

GAGG シンチレーション光における波長変換ファイバーの収集効率

概要

波長変換ファイバーを用いた PET 装置は 0.1mm の位置分解能を達成する可能性を持つ。本測定は GAGG 結晶からのシンチレーション光を直接 PMT で読みだした場合と波長変換ファイバー (R-3) を経由して伝搬された光を PMT で読みだした場合のそれぞれの光電子数を比較し、ファイバーの収集効率を評価する。ファイバーの層ごとの光電子数の関係から R-3 のコアの波長変換効率を推定する。

1. セットアップ

図1に本測定のセットアップと PMT 1と PMT2 の ADC 分布を示す。

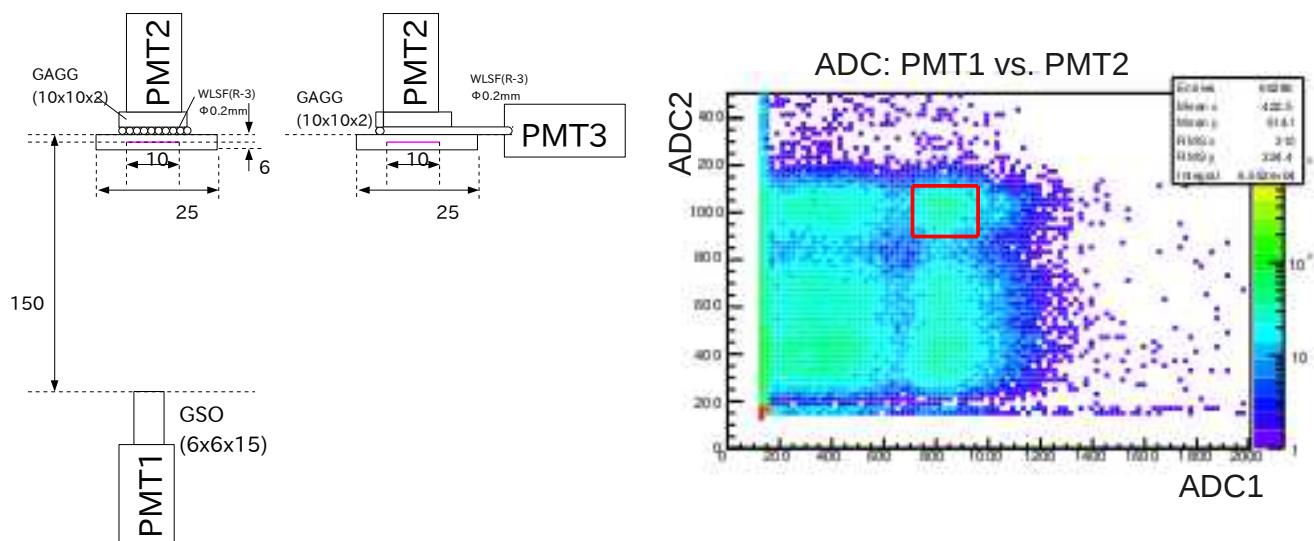


図1. ^{22}Na 線源を用いたガンマ線測定システムのセットアップ: ^{22}Na 線源を中心にして PMT1 と PMT2 を挟んでいる。PMT 2 には GAGG が接続されその反対側に波長変換ファイバー (WLSF) が接続されている。WLSF の末端に PMT3 が接続されている。図面の単位は [mm] である(左)。PMT 1 と PMT 2 の ADC 分布: GSO と GAGG においてどちらも 511 keV の光電効果事象を選別してデータ解析する。赤線枠内事象を抽出する(右)。

PMT1 と PMT 2 が同時に γ 線を検出した事象をトリガーにして PMT 2 と PMT3 の反応を調べる。PMT 1 にはサイズ 6x6x15 mm³、1面機械研磨された GSO 結晶が接続され、PMT 2 にはサイズ 10x10x2 mm³、2面機械研磨された GAGG 結晶が接続されている。その GAGG 結晶の反対面に波長変換ファイバーのシートが接続され、ファイバーの末端に PMT 3 が接続されている。

2. 解析

GAGG 結晶からのシンチレーション光を直接読みだした場合と波長変換ファイバーを経由した場合の光電子数の関係を図2に示す。これは ADC 1において 511 keV の光電ピークの $\pm\sigma$ の領域を抽出している。ADC 2に比例した ADC3 の関係が確認できる。幅広い直線なのは γ 線が相互作用した結晶の奥行き揺らぎが影響している。

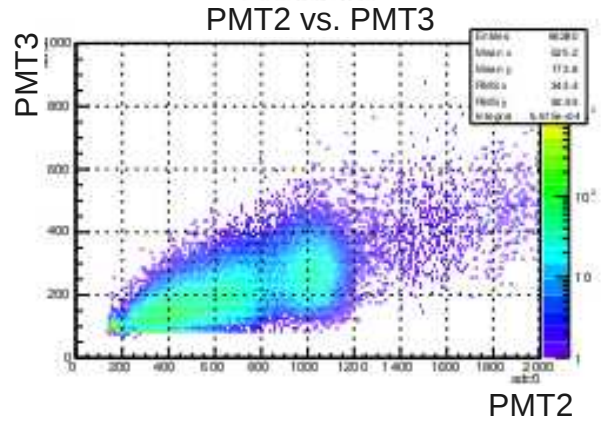


図2. GAGG から直接読み出し (PMT2) と WLSF 経由の読み出し (PMT3) の ADC 分布

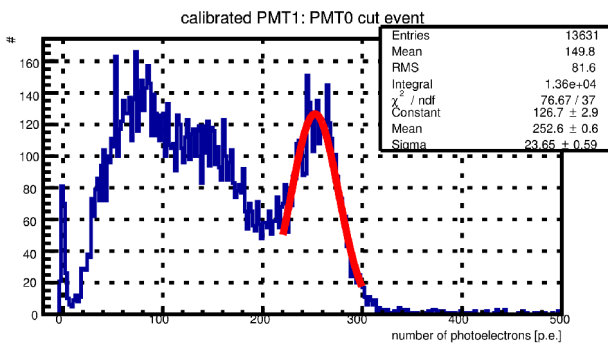


図3. GAGG から直接読み出したときの光電子数分布: ガウス分布でフィットされている。

PMT 1と PMT 2において両方 511 keV 光電ピーク $\pm\sigma$ の領域の事象における PMT 3の光電子数分布を図4(a)に示す。ファイバーシートを1層~4層と増やしていくと、1層目で収集しきれない光も下層で吸収し、そして全て収集し尽くすのである層で読み出し光電子数が飽和する。光電子数分布はポアソン分布でそれぞれフィットし、その平均値とファイバー層の関係を図4(b)、表1に示す。

4層目で飽和状態に近づく様子が確認できる。この関係を式

$$p_0(1 - e^{-p_1x}) + p_2 \quad (1)$$

でフィットした。飽和光電子数は p_0+p_2 で評価され、4層目で飽和光電子数 8.60 ± 0.56 p.e. が得られた。

layers	p.e.	coll. eff.
1	3.96 ± 0.28 p.e.	$1.6 \pm 0.1\%$
2	7.38 ± 0.48 p.e.	$2.9 \pm 0.2\%$
3	8.24 ± 0.16 p.e.	$3.3 \pm 0.1\%$
4	8.60 ± 0.56 p.e.	$3.4 \pm 0.2\%$

表1. ファイバー層と光電子数の関係、そして収集効率

PMT 2の光電子数分布を図3に示す。これは事前に PMT の校正測定を完了しており、印加電圧 1200 V の時 $(3.41 \pm 0.04) \times 10^7$ の増幅率を得ている。511 keV 光電ピークをガウス分布でフィットし、平均値 252.6 ± 0.6 、標準偏差 23.7 ± 0.6 が得られた。これより、GAGG 結晶から直接読みだした場合の光電子数は 252.6 ± 0.2 p.e. と評価できる。

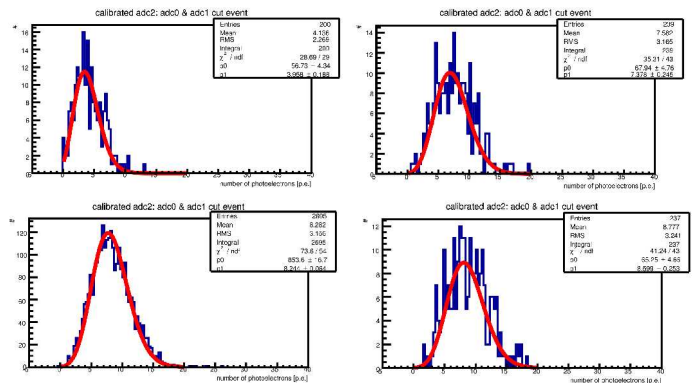


図4(a) ファイバー層 1,2,3,4 層における PMT 3の光電子数分布: PMT 1と PMT 2両方光電効果事象のみをデータカットしている。

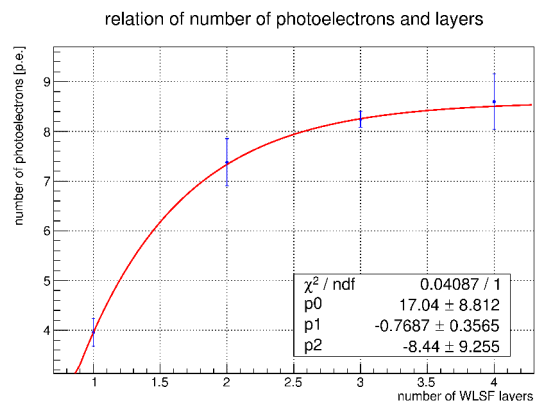


図4(b) ファイバー層と PMT 3の光電子数の関係

3. 結果

(1) コア波長変換効率

直接 GAGG からシンチレーション光と比較して収集効率は最大 $3.4 \pm 0.2\%$ が評価された。ファイバーのダブルクラッド構造によるトラッピング効率 (5.4%) は波長変換ファイバーのコアにシンチレーション光が入射し吸収・再発光した光が全反射条件を満たして片側末端へ伝搬する割合を意味する。したがって、これらの比からファイバーに入射した光のファイバーコアの波長変換効率を評価でき、 $63 \pm 4\%$ が得られた。

(2) ファイバー経由における光電子数

直接 GAGG 結晶からのシンチレーション光を PMT で読みだした場合、観測される光電子数 $N_{p.e.}$ は以下で与えられる。

$$N_{p.e.} = \int \frac{N_{ph}(\lambda)}{MeV} \Omega(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ここで、 N_{ph} は γ 線の相互作用によって発光する単位 MeV 当たりのシンチレーション光光子数、 Ω は結晶からファイバーへ入射される光子の割合である。

波長変換ファイバーを経由した時の光電子数 $N_{p.e.}$ は以下の式で与え得られる。

$$N_{p.e.} = \int \frac{N_{ph}(\lambda)}{MeV} \Omega(\lambda) \epsilon_{core}(\lambda) \epsilon_{trap}(\lambda) \epsilon_{PMT}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{core} は波長変換ファイバーの波長変換効率、 ϵ_{trap} はファイバーのトラッピング効率でダブルクラッド構造の場合片側で 5.4%、 ϵ_{PMT} は光電子増倍管の量子効率である。

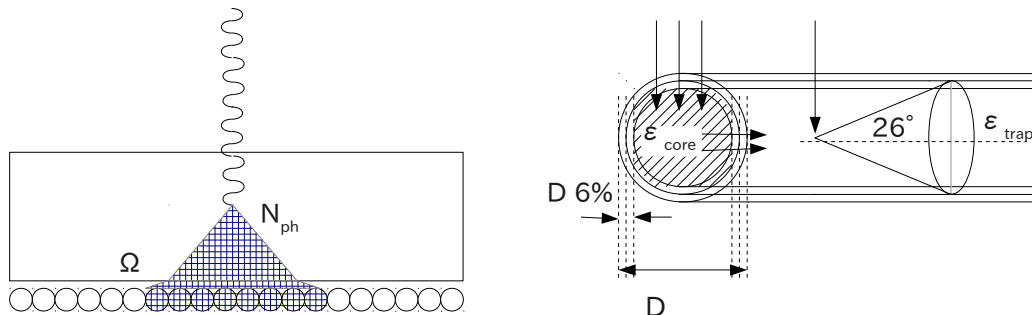


図5. シンチレータ結晶から波長変換ファイバーへ入射するメカニズム (左) と波長変換ファイバーの側面から吸収し再発光、そして伝播されるメカニズム (右)。

(3) ファイバー1本あたりの光電子数

結晶からファイバーへ入射する光の割合は $\Omega(\lambda)$ でほぼ決定される。全反射条件から臨界角 $\theta_r = n_{AIR}/n_{GAGG}$ で、GAGG 結晶の屈折率は約 1.9、空気の屈折率は 1.0003 である。漏れ出る光の最大の広がりには結晶の厚さ d に依存し、直径 R は以下で示される。

$$R = 2d \tan \theta_r$$

厚さ 2 mm の GAGG 結晶を使用した場合、 $R \sim 2.48$ mm である。つまり、直径 0.2 mm の波長変換ファイバー約 13 本に入射していることになる。1層に対して約 4 p.e. 得られたので、1本当たりの平均光電子数は 0.3 p.e. である。

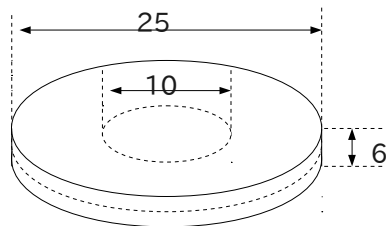
また、結晶側面に波長変換ファイバーを1本接続し同様の測定を行った場合、入射位置に対して幅 $2R$ の矩形の検出効率の関係が得られるだろう。もちろん、漏れ出る光の中央のファイバーには他より多くの光が入射されるので、入射位置に対して幅 $2R$ の山形の光電子数の関係が得られるだろう。

5. 付録

使用した結晶

	size [mm]	polish
GAGG	10x10x2	機械研磨(2面)
	10x10x1	機械研磨(2面)
	10x10x5	機械研磨(2面)
GSO	6x6x15	機械研磨(1面)

^{22}Na 線源



光電子増倍管

	型番	増幅率@1200V	感度波長[nm]	最大量子効率
PMT1	R9880U-210: BAC7472	$(1.93 \pm 0.02) \times 10^7$	350 - 550	40%(370 nm)
PMT2	R9880U-20: BCA9345	$(3.41 \pm 0.04) \times 10^7$	400 - 700	20%(500 nm)
PMT3	R9880U-20: BCA6347	$(3.55 \pm 0.01) \times 10^7$	400 - 700	20%(500 nm)