

# モンテカルロシミュレーションによる 雷雲ガンマ線放射モデルの構築

古田 禄大 (東大理)

中澤知洋 (東大理), 和田有希 (東大理/理研), 榎本大悟 (理研),  
榎戸輝揚 (京大宇物), 湯浅孝行 (理研), 土屋晴文 (JAEA/理研),  
牧島一夫 (理研), ほか GROWTH コラボレーション

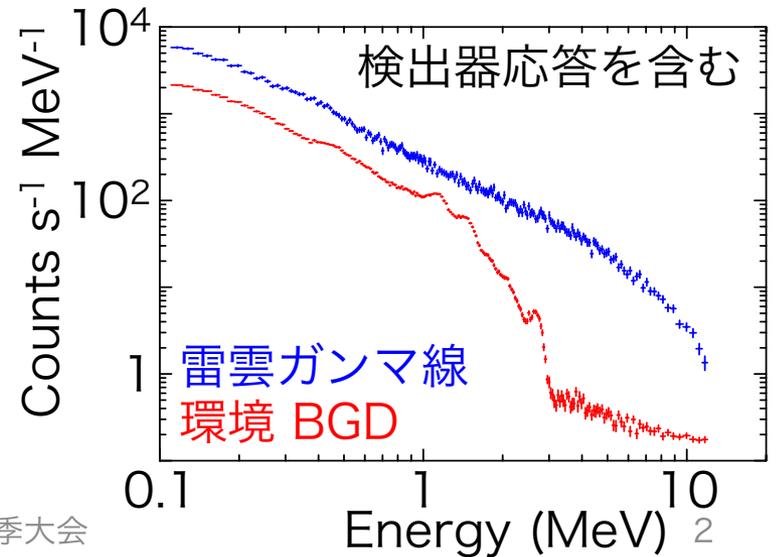
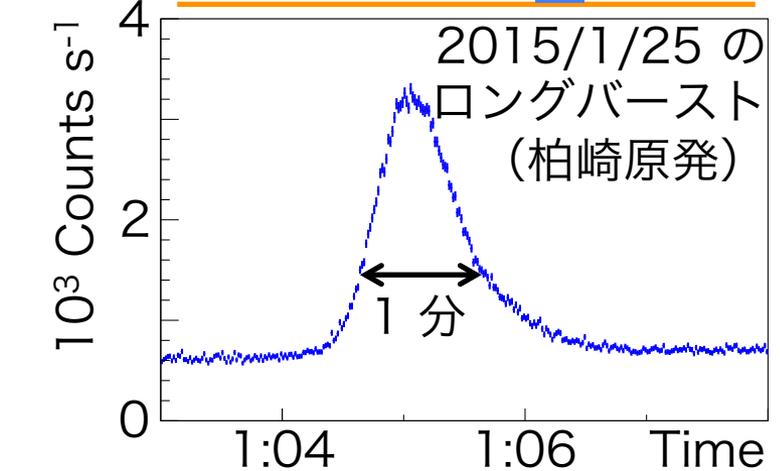
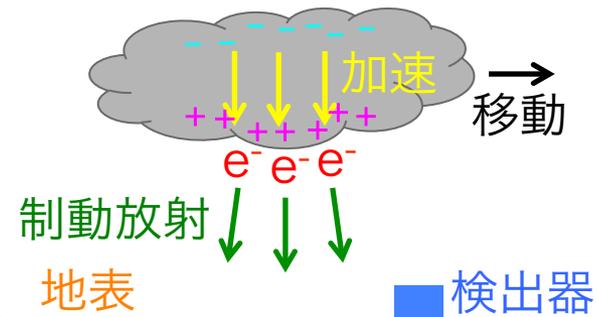
# 1. 雷雲起源のガンマ線放射

## ロングバースト：数分続く雷雲ガンマ線

- 雷雲が近づくとガンマ線量が増大
- 必ずしも落雷を伴わない
- スペクトルは 10 MeV に達するべき型カットオフの徴候も
- 電場加速された電子の制動放射で解釈可

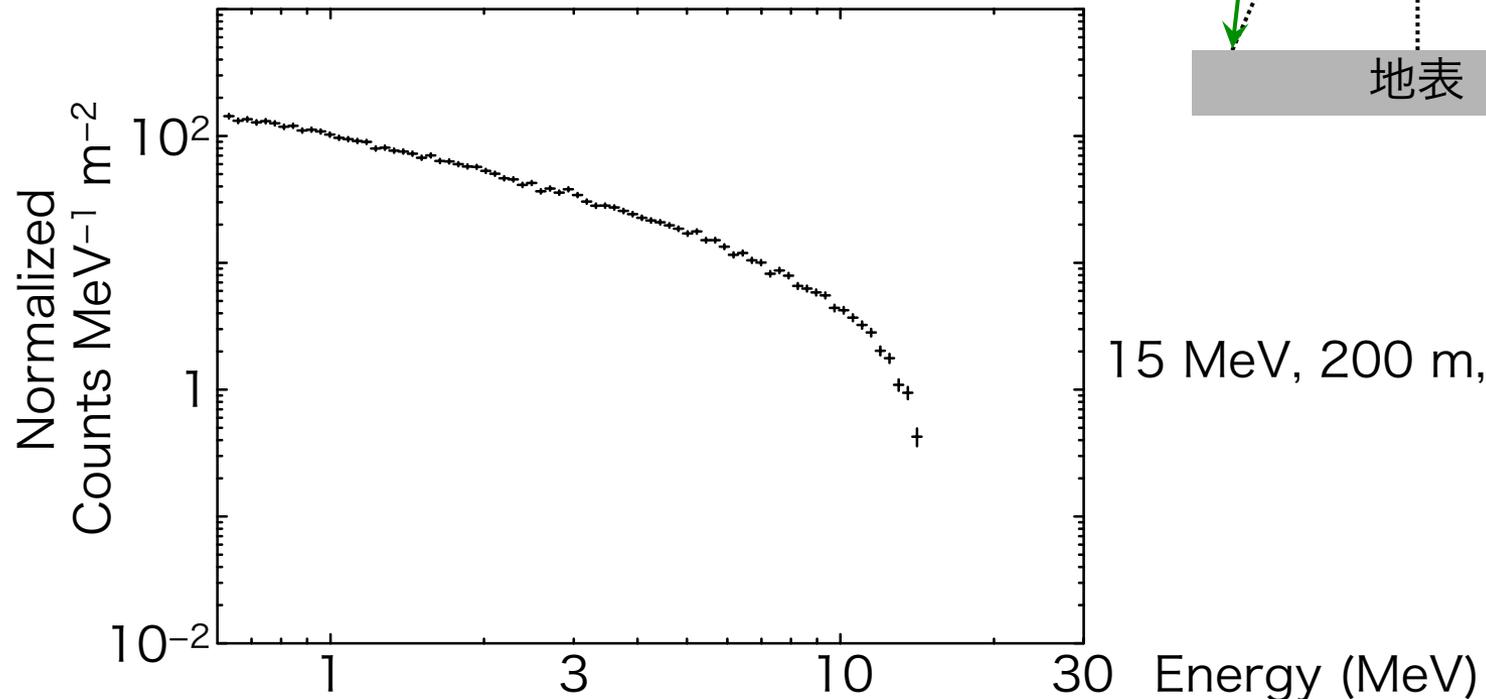
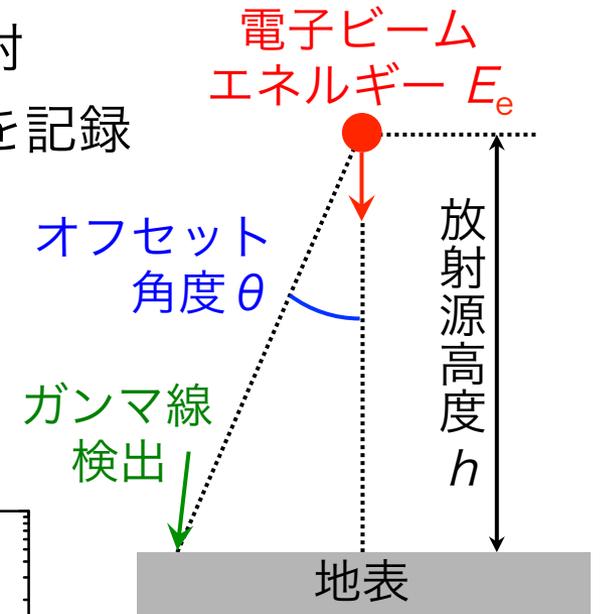
## スペクトルから探る電場加速器

- ガンマ線は地上に届くまでに大気中で多数の散乱・吸収
- 形や強度から加速器の情報が分かるはず  
e.g. 放射源高度, 広がり,  
加速電子のエネルギー, 電場強度
- モンテカルロシミュレーションを使い雷雲ガンマ線をモデル化  
→ 観測データと比較しこれらを推定



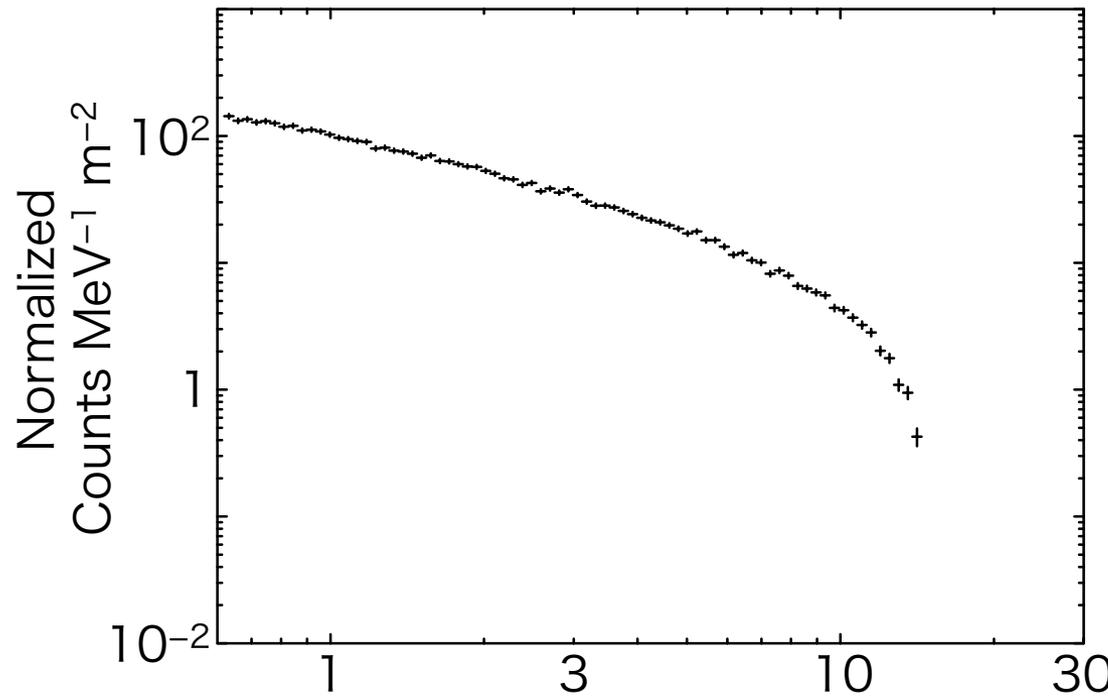
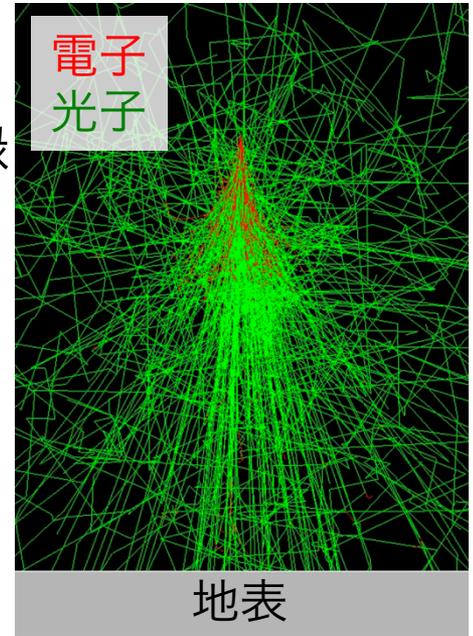
## 2. Geant4 による大気散乱シミュレーション

- 単一エネルギーの加速電子を点源から真下に照射
- 地表でガンマ線のオフセット角度とエネルギーを記録
- 入力パラメータ
  1. 電子エネルギー  $E_e$  (10–30 MeV)
  2. 放射源高度  $h$  (100–1000 m)
  3. オフセット角度  $\theta$  ( $0^\circ$ – $45^\circ$ )



## 2. Geant4 による大気散乱シミュレーション

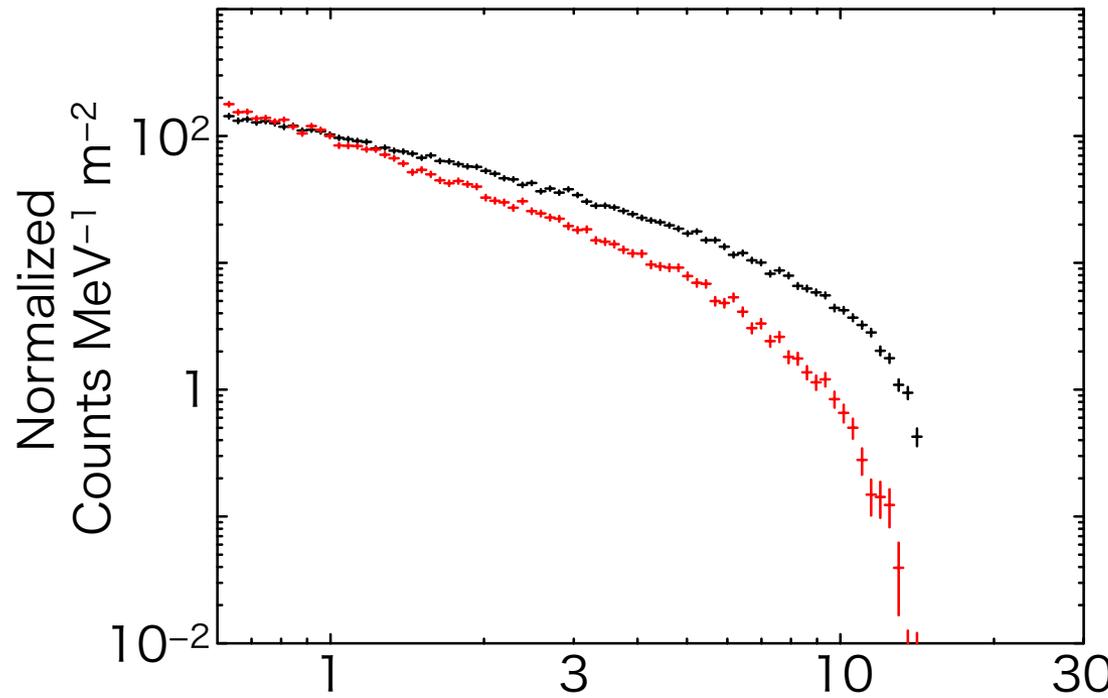
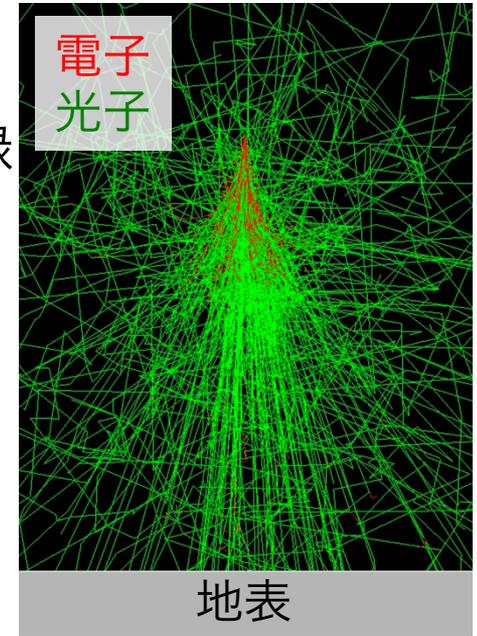
- 単一エネルギーの加速電子を点源から真下に照射
- 地表でガンマ線のオフセット角度とエネルギーを記録
- 入力パラメータ
  1. 電子エネルギー  $E_e$  (10–30 MeV)
  2. 放射源高度  $h$  (100–1000 m)
  3. オフセット角度  $\theta$  ( $0^\circ$ – $45^\circ$ )



15 MeV, 200 m,  $0^\circ$ – $10^\circ$

## 2. Geant4 による大気散乱シミュレーション

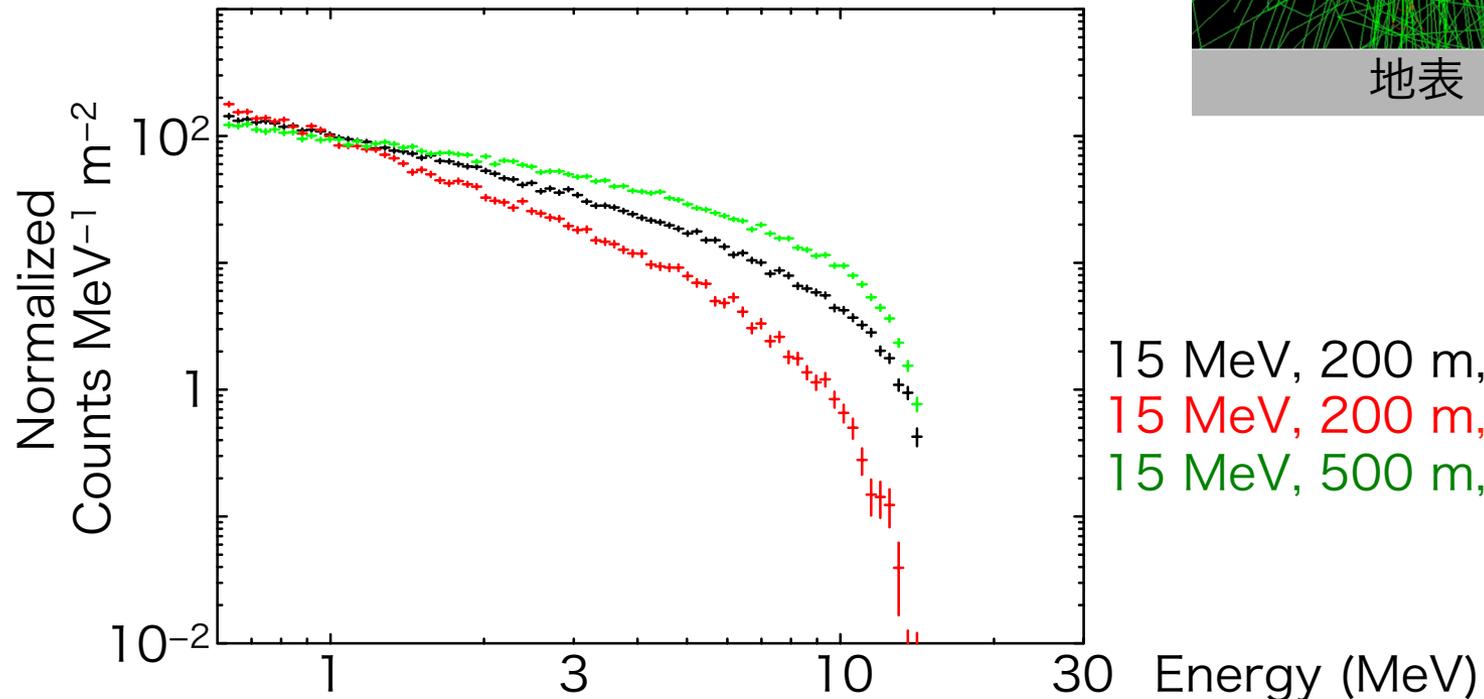
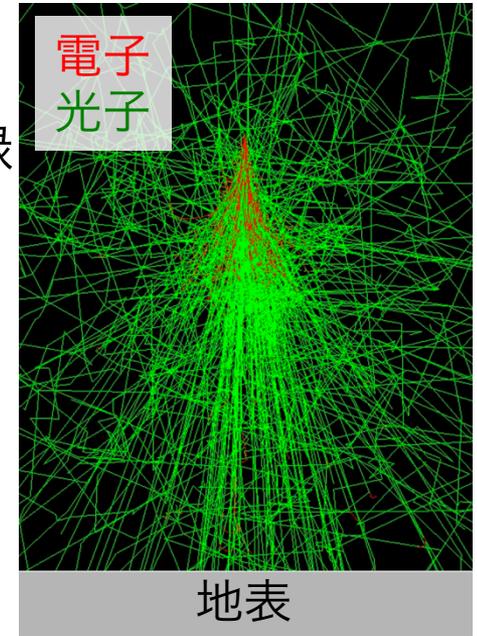
- 単一エネルギーの加速電子を点源から真下に照射
- 地表でガンマ線のオフセット角度とエネルギーを記録
- 入力パラメータ
  1. 電子エネルギー  $E_e$  (10–30 MeV)
  2. 放射源高度  $h$  (100–1000 m)
  3. オフセット角度  $\theta$  ( $0^\circ$ – $45^\circ$ )



15 MeV, 200 m,  $0^\circ$ – $10^\circ$   
15 MeV, 200 m,  $20^\circ$ – $30^\circ$

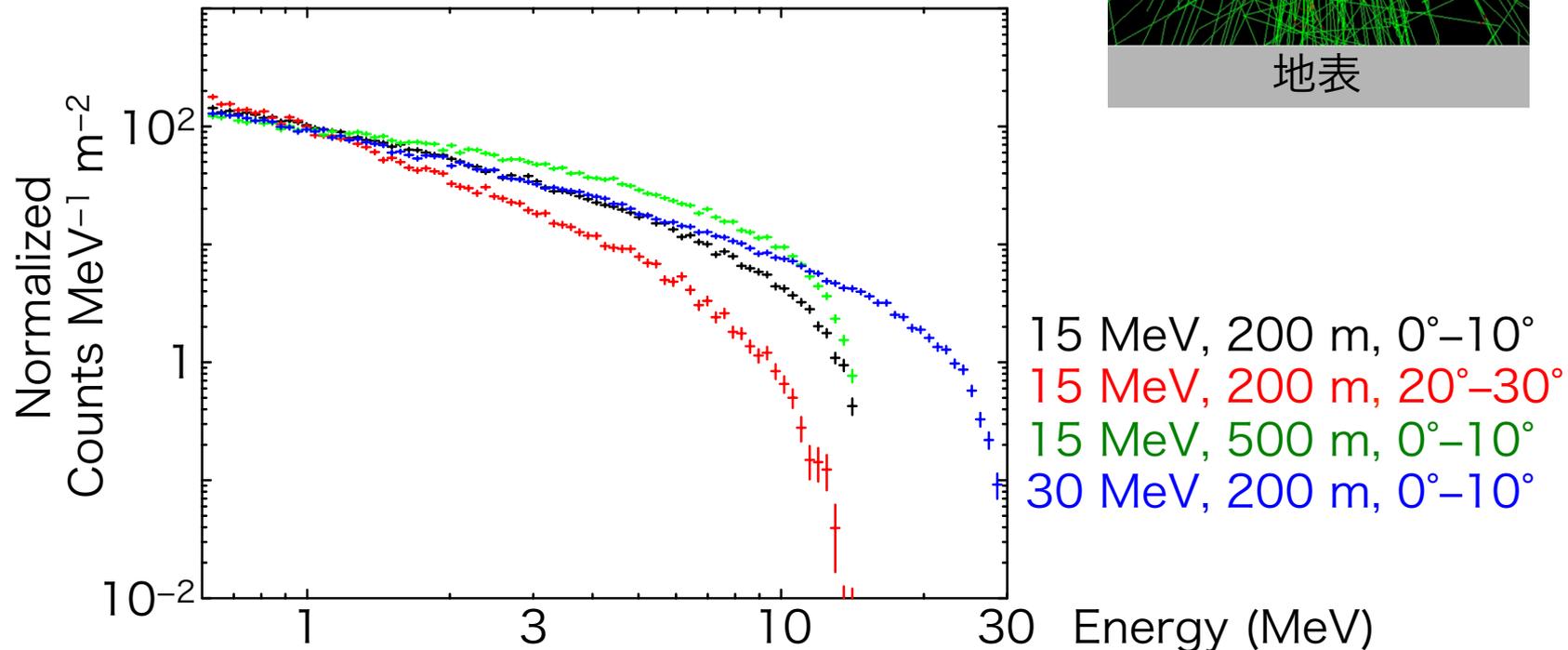
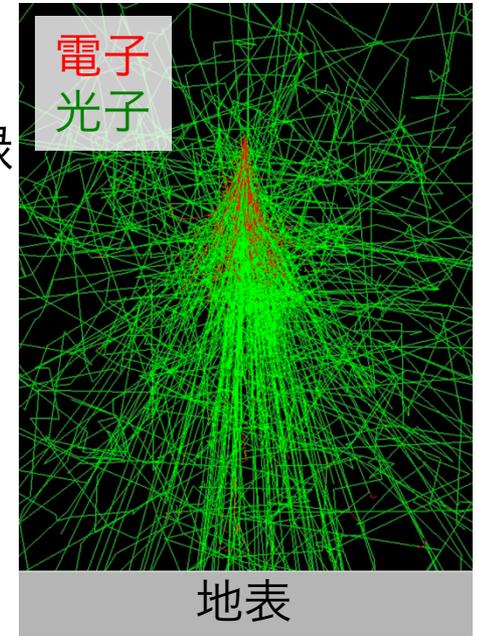
## 2. Geant4 による大気散乱シミュレーション

- 単一エネルギーの加速電子を点源から真下に照射
- 地表でガンマ線のオフセット角度とエネルギーを記録
- 入力パラメータ
  1. 電子エネルギー  $E_e$  (10–30 MeV)
  2. 放射源高度  $h$  (100–1000 m)
  3. オフセット角度  $\theta$  ( $0^\circ$ – $45^\circ$ )



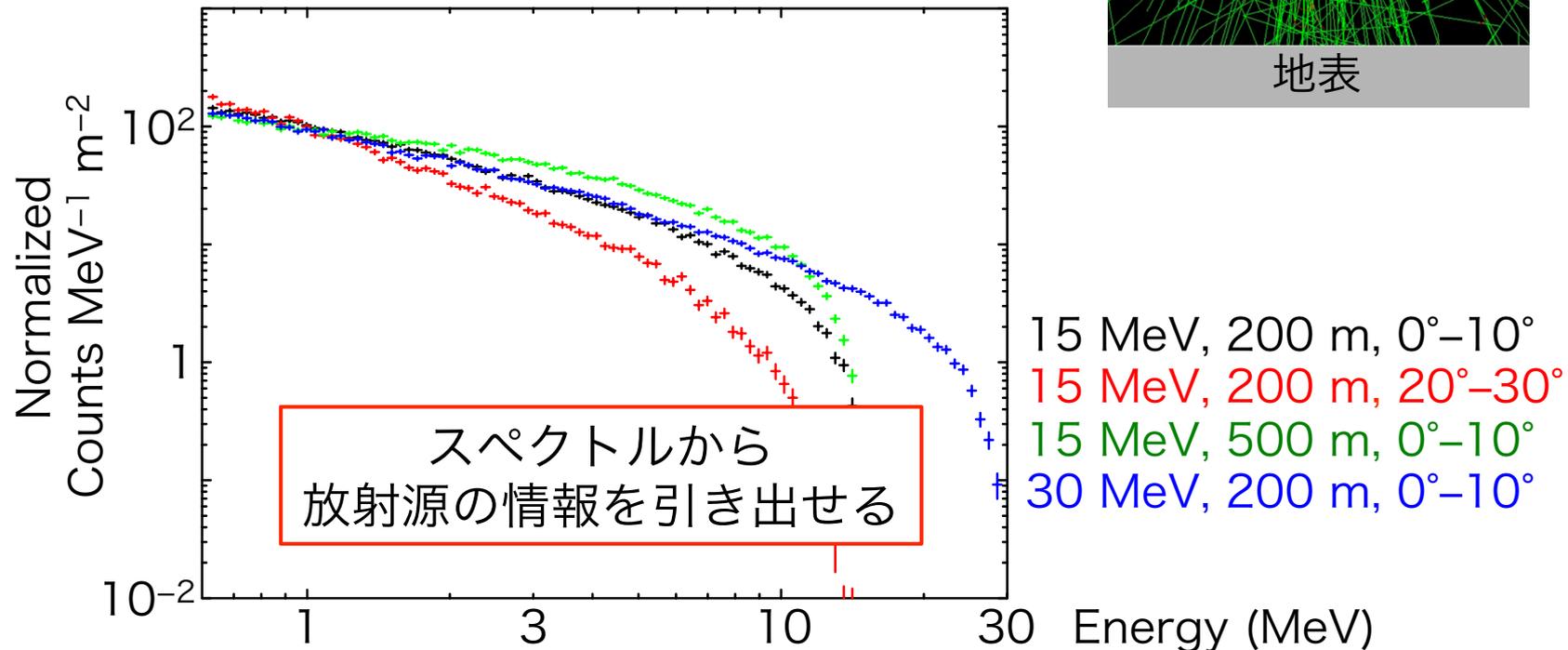
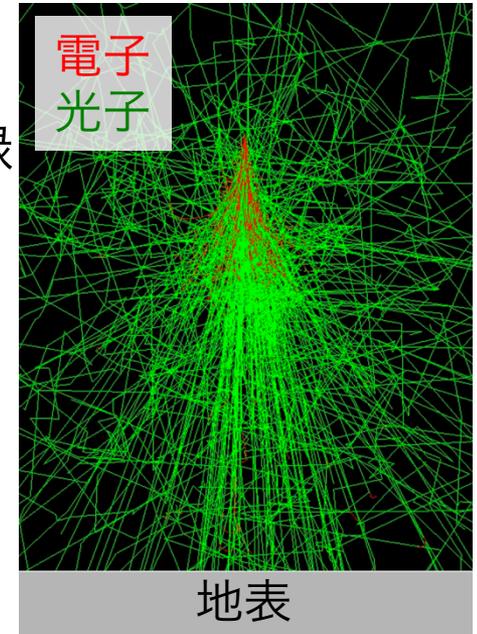
## 2. Geant4 による大気散乱シミュレーション

- 単一エネルギーの加速電子を点源から真下に照射
- 地表でガンマ線のオフセット角度とエネルギーを記録
- 入力パラメータ
  1. 電子エネルギー  $E_e$  (10–30 MeV)
  2. 放射源高度  $h$  (100–1000 m)
  3. オフセット角度  $\theta$  ( $0^\circ$ – $45^\circ$ )



## 2. Geant4 による大気散乱シミュレーション

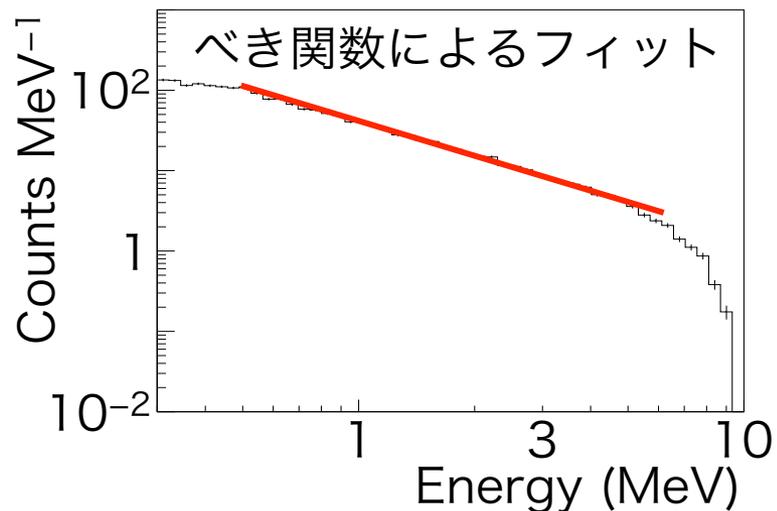
- 単一エネルギーの加速電子を点源から真下に照射
- 地表でガンマ線のオフセット角度とエネルギーを記録
- 入力パラメータ
  1. 電子エネルギー  $E_e$  (10–30 MeV)
  2. 放射源高度  $h$  (100–1000 m)
  3. オフセット角度  $\theta$  ( $0^\circ$ – $45^\circ$ )



# 3. 解析的な関数による近似

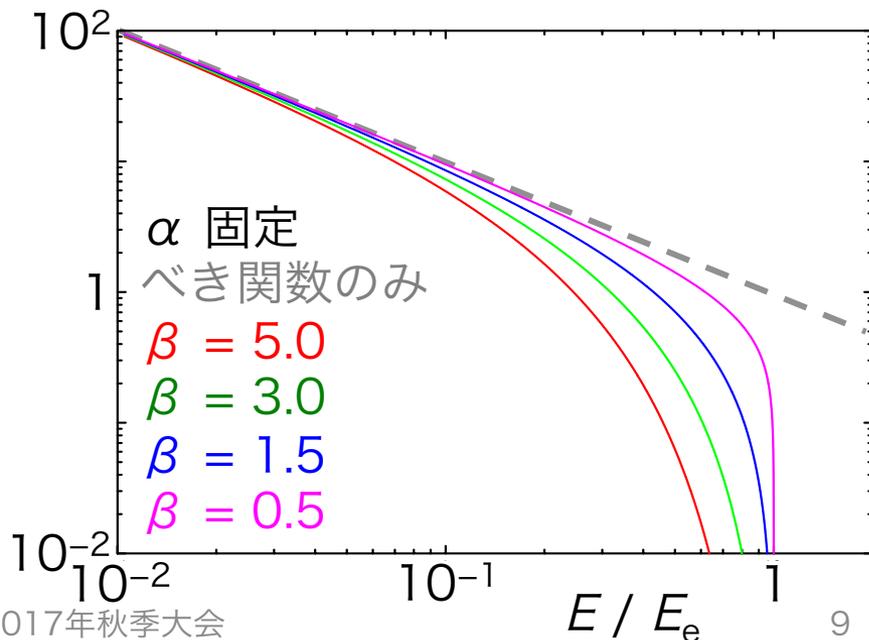
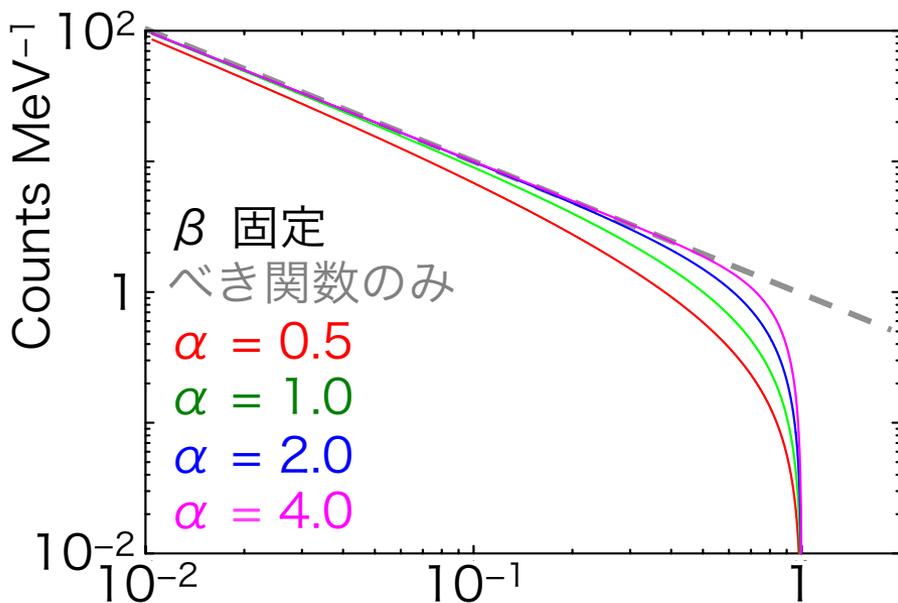
## 従来の手法 (e.g. 古田+17 春)

- べき関数  $AE^\Gamma$  で低エネルギー側を近似
- $A, \Gamma$  を実データと比較
- 情報量が少なく一意に決まらず



## 新たな近似関数

- カットオフも近似できる新たな関数を提案： $AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$
- $\alpha$  はカットオフの始まりの位置,  $\beta$  はカットオフの鋭さを反映



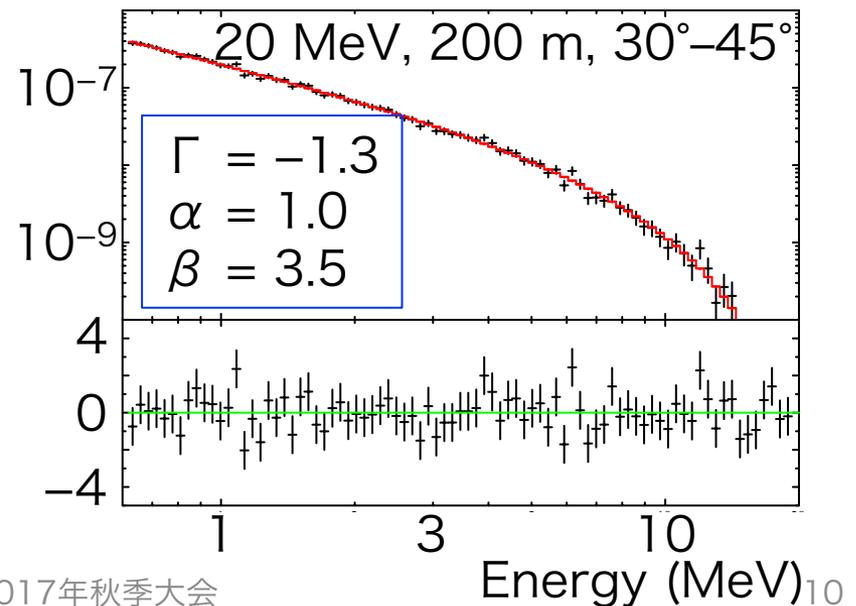
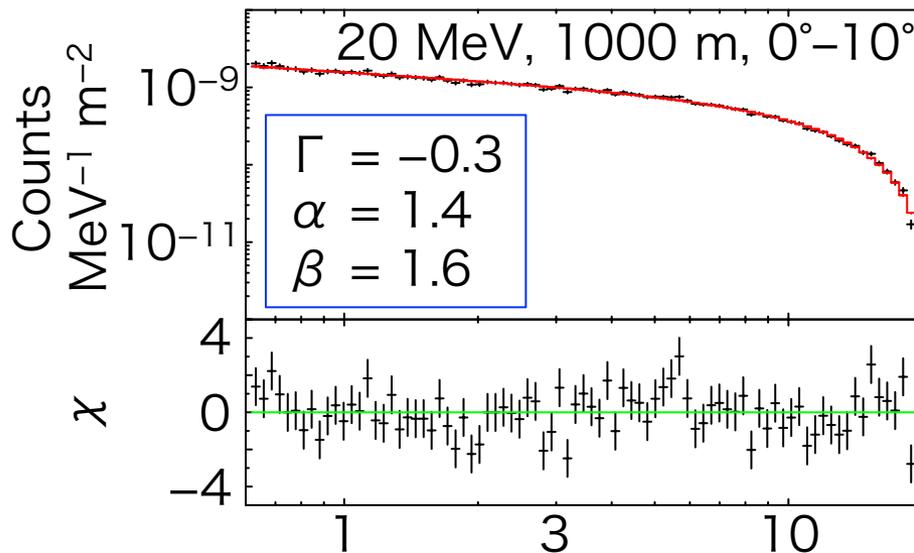
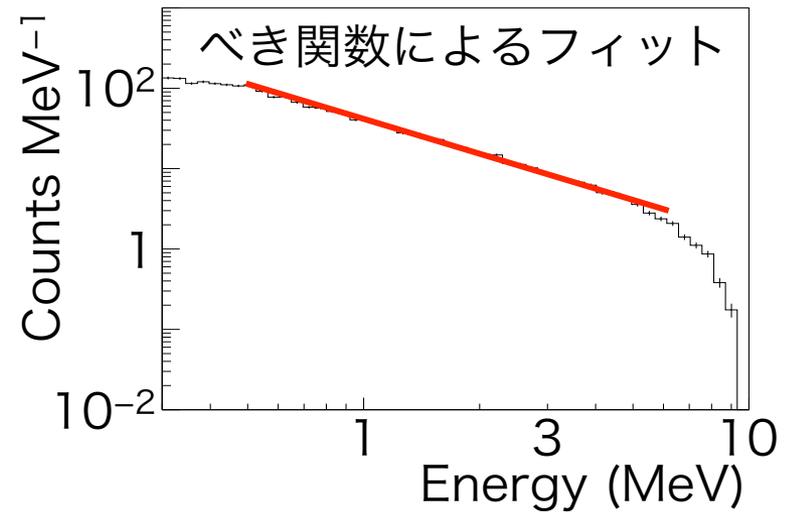
# 3. 解析的な関数による近似

## 従来の手法 (e.g. 古田+17 春)

- べき関数  $AE^\Gamma$  で低エネルギー側を近似
- $A, \Gamma$  を実データと比較
- 情報量が少なく一意に決まらず

## 新たな近似関数

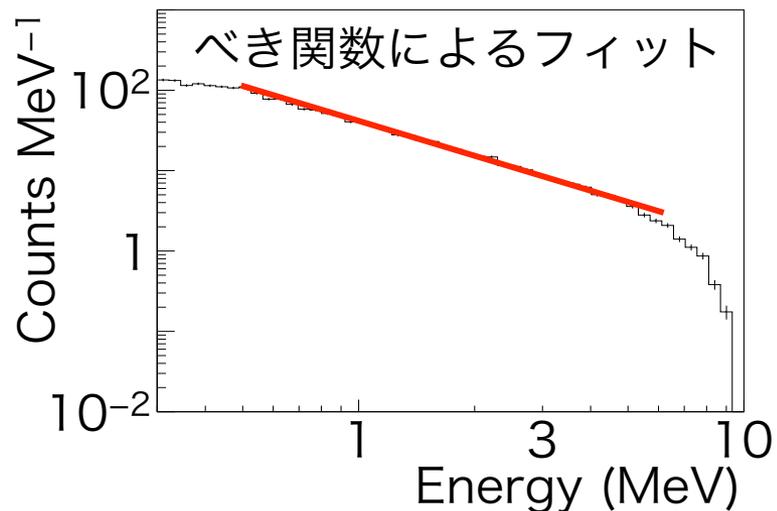
- カットオフも近似できる新たな関数を提案： $AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$
- $\alpha$  はカットオフの始まりの位置,  $\beta$  はカットオフの鋭さを反映



# 3. 解析的な関数による近似

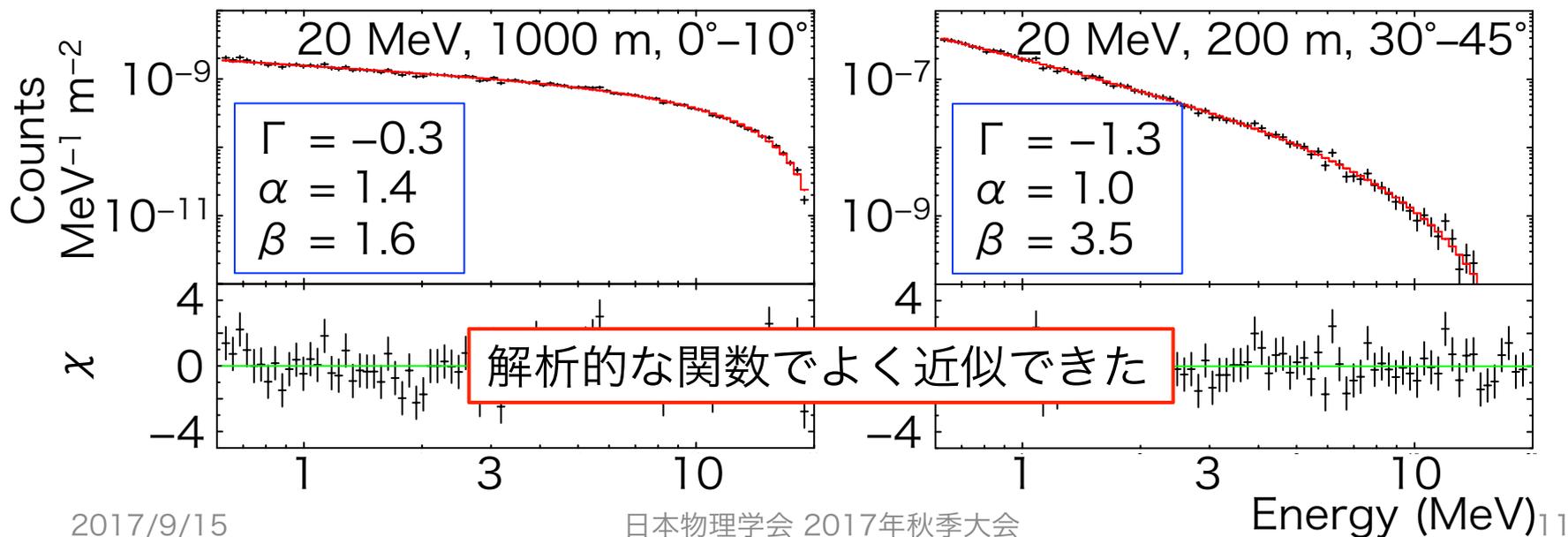
## 従来の手法 (e.g. 古田+17 春)

- べき関数  $AE^\Gamma$  で低エネルギー側を近似
- $A, \Gamma$  を実データと比較
- 情報量が少なく一意に決まらず



## 新たな近似関数

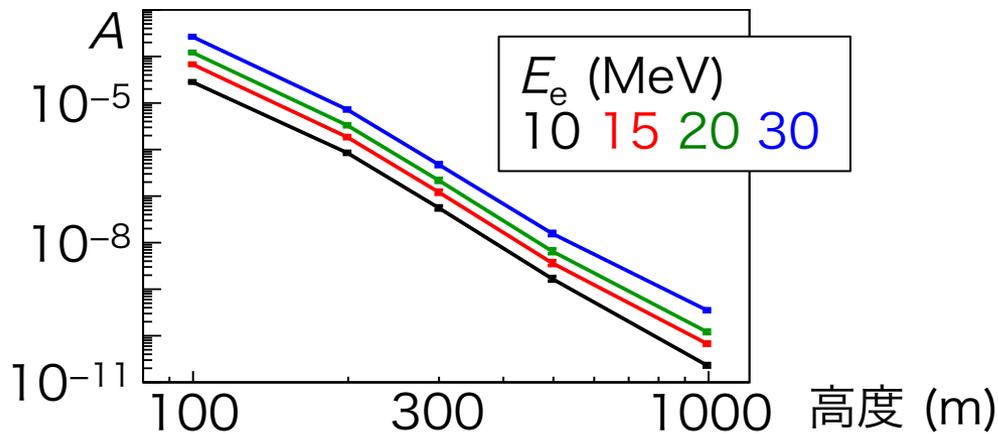
- カットオフも近似できる新たな関数を提案:  $AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$
- $\alpha$  はカットオフの始まりの位置,  $\beta$  はカットオフの鋭さを反映



## 4. 関数のパラメータの振る舞い

$$AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$$

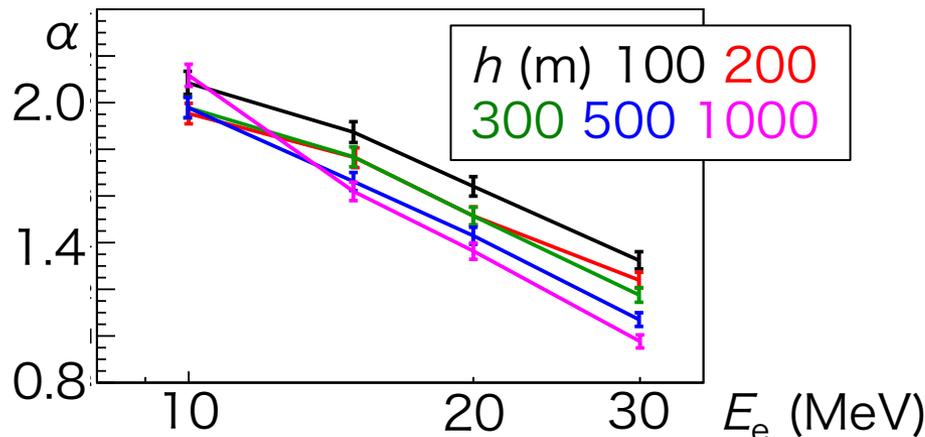
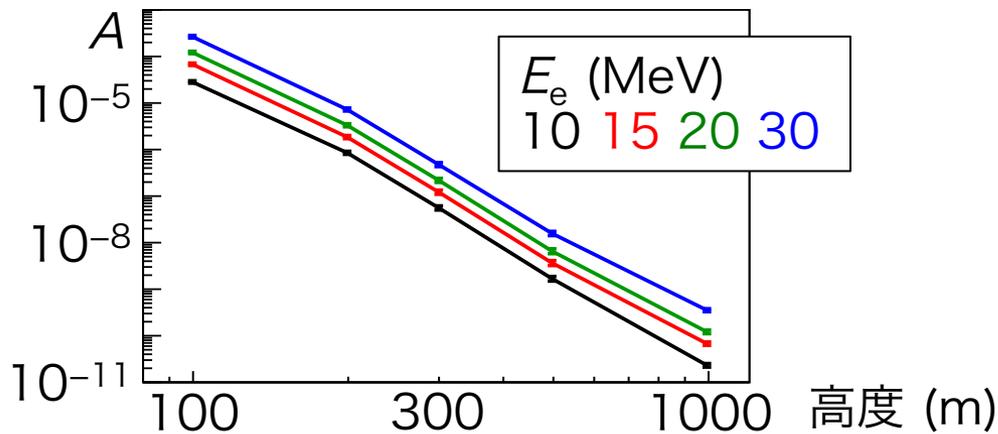
- $A$  は高度  $h$  の  $\sim 6$  乗に逆比例
- $E_e$  が大  $\Rightarrow \alpha$  が小；相対的により低エネルギー側までカットオフ
- $\theta$  が大  $\Rightarrow \Gamma$  が小；ソフトなスペクトル（制動放射のビーミング効果）  
 $\beta$  が大；なだらかなカットオフ



## 4. 関数のパラメータの振る舞い

$$AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$$

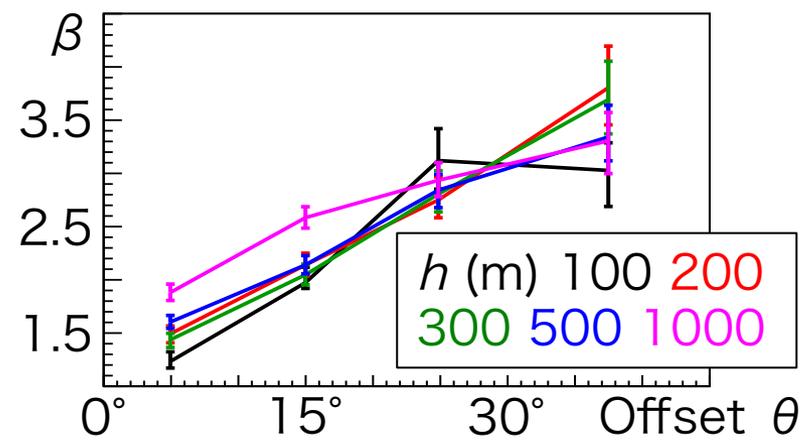
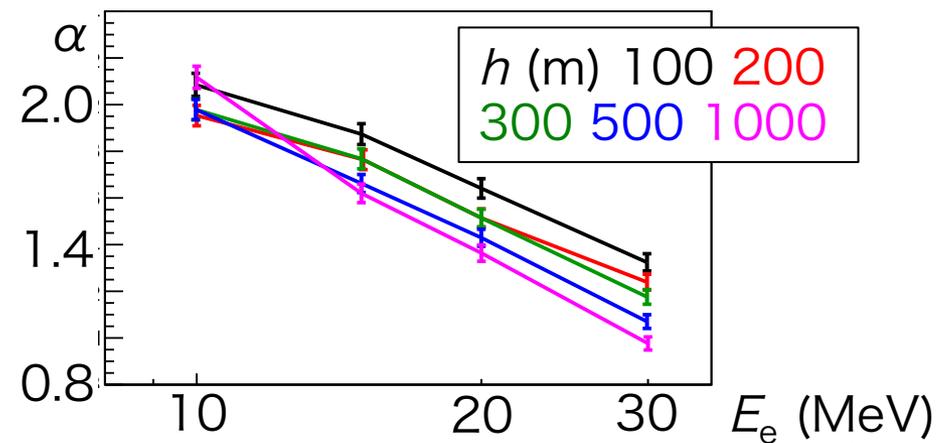
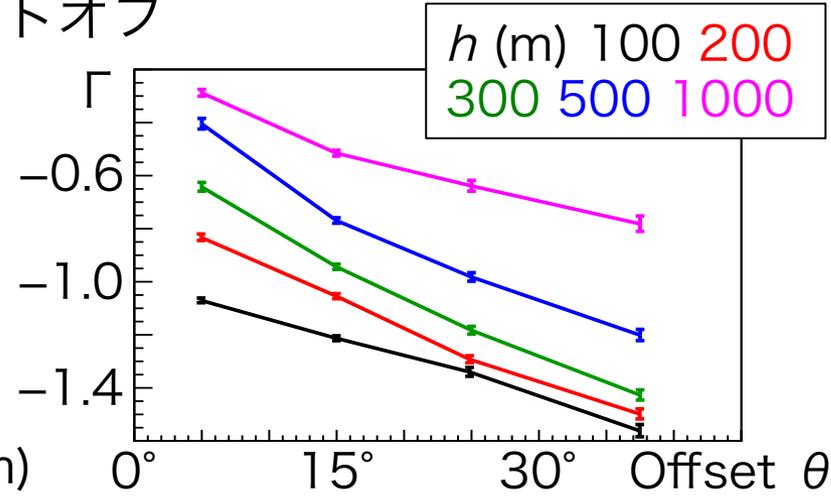
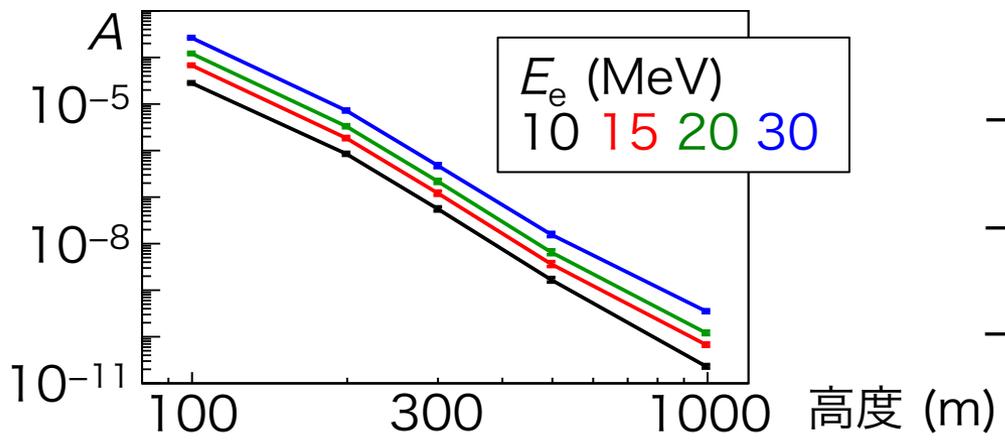
- $A$  は高度  $h$  の  $\sim 6$  乗に逆比例
- $E_e$  が大  $\Rightarrow \alpha$  が小；相対的により低エネルギー側までカットオフ
- $\theta$  が大  $\Rightarrow \Gamma$  が小；ソフトなスペクトル（制動放射のビーミング効果）  
 $\beta$  が大；なだらかなカットオフ



# 4. 関数のパラメータの振る舞い

$$AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$$

- $A$  は高度  $h$  の  $\sim 6$  乗に逆比例
- $E_e$  が大  $\Rightarrow \alpha$  が小；相対的により低エネルギー側までカットオフ
- $\theta$  が大  $\Rightarrow \Gamma$  が小；ソフトなスペクトル（制動放射のビーミング効果）
- $\beta$  が大；なだらかなカットオフ



# 5. 地上観測データへの適用

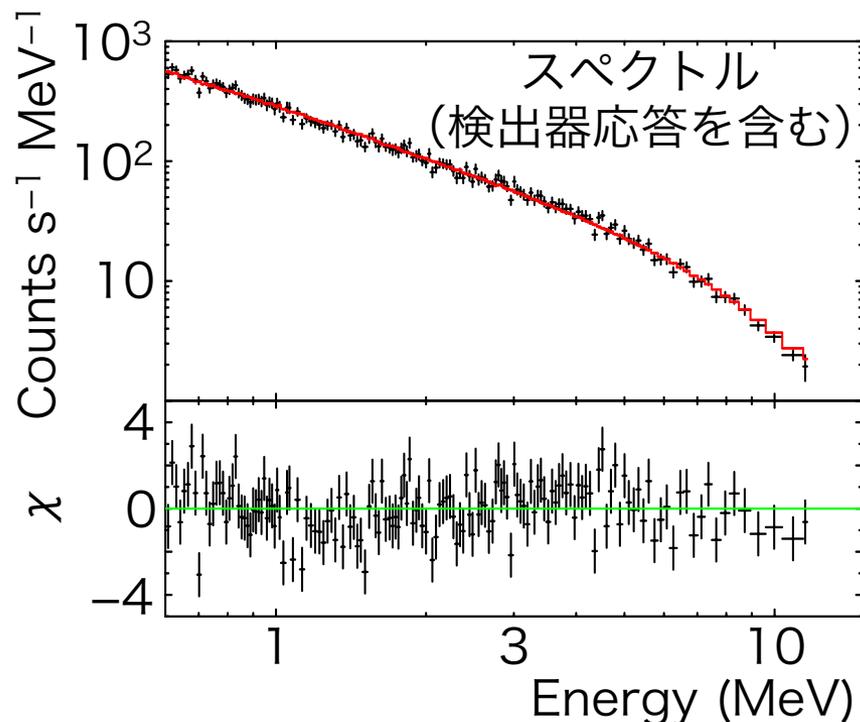
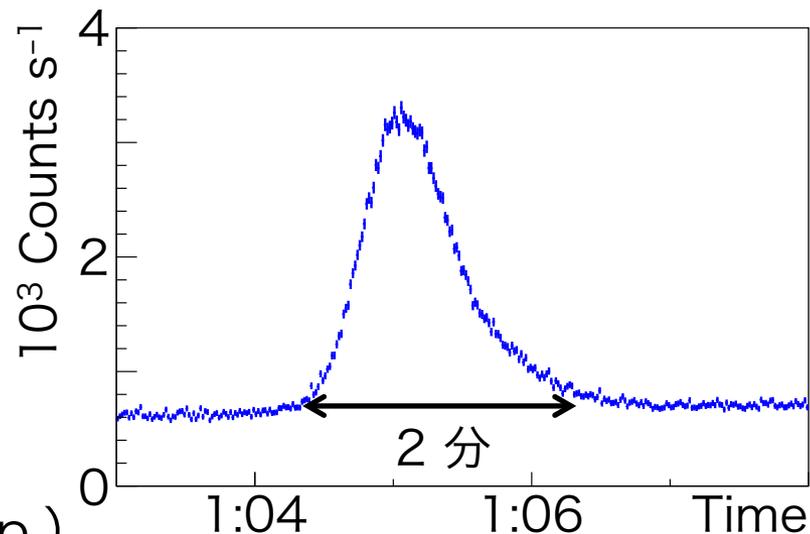
## 2015/1/25 のロングバースト

- 過去最大の光子統計
- 原発のモニタリングポストでも検出
- モニタリングポストでの最大光度から放射源の通過位置を推定  
→ 検出器の直上を通過 (楳本+ in prep.)

## 近似関数によるフィット

$$AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$$

- X線天文のスペクトル解析ツール XSPEC (NASA) を使用
- 光度曲線の FWHM 内 45 秒間からデータ抽出し近似関数でフィット
- $\theta$  は十分小  $\rightarrow \beta = 2$  に fix



# 5. 地上観測データへの適用

## 2015/1/25 のロングバースト

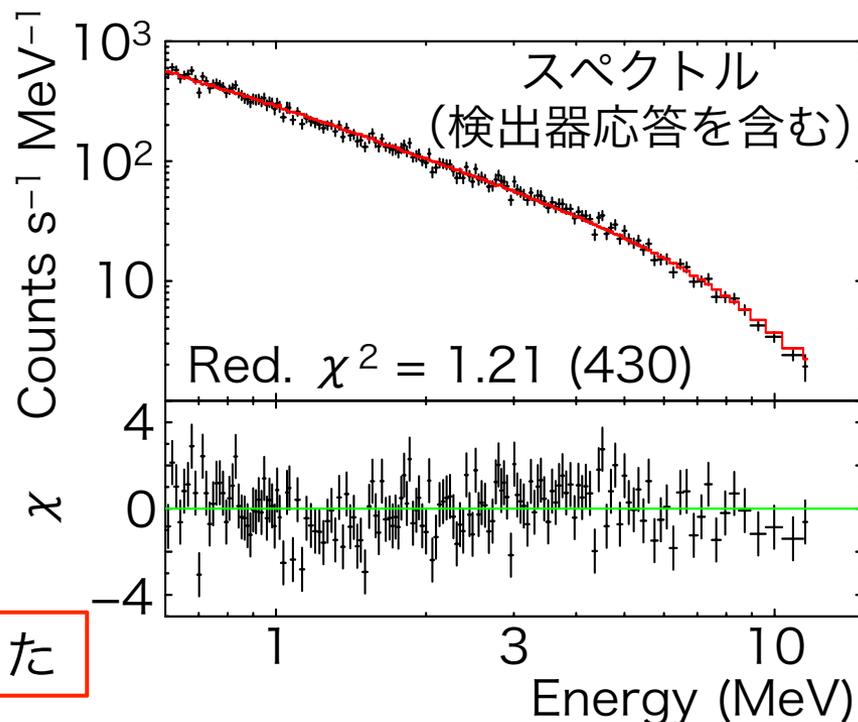
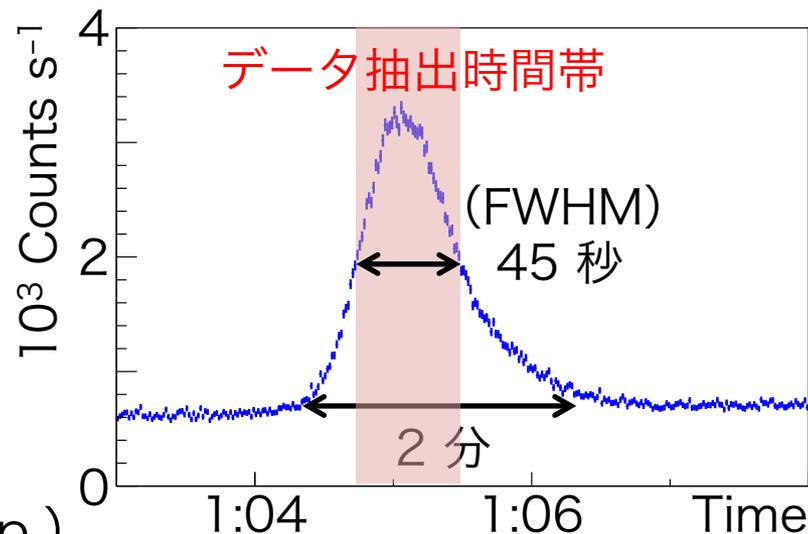
- 過去最大の光子統計
- 原発のモニタリングポストでも検出
- モニタリングポストでの最大光度から放射源の通過位置を推定  
→ 検出器の直上を通過 (楳本+ in prep.)

## 近似関数によるフィット

$$AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$$

- X線天文のスペクトル解析ツール XSPEC (NASA) を使用
- 光度曲線の FWHM 内 45 秒間からデータ抽出し近似関数でフィット
- $\theta$  は十分小  $\rightarrow \beta = 2$  に fix

実データも近似関数でよく説明できた



# 6. 放射源情報の推定

## 放射源高度と電子数

- $\Gamma \sim -0.8 \rightarrow$  高度 200–500 m  
冬季雷の典型的な雲底高度と無矛盾  
(200–800 m ; Goto+1992)
- シミュレーションとフラックスを比較  
 $A \sim 1.5$ ,  $E_e \sim 20$  MeV,  $h \sim 300$  m  
 $\rightarrow$  加速電子数  $\sim 5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$   
(cf. 土屋+11 での推定  $10^{7-10} \text{ s}^{-1}$ )

実データから物理的に妥当な解が得られた

## 今後の進展

- 低統計のデータに適用するには観測との両輪が重要
  1. 数十 MeV での有効面積拡大・ダイナミックレンジの確保
  2. 多地点観測でオフセット角度推定・三角測量で高度測定
- 電子エネルギーに広がりがある場合  $\rightarrow$  今後検証  
(原理的にはモデルの畳み込みで再現可能)

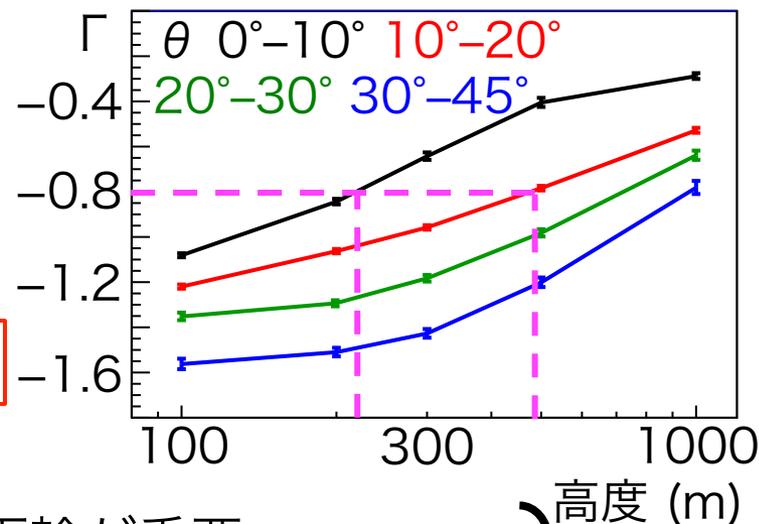
$$AE^\Gamma [1 - (E/E_e)^\alpha]^\beta$$

$$A = 1.50 \text{ (0.97-2.40)}$$

$$E_e = 21.6 \text{ (20.6-22.7) MeV}$$

$$\Gamma = -0.80 \text{ (0.90-0.56)}$$

$$\alpha = 0.45 \text{ (0.26-0.61)}$$



高度 (m)

中澤+  
次公演

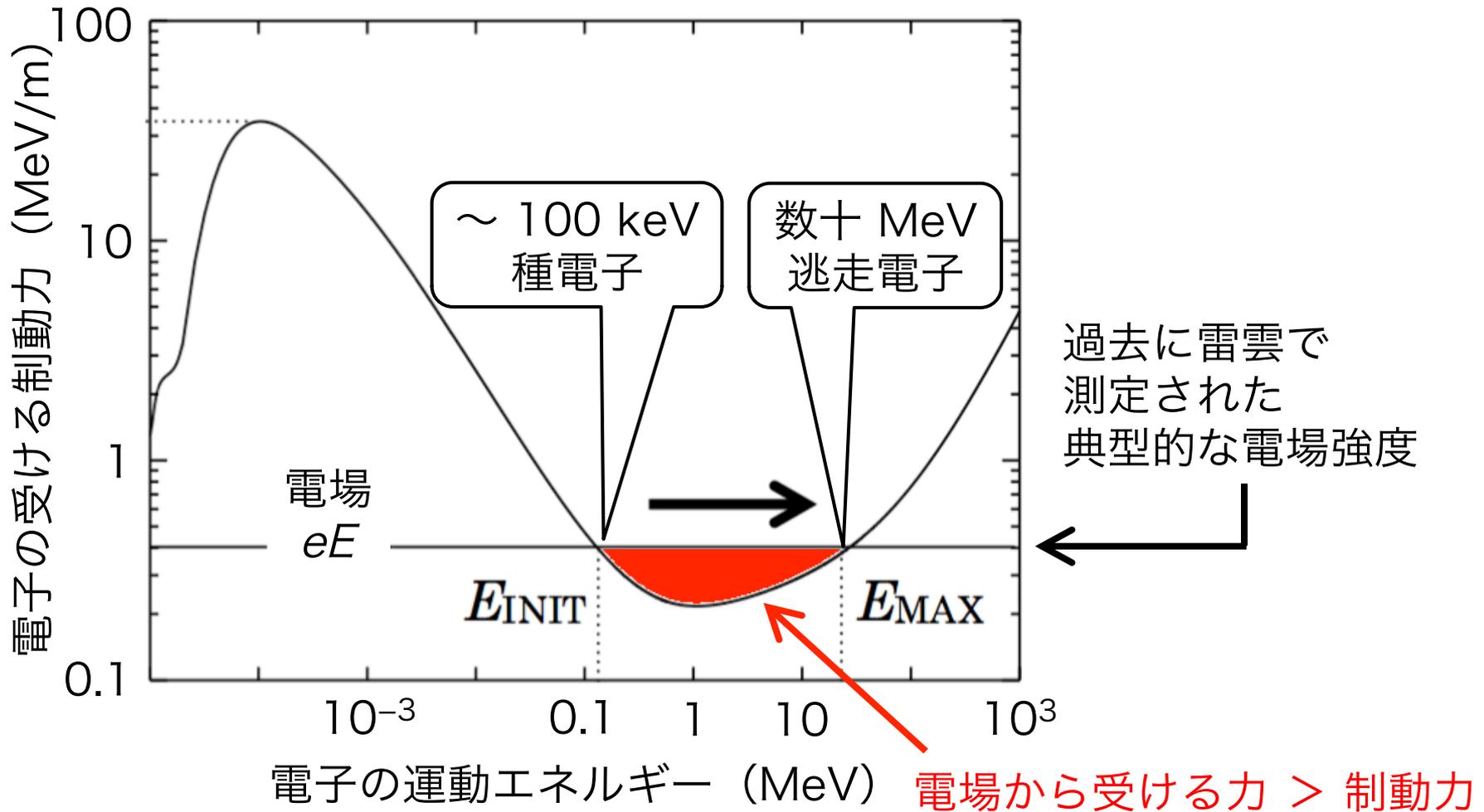
## 7. まとめ

- 過去の新潟県柏崎刈羽原発での地上観測により，雷雲ガンマ線の放射源の水平位置は概ねわかってきたが，高さや加速電子のエネルギーは未知。
- カットオフを含むスペクトル全体を使って放射源の情報を推定するため，モンテカルロシミュレーションを使い，雷雲ガンマ線をモデル化した。
- カットオフの形状も表現できる解析的な関数で近似し，放射源の高度・電子エネルギー・オフセット角度と関数パラメータの対応関係を得た。
- 過去最大の光子統計があったロングバーストのスペクトルをこの関数でフィットし，そのパラメータから，電子エネルギー  $\sim 20$  MeV，放射源高度 200–500 m，加速電子数  $\sim 5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  を推定した。
- 低統計のデータでは推定精度が落ちるが，十分な感度とダイナミックレンジをもった検出器を設置したり，多地点観測網で情報量を拡大することで補える。

# Appendix

# 雷雲電場による電子加速

- $\sim 100$  keV の種電子と数百 kV/m の電場があれば、電子は数十 MeV まで加速されうる



# Geant4 による大気散乱シミュレーション

- 加速電子を模擬し，上空の一点源から真下方向に電子ビームを照射
- 異なる電子エネルギー・高度でシミュレーション
- 地表でのガンマ線の到達位置とエネルギーを記録し，オフセット角度で分類

<入力パラメータ>：組み合わせ 80 通り

電子エネルギー (MeV)	10, 15, 20, 30
放射源高度 (m)	100, 200, 300, 500, 1000
オフセット角度 (度)	0-10, 10-20, 20-30, 30-45

- 電磁相互作用の Physics List は Livermore を使用
- Cut Range はデフォルト (0.7 mm)  
空気中で 1 keV までのトラッキングに相当
- 空気密度  $1.205 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$

