

なんと雷のリーダーからX線が！富士山頂ならではの雷起源放射線計測（SR04-2）

D. M. Smith¹, 鴨川仁², 鈴木智幸², J. Ortberg¹, J. Chaffin¹

1. カリフォルニア大学サンタクルーズ校, 2. 静岡県立大学

1. はじめに

高エネルギー放射線の3つの形態が雷雨に関連して観測されている。ガンマ線グローは数分以上続くことがあり¹⁻³, 負リーダーの先端で発生するX線は, ステップに伴うマイクロ秒のバースト(通常数百keVのエネルギー)^{4,5}, 地上ガンマ線フラッシュ(Terrestrial Gamma Flash; TGF)は, グローと同じ高エネルギースペクトル(光子エネルギーは最大40 MeV)を持つが, 時間スケールは短い(数十マイクロ秒から約1ミリ秒)。ほとんどのTGFは宇宙から観測されている^{6,7}。しかし, 少数の下向きのTGFが地上から観測されており, その多くは日本では冬の中部地方西海岸付近で観測されている⁸⁻¹¹。TGFは, 他の2つの現象とは異なり, 非常に明るく, 10^{18} のオーダーのガンマ線を発生し, 発生地点のごく近くにいる人に放射線の危険をもたらすのに十分である¹²。

2. 測定方法

カリフォルニア大学サンタクルーズ校で作られたガンマ線検出器のアレイが, 鴨川グループによって富士山に配備され, 今年で5シーズン目を迎えた。GODOTとTHORという2つの観測装置は, ガンマ線やその他の高エネルギー粒子を検出するための複数のシンチレータで構成されている。それぞれ, 弱くて遠い事象を検出するための大型検出器と, 大型検出器を飽和させ, あるいは停止させる非常に明るい事象を測定するための小型検出器を持っている。どちらの検出器も, 個々のガンマ線光子のタイミングとエネルギーを特定しようとするもので, シンチレータによって可視光に変換され, 光電子増倍管によって電流パルスに変換される。

これらのパルスはデジタル化され, リアルタイムで分析され, どちらの装置もそれぞれのガンマ線光子の到達時間とそのエネルギーを記録することができる。次のセクションで示すデータはTHORからのもので, 3つの大きく異なるサイズのプラスチックシンチレータ(小型, 中型, 大型)と, ヨウ化ナトリウム(NaI)製の大型検出器1つを備えている。

プラスチックシンチレータは高速応答(最大4,000,000カウント/秒のカウントレートで動作するように)に最適化されており, NaIは光子のエネルギーをより正確に記録するために最適化されている。

しかし, 非常に明るいTGFの間や, ステップリーダー

X線の非常に短い持続時間のパルスの間は, 複数のガンマ線からのパルスが重なり, 機器はもはや時間とエネルギーの個々のデータ記録に分離することができない。このような状態では, GODOTはカウントの記録を停止するだけですが, 新しいTHOR装置は, 80MHzでデジタル化された光電子増倍管の生の出力を示す, 最大300マイクロ秒のデータの完全なデジタル記録を保存する。

これにより, 重なり合ったパルスを直接観測することができ, 時間, エネルギー, 明るさのデータを取り出すことができる。THORはタイミングにおいてもGODOTを上回る。GODOTのタイミング精度は数ミリ秒である。これは, データ取得コンピュータの絶対タイミングにネットワークタイミングプロトコル(NTP)を使用しているためで, 検出器のデジタイザからコンピュータにデータを移動する際にわずかな時間遅延が発生するためである。THORはGPSレシーバーを使用しており, レシーバーからのパルス毎秒の信号は直接ディテクターのエレクトロニクスに送られ, そこでGPSからのものであることを示す特別なビットを持つデータストリームの別のイベントとして処理される。

これにより, THORのデータはマイクロ秒単位の絶対精度を持つことになり, ガンマ線データを電波データと比較し, 雷プロセスのどの部分でガンマ線が発生しているかを明らかにする上で非常に貴重なデータとなる。

3. 観測

2022年, 我々は富士山頂から地上から見た日本初の夏のTGFを報告した。2023年の夏, 富士山は私たちに別のプレゼントをくれた。下向きのステップリーダー(雷が地上に接近する最初の瞬間)とそれに続くダートリーダー(最初のステップリーダーによって作られた電離経路に沿って雲から降りてくる電荷の後のパケット)によるX線バーストの例であると私たちが考えているいくつかの事象である。

図1(a)から1(d)は, 富士山観測所のロゴスキーコイルによって記録された(本稿の安本らの内容を参照)落雷の一部である一連のX線バーストの異なる部分からのTHORデータで, ある段階で雷が観測所自体に落ちたことを示している。プロットの下部に沿って, 各ドットは1つの光子を表し, 縦軸は校正されていないチャンネル(おおよそ100 keVから10 MeVまで)のエネルギー

の対数である。これはTHORが連続的に記録しているデータモードである。プロットのもっと上には、80 MHzでサンプリングされた検出器の直接デジタル化された出力がある（トリガーモード）。横軸はミリ秒単位の時間であり、切り捨てられた秒は図のタイトルに示されている。

図2(a)から図2(c)は、その20秒前に発生した別のフラッシュで、ログスキーコイルがトリガーされなかったため、おそらくステーションに直接当たらなかったと思われる。この場合、雲から地面への閃光（CG）なのか、雲内閃光（IC）なのかはわからない。

参考文献

- 1) Torii, T., Takeishi, M., Hosono, T. (2002), Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity, *J. Geophys. Res.*, **D107**, 4324
- 2) Tsuchiya, H. et al. (2007), Detection of High-Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 165002
- 3) Wada, Y. et al. (2023), Negative Excursion of Surface Electric Fields During Gamma-Ray Glows in Winter Thunderstorms, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2023JD039354
- 4) Moore, C. B., Eack, K. B., Aulich, G. D., Rison, W. (2001), Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2141–2144.
- 5) Dwyer, J. R. et al. (2005), X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01803
- 6) Fishman, J. et al. (1994), Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, *Science*, **264**, 1313-1316
- 7) Smith, D. M. et al. (2005), Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV, *Science*, **307**, 1085
- 8) Enoto, T. et al. (2017), Photonuclear reactions triggered by lightning discharge, *Nature*, **551**, 481-484.
- 9) Bowers, G. et al. (2017), Gamma Ray Signatures of Neutrons From a Terrestrial Gamma Ray Flash, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 10,063-10,070.
- 10) Wada, Y. et al. (2019), Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observed in a Winter Thunderstorm, *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 061103
- 11) Wada, Y. et al. (2022), Characteristics of Low-Frequency Pulses Associated With Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL097348
- 12) Dwyer, J. et al. (2010), Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting radiation doses received in aircraft, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D9, D0920621, 1727-1730.

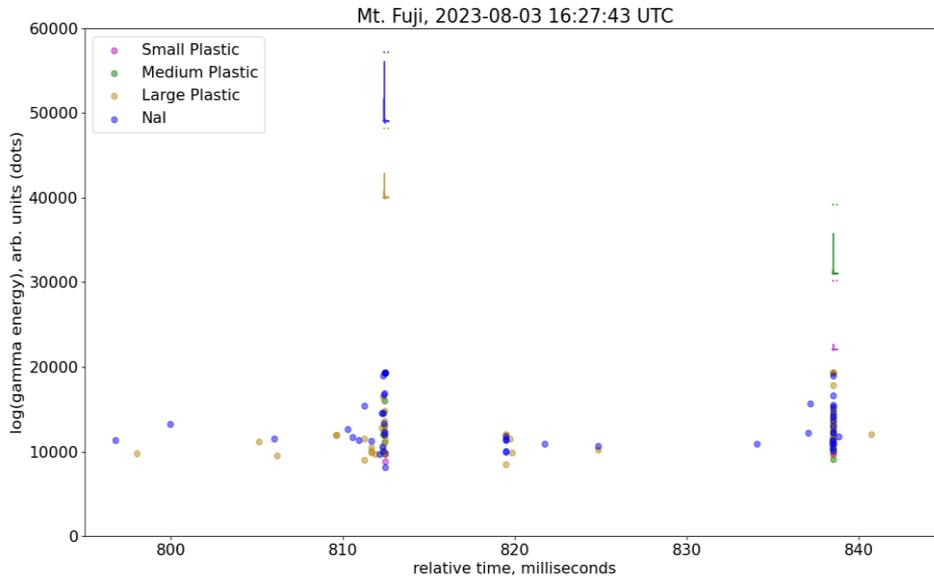


図1(a) ログスキーコイルをトリガーしたフラッシュは、30ミリ秒の間に3つの別々のリーダーシーケンスを示している。最初のシーケンスは~812 msで、2つの大きな検出器のみをトリガーした。最後のシーケンス (~838ミリ秒) ははるかに明るく、最小の検出器もトリガーした。残念なことに、最初のトリガーからのデータがまだ読み出されていないため、大型検出器が再トリガーするには、最初のシーケンスから時間が経ちすぎている。

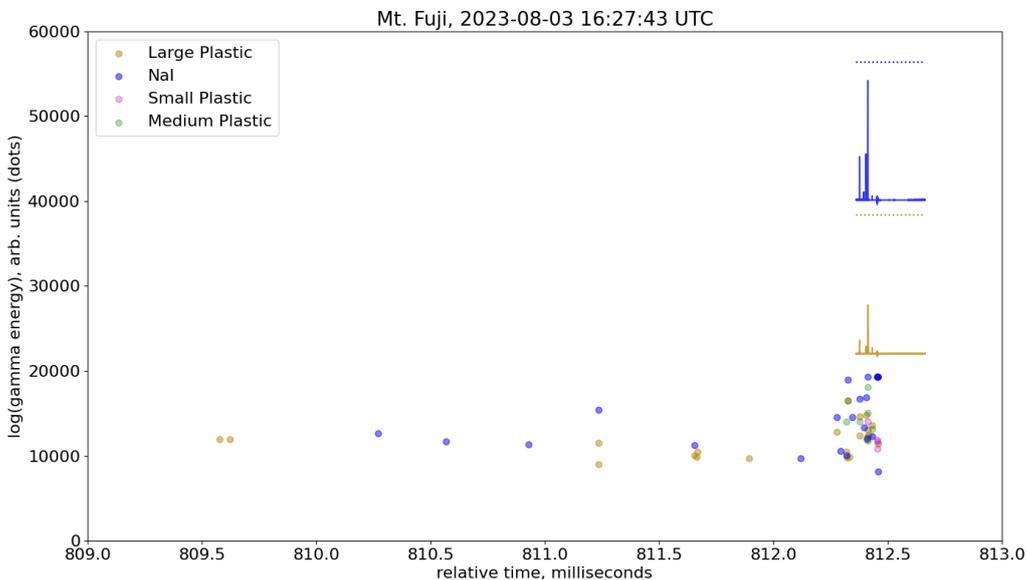


図1(b) 最初のシーケンスのリーダー進行3msのクローズアップ。これがステーションに衝突したのか、あるいはそのすぐ近くに衝突したのかは不明。最後の方(最後の0.2ミリ秒ほど)で明るくなっているが、劇的な明るさではない。このフラッシュに関連する電波データを調べるまでは、これが地上へのステップ状のリーダーであり、上空を移動するICリーダーでないことを確信することもできない。

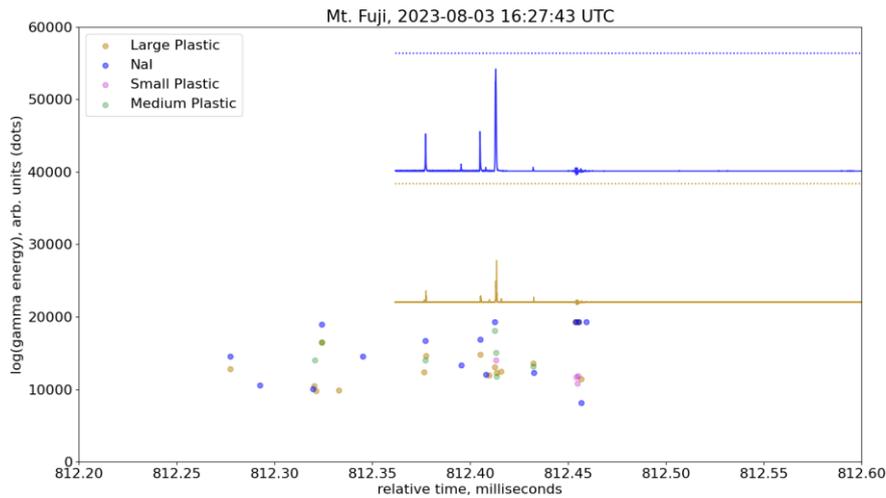


図 1(c) フラッシュの最初のシーケンスの最後の 0.2ms のクローズアップ。812.46 ミリ秒の特徴は、NaI 検出器では非常に高いエネルギーのカウントがいくつか、小型プラスチック検出器では非常に低いエネルギーのカウントがいくつか観測されているように見えますが、トレースデータを見ると、ベースラインの上下に振動しているため、この時間に起きていることは単なるノイズであることがわかります。THOR は通常、電磁ノイズに非常に強いので、これはおそらく、リーダーが地面に取り付けられ、その地域に非常に強い電磁ノイズが発生した瞬間を表している。

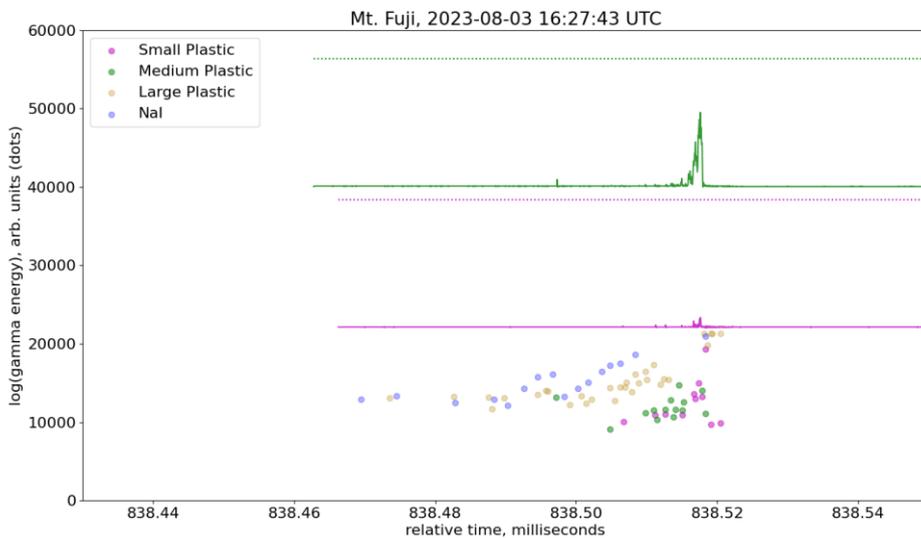


図 1(d) 最後のリーダーシーケンスのクローズアップ。図 1b の 3ms に対し、ここではリーダー全体の進化が約 0.05ms で起こっている。これは、最初のリーダー (図 1a-1c) によって確立されたイオン化チャネルを使用したダーツリーダーであることを示す可能性がある。また、X線発光が見えるようになる前に、リーダーがすでに下方に移動している可能性もある。イベントリストのデータ (点) を見ると、大型検出器が最初に現れ、高い計数率によって飽和するために消えていき、最後に飽和していないのは小型検出器と中型検出器だけであることに注目してください。また、強度は最後の最後で非常に速く上昇し、トレースは多くの低エネルギーカウントが積み重なってできているように見える。これらの特徴はすべて、ステーションへの直接攻撃を示唆している (リーダーが非常に近くにいないければ、非常に低エネルギーのカウントは遠くまで飛ばないだろう)。

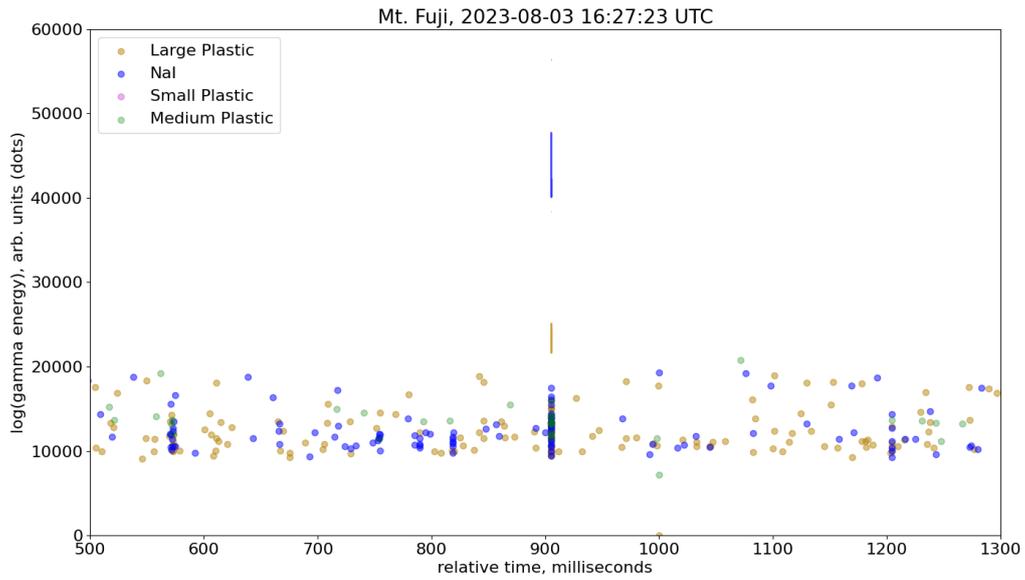


図2(a) このフラッシュは、約650msの間隔をあけた、より長いリーダーのシーケンスを示している。ロゴスキーコイルには信号が記録されておらず、明らかに明るくなるシーケンスもない。これはおそらく、頭上で進行する一連のICリーダーか、ステーションからある程度離れた場所で発生した、複数のリターンストロークを持つCGフラッシュのどちらかであろう。

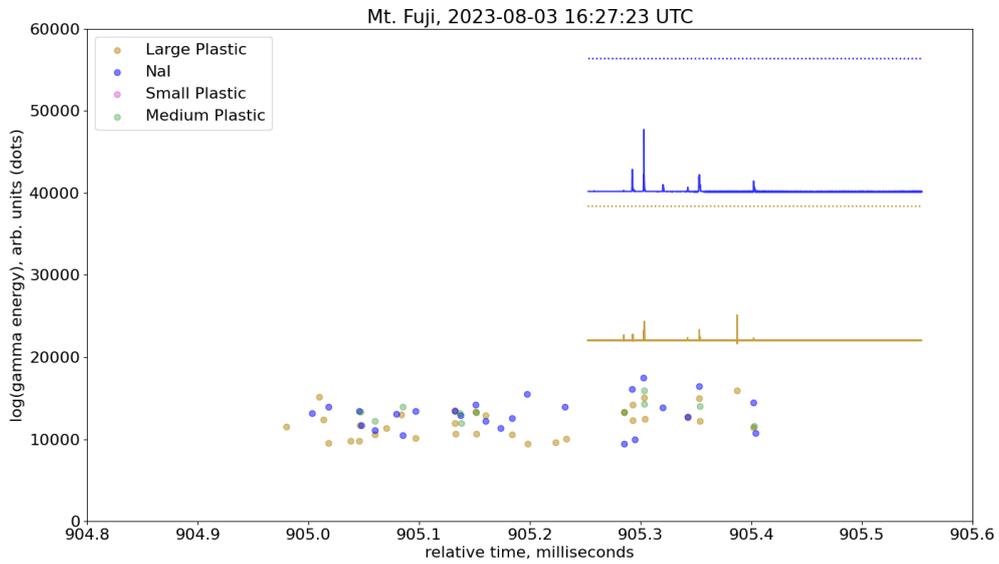


図2(b) 905 msに発生した最も明るいリーダーシーケンスのクローズアップ。これは、トレース収集をトリガーしたこのフラッシュの唯一の部分であり、2つの最も大きな検出器のみであった。

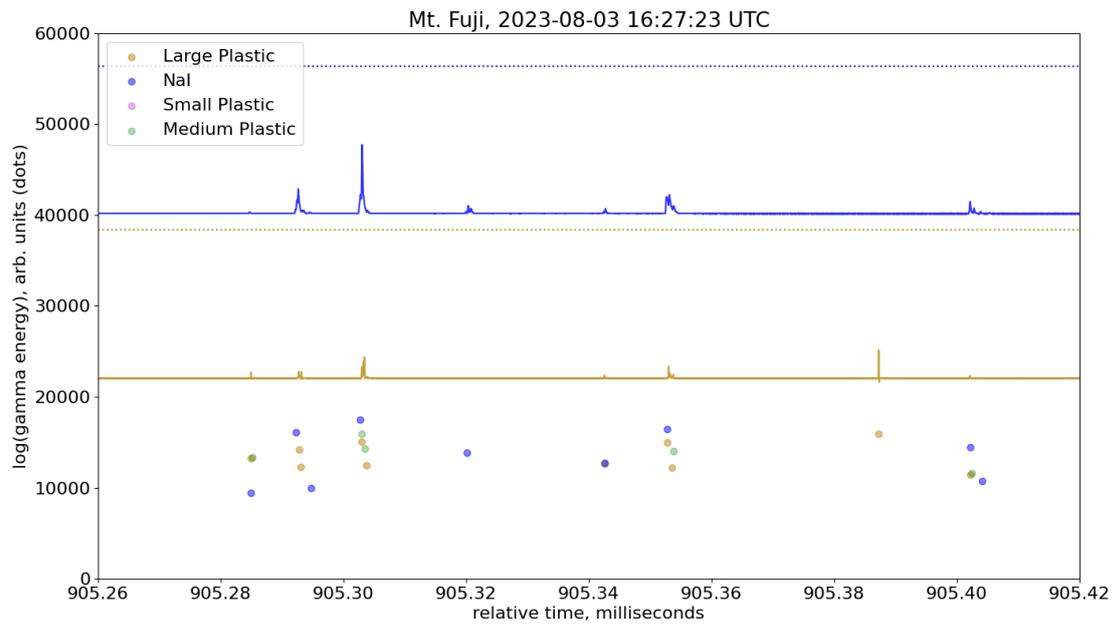


図2(c) このフラッシュで最も明るいリーダーシーケンスの0.12ミリ秒の極端なクローズアップ。各パルスは、およそ2マイクロ秒以内に束ねられた数カウントのクラスターであることに注意。これは、フロリダ5)などで観測されたステップリーダーからのX線バーストの典型である。