$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 実験における
カロリーメーターからの電磁シャワーの洩れの研究

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻

山中卓研究室 博士前期課程 2 年

西 宣彦

平成 17 年 3 月 28 日

概要

$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊実験は、CP の破れを生む小林益川行列の複素成分 (η) を測定する有力な方法である。モンテカルロシミュレーションを用いて、崩壊領域をすき間なく覆う円筒状の光子検出器での、電磁シャワーの洩れが及ぼす影響を調べ、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊 を集める方法を研究をした。

円筒の側面で、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊を観測しても、シャワーの洩れによって、シグナルと見なされなくなる。よって、円筒の半径をできる限り大きくし、円筒の底面に CsI を置き、側面を veto 検出器として、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の観測をすることを提案する。

J-PARC の 50GeV/c 加速器、1.7×10^{14} protons per pulse を想定し、検出器の半径を 150cm とすると、3 年間 $(3 \times 10^7$秒) で、シグナル事象数は 109、S/N が 1.2、η の精度を 6.7%の精度で測定できると期待できる。

目 次

第 1 章 序論 **12**

1.1 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ の物理 12

1.1.1 CP 非保存 12

1.1.2 中性 K 中間子 12

1.1.3 小林益川行列 13

1.1.4 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊 13

1.2 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 実験 15

1.3 研究の目的 15

第 2 章 シャワーの洩れ **17**

2.1 検出器 17

2.2 シャワーの洩れの大きさ 17

2.3 シャワーの洩れの性質 18

2.3.1 洩れ出る粒子 18

2.3.2 入射角度依存性と入射エネルギー依存性 20

2.3.3 カロリーメーターに占めるシンチレーターの割合 20

2.4 結果 21

第 3 章 シャワーの洩れが及ぼす影響 **24**

3.1 検出器と環境 24

3.1.1 K_L ビーム 24

3.1.2 検出器の形と性能 27

3.2 シャワーの洩れによるシグナルアクセプタンスの損失 27

3.2.1 シグナルの選択 28

3.2.2 シグナルアクセプタンスの Veto threshold 依存性 29

3.2.3 シグナルアクセプタンスの検出器の半径依存性 32

3.2.4 カロリーメーターの改良 32

3.3 Dead time 33

3.3.1 Dead time の算出 33

3.3.2 Dead time の veto threshold 依存性 34

3.3.3 Dead time の検出器の半径依存性 35

3.3.4 カロリーメーターの改良 35

3.4 結果 36

第 4 章 η の誤差 **37**
4.1 検出器と環境 . . . 37
4.1.1 検出器の配置 . . . 37
4.1.2 光子検出器の性能 . . . 37
4.1.3 イベントに対する重み . . . 38
4.1.4 η の誤差の見積もり . . . 39
4.2 解析 . . . 39
4.2.1 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーター (Case A) . 39
4.2.2 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーターの手前に厚さ 10cm のシンチレーターを置く (Case B) . . . 43
4.2.3 CsI カロリーメータ (Case C、D) . . . 46
4.3 結果 . . . 47

第 5 章 30GeV/c 陽子ビームの可能性 **48**
5.1 K_L ビームの比較 . . . 48
5.2 シグナルアクセプタンスの比較 . . . 48
5.3 Dead time の比較 . . . 49
5.4 $\frac{\triangle\eta}{\eta}$ の比較 . . . 49
5.4.1 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーター . . . 50
5.4.2 CsI . . . 50
5.5 結果 . . . 51

第 6 章 議論 **52**
6.1 Side カロリーメーターの意義 . . . 52
6.2 Veto threshold . . . 53

第 7 章 結論 **54**

付 録 A 光子検出器の不感率 **55**
A.1 原理 . . . 55
A.2 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーターの不感率の見積もり 55
A.2.1 サンプリング効果とパンチスルー . . . 55
A.2.2 光核相互作用 . . . 56
A.2.3 全不感率 . . . 56
A.3 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーターの手前に厚さ 10cm のシンチを置いた場合の不感率の見積もり。 . . . 56
A.3.1 サンプリング効果とパンチスルー . . . 56
A.3.2 光核相互作用 . . . 60
A.3.3 全不感率 . . . 60
A.4 CsI カロリーメーターの不感率の見積もり。 . . . 63
A.4.1 電磁相互作用 . . . 63

A.4.2 光核相互作用 . . . 63
A.4.3 全不感率 . . . 63
A.5 光子不感率 $\bar{\epsilon}$ の求め方 . . . 67

付 録 B 30GeV/c 陽子ビーム **68**
B.1 K_L ビーム . . . 68
B.2 シグナルアクセプタンス . . . 69
B.2.1 シグナルアクセプタンスの Veto threshold 依存性 . . . 69
B.2.2 シグナルアクセプタンスの検出器の半径依存性 . . . 71
B.3 Dead time . . . 71
B.3.1 Dead time の算出 . . . 71
B.3.2 Dead time の veto threshold 依存性 . . . 72
B.3.3 Dead time の検出器の半径依存性 . . . 73
B.4 η の誤差 . . . 74
B.4.1 η の誤差の見積もり . . . 74
B.4.2 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーター (Case A) . 74
B.4.3 CsI カロリーメータ (Case C) . . . 76
B.5 結果 . . . 77

図 目 次

1.1 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊に寄与するペンギン・ダイアグラム、およびボックス・ダイアグラム . . 14

2.1 カロリーメーター 17
2.2 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に光子が 10000 個入射したときに洩れ出た光子のエネルギーの分布。上から光子の入射エネルギーが 100MeV、400MeV、700MeV、1GeV を表す。左から光子の入射角度 10 °、30 °、50 ° を表す。 18
2.3 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に光子が 10000 個入射したときに洩れ出た電子・陽電子のエネルギーの分布。上から光子の入射エネルギーが 100MeV、400MeV、700MeV、1GeV を表す。左から光子の入射角度 10 °、30 °、50 ° を表す。 19
2.4 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター にエネルギー 1GeV の光子が 30 ° で入射したときに洩れ出た粒子 (光子、電子・陽電子) の平均の数を threshold の関数として表す。 20
2.5 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に 50MeV(■)、100MeV(▲)、500MeV(▼)、1GeV(○) の光子が入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、入射角度の関数として表す。用いた threshold は 5MeV である。 21
2.6 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に 10 ° (■)、30 ° (▲)、50 ° (▼)、70 ° (○)、90 ° (□) で光子が入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、入射エネルギーの関数として表す。用いた threshold は 5MeV である。 . . . 22
2.7 サンプリングカロリーメーターにエネルギー 1GeV の光子が 30 ° で入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、様々な鉛とシンチレーターの厚さに対して示す。横軸は鉛の厚さ (mm) を表す。シンチレーターの厚さを 5mm(■)、10mm(▲)、15mm(▼)、20mm(○) で表す。用いた threshold は 5MeV である。 22
2.8 エネルギー 1GeV の光子が 30 ° で入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、カロリーメーターに占めるシンチレーターの体積の割合 (%) の関数として表す。▼ はサンプリングカロリーメーター、○ は混合物を表す。用いた threshold は 5MeV である。 23

3.1 J-PARC のビームラインの概略を上から見た簡単な平面図を示す。 24
3.2 K_L と中性子の、全 ϕ 方向で積分した極角度分布を示す。下のヒストグラムは K_L、上のヒストグラムは中性子を表す。 25
3.3 K_L と中性子の数の比を取り出し角度の関数として示す。横軸は陽子ビームとのそれぞれの極角度を表す。 26

3.4 K_L の運動量の分布を示す。 26
3.5 検出器の配置を示す。 27
3.6 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊での π^0 の横運動量を示す 29
3.7 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊でできた光子の各カロリーメーターへの入射エネルギーと、検出器の表面となす入射角度の分布を表す。上は Side、下は End カロリーメーターを表す。左は入射エネルギー、右は入射角度を表す。 30
3.8 シグナルのアクセプタンスを veto threshold の関数として示す。■ はシャワーが洩れ出た場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを完全に防いだ場合のアクセプタンス (A_{tot}) を表す。 31
3.9 シグナルアクセプタンスを検出器の半径の関数として表す。■ はシャワーが洩れ出た場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを完全に防いだ場合のアクセプタンスを (A_{tot}) を表す。用いた、veto threshold は 5MeV。 32
3.10 シグナルアクセプタンスを、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のの手前に置いたシンチレーターの厚さ (cm) の関数として表す。■ は検出器の半径 100cm、▲ は半径 150cm、▼ は内径 200cm を表す。ただし、veto threshold は 5MeV。 33
3.11 veto threshold の関数として Dead time を示す。 34
3.12 検出器の半径 (cm) の関数として Dead time を示す。 35
3.13 シンチレーターの厚さ (cm) の関数として Dead time を示す。■ は検出器の半径 100cm、▲ は半径 150cm、▼ は内径 200cm を表す。ただし、veto threshold は 5MeV 用いた。 . . . 36

A.1 各入射エネルギーの光子が、入射角度 90 ° のときに、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、シンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。 57
A.2 各入射角度の光子が、入射エネルギー 30MeV のときに、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、シンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。 57
A.3 エネルギー threshold が 5MeV の場合の、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における光子のサンプリング効果とパンチスルーによる不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 58
A.4 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における、光核子反応による光子の不感率を示す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 . . 58
A.5 エネルギー threshold が 5MeV の場合の、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 59

A.6 エネルギー threshold が 10MeV の場合の、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 59
A.7 各入射エネルギーの光子が入射角度 90 ° のときにシンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。左は手前のシンチレーター、右は 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの場合を表す。上から、入射エネルギーが 10MeV、40MeV、70MeV、100MeV の場合を表す。 60
A.8 各入射角度の光子が入射エネルギー 30MeV のときにシンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。左は手前のシンチレーター、右は 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの場合を表す。上から、入射角度が、4 ° 、20 ° 、50 ° 、90 ° を表す。 61
A.9 手前のシンチレーターの threshold が 1MeV で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの threshold が 5MeV の場合の、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 61
A.10 手前のシンチレーターの threshold が 2MeV で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの threshold が 5MeV の場合の、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 62
A.11 手前のシンチレーターの threshold が 5MeV で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの threshold が 5MeV の場合の、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 62
A.12 各入射エネルギーの光子が、入射角度 90 ° のときに CsI に、落とすエネルギーの分布を示す。 64
A.13 各入射角度の光子が、入射エネルギー 30MeV のときに CsI に、落とすエネルギーの分布を示す。 64
A.14 CsI における光核子反応による光子の不感率を示す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 65
A.15 エネルギー threshold が 2MeV の場合の、CsI における光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 65
A.16 エネルギー threshold が 5MeV の場合の、CsI における光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 66
A.17 エネルギー threshold が 10MeV の場合の、CsI における光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。 66

B.1 K_L の運動量の分布を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.4) 68

B.2 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊でできた光子の各カロリーメーターへの入射エネルギーと検出器の表面となす入射角度の分布を表す。上は Side、下は End カロリーメーターを表す。左は入射エネルギー、右は入射角度を表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.7) 69
B.3 シグナルのアクセプタンスを veto threshold の関数として示す。■ はシャワーが起きた場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを完全に防いだ場合のアクセプタンス (A_{tot}) を表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.8) 70
B.4 シグナルアクセプタンスを検出器の半径の関数として表す。■ はシャワーを起こした場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを起こさなかった場合のアクセプタンスを (A_{tot}) を表す。用いた、veto threshold は 5MeV。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.9) 71
B.5 veto threshold の関数として Dead time を示す ($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.11) . 72
B.6 検出器の半径 (cm) の関数として Dead time を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.12) 73

表 目 次

3.1 Threshold を 2、5、10MeV にした場合のカテゴリー別にみたアクセプタンスを表す。 . . 31

4.1 各カロリーメーターのエネルギー分解能と位置分解能を示す。 38
4.2 $K_L \to \pi^0\pi^0$ の重み。$\bar{\epsilon}(\gamma_1)\ldots\ \bar{\epsilon}(\gamma_4)$ は π^0 が崩壊してできた光子、$\gamma_5 \ldots \gamma_M$ はシャワーの洩れによる光子を表す。 38
4.3 カロリーメーターに用いた検出器の種類を表す。A、B、C、D 各場合に対して、検出器の半径を 100cm、150cm、200cm とし、threshold も変える。 40
4.4 各場合に用いた崩壊点 z と横運動量 P_T のカットの値を示す。 40
4.5 半径 100cm の検出器、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター で、threshold が 5MeV,10MeV のときの シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。 40
4.6 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値をカテゴリーごとに示す。用いた threshold は 5MeV である。 41
4.7 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 100cm、150cm、200cm の場合の、全シグナル事象の数、全バックグラウンド事象の数、 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。用いた threshold は 5MeV である。 42
4.8 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前のシンチレーターの threshold を 1MeV、2MeV、5MeV にしたときのそれぞれのシグナル事象の数, バックグラウンド事象の数, $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表す。ただし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV。 . . . 44
4.9 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前に 10cm のシンチレーターを置き、検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナル事象の数とバックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値を示す。 45
4.10 シグナル事象の数, バックグラウンド事象の数, $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表す。 46
4.11 検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値を示す。 47
4.12 各場合の $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。括弧内はシグナル事象数とバックグラウンド事象数の比 (S/N) を表す。A、B、C、D は Side と End に置いたカロリーメーターでの場合分けを表す (表 4.3 を参照)。A、B はカテゴリー EE、SS、ES の合計で算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$、C、D は EE だけで算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ である。ただし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV、その手前に置いたシンチの threshold は 2MeV、CsI の threshold は 2MeV の場合である。 47

5.1 K_p は、1 つの陽子が標的に当たって、標的から 50m 下流 (検出器先端) を通過する立体角 $1\mu str$ での K_L の数を表す。N_K は、1 秒あたりの、標的から 50m 下流 (検出器先端) を通過する立体角 $1\mu str$ での K_L の数を表す。Decay probabilty は 15m の崩壊領域での K_L の崩壊確率を表す。 48
5.2 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれのカテゴリー別にみたシグナルアクセプタンスを示す。End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用い、threshold は 5MeV とする。 49
5.3 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれの dead time を示す。End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用い、threshold は 5MeV とする。 49
5.4 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれのカテゴリー別にみたシグナル事象と $\frac{\Delta\eta}{\eta}$(EE+SS+ES で算出) を示す。括弧内は S/N を表す。検出器の半径 100cm で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーターで、用いた threshold は 5MeV。 50
5.5 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれのシグナル事象、バックグラウンド事象、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。検出器の半径は 150cm で、用いた threshold は 2MeV。 . . . 50

B.1 Threshold を 2、5、10MeV にした場合のカテゴリー別にみたアクセプタンスを表す。($50GeV/c$陽子ビームの場合 は表 3.1) 70
B.2 半径 100cm の検出器、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター で、threshold が 5MeV のときの シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.5) 74
B.3 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値をカテゴリーごとに示す。用いた threshold は 5MeV である。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.6) 75
B.4 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 100cm、150cm、200cm の場合の、全シグナル事象の数、全バックグラウンド事象の数、 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。用いた threshold は 5MeV である。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合は表 4.7) 75
B.5 シグナル事象の数, バックグラウンド事象の数, $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.10) 76
B.6 検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.11) 76

B.7 各場合の $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。括弧内はシグナル事象数とバックグラウンド事象数の比 (S/N) を表す。A、C は Side と End に置いたカロリーメーターでの場合分けを表す (表 4.3 を参照)。A はカテゴリー EE、SS、ES の合計で算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$、C は EE だけで算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ である。ただし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV、CsI の threshold は 2MeV の場合である。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.12) 77

第1章　序論

1.1　$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ の物理

1.1.1　CP 非保存

物理学において現象の理解を深めるために、物理現象に対する対称性とそれに伴う保存則は非常に重要である。その対称性のなかに、とくに C 変換 (粒子と反粒子とを反転させる変換)、P 変換 (空間反転変換)、T 変換 (時間反転変換) に対する対称性がある。

それら 3 種類の対称変換を同時に行う CPT 対称変換については、すべての現物理象に対して対称性が成り立っていると考えられ、現在、すべての実験結果がそれを示している。C 変換、P 変換、および T 変換においても、強い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用に対しては対称性が成り立っていることが確かめられている。しかし、P 対称性が、弱い相互作用に対して破れていることが 1957 年、C. S. Wu [1] によって発見された。同様に、C 対称性も、弱い相互作用に対して破れていることが示された。だが、弱い相互作用に対しては CP 対称性は成り立っていると考えられていた。

1964 年、K 中間子系での CP 非対称性が V. L. Fitch、J. W. Cronin ら [2] により発見された。それ以来、CP 非保存は、素粒子物理学の世界で、最も興味深い研究対象の一つとなり、多くの実験が行われている。そして現在においても、CP 非保存の起源についての研究が進められ、その謎が少しずつ明らかにされつつある。

1.1.2　中性 K 中間子

中性 K 中間子は、K^0 と $\bar{K^0}$ がある。これらは、強い相互作用においては固有状態であるが、CP 変換については、つぎのように K^0 も $\bar{K^0}$ も固有状態ではない。

$$CP|K^0\rangle = |\bar{K^0}\rangle \tag{1.1}$$

$$CP|\bar{K^0}\rangle = |K^0\rangle \tag{1.2}$$

しかし、つぎのように両者の一次結合は、CP 変換の固有状態になる。

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K^0}\rangle) \ : \ CP|K_1\rangle = +|K_1\rangle \tag{1.3}$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K^0}\rangle) \ : \ CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle \tag{1.4}$$

となる。位相空間の大きさから考えると、K_1 のほうが崩壊しやすく、寿命が短い。実際に、中性 K 中間子の崩壊では、寿命の長い成分 K_L（寿命 5.2×10^{-8} 秒）と短い成分 K_S（寿命 0.89×10^{-10} 秒）とが観測できる。

V. L. Fitch、J. W. Cronin らは、長寿命の K 中間子が $\pi^+\pi+-$ に崩壊する過程を発見した。CP 対称性が成り立っていると、CP の固有値が -1 の長寿命の K 中間子は、CP の固有値が $+1$ の 2π 系には決して崩壊できない。この現象は、実際に観測される長寿命の中性 K 中間子は、K_2 成分だけでなく、ごくわずかに K_1 成分が混合しており、この K_1 成分の寄与により、$K_L \to \pi\pi$ 崩壊が生じる、と説明される。

1.1.3 小林益川行列

CP 非保存の起源についての説明として、様々な理論があるが、その中の有力な理論として、小林益川理論 [4] がある。この理論によると、CP 非保存は 3 世代のクォークが混合することにより生じる。この混合行列は、小林益川行列と呼ばれ、3×3 の成分を持つユニタリー行列として表される。

$$U = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \tag{1.5}$$

この行列 U は、4 変数で表すことができる。そのうちの 3 変数は実数であるが、1 変数は複素数の位相であり、これが CP 非保存の起源となる。

L. Wolfenstein [5] は、行列の成分を式 (1.6) のように変数化した。

$$U = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \tag{1.6}$$

この複素数 η の値を求めることが、今日の素粒子物理学の主要な目的の一つとなっている。

1.1.4 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊

小林益川行列の複素成分 η の値を精度よく求める有力な方法として $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の分岐比の測定がある。この崩壊の振幅の大きさは、

$$A(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}) = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon^2}}[A(K_2 \to \pi^0\nu\bar{\nu}) + \epsilon A(K_1 \to \pi^0\nu\bar{\nu})] \tag{1.7}$$

となる。図 1.1 で示されるように、この崩壊は中間状態において t クォークが介在するので、V_{td} 成分、および、V_{ts} 成分を含み、式 (1.7) は式 (1.6) を使って、

$$A(K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}) \propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td} \propto 2i\eta \tag{1.8}$$

となる。

その分岐比は文献 [6, 7] より、

$$BR(K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}) = 1.94 \times 10^{-10} \eta^2 A^4 \chi^2 (\frac{m_t}{m_W}) \tag{1.9}$$

と計算される。ここで、 m_t 、m_W は t クォーク、W ボゾンの質量であり、$\chi(m_t/m_W) \sim (m_t/m_W)^{1.2}$, そして A は小林益川行列の変数である。

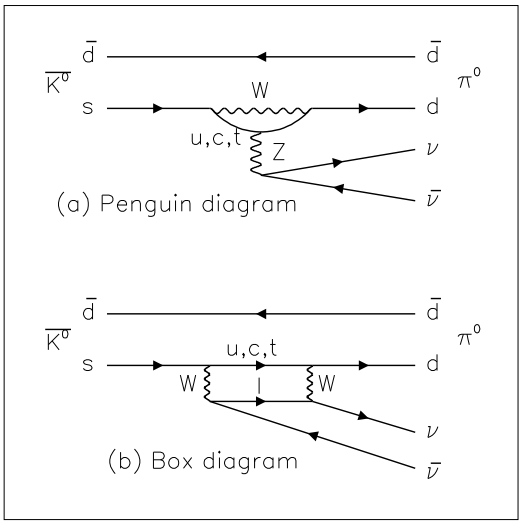

図 1.1: $K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$ 崩壊に寄与するペンギン・ダイアグラム、およびボックス・ダイアグラム

今日知られている小林益川行列の要素に基づいた $K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$ 崩壊の分岐比の理論予想値は、$(3.0 \pm 2.0) \times 10^{-11}$ である [6, 7]。また式 (1.9) での、$A^4 \chi^2(x)$ は 2%の精度でわかっているので [6]、$K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を測ることによって、η の精密測定が可能である。

実験での、現在の $K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$ 崩壊の分岐比の上限は、アメリカ合衆国フェルミ国立研究所で行われた、KTeV 実験による $BR < 5.9 \times 10^{-7} (90\%\ \mathrm{CL})$ [8] である。

1.2 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 実験

この節では、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊を集める実験について述べる。われわれの目標は 100 個以上の $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊を集めて、η を 10%以下の精度で測定することである。観測できる $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の数は、

$$N_{evt} = N_{K_{decay}} \times BR \times A \tag{1.10}$$

である。ここで、$N_{K_{decay}}$ は崩壊領域で崩壊する K_L の数、BR は $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ の分岐比、A は検出器の感受率 (以下、アクセプタンスと呼ぶ) を表す。先程示したが、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ の分岐比は非常に小さいので、大量の K_L と大きなアクセプタンスを持つ検出器が必要である。

実験では、この崩壊のシグナルとして、π^0 が崩壊してできる二つの光子を要求する。このシグナルに対し、いくつかのバックグラウンドがあるので、以下に述べるような実験環境が必要となる。

1. K_L や中性子と物質との相互作用による π^0 の生成によって起きるバックグラウンドを防ぐため、崩壊領域は高真空にしなければならない。

2. シグナルにはバックグラウンドとなる崩壊が数種類あり、それらは、$K_L \to \pi^0\pi^0$、$K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$、$K_L \to \gamma\gamma$、$K_L \to \pi^0\gamma\gamma$、$\Lambda \to n\pi^0$ などがある。2γ 事象である $K_L \to \gamma\gamma$ は、二つの光子の運動量の、ビーム軸に垂直な成分 (横運動量) P_t の和が 0 なので、容易に排除できる。横運動量の求め方については後述する。

   これらの崩壊のなかで最も大きく寄与し、除去することが困難なバックグラウンドは、$K_L \to \pi^0\pi^0 \to 4\gamma(\mathrm{BR}=9.36\times10^{-4})$ の 4 つの光子のうち、二つの光子を見失った場合である。このバックグラウンドを防ぐ有力な方法は、崩壊してできたすべての光子を検出することである。

   そのために、崩壊領域を光子検出器ですき間なく覆う。

3. ただし、この光子検出器には不感率がある。一般に、不感率は光子のエネルギーが高いと不感率が小さい。したがって、高いエネルギーの K_L が必要である。

1.3 研究の目的

将来、J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) で、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の実験が計画されている。J-PARC は MW-class の高出力陽子ビームを供給する日本の新しい加速器計画である。ここで、高エネルギー (50GeV) で高強度 (最大で、3.3×10^{14} protons per pulse) の陽子ビームを標的に入射させることによって、高エネルギーで非常に多くの K_L を生成することを可能にする。

K_L から崩壊した光子は、検出器であるカロリーメーターで電磁シャワーを起こし、発生した電子・陽電子の落としたエネルギーの測定によって検出される。このシャワーによって 2 次粒子が検出器の表面から洩れ出てしまうことがある。この 2 次粒子が及ぼす深刻な影響がふたつある。

ひとつはシグナルアクセプタンスの損失である。これは $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊においてシャワーが洩れることによって起きる。2 次粒子が検出器の他の場所に当たると、検出される光子の数が 3 つ以上になるため、シグナルと見なされなくなってしまうからである。

ふたつめはシグナルを観測することができない時間 (dead time) の増加である。シグナルとして要求する二つの光子は、ある時間幅 Δt の中で検出されなければならない。この Δt の中で $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊以

外の寄与による光子が検出されると、そのイベントは排除されてしまう。すなわち、シグナル以外の寄与によって光子が検出されると、Δt の間、シグナルは観測できない。1 秒あたりの dead time は近似で、

$$Dead\ \ time = N_K \times (\Delta t) \times \sum_{i=1}^{n} [(BR_i) \times < N_i >] \tag{1.11}$$

である。ここで、N_K は、陽子ビームで生成されて崩壊領域で崩壊する 1 秒当たりの K_L の数、BR は $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊以外のある崩壊の分岐比を表し、$< N >$ はシャワーの洩れも含め発生した光子と荷電粒子の和の、1 回の K_L 崩壊あたりの平均を表す。K_L の数を増やすには、N_K を大きくしなければならない。分岐比の大きな $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$(BR=0.21) などの崩壊においてシャワーの洩れで大量の粒子が発生すれば、検出器の Dead time が長くなることが分かる。

本研究の目標は、Geant シミュレーション [9] を用いて、シャワーの洩れに対する対策として、様々な検出器を比較検討し、この $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 実験に適した検出器の案を提案することである。

以下、第 2 章では、この実験で重要な問題になりうるシャワーの洩れの性質を述べる。第 3 章では、シャワーの洩れの具体的な影響について調べる。第 4 章では、様々な場合におけるシグナルとバックグラウンドを見積もる。第 5 章では、30GeV/c 陽子ビームの場合について述べる。第 6 章では、本研究で得られた結果をもとに、議論をする。第 7 章では、本研究における結論を述べる。

第2章　シャワーの洩れ

この章では、GEANT3 を用いて、シャワーの洩れの性質を調べる。本研究では、「シャワーの洩れ」とは光子がカロリーメーターに入射し、電磁相互作用によって、図 2.1 のように粒子がカロリーメーターの表面から洩れ出た状況を呼ぶ。

2.1　検出器

今回の研究では、鉛とシンチレーターを交互に 100 層重ねたサンプリングカロリーメーターと呼ばれる検出器を想定した。

2.2　シャワーの洩れの大きさ

光子の入射エネルギー、角度、カロリーメーターの鉛とシンチレーターの厚さを変え、シャワーの洩れの大きさを以下測定した。「シャワーの洩れの大きさ」は、「1 個の入射光子あたりに洩れ出る、エネルギーがある値 (threshold) 以上の光子の数と、1MeV 以上のエネルギーを持った電子、陽電子の数の和」と定義する。以下のシミュレーションでは、各々の入射エネルギー、入射光子と検出器の表面がなす角度 (図 2.1) 、鉛とシンチレーターの厚さの条件について、それぞれ、10000 個の光子を入射した。

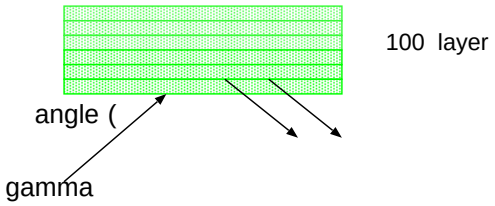

図 2.1: カロリーメーター

2.3 シャワーの洩れの性質

2.3.1 洩れ出る粒子

後述するが、J-PARC 実験で用いる K_L の平均の運動量は 5.8GeV/c である。この K_L が崩壊してできる光子のエネルギーは主に数十 MeV ~ 数 GeV である。例として、厚さ 1 mm の鉛と厚さ 5 mm のシンチレーターから成るカロリーメーターに様々な入射エネルギーと入射角度の光子を入射した場合に、洩れ出た光子の運動量分布を図 2.2 に、電子・陽電子の運動量分布を図 2.3 に示す。これを見ると、洩れ出る粒子は、光子のほうが電子・陽電子より多く、どちらもエネルギーのほとんどが数 MeV 以下であることが分かる。図 2.4 にその洩れ出た粒子の平均数を threshold の関数として表す。Threshold を 5MeV 以下にすると、洩れ出る粒子の数が急激に増えている。

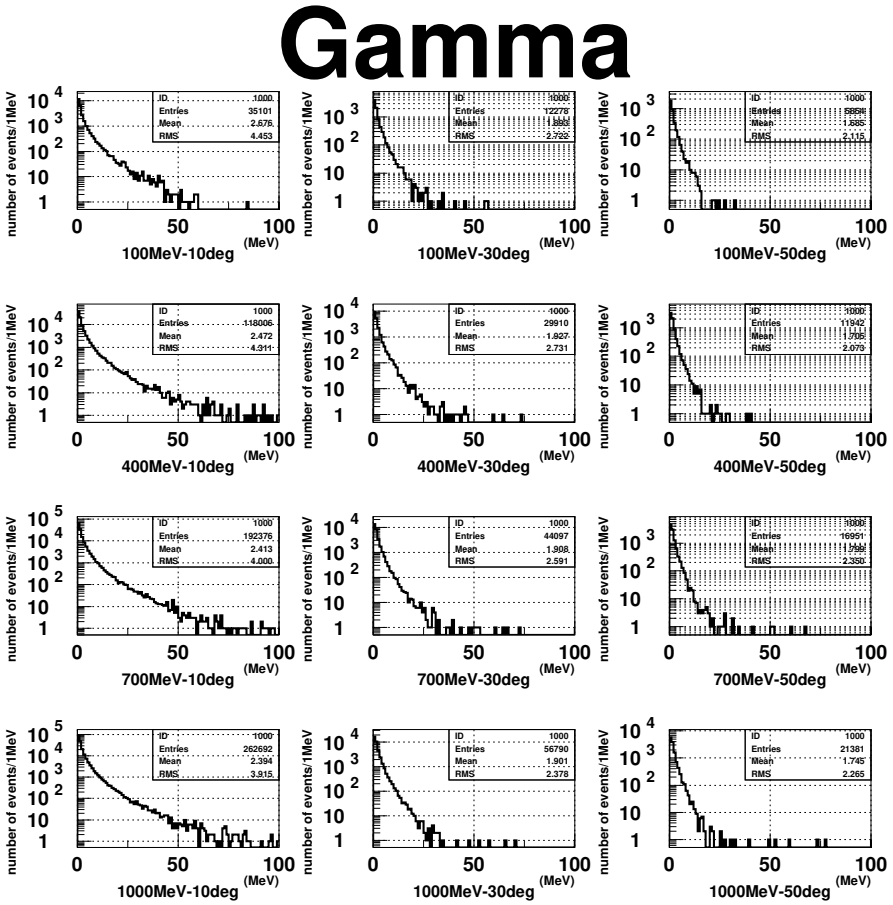

図 2.2: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に光子が 10000 個入射したときに洩れ出た光子のエネルギーの分布。上から光子の入射エネルギーが 100MeV、400MeV、700MeV、1GeV を表す。左から光子の入射角度 10 °、30 °、50 ° を表す。

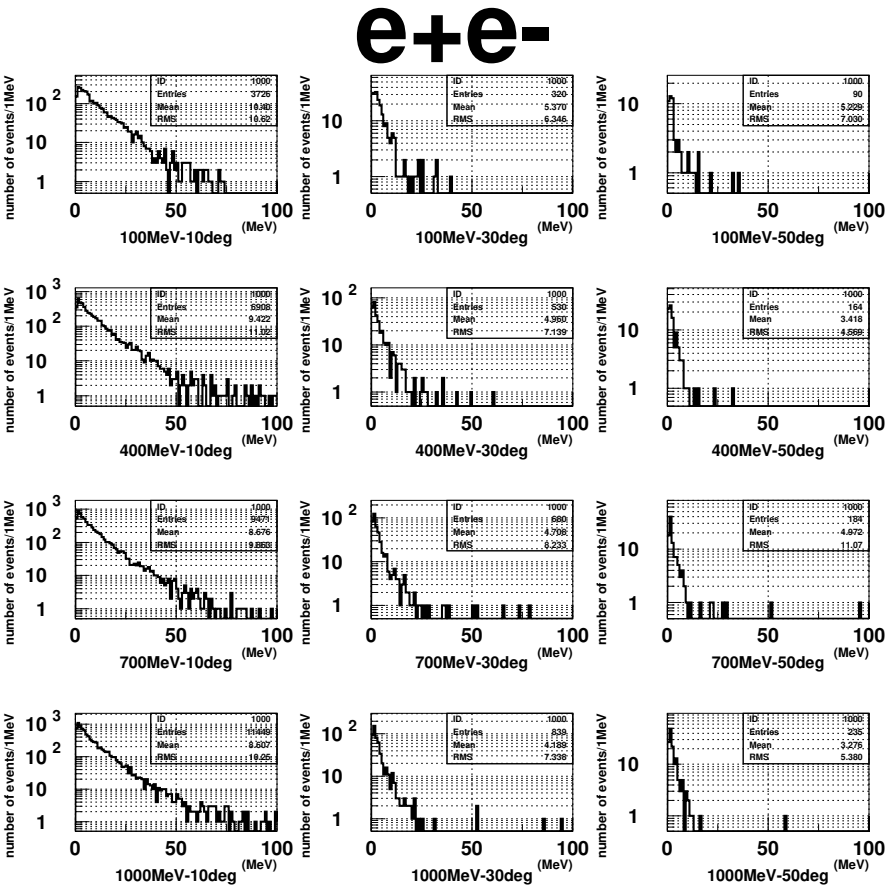

図 2.3: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に光子が 10000 個入射したときに洩れ出た電子・陽電子のエネルギーの分布。上から光子の入射エネルギーが 100MeV、400MeV、700MeV、1GeV を表す。左から光子の入射角度 $10\,^\circ$、$30\,^\circ$、$50\,^\circ$ を表す。

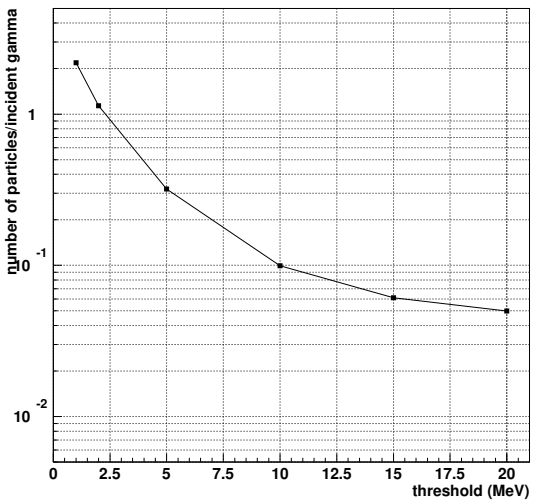

図 2.4: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター にエネルギー 1GeV の光子が 30 ° で入射したときに洩れ出た粒子 (光子、電子・陽電子) の平均の数を threshold の関数として表す。

2.3.2 入射角度依存性と入射エネルギー依存性

ここでは、シャワーの洩れの、入射角度依存性とエネルギー依存性を見る。カロリーメーターは、厚さ 1 mm の鉛と厚さ 5mm のシンチレーターを用いる。ただし、threshold は 5MeV を用いる。図 2.5 にシャワーの洩れの大きさの角度依存性を示す。小さい角度でシャワーの洩れが大きくなる。図 2.6 にエネルギー依存性を示す。エネルギーが大きくなるとシャワーの洩れが大きくなる。

2.3.3 カロリーメーターに占めるシンチレーターの割合

ここでは、シャワーの洩れが、カロリーメーターに占めるシンチレーターの割合に依存することを調べる。光子の入射エネルギーを 1GeV、入射角度を 30 ° に固定する。ただし、threshold は 5MeV を用いる。鉛の厚さとシンチレーターの厚さを変えたときのシャワーの洩れの大きさを図 2.7 に示す。これを見ると、鉛を薄く、シンチレーターを厚くするとシャワーの洩れが減ることが分かる。

Mixture

ここで、シャワーの洩れがカロリーメーターに占めるシンチレーターの割合にどう依存するかを調べるため、カロリーメーターを、鉛とシンチレーターが一様に混じったものとして、GEANT で定義する。このカロリーメーターは十分に大きな放射長 $(40\ X_0)$ を 1 辺とする立方体に設定した。この混合物の表面の中心に 1GeV の光子を入射角 30 ° で打ち込んだ。そのときのシャワーの洩れの大きさを、カロリーメー

ターに占めるシンチレーターの体積比の関数として、 図 2.8 に示す。また同じ図中に、サンプリングカロリーメーターの洩れの大きさも示す。混合物の場合とサンプリングカロリーメーターの場合がよく一致する。シャワーの洩れはカロリーメーターに占めるシンチレーターの割合が 90%を越えると急激に減る。

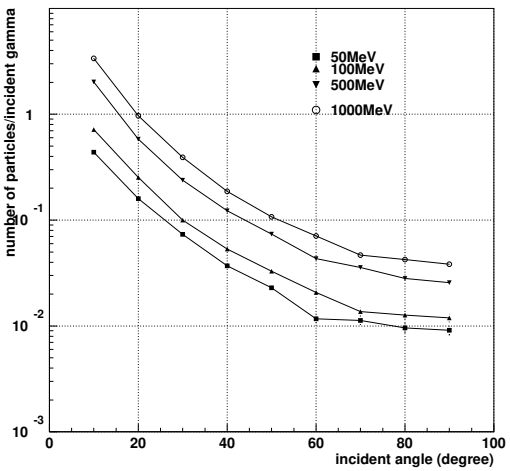

図 2.5: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に 50MeV(■)、100MeV(▲)、500MeV(▼)、1GeV(○) の光子が入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、入射角度の関数として表す。用いた threshold は 5MeV である。

2.4 結果

このシミュレーションで、シャワーの洩れについて以下のことがわかった。

1. 洩れ出る光子のほとんどが数 MeV 以下である。
2. 入射角度が小さいとき洩れが大きい。
3. カロリーメーターに占めるシンチレーターの割合が大きいと、洩れが小さい。

次章以降、これらの性質を考慮して、シャワーの洩れへの対策を考える。

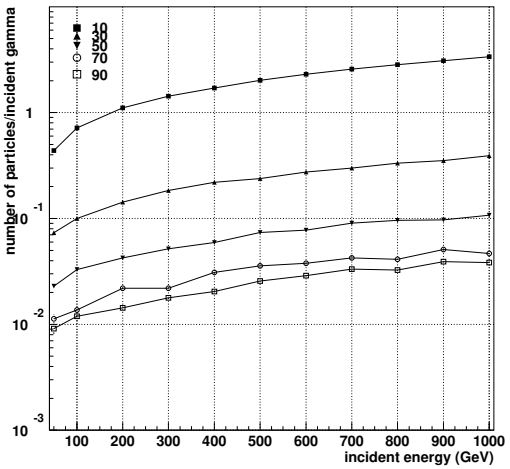

図 2.6: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター に $10°$ (■)、$30°$ (▲)、$50°$ (▼)、$70°$ (○)、$90°$ (□) で光子が入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、入射エネルギーの関数として表す。用いた threshold は $5\mathrm{MeV}$ である。

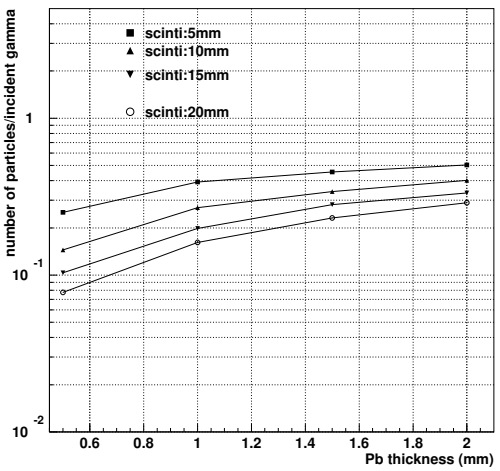

図 2.7: サンプリングカロリーメーターにエネルギー $1\mathrm{GeV}$ の光子が $30°$ で入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、様々な鉛とシンチレーターの厚さに対して示す。横軸は鉛の厚さ (mm) を表す。シンチレーターの厚さを $5\mathrm{mm}$(■)、$10\mathrm{mm}$(▲)、$15\mathrm{mm}$(▼)、$20\mathrm{mm}$(○) で表す。用いた threshold は $5\mathrm{MeV}$ である。

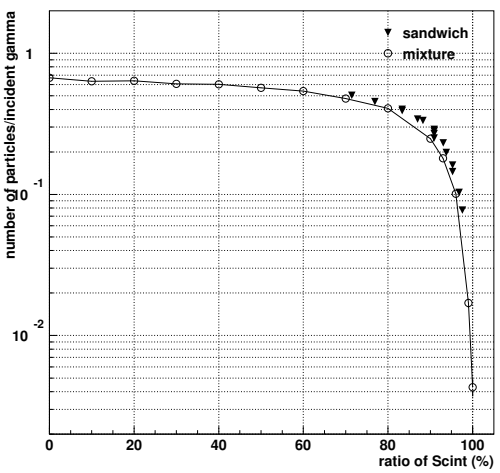

図 2.8: エネルギー 1GeV の光子が 30° で入射したときに洩れ出る粒子の平均の数を、カロリーメーターに占めるシンチレーターの体積の割合 (%) の関数として表す。▼ はサンプリングカロリーメーター、○ は混合物を表す。用いた threshold は 5MeV である。

第3章　シャワーの洩れが及ぼす影響

この章では、J-PARC で想定されている K_L ビームの運動量分布と様々な検出器を用いる。以下、シャワーの洩れが、シグナルアクセプタンスと dead time に、どのような影響を及ぼすのかを、GEANT3 を用いて調べる。

3.1　検出器と環境

図 3.1 に J-PARC のビームラインの概略を示す。この節では、使用する K_L ビームと検出器について説明する。

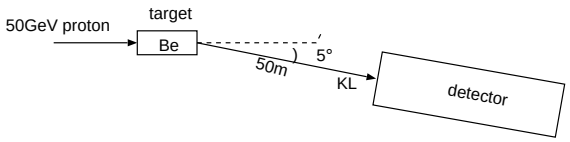

図 3.1: J-PARC のビームラインの概略を上から見た簡単な平面図を示す。

3.1.1　K_L ビーム

運動量 50GeV/c の陽子を標的に入射させて K_L を生成する。標的は半径 0.3cm の円柱状の Be を想定した。標的では K_L 以外にも様々な粒子が生成されるが、荷電粒子は標的の下流に磁石を置くことによって排除する。K_L は検出器に入る前にコリメーターによって絞られる。このとき、主なバックグラウンドとして残る粒子は光子と中性子と Λ である。

光子

標的から 5m 下流に吸収体 ($0.75\ \lambda_I$ の Be と $9X_0(\sim 0.3\lambda_I)$ の鉛) を置くことで、大部分の光子を排除できる。ただし、ここを通過すると、K_L の数は約 40% になる [10]。

中性子

図 3.2 に、生成される K_L と中性子の、陽子ビーム軸に対する極角度分布を示す。図 3.3 に K_L と中性子の数の比を極角度の関数として示す。5 ° 付近でその比が最小になることがわかる。さらに、吸収体を

通過することで、70%以上中性子を排除できる。

Λ

Λ は分岐比 35.8% で $\Lambda \to \pi^0 n$ の崩壊をする。もし、崩壊領域でこの崩壊が起きて n を検出できなければ、バックグラウンドとなる。しかし、Λ は $\tau = 2.632 \times 10^{-10}$ 秒と寿命が短く、生成される平均運動量が約 18GeV/c なので、標的と検出器の距離を 50m と想定することで大部分の Λ を排除することができる。残った Λ のバックグラウンドも 3.2.1 節で述べる、π^0 の横運動量に対する選択によって排除することができる。

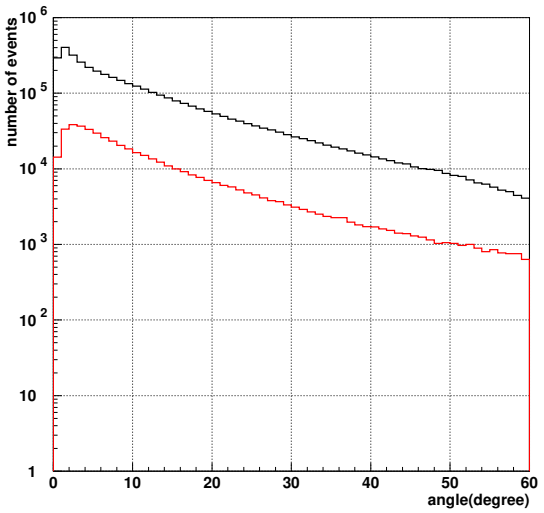

図 3.2: K_L と中性子の、全 ϕ 方向で積分した極角度分布を示す。下のヒストグラムは K_L、上のヒストグラムは中性子を表す。

K_L

50GeV/c の陽子を標的に入射し、標的から 50m 下流を通過する K_L の運動量分布を図 3.4 に示す。K_L の取り出し角度は 5° で、その平均運動量は 5.8GeV/c である。このとき、入射陽子 1 個あたりの K_L の数 K_p は $4.4 \times 10^{-7}/proton/\mu str$ である。また J-PARC の陽子ビームの最大強度の 50% 、すなわち 1.7×10^{14} protons/pluse を用いると想定すると、ビームパルスの幅は 0.7 秒なので、その間の K_L の頻度 N_K は $4.1 \times 10^7/sec/\mu str$ である。

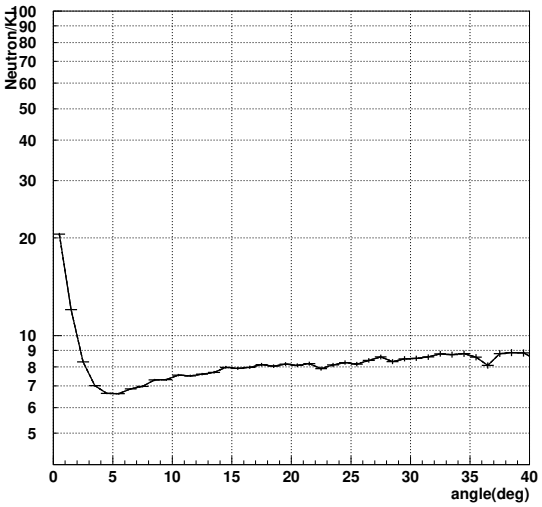

図 3.3: K_L と中性子の数の比を取り出し角度の関数として示す。横軸は陽子ビームとのそれぞれの極角度を表す。

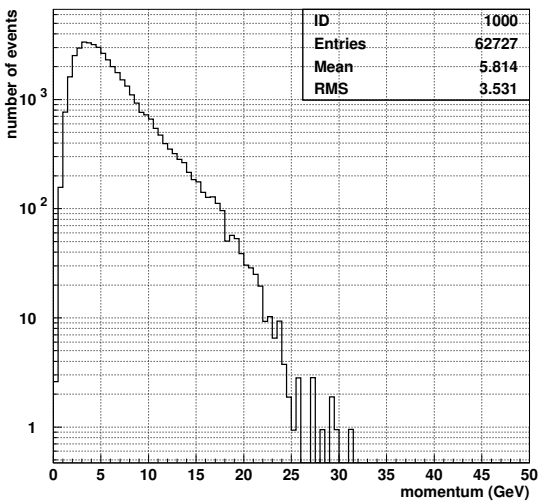

図 3.4: K_L の運動量の分布を示す。

3.1.2　検出器の形と性能

図 3.5 に、本研究で想定した検出器の概略を示す。以下、標的を座標原点にとり、K_L ビーム中心を Z 軸と定義する。Z=50m から Z=65 までの、長さ 15m の区間を崩壊領域とする。この領域をすき間なく覆うために側面には円筒状のカロリーメーターを置く (Side カロリーメーター)。その上流端 (Z=50m) には、円筒をふさぐようにカロリーメーター置き、そこに光子が当たる事象を排除する。また下流端 (Z=65m) にもカロリーメーターを置く (End カロリーメーター)。この End カロリーメーターは、ビームが通り抜けられるように、ビーム軸を中心とする半径 5cm 以内の穴があけられている。またビーム軸から、半径 5cm から 10cm の範囲は veto 検出器、その外側を End カロリーメーターとする。Z=75m にも veto 検出器 (Beam Anti) を置き、End カロリーメーターの穴を抜けた光子を検出する。ただし、z = 75m においてビーム軸から半径 5cm 以内では、穴が空いていて、光子は検出できないと仮定する。これは中性子や崩壊しなかった K_L が高い強度で通過するためである。

またこの章では、断りのないかぎり、カロリーメーターも veto 検出器も、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーター100 層からなり、その検出効率は、光子のエネルギーが あるエネルギー (veto threshold) 以上では 100% 、veto threshold 以下では 0% とする。さらにカロリーメーターのエネルギー分解能、位置分解能の測定誤差はないと仮定する。

このシミュレーションでは、カロリーメーターでも veto 検出器でもシャワーを起こさせた。

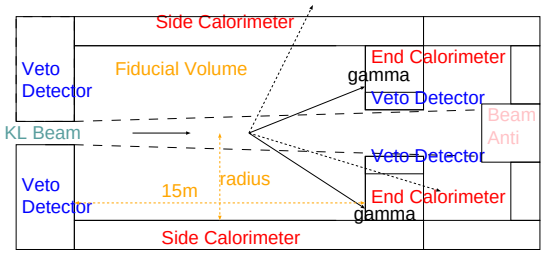

図 3.5: 検出器の配置を示す。

3.2　シャワーの洩れによるシグナルアクセプタンスの損失

この節では、シャワーの洩れによる、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊のシグナルアクセプタンスの損失を調べる。

序章でも述べたように、この崩壊のシグナルとして光子が二つだけであるという要求をする。しかし、シャワーで洩れ出た粒子が他の場所で検出されると、3 つ以上の粒子が見えてしまい、この場合は、シグナルとみなされなくなるので、アクセプタンスの損失となる。

ここで、カロリーメーターのヒットパターンとして次の 3 つのカテゴリーを定義する。

1. EE は 2 つの光子が End カロリーメーターで検出された場合。
2. SS は 2 つの光子が Side カロリーメーターで検出された場合。

3. ES は 1 つの光子が End カロリーメーターで検出され、もう 1 つの光子が Side カロリーメーターで検出された場合。

以下、各カテゴリーでのシャワーの洩れの影響の違いを調べた。

3.2.1 シグナルの選択

ここでは、シグナルの選択方法について述べる。

再構成される崩壊点 z と π^0 の横運動量 Pt

K_L の崩壊点 z を計算するために、検出されるふたつの光子は Z 軸上で π^0 から崩壊すると仮定した。二つの光子の不変質量を M_{π^0} と仮定すると、ふたつの光子の間の角度、θ には、以下の式 3.1 が成り立つ。

$$cos\theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_{\gamma 1}E_{\gamma 2}} \tag{3.1}$$

ここで M_{π^0} は π^0 の質量、$\mathrm{E}_{\gamma 1}$ と $\mathrm{E}_{\gamma 2}$ は検出されたふたつの光子のエネルギーを表す。この θ と光子が当たった位置を使って崩壊点 z を計算する。この崩壊点 z と光子のエネルギーと光子の当たった位置を使って、崩壊してできた二つの光子の運動量をそれぞれ求める。そして、π^0 の運動量の、ビーム軸に垂直な成分 (横運動量) P_t を計算する。

事象の選択

$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊からのバックグラウンドを減らして、シグナルを選択するために、以下のようなカットを用いた。

1. π^0 から崩壊してできたふたつの光子のエネルギーがそれぞれ 100MeV 以上あることを要求した。

2. 再構成された π^0 の崩壊点 z が $52 < z < 61(\mathrm{m})$。

   $z > 61\mathrm{m}$ で崩壊した光子は、穴 (Z=75m) を通過する確率が増え、$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊からのバックグラウンドが増えることになるのでそういう事象は排除する。また $z < 52$ の要求は検出器の先端で π^0 の生成を防ぐためである[1] 。

3. 再構成された π^0 の横運動量 P_t が $135 < P_t < 240(\mathrm{MeV/c})$。

   $P_t > 135\ \mathrm{MeV/c}$ の要求は、崩壊領域まで残った Λ から崩壊した π^0 の横運動量はほとんどが 120MeV/c 以下であるためである [10]。また $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ の π^0 の横運動量の分布を図に示す。これから、$P_t < 240(\mathrm{MeV/c})$ を決めた。

4. 1. の二つの光子以外に、エネルギーがある値 (veto threshold) を越えた光子も、エネルギーが 1MeV を越えた電子陽電子も検出されないことを要求した。

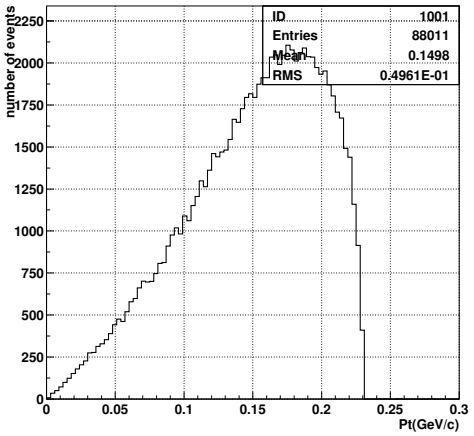

図 3.6: $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊での π^0 の横運動量を示す

以上のカットの後、残った事象数を N_{sig} とする。序章で述べた検出器の感受率 (アクセプタンス) は、

$$A_{sig} = \frac{N_{sig}}{N_{(K_L\to\pi^0\nu\bar{\nu})}} \tag{3.2}$$

となる。ここで、$N_{(K_L\to\pi^0\nu\bar{\nu})}$ は崩壊領域での $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の数で、このシミュレーションでは各条件に対して 10^5 個発生させた。

また、シャワーの洩れによる損失の大きさをみるため、4. のカットをせずに残った事象数を N_{tot} と定義する。この N_{tot} は、シャワーの洩れを完全に防いだ場合の、理想的なシグナル事象数である。その場合のアクセプタンスは、

$$A_{tot} = \frac{N_{tot}}{N_{(K_L\to\pi^0\nu\bar{\nu})}} \tag{3.3}$$

となる。

A_{tot} と A_{sig} の差がシャワーの洩れによるアクセプタンスの損失になる。

3.2.2 シグナルアクセプタンスの Veto threshold 依存性

ここでは、シグナルアクセプタンスの veto threshold 依存性をみる。円筒形の検出器の半径は 100cm とし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用いる。End カロリーメーターと Side カロリーメーターに入射する、π^0 が崩壊してできる光子の、入射エネルギーと、入射光子と検出器の表面がなす角度を図 3.7 に示す。Side カロリーメーターでの入射角度は平均約 20° と小さい。表 3.1 にカテゴリー別にみたアクセプタンスを示す。Side カロリーメーターでシャワーの洩れが多く起き、アクセプタンスの損失が大きい (A_{tot} と A_{sig} の差)。図 3.8 に全アクセプタンス (EE+SS+ES) を veto threshold の関数として表す。Veto threshold を上げることによって、シャワーの洩れを観測しな

[1]文献 [10] では、EE、SS、ES、でシグナルを選択する再構築の値を変えているが、ここではシャワーの洩れの影響をみることが目的なので簡単なカットを用いた。厳密なカットについては 4 章で行う。

くなり、アクセプタンスを増やすことができる。しかし、$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊からのバックグラウンドも増えるので、単純に veto threshold を上げればいいということにはならない。

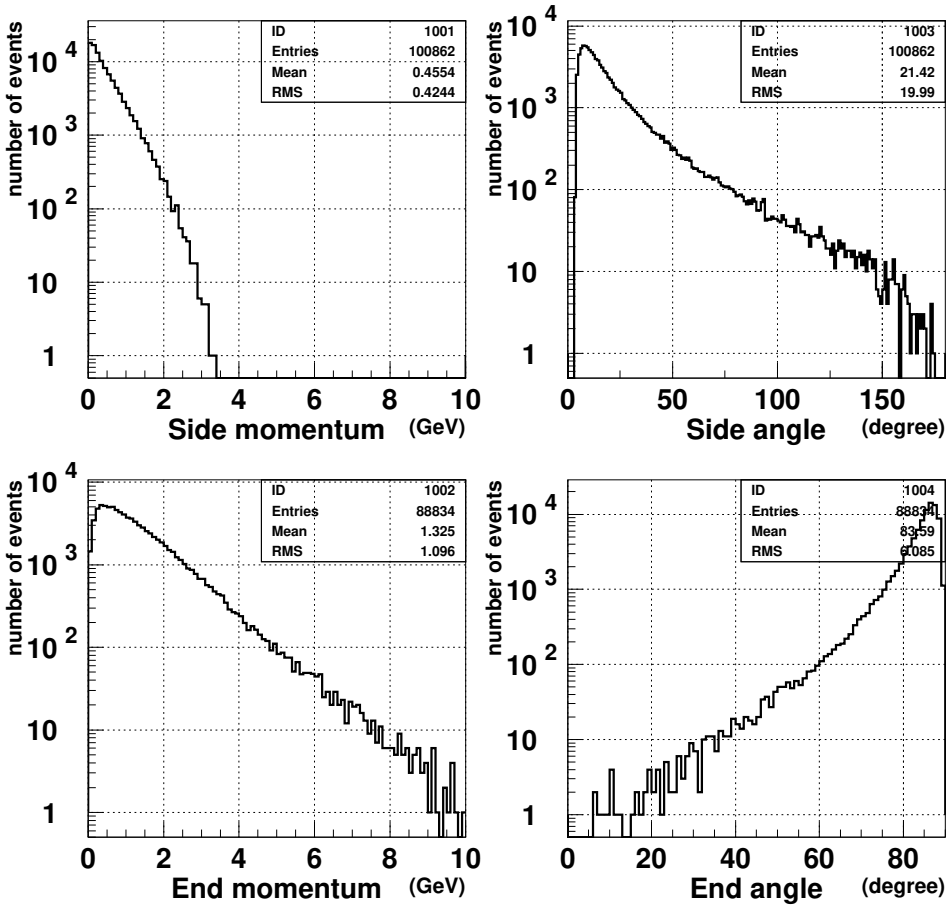

図 3.7: $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊でできた光子の各カロリーメーターへの入射エネルギーと、検出器の表面となす入射角度の分布を表す。上は Side、下は End カロリーメーターを表す。左は入射エネルギー、右は入射角度を表す。

表 3.1: Threshold を 2、5、10MeV にした場合のカテゴリー別にみたアクセプタンスを表す。

	A_{sig}(%) for th.2MeV	A_{sig}(%) for th.5MeV	A_{sig}(%) for th.10MeV	A_{tot}(%)
EE	3.7	6.2	6.7	7.1
ES	1.6	4.0	5.9	11.9
SS	0.5	1.8	3.0	9.4
Total	4.8	12.0	15.6	28.4

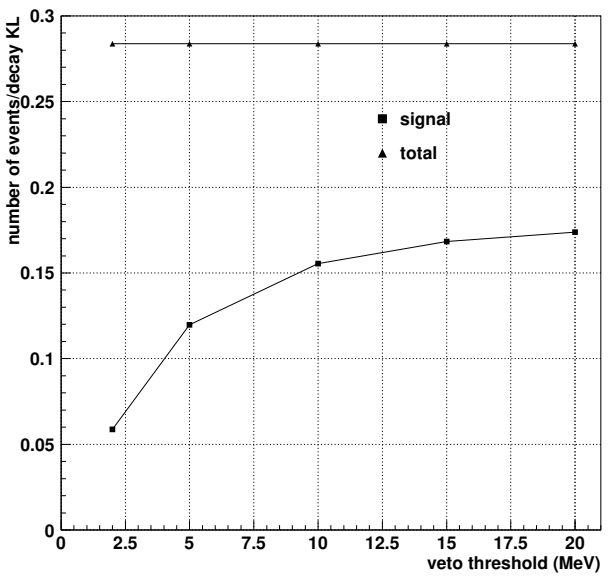

図 3.8: シグナルのアクセプタンスを veto threshold の関数として示す。■ はシャワーが洩れ出た場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを完全に防いだ場合のアクセプタンス (A_{tot}) を表す。

3.2.3 シグナルアクセプタンスの検出器の半径依存性

ここでは、シグナルアクセプタンスの、検出器の半径依存性をみる。ここでは、Veto threshold は 5MeV に設定する。検出器の半径を大きくすると、もともと Side カロリーメーターに当たっていた光子は、より大きな入射角度で End カロリーメーターに当たる。図 2.5 で示したように、光子が大きな角度で入射すると、シャワーの洩れは小さい。シグナルアクセプタンスと検出器の半径の関係を図 3.9 に示す。半径を大きくすれば、シャワーの洩れが減るので、アクセプタンスが大きくなる。

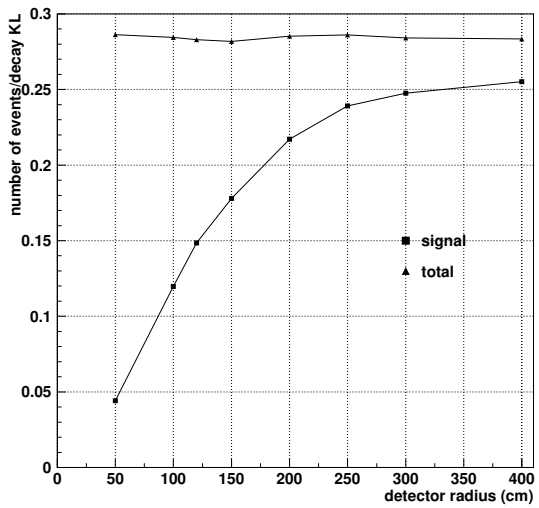

図 3.9: シグナルアクセプタンスを検出器の半径の関数として表す。■ はシャワーが洩れ出た場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを完全に防いだ場合のアクセプタンスを (A_{tot}) を表す。用いた、veto threshold は 5MeV。

3.2.4 カロリーメーターの改良

2 章で示したように、カロリーメーターに占めるシンチレーターの割合を大きくすると、シャワーの洩れは減る。つまりシンチレーターだけを用いるとシャワーの洩れは最小となる。しかしそれでは光子の不感率を小さくするため必要な放射長 $(\doteqdot 20X_0)$ を保とうとすると、厚さが 8m のカロリーメーターが必要になってしまう。そこで、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーター からできた、End カロリーメーターと Side カロリーメーターの両方の手前に、ある厚さ (d cm) のシンチレーターを置いた。図 3.10 に、シグナルアクセプタンスを、厚さ d の関数として示す。シンチレーターも含めた検出器の半径が 100cm の場合、厚さ d を 10cm にすれば、アクセプタンスは 1.5 倍になる。

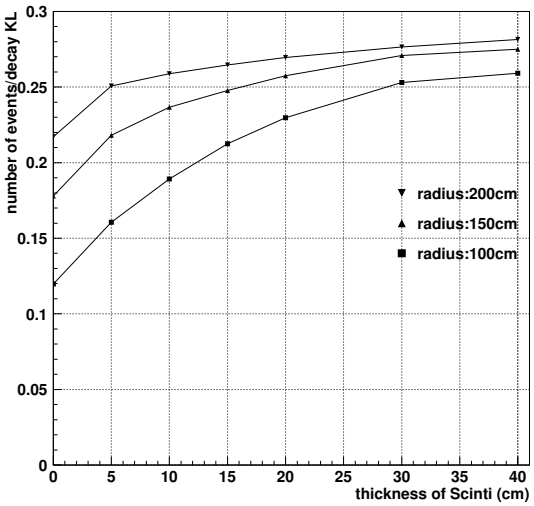

図 3.10: シグナルアクセプタンスを、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のの手前に置いたシンチレーターの厚さ (cm) の関数として表す。■ は検出器の半径 100cm、▲ は半径 150cm、▼ は内径 200cm を表す。ただし、veto threshold は 5MeV。

3.3 Dead time

この節では、シャワーの洩れによって発生する粒子が dead time をどれほど増やすのかということについて調べる。ここでは主な原因になりうる $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊だけを考えた。

3.3.1 Dead time の算出

Dead time の近似的な算出については式 (1.11) を用いる。

ビームの立体角 $1\mu str$ で、1 秒あたりの数 N_K は 3.1.1 より、$4.1 \times 10^7/sec$、$K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ の分岐比 $BR = 0.21$、decay probabilty=0.108 であり、シグナルを観測できない時間幅 Δt を 20×10^{-9} 秒と仮定すると、式 (1.11) は

$$Dead\ \ time = 0.0188\times < N_{K_L\to\pi^0\pi^0\pi^0} > \tag{3.4}$$

となる。$< N_{K_L\to\pi^0\pi^0\pi^0} >$ は 1 回の $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊でシャワーの洩れも含めて観測される粒子の平均数を表す。シャワーの洩れが大きくなると dead time が増えるのがわかる。前節で示したように、シャワーの洩れの観測を小さくするためには、検出器の veto threshold を下げる、検出器の半径を大きくする、カロリーメーターのシンチレーターの割合を増やすなどの方法がある。

われわれは dead time を見積もるために、各条件でそれぞれ 10^5 個の $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊をシミュレーションで発生させた。以下、その結果を示す。

3.3.2 Dead time の veto threshold 依存性

ここでは、dead time の veto threshold 依存性をみる。そのため検出器の 半径は 100cm とする。Dead time を veto threshold の関数として図 3.11 に示す。Veto threshold を 2MeV まで下げると急激に dead time が増えているのがわかる。

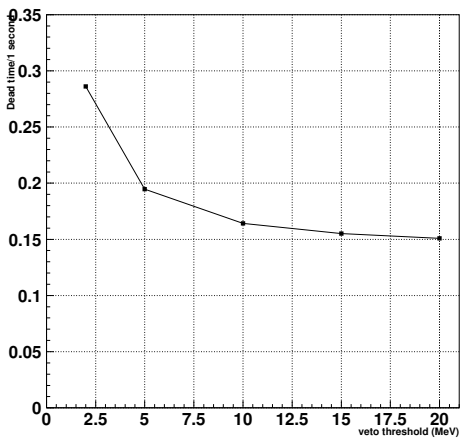

図 3.11: veto threshold の関数として Dead time を示す。

3.3.3 Dead time の検出器の半径依存性

ここでは、dead time の検出器の半径依存をみる。Veto threshold は 5MeV とする。Dead time を検出器の半径の関数として図 3.12 に示す。半径を大きくすると、dead time が減っているのがわかる。これは 3.2.3 節で示したように、崩壊してできた光子がより多く、大きな角度で End カロリーメーターに当たり、シャワーの洩れが小さくなるためである。

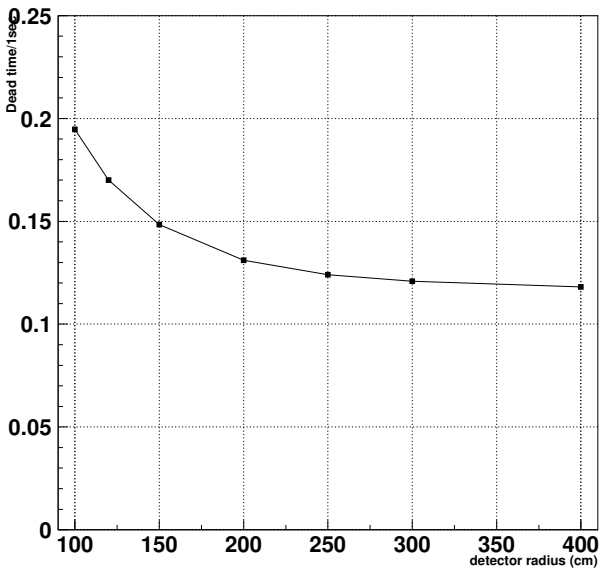

図 3.12: 検出器の半径 (cm) の関数として Dead time を示す。

3.3.4 カロリーメーターの改良

3.2.4 節と同様に、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーターの手前にある厚さ (d cm) のシンチレーターを置く。図 3.13 に dead time を厚さ d(cm) の関数として示す。検出器の半径が 100cm で、手前に置くシンチレーターの厚さ 10cm まで増やせば dead time が 30 % 程減る。

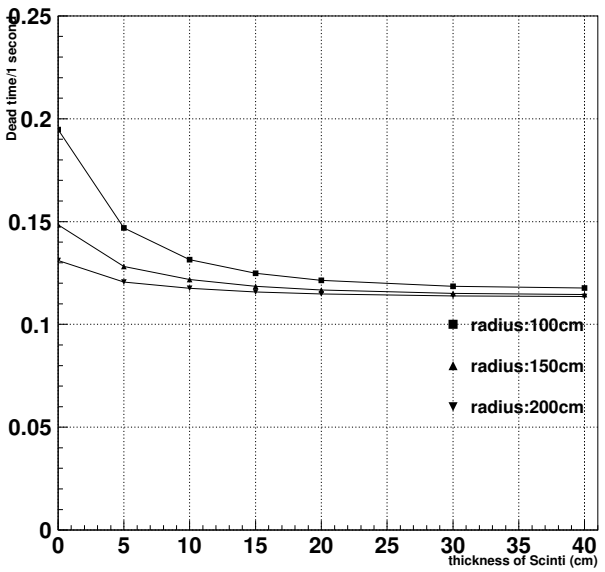

図 3.13: シンチレーターの厚さ (cm) の関数として Dead time を示す。■ は検出器の半径 100cm、▲ は半径 150cm、▼ は内径 200cm を表す。ただし、veto threshold は 5MeV 用いた。

3.4 結果

このシミュレーションで、以下のように検出器の形状を変えることによってシャワーの洩れを減らすことができることがわかった。

1. 検出器の半径を 100cm から 150cm にすることで、シグナルアクセプタンスは 1.5 倍に、dead time は 0.8 倍になる。
2. 検出器の半径が 100cm の場合、カロリーメーターの手前に厚さ 10cm のシンチレーターを置くことで、シグナルアクセプタンスは 1.6 倍に、dead time は 0.7 倍になる。

第4章　η の誤差

この章では、3 章で得られた結果を参考にし、様々な検出器におけるシグナルとバックグラウンドの数を見積もり、η の誤差の測定をする。

4.1　検出器と環境

この節で、検出器の外形、K_L の数、カロリーメーターに対する光子の不感率について説明する。

4.1.1　検出器の配置

検出器は 3 章と同じ円筒状を想定した。シミュレーションの時間短縮のため、End カロリーメーターではシャワーを起こしていない[1]。

4.1.2　光子検出器の性能

ここでは、カロリーメーターの性能について述べる。用いるカロリーメーターは、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前に 10cm のシンチを置いたカロリーメーター、CsI の 3 種類である。

光子検出器のエネルギー分解能と位置分解能

表 4.1 に、この章のシミュレーションで用いる各カロリーメーターのエネルギー分解能と位置分解能を示す。

光子検出器の不感率

$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊で 2 つの光子を見失うとバックグラウンドになるので、光子の不感率は $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 実験において非常に重要である。この不感率は光子の入射エネルギーと入射角度に依存する。その導出方法は付録 A で述べる。ただし、前章と同様に、Z=75m に置いたカロリーメーターのビーム軸を中心とする半径 5cm 以内では、光子を検出できないと仮定する。

[1]表 3.1 を見ると、threshold を 5MeV にした場合 EE のシャワーの洩れによるアクセプタンスの損失は約 10 % であり、Side カロリーメーターよりもシャワーの洩れが十分小さい。したがって、Side カロリーメーターで起きるシャワーの洩れだけを考えても十分に議論できると判断した。

表 4.1: 各カロリーメーターのエネルギー分解能と位置分解能を示す。

	エネルギー分解能 ($\frac{\triangle E}{E}$)	位置分解能 (ΔX)
1mm 鉛/5mm シンチ	$\frac{4.5\%}{\sqrt{E(GeV)}}$	$\frac{0.5(cm)}{\sqrt{E(GeV)}}$
1mm 鉛/5mm シンチの手前に 10cm のシンチ	$\frac{4.5\%}{\sqrt{E(GeV)}}$	$\frac{0.5(cm)}{\sqrt{E(GeV)}}$
CsI	$\frac{2\%}{\sqrt{E(GeV)}}$	$\frac{0.1(cm)}{\sqrt{E(GeV)}}$

4.1.3 イベントに対する重み

$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊や $K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊から二つの光子のみを観測するイベント数を、効率良く求める方法を述べる。もし各光子に対して不感率を適用させれば、$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊のほとんどのイベントの光子は検出されて、バックグラウンドにならないので、シミュレーションの時間がかかり過ぎる。

そこでこの問題を解決するために、そのイベントの二つの光子のみを観測する確率を各イベントに対して重みとして与えた。

$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊に用いる重みを、表 4.2 に示す。これら 6 つの重みの和が $K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊のひとつの事象の重みとなる。

表 4.2: $K_L \to \pi^0\pi^0$ の重み。$\bar{\epsilon}(\gamma_1)\ldots\ \bar{\epsilon}(\gamma_4)$ は π^0 が崩壊してできた光子、$\gamma_5 \ldots \gamma_M$ はシャワーの洩れによる光子を表す。

検出	未検出	重み
γ_1, γ_2	$\gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \ldots \gamma_{M-1}, \gamma_M$	$(1. - \bar{\epsilon}(\gamma_1))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_2))\bar{\epsilon}(\gamma_3)\bar{\epsilon}(\gamma_4)\bar{\epsilon}(\gamma_5)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{M-1})\bar{\epsilon}(\gamma_M)$
γ_1, γ_3	$\gamma_2, \gamma_4, \gamma_5, \ldots \gamma_{M-1}, \gamma_M$	$(1. - \bar{\epsilon}(\gamma_1))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_3))\bar{\epsilon}(\gamma_2)\bar{\epsilon}(\gamma_4)\bar{\epsilon}(\gamma_5)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{M-1})\bar{\epsilon}(\gamma_M)$
γ_1, γ_4	$\gamma_2, \gamma_3, \gamma_5, \ldots \gamma_{M-1}, \gamma_M$	$(1. - \bar{\epsilon}(\gamma_1))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_4))\bar{\epsilon}(\gamma_2)\bar{\epsilon}(\gamma_3)\bar{\epsilon}(\gamma_5)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{M-1})\bar{\epsilon}(\gamma_M)$
γ_2, γ_3	$\gamma_1, \gamma_4, \gamma_5, \ldots \gamma_{M-1}, \gamma_M$	$(1. - \bar{\epsilon}(\gamma_2))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_3))\bar{\epsilon}(\gamma_1)\bar{\epsilon}(\gamma_4)\bar{\epsilon}(\gamma_5)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{M-1})\bar{\epsilon}(\gamma_M)$
γ_2, γ_4	$\gamma_1, \gamma_3, \gamma_5, \ldots \gamma_{M-1}, \gamma_M$	$(1. - \bar{\epsilon}(\gamma_2))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_4))\bar{\epsilon}(\gamma_1)\bar{\epsilon}(\gamma_3)\bar{\epsilon}(\gamma_5)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{M-1})\bar{\epsilon}(\gamma_M)$
γ_3, γ_4	$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_5, \ldots \gamma_{M-1}, \gamma_M$	$(1. - \bar{\epsilon}(\gamma_3))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_4))\bar{\epsilon}(\gamma_1)\bar{\epsilon}(\gamma_2)\bar{\epsilon}(\gamma_5)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{M-1})\bar{\epsilon}(\gamma_M)$

$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊においても、洩れ出た光子を含めて、その重みは、

$$W = (1. - \bar{\epsilon}(\gamma_1))(1 - \bar{\epsilon}(\gamma_2))\bar{\epsilon}(\gamma_4)\bar{\epsilon}(\gamma_4)\ldots\bar{\epsilon}(\gamma_{N-1})\bar{\epsilon}(\gamma_N) \tag{4.1}$$

となる。ここで、$\bar{\epsilon}$ は光子の入射エネルギーと入射角度の関数で表される光子の不感率、γ_1 と γ_2 はそれぞれ π^0 が崩壊してできた光子、$\gamma_3 \ldots \gamma_N$ はシャワーの洩れによる光子を表す。

4.1.4 η の誤差の見積もり

ここでは、η の誤差の測定について述べる。シミュレーションで様々な条件に対して、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊を 10^6 個、$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊を 10^7 個発生させた。

シグナル事象数 S とバックグラウンド事象数 N はそれぞれ、

$$S = N_{K_{decay}} \times BR(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}) \times A_{(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu})} \tag{4.2}$$

$$N = N_{K_{decay}} \times BR(K_L \to \pi^0\pi^0) \times A_{(K_L \to \pi^0\pi^0)} \tag{4.3}$$

である。$N_{K_{decay}}$ は崩壊領域で崩壊する K_L の数、BR はそれぞれの分岐比、A はそれぞれのアクセプタンスを表す。陽子ビームの強度を 1.7×10^{14} protons/pluse (ビームパルスの周期は 3.4 秒)、1 年を 10^7 秒とし、3 年間実験を走らせると、検出器の先端 (Z=50) を通過する (立体角は 1.0 μstr)、K_L は 2.6×10^{14} 個である。このうち、10.8 % の K_L が崩壊領域で崩壊するので、式 (4.2) (4.3) は、

$$S = 2.8 \times 10^{13} \times BR_{(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu})} \times A_{(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu})} \tag{4.4}$$

$$N = 2.8 \times 10^{13} \times BR_{(K_L \to \pi^0\pi^0)} \times A_{(K_L \to \pi^0\pi^0)} \tag{4.5}$$

となる。

η の統計的な不定性は、

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{1}{2}\frac{\Delta BR}{BR} \tag{4.6}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{\sqrt{(S+N)}}{S} \tag{4.7}$$

である。ここで、BR は $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の分岐比を表す。$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ は、シグナル事象の数とバックグラウンド事象の数に依存することがわかる。また、S、N は横運動量 P_t と π^0 の崩壊点 z のカットに依存する。崩壊してできた光子のヒットパターンのカテゴリーごとに、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を小さくするシグナル領域を設定する。

4.2 解析

この節では、表 4.3 に示すような End カロリーメーターと Side カロリーメーターを使って、η の誤差の値を見積もる。また、それぞれのカロリーメーターに対して、検出器の半径と、veto threshold を変える。以上の各場合に対して表 4.4 に示すカットを行い、シグナルとバックグラウンドの事象数を求めた。

4.2.1 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーター (Case A)

Veto threshold

ここでは半径 100cm の検出器、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を想定する。このカロリーメーターの光子に対する不感率は、付録 A に示す。検出器の veto threshold を 5MeV、10MeV に設定した場合の、シグナル事象、バックグラウンド事象、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ をヒットパターンごとに表 4.5 に示す。threshold を 5MeV から 10MeV に上げると、SS、ES のシグナル事象数が増えるが、どのカテゴリーでも、それ以上にバックグランドが増える。

表 4.3: カロリーメーターに用いた検出器の種類を表す。A、B、C、D 各場合に対して、検出器の半径を 100cm、150cm、200cm とし、threshold も変える。

Case	End カロリーメーター	Side カロリーメーター
A	1mm 鉛/5mm シンチ	1mm 鉛/5mm シンチ
B	1mm 鉛/5mm シンチの手前に 10cm のシンチ	1mm 鉛/5mm シンチの手前に 10cm のシンチ
C	CsI	1mm 鉛/5mm シンチ
D	CsI	1mm 鉛/5mm シンチの手前に 10cm のシンチ

表 4.4: 各場合に用いた崩壊点 z と横運動量 P_T のカットの値を示す。

	最小値 z (m)	最大値 z (m)	最小値 P_T (GeV/c)	最大値 P_T (GeV/c)
EE	52	60	0.14	0.23
SS	52	59	0.13	0.24
ES	52	60	0.13	0.24

表 4.5: 半径 100cm の検出器、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター で、threshold が 5MeV,10MeV のときの シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、 $\frac{\triangle\eta}{\eta}$ を示す。

Threshold を 5MeV にした場合

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
EE	56	60	9.7
SS	14	32	24
ES	37	64	14

Threshold を 10MeV にした場合

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
EE	56	117	12
SS	22	154	30
ES	49	181	15

検出器の半径

ここでは、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の、検出器の半径依存性をみる。厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を想定し、threshold を 5MeV に設定した。先程、threshold を 10MeV まで上げると、バックグラウンドが増えるのを見たので、threshold が 5MeV の場合だけを調べる。検出器の半径が 150、200cm の場合の、シグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ をカテゴリーごとに表 4.6 に示す。

半径が 100cm、150cm、200cm の場合の、EE、SS、ES を合わせたシグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表 4.7 に示す。半径を 100cm から 150cm にすると、シグナル事象数は 1.5 倍に、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ が 7.6% から 6.1%と η の精度が良くなる。

表 4.6: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値をカテゴリーごとに示す。用いた threshold は 5MeV である。

半径 **150cm**

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
EE	103	128	7.3
SS	12	19	23
ES	48	85	12

半径 **200cm**

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
EE	140	187	6.4
SS	9	15	27
ES	48	81	12

表 4.7: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 100cm、150cm、200cm の場合の、全シグナル事象の数、全バックグラウンド事象の数、 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。用いた threshold は 5MeV である。

	全シグナル事象	全バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
半径 100cm	107	156	7.6
半径 150cm	163	232	6.1
半径 200cm	197	283	5.6

4.2.2 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーターの手前に厚さ 10cm のシンチレーターを置く (Case B)

3.2.4 節の結果をふまえ、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前に厚さ 10cm のシンチレーターを置く。このときの不感率は付録 A で示す。

Veto threshold

ここでは、検出器の半径を 100cm にする。厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV で、手前のシンチレーターの threshold を 1MeV、2MEV、5MeV と変えた。この場合の、シグナル事象とバックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ をカテゴリーごとに表 4.8 に示す。手前にシンチレーターを置かなかった場合 (表 4.5 の threshold 5MeV)、ES で $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ が 14%だが、手前にシンチレーター (threshold 2MeV の場合) を置くと、10%になり、ES のシグナルの数は 1.6 倍になっている。

表 4.8: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前のシンチレーターの threshold を 1MeV、2MeV、5MeV にしたときのそれぞれのシグナル事象の数, バックグラウンド事象の数, $\frac{\triangle\eta}{\eta}$ を表す。ただし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV。

手前のシンチレーターの **threshold** を **1MeV** にした場合

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
EE	56	53	9.3
SS	29	53	16
ES	60	94	10

手前のシンチレーターの **threshold** を **2MeV** にした場合

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
EE	56	55	9.4
SS	29	57	16
ES	61	99	10

手前のシンチレーターの **threshold** を **5MeV** にした場合

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
EE	56	67	10
SS	39	86	14
ES	71	133	10

検出器の半径

ここでは、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の検出器の半径依存性をみる。厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV、その手前に置いた 10cm のシンチレーターの threshold を 2MeV に設定した。検出器の半径が 150cm、200cm の場合の、シグナル事象の数とバックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ をカテゴリーごとに図 4.9 に示す。

表 4.9: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前に 10cm のシンチレーターを置き、検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナル事象の数とバックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値を示す。

半径 **150cm**

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
EE	103	119	7.2
SS	20	31	18
ES	67	103	9.7

半径 **200cm**

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
EE	140	167	6.3
SS	13	14	20
ES	60	91	10

4.2.3 CsI カロリーメータ (Case C、D)

CsI の結晶は非常に高額なので、現実的な案として、End カロリーメーターにのみ CsI を用いる場合を考える。この CsI はサンプリングカロリーメーターに比べて不感率が小さく、エネルギー分解能と位置分解能が良い。Side カロリーメーターには veto 検出器として 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の場合 (Case C) と、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前に厚さ 10cm のシンチレーターを置いた場合 (Case D) を想定する。ここでは、Side カロリーメーターの threshold を 5MeV、その手前のシンチレーターの threshold を 2MeV とする。

Side カロリーメーターは veto 検出器として用いるので、カテゴリー EE のみを調べる。

Veto threshold

End カロリーメーターに置く CsI の threshold を 2MeV、5MEV、10MeV と変える。Threshold が 2MeV、5MeV、10MeV の場合の不感率をそれぞれ、図 A.15 に、図 A.16 に、図 A.17 に示す。

このときの、シグナル事象の数とバックグラウンド事象の数、η の誤差の値を表に示す。

表 4.10: シグナル事象の数, バックグラウンド事象の数, $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表す。

(Case C)

CsI の threshold	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
2MeV	56	42	8.9
5MeV	56	59	9.6
10MeV	56	114	12

(Case D)

CsI の threshold	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
2MeV	56	39	8.7
5MeV	56	57	9.5
10MeV	56	122	12

検出器の半径

ここでは、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の、検出器の半径依存性をみる。CsI の threshold は 2MeV に設定した。検出器の半径を 150、200cm にしたときの、シグナルとバックグラウンドの数、η の誤差の値を表 4.11 に示す。

表 4.11: 検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値を示す。

(Case C)

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
半径 150cm	103	90	6.7
半径 200cm	140	140	6.0

(Case D)

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
半径 150cm	103	88	6.7
半径 200cm	141	123	5.8

4.3 結果

この章で様々なカロリーメーターを用い、検出器の半径を変えて、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を見積もった。その結果を、表 4.12 に示す。

	半径 100cm	半径 150cm	半径 200cm
A	7.6 % (0.69)	6.1 % (0.70)	5.6 % (0.70)
B	6.5 % (0.69)	5.5 % (0.75)	5.2 % (0.78)
C	8.9 % (1.3)	6.7 % (1.1)	6.0 % (1.0)
D	8.7 % (1.4)	6.7 % (1.2)	5.8 % (1.1)

表 4.12: 各場合の $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。括弧内はシグナル事象数とバックグラウンド事象数の比 (S/N) を表す。A、B、C、D は Side と End に置いたカロリーメーターでの場合分けを表す (表 4.3 を参照)。A、B はカテゴリー EE、SS、ES の合計で算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$、C、D は EE だけで算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ である。ただし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV、その手前に置いたシンチの threshold は 2MeV、CsI の threshold は 2MeV の場合である。

第5章　30GeV/c 陽子ビームの可能性

この章では、30GeV/c の陽子ビームで作られた K_L を使って、3 章、4 章で行った 50GeV/c の場合と同様のシミュレーションを行った。30GeV/c は J-PARC 加速器が初期に出せる現実的な運動量である。以下、50GeV/c との比較のいくつかを示すが、詳しい結果については付録 B で示す。

5.1　K_L ビームの比較

ここでは、K_L ビームの比較をする。表 5.1 に K_L ビームのパラメーターを示す。K_L ビームの取り出し角度で、立体角を 1 μstr とする。1 秒あたりに、崩壊領域で崩壊する K_L の数を比べると、30GeV/c 陽子ビームの場合は、50GeV/c 陽子ビームの場合の約 60%である。

	50GeV/c 陽子ビーム	30GeV/c 陽子ビーム
K_L 平均運動量 (GeV/c)	5.8	5.2
K_p (個/proton/1μstr)	4.4×10^{-7}	2.5×10^{-7}
N_K (個/秒/1μstr)	4.1×10^{7}	2.3×10^{7}
Decay probabilty	10.8 %	11.5 %

表 5.1: K_p は、1 つの陽子が標的に当たって、標的から 50m 下流 (検出器先端) を通過する立体角 1μstr での K_L の数を表す。N_K は、1 秒あたりの、標的から 50m 下流 (検出器先端) を通過する立体角 1μstr での K_L の数を表す。Decay probabilty は 15m の崩壊領域での K_L の崩壊確率を表す。

5.2　シグナルアクセプタンスの比較

ここでは、シグナルアクセプタンスの比較をする。検出器の半径は 100cm で、End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用いる。発生させる $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊は 10^5 個である。表 5.2 にカテゴリー別にみたアクセプタンスの比較を示す (3.2.2 節と同様の解析)。50GeV/c の場合の方が EE のアクセプタンスが少し大きいが、他はほとんど同じである。

	50GeV/c 陽子ビーム (%)	30GeV/c 陽子ビーム (%)
EE	6.2	5.8
SS	1.8	1.9
ES	4.0	4.1
Total	12.0	11.8

表 5.2: 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれのカテゴリー別にみたシグナルアクセプタンスを示す。End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用い、threshold は 5MeV とする。

5.3 Dead time の比較

ここでは dead time の比較をする。End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用い、threshold 5MeV のときの、dead time を表 5.3 に示す。30GeV/c の場合の dead time は 50GeV/c の場合の dead time の約 60%である。

	50GeV/c 陽子ビーム	30GeV/c 陽子ビーム
半径 100cm	0.195	0.118
半径 150cm	0.148	0.090
半径 200cm	0.131	0.080

表 5.3: 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれの dead time を示す。End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用い、threshold は 5MeV とする。

5.4 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の比較

ここでは、4 章で用いた検出器のいくつかを取り上げて、シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の比較をする。

5.4.1 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーター

ここでは、End カロリーメーター、Side カロリーメーターに 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用い (Case A)、検出器の半径は 100cm で、threshold は 5MeV に設定する。そのときの、シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表 5.4 に示す。30GeV/c の場合、EE で少し S/N が小さい。全シグナル事象は 50GeV/c の場合は 107 で 30GeV/c の場合は 68 である。

	50GeV/c 陽子ビーム	30GeV/c 陽子ビーム
EE のシグナル事象	56(0.93)	31(0.83)
SS のシグナル事象	14(0.43)	10(0.45)
ES のシグナル事象	37 (0.58)	27 (0.55)
$\frac{\Delta\eta}{\eta}$	7.6 %	9.8 %

表 5.4: 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれのカテゴリー別にみたシグナル事象と $\frac{\Delta\eta}{\eta}$(EE+SS+ES で算出) を示す。括弧内は S/N を表す。検出器の半径 100cm で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター で、用いた threshold は 5MeV。

5.4.2 CsI

ここでは、End に CsI、Side カロリーメーターに veto 検出器として 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を置く (Case C)。検出器の半径は 150cm で、CsI の threshold は 2MeV、Side カロリーメーターの threshold は 5MeV に設定する。そのときの、シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表 5.5 に示す。30GeV/c の場合、シグナルの数が約 60% になる。

	50GeV/c 陽子ビーム	30GeV/c 陽子ビーム
シグナル事象	103	59
バックグラウンド事象	90	53
$\frac{\Delta\eta}{\eta}$	7.0 %	8.9 %

表 5.5: 50GeV/c 陽子ビーム と 30GeV/c 陽子ビームの場合のそれぞれのシグナル事象、バックグラウンド事象、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。検出器の半径は 150cm で、用いた threshold は 2MeV。

5.5 結果

30GeV/c 陽子ビームを使うと、50GeV/c 陽子ビームを使った場合と比較して、

1. 崩壊領域で崩壊する K_L の数が約 0.6 倍にる。
2. Dead time が約 0.6 倍になる。
3. 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター では、シグナルの数が約 60% になり、S/N が 10% 悪くなる。
4. CsI では、シグナルの数が約 60% になり、S/N はあまり変わらない。

この章のこれまでの結果と、シグナルの数と dead time は、崩壊領域で崩壊する K_L の数に比例するということを考慮すると、シグナルアクセプタンスと $N_{K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0}$ は、30GeV/c 陽子ビームの場合でも、それほど変わらないといことになる。

第6章　議論

6.1　Sideカロリーメーターの意義

$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の実験で、何よりも困難な点はやはり、分岐比が非常に小さいということである。序章でも述べたが、これは大きなアクセプタンスを持つ検出器が必要であるということになる。また、K_L の寿命が、他の高エネルギー実験で扱われる粒子 (B など) に比べて長い。このため崩壊領域を長くする必要がある。アクセプタンスをできる限り大きくしたいことを考えると、この崩壊領域を覆うすべての検出器を使って、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊を観測することは自然な発想である。

しかし、本研究で、シャワーの洩れによって、SS、ES でのアクセプタンスの損失が多く起きることが明らかになった。例として、半径 100cm の検出器で、Side カロリーメーターと End カロリーメーターに厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用いた場合を述べる。表 3.1 をみると、シャワーの洩れを完全に防いだ場合 (以前までシャワーの洩れを深刻に考慮していなかった)、Side カロリーメーターを使うことによって、4 倍のアクセプタンスを期待できると考えられていた。しかし、シャワーの洩れを考えると、threshold を 5MeV にした場合、2 倍のアクセプタンスしか期待できない。これは問題である。それでも、Side カロリーメーターを使うのか、それとも、End カロリーメーターだけを使うのかを本研究で得られた結果を用いて以下議論する。

これまで、様々な検出器を用いて、シグナル事象数とバックグラウンド事象数を求めてきた。ここでは、50GeV/c 陽子ビームを想定し、検出器の方針として、二つの場合を比較する。

1. 比較的安価な鉛とシンチレーターのサンプリングカロリーメーターを End カロリーメーターと Side カロリーメーターに使う。

   この場合、Side でもエネルギー測定、位置測定を行うので、半径をあまり大きくすると、PMT の数が多くなり過ぎる。そのため、検出器の半径は 100cm で考えた (Case A の内径 100cm)。

2. End カロリーメーターに CsI を置き、Side カロリーメーターを veto 検出器として用いる。この場合、Side でのエネルギー測定、位置測定を行わないので、検出器の半径を 150cm が可能であるとした (Case C の半径 150cm)。

このふたつを比較すると、シグナルの数は 1. で「107」、2. で「103」であるが、2. の S/N が 1.6 倍良いため、$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ は 1. の場合 7.6%、2. の場合 6.7% となる。2. のほうが η を精度良く測れる。この S/N の違いは、CsI の不感率が小さいということが大きく関係しているが、もうひとつ原因が考えられる。$K_L \to \pi^0\pi^0$ で、ふたつの光子を見失ってバックグラウンドが起きるとき、そのときの K_L の運動量が小さいと予想できる。この小さい運動量の K_L が崩壊してできた光子は Side カロリーメーターに当たることが多い。つまり、どうしても Side カロリーメーターでのバックグラウンドが多くなってしまうのである。

以上の結果から、Side カロリーメーターを $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ の観測には使わずに、veto 検出器として用い、できる限り検出器の半径を大きくして、End カロリーメーターだけを観測に使うことを提案する。

6.2 Veto threshold

崩壊した光子を、できる限り、End カロリーメーターで観測することを勧めたが、End カロリーメーターでもシャワーの洩れは起こる。表 3.1 の threshold 2MeV の場合をみると、EE でのアクセプタンスはシャワーの洩れによって 50%になる。すなわち、たとえ End カロリーメーターだけを $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の観測に使ったとしても、$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊のバックグラウンドを下げるために、Side カロリーメーターの threshold を下げ過ぎることはできない。

またこれは、dead time についても言える。図 3.11 を見ると threshold を 2MeV にすると、dead time は threshold を 5MeV の場合の 1.5 倍になる。

第7章　結論

$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 実験は、シグナルとして二つの光子のみを要求する。崩壊領域の Side 部分 (Side カロリーメーター) を $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の観測に使っても、Side カロリーメーターからの、シャワーの洩れによる二次粒子が他の場所にあたり、三つ以上の光子を観測してしまう場合が多く起こる。これはアクセプタンスを大きく損失する。よって、検出器の半径をできる限り大きくし、End カロリーメーターだけで、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の観測をすることを提案する。以下にそのときの η の誤差の見積もりを示す。

J-PARC の 50GeV/c 陽子ビームで予定されている 50% の強度 ($1.7 \times 10^{14} protons per pulse$) を想定し、3 年間 ($3 \times 10^7$秒) ビームを走らせる。検出器の半径を 150cm、End カロリーメーターに CsI を置き、Side カロリーメーターを veto 検出器とすることで、シャワーの洩れによる dead time は半径 100cm の場合と比べて 20% 減らすことができる。またそのときの、シグナル事象数は 109、バックグラウンド事象数は 90 と算出した。これにより、S/N が 1.2、η の精度を 6.7%の精度で測定できると期待できる。

付 録A　光子検出器の不感率

ここでは、まず、光子の不感率の原理について述べる。次に、いくつかのカロリーメーターを見積もる。ここで、検討したカロリーメーターは、以下の 3 つである。

1. 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター。
2. 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前にシンチレーターを置いた場合。
3. CsI。

最後に、不感率 $\bar{\epsilon}$ の求め方について述べる。

A.1　原理

光子が検出器に当たっても観測されない確率 (不感率) には、おもに三つの原因がある。

ひとつめは光核相互作用である。これは、光子を吸収した原子核が、そのエネルギーを複数の核子に分配して放出する現象である。反応で陽子が放出された場合には、検出することは容易である。しかし、中性子や低エネルギーの光子だけが放出された場合には検出することが難しい。

二つめは、サンプリング効果である。サンプリングカロリーメーターにおいて鉛にほとんどのエネルギーを落としてしまい、シンチレーターには threshold 以下のエネルギーしか落とさないと、光子は検出されない。

三つめは、パンチスルーである。これは光子が検出器と反応せず、そのまま検出器を通り抜ける事象のことである。

A.2　厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーターの不感率の見積もり

A.2.1　サンプリング効果とパンチスルー

サンプリング効果とパンチスルーに関しては、様々な実験によりその物理過程が詳細に知られている。したがってこれらはシミュレーションによって再現した。

入射エネルギーと入射角度を変えて、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター150 層から成るサンプリングカロリーメーターに光子を入射させた。例として、入射角度は $90°$ に固定し、入射エネルギーを変えたときにシンチレーターに落としたエネルギーの分布を図

A.1 に示す。また、入射エネルギーを 30MeV に固定し、入射各角度を変えたときにシンチレーターに落としたエネルギーの分布を図 A.2 に示す。

このシンチレーターに落とすエネルギーがあるエネルギー E_{th} 以下であれば、その事象を見失ったと定義する。ここでは、E_{th} として、1.6MeV、3.2MeV の二種類を設定する。これらは 90° の角度で、それぞれ 5MeV と 10MeV の光子がシンチレーターに落とすエネルギーに相当する。以下、threshold は入射エネルギーの値で表す。エネルギー threshold 5MeV の場合のサンプリング効果とパンチスルーによる不感率を図 A.3 示す。

A.2.2 光核相互作用

光核相互作用による不感率は ES171 で測定された結果 [11] を用いた。この実験では光子のエネルギーの threshold が 10MeV の結果しかない。サンプリング効果とパンチスルーではエネルギー threshold を 5MeV、10MeV に設定したが、本研究では ES171 で測定されたエネルギー threshold 10MeV の結果をそのまま用いた。また ES171 実験では、光子の入射角度は 90° でだけ測定しているが、この 90° の結果を、全ての入射角度の光子に対して当てはまると仮定する。図 A.4 に光核相互作用による不感率を示す。実験では光核相互作用の 100MeV 以下の実験は行われていない。100MeV 以下のエネルギーでの光核相互作用の不感率は 100MeV での不感率から一定と仮定する。

A.2.3 全不感率

光子検出器の全不感率はサンプリング効果とパンチスルーによる不感率と光核相互作用による不感率の総和である。エネルギー threshold 5MeV の場合の全不感率を図 A.5、エネルギー threshold 10MeV の場合の全不感率を図 A.6 に示す。

A.3 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーターの手前に厚さ 10cm のシンチを置いた場合の不感率の見積もり。

A.3.1 サンプリング効果とパンチスルー

A.2 節と同じ 150 層のサンプリングカロリーメーターの手前に厚さ 10cm のシンチレーターを置いて、入射エネルギーと入射角度を変えて、光子を入射する。サンプリングカロリーメーターのシンチレーターに落とすエネルギーと、手前に置いたシンチレーターに落とすエネルギーを調べる。例として、入射角度は 90° に固定し、入射エネルギーを変えたときを図 A.7 に、入射エネルギーを 30MeV に固定し、入射各角度を変えたときを図 A.8 に示す。

手前のシンチレーターに落としたエネルギーに対して E_{th} を 1MeV、2MeV、5MeV と 3 種類設定する。この場合、この E_{th} を threshold とする。奥のサンプリングカロリーメーターには 5MeV(シンチにレーター落としたエネルギーが 1.6MeV) の threshold を設定する。シンチレーターに落としたそれぞれのエネルギーが、この二つの threshold を両方とも越えなかった場合を見失った事象とする。

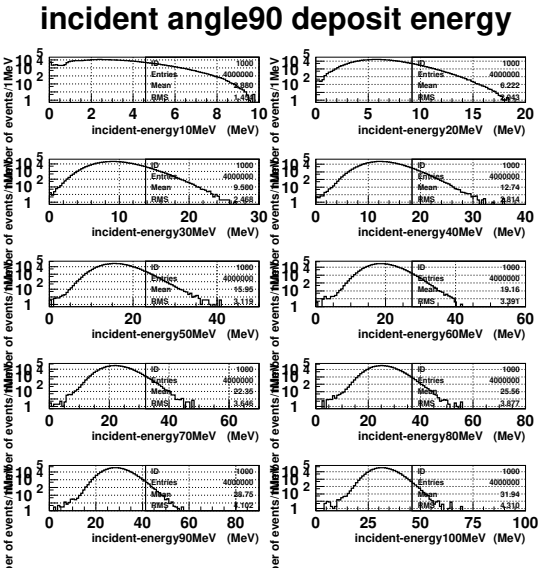

図 A.1: 各入射エネルギーの光子が、入射角度 $90\,^\circ$ のときに、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、シンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。

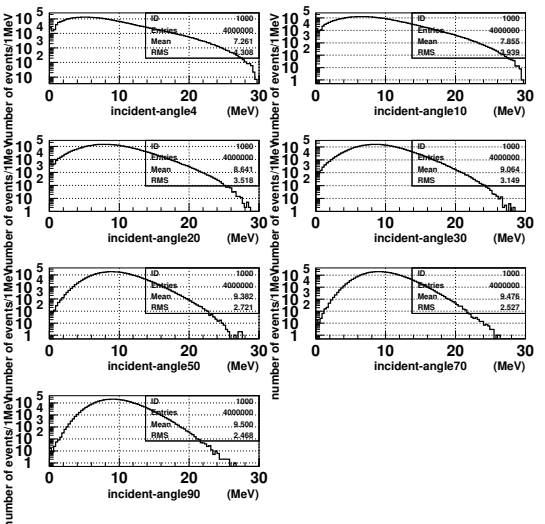

図 A.2: 各入射角度の光子が、入射エネルギー $30\mathrm{MeV}$ のときに、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、シンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。

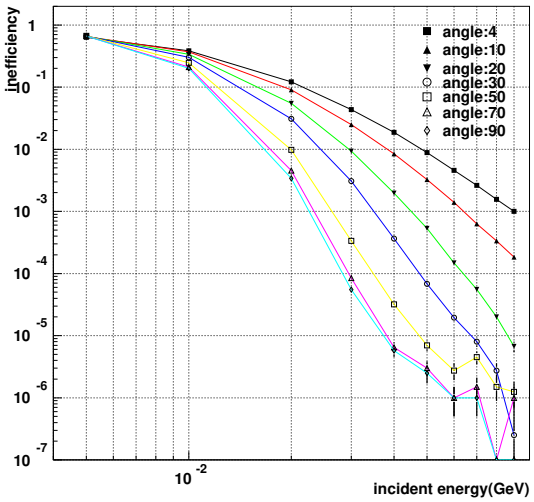

図 A.3: エネルギー threshold が 5MeV の場合の、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における光子のサンプリング効果とパンチスルーによる不感率を示す。それぞれ、入射角度 $4°$ (■)、$10°$ (▲)、$20°$ (▼)、$30°$ (○)、$50°$ (□)、$70°$ (△)、$90°$ (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

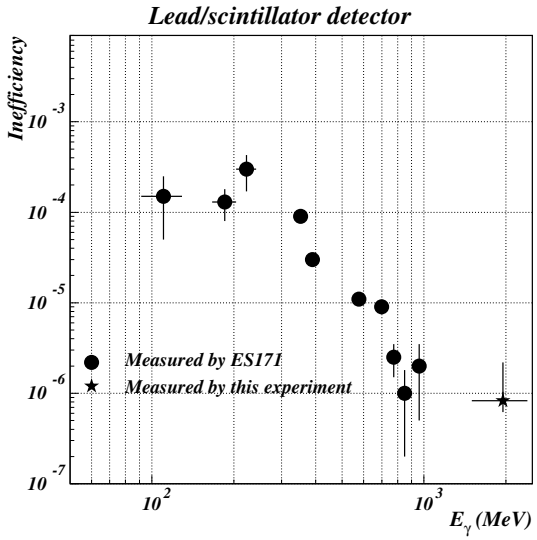

図 A.4: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における、光核子反応による光子の不感率を示す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

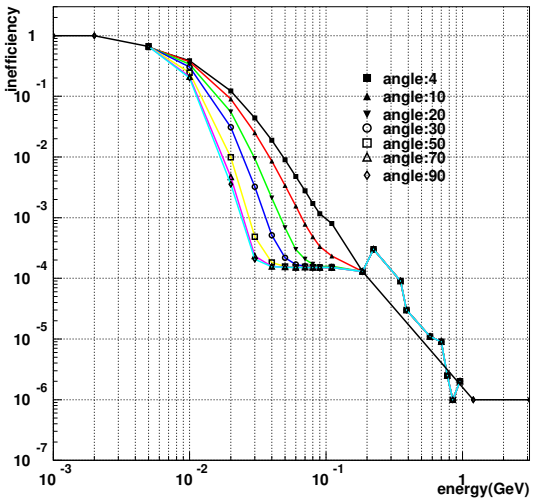

図 A.5: エネルギー threshold が 5MeV の場合の、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 $4°$ (■)、$10°$ (▲)、$20°$ (▼)、$30°$ (○)、$50°$ (□)、$70°$ (△)、$90°$ (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

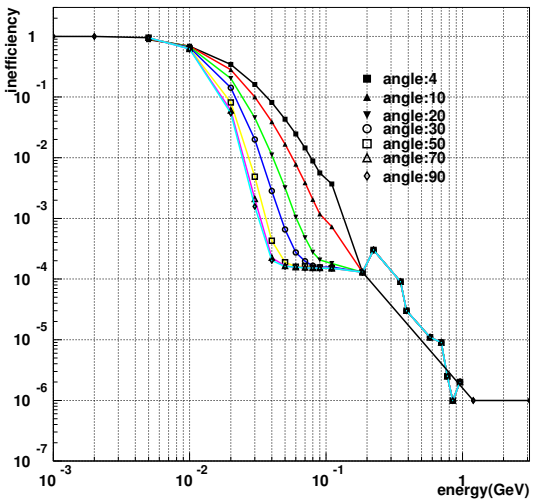

図 A.6: エネルギー threshold が 10MeV の場合の、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター における、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 $4°$ (■)、$10°$ (▲)、$20°$ (▼)、$30°$ (○)、$50°$ (□)、$70°$ (△)、$90°$ (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

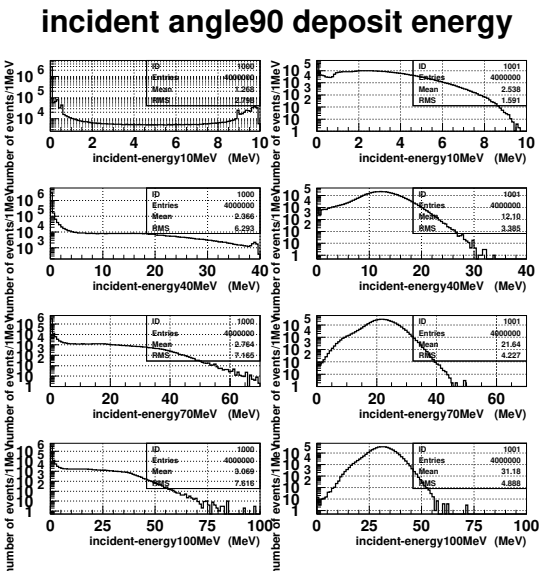

図 A.7: 各入射エネルギーの光子が入射角度 90 ° のときにシンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。左は手前のシンチレーター、右は 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの場合を表す。上から、入射エネルギーが 10MeV、40MeV、70MeV、100MeV の場合を表す。

A.3.2 光核相互作用

光核相互作用による不感率は A.2 節と同様に、図 A.4 を用いた。

A.3.3 全不感率

手前のエネルギー threshold を 1MeV、2MeV、5MeV と変える。厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の手前に厚さ 10cm のシンチを置いた場合の全不感率を、それぞれ図 A.9、図 A.10、図 A.11 に示す。

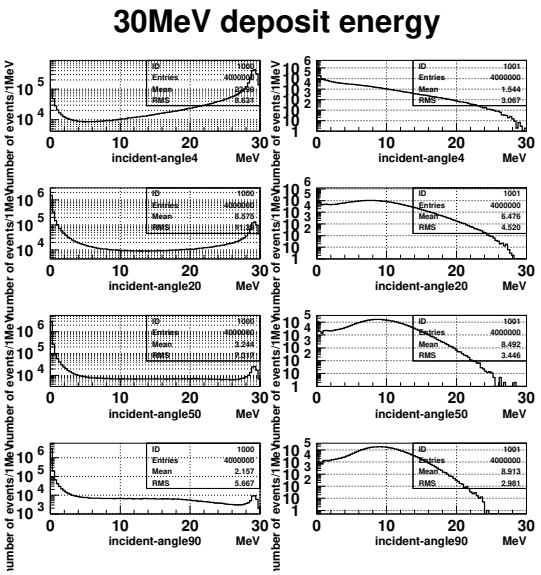

図 A.8: 各入射角度の光子が入射エネルギー 30MeV のときにシンチレーターに落とすエネルギーの分布を示す。左は手前のシンチレーター、右は 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの場合を表す。上から、入射角度が、$4°$、$20°$、$50°$、$90°$ を表す。

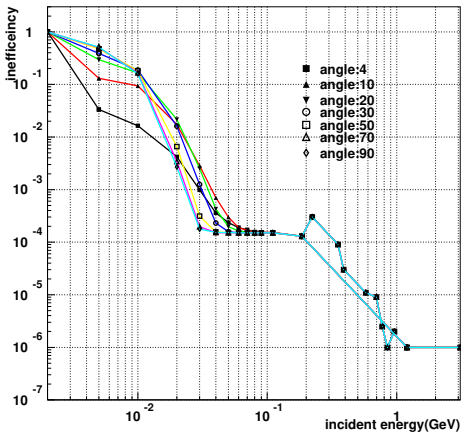

図 A.9: 手前のシンチレーターの threshold が 1MeV で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの threshold が 5MeV の場合の、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 $4°$ (■)、$10°$ (▲)、$20°$ (▼)、$30°$ (○)、$50°$ (□)、$70°$ (△)、$90°$ (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

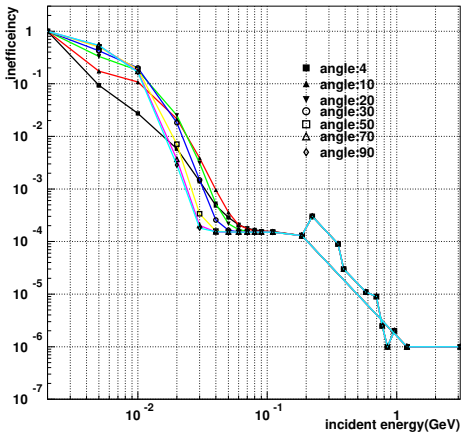

図 A.10: 手前のシンチレーターの threshold が 2MeV で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの threshold が 5MeV の場合の、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

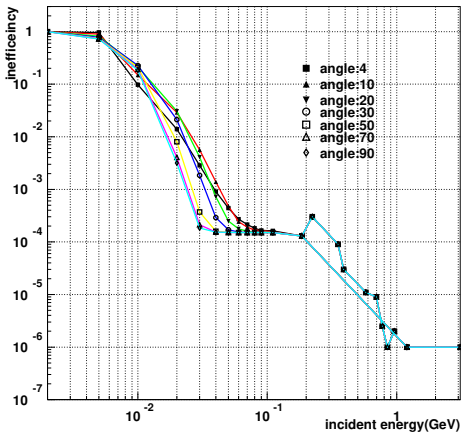

図 A.11: 手前のシンチレーターの threshold が 5MeV で、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター のシンチレーターの threshold が 5MeV の場合の、光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

A.4　CsI カロリーメーターの不感率の見積もり。

A.4.1　電磁相互作用

光子が CsI に入射して、CsI に落とすエネルギーが E_{th} を越えないことがある。入射エネルギーと入射角度を変えて、CsI カロリーメーターに光子を入射させた。例として、入射角度は 90 ° に固定し、入射エネルギーを変えたときにシンチレーターに落としたエネルギーの分布を図 A.12 に示す。また、入射エネルギーを 30MeV に固定し、入射各角度を変えたときにシンチレーターに落としたエネルギーの分布を図 A.13 に示す。

エネルギー threshold は CsI に落としたエネルギーを 2MeV、5MeV、10MeV に設定する。

A.4.2　光核相互作用

A.2 と同様に、光核相互作用による不感率は ES171 で測定した結果 [11] を用いた。この実験では光子のエネルギーの threshold が 10MeV の結果しかない。A.4.1 節では、エネルギー threshold を 2MeV、5MeV、10MeV に設定したが、本研究では ES171 で測定されたエネルギー threshold 10MeV の結果をそのまま用いた。また ES171 実験では、光子の入射角度は 90 ° でだけ測定しているが、この 90 ° の結果を光子の全ての入射角度に対して当てはまると仮定する。図 A.14 に CsI カロリーメーターの光核相互作用による不感率を示す。実験では光核相互作用の 100MeV 以下の実験は行われていない。100MeV 以下のエネルギーでの光核相互作用の不感率は 100MeV での不感率から一定と仮定した。

A.4.3　全不感率

光子検出器の全不感率はサンプリング効果とパンチスルーによる不感率と光核相互作用による不感率の総和である。この全不感率を Threshold が 2MeV の場合を図 A.15 に、threshold が 5MeV の場合を図 A.16 に、threshold が 10MeV の場合を図 A.17 に示す。

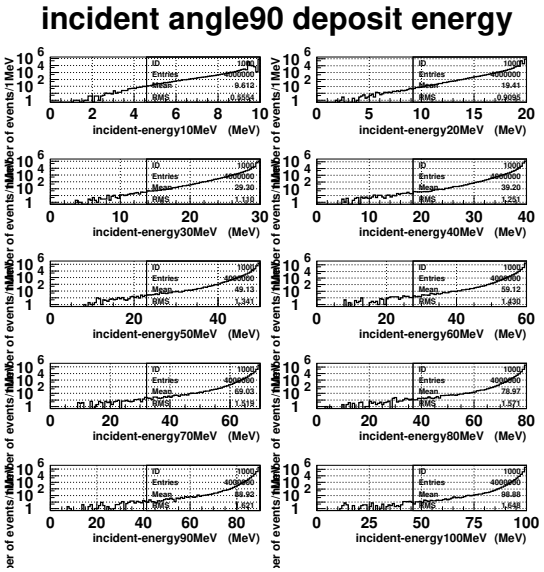

図 A.12: 各入射エネルギーの光子が、入射角度 90 ° のときに CsI に、落とすエネルギーの分布を示す。

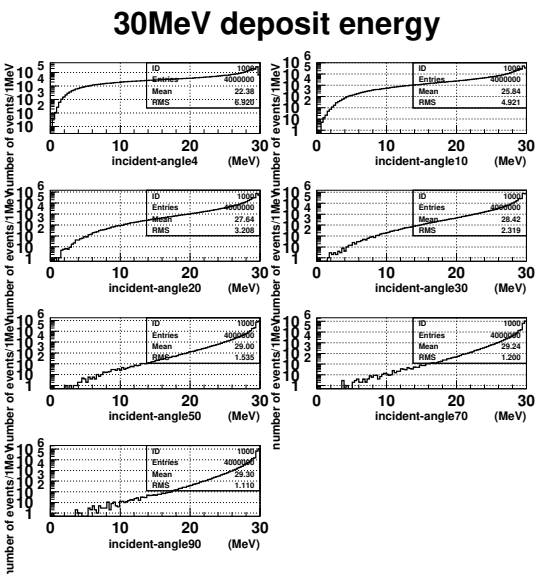

図 A.13: 各入射角度の光子が、入射エネルギー 30MeV のときに CsI に、落とすエネルギーの分布を示す。

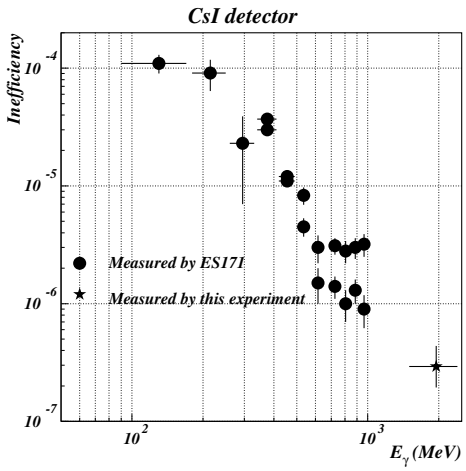

図 A.14: CsI における光核子反応による光子の不感率を示す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

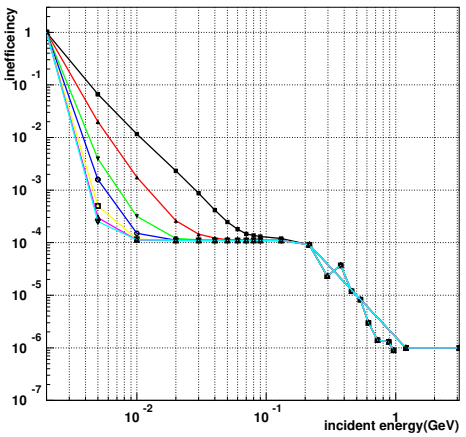

図 A.15: エネルギー threshold が 2MeV の場合の、CsI における光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

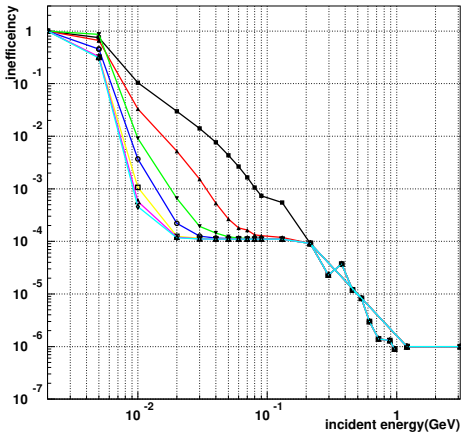

図 A.16: エネルギー threshold が 5MeV の場合の、CsI における光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

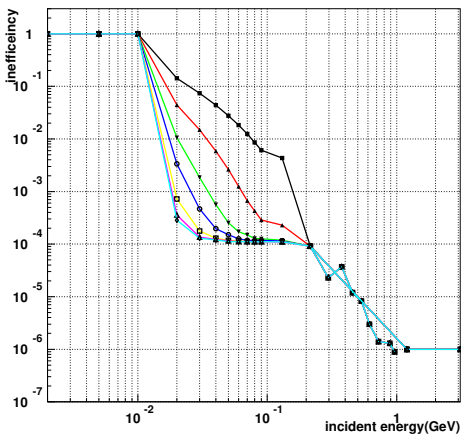

図 A.17: エネルギー threshold が 10MeV の場合の、CsI における光子の全不感率を示す。それぞれ、入射角度 4 ° (■)、10 ° (▲)、20 ° (▼)、30 ° (○)、50 ° (□)、70 ° (△)、90 ° (◇) を表す。横軸は入射エネルギー (GeV) を表す。

A.5　光子不感率 $\bar{\epsilon}$ の求め方

これまで、ある間隔おきの、入射エネルギー E_i と入射角度 a_j での光子の不感率 $\bar{\epsilon}(E_i, a_j)$ を求めた。$\{ E_i \} = \{ 5,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,200,1000\}$ (単位は MeV)。$\{ a_j \} = \{ 4,10,20,30,50,70,90\}$ (単位は「°」)。ここでは、これらの値を使って、任意の入射エネルギーと入射角度の、$\bar{\epsilon}$ の求め方について述べる。まず、入射エネルギーによって以下の場合分けをする。

1. $i < 11 (E < 200MeV)$

   この場合、入射エネルギーと入射角度を考慮した不感率を求める。GEANT で得る光子の入射エネルギー E と入射角度 a から、$E_i < E < E_{i+1}$ 、$a_j < a < a_{j+1}$ となる i と j を決める。$\bar{\epsilon}(E_i, a_j), \bar{\epsilon}(E_i, a_{j+1}), \bar{\epsilon}(E_{i+1}, a_j), \bar{\epsilon}(E_{i+1}, a_{j+1})$ の 4 つの値を使って $\bar{\epsilon}(E, a)$ を求める。まず、座標系 (X,Y,Z) を定義する。X は入射エネルギー、Y は入射角度、Z は不感率を表す。また、$Z(\log X, Y) = \log \bar{\epsilon}(X, Y)$ とする。

   そうすると、角度 (a_j) を固定した場合、2 点 $(\log E_i, a_j, Z(\log E_i, a_j))$ と $(\log E_{i+1}, a_j, Z(\log E_{i+1}, a_j))$ を想定し、この 2 点がつくる直線上で、$X = \log E$ であれば、そのときの Z の値は、

   $$Z(\log E, a_j) = Z(\log E_{i+1}, a_j) \times X_1 + Z(\log E_i, a_j) \times X_2 \tag{A.1}$$

   となる。ただし $X_1 = (\log E - \log E_i) / (\log E_{i+1} - \log E_i)$、$X_2 = (\log E_{i+1} - \log E) / (\log E_{i+1} - \log E_i)$

   同様に (a_{j+1}) を固定した場合、$X = \log E$ であれば、そのときの Z の値は、

   $$Z(\log E, a_{j+1}) = Z(\log E_{i+1}, a_{j+1}) \times X_1 + Z(\log E_i, a_{j+1}) \times X_2 \tag{A.2}$$

   と計算できる。今度は、2 点 $(\log E, a_j, Z(\log E, a_j))$ と $(\log E, a_{j+1}, Z(\log E, a_{j+1}))$ を想定し、この 2 点でつくられる直線上で、Y=a であれば、そのときの Z の値は

   $$Z(\log E, a) = \frac{Z(\log E, a_{j+1}) \times (a - a_j) + Z(\log E, a_j) \times (a_{j+1} - a)}{a_{j+1} - a_j} \tag{A.3}$$

   となる。さらに、

   $$\bar{\epsilon}(E, a) = \exp(Z(\log E, a)) \tag{A.4}$$

   となる。このように $\bar{\epsilon}(E, a)$ を求めた。

   ただし、X(入射エネルギー依存) では対数で考えたが、これは入射エネルギーが強く不感率に影響することを考慮したためである。

2. $i > 12 (200MeV < E < 1GeV)$

   ここでは、入射角度 90° しかないので、$(\log E_{12}, \log \bar{\epsilon}(E_{12}, a_7))$ と $(\log E_{13}, \log \bar{\epsilon}(E_{13}, a_7))$ の 2 点でつくられた直線を使って不感率 $\bar{\epsilon}(E)$ を求めた。

3. $E > 1GeV$

   入射エネルギーが 1GeV 以上では、1GeV の不感率から一定と仮定し、

   $\bar{\epsilon}(E, a) = \bar{\epsilon}(E_{13}, a_7) = 10^{-6}$ を用いた。

付 録B　30GeV/c陽子ビーム

ここでは、3 章、4 章で行ったシミュレーションの一部を、30GeV/c 陽子ビームでつくられた K_L を用いて調べる。

B.1　K_L ビーム

30GeV/c の陽子を標的に入射し、標的から 50m 下流を通過する K_L の運動量分布を図 B.1 に示す。その平均運動量は 5.2GeV/c である。K_L の取り出し角度は 5 ° で、ビームの立体角は 1.0 μstr である。このとき、入射陽子 1 個あたりの K_L の数 K_p は、$2.5 \times 10^{-7}/proton/\mu str$ である。また J-PARC の陽子ビームの最大強度の 50% 、すなわち 1.7×10^{14} protons/pluse を用いると想定すると、ビームパルスの幅は 0.7 秒なので、その間の K_L の頻度 N_K は $2.3 \times 10^{7}/sec/\mu str$ である。

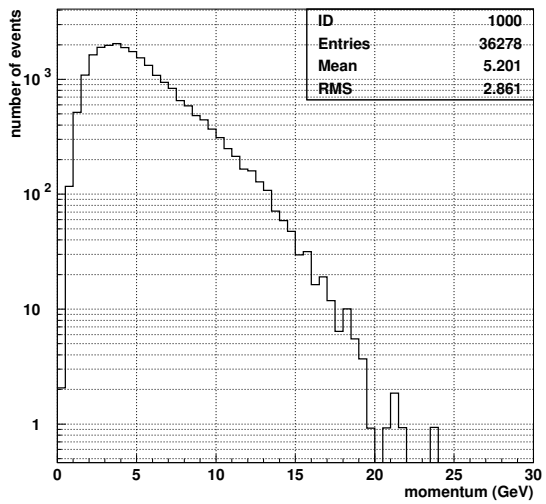

図 B.1: K_L の運動量の分布を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.4)

B.2　シグナルアクセプタンス

B.2.1　シグナルアクセプタンスの Veto threshold 依存性

ここでは、シグナルアクセプタンスの veto threshold 依存性をみる。検出器の半径は 100cm、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用いる。End カロリーメーターと Side カロリーメーターに入射する、π^0 が崩壊してできる光子の、入射エネルギーと、入射光子と検出器の表面がなす角度を図 B.2 に示す。表 B.1 にカテゴリー別にみたアクセプタンスを示す。図 B.3 に全アクセプタンス (EE+SS+ES) を veto threshold の関数として表す。

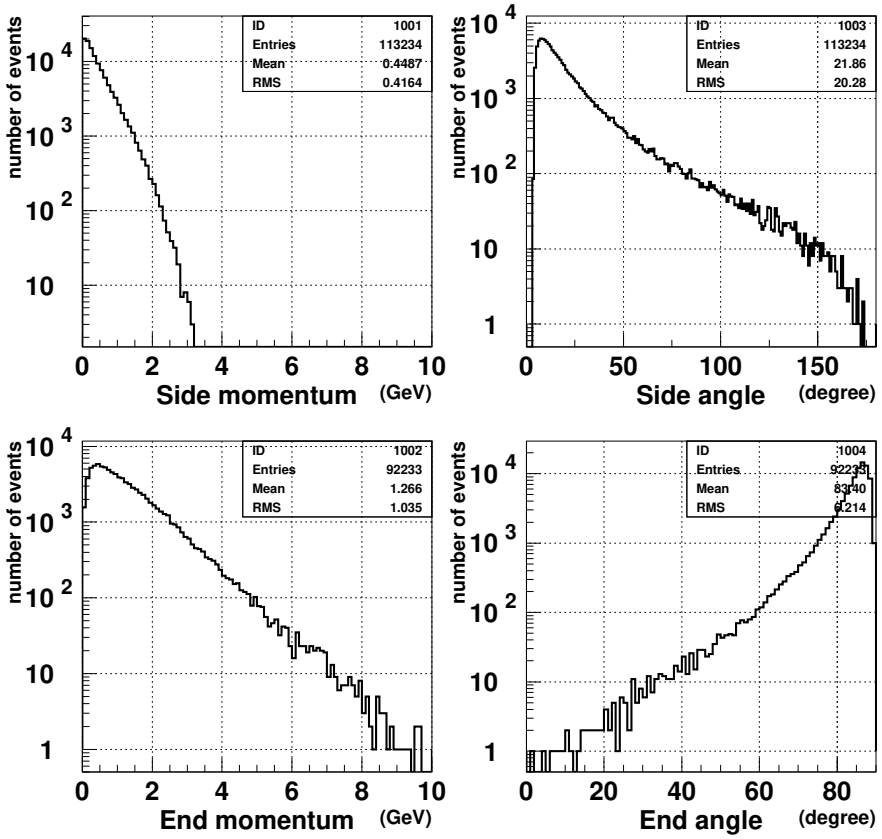

図 B.2: $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊でできた光子の各カロリーメーターへの入射エネルギーと検出器の表面となす入射角度の分布を表す。上は Side、下は End カロリーメーターを表す。左は入射エネルギー、右は入射角度を表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.7)

表 B.1: Threshold を 2、5、10MeV にした場合のカテゴリー別にみたアクセプタンスを表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 3.1)

	A_{sig}(%) for th.2MeV	A_{sig}(%) for th.5MeV	A_{sig}(%) for th.10MeV	A_{tot}(%)
EE	3.5	5.8	6.2	6.5
ES	1.7	4.1	6.0	12.0
SS	0.6	1.9	3.2	10.2
Total	4.8	11.8	15.4	28.7

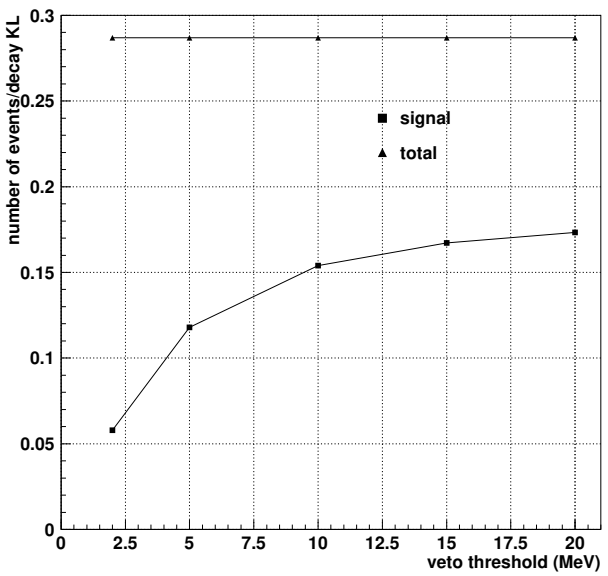

図 B.3: シグナルのアクセプタンスを veto threshold の関数として示す。■ はシャワーが起きた場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを完全に防いだ場合のアクセプタンス (A_{tot}) を表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.8)

B.2.2 シグナルアクセプタンスの検出器の半径依存性

ここでは、シグナルアクセプタンスの検出器の半径依存性をみる。厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を用いて、veto threshold は 5MeV に設定する。シグナルアクセプタンスと検出器の半径の関係を図 3.9 に示す。

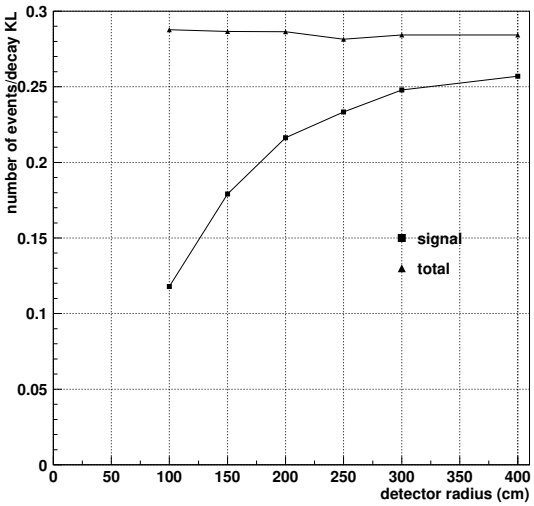

図 B.4: シグナルアクセプタンスを検出器の半径の関数として表す。■ はシャワーを起こした場合のアクセプタンス (A_{sig}) を、▲ はシャワーを起こさなかった場合のアクセプタンスを (A_{tot}) を表す。用いた、veto threshold は 5MeV。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.9)

B.3 Dead time

この節では、シャワーの洩れによって発生する粒子が dead time をどれほど増やすのかということについて調べる。ここでは主な原因になりうる $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊だけを考えた。

B.3.1 Dead time の算出

Dead time の近似的な算出については式 (1.11) を用いる。

ビームの立体角 $1\mu str$ で、1 秒あたりの数 N_K は 3.1.1 より、$2.3 \times 10^7/sec$、$K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ の分岐比 $BR = 0.21$、decay probabilty=0.108 であり、シグナルを観測できない時間幅 Δt を 20×10^{-9} 秒と仮定すると、式 (1.11) は

$$Dead\ \ time = 0.0115 \times < N_{K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0} > \tag{B.1}$$

となる。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は式 3.4)

$< N_{K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0} >$ は 1 回の $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊でシャワーの洩れも含めて観測される粒子の平均数を表す。シャワーの洩れが大きくなると dead time が増えるのがわかる。われわれは dead time を見積もるために、各条件でそれぞれ 10^5 個の $K_L \to \pi^0\pi^0\pi^0$ 崩壊をシミュレーションで発生させた。

以下、その結果を示す。

B.3.2 Dead time の veto threshold 依存性

ここでは、dead time の veto threshold 依存性をみる。そのため検出器の半径は 100cm、カロリーメーターは厚さ 1mm の鉛と厚さ 5mm のシンチレーターを用いる。Dead time を veto threshold の関数として図 B.5 に示す。

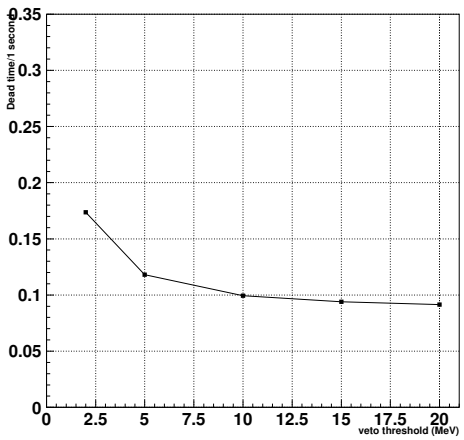

図 B.5: veto threshold の関数として Dead time を示す ($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.11)

B.3.3 Dead time の検出器の半径依存性

ここでは、dead time の検出器の半径依存をみる。Veto threshold は 5MeV、カロリーメーターは厚さ 1mm の鉛と厚さ 5mm のシンチレーターを用いる。dead time を検出器の半径の関数として図 B.6 に示す。

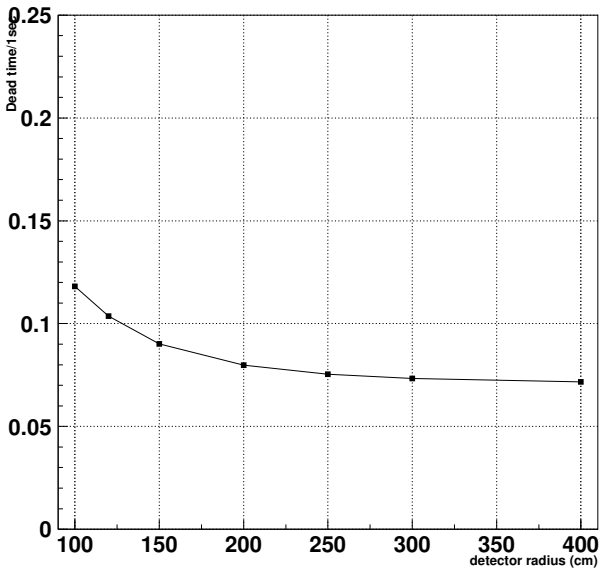

図 B.6: 検出器の半径 (cm) の関数として Dead time を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は図 3.12)

B.4 η の誤差

この章では、様々な検出器におけるシグナルとバックグラウンドの数を見積もり、η の誤差の測定をする。

B.4.1 η の誤差の見積もり

ここでは、η の誤差の測定について述べる。シミュレーションで様々な条件に対して、$K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊を 10^6 個、$K_L \to \pi^0\pi^0$ 崩壊を 10^7 個発生させた。

陽子ビームの強度を 1.7×10^{14} protons/pluse 、1 年を 10^7 秒とし、3 年間実験を走らせると、検出器の先端 (Z=50) を通過する K_L は 2.6×10^{14} 個である。このうち、11.5 % の K_L が崩壊領域で崩壊するので、式 (4.2) (4.3) は、

$$S = 1.7 \times 10^{13} \times BR_{(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu})} \times A_{(K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu})} \tag{B.2}$$

$$N = 1.7 \times 10^{13} \times BR_{(K_L \to \pi^0\pi^0)} \times A_{(K_L \to \pi^0\pi^0)} \tag{B.3}$$

となる。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は式 4.4、式 4.5)

B.4.2 厚さが 1mm の鉛と厚さが 5mm のシンチレーターのカロリーメーター (Case A)

Veto threshold

ここでは半径 100cm の検出器、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を想定する。このカロリーメーターの光子に対する不感率は、付録 A に示す。検出器の veto threshold を 5MeV に設定した場合の、シグナル事象、バックグラウンド事象、 $\frac{\triangle\eta}{\eta}$ をヒットパターンごとに表 B.2 に示す。

表 B.2: 半径 100cm の検出器、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター で、threshold が 5MeV のときの シグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、 $\frac{\triangle\eta}{\eta}$ を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.5)

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
EE	31	37	13
SS	10	22	27
ES	27	49	16

検出器の半径

ここでは、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の、検出器の半径依存性をみる。厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター を想定し、threshold を 5MeV に設定した。検出器の半径が 150、200cm の場合の、シグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ をカテゴリーごとに表 B.3 に示す。

半径が 100cm、150cm、200cm の場合の EE、SS、ES の総和でのシグナル事象の数、バックグラウンド事象の数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を表 B.4 に示す。

表 B.3: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ の誤差の値をカテゴリーごとに示す。用いた threshold は 5MeV である。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.6)

半径 **150cm**

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
EE	59	77	9.8
SS	8	15	29
ES	33	61	15

半径 **200cm**

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
EE	81	121	8.7
SS	6	9	31
ES	33	58	15

表 B.4: 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の、検出器の半径が 100cm、150cm、200cm の場合の、全シグナル事象の数、全バックグラウンド事象の数、 $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。用いた threshold は 5MeV である。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.7)

	全シグナル事象	全バックグラウンド事象	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ %
半径 100cm	68	108	9.8
半径 150cm	100	153	8.0
半径 200cm	120	188	7.3

B.4.3 CsI カロリーメータ (Case C)

ここでは、End カロリーメーターにのみ CsI を用いる。Side カロリーメーターには veto 検出器として厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の場合 (Case C) を想定する。ここでは、Side カロリーメーターに置く 厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold を 5MeV に設定する。Side カロリーメーターは veto 検出器として用いるので、カテゴリー EE のみを用いる。

Veto threshold

End カロリーメーターに置く CsI の threshold を 2MeV、5MEV、10MeV と変える。このときの、シグナル事象とバックグラウンド事象の数、η の誤差の値を表 B.5 に示す。

表 B.5: シグナル事象の数, バックグラウンド事象の数, $\frac{\triangle\eta}{\eta}$ を表す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.10)

CsI の threshold	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
2MeV	31	25	12 %
5MeV	31	35	13 %
10MeV	31	71	16 %

検出器の半径

ここでは、$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ の、検出器の半径依存性をみる。ここでは、CsI の threshold を 2MeV に設定した。検出器の半径を 150、200cm にしたときの、シグナルとバックグラウンドの数、η の誤差の値を表 B.6 に示す。

表 B.6: 検出器の半径が 150、200cm の場合のシグナルとバックグラウンドの数、$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ の誤差の値を示す。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.11)

	シグナル事象	バックグラウンド事象	$\frac{\triangle\eta}{\eta}$ %
半径 150cm	59	53	8.9 %
半径 200cm	82	87	7.9 %

B.5 結果

様々なカロリーメーターを用い、検出器の半径を変えて、$\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を見積もった。その結果を、表 B.7 に示す。

	半径 100cm	半径 150cm	半径 200cm
A	9.8 % (0.63)	8.0 % (0.65)	7.3 % (0.64)
C	12 % (1.2)	8.9 % (1.1)	7.9 % (0.94)

表 B.7: 各場合の $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ を示す。括弧内はシグナル事象数とバックグラウンド事象数の比 (S/N) を表す。A、C は Side と End に置いたカロリーメーターでの場合分けを表す (表 4.3 を参照)。A はカテゴリー EE、SS、ES の合計で算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$、C は EE だけで算出した $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ である。ただし、厚さが $1mm$ の鉛と厚さが $5mm$ のシンチレーターのサンプリングカロリーメーター の threshold は 5MeV、CsI の threshold は 2MeV の場合である。($50GeV/c$ 陽子ビームの場合 は表 4.12)

関連図書

[1] C. S. Wu *et al.*, *Phys. Rev.* **105**, 1413 (1957).

[2] J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 138 (1964).

[3] S. Eidelman *et al.*, *Phys. Lett.*B**592**, 1 (2004)

[4] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973)..

[5] L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. **51**, 1945 (1983).

[6] A. Buras, Phys. Lett. **B333**, 476 (1994).

[7] G. Buchalla and A. Buras, Phys. Rev. **D54**, 6782 (1996).

[8] A. Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. **D61**, 072006 (2000).

[9] CERN Program Library.

[10] E. Tanaka,Master Thesis, Osaka Univ., Phys., "MC Study of $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ Experiment at J-PARC B-line (2003).

[11] K. Sakashita,Master Thesis, Osaka Univ., Phys., "Measurement of the photon detection inefficiency due photo-nuclear interaction (2002).