

2021年度卒業論文
アクティブ吸収層向けタイル型結晶シンチレーターの読み出し光量測定

奈良女子大学理学部数物科学科物理学コース
高エネルギー物理学研究室
今井彩加 田頭陽菜

2022年3月23日

概要

現在の Belle II 実験において、電磁シャワーを利用して γ 線の検出を行っている電磁カロリメーターは CsI(Tl) 結晶シンチレーターと PIN-PD を組み合わせた検出器を使用している。この CsI(Tl) カロリメーターは、ガンマ線の到来方向に対する感度がなく、数 10 cm 進んで $\gamma\gamma$ に崩壊する暗黒物質粒子の質量決定やビーム衝突点以外から飛来するビームバックグラウンド光子を排除する性能が制限されている。また、CsI(Tl) シンチレーターの発光時間が約 $1 \mu\text{s}$ と長いため、ビームバックグラウンド入射によるパイルアップのため、エネルギー分解能の悪化が予想される。そのため、 γ 線の到来方向を再構成する機能を持ち、ビームバックグラウンドに起因するパイルアップを起こさないブリシャワー検出器を検討するにあたり、検出器内におけるエネルギー損失測定の分解能を左右しうる、結晶シンチレーターからの読み出し光量の位置依存を測定した。

本研究では $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 1.2\text{cm}$ のサイズを持つタイル型 BGO 結晶シンチレーターが、 ^{137}Cs が発する γ 線を検出した際の波高分布の入射位置依存を測定した。

目次

1	序論	6
1.1	Belle II 実験	6
1.2	SuperKEKB 加速器	6
1.3	Belle II 測定器	6
1.4	電磁カロリメーター	7
1.4.1	CsI(Tl) シンチレーター	7
1.4.2	PIN-PD	8
1.5	プリシャワー検出器の動機	8
1.6	電磁シャワーによる γ 線のエネルギーの測定	8
1.7	アクティブ吸収層となる結晶シンチレーターの読み出し光量測定	9
2	実験方法	10
2.1	セットアップ	10
2.2	使用した装置	11
2.2.1	BGO シンチレーター結晶	11
2.2.2	コリメーター	11
2.2.3	デジタルオシロスコープ	11
2.2.4	^{137}Cs	11
2.2.5	High Voltage	11
2.2.6	PMT	11
2.2.7	Amp	12
2.2.8	Shaper	12
2.2.9	Discriminator	12
2.2.10	Gate Generator	12
2.2.11	Scalar	12
2.3	測定方法	14
2.4	データのフォーマット	16
3	解析方法	17
3.1	波形データの積分による信号電荷の算出	17
3.2	信号電荷分布	18
4	読み出し光量の測定	19
4.1	信号電荷分布と読み出し光量の評価	19
5	モンテカルロシミュレーションとの比較	28
5.1	シミュレーションの方法	28
5.2	実データとモンテカルロシミュレーションの比較によるエネルギー較正	29

6	まとめ	34
	謝辞	35
	参考文献	36
付録 1	データ収集プログラム	37
付録 2	データ解析プログラム	39
付録 3	測定結果とシミュレーション結果	41

目 次

1	SuperKEKB 加速器の概観図	6
2	Belle II 測定器の模式図	7
3	長寿命粒子が $\gamma\gamma$ に崩壊する事象の模式図	9
4	プリシャワー検出器の装置ジオメトリ	9
5	結晶シンチレーターに BGO を使用して光量測定を行った時のセット アップ	10
6	暗箱の中身	10
7	暗箱の外側	10
8	反射材で包んだ BGO 結晶シンチレーター	13
9	コリメーター	13
10	オシロスコープ	13
11	放射線源 ^{137}Cs	13
12	NIM モジュール	13
13	放射線源を置いたときの信号パルス	14
14	上から見た時の BGO 結晶とコリメーターの位置関係	15
15	5 番 $(x,y)=(0,0)$ の位置にコリメーターをおいた時に読み出した波高 分布	19
16	コリメーターの位置が 1 番 $(-2.2,2.2)$ での測定	22
17	コリメーターの位置が 2 番 $(0.0,2.2)$ での測定	22
18	コリメーターの位置が 3 番 $(2.2,2.2)$ での測定	22
19	コリメーターの位置が 4 番 $(-2.2,0.0)$ での測定	23
20	コリメーターの位置が 5 番 $(0.0,0.0)$ での測定	23
21	コリメーターの位置が 6 番 $(2.2,0.0)$ での測定	23
22	コリメーターの位置が 7 番 $(-2.2,-2.2)$ での測定	24
23	コリメーターの位置が 8 番 $(0.0,-2.2)$ での測定	24
24	コリメーターの位置が 9 番 $(2.2,-2.2)$ での測定	24
25	全吸収ピークの平均値 (μ) を線源位置の関数として示す	27
26	$(0.0,0.0)$ に置いた時の 1 回目の測定結果とシミュレーション結果	29
27	較正した実データのエネルギー損失分布	29

1 序論

1.1 Belle II 実験

Belle II 実験は Belle II 測定器と SuperKEKB 加速器を用いて行われる素粒子物理学実験である。茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構に建設されて現在も運用中で、B 中間子系における CP 対称性の破れの精密測定をはじめ、素粒子標準理論で禁止または抑制されている物理過程の探索または測定により新しい物理法則の解明を目指す国際共同プロジェクトである。

1.2 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる B 中間子・反 B 中間子対の生成に適した 2 リング形非対称エネルギー衝突型 電子・陽電子加速器である。SuperKEKB 加速器の概観図を図 1 に示す。

地下約 11 m の 1 周約 3 km のトンネルの中に、二つのリング型加速器がある。電子は RF 電子銃で作られ、直線型加速器で加速された後に HER(High Energy Ring) に入射されて図中右回りに周回する。陽電子は 3.5 GeV まで加速した電子を金属標的に当てて作り出し、陽電子ダンピングリングでビームのエミッタンスを下げた後に LER(Low Energy Ring) に入射されて図中左回りに周回する。各ビームが交差する衝突点を囲うように Belle II 測定器が設置されている。

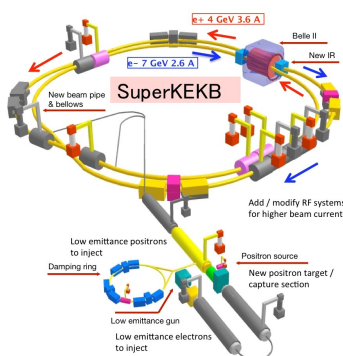


図 1: SuperKEKB 加速器の概観図

1.3 Belle II 測定器

Belle II 測定器は SuperKEKB 加速器の衝突点に設置し、異なる役割を持った 7 種類の検出器を組み合わせた構造を持つ。図 2 で示すように、内側からピクセル検出器とシリコンバックス検出器が設置されている。これらとその外側にある中央飛跡検出器が荷電粒子の飛跡測定するトラッキングシステムを構成する。チェレンコ

フ光の放射を用いて荷電粒子の識別を行う ARICH カウンターと TOP カウンター、 γ 線や電子のエネルギーを測る電磁カロリメーターがトラッキングシステム外側の超伝導ソレノイド電磁石中を占める。ソレノイドの外側がミュー粒子・中性 K 中間子検出器である。次節では、電磁カロリメーターに関して更に述べる。

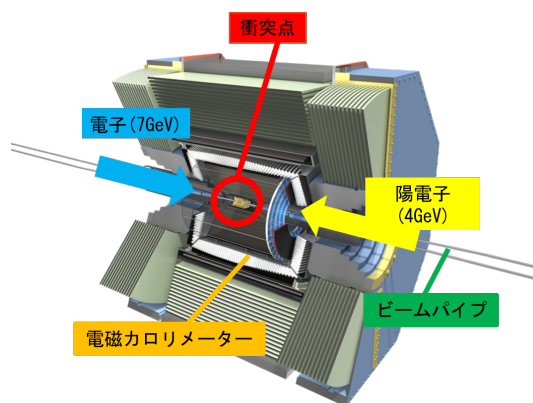


図 2: Belle II 測定器の模式図

1.4 電磁カロリメーター

Belle II 実験の電磁カロリメーターはタリウムを添加したヨウ化セシウム (CsI(Tl)) 結晶内で、入射した粒子のエネルギー損失によるシンチレーション光を光検出器 (PIN-PD) で読み出すカウンターを 8736 本使用している。

CsI(Tl) 結晶に入射した電子や光子は電磁シャワーを作り、生じたエネルギー損失によりシンチレーション光が発生し、これを PIN-PD で電気信号パルスに変えてその信号電荷を記録することにより、検出器有感領域内で生じたエネルギー損失を測定する。

1.4.1 CsI(Tl) シンチレーター

シンチレーターとは、入射した粒子によるエネルギー損失があると蛍光を出す物質のことである。シンチレーターは有機シンチレーターと無機シンチレーターに大別され、Belle II 測定器の電磁カロリメーターに使用されている CsI(Tl) は無機結晶シンチレーターである。無機シンチレーターの多くは、シンチレーターの原子番号が比較的高く密度も高いことから、 γ 線の検出及びエネルギー測定に使用する検出器に適している。 CsI(Tl) は密度 4.53 g/cm^3 、発光量が約 $50,000$ 光子/MeV であるが、発光の減衰時間が約 $1 \mu\text{s}$ と長いため、高ルミノシティ環境ではビームに付随して発生するバックグラウンド放射線 (以下、ビームバックグラウンド) によるパイルアップが雑音の増加となるためエネルギー分解能が制限される問題が発生する。

1.4.2 PIN-PD

光検出器は、粒子結晶シンチレータ内で起こしたエネルギー損失により発生した光を、電気信号に変換する。pn 接合した半導体に電流が流れない向きに電圧をかけると、N 型半導体中の電子の一部が P 型半導体のキャリアであるホールと結合し、キャリアのいない空乏層と呼ばれる領域ができる。これにより、空乏層の N 側は+に、P 側は-に帯電して内部電場が発生する。空乏層に光が当たって光電効果を起こすと電子・ホール対が発生し、内部電場により電子は N 側、ホールは P 側へ移動し、電気信号が形成される。

PIN 型フォトダイオードは P 型半導体と N 型半導体の間に絶縁性の真性半導体である I 型半導体を挟んだ構造を持つ。空乏化するのとは主として I 層で、ここに比較的高い内部電場を形成できるため、I 層への光照射で生成した電子やホールは迅速に移動するため高速応答性が得られる。

1.5 プリシャワー検出器の動機

Belle II 実験の CsI(Tl) カロリメーターは、検出体として、約 $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ の断面積を持ち、長さ 30 cm の CsI(Tl) 結晶を用いているため、 γ 線の到来方向に対する感度が低く、数 10 cm 進んで $\gamma\gamma$ に崩壊する暗黒物質粒子の質量決定や、ビーム衝突点以外の場所から飛来するビームバックグラウンドの γ を分離する性能が制限されている。例えば、図 3 に示すように、数 10 cm 飛行した後に $\gamma\gamma$ に崩壊するアクション似粒子 (暗黒物質粒子候補の一種) に対して、 γ の到来方向に対する感度がないと、電磁シャワーを検出した位置とビーム衝突点を直線で結んで γ の方向とするため、運動量ベクトルは真の値からずれてしまう。また、発光減衰時間が約 $1 \mu\text{s}$ と長いと、ビームバックグラウンドに起因するパイルアップにより、雑音レベルが上昇する結果としてエネルギー分解能の悪化が問題になっている。CsI(Tl) カロリメーターの前に、応答が速く、数 MeV 程度の低エネルギーの γ 線を吸収し、研究対象とするガンマ線の到来方向を再構成する機能を持ち、ビームバックグラウンドに起因するパイルアップを起こさないプリシャワー検出器の開発を行う。

現在検討されているプリシャワー検出器は図 4 に示すように BGO または LYSO 結晶シンチレータをアクティブ吸収層とし、Si ピクセル検出器を 1 層とした 3 層構造のものである。結晶シンチレータでは電磁シャワーの生成とエネルギー損失の測定を行い、Si ピクセル検出器では電子・陽電子の通過位置の検出を行う。

1.6 電磁シャワーによる γ 線のエネルギーの測定

γ 線は物質中で光電効果・コンプトン散乱・電子対生成という相互作用を行う。Belle II で測定すべき数 10 MeV ~ 数 GeV のエネルギーの γ 線では電子対生成が主な相互作用となる。

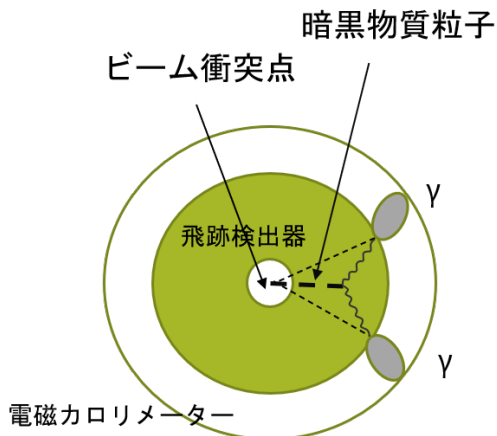


図 3: 長寿命粒子が $\gamma\gamma$ に崩壊する事象の模式図

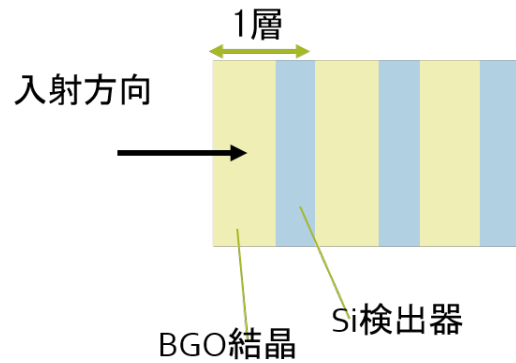


図 4: プリシャワー検出器の装置ジオメトリ

電子対生成とは γ 線が電子・陽電子を生成することを指す。このときに、電子・陽電子の組を生成させる必要があるため、それぞれの質量 (0.511 MeV) の合計である 1.022 MeV のエネルギーが最低限必要である。このときに生成された電子・陽電子でエネルギーが高いものは制動放射を起こす。

制動放射とは荷電粒子が主として原子核のクーロン場において減速されたり軌道を曲げられたりしたときにエネルギーとして γ 線を放出することを指す。制動放射で生じた γ 線のエネルギーが十分に高いと電子対生成を起こす。

このように、電子対生成と制動放射は γ 線と電子・陽電子にじゅうぶんなエネルギーがある間は繰り返され、この反応のことを電磁シャワーと呼ぶ。電磁シャワーが有感領域内でエネルギー損失を読み出してエネルギーを測定することが電磁カロリメーターの原理である。

1.7 アクティブ吸収層となる結晶シンチレーターの読み出し光量測定

結晶シンチレーターの内部で生じた同一の値のエネルギー損失に対して、エネルギー損失を起こした場所により信号パルス大きさが異なるとエネルギーの測定精度に悪影響を与える可能性がある。そこで、放射線源から出る γ 線をコリメーターで絞ってシンチレーターに当てて、その位置を変化させた場合に波高分布がどのように変化するかを調べた。

2 実験方法

プリシャワー検出器のアクティブ吸収層となる結晶シンチレーターから読み出す光量がエネルギー損失の生じた場所に依存して変化するかを調べた。以下にその詳細について述べる。

2.1 セットアップ

本実験で使用した機器を用いた測定のセットアップを以下の図5に示す。それぞれの機器の詳細は次節に記す。信号パルスの波形の観測および波形データの収集をテクトロニクス PPO3034 型デジタルオシロスコープを用いて行い、数値化した波形データはLAN 経由でLinux PC ストレージに記録した。PMT を暗箱の中に入れ、ケーブルの出口付近から内部への光線漏れがないよう暗幕を用いて遮光した。この暗箱のアルミニウム製のふたの一部は線源からの β 線や γ 線が通過するよう1 mm 程度まで薄くしてあり、そこにコリメーターを介した線源を置いて測定した。暗箱内に置くシンチレーターはこのふたが薄くなっている部分の真下に位置するように、コリメーターを設置する位置の再現性を確保するために蓋にはグラフ用紙を貼り付けて、位置の基準とした。これにより全ての実験を通して線源とコリメーターを約1 mm 以内で位置づけることができた。

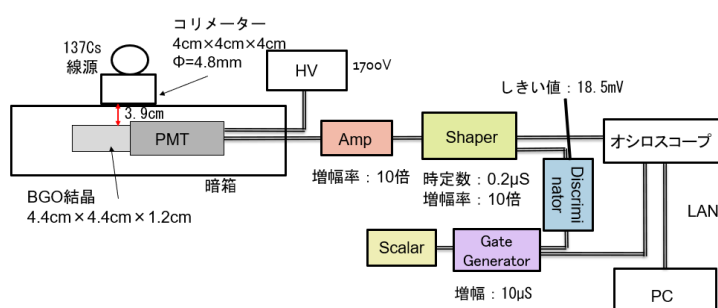


図 5: 結晶シンチレーターに BGO を使用して光量測定を行った時のセットアップ



図 6: 暗箱の中身

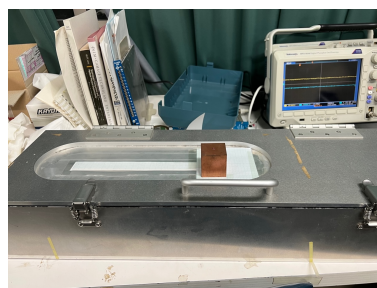


図 7: 暗箱の外側

2.2 使用した装置

2.2.1 BGO シンチレーター結晶

BGO(ゲルマニウム酸ビスマス)シンチレーター結晶は、無色透明で潮解性を持たない無機酸化物である。BGO結晶シンチレーション光は波長分布はピーク波長480 nmの緑色の光である。密度7.13 g/cm²、放射長11.2 mm、発光減衰時間は300 nsである。本研究では縦4.4 cm、横4.4 cm、厚み1.2 cmのBGO結晶を使用している。また、このBGO結晶は白色ゴアテックスシートの反射材で包み、PMTに接する面の中心部に一辺1.0 cm × 1.0 cmの正方形の穴を開けている。これは大面積のAPDまたはMPPCアレイを光検出器とする場合を模したものである。

2.2.2 コリメーター

本実験では¹³⁷Csが発するγ線がBGOシンチレーターに入射する領域を制限するため一辺4.0 cmの銅の立方体に直径4.8 mmの穴を開けたものをコリメーターとして用いた。

2.2.3 デジタルオシロスコープ

使用したオシロスコープはTektronix DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscopeである。LANインターフェースを持ち、これにIPアドレスを割り当て、PCからオシロスコープへ命令の送信や、データを受信が可能である。

2.2.4 ¹³⁷Cs

本実験で使用した放射線源である。β崩壊により¹³⁷Baに壊変し、その¹³⁷Baが662KeVのγ線を放出する。

2.2.5 High Voltage

本実験ではHAYASHI-REPIC RPH-030 -HV 4ch 電源を使用した。

2.2.6 PMT

結晶シンチレータが発したシンチレーション光を捉えて増幅することにより、電気信号パルスとして出力する光検出器。本実験では口径2インチの浜松ホトニクス製H3983を使用した。

2.2.7 Amp

PMT が出力した電気信号を増幅する。カイズワークス 12ch PMT AMP 2107 型で、増幅率は 10 倍である。

2.2.8 Shaper

信号パルスの周波数帯域のみを伝える時定数を設定することにより波形形成するとともに線形増幅をする。HOSHIN N012-F 型を使用し、時定数を $0.2 \mu\text{S}$ 、増幅率 10 倍とした。

2.2.9 Discriminator

しきい値電圧を超える入力パルスが入ってきた場合に NIM 規格の方形波を出力する。本実験では Technoland corporation N-TM 716 4CH Discriminator を使用し、しきい値電圧は 18.5 mV 、パルス幅 100 nS に設定した。

2.2.10 Gate Generator

PMT からの同一パルスををダブルカウントすることがないようにディスクリミネーターで出力した NIM 規格パルスの幅を広げる調整と遅延させる機能を持つ。本実験ではパルス幅を $10 \mu\text{S}$ に設定して使用した。

2.2.11 Scalar

Gate Generator が出力した信号パルスをカウントする。本実験ではカイズワークス 80MHz SCALER 120 を使用した。



図 8: 反射材で包んだ
BGO 結晶シンチレーター

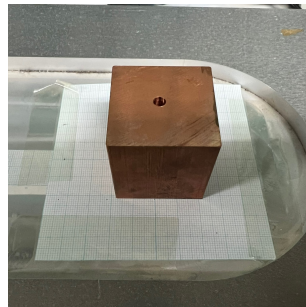


図 9: コリメーター

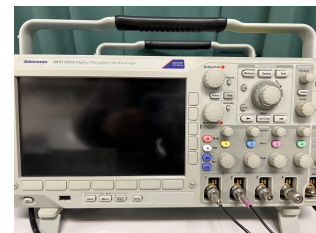


図 10: オシロスコープ



図 11: 放射線源 ^{137}Cs
円板形のアルミニウム
とアクリル板で作られた
ケースに入っている

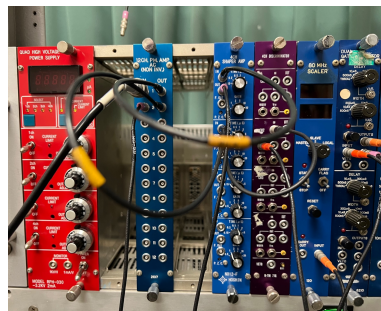


図 12: NIM モジュール
左から High Voltage、
Amp、Shaper、
Discriminator、Scaler、
GateGenerator

2.3 測定方法

PMT に印加する電圧は 1700 V とした。また、先に述べたように Amp の増幅率は 10 倍、Shaper は時定数は $0.2 \mu\text{s}$ 、増幅率 10 倍で使用している。トリガーは図 13 に示すようにデジタルオシロスコープ時間レンジの起点から 20.00 % の時点とする設定とした。

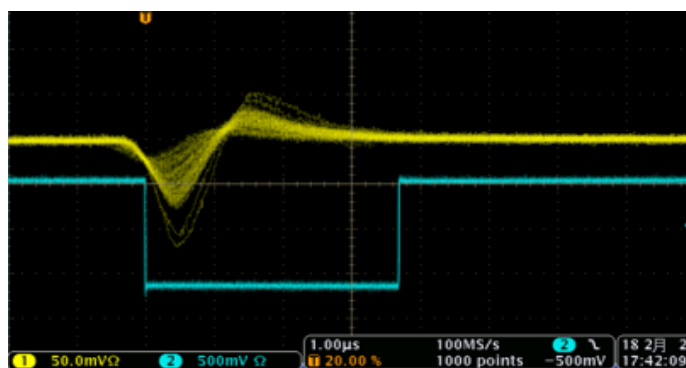


図 13: 放射線源を置いたときの信号パルス

デジタルオシロスコープはトリガーがかかると数値化した波形データを内部のメモリーに蓄積し、スクリーンにそれを描画するとともに、PC から LAN 経由で発行されるコマンドに対応して、波形データのブロック転送を行う。この一連の動作中は、新たなイベントに対応できずデッドタイムが発生する。そこで、PC 上でデータ収集サイクルを開始すると同時に、PMT が出す信号パルス数をスケーラーでカウントすることにした。PC 上のデータ収集サイクルは 20000 イベントに達すると自動で止まる。このサイクルの開始時と終了時にスケーラーの起動と停止を手動で行った。同時に、データ収集サイクルの開始から終了までの時間をストップウォッチで測定した。

スケーラーによりカウントしたパルス数、イベントサイクル開始から終了までの時間より線源ありのデータが示す波高分布から線源なしのバックグラウンドの波高分布を引き算する際の規格化定数を算出した。

なお、データ収集プログラムのソースコードは付録 1 に収録した。

線源を載せたコリメーターの穴の位置は BGO 結晶の中心点を $(0.0, 0.0)$ とし、それ以外の位置は図 14 にあるように右向きと上向きをそれぞれ x 軸と y 軸の正の向きとした。

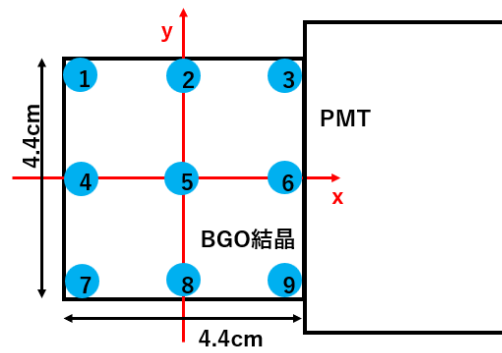


図 14: 上から見た時の BGO 結晶とコリメーターの位置関係
 図中1番から順に 1番 $(-2.2, 2.2)$, 2番 $(0.0, 2.2)$, 3番 $(2.2, 2.2)$, 4番 $(-2.2, 0.0)$, 5番 $(0.0, 0.0)$, 6番 $(2.2, 0.0)$, 7番 $(-2.2, -2.2)$, 8番 $(0.0, -2.2)$, 9番 $(2.2, -2.2)$ となる。

2.4 データのフォーマット

収集したデータのフォーマットを以下に示す。

```

1.000e-08
 1 1000 24 25 23 25 24 24 24 24 24 25 24 23 25 25 24 25 25 23 25 22 25 23 24
    26 23 25 25 25 24 25 22 23 23 24 24 23 23 23 24 25 23 24 24 24 25 24 23 23
    24 24 23 23 23 22 24 23 24 25 24 23 26 26 23 25 23 22 23 24 24 24 24 23
    23 23 23 24 25 23 23 23 23 24 24 23 23 25 24 24 24 26 23 25 23 22 25 24 25
    24 24 24 23 24 24 23 24 23 23 25 25 23 25 24 26 25 24 23 24 24 26 25 24
    24 25 26 24 23 23 24 24 24 23 ...
 2 1000 25 25 24 24 23 24 23 24 25 25 25 26 24 25 25 25 23 23 23 25 26 24 24 24
    24 22 24 25 25 25 24 24 24 25 24 22 23 25 23 23 23 23 23 24 24 24 23 23 23
    24 23 24 24 23 25 24 23 24 24 23 24 24 25 23 23 23 24 24 24 23 23 23 24 24
    23 24 23 24 23 23 23 24 24 24 24 25 24 25 24 25 23 24 23 24 24 24 24 23 24
    25 24 24 24 24 23 25 23 23 24 25 24 26 25 25 25 25 24 24 22 25 24 23 24 23
    24 23 24 24 23 24 23 ...
 3 1000 26 25 23 25 23 25 26 22 25 24 23 24 23 22 23 27 24 25 24 25 23 25 24
    24 24 24 25 21 27 23 24 24 23 25 24 24 24 25 24 24 25 24 24 24 25 25
    26 25 26 23 25 25 25 25 24 24 25 26 25 25 23 24 24 24 25 27 24 23 25 25
    25 26 26 24 24 26 25 26 26 23 25 25 25 24 23 23 25 28 25 25 25 25 26 27
    26 25 27 25 25 25 25 27 26 25 24 26 24 24 25 25 26 25 25 25 24 25 25 24
    24 23 25 25 25 23 26 23 24 24 ...

```

- 1行目はラン開始レコードにあたり、デジタルオシロスコープが100 MSample/s、すなわち時間間隔が、

$$\frac{1\text{s}}{100\text{MSample}} = 10\text{ns} \quad (1)$$

で、収集されたデータであることを示す。

- 2行目は、最初のイベントレコードで、イベント番号、サンプリング数を表し、その後8bitのデータがサンプリング数1000個分続く。DPO3034型の仕様のため、8bitのデータは符1bit、絶対値を7bitで表す整数型で、-127から+127の値をとる。
- その後、イベントレコードがファイルの末尾まで繰り返される。

3 解析方法

3.1 波形データの積分による信号電荷の算出

PC 上に取り込んだ波形データは 1 パルスつまり 1 イベント当たり 1000 個のサンプル・アンド・ホールドした値を含む。以下に示す (2) 式・(4) 式を用いてゼロ点と積分値を計算した。この積分値は信号パルスの電荷にあたり、シンチレータからの読み出し光量に比例する量である。このデータ処理を行うプログラムのソースコードは付録 2 に収録した。

この処理を行って出力されるデータを以下に示す。

```
1 23.870000 0.893100 10.870000 610.500000
2 23.880000 0.665600 27.880000 1907.640000
3 24.590000 1.421900 13.590000 967.500000
4 24.320000 0.617600 31.320000 2191.240000
5 23.780000 0.711600 31.780000 2077.900000
6 24.440000 0.846400 27.440000 1794.000000
7 24.570000 0.825100 17.570000 1157.500000
8 24.220000 0.911600 57.220000 3694.200000
9 24.510000 0.929900 47.510000 3121.600000
10 24.840000 0.994400 15.840000 1109.000000
...
```

- 1 列目：イベント番号
- 2 列目：ゼロ点の値
各イベント最初の 100 個のデータはトリガーを時間レンジの 20 % の時点に設定したことから、信号パルスの開始前、すなわち無信号時のデータであるから、それらの平均値をゼロ点と呼ぶ。その計算式は (2) 式である。

$$\text{ゼロ点} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i}{100} \quad (2)$$

ここで x_i は i 番目でのデータの値のことを指す。

- 3 列目：ゼロ点の計算に用いた 100 個のデータが示す分散

$$\text{分散} = \frac{\sum_{i=1}^{100} (\text{ゼロ点} - x_i)^2}{100} \quad (3)$$

- 4 列目：ピーク波高
パルスがピークとなった時点のデータとゼロ点の差。
- 5 列目：信号電荷
正味の信号パルス波形は 150 番目のデータ以降に記録されているので、末尾の 1000 番目までゼロ点とデータの値 x_i の差を積分することにより信号電荷の値を得る。ここで、データとゼロ点の差が負となるものは除外した。

$$\text{積分} = \sum_{i=150}^{1000} (\text{ゼロ点} - x_i) \quad (4)$$

3.2 信号電荷分布

前節で述べた手法により、イベント毎の信号電荷が arbitrary unit で求まるので、その分布から読み出し光量がコリメーター（線源）位置を変えた際に、それに依存した変化を求める。

放射線源を置かないときの信号電荷分布はバックグラウンドによるものであり、放射線源を使用したときの分布からバックグラウンドの分布をスケーラーでの総カウント数で重みをつけて引き算を行い、 ^{137}Cs が発する 0.662 MeV の γ 線が BGO シンチレーターに検出された信号の正味の分布を得た。その分布が示す光電ピークをガウス分布でフィットを行い、その平均値で評価することにした。

4 読み出し光量の測定

^{137}Cs が発する 0.662 MeV の γ 線を BGO のような無機シンチレーターにより検出する場合、読み出すシンチレーション光量の分布はコンプトン散乱によりコンプトン端まで続く分布と、光電効果により γ 線のエネルギーが全吸収される分布が合わさったものになる。光電効果による全吸収ピークの平均値付近から高い領域の分布にはコンプトン散乱の影響は少ないものと考え、それをガウス分布でフィットすることにより全吸収ピークの平均値を求めた。

再現性を確保するために、BGO シンチレーターと PMT の間に定まった厚みのスペーサーを挟んで設置した後に、静かにスペーサーを抜くことにより、シンチレーターと PMT の間には一定間隔の空隙が存在するエアコンタクトとなるようにした。

4.1 信号電荷分布と読み出し光量の評価

図 15(a) はバックグラウンドの波高分布を青、 ^{137}Cs 線源をコリメーターを介して $(x,y)=(0,0)$ の位置、すなわち BGO シンチレーターの中央に置いた波高分布を赤で示したものである。測定の再現性の確認、すなわち波高測定の誤差を見積もる目的で線源を置いた測定を 6 回にわたって繰り返した。それらの結果を表 1 にまとめた。それぞれの位置で複数回測定を行っているが以降の節では、測定結果の図は 1 回目するときのみ掲載し、残りは付録に収録した。

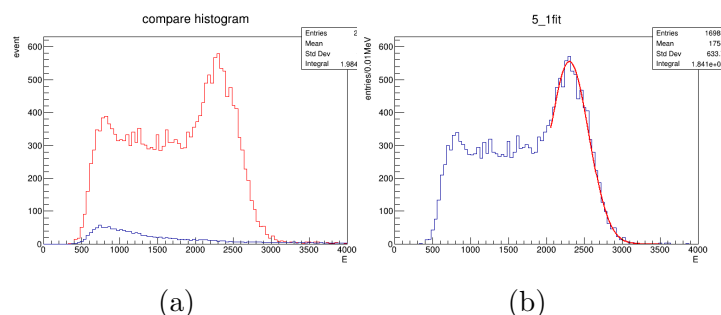


図 15: 5 番 $(x,y)=(0,0)$ の位置にコリメーターをおいた時に読み出した波高分布 (a) ^{137}Cs 線源を置いた際の波高分布 (赤) と見積もったバックグラウンド (青) の図。 (b) バックグラウンドの分布を引き算した後、光電ピークをガウス分布でフィットした図。

表 1: 測定結果の各数値

1回の計測はPC上でデジタルオシロスコープからデジタル化した波形データを20000 イベント収集するサイクルである。スケーラーでの総カウント数とは、1回の計測サイクル開始から終了までにスケーラーがカウントした信号パルスの数である。計測時間は当該測定サイクルにかかった時間である。1秒あたりのカウント数はスケーラーにおける1秒当たりのカウント数を指す。

計測番号	スケーラーでの 総カウント数 (回)	計測時間 (秒)	1秒あたりの カウント数 (回)
1回目	1443202	3996	361
2回目	1439200	4005	359
3回目	1433036	4006	358
4回目	1449059	3987	363
5回目	1383002	4006	345
6回目	1514312	4016	377
バックグラウンド	114664	4156	28

表 2: ガウス分布でフィットしたときの平均値と標準偏差

6回の計測サイクルで取得したデータについて、光電効果による全吸収ピークをガウス分布でフィットしたときの平均値 μ および標準偏差 σ を表 2 に示した。ここで示している誤差はフィットが返す統計誤差である。6回の計測を行った結果、平均値 μ の中心値のばらつきが1回の計測における統計誤差より大きいので、 μ の中心の単純平均の値のその不変分散の平方根を μ 平均値の誤差とした。

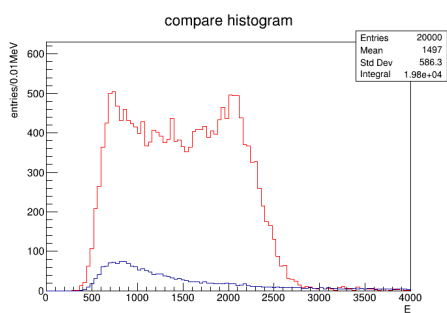
計測番号	平均値 μ	標準偏差 σ
1回目	2301 \pm 5	258 \pm 3
2回目	2269 \pm 3	232 \pm 5
3回目	2227 \pm 5	244 \pm 4
4回目	2274 \pm 5	256 \pm 3
5回目	2166 \pm 6	236 \pm 3
6回目	2146 \pm 5	242 \pm 3
平均	2231 \pm 63	245 \pm 10

この結果から光電効果による全吸収ピークの平均値を $\mu = 2231 \pm 63$ と得た。

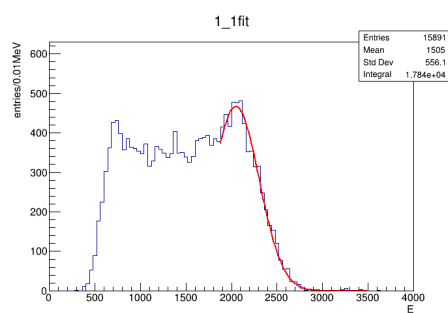
他の8か所についてもこの方法で測定を行った。それぞれの場所において典型例として1回目の測定で得た波高分布を示す。それ以外は付録3に収録した。それぞれの測定でのカウント数や計測時間などは表3に記した。

また、図16から図24は図15と同様に、(a)は放射線源を使用したときの波高分布を赤、見積もったバックグラウンドの波高分布を青で表した図である。(b)は(a)に示したバックグラウンドの分布を引き、光電ピーク部分にガウス分布でフィットを行った。

さらに、表2と同様に、平均値 μ および標準偏差 σ の誤差を表4に示した。

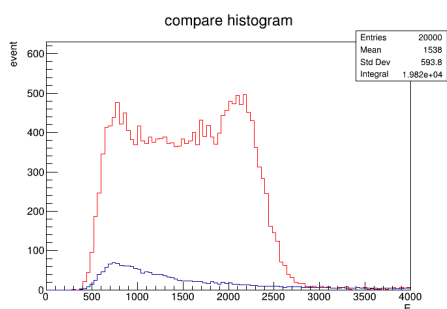


(a)

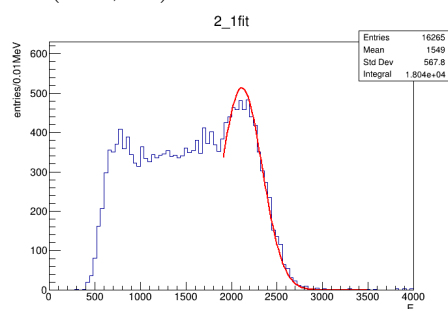


(b)

図 16: コリメーターの位置が 1 番 (-2.2,2.2) での測定

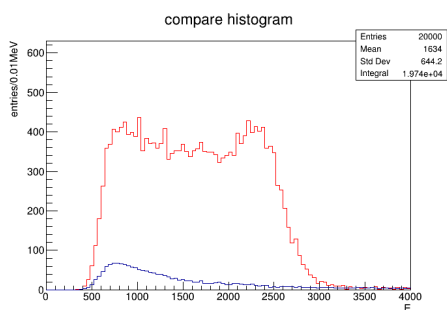


(a)

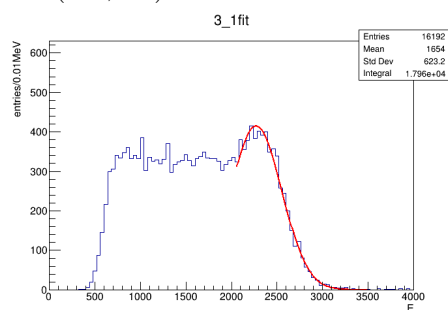


(b)

図 17: コリメーターの位置が 2 番 (0.0,2.2) での測定

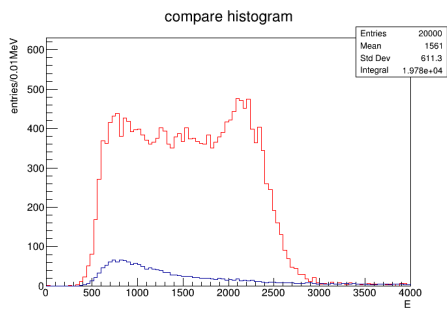


(a)

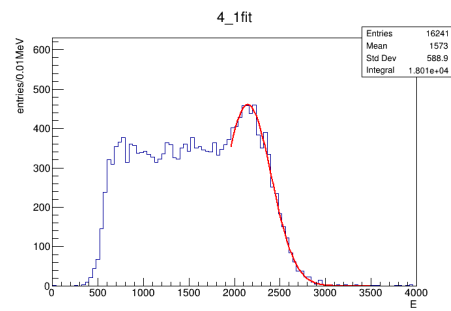


(b)

図 18: コリメーターの位置が 3 番 (2.2,2.2) での測定

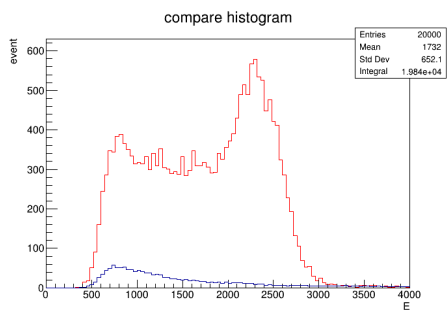


(a)

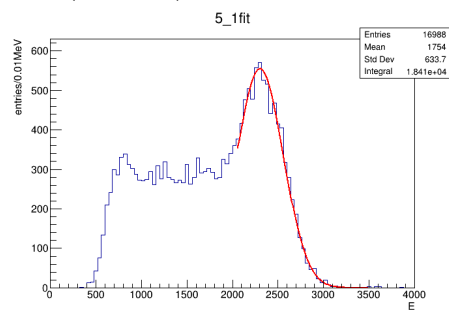


(b)

図 19: コリメーターの位置が 4 番 (-2.2,0.0) での測定

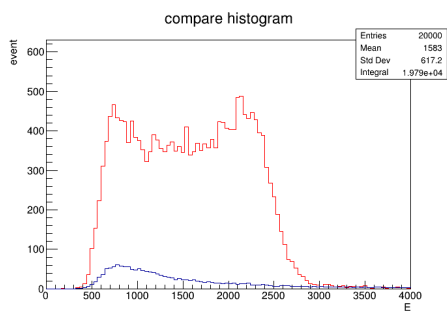


(a)

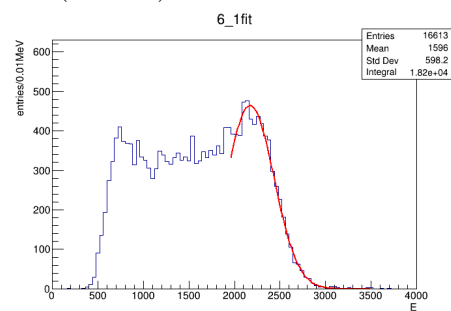


(b)

図 20: コリメーターの位置が 5 番 (0.0,0.0) での測定

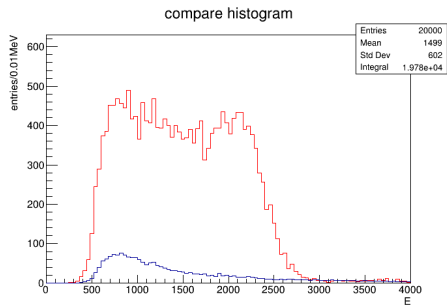


(a)

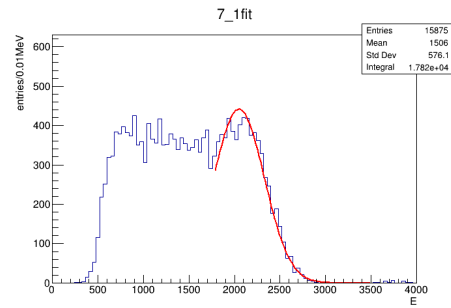


(b)

図 21: コリメーターの位置が 6 番 (2.2,0.0) での測定

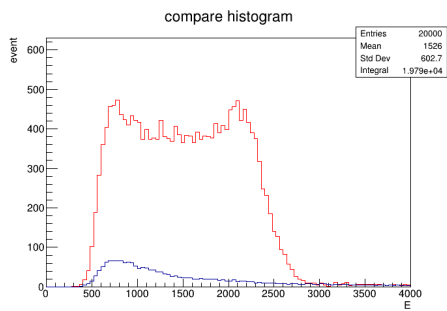


(a)

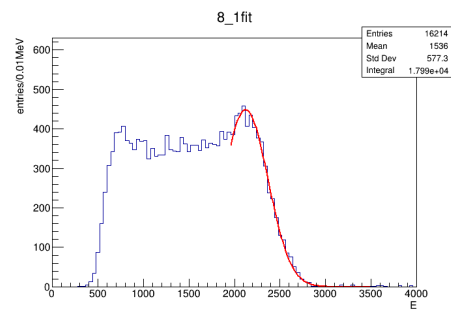


(b)

図 22: コリメーターの位置が 7 番 (-2.2,-2.2) での測定

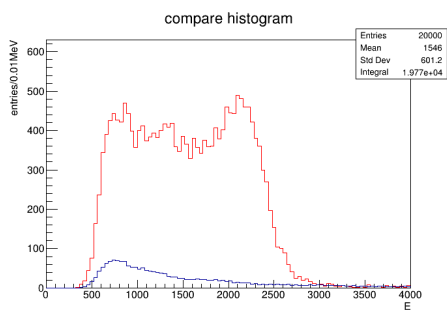


(a)

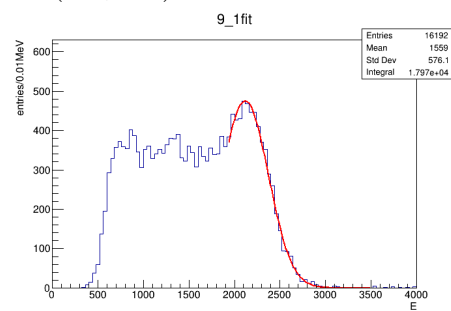


(b)

図 23: コリメーターの位置が 8 番 (0.0,-2.2) での測定



(a)



(b)

図 24: コリメーターの位置が 9 番 (2.2,-2.2) での測定

表 3: 測定結果の各数値

それぞれの表の数値の意味は表 1 と同じである。

測定場所	計測番号	スケーターでの 総カウント数 (回)	計測時間 (秒)	1 秒あたりの カウント数 (回)
1 番	1 回目	1051636	4018	262
	2 回目	1046884	4013	261
	3 回目	1052063	4016	262
	4 回目	1128014	3996	282
	バックグラウンド	118332	4157	29
2 番	1 回目	1181296	4021	294
	2 回目	1174762	4033	291
	3 回目	1256730	4018	313
	4 回目	1252475	4027	311
	バックグラウンド	119330	4146	29
3 番	1 回目	1157976	4006	289
	2 回目	1183466	3977	298
	3 回目	1167737	4002	292
	4 回目	1150824	4001	288
	5 回目	1145353	4000	286
	6 回目	1140834	4014	284
	バックグラウンド	120566	4134	29
4 番	1 回目	1154065	4009	288
	2 回目	1156210	4006	289
	3 回目	1149830	4002	287
	バックグラウンド	117183	4116	29
6 番	1 回目	1195521	4020	297
	2 回目	1185322	4020	295
	3 回目	1250086	4013	312
	バックグラウンド	112720	4124	27
7 番	1 回目	1032124	3994	258
	2 回目	1036127	3898	266
	3 回目	1037440	3970	261
	4 回目	1067067	4025	265
	バックグラウンド	114781	4182	27
8 番	1 回目	1151200	4026	286
	2 回目	1141882	4011	285
	3 回目	1138482	4012	284
	4 回目	1149286	4027	285
	バックグラウンド	112943	4218	27
9 番	1 回目	1086644	4007	271
	2 回目	1078951	4009	269
	3 回目	1076401	4025	269
	4 回目	1067067	4025	266
	5 回目	1076401	4008	265
	バックグラウンド	111411	4184	27

表 4: 測定結果の各数値

それぞれの数値の意味は表 2 と同じである。一番下の行にある平均値にかかる誤差はその数値を求める際にかかる平均誤差とそれぞれの場所で算出した平均値の誤差を加味した。

測定場所	計測番号	平均値	標準偏差
1 番	1 回目	2048 ± 8	256 ± 4
	2 回目	2069 ± 7	241 ± 4
	3 回目	2047 ± 7	255 ± 4
	平均	2055 ± 12	251 ± 8
2 番	1 回目	2114 ± 5	224 ± 2
	2 回目	2081 ± 7	244 ± 4
	3 回目	2146 ± 6	243 ± 3
	4 回目	2148 ± 6	228 ± 3
	平均	2122 ± 32	235 ± 10
3 番	1 回目	2270 ± 8	283 ± 5
	2 回目	2274 ± 7	264 ± 4
	3 回目	2228 ± 8	253 ± 5
	4 回目	2278 ± 6	268 ± 4
	5 回目	2199 ± 6	277 ± 3
	6 回目	2194 ± 7	263 ± 4
	平均	2241 ± 39	267 ± 11
4 番	1 回目	2146 ± 8	259 ± 5
	2 回目	2137 ± 7	241 ± 4
	3 回目	2147 ± 6	224 ± 3
	平均	2143 ± 5	241 ± 18
5 番	1 回目	2301 ± 5	258 ± 3
	2 回目	2269 ± 3	232 ± 5
	3 回目	2227 ± 5	244 ± 4
	4 回目	2274 ± 5	256 ± 3
	5 回目	2166 ± 6	236 ± 3
	6 回目	2146 ± 5	242 ± 3
	平均	2231 ± 63	245 ± 10
6 番	1 回目	2177 ± 7	262 ± 5
	2 回目	2138 ± 8	263 ± 5
	3 回目	2221 ± 6	252 ± 4
	平均	2177 ± 42	260 ± 7
7 番	1 回目	2050 ± 7	279 ± 4
	2 回目	2170 ± 7	294 ± 4
	3 回目	2173 ± 7	249 ± 4
	4 回目	2127 ± 7	266 ± 4
	平均	2130 ± 57	272 ± 19
8 番	1 回目	2122 ± 8	247 ± 5
	2 回目	2210 ± 5	166 ± 1
	3 回目	2125 ± 8	250 ± 5
	4 回目	2123 ± 9	253 ± 5
	平均	2145 ± 44	229 ± 42
9 番	1 回目	2118 ± 7	255 ± 5
	2 回目	2101 ± 8	253 ± 5
	3 回目	2070 ± 6	252 ± 3
	4 回目	2180 ± 7	257 ± 4
	5 回目	2204 ± 6	221 ± 3
	平均	2135 ± 56	245 ± 19
平均		2153 ± 71	249 ± 25

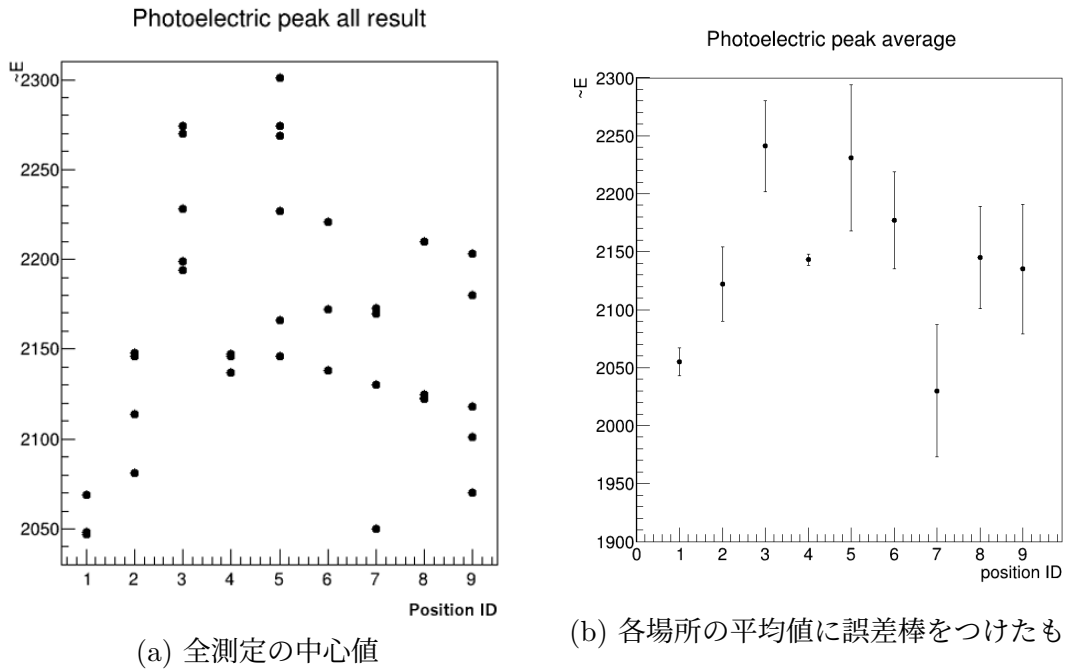


図 25: 全吸収ピークの平均値 (μ) を線源位置の関数として示す

共に縦軸は読み出した光量の値、横軸は測定場所を番号で表す。(a)1~9番において全ての結果をプロットした図。(b)場所ごとの平均値の誤差棒の長さは繰り返し測定した結果の不変分散の平方根を表す。

図 25 に光電効果による全吸収ピークをガウス分布でフィットした平均値 μ をコリメーターを介して線源を置いた位置の関数として示す。同一位置に線源を置き直して測定を繰り返した場合に読み出し光量のばらつきを不変分散の平方根で見積もると平均値の約 2.5% であるため、位置による読み出し光量の差異は顕著なものではない。

5 モンテカルロシミュレーションとの比較

本研究で得たBGOシンチレーターをPMTで読み出した波高分布について考察するために実行したモンテカルロシミュレーションについて記す。

5.1 シミュレーションの方法

本研究の対象であるシンチレーションカウンターが ^{137}Cs が発する662 KeVの γ 線を検出したときに得られる波高分布は光電効果とコンプトン散乱による。そこで、光電効果による全吸収が起きた事象が波高分布に作る光電ピークを δ 関数、コンプトン散乱は(5)式に示すコンプトン散乱により電子が受け取るエネルギー T の分布を棄却法で生成した。これに検出器の分解能の影響をガウス分布を仮定して加えることにした。モンテカルロシミュレーションを実行し、実験データと比較することにした。

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{\pi r_e^2}{m_e c^2 \gamma^2} \left[2 + \frac{s^2}{\gamma^2 (1-s)^2} + \frac{s}{1-s} \left(s - \frac{2}{\gamma} \right) \right] \quad (5)$$

エネルギー $h\nu$ の γ 線に対し

r_e : 電子の半径 [m]

m_e : 電子の質量 [MeV]

T : エネルギー [MeV]

$$s = \frac{T}{h\nu}$$

$$\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

検出器の分解能は前章に記載した測定結果から検出エネルギー $E=0.662$ MeV に対して、 $\sigma_E/E = 0.11 \sim 0.13, \sigma_E/E \propto 1/\sqrt{E}$ の関係式が成り立つと仮定した。

5.2 実データとモンテカルロシミュレーションの比較によるエネルギー較正

実データを用いて arbitrary unit で光電効果による全吸収ピークの平均値を求める手順と同様に、線源を置く位置を変更したときのそれぞれの場合に対応してコンプトン散乱と全吸収のそれぞれのイベント数を調整して生成したモンテカルロシミュレーションのデータが示す全吸収ピークの平均値をガウス分布でフィットしてもとめた。すると、基本的に真の値である 662 KeV と一致しており、最も大きな差異を示した場合でも 4 KeV の差であった。これは実データの arbitrary unit からシンチレータ内のエネルギー損失に換算する較正係数の不定性として 0.6 % に対応し、実データで全吸収ピークの平均を決定する不定性 3 % の 1/5 程度と小さい。このことは、全吸収ピークをガウス分布でフィットする手法は、データからエネルギー損失の値を得る手続きとして、結果をバイアスすることはないと解釈できる。そこで、実データにおける全吸収ピークの平均値が 0.662 MeV となるよう較正係数を決定した。

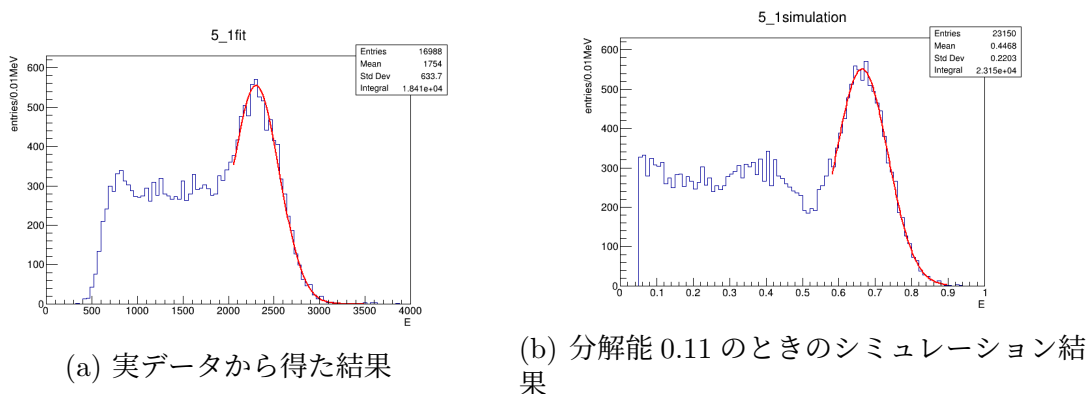


図 26: (0.0,0.0) に置いた時の 1 回目の測定結果とシミュレーション結果

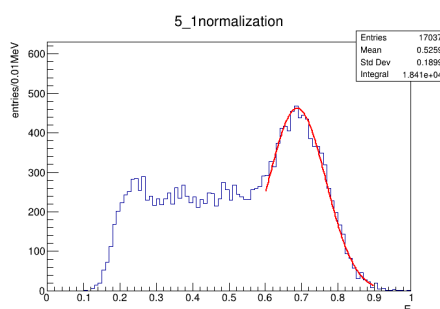


図 27: 較正した実データのエネルギー損失分布

図 26 において、(b) はエネルギー分解能を 0.11、コンプトン散乱部分の乱数生成回数を 15000 回、ガウス分布の部分の乱数生成回数を 10000 回にしてそれぞれのヒストグラムを連結させたものである。分解能は (a) の結果から見積もったものを採

用している。同様に2番～9番でもシミュレーションを行った。詳細な数値は表5に示した。

表 5: 結果の各数値

ガウス関数でフィットしたときに生じる誤差と、同じ位置で複数回測定した結果の平均値 μ の標準偏差を比較した。(a) 実データから得た結果 (b) シミュレーションデータのフィットより得た結果 (c) 実データの結果に較正係数をかけて得た結果 (b)(c) のそれぞれの場所における平均値の誤差は、各回のフィットの誤差と標準偏差を加味した。

測定場所	計測番号	(a) 平均値 ($\propto E$)	(b) 平均値 (MeV)	コンプトン 乱数生成 (回)	光電ピーク 乱数生成 (回)	(c) 平均値 (MeV)
1 番	1 回目	2048 ± 4	0.662 ± 0.002	18800	9000	0.620 ± 0.002
	2 回目	2069 ± 8	0.662 ± 0.002	19500	9000	0.630 ± 0.003
	3 回目	2047 ± 7	0.662 ± 0.002	18800	9000	0.623 ± 0.003
	平均	2055 ± 12	0.662 ± 0.002			0.624 ± 0.006
2 番	1 回目	2114 ± 5	0.664 ± 0.001	17500	9500	0.635 ± 0.003
	2 回目	2081 ± 7	0.663 ± 0.002	18000	9500	0.631 ± 0.002
	3 回目	2146 ± 6	0.664 ± 0.001	17500	9500	0.642 ± 0.002
	4 回目	2148 ± 6	0.663 ± 0.001	17500	9500	0.643 ± 0.002
	平均	2122 ± 32	0.662 ± 0.002			0.6378 ± 0.006
3 番	1 回目	2270 ± 8	0.662 ± 0.002	17500	8800	0.683 ± 0.003
	2 回目	2274 ± 7	0.663 ± 0.001	17000	8800	0.681 ± 0.003
	3 回目	2228 ± 8	0.663 ± 0.001	17800	8800	0.667 ± 0.002
	4 回目	2278 ± 6	0.663 ± 0.001	17000	7500	0.682 ± 0.003
	5 回目	2199 ± 6	0.662 ± 0.002	17000	8500	0.661 ± 0.002
	6 回目	2194 ± 7	0.663 ± 0.002	17200	9000	0.658 ± 0.002
	平均	2241 ± 39	0.6626 ± 0.002			0.672 ± 0.012
4 番	1 回目	2146 ± 8	0.662 ± 0.002	17800	8800	0.640 ± 0.002
	2 回目	2137 ± 7	0.663 ± 0.002	17500	8500	0.643 ± 0.002
	3 回目	2147 ± 6	0.664 ± 0.001	17800	7900	0.641 ± 0.002
	平均	2143 ± 5	0.663 ± 0.002			0.642 ± 0.003
5 番	1 回目	2301 ± 5	0.6636 ± 0.0012	15000	10000	0.688 ± 0.0011
	2 回目	2269 ± 3	0.6635 ± 0.0001	15000	10800	0.676 ± 0.002
	3 回目	2227 ± 5	0.6635 ± 0.0012	16000	10800	0.664 ± 0.002
	4 回目	2274 ± 5	0.6634 ± 0.0012	16500	10000	0.681 ± 0.002
	5 回目	2166 ± 6	0.6632 ± 0.0012	17500	10000	0.650 ± 0.002
	6 回目	2146 ± 5	0.6633 ± 0.0012	16500	11000	0.646 ± 0.002
	平均	2231 ± 63	0.6634 ± 0.001			0.678 ± 0.017
6 番	1 回目	2172 ± 7	0.663 ± 0.002	17000	9000	0.655 ± 0.002
	2 回目	2138 ± 8	0.663 ± 0.002	17500	9500	0.644 ± 0.002
	3 回目	2221 ± 6	0.663 ± 0.002	17000	10000	0.662 ± 0.002
	平均	2177 ± 42	0.6629 ± 0.002			0.654 ± 0.009
7 番	1 回目	2050 ± 7	0.657 ± 0.003	19000	10000	0.615 ± 0.002
	2 回目	2170 ± 7	0.661 ± 0.002	19000	8500	0.653 ± 0.002
	3 回目	2173 ± 7	0.662 ± 0.002	19500	7200	0.651 ± 0.002
	4 回目	2127 ± 7	0.663 ± 0.002	19000	7000	0.641 ± 0.004
	平均	2131 ± 70	0.660 ± 0.004			0.64 ± 0.018
8 番	1 回目	2122 ± 8	0.663 ± 0.002	18000	9000	0.639 ± 0.002
	2 回目	2210 ± 5	0.663 ± 0.001	19500	6500	0.643 ± 0.002
	3 回目	2125 ± 8	0.662 ± 0.002	18500	9500	0.633 ± 0.003
	4 回目	2123 ± 9	0.663 ± 0.002	18500	8800	0.630 ± 0.003
	平均	2145 ± 44	0.662 ± 0.002			0.644 ± 0.006
9 番	1 回目	2118 ± 7	0.663 ± 0.002	19000	9200	0.635 ± 0.002
	2 回目	2101 ± 8	0.663 ± 0.002	19000	9200	0.630 ± 0.002
	3 回目	2070 ± 6	0.663 ± 0.001	18800	8800	0.618 ± 0.002
	4 回目	2180 ± 7	0.661 ± 0.002	17800	8000	0.655 ± 0.002
	5 回目	2204 ± 6	0.663 ± 0.002	18500	7000	0.660 ± 0.002
	平均	2135 ± 56	0.663 ± 0.002			0.640 ± 0.018
	平均	2153	0.66			0.65

表 6: エネルギー分解能の比較

(a) 実データ (b) シミュレーションデータ (c) 実データに較正係数をかけたデータを示している。それぞれのフィットから得た平均値 σ と標準偏差 μ の割り算より算出したエネルギー分解能 σ/μ と見積もり値を比較している。標準偏差 σ の誤差はフィットにより生じた誤差の値であり、 σ/μ の誤差は誤差伝播の式より算出した。

測定場所	計測番号	見積もり値	(a) σ/μ	(a) σ	(b) σ/μ	(b) σ	(c) σ/μ	(c) σ
1 番	1 回目	0.125	0.124 ± 0.002	256 ± 8	0.127 ± 0.002	0.0845 ± 0.0012	0.115 ± 0.002	0.0718 ± 0.0010
	2 回目	0.119	0.116 ± 0.002	241 ± 4	0.117 ± 0.002	0.0777 ± 0.0015	0.108 ± 0.002	0.0684 ± 0.0014
	3 回目	0.126	0.124 ± 0.002	255 ± 4	0.127 ± 0.002	0.0845 ± 0.0012	0.117 ± 0.002	0.0730 ± 0.0016
2 番	1 回目	0.111	0.1059 ± 0.0010	224 ± 2	0.107 ± 0.002	0.0713 ± 0.0010	0.111 ± 0.002	0.0707 ± 0.0014
	2 回目	0.122	0.117 ± 0.002	244 ± 4	0.1117 ± 0.002	0.0776 ± 0.0011	0.105 ± 0.002	0.0669 ± 0.0012
	3 回目	0.108	0.113 ± 0.002	243 ± 6	0.107 ± 0.002	0.0713 ± 0.0010	0.116 ± 0.002	0.0744 ± 0.0013
	4 回目	0.108	0.1063 ± 0.0014	229 ± 3	0.107 ± 0.002	0.0713 ± 0.0010	0.109 ± 0.002	0.0699 ± 0.0012
3 番	1 回目	0.127	0.125 ± 0.002	283 ± 5	0.127 ± 0.002	0.0841 ± 0.0015	0.120 ± 0.003	0.0823 ± 0.0017
	2 回目	0.114	0.115 ± 0.002	263 ± 4	0.1079 ± 0.0013	0.0716 ± 0.0009	0.117 ± 0.002	0.0809 ± 0.0016
	3 回目	0.107	0.113 ± 0.002	253 ± 5	0.1081 ± 0.0013	0.0717 ± 0.0009	0.114 ± 0.002	0.0763 ± 0.0015
	4 回目	0.113	0.117 ± 0.002	268 ± 4	0.107 ± 0.002	0.0708 ± 0.0010	0.126 ± 0.003	0.0863 ± 0.0018
	5 回目	0.124	0.126 ± 0.002	277 ± 3	0.118 ± 0.002	0.0778 ± 0.0011	0.128 ± 0.002	0.0850 ± 0.0014
	6 回目	0.122	0.120 ± 0.002	263 ± 4	0.117 ± 0.002	0.0776 ± 0.0011	0.121 ± 0.002	0.0793 ± 0.0014
4 番	1 回目	0.124	0.121 ± 0.002	259 ± 5	0.117 ± 0.002	0.0777 ± 0.0012	0.125 ± 0.002	0.0801 ± 0.0015
	2 回目	0.112	0.113 ± 0.002	241 ± 4	0.108 ± 0.002	0.0715 ± 0.0010	0.109 ± 0.002	0.0704 ± 0.0011
	3 回目	0.104	0.104 ± 0.002	224 ± 3	0.0961 ± 0.0013	0.0638 ± 0.0009	0.110 ± 0.002	0.0708 ± 0.0012
5 番	1 回目	0.111	0.1119 ± 0.0014	258 ± 3	0.1075 ± 0.0013	0.0714 ± 0.0009	0.115 ± 0.002	0.079 ± 0.0015
	2 回目	0.105	0.102 ± 0.002	232 ± 5	0.1074 ± 0.0014	0.0713 ± 0.0009	0.114 ± 0.002	0.077 ± 0.0012
	3 回目	0.112	0.109 ± 0.002	244 ± 4	0.1075 ± 0.0014	0.0713 ± 0.0009	0.114 ± 0.002	0.076 ± 0.0011
	4 回目	0.114	0.1123 ± 0.0014	256 ± 4	0.1078 ± 0.0014	0.0715 ± 0.0009	0.115 ± 0.002	0.078 ± 0.0012
	5 回目	0.111	0.109 ± 0.002	236 ± 3	0.1078 ± 0.0013	0.0715 ± 0.0009	0.108 ± 0.002	0.070 ± 0.0010
	6 回目	0.112	0.1127 ± 0.0014	242 ± 3	0.1075 ± 0.0014	0.0713 ± 0.0009	0.111 ± 0.002	0.072 ± 0.0011
6 番	1 回目	0.117	0.121 ± 0.002	262 ± 5	0.117 ± 0.002	0.0775 ± 0.0011	0.117 ± 0.002	0.0765 ± 0.0015
	2 回目	0.124	0.123 ± 0.002	263 ± 5	0.117 ± 0.002	0.0776 ± 0.0011	0.118 ± 0.002	0.0761 ± 0.0013
	3 回目	0.118	0.113 ± 0.002	252 ± 4	0.117 ± 0.002	0.0777 ± 0.0011	0.121 ± 0.002	0.0799 ± 0.0013
7 番	1 回目	0.145	0.136 ± 0.002	279 ± 4	0.153 ± 0.003	0.100 ± 0.0020	0.137 ± 0.002	0.0844 ± 0.0012
	2 回目	0.134	0.135 ± 0.002	293 ± 4	0.128 ± 0.002	0.0846 ± 0.0014	0.133 ± 0.002	0.0871 ± 0.0016
	3 回目	0.109	0.115 ± 0.002	249 ± 4	0.107 ± 0.002	0.0710 ± 0.0011	0.117 ± 0.002	0.0759 ± 0.0013
	4 回目	0.133	0.125 ± 0.002	266 ± 4	0.097 ± 0.02	0.0644 ± 0.0011	0.131 ± 0.003	0.0836 ± 0.0021
8 番	1 回目	0.119	0.116 ± 0.003	247 ± 5	0.117 ± 0.003	0.0775 ± 0.0019	0.113 ± 0.002	0.0719 ± 0.0012
	2 回目	0.077	0.0075 ± 0.0008	166 ± 1	0.0780 ± 0.0011	0.0051 ± 0.0007	0.115 ± 0.003	0.0742 ± 0.0013
	3 回目	0.130	0.118 ± 0.003	250 ± 5	0.127 ± 0.002	0.0842 ± 0.0013	0.129 ± 0.003	0.0814 ± 0.0016
	4 回目	0.123	0.119 ± 0.003	253 ± 5	0.117 ± 0.002	0.0777 ± 0.0012	0.131 ± 0.004	0.0827 ± 0.0018
9 番	1 回目	0.121	0.120 ± 0.003	255 ± 5	0.117 ± 0.002	0.0775 ± 0.0010	0.121 ± 0.003	0.0768 ± 0.0014
	2 回目	0.117	0.120 ± 0.003	253 ± 5	0.117 ± 0.002	0.0775 ± 0.0010	0.120 ± 0.003	0.0755 ± 0.0013
	3 回目	0.115	0.122 ± 0.002	252 ± 3	0.108 ± 0.002	0.0717 ± 0.0009	0.127 ± 0.002	0.0786 ± 0.0012
	4 回目	0.117	0.118 ± 0.002	256 ± 4	0.117 ± 0.003	0.0775 ± 0.0014	0.116 ± 0.002	0.0756 ± 0.0012
	5 回目	0.103	0.1004 ± 0.0016	221 ± 3	0.097 ± 0.002	0.0644 ± 0.0010	0.102 ± 0.002	0.0672 ± 0.0010

$E=0.662$ MeV のとき $\frac{\sigma_E}{E} = 0.11 \sim 0.13$, $\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$ を仮定したシミュレーションデータの示す分布が測定結果を概ね再現することがわかった。エネルギー分解能は $0.11 \sim 0.13$ の可能性がある。また、コンプトン散乱と光電効果は前者の方が多い。その割合は線源の位置により変化する。シンチレーター中央の 5 番の位置ではコンプトン散乱イベント数：光電ピークイベント数=3：2 程度であるが、シンチレーターの端、1 番、3 番、7 番、9 番の位置では、この比が 2：1 程度になる。これは、シンチレーター内で最初にコンプトン散乱を起こし、その後に γ 線がシンチレーター外へ逃げずに光電吸収して全吸収イベントになる事例が相当数あることを示しており、最初にコンプトン散乱した場所がシンチレーター中央であったときと比べ、シンチレーターの端でコンプトン散乱した後はガンマ線が逃げやすいからである。そのため、光電ピークのイベント数の割合が多いシンチレーター中央の 5 番の位置での光電ピークのエネルギーは他の場所での光電ピークの値よりも数% 大きい。

6 まとめ

Belle II 実験における γ 線検出について、 γ 線の到来方向について感度を持ち、50 MeV から 100 MeV 程度の低エネルギーのガンマ線に対するエネルギー分解能と検出効率を確保するソリューションとして、プリシャワー検出器の検討を行なっている。本研究では、プリシャワー検出器で、生成したシャワーのエネルギー損失を測定するアクティブ吸収層をなす結晶シンチレーターの読み出し光量について調べた。

具体的には、 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の面積を持ち、厚みが 1 放射長 (11.2 mm) に概ね対応する 12 mm の BGO 結晶シンチレーターを反射材である白色ゴアテックスシートで包み、 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の受光部面積を持つ半導体検出器が使用された場合を想定して側面の一箇所に白色ゴアテックスシートを切って窓をあけ、そこからわずかな空隙を設けたエアコンタクトで PMT によりシンチレーション光を読み出す測定を行なった。BGO シンチレーターには ^{137}Cs 線源が発する 0.662 MeV のガンマ線を直径 4.8 mm のコリメーターを介して当てることにより、エネルギー損失が生じた場所により読み出し光量の変化するかを調べた。

PMT の出力パルスはテクトロニクス DPO3034 型デジタルオシロスコープで読み出して数値化し、その波形データを Linux PC が LAN 経由でブロック転送して取得するプログラムを用いてデータ収集を行った。1 回のデータ収集サイクルで 20000 イベントを記録し、波高分布のうち光電効果による全吸収ピークをガウス分布でフィットして得た平均値を読み出し光量の測定値とした。フィットの統計誤差は 0.3 % 程度であるのに対して、コリメーターと線源を同一の位置に置き直して測定を繰り返し、読み出し光量中心値の不偏分散の平方根により、ばらつきを見積もると約 3 % で、こちらのほうが数値的に大きい。そこで、これを読み出し光量の不定性と考えたこととした。

コリメーターを介して線源を置く位置を変更したときの読み出し光量の変化は、読み出し光量の不定性を考慮すると顕著ではない。したがって、シンチレーター内でエネルギー損失が起きた位置に依存する読み出し光量の変化は、本研究における読み出し光量測定の不定性 3 % 程度あるいはそれ以下であると考えられる。

波高分布は光電効果による全吸収ピークとコンプトン散乱によることから、エネルギー損失の値を棄却法で生成するモンテカルロシミュレーションを行い、実験データと比較した。エネルギー損失 $E=0.662 \text{ MeV}$ の場合のエネルギー分解能 $\sigma_E/E=0.11\sim 0.13$ 、 $\sigma_E/E \propto 1/\sqrt{E}$ に設定したシミュレーションで概ね実験データを再現できることがわかった。コンプトン散乱イベント数：全吸収のイベント数の比はコリメーターつき線源を置く位置により差異が見られ、シンチレーター中央では 3:2 程度であるが、シンチレーターの端では 2:1 程度になる。これは、シンチレーター内で最初にコンプトン散乱を起こした γ 線が、その後に光電効果を起こして全エネルギーが検出されるものが、全吸収ピークを形成するイベントの中に無視できない割合を占めること、つまりコンプトン散乱を起こした後にシンチレーター外へ逃げる確率が γ 線の入射位置により異なるためである。

謝辞

本研究において、ご指導いただいた宮林謙吉教授に心より感謝申し上げます。お忙しいにもかかわらず右も左もわからない状態だった私たちに1から検出器の扱い方や研究の方針についてなど丁寧にサポートしていただきました。また、下村真弥助教、蜂谷崇助教、林井久樹名誉教授には、ゼミの時間やミーティング時の質問などでお世話になりました。そして、研究室の先輩方、同回生の皆様にも感謝申し上げます。最後に、これまで支えていただいた全ての皆様に感謝申し上げますとともに、謝辞とさせていただきます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Belle II 実験ホームページ
<https://belle2pb.kek.jp/Detector/>
- [2] ファイバーラボ株式会社 フォトダイオード (PD) の構造や原理とは
<https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-pd/>
- [3] 株式会社ハナムラオプティクス シンチレータ BGO 結晶
<http://www.hanamuraoptics.com/scintillatorcrystal/scintillatorcrystals/bgo.htm>
- [4] KEK 目で見る素粒子
<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2004/janfeb/scintillator.html>
- [5] 五屋郁美 卒業論文「シリコンピクセルを用いたプリシャワー検出器の Geant4 シミュレーションによる検討」奈良女子大学 (2021 年)
https://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/old_HP/thesis/4kaisei/2020/ikumi_goya_bathesis_fy2020.pdf
- [6] 長坂憲子、横山紗依 卒業論文「デジタルオシロスコープによる高速サンプリング記録を用いた MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの特性評価」奈良女子大学 (2015 年)
https://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/old_HP/thesis/4kaisei/2014/2014-nagasaka-yokoyama.pdf
- [7] W.R.Leo 「Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach Second Revised Edition」

付録1 データ収集プログラム

```
//header file
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include "vxi11_user.h"

int main(int argc, char* argv[]) {

    FILE* fp;
    fp = fopen("hoge hoge.txt", "w");
    int nevt = 20000; //event number
    int count = 1;
    CLINK* clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "192.168.11.62";

    //-- open scope
    if (vxi11_open_device(serverIP, clink) != 0) {
        printf("Couldn't open scope.\n");
        exit(1);
    }

    /*buffer to receive data block tsuika*/
    static char wf1[10000];
    static char wf11[10000];

    //-- buffer to receive data block.
    static char wf[10000];
    char buffer[40];
    int ret;
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:SCA_10E-07"); //Horizontal 100ns/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH1:SCA_50E-03"); //ch=1 vertical 50mV/div
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SOU_CH2"); //triger type = edge.ch=2
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SLO_FALL"); //slope control=fall
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:LEV:CH1_20E-03"); //triger level = -20mV
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:MODE_NORM"); //trigered data get
    ret = vxi11_send(clink, "CH1:POS_1.0"); //vertical position
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:DEL:MOD_OFF"); //delay mode off
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:POS_20"); //trig pos 20% from left
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:RECO_1000"); // record length
    ret = vxi11_send(clink, "ACQ:MOD_SAM"); // acquisition mode = 8bit
    printf("%d", ret);
    double xinc = vxi11_obtain_double_value(clink, "WFMO:XIN?"); //get horizontal
        range
    printf("%10.3e\n", xinc);
    fprintf(fp, "%10.3e\n", xinc);

    ret = vxi11_send(clink, "DAT:ENC_FAS"); // fastest encoding
    ret = vxi11_send(clink, "WFMO:BYT_N_1"); //range = -128~127
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:STAR_1");
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:STOP_1000");
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:SOU_CH1"); //Digitize ch=1 signal.
    ret = vxi11_send(clink, "CURV?"); //get data
    long bytes_returned = vxi11_receive_data_block(clink, wf11, 10000, 1000);

    time_t start, end;
    start = time(NULL);

    for (int iev = 0; iev < nevt + 1; iev++) {

        ret = vxi11_send(clink, "DAT:SOU_CH1");
        ret = vxi11_send(clink, "CURV?");
        long bytes_returned1 = vxi11_receive_data_block(clink, wf1, 10000, 1000);

        /*if getting data is unequal to got data then fprintf getting data
        */
    }
}
```

```

    if (wf1[1] != wf11[1] || wf1[2] != wf11[2] || wf1[3] != wf11[3]) {
        for (int i = 0; i < 1000; i++) {
            wf11[i] = wf1[i];
        }

        if (iev == 0) continue;

        printf("_%5d_%5d_", iev, bytes_returned);
        fprintf(fp, "_%5d_%5d_", iev, bytes_returned);

        for (int i = 0; i < 1000; i++) {
            fprintf(fp, "%d_", (char)wf11[i]);
        }

        count = count + 1;
        printf("\n");
        fprintf(fp, "\n");
        if (iev == 0) continue;
    }
    else {
        iev--;
    }
    if (count == 20001) break;
}

end = time(NULL);

printf("%ld\n", end - start);

fclose(fp);
printf("ending..._\n");

vxi11_close_device(serverIP, clink);

return 0;
}

```

付録2 データ解析プログラム

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
int main()
{
    int i;
    float xdiv; // horizontal axes range .
    int iev, nsample; // Event number and number of sampling .
    int siny[10000];
    FILE* fp; // iostream
    FILE* fpout; // iostream
    errno_t error;
    error = fopen_s(&fp, "hoge hoge.txt", "r");
    if (fp == NULL) {
        printf("can't open file\n");
        return 0;
    }
    error = fopen_s(&fpout, "hoge hoge1.txt", "w");
    /* Top line is x/ div . */
    fscanf_s(fp, "%e\n", &xdiv);
    printf("xdiv read done.\n");
    /* Read event number unless EOF .*/
    while (fscanf_s(fp, "%d", &iev) != EOF) {
        /*
         printf (" event number = %d", iev );
         fprintf ( fpout , " event number = %d", iev );
        */
        /* Check number of samplings .*/
        fscanf_s(fp, "%d", &nsample);
        /* Read sample and hold data .*/
        const int nstot = 1000; // taking 1000 sample is normal
        for (i = 0; i < nstot; i++) {
            fscanf_s(fp, "%d", &(siny[i])); // get data
        }
        printf("\n");
        if (nsample == nstot) {
            /* Do needed instructions for the read data .*/
            double sum = 0.0;
            double sum2 = 0.0;
            double sum3 = 0.0;
            double dev = 0.0;
            double ave = 0.0;
            double delta = 0.0;
            double max = 0.0;
            const int nped = 100;
            double max_2 = 0.0;
            double sum3_2 = 0.0;
            double std = 0.0;
            /* sum */
            for (i = 0; i < nped; i++) {
                sum = sum + (double)siny[i];
            }
            /* average */
            ave = sum / nped;
            /* deviation */
            for (i = 0; i < nped; i++) {
                sum2 = sum2 + (ave - (double)siny[i]) * (ave - (double)siny[i]);
            }
            dev = sum2 / nped;
            /* delta */

            const int nstart = 150;
            const int nend = 1000;
            i = nstart;

            while (i < 300)
            {
```

```

    delta = ave - (double)siny[i];

    /* pulse hight */
    if (max < delta) {
        max = delta;
    }
    sum3 = sum3 + delta;
    i++;
}

while (ave > (double)siny[i] && i < nend)
{
    delta = ave - (double)siny[i];

    /* pulse hight */
    if (max < delta) {
        max = delta;
    }
    sum3 = sum3 + delta;
    i++;
}

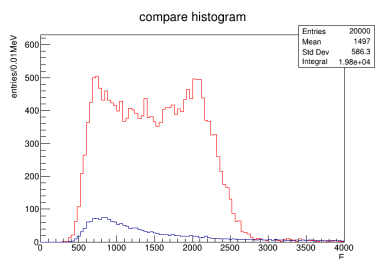
if (dev < 10) {
    printf("%d%f%f%f%f\n", iev, ave, dev, max, sum3);
}

fprintf(fpout, "%f\n", sum3);
}
} // Event loop end .
fclose(fp);
fclose(fpout);
printf("ending...\n");
}

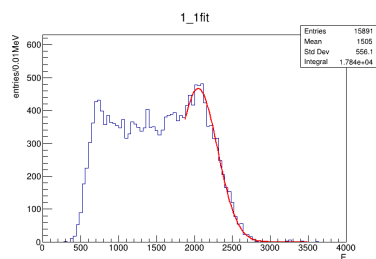
```


付録3 測定結果とシミュレーション結果

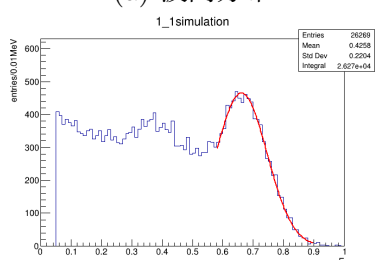
1番 (-2.2,2.2) のとき



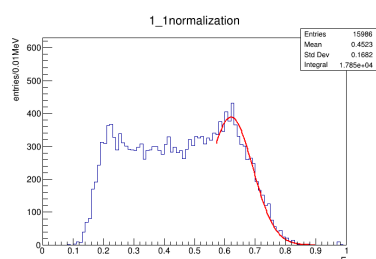
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

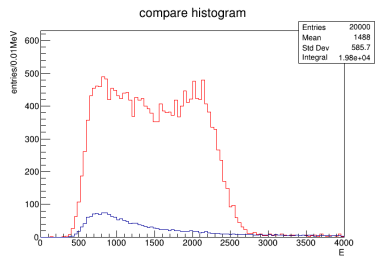


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

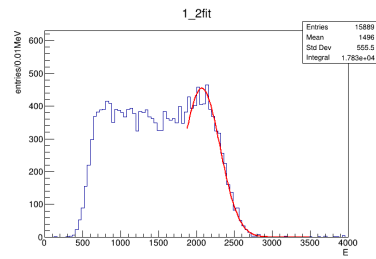


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

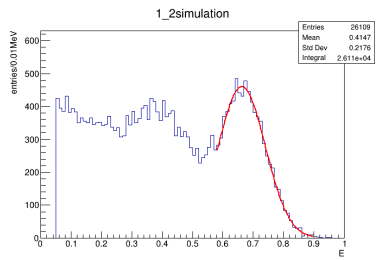
1番 (-2.2,2.2) の1回目



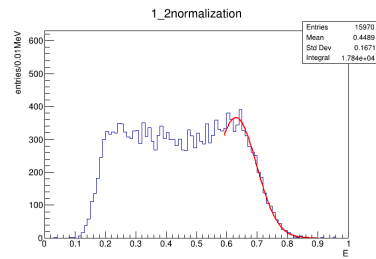
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

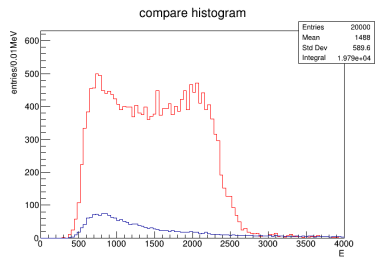


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

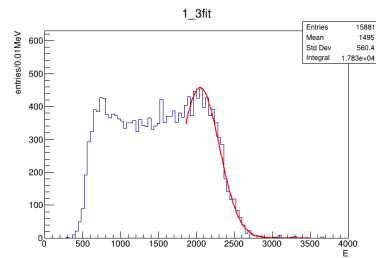


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

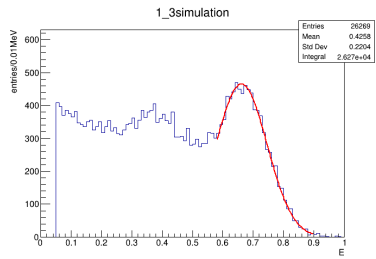
1番 (-2.2,2.2) の2回目



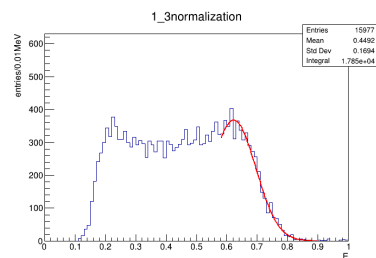
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



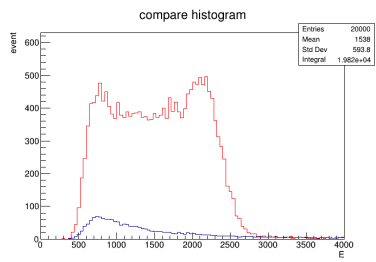
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



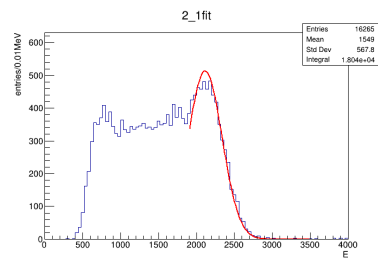
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

1番 (-2.2,2.2) の3回目

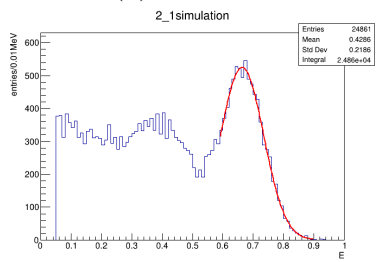
2番(0.0,2.2)のとき



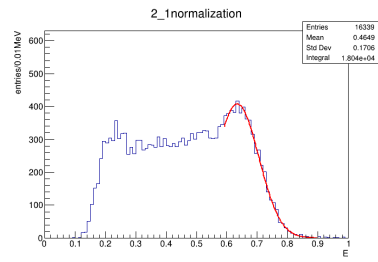
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

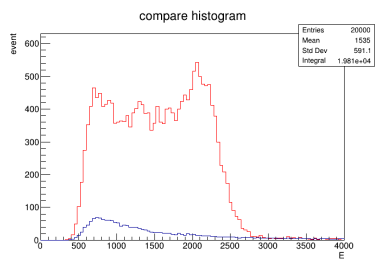


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

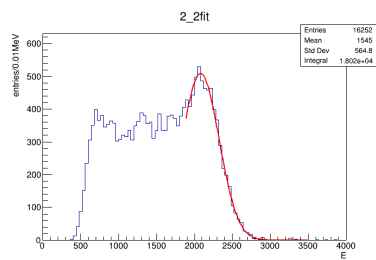


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

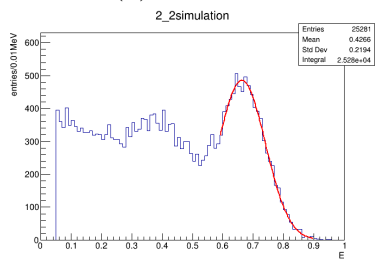
2番(0.0,2.2)の1回目



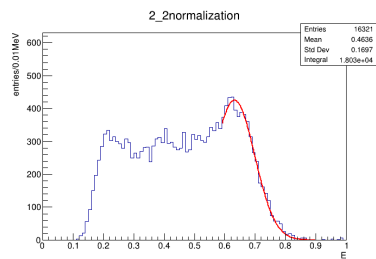
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

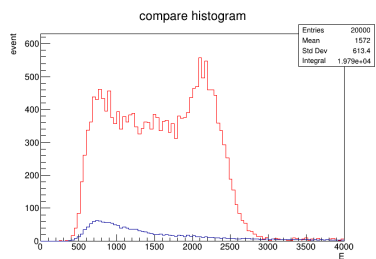


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

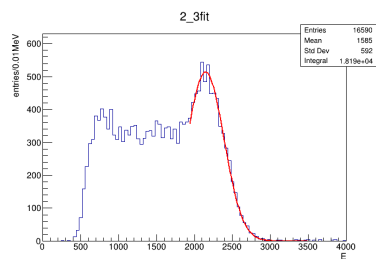


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

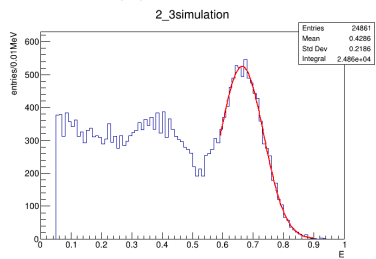
2番(0.0,2.2)の2回目



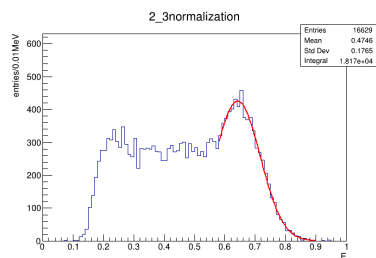
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

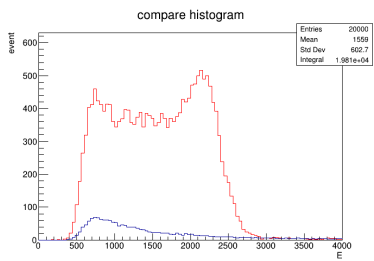


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

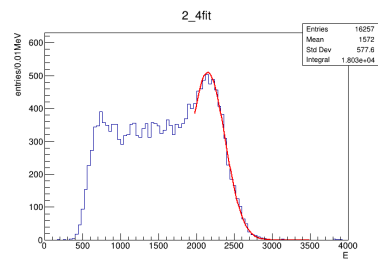


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

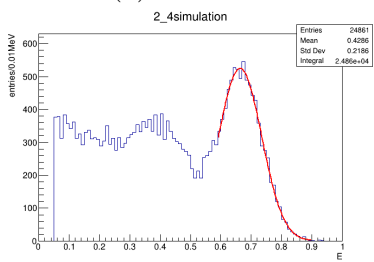
2番(0.0,2.2)の3回目



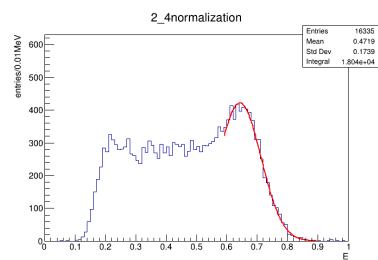
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



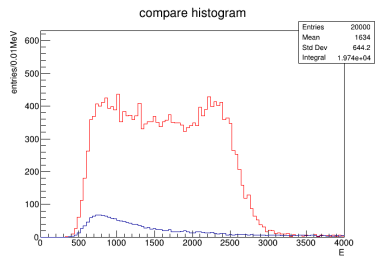
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



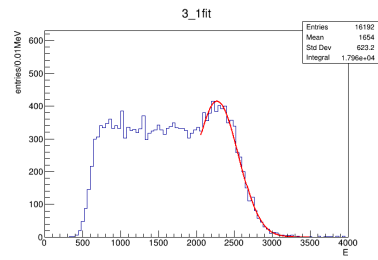
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

2番(0.0,2.2)の4回目

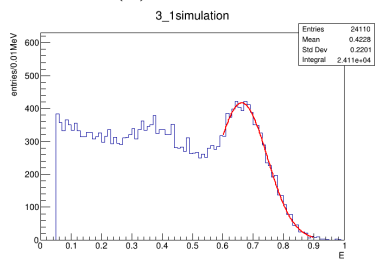
3番(2.2,2.2)のとき



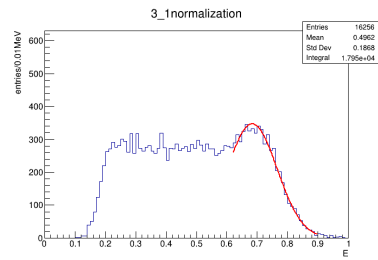
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

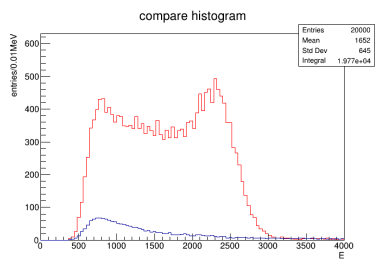


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

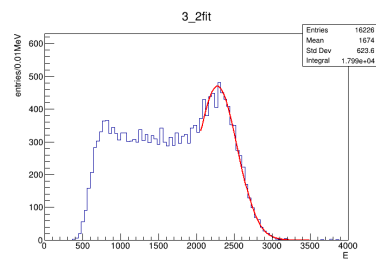


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

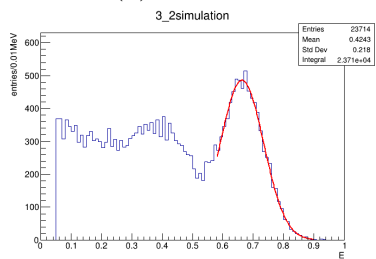
3番(2.2,2.2)の1回目



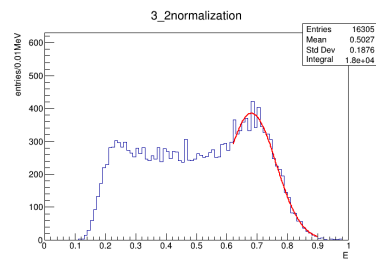
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

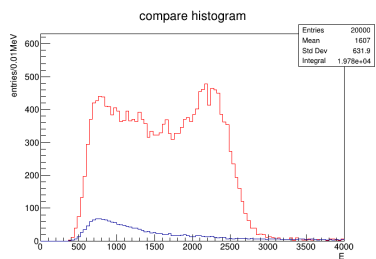


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

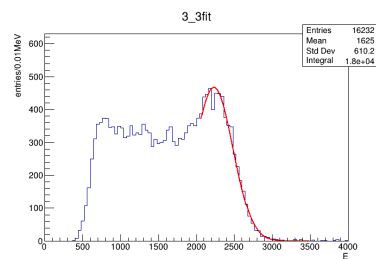


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

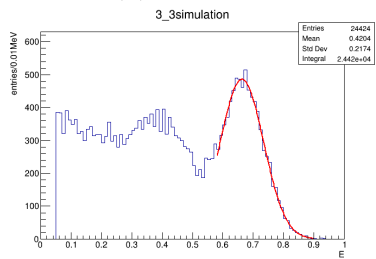
3番(2.2,2.2)の2回目



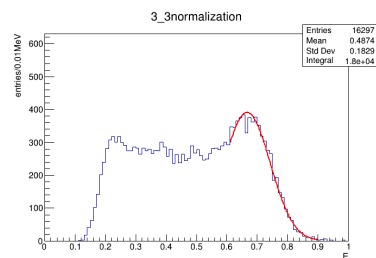
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

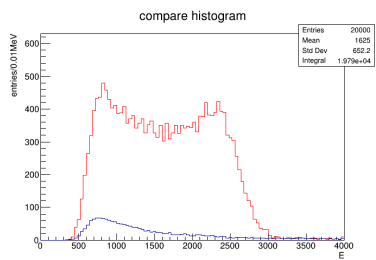


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

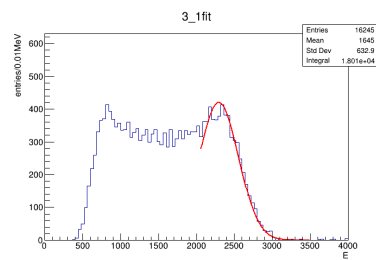


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

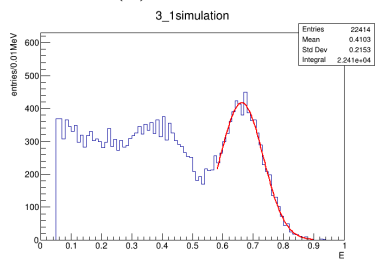
3番(2.2,2.2)の3回目



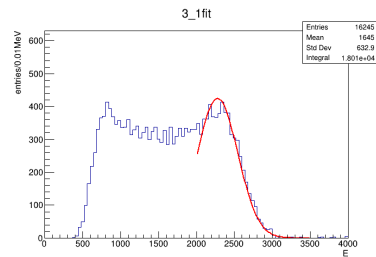
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

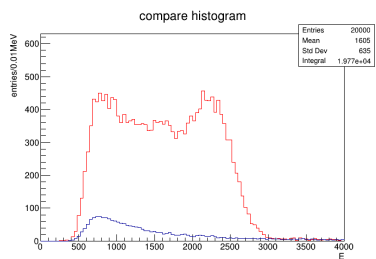


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

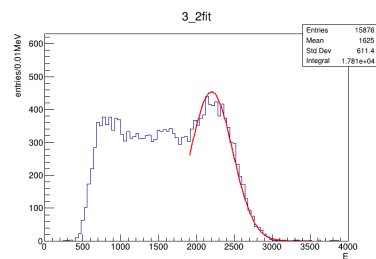


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

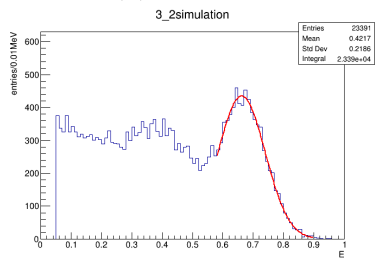
3番(2.2,2.2)の4回目



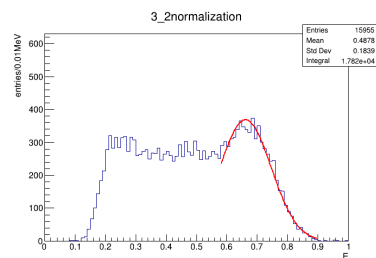
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

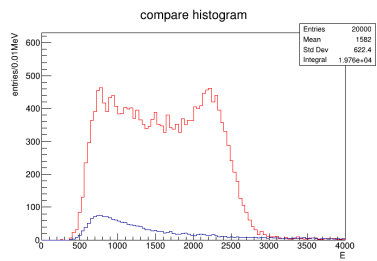


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

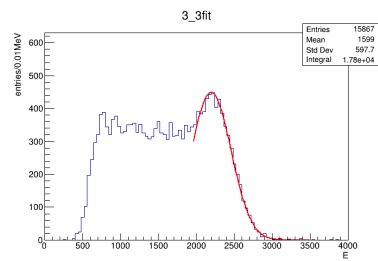


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

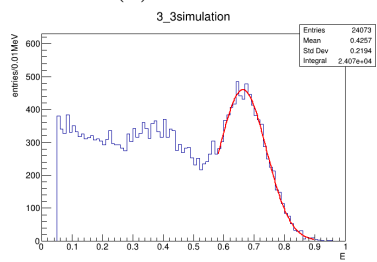
3番(2.2,2.2)の5回目



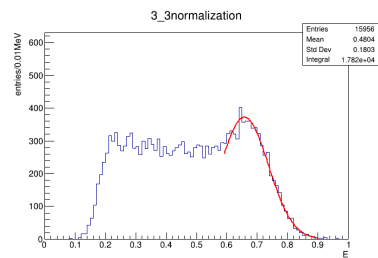
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



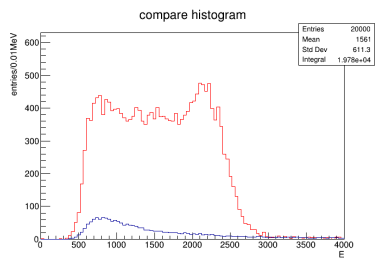
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



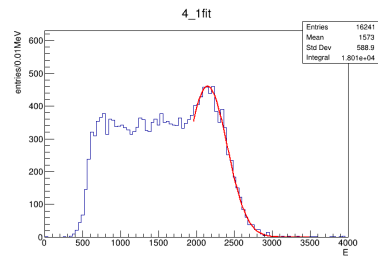
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

3番(2.2,2.2)の6回目

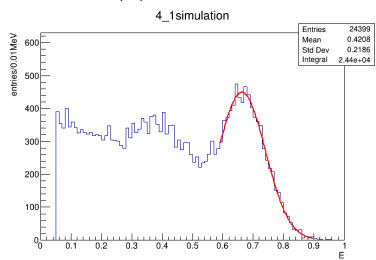
4番 (-2.2,0.0) のとき



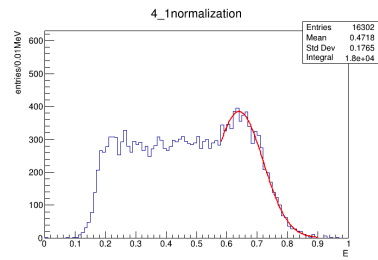
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

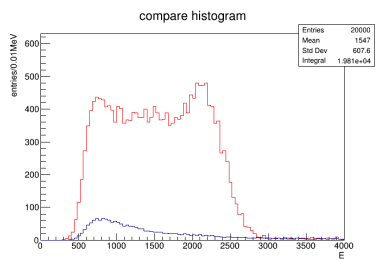


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

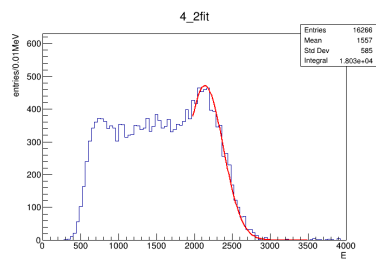


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

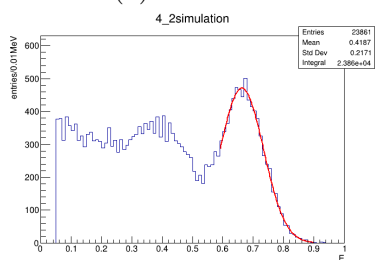
4番 (-2.2,0.0) の1回目



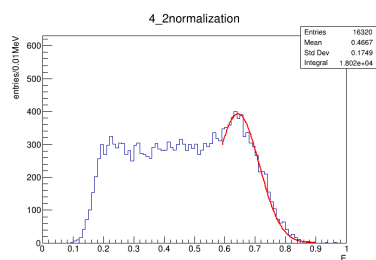
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

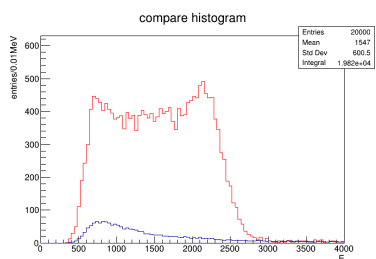


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

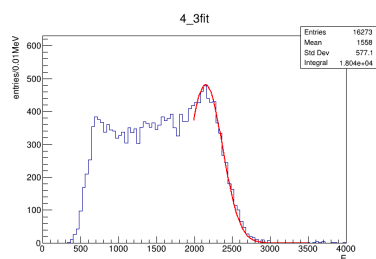


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

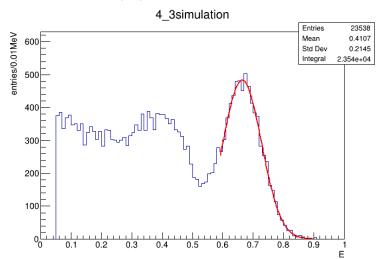
4番 (-2.2,0.0) の2回目



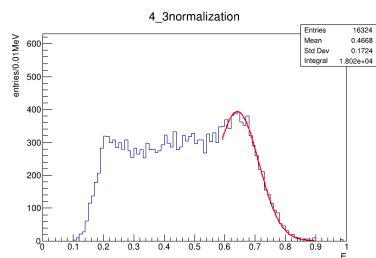
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



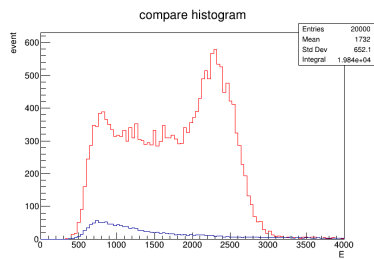
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



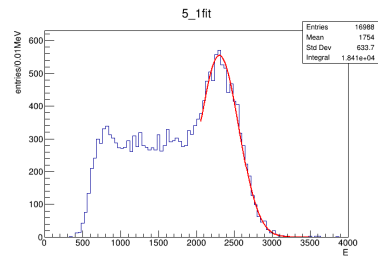
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

4番 (-2.2,0.0) の3回目

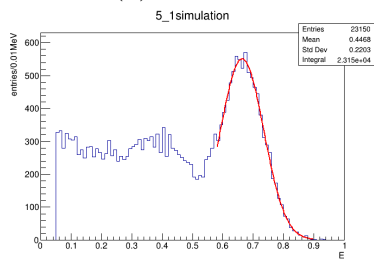
5番 (0.0,0.0) のとき



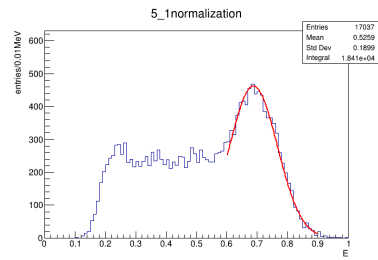
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

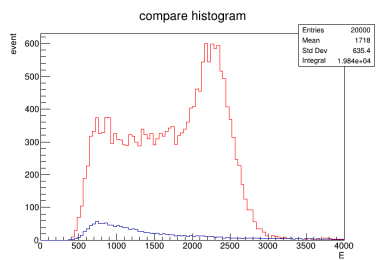


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

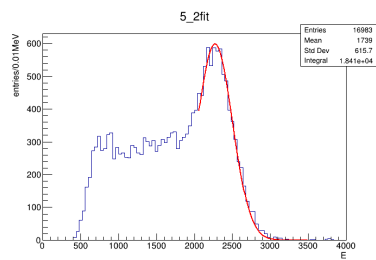


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

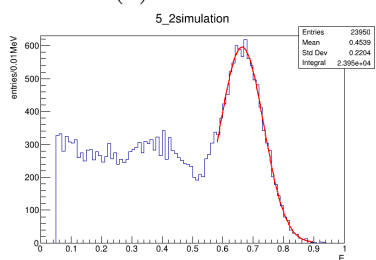
5番 (0.0,0.0) の1回目



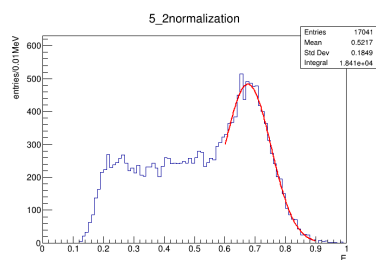
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

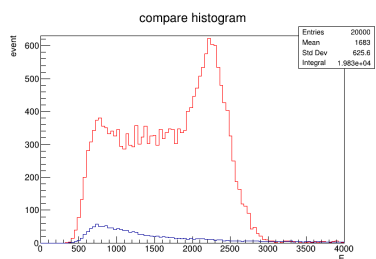


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

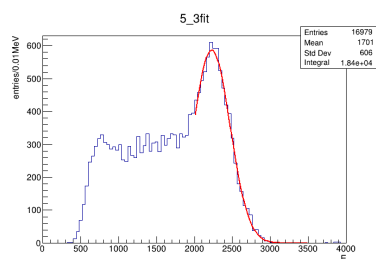


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

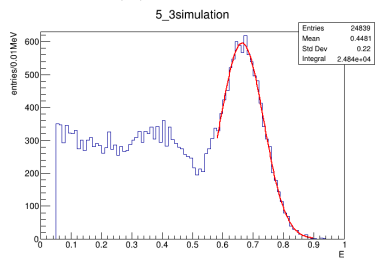
5番(0.0,0.0)の2回目



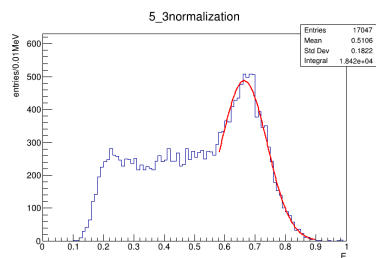
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

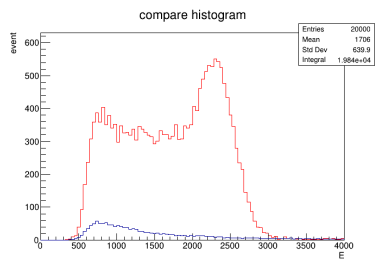


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

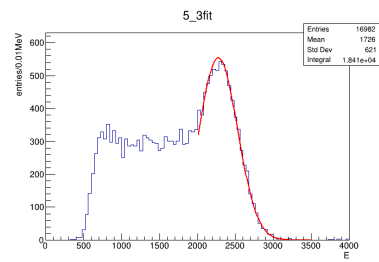


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

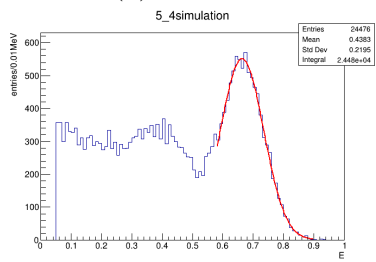
5番(0.0,0.0)の3回目



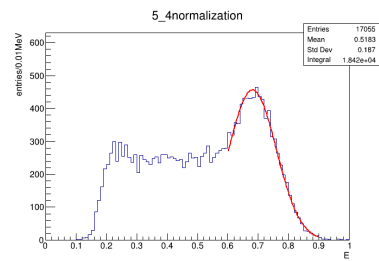
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

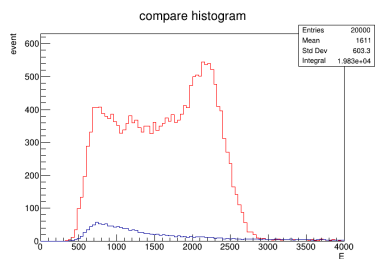


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

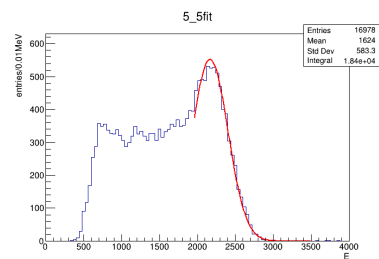


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

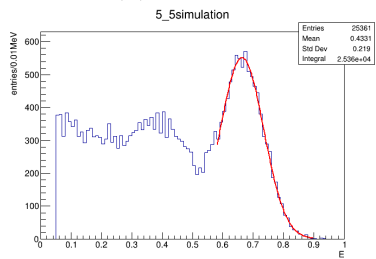
5番(0.0,0.0)の4回目



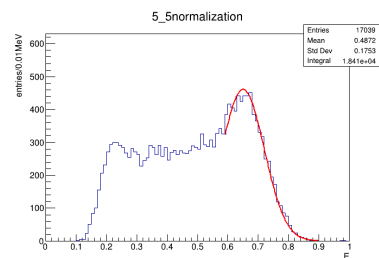
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

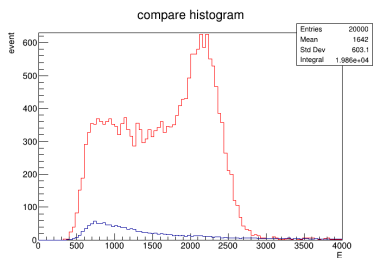


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

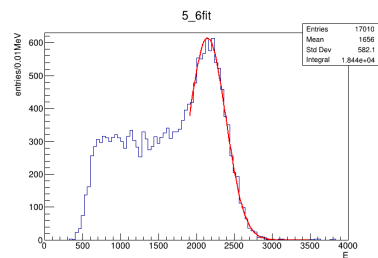


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

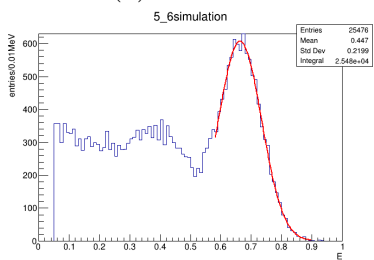
5番(0.0,0.0)の5回目



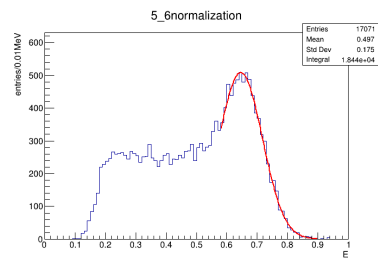
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



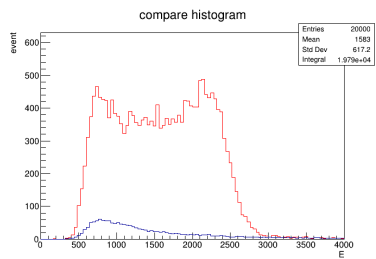
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



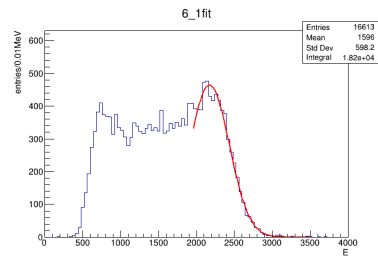
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

5番(0.0,0.0)の6回目

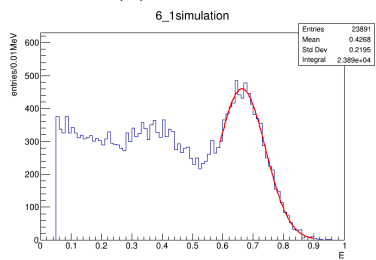
6番 (2.2,0.0) のとき



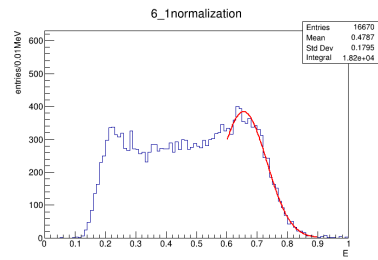
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

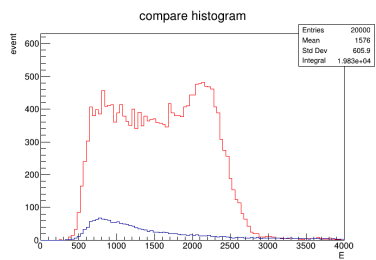


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

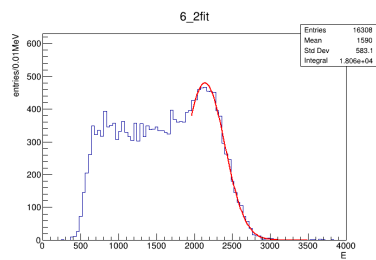


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

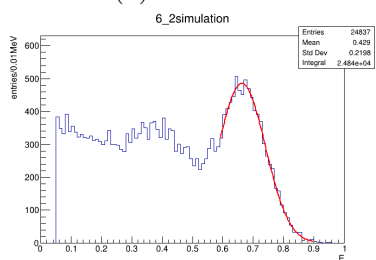
6番 (2.2,0.0) の1回目



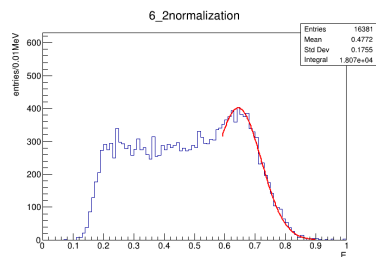
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

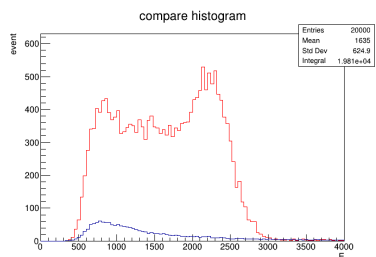


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

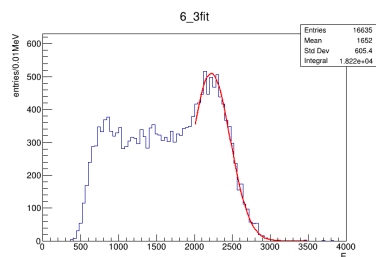


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

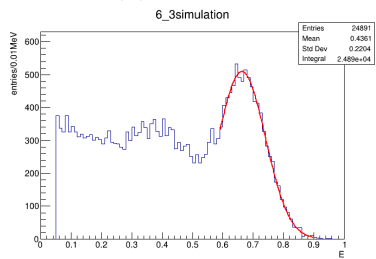
6 番 (2.2,0.0) の 2 回目



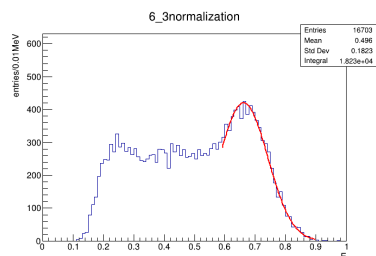
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



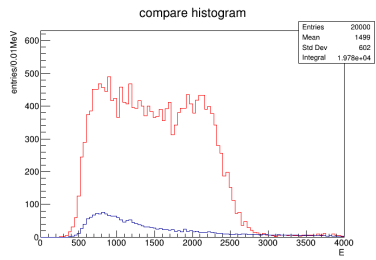
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



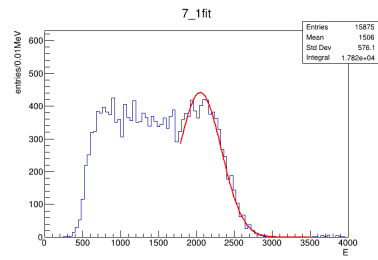
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

6 番 (2.2,0.0) の 3 回目

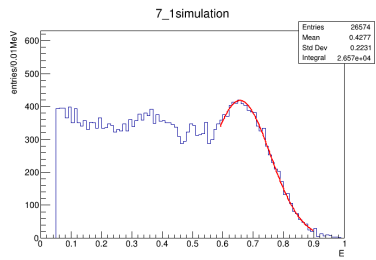
7番 (-2.2,2-2.2) のとき



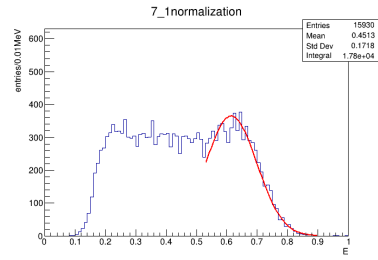
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

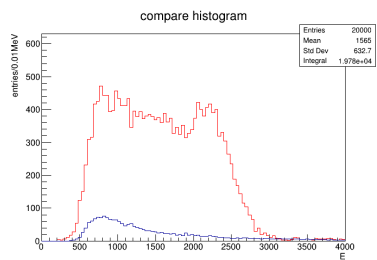


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

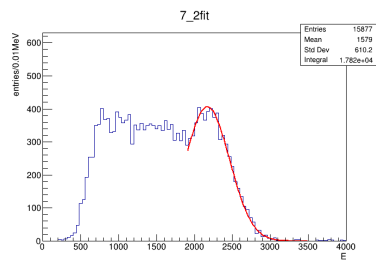


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

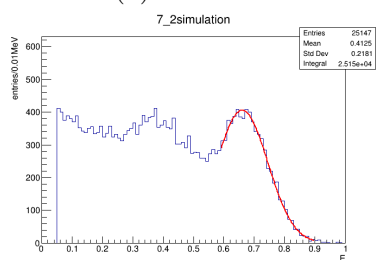
7番 (-2.2,2-2.2) の1回目



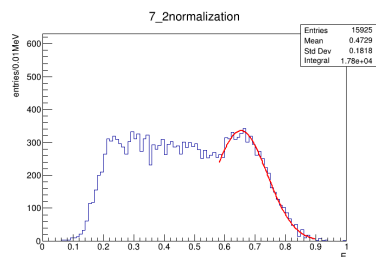
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

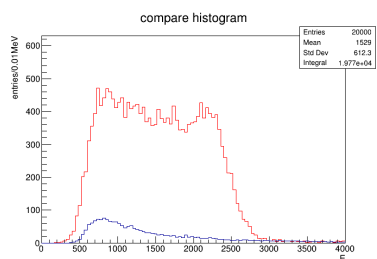


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

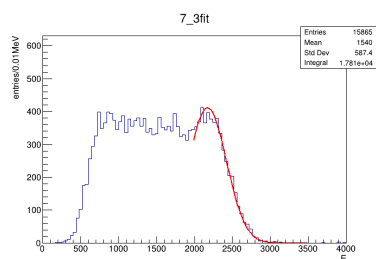


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

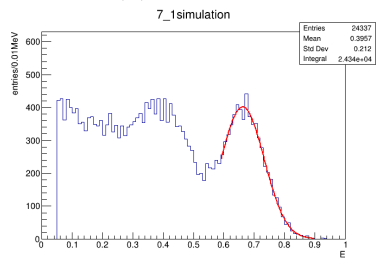
7番 (-2.2,2-2.2) の2回目



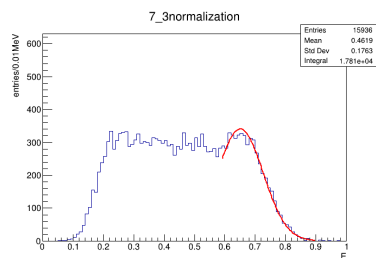
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

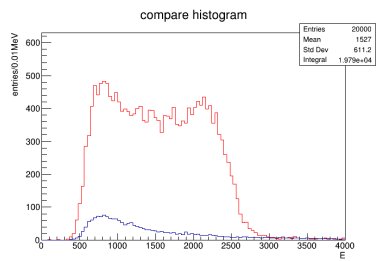


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

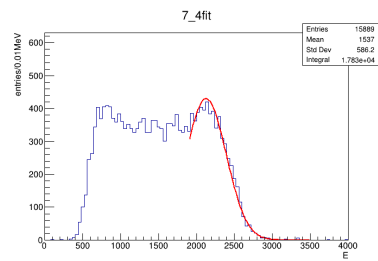


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

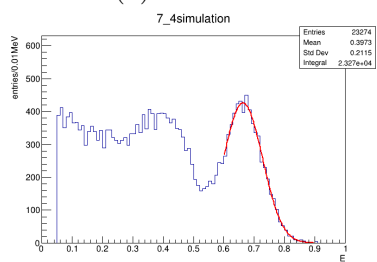
7番 (-2.2,2-2.2) の3回目



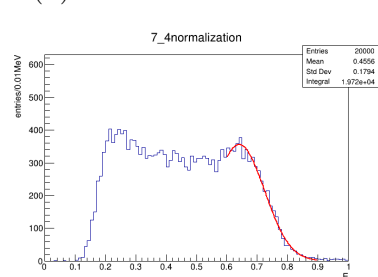
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



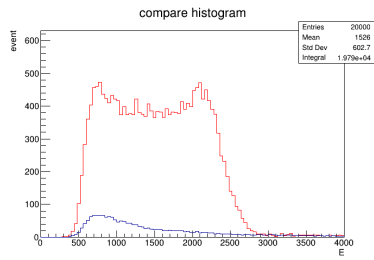
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



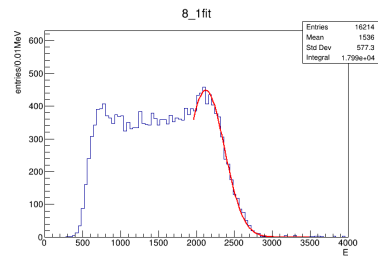
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

7番(-2.2,2-2.2)の4回目

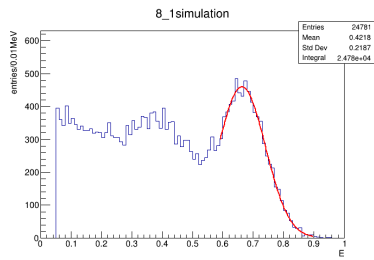
8番 (0.0,-2.2) のとき



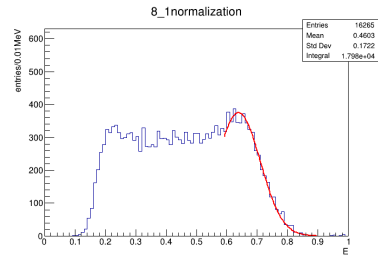
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

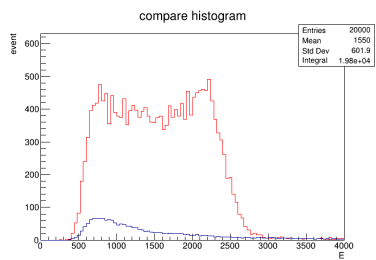


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

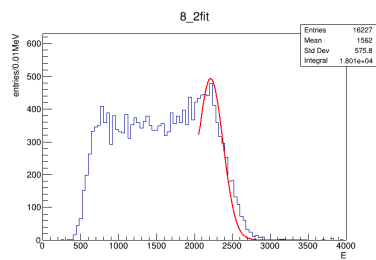


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

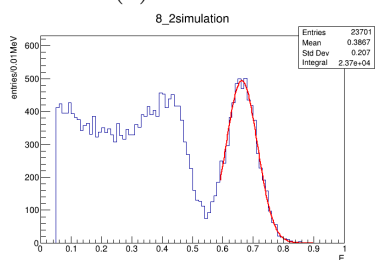
8番 (0.0,-2.2) の1回目



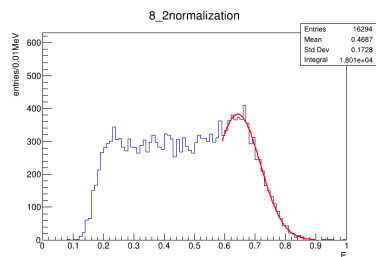
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

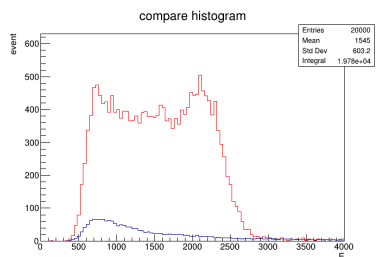


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

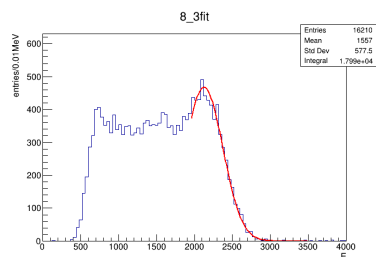


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

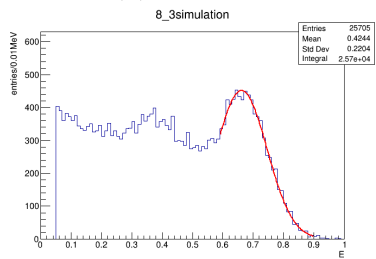
8番 (0.0,-2.2) の2回目



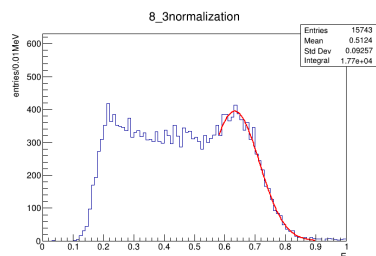
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

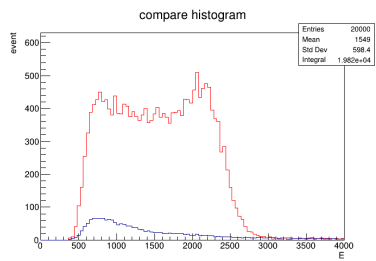


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

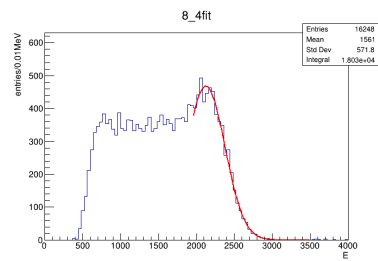


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

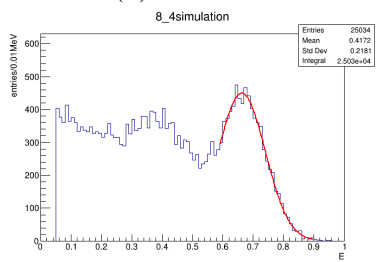
8番 (0.0,-2.2) の3回目



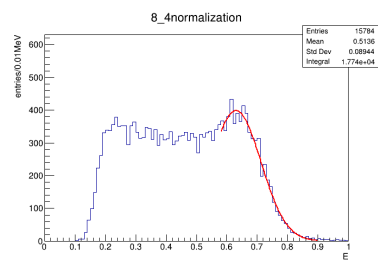
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



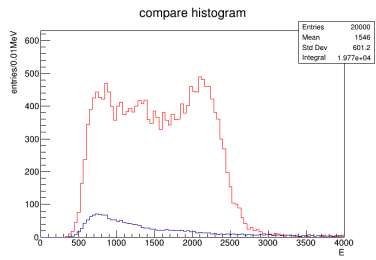
(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



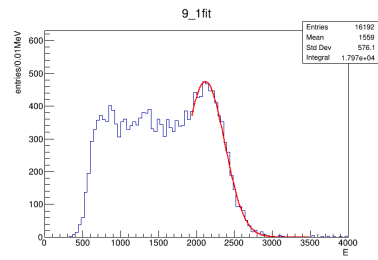
(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

8番(0.0,-2.2)の4回目

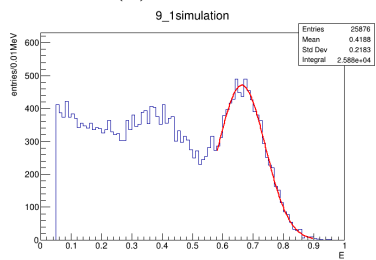
9番(2.2,-2.2)のとき



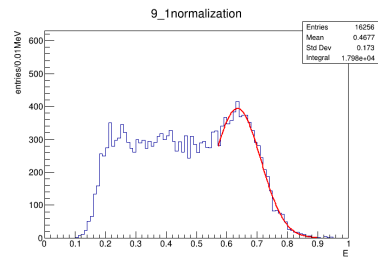
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

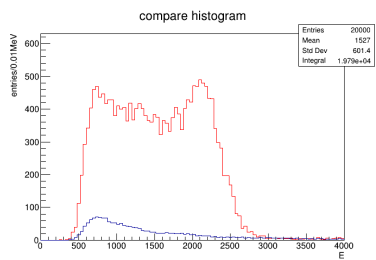


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

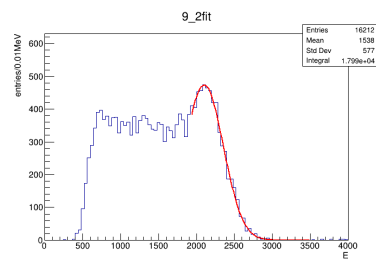


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

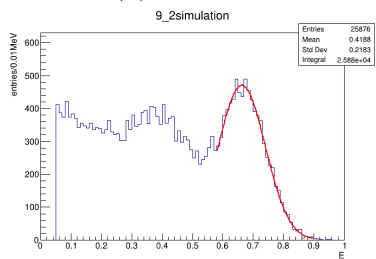
9番(2.2,-2.2)の1回目



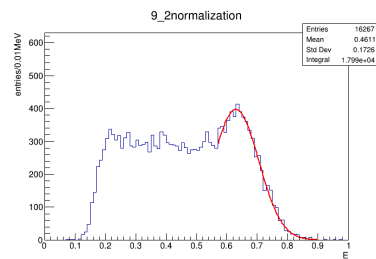
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

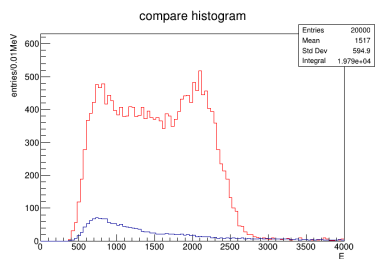


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

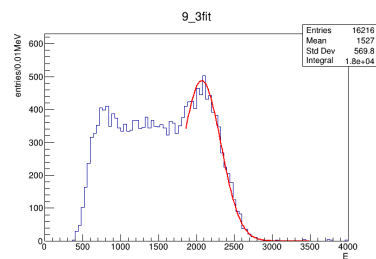


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

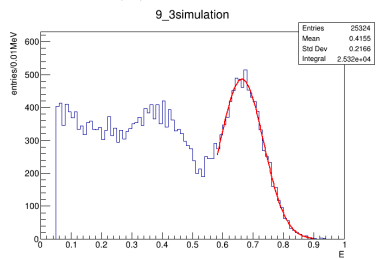
9番(2.2,-2.2)の2回目



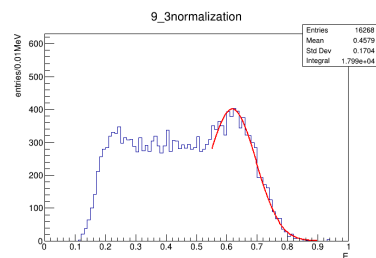
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

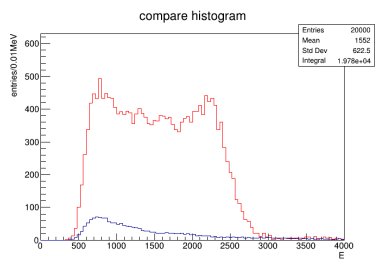


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

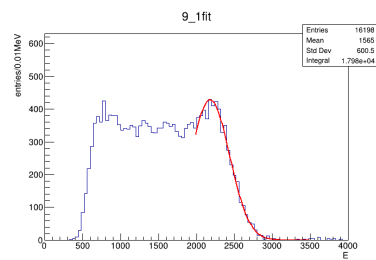


(d) 較正した実データのエネルギー損失分布

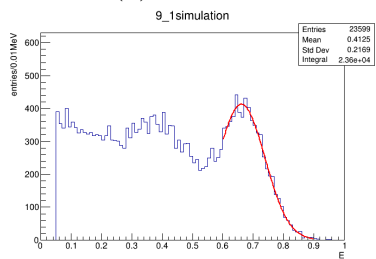
9番(2.2,-2.2)の3回目



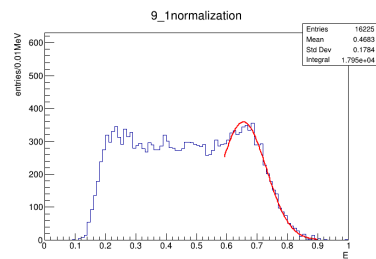
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果

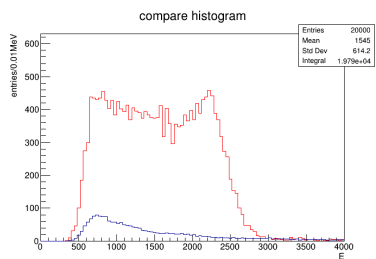


(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果

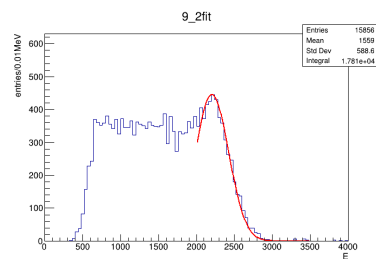


(d) 校正した実データのエネルギー損失分布

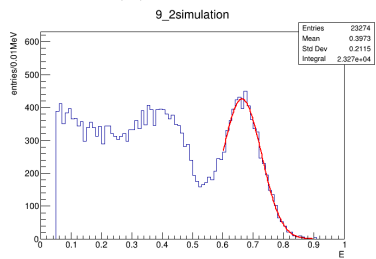
9番(2.2,-2.2)の4回目



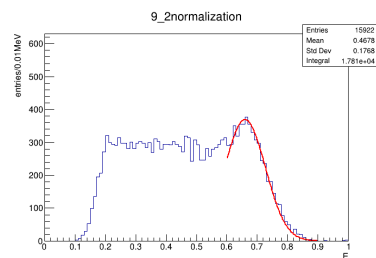
(a) 波高分布



(b) 実データから得た結果



(c) 見積もった分解能でのシミュレーション結果



(d) 校正した実データのエネルギー損失分布

9番(2.2,-2.2)の5回目