

雷や雷雲での粒子加速と 高エネルギー現象

-GROWTHや高山観測-



(独) 理化学研究所/原子力機構

土屋晴文

ICRR (20141107)

雷雲と高エネルギー現象

★宇宙物理的な粒子加速の観点

●宇宙観測では困難な電場加速の直接観測

"濃い"地球大気中で電子が相対論的なエネルギーに加速される仕組みは？

放射時間の短いガンマ線バーストと長いガンマ線バーストの生成の仕組みは？

陽電子や中性子を生み出すメカニズムは？

★太陽地球環境の観点

●雷の発生メカニズムの研究：X線やガンマ線で見える。

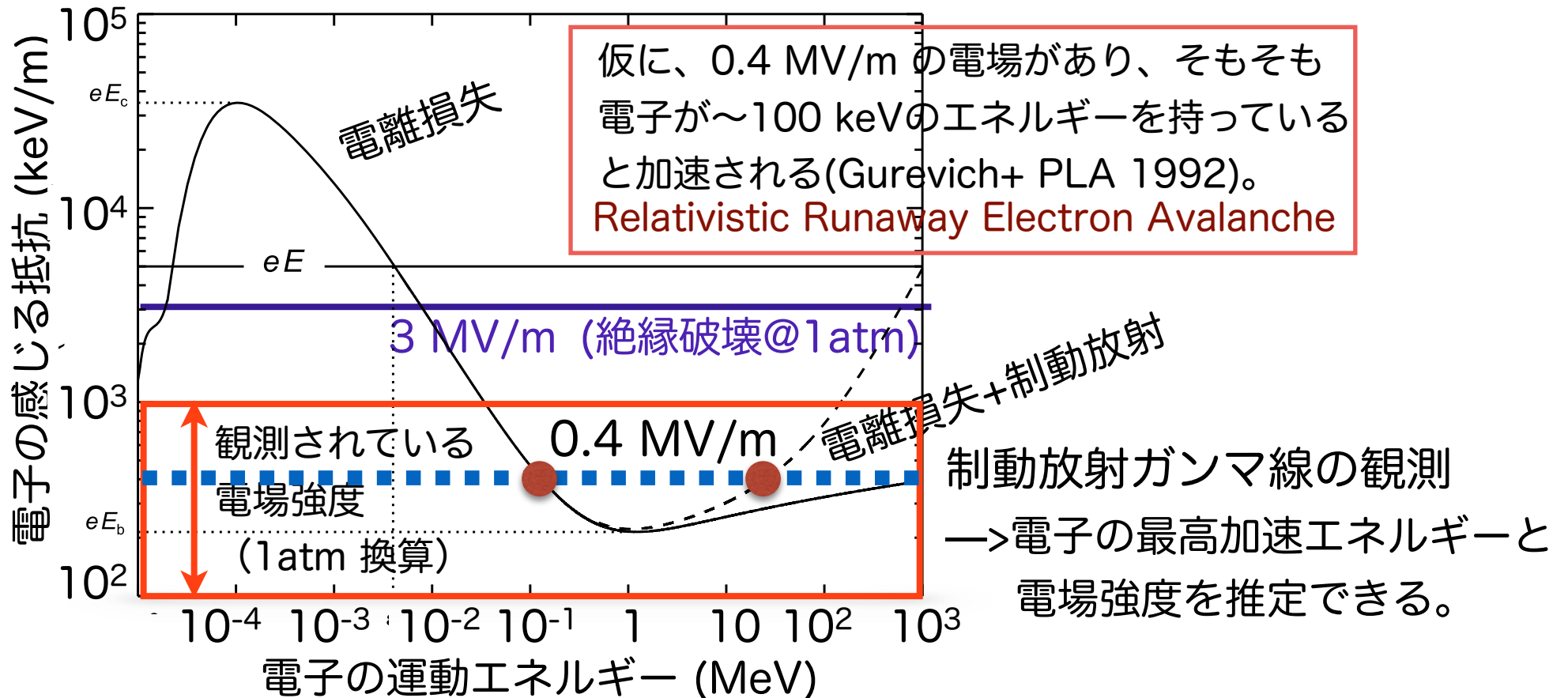
"宇宙線やラドンなどの放射性物質"が種になる？

●宇宙線以外の ^{14}C を生み出す中性子源になる可能性

大気中での電場加速

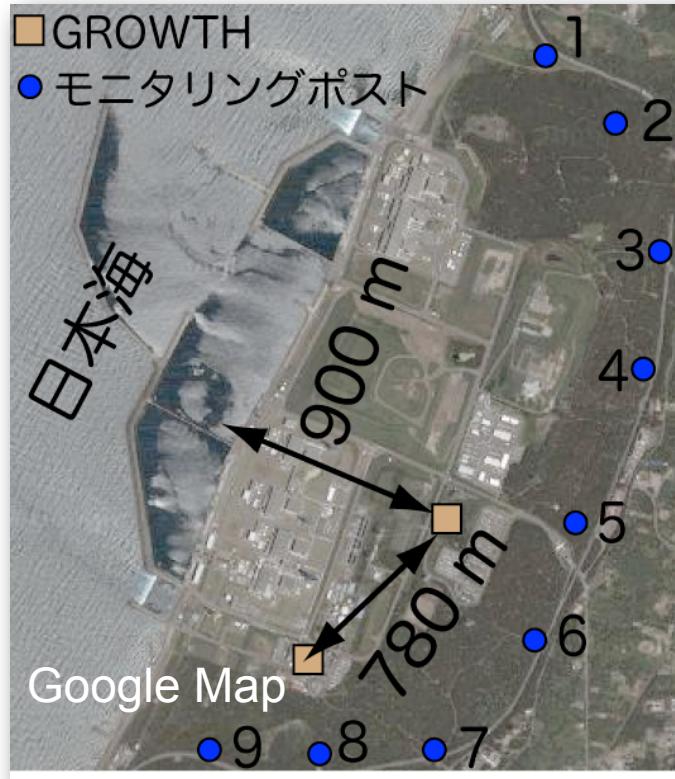
●根底には電場による電子加速

通常の電場中では、“冷たい”電子は電離損失の山を越えることはできず、加速されない。



GROWTHや高山観測

❶ 冬の日本海側での観測(GROWTH;PRL 2007,2013;JGR 2011)



柏崎刈羽原子力発電所で2006年より開始

冬の雷雲：200-800 m の低雲底

Nal, Csl, BGO などのシンチレータ検出器やMP
を用いた広域観測。
光検出器や電場計

長時間バースト：10例（柏崎）+1例（乗鞍）
+5例（チベット）

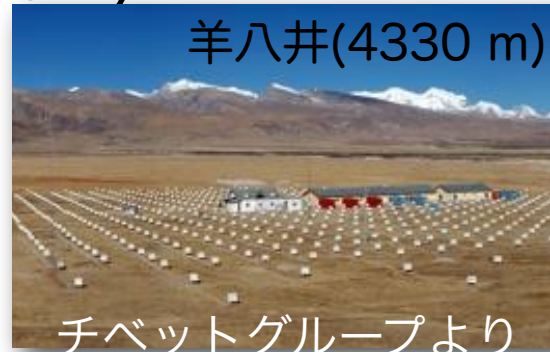
短時間バースト：8例（柏崎）+2例（乗鞍）

❷ 夏の高山での観測(PRL 2009; PRD 2012)



乗鞍岳(2770 m)

Nal
中性子モニタ
太陽中性子検出器
電場計



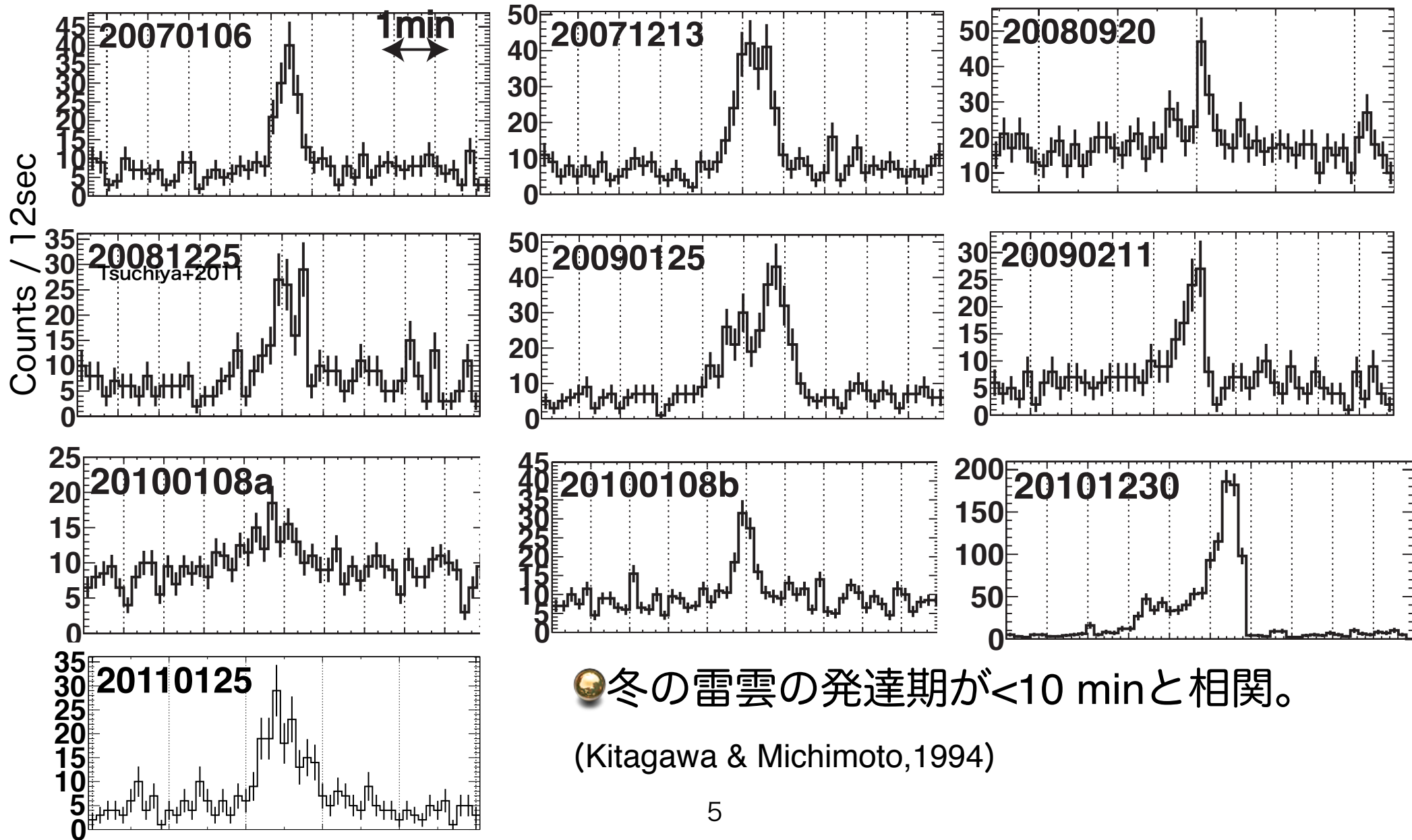
羊八井(4330 m)

中性子モニタ
太陽中性子検出器
電場計

継続時間

柏崎+乗鞍 (0-3000m)

数十秒- 数分の放射



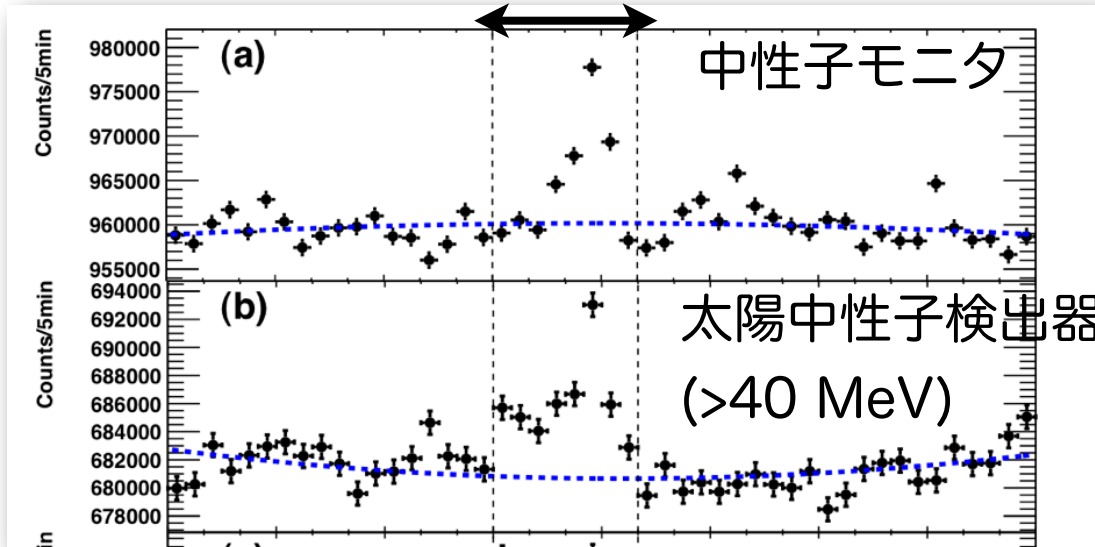
☀ 冬の雷雲の発達期が<10 minと相関。

(Kitagawa & Michimoto, 1994)

継続時間

羊八井(4300 m)

2010年7月22日 40min



● 2010年の夏季に5例
(Tsuchiya+, PRD 2012)

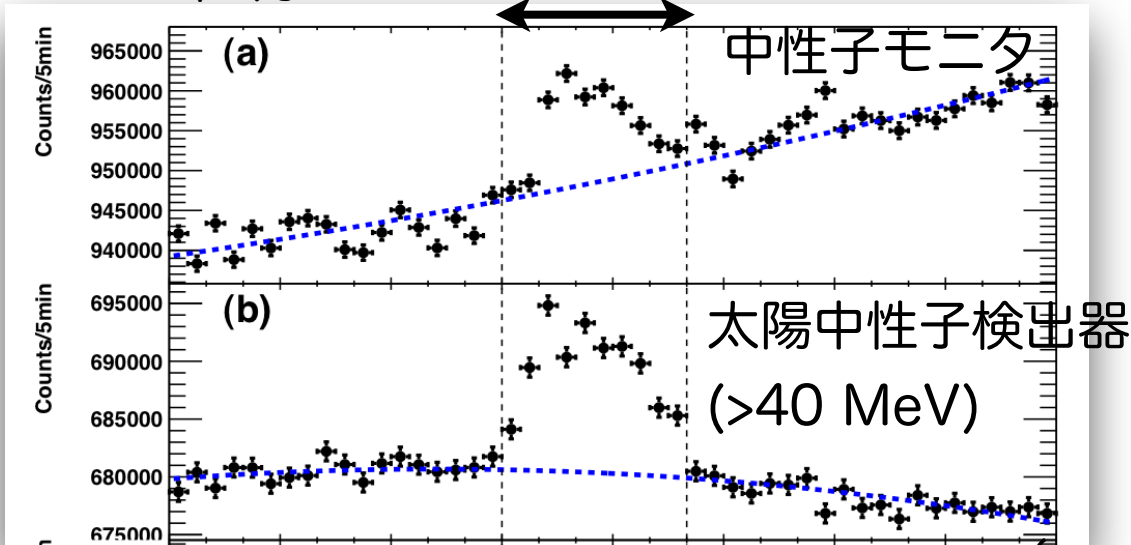
● 10分ー50分続く

☆ 夏の雷雲の発達期が<1 hrと相関。

● 富士山やMt. Aragatz(3350m)でも夏の雷雲から10-20分の放射が観測されている
(Torii+2009, Chilingarian+2010)

● >40 MeVのガンマ線の検出

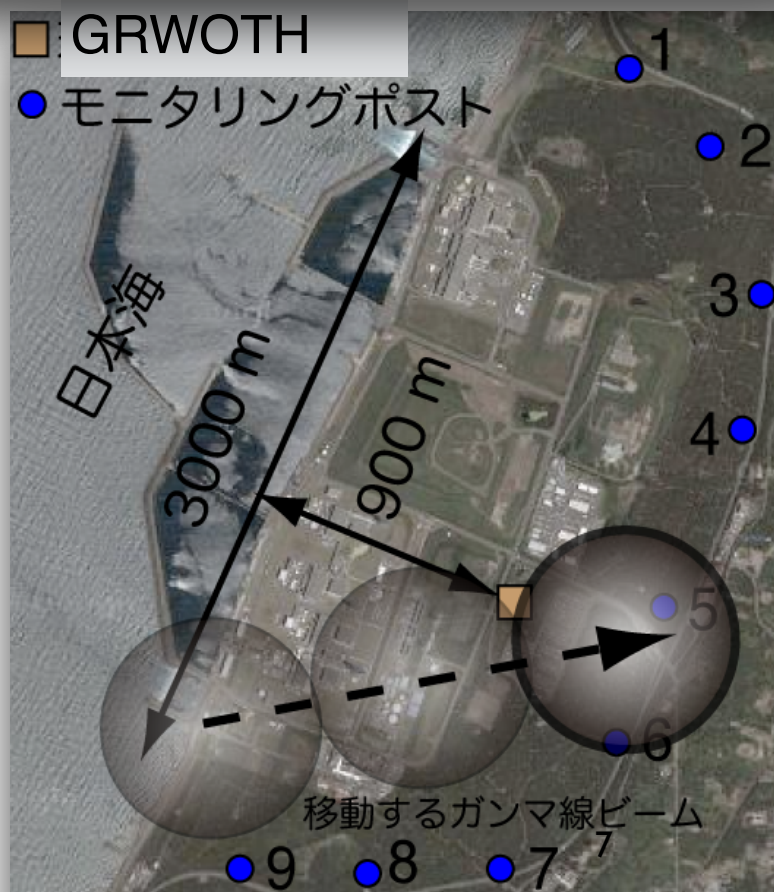
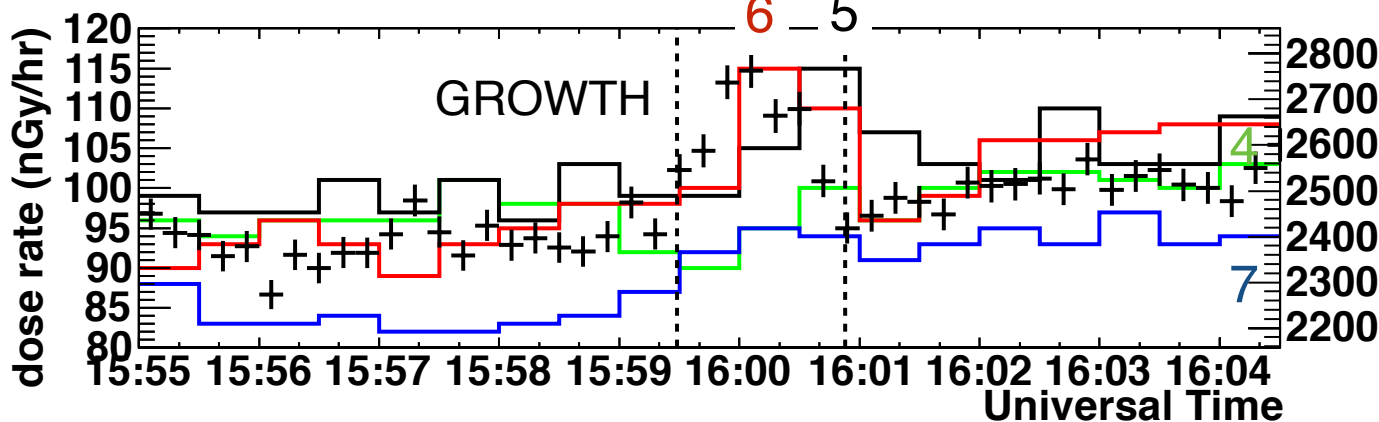
2010年8月23日 50min



ガンマ線源の移動と広がり



GROWTH



● 地上での広がり～600 m。

● 移動があるため、ガンマ線の計測時間が”**本当の継続時間**”なのか”**移動したため、見えなくなった**”のかの縮退はまだ解決していない。

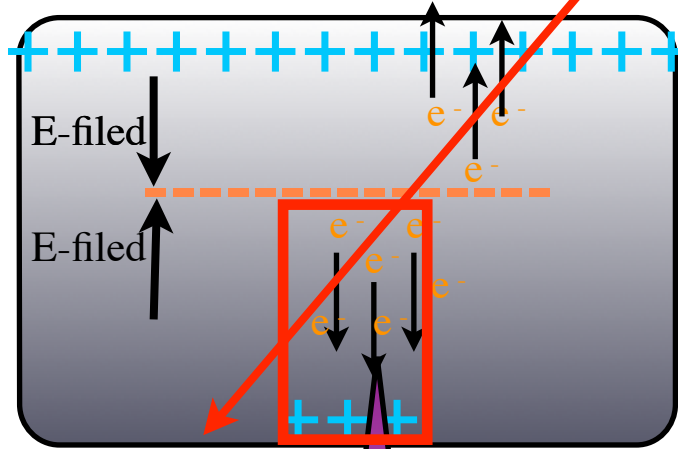
ガンマ線放射のモデリング



雷雲

GROWTH

宇宙線($\sim 100/m^2/s$)



RREA modelからの予測電子数

$$N_{RREA} =$$

$$2 \times 10^{11} \times (L/600 \text{ m})^2 \times dt/100 \text{ sec} \times n/30$$

L: 加速領域の横広がり

dt: 継続時間

n: 電子増幅率

Exp. (GROWTH)

$$N_{gro} = 10^9 - 10^{11}$$

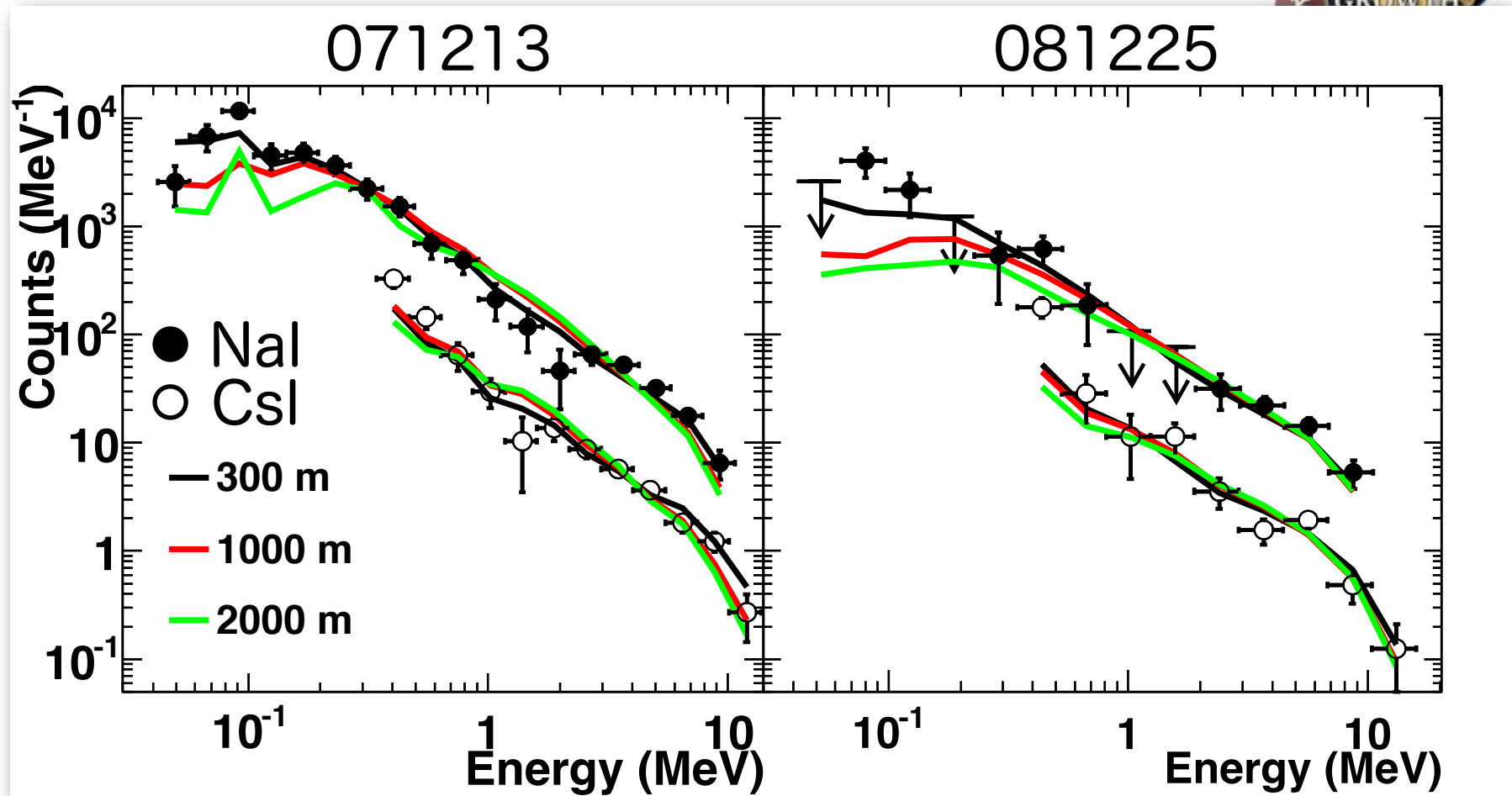
Exp. (TGF)

$$N_{TGF} = 10^{16} - 10^{17}$$

gamma-ray search light

スペクトルと源までの距離

Tsuchiya, Enoto, Yuasa+ JGR 2011 GROWTH



$\alpha(\text{MeV}^{-1}\text{sr}^{-1}) \quad (1.25 \pm 0.03) \times 10^{11}$

$(1.21 \pm 0.09) \times 10^9$

β

2.03 ± 0.02

1.61 ± 0.03

$d(m)$

400^{+160}_{-110}

300^{+390}_{-180}

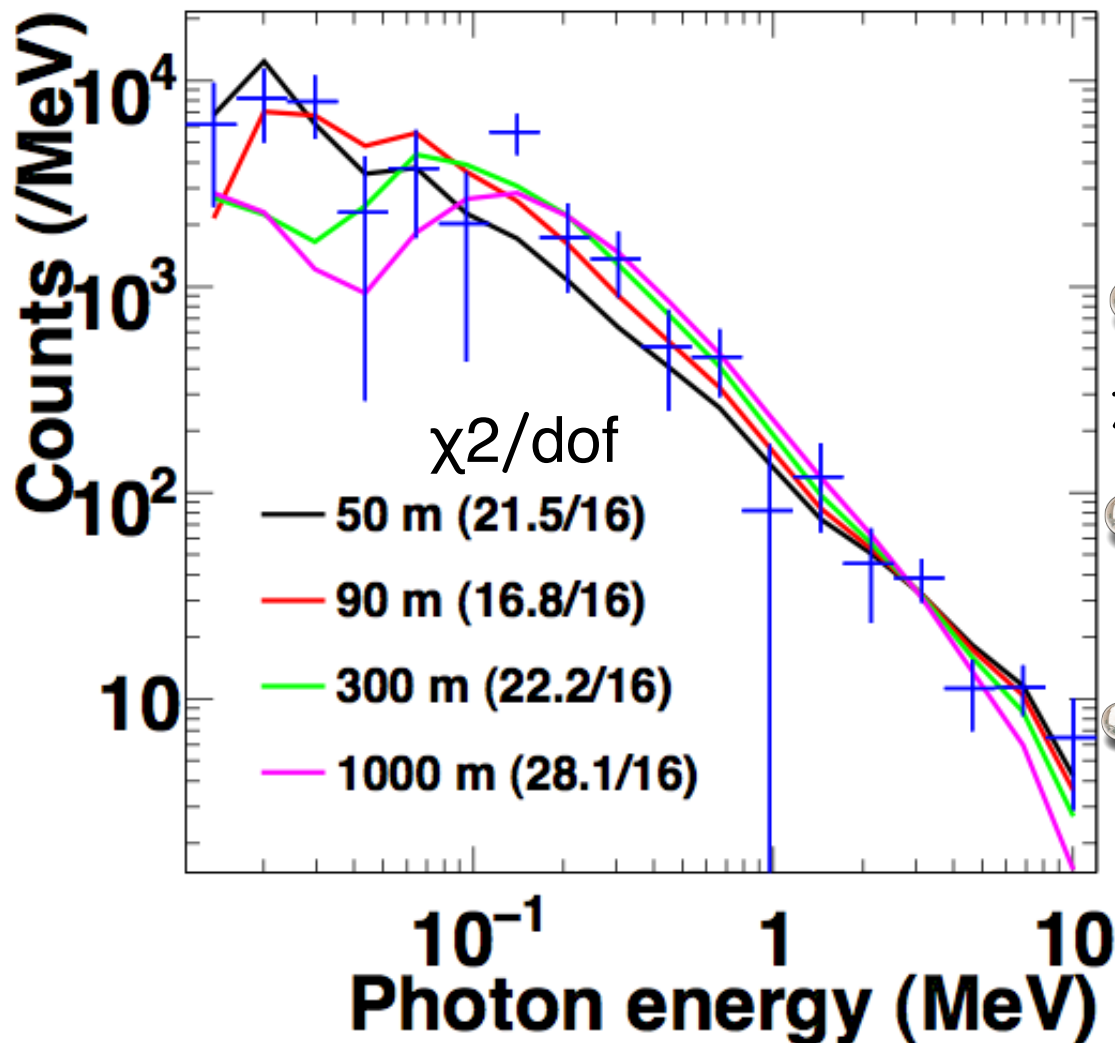
冬の雷雲の底が200-800 mということと一致

スペクトルと源までの距離

乗鞍観測

Tsuchiya, Enoto, Torii+ PRL 2009

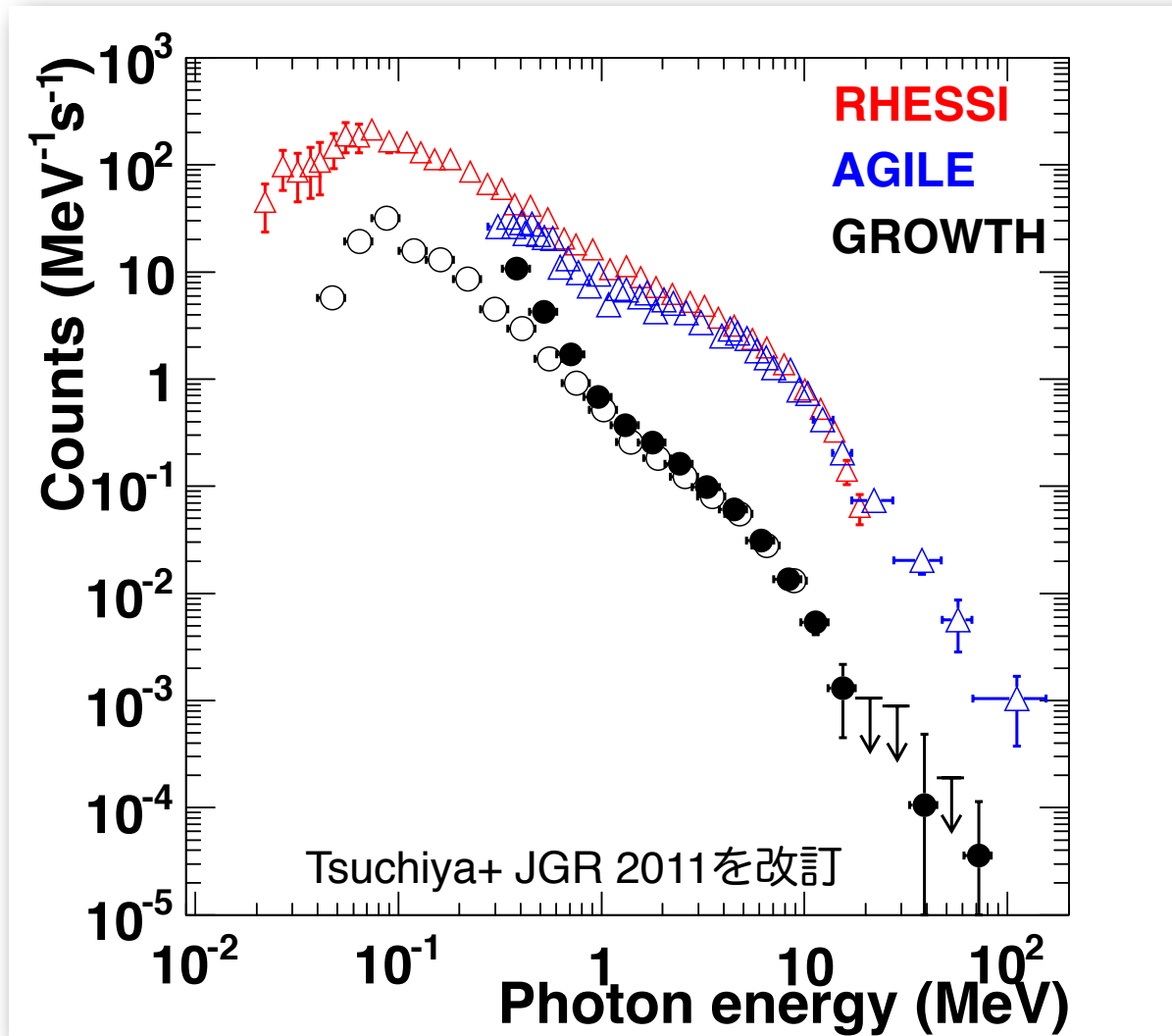
2008年9月20日



$$F(E) = \alpha E^\beta \text{ (MeV}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{)}$$
$$\alpha = (2.4 \pm 0.3) \times 10^8$$
$$\beta = -1.15 \pm 0.06$$

- ごく近傍(60-130m@90%C.L.)から到来したガンマ線。
- 高山(2770 m)ゆえに、雷雲に至近にまで近づける。
- Mt Aragats(3300 m)でも150 m (Chilingarian+ 2010)

TGF との比較



● 最高到達エネルギー

TGF ~ 100 MeV

羊八井 ~ > 40 MeV

GROWTH ~ 20 MeV

● > 1 MeV の電子数

TGF ~ 10¹⁶ - 10¹⁷個

GROWTH ~ 10⁹ - 10¹¹個

● 放射エネルギー (> 1 MeV)

TGF ~ 10 - 40 kJ

GROWTH ~ 10⁻² - 1 J

e.g. 雷 ~ 10⁹ J

RHESSI: 289 eventsの和 (Dwyer&Smith,2005)

AGILE: 130 eventsの和 (Tavani+2011)

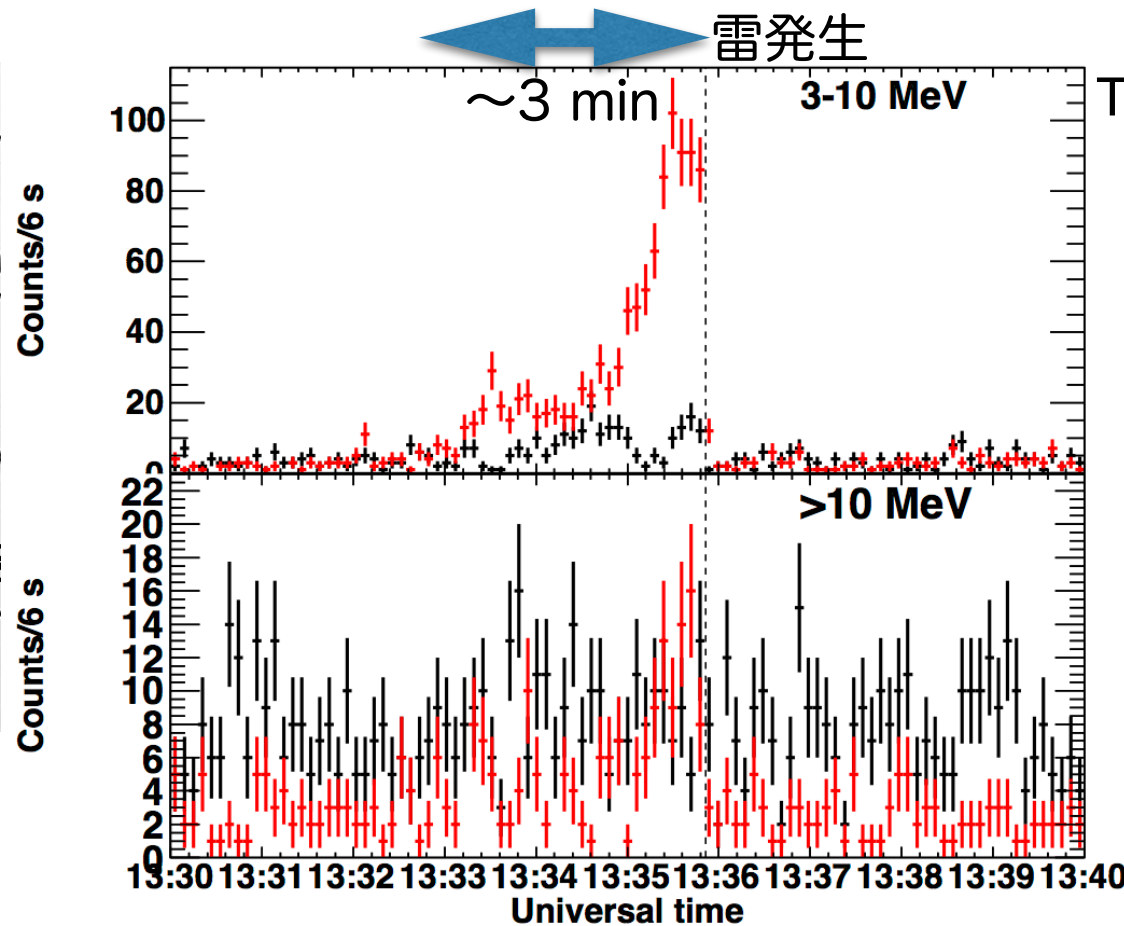
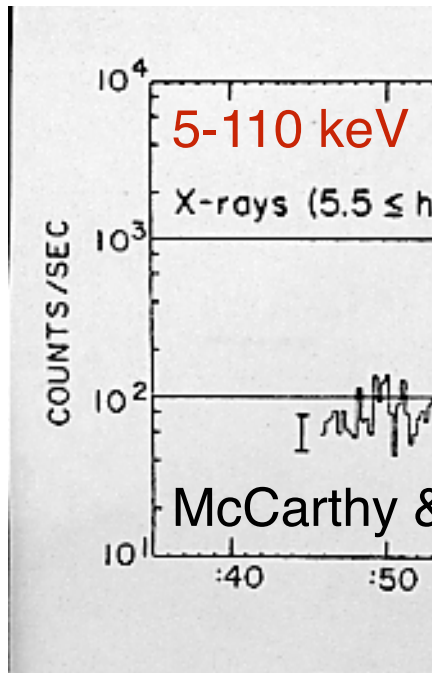
GROWTH: 5 eventsの和

雷雲ガンマ線と雷との関連



基本的には、雷雲ガンマ線と雷とは無関係に見える。

雷の発生とともにガンマ線の放射が止まるイベントがある。



Tsuchiya, Enoto+ 2013

加速領域の破壊
あるいは
電場が弱まった。

雷の発生とともにガンマ線の放射が始まるイベント(次の講演)も。

(Umemoto+, in prep.)

雷雲ガンマ線と中性子生成

🌐 1970-80 年代 : $D + D \rightarrow n + {}^3\text{He}$ の中性子の探査。

📌 C14の強度変動に影響を与える可能性の示唆。Libby & Lukens, JGR 1973

📌 "Positive"な観測報告。Shah+1985, Shyam&Kaushik 1999などあるが….

📌 “通常の雷環境では核融合反応は実現性に乏しい” Babich+2007

🌐 2000年代 : $\gamma + {}^{14}\text{N} \rightarrow n + {}^{13}\text{N}$ での光核反応での中性子の探査

📌 10 MeVを超えるガンマ線の存在の確立 : NASAの衛星やGROWTH。

反応のしきい値 : 10.5 MeV

📌 雷やTGFs に由来した中性子生成と期待されるflux Babich+2007, Carlson+2010

📌 高山に設置された中性子モニタやHe-3検出器による観測

Chilingarian+ PRD 2010: Mt. Aragatz (3350 m)の中性子モニタ

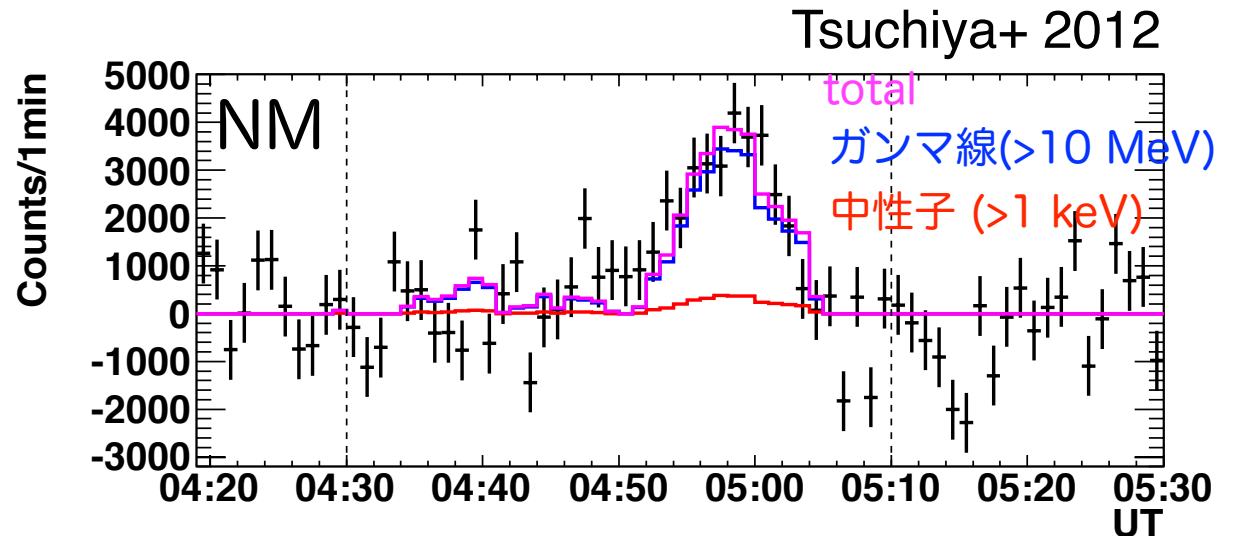
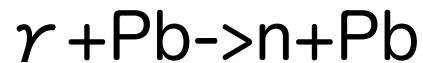
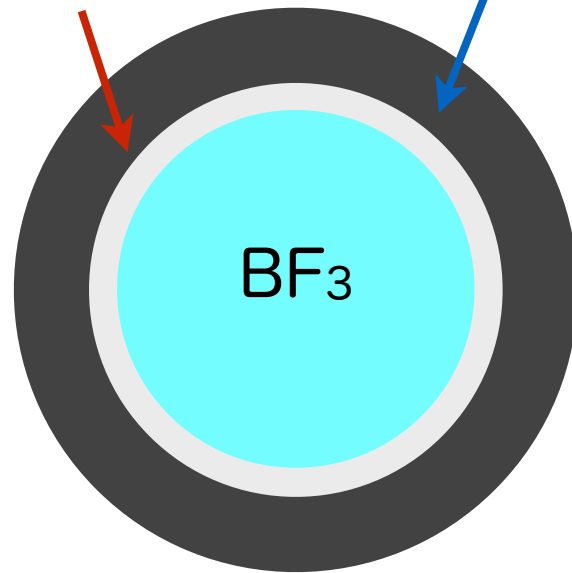
Tsuchiya+ PRD 2012 : チベット羊八井(4300 m)の中性子モニタ

Gurevich+ PRL 2012:Tie-shen (3300 m)のHe-3検出器

雷雲ガンマ線と中性子生成

光核反応中性子

ガンマ線



ガンマ線~90%

中性子 ~10%

★未だ、決定的な雷や雷雲由来の中性子観測はない。

★伝統的な中性子モニタは、雷雲ガンマ線の観測に非常に有効なツールである。

まとめ

○電子の電場加速に由来する二種類のガンマ線バーストがある。

継続時間の短い (<1 秒) バースト

継続時間の長い (数十秒から数十分) バースト

○長いガンマ線バーストの詳細が明らかになりつつある。

放射領域は冬の雲底ほどの高さにあり、その広がり数百 mほどで雷雲とともに移動している。

ガンマ線のエネルギー ~20 MeV(地上), >40 MeV(高山)

予測される電子数 — RREA モデルとおおよそ一致

○ガンマ線のみならず、中性子も生成されているかもしれない。 まだ、決定的な観測はない。

○陽電子に関しては、次の講演で。