

PoGOLino気球実験による 大気中性子フラックスの計測

高橋弘充、河野貴文、水野恒史、深沢泰司(広島大学)
M. Kole, M. Pearce(スウェーデン王立工科大学)、
PoGOLite/PoGOLino チーム

PoGOLite: 硬X線偏光観測



PoGOLino: 中性子バックグラウンド計測



硬X線・軟ガンマ線のバックグラウンド



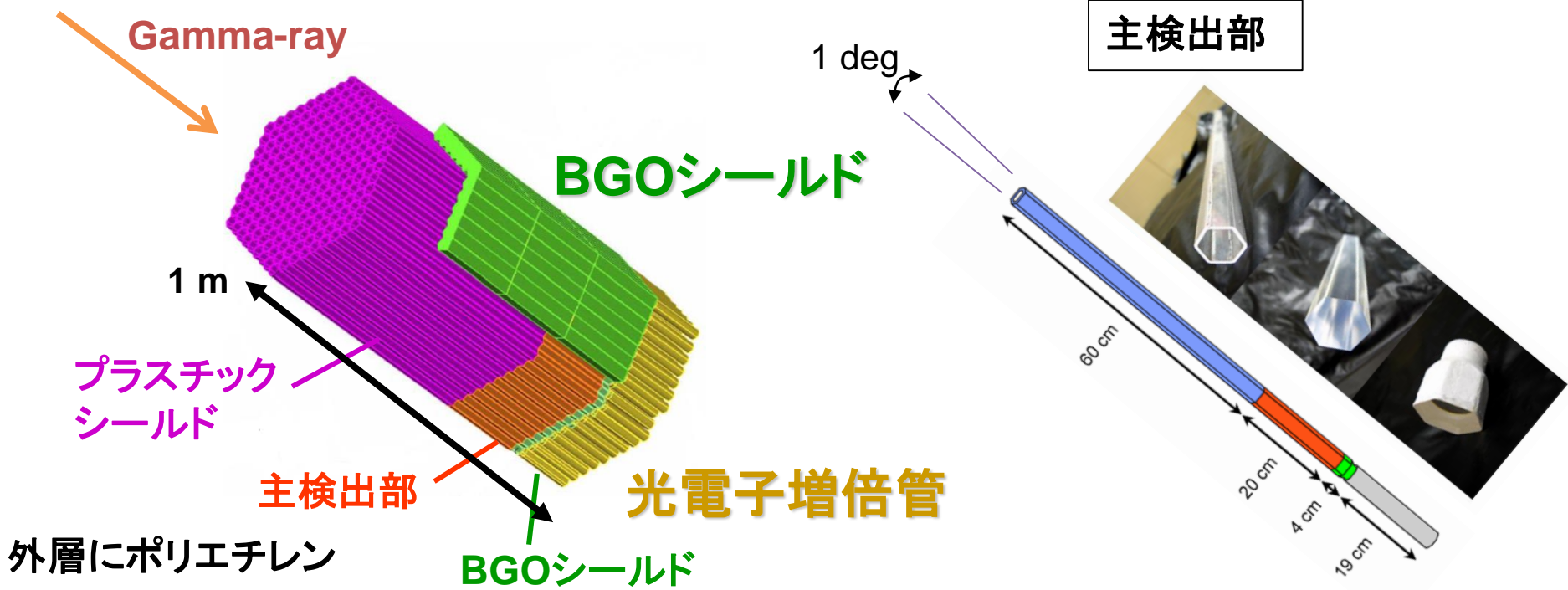
荷電粒子や中性子、天体以外からのX線・ガンマ線のバックグラウンド源のフラックスは、天体フラックスの～1000倍にも達する。

- **主検出部を狭視野に** (視野外からのバックグラウンド除去)
- **周囲にシールド**: BGOやCsIシンチレータ(原子番号の大きい)、ポリエチレン



荷電粒子とX線・ガンマ線は、BGOでほぼ100%除去
中性子の弾性散乱に起因したイベントがバックグラウンドの主成分

PoGO Lite気球実験(25-80 keV 硬X線帯域での偏光観測)



硬X線・軟ガンマ線のバックグラウンド



荷電粒子や中性子、天体以外からのX線・ガンマ線のバックグラウンド源のフラックスは、天体フラックスの～1000倍にも達する。

- **主検出部を狭視野に** (視野外からのバックグラウンド除去)
- **周囲にシールド**: BGOやCsIシンチレータ(原子番号の大きい)、ポリエチレン



荷電粒子とX線・ガンマ線は、BGOでほぼ100%除去
中性子の弾性散乱に起因したイベントがバックグラウンドの主成分

PoGO Lite 気球実験 (25-80 keV 硬X線帯域での偏光観測)

Gamma-ray

1 deg

主検出部

大気中性子の弾性散乱がもっとも支配的なバックグラウンド源(天体信号の～1/2)。スウェーデン上空での中性子フラックスの実測は、これまで行われていない。

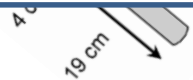
- 中性子のフラックスを刻一刻とモニターすれば、バックグラウンドの変動を追え、より良い感度を達成できる可能性がある。



大気中性子モニターを開発し、PoGO Lite/PoGO Lino搭載

外層にポリエチレン

BGOシールド





中性子の検出

- 高速中性子: (非)弾性散乱 (e.g., $n + p \rightarrow p + n$)
- 熱中性子: 核捕獲反応 (e.g., $n + {}^{157}\text{Gd} \rightarrow {}^{158}\text{Gd} + \gamma$)
 - 核捕獲反応の信号は、**単色エネルギー** (スペクトルでライン~ MeV)。
 - **原子番号の小さい物質** (ガンマ線の反応確率が低い) は中性子のみを感度よく検出できる。



(2.73 + 2.05 MeV)

従来の大型の中性子検出器は ${}^3\text{He}$ か ${}^{10}\text{B}$ が主であったが、これらはガスか液体である。

⇔ 固体: 高い密度 (= 反応確率)、ハンドリングや環境の条件が容易



我々は最近 ${}^6\text{Li}$ を含んだ大型の**結晶シンチレータ**を開発。

LiCaAlF_6 (LiCAF) : Eu 2%ドープ



中性子の検出

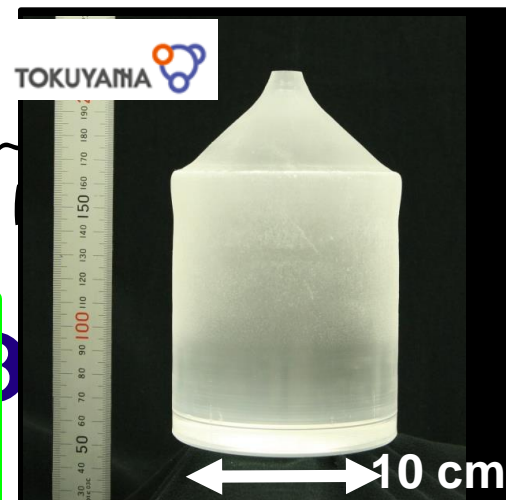
- 高速中性子: (非)弾性散乱 (e.g., $n + p \rightarrow p + n$)

- 熱中性子: 核捕獲反応 (e.g., $n + {}^{157}\text{Gd} \rightarrow {}^{158}\text{Gd}$)

- 核捕獲反応の信号は、**単色エネルギー** (スペクトルでライン)
- **原子番号の小さい物質** (ガンマ線の反応確率が低い)
中性子のみを感度よく検出できる。



(2.73 + 2.05 MeV)



従来の大型の中性子検出器は ${}^3\text{He}$ か ${}^{10}\text{B}$ が主であったが、
これらはガスか液体である。

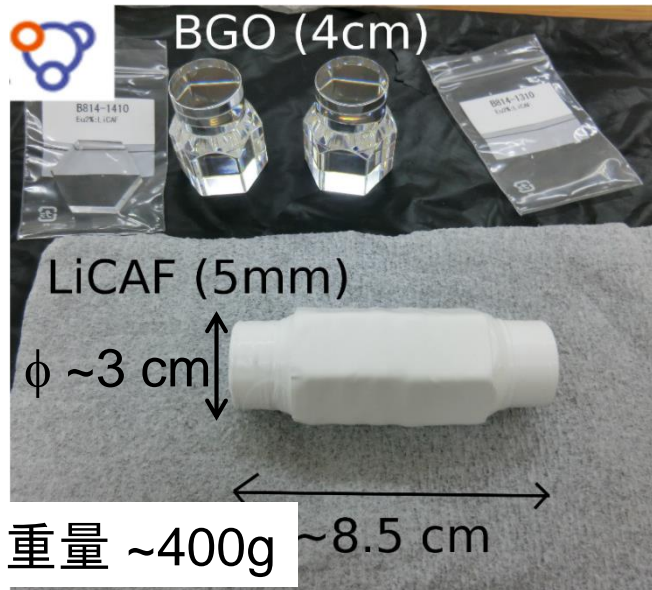
⇔ 固体: 高い密度 (= 反応確率)、ハンドリングや環境の条件が容易



我々は最近 ${}^6\text{Li}$ を含んだ大型の**結晶シンチレータ**を開発。

LiCaAlF_6 (LiCAF) : Eu 2%ドープ

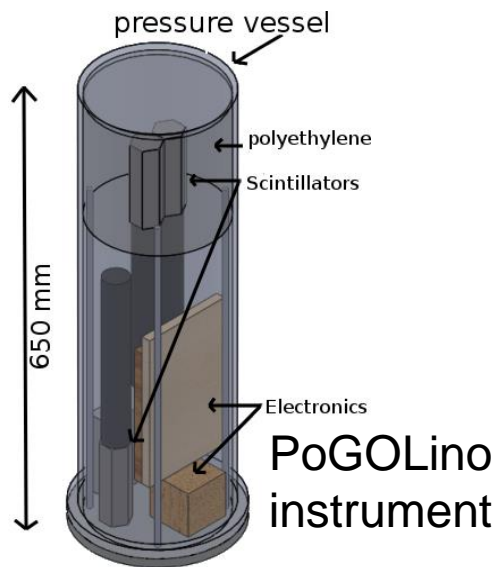
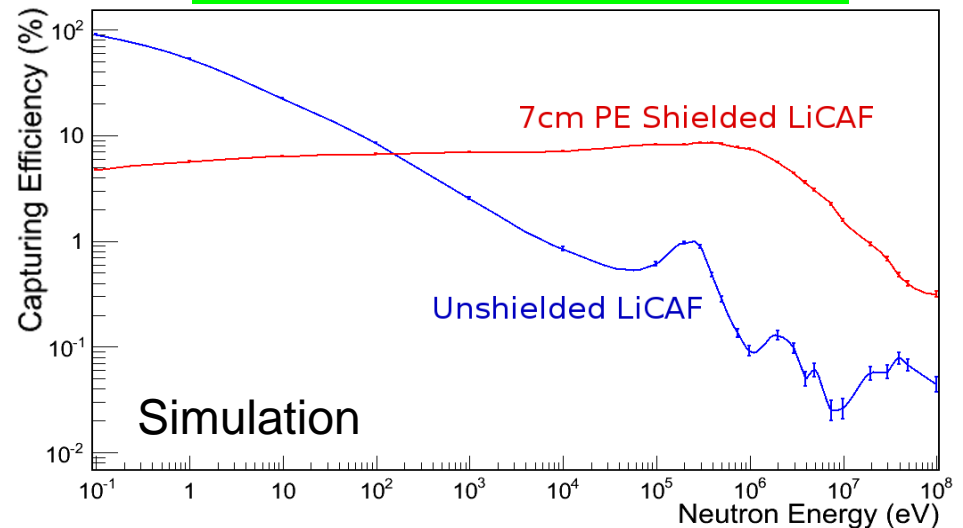
中性子検出器 (PoGOLino)



LiCAFの上下をBGOで囲ったフォスウィッチ検出器

- (1) **7cm厚のポリエチレンシールドでカバー**
⇒ $\sim 1 \text{ MeV}$ 中性子に感度
- (2) **シールドなし**
⇒ もともと熱化されていた中性子に感度

2種類の検出器の感度

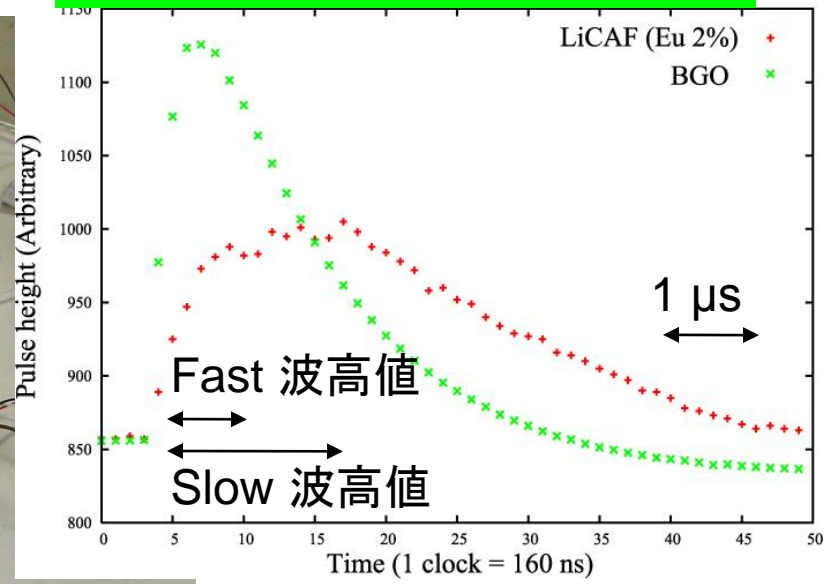


中性子のエネルギースペクトルを「べき状」と仮定
⇒ 「フラックス」と「べき」が決められる

中性子照射実験



LiCAF と BGO の波形データ
(プリアンプ出力後)

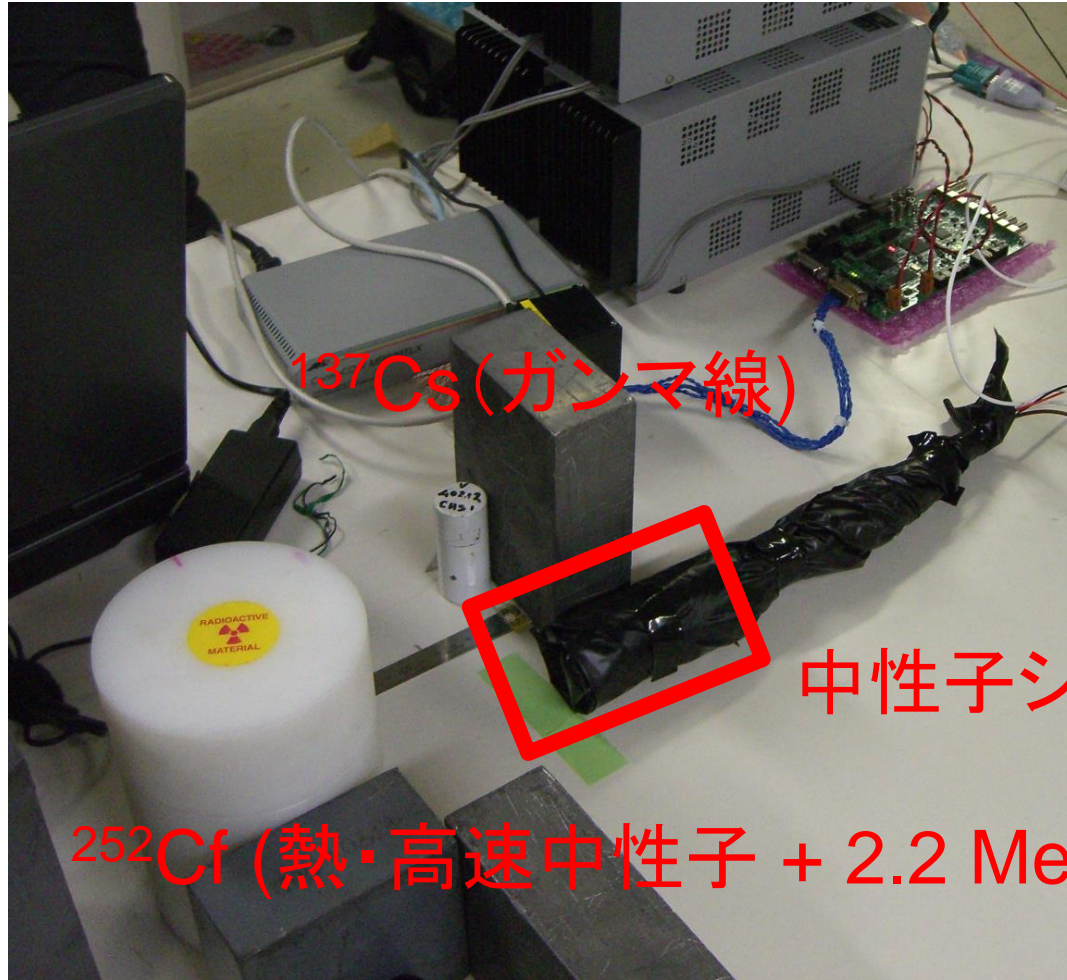


^{137}Cs (ガンマ線)

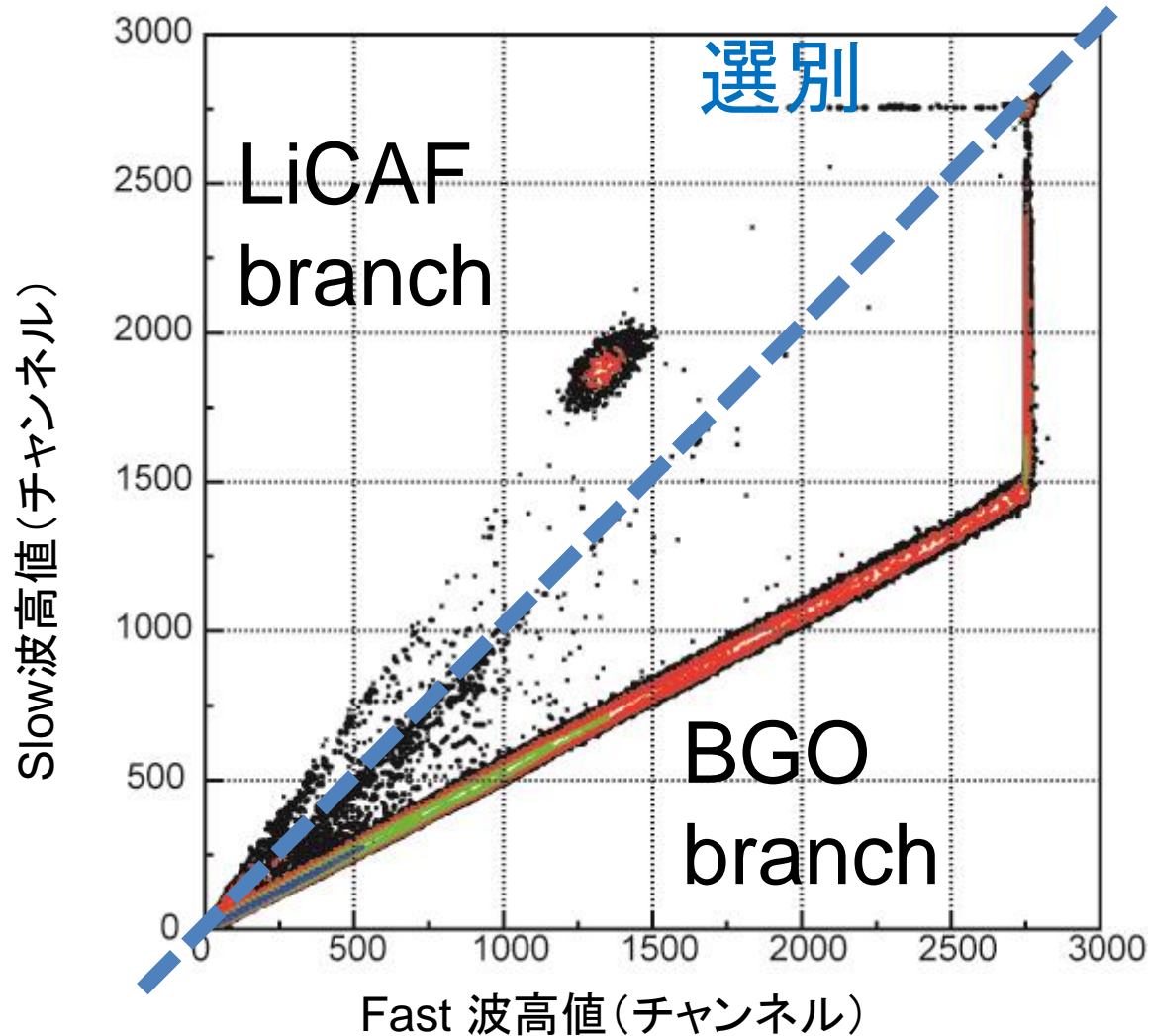


中性子シンチレータ

^{252}Cf (熱・高速中性子 + 2.2 MeV ガンマ線)



2次元スペクトル



LiCAF と BGO の波形をしっかりと分離できている。

ポリエチレンシールドあり・なし



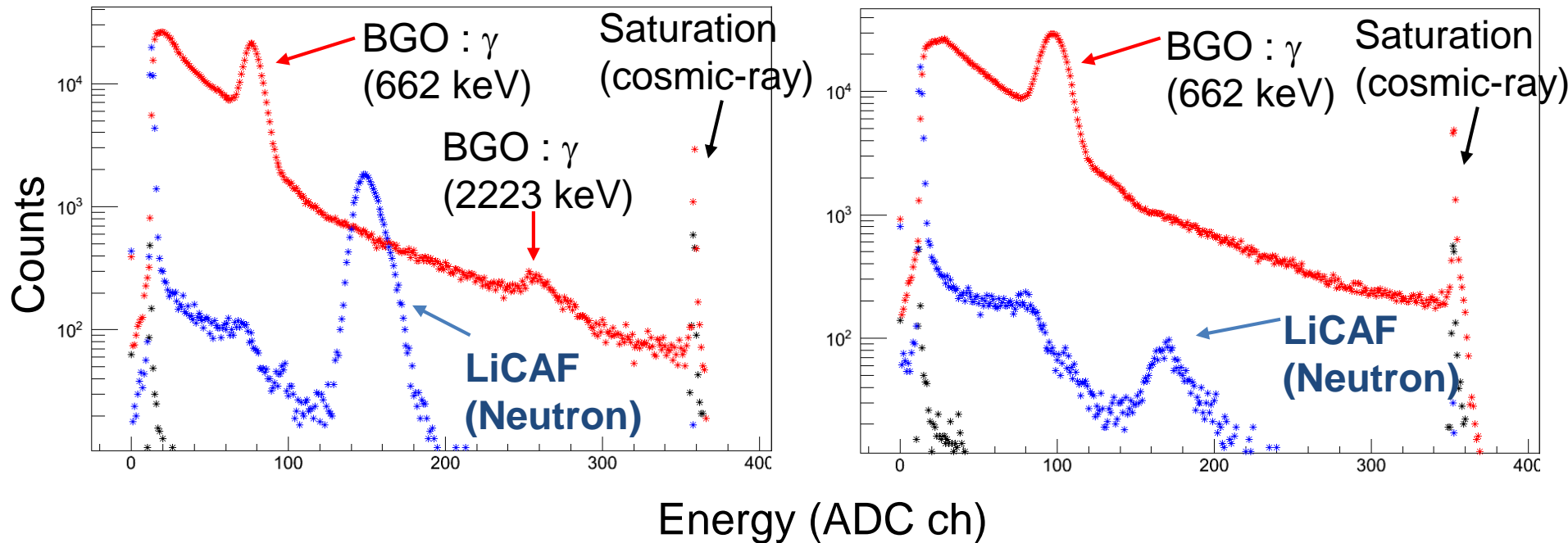
^{252}Cf (2.3 MBq)と ^{137}Cs (1 MBq)を同時に照射

距離: 15 cm、照射時間: 300 s

中性子: ^{252}Cf 、ガンマ線 ^{252}Cf と ^{137}Cs の両方から

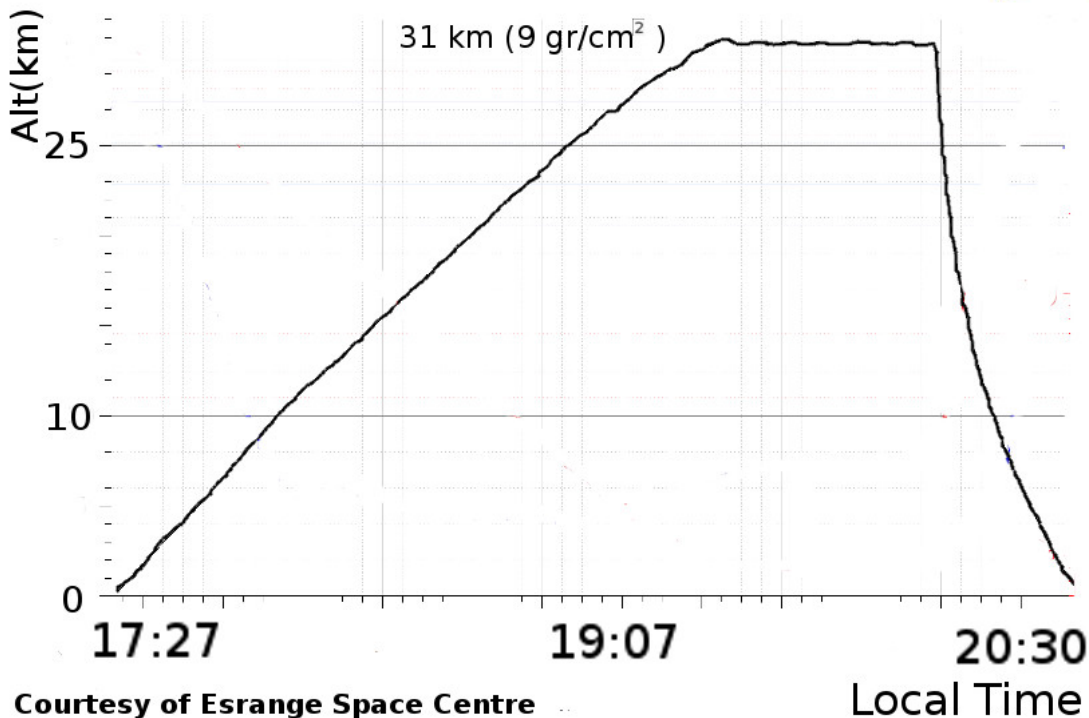
7cmポリエチレンシールドあり

シールドなし



シールドありの方が、ポリエチレンシールドで熱化された中性子をより多く検出している(予想通り)

PoGOLino 大気中性子実験(2013/3)

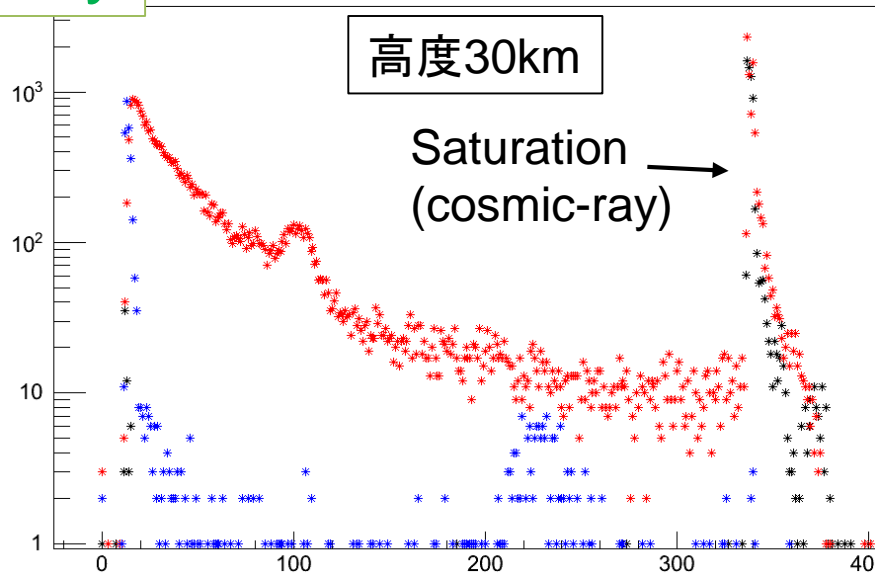
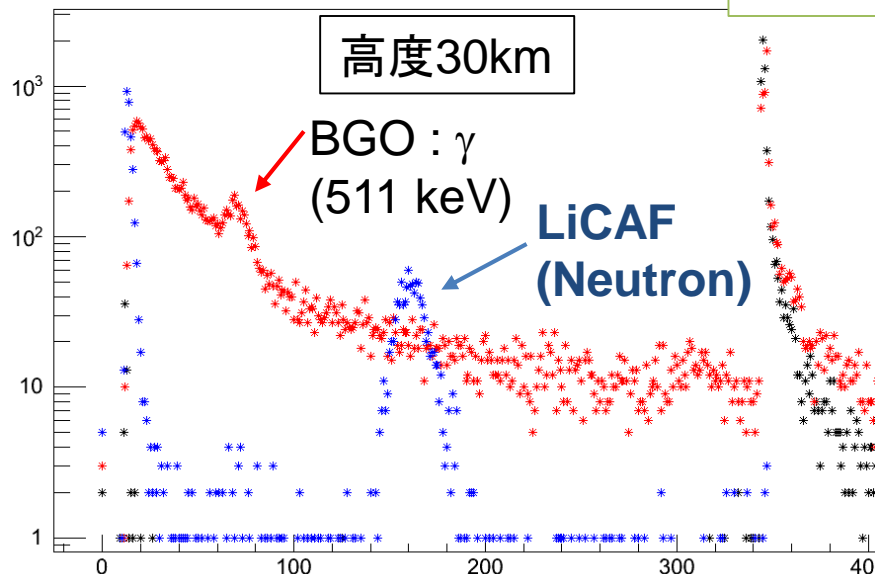
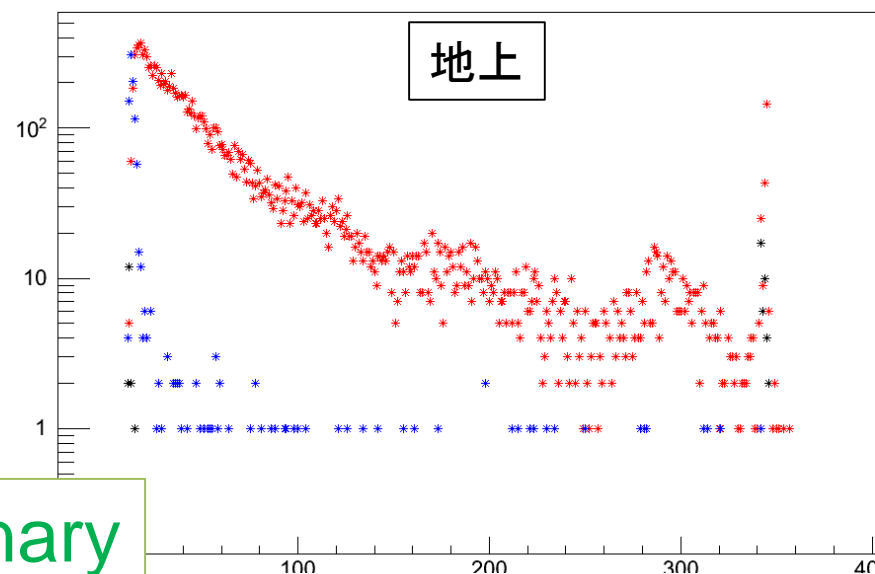
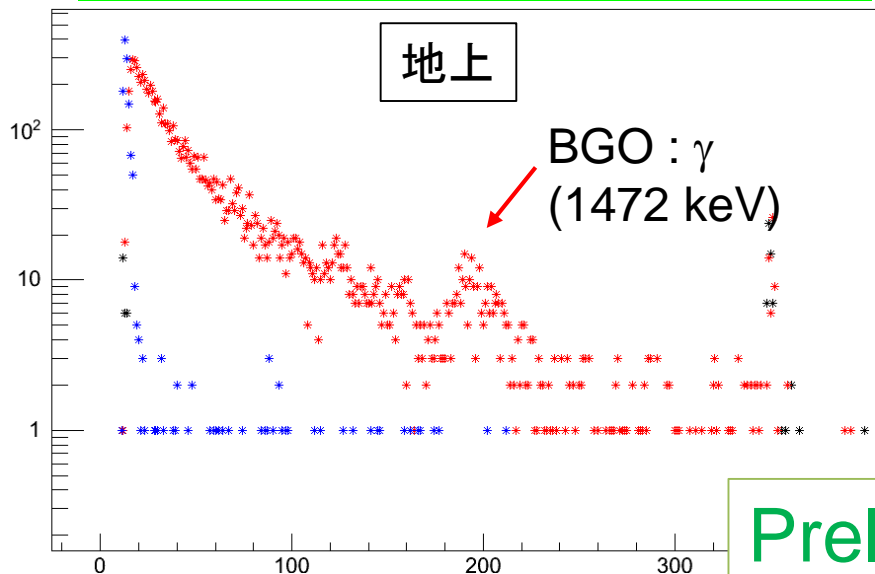


- スウェーデンの北方、Esrange 気球実験場から
2013年3月20日に放球。
- 約3時間で、高度 0-31 km をフライト。
- PoGOLite と同様の中性子検出器を搭載。

中性子フラックス (2013/3 PoGOLino) 300秒積分

7cmポリエチレンシールド中

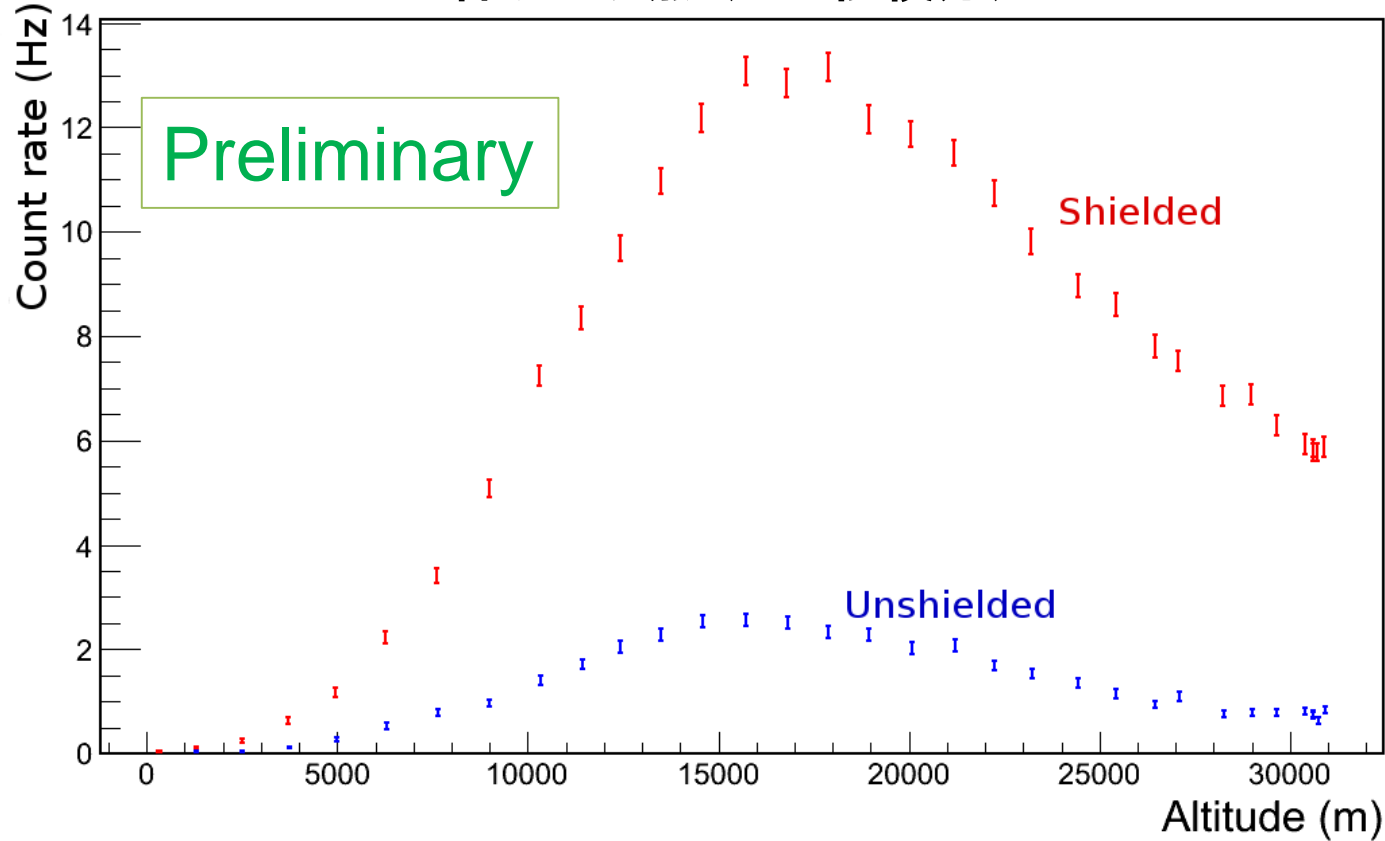
シールドなし



観測された中性子イベントレート

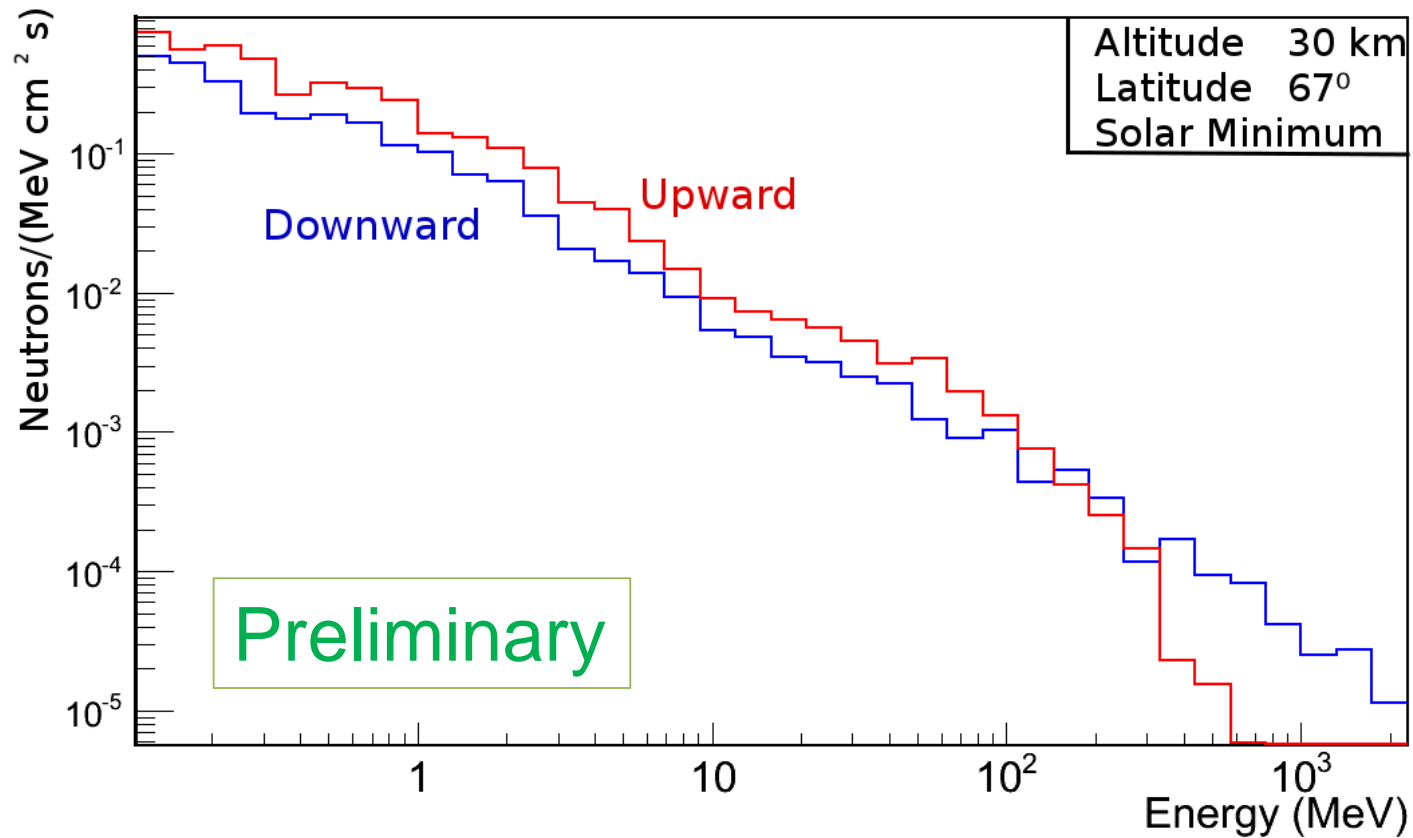


各データ点 (300秒積分)



高度0-31kmにわたって、大気中性子のレートを実測することができた。

シミュレーション予想

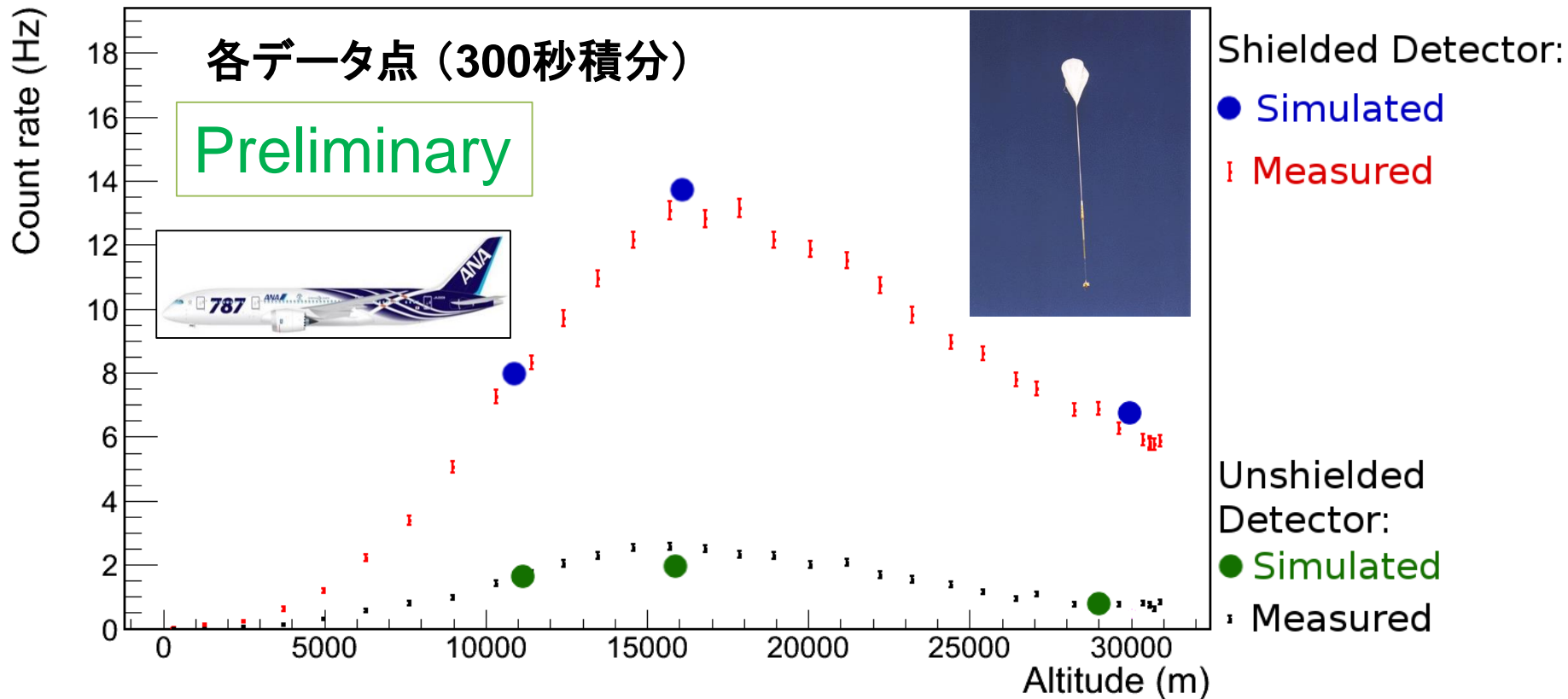
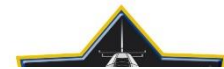


ソフトウェア: PLANETOCOSMICS with Geant4.9.5

テキサス上空での気球実験データ (Armstrong+1973) で検証されたもの

条件: 緯度 67°、高度 30 km

観測データとシミュレーションの比較



シミュレーションを実施した 11, 15, 30 km で、データとシミュレーションは良く一致
⇒ PoGOLiteが高度40kmをフライトする際に、
同じ検出器とシミュレータで、大気中性子のフラックスを推定できると考えている

移動速度: 気球~100 km/h (= 8 km/300 s)、飛行機 ~1000 km/h (= 80 km/300 s).
⇒ 飛行機に搭載すれば、コンパクト&リアルタイムでの
中性子・ガンマ線・荷電粒子モニターになる

まとめ



- 硬X線・軟ガンマ線の帯域の天体観測では、中性子バックグラウンドが検出器の主要なバックグラウンド源となっている。
- PoGO Lite気球実験を行うスウェーデン上空では、大気中性子フラックスが測定されたことはなかったため、2013年3月にPoGO Lino気球実験を実施した。
- LiCAF(Eu)とBGOを組み合わせたフォスウィッチ検出器を2個作成し、(1)7cmのポリエチレンシールド中に、(2)シールドなし、の環境下におくことで、大気中性子のフラックスとエネルギースペクトルのべきを測定することができた。
- 観測データを再現するシミュレータも作成し、PoGO Lite気球実験におけるバックグラウンド推定も実施できる見通しがたった。

地球科学の分野でも有益なデータとなるようでしたら、ぜひコメントをお願いします。
PoGO Liteのデータもロシアから無事に回収されたので、その解析の結果も引き続き報告を行っていきます。