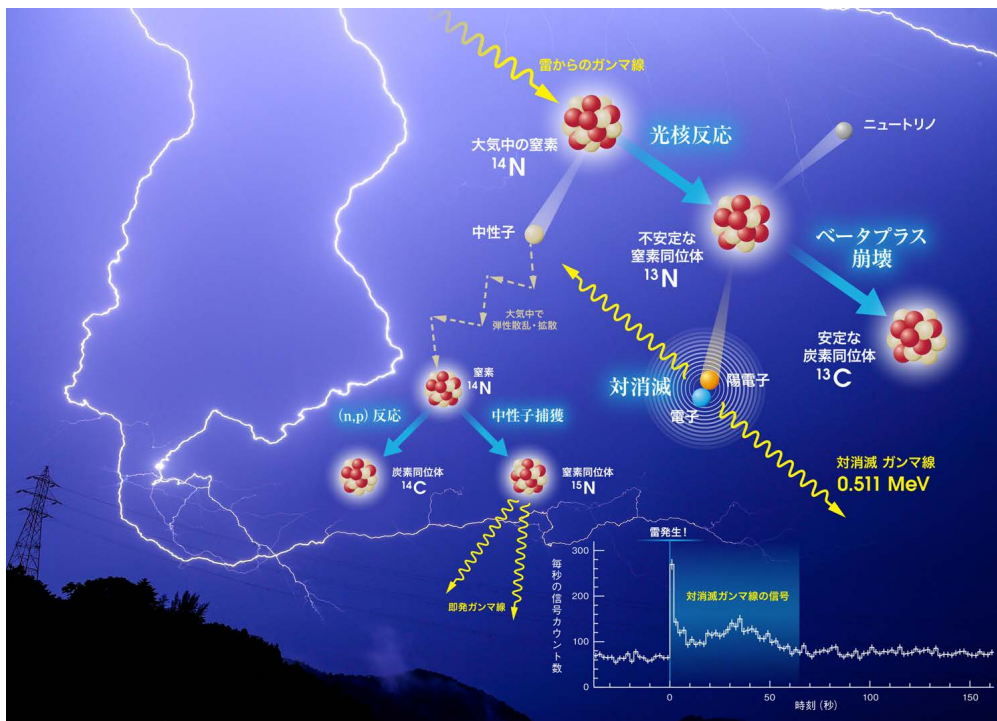


衛星を用いたTGF観測とスカイツリーでの観測の試み

中澤 知洋 (KMI/理学研究科、名古屋大学)

T. Enoto (Kyoto U.), Y. Wada, Y. Furuta, T. Matsumoto, T. Kasuga, K. Okuda (Univ. Tokyo), T. Yuasa, T. Nakano, D. Umemoto, H. Kato, K. Makishima (RIKEN), M. Sato (Hokkaido U.), Y. Sato (Grad. school of Eng. NU), H. Tsuchiya (JAEA) and the GROWTH collaboration



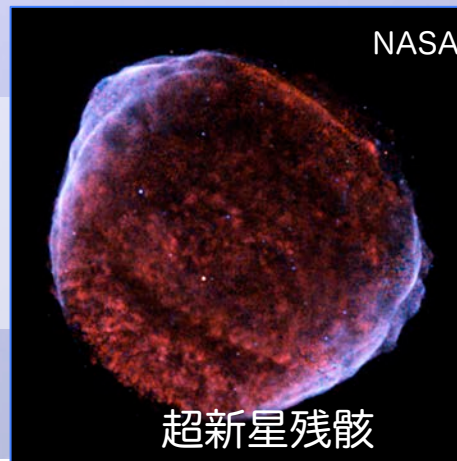
高エネルギー天体物理の視点で見た 雷ガンマ線研究の3つの意義

1: 科学目的が重要で相補的

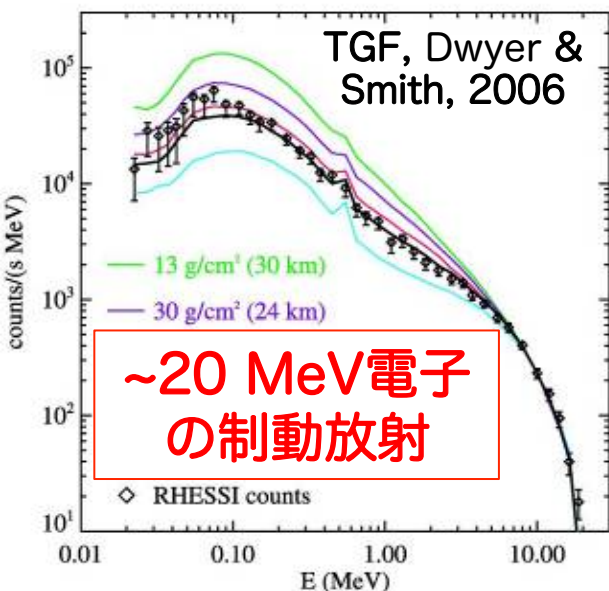
SNR、太陽フレア etc.

= 磁場が必須の TeV/PeV 加速器

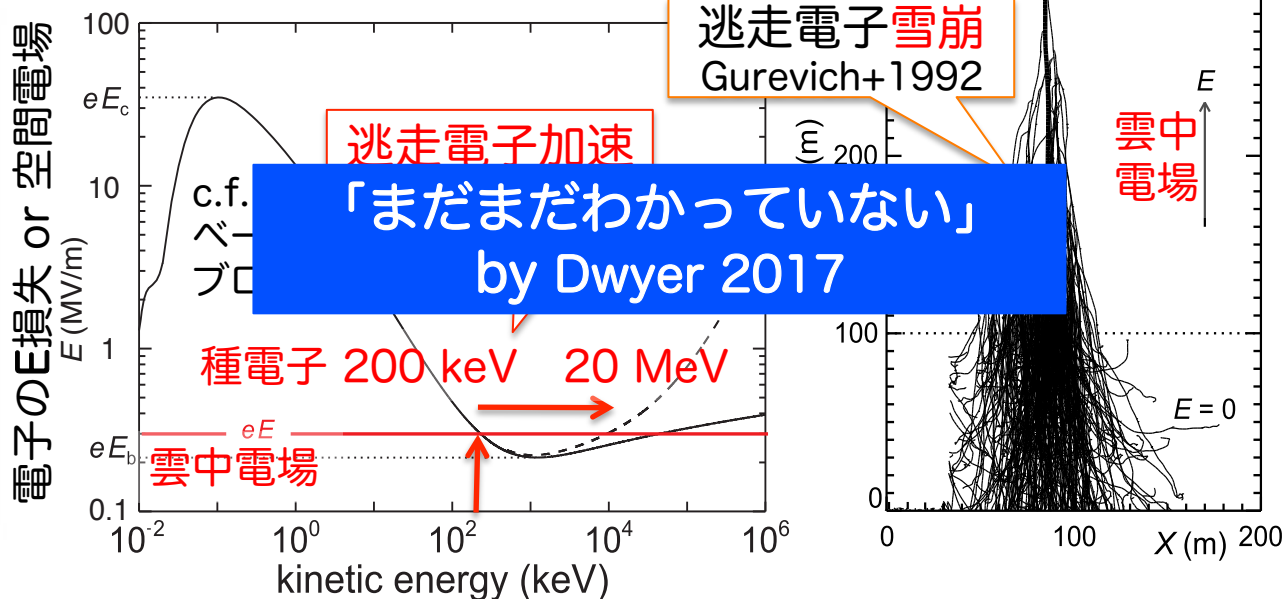
雷雲 = 静電場だけの 30 MeV 加速器



雷ガンマ線のスペクトル



電子加速のモデル Dwyer 2012 より



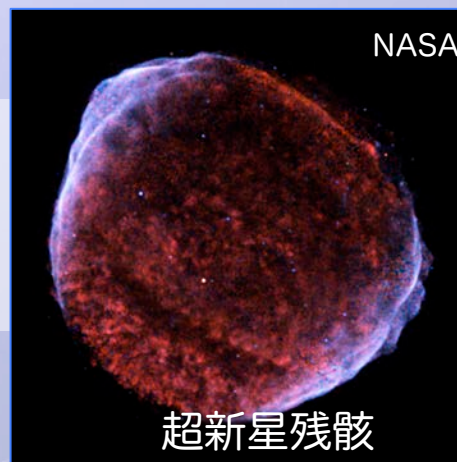
高エネルギー天体物理の視点で見た 雷ガンマ線研究の3つの意義

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



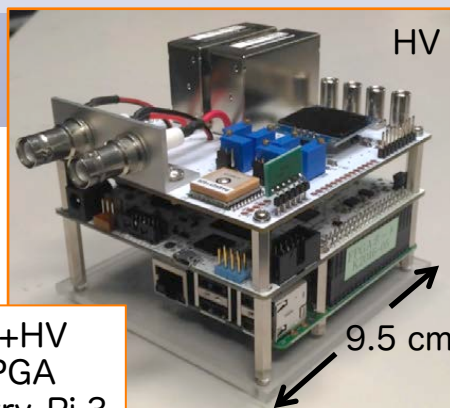
2：今、Hotな分野

- 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)

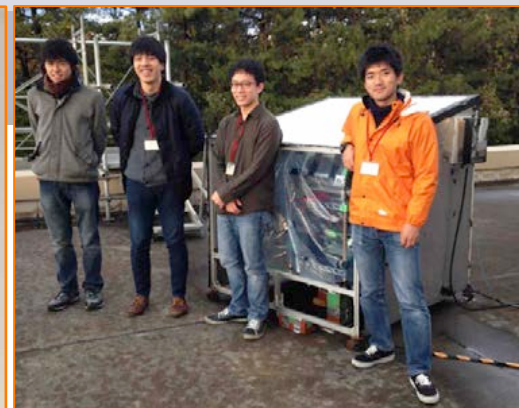
3：将来衛星への開発活動

- 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

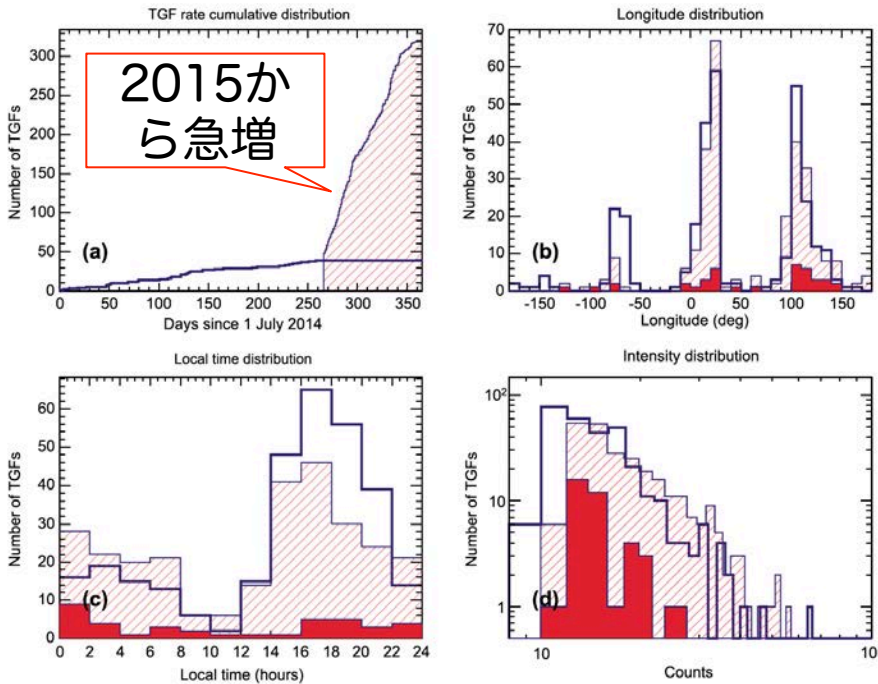


最近のTGF観測の新展開

継続時間 0.2-1 ms ではなく 50 us の現象とわかってきて
検出数が大きく増えた

トリガー条件を変え、短時間成分への感度を
上げることで、TGFの検出数が大きく増えた

Marisaldi+ 2015



増えたのは、短い継続時間
(~50 us)のイベント

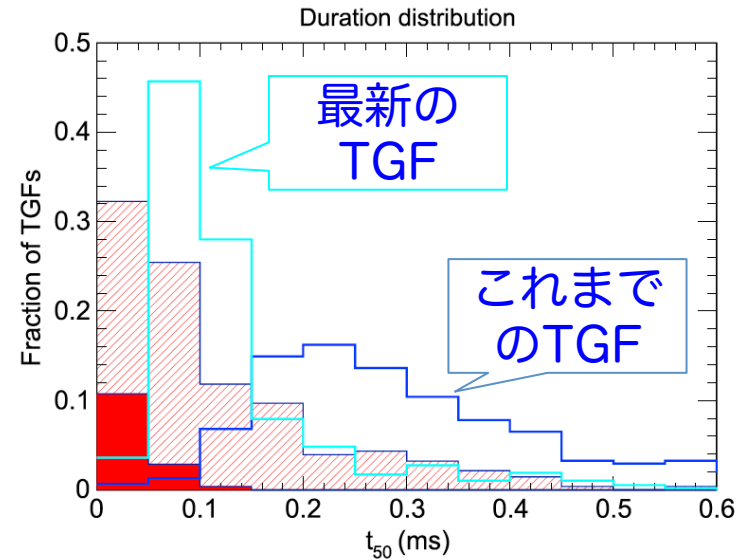
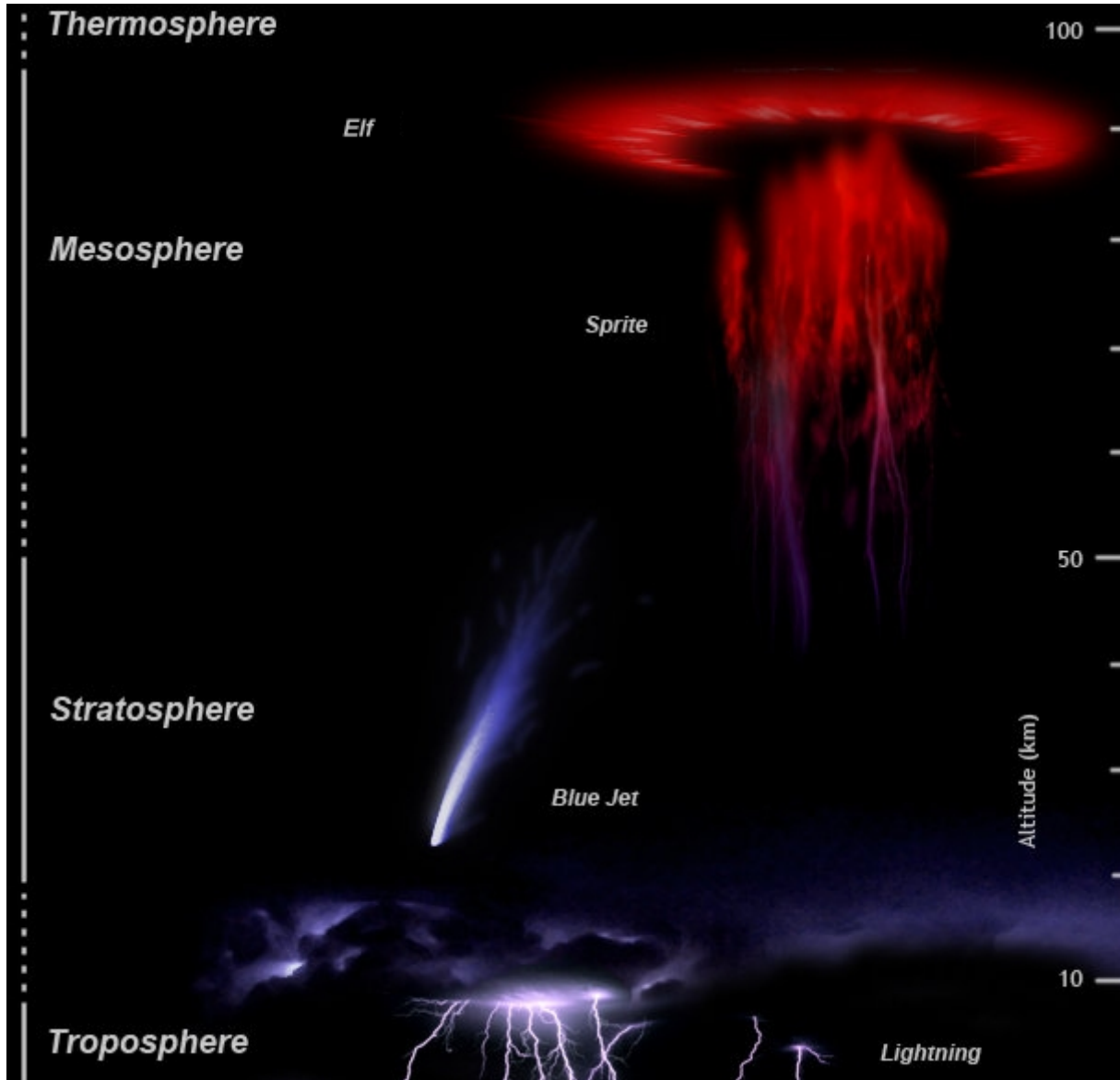


Figure 2. Normalized duration (t_{50}) distribution for the enhanced (red hatches) and standard (blue line) TGF samples. Red filled histogram: t_{50} distribution of the enhanced TGFs with a simultaneous WWLLN match normalized to the total number of the enhanced sample. Cyan histogram: Fermi GBM t_{50} distribution calculated for counts above 300 keV, from *Connaughton et al.* [2013], Figure 3.

Figure 1. (a) Cumulative TGF rate, (b) longitude, (c) local time, and (d) number of counts distributions for the TGF samples in standard (blue) and enhanced (red hatches) configurations. Red-filled histograms are the corresponding distributions for events with a simultaneous WWLLN match.

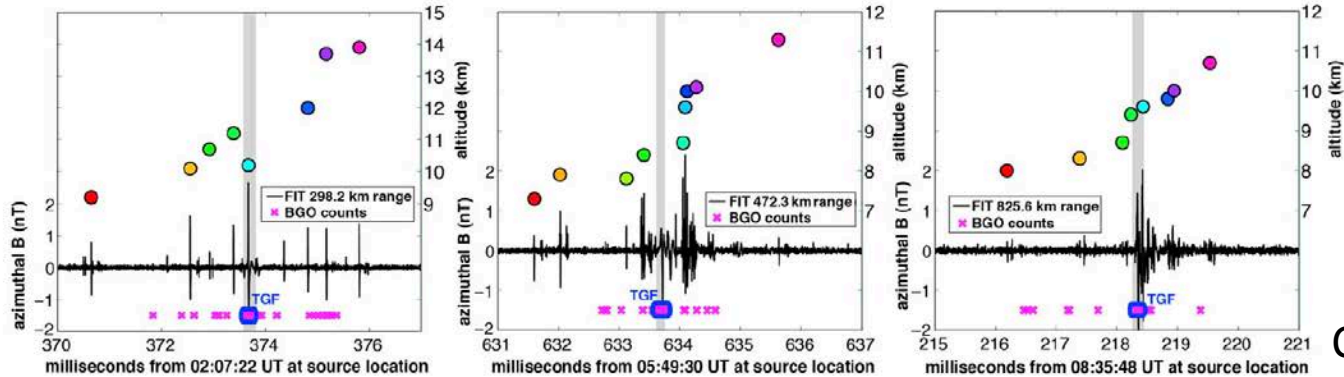
TLE (transient luminous event) 現象



- TGFとの関係はまだ明確にはなっていない
 - 1:1に対応しているわけではないことは分かっている
- まさに今後研究が進む

TGFと電波観測→雷放電におけるTGF

- 上空ヘリーダーが進展する途中でTGFが発生する例



Cummer et al. 2015

Figure 3. Measured altitude sequence of lightning leader radio pulses overlaid on the radio waveform and the gamma ray counts. (left) For the 1 July 2014 TGF, the lightning leader ascended from 9.2 to 13.9 km altitude in 5.2 ms, and the marked TGF was produced 3.0 ms after lightning initiation. (middle) For the 10 August 2014 TGF, the lightning leader ascended from 7.3 to 11.3 km altitude in 4.0 ms, and the marked TGF was produced 2.1 ms after lightning initiation. (right) For the 24 September 2014 TGF, the lightning leader ascended from 8.0 to 10.7 km altitude in 3.3 ms, and the marked TGF was produced 2.2 ms after lightning initiation.

- +EIP (正電荷の Energetic In-cloud Pulse) とTGFが同時に出ている例

Lyu+ 2016

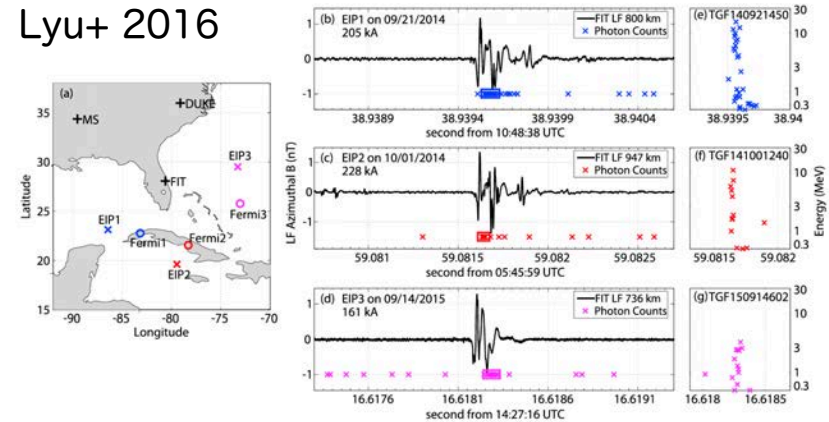


Figure 1. The geolocation, low-frequency (LF) radio signal, and TGF photons of the three +EIP-TGF. (a) Geolocation of three +EIPs (EIP1, EIP2, and EIP3, marked as crosses) and the Fermi footprints (Fermi1, Fermi2, and Fermi3, marked as circles) at the +EIP time and three LF sensors (DUKE, FIT, and MS marked as pluses); the three different colors of +EIPs and Fermi footprints illustrate each pair of them. (b-d) LF radio signals of +EIPs (peak current of 205 kA, 228 kA, and 161 kA, respectively) recorded by FIT sensor and the time of Fermi-GBM photons (GPS time converted to coordinated universal time (UTC)); all times were shifted to the +EIPs source positions, and TGFs are marked by the boxes on the photons time in each figure. (e-g) Energy distribution of the three Fermi-GBM TGFs with GBM names of TGF140921450, TGF141001240, and TGF150914602, respectively. Note that Fermi-GBM gamma ray data from two bismuth germanate (BGO) scintillator detectors were used in the plot.

Double-TGFと電波観測

Mezentsev et al. 2016

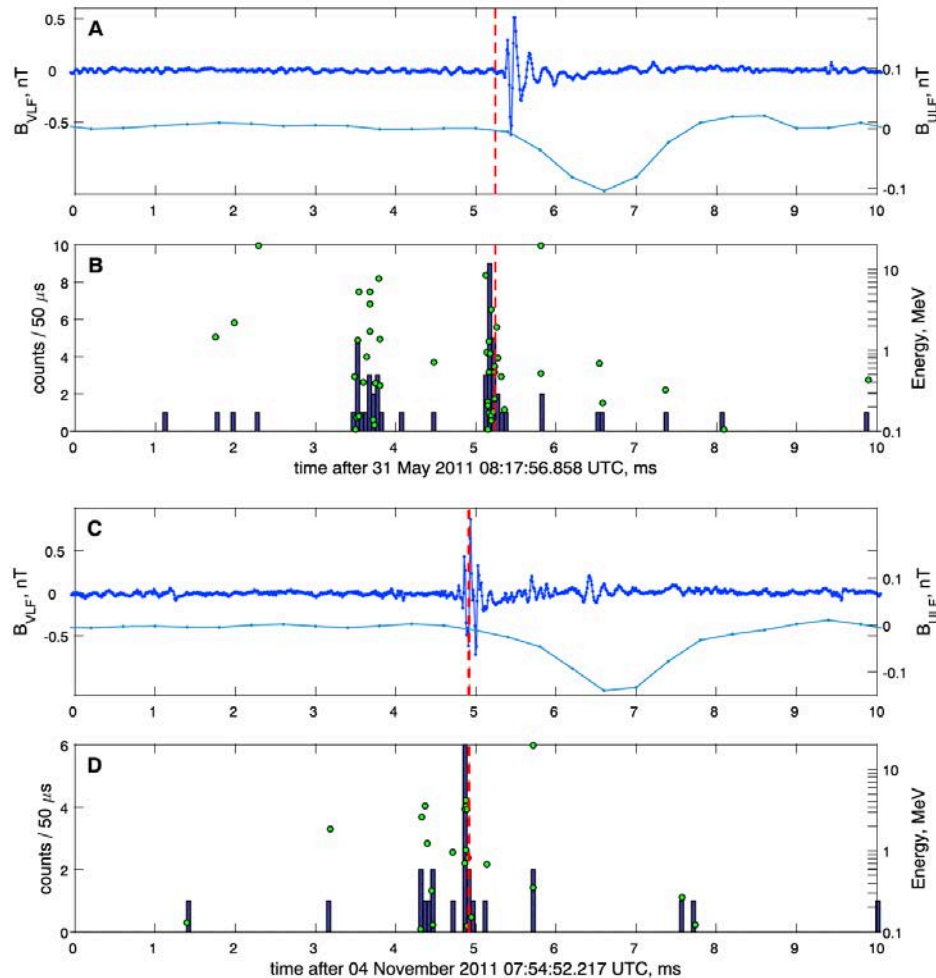


Figure 5. Two double TGFs with simultaneous WWLLN detections (red dashed vertical lines), VLF, and ULF waveforms recorded at Duke: (a, b) 31 May 2011 and (c, d) 4 November 2011. (Figures 5a and 5c) VLF (left axes) and ULF (slowly varying curves, right axes) radio recordings. (Figures 5b and 5d) RHESSI photon counts and energies versus time. See text for details.

TGFと電波モデリング

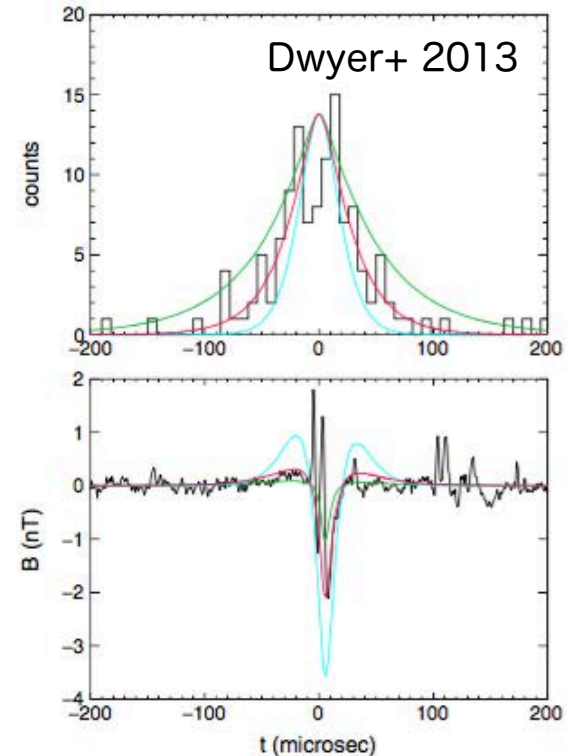


Figure 9. Top panel: Fermi counts versus time for the 5 September 2010 TGF (black) as presented in *Cummer et al.* [2011]. The smooth curves show different fits of equation (33). Bottom panel: The magnetic field measured by the Duke sensor at Florida Tech (black) for the same event. The smooth curves show the predicted RF emissions based upon the sources shown in the top panel. The models include the effects of propagation and the antenna response discussed in section 12.

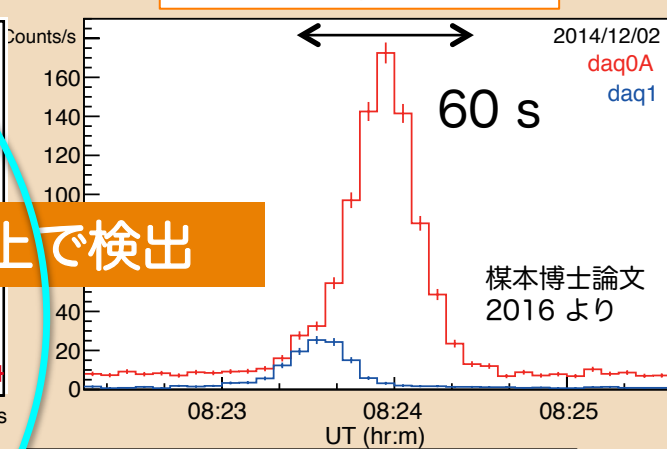
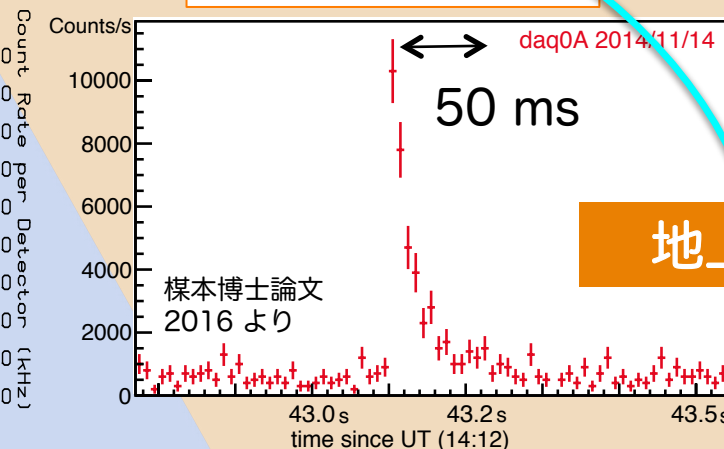
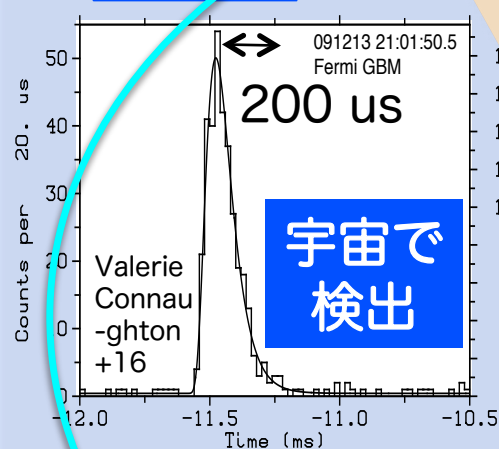
雷ガンマ線の「3形態」

榎戸さんtalk

1: TGF

2: Short burst

3: Long burst



地上で検出

雷 と 同 期

雷雲そのものから

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

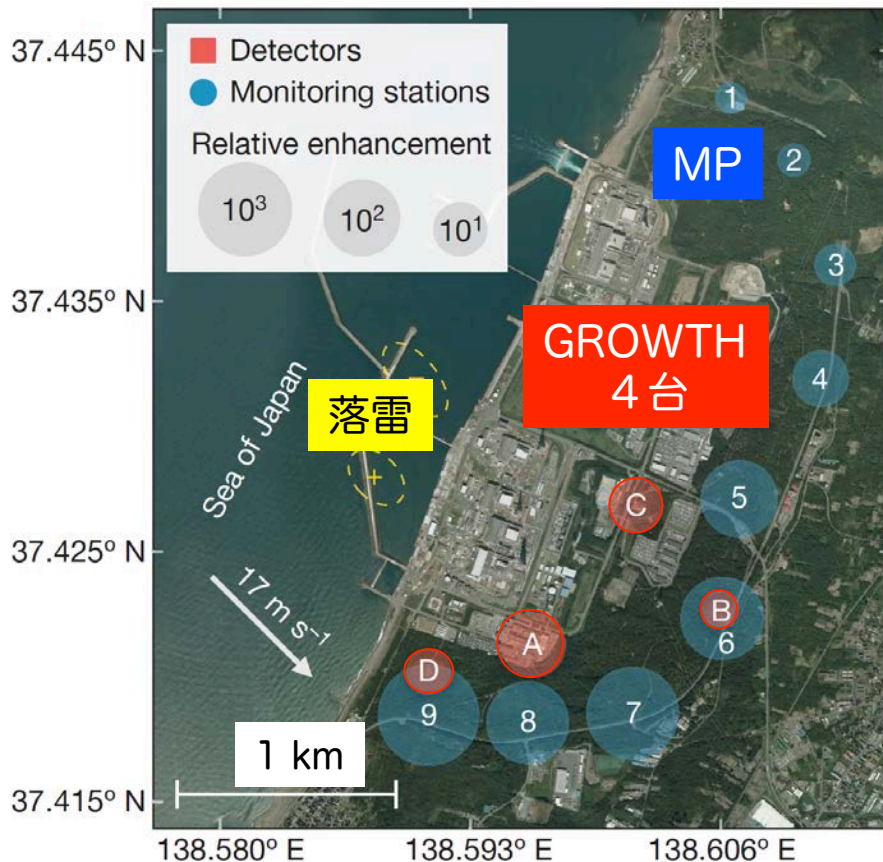
- 日本の冬季雷：低雲底 x 大エネルギー → 世界的に重要
- 日本における地上観測の発展 → GROWTHほか

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

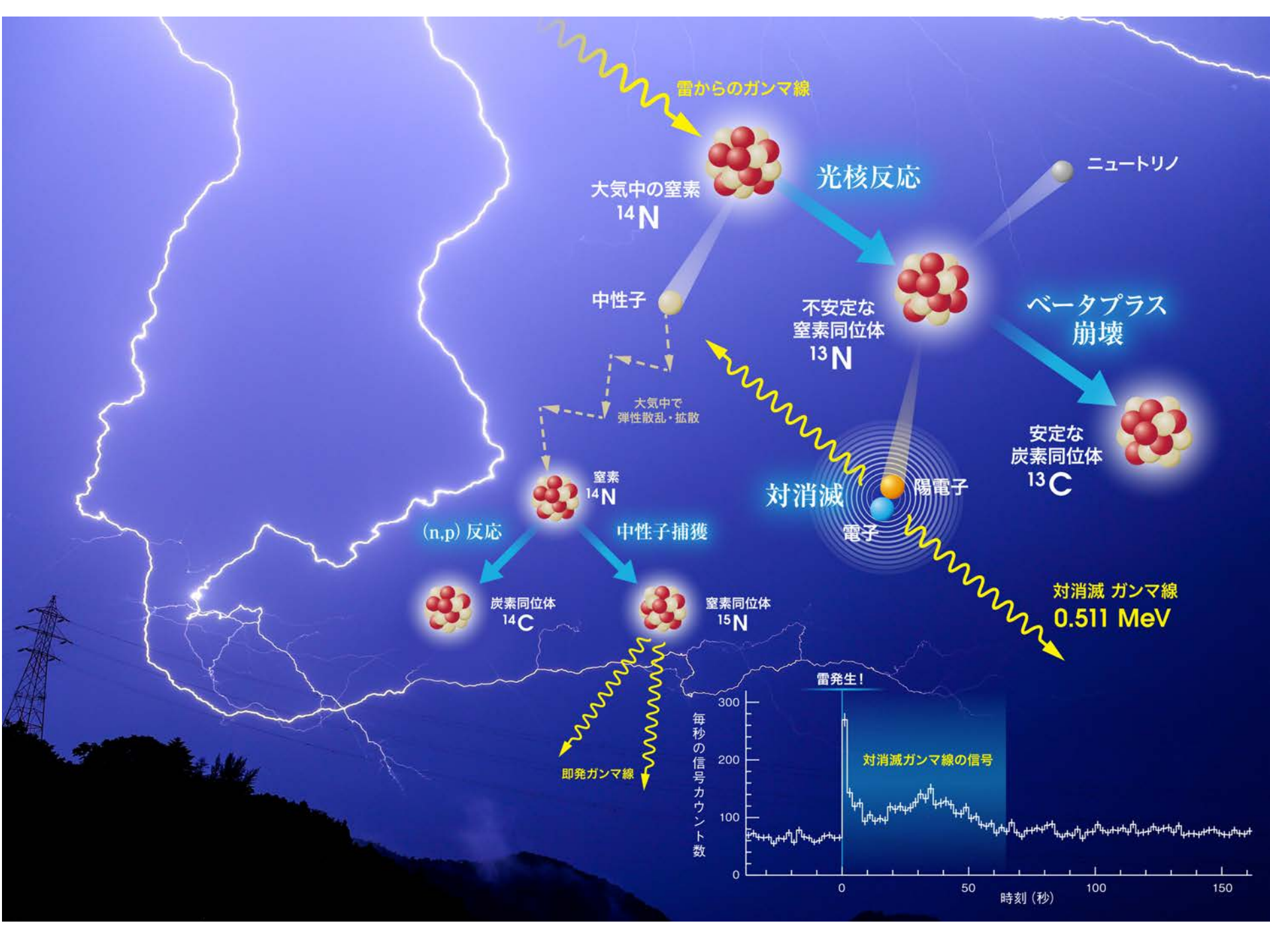
International journal of science

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.



大気中の窒素 ^{14}N

光核反応

不安定な窒素同位体 ^{13}N

ベータプラス崩壊

安定な炭素同位体 ^{13}C

対消滅

対消滅ガンマ線 0.511 MeV

中性子

大気中で弾性散乱・拡散

窒素 ^{14}N

(n,p) 反応

炭素同位体 ^{14}C

中性子捕獲

窒素同位体 ^{15}N

即発ガンマ線

雷発生!

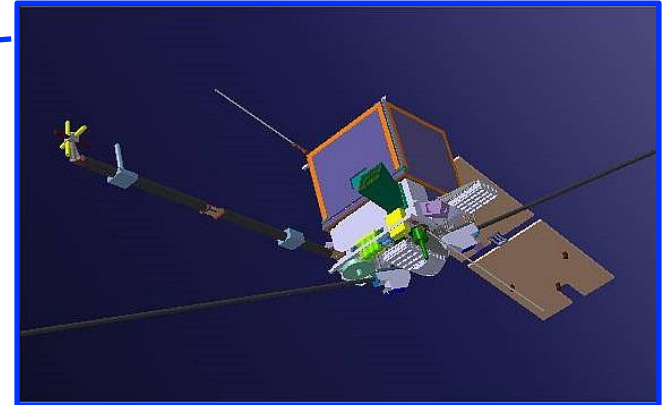
毎秒の信号カウンタ数

対消滅ガンマ線の信号

時刻 (秒)

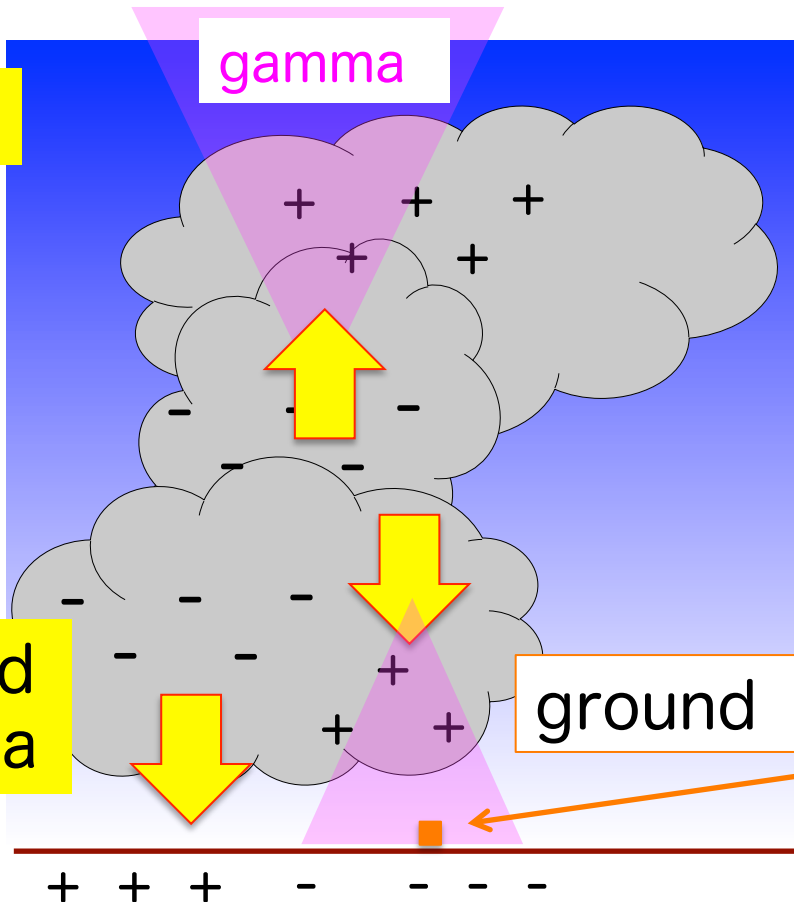
「雷ガンマ線フラッシュ」に “天と地から迫る”

Satellites



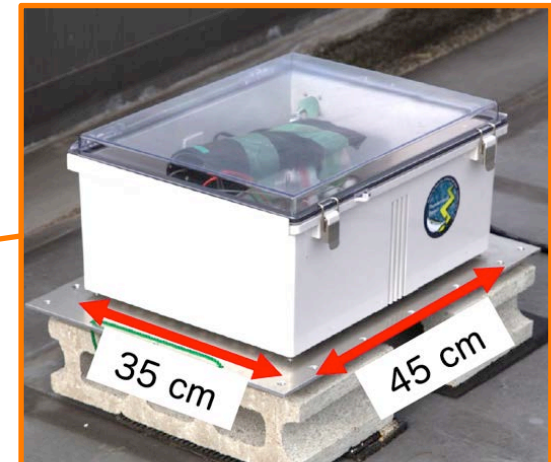
TGF

gamma



ground
gamma

ground



「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

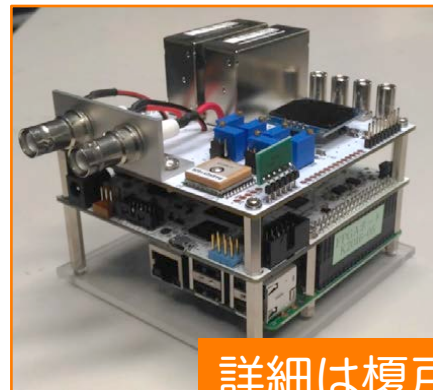
- 多数(>100 /yr)のTGFで、可視光・電波と同時観測
- ガンマ線は 10~100 cts/eventと暗く、平均的な議論しのみ
- 宇宙からの多波長同時観測



以下で紹介

地からの観測 e.g. GROWTH 実験

- 超大統計(10^6 - 10^9 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



詳細は榎戸さんトーク

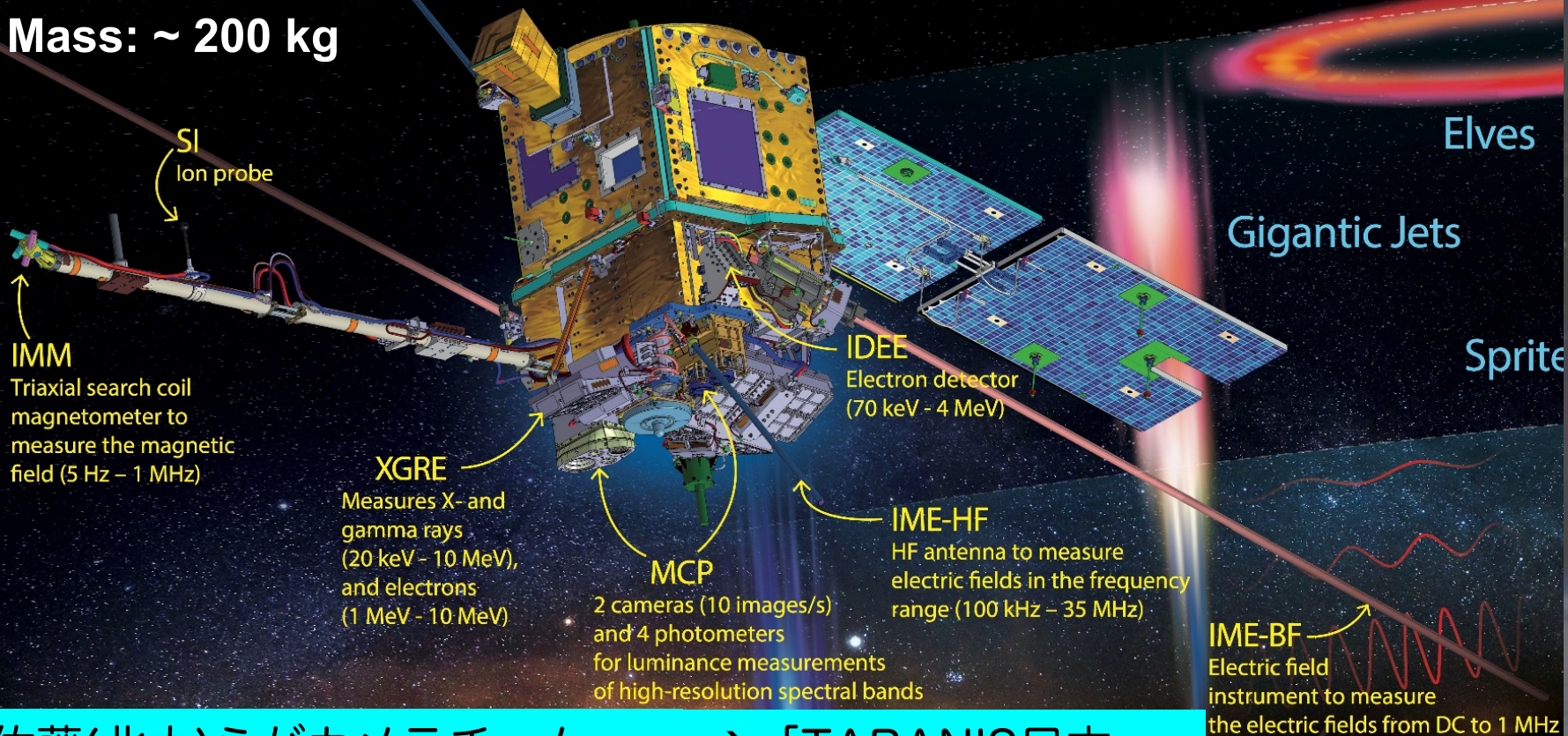
TARANIS 衛星 2019 打ち上げ予定

- 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日本チーム」として連携
- 和田、中澤らがガンマ線チーム

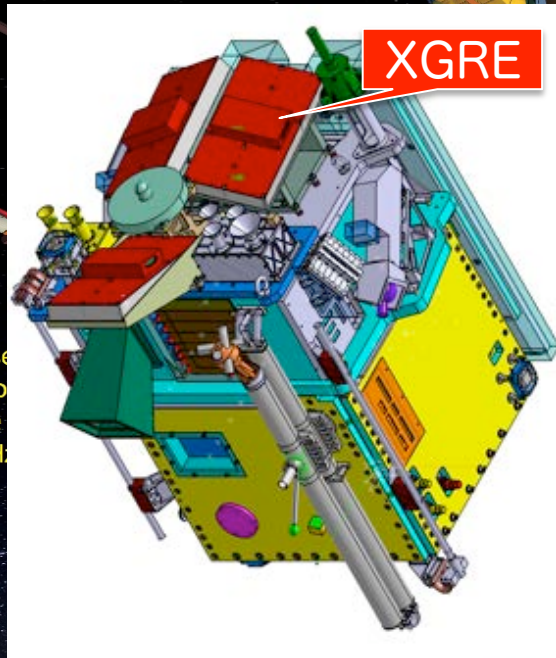
TARANIS 衛星 2019 打ち上げ予定

- 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

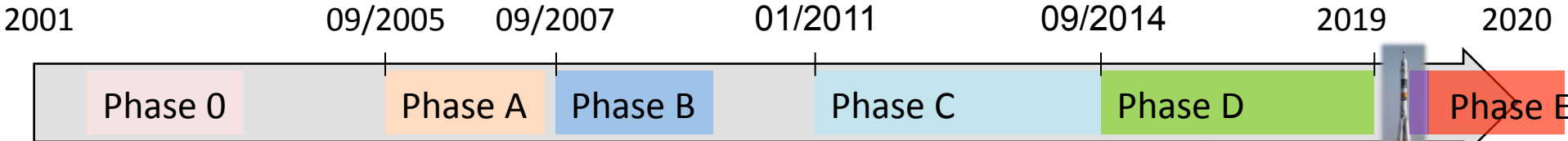


2 cameras (10 images/s) range (100 kHz - 35 MHz)
and 4 photometers
for luminance measurements
of high-resolution spectral bands

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

TARANIS status



Phase D :

- Technical Qualification (System)
- Delivery of CMS-T
- Operational Qualification (System)
- **AIT Payload**
- **AIT Satellite**
- **Ready to Launch: June 2019.**
- **Launch: September 2019.**

Now: **Assembly Integration Test Payload and Satellite**



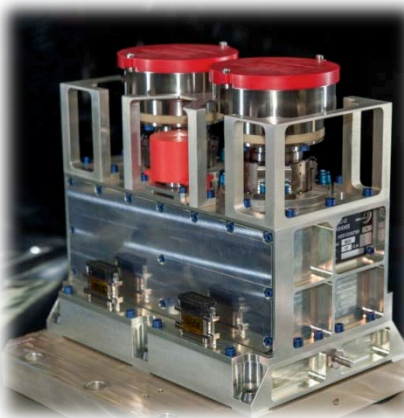
MCP (CEA)

MCP-PH 4 photometers



762 ± 5 nm
160-260 nm 600 - 900 nm
337 ± 5 nm

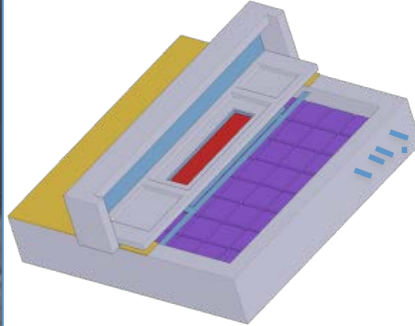
MCP-MC 2 cameras



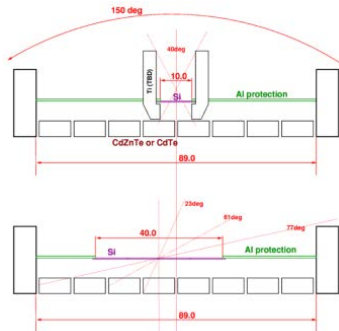
762 ± 5 nm
777 ± 5 nm

IDEE (IRAP)

 Silicium, 5 cells



 CdTe, 64 cells



Field Of View

[60 keV – 500 keV]:

FoV = 150°x40°

[500 keV – 5 MeV]:

FoV = 150°x150°

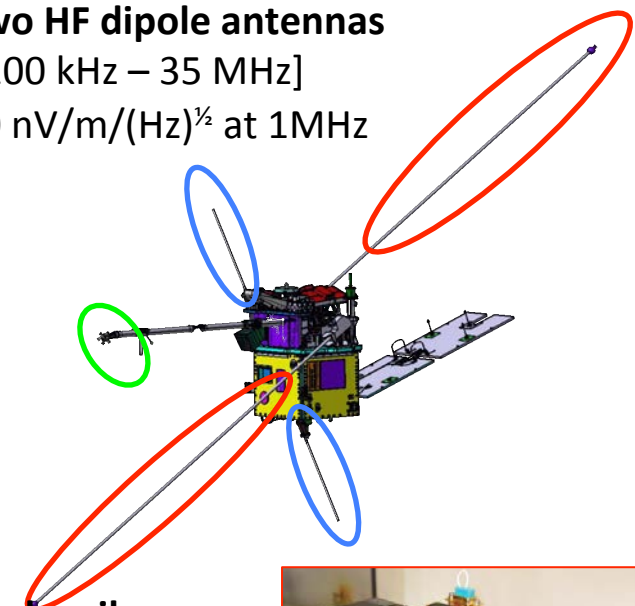
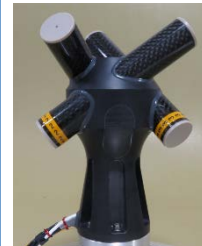
IMM (LPC2E) IME-HF(LPC2E) IME-BF (LATMOS)

IME-HF

Two HF dipole antennas

[100 kHz – 35 MHz]

20 nV/m/(Hz)^{1/2} at 1MHz



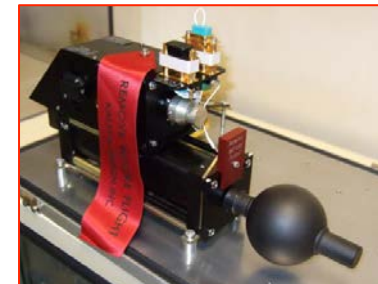
IMM

Triaxial search coil

[5 Hz – 1 MHz]

8.10⁻⁵ nT/(Hz)^{1/2} at 2 kHz

9.10⁻⁶ nT/(Hz)^{1/2} at 100 kHz



IME-BF

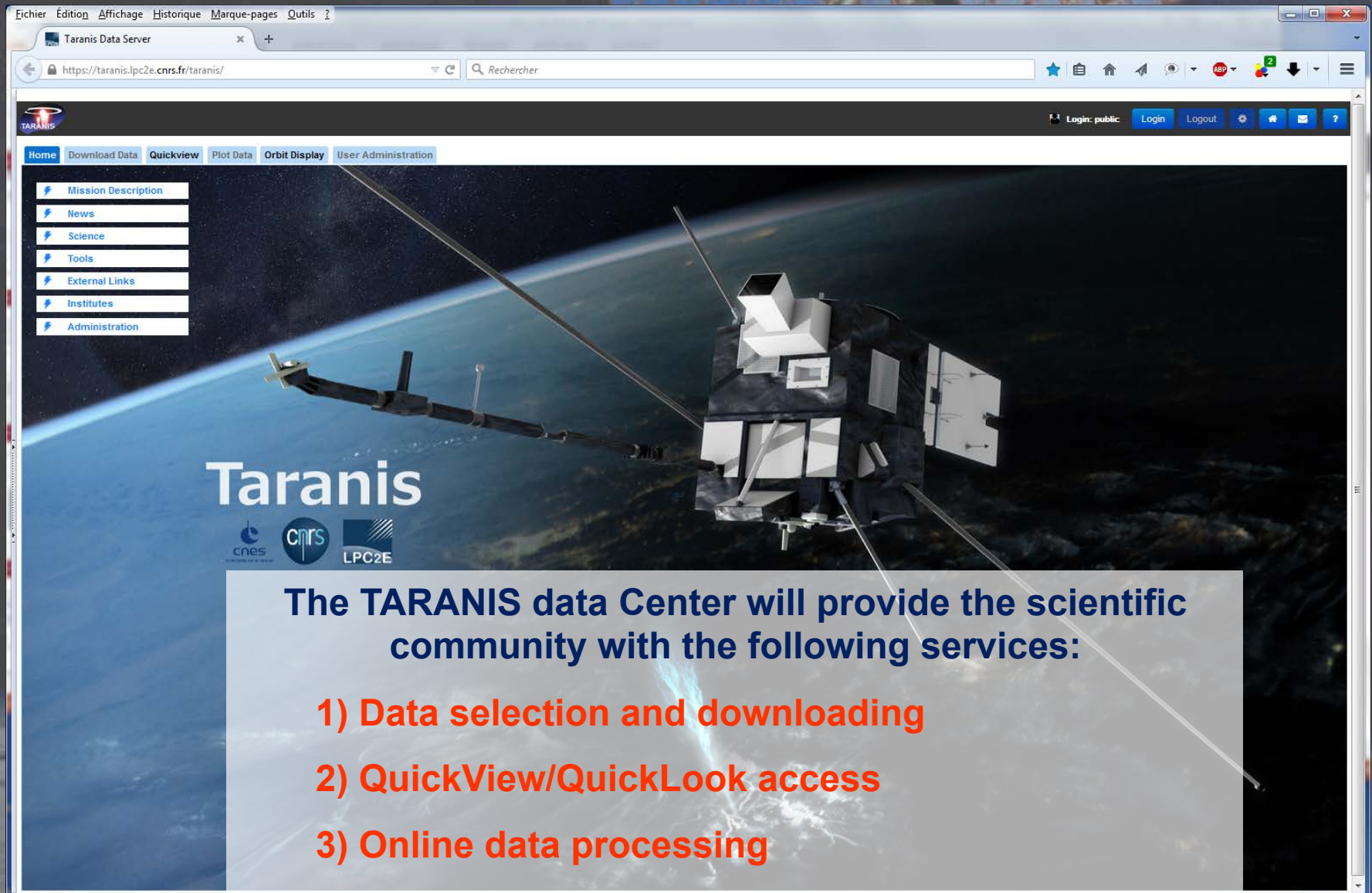
Two LF antennas

[DC – 20 kHz]

126 nV/m/(Hz)^{1/2} at 100 Hz

40 nV/m/(Hz)^{1/2} at 10 kHz

TARANIS – Data center

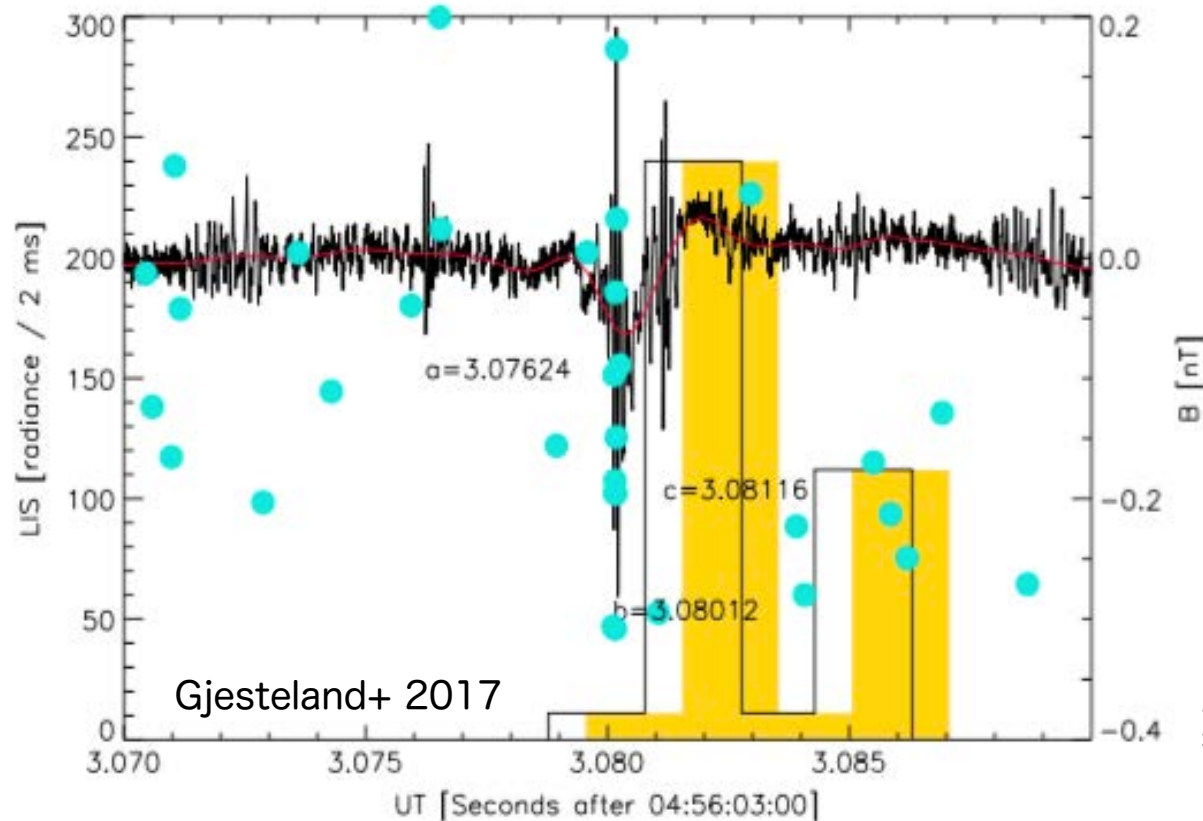


The Taranis data Center will provide the scientific community with the following services:

- 1) Data selection and downloading
- 2) QuickView/QuickLook access
- 3) Online data processing

TARANIS-Japan team can be a interface to these data

TGF+電波+可視光観測



radio
gamma
optical

Data obtained using

- 2 satellites and
- 3 ground radio stations.

サンプルがまだ少なく、時刻付の系統誤差が大きい

電波・可視光・ガンマ線の同時観測で、年間~100個のTGFを検出する。

- TGFはいつ・どこで(電波)発生するのか? → 加速器の位置は?
- TGFと、スプライト、エルブスなどの発光現象との関係は? → TGFの雷放電全体に占める位置付け
- 多数のTGFを定量評価して、その光度分布を明確に。

スカイツリーでの測定の試み

夏の雷でもガンマ線や中性子が発生するのか？

- 一地点(ガンマ線の到達距離は300-500m)に落下する雷の数は少ない。
- スカイツリーでは年平均10発もの落雷 → 夏季雷の研究に最高の場所。

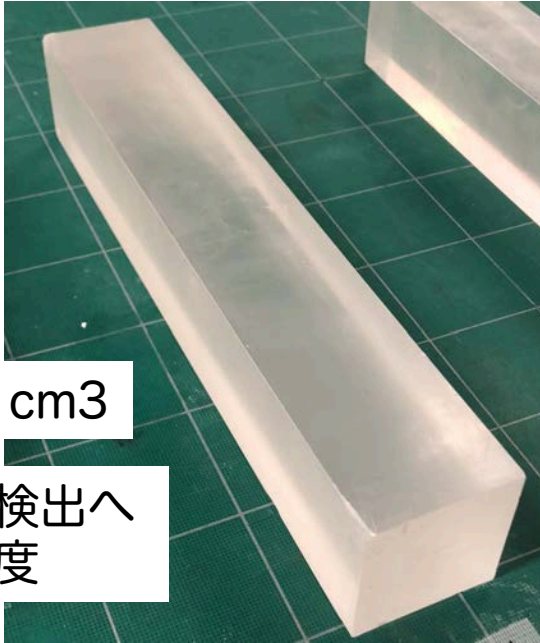
→ スカイツリーは、雷研究のメッカになれるかもしれない。



検出器

大型 CsI シンチレータ

CLEOII



30x5x5 cm³

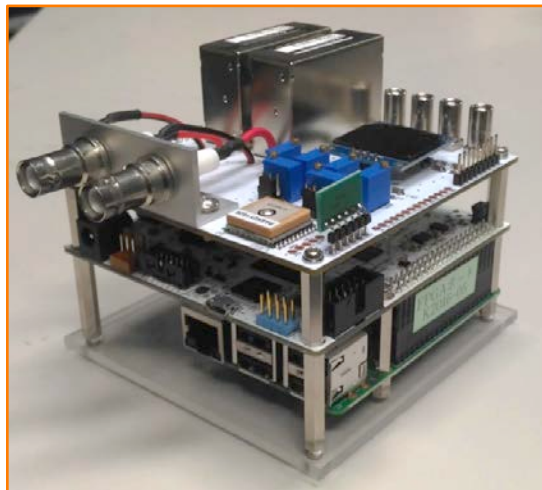
ガンマ線検出への高い感度

EJ-270 熱中性子プラシンチ



高速および熱中性子を検出できる。
熱中性子は6Li由来のピークを作る

コンパクトな DAQシステム



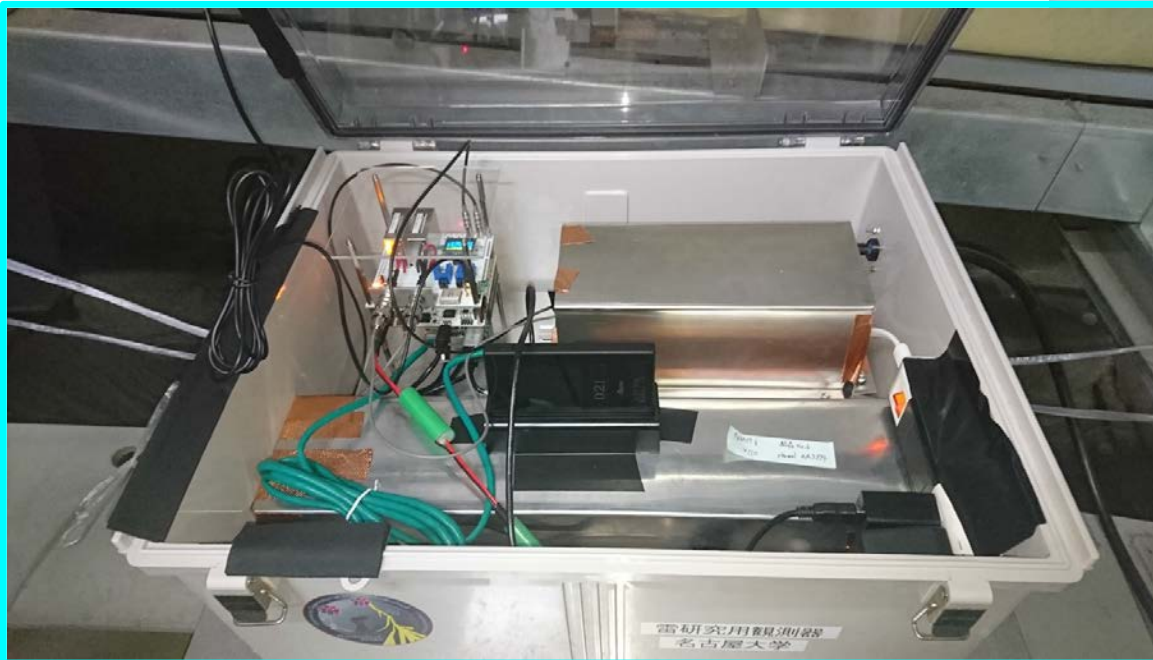
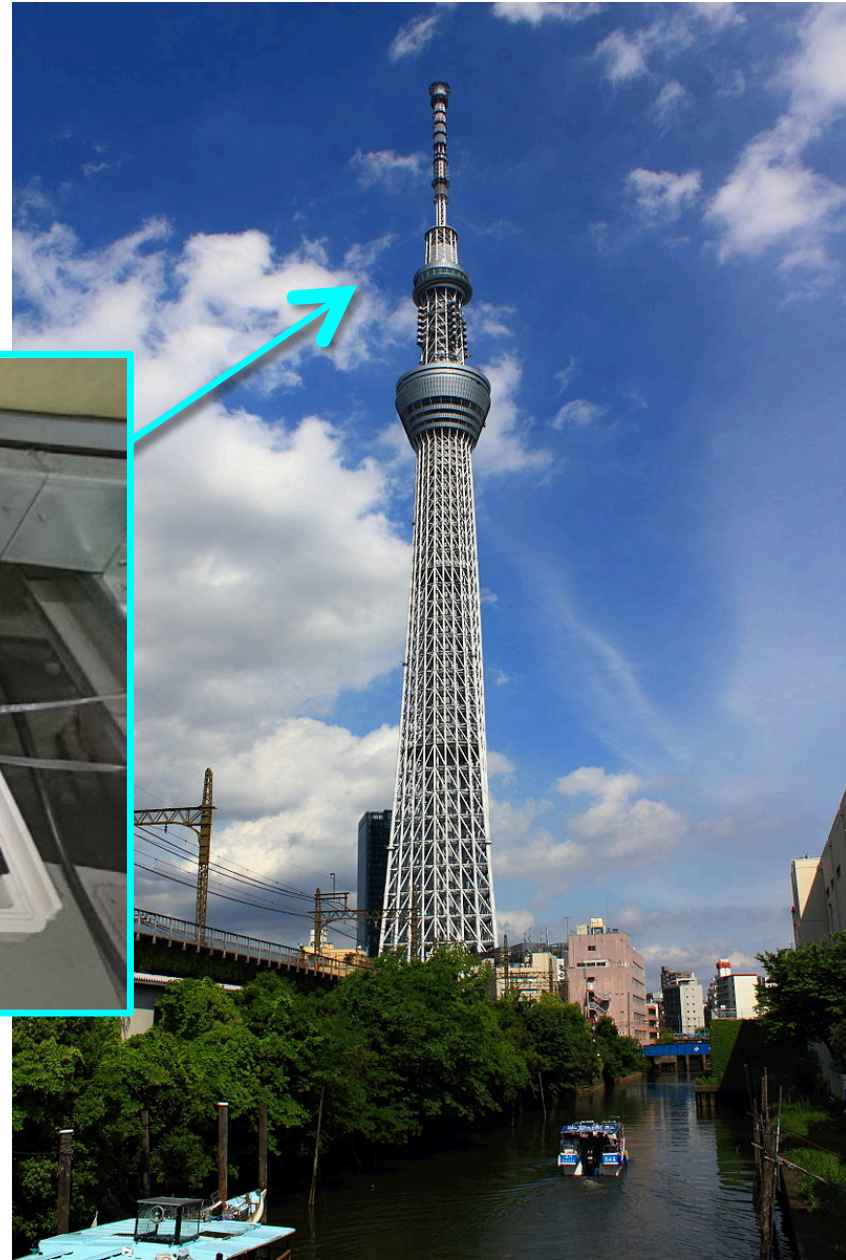
スカイツリーへの設置

5/21 初回設置

6/15 ネットrestart、観測開始

8/3 中性子検出器追加

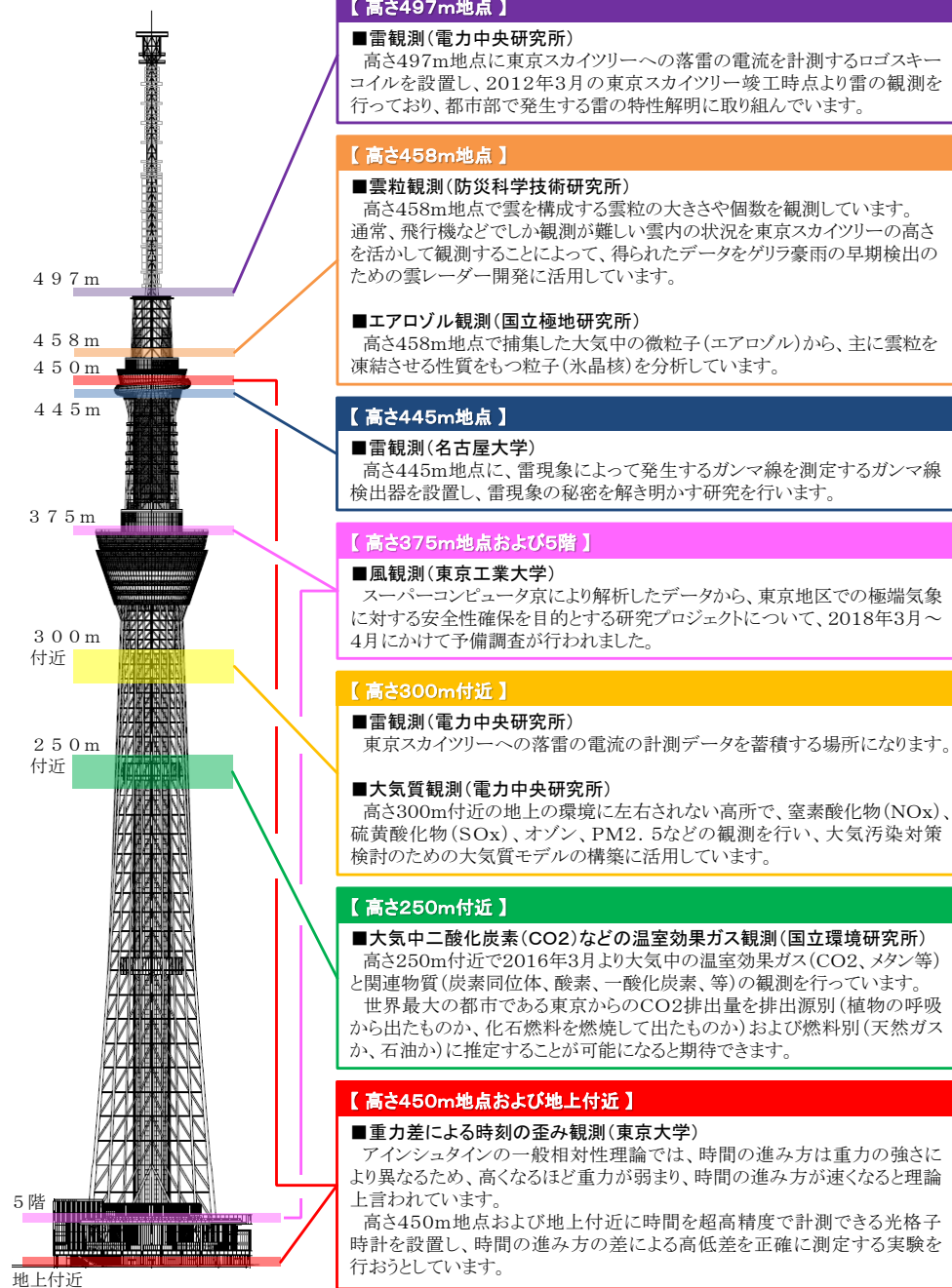
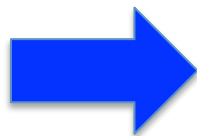
今の所、落雷がない。。。



東京スカイツリーの高さを活用した研究について

参考：研究拠点としてのスカイツリー

「ぜひ宣伝してほしい」とのこと



まとめ

1：雷ガンマ線の物理は、高エネルギー宇宙物理、大気物理など多くの視点で重要かつ未知の先端物理である。

2：近年、ホットなサイエンスになっている

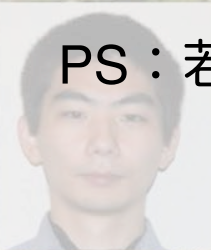
- 多くの新発見が出てきている。下向きTGFや光核反応など。

3：多波長TGF・雷放電観測を実現する、新世代のTGF観測衛星が立ち上がりつつある。ASIM (2018)、TARANIS(2019)

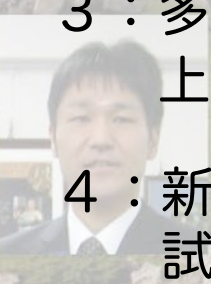
4：新たな「夏の雷」へのステップとして、東京スカイツリーでの観測を試みている

PS：若手の検出器技術→観測→トップサイエンスの場として優れている

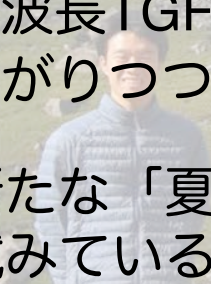
土屋



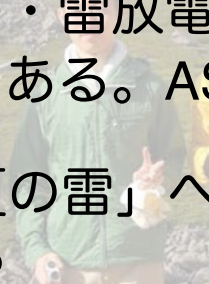
松元



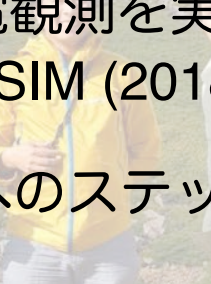
白川



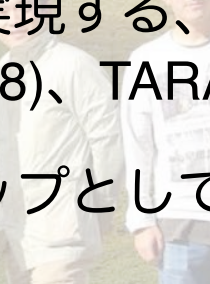
榎戸



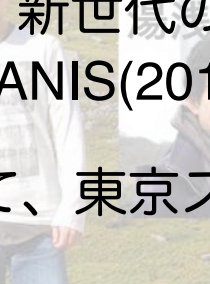
中津



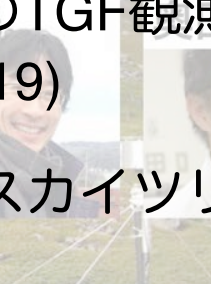
福田



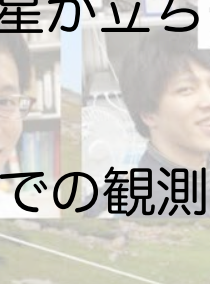
古田



古田



古田



古田

