

**GROWTH実験：
コリメータを用いた
雷雲由来ガンマ線の角度分布の測定**

東大, 理研^A, 京大^B

奥田和史

中澤知洋, 古田禄大, 和田有希, 湯浅孝行^A, 榎戸輝揚^B

鈴木寛大, 榎本大悟, 土屋晴文^A, 牧島一夫^A

1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

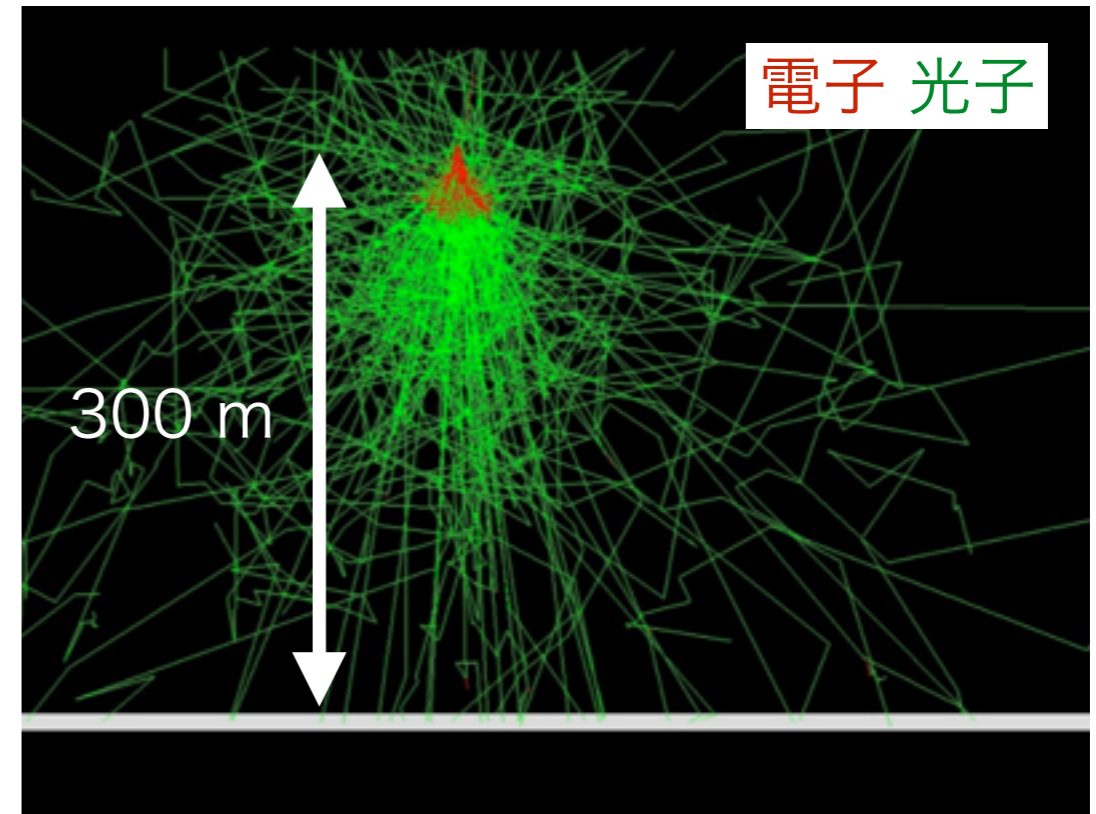
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

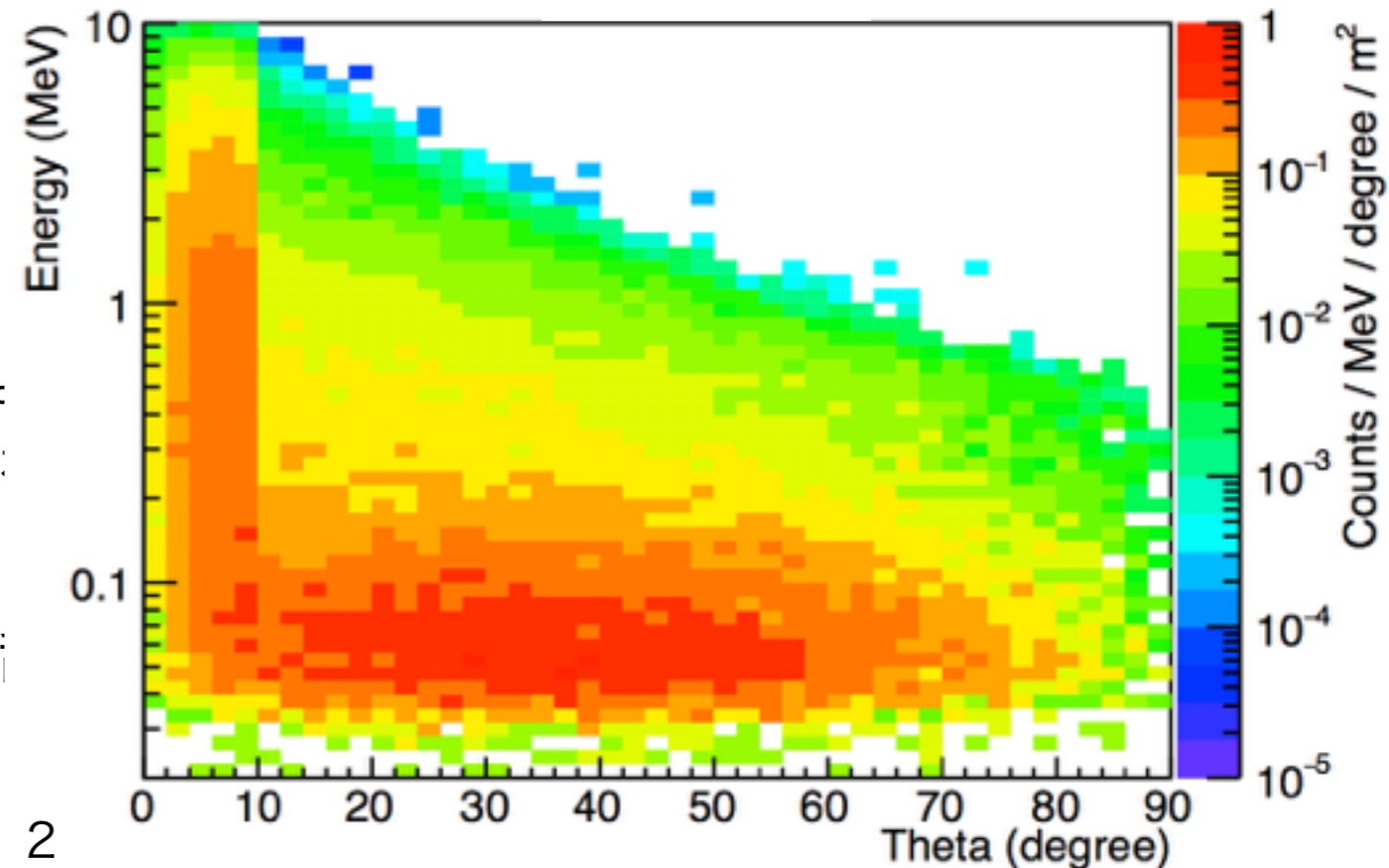
- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



$r = 0-50$ m



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

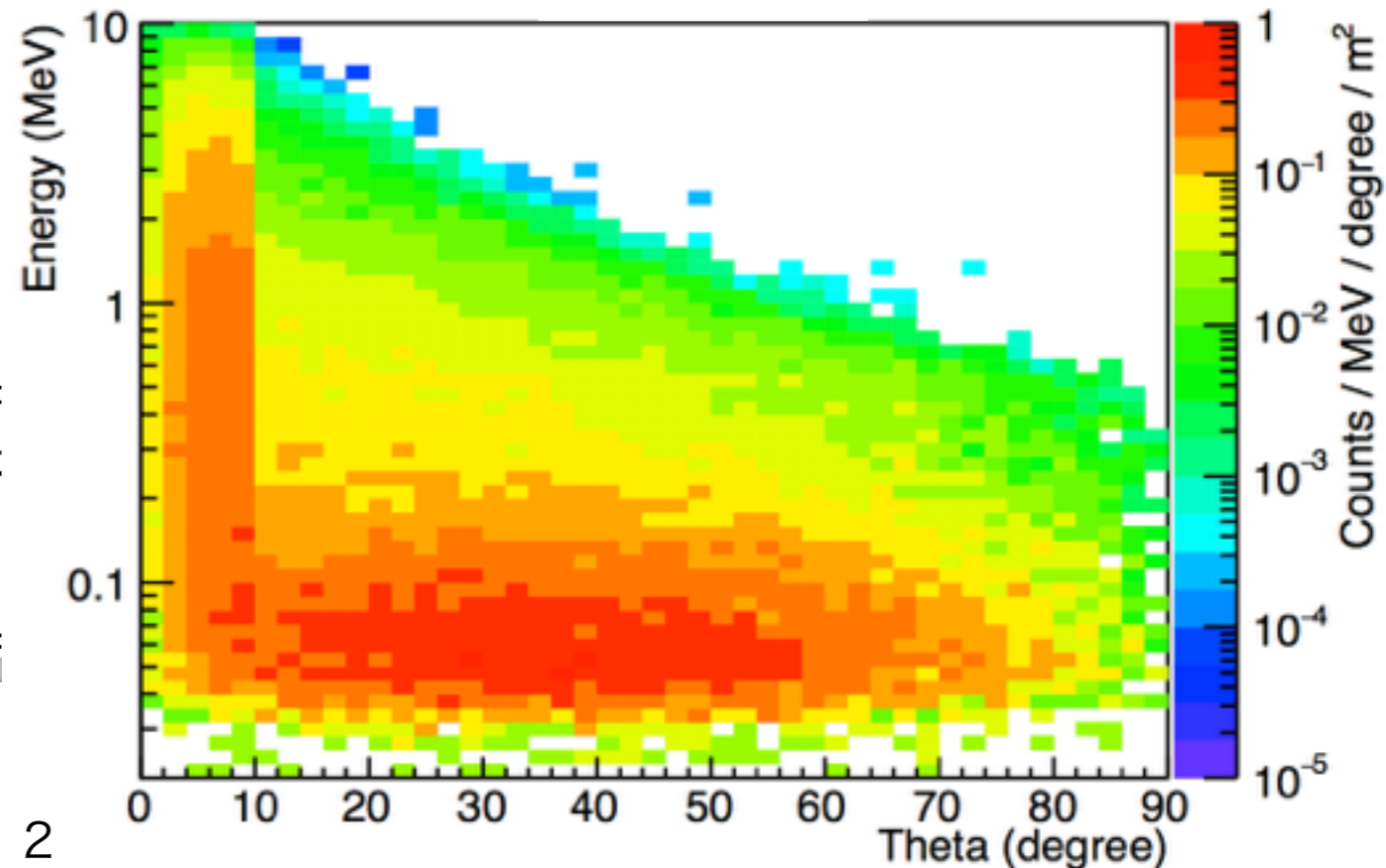
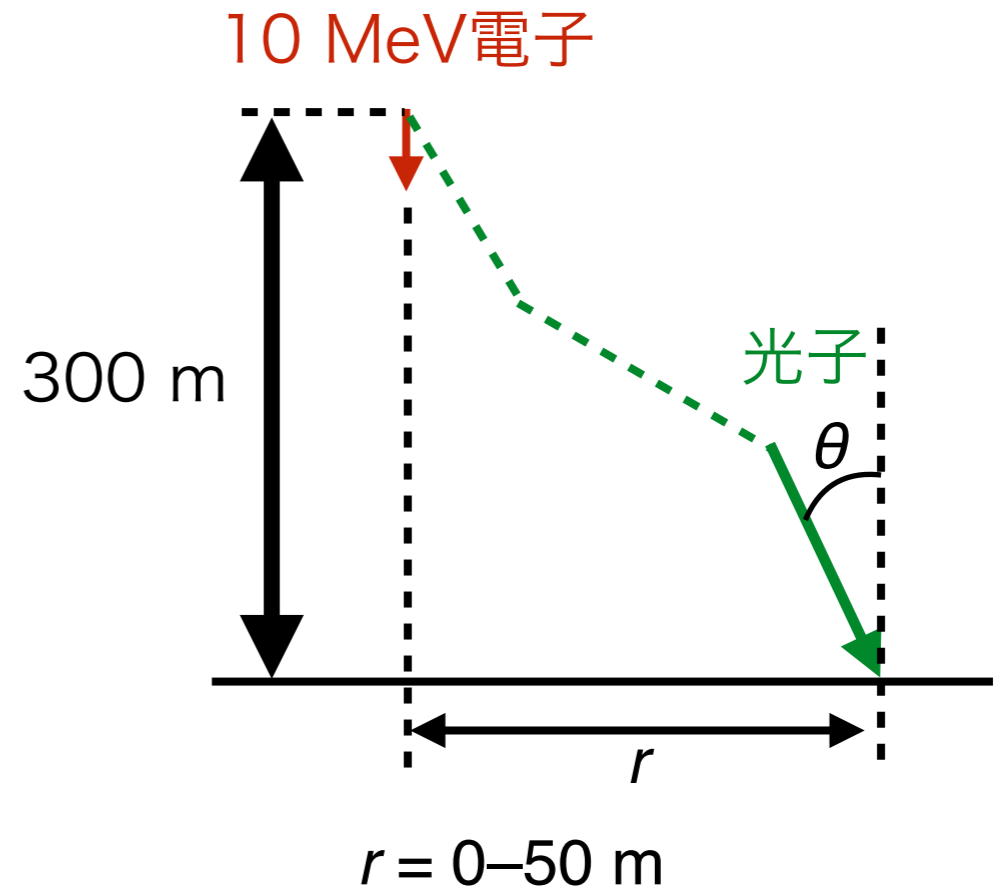
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

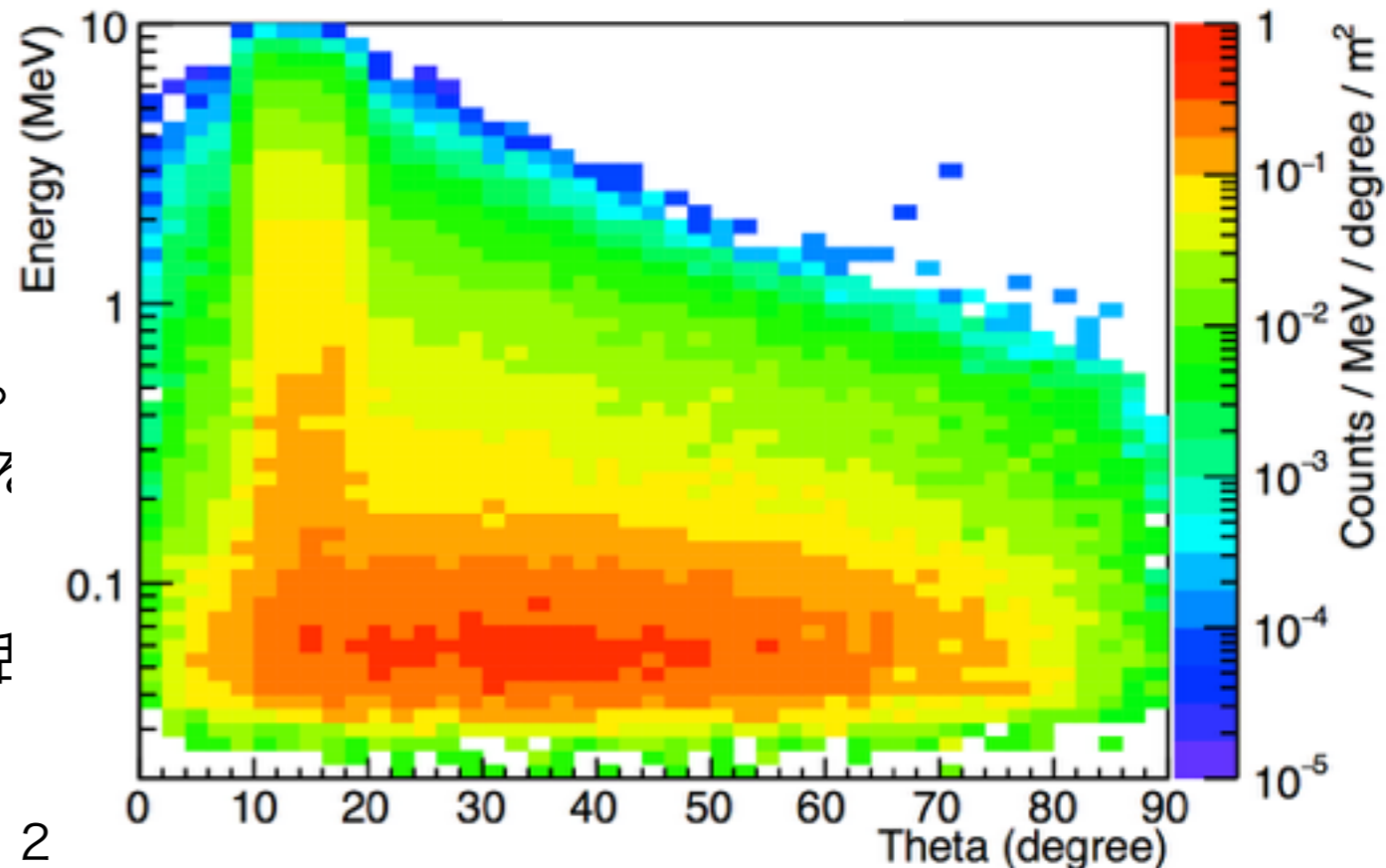
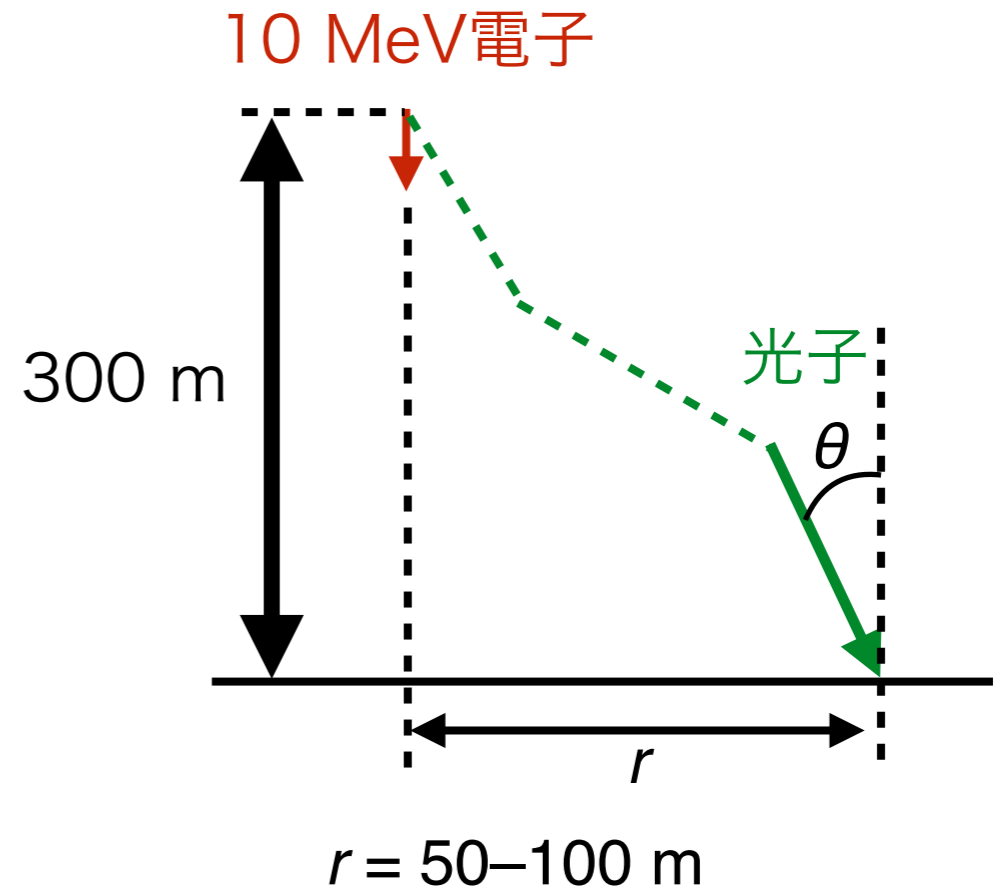
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

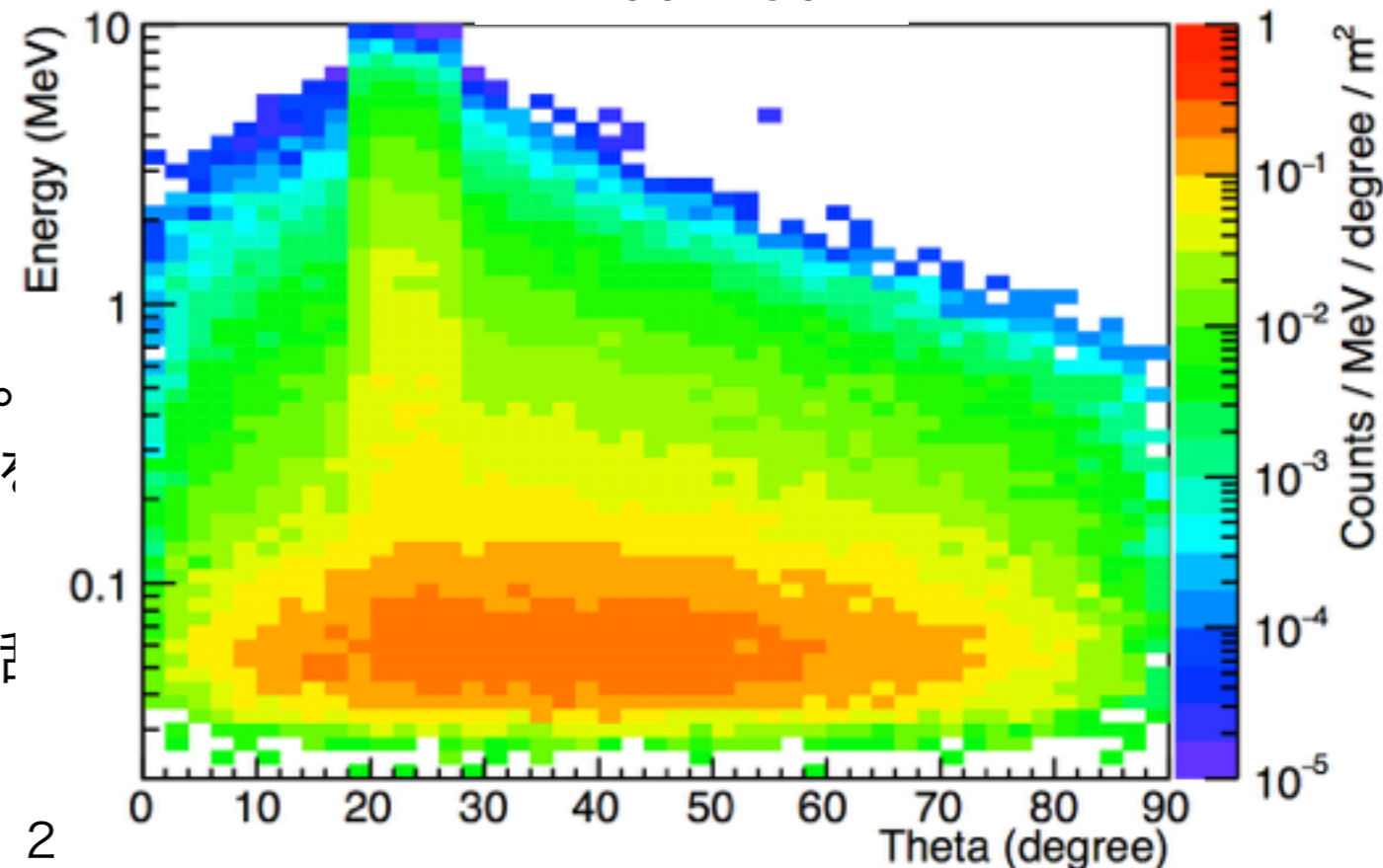
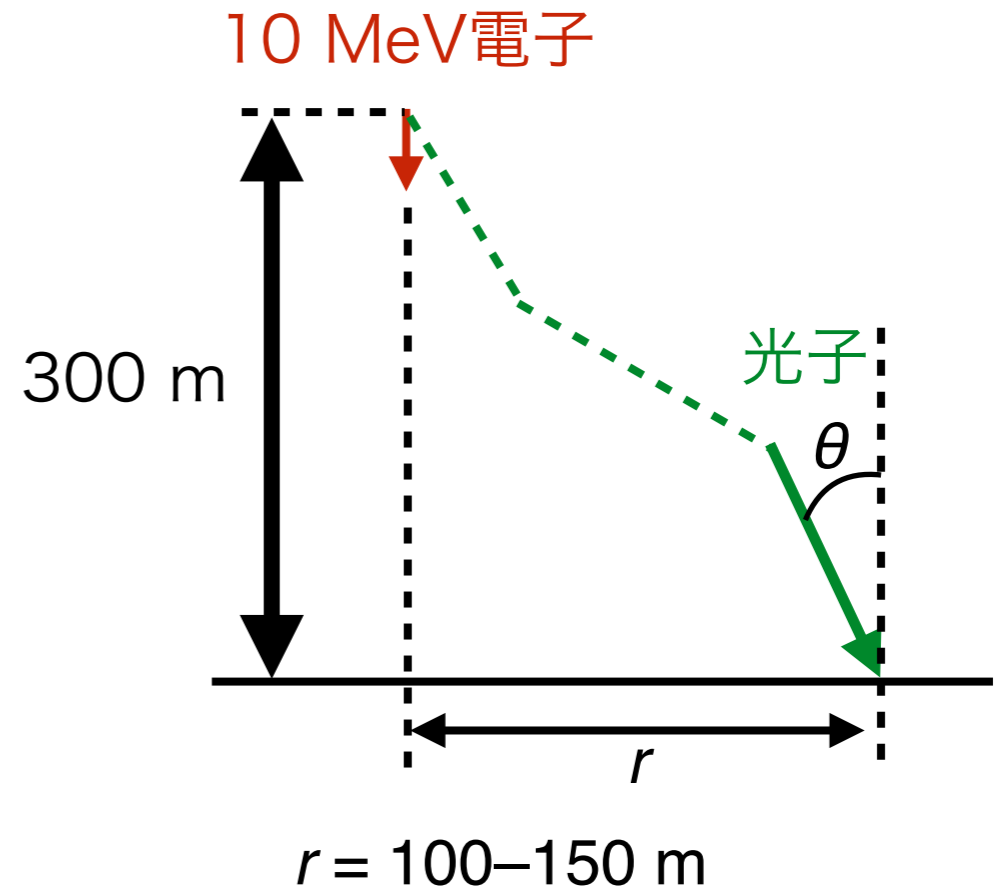
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

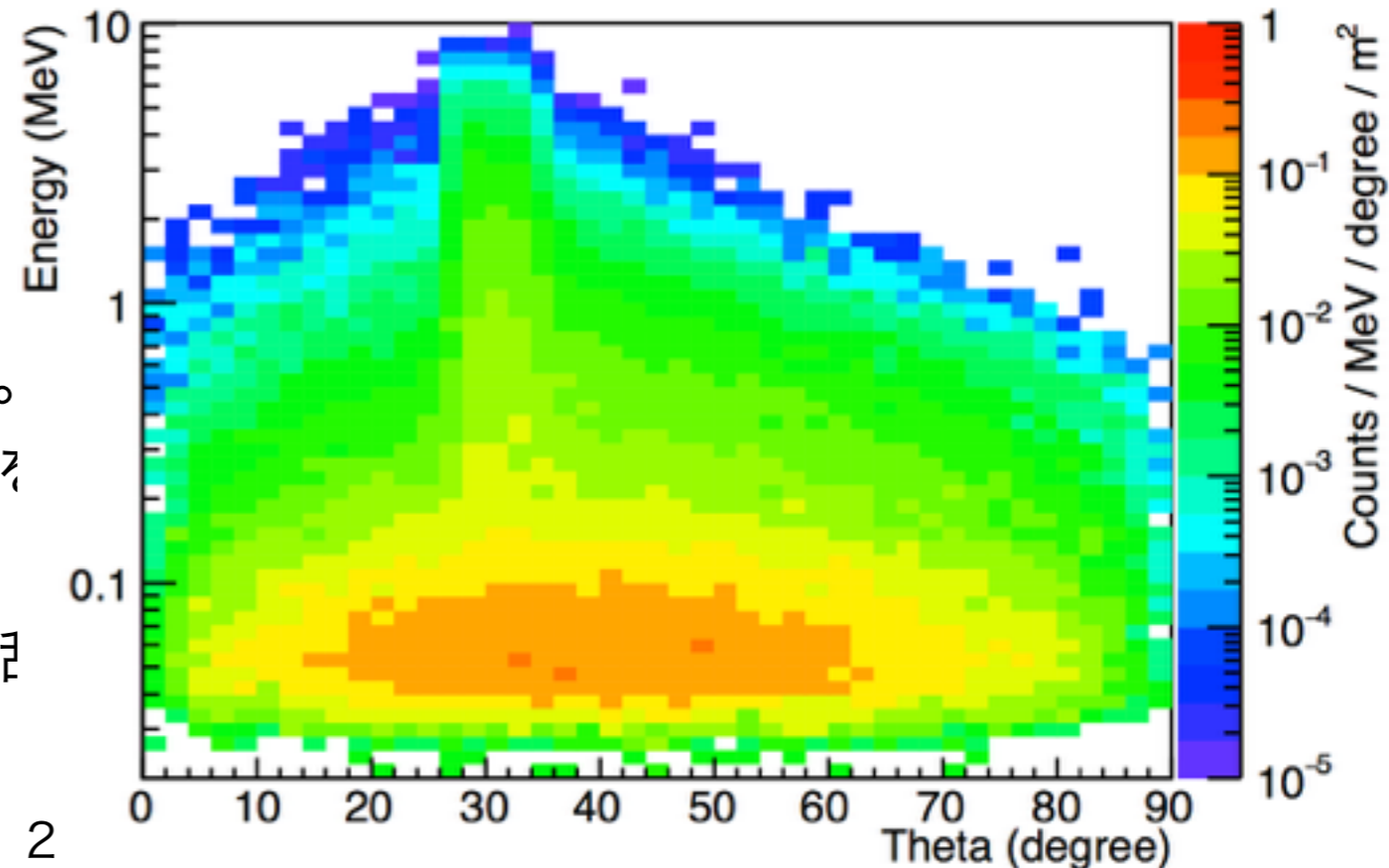
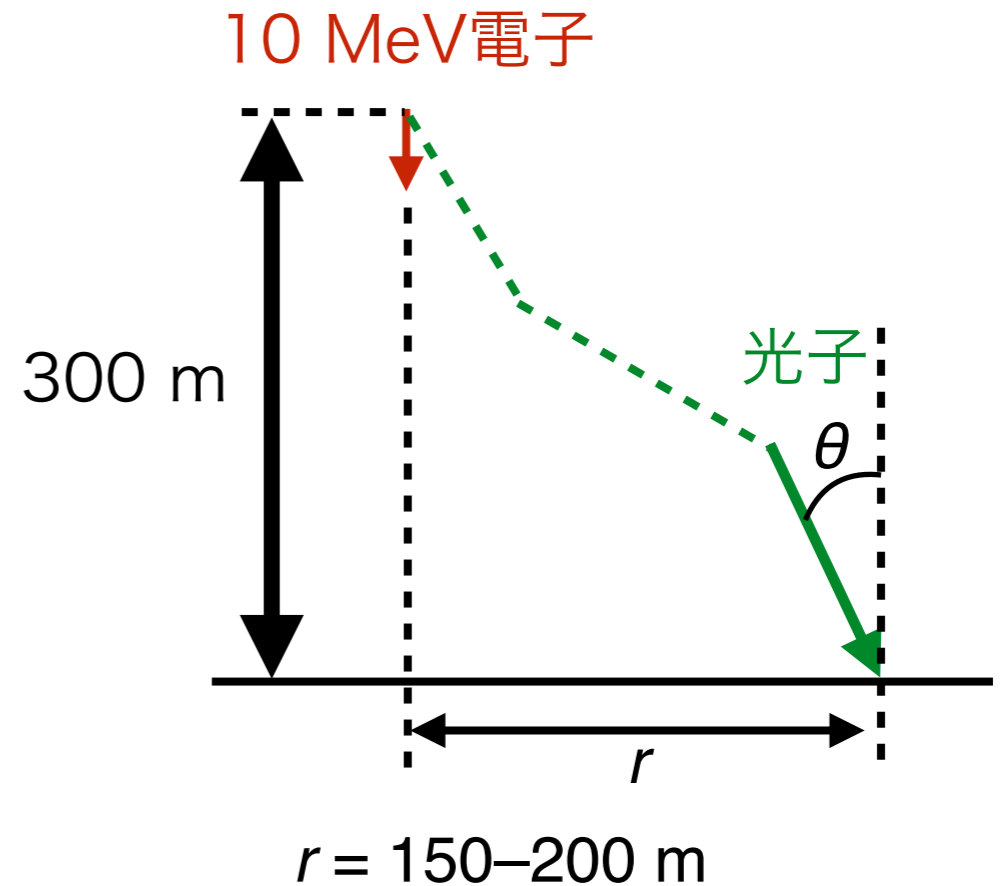
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

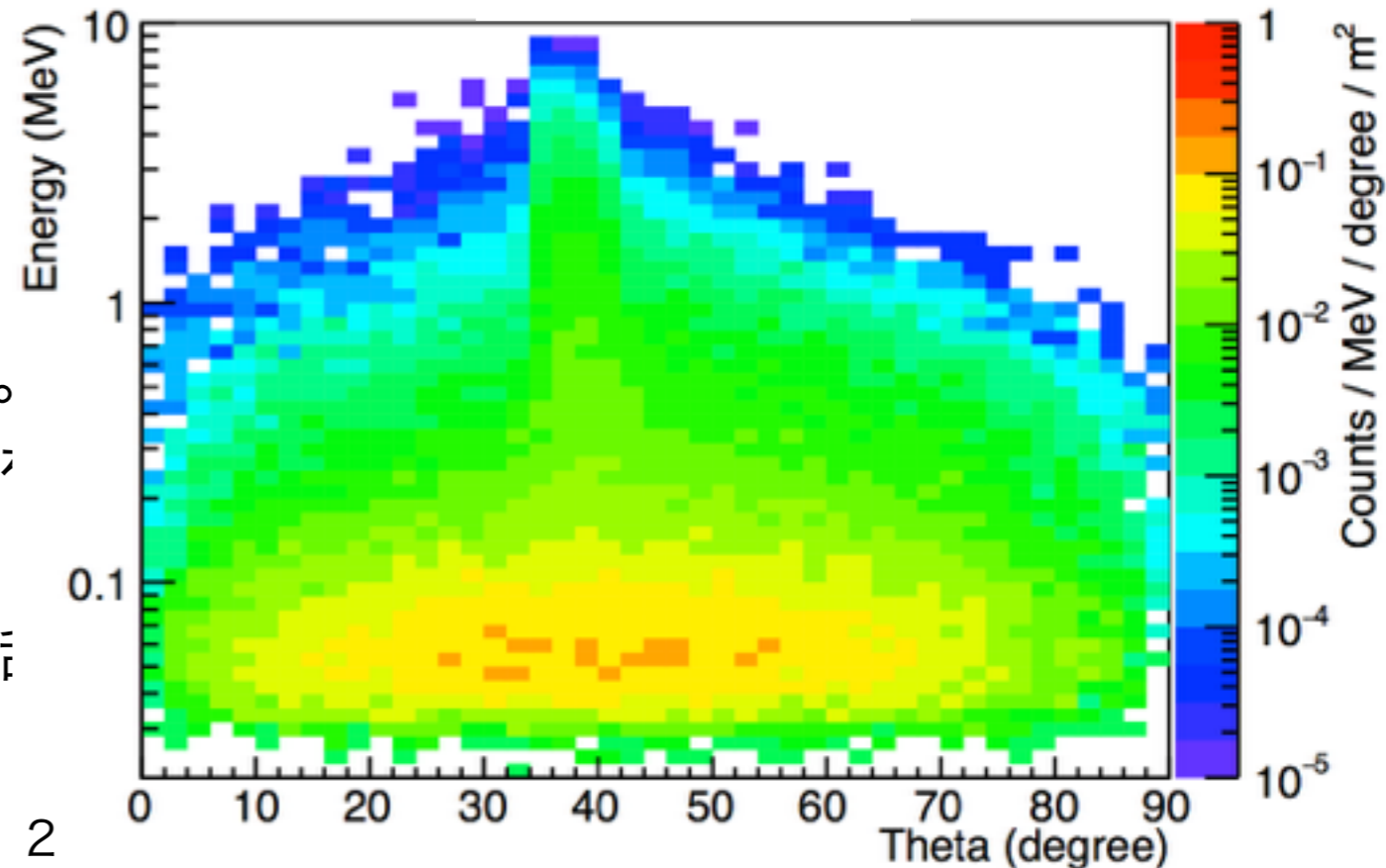
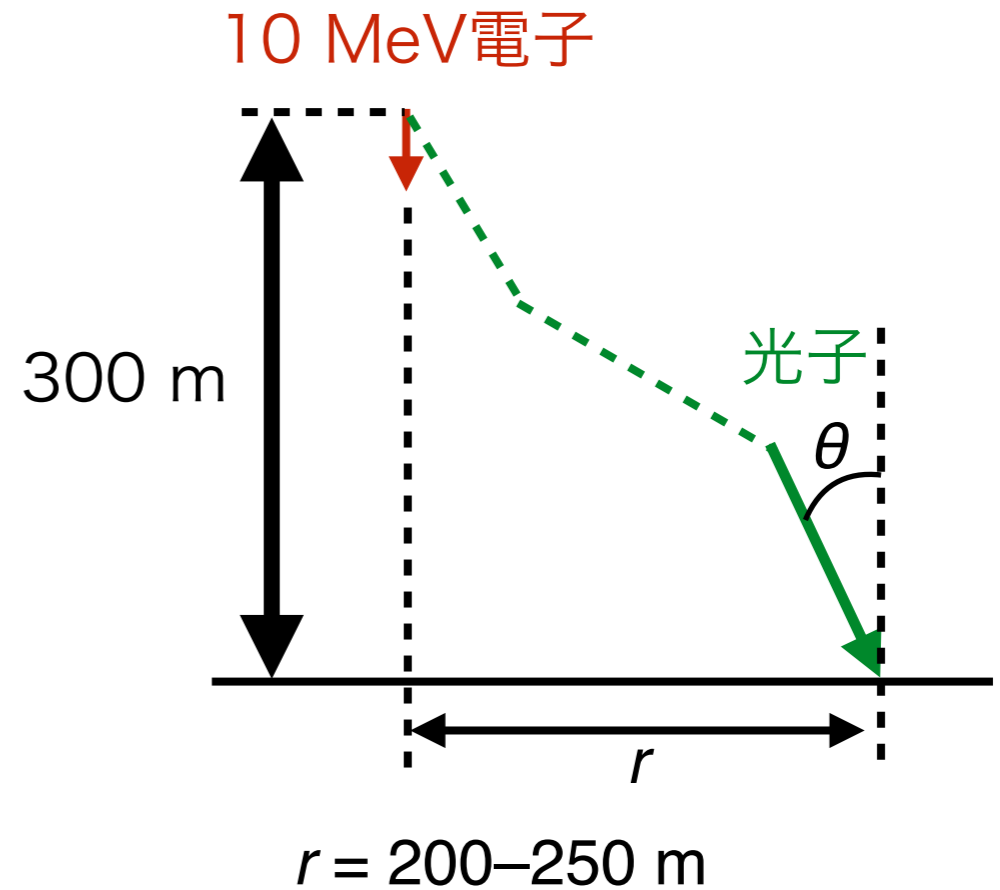
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

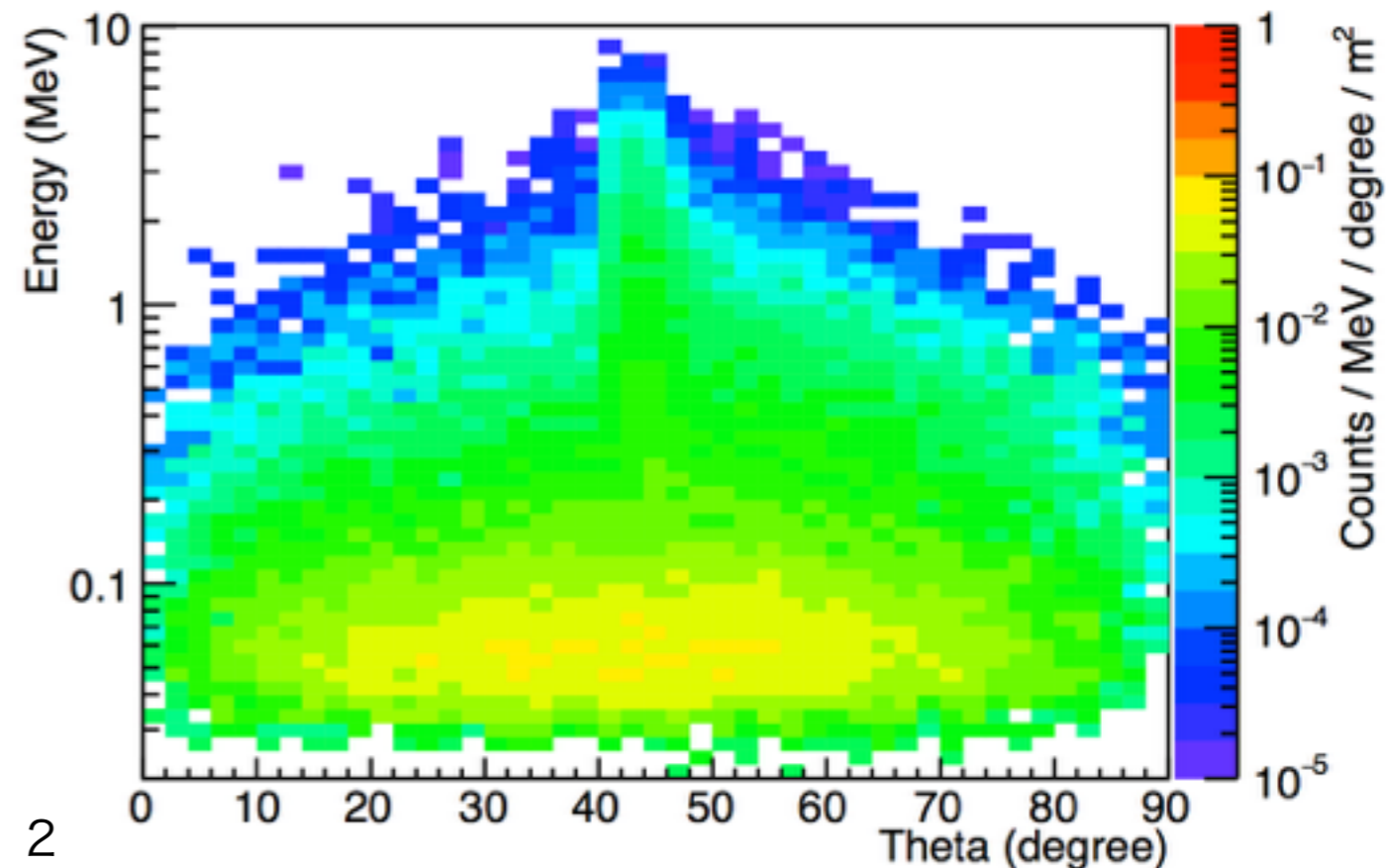
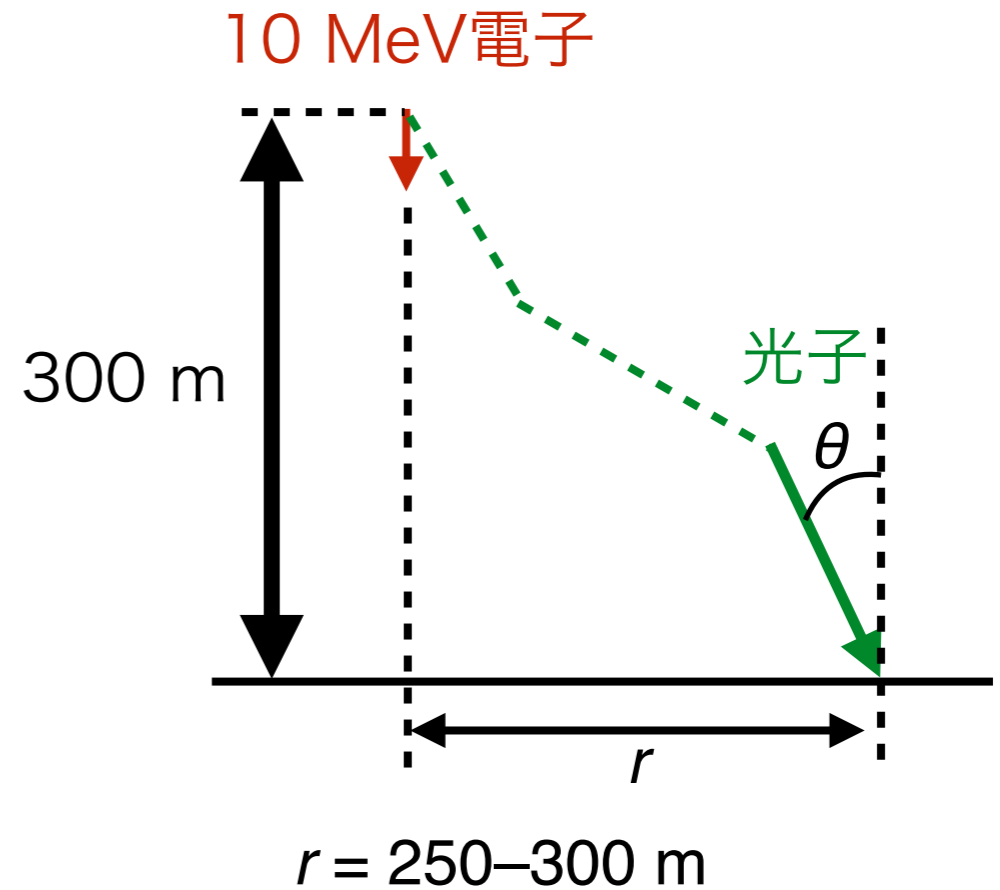
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

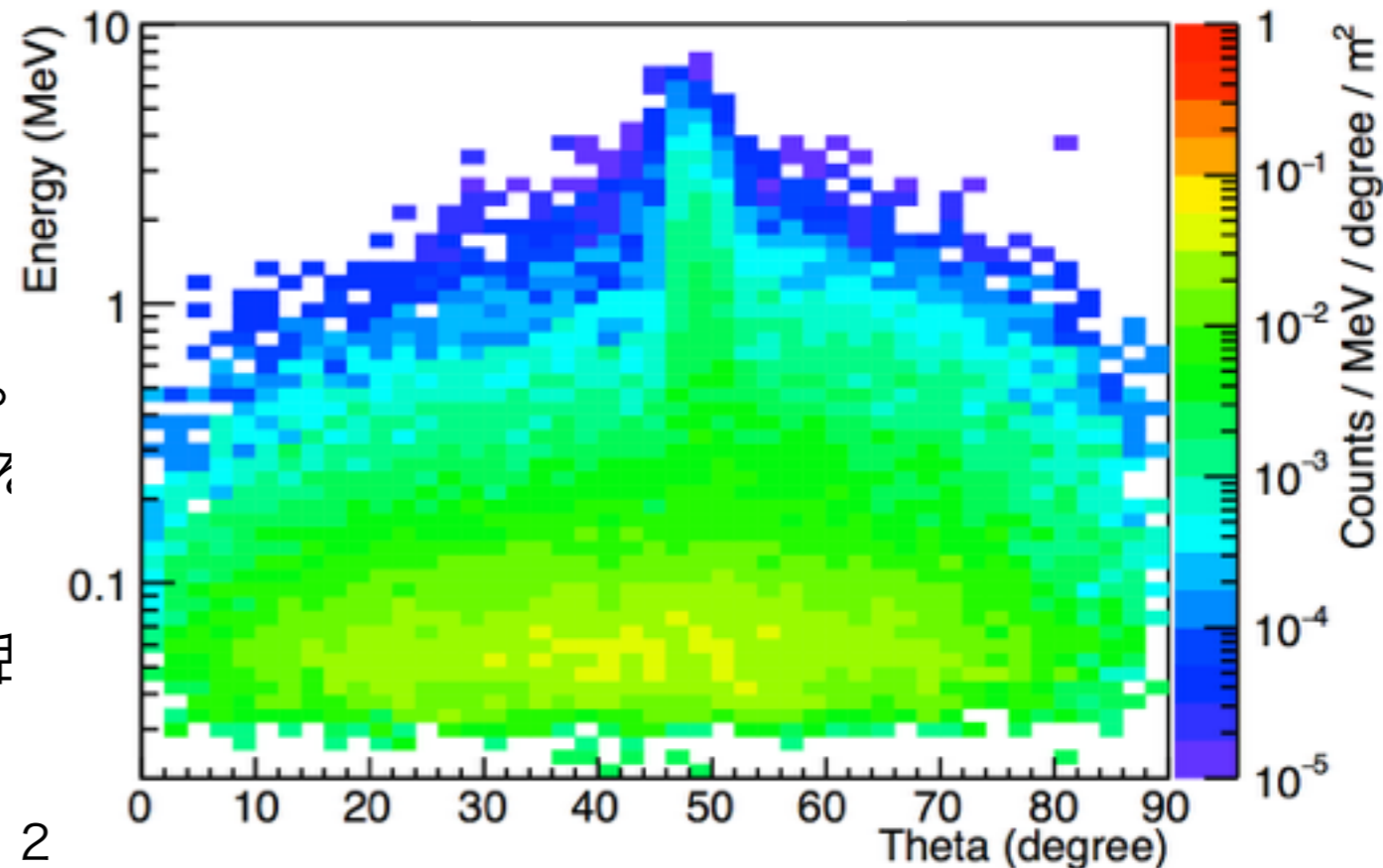
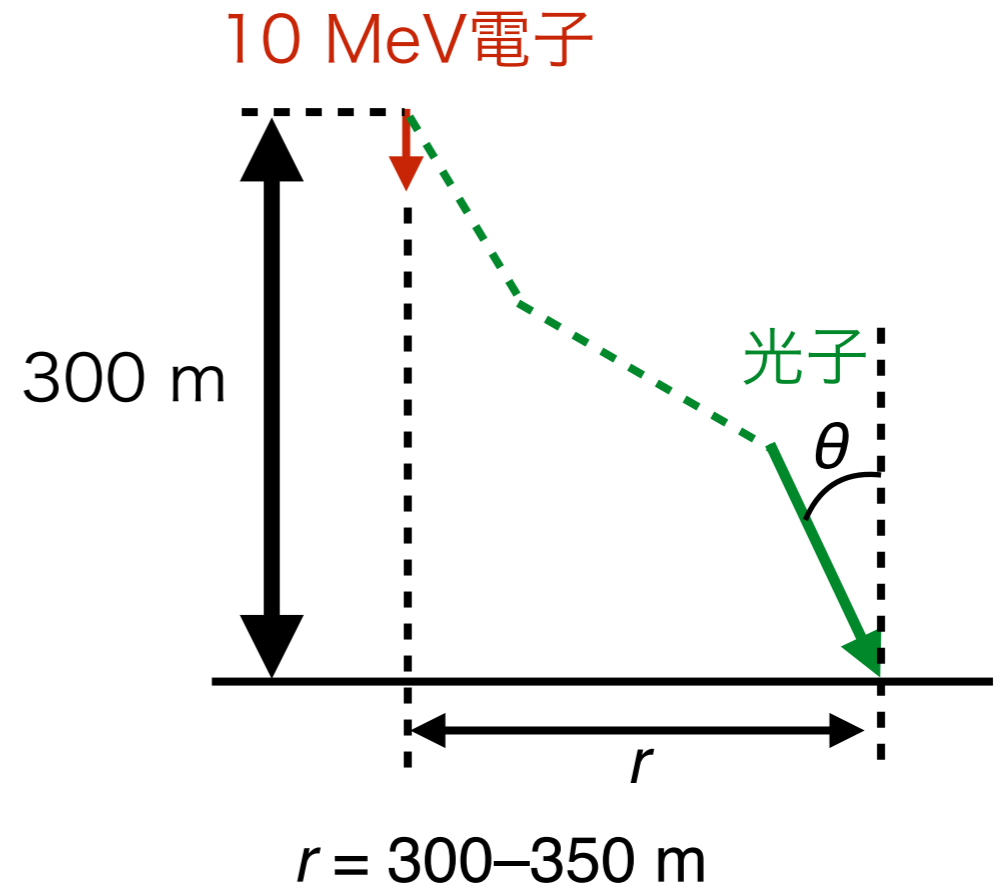
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

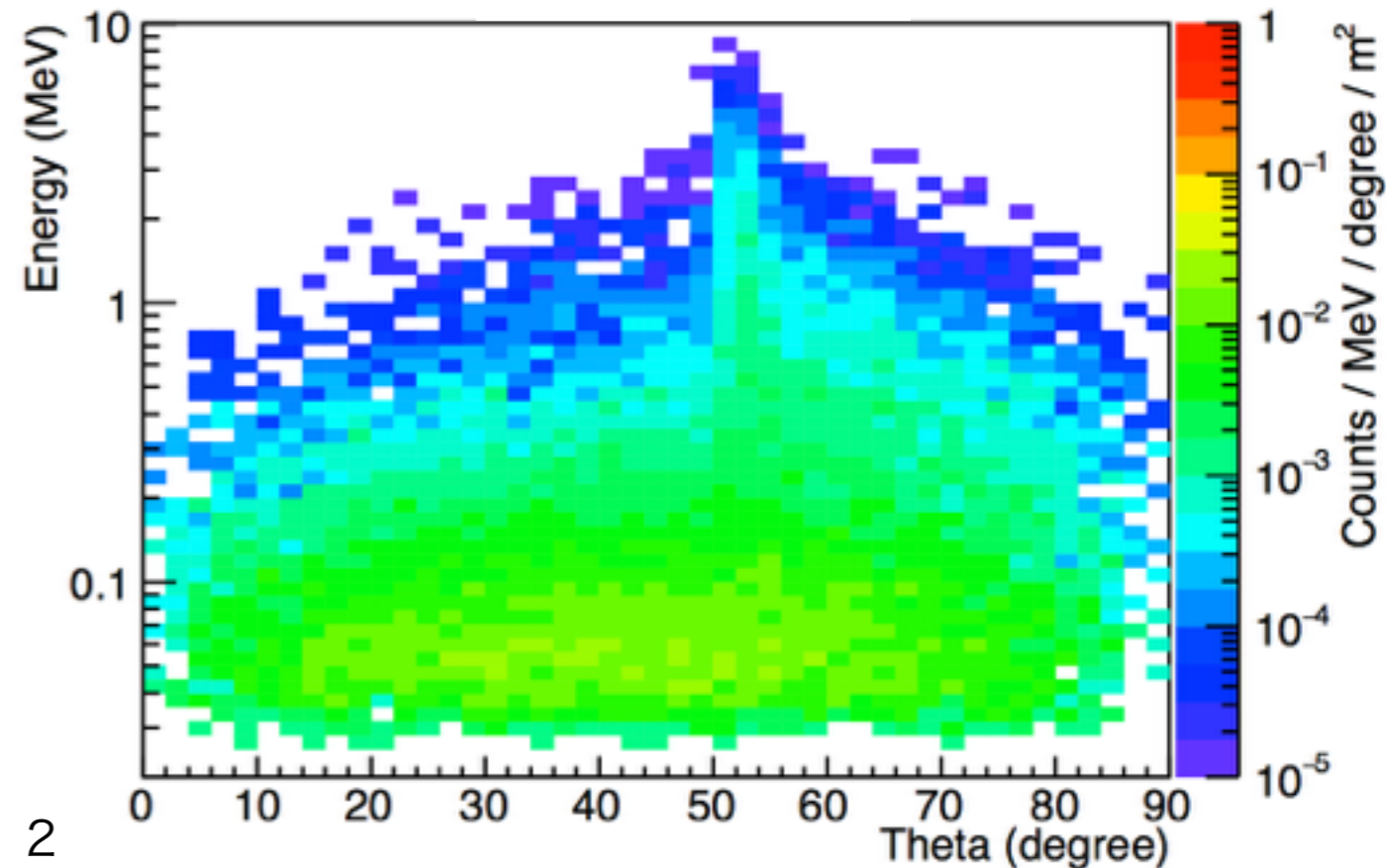
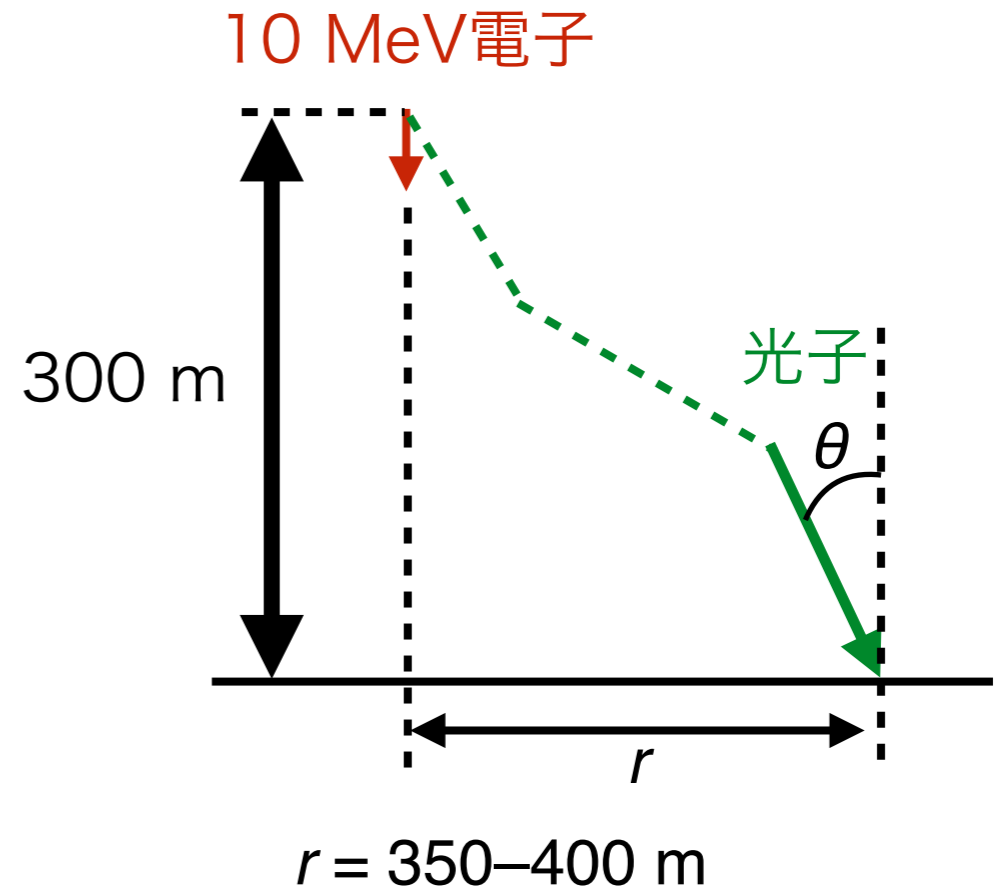
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

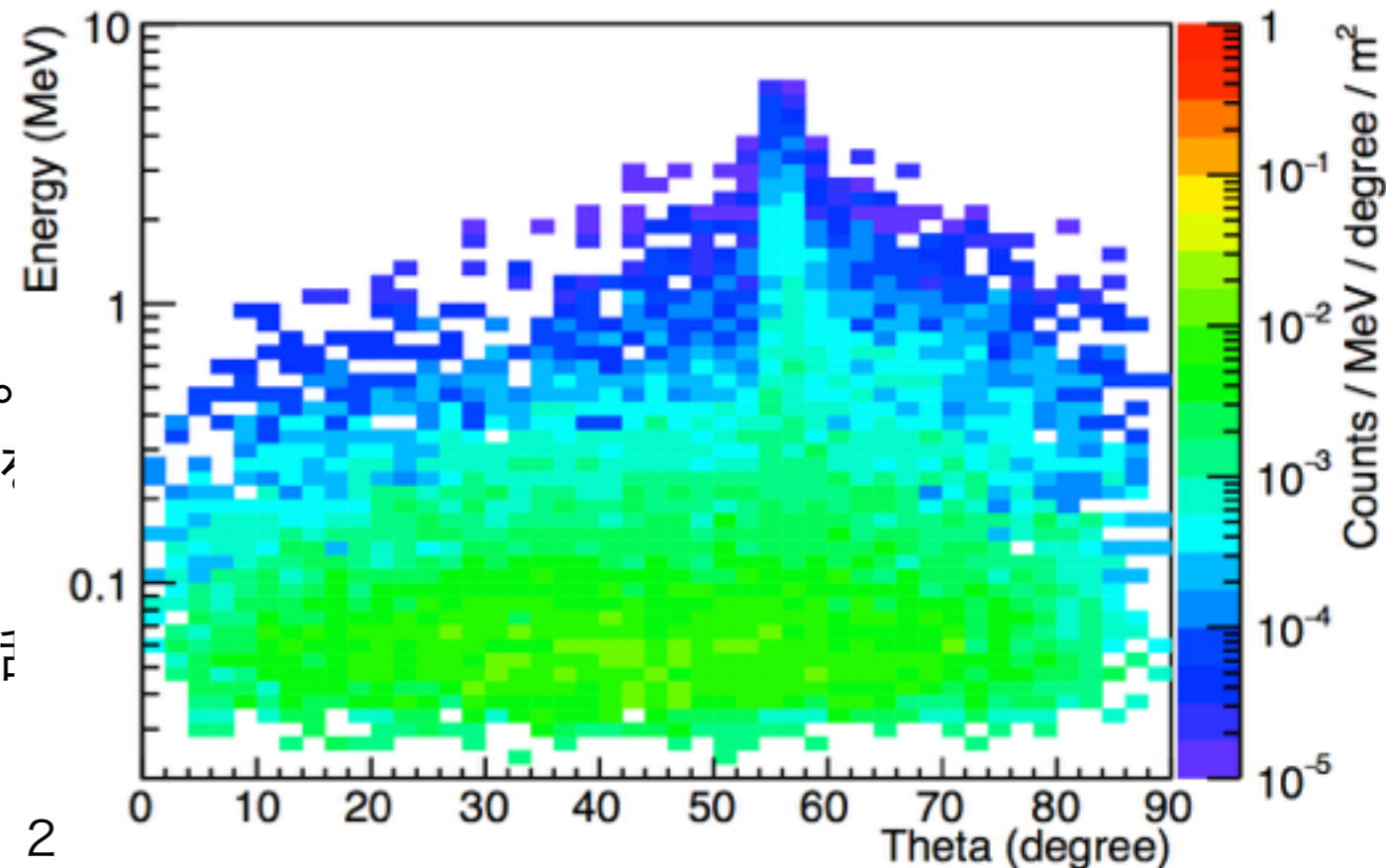
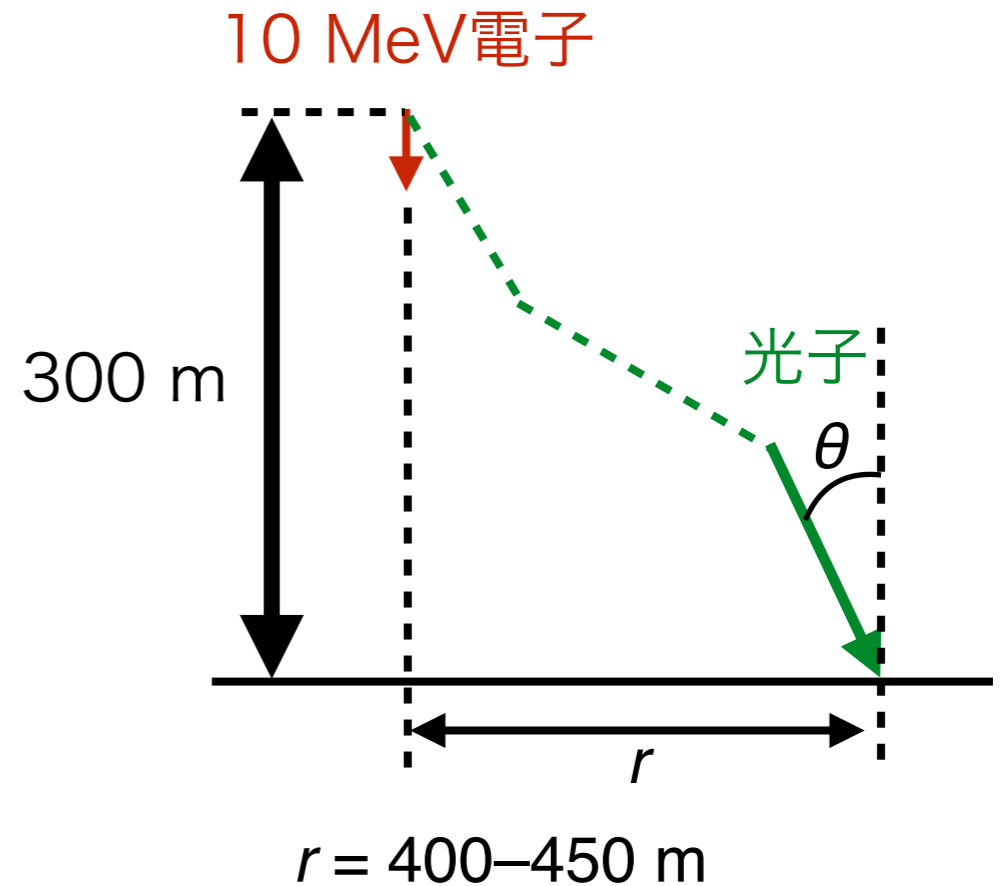
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報が失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



1. 雷雲由来のガンマ線

雷雲由来ガンマ線の未解決問題

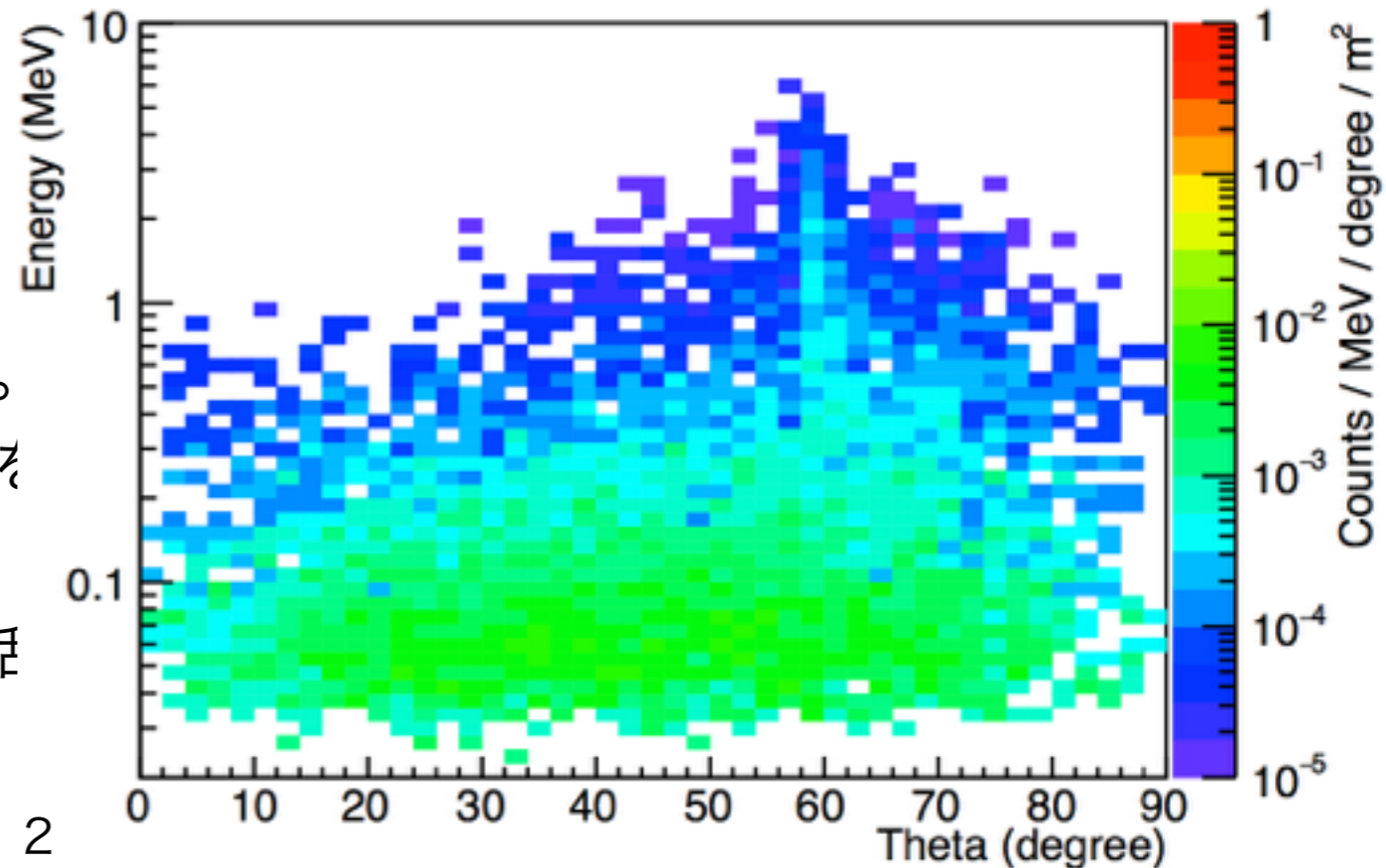
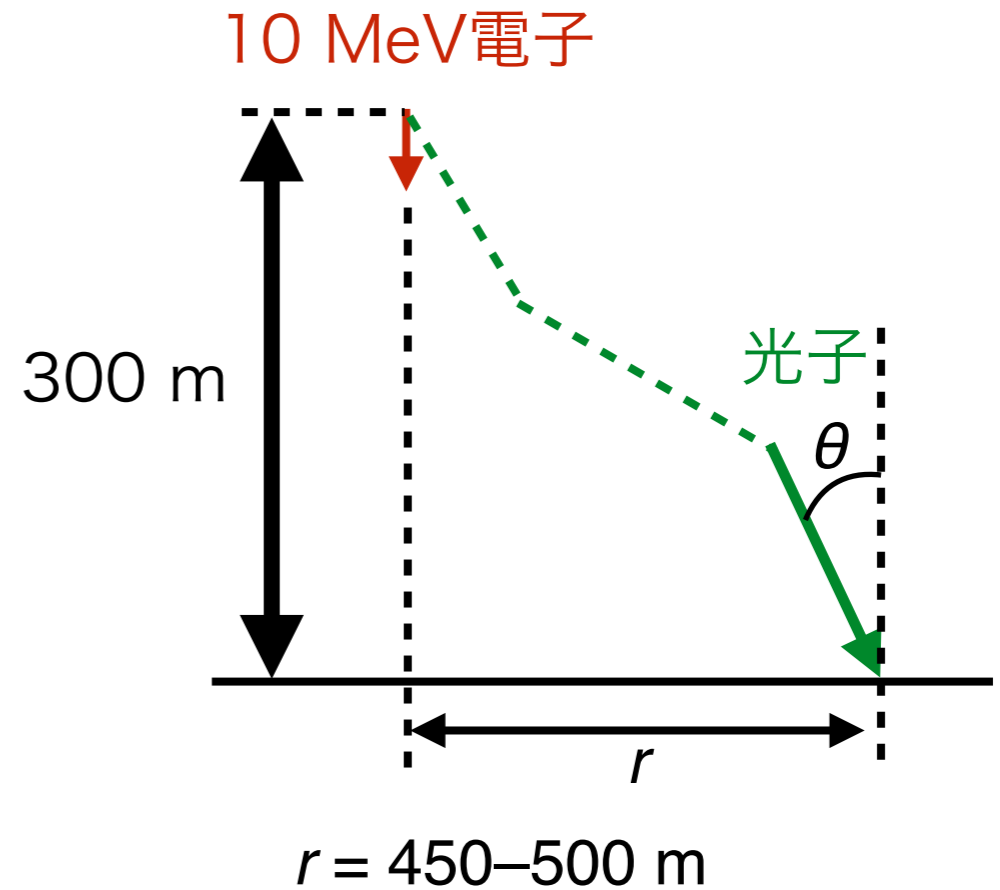
- 放射源での明るさ、スペクトル。
 - 放射源高度・方向がわかれば地上データから逆解きできる。
 - 加速電子のスペクトルを推定できる。

本実験の目的：放射源高度の三角測量

- ガンマ線の入射角に感度を持つ検出器を設計・製作。
- 放射源の方向を測定。気象レーダーで雲の速度がわかれば放射源の高度が求まる。

ガンマ線の大気散乱シミュレーション

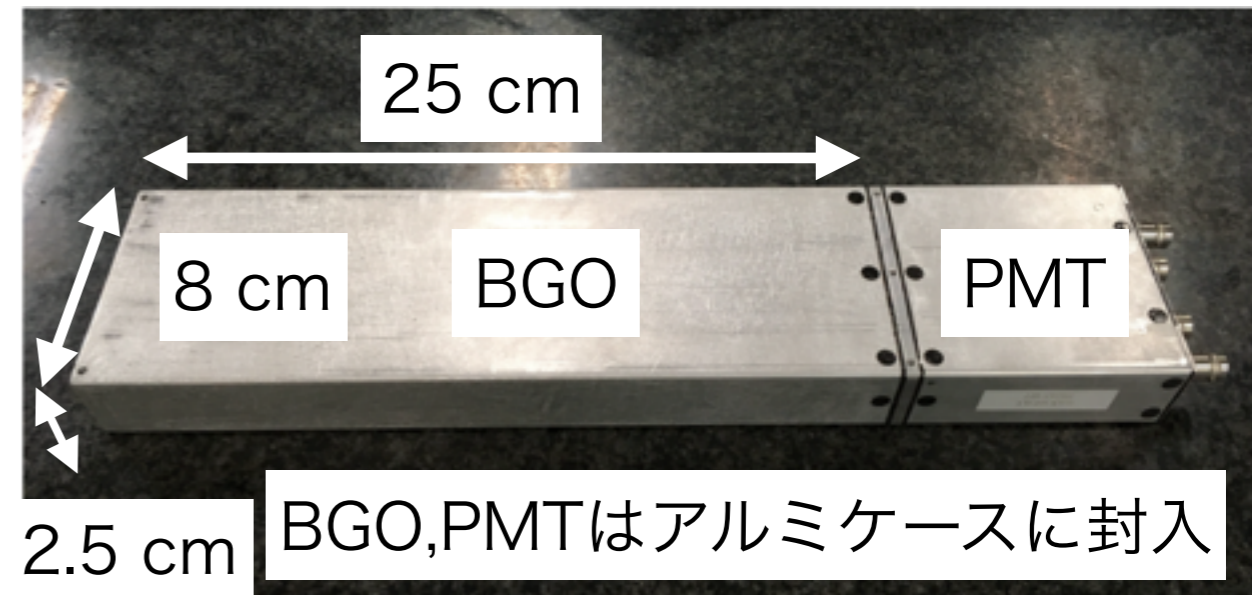
- 高度300 mから10 MeV電子を真下に照射。
- 数百 keV以下は地上では放射源の角度情報を失う。
- 3 MeV以上は大部分の光子が放射源から散乱を受けず、まっすぐに地上に到達。



2. 観測装置

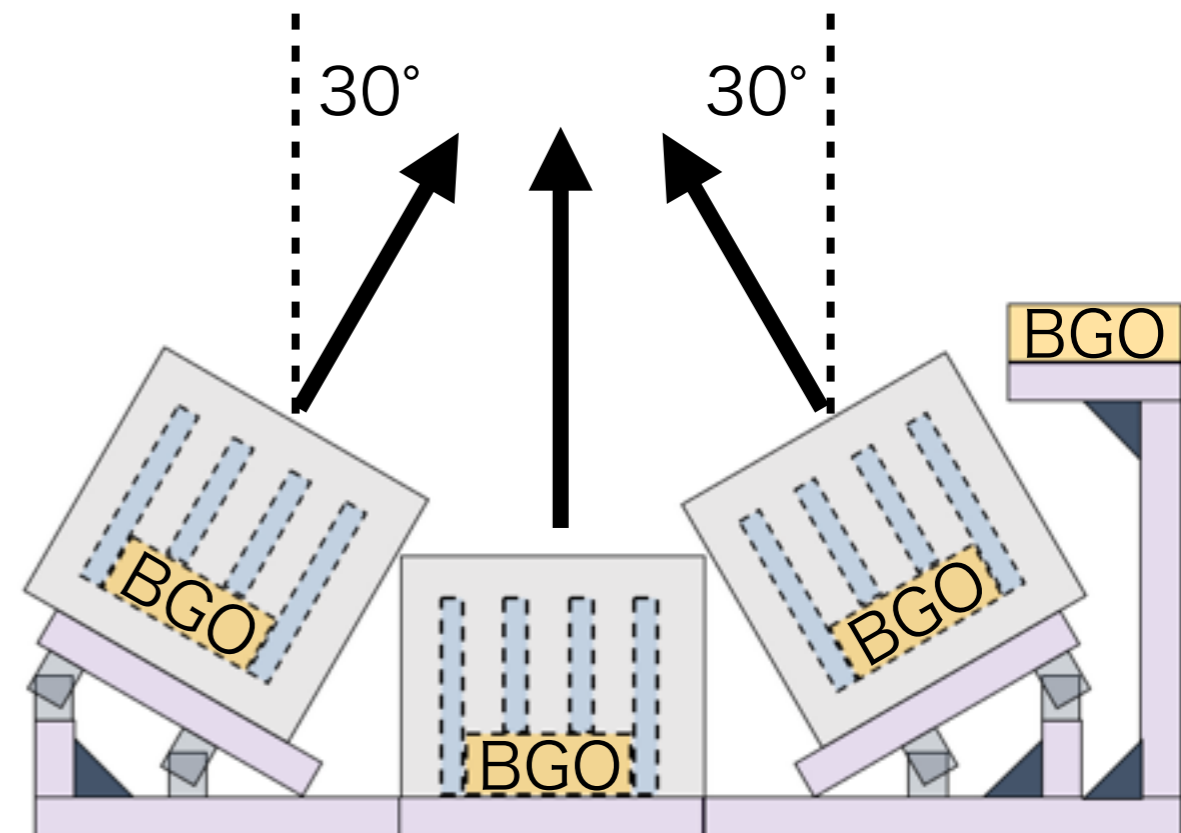
検出器の概要

- 主検出部はBGOシンチレータ。
- BGOに鉛のスリットコリメータを設けてFWHMで 30° の角度分解能。
- コリメータ検出器3台(真上、 $\pm 30^\circ$ 方向) + 参照用BGO検出器1台で1セット。



放射源方向の測定原理

- 参照用BGOとコリメータ検出器の線量の比をとることで、地上に届いたガンマ線のうちコリメータの視線方向から来る割合を求める。
- この割合がピークになる時間帯に、放射源はコリメータの視線方向に存在。



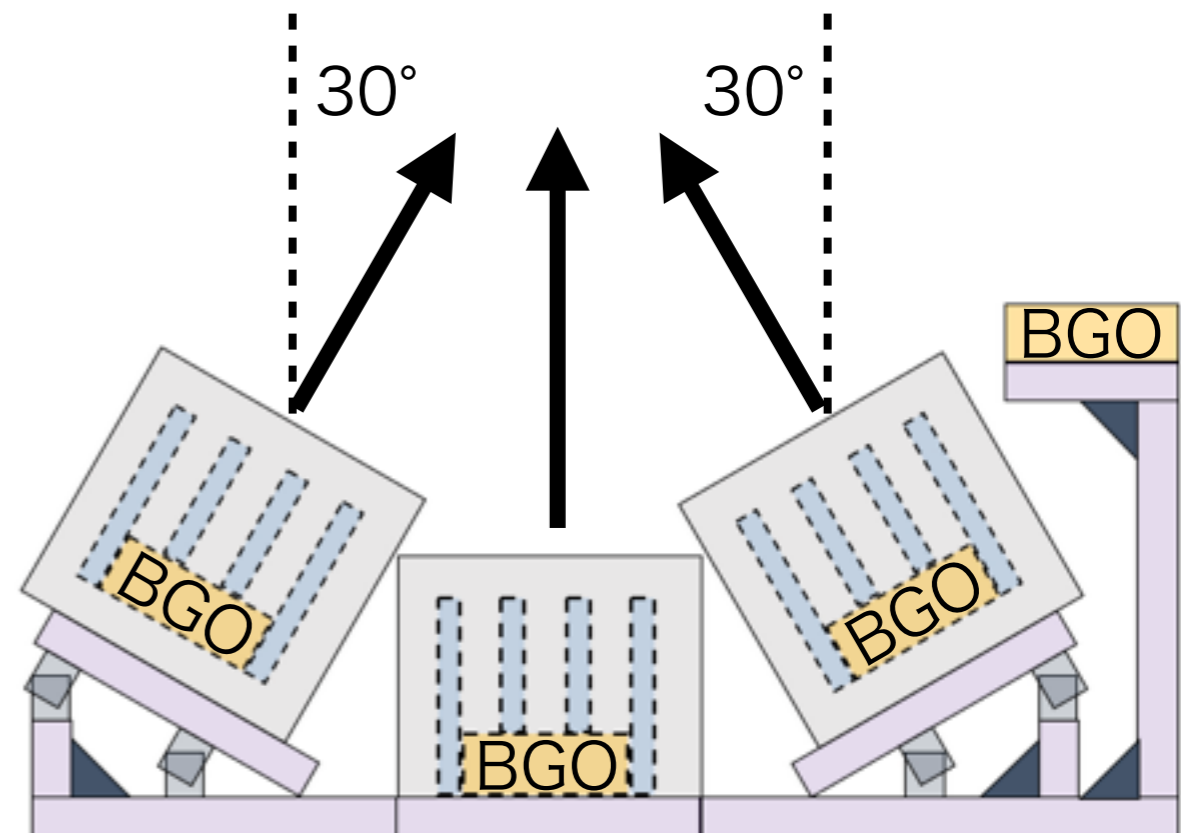
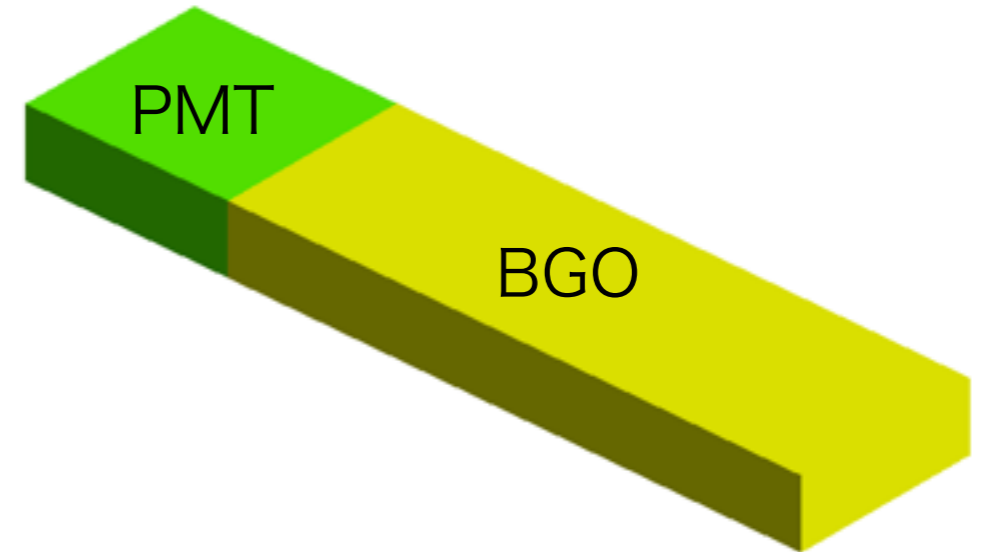
2. 観測装置

検出器の概要

- 主検出部はBGOシンチレータ。
- BGOに鉛のスリットコリメータを設けてFWHMで30°の角度分解能。
- コリメータ検出器3台(真上、 $\pm 30^\circ$ 方向) + 参照用BGO検出器1台で1セット。

放射源方向の測定原理

- 参照用BGOとコリメータ検出器の線量の比をとることで、地上に届いたガンマ線のうちコリメータの視線方向から来る割合を求める。
- この割合がピークになる時間帯に、放射源はコリメータの視線方向に存在。



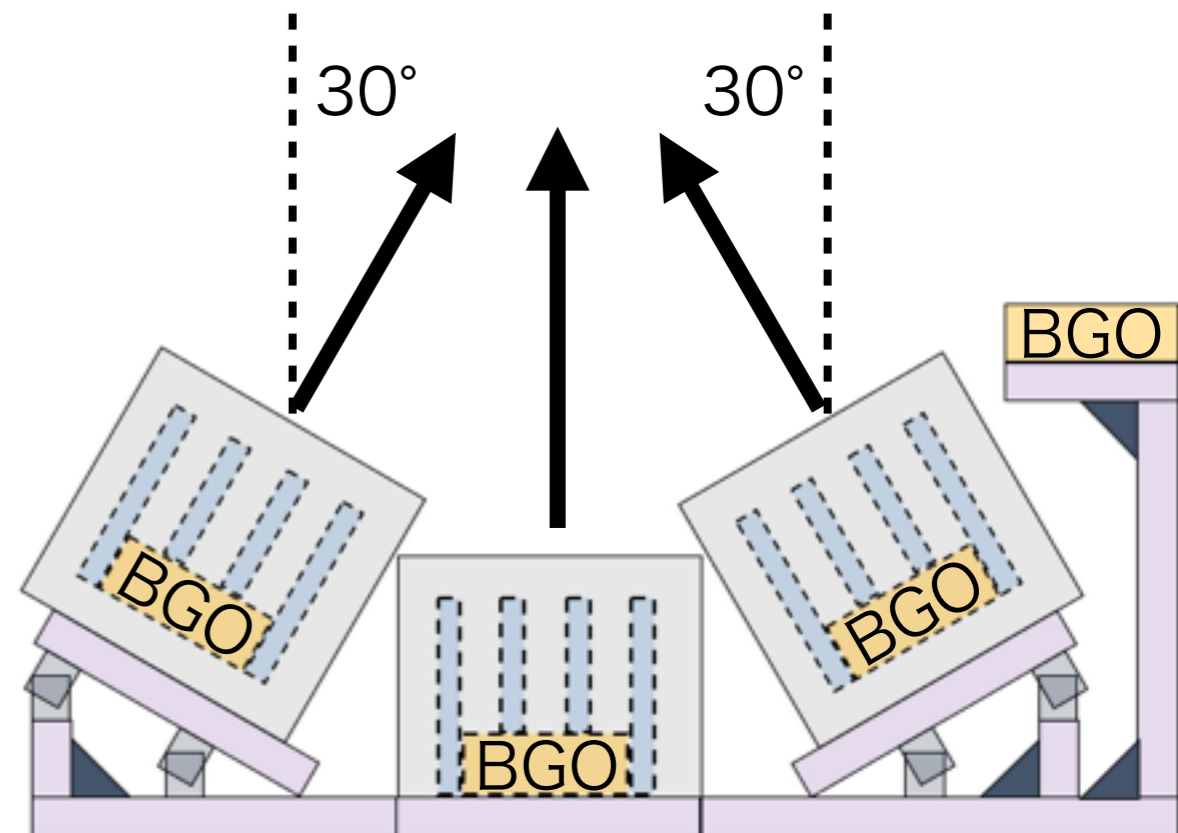
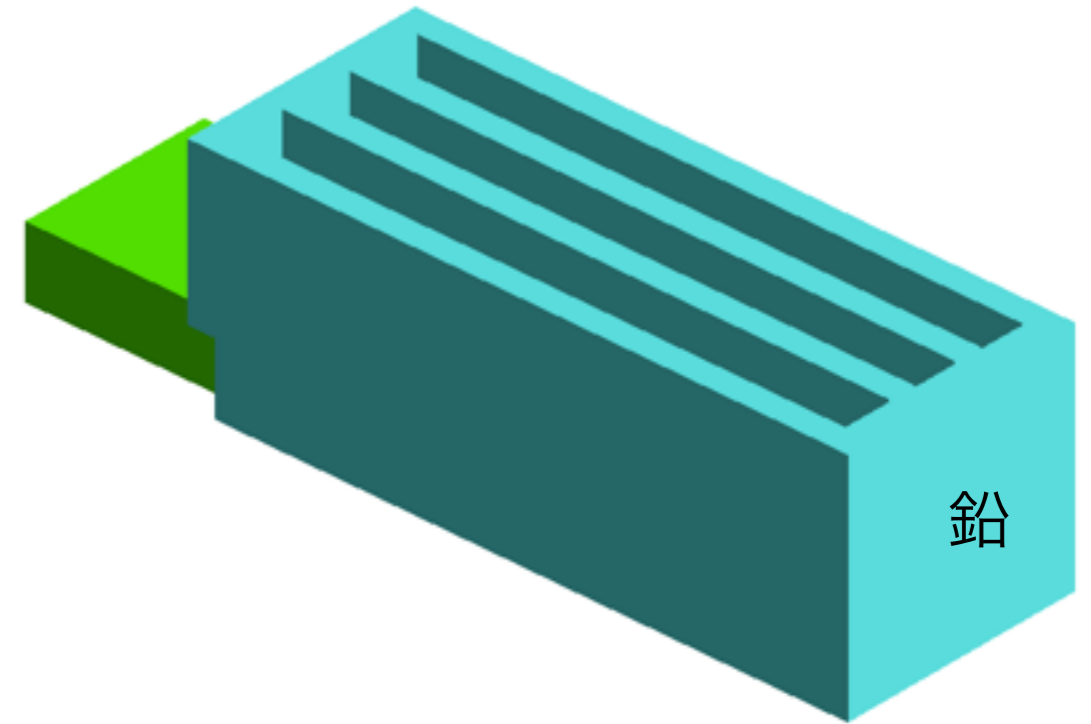
2. 観測装置

検出器の概要

- 主検出部はBGOシンチレータ。
- BGOに鉛のスリットコリメータを設けてFWHMで30°の角度分解能。
- コリメータ検出器3台(真上、 $\pm 30^\circ$ 方向) + 参照用BGO検出器1台で1セット。

放射源方向の測定原理

- 参照用BGOとコリメータ検出器の線量の比をとることで、地上に届いたガンマ線のうちコリメータの視線方向から来る割合を求める。
- この割合がピークになる時間帯に、放射源はコリメータの視線方向に存在。



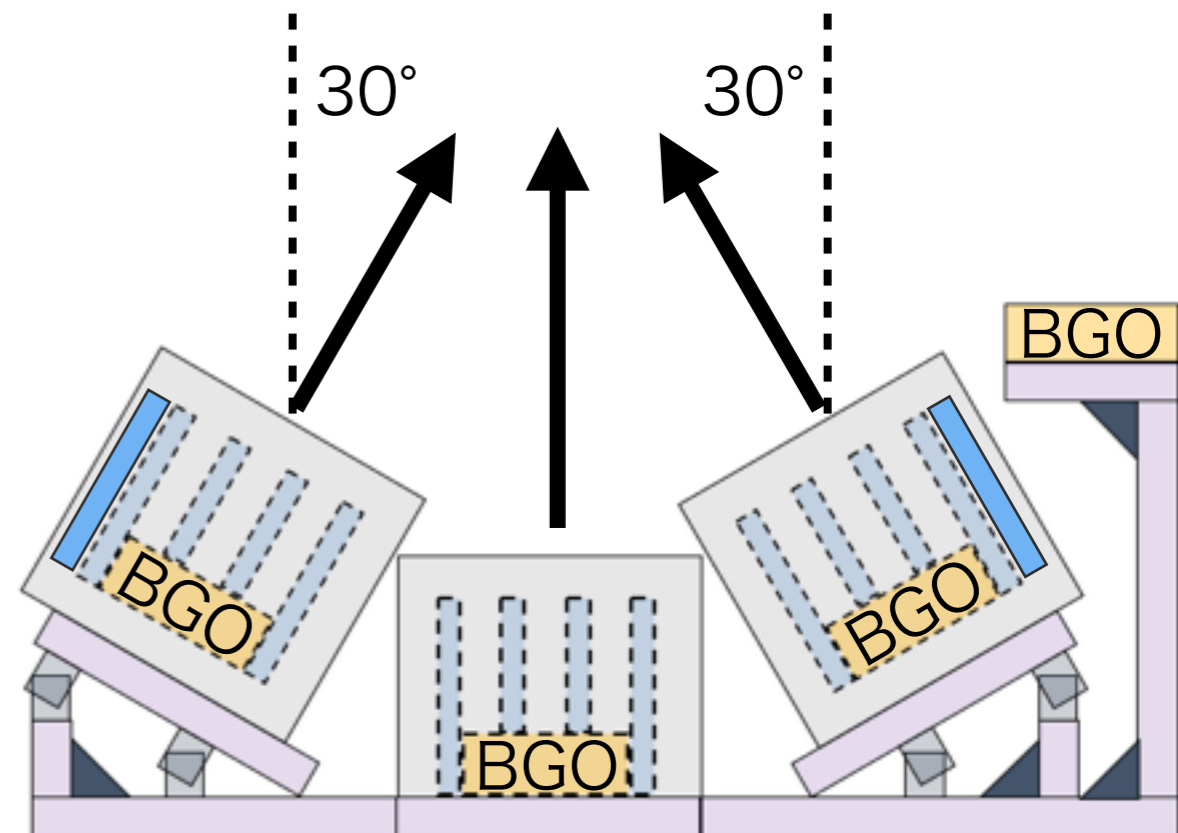
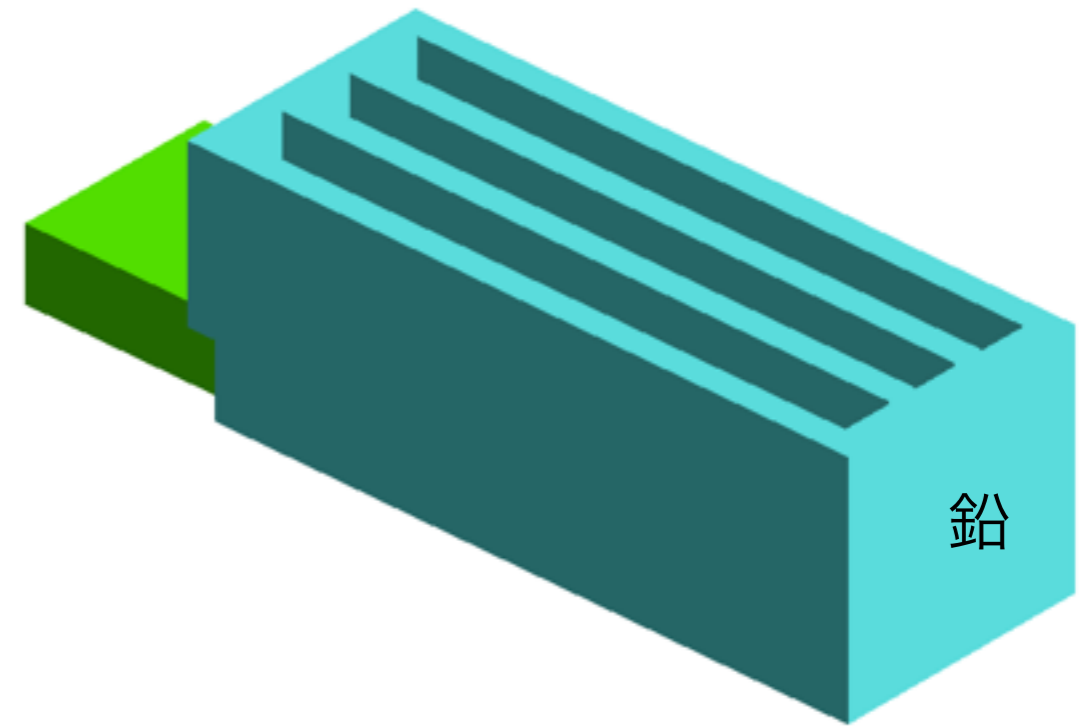
2. 観測装置

検出器の概要

- 主検出部はBGOシンチレータ。
- BGOに鉛のスリットコリメータを設けてFWHMで30°の角度分解能。
- コリメータ検出器3台(真上、 $\pm 30^\circ$ 方向) + 参照用BGO検出器1台で1セット。

放射源方向の測定原理

- 参照用BGOとコリメータ検出器の線量の比をとることで、地上に届いたガンマ線のうちコリメータの視線方向から来る割合を求める。
- この割合がピークになる時間帯に、放射源はコリメータの視線方向に存在。



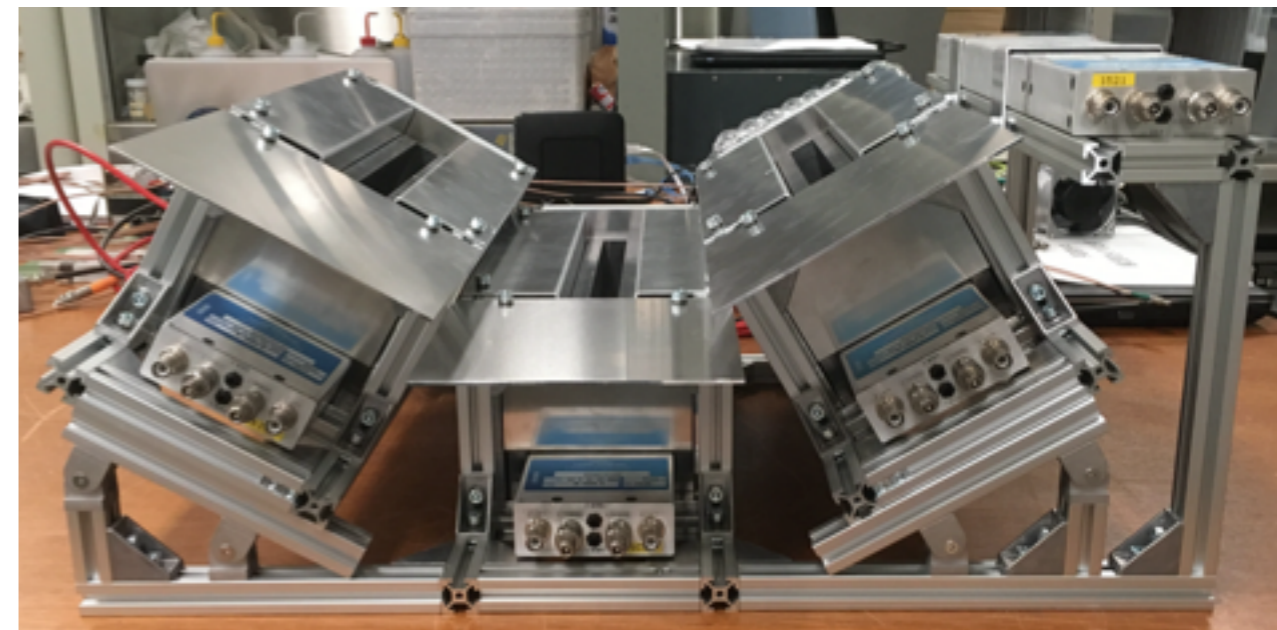
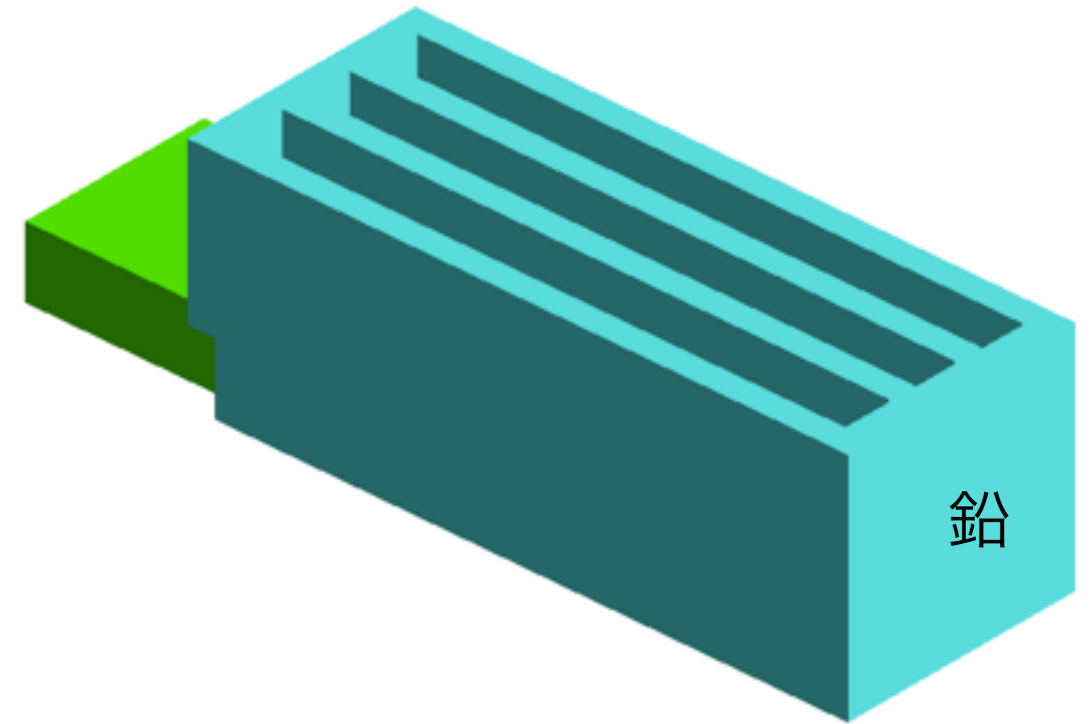
2. 観測装置

検出器の概要

- 主検出部はBGOシンチレータ。
- BGOに鉛のスリットコリメータを設けてFWHMで30°の角度分解能。
- コリメータ検出器3台(真上、 $\pm 30^\circ$ 方向) + 参照用BGO検出器1台で1セット。

放射源方向の測定原理

- 参照用BGOとコリメータ検出器の線量の比をとることで、地上に届いたガンマ線のうちコリメータの視線方向から来る割合を求める。
- この割合がピークになる時間帯に、放射源はコリメータの視線方向に存在。



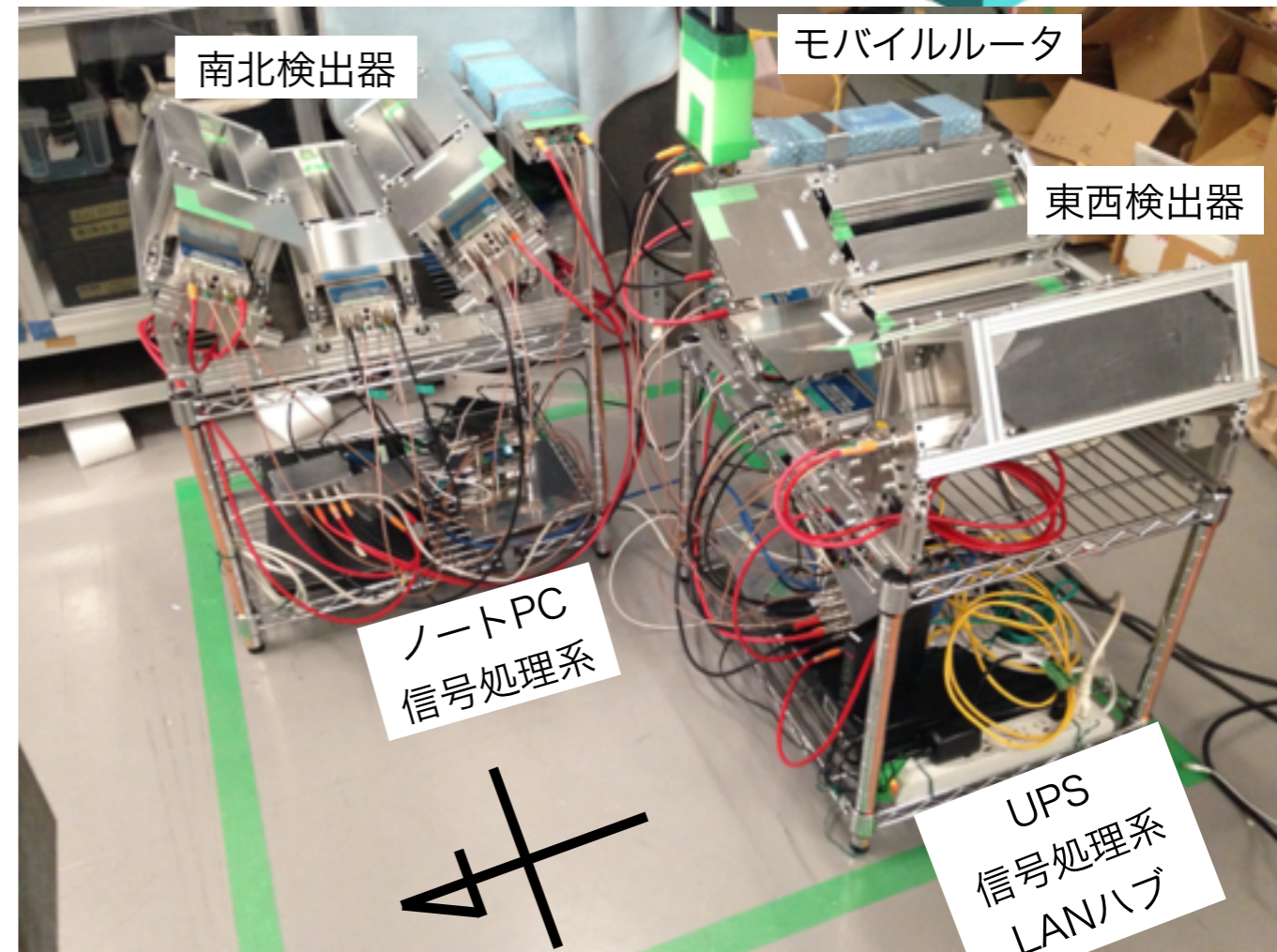
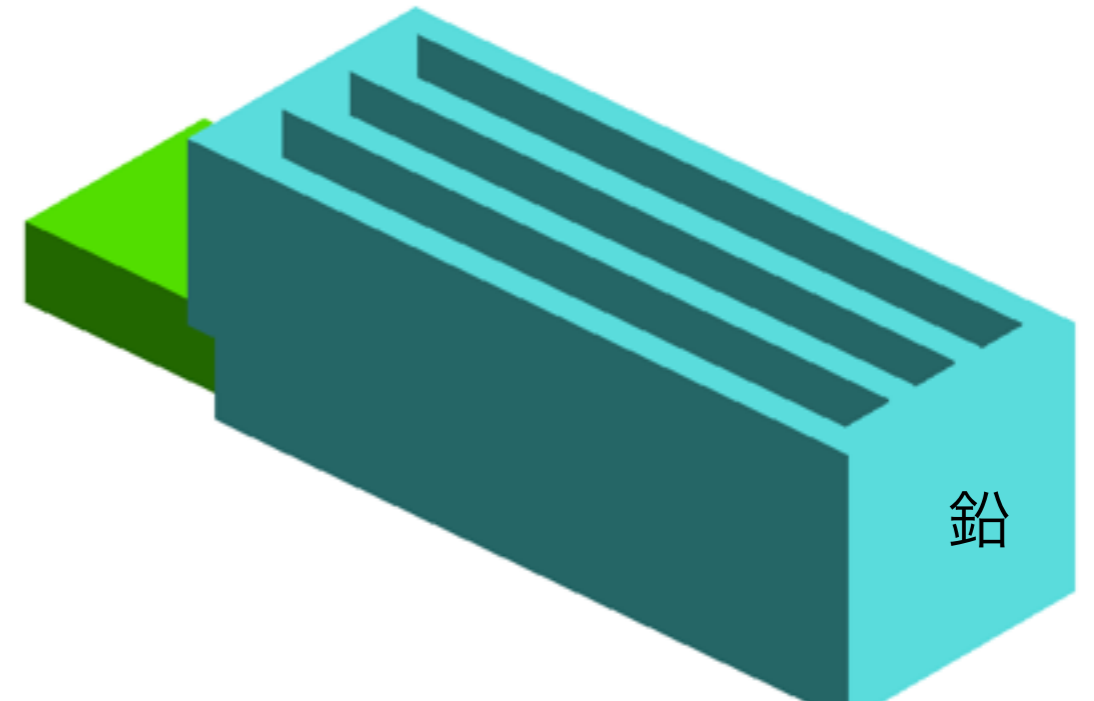
2. 観測装置

検出器の概要

- 主検出部はBGOシンチレータ。
- BGOに鉛のスリットコリメータを設けてFWHMで30°の角度分解能。
- コリメータ検出器3台(真上、 $\pm 30^\circ$ 方向) + 参照用BGO検出器1台で1セット。

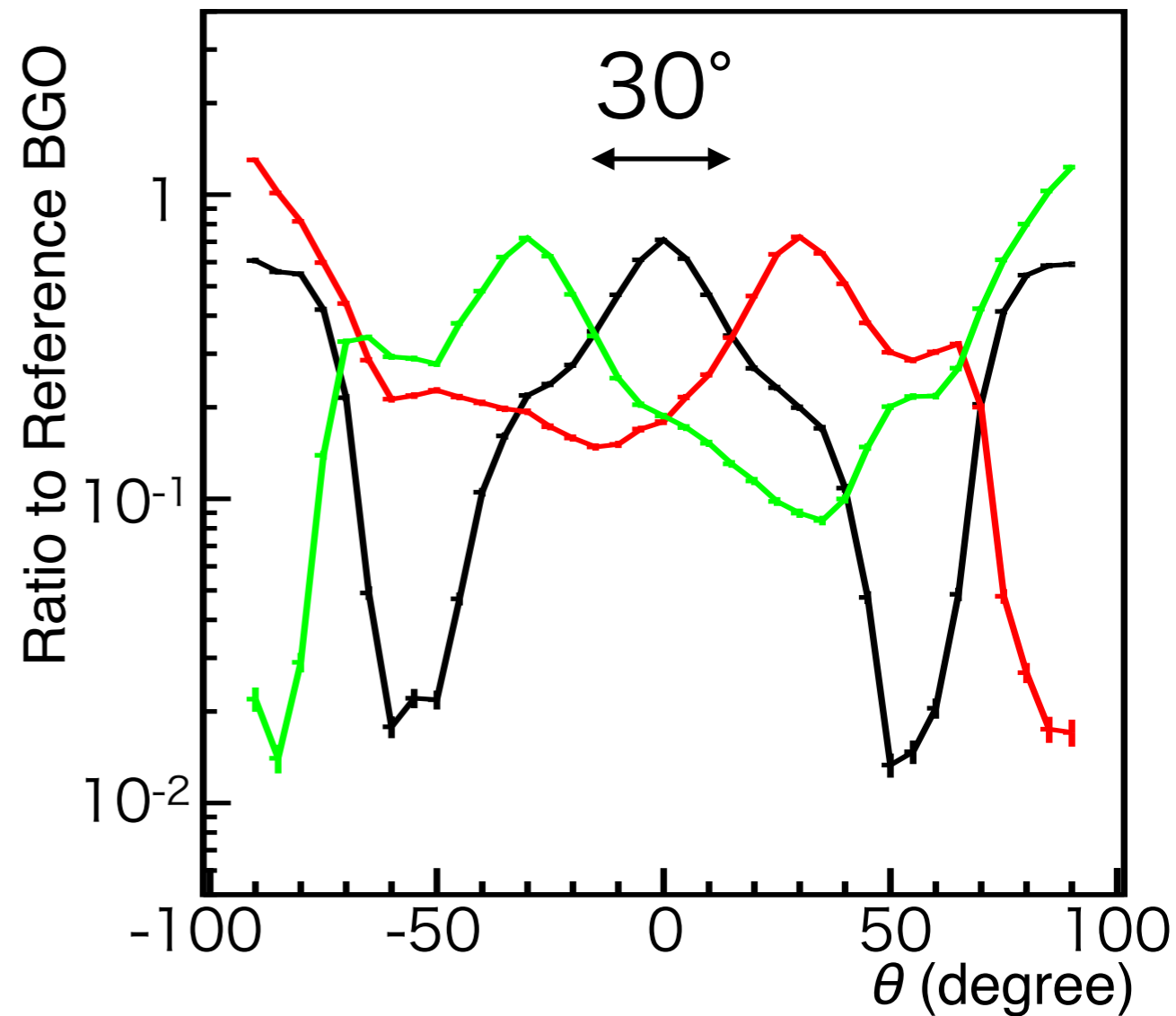
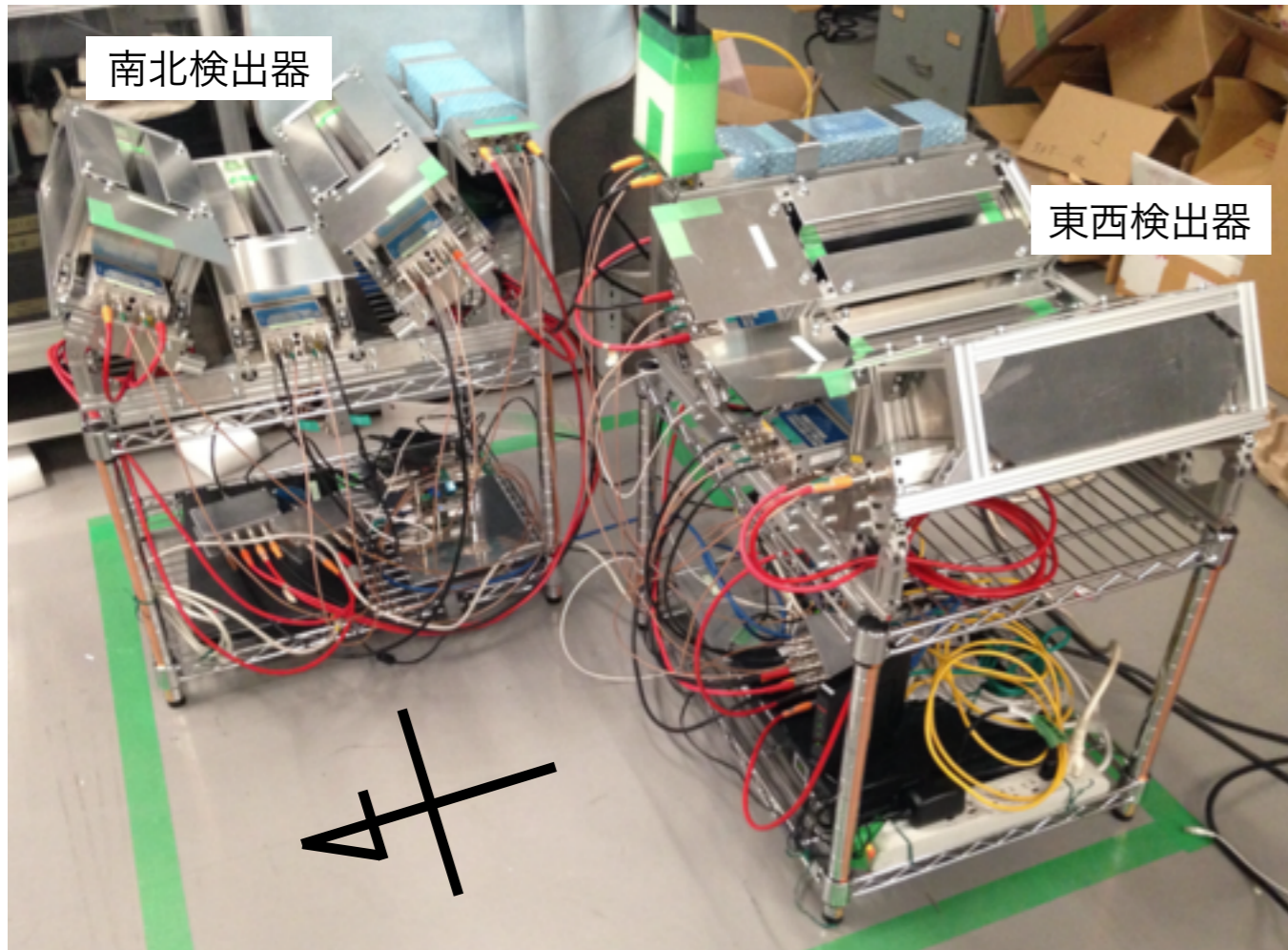
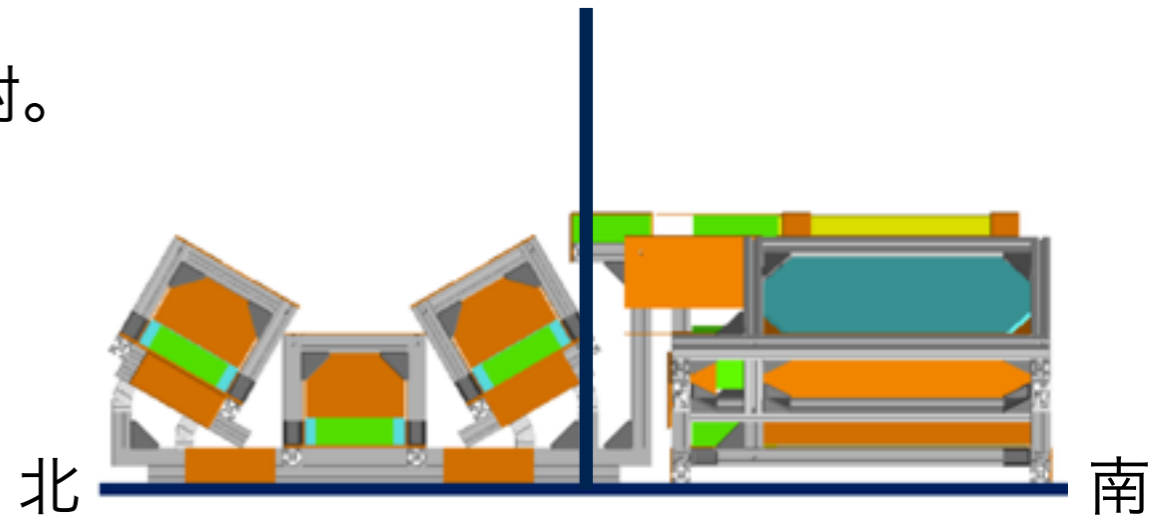
放射源方向の測定原理

- 参照用BGOとコリメータ検出器の線量の比をとることで、地上に届いたガンマ線のうちコリメータの視線方向から来る割合を求める。
- この割合がピークになる時間帯に、放射源はコリメータの視線方向に存在。



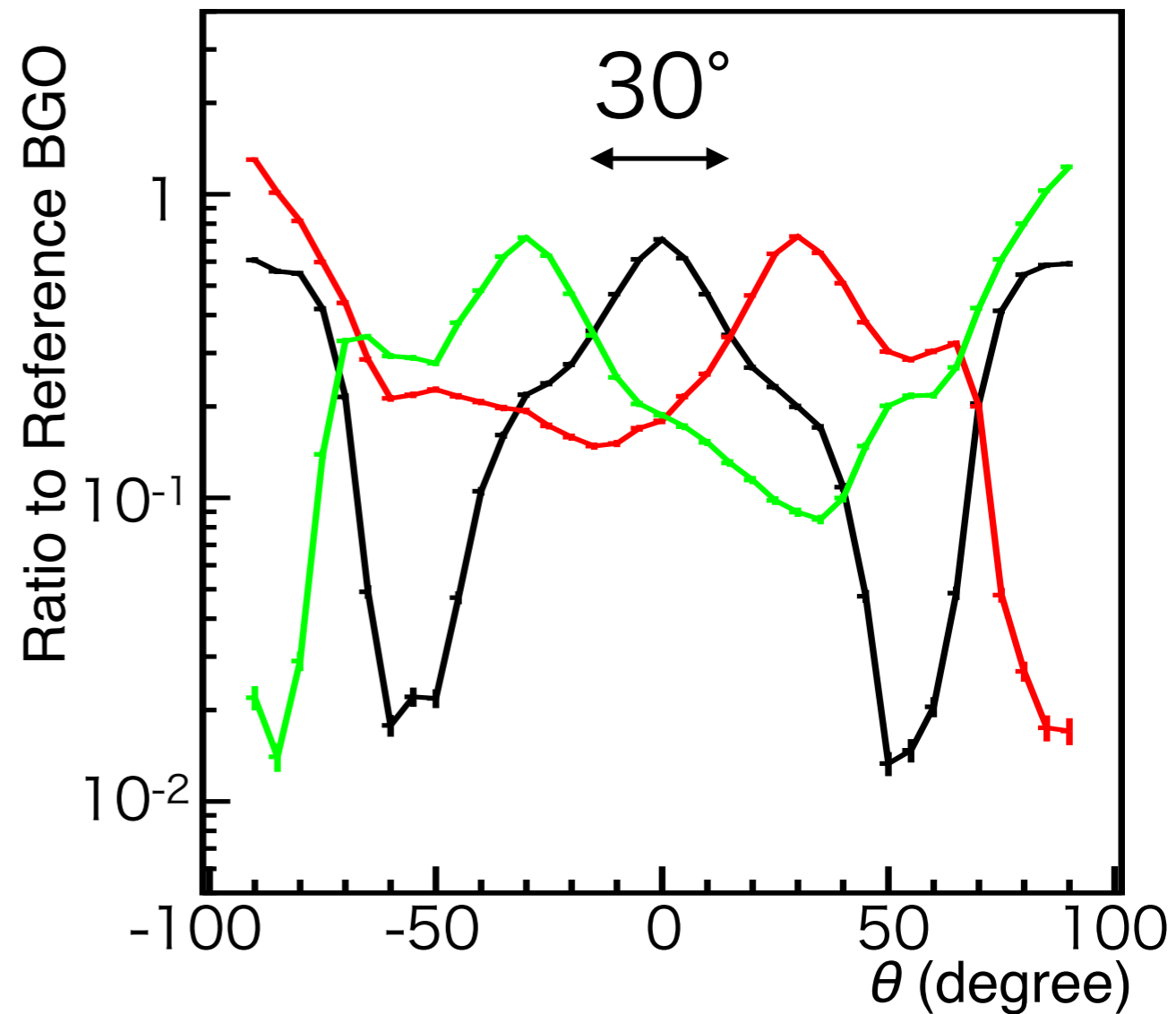
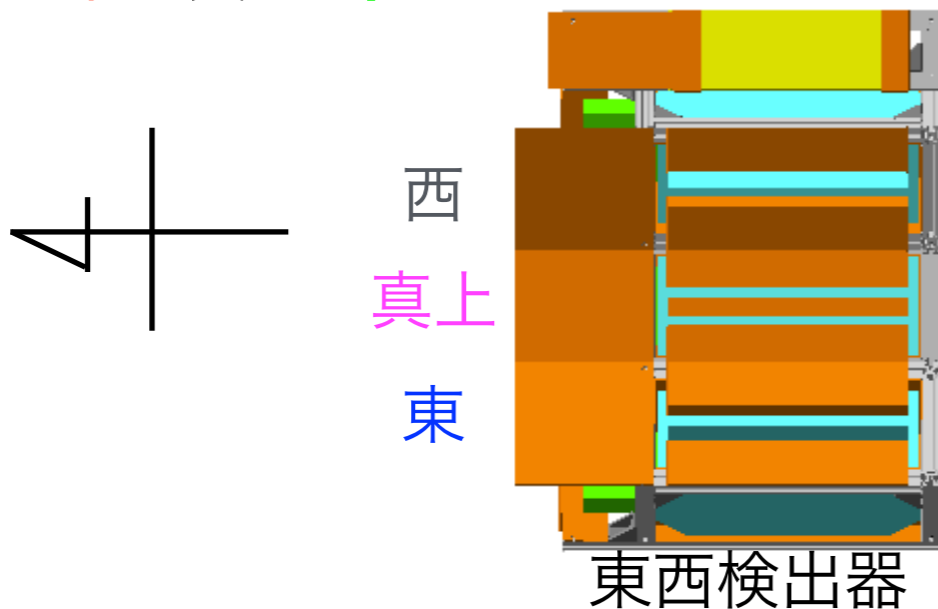
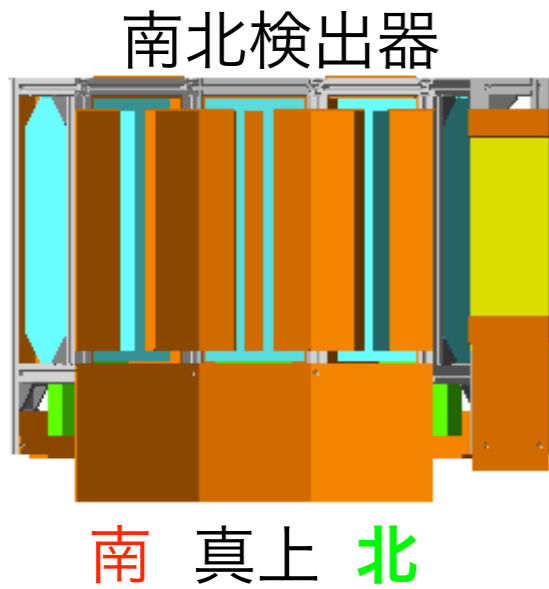
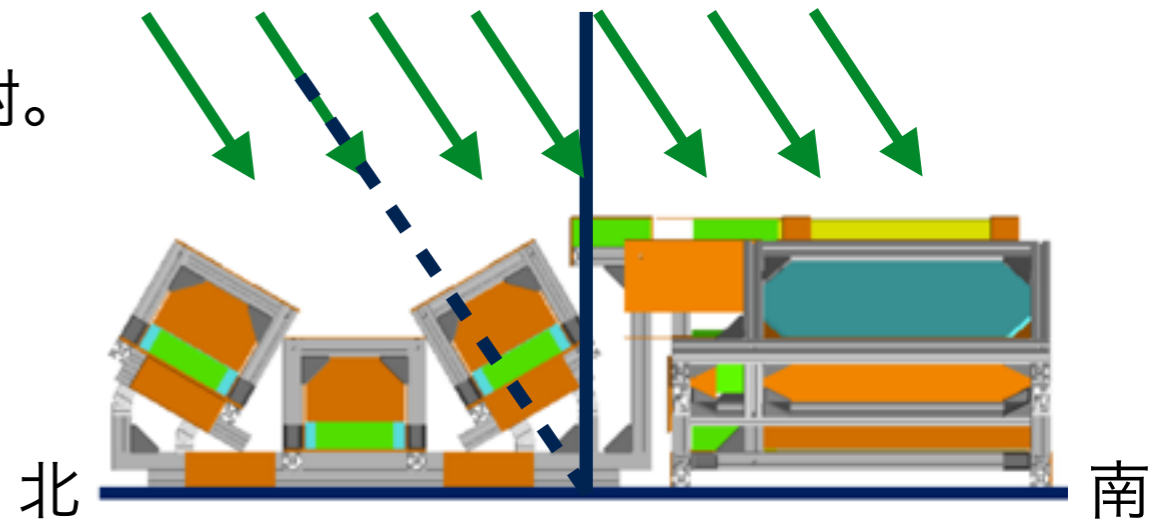
3. Geant4による検出器のシミュレーション

- Geant4で有効面積の角度依存性を評価
- 検出器全体に同一の面密度で10 MeV平行光を照射。
- 北→真上→南と入射方向を変化させた。
- BGOに 3–10 MeVを落とした光子数の比を表示。
- 有効面積のFWHMは30°。



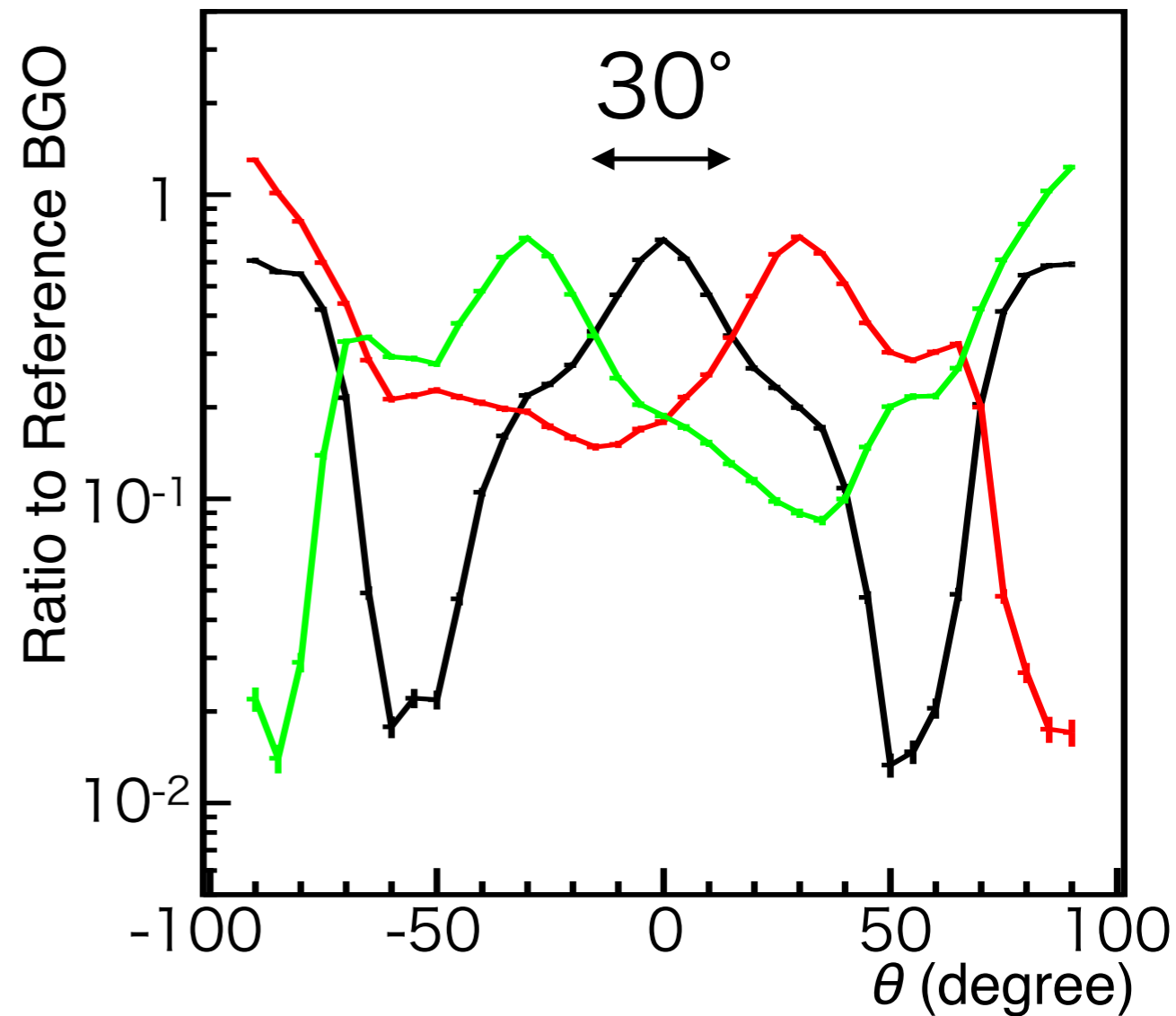
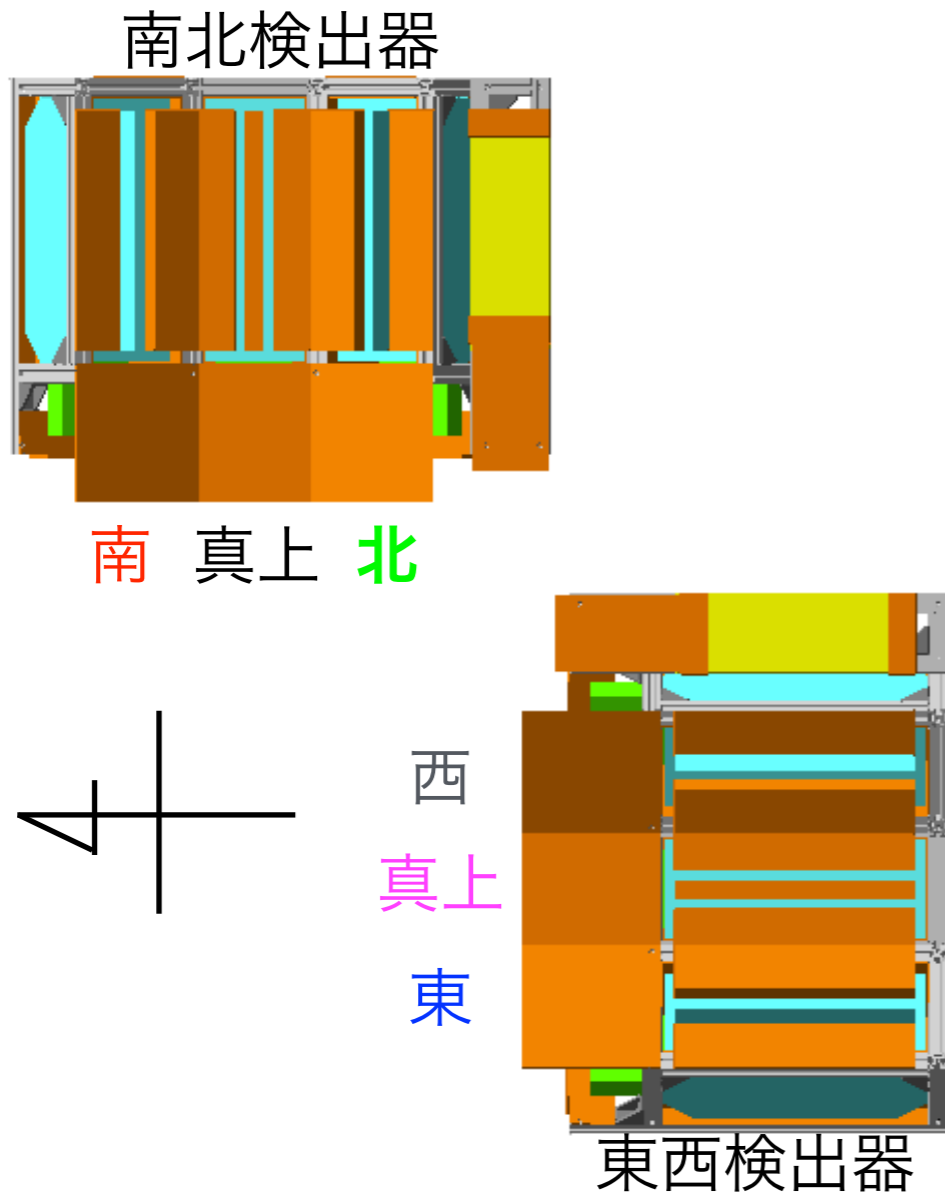
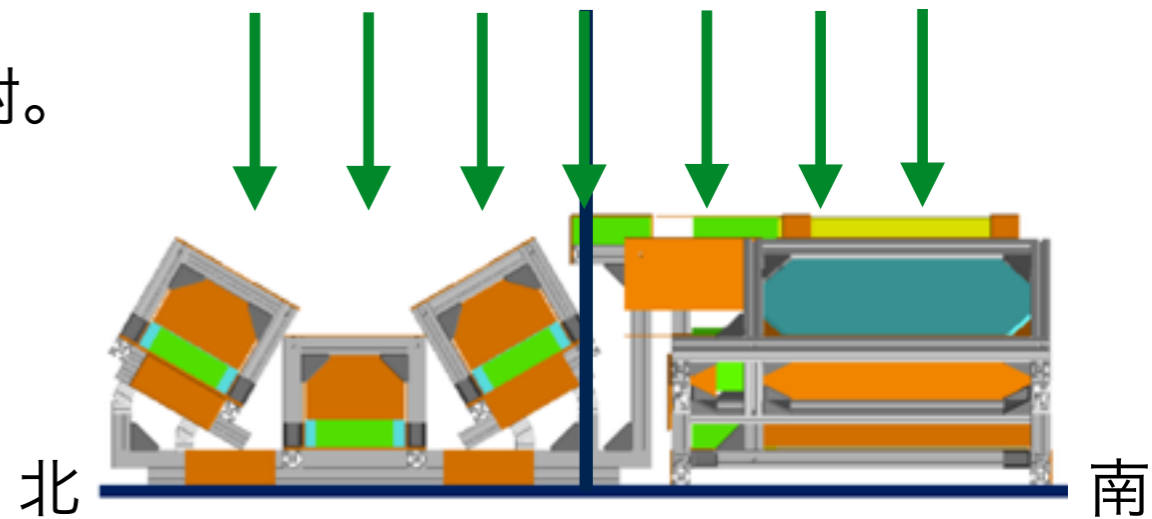
3. Geant4による検出器のシミュレーション

- Geant4で有効面積の角度依存性を評価
- 検出器全体に同一の面密度で10 MeV平行光を照射。
- 北→真上→南と入射方向を変化させた。
- BGOに 3–10 MeVを落とした光子数の比を表示。
- 有効面積のFWHMは30°。



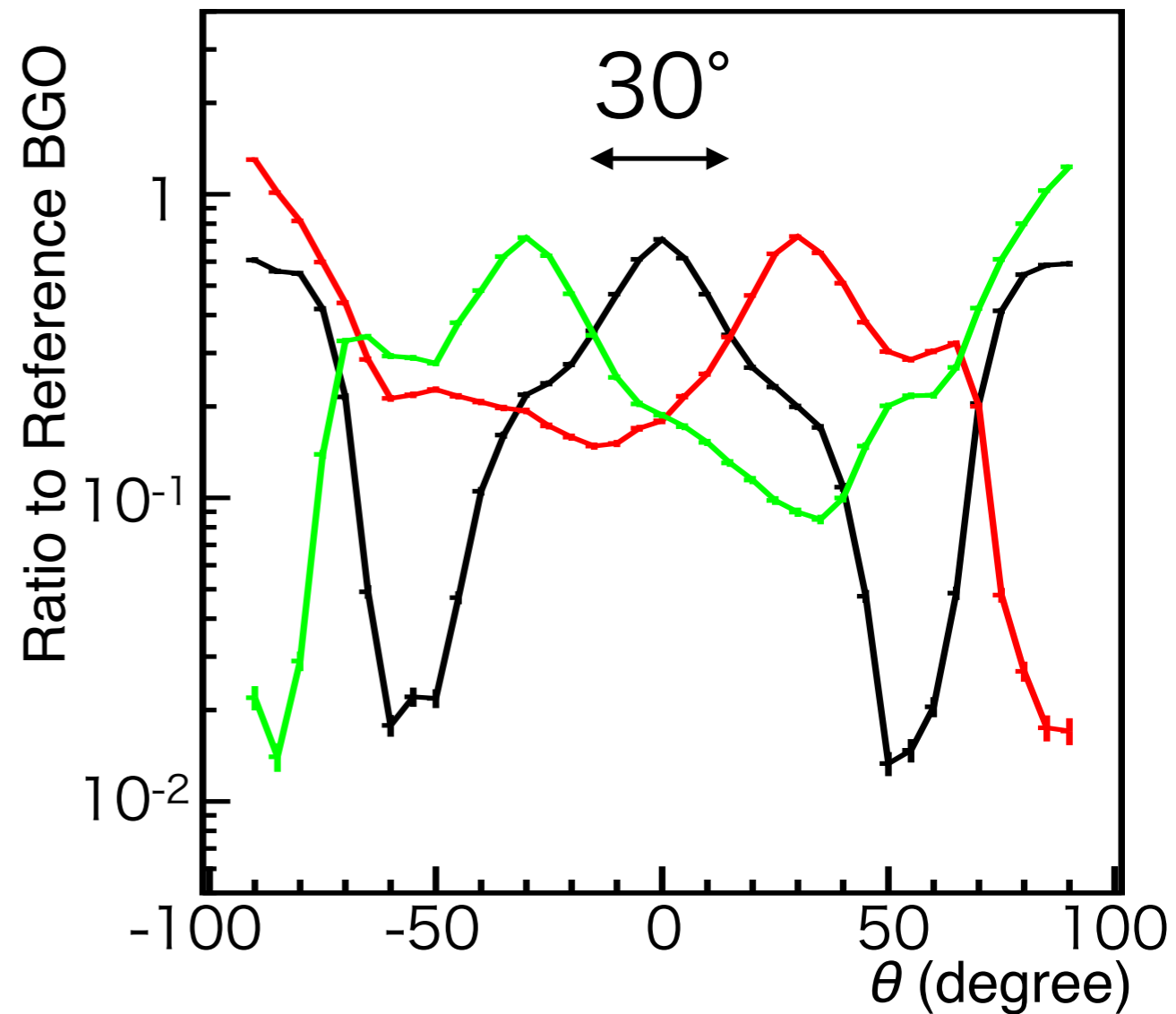
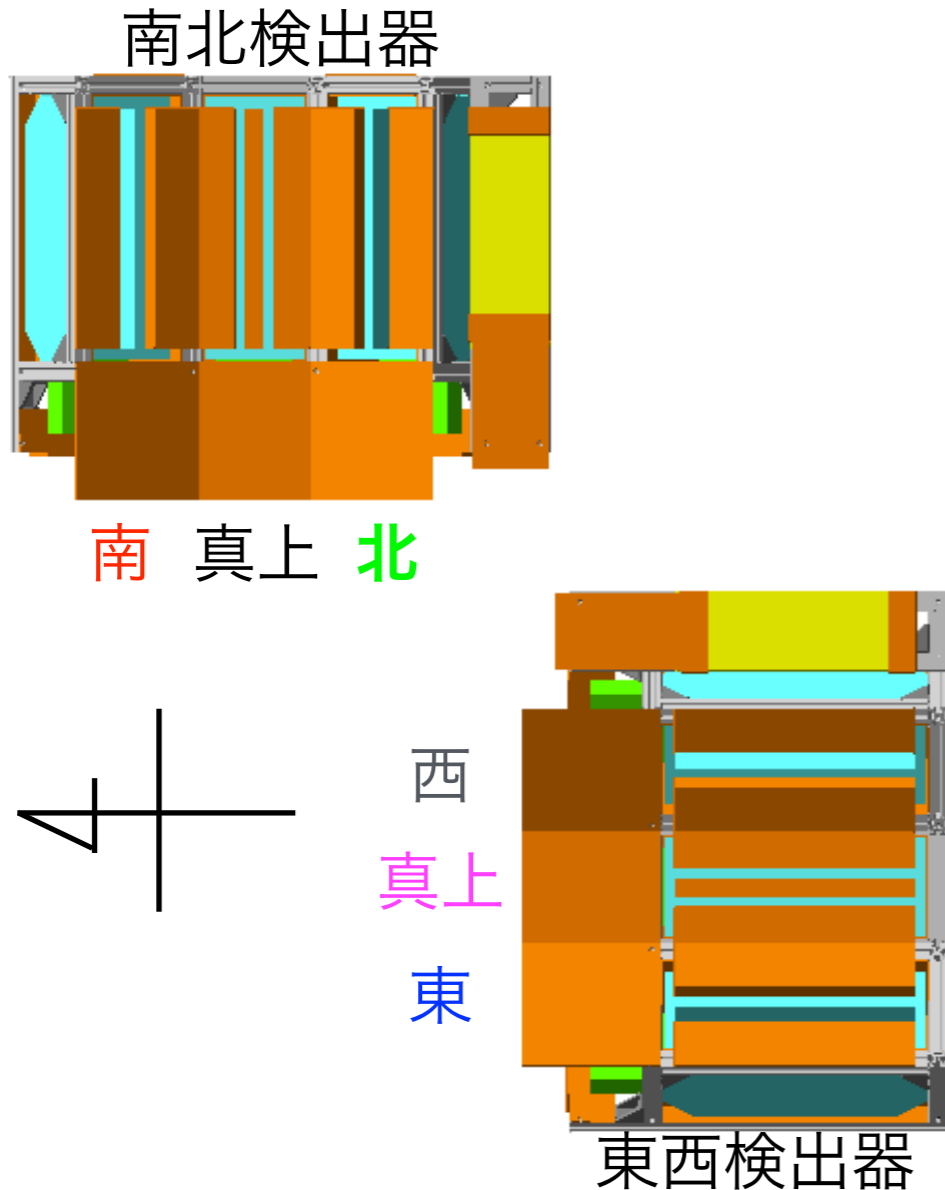
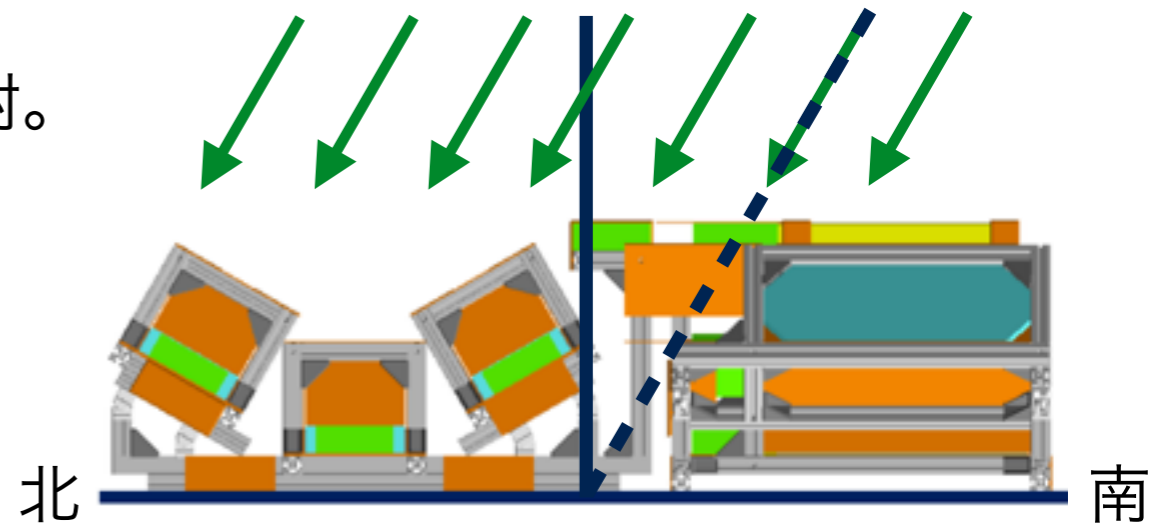
3. Geant4による検出器のシミュレーション

- Geant4で有効面積の角度依存性を評価
- 検出器全体に同一の面密度で10 MeV平行光を照射。
- 北→真上→南と入射方向を変化させた。
- BGOに 3–10 MeVを落とした光子数の比を表示。
- 有効面積のFWHMは30°。



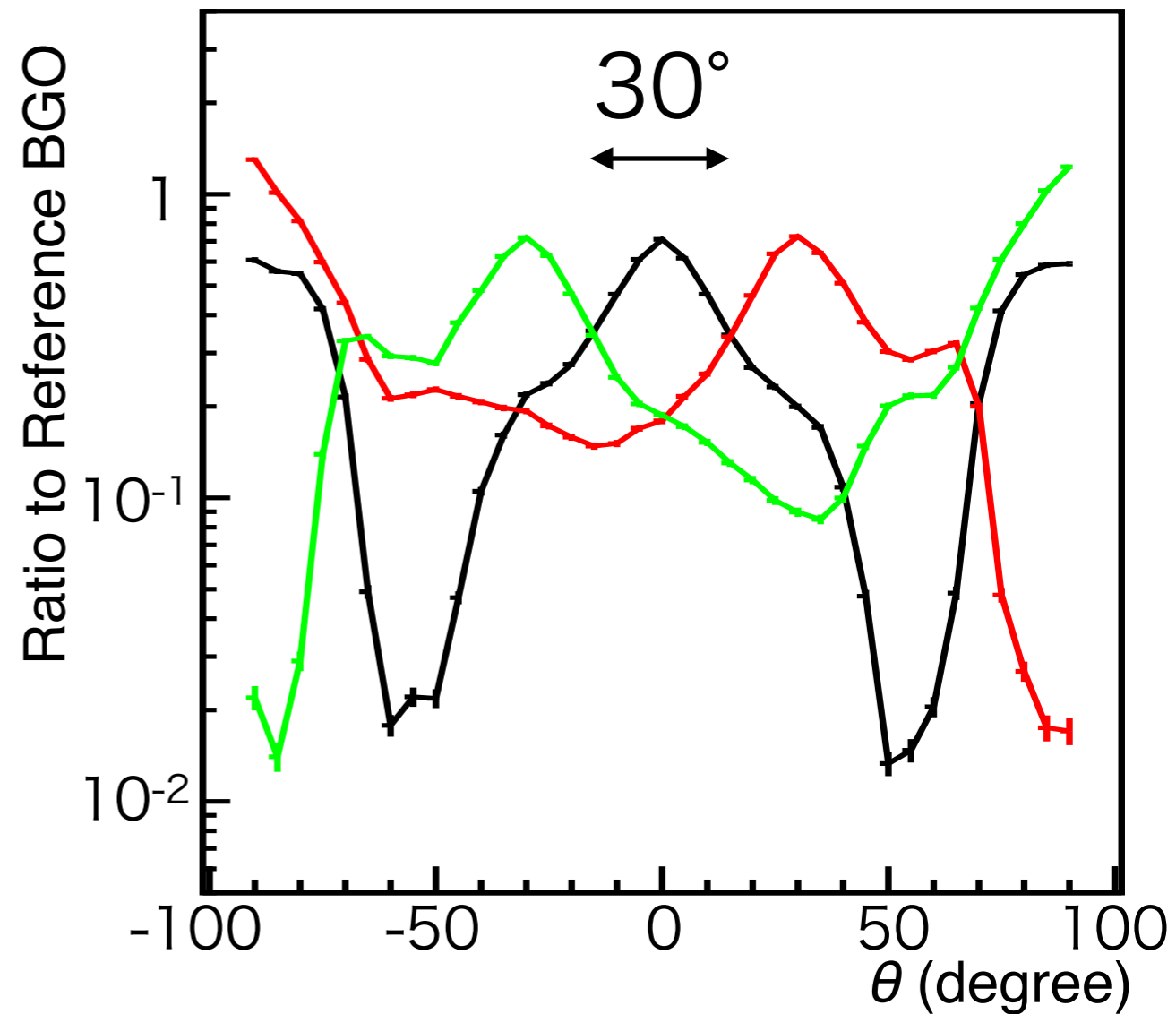
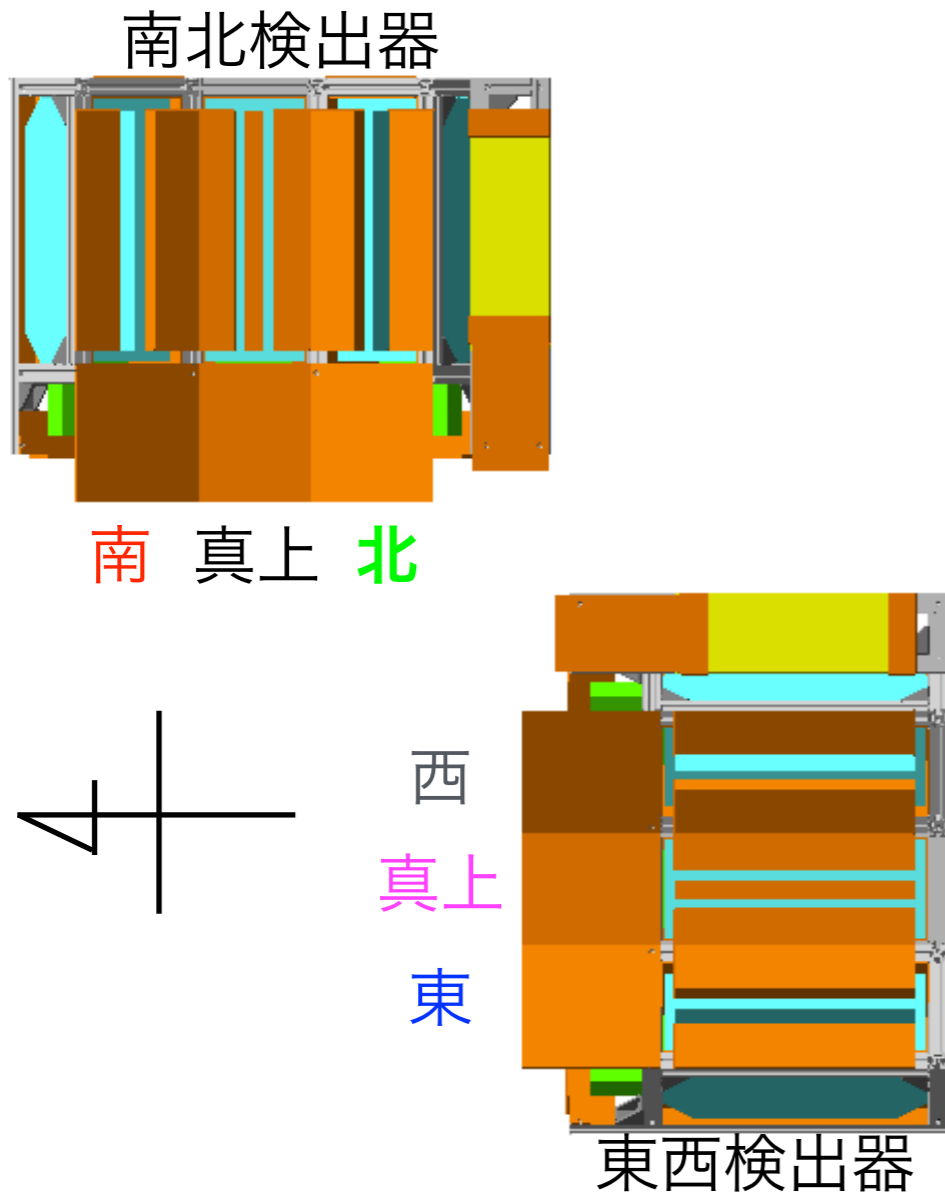
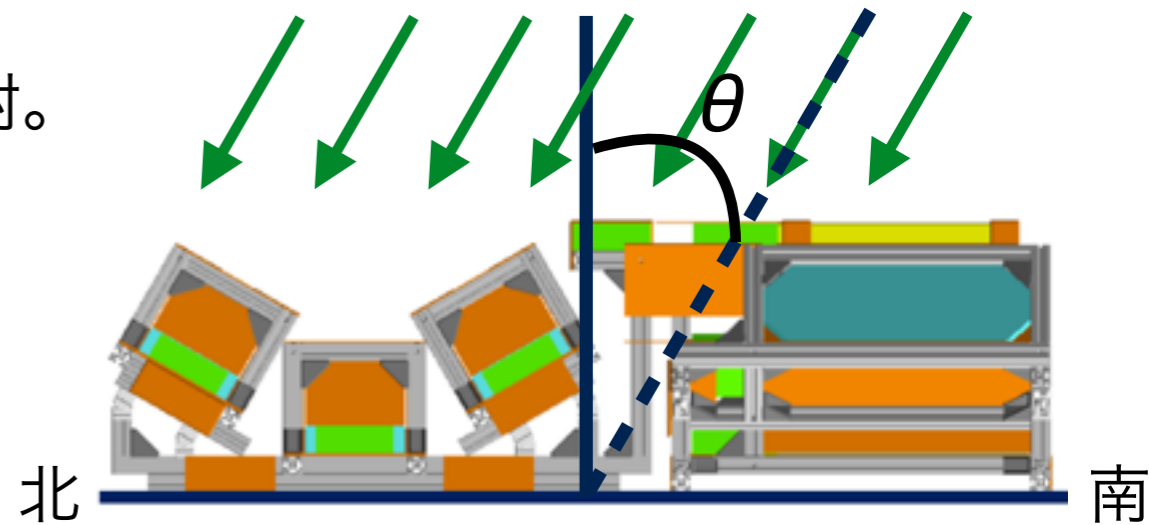
3. Geant4による検出器のシミュレーション

- Geant4で有効面積の角度依存性を評価
- 検出器全体に同一の面密度で10 MeV平行光を照射。
- 北→真上→南と入射方向を変化させた。
- BGOに 3–10 MeVを落とした光子数の比を表示。
- 有効面積のFWHMは30°。



3. Geant4による検出器のシミュレーション

- Geant4で有効面積の角度依存性を評価
- 検出器全体に同一の面密度で10 MeV平行光を照射。
- 北→真上→南と入射方向を変化させた。
- BGOに 3–10 MeVを落とした光子数の比を表示。
- 有効面積のFWHMは30°。



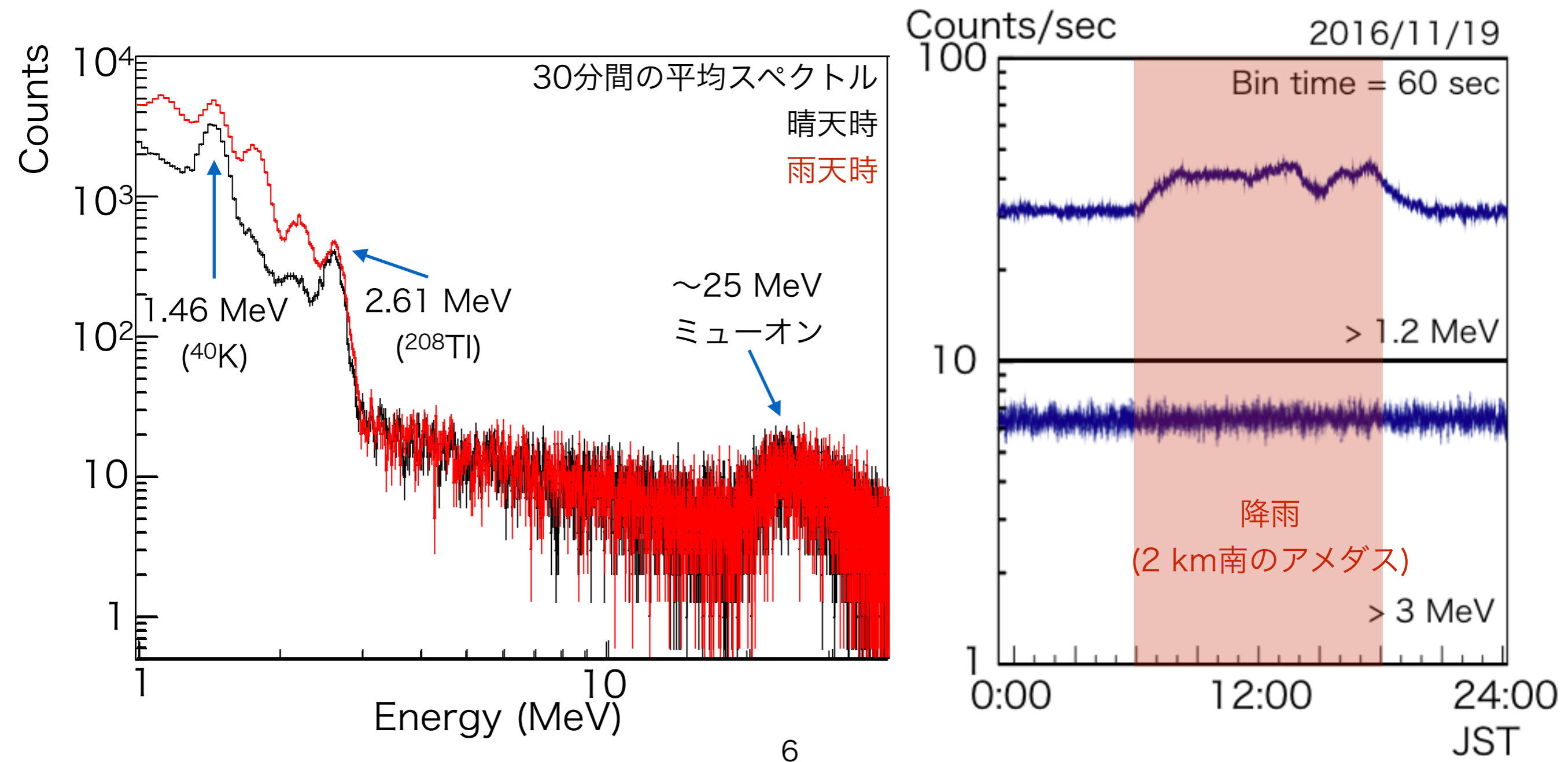
4. 観測装置の設置と運用

- 新潟県の柏崎刈羽原子力発電所の環境管理棟屋上に11月9日から11日に設置。
- 2016年11月11日：本観測を開始。
- 2016年12月24日：通信途絶。28日に復旧作業(携帯回線の不調)。
- 2017年02月06日：東西検出器停止。22日に復旧作業(信号処理系の不調)。
- 2017年03月19日：正常に観測中。



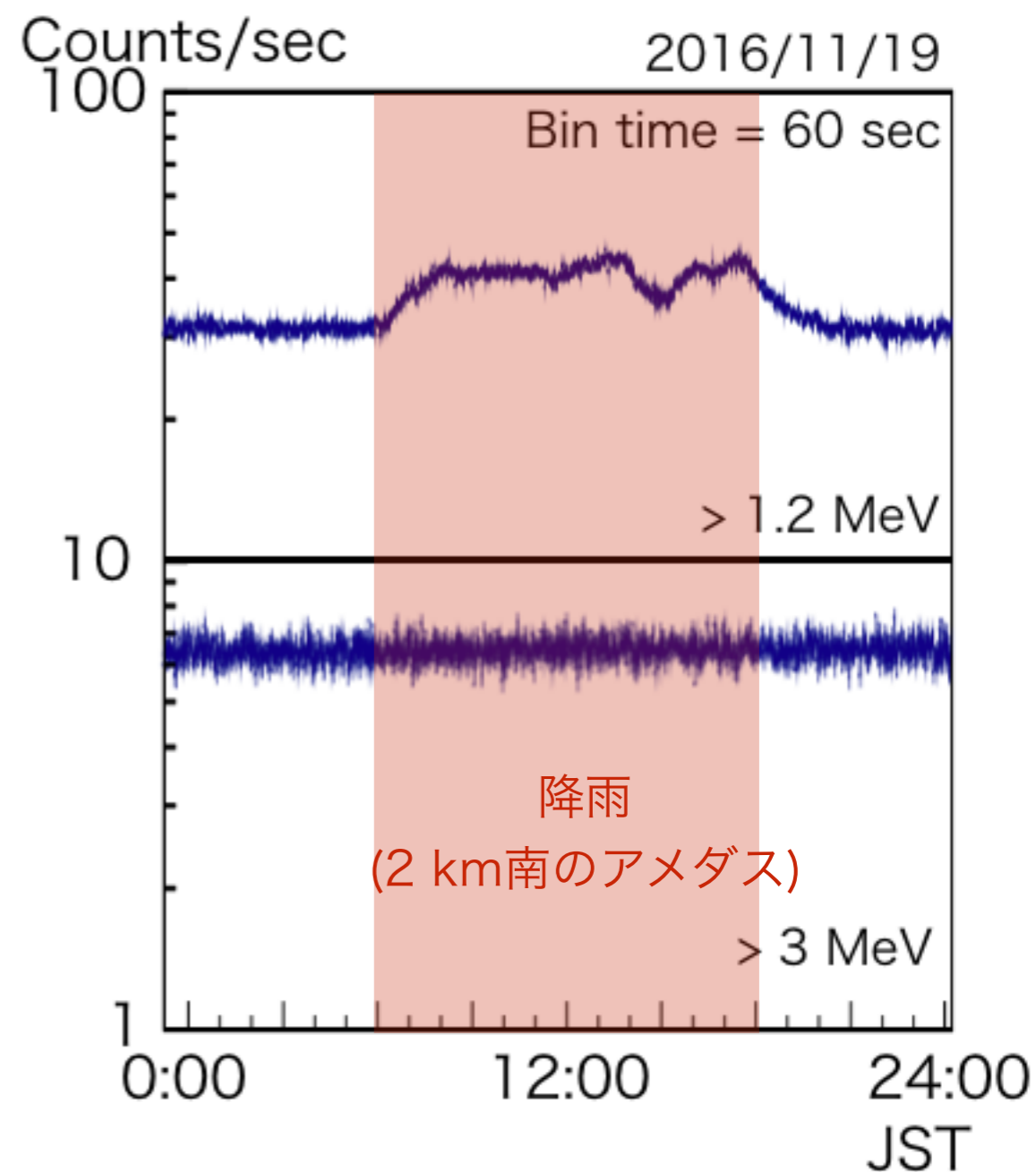
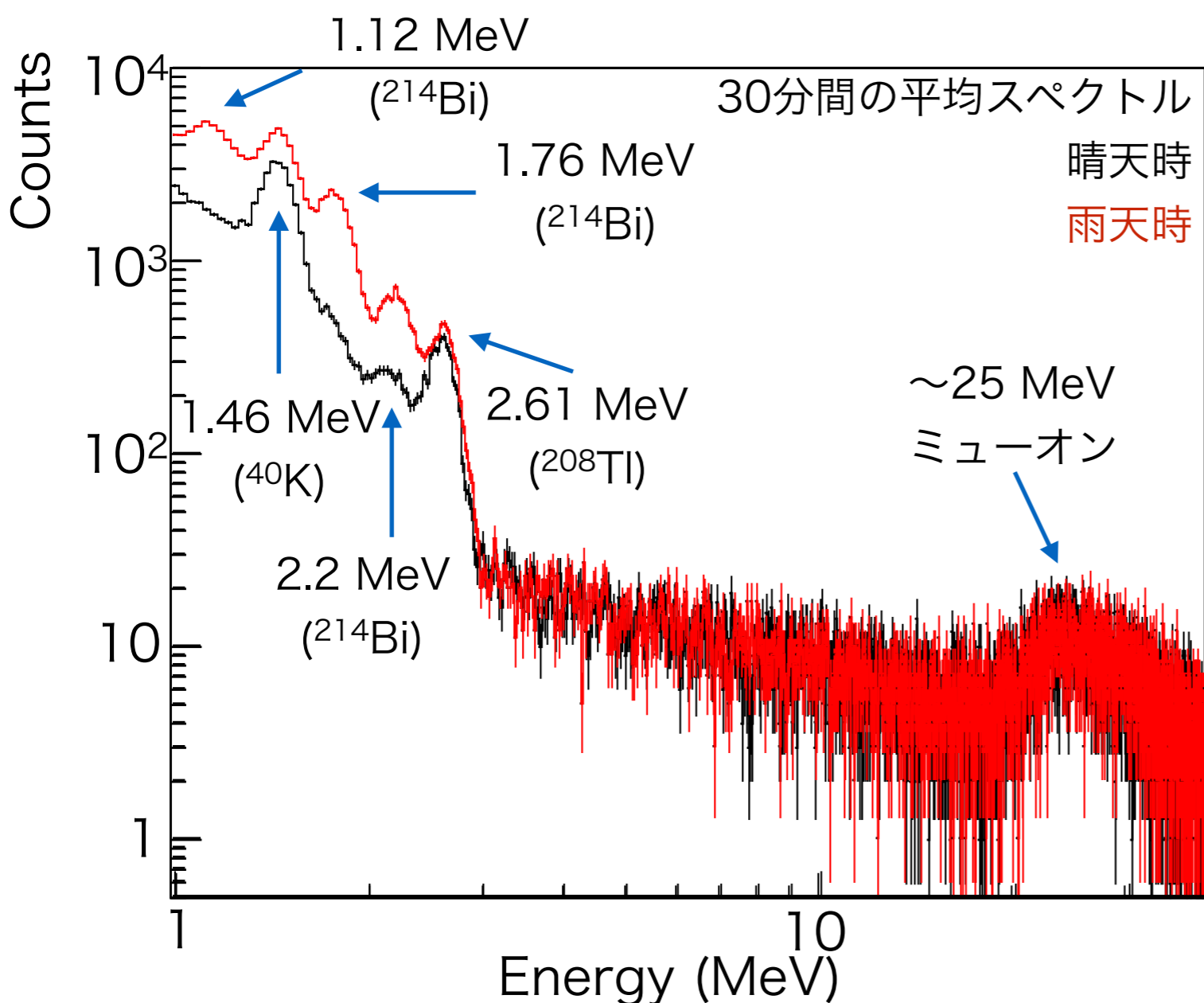
5. エネルギースペクトル

- 1.46 MeV (^{40}K)、2.61 MeV (^{208}Tl)を常に検出 -> エネルギー較正に用いる。
- 雨天時は ^{222}Rn ウォッシュアウトで ^{214}Bi による輝線も顕著に。線量は増加。
- 3 MeV以上は宇宙線成分で線量はほぼ一定。



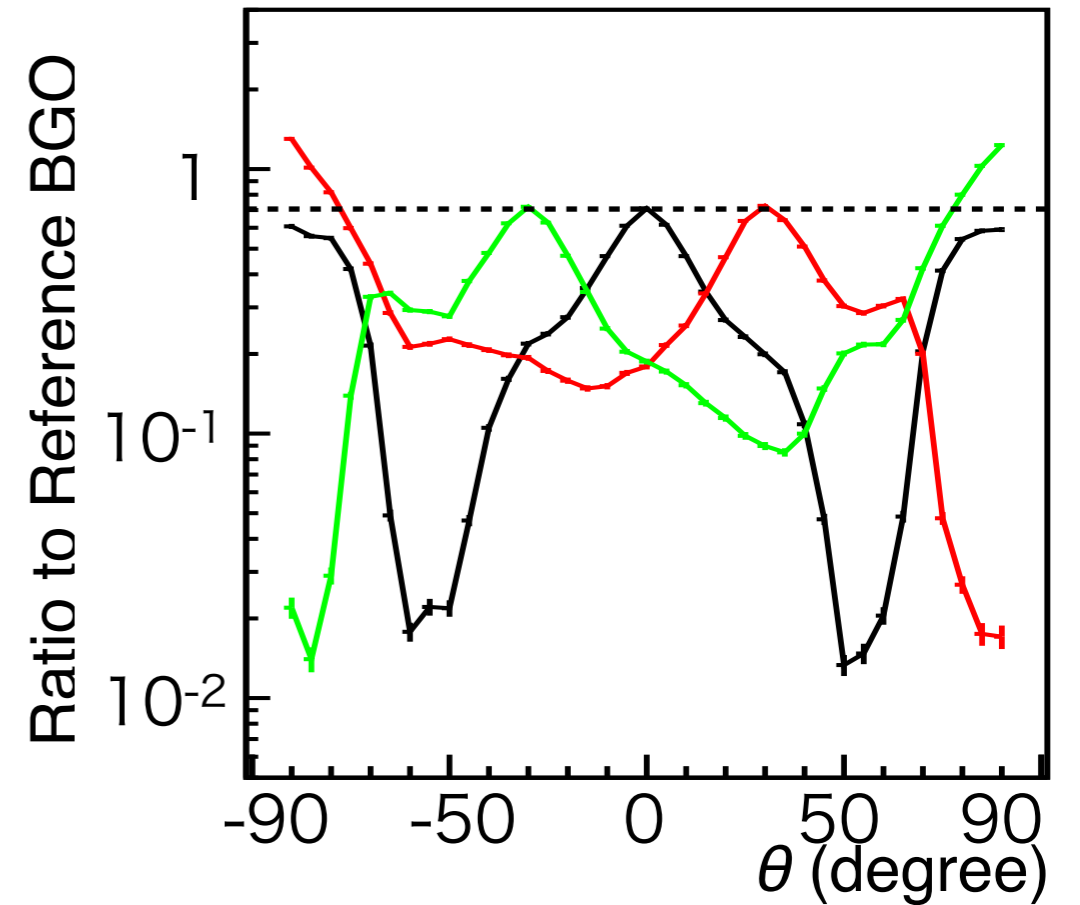
5. エネルギースペクトル

- 1.46 MeV (^{40}K)、2.61 MeV (^{208}Tl)を常に検出 -> エネルギー較正に用いる。
- 雨天時は ^{222}Rn ウォッシュアウトで ^{214}Bi による輝線も顕著に。線量は増加。
- 3 MeV以上は宇宙線成分で線量はほぼ一定。

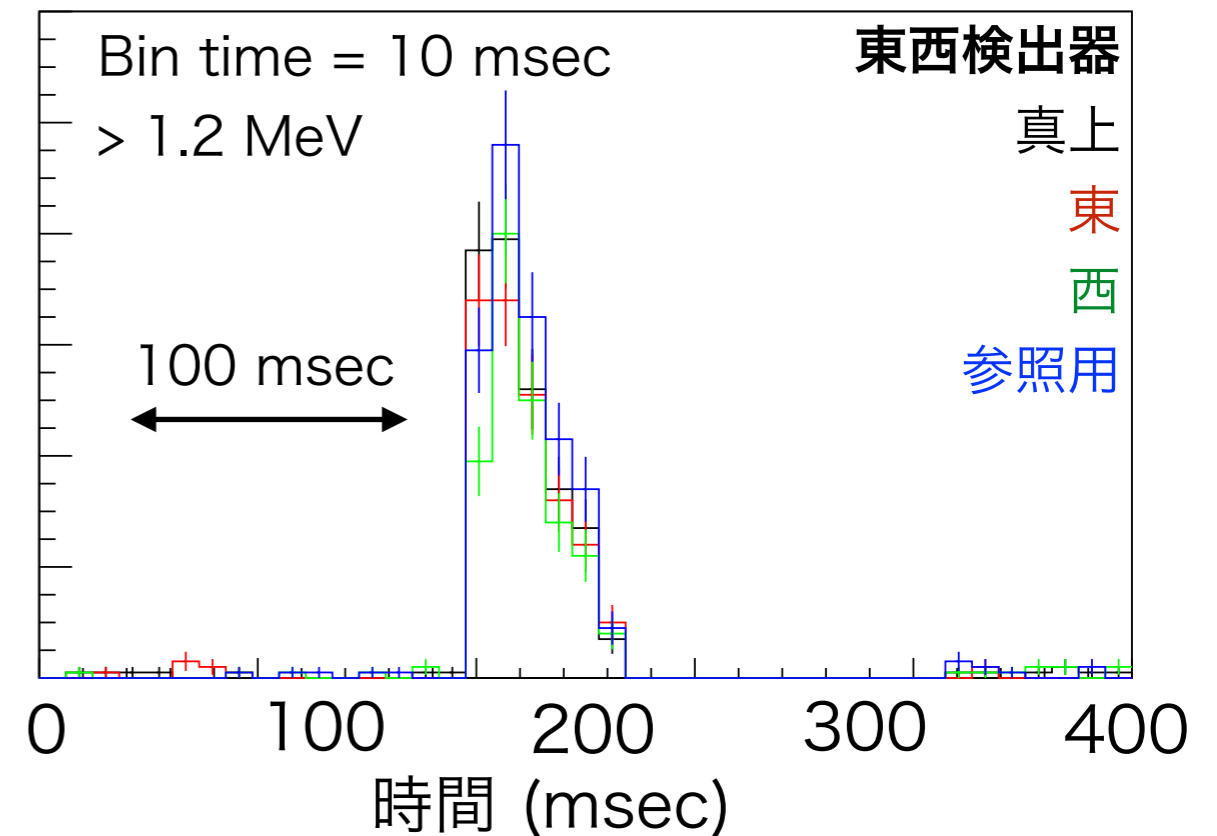
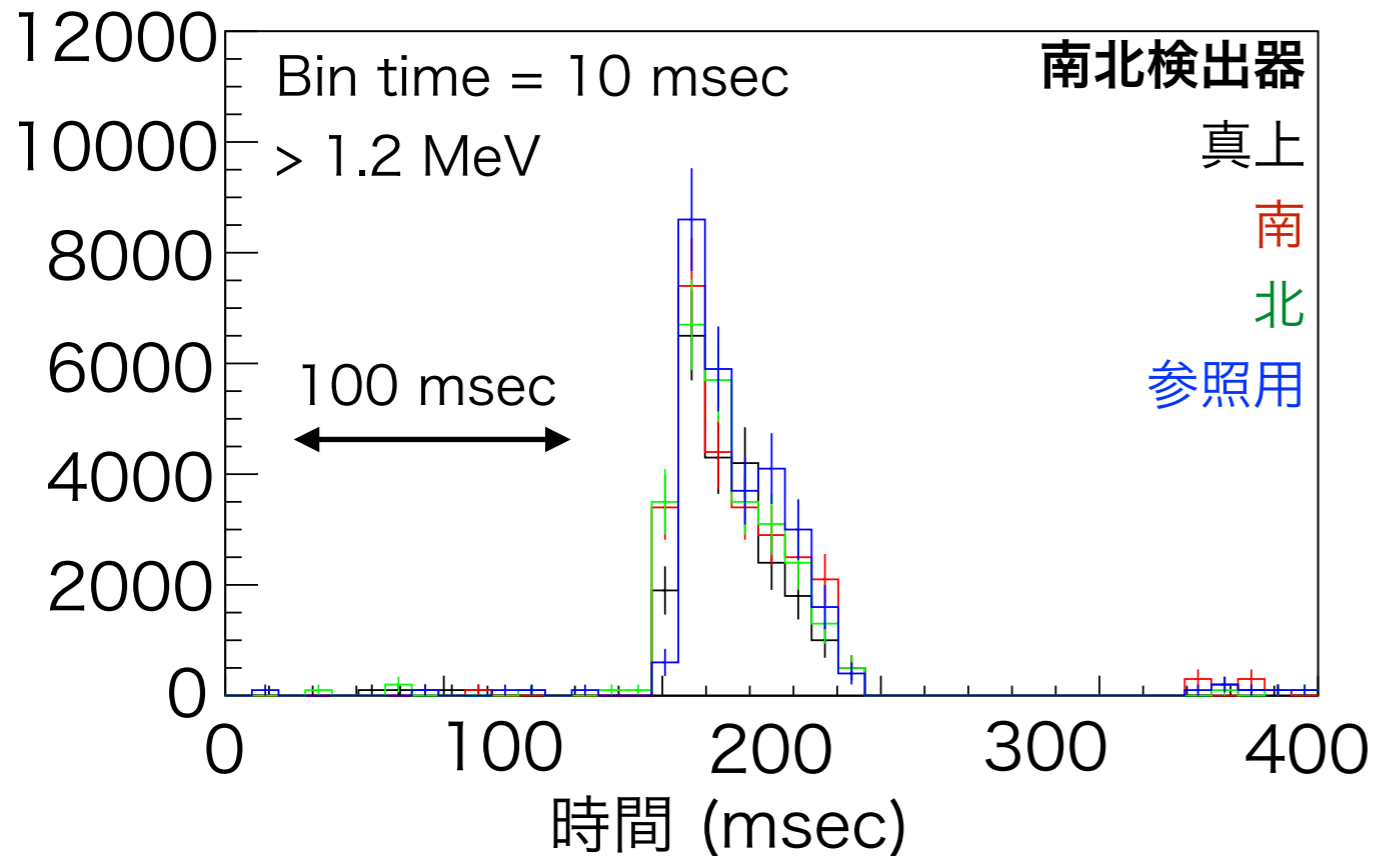


6. 雷雲ガンマ線イベントの検出

- バースト発生と同時に観測装置周辺で落雷。
- 後半の ~ 100 msecはデータ取得できず。
- 検出器間のカウントレート比は30%以内。
 - ▶ ガンマ線平行光に対するコリメータの応答とは矛盾 \rightarrow 検討中。

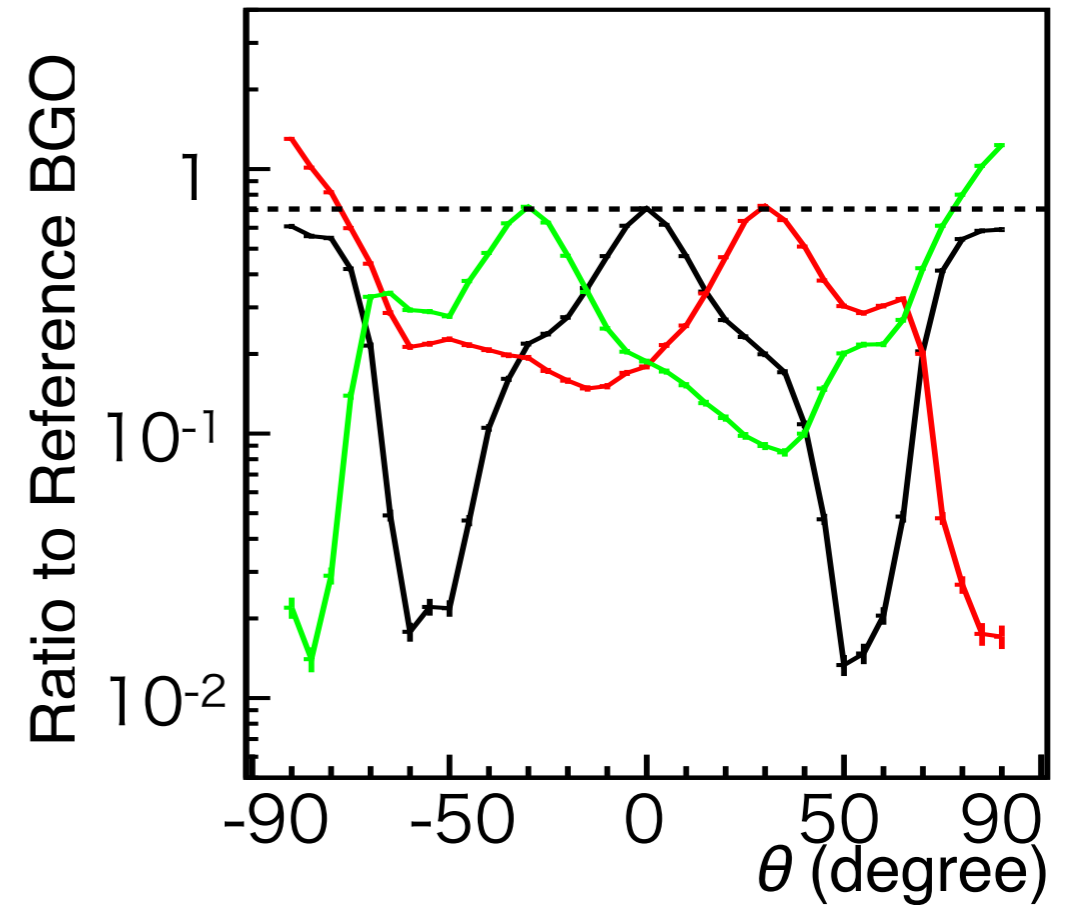


Counts/sec

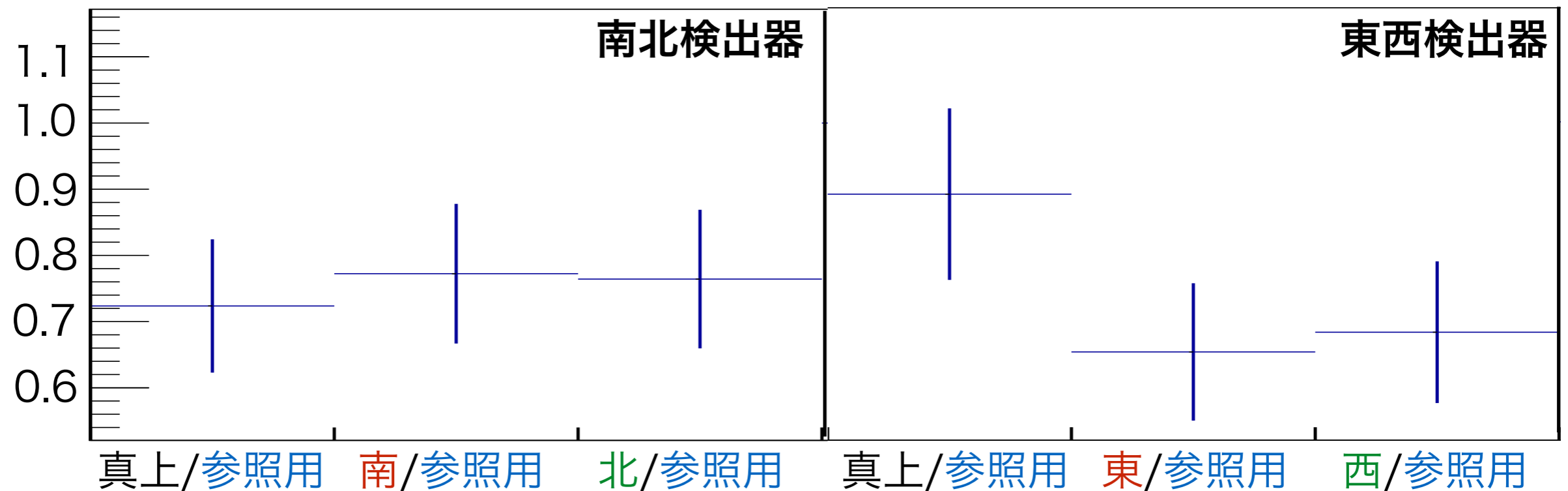


6. 雷雲ガンマ線イベントの検出

- バースト発生と同時に観測装置周辺で落雷。
- 後半の～100 msecはデータ取得できず。
- 検出器間のカウントレート比は30%以内。
 - ▶ ガンマ線平行光に対するコリメータの応答とは矛盾 → 検討中。



検出光子数の参照用検出器との比(>3 MeV)



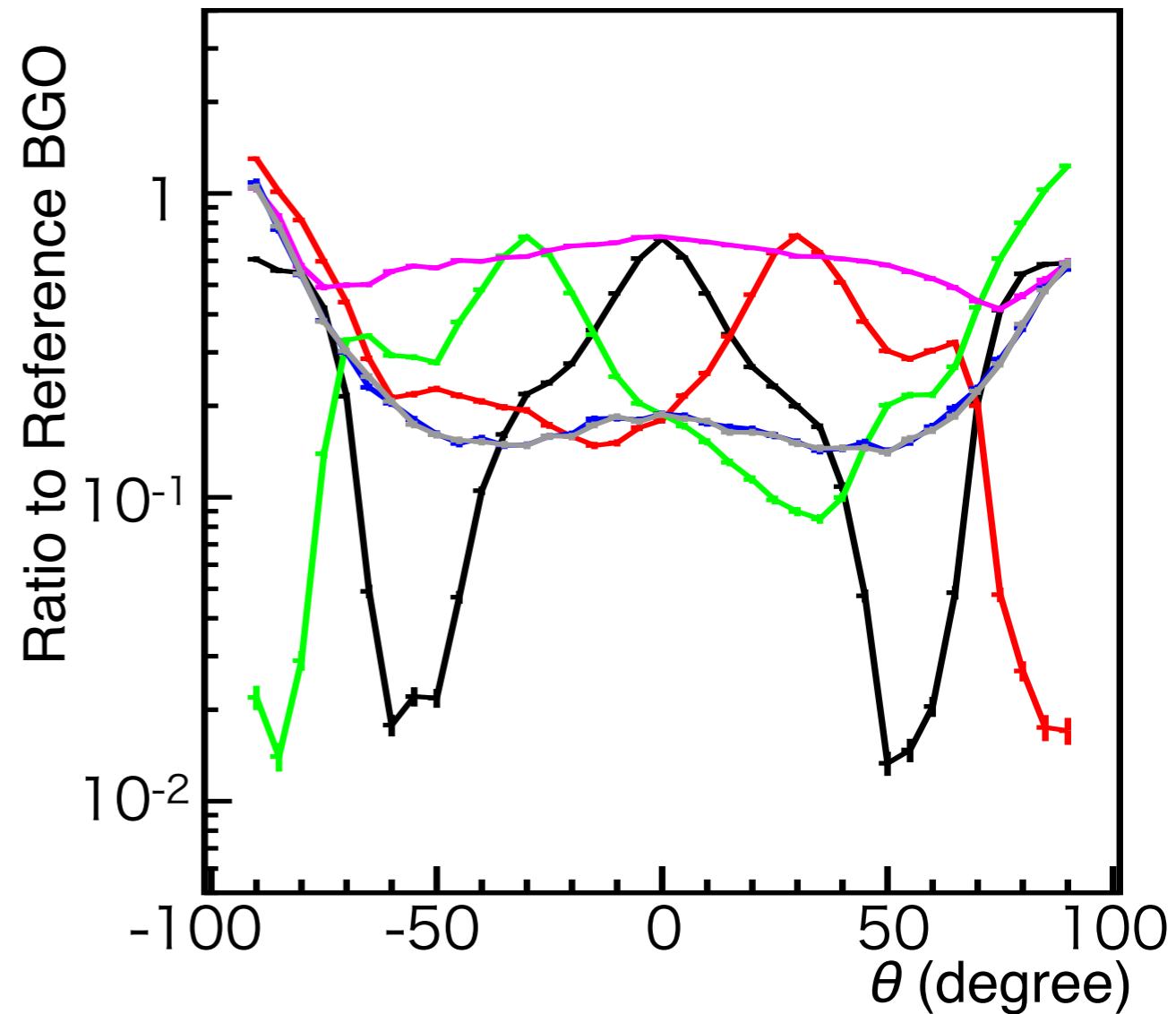
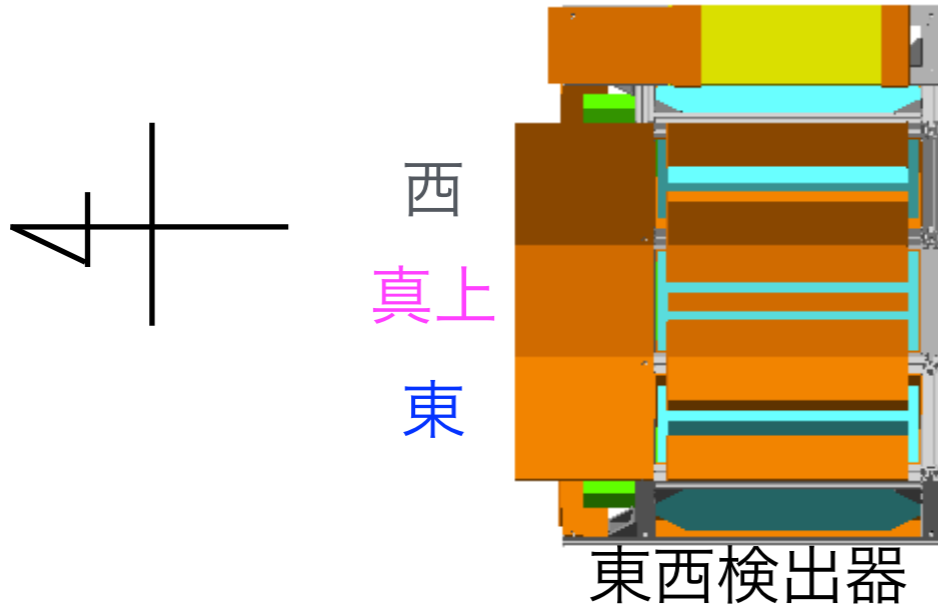
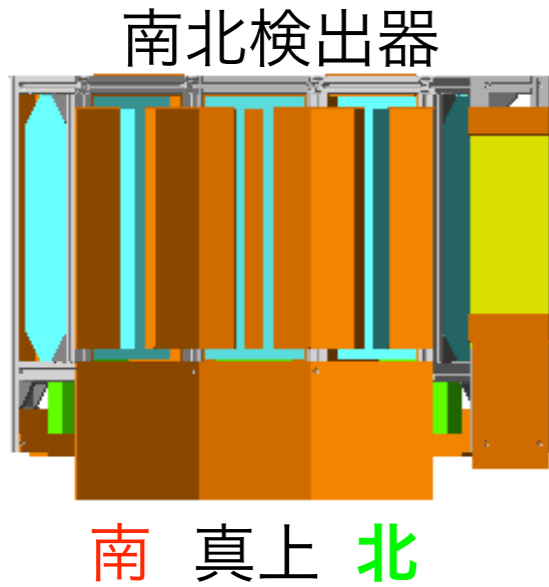
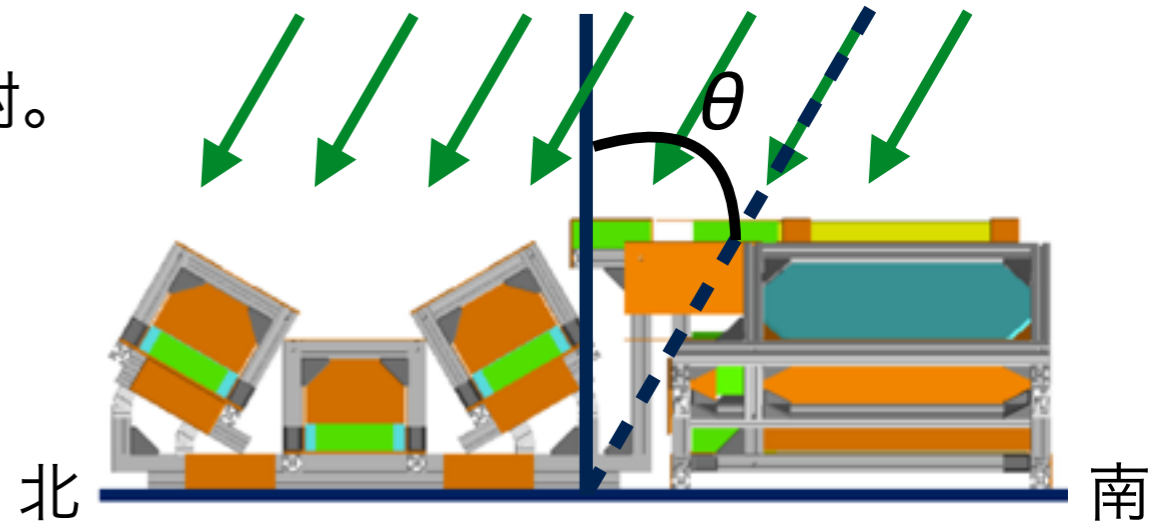
7. まとめ

- 雷雲内のガンマ線放射源の高度測定を目的に、BGOシンチレータと鉛を用いて3 MeV以上のガンマ線に対して角度分解能が 15° (HWHM)の検出器を設計・製作した。
- 検出器が必要な角度分解能を持つことを、モンテカルロ・シミュレーションによって確認した。
- 製作した観測装置を新潟県の柏崎刈羽原子力発電所の敷地内に設置して観測を行い、検出器は4か月以上にわたって正常に動作した。
- 2017年1月16日にショートバーストを検出。詳細は解析中。

Appendix

3. Geant4による検出器のシミュレーション

- Geant4で有効面積の角度依存性を評価
- 検出器全体に同一の面密度で10 MeV平行光を照射。
- 北→真上→南と入射方向を変化させた。
- BGOに 3–10 MeVを落とした光子数の比を表示。
- 有効面積のFWHMは30°。

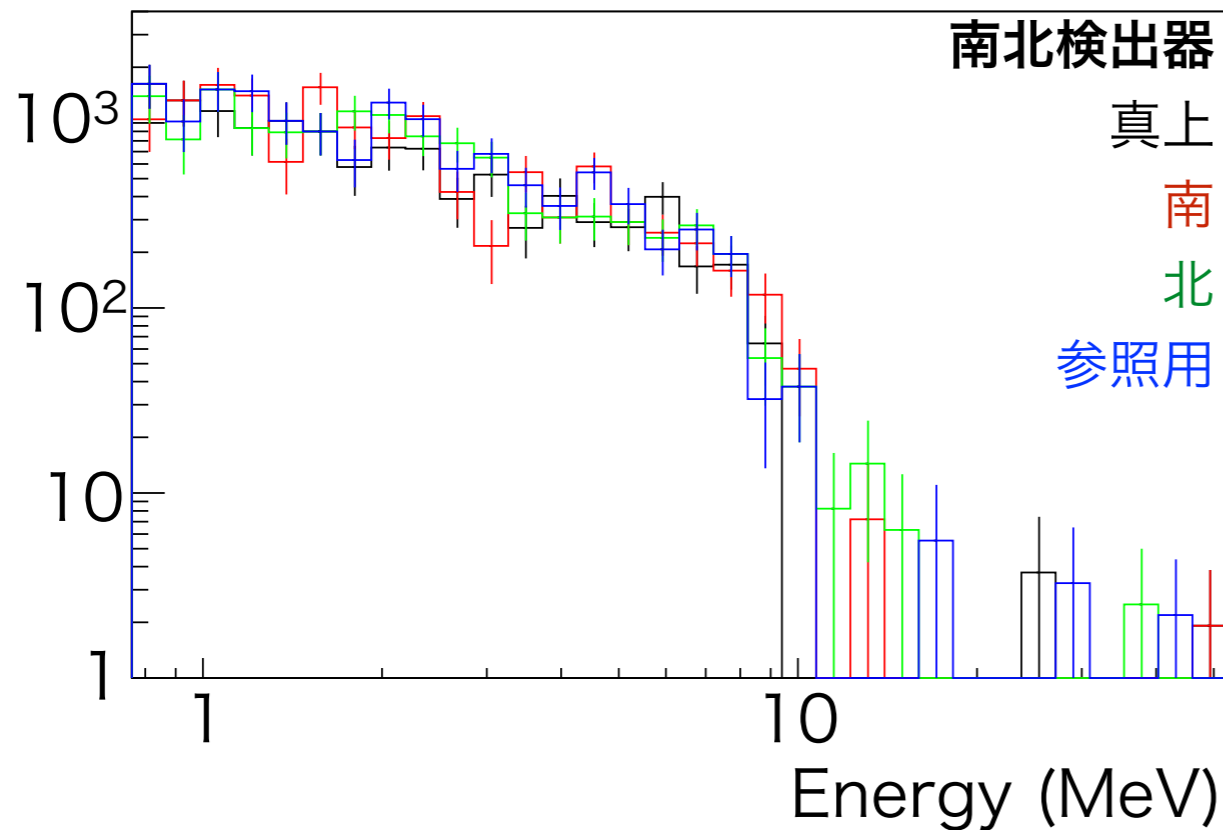


6. 雷雲ガンマ線イベントの検出

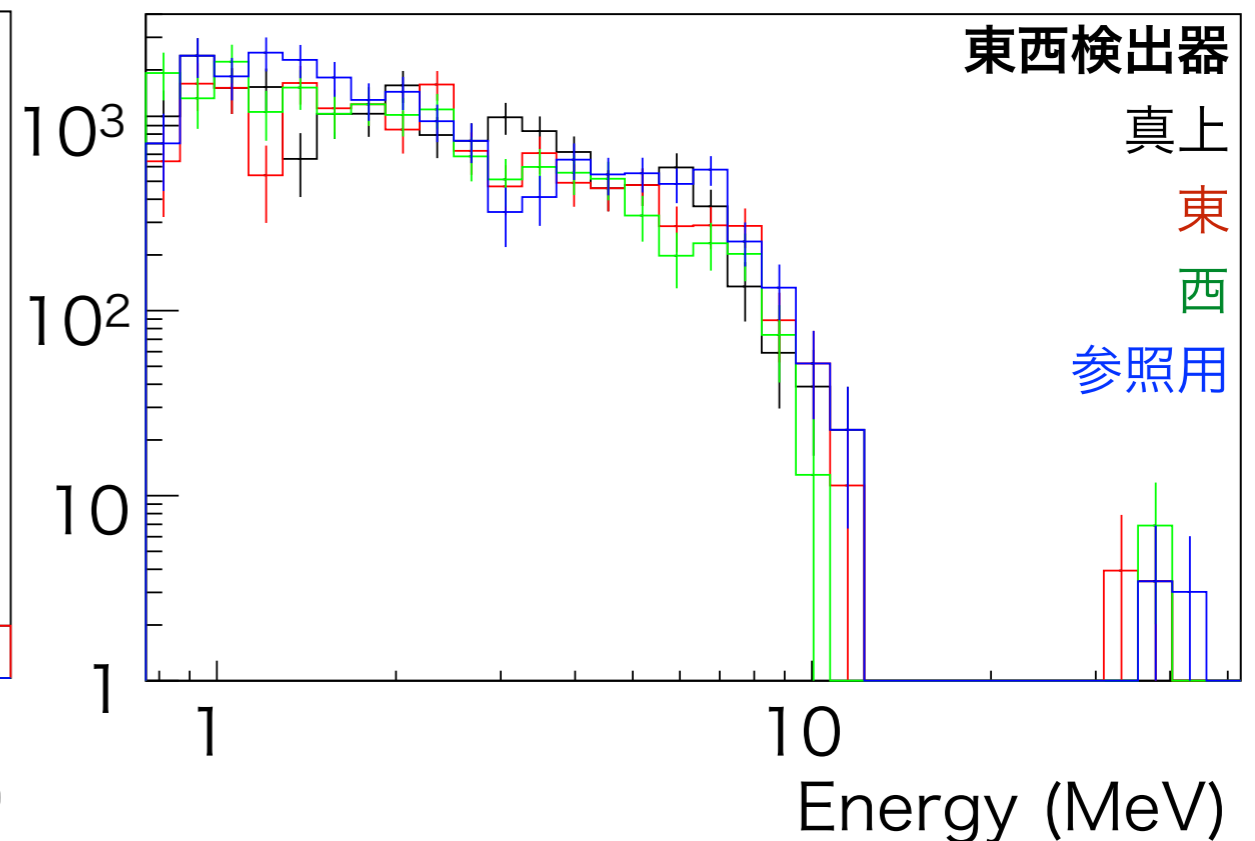
エネルギースペクトルの形状

- どの検出器もスペクトルは ~ 10 MeVまでのび、急激に折れ曲がる。
- スペクトルは検出器応答を解いていないが、 ~ 30 MeVまではfactor2以内でフラット。
- コリメータ検出器間で形状に大きな差はない。

Counts/sec/MeV



Counts/sec/MeV



6. 雷雲ガンマ線イベントの検出

エネルギースペクトルの形状

- どの検出器もスペクトルは ~ 10 MeVまでのび、急激に折れ曲がる。
- スペクトルは検出器応答を解いていないが、 ~ 30 MeVまではfactor2以内でフラット。
- コリメータ検出器間で形状に大きな差はない。

