2019年9月4日@シチリア島

北陸冬季雷で発生する 大気中での電子加速と光核反応

和田有希 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻

第31回 放射線利用総合シンポジウム



多くの分野

- ・X線: 電子遷移と制動放射による高エネルギー光子
- ・ガンマ線:原子核反応や対消滅による高エネルギー光子
- 一部の分野 (宇宙物理学や高エネルギー大気物理学など)
- ・X線: 100 keV未満の高エネルギー光子
- ・ガンマ線:100 keV以上の高エネルギー光子

本講演では前者の立場をとりつつ

歴史的経緯で後者 (現象の名称など)を使用することもあります

2019年9月4日@シチリア島

かみ-なり【 電気を帯びた雲と雲の間、 あるいは雲と地表との間に起こる放電現象。 - デジタル大辞泉

雷放電が生み出す地球ガンマ線フラッシュ



NASA/J.Dwyer

もんじゅで捉えた異常な放射線増加



- 雷雲の通過に伴う数分の放射線の増光をモニタリングポストが観測 - **雷雲で放射線が生み出されている!**





- 雷雲の中に強い電場領域が発生

雷放電・雷雲で発生する放射線



- 雷雲の中に強い電場領域が発生
- <u>電場で電子が加速され、大気中の原子とぶつかり、制動放射を出す</u>
- 電子と大気中の電子がぶつかると、さらに電子も出す
- -> <u>雪だるま式に電子の数が増える</u>

高エネルギー大気現象



地球ガンマ線フラッシュ (TGF)

- 雷放電に同期した数百マイクロ秒の現象
- 20 MeVを超える制動放射スペクトル
- CGROやFermiなどガンマ線観測衛星で検出
- 近年は地上で下向きTGFが検出

ガンマ線グロー (Gamma-ray Glow)

- 雷雲中の電場による準定常的な電子加速
- 少なくとも数十秒から数分の継続時間
- 20 MeVを超える制動放射スペクトル
- 地上 / 高山 / 航空機観測などで検出





地球ガンマ線フラッシュ (TGF)

- 雷放電に同期した数百マイクロ秒の現象
- 20 MeVを超える制動放射スペクトル
- CGROやFermiなどガンマ線観測衛星で検出
- 近年は地上で下向きTGFが検出

ガンマ線グロー (Gamma-ray Glow)

- 雷雲中の電場による準定常的な電子加速
- 少なくとも数十秒から数分の継続時間
- 20 MeVを超える制動放射スペクトル
- 地上 / 高山 / 航空機観測などで検出



相対論的逃走電子なだれ増幅モデル (RREA)

- 大気中では電子に大きな摩擦 (電離損失) → 摩擦力を超える電場がかかれば加速



相対論的逃走電子なだれ増幅モデル (RREA)

- 大気中では電子に大きな摩擦 (電離損失) → 摩擦力を超える電場がかかれば加速
- 数百 keVの種電子が加速に必要 (二次宇宙線の電子成分?)
- 電離損失は2次電子を生み出す → 2次電子も種電子となって増幅
- 電子の数は指数関数で増幅 (0.4 MV/m: 40 mごとに2倍)
 - → <u>最終的な電子数は電場の強度・加速距離・初期の種電子の数で決まる</u>



高エネルギー大気物理学における未解決問題

地球ガンマ線フラッシュ

- RREAだけでは電子の増幅率が全く足りない
 - 1回のTGFで10¹⁸個のMeV電子が生成
 - 二次宇宙線の電子+RREAで作れる電子数では5桁も不足
 - RREAに加えて効率の良い電子増幅機構があることが示唆
- どのような雷放電で発生するか?

ガンマ線グロー

- 準定常的に粒子加速を成立させるメカニズムは?
- どのように加速領域は形成されるか? (ライフサイクル)
- 加速領域の大きさ・加速長・電場強度は?

 雷放電との関係は?

GROWTH実験

季節風

柏崎

金沢

2017/2/6 15:00 JST Himawari-8 Real-time Web / NICT

日本海

Gamma-ray Observation of Winter Thunderclouds (土屋+07,11,13, 楳本+16, 榎戸+17, 湯浅+20, 和田+18,19a, b, 20a, b, c, d)

- 北陸地方の冬季雷からの高エネルギー現象を狙う
- 2006年より新潟県の柏崎刈羽原子力発電所で開始
- 2015年から金沢市でマッピング観測を開始



- 取り回しのよい可搬型検出器 (修論で開発) - シンチレータ+読み出し系+Raspberry Pi

大気中における電子・光子の挙動



- 大気中において電子は数十メートル程度しか飛ばない
- 光子は数回の散乱を経て数百メートル飛ぶ

北陸地方の冬季雷



北陸冬季雷は高エネルギー現象の観測に最適

- - 光子の大気吸収の影響が少ない
 - 海抜高度での観測が世界で唯一可能



世界での放射線観測

- 夏の雷雲からの放射線を捉えるには雷雲に近づく必要あり
 - 航空機・バルーンなどの飛翔体観測(アメリカ、ノルウェーなど)
 - 高山での観測 (アルメニア、スロヴァキア、日本など)



- <u>北陸の冬季観測のほうが楽に高品質なデータを取れる!</u>



ガンマ線グローの観測



Gamma-ray Observation of Winter Thunderclouds

- 北陸地方の冬季雷からの高エネルギー現象を狙う
- 2015年から金沢市・小松市でマッピング観測を開始
 2019年度までに10台の検出器を展開

可搬型のガンマ線検出器を使用

- BGOシンチレータ (25×8×2.5 cm³)
- Csl シンチレータ (30×5×5 cm³)

FY2016-FY2019の4シーズンで70例を検出

- FY2017が最多の25イベント検出

- 平均して1シーズン1台あたり1-4イベント



50

05:02

05:04

05:06

Local time (JST)

05:08

ライトカーブの形状から3種類に分類

- 単一の対称なピークをもつイベント (34例)
- 非対称な/複数のピークをもつイベント (17例)
- 雷放電で途絶したイベント (19例)



ライトカーブの形状から3種類に分類

- 単一の対称なピークをもつイベント (34例)
- 非対称な/複数のピークをもつイベント (17例)
- 雷放電で途絶したイベント (19例)

ライトカーブの解釈



Time / Distance





スペクトルのスタッキング解析 (21イベント)

- 3 MeV以上で>1000光子のイベント (28例)
- バックグラウンド除去
- 同一の検出器レスポンスのイベントを加算
- XSPECでフィッティング・検出器応答を除去

- べき関数×指数関数カットオフでフィット

-
$$f(E) = aE^{-\Gamma}exp\left(-\frac{E}{E_{\text{cut}}}\right)$$

- $\Gamma = 0.613 \pm 0.009$

-
$$E_{cut} = 4.68 \pm 0.04 \text{ MeV}$$

地球ガンマ線フラッシュと光核反応



雷放電に同期したバーストを検出

2022年2月6日17時34分06秒 (日本時間)
柏崎刈羽原子力発電所内の4台の検出器
で同時に観測

- 雷放電に同期したショートバーストを検知
- 数百ミリ秒の継続時間で指数関数的に減衰



- ショートバーストの後に1分ほど続く残光を検出



- ショートバーストの後に1分ほど続く残光を検出
- 511 keVのピークを検出 -> 陽電子の生成か?
- 1 MeV以上の光子はほとんど検出されず -> 対生成の可能性は低い



TGFによる光核反応の発生

TGFによる光核反応が有力 (Enoto, Wada, et al., Nature, 2017)







- 50 msの時定数で指数減衰するガンマ線カウント → 中性子の大気中での熱化
- 10 MeVまで伸びるスペクトル → 中性子捕獲後の核ガンマ線の重ね合わせ





- 511 keVとそのコンプトン成分
- 雷から30秒おくれて増大するガンマ線カウント → 不安定核が風で流された?





TGFによる地上での吸収線量

- TGF光子の大気伝搬およびモニタリングポストの検出器応答を計算
- TGFの位置・発生高度・電子数を推定



TGFによる地上での吸収線量

- 高度2 km、電子数 10¹⁹ と推定
- 観測された中性子数・陽電子数とも整合
- 発生電子数は衛星で観測されるTGFと同等レベル



TGFによる同位体生成



- ¹⁴C は年代測定で重要な放射性同位体 (半減期5700年)
- 今回の見積もりでは1回のTGFで10¹³-10¹⁴ 個の¹⁴Cが生成される
- 宇宙線による生成レートより4桁以上低い



ガンマ線グロー

- 雷雲中で加速された電子が出す制動放射が地上に到達
- 雷雲の形成高度が低い北陸冬季雷では地上観測が可能
- 20 MeV以上に達する冪関数+指数関数カットオフのエネルギースペクトル
- 雷雲とともに移動し、雷放電によって途絶することもある

地球ガンマ線フラッシュ (TGF)

- 雷放電に同期して大量の電子が加速され制動放射光子が放出される
- 10 MeVの高エネルギー光子が大気中で光核反応を引き起こす
- 柏崎市でTGFが引き起こす光核反応による中性子・陽電子の信号を検出
- 宇宙から観測されているTGFと同じような規模の現象が地上付近で発生
- 炭素14などの同位体も生成されるが、宇宙線による生成量と比べて微量

現象のさらなる理解のために

ガンマ線グロー

- 電子加速を発生させる雷雲そのものの観測が重要
 - 気象レーダーによる観測
 - 地上電場観測による雲内電場の推定 - 降水粒子観測



- ガンマ線グローの観測から雷雲内部の電場構造を推定できるか?

地球ガンマ線フラッシュ (TGF)

- 光子を飽和せずに観測できる高速検出器の投入
- 電子加速を発生させる雷放電そのものの観測が重要
 - 電波帯 (長波・超短波) による放電路の可視化
 - 可視光カメラによる放電路の撮影
- どのような雷放電でTGFが生じているか?



