

GROWTH 実験： モンテカルロシミュレーションを用いた、 雷雲ガンマ線放射の広がりの解釈

古田 禄大 (東大理)

榎本 大悟, 中澤 知洋, 奥田 和史, 和田 有希 (東大理),
榎戸 輝揚 (京大宇物), 湯浅 孝行, 土屋 晴文, 牧島 一夫 (理研)

1. 地上観測で探るロングバーストの放射源

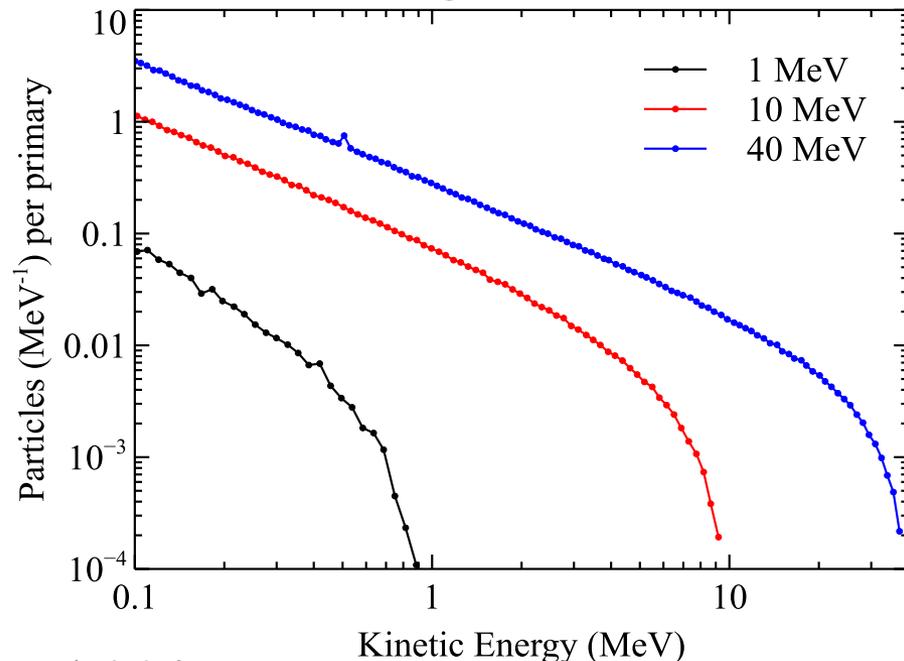
放射源の未解明情報

- 放射源の水平位置は雷雲内のポケット正電荷に対応か？（前講演）
- 一方、高度・加速電子の指向性・電子スペクトルは未知
- 加速電子（10–30 MeV 程度）は大気で曲げられ制動放射
→ コンプトン散乱・対生成・制動放射を繰り返す
→ 空間的・エネルギー的広がり … 放射源の情報を反映

地上観測から逆問題を解く

- 照射域サイズ・明るさ・べきを地上観測とシミュレーションとで比較
- 明るさとべきは放射源と検出器の位置関係にも依存
→ 時間変動（cf. 前講演）
- 観測データで明るさとべきに相関は見えるか？
- 両者の関係から放射源の情報を推定できるか？

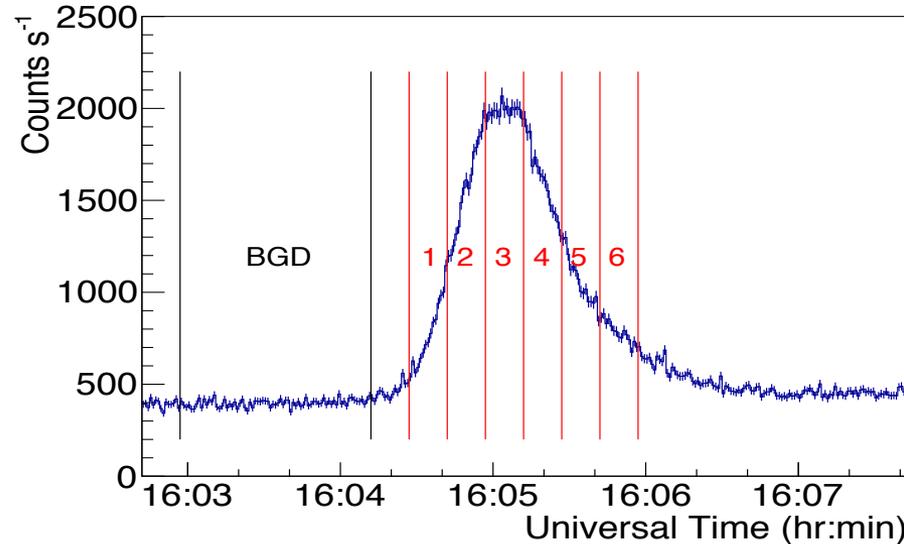
Rutjes+2016 より作成



2. 2015/1/24 のロングバースト

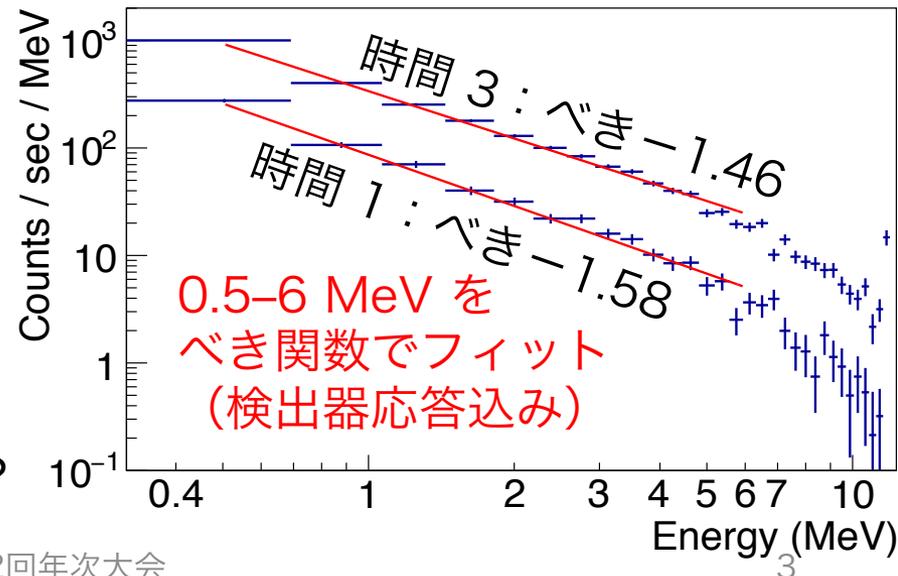
照射域サイズ・明るさとべきの相関

- 前講演と同様に解析 (榎本博士論文)
- 照射域は FWHM ~ 800 m の円形 (風速・モニタリングポストから)
- 6つの時間帯に分け, スペクトルの強度とべきの変化を追う
→ 明るい時間帯ほどべきの絶対値が小さい (硬い)



解釈

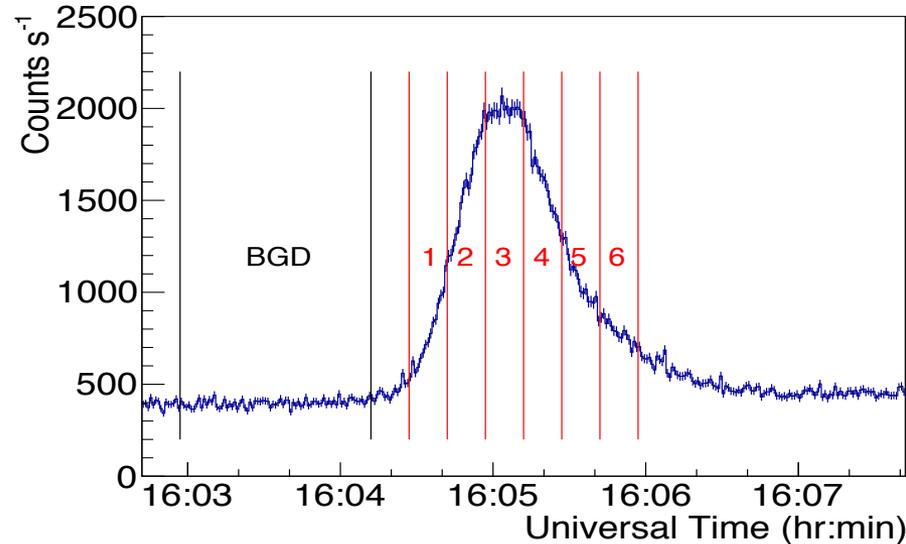
- 明るい時間帯 = 放射源に近い
→ 照射域の中心で硬く裾で軟らか
- この傾向は雷雲から下向きに運動する相対論的電子の制動放射の性質と定性的に一致
- シミュレーションで, スペクトルのべきの値やこの相関を再現できるか?



2. 2015/1/24 のロングバースト

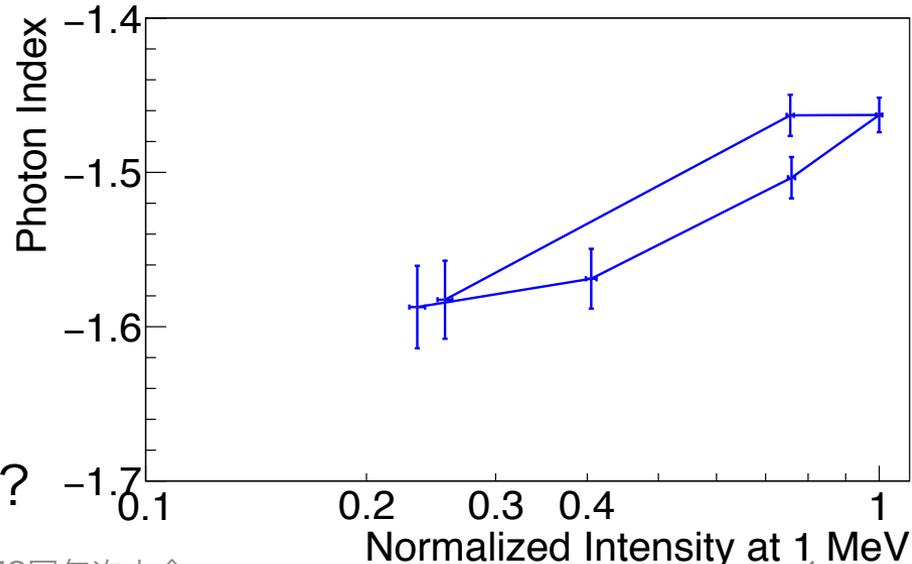
照射域サイズ・明るさとべきの相関

- 前講演と同様に解析 (榎本博士論文)
- 照射域は FWHM ~ 800 m の円形 (風速・モニタリングポストから)
- 6つの時間帯に分け, スペクトルの強度とべきの変化を追う
→ 明るい時間帯ほどべきの絶対値が小さい (硬い)



解釈

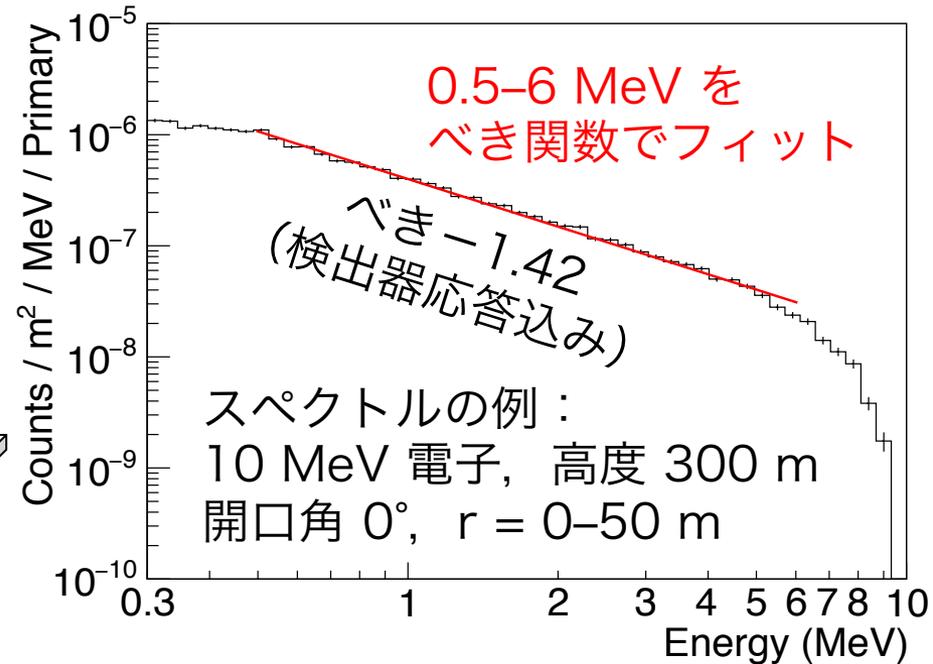
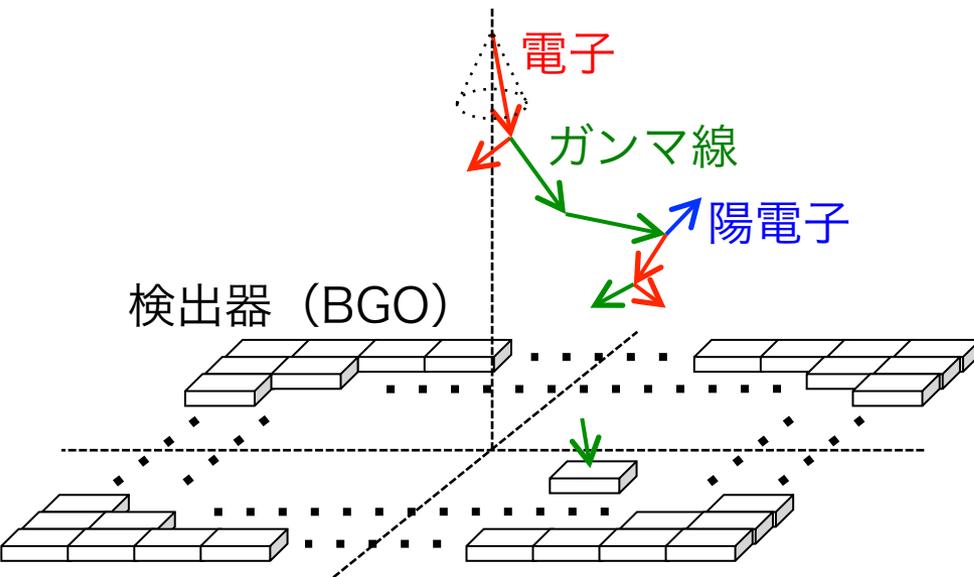
- 明るい時間帯 = 放射源に近い
→ 照射域の中心で硬く裾で軟らか
- この傾向は雷雲から下向きに運動する相対論的電子の制動放射の性質と定性的に一致
- シミュレーションで, スペクトルのべきの値やこの相関を再現できるか?



3. 雷雲ガンマ線を模擬したシミュレーション

- Geant4 を使用
- 上空の一つの点源から単色電子が地上へ放射される, 最もシンプルな描像を仮定
- 地表に並べた検出器でガンマ線を測定
- 電子のエネルギー・放射源の高度・電子発生方向 (ビーム開口角) がパラメータ

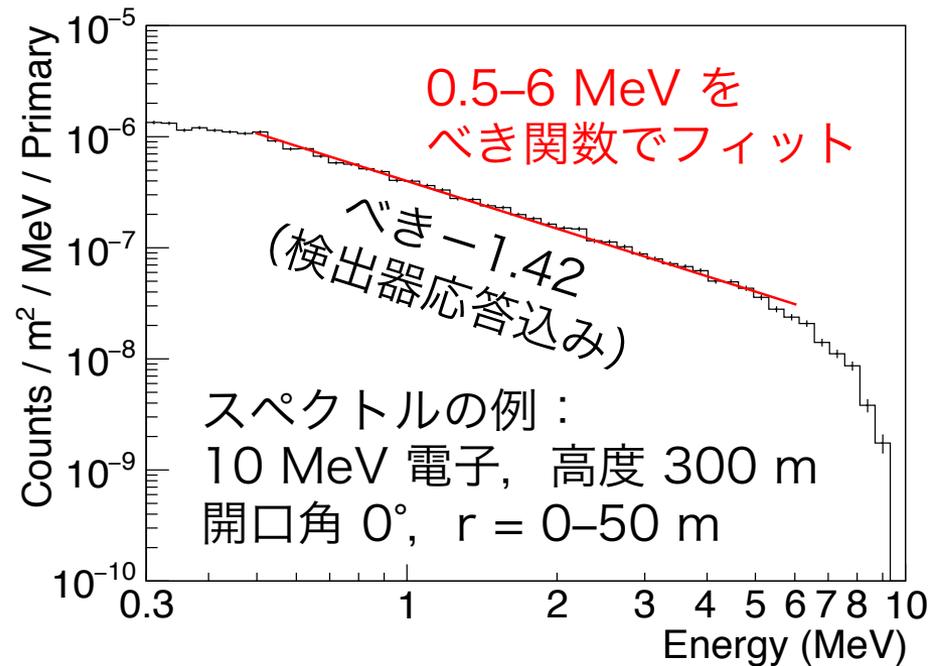
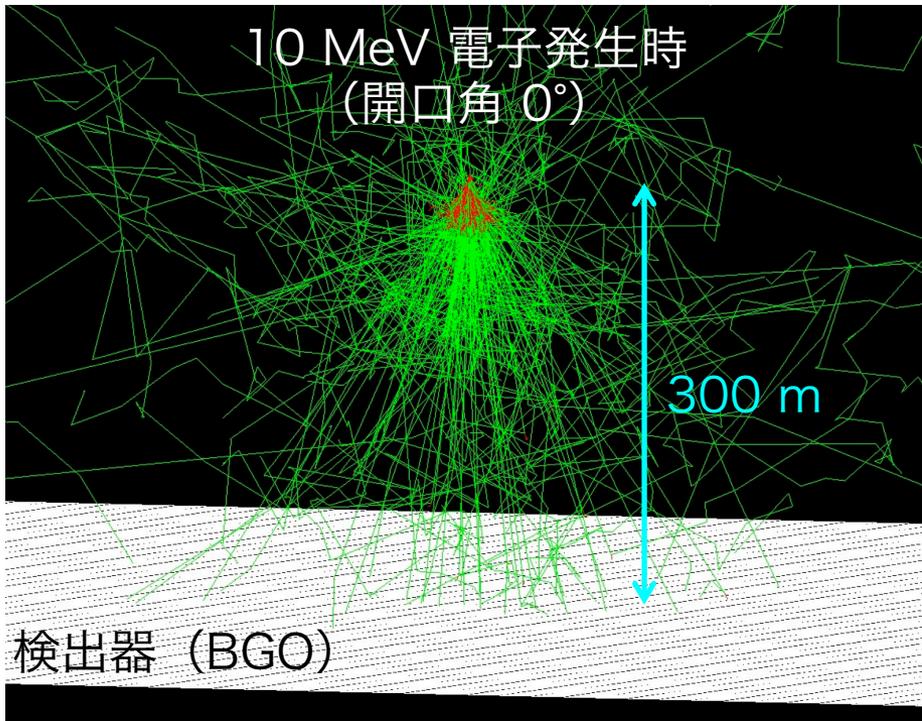
エネルギー	10 MeV, 30 MeV
高度	300 m, 500 m, 1000 m
ビーム開口角	0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 60°, 90°



3. 雷雲ガンマ線を模擬したシミュレーション

- Geant4 を使用
- 上空の一つの点源から単色電子が地上へ放射される, 最もシンプルな描像を仮定
- 地表に並べた検出器でガンマ線を測定
- 電子のエネルギー・放射源の高度・電子発生方向 (ビーム開口角) がパラメータ

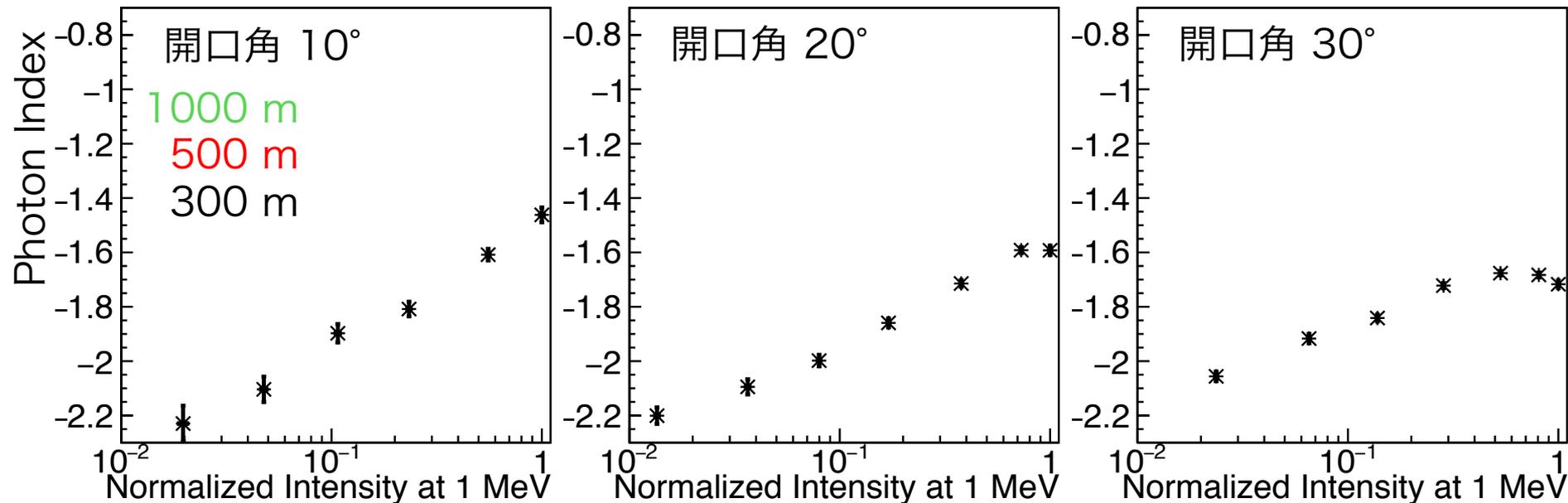
エネルギー	10 MeV, 30 MeV
高度	300 m, 500 m, 1000 m
ビーム開口角	0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 60°, 90°



4. シミュレーションによる明るさとべきの相関

- 開口角を広げると、プロットが右下がりに
… 暗い外縁部は経路が長く、吸収を受けて硬くなる
- 観測事実「明るい時ほど硬い」 → 開口角に上限値がありそう

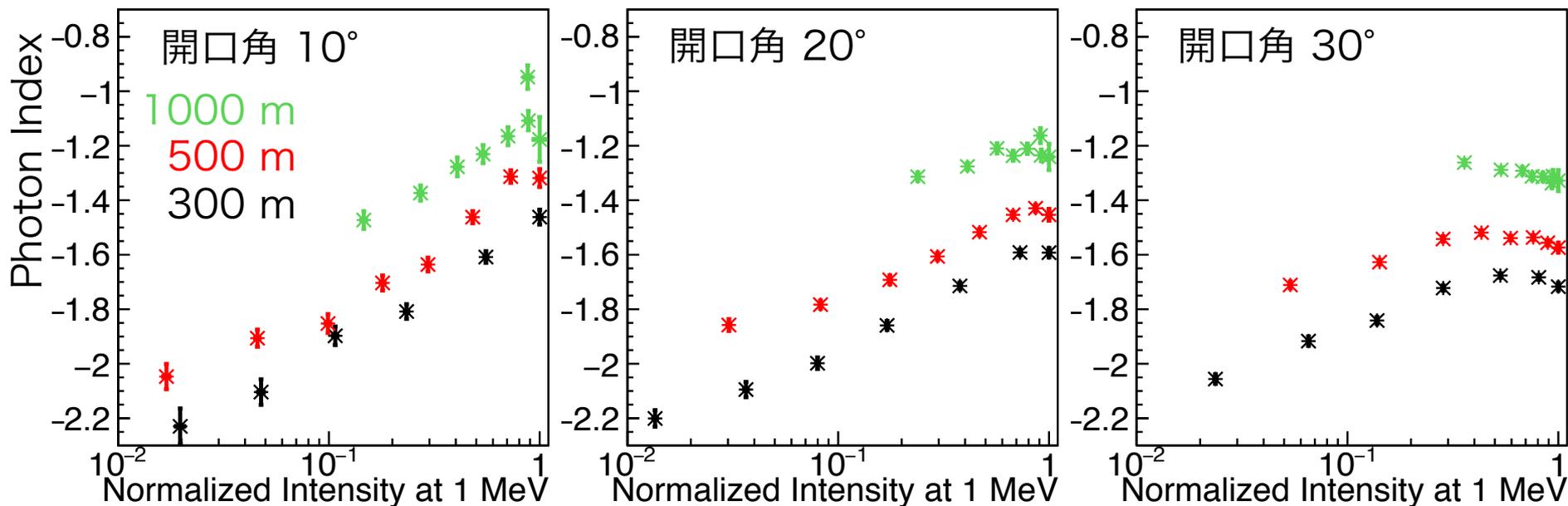
電子エネルギー 10 MeV



4. シミュレーションによる明るさとべきの相関

- 開口角を広げると、プロットが右下がりに
… 暗い外縁部は経路が長く、吸収を受けて硬くなる
- 観測事実「明るい時ほど硬い」 → 開口角に上限値がありそう

電子エネルギー 10 MeV

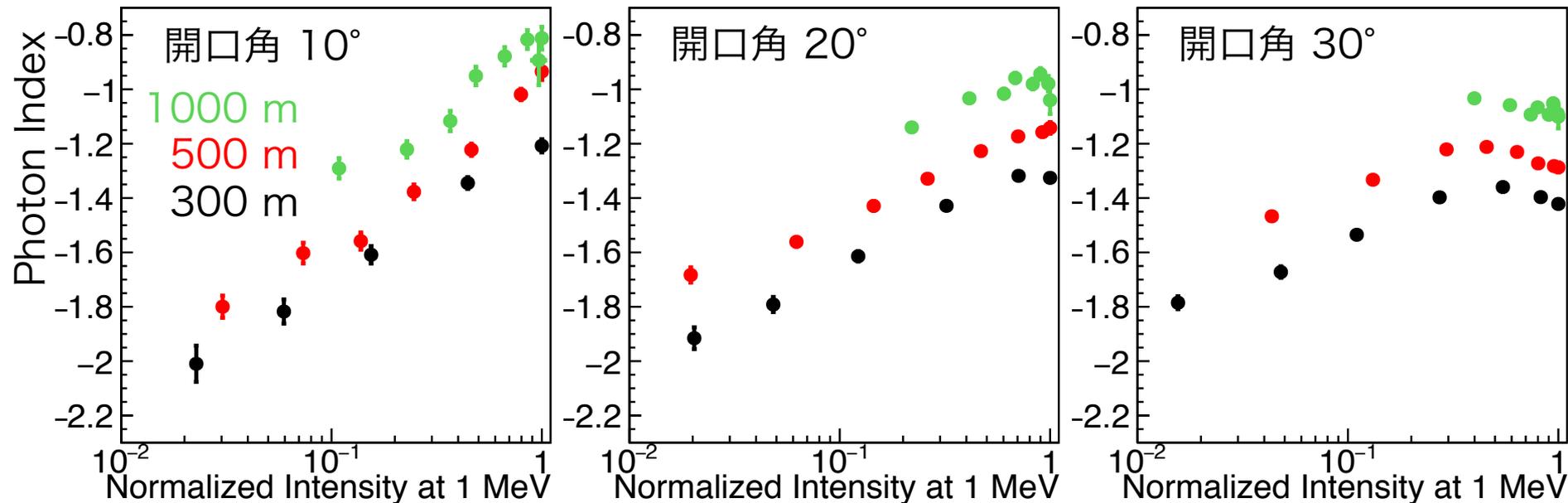


- 高度や電子のエネルギーを上げると、プロットの形はほとんど変わらずに全体が硬くなる
→ 開口角 $< 20^\circ$, 電子が鉛直方向に強く指向性をもつことを示唆
→ 鉛直方向に電場加速された電子が由来であることを支持

4. シミュレーションによる明るさとべきの相関

- 開口角を広げると、プロットが右下がりに
… 暗い外縁部は経路が長く、吸収を受けて硬くなる
- 観測事実「明るい時ほど硬い」 → 開口角に上限値がありそう

電子エネルギー 30 MeV



- 高度や電子のエネルギーを上げると、プロットの形はほとんど変わらずに全体が硬くなる
→ 開口角 < 20°, 電子が鉛直方向に強く指向性をもつことを示唆
→ 鉛直方向に電場加速された電子が由来であることを支持

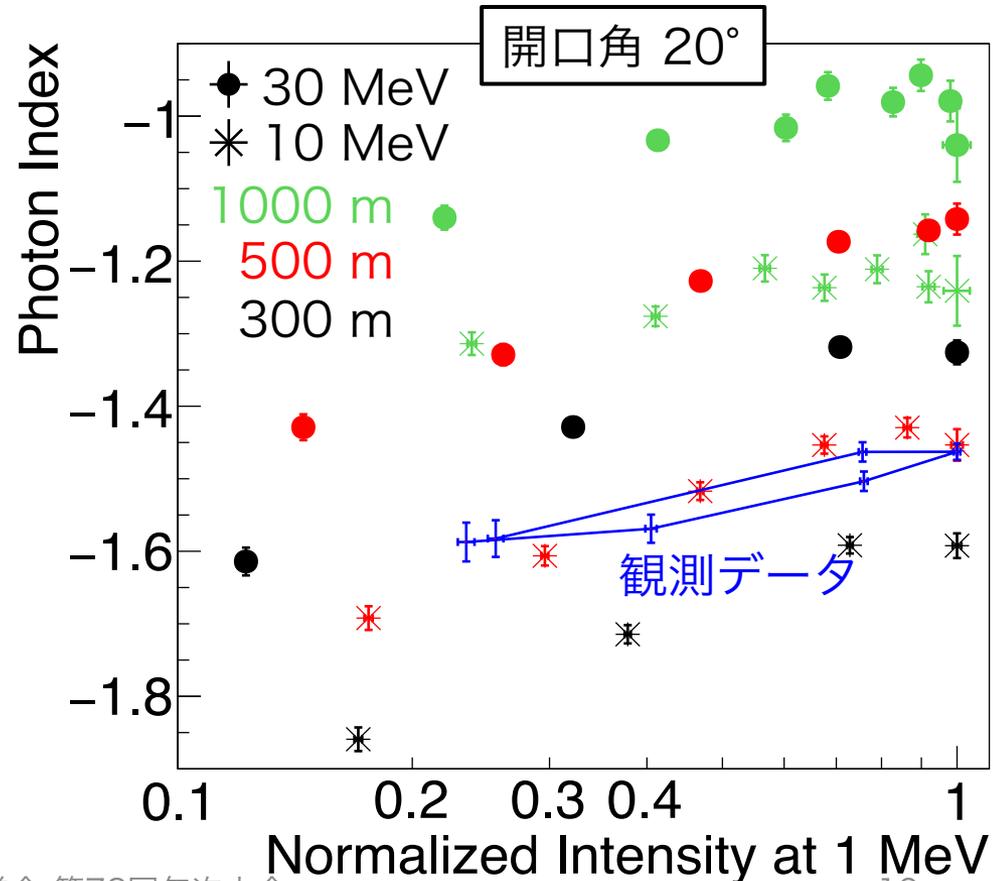
5. 観測データとシミュレーションの比較

2015/1/24 のロングバーストとの比較

- 今回試したパラメータの中では、**電子エネルギー 10 MeV**、**高度 500 m**、**開口角 20°** のとき、シミュレーションが観測データを再現
- 「単色電子が一つの点源から地上へ向かって放射されている」というシンプルな描像で**スペクトルの強度とべきの変化を説明できた**

他の解の可能性

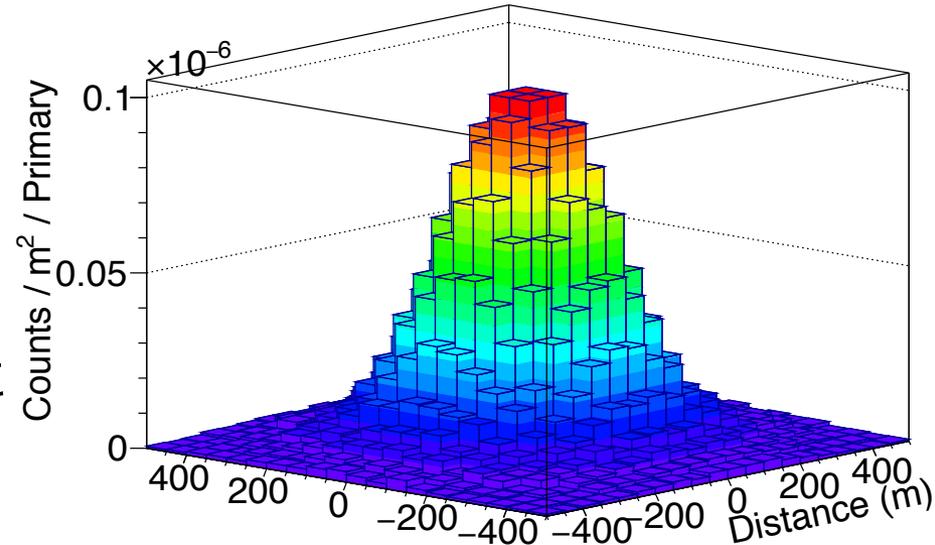
- プロット点の傾きから、開口角は 20° が妥当
- ~ 5 MeV, 高度 1000 m は？
→ 観測データのスペクトルが > 10 MeV まで伸びている
→ **不適當**
- ~ 20 MeV, 高度 300 m は？
→ 解としてはあり得る



6. ガンマ線照射域のサイズ

放射源は点源か？

- 観測で推定されたこのロングバーストの照射域は FWHM ~ 800 m
 - 一方, シミュレーションで得た空間広がりには ~ 400 m (約半分)
- 「単色電子が一つの点源から地上に向かって放射されている」という単純な描像では説明できない



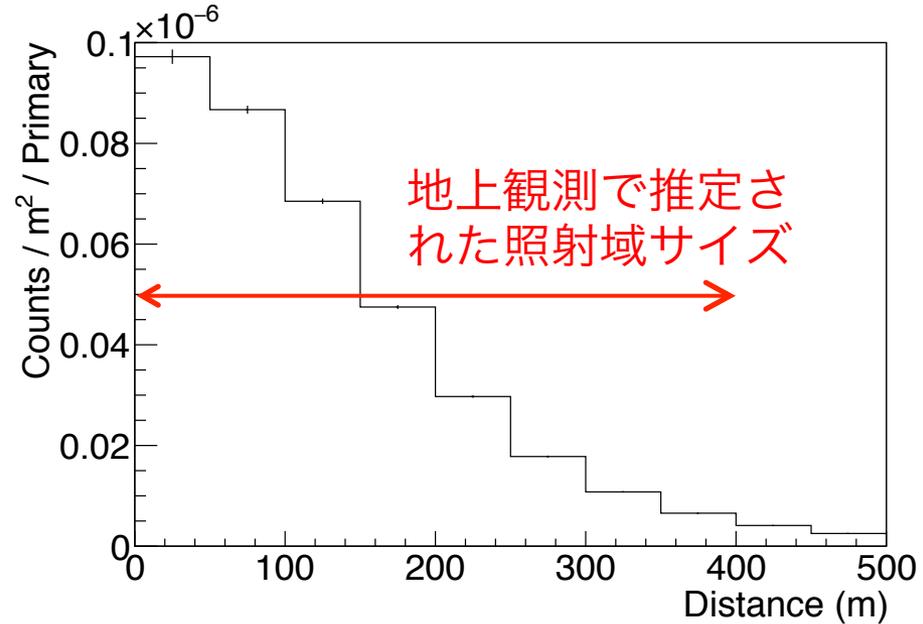
モデルの改善と新しい観測

- 放射源 (=ポケット正電荷?) のシミュレーションモデルに改善が必要
 - 放射源が点源ではなく, **水平方向に広がり**をもつ?
 - 加速電子は単色ではなく **連続的なエネルギー分布**?
- モデルの拡張=パラメータが増加 → 解の絞り込みが困難に
- いずれかのパラメータを観測的に決定することが重要
 - … 例えば**高度の直接測定** (→ 奥田+次講演)

6. ガンマ線照射域のサイズ

放射源は点源か？

- 観測で推定されたこのロングバーストの照射域は FWHM \sim 800 m
 - 一方, シミュレーションで得た空間広がり \sim 400 m (約半分)
- 「単色電子が一つの点源から地上に向かって放射されている」という単純な描像では説明できない



モデルの改善と新しい観測

- 放射源 (=ポケット正電荷?) のシミュレーションモデルに改善が必要
 - 放射源が点源ではなく, **水平方向に広がり**をもつ?
 - 加速電子は単色ではなく **連続的なエネルギー分布**?
- モデルの拡張=パラメータが増加 → 解の絞り込みが困難に
- いずれかのパラメータを観測的に決定することが重要
 - … 例えば**高度の直接測定** (→ 奥田+次講演)

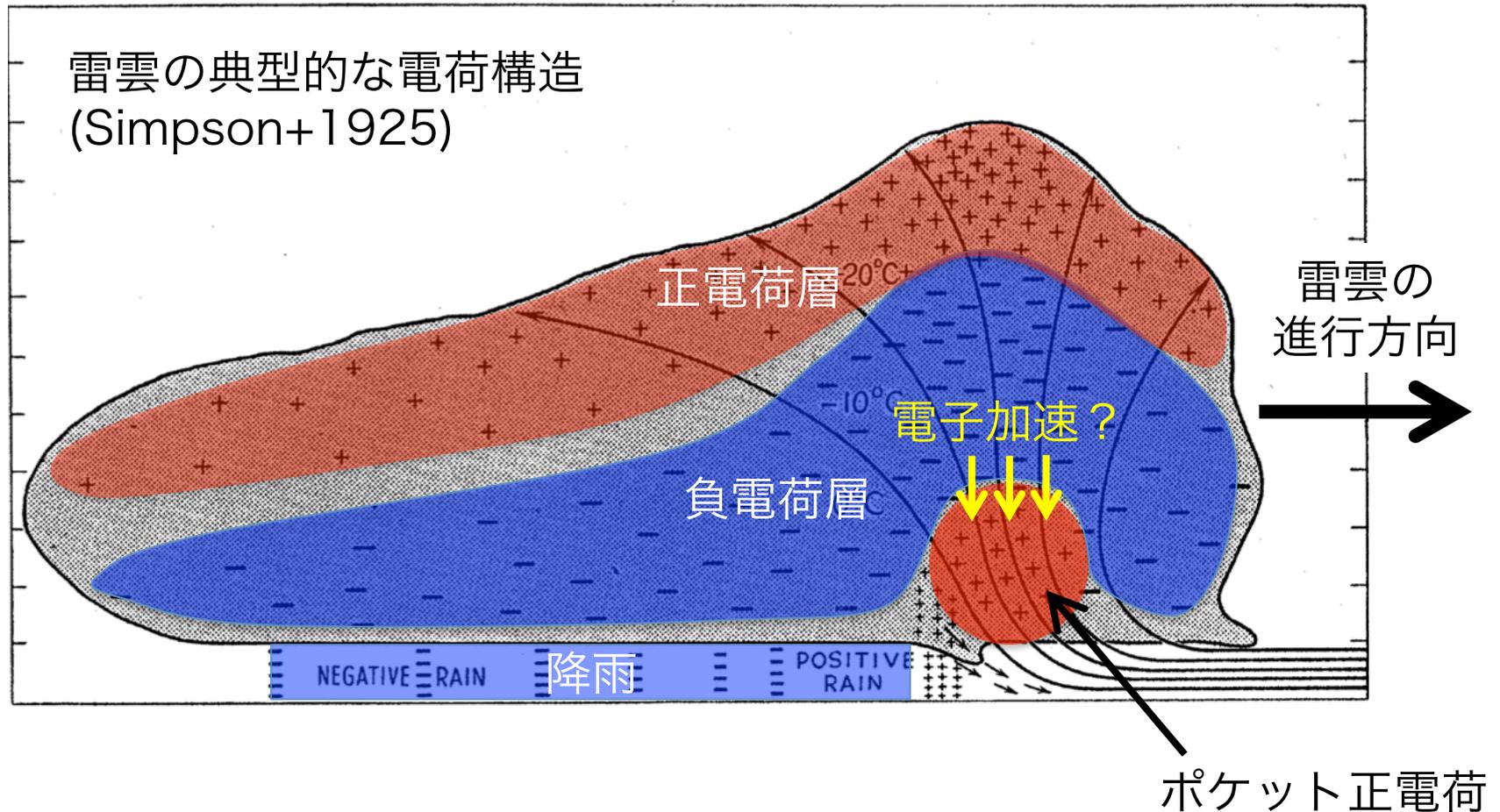
7. 結論

- Geant4 を使って、「単色電子が一つの点源から地上に向かって放射されている」という最もシンプルな仮定のもとで雷雲ガンマ線を再現したところ、地上観測と同様にべき関数型のガンマ線スペクトルが得られた。
- 観測事実である「明るい時間帯ほどスペクトルが硬くなる」という制約から、電子が鉛直方向に強く指向性をもつことが示唆され、雷雲ガンマ線の起源が電場加速された電子であることを支持した。
- 2015/1/24 に検出されたロングバーストで得られた明るさとべきの相関を再現できるパラメータを探すと、電子のエネルギー 10 MeV、高度 500 m、ビーム開口角 20° のときに、観測データのスペクトル変化を説明できた。
- 一方、シミュレーションで得られた照射域サイズは FWHM ~ 400 m で、観測データから推定された FWHM ~ 800 m の約半分となり、現状のモデルではスペクトルと照射域サイズを同時に説明することはできなかった。
- 両者を同時に説明するためには、放射源を水平方向に広げたり、加速電子にエネルギー分布をもたせるなど、モデルの拡張が必要である。

Appendix

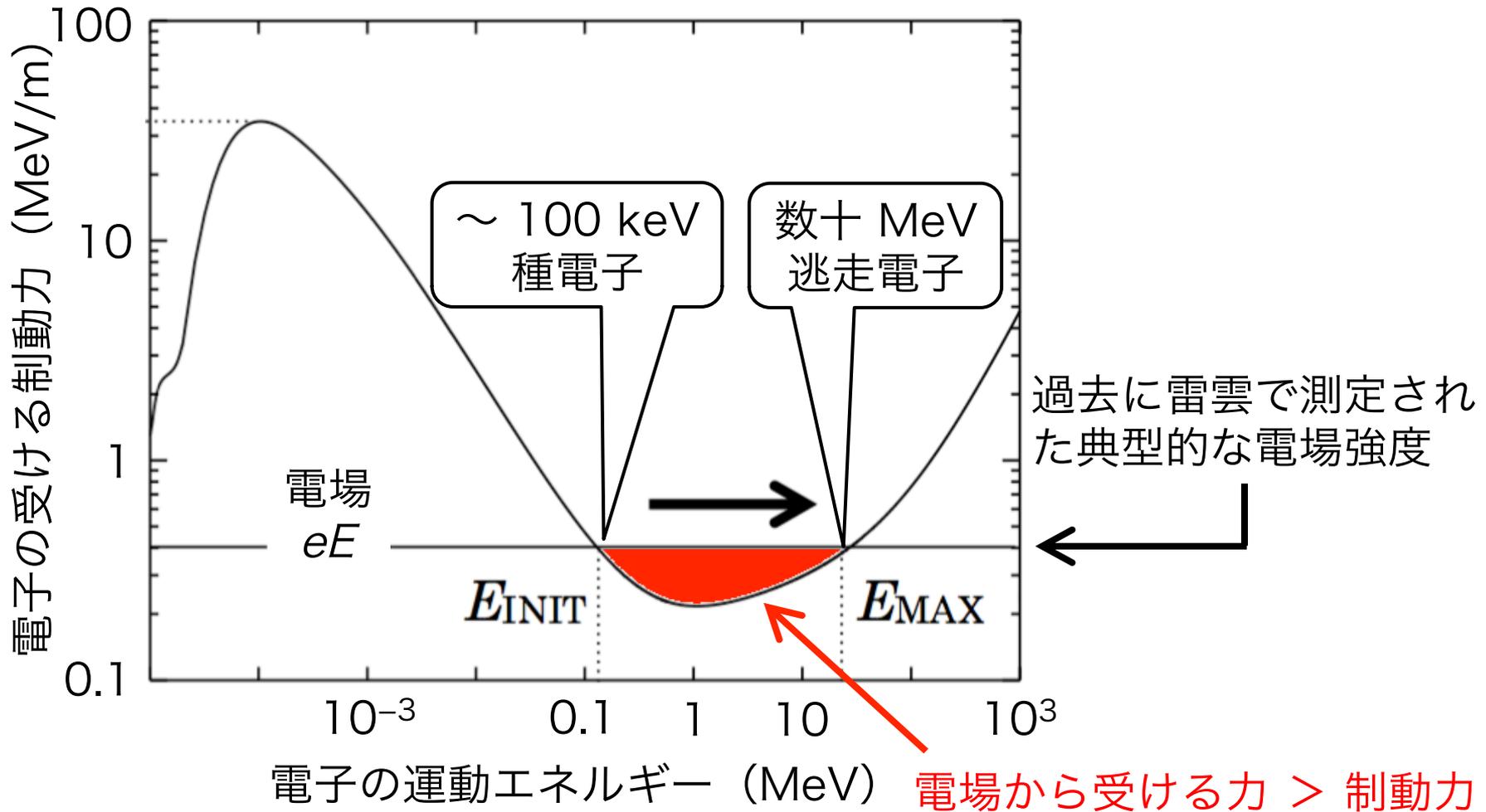
雷雲内の電荷構造とポケット正電荷

- 放射源の水平位置はポケット正電荷と対応か？（楳本+前講演）



雷雲電場による電子加速

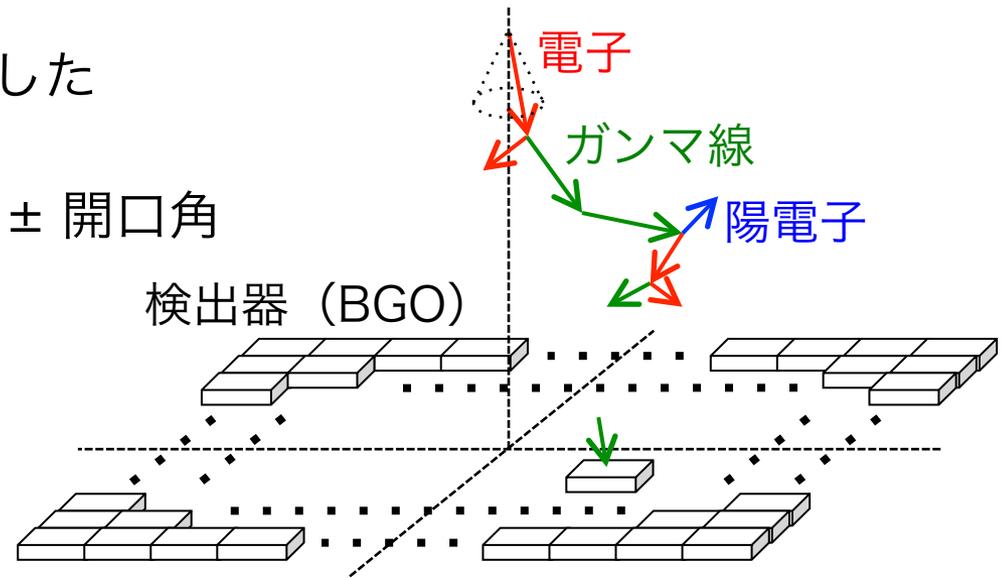
- ~ 100 keV の種電子と数百 keV/m の電場があれば、電子は数十 MeV まで加速されうる



Geant4 の設定

- World Volume : 2000 m 四方, 高さ 1500 m の直方体
- 地表に 10 cm 四方, 厚さ 2.5 cm の BGO シンチレータを 4 億個配置
- 空間は密度 1.205 g/cm^{-3} の一様大気で満たされている
- Physics List は FTFP_BERT_LIV (標準的な電磁相互作用を網羅)

- 単一エネルギーの電子を, 指定した高度から下向きに発生
- 粒子の発生方向は, 鉛直下向き \pm 開口角
- 開口角の範囲内では粒子は球対称に発生

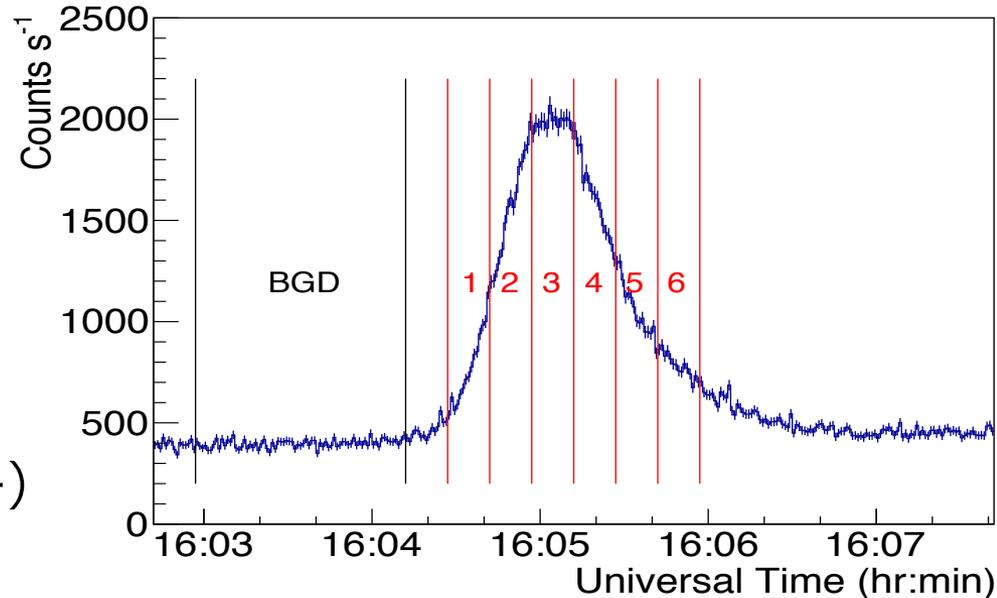


- 各検出器で入射粒子が失ったエネルギーを, 検出エネルギーとする
- 検出器を突き抜けた粒子・隣接する検出器へ入った粒子・検出器から再び大気中へ戻った粒子は消滅させ, 以後追跡しない

2015/1/24 のロングバーストの基礎情報

以下の情報は全て、榎本博士論文による。

- 継続時間 44.2 ± 0.6 sec
(ガウシアンフィットの FWHM で定義)
- 風速 17 ± 1.5 m (気象レーダー)
→ 東西サイズ 751 ± 67 m



- 南北サイズは、モニタリングポストのピーク分布から、 829 ± 12 m
- 同じくモニタリングポストのピーク分布から、検出器と照射域中心の最接近距離は 49 ± 6 m で、ほぼ真上を通っている