

令和 2 年度 修士論文

J-PARC KOTO 実験における  
 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数の評価と削減

大阪大学大学院理学研究科  
物理学専攻  
山中卓研究室  
乃一 雄也

2021 年 3 月 31 日



# 概要

J-PARC KOTO 実験では、中性 K 中間子の稀な崩壊である  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊を通して、CP 対称性を破る新物理の探索を行っている。この崩壊は、標準理論で予測される分岐比が  $3.0 \times 10^{-11}$  と非常に小さいため、新物理によって分岐比が異なった場合に違いをとらえやすい。このように、崩壊分岐比の小さい事象を探索するためには、背景事象を理解し削減することが重要である。KOTO 実験で用いているビームの外縁部には、検出器上流で散乱されビーム中心軸から大きく離れた飛跡を描くビームハローの  $K_L$  が存在する。このハロー  $K_L$  が二光子へ崩壊すると実験の背景事象となりうる。これは  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象と呼ばれる。

これまでのシミュレーションでは、この  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数が正確には見積もられていなかった。本研究では、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルによって測定したハロー  $K_L$  のフラックスを用いてシミュレーションを補正した。結果として、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析における感度での  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を  $0.26 \pm 0.07$  と見積もった。

さらに、クラスターの形状および運動学的変数の違いを利用して、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減する新たなカットを開発した。このカットは信号事象の効率を 90% を保った上で、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 94% を削減できる。この削減によって、標準理論による信号 1 事象に対応する  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数は  $0.79 \pm 0.26$  となる。

# 目次

|              |                                                                       |           |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>序論</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1          | KOTO 実験                                                               | 1         |
| 1.1.1        | KOTO 実験の物理                                                            | 1         |
| 1.1.2        | 実験施設の概要                                                               | 1         |
| 1.1.3        | 測定原理                                                                  | 2         |
| 1.1.4        | 信号の再構成                                                                | 3         |
| 1.1.5        | 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析結果                                       | 3         |
| 1.2          | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象                                        | 5         |
| 1.2.1        | 背景事象となる機序                                                             | 5         |
|              | ビーム中の $K_L$ が $K_L \rightarrow 2\gamma$ の崩壊をした場合                      | 5         |
|              | ビーム中心から大きくずれた $K_L$ (ハロー $K_L$ ) が $K_L \rightarrow 2\gamma$ の崩壊をした場合 | 5         |
| 1.3          | 本研究の目的                                                                | 7         |
| <b>第 2 章</b> | <b>KOTO 実験</b>                                                        | <b>8</b>  |
| 2.1          | ビームライン                                                                | 8         |
| 2.2          | 検出器                                                                   | 9         |
| 2.2.1        | CsI カロリメータ                                                            | 9         |
| 2.2.2        | Veto 検出器                                                              | 10        |
|              | Barrel Veto 検出器                                                       | 10        |
|              | Collar Counter                                                        | 10        |
|              | Outer Edge Veto 検出器 [12]                                              | 11        |
|              | 荷電粒子 Veto 検出器                                                         | 11        |
|              | ビームホール Veto 検出器                                                       | 11        |
| 2.3          | データ取得                                                                 | 11        |
| 2.4          | ランとトリガー                                                               | 12        |
| 2.4.1        | 物理ラン                                                                  | 12        |
| 2.4.2        | Pyhsics Trigger                                                       | 12        |
| 2.4.3        | Normalization Trigger                                                 | 13        |
| <b>第 3 章</b> | <b>ハロー <math>K_L</math> フラックスの測定</b>                                  | <b>14</b> |



|       |                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1   | ハロー $K_L$ . . . . .                                                        | 14 |
| 3.1.1 | ハロー $K_L$ の生成過程 . . . . .                                                  | 14 |
| 3.2   | ハロー $K_L$ フラックスの測定方法 . . . . .                                             | 16 |
| 3.2.1 | COE の定義 . . . . .                                                          | 16 |
|       | COE と $K_L$ の到達点との近似 . . . . .                                             | 17 |
| 3.2.2 | COE 半径とハロー $K_L$ との関係およびハロー $K_L$ フラックスの測定方法 . . .                         | 18 |
| 3.2.3 | COE 半径のハロー $K_L$ 指標としての妥当性 . . . . .                                       | 19 |
| 3.3   | ハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプル . . . . .                                | 19 |
| 3.3.1 | データ取得 . . . . .                                                            | 19 |
| 3.3.2 | MC サンプルの生成 . . . . .                                                       | 19 |
| 3.3.3 | クラスターの再構成 . . . . .                                                        | 20 |
| 3.3.4 | $\pi^0$ の再構成 . . . . .                                                     | 21 |
|       | 崩壊位置 . . . . .                                                             | 22 |
|       | 横方向運動量 . . . . .                                                           | 22 |
|       | 崩壊時間 . . . . .                                                             | 23 |
| 3.3.5 | $K_L$ の再構成 . . . . .                                                       | 23 |
|       | 崩壊 $z$ 座標 . . . . .                                                        | 23 |
|       | 崩壊 $x, y$ 座標 . . . . .                                                     | 23 |
|       | 崩壊時間 . . . . .                                                             | 24 |
| 3.3.6 | 事象選別 . . . . .                                                             | 24 |
|       | 運動学的カット . . . . .                                                          | 24 |
|       | veto 検出器を用いた事象選別 . . . . .                                                 | 25 |
| 3.3.7 | CsI 検出器を用いた veto . . . . .                                                 | 26 |
| 3.3.8 | クラスターの形を用いたカット . . . . .                                                   | 26 |
| 3.4   | ハロー $K_L$ フラックスの測定 . . . . .                                               | 26 |
| 3.4.1 | ハロー $K_L$ による寄与 . . . . .                                                  | 27 |
| 3.4.2 | データと MC の比較 . . . . .                                                      | 27 |
| 3.4.3 | データと MC の間の乖離の原因考察 . . . . .                                               | 27 |
| 3.4.4 | データと MC の間の乖離が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数評価へもたらす影響 . . . .            | 29 |
| 第 4 章 | <b>シミュレーションの事象数の補正と <math>K_L \rightarrow 2\gamma</math> 背景事象数の新たな見積もり</b> | 30 |
| 4.1   | 補正方法の検討 . . . . .                                                          | 30 |
| 4.2   | ハロー $K_L$ フラックスの補正係数 . . . . .                                             | 33 |
| 4.3   | 補正方法の妥当性 . . . . .                                                         | 34 |
| 4.4   | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC サンプル . . . . .                          | 34 |
| 4.4.1 | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC の生成 . . . . .                           | 34 |
| 4.4.2 | イベント再構成 . . . . .                                                          | 34 |
| 4.4.3 | 事象選別 . . . . .                                                             | 35 |
|       | 運動学的カット . . . . .                                                          | 35 |

|              |                                                             |           |
|--------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
|              | veto 検出器を用いた veto                                           | 38        |
|              | CsI 検出器を用いた veto                                            | 39        |
|              | クラスターの形を用いたカット                                              | 39        |
| 4.4.4        | 波形を用いたカット                                                   | 40        |
| 4.5          | MC の事象数を補正する前の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数              | 40        |
| 4.6          | MC の事象数の補正をした後の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数             | 42        |
| 4.7          | 2016-2018 年取得データ解析の結論                                       | 42        |
| <b>第 5 章</b> | <b><math>K_L \rightarrow 2\gamma</math> 背景事象の削減可能性</b>      | <b>46</b> |
| 5.1          | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の違い                     | 46        |
| 5.1.1        | クラスターの形の違い                                                  | 46        |
| 5.1.2        | 運動学的変数の違い                                                   | 47        |
| 5.2          | まとめ                                                         | 50        |
| <b>第 6 章</b> | <b>クラスターの形の違いを用いた新たな削減手法の開発</b>                             | <b>51</b> |
| 6.1          | 新たなカットの概要                                                   | 51        |
| 6.1.1        | 信号事象仮定                                                      | 51        |
| 6.1.2        | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定                            | 51        |
| 6.2          | Likelihood                                                  | 53        |
| 6.2.1        | Likelihood の定義                                              | 53        |
| 6.2.2        | Likelihood の分布                                              | 53        |
|              | 信号事象仮定での Likelihood の分布                                     | 53        |
|              | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定した Likelihood の分布          | 53        |
| 6.2.3        | 2つのクラスター間での Likelihood の相関                                  | 53        |
| 6.2.4        | 信号事象仮定と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定での Likelihood の相関   | 55        |
| 6.3          | Likelihood Ratio                                            | 56        |
| 6.3.1        | Likelihood Ratio の定義                                        | 56        |
| 6.3.2        | Likelihood Ratio によるカットの $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力 | 58        |
| 6.3.3        | データによる再現性の確認                                                | 58        |
|              | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルによる確認                          | 58        |
|              | $K_L \rightarrow 2\gamma$ サンプルによる確認                         | 60        |
| <b>第 7 章</b> | <b>運動学的変数の違いを用いた新たな削減手法の開発</b>                              | <b>61</b> |
| 7.1          | 1つの運動学的変数を用いたカット                                            | 61        |
| 7.2          | 多変数解析を用いたカット                                                | 62        |
| 7.2.1        | 多変数解析の概要                                                    | 62        |
| 7.2.2        | 多変数解析の訓練サンプル                                                | 63        |
| 7.2.3        | 多変数解析の入力変数                                                  | 63        |
| 7.2.4        | 多変数解析を用いたカットによる $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力          | 65        |

|               |                                                                       |           |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.2.5         | 過学習の確認 . . . . .                                                      | 65        |
| 7.2.6         | データによる再現性の確認 . . . . .                                                | 66        |
|               | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルによる確認 . . . . .                          | 66        |
|               | $K_L \rightarrow 2\gamma$ サンプルによる確認 . . . . .                         | 66        |
| 7.3           | まとめ . . . . .                                                         | 67        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>2つのカットを組み合わせたときの <math>K_L \rightarrow 2\gamma</math> 背景事象削減能力</b> | <b>68</b> |
| 8.1           | 2つのカットの相関 . . . . .                                                   | 69        |
| 8.2           | 2つのカットを組み合わせたときの $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力 . . . . .         | 69        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>標準理論感度で予測される <math>K_L \rightarrow 2\gamma</math> 背景事象数</b>        | <b>71</b> |
| 9.1           | 荷電 $K$ 中間子 veto 検出器による散乱の影響 . . . . .                                 | 71        |
| 9.2           | 標準理論感度で予測される $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数 . . . . .                | 72        |
| <b>第 10 章</b> | <b>考察</b>                                                             | <b>74</b> |
| 10.1          | 事象選別によるハロー $K_L$ フラックスの補正係数への影響 . . . . .                             | 74        |
| 10.1.1        | 事象選別 . . . . .                                                        | 74        |
|               | 運動学的カット . . . . .                                                     | 74        |
|               | veto 検出器を用いたカット . . . . .                                             | 75        |
| 10.1.2        | 補正係数の比較 . . . . .                                                     | 75        |
| <b>第 11 章</b> | <b>結論</b>                                                             | <b>77</b> |
|               | <b>参考文献</b>                                                           | <b>80</b> |

# 目次

|     |                                                                                                                                                                            |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のファインマンダイアグラムの例                                                                                                                      | 1  |
| 1.2 | JPARC の鳥瞰図 [8]。                                                                                                                                                            | 2  |
| 1.3 | KOTO 実験検出器の概要図                                                                                                                                                             | 2  |
| 1.4 | CsI カロリメータの断面図。赤い部分が小さな結晶、青い部分が大きな結晶を示している。                                                                                                                                | 3  |
| 1.5 | KOTO 実験の解析の概要。ビーム軸方向を $z$ 軸、鉛直方向を $y$ 軸とする。横方向運動量 ( $P_T$ ) と $z$ 崩壊位置 ( $Z_{\text{ vtx }}$ ) を用いて信号領域を定義している。 $Z_{\text{ vtx }} = 0$ mm は、2.2.2 節で述べる FB の上流端に対応する。       | 4  |
| 1.6 | 2016-2018 年物理ランの結果 [9]。横軸が再構成した $\pi^0$ が崩壊した $z$ 位置、縦軸が $\pi^0$ の横方向運動量。黒色で書かれた数字がデータで観測された事象数、赤色で描かれた数字が予測された背景事象数である。中央の黒い枠で囲まれた部分が blind region であり、点線で囲まれた領域が信号領域である。 | 5  |
| 1.7 | コア $K_L$ が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 崩壊した場合 (上) と再構成される崩壊 $z$ 位置および $P_T$ (下) の概念図。                                                                                        | 6  |
| 1.8 | ハローの $K_L$ が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 崩壊した場合 (上) と再構成される崩壊 $z$ 位置および $P_T$ (下) の概念図。                                                                                      | 6  |
| 2.1 | KOTO 実験のビームライン概略図                                                                                                                                                          | 8  |
| 2.2 | KOTO 実験の検出器                                                                                                                                                                | 9  |
| 2.3 | CsI カロリメータの断面図。赤い部分が small 結晶、青い部分が large 結晶で構成されている。緑の部分は Outer Edge Veto (OEV) と呼ばれる veto 検出器である。                                                                        | 10 |
| 2.4 | ベッセルフィルターによる波形変化 [15]。点線がベッセルフィルター通過前の波形、実践がフィルター通過後の波形を示す。シミュレーションによる結果を表している。                                                                                            | 12 |
| 3.1 | KOTO 実験におけるビームラインの、 $x-z$ 平面の断面図 [16]                                                                                                                                      | 14 |
| 3.2 | KOTO 実験におけるビームラインの X-Z 面および Y-Z 面の概要図 [16]。①、②、③はそれぞれ、散乱しなかった場合、コリメータで 1 回散乱した場合、アブゾーバで 1 回散乱した場合に $K_L$ がとりうる、もっともビーム中心軸から離れた飛跡を示している。                                    | 15 |
| 3.3 | $K_L$ がビームライン構造物と複数回散乱した場合の概念図                                                                                                                                             | 16 |

|      |                                                                                                                                                                                                   |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4  | 3.3.2 節で述べる MC で生成したハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルにおける、COE 半径と $K_L$ の CsI カロリメータ上の真の到達位置の相関。 . . . . .                                                                                        | 19 |
| 3.5  | MC の生成に用いた $K_L$ の位置と運動量の情報において、初期位置および運動量から CsI カロリメータ表面へ外挿したときの $x, y$ 分布。赤い四角形で示した中央の 70 mm 角の領域の外側の事象だけを選択し、ハロー $K_L$ による事象を効率的に生成した。 . . .                                                   | 20 |
| 3.6  | クラスター再構成の概要図。色がついた結晶がクラスターシードである。それぞれのクラスターから 70 mm 以内にあるクラスターシードをまとめ、クラスターとする。灰色で示したのが isolated hit crystal である。 . . . . .                                                                       | 21 |
| 3.7  | $\pi^0$ 再構成の概要図 . . . . .                                                                                                                                                                         | 22 |
| 3.8  | MC を用いて作成したシャワーマップの例 [19] . . . . .                                                                                                                                                               | 27 |
| 3.9  | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータと MC それぞれの COE 半径の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。黒い十字がデータを、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。 . . . . .                                                          | 28 |
| 3.10 | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータと MC それぞれの COE 半径の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。MC は、 $K_L$ が最後に散乱した位置ごとに色分けをしている。赤が金標的、緑が 1 次コリメータ、黄色が 2 次コリメータ、青がその他で最後に散乱した事象を示す。データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。 . . . . . | 28 |
| 4.1  | ハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータと MC における、6 つのクラスターのエネルギーの和の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC それぞれの事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                               | 32 |
| 4.2  | ハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータと MC における、再構成された崩壊 $z$ 座標の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC それぞれの事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                                 | 32 |
| 4.3  | それぞれの COE 半径の領域における、MC の $K_L$ シードでの $K_L$ の運動エネルギーの分布。緑が 200 mm から 350 mm の領域、赤が 350 mm から 500 mm の領域、緑が 500 mm から 650 mm の領域を示す。それぞれの領域における事象数を用いて規格化した。 . . . . .                              | 32 |
| 4.4  | 3 章で測定したハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータと MC での COE 半径の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。40 mm ごとにビン分けを行った。黒い十字がデータを、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC は POT を用いて規格化した。 . . . . .                                  | 33 |
| 4.5  | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータおよび補正後の MC における 6 光子のエネルギーの和の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが補正後の MC を表す。データと MC はそれぞれ POT を用いて規格化した。 . . . . .                                           | 35 |
| 4.6  | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータおよび補正後の MC における $K_L$ の崩壊 $z$ 位置の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが補正後の MC を表す。データと MC はそれぞれ POT を用いて規格化した。 . . . . .                                       | 35 |
| 4.7  | 中性子背景事象の概要図 . . . . .                                                                                                                                                                             | 37 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8  | $P_t/P_z - Z_{\text{vtx}}, E - Z_{\text{vtx}}$ を用いた事象選別 [20]。シミュレーションによる $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分布を赤紫色で示す。緑色の線でカットの領域を示す。 . . . . .                                                                                                   | 38 |
| 4.9  | FPSD を用いたカットの概要 [21] . . . . .                                                                                                                                                                                                                        | 41 |
| 4.10 | 4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別をした $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における COE 半径の分布。ハロー $K_L$ フラックスに対する補正を行う前の分布を示す。 . . . .                                                                                                                                 | 41 |
| 4.11 | 4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別をした $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における COE 半径の分布。ハロー $K_L$ フラックスに対する補正を行った後の分布を示す。 . . . .                                                                                                                                | 41 |
| 4.12 | 4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別した $K_L \rightarrow 2\gamma$ の MC における、再構成された $\pi^0$ の崩壊 $z$ 座標と横方向運動量の散布図。ハロー $K_L$ フラックスに対する MC の補正を行った後の結果を示す。数字は各領域内に残った事象数を表す。生成した $K_L \rightarrow 2\gamma$ の MC と、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの POT を用いて規格化した。 . . . . . | 43 |
| 4.13 | 2016-2018 年物理ランの結果 [9]。横軸が再構成した $\pi^0$ が崩壊した $z$ 位置、縦軸が $\pi^0$ の横方向運動量。黒色で書かれた数字がデータで観測された事象数、赤色で描かれた数字が予測された背景事象数である。中央の黒い枠で囲まれた部分が blind region であり、赤い枠で囲まれた領域が信号領域である。 . . . . .                                                                 | 44 |
| 5.1  | 信号事象 (左) と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象 (右) を比較した概念図 . . . . .                                                                                                                                                                                      | 47 |
| 5.2  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における Theta $\chi^2$ の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。カット値である 4.5 より小さい事象を選択する。 . . . . .                                                                                         | 48 |
| 5.3  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における CSDDL の分布。2つのクラスターで計算した値のうち、小さい方を選んでいく。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。カット値である 0.985 より大きい事象を選択する。 . . . . .                                                                   | 48 |
| 5.4  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における Eta CSD の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。カット値である 0.91 より大きい事象を選択する。 . . . . .                                                                                               | 48 |
| 5.5  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における 2 個の $\gamma$ 線のエネルギーの和の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                          | 49 |
| 5.6  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC におけるクラスター間の距離の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                                         | 49 |
| 5.7  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における Projection Angle 距離の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                              | 49 |
| 5.8  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における $\pi^0$ の再構成 $P_T$ の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                              | 49 |
| 5.9  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC で再構成した $\pi^0$ の崩壊 $z$ 位置の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                             | 50 |
| 6.1  | 信号事象仮定 (上) と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定 (下) の概念図 . . . . .                                                                                                                                                                                      | 52 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2  | MC を用いて生成した信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象において、エネルギーが大きい方のクラスターに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。                            | 54 |
| 6.3  | MC を用いて生成した信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象において、エネルギーが小さい方のクラスターに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。                            | 54 |
| 6.4  | MC を用いて生成した信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象において、エネルギーが大きい方のクラスターに対して $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。 | 54 |
| 6.5  | MC を用いて生成した信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象において、エネルギーが小さい方のクラスターに対して $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。 | 54 |
| 6.6  | 信号事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。                                                          | 56 |
| 6.7  | 信号事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。                               | 56 |
| 6.8  | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。                                | 57 |
| 6.9  | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。     | 57 |
| 6.10 | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC において、信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。                                                      | 57 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.11 | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC において、 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。                                                                                                          | 57 |
| 6.12 | 信号事象の MC において、信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれを仮定したときの Likelihood の相関。横軸が信号事象仮定を、縦軸が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定をして求めた Likelihood を示す。黒線は、それぞれの Likelihood の値が等しい領域を表す。                                                                                                                                  | 58 |
| 6.13 | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC において、信号事象および $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれを仮定したときの Likelihood の相関。横軸が信号事象仮定を、縦軸が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定をして求めた Likelihood を示す。黒線は、それぞれの Likelihood の値が等しい領域を示す。                                                                                                      | 58 |
| 6.14 | MC で生成した信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象に対して求めた Likelihood Ratio の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示している。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。                                                                                                                                        | 59 |
| 6.15 | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ データと MC それぞれの Likelihood Ratio の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが MC を示す。データと MC は、それぞれの POT を用いて規格化した。                                                                                                                                                                              | 59 |
| 6.16 | ビーム中の $K_L$ が崩壊した $K_L \rightarrow 2\gamma$ データと MC それぞれの Likelihood Ratio の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが MC を示す。データと MC は、それぞれの POT を用いて規格化した。                                                                                                                                                           | 59 |
| 7.1  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における 2 光子のエネルギーの和の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。                                                                                                                                                                                                            | 61 |
| 7.2  | 2 変数に対するフィッシャー線型判別法 (FD) の概念図。青を信号事象、赤を背景事象とした場合、緑色の線の右上の領域内にある事象を棄却することで、背景事象を削減する。                                                                                                                                                                                                                                  | 62 |
| 7.3  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の分布。青が信号事象を、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を表す。それぞれ、エネルギーが小さい方の光子のエネルギー (左上)、エネルギーが大きい方の光子のエネルギー (中上)、クラスター間の距離 (右上)、Projection Angle (左下)、2 光子のエネルギーの和 (中下)、再構成された $\pi^0$ の $P_T$ (右下) を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。 | 64 |
| 7.4  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の分布。青が信号事象を、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を表す。それぞれ、再構成された $\pi^0$ の崩壊 $z$ 座標 (左上)、COE 半径 (中上)、エネルギーが大きい方の光子の CsI カロリメータへの入射極角 (右上)、エネルギーが小さい方の光子の CsI カロリメータへの入射極角 (左下) を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。                 | 64 |
| 7.5  | 信号事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の 2 変数間の相関係数。相関係数は式 6.5 を用いて計算した。                                                                                                                                                                                                                                                     | 65 |



|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.6  | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の 2 変数間の相関係数。相関係数は式 6.5 を用いて計算した。 . . . . .                                                                                                                                                                                                         | 65 |
| 7.7  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象のテストサンプルでの、FD (黒)、BDT (緑)、BDTG (赤) での信号事象感度と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の削減能力の相関。 . . . . .                                                                                                                                                                            | 66 |
| 7.8  | 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の訓練サンプル (ヒストグラム) およびテストサンプル (点線) に対する FD 値。青が信号事象を、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。 . . . . .                                                                                                                                                                        | 66 |
| 7.9  | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータと MC に対する FD 値の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒十字がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC は POT を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                                                                                              | 67 |
| 7.10 | $K_L \rightarrow 2\gamma$ のデータと MC に対する FD 値の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒十字がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC は POT を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                                                                                             | 67 |
| 8.1  | 多変数解析によるカットをかけた後の、MC で生成した信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象における Likelihood Ratio の分布。緑が信号事象、赤が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を示す。信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。Likelihood Ratio の閾値を 0.764 とし、それ以上の事象を選択すると、信号事象の感度を 90% を保ち $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の 92% を削減できる。 . . . . . | 68 |
| 8.2  | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における、Likelihood Ratio と多変数解析の出力の値に対して 90% の信号事象感度を満たす組み合わせでの $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力。2 本の赤い線は、それぞれ最適化された 2 変数の閾値を示す。影をつけた領域を棄却した場合、信号感度 90% で $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を 94% 削減できる。 . . . . .                                                              | 69 |
| 9.1  | 試作型 UCV をビーム中に入れた場合 (赤) と入れなかった場合 (青) の $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルにおける COE 半径の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。POT を用いてそれぞれの事象を規格化した。 . . . . .                                                                                                                                                                    | 72 |
| 9.2  | Likelihood Ratio カットと多変数解析によるカットをかける前の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における、再構成された $\pi^0$ の崩壊 $z$ 座標と横方向運動量の相関。SES が $3 \times 10^{-11}$ のときのそれぞれの領域内の事象数を数字で示す。 . . . . .                                                                                                                                | 73 |
| 9.3  | Likelihood Ratio カットと多変数解析によるカットをかけた後の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC における、再構成された $\pi^0$ の崩壊 $z$ 座標と横方向運動量の相関。SES が $3 \times 10^{-11}$ のときのそれぞれの領域内の事象数を数字で示す。 . . . . .                                                                                                                                | 73 |
| 10.1 | 3.3.6 節で述べたカットに加えて、10.1.1 節で述べたカットを用いて事象選別した $K_L \rightarrow 3\pi^0$ のデータおよび MC における COE 半径の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い十字がデータを、赤いヒストグラムが MC をそれぞれ表す。データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。 . . . . .                                                                                                                  | 76 |

|      |                                                                                                                                                                       |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10.2 | 3.3.6 節で述べたカットのみを用いて事象選別をした場合 (赤) と、3.3.6 節で述べたカットに加えて 10.1.1 節で述べたカットを用いて事象選別をした場合 (青) の $K_L \rightarrow 3\pi^0$ データおよび MC から得たハロー $K_L$ フラックスの補正係数の比較結果。 . . . . . | 76 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

# 表目次

|      |                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析において予測された背景事象の一覧 [9]。                                                                                                                                                                                                  | 4  |
| 3.1  | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ 崩壊を選択するために用いた運動学的カット一覧                                                                                                                                                                                                     | 24 |
| 3.2  | それぞれの veto 検出器でのエネルギー閾値一覧。(*) newBHCV では、3 層のうち 2 層以上のモジュールでヒットがあり、それぞれの層でのエネルギーが閾値を超えた場合 veto される。(**) BHPV では veto の閾値としてエネルギーの代わりに、相当する光電子 (p.e.) の数が使われている。ヒットのあったモジュールが 3 個以上の場合、veto される。(***) BHGC も veto の閾値として、エネルギーの代わりに相当する光電子の数が使われている。 | 25 |
| 4.1  | それぞれの COE 半径の領域に対するハロー $K_L$ フラックスの補正係数および誤差の一覧                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| 4.2  | $K_L \rightarrow 2\gamma$ に対して用いた運動学的カット一覧                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| 4.3  | それぞれの veto 検出器でのエネルギー閾値一覧。(*) newBHCV では、3 層のうち 2 層以上のモジュールでヒットがあり、それぞれの層でのエネルギーが閾値を超えた場合 veto される。(**) BHPV では veto の閾値としてエネルギーの代わりに、相当する光電子の数が使われている。ヒットのあったモジュールが 3 個以上の場合、veto される。(***) BHGC も veto の閾値として、エネルギーの代わりに相当する光電子の数が使われている。         | 38 |
| 4.4  | $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC に対して用いた、クラスターの形を用いたカットの一覧。                                                                                                                                                                                       | 39 |
| 4.5  | 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析において予測された背景事象の一覧 [9]。                                                                                                                                                                                                  | 45 |
| 10.1 | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルに対して新たに用いた運動学的カット一覧                                                                                                                                                                                                    | 74 |
| 10.2 | $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルに対して新たに用いた veto 検出器のエネルギー閾値一覧。                                                                                                                                                                                         | 75 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 KOTO 実験

#### 1.1.1 KOTO 実験の物理

KOTO 実験は、K 中間子の稀な崩壊である  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索している。この崩壊モードは、C 変換 (荷電共役変換) と P 変換 (パリティ変換) を組み合わせた変換に対する対称性である CP 対称性を破る。1964 年、中性 K 中間子の崩壊を観測した実験で、弱い相互作用において CP 対称性が破れていることが明らかになった [1]。CP 対称性の破れは、CKM 行列が複素数成分を持つことによって説明できる [2, 3]。しかし、CKM 行列によって説明できる CP 対称性の破れは現在の宇宙の物質優勢を説明するには小さすぎるため [4]、標準理論を越えた物理が存在するはずである。

図 1.1 に  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の標準理論でのファインマンダイアグラムの例を示す。図 1.1 から分かるように、 $d$  クォークが  $s$  クォークに変わるという、フレーバーを破る中性カレントを含んでいる。そのため、標準理論で予測される  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の分岐比は  $3.0 \times 10^{-11}$  と小さい [5]。また、分岐比の論理的誤差も 2% と小さい [5]。したがって、標準理論からの寄与が小さいこの崩壊モードは、新しい物理によって崩壊分岐比が予想と異なった場合に違いをとらえやすい [6, 7]。

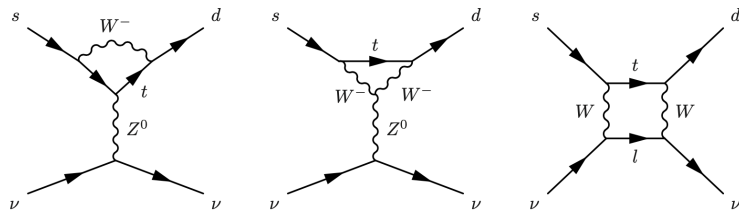


図 1.1  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  のファインマンダイアグラムの例

#### 1.1.2 実験施設の概要

KOTO 実験は茨城県那珂郡東海村にある Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) という加速器実験施設 [8] で行われている。図 1.2 に J-PARC の鳥瞰図を示す。J-PARC の加速器は

Linac, Rapid Cycling Synchrotron (RCS), Main Ring (MR) から構成されている。KOTO 実験では MR で 30 GeV まで加速された陽子を、金標的に当てて  $K_L$  を生成する。

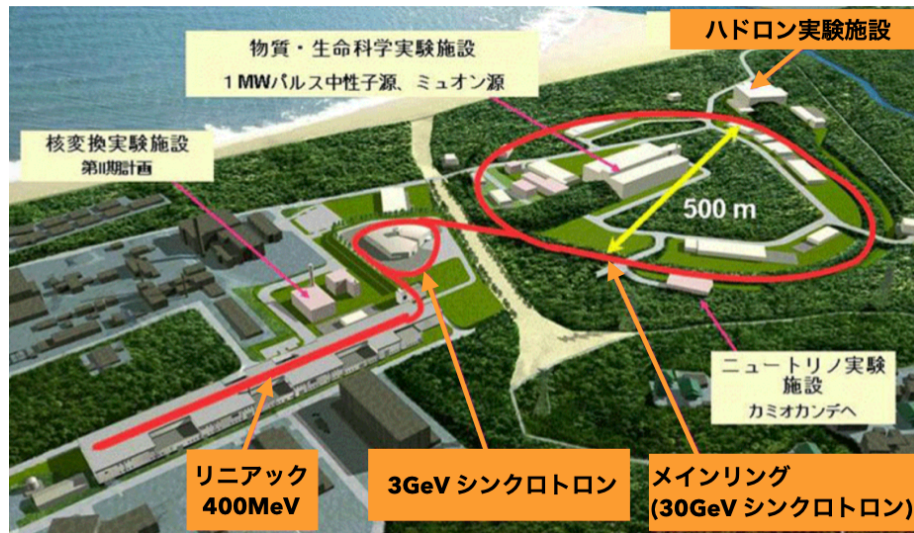


図 1.2 JPARC の鳥瞰図 [8]。

### 1.1.3 測定原理

KOTO 実験の検出器の概要を図 1.3 に示す。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の信号は、 $\pi^0$  が崩壊してできる二つの  $\gamma$  のみである。KOTO 実験の検出器は、 $\pi^0$  が崩壊してできる二つの  $\gamma$  線を検出する電磁カロリメータと、他に粒子が存在しないことを保証する veto 検出器から構成されている。

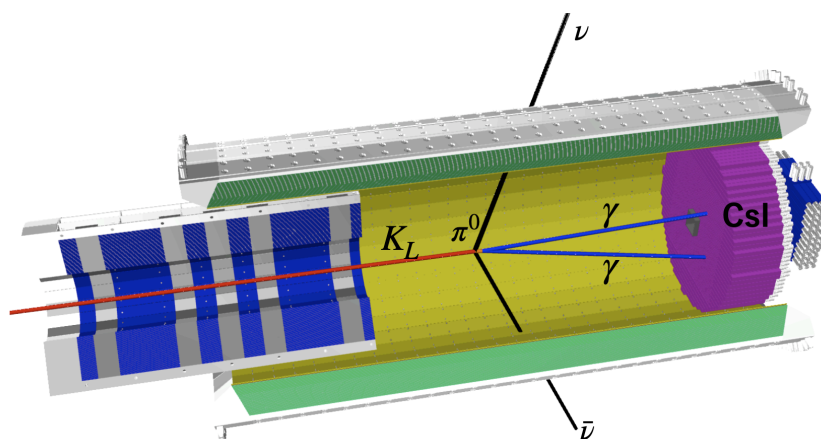


図 1.3 KOTO 実験検出器の概要図

KOTO 実験のカロリメータの断面図を図 1.4 に示す。この電磁カロリメータは、他の物質がドーブ

されていない、純粋なヨウ化セシウム (CsI) 結晶から構成されており、大きさは直径が約 1.9 m である。(以降 CsI カロリメータと呼ぶ。) 結晶には 25 mm 角の小さな結晶と、50 mm 角の大きな結晶があり、どちらも結晶の長さが 50 cm ( $27X_0$ ) である。CsI のシンチレーション光はビーム下流側に取り付けられた光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) で読み出している。検出器の詳細については 2 章で詳しく説明する。

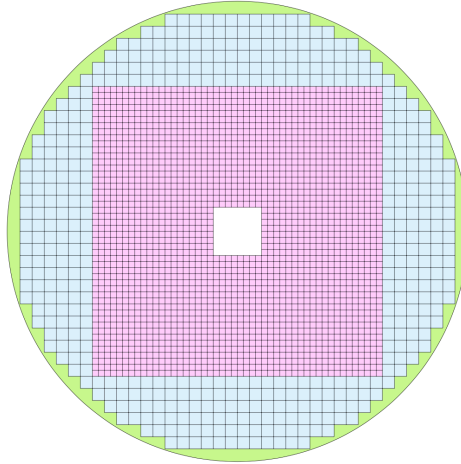


図 1.4 CsI カロリメータの断面図。赤い部分が小さな結晶、青い部分が大きな結晶を示している。

#### 1.1.4 信号の再構成

図 1.5 に KOTO 実験の信号再構成の概要を示す。座標軸はビーム軸を  $z$  軸、鉛直方向を  $y$  軸として右手系をなすように定義する。KOTO 実験では、観測した二つの  $\gamma$  線のエネルギーと位置から、ビーム軸上で  $\pi^0$  が崩壊したことを仮定し、 $\pi^0$  の不変質量を満たす崩壊  $z$  位置を再構成している。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊では、二つのニュートリノが運動量を持ち去るため、 $\pi^0$  は横方向運動量を持つ。また、検出器で覆われた領域 (崩壊領域) 内で崩壊した  $\pi^0$  の事象が重要である。したがって、信号領域を、再構成された  $\pi^0$  の横方向運動量と崩壊位置を用いて定義する。KOTO 実験では、信号領域より一回り大きな領域を blind region としている。解析中は blind region を隠して解析を行う。全てのカットを決定した後に、blind region を開け、信号領域に残った事象数から、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の崩壊分岐比もしくはその上限値を計算する。

#### 1.1.5 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析結果

KOTO 実験では、2016 年から 2018 年にかけて取得したデータに対して解析を行った [9]。図 4.13 にその結果を示す。Single Event Sensitivity (SES)<sup>\*1</sup>が  $7.2 \times 10^{-10}$  のデータに対して、信号領域で 3 事象が観測された。表 4.5 に 2016, 2017, 2018 年物理ランで信号領域に予測された背景事象数を示す。

<sup>\*1</sup> 崩壊分岐比が  $B$  である事象は、 $B/SES$  事象観測されると期待される。

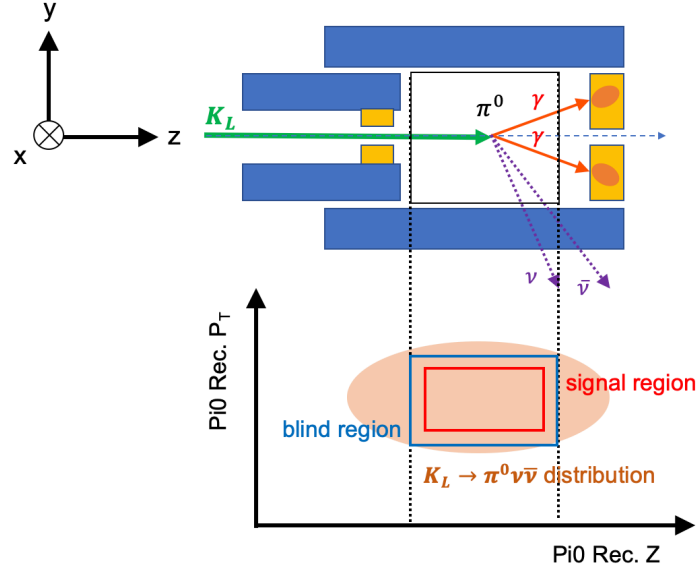


図 1.5 KOTO 実験の解析の概要。ビーム軸方向を  $z$  軸、鉛直方向を  $y$  軸とする。横方向運動量 ( $P_T$ ) と  $z$  崩壊位置 ( $Z_{\text{vtx}}$ ) を用いて信号領域を定義している。 $Z_{\text{vtx}} = 0$  mm は、2.2.2 節で述べる FB の上流端に対応する。

この表の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  (beam halo) は、ビーム中心軸からずれた飛跡を描くハロー  $K_L$  の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊を起源とする背景事象を表している。この背景事象数の  $0.26 \pm 0.07$  という値は、本研究で評価したものであり、かつ、本研究の主題の 1 つである。

表 1.1 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析において予測された背景事象の一覧 [9]。

| source  | 崩壊モード                                 | 事象数               |
|---------|---------------------------------------|-------------------|
| $K_L$   | $K_L \rightarrow 3\pi^0$              | $0.01 \pm 0.01$   |
|         | $K_L \rightarrow 2\gamma$ (beam-halo) | $0.26 \pm 0.07$   |
|         | その他の $K_L$ 崩壊                         | $0.001 \pm 0.001$ |
| $K^\pm$ |                                       | $0.87 \pm 0.25$   |
| 中性子     | ハドロンクラスター                             | $0.017 \pm 0.002$ |
|         | Upstream- $\pi^0$                     | $0.03 \pm 0.03$   |
|         | CV- $\eta$                            | $0.03 \pm 0.01$   |
| total   |                                       | $1.22 \pm 0.26$   |

留意点として、この  $K_L \rightarrow 2\gamma$  (beam halo) および  $K^\pm$  に起因する背景事象数は、2019 年 8 月に一度 blind region を開けた後で、新たに見積もられた。これは、blind region を開けるまでに見積もられていた背景事象数 (0.05) では観測された 3 事象が解釈できず、これが新物理による寄与かどうかを慎重に評価するため、背景事象数を過小評価していないか、また別の背景事象の寄与を見落としていない



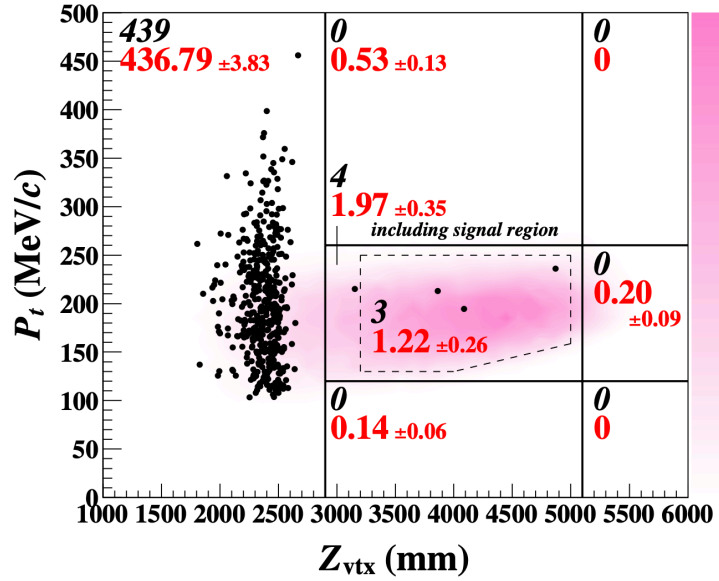


図 1.6 2016-2018 年物理ランの結果 [9]。横軸が再構成した  $\pi^0$  が崩壊した  $z$  位置、縦軸が  $\pi^0$  の横方向運動量。黒色で書かれた数字がデータで観測された事象数、赤色で描かれた数字が予測された背景事象数である。中央の黒い枠で囲まれた部分が blind region であり、点線で囲まれた領域が信号領域である。

かを評価したためである。結果として、新たに見積もられた背景事象のうちの 1 つが、これから述べる  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象である。

## 1.2 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象

### 1.2.1 背景事象となる機序

#### ビーム中の $K_L$ が $K_L \rightarrow 2\gamma$ の崩壊をした場合

図 1.7 に、ビーム中心軸に近い飛跡を描く  $K_L$  (コア  $K_L$ ) が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  の崩壊をした場合の概念図を示す。この場合、信号事象と同じく、CSI カロリメータで 2 つの光子のヒットのみが観測され、veto 検出器で何も検出されない。しかし、2 光子の運動量のバランスから、再構成された  $\pi^0$  の横方向運動量が 0 に近い値となり、信号事象の条件を満たさない。よって、コア  $K_L$  が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  の崩壊を起こしても背景事象にはならない。

#### ビーム中心から大きくずれた $K_L$ (ハロー $K_L$ ) が $K_L \rightarrow 2\gamma$ の崩壊をした場合

次に、ビーム中心から大きくずれたビームハローの  $K_L$  (ハロー  $K_L$ ) が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  の崩壊をした場合を考える。このような場合の概念図を図 1.8 に示す。まず、CSI カロリメータでは二つの光子によるヒットのみが観測され、veto 検出器では何も検出されない。さらに、ハロー  $K_L$  がもともと大きな横方向運動量を持っていることに加え、 $\pi^0$  の再構成がビーム中心軸上で崩壊したと仮定して行われること



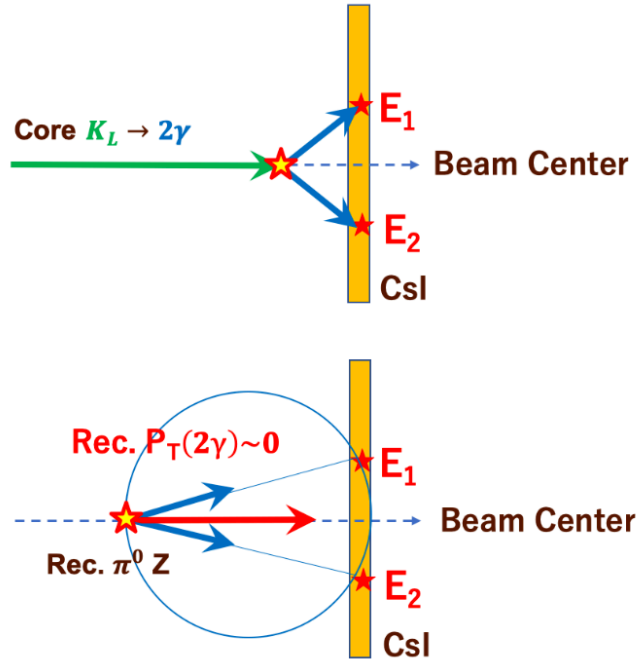


図 1.7 コア  $K_L$  が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊した場合 (上) と再構成される崩壊  $z$  位置および  $P_T$ (下) の概念図。

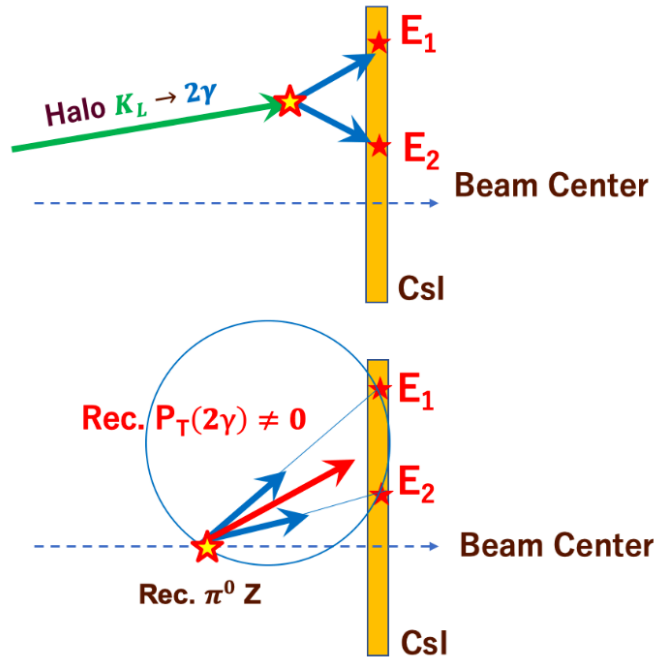


図 1.8 ハローの  $K_L$  が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊した場合 (上) と再構成される崩壊  $z$  位置および  $P_T$ (下) の概念図。

から、再構成された  $\pi^0$  の横方向運動量は大きくなる。よってこれは信号事象の条件を満たしうるため、背景事象となる。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、大きく分けて、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を評価することと、削減することの 2 つである。

まず、上で述べた 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析の結果に対してより慎重な評価を与えるため、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を新たに見積もる。これまで  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数の見積もりには、ハロー  $K_L$  による事象を見積もることに特化したモンテカルロシミュレーション (MC) を用いていた。この MC は、コア  $K_L$  の事象に対して用いてきた MC と違いデータによる補正がまだされていないため、ハロー  $K_L$  のフラックスを再現できていない可能性がある。そこで本研究では、実際のデータで測定したハロー  $K_L$  のフラックスを用いてこの MC を補正し、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を新たに評価する。

次に、今後のデータ解析において  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減するため、新たな事象選択 (カット) を開発する。まず、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の削減可能性があるかを検討するために、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の間でのクラスターの形の違いや運動学的変数の違いについて調べる。また、どのような変数に違いがあるかを調べることにより、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  の運動学的特徴についての知見を得る。それらの知見を生かし、クラスターの形の違いを用いたカットと運動学的変数の違いを用いたカットを新たに開発する。また、それぞれのカットが持つ  $K_L \rightarrow 2\gamma$  削減能力およびデータでの再現性を評価する。さらに、それぞれのカットの間の相関について調べ、2 つのカットを組み合わせた時の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数削減能力を評価する。最終的に、SES が  $3 \times 10^{-11}$  の場合に予想される  $K_L \rightarrow 2\gamma$  を評価し、新たに開発したカットによる  $K_L \rightarrow 2\gamma$  削減能力が十分かを評価する。

論文の構成は以下の通りである。

2 章 KOTO 実験の検出器について述べる。

3 章 ハロー  $K_L$  の定義や測定方法について述べ、ハロー  $K_L$  フラックスの測定を行う。

4 章 ハロー  $K_L$  フラックスを用いて MC を補正し  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を見積もる。

5 章 信号事象とハロー  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の違いについて調べ、削減可能性を検討する。

6 章 クラスターの形の違いを用いた新たなカットを開発する。

7 章 運動学的変数の違いを用いた新たなカットを開発する。

8 章 2 つのカットを組み合わせたときの  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を見積もる。

9 章 SES が  $3 \times 10^{-11}$  の場合に予想される  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を見積もる。

10 章 上記の結果に基づいて考察を行う。

11 章 本研究の結論を述べる。

## 第 2 章

# KOTO 実験

本研究では、KOTO 実験において取得したデータを用いて解析を行った。本章では、KOTO 実験の実験環境と測定器について述べる。

## 2.1 ビームライン

KOTO 実験のビームラインを図 2.1 に示す。MR で 30 GeV まで加速された陽子を金でできた標的 (“T1 Target”) へ衝突させて、 $K_L$  を生成する。元の陽子ビームラインから 16 度の方向に長さ 20 m の  $K_L$  ビームラインを設置している。

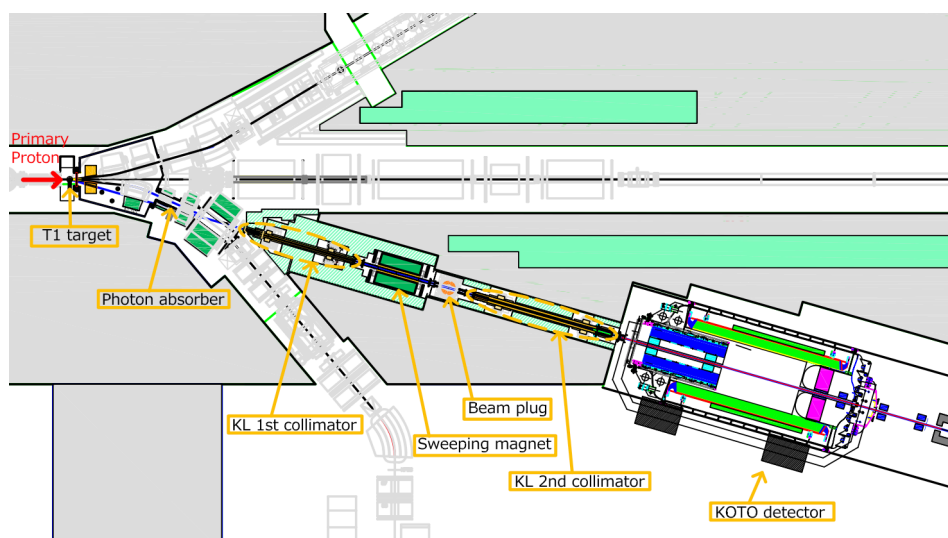


図 2.1 KOTO 実験のビームライン概略図

$K_L$  ビーム中に含まれる  $K_L$  以外の粒子を削減するために、検出器の上流側にいくつかの装置が設置されている。まず、ビーム中の  $\gamma$  線を削減するために、厚さ 7 cm の鉛を photon absorber として設置している。また、ビーム中の荷電粒子を削減するために、1.2 T の磁石 (sweeping magnet) を設置している。さらに、細いビームを生成するため、 $K_L$  コリメータを標的の下流に設置している。ビームライン

を構成するビームライン構造物と  $K_L$  の散乱については、詳しくは 3 章で述べる。

## 2.2 検出器

KOTO 実験の検出器の概要を図 2.2 に示す。KOTO 実験の検出器は、 $\pi^0$  の崩壊で生成される 2 つの  $\gamma$  線を測定する CSI カロリメータと、他に粒子がないことを保証する veto 検出器から構成される。

ビーム中に含まれる中性子と残存ガスが相互作用した場合、 $\pi^0$  を生成して背景事象になりうるため、 $K_L$  の崩壊領域 (decay volume) を真空に保つ必要がある。また、ビームパイプで崩壊領域と検出器を仕切る場合、崩壊でできた  $\gamma$  線などとビームパイプが相互作用し、veto 検出器で測定できない事象がある。そのため、KOTO 実験ではビームと検出器の間に構造物を設置せず、崩壊領域を含む検出器全体を真空タンクの中に設置している。検出器に含まれる物質からのアウトガスの影響を抑えるため、崩壊領域と検出器の設置領域はメンブレンと呼ばれるフィルムで仕切られている。崩壊領域の圧力は  $10^{-5}$  Pa 程度で、検出器が設置されている領域の圧力は 0.1 Pa 程度である。

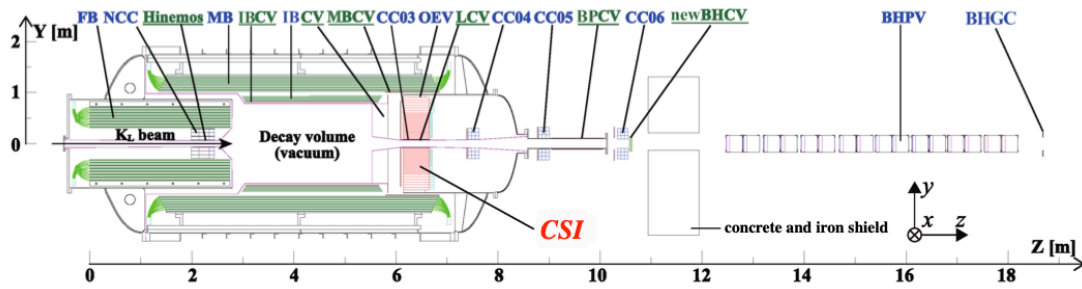


図 2.2 KOTO 実験の検出器

### 2.2.1 CsI カロリメータ

図 2.3 に CsI カロリメータの断面図を示す。CsI カロリメータは、ドーピングされていない純粋な CsI 結晶 2716 本から構成される、直径 1.9 m のシンチレーション検出器である [10]。CsI 結晶 2716 本そのうち 2240 本は 2.5 cm 角の小さな結晶で、476 本は 5 cm 角の大きな結晶である。どちらの大きさの結晶も、z 軸方向に 50 cm ( $27X_0$ ) の長さである。それぞれの結晶は光量を増やすため、また隣接するの結晶への光の漏れを防ぐために、アルミ蒸着したフィルム (アルミナイズドマイラー) で包んでいる。ビームが通り抜けられるように、中心の 15 cm 角の領域をビームホールとして空けている。

各結晶から放出されたシンチレーション光を、下流側に取り付けられた PMT で読み出している。CsI カロリメータのエネルギー分解能は、 $\sigma_E/E = (0.99 \oplus 1.74/\sqrt{E})\%$  である [10]。ここで  $\oplus$  は平方和を示し、 $E$  は入射電子のエネルギー (GeV) である。

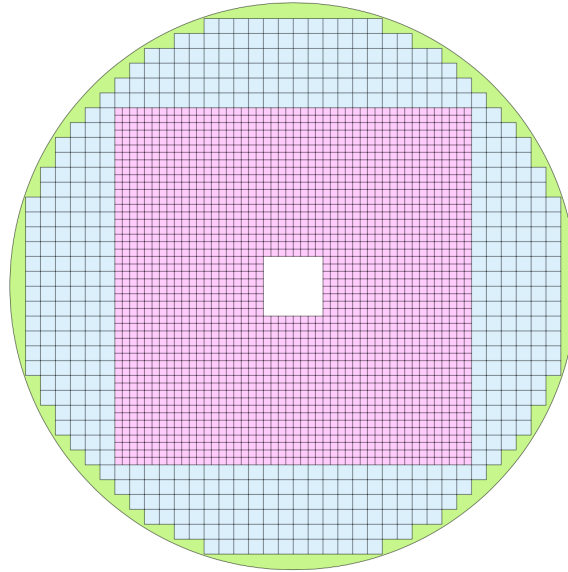


図 2.3 CsI カロリメータの断面図。赤い部分が small 結晶、青い部分が large 結晶で構成されている。緑の部分は Outer Edge Veto (OEV) と呼ばれる veto 検出器である。

## 2.2.2 Veto 検出器

veto 検出器は  $\pi^0$  の崩壊でできる  $2\gamma$  以外の粒子が存在しないことを保証する。veto 検出器は上流ビーム方向を除き崩壊領域の立体角を囲む。veto 検出器には大きく分けて Barrel veto 検出器、Collar Counter、Outer Edge veto 検出器、荷電粒子 veto 検出器、ビームホール veto 検出器がある。

### Barrel Veto 検出器

$\gamma$  線を veto するための、円筒形の veto 検出器である。上流部に Front Barrel (FB)、中流部に Main Barrel (MB) と Inner Barrel (IB)[11] と呼ばれる検出器がある。FB の目的は、崩壊領域よりも上流側で崩壊した  $K_L$  由来の  $\gamma$  線、もしくは崩壊領域で崩壊し上流側に飛んだ  $\gamma$  線を捉えることである。それぞれの検出器群はプラスチックシンチレータと鉛の積層構造でできたサンプリングカロリメータである。半径方向の厚さは FB が  $16.5 X_0$ 、MB が  $14.0 X_0$ 、IB が  $5 X_0$  である。シンチレーション光はシンチレータに埋め込まれた波長変換ファイバーから読み出されている。

### Collar Counter

Collar Counter はビーム中心付近にある検出器である。それぞれ Neutron Collar Counter (NCC)、Collar Counter 3,4,5,6 (CC03, CC04, CC05, CC06) である。NCC の目的は、崩壊領域よりも上流側で崩壊してできた  $\gamma$  線を捉えることである。CC03 の目的は、CsI カロリメータのビームホールの付近やビームホールの内側から入射する  $\gamma$  線を捉えることで、CC04, CC05, CC06 の目的はビームホール

を抜ける  $\gamma$  線を捉えることである。これらの検出器は、ドーブされていない純粋な CsI 結晶から構成されており、結晶からのシンチレーション光を PMT で読み出す。NCC では、シンチレーション光を波長変換ファイバーを用いて読み出す。

#### Outer Edge Veto 検出器 [12]

CsI カロリメータの結晶は、円筒形の構造体中にある。構造体と CsI 結晶の隙間は鉛とプラスチックシンチレータの積層でできたモジュールで埋めている。この検出器を Outer Edge Veto (OEV) と呼ぶ (図 2.3 の緑色の部分)。CsI 結晶からのシンチレーション光は、シンチレータに埋め込まれた波長変換ファイバーによって読み出している。

#### 荷電粒子 Veto 検出器

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊では荷電粒子が生成されないが、他の崩壊モードは荷電粒子を含むものが多く存在する。そのため、荷電粒子を veto する必要がある、複数の荷電粒子 veto 検出器がある。

- Main Barrel Charged Veto (MBCV), Inner Barrel Charged Veto (IBCV): それぞれ Barrel veto 検出器の内側に設置している。
- Hinemos: NCC の内側にある。
- Charged Veto (CV)[13]: CsI カロリメータのすぐ上流にある。
- Linear Charged Veto (LCV): CC03 のすぐ内側にある。
- Downstream Charged Veto (DCV): ビーム下流側にある。
- CC04, CC05, CC06 Scintillator: それぞれ CC04, CC05, CC06 のすぐ上流にある。

それぞれ、プラスチックシンチレータで構成されており、シンチレーション光はシンチレータに埋め込まれた波長変換ファイバー、もしくはライトガイドから読み出している。

#### ビームホール Veto 検出器

ビームホールを抜ける荷電粒子を検出するため、new Beam Hole Charged Veto (newBHCV) がある。またビームホールを抜ける  $\gamma$  線を検出するため、Beam Hole Photon Veto (BHPV) と Beam Hole Guard Counter (BHGC) がある。

newBHCV には三層の multi wire proportional chamber (MWPC) であり、荷電粒子に感度がある。

BHPV は鉛とエアロジェルから構成される。鉛によってはビーム中の光子が電子・陽電子を対生成する。それらの電子・陽電子がエアロゲル中を通った時に出すチェレンコフ光を観測する。

BHGC は鉛とアクリル板からなる。下流部では BHPV の外側にはみ出すようなビーム外縁部の光子を veto できる。

## 2.3 データ取得

CsI カロリメータ、veto 検出器ともに Analog-to-Digital Converter (ADC) で波形を取得し、時間やエネルギーを計算している。KOTO 実験では、サンプリング周波数が 125 MHz の ADC と 500 MHz の ADC を使用している [14]。IB, newBHCV, BHPV, BHGC は検出器のヒットレートが

高いため、500 MHz の ADC を使って読み出している。それ以外の検出器では、125 MHz の ADC を使って読み出している。

検出器からの生の波形を 125 MHz の ADC で取得すると、波形幅が短いため波形の立ち上がり部分のデータを複数点取得できず、時間分解能が悪化するという問題があった。この問題を解決するため、ADC モジュールにベッセルフィルターを用いて波形を鈍らせ、立ち上がり部分のデータ点を増やすことで、時間分解能を失わないようにしている。図 2.4 にベッセルフィルターによる波形変化を示す [15]。通過前後で立ち上がり部分がおおよそ 20 ns から 60 ns に変化している。500 MHz の ADC ではベッセルフィルターを用いていない。

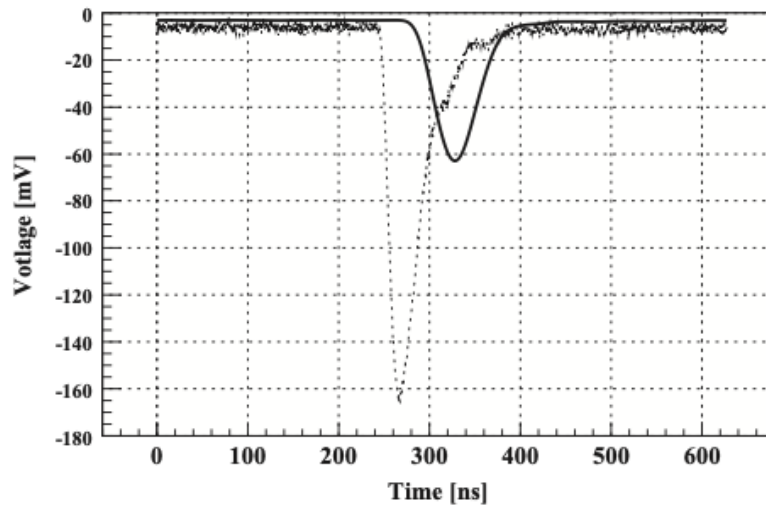


図 2.4 ベッセルフィルターによる波形変化 [15]。点線がベッセルフィルター通過前の波形、実践がフィルター通過後の波形を示す。シミュレーションによる結果を表している。

## 2.4 ランとトリガー

以下では、本研究に用いた物理ランについて述べる。

### 2.4.1 物理ラン

物理ランは  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊や  $K_L$  のその他の崩壊モードのデータを取得するためのランである。本研究では、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルとして、物理ランで取得したデータを用いた。データ取得には複数のトリガーを用いているが、ここでは代表的なトリガーのみ言及する。

### 2.4.2 Physics Trigger

Physics Trigger は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を探索するためのトリガーである。CsI カロリメータで一定以上のエネルギー損失が観測された時にトリガーが発行される。効率的にデータを取得するために、トリガー

回路で veto をかけている。この veto では、CV, NCC, CC03, CC04, CC05, CC06, MB, IB を用いている。また  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  では、 $\pi^0$  の崩壊で二つの  $\gamma$  線ができる。そのため、トリガー回路で計算された CsI カロリメータでのクラスター数が2個の事象を選択している。

### 2.4.3 Normalization Trigger

Normalization Trigger のトリガー発行条件、トリガー回路の veto は Physics Trigger と同じである。クラスター数の条件がないため、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$ ,  $K_L \rightarrow 2\pi^0$ ,  $K_L \rightarrow 2\gamma$  のサンプルを取得できる。このトリガーで取得したデータは、データ中に金標的に生成された  $K_L$  の数の見積もりや、背景事象数の見積もりに用いる。



## 第 3 章

# ハロー $K_L$ フラックスの測定

1.2.1 節で述べた通り、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象は、ビーム中心から大きくずれたビームハローの  $K_L$  による寄与が独占的である。そのため、このハロー  $K_L$  のフラックスを正確に理解することが重要となる。本章では、ハロー  $K_L$  の生成過程およびハロー  $K_L$  フラックスの測定方法と測定結果について述べる。

## 3.1 ハロー $K_L$

### 3.1.1 ハロー $K_L$ の生成過程

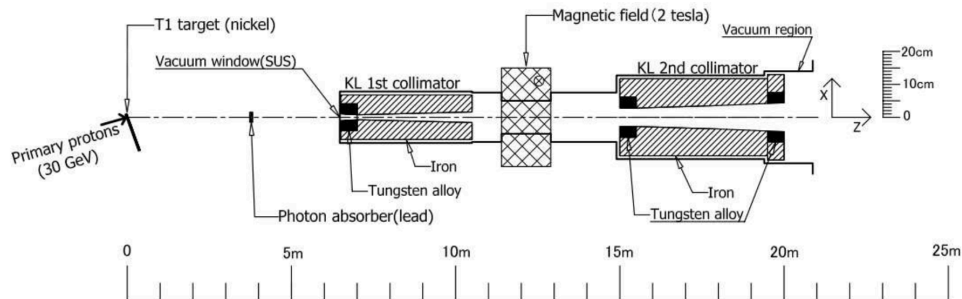


図 3.1 KOTO 実験におけるビームラインの、 $x-z$  平面の断面図 [16]

2.1 節で述べたように、KOTO 実験で用いている  $K_L$  ビームラインには、金標的で  $K_L$  が生成されてから KOTO 検出器に到達するまでに、ビームラインを構成する構造物が存在する。図 3.1 に  $K_L$  ビームラインの断面図を示す。これらのビームライン構造物で  $K_L$  が散乱すると、 $K_L$  はビーム中心軸からずれた飛跡を描く。このずれが特に大きく、中心軸上から 200 mm 以上離れて CsI カロリメータへ向かって飛ぶような  $K_L$  を、ハロー  $K_L$  と定義する。ここで 200 mm 以上と定めた理由は 3.2.2 節で述べる。

ハロー  $K_L$  の生成を抑制するために、ビームライン構造物は、 $K_L$  が 1 回散乱しただけでは、ビーム軸から 200 mm 以上離れるようなハロー  $K_L$  とならないように設計されている。図 3.2 に金標的から CsI カロリメータまでのビームライン構造物の X-Z 面および Y-Z 面の概略図を示す [16]。まず、

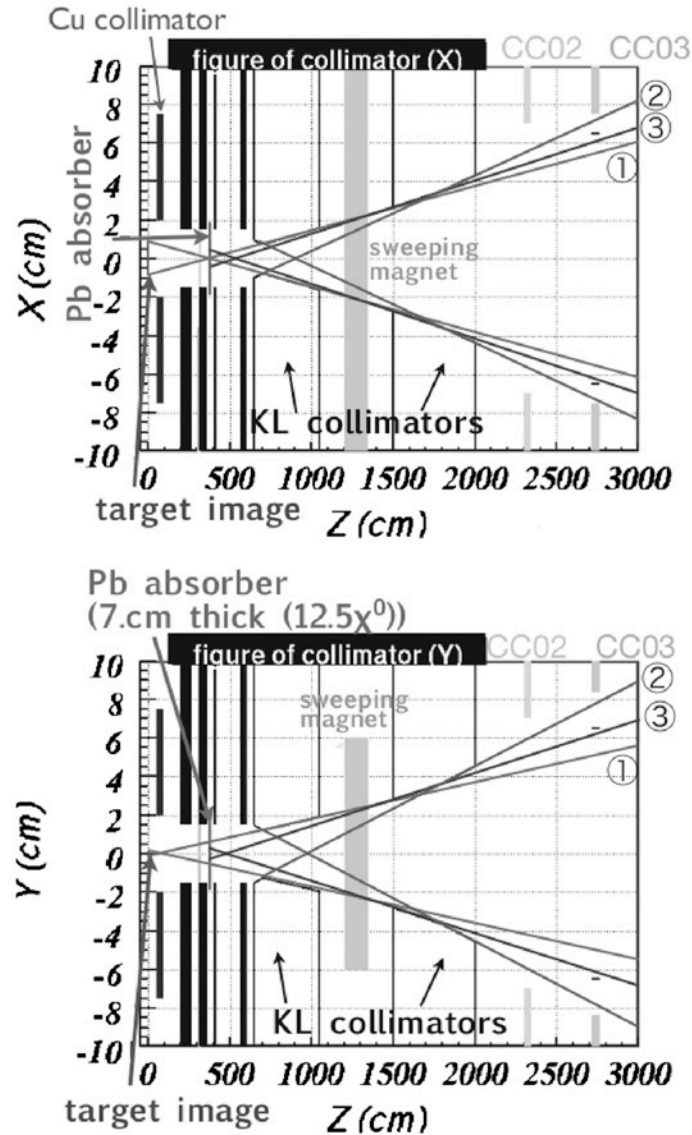
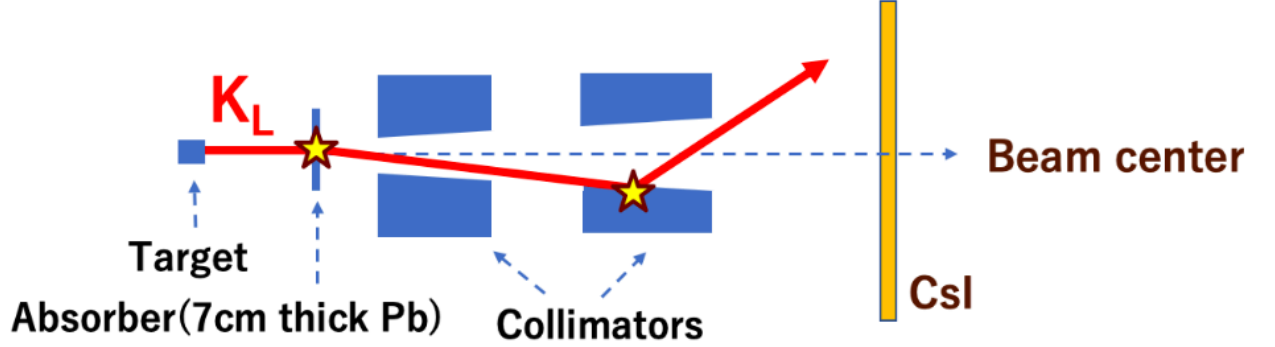


図 3.2 KOTO 実験におけるビームラインの X-Z 面および Y-Z 面の概要図 [16]。①、②、③はそれぞれ、散乱しなかった場合、コリメータで 1 回散乱した場合、アブゾーバで 1 回散乱した場合に  $K_L$  がとりうる、もっともビーム中心軸から離れた飛跡を示している。

$K_L$  とビームライン構造物が 1 回だけ散乱を起こす場合を考える。もっともビーム中心軸から離れた飛跡を描くのは、 $K_L$  が 1 次コリメータと散乱する②の場合だが、この場合でも CsI カロリメータに到達した段階でビーム中心から 200 mm 以上離れるようなハロー  $K_L$  が生じることはない。

しかし、ビームライン構造物と  $K_L$  が複数回散乱した場合には、ハロー  $K_L$  となる可能性がある。図 3.3 に、 $K_L$  がビームライン構造物と複数回散乱した場合の概念図を示す。1 回目の散乱ののち、より大きな角度で 2 回目の散乱を起こした場合には、ビーム中心軸から 200 mm 以上離れるようなハロー  $K_L$  が生じうる。

図 3.3  $K_L$  がビームライン構造物と複数回散乱した場合の概念図

$K_L$  がビームライン構造物と複数回散乱することは稀であるため、ハロー  $K_L$  のフラックスは、ビーム中の  $K_L$  のフラックスに比べて非常に小さい。しかし、わずかなハロー  $K_L$  のフラックスが  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象へ大きく影響する。したがって、ハロー  $K_L$  のフラックスを正確に測定する必要がある。

## 3.2 ハロー $K_L$ フラックスの測定方法

$K_L$  は中性のハドロンであるため、荷電粒子検出器や CsI カロリメータを用いて直接検出することは困難である。しかし、ハロー  $K_L$  が崩壊して生じる光子などの娘粒子は、CsI カロリメータで容易に検出できる。したがって、ハロー  $K_L$  に起因する崩壊を再構成して、間接的にハロー  $K_L$  のフラックスを測定できる。

本研究では、ハロー  $K_L$  フラックスの測定に  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  という崩壊モードを用いた。 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  は終状態が6個の  $\gamma$  線であるため、CsI カロリメータで6個のクラスターを要求した。クラスターが6個できる事象は他にないため、他の崩壊による混入が比較的少なく、純度の高い事象を集めることができる。さらに、崩壊分岐比が19.5%と大きいため、多くの事象を集めることができる。

また、ハロー  $K_L$  のフラックスを測定するには、着目している  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊に起因する  $K_L$  がビーム中心軸からどれだけ離れて飛来したかを知る必要がある。本研究では、次に述べる COE (Center Of Energy, エネルギー重心) と呼ばれる KOTO 実験独自の変数を用いて  $K_L$  の飛来位置を再構成している。

### 3.2.1 COE の定義

COE (Center of Energy, エネルギー重心) を以下のように定義する。

$$X_{COE} = \frac{\sum_i^N x_i E_i}{\sum_i^N E_i} \quad (3.1)$$

$$Y_{COE} = \frac{\sum_i^N y_i E_i}{\sum_i^N E_i} \quad (3.2)$$

ここで、 $x_i$ 、 $y_i$ 、 $E_i$  はそれぞれ CsI カロリメータで測定された  $i$  番目のクラスターのヒット位置およびエネルギーである。COE は、それぞれの光子のエネルギーで重み付けされた CsI カロリメータ上の重心座標を表す。 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊の場合には、COE は、 $K_L$  が崩壊しなかった場合に CsI カロリメータ上に到達する位置と近似できる。以下、この近似について詳しく述べる。

#### COE と $K_L$ の到達点との近似

- $\mathbf{P}_T^{K_L} = \mathbf{0}$

まず、 $K_L$  の横方向運動量  $\mathbf{P}_T^{K_L}$  が  $\mathbf{0}$  の場合を考える。運動量のバランスから、 $i$  番目の光子の横方向運動量  $\mathbf{P}_{T_i}$  は以下のように表せる。

$$\sum \mathbf{P}_{T_i} = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

$$\sum E_i \frac{(\mathbf{r}_i^{xy} - \mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy})}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|} = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

$$\sum \frac{E_i \mathbf{r}_i^{xy}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|} - \sum \frac{E_i \mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|} = \mathbf{0} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy} = \frac{\sum w_i \mathbf{r}_i^{xy}}{\sum w_i}, w_i \equiv \frac{E_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|} \quad (3.6)$$

ここで、 $E_i$  は  $i$  番目の光子のエネルギー、 $\mathbf{r}_i^{xy}$ 、 $\mathbf{r}_i$  は  $i$  番目の光子のヒットの  $(x, y)$  位置および  $(x, y, z)$  位置、 $\mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy}$ 、 $\mathbf{r}_{\text{vtx}}$  は  $K_L$  の崩壊点の  $(x, y)$  位置および  $(x, y, z)$  位置を表す。

もし  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|$  が全ての光子で等しく  $L$  とみなせれば、以下の近似ができる。

$$\sum w_i \rightarrow \frac{1}{L} \sum E_i \quad (3.7)$$

したがって、 $K_L$  の崩壊  $(x, y)$  位置と、COE の  $(x, y)$  位置  $\mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy}$  が等しくなる。

$$\mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy} = \frac{\sum E_i \mathbf{r}_i^{xy}}{\sum E_i} \equiv \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy} \quad (3.8)$$

$K_L$  の飛跡を CsI カロリメータ表面まで外挿した座標  $\mathbf{r}_{\text{CsI}}^{xy}$  は、CsI カロリメータおよび  $K_L$  の崩壊位置の  $z$  座標  $Z_{\text{CsI}}$ 、 $Z_{\text{vtx}}$  を用いて以下のように表せ、 $\mathbf{P}_T^{K_L} = \mathbf{0}$  の場合は COE と等しくなる。

$$\mathbf{r}_{\text{CsI}}^{xy} = \mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy} + \frac{\mathbf{P}_T^{K_L}}{P_z^{K_L}} (Z_{\text{CsI}} - Z_{\text{vtx}}) = \mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy} = \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy}. \quad (3.9)$$

- $\mathbf{P}_T^{K_L} \neq \mathbf{0}$

$K_L$  が横方向運動量  $\mathbf{P}_T^{K_L}$  を持つ場合には、以下のように表せる。

$$\sum \mathbf{P}_{T_i} = \mathbf{P}_T^{K_L} \quad (3.10)$$

$$\sum E_i \frac{(\mathbf{r}_i^{xy} - \mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy})}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|} = \mathbf{P}_T^{K_L} \quad (3.11)$$

$$(\sum w_i \mathbf{r}_i^{xy}) - (\sum w_i \mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy}) = \mathbf{P}_T^{K_L} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy} = \frac{(\sum w_i \mathbf{r}_i^{xy}) - \mathbf{P}_T^{K_L}}{\sum w_i} = \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy} - \frac{\mathbf{P}_T^{K_L}}{\sum w_i} \quad (3.13)$$

$$(w_i \equiv \frac{E_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|}) \quad (3.14)$$

もし  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{vtx}}|$  が全ての光子で等しく  $L$  とみなせれば、式 3.7 の近似によって、

$$\mathbf{r}_{\text{vtx}}^{xy} = \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy} - \frac{\mathbf{P}_T^{K_L}}{E_{K_L}} L \quad (3.15)$$

$$\mathbf{r}_{\text{CsI}}^{xy} = \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy} - \frac{\mathbf{P}_T^{K_L}}{E_{K_L}} L + \frac{\mathbf{P}_T^{K_L}}{P_z^{K_L}} (Z_{\text{CsI}} - Z_{\text{vtx}}) \quad (3.16)$$

となる。ここで、 $E_{K_L}$  は  $K_L$  の全エネルギー、 $P_z^{K_L}$  は  $K_L$  の運動量の  $z$  成分である。 $P_z^{K_L}$  が  $|\mathbf{P}_T^{K_L}|$  に比べて十分大きい場合、 $P_z^{K_L} \sim E_{K_L}$  より、

$$\mathbf{r}_{\text{CsI}}^{xy} = \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy} - \frac{\mathbf{P}_T^{K_L}}{E_{K_L}} (L - (Z_{\text{CsI}} - Z_{\text{vtx}})) \quad (3.17)$$

が得られる。ここで、 $L$  と  $(Z_{\text{CsI}} - Z_{\text{vtx}})$  の差が十分小さければ以下のように表せ、 $K_L$  の飛跡を CsI カロリメータ表面に外挿した  $(x, y)$  位置は COE の  $(x, y)$  位置と等しいと近似できる。

$$\mathbf{r}_{\text{CsI}}^{xy} = \mathbf{r}_{\text{COE}}^{xy}. \quad (3.18)$$

### 3.2.2 COE 半径とハロー $K_L$ との関係およびハロー $K_L$ フラックスの測定方法

COE とビーム中心軸との距離 COE 半径  $r_{\text{COE}}$  を以下の式で定義する。

$$r_{\text{COE}} = \sqrt{X_{\text{COE}}^2 + Y_{\text{COE}}^2} \quad (3.19)$$

例えば、COE 半径が大きい場合には、その崩壊はビーム中心軸から大きく離れた  $K_L$  に起因しているとみなせる。このように、ハロー  $K_L$  に起因する  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊を再構成することによって、ハロー  $K_L$  のフラックスを測定できる。再構成の方法については、3.3.3 節以降で詳しく述べる。

また、信号事象ではニュートリノが運動量を持ち去ることで COE 半径が大きくなるため、信号条件には COE 半径が 200 mm 以上であることを要求する。したがって、背景事象となりうるのは COE 半径が 200 mm 以上の事象のみである。以上の理由から、中心軸上から 200 mm 以上離れて CsI カロリメータへ向かって飛ぶ  $K_L$  をハロー  $K_L$  と定義した。

### 3.2.3 COE 半径のハロー $K_L$ 指標としての妥当性

本研究では COE を CsI カロリメータ上における  $K_L$  の到達点として用いているが、これは近似によって成り立つ関係である。よって、妥当性を確認することが必要である。

図 3.4 に、3.3.2 節で述べる MC で生成したハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルでの、 $K_L$  の CsI カロリメータ上へ外挿した点のビーム軸からの距離 (True Hit R) と、COE 半径との相関を示す。 $K_L$  の CsI カロリメータ上の True Hit R と COE 半径との間に大きな乖離がないことがわかる。

この結果から、COE 半径はハロー  $K_L$  の指標として妥当と判断し、COE 半径を用いてハロー  $K_L$  フラックスの測定を行った。

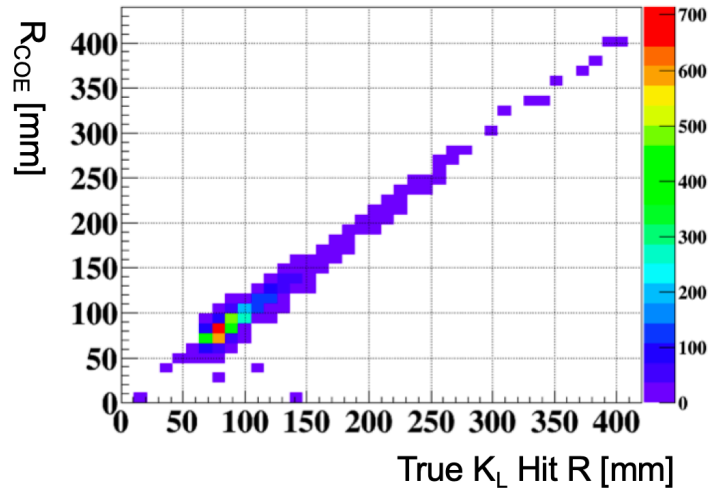


図 3.4 3.3.2 節で述べる MC で生成したハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルにおける、COE 半径と  $K_L$  の CsI カロリメータ上の真の到達位置の相関。

## 3.3 ハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプル

### 3.3.1 データ取得

2.4.1 節で述べた、物理ランのデータを用いた。

### 3.3.2 MC サンプルの生成

ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  の MC サンプルは、Geant3 [17] によるビームラインシミュレーションを用いて生成した。まず、陽子を金標的に衝突させて  $K_L$  を生成した。生成した  $K_L$  がビームラインを通過して KOTO 検出器の上流端 ( $z = 0$  mm) に到達するまでを  $1.2 \times 10^9$  事象分シミュレーションし、その地点より下流側のシミュレーションをする際の入力となる  $K_L$  の位置と運動量の情報を作成した。この  $K_L$

の位置と運動量の情報を再利用することで、崩壊領域での事象を効率的にシミュレーションできる。

また、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  の MC サンプルを効率的に生成するために、 $K_L$  の位置と運動量の情報にカットをかけ、ハロー  $K_L$  だけを選択した。図 3.5 に、 $K_L$  の位置と運動量の情報から外挿した CsI カロリメータ上  $x, y$  座標の分布を示す。この  $x, y$  座標が、図に示す 70 mm 角の赤い四角形の領域の外側であることを要求した。このカットによって、 $1.2 \times 10^9$  個の  $K_L$  の位置と運動量の情報から  $2.1 \times 10^5$  個のハロー  $K_L$  だけを選択できる。選択した  $K_L$  に対して崩壊分岐比 100% で  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊をさせ、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  の MC サンプルを生成した。

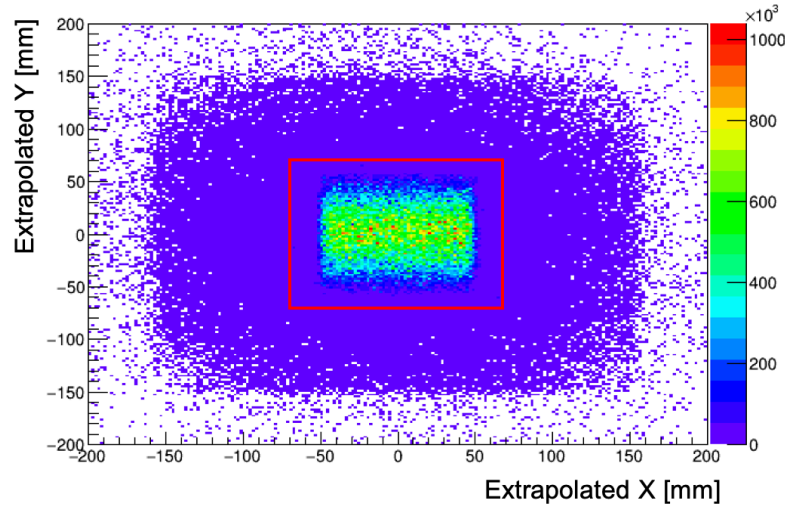


図 3.5 MC の生成に用いた  $K_L$  の位置と運動量の情報において、初期位置および運動量から CsI カロリメータ表面へ外挿したときの  $x, y$  分布。赤い四角形で示した中央の 70 mm 角の領域の外側の事象だけを選択し、ハロー  $K_L$  による事象を効率的に生成した。

### 3.3.3 クラスターの再構成

CsI カロリメータにおけるクラスターとは、エネルギーが落ちた CsI 結晶のまとまりである。1つの入射粒子が作ったシャワーによってクラスターができると考え、クラスター単位での解析を行う。クラスターの再構成は以下のように行う。

図 3.6 に、クラスター再構成の概要を示す。はじめに、3 MeV 以上のエネルギーが落ちた結晶をクラスターシードとする。それぞれのクラスターシードの中心から、半径 70 mm 以内にあるクラスターシードをまとめて、クラスターとする。2つ以上の結晶からできたクラスターをこの後の  $\pi^0$  再構成に用いる。1つの結晶からできたクラスターは、isolated hit crystal と呼ばれる。isolated hit crystal はこの後の  $\pi^0$  再構成には用いないが、veto の条件として用いる。それぞれのクラスターのエネルギー

( $E_{\text{clus}}$ )、場所 ( $x_{\text{clus}}, y_{\text{clus}}$ )、時間 ( $t_{\text{clus}}$ ) を以下のように定義する<sup>\*1</sup>

$$E_{\text{clus}} = \sum_i^n E_i \quad (3.20)$$

$$x_{\text{clus}} = \frac{\sum_i^n x_i E_i}{\sum_i^n E_i} \quad (3.21)$$

$$y_{\text{clus}} = \frac{\sum_i^n y_i E_i}{\sum_i^n E_i} \quad (3.22)$$

$$t_{\text{clus}} = \frac{\sum_i^n t_i / \sigma_i^2}{\sum_i^n 1 / \sigma_i^2} \quad (3.23)$$

$\sum_i^n$  でクラスターに属する全ての結晶に対する和を計算している。 $x_i, y_i$  は  $i$  番目の結晶の位置、 $E_i, t_i$  は結晶に落とされたエネルギーと、エネルギーが落とされた時間である。 $\sigma_t$  は過去に測定された結晶の時間分解能であり、次のように表される [10]。

$$\sigma_t[\text{ns}] = \frac{5}{E} + \frac{3.63}{\sqrt{E}} + 0.11(E : \text{MeV}) \quad (3.24)$$

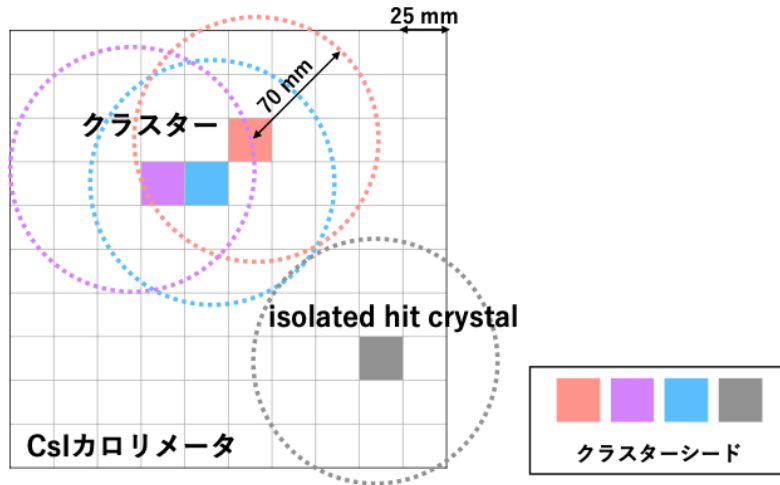


図 3.6 クラスター再構成の概要図。色がついた結晶がクラスターシードである。それぞれのクラスターから 70 mm 以内にあるクラスターシードをまとめ、クラスターとする。灰色で示したのが isolated hit crystal である。

### 3.3.4 $\pi^0$ の再構成

6 個のクラスターを用いて 3 つの  $\pi^0$  を再構成する。この場合、再構成するクラスターの組み合わせが 15 通り存在するが、全ての組み合わせに対して  $\pi^0$  の再構成を行う。正しい組み方を選ぶための手法

<sup>\*1</sup> 正確には  $\pi^0$  もしくは  $K_L$  の再構成後に、再構成された崩壊位置を用いて  $\gamma$  線の入射角度を計算し、クラスターのエネルギーを補正している。また、 $\gamma$  線の入射位置も計算している。詳細は [18] に記述されている。



は後述する。この説では、2つのクラスターから1つの  $\pi^0$  を再構成し、 $\pi^0$  の崩壊位置と崩壊時間に至るまでを述べる。図 3.7 に  $\pi^0$  の再構成の概要を示す。

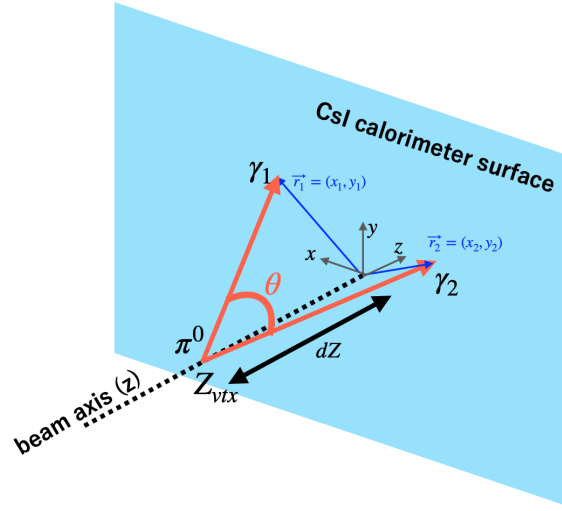


図 3.7  $\pi^0$  再構成の概要図

#### 崩壊位置

2つのクラスターを用いて、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  崩壊がビーム軸上で起きたと仮定し、 $\pi^0$  を再構成する。 $\pi^0$  と  $\gamma$  の四元運動量保存 (式 3.25) により、以下のように式 3.26 が成り立つ。

$$M_{\pi^0}^2 = (E_1 + E_2)^2 \quad (3.25)$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1 E_2} \quad (3.26)$$

ここで、 $M_{\pi^0}$  は  $\pi^0$  の質量、 $E_1$ 、 $E_2$  はそれぞれのクラスターのエネルギー、 $\theta$  は2つの  $\gamma$  線の方がなす角度である。

また、 $\pi^0$  の崩壊が  $z$  軸上で起きたと仮定して、崩壊  $z$  座標 ( $Z_{\text{vtx}}$ ) を再構成する。

#### 横方向運動量

$\pi^0$  の横方向運動量 ( $P_T$ ) は、 $i$  番目のクラスターの座標  $\vec{r}_i$  および  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標と CsI カロリメータの  $z$  座標の差  $dZ$  から、次のように求める。

$$P_T = \left| \sum_i^2 \frac{E_i \vec{r}_i}{\sqrt{r_i^2 + dZ^2}} \right| \quad (3.27)$$

### 崩壊時間

$\pi^0$  の崩壊時間は、 $\gamma$  が検出された時間から、 $\gamma$  の Time of Flight (TOF) を差し引いて求められる。それぞれのクラスターについて崩壊時間 ( $t_{\text{vtx}}$ ) は以下のように計算する。

$$t_{\text{vtx}}^i = t_i - \frac{\sqrt{r_i^2 + dZ^2}}{2} \quad (3.28)$$

ここで  $c$  は光速である。また、2つのクラスターから計算した崩壊時間を用いて、 $\pi^0$  の崩壊時間 ( $T_{\text{vtx}}$ ) を以下のように計算する。

$$T_{\text{vtx}}^{\pi^0} = \frac{\sum_i^2 t_{\text{vtx}}^i / \sigma_t^2(E_i)}{\sum_i^2 1 / \sigma_t^2(E_i)} \quad (3.29)$$

ここで  $\sigma_t$  はそれぞれクラスターの時間分解能であり、エネルギーの関数として以下のように表される。

$$\sigma_t(E) [\text{ns}] = \frac{3.8}{\sqrt{E}} + 0.19 \quad (E : \text{MeV}) \quad (3.30)$$

### 3.3.5 $K_L$ の再構成

$K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊では6つのクラスターが存在するため、それらの6つのクラスターから3組の  $\pi^0$  を選ぶ組み合わせが15通り存在する。それらの中から、以下に述べる崩壊  $z$  座標に対する  $\chi_z^2$  が最も小さな組み合わせを選ぶ。

#### 崩壊 $z$ 座標

$K_L$  の崩壊  $z$  座標は、再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標に重みをつけて求める。

$$Z_{\text{vtx}}^{K_L} = \frac{\sum_i^{N/2} Z_{\text{vtx}}^i / \sigma_i^2}{\sum_i^{N/2} 1 / \sigma_i^2} \quad (3.31)$$

ここで、 $N$  はクラスターの数、 $Z_{\text{vtx}}^i$  は再構成された崩壊  $z$  座標、 $\sigma_i$  は再構成された崩壊  $z$  座標の誤差である。

再構成された崩壊  $z$  座標に対する  $\chi_z^2$  を以下のように計算する。

$$\chi_z^2 = \sum_i^3 \frac{(Z_{\text{vtx}}^i - Z_{\text{vtx}}^{K_L})^2}{\sigma_i^2} \quad (3.32)$$

全ての組み合わせについて  $\chi_z^2$  を計算し、もっとも  $\chi_z^2$  の小さい組み合わせを選ぶ。

#### 崩壊 $x, y$ 座標

また、 $K_L$  の崩壊位置が、金標的と COE を結んだ直線上にあることを仮定し、 $Z_{\text{vtx}}^{K_L}$  から崩壊  $x, y$  座標を計算する。

$$X_{\text{vtx}}^{K_L} = \frac{Z_{\text{vtx}}^{K_L} - Z_{\text{target}}}{Z_{\text{CsI}} - Z_{\text{target}}} X_{\text{COE}} \quad (3.33)$$

$$Y_{vtx}^{K_L} = \frac{Z_{vtx}^{K_L} - Z_{target}}{Z_{CsI} - Z_{target}} Y_{COE} \quad (3.34)$$

ここで、 $Z_{target}$  は金標的の  $z$  位置である。

### 崩壊時間

6つのクラスター情報を用いて、 $K_L$  の崩壊時間を次のように計算する。

$$T_{vtx}^{K_L} = \frac{\sum_i^6 t_{vtx}^i / \sigma_i^2(E_i)}{\sum_i^6 1 / \sigma_i^2(E_i)} \quad (3.35)$$

### 3.3.6 事象選別

$K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊を選ぶために、以下のカットを使用した。

#### 運動学的カット

表 3.1 に、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊を選択するために用いた運動学的カットの一覧を示す。以下、それぞれの詳細について説明する。

表 3.1  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊を選択するために用いた運動学的カット一覧

| selection                | 閾値                                                          |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Delta Vertex Time        | $\Delta T \leq 3 \text{ ns}$                                |
| Cluster Energy           | $E_\gamma \geq 50 \text{ MeV}$                              |
| Total Energy             | $E_{\text{total}} \geq 1000 \text{ MeV}$                    |
| Photon Position          | $\min( x ,  y ) \geq 150 \text{ mm}, r \leq 850 \text{ mm}$ |
| Cluster Distance ( $d$ ) | $d \geq 150 \text{ mm}$                                     |
| $Z_{vtx}^{K_L}$          | $3000 \text{ mm} \geq Z_{vtx}^{K_L} \geq 5000 \text{ mm}$   |

- Delta Vertex Time

すべてのクラスターが  $K_L$  の崩壊によることを保証するために、再構成された  $K_L$  の崩壊時間 (式 3.35) と、それぞれのクラスターから計算された崩壊時間 (式 3.28) の差が 3 ns 以下であることを要求する。

- Cluster Energy

位置分解能・時間分解能が大きい事象を取り除くため、低エネルギーの事象を取り除く。1つのクラスターのエネルギーが 50 MeV 以上であることを要求する。

- Total Energy

6つのクラスターの合計エネルギーが 650 MeV 以上であることを要求する。

- Photon Position

シャワーが CsI カロリメータから漏れた場合、エネルギーを正しく測定できない。 $\gamma$  線による電磁シャワーがすべて CsI カロリメータ内におさまっていることを要求するために、 $x, y$  ヒット位置のうち大きい方の値がそれぞれ 150 mm 以上であり、カロリメータの中心から 850 mm 以内であることを要求する。

- Cluster Distance

2つのクラスター間の距離が 150 mm 以上であることを要求し、2つのクラスターが分かれていることを保証する。

- $Z_{vtx}^{K_L}$

$K_L$  の崩壊が、KOTO 実験の検出器で囲まれた崩壊領域で起きたことを保証するために、再構成された  $K_L$  の Z 崩壊位置に対して、3000 mm 以上 5000 mm 以下であることを要求する。

ここで、1.1.4 節で述べたとおり、 $z = 0$  mm は FB の上流端に対応する。

#### veto 検出器を用いた事象選別

表 3.2 にそれぞれの veto 検出器におけるエネルギー閾値を示す。検出器で観測されたエネルギーが閾値以上の場合、その事象は使わない。

表 3.2 それぞれの veto 検出器でのエネルギー閾値一覧。(\*) newBHCV では、3 層のうち 2 層以上のモジュールでヒットがあり、それぞれの層でのエネルギーが閾値を超えた場合 veto される。(\*\*) BHPV では veto の閾値としてエネルギーの代わりに、相当する光電子 (p.e.) の数が使われている。ヒットのあったモジュールが 3 個以上の場合、veto される。(\*\*\*) BHGC も veto の閾値として、エネルギーの代わりに相当する光電子の数が使われている。

| 検出器                                     | 閾値             |
|-----------------------------------------|----------------|
| CV                                      | 0.2 MeV        |
| NCC                                     | 1 MeV          |
| Hinemos                                 | 1 MeV          |
| FB, MB, IB                              | 5 MeV          |
| CC03                                    | 3 MeV          |
| CC04, CC05, CC06 (CsI crystal)          | 3 MeV          |
| CC04, CC05, CC06 (plastic scintillator) | 3 MeV          |
| LCV                                     | 0.6 MeV        |
| OEV                                     | 1 MeV          |
| IBCV, MBCV                              | 0.5 MeV        |
| newBHCV                                 | 221 eV (*)     |
| BHPV                                    | 2.5 p.e. (**)  |
| BHGC                                    | 2.5 p.e. (***) |

### 3.3.7 CsI 検出器を用いた veto

CsI カロリメータのヒットを用いた veto が2種類ある。以下にその veto の条件を述べる。

- Isolated Hit Crystal Veto

Isolated Hit Crystal Veto は、1つの結晶からできたクラスター (isolated hit crystal) を用いた veto である。isolated hit crystal と最近接クラスターのヒット時間の差が  $\pm 10$  ns 以内であり、結晶のエネルギーが次に定める式の閾値以上のとき、この事象は棄却する。エネルギー閾値は以下のように定義する。

$$E_{\text{threshold}} = \begin{cases} 10 \text{ MeV} & (d \leq 200 \text{ mm}) \\ (13.5 - 0.0175d) \text{ MeV} & (200 < d \leq 600 \text{ mm}) \\ 3 \text{ MeV} & (d > 600 \text{ mm}) \end{cases} \quad (3.36)$$

ここで、 $d$  は isolated hit crystal ともっとも近いクラスターとの距離である。

- Extra Cluster Veto

Extra Cluster Veto は、クラスターの数に6個より多かった場合に  $K_L$  を再構成するために用いなかったクラスターに対する veto である。再構成された  $K_L$  の崩壊位置を使って、Extra Cluster に対応する崩壊時間を計算する。この崩壊時間が  $\pm 10$  ns 以内である場合、同じ  $K_L$  の崩壊に由来するクラスターの可能性があるため、この事象は棄却する。

### 3.3.8 クラスターの形を用いたカット

クラスターの形を用いたカットとして、Shape  $\chi^2$  を用いた [19]。Shape  $\chi^2$  は、観測されたクラスターの形状が MC から予測される光子のクラスターの形状とどの程度一致しているかを示す指標である。それぞれのエネルギー、運動量、入射位置の光子がつくるクラスターをシミュレーションし、シャワーマップと呼ばれる各結晶のエネルギー分布を作成した。図 3.8 にシャワーマップの例を示す。

このシャワーマップを用いて、 $\chi^2$  を次式で定義する。

$$\chi_{\text{shape}}^2 = \frac{1}{N} \sum_i^{27 \times 27} \left( \frac{e_i/e_\gamma - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.37)$$

ここで、 $e_\gamma$  は光子のエネルギー、 $e_i$  はクラスターに属する  $i$  番目の結晶のエネルギー、 $\mu_i$  および  $\sigma_i$  はシャワーマップの  $i$  番目の結晶の  $e_i/e_\gamma$  の平均値と標準偏差であり、 $N$  は光子のクラスターに含まれる結晶の数である。 $\chi_{\text{shape}}^2$  は光子が作るシャワーによるクラスターでは1に近い値になり、中性子などが形成するシャワーによるクラスターでは1より十分大きい値になる。そこで、 $\chi_{\text{shape}}^2$  に対して4.6以下を要求した。

## 3.4 ハロー $K_L$ フラックスの測定

これまで述べてきた事象選別によって集めた  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルを使って、ハロー  $K_L$  フラックスの測定を行った。この節では、測定結果および考察について述べる。

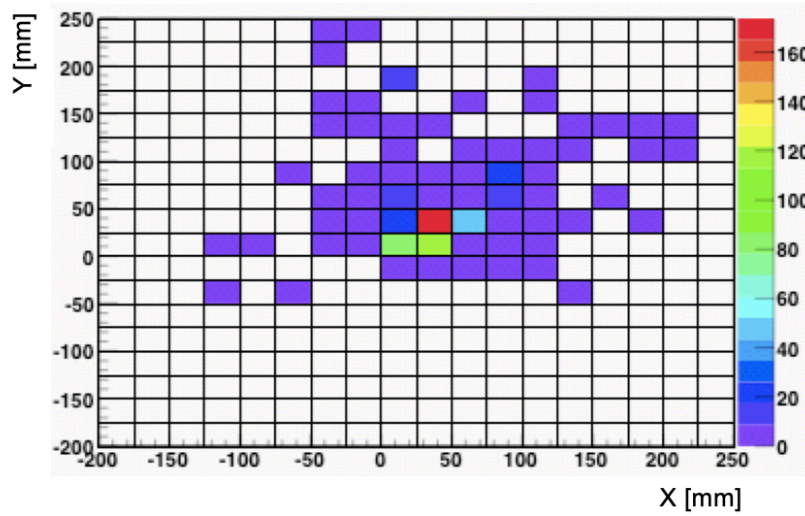


図 3.8 MC を用いて作成したシャワーマップの例 [19]

### 3.4.1 ハロー $K_L$ による寄与

図 3.9 に、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊におけるデータと MC それぞれの COE 半径の分布およびデータと MC の比を示す。ここで、データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。POT とは金標的に当たった陽子の数である。生成される  $K_L$  の数は POT に比例するため、KOTO 実験では POT を取得した事象数の指針として用いる。データ MC 両者とも、COE 半径が 200 mm 以上の領域にもイベントが分布している。

### 3.4.2 データと MC の比較

図 3.9 では、COE 半径が約 70 mm 以上で、データと MC の間に乖離が起きている。COE 半径が 200 mm 以上の領域においても、大きな乖離が見られる。これは、ハロー  $K_L$  のフラックスに関して、MC がデータを再現できていないことを示している。

### 3.4.3 データと MC の間の乖離の原因考察

図 3.10 に、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC の COE 半径の分布を示す。MC に対して、 $K_L$  が最後に散乱した位置ごとに色分けをしている。乖離が見られる COE 半径 70 mm 以上の領域と、 $K_L$  が最後にコリメータで散乱した領域とが一致している。すなわち、コリメータで散乱したイベントに対して、MC がデータを正確に再現できていない可能性がある。コリメータとの複数回の散乱を起こした場合には、 $K_L$  はコリメータと微小角でのハドロン相互作用を起こしうる。Geant3 は、微小角でのハドロン相互作用において不定性がある [17] ため、この不定性によってデータと MC の間に乖離が起きている可能性がある。

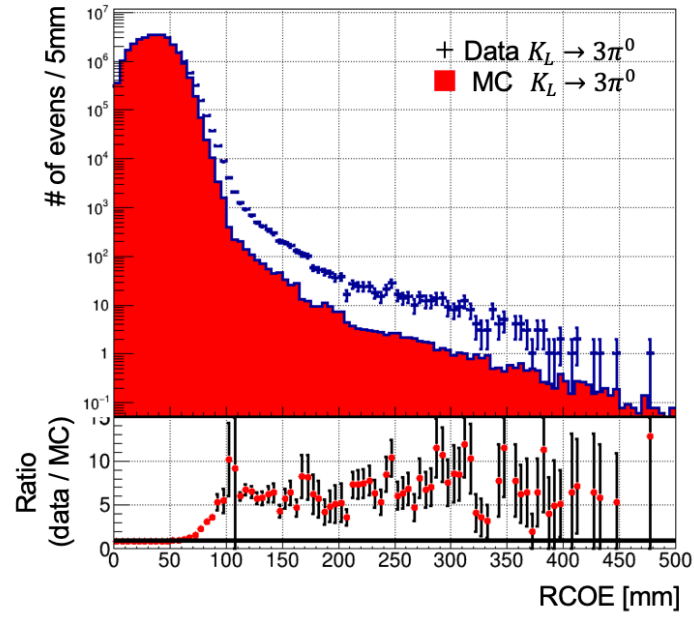


図 3.9  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC それぞれの COE 半径の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。黒い十字がデータを、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。

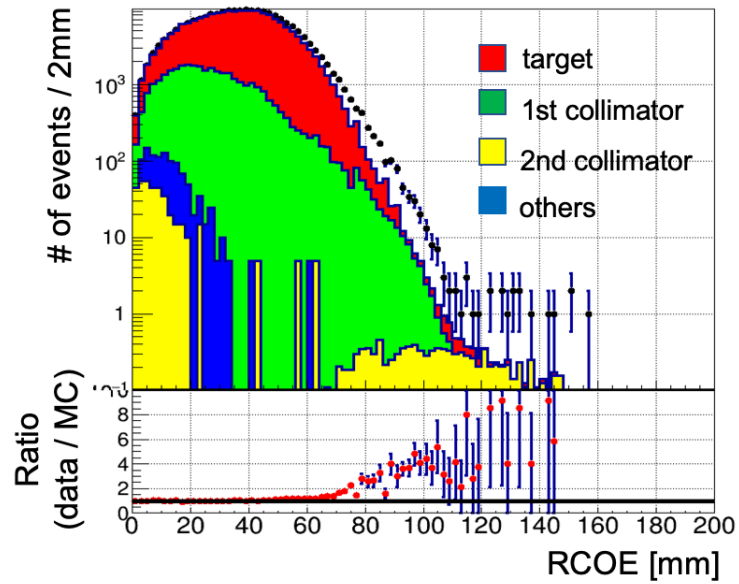


図 3.10  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC それぞれの COE 半径の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。MC は、 $K_L$  が最後に散乱した位置ごとに色分けをしている。赤が金標的、緑が1次コリメータ、黄色が2次コリメータ、青がその他で最後に散乱した事象を示す。データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。

#### 3.4.4 データと MC の間の乖離が $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数評価へもたらす影響

1.2.1 節で述べたように、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象はハロー  $K_L$  による寄与が大きいため、ハロー  $K_L$  のフラックスが重要な要素となる。したがって、データを用いて MC を補正する必要がある。



## 第 4 章

# シミュレーションの事象数の補正と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数の新たな見積もり

本章では、ハロー  $K_L$  フラックスに関する MC の事象数の補正を行い、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を新たに見積もる。まず MC の事象数の補正方法およびその妥当性について検討し、補正方法を決定したのち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC の事象選別について述べる。最後に、補正後の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数および 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析結果の結論について述べる。

### 4.1 補正方法の検討

前章で、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルを用いてデータと MC のハロー  $K_L$  フラックスを測定した。データと MC に対して、それぞれの POT を用いて規格化している。このハロー  $K_L$  フラックスを用いて、MC で生成した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を補正する方法を検討する。

ここで、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC において、それぞれの COE 半径において観測される事象数密度  $N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)$ ,  $N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)$  は、以下のように表される。

$$N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)dR = F_{\text{data}}^{K_L}(R)A_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)dR \quad (4.1)$$

$$N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)dR = F_{\text{MC}}^{K_L}(R)A_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)dR \quad (4.2)$$

ここで、 $F_{\text{data}}^{K_L}(R)$ ,  $F_{\text{MC}}^{K_L}(R)$  はそれぞれの COE 半径 ( $R$ ) での  $K_L$  のフラックス (単位長さあたりの  $K_L$  の数)、 $A_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)$ ,  $A_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)$  はそれぞれの COE 半径での  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC に対するアクセプタンスを表す。また、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のデータと MC に対しても同様に、以下のように表せる。

$$N_{\text{data}}^{2\gamma}(R)dR = F_{\text{data}}^{K_L}(R)A_{\text{data}}^{2\gamma}(R)dR \quad (4.3)$$

$$N_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)dR = F_{\text{MC}}^{K_L}(R)A_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)dR \quad (4.4)$$

ここで、 $A_{\text{data}}^{2\gamma}(R)$ ,  $A_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)$  はそれぞれの COE 半径における  $K_L \rightarrow 2\gamma$  のデータと MC におけるアクセプタンスを表す。

前章で求めたのはそれぞれの COE 半径における  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC の再構成された事象数の密度であるから、 $N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)$  と  $N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)$  である。また、データと MC における  $K_L$  のフラックスの

比は、上の式から

$$\frac{F_{\text{data}}^{K_L}(R)}{F_{\text{MC}}^{K_L}(R)} = \frac{N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)A_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)}{N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)A_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)} \quad (4.5)$$

である。ここで、MC が  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータのアクセプタンスを再現する場合、上式のアクセプタンスの比の部分の部分を消去できる。

アクセプタンスは  $K_L$  のエネルギーに強い依存性がある。したがって、MC が  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータのエネルギー分布を再現する場合、アクセプタンスも再現できていると仮定する。

図 4.1、図 4.2 に、それぞれハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC における 6 つのクラスターのエネルギーの和の分布および再構成された崩壊  $z$  位置の分布、およびそれらのデータと MC の比を示す。データと MC の事象数はそれぞれの POT を用いて規格化した。6 つのクラスターのエネルギーの和の分布および再構成された崩壊  $z$  位置に対してデータと MC に大きな乖離はなく、MC はデータを再現している。したがって、アクセプタンスに関して、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC は一致していると判断した。

以上より、それぞれの COE 半径における、データと MC の  $K_L$  フラックスの比は、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC において観測された事象数の比から求められる。

$$\frac{F_{\text{data}}^{K_L}(R)}{F_{\text{MC}}^{K_L}(R)} = \frac{N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)}{N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)} \quad (4.6)$$

また、ここで最終的に求めたいのはデータで観測される  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の数  $\int N_{\text{data}}^{2\gamma}(R)dR$  であり、以下のように表せる。

$$\int N_{\text{data}}^{2\gamma}(R)dR = \int \frac{F_{\text{data}}^{K_L}(R)A_{\text{data}}^{2\gamma}(R)}{F_{\text{MC}}^{K_L}(R)A_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)} N_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)dR = \int \frac{N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)A_{\text{data}}^{2\gamma}(R)}{N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)A_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)} N_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)dR \quad (4.7)$$

ここで、MC が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のデータのアクセプタンスを再現できていれば、上式のアクセプタンスの比の部分の部分を消去できる。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のデータは統計が非常に少ないため、直接データと MC におけるエネルギー分布を比較することはできない。しかし、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊は単純な 2 体崩壊であり、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  の MC がデータのエネルギー分布を再現していることから、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC は、データのアクセプタンスを再現できていると判断した。

以上より、以下の式を得た。

$$\int N_{\text{data}}^{2\gamma}(R)dR = \int \frac{N_{\text{data}}^{3\pi^0}(R)}{N_{\text{MC}}^{3\pi^0}(R)} N_{\text{MC}}^{2\gamma}(R)dR \quad (4.8)$$

すなわち、それぞれの COE 半径における  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC の比を、MC で生成した対応する COE 半径の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象に対して重み付けすることによって、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のデータにおける事象数が得られる。

ここで、もし COE 半径とアクセプタンスが大きな相関を持つ場合には、この相関を考慮して補正を行う必要がある。図 4.3 に、真の COE 半径に対して 3 つの領域に分けた MC の  $K_L$  シードの、運動エネルギーの分布を調べた。緑が 200 mm から 350 mm の領域、赤が 350 mm から 500 mm の領域、緑が 500 mm から 650 mm の領域を示す。真の COE 半径が小さいほど運動エネルギーが大きい傾向が

わずかに見られるものの、それぞれの領域の事象の分布に大きな差はないため、COE 半径と  $K_L$  の運動エネルギーとの間の相関は小さい。よって、COE 半径とアクセプタンスとの相関は小さい。

以上より、COE 半径 1 変数を用いた補正が妥当であると判断した。

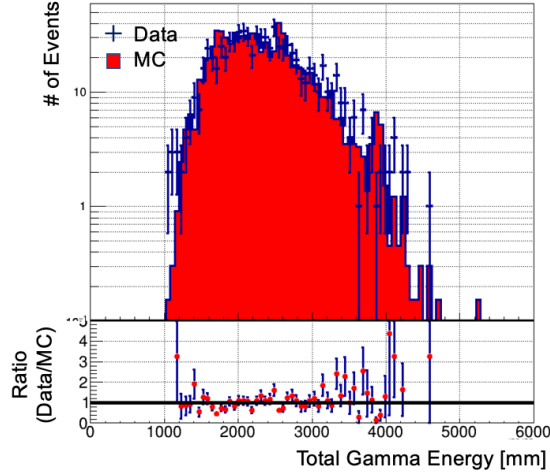


図 4.1 ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC における、6つのクラスターのエネルギーの和の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC それぞれの事象数を用いて規格化した。

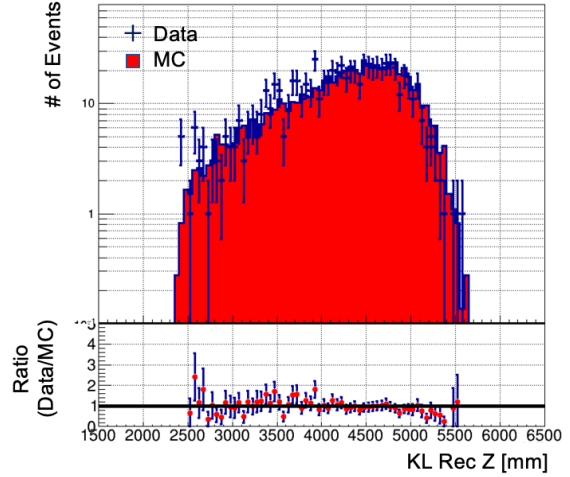


図 4.2 ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC における、再構成された崩壊  $z$  座標の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC それぞれの事象数を用いて規格化した。

## 4.2 ハロー $K_L$ フラックスの補正係数

図 4.4 に、ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC における COE の分布およびデータと MC の比を示す。信号事象には COE 半径が 200 mm 以上であることが要求されるため、COE 半径 200 mm 以上の領域のみ着目した。ここで、COE 半径が大きい領域は事象数が小さいため、COE 半径で分けるビンの幅を 40 mm まで広げた。それぞれのビンに対して得られたデータと MC の比および比の統計誤差を、補正係数および補正係数の誤差とする。

表 4.1 にそれぞれの COE 半径の領域における補正係数とその誤差を示す。MC で作った  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象に対して、それぞれの事象の COE 半径に対応する補正係数を重み付けすることにより、シミュレーションの事象数を補正する。

## 4.3 補正方法の妥当性

本研究では、4.1 節で述べたように、COE 半径 1 変数のみを用いて MC の補正を行う。この補正の妥当性を保証するため、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  の MC サンプルにおいて、COE 半径を用いた補正を行った後に、COE 半径以外の変数に対して MC がデータを再現するかを調べた。

図 4.5、図 4.6 にそれぞれ、補正後の MC およびデータにおける 6 光子のエネルギーの和および  $K_L$

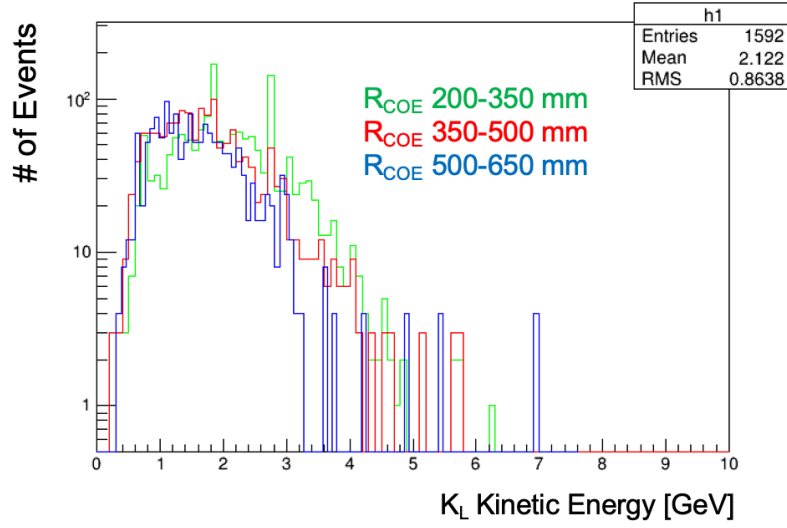


図 4.3 それぞれの COE 半径の領域における、MC の  $K_L$  シードでの  $K_L$  の運動エネルギーの分布。緑が 200 mm から 350 mm の領域、赤が 350 mm から 500 mm の領域、青が 500 mm から 650 mm の領域を示す。それぞれの領域における事象数を用いて規格化した。

表 4.1 それぞれの COE 半径の領域に対するハロー  $K_L$  フラックスの補正係数および誤差の一覧

| 領域番号 | COE 半径 [mm] | 補正係数             |
|------|-------------|------------------|
| 0    | 200-240     | $6.38 \pm 0.43$  |
| 1    | 240-280     | $6.74 \pm 0.56$  |
| 2    | 280-320     | $7.09 \pm 0.81$  |
| 3    | 320-360     | $6.92 \pm 1.07$  |
| 4    | 360-400     | $6.96 \pm 1.43$  |
| 5    | 400-440     | $4.82 \pm 1.47$  |
| 6    | 440-480     | $6.92 \pm 2.84$  |
| 7    | 480-520     | $10.52 \pm 4.84$ |
| 8    | 520-560     | $5.14 \pm 3.87$  |

の再構成  $z$  位置の分布を示す。いずれもデータと MC の間に大きな乖離はなく、MC がデータを再現している。よって、COE 半径のみを用いた補正が妥当であると判断した。

## 4.4 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC サンプル

### 4.4.1 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の MC の生成

3.3.2 節と同じ方法で打ちこんだハロー  $K_L$  に対して、崩壊分岐比 100% で  $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊させ  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC を生成した。本研究では、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの 390 倍

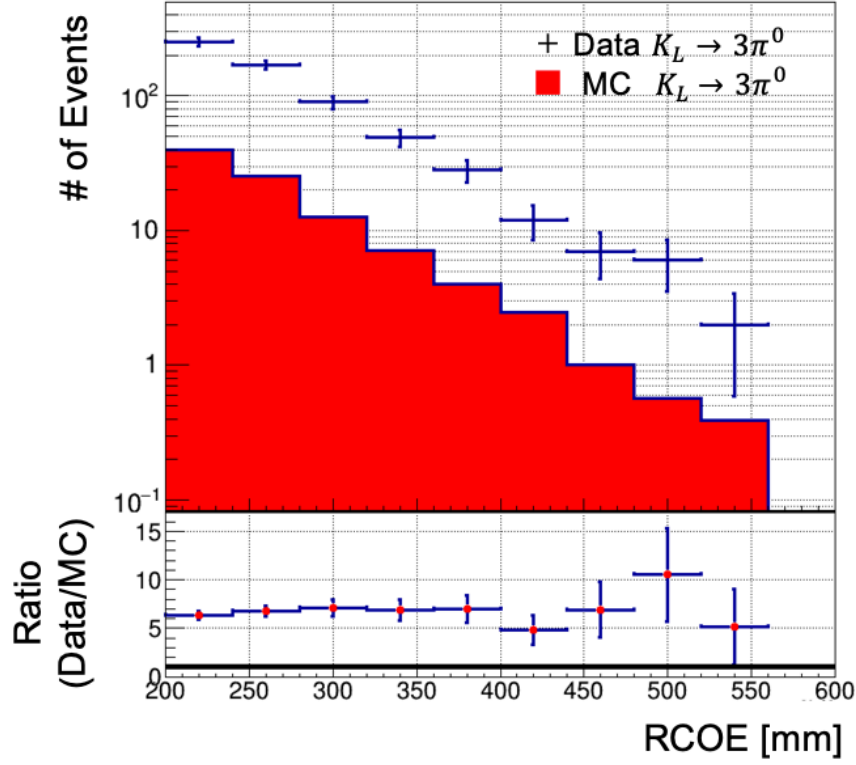


図 4.4 3 章で測定したハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC での COE 半径の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。40 mm ごとにビン分けを行った。黒い十字がデータを、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC は POT を用いて規格化した。

の事象を生成した。

#### 4.4.2 イベント再構成

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  に対して背景事象となる事象を選ぶために、イベント再構成は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  と同じ手法を用いた。波形解析やクラスターの再構成については、3.3.3 節で述べた手法を用いた。2つのクラスターは  $\pi^0$  の崩壊によってできた 2 光子が作ったと仮定する。また、ビーム軸上で崩壊したことを仮定する。

#### 4.4.3 事象選別

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の背景事象となる事象を選ぶために、以下に述べる  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  と同じ事象選別を用いた。

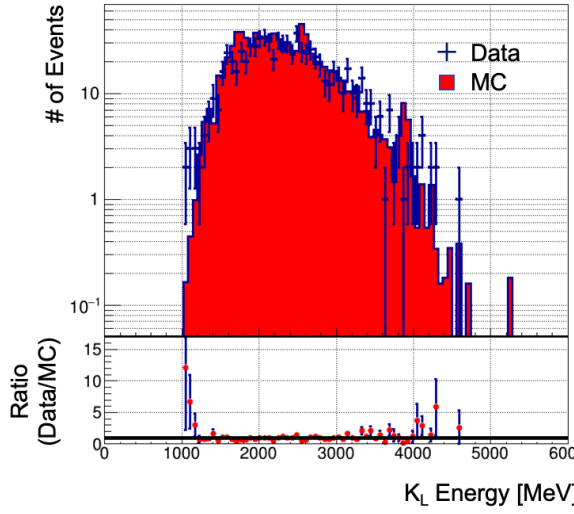


図 4.5  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータおよび補正後の MC における 6 光子のエネルギーの和の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが補正後の MC を表す。データと MC はそれぞれ POT を用いて規格化した。

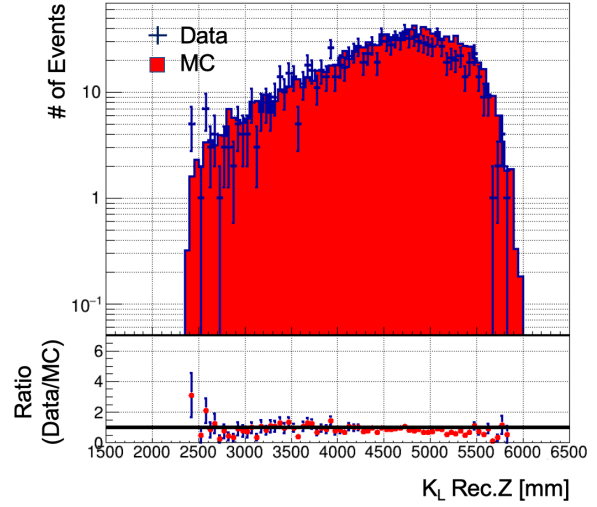


図 4.6  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータおよび補正後の MC における  $K_L$  の崩壊  $z$  位置の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが補正後の MC を表す。データと MC はそれぞれ POT を用いて規格化した。

### 運動学的カット

表 4.2 に  $K_L \rightarrow 2\gamma$  サンプルに用いた運動学的カットの一覧を示す。以下、それぞれの詳細について述べる。

- Cluster Energy  
位置分解能・時間分解能の大きい事象を取り除く。また  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊でできる  $\gamma$  線として、エネルギーが高すぎる事象を取り除く。それぞれのクラスターのエネルギーが 100 MeV 以上 2000 MeV 以下であることを要求する。
- Total Energy  
ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルと同じ。
- Photon Position  
ハロー  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルと同じ。
- Cluster Distance  
2つのクラスター間の距離が 300 mm 以上であることを要求する。
- $\Delta T$   
式 3.28 で定義したそれぞれのクラスターから計算した崩壊時間の差 ( $t_{\text{vtx}}^0 - t_{\text{vtx}}^1$ ) の絶対値が 2 ns 以下であることを要求する。このカットにより、対象とする  $K_L$  以外に起因する事象を削減する。
- Projection Angle

表 4.2  $K_L \rightarrow 2\gamma$  に対して用いた運動学的カット一覧

| selection                                                | 閾値                                                            |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Cluster Energy                                           | $100 \text{ MeV} \leq E_{\text{total}} \leq 2000 \text{ MeV}$ |
| Total Energy                                             | ハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルと同じ                          |
| Photon Position                                          | ハロー $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルと同じ                          |
| Cluster Distance ( $d$ )                                 | $d \geq 300 \text{ mm}$                                       |
| Delta Vertex Time                                        | $ t_{\text{vtx}}^0 - t_{\text{vtx}}^1  \leq 3 \text{ ns}$     |
| Projection Angle                                         | Projection Angle $\leq 150 \text{ degree}$                    |
| $E \cdot \theta$                                         | $E \cdot \theta \geq 2500 \text{ MeV} \cdot \text{degree}$    |
| Cluster Energy Ratio                                     | Cluster Energy Ratio $\geq 0.2$                               |
| $r_{\text{COE}}$                                         | $r_{\text{COE}} \geq 200 \text{ mm}$                          |
| Cluster RMS                                              | Cluster RMS $\geq 10 \text{ mm}$                              |
| Cluster Size                                             | Cluster Size $\geq 5$                                         |
| Minimum Distance from Dead Channel ( $d_{\text{dead}}$ ) | $d_{\text{dead}} \geq 53 \text{ mm}$                          |
| $P_t/P_z - Z_{\text{vtx}}, E - Z_{\text{vtx}}$           | (*)                                                           |

CsI の X, Y 平面上に投影した 2 つの  $\gamma$  線の運動量ベクトルがなす角度を projection angle とし、この projection angle が 150 度以下であることを要求する。このカットによって、重心系で反対方向に  $\gamma$  が飛ぶ  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減する。

- $E \cdot \theta$

クラスターエネルギー  $E$  と、ビーム軸と 2 つのクラスターのなす角  $\theta$  との積が 2500 (MeV・度) 以上であることを要求する。このカットにより、別の  $\pi^0$  の崩壊から出た 2 つの  $\gamma$  線を使って  $\pi^0$  を再構成する事象 (odd-paring 事象) を削減する。

- Cluster Energy Ratio

2 つのクラスターのエネルギー比 (最小クラスターエネルギー/最大クラスターエネルギー) が 0.2 以上であることを要求する。これにより、odd-paring 事象および以下に述べる中性子背景事象を削減する。図 4.4.3 に中性子背景事象の概要図を示す。CsI カロリメータに入射したハロー中性子が 1 つのクラスターを形成し、さらにそこで発生した中性子が別のクラスターを形成した場合、それぞれのクラスターが 2 光子として誤認される背景事象を中性子背景事象と呼ぶ。中性子背景事象では、2 つ目のクラスターを作る中性子は 2 次的に生成されるため、2 つのクラスターのエネルギーの比が小さく分布する。したがって、このカットによって中性子背景事象を削減できる。

- $r_{\text{COE}}$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊では、ニュートリノが運動量を持ち去るため、COE 半径が大きくなる。よって、COE 半径が 200 mm 以上であることを要求する。

- Cluster RMS

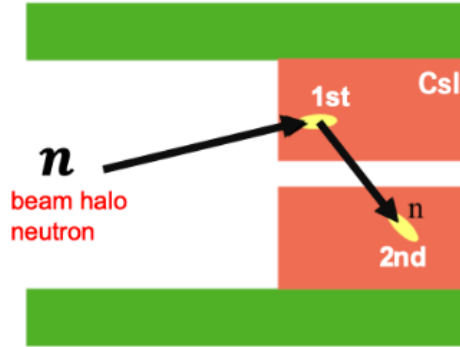


図 4.7 中性子背景事象の概要図

Cluster RMS を以下のように定義する。

$$\text{Cluster RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i^N E_i r_i^2}{\sum_i^N E_i}} \quad (4.9)$$

ここで  $E_i$  は各結晶のエネルギー、 $r_i$  は各結晶とクラスターのエネルギー重心までの距離を表す。4.4.3 節で述べた中性子背景事象が作るクラスターは Cluster RMS が小さくなるため、Cluster RMS が 10 mm 以上であることを要求する。

- Cluster size

Cluster Size とは、クラスター中の CsI 結晶の数である。中性子背景事象が作るクラスターは、 $\gamma$  線によるクラスターよりもクラスターが小さくなるため、Cluster Size が 5 以上であることを要求する。

- Minimum Distance from Dead Channel

PMT の不具合などで、信号が読み出せなかったチャンネルを dead channel と呼ぶ。CsI カロリメータの dead channel にエネルギーが落とされると、正しくエネルギーを測定することができない。このような事象を削減するため、クラスターの再構成された  $x, y$  位置から dead ch が 53 mm 以上離れていることを要求する。

- $P_t/P_z - Z_{\text{vtx}}, E - Z_{\text{vtx}}$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊でできた  $\pi^0$  らしいイベントを選ぶカット。図 4.8 に示すように、 $P_t/P_z - Z_{\text{vtx}}$  平面と、 $E - Z_{\text{vtx}}$  平面でカット領域を設定する。ここで、 $P_z, Z_{\text{vtx}}$  はそれぞれ、 $\pi^0$  の縦方向運動量およびエネルギーである。シミュレーションによる  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の分布を赤紫色で示す。緑色の線でカットの領域を示す。

#### veto 検出器を用いた veto

表 4.3 にそれぞれの veto 検出器におけるエネルギー閾値を示す。検出器で観測されたエネルギーが閾値以上の場合、その事象は棄却する。



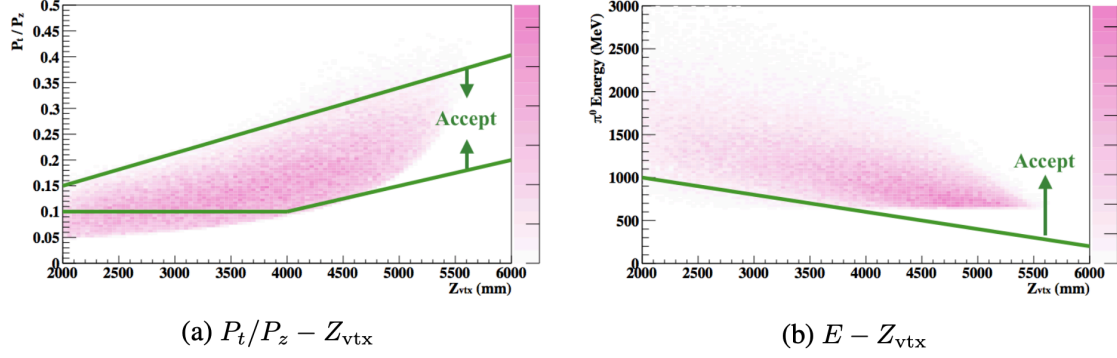


図 4.8  $P_t/P_z - Z_{\text{vtx}}$ ,  $E - Z_{\text{vtx}}$  を用いた事象選別 [20]。シミュレーションによる  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の分布を赤紫色で示す。緑色の線でカットの領域を示す。

表 4.3 それぞれの veto 検出器でのエネルギー閾値一覧。(\*) newBHCV では、3 層のうち 2 層以上のモジュールでヒットがあり、それぞれの層でのエネルギーが閾値を超えた場合 veto される。(\*\*) BHPV では veto の閾値としてエネルギーの代わりに、相当する光電子の数が使われている。ヒットのあったモジュールが 3 個以上の場合、veto される。(\*\*\*) BHGC も veto の閾値として、エネルギーの代わりに相当する光電子の数が使われている。

| 検出器                                     | 閾値             |
|-----------------------------------------|----------------|
| CV                                      | 0.2 MeV        |
| NCC                                     | 1 MeV          |
| Hinemos                                 | 1 MeV          |
| FB, MB, IB                              | 5 MeV          |
| CC03                                    | 3 MeV          |
| CC04, CC05, CC06 (CsI crystal)          | 3 MeV          |
| CC04, CC05, CC06 (plastic scintillator) | 3 MeV          |
| LCV                                     | 0.6 MeV        |
| OEV                                     | 1 MeV          |
| IBCV, MBCV                              | 0.5 MeV        |
| newBHCV                                 | 221 eV (*)     |
| BHPV                                    | 2.5 p.e. (**)  |
| BHGC                                    | 2.5 p.e. (***) |

## CsI 検出器を用いた veto

3.3.7 節で述べた条件を課す。

## クラスターの形を用いたカット

表 4.4 にクラスターの形を用いたカットの一覧を示す。以下、それぞれのカットの詳細を述べる。

表 4.4  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC に対して用いた、クラスターの形を用いたカットの一覧。

| selection                            | 閾値        |
|--------------------------------------|-----------|
| Theta $\chi^2$                       | $< 4.5$   |
| CSDDL                                | $> 0.985$ |
| Eta CSD                              | $> 0.91$  |
| $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ DL | $> 0.922$ |

- Theta  $\chi^2$

Theta  $\chi^2$  は再構成した光子の CsI カロリメータへの入射角  $\theta_{\text{rec}}$  が、ニューラルネットワークによって求めた角度  $\theta_{\text{NN}}$  とどの程度一致しているかを表す指標であり、以下のように定義される。

$$\chi_{\theta}^2 = \frac{(\theta_{\text{rec}} - \theta_{\text{NN}})^2}{\sigma_{\theta_{\text{NN}}}^2} \quad (4.10)$$

ここで、 $\sigma_{\theta_{\text{NN}}}^2$  は  $\theta_{\text{NN}}$  の予測の誤差である。ニューラルネットワークの入力には、クラスターに含まれる結晶のエネルギーと、光子の入射位置を用いた。 $\chi_{\theta}^2$  は、 $\pi^0$  の崩壊点の再構成が正しい場合に 1 に近い値を返し、実際の崩壊点からずれた位置に再構成された場合に 1 より十分に大きい値を返す。例えば、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$  の odd-paring のように崩壊点位置の再構成を間違えている事象を棄却できる。したがって、 $\chi_{\theta}^2$  がどちらのクラスターでも 4.5 より小さいことを要求した。

- CSDDL

CSDDL は、光子のクラスターとハドロンのクラスターを弁別するニューラルネットワークの出力値であり、1 に近いほど光子のクラスターらしいことを表し、0 に近いほどハドロンクラスターらしいことを表す。ニューラルネットワークの入力には、クラスターに含まれる結晶のエネルギー、光子の CsI カロリメータへの入射位置、入射極角などを用いている。ハドロンクラスターの事象を抑制するために、2つのクラスターの CSDDL のどちらも 0.985 より大きいことを要求した。

- Eta CSD

CV に入射した中性子が  $\eta$  を生成し、 $\eta \rightarrow 2\gamma$  で生成した 2 光子が CsI カロリメータに入射するという背景事象 (CV- $\eta$  背景事象) がある。Eta CSD は、この CV- $\eta$  背景事象によるクラスターと、ビーム軸上の  $\pi^0$  が崩壊した 2 光子のクラスターを弁別するニューラルネットワークの出力値であり、0 に近いほど  $\pi^0$  が崩壊してできた 2 光子のクラスターらしく、1 に近いほど CV- $\eta$  背景事象による 2 クラスターらしいことを表す。よって、Eta CSD に対して 0.91 より大きい

ことを要求した。

- $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  DL

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  崩壊は、 $\pi^0$  からの 2 つの光子が CsI カロリメータに入射し、残った  $\pi^\pm$  を取りこぼすことによって背景事象となる。 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  DL は、この  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  背景事象による事象と信号事象を弁別するニューラルネットワークの出力値である。ニューラルネットワークの入力には、クラスターに含まれる結晶のエネルギー、光子の CsI カロリメータへの入射位置、入射極角などを用いた。出力値が 1 に近いほど信号事象らしく、0 に近いほど  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  背景事象らしいことを表す。よって、 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  DL の出力値が 0.922 より大きいことを要求した。

#### 4.4.4 波形を用いたカット

KOTO 実験には、中性子による波形と光子による波形を弁別するために開発された Fourier Pulse Shape Discriminator (FPSD) を用いたカットがある [21]。ここでは、このカットの手法について説明する。

まず、光子と中性子のサンプルを用いて FPSD のテンプレートを作成する。ADC を用いて取得した CsI の波形の例を図 4.9 左上に示す。波形の 64 個のデータのうち、もっとも大きい ADC 値のデータ点の時間をピーク時間とする。[ピーク時間-10, ピーク時間+17] に含まれるデータ点を離散フーリエ変換 (FFT) する (図 4.9 右上)。離散フーリエ変換した波形のうち、周波数の低い 5 点を除いて、光子と中性子のサンプルのテンプレートを CsI 結晶ごとに作成する (図 4.9 右下)。

ここからは、作成したテンプレートを用いて、事象ごと、クラスターごとに FPSD を計算する手法について説明する。まずクラスターに属する結晶ごとに、テンプレートを用いて波形の光子に対する Likelihood Ratio を計算する。結晶ごとに中性子背景事象の削減能力が異なるため、Likelihood Ratio は結晶ごとの削減性能で重みをつける。クラスターに属する結晶全ての Likelihood Ratio の平均をクラスターの FPSD とする。

この FPSD を用いた Likelihood Ratio の値が 1 に近いと光子らしく、0 に近いと中性子らしいことを表す。よって、Likelihood Ratio の値が 0.5 以上であることを要求した。また、MC を用いた波形のシミュレーションは不定性があるため [17]、その検出効率を考慮し、エネルギーの関数である FPSD efficiency をその事象数にかける。

### 4.5 MC の事象数を補正する前の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数

ここで、本研究でハロー  $K_L$  フラックスによる MC の事象数の補正をする前の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数について述べる。上で述べた全てのカットを用いて事象選別をした  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC において、信号領域に  $(0.04 \pm 0.01)$  事象を見積もった。ここで、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  の MC の事象数は、2016, 2017, 2018 年に取得したデータと、MC の POT を用いて規格化した。

しかし、ここではハロー  $K_L$  フラックスに対するデータと MC の乖離の影響を考慮していない。したがって、それらの影響を考慮し、MC の補正を行う必要がある。

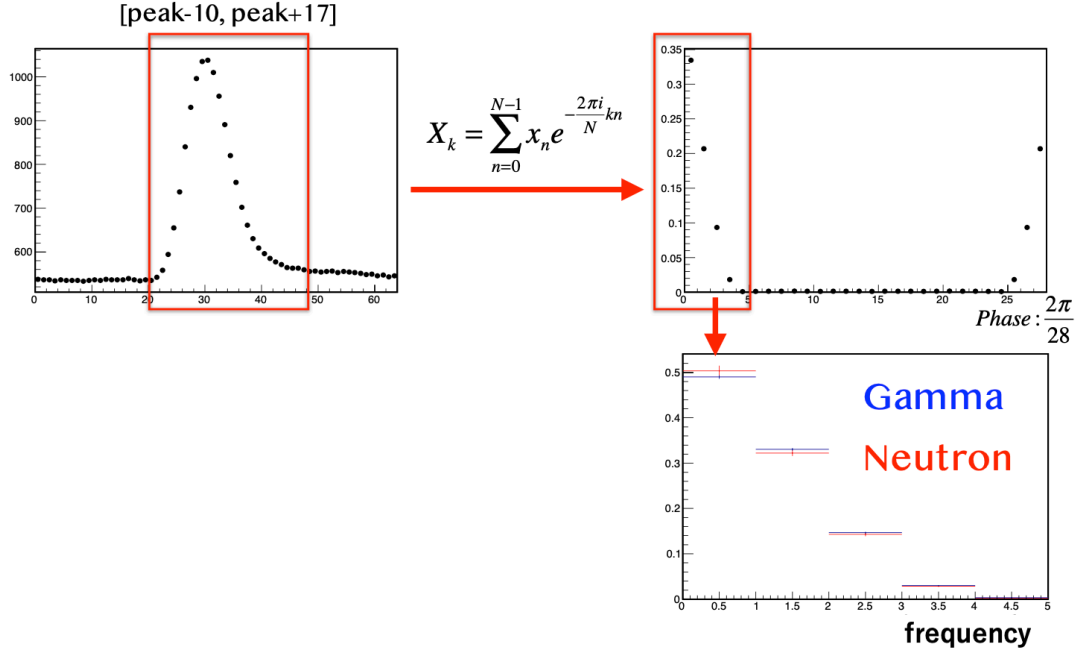
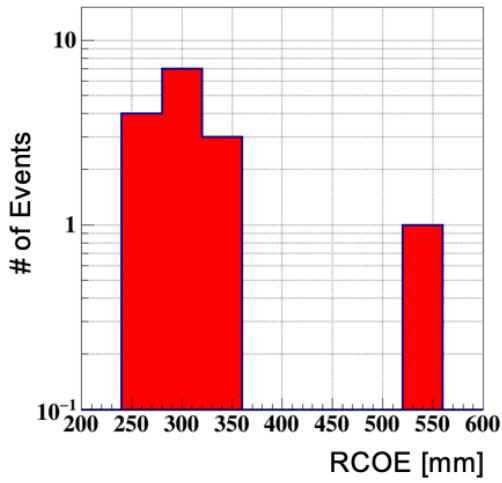
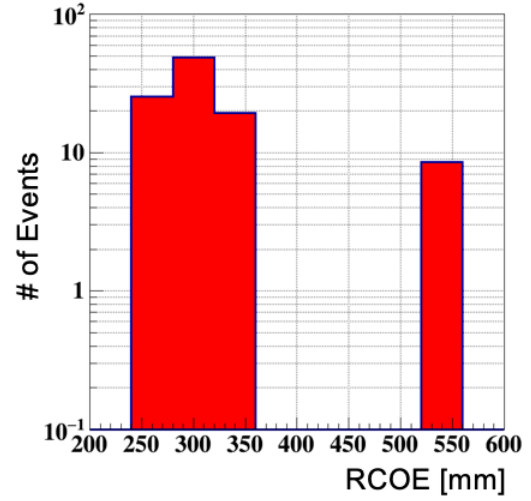


図 4.9 FPSD を用いたカットの概要 [21]

図 4.10 4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別をした  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における COE 半径の分布。ハロー  $K_L$  フラックスに対する補正を行う前の分布を示す。図 4.11 4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別をした  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における COE 半径の分布。ハロー  $K_L$  フラックスに対する補正を行った後の分布を示す。

## 4.6 MC の事象数の補正をした後の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数

図 4.10 に、補正を行う前の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象 MC における COE 半径の分布を示す。これらの事象に対して、表 4.1 に示した、それぞれの COE 半径に対応する補正係数で重み付けを行い、MC の補正を行った。図 4.11 に、補正を行った後の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象 MC における COE 半径の分布を示す。

補正を行った後の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標と横方向運動量の散布図を図 4.12 に示す。数字は各領域内に残った事象数を表す。生成した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  の MC と、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの POT を用いて規格化した。

赤い数字で示しているのが信号領域内に残った  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数であり、中央値として 0.26 事象を見積もった。これは、補正を行う前の 0.04 事象と比べると 6.5 倍大きい値である。

また、以下のように統計誤差  $\sigma_{\text{stat.}}$  を見積もった。

$$\sigma_{\text{stat.}} = f_{\text{Norm}} \sqrt{\sum_i^n (F_{\text{halo}}^i \cdot \epsilon_{\text{FPSD}}^i)^2} \quad (4.11)$$

ここで、 $f_{\text{Norm}}$  は 2016, 2017, 2018 年に取得したデータと本研究で生成した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC の POT から求めた規格化係数 (0.00259) であり、 $n$  は総事象数、 $F_{\text{halo}}^i$ 、 $\epsilon_{\text{FPSD}}^i$  はそれぞれ  $i$  番目の事象の COE 半径に対応するハロー  $K_L$  フラックスの補正係数と FPSD Efficiency の値を表す。結果として、統計誤差を 0.064 と見積もった。

さらに、以下のようにハロー  $K_L$  フラックスの誤差による系統誤差  $\sigma_{\text{syst.}}$  を見積もった。

$$\sigma_{\text{syst.}} = f_{\text{Norm}} \sqrt{\sum_{k=0}^l (N_k \cdot \sigma_{F_{\text{halo}}}^k)^2} \quad (4.12)$$

ここで、 $N_k$ 、 $\sigma_{F_{\text{halo}}}^k$  はそれぞれ、表 4.1 で示した COE 半径の  $k$  番目の領域内にある事象数および補正係数の誤差を表す。結果として、系統誤差を 0.021 と見積もった。

以上より、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析における補正後の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を、新たに  $(0.26 \pm 0.07)$  事象と見積もった。

## 4.7 2016-2018 年取得データ解析の結論

この節では、本章で得られた結果を踏まえて、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析の結論について述べる。

図 4.13 に、1 章で示した 2016, 2017, 2018 年に取得したデータを解析した結果を改めて示す。また、表 4.5 に、1 章で示した予測された背景事象の一覧を改めて示す。信号領域内に 3 事象が観測され、それに対する  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数は  $(0.26 \pm 0.07)$  事象である。

ここで、観測された 3 事象が全て  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象である場合について考える。予測される事象数が 0.26 事象のときに 3 事象以上が観測される確率は、以下のようにポアソン分布の上側累積確率

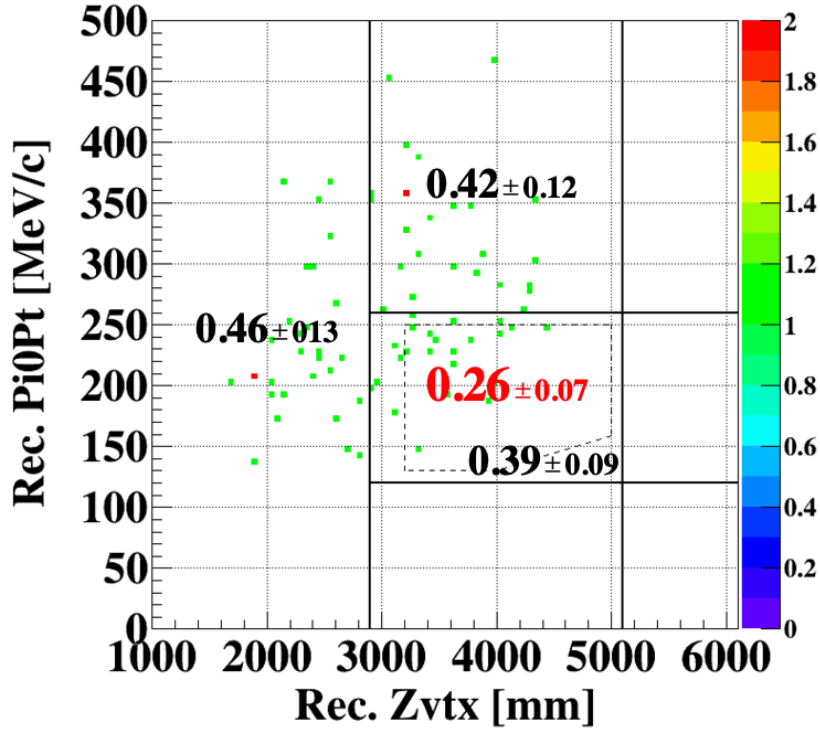


図 4.12 4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  の MC における、再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標と横方向運動量の散布図。ハロー  $K_L$  フラックスに対する MC の補正を行った後の結果を示す。数字は各領域内に残った事象数を表す。生成した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  の MC と、2016, 2017, 2018 年に取得したデータの POT を用いて規格化した。

$Q(x, \lambda)$  から求められる。

$$f(x, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{\Gamma(x+1)} \quad (4.13)$$

$$Q(x, \lambda) = \sum_{t=x}^{\infty} f(t, \lambda) \quad (4.14)$$

ここで、 $\lambda$ ,  $x$  はそれぞれ予測された事象数および観測された事象数、 $\Gamma$  はガンマ関数、 $f(x, \lambda)$  は確率密度関数を表す。予測される事象数が 0.26 事象のときに 3 事象が観測される確率は、式 4.14 に  $x = 3$ ,  $\lambda = 0.26$  を代入して 2.4% と得られた。したがって、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象だけでこの 3 事象を説明することは難しい。

しかし、荷電  $K$  中間子背景事象が新たに見積もられた。これは、sweeping magnet よりも下流の 2 次コリメータで生成された荷電  $K$  中間子が  $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu$  をはじめとする崩壊を起こし、荷電粒子をとりこぼして  $\pi^0$  が崩壊してできた 2 光子だけを観測した場合に背景事象となる。KOTO 実験では、2020 年に行ったランにおいて、荷電粒子検出器を用いてこの荷電  $K$  中間子による背景事象数を見積もった。この荷電  $K$  中間子背景事象が  $(0.87 \pm 0.05)$  事象見積もられ、結果、他の背景事象と合わせて  $(1.22 \pm 0.26)$  事象が予測された。予測される事象数が 1.22 事象のときに 3 事象が観測される確率は、

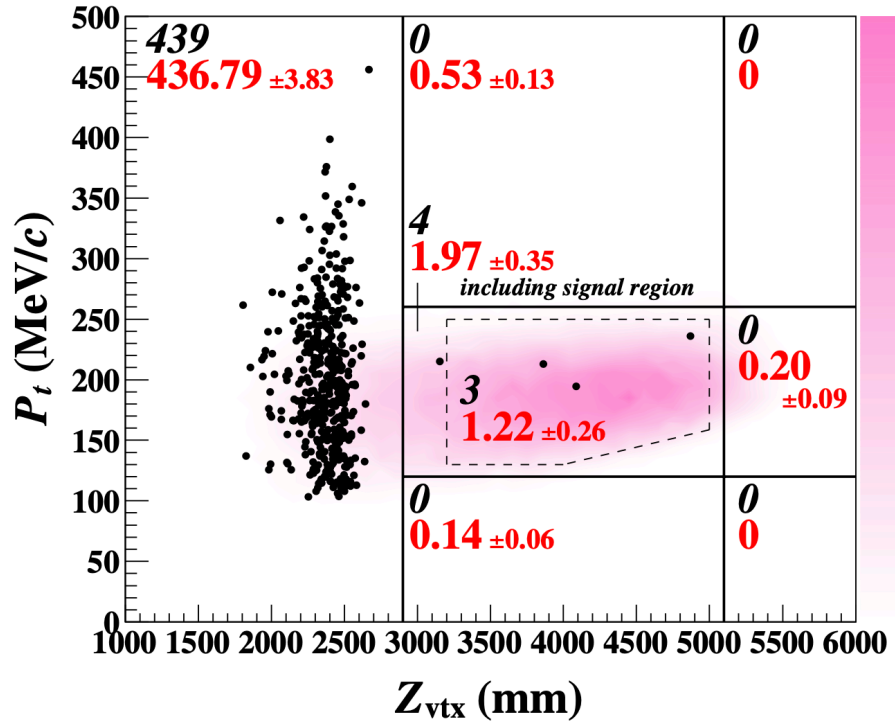


図 4.13 2016-2018 年物理ランの結果 [9]。横軸が再構成した  $\pi^0$  が崩壊した  $z$  位置、縦軸が  $\pi^0$  の横方向運動量。黒色で書かれた数字がデータで観測された事象数、赤色で描かれた数字が予測された背景事象数である。中央の黒い枠で囲まれた部分が blind region であり、赤い枠で囲まれた領域が信号領域である。

式 4.14 に  $x = 3$ ,  $\lambda = 1.22$  を代入して 13% と得られた。以上より、予測した背景事象数によって、観測された 3 事象を矛盾なく説明できる。

表 4.5 2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析において予測された背景事象の一覧 [9]。

| source  | 崩壊モード                                 | 事象数               |
|---------|---------------------------------------|-------------------|
| $K_L$   | $K_L \rightarrow 3\pi^0$              | $0.01 \pm 0.01$   |
|         | $K_L \rightarrow 2\gamma$ (beam-halo) | $0.26 \pm 0.07$   |
|         | その他の $K_L$ 崩壊                         | $0.001 \pm 0.001$ |
| $K^\pm$ |                                       | $0.87 \pm 0.25$   |
| 中性子     | ハドロンクラスター                             | $0.017 \pm 0.002$ |
|         | Upstream- $\pi^0$                     | $0.03 \pm 0.03$   |
|         | CV- $\eta$                            | $0.03 \pm 0.01$   |
| total   |                                       | $1.22 \pm 0.26$   |



## 第 5 章

# $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の削減可能性

2016, 2017, 2018 年に取得したデータの解析において、本研究で新たに見積もった  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数は  $0.26 \pm 0.07$  であり、現在 KOTO 実験において 2 番目に大きな背景事象である。したがって、今後さらに高感度のデータ解析を行うためには、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のさらなる削減が必要である。本章では、クラスターの形および運動学的変数に着目して信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の違いを調べ、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の削減可能性について検討する。

### 5.1 信号事象と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象の違い

図 5.1 に信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を比較した概念図を示す。1.2.1 節で述べたように、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象は、大きく分けて 2 つの違いがある。まず、信号事象では  $K_L$  がビーム中で崩壊するが、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象ではビーム軸上から大きく離れた点で崩壊する。また、 $2\gamma$  の親粒子は信号事象では  $\pi^0$  であるが、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では  $K_L$  である。

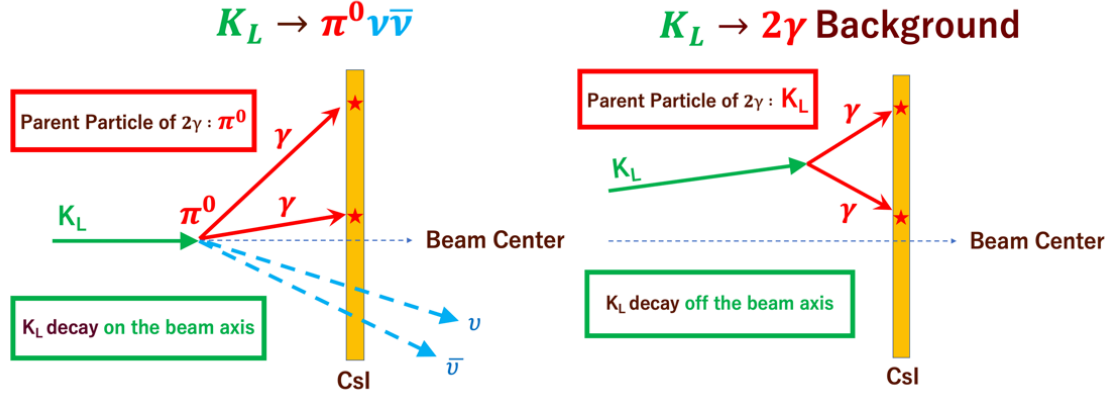
これらの違いは、クラスターの形および運動学的変数の違いとして観測量に現れるはずである。もし観測量に違いがあれば、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減できる可能性が高い。この実現可能性を調べるために、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象に対して、クラスターの形を表す変数や運動学的変数の分布を比較した。

#### 5.1.1 クラスターの形の違い

クラスターの形の違いは、まず 4.4.3 節で述べたカットで用いた、クラスターの形を表す変数の分布を確認した。図 5.2、図 5.3、図 5.4 に、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、それぞれの変数の分布を示す。これらの事象は、4.4.3 節で述べたカットのうち、クラスターの形を用いたカットを除く全てのカットをかけて選別した。以下、それぞれのカットに対する分布の詳細について述べる。

- Theta  $\chi^2$

4.4.3 節で述べたように、再構成された光子の CsI カロリメータへの入射角度と、クラスターの形から求められる光子の入射角度との差が大きな事象では、この変数の値が大きくなる。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では再構成された光子の入射角度と実際の入射角度は大きく異なるため、図 5.2 のように Theta  $\chi^2$  の値が信号事象よりも高い方に分布している。

図 5.1 信号事象 (左) と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象 (右) を比較した概念図

- CSDDL

4.4.3 節で述べたように、この変数は、光子と中性子が作るクラスターの形の違いをとらえ、中性子がつくるクラスターでは値が 0 に近づく。中性子背景事象はビームハローがクラスターを 2 つ作るにより生じるため、クラスターの入射角度と真の入射角度は異なる。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象は、光子が作るクラスターによるイベントであるが、再構成された入射角度と真の入射角度は異なる。したがって、図 5.3 のように、CSDDL の分布が信号事象と異なる。

- Eta CSD

4.4.3 節で述べたように、この変数は CV- $\eta$  背景事象と信号事象との違いをとらえ、CV- $\eta$  背景事象では値が 0 に近づく。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では、CsI カロリメータに近い位置で  $K_L$  が崩壊しており、CV- $\eta$  背景事象と運動学的に似ている。したがって、図 5.4 のように、Eta CSD の分布が信号事象と異なる。

いずれの変数でも、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では分布が異なり、クラスターの形に違いがあることを示している。これらの既存のカットは  $K_L \rightarrow 2\gamma$  を削減することを目的としたカットではない。したがって、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の削減に特化したカットを新たに開発することにより、背景事象数を大きく削減できる可能性がある。

### 5.1.2 運動学的変数の違い

4.4.3 節で述べたそれぞれの運動学的変数に対しても、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の違いを確認した。図 5.5、図 5.6、図 5.7、図 5.8、図 5.9 に、MC で生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象における主要な運動学的変数の分布を示す。これらのイベントには、4.4.3 節で述べたカットを全て用いた (再構成された  $\pi^0$  の  $P_T$  および崩壊  $z$  位置を用いたカットを除く)。以下、それぞれの変数の詳細について述べる。

- 2 個の  $\gamma$  線のエネルギーの和

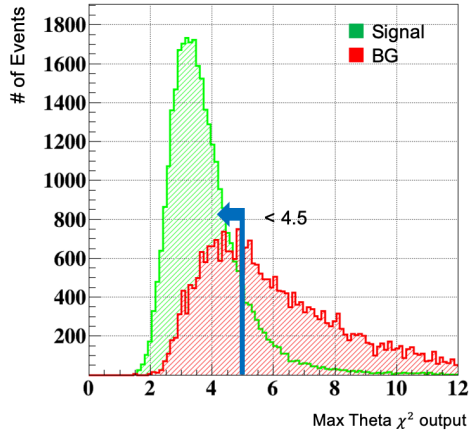


図 5.2 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における Theta  $\chi^2$  の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。カット値である 4.5 より小さい事象を選択する。

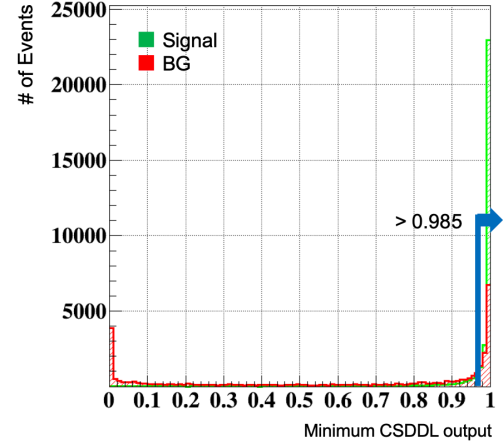


図 5.3 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における CSDDL の分布。2つのクラスターで計算した値のうち、小さい方を選んでいる。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。カット値である 0.985 より大きい事象を選択する。

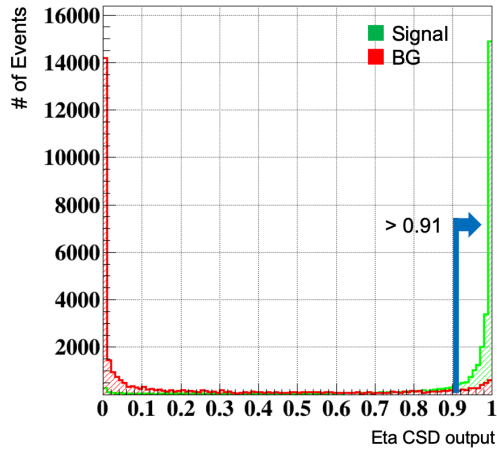


図 5.4 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における Eta CSD の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。カット値である 0.91 より大きい事象を選択する。

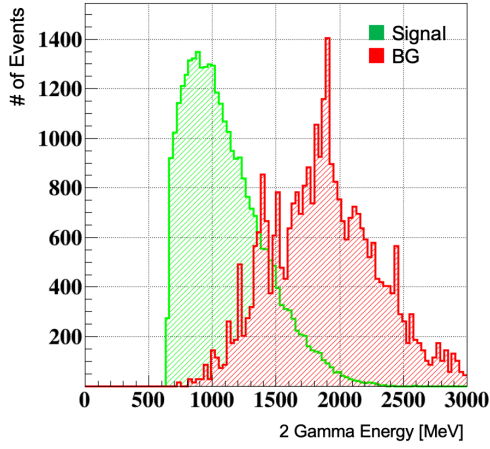


図 5.5 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における 2 個の  $\gamma$  線のエネルギーの和の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。

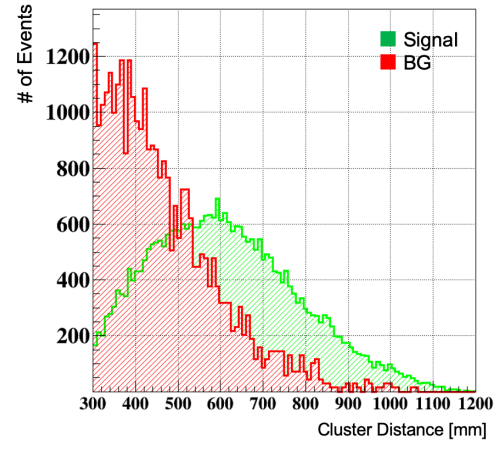


図 5.6 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC におけるクラスター間の距離の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。

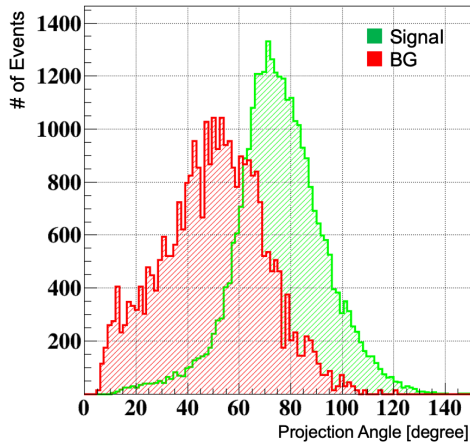


図 5.7 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における Projection Angle 距離の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。

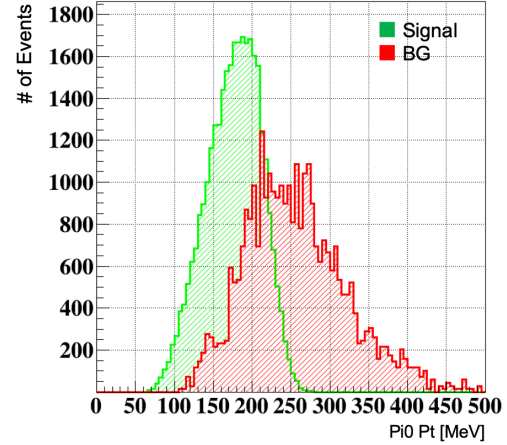


図 5.8 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における  $\pi^0$  の再構成  $P_T$  の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。

図 5.5 に示すように、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が信号事象より 2 個の  $\gamma$  線のエネルギーの和が大きい。これは、信号事象と異なり、ニュートリノがエネルギーを持ち去ることがないためである。

- クラスター間の距離

図 5.6 に示すように、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が信号事象よりもクラスター間の距離が小さい。これは、1.2.1 節で述べたように、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では  $K_L$  の真の崩壊  $z$  位置が CsI カロリメータに非常に近く、2 光子の飛距離が短くなるためである。

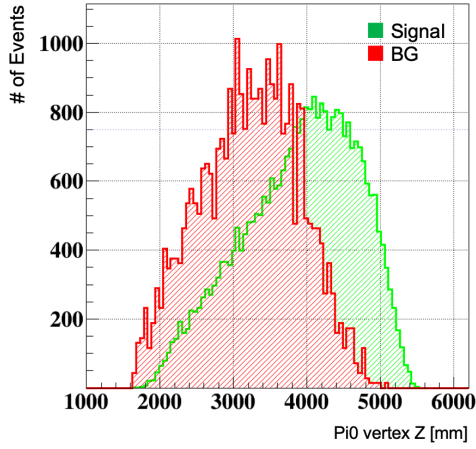


図 5.9 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC で再構成した  $\pi^0$  の崩壊  $z$  位置の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。事象数を用いて規格化した。

- Projection Angle

図 5.7 に示すように、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が信号事象よりも Projection Angle が小さい。これは、クラスター間の距離が短いほど Projection Angle が小さくなるためである。

- $\pi^0 P_T$

図 5.7 に示すように、信号事象よりも  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が  $P_T$  が大きい。これは、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が、信号事象よりも  $2\gamma$  のエネルギーが大きく、また実際と異なる仮定によって再構成された  $P_T$  が真の値よりも大きくなるためである。

- $\pi^0$  の崩壊  $z$  位置

図 5.9 に示すように、信号事象よりも  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が再構成した崩壊  $z$  位置が上流側に分布している。1.2.1 節で述べたように、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では真の崩壊  $z$  位置は CsI カロリメータに近い地点に分布しており、CsI カロリメータに近すぎる地点で崩壊をした事象は光子がビームホールをすり抜けるため検出されない。そのため、信号事象に比べて下流側に再構成した事象が少ない。また、2.2 節で述べたように上流側には veto 検出器が設置されており、これらの検出器と相互作用を起こした光子は CsI カロリメータで検出できないため、上流側で崩壊した事象は少なくなる。しかし、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では上流側に再構成した事象でも真の崩壊  $z$  位置は下流側であるため、上流の veto 検出器の影響を受けにくく、上流側に再構成した事象が多い。

## 5.2 まとめ

クラスターの形と運動学的変数それぞれに対して、MC で生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の間で違いがあることを確認できた。これらの違いを利用すれば、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減できる可能性は十分にある。次章から、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減する新たなカットを開発していく。

## 第 6 章

# クラスターの形の違いを用いた新たな削減手法の開発

前章で述べたように、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象ではクラスターの形に違いがある。本章では、この違いを利用して  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を削減する新たなカットの開発について述べる。

### 6.1 新たなカットの概要

新たなカットでは、まず、同一の事象に対して信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 2 通りの仮定を行い、3.3.8 節で述べた Shape  $\chi^2$  を 2 通り計算する。得られた Shape  $\chi^2$  の値から、後述する Likelihood を計算し、どちらの仮定の方がもっともらしいかを比較する。もし、信号事象を仮定した場合 (以後、信号事象仮定) よりも  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定した場合 (以後、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定) のほうが Likelihood の値が 1 に近ければ、その事象は  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の可能性が高い。

図 6.1 に信号事象仮定と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定の概念図を示す。以下、それぞれの仮定の詳細について述べる。

#### 6.1.1 信号事象仮定

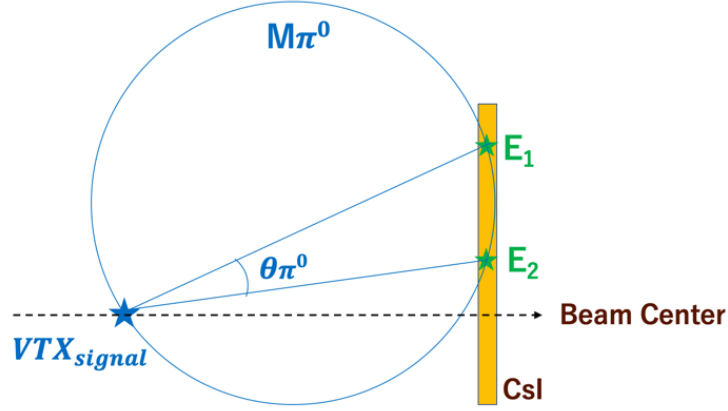
信号事象仮定では、1.1.4 節で述べた信号事象の再構成と同じ仮定を用いる。すなわち、 $\pi^0$  がビーム軸上で崩壊してできた 2 光子が 2 つのクラスターを作ったと仮定する。

#### 6.1.2 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定

$K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定では、以下の 2 点を仮定する。

- 親粒子の仮定  
 $K_L$  が直接崩壊してできた 2 光子が 2 つのクラスターを作ったと仮定する。
- 崩壊位置の仮定  
 $K_L$  がビーム軸上から離れた位置 (2 次コリメータの上流端と COE を結んだ直線上) で崩壊したと仮定する。

### Signal assumption



### $K_L \rightarrow 2\gamma$ BG assumption

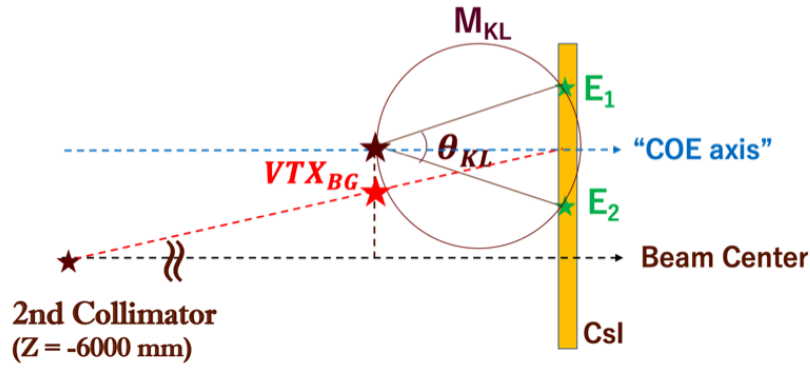


図 6.1 信号事象仮定 (上) と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定 (下) の概念図

まず、COE を通りビーム軸と並行な軸 (以後、COE 軸) 上に、 $K_L$  の不変質量を満たす崩壊  $z$  座標  $Z_{\text{vtx}}^{\text{bg}}$  を再構成する。次に、以下の式を用いて COE と 2 次コリメータの上流端 (0, 0, -6000 mm) を結んだ線上に崩壊  $x, y$  座標を外挿する。

$$X_{\text{vtx}}^{\text{bg}} = \frac{Z_{\text{vtx}}^{\text{bg}} - Z_{\text{csi}}}{Z_{\text{col}} - Z_{\text{csi}}} X_{\text{coe}} \quad (6.1)$$

$$Y_{\text{vtx}}^{\text{bg}} = \frac{Z_{\text{vtx}}^{\text{bg}} - Z_{\text{csi}}}{Z_{\text{col}} - Z_{\text{csi}}} Y_{\text{coe}} \quad (6.2)$$

ここで、 $Z_{\text{col}}$  は 2 次コリメータの上端部の  $z$  座標 ( $z = -6000$  mm)、 $X_{\text{vtx}}^{\text{bg}}$ ,  $Y_{\text{vtx}}^{\text{bg}}$ ,  $X_{\text{coe}}$ ,  $Y_{\text{coe}}$  はそれぞれ  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定で再構成した崩壊点の  $x, y$  座標と COE の  $x, y$  座標を表す。



## 6.2 Likelihood

### 6.2.1 Likelihood の定義

上で述べた通り、それぞれの仮定におけるもっともらしさを調べる際には、Shape  $\chi^2$  を用いた。この Shape  $\chi^2$  を用いて、以下のように、それぞれのクラスターにおける Likelihood  $L_i$  を定義する。

$$L_i = \frac{x_i^{\frac{k_i}{2}-1} e^{-\frac{x_i}{2}}}{2^{\frac{k_i}{2}} \Gamma(\frac{k_i}{2})} \quad (6.3)$$

ここで、 $x_i, k_i$  はそれぞれ  $i$  番目のクラスターの Shape  $\chi^2$ 、クラスターに含まれる CsI 結晶の数 (Shape  $\chi^2$  の自由度) であり、 $\Gamma(z)$  は以下の式で与えられるガンマ関数を表す。

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (6.4)$$

ただし  $z$  は正の有理数とする。

Likelihood の計算に用いた仮定が実際の状況と近ければ、この Likelihood の値は 1 に近づく。反対に、行った仮定が実際の状況と大きく異なれば、この Likelihood の値は 0 に近づく。

### 6.2.2 Likelihood の分布

#### 信号事象仮定での Likelihood の分布

図 6.2、図 6.3 に、MC を用いて生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象に対して、エネルギーが大きいクラスターと小さいクラスターにそれぞれに信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布を示す。どちらのクラスターでも、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象よりも信号事象の方が、信号事象仮定での Likelihood の値が 1 に近い。

以上より、信号事象仮定での Likelihood は、2つのクラスターどちらに対しても、正しい仮定をしたかどうかに関係なく感度をもつ。

#### $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を仮定した Likelihood の分布

図 6.4、図 6.5 に、MC を用いて生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象に対して、エネルギーが大きいクラスターと小さいクラスターにそれぞれに  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布を示す。どちらのクラスターでも、信号事象よりも  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の方が、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の値が 1 に近い。

以上より、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定での Likelihood は、2つのクラスターどちらに対しても、正しい仮定をしたかどうかに関係なく感度をもつ。

### 6.2.3 2つのクラスター間での Likelihood の相関

これまで、2つのクラスターに対してそれぞれ個別の Likelihood を調べた。ここからは、さらに削減能力を高めるため、2つのクラスター全体の Likelihood を計算したい。ここで、もし2つのクラス



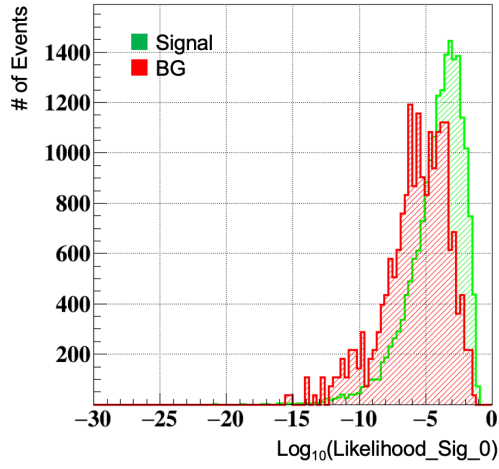


図 6.2 MC を用いて生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象において、エネルギーが大きい方のクラスターに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

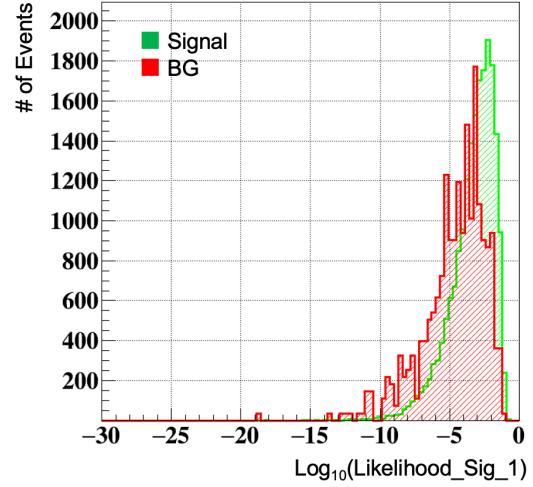


図 6.3 MC を用いて生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象において、エネルギーが小さい方のクラスターに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

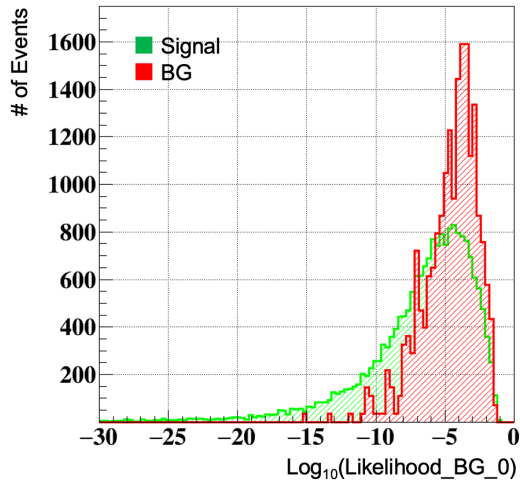


図 6.4 MC を用いて生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象において、エネルギーが大きい方のクラスターに対して  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

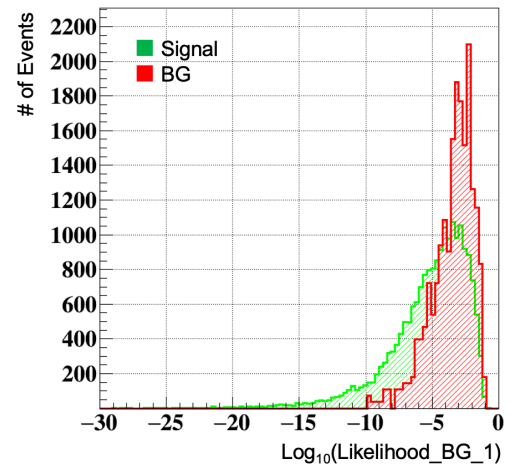


図 6.5 MC を用いて生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象において、エネルギーが小さい方のクラスターに対して  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

ターの Likelihood の相関が小さければ、それぞれの Likelihood の積を、全体の Likelihood とみなせる。そこで、2つのクラスター間の Likelihood の相関を調べた。

また、相関の度合いについては、以下の式で計算した相関係数  $r$  を用いて調べた。

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.5)$$

ここで、 $x, y$  は着目している 2 変数、 $n, x_i, y_i, \bar{x}, \bar{y}, s_{xy}, s_x, s_y$  はそれぞれ 総事象数、 $i$  番目の  $x$  と  $y$  の値、 $x$  と  $y$  の平均値、 $x$  と  $y$  の共分散、 $x$  の標準偏差、 $y$  の標準偏差を表す。

図 6.6、図 6.7 に、信号事象 MC に対して信号事象を仮定した場合と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定した場合の、2つのクラスター間の Likelihood の相関を示す。また、図 6.8、図 6.9 に、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象 MC で信号事象を仮定した場合および  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定した場合の、2つのクラスター間の Likelihood の相関を示す。左下に式 6.5 で計算した相関係数を示す。

いずれの場合でも相関係数は十分小さく、それぞれのクラスターに対して求めた Likelihood は独立であるとみなせる。したがって、2つのクラスター全体の Likelihood  $L$  を以下のように定義する。

$$L = L_1 \times L_2 \quad (6.6)$$

ここで  $L_1$  はエネルギーが大きい方のクラスターの Likelihood、 $L_2$  はエネルギーが小さい方のクラスターの Likelihood を表す。

図 6.10 (図 6.11) に、信号事象および  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC それぞれに対して信号事象仮定 ( $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定) をしたときの、2つのクラスター全体の Likelihood の分布を示す。どちらの仮定に対しても、その仮定と合致する MC の Likelihood の方が 1 に近い。

## 6.2.4 信号事象仮定と $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象仮定での Likelihood の相関

これまで、1つの事象に対して、信号事象仮定と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定をして 2通りの Likelihood を求めた。ここからは、この 2つの Likelihood から  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を効果的に削減できるカットを開発するために、2つの Likelihood 間の相関を調べた。

図 6.12、図 6.13 に、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象 MC に対して、それぞれ信号事象仮定および背景事象仮定を用いて求めた Likelihood の相関を示す。黒線は、それぞれの Likelihood が等しい値になる領域を示す。

信号事象の MC では、分布が黒い線の右下、すなわち信号事象を仮定した Likelihood の方が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定した Likelihood よりも大きい領域に多く分布している。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC では、分布が黒い線の左上、すなわち  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定した Likelihood の方が信号事象を仮定した Likelihood よりも大きい領域に多く分布している。したがって、この黒い線上の左上の領域の事象を棄却すれば、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を効果的に削減できる。これは、それぞれの仮定で求めた Likelihood の比を用いて事象選択をすることに対応する。

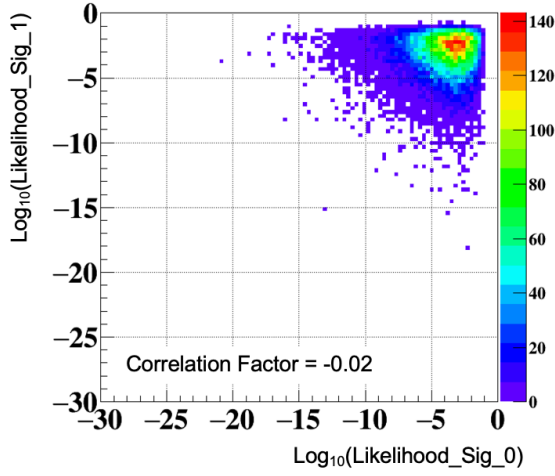


図 6.6 信号事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。

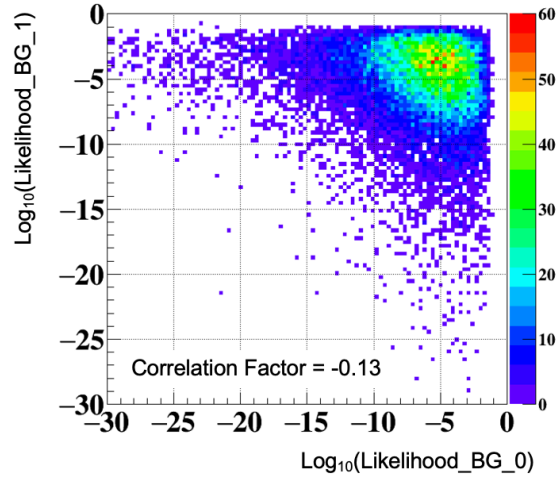


図 6.7 信号事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。

### 6.3 Likelihood Ratio

本節では、2つの Likelihood の比を用いたカットの定義、およびその  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力、データによる再現性の確認について述べる。

#### 6.3.1 Likelihood Ratio の定義

信号事象仮定および  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定で求めた 2つの Likelihood を用いて、Likelihood Ratio を以下のように定義する。

$$LR = \frac{L_{\text{sig}}}{L_{\text{sig}} + L_{\text{bg}}} = \frac{1}{1 + L_{\text{bg}}/L_{\text{sig}}} \quad (6.7)$$

ここで、 $L_{\text{sig}}$  は信号事象を仮定して求めた Likelihood、 $L_{\text{bg}}$  は  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood を表す。この Likelihood Ratio が 0 に近い事象は  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象である可能性が高く、1 に近い事象は信号事象である可能性が高い。

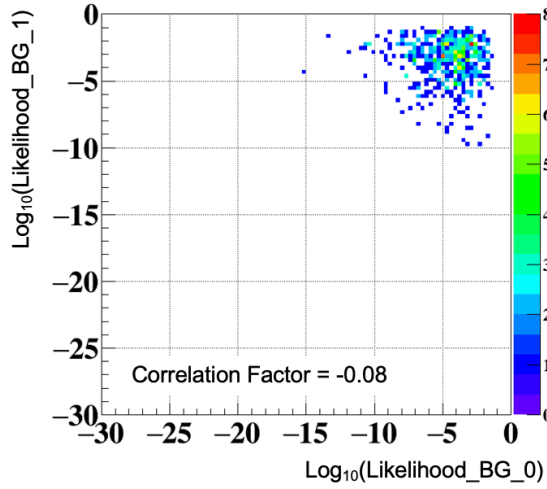


図 6.8  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。

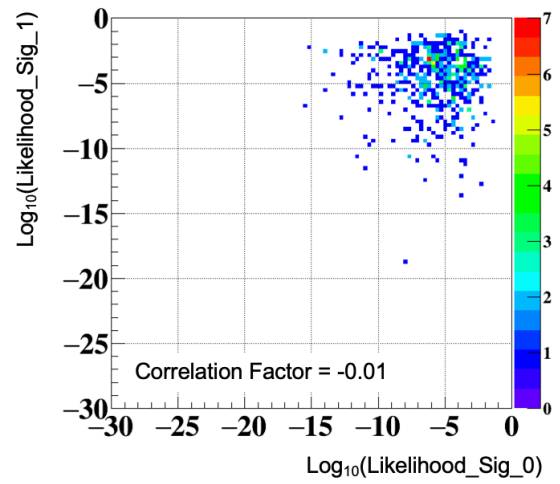


図 6.9  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC において、エネルギーが大きい方のクラスターと小さい方のクラスターそれぞれに対して  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の相関。横軸がエネルギーの大きい方のクラスターを用いて求めた Likelihood、縦軸がエネルギーが小さい方のクラスターを用いて求めた Likelihood を示す。相関係数を左下に示す。

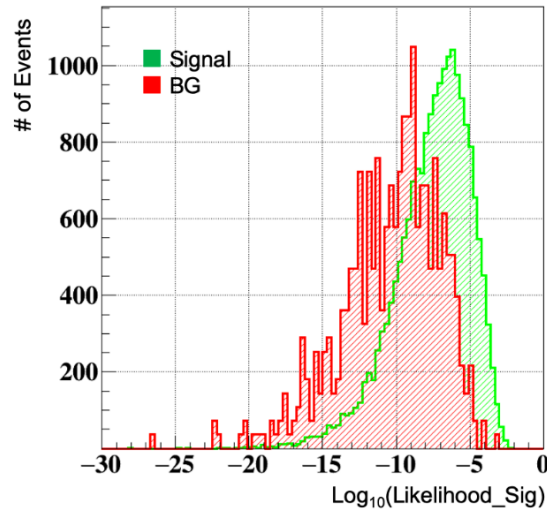


図 6.10 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC において、信号事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

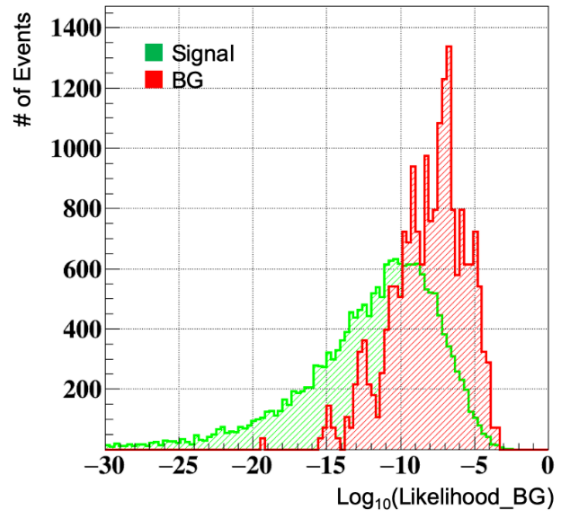


図 6.11 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC において、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を仮定して求めた Likelihood の常用対数の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

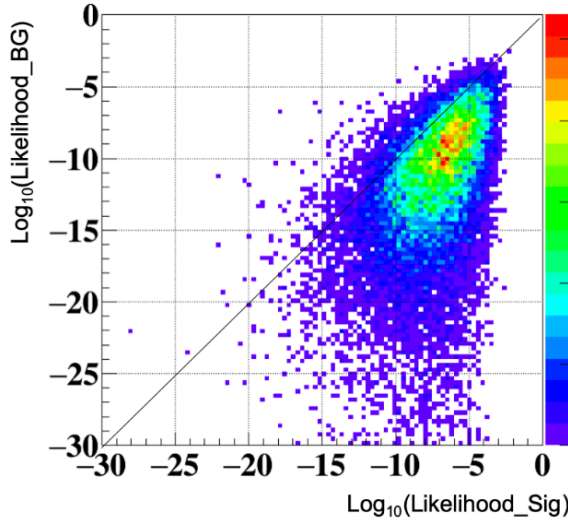


図 6.12 信号事象の MC において、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれを仮定したときの Likelihood の相関。横軸が信号事象仮定を、縦軸が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定をして求めた Likelihood を示す。黒線は、それぞれの Likelihood の値が等しい領域を表す。

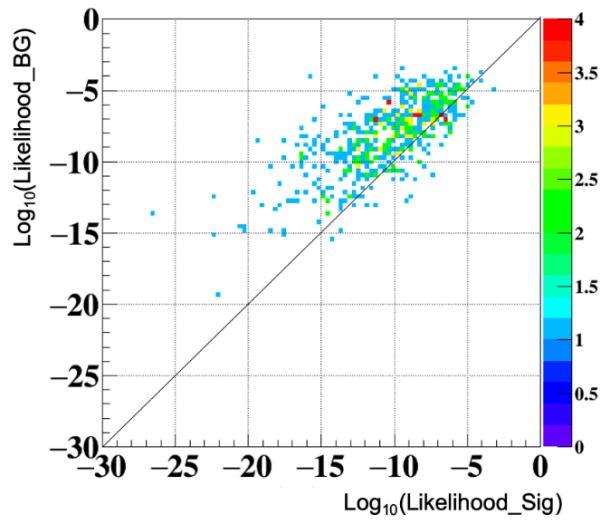


図 6.13  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC において、信号事象および  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれを仮定したときの Likelihood の相関。横軸が信号事象仮定を、縦軸が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定をして求めた Likelihood を示す。黒線は、それぞれの Likelihood の値が等しい領域を示す。

### 6.3.2 Likelihood Ratio によるカットの $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力

図 6.14 に、MC で生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれに対して求めた Likelihood Ratio の分布を示す。それぞれの分布から、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を大きく弁別できていることがわかる。閾値を 0.692 とし、この値以上の事象を選択した場合、信号感度を 90% 保ち、背景事象の 89% を削減できる。

### 6.3.3 データによる再現性の確認

前節では、MC のみを用いて、Likelihood Ratio の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を評価した。ここでは、データと MC の間で乖離が起きていないことを保証するため、以下のコントロールサンプルを用いて MC の再現性を確認した。

#### $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルによる確認

図 6.15 に、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊のデータと MC それぞれに対して求めた Likelihood Ratio の分布を示す。 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  で再構成された 3つの  $\pi^0$  の中で、もっともエネルギーの大きい  $\pi^0$  が崩壊してできた 2 光子によるクラスターを選択した。データ MC 間に大きな乖離はなく、MC はデータを再現している。また、データ、MC ともに 1 (Signal Like) にピークを持つ。これは、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  事象の多くが

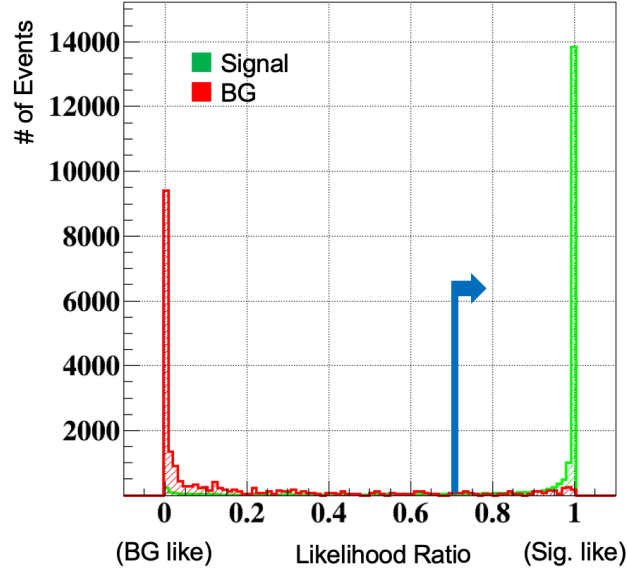


図 6.14 MC で生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象に対して求めた Likelihood Ratio の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示している。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

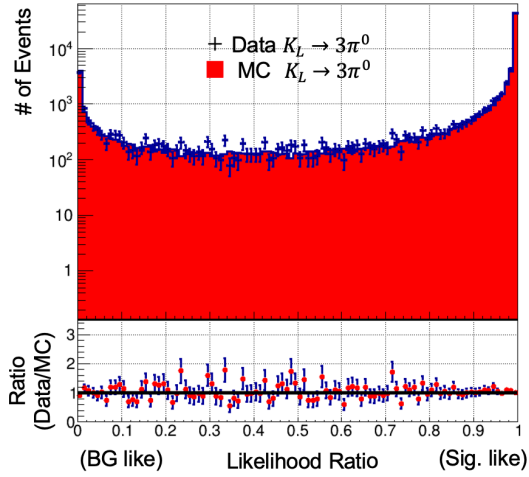


図 6.15  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  データと MC それぞれの Likelihood Ratio の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが MC を示す。データと MC は、それぞれの POT を用いて規格化した。

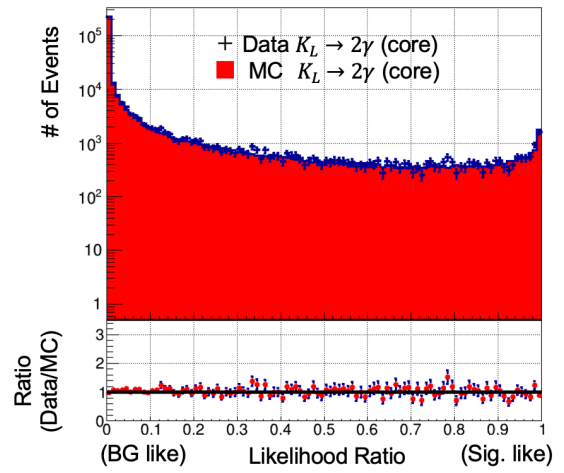


図 6.16 ビーム中の  $K_L$  が崩壊した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  データと MC それぞれの Likelihood Ratio の分布 (上) とデータと MC の比 (下)。黒い点がデータを、赤いヒストグラムが MC を示す。データと MC は、それぞれの POT を用いて規格化した。



ビーム軸に近い位置で崩壊し、さらに 2 光子の親粒子が  $\pi^0$  であることから、クラスターの形状と光子の CsI カロリメータへの入射角が信号事象と似ているためである。

#### $K_L \rightarrow 2\gamma$ サンプルによる確認

図 6.16 に、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊のデータと MC それぞれに対して求めた Likelihood Ratio の分布を示す。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象となる事象はデータでは統計が非常に少ないため、ビーム中の  $K_L$  が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊をした事象を用いた。データと MC の間に大きな乖離はなく、MC はデータを再現している。また、データ、MC ともに 0 (Background like) にピークを持つ。これは、ここで用いた  $K_L \rightarrow 2\gamma$  サンプルでは 2 光子の親粒子が  $K_L$  であり、COE がビーム中心軸近くであることから、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象仮定が実際の状況と合致するためである。

## 第 7 章

# 運動学的変数の違いを用いた新たな削減手法の開発

5.1.2 節で述べたように、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象は運動学的変数に違いがある。この違いを用いて、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減する新たなカットを開発する。

### 7.1 1つの運動学的変数を用いたカット

まず、1つの運動学的変数を用いたカットを検討する。ここでは、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の間でもっとも大きな違いがある、2光子のエネルギーの和に対して閾値を定めたときの  $K_L \rightarrow 2\gamma$  削減能力を調べた。

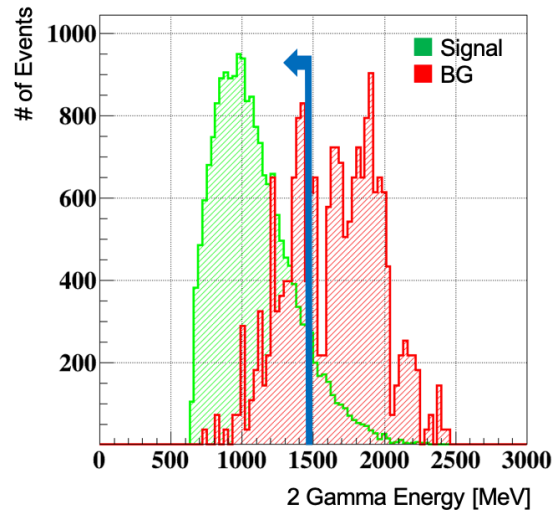


図 7.1 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における 2 光子のエネルギーの和の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。

図 7.1 に、MC で生成し、4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景



事象それぞれの、2 光子のエネルギーの和の分布を示す。5.1.2 節で述べたとおり、信号事象ではニュートリノがエネルギーを持ち去るのに対して、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では  $K_L$  が直接 2 光子へ崩壊するため、信号事象よりも 2 光子のエネルギーの和が大きい。ここで、2 光子のエネルギー和が 1500 MeV 以下の事象を選択した場合には、信号事象の感度 90% を保ち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 65% を削減できる。

## 7.2 多変数解析を用いたカット

次に、多変数を用いたカットを検討する。本研究では、TMVA (Toolkit for MultiVariate data Analysis with ROOT) を用いて多変数解析を行った [22]。

### 7.2.1 多変数解析の概要

多変数解析は、学習アルゴリズムを用いて信号事象と背景事象を分離する方法の 1 つである。学習アルゴリズムは、十分な数の信号事象と背景事象からなる訓練サンプルを与えられると、各事象がもつ複数の変数の値を入力とし、どのような事象が信号事象もしくは背景事象なのかを事前に学習する。着目するサンプルに多変数解析を実行すると、その事象が信号事象と背景事象のどちららしいかを各事象ごとに値として出力する。この出力の値に対して閾値をかけ、背景事象を削減する。

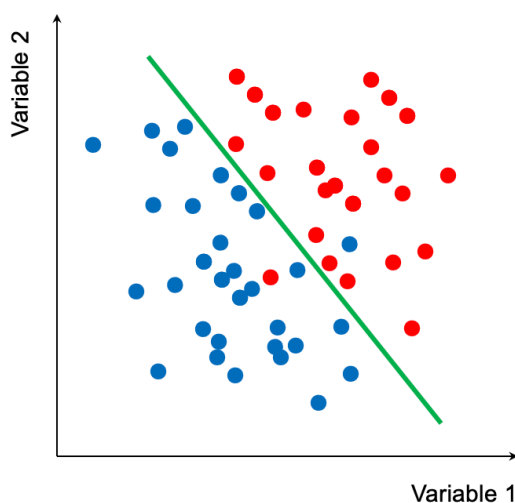


図 7.2 2 変数に対するフィッシャー線型判別法 (FD) の概念図。青を信号事象、赤を背景事象とした場合、緑色の線の右上の領域内にある事象を棄却することで、背景事象を削減する。

本研究では、TMVA で提供されているフィッシャー線型判別法 (Fisher Discriminant, FD) を用いて多変数解析を行った [23]。図 7.2 に、2 変数のみを考えたときの FD の概念図を示す。FD は、入力変数間の位相平面上において最も信号事象と背景事象を分離できる直線を決定する手法である。訓練サンプル数が少なくても比較的大きな削減性能を持ち、かつ学習アルゴリズムが明快で堅牢性が高いという特徴がある。

まず、訓練サンプルを用いて、 $k$  番目と  $l$  番目の入力変数  $x_k, x_l$  に対して以下のように定義する変数内行列  $W_{kl}$  を求める。

$$W_{kl} = \sum_{U=S,B} (x_{U,k} - \overline{x_{U,k}})(x_{U,l} - \overline{x_{U,l}}) = C_{S,kl} + C_{B,kl} \quad (7.1)$$

ここで、 $\overline{x}$  は変数の平均を、 $C_{S(B)}$  は信号事象 (背景事象) における全ての 2 変数間の相関係数行列を表す。

この変数内行列  $W_{kl}$  を用いて、以下のように定義する FD 係数  $F_k$  を求める。

$$F_k = \frac{\sqrt{N_S N_B}}{N_S + N_B} \sum_{l=1}^{n_{\text{var}}} W_{kl}^{-1} (\overline{x_{S,l}} - \overline{x_{B,l}}) \quad (7.2)$$

ここで、 $N_S, N_B$  はそれぞれ信号事象と背景事象の事象数、 $n_{\text{var}}$  は入力変数の総数を表す。

$i$  番目の事象に対する FD の出力 (FD 値)  $y_{F_i(i)}$  は以下の式で与えられる。

$$y_{F_i(i)} = -F_0 + \sum_{k=1}^{n_{\text{var}}} F_k x_k(i) \quad (7.3)$$

ここで、 $F_0$  は  $N_S + N_B$  事象全てから求めた FD 係数  $F_k$  の平均値である。

この FD 値  $y_{F_i(i)}$  に対して閾値をかけることで、背景事象を削減する。

## 7.2.2 多変数解析の訓練サンプル

多変数解析の信号事象と背景事象の訓練サンプルには、4.4.3 節で述べた全てのカットを用いて選別した信号事象の MC 9,755 事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC 540 事象を用いた。

## 7.2.3 多変数解析の入力変数

図 7.3、図 7.4 に、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の分布を示す。5.1.2 節で述べた変数をはじめとする、以下の 10 種類の運動学的変数を用いた。

- エネルギーが大きい方の光子のエネルギー
- エネルギーが小さい方の光子のエネルギー
- クラスタ間の距離
- Projection Angle
- 2 光子のエネルギーの和
- 再構成された  $\pi^0$  の  $P_T$
- 再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標
- COE 半径
- エネルギーが大きい方の光子の CsI カロリメータへの入射極角
- エネルギーが小さい方の光子の CsI カロリメータへの入射極角

いずれの変数も、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象では違いがある。

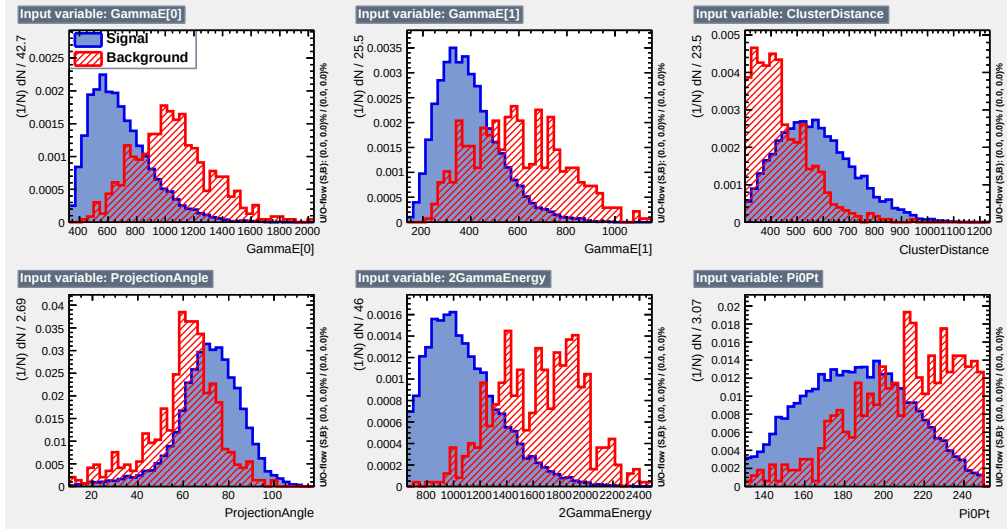


図 7.3 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の分布。青が信号事象を、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を表す。それぞれ、エネルギーが小さい方の光子のエネルギー (左上)、エネルギーが大きい方の光子のエネルギー (中上)、クラスター間の距離 (右上)、Projection Angle (左下)、2 光子のエネルギーの和 (中下)、再構成された  $\pi^0$  の  $P_T$  (右下) を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

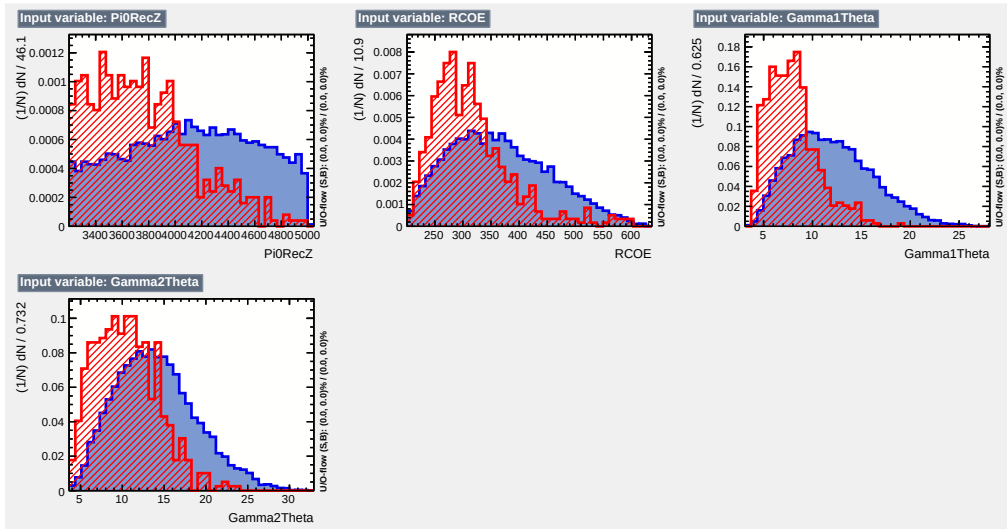


図 7.4 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の分布。青が信号事象を、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を表す。それぞれ、再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標 (左上)、COE 半径 (中上)、エネルギーが大きい方の光子の CsI カロリメータへの入射極角 (右上)、エネルギーが小さい方の光子の CsI カロリメータへの入射極角 (左下) を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。

また、図 7.5、図 7.6 に、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象における 2 つの入力変数間の相関係数の一覧を示す。この相関係数は、式 6.5 を用いて計算した。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のどちらにおいても、2 光子のエネルギーの和と、エネルギーが大きい方の光子のエネルギーの間に強い相関がある。また、COE 半径とクラスター間の距離の間にも強い相関がある。

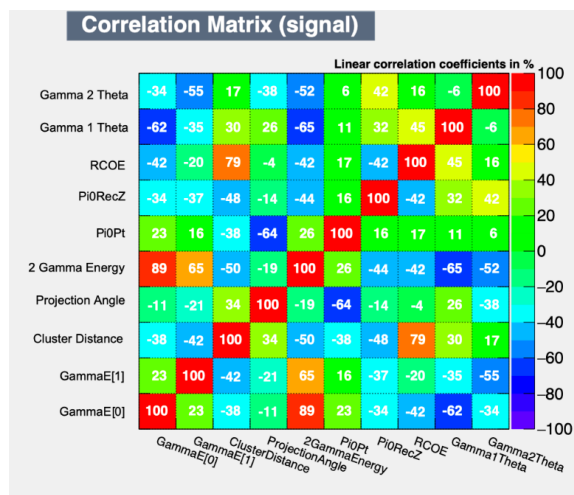


図 7.5 信号事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の 2 変数間の相関係数。相関係数は式 6.5 を用いて計算した。

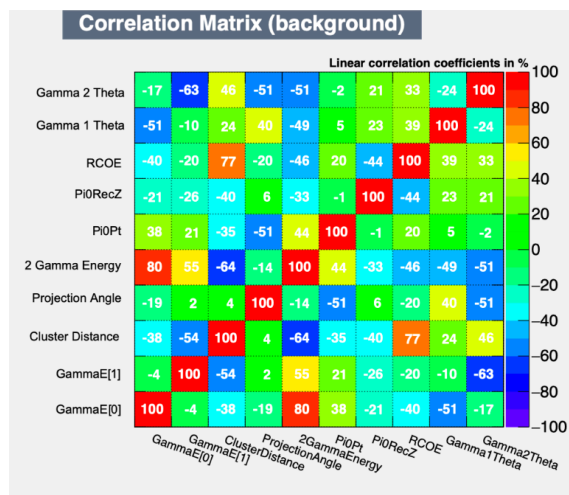


図 7.6  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、多変数解析の入力に用いた運動学的変数の 2 変数間の相関係数。相関係数は式 6.5 を用いて計算した。

## 7.2.4 多変数解析を用いたカットによる $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力

訓練サンプルとは別の信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC をテストサンプルとし、このテストサンプルに対して事前に学習した多変数解析を実行することにより、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を評価した。図 7.7 に、各分類器を用いた多変数解析の出力値に対する閾値を変えて得られる信号事象感度と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力の相関を示す。FD 値が 0.09 以上の事象を選択した場合、信号事象の感度 90% 保ち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 72% を削減できる。FD は、その他の分類器として検討した決定木判別法 (Boosted Decision Tree, BDT) および勾配決定木判別法 (Gradient Boosted Decision Tree, GBDT) よりも高い  $K_L \rightarrow 2\gamma$  削減能力をもつ。

## 7.2.5 過学習の確認

機械学習では、過学習 (overtraining) が起こっていないことを確認することが重要である。基本的に、機械学習は訓練サンプルを用いて訓練され、典型的な入力とそれに対する出力結果を与えるため、訓練サンプルとは異なるサンプルに対しても正しい出力を返すことが期待される。しかし、学習期間が長すぎたり、訓練サンプルが典型的なものでなかった場合には、本来学習させたい特徴とは無関係な特徴をとらえてしまう可能性がある。これを過学習と呼ぶ。このような過学習の状態では、訓練サンプル

に対する性能は向上するが、それ以外のサンプルに対しては性能が悪化するため、訓練サンプルとテストサンプルの出力の分布が異なる。

図 7.8 に、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の訓練サンプルおよびテストサンプルに対する、FD 値の分布を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象どちらにおいても、訓練サンプルとテストサンプルの分布に大きな乖離はない。したがって、過学習が起こっていないと判断した。

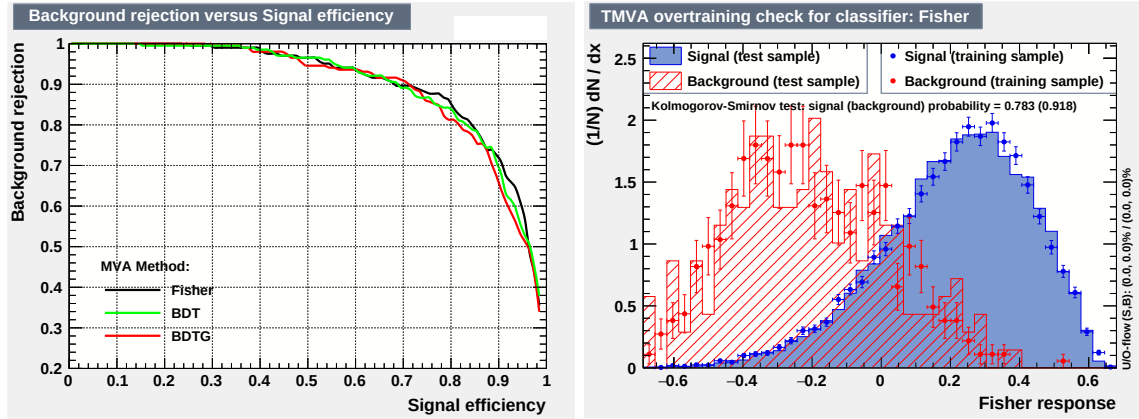


図 7.7 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象のテストサンプルでの、FD (黒)、BDT (緑)、BDTG (赤) での信号事象感度と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の削減能力の相関。

図 7.8 信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の訓練サンプル (ヒストグラム) およびテストサンプル (点線) に対する FD 値。青が信号事象を、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。

## 7.2.6 データによる再現性の確認

前節での多変数解析の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力は MC のみを用いて評価した。ここでは、データと MC の間で乖離が起きていないことを保証するため、以下のコントロールサンプルを用いて MC の再現性を確認した。

### $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルによる確認

図 7.9 に、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC をテストサンプルとして用いて得られた FD 値の分布を示す。ここでは、7.2.2 節と同じ訓練サンプルを用いた。また、2 光子は 6.3.3 節と同じ方法で選択した。データと MC それぞれの FD 値の分布に大きな乖離はなく、MC はデータを再現している。また、データと MC とともに、信号事象の MC と似た FD 値分布を示した。これは、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊の多くがビーム軸に近い位置で崩壊し、さらに 2 光子の親粒子が  $\pi^0$  であることから、信号事象と運動学的に似ているためである。

### $K_L \rightarrow 2\gamma$ サンプルによる確認

図 7.10 に、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  のデータと MC をテストサンプルとして用いて得られた FD 値の分布を示す。 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象となる事象はデータでは統計が非常に少ないため、ビーム中の  $K_L$  が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩

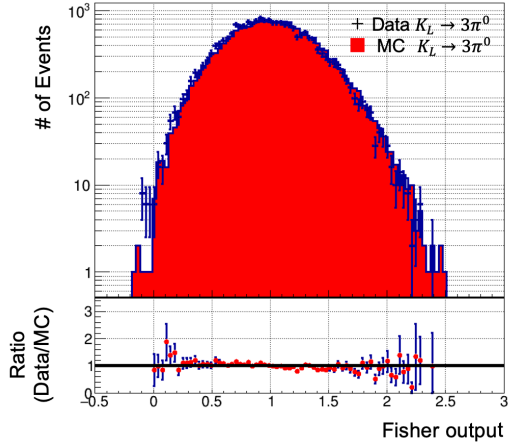


図 7.9  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータと MC に対する FD 値の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒十字がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC は POT を用いて規格化した。

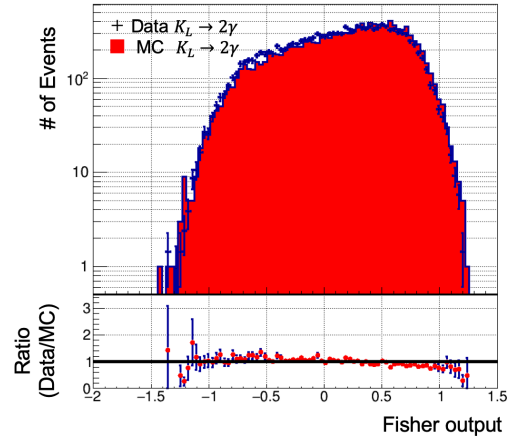


図 7.10  $K_L \rightarrow 2\gamma$  のデータと MC に対する FD 値の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒十字がデータ、赤いヒストグラムが MC を表す。データと MC は POT を用いて規格化した。

壊をした事象を用いた。ここでは、7.2.2 節と同じ訓練サンプルを用いた。データと MC それぞれの FD 値の分布に大きな乖離はなく、MC はデータを再現している。また、データと MC とともに、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC と似た FD 値分布を示した。これは、ここで用いた  $K_L \rightarrow 2\gamma$  サンプルの 2 光子の親粒子が  $K_L$  であり、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象と運動学的に似ているためである。

### 7.3 まとめ

本章では、運動学的変数を用いたカットとして、1 変数のみを用いたカットと、多変数解析を用いたカットについて検討した。多変数解析を用いたカットは 1 変数のみを用いたカットよりも  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力が高く、信号感度 90% を保ち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 72% を削減できる。

## 第 8 章

# 2つのカットを組み合わせたときの $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力

これまで、クラスターの形および運動学的変数の違いを用いて、Likelihood Ratio および多変数解析を用いた2種類のカットを開発し、ともに高い  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を持つことを確認した。本章では、これらの2つのカットの相関について調べたのち、2つのカットを組み合わせたときの  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を評価する。

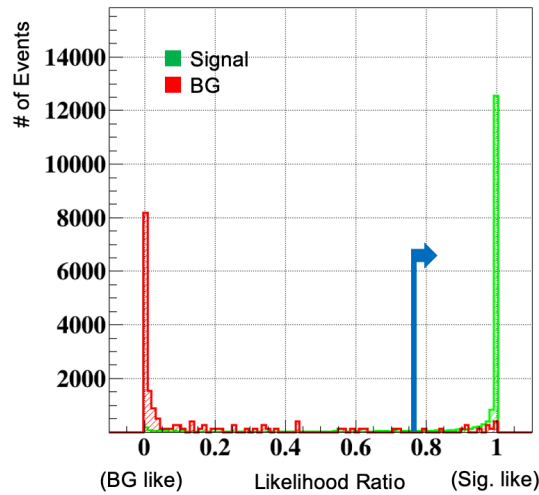


図 8.1 多変数解析によるカットをかけた後の、MC で生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象における Likelihood Ratio の分布。緑が信号事象、赤が  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を示す。信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象それぞれの事象数を用いて規格化した。Likelihood Ratio の閾値を 0.764 とし、それ以上の事象を選択すると、信号事象の感度を 90% を保ち  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 92% を削減できる。



## 8.1 2つのカットの相関

図 8.1 に、FD 値によるカットをかけた後の、MC で生成した信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象における Likelihood Ratio の分布を示す。ここで、Likelihood Ratio の閾値を 0.764 とし、それ以上の事象を選択した場合、信号事象の感度を 90% に保ち、背景事象の 92% を削減できる。これは、多変数解析のカットをかけていない MC に対する Likelihood Ratio の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力である 89% を上回る。したがって、2つのカットは相関が小さく、それぞれ独立した  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減できる。

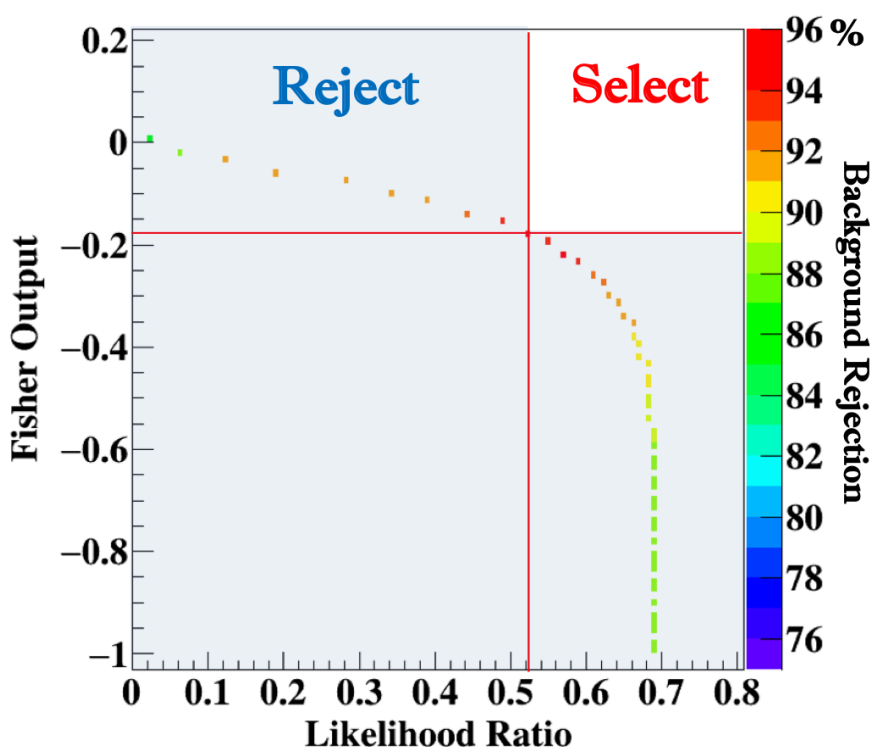


図 8.2  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、Likelihood Ratio と多変数解析の出力の値に対して 90% の信号事象感度を満たす組み合わせでの  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力。2本の赤い線は、それぞれ最適化された2変数の閾値を示す。影をつけた領域を棄却した場合、信号感度 90% で  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を 94% 削減できる。

## 8.2 2つのカットを組み合わせたときの $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象削減能力

2つのカットを組み合わせたときの  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を調べた。図 8.2 に、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象および信号事象の MC において、信号事象感度が 90% に対応する 2つのカットの閾値の組み合わせそれぞれにおける  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象削減能力を示す。



2つの赤い線は、2変数の最適化された閾値を示し、それぞれの値として、Likelihood Ratio では 0.51、多変数解析の出力では-0.18 である。2変数がそれぞれ閾値以下の領域、すなわち図 8.2 の青い影をつけた領域内にある事象を棄却すれば、信号事象の感度を 90% 保ち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 94% を削減できる。

## 第 9 章

# 標準理論感度で予測される $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数

これまで、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を新たに見積もり、新たな開発削減方法によって  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を大幅に削減できることを示した。本章では、これらの知見を活かし、標準理論感度 (SES が  $3 \times 10^{-11}$  の感度) で予測される  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を見積もる。

まず、今後のランで設置する荷電  $K$  中間子 veto 検出器によるハロー  $K_L$  フラックスへの寄与を評価する。この寄与を考慮した上で、標準理論感度で予測される  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を評価する。最終的に、本研究で開発したカットによって標準理論感度での  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象がどこまで削減されるかを評価し、本研究の結論を導く。

### 9.1 荷電 $K$ 中間子 veto 検出器による散乱の影響

4.7 節で述べた荷電  $K$  背景事象を削減するため、今後のランでは UCV (Upstream Charged Veto) を設置してデータの取得を行う。UCV はプラスチックシンチレータで荷電粒子を検出するが、ビーム中の  $K_L$  が散乱することによってハロー  $K_L$  フラックスが大きくなるおそれがある。この影響を見積もるため、2019 年に行ったランにおいて、試作型の UCV をビーム中に入れた場合と入れなかった場合にデータを取得し、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルからそれぞれのハロー  $K_L$  のフラックスを比較した。なお、この試作型の UCV では、プラスチックシンチレータの厚さが 1 mm であった。

図 9.1 に、試作型の UCV をビーム中に入れた場合と入れなかった場合の  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルにおける COE 半径の分布を示す。赤が試作型 UCV をビーム中に入れたとき、青が入れなかったときの事象を示す。それぞれ事象数は POT を用いて規格化した。ハロー  $K_L$  の事象数は、試作型 UCV を入れた場合には 46 事象、入れなかった場合は 13.1 事象であった。ビーム中に試作型 UCV を入れたことで、入れなかった場合に比べて、ハロー  $K_L$  のフラックスが 3.51 倍になった。よって、1 mm 厚のプラスチックシンチレータによるハロー  $K_L$  フラックスの増分は  $3.51 - 1 = 2.51$  である。また、 $K_L$  と物質との相互作用の起こりやすさは、物質の厚さに比例する。したがって、現在検討中の 0.2 mm 厚のプラスチックシンチレータ UCV を用いた場合、ハロー  $K_L$  フラックスの増分は  $2.51 \times 0.2 = 0.50$  となり、UCV を用いたときのハロー  $K_L$  フラックスは 1.50 倍になる。さらに、規格化をする前の事象数から、この値の統計誤差を 0.14 と評価した。

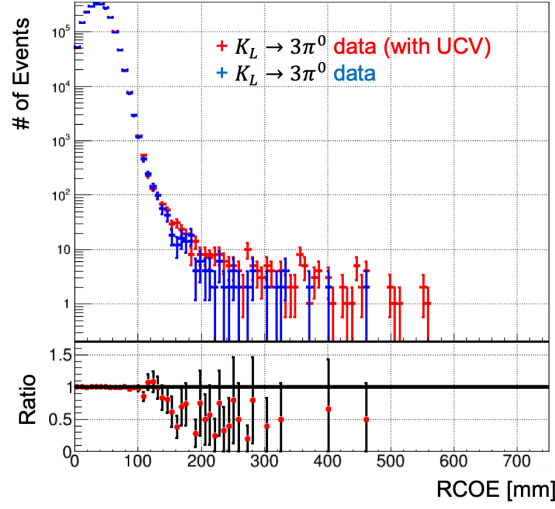


図9.1 試作型UCVをビーム中に入れた場合(赤)と入れなかった場合(青)の $K_L \rightarrow 3\pi^0$ サンプルにおけるCOE半径の分布(上)およびデータとMCの比(下)。POTを用いてそれぞれの事象を規格化した。

以上より、0.2 mmの厚さのUCVと $K_L$ の散乱によって、ハロー $K_L$ フラックスは $(1.50 \pm 0.14)$ 倍に大きくなると評価した。この影響を考慮した上で、標準理論感度での $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数を見積もる。

## 9.2 標準理論感度で予測される $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象数

図に、4.4.3節で述べたカットを全て用いて選別した $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象のMCにおける再構成された $\pi^0$ の崩壊 $z$ 座標と横方向運動量の分布を示す。これらの事象にはハロー $K_L$ フラックスの補正を行い、前節で述べたUCVによるハロー $K_L$ フラックスへの散乱の影響を考慮した。また、2016, 2017, 2018年に取得したデータの解析におけるPOTとSESから、標準理論感度におけるPOTを以下のように仮定した。

$$\text{POT}_{\text{SM}} = \frac{\text{SES}_{2016-2018}}{\text{SES}_{\text{SM}}} \text{POT}_{2016-2018} = 7.3 \times 10^{20} \quad (9.1)$$

各領域内の事象数および統計誤差の評価には、4.6節と同じ手法を用いた。統計誤差は、UCVによるハロー $K_L$ フラックスの影響における統計誤差も考慮して求めた。結果として、信号領域内に $(11.94 \pm 1.40)$ 事象を見積もった。

また、これらの事象に対して、本研究で開発したLikelihood RatioとFDを組み合わせたカットを用いて選別を行った後の、再構成された $\pi^0$ の崩壊 $z$ 座標と横方向運動量の散布図を図9.3に示す。上と同様に中央値と統計誤差および系統誤差を求め、新たに開発したカットによって信号事象感度が10%失われることを考慮した結果、信号領域内に $(0.79 \pm 0.26)$ 事象を見積もった。これは、94%の $K_L \rightarrow 2\gamma$ 背景事象を削減できたことに対応する。

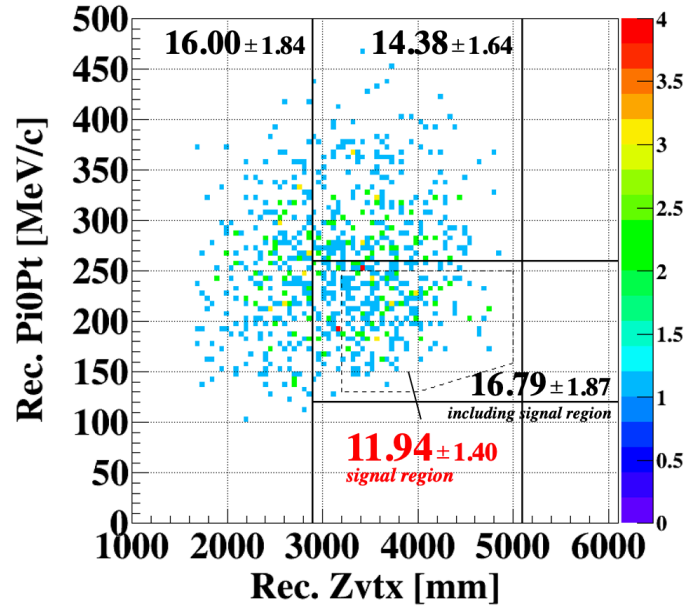


図 9.2 Likelihood Ratio カットと多変数解析によるカットをかける前の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標と横方向運動量の相関。SES が  $3 \times 10^{-11}$  のときのそれぞれの領域内の事象数を数字で示す。

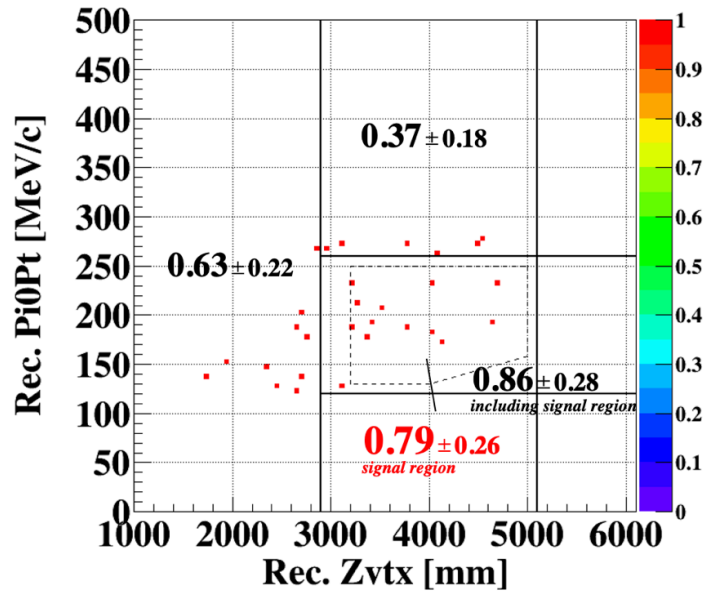


図 9.3 Likelihood Ratio カットと多変数解析によるカットをかけた後の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の MC における、再構成された  $\pi^0$  の崩壊  $z$  座標と横方向運動量の相関。SES が  $3 \times 10^{-11}$  のときのそれぞれの領域内の事象数を数字で示す。

## 第 10 章

# 考察

### 10.1 事象選別によるハロー $K_L$ フラックスの補正係数への影響

本研究では、ハロー  $K_L$  フラックスの補正係数を求める際に 3.3.6 節で述べた事象選別を行った。この事象選別では、データの統計量を増やすため、KOTO 実験の解析において通常用いている  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  崩壊へのカットのうち、いくつかのカットを緩めている。この事象選別による補正係数への影響を調べるため、3.3.6 節で述べたカットのみを用いて事象選別をした場合と、さらに以下で述べるカットを用いて事象選別を行った場合のハロー  $K_L$  フラックスの補正係数を比較した。

#### 10.1.1 事象選別

##### 運動学的カット

図 10.1 に、ここで用いた運動学的カットの一覧を示す。3.3.6 節で述べたカットをかけた後の  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルに対して、さらにこれらのカットをかけて事象選別を行った。

表 10.1  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルに対して新たに用いた運動学的カット一覧

| selection          | 閾値                                           |
|--------------------|----------------------------------------------|
| $K_L$ 再構成質量        | $ \Delta M_{K_L}  \leq 15 \text{ MeV}/c^2$   |
| $\pi^0$ 再構成質量      | $ \Delta M_{\pi^0}  \leq 10 \text{ MeV}/c^2$ |
| $\pi^0$ 再構成 $z$ 位置 | $ \Delta Z_{\pi^0}  \leq 400 \text{ mm}$     |
| $\chi_z^2$         | $\chi_z^2 \leq 20$                           |

- $K_L$  の再構成質量

再構成された  $K_L$  の崩壊位置と光子のヒット位置から再構成した  $K_L$  の不変質量が、 $K_L$  の質量の文献値 [24] である  $497.614 \text{ MeV}/c^2$  に対して  $15 \text{ MeV}/c^2$  以内であることを要求する。このカットによって、 $K_L$  の崩壊に起因しない事象を削減できる。

- $\pi^0$  の再構成質量

再構成された  $K_L$  の崩壊位置と光子のヒット位置から再構成した 3 つの  $\pi^0$  の不変質量が、すべて  $\pi^0$  の質量の文献値 [25] である  $134.977 \text{ MeV}/c^2$  に対して  $10 \text{ MeV}/c^2$  以内であることを要求

する。このカットによって、 $\pi^0$  に起因しない光子による事象を削減できる。

- $\pi^0$  の再構成  $z$  位置

3 つの  $\pi^0$  の再構成  $z$  位置が、 $K_L$  の再構成  $z$  位置から 400 mm 以内であることを要求する。このカットによって、 $K_L$  の崩壊に起因しない事象を削減できる。

- $\chi_z^2$

3.3.5 節で述べた  $\chi_z^2$  が 20 より小さいことを要求する。このカットによって、odd-paring 事象を削減できる。

#### veto 検出器を用いたカット

表 10.2 に、veto 検出器を用いたカットの一覧を示す。3.3.6 節で述べたカットをかけた後に、さらにこれらのカットをかけて事象選別を行った。

表 10.2  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  サンプルに対して新たに用いた veto 検出器のエネルギー閾値一覧。

| 検出器                                     | 閾値    |
|-----------------------------------------|-------|
| NCC                                     | 1 MeV |
| Hinemos                                 | 1 MeV |
| FB, MB, IB                              | 1 MeV |
| CC04, CC05, CC06 (CsI crystal)          | 1 MeV |
| CC04, CC05, CC06 (plastic scintillator) | 1 MeV |

#### 10.1.2 補正係数の比較

図 10.1 に、10.1.1 節で述べたカットを用いて事象選別をした  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータおよび MC サンプルにおける COE 半径の分布 (上) およびデータと MC の比 (下) を示す。また、図 10.2 に、3.3.6 節で述べたカットのみを用いた場合 (赤) と、3.3.6 節で述べたカットに加えて 10.1.1 節で述べたカットを用いた場合 (青) の  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  データおよび MC から得たハロー  $K_L$  の補正係数の比較結果を示す。

3.3.6 節で述べたカットに加えて 10.1.1 節で述べたカットを用いた場合 (青) では、COE 半径が 540 mm 以上の領域にはデータ点がないため、補正係数が定義できない。しかし、COE 半径が 540 mm 以下の領域では、2 つの補正係数の値に大きな差はなく、統計誤差の範囲内である。よって、事象選別による影響は小さい。

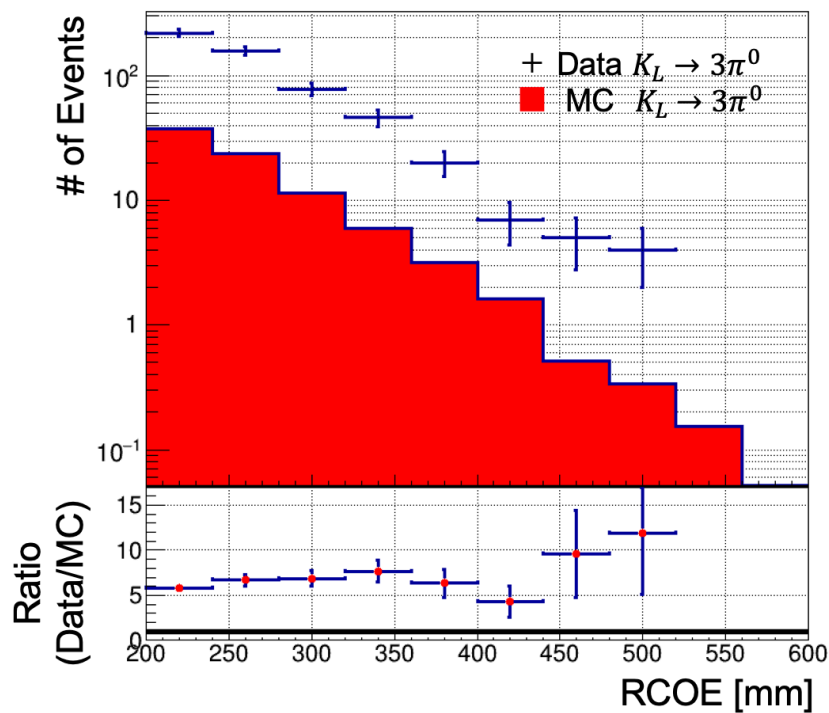


図 10.1 3.3.6 節で述べたカットに加えて、10.1.1 節で述べたカットを用いて事象選別した  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  のデータおよび MC における COE 半径の分布 (上) およびデータと MC の比 (下)。黒い十字がデータを、赤いヒストグラムが MC をそれぞれ表す。データと MC はそれぞれの POT を用いて規格化した。

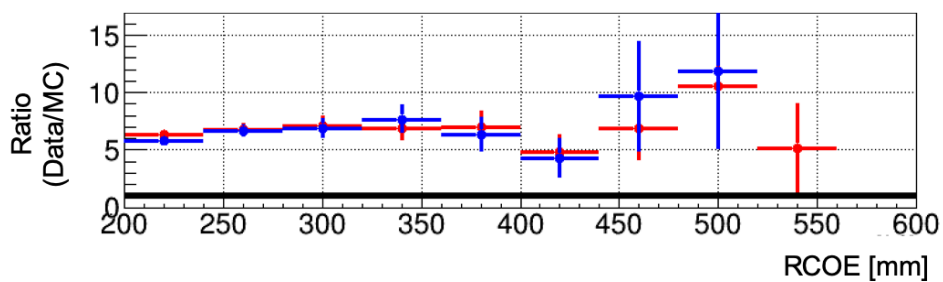


図 10.2 3.3.6 節で述べたカットのみを用いて事象選別をした場合 (赤) と、3.3.6 節で述べたカットに加えて 10.1.1 節で述べたカットを用いて事象選別をした場合 (青) の  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  データおよび MC から得たハロー  $K_L$  フラックスの補正係数の比較結果。

## 第 11 章

# 結論

KOTO 実験では、2016, 2017, 2018 年に取得したデータに対して解析を行い、SES が  $7.2 \times 10^{-10}$  のデータに対して信号領域に 3 事象を観測した。これは予測されていた背景事象数 0.05 を大きく上回る数であり、これが新物理による寄与かどうかを慎重に評価するため、blind region を開けた後で背景事象数を新たに見積もった。

本研究では、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の新たな見積もりを行った。これまで  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数の見積もりに用いていた MC はデータを再現していなかったため、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$  データから測定したハロー  $K_L$  フラックスを用いて MC を補正した。結果として、SES が  $7.2 \times 10^{-10}$  の場合の  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を、新たに  $(0.26 \pm 0.07)$  事象と見積もった。

また、今後のデータ解析において  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象を削減するため、新たなカットを開発した。まず、信号事象と  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の間でのクラスターの形の違いや運動学的変数の違いについて調べ、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の削減可能性が十分にあることを確認した。それらの知見を生かし、クラスターの形の違いを用いた Likelihood Ratio カットと、運動学的変数の違いを用いた FD カットを新たに開発した。2つのカットは相関が小さく、両者を組み合わせると、信号事象の感度を 90% 保ち、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象の 94% を削減できる。最終的に、SES が  $3 \times 10^{-11}$  の場合に予測される  $K_L \rightarrow 2\gamma$  背景事象数を  $(0.79 \pm 0.26)$  事象と見積もった。



## 謝辞

研究生活および本論文の執筆にあたってお世話になった方々に、この場を借りてお礼申し上げたいと思います。

山中卓教授には、私が山中研究室で学ぶ機会をいただき、2年間お世話になりました。研究において物事の本質を捉え理解することの大切さや、他者に自分の成果を伝えるための術など、多くのことを学ばせていただきました。ありがとうございました。

南條創准教授には、主に技術的な面でお世話になりました。研究の基礎となる考え方から一つ一つコメントやアドバイスをいただき、丁寧に鍛えていただきました。また、私が解析で行き詰まった際などにはお力を貸していただき、何度も苦境を助けていただきました。ありがとうございました。

大阪の KOTO 実験のメンバーの小寺克茂さん、清水信宏さん、篠原智史さんにも感謝を申し上げます。小寺さんには、ミーティングなどでご指摘をいただき、非常に勉強になりました。また、その優しいお人柄に幾度となく癒されました。清水さんには、実験の基礎的な事項から、シミュレーションの手法など研究の要となる部分まで、多くのことを教えていただきました。また、研究で行き詰まった時にご相談した際にはいつもの確かなアドバイスをいただき、研究を大きく進めることができました。篠原さんには、実験の解析に関して基礎的な部分から丁寧に教えていただきました。また、夜遅くまで研究の方針などのご相談に付き合っていたり、研究を進めるヒントを多く与えていただき、大変お世話になりました。ありがとうございました。

また、既に卒業された KOTO 実験の先輩である大杉真優さんには、様々な面でお世話になりました。いつも気遣っていただき、研究以外の就職活動などについてもご相談させていただきました。ありがとうございました。

KOTO 実験の同期の白石諒太くん、Taylor Cassidy Nunes くん、1つ下の後輩の加藤大志くん、花井幸太くんとは研究内容は異なりましたが、ミーティング等で発表を聞いたり、指摘をもらったりと非常に刺激になりました。特に、12月のビームテストで夜遅くまで頑張っている姿を見て、私も頑張らなければと励まされました。

KEK の野村正准教授、塩見公志助教には、シミュレーションや解析等についてご相談させていただいたり、様々なことでお世話になりました。ありがとうございました。また、書き切れませんが、他 KOTO コラボレーションの方々にも、ミーティングの際に意見をいただき、お世話になりました。

秘書の藤阪千代さんには、J-PARC の入稿申請や出張申請など、事務手続きの面で大変お世話になりました。いつも素早くご対応していただけるおかげで、滞りなく研究や発表を進めていくことができました。事務手続き以外にも様々な面で気遣っていただき、研究室での生活を支えていただきました。ありがとうございました。

また、KOTO 実験以外の山中研究室の皆様にもお世話になりました。同期の Lakmin Wickremasinghe くんとは、研究内容は大きく違いましたが、お互いの研究の話をするのが楽しかったです。いつも気さくに話しかけてくれたおかげで、2 年間の研究生生活を気持ちよく過ごすことができました。廣瀬 穰助教、大西裕二さん、山家谷昌平さん、Quin Huong Vuong さん、Mario Gonzalez くん、岩田和志くん、小島陽紀くん、学部 4 年生の荒久田周作くん、小野啓太くん、藤田侑葵子さんには、学会発表練習や論文紹介などで鋭いコメントをいただきました。また、日々の昼食や研究室旅行などで雑談や議論をするのも楽しかったです。

また、副査の中野貴志教授、吉田斉准教授には建設的なご指摘をいただき、感謝しています。

最後に、私の選んだ進路に対していつも応援し見守ってくれた家族に、深い感謝の意を伝えたいと思います。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] J. H. Christenson *et al.* Phys. Rev. Lett. **13** 138-140 (1964).
- [2] M. Kobayashi and Masukawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973).
- [3] N. Cabibbo, Phys. Rev. Lett. **10**, 531-533 (1963).
- [4] P. Heut and E.Sather, Phys. Rev. D **51**, 379-394 (1995).
- [5] A. J. Buras *et al.* J. High Energy Phys. **11**, 33, (2015).
- [6] L. S. Littenberg, Phys. Rev. D **39**, 3322-3324 (1989).
- [7] V. Cirigliano *et al.* Rev. Mod. Phys. **84**, 399-447 (2012).
- [8] J-PARC, <https://j-parc.jp/c/index.html>
- [9] S. Shihohara, *et al.* "Study of the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay at the J-PARC KOTO experiment" CoRR, (2020).
- [10] K. Sato, *et al.* Nucl. Instr. and Meth. A, **982**, 164527 (2020).
- [11] R. Murayama *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **953**, 163255 (2020).
- [12] T. Matsumura *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **795**, 19 (2015).
- [13] D. Naito *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 023C01 (2016).
- [14] Y. Sugiyama *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **62**, 1115-1121 (2015).
- [15] Y. Maeda, Ph.D. thesis "Search for the Decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  with a Neutron-Insensitive Gev Energy Photon Detector", Kyoto Univ. (2016).
- [16] T. Shimogawa, Nucl. Instr. and Meth. A, **623** 585 (2010).
- [17] R. Brun, *et al.*, Geant3 Users Guide, CERN DD/EE/84-1. (1985).
- [18] J. W. Lee, Ph.D. thesis "Energy Calibration Method for the KOTO CsI Calorimeter", Osaka Univ. (2014).
- [19] 佐藤和史, 修士論文 "CsI calorimeter 上に作られる cluster shape を用いた background の識別", 大阪大学 (2008).
- [20] K. Nakagiri, Ph.D. thesis "Search for the Decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  at the J-PARC KOTO Experiment", Kyoto Univ. (2019).
- [21] Y. C. Tung, Physics in Collision, (2019).
- [22] A.Hoecker, *et al.* TMVA4-Toolkit for Multivariate Data Analysis with ROOT Users Guide 2009.
- [23] R. A. Fisher, Annals Eugenics **7**, 179 (1936).
- [24] Particle Data Group, <https://pdg.lbl.gov/2020/listings/rpp2020-list-K-zero-L.pdf>

- 
- [25] Particle Data Group, <https://pdg.lbl.gov/2020/listings/rpp2020-list-pi-zero.pdf>