

雷が起こす光核反応の物理

T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda,
K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya,
“Photonuclear reactions triggered by lightning discharge”
Nature, vol 551, 481 (2017)
<https://www.nature.com/articles/nature24630>

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)



academist

GROWTH Collaboration

(Gamma-Ray Observation of Winter THunderclouds)

土屋



松元



古川



榎戸



中澤



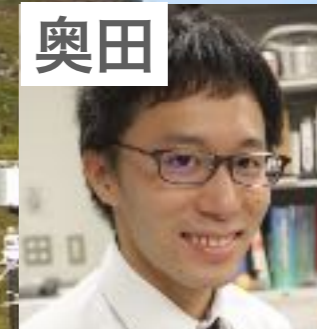
和田



湯浅



奥田



古田



榎本



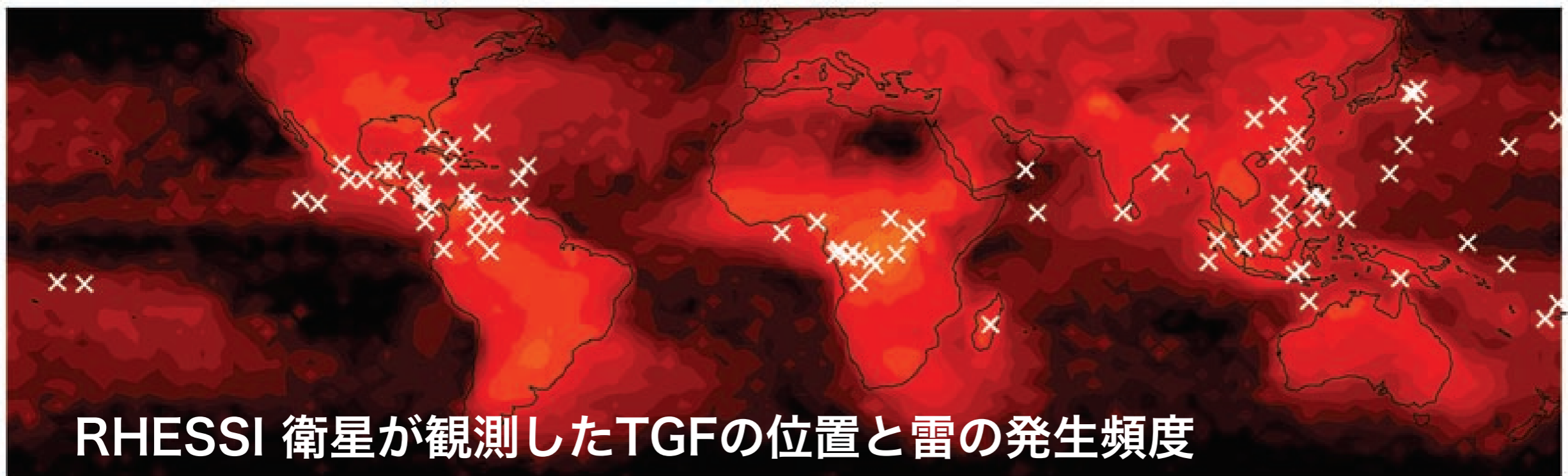
中野



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！

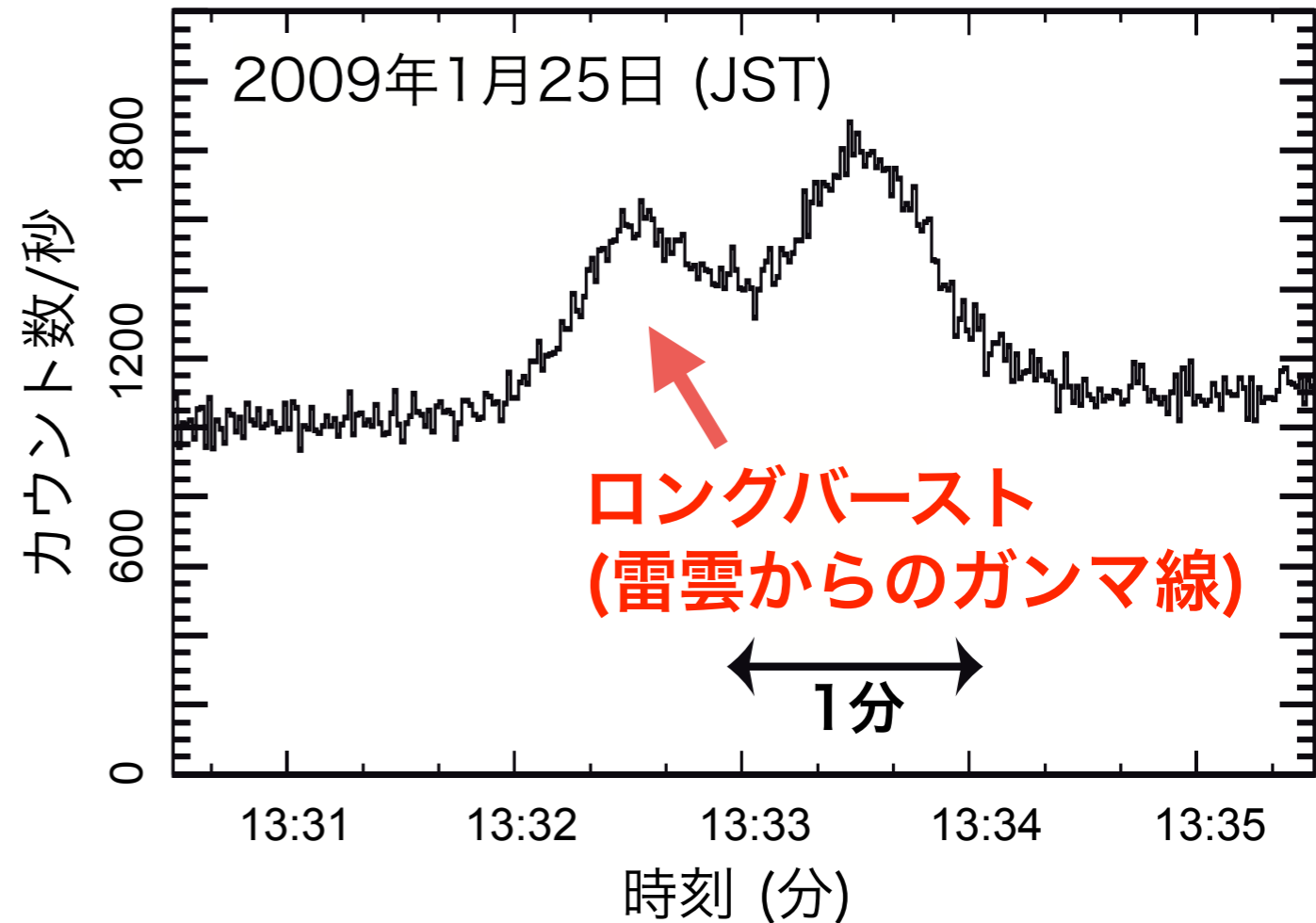
地球ガンマ線フラッシュ (Terrestrial Gamma-ray Flash)

- 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ですが、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！

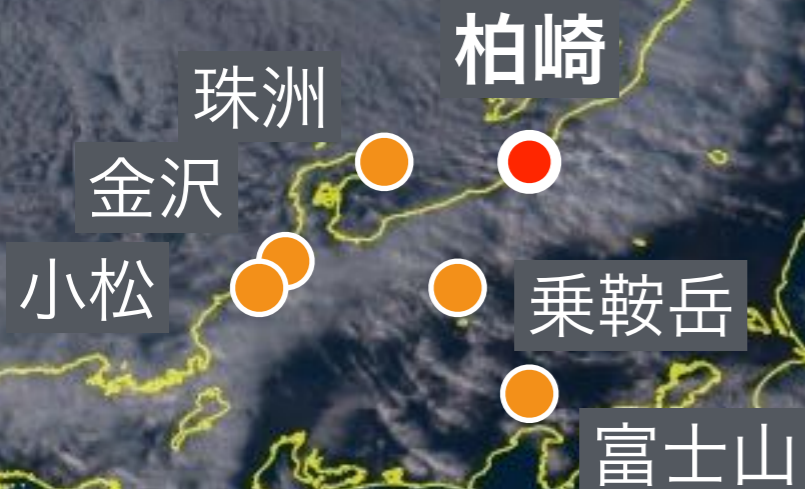
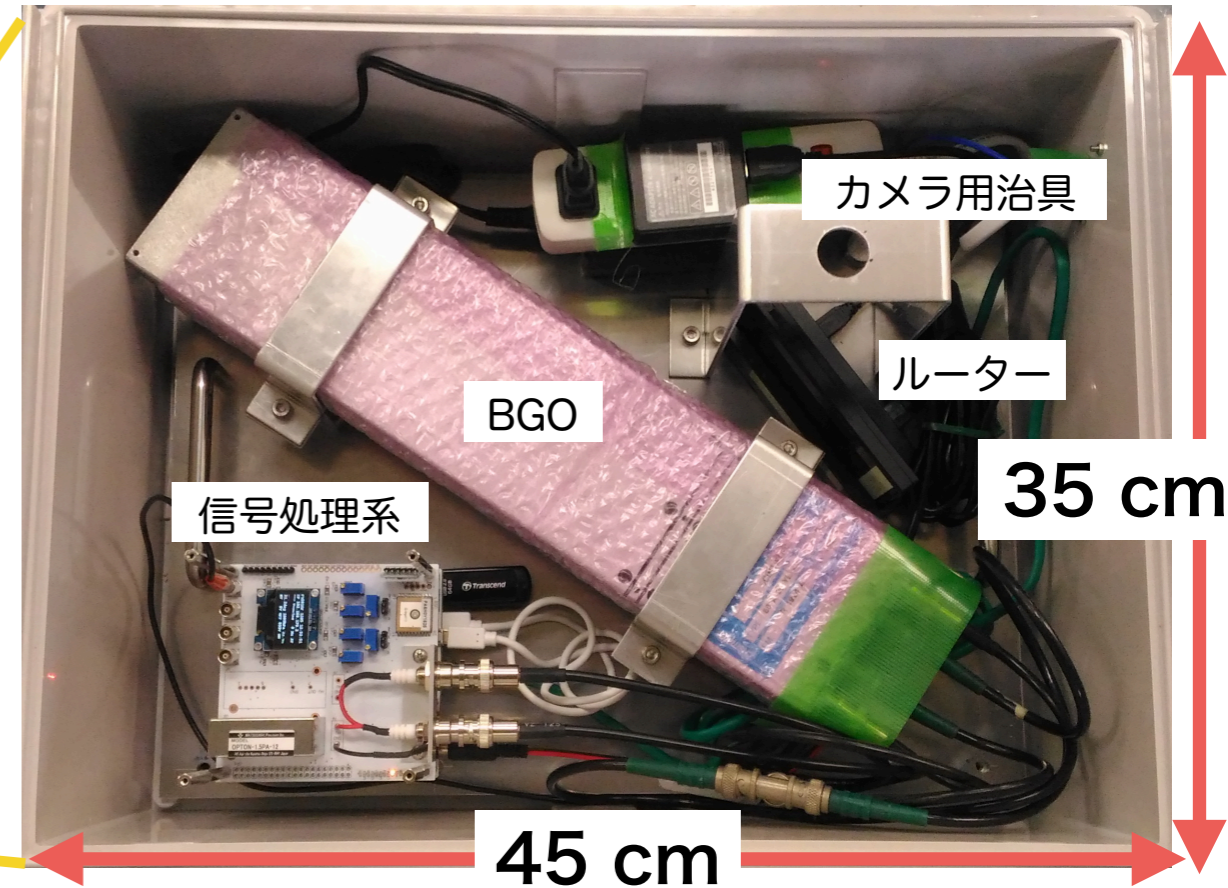
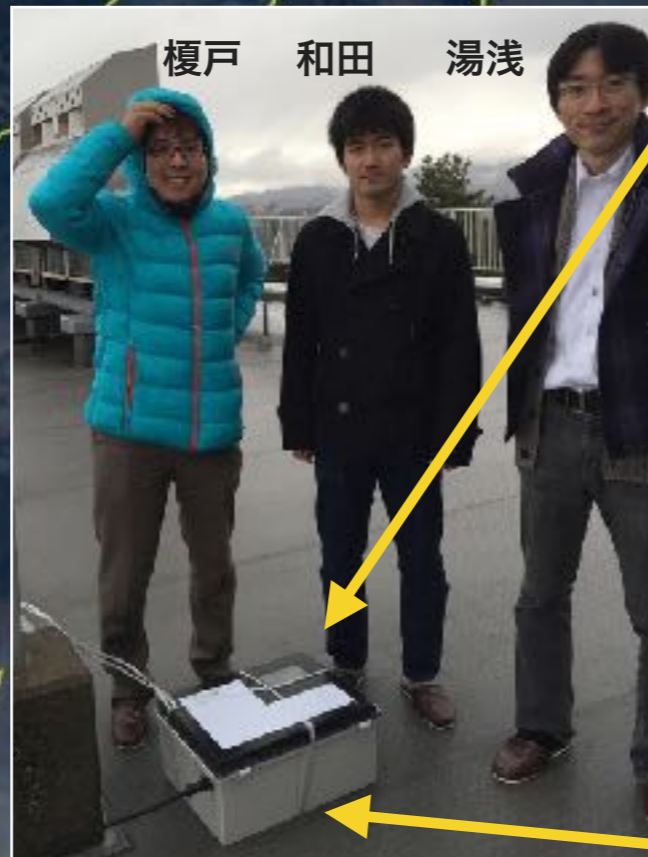
日本海沿岸で多地点マッピング観測の実現へ

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)



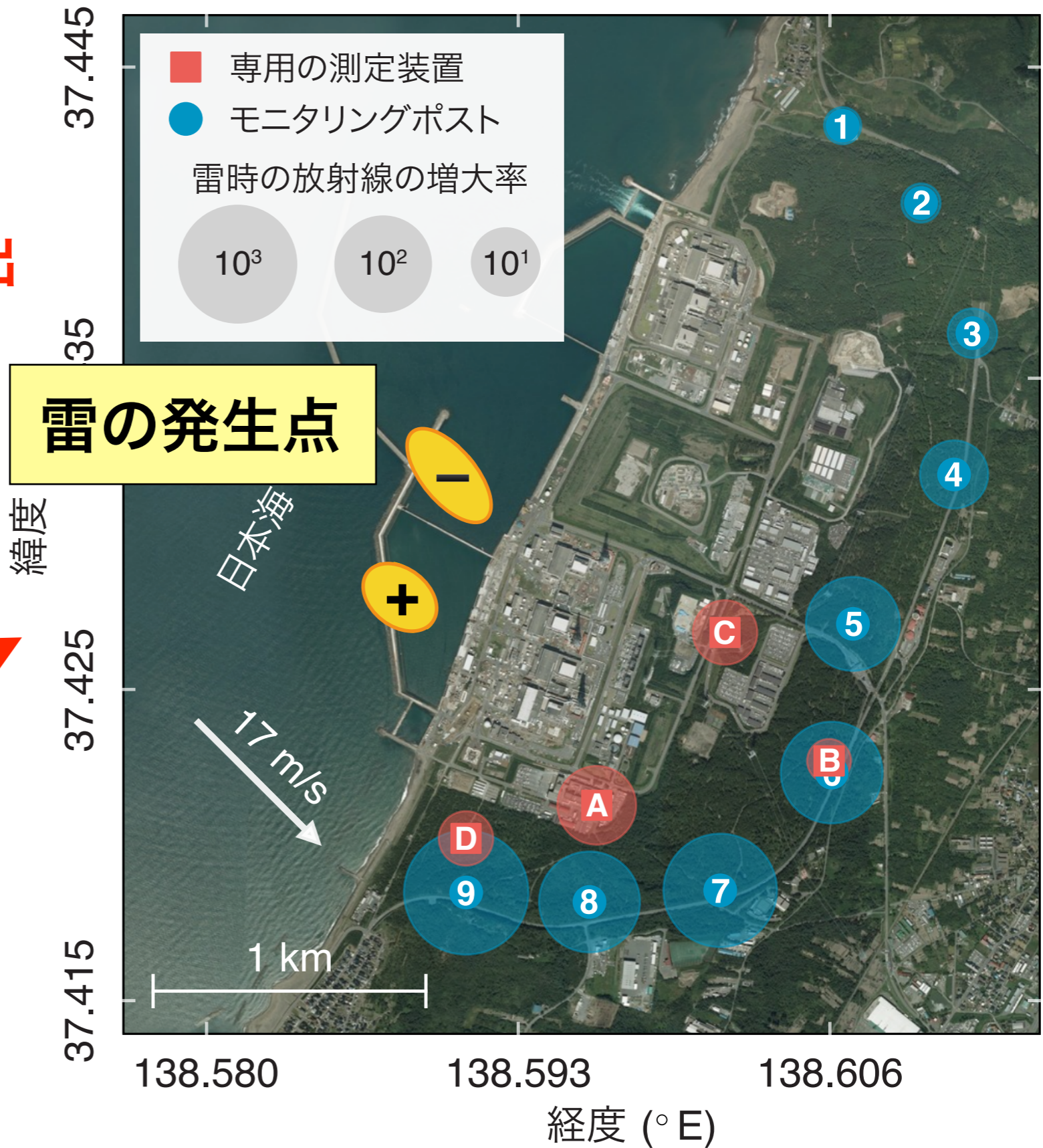
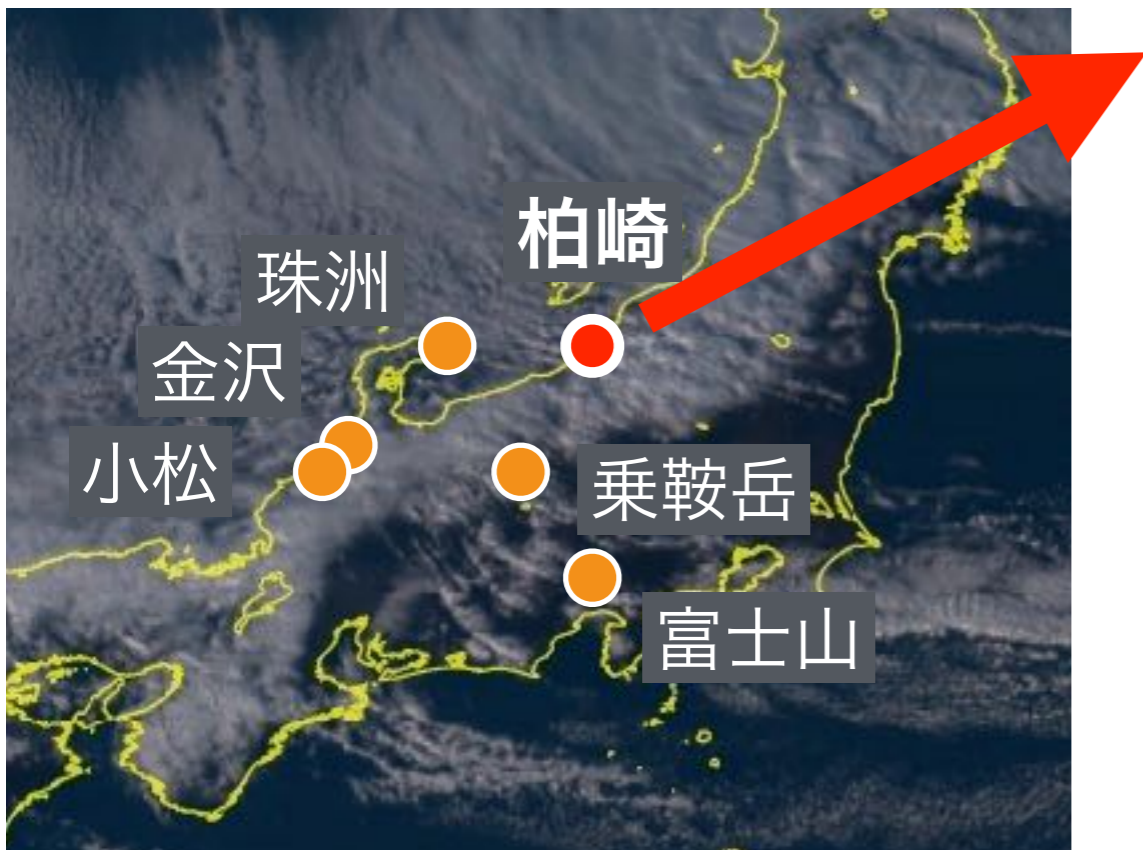
- 湯浅らを中心に小型で安価な信号処理回路を開発。
- 名刺サイズの小型コンピュータ Raspberry Piを使用。
- 持ち運びできる小型検出器が完成。
- 日本海沿岸の観測拠点に設置し、多地点マッピング観測を実現！

雷と同期したガンマ線バーストを検出

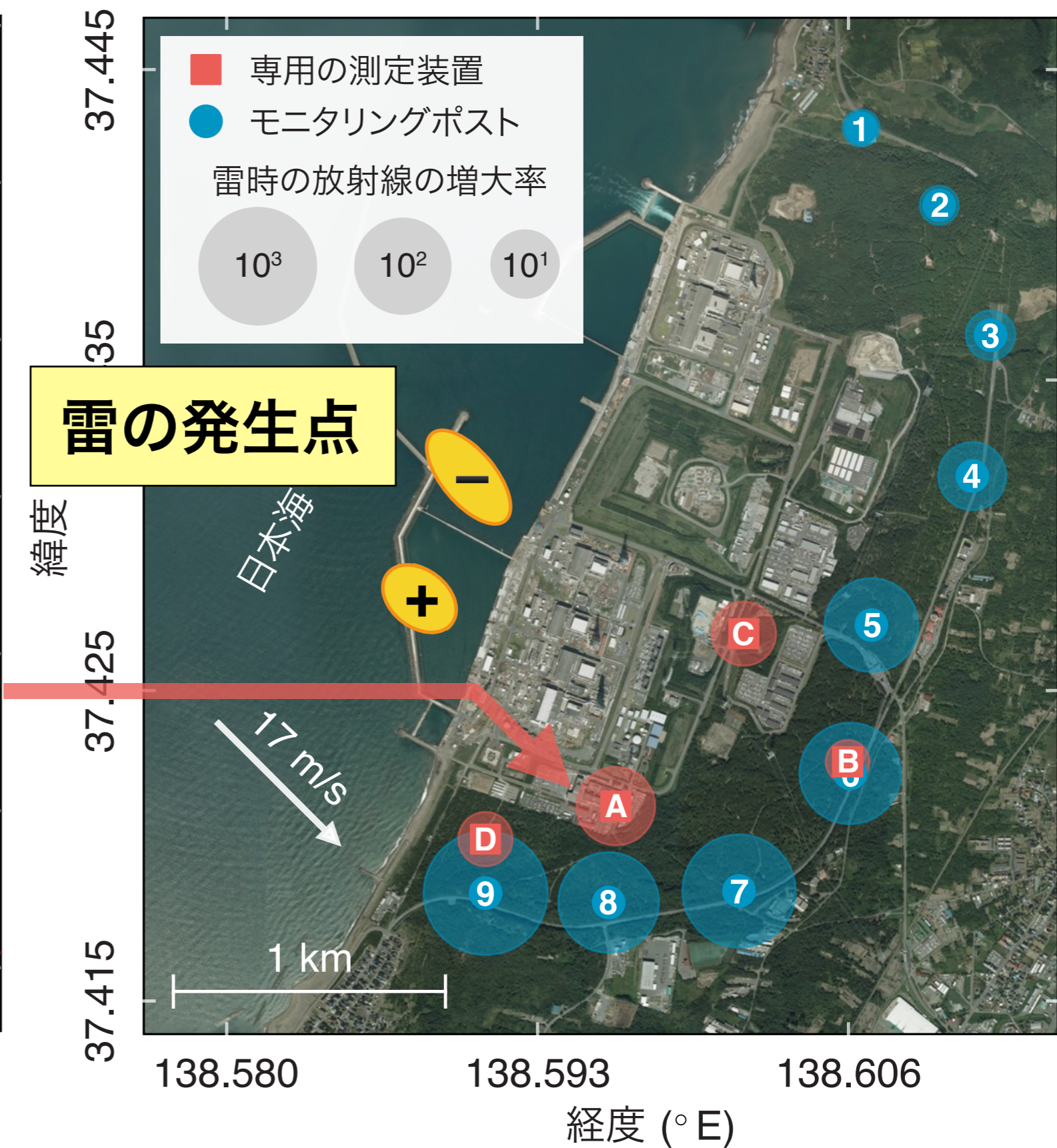
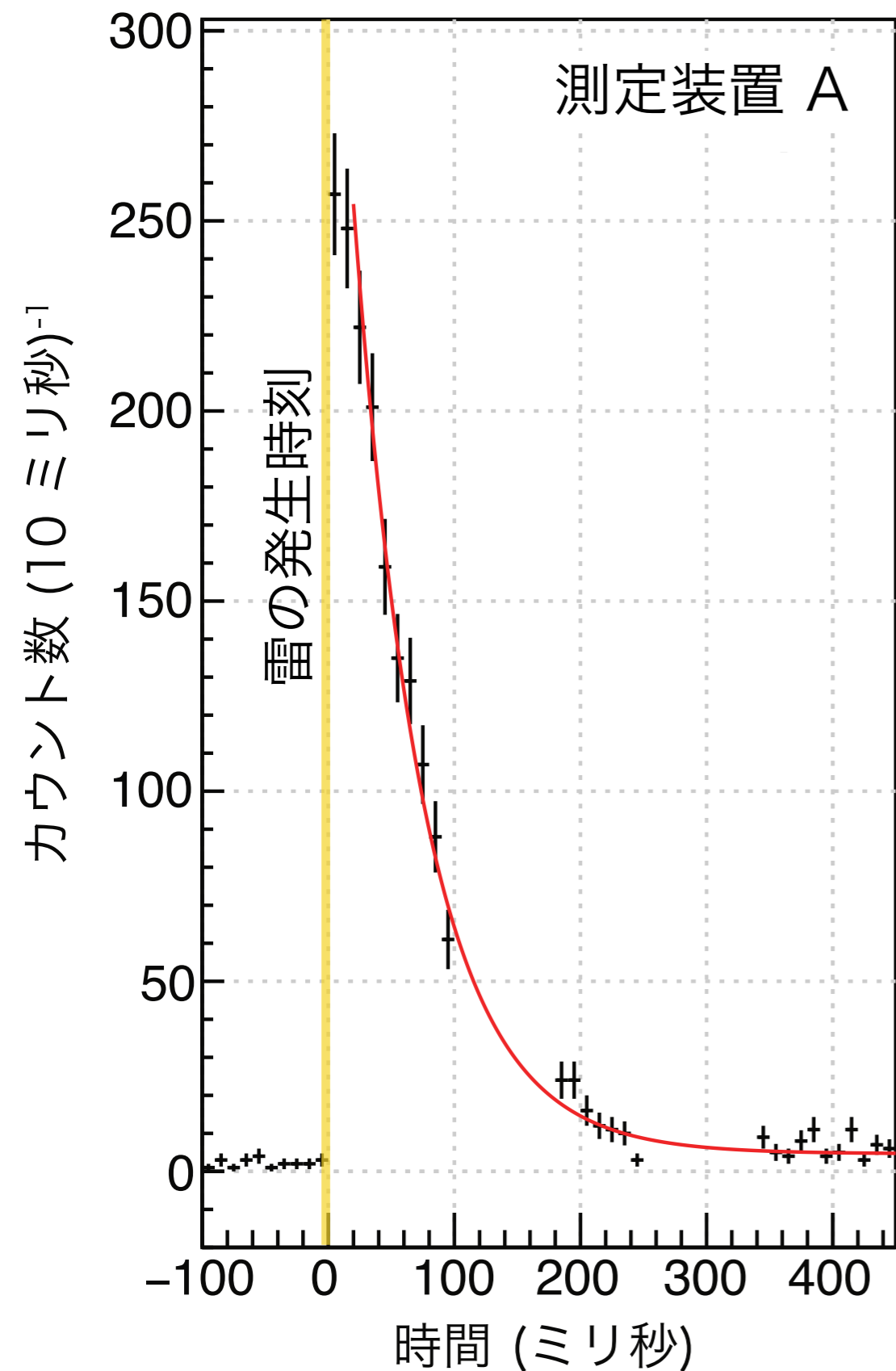
- 2017年2月6日 17:34:06 (日本時間) に柏崎で雷が発生。

→ 放射線イベントを同時検出

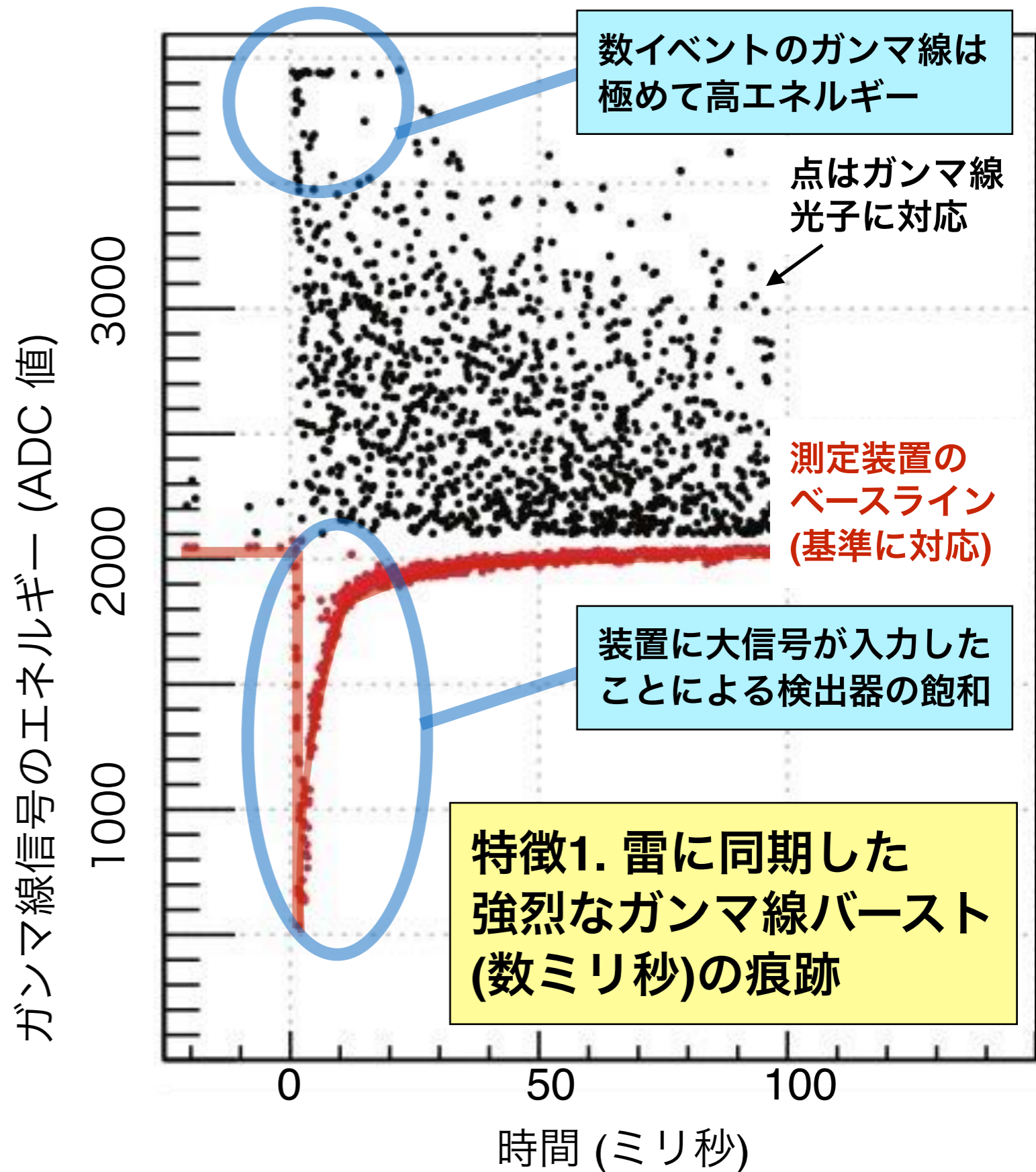
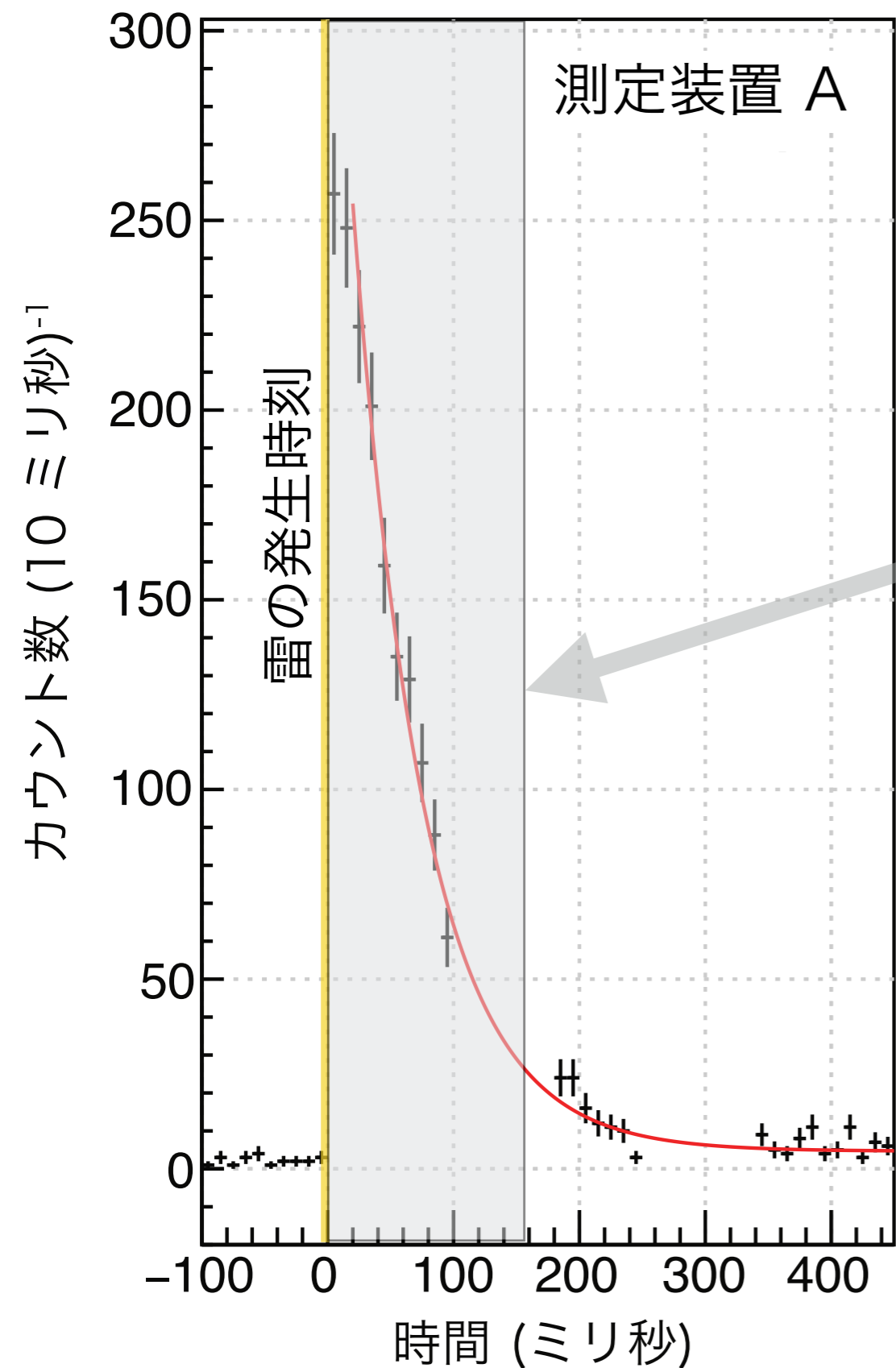
- 雷観測ネットワーク (JLDN) に加え、佐藤ら (北大) の電波観測で雷の発生を確認。



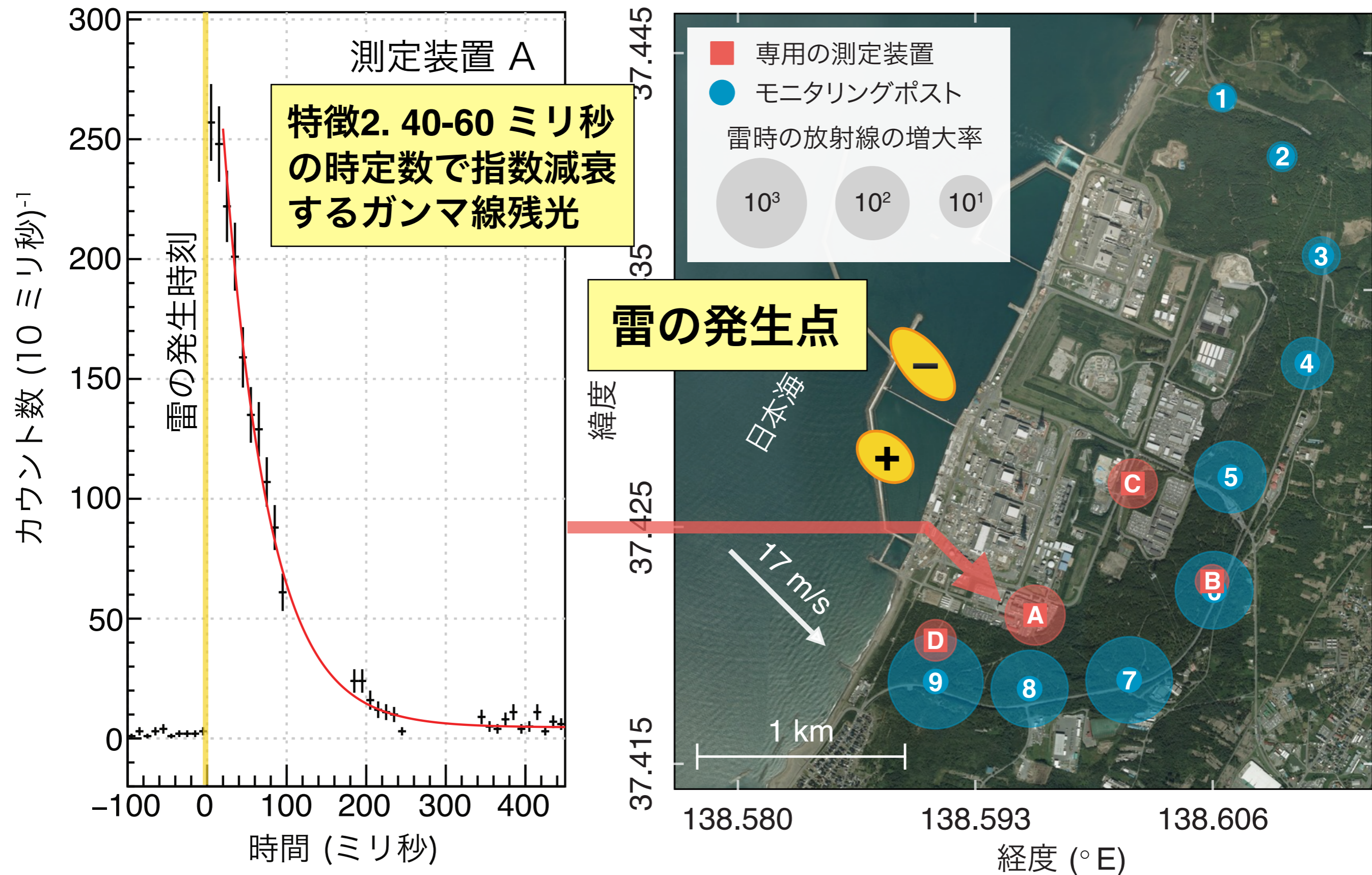
雷と同期したガンマ線バーストを検出



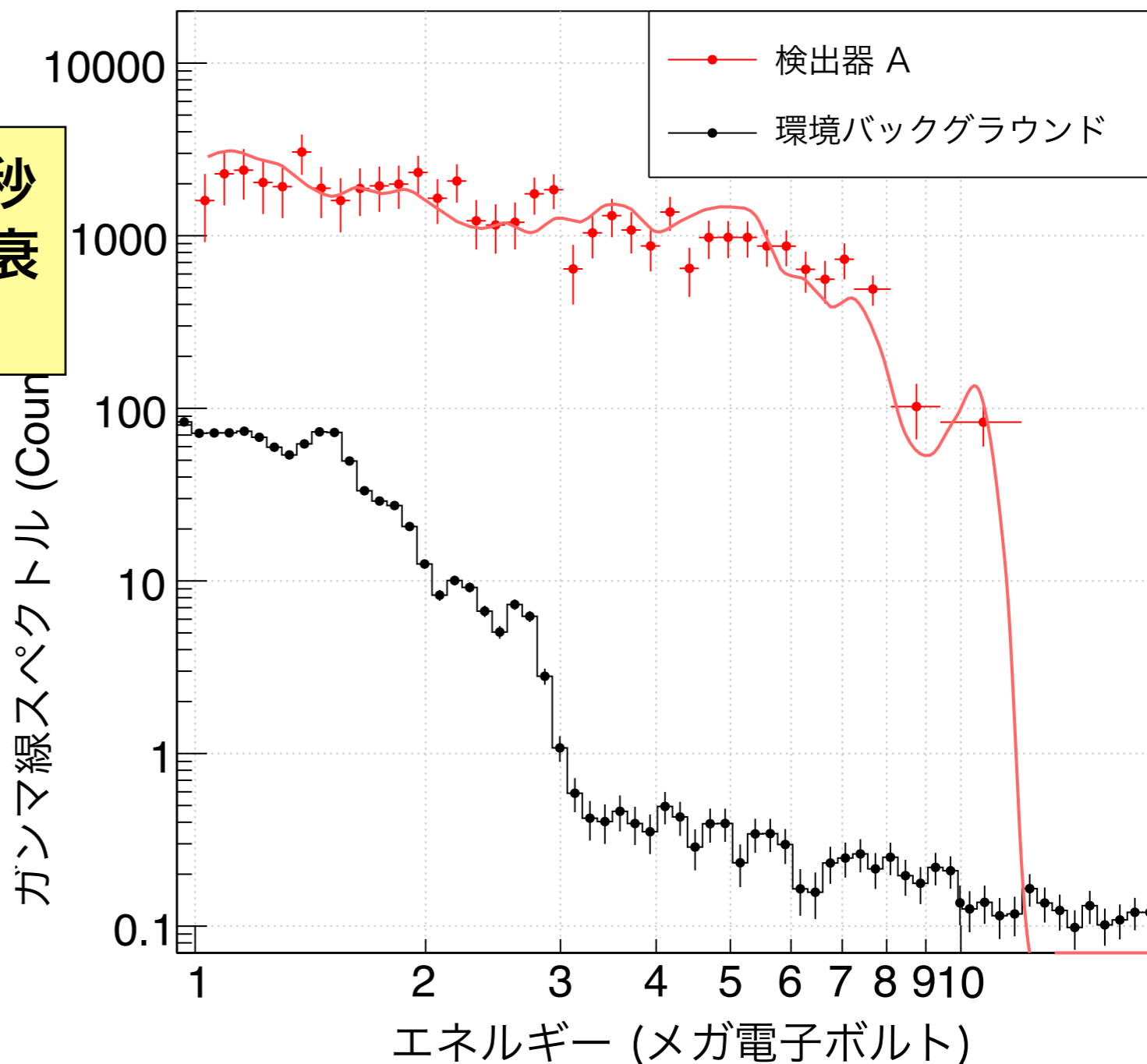
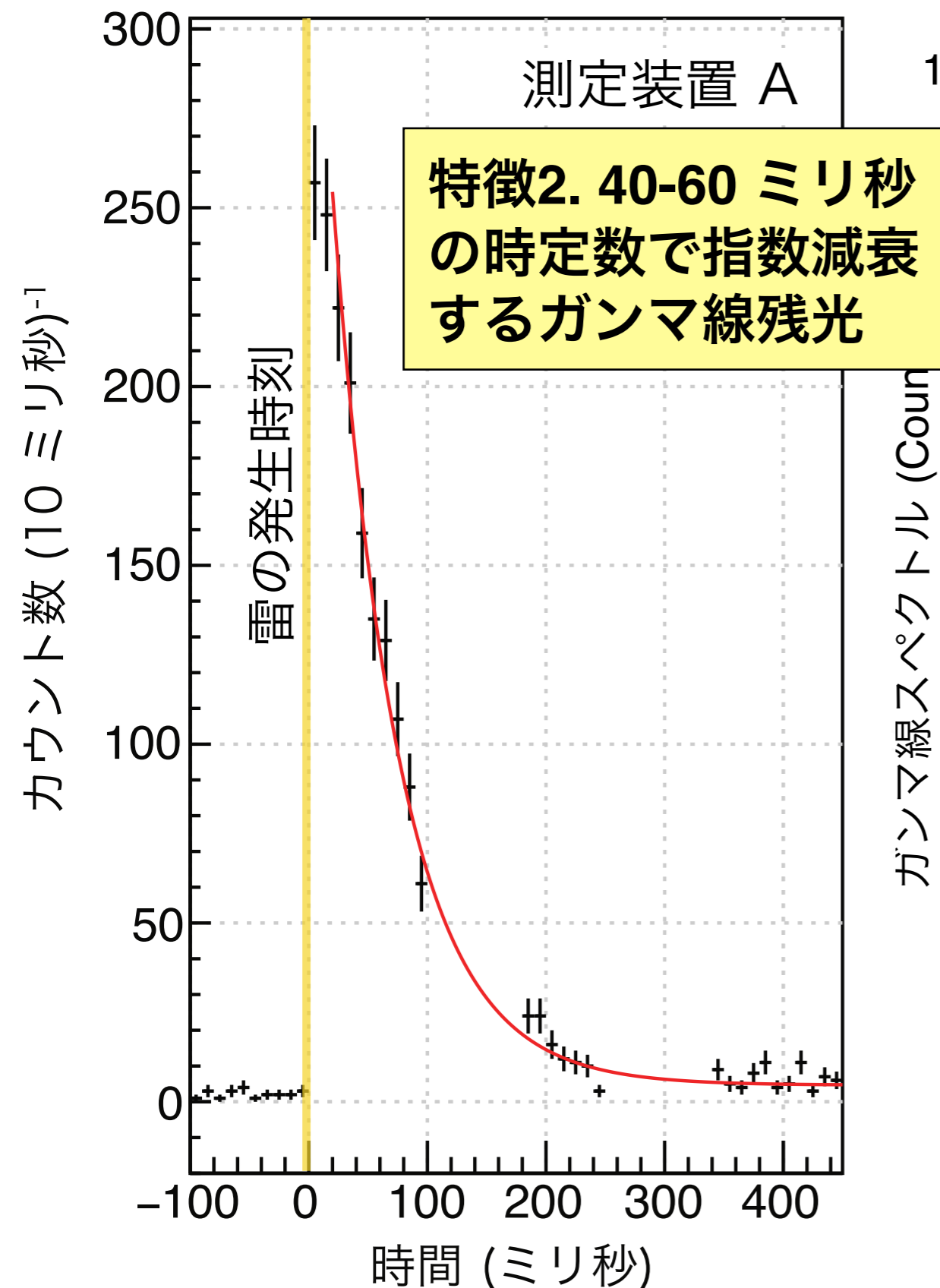
雷と同期したガンマ線バーストを検出



雷の直後に ~50 ミリ秒続くガンマ線残光



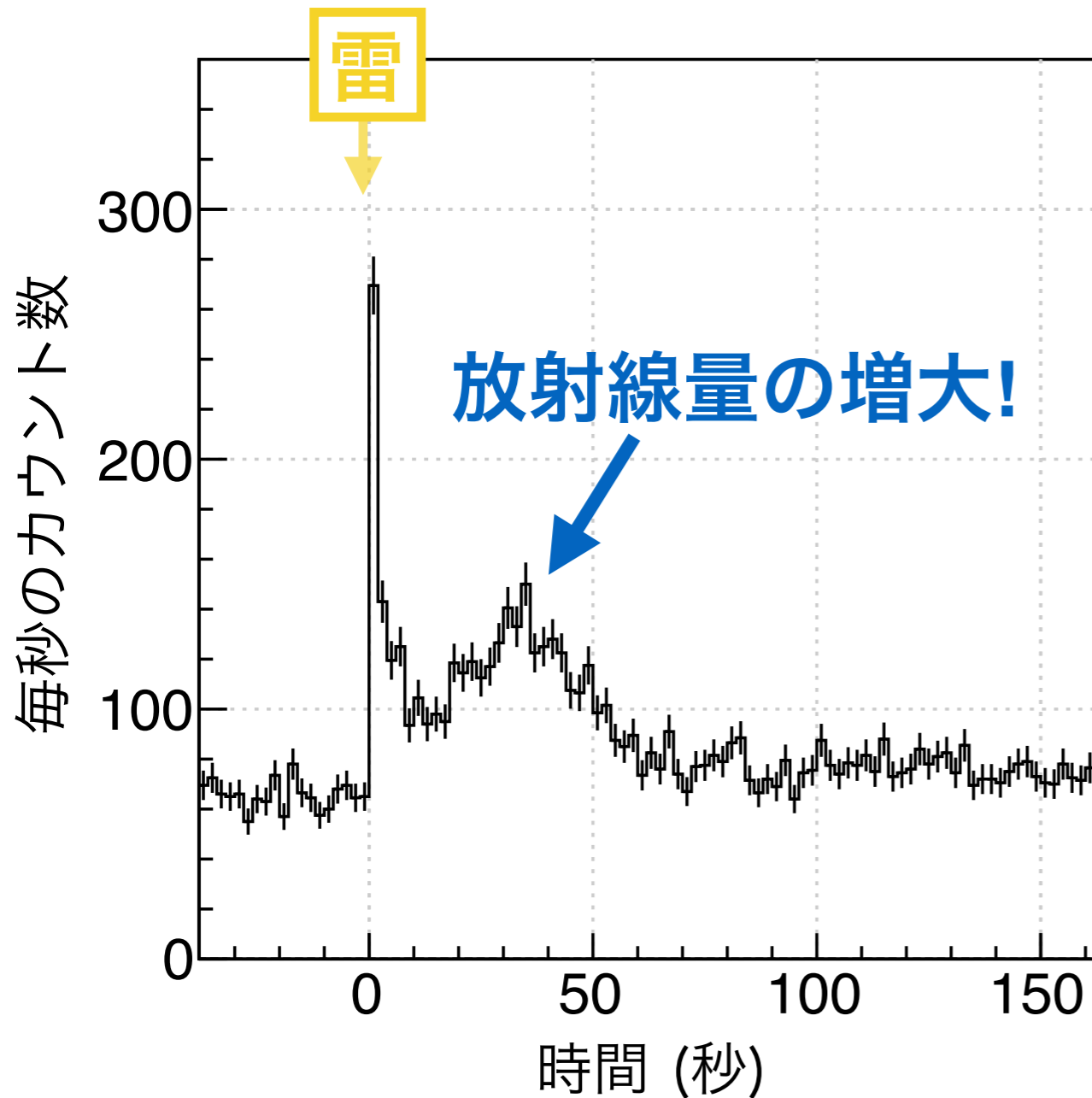
雷の直後に ~50 ミリ秒続くガンマ線のバースト



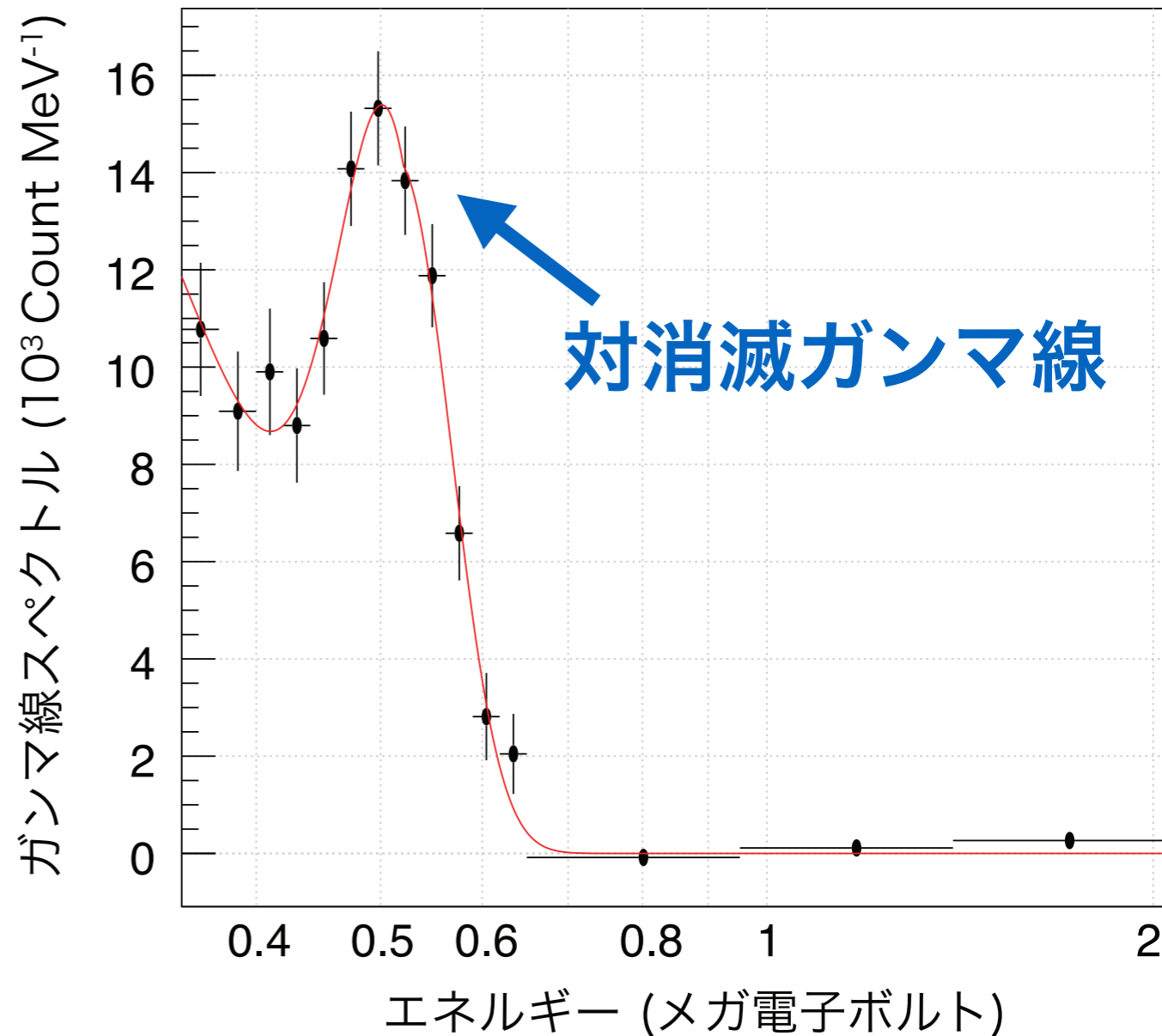
特徴3. 約10メガ電子ボルトのエネルギーまで続く放射線の到来。

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)



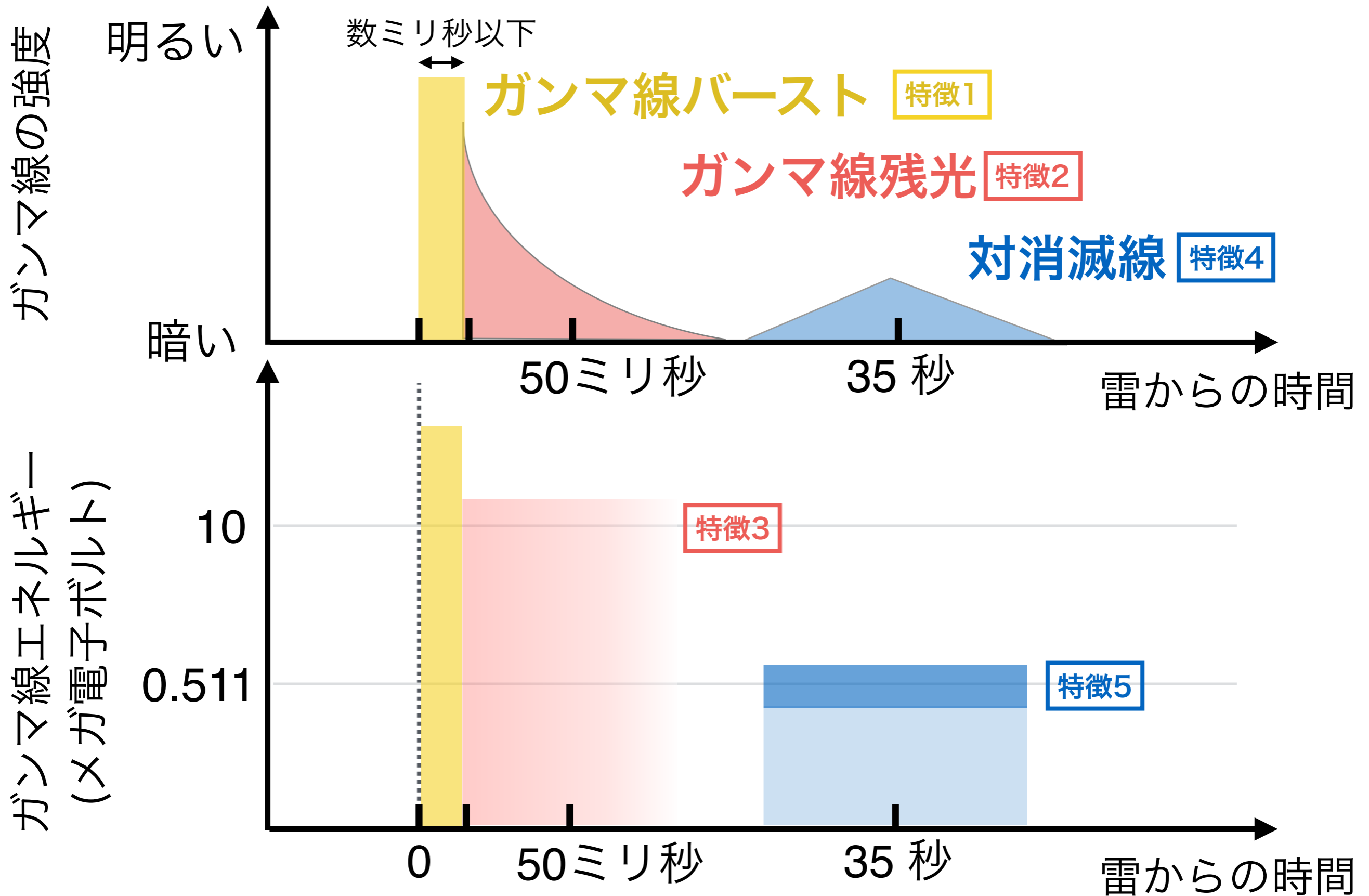
雷の後 1-63秒の間のスペクトル



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!

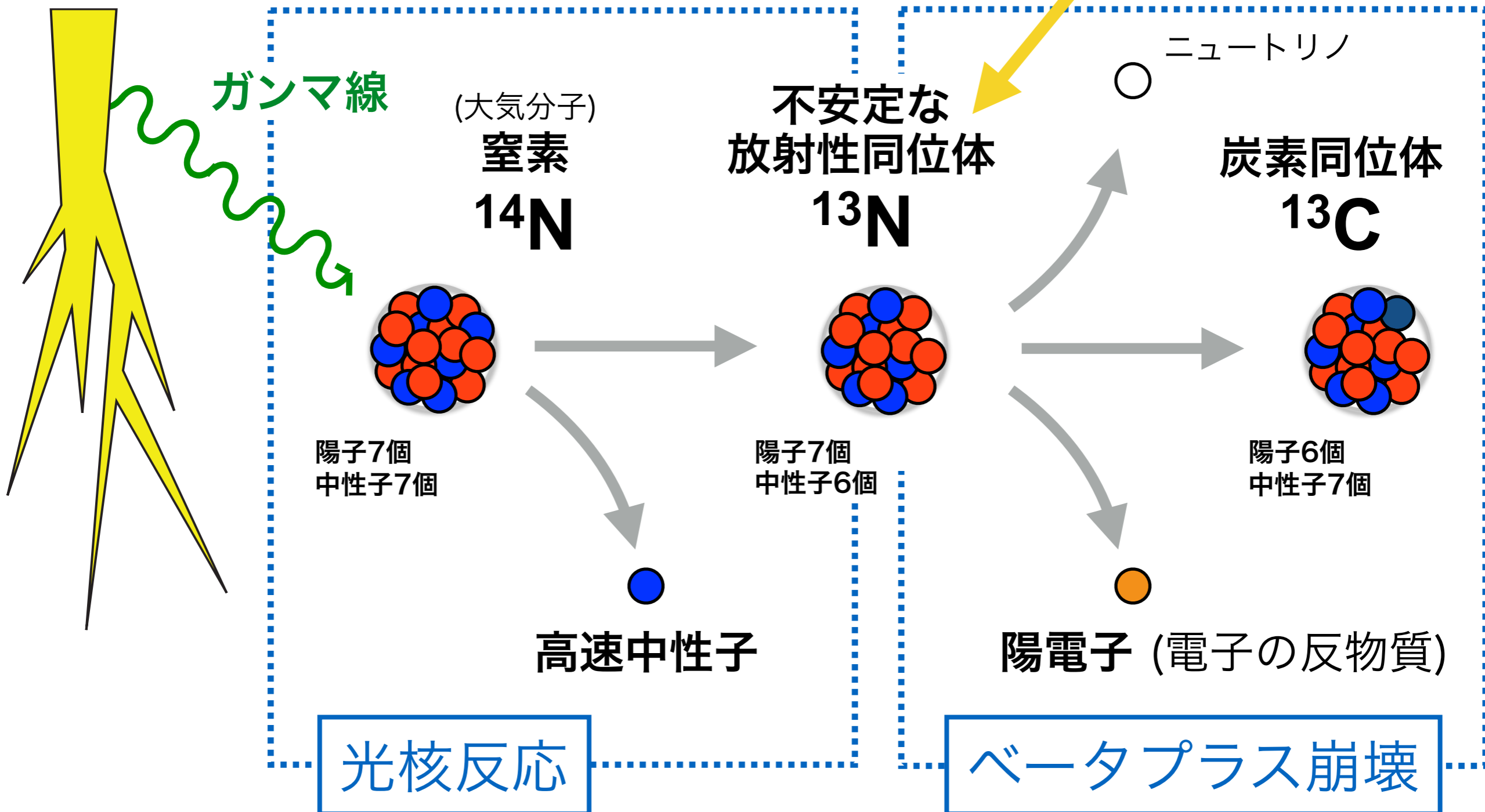
観測のまとめ (模式図)



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



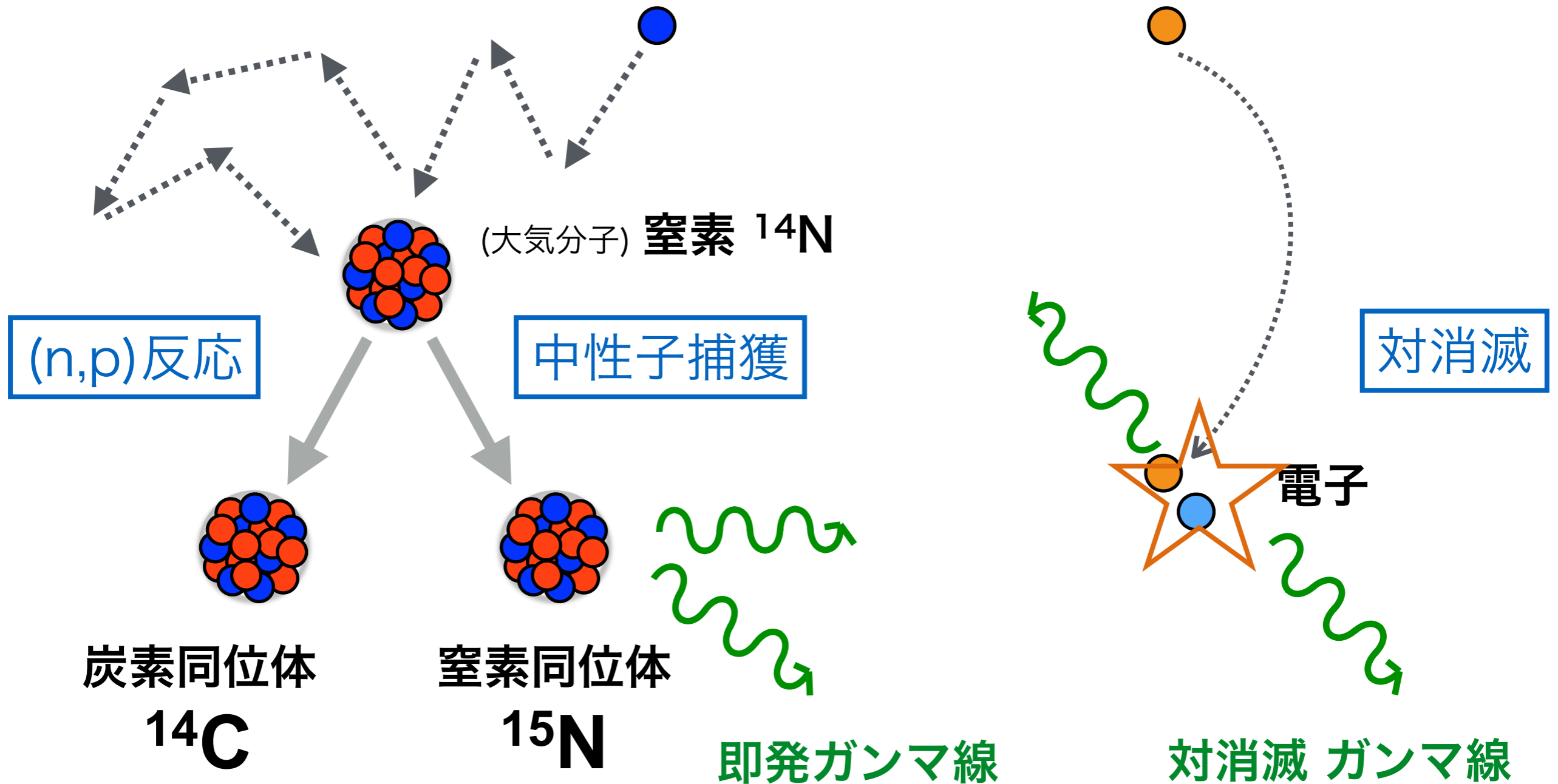
陽電子 (電子の反物質)



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

ガンマ線残光
として検出!

~35秒遅れ検出!

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？
 - ➔ 高精度の校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。

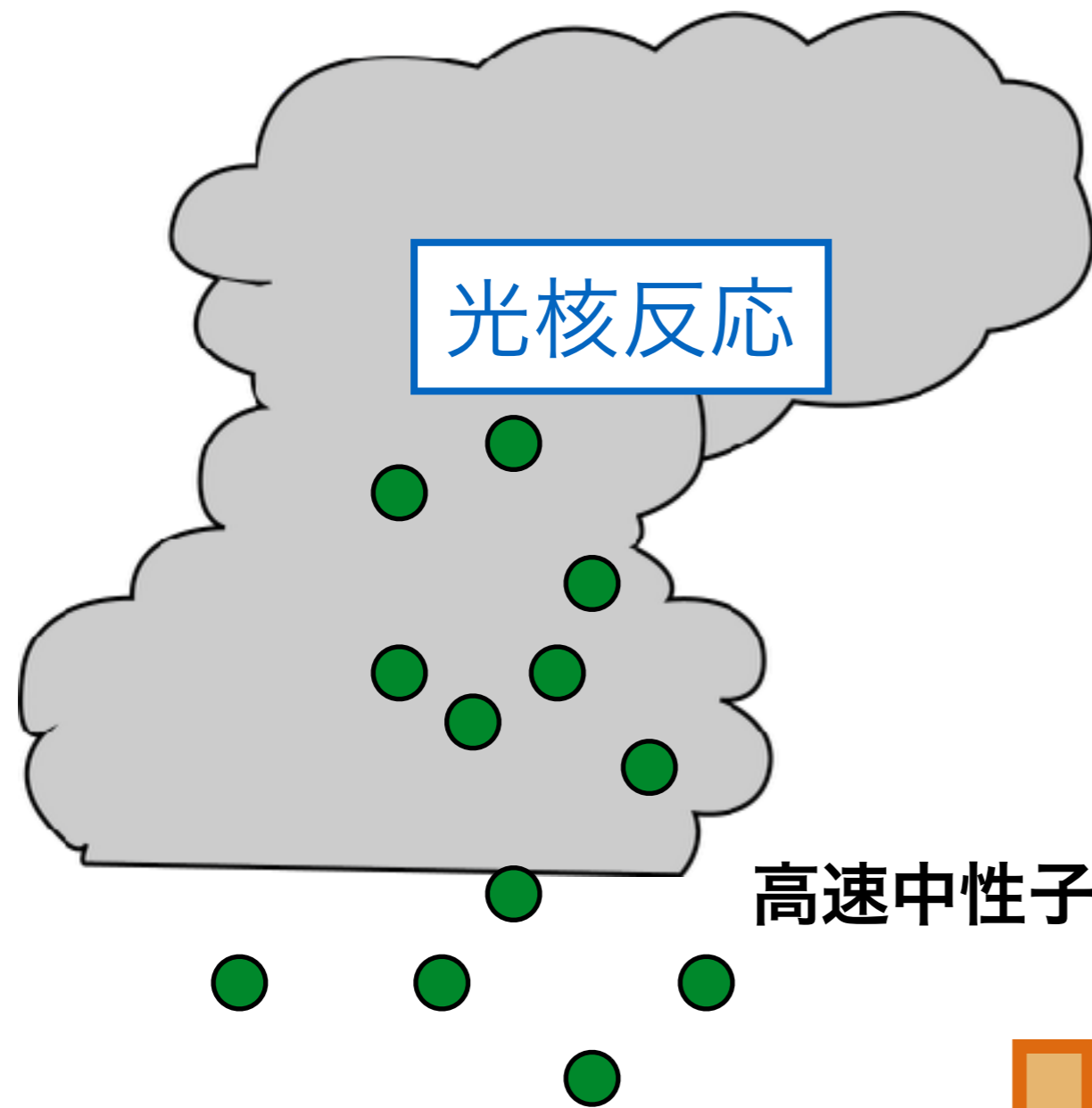
雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



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)

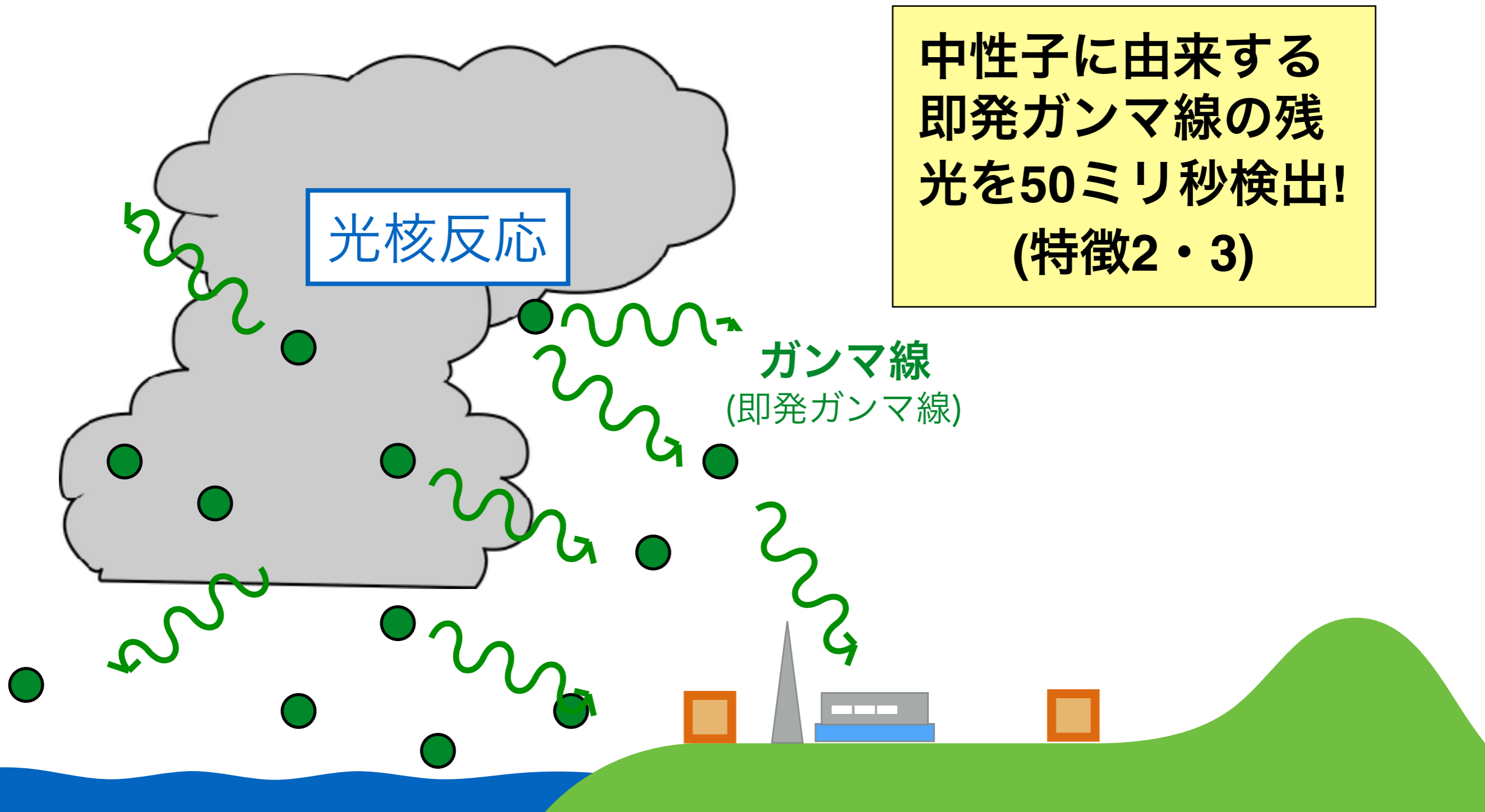
1. 雷が発生。雷からのガンマ線が大気窒素と衝突して光核反応を生じ、**高速中性子**と**窒素同位体**を発生させる。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



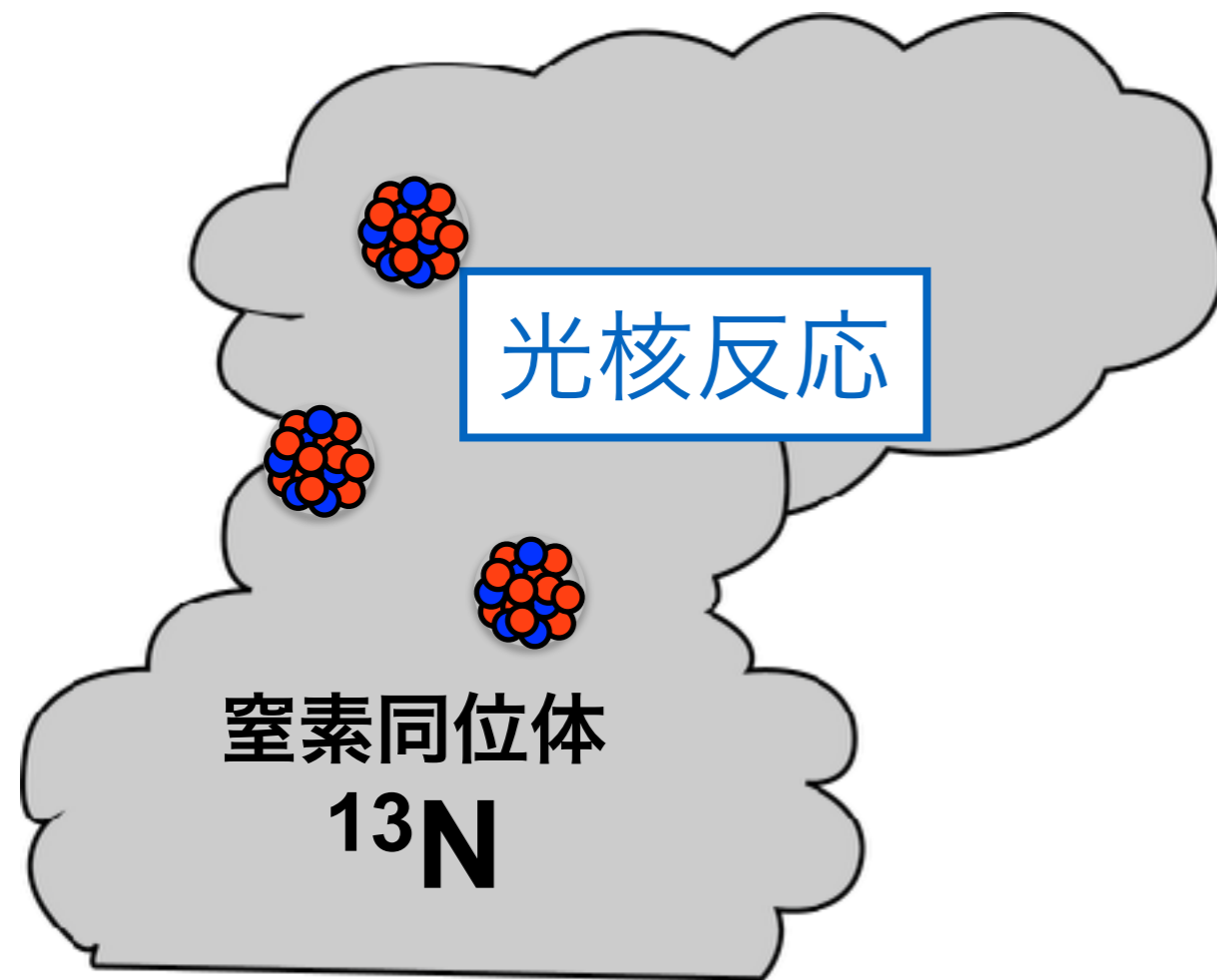
2. **中性子**は大気中で散乱を繰り返しエネルギーを失い広がる。大気中の窒素原子核に吸収されて**即発ガンマ線**を放出する。

雷がつくる反物質(陽電子)を放つ雲



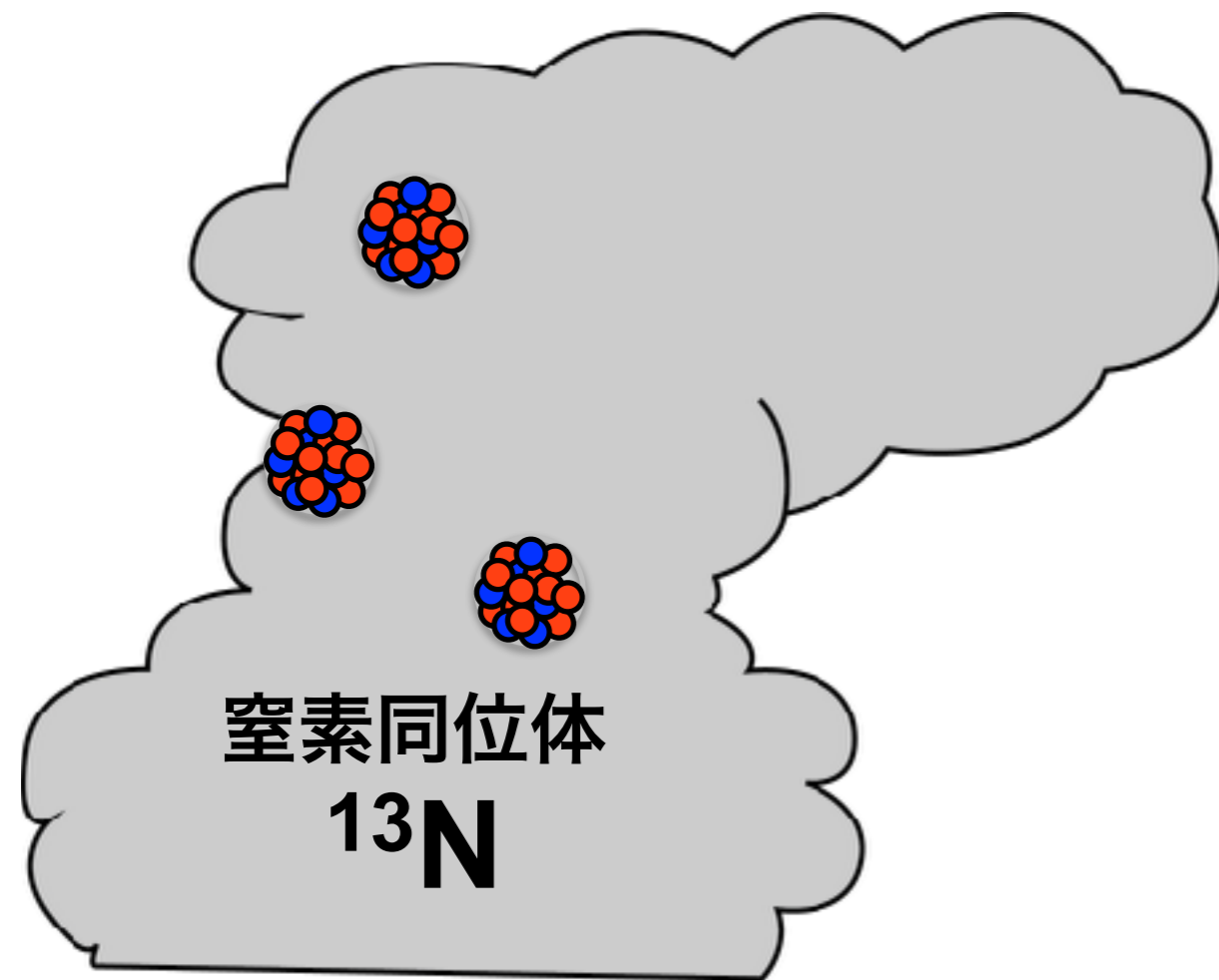
2. **中性子**は大気中で散乱を繰り返しエネルギーを失い広がる。大気中の窒素原子核に吸収されて**即発ガンマ線**を放出する。

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

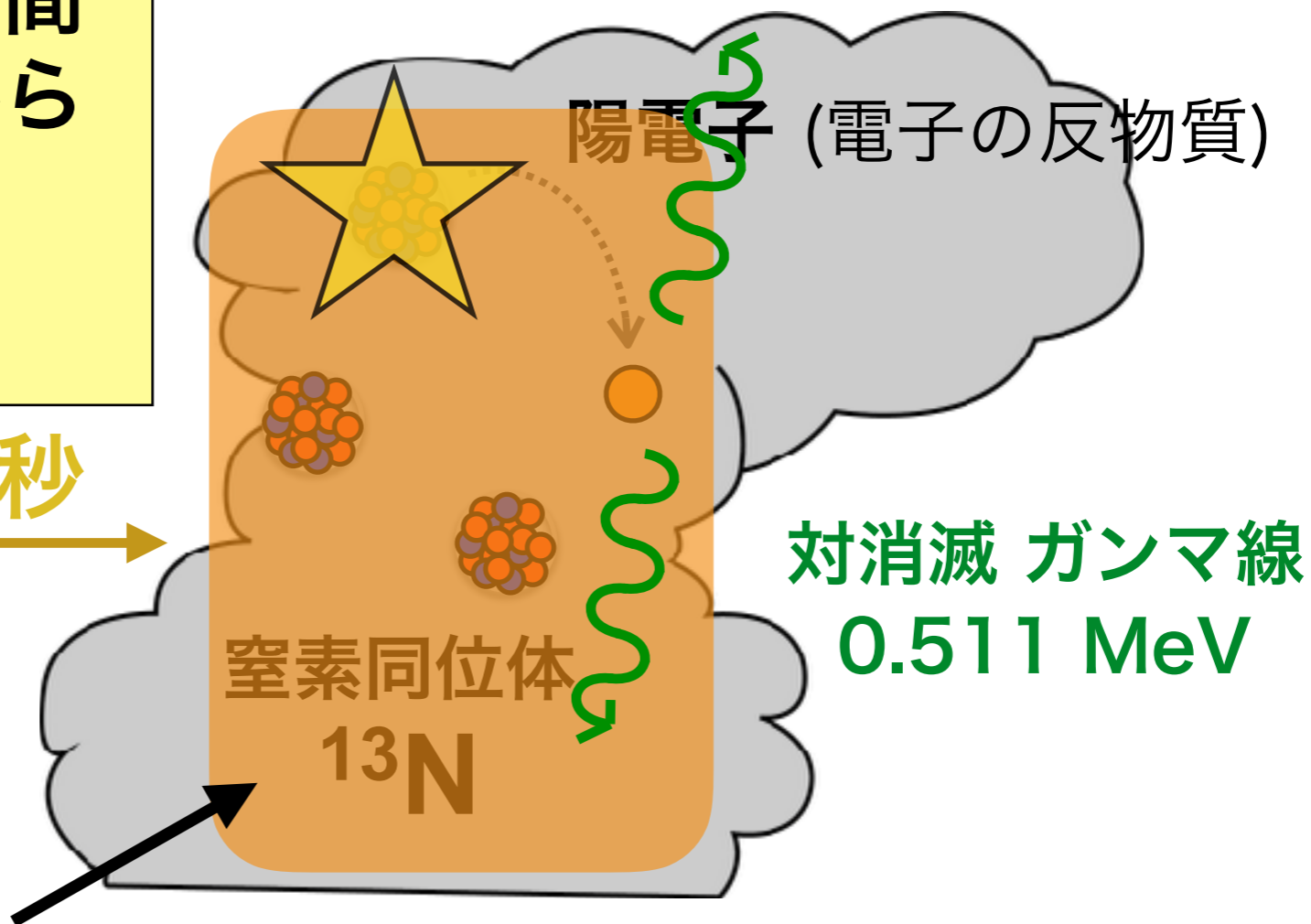


3. 光核反応で大気窒素は**不安定な同位体 ^{13}N** になる。雷雲とともに上空を移動する。なお、大気酸素から ^{15}O も生成される。

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)

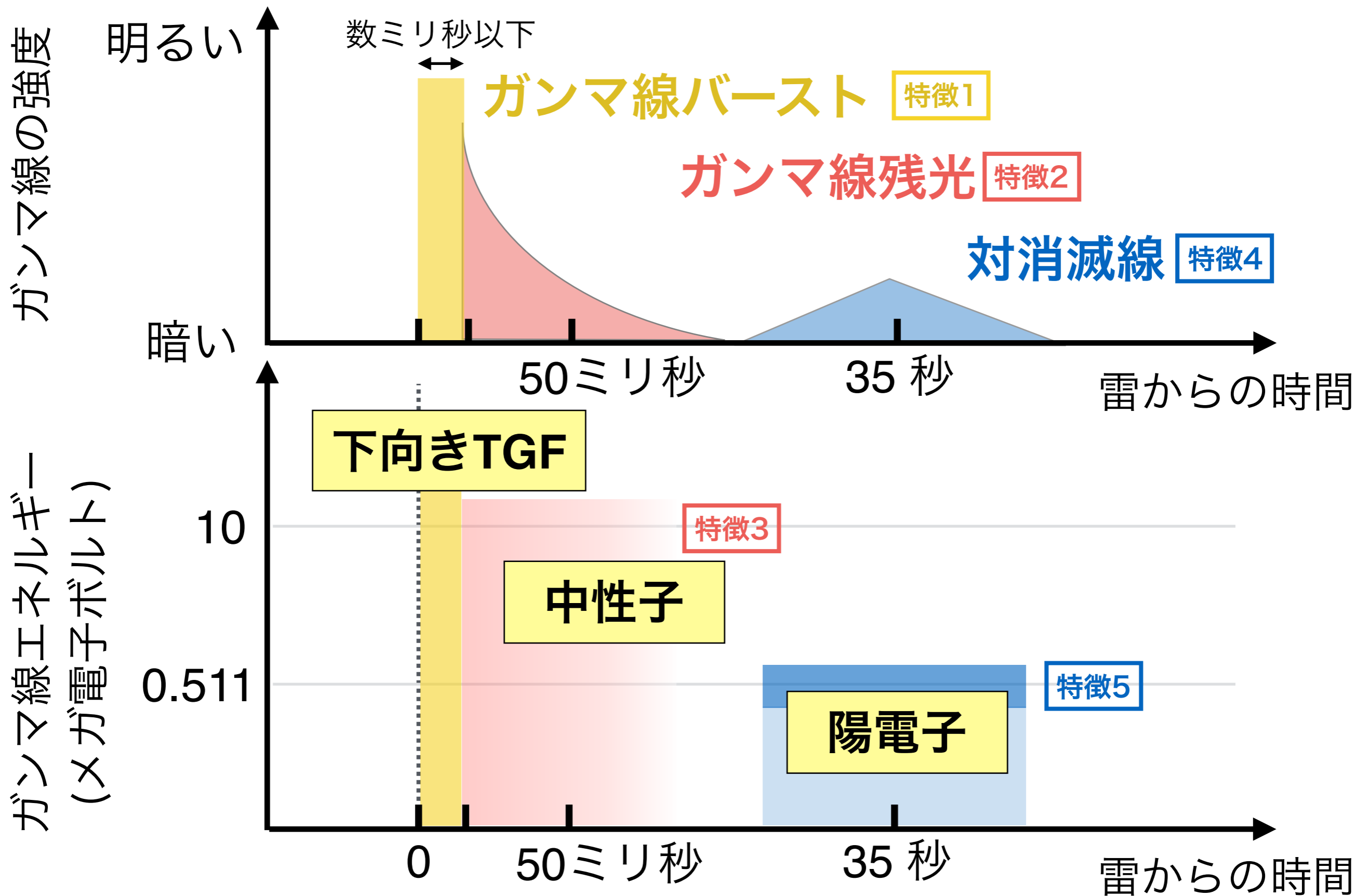
約35秒



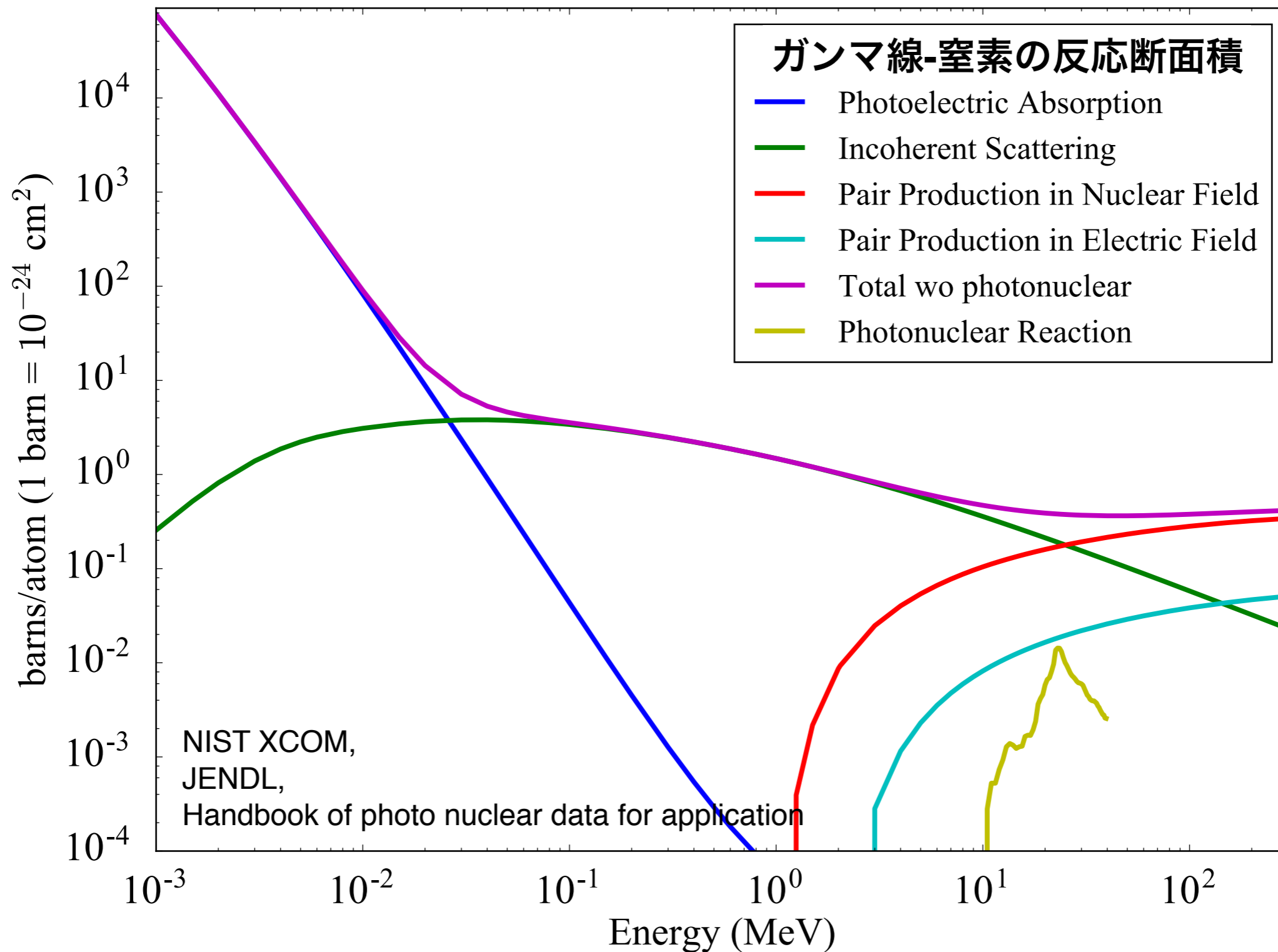
反物質の雲が上空を
通過していった。

- 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)

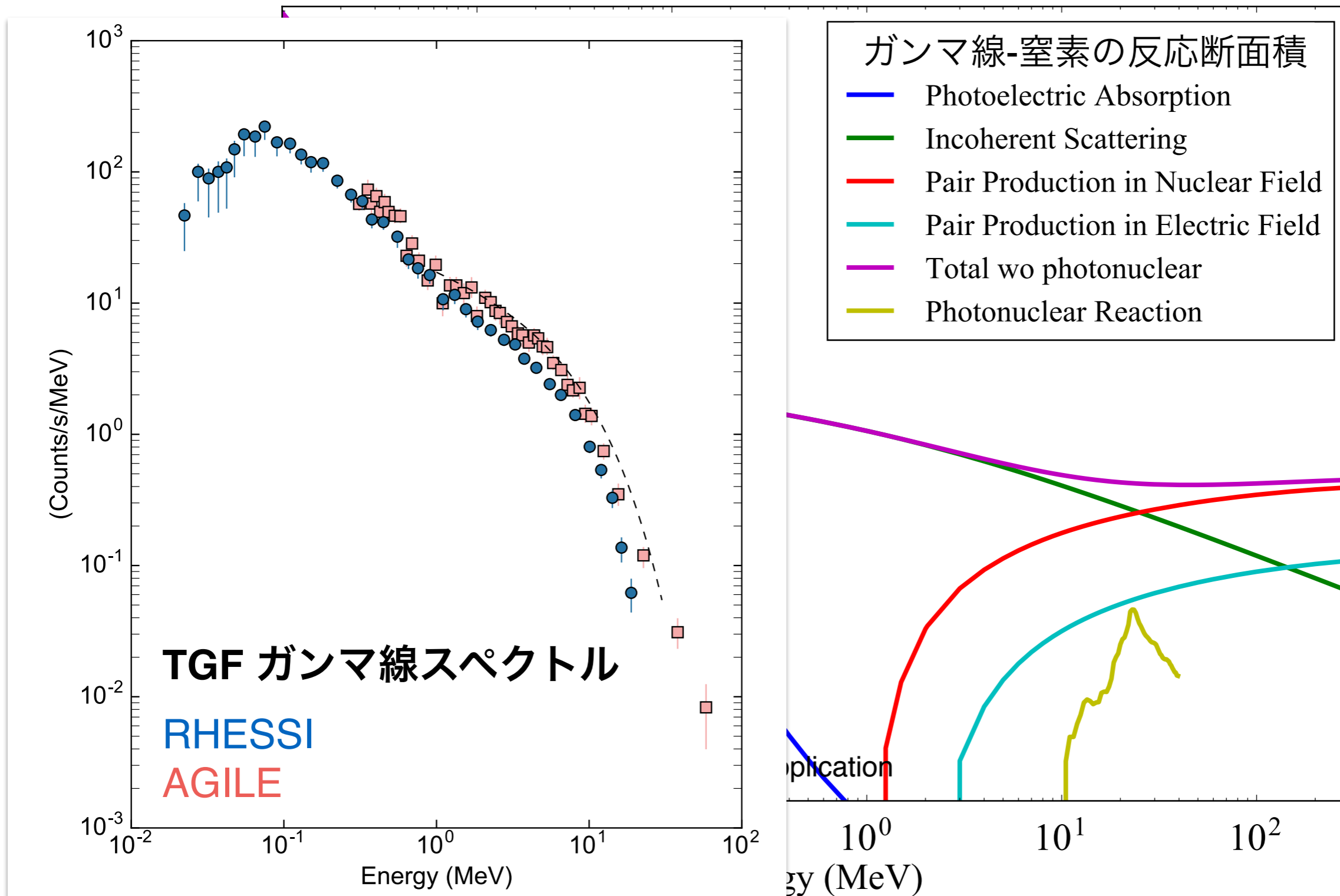


下向き TGF による光核反応 (特徴1: 強烈なガンマ線)



- >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)

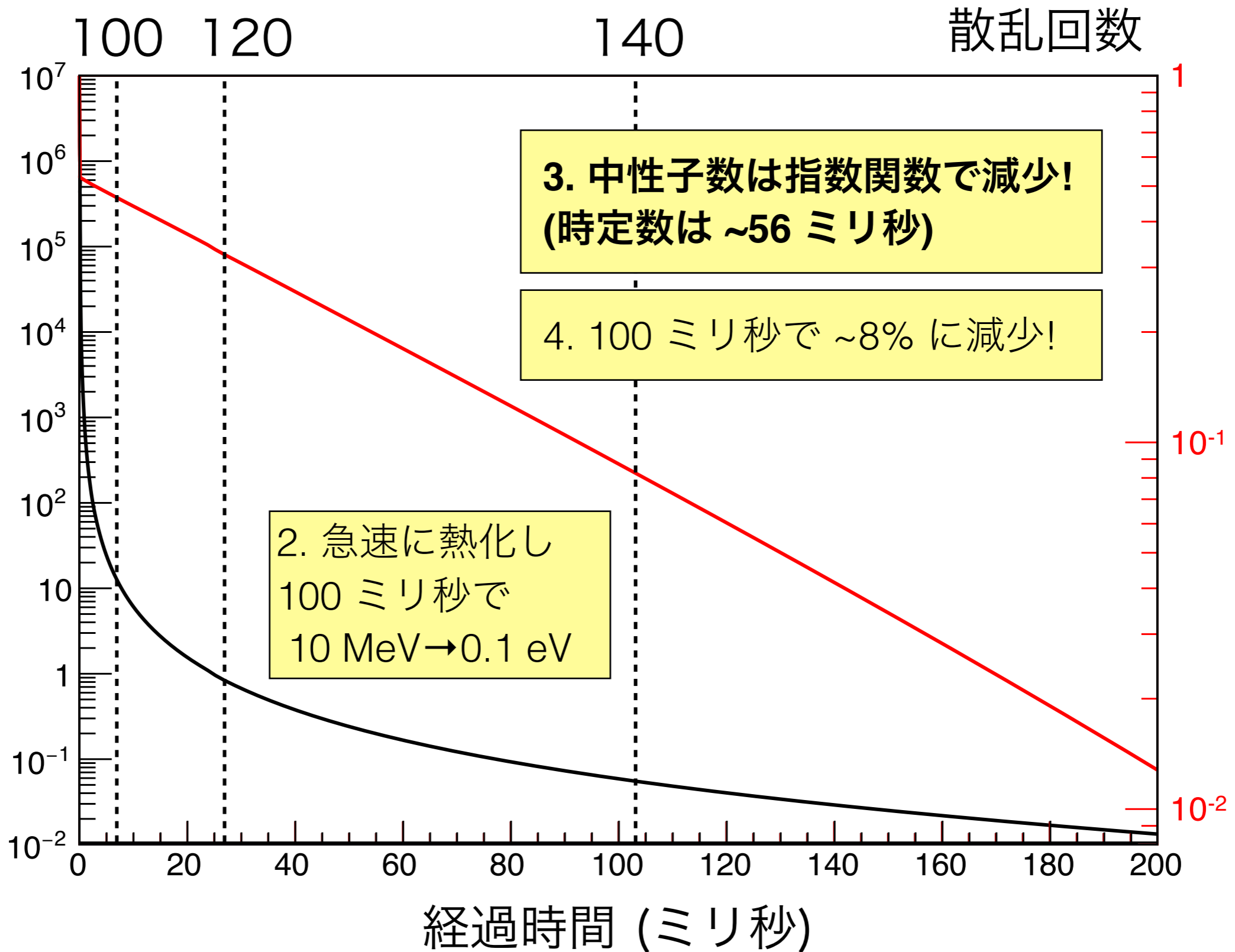


- >10 MeV ガンマ線で光核反応が発生。対生成の ~ 1 桁ほど小さい断面積。
- TGF のエネルギースペクトルは 10 MeV 以上まで伸びている。

ガンマ線残光: 中性子の解釈 (特徴2: 時間変化)

1. 最初は
10 MeV

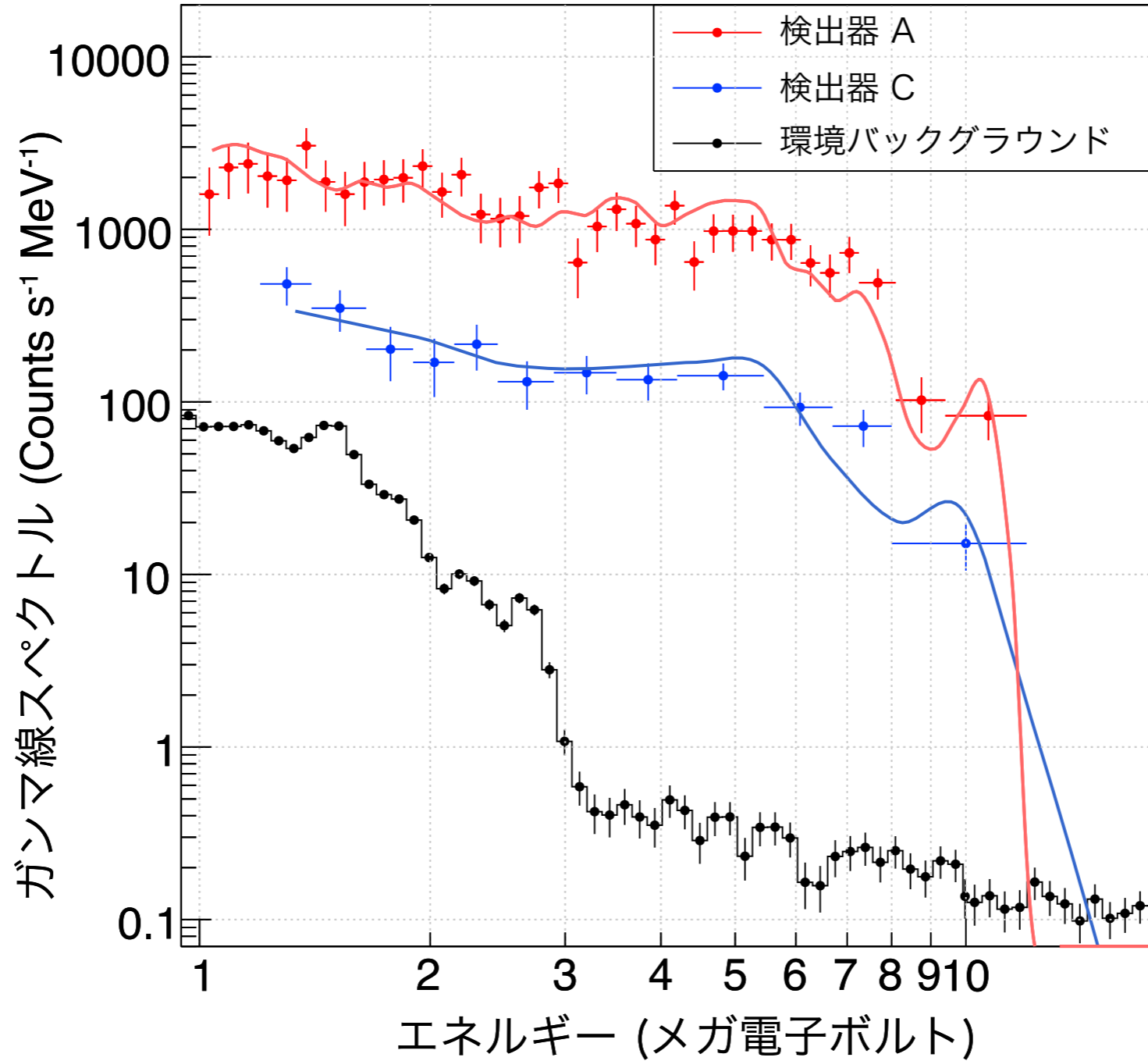
中性子のエネルギー
(電子ボルト)



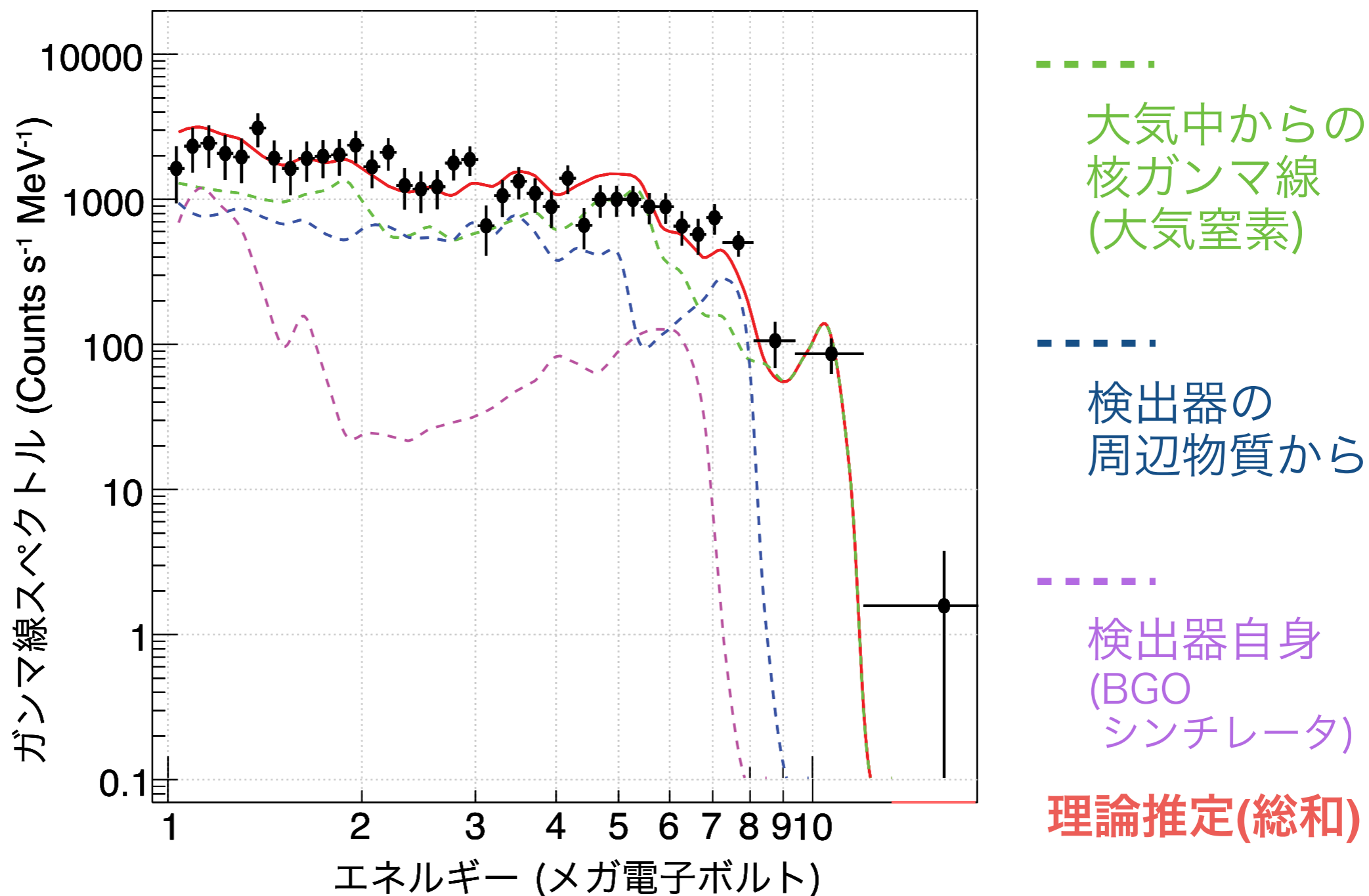
中性子の総数 (相対比)

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)

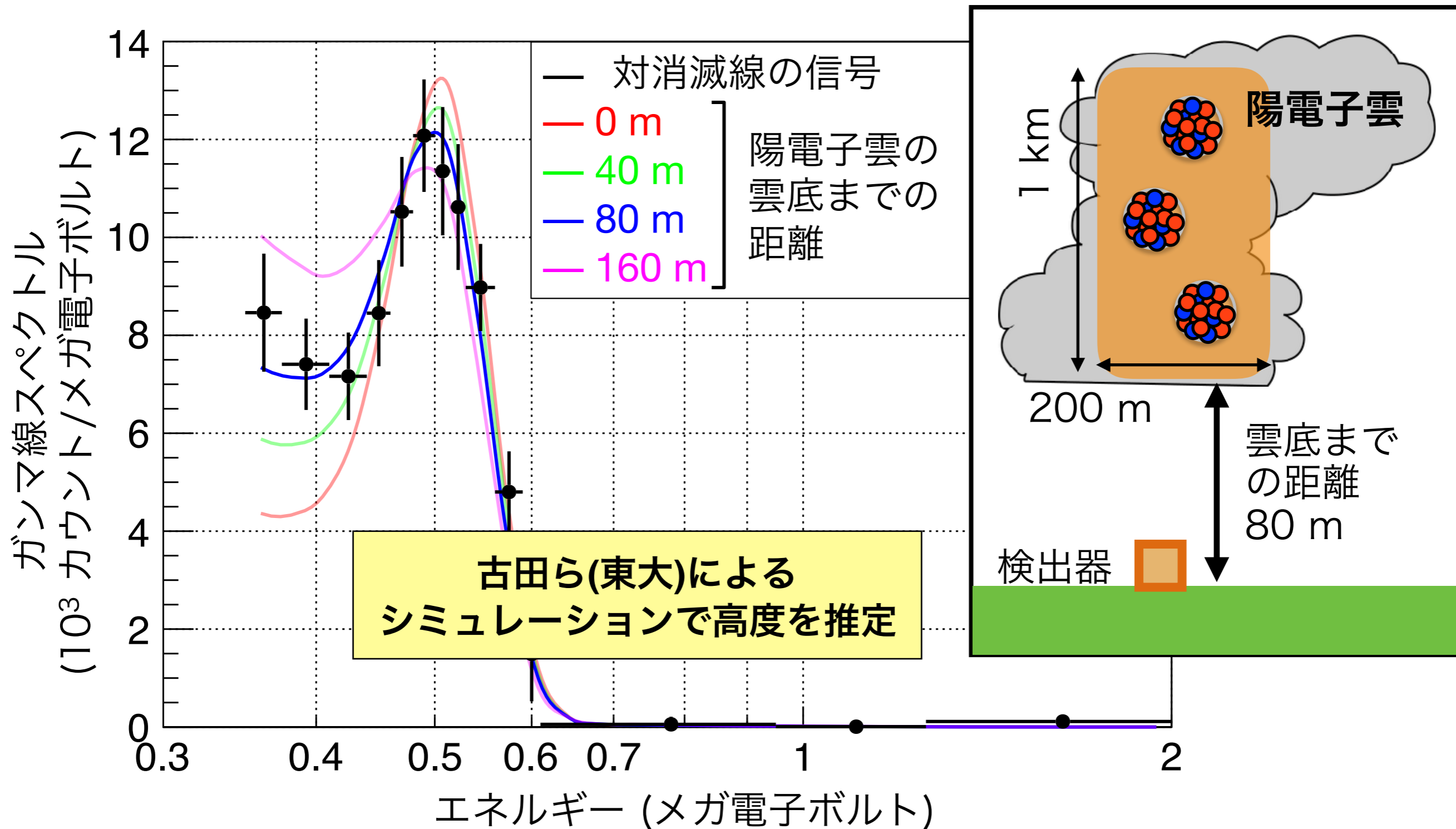


ガンマ線残光: 中性子の解釈 (特徴3:スペクトル)



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。

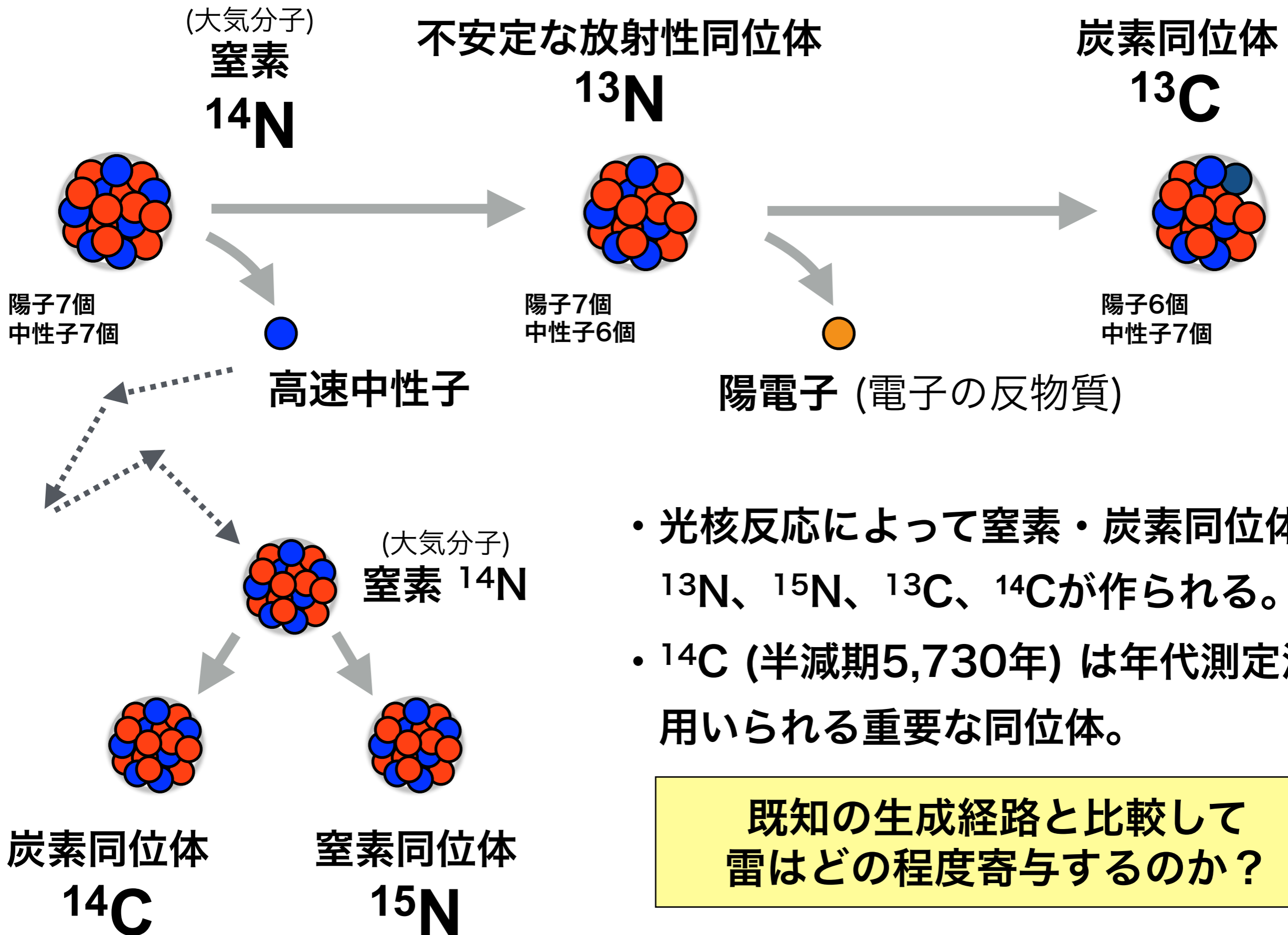
対消滅線の強度から光核反応の量を推定



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

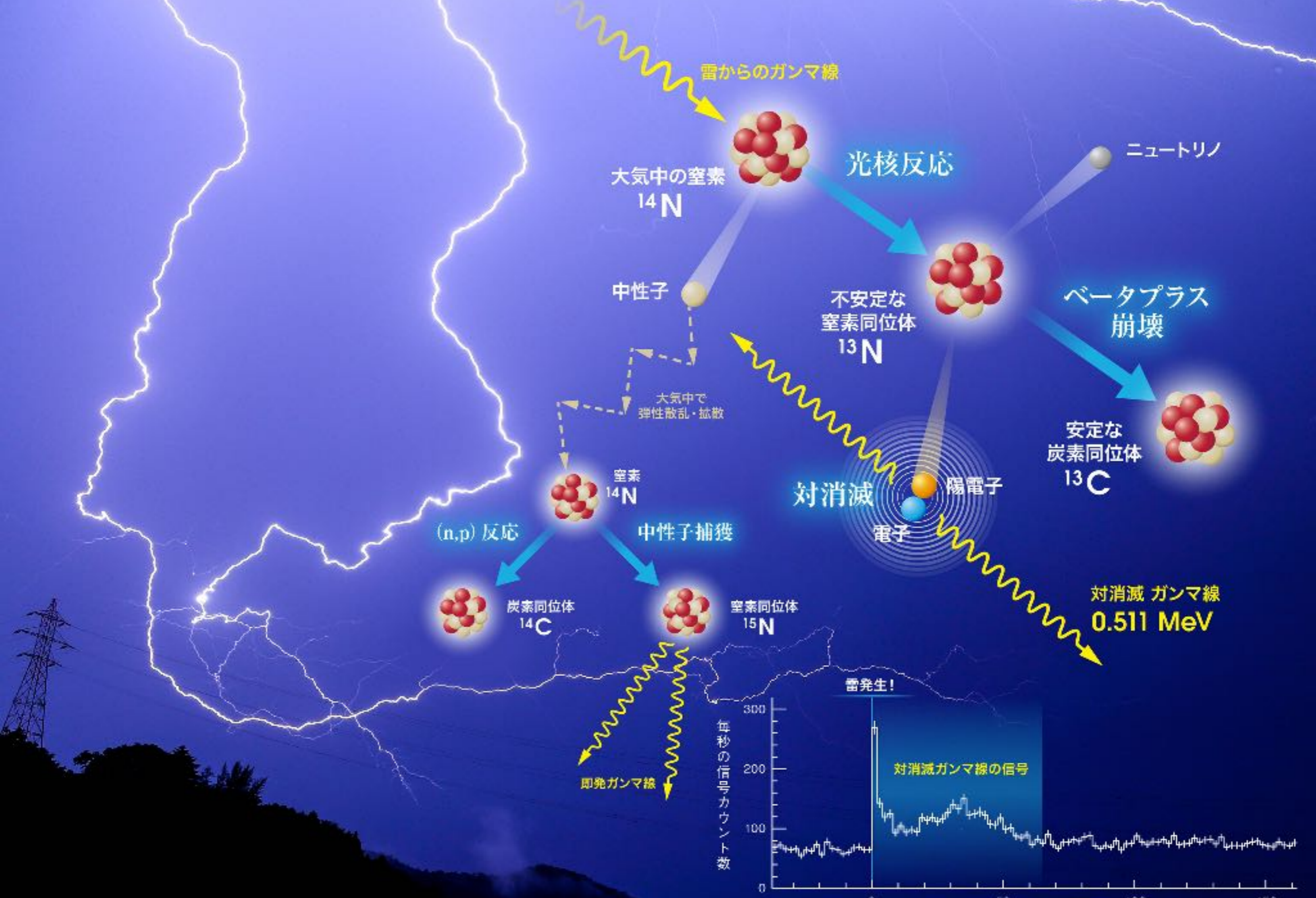


- 光核反応によって窒素・炭素同位体 ^{13}N 、 ^{15}N 、 ^{13}C 、 ^{14}C が作られる。
- ^{14}C (半減期5,730年) は年代測定法で用いられる重要な同位体。

既知の生成経路と比較して
雷はどの程度寄与するのか？

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。
- 今後は、電波による放電路の測定や地上での電場計測と連携した観測体制を構築したい（本研究会の最後にまとめをやりまます）。



雷が引き起こす光核反応