

J-PARC KOTO 実験用下流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
山中研究室 博士前期課程2年

高島悠太

平成26年2月5日

概要

KOTO 実験とは茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で行われている中性 K 中間子の極稀崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索を行っている実験である。この崩壊イベントにおいて終状態で測定可能なのは π^0 からの 2γ のみである。シグナルとなる 2γ を CsI カロリメータで測定し、それ以外の検出領域を veto 検出器で覆うことにより、その他の粒子が存在しないことを示す必要がある。

本研究では、CsI カロリメータ中央に存在するビームホールからビーム下流方向へ γ 線が通り抜けて起こるバックグラウンドイベントを削減するための 2 台の下流ガンマ線 veto 検出器 (CC05, CC06) の開発を行った。シミュレーションを用いて要求される性能を決定し、2013 年の春に実機の製作を行い、インストールした。2013 年 5 月の物理データ取得実験において検出器のエネルギー較正や時間較正、カウントレートの測定を行い、veto 検出器として正しく働いていることを確認した。

すでにインストールされている CC03 や CC04 の非検出効率関数に、他の検出器の非検出効率関数が用いられているという問題が存在した。この問題を解決するために、Collar 検出器の新たな非検出効率関数の導出を行った。そのために、シミュレーションを使用して、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊における Collar 検出器の放射長の見積もりを行い、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊からの γ 線は少なくとも $8X_0$ 分の CsI 結晶を貫通することがわかった。CsI 結晶 $8X_0$ に対する非検出効率関数を求め、それを Collar 検出器の新たな非検出効率関数として使用し、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊を起源とするバックグラウンド数の見積もりを行った。ビーム強度 100kW での 3 年間の物理データ取得実験を仮定すると、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊を起源とする 4.2 ± 0.54 イベントのバックグラウンドが残ることがわかった。また、カウントレートの見積もりを実験データとシミュレーションから行い、ビーム強度が 24kW の場合、CC05 で約 15kHz、CC06 で約 20kHz であることがわかった。カウントレートがビーム強度に比例すると考えると、デザイン値である 290kW 運転時にもカウントレートは 1MHz 以下であり、現行の CC05, CC06 でのデータ取得が可能である。

目次

第1章 序論	6
1.1 物理	6
1.1.1 CP 対称性の破れ	6
1.1.2 中性 K 中間子	7
1.1.3 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊	7
1.2 KOTO 実験	8
1.2.1 検出器と測定原理	8
1.2.2 バックグラウンド事象	10
1.3 本研究の目的と概要	12
第2章 KOTO 実験の検出器	14
2.1 J-PARC ハドロン実験施設について	14
2.1.1 KL ビームライン	14
2.1.2 陽子ビーム	16
2.1.3 金標的	16
2.2 検出器	16
2.2.1 CsI カロリメータ	17
2.2.2 Barrel Veto 検出器	18
2.2.3 Charged Veto 検出器	18
2.2.4 Collar 検出器	18
2.2.5 Beam Hole Veto 検出器	19
第3章 下流 Collar 検出器への要求	22
3.1 対象となるバックグラウンド事象	22
3.2 Collar 検出器に対する要求	23
3.2.1 CC05, CC06 のビームホール	23
3.2.2 CC05, CC06 の検出面積	28
3.2.3 CC05, CC06 のビーム軸に対する厚さ	28
第4章 CC05, CC06 の製作	30
4.1 構成	30
4.2 CC05, CC06 の結晶間のすきま	32
4.3 CC05, CC06 の設置	33

第5章 シミュレーションによる性能評価	37
5.1 シミュレーションのセットアップ	37
5.2 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ の崩壊からの γ 線についての Collar 検出器の放射長の和 . .	39
5.3 各エネルギーに対する CsI 結晶の非検出効率	39
5.4 CC05, CC06 の有無による $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ 起源のバックグラウンド数の変化	41
第6章 物理データ取得実験における CC05, CC06 の調整	44
6.1 物理データ取得実験の状況	44
6.2 データ収集システムについて	44
6.3 KOTO 実験におけるデータの扱い	46
6.4 CC05, CC06 の較正	47
6.4.1 エネルギー較正	47
6.4.2 時間較正	49
第7章 考察	51
7.1 MC とデータの比較	51
7.1.1 カウンティングレート	51
第8章 結論	54
付録 A 謝辞	55

目次

1.1	標準理論における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊ダイアグラム	8
1.2	J-PARC の俯瞰図. KOTO 実験は右下のハドロン実験施設にて行われている	9
1.3	KOTO 実験検出器の全体図	9
1.4	イベントの再構成	10
1.5	CC05, CC06 がインストールされる前の検出器の様子. BHPV も同時期に製作が行われていた.	12
2.1	ハドロン実験施設 KL ビームラインの様子	14
2.2	カリメータのデザイン	15
2.3	金標的の構造	16
2.4	CsI カロリメータの図	17
2.5	NCC 検出器の様子. 写真は上流から撮影されたもの	18
2.6	CsI カロリメータのビームホール周辺図. 図は上流側から見たもの	19
2.7	CC04 の構造	20
2.8	BHPV の入射 γ のエネルギーごとの非検出効率 (Inefficiency) のシミュレーションによる見積もり [6].	20
2.9	BHPV での γ 線検出原理	21
3.1	パンチスルーの様子. CC04 をかすめたガンマ線がパンチスルーを起こしている.	23
3.2	ビームパイプ周りの状況. 写真は下流側から撮影	24
3.3	CsI, CC04, BHPV の真上から見た位置関係	25
3.4	CC06 設置位置における K_L ビームの形 (x 方向)	27
3.5	CC06 設置位置における K_L ビームの形 (y 方向)	27
3.6	CC04, CC05, CC06 の位置関係	28
4.1	CC05 の全体図	30
4.2	CC06 の全体図	31
4.3	宇宙線測定 of データ	32
4.4	CC05 の構造	34
4.5	CC05 の製作風景	35
4.6	CC06 の製作風景	36
5.1	真上から見たシミュレーションセットアップ	38

5.2	CC03, CC04, CC05にヒットしたイベントのCC03,CC04,CC05,CC06,CsI での合計放射長	40
5.3	シミュレーションで求めた CsI 結晶 (厚さ $11X_0$) への入射 γ 線のエネルギーと非検出効率の関係. threshold の値 黒:1MeV, 赤:2MeV, 青:3MeV, 黄:10MeV	41
5.4	CC05, CC06 の有無による $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドイベント数の変化	42
6.1	KOTO 実験におけるデータ収集システムの概要	45
6.2	FADC で取得される波形データの一例. 横軸:1sampleあたり 8ns, 縦軸: ADCcount	45
6.3	KOTO 実験で使用される色々な変数	46
6.4	CC05, CC06 におけるエネルギー較正の方法	47
6.5	ビームミュオンランで得られるエネルギー分布	48
6.6	(ビームミュオンランによる MIP 値) ÷ (宇宙線測定による MIP 値). 横軸は検出器のチャンネル ID	48
6.7	CC05, CC06 での時間較正に使用するシンチレータ間の時間差の求め方	49
6.8	各ビームミュオンランごとの CC05, CC06 の時間較正の補正值の安定性. 横軸が物理ランの ID, 縦軸が時間較正の補正值 [ns]. ch0 が補正值の基準であり, 青点線同士は 0.5ns 離れている.	50
7.1	MC によるカウントレート. 横軸:chID 縦軸:カウントレート [Hz].	52
7.2	データと MC の比較. 横軸:chID(0~53:CsI 結晶, 60~65:シンチレータ) 縦軸:カウントレート [kHz]. 黒がデータ, 赤が MC.	53

表 目 次

1.1	K_L の主な崩壊モード	11
5.1	CC05, CC06 のシミュレーションセットアップ	37
5.2	非検出効率関数の変更による signal box 内に残る $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラ ウンド数の変化	43
6.1	シンチレータ間の時間較正の補正值	49

第1章 序論

1.1 物理

1.1.1 CP 対称性の破れ

何らかの物理的な操作を行った際に対象の状態が変化しない場合, その操作に対して対称性が保存しているという. CP 変換は P 変換¹と C 変換² を同時に行う操作であり, CP 対称性の破れは粒子と反粒子に働く物理法則に違いがあることを意味する.

宇宙生成初期には粒子と反粒子が同数存在したと考えられているが, 現在の宇宙には反物質はほとんど存在せず物質が優勢である. このような宇宙が作られた要因の一つとして CP 対称性の破れが考えられている.

標準理論において, CP 対称性の破れは小林・益川理論による三世代間のクォークの混合によって説明される. 弱い力による相互作用の場合, クォークは混合のため質量の固有状態にはなっておらず, 以下のように表される.

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

この時の (d', s', b') と (d, s, b) の関係を行列によって表現したものが Cabbibo・小林・益川行列 (CKM 行列) である. [1]

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

CKM 行列は Wolfenstein のパラメータ λ, ρ, η を用いて式 (1.2) のように表され [2], CP 対称性の破れの大きさはこの行列の複素成分 η に比例している. しかし, K 中間子や B 中間子を用いて直接的・間接的に測定されている η の大きさだけでは先述の物質反物質の存在比を説明することが出来ない. そのため, 標準理論を超える新しい物理による CP 対称性の破れを探す必要がある.

¹パリティ変換—空間反転を行う変換. $A = (x, y, z) \rightarrow A' = (-x, -y, -z)$

²荷電共役変換—粒子・反粒子を入れ替える変換. $e^- \rightarrow e^+, \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$

1.1.2 中性 K 中間子

中性 K 中間子にはストレンジネス $S = +1$ をもつ K^0 と $S = -1$ をもつ \bar{K}^0 の 2 つが存在し,

$$|K^0\rangle \equiv CP|\bar{K}^0\rangle, |\bar{K}^0\rangle \equiv CP|K^0\rangle \quad (1.3)$$

のように定義できる. 弱い力によるクォークのフレーバー混合により, K^0 と \bar{K}^0 は CP 固有状態 K_1 と K_2 をつくる.

$$\begin{aligned} |K_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad (CP = +1) \\ |K_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad (CP = -1) \end{aligned} \quad (1.4)$$

実験的に K_1 と K_2 は異なった寿命を持つことが知られている. ($\tau_{K_1} \approx 0.9 \times 10^{-10}$ [sec], $\tau_{K_2} \approx 5.2 \times 10^{-8}$ [sec])

フィッチ・クローニンらが実験で発見したように [3], K 中間子の CP 対称性はわずかに破れている. そのため K_1 と K_2 は混合状態をとり, K_1 の成分が多く寿命の短い $K_{short}(K_S)$ と, K_2 の成分が多く寿命の長い $K_{long}(K_L)$ は, それぞれ式 (1.5) のように表される.

$$\begin{aligned} |K_S\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2(1+|\epsilon|^2)}}(|K_1\rangle + \epsilon|K_2\rangle) \\ |K_L\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2(1+|\epsilon|^2)}}(|K_2\rangle + \epsilon|K_1\rangle) \end{aligned} \quad (1.5)$$

ϵ は K_1 と K_2 の混合の割合である.

1.1.3 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊

直接的に CP の破れの大きさ η を知ることが出来る崩壊モードの 1 つに $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊がある.

標準理論における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のダイアグラムを図 1.1 に示す. s クォーク側の崩壊は t クォークの中間状態を経由するため, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊振幅 $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ は 2 つの結合定数 V_{td}, V_{ts} を含む.

K_L が K^0, \bar{K}^0 の混合状態であることを踏まえると,

$$\begin{aligned} A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) &= \frac{1}{\sqrt{2(1+|\epsilon|^2)}} \{ (1+\epsilon)A(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) - (1-\epsilon)A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \} \\ &\sim \frac{1}{\sqrt{2}} \{ A(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) - A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \} \quad (\because \epsilon \ll 1) \\ &\propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td} \\ &= 2 \times \text{Im}(V_{ts}^* V_{td}) \\ &\propto 2i\eta \end{aligned} \quad (1.6)$$

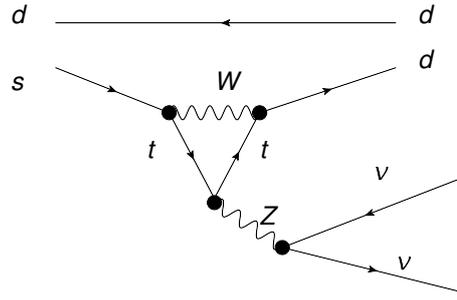


図 1.1: 標準理論における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊ダイヤグラム

のようになり, η に比例する. 崩壊分岐比 $Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ は崩壊振幅 $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ の 2 乗に比例するので,

$$Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2 \quad (1.7)$$

となる. したがって, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比を測定すれば CKM 行列の複素要素 η が求まる.

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は実験的にまだ見つかっておらず, 実験による分岐比の上限値は KEK E391a 実験の結果から, 6.7×10^{-8} (90% CL) となっている. 標準理論で予言されている $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比は $(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ [4] である. ハドロン相互作用の影響は, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ とアイソスピン対称性を持つ $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ の崩壊から見積もることができるため, 標準理論による理論値の不定性は 1 ~ 2% と小さい. $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊はループダイヤグラムを介して起こるため, 中間状態に未知の粒子からの寄与があった場合, それは分岐比の変化として観測される. そのため, 理論値と実験値の比較から標準理論の検証と新しい物理の探索を行うことが出来る.

1.2 KOTO 実験

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探索するために我々は KOTO 実験を行っている.

1.2.1 検出器と測定原理

KOTO 実験で使用する検出器の全体図を図 1.3 に示す. $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊において測定可能であるのは生成された π^0 がすぐに崩壊してできる 2 つの γ 線のみであり, 2 つのニュートリノは検出できない. そのため KOTO 実験では, 2 つの γ 線を CsI カロリメータで検出し, 検出領域の周囲を「粒子が来ていないことを保証するための検出器 (veto 検出器)」で覆うことにより, それ以外の粒子が存在しないことを示す.



図 1.2: J-PARC の俯瞰図. KOTO 実験は右下のハドロン実験施設にて行われている

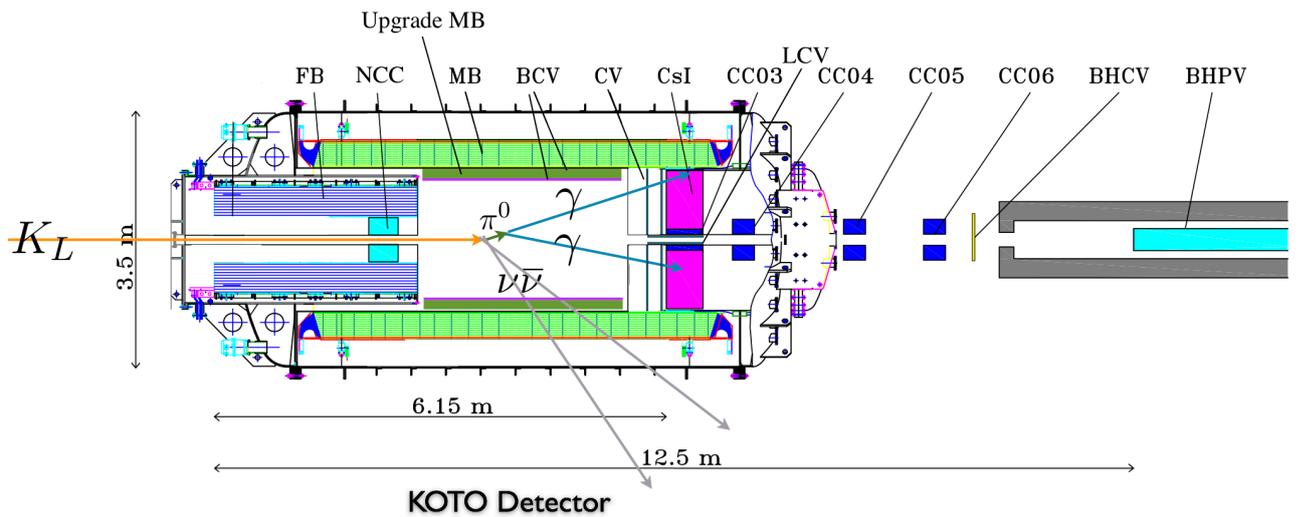


図 1.3: KOTO 実験検出器の全体図

イベントの再構成

まず, KOTO 実験におけるイベントの再構成について述べる. 2章で述べるように, CsI カロリメータは細分化されており, 2つの γ 線の入射位置とエネルギーが測定可能である. 2つの γ 線の不変質量が π^0 の質量 m_{π^0} であると仮定すると, 4元運動量の保存から式 (1.8) のような関係式が得られる.

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_{\pi^0}^2}{2E_1E_2} \quad (1.8)$$

ここで, E_1, E_2 は CsI カロリメータで測定された γ 線のエネルギー, θ は2つの γ 線がなす角度である. 式 (1.8) と2つの γ 線の入射位置に加え, π^0 がビーム軸上で崩壊したと仮定すると, K_L の崩壊点 Z_{vtx} が求まる. これにより, 2つの γ 線の CsI カロリメータへの入射方向が計算でき, 再構成された π^0 のビーム軸に対する横方向運動量 P_t が計算できる.

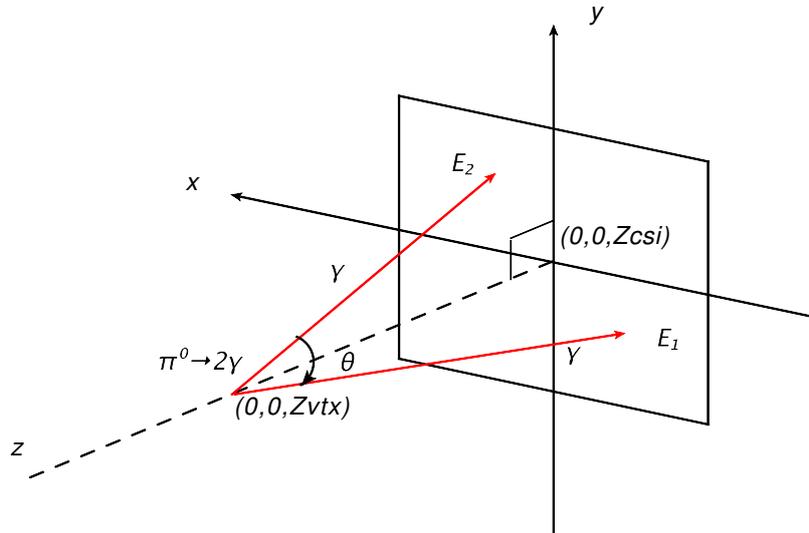


図 1.4: イベントの再構成

1.2.2 バックグラウンド事象

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊ではないイベントを検出器で正しく検出できない場合, それをシグナル事象と見誤ることがある. このような事象をバックグラウンド事象と呼び, 生成過程により大きく以下の2つに分けられる.

1. K_L が $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 以外の崩壊をした時にシグナルであると誤認して起こるもの

2. K_L ビームの周りに広がって分布している中性子 (ハロー中性子) が検出器やその周りの物質と反応して起こるもの

1 番の場合に関わってくる K_L の代表的な崩壊モードを表 1.1 に示す.[5]

表 1.1: K_L の主な崩壊モード

崩壊モード	崩壊分岐比	終状態
$K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e$	40.55 ± 0.12 [%]	荷電粒子有り
$K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$	27.04 ± 0.07 [%]	荷電粒子有り
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$	19.52 ± 0.12 [%]	中性粒子のみ
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	12.54 ± 0.05 [%]	荷電粒子有り
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$(1.966 \pm 0.010) \times 10^{-3}$	荷電粒子有り
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$(8.65 \pm 0.06) \times 10^{-4}$	中性粒子のみ
$K_L \rightarrow \gamma\gamma$	$(5.47 \pm 0.04) \times 10^{-4}$	中性粒子のみ
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$< 6.7 \times 10^{-8}$ (90% CL) [理論値] $(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-11}$	中性粒子のみ

シグナル事象は終状態に荷電粒子を含まない. そのため, 終状態に荷電粒子を含む崩壊モードは荷電粒子が来ていないことを保証することによって効率よく取り除くことが出来る.

終状態が中性粒子のみの場合, 問題となってくるのは $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ において生成される 4 つの γ 線のうち 2 つを取り逃し, シグナル事象と誤認する場合である. $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ においても同様に 6 つのうち 4 つを取り逃がせばシグナルと誤認するが, 終状態の粒子数が多いため, 分岐比は $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ よりも大きいバックグラウンドには残りにくい. $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ の場合, CsI に入った 2 つの γ 線から π^0 を再構成すると, 二体崩壊のため, π^0 の横方向運動量が 0 になる. 一方, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊はニュートリノ 2 つを含む三体崩壊のため, 再構成された π^0 は大きな横方向運動量をもつ. そのため, シグナル事象に対して再構成された π^0 が十分な横方向運動量を持つという条件を課すことにより $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ からのバックグラウンドを抑えることが出来る.

2 番のハロー中性子によるバックグラウンドを完全に取り除くことは難しい. そのため, ハロー中性子の少ないビームラインを作り, ハロー中性子とガンマ線の識別を行う検出器を設置した.

1.3 本研究の目的と概要

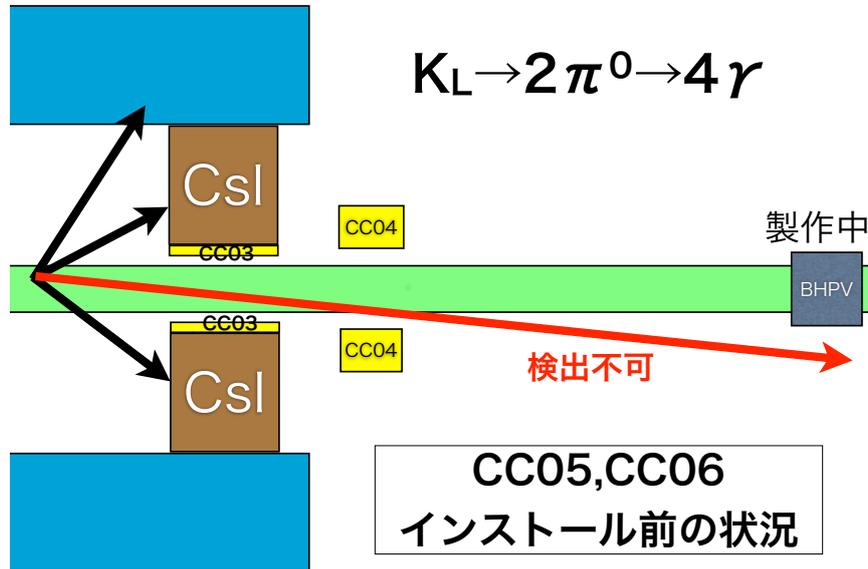


図 1.5: CC05, CC06 がインストールされる前の検出器の様子. BHPV も同時期に製作が行われていた.

CsI カロリメータの中央にはビームを通すための穴 (ビームホール) が空けられているため, そこを通り抜けた K_L の崩壊からの γ 線が下流へと逃げるができる. そのため, CsI カロリメータよりも下流側にもそのような γ 線を検出するための veto 検出器を設置する必要がある.

本研究が行われた時点での検出器の状況を図 1.5 に示す. Beam Hole Photon Veto 検出器 (BHPV) はビーム最下流部のビーム中に設置され, CsI カロリメータのビームホールをビーム軸に沿って抜けてきた γ 線の veto をする. ビーム中には K_L 以外にも多くの中性子や γ 線が含まれる. そのような粒子が BHPV に入射したときに, 2次粒子が入射方向の後方にも生成される現象, "back splash", を起こし, それらが CsI カロリメータに入射した場合, バックグラウンド源となる. そのため, BHPV は CsI カロリメータ近傍ではなく数 m 下流に設置され, CsI との間には鉄製のシールドが配置されている. しかしながら, BHPV はカウントレートが数 MHz となる高レートのビーム中に設置される検出器であるため, 検出効率が他の検出器に比べ, 低い. そのため, ビームホールを抜けビーム中に飛んだ γ 線は BHPV で検出し, ビームの外側に出たものは検出効率が高い別の検出器によって検出を行う. そのために開発された検出器が Collar Counter 04 (CC04) である.

CC04 は CsI 結晶と前面のプラスチックシンチレータによって構成される γ 線検出器である. 不感領域の少ない CsI 結晶を使用しており, 検出効率は BHPV に比べ, 高い. ビームホールの断面は 170 mm \times 170 mm である. CsI カロリメータなどの検出器は真空

容器の中に設置されているが、下流側に容器を閉じるための蓋が設置されている。真空容器の蓋に当たったハロー中性子が π^0 を生成し、それらが上流のCsIカロリメータに入射するようなイベントが存在するため、CC04はCsIカロリメータの後方の真空容器内に設置される。

しかし、図 1.5 に示すように、CC04, BHPV のいずれでもカバーされていない”すきま”の領域が存在する。そのような領域に出てしまう粒子は測定することが出来ないため、バックグラウンド源となる。

このようなイベントの低減を行うために、私は新たに γ 線 veto 検出器, Collar Counter 05(CC05), Collar Counter 06(CC06)を開発した。CC05, CC06 に求められるのは、以下の事柄である。

- CC04 と BHPV の間の “すきま” の部分をカバーする検出面積
- 高い検出効率
- ビーム中の粒子による back splash を起こさないような配置

これらの Collar 検出器への要請は 3 章において議論する。4 章では CC05, CC06 の実機製作, 5 章では Geant4 シミュレーションによる性能評価, 6 章では物理データ取得実験による性能評価, について述べる。

第2章 KOTO実験の検出器

この章では J-PARC ハドロン実験施設と KOTO 検出器について述べる.

2.1 J-PARC ハドロン実験施設について

2.1.1 KL ビームライン

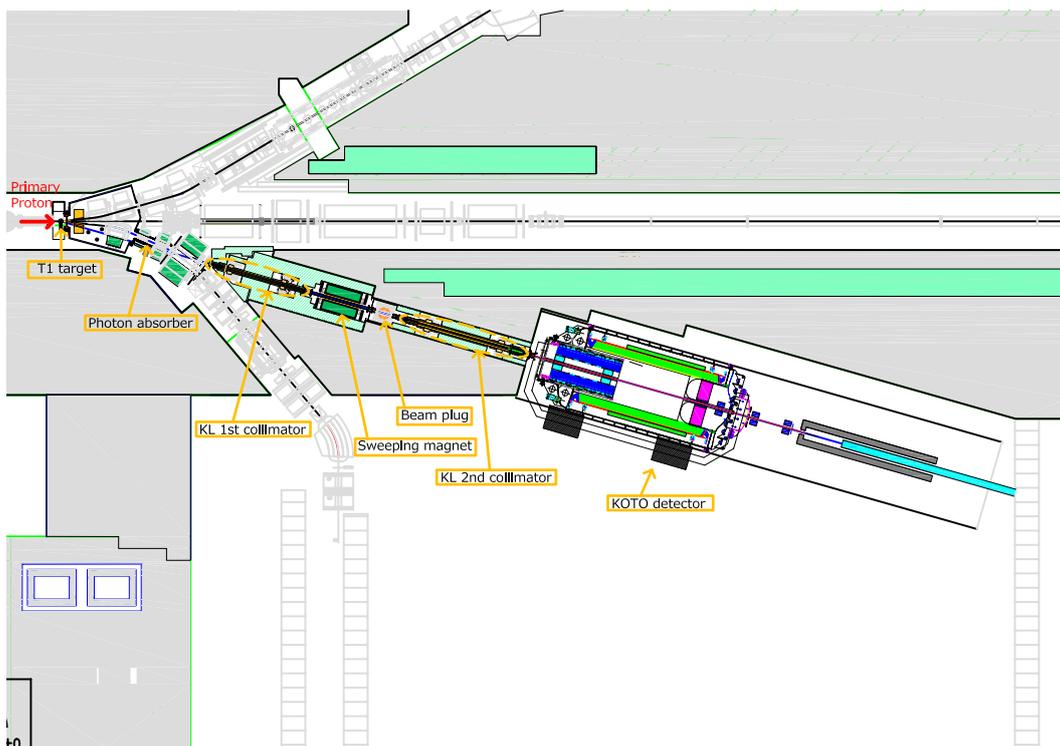


図 2.1: ハドロン実験施設 KL ビームラインの様子

KOTO 実験では J-PARC ハドロン実験施設の KL ビームラインを使用して実験を行っている. 図 2.1 に実験エリアとビームラインを示す. KOTO 実験における座標軸の定義は, ビーム軸上を x, y 原点, 全検出器の最上流端を z 原点として, ビーム軸方向に z が向く右手系である. メインリング加速器からの 30GeV の陽子をハドロンホールにある金

標的に衝突させ KL ビームを発生させている。発生した KL ビームはビーム軸から 16 度の方向に引き出され, 2つのコリメータによって形成されながらビーム取り出し口までくる。コリメータの様子を図 2.2 に示す。コリメータにおいて重要なのは, ビームサイズを十分絞ることが出来るかどうかである。ビームサイズが細いことによる利点は 2つある。1つはビーム軸上に π^0 を再構成する際に, 横方向運動量 p_t の不定性が小さくなることである。もう 1つは, ビームサイズが細くなればビームホールのサイズを小さくでき, ビーム軸に沿ってビームホールから出る粒子を減らすことが出来る点である。また, Sweeping magnet とよばれる電磁石によって電荷をもつ粒子を取り除き, 陽子と金標的の反応によって生じた粒子のうち中性の粒子のみを取り出すことが出来る。標的からビーム取り出し口まで約 20m あけることにより, K_S, η, Λ^0 のような短寿命の中性粒子は途中で崩壊するため, 残ってくるのは K_L , 中性子, γ 線である。このうち γ 線はコリメータの上流に設置された “ γ absorber” と呼ばれる鉛ブロックによって低減されている。

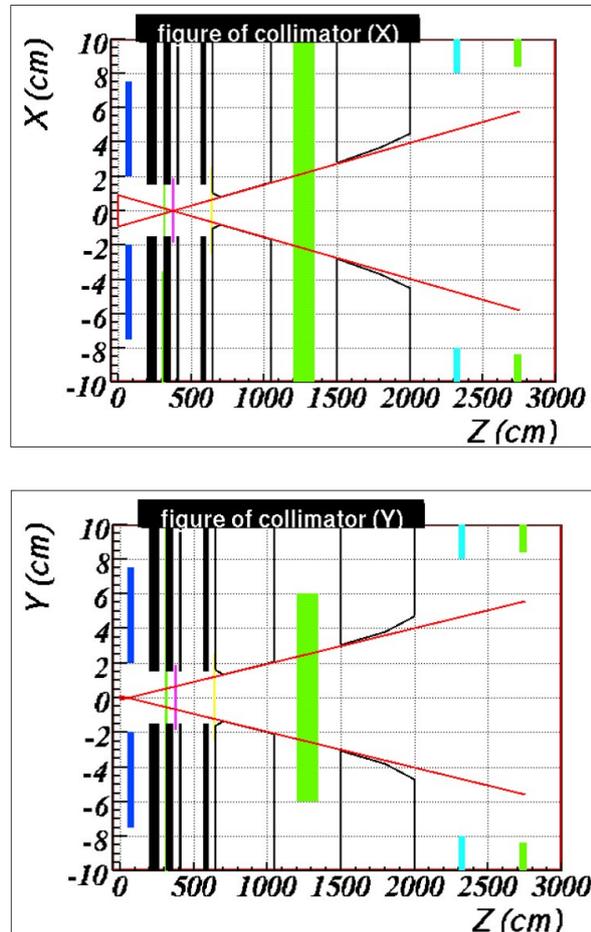


図 2.2: コリメータのデザイン

2.1.2 陽子ビーム

J-PARCの加速器は線形加速器(リニアック), 3GeVシンクロトロン(RCS), 50GeVシンクロトロン(メインリング)の3段で構成されている。これらの加速器によって30GeVに加速された陽子を2秒の間に“遅い取り出し”によって連続的に取り出し, 後述の金標的に衝突させ, KLビームとして取り出している。一度の連続的取り出しをスピルと呼ぶ。遅い取り出しでのビームパワーの上限値は290kWが予定されており, 2013年5月には24kWでの運転が行われた。

2.1.3 金標的

メインリングからの1次ビームはハドロンホールに設置されている金標的に照射される。標的は図2.3に示すように、ターゲットとなる金標的, 冷却用の配管, 温度モニター用の熱電対で構成されている。

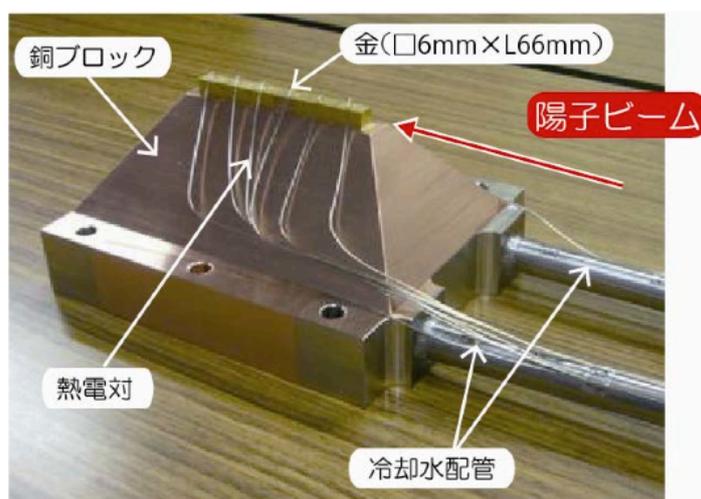


図 2.3: 金標的の構造

2.2 検出器

KOTO実験の検出器はCsIカロリメータと,veto検出器で構成されている。veto検出器は主に以下の4つに分類される。

- Barrel Veto 検出器 (FB, MB) … 崩壊領域を囲み, 余剰粒子からのガンマ線の検出を行う
- Charged Veto 検出器 (CV) … CsIカロリメータに入射する荷電粒子の検出を行う

- Collar 検出器 (CC03~CC06) … CsI カロリメータのビームを通すための穴 (ビームホール) からビーム下流へ出る粒子の検出を行う
- Beam Hole Veto 検出器 (BHPV, BHCV) … Collar 検出器のさらに下流のビーム軸上において粒子の検出を行う

各検出器について述べる前に, ここで, KOTO 実験における座標の定義を行う. z 軸を KL ビームの下流方向, y 軸を鉛直上向き, x 軸を右手系と定める. 座標の原点は標的から 21.507m 下流のビーム軸上である.

2.2.1 CsI カロリメータ

CsI カロリメータの役割は, π^0 から崩壊した γ 線のエネルギーを正確に測り, π^0 の再構成を行うことである. 図 2.4 にビームライン上流側から見た CsI カロリメータの概観を

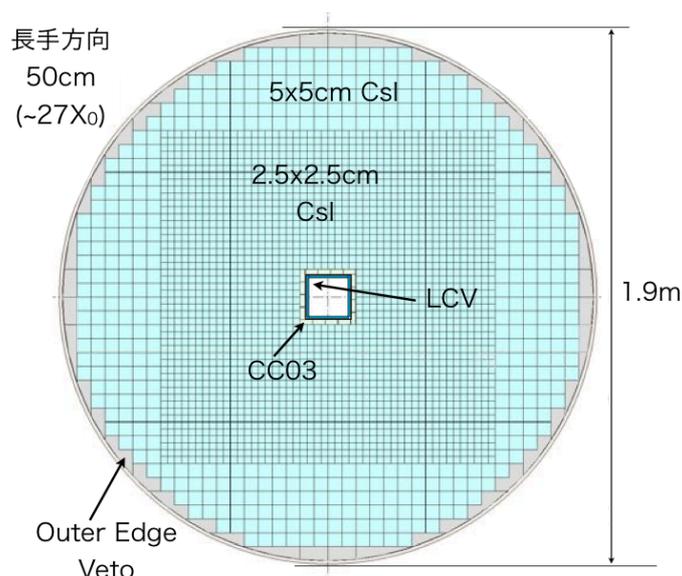


図 2.4: CsI カロリメータの図

示す. 結晶はタリウムなどが添加されていない純 CsI 結晶である. 内側に 2.5cm 角の結晶を 2240 個, 外側に 5.0cm 角の結晶を 476 個を使用している. ビーム軸方向の長さは 50cm あり, これは約 27 放射長 ($27X_0$) に相当する. 中央にはビームを通すために 200mm 四方の穴がビーム軸方向に奥まであけられている (ビームホール). その内側に CC03 が設置されているため, 実際のビームホールの大きさは 160mm 四方である.

粒子が入射すると CsI 結晶でシンチレーション光が発生する. シンチレーション光は結晶の下流端から透明なシリコン樹脂 (シリコンクッキー) による光学接続を通じて光電子増倍管 (PMT) に入り, 粒子が落としたエネルギーや時間の情報が電気信号として読み出される.

2.2.2 Barrel Veto 検出器

Front Barrel(FB) と Main Barrel(MB) はビーム軸を中心に円筒状に配置された γ 線 veto 検出器である。FB が崩壊領域上流, MB が中流をそれぞれ覆っている。鉛とシンチレータのサンプリング構造になっており, 波長変換ファイバーと PMT を使用して読み出しを行っている。MB 最内層は Barrel Charged Veto(BCV) と呼ばれる荷電粒子 veto 検出器となっている。

γ 線に対する不感率を抑えるため, 新たに MB の内側に Inner Barrel(IB) と呼ばれる新たな検出器が導入される予定である。IB は MB と同様, 鉛とシンチレータのサンプリング構造であり, KEK において製作が進められている。

2.2.3 Charged Veto 検出器

Chaged Veto(CV) は CsI カロリメータの少し上流に設置されている荷電粒子 veto 検出器である。厚さ 3mm のプラスチックシンチレータ 2 層で構成され, 波長変換ファイバーと Multi Pixel Photon Counter(MPPC) と呼ばれる半導体検出器を用いて読み出しを行っている。

2.2.4 Collar 検出器

Collar 検出器とは, ビーム軸周りに設置される γ 線 veto 検出器のことである。上流にある Neutron Collar Counter(NCC) ではガンマ線だけでなく, ハロー中性子の検出も行う。NCC の構造を図 2.5 に示す。

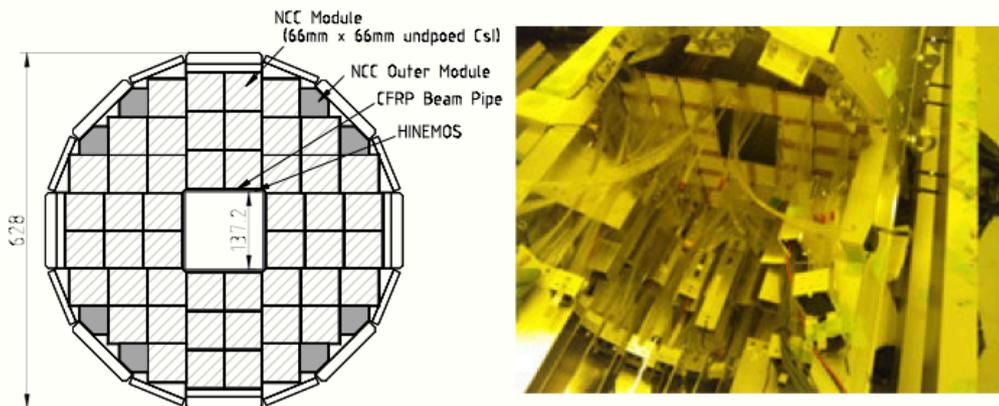


図 2.5: NCC 検出器の様子. 写真は上流から撮影されたもの

CsI 下流には複数の Collar 検出器が設置されている。Collar 検出器はいずれも CsI 結晶を用いて構成されている。CC03 の構造を図 2.6, CC04 の構造を図 2.7 に示す。CC03 は CsI カロリメータのビームホール内壁に設置されており, ビームホールの断面は 160

mm×160 mm である。ビーム軸方向の長さは CsI カロリメータと同じ 50cm であり、これは約 $27X_0$ に相当する。

CC04 は CsI カロリメータの下流に順に設置されている。CC04 は γ 線 veto 用に CsI 結晶 58 個を積み上げて構成されており、信号の読出しには PMT を使用している。前面には荷電粒子の veto 用にプラスチックシンチレータが設置されている。ビーム軸に対しての厚さは 21cm でこれは約 $11X_0$ に相当する。また、ビームホールの断面は 170 mm×170 mm である。

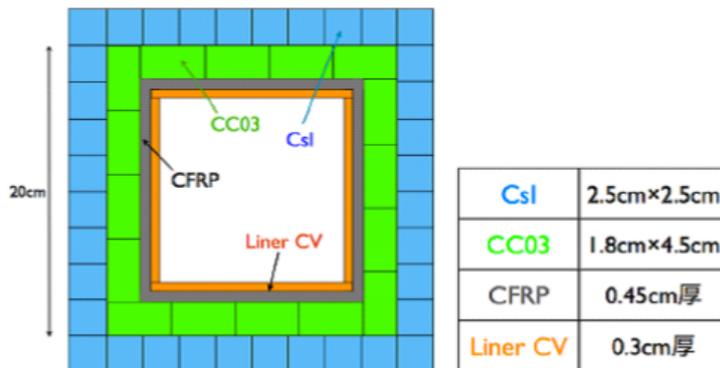


図 2.6: CsI カロリメータのビームホール周辺図. 図は上流側から見たもの

2.2.5 Beam Hole Veto 検出器

ビームホールを抜けてきたビーム軸周りの粒子を veto することも必要である。そのために Collar 検出器のさらに下流に設置されるのが Beam Hole Veto 検出器である。 γ 線を検出するための Beam Hole Photon Veto(BHPV) と荷電粒子を検出するための Beam Hole Charged Veto(BHCV) の 2 つが存在する。これらはいずれもビーム中に置かれるため、ビームに大量に含まれる中性子に対しては不感であり、かつ高レート環境下での安定した動作が要求される。

BHPV はエアロゲルと鉛で出来た Cerenkov 光検出器である。図 2.9 に示すように、入射した γ 線を鉛で e^+e^- 対に変換し、それらがエアロゲル中で発する Cerenkov 光を集め、PMT によって読み出しを行う。このような検出器が複数個ビーム軸方向に並べられる。エネルギーごとの非検出効率を図 2.8 に示す。

BHCV は CC06 の下流部に設置されるビーム軸周りの荷電粒子を veto する検出器で、厚さ 3mm のプラスチックシンチレータを使用している。

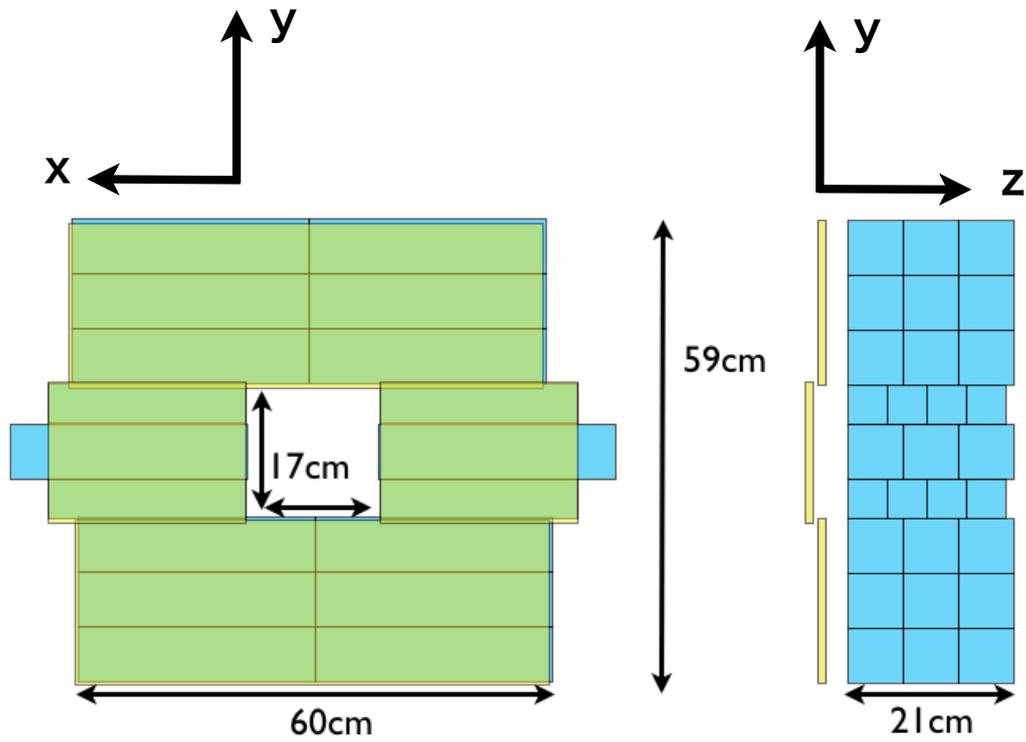


図 2.7: CC04 の構造

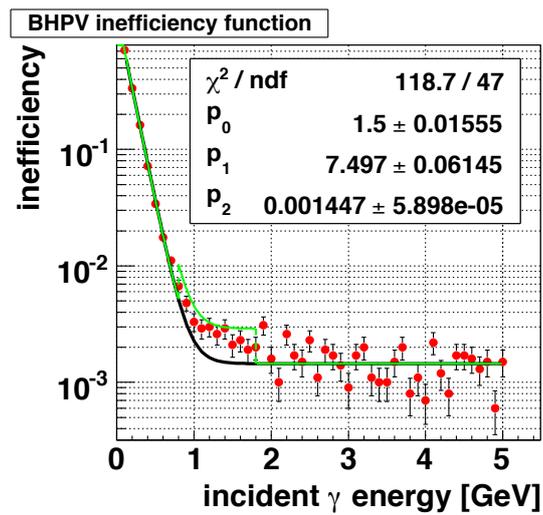


図 2.8: BHPV の入射 γ のエネルギーごとの非検出効率 (Inefficiency) のシミュレーションによる見積もり [6].

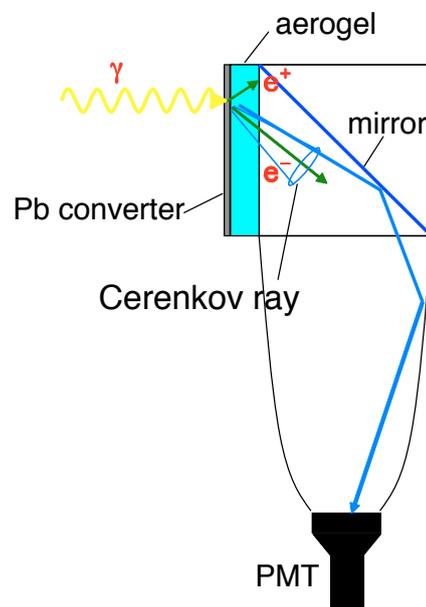


図 2.9: BHPV での γ 線検出原理

第3章 下流 Collar 検出器への要求

本章では下流 Collar 検出器に対する様々な要請について述べる。

3.1 対象となるバックグラウンド事象

下流 Collar 検出器のメインとなる veto 対象は $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ からの γ 線である。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊分岐比は 8.65×10^{-4} であり、メインモード ($K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e$ や $K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$ など) に比べると小さい。しかし、KOTO 実験のシグナル事象である $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の予想される崩壊分岐比 2.4×10^{-11} に比べると8桁も大きく、崩壊の終状態もシグナル事象の他に γ 線が2つであるため、バックグラウンド事象として残りやすい。したがって、Collar 検出器には γ 線に対する veto 性能が要求される。

$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊は終状態が 2γ と荷電パイオン2つであるため、問題となる。こちらは γ 線2本が CsI カロリメータに入り、veto 検出器で荷電パイオン2つを検出できなかった場合にバックグラウンド事象となる。そのため、Collar 検出器には荷電粒子についての veto 性能も要求される。

検出器を反応せず突き抜ける事象 (パンチスルー)

検出器に入射した粒子はその全てが検出器と反応し、測定されるわけではない。入射粒子が検出器と相互作用を起こさずに通り抜ける現象をパンチスルーと呼ぶ。例えば、図 3.1 に示すように CC04 に入射した γ 線がパンチスルーを起こし CC05 で検出される場合もある。

入射粒子が検出器を通過する距離を x 、電子の平均自由行程を λ とすると、入射電子がパンチスルーを起こす確率は、

$$P(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (3.1)$$

となる。検出器の放射長を X_0 とすると、入射粒子が γ 線の場合、我々が測定するエネルギー領域では $\lambda \approx \frac{9}{7} X_0$ の関係をもつ。したがって、式 (3.1) は

$$P(x) = e^{-\frac{7}{9} \frac{x}{X_0}} \quad (3.2)$$

と書ける。

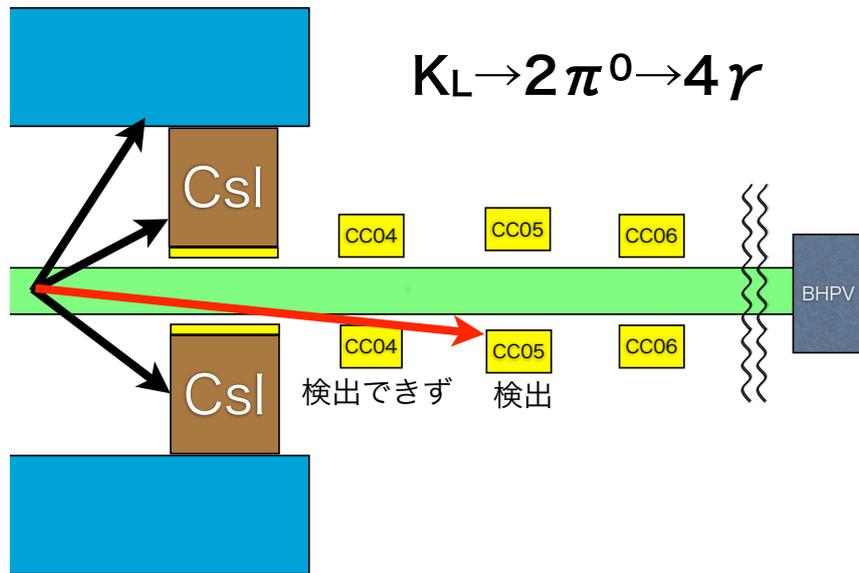


図 3.1: パンチスルーの様子. CC04 をかすめたガンマ線がパンチスルーを起こしている.

3.2 Collar 検出器に対する要求

本研究が行われる段階で Collar 検出器のうち CC03 と CC04 はすでに実装済みであった. そのため, 本研究は,

- CC03, CC04 については実装された状況のまま固定して考える
- 製作が進められていた BHPV については検出面積の内側に入ったものは 100% 測定される

という前提のもと行った.

Collar 検出器に対する要求には以下の様なものがある.

- ビームホールの大きさ
- 検出面積の大きさ
- ビーム軸に対する厚さ

それぞれについて, 詳しく述べる

3.2.1 CC05, CC06 のビームホール

真空容器の下流側には図 3.2 に示すようにビームパイプが存在している. CC05, CC06 の 2 台をインストールするためには, 空いている空間上の制限から CC05 はビームパイプが存在する場所に設置しなければならない.

そのため, CC05 のビームホールの大きさ R_{05} はビームパイプの大きさによる制限から最小で 210 mm となる.

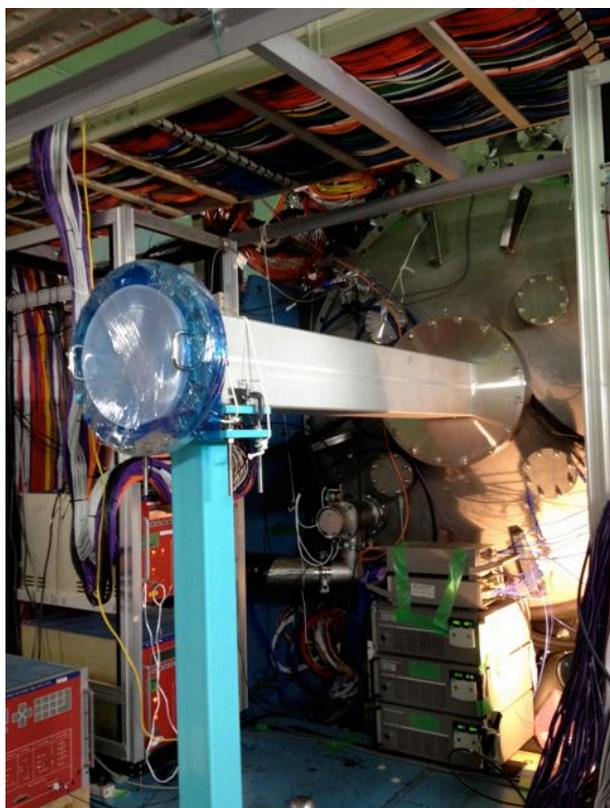


図 3.2: ビームパイプ周りの状況. 写真は下流側から撮影

図 3.3 に CsI カロリメータとカロリメータ下流にインストールされている検出器の位置関係を示す. CC06 は当初の構想ではビームパイプの最下流部に設置される予定であった. しかし, ビームパイプによる制限の元では, 崩壊領域から CC06 ビームホールへ伸ばした直線が BHPV までをカバーすることが出来ない. このため, CC06 はビームパイプの下流端より下流に設置することとし, ビームホールの大きさの制約を回避した. したがって CC06 のビームホールの大きさ R_{06} は,

- K_L ビームに当たることなく, 加速器が 290kW で稼働している時の CC06 のカウントレートが 1MHz 以下である
- 崩壊領域から CC06 のビームホールを見た場合, そこから見える領域が BHPV によってカバーされている

の 2 点から決定される.

R_{06} を決定するために, CC06 が置かれる予定の位置でのビームの形をシミュレーション (Geant4) を用いて見積もった. その結果を図 3.4, 図 3.5 に示す. 我々が使用している KL ビームの形は完全な矩形状ではなく, なだらかな肩を持つような構造になっている.

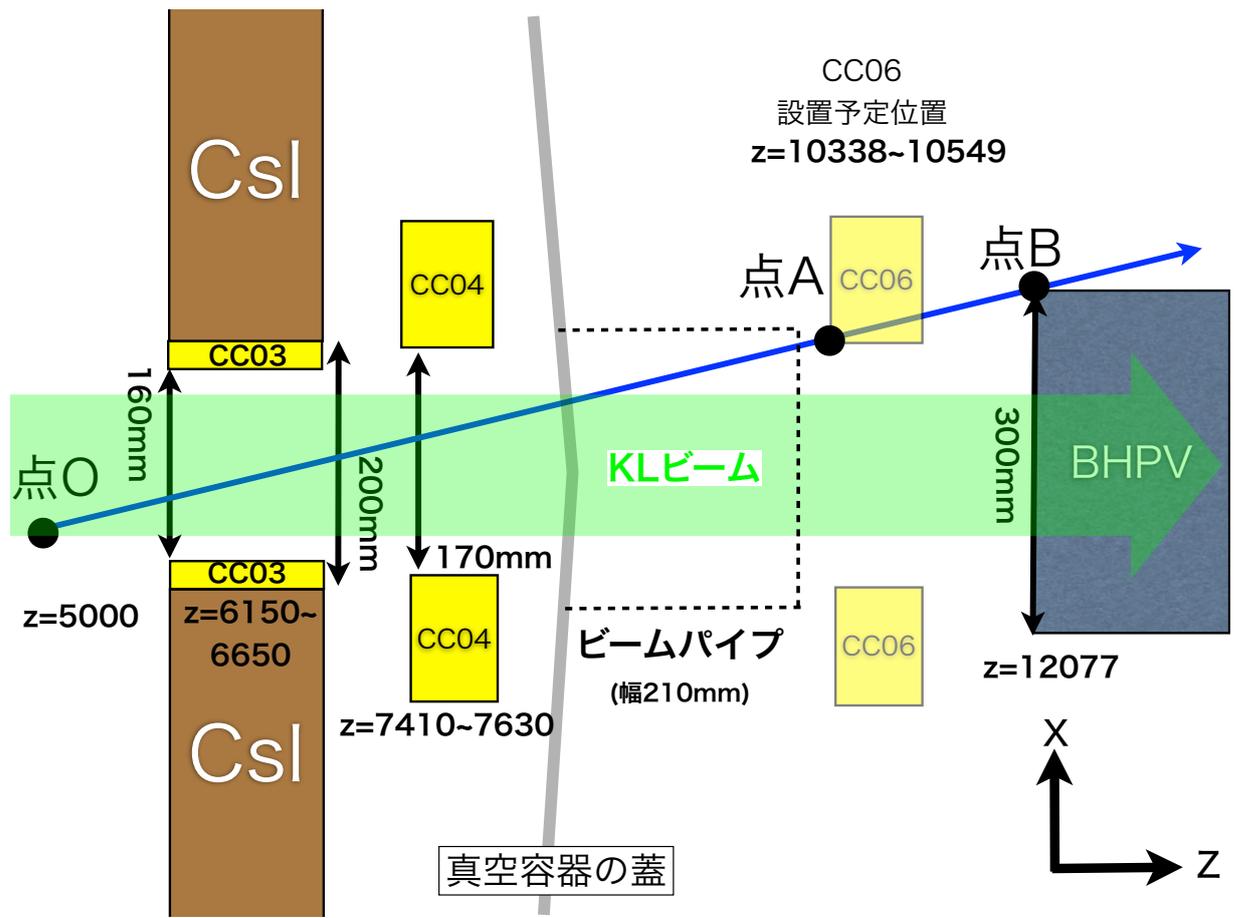


図 3.3: CsI, CC04, BHPV の真上から見た位置関係

x 方向, y 方向のいずれについても, $\pm 100\text{mm}$ を超えると一定の低レートであり, $\pm 80\text{mm}$ より内側では低レートの部分の 100 倍以上の高レート状態となる. すでにインストールされているビームホール径 170mm の CC04 のビーム取得実験のカウントレートも考慮し, R_{06} は最小で 180 mm と決定した.

KOTO 実験では FB 上流端からのビーム軸方向の距離を $z[\text{mm}]$ で表す. 物理データの解析に用いられるイベントは, K_L の崩壊点が $z=2500\sim 5000$ の“崩壊領域”内のものが使用されるため, その領域からの γ 線の veto について考える. 図 3.3 の様に, 点 O, A, B を通る直線を考える. ここで, 議論する検出器のビームホール, BHPV の前面は全て正方形であり, ビームの形状も x 方向, y 方向で大きな違いはないため, x 方向に射影したものを考える. ビームの中心を $x=0$ とすると, BHPV の x 方向の大きさは $\pm 150\text{mm}$, ビームの高レート部分の x 方向の広がりは $\pm 60\text{ mm}$ となる. このときの点 A での x 座標が, R_{06} の最大値の半分となる. 実際に x 座標を求めると,

$$x = \frac{(\text{BHPV の幅}) + (\text{ビームの広がり})}{(\text{BHPV の } z \text{ 位置}) - 5000} \times ((\text{CC06 の } z \text{ 位置}) - 5000) - (\text{ビームの広がり})$$

$$\rightarrow x = 98.40 [\text{mm}]$$

となる. したがって, R_{06} は 196.8 mm 以下である必要がある.

以上のことから CC05, CC06 のビームホールは,

- $R_{05} \geq 210\text{ mm} \rightarrow R_{05} = 210\text{ mm}$
- $R_{06} \geq 180\text{ mm} , R_{06} \leq 196.8\text{ mm} \rightarrow R_{06} = 180\text{ mm}$

と決定した.

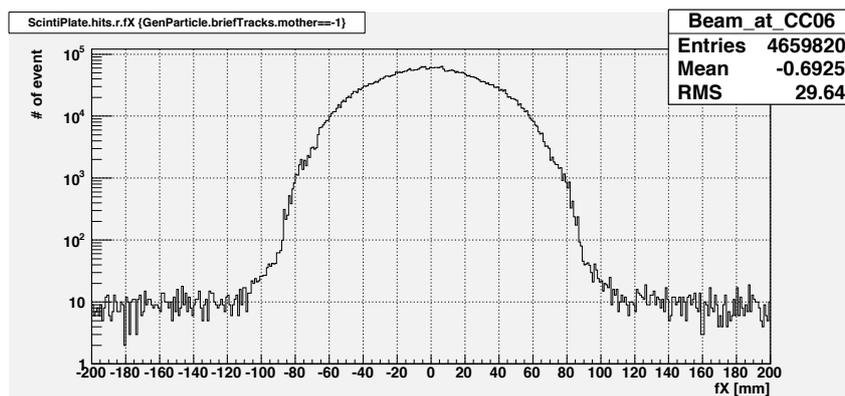


図 3.4: CC06 設置位置における K_L ビームの形 (x 方向)

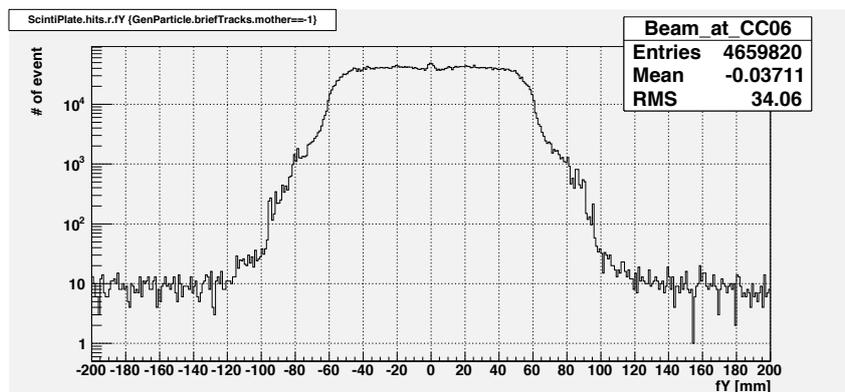


図 3.5: CC06 設置位置における K_L ビームの形 (y 方向)

3.2.2 CC05, CC06 の検出面積

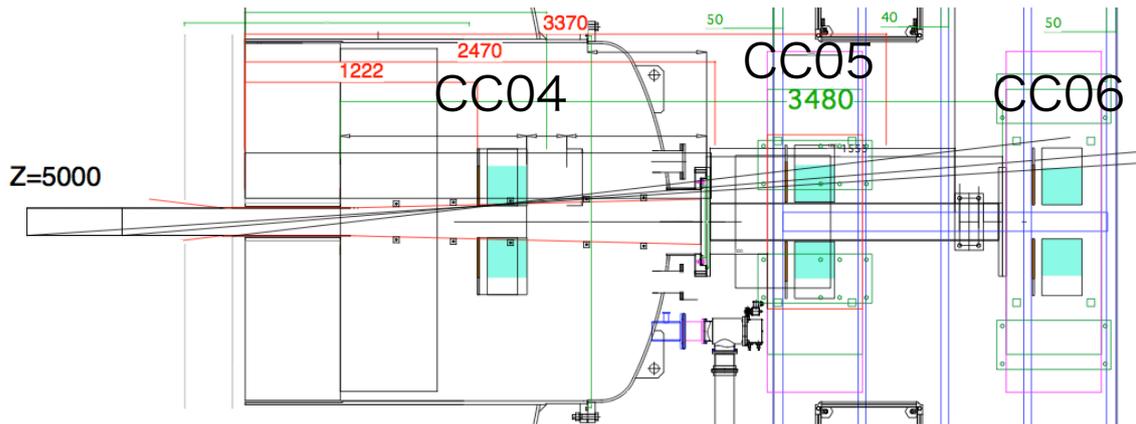


図 3.6: CC04, CC05, CC06 の位置関係

図 3.6 に CC04, CC05, CC06 の位置関係を示す。必要な検出面積を見積もるために図面を書き、CC05, CC06 の位置には CC04 と同じ大きさの箱をおいた。z=5000 の位置から CC04 のビームホール上流の角を通り、パンチスルーにより突き抜けていくような線を引くと、CC05 の位置では箱を上流下流共に貫通する。したがって、CC05 の検出面積は CC04 と同程度あればよい。同じ線が CC06 の位置でも箱の上流下流を貫通している。したがって、CC06 の検出面積は CC04 と同程度あればよい。CC06 の検出面積には CC05 のパンチスルーを考慮する必要があるが、CC06 が CC04 と同程度の検出面積を持つ場合、明らかにカバーされる。

以上のことから、CC05, CC06 の検出面積を CC04 と同程度にすることに決定した。

3.2.3 CC05, CC06 のビーム軸に対する厚さ

CC05, CC06 のビーム軸に対する厚さは、以下のことを考慮し、21cm(約 $11X_0$) と決定された。

- パンチスルーを起こすようなイベントを 10^{-4} 程度に抑えるために必要な CsI の放射長は約 $11.8X_0$ である
- 用意する CsI 結晶, PMT などの物質的, 時間的な制限から CC05, CC06 のチャンネル数は 60 個程度までである
- CC04 実機でのビームデータを用いた veto 性能 [7] から, ビーム軸に対し約 $11X_0$ 分の厚さの CsI 結晶を使用すれば十分な veto 性能が得られる

第4章 CC05, CC06の製作

本章では CC05, CC06 の製作に使用した CsI 結晶やプラスチックシンチレータ、光電子増倍管 (PMT) の性能等について述べる。

4.1 構成

CC05, CC06 は γ 線を検出する必要があるため、放射長が短い CsI 結晶を使用する。3 章での議論をふまえ、 γ 線を効率よく測定するために、CsI 結晶を図 4.1, 図 4.2 のように積み上げた。

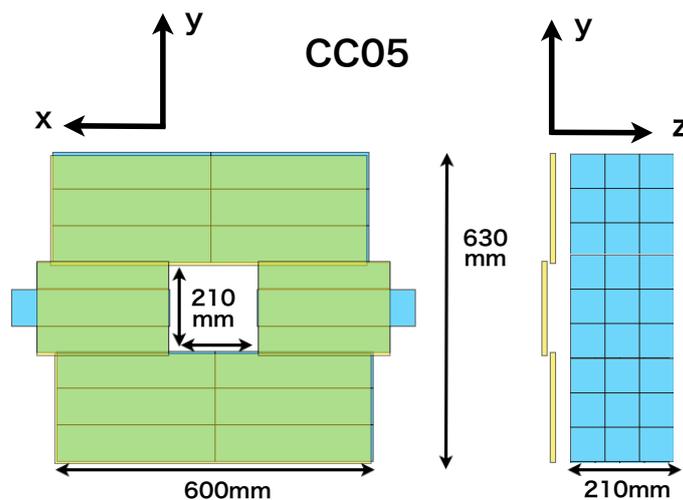


図 4.1: CC05 の全体図

CsI 結晶部分は、 $70 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3$ の 7cm 角の CsI 結晶を 54 個を使用し、9 段 3 層に積んで構成されている。全体での大きさは $600 \times 630 \times 210 \text{ mm}^3$ であり、中央部にはビームを通すために断面積 $210 \times 210 \text{ mm}^2$ のビームホールが空いている。CsI 結晶の表面には反射材としてアルミナイズドマイラーとテフロンが巻かれている (厚さ $50 \sim 100 \mu\text{m}$)。

CC06 でも同様に 7cm 角の結晶を使用するが、ビームホールの大きさの調整のため、12 本は $70 \times 55 \times 300 \text{ mm}^3$ の大きさに加工した結晶を使用した。CC06 では、結晶部の大きさは $600 \times 600 \times 210 \text{ mm}^3$ でありビームホールの断面積は $180 \times 180 \text{ mm}^2$ である。

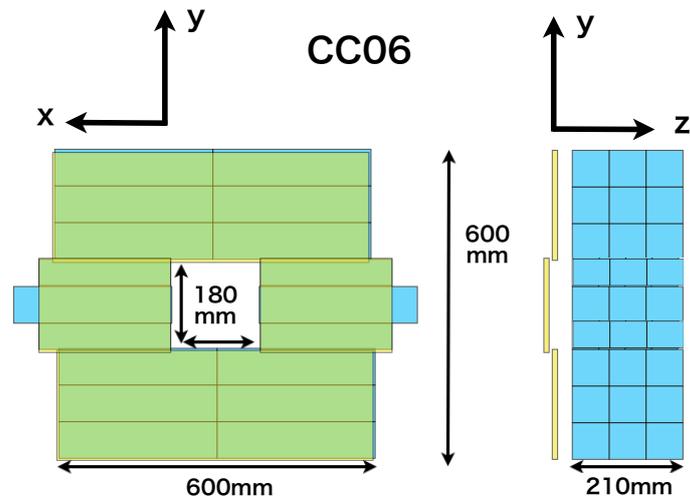


図 4.2: CC06 の全体図

CC05, CC06 いずれの前面にも荷電粒子検出器として厚さ 5mm のプラスチックシンチレータが設置されている。上段部、下段部のシンチレータは両読み、中段部は片読みである。

CsI 結晶、シンチレータともに透明なシリコン樹脂を使用して光学接続を行い、光電子増倍管 (PMT) で信号読出しを行っている。PMT は浜松ホトニクス製の R4275-2 を使用した。

荷電粒子測定用シンチレータ

荷電粒子測定用のプラスチックシンチレータには ELJEN Technology 社の EJ-200 を使用した。CC04 での研究から、Collar 検出器での使用に対し、十分な性能を持っていることがわかっている [7]。シンチレータは CC05, CC06 共に大小 2 枚ずつ使用し、大きさは大小それぞれ、 $600 \times 210 \times 10 \text{ mm}^3$ と $250 \times 230 \times 10 \text{ mm}^3$ である。

シンチレータと PMT の間は CC04 と同じ型のアクリル製のライトガイドを使用した。こちらも CC04 での研究から、Collar 検出器での使用に対して、十分な性能を持っていることがわかっている [7]。

結晶の光量

CC05, CC06 に使用した CsI 結晶は CC04 に使用した結晶と同じく KEK E391a という別の実験の電磁カロリメータに使用されていたものである。CC04 における結晶光量の測定の結果から [7], それらの結晶は最小で 22 [photoelectron/MeV], 最大で 41 [photoelectron/MeV], 平均的に 30 [photoelectron/MeV] の光量を持っている。CC05, CC06 が見るべき数 MeV 以上の γ 線では 100 photoelectron を超えるため、光統計によ

る光量のばらつきは小さい。平均よりも低めの光量を持つ結晶1つをリファレンスとして使用し、CC05, CC06用の結晶の相対的な光量の測定を行った。光量の測定は1つの決まったPMTをそれぞれの結晶につなぎ変え、宇宙線中のミュオンによるMIPのエネルギーを基準にして行った。その一例が図4.3である。測定した結晶の中からリファレンスを超える相対的な結晶光量が高いものを選び出し、CC05, CC06の製作に使用した。

使用するPMTの選定も宇宙線測定によって行った。1つの決まった結晶にそれぞれのPMTを接続し、相対的なPMTのゲインを求めた。

実際に使用する結晶とPMTは、(相対的な結晶光量) \times (相対的なPMTゲイン)が同程度になるように組み合わせを決めた。

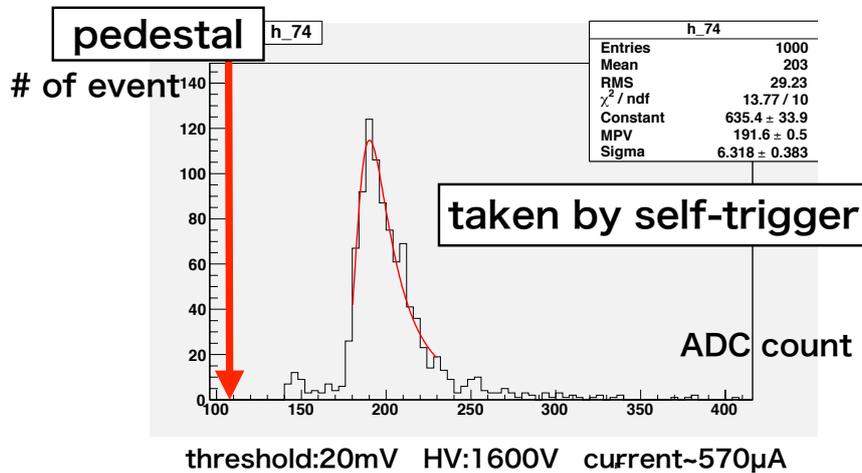


図 4.3: 宇宙線測定の実データ

4.2 CC05,CC06の結晶間のすきま

CC05, CC06は結晶を積み上げて構成されるため、以下の様な様々なすきまが存在する。

1. 結晶を積み上げた時に出来る、結晶自体の歪みによる層ごとのすきま (y方向, z方向)
2. 結晶を積み上げた時に出来る結晶先端どうしのすきま (x方向)
3. 結晶のPMT接続側から10cmの部分のすきま

それぞれについて以下で述べる.

結晶を積み上げた時に出来る y 方向, z 方向のすきまは, 結晶1つの平均的な大きさ l_{avr} を測定し, 9段積み上げた時の高さ L との差から, 結晶間にできる結晶の歪みによるすきまの大きさの平均値 l_{gap} を求めた.

$$L = 9 \times l_{avr} + 8 \times l_{gap}$$

より, l_{gap} は 0.29 mm であることがわかった.

x 方向のすきまは, y, z 方向に比べてかなり大きい. その理由は, 結晶の先端に結晶の形状を保つために厚さ 1mm のアクリル板が取り付けられており, 2つの結晶が向かい合わせに配置されているからである. ここに入射した粒子は測定されないため, すきまとして扱う. このすきまの大きさの平均値は 2.2 mm である. このすきまに対する対処として, z 方向に3層並べる際に, 2層目を x 方向に 20mm, 3層目を x 方向に -20mm ずらして配置した. これにより, CC05, CC06 が対象とするビーム軸に平行に近い角度で入射してくる粒子が, このすきまを複数層で通ることを防ぐことが出来る.

使用している CsI 結晶の PMT 接続側 10cm の部分の各面が, 1.5 mm ずつ掘り下げられて幅が 3mm 狭まっているため, そのまま積み上げてしまうと各層の PMT 側に 10cm×3mm のすきまが出来てしまう. そのため, 厚さ 1.0mm の鉄製のパーマロイをその部分に取り付け, すきまを低減した. 入射粒子がパーマロイで反応し, シャワーを起こせば, シャワーの一部を CsI 結晶で測定できる場合があるため, パーマロイには物質量があり加工しやすい鉄を採用した.

これまでの議論を考慮すると, CC05 の構造は図 4.4 のようになる. CC06 の構造もビームホール径が異なる以外は同様の構造である.

4.3 CC05, CC06 の設置

CC06 の実機製作は 2013 年の 2 月に行い, 3 月のビームデータ取得実験前に, 設置した. CC05 の実機製作は 2013 年 4 月に行い, 5 月のビームデータ取得実験前に設置した. その様子を図 4.5, 図 4.6 に示す. CsI 結晶は潮解性をもつため CC05, CC06 を低湿度状態に保つ必要がある. そのために, CC05, CC06 の周りを厚さ 1 mm のアルミ板とブラックシートで覆い, その中に乾燥空気を送り込んでいる. また, CsI 結晶の温度による出力変化をモニタリングするために, 熱電対を数個の結晶, PMT に取り付けた.

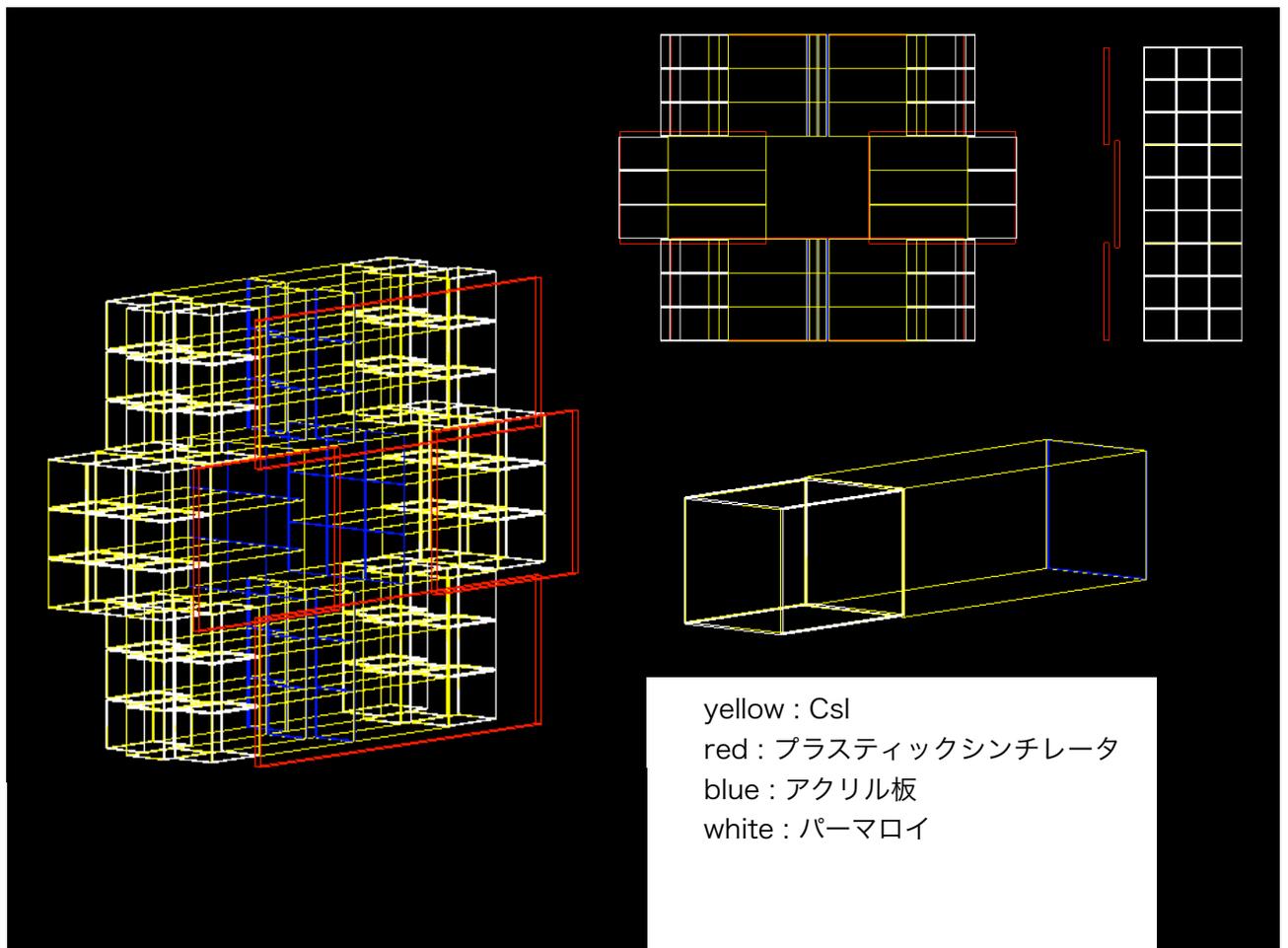


図 4.4: CC05 の構造

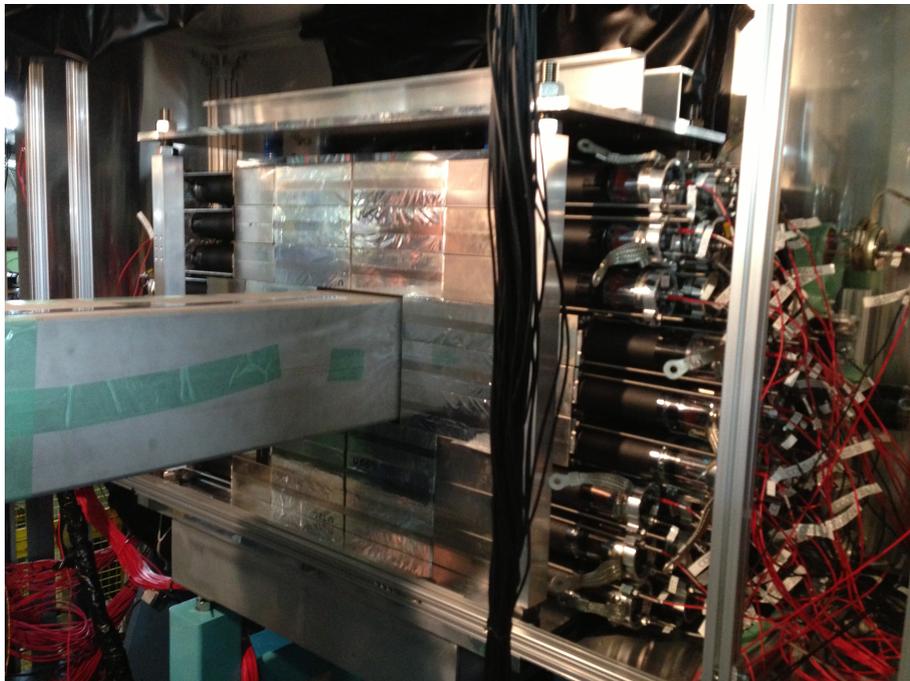


図 4.5: CC05 の製作風景



図 4.6: CC06 の製作風景

第5章 シミュレーションによる性能評価

この章では Geant4 によるシミュレーションを行い, 以下のことを調べた.

- $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ の崩壊からの γ 線についての Collar 検出器 (CC03~CC06) の放射長の和
- 各エネルギーに対する CsI 結晶の非検出効率
- Collar 検出器の非検出効率関数の変更による $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ 起源のバックグラウンド数の変化

行ったシミュレーションには, fast simulation と full simulation の2つのモードがある. fast simulation は検出器に入射した粒子を検出器の表面で止めて, それ以上の反応をさせないモードであり, full simulation は検出器に入った後もハドロン, 電磁シャワーの計算を行うモードである.

5.1 シミュレーションのセットアップ

今までの議論を満たすよう, 図 5.1, 表 5.1 のセットアップの検出器を置き, Geant4 を用いてモンテカルロシミュレーションを行った.

表 5.1: CC05, CC06 のシミュレーションセットアップ

	CC05	CC06
CsI 結晶数	54	54
結晶の大きさ	$70 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3$	$70 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3, 70 \times 55 \times 300 \text{ mm}^3$
ビームホールの断面積 [mm^2]	210×210	180×180
z 位置	ビームパイプ上流 $z=8792 \sim 9004$	ビームパイプ下流端の下流 $z=10388 \sim 10549$
プラスチックシンチレータ	4 枚	4 枚

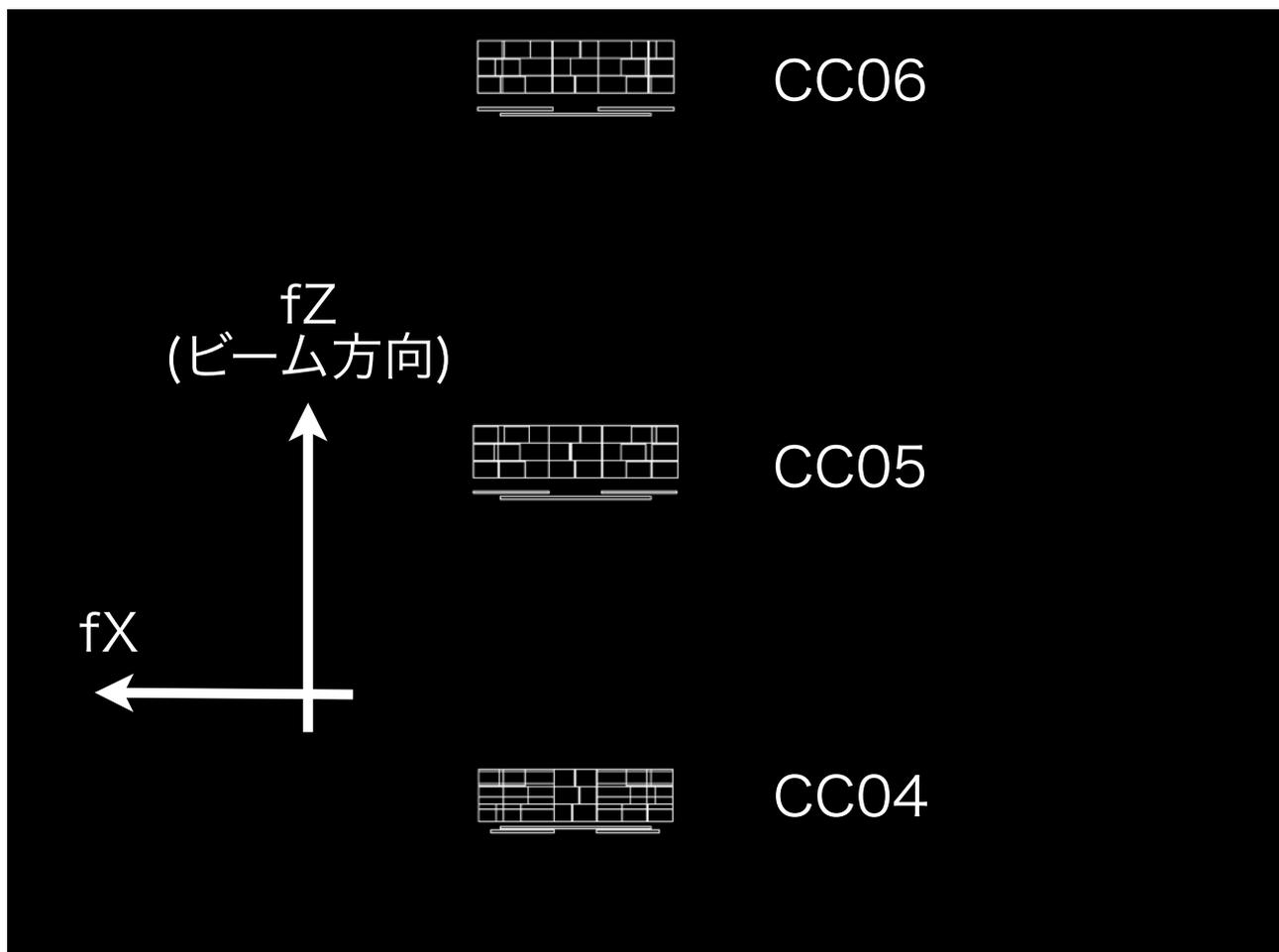


図 5.1: 真上から見たシミュレーションセットアップ

5.2 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ の崩壊からの γ 線についての Collar 検出器の放射長の和

今回のセットアップでの Collar 検出器の放射長を見積もるため、以下の様な方法を用いた。

1. $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ を 10^8 イベント発生させ、fast simulation を行う
2. π^0 の崩壊から出来た γ 線を検出器の表面で止め、崩壊点や運動量などの情報を保存する
3. CC03, CC04, CC05, CC06 の表面で止まった粒子の保存された情報を初期値として full simulation を行う。その際に粒子の ID を γ から geantino に変更する。geantino とは Geant4 シミュレーション上に存在する仮想粒子であり、質量 0 で物質と一切の相互作用をしないといった性質を持つ
4. geantino が通過した距離が放射長として記録されるため、CC03~CC06+CsI での放射長の合計を求める。その際に検出器に入射した γ 線が崩壊領域から来ていて、かつ CsI カロリメータに 2 つ以上の γ 線が入射しているという cut をかけた

その結果が図 5.2 である。放射長が最小となるのは CC05 に当たり $8X_0$ 分通過する場合であり、これは 3 層ある結晶に対して 1 層の隙間を抜け残り 2 層を貫通している場合である。そのようなすきまを抜けたイベントを除外すると、少なくとも $11X_0$ 分通過することがわかる。このことから CsI 結晶 $11X_0$ 分に対する非検出効率を求めれば、Collar 検出器の非検出効率はそれ以上が保証される。

5.3 各エネルギーに対する CsI 結晶の非検出効率

先行してインストールされた CC04 のシミュレーションでは、「鉛シンチである MB の非検出効率よりも CsI で構成される CC04 の非検出効率の方が低いはずである」という仮定のもと、非検出効率の関数を MB のものを代用して行っていた。本研究ではより現実に即した関数を求めるため、以下のことを行った。

1. 断面積 $1m^2$ 、厚さ $11X_0$ の CsI 結晶を置き、ある決まったエネルギー (3, 5, 10, 50, 100, 300, 500MeV) の γ 線を正面から 10 万イベント入射させ、full simulation を行う
2. 閾値を 1, 2, 3, 10MeV と変化させ、閾値を超えなかったイベント数を記録し、その割合を求める

その結果を図 5.3 に示す。CC04 での研究による設定値 threshold 10MeV では数 10MeV の低エネルギー領域の veto を十分に行うことが出来ない。したがって、Collar 検出器の threshold を 3MeV まで引き下げる。

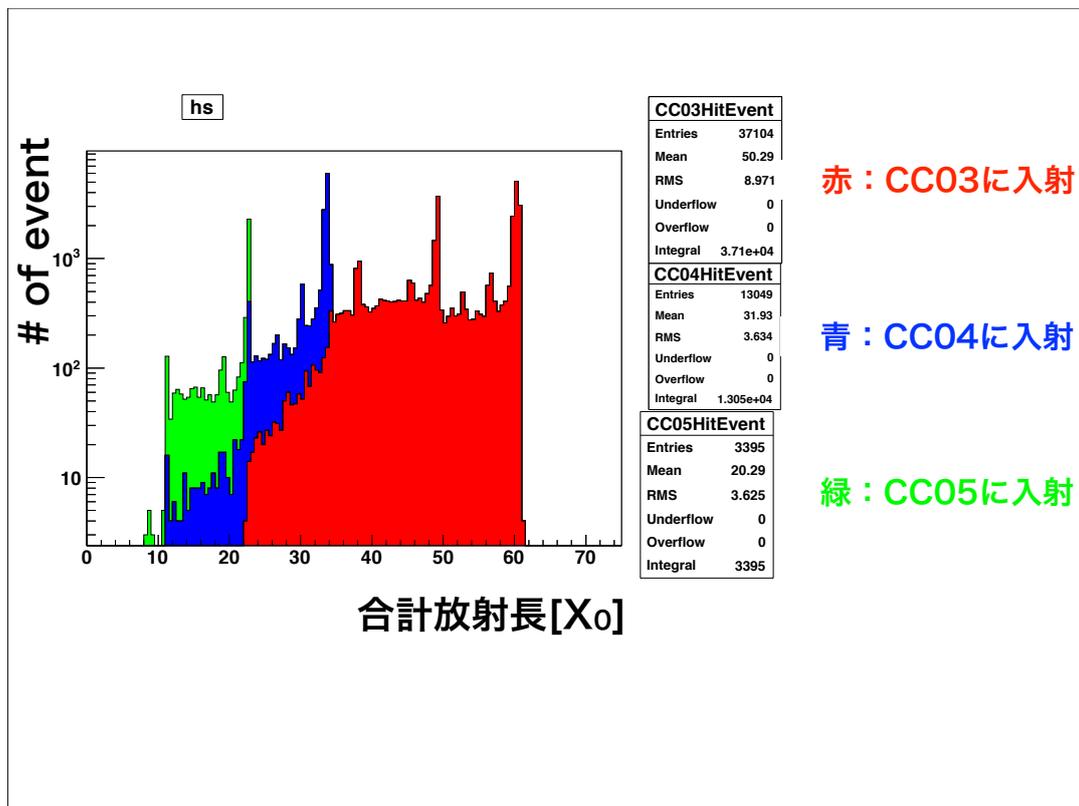


図 5.2: CC03, CC04, CC05 にヒットしたイベントの CC03,CC04,CC05,CC06,CsI での合計放射長

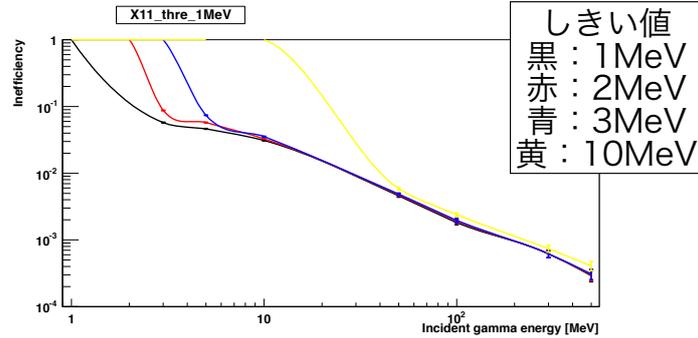


図 5.3: シミュレーションで求めた CsI 結晶 (厚さ $11X_0$) への入射 γ 線のエネルギーと非検出効率の関係. threshold の値 黒:1MeV, 赤:2MeV, 青:3MeV, 黄:10MeV

5.4 CC05, CC06 の有無による $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ 起源のバックグラウンド数の変化

バックグラウンドとして残る $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ イベント数の CC05, CC06 の有無による変化を調べた. 図 5.4 に残ってくるイベントの再構成された横方向運動量と z 位置を示す.

signal box 内に残ったイベント数を N , シミュレーションで使った K_L の数を $\#KL$, 3 年間で行われる物理ランの日数が 365 日, ビームの強度が 100kW, ビームの周期が 3.3 秒間あたり 1spill とすると, 3 年間の物理ランにおいて予想される $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド数 $\#BG_{2\pi^0}$ は,

$$\#BG_{2\pi^0} = N \times \frac{KL/spill}{\#KL} \times (3600 \times 24 \times 365) \times Br(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)/3.3$$

となる. その結果を表 5.2 に示す.

同様の条件下での予想される $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ イベント数は 4.23 ± 0.7 イベントであり, CC05, CC06 がある場合, $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンドをシグナルイベント数以下に抑えることが出来る.

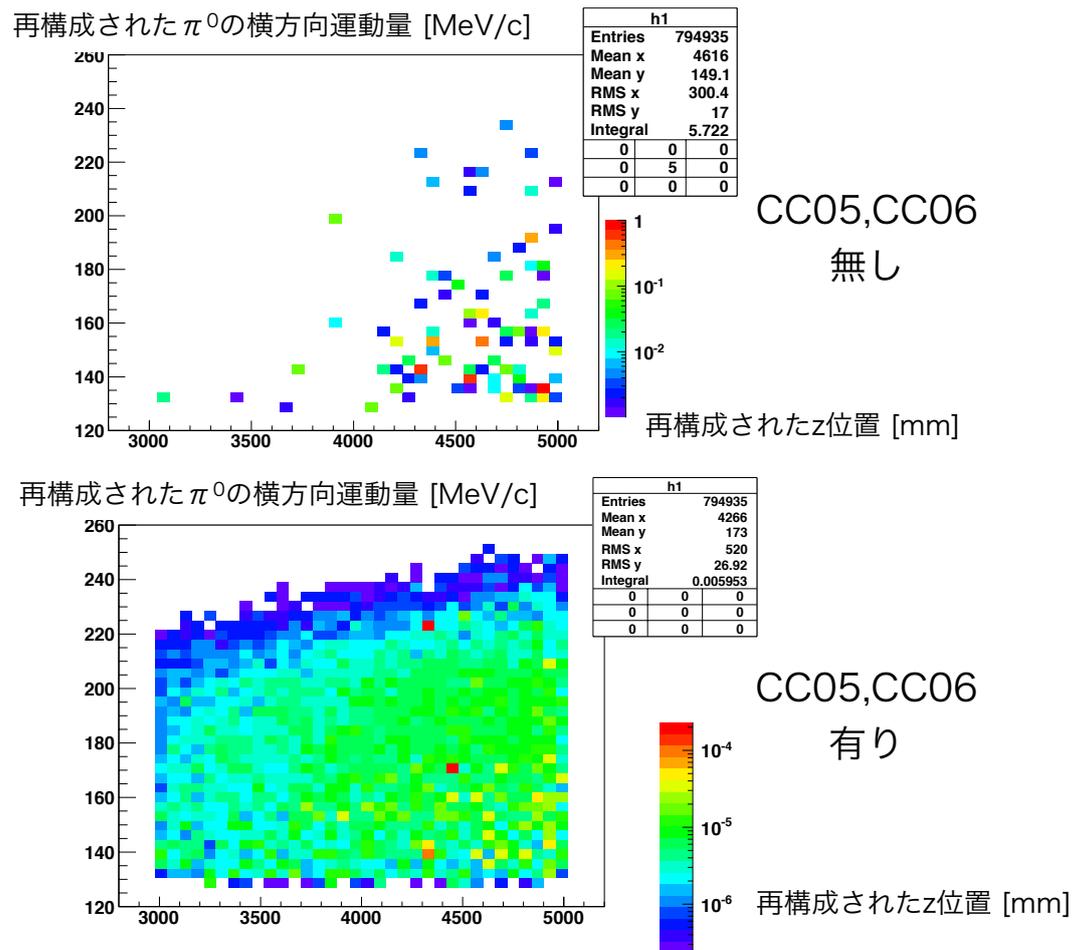


図 5.4: CC05, CC06 の有無による $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラウンドイベント数の変化

表 5.2: 非検出効率関数の変更による signal box 内に残る $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド数の変化

CC05, CC06 の有無	無し	有り
$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ バックグラウンド数	3151 ± 880	3.28 ± 0.19

第6章 物理データ取得実験における CC05, CC06の調整

この章では物理データ取得実験 (JPARC E14 Run49) の状況と、私が行った検出器の調整などについて述べる。この物理ランにおいて、私はビームデータを用いて、

- CC05, CC06 のエネルギー較正や時間較正といった検出器の調整
- ビームデータからのカウントレートの見積もり

などを行った。

6.1 物理データ取得実験の状況

2013年5月までに KOTO 実験に必要なほぼ全ての検出器のインストールが完了した。2013年5月12日から KOTO 実験として、はじめての物理ランとなる Run49 が始まり、ビーム強度 24kW, 5日分の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索用の物理データの取得が行われた。Run49 では、

- 新たにインストールされた検出器の調整 (CC05, CC06, BHPV, BHCV)
- 新たなオンラインカット (COE cut) の導入などデータ収集システムのアップグレード

などが行われた。

6.2 データ収集システムについて

KOTO 実験では図 6.1 のようなシステムを使用し、データの収集を行っている [8]。すべての検出器からのアナログ信号は Flash ADC ボード (以下 FADC) と呼ばれるモジュールに送られ、一定の時間間隔ごとに波高をデジタル化する。現在は1つの波形当たり、8ns 間隔で 64sample が取得されている。図 6.2 に得られる波形データの一例を示す。KOTO 実験では L1, L2, L3 の3段階のトリガー判断が行われている。L1 トリガーは最も基本的なトリガーであり、CsI カロリメータに記録されたエネルギーの総和 E_t を用いて判断する。この E_t が設定された閾値を超えた場合、L1 トリガーが発行され、FADC を通じて L2 トリガーボードへと送られる。L2 トリガーでは各検出器のデータをまとめ、イベントの再構成を行い、ソフトウェアを用いて L3 トリガー判断を行う。

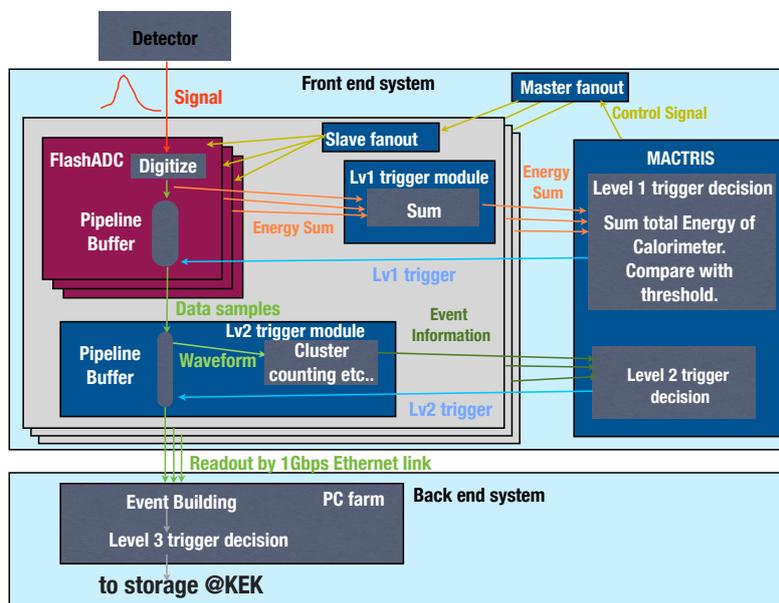


図 6.1: KOTO 実験におけるデータ収集システムの概要

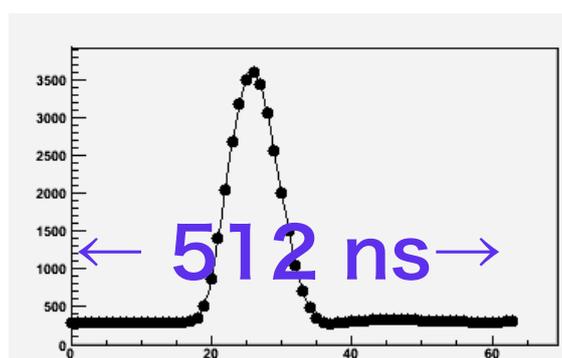


図 6.2: FADC で取得される波形データの一例. 横軸: 1sample あたり 8ns, 縦軸: ADCcount

6.3 KOTO 実験におけるデータの扱い

KOTO 実験では FADC で得られた波形データから、エネルギーと時間の情報を得ている。ここで、KOTO 実験で使用されるデータの変数について図 6.3 を用いて説明する。

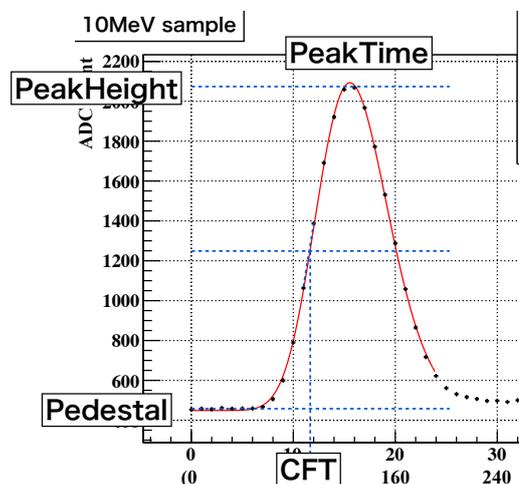


図 6.3: KOTO 実験で使用される色々な変数

エネルギーの変数

エネルギーに関わる変数は、主に“Pedestal”、“PeakHeight”、“IntegratedADC”、“Ene”の4つが存在する。FADC で得られた波形データの初めの 10sample の平均を検出器の出力のオフセット、すなわち Pedestal として使用している。ビームが来ていない時の Pedestal の幅がノイズの大きさに相当する。PeakHeight には 64sample 中、最も大きな ADC 値から Pedestal を引いたものが記録される。IntegratedADC は各 sample の ADC 値から Pedestal を引いたものの、64sample 分の積分値で、これがエネルギーに相当するものである。Ene は IntegrateADC の値に各検出器の応答を加え、実際のエネルギーに直したものである。

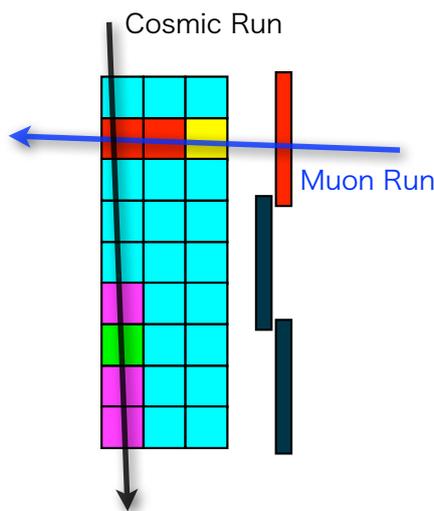
時間の変数

時間に関わる変数として、“PeakTime”と“ConstantFractionTime(CFT)”がある。PeakTime は PeakHeight となる点の時間記録開始時からの時間が記録される。CFT は、ADC 値が $\frac{1}{2}(\text{Pedestal} + \text{PeakHeight})$ となる点の時間記録開始時からの時間であり、通常の場合、CFT がイベントの時間情報として使用される。Peak Time ではなく CFT を使用するの、CFT を使用した場合のほうが、時間分解能が高いからである。

6.4 CC05,CC06の較正

6.4.1 エネルギー較正

CC05, CC06におけるエネルギー較正は, 上流にあるNCCと, CC05, CC06のいずれかを貫通するようなビーム中のミュオンを使用して行った(ビームミュオンラン). このトリガーを要求した場合, NCCとCC05, CC06は5m以上離れているため, 測定されるミュオンはビーム軸に対してほぼ平行であるものだけが選ばれる. そのため, これらのミュオンが貫通するCsI結晶の長さは, 1結晶当たり7cmとみなすことができる. 図6.4にエネルギー較正の様子を示す. 見たい検出器のチャンネルの, 同じ段にある上流下流の結晶と, 前面のシンチレータに対して, 一定以上のエネルギーを落とすことを要求することによって, ノイズやミュオン以外の粒子によるイベントを取り除いた. 貫通するミュオンがMIP(Minimum Ionizing Point)であると仮定し, ミュオンがCC05, CC06に落とすエネルギーはCsI結晶1つあたり39.2MeVとした. 図6.5に得られるエネルギー分布を示す. MIP付近をLandau関数でフィットし, 得られるMeanとSigmaをエネルギー較正の補正值として使用する.



真横から見た図

図 6.4: CC05, CC06 におけるエネルギー較正の方法

ランが行われていない時は, 図6.4のような宇宙線中のミュオンの貫通イベントを使用し, エネルギー較正を行っている. 図6.6に宇宙線測定で得られるMIPピークの値とビームミュオンランで得られるMIPピークを比較した結果を示す. 斜め入射が許される宇宙線測定のほうが検出器に落とすエネルギーが大きくなるため, ピークの値は1割ほど大きくなる.

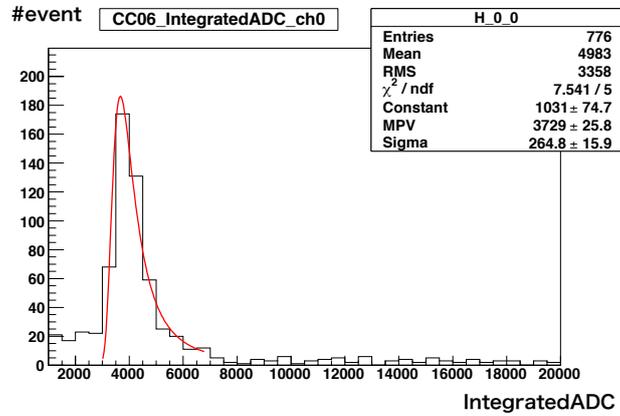


図 6.5: ビームミュオンランで得られるエネルギー分布

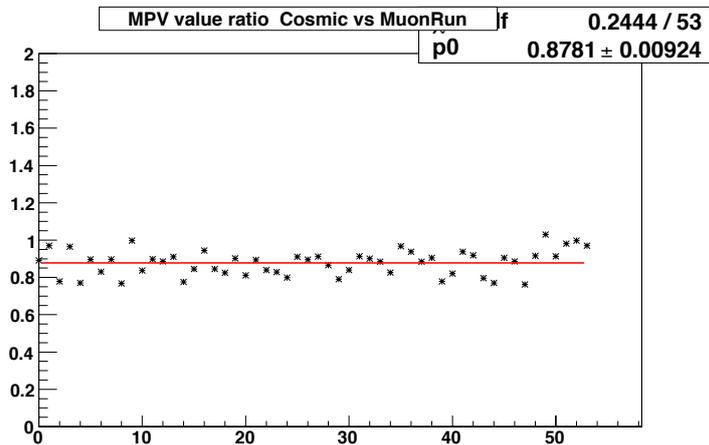


図 6.6: (ビームミュオンランによる MIP 値) ÷ (宇宙線測定による MIP 値). 横軸は検出器のチャンネル ID

6.4.2 時間較正

CC05, CC06 の時間較正にはビームミュオンランを使用した。

まず, シンチレータ同士の時間原点を求めた。シンチレータには図 6.7 のように正面から見て重なり合う部分が存在するため, そこに入射した粒子を選び, 各シンチレータ同士での時間差と PMT までの経路差を求め, 各シンチレータに固有の時間のオフセットを求めた。その結果を, 表 6.1 に示す。次に, シンチレータと各結晶間での時間差分布を求め, 各シンチレータに対する時間のオフセットを得た。これら 2 つを合わせ, ch0 の時間のオフセットが 0 となるように, CC05, CC06 の時間較正の補正值を決定した。

物理ラン中の時間較正の補正值の安定性を図 6.8 に示す。CC05, CC06 共に変動は 0.5 ns 以下であり, 安定している。

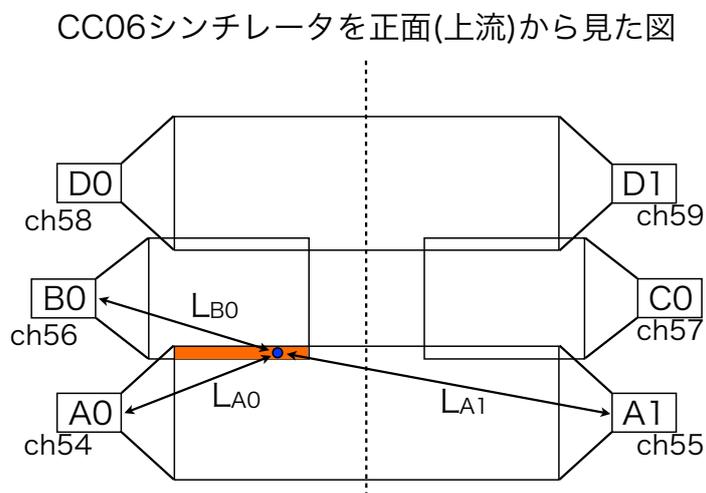


図 6.7: CC05, CC06 での時間較正に使用するシンチレータ間の時間差の求め方

表 6.1: シンチレータ間の時間較正の補正值

CC05	ch	時間較正の補正值 [ns]	CC06	ch	時間較正の補正值 [ns]
	54	0 (基準)		54	0 (基準)
	55	0.57		55	0.09
	56	2.40		56	0.02
	57	1.97		57	0.15
	58	1.08		58	0.13
	59	1.97		59	0.44

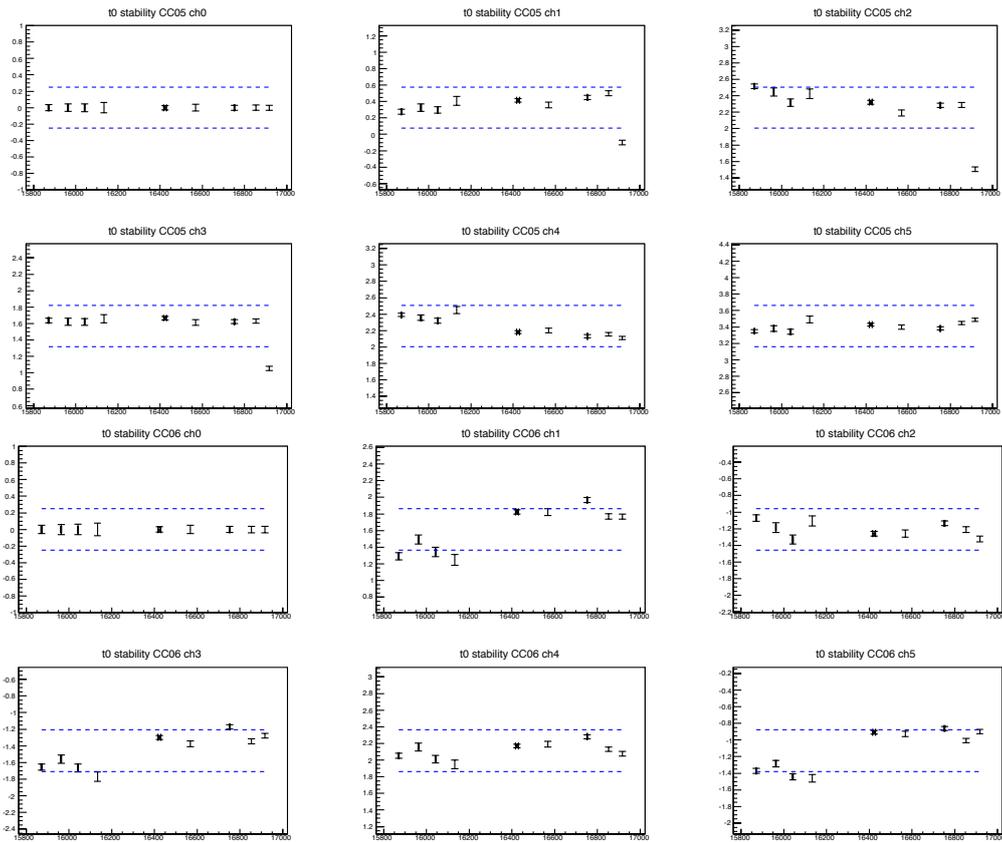


図 6.8: 各ビームミュオンランごとの CC05, CC06 の時間較正の補正値の安定性. 横軸が物理ランの ID, 縦軸が時間較正の補正値 [ns]. ch0 が補正値の基準であり, 青点線同士は 0.5ns 離れている.

第7章 考察

7.1 MCとデータの比較

7.1.1 カウンティングレート

ここでは、実験データとシミュレーションのカウントレートの比較を行い、シミュレーションの妥当性を調べた。

カウントレートの定義は「単位時間あたりに決められた threshold を超えるイベント数 [Hz]」である。今回の解析では CC05, CC06 の threshold を 3MeV に設定した。シミュレーションにおけるカウントレートは以下の方法を用いて見積もった。

- K_L 起源の粒子 … 6つの崩壊モードごとに full simulation を行い、それぞれの崩壊分岐比で割り、その和を取ることで KL によるカウントレートを見積もった
- ビーム中に含まれる中性子と γ 線 … ビームの full simulation の中から K_L 起源の粒子を全て取り除いたものから見積もった

その結果を図 7.1 に示す。図 7.1 で描かれているのは、上から順に、 $K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e$, $K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$, $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$, $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$, 中性子と γ 線の 6つの寄与である。CC05, CC06 のカウントレートは K_L のメインモード ($K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e$, $K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$, $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$) によって決まっていることが分かる。ビームに近い CC06 では CC05 と違いビームに含まれる中性子や γ 線による影響が見られる。

次に実際のビームデータからのカウントレートの導出を行う。物理データ取得のためのランのデータ中から、ビームによるトリガーイベントだけを集め、カウントレートの見積もりを行った。こちらでも threshold は 3MeV に設定した。

シミュレーションにおけるカウントレートとデータによるカウントレートの比較を行うためには、それぞれの統計量をそろえる必要がある。シミュレーションでは統計量の単位は POT (Proton On Target: ターゲットへの陽子の衝突回数) で表され、full simulation 1file あたり $1.66 \times 190 \times 10^9$ [POT] である。一方、ビームデータにおいて統計量は生成された K_L の数、 $\#KL$ で表される。実験データから、金標的の場合、POT と $\#KL$ は以下の関係をもつことがわかっている。

$$4.178 \times 10^7 [\#KL]/2 \times 10^{14} [POT] \quad (7.1)$$

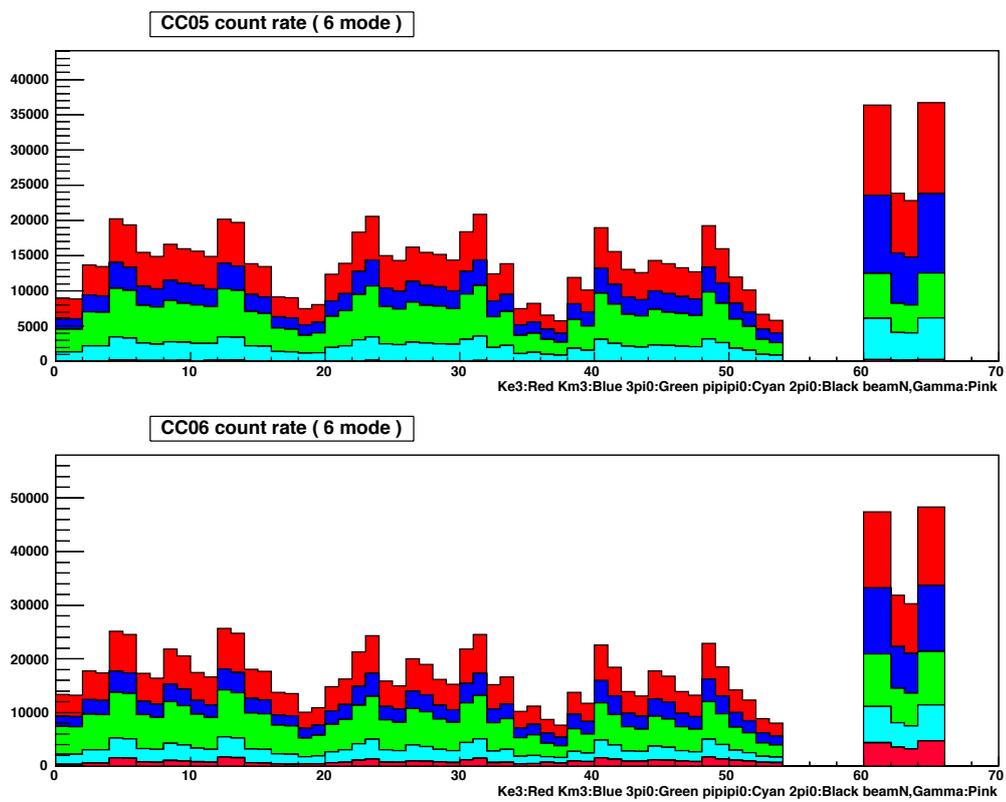


図 7.1: MC によるカウントレート. 横軸:chID 縦軸:カウントレート [Hz].

ビームの強度 $W = \text{電圧 } V \times \text{電流 } I$ から, 1 スpillあたりの POT を P_n , 1 スpillあたりの K_L 生成数を K_n とすると,

$$W = 30 [\text{GeV}] \times P_n / 6 = 24 [\text{kW}]$$

$$\rightarrow P_n = 3.00 \times 10^{13} [\text{POT/spill}]$$

式 (7.1) より,

$$K_n = 6.27 \times 10^6 [\#KL/spill]$$

これらの値を用いて比較を行う. その結果を図 7.2 に示す. CC05, CC06 のいずれでも CsI 結晶部分はよく一致しており, シミュレーションで想定している状況が現実に即していることが分かる. カウントレートはビーム強度に比例すると考えると, 290kW でのオペレーション時にはカウントレートは CC05 で $\sim 200\text{kHz}$, CC06 で $\sim 250\text{kHz}$ と予想できる. これは 3 章でのカウントレート 1MHz 以下という要求を満たしている.

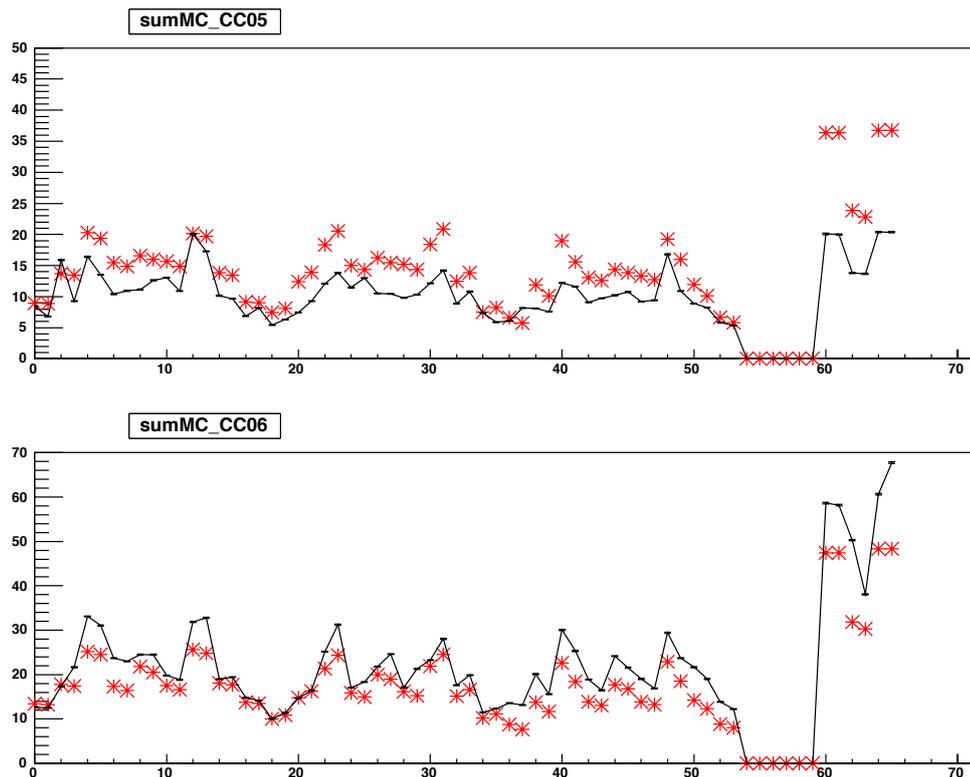


図 7.2: データと MC の比較. 横軸:chID(0~53:CsI 結晶, 60~65:シンチレータ) 縦軸:カウントレート [kHz]. 黒がデータ, 赤が MC.

第8章 結論

直接的に CP 対称性を破る $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊を探索するために行われている KOTO 実験で使用する CsI カロリメータの下流に設置される CC05, CC06 と呼ばれる 2 台のガンマ線 veto 検出器の開発を行った. 2013 年 5 月のビームデータ取得実験において, エネルギー較正や時間較正を行い, CC05, CC06 が veto 検出器として機能するよう調整を行った. また, すでにインストールされていた CC04 を含めたシミュレーションを行い, 下流 Collar 検出器が十分な放射長を持っていることを示した. CC03 や CC04 のシミュレーションにおいて, 別の検出器の非検出効率関数を代用して行われている, という問題が存在していたが, CsI 結晶を使用したシミュレーションを行い, Collar 検出器に対する新たな非検出効率関数を得た.

CC05, CC06 の有無による $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊起源のバックグラウンド数の変化を見積もりを行った. 3 年間の物理データ取得実験を仮定すると, CC05, CC06 がある場合 3.28 ± 0.19 イベントの $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 起源のバックグラウンドが残ることがわかった. この条件においてシグナルイベント数は 4.23 ± 0.7 と予想されているため, CC05, CC06 の導入により $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ バックグラウンドをシグナルイベント数と同程度まで落とすことができることがわかった.

また, カウントレートの見積もりを実験データとシミュレーションから行い, ビーム強度が 24kW の場合, CC05 で約 15kHz, CC06 で約 20kHz であることがわかった. カウントレートがビーム強度に比例すると考えると, デザイン値である 290kW 運転時にもカウントレートは 1MHz 以下であり, 現行の CC05, CC06 でのデータ取得が可能である.

付録A 謝辞

本研究を行う上で、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。実験や物理についてだけでなく、日頃の様々なことに対しても考察を行い、改善していこうとする姿勢は大変勉強になります。研究についても的確な指摘や、アドバイスをいただき、本論文を完成させることができました。色々のご心配、ご迷惑をお掛けしましたが、支えてくださって本当にありがとうございました。

花垣和則准教授には卒業研究やゼミの時にお世話になりました。普段の会話などでも色々な面白い話を聞かせて頂いて楽しかったです。

外川学助教には本研究の初めから終わりまでずっとお世話になりっぱなしでした。CC05, CC06の架台の設計や必要な物品の購入など検出器の製作に関して色々手伝っていただきました。本論文の作成においても多大な助力をありがとうございました。

特任研究員の塩見公志さんには、J-PARCでの生活や大阪での解析作業においてとてもお世話になりました。忙しい中、CC05, CC06の設置作業の手伝いをしていただきありがとうございました。特任研究員の佐藤和史さんにはシミュレーションを行う際に色々教えていただきました。ありがとうございました。秘書の川原さんには、出張手続きや提出書類などについてお世話になりました。

KEKの野村正さんや、小松原健さん、Lim Gei Youbさんや渡辺丈晃さんにはJ-PARCやKEKにおいて様々な支援をしていただきました。ありがとうございました。

CC04の製作者である伴野さんには、CC05, CC06を製作していく上での様々なことを教えていただきました。阪大KOTOグループの先輩であるLee Jong Wonさん、岩井さんご夫妻にはJ-PARCや大阪で解析について色々なことを教えていただきました。D3の杉山さんにはJ-PARCの物理ラン中に色々ご迷惑をお掛けしましたが、きちんとデータがとれたのは杉山さんのお陰です。

京大KOTOグループの関繁人さんにはCC05, CC06の設置作業において大変お世話になりました。関さんのお陰でCC05, CC06は完成したと思っています。京大KOTOグループの前田陽佑さんには、BHPVを含めた下流検出器についての解析を行う際に色々なアドバイスを頂き、大きな助けとなりました。感謝しています。

参考文献

- [1] M.Kobayashi and T.Maskawa,Prog.Theor.Phys.49,652(1973).
- [2] L. Wolfenstein, “Parameterization of the Kobayashi Masukawa Matrix”, Phys. Rev. Lett. 51, 1945 (1983).
- [3] J.H.Christenson,J.W.Cronin, V.L.Fitch, and R.Turlay, Phys. Rev. Lett.13,138 (1964).
- [4] Vincenzo Cirigliano, Rev. Mod. Phys. 84, 399-447 (2012)
- [5] Particle Data Group, “REVIEW OF PARTICLE PHYSICS”, (2010)
- [6] 前田陽佑, ”KOTO 実験のための中性子不感型光子 veto 検出器の開発”, 修士論文, 京都大学 (2010)
- [7] 伴野真太郎, ”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”, 修士論文, 大阪大学 (2013)
- [8] 杉山泰之, ”J-PARC E14 KOTO 実験のためのデータ収集システムの開発及び構築”, 修士論文, 大阪大学 (2011)