

PET/WLSF 開発基礎研究： γ 線の検出効率測定と光電吸収内コンプトン散乱事象

2016年 4月 8日

概要

我々は ^{22}Na 線源から放出される γ 線(1.27 MeV)と陽電子放出後対消滅して放出される片方の γ (511 keV) を捉えることで γ (511 keV)の入射事象を選別するシステムを構築した。結晶の厚さとの関係からシミュレーションと比較した結果、GAGG 結晶と GSO 結晶どちらも Geant4 の結果より低い値を示した。このシステムを利用して光電吸収領域におけるコンプトン散乱事象を観測した。PET 装置の検出効率は光電効果事象の同時計測のため、非常に検出効率が低いことは知られており、光電吸収事象のうちコンプトン散乱事象も解析に使用できれば統計数向上による画像解像度向上、そして患者被曝量を低減が期待できる。

1. 前回までの進捗

1.1. γ 線検出効率測定システム

^{22}Na は陽電子を放出後 1.27 MeV の光子を放出するので、対消滅して生成された光子の片方と γ (1.27 MeV)を観測することで γ (511 keV)の事象タグを取得できる。入射光子数に対する標的検出器の 511 keV 光電吸収事象数の割合を検出効と定義する。図 1 にセットアップを示す。2つの GSO ブロックで線源を挟み、その片側を1つの浜松ホトニクス社の R6231-100

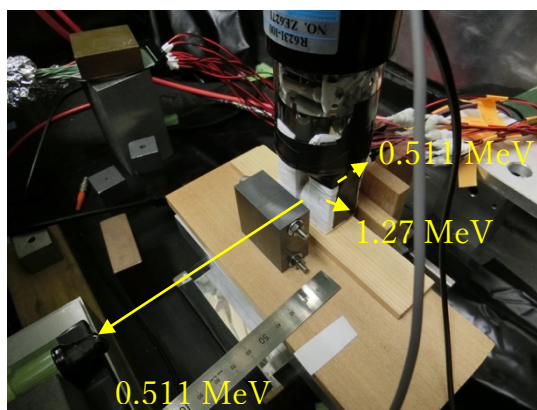


図 1. Setup 写真

No.ZE6271 で読み出す。増幅率は電圧 1800 V で 10^6 程度。GSO 結晶はサイズ $48 \times 24 \times 2.6 \text{ mm}^3$ を 6 枚重ねて1つのブロックにした。つまり、結晶ブロックは $48 \times 24 \times 15.6 \text{ mm}^3$ のサイズだ。結晶ブロックの5面には白色の自己融着テープを巻き乱反射させて収集効率を上げた。

1.2. Calibration 測定

1.27 γ 線検出器に据え付けられた2つの GSO ブロックの間に ^{22}Na 線源を設置しエネルギー校正を行った。セルフトリガーによる測定では β^+ 崩壊した陽電子による対消滅後の2本の γ 線が片方(511 keV)もしくは両方検出された事象(1022 keV)、 β^+ 崩壊後の ^{22}Ne の励起状態から遷移する時に 1275 keV の γ 線をほぼ同時に放出する事象、そしてサム効果によって $511 + 1275 = 1786 \text{ keV}$ が観測された。ADC 分布と比較して良い線形性を見せた。1次関数でフィットした結果校正係数 $1.908 \pm 0.06 \text{ ADC/MeV}$ を得ることができた。各エネルギーピークにおけるエネルギー分解能はそれぞれ FWHM 17.5% @511 keV, FWHM 14.5% @1.02 MeV, FWHM 18.8% @1.27MeV, FWHM 16.8% @1.79 MeV と評価した。

1.2. γ 線(511 keV)事象選択による結果

1.27 γ 検出器のしきい値を 1 MeV 相当(ディスクリミネータしきい値-150 mV)に設定し、511 keV γ 線の片割れと同時に検出された事象をトリガーに設定する。図 2 は 1.27 γ 検出器と参照検出器のスキッタプロットを示す。赤線枠内の事象は、参照検出器で 511 keV 落とし、かつ 1.27 γ 検出器で 1.27 MeV 落としているので、つまり標的

方向に 511 keV の γ 線を照射したことが保証される。縦軸 1022 keV の領域は線源を挟んだ GSO に消滅 γ が 2 本エネルギーを落とした事象で、同時に放出された 1.27 MeV が参照検出器に入射することを許すので横線ができる。511 keV にピークらしきものができているのは 1.27 MeV の γ 線が電子陽電子対生成した後に対消滅して生じた γ 線が入射していると推察できる。1.27 MeV では対生成する確率はコンプトン

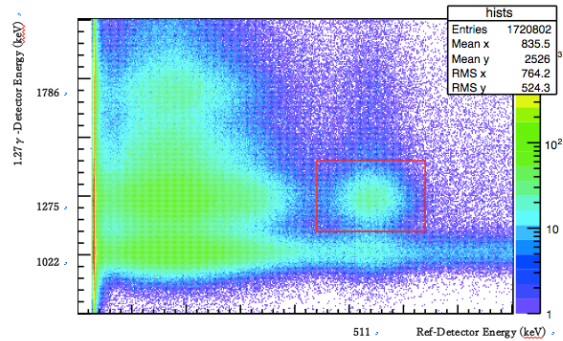


図 2. トリガー検出器のエネルギー分布

散乱に比べ高くはないが、コリメータに鉛を使用しているため、高い確率頻度は原子番号の 2 乗に比例することから説明される。

図 3 は事象選択された標的検出器の ADC 分布で、400-600 keV が光電吸収事象の領域であることがわかる。標的検出器の GAGG 結晶の厚さを 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 5.0 mm と変えた時、511 keV 光電吸収事象の割合が次第に向上していることが確認できた。

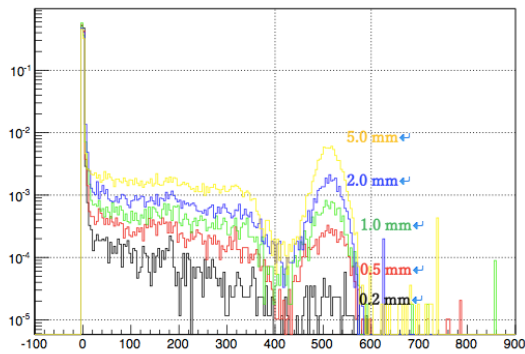


図 3. 事象選択された標的検出器のエネルギー分布。

1.3. モンテカルロシミュレーションによる比較

Geant4 によるシミュレーションで比較するためのジオメトリは、511 keV の γ 線を GAGG 結晶 ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$)に入射させ、損失エネルギーを測定する比較的容易な仕様が採用された。ただし物質は実験と同様のサイズ: 10 mm \times 10 mm で厚さ 0.1 mm から 6.0 mm までを 0.1 mm ステップで変化させ、密度も 4.03 g/cm³ から 6.83 g/cm³ まで 0.4 g/cm³ ステップで変化させた。

シミュレーションと測定結果の比較を図 4 に示す。黒点がデータを示し、各色の□が Geant4 によるシミュレーション結果を示す。GAGG 結晶の密度はカタログ値では 6.63 g/cm³ で、実際に測ると 6.8

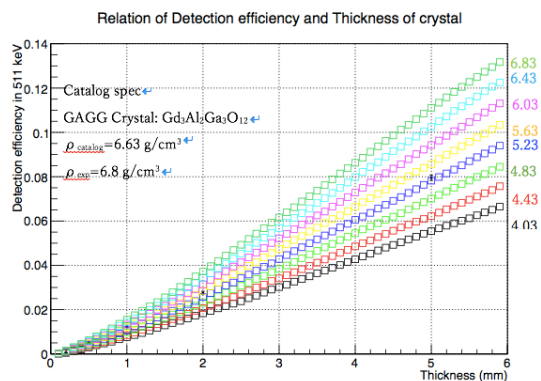


図 4. GAGG 結晶の厚さと検出効率の関係。測定値とシミュレーションとの比較。

±0.3 g/cm³ なことから Geant4 の結晶模型は γ 線内における相互作用において正確ではないことを指摘される。測定結果は密度 5.83 g/cm³ の曲線に乗っており、本来の密度で計算した場合実際より感度をよく見積もることになる。

1.4. 光電吸収事象領域におけるコンプトン散乱

サイズ 24.0 mm×48.0 mm×2.6 mm の GSO 結晶に PMT を接続し 2 枚用意する。その間に同じ結晶をはさんでいき、 γ (511 keV) を照射して光電吸収しかつコンプトン散乱した事象を観測した。標的検出器において手前の PMT は R6231-100 No.ZE6267 で奥が No.ZE6266 である。系統誤差を見積もるために同じ組み合わせにおいて互いに PMT を入れ替えて測定した。

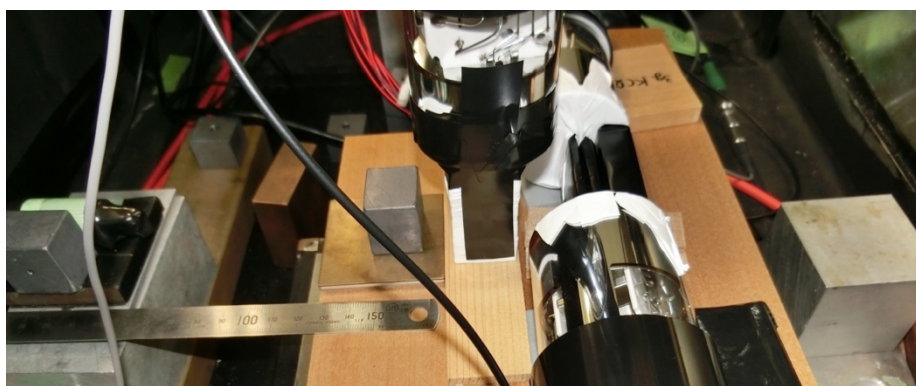


図 5. 光電吸収領域におけるコンプトン散乱事象の測定のためのセットアップ。

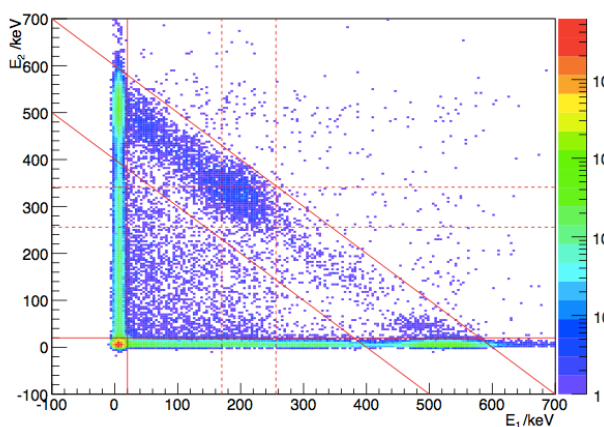


図 6. GSO 結晶 2 つのエネルギー分布。

結晶 1 で落としたエネルギー(E_1)と結晶 2 で落としたエネルギー(E_2)の分布を示す。ちょうど($E_1/\text{keV}, E_2/\text{keV}$)=(20, 491)から(256, 256)にかけての領域が前方散乱(0~90°)、(171, 350)から(256, 256)にかけての領域が後方散乱(90~180°)を示す。(491, 20)から(256, 256)の領域は 2 回以上コンプトン散乱を同じ結晶内で起きた事象であると説明され、前方散乱・後方散乱といえる領域にも存在されると考えられる。

γ 線照射事象における 511 keV 光電吸収事象の割合の 2 つの結晶の間に挟んだ結晶の枚数における関係を図 7(左)に示す。間に厚さ 2.6 mm の GSO を挟むと光電吸収事象が減少傾向にある。これは γ 線の強度と透過長の考え方そのもので、上流の結晶で光電効果する確率、そしてコンプトン散乱する確率は変わらないが下流の結晶では間に物質が増えると 511 keV 落とす割合が減少するので、合算して光電吸収する確率が減ることが説明できる。

光電吸収事象のなかでコンプトン散乱した事象($20 \text{ keV} < E_1 \otimes 20 \text{ keV} < E_2 \otimes 400 \text{ keV} < E_1 < 600$)

keV)の割合における同様の関係性を図 7(右)に示す。結晶間の物質量が増えるにしたがって減衰傾向にある。コンプトン散乱した低いエネルギーの γ 線は 511 keV と比べて透過長が低いため右図は左図と比較して減衰係数が高いと説明できる。光電吸収内にコンプトン散乱事象は、結晶間に結晶がない時は 15%、1層ある時 7%、2層の時は 4%という風に指数関数的に減少する結果が得られた。

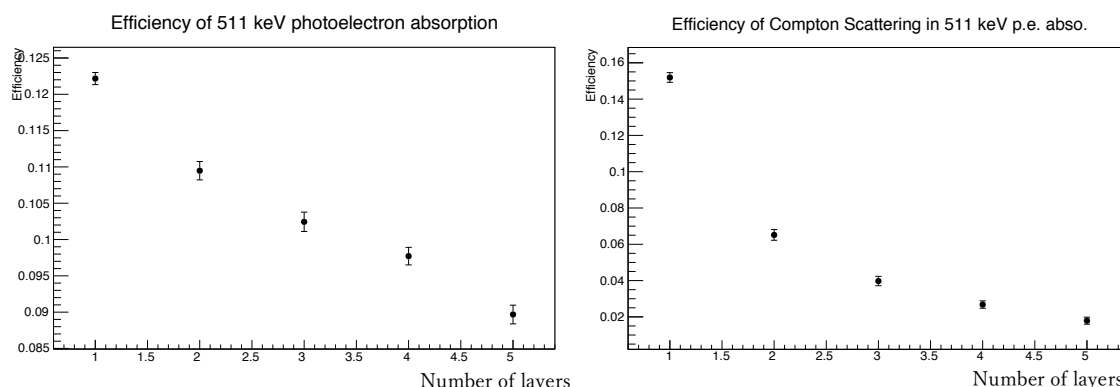


図7. 結晶間 GSO 枚数における 511 keV 光電吸収確率(左)と光電吸収領域のコンプトン散乱事象の割合(右)

2. 今週(4/1~8)の仕事と報告

今週の仕事を下に示す：(1) GSO 結晶の検出効率測定を GAGG 結晶同様に行い、シミュレーション値との比較、(2) GSO 結晶における光電吸収事象内コンプトン散乱事象のグラフの校正、(3) Geant4 シミュレーションの γ 線照射条件の設定。最後に考察と来週の仕事についての計画を記述する。

2.1. GSO 結晶の検出効率測定

GAGG 結晶同様に γ 線入射システムを使って、GSO 結晶の結晶厚さにおける検出効率測定を実施した。GSO はサイズ 24 mm×48 mm×2.6 mm で 20.6 g なので密度は 6.88 g/cm³である。GAGG 結晶と密度はちかい。結晶厚は 1層から 6層まで測定した。これについてもシミュレーションと値は一致せず、測定値が低い結果となった。

2.2. 光電吸収内コンプトン散乱

新田さんと議論したところ、放医研でも同様なセットアップでシミュレーションしており、X'tal cube PET のジオメトリで、こちらの実験セットアップに合わせて比較できるようにしてみると言った。とくに結晶板全体で 511 keV 落とした事象で割合を出すのではなく、結晶 2 枚で 511 keV 落とした事象での割合でもう一度解析なおしてくれると新田さんは言った。こちらの解析では結晶の厚さを横軸にするのではなく、より一般に物質量(g/cm²)における割合としてグラフを書き直した。

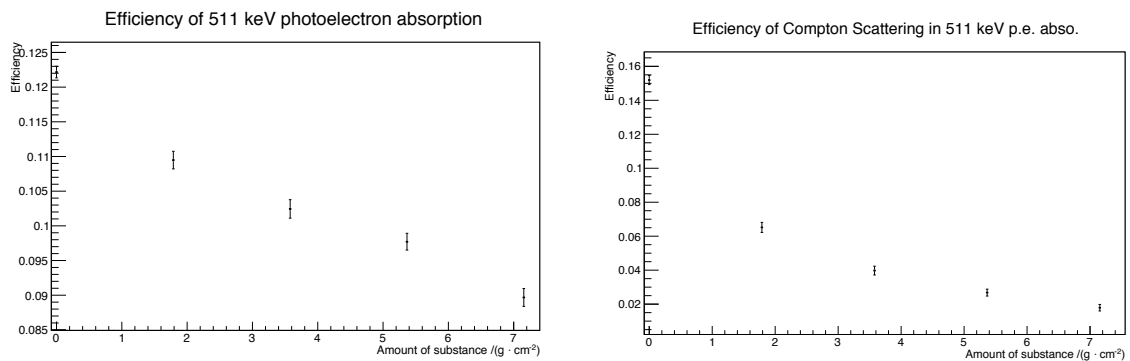


図 8. 結晶間物質質量における 511 keV 光電吸収確率(左)と光電吸収領域のコプトン散乱事象の割合(右)

2.3. G4 γ 線照射条件の変更

測定値とシミュレーション値が一致しないのは γ 線をただ入射させているだけで、入射角度による影響を考えていないからではないかと考え、今度は入射角度、入射位置を変更してシミュレーションをかけた。結果から言えば、これが要因ではないことがわかった。

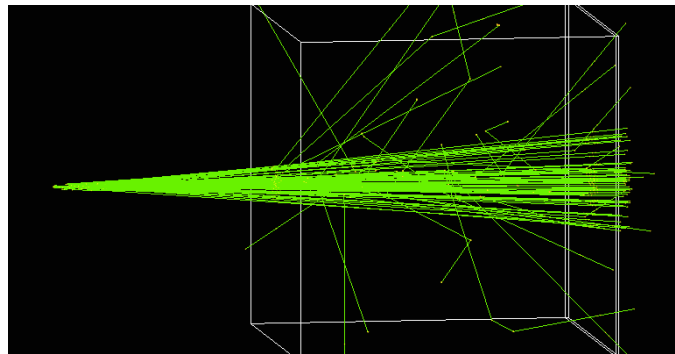


図 9. γ 線入射角度 $0 \sim \text{atan}(0.1)$ で乱数を振っている

2.4. 考察

検出効率測定が測定値と理論値が一致しない原因は入射角度、入射位置ではないことがわかった。根本的に γ 線をただ入射するだけのジオメトリではでない要因が実験セットアップで出てくるのかもしれない。リファレンス検出器で 1.27 MeV と 0.511 MeV を取得して事象選択しているが、この事象のなかにノイズがかくれている可能性がある。そこで仕方ないから実験セットアップと同じ環境でシミュレーションをかける他なくなった。現在ジオメトリ作成中。

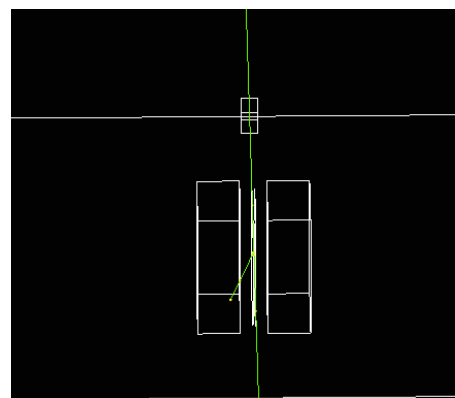


図 10. ²²Na 線源によるシミュ・ジオメトリ (未完成)

3. 来週の仕事の予定

シミュレーションについては ^{22}Na 線源を用いたセットアップを作り上げて、実測値と比較する。シミュレーション値でも結晶厚さと検出効率でなくて、物質質量と検出効率にグラフを書き直して、結晶のちがいをしてみる。

波長変換ファイバーを用いた測定のために MPPC のコネクタ圧着と Calib を進めよう。合計 20 個すぐに使えるようにしておくことが来週の仕事の一つ。

La-GPS の結晶厚における検出効率測定を進めておきたい。1 週間で 1 サイクルと考えれば、あつこばに任せても大丈夫なはず。