

2023 年度 修士論文

J-PARC KOTO 実験のための  
検出器の光核反応による光子検出不感率の測定手法

大阪大学大学院理学研究科  
物理学専攻

博士課程（前期課程）2 年  
学籍番号 u073486f

川田 悠統

2024 年 3 月 24 日

## 概要

J-PARC KOTO 実験では、中性 K 中間子の稀な崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索している。この事象では終状態に2つの光子しか観測されない。この事象を探索するためには、背景事象を削減することが重要である。背景事象の多くは、電子や3つ以上の光子など、終状態に2つの光子以外の粒子が観測されるため、これらの粒子を漏れなく捉える必要がある。

現在 KOTO 実験では、背景事象を捉えるための検出器の一つである、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における光核反応による光子不感率が問題になっている。 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  崩壊事象において、終状態の4つの光子のうち2つを検出し、もう2つを検出し損なうと背景事象となり得る。この背景事象について、シミュレーションによる評価を行ったが、シミュレーションのバージョンにより光核反応による光子不感率が異なるため、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  事象数の系統誤差が大きい。

本研究では、標識化光子ビームを用いた光核反応による光子不感率の実測を目指した。電子ビームを標的に当てた時の制動放射によって生じた光子ビームを用いる。制動放射後の電子の運動量の情報と光子のエネルギーを対応させることで、光子ビームを標識化する。

まず、光核反応による光子不感率の測定方法を設計した。ビームに当てる不感率測定の対象として、1 mm の鉛と 4.4 mm のプラスチックシンチレータが交互に 17 層重なった光子検出器を用意した。光子ビームをこの検出器に入射させ、光核反応により生じた中性子を、周囲を囲むようにして配置した液体シンチレータで検出する。中性子を検出したとき、光子検出器に落としたエネルギーが閾値以下の事象が光子不感事象である。

その後、標識化光子ビームを用いてビームテストを行った。今回のビームテストでは、光子不感率の実測に至らなかったが、ビームテストで取得したデータを用いて設計を評価した。用いたビームの性質、光子検出器、中性子検出器、データ収集システムのそれぞれについて知見を得た。

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	KOTO 実験	1
1.1.1	KOTO 実験の概要	1
1.1.2	バレル検出器	1
1.2	KOTO 実験における光子不感事象	2
1.2.1	光子不感事象の原因	2
1.2.2	KOTO 実験における光子不感事象の影響	4
1.3	光子不感率の測定に関する先行研究の結果	5
1.4	本研究の目的	5
第 2 章	光子不感率の測定原理	6
2.1	先行研究における測定原理	6
2.1.1	中性子の検出	6
2.1.2	標識化光子	7
2.2	概念設計	8
2.3	目的達成のための要求	8
第 3 章	測定手法の設計	10
3.1	実験装置の全体図	10
3.2	標識化光子ビーム	10
3.2.1	光子の標識化	11
3.2.2	標識化光子のエネルギーと標識化信号の対応	11
3.2.3	標識化光子ビームのエネルギー分布	12
3.2.4	標識化光子のエネルギー分布の測定手法	12
3.2.5	標識化光子ビームの中心位置の測定手法	14
3.2.6	標識化光子ビームの取り出し	15
3.3	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器	15
3.3.1	検出器の基本情報	15
3.3.2	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器から飛び出す粒子の位置分布	15
3.4	液体シンチレータ	16
3.5	データ収集システム	18
3.5.1	ADC	18
3.5.2	データ収集システムの設計	20

第 4 章	光核反応による光子不感率の測定のためのデータ取得	21
4.1	ELPH の標識化光子ビームラインの概要	21
4.2	各測定の設定アップ	21
4.2.1	ビームの中心位置測定	21
4.2.2	CsI のエネルギー較正	21
4.2.3	標識化光子ビームのエネルギー分布の測定	22
4.2.4	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のエネルギー較正	23
4.2.5	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の PMT のゲイン変動の有無の測定	24
4.2.6	液体シンチレータのエネルギー較正と中性子識別用データの取得	26
4.2.7	光核反応による光子不感率の測定	26
第 5 章	取得したデータの解析結果	28
5.1	取得したデータを用いた ADC の評価	28
5.1.1	オフライン解析でのコインシデンス	28
5.1.2	ADC の不感時間の評価	28
5.2	標識化光子ビーム	30
5.2.1	ビーム中心位置	30
5.2.2	CsI 結晶のエネルギー較正	30
5.2.3	低エネルギー光子の混入	31
5.3	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器	32
5.3.1	エネルギー較正	32
5.3.2	ビーム照射時の応答	33
5.3.3	レート耐性	34
5.3.4	標識化光子ビーム入射時に鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギー	36
5.4	液体シンチレータ	36
5.4.1	エネルギー較正	36
5.4.2	中性子識別能力の評価	39
5.4.3	標識化光子ビームランでの中性子イベント探索	41
第 6 章	考察	47
6.1	不感時間	47
6.2	今後の展望	47
第 7 章	結論	48
謝辞		49
付録		50
A	KOTO 実験の物理	50
B	Gwant4 コード内の光核反応モデルの違い	50
B.1	入射光子エネルギーに対するモデルの使い分け	50
B.2	CHIPS モデル	51

---

B.3 BERT モデル .....	52
引用文献	53

# 目次

1.1	KOTO 実験検出器の概念図。信号事象の例。 . . . . .	2
1.2	KOTO 実験検出器。3 種類のバレル検出器がある。 . . . .	2
1.3	左はバレル検出器の一つ、MB の断面図。右は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のプラスチックシンチレータ層に波長変換ファイバーが埋め込まれている様子 [1][2]。 . . . .	3
1.4	Main Barrel 検出器に入射する、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊の片方の $\pi^0$ から生じた光子のエネルギー分布。この図は、モンテカルロシミュレーションで見積もった結果である。 . . . .	3
1.5	KEK の塩見氏が行った、Geant4 モンテカルロシミュレーションにより見積もった、入射光子のエネルギーに対する光核反応による光子不感率の変化。バージョンにより結果が異なる。 . . . .	4
1.6	ES171 実験における光核反応による光子不感率の測定結果。横軸が入射光子のエネルギー、縦軸が光子不感率。測定対象の鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のエネルギー閾値別に 3 種類のプロットがある [3]。 . . . .	5
2.1	先行研究における、標識化光子ビームを用いた光核反応による光子不感率の測定方法の概念図。 . .	6
2.2	電子と原子核のクーロン場との相互作用のファインマン図。 . . . .	7
2.3	標識化光子ビームの生成原理。 . . . .	8
3.1	今回の測定のために設計した装置の全体図。図中赤は液体シンチレータ、灰と黒は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器、緑は標識化光子のビーム軸を指す。 . . . .	10
3.2	ELPH の標識化光子ビームラインの概観 [4]。 . . . .	11
3.3	ELPH の標識化光子ビームラインのタグカウンターの概観 [5]。図中 z 軸方向の点線は光子、実曲線は電子である。 . . . .	12
3.4	ELPH の標識化光子ビームラインにおける、入射した光子のエネルギー分布 (青) と、標識化光子のエネルギー分布 (赤)[5]。 . . . .	13
3.5	標識化光子のエネルギー分布を確認するために用いる、CsI 結晶の外観。銀色の部分に CsI 結晶があり、黒の部分は光電子増倍管である。 . . . .	13
3.6	CsI 結晶の概念図 [6]。 . . . .	13
3.7	CsI 結晶を積み重ねたセットアップ図。 . . . .	14
3.8	CsI 結晶に 1000MeV の光子を入射した時のエネルギー分布。モンテカルロシミュレーションを用いて得た結果である。 . . . .	14
3.9	小寺氏の設計した検出器の概念図。 . . . .	15
3.10	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の外観。 . . . .	16

3.11	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の大きさを变化させた時の、検出器側面方向に飛び出す 1 MeV 以上のエネルギーを持つ粒子の位置分布。上段が検出器の厚さ $3 X_0$ 、下段が検出器の厚さ $10 X_0$ 。大きさは左列から順に $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 、 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 。緑が光子、青が電子、赤が中性子である。図中色のついた領域は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のある場所を示す。 . . . . .	17
3.12	液体シンチレータの外観。 . . . . .	17
3.13	液体シンチレータを 12 個設置した場合の、1 事象あたりの、中性子を検出した液体シンチレータの個数の分布。モンテカルロシミュレーションで見積もった。 . . . . .	18
3.14	液体シンチレータが 8 台の時の実験装置全体図。図中赤 (実線) は液体シンチレータ、灰と黒は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器、緑は標識化光子のビーム軸を指す。図中青 (点線) は 12 台の使用を予定していた時に配置してあった液体シンチレータ。 . . . . .	19
3.15	液体シンチレータを 8 個設置した場合の、1 事象あたりの、中性子を検出した液体シンチレータの個数の分布。モンテカルロシミュレーションで見積もった。 . . . . .	19
4.1	ELPH 標識化光子ビームライン測定室の俯瞰写真。図中ピンクの領域が今回の測定で実験装置を配置した場所である。 . . . . .	22
4.2	CsI 単結晶のエネルギー較正のためのデータ取得の概念図。 . . . . .	22
4.3	CsI4 結晶をビーム軸上に設置した写真。 . . . . .	23
4.4	標識化光子ビームのエネルギー分布測定のためのデータ収集システムダイアグラム。 . . . . .	24
4.5	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の宇宙線のデータ取得の概念図。 . . . . .	24
4.6	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の宇宙線のデータの測定の様子。 . . . . .	25
4.7	LED による入射光子レート耐性試験のセットアップ。 . . . . .	25
4.8	8 台の液体シンチレータを設置した様子。 . . . . .	26
4.9	光核反応による光子不感率の測定のデータ収集システムダイアグラム。 . . . . .	27
5.1	Tag と鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器信号の、TimeStamp による時間差の分布。 . . . . .	29
5.2	ビーム位置測定用検出器のヒットマップ。座標はビーム進行方向を Z 軸、鉛直方向を Y 軸とした右手系である。原点はレーザー墨出して求めたビーム中心位置である。 . . . . .	31
5.3	CsI1 結晶をビームに当てた際の出力波形。1.0 GeV 標識化光子ビームでの結果である。図中色付き領域は、積分範囲を表す。 . . . . .	31
5.4	CsI 結晶を一つずつ標識化光子ビームに当てた時の、CsI 結晶に落としたエネルギー分布。それぞれの図において、横軸は波形積分値、縦軸は事象数である。(a)(b)(c)(d) は全て 1.0 GeV 標識化光子ビームでの結果である。 . . . . .	32
5.5	4 結晶を用いた測定の結果。青が取得データ、緑がモンテカルロシミュレーションの結果である。1.0 GeV 標識化光子ビームでの結果である。 . . . . .	33
5.6	0.8 GeV 標識化光子ビームのエネルギー分布。青が取得データ、赤がモンテカルロシミュレーションの結果である。 . . . . .	33
5.7	宇宙線を検出した時の取得波形の例。色つきの領域は積分範囲である。 . . . . .	34
5.8	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギー分布。(a) は取得データの結果。(b) はモンテカルロシミュレーションの結果。 . . . . .	34

5.9	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における、LED を ON/OFF にした時の波形データ。トリガーは LED を光らせるためのファンクションジェネレータの信号である。(a) は LED を OFF にした時の取得波形。(b) は LED を ON にした時の取得波形。 . . . . .	35
5.10	ADC の Tag チャンネルの取得データにおける、Tag 波形の波高のピーク値の TimeStamp 分布。図中赤色の領域を on-spill、青色の領域を off-spill とした。 . . . . .	35
5.11	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における、取得波形の波高分布。図中緑が on-spill、青が offspill の事象である。 . . . . .	36
5.12	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における、0.8 GeV 標識化光子ビームを入射したときの取得波形。図中色付きの領域は積分範囲を表す。 . . . . .	37
5.13	0.8 GeV 標識化光子を入射した時の、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギー分布。(a) は取得データの結果である。図中赤は 100 kHz、青は 1 MHz 入射光子フラックスのデータである。(b) はモンテカルロシミュレーションより見積もった結果である。 . . . . .	37
5.14	ガンマ線を検出した時の取得波形の例。色つきの領域は積分範囲である。 . . . . .	38
5.15	液体シンチレータの取得波形の、積分値の分布。左図が $^{137}\text{Cs}$ 、右図が $^{22}\text{Na}$ である。図中矢印は各線源のコンプトン端を示す。 $^{137}\text{Cs}$ の 8000 ADC Count あたりにあるピークは、環境放射線 $^{40}\text{K}$ のコンプトン端である。 . . . . .	38
5.16	観測したコンプトン端の位置の決め方の概念図。 . . . . .	39
5.17	ガンマ線源によるコンプトン端を用いたエネルギー較正の結果。(a) は液体シンチレータ 0 番の結果、(b) は 1 番の結果である。図中の緑矢印は $^{137}\text{Cs}$ 、赤と青矢印は $^{22}\text{Na}$ のコンプトン端の位置のプロットである。 . . . . .	39
5.18	液体シンチレータにおける、光子と中性子の出力波形の違いの概念図。図中赤が中性子、青が光子である。 . . . . .	40
5.19	液体シンチレータにおける、波形の違いによる中性子の識別方法。 . . . . .	41
5.20	中性子識別能力の評価方法。(a)(b)(c) の順に解析を進める。(a) は横軸 $Q_L$ 、縦軸 $(Q_L - Q_S)$ の二次元プロットである。(b) は横軸 $Q_L$ 、縦軸 $(Q_L - Q_S)/Q_L$ の二次元プロットである。(c) は、(b) を $(Q_L - Q_S)/Q_L$ 方向に射影した結果である。 . . . . .	42
5.21	$Q_S$ の積分範囲の変えた時の、 $S$ の変化。誤差は小さすぎて図では見えない。 . . . . .	43
5.22	$Q_L$ の積分範囲の変えた時の、 $S$ の変化。誤差は小さすぎて図では見えない。 . . . . .	43
5.23	$Q_L$ を確定した後、もう一度 $Q_S$ の積分範囲の変えた時の、 $S$ の変化。誤差は小さすぎて図では見えない。 . . . . .	44
5.24	8 台の液体シンチレータそれぞれにおける、光核反応による光子不感率測定用データの $Q_L$ と $(Q_L - Q_S)$ の分布。(a) が入射光子フラックス 1 MHz、(b) が 100 kHz の場合である。 . . . . .	45
5.25	8 台の液体シンチレータそれぞれにおける、光核反応による光子不感率測定用データの $(Q_L - Q_S)/Q_L$ の射影。右上の数字は液体シンチレータの番号を表す。図中赤線は光子と中性子の境界線を表す。(a) が入射光子フラックス 1 MHz、(b) が 100 kHz の場合である。 . . . . .	45
5.26	液体シンチレータの番号と、データ取得時の設置位置の関係。座標はビーム進行方向を Z 軸とした時の右手系。図中黒枠の数字はそれぞれの検出器中心間の距離である。赤枠の数字は液体シンチレータの番号である。奇数番号が上流側、偶数番号が下流側に設置されている。 . . . . .	46
A.1	$\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のファインマン図。 . . . . .	51
A.2	$K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のファインマン図。 . . . . .	51
A.3	CKM 行列。 . . . . .	52



# 表目次

3.1	ELPH、タグカウンターの番号と標識化光子のエネルギーの対応。ELPH の時安氏からの情報である。 . . . . .	11
3.2	使用した液体シンチレータの情報。 . . . . .	17
4.1	CsI のエネルギー較正のために取得したデータの情報。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。 . . . . .	23
4.2	標識化光子ビームのエネルギー分布の測定のために取得したデータの情報。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。 . . . . .	23
4.3	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の PMT のゲイン変動の有無の測定のために取得したデータの情報。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。 . . . . .	25
4.4	光核反応による光子不感率の測定のために取得したデータの情報。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。 . . . . .	27
5.1	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の 10 倍信号を取得した事象数と、さらにその時 1 倍信号を取得した事象数、および 1 倍信号取得数の 10 倍信号事象数に対する割合。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで評価した。 . . . . .	29
5.2	各チャンネルの ADC 不感率。表中 Pb/sci は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器を表す。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで評価した。表中の、スケーラーの値は目安である。 . . . . .	30
5.3	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の、スケーラーで求めた単位時間あたりの事象数。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで評価した。 . . . . .	35
5.4	液体シンチレータのエネルギー較正結果。パラメータ a、b は、フィットした直線の式 $y[\text{ADCCount}] = a \cdot x[\text{MeV}] + b$ における傾き a と切片 b である。 . . . . .	40
5.5	液体シンチレータ 8 台それぞれの、最も中性子が分かれている $Q_S$ 、 $Q_L$ の積分範囲とその時の $S$ 。 . . . . .	44
5.6	液体シンチレータ 8 台それぞれの、取得事象数と中性子事象数。中性子を検出した液体シンチレータについては、光子が混入する個数を見積もった。 . . . . .	46



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 KOTO 実験

本節では、KOTO 実験の概要と、本研究で焦点を当てる Barrel 検出器を説明する。

#### 1.1.1 KOTO 実験の概要

J-PARC KOTO 実験は、中性 K 中間子の稀崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索している。この崩壊の特徴は二つある。標準理論で予測される崩壊分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  と小さいことと、理論的不確かさが 2% と小さいことである [7](詳細は A 節)。

標準理論で予測されている  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊分岐比と、実験による測定値が異なる場合、そこには標準理論に含まれない寄与が存在する。この標準理論を超える物理を新物理と呼ぶ。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  は、理論的不確かさが小さいことで、新物理の寄与を探しやすい。したがって、この崩壊は標準理論を越える新物理に感度がある。

図 1.1 に、KOTO 実験の検出器と信号事象の検出の様子を示す。図中左より KOTO 検出器に入射した  $K_L$  が、崩壊領域で  $\pi^0 \nu \bar{\nu}$  に崩壊する。 $\pi^0$  はすぐに 2 つの光子 ( $2\gamma$ ) に崩壊する。ニュートリノ ( $\nu \bar{\nu}$ ) は検出器と相互作用をほとんど起こさないため、2 つの光子を電磁カロリメータで検出し、信号事象を探す。

稀な事象の探索であるため、背景事象を削減することが重要である。背景事象とは、信号事象と区別のつかない事象のことである。背景事象の多くは、電子や 3 つ以上の光子など、2 つの光子以外の観測可能な粒子が終状態にあるため、これらの粒子を捉える必要がある。そのため、KOTO 実験の検出器は、2 つの光子を検出するための電磁カロリメータ (図 1.1 中緑) と、それ以外は全て、信号を検出した際にその事象を棄却する検出器 (veto 検出器) である。

#### 1.1.2 バレル検出器

KOTO 実験検出器の veto 検出器の一つにバレル検出器がある。バレル検出器は円筒型の光子検出器である。図 1.2 に示すように、Front Barrel (FB)[1]、Main Barrel (MB)[1]、Inner Barrel (IB)[2] と呼ばれる検出器がある。MB の構造を図 1.3 に示す。これらの検出器は鉛とプラスチックシンチレータの積層構造を持つ検出器 (以下鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器) である。プラスチックシンチレータには波長変換ファイバーが埋め込まれている。波長変換ファイバーがシンチレーション光を吸収し、シンチレーション光とは異なる波長の光を発する。その光がファイバー内を伝播し、光電子増倍管 (以降 PMT と呼ぶ) で読み出される。

この検出器で削減する背景事象の一つに、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  事象がある。この事象で生じた 4 つの光子のうち、2 つを電磁カロリメータで検出し、残り 2 つを検出し損なう場合、背景事象となりうる。一方で、残り 2 つのうち 1 つ以上の光子をバレル検出器で検出した場合、信号事象と区別がつくため背景事象にならない。MB に入射す

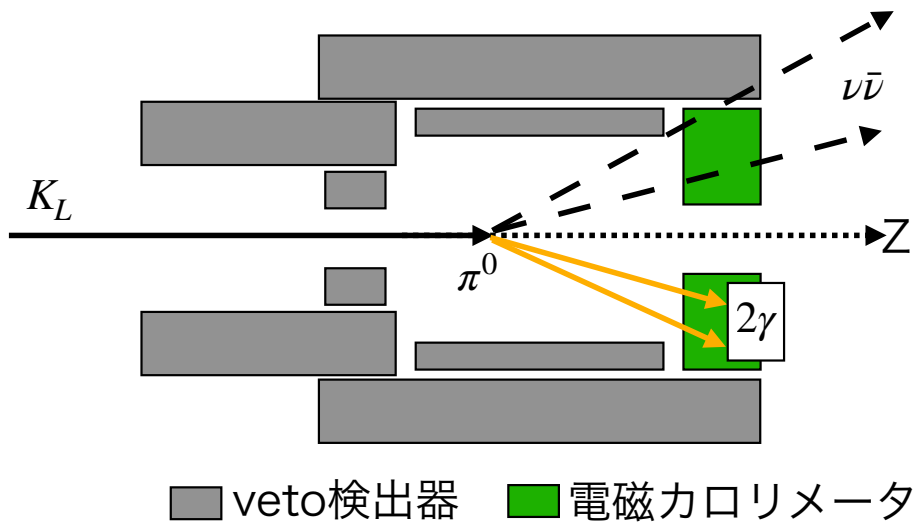


図 1.1 KOTO 実験検出器の概念図。信号事象を検出した例。

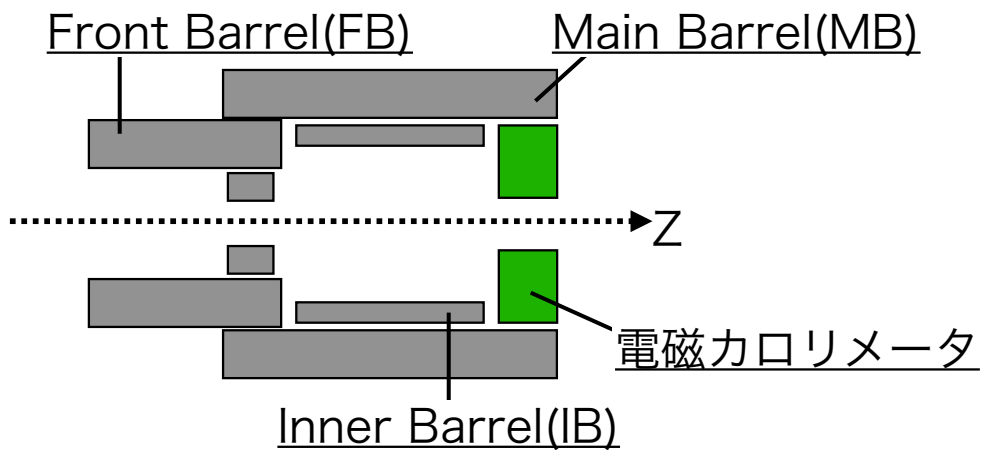


図 1.2 KOTO 実験検出器。3 種類のパレル検出器がある。

る、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  崩壊の  $\pi^0$  から生じる光子のエネルギー分布を図 1.4 に示す。入射する光子のエネルギー範囲は数 MeV ~ 1000 MeV である。

## 1.2 KOTO 実験における光子不感事象

本節では、光子不感事象の原因、KOTO 実験における光子不感事象の影響、先行研究での光子不感率の測定の概要を説明する。

### 1.2.1 光子不感事象の原因

光子不感事象とは光子が検出できない事象であり、その原因には以下の三種類がある。

- パンチスルー

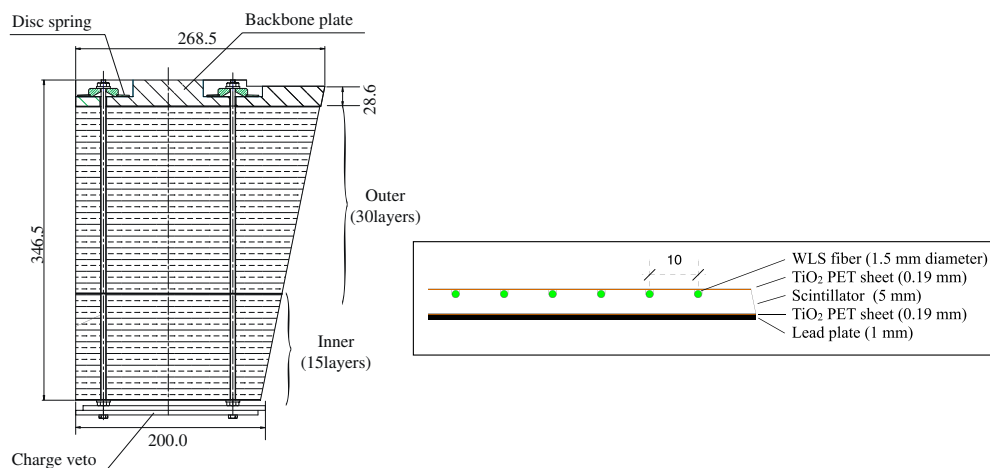


図 1.3 左はバレル検出器の一つ、MB の断面図。右は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のプラスチックシンチレータ層に波長変換ファイバーが埋め込まれている様子 [1][2]。

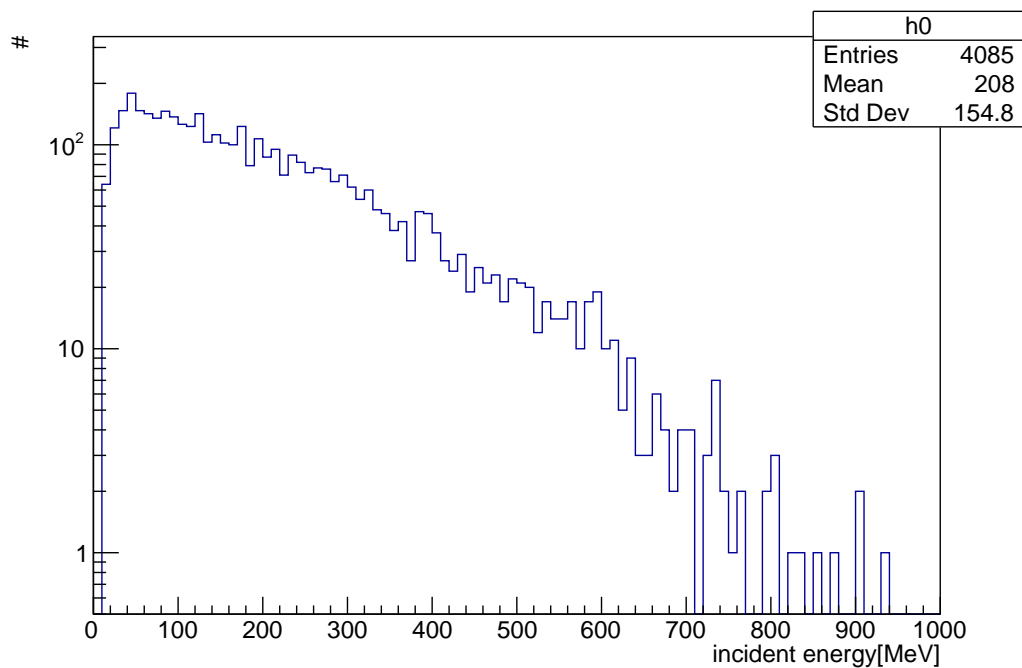


図 1.4 Main Barrel 検出器に入射する、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  崩壊の片方の  $\pi^0$  から生じた光子のエネルギー分布。この図は、モンテカルロシミュレーションで見積もった結果である。

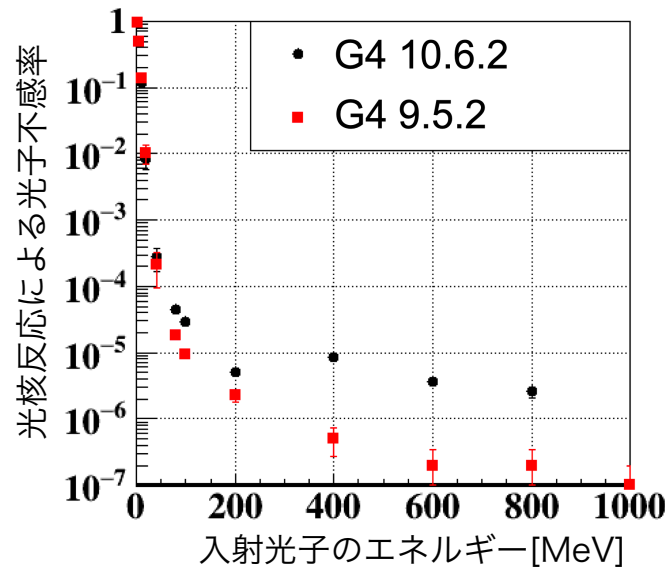


図 1.5 KEK の塩見氏が行った、Geant4 モンテカルロシミュレーションにより見積もった、入射光子のエネルギーに対する光核反応による光子不感率の変化。バージョンにより結果が異なる。

入射した光子が検出器と相互作用をせずにそのまま突き抜けてしまう事象である。検出器にエネルギーを落とさないため不感事象となる。

- サンプリング効果

バレル検出器の鉛層でエネルギーの大半を落とし、プラスチックシンチレータに落とすエネルギーが小さくなる現象である。落とすエネルギーが閾値以下の場合、不感事象となる。

- 光核反応

入射した光子が検出器を構成する原子の核子に吸収され、二次粒子を放出する反応のことである。入射光子のエネルギーにより、支配的な反応が異なる。光子のエネルギーが  $\pi$  中間子生成閾値 ( $\sim 140$  MeV) 以下では、励起した原子核が中性子や陽子、 $\alpha$  粒子等を放出する反応が支配的である。この時、クーロン障壁により荷電粒子の放出は抑えられるので、主に中性子が放出される。一方で、光子のエネルギーが閾値以上では  $\pi$  中間子生成が支配的である。 $\pi$  中間子が原子核に捕獲されると、核破砕反応が起こり、核子や  $\alpha$  粒子を生成する [8][9]。

生じた粒子のうち、中性子はバレル検出器では検出しにくいいため不感事象となりうる。

パンチスルーとサンプリング効果は電磁相互作用なのでよく理解されている。一方、光核反応は原子核の励起状態や飛び出す二次粒子のシミュレーションでの再現が難しい。本研究は、光核反応に焦点を当てる。

### 1.2.2 KOTO 実験における光子不感事象の影響

KOTO 実験では、Geant4 シミュレーションを用いて光子不感率を評価した。図 1.5 に示すように、シミュレーションのバージョンにより、光核反応による光子不感率の結果が異なる。この差は、Geant4 コード内の光核反応モデルを Chiral Invariant Phase Space (CHIPS) モデルから Bertini-Cascade (BERT) モデルに変更したためである (CHIPS と BERT の違いの詳細は B 節)。どちらのモデルが正しいのかは現在わかっていない。

光子不感率の結果が異なるため、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  背景事象数の系統誤差が大きい。私は、この問題を解決するために、光核反応による光子不感率の実験による測定を目指した。

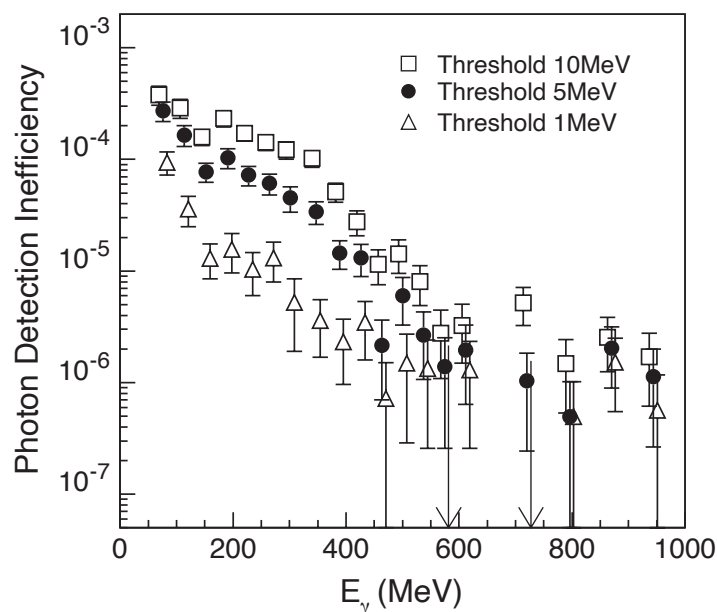


図 1.6 ES171 実験における光核反応による光子不感率の測定結果。横軸が入射光子のエネルギー、縦軸が光子不感率。測定対象の鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のエネルギー閾値別に 3 種類のプロットがある [3]。

### 1.3 光子不感率の測定に関する先行研究の結果

先行研究で得られた結果を述べる。ES171 実験における光子不感率の測定結果 [3] を図 1.6 に示す。入射光子のエネルギー範囲 1000 MeV 未満を探索している。KOTO 実験のバレル検出器のエネルギー閾値 1 MeV の結果は誤差が大きく、シミュレーションの差について議論できない。

坂下氏の修士論文 [10] では、入射光子のエネルギー範囲 1.5 ~ 2.4 GeV、エネルギー閾値 10 MeV において、光核反応による光子不感率  $(8.3 \pm 1.7_{(stat.)}^{+13.5}_{-1.2(sys.)}) \times 10^{-7}$  を測定した。

### 1.4 本研究の目的

先行研究を踏まえ、本研究は入射光子エネルギー 1000 MeV 未満の領域を探索する。本研究では、光子ビームを用い、光核反応による光子不感率の実測を目指した。ビームテストを行ったが、光子不感率の実測には至らなかった。ビームテストで取得したデータを用いて、光子不感率測定のための設計を評価した。用いたビームの性質、使用した検出器の性能、データ収集システムのそれぞれについて知見を得た。本論文では、光核反応による光子不感率の測定方法の設計と、ビームテストで得た知見について報告する。

## 第2章

# 光子不感率の測定原理

本章では、光子不感率の測定原理を説明する。

### 2.1 先行研究における測定原理

先行研究における、光核反応による光子不感率の測定方法を以下に述べる。図 2.1 のように、光子不感率を測定する検出器の周囲に中性子検出器を置く。光子検出器に光子ビームを当て、光核反応により生じた中性子を中性子検出器で検出する (検出原理は 2.1.1 節で述べる)。

中性子が検出された時の光子検出器に落としたエネルギーが閾値以下ならば、光核反応による光子不感事象である。標識化光子 (詳細は 2.1.2 節) を用い、光子が入射した事象と光子のエネルギーを得る。

#### 2.1.1 中性子の検出

本節では、中性子検出器における中性子の検出原理と、中性子を検出する理由を述べる。

中性子の検出原理を述べる。検出器に入射した中性子が検出器中の原子核と弾性散乱し、反跳陽子が生じる。反跳陽子が物質中を通過すると検出器中の電子を励起する。励起した電子が基底状態に戻る際にシンチレーション光

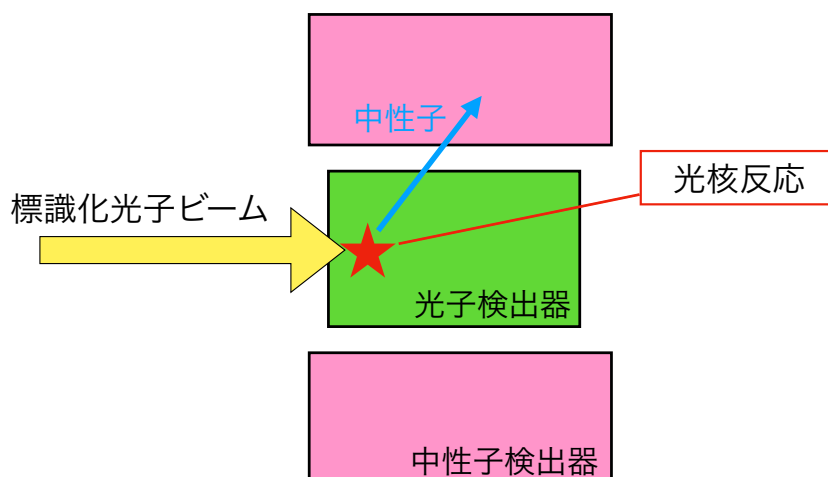


図 2.1 先行研究における、標識化光子ビームを用いた光核反応による光子不感率の測定方法の概念図。



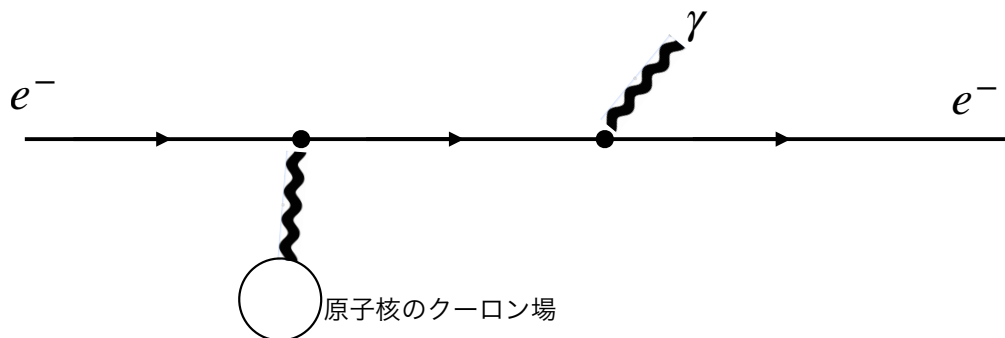


図 2.2 電子と原子核のクーロン場との相互作用のファインマン図。

を生じる。このシンチレーション光を PMT で検出することで中性子を検出する。

中性子を検出する理由を述べる。1.2 節で述べたような光核反応を想定した時、光子検出器から飛び出すのは中性子、陽子、 $\alpha$  線、光子 ( $\pi$  中間子由来) である。このうち、光子は光子検出器にエネルギーを落とすため不感事象になりにくいと考えられる。また、陽子や  $\alpha$  粒子については、鉛中では容易に止まるため光子検出器から飛び出してこず、プラスチックシンチレータ中ではエネルギーを落とすため不感事象になりにくいと考えられる。以上の理由から、光核反応による光子不感事象を探索する際、中性子を検出する。

### 2.1.2 標識化光子

本研究の測定に用いる、標識化光子ビームを説明する。図 2.3 に光子の標識化原理を示す。電子ビームを標的に当てた時の制動放射によって生じた光子ビームを用いる。この時の電子と原子核のクーロン場との相互作用を図 2.2 に示す。運動量保存則は式 2.1 である。

$$\vec{p}_1 + \vec{Q} = \vec{p}_2 + \vec{q} \quad (2.1)$$

$\vec{p}_1, \vec{p}_2$  はそれぞれ制動放射前、後の電子の運動量である。 $\vec{Q}$  は原子核との相互作用により電子に与えられる運動量である (この値は無視できるほど小さい)。 $\vec{q}$  は制動放射によって生じた光子の運動量である。

制動放射後の電子は、磁石によって曲げられ、タグカウンターで検出される。運動量によって曲がり具合が異なるため、電子を検出した位置により電子の運動量を求める。式 2.2 を用いて、電子の運動量から光子のエネルギーを計算する。

$$E_\gamma = E_{e^-}^{\text{in}} - E_{e^-}^{\text{tag}} \quad (2.2)$$

$E_\gamma$  は制動放射によって生じた光子のエネルギーである。 $E_{e^-}^{\text{in}}$  は標的に当てる前の電子のエネルギーである。 $E_{e^-}^{\text{tag}}$  は制動放射後の電子のエネルギーである。タグカウンターの事象と光子を対応させて、光子ビームを標識化する。また、この時電子を検出したタグカウンターからの信号を標識化信号という。

標識化の効率は 100 % ではなく、標識化信号がある時必ずしも標識化光子が入射しているとは限らない。

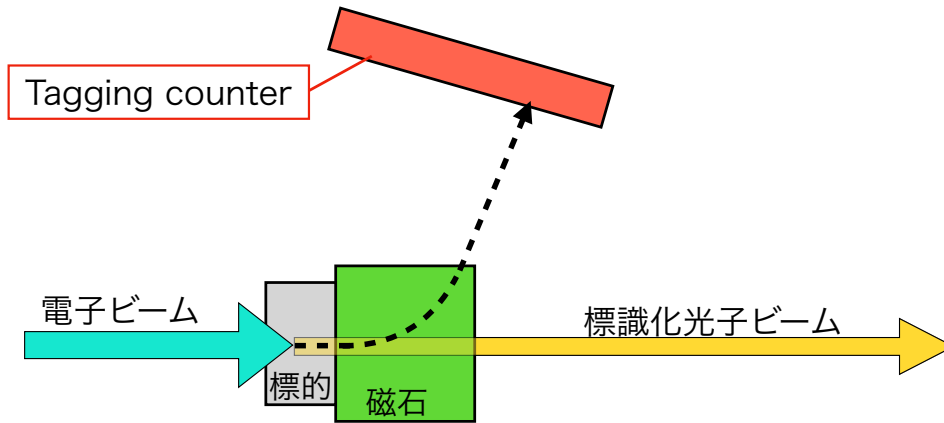


図 2.3 標識化光子ビームの生成原理。

## 2.2 概念設計

本研究で測定に用いる検出器の種類を述べる。光子検出器に、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器を用いる。中性子検出器に、液体シンチレータを用いる。各検出器の数や大きさ等の詳細は 3 章で述べる。

光核反応による光子不感率  $\eta$  を式 2.3 により求める。

$$\eta = \frac{N_{\text{inefficient}}^{\text{raw}}}{(1 - P_0)N_{\text{incident}}} \quad (2.3)$$

$N_{\text{incident}}$  は光子検出器に入射した標識化光子の個数である。

$N_{\text{inefficient}}^{\text{raw}}$  は光核反応による光子不感事象数である。これは、中性子を検出した中性子検出器が一台以上ある時、光子検出器に落としたエネルギーが閾値以下の事象である。

$P_0$  は中性子検出器の中性子検出効率の補正值である。光核反応により中性子が生じた時、中性子検出器自身の検出効率により中性子が検出できない場合や、中性子検出器がない領域に中性子が飛び出す場合がある。この影響を補正するため、1 事象あたりの中性子を検出した検出器の個数の分布をポアソン分布でフィットし、中性子を 0 個検出する確率を求める。この確率が  $P_0$  である。

## 2.3 目的達成のための要求

標識化光子ビームのエネルギーへの要求を述べる。KOTO 実験では、MB に入射する光子のエネルギーは数 MeV ~ 1000 MeV である。また、1.2.2 節より、入射光子エネルギーは 400 ~ 1000 MeV を扱いたい。したがって、標識化光子ビームのエネルギーとして 400 ~ 1000 MeV の範囲を要求する。

また、標識化光子を用いて入射光子のエネルギーの情報を得るが、その情報が正確でない可能性がある。そのため、標識化光子のエネルギー分布を知る必要がある。光子検出器に落としたエネルギーのデータを取得するため、標識化信号と光子検出器によるエネルギー測定が要る。

式 2.3 中の各パラメータの求め方と要求を述べる。 $N_{\text{incident}}$  は、光子検出器にできるだけ低い閾値を課し、この

信号をトリガーとしてデータを取得した際の事象数から求める。この時、1.2.1 節に述べたパンチスルー、サンプリング効果、光核反応により課した閾値以下の事象は取り逃す。そのため、取り逃した事象数を補正する。光核反応による事象数は、シミュレーションで予測される事象数が小さいので無視する。パンチスルー、サンプリング効果はモンテカルロシミュレーションで補正する。

$P_0$  には、1 事象ごとの各中性子検出器の中性子ヒット情報が要る。中性子検出器に入射する粒子は中性子、光子、荷電粒子と様々なため、中性子識別能力を評価する。波形の違いで中性子を識別するため (5.4.2 節)、中性子検出器の生波形データが要る<sup>\*1</sup>。

$N_{\text{inefficient}}^{\text{raw}}$  に必要な情報は、中性子検出器の中性子ヒット情報と、光子検出器に落としたエネルギーの情報である。

取得する標識化光子数への要求を述べる。シミュレーションで予想される光核反応の光子不感率から、例えば 800 MeV 標識化光子を  $10^7$  個取得した時、図 1.5 の黒プロットの 800 MeV の光子不感率  $2 \times 10^{-6}$  から、光子不感の事象数はおおよそ 20 である。この時の統計精度は約 22 % であることから、バージョンによる結果の差 ( $2 \times 10^{-7}$  と  $2 \times 10^{-6}$ ) について有意な結論を出せる。したがって、ビームテストで取得する標識化光子数は  $10^7$  個を目標とする。

---

\*1 2 つの ADC でそれぞれゲートを変えてデータを取得する方法もある [3]。

## 第 3 章

# 測定手法の設計

本章では、今回のビームテストで用いた測定手法の設計を述べる。

### 3.1 実験装置の全体図

本研究のために設計した実験装置の全体図を図 3.1 に示す。標識化光子ビームライン上に置いた鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の周囲を、12 台の液体シンチレータで囲んでいる。3.2 節で標識化光子ビーム、3.3 節で鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器、3.4 節で液体シンチレータ、3.5 節でデータ収集システムを説明する。

### 3.2 標識化光子ビーム

入射光子のエネルギーの要求から、東北大学電子光物理学研究センター（以下 ELPH）の標識化光子ビームラインを選んだ。本節では、ELPH の標識化光子の特徴を述べる。

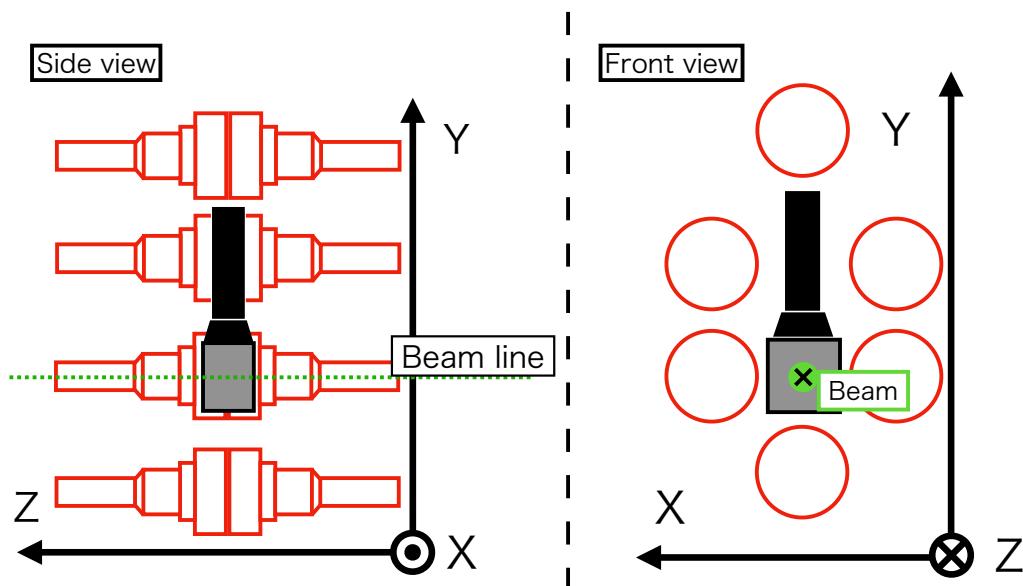


図 3.1 今回の測定のために設計した装置の全体図。図中赤は液体シンチレータ、灰と黒は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器、緑は標識化光子のビーム軸を指す。

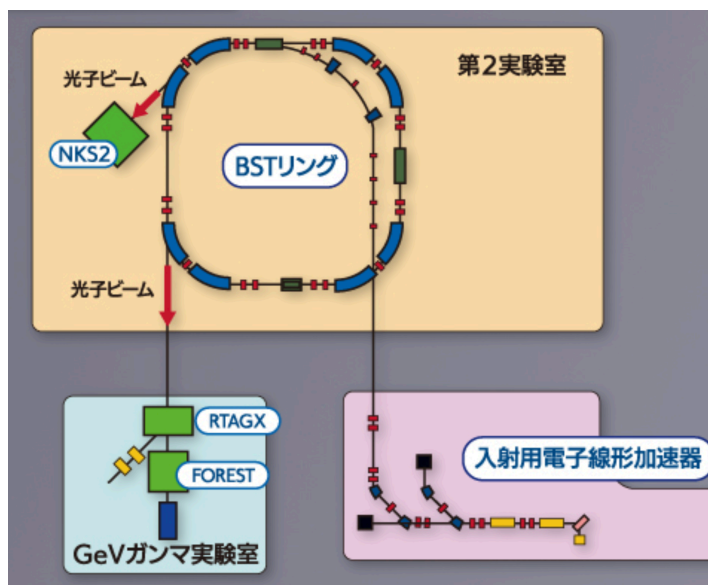


図 3.2 ELPH の標識化光子ビームラインの概観 [4]。

表 3.1 ELPH、タグカウンターの番号と標識化光子のエネルギーの対応。ELPH の時安氏からの情報である。

タグカウンターの番号	標識化光子のエネルギー [MeV]
1	1218
89	998
104	904
116	817

### 3.2.1 光子の標識化

ELPH の標識化光子ビームラインの概観を図 3.2 に示す。電子ビームライン中の電子を標的に当てたときの制動放射によって生じた光子ビームを測定室 (図中 GeV ガンマ実験室) で利用する。測定室上流部には、大きさ 20 mmφ のコリメータがある。

タグカウンターの概観を図 3.3 に示す。カウンターは全 116 個あり、約 800 ~ 1200 MeV のエネルギー範囲の光子を標識化する。制動放射後の電子をタグカウンターで検出した時の信号を標識化信号として取得した。

また、標的に電子ビームが当たっている時にアクティブになる信号 (以下ラジエータ信号) を取得した。オフライン解析でラジエータ信号を課すことで、光子ビームが来ている時間帯の事象を選ぶ。

### 3.2.2 標識化光子のエネルギーと標識化信号の対応

表 3.1 に、タグカウンターの番号と標識化光子のエネルギーの対応の一部を示す。今回のビームテストで用いたのは、800 MeV、900 MeV、1000 MeV の標識化光子 (表 3.1 中番号 116、104、89 に対応) である。

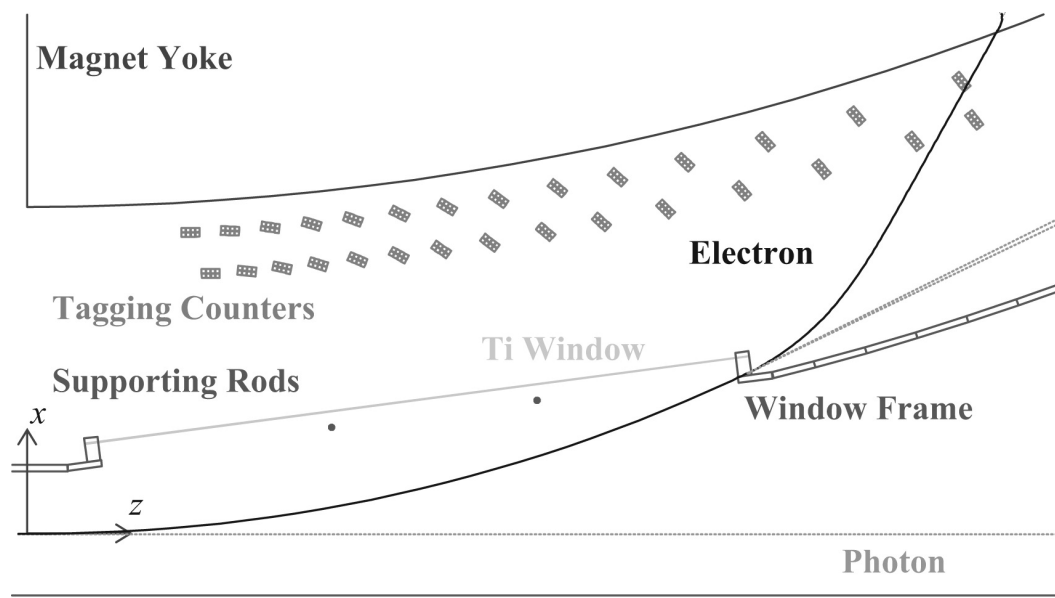


図 3.3 ELPH の標識化光子ビームラインのタグカウンターの概観 [5]。図中  $z$  軸方向の点線は光子、実曲線は電子である。

### 3.2.3 標識化光子ビームのエネルギー分布

ELPH の標識化光子ビーム中には、低エネルギーの光子が混入する事象がある [5]。図 3.4 に文献による全入射光子のエネルギー分布と、標識化光子のエネルギー分布を示す。800 ~ 1200 MeV の標識化光子の分布で、約 10 分の 1 の割合で 800 MeV 以下の光子が混じる。

この標識化光子中の低エネルギー光子の混入の割合と、光子不感率測定への影響を評価するため、ドーピングしていない CsI 結晶を用いて光子のエネルギーを実測する。

### 3.2.4 標識化光子のエネルギー分布の測定手法

今回用いた、ドーピングしていない CsI 結晶の外観を図 3.5 に示す (以降 CsI 結晶は全てドーピングしていないものである)。また、概念図をを図 3.5 に示す [6]。結晶の潮解を避けるために、乾燥剤とともに袋に入れて保管・運用した。この結晶は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) から借りたもので、大きさは  $7 \times 7 \times 30 \text{ cm}^3$  である。光検出器として光電子増倍管を使用している\*1。

測定では、図 3.7 のように、結晶を  $2 \times 2$  に積む。この設計で標識化光子ビームを入射させた際、CsI 結晶に落とすエネルギー分布をシミュレーションで確認した。

図 3.8 に、 $14 \times 14 \times 30 \text{ cm}^3$  の CsI 結晶 (実際に用いる結晶を  $2 \times 2$  に積んだものと同じ大きさ) に 1.0 GeV 光子を入射した時のシミュレーションの結果を示す。エネルギー分布が左側 (低エネルギー側) にテイルを引くのは、パンチスルー等により CsI に落とすエネルギーが小さい事象が含まれるためである。低エネルギー領域の事象数は 1% 未満であった。したがって、標識化光子ビームの低エネルギー成分を調べるのに適している。

\*1 CsI と PMT の間にライトガイドがあるが、これはこの CsI が以前使われていた E391a 実験において、PMT の磁気シールドを伸ばす目的で挿れている。

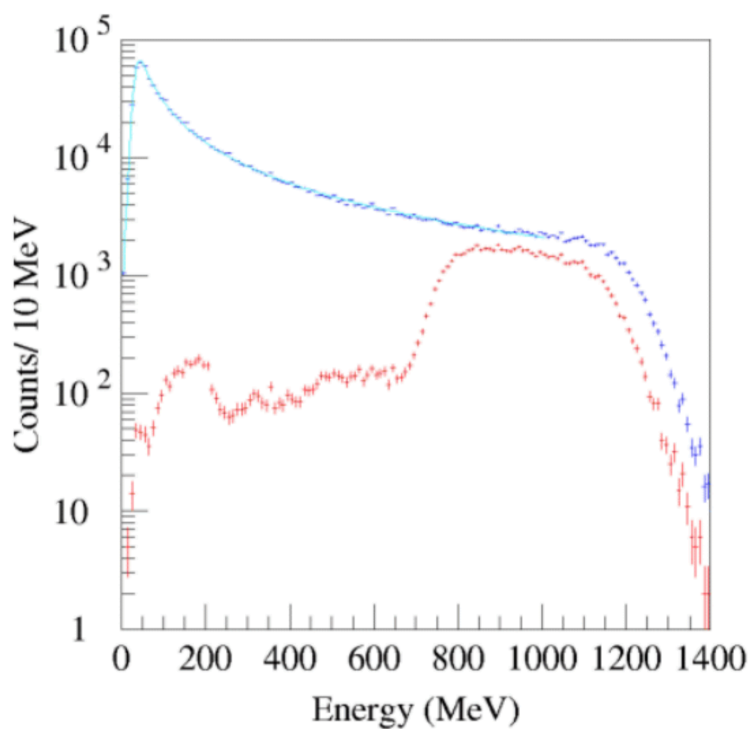


図 3.4 ELPH の標識化光子ビームラインにおける、入射した光子のエネルギー分布 (青) と、標識化光子のエネルギー分布 (赤)[5]。

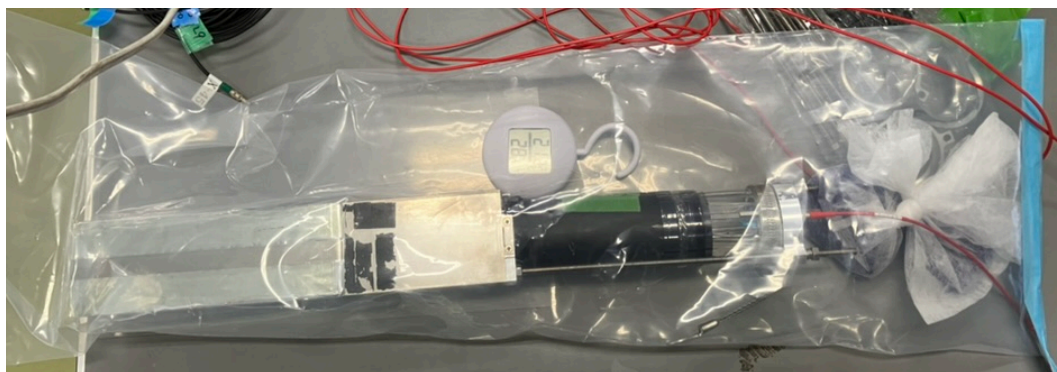


図 3.5 標識化光子のエネルギー分布を確認するために用いる、CsI 結晶の外観。銀色の部分に CsI 結晶があり、黒の部分は光電子増倍管である。

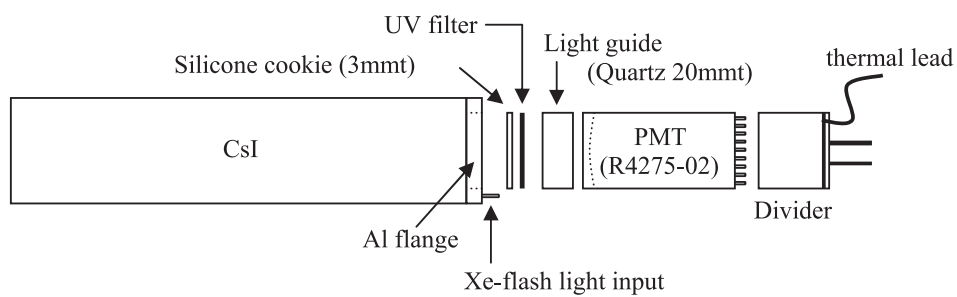


図 3.6 CsI 結晶の概念図 [6]。

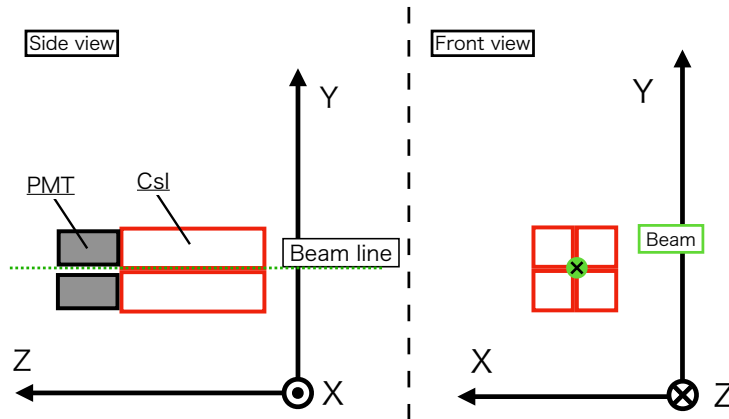


図 3.7 CsI 結晶を積み重ねたセットアップ図。

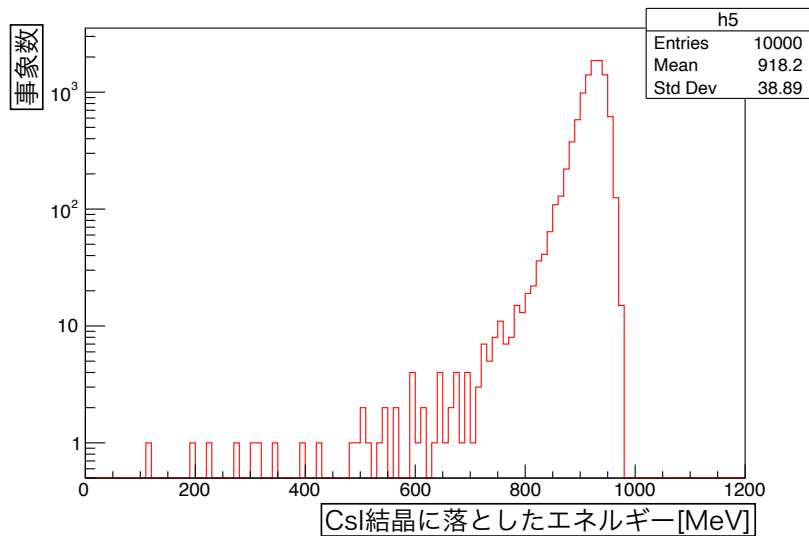


図 3.8 CsI 結晶に 1000MeV の光子を入射した時のエネルギー分布。モンテカルロシミュレーションを用いて得た結果である。

### 3.2.5 標識化光子ビームの中心位置の測定手法

ELPH の標識化光子ビームの中心位置の測定のため、小寺氏に光子の位置分布の測定を依頼した。概念図を図 3.9 に示す。使用した検出器は、鉄のコンバータとシンチレーションファイバーを並べて作った平面からなる。各ファイバーが、1 事象毎に信号を検出したかどうか、という情報を取得する。ビーム進行方向を z 軸とした右手系の座標において、ファイバーは x-y 平面上に面を作るように並ぶ。このファイバー面は、x 軸に平行に並ぶもの、y 軸に並行に並ぶものの 2 つがあり、前者で y 方向、後者で x 方向の位置情報を得る。それぞれの面の情報を合わせて、ビームの二次元位置情報を取得する。



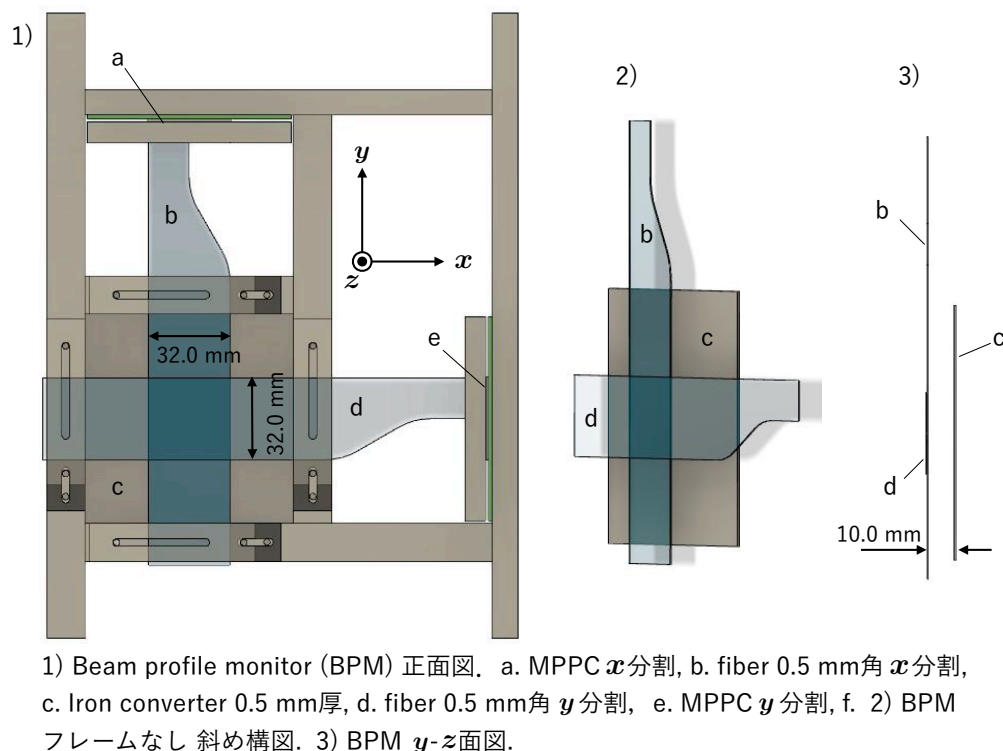


図 3.9 小寺氏の設計した検出器の概念図。

### 3.2.6 標識化光子ビームの取り出し

今回用いる ELPH の標識化光子ビームラインは、17 秒サイクルのうち 10 秒ビームを取り出す (on-spill)。以降、ビームが来ていない 7 秒を off-spill と呼ぶ。

## 3.3 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器

### 3.3.1 検出器の基本情報

光核反応による光子不感率の測定対象として、1 mm 厚の鉛と 4.4 mm 厚のプラスチックシンチレータが交互に 17 層重なった光子検出器を用意した。外観を図 3.10 に示す。ビーム軸方向の断面積は  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 、厚みは 96 mm ( $\sim 3 X_0$ ) ( $X_0$  は放射長) である。光子検出器の大きさや厚さについて、3.3.2 節で適した形状を予めシミュレーションで評価し、上述の既存の検出器を採用した。

### 3.3.2 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器から飛び出す粒子の位置分布

中性子検出器の配置を議論するため、光子を入射した際に光子検出器から飛び出す粒子の位置分布を調べた。シミュレーションの方法を述べる。入射光子のエネルギーは 800 MeV である。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のビーム軸方向の断面積は  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 、 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 、厚みは  $3 X_0$ 、 $10 X_0$  を調べた。それぞれについて、検出器側面から飛び出した粒子の位置分布を調べた。

図 3.11 にその結果を示す。図において、検出器はビーム軸上、厚さ  $3 X_0$  の検出器は 100 ~ 205 mm、厚さ  $10 X_0$

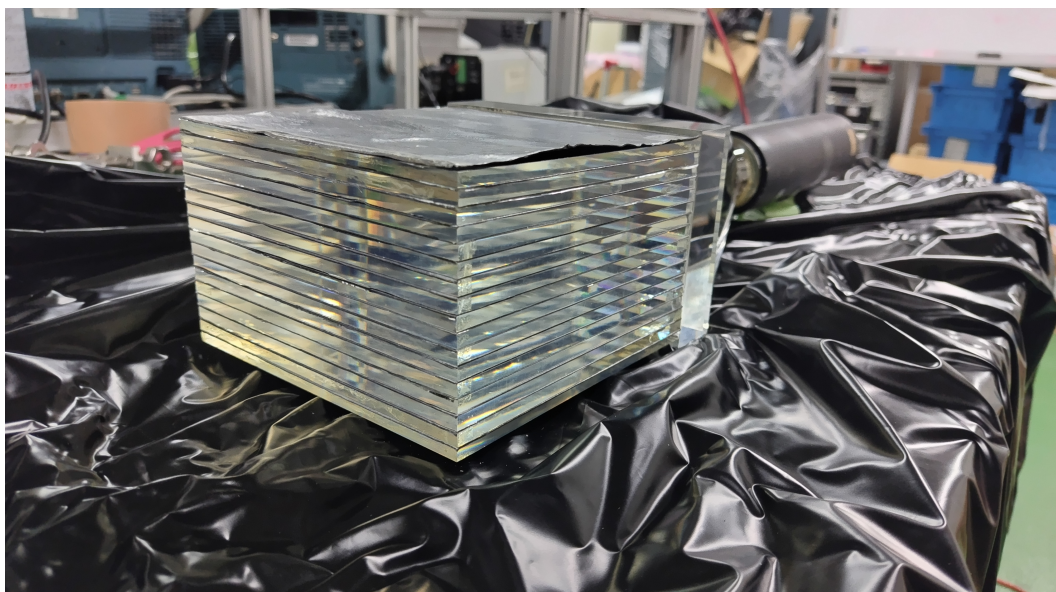


図 3.10 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の外観。

の検出器は 100 ~ 391 mm にある。検出器がある位置に対応する領域を、図中に色つき領域で示す。検出器の厚さについて、 $3 X_0$  の方が  $10 X_0$  より、領域内での光子、電子の飛び出す数の上限が小さい。入射する光子が多いと、中性子の事象選択の際光子が混ざりやすい。中性子検出器の中性子識別能力向上のため、中性子検出器に入射する光子は少ない方が良い。一方で、飛び出す中性子の個数は、 $3 X_0$  と  $10 X_0$  でほとんど変わらない。したがって、飛び出す光子が少ない  $3 X_0$  を選んだ。

次に、検出器の断面積について、中性子数の最大値は 100 ~ 300 個とほとんど差がないが、電子と光子は  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  と他 2 つで大きく異なる。 $15 \times 15 \text{ cm}^2$  と  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  は桁が変わるほどの差がないため、有限の数の液体シンチレータでより広い範囲をカバーできる  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  を選択した。

光子不感率の測定で興味があるのは、検出器に落とすエネルギーが小さい事象である。このため、今回の測定では、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の出力信号を二つに分け、一方はそのまま読み出し (1 倍信号)、もう一方は 10 倍に増幅して読み出す (10 倍信号)。

また、光核反応による光子不感率は  $10^{-5}$  と小さく、測定のために鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器への入射光子の事象数を稼ぐ必要がある。そのために標識化光子ビームの入射レートを上げたいが、光子検出器に用いられている PMT への入射光量が上がるとゲインが変化する。本研究で用いる 1 MHz 光子ビームフラックスに対する PMT のゲイン変動の有無を調べるため、LED を用いて調べられるよう設計した。

### 3.4 液体シンチレータ

ELPH の所有する液体シンチレータ (OKEN 社製) を使用した。外観を図 3.12 に示す。検出器の型番、大きさ、本研究で借りた数を表 3.2 に示す。設計の時点で、借用した 14 台のうち 2 台を予備とし、12 台を用いる予定であった。3.3.2 節の議論と、検出器側面から飛び出す粒子の個数分布がビーム軸垂直方向に一様であるという予想から、液体シンチレータを図 3.1 のように配置した。

この配置の時、中性子の検出事象数、液体シンチレータのヒット数分布をシミュレーションで見積もった。結果を図 3.13 に示す。中性子検出器のエネルギー閾値は 1 MeV とした。また、中性子を検出したとき、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギーに対し 10 MeV 未満を要求した。2.3 で述べた要求である、 $10^7$

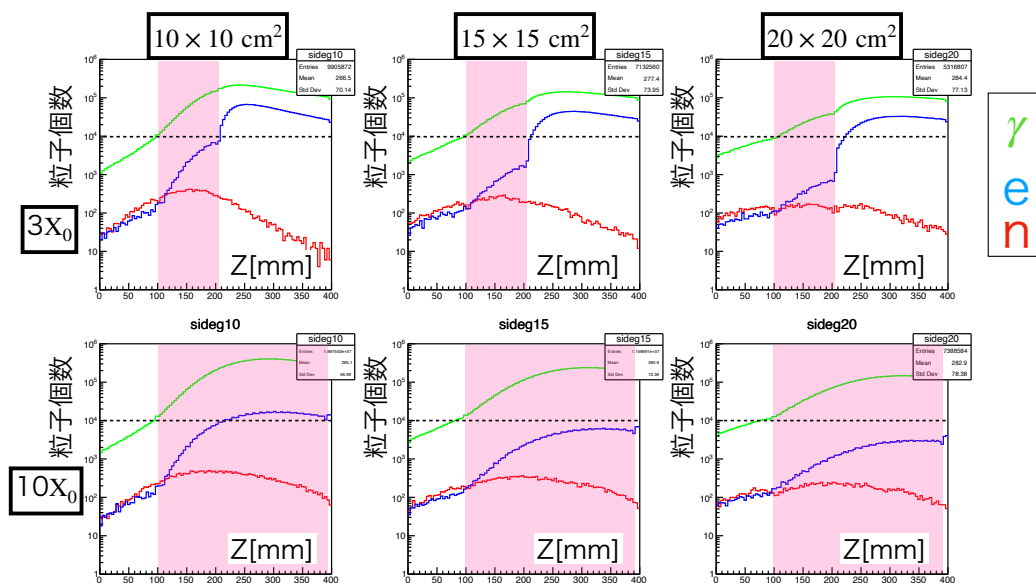


図 3.11 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の大きさを变化させた時の、検出器側面方向に飛び出す 1 MeV 以上のエネルギーを持つ粒子の位置分布。上段が検出器の厚さ  $3X_0$ 、下段が検出器の厚さ  $10X_0$ 。大きさは左列から順に  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 、 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 。緑が光子、青が電子、赤が中性子である。図中色のついた領域は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のある場所を示す。

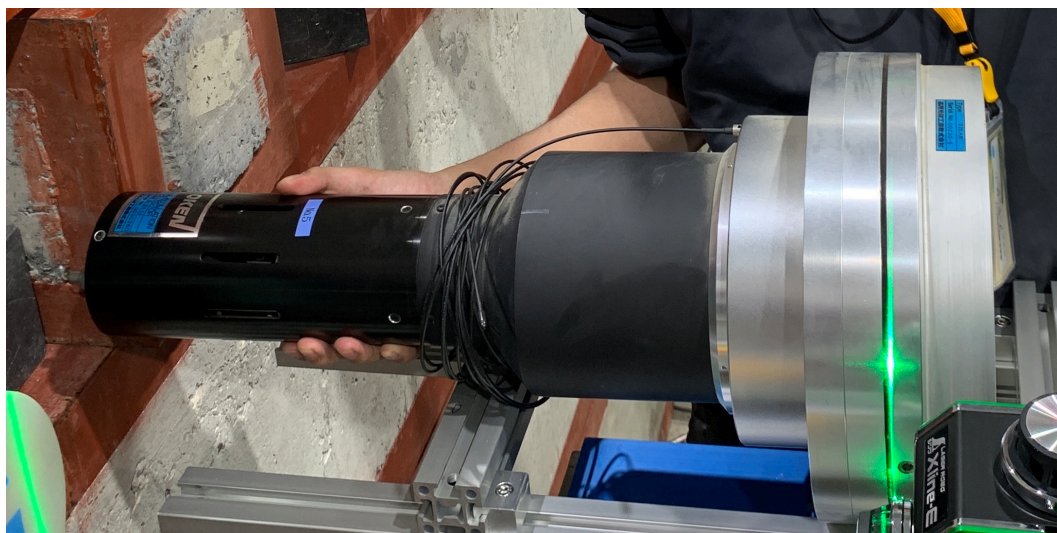


図 3.12 液体シンチレータの外観。

表 3.2 使用した液体シンチレータの情報。

液体シンチレータの型番	液体シンチレータの大きさ	PMT の型番
NE-213	直径 20.32 cm × 厚み 5 cm	EMI 9823KB

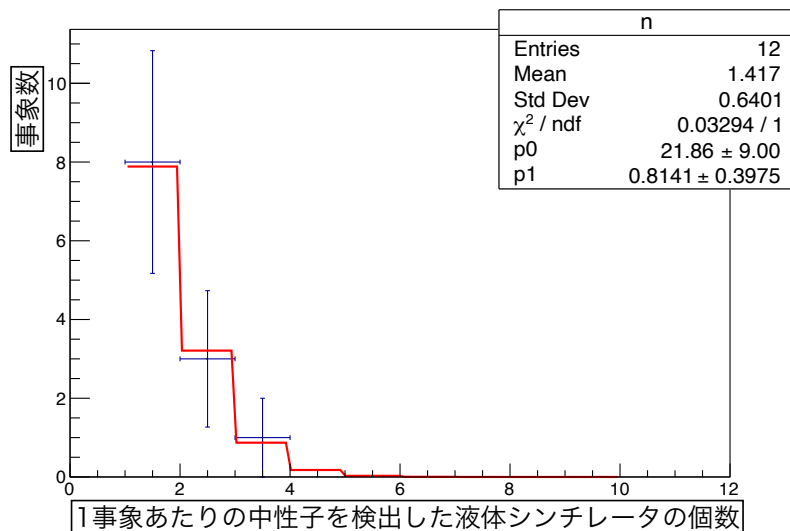


図 3.13 液体シンチレータを 12 個設置した場合の、1 事象あたりの、中性子を検出した液体シンチレータの個数の分布。モンテカルロシミュレーションで見積もった。

個の 800 MeV 光子を入射したときに中性子を 12 個検出する。ヒット数分布をポアソン分布でフィットしたときの 0 事象確率は  $0.37 \pm 0.62$  である。この時、光子不感率は  $(1.9 \pm 2.0) \times 10^{-6}$  である。

ビームテストで液体シンチレータの状態を確認したところ、光量の不足等により 8 台しか使えなかった。この 8 台を図 3.1 のように配置した。台数が減ったことによる中性子検出事象数への影響をシミュレーションで見積もった。結果を図 3.15 に示す。 $10^7$  個の 800 MeV 光子を入射したときに中性子を 14 個検出する。ヒット数分布をポアソンフィットしたときの 0 事象確率は  $0.25 \pm 0.46$  である。この時、光子不感率は  $(1.9 \pm 1.3) \times 10^{-6}$  である。

液体シンチレータを 12 台用いた場合は最大 3 台が同時に中性子を検出したのに対し、液体シンチレータを 8 台用いた場合のヒット数の最大値は 2 台となった。しかし、目標の標識化光子数  $10^7$  でポアソンフィットでき、光子不感率を  $2 \times 10^{-6}$  と  $2 \times 10^{-7}$  の差が有意に判断できる精度で見積もることができることから、8 台のセットアップで問題ないと判断した。

## 3.5 データ収集システム

本節では、本研究でデータを取得する際のデータ収集システムの設計を述べる。

### 3.5.1 ADC

本研究では、中性子と光子の弁別に波形の違いを利用する (5.4.2 節)。ADC の分解能が高いほど、波形の違いが明確になる。そのため、14bit の縦軸方向の分解能を持つ、テクノエーピー社製 APV8516 を用いた。基本情報を述べる。1 モジュールあたり 16 チャンネルあり、各チャンネルで独立にセルフトリガーで信号を取得する。サンプリング周波数は 500 MHz である。ADC と PC 間は Ethernet ケーブルにより接続する。ADC は、PC に専用のアプリケーションをインストールして制御する。

また、ゲート機能を持つ。ゲート機能とは、ゲート信号が立ち上がっている間のみ全チャンネルのデータ取得を有効にするものである。ゲート信号として標識化信号かつラジエータ信号を使いたかったが、それらの信号と検出器の信号のタイミング差が、ゲート信号の幅を超えていて使えなかった。今回は、全チャンネルをセルフトリガー

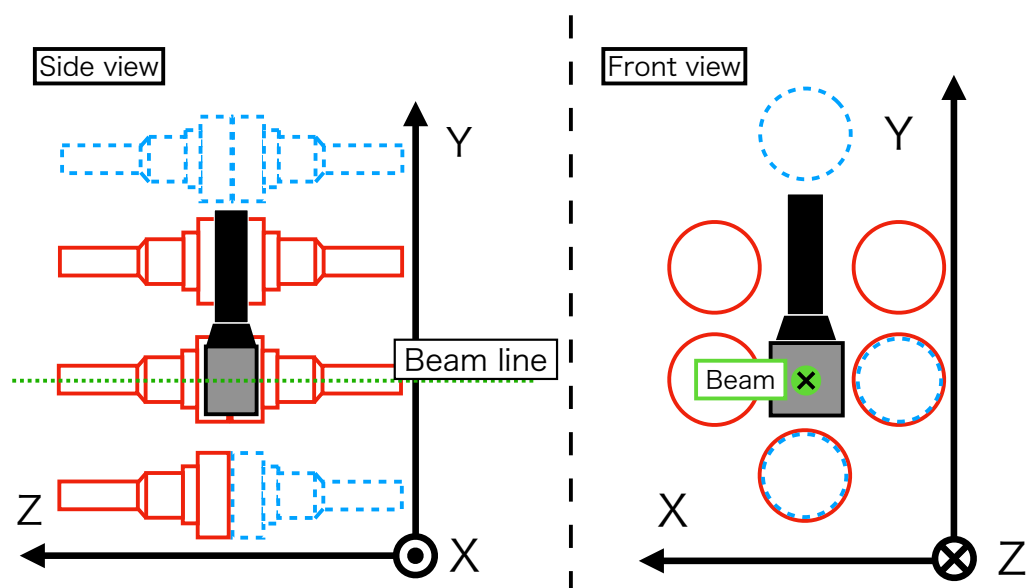


図 3.14 液体シンチレータが 8 台の時の実験装置全体図。図中赤 (実線) は液体シンチレータ、灰と黒は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器、緑は標識化光子のビーム軸を指す。図中青 (点線) は 12 台の使用を予定していた時に配置してあった液体シンチレータ。

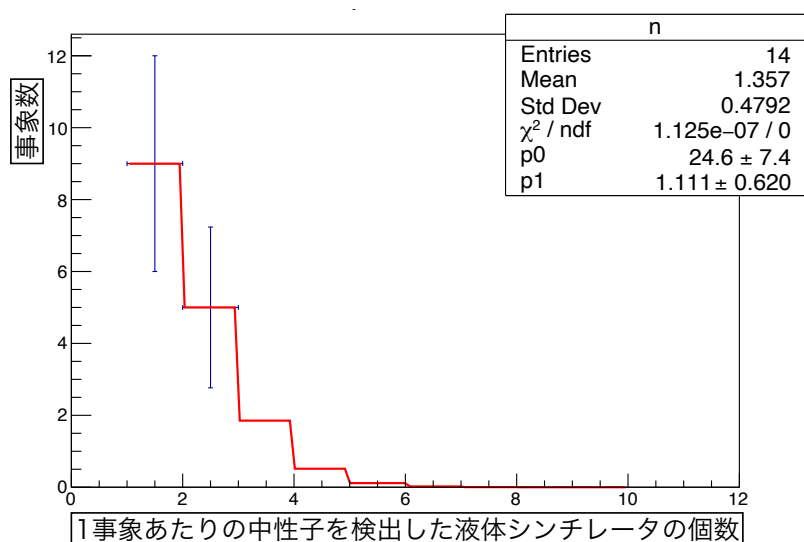


図 3.15 液体シンチレータを 8 個設置した場合の、1 事象あたりの、中性子を検出した液体シンチレータの個数の分布。モンテカルロシミュレーションで見積もった。

で取得した。データを取得する際、トリガーのかかった時刻を取得する。これを **TimeStamp** と呼ぶ。今回用いた ADC の **TimeStamp** 機能は、7.8 ps の時間間隔で信号を記録できる。オフライン解析でチャンネル間の **TimeStamp** の情報を用い、同時に起きた事象を選択した (詳細は 5.1 章)。

### 3.5.2 データ収集システムの設計

データ収集システムの設計を述べる。ADC に入力する信号は、それぞれセルフトリガーでデータを取得する。信号の種類には、標識化信号 (以下 **Tag**) とラジエータ信号 (以下 **Radiator**)、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の 1 倍信号と 10 倍信号、液体シンチレータの信号がある。これらを組み合わせてそれぞれの測定のためのデータ収集システムを設計した。

## 第 4 章

# 光核反応による光子不感率の測定のためのデータ取得

本章では、今回行ったビームテストでのデータ取得方法を述べる。

### 4.1 ELPH の標識化光子ビームラインの概要

ELPH の標識化光子ビームは、入射光子のフラックスを調整できる。今回は、1 MHz と 100 kHz の 2 種類のフラックスでデータ取得を行った。

入射光子フラックスの調整、確認方法を以下に述べる。入射光子フラックスの調整は、制動放射前の電子ビームのフラックスで調整する。電子ビームのフラックスは、ビームの電流値を調整することで調整する。調整した入射光子フラックスの確認は、Tag の事象数をスケーラーで計測することで行った。

### 4.2 各測定の設定アップ

本節では、3 章で述べた測定の設定アップ方法を述べる。図 4.1 に測定室の俯瞰写真を示す。図中ピンクで囲んだ領域に実験装置を設置した。

#### 4.2.1 ビームの中心位置測定

ビームの中心位置の測定方法を述べる。まずレーザー墨出しでビーム中心位置を決めた。

墨出しで決めた中心位置にビーム位置測定用検出器を設置してデータを取得した。データ取得は小寺氏に依頼した。

#### 4.2.2 CsI のエネルギー較正

CsI のエネルギー較正のためのデータの取得方法を述べる。CsI 単結晶のみをビーム軸上に置いて、エネルギー較正用データを取得した。図 4.2 にその概念図を示す。

5.2.1 節で詳細を述べるが、この測定の際、実際の光子ビームの中心と検出器中心は一致していない。以降の全てのデータ取得時、ビーム中心とセットアップの中心は一致していない。

取得したデータ情報を表 4.1 に示す。

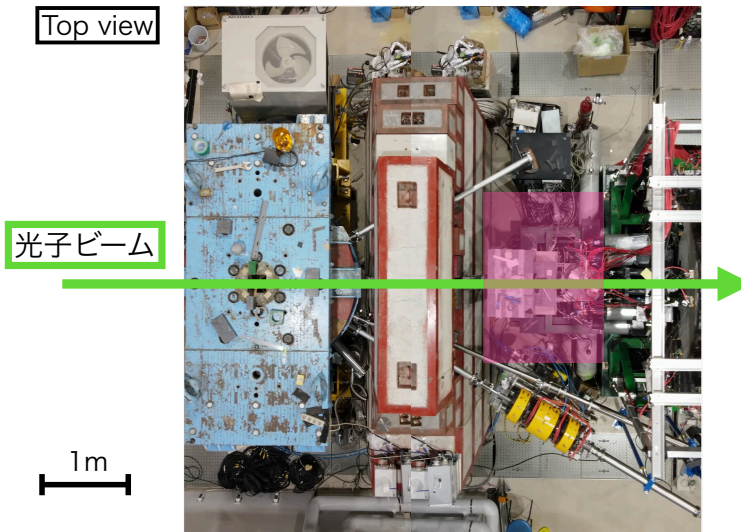


図 4.1 ELPH 標識化光子ビームライン測定室の俯瞰写真。図中ピンクの領域が今回の測定で実験装置を配置した場所である。

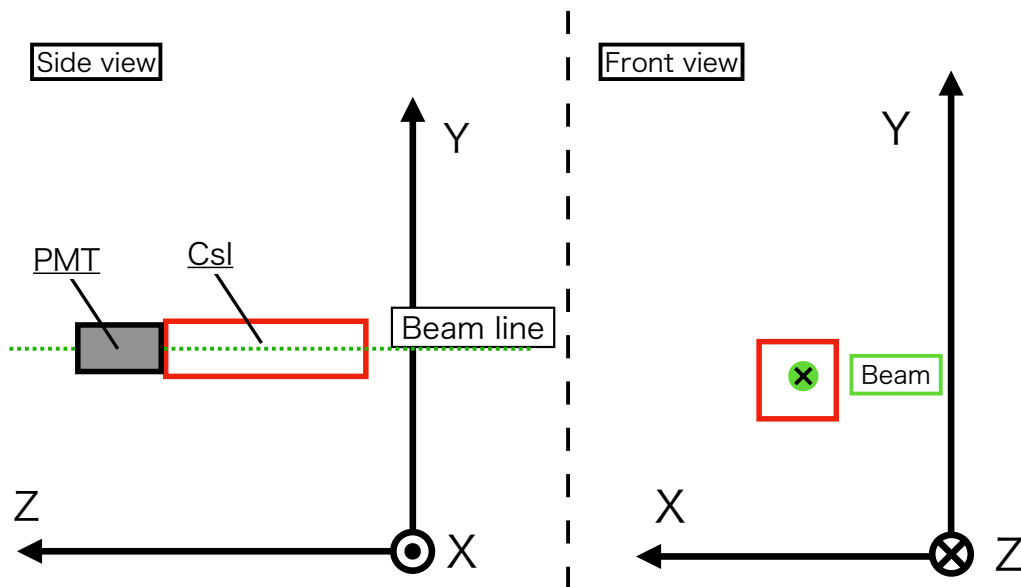


図 4.2 CsI 単結晶のエネルギー較正のためのデータ取得の概念図。

### 4.2.3 標識化光子ビームのエネルギー分布の測定

標識化光子ビームのエネルギー分布測定用データの取得方法を述べる。CsI 結晶を  $2 \times 2$  で積んでエネルギー分布測定用データを取得した (概念図は図 3.7)。図 4.3 にその様子を示す。

測定に用いたデータ収集システムを図 4.4 に示す。標識化光子ビームの Tag として、0.8 GeV、0.9 GeV、1.0 GeV の信号を取得した。4 つの CsI 結晶のそれぞれについて、出力信号をセルフトリガーで取得した。

取得したデータ情報を表 4.2 に示す。



表 4.1 CsI のエネルギー較正のために取得したデータの情報の。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。

入射光子フラックス [Hz]	Tag [ GeV]	検出器	計測時間 [s]
100 k	0.8	CsI0	412
	0.8	CsI1	276
	0.8	CsI2	297
	0.8	CsI3	196
1 M	0.8	CsI0	258
	0.8	CsI1	268
	0.8	CsI2	267
	0.8	CsI3	259

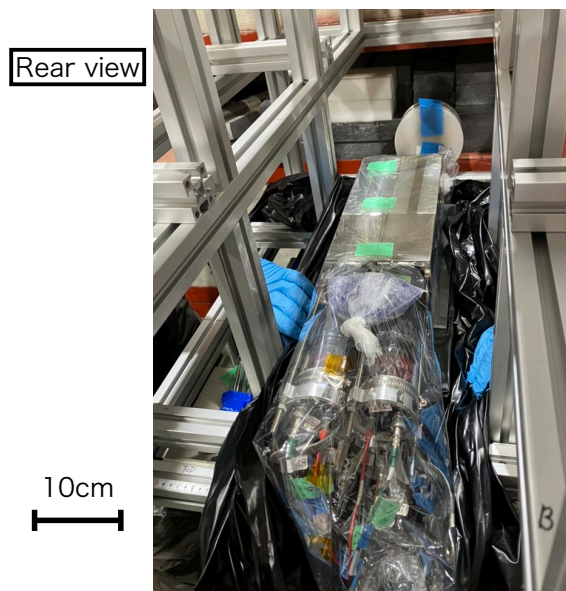


図 4.3 CsI4 結晶をビーム軸上に設置した写真。

表 4.2 標識化光子ビームのエネルギー分布の測定のために取得したデータの情報の。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。

入射光子フラックス [Hz]	Tag [ GeV]	検出器	計測時間 [s]
100 k	0.8	CsI0,1,2,3	184
	1.0	CsI0,1,2,3	254

#### 4.2.4 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のエネルギー較正

鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のエネルギー較正には宇宙線を用いた。この測定は M1 の片山氏、森岡氏に依頼した。測定概念図を図 4.5 に、測定の様子を図 4.6 に示す。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の信号と、上下のトリガーカウンターのそれぞれをセルフトリガーで取得した。

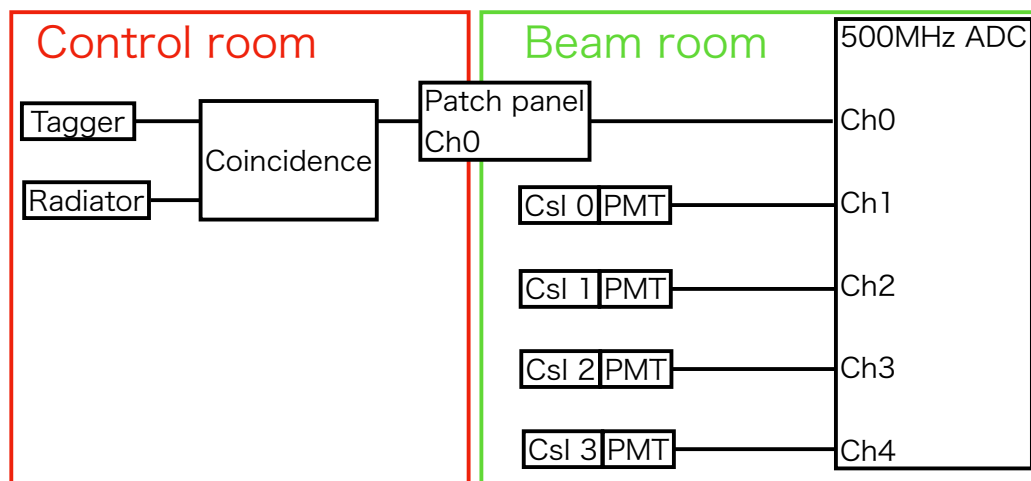


図 4.4 標識化光子ビームのエネルギー分布測定のためのデータ収集システムダイアグラム。

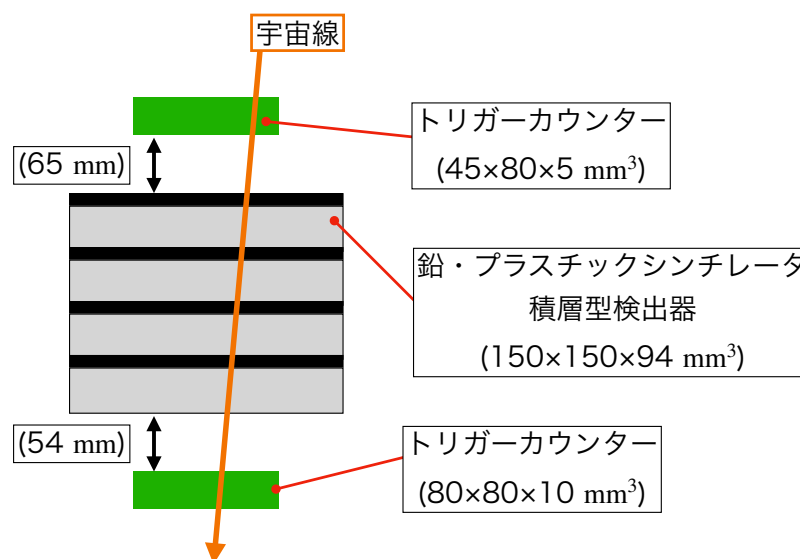


図 4.5 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の宇宙線のデータ取得の概念図。

#### 4.2.5 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の PMT のゲイン変動の有無の測定

光子ビームフラックスによる鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のゲイン変動の有無の確認を行った。測定に用いたデータ収集システムを図 4.7 に示す。測定方法を述べる。LED は 1kHz のレートで光らせる。LED を光らせた状態で、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に光子ビーム (フラックス 1 MHz) を入射した。光らせるための信号をトリガーとして、ランダムトリガーのデータを取得する。on-spill と off-spill で取得波形を比較し、波高に変化がないかを調べる。この測定は M1 の片山氏、森岡氏に依頼した。

取得したデータ情報を表 4.3 に示す。

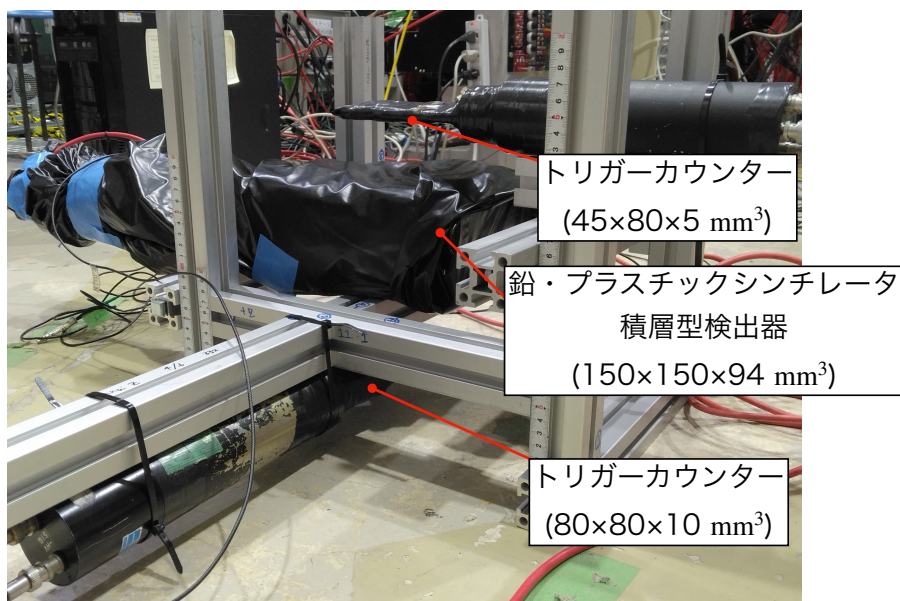


図 4.6 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の宇宙線のデータの測定の様子。

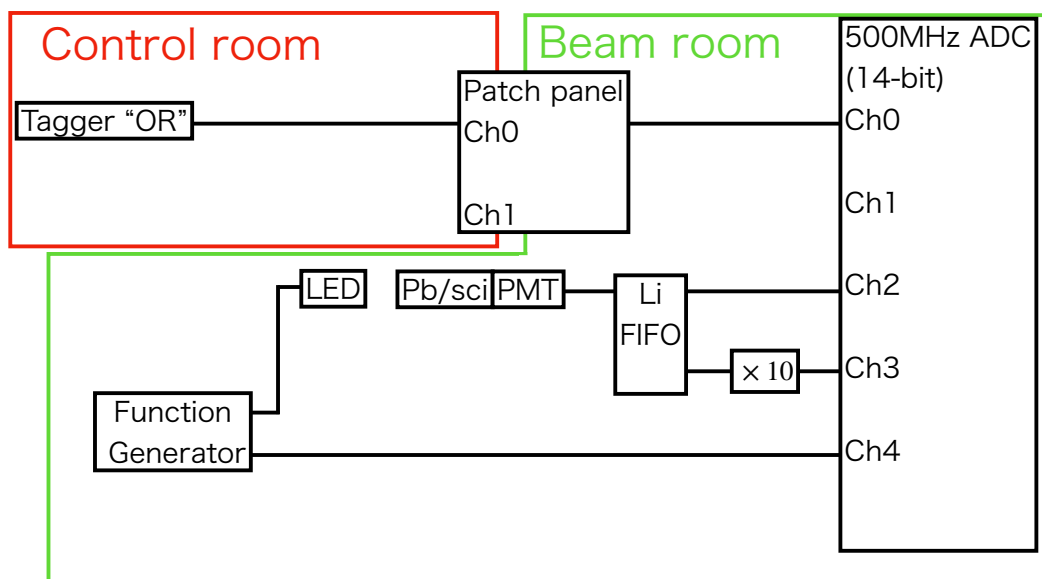


図 4.7 LED による入射光子レート耐性試験のセットアップ。

表 4.3 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の PMT のゲイン変動の有無の測定のために取得したデータの情報。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。

入射光子フラックス [Hz]	Tag [ GeV]	検出器	計測時間 [s]
1 M	0.8	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器	1799



図 4.8 8 台の液体シンチレータを設置した様子。

#### 4.2.6 液体シンチレータのエネルギー較正と中性子識別用データの取得

中性子検出のための液体シンチレータ 8 台は、アルミフレームを用いて設置した。図 4.8 にその様子を示す。液体シンチレータのエネルギー較正は、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{22}\text{Na}$  線源を用いてデータを取得した。中性子識別機能評価の測定は、 $^{252}\text{Cf}$  線源を用いてデータを取得した。私が測定条件を決めた後、それぞれのデータ取得を D1 小野氏に依頼した。

#### 4.2.7 光核反応による光子不感率の測定

光核反応による光子不感率を測定するためのデータを取得した。入射光子フラックスが 1 MHz の場合と 100 kHz の場合の 2 種のデータを取った。測定に用いたデータ収集システムを図 4.9 に示す。Tag と Radiator のコインシデンス、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の 1 倍信号と 10 倍信号、8 台の液体シンチレータのそれぞれを ADC に入力する。

データ取得の際の各信号のトリガー閾値を述べる。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器は、1 倍信号は 11 MeV、10 倍信号は 2 MeV 相当の閾値を設けた。液体シンチレータは、エネルギー較正の結果各検出器の 0.5 MeV 相当の閾値を設けた。

また、ADC に入力する各信号は、スケーラーで事象数を計測した。各出力信号をディスクリミネータに入力し、ディスクリミネータに課した閾値を越えた時、NIM 信号がスケーラーへ出力される。スケーラーの閾値は、ADC セルフトリガーの各信号の閾値と同じ値にした。上述のディスクリミネータの出力をスケーラーにも入れた。ADC セルフトリガーの信号の閾値は、ADC 制御用アプリケーションから設定した。

取得したデータ情報を表 4.4 に示す。

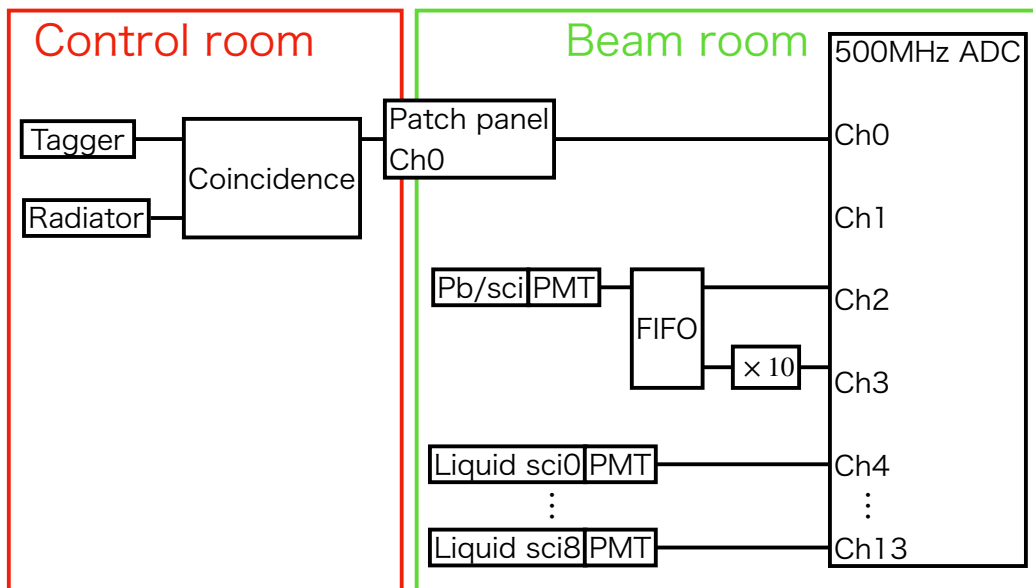


図 4.9 光核反応による光子不感率の測定のためのデータ収集システムダイアグラム。

表 4.4 光核反応による光子不感率の測定のために取得したデータの情報の情報。左から入射光子フラックス、Tag のエネルギー、測定した検出器、測定時間である。

入射光子フラックス [Hz]	Tag [ GeV]	検出器	計測時間 [s]
100 k	0.8	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器液体シンチレータ 液体シンチレータ	8927
1 M	0.8	鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器液体シンチレータ 液体シンチレータ	26598

## 第 5 章

# 取得したデータの解析結果

本章では、取得したデータの解析結果について報告する。本章で扱うデータは、ビーム照射直前に行った、検出器のエネルギー較正のデータと、ビームを用いたデータの 2 種が含まれる。

### 5.1 取得したデータを用いた ADC の評価

3.5 節で述べたように、ADC の全チャンネルを独立したセルフトリガーで取得した。本節では、ADC で取得したデータとスケーラーでの取得事象数の比較による、ADC の評価結果を述べる。

#### 5.1.1 オフライン解析でのコインシデンス

データ取得後、チャンネル間のコインシデンスをオフラインで取った。その方法を、Tag と鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のコインシデンスを例に述べる。取得した信号は、測定開始時間を 0 とした TimeStamp の情報を持つ (時間分解能は 7.8 ps、最大 48 時間)。取得データのうち、Tag を基準とした TimeStamp の時間差を計算し、コインシデンスが取れる時間を探索した。Tag のそれぞれについて、時間差  $-1500 \sim +1500$  ns の範囲で最も差が小さい信号をコインシデンスとして選択した。図 5.1 に Tag と鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器信号の時間差の分布を示す。時間差が  $-300 \sim -400$  ns の領域の事象が Tag と鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のコインシデンスの事象である。他の信号も同様の手法でコインシデンス事象を選択した。

#### 5.1.2 ADC の不感時間の評価

ADC で取得したある信号の事象数と、同じ信号をスケーラーで数えた事象数を比べたところ、ADC の不感時間が大きいことが分かった。本節では、不感時間の評価方法と結果を述べる。

まず、ADC のチャンネル全体で同時に不感なのか、チャンネル毎に独立して不感なのかを判断した。方法を以下に述べる。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器は、信号を ADC で取得する際に、同じ信号を 2 つに分け、片方を 1 倍、もう片方を 10 倍にした。信号取得のトリガーの閾値は 10 倍の方が低いため、不感が同時ならば 10 倍信号を取得した時必ず 1 倍信号を取得するはずである。表 5.1 に結果を示す。入射光子フラックス 100 kHz において、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の 10 倍信号を取得した事象数に対し、その時さらに 1 倍信号を取得した事象数の割合は、0.104 である。よって、ADC のチャンネル毎に独立して不感であると判断した。また、この測定における不感率は入射光子フラックス 1 MHz で  $0.992 \pm 0.0000353$ 、100 kHz で  $0.896 \pm 0.000119$  である。

次に、不感時間の大きさを評価した。以下に方法を述べる。スケーラーで計測した事象数と、ADC で取得した事象数とを比較する。データ取得の際、スケーラーでは 1spill あたりの事象数を計測した。単位時間あたりのこの事

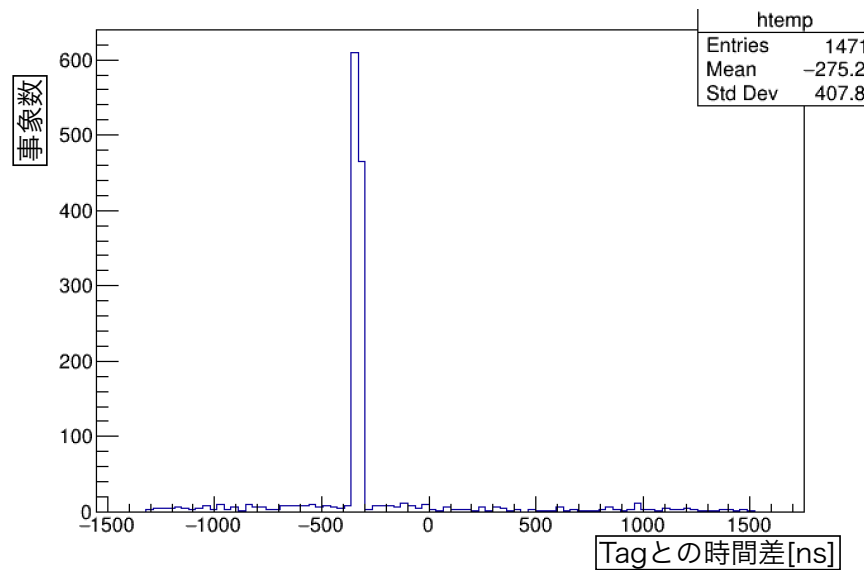


図 5.1 Tag と鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器信号の、TimeStamp による時間差の分布。

表 5.1 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の 10 倍信号を取得した事象数と、さらにその時 1 倍信号を取得した事象数、および 1 倍信号取得数の 10 倍信号事象数に対する割合。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで評価した。

入射光子フラックス [Hz]	鉛シンチ 10 倍信号事象数	10 倍信号取得時に 1 倍信号を取得した事象数	割合
1 M	6358630	48191	0.00758
100 k	6609754	685574	0.104

象数と、単位時間あたりの ADC の取得事象数とを比べた。スケーラーの事象数に対する、ADC で取得できなかった事象数の割合を ADC 不感率とする。ADC 不感率は式 5.1 で計算する。

$$T_{\text{dead}} = 1 - \frac{N_{\text{ADC}}}{N_{\text{scaler}}} \quad (5.1)$$

$N_{\text{ADC}}$  は単位時間あたりの ADC の取得事象数である。 $N_{\text{scaler}}$  は単位時間あたりのスケーラーでの取得事象数である。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで、各チャンネルの ADC 不感率を計算した。結果を表 5.2 に示す。表より、光子の入射フラックスによらず、ADC 不感率が大きく、信号のほとんどがデータ取得できていないことが分かった。また、ADC 不感率は、ADC の各チャンネルに入力する信号のレートによることも分かった。

また、表 5.1 での鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器 10 倍信号に対する 1 倍信号の不感率と、表 5.2 での 1 倍信号における ADC 不感率を比較した。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、後者が前者より 0.4 % 増加した。100 kHz の場合、後者が前者より 4.8 % 減少した。このように不感率が一致しない原因として、以下が考えられる。スケーラーの事象数は ADC でのデータ取得開始時の 1 spill 分であり、データ取得中の入射光子フラックスは spill 毎に異なっていた。このため、スケーラーの値が spill 毎に異なる可能性が高い。

表 5.2 各チャンネルの ADC 不感率。表中 Pb/sci は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器を表す。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで評価した。表中の、スケーラーの値は目安である。

入射光子フラックス [Hz]	ADC チャンネル	スケーラーの単位時間 あたり取得事象数	ADC の単位時間 あたり取得事象数	ADC 不感率
1 M	Pb/sci×1	597 k	1.69 k	$0.997 \pm 0.0000708$
	Pb/sci×10	821 k	2.33 k	$0.997 \pm 0.0000604$
	0.8 GeV Tag	5.20 k	2.98 k	$0.426 \pm 0.00686$
100 k	Pb/sci×1	28.7 k	4.21 k	$0.853 \pm 0.00209$
	Pb/sci×10	40.8 k	5.80 k	$0.858 \pm 0.00173$
	0.8 GeV Tag	0.235 k	0.224 k	$0.0468 \pm 0.0141$

## 5.2 標識化光子ビーム

本節では、標識化光子ビームの中心位置、エネルギー分布、標識化効率の解析結果を述べる。

### 5.2.1 ビーム中心位置

小寺氏のビーム位置測定用検出器の結果を図 5.2 に示す。図中の事象は、 $x$  軸、 $y$  軸平面のファイバー層の両方で信号を検出した事象である。ビーム中心がレーザー墨出しで決めた基準 (図中原点) に対し  $x$  方向に +17 mm 以上ずれていることが分かった。ビームテスト時はこの結果が分からなかったが、以下の測定を行った。CsI 単結晶のエネルギー較正を行なった際、結晶の  $x$  位置を -10 mm、0 mm、+10 mm、+20 mm と 4 点変えて測定した。その取得波形の波高の変化から、大まかにビーム位置を決めた。以降の測定は、ビーム中心位置をレーザー墨出しから  $x$  方向に +10 mm ずらしている。

また、ビームの大きさは、ELPH の測定室上流に設置している 20mm $\phi$  のコリメータの大きさにより決まる。図 5.2 より、 $y$  方向の広がり は 30mm $\phi$  以上である。

### 5.2.2 CsI 結晶のエネルギー較正

CsI 結晶を一つずつビームに当てたセットアップの取得データにおいて、Tag とのコインシデンスが取れている事象を選択した。取得波形を図 5.3 に示す。取得波形の 80 ns 範囲を積分した値の分布を作った。結果を図 5.4 に示す。それぞれのピーク位置をガウス関数でフィットした。ピーク位置が図 5.4(a) の位置 (49500 ADC count) と一致するように、図 5.4(b)(c)(d) それぞれに補正值をかけた。

続いて、結晶を 2×2 に積んだセットアップでの測定データを用いて、エネルギーを較正した。取得データのうち、Tag とのコインシデンスが取れていて、かつ、4 つの結晶全てに信号がある事象を選択した。相対ゲインを揃えた状態で、事象毎にそれぞれの結晶の 80 ns の範囲の波形の積分値を足し上げた。結果を図 5.5 に示す。4 結晶積み上げたシミュレーションのエネルギー分布 (図中緑) と、データの分布 (図中青) のそれぞれをガウス関数でフィットした。その後、各ガウス関数のピーク位置を合わせることでエネルギーを較正した。



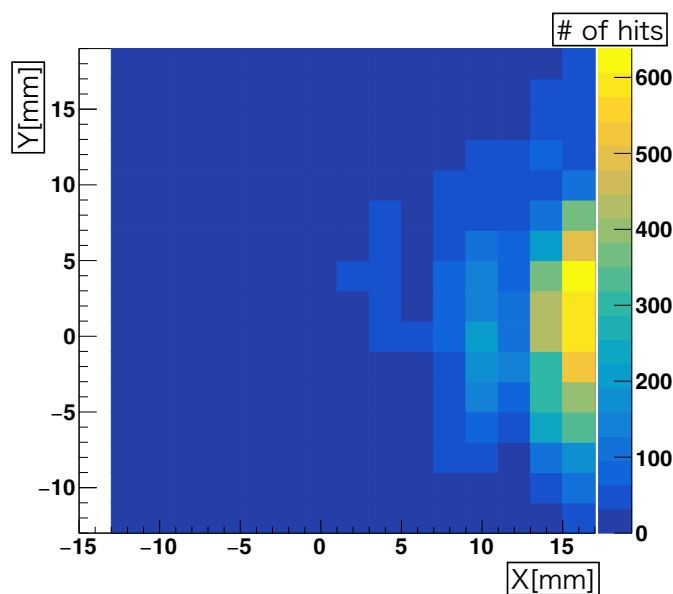


図 5.2 ビーム位置測定用検出器のヒットマップ。座標はビーム進行方向を Z 軸、鉛直方向を Y 軸とした右手系である。原点はレーザー墨出しで求めたビーム中心位置である。

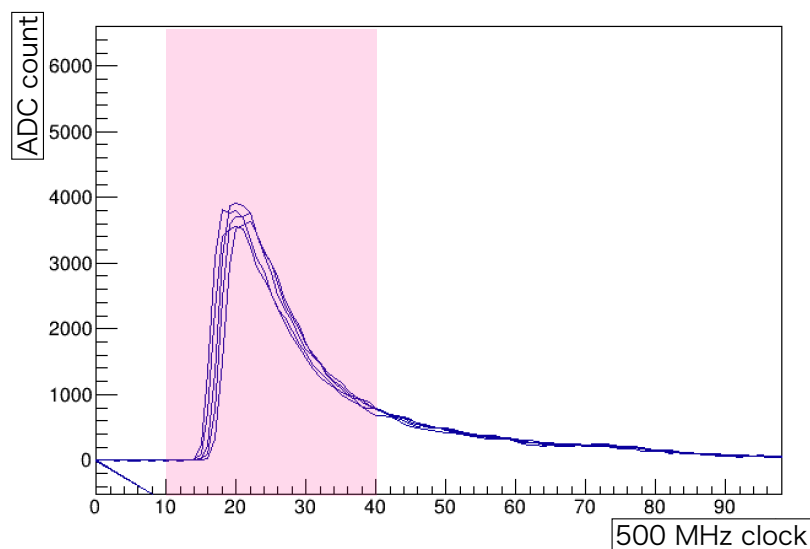


図 5.3 CsI1 結晶をビームに当てた際の出力波形。1.0 GeV 標識化光子ビームでの結果である。図中色付き領域は、積分範囲を表す。

### 5.2.3 低エネルギー光子の混入

低エネルギー光子の混入を評価するために、CsI を 4 結晶用いたセットアップの測定データを用いた。測定データのうち、0.8 GeV Tag とのコインシデンス、かつ、4 つの結晶全てに信号がある事象を選択した。1.0 GeV 標識化光子ビームで行ったエネルギー較正の結果を用いて、0.8 GeV 標識化光子ビームのエネルギー分布を求めた。結果を図 5.6 に示す。CsI4 結晶積み上げ、0.8 GeV 光子を入射したシミュレーションとデータを比較すると、データ

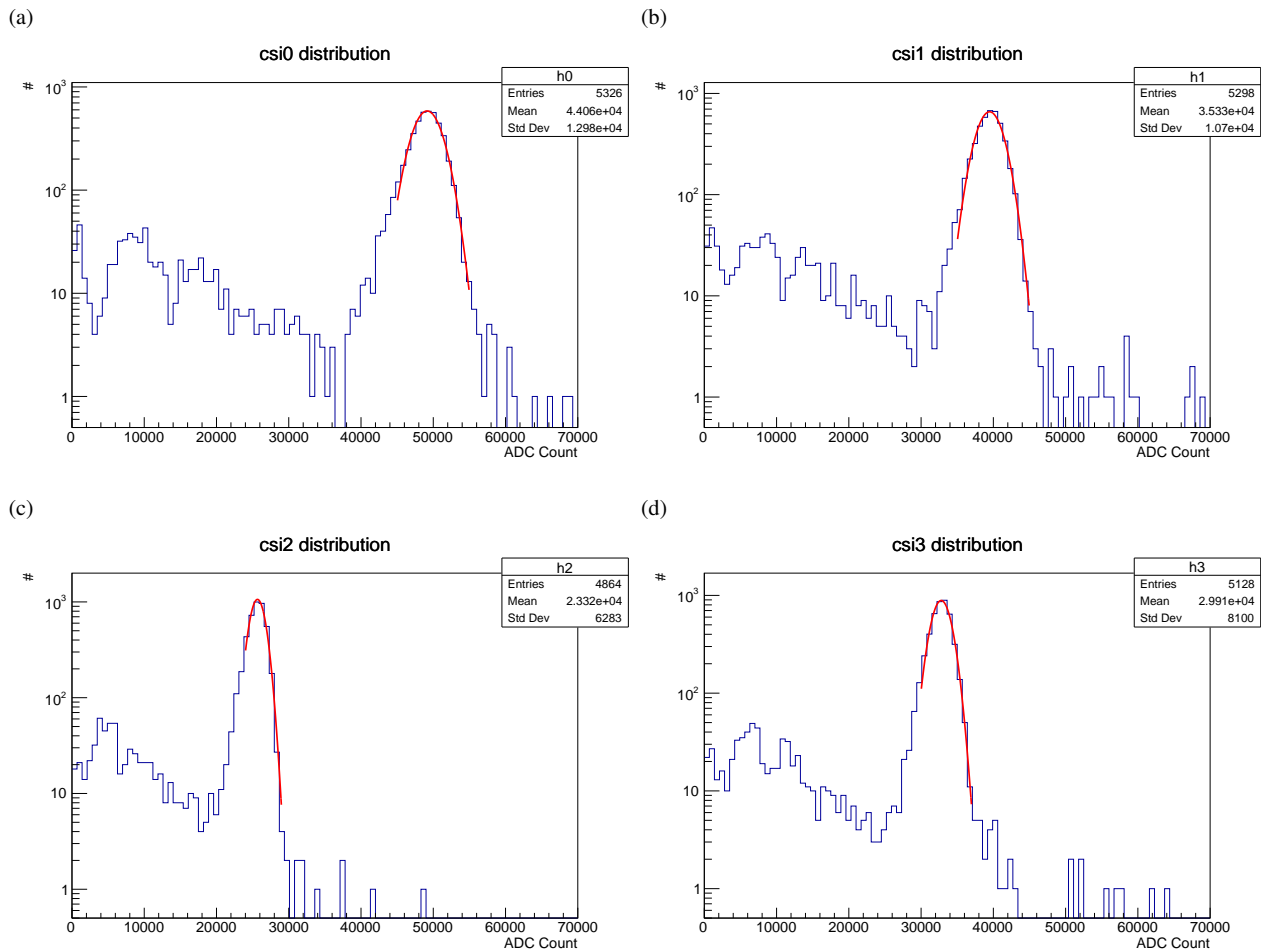


図 5.4 CsI 結晶を一つずつ標識化光子ビームに当たった時の、CsI 結晶に落としたエネルギー分布。それぞれの図において、横軸は波形積分値、縦軸は事象数である。(a)(b)(c)(d) は全て 1.0 GeV 標識化光子ビームでの結果である。

の方が低エネルギー光子が多く、これが低エネルギー粒子の混入である。この分布から、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の閾値以下の領域に混入する低エネルギー光子の個数を評価する。図 5.6 において、10 MeV 以下の光子の観測数は 0 である。この時、事象を観測しなかったため、90% 信頼度の上限值 2.3 を設定する。全事象数が 343 なので、10 MeV 以下の光子が混入する確率は  $2.3 \div 343 \sim 6.7 \times 10^{-3}$  である。この値は光核反応による光子不感率  $\sim 10^{-5}$  に比べて大きいため、統計が不十分である。データ取得時間に対して、ADC 不感率が大きかったために統計が不十分になってしまった。

### 5.3 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器

本節では、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のデータ解析結果を報告する。

#### 5.3.1 エネルギー較正

鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器で取得したデータのうち、上下に設置したトリガーカウンターの両方で信号を検出した事象を選択した。選択した波形の一例を図 5.7 に示す。波形のうち、10 ~ 40 clock の範囲 (60 ns

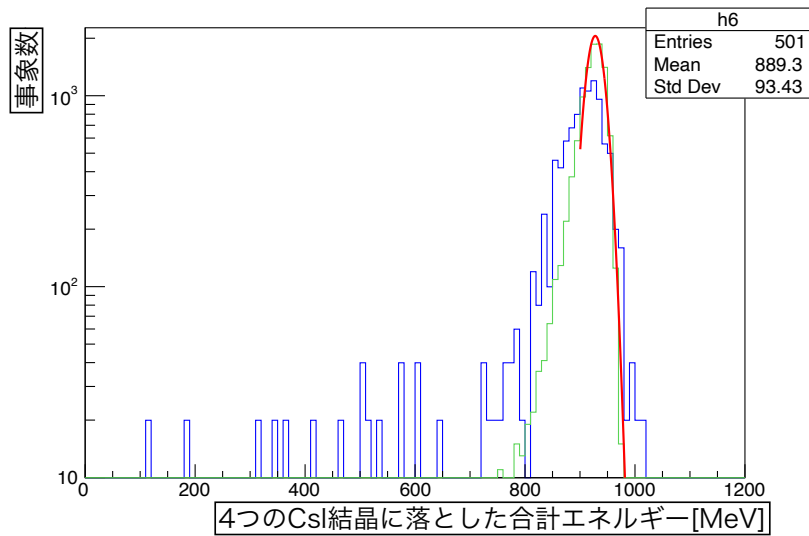


図 5.5 4 結晶を用いた測定の結果。青が取得データ、緑がモンテカルロシミュレーションの結果である。1.0 GeV 標識化光子ビームでの結果である。

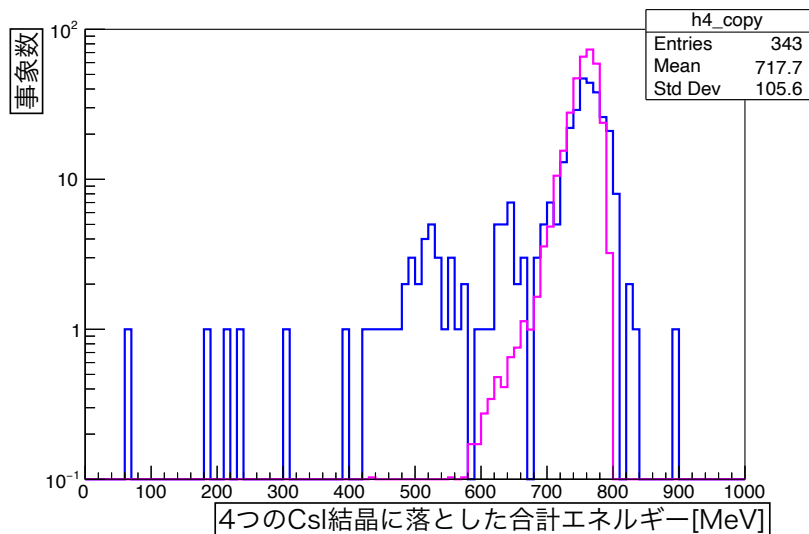


図 5.6 0.8 GeV 標識化光子ビームのエネルギー分布。青が取得データ、赤がモンテカルロシミュレーションの結果である。

相当) の積分値を取得した。波形積分値の分布とエネルギー較正の結果を図 5.8 に示す。シミュレーションとデータのそれぞれのピークをガウス関数でフィットし、フィットのピーク位置を揃えることでエネルギーを較正した。

### 5.3.2 ビーム照射時の応答

光子ビームを照射した時の、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のレートを述べる。検出器のレートは、スケーラーの計数で、単位時間あたりの事象数として求めた。その結果を表 5.3 に示す。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のレートにばらつきがあるが、これは入射光子フラックスが spill 毎に変わるためである。Tag

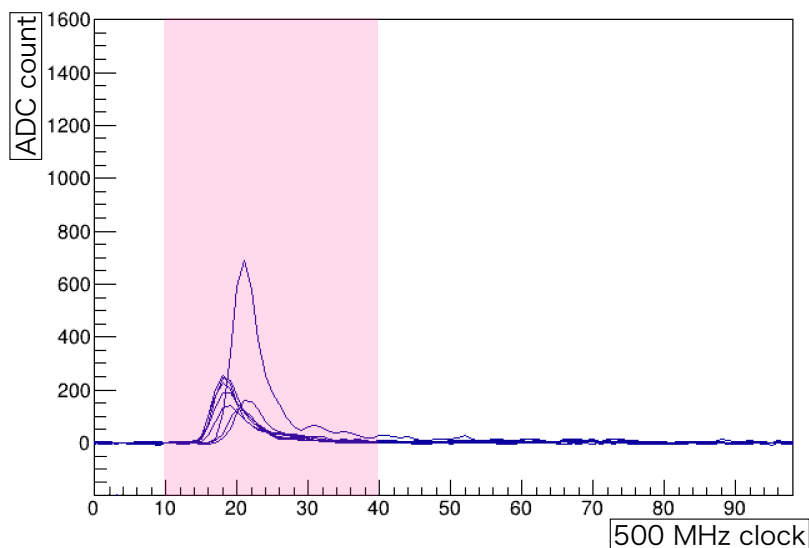


図 5.7 宇宙線を検出した時の取得波形の例。色つきの領域は積分範囲である。

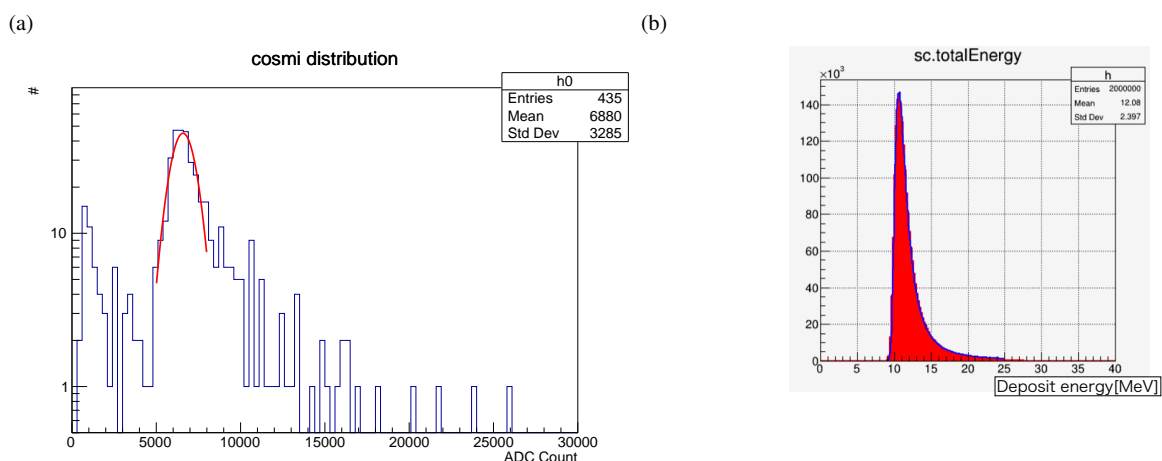


図 5.8 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギー分布。(a) は取得データの結果。(b) はモンテカルロシミュレーションの結果。

のレートも入射光子フラックスに合わせて変化するため、Tag のレートをスケーラーで計数することで、標識化光子のレートを見積もる。

### 5.3.3 レート耐性

1 MHz の入射光子フラックスに対する鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器のゲインの変動を調べた。以下に方法を述べる。LED が発光した時の鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の応答波形について、on-spill と off-spill を比較する。PMT のゲインが変動しているならば、LED による波形の波高が on-spill と off-spill で異なる。

まず、LED の波形を特定するために、LED がオフのデータとオンのデータについて、取得波形を比較した。図 5.9 に結果を示す。図 (a) と (b) の比較により、波高のピークが  $\sim 70$  ADCcount のものが LED によるもの、それ

表 5.3 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の、スケーラーで求めた単位時間あたりの事象数。入射光子フラックスが 1 MHz の場合、100 kHz の場合のそれぞれで評価した。

入射光子フラックス [Hz]	鉛シンチ 1 倍信号 [Hz]	鉛シンチ 10 倍信号 [Hz]
1 M	0.3~1.1 M	0.4~1.5 M
100 k	20~40 k	35~90 k

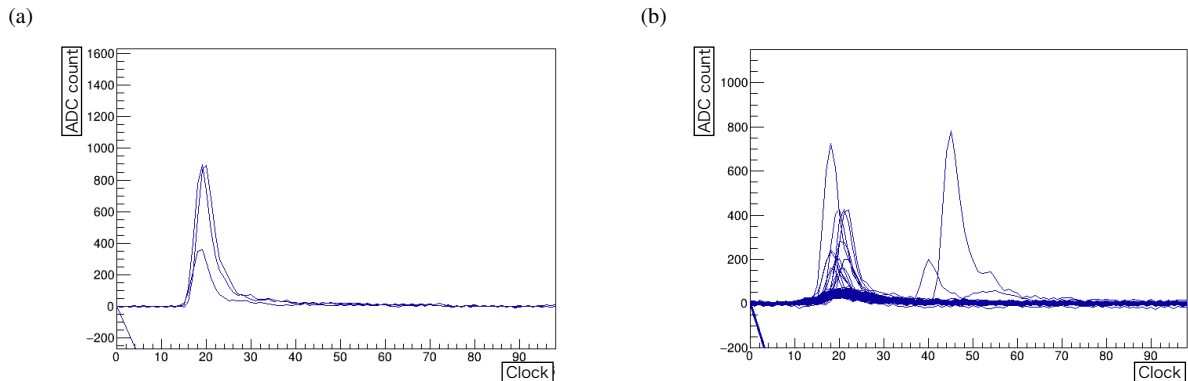


図 5.9 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における、LED を ON/OFF にした時の波形データ。トリガーは LED を光らせるためのファンクションジェネレータの信号である。(a) は LED を OFF にした時の取得波形。(b) は LED を ON にした時の取得波形。

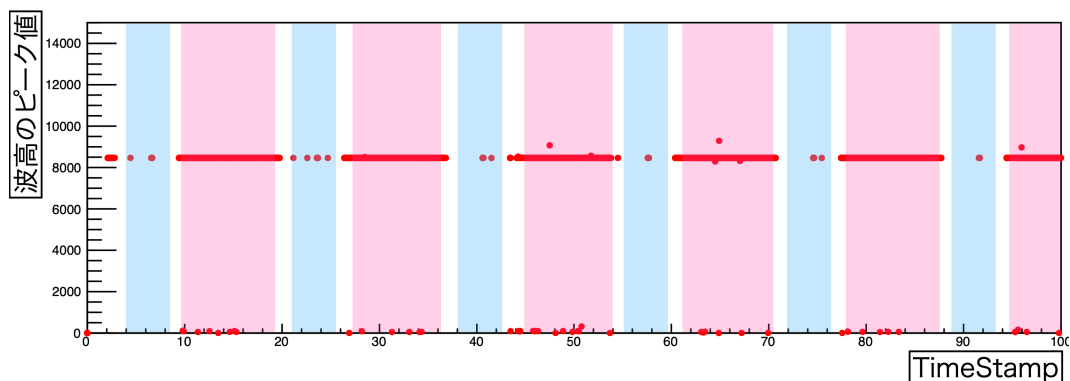


図 5.10 ADC の Tag チャンネルの取得データにおける、Tag 波形の波高のピーク値の TimeStamp 分布。図中赤色の領域を on-spill、青色の領域を off-spill とした。

以上の波高のものが入射光子ビームによるものであると判断した。

次に、取得データ中の on-spill と off-spill を区別した。Tag は基本的に on-spill の時発行され、off-spill の時にほとんど発行されない。これを用いて、図 5.10 のように Tag チャンネルの波形のピーク値の TimeStamp の分布から on-spill と off-spill を区別した。Tag 波形の波高のピーク値は約 8100 である。セルフトリガーでのデータ取得のため、off-spill の時は Tag 信号は取れていない。図中で、縦軸 8100 辺りに多く事象がある時間が on-spill、ほとんど事象がない時間が off-spill である。図中の on-spill と off-spill の境界の TimeStamp から、 $\pm 1$  TimeStamp を事象選択から除外した。

on-spill と off-spill の事象で、LED による波形の波高を比較した。結果を図 5.11 に示す。図において、on-spill (図中緑) について、波形のピーク値が 100 より大きいものはビームの波形である。また、100 未満の成分は、LED による波形である。on-spill と off-spill のそれぞれで、波高分布の LED 成分をガウス関数でフィットした。

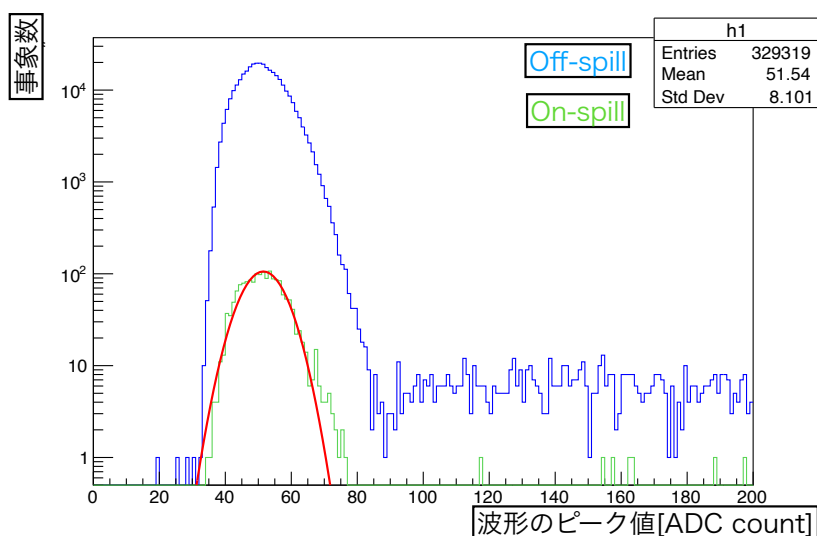


図 5.11 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における、取得波形の波高分布。図中緑が on-spill、青が offspill の事象である。

各ピーク位置は、on-spill が  $51.5 \pm 0.16$ 、off-spill が  $51.6 \pm 0.014$  である。on-spill が off-spill より 0.2% 減少した。ゲインの変動はほとんどないことを確認した。

### 5.3.4 標識化光子ビーム入射時に鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギー

エネルギー較正の結果を用いて、標識化光子入射時に鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギーの分布を求めた。測定データにおいて、Tag とのコインシデンスが取れている事象を選択した。選択した事象の波形を図 5.12 に示す。図中色つきの領域 (80 ns) を積分した。

結果を図 5.13(a) に示す。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギーのレンジについて、同じ検出器に 0.8 GeV 光子を入射したシミュレーション結果 (図 5.13(b)) が  $\sim 200\text{MeV}$  であるのに対し、取得データの結果が  $\sim 20\text{MeV}$  である。この原因は現在調査中である。

## 5.4 液体シンチレータ

本節では、液体シンチレータのエネルギー較正、中性子識別能力の評価、ビームでの中性子ヒット数の解析結果を報告する。

### 5.4.1 エネルギー較正

エネルギー較正には、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の 2 種のガンマ線源を用いた。液体シンチレータの出力波形の例を図 5.14 に示す。図中色つきの領域 (70 ns 相当) を積分した。 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  それぞれの積分値の分布を図 5.15 に示す。 $^{22}\text{Na}$  では 2 つ、 $^{137}\text{Cs}$  では 1 つのコムpton端が見える。コムpton端の測定値と理論値を対応させてエネルギー較正を行った。

コムpton端の電子のエネルギーの理論値の計算方法を述べる。コムpton散乱が起こった時、コムpton電子

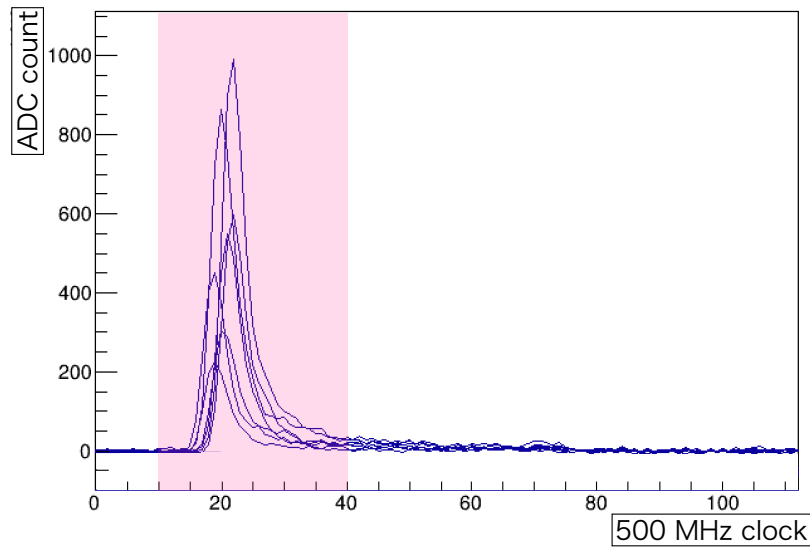


図 5.12 鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器における、0.8 GeV 標識化光子ビームを入射したときの取得波形。図中色付きの領域は積分範囲を表す。

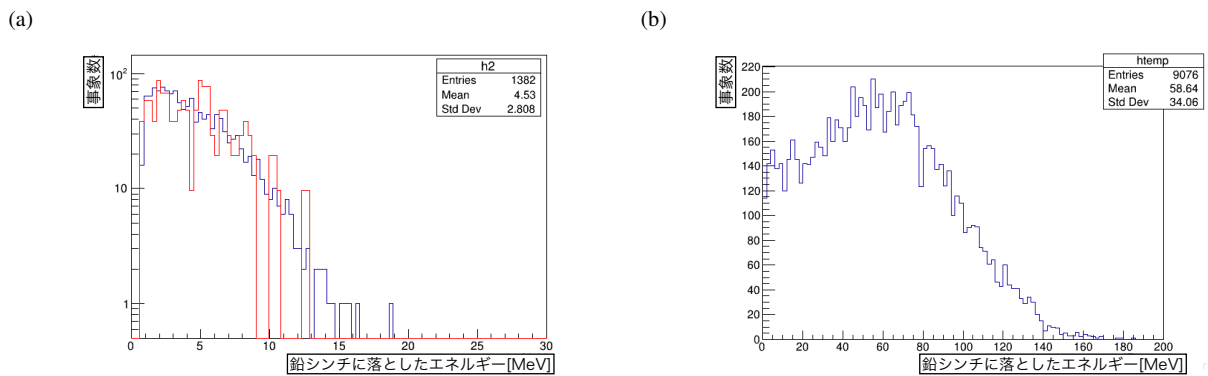


図 5.13 0.8 GeV 標識化光子を入射した時の、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器に落としたエネルギー分布。(a) は取得データの結果である。図中赤は 100 kHz、青は 1 MHz 入射光子フラックスのデータである。(b) はモンテカルロシミュレーションより見積もった結果である。

のエネルギーは式 5.2、5.3 より求める。

$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'} \quad (5.2)$$

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad (5.3)$$

$E_e$ 、 $E_\gamma$ 、 $E_{\gamma'}$  はそれぞれコンプトン電子、入射光子、散乱光子のエネルギーである。 $mc^2$  は電子の静止エネルギー (0.511 MeV)、 $\theta$  は光子の散乱角度である。光子の散乱角度が  $180^\circ$  の時、コンプトン電子のエネルギーが最大となる。

この式に、 $^{22}\text{Na}$  の 2 種のガンマ線 (0.511 MeV、1.276 MeV)、 $^{137}\text{Cs}$  のガンマ線 0.662 MeV の値を用いてコンプトン端の位置を計算した。

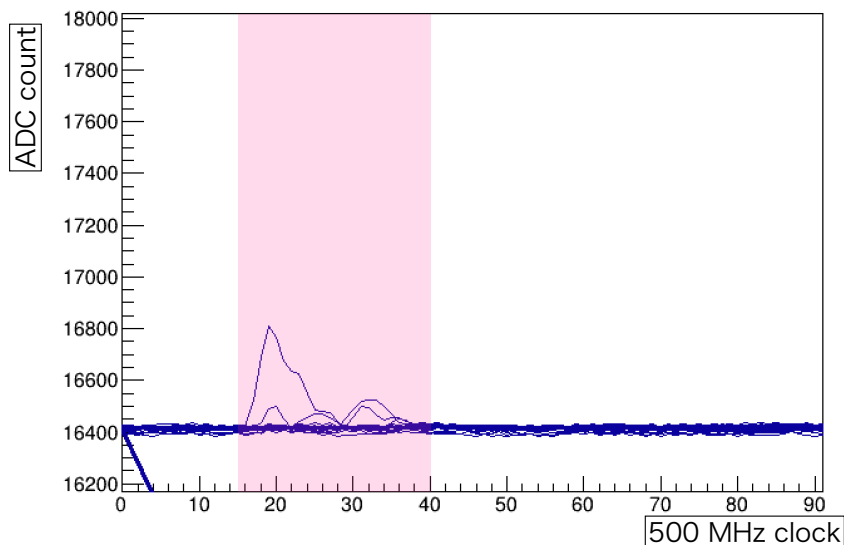


図 5.14 ガンマ線を検出した時の取得波形の例。色つきの領域は積分範囲である。

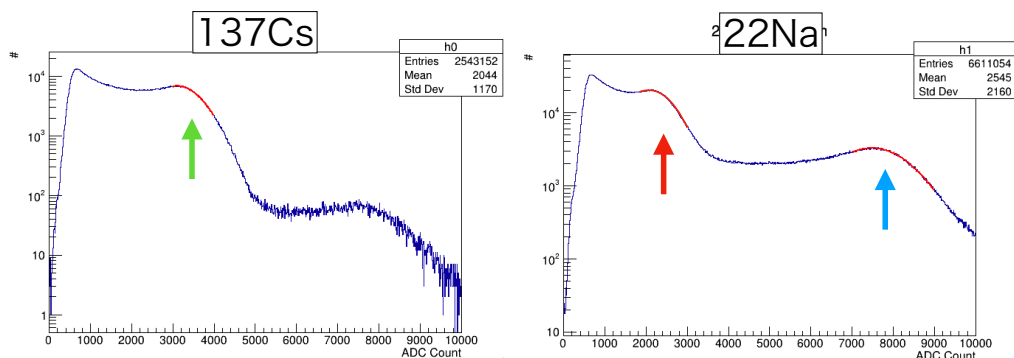


図 5.15 液体シンチレータの取得波形の、積分値の分布。左図が  $^{137}\text{Cs}$ 、右図が  $^{22}\text{Na}$  である。図中矢印は各線源のコンプトン端を示す。 $^{137}\text{Cs}$  の 8000 ADC Count あたりにあるピークは、環境放射線  $^{40}\text{K}$  のコンプトン端である。

次に、観測したデータについて、コンプトン端の位置の決め方を述べる。方法を図 5.16 に示す。観測されるコンプトン端 (図中赤) は、理想的なもの (図中黒) より鈍っている。鈍ったコンプトン端から位置を見積もるために、コンプトン端をガウス関数でフィットした。コンプトン端の位置を、ガウス関数のピーク位置 ( $M$ ) と半値半幅 (HWHM) を用い、 $M + (\text{HWHM})$  で計算した。

実際は、コンプトン散乱のスペクトルは図のように平坦ではないが、コンプトン端付近を平坦だと近似している。

コンプトン端の理論値と測定値を対応させた結果を図 5.17 に示す。ガンマ線源による 3 つのコンプトン端の他に、波形のベデスタルを 0 点に取った。4 点のプロットを直線でフィットすることで、エネルギー較正を行った。8



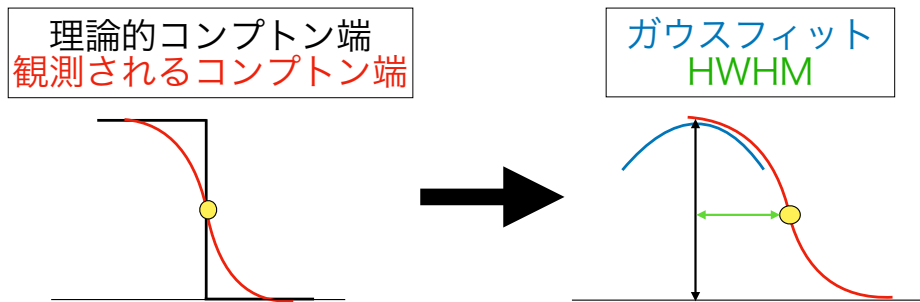
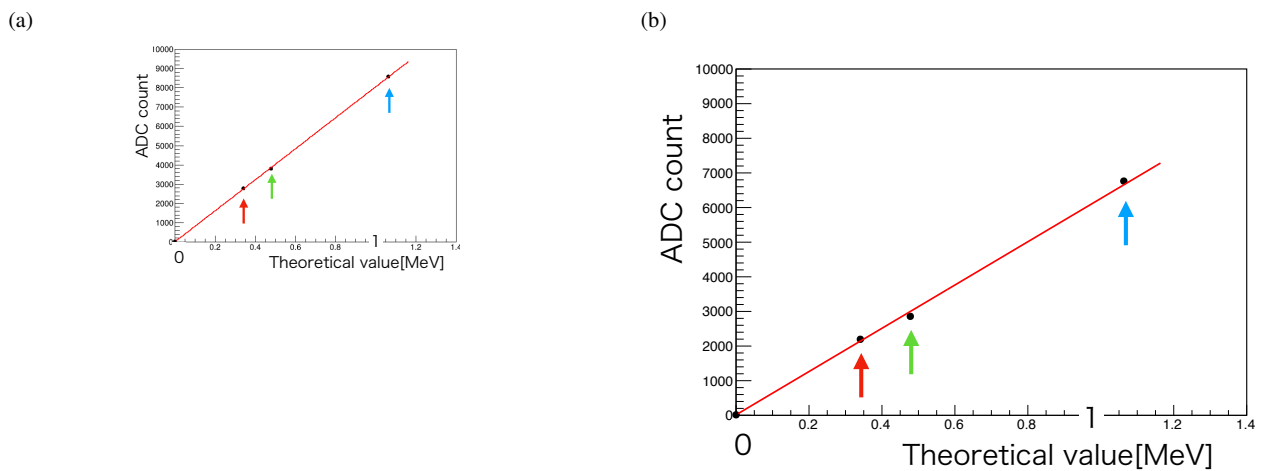


図 5.16 観測したコンプトン端の位置の決め方の概念図。

図 5.17 ガンマ線源によるコンプトン端を用いたエネルギー較正の結果。(a) は液体シンチレータ 0 番の結果、(b) は 1 番の結果である。図中の緑矢印は  $^{137}\text{Cs}$ 、赤と青矢印は  $^{22}\text{Na}$  のコンプトン端の位置のプロットである。

台の液体シンチレータのエネルギー較正の結果を表 5.4 に示す。

直線フィットした時の  $\chi^2$  はどれも大きく、フィットが正確でない。特に  $\chi^2$  が大きい液体シンチレータ 1 番の直線フィットの結果を図 5.17(b) に示す。

また、直線フィットの傾き  $a$  の値は、液体シンチレータによりばらつきがある。液体シンチレータの光量チェックの際、 $^{137}\text{Cs}$  のコンプトン端が見えるような電圧を PMT に印加したが、その際の電圧値の調整で出力を揃えきれていないからである。。

### 5.4.2 中性子識別能力の評価

液体シンチレータは、中性子と光子で発光過程が異なる。これにより、出力波形に違いが生じる。本節では、波形の違いによる中性子と光子の識別方法と、識別に用いるパラメータの最適化について述べる。

液体シンチレータの、光子と中性子の出力波形の違いを図 5.18 に示す。光子の波形は、立ち上がり後すぐに立ち下がる。一方、中性子は立ち上がりから立ち下がるまでに比較的時間がかかる。したがって、出力波形のピークからの立ち下がりとの差異を評価することで、光子と中性子の識別ができる。光子・中性子線源である  $^{252}\text{Cf}$  を用いて取得したデータから中性子識別能力を評価した。

波形の違いの評価方法を述べる。図 5.19 に方法を示す。液体シンチレータで取得した波形をある時間で二つに分

表 5.4 液体シンチレータのエネルギー較正結果。パラメータ  $a$ 、 $b$  は、フィットした直線の式  $y[\text{ADCCount}] = a \cdot x[\text{MeV}] + b$  における傾き  $a$  と切片  $b$  である。

番号	HV[V]	直線フィットパラメータ	フィット時の $\chi^2$
0	2100	$a = 8041.0 \pm 3.6873$ , $b = 17.1 \pm 0.00808$	193.30
1	2100	$a = 6223.5 \pm 1.9529$ , $b = 16.6 \pm 0.00845$	9209.7
2	1500	$a = 6221.8 \pm 4.0288$ , $b = 15.6 \pm 0.00830$	242.16
4	2200	$a = 4493.1 \pm 3.4973$ , $b = 13.6 \pm 0.00803$	1443.4
5	2100	$a = 7740.3 \pm 2.4578$ , $b = 16.0 \pm 0.00773$	2020.6
6	2100	$a = 4795.9 \pm 1.7779$ , $b = 14.6 \pm 0.00803$	556.00
7	2050	$a = 5799.1 \pm 2.6246$ , $b = 15.1 \pm 0.00854$	394.01
8	2150	$a = 4927.4 \pm 2.6094$ , $b = 15.0 \pm 0.00998$	1531.8

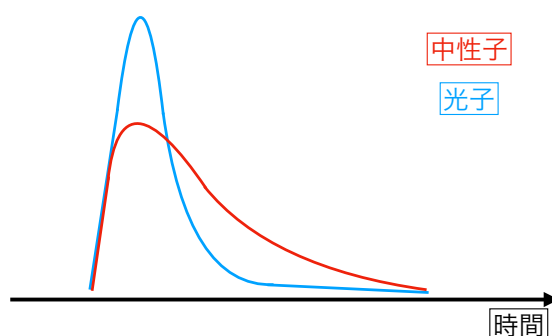


図 5.18 液体シンチレータにおける、光子と中性子の出力波形の違いの概念図。図中赤が中性子、青が光子である。

ける。以降、波形のピーク部分を含む方を **peak**、含まない方を **tail** と呼ぶ。peak の積分値を  $Q_S$ 、波形全体の積分値を  $Q_L$  とする。この時、tail 部分の積分値は  $Q_L - Q_S$  である。

光子と中性子の波形を比較した時、 $Q_L$  が同じであれば、 $Q_L - Q_S$  が大きい方が中性子である。波形を二つに分ける場所や、波形全体の積分範囲が変化すると、光子と中性子の  $Q_L - Q_S$  の差も変化する。光子と中性子が最もよく分かれている  $Q_S$ 、 $Q_L$  の積分範囲を求めた。

中性子識別能力の評価方法について述べる。方法を図 5.20 に示す。ここでは  $Q_L$  の積分範囲を 140 ns、 $Q_S$  の積分範囲を 36 ns としたものを例に説明する。図 5.20(a) は横軸  $Q_L$ 、縦軸  $Q_L - Q_S$  の二次元プロットである。プロットにおいて、傾きの大きい成分が中性子、小さい成分が光子である。次に、図 5.20(b) のように、縦軸を傾きにした分布を作った。その後、 $(Q_L - Q_S)/Q_L$  方向に射影し、図 5.20(c) を得た。

図 5.20(c) において、光子と中性子の二つのピークをガウス関数でフィットした。二つのガウス関数の離れ具合を式 5.4 で計算した。

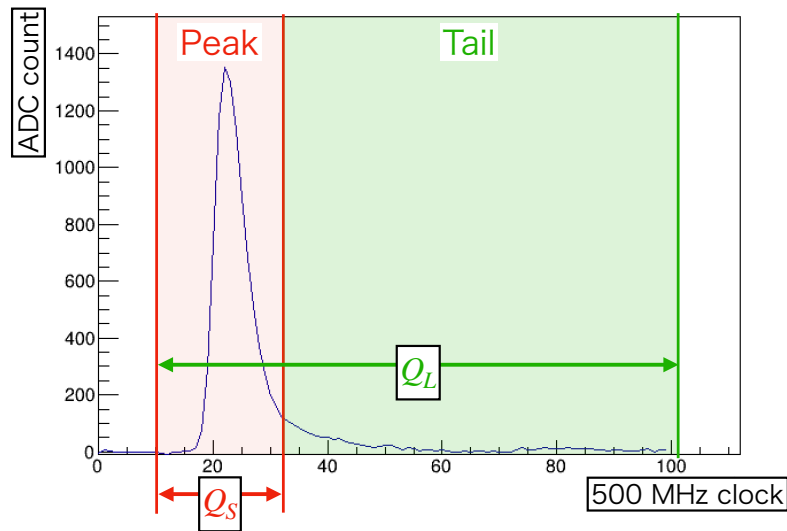


図 5.19 液体シンチレータにおける、波形の違いによる中性子の識別方法。

$$S = \frac{p_n - p_p}{\sqrt{\Gamma_n^2 + \Gamma_p^2}} \quad (5.4)$$

$p_n$ 、 $p_p$  はそれぞれのガウス関数のピーク位置である。 $\Gamma_n^2$ 、 $\Gamma_p^2$  はそれぞれのガウス関数の半値半幅である。

$Q_L$  の積分範囲を 140 ns に固定し、 $Q_S$  の積分範囲を 28, 36, 44, 52, 60, 68, 76, 84 ns とした時の  $S$  を計算した。図 5.21 に結果を示す。図中で  $S = 0$  となっているのは、中性子のピークと光子のピークが近すぎてガウスフィットできない場合である。 $Q_S = 36$  ns が最も中性子が分かれている。

同様の手法で、 $Q_S$  を 36 ns に固定し、 $Q_L$  の積分範囲を 120 ~ 420 ns で 20 ns 毎に変えて  $S$  を計算した。図 5.22 に結果を示す。 $Q_L = 320$  ns が最も中性子が分かれている。 $Q_L$  を確定したのち、もう一度  $Q_S$  を変えて最適な値を求めた。図 5.23 に結果を示す。図中で、 $S$  のピークが 2 箇所ある。この 2 箇所のピークは、8 台の液体シンチレータ全てで見られた。

$Q_L$  と  $Q_S$  の積分範囲を最適化する作業を、液体シンチレータ 8 台のそれぞれで行った。結果を表 5.5 に示す。液体シンチレータ 1 番と 2 番について、表 5.4 では波高が同じである一方、光子中性子弁別能力  $S$  は約 1.3 倍異なる。このように、同じ波高でも  $S$  が異なる。さらに、液体シンチレータ 2 番は印加電圧が 1 番より低い。この時、液体シンチレータ 2 番は 1 番より光量大きい可能性や、PMT のゲインと印加電圧の関係が違う可能性が考えられる。

また、この時図 5.20(c) において、光子の成分をガウス関数でフィットした時のピーク値 ( $M$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ ) を用いて、 $M + 3 \times \sigma$  以上の領域を中性子事象であると判断した。

### 5.4.3 標識化光子ビームランでの中性子イベント探索

光核反応による光子不感率測定用のデータを用いて、液体シンチレータに入射した中性子事象数を求めた。方法を述べる。5.4.2 節で求めた、各液体シンチレータの  $Q_L$ 、 $Q_S$  を用いて中性子を識別した。入射光子フラックス 1 MHz と 100 kHz のそれぞれのデータにおける、液体シンチレータそれぞれの  $Q_L$  と  $(Q_L - Q_S)$  の分布を図 5.24 に示す。各検出器の事象数は 100 未満である。

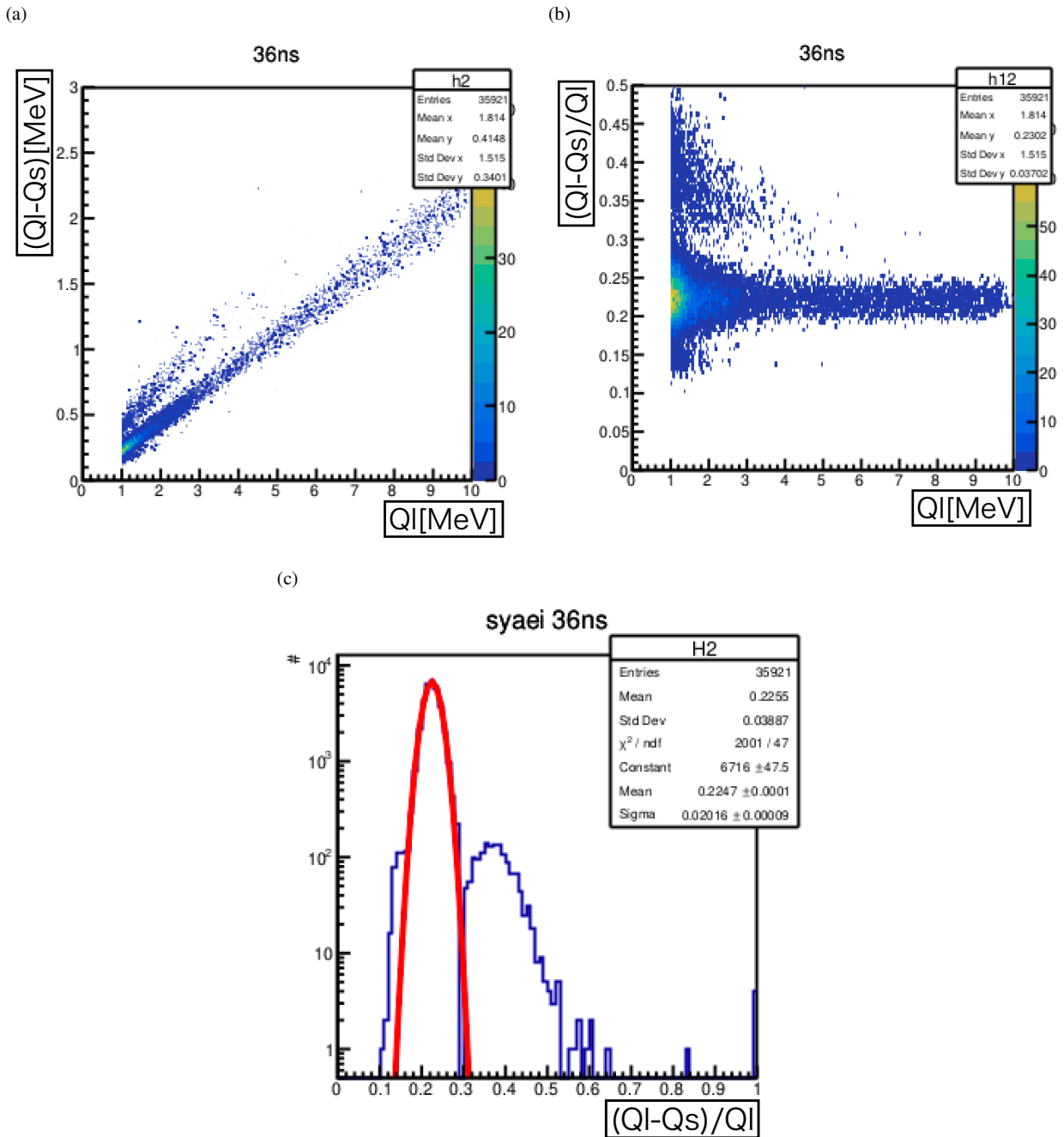


図 5.20 中性子識別能力の評価方法。(a)(b)(c)の順に解析を進める。(a)は横軸  $Q_L$ 、縦軸  $(Q_L - Q_S)$  の二次元プロットである。(b)は横軸  $Q_L$ 、縦軸  $(Q_L - Q_S)/Q_L$  の二次元プロットである。(c)は、(b)を  $(Q_L - Q_S)/Q_L$  方向に射影した結果である。

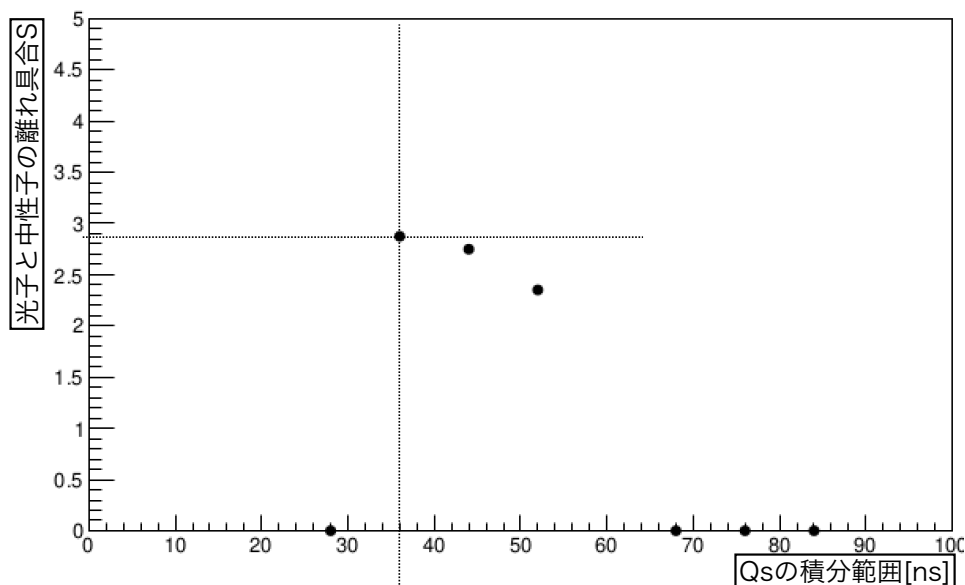


図 5.21  $Q_S$  の積分範囲を変えた時の、 $S$  の変化。誤差は小さすぎて図では見えない。

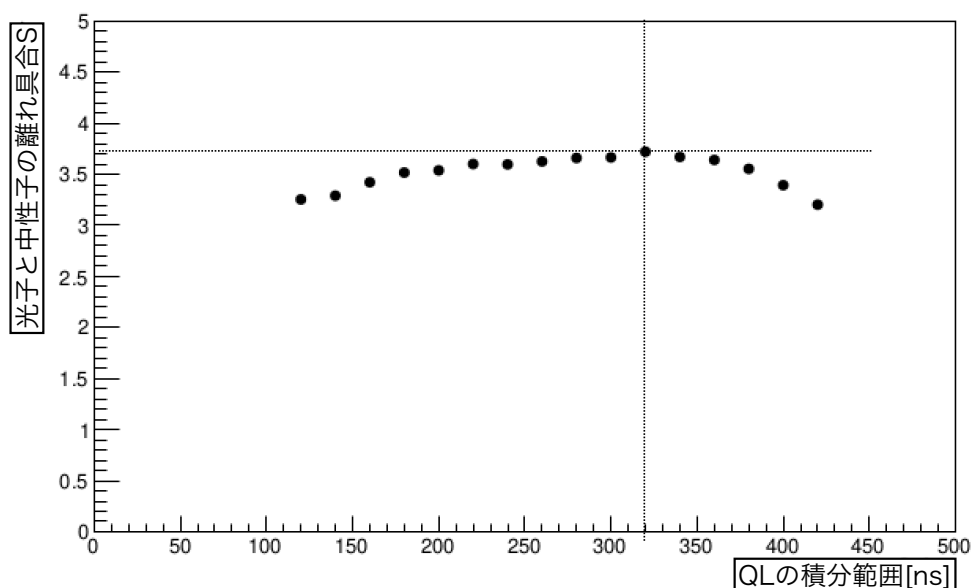


図 5.22  $Q_L$  の積分範囲を変えた時の、 $S$  の変化。誤差は小さすぎて図では見えない。

また、横軸  $(Q_L - Q_S)/Q_L$  で射影したもの (図 5.20(c) と同様のもの) を図 5.25 に示す。図中赤線より右側にある事象を中性子事象とした。

次に、中性子の識別条件から見積もった各液体シンチレータで検出した事象数および中性子事象数、中性子領域に混入する光子数の見積もりを表 5.6 に示す。表 5.6 における、液体シンチレータの番号と設置位置の関係を図 5.26 に示す。

液体シンチレータ間の事象数の違いを述べる。以下の議論では、ADC 不感率に ADC チャンネル依存性がないことを仮定した。取得事象数が多いのは、鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の真横に設置した検出器 (0 ~ 2) であり、特に 0 番が多い (統計誤差で  $2\sigma$  ほどしか離れていないので、有意に多いとは言えない)。これは、

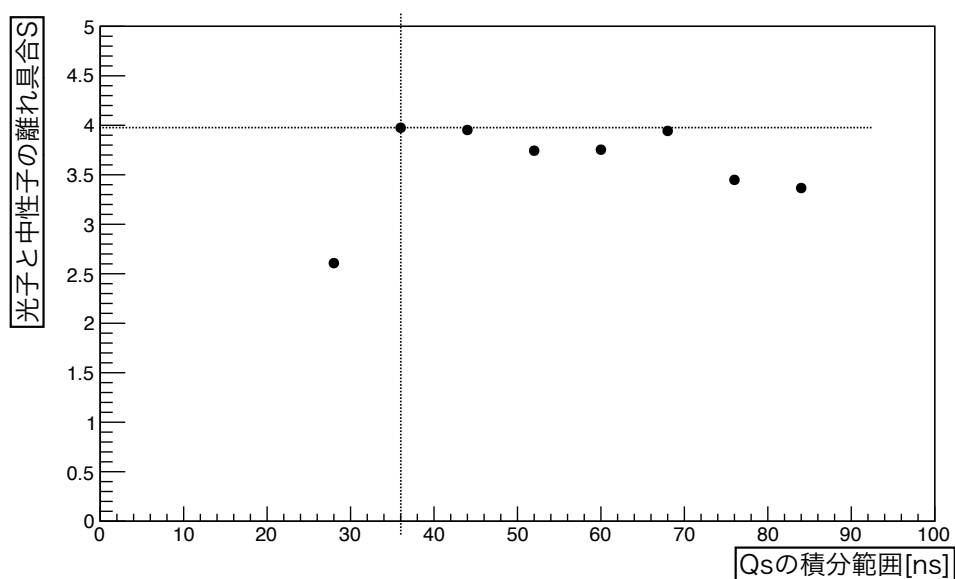


図 5.23  $Q_L$  を確定した後、もう一度  $Q_S$  の積分範囲を変えた時の、 $S$  の変化。誤差は小さすぎて図では見えない。

表 5.5 液体シンチレータ 8 台それぞれの、最も中性子が分かれている  $Q_S$ 、 $Q_L$  の積分範囲とその時の  $S$ 。

液体シンチ番号	$Q_S$ の積分範囲 [ns]	$Q_L$ の積分範囲 [ns]	$S$
0	36	260	3.51
1	60	200	3.06
2	36	320	3.97
4	36	320	3.14
5	60	260	3.66
6	68	260	3.50
7	44	300	3.29
8	36	280	3.33

下流側の検出器は鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器から飛び出す粒子が多いことと、ビーム中心が鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器の中心より  $x + 7$  mm 程度ずれていることが原因である可能性がある。

また、中性子を検出した液体シンチレータについて、光子事象が中性子に混入する数を見積もった。光子の領域を、正規分布を仮定したときの  $3\sigma$  以内としたため、混入する事象数は全体の 0.135% である。光子数を見積もった結果、中性子事象は光子が混入したものではない可能性が高い。

統計量を十分稼げた場合、光子中性子弁別能力  $S$  が最も大きい 2 番の結果について、中性子事象に対して 1.6% の割合で光子事象が混入する。また、 $S$  が最も小さい 1 番について、中性子事象に対しての 1.0% の割合で光子事象が混入する。1 事象あたり中性子を検出した液体シンチレータの数の分布の結果において、中性子事象の統計誤差に対し、混入する光子数は十分小さいと考えられる。

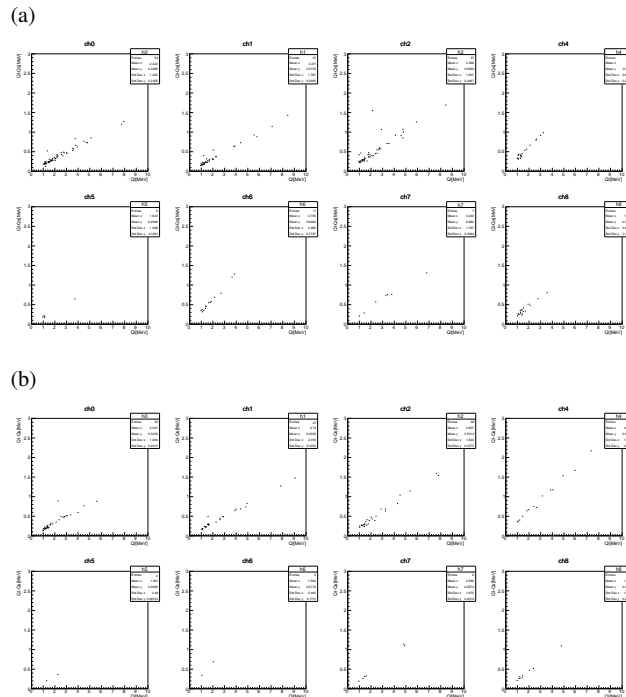


図 5.24 8 台の液体シンチレータそれぞれにおける、光核反応による光子不感率測定用データの  $Q_L$  と  $(Q_L - Q_S)$  の分布。(a) が入射光子フラックス 1 MHz、(b) が 100 kHz の場合である。

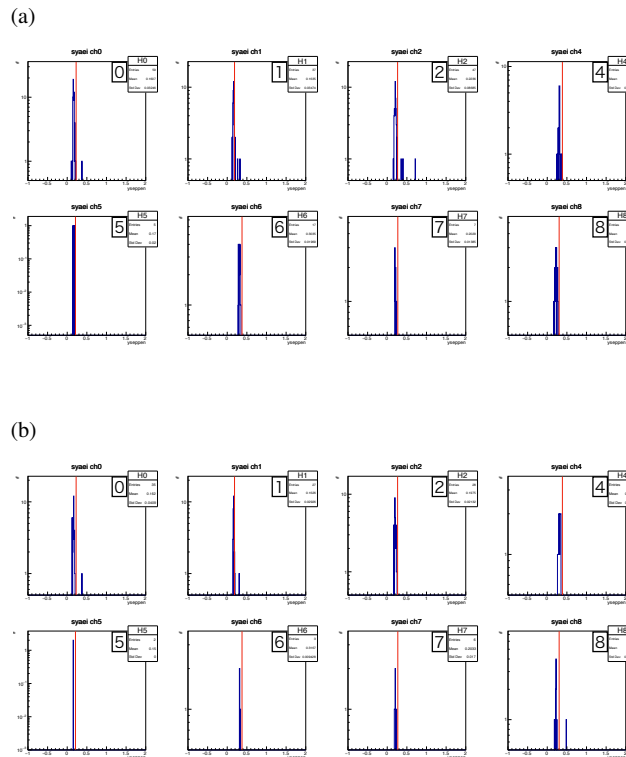


図 5.25 8 台の液体シンチレータそれぞれにおける、光核反応による光子不感率測定用データの  $(Q_L - Q_S)/Q_L$  の射影。右上の数字は液体シンチレータの番号を表す。図中赤線は光子と中性子の境界線を表す。(a) が入射光子フラックス 1 MHz、(b) が 100 kHz の場合である。

表 5.6 液体シンチレータ 8 台それぞれの、取得事象数と中性子事象数。中性子を検出した液体シンチレータについては、光子が混入する個数を見積もった。

入射光子フラックス [Hz]	液体シンチ番号	全取得事象数	中性子事象数	混入光子数
1 M	0	59	2	$0.080 \pm 0.010$
	1	37	5	$0.050 \pm 0.0082$
	2	47	4	$0.063 \pm 0.0093$
	4	20	0	
	5	5	0	
	6	17	0	
	7	7	0	
	8	18	0	
100 k	0	35	1	$0.047 \pm 0.0080$
	1	27	2	$0.036 \pm 0.0070$
	2	28	0	
	4	14	0	
	5	2	0	
	6	3	0	
	7	6	0	
	8	10	1	$0.014 \pm 0.0043$

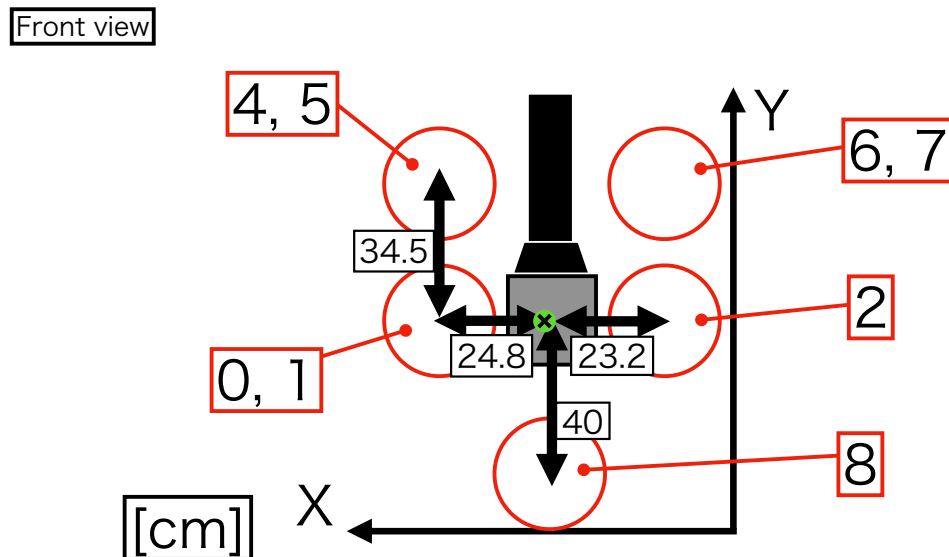


図 5.26 液体シンチレータの番号と、データ取得時の設置位置の関係。座標はビーム進行方向を Z 軸とした時の右手系。図中黒枠の数字はそれぞれの検出器中心間の距離である。赤枠の数字は液体シンチレータの番号である。奇数番号が上流側、偶数番号が下流側に設置されている。



## 第 6 章

# 考察

### 6.1 不感時間

ADC の不感時間について述べる。表 5.2 より、入射光子フラックス 100 kHz、0.8 GeVTag の ADC 不感率は、0.0468 と、他の ADC チャンネルと比べて小さい。スケーラーと ADC、それぞれの単位時間あたり取得事象数から、ADC へ記録される信号の頻度は  $\sim 10^2$  Hz である。記録頻度が 100 Hz 程度と低い場合は、ADC 不感率の改善が見込まれる。

今回のビームテストでは、ADC の全チャンネルをセルフトリガーで取得した。入射光子フラックス 100 kHz の状態で、0.8 GeV Tag をゲート信号として利用した場合、ADC 各チャンネルへ記録される信号の頻度がゲート信号の頻度以下になるため、ADC 不感率が改善すると考えられる。

### 6.2 今後の展望

今回と同様の目的でビームテストを行う場合の理解状況を述べる。データ収集システムの設計については、6.1 節で議論した改善方法を実証する必要がある。標識化光子ビームについては、中心位置の特定がまだ行えていない。CsI 結晶は、統計量を稼げば低エネルギー粒子の混入を評価できる。鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器については、検出器に落としたエネルギーのレンジについて原因を調査する。液体シンチレータは、本体の中性子識別能力は十分であることを確認した。

## 第 7 章

### 結論

本研究では、標識化光子ビームを用いた光核反応による光子不感率の実測を目指した。

標識化光子ビームを用いてビームテストを行った。今回のビームテストでは、ADCの不感時間が大きく、データ取得数が少なかったため光子不感率の実測に至らなかった。ビームテストで取得したデータを用いて、設計を評価した。

用いた標識化光子ビームの低エネルギー粒子の混入について、0.8 GeV 標識化光子中に 10 MeV 以下の光子が混入する確率について、90% 信頼度で  $6.7 \times 10^{-3}$  の上限値を与えた。この値は、シミュレーションで見積もった光核反応による光子不感率 ( $\sim 10^{-5}$ ) と比べて十分大きいため、統計が不十分である。

用いた光子検出器 (鉛・プラスチックシンチレータ積層型検出器) について、入射光子フラックス 1 MHz における PMT のゲインはほとんど変化しなかったため、1 MHz レートに対し耐性がある。また、ビーム入射時の光子検出器の取得エネルギー範囲が予想よりも小さく、現在原因を調査中である。

用いた中性子検出器 (液体シンチレータ) について、一部の液体シンチレータで中性子事象を検出した。中性子事象への光子の混入については、割合が小さいため十分無視できると考えられる。液体シンチレータの光子中性子識別能力は、本研究において十分である。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方にお世話になりました。ここに感謝を述べます。今年度の指導教員である南條創教授には、研究に関する様々なアドバイスや、ビームテストでの DAQ 構築の手伝い等、本研究をいろいろな面から支えていただきました。ある結果に対して、議論を通じて原因を追求する中で、研究者としての姿勢を学ぶことができました。昨年度の指導教員である山中卓元教授には、ゼミによる KOTO 実験の基本知識の習得や、実験屋としての心構え等、自身の研究者としての基礎スペックの向上の際に多くの手助けをしていただきました。

また、本研究のビームテストを行う際にも、多くの方々に協力していただきました。東北大学電子高理学研究センターの時安敦史助教授には、今回 ELPH 側のスタッフとしてビームテスト当日だけでなく、ビームや検出器に関する疑問点に対応していただきました。KOTO 実験メンバーの小寺克茂研究員には、セットアップのフレームに関する議論や、ビーム位置測定等で大変お世話になりました。KOTO 実験メンバーの白石諒太博士、Mario Gonzalez 博士には、ビームテスト前後でのシミュレーションやデータ解析の議論において、多くのコメントやアドバイスをいただきました。KOTO 実験メンバーの小野啓太博士、北川歩博士には、ビームテストの手伝いのみならず、本研究に関するアドバイスを多数いただきました。また、KOTO 実験メンバーの片山舞さん、森岡樹くんには、光子検出器の面倒を見ていただきました。

その他の KOTO 実験共同研究者の方々にも、ミーティングでの議論を通じて多くのクリティカルなアドバイスをいただきました。

また、南條研究室の皆様にも、日常生活面、研究面の双方からお世話になりました。

最後に、大学生活の食事を支えてくださった家族に感謝します。ありがとうございます。

# 付録

## A KOTO 実験の物理

1.1 節で述べた、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊分岐比の計算方法を述べる。

$K_L$  粒子は、 $K^0$  と  $\bar{K}^0$  の混合状態であり、以下の式 A.1 で記述される。

$$|K_L\rangle \sim \frac{|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle}{\sqrt{2}} \quad (\text{A.1})$$

したがって、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊振幅 ( $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ ) は、混合状態のそれぞれの崩壊振幅により記述でき、式 A.2 のようになる。

$$A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto A(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) - A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \quad (\text{A.2})$$

図 A.1 に  $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 、図 A.2 に  $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  のファインマン図を示す。図中のトップクォーク ( $t$ ) とダウンクォーク ( $d$ )、ストレンジクォーク ( $s$ ) の混合が崩壊分岐比に関わる。図 A.3 に CKM 行列 [11] を示す。図 A.1 における  $s \rightarrow t \rightarrow d$  のクォーク遷移確率は CKM 行列中のパラメータ  $V_{td}$  と  $V_{ts}$  の複素共役  $V_{ts}^*$  の積に比例する。同様に、図 A.2 における  $\bar{s} \rightarrow \bar{t} \rightarrow \bar{d}$  のクォーク遷移確率は CKM 行列中のパラメータ  $V_{td}^*$  と  $V_{ts}$  の積に比例する。 $V_{ts} = V_{ts}^*$  であるため、式 A.2 は以下 A.3 のように計算される。

$$\begin{aligned} A(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) - A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) &\propto V_{td} - V_{td}^* \\ &\propto \text{Im}(V_{td}) \\ &\propto \eta \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

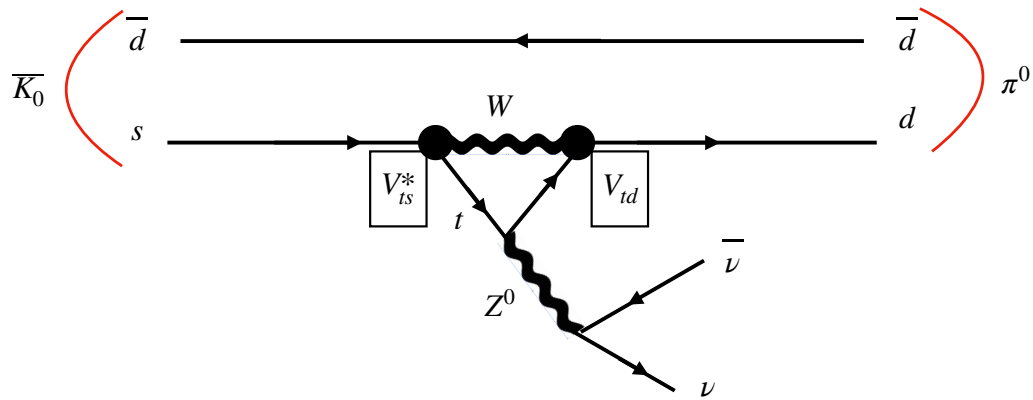
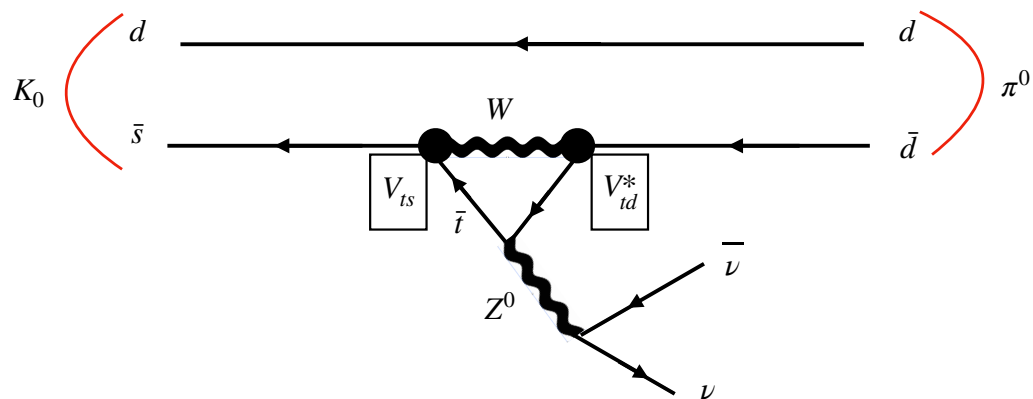
崩壊分岐比は崩壊振幅の 2 乗である。したがって、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊分岐比は  $\eta^2$  に比例する。標準理論で予測される、この崩壊の分岐比は  $\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.43_{-0.37}^{+0.40} \pm 0.06) \times 10^{-11}$  である [12]。一つ目の誤差は、入力パラメータの不確かさである。二つ目の誤差は、理論的不確かさであり、これが 2% である。

## B Gwant4 コード内の光核反応モデルの違い

本節では、Geant4 の光核反応モデルである CHIPS と BERT の違いを述べる。

### B.1 入射光子エネルギーに対するモデルの使い分け

入射光子のエネルギーによって、用いるモデルが異なる [13]。入射光子エネルギーが数 GeV 以上の場合、QGSP モデルが用いられる。数 GeV 以下の場合、本節で述べる CHIPS と BERT の二つのモデルから選択して用いる。また、20 MeV 以下では、BERT より精度の良い Low Energy Nuclear Data (LEND) モデルがある。

図 A.1  $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊のファインマン図。図 A.2  $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊のファインマン図。

## B.2 CHIPS モデル

CHIPS モデルでは、励起されたハドロン系はすべて質量を持たないクォークを含む泡 (quasmon) であると考えられている [14][15]。このモデルでは、どのハドロンも数個のクォーク粒子から構成されており、ハドロン間の相互作用はクォーク交換反応による純粋な運動論的效果としてモデル化される。quasmon の崩壊は、quasmon 内の 2 つのクォーク粒子の融合としてモデル化される。ハドロン化した核子は、核蒸発反応により二次粒子を放出する。

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix}$$

図 A.3 CKM 行列。

### B.3 BERT モデル

BERT モデルにおいて、核子と光子との相互作用は、部分断面積の測定値を用いて行われる。光核反応によって生じた二次粒子は、周囲の核子と相互作用する。BERT では核内カスケードモデル (INC) が用いられている。INC では、原子核内の核子と入射粒子との衝突を計算するというように、核子を古典的に扱う。また、二次粒子を放出した後の脱励起した核子は、低エネルギーのフラグメントを放出する [13]。

## 引用文献

- [1] Y.Tajima et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 592, 2008.
- [2] R.Murayama et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 953, 2020.
- [3] S. Ajimura et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 552, 2005.
- [4] 東北大学電子光理学研究センター. <https://www1.lns.tohoku.ac.jp/hadron/lns/>.
- [5] T.Ishikawa et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 622, 2010.
- [6] M.Doroshenko et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 545, 2005.
- [7] Andrzej J. Buras et al. *High Energy Physics - Phenomenology*, 33, 2015.
- [8] S. Ajimura et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 408, 1999.
- [9] Tables of particle properties. *Rev. Mod. Phys.*, 407, 1982.
- [10] Ken Sakashita. Measurement of the photon detection inefficiency due to photo-nuclear interaction. Master's thesis, Department of Physics at Osaka University, 2002.
- [11] M. Kobayashi and K. Maskawa. *Prog. Theor. Phys.*, 652, 1973.
- [12] M. Gorbahn J. Brod and E. Stamou. *Phys. Rev. D*, 034030, 2011.
- [13] Geant4 Collaboration. *Physics Reference Manual Release 10.5*, 2019.
- [14] P. V. Degtyarenko et al. *The European Physical Journal A*, 217-222, 2000.
- [15] P. V. Degtyarenko et al. *The European Physical Journal A*, 411-420, 2000.