

シンチレータ結晶厚さに依存した γ 線検出効率測定システムによる 光電吸収事象におけるコンプトン散乱の測定

2016年03月25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、Geant4 では結晶模型が不十分であることを指摘する。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. 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)の事象タグを取得することができる。入射光子数に対して標的検出器の 511 keV 光電吸収領域の事象数の割合から直接検出効率を評価するシステムを構築した。

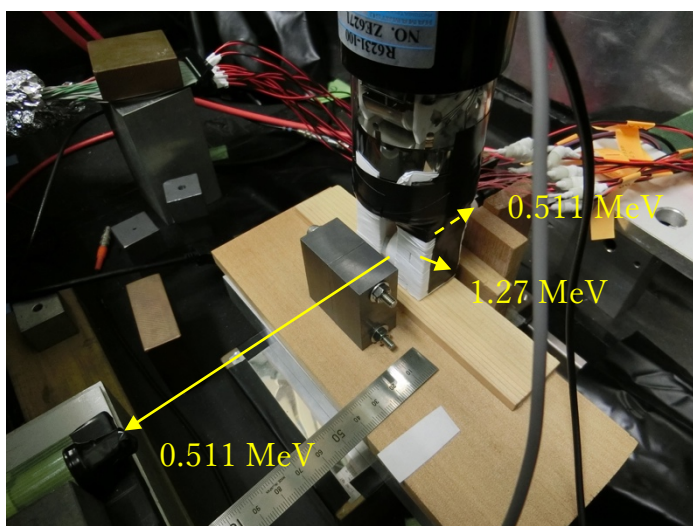


図 1. Setup 写真

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つの光電子増倍管(PMT)で読み出す。PMT は浜松ホトニクス社の R6231-100 No.ZE6271 で、増幅率は電圧 1800 V で 10^6 程度だ。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 $48 \times 24 \times 15.6 \text{ mm}^3$ のサイズである。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。

1.1. 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 $511 + 1275 = 1786$ 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 ± 0.06 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。

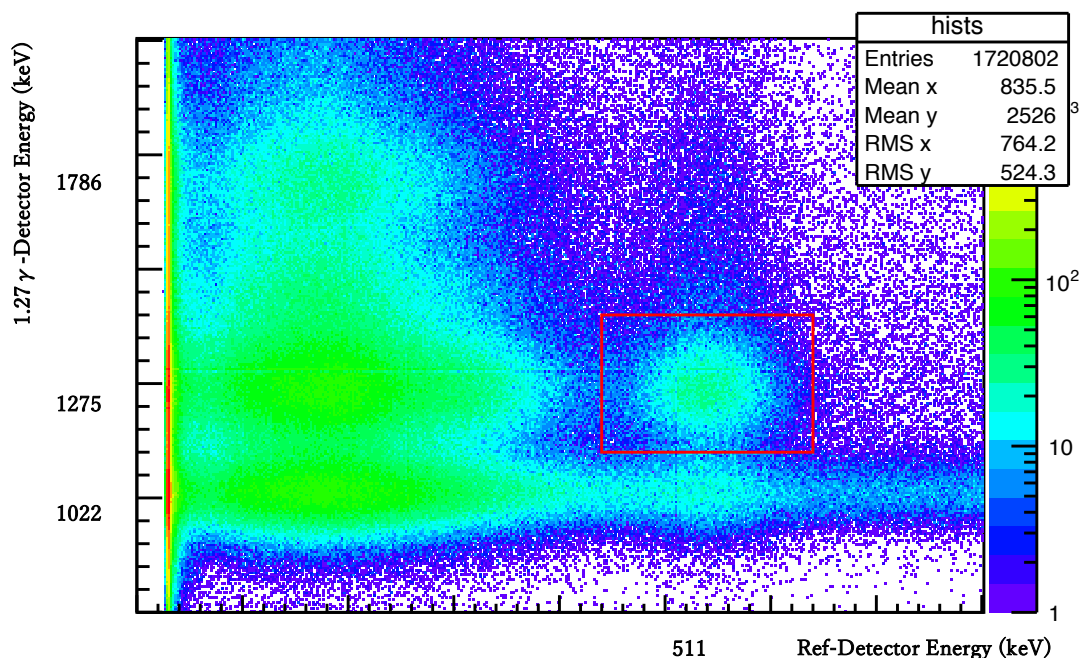


図 2. トリガー検出器のエネルギー分布

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。

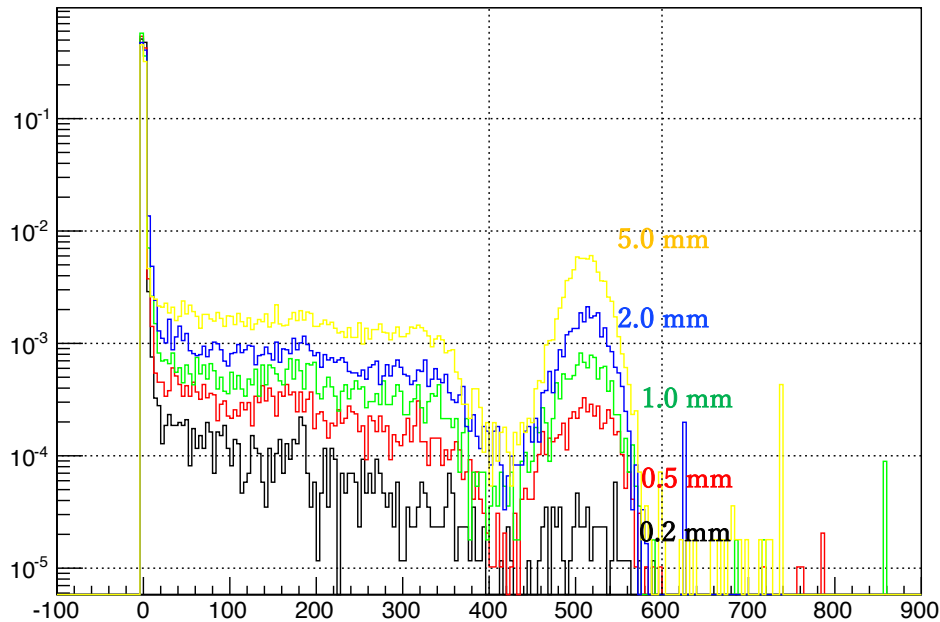


図3. 事象選択された標的検出器のエネルギー分布。黒、赤、緑、青、黄線はGAGG結晶の厚さがそれぞれ0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mmである

2. 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×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±0.3 g/cm³なことからGeant4の結晶モデルは 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。

Relation of Detection efficiency and Thickness of crystal

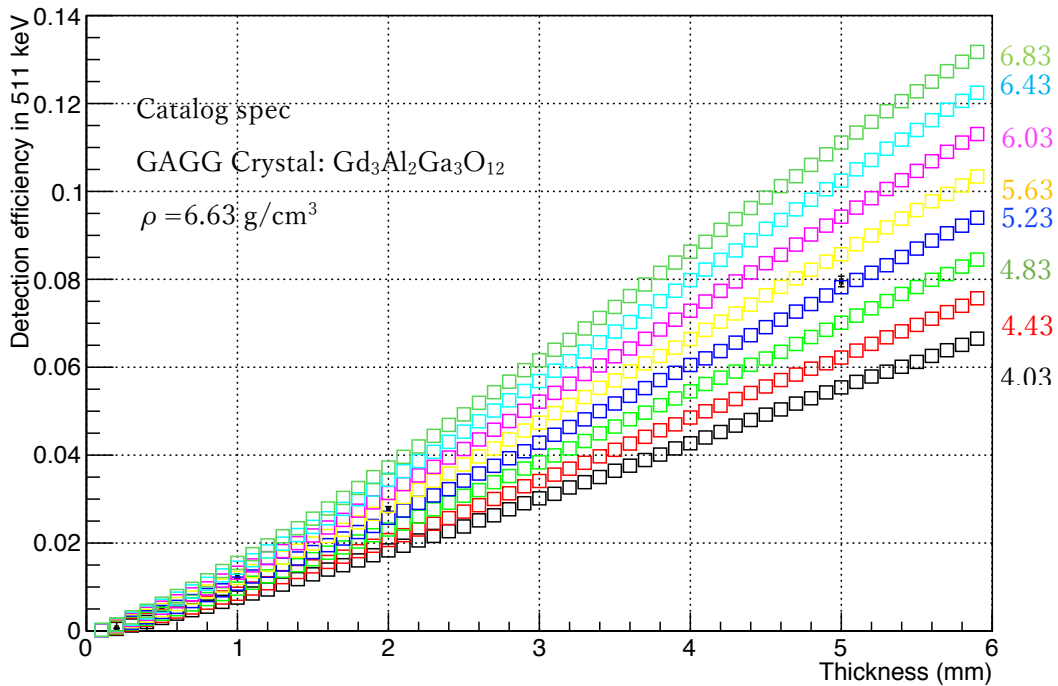


図 4. GAGG 結晶の厚さと検出効率の関係。測定値とシミュレーションとの比較。

3. 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。

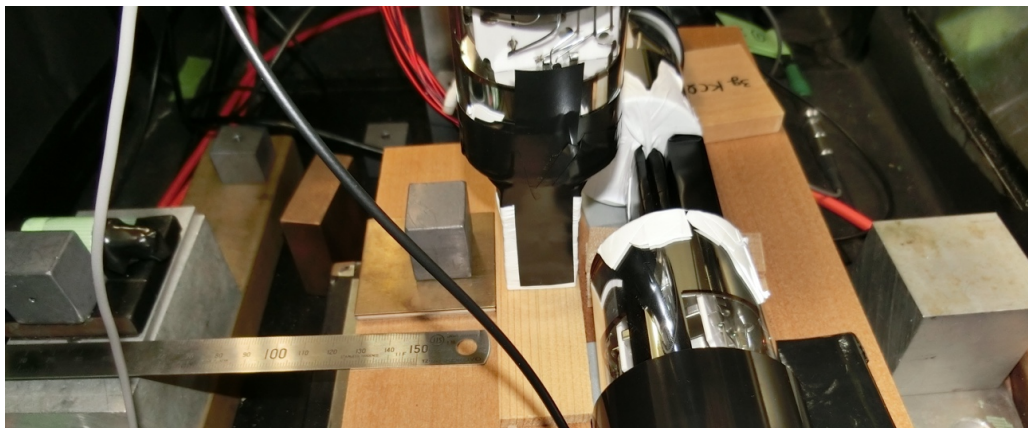


図 5. 光電吸収領域におけるコンプトン散乱事象の測定のためのセットアップ。

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, E_2)=(20 keV, 491 keV)から(256 keV, 256 keV)にかけての領域が前方散乱($0^\circ - 90^\circ$)、(171 keV, 350 keV)から(256 keV, 256 keV)にかけての領域が後方散乱($90^\circ - 180^\circ$)を示す。(491 keV, 20 keV)から(256 keV, 256 keV)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ことが考えられる。

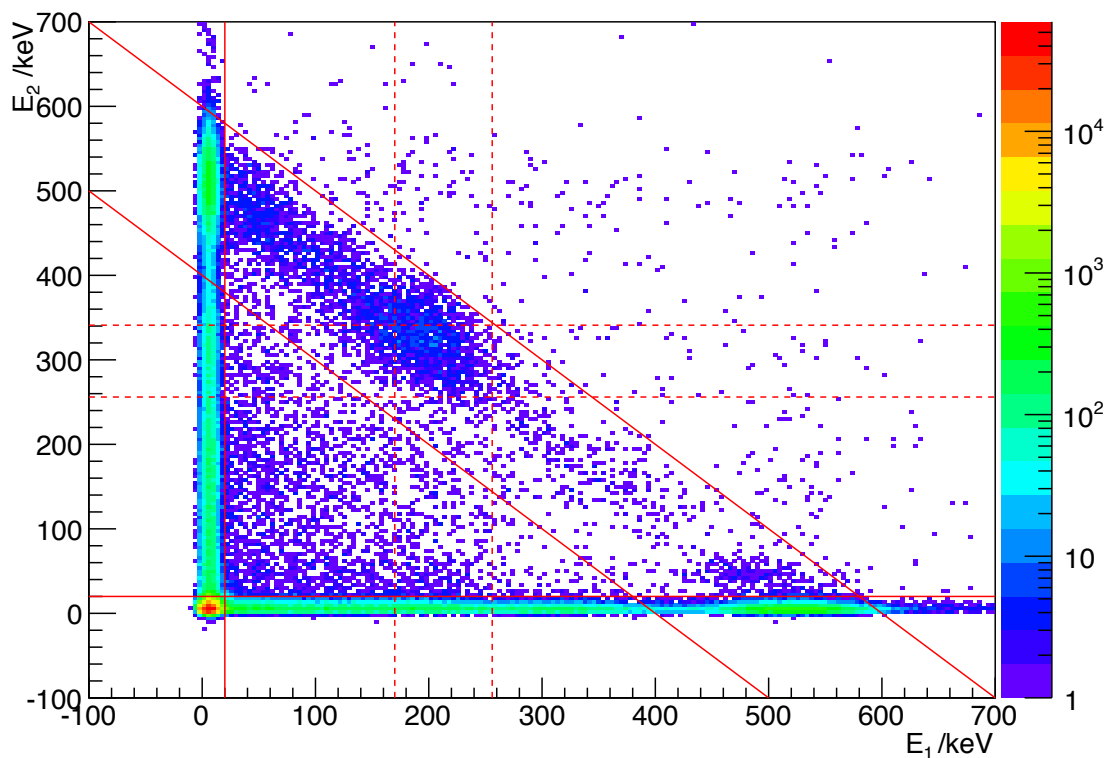


図6. GSO 結晶2つのエネルギー分布。

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($20 \text{ keV} < E_1 \otimes 20 \text{ keV} < E_2 \otimes 400 \text{ keV} < E_1 < 600 \text{ keV}$)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。

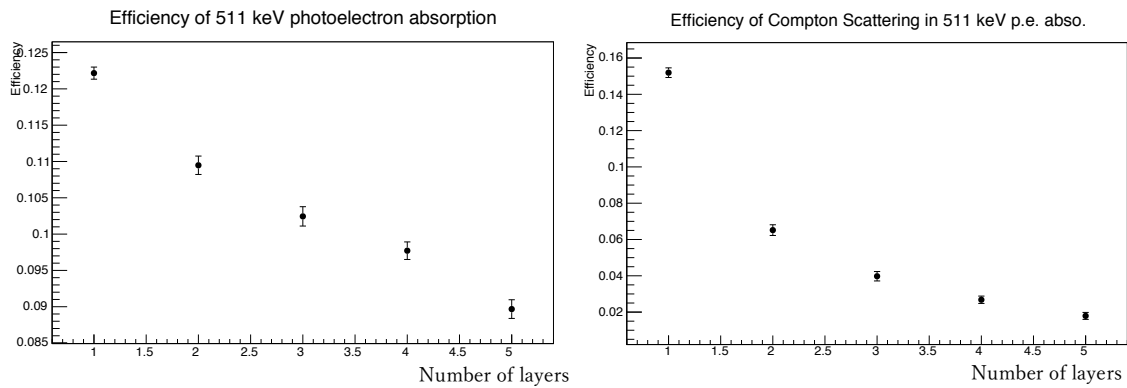


図 7. 結晶間 GSO 枚数における 511 keV 光電吸収確率 (左)と光電吸収領域のコンプトン散乱事象の割合(右)

4. 考察とまとめ

γ 線照射システムを構築し GAGG 結晶の厚さにおける検出効率を測定した。Geant4 モンテカルロシミュレーションと比較し、結晶モデルが一致しないことを指摘した。このシステムを使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。2つの結晶の間に同じ結晶をダミーとして挟み増やしていくと、光電吸収および光電吸収内コンプトン散乱事象が減少した。これは γ 線の透過長に由来する効果が表れていることで説明がつく。

この結果から言えることは結晶のすぐ近くで光電吸収内コンプトン散乱事象が多く存在し、厚さ 2.6 mm の GSO 結晶では隣同士で 16%含まれているということである。PET 装置の結晶が最大 6 層であると仮定する。隣同士の結晶の組み合わせは 5 通りなので 2 個の結晶で光電吸収した事象でコンプトン散乱したイベントを救えるなら

$$\frac{1}{(1 - 0.16)^5} = 2.39$$

倍の統計量は最低でも向上できると考えられる。そして、PET では同時計測するためその 2 乗の 5.7 倍は統計数の向上が見込まれるだろう。

今後の展望は Geant4 で同様のセットアップで比較することで、全体の光電吸収事象にどれだけコンプトン散乱事象が存在するのか、そこから先ほどの議論を詰める予定だ。測定に関しては、他の結晶でも同様の測定をしたい。