

J-PARC KOTO実験のカロリメータ下流部に
設置するガンマ線検出器の開発とその性能評価

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻
山中卓研究室 博士前期課程2年

伴野 真太郎

February 1, 2013

概要

J-PARC で行われる KOTO 実験は、中性 K 中間子の稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を用いて新しい物理を発見することを目指している。この崩壊を観測するためには、電磁カロリメータに入射する 2 つの γ 線から π^0 を再構成し、崩壊領域全体を覆う veto 検出器でそれ以外に崩壊粒子が無いことを要求する。

本研究では、カロリメータ中央のビームホールを γ 線が通り抜けて起きるバックグラウンドを削減するために、電磁カロリメータ下流部に設置する veto 用ガンマ線検出器 (CC04) の設計・開発を行った。また、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントの解析をし、CC04 の veto 性能評価を行った。その結果、CC04 の時間情報とエネルギー損失情報での veto によって、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントに対する $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ のバックグラウンドを $11.4 \pm 0.2\%$ 削減できることを示した。

目 次

第1章 はじめに	7
1.1 Kの物理	7
1.1.1 CP 対称性の破れ	7
1.1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊	8
1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験の概要	9
1.2.1 E391a 実験	9
1.2.2 J-PARC KOTO 実験	9
1.3 測定原理	11
1.3.1 シグナル事象	11
1.3.2 バックグラウンド事象	11
1.4 ビームライン	13
1.5 検出器	14
1.5.1 CsI カロリメータ	14
1.5.2 veto 検出器	15
1.6 本研究の目的	16
第2章 CC04に対する要求	19
2.1 ジオメトリに対する要求	19
2.1.1 配置場所	19
2.1.2 ビームホール	19
2.1.3 検出面積	21
2.1.4 厚さ	23
2.2 バックグラウンド事象に対する要求性能	26
2.2.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラウンド	26
2.2.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ シグナル	27
2.2.3 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ バックグラウンド	27
第3章 CC04の設計・開発	30
3.1 CC04の設計	30
3.1.1 検出器	30
3.1.2 設置架台	31

3.1.3 水冷配管	31
3.2 CsI 結晶	33
3.2.1 $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ CsI 結晶	33
3.2.2 $50 \times 50 \times 250\text{mm}^3$ CsI 結晶	33
3.2.3 光量測定	34
3.3 荷電粒子検出器用シンチレータ	35
3.3.1 プラスチックシンチレータとライトガイド	36
3.3.2 ライトガイド長別の光量位置依存性	36
3.3.3 プラスチックシンチレータの光量	38
3.4 光電子増倍管	38
3.4.1 7cm 角 CsI 結晶用 PMT	39
3.4.2 5cm 角 CsI 結晶用 PMT	39
3.4.3 プラスチックシンチレータ用 PMT	40
3.4.4 ゲイン測定	40
3.5 開発のまとめ	41
第4章 12月のビームデータ取得実験による性能評価	44
4.1 12月のビームデータ取得実験の概要	44
4.1.1 CC04 の設置	44
4.1.2 12月のビームデータ取得実験の状況	46
4.2 ビームミューオンを用いたエネルギー校正	47
4.2.1 CC04 での突き抜けミューオンイベント収集	47
4.2.2 エネルギー校正	48
4.3 カウンティングレート	49
4.4 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントを用いた CC04 の veto 性能評価	50
4.4.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベント収集	50
4.4.2 CC04 によるバックグラウンドの除去	51
4.5 CC04 の veto 性能評価の結果	52
第5章 考察	55
5.1 CC04 と他の veto 検出器との相関	55
5.2 CC04 のみによる veto 性能	56
5.3 シミュレーションとの比較	58
第6章 まとめ	61
付録 A 各 veto 検出器の図	62

図 目 次

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	9
1.2	J-PARC の概観	10
1.3	KOTO 実験の検出器と測定事象の概略図	10
1.4	π^0 の再構成	12
1.5	実験エリア全体図	13
1.6	ビームライン	14
1.7	CsI カロリメータの図	15
1.8	CsI カロリメータの写真	15
1.9	CC03 とビームホール周辺	17
1.10	ビームホールを抜ける粒子の veto 概念図	18
2.1	CC04 配置場所	20
2.2	ビームホールシミュレーションの状況模式図	21
2.3	CC04 配置場所表面におけるビーム中性子の位置分布	22
2.4	検出面積シミュレーションの状況模式図	22
2.5	$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラウンド由来の γ 線が、CC04 上流面に直接入射する位置の分布	24
2.6	$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラウンド由来の γ 線が、CC03 をパンチスルーして CC04 上流面に入射する位置の分布	24
2.7	直接入射イベントの CC04 不感率を付加した場合と不感率ゼロの場合との入射位置分布の比較	25
2.8	直接入射イベントの CC04 不感率により検出できなかったイベントの入射位置分布	25
2.9	CC03 パンチスルーイベントの CC04 不感率を付加した場合と不感率ゼロの場合との入射位置分布の比較	25
2.10	CC03 パンチスルーイベントの CC04 不感率により検出できなかったイベントの入射位置分布	25
2.11	$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラウンドと $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ シグナルの CC04 ガンマ線検出器でのエネルギー損失	28
2.12	CC04 ガンマ線検出器でのエネルギー損失に対する『閾値による不感率』	28

2.13 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ バックグラウンドの CC04 荷電粒子検出器でのエネルギー損失	29
2.14 CC04 荷電粒子検出器でのエネルギー損失に対する『閾値による不感率』	29
 3.1 CC04 のデザイン	30
3.2 検出器、設置架台、水冷配管をまとめた図	32
3.3 7cm 角の CsI 結晶	33
3.4 PMT 接続面とフランジ	33
3.5 5cm 角 CsI 結晶	34
3.6 7cm 角 CsI 結晶の光量測定	34
3.7 5cm 角 CsI 結晶の光量測定	34
3.8 7cm 角 CsI 結晶用 PMT で見た 662keV の光電ピーク	35
3.9 5cm 角 CsI 結晶用 PMT で見た 662keV の光電ピーク	35
3.10 600 × 210 × 10mm ³ プラスチックシンチレータの写真	36
3.11 ライトガイドの図	37
3.12 ライトガイドの写真	37
3.13 ライトガイド長別の光量位置依存性測定	38
3.14 7cm 角 CsI 結晶用の PMT と留め具	39
3.15 5cm 角 CsI 結晶用の PMT と留め具	40
3.16 ヒートガンを用いた、プラスチックシンチレータ用の PMT の紫外フィルターの剥がし方	41
3.17 PMT のゲイン測定	42
3.18 7cm 角 CsI 結晶用 PMT の 1 photoelectron ピーク	42
3.19 5cm 角 CsI 結晶用 PMT の 1 photoelectron ピーク	42
 4.1 レーザー墨出し器による架台位置調整	45
4.2 ビーム上流側から見た荷電粒子検出器の写真	45
4.3 ビーム下流から見た CC04 検出器の写真	45
4.4 耐地震用のカバー装着後の写真	45
4.5 CC04 の各モジュールの ID と状態	46
4.6 突き抜けミューオンの横から見た簡略図	47
4.7 CC04 のモジュール ID5, 19, 33 を突き抜けたミューオンの ADC count	48
4.8 CC04 の各モジュールでのカウンティングレート	49
4.9 シミュレーションでのカウンティングレート	49
4.10 CC04 による veto が無い状態での $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントの K_L 質量分布	51
4.11 CC04 のタイミングのずれとエネルギー損失の相関	52
4.12 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベント候補での CC04 エネルギー損失の最大値	53
4.13 CC04veto の有無による K_L 質量分布	53

4.14 K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率	53
5.1 CC04 と CC03 のエネルギー損失の相関	55
5.2 CC04 と MB のエネルギー損失の相関	56
5.3 CC04veto の有無による K_L 質量分布	57
5.4 K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率	57
5.5 CC04 により削減された事象の K_L 質量分布	58
5.6 アクシデンタルな時間領域での CC04 により削減された事象の K_L 質量分布	58
5.7 アクシデンタルな時間領域での K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率	59
5.8 シミュレーションでの CC04 のエネルギー損失分布	59
5.9 実験データでの CC04 のエネルギー損失分布	59
5.10 シミュレーションでの CC04veto の有無による K_L 質量分布	60
5.11 シミュレーションでの K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率	60
A.1 NCC の図	62
A.2 FB の図	62
A.3 FB の写真	62
A.4 MB の図	63
A.5 MB の写真	63
A.6 CV の図	63
A.7 CV の写真	63
A.8 BHPV の図	64

表 目 次

1.1	K_L の各崩壊モードとその崩壊分岐比	12
3.1	各ライトガイド、位置での波高平均値	37

第1章 はじめに

この章では、本研究で開発したガンマ線検出器が使用される KOTO 実験の概要と、本研究を行う目的について述べる。

1.1 K の物理

KOTO 実験は、CP 対称性の破れの大きさの決定に優れ、標準理論を超える物理に対する感度が高い中性 K 中間子の稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索を目指している。ここではその物理について述べる。

1.1.1 CP 対称性の破れ

CP 対称性とは、素粒子物理学において荷電共役変換 (C 変換) とパリティ変換 (P 変換) を同時に行つた際の対称性である。

CP 対称性が成立していれば、粒子の電荷反転と空間座標反転の下で同じ物理法則が成り立つ。宇宙誕生初期では粒子と反粒子が同数であったと考えられるので、もし宇宙で CP 対称性が完全に成立しているならば、時間が経過した現在でも粒子と反粒子の数は等しいか、もしくはそれらの対消滅により γ 線のみの世界となっているはずである。しかし、現在の宇宙には反粒子がほとんど存在しない。その原因は CP 対称性が破れていたためである。すなわち、CP 対称性の破れの研究は宇宙誕生のメカニズムの解明にも重要な役割を担っている。

歴史的には、1964 年にブルックヘブン研究所で行われた実験において K 中間子の CP 対称性の破れが初めて発見された。この対称性の破れは、1973 年に小林誠と益川敏英によって提唱された小林・益川理論によって説明された。現在では、小林・益川理論は素粒子物理学の標準理論に組み込まれている。

小林・益川理論において、CP 対称性の破れはカビボ・小林・益川行列 (CKM 行列) で説明することができる。CKM 行列とは、フレーバーが変化する弱い相互作用での結合定数を表すユニタリー行列である。 V_{ij} を、 i クォークと j クォークの混合と

すると CKM 行列は以下のように書ける。

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

対称性の破れは、クォークが 3 世代存在する事によって行列 V_{CKM} に複素成分が現れることで引き起こされる。(1.1) 式を Wolfenstein 表記 [1] で表すと、

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

となり、CP 対称性の破れは複素成分 η の大きさで決まる。既に観測された B 中間子の CP 対称性の破れからこの破れの大きさ η は求まり、標準理論は B 中間子の性質をよく表している。

しかし、標準理論による CP 対称性の破れの大きさでは現在の反粒子がほとんど存在しない世界を説明するには不十分である。つまり、標準理論ではなく、それを超えた新しい物理が起因する CP 対称性の破れが存在するはずである。B 中間子の他にこの η の大きさの実験的測定に適しているのが、中性 K 中間子の稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ である。この稀崩壊事象を観測すれば、K 中間子から求まる η と B 中間子から求まる η の値を比較する事ができる。それらの結果にずれがあるならば、標準理論を超える新しい物理の存在を示唆することになる。

1.1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊が、新しい物理による CP 対称性の破れの大きさの決定に適している理由を述べる。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊とは、寿命の長い中性 K 中間子が高次の弱い相互作用によって、フレーバーの変化を伴いながらも電荷は変化せずに崩壊する事象である。標準理論でのファインマンダイアグラムは図 1.1 のようになる。

図 1.1 のダイアグラムからわかるように、s クォークは t クォークの中間状態を経由して d クォークに崩壊する。つまり、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊振幅には CKM 行列の V_{ts} 、 V_{td} の 2 つの結合定数が寄与することがわかる。 K_L が K^0 とその反粒子 \bar{K}^0 の混合状態である事を考慮すると、崩壊振幅 $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ は、

$$\begin{aligned} A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) &\sim \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ A(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) - A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \right\} \\ &\propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td} \end{aligned}$$

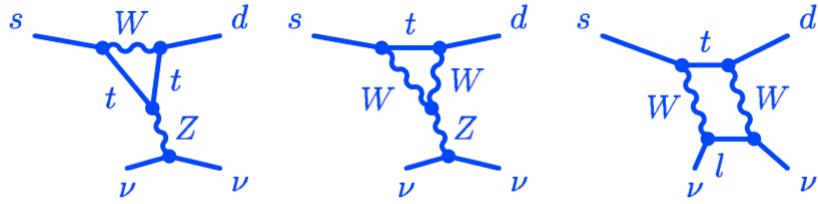


図 1.1: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のファインマンダイアグラム

$$\begin{aligned}
 &= (A\lambda^3(1 - \rho + i\eta))(-A\lambda^2) - (-A\lambda^2)(A\lambda^3(1 - \rho - i\eta)) \\
 &\propto 2i\eta
 \end{aligned}$$

となり、 η に比例する。崩壊分岐比は崩壊振幅の2乗に比例しているので、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比測定は、CP 対称性の破れの大きさの決定に適している。

現在、標準理論で予想されている $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比は、 $(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ と小さい [2]。この崩壊分岐比は、 $\nu \bar{\nu}$ 対を作るのは Z ボゾンのみであることから、理論的な不定性は約 2% と小さい。もし、標準理論を超えた未知の粒子が中間状態に寄与する場合、それによって崩壊分岐比が大きく変化する可能性がある。そのため、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の崩壊分岐比を調べることは新しい物理の探索に適している。

1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験の概要

ここでは、中性 K 中間子の稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索実験である KOTO 実験、とその前実験にあたる E391a 実験の概要を述べる。

1.2.1 E391a 実験

E391a 実験とは、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeV 陽子サイクロトロンを用いた、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索に特化した世界初の実験である。データの取得は 2004 年から 2005 年にかけて行われ、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の上限値 2.6×10^{-8} (90%CL) が得られた [3]。この実験の成果を元に発展させたのが KOTO 実験である。

1.2.2 J-PARC KOTO 実験

KOTO 実験とは、茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC にて行われる、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索実験である。ビームラインを新しく作り、検出器を E391a

実験から改良する事により、E391a 実験よりも高レート・低バックグラウンドの実現を目指している。数回のエンジニアリングランを経て、2013 年度から $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の世界初観測を目標とする物理データ取得実験の開始を予定している。実験が行われる J-PARC と、KOTO 実験の検出器全体をそれぞれ図 1.2 と図 1.3 に示す。



図 1.2: J-PARC の概観。KOTO 実験はハドロン実験施設にて行われる。

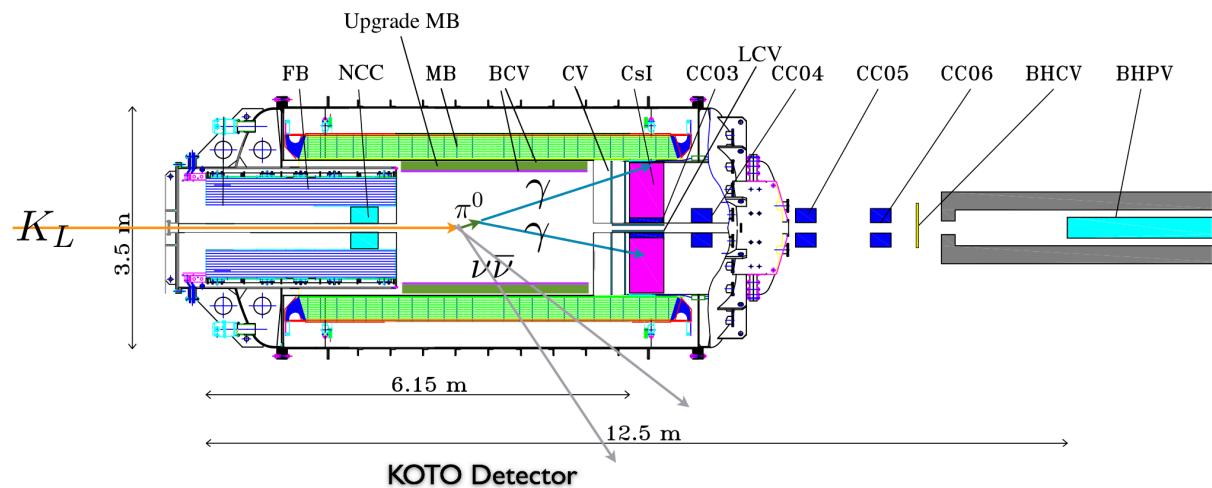


図 1.3: KOTO 実験の検出器と測定事象の概略図。図では便宜上長くなっているが、 π^0 はすぐに 2 γ に崩壊し、2 γ は CsI カロリメータで観測される。

1.3 測定原理

ここでは KOTO 実験における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ イベントを同定する原理について述べる。

1.3.1 シグナル事象

KOTO 実験が観測を目指すシグナル事象は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象である。この崩壊によってできた π^0 はすぐに、崩壊分岐比 99.8% で 2 つの γ 線に崩壊する。一方、ニュートリノ粒子は本実験の検出器で観測する事はできない。よって、シグナル事象で観測されるのは 2 つの γ 線のみである。

本実験では 2 γ の入射位置とエネルギーを測定するために、CsI 電磁カロリメータを崩壊領域の下流に設置する。ビーム軸上で π^0 が崩壊したことと、観測された 2 γ の不变質量が π^0 と同じであることを仮定し、図 1.4 に示したパラメータを用いて計算すると、 π^0 を再構成して崩壊位置 Z_{vrt} を求める事ができる。 Z_{vrt} が求まると 2 つの γ 線の運動量ベクトルが求まるため、それらを足し合わせて π^0 の横方向運動量を得る。シグナル事象では、終状態に π^0 の他に 2 つのニュートリノ粒子があるため、再構成された π^0 は高い横方向運動量を持つ。

また、シグナル事象ならばカロリメータで再構成された π^0 以外に、検出できる崩壊粒子は存在しない。そのため、崩壊領域全体に π^0 以外の粒子が存在しないことを要求しなければならない。KOTO 実験では崩壊領域の周りに覆うように veto 用検出器を設置する。

よって、実際は他にも様々な運動力学的カットを施す必要があるが、基本となるシグナル事象の同定条件は、「終状態が 2 γ のみで、高い横方向運動量の π^0 が再構成できる」ことである。

1.3.2 バックグラウンド事象

バックグラウンド事象とは、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ イベントではないのに、シグナル事象の同定条件を満たしてしまうようなイベントである。主なバックグラウンドは大きく次の 2 種類に分ける事ができる。

1. K_L 崩壊によるバックグラウンド
2. ハロー中性子によるバックグラウンド

K_L 崩壊によるバックグラウンド事象とは、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 以外の崩壊モードをシグナルイベントと見間違える事によるバックグラウンド事象である。 K_L の各崩壊モードとその崩壊分岐比を表 1.1 に示す。表 1.1 に示した崩壊モードのうち幾つかのもの

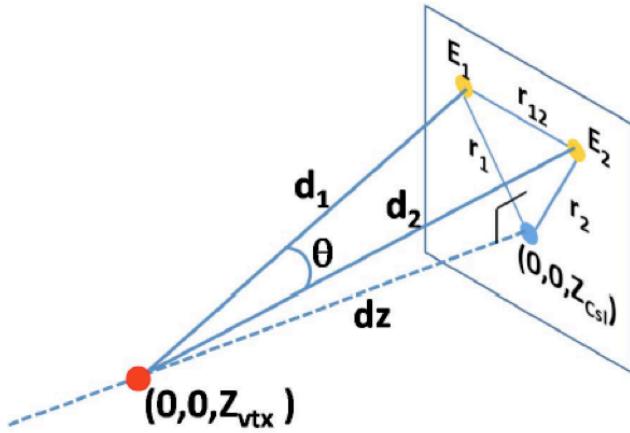


図 1.4: π^0 の再構成

がバックグラウンドになりうる。この中で、特にバックグラウンドになりやすいものは $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ と $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ である。これらの崩壊モードは、 π^0 を 1 つ以上含んでいるため、カロリメータで π^0 が再構成できた場合に、残りの粒子が 1 つも検出できなければバックグラウンドとなってしまう。同じように π^0 を含む $K_L \rightarrow 3\pi^0$ は、分岐比は大きいが終状態粒子が多いいため、検出し損ねる可能性は低くなり、その寄与はほとんど無視できる。 $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ は終状態が 2 γ のみとなりシグナル事象と似ているが、こちらは 2 体崩壊なので横方向運動量は 0 となり、再構成された π^0 に高い横方向運動量を要求すれば、 $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ によるバックグラウンドの事象数は無視できるほど小さくなる。

表 1.1: K_L の各崩壊モードとその崩壊分岐比

崩壊モード	崩壊分岐比
$K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e$	$40.55 \pm 0.11\%$
$K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$	$27.04 \pm 0.07\%$
$K_L \rightarrow 3\pi^0$	$19.52 \pm 0.12\%$
$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$	$12.54 \pm 0.05\%$
$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$	$(1.967 \pm 0.010) \times 10^{-3}$
$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$	$(8.64 \pm 0.06) \times 10^{-4}$
$K_L \rightarrow \gamma\gamma$	$(5.47 \pm 0.04) \times 10^{-4}$
$K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$	$(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-11}$

K_L は陽子ビームをターゲットに当てる事で生成するが、そのときに中性子も生成される。このビーム周りに広く存在する中性子をハロー中性子と呼んでいる。ハロー中性子によるバックグラウンド事象とは、ハロー中性子が検出器と相互作用する事で π^0 が生成されてしまい、それをシグナルイベントと見間違える事によるバックグラウンド事象である。こちらは、E391a 実験に比べて中性子の割合が少ないビームラインにし、そして検出器を改善する事でバックグラウンドの削減を目指している。

1.4 ビームライン

ここでは、KOTO 実験のビームラインについて述べる。ビームラインと検出器を含む実験エリア全体図を図 1.5 に、ビームラインのデザインを図 1.6 に示す。

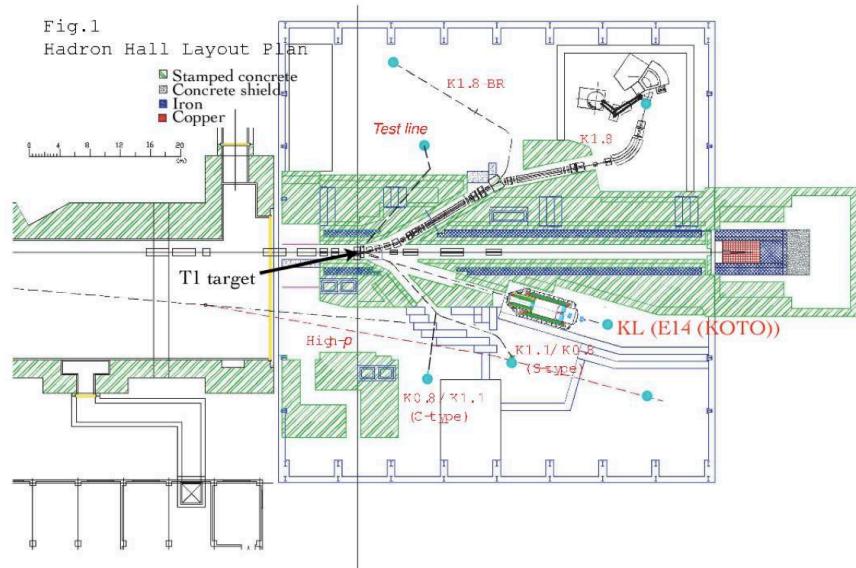


図 1.5: 実験エリア全体図

KOTO 実験で用いられる K_L ビームは J-PARC のメインリング加速器から取り出される陽子ビームをターゲットに衝突させる事で作り出される。 K_L ビームは陽子ビームに対して 16° の方向に取り出され、2つのコリメータによってビームは立体角 $9 \mu\text{sr}$ に絞られる。ビームの広がりを小さくする事によって、 π^0 再構成の崩壊位置の不確定性が軽減される。また、コリメータ部分では K_L 以外の粒子を除去する工夫が施されている。ビーム中に含まれる荷電粒子はコリメータ中間の電磁石によって、 γ 線はコリメータ上流の鉛製アブソーバによって、それぞれ除去される。コリメータはハロー中性子の発生源でもあるため、コリメータの物質や形状、長さを最適化する事でハロー中性子の生成を抑制している。

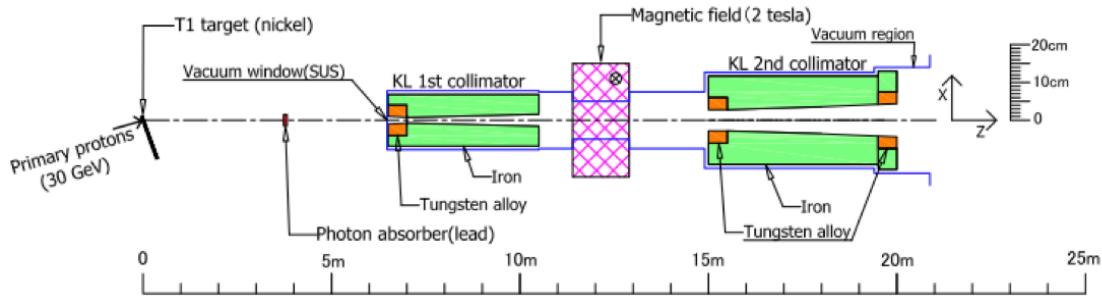


図 1.6: ビームライン

ビーム取り出しは、スピル(spill)と呼ばれる一定の時間間隔の取り出しを数秒おきに繰り返して(cycle)行われる。実験提案書ではビーム強度330kW、spill/cycle=0.7/3.3secを想定している。その場合、1スピルあたり 2×10^{14} 個の陽子がターゲットに衝突し、それによっておよそ 1×10^7 個の K_L がビームにして取り出される。

1.5 検出器

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 事象を捕らえるために、KOTO 実験には次の 2 種類の検出器がある。1つは π^0 から崩壊した 2 つの γ 線を捕らえて π^0 を再構成する CsI カロリメータ、もう 1 つは様々な位置に設置され、崩壊領域全体を覆うことで 2 γ 以外の粒子が存在しないことを要求する veto 検出器である。CsI カロリメータと、この後説明する CC05、CC06、Beam Hole Veto を除く veto 検出器は真空容器内に設置され、真空状態で稼働する。検出器と崩壊領域を真空状態にする理由は、ビームや崩壊粒子が空気や真空容器等の物質と相互作用してバックグラウンドとなってしまうのを抑制するためである。以下、検出器について述べる。

1.5.1 CsI カロリメータ

CsI カロリメータは CsI 結晶で構成されている、直径 1.9m の円形電磁カロリメータである。CsI カロリメータの図と写真をそれぞれ図 1.7 と図 1.8 に示す。CsI カロリメータ中央には、ビームを通すために $200 \times 200\text{mm}^2$ の正方形型のビームホールが空けられている。使われている CsI 結晶は大きさ $25 \times 25 \times 500\text{mm}^3$ と $50 \times 50 \times 500\text{mm}^3$ の CsI 純結晶で、25mm 角の結晶 2240 個を内側に、50mm 角の結晶 476 個を外側に使用している。

また、直方体の CsI 結晶を円形シリンダーに積むため、カロリメータの外側の部分は滑らかな円形にはならない。カロリメータの外側とシリンダーの間が不感領域

にならぬように、Outer Edge Veto(OEV)と呼ばれる鉛とプラスチックからなるサンプリングカロリメータが詰められている。

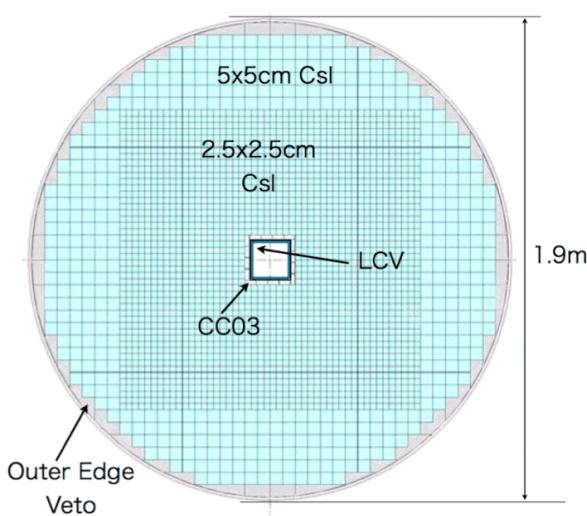


図 1.7: CsI カロリメータの図

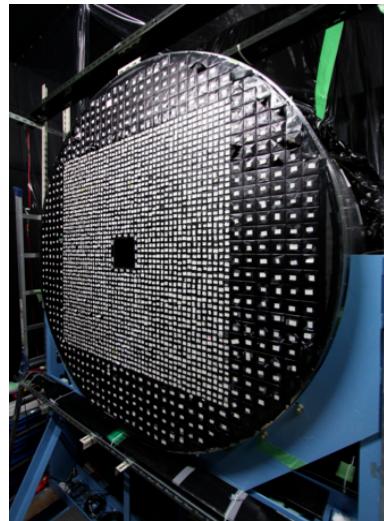


図 1.8: CsI カロリメータの写真

1.5.2 veto 検出器

veto 検出器は、崩壊領域全体を覆う事により 2γ 以外の粒子が存在しないことを要求する。図 1.3 に示したように、それぞれの veto 検出器は設置場所に適した形をしている。ここでは主な veto 検出器について簡単に説明する。ここに載せていない各 veto 検出器の図は付録 A に載せてある。

Neutron Collar Counter

Neutron Collar Counter(NCC)とは、検出器全体でビーム上流部に設置される、CsI 純結晶で構成された veto 検出器である。NCC の基本的な役割は、ビーム上流で崩壊した K_L によるバックグラウンドを抑制する事、NCC にハロー中性子が反応する事で起こるバックグラウンドを NCC 自体で veto する事、崩壊領域で崩壊して上流に逃げる粒子を検出し veto する事である。

Barrel Photon Veto

Barrel Photon Veto は、ビーム軸に対して 360° 覆っている、鉛とプラスチックからなるサンプリングカロリメータで構成された円筒型の veto 検出器である。広い領

域を覆う事で、横方向に逃げる粒子を veto する役割を持っている。Barrel Photon Veto は Front Barrel(FB) と Main Barrel(MB) の 2 つから成る。FB はビーム上流周りを、MB は崩壊領域周りをそれぞれ覆っている。

Charged Veto

Charged Veto(CV) は、CsI カロリメータ直前に設置される荷電粒子 veto 検出器である。 K_L 崩壊による荷電粒子を検出する事でバックグラウンドを抑制する役割を持っている。Front CV、Rear CV の 2 層から成り、プラスチックシンチレータで構成されている。

また、同じく荷電粒子を veto する検出器として、MB の前面に設置されている Barrel Charged Veto(BCV) と、CsI カロリメータのビームホール内側を覆うように設置される Liner Charged Veto(LCV) がある。

Beam Hole Veto

Beam Hole Veto とは、最下流のビーム軸上に設置される veto 検出器である。Beam Hole Veto は、ガンマ線用の Beam Hole Photon Veto(BHPV) と、荷電粒子用の Beam Hole Charged Veto(BHCV) の 2 つから成る。これらは、ビームに直接当たる検出器であるため、高いレート耐性と、ビーム中性子に対して不感である事が要求される。

Collor Counter

Collor Counter とは、ビーム軸周りに設置される veto 検出器群の総称である。先に述べた NCC を含め、上流側から順番に CC03～CC06 が存在する。CC03～CC06 の役割は、CsI カロリメータのビームホールを通って逃げてしまう粒子を検出し veto する事である。CC03 は、図 1.7 のように CsI カロリメータのビームホールの内側に設置される。CC04～CC06 は CsI カロリメータ下流側に設置される。

CC03 とビームホール周辺を図 1.9 に示す。CC03 は厚さ 18mm の CsI 結晶で構成されており、その内側にビームホールの構造を維持するための CFRP 製のビームパイプと LCV が設置される。結果的にビームホールの大きさは $149 \times 149 \text{ mm}^2$ となっている。

1.6 本研究の目的

本研究の目的は、veto 検出器である Collar Counter の 1 つで、CsI カロリメータの下流側直後に設置される検出器の CC04 を設計・開発し、その veto 性能について評価する事である。

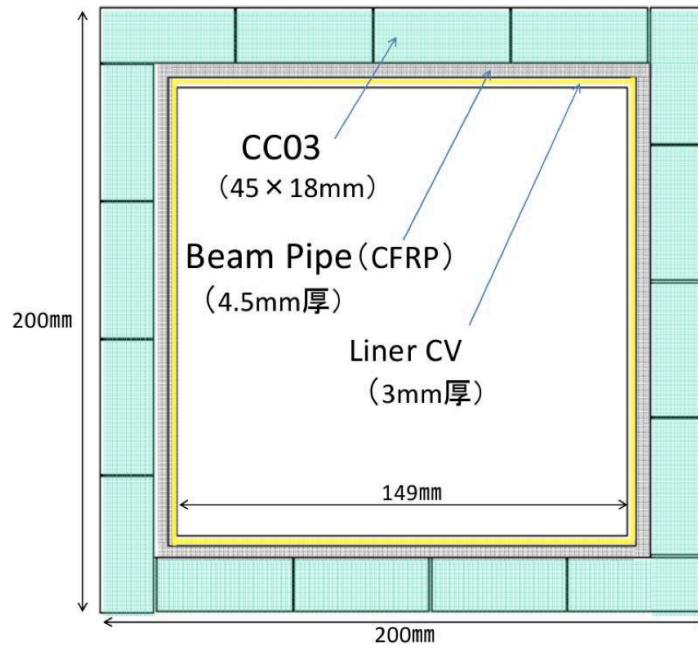


図 1.9: CC03 とビームホール周辺

KOTO 実験では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 事象を観測するために、崩壊領域全体に π^0 以外の粒子が存在しないことを示さなければならぬ。しかし、CsI カロリメータには中央にビームを通すためのビームホールが空いているため、バックグラウンドとなる粒子がここを通って逃げてしまう。このような粒子を捕まえるために、CsI カロリメータの下流側にも veto 検出器が必要となる。

CsI カロリメータ中央のビームホールを通って逃げてしまう γ 線は図 1.10 のように、ビーム軸に対して有限の角度を持っている。そのため、veto すべき粒子はビームの面積よりも広がってしまい、下流側の veto 検出器はビーム面積とその周辺も覆わなくてはならない。ただし、ビーム面積上には veto すべき粒子以外にもビーム粒子も含んでいる。このビーム粒子が直接当たる場合は、検出器から 2 次粒子が後方に放出される現象 (back splash) が起こり、これが CsI カロリメータに当たるとバックグラウンドになくなってしまう。そこで下流側 veto 検出器を、ビーム軸上最下流を veto する Beam Hole Veto と、BHV までのビーム軸周辺を veto する Collar Counter に分けることで、BHV からの back splash 粒子も抑制することができる。さらに、CsI カロリメータ下流にある真空容器の蓋にハロー中性子が当たってしまうと、ここでも π^0 が生成されて、後方に放出されればバックグラウンドになくなってしまう。そのようなバックグラウンドの抑制も兼ねて、CsI カロリメータと真空容器内の間に設置して、ビーム軸周辺に広がる粒子を veto するのが CC04 である。

E391a 実験でも同じコンセプトの下、鉛とプラスチックからなるサンプリングカロ

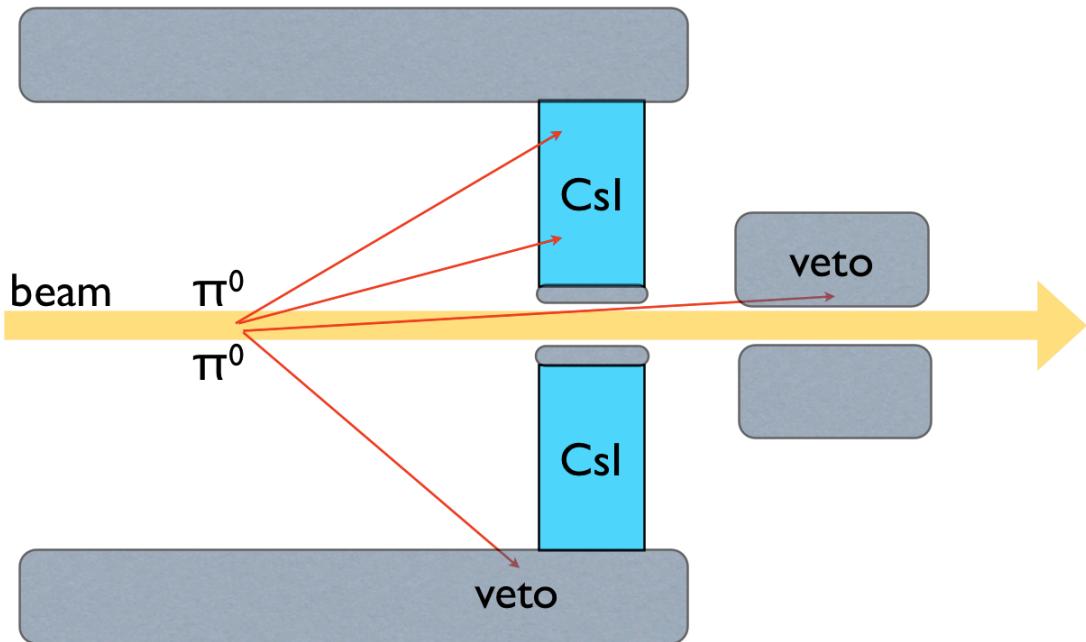


図 1.10: ビームホールを抜ける粒子の veto 概念図

リメータで構成された測定器が使用された。サンプリングカロリメータでは鉛部分が不感領域となるため、その分検出効率が低下してしまう。そこで本研究では、KOTO 実験で使用する CC04 の検出効率を上げるために、不感領域の少ない CsI 結晶で構成された検出器として一から開発する事にした。設計は KOTO 実験のモンテカルロシミュレーションを用いて見積もられた様々な要求条件を満たすように行った。また、設計に沿った実機製作においても、実際に測定を行う事で設計通りに veto 検出器として機能するかを確かめた。CC04 が veto 検出器として実際に KOTO 実験が目指す物理に貢献できるかを評価するために、2012 年 12 月に行われたビームデータ取得実験にて CC04 を設置して、物理データ取得に向けた調整と実際に得られたビームデータの解析を行った。

第2章 CC04に対する要求

CC04の主な役割は、カロリメータ中央部に空けられたビーム通過用ビームホールを通り抜けて、カロリメータ下流側にやってきた粒子を検出し、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ シグナルイベントに対するバックグラウンド事象を抑制する事である。CC04は、この役割を十分に果たす事ができるように設計されている必要がある。この章では、設計に必要となった、ジオメトリや、バックグラウンド事象に対する性能の要求について述べる。

2.1 ジオメトリに対する要求

ここでは、設計を行う上でCC04のジオメトリ構造に対してどのような要求があるのかについて述べる。

2.1.1 配置場所

CC04は、カロリメータ下流部に、且つ真空容器内に設置される検出器である。真空を作り出すために、カロリメータ下流部は図2.1の右端部分に蓋がされる。また、カロリメータはCsI結晶の長さ500mmである他に、下流側には光電子増倍管(PMT)や信号読み出し用の配線が占有する領域も存在する。これらの物理的要因から、CC04の配置場所はほぼ一意に決まる。FB検出器の上流端を $z=0$ とした時の、CC04ガンマ線検出器上流端の z 位置はおよそ $z=7.4m$ となった。CsIカロリメータのCsI結晶下流端は $z=6.65m$ であるため、CsIカロリメータ下流端からCC04ガンマ線検出器上流端までの距離はおよそ75cmとなり、PMTや信号読み出し用の配線がその間に収まるようにする必要がある。

2.1.2 ビームホール

CC04にはカロリメータと同様にビームを逃がすための穴(ビームホール)が必要である。このホールの大きさを決定するために、図2.2に示すようにシミュレーション上でCC04ガンマ線検出器下流端(およそ $z=7.6m$)の位置でのビームの広がりを見た。使用したビームは、FB検出器の上流端で見積もられている分布から発生させて

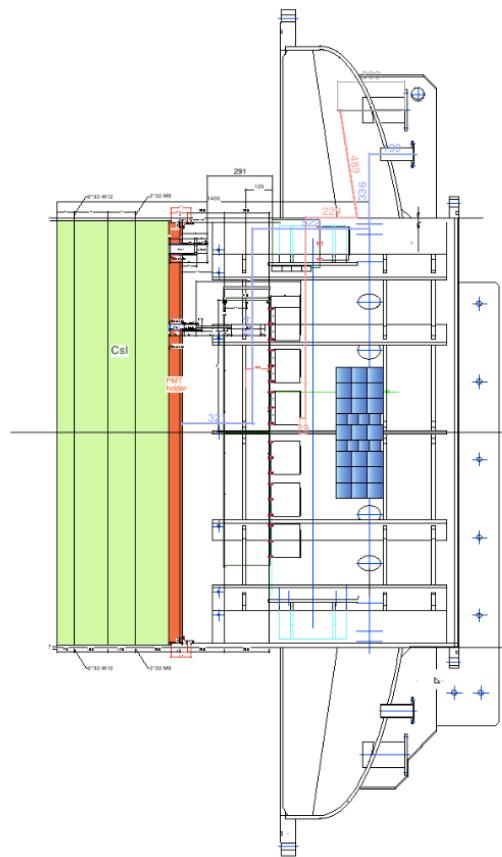


図 2.1: CC04 配置場所。青色で表されているのが CC04 である。この図では右が下流側となっており、CC04 の上流には緑色で表された CsI カロリメータとその読み出し構造がある。また、真空容器の下流端には蓋がされる。

いる。図 2.3 に示すように、ビームに含まれる中性子は四角形に正方形に近い形で広がり、ビーム中心から $\pm 85\text{mm}$ 以内に収まっている。1 スピルあたりの陽子ビームの数が 1.0×10^{12} 個の場合、ビーム中心から $\pm 85\text{mm}$ 以上の領域での中性子のヒットレートは $7.1 \times 10^{-4}\text{Hz}$ となり、ほとんど入射する事は無い。よって、ビーム中心から $\pm 85\text{mm}$ の正方形、つまり $170 \times 170\text{mm}^2$ のビームホールが必要となる。

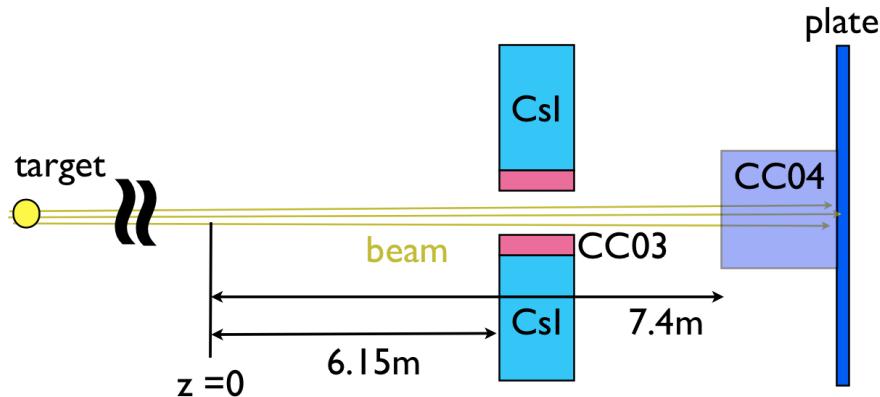


図 2.2: ビームホールシミュレーションの状況模式図

2.1.3 検出面積

CC04 は、カロリメータ上流側の崩壊領域で崩壊した粒子のうち、CsI カロリメータ及び CC03 のいずれにも検出されなかったバックグラウンド粒子を捕まえなければならない。そのような粒子がある理由として次の 2 つが考えられる。

1. CsI カロリメータ中央のビームホールを通り抜けてしまった (直接入射)
2. CC03、もしくは CC03・CsI カロリメータ両方に入射したが、反応しなかった (CC03 パンチスルー)

これら 2 つの場合それぞれにおいて、CC04 の設置場所でバックグラウンド粒子の位置分布をシミュレーションから見積もった。シミュレーションには、主要なバックグラウンドの 1 つである $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 事象で、3 年間の物理データ取得で期待される事象数の 1000 分の 1 の統計量のイベントを用いた。シミュレーションでの状況模式図を図 2.4 に示す。バックグラウンドとなりうるイベントの条件は、CsI カロリメータに 2 つ以上の γ 線が入射し、且つ π^0 の真の崩壊位置がシグナル領域である 3000mm

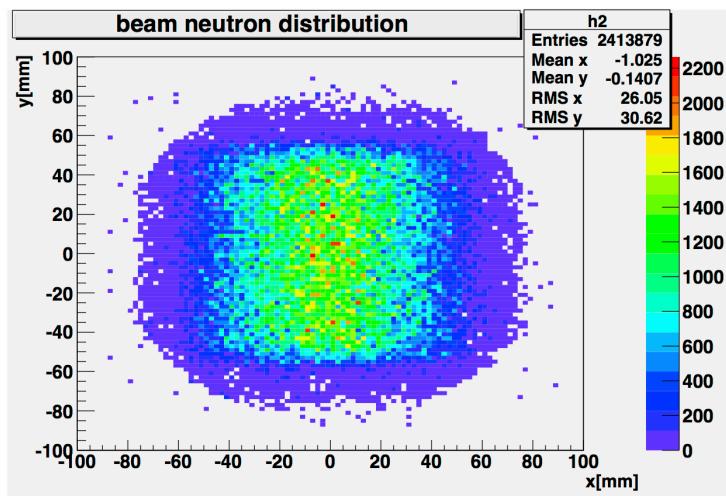


図 2.3: CC04 配置場所表面におけるビーム中性子の位置分布。横軸は x 方向の位置 [mm]、縦軸は y 方向の位置 [mm]、z 軸はビーム中性子のヒット数を表す。

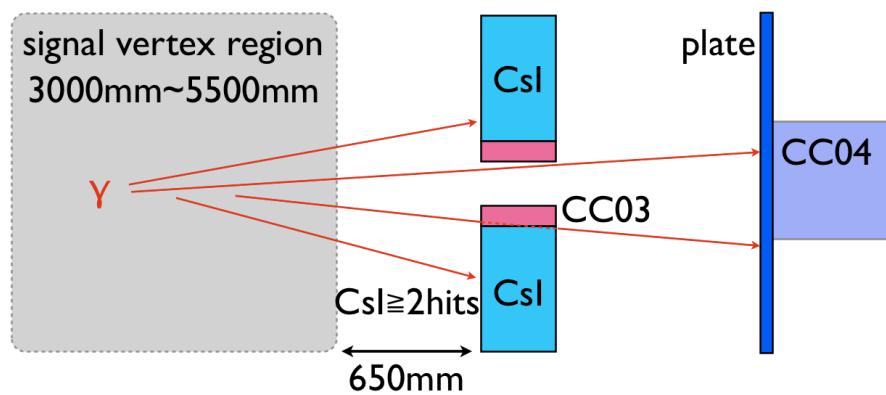


図 2.4: 検出面積シミュレーションの状況模式図

$\leq Z_{vrt} \leq 5500\text{mm}$ にあることである。この条件を満たしたイベントにおいて CC04 ガンマ線検出器上流端(およそ $z=7.4\text{m}$)を通過する γ 線の位置分布を見た。

直接入射のイベントは、CC03 に入射した γ 線を必ずその場で止めることによって選んだ。直接入射粒子のビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値分布を図 2.5 に示す。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド由来で直接入射する γ 粒子は、ビーム中心から 170mm 以内の正方形にほぼ収まっている。

CC03 パンチスルーは、CC03 に入射した粒子が CC03・CsI カロリメータの両方で相互作用が起こらない事象である。粒子が通過する物質と相互作用しない確率は、通過距離を x とすると次のようになる。

$$P(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad \lambda : \text{平均自由行程} \quad (2.1)$$

γ 線の場合、本実験でのエネルギー領域では平均自由行程 λ は放射長でおよそ $9/7[X_0]$ となるから、(2.1) 式は、次のようになる。

$$P(x) = e^{-\frac{7}{9}x} \quad x[X_0] \quad (2.2)$$

よって、CC03 に入射した際にその場で止めてしまった 1 個の γ 線について、そのまま飛んでいれば通過していたはずの CC03・CsI カロリメータの距離 $[X_0]$ を求め、それらの中を反応せずに通過する確率を求めた。その確率をその事象の重みとして、CC04 表面での入射位置をヒストグラムに蓄積した。CC03 パンチスルーアイベントの、ビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値分布を図 2.6 に示す。CC03 パンチスルーのイベントの重みの合計は 4614 イベントあり、ビーム中心から 400mm の正方形まで広がっている。ただし、真空容器の大きさを考慮すると、現実的に考えられる検出器の面積はビーム中心からせいぜい 300mm の正方形の範囲である。300mm 以上の位置に入射するイベント数は 4.0×10^{-6} であり、KOTO 実験が行う予定の 3 年間の物理データ量では 4.0×10^{-3} イベントに相当する。したがってバックグラウンドとしては影響は無い。

検出面積はビーム中心から 300mmまでの正方形の範囲にあればよい事がわかった。この結果から、CC04 は約 $600 \times 600\text{mm}^2$ の検出面積が必要である。

2.1.4 厚さ

バックグラウンドとなる粒子が CC04 の検出面積に入射しても、CC04 検出器には不感率があるため、全ての粒子が検出できるとは限らない。この不感率には、光核反応とパンチスルーによるものがあるが、その寄与で大きく占めているのは CC04 の厚さによって決まるパンチスルーである。そこで、先ほどの検出面積でのシミュレーションの結果を用いて、CC04 がパンチスルー不感率によってどれくらいのイベント

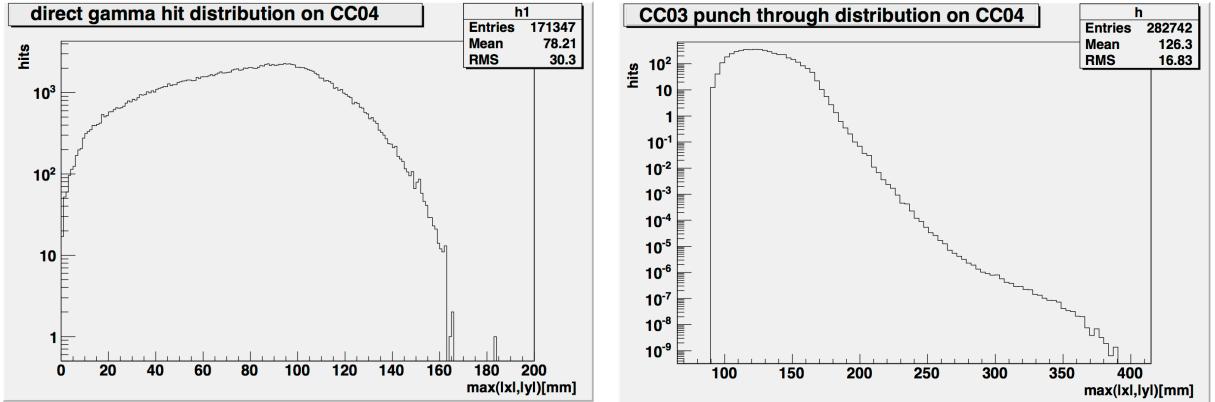


図 2.5: $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド由来の γ 線が、CC04 上流面に直接入射する位置の分布。横軸はヒット位置のビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値 [mm]、縦軸は 3 年間の 1 0 0 0 分の 1 の物理ランあたりのヒット数を表す。

図 2.6: $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド由来の γ 線が、CC03 をパンチスルーして CC04 上流面に入射する位置の分布。横軸はヒット位置のビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値 [mm]、縦軸は 3 年間の 1 0 0 0 分の 1 の物理ランあたりのヒット数を表す。

を検出し損ねてしまうかを見積もった。検出面積は約 $600 \times 600 \text{ mm}^2$ 、ビームホールは $170 \times 170 \text{ mm}^2$ とする。厚さは、CsI 結晶に E391a 実験のカロリメータに使用した $70 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3$ の CsI 結晶を使用することを考えて、それを 3 つ並べた 210mm とした。直接入射イベントの 1 ヒットに対して CC04 不感率の重みをかけた場合とかけない場合での入射位置の比較を図 2.7 に示す。また、直接入射イベントで CC04 不感率により検出できなかったイベントの入射位置分布を図 2.8 に示す。

図 2.7、図 2.8 から、直接入射イベントでは、85mm 付近以下で大半のイベントが検出できなくなることがわかる。これは 85mm 以下はビームホールとなっており、検出器の物質自体が無いからである。85mm 以下でも検出できているイベントがあるのは、崩壊粒子がビーム軸に対して有限の角度を持っているために、ビームホールの通過途中で広がって CC04 に入射するからである。85mm 以上での全入射イベント数が 7.9×10^4 イベントであるのに対し、85mm 以上で検出できなかったイベント数は 20 イベントとなり、検出損失は 0.025% に留まっている。

CC03 パンチスルーアイベントについても同様に、1 ヒットに対して CC04 不感率の重みをかけた場合とかけない場合での入射位置の比較を図 2.9 に、CC04 不感率により検出できなかったイベントの入射位置分布を図 2.10 に示す。CC03 パンチスルーアイベントでは、全入射イベント数が 4.6×10^3 イベントであるのに対し、検出できなかったイベント数は 0.7 イベントとなり、検出損失率は 0.016% であった。

以上の結果から、厚さが 210mm ならばバックグラウンドの検出に影響が無い程度の不感率である。よって、CC04 検出器には 210mm の厚さが必要である。

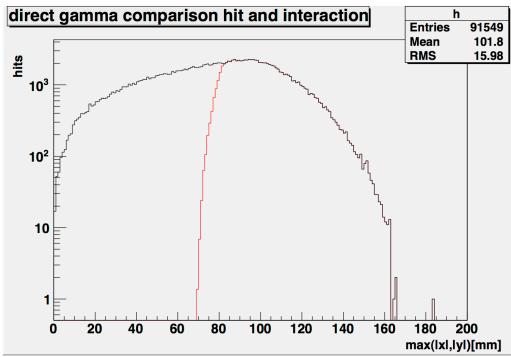


図 2.7: 直接入射イベントの CC04 不感率を付加した場合と不感率ゼロの場合との入射位置分布の比較。黒線が不感率ゼロの場合、赤線が厚みによる不感率を付加した場合である。横軸はビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値 [mm]、縦軸は検出できたイベント数を表す。

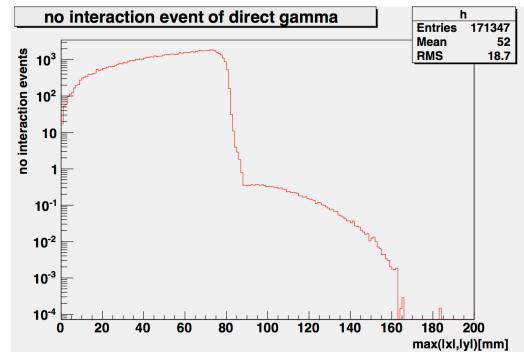


図 2.8: 直接入射イベントの CC04 不感率により検出できなかったイベントの入射位置分布。横軸はヒット位置のビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値 [mm]、縦軸は検出できなかったイベント数を表す。

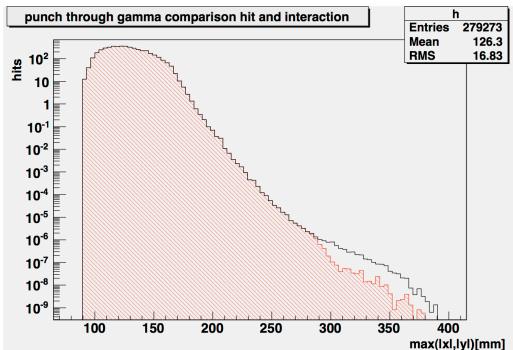


図 2.9: CC03 パンチスルーイベントの CC04 不感率を付加した場合と不感率ゼロの場合との入射位置分布の比較。黒線が不感率ゼロの場合、赤線が厚みによる不感率を付加した場合である。横軸はヒット位置のビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値 [mm]、縦軸は検出できたイベント数を表す。

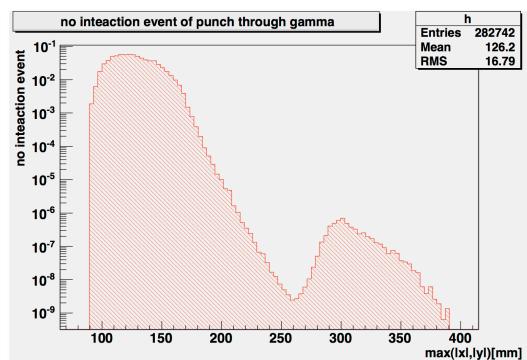


図 2.10: CC03 パンチスルーイベントの CC04 不感率により検出できなかったイベントの入射位置分布。横軸はヒット位置のビーム中心からの x,y 垂直距離の最大値 [mm]、縦軸は検出できなかったイベント数を表す。

2.2 バックグラウンド事象に対する要求性能

CC04 が抑制すべきバックグラウンド事象は、主に K_L 崩壊によってできた γ の内 2つが CsI カロリメータに入射し、残りの粒子が CsI 下流側に逃げてしまう事象である。ここでは、バックグラウンドのほとんどを占める $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ と $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ と、 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルイベントについて CC04 で落とすエネルギー分布をシミュレーションで求めた。

veto すべき余剰粒子は、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ では γ 線、 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ では荷電粒子である。そこで CC04 検出器は、前述のジオメトリ構造を満たし、CsI 結晶を構造物としたガンマ線検出器と、ガンマ線検出器前面を覆う、プラスチックシンチレータを構造物とした荷電粒子検出器の 2つで構成するとした。ここで荷電粒子検出器は、5mm 厚のプラスチックシンチレータを 2枚重ねたものを仮定した。

また、CC04 の下流側には同じ役割を担う veto 検出器の CC05 と CC06 がある。これらは CC04 が検出し損ねた粒子を veto する役割もあるため、CC04、CC05、CC06 のいずれかで veto できればよいと言える。そこで、CC05 と CC06 のデザインを仮に CC04 と同じものとして 1m 間隔で設置し、いずれかでの最大エネルギーを調べる事にした。

2.2.1 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドとは、主に $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ の終状態 4 γ のうち 2つの γ 線が CsI カロリメータに入射し、残りの 2 γ が検出されなかつた場合に起こるバックグラウンドである。シミュレーションでは、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ 事象を発生させ、CsI カロリメータに 2つ以上の γ 線が入射し、且つ π^0 が崩壊した真の z 位置がシグナル領域である $3000\text{mm} \leq Z_{\text{vrt}} \leq 5500\text{mm}$ にあるという条件を満たしたものとをバックグラウンドイベントとした。このバックグラウンドイベントの中で、CC04、CC05、CC06 のガンマ線検出器のいずれかでエネルギーを落としたイベントを抽出し、その時の落としたエネルギーの最大値を調べた。図 2.11 の黒線のプロットはエネルギー最大値の分布を示す。分布は 150MeV 付近のピークから 30MeV にかけて減少した後、0MeV まで緩やかに広がっている。よって、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドの大半を veto するには、ガンマ線検出器に少なくとも 30MeV 以下の閾値をかける必要がある。全バックグラウンドイベント中で閾値以下のエネルギー損失であったイベントは veto しないので、そのようなバックグラウンドイベントに対しては不感となる。この閾値によるバックグラウンド (BG) 不感率を次のように定義した。

$$\begin{aligned} \text{閾値による BG 不感率} &= \frac{\text{分母イベント中でエネルギー損失が閾値以下のイベント数}}{\text{CC04, CC05, CC06 でエネルギー損失があった BG イベント数}} \end{aligned}$$

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドに対する、『閾値による BG 不感率』を図 2.12 の青線に示す。不感率は閾値を下げれば下げるほど小さくなるので、できる限り低い閾値にする必要がある。

2.2.2 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナル

$K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルでは、終状態粒子の 2 γ が CsI カロリメータに入射し、他の粒子は検出されない。よって CC04、CC05、CC06 では何も検出されないはずであるが、 γ 線が CsI カロリメータで相互作用した時にできる電磁シャワーが下流側に漏れてしまう場合はそれらを検出し、間違えて veto してしまう可能性がある。その効果を見積るために、 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルのシミュレーションも行った。 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 事象を発生させ、条件は $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ のシミュレーションと同様にしてイベントを収集し、エネルギーの最大値についても同様に調べた。図 2.11 の赤線のプロットはエネルギー損失の最大値分布を示す。ほとんどが 0MeV であるが、僅かに漏れによるエネルギー損失がある事がわかる。エネルギー損失が閾値を超えると、そのイベントはバックグラウンドと認識されて veto されてしまう。そのような閾値によるシグナル不感率を次のように定義した。

$$\text{閾値によるシグナル不感率} = \frac{\text{分母イベント中でエネルギー損失が閾値以上のイベント数}}{\text{全シグナルイベント数}}$$

$K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルに対する、『閾値によるシグナル不感率』を図 2.12 のピンク線で示す。シグナル不感率は、5MeV 以下で急激に上昇する事から、シグナル事象を間違えて veto しないためには 5MeV 以上に閾値を設定する必要がある。よって、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドの不感率も考慮して、CC04 ガンマ線検出器の veto の閾値は 10MeV に決定した。

2.2.3 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ バックグラウンド

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ バックグラウンドとは、主に $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ の終状態粒子のうち 2 つの γ 線が CsI カロリメータに入射し、残りの荷電粒子が検出されなかつた場合に起こるバックグラウンドである。シミュレーションで $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 事象を発生させ、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドと同様の条件を課してバックグラウンドイベントを収集した。このバックグラウンドイベントの中で、CC04、CC05、CC06 の荷電粒子検出器のいずれかでエネルギーを落としたイベントを抽出し、その時の落としたエネルギーの最大値を調べた。図 2.13 に荷電粒子検出器でのエネルギー損失の最大値の分布を示す。図 2.13 での 1MeV・2MeV 付近のピークは、それぞれ 5mm 厚プラスチックシンチレータの 1MIP・2MIP に相当する。 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ バックグラウ

ンドに対する、荷電粒子検出器での『閾値による BG 不感率』は、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドと同様に定義して、図 2.14 の赤線で示す。図 2.14 から、1MIP エネルギーの半分に相当する 0.5MeV で不感率は十分に落ちきる事がわかる。しかし、実際は光量のばらつきによって分布は横に広がってしまう可能性がある。よって、荷電粒子検出器は MIP エネルギーの半分以下のエネルギーで、MIP エネルギー分布が十分取まるように veto の閾値をかけねばよい。そこで実機を製作する上では、より大きいエネルギーで閾値をかけられるように、10mm 厚のプラスチックシンチレータ 1 枚を使用することにした。この場合の 1MIP エネルギー損失は 2MeV に相当するので、その半分の 1MeV 以下の閾値でかける。

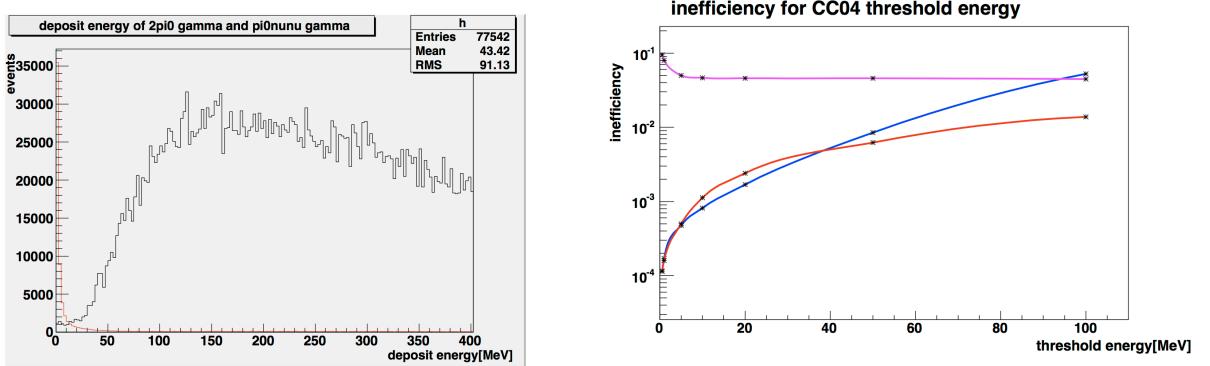


図 2.11: $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドと $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルの CC04 ガンマ線検出器でのエネルギー損失。横軸は CC04、CC05、CC06 いずれかのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸はイベント数を表す。黒線は $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド、赤線は $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルである。

図 2.12: CC04 ガンマ線検出器でのエネルギー損失に対する『閾値による不感率』。横軸は CC04、CC05、CC06 いずれかのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸は不感率を表す。青線は $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド、赤線は $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ バックグラウンド荷電粒子に対する不感率。ピンク線は $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルの不感率である。

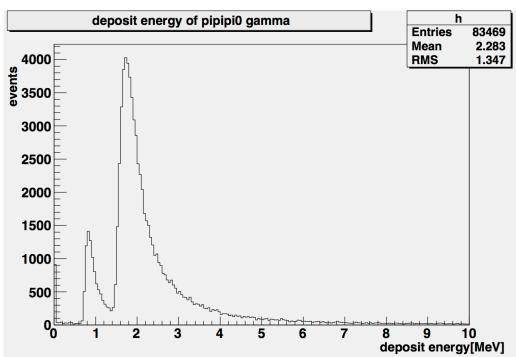


図 2.13: $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ バックグラウンドの CC04 荷電粒子検出器でのエネルギー損失。横軸は CC04、CC05、CC06 いずれかのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸はイベント数を表す。

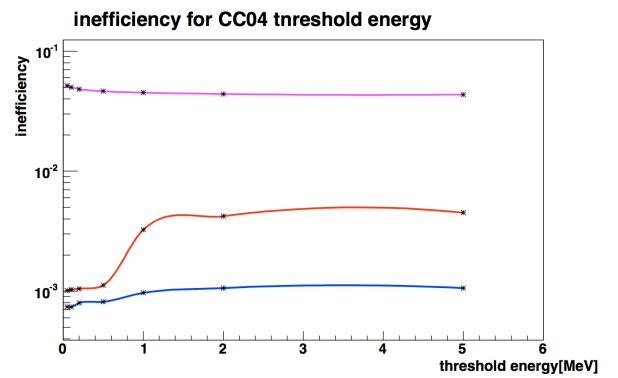


図 2.14: CC04 荷電粒子検出器でのエネルギー損失に対する『閾値による不感率』。横軸は CC04、CC05、CC06 いずれかのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸は不感率を表す。青線は $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ バックグラウンド荷電粒子に対する不感率。ピンクの線は $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルの不感率である。

第3章 CC04の設計・開発

本章では CC04 実機の製作にあたり必要となる設計概要と、使用する結晶やシンチレータ、PMT、またそれらの性能評価について述べる。

3.1 CC04 の設計

ここでは CC04 の設計として、CC04 の本体部分にあたる検出器、それを設置し支えるための設置架台、PMT の発熱を抑えるための水冷配管について説明する。

3.1.1 検出器

CC04 検出器を第 2 章で説明した要求を満たすように設計した。CC04 は図 3.1 に示すように、ガンマ線検出器とその前面を覆う荷電粒子検出器で構成されている。

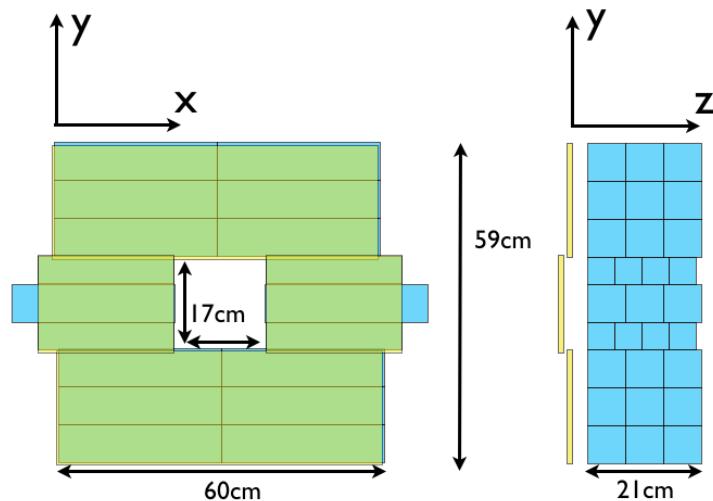


図 3.1: CC04 のデザイン。右はビーム軸に沿って上流側から見た図で、左はビーム軸に垂直な方向(南側)から見た図。水色で表された部分は CsI 結晶から成るガンマ線検出器、黄色で表された部分はプラスチックシンチレータから成る荷電粒子検出器である。

ガンマ線検出器の大きさは $600 \times 590 \times 210\text{mm}^3$ で、中央にビームを通すために $170 \times 170\text{mm}^2$ の大きさのビームホールが空いている。ガンマ線検出器には、 $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ の CsI 結晶を 4 本、 $50 \times 50 \times 250\text{mm}^3$ の CsI 結晶を 1 本使用する。下と上の部分はそれぞれ、 $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ の CsI 結晶のみ使用し、横方向 (x 方向) に結晶 2 つで 600mm、高さ方向 (y 方向) に結晶 3 段で 210mm、ビーム軸方向 (z 方向) に結晶 3 層で 210mm となっている。中間部分は左右に $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ の CsI 結晶と $50 \times 50 \times 250\text{mm}^3$ の CsI 結晶を組み合わせて設置する事によって、高さ 170mm のビームホールを実現している。これらの結晶のシンチレーション光は、シリコン樹脂によって光学接続された光電子増倍管 (PMT) によって読み出される。

ガンマ線検出器前面部には、荷電粒子検出器として厚さ 10mm のプラスチックシンチレータを設置する。プラスチックシンチレータは結晶に比べて薄く、物質量が小さいので γ 線には感度が低いが、荷電粒子を検出する事ができる。下と上の部分はそれぞれ、 $600 \times 210 \times 10\text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータを、中間部分は左右に $250 \times 182 \times 10\text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータを上下に 6mm ずつ重なるように、ビーム軸方向 (z 方向) に若干ずらして設置する。プラスチックシンチレータのシンチレーション光は、ライトガイドによって集光され、光学セメントで接着された PMT によって読み出す。下と上のプラスチックシンチレータは左右両側に PMT を付けて両側から読む。

3.1.2 設置架台

設置架台は、CsI カロリメータ下流部の限られたスペースに、重量約 400kg の検出器を載せてもたわまず、安定して設置できるように設計された。また、東日本大震災のような巨大地震が起こる事も想定して設計されている。

検出器はボルトによる高さ調節可能な設置架台の底面に置かれる。検出器は、架台の柱の上に取り付けられたバネ付きの板によって上から押し付けられる。この力によって結晶・架台の間で摩擦力が働き、巨大地震による揺れに耐える事ができる。

また、万一揺れに耐えられず結晶が前後に飛び出してしまう場合に備え、テクノーラと呼ばれる芳香族ポリアミド系樹脂製繊維のカバーで前後を覆っている。

3.1.3 水冷配管

PMT の発熱を冷却できるように水冷配管も設計されている。CC04 は真空中に設置されるため、温度が高くなりやすく、検出器が高温状態にさらされてしまう。高温状態では、CsI 結晶の光量が減少してしまう他、平温で稼働することを想定しているものに悪影響を及ぼす可能性もある。そのため、発熱源である PMT に熱伝導性の高い平網銅線を取り付け、それを冷水が流れる配管に接続して冷却を行う。

検出器、設置架台、水冷配管をまとめたものを図 3.2 に示す。

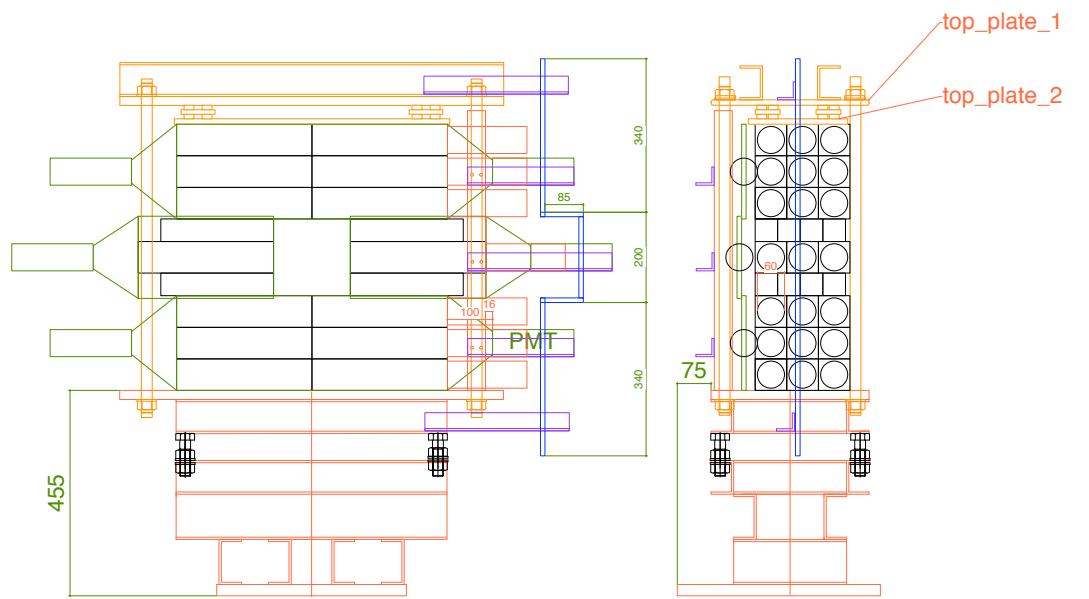


図 3.2: 検出器、設置架台、水冷配管をまとめた図。右はビーム軸に沿って上流側から見た図で、左はビーム軸に垂直な方向(南側)から見た図。主に黒線がガンマ線検出器、緑線が荷電粒子検出器、橙線が設置架台、青線が水冷配管を表す。

3.2 CsI 結晶

ここでは CC04 のガンマ線検出器に使用する CsI 結晶と、その光量測定について述べる。

3.2.1 $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ CsI 結晶

CC04 で用いる、 $70 \times 70 \times 300\text{mm}^3$ の大きさの CsI 結晶 (7cm 角 CsI 結晶: 図 3.3) は、E391a 実験の CsI カロリメータに用いられたものである。結晶には反射材として、アルミナ化ドマイラーとテフロンが巻かれている。反射材が無い PMT 接続面には図 3.4 に示すような、PMT 接続用のフランジと呼ばれるアルミ製の部品が取り付けられている。また、PMT 接続面から結晶の長さ 100mm の部分には周りに、パーキトリオイ製の磁気シールドがはめ込まれている。



図 3.3: 7cm 角の CsI 結晶



図 3.4: PMT 接続面とフランジ

3.2.2 $50 \times 50 \times 250\text{mm}^3$ CsI 結晶

$50 \times 50 \times 250\text{mm}^3$ の大きさの CsI 結晶は、7cm 角 CsI 結晶と組み合わせて 17cm 角のビームホールを作るために使用される。5cm 角 CsI 結晶の写真を図 3.5 に示す。この結晶は、本実験の CsI カロリメータに使用されている 5cm 角 CsI 結晶と同じ規格で、カロリメータに使用されずに予備として残されていた結晶を半分に切断したものである。結晶は反射材のアルミナ化ドマイラーで覆い、PMT 接続面は樹脂製のフランジが接着される。



図 3.5: 5cm 角 CsI 結晶

3.2.3 光量測定

7cm 角 CsI 結晶、5cm 角 CsI 結晶それぞれについて、入射粒子が落とすエネルギーに対する光量の測定を行った。目的は、第 2 章で言及したバックグラウンド事象を veto するエネルギー分解能を得るために必要な光量を、CC04 検出器に使用する全ての CsI 結晶が持っているかどうかを確認することである。光量測定は、 Cs^{137} 線源を用いて 662keV の γ 線の光電効果による全エネルギー吸収事象を見る方法で行った。測定時の写真を図 3.6 と図 3.7 に示す。



図 3.6: 7cm 角 CsI 結晶の光量測定

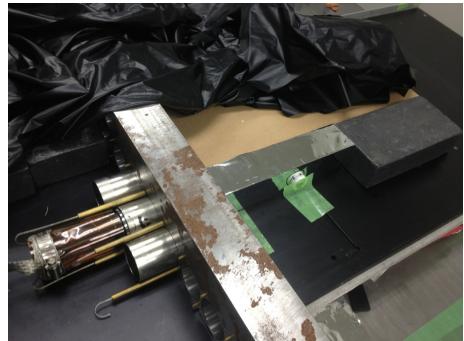


図 3.7: 5cm 角 CsI 結晶の光量測定

結晶のシンチレーション光は、既に 1 photoelectron に対するゲインの大きさがわかっている PMT を用いて、HV を最大供給電圧の -2000V にして ADC で読み出した。得られた ADC データの一例を図 3.8 と図 3.9 に示す。光電ピーク (662keV peak) の ADC count の分布を、ガウシアン + 指数関数でフィッティングし、ピークの中心値を求めた。ペデスタルの値を引いた光電ピークの値と 1 photoelectron ピーク (1 p.e peak) の値を用いて、1MeV に対する結晶の光量 [p.e/MeV] を次の式で求めた。

$$\text{光量 [p.e/MeV]} = \frac{662\text{keV peak [ADC count]}}{1\text{p.e peak [ADC count]} \times 0.662[\text{MeV}]}$$

光量の計算結果は、7cm 角 CsI 結晶 4 本では最大で 40.7 p.e/MeV、最小で 22.1 p.e/MeV となった。5cm 角 CsI 結晶 1 6 本では最大で 83.3 p.e/MeV、最小で 47.3 p.e/MeV となった。CC04 によるバックグラウンドの抑制には、10MeV の γ 線に感度があればよいので、光量が最小の結晶でも 221 p.e となり、光統計のばらつきは十分小さい。

また、KOTO 実験での信号読み出しには 16,000[ADC count / V] のフラッシュ ADC を使用する。10MeV のエネルギーを見る場合に、十分な分解能を得られるよう 1MeV が 15ADC count に相当するように設定したい。従って、フラッシュ ADC に入る信号出力は 1MeV に対して 1mV 必要となる。7cm 角 CsI 結晶に使用する PMT での平均的な信号出力は、HV が -2000V において、1 p.e に対しておよそ 1mV であつた。よって、光量が最小の結晶でも 1MeV に対して 22mV を達成しているため、全ての結晶の光量は十分である。

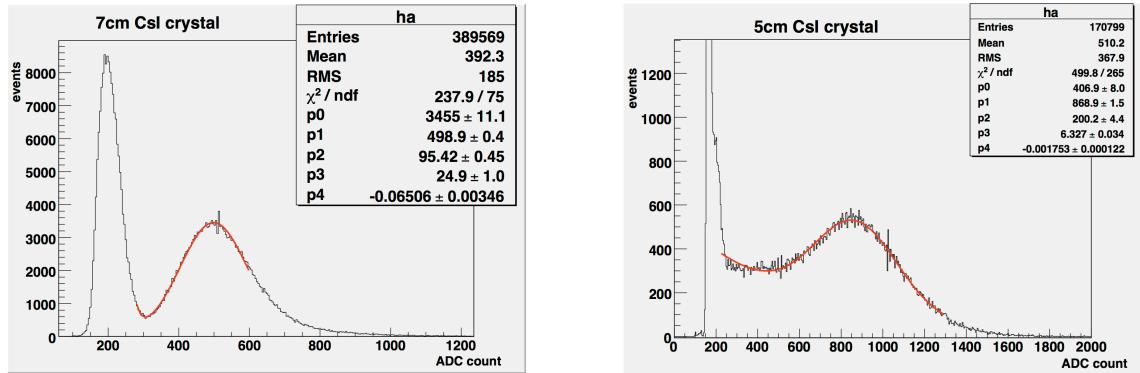


図 3.8: 7cm 角 CsI 結晶用 PMT で見た 662keV の光電ピーク。横軸は ADC count、縦軸は事象数である。

図 3.9: 5cm 角 CsI 結晶用 PMT で見た 662keV の光電ピーク。横軸は ADC count、縦軸は事象数である。

3.3 荷電粒子検出器用シンチレータ

CC04 のガンマ線検出器前面には荷電粒子検出器として、プラスチックシンチレータを設置した。ここでは、使用するプラスチックシンチレータとライトガイドについて述べる。

3.3.1 プラスチックシンチレータとライトガイド

プラスチックシンチレータは図3.10に示すように、厚さ10mmのEJ-200を使用する。お大きさは $600 \times 210 \times 10\text{mm}^3$ 、 $250 \times 182 \times 10\text{mm}^3$ の2つである。



図3.10: $600 \times 210 \times 10\text{mm}^3$ プラスチックシンチレータの写真

プラスチックシンチレータと信号読み出し用のPMTは、アクリル製のライトガイドによって接続する。ライトガイドの図と写真を図3.11と図3.12に示す。 $600 \times 210 \times 10\text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータは両側から信号を読み出すために、両端に幅210mm全長100mmのフィッシュテイル型ライトガイドを使用する。 $250 \times 182 \times 10\text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータは片側読み出しで、幅182mm全長85mmのフィッシュテイル型ライトガイドを使用する。ライトガイドの長さは、設置スペースの幅にちょうど収まるように設計されている。このライトガイドの長さで集光効率が十分であるかを確認するために、実際には使用しないが比較用として幅210mm全長148mmのフィッシュテイル型ライトガイドも用意した。

3.3.2 ライトガイド長別の光量位置依存性

短いライトガイドと長いライトガイドで光量がどのように異なるかを宇宙線測定を用いて調べた。

フィッシュテイル型ライトガイドは、主にシンチレータの光をPMTの光電面に効率よく集光するために用いられる。直接光電面に入射しない光をライトガイドと空気(または反射材)の境界で全反射させる事によって光電面まで届かせる。屈折率の観点から、ライトガイド側面とシンチレータ接続面との角度は大きくなるにつれて、全反射しやすく光はよく届くようになる。一方、角度が大きくなればシンチレータ接続面とPMT接続面までの距離が大きくなるので、反射の回数も増えて減衰率が大

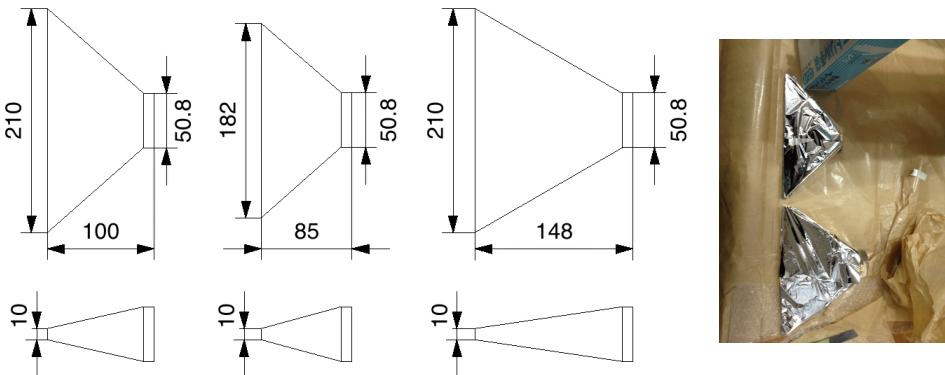


図 3.12: ライトガイドの写真

図 3.11: ライトガイドの図

きくなってしまう。これらを考慮して、一般的には角度が 60° 前後のものが主流である。今回使用するライトガイドは、スペースの制約から約 45° のものになっている。このライトガイドと、角度が 60° の幅 210mm 全長 148mm ライトガイドでの光量の違いを比較した。

各ライトガイドは、この測定のみ PMT、プラスチックシンチレータとオプティカルグリースで接続し、着脱が容易に行えるようにした。トリガー用シンチレータ 2 枚を用いて、宇宙線ミューオンがプラスチックシンチレータを突き抜けたイベントを取得した。PMT の HV は -2000V とした。測定のセットアップの写真を図 3.13 に示す。プラスチックシンチレータの位置によっても反射のしかたが変化するため、トリガー用シンチレータを移動させ、表 3.1 と図 3.13 に示した 4 カ所でのシンチレーション光を測定した。この測定を幅 210mm 全長 100mm の 45° ライトガイドと幅 210mm 全長 148mm の 60° ライトガイドでそれぞれ行った。PMT からの信号はオシロスコープで読み出し、各場所毎の 64 サンプルの大まかな波高平均値を調べた。結果を表 3.1 に示す。

表 3.1: 各ライトガイド、位置での波高平均値

	①ライトガイド接続面から 30cm の端側	②ライトガイド接続面から 30cm の中央	③ライトガイド接続面から 10cm の端側	④ライトガイド接続面から 10cm の中央
45° ライトガイド	160mV	170mV	180mV	200mV
60° ライトガイド	180mV	210mV	240mV	210mV

45° ライトガイドは 60° ライトガイドに比べ、全体的に波高が小さく集光効率が小さい。^③の位置では、集光に対して反射による影響が大きいため、 60° ライトガ

イドより約25%低くなっているが、④の位置では、ほとんどが直接入射する光であるため、あまり違いが見られない。また、CC04の荷電粒子検出器で使用する際に最もヒットが多いのは①の位置であるが、約10%の減衰に留まっている。

3.3.3 プラスチックシンチレータの光量

荷電粒子検出器はガンマ線検出器と同じく、16,000[ADC count / V]のフラッシュADCを使用する場合を考える。理想的な場合の閾値である0.5MIPエネルギーは1MeVであるので、十分な分解能を得られるように最低でも1MeVが150ADC count以上に相当するように設定したい。よって、フラッシュADCに入る信号出力は1MeVに対して10mV以上が必要となる。45°ライトガイドの最も低い波高平均値は160mVである。このエネルギーは2MeVに相当するので、1MeVに対して80mVを達成している。よって、45°ライトガイドでも十分な光量が得られる。



図 3.13: ライトガイド長別の光量位置依存性測定。番号は各測定位置を表す。

3.4 光電子増倍管

CsI結晶やプラスチックシンチレータで粒子がエネルギーを落とした際の発光は、光電子増倍管(PMT)によって信号として読み出される。ここでは7cm角CsI結晶と5cm角CsI結晶、プラスチックシンチレータに用いられるPMTと、そのゲイン測定について述べる。

3.4.1 7cm 角 CsI 結晶用 PMT

7cm 角 CsI 結晶には浜松ホトニクス製の R4275-2 という PMT を使用する。PMT と留め具の写真を図 3.14 に示す。光電面の直径は約 2 inch である。PMT の周りはミューーメタルで覆われている他、光電面には 400nm 以上の波長の光をカットする紫外線フィルターが装着されている。

結晶との光学的な接続には、結晶との屈折率が近く、程よい粘性と柔らかさにより着脱が容易である、円形のシリコン樹脂(シリコンクッキー)を使用する。また、結晶と PMT は、結晶に接着されたフランジと呼ばれる部分と PMT の端部を留め具用ねじを通して固定する。

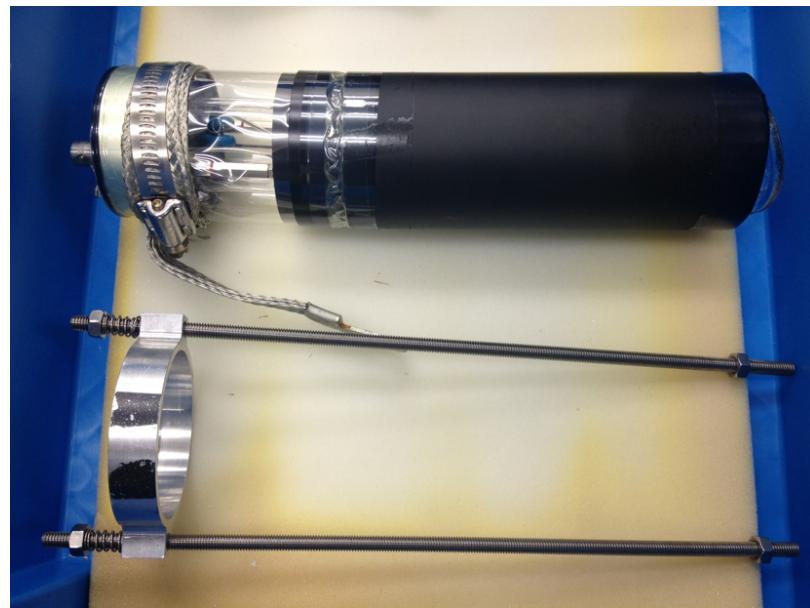


図 3.14: 7cm 角 CsI 結晶用の PMT と留め具

3.4.2 5cm 角 CsI 結晶用 PMT

5cm 角 CsI 結晶には浜松ホトニクス製の R580UV という PMT を使用する。PMT と留め具の写真は図 3.15 に示す。光電面の直径は約 1.5 inch である。7cm 角 CsI 結晶用 PMT と同様に、光電面には紫外線フィルターが装着されている。

結晶との光学的な接続も同様に、シリコンクッキーを使用する。結晶と PMT の物理的な固定方法は、結晶に接着されたフランジに取り付けられたバネ付きフックを PMT 端部に引っ掛ける事で固定する。

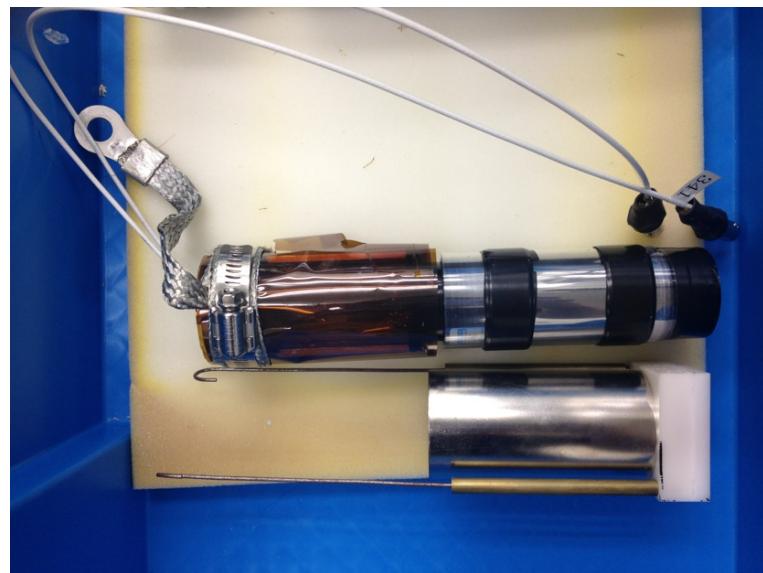


図 3.15: 5cm 角 CsI 結晶用の PMT と留め具

3.4.3 プラスチックシンチレータ用 PMT

プラスチックシンチレータには、7cm 角 CsI 結晶用 PMT と同様の浜松ホトニクス製の R4275-2 を使用する。ただし、プラスチックシンチレータの波長 425nm のシンチレーション光を透過させるために、光電面の紫外フィルターは取り外している。光学セメントで強固に接着されていた紫外フィルターを取り外すために、図 3.16 に示すようにヒートガンで熱し熱膨張率の違いで剥離させた。

ライトガイドと PMT の接続には、光学セメントを用いた。これによって簡単に着脱させる事はできないが、光学的接続と物理的固定を実現している。

3.4.4 ゲイン測定

それぞれの PMT に対してゲイン測定を行った。ゲインとは、光電面に入射した光によって生成される光電子の電荷量と、PMT から出る信号の電荷量の比である。この測定には、青色 LED からの微弱な光を用いて、PMT での 1 photoelectron 信号の大きさを ADC で読み取る方法を採用した。ゲイン測定の様子を図 3.17 に示す。

PMT にかける HV 電圧は一律 2000V とした。生の 1 photoelectron 信号は小さすぎるため増幅率 100 倍のアンプを用いて信号を増幅した。得られた ADC データの一例を図 3.18 図と 3.19 に示す。ADC データのペデスタルと 1 photoelectron によるピークそれぞれをガウシアンでフィッティングし、ペデスタルを引いた 1 photoelectron ピーク (1 p.e peak) の値を求めた。使用した ADC である RPC-22(林栄精器製) の変



図 3.16: ヒートガンを用いた、プラスチックシンチレータ用のPMTの紫外フィルターの剥がし方

換率が約 $0.25\text{pC}/\text{ADC count}$ である事と電子の電荷量が約 $1.60 \times 10^{-7}\text{pC}$ である事を考慮して、今回の測定でのゲインは次の式で求める事ができる。

$$\text{ゲイン} = \frac{1\text{p.epeak}[\text{ADCcount}] \times 0.25[\text{pC}/\text{ADCcount}]}{1.60 \times 10^{-7}[\text{pC}] \times 100[\text{アンプによる増幅率}]}$$

測定結果の計算から、7cm 角 CsI 結晶用 PMT のゲインは平均 2.7×10^5 で、最大で 3.5×10^5 、最小で 1.9×10^5 となった。5cm 角 CsI 結晶用 PMT のゲインは平均 5.0×10^6 で、最大で 6.6×10^6 、最小で 2.4×10^6 となった。得られたゲインと結晶の光量をもとに、組み合わせた時の信号の差が最小になるように組み合わせた。

3.5 開発のまとめ

CC04 は、E391a 実験で使用された鉛とプラスチックからなるサンプリングカロリメータのものから一新し、より検出効率の高い検出器として CsI 結晶を用いることを前提に一から設計した。veto 検出器として必要な設計要求は、既に完成している検出器との兼ね合いやシミュレーションを元にして見積もった。その結果、10MeV のエネルギーに対して感度がある大きさ $600 \times 600 \times 210\text{mm}^3$ で $170 \times 170\text{mm}^2$ ピームホールが空いているガンマ線検出器と、その前面に 1MeV のエネルギーに対して



図 3.17: PMT のゲイン測定。PMT が置かれた場所の奥に青色 LED が設置されている。

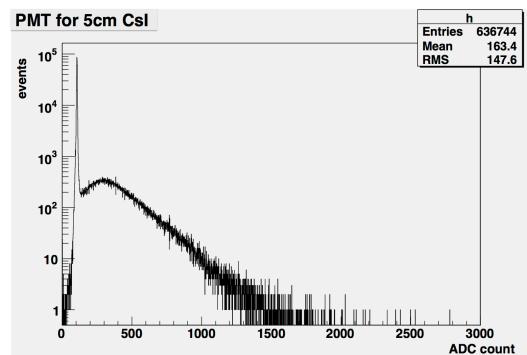
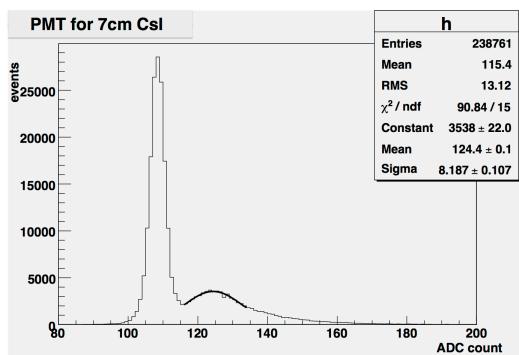


図 3.18: 7cm 角 CsI 結晶用 PMT の 1 photoelectron ピーク。横軸は ADC count、縦軸は事象数である。

図 3.19: 5cm 角 CsI 結晶用 PMT の 1 photoelectron ピーク。横軸は ADC count、縦軸は事象数である。

感度がある 10mm 厚プラスチックシンチレータの荷電粒子検出器が必要である事がわかった。

設計要求を満たすように設計を行い、使用する CsI 結晶、プラスチックシンチレータ、PMT を選定した。7cm 角と 5cm 角の CsI 結晶、プラスチックシンチレータ、PMT に対して、光量・ゲイン測定を行うことで設計要求を十分満たせる事を確認した。

第4章 12月のビームデータ取得実験による性能評価

この章では、2012年12月のビームタイムに行われた実験で得られたデータを用いた、CC04の調整とveto性能評価の解析について述べる。

4.1 12月のビームデータ取得実験の概要

2012年12月に、KOTO実験はビームを出してデータの取得を行った。今回の実験は、2013年度から開始予定の $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 探索を目的とした物理データ取得実験に向けて、以下の目的を主として行われた。

- 新しい検出器の調整
- データ収集システム構築

12月のビームデータ取得実験では、CC04を含む幾つかの検出器が初めて導入され、真空容器内に設置されるほぼ全ての検出器が揃った。2013年度にこれらの検出器それぞれが機能して、期待される物理データが取得できるように12月の実験で調整を行い、また必要な修復・改善点を洗い出した。

ここでは、本実験でのCC04の設置についてと、CC04の状況について述べる。

4.1.1 CC04の設置

12月以降のビームデータ取得実験に向けて、他の検出器同様にCC04が設置された。CC04の位置がCsIカロリメータのすぐ後ろである事から、CsIカロリメータの準備が完了してからCC04を設置した。

まず、予め想定されているビーム中心に検出器中心が合うように、レーザー墨出し器を用いて、架台を適切な高さ・角度に調節した。プラスチックシンチレータと結晶を下から組み上げていき、検出器の組み上げ完了後に上部の板と耐地震用のカバーを取り付けた。設置作業とCC04検出器実機の写真を図4.1、図4.2、図4.3、図4.4に示す。

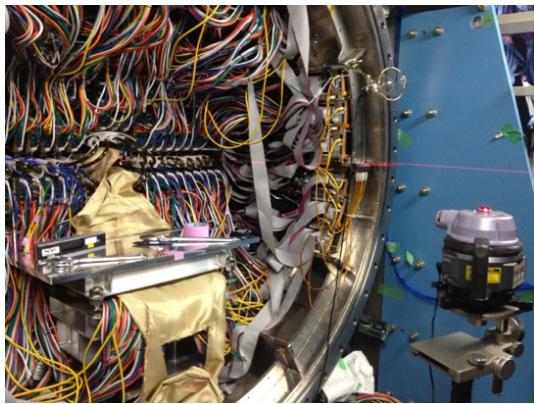


図 4.1: レーザー墨出し器による架台位置調整

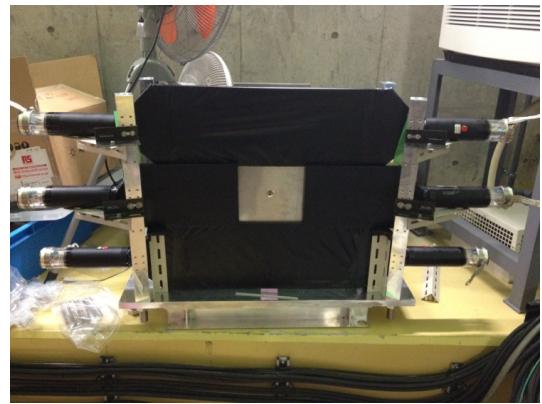


図 4.2: ビーム上流側から見た荷電粒子検出器の写真

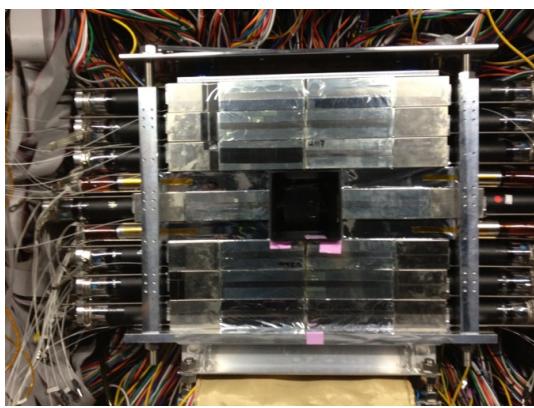


図 4.3: ビーム下流から見た CC04 検出器の写真

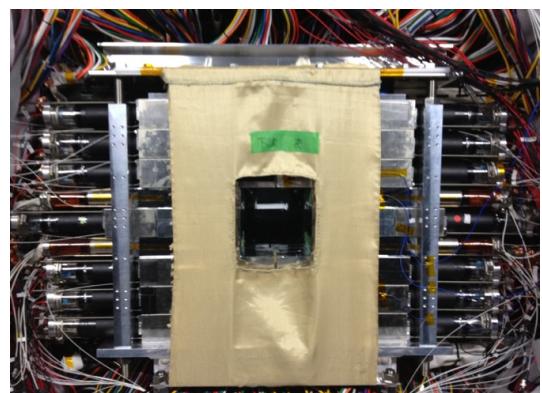


図 4.4: 耐地震用のカバー装着後の写真

4.1.2 12月のビームデータ取得実験の状況

CC04は、ガンマ線検出器のCsI結晶や荷電粒子検出器のプラスチックシンチレータ1つ1つをモジュールとして個別に信号を読み出す。本実験で割り振られた計64個のモジュールのIDを図4.5に示す。幾つかのモジュールにおいて、真空容器の蓋が取り付けられてしまった後に異常が発生したものがあるので紹介する。

- モジュールID26、36はHV電圧が-1000Vより大きくなると放電を起こした。検出器に直接アクセスできないため、HV電圧は-1000Vとして、データ取得用のフラッシュADCの直前で増幅率10倍のアンプで信号を増幅する事で対処した。信号は読み出せるが、ノイズも増幅されてしまっているという問題がある。
- モジュールID56、57は信号が出ない。原因是PMTのブリーダー部分で信号線またはHV線が断線してしまった事であると考えられる。これらは直接PMTを交換する他に修復する手段が無いため、今回の実験ではこれらはデッドチャンネルとした。

- 正常なモジュールのID
- アンプで増幅しているモジュールのID
- 信号の無いモジュールのID

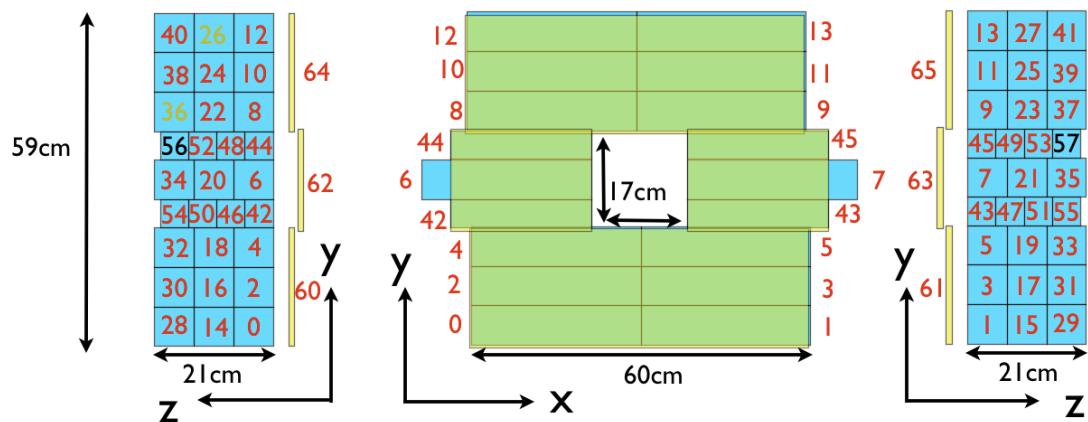


図4.5: CC04の各モジュールのIDと状態

12月の実験で使用された検出器は、CsIカロリメータとveto検出器のNCC、FB、MB、CV、LCV、OEV、CC03、CC04である。これらの検出器は全て真空容器内に設置されたが、12月の実験では真空状態にせずにビームデータの取得を行った。

4.2 ビームミューオンを用いたエネルギー校正

各検出器の信号はフラッシュADCによってADC countとして読み出される。よって、検出器でのエネルギー損失を知るためにADC countとエネルギーの対応関係を知っている必要がある。このADC countとエネルギーの対応付けをエネルギー校正と呼ぶ。

CC04がveto検出器として機能するためには、エネルギー校正が必要である。今回は、CC04ではエネルギー校正にビーム上流からやってくるビーム由来のミューオン粒子(以下、ビームミューオン)を用いた。このビームミューオンのイベントは、CsIカロリメータで一定以上のエネルギー損失がある場合にデータを取得するトリガーで得る事ができる。これは特別なトリガーではないため、今後連続的にデータを取得する場合でも定常的にCC04のエネルギー校正ができる。これによって、CC04のゲイン変動をチェックでき、変動してしまった場合でもエネルギー校正で対処できる。ここでは、ビームミューオンを用いたエネルギー校正の方法と結果について述べる。

4.2.1 CC04での突き抜けミューオンイベント収集

CsIカロリメータでトリガーされたイベントの中から、CC04のエネルギー校正に使用するビームミューオンのイベントを収集する。ビームミューオンイベントの抽出の簡略図を図4.6に示す。

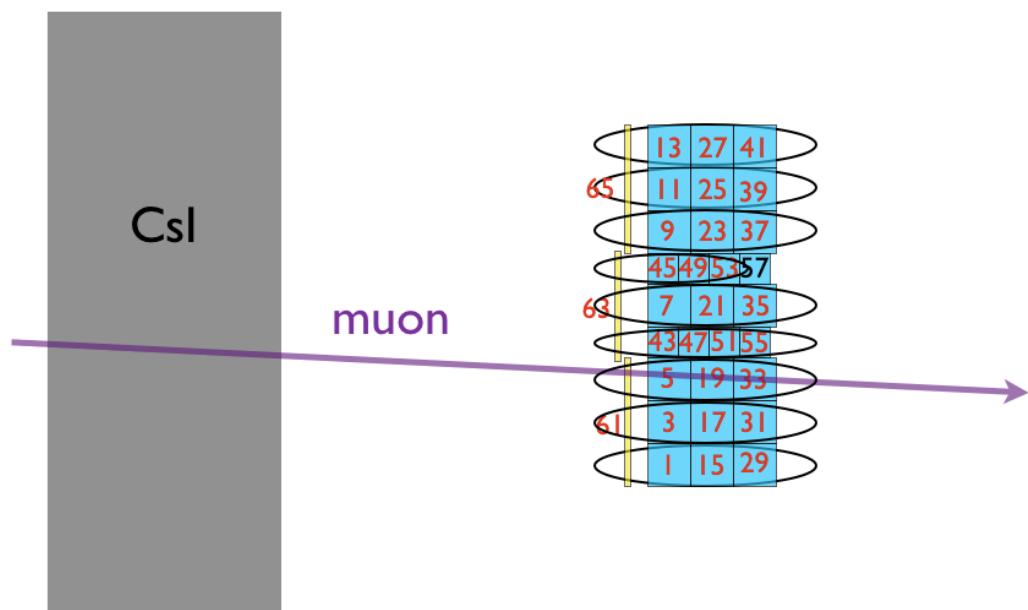


図 4.6: 突き抜けミューオンの横から見た簡略図

図 4.6 の楕円で囲まれた部分のモジュール全てで一定以上の ADCcount が得られたイベントは、CC04 の楕円部分のモジュールに比較的水平にビームミューオンが入射し、そのまま突き抜けたイベントである。このようなイベントを、図の楕円で囲まれたモジュール群毎に収集してエネルギー校正に用いた。

4.2.2 エネルギー校正

図 4.6 の方法で収集したイベントのうち、CC04 のモジュール ID が 5、19、33 のモジュールを突き抜けたイベントの ADC count を図 4.7 に示す。

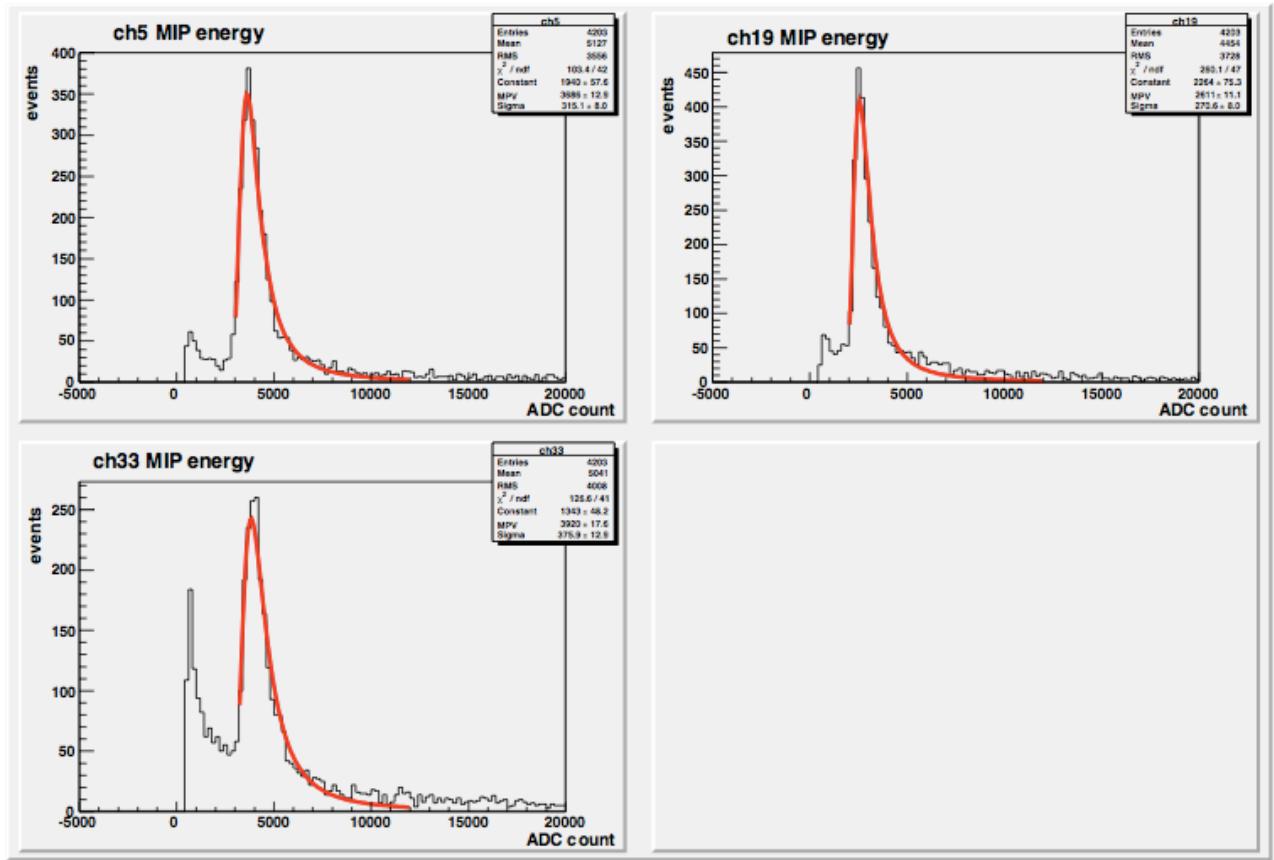


図 4.7: CC04 のモジュール ID5、19、33 を突き抜けたミューオンの ADCcount。左上が 5、右上が 19、左下が 33 のデータである。横軸は ADC count、縦軸は事象数を表す。

得られたデータには MIP エネルギーに対応するピークがある。ミューオンが突き抜けた際の MIP エネルギーは、突き抜けた距離に比例したエネルギーとなる。ビームミューオンが水平に突き抜けたとすると、物質の密度と通過距離から 7cm 角 CsI 結

晶、5cm 角 CsI 結晶、10mm 厚プラスチックシンチレータの MIP エネルギーはそれぞれ 39.2MeV、28MeV、2MeV に相当する。データのピークをランダウ分布でフィッティングし、得られた ADC count のピーク値とそれぞれの MIP エネルギーを対応付ける事により、デッドチャンネルを除く全ての CC04 モジュールに対してエネルギー校正をした。

4.3 カウンティングレート

データ取得時のトリガーに関係無く、CC04 の各モジュールがどれくらいの頻度で信号を出しているかを表すカウンティングレートを調べた。今回は 1 スピル毎に CC04 の veto 閾値である、ガンマ線検出器で 10MeV、荷電粒子検出器で 1MeV 以上の信号が検出された回数を計測した。1 スピルの時間間隔は 6 秒で、ビーム強度 10kW、ターゲットは Au を使用している。得られたカウンティングレートを図 4.8 に示す。また、同じビーム強度を想定した場合の 1 スピルでのカウンティングレートのシミュレーションを行った。ただし、ターゲットに Pt を使用した場合で見積もっている。その結果を図 4.9 に示す。

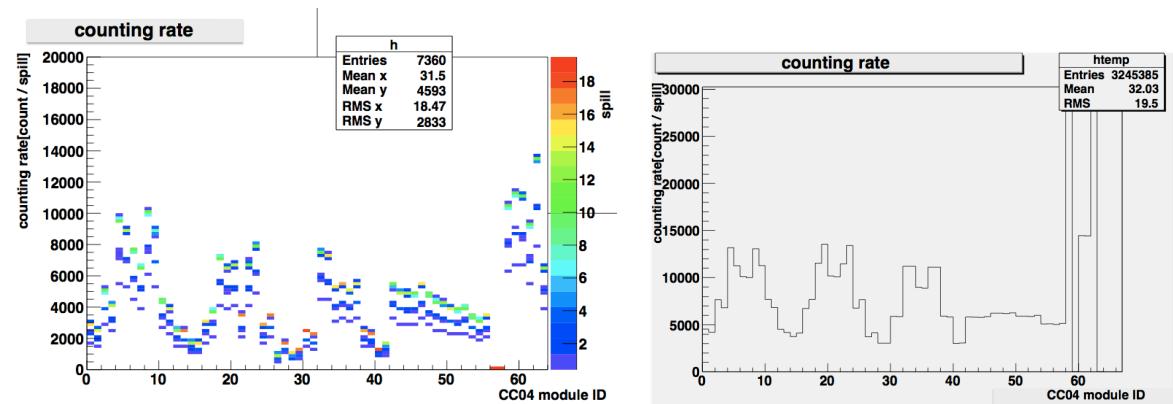


図 4.8: CC04 の各モジュールでのカウンティングレート。横軸は CC04 のモジュール ID、縦軸は 1 スピル毎のカウンティングレート、z 軸はそのカウンティングレートとなったスピルの数を表す。

図 4.9: シミュレーションでのカウンティングレート。横軸は CC04 のモジュール ID、縦軸は 1 スピル毎のカウンティングレートを表す。

これらの結果から、シミュレーションより若干小さいものの、オーダーとモジュール毎のカウンティングレートの分布の形は概ねシミュレーションの結果と同じようになっている。これらの原因はターゲットの違いも関係していると考えられる。

4.4 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントを用いたCC04のveto性能評価

今回の実験で得られたデータを用いて CC04 の veto 性能を評価した。 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルにおけるバックグラウンドで最も多いとされる $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ は、CsI カロリメータに入射しなかった 2 つの γ 線を見逃してしまうことでバックグラウンドとなる。この 2 γ を CC04 でどれくらい捕まえられるのかを確認したい。ただし、今回は物理データ取得実験ではなく、統計量も多くないため $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルを観測することは難しい。そこで、代わりに $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントを用いて評価することにした。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ を本研究におけるシグナルイベントとすると、主なバックグラウンドは $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ の 6 γ のうち 2 つの γ 線が CsI カロリメータに入射せずに見失ってしまうイベントである。このメカニズムは、 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ シグナルの場合とよく似ているため、CC04 によって $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ シグナルに対するバックグラウンドをどれくらい除去できるかを調べることによって veto 性能を評価した。ここでは $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントの取得と CC04 によるそのイベントのバックグラウンド veto について述べる。

4.4.1 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント収集

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントでは、CsI カロリメータで一定以上のエネルギーを損失する。それは CsI カロリメータに入射する 4 つの γ 線によって起こるため、CsI カロリメータ上の位置に、エネルギー損失があった結晶群(クラスター)が 4 つ存在する。エネルギー損失による電磁シャワーが CsI カロリメータから漏れて正しい情報が得られなくなるのを防ぐために、これらのクラスターの CsI カロリメータ上の位置はビームホール中心から $175\text{mm} \leq r \leq 850\text{mm}$ であるとする。各クラスターのエネルギー損失と入射位置を見積もれば、1.3.1 で説明したように 2 つの π^0 を再構成することができる。4 つの γ 線があることにより π^0 の再構成の組み合わせは複数存在するが、2 つの π^0 の崩壊 z 位置が近ければ、2 つともが正しく K_L から崩壊しているものであると言える。そのため、再構成で見積もられる 2 π^0 の崩壊 z 位置の差の χ^2 が小さいという条件を課した。以上の条件を満たしたイベントが $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント候補である。

ただし、それだけでは多くのバックグラウンドを含んでいる。そのバックグラウンドの原因として最も有力なのが、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ の 6 γ のうち 2 つの γ 線が CsI カロリメータに入射しないイベントである。よって veto 検出器で何も検出されなかつたことを要求することで、真の $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントを取り出すことができる。veto 検出器の CC03 の閾値を 10MeV、MB と CV はエネルギー校正が完了していなかつたため、MB の閾値を 3000 ADC count、CV の閾値を 100000 ADC countとした。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント候補のうち、veto 検出器の MB・CV・CC03 で閾値以上のエネルギー損失が検出されなかつたことを要求した場合に、再構成された K_L の質量分

布を図 4.10 に示す。図 4.10 の 497MeV 付近にあるピークが $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントである。しかし、依然として 497MeV 以外の質量にも分布が存在しているため、バックグラウンドは完全に除去できていない。このまだ残っているバックグラウンドを CC04 でどれくらい除去できるかを評価する。

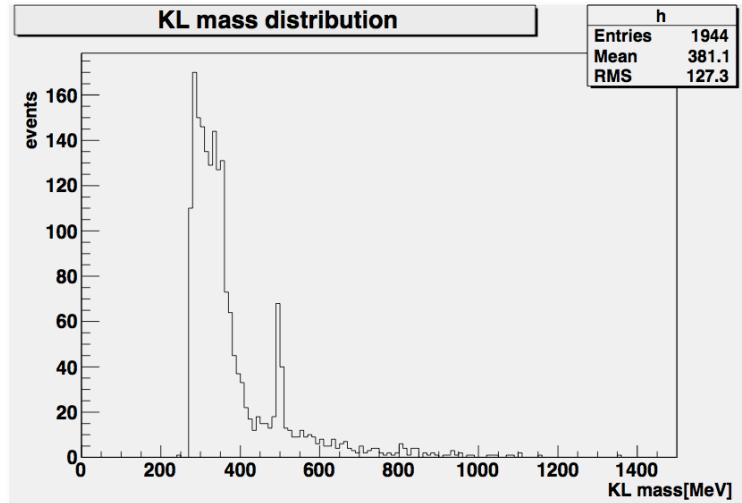


図 4.10: CC04 による veto が無い状態での $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントの K_L 質量分布。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

4.4.2 CC04 によるバックグラウンドの除去

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントにおけるバックグラウンドを CC04 で除去するということは、CC04 に信号があるイベントを取り除くということである。主なバックグラウンドは $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ の 2 つの γ 線であると考えられるので、第 2 章で求めた閾値と同じように、CC04 ガンマ線検出器のモジュールに 10MeV 以上のエネルギー損失があったイベントを取り除くことにした。

ただし、10MeV 以上のエネルギー損失があるイベント全てが、veto すべきイベントであるとは限らない。なぜなら、トリガー時間内に $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントとは無関係なものが、CC04 に検出されてしまうアクシデンタルなイベントが含まれているからである。これを除去するために CC04 でのエネルギー損失の時間情報を使用する。CC04 各モジュールの信号時間は、ビームミューオンを用いてタイミングを合わせた。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント由来の信号時間をゼロとした時のタイミングのずれとエネルギー損失の相関を図 4.11 に示す。

図 4.11 から $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント由来の信号は時間のずれ $\pm 8\text{ns}$ 以内に収まり、それ以外の時間にアクシデンタルなイベントが広がっていることがわかる。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$

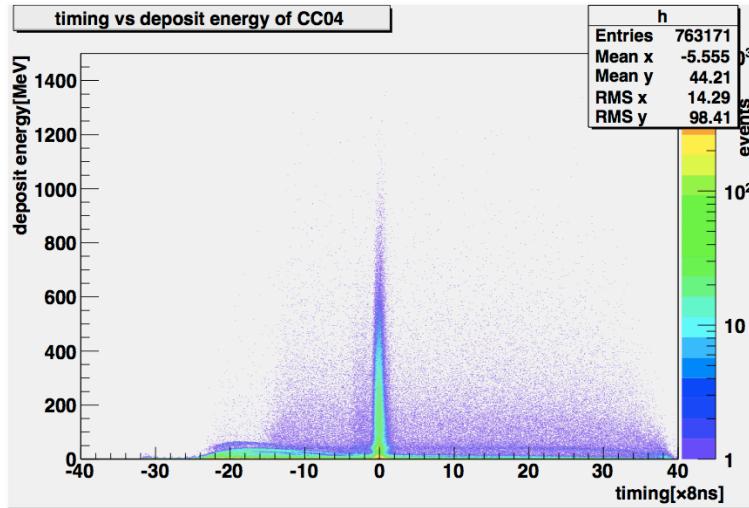


図 4.11: CC04 のタイミングのずれとエネルギー損失の相関。横軸は CC04 での $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント由来の信号時間をゼロとした時のタイミングのずれ [$\times 8\text{ns}$]、縦軸は CC04 での各モジュールのエネルギー損失の最大値 [MeV]、z 軸は事象数を表す。

イベント候補での CC04 での各モジュールのエネルギー損失の最大値を、時間の条件を加えていない場合を赤線に、時間のずれが $\pm 8\text{ns}$ 以内という条件を課した場合を黒線として図 4.12 に示す。

図 4.12 から、時間のずれが $\pm 8\text{ns}$ 以内のイベントを指定すると、低エネルギーのイベントが大幅に削減されるが、高エネルギーのイベントはあまり減っておらず、正しくバックグラウンド粒子が入射したイベントを選んでいる。また、40MeV 付近のピークは CsI 結晶の 1MIP に相当するため、荷電粒子の突き抜けイベントも多く存在していることがわかった。

以上から、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント由来のバックグラウンドを正しく除去するために、各モジュールのエネルギー損失の最大値が 10MeV 以上、且つ信号時間のずれが $\pm 8\text{ns}$ 以内という条件で CC04 による veto をかけることにした。図 4.10 の K_L 質量分布を赤線として、それに以上の条件で CC04veto を付加した場合の K_L 質量分布を黒線としたものを図 4.13 に示す。また、CC04 で veto した前後の事象数の比を K_L 質量の関数として図 4.14 に示す。

4.5 CC04 の veto 性能評価の結果

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントを用いた CC04 の veto 性能評価の結果から、図 4.13 と図 4.14 を見ると、 K_L 質量の 497MeV では約 10% のイベントを除去しており、その周辺のバックグラウンドイベントは平均しておよそ 20% 除去されていることがわかつ

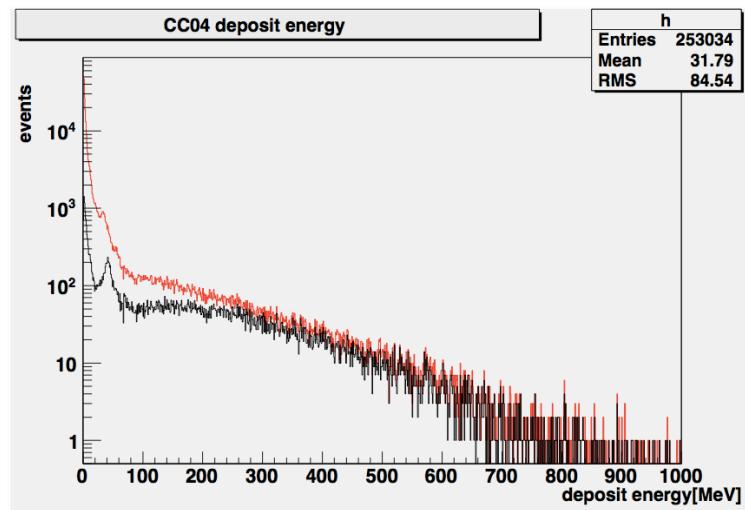


図 4.12: $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント候補での CC04 エネルギー損失の最大値。時間の条件を加えていない場合を赤線に、時間のずれが ± 8 ns 以内という条件を課した場合を黒線に示す。横軸は CC04 での各モジュールのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

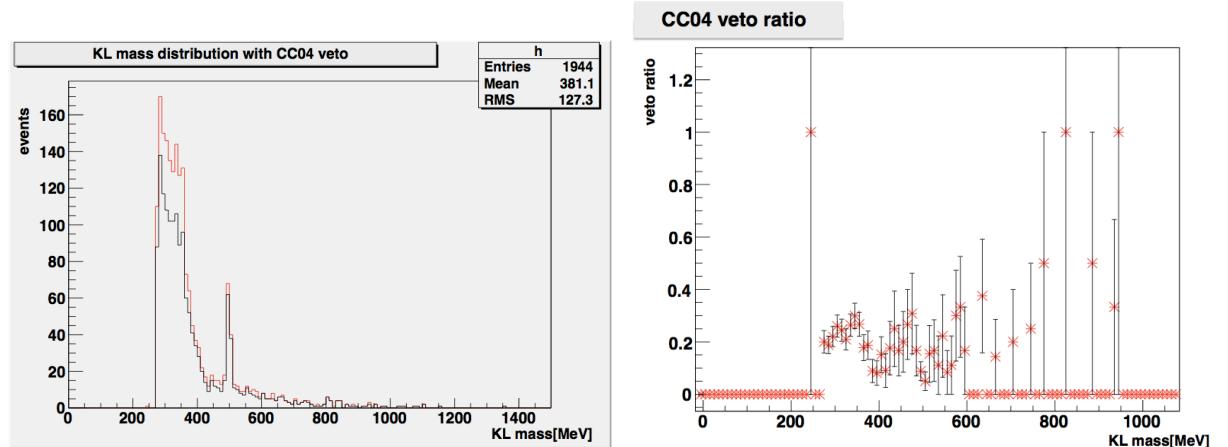


図 4.13: CC04veto の有無による K_L 質量分布。赤線が CC04veto 無し、黒線が CC04veto 有りである、横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

図 4.14: K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は CC04veto 無しの時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を表す。

た。また、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント数がCC04veto 無しで 1944 イベントであったものが CC04veto の追加で 1550 イベントとなり、全体のイベント数も $20.3 \pm 1.0\%$ 減少している。CC04veto 無しでは、490MeV から 500MeV の間のイベント数は 68 イベントで、バックグラウンドの分布を考慮すると、その内のおよそ 55 イベントがシグナル事象で 13 イベントがバックグラウンド事象となる。仮にこの範囲でもバックグラウンドを 20% 削減しているとすると、バックグラウンドは 2.6 イベント削減されていると考えることができる。CC04veto の追加によって、490MeV から 500MeV の間では 6 イベント削減されていることから、この場合ではシグナル事象は 3.4 イベント削減されているので、シグナルイベントの損失を $6.2 \pm 4.2\%$ に留めつつ、 $20.3 \pm 1.0\%$ のバックグラウンドを除去できている。

第5章 考察

5.1 CC04 と他の veto 検出器との相関

今回の $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントでの CC04veto の追加では、さらに 20% のバックグラウンドが除去できたが、CC04veto 追加前には、既に veto 検出器の MB、CV、CC03 の veto が含まれている。よって、これらの veto 検出器によって CC04 が veto できるはずのバックグラウンドが追加前の段階で除去されてしまっている可能性がある。そこで、特に CC04 との関係性が高い CC03 との相関を調べた。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントのうち、veto 検出器による veto が無いイベントでの CC04 と CC03 のエネルギー損失の最大値の相関を図 5.1 に示す。

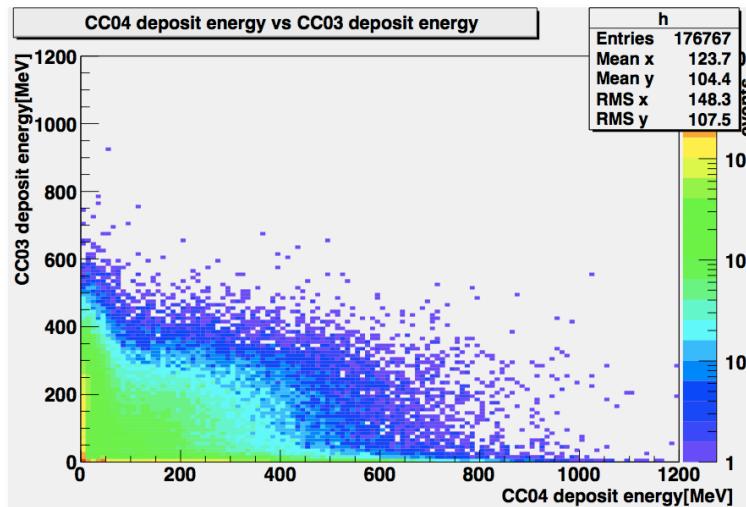


図 5.1: CC04 と CC03 のエネルギー損失の相関。横軸は CC04 での各モジュールのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸は CC03 での各モジュールのエネルギー損失の最大値 [MeV] である。

図 5.1 に示すように、CC03 のエネルギー損失 50MeV 以上から 400MeV 以下にかけて、CC04 でも大きいエネルギー損失がある。つまり、CC03 でエネルギー損失が起こっても、下流側に漏れて CC04 で検出されているイベントがある。よって、CC03 による veto で既にバックグラウンドが除去できるイベントが存在していることになる。

何もカットをかけていない $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント候補全体では、CC04のみによって vetoされるイベント数は 133529 イベントあるのに対し、CC03veto がある状態で、新たに CC04 によって vetoされるイベント数は 41457 イベントとなる。よって、CC04 が veto に寄与するイベント数のうち約 70% は CC03 によって veto されている。

また、主なバックグラウンドが $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ であるとすると、CsI カロリメータに入射していない 2 つの γ 線が存在する。よって、1 つの γ 線が CC04 に入射した場合、もう 1 つの γ 線も別の veto 検出器に入射している可能性が高い。そこで、広範囲を覆っている MB との相関を確認した。CC04 と MB のエネルギー損失の最大値の相関を図 5.2 に示す。ただし、MB のエネルギー校正は行われていなかったため、MB のエネルギー損失は ADC count で表す。

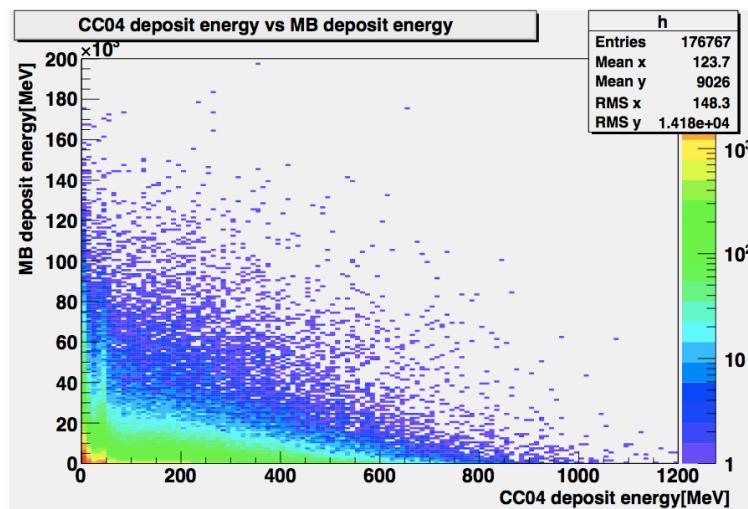


図 5.2: CC04 と MB のエネルギー損失の相関。横軸は CC04 での各モジュールのエネルギー損失の最大値 [MeV]、縦軸は MB での各モジュールのエネルギー損失の最大値 [ADC count] である。

図 5.2 に示すように、MB には CC03 のような強い相関は無い。ただし、分布の広がり方から CC04 でエネルギー損失がある場合に MB でもエネルギー損失があるイベントが若干多いことがわかる。

5.2 CC04のみによる veto 性能

以上のことを見て、他の veto 検出器でのイベントカットが無い状態で、CC04 のみでバックグラウンドをどれくらい落とせるかを確認した。veto 検出器による veto が無い場合の K_L 質量分布を赤線、CC04veto を付加した場合を黒線としたものを図

5.3 に示す。また、 K_L 質量毎の CC04veto 無しの時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を図 5.4 に示す。

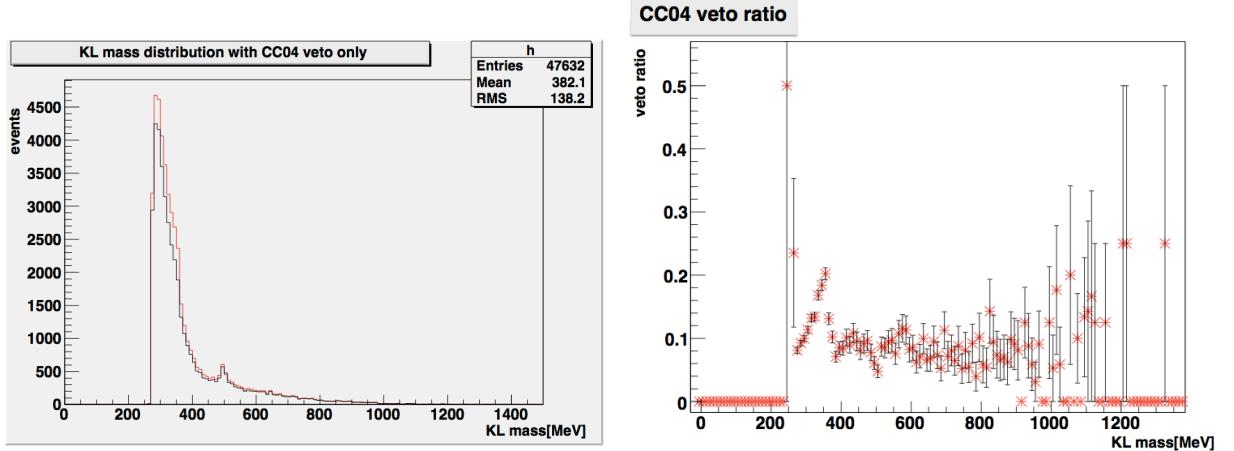


図 5.3: CC04veto の有無による K_L 質量分布。赤線が CC04veto 無し、黒線が CC04veto 有りである、横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

図 5.4: K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は CC04veto 無しの時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を表す。

図 5.4 から、バックグラウンドの削減率は $11.4 \pm 0.2\%$ に落ちてしまうが、やはり 497MeV 付近は 6% くらいである。CC04veto 無しでは、490MeV から 500MeV の間のイベント数は 609 イベントで、バックグラウンドの分布を考慮すると、その内のおよそ 234 イベントがシグナル事象で 375 イベントがバックグラウンド事象となる。仮にこの範囲でもバックグラウンドをおよそ 10% 削減しているとすると、バックグラウンドは 37.5 イベント削減されていると考えることができる。CC04veto の追加によって、490MeV から 500MeV の間では 38 イベント削減されていることから、この場合ではシグナル事象は 0.5 イベント削減されているので、シグナルイベントの損失は $0.2 \pm 2.6\%$ となり、ほぼバックグラウンドのみを $11.4 \pm 0.2\%$ 削除できている。また、この場合の CC04 によって削減された事象数を K_L 質量の関数として図 5.5 に示す。

図 5.5 に示す分布の形状は、図 5.4 に示す分布でシグナルピークの除いた場合のバックグラウンドの質量分布と同じ形になっている。つまり、正しいバックグラウンドイベントのみを削減している。それに対して、時間情報で $\pm 8\text{ns}$ 以上であったアクシデンタルなイベントと思われる時間領域で、且つ 10MeV 以上のエネルギー損失がある場合に CC04 によって削減された事象数を K_L 質量の関数として図 5.6 に示す。アクシデンタルなイベントを veto した場合は 497MeV 付近でピークがある。つまり、シグナルイベントも同時に削減してしまっている。また、 K_L 質量毎の CC04veto 無し

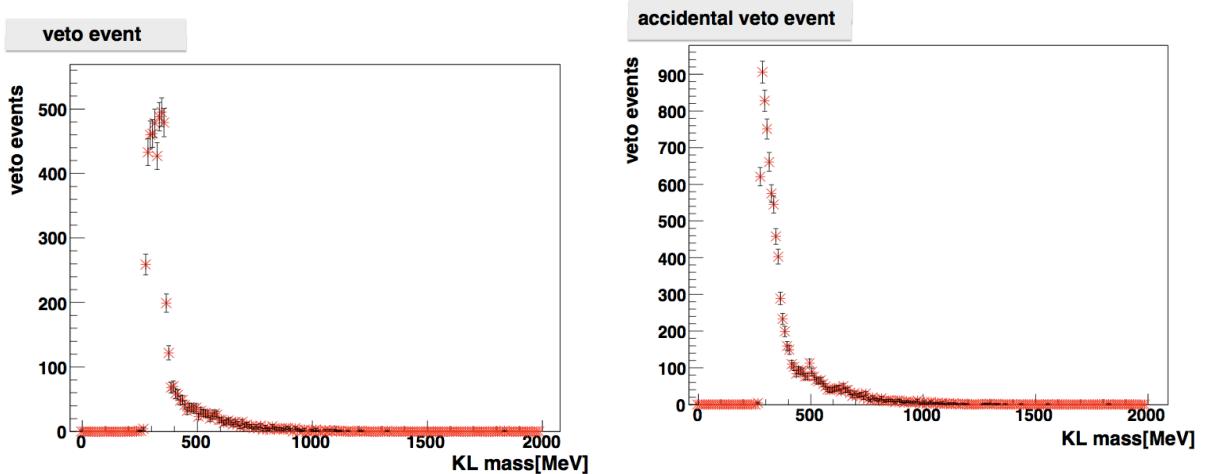


図 5.5: CC04 により削減された事象の K_L 質量分布。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は 削減された事象数を表す。

図 5.6: アクシデンタルな時間領域での CC04 により削減された事象の K_L 質量分布。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は 削減された事象数を表す。

の時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を図 5.7 に示す。

図 5.7 に示すように、削減率は 0.6% となり、若干構造はあるものの図 5.4 で見られる K_L 質量が 350MeV 付近でのピーク構造は無く、全体的に一様にバックグラウンドを落としている。つまり、アクシデンタルな時間領域では、イベントに対してアクシデンタルであるために、veto する場合は K_L 質量に関係なくランダムに veto していると考えることができる。よって、時間情報とエネルギー損失情報を用いた veto は正しく機能している。

5.3 シミュレーションとの比較

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベントで CC04 のみで veto をかけた場合を、シミュレーションで再現した。シミュレーションでは、 K_L の全崩壊事象を発生させ、12月の実験と同様の手順で $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント候補を抽出した。シミュレーションでの CC04 のエネルギー損失分布を図 5.8 に示す。また、同じ手順で選んだ実験データでの、±8ns 以内の CC04 のエネルギー損失分布を赤線、アクシデンタルな時間領域での CC04 のエネルギー損失分布を黒線としたものを図 5.9 に示す。シミュレーションの統計量は実験データの $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント候補数と等しくなるようにスケーリングしている。

図 5.8 と図 5.9 の赤線を見比べると、高いエネルギー側は統計量のシミュレーションの統計量が少なかったこともあり、若干違いがあるもののほぼ同じ形で分布している。シミュレーションではアクシデンタルなイベントは存在しないので、時間を

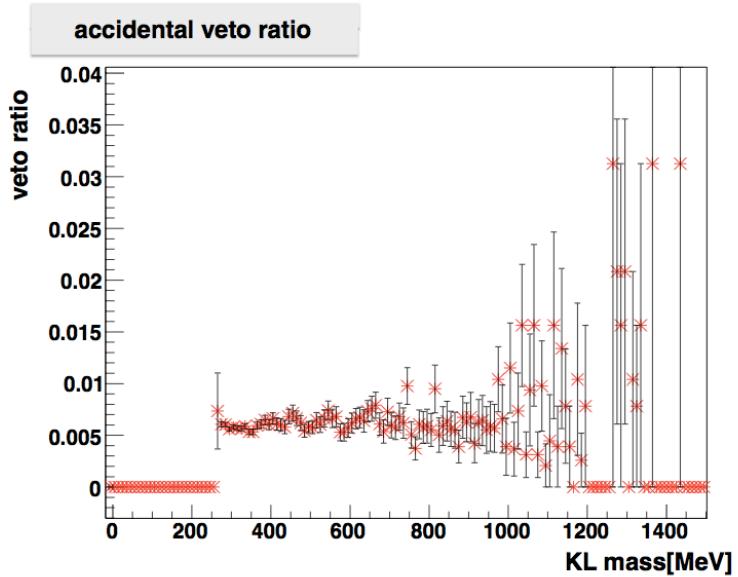


図 5.7: アクシデンタルな時間領域での K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は CC04veto 無しの時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を表す。

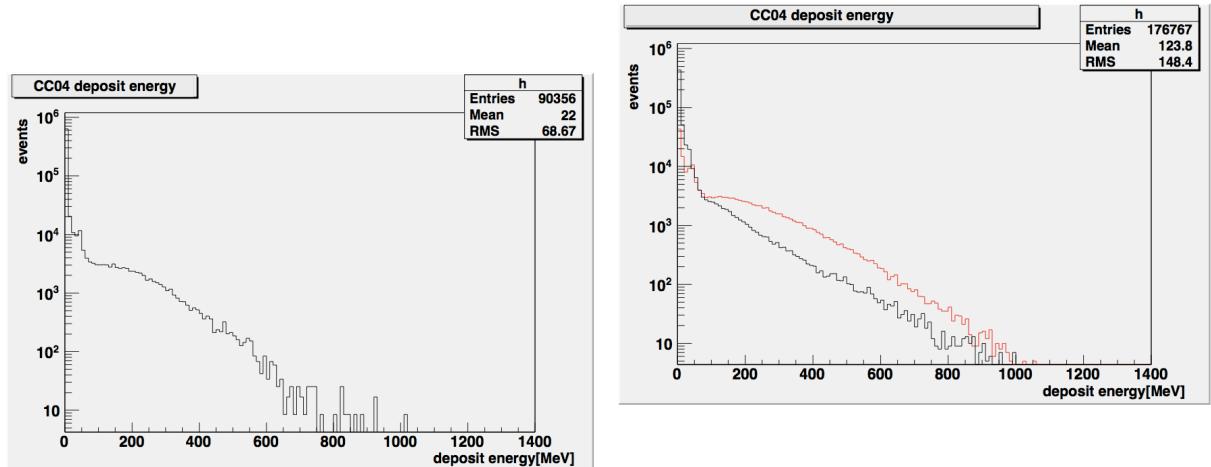


図 5.8: シミュレーションでの、CC04 のエネルギー損失分布。横軸は CC04 のエネルギー損失分布 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

図 5.9: 実験データでの CC04 のエネルギー損失分布。±8ns 以内の CC04 のエネルギー損失分布を赤線、アクシデンタルな時間領域での CC04 のエネルギー損失分布を黒線とする。横軸は CC04 のエネルギー損失分布 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

$\pm 8\text{ns}$ 以内に指定することで正しいイベントを選択できていることがわかる。

また、シミュレーションでも同様に、CC04のみで veto した場合の K_L 質量分布を調べた。シミュレーションでの、veto 検出器による veto が無い場合の K_L 質量分布を赤線、CC04veto を付加した場合を黒線としたものを図 5.10 に示す。また、 K_L 質量毎の CC04veto 無しの時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を図 5.11 に示す。

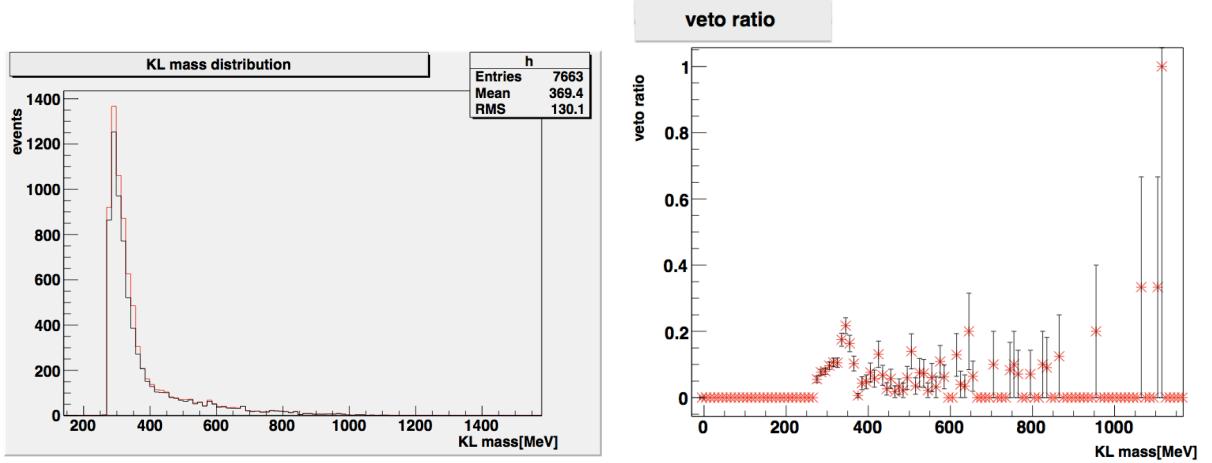


図 5.10: シミュレーションでの CC04veto の有無による K_L 質量分布。赤線が CC04veto 無し、黒線が CC04veto 有りである、横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は事象数を表す。

図 5.11: シミュレーションでの K_L 質量毎の CC04veto により veto されたイベントの比率。横軸は K_L 質量 [MeV]、縦軸は CC04veto 無しの時の事象数に対する CC04veto で削減された事象数の比率を表す。

図 5.10 に示すように、シミュレーションでのバックグラウンドの K_L 質量分布は実験データと同じような分布をしている。ただし、シグナルがあるはずの 497MeV には顕著なピークは見られない。しかし、シミュレーションでの削減の比率は全体の平均で $9.1 \pm 0.3\%$ となり、若干小さいものの実験データの $11.4 \pm 0.2\%$ と近い値になった。また、比率の分布の形もシミュレーションと実験データでよく似ている。

よって、実験データでの veto 性能評価は、シミュレーションの結果をよく再現している。以上から、CC04のみでの veto 性能は $11.4 \pm 0.2\%$ のバックグラウンド除去率である。今回は $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントを用いた veto 性能評価であったが、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ シグナルでの veto 性能もシミュレーションで評価することができると言える。

第6章　まとめ

中性 K 中間子の稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索する KOTO 実験のために、CsI カロリメータの下流部に設置する veto 検出器である CC04 を設計・開発し、2012 年 12 月のビームデータ取得実験にてその veto 性能について評価した。

12 月に行われたビームデータ取得実験では、まず CC04 が veto 検出器として機能するようにエネルギー校正を行い、カウンティングレートや時間情報といった基礎情報を取得した。veto 性能評価には、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントを用いた。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントに対する $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ からのバックグラウンドを CC04 がどれくらい除去できるかを調べた。CC04 で 10MeV 以上のエネルギー損失があり、且つ信号時間が $\pm 8\text{ns}$ 以内に収まっているイベントを veto した。その結果、MB・CV・CC03 での veto が行われたイベントに対しては、CC04 の追加によって $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベント候補のうち、 $20.3 \pm 1.0\%$ のバックグラウンドを除去できることがわかった。

CC04のみでイベントをカットする場合は、バックグラウンドの削減率は $11.4 \pm 0.2\%$ となる。また、削減された事象の K_L 質量分布から、時間情報とエネルギー損失情報で veto することでシグナル事象の削減率を $0.2 \pm 2.6\%$ に抑えて、バックグラウンドを正しく veto できる。この解析結果は、シミュレーションとよく一致している。よって、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ イベントを用いた veto 性能評価は正しく行われ、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ シグナルに対する veto 性能も同様に、シミュレーションと比較できると考える。

付 錄 A 各veto検出器の図

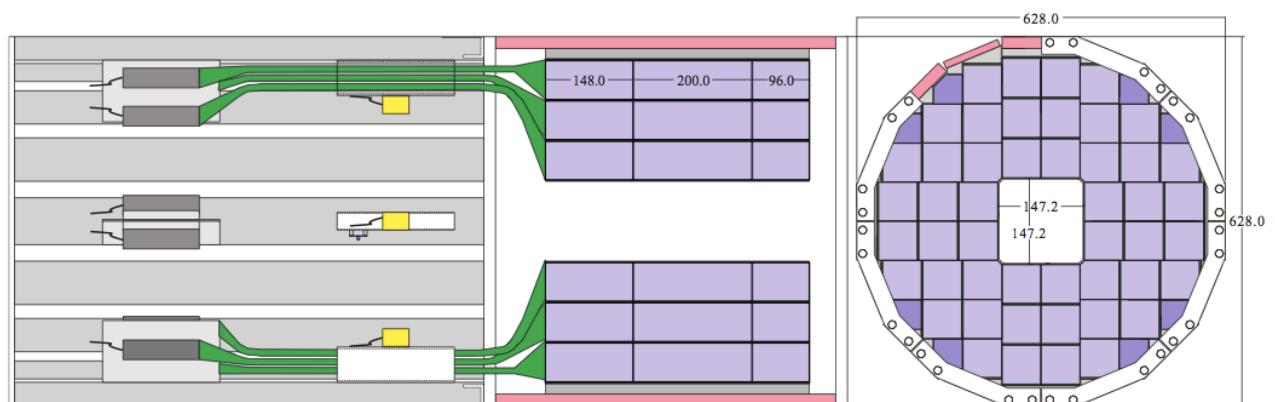


図 A.1: NCC の図

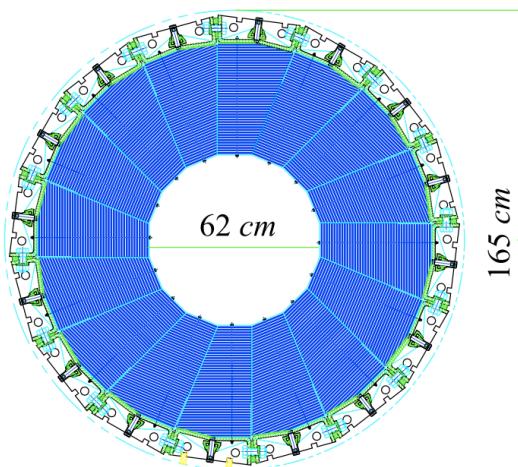


図 A.2: FB の図



図 A.3: FB の写真

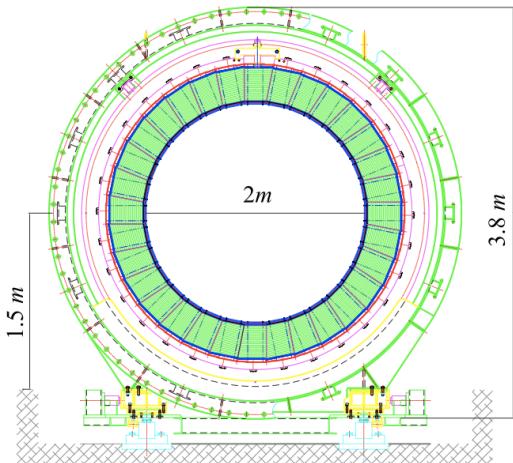


図 A.4: MB の図



図 A.5: MB の写真

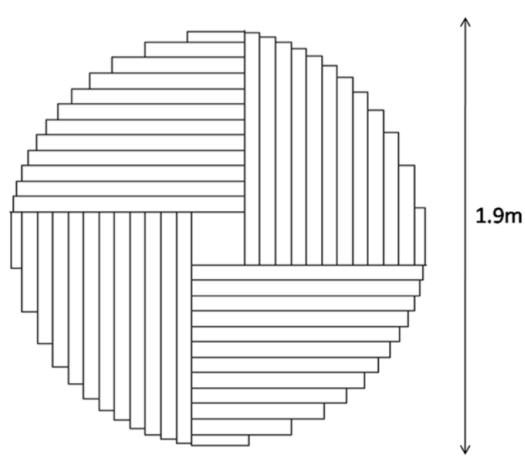


図 A.6: CV の図

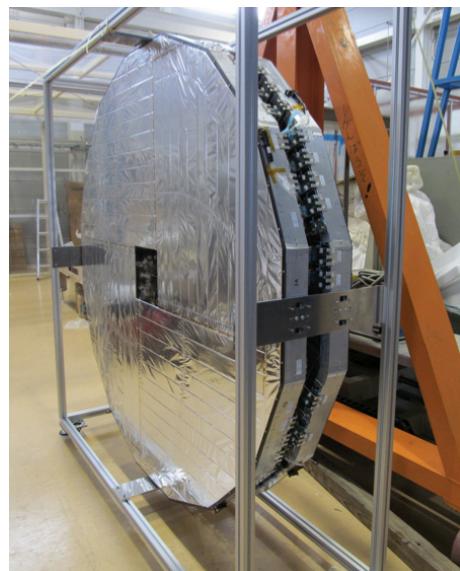


図 A.7: CV の写真

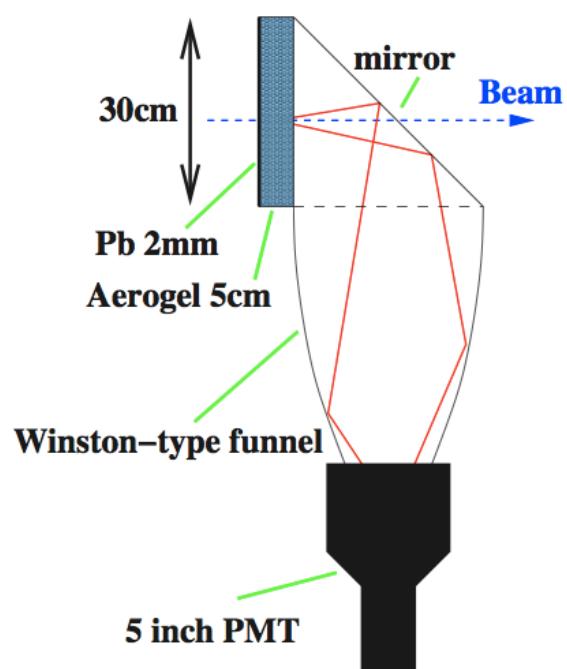


図 A.8: BHPV の図

謝辞

本研究を行うにあたってお世話になった皆様に、心から感謝致します。

指導教官である山中卓教授には大変お世話になりました。ご心配をおかけすることも多々ありましたが、それでも親身になって指導して頂いたおかげで、本論文を完成させることができました。研究のアドバイスはどれも的確で多くのことを学ぶことができましたし、様々な物事に興味を抱き、実践する姿勢には今後も見習っていきたいと思います。3回生での結晶測定から数えて、3年と数ヶ月とお世話になりましたが、本当にありがとうございました。

花垣和則准教授には、4回生の卒業実験とゼミで指導して頂き、たくさんのこと学ばせて頂きました。特に、卒業研究では測定実験の基礎を丁寧に教えて頂いたことで、実験の面白さを知ることができました。ありがとうございました。

外川学助教には、本研究で特にお世話になりました。研究を行う上で何をすべきか悩んでいるときに道を示してくださったり、忙しいにも関わらず、自分では手に負えなかつた架台の設計や真空試験をして頂きました。さらに検出器の設置・導入の時にも、夜遅くまで重い結晶の積み上げ作業を手伝ってくださったおかげで、無事に検出器を完成させることができました。大変感謝致します、ありがとうございました。

特任研究員である李栄篤さんと塩見公志さんには、東海村での生活で大変お世話になりました。忙しく、疲れているにもかかわらず車で様々なところへ食事に連れて行って頂けて有意義な生活を送ることができたことに、感謝致します。

秘書の茶田さんには、書類の提出期限でご迷惑をおかけすることがよくありました。その明るくユーモアのあるキャラクターに何度も救われました。ありがとうございました。

KOTO 実験の先輩である、岩井さん、佐藤さん、Leeさん、村山さん、杉山さんは解析の方法をたくさん教えて頂きました。ATLAS 実験の廣瀬さん、岡村さん、遠藤さんは日本に帰っている時に色々と気にかけていただきました。同期の JJ君、辻君、東野君の頑張っている姿にはとても励まされました。後輩の石島君、高島君、豊田君、渡邊君は皆優秀で、先輩らしいことはあまりできませんでしたが、これからも頑張ってください。皆さん、ありがとうございました。

多くの人の支えがあって、2年間の研究生活を送ることができました。特に、6年間も大阪での学生生活をさせて下さった両親に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] L.Wolfenstein, Phys. Rev. Lett.51, 1945 (1983).
- [2] Vincenzo Cirigliano, Rev. Mod. Phys. 84, 399-447 (2012).
- [3] E391a Collaboration, J. K. Ahn et al., Phys. Rev. D 81, 072004 (2010).