

雷雲ガンマ線の観測プロジェクトと 雷での光核反応の検出

T. Enoto, et al “Photonuclear reactions triggered by lightning discharge”,
Nature, 551, 481 (2017) <https://www.nature.com/articles/nature24630>

榎戸 輝揚, 和田 有希^{A,B}, 古田 禄大^A, 中澤 知洋^C, 湯浅 孝行^B,
奥田 和史^A, 牧島 一夫^B, 佐藤 光輝^C, 佐藤 陽祐^D, 中野 俊男^B,
榎本 大悟^B, 土屋 晴文^{E,B}

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



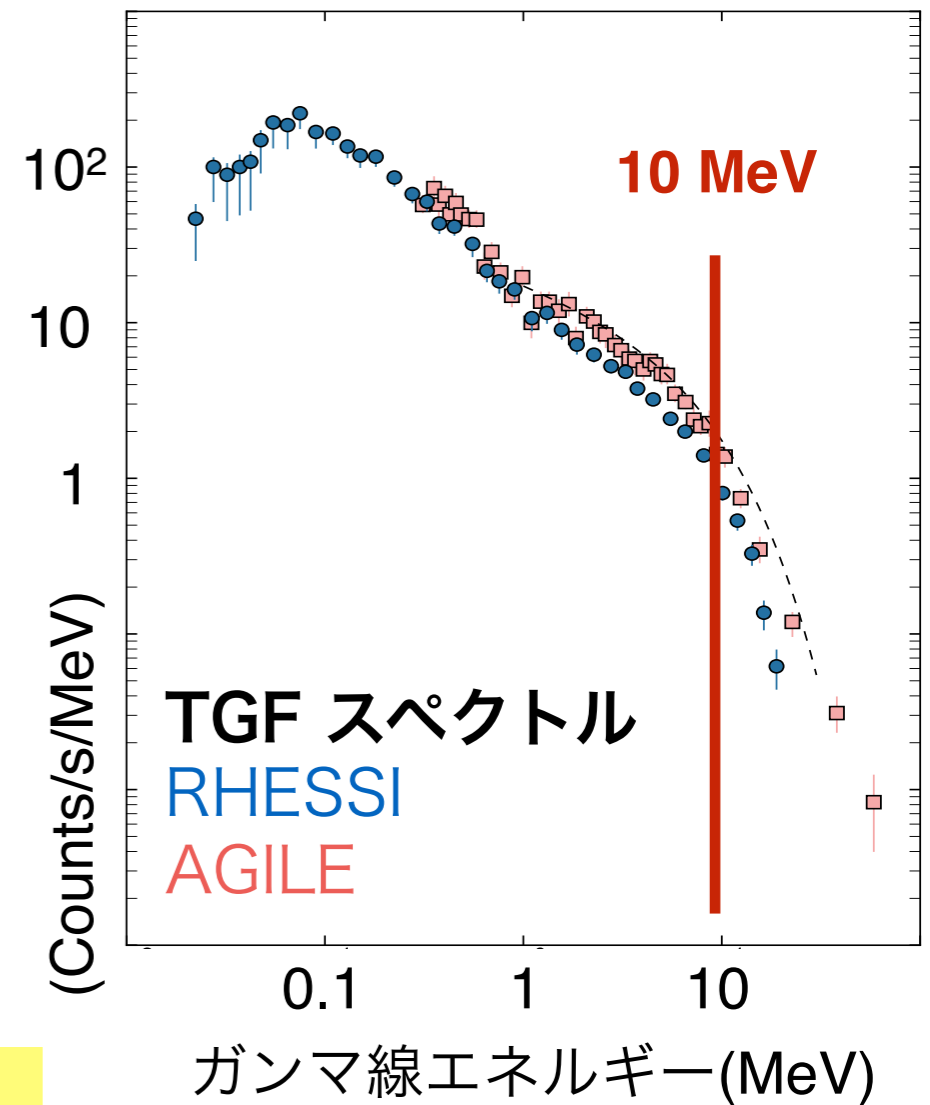
京都大学
KYOTO UNIVERSITY



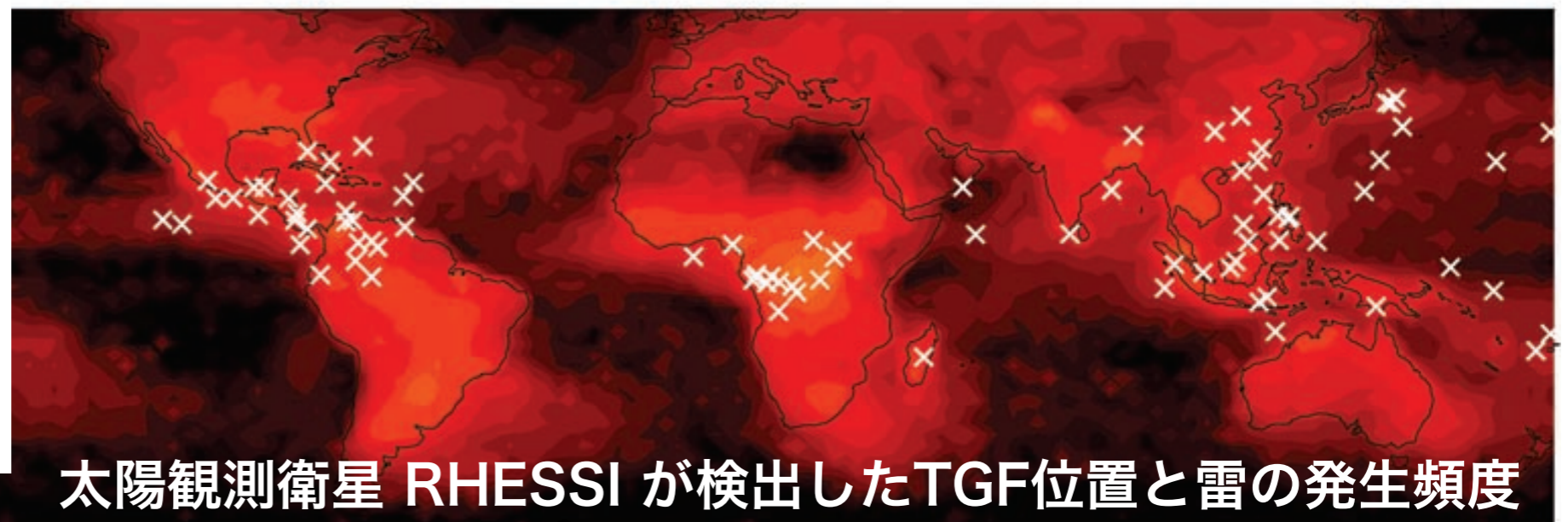
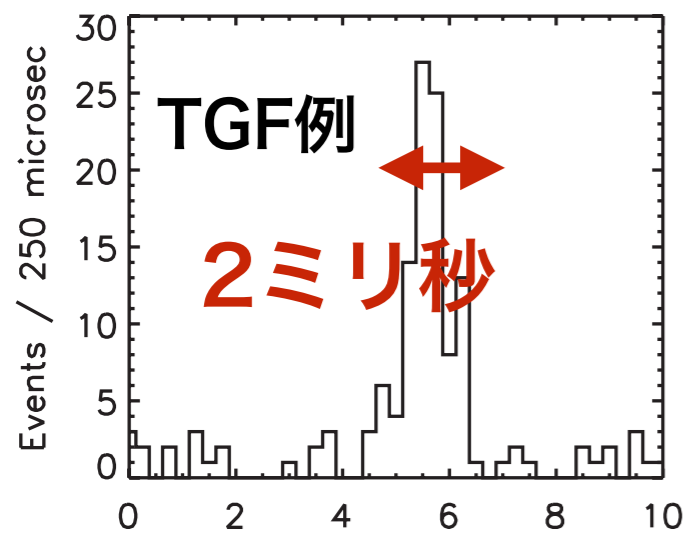
北海道大学 academist

雷の高エネルギー放射と核反応

- 雷がDD 反応で中性子? (Shah et al. 1985, Nature)
- **Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF) の発見**
 - 天文衛星が発見した、地球方向から到来するミリ秒ほどの強烈なガンマ線バースト。地上で発生した雷に伴い、雷雲から宇宙に向かって駆け上がる電子が生じ、その制動放射ガンマ線と考えられる。
- **TGFのガンマ線スペクトルは >10 MeV まで到達**
 - 大気窒素と光核反応 (対生成より1桁小さい)が可能?



長らく議論されてきたが観測証拠がなかった

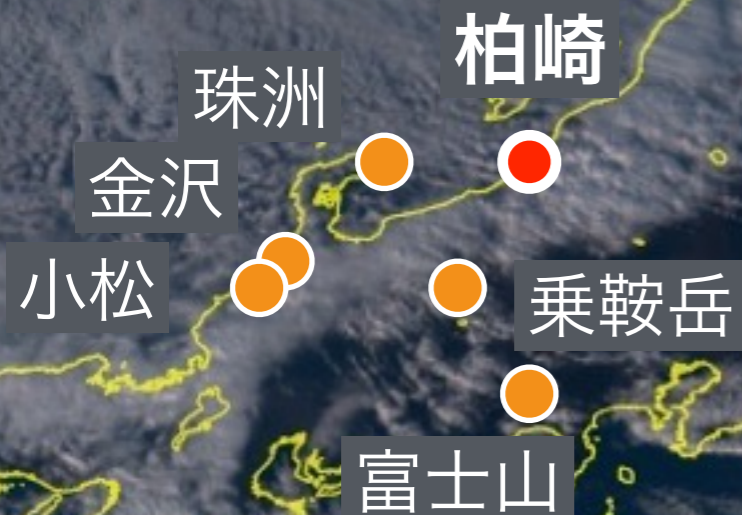
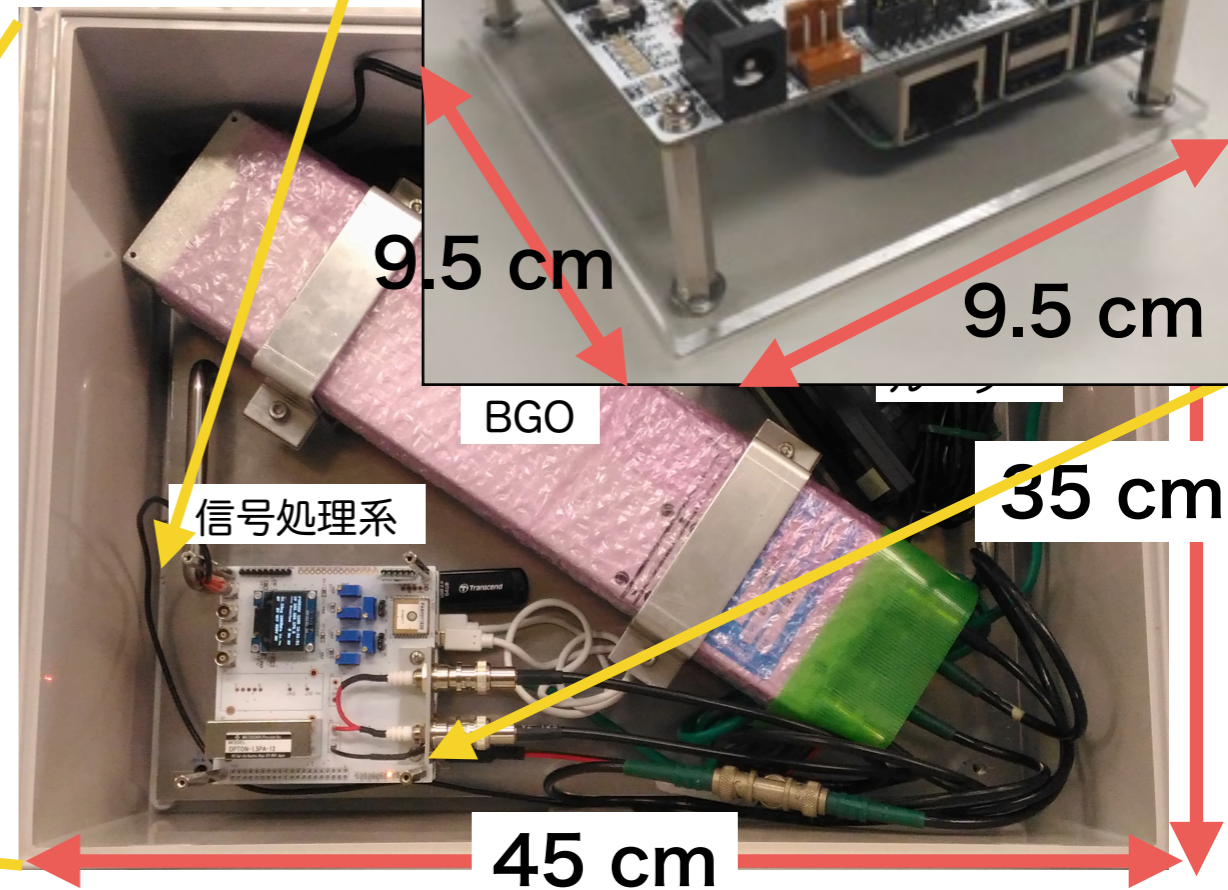
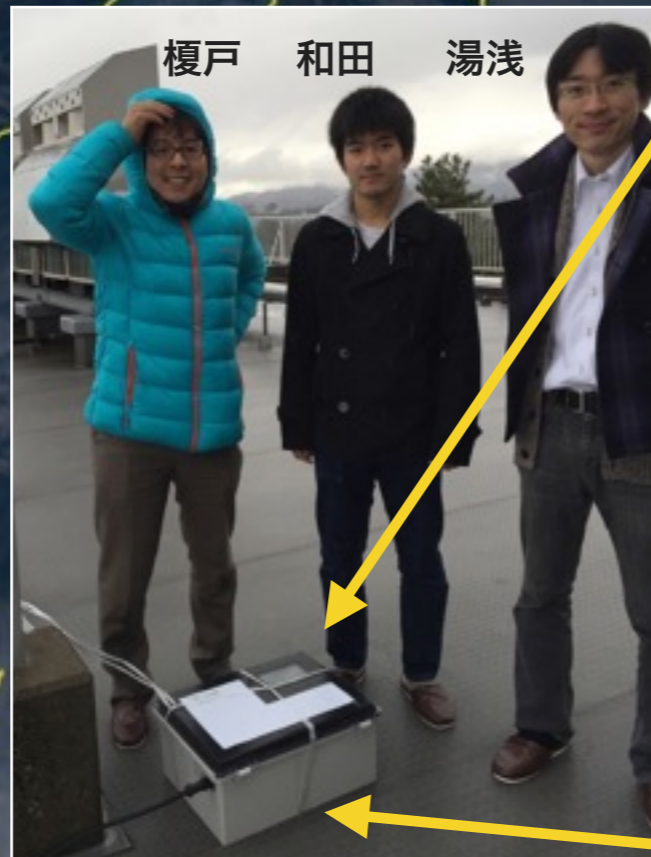


冬季雷雲のマッピング観測

北陸沿岸の
冬季雷雲は
雲底が低く
絶好の観測対象

● 観測サイト

Gamma-ray Observation of
Winter Thundercloud
(GROWTH) Collaboration



2月6日 14:00 JST
(ひまわり8号)
冬型の気圧配置

- 低コストで高性能な放射線測定器を開発し多地点に展開
- Raspberry Pi 3 で駆動できる FPGA-ADC ボード等を開発
- 学術系クラウドファンディングでスタートし科学研究費獲得へ

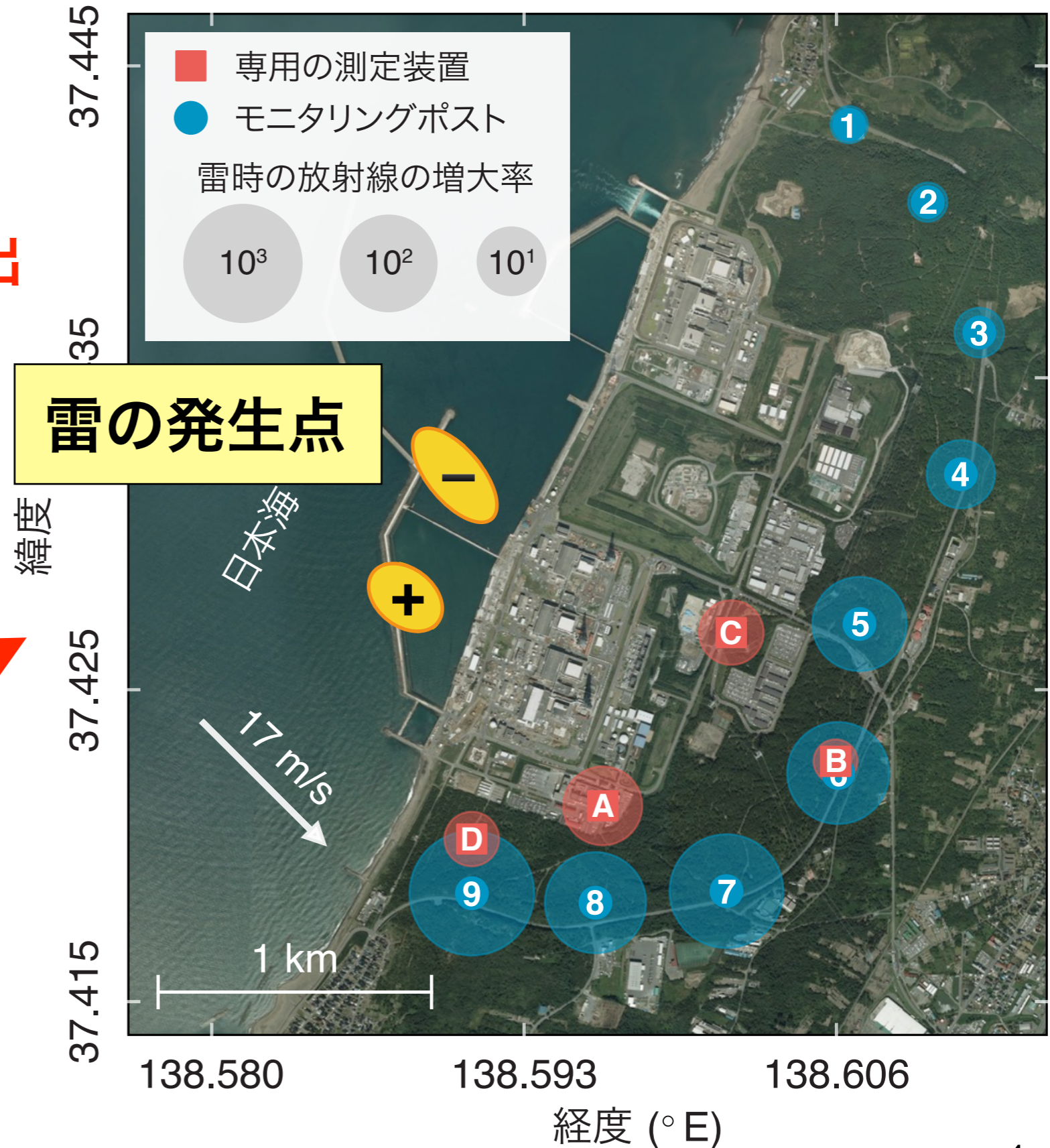
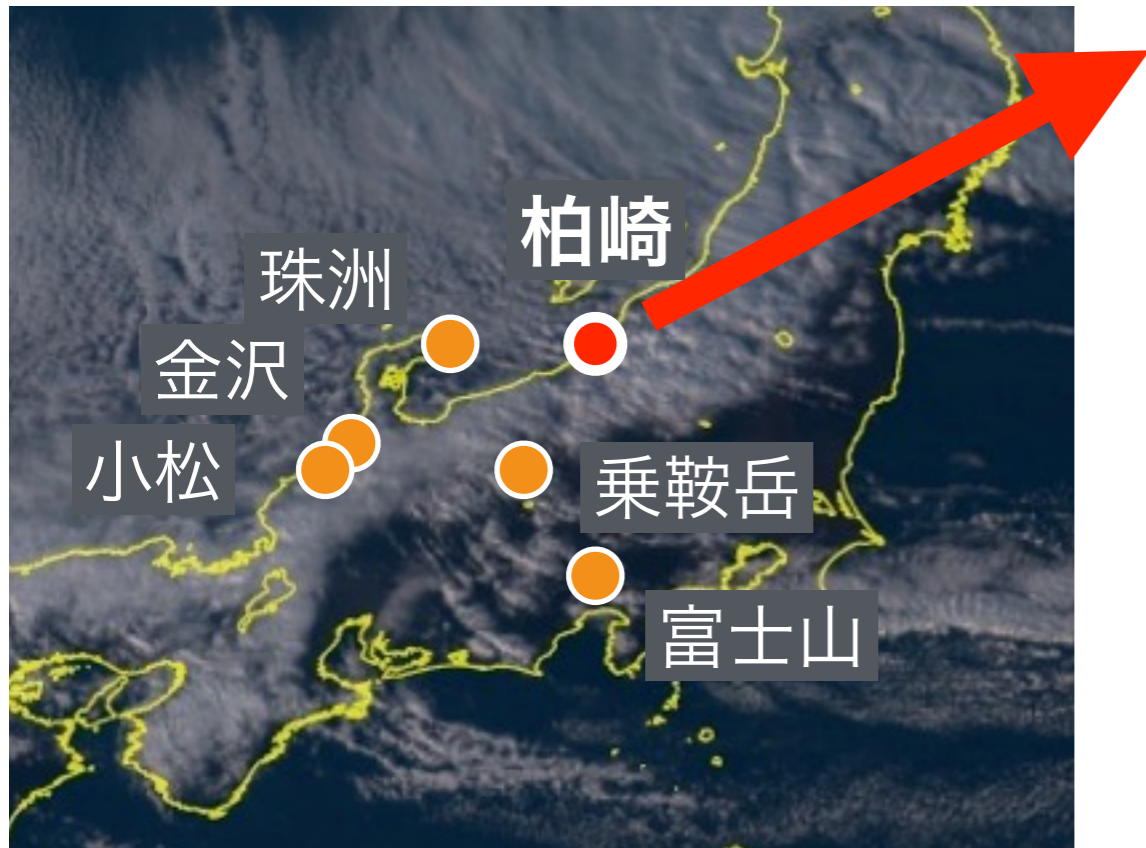
BGOは理研仁科センター
櫻井研からお借りしました

(1) 雷放電に伴う下向き TGF の検出

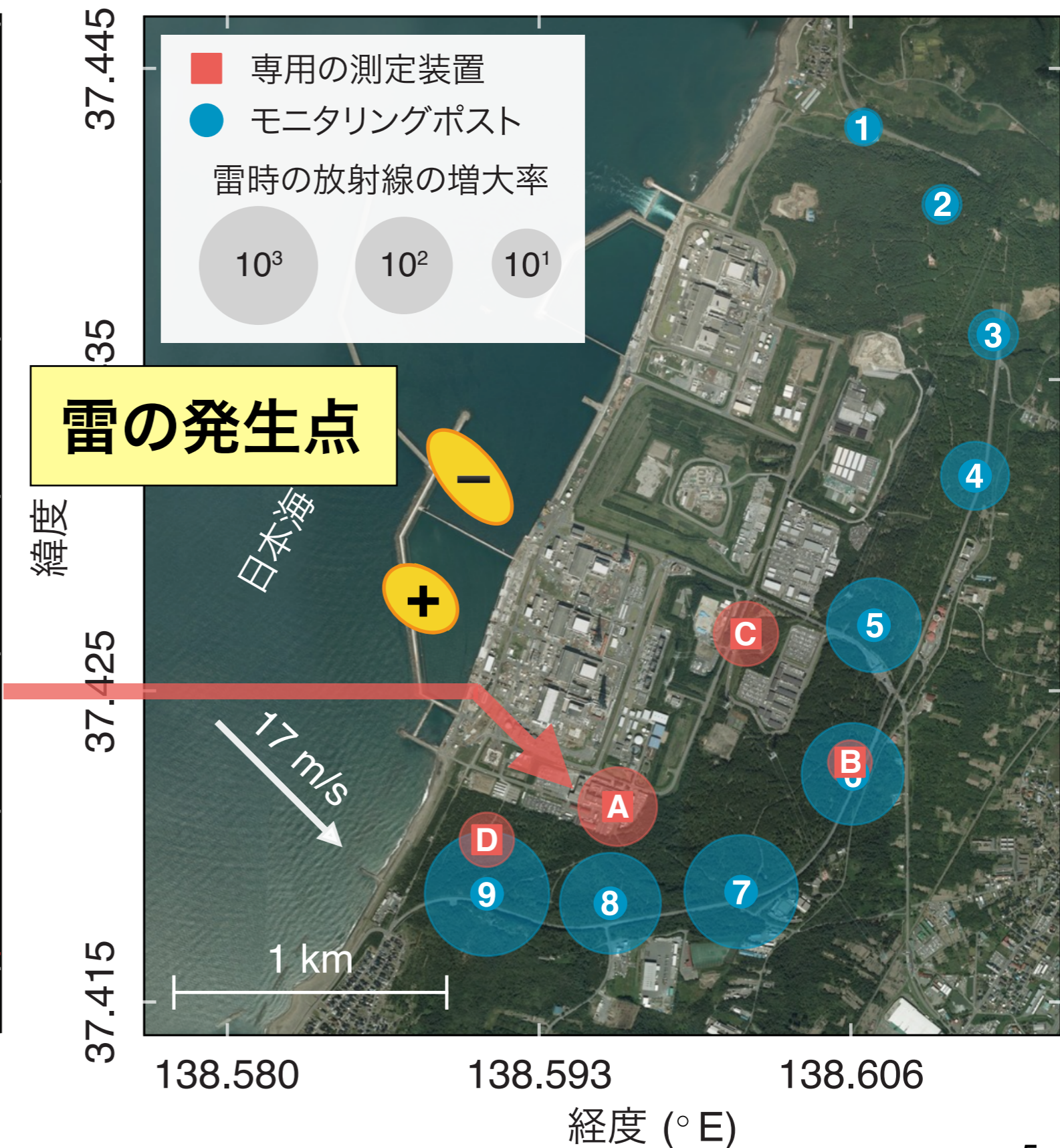
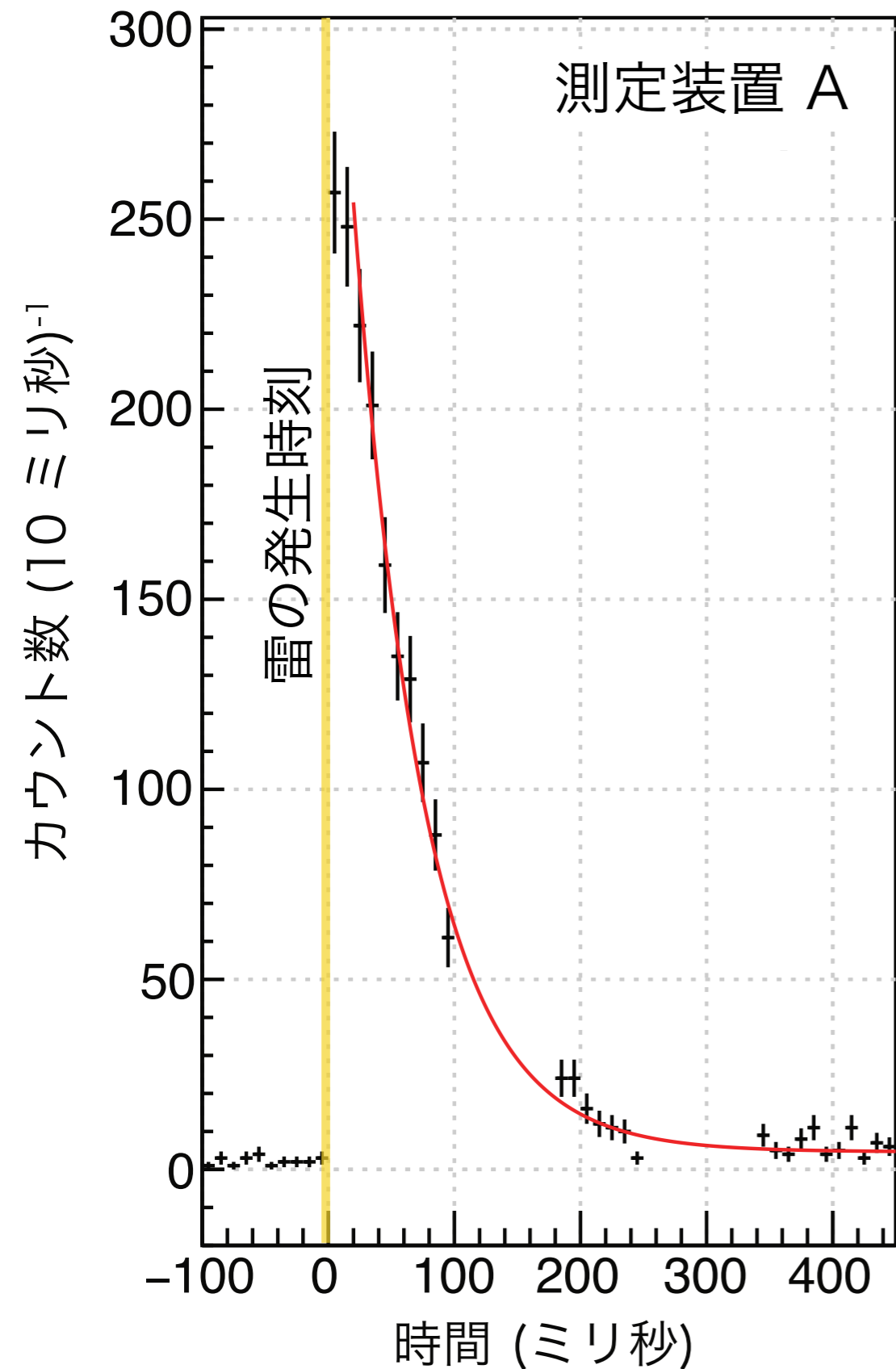
- 2017年2月6日 17:34:06 (日本時間) に柏崎で雷が発生。

→ 放射線イベントを同時検出

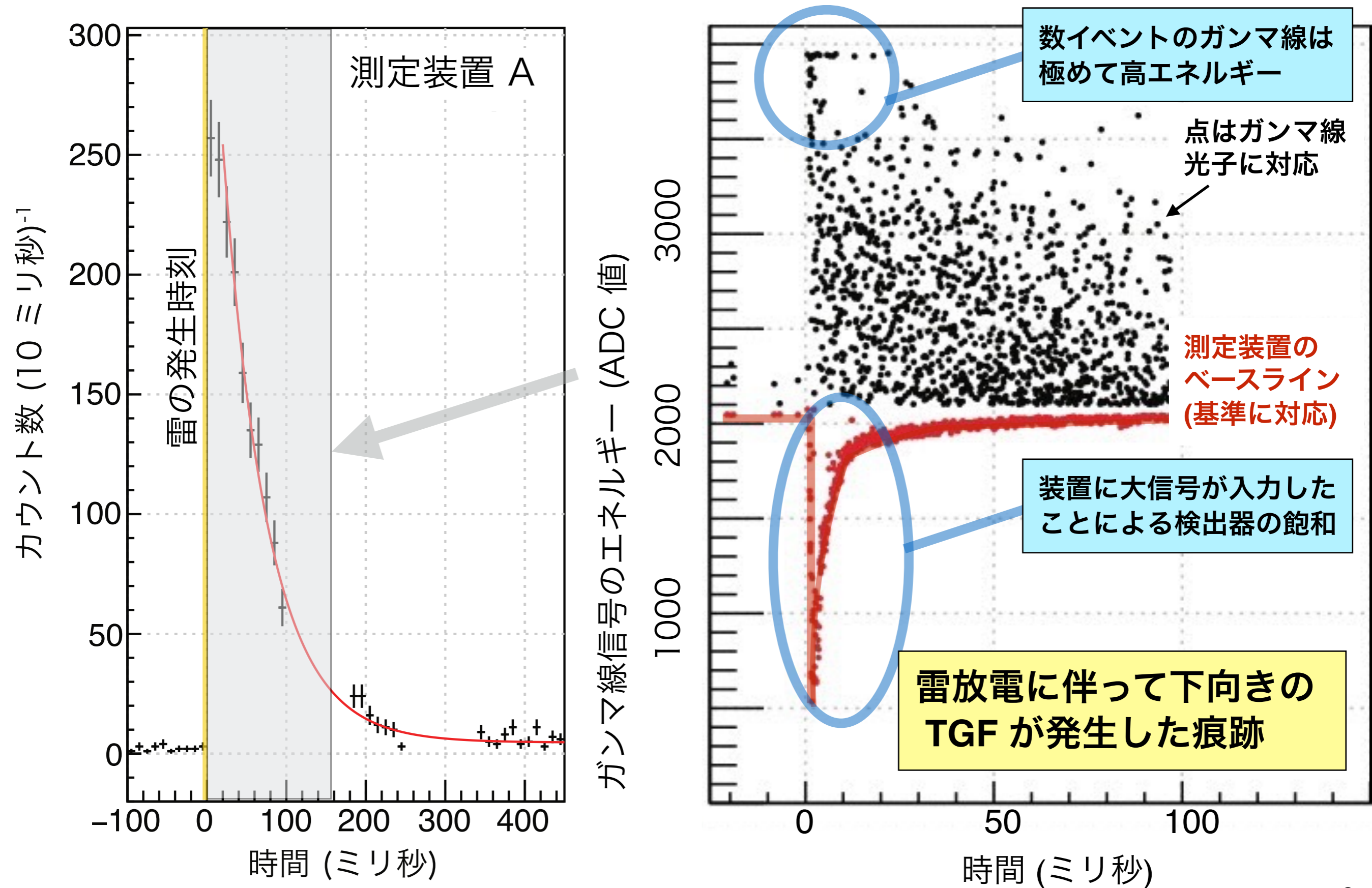
- 雷観測ネットワーク (JLDN) に加え、佐藤ら (北大) の電波観測で雷の発生を確認。



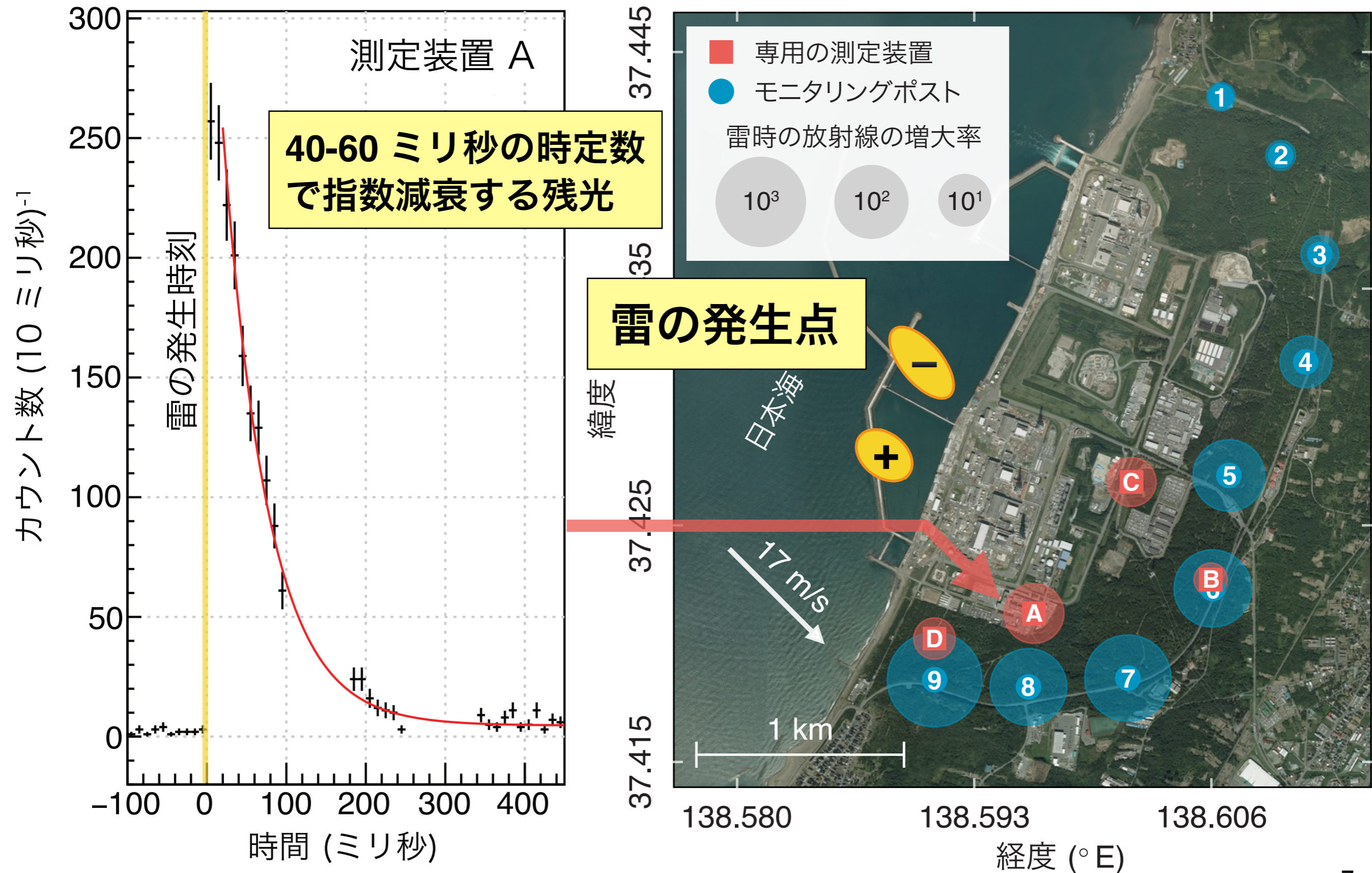
(1) 雷放電に伴う下向き TGF の検出



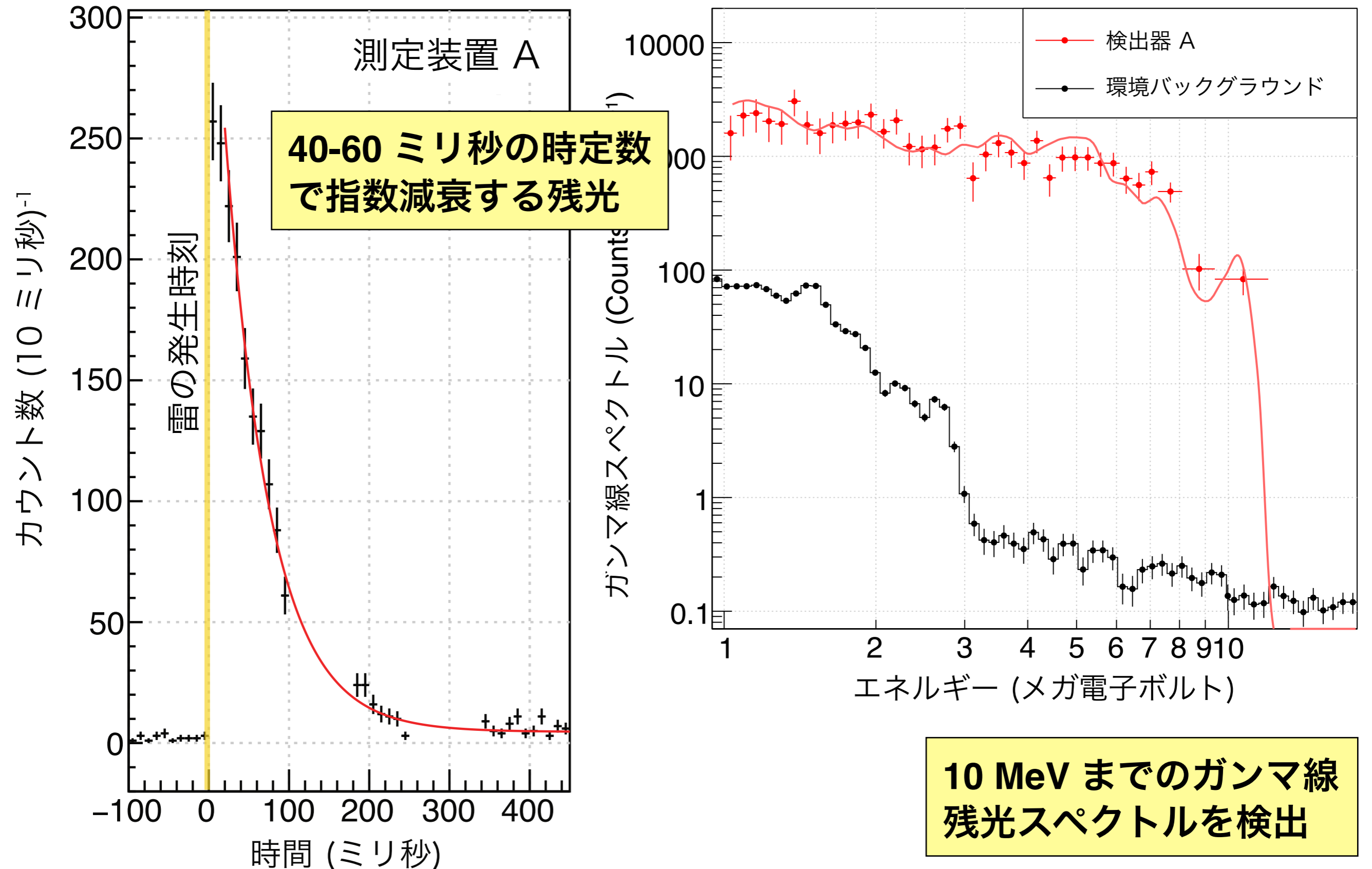
(1) 雷放電に伴う下向き TGF の検出



(2) 指数関数で減衰するガンマ線残光

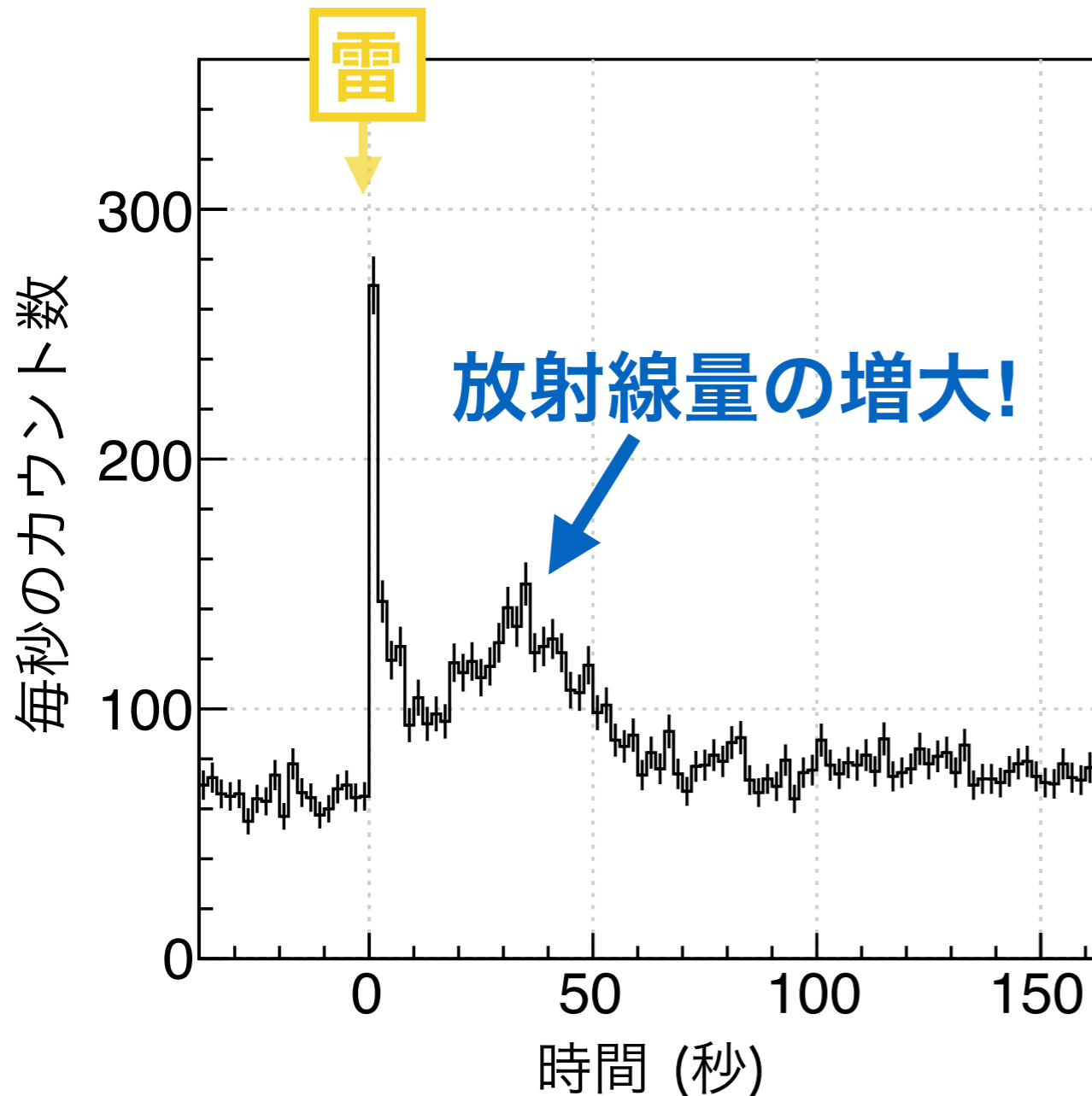


(2) 指数関数で減衰するガンマ線残光

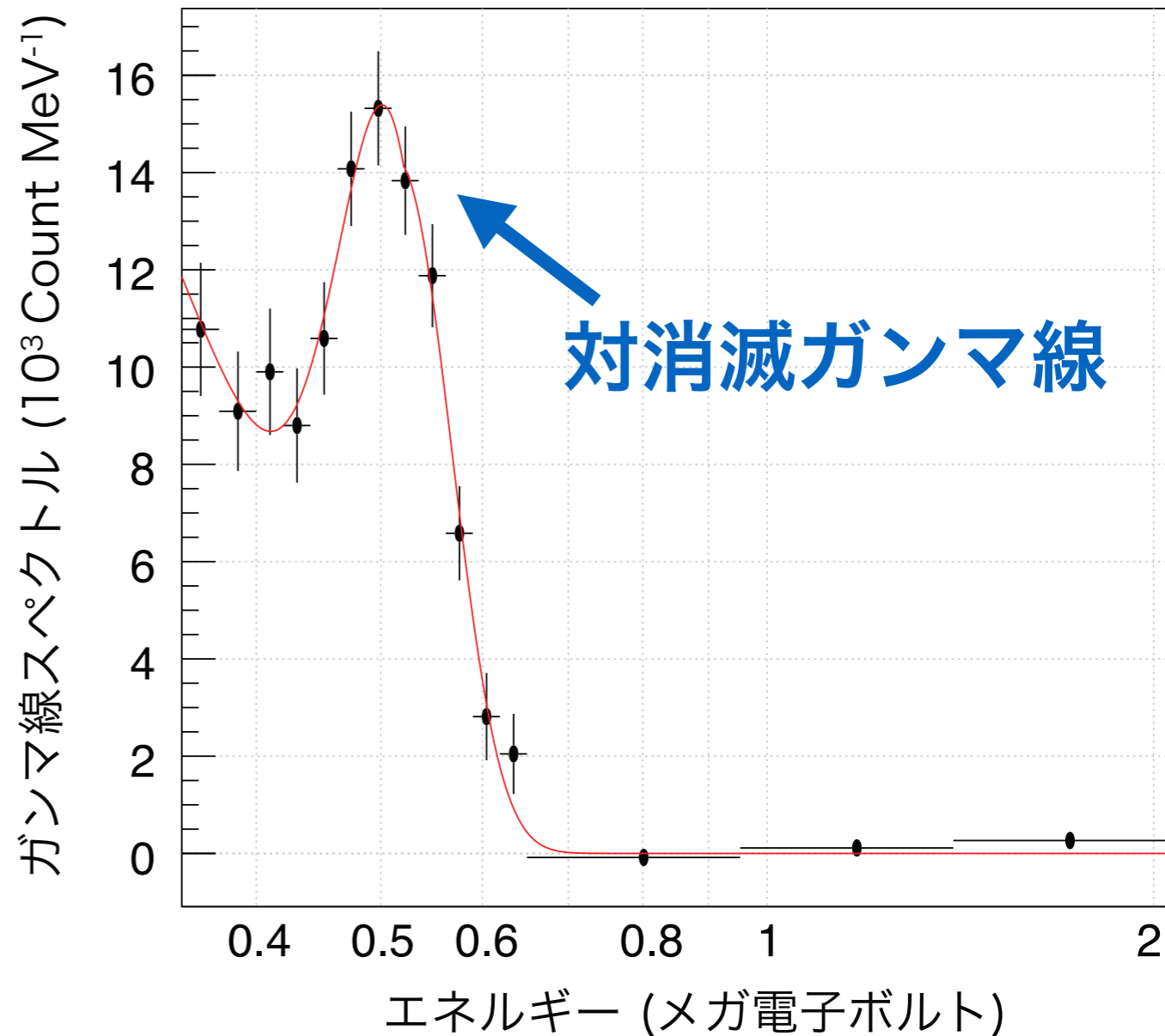


(3) 電子-陽電子対消滅線の検出

放射線量の変動 (0.35-0.60 MeV)



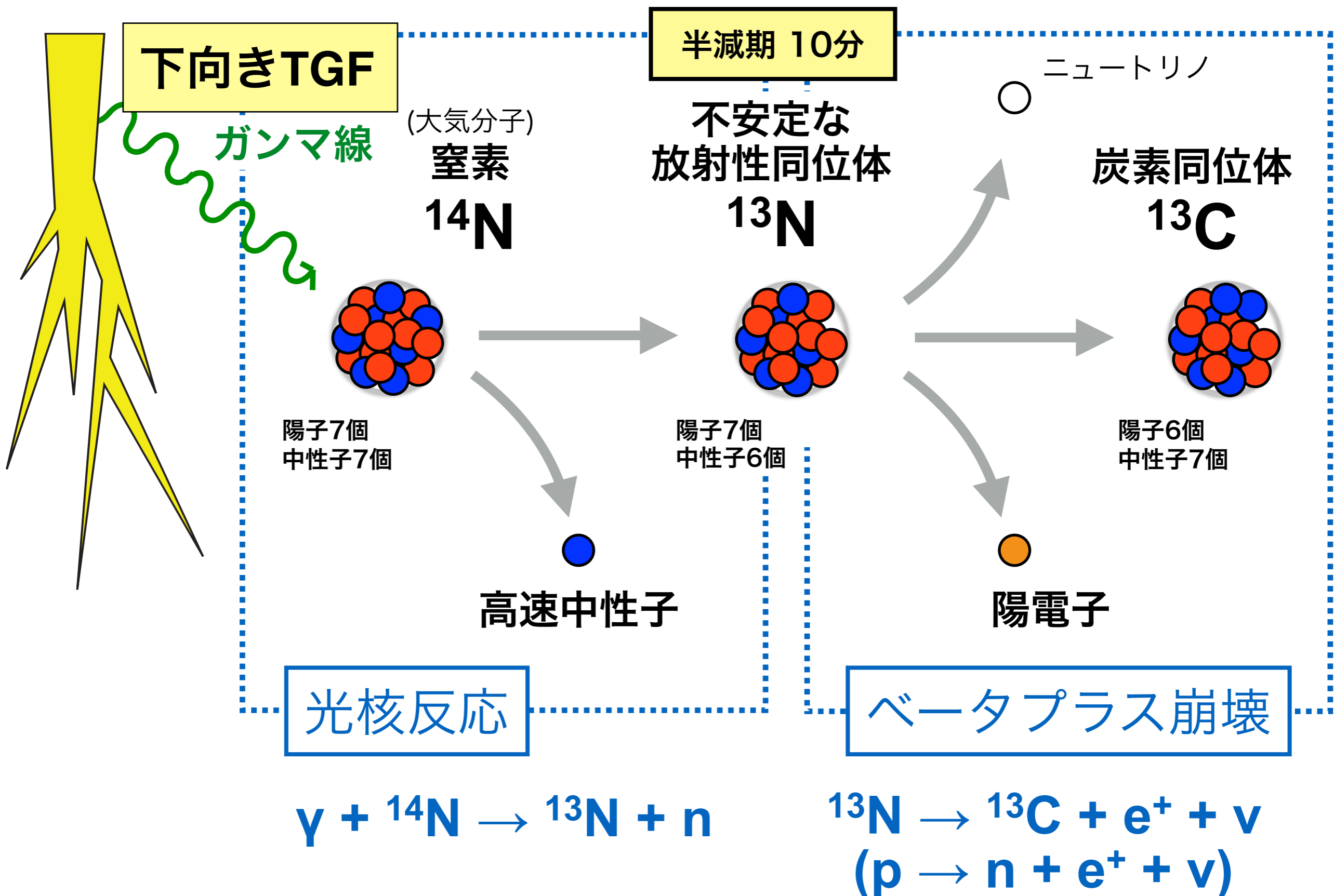
雷の後 1-63秒の間のスペクトル



およそ35秒ほど遅れて、雷の発生点の下流に設置した検出器で放射線が増大!

0.511 MeV の対消滅ガンマ線とそれ以下のエネルギーの連続成分を検出

雷で生じる光核反応



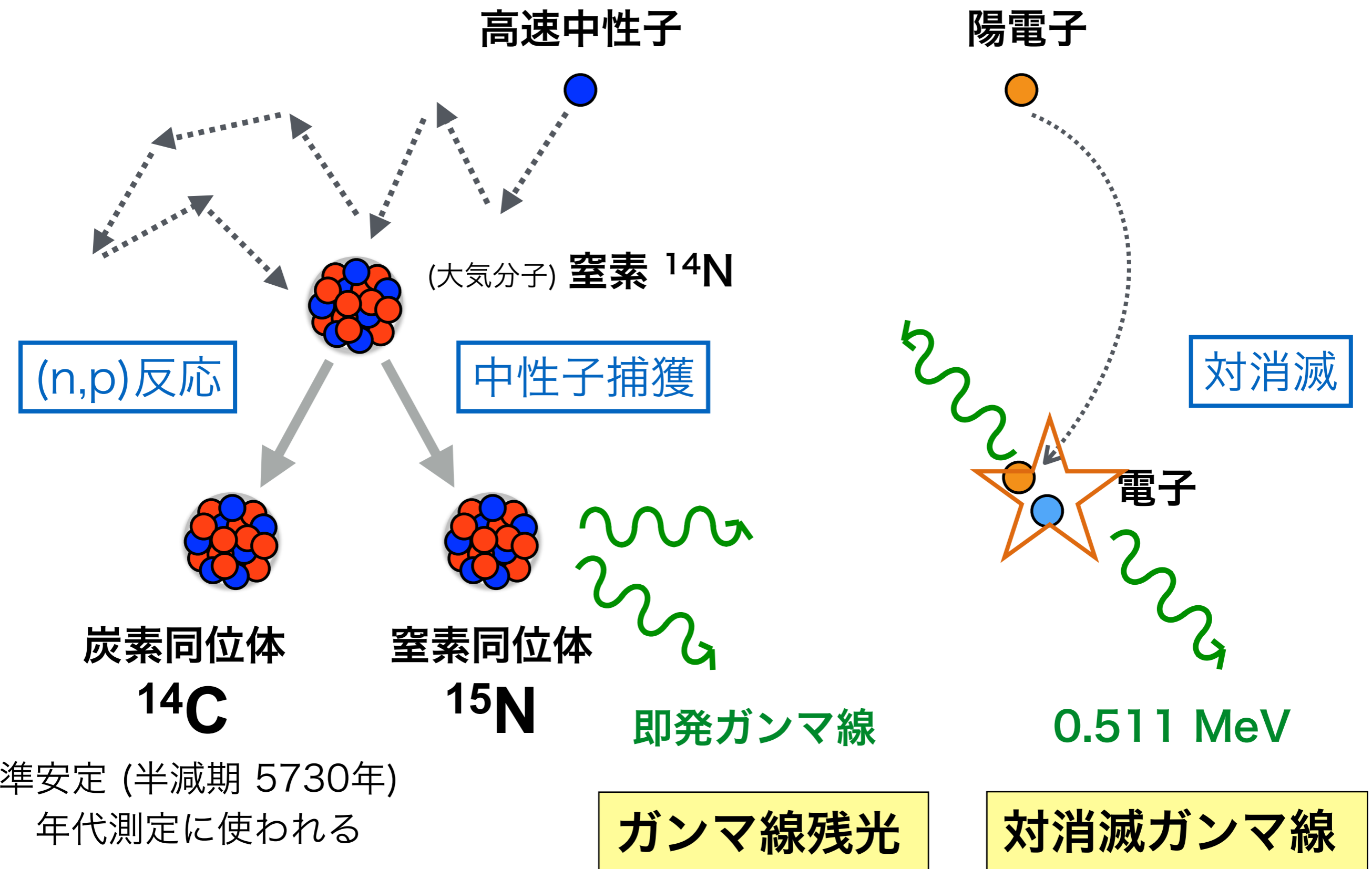
高速中性子



陽電子



中性子と陽電子が残すガンマ線の痕跡



雷の光核反応としての解釈と定量的評価

- 雷に同期した数ミリ秒以内の強烈な放射線
 - ➔ TGF と継続時間、エネルギーが一致。地上で検出した稀な例。
- 時定数 40-60 ミリ秒で指数減衰する <10 MeV のガンマ線残光
 - ➔ 高速中性子の大気中での弾性散乱と熱化、中性子捕獲と (n,p) 反応を解析的に解くと、時定数 56 ミリ秒の指数減衰になる。
 - ➔ 中性子を捕獲した窒素からの即発ガンマ線は <10 MeV
- 落雷から35秒ほど遅れた 0.511 MeV の対消滅ガンマ線
 - ➔ 35秒は、落雷点から検出点まで風速 17 m/s での移動時間
 - ➔ 対消滅線の強度と、大気中での散乱で生じる連続成分の比から Geant4 を使ったシミュレーションで発生源は >80 m 上空
 - ➔ 上空に窒素¹³N の雲があるとして観測条件から推定した光核反応の量は 4×10^{12} 個で、理論予想の 10^{11-15} 個と一致。

冬季雷のガンマ線で光核反応が生じることを観測的に解明

詳細は Enoto et al., Nature (2017) Methods 参照

まとめ

- 雷が作り出した強力なガンマ線が、大気中の窒素原子核と光核反応を起こすことを地上での放射線計測で観測的に発見した。
- 北陸の冬季雷雲では光核反応による窒素の放射性同位体 ^{13}N が陽電子を放出しながら10分ほど漂うため、対消滅線が検出される。
- 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。



英国物理学会(IOP) Physics World 誌による Top 10 Breakthrough 2017 に選定。
(他には中性子星連星合体による重力波など)