

MeVガンマ線観測衛星AMEGOにおける コンプトン再構成プログラムのスタディー

末岡耕平

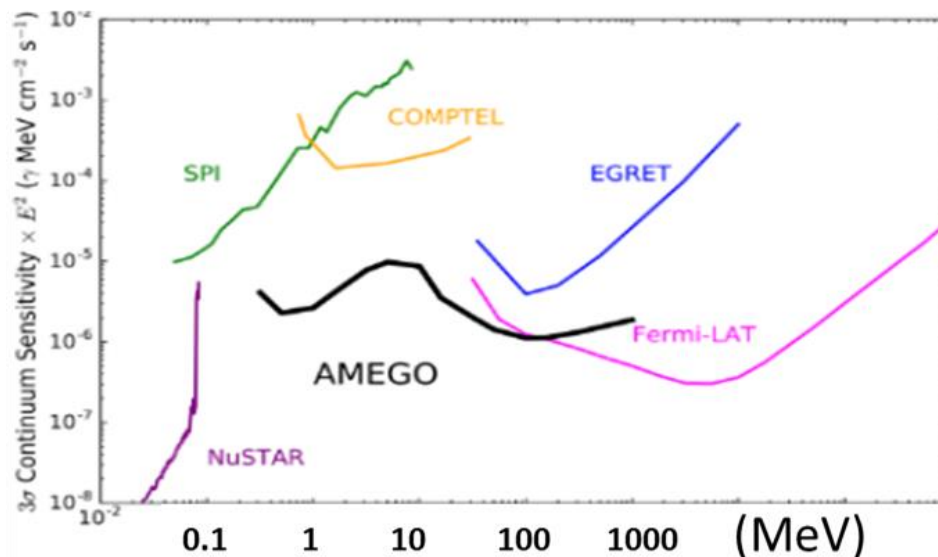
内田悠介 深沢泰司(広島大学)

AMEGO計画

全天MeVガンマ線観測衛星、2030年頃の打ち上げを目指す

- 0.1 MeVから100 MeVの MeV帯域のガンマ線観測
→ CGRO衛星のCOMPTEL以来

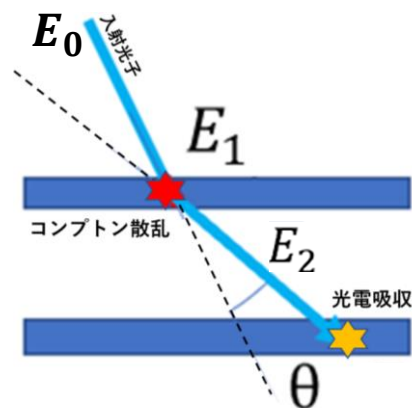
各検出器の感度比較



- 視野が天球の20 %、数 GeVまで観測可能
→ 全天ガンマ線モニター
- ガンマ線偏光観測

AMEGOによるガンマ線観測方法

- ・ 数10 MeVから数 GeVのガンマ線観測：電子陽電子対生成を利用
- ・ 数100 keVから数10 MeVのガンマ線観測
 - ・ コンプトン再構成
コンプトン散乱から入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を求める

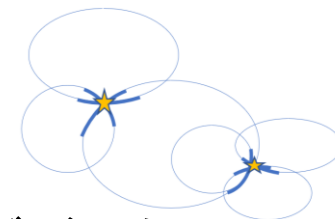


- ・ 落としたエネルギー
→ $E_0 = E_1 + E_2$ (入射エネルギー)
→ $\cos \theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2(E_1 + E_2)} E_1$
- ・ 反応位置

コンプトンコーン
到来方向を制限

The diagram shows a blue cone representing the Compton cone. The scattered photon with energy E_1 is at the center of the cone. The angle between the cone's axis and the scattered photon's path is θ . The scattered photon then hits a detector layer at energy E_2 . The angle between the cone's axis and the detector layer is also θ .

- ・ コンプトンイメージング
コンプトンコーンが複数交わるところが光源
500 keV以上で、反跳電子を用いればよりよいイメージングが可能



AMEGOに搭載される検出器

- Tracker

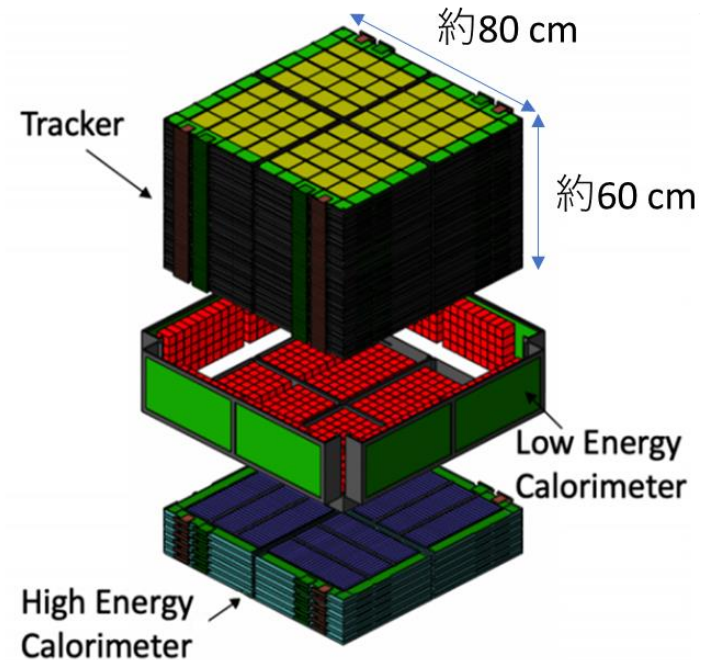
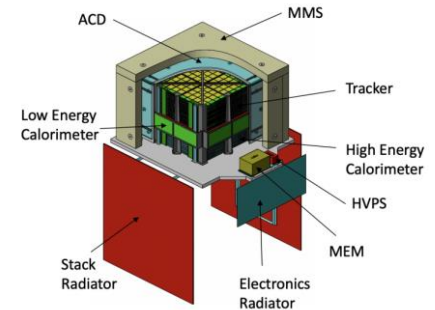
両面シリコンストリップ検出器 (3840個) 60層
→ コンプトン散乱、電子陽電子対生成

- Low-Energy Calorimeter

CZT半導体検出器 (12160個)
→ 光電吸収

- High-Energy Calorimeter

CsI (TI) シンチレーター (624個)



研究目的

目的

ガンマ線バーストの発生機構の解明のために、
AMEGOによるガンマ線バーストのガンマ線偏光観測を検討する

ガンマ線バーストのプロンプト放射は数100 keVの
エネルギー帯において非常に強い放射

➡ AMEGOによる反跳電子を利用しない
コンプトン再構成を目指す

研究方法

1. 数100 keVのガンマ線光子とAMEGOとの相互作用をモンテカルロシミュレータを用いて模擬する
2. 反跳電子を用いないコンプトン再構成プログラムを作成する
→ ひとみ衛星SGD(狭視野)の再構成アルゴリズムを参考にした

AMEGO

- ・ 観測帯域が200 keV以上10 MeVであり、**より高エネルギー側**
(SGDは、60 keV ~ 600 keV)
- ・ 視野(2.5 str)が広く、**さまざまな角度から光子が到来する**

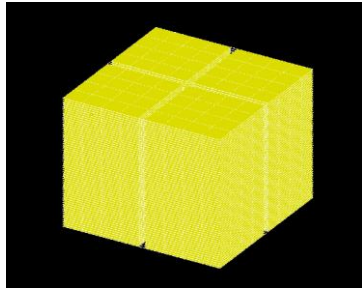
ガンマ線光子とAMEGOとの相互作用の模擬

- Geant4

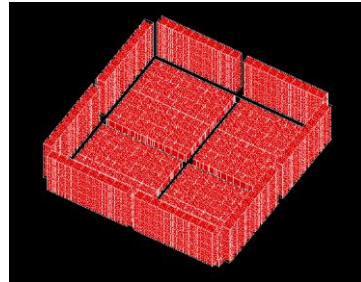
モンテカルロシミュレーションツールキット

ガンマ線と検出器の確率的な反応を擬似乱数を用いて模擬

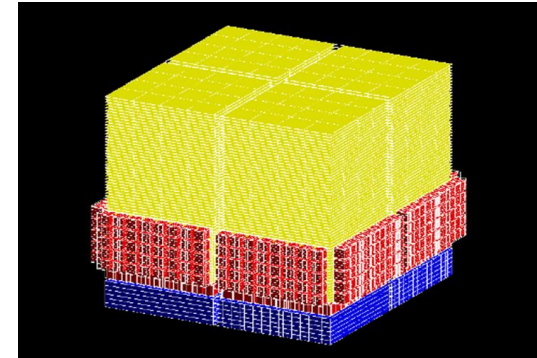
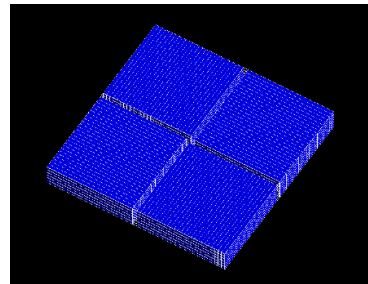
Tracker



Low-Energy Calorimeter



High-Energy Calorimeter



AMEGOジオメトリ

→ AMEGOジオメトリをGeant4上で再現

- 検出器の設定

検出器応答を設定した

エネルギー分解能 (FWHM @200 keV) : Si 1.99 keV, CZT 1.99 keV, CSI 54.9 keV

スレッシュホールドエネルギー : Si 10 keV, CZT 10 keV, CSI 139.6 keV

開発中のコンプトン再構成プログラム

光子が検出器とn回反応する場合、考えられる反応順序はn!通り

➔ 正しい順序を求める

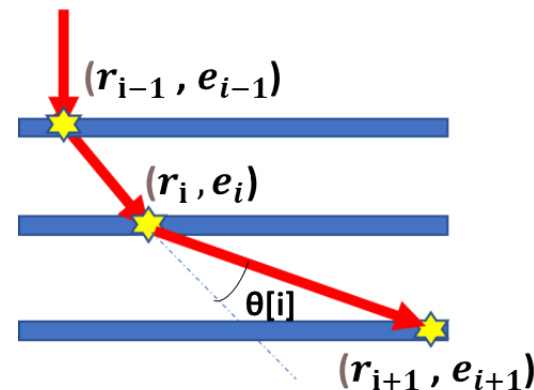
以下の量を用いてコンプトン再構成する

・パラメータ：ヒット位置 r_i ヒットエネルギー e_i

・運動学から求まる散乱角：
$$\cos\theta k[i] = 1 - \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i+1}^{n-1} e_j} + \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i}^{n-1} e_j}$$

・幾何学から求まる散乱角：
$$\cos\theta g[i] = \frac{r_i - r_{i-1}}{|r_i - r_{i-1}|} \cdot \frac{r_{i+1} - r_i}{|r_{i+1} - r_i|}$$

※二回目の散乱以降



2 ヒット 3 ヒット以上

①~②

再構成完了

①~④

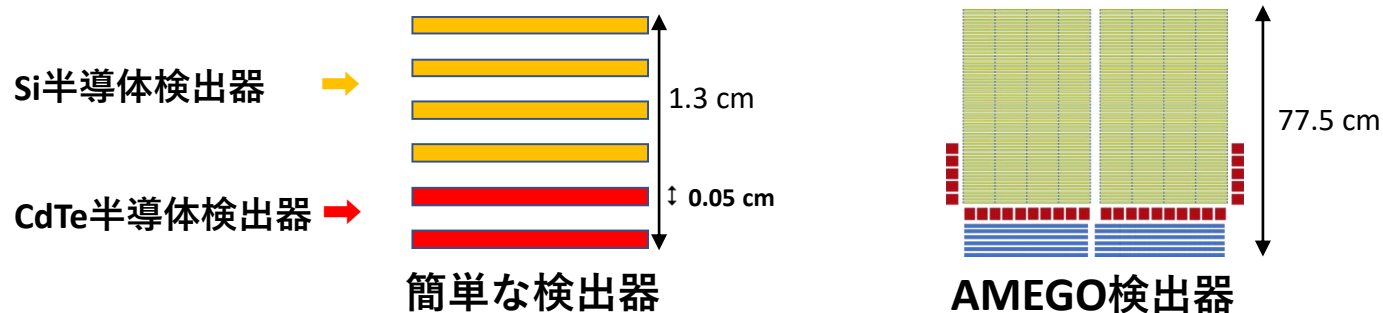
再構成完了

- ① 蛍光エックス線によるヒットを持たない (元のヒットへのマージは未実装)
- ② $|\cos\theta k[i]| \leq 1$ である反応順序
※2ヒットイベントでは、一意に反応順序が決まらなければ棄却
- ③ 二回目の散乱以降、 $\cos\theta g$ と $\cos\theta k$ が一致する反応順序
- ④ 残った複数の反応順序のうち、各ヒットで $\cos\theta g$ と $\cos\theta k$ の差が最小となる反応順序

コンプトン再構成プログラムの検証方法

100 keV～600 keVのガンマ線を真上から垂直に入射した際に生じる2～5ヒットイベントのコンプトン再構成を試みた

➡ 簡単な検出器で検証後、AMEGO検出器へ適用

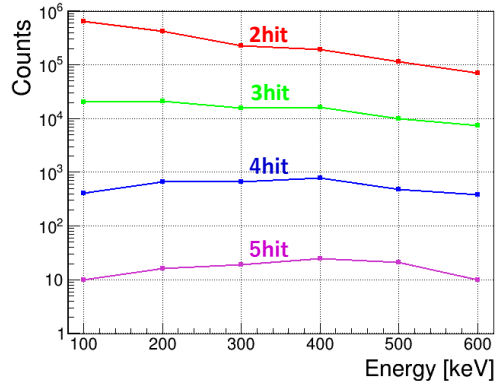


※ 開発段階のため、以下を満たすイベントを対象にコンプトン再構成をした

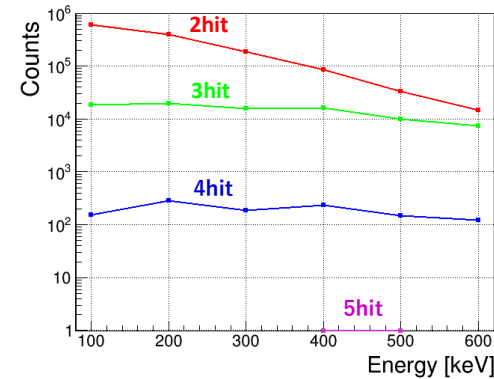
- ・ 入射ガンマ線のエネルギーが全て検出器に落ちる
- ・ コンプトン散乱後に光電吸収が1回起きる
- ・ 各相互作用の際に生じる二次粒子による単独のヒットがない

簡単な検出器における検証

(A) 全エネルギーがデポジットし、コンプトン散乱後に光電吸収が起きたイベント数



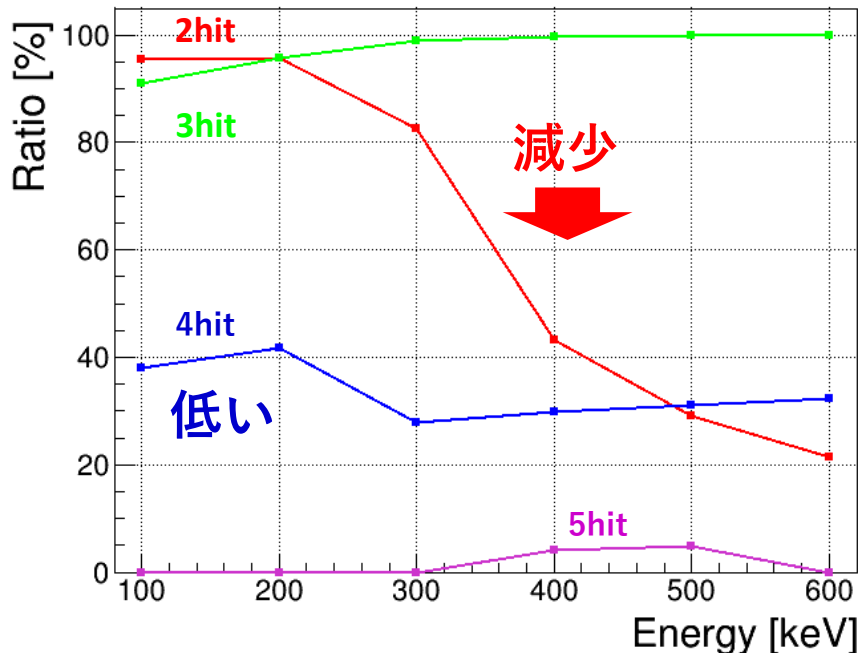
(B) (A)のうち、コンプトン再構成が行えたイベント数



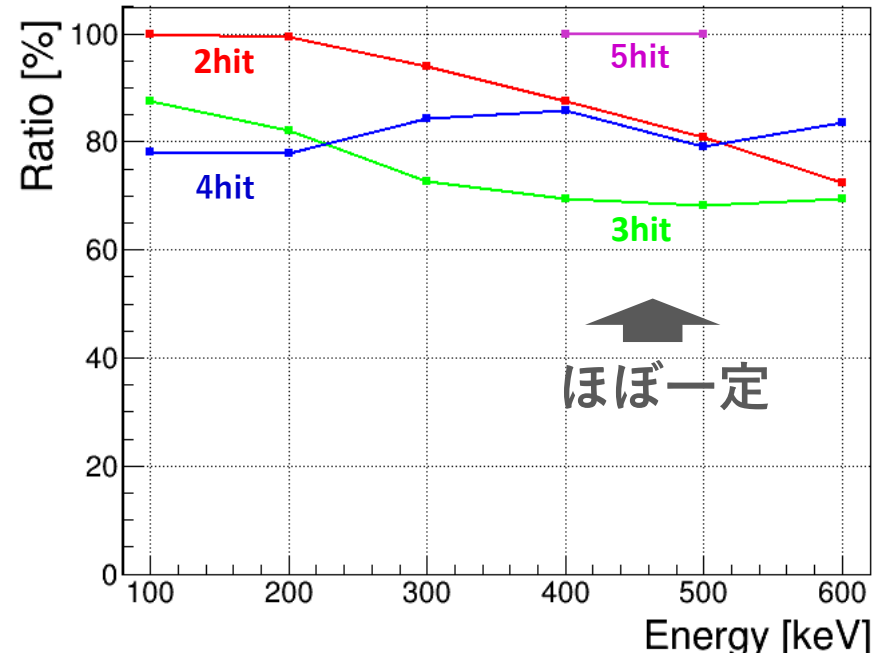
再構成



再構成率 (B)/(A)

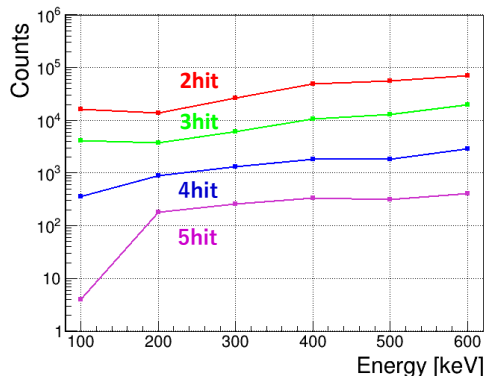


(B)の反応順序の正答率

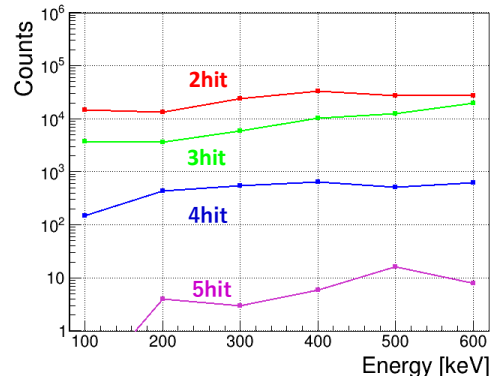


AMEGO検出器における検証

(A) 全エネルギーがデポジットし、コンプトン散乱後に光電吸収が起きたイベント数



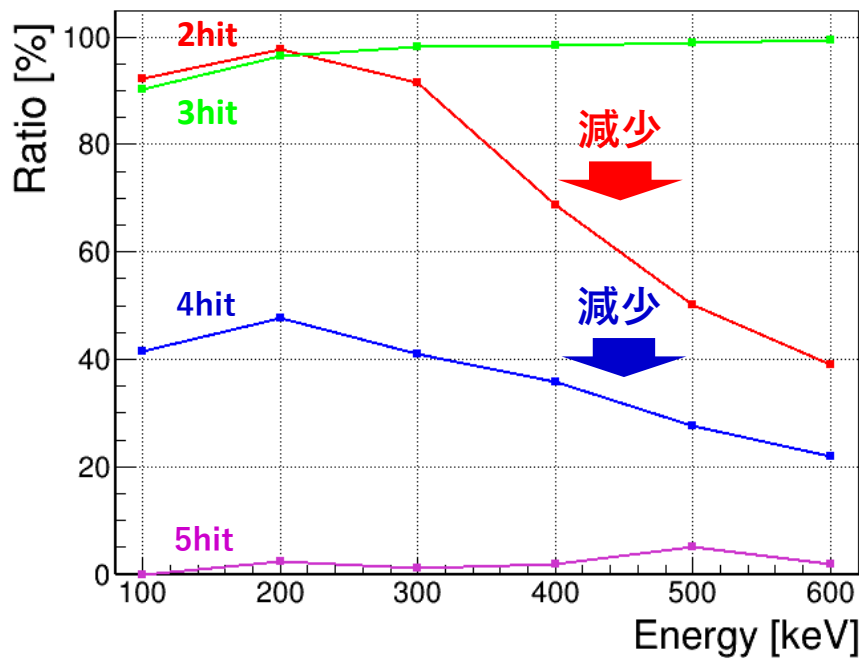
(B) (A)のうち、コンプトン再構成が行えたイベント数



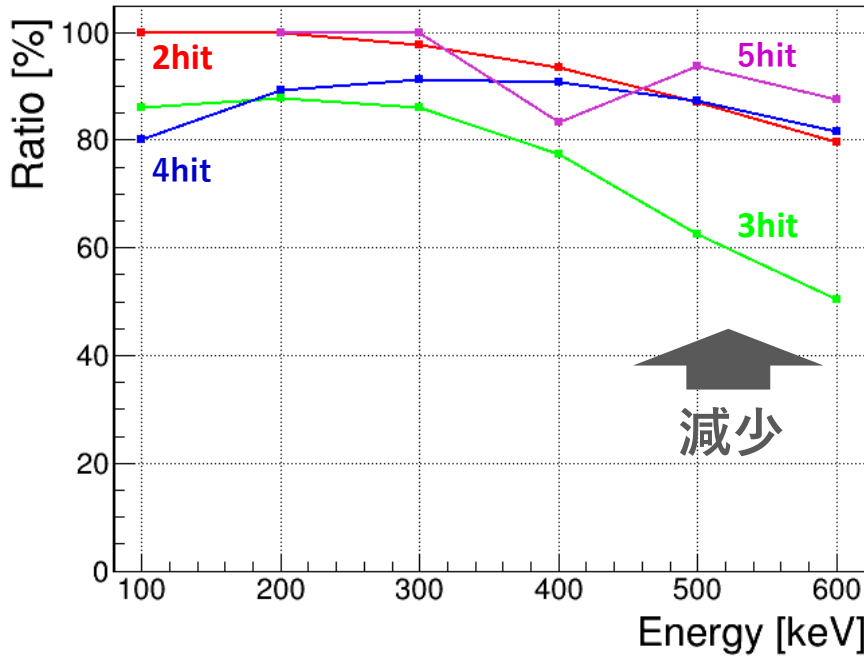
再構成



再構成率 (B)/(A)



(B)の反応順序の正答率



コンプトン再構成プログラムの今後

AMEGOのジオメトリで再構成を行った結果

再構成率: ・ 2hit, 3hit: 100 keV~300 keVで90 %以上

- ・ 2hit: 高エネルギーになるにつれて減少
- ・ 4hit, 5hit: 50 %以下

正答率 : ・ 2hit~5hit: 100 keV~300 keVで80 %以上

- ・ 2hit~5hit: 高エネルギーになるにつれて減少
- ➔ 高エネルギーになるにつれ、CZT半導体検出器との相互作用が増えていき、CZT検出器の厚さ(40 mm)の影響が出た

今後

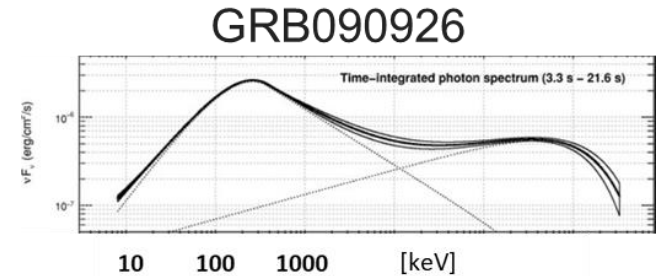
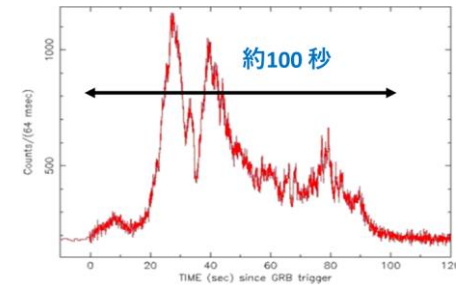
- ・ 測定値の不定性やヒット間距離などを考慮しながら、再構成率、反応順序の正答率を上げるための改良を行う
- ・ 各相互作用の際に生じる二次粒子による単独のヒットを考慮する

予備資料

ガンマ線バースト

秒程度から数時間にわたってガンマ線が閃光のように放射される瞬間的で宇宙で最も明るい物理現象

- 数100keVで非常に強い放射
- ガンマ線放射のメカニズムは
解明されていない



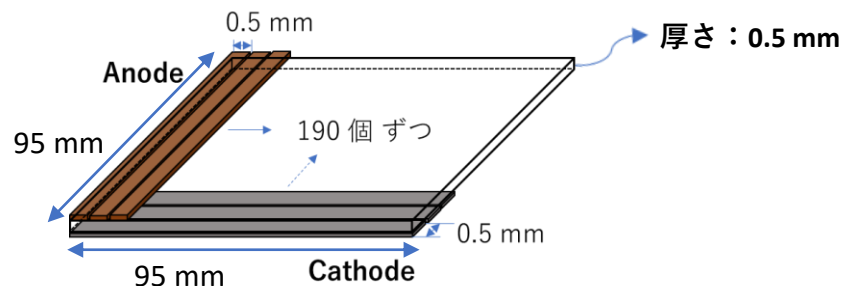
→ 理論的な予想ではシンクロトロン放射

→ ガンマ線偏光観測でメカニズムの解明

AMEGOに搭載される検出器

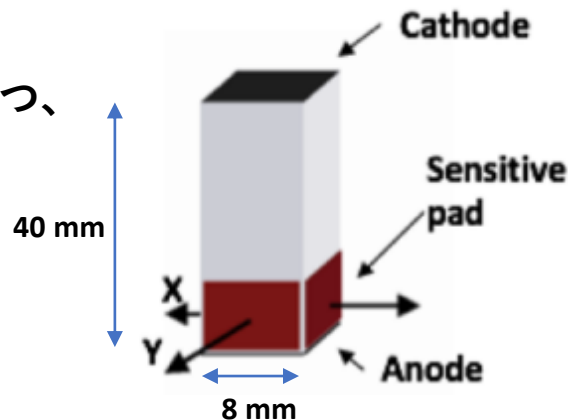
• 両面シリコンストリップ検出器

→ シリコン半導体の表面と裏面にそれぞれ190列ずつ電極がある



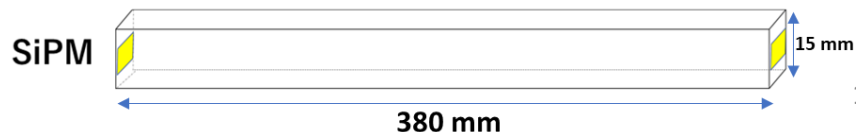
• CZT半導体検出器

→ CZT半導体の表面に1つ、側面に4つ、底面に1つの電極がある
※側面の電極は未実装

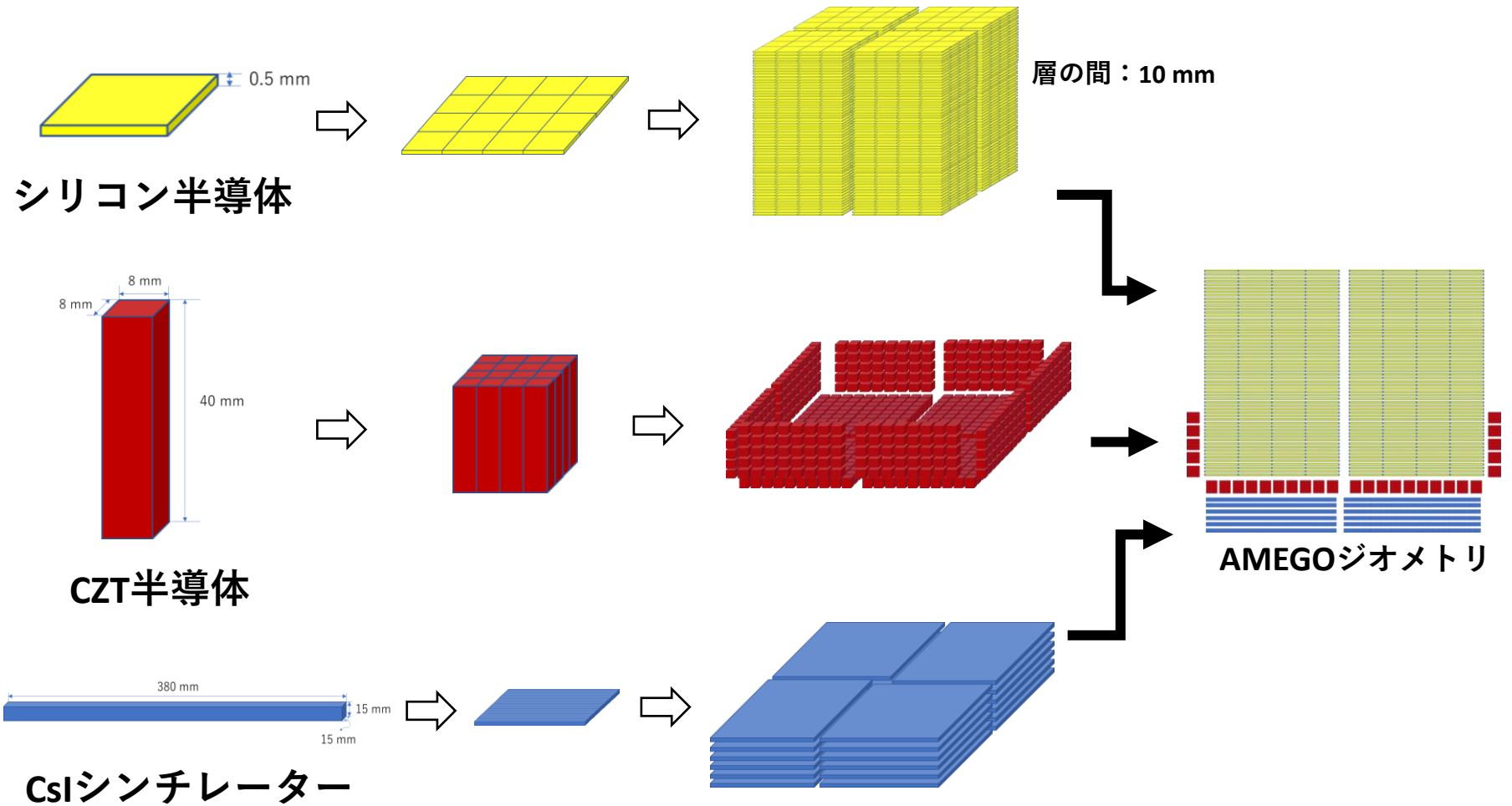


• CsI(Tl)シンチレータ

→ 両端にSiPMがある
※片方のSiPMは未実装



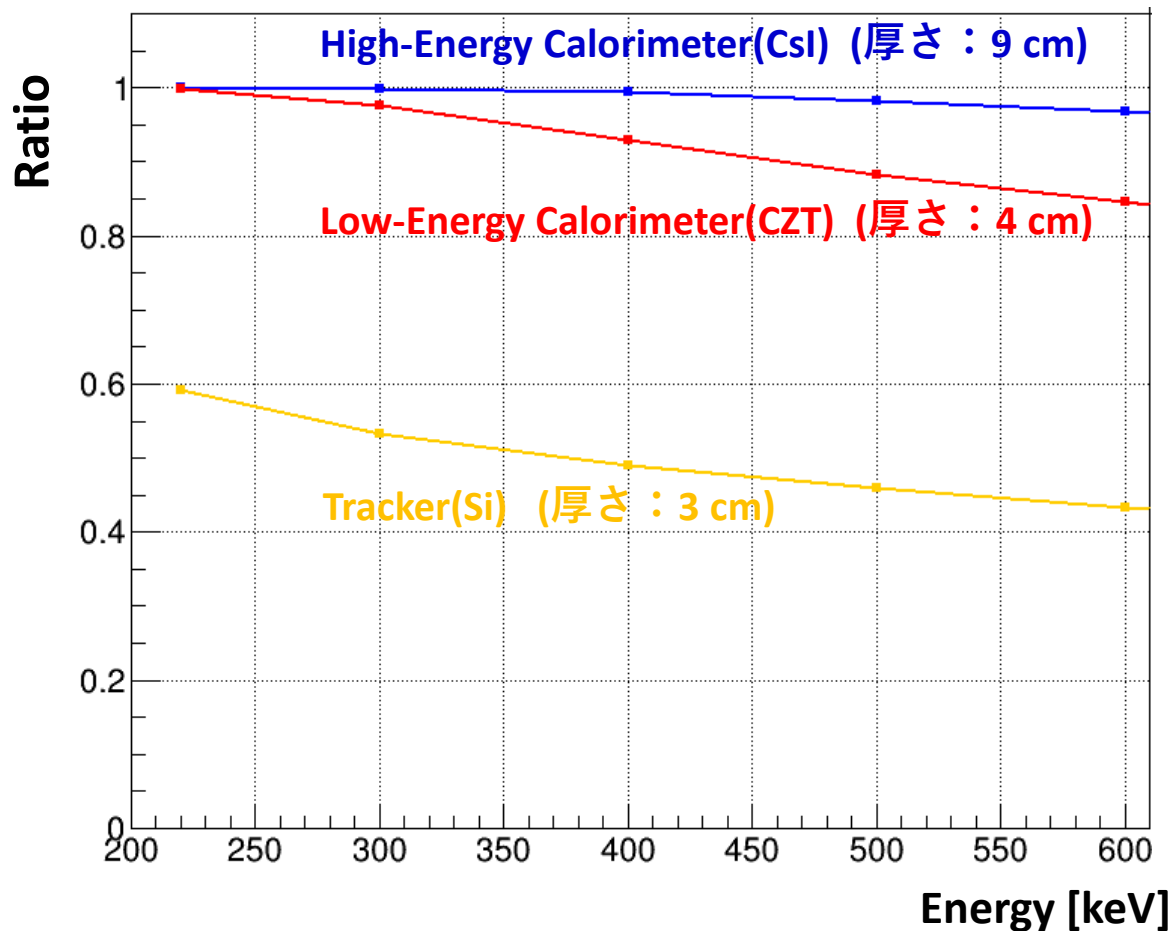
AMEGOジオメトリ



AMEGOジオメトリにおける反応率

反応断面積を用いて各検出器における反応率を計算した

AMEGOの各検出器にガンマ線を照射したとき、
コンプトン散乱or光電吸収が起きる確率



➡ Si、CZTと90%以上の
確率で反応

再構成プログラムの条件②③

② $|\cos \theta k[i]| \leq 1$ である反応順序

$$-1 \leq \cos \theta k[i] \left(= 1 - \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i+1}^{n-1} e[j]} + \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i}^{n-1} e[j]} \right) \leq 1$$

$$\Leftrightarrow 0 < f[i] = 2 \left(\sum_{j=i+1}^n e[j] \right)^2 + 2 \left(\sum_{j=i+1}^n e[j] \right) e[i] - m c^2 \times e[i] \text{ より}$$

$$\textcircled{2} \Leftrightarrow f[i] + df > 0 \quad \leftarrow \text{エネルギー分解能による不定性を考慮}$$

③ 二回目の散乱以降、 $\cos \theta g$ と $\cos \theta k$ が一致する反応順序

$$g[i] \equiv \cos \theta g[i] - \cos \theta k[i] = 0 \text{ とおくと}$$

$$\textcircled{3} \Leftrightarrow -dg \leq g[i] \leq dg \quad \leftarrow \text{エネルギー分解能による不定性を考慮}$$

再構成率及び正答率の考察

再構成率及び正答率が100 %でない理由

- 検出器による測定値の不確かさ(エネルギー分解能、位置分解能)
- 条件④で、二回目の散乱以降全てにおいて、 $\cos \theta g[i]$ と $\cos \theta k[i]$ の差が、最小となる反応順序を選び出している
 - 全ての散乱において最小となる反応順序を持たないイベントがある
 - ②～④だけで正しい反応順序を選び出すことには限界がある
- ドップラーブロードニング(散乱前の電子は原子核の周りで有限の運動量を持つことを考慮して散乱角の式が決まる)
 - ②～④における $\cos \theta k[i]$ の計算が正しくない

$$\cos \theta k[i] = 1 - \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i+1}^{n-1} e_j} + \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i}^{n-1} e_j} \quad \leftarrow \text{静止した電子にガンマ線光子が衝突する場合}$$

- Geant4あるいは再構成プログラムの数値計算における丸め誤差(丸め誤差: ある桁以降を無視することによって生じる誤差)

真上から到来するときのコンプトン再構成プログラム

光子が検出器とn回反応する場合、考えられる反応順序はn!通り

➔ 正しい順序を求める

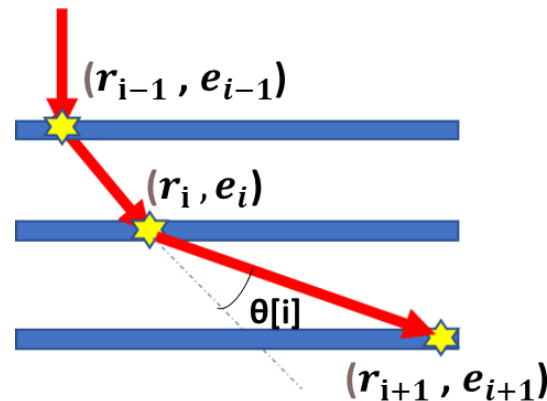
以下の量を用いてコンプトン再構成する

・パラメータ：ヒット位置 r_i ヒットエネルギー e_i

・運動学から求まる散乱角：
$$\cos \theta k[i] = 1 - \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i+1}^{n-1} e_j} + \frac{m_e c^2}{\sum_{j=i}^{n-1} e_j}$$

・幾何学から求まる散乱角：
$$\cos \theta g[i] = \frac{r_i - r_{i-1}}{|r_i - r_{i-1}|} \cdot \frac{r_{i+1} - r_i}{|r_{i+1} - r_i|}$$

※全ての散乱で求める



2 ヒット 3 ヒット以上

①~④

①~④

再構成完了 再構成完了

① 蛍光エックス線によるヒットを持たない
(元のヒットへのマージは未実装)

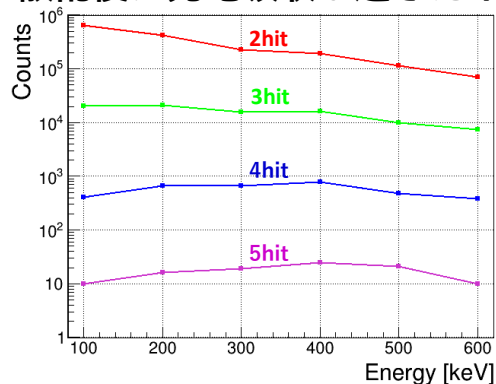
② $|\cos \theta k[i]| \leq 1$ である反応順序

③ 全ての散乱で、 $\cos \theta g$ と $\cos \theta k$ が一致する反応順序

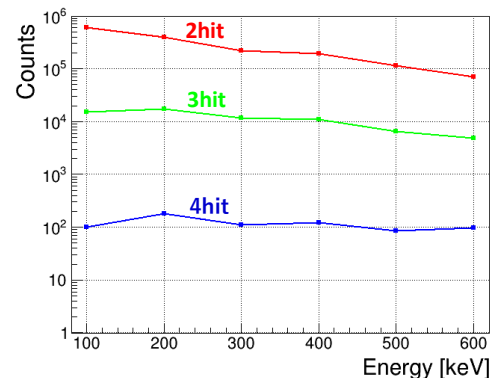
④ 残った複数の反応順序のうち、各ヒットで $\cos \theta g$ と $\cos \theta k$ の差が最小となる反応順序

真上から到来するときの簡単な検出器における検証

(A) 全エネルギーがデポジットし、コンプトン散乱後に光電吸収が起きたイベント数



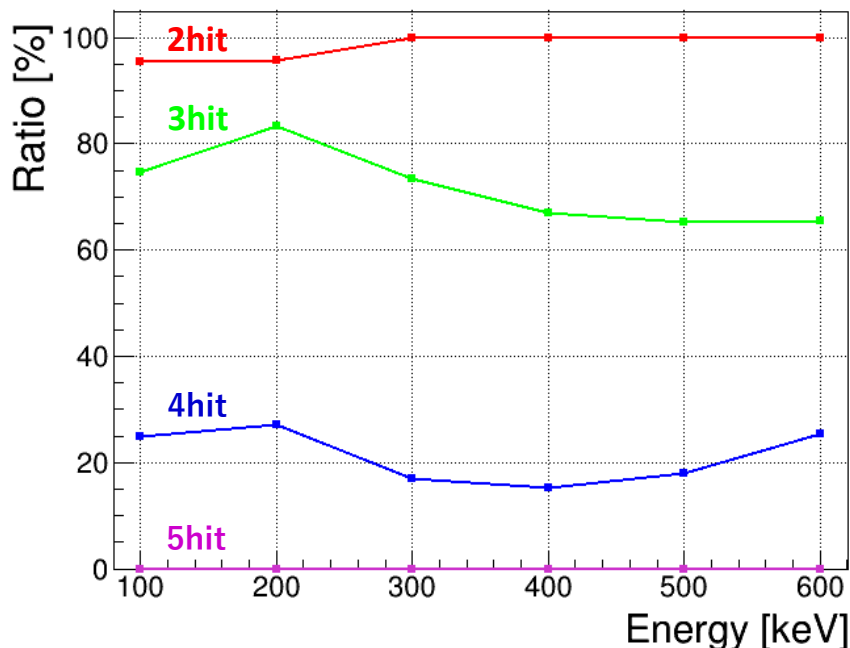
(B) (A)のうち、コンプトン再構成が行えたイベント数



再構成



再構成率 (B)/(A)



(B)の反応順序の正答率

