# J-PARC KOTO 実験における、

中性子背景事象削減のための CsI電磁カロリメータ両端読み出しの研究

> 大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻 山中卓研究室 博士課程前期2年

# 原口 弘

平成29年3月17日

概 要

KOTO 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で行なわれ ている、中性 K 中間子の稀な崩壊モード  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索する実験である。

 $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のシグナルは $\pi^0$ が崩壊して生成された、2つの $\gamma$ 線のみが検出 される事である。そのため、高性能なカロリメータを用いてこの2つの $\gamma$ 線を検 出すると共に、 $K_L$ の崩壊領域を検出器で覆い、2つの $\gamma$ 線以外の粒子が観測され ない事を要求して、シグナル事象の同定を行う。

KOTO 実験における背景事象の一つとして中性子由来の背景事象がある。これ はビーム上流でビームから外れたハロー中性子が、カロリメータ内でエネルギー を落とした後反跳し、さらに別の箇所でエネルギーを落とす事により2つのγ線 と誤認される事象である。

この中性子背景事象を削減するために、KOTO 実験では新しい削減手法を導入する。現在 KOTO 実験では、カロリメータをビーム下流側から光電子増倍管 (PMT)を用いて読み出しを行っている。そこで、新しい削減手法では上流側にも MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を取り付けてカロリメータを両端から読み出す。これにより、カロリメータの両端の信号の時間差から、γ線や中性子がカロリメータ内で起こすシャワーの位置を測定でき、両粒子のシャワー生成の違いから ハロー中性子由来の背景事象の削減が見込まれる。

本研究の目的は、この新しい削減手法の評価である。まず  $\gamma$  線に対する CsI 電磁カロリメータ両端読み出しの評価のために、東北大学電子光理学センターの 150 ~800 MeV/c の陽電子ビームを用いて照射実験を行った。また、中性子に対する評価のために、大阪大学核物理研究センターの 80 MeV の中性子ビームを用いて照射実験を行った。両実験のデータ解析の結果、80 MeV の中性子に対しては、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の検出効率が 91.2% となるカットを用いて、73.0% の中性子事象を削減できた。

# 目 次

第1章	序論	8
1.1	KOTO 実験の物理	8
1.2	KOTO 実験の原理	9
	1.2.1 ビームライン	9
	1.2.2 測定原理	10
	1.2.3 背景事象	12
1.3	2013 年物理ラン	14
1.4	CsI 電磁カロリメータの両端読み出し	15
	1.4.1 削減手法の概要	15
	1.4.2 要求する削減能力	16
1.5	本研究の目的	17
<u></u>		
第2章	モンテカルロシュミレーション	18
2.1		18
2.2	Csl 電磁カロリメータ両端の時間差分布の再現方法	19
第3章	陽雷子ビームを用いた昭射実験	20
31	実験概要	20
3.2	セットアップ	$\frac{20}{20}$
3.3	・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	$\frac{-0}{22}$
0.0	331 垂直ランの概要	22
	3.3.2 波形解析	 22
	3.3.3 光量	${25}$
	334 時間分解能	$\frac{-6}{26}$
	3.3.5 CsI 電磁カロリメータ両端で観測した時間の差分と発光位置	_0
		29
3.4	平行ラン	$\frac{-5}{29}$
	3.4.1 平行ランの概要	30
	3.4.2 エネルギー分解能	30
	3.4.3 CsI 電磁カロリメータ両端の発光位置分布	31
3.5	シュミレーションとの比較	32
36	まとめ	33

第4章	中性子ビームを用いた照射実験	<b>34</b>
4.1	実験概要	34
4.2	セットアップ	35
4.3	宇宙線測定	35
	4.3.1 セットアップ	35
	4.3.2 エネルギー較正	36
	4.3.3 CsI 電磁カロリメータ両端で観測した時間の差分と発光位置	
	の較正	37
4.4	事象選別	38
	4.4.1 時間を用いたカット	38
	4.4.2 エネルギーを用いたカット	39
4.5	CsI 電磁カロリメータ両端の発光位置分布	40
4.6	シュミレーションとの比較......................	41
4.7	まとめ	42
第5章	中性子背景事象削減能力の見積もり	43
5.1	実験データからの見積もり....................	43
第6章	考察	45
6.1	CsI 結晶の中心を境に光量の違いが生まれた点	45
6.2	時間差と発光位置の変換式の傾きについて..........	45
6.3	ビーム照射実験とシュミレーションの結果の相違	46
6.4	今後の展望	47
笛7音	結論	48
212 I H		10

# 表目次

1.1	<i>K<sub>L</sub></i> の主要な崩壊モードとその崩壊分岐比 [8]	12
1.2	KOTO 実験における Veto 検出器	13

# 図目次

1.1	$K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のファインマンダイアグラム [1]。	8
1.2	J-PARC の全体図。KOTO 実験は、図右上に位置するハドロン実験	
	施設にて行われている。[6]	10
1.3	KOTO 実験の $K_L$ ビームライン [7] 。	10
1.4	KOTO 実験で使用する検出器の全体図。CsI calorimeter と記した電	
	磁カロリメータで2つのγ線を検出する。それ以外は全て背景事象	
	削減に用いる Veto 検出器である。 .................	11
1.5	CsI 電磁カロリメータの断面図。青で示した領域は 5 × 5 × 50 cm <sup>3</sup>	
	の pure CsI 結晶、赤で示した領域は 2.5 × 2.5 × 50 cm <sup>3</sup> の pure CsI	
	結晶で構成している。中心の白で示した領域は、ビームを下流へ通	
	すためのビーム穴。	11
1.6	CsI 電磁カロリメータで検出したハロー中性子を、2 つのγ線と誤	
	認する例。	14
1.7	2013 年物理ラン解析で得られた P <sub>T</sub> と Z <sub>REC</sub> 分布。130 < Pt < 250	
	$\mathrm{MeV/c}$ 、 $3000 < Z_{REC} < 5000 \mathrm{~mm}$ 領域が $\mathrm{signal~box}$ と定義されて	
	いる。分布は P <sub>T</sub> , Z <sub>REC</sub> 毎によっていくつかの領域に分けられてお	
	り、分布中の赤数字は黒枠内でシミュレーションにより見積もられ	
	た事象数、黒数字は黒枠内に実験で残った事象数である [9]。	15
1.8	γ線と中性子がCsI電磁カロリメータ内で生じる発光例。	16
1.9	両端読み出しにした CsI 電磁カロリメータの図。現在 KOTO 実験で	
	は、CsI 電磁カロリメータのビーム下流側から PMT を用いてデー	
	タを読み出しているが、上流側にも MPPC を取り付けて両端から	
	読み出す。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
21	シュミレーション上のセットアップ 5×5×50 cm <sup>3</sup> の pure CsI 結	
<i></i> 1	品の端面の中心に $\gamma$ 線。中性子を入射する。入射した粒子が結晶内	
	で起こした相互作用を情報として記録する。	19
		10

3.1	本実験で構築した乾燥機構の図。フレームの上にアルミ板を敷いた	
	土台の上に CsI 結晶置き、その周りをポリチューブで覆って密閉し、	
	そこヘコンプレッサーから乾燥フィルターを通した乾燥空気を送っ	
	た。また、湿度が 10%以下に保たれているかを、PC と USBRH を	
	用いてモニタリングした。	21
3.2	本実験のセットアップ。CsI電磁カロリメータの長手方向に対して垂	
	直にビームを照射したセットアップ(上図)と、平行に照射したセッ	
	トアップ (下図) に分けて実験を行った。	21
3.3	垂直ランで陽電子ビームを照射した位置。CsI 結晶の長手方向の中	
	心を原点とし、Z = 0、± 90、± 180 mm の位置に照射した。	22
3.4	垂直ランで Z = -180 mm の位置に陽電子ビーム照射した際にオシ	
	ロスコープで観測した 10 イベントの PMT 波形の重ね合わせ。横軸	
	が時間、縦軸が波高を表している。・・・・・・・・・・・・・・・	23
3.5	PMT の波形と同様に得た MPPC の波形。	23
3.6	垂直ランで Z = −180 mm の位置に陽電子ビーム照射した際に、オ	
	シロスコープで観測した PMT の波形のピークの時間を 0 s と定め、	
	かつピーク値を規格化した波形を全イベントで重ね合わせ、プロジェ	
	クションした波形。フィットした関数を赤線で示す。	24
3.7	PMT の波形と同様に得た MPPC の波形。フィットした関数を赤線	
	に示す。	25
3.8	垂直ランで Z = -180 mm の位置にビームを照射した際の PMT の	
	光量の分布。横軸は波形の積分値。フィットした正規分布の確率密	
	度関数を赤線で示す。	26
3.9	各照射位置の PMT(a)、MPPC(b) それぞれの光量。横軸は波形の	
	積分値。	26
3.10	垂直ランで Z = -180 mm の位置にビームを照射した際の PMT(a)、	
	MPPC(b)の時間分布。フィットした正規分布の確率密度関数を赤	
	線で示す。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
3.11	各照射位置での PMT、MPPC の時間分布を正規分布の確率密度関	
	数でフィットした際のσの値。	27
3.12	垂直ランで Z = −180 mm の位置にビームを照射した際の時間差分	
	布。フィットした正規分布の確率密度関数を赤線で示す。	28
3.13	各照射位置の時間差分解能。横軸がビーム照射位置、縦軸が各照射	
	位置の時間差分布を正規分布の確率密度関数でフィットした際のσ	
	の値。σの平均値を定数として赤線で示している。	28
3.14	カロリメータ両端の時間差と照射位置の相関図。横軸がビーム照射	
	位置、縦軸が各照射位置の時間差分布を正規分布の確率密度関数で	
	フィッティングした際のピークの値。5 点の直線近似を赤線で示し	
	ている。	29

3.15	陽電子ビームのエネルギーを変えて照射した際の PMT、MPPC そ れぞれの波形の光量分布。横軸は波形の面積分値。赤、青、ピンク、	
	緑色の順で、ヒームの連動量 200、400、600、800 MeV/c に対応す ろ	30
3.16	図 3.15 で示した PMT、MPPC のエネルギー分布を正規分布の確率 密度関数でフィットしたピーク値の光量とビームの運動量の関係	31
3.17	図3.15で示した PMT、MPPC のエネルギー分布を正規分布の確率	91
0	密度関数でフィットしたのを光量で割った値とビーム運動量の関係。	31
3.18	200 MeV/cの陽電子ビームを照射した平行ランで得た時間差を発光	
	位置に変換した分布。	32
3.19	本実験で得た発光位置分布(赤)とシュミレーションで得た発光位置	0.0
	分布 (育) の比較。縦軸は分布の面積分値で焼格化した。	33
4.1	中性子ビーム照射実験施設のビームラインの配置図 [11]。Li 標的に	
	陽子ビームを当てて中性子を生成し、図中左の照射実験室に導く。	34
4.2	実験のセットアッフ。陽電子照射実験の時と同様のセットアッフを	
	祖の、ビームの高さに合わせた朱音の上に固定している。USI 福태 の上下に宇宙線トリガー田のシンチレータを配置し、宇宙線も測定	
	できるようにした。	35
4.3	PMTの光量分布。ランダウ分布の確率密度関数でフィットし、ピー	
	クの光量を求めた。	36
4.4	CsI 結晶 Z = 150 mm に置いた上下 2 本のシンチレータを宇宙線が	
	通過した際のカロリメータ両端で観測した時間の差分布。正規分布	07
45	の確率密度関数でノイットし、ヒークの時間差を氷めた。	37
4.0	縦軸がカロリメータ両端で観測したの時間の差分布を正規分布の確	
	率密度関数でフィットした際のピークの時間差。3 点の直線近似を	
	赤線で示している。	38
4.6	PMT の時間分布。	39
4.7	各時間範囲の時間分布。それぞれ正規分布の確率密度関数でフィッ	
1.0	トし、ピークの時間を求めた。	39
4.8	十田緑側足じ $CSI$ 稻酯 $Z = 150 \text{ mm}$ の $仏直に于田緑が通過した院のエネルギー分布$	40
4.9	発光位置分布。横軸はCsI結晶の中心を0mmとした結晶の長手方	40
, in the second se	向の位置。	41
4.10	本実験で得た発光位置分布 (青) とシュミレーションで得た発光位置	
	分布 (赤)の比較。縦軸は実験で得た発光位置分布の面積分値で規格	
	化した。...............................	42

5.1	陽電子ビーム照射実験で得た発光位置分布 (赤) と中性子ビーム照 射実験で得た発光位置分布 (青)の比較。縦軸は分布の面積分値で規	
5.2	格化した。 発光位置でカットをかけた際の、γ線と中性子のそれぞれの検出効	44
	率。	44
6.1	陽電子ビーム照射実験の垂直ランにおける時間差と発光位置の相関。 横軸が発光位置、縦軸が時間差を示す。第3章で述べた Z = ±180 mm の点は除いた。	46

# 第1章 序論

本章では、中性 K 中間子の稀な崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索を行う KOTO 実験の概要と、本研究の目的を述べる。

### 1.1 KOTO 実験の物理

本節では KOTO 実験が探索している  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊とその目的について述べる。

 $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は標準理論で予測されている崩壊である。また、この崩壊は CP 対称性を破る性質を持つ。CP 対称性とは、粒子・反粒子に対して荷電共役変換 C とパリティ変換 P を同時に行った際に、両粒子に対して物理法則が同じように働 くとする対称性である。 $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊ダイアグラムを図 1.1 に示す。



図 1.1:  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊のファインマンダイアグラム [1]。

このように  $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊は崩壊過程にループを含み、ループに新粒子の介入 があった際には、標準理論によって予測されている  $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比の値 と実測値との間にズレが生じる。また、この崩壊は標準理論において予測される 分岐比が 2×10<sup>-11</sup>[2] と小さいことに加え、分岐比の理論予測の不定性が 2%[2] 程 度と小さいため、新粒子の介入が及ぼす崩壊分岐比への寄与を観測しやすい。例 えば、標準模型を拡張し超対称性を持つような MSSM モデルでは、 $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の 崩壊分岐比が 1 桁近く高くなる可能性があると予測されている [3]。

 $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索は様々なグループにより実験が行われてきており、この崩壊分 岐比に対して現在与えられている上限値は、高エネルギー加速器研究機構で行わ れた E391a 実験で得られた、

$$Br(K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8} (90\% \ C.L.)$$
 (1.1)

である [4]。

KOTO 実験は、より高い感度で  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索し、標準理論を超えた様々な新物理のモデルを検証する。

#### 1.2 KOTO 実験の原理

本節では、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の観測を目指す KOTO 実験の測定原理と、その背 景事象について述べる。

#### 1.2.1 ビームライン

KOTO 実験は、茨城県東海村にある大強度用紙加速器施設 J-PARC で行ってい る実験である。J-PARC の全体図を図 1.2 に、KOTO 実験の  $K_L$  ビームラインの 全体図を図 1.3 に示す。J-PARC のメインリングで 30 GeV に加速された一次陽子 ビームを、標的 (設計上は Ni を用いていたが、現状では Au を使用している) に当 てて  $K_L$  を生成し、その崩壊を観測する。標的からは  $K_L$  以外の粒子も発生する が、標的から崩壊領域まで 20 m の距離を設けて短寿命の粒子を取り除き、荷電粒 子は電磁石 ("Sweeping magnet") によって曲げてビームライン外に排出し、 $\gamma$ 線は 70 mm 厚の鉛でできた"Photon absorber"によって遮蔽している。

KOTO 実験では  $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の  $\pi^0$  を再構成する際に、 $\pi^0$  がビーム軸上で崩壊した事を仮定して事象選別を行っており、そのため  $K_L$  ビームはコリメータを用いて 9  $\mu$ sr に絞っている。二次粒子として生成されたビーム中の中性子は、このコリメータで複数回散乱する事によりビームの外に出てハロー中性子となる。これを削減するためにコリメータを 2 段階に分け、コリメータ表面の角度を 1 段目と 2 段目で僅かに変え、1 段目で散乱した中性子が 2 段目のコリメータの内側で散乱してハロー中性子となる事象を削減している。この結果、ハロー中性子の数を 5 桁近く削減している [5]。



図 1.2: J-PARC の全体図。KOTO 実験は、図右上に位置するハドロン実験施設に て行われている。[6]



図 1.3: KOTO 実験の  $K_L$  ビームライン [7]。

#### 1.2.2 測定原理

KOTO 実験で用いている検出器を図 1.4、CsI 電磁カロリメータの断面図を図 1.5 に示す。CsI 電磁カロリメータは、 $2.5 \times 2.5 \times 50$  cm<sup>3</sup>の pure CsI 結晶 2240 本の周 りを $5 \times 5 \times 50$  cm<sup>3</sup>の pure CsI 結晶 476 本で囲んで構成している。また、結晶に特 殊なラッピングを施しており、結晶内の発光位置によらず、読み出す光量の一様性 を保っている。KOTO 実験では検出器で囲まれた領域を崩壊領域と定め、この領 域内で崩壊した  $K_L$  のみを観測する。図の左側から入射した  $K_L$  は  $\pi^0$  とニュート リノ対に崩壊し、生成された  $\pi^0$  は直ちに 2 つの  $\gamma$  線に崩壊する。ニュートリノ対 は反応確率が低く検出されないため、2 つの  $\gamma$  線のみをカロリメータによって検出 する。また、崩壊の際にニュートリノ対が運動量を持ち去るため、 $\pi^0$  は  $K_L$  ビーム 軸方向に対して垂直な横方向の運動量成分を持つ。そこで、カロリメータに入射 した2つの $\gamma$ 線から $\pi^0$ を再構成し、再構成した崩壊位置 ( $Z_{REC}$ ) が定めた崩壊領 域内であることと、 $\pi^0$  が横方向運動量 ( $P_t$ )を持つことを要求して  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩 壊事象と同定する。崩壊領域を抜けたビームは、カロリメータ中心に空けたビー ム穴を通って下流へ抜ける。



図 1.4: KOTO 実験で使用する検出器の全体図。CsI calorimeter と記した電磁カロ リメータで 2 つの  $\gamma$ 線を検出する。それ以外は全て背景事象削減に用いる Veto 検 出器である。



図 1.5: CsI 電磁カロリメータの断面図。青で示した領域は $5 \times 5 \times 50$  cm<sup>3</sup> の pure CsI 結晶、赤で示した領域は $2.5 \times 2.5 \times 50$  cm<sup>3</sup> の pure CsI 結晶で構成している。 中心の白で示した領域は、ビームを下流へ通すためのビーム穴。

### 1.2.3 背景事象

本小節では、KOTO 実験の背景事象について述べる。

#### K<sub>L</sub>崩壊による背景事象

 $K_L$ の主要な崩壊モードを表 1.1 に示す。これらの崩壊を $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊と誤認 すると、KOTO実験において背景事象となる。そのため、 $K_L$ ビーム周りを Veto 検出器と呼ばれる検出器で囲い (図 1.4 参照)、各々の検出器で表 1.2 で示す粒子を 観測して  $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊と区別し、 $\pi^0$ 再構成の情報も合わせて背景事象を削減 している。

崩壊モード	崩壊分岐比	
$K_L \to \pi^{\pm} e^{\mp} \nu$	$40.55\pm0.11~\%$	
$K_L \to \pi^{\pm} \mu^{\mp} \nu$	$27.04\pm0.07\%$	
$K_L \to \pi^0 \pi^0 \pi^0$	$19.52 \pm 0.12 \ \%$	
$K_L \to \pi^+ \pi^- \pi^0$	$12.54 \pm 0.05 ~\%$	
$K_L \to \pi^+ \pi^-$	$(1.967 \pm 0.010) \times 10^{-3}$	
$K_L \to \pi^0 \pi^0$	$(8.64 \pm 0.06) \times 10^{-4}$	
$K_L \to \gamma \gamma$	$(5.47 \pm 0.04) \times 10^{-4}$	

表 1.1: K<sub>L</sub>の主要な崩壊モードとその崩壊分岐比 [8]

表 1.2: KOTO 実験における Vete	o検出器
検出器名	検出粒子
Charged Veto (CV)	荷電粒子
Main Barrel (MB)	$\gamma$
Inner Barrel (IB)	$\gamma$
Barrel Charged Veto (BCV)	荷電粒子
Front Barrel (FB)	$\gamma$
Neutron Color Counter (NCC)	$\gamma$
Liner Charged Veto (LCV)	荷電粒子
Outer Edge Veto (OEV)	$\gamma$
Collar Counter 04 (CC04)	$\gamma$
Collar Counter 05 (CC05)	$\gamma$
Collar Counter 06 (CC06)	$\gamma$
Beam Hole Charged Veto (BHCV)	荷電粒子
Beam Hole Photon Veto (BHPV)	$\gamma$
Beam Pipe Charged Veto (BPCV)	荷電粒子

#### 中性子由来の背景事象

ビーム上流で標的から発生した中性子の大多数は*K<sub>L</sub>*ビームに沿って進むため、 カロリメータの位置に到達してもビーム穴を通って下流へ抜ける。しかし、崩壊 領域内で中性子が空気と相互作用して π<sup>0</sup>を生成すると、カロリメータに 2 つの γ 線が到達し背景事象となる。この背景事象の削減のため、崩壊領域を囲む検出器 を真空容器内に設置し、検出器内の空間を真空に保っている。

また、コリメータ内で複数回散乱して *K*<sub>L</sub> ビーム軸から逸れたハロー中性子が カロリメータに入射し、図 1.6 に示すように、一度エネルギーを落とした後に反跳 し、更に別の箇所でエネルギーを落とした際に、2つのγ線と誤認され背景事象と なる可能性がある。これに対しても、γ線と π<sup>0</sup> に対する運動力学的カットと、カ ロリメータ上にできる電磁シャワーの形状に対するカットを用いて削減している。



図 1.6: CsI 電磁カロリメータで検出したハロー中性子を、2つのγ線と誤認する例。

## 1.3 2013年物理ラン

KOTO 実験に用いる検出器は 2012 年中に製作、配置を終えた。この段階では、 図 1.4 中の Inner Barrel と Beam Pipe Charged Veto は未実装である。

2013年5月に初の物理ランを行い、約100時間分<sup>1</sup>の物理データを取得した。この物理ランにおけるデータは既に解析済みで、結果を発表している[9]。

解析結果を図 1.7 に示す。2013 年物理ランでは signal box 中に1事象観測した。 また、シュミレーションによって signal box 中の背景事象数を 0.36 ± 0.16、その 内ハロー中性子由来の背景事象を 0.18 ± 0.15 と見積もっており [9]、観測された1 事象はビーム上流で生成されたハロー中性子由来のものであると予測している。

最終結果として、 $1.29 \times 10^{-8}$ の実験感度 (S.E.S.<sup>2</sup>) を達成した。これは、E391a 実験の最終実験感度  $1.11 \times 10^{-8}$  とほぼ同等の値である。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>J-PARC ハドロン実験施設における放射能漏れの事故により加速器が途中で止まったため、取 得期間は4日間に留まっている。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>S.E.S. = Single Event Sensitivity:目的とする崩壊モードの分岐比を S.E.S. で割った値は、 その実験で期待される事象数に一致する。



図 1.7: 2013 年物理ラン解析で得られた  $P_T \ge Z_{REC}$  分布。130 < Pt < 250 MeV/c、 3000 <  $Z_{REC}$  < 5000 mm 領域が signal box と定義されている。分布は  $P_T$ ,  $Z_{REC}$ 毎によっていくつかの領域に分けられており、分布中の赤数字は黒枠内でシミュ レーションにより見積もられた事象数、黒数字は黒枠内に実験で残った事象数で ある [9]。

## 1.4 CsI電磁カロリメータの両端読み出し

本節では、中性子背景事象の削減手法として新しく導入予定である CsI 電磁カ ロリメータの両端読み出しについて述べる。

#### 1.4.1 削減手法の概要

前節で述べたように、2013 年物理ランではハロー中性子由来の背景事象が1事 象観測された。そのため、この背景事象を削減する新しい手法を開発して導入す ることが必須となっている。そこで KOTO 実験では、 $\gamma$ 線と中性子が CsI 電磁カ ロリメータ内で生成するシャワー生成の相違から各粒子を判別する新しい手法を 導入する。例えば 500 MeV の $\gamma$ 線による電磁シャワーでエネルギーを最大に落と す位置は、放射長の約5倍の位置である。pure CsI 結晶の $\gamma$ 線の放射長は 1.86 cm であるため、その位置は約 9.3 cm である。一方、中性子の Interaction length は 39.3 cm と長く、シャワーを生成する位置は結晶の奥行方向に一様に分布する。そ のため、各粒子がカロリメータ内で図 1.8 のようにシャワーを生成した場合、そ の発光位置を測定することにより $\gamma$ 線と中性子の判別が可能である。



図 1.8: γ線と中性子が CsI 電磁カロリメータ内で生じる発光例。

現在 KOTO 実験では、CsI 電磁カロリメータの K<sub>L</sub> ビーム下流側から光電子増 倍管 (PMT) を用いてデータを読み出している。そこで、我々は図 1.9 のように、 ビーム上流側にも MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) を取り付けて両端から光 を読み出し、両端の時間差から発光位置を測定する。そして、カロリメータ後方 で発光した事象については中性子由来の背景事象として排除する。



図 1.9: 両端読み出しにした CsI 電磁カロリメータの図。現在 KOTO 実験では、 CsI 電磁カロリメータのビーム下流側から PMT を用いてデータを読み出している が、上流側にも MPPC を取り付けて両端から読み出す。

#### 1.4.2 要求する削減能力

標準理論で予測される  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の観測のためには、2013 年物理ランの 500 倍近い統計量が必要である。そのため、実際に観測した 1 事象と考えられてい るハロー中性子由来の事象に対しては、事象数を 3 桁削減することが要求されてい た。そこで、2013 年物理ラン以降この背景事象に対する新しい削減手法が開発さ れており [10]、現在 2 桁の削減を達成している。そのため本削減手法では、ハロー 中性子由来の背景事象を 1/10 以下に削減する削減能力を要求する。

# 1.5 本研究の目的

本研究の目的は、前節で述べた CsI 電磁カロリメータの両端読み出しによる中 性子背景事象の削減手法の評価である。この削減手法を評価するためには、この 手法を用いた際に、γ線と中性子によってどのような応答が得られるのかを、それ ぞれ独自に測定する必要がある。そこで、γ線に対する評価のために東北大学電子 光理学センターの150~800MeVの陽電子ビームを用いて照射実験を行い、中性子 に対する評価のために大阪大学核物理研究センターの80MeVの中性子ビームを用 いて照射実験を行った。また、両実験の結果を比較して本削減手法の削減能力を 見積もった。

# 第2章 モンテカルロシュミレー ション

本章では、本削減手法の削減能力の見積もりに用いるモンテカルロシュミレー ションについて述べる。

## 2.1 モンテカルロシュミレーションの概要

本削減手法を KOTO 実験に導入した際の削減能力を見積もるために、モンテカ ルロシュミレーションを行う。その際には、シュミレーションが本削減手法によ る応答を再現していることを保証しなければならない。そのため、最終的な削減 能力を見積もる前段階として、今回行ったビーム照射実験をシュミレーションし、 その結果と実験結果の比較によって本削減手法の応答をシュミレーション上で正 しく再現できているか評価する。

モンテカルロシュミレーションにはGeant4を用いた。これは素粒子物理学でよ く用いられる物質と粒子との相互作用を計算するためのソフトウェアである。

本研究では、 $5 \times 5 \times 50$  cm<sup>3</sup> の pure CsI 結晶をシュミレーション上に用意し、 図 2.1 のように結晶の長手方向に向かって、結晶端面の中心に $\gamma$ 線と中性子を入射 するセットアップを組み、各粒子が pure CsI 結晶内で起こす相互作用を計算した。

Geant4では粒子が物質に入射した際に、物質内で起こした相互作用を細かいス テップに分けて計算し、粒子のエネルギーが0になるまで計算を続ける。そして、 各ステップ毎のエネルギー損失、時間、場所を情報として記録する。また入射し た粒子だけでなく、物質内の相互作用で生成された二次、三次...粒子の情報も同 様に記録するため、物質内でシャワーが生成された場合も、正確にシュミレーショ ンする事ができる。

図 2.1: シュミレーション上のセットアップ。 $5 \times 5 \times 50$  cm<sup>3</sup> の pure CsI 結晶の端 面の中心に  $\gamma$ 線、中性子を入射する。入射した粒子が結晶内で起こした相互作用 を情報として記録する。

# 2.2 CsI電磁カロリメータ両端の時間差分布の再現方法

本削減手法では、CsI電磁カロリメータの両端で観測した時間の差分から発光位 置を測定する。そのため、ビーム照射実験との比較にモンテカルロシュミレーショ ンを用いる際は、シュミレーション上でも同様に時間差分布を再現する必要があ る。その再現を以下のような手順で行う。

- 1.1粒子を照射し始めてから各ステップで落としたエネルギーによって発光し た光が両端へと伝播するまでの時間を求める。
- 2. 求めた時間とエネルギーから、発光した光が上流端 (MPPC)、下流端 (PMT) で観測される波形を各ステップで再現する。
- 3. 再現した波形を全ステップについて足し合わせ、1粒子がカロリメータ内で 生成したシャワーによって得られる波形を再現する。
- 4. その波形から、上流端、下流端共に時間を定め、両端の時間差を求める。
- 5. 求めた時間差をビーム照射実験で得た時間差と発光位置の MPPC と PMT の 時間差分解能でなまらせる。
- 6. 照射した全粒子において同様のことを行い、histogram につめて時間差分布 を作成する

この再現をする際に、以下の4項目はビーム照射実験で実際に得られる値を用 いる。

- 1. カロリメータ内の光の伝搬速度
- 2. 上流端、下流端で得られる波形を表すパラメータ

3. 実験に用いた MPPC と PMT の時間分解能

次章から述べるビーム照射実験については、時間差分布と共にこれらの項目に ついても測定を行う。

# 第3章 陽電子ビームを用いた照射 実験

本章では、陽電子ビーム照射実験の概要と結果を述べる。

#### 3.1 実験概要

CsI 電磁カロリメータ内で電磁シャワーが生成された際の本削減手法の評価の ため、東北大学電子光理学センターの 200~800 MeV/c の陽電子ビームを用いて ビーム照射実験を行った。KOTO 実験ではγ線をカロリメータによって観測する が、陽電子はカロリメータに入射した際にγ線と同様に電磁シャワーを生成する ため、陽電子に対する本削減手法の評価はγ線に対する評価と相関を持つ。

# 3.2 セットアップ

pure CsI 結晶は潮解性を持つため、図 3.1 のような乾燥機構を構築して実験を 行った。pure CsI 結晶周りはポリチューブで覆って密閉し、コンプレッサーから は乾燥フィルターを通して乾燥空気を送った。また、USBRH<sup>1</sup>と PC を用いて湿度 をモニタリングし、湿度が 10 %以下に保たれていることを確認した。

実験のセットアップを図 3.2 に示す。本実験では、カロリメータの長手方向に対 して垂直な方向にビームを照射したセットアップ(以下、垂直ラン)と、平行な方 向に照射したセットアップ(以下、平行ラン)に分けて実験を行った。1×1 cm<sup>2</sup> の シンチレータ3本の同期を取って照射位置を定め、時間分解能が 100 ps のシンチ レータを用いて時間の始点を定めている。PMT、MPPCの波形はオシロスコープ を用いて記録した。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>USB 接続の湿度計モジュール



図 3.1: 本実験で構築した乾燥機構の図。フレームの上にアルミ板を敷いた土台の 上に CsI 結晶置き、その周りをポリチューブで覆って密閉し、そこへコンプレッ サーから乾燥フィルターを通した乾燥空気を送った。また、湿度が 10%以下に保 たれているかを、PC と USBRH を用いてモニタリングした。



図 3.2: 本実験のセットアップ。CsI 電磁カロリメータの長手方向に対して垂直に ビームを照射したセットアップ(上図)と、平行に照射したセットアップ(下図)に 分けて実験を行った。

### 3.3 垂直ラン

本節では、垂直ランの概要とその結果について述べる。

#### 3.3.1 垂直ランの概要

カロリメータ両端の時間差と発光位置の較正を行うために、500 MeV/c の陽電 子ビームをカロリメータの長手方向に対して垂直に照射した。垂直ランでは、図 3.3 に示すようにカロリメータの側面に対して5点照射位置を定めてビームを照射 した。



図 3.3: 垂直ランで陽電子ビームを照射した位置。CsI 結晶の長手方向の中心を原 点とし、 $Z = 0, \pm 90, \pm 180 \text{ mm}$ の位置に照射した。

#### 3.3.2 波形解析

垂直ランにおいて Z = -180 mm の位置に陽電子ビームを照射した際に、上流端 (MPPC)、下流端 (PMT) で得た波形をそれぞれ図 3.4、図 3.5 に示す。波形を鮮明にするために 10 イベントの波形を重ね合わせている。MPPC の波形の波高が -0.1 V の閾値を超えた時間を 0 s とした。図中の  $-0.7 \times 10^{-6} \text{ s}$  から  $-0.3 \times 10^{-6} \text{ s}$ の波高の平均値をペデスタルとし、各点の波高との差分を全時間範囲で積分した値を光量として用いた。



図 3.4: 垂直ランで Z = -180 mm の位置に陽電子ビーム照射した際にオシロス コープで観測した 10 イベントの PMT 波形の重ね合わせ。横軸が時間、縦軸が波 高を表している。



図 3.5: PMT の波形と同様に得た MPPC の波形。

また PMT、MPPC それぞれの波形に対して、ピークの時間を0sと定め、かつ ピーク値を規格化した波形を作成した。その波形を全イベントで重ね合わせ、プロ ジェクションしたものを図 3.6、3.7 に示す。それぞれの波形は、CsI 結晶に入射し た粒子がエネルギーを落とした際に生じる光の光量が時間に応じて指数減衰する 効果と、PMT、MPPC によって光が増幅される際にその光量が時間分解能によっ てなまる効果の重ね合わせによって形成される。そのため、この波形を以下の式 で示す指数減衰関数と相補誤差関数を重ね合わせた関数でフィットした。

$$A(t) = A \exp(-B(t-t_0)) \operatorname{erfc}\left(\frac{-(t-t_0) + \sigma^2 B}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$
(3.1)

Bは指数減衰関数の指数であるため、波形の減衰の度合いを示す。また、σは波形 全体の広がりを示すパラメータである。MPPCの波形をフィットした関数は B、σ の値が PMT の波形をフィットした関数の同パラメータより大きく、PMT と比較 して波形の減衰が遅く、波形が広がっていることがわかる。シュミレーション上 で波形を再現する際には、このフィットで得た B、σ のパラメータを用いる。



図 3.6: 垂直ランで Z = -180 mm の位置に陽電子ビーム照射した際に、オシロス コープで観測した PMT の波形のピークの時間を 0 s と定め、かつピーク値を規格 化した波形を全イベントで重ね合わせ、プロジェクションした波形。フィットした 関数を赤線で示す。



図 3.7: PMT の波形と同様に得た MPPC の波形。フィットした関数を赤線に示す。

#### 3.3.3 光量

垂直ランで、Z = -180 mm 位置に陽電子ビームを照射した際の PMT の光量分 布を図 3.8 に示す。横軸は波形の積分値となっている。この分布を正規分布の確率 密度関数でフィットし、ピークの光量を求めた。MPPC でも同様のことを行い、各 照射位置でのピークの光量をプロットしたものが図 3.9 である。PMT はビーム照 射位置が PMT に近づくにつれて光量が増えているが、約 10%以内に収まってい る。一方、MPPC は Z = 0 mm の照射位置を境に、光量に約 40% の大きな違いが 生まれている。これについては理由の特定に至っておらず、第 6 章にて考察する。



図 3.8: 垂直ランで Z = -180 mm の位置にビームを照射した際の PMT の光量の 分布。横軸は波形の積分値。フィットした正規分布の確率密度関数を赤線で示す。



図 3.9: 各照射位置の PMT(a)、MPPC(b) それぞれの光量。横軸は波形の積分値。

#### 3.3.4 時間分解能

図 3.3 中の Z = -180 mm の位置にビームを照射した際に得た PMT、MPPC の時間分布を図 3.10 に示す。この解析では波形のピーク値の半分を閾値として定め、その閾値を超えた時間を用いることにより、ピーク値によって時間が揺らぐ効果を削減している。得た時間分布を正規分布の確率密度関数でフィットし、その $\sigma$ の値を求めた。また各照射位置での $\sigma$ の値を図 3.11 に示す。PMT よりも MPPC の

方がσが大きいことがわかる。また、各照射位置で PMT、MPPC の時間分解能に 違いが生じていることがわかる。



図 3.10: 垂直ランで Z = -180 mm の位置にビームを照射した際の PMT(a)、 MPPC(b) の時間分布。フィットした正規分布の確率密度関数を赤線で示す。



図 3.11: 各照射位置での PMT、MPPC の時間分布を正規分布の確率密度関数で フィットした際の σ の値。

同じランで得た、PMT と MPPC の間の時間の差分布を図 3.12 に示す。また、 この分布を正規分布の確率密度関数でフィットし、 $\sigma$ の値を求めた。同様にして得 た各照射位置の $\sigma$ の値を図 3.13 に示す。ビーム照射位置によって $\sigma$ の値に違いが 生じており、照射位置が MPPC から遠く、また PMT に近くなるにつれて $\sigma$ の値 が大きくなっている。これは、MPPC の時間分解能が PMT と MPPC の間の時間 差の分解能を決定しており、MPPCの光量が大きいとσの値が小さく、光量が小 さいとσの値が大きくなるためである。



図 3.12: 垂直ランで Z = -180 mm の位置にビームを照射した際の時間差分布。 フィットした正規分布の確率密度関数を赤線で示す。



図 3.13: 各照射位置の時間差分解能。横軸がビーム照射位置、縦軸が各照射位置 の時間差分布を正規分布の確率密度関数でフィットした際の σ の値。 σ の平均値を 定数として赤線で示している。

# 3.3.5 CsI 電磁カロリメータ両端で観測した時間の差分と発光位置 の較正

CsI 電磁カロリメータ両端で観測した時間の差分と発光位置の較正を行うため に、各照射位置で図 3.12 のように時間差分布をフィットしてピークの時間差の値 を求めた。また、誤差を含めた時間差の値と照射位置の相関を図 3.14 に示す。赤 線が 5 点の直線近似を示しており、時間差と発光位置の変換式として、

時間差 
$$[s] = 1.73 \times 10^{-11} \times$$
発光位置  $[mm] - 3.00 \times 10^{-8}$  (3.2)

を得た。平行ランにおけるカロリメータ両端の時間差を発光位置に変換する際に はこの式を用いる。また、この式の傾きの逆数は節2.2で述べたカロリメータ内の 光の伝搬速度の2倍に相当する。



図 3.14: カロリメータ両端の時間差と照射位置の相関図。横軸がビーム照射位置、 縦軸が各照射位置の時間差分布を正規分布の確率密度関数でフィッティングした際 のピークの値。5点の直線近似を赤線で示している。

# 3.4 平行ラン

本節では、平行ランの概要とその結果について述べる。

#### 3.4.1 平行ランの概要

KOTO 実験で CsI 電磁カロリメータに入射する  $\gamma$  線は  $K_L$  ビーム方向の運動量 成分が大きい。そのため、平行ランによって得た時間差分布を本削減手法におけ る削減能力の見積もりに用いる。平行ランでは陽電子ビームの運動量を 200、400、 600、800 MeV/c と変えて照射し、時間応答と共にエネルギー応答も観測した。

#### 3.4.2 エネルギー分解能

照射した陽電子ビームのエネルギーに応じた PMT、MPPC で測定した光量分 布を図 3.15 に示す。横軸は 3.3.2 で述べた波形の面積分値を示す。また、各分布を 正規分布の確率密度関数でフィットし、そのピーク値の光量と、σの値とビームの エネルギーの関係を図 3.16、3.17 に示す。光量はビームの運動量に比例し、光量 が大きくなるにつれエネルギー分解能が小さくなることがわかる。



図 3.15: 陽電子ビームのエネルギーを変えて照射した際の PMT、MPPC それぞれ の波形の光量分布。横軸は波形の面積分値。赤、青、ピンク、緑色の順で、ビーム の運動量 200、400、600、800 MeV/c に対応する。



図 3.16: 図 3.15 で示した PMT、MPPC のエネルギー分布を正規分布の確率密度 関数でフィットしたピーク値の光量とビームの運動量の関係。



図 3.17: 図 3.15 で示した PMT、MPPC のエネルギー分布を正規分布の確率密度 関数でフィットしたσを光量で割った値とビーム運動量の関係。

### 3.4.3 CsI 電磁カロリメータ両端の発光位置分布

200 MeV/c の陽電子ビームを照射した平行ランで得た時間差を、式 4.1 を用い て変換した発光位置の分布を図 3.18 に示す。カロリメータの長手方向 -250 mm< Z < -50mm 付近にイベントが固まっており、入射した陽電子がカロリメータ前 方で電磁シャワーを生成し、エネルギーを落としていることがわかる。



図 3.18: 200 MeV/cの陽電子ビームを照射した平行ランで得た時間差を発光位置 に変換した分布。

# 3.5 シュミレーションとの比較

節2.2 に述べた方法で、5×5×50 cm<sup>3</sup>の pure CsI 結晶の長手方向に対して、結 晶端面の中心に 200MeV の陽電子を照射したシュミレーションを行った。その結 果と前節で得た発光位置分布との比較を図 3.19 に示す。縦軸は分布の積分値で規 格化した。シュミレーションによるピークの位置が約 30mm ビーム上流側にズレ ている。これは、時間差にして約 0.5 ns に相当する。



図 3.19: 本実験で得た発光位置分布 (赤) とシュミレーションで得た発光位置分布 (青)の比較。縦軸は分布の面積分値で規格化した。

# 3.6 まとめ

CsI 電磁カロリメータ内で電磁シャワーが生成された際の本削減手法の評価の ために、東北大学電子光理学センターの陽電子ビームを用いてビーム照射実験を 行った。結果として得た発光位置分布は、ビーム方向に対してカロリメータの上 流側に電磁シャワーが生成されることを示した。また、モンテカルロシュミレー ションを用いて実験結果の再現を試みたが、それぞれの結果に違いが生じた。こ の理由については第6章で考察する。

# 第4章 中性子ビームを用いた照射 実験

本章では、中性子ビーム照射実験の概要と結果について述べる。

### 4.1 実験概要

中性子に対する本削減手法の評価のために、大阪大学核物理研究センターの中 性子ビームを用いてビーム照射実験を行った。実験施設のビームラインの配置図 を図4.1に示す。ビーム上流のリングサイクロトロンで加速した陽子を、図中のLi 標的に照射して中性子を生成し、コリメータを通して全長100 mの照射実験室に 中性子を導く。また、標的からはγ線も生成されて照射実験室に到達する。



図 4.1: 中性子ビーム照射実験施設のビームラインの配置図 [11]。Li 標的に陽子 ビームを当てて中性子を生成し、図中左の照射実験室に導く。

## 4.2 セットアップ

実験のセットアップを図 4.2 に示す。乾燥機構と CsI 結晶、PMT、MPPC は、3 章で述べた陽電子照射実験で用いたものを再度使用しており、データ取得も同様 にオシロスコープを用いて波形を記録した。また、宇宙線測定用のトリガーシン チレータも同時に配置した。

セットアップは標的から 30m の位置で組み立てた。この時、80 MeV の中性子 と  $\gamma$  線との飛行時間の差は約 142 ns であり、時間のカットを用いて中性子事象と  $\gamma$  線事象の判別が可能である。



図 4.2: 実験のセットアップ。陽電子照射実験の時と同様のセットアップを組み、 ビームの高さに合わせた架台の上に固定している。CsI 結晶の上下に宇宙線トリ ガー用のシンチレータを配置し、宇宙線も測定できるようにした。

#### 4.3 宇宙線測定

本節では、同照射実験室で行った宇宙線測定の概要と結果について述べる。

#### 4.3.1 セットアップ

前節で述べたように、宇宙線測定のセットアップは照射実験のセットアップに 組み込んである。本測定では図中 CsI 結晶の Z = -150,0,150 mm の位置に、結晶 を挟むように約8 cm 角のシンチレータを設置し、同位置の上下2本のシンチレー タの同期を取って宇宙線が結晶を突き抜けたことを要求し、時間の始点を定めた。

#### 4.3.2 エネルギー較正

宇宙線が CsI 結晶を突き抜けた際に落としたエネルギーを算出してエネルギー 較正を行った。宇宙線が CsI 結晶内を通過する際の 1 cm あたりのエネルギー損失 は約 5.61 MeV である [8]。また、本実験では 5×5×50 cm<sup>3</sup> の CsI 結晶を用いてい るため、結晶の側面に対して垂直に入射した宇宙線が結晶内で落とすエネルギー は 28.1 MeV となる。

宇宙線がZ = 150 mm に置いた上下2本のシンチレータを突き抜けた時の、PMT の光量分布を図 4.3 に示す。横軸は PMT の波形の面積分値を示す。横軸0付近に ピークを持つ事象は、シンチレータの幅が CsI 結晶の幅よりも大きいために結晶 を突き抜けずに上下のシンチレータを通過した事象である。この分布をランダウ 分布の確率密度関数でフィットし、ピークの光量を28.1 MeV としてエネルギー較 正を行った。



図 4.3: PMT の光量分布。ランダウ分布の確率密度関数でフィットし、ピークの光量を求めた。

# 4.3.3 CsI 電磁カロリメータ両端で観測した時間の差分と発光位置 の較正

CsI 結晶 Z = 150 mm に置いた上下2本のシンチレータを宇宙線が通過した際 の時間差分布を図4.4 に示す。この分布を正規分布の確率密度関数でフィットして ピークの時間差を求めた。また、各位置でのピークの時間差を図4.5 に示す。この 3 点を直線近似し、CsI 電磁カロリメータ両端で観測した時間の差分と発光位置の 変換式

時間差 
$$[s] = 1.78 \times 10^{-11} \times$$
発光位置  $[mm] - 3.90 \times 10^{-8}$  (4.1)

を得た。この傾きは、節 3.3.5 で得た陽電子ビーム照射実験時の変換式の傾きと比べて誤差の範囲で一致している。



図 4.4: CsI 結晶 Z = 150 mm に置いた上下 2本のシンチレータを宇宙線が通過 した際のカロリメータ両端で観測した時間の差分布。正規分布の確率密度関数で フィットし、ピークの時間差を求めた。



図 4.5: カロリメータ両端の時間差と発光位置の相関図。横軸が発光位置、縦軸が カロリメータ両端で観測したの時間の差分布を正規分布の確率密度関数でフィット した際のピークの時間差。3 点の直線近似を赤線で示している。

### 4.4 事象選別

本節では、実験データの解析に用いたカットについて述べる。

#### 4.4.1 時間を用いたカット

 $\gamma$ 線事象と中性子事象を選別するために、PMTの時間を用いたカットを行った。 時間の始点としてリングサイクロトロンの RF の信号を用いた。PMT の時間分布 を図 4.6 に示す。また、横軸  $-0.16 \times 10^{-6}$  s 辺りと0 s 辺りの2つのピークを、図 4.7 のように正規分布の確率密度関数でフィッティングを行い、それぞれのピーク の値を求めた。その差が約 160 ns と 4.2 で述べた 80 MeV 中性子と $\gamma$ 線の飛行時間 の差に近いことから、前者が $\gamma$ 線事象、後者が中性子事象である。そこで、PMT の時間が  $-0.01 \times 10^{-6}$  s 以上であることを要求して $\gamma$ 線事象を削減した。

また本実験の結果を陽電子ビーム照射実験との比較に用いるためには、標的から直接カロリメータに入射した中性子を観測したい。そこで PMT の時間が 0 s 以下であることを要求し、実験室の壁などで散乱してカロリメータに入射した中性子事象を排除した。





図 4.7: 各時間範囲の時間分布。それぞれ正規分布の確率密度関数でフィットし、 ピークの時間を求めた。

### 4.4.2 エネルギーを用いたカット

宇宙線由来の信号を削減するために、エネルギーを用いたカットを行った。宇宙線測定時の PMT のエネルギー分布を図 4.8 に示す。エネルギーが約 30 MeV の 値でピークを持ち、そこから高いエネルギーへ向かって分布が広がっている。そ のため 50 MeV 以下の事象をカットし、宇宙線由来の信号を排除した。



図 4.8: 宇宙線測定で CsI 結晶 Z = 150 mm の位置に宇宙線が通過した際のエネル ギー分布。

# 4.5 CsI電磁カロリメータ両端の発光位置分布

中性子ビームを照射した際に CsI 電磁カロリメータの両端で観測した時間の差 分を求めた。また、時間差分から変換して求めた発光位置の分布を図 4.9 に示す。 カロリメータのビーム上流側で発光する事象が比較的多いが、下流側にかけて分 布が広がっていることがわかる。



図 4.9:発光位置分布。横軸は CsI 結晶の中心を 0 mm とした結晶の長手方向の 位置。

# 4.6 シュミレーションとの比較

節 2.2 に述べた方法で、 $5 \times 5 \times 50$  cm<sup>3</sup>の pure CsI 結晶の長手方向に対して、結晶端面の中心に 80 MeV の中性子を照射したシュミレーションを行った。その結果得た発光位置分布と、本実験で得た発光位置分布との比較を図 4.10 に示す。縦軸は実験で得た発光位置分布の積分値で規格化した。この分布同士でカイ二乗検定を行ったところ、実験で得た発光位置分布を基準値として得た  $\chi^2$  の値は、自由度 24 で 188 となった。自由度 24 の時の有意水準 5% の  $\chi^2$  の値が 36.4 であるため、この分布同士には有意な差がある。



図 4.10: 本実験で得た発光位置分布 (青) とシュミレーションで得た発光位置分布 (赤)の比較。縦軸は実験で得た発光位置分布の面積分値で規格化した。

# 4.7 まとめ

中性子が CsI 電磁カロリメータでシャワーを生成した際の本削減手法の評価の ために、大阪大学核物理研究センターの中性子ビームを用いてビーム照射実験を 行った。結果として得た発光位置分布は、ビーム方向に対してカロリメータ上流 側の事象が多かったが、下流側にかけても広く分布した。また、モンテカルロシュ ミレーションを用いて実験結果の再現を試みたが結果に違いが生じた。この理由 については第6章で考察する。

# 第5章 中性子背景事象削減能力の見 積もり

本章では、ビーム照射実験の結果から見積もった本削減手法の削減能力につい て述べる。

### 5.1 実験データからの見積もり

第3章と第4章で述べた両実験で、結果として得た発光位置分布の比較を図5.1 に示す。赤が200 MeV/cの陽電子ビーム照射実験、青が80 MeVの中性子ビーム 照射実験で得た発光値分布となっている。陽電子の発光位置分布が比較的狭い範 囲で事象が固まっているのに対して、中性子の発光位置分布は広く分布している。

発光位置でカットした時の、 $\gamma$ 線と中性子のそれぞれの検出効率を図 5.2で示す。 また、カットの位置を変えて $\gamma$ 線と中性子それぞれの検出効率の推移を示した。中 性子の検出効率の 60% あたりから $\gamma$ 線の検出効率が下がっている。 $\gamma$ 線の検出効 率が 95.5% になるカットをかけた際に、中性子事象の検出効率が 52.0% となるこ とがわかった。また、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊では 2 つの $\gamma$ 線を観測することを加味する と、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の検出効率が 91.2% となるカットをかけた際に中性子事象の 73.0% は削減できることがわかった。

この削減能力は中性子背景事象を1/10に削減する目標には到達していない。しかし、実際に KOTO 実験に導入した際の本削減手法の削減能力を見積もるためには、シュミレーションによって KOTO 実験を再現する必要がある。そのため、この削減能力は KOTO 実験における本削減手法の削減能力には相当しない。

しかし、シュミレーションによって得た KOTO 実験で背景事象を生じるハロー 中性子のエネルギーは 200 MeV 以上であり [10]、今回の実験で用いた中性子のエ ネルギー 80 MeV と比べてエネルギーが大きい。80 MeV 辺りの中性子が CsI 結 晶に入射した際には主に原子核、陽子との散乱を起こすのに対し、200 MeV 以上 の中性子は結晶内でハドロンシャワーを生成する。pure CsI 結晶では Interaction length が Collision length より長いため [8]、200 MeV 以上のエネルギー領域の中 性子の方が、カロリメータ内でビーム下流側にエネルギーを落とす。そのため、今 回得た削減能力以上の削減が見込まれる。



図 5.1: 陽電子ビーム照射実験で得た発光位置分布(赤)と中性子ビーム照射実験 で得た発光位置分布(青)の比較。縦軸は分布の面積分値で規格化した。



図 5.2: 発光位置でカットをかけた際の、γ線と中性子のそれぞれの検出効率。

# 第6章 考察

本章では本研究で問題点となっている点について考察し、今後の展望を述べる。

## 6.1 CsI結晶の中心を境に光量の違いが生まれた点

節3.3.3 で述べたように、CsI 結晶の長手方向の中心を境に MPPC で観測する光量に違いが生じている。この理由として、本実験で用いた CsI 結晶が異なる 2本の CsI 結晶を繋いで1本としているため、どちらの結晶側で発光するかによって光量の違いが生じている可能性がある。そのため CsI 結晶の発光位置と光量の関係を測定し、一本物の結晶と2本を繋ぎ合せた結晶で比較してこの原因の解明を行う必要がある。

# 6.2 時間差と発光位置の変換式の傾きについて

陽電子ビーム照射実験の垂直ランにおける CsI 電磁カロリメータの両端で観測 した時間の差分 (以下、時間差) と発光位置の変換式を求める際に、Z = ±180 mm の位置に照射した点を除いて線形で近似したプロットを図 6.1 に示す。この式の傾 きは 1.84 × 10<sup>-11</sup> であり、第 3 章で得た陽電子ビーム照射実験の変換式の傾きの 1.73 × 10<sup>-11</sup> と比較して、誤差を含めて 3σ以上のズレが生じている。そのため時 間差と発光位置の変換式を求める際に、どの発光位置の時間差を用いるかによって 変換式の傾きが変わることがわかる。そのため、2017 年 2 月末に予定している 400 MeV 中性子を用いたビーム照射実験と、2017 年 7 月に予定している陽電子ビーム 照射実験では、調べる発光位置を増やすことによって、発光位置の違いが時間差 に与える効果を付与して解析を行うべきである。



図 6.1: 陽電子ビーム照射実験の垂直ランにおける時間差と発光位置の相関。横軸 が発光位置、縦軸が時間差を示す。第3章で述べた Z = ±180 mm の点は除いた。

# 6.3 ビーム照射実験とシュミレーションの結果の相違

第3章と第4章で述べたように陽電子、中性子ビーム照射実験で得た発光位置 分布とシュミレーションによって得た発光位置分布に違いが生じた。この理由に ついて考察する。

シュミレーションを用いて実験を再現する際に、加味できていない要素につい て箇条書きにして以下に述べる。

- 1.1 粒子が CsI 結晶に入射した際に、結晶内で落としたエネルギーに応じて PMT、MPPCの時間分解能が変わる効果。
- 2. 異なる CsI 結晶 2 本を繋いで1つの結晶としていることによる効果。
- 3. CsI 結晶に入射した粒子が各ステップで落としたエネルギーによって生じた 光が伝搬する際に、結晶端面の反射によって生じる伝搬時間の相違。
- 4. 時間差を PMT と MPPC 時間差分解能でなまらせる際に、元となる時間差の 分解能を二重になまらせているので、その分を差し引く効果。

これらの要素をシュミレーションで付与することにより、実験とシュミレーション 結果の相違が解消する可能性がある。

# 6.4 今後の展望

今後の本削減手法の評価の展望として、まず2017年2月末に約400 MeVの中性 子を用いたビーム照射実験を予定している。これにより、KOTO実験で生じるハ ロー中性子のエネルギーに近い中性子に対して、本削減手法の削減能力を見積る ことができる。またCsI電磁カロリメータを積み上げたセットアップに対するビー ム照射も行う予定であり、複数本のカロリメータの応答を用いた解析による、本削 減手法の評価も同時に行う。また2017年7月に、同様のセットアップを用いた陽 電子ビーム照射実験を予定している。両実験の結果の比較を用いて、より KOTO 実験に近い状況での本削減手法の評価を行う。そこで期待する削減能力を得るこ とを評価できれば、2018年に KOTO 実験に本削減手法を導入する予定である。

# 第7章 結論

KOTO 実験では、ビーム上流側で生成されたハロー中性子由来の事象が大きな 背景事象となっている。そこで、この事象を削減するために CsI 電磁カロリメー タを両端から読み出す新しい手法を導入する。その削減手法の評価のために、陽 電子ビームと中性子ビームを用いた照射実験を行った。両実験の解析の結果、200 MeV のγ線の検出効率 91.2% に対して、80 MeV 中性子事象は 73.0% 削減できる ことがわかった。

# 謝辞

まずはこの場をかりて、私の学部1年、修士2年間でお世話になった全ての方々 に、心より感謝申し上げます。

指導教員である山中卓教授には、学部生の頃からゼミ等を通して素粒子物理の 奥深さや楽しさを教えていただき、研究室に配属された当初、研究に向かう姿勢 が甘かった私の意識を根本から変えていただきました。また、KOTO実験グルー プに配属された後も、こちらの度々の質問にも単なる回答だけに留まらず、その 回答に至った過程など含め、その後の研究に繋がる丁寧な対応をしていただきま した。また、私が不甲斐ないばかりに生活面でもサポートしていただいたことに も、この場を借りて感謝申し上げます。山中教授には研究だけに留まらず、社会 に出ていく上でも糧となる様々なことを教わりました。それらのことを肝に銘じ て、これからの社会人生活を歩んでいきたいと思います。

花垣和則教授には直接研究で関わることは少なかったですが、学会発表練習等 では鋭い指摘していただき、私の見解を大いに広げてもらいました。また、何事 を為すにも型に囚われない姿勢には尊敬の念に堪えません。また、飲み会の席に おいても、色々と面白い話を聞かせてもらい、楽しい時間を過ごすことができま した。

南條創准教授は私が修士2年からの着任で、お世話になったのは実質1年間で したが、1年とは思えないような濃密な指導をしていただき、研究者として大きく 成長する機会を与えていただきました。南條准教授の何事にも根本から突き詰め て考える姿勢に、自分の研究に対する認識の甘さを強く実感させられ、綿密な計 画を練ってから行動に移す重要さを学びました。南條創准教授のお力添えなくし て本修士論文の完成は成し得なかったと思います、誠に感謝申し上げます。

外川学助教には、特に KEK でのインナーバレルの作業の際に、非常にお世話に なりました。今思い返せば過酷だったあの日々も、学生の視点に立って話をして くださる外川助教のお陰である程度緩和されていたのだと思います。また研究に おいても、色々と愚痴はこぼしながらも実直に物事を遂行するその様を見て学ぶ ことは非常に多かったです。学部生の頃からの付き合いで、色々とご迷惑をおか けした部分もあったかとは思いますが、私の研究生活を彩りあるものにしていた だきました、誠にありがとうございました。

秘書の藤阪さん、また前任の川原さんには、私のスケジュール管理の甘さ故に 色々と迷惑をおかけしたかと思います、申し訳ありません。秘書の方々とは事務 的なこと以外にも様々な話をしていただき、研究の合間の良い息抜きになりまし た。これからも学生に癒しを与える存在としてサポート頑張って下さい、ありが とうございました。

大阪大学の KOTO グループの先輩である、佐藤和史さん、村山理恵さん、杉山 泰之さん、磯江麻衣さんには研究者として未熟だった私に救いの手を差し伸べて いただき、非常にお世話になりました、ありがとうございました。

また先輩で同期の宮崎康一くんとは、KEK でのインナーバレル作業の際に毎日 くだらない話で盛り上がりましたが、あの時間があったからこそ、忙しい日々を 精神的に穏やかに過ごすことができたのだと思います。あと、外食の際には常に 運転をしてくれてありがとうございました。

KEK の塩見公志さん、野村正さん、Lim GeiYoub さん、山形大学の田島靖久さんや、京都大学 KOTO グループの皆様には KOTO 実験のミーティングやビームテストなどで色々とお世話になりました。特に田島さんには ELPH、RCNP でのビームテストで遠路はるばる手伝いに来ていただき、そのお陰で両実験とも良い結果を得ることができました、本当にありがとうございました。

また後輩の佐藤くん、西宮くんは両者とも優秀で、私自身先輩として模範になら なければいけないと自身を鼓舞する機会を与えてくれました。模範になれなくて 申し訳ありませんが、これからもお互い切磋琢磨し合って研究頑張ってください。

また山中卓研究室の KOTO グループ以外の皆様にも大変お世話になりました。 同期の今坂くん、森くんとはお互いに牽制し合いながらも刺激を得ることができ、 研究に対するモチベーションの向上へ繋がりました。M1 の山元くん、澤田くんに は、半ば強制的にではありますが私の良き話相手となってもらいました。また、B4 の大西くん、原くん、真利くんの卒業研究に向かう真摯な姿勢には刺激を受けま した。

最後に、1年余分に大学生活を送るようなどうしようもない息子に対しても、生 活費、学費の援助をしてくれ、また帰省の際にも温かく迎え入れてくれて、経済 的にも精神的にも支えてくれた両親に対して深い感謝の意を表したいと思います。 本当にありがとうございました。

# 参考文献

- [1] Proposal for  $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$  Experiment at J-Parc (2006).
- [2] Joachim Brod, et al, Phys. Rev. D 83, 034030 (2011).
- [3] A.J.Buras, T.Ewerth, S.Jager, J.Roseik, Nucl. Phys. B, **714** (2005).
- [4] J.K.Ahn et al. Phys. Rev. D 81, 072004 (2010).
- [5] T.Shimogawa, Nucl. Inst. Meth. A 623, **585** (2010).
- [6] J-PARC web site.
- [7] H.Watanabe, ICHEP2010 (2010).
- [8] K.A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014).
- [9] K.Shiomi, arXiv:1411.4250 (2014).
- [10] Y.Sugiyama, PhD thesis, Pulse shape discrimination method to suppress neutron-induced background in the J-PARC KOTO experiment (2016)
- [11] Research Center for Nuclear Physics, Osaka University web site.