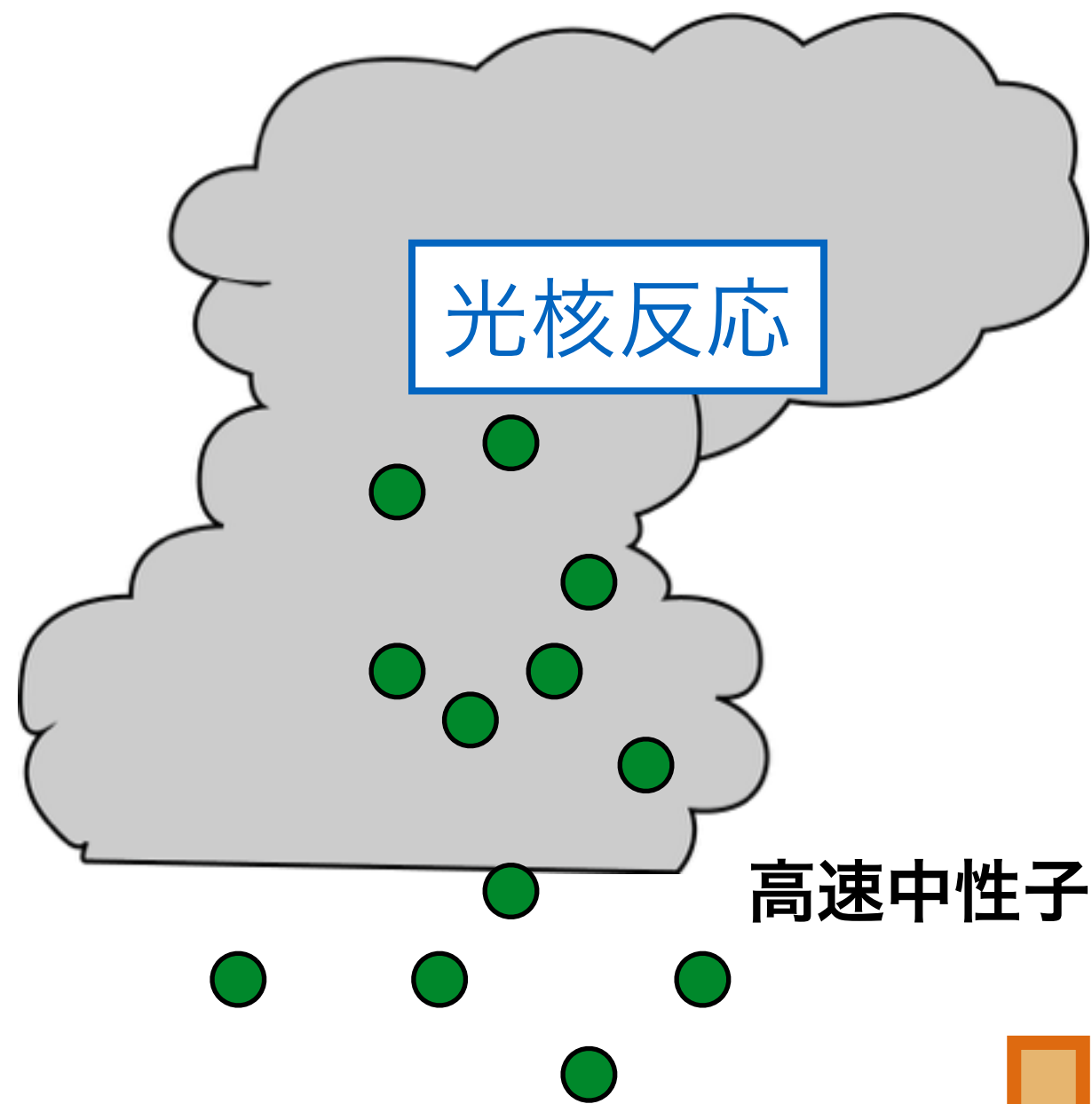
雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



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。

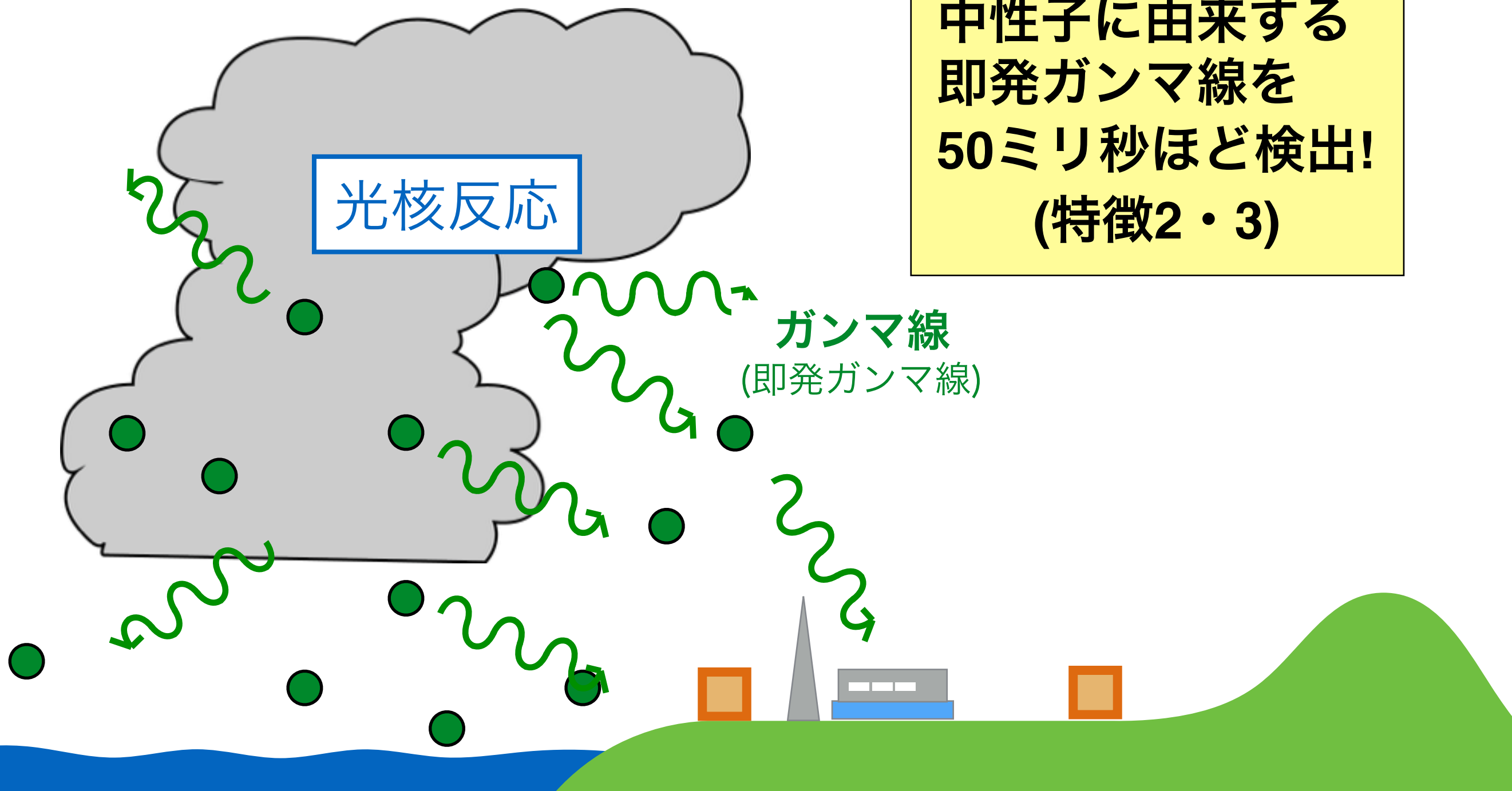
雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



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。

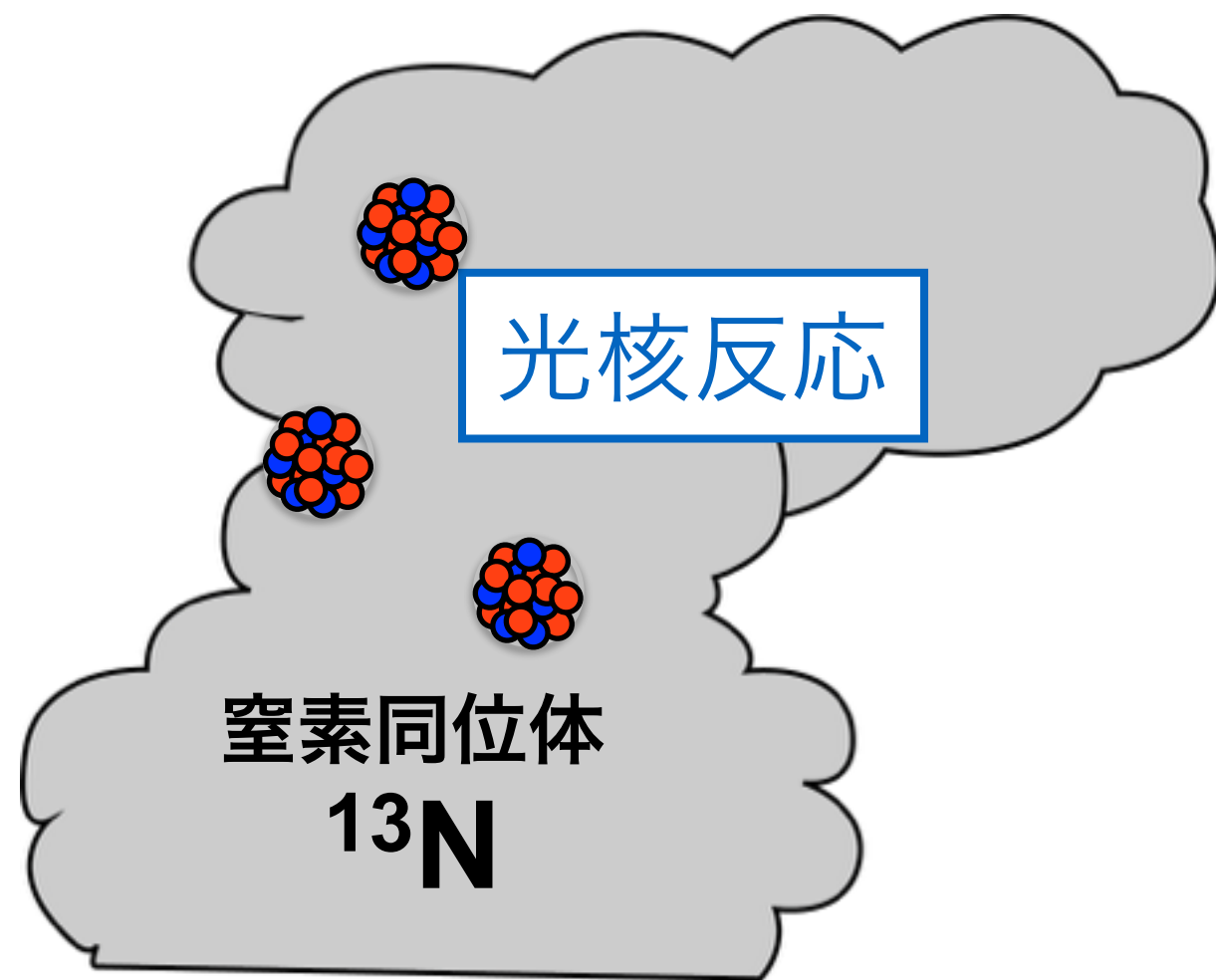
雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲

中性子に由来する
即発ガンマ線を
50ミリ秒ほど検出!
(特徴2・3)



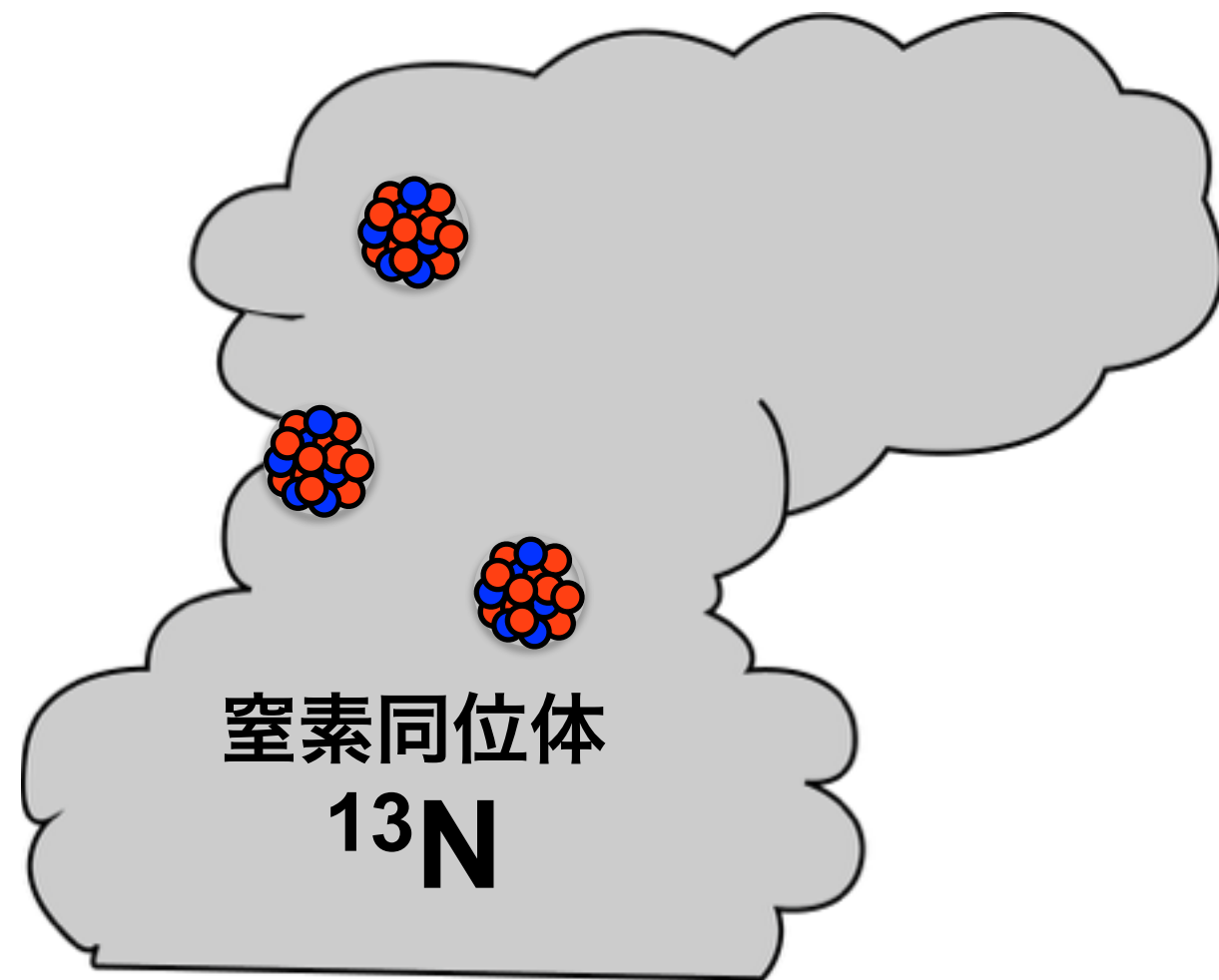
2. **中性子**は大気中で散乱を繰り返しエネルギーを失い広がる。大気中の窒素原子核に吸収されて**即発ガンマ線**を放出する。

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** になる。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

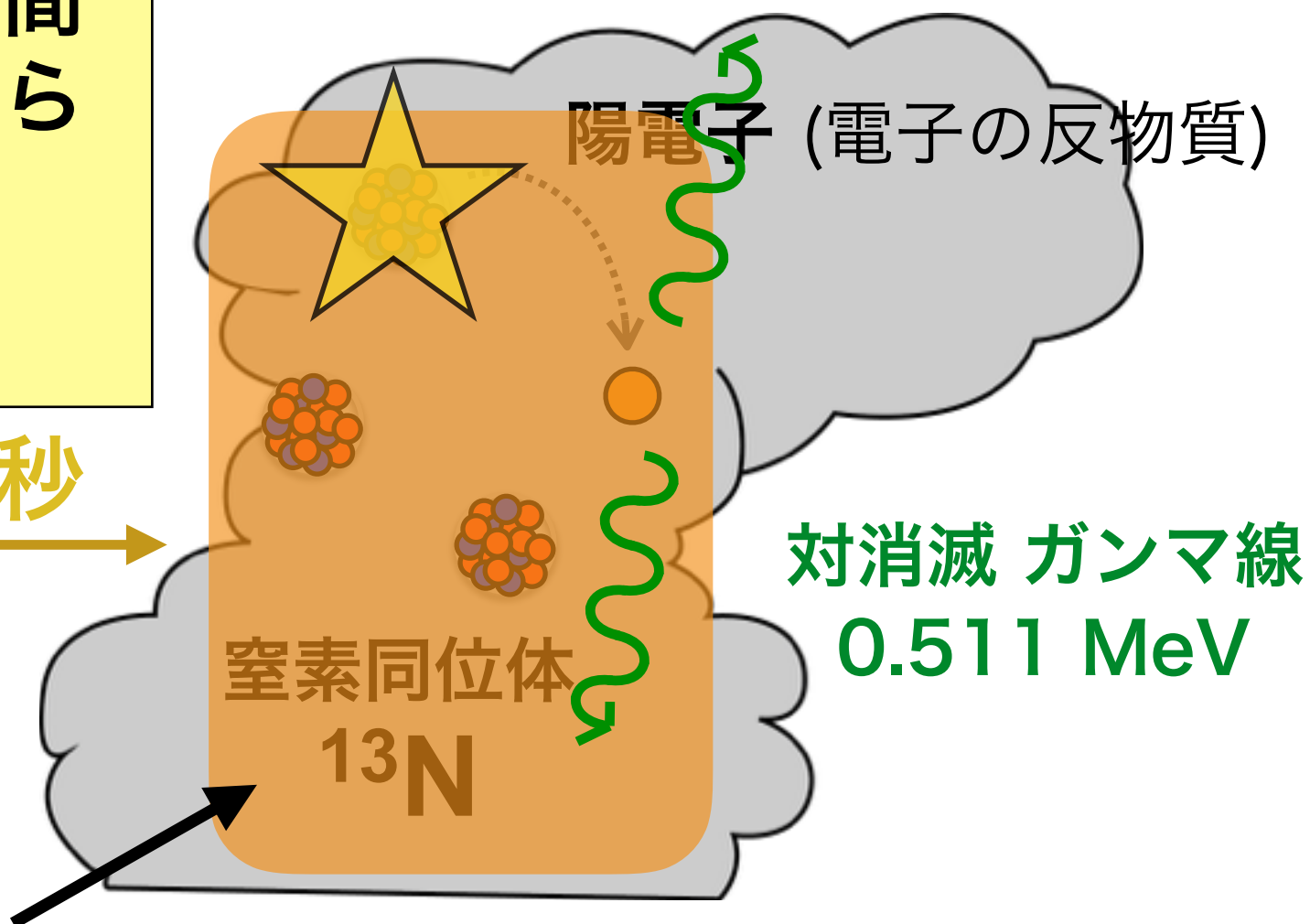


3. 光核反応で大気窒素は**不安定な同位体 ^{13}N** になる。雷雲とともに上空を移動する。なお、大気酸素から ^{15}O も生成される。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲

雷雲が風で流れる時間
だけ遅れ、陽電子から
の対消滅線を検出!
(特徴4・5)

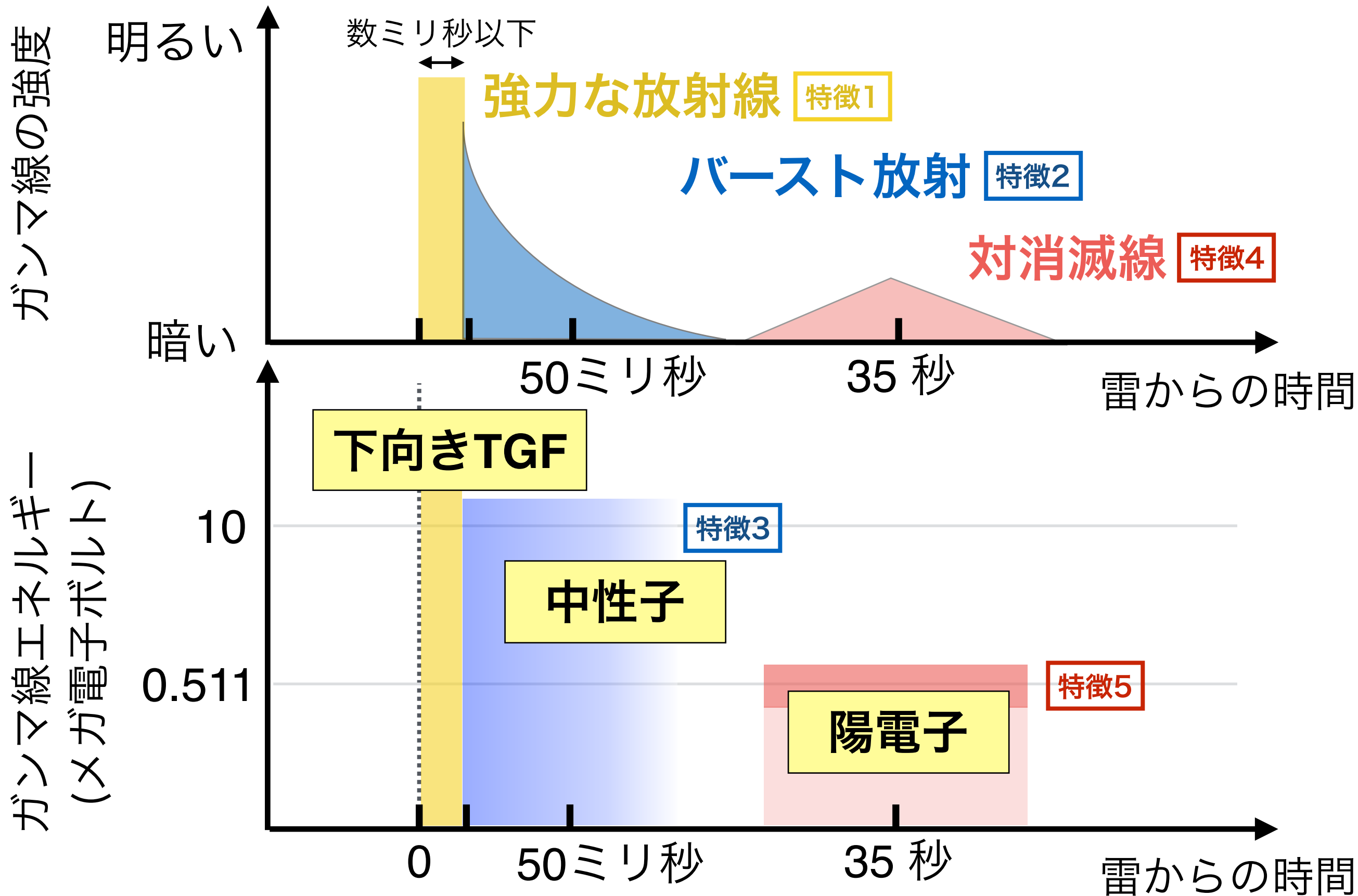
約35秒



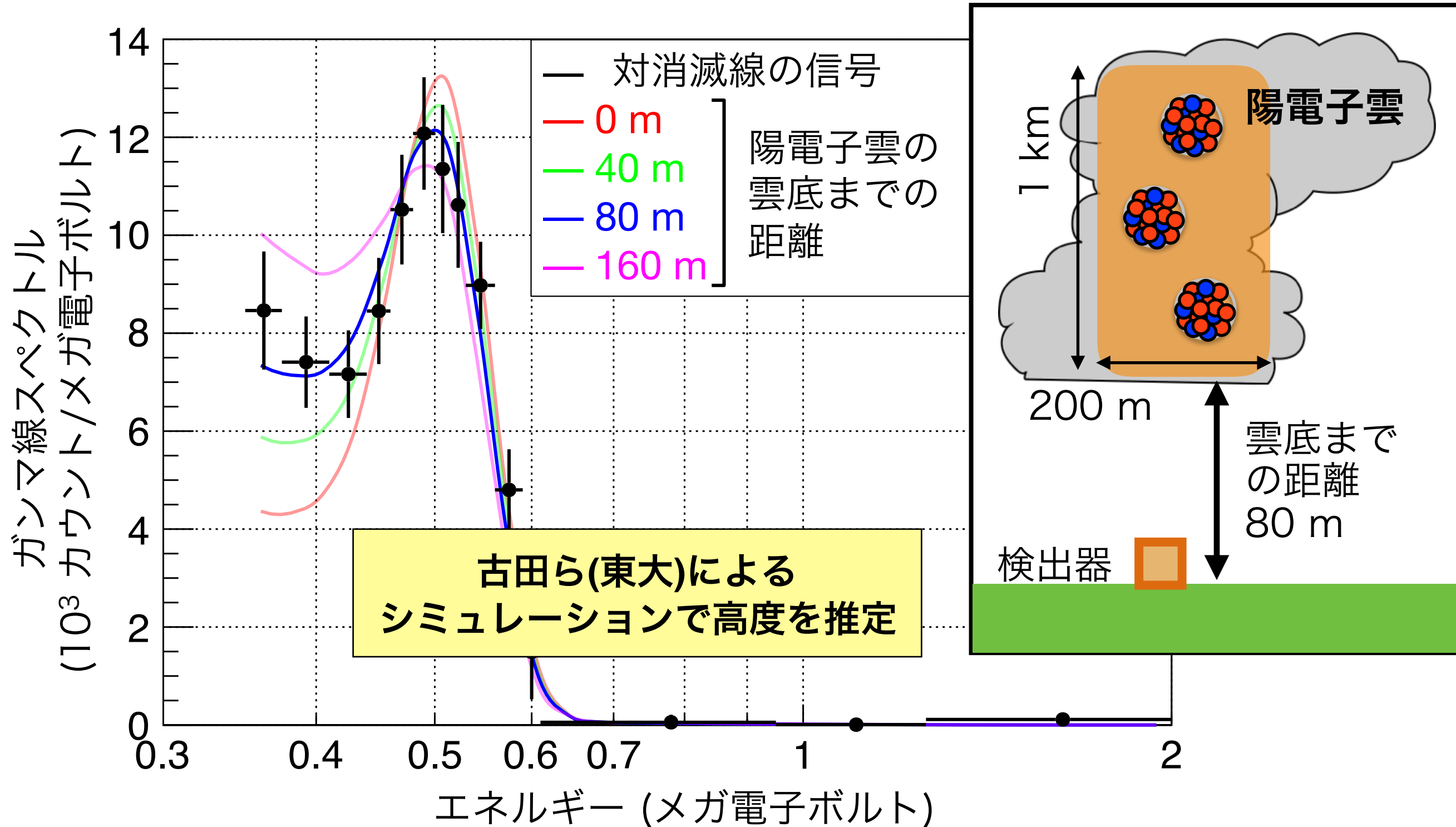
反物質の雲が上空を
通過していった。

- 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)



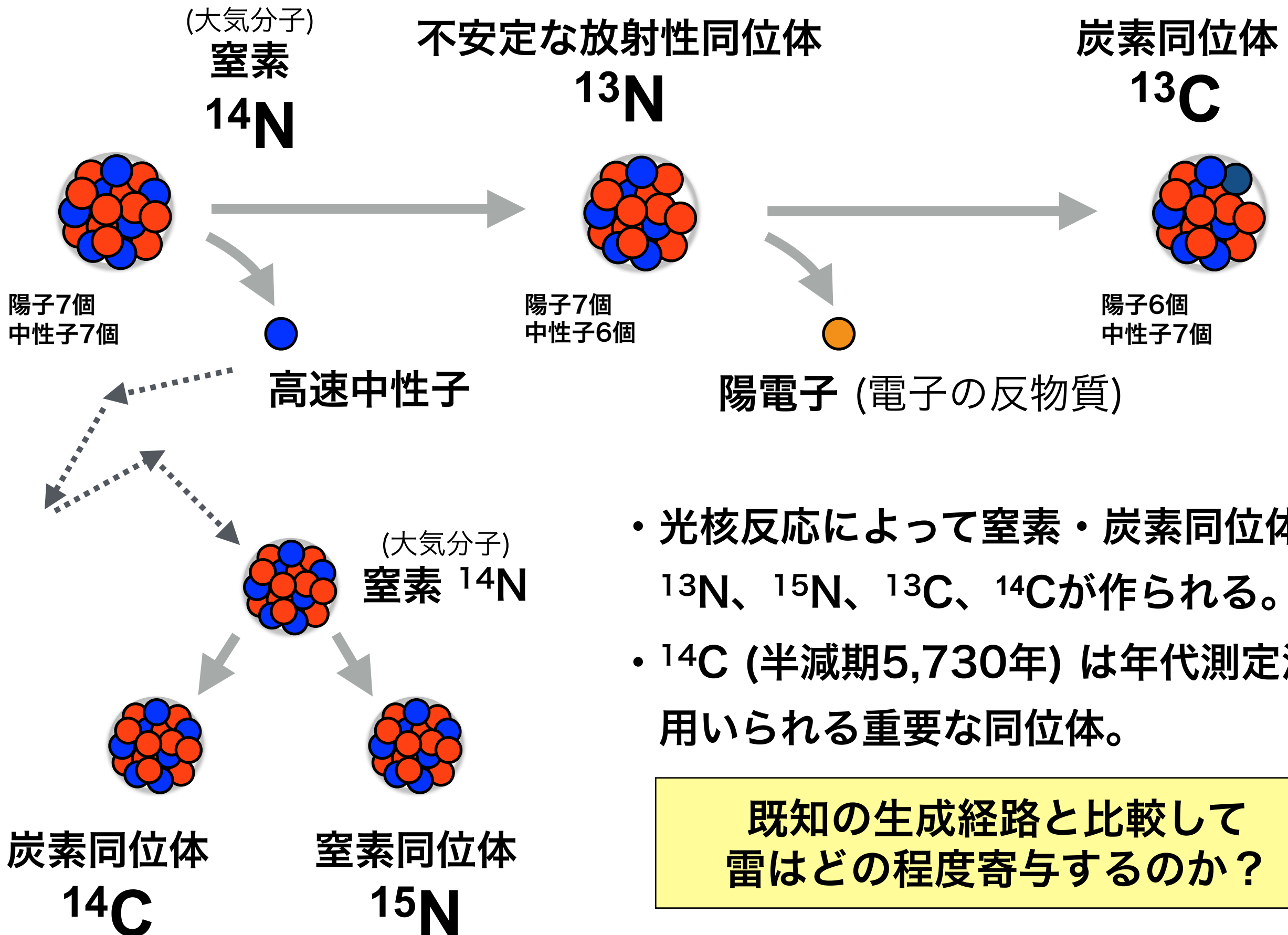
対消滅線の強度から光核反応の量を推定



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？

GROWTH Collaboration

(Gamma-Ray Observation of Winter THunderclouds)

土屋



松元



古川



榎戸



中澤



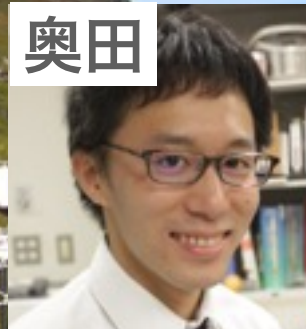
和田



湯浅



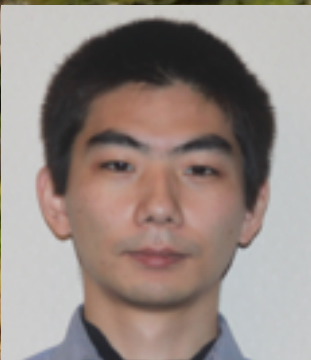
奥田



古田



榎本



中野



2016年夏乗鞍岳にて / コラボレーションのメンバーの一部です！

学術系クラウドファンディングへの挑戦

SNSを活用し一般市民による研究のサポートを得る!

学術系クラウドファンディングサイト「academist (アカデミスト)」

オリジナルリターンの準備

(協)アダチ・デザイン研究室

マグカップ

オリジナル T シャツ

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、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に仕事頑張ろうと思いました。がんばってください。

サポートしてくださった皆様
ありがとうございました!!

THUNDER CLOUD
PROJECT

今後の展望

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

今後の展望

雷の原子核反応の発見を軸に、気象観測や大気計測の分野と連携し
「雷と雷雲の高エネルギー大気物理学」という新分野を作りたい。

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

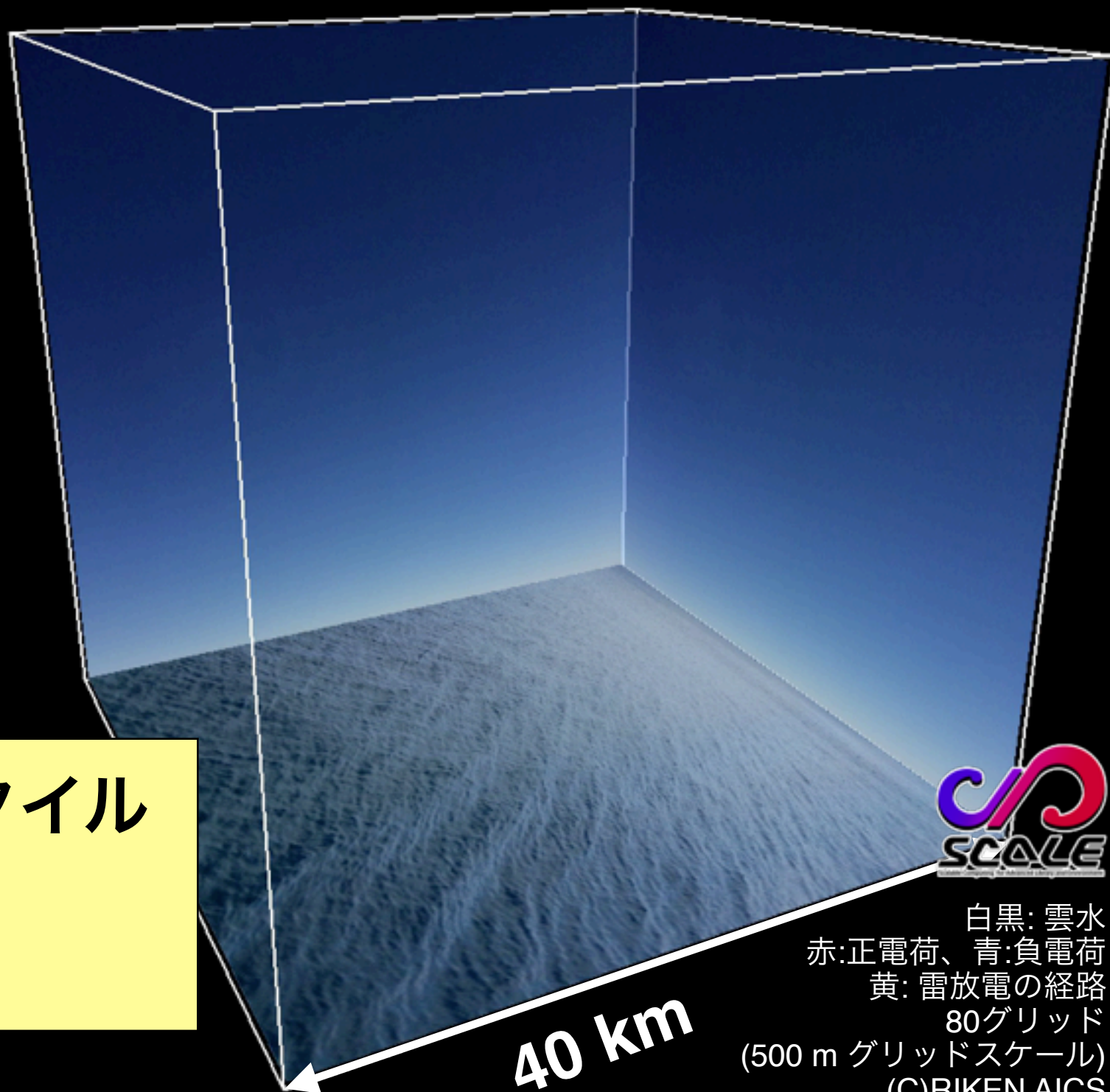
今後の展望

雷の原子核反応の発見を軸に、気象観測や大気計測の分野と連携し
「**雷と雷雲の高エネルギー大気物理学**」という新分野を作りたい。

佐藤ら（名古屋大学）は
数値気象シミュレーション
SCALE-TH に電荷や電場を
導入し、雷雲内の電場分布や
放電を模擬することに成功。

我々の地上の雷雲ガンマ線と
比較する新しい研究へ

多様な観測手法、研究スタイル
による学際研究に向けて、
どうぞ応援ください！



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

まとめ

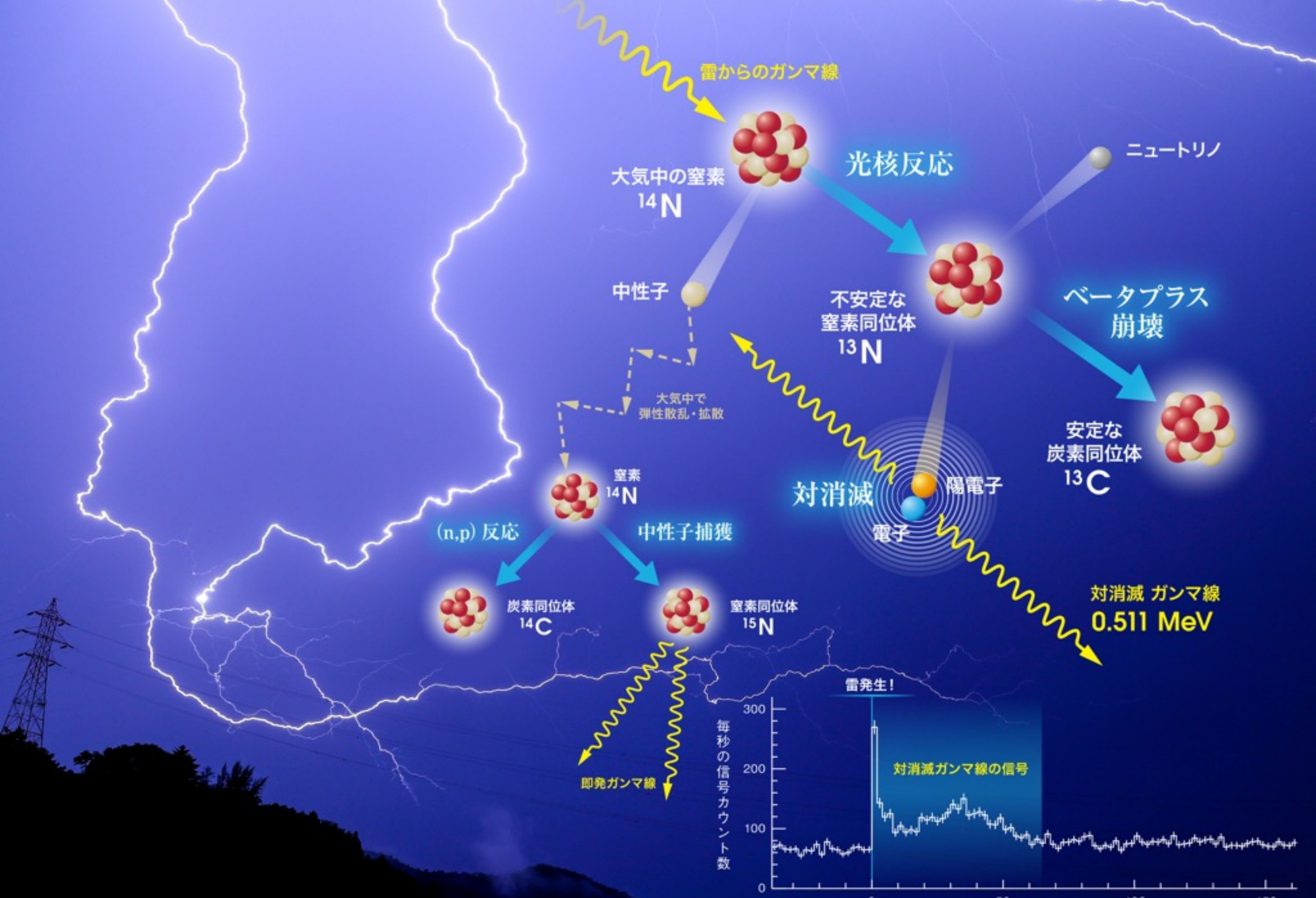
- 雷が作り出した強力なガンマ線が、原子核を壊す「光核反応」を引き起こすことを観測的に解明した。
- 陽電子（電子の反物質）を放つ雲が、雷雲とともに上空を通過するという自然の秘密が明らかになった。
- 炭素、窒素の同位体が雷で作られることが解明され、他の生成経路と比較して雷の寄与が大きいのか、といった研究が重要になる。
- 学術系クラウドファンディングの支援を受ける研究で、Nature誌に掲載される最先端の成果を出せることを示した。

謝辞

本研究では以下の皆様に大変お世話になりました。

この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

- 東京電力 柏崎刈羽原子力発電所
- 理化学研究所 櫻井研究室
- 株式会社 シマフジ電機
- 株式会社 ジーテック
- 金沢大学 米徳研究室、金沢大学附属高校、金沢泉丘高校、小松高校、サイエンスヒルズこまつ ひとつものづくり科学館
- 学術系クラウドファンディング academist とサポーターの皆様
- アダチ・デザイン研究室
- Wise Babel Ltd
- 京都オープンサイエンス・ミートアップ
- 東京学芸大学 鴨川研究室、近畿大学 森本研究室
- 京都大学 白眉プロジェクト、SPRITS、日本学術振興会



雷が反物質の雲をつくる!?