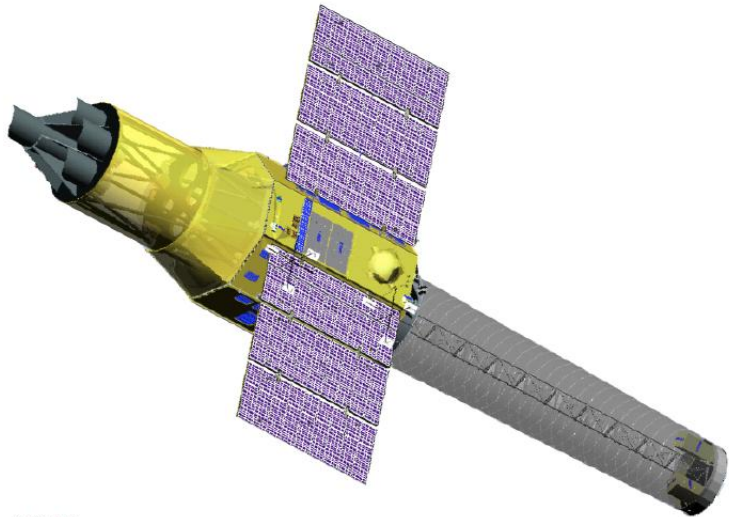


ASTRO-H 半導体コンプトンカメラの 放射化バックグラウンド・ モンテカルロシミュレータの 開発とその評価

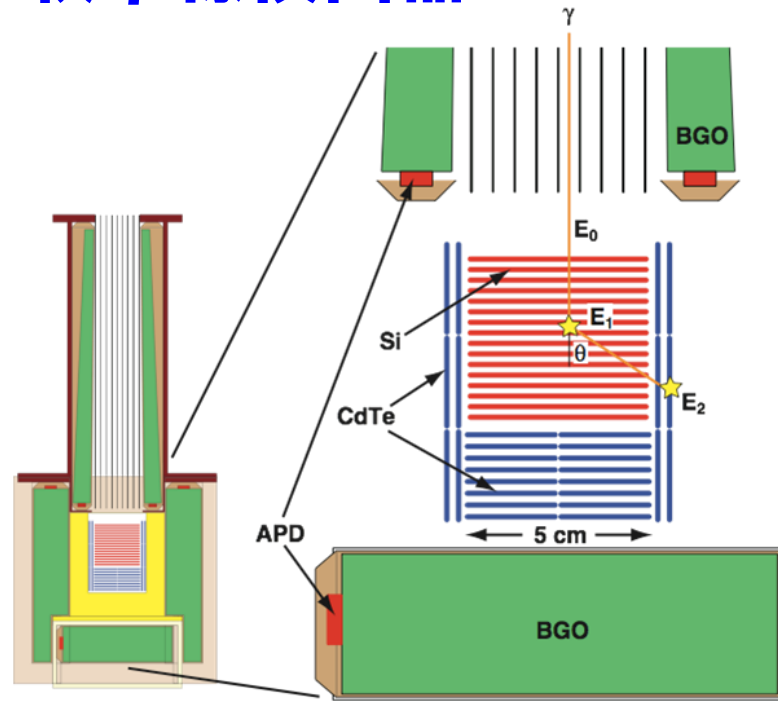
平木 一至、水野 恒史、深沢 泰司、小高 裕和^A、渡辺 伸^A、
国分 紀秀^A、高橋 忠幸^A、中澤 知洋^B、下浦 享^B、中平 聡志^C、
寺田 幸功^D、田島 宏康^E、他 HXI/SGDチーム

広大理、ISAS/JAXA^A、東大理^B、青学大理工^C、
埼大理^D、KIPAC/Stanford^E

ASTRO-H搭載 軟 γ 線検出器SGD



(c) NEC



- 2014年打ち上げ予定
- 4種類の検出器を搭載
- 軟X線から軟 γ 線の
広帯域でブラックホール
などの高エネルギー現象
を観測

SGDの要求性能

⇒10-600 keVでの観測

50-300 keVでは過去最高感度
(「すざく」HXDの約10倍)、
HXI (硬X線イメージャ) の帯域と
スムーズにつながる。

SGDに採用された狭視野コンプトンカメラの原理

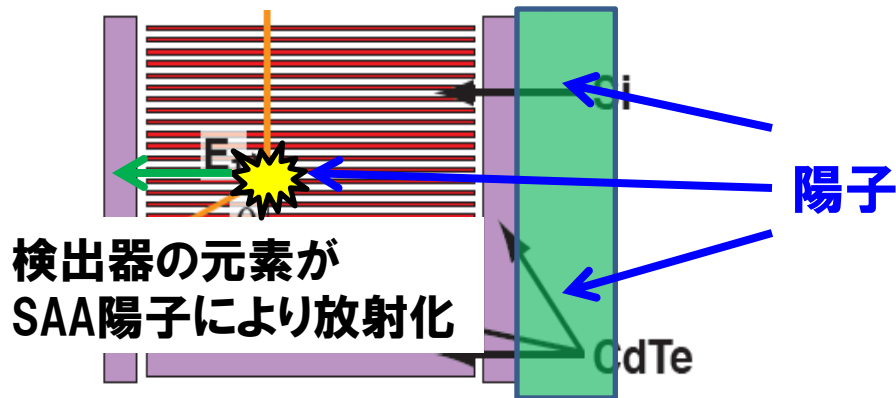
軟 γ 線帯域では、天体信号は弱いのに、バックグラウンド (BG) レベルは高い
⇒ BGが検出器の感度を定める大きな要因

BGOアクティブシールド + コンプトン再構成

- BGOアクティブシールド
→ 信号読み出し可能なシールド
- コンプトン再構成
→ 光子の到来方向を利用したイベントの選定

これら徹底したBG除去技術でも、**BGを完全には除去できない**

○大気中性子弾性散乱および軌道上での放射化



シールド、CdTe、Fine Collimatorが放射化
⇒ 検出器自身がバックグラウンド源に

軌道上での放射化BGを正確に見積る



- 検出器デザインの決定
- 感度の評価

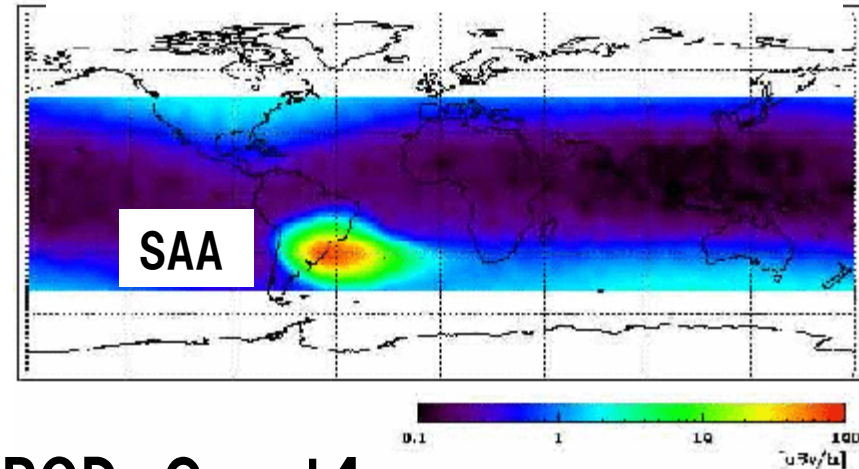
研究目的

軟γ線検出器SGDの放射化バックグラウンド評価

衛星軌道での環境を模擬するには、
モンテカルロシミュレーションが最適

- 南大西洋の上空にある地磁気の異常帯
- 1日に9回 通過する
- 数百 MeV程度の陽子が
1000秒で約 10^5 個/cm²も降り注ぐ

衛星軌道での荷電粒子フラックス



使用するシミュレーションツール: MGGPOD、Geant4

- 実績のある既存のフレームワークを利用 (Weidenspointner et al. 2004)
- ただしプロセスは、ユーザー自身で検証する必要がある
 - CdTe検出器は、宇宙環境では新しい素材
 - 低エネルギー (keV帯域) の精度を要求

本研究の目的



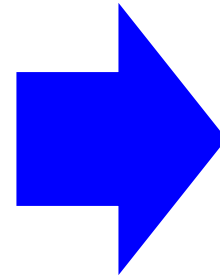
地上実験データや文献と比較することで、
シミュレーションプログラム (物理プロセス) の検証を行い、
これを用いて検出器の感度の評価やデザインの最適化を行う。

放射化バックグラウンドを見積もるには

放射化BGを次の3段階に分けてシミュレートすることで推定する

Step 1. 放射性同位体の生成 (MGGPOD)

→軌道上の放射線環境を仮定し、
検出器との相互作用で
**生成する放射性同位体を
シミュレートする。**



アイソマーの生成と
崩壊の分岐比の、
修正および検証

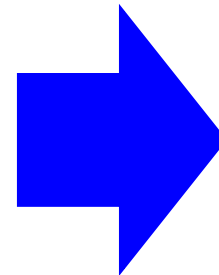
Step 2. 生成された放射性同位体の 崩壊レートの計算 (MGGPOD)

→宇宙線粒子の照射・冷却時間に応じた
核種毎の崩壊レートを計算。

MGGPOD

Step 3. 放射性同位体の崩壊後 (Geant4)

→Step2までの結果を利用して
**検出器と粒子との相互作用を
シミュレートし、
放射化バックグラウンドを見積る。**



放射性同位体の崩壊の
プロセスを検証

Geant4

CdTe放射化実験の再現によるシミュレータの調整

150 MeV単色陽子

厚さ 0.5 mm

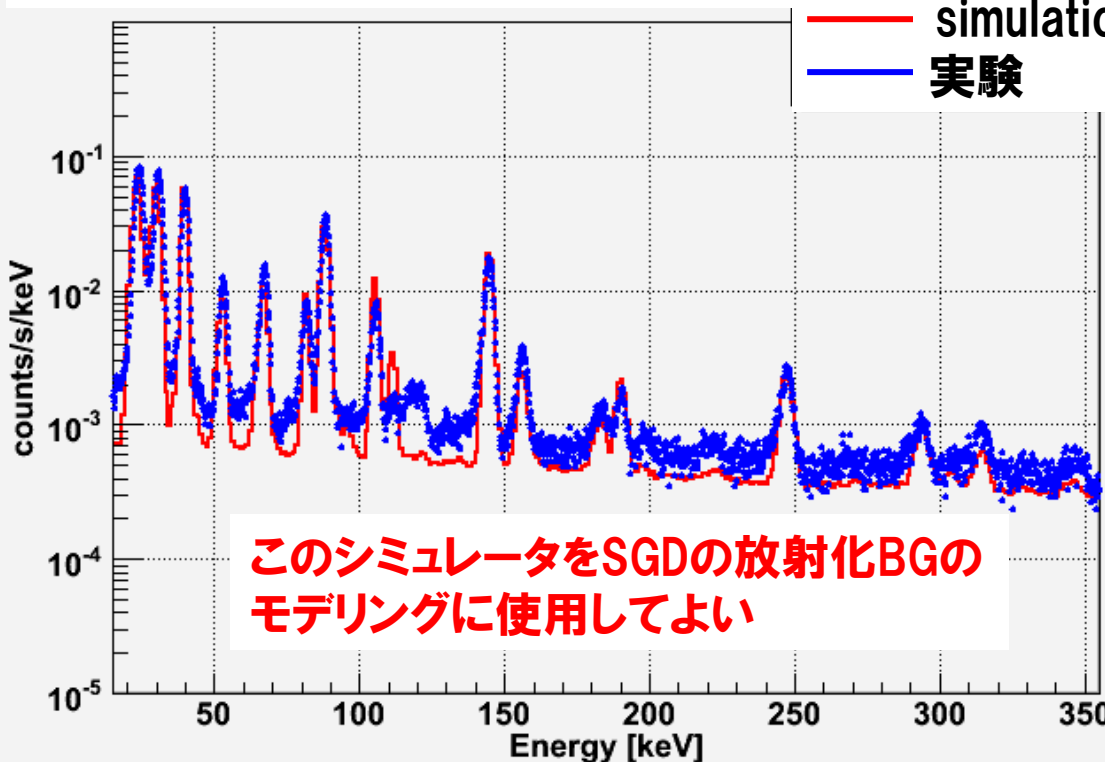
10 mm

10 mm

CdTe waferの放射化実験の再現
(Murakami et al. 2003)

- 数日から1ヵ月にわたり放射化BGのライン成分、連続成分を精度良く再現できている。ただし、照射後18-40日では連続成分は若干低い (factor 2程度)。

陽子照射18-40日後の放射化BGの平均

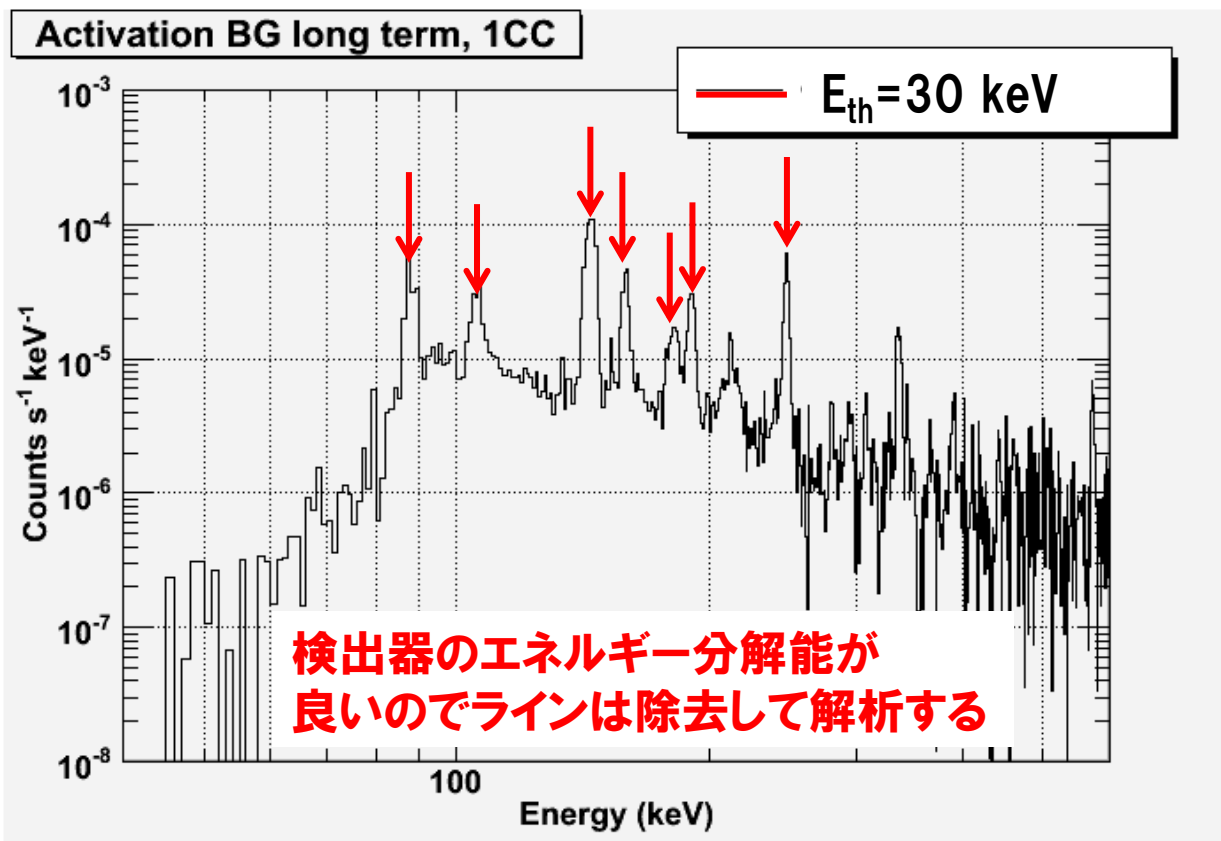


実験で同定されたライン

40 keV	^{103m}Rh
53 keV	^{119}Sb
67 keV	^{125}I
82 keV	^{121m}Te
87 keV	^{109m}Ag , ^{127m}Te
105 keV	^{129m}Te
145 keV	^{125m}Te
156 keV	^{101m}Rh
181 keV	^{100}Pd , ^{119m}Te
198 keV	^{111}In
247 keV	^{123m}Te

軌道上でのCdTe放射化BG 長期成分の見積もり

- コンプトンカメラ1台当たりの放射化BG長期成分 (Compton mode)
 - イベントセレクション (2回反応、コンプトン再構成による角度の制限) により目標としているBG ($< 10^{-5}$ counts/s/keV/cm²@100 keV, コンプトンカメラ1台の有効面積: 3cm²@100 keV) は実現できる見込み。
 - 主なラインと核種は地上放射化実験でも同定されている。

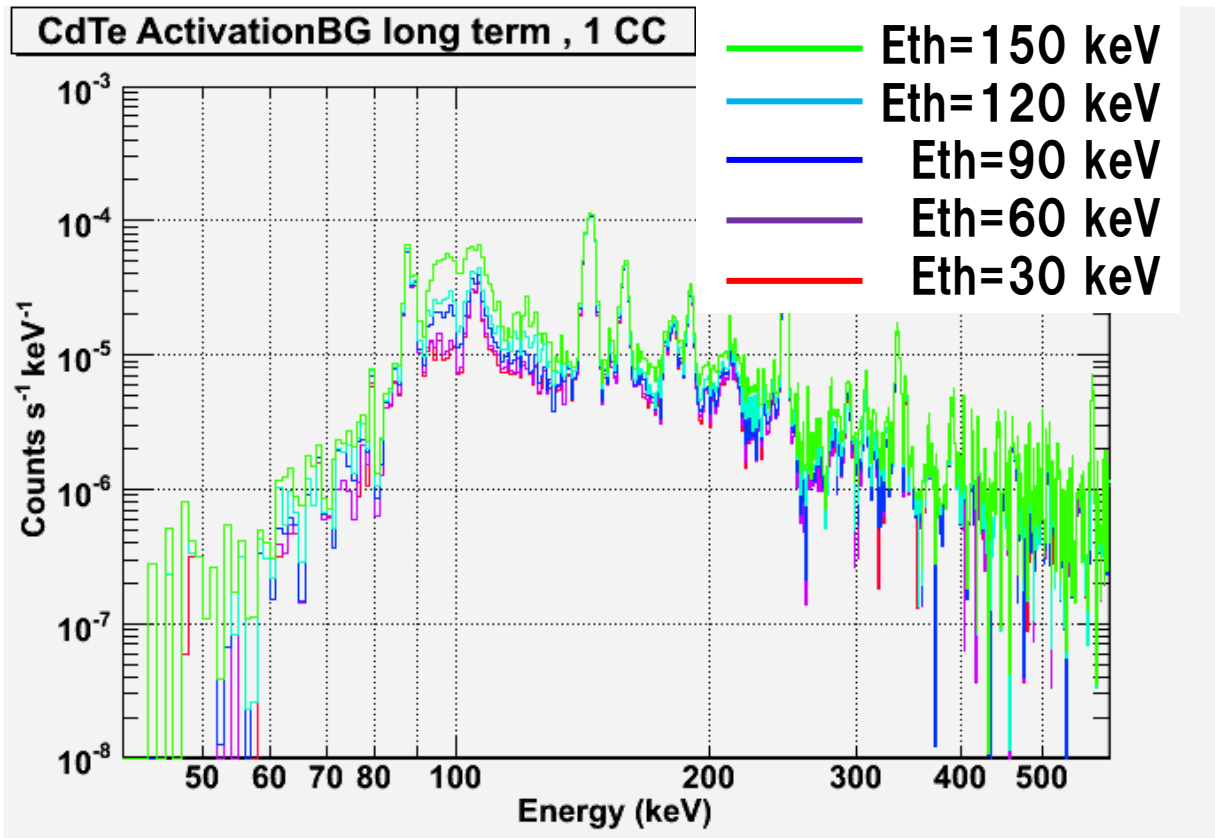


主なラインと核種

87 keV	^{109m} Ag, ^{127m} Te
105 keV	^{129m} Te
145 keV	^{125m} Te
156 keV	^{101m} Rh
159 keV	^{123m} Te
181 keV	^{119m} Te
190 keV	^{114m} In
247 keV	^{123m} Te

CdTe放射化BGのBGOスレッシュホールド依存性

- スレッシュホールド依存性を調べる目的
 - 目標としているBGを達成するために必要なBGOスレッシュホールドの値
- CdTe放射化BGの長期成分 (Compton mode)
 - BGOスレッシュホールド30-150 keVを30 keV刻みで調べた。
 - ライン成分はほとんど変化しない。
 - $E_{th} \geq 90 \text{ keV}$ で、90-150 keVの連続成分が増える。



目標としているBGを実現するには
→BGOスレッシュホールドを60 keV程度以下に抑えることが重要。

まとめ

検出器デザインの最適化や感度の評価には軌道上BGの正確な見積もりが重要

放射化BGシミュレータで使用しているGeant4とMGGPODの2つについて、プロセスの検証を行った。

- Geant4の検証

- 放射性同位体の崩壊のプロセスが正常に動作することを確認。

- MGGPODの検証

- 数日から1ヵ月にわたり、ライン・連続成分共にCdTe waferの地上放射化実験を精度良く再現できた。

ただし、長期のBGでは連続成分が実験と比較してfactor 2程度低い。

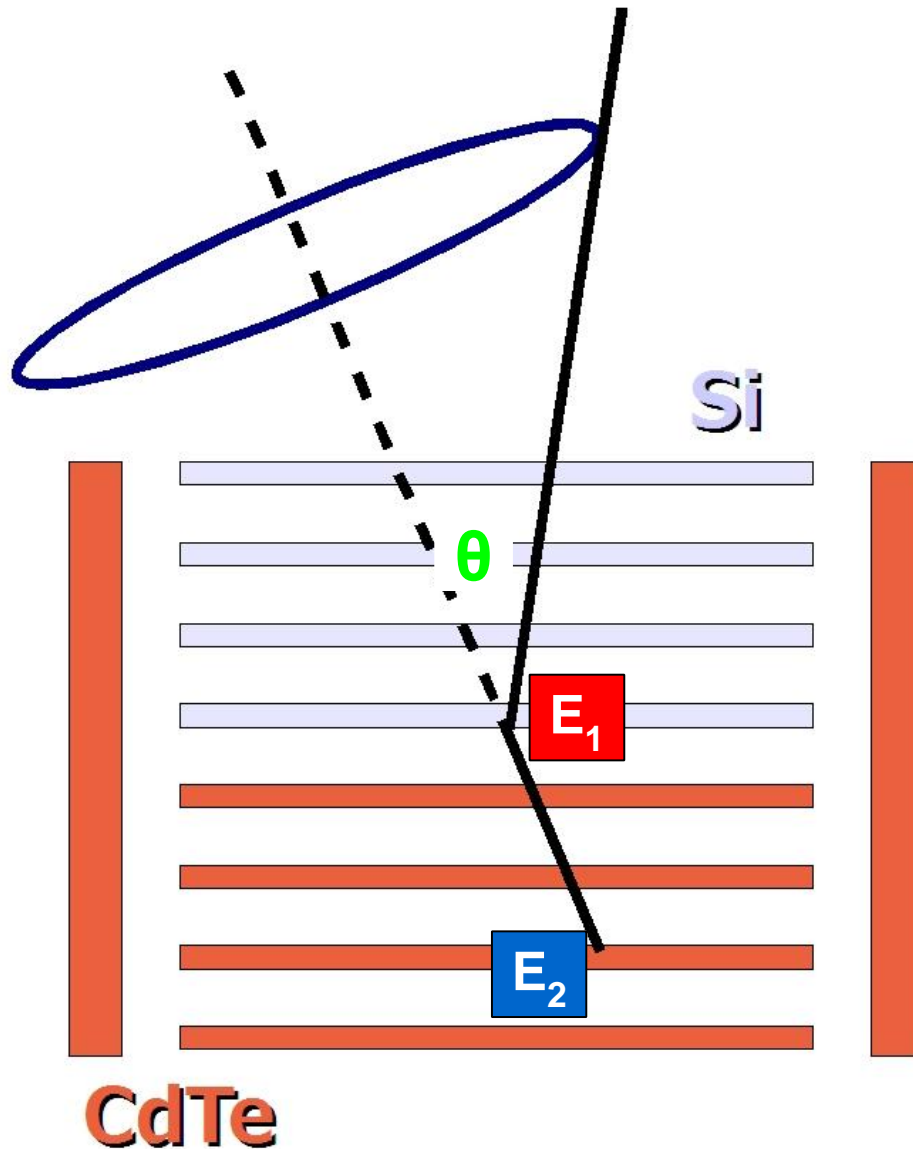
検出器デザインおよび感度の評価

CdTe素子の放射化BGのBGO スレッシュホールド依存性を調べた結果、

- **目標としているBGを実現するにはBGOスレッシュホールドを60 keV程度以下に抑えることが重要であることが分かった。**

隠しトラペ

狭視野コンプトンカメラ



E_1 : 散乱エネルギー

E_2 : 吸収エネルギー

$$\cos \theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2}$$

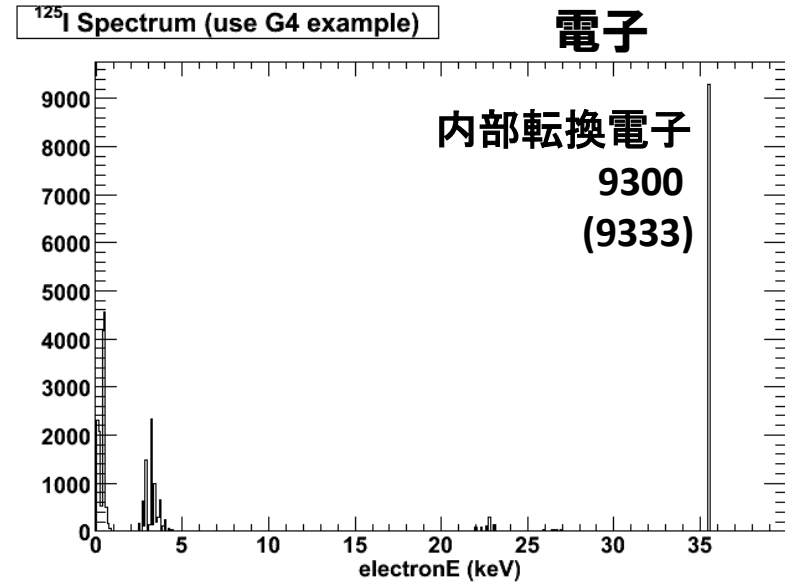
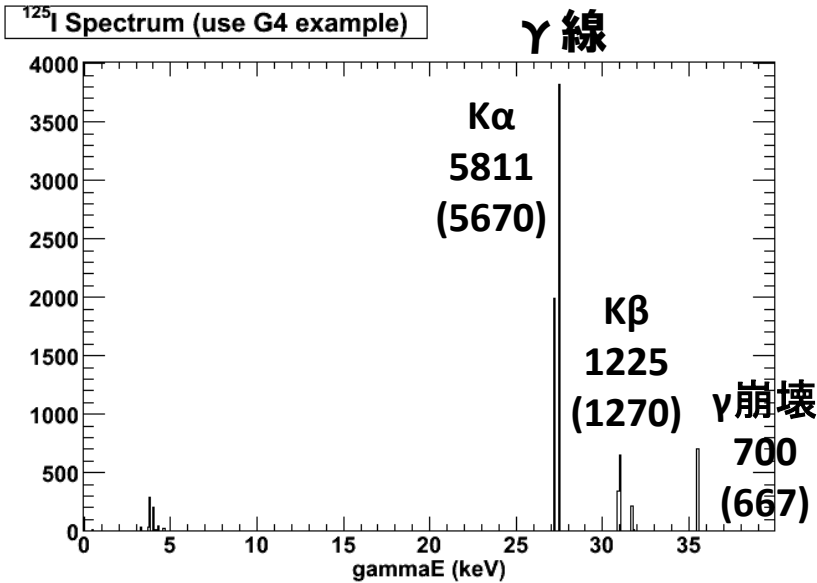
→ 視野内 → 天体信号

θ

→ 視野外 → 除去

Geant4の検証

例) 電子捕獲 (EC) と γ 崩壊 (及び内部転換) の検証 (^{125}I から ^{125}Te への崩壊)



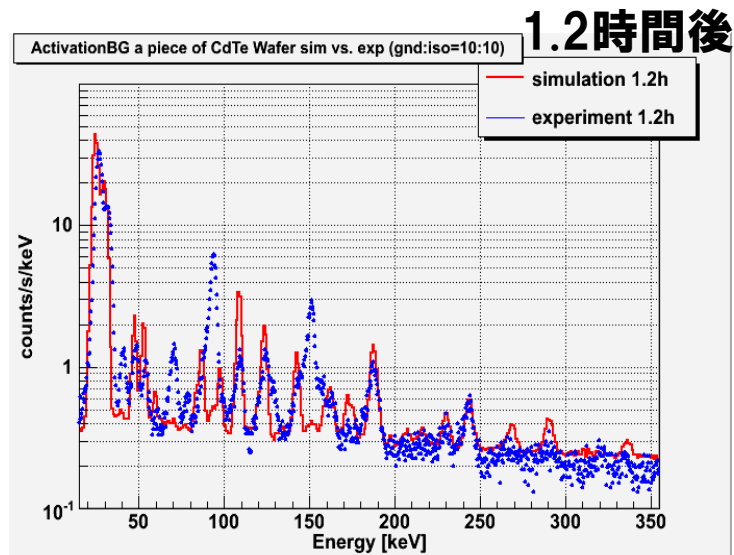
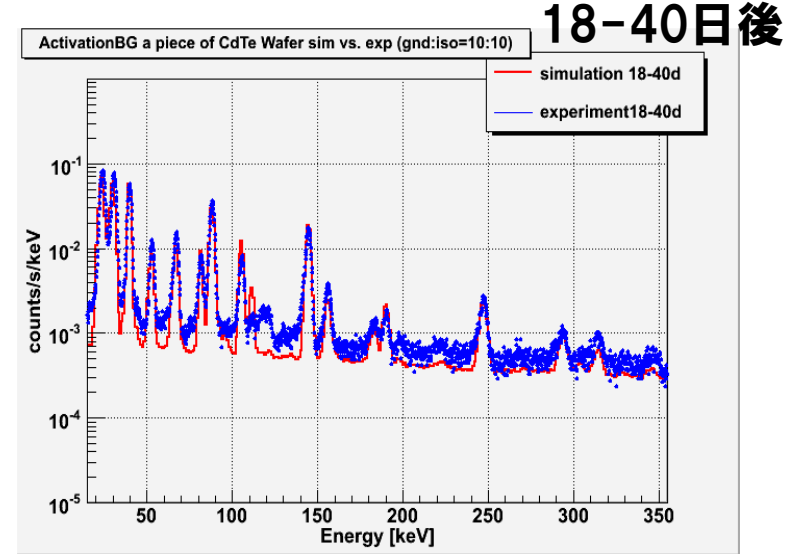
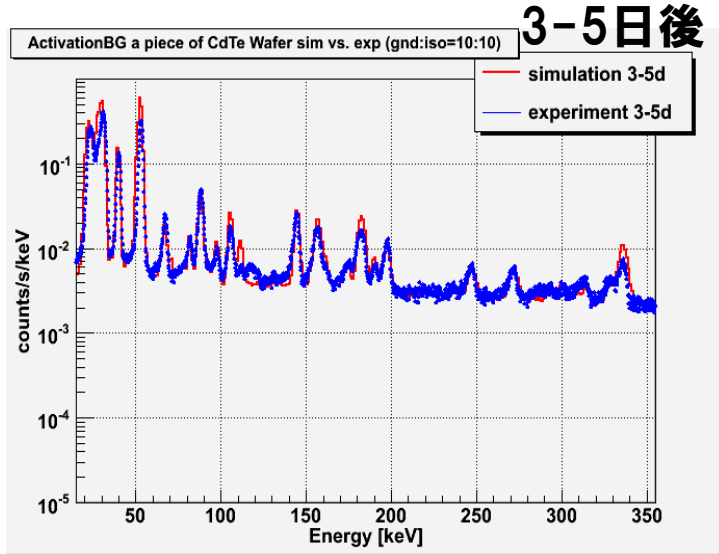
上は親核種の崩壊によってできた個々の粒子の運動エネルギー、左が γ 線、右が電子。図中の数字はラインの強度、括弧の数字は文献からの予測値。

→ **ラインのエネルギー・強度は概ね正しい。**

例のように放射化BGで重要な以下の物理プロセスが正常に動作していることを確認した。

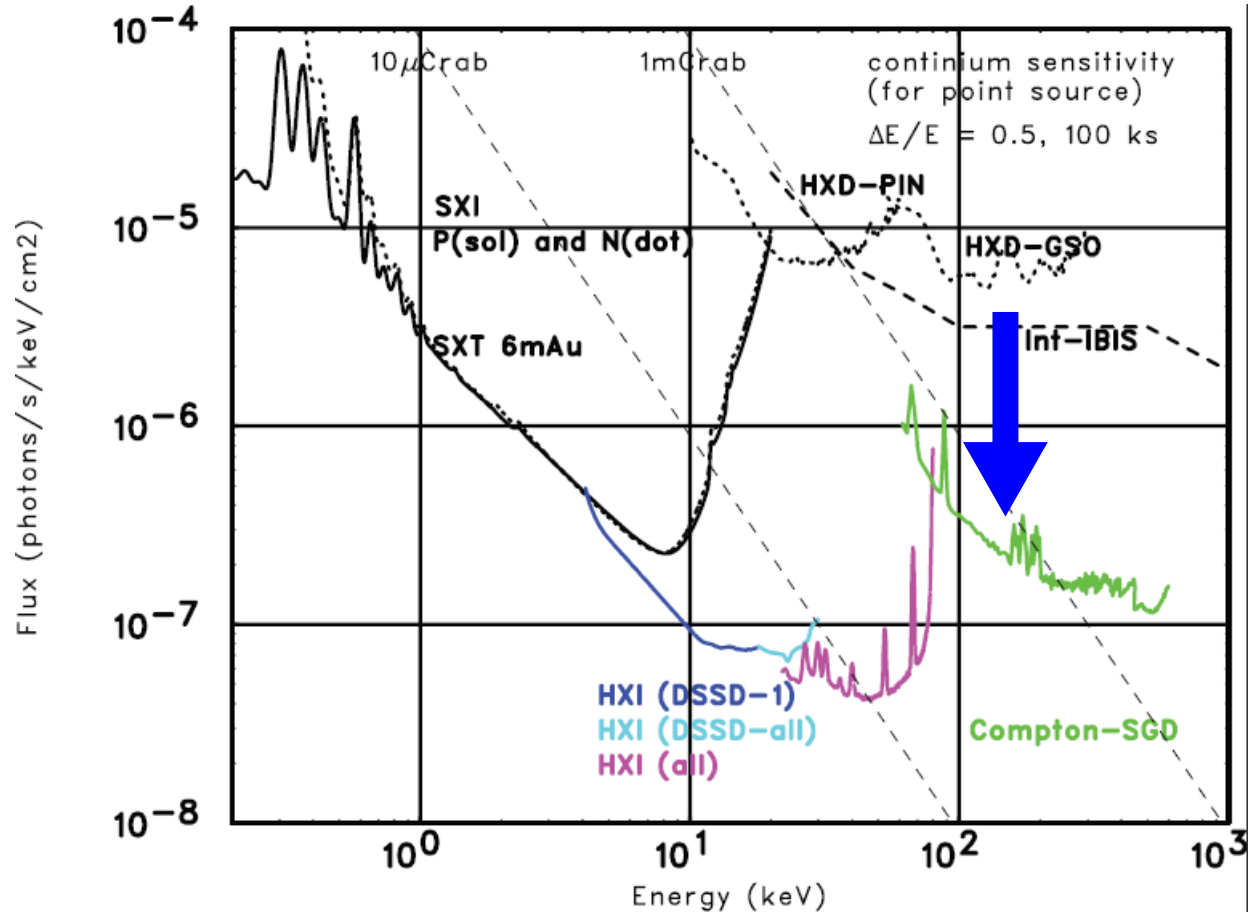
1. 電子捕獲 (β^+ 崩壊)
2. γ 崩壊 (内部転換)
3. β^- 崩壊

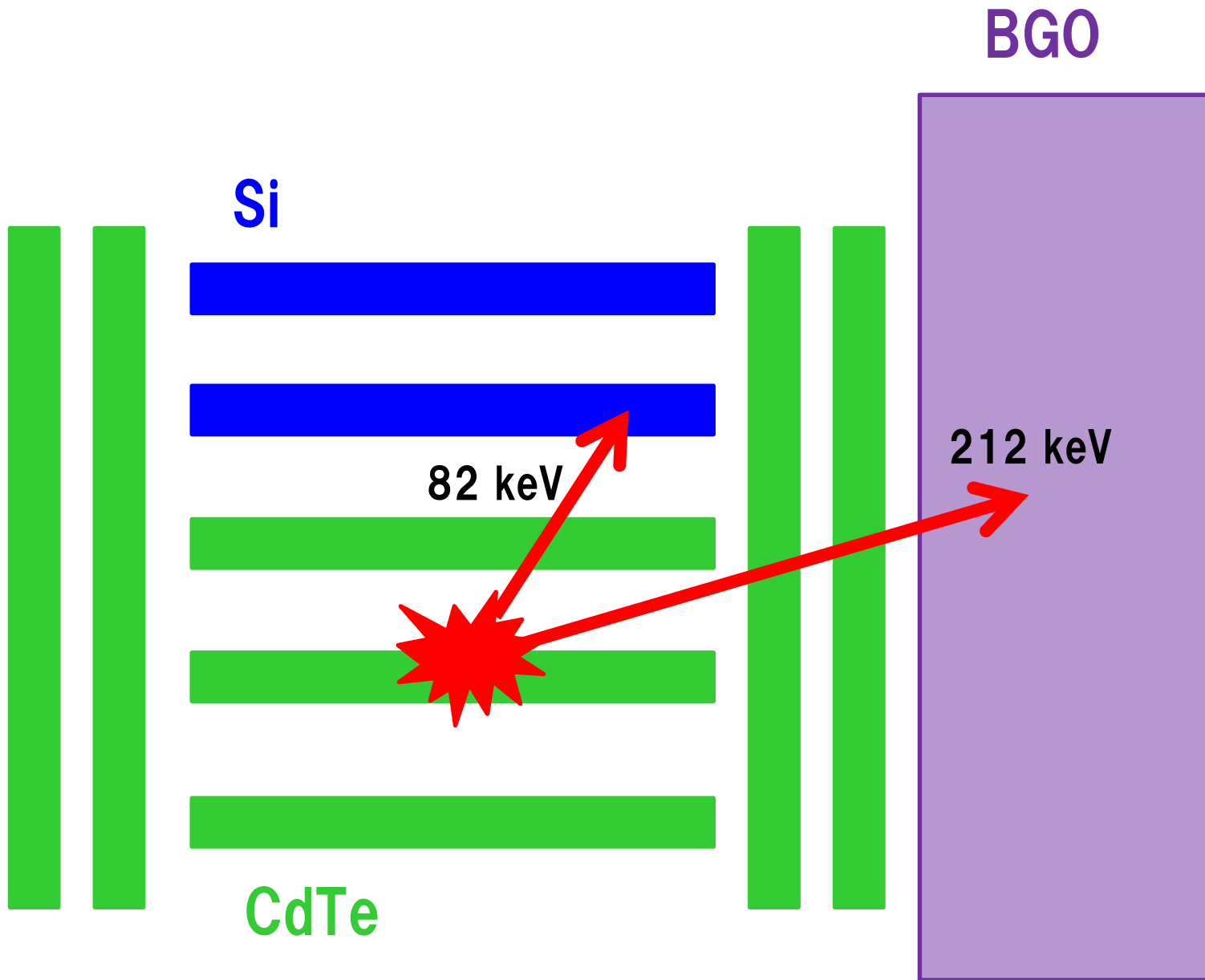
CdTe放射化実験とシミュレーションの比較



○短期でいくつかのラインができない、
長期で若干連続成分が低いなどの
問題はあるが、1時間-1カ月に渡り、
実験を良く再現する。
SGDのBGモデルに用いても
良いと考えられる。

ASTRO-Hの目標感度



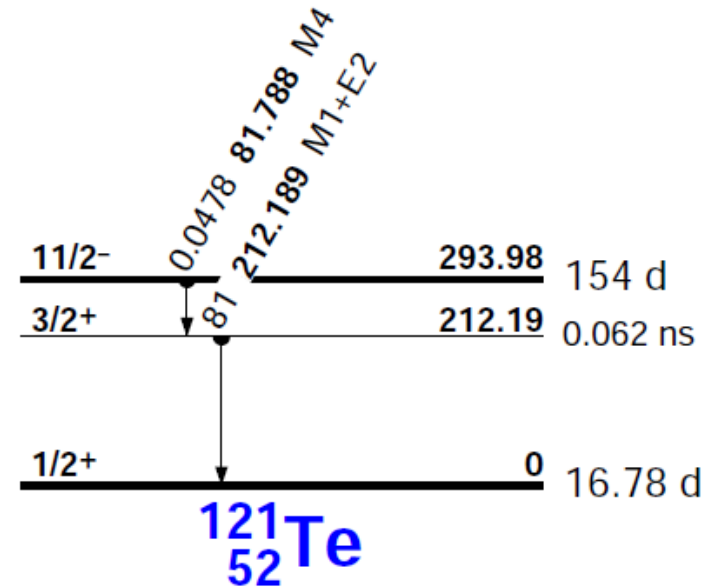
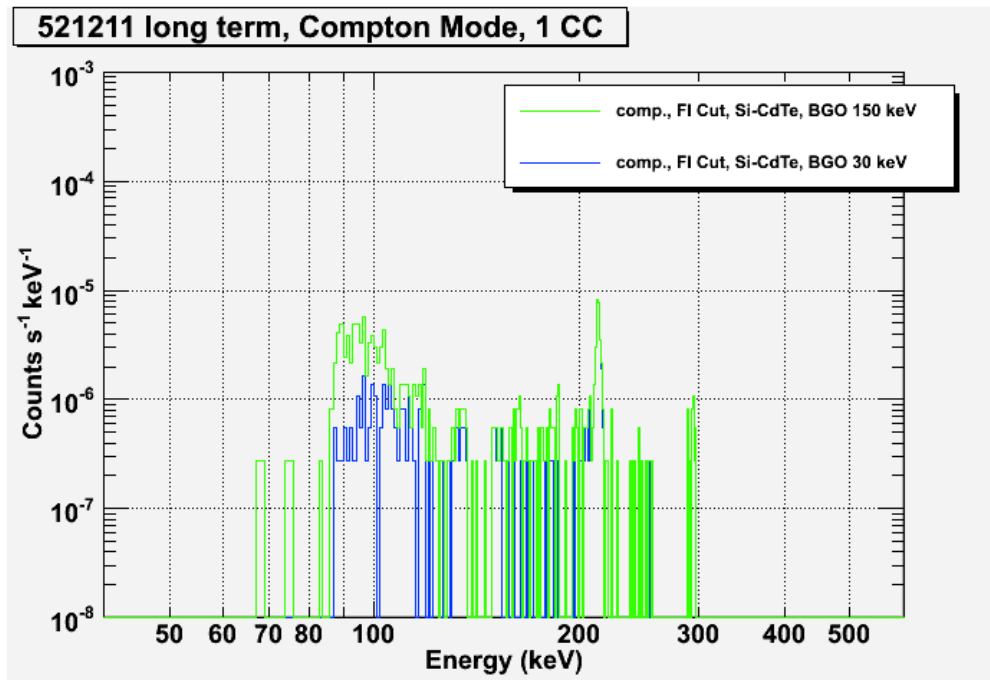


例1) ^{121m}Te

2本以上のX線・ γ 線をほぼ同時にだし、

高エネルギーの方が100 keV以上の核種がBGに寄与している。

- 2本のX線・ γ 線を出すのでComptonイベントと見なされやすい。
- うち一つは100 keV以上なため、Si/CdTeを抜けてBGOに到達しやすい。
- (左) CdTe放射化BG 長期成分 Compton Mode (Si-CdTe)。
 $E_{\text{th}} = 30 \text{ keV}$ および150 keV。
- (右) decay scheme
 - 82 keVと212 keVのラインをほぼ同時に出す。



例1) ^{121m}Te 2次元エネルギー分布

- CdTeで82 keVを吸収、Siで212 keVをコンプトン散乱した (もしくはその逆) イベントが多い。(赤で囲った領域)
- これらの事象はBGO スレッシュホールドの影響によりBGが増える。
注) セレクションにより、Total E < 255.5 keVかつ、CdTeで散乱、Siで吸収といった反応は除去してある。(緑点線で囲った領域)

