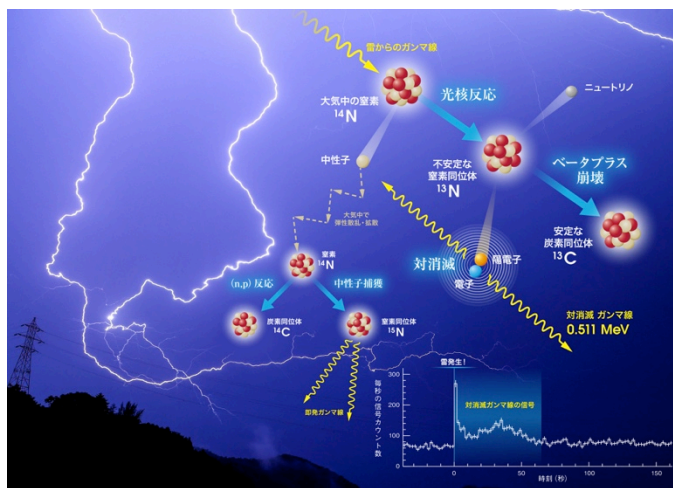
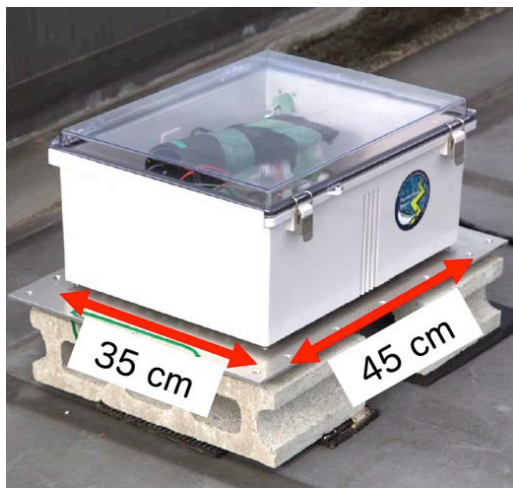


地上と宇宙から探る雷放電に同期する突発ガンマ線観測への取り組み

中澤知洋（名大理/KMI, 東大理）

榎戸輝揚（京大白眉）、和田有希（東大理/理研）、古田禄大、松元崇弘、春日
知明、奥田和史（東大理）、湯浅孝行、中野俊男、榎本大悟、加藤博、牧島一
夫（理研）、佐藤光輝（北大理）、佐藤陽祐（名大工）、土屋晴文（JAEA）、
ほかGROWTHコラボレーション



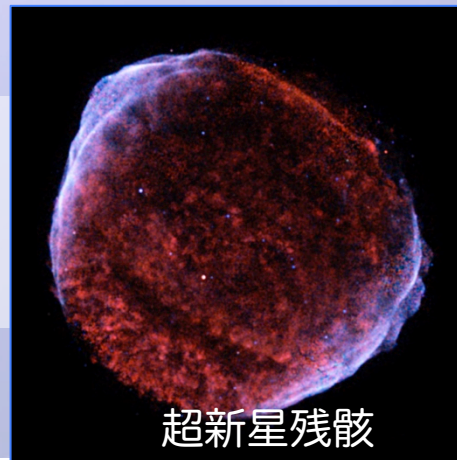
高エネルギー天体物理の視点で見た 雷ガンマ線研究の3つの意義

1: 科学目的が重要で相補的

SNR、太陽フレア etc.

= **磁場が必須**のTeV/PeV加速器

雷雲 = **静電場だけ**の30 MeV 加速器

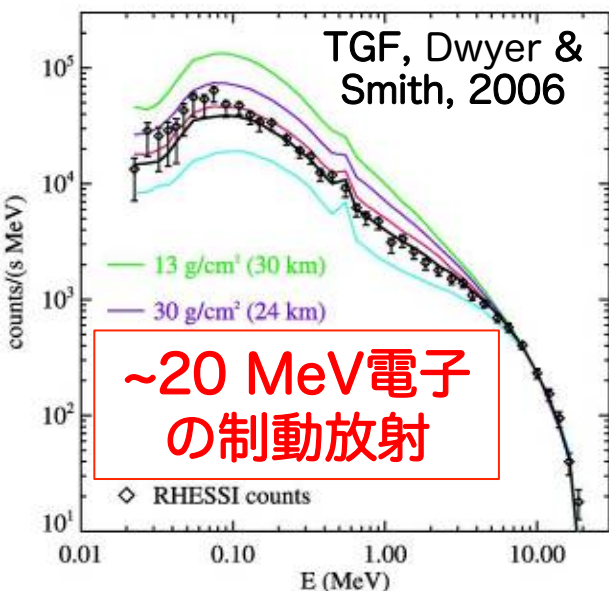


超新星残骸

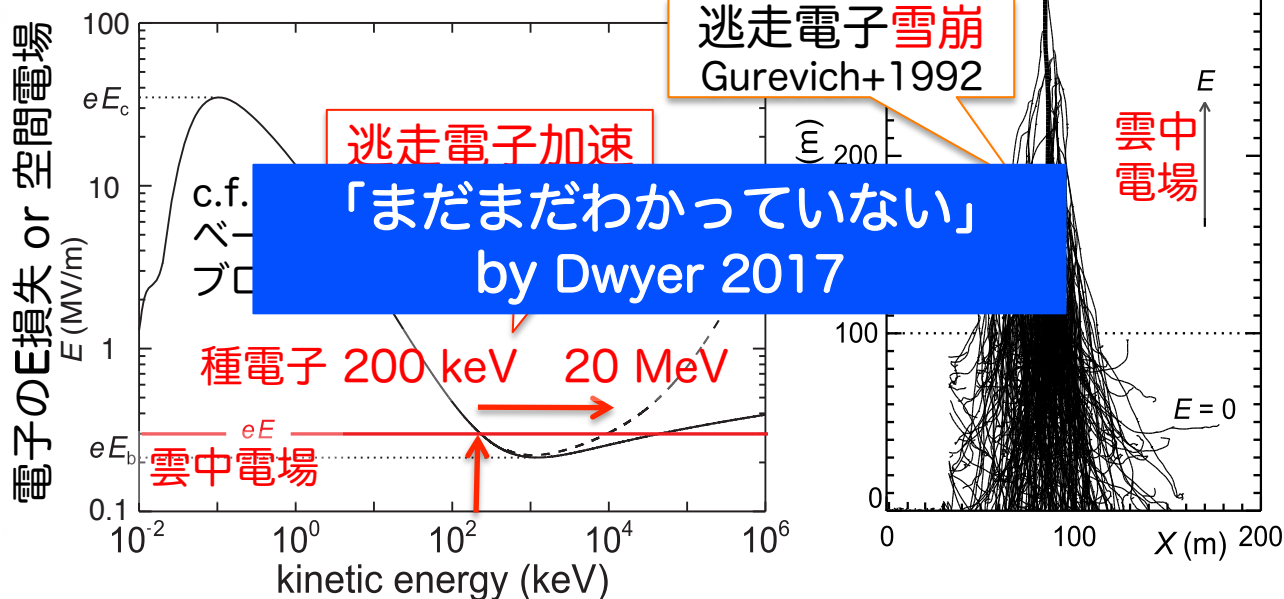


TARANIS
(2019-予定)

雷ガンマ線のスペクトル



電子加速のモデル Dwyer 2012 より



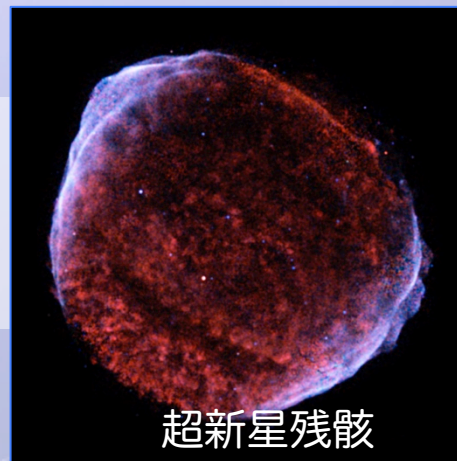
高エネルギー天体物理の視点で見た 雷ガンマ線研究の3つの意義

1 : 科学目的が重要で相補的

SNR、太陽フレア etc.

=磁場が必須のTeV/PeV加速器

雷雲 = 静電場だけの 30 MeV 加速器



超新星残骸



TARANIS
(2019-予定)

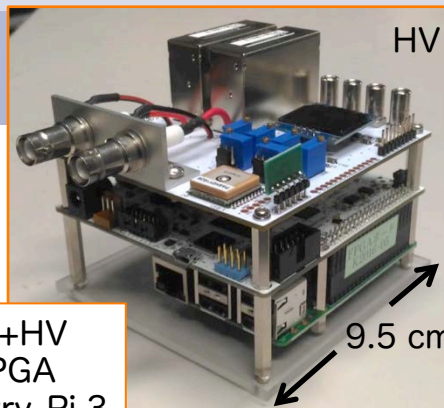
2 : 今、Hotな分野

- AGILE、Fermiで100/yr → トリガー最適化で ~10倍に
- 地上観測も日米欧で発展し、新発見多数 (e.g. Enoto+ Nature 2017)
- 次世代の雷観測衛星の打ち上げ : ASIM (2018)、TARANIS(2019)

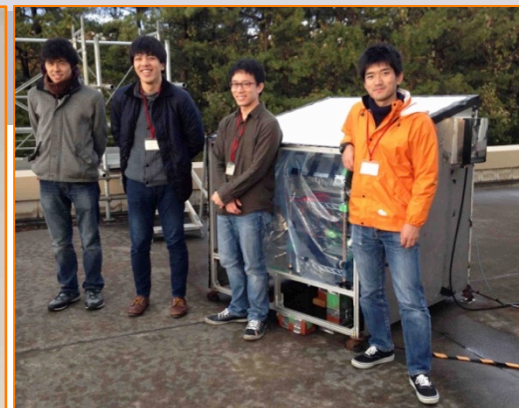
3 : 将来衛星への開発活動

- 新しい小型DAQシステムの開発
- TARANIS衛星への参加

→ 大学院生の活躍



- 1) アナログ+HV
- 2) ADC+FPGA
- 3) Raspberry-Pi 3



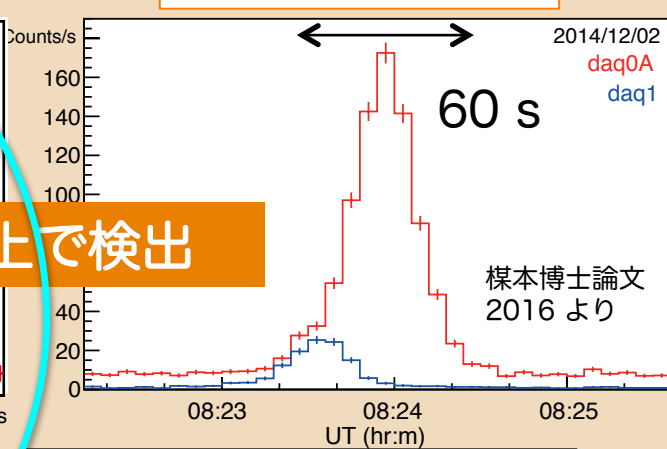
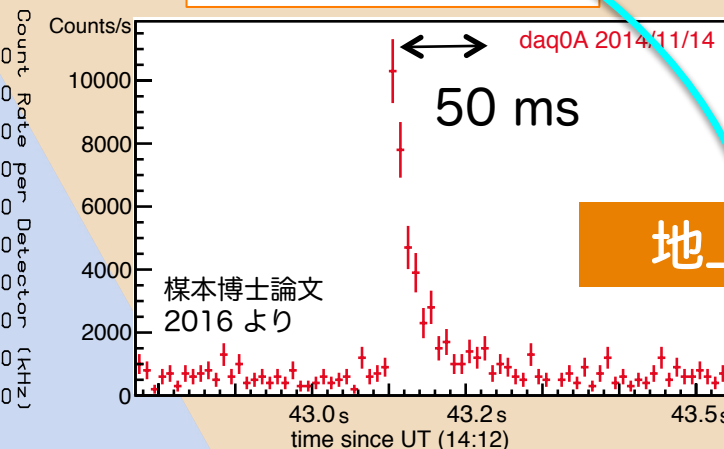
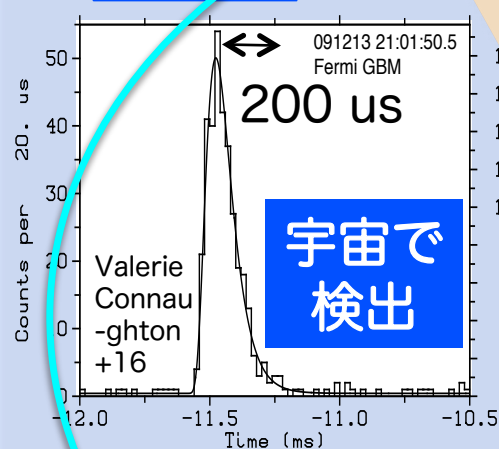
雷ガンマ線の「3形態」

大きな進展

1: TGF

2: Short burst

3: Long burst



雷 と 同 期

雷雲そのものから

e.g. Fishman+94, Smith+05, Briggs+10, Marisaldi+10

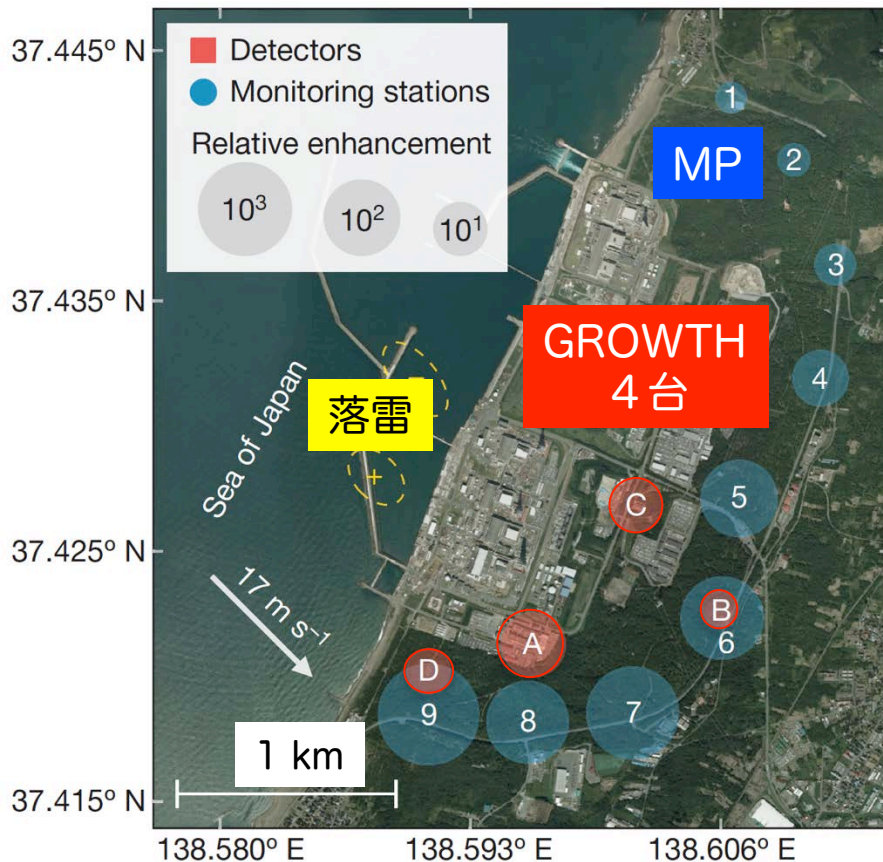
- 日本の冬季雷：低雲底 x 大エネルギー → 世界的に重要
- 日本における地上観測の発展 → GROWTHほか

e.g. Torii +02, Tsuchiya PRL+07, Tsuchiya+ JGR 2011, Tsuchiya+ PRD 2012, Umemoto+2016 PRE, Kuroda+ PLB 2016

2017年GROWTHチームの新発見

○ Short Burst の検出

- 2017/2/6 夕方に落雷
- GROWTH 4検出器 + 原発のMPで



● 結論を先に…

- short burst の「本体」は、(非常に明るい)「下向きTGF」
- ~50 ms成分は「光核反応」に由来する

nature

International journal of science

physicsworld

TOP 10
BREAKTHROUGH

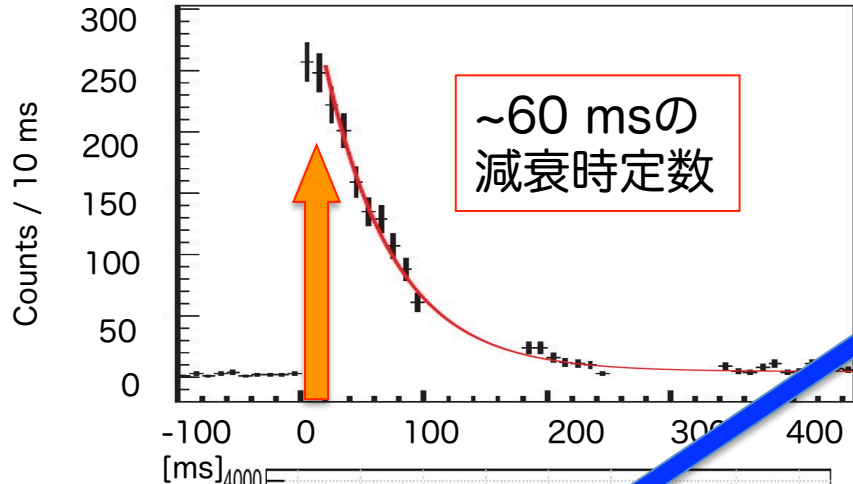
2017

Photonuclear reactions
triggered by lightning discharge

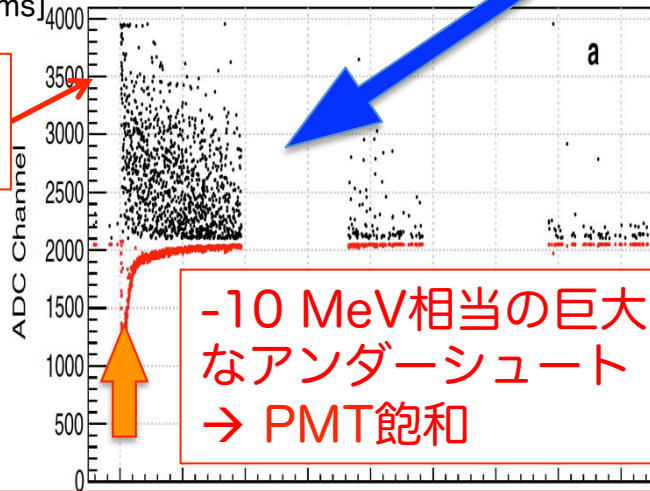
榎戸、和田、古田、中澤、湯浅、佐藤、土屋 et al.

2016/2/6 Short Burstの詳細データ

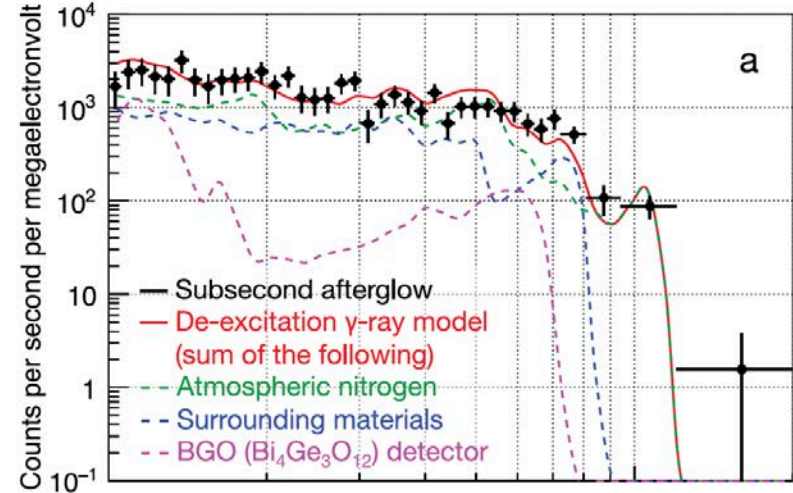
○ ~ 60 msの減衰を持つ信号



10 MeV相当



○ 減衰成分の特異なスペクトル



- ^{14}N などからの中性子捕獲、即発ガンマ線によくモデル化 → 熱中性子の証拠
- 大気中での高速中性子の弾性散乱による熱化のタイムスケール 56 ms と一致。

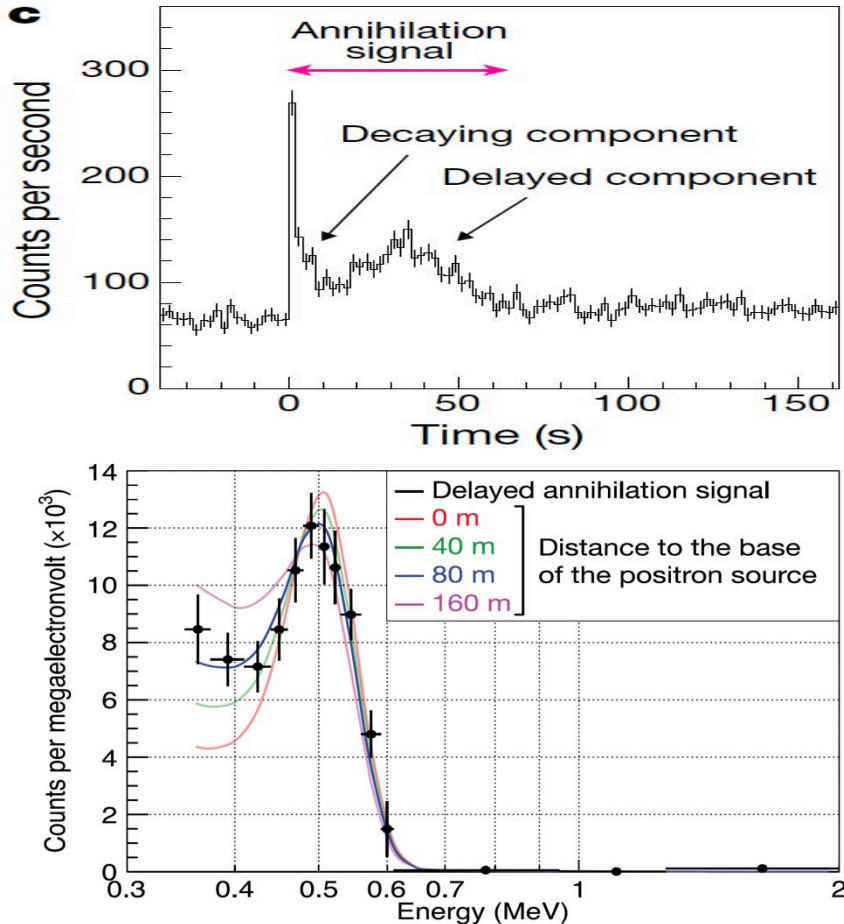
New2: 観測された“short burst”は2次中性子からの信号である

New1: 冒頭 < 1msに巨大パルス → “Downward TGF”か？

e.g. Bowers+ 2017, Babich 2017

2016/2/6 Short Burstの詳細データ

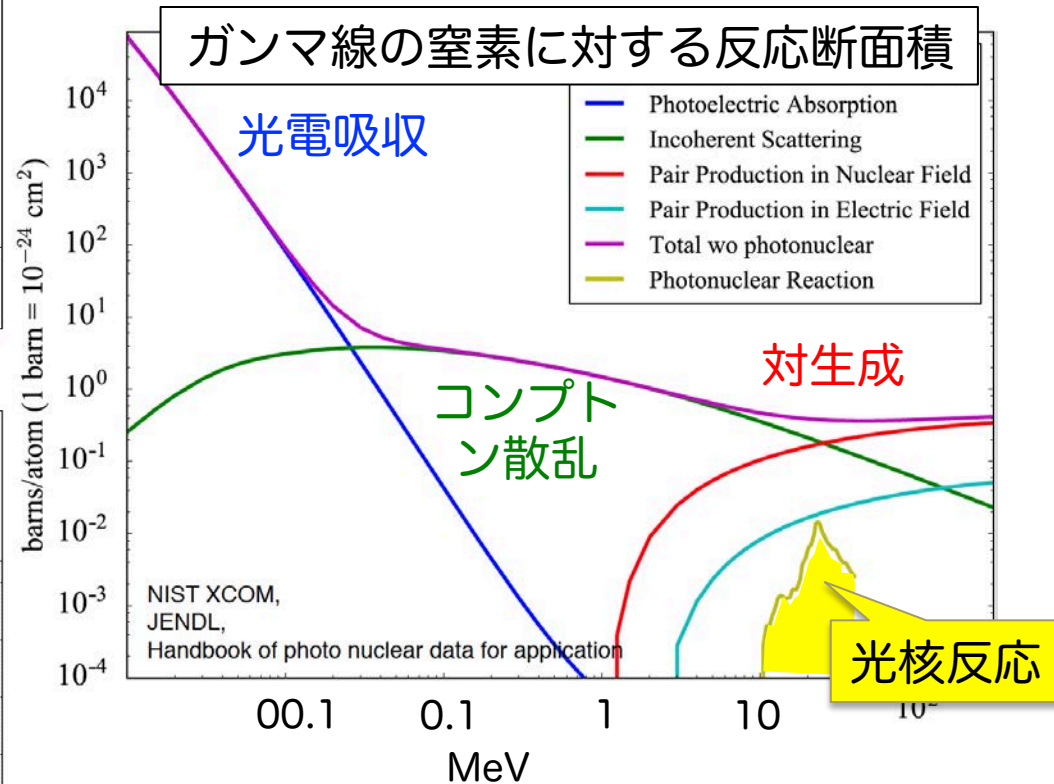
○ 落雷の20-60秒後の511 keV



New3: β^+ 崩壊核子が上空を通過

時折見えていた511 keV (e.g. 楳本+PRE 2016)の起源に決着

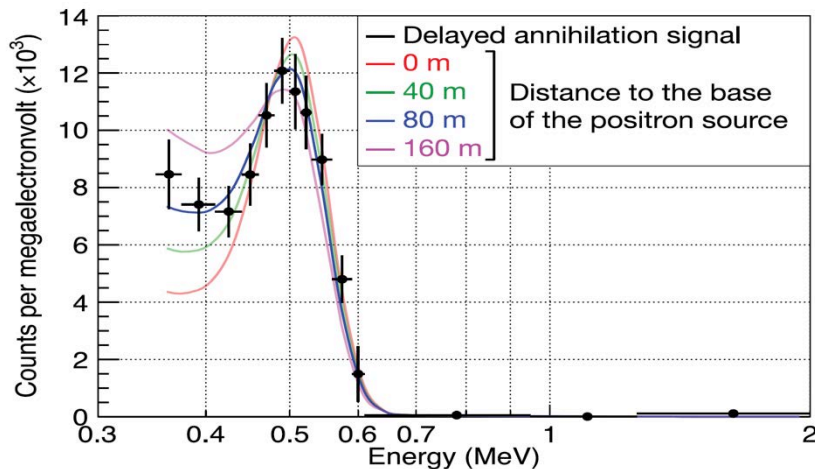
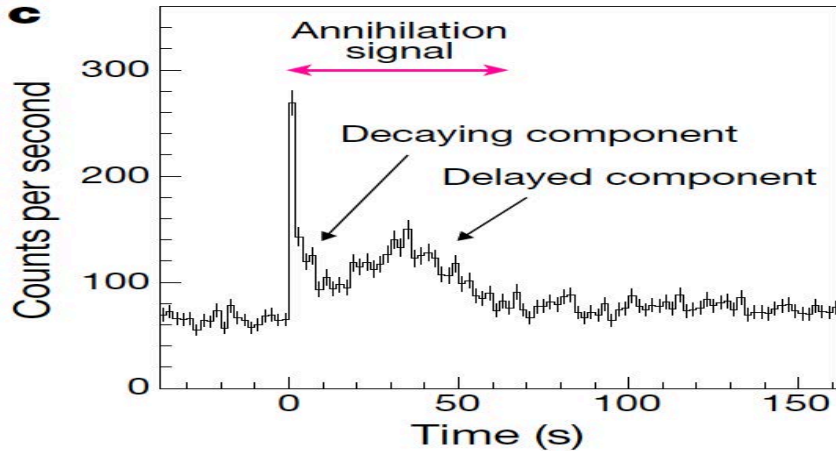
○ 強烈なDownward TGFがトリガーした光核反応



- short burst の本体は、(理論上~6桁も) 明るい「下向きTGF」である
- 50 ms成分は高速中性子に、500 keVは β^+ 崩壊に由来

2016/2/6 Short Burstの詳細データ

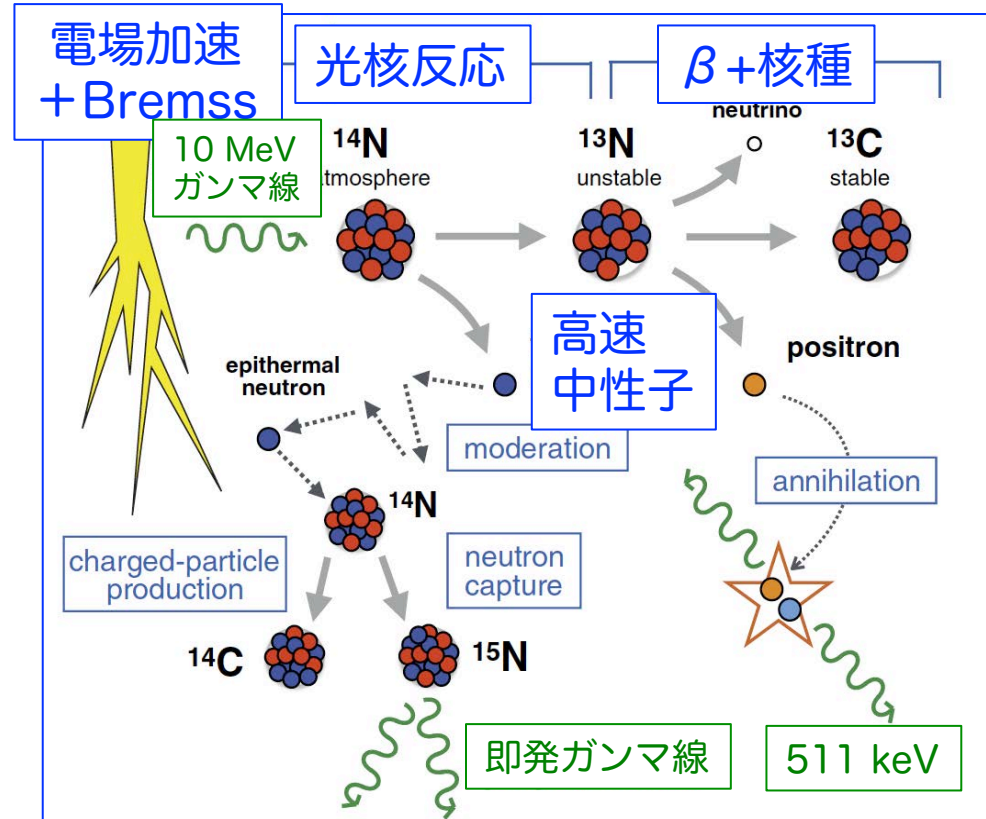
○ 落雷の20-60秒後の511 keV



New3: β^+ 崩壊核子が上空を通過

時折見えていた511 keV (e.g. 楳本+PRE 2016)の起源に決着

○ 強烈なDownward TGFがトリガーした光核反応

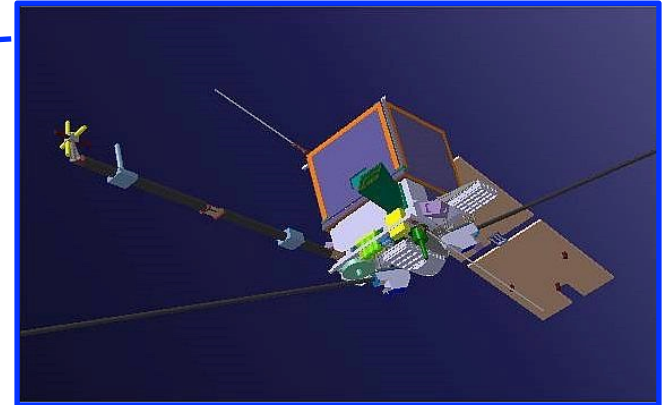


• short burst の本体は、明るい (6桁も?) 「下向きTGF」である

• 50 ms成分は高速中性子に、500 keVは β^+ 崩壊に由来

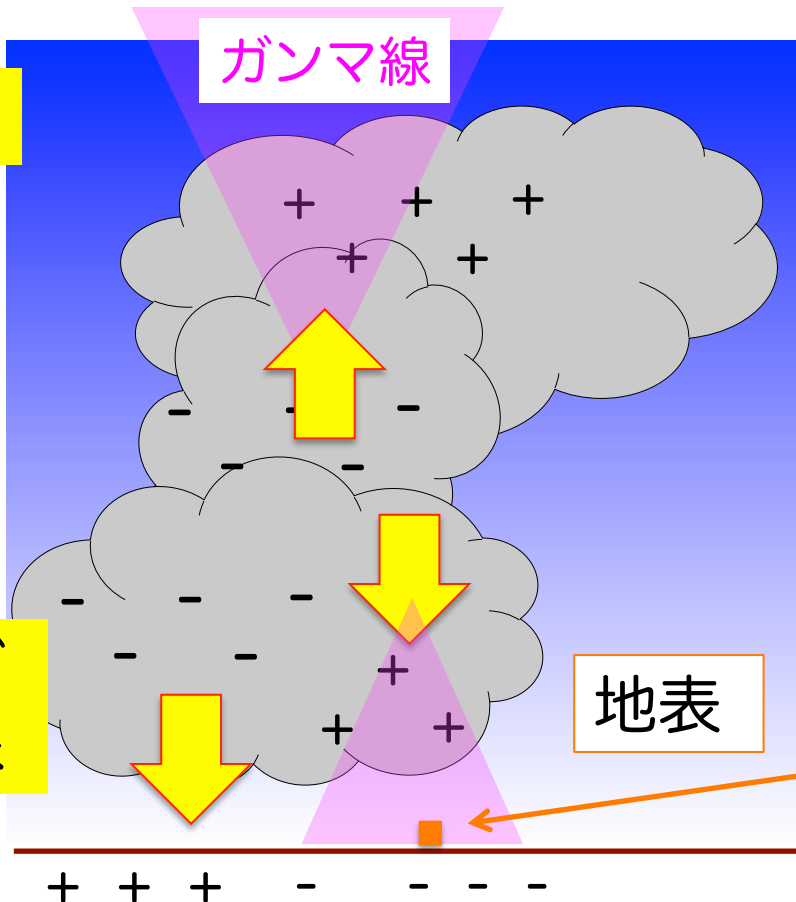
「雷ガンマ線フラッシュ」に “天と地から迫る”

飛翔体



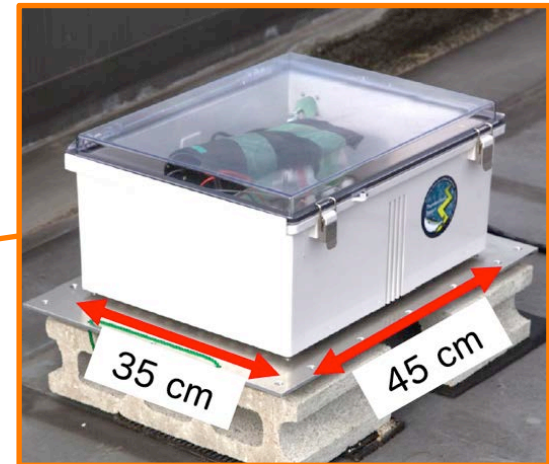
ガンマ線

TGF



地上ガン
マ線

地表



「雷ガンマ線フラッシュ」に “天と地から迫る”

- 増幅の素過程は何か？ → 非線形なので観測が重要
- 放電のどの段階でどこで発生？ → 電波、可視光と連携

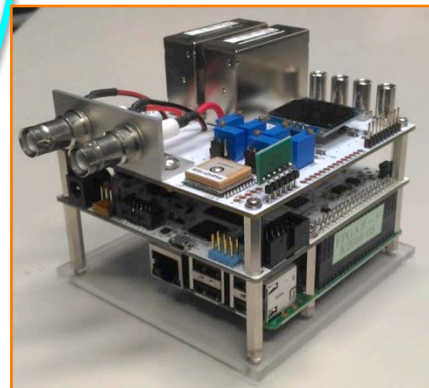
天からの観測 e.g. TARANIS衛星

- 多数(>100 /yr)のTGFで、可視光・電波と同時観測
- ガンマ線は 10~100 cts/eventと暗く、平均的な議論のみ
- 宇宙からの同時観測



地からの観測 e.g. GROWTH 実験

- 超大統計(10^6-9 cts)の下向きTGFを、詳細な電波観測と同時に。
- イベント数が少い(~1/yr)。
- 超大フラックスに耐える必要あり。
- 大小の検出器を組み合わせ、多地点観測を効率的に拡大+装置の高速化



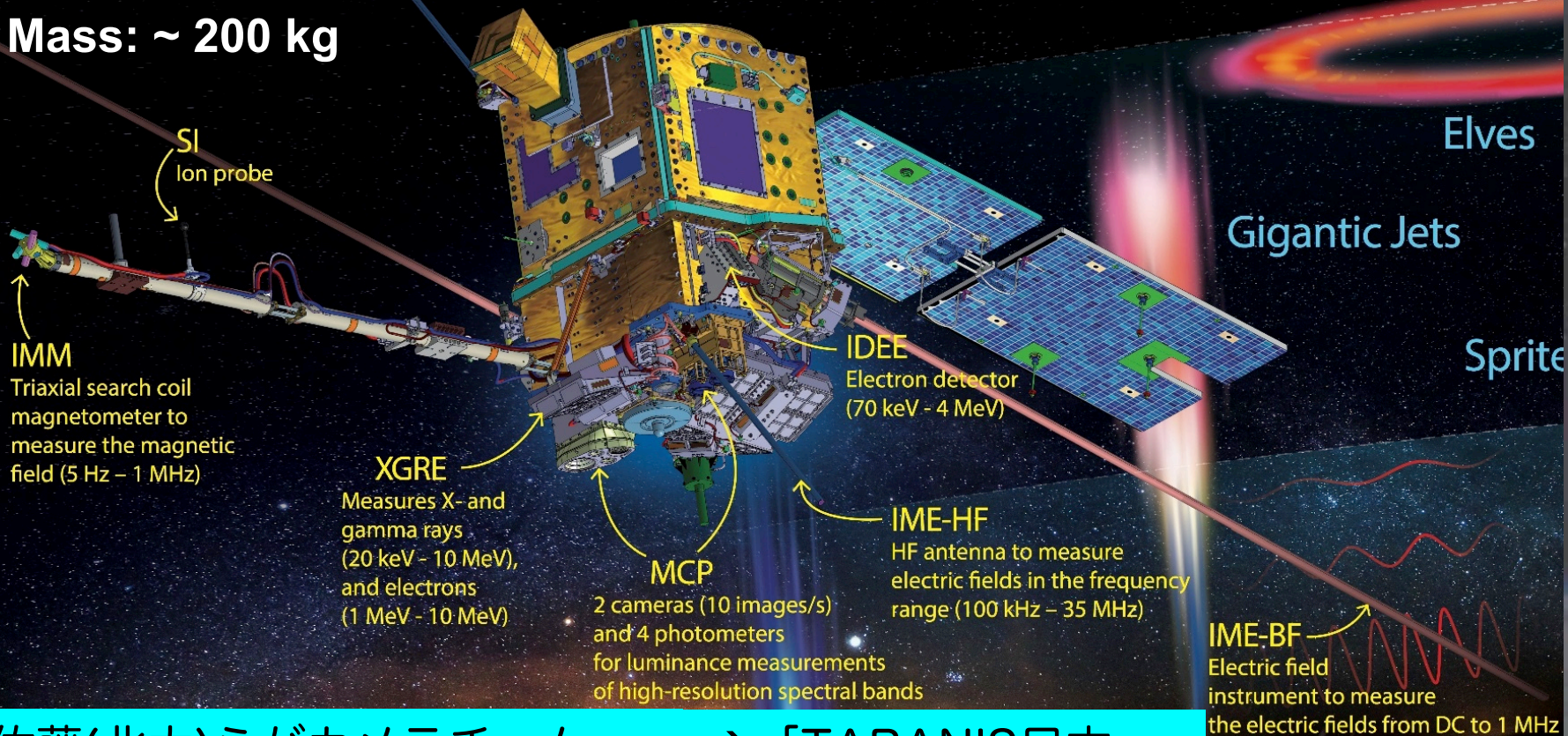
TARANIS 衛星 2019 打ち上げ予定

- TLE(電子ジェット)もTGFも観測可能
- 高エネルギー電子の高精度測定
- DC~35 MHz までの電波観測



イベントをトリガーするたびに、
~200 msの高時間分解能データを保存

- **Dimension: ~ 1m³**
- **Mass: ~ 200 kg**



- 佐藤(北大)らがカメラチーム → 「TARANIS日本
- 和田、中澤らがガンマ線チーム チーム」として連携

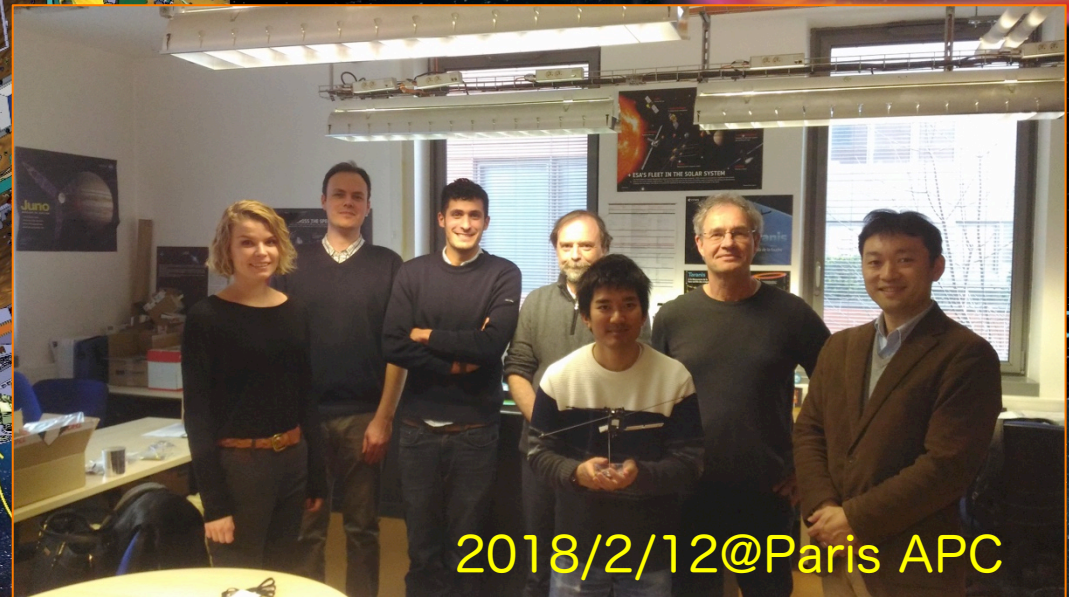
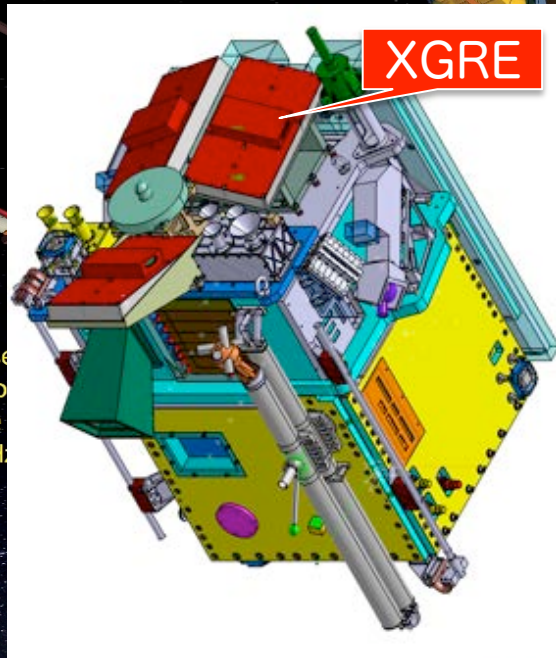
TARANIS 衛星 2019 打ち上げ予定

- TLE(電子ジェット)もTGFも観測可能
- 高エネルギー電子の高精度測定
- DC~35 MHz までの電波観測



イベントをトリガーするたびに、
~200 msの高時間分解能データを保存

- Dimension: ~ 1m³
- Mass: ~ 200 kg



2 cameras (10 images/s) range (100 kHz - 35 MHz)
and 4 photometers
for luminance measurements
of high-resolution spectral bands

IME-BF
Electric field
instrument to measure
the electric fields from DC to 1 MHz

- 佐藤(北大)らがカメラチーム → 「TARANIS日本
- 和田、中澤らがガンマ線チーム チーム」として連携

まとめに代えて

土屋



松元



古川



榎戸



中澤



和田



湯浅



奥田



古田



榎本



まとめに代えて

1 : 雷ガンマ線研究は重要な科学目的を持ち、しかも、高エネルギー宇宙物理における粒子加速研究と相補的

雷雲 = 静電場だけの 30 MeV 加速器 → 貴重な高エネルギー現象

2 : Hotな分野

- 新発見多数 e.g. Enoto et al. 2017 Nature → 宇宙と地上の両方から、大気中の電場加速を研究。
- 次世代の雷観測衛星の打ち上げ迫る：ASIM (2018)、TARANIS(2019)

3 : 将来X線ガンマ線衛星への開発活動

- 新しい小型DAQシステムの開発。
- 2019打ち上げ予定のTARANIS衛星のXGRE検出器への参加。

(1,2) サイエンス、および (3) 装置開発技術・若手育成の視点で、次世代の衛星搭載の硬X線、MeV/GeV検出器へと繋がるアクティビティー