

広島大学

# 大気中性子バックグラウンド計測検出器 PoGOLino気球実験

高橋弘充(広島大)

平野 敬純、河野 貴文、水野 恒史、深沢 泰司(広島大学)、  
Merlin Kole、Mark Pearce(スウェーデン王立工科大学)、  
他PoGOLiteチーム

**PoGOLino:**

硬X線偏光検出器PoGOLite気球実験で  
主要なバックグラウンド源である大気中性子  
をスウェーデン上空で実測する  
(PoGOLiteは今年の夏に放球予定)。

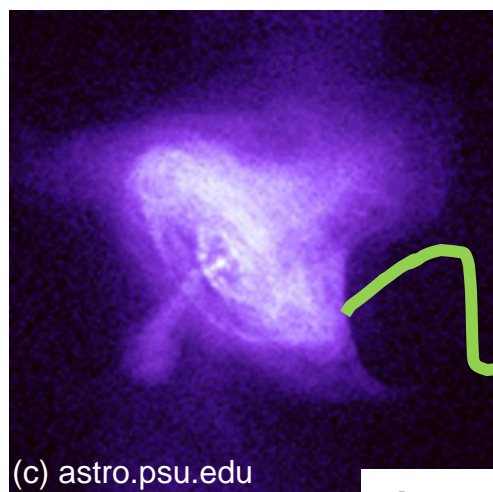
PI: Mark Pearce (スウェーデン王立工科大学)  
([www.particle.kth.se/pogolite](http://www.particle.kth.se/pogolite))





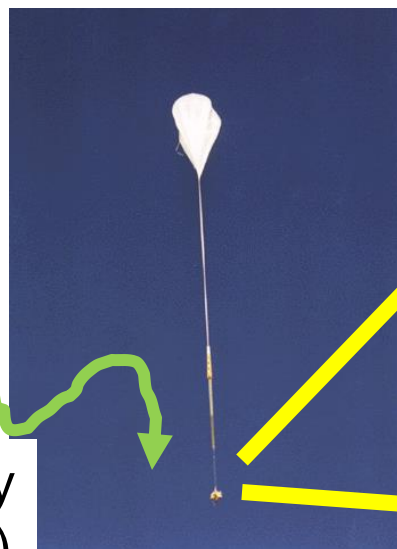
# X線・ガンマ線 偏光観測

- **偏光**測定 (イメージ、タイミング、スペクトルとは異なる情報)  
=> パルサーやブラックホール、活動銀河核、ガンマ線バーストなどにおける高エネルギー現象の研究で重要
- しかしながら、**X線・ガンマ線の偏光が検出された天体は、ガンマ線バースト、かに星雲** (2.6/5.2 keV と 200 keV 以上) と **Cyg X-1** (600 keV 以上) のみ
- 他のエネルギー帯域、他の天体の偏光観測が必要不可欠  
PHENEX, PoGOLite, ASTRO-H, GEMS, PolariS ...

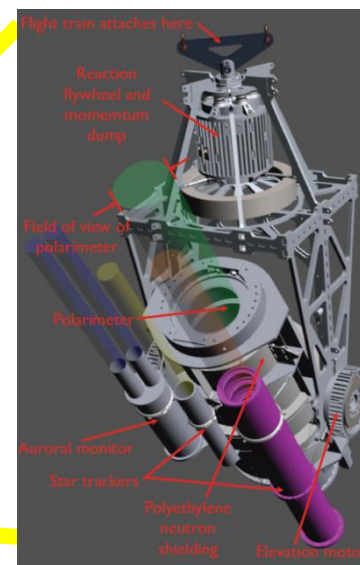


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray  
(25-80 keV)



~40 km

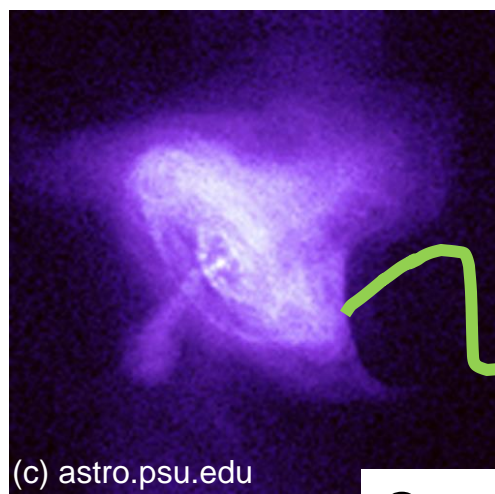


Weight (wo ballast) : ~2000 kg<sub>2</sub>  
Power : ~300 W (Instrument)  
~200 W (Gondola, etc.)



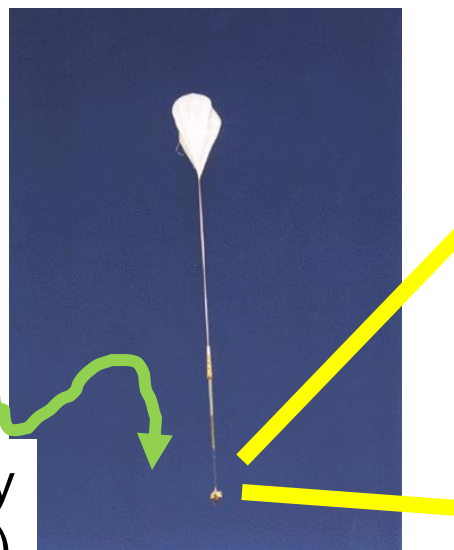
# Polarized Gamma-ray Observer (PoGO Lite)

- **PoGO Lite 気球実験は、25-80 keV の硬X線帯域で、200 mCrab の天体から10% の偏光を検出する能力を持つ。**
- 日米欧の国際共同プロジェクト。
- スウェーデンのキルナから放球し、かに星雲と Cyg X-1 を観測。

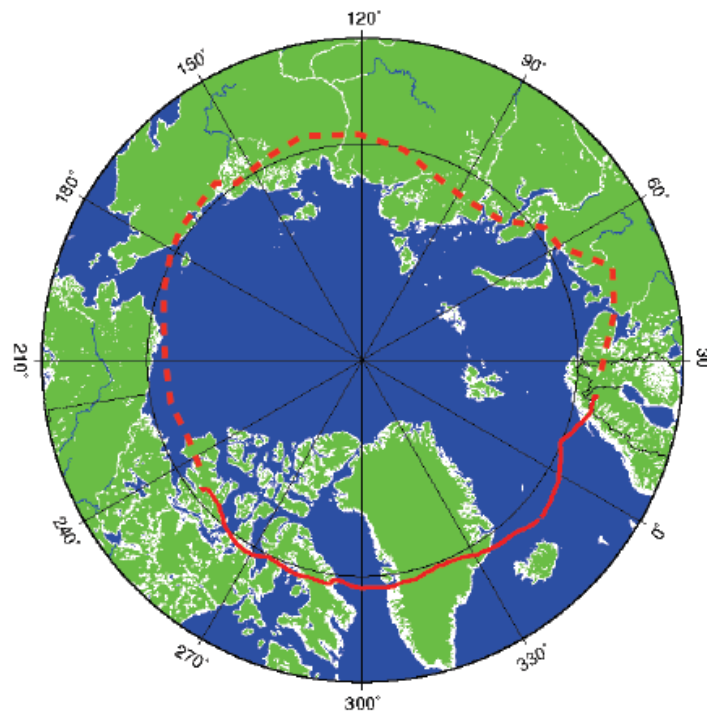


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray  
(25-80 keV)



~40 km

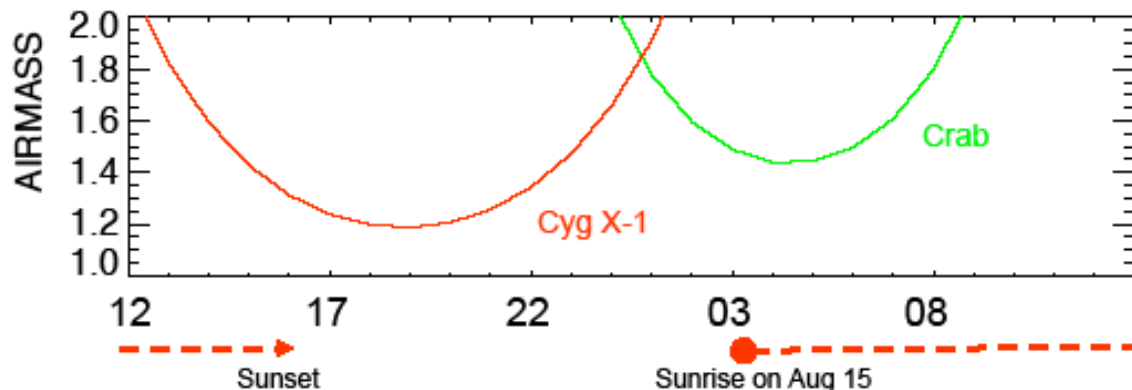


200 W (Canada, etc.)

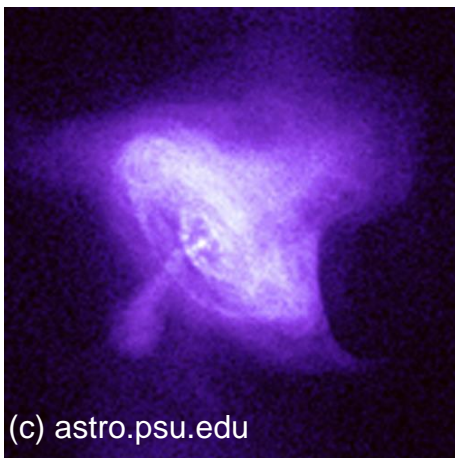


# Pathfinder Flight from Sweden

## Flight Plan (1-day long)



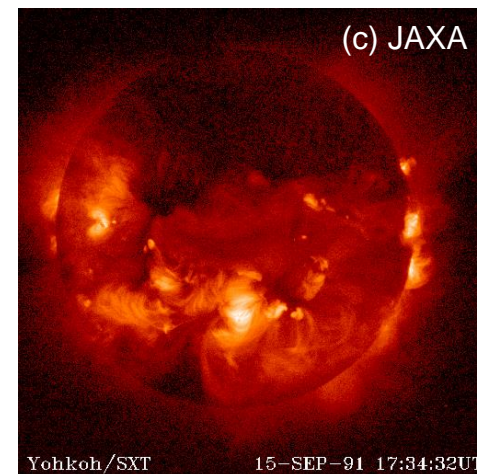
## Crab nebula (Pulsar)



## Cyg X-1 (Black hole binary)



## Solar flare



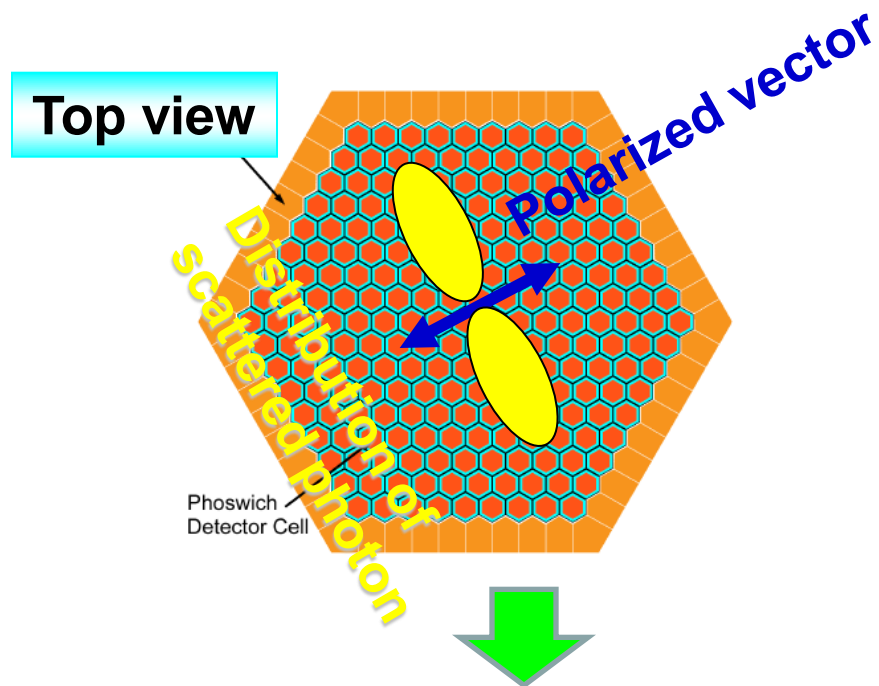
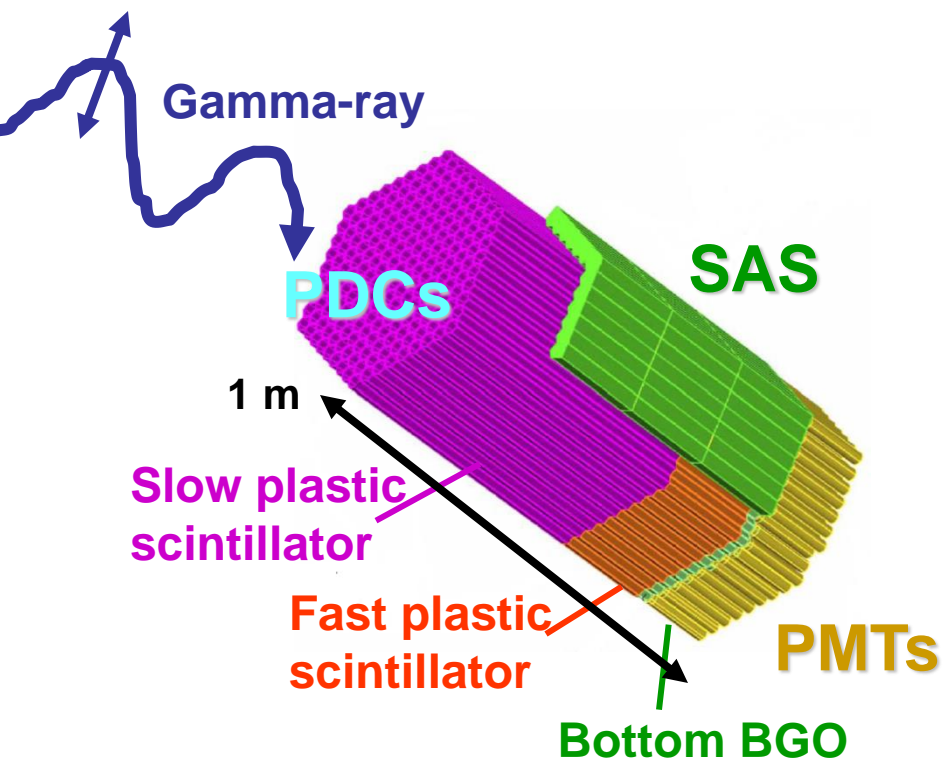
## PoGOLite の特徴

- 大面積、(それなりの)低バックグラウンド => 明るい天体から硬X線偏光の検出
- 長時間の連続観測(最長~2週間): 高い統計、天体の変動(かに星雲も変動)<sup>4</sup>



# 偏光検出

- **PoGOLite** ではコンプトン散乱を検出し、その散乱角の異方性から偏光を検出  
主検出部(PDC)は 217 ユニット(本番観測)、61 ユニット(パスファインダーフライト)
- 検出器自身の系統誤差、大気中性子フラックスの異方性をキャンセルするため、観測中は検出器が 5 分で1回転する。



偏光方位角と直交方向に  
多くのイベントが検出される<sup>5</sup>



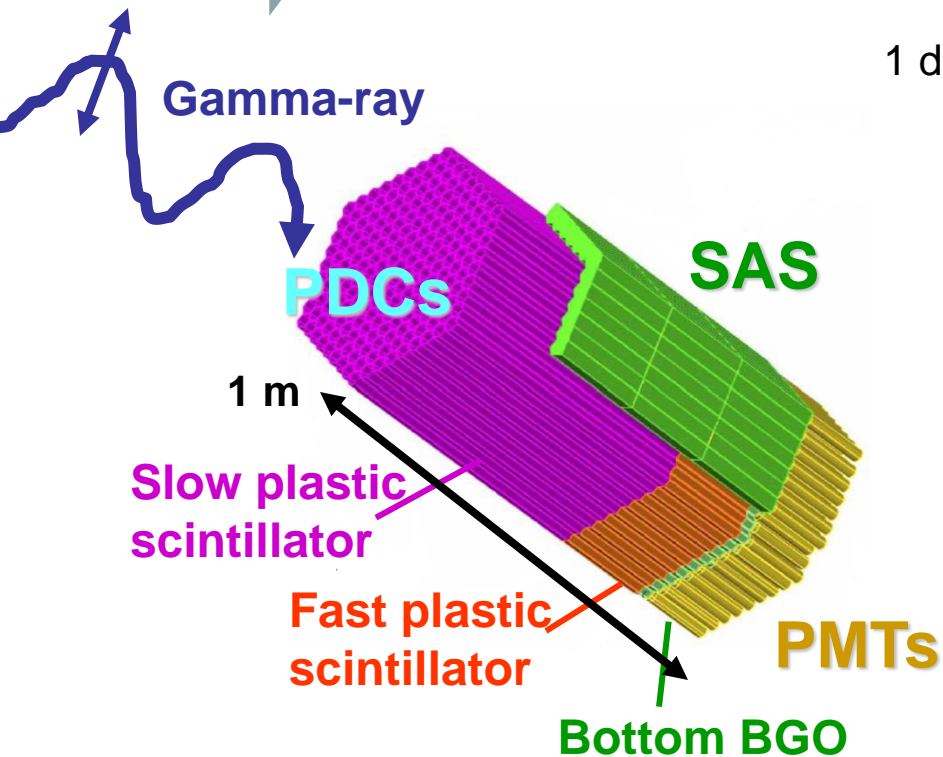
# 低バックグラウンド

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 $\sim 1000$ 倍にも達する。

- **主検出部(PDC)**は井戸型フォスウィッチ検出器：視野角 $\sim 1^\circ$
- **周囲にシールド**: BGOシンチレータ (SAS)、ポリエチレン

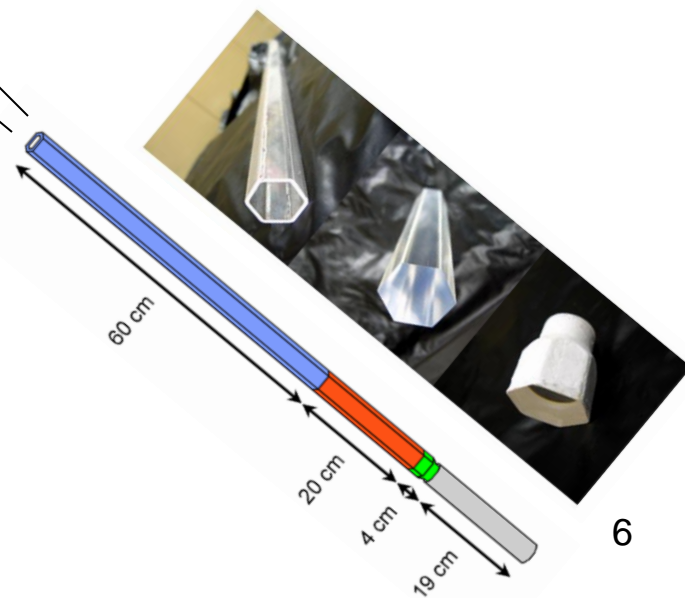


荷電粒子とX線・ガンマ線は、BGOでほぼ100%除去  
中性子の弾性散乱に起因したイベントがバックグラウンドの主成分



1 deg

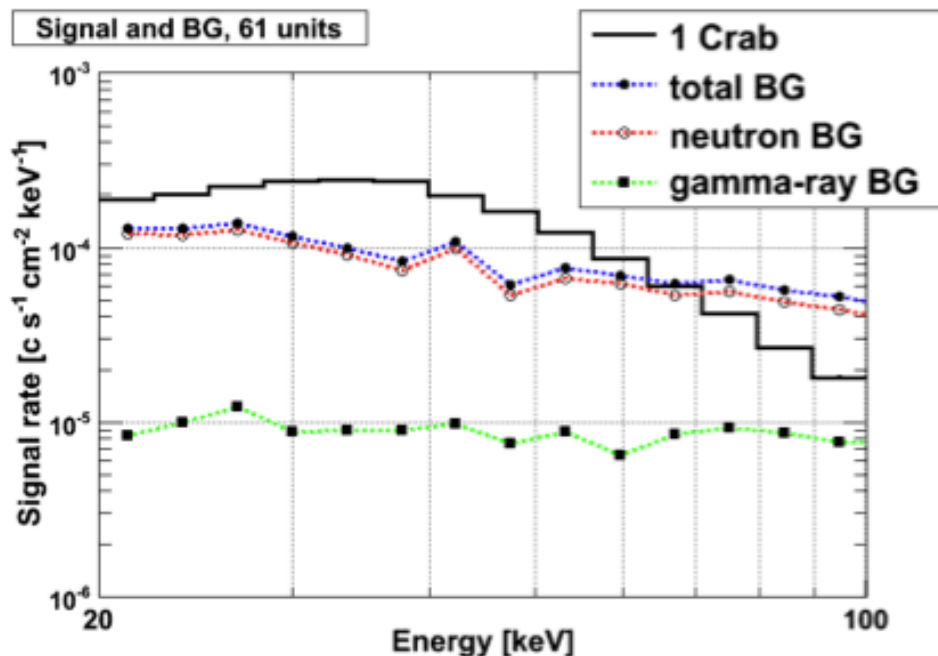
PDC unit





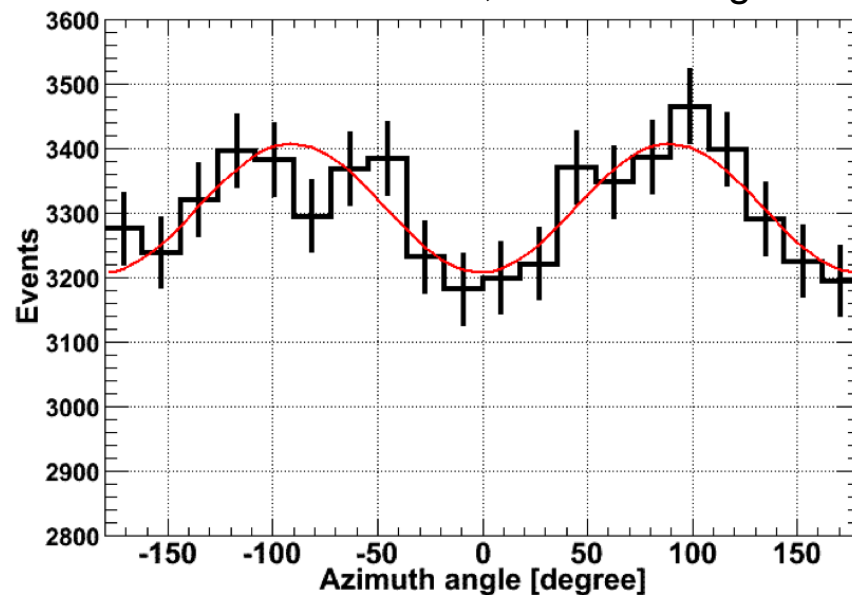
# パスファインダーフライトの予想感度

天体信号とバックグラウンドのフラックスの比較



予想モジュレーションカーブ  
かに星雲(偏光度 20% 仮定)

観測時間: 6 hours, Air mass:  $5 \text{ g/cm}^2$



**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 $\sim 1/2$ )  
→ 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搭載(PoGOLino, PoGOLite)**



# 中性子の検出

(株)トクヤマの協力

- 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。

**$\text{LiCaAlF}_6$  (LiCAF) : Eu 2%ドープ**



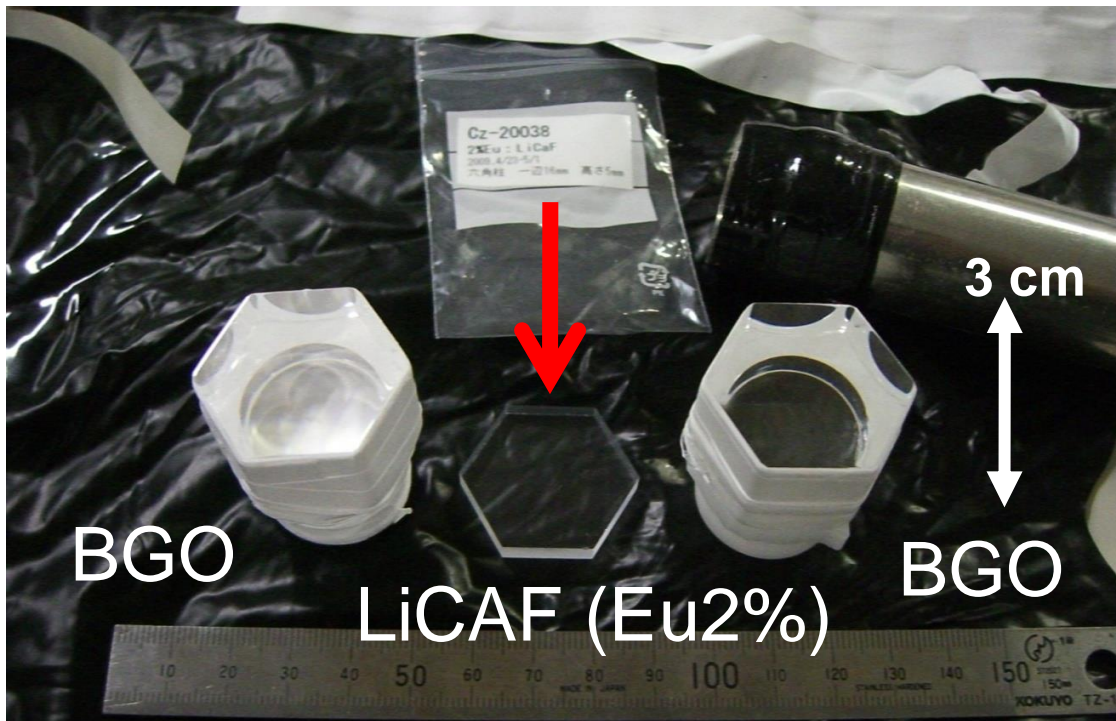
# 大気中性子モニター

PoGOLite では、ポリエチレンで減速された熱中性子が周囲に存在

→ **LiCAF (Eu 2%)** で熱中性子を観測

- 光量: 9000 photon/neutron、減衰時定数:  $\tau \sim 1.5 \mu\text{s}$ 、潮解性なし
- 厚さ 5 mm ( ${}^6\text{Li}$  50%): 熱中性子を核捕獲する確率  $> 90\%$
- 上下を主検出部と同型のBGOシンチレータ( $\tau \sim 300 \text{ ns}$ )ではさむ

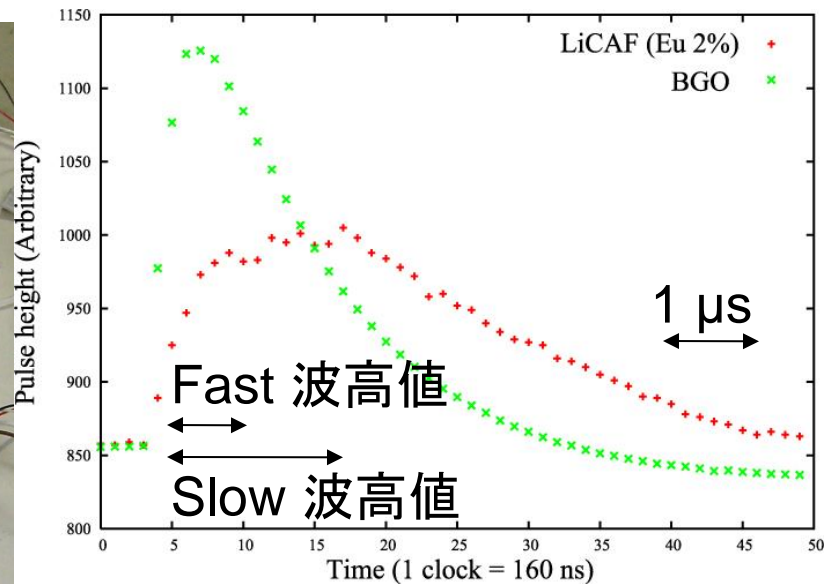
→ **フォスウィッチ検出器**





# 中性子照射実験

LiCAF と BGO の波形データ  
(プリアンプ出力後)



$^{137}\text{Cs}$  (ガンマ線)

中性子シンチレータ

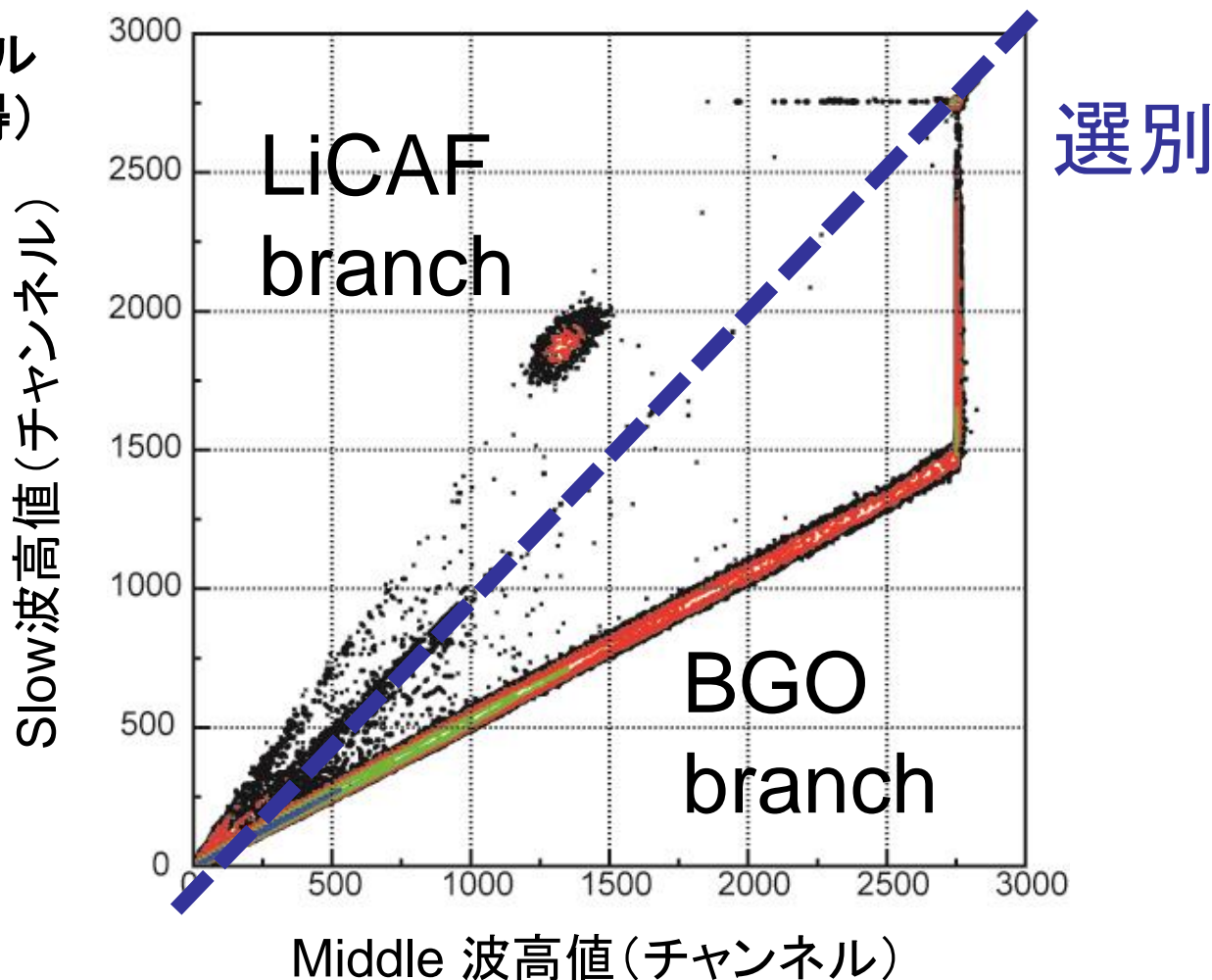
$^{252}\text{Cf}$  (熱・高速中性子 + 2.2 MeV ガンマ線)



# フォスウィッチ判定、波形取得、ヒストグラム機能

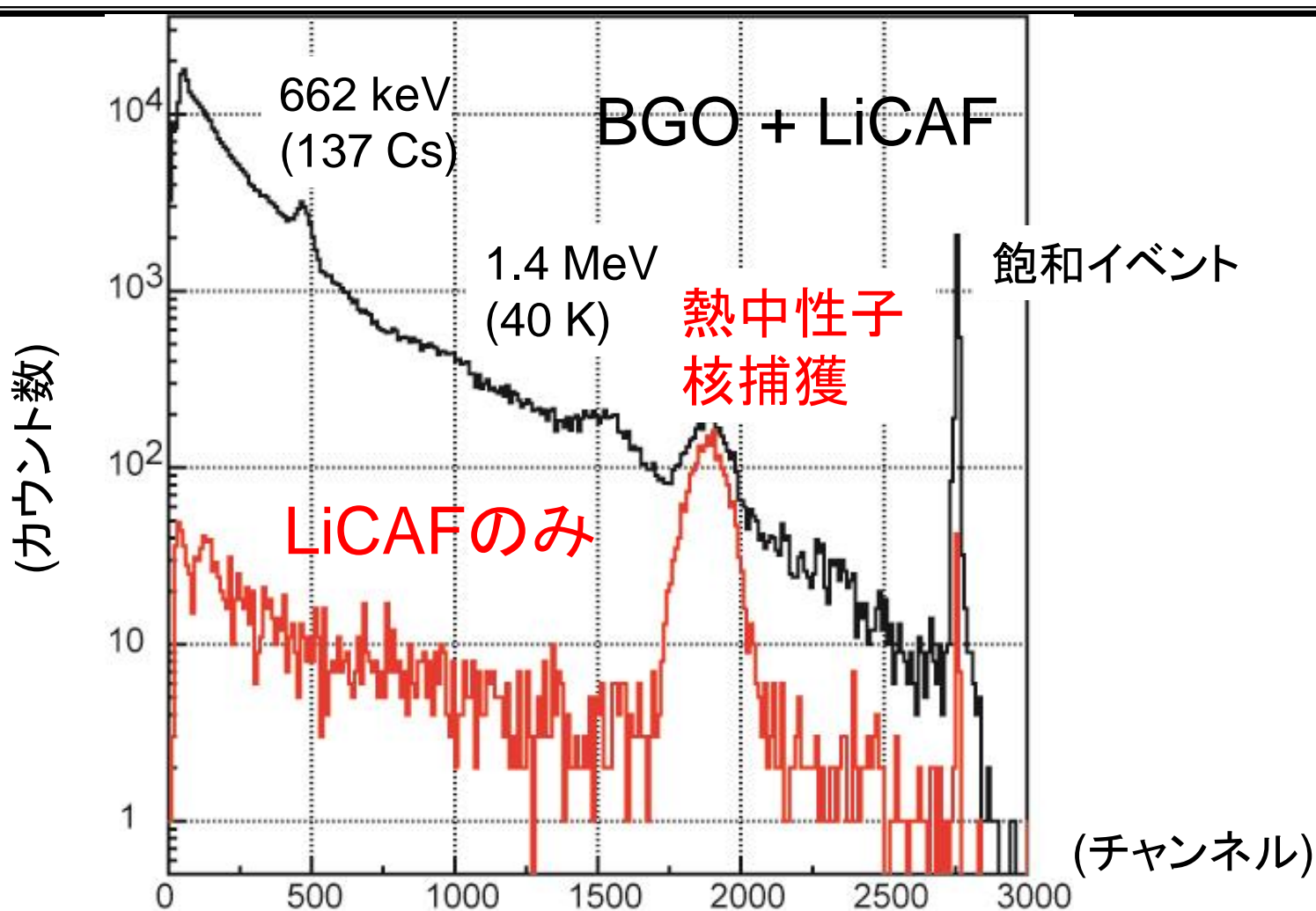
- ・入力3 ch (ADC 37.5 MHz サンプリング)
- ・FPGAでフォスウィッチ判定後に、波形取得+ヒストグラム取得 (Fast, Middle, Slow : 時定数に応じて3種類、プラスチックシンチレータ用、BGO用、LiCAF用)

2次元スペクトル  
(全波形を取得)





# 選別前後のエネルギースペクトル



LiCAF (Eu 2%) と BGO シールドを組み合わせフォスウィッチ検出器により、<sup>12</sup>ガンマ線(荷電粒子)を除去し、**熱中性子だけを効率的に検出**。特許出願中



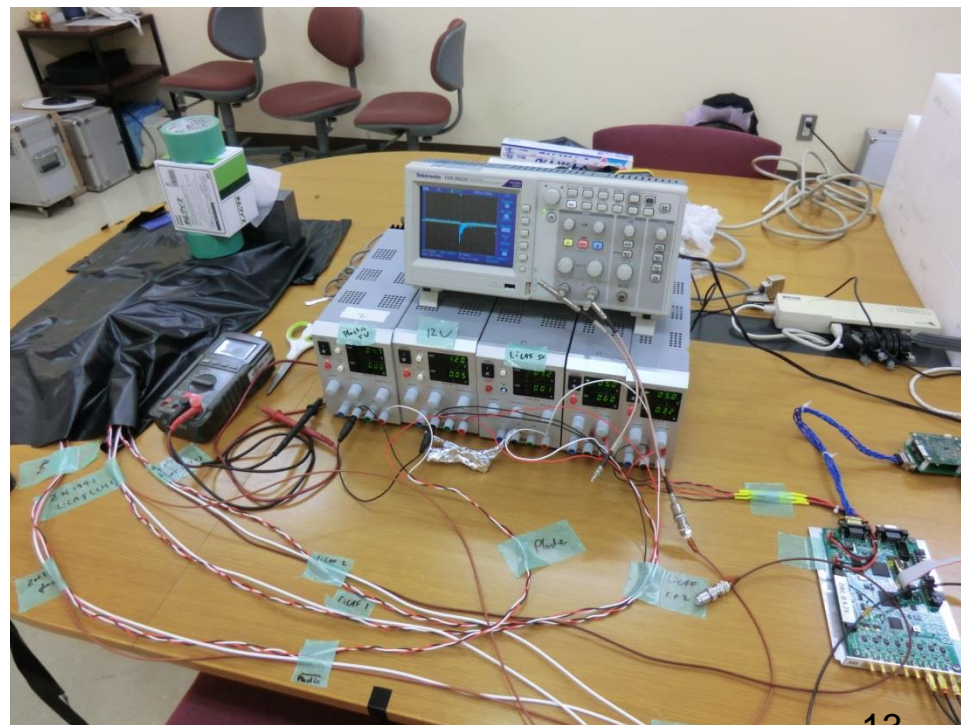
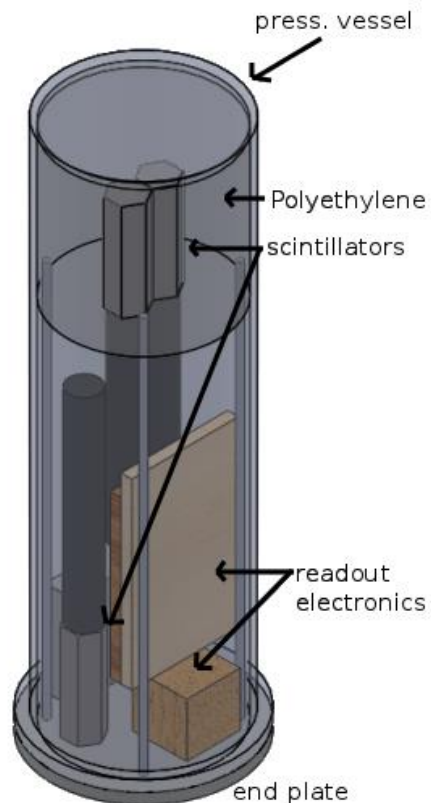
# PoGOLino

- 10cm厚 ポリエチレン(高速中性子シールド)の中:  
PoGOLite用プラスチックシンチレータ

**中性子モニター**

- 外部:**中性子モニター**

} 同一、両者の比較から  
大気中性子のエネルギースペクトルを推定





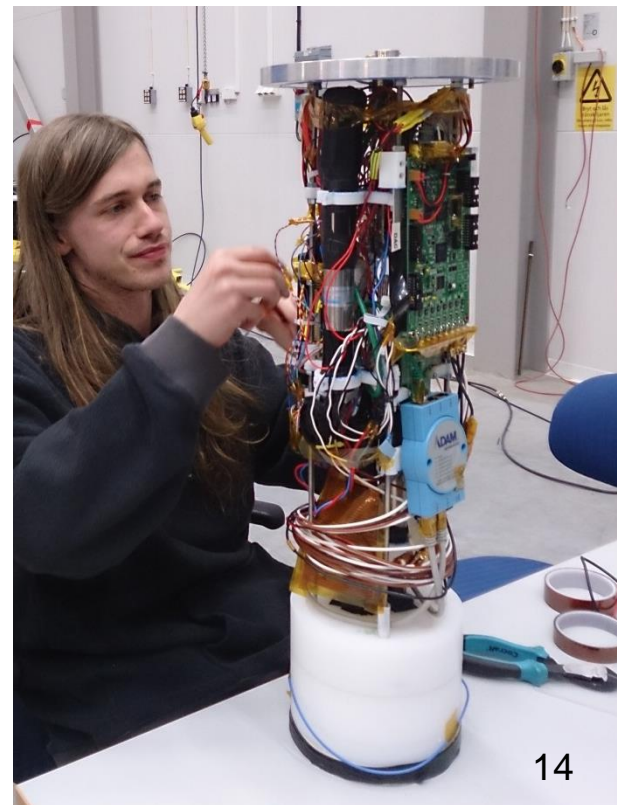
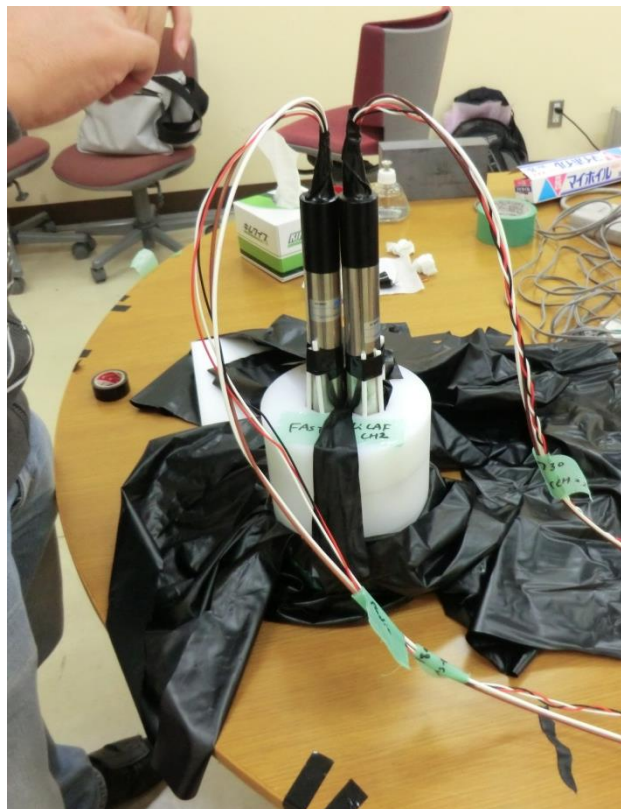
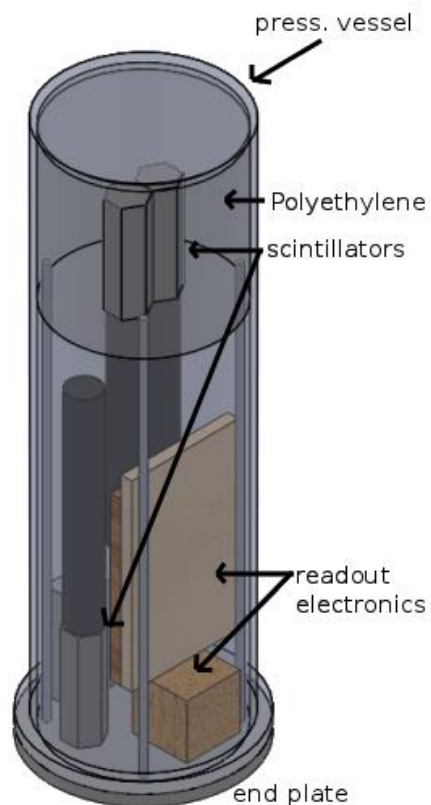
# PoGOLino

- 10cm厚 ポリエチレン(高速中性子シールド)の中:  
PoGOLite用プラスチックシンチレータ

**中性子モニター**

- 外部:**中性子モニター**

同一、両者の比較から  
大気中性子のエネルギースペクトルを推定





# まとめ

- PoGOLite 検出器の主要なバックグラウンド源である大気中性子のフラックスを計測するため、PoGOLino検出器を製作した。
- スウェーデン・キルナにおいて、今週PoGOLinoの放球が成功裏に行われ、フライト中に大気中性子を計測することができた。
- 今後シミュレーションと比較し、今年夏のPoGOLiteのバックグラウンド推定に役立てる。

