鉛/Plastic Scintillator サンプリングカロリーメーターの光核反応による不感率の測定

紅林 圭太郎

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻
博士前期過程２年

1999 年 2 月 4 日

概 要

エネルギーが 50 MeV から 980 MeV の光子に対する、鉛／プラスティックシンチレーター積層型のサンプリングカロリーメーターの光核反応による不感率を調べた。その結果、カロリーメーターのしきい値を 5 MeV 以下にした場合、光核反応による不感率は 200 MeV の光子に対して 4×10^{-5} 、900 MeV の光子に対して 5×10^{-7} であった。これは $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ の分岐比測定実験「 KAMI 」で要求されている不感率を十分に満たしている。

目 次

1 Introduction **7**

1.1 $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊分岐比測定実験と光子検出 7

1.2 光核反応の光子検出効率への影響、実験の目的 7

2 実験 **9**

2.1 光核反応による不感事象とは 9

2.2 実験装置の構成、手順 9

2.2.1 STEP.1 電子ビームの引き出しから光子ビームの発生 9

2.2.2 STEP.2 光子放出後の電子のゆくえ 13

2.2.3 STEP.3 発生した光子のゆくえ、カロリーメーター 14

2.2.4 STEP.4 電磁相互作用を起こした事象の扱い 14

2.2.5 STEP.5 光核反応の事象の判別 15

2.3 今回作成したカロリーメーター 15

2.3.1 サンプリングカロリーメーターの構造 15

2.3.2 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター 17

2.3.3 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター 19

2.3.4 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーター 20

2.3.5 光電子増倍管にかける高電圧の決定 21

2.4 トリガー 22

2.4.1 光核反応の事象を集めるためのトリガー（ $\overline{EG}$ トリガー） 22

2.4.2 電磁気相互作用を起こした場合のトリガー（ $Tag\Sigma$ トリガー） 22

2.4.3 アクシデンタルトリガー 23

2.5 データの収集 23

3 カロリーメーターの較正 **25**

3.1 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正 25

3.2 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの較正 27

4 解析 **32**

4.1 解析方法 32

4.2 ビーム $veto$ カウンターのしきい値の決定 32

4.3 中性子の選別 38

4.3.1 時間情報による中性子の選別条件 38

4.3.2 エネルギー情報による中性子の選別条件 38

4.4 不感率の算出 44

4.4.1 入射光子の数の数え方 44

4.4.2 光核反応を起こした事象の判別 44

4.4.3 不感事象の数の見積もり 46

4.4.4 中性子の検出効率の見積もり 56
4.5 背景事象について 65
4.5.1 *Punch Though* による背景事象 (0.5*mm Pb*/ 5*mm Scint.* 、 40 *cm Scintillator*) 65
4.5.2 中性子の判別条件を満たす光子の数 67
4.5.3 宇宙線による背景事象 70

5 結果 **71**

6 考察 **74**
6.1 サンプリングカロリーメーターの E-cal の分布に見える山について 74
6.2 40 *cm Scintillator* カロリーメーターについて 78
6.2.1 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* からのしみ込み 78
6.2.2 π_0 の光生成による背景事象 80
6.3 サンプリングカロリーメーターの不感率について 81
6.3.1 シンチレーターの中での光核反応の効果 81
6.3.2 鉛とシンチレーターの厚さの比について 82

7 結論 **84**

A 光核反応 **87**
A.1 光核反応の原理 87
A.2 中性子放出と陽子放出の違い 88

B タギングシステムの較正 **90**
B.1 KTeVCsI カロリーメーターの電子ビームエネルギーのスピルタイミング依存の補正 . 90
B.2 タギングシステムの較正 91

C 中性子検出器の検出効率に関するデータ **94**
C.1 E-cal のしきい値以下の事象の検出効率の分布をとった時の、しきい値に対する平均値 μ の相関 94

図 目 次

1 実験の進行の摸式図 10
2 実験装置 12
3 電子から光子が発生する様子 13
4 中性子検出器 15
5 中性子検出器の配置 16
6 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター 17
7 カロリーメーターの配置 18
8 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのエネルギーのもれ 18
9 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター 19
10 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーター 20
11 $0.5mmPb/5mmScint.$、$Scint.block$ の高電圧を決めるときの、検出器の並べ方 21
12 $\overline{EG}$ トリガーのエネルギーしきい値の位置 23
13 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの並びの入れかえ。 25
14 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの並びを変える前後のエネルギー分布 26
15 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの、測定エネルギーと EGS シミュレーションの結果との比較 29
16 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの、測定エネルギーと EGS シミュレーションの結果との比較 30
17 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正の結果 31
18 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正の結果 31
19 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの較正の結果 31
20 E+ カウンターのエネルギー分布 33
21 Mistag 事象の割合とビーム $veto$ （ E+ ）を通過した事象の数 34
22 中性子検出器の TDC 分布 39
23 中性子と光子の信号の形の違い 40
24 中性子と光子を判別する原理 41
25 中性子検出器の ADC(narrow) と ADC(wide) の分布 42
26 AUN の分布 42
27 中性子検出器の AUN と TDC の分布 43
28 中性子を一つだけ観測した事象の TDC 分布 46
29 430 MeV の電子エネルギーで $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 48
30 750 MeV の電子エネルギーで $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 49
31 1100 MeV の電子エネルギーで $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 50

32 430 MeV の電子エネルギーで 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 51
33 750 MeV の電子エネルギーで 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 52
34 1100 MeV の電子エネルギーで 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 53
35 430 MeV の電子エネルギーで 40 cm $Scintillator$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 54
36 750 MeV の電子エネルギーで 40 cm $Scintillator$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布 55
37 μ と E-cal のしきい値の相関 56
38 430 MeV Run での 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 . . 57
39 750 MeV Run での 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 . . 58
40 1100 MeV Run での 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 . 59
41 430 MeV Run での 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 . 60
42 750 MeV Run での 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 . 61
43 1100 MeV Run での 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 62
44 430 MeV Run 、 750 MeV での 40 cm $Scintillator$ カロリーメーターの中性子計測数の分布 63
45 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターのしきい値に対する μ の変化 64
46 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターのしきい値に対する μ の変化 64
47 $Punch\,Though$ のあと後ろの 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの中で光核反応を起こした事象 65
48 中性子の判別条件の中にはいってくる光子 67
49 $0.45 \leq AUN \leq 2.5$ を満たす事象の中性子検出器の TDC 分布 68
50 $4 \leq TDC(nsec) \leq 25$ を満たす事象の中性子検出器の AUN 分布 69
51 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーター、 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの光核反応による不感率 72
52 40 cm $Scintillator$ カロリーメーターの光核反応による不感率 73
53 サンプリングカロリーメーターの E-cal の分布に現れる二つの山 74
54 各 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの測定エネルギーの割合の分布の説明 . . . 75
55 E-cal が 30 MeV 以下の事象に対する、各カロリーメーターの測定エネルギーの割合 . 77
56 E-cal が 70 MeV 以下の事象に対する、各カロリーメーターの測定エネルギーの割合 . 77
57 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ で光核反応が起こった後、放出された粒子が 40 cm $Scintillator$ の中だけでエネルギーを落す場合の摸式図 78
58 上流の２個（左）および３個（右）のカロリーメーターだけを使って算出した 40 cm $Scintillator$ の不感率の結果。カロリーメーターのしきい値は 30 MeV である。 79
59 π^0 中間子の光生成を含む、光核反応の反応断面積 81
60 1mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターで鉛の中で光核反応が起こった割合 82

61 光子を吸収して分極した原子核 87
62 陽子が感じるクーロン障壁 88
63 KTeVCsI カロリーメーターの構造と実験時の配置 90
64 E-cal のスピルのタイミングの依存性 91
65 タギングカウンターに入ってくる電子の運動量 92
66 タギングカウンター較正後の測定エネルギーと実際の光子のエネルギーの関係 93
67 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 430 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化 . . . 95
68 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 750 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化 . . . 96
69 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 1100 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化 . . 97
70 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 430 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化 . . . 98
71 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 750 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化 . . . 99
72 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 1100 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化 . . 100

表 目 次

1 KAMI 実験で求められている不感率の値 [3] 8
2 ビーム *veto* カウンターの種類と役割 11
3 光電子増倍管の高電圧の値 22
4 データ収集の日程とそこで得たデータの量 24
5 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正係数の値 27
6 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正係数の値 28
7 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの較正係数の値 28
8 電子ビームのエネルギーが 430 MeV の時の、ビーム veto のカットにより、信号が残る割合 35
9 電子ビームのエネルギーが 750 MeV の時の、ビーム veto のカットにより、信号が残る割合 36
10 電子ビームのエネルギーが 1100 MeV の時の、ビーム veto のカットにより、信号が残る割合 37
11 全入射光子数 45
12 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ で光核反応をおこした背景事象の数の見積もり 66
13 中性子であると判別した全事象数に対する、 AUN 条件の境界から中性子の判別条件に入ってくる光子の数の割合 67
14 中性子であると判別した全事象数に対する、 AUN 条件の境界から中性子の判別条件に入ってくる光子の数の割合 69
15 4 個の 40 *cm Scintillator* カロリーメーターそれぞれで起こった光核反応の事象数の比 80
16 フィットで求めた E_0 と ΔE_{tag} の値 92

1 Introduction

今回行なった実験は、米国の Fermi 加速器研究所で準備中の $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊の分岐比測定実験「 KAMI 」で用いる可能性のある光子検出器の、特に光核反応という現象に対する特性を調べたものである。この章ではまず、 $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊分岐比測定実験と、その時の光子検出の重要性について触れる。次に、光核反応と光子検出器の不感率の関係について説明し、今回行なった実験の持つ意味と目的ついて述べる。

1.1 $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊分岐比測定実験と光子検出

今回、 $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊分岐比測定実験で必要な光子検出器の不感率[a] を測定した。

$K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊は、高エネルギー物理学においてもっとも注目されている崩壊の一つである。その理由は、標準理論で予測されているこの崩壊の分岐比が、 CP 対称性の破れをあらわすパラメーターの自乗に比例しているからである。したがって、この崩壊の分岐比を正確に測定することで、標準理論が正しいかどうかを判断することができる。

この崩壊分岐比を測定するためには、高い検出効率を持った光子検出器が必要である。それは背景事象を除去するためである。 $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊の崩壊分岐比は $\sim 3 \times 10^{-11}$ [1] と大変小さく予想されているので、わずかな背景事象が測定感度に大きく影響する。

$K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊後残る粒子のうち、ニュートリノは物質とほとんど反応しないために検出することはできない。そこで検出できるのは $\pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma$ 崩壊によって生じる二つの光子だけということになる。しかし、実際には K_L の崩壊には、背景事象[b] となり得る終状態に光子を含む崩壊が多く存在する。たとえば、崩壊分岐比が $\sim 1 \times 10^{-3}$ である $K_L \longrightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊は、 $\pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma$ 崩壊によって出てきた四つの光子のうち、そのうちの二つが観測されないと $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊 と見分けがつかなくなり、背景事象として計測される。

いままでに、米国の Fermi 加速器研究所のグループがこの分岐比測定を試みたが崩壊は見つからず、5.88×10^{-7} (90 % $C.L.$) [2] という上限値を得ている。これから、さらに精密な分岐比測定を行なおうと計画されている実験が「 KAMI 」である。「 KAMI 」で要求されている不感率の値を表 1 にしめす。

いかに背景事象に含まれる光子を漏らすことなく検出し、背景事象を除去できるかどうかが $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊分岐比測定実験の結果を大きく左右する。つまり、高い感度の結果を得るには、高い検出効率を持った光子検出器、検出効率についてよく理解できている光子検出器が、この実験を成功させるために必要なのである。

1.2 光核反応の光子検出効率への影響、実験の目的

光子検出器の不感事象の原因は、主に二つの原因を挙げることができる。

ひとつは、電磁気相互作用による不感事象、つまりカロリーメーターと反応せずに通り抜けるような事象である。このような事象のことを $Punch\ Though$ 事象という。しかし、電磁気相互作用については、

[a] 不感率とは、全入射光子の数に対して光子が検出器にはいってきたのに観測できなかった事象、つまり不感事象のの割合のことである。

[b] 背景事象とは、何かの誤りで、本来見たい事象以外のものをそれだと勘違いされた事象のことである。

入射光子のエネルギー (GeV)	光子検出器の不感率
0.0 - 0.02	2×10^{-1}
0.02 - 0.04	3×10^{-2}
0.04 - 0.06	3×10^{-3}
0.06 - 0.10	7×10^{-4}
0.10 - 0.20	4×10^{-4}
0.20 - 0.40	1×10^{-4}
0.40 - 1.00	3×10^{-5}
1.00 - 3.00	3×10^{-6}
3.00 - 10.0	1×10^{-6}
10.0 - Inf.	1×10^{-6}

表 1: KAMI 実験で求められている不感率の値 [3]

十分な知識があるので、シミュレーションなどによってこのような不感事象を見積もることができる。

もうひとつが、この実験の対象である光核反応である。光核反応とは、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（付録 A）。反応で陽子が出た場合は、エネルギーをすぐに落すので検出は簡単だが、中性子や低エネルギーの光子だけが出た場合の検出は難しい。中性子は電荷を持たず、物質との反応性が乏しいので検出しにくいためである。したがって、このような光核反応は不感率の原因となる。

光核反応については、出てくる核子の数や種類、エネルギーなど、わかっていないことが多く、シミュレーションで光子検出器の性能を見積もることは難しい。そこで、直接光子検出器の不感率を測定して、性能を見積もろうというのが、この実験の目的である。

この論文では、 50 MeV から 980 MeV のエネルギーの光子に対し、光子検出器として鉛／プラスティックシンチレーターサンプリングカロリーメーター (2.3 節参照) を用いて行なった実験について説明し、その結果を考察する。そして最終的に、「 KAMI 」での実用可能性を探る。

2　実験

ここではまず、光核反応による不感事象として、どのような事象を集めるか簡単に説明し、今回用いた実験装置の細かい部分について解説する。次にその実験装置を使って、どのような条件のもとで実験を行なったかを説明する。

2.1　光核反応による不感事象とは

この節で、光核反応による不感事象とはなにかということをを説明する。

この実験の目的は、光核反応による光子検出の不感率を、光子のエネルギーの関数としてを測定することである。そこで、光核反応による不感事象が実験でどのような事象となってあらわれてくるのか、ここで確認しておく。

1. 光子検出器のエネルギー測定値が、しきい値以下である。
まず、不感率を測定したいカロリーメーターに光子を入れ、カロリーメーターで測定したエネルギーがしきい値にいたらなかった事象を不感事象として数える。カロリーメーターの中で電磁相互作用を起こした場合は、入射光子の一つとして数を数えるために用いる。

2. 中性子が少なくとも一つ観測される。
光核反応を起こした事象を判別する条件として, 中性子が多く放出された時が不感事象となるので、中性子を観測する。

以上の条件を満たした事象を光核反応による不感事象として集めることにする。

2.2　実験装置の構成、手順

まず、実験装置の大雑把な流れをつかむために、だいたいの動作過程を図 1 に示す。以降順番に詳しく説明していくことにする。これから図 1 の各 STEP を順をおって詳しく説明する。具体的な実験装置の構成を図 2 に載せる。

2.2.1　STEP.1 電子ビームの引き出しから光子ビームの発生

この STEP では加速器で加速された電子ビームを用いて光子ビームを発生させる。その過程を説明する。

1.3 GeV 電子シンクロトロン　実験で使う電子を加速するため、高エネルギー研究機構田無分室にある電子シンクロトロンを使った。ここの加速器は電子ビームを 21.5 Hz の頻度で取り出すことができる。ビームを取り出しによる電子ビームのエネルギー損失は 1 % 以内である。

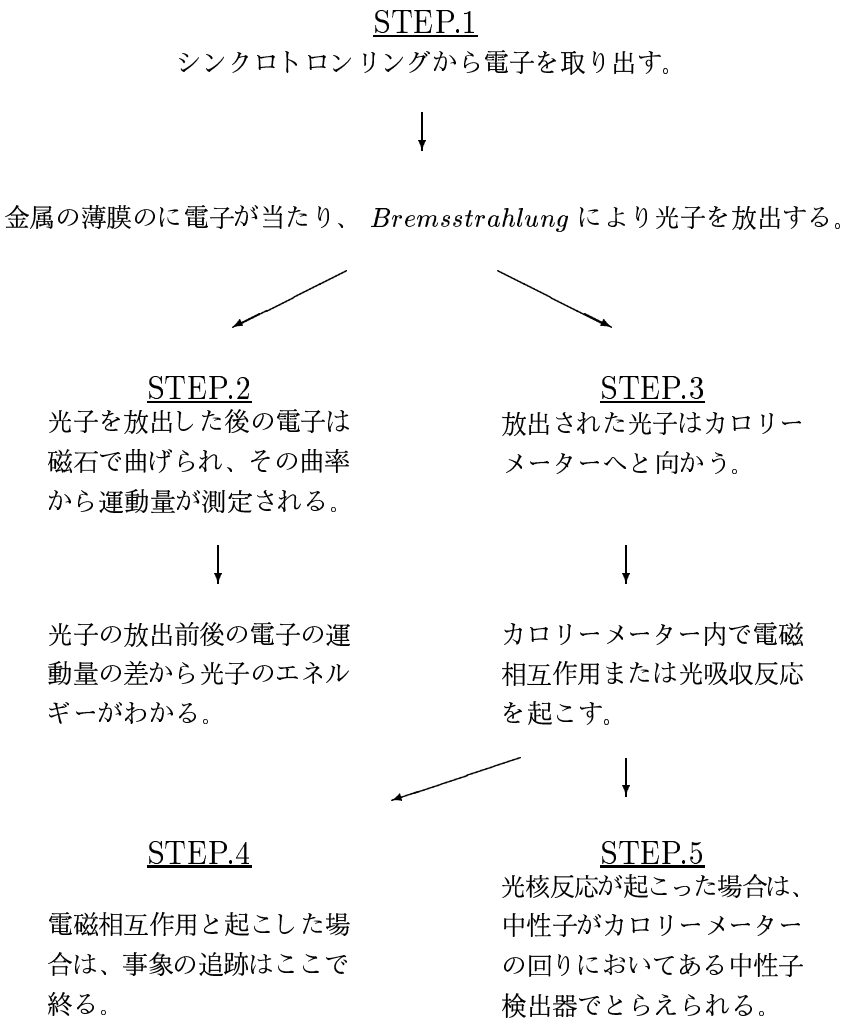


図 1: 実験の進行の摸式図

veto カウンター	役割
HU,HD	ラジエーターの前後に置かれているプラスティックシンチレーターで、ビームが通る穴が開いている。ラジエーターの前後での、電子ビームの広がりを除去する。
E+	アナライザーマグネットの中で、電子の入射方向から見てタギングカウンターと反対の方向に置かれている。磁場で電子とは逆に曲げられる陽電子をとらえることで、ラジエーターの中で発生した光子が電子対生成を起こした事象を除去する。プラスティックシンチレーターである。
MU,MD	アナライザーマグネットで曲げられた電子が磁場から抜ける地点に、電子の軌道の鉛直上下におかれている。電子がラジエーターの中で散乱されて鉛直方向に運動量を持つような事象を除去する。プラスティックシンチレーターである。
AU, AD	ラジエーターで発生した光子に対するカウンターである。詳しくは 2.2.3 で説明する。

表 2: ビーム *veto* カウンターの種類と役割

今回は、電子のエネルギーが 430 MeV 、 750 MeV 、 1.1 GeV の 3 種類のビームを用いた。取り出したスピルの時間幅は 430 MeV の時は 2 $msec$ 、 750 MeV と 1.1 GeV のときは 5 $msec$ とした。

ラジエーター　ここで、加速器から取り出した電子ビームを金属の薄膜に通して光子ビームをつくり出す。電子が金属の薄膜の中の原子核の近くを通ると、その電場から力を受け、その時の加速度の変化によって光子を発生する。これが *Bremsstrahlung* という現象で、放出される光子のエネルギー分布は、$1/E_\gamma$ に比例する。このときの、金属の薄膜のことをラジエーターと呼ぶ。

今回は、電子ビームのエネルギーが 430 MeV の時は厚さ 200 μm のアルミニウムを、 750 MeV と 1100 MeV の時には厚さ 350 μm のアルミニウムをラジエーターとして使用した。電子ビームのエネルギーが低い時に薄いラジエーターを使うのは、ラジエーターの中での multiple scattering を減らすためである。

これから先の光子のゆくえは 2.2.3 以降で説明する。光子を発生させた後の電子のゆくえは 2.2.2 で説明する。

ビーム *veto* カウンター　2 に示すように、電子ビームの上流側から HU、HD、$E+$、MU/D、AU、AD の *veto* カウンターがある。これらは、電子や光子の軌道やエネルギーが実験で望まれている軌道やエネルギーからずれており、実験で使用できないビームが来た時に、その事象を除去するための信号を出す検出器のことである。

それぞれの詳しい役割を表 2 に示す。

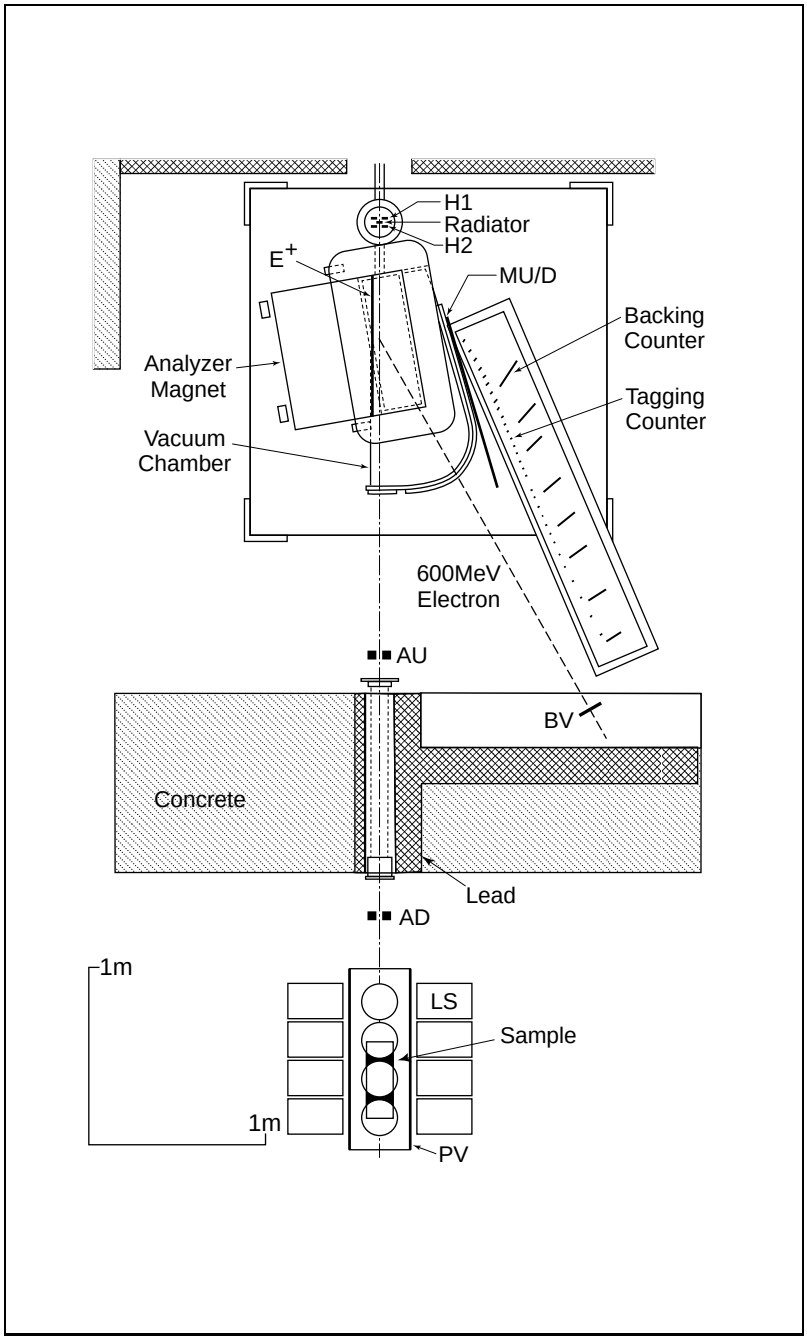


図 2: ES 171 の実験装置

2.2.2 STEP.2 光子放出後の電子のゆくえ

この STEP では、 STEP.1 で電子が光子を発生させたあとの電子のゆくえに注目する。

光子を放出する前の電子ビームのエネルギーと、光子のエネルギー、そして光子を放出した後の電子のエネルギーには次のような関係がある。

$$\text{光子のエネルギー} = \text{電子ビームのエネルギー} - \text{光子放出後の電子のエネルギー}$$

この関係から光子を放射後の電子のエネルギーを測定すれば、光子のエネルギーを決定することができる。

アナライザーマグネット　光子を放出した後の電子は、すぐにアナライザーマグネットと呼ばれる磁場の中に入る。ここにかかっている磁界を感じた電子は、図 2 の右側にあるタギングカウンターに向かう。その時の様子を図 3 にしめす。磁場の強さは 11.7 kG で常に一定に設定されており、ふらつきは 1 % 以内である。

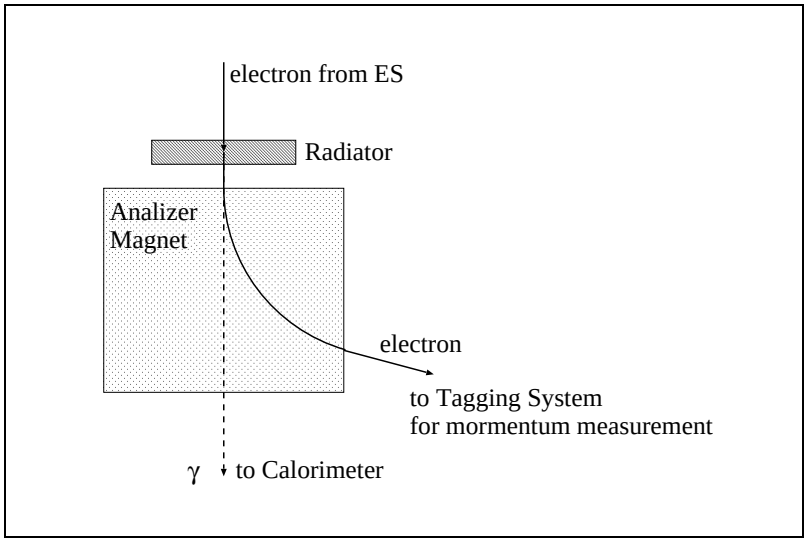


図 3: 電子から光子が発生する様子

タギングカウンター　タギングカウンターは電子の運動量を測る装置である。

ラジエーターに対して、アナライザーマグネットの磁場の焦点面上に３２本のタギングカウンターが並んでいる。電子が磁場によって曲げられる時の軌道は運動量によって決まっている。そこで、どのタギングカウンターに電子が当たったかを調べると、その電子の軌道がわかり、運動量が計算できる。

タギングカウンターが磁場の焦点面上にあるため、アナライザーマグネットに電子が入ってくる時に少々軌道がずれていても、運動量が同じであれば磁場で曲げられた後の軌道は同じタギングカウンター

に収束する。電子軌道のずれの原因としては、ビームを引き出した時にもともと持っている 1 $mrad$ 以内のビームの広がり、ラジエーターの中での電子の multiple scattering などがある。

タギングカウンターはプラスティックシンチレーターでできている。隣りあうカウンターのに入る電子の運動量の間隔は 9.38 MeV/c である。具体的には図 2 の一番上のカウンターに入る電子の運動量が 123.18 MeV/c で、二番目、三番目のカウンターに入る電子の運動量はこれより 9.38 MeV/c ずつ大きくなる。この値は私が較正して得た。これらの較正については付録 9 で説明する。

タギングカウンターの後ろには、タギングカウンターと同期した信号をとるためのバッキングカウンターがある。バッキングカウンターはプラスティックシンチレーターで、タギングカウンター 4 つにひとつ割り当てられている。

2.2.3 STEP.3 発生した光子のゆくえ、カロリーメーター

つぎに、ラジエーターで発生した光子のゆくえを説明する。

光子コリメーター 実験で求めている光子の軌道からずれた光子を除去するために、 AU 、 AD と呼ばれる光子コリメーターを置いた。これらは、いずれも pure CsI で作られており、中央に光子ビームが通る穴がある。この穴を外れた光子は CsI 中で電磁気相互作用を起こし、生じた電子はシンチレーター光を出す。この光を観測することにより、軌道からずれた光子を除去する。

ラジエーターから 2 m 下流に AU がある。大きさは厚さ 6 cm 、高さ 10 cm 、幅 12 cm で、直径 3 cm の穴があいている。 4 つの光電子増倍管を用いて信号を取り出す。

さらに、厚さ 1m の鉛の壁をはさんだ下流に、 AD がある。ラジエーターからの距離は 3.85 m である。大きさは厚さ 5 cm 、高さ 10 cm 、幅 20 cm で、中心に光子ビームが通るための、直径 2 cm の穴があいている。4 つの光電子増倍管を用いて信号を取り出す。

カロリーメーター AD から約 50 cm 下流に、不感率を測定したい光子検出器を置く。今回は 3 種類のカロリーメーターを作成し、実験に使用した。具体的なカロリーメーターの構造は 2.3 で詳しく説明する。

カロリーメーターに入った光子はそこで検出器と反応を起こす。大部分は電磁相互作用によって電磁シャワーを起こし、それより小さい割合だが光核反応も起こす。大きなエネルギーを落していた場合は STEP.4 へ、測定したエネルギーが小さかった場合は STEP.5 へと進む。

2.2.4 STEP.4 電磁相互作用を起こした事象の扱い

カロリーメーターの中で、入射光子のエネルギーに近い大量のエネルギーを落している事象は、電磁シャワーを起こしている事象である。電磁シャワーを起こしている事象は、不感事象とはならない。これらの事象の数は不感率を計算する時に利用する。このような事象に対して、事象の追跡はここで終る。

2.2.5 STEP.5 光核反応の事象の判別

カロリーメーターの中に落したエネルギーが小さい場合は、光核反応事象の候補となる。次はその反応で中性子が出たかどうかでカロリーメーターの中で光核反応が起きたかどうか見分ける。

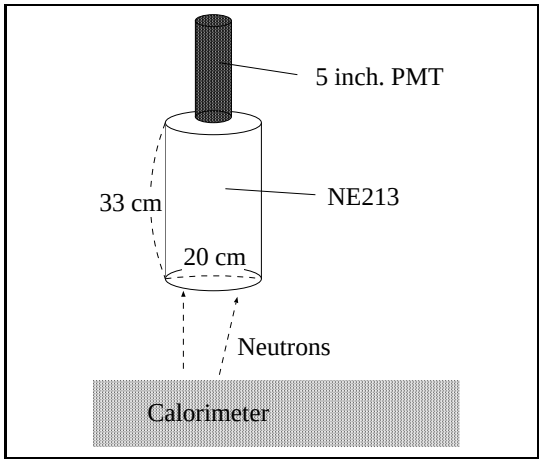


図 4: 中性子検出器

中性子検出器　今回用いた中性子検出器は、直径 20 cm 、長さ 33 cm のアルミニウム製の円筒の中に 10 l の液体シンチレーター NE 213 をつめ、直径 5 $inch$ の浜松フォトニクス社製の R1512 型光電子増倍管をつけたものである。図 4 に中性子検出器の形をしめす。この中性子検出器を 1 2 個、図 5 のようにカロリーメーターのまわりに置いた。カロリーメーターの中心軸からの距離は 20 cm である。

中性子検出器は中性子のほかに、光子も検出することができる。中性子と光子の判別方法については 4.3 で説明する。

2.3 今回作成したカロリーメーター

光核反応による不感率を測定する対象として、全部で 3 種類のカロリーメーターを用意した。そのうち 2 種類は鉛とプラスティックシンチレーターのサンプリングカロリーメーターである。残りの一種類は、サンプリングカロリーメーターのシンチレーターの部分で起こった光核反応の寄与の大きさを見積もるために用意したプラスティックシンチレーターの固まりである。

2.3.1 サンプリングカロリーメーターの構造

今回実験に用いたサンプリングカロリーメーターは電磁シャワーを起こすための光子の電磁気相互作用の反応断面積が極めて大きい鉛の板と、電磁シャワーのエネルギー損失を測定するためのシンチレーターを交互に並べた形になっている。

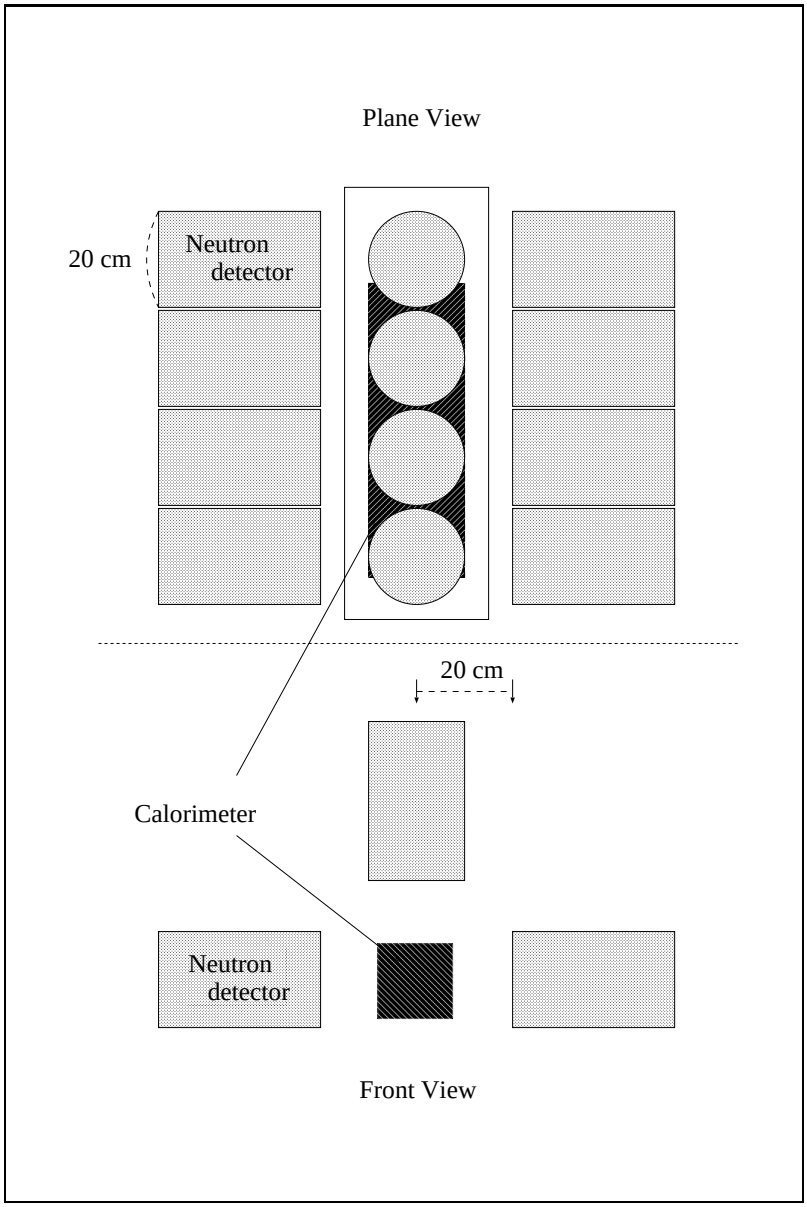


図 5: 中性子検出器の配置

エネルギー測定の過程は次のようなものである。入射した光子はまず鉛の中で電子対生成を起こし、電磁シャワーを起こす。その中に含まれる荷電粒子がシンチレーターの中で落したエネルギーを測定する。鉛の中で失ったエネルギーは測定されないが、吸収体の中とシンチレーターの中で損失するエネルギーの比が一定であると仮定すると、全エネルギー損失をシンチレーター中で損失したエネルギーから求めることができる。

サンプリングカロリーメーターの利点として、

1. 材料が鉛やプラスティックシンチレーターなど、扱いやすく大型のものを作ることができる、
2. 材料が安価で手に入りやすい、
3. 放射長が短い物質を使うので、小さい厚みで放射長を簡単にかせぐことができる、

ということがあげられる。今回サンプリングカロリーメーターを選んだ理由は、これらの利点が $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊分岐比測定実験に適しているからである

2.3.2 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター

$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターは厚さ 1 mm の鉛の板と厚さ 5 mm のシンチレーター板を交互に重ねた、サンプリングカロリーメーターである。この模式図を図 6 に示す。

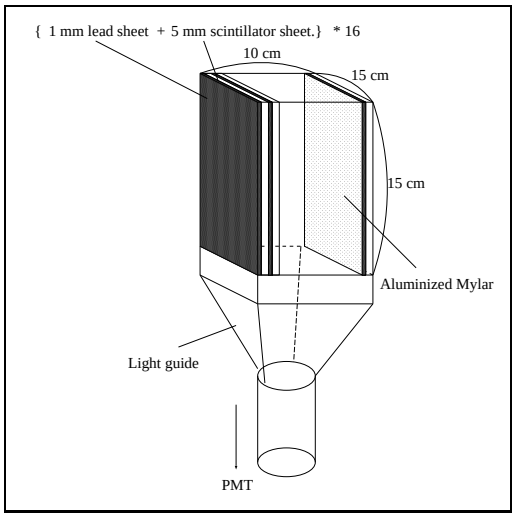


図 6: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター

鉛とシンチレーターの板は縦横の長さがそれぞれ 15cm の正方形であり、これらの板の組を１６組重ねて一つの検出器とした。厚さは板に垂直な方向に 3.4 放射長の長さがある。シンチレーター 板と鉛板の間にはシンチレーション光の反射率を良くするために厚さ $3\mu m$ のアルミ蒸着マイラーをはさんだ。ライトガイドと鉛とシンチレーターの組との接着は NE518 を用いた。ライトガイドには直径 6 cm の浜松フォトニクス社製の H1161 型光電子増倍管を接着した。カロリーメーターの中で荷電粒子によっ

て発せられたシンチレーション光は、図 6 の下についているライトガイドを通して、光電子増倍管へと伝わる。遮光のため、カロリーメーター全体にアルミ蒸着マイラーをまいたあと、厚さ 10 μ m の黒色の塩化ビニルを巻いた。

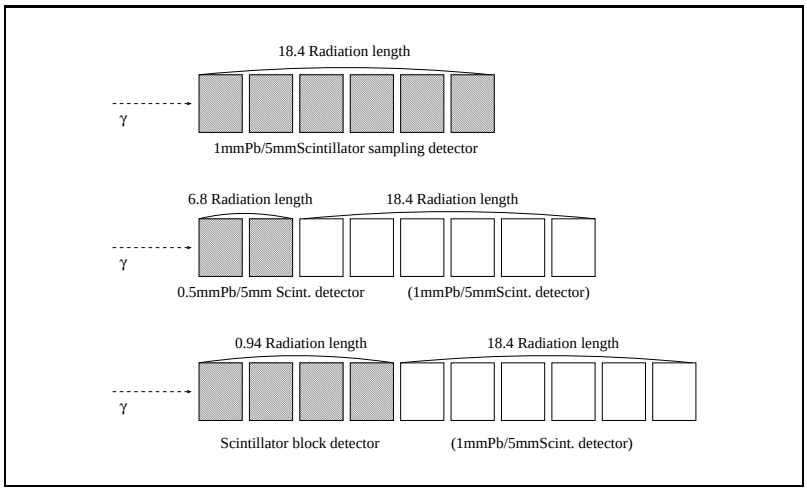


図 7: カロリーメーターの置き方。上から $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 40 $cm\ Scintillator$ カロリーメーターの実験。

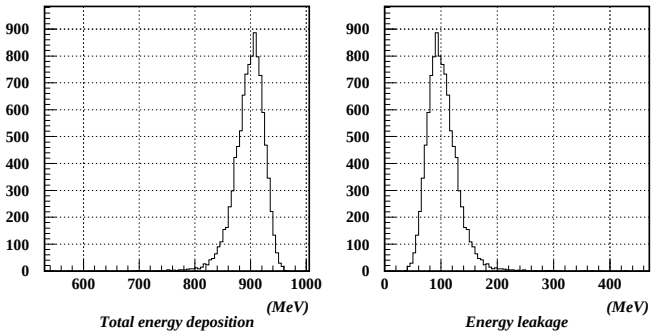


図 8: 1000 MeV の光子を入射した時の $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのエネルギーの全吸収エネルギー (右) と、カロリーメーターからのもれ (左) の EGS シミュレーションの結果。

実験では入射光子ビームに沿った方向に、6 個の検出器を図 7 の上のようにならべた。したがって全体の厚さは 18.4 放射長になる。光子がカロリーメーターと反応を起こす平均的な位置は上流から 9/7 放射長（ 4 cm ）の位置なので、そこが中性子検出器の中心に来るように配置した。

この検出器の長さで、光子が検出器内で何も反応を起こさずに通り過ぎる確率（ $Punch\ Though$ の確率）は、 $\sim 6\times 10^{-7}$ である。 $Punch\ Though$ 事象は中性子を出さないことを考えると、今回の不感

率の達成目標は 10^{-4}~10^{-6} であるので、 $Punch\ Though$ 事象の光核反応による不感率への影響は無視できる。

このカロリーメーター6個に対し、検出器内で電磁シャワーが起こった時の横からのエネルギーのもれは、 1000 MeV の光子が入射した時に 10% 程度である。このもれを EGS シミュレーションで見積もった結果が図 8 である。このもれの効果については、カロリーメーターの較正の時に補正した。

2.3.3 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター

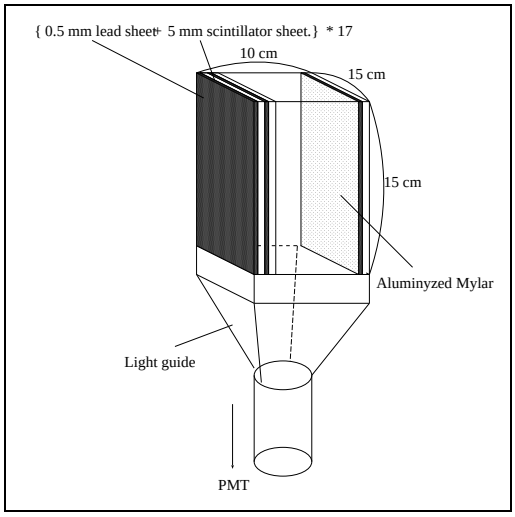


図 9: $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター

$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターは縦横の長さがそれぞれ 15 cm の、厚さ $0.5mm$ の鉛板と厚さ $5mm$ のシンチレーター を交互に１７組ならべたものである (図 9)。そのほかの構造は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターと同じである。検出器一つあたりの厚みは、$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 検出器の半分の 1.7 放射長である。 同じ構造の検出器を二つ作成した

$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで不感率を測定する時には、光子ビームの入射方向に沿って二つの $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターを置いた。しかし、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの厚みでは 7% 程度の $Punch\ Though$ 事象が残る。それを背景事象として除去するために、その後ろに $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターを 6 個並べた（図 7 中)。並べた位置は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの時と同じように $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの上流の面から 9/7 放射長（ 7.6 cm ）の位置を中性子検出器の中心に置いた。

後ろに置いている $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターは電磁シャワーを起こすのに十分な厚みを持っているので、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中でのエネルギー損失を測定することによって $Punch\ Though$ 事象を見分けることができる。

2.3.4 40 *cm Scintillator* カロリーメーター

この実験の目的は鉛/プラスティックシンチレーターサンプリングカロリーメーターの光核反応の不感率を調べることである。しかし、サンプリングカロリーメーターの結果から直接不感率を求めようとすると、鉛の中とシンチレーターの中で、光核反応が起こった時の中性子検出器の検出効率が異なるので、誤った結果を得る可能性がある。そこで、シンチレーター の中で起こった光核反応の効果の大きさを見積もるために、シンチレーター だけからなる検出器を作った。

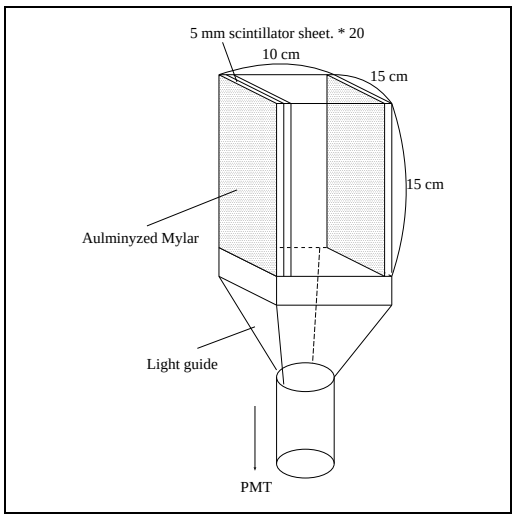


図 10: 40 *cm Scintillator* カロリーメーター

$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターは、一つの検出器につき縦横 15 cm 、厚さ 5 mm のシンチレーター 板を２０枚重ねたものである。鉛/シンチレーター サンプリングカロリーメーターと条件を同じにするために、シンチレーター 板の間にはアルミ蒸着マイラーをはさんだ（図 10）。カロリーメーターの回りには反射材と遮光材を巻いた。ライトガイドとの接着剤、光電子増倍管ともに、ほかのカロリーメーターと同じ種類のものを使用した。

検出器の厚みは一つあたり 0.24 放射長である。使用する時は光子ビームの入射方向に沿ってこの検出器を 4 個並べた。この厚みでは 47 % 程度の *Punch Though* 事象が残ってくる。したがって、この検出器を用いる時も $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の時と同じように、うしろに $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターを置くことで、この検出器で反応しなかった *Punch Though* 事象を除去することにした。（図 7 下）。

40 *cm Scintillator* カロリーメーターはほかのカロリーメーターと違って、4 個並べても長さが 0.96 放射長しかないので、上流から 9/7 放射長の位置を中性子検出器の中心に置くと、カロリーメーターが中性子検出器からはみ出てしまう。そこで、 40 *cm Scintillator* と $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の中間が中性子検出器の中心にくるように並べた。

2.3.5 光電子増倍管にかける高電圧の決定

今回実験で使う光子のエネルギーを、 ADC [c] の許容量からあふれることなく測定できるように、カロリーメーターの光電子増倍管にかける適当な高電圧を決めた。カロリーメーターの精密は較正は 4.2 節で説明する。

実験で使う光子のエネルギー領域は、 16 MeV から 980 MeV までである。使用する ADC は 12 bit なので、 1 GeV の光子のエネルギーを測定した時に ADC のカウント数の合計が約 3000 になるように、光電子増倍管の高電圧を合わせることにした。

カロリーメーターは 3 種類あるが、まず $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターについて、次の順番で高電圧を決めた。

1. まず一つの検出器に対し、宇宙線ミューオンを使って高電圧を決める。
   宇宙線ミューオンを MIP [d] と考えると、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのシンチレーター 1 6 枚に 16 MeV のエネルギーを落すので、その結果を用いて高電圧を合わせた。

2. 次に、実際の光子ビームを使ってその検出器のエネルギー分布を見る。

3. ほかの検出器に対して同じエネルギーの光子ビームを当て、 ADC 分布がどの検出器も同じ形になるように、高電圧を合わせる。

すべてのカロリーメーターの高電圧を宇宙線を使って合わせなかったのは、宇宙線ミューオンのフラックスが約 1 個／ 10 cm^2 [5] とたいへん小さいために、統計が得にくかったからである。

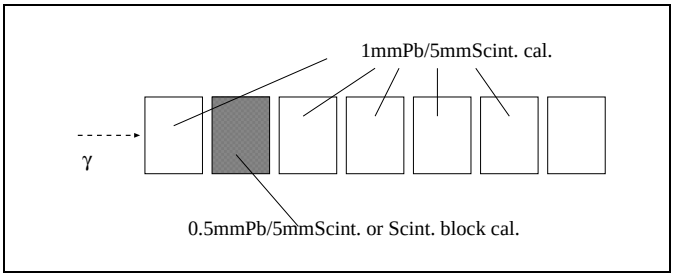


図 11: $0.5mmPb/5mmScint.$、$Scint.block$ の高電圧を決めるときの、検出器の並べ方

次に $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 40 $cm\ Scintillator$ の高電圧を決めた。今度は図 11 のように、$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターを 6 個並べ、電磁シャワーが最大になる二つめのカロリーメーターを、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ または 40 $cm\ Scintillator$ カロリーメーターに置き換えた。そこで、355 MeV の光子ビームを当てた。 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の高電圧は合わせられているので、この光子

[c] ADC とは $Analog\ to\ Digital\ Converter$ の略で、エネルギーを測定する CAMAC のモジュールである。
[d] Minimum Ionizing Particle

が入ってきた場合に、一連のカロリーメーターが測定する ADC 値の合計は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターだけの時と、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの間にほかのカロリーメーターをはさんでいる時とで同じ値になるように調節した。

結果を表 3 に示す。

$1mmPb/5mmScint.$		$0.5mmPb/5mmScint.$		$Scint.\ block$	
検出器	電圧 (V)	検出器	電圧 (V)	検出器	電圧 (V)
#1 (#6)	1730 (2050)	#7	1738	#9	1540
#4 (#1)	1600 (1730)	#8	1615	#10	1560
#5 (#4)	1500 (1600)			#11	1495
#6 (#5)	1730 (1500)			#12	1540
#3	1520				
#2	1805				

表 3: 光電子増倍管の高電圧の値。表の上からビーム上流側に置いた検出器の順にならんでいる。$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験のはじめに、カロリーメーターの一部順番を入れかえた。かっこ内は入れかえる以前の値をあらわす。

2.4 トリガー

実験で、データ収集に用いたトリガーは光核反応の事象を集めるもの、電磁相互作用の事象を集めるもの、ペデスタルを測定するための事象を集めるものの 3 種類を使った。

2.4.1 光核反応の事象を集めるためのトリガー（ $\overline{EG}$ トリガー）

光核反応を起こした事象は中性子や低エネルギーの光子を放出するために、電磁相互作用に比べて検出器の中に落すエネルギーは低い。光核反応を集めるためのこのトリガーがかかる条件は、まずタギングカウンターが鳴り、ビーム veto が鳴っておらず、カロリーメーターの出力の和が設定したしきい値を越えなかったということである。このトリガーを、以降 $\overline{EG}$ トリガーと呼ぶ。

設定したしきい値ははタギングカウンター 8 本ごとに一つ、4 種類用意した。しきい値は図 12 のように、電磁気相互作用をした場合のカロリーメーター測定エネルギーの山が途切れるあたりに設定した。

2.4.2 電磁気相互作用を起こした場合のトリガー（ $Tag\Sigma$ トリガー）

$\overline{EG}$ トリガー以外の事象は電磁気相互作用を起こした事象である。これらの事象は不感率を算出するとき、全入射光子の数を求める時に使う。電子がタギングカウンターに入り、ビーム veto カウンターが一つも鳴らず、 $\overline{EG}$ トリガーがかからなかった時にこのトリガーがかかる。以降、このトリガーを $Tag\Sigma$ トリガーと呼ぶ。

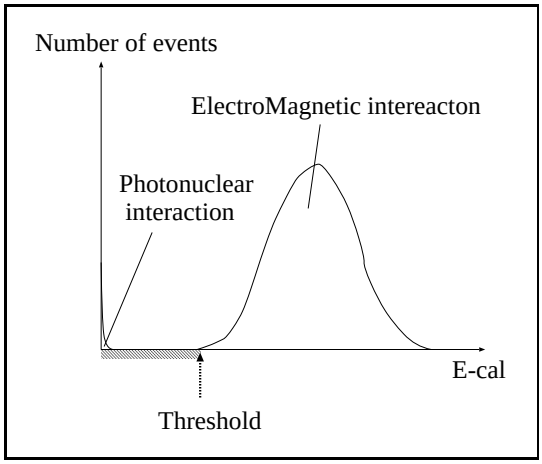


図 12: $\overline{EG}$ トリガーのエネルギーしきい値の位置。斜線の部分の事象を集めた。

電磁相互作用を起こす事象は光核反応を起こす事象に比べて圧倒的に多い。そこで、データの量を節約するために prescaler [e] を用いて $Tag\Sigma$ トリガーをプリスケールすることにした。今回は、電子ビームのエネルギーが 430 MeV のときは 1/33 に、 750 MeV と 1100 MeV のときは 1/65 にプリスケールした。

2.4.3 アクシデンタルトリガー

このトリガーは、主にペデスタルの値を測定することを目的としたトリガーである。

具体的には $Tag\Sigma$ トリガーのタイミングから $100\mu sec$ 遅らせたタイミングでこのトリガーをいれている。この遅らせた時間は電子ビームが数 μsec の頻度でくるのに比べて非常に長い。したがって、この遅れの長さから、光子ビームのタイミングとは相関がない時間にアクシデンタルトリガーはかかっている。また、一方でこのトリガーの頻度は光子ビームの強度と比例しているので、ビーム強度によるペデスタルの変化を知ることができる。

このトリガーは、 $Tag\Sigma$ トリガーと同じようにプリスケールされており、プリスケールファクターは電子ビームのエネルギーが 430 MeV の時 1/10 、それ以外の時は 1/100 とした。

2.5 データの収集

この章で説明してきた実験装置を使って、データを収集した。実験を行なった期間と得ることができた事象の数を表 4 に示す。

[e] prescaler とは、トリガーの数をある割合で間引くモジュールである。

日程	測定したカロリーメーター	電子ビームエネルギー (MeV)	事象数
98/5/27 - 98/5/28	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	750	2,457,000
98/5/29 - 98/5/29	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	1100	6,397,000
98/5/30 - 98/5/31	$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	1100	2,000,000
98/6/2 - 98/6/3	$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	430	4,170,000
98/6/3 - 98/6/4	$40\ cm\ Scintillator$	430	2,500,000
98/6/4 - 98/6/5	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	430	2,693,000
98/6/6 - 98/6/6	$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	750	4,000,000
98/6/6 - 98/6/7	$40\ cm\ Scintillator$	750	2,222,000
98/6/8 - 98/6/8	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	750	1,000,000

表 4: データ収集の日程とそこで得たデータの量

3　カロリーメーターの較正

それぞれのカロリーメーターについて、2.4 節で光電子増倍管の高電圧をあわせたときに、おおまかなゲインは合わせた。ここではさらに精密に較正係数の[f] 決定を行なった。まず、$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正を行ない、次に残りの $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの較正を行なった。

3.1　$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正

$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正について説明する。まず、6 個の検出器の間での相対的な較正係数を決め、そのあとタギングカウンターで測定した光子のエネルギーを使って、絶対的な較正係数を決めた。較正には電磁シャワーを起こした事象を使うので、$Tag\Sigma$ トリガーの事象を用いた。

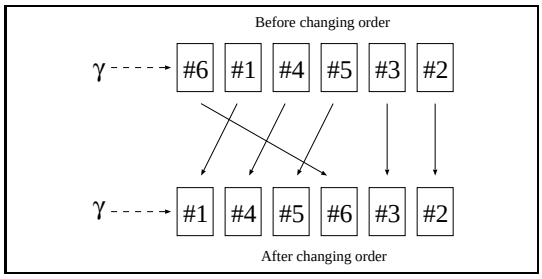


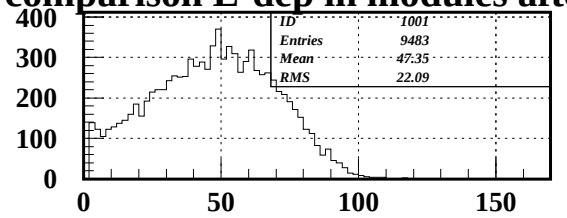
図 13:　$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの並びの入れかえ。

はじめに、6 個の検出器が同じゲインになるように、相対的な較正係数を決める。$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験では、電子ビームのエネルギーが 750 MeV 、 1100 MeV 、 430 MeV の順に実験を行なった。 750 MeV の実験の中で、 3,450,000 事象のうち、はじめの 1,450,000 事象をとり終ってから図 13 のように順番を入れ換えた。理由は #6 の検出器のゲインが低かったためである。このとき同時に #6 の検出器の高電圧も変えた。カロリーメーターの順番を入れ換えても、入射光子のエネルギーが同じであれば、カロリーメーターで測定されるエネルギーも同じはずである。そこで、順番の入れ換え前後で、各カロリーメーターの測定エネルギーの分布をくらべ、その平均値が同じになるように較正係数を決めた。図 14 が較正後の各検出器の測定エネルギーの分布である。順番を入れ換える前後で分布の平均値は一致している。

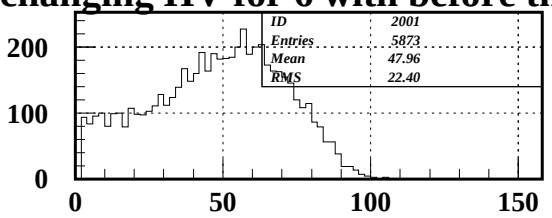
上流から 5 番目、6 番目の検出器に対しては、検出器の下流に位置するので、エネルギーを落した事象の数が少なく、この方法で較正ができなかった。これらの検出器の較正には宇宙線ミューオンを使った。シンチレーターの厚みは一つの検出器につき 8 cm なので、宇宙線ミューオンを $Minimum\ Ionizing\ Particle$ として考えると、検出器の中で 16 MeV のエネルギーを落すはずである。また $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター中で鉛の中とシンチレーターの中に落すエネルギーの比は 7 対 3 である。このことを使って、カロリーメーター全体に対する較正係数を決めた。

[f] 較正係数とは実験で得た ADC の値を、エネルギーに変えるときの比例係数のことである。

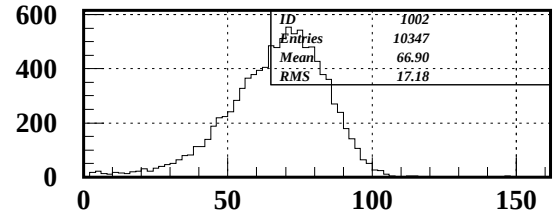
comparison E-dep in modules after changing HV for 6 with before them.



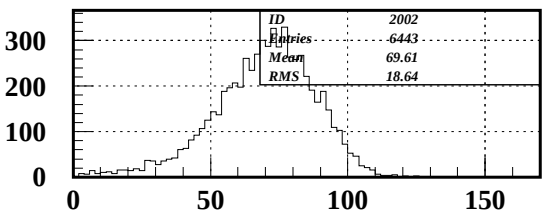
before changing HV for 6, 1st module



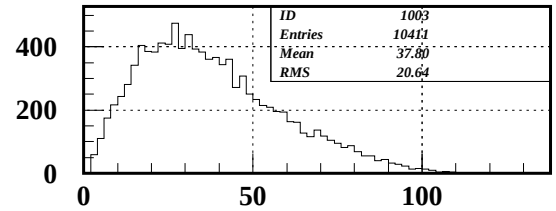
after changing HV for 6, 1st module



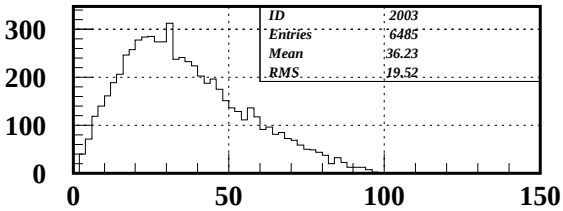
before changing HV for 6, 2nd module



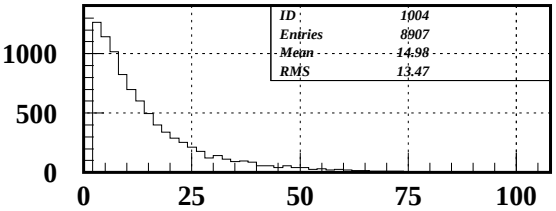
after changing HV for 6, 2nd module



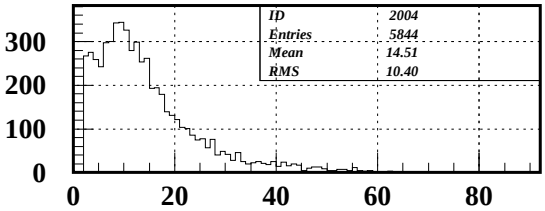
before changing HV for 6, 3rd module



after changing HV for 6, 3rd module

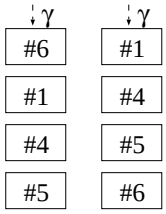


before changing HV for 6, 4th module



after changing HV for 6, 4th module

図 14: 相対的な較正の後の $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの並びを変える前 (左) と後 (右) のエネルギー分布。横軸は、 ADC の値に相対的な較正係数をかけたものである。右の図の順番で並んでいる。



つぎに、6 個の検出器の ADC の値の合計に相対的な較正係数をかけた値と、タギングカウンターで測定した光子エネルギーの比から較正係数を求めた。したがってこの較正係数は、光子のエネルギーのもれに対する補正も含んでいる。

較正の結果を図 17 に示す。較正係数の値は表 5 のとおりである。

1mm Pb/ 5mm Scint. カロリーメーター			
検出器の番号	較正係数		
（ビーム上流から）	430 MeV	750 MeV	1100 MeV
# 1 (# 6)	0.1069	0.1356 (0.1386)	0.1515
# 4 (# 1)	0.1099	0.1393 (0.1356)	0.1557
# 5 (# 4)	0.0982	0.1244 (0.1393)	0.1391
# 6 (# 5)	0.0551	0.0698 (0.1244)	0.0780
# 3	0.0996	0.1263	0.1411
# 2	0.1172	0.1486	0.1660

表 5: 1*mm Pb/ 5mm Scint.* カロリーメーターの較正係数の値。かっこ内は、検出器の順番を入れかえる前の値。

3.2 0.5*mm Pb/ 5mm Scint.* 、 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの較正

0.5*mm Pb/ 5mm Scint.* 、 40 *cm Scintillator* カロリーメーターは実験中にカロリーメーターの順番を入れかえていないので、 1*mm Pb/ 5mm Scint.* カロリーメーターと同じ方法で較正することはできない。このふたつのカロリーメーターの較正には EGS シミュレーション[g] の結果と実験データを比較することにした。較正には $Tag\Sigma$ トリガーの事象を用いた。較正を行なった後の各検出器の測定エネルギーの分布と EGS シミュレーションの結果を、図 15、図 16 に示す。

そのあと、タギングカウンターで測定された光子のエネルギーと、カロリーメーターで測定した値が一致するように、 0.5*mm Pb/ 5mm Scint.* または 40 *cm Scintillator* カロリーメーターと、1*mm Pb/ 5mm Scint.* カロリーメーターの合計の測定エネルギーに補正の係数をかけた。

較正を終えたあとの、測定エネルギーの分布と EGS シミュレーションの結果との比較を図 18、図 19 に示す。較正係数の値は表 6、7 にある。図 17 から図 19 で 3 種類の電子エネルギーのデータの間で不連続になっている。原因は、入射光子エネルギーが高くなるにつれて飽和していく光電子増倍管を線形で較正したからだと考えられる。ほかの原因として、 ADC や、光電子増倍管からの信号が ADC に達する前に通る増幅器をあげることができるが、 KTeVCsI カロリーメーターの較正 (付録 B) では非線形性は見えていないので、 ADC や増幅器の線形性は保たれている。

[g] Electron Gamma Shower

0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーター			
検出器の番号	較正係数		
（ビーム上流から）	430 MeV	750 MeV	1100 MeV
# 1 (0.5mmlead)	0.0951	0.0922	0.0933
# 2 (0.5mmlead)	0.1462	0.1418	0.1435
# 1 (1mmlead)	0.1078	0.1326	0.1499
# 4 (1mmlead)	0.1108	0.1362	0.1540
# 5 (1mmlead)	0.0990	0.1217	0.1376
# 6 (1mmlead)	0.0555	0.0683	0.0772
# 3 (1mmlead)	0.1004	0.1235	0.1396
# 2 (1mmlead)	0.1181	0.1453	0.1642

表 6: 0.5mm Pb/ 5mm $Scint.$ カロリーメーターの較正係数の値

40 cm $Scintillator$ カロリーメーター		
検出器の番号	較正係数	
（ビーム上流から）	430 MeV	750 MeV
# 1 (Scint.block)	0.1410	0.0701
# 2 (Scint.block)	0.1479	0.0789
# 3 (Scint.block)	0.1290	0.0682
# 4 (Scint.block)	0.1380	0.1380
# 1 (1mmlead)	0.1053	0.1336
# 4 (1mmlead)	0.1083	0.1373
# 5 (1mmlead)	0.0967	0.1227
# 6 (1mmlead)	0.0572	0.0746
# 3 (1mmlead)	0.0982	0.1245
# 2 (1mmlead)	0.1154	0.1465

表 7: 40 cm $Scintillator$ カロリーメーターの較正係数の値

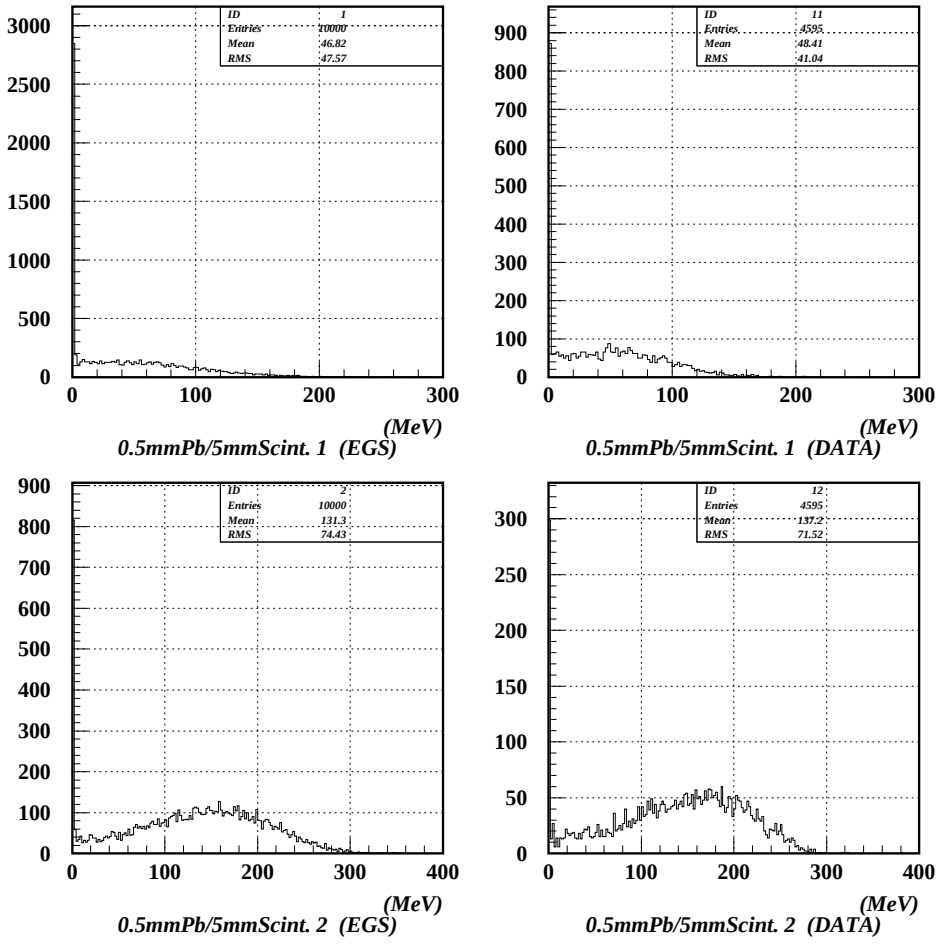


図 15: 600 MeV の入射光子に対する $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの、測定エネルギーと EGS シミュレーションの結果との比較。右が実際のデータで、左がシミュレーションの結果。

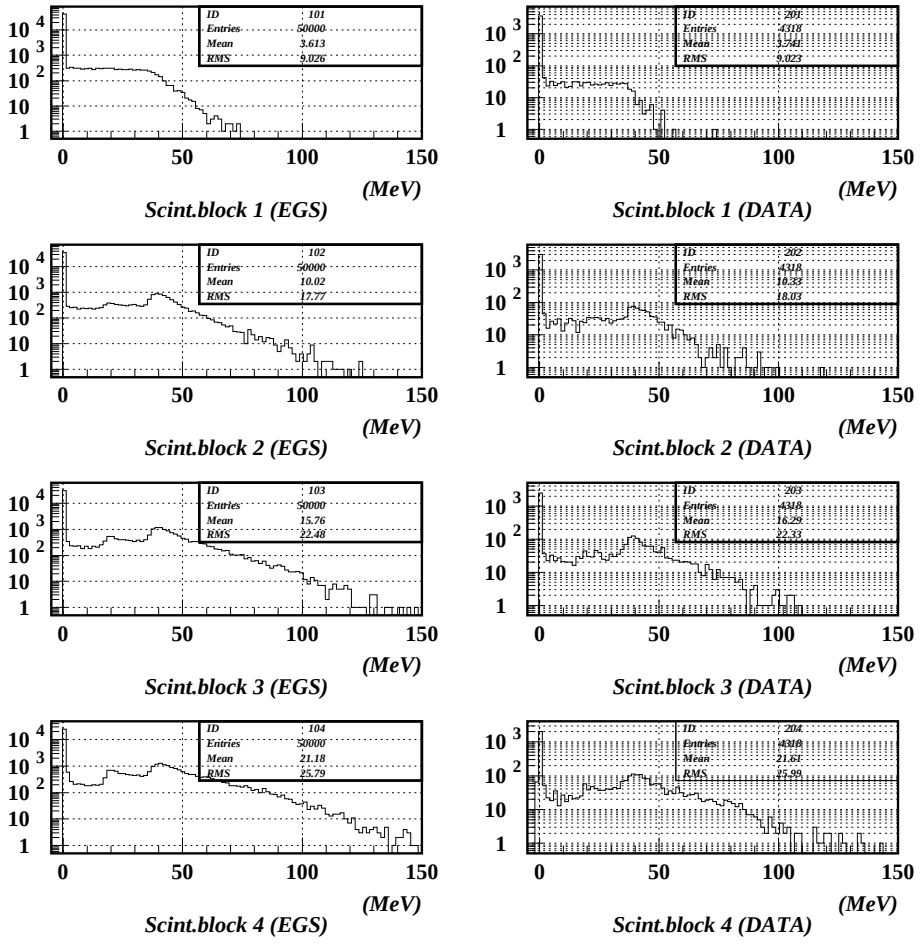


図 16: 600 MeV の入射光子に対する 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの、測定エネルギーと EGS シミュレーションの結果との比較。右が実際のデータで、左がシミュレーションの結果。

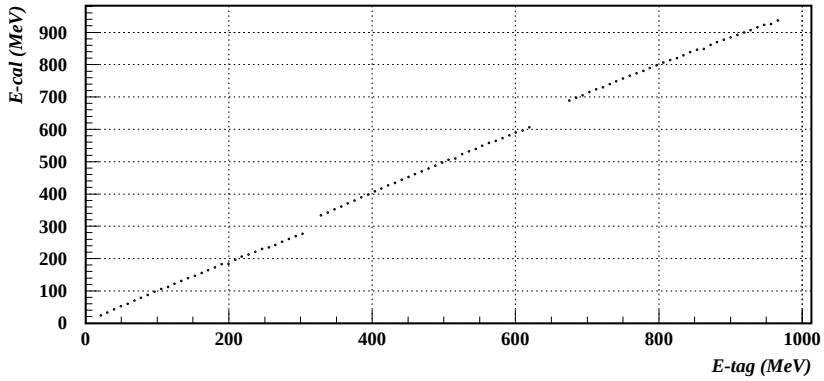


図 17: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正の結果。横軸はタギングカウンターで測定した光子のエネルギー、縦軸はカロリーメーターで測定した光子のエネルギーである。

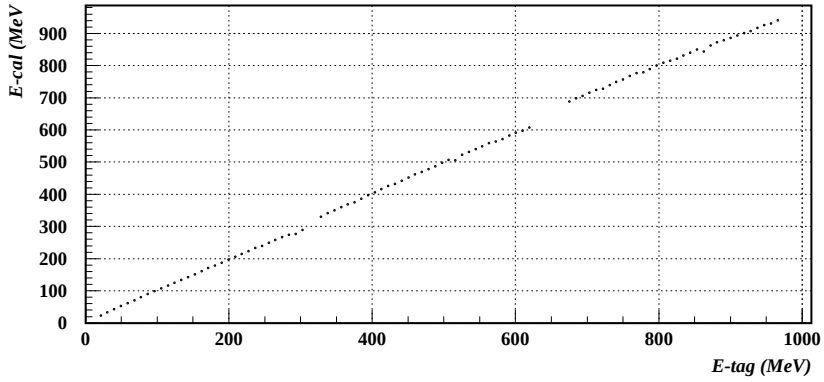


図 18: $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの較正の結果。横軸はタギングカウンターで測定した光子のエネルギー、縦軸はカロリーメーターで測定した光子のエネルギーである。

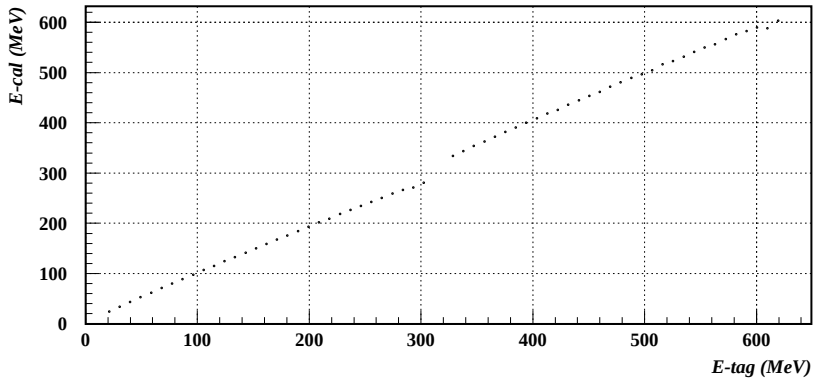


図 19: $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの較正の結果。横軸はタギングカウンターで測定した光子のエネルギー、縦軸はカロリーメーターで測定した光子のエネルギーである。

4 解析

この章では、まずはじめに解析の原理について述べ、 veto カウンターのしきい値の決め方について説明する。そのあと、不感率の算出について述べ、最後に背景事象について考察する。

4.1 解析方法

光核反応による不感率は、不感事象の数を N_{ineff} 、全入射光子の数を N_{all} 、中性子検出器の検出効率を η とすると

$$\text{不感率} = \frac{N_{ineff}}{N_{all}}\frac{1}{\eta} \tag{1}$$

であらわされる。つまり、 N_{ineff} 、 N_{all} 、 η の三つを知ることができれば、不感率を計算できる。

入射光子の数は $Tag\Sigma$ トリガーと $\overline{EG}$ トリガーの事象数から求める。不感事象の数 N_{ineff} は、光核反応であるという条件を満たした事象に対し、カロリーメーターのしきい値以下の事象数を数える。

中性子検出器の検出効率 η は観測した中性子数の分布を用いて計算することができる。中性子数の分布をポアソン分布でフィットし、その平均値 μ から中性子が少なくとも m 個以上計測される確率を求める。

$$\eta = 1 - \sum_{n=0}^{m-1} P(\mu, n) \tag{2}$$

これが中性子検出器の検出効率となる。 $P(\mu, n)$ は平均が μ の Poisson 分布で計測数が n となる確率である。不感事象の数を検出効率でを割ることで、中性子検出器の約 40 % というジオメトリーのアクセプタンスや、中性子検出器自体の不感率を補正することができる。

4.2 ビーム *veto* カウンターのしきい値の決定

ここでは、オフラインの解析で用いるビーム *veto* カウンターのしきい値の決め方について説明する。今回、ビーム *veto* カウンターの研究を、共同実験者である佐賀大学の宮原が行なった。そこで、私は彼がもとめた最適なしきい値を使うことにした。ここで最適なしきい値とは、次の二つの条件の兼ね合いから求めたものである。

1. タギングカウンターに電子が入ったのに、カロリーメーターには光子が来なかった事象ができるだけ少ない。
2. 解析に使える事象をできるだけ除去しない。

1. については、例えば、ラジエーターの中で発生した光子が電子対生成を起こした場合を考えてみる。光子はカロリーメーターに入らず、電子対生成でできた陽電子が E+ カウンターを鳴らす。このような事象に対し、ここでカロリーメーターのエネルギーの測定値が 1 MeV 以下である事象は背景事象として除去されなければならない。

いま、ビーム *veto* カウンター E+ を例にとって、しきい値の決め方を説明する。図 20 に E+ カウンターの ADC 分布を示す。図 21 に、許し得る E+ カウンターの ADC の上限値を 1 ADC count か

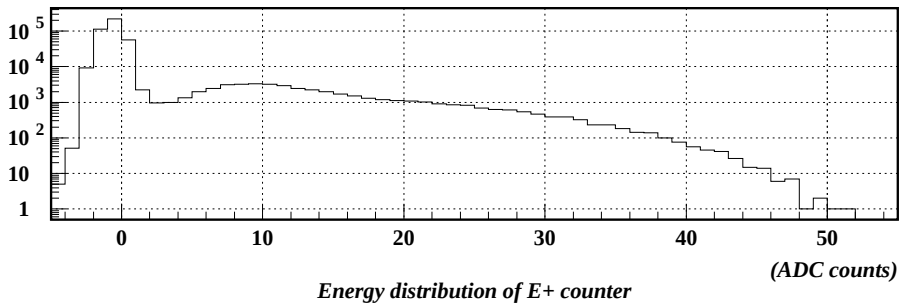


図 20: E+ カウンターのエネルギー分布

ら 40 ADC counts まで変えた時の Mistag 事象の割合と、 E+ に対するカットを通過した事象の数を数えた。 Mistag 事象とは、タギングカウンターがなったのに、カロリーメーターには光子が入ってこなかったような事象のことである。ここでは、カロリーメーターの測定エネルギーが 1 MeV 以下の事象を Mistag 事象とした。ここで示しているのは $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで、電子ビームのエネルギーが 750 MeV での実験でのデータである。1.、2. の条件の兼ね合いを考えると、ここではしきい値が 5 ADC counts あたりから Mistag 事象の割合が急に上がっているので、 E+ カウンターの最適なしきい値は 5 ADC counts とした。

同じことをほかのビーム *veto* カウンターに対しても行ない、また 3 種類の電子ビームエネルギーに対してそれぞれ最適なしきい値を決めた。

ビーム veto のカットを加えると、どのくらい解析に使える事象が除去されるかを見積った結果を表 8、表 9、表 10 に示す。誤差は 0.1 % 以下である。アクシデンタルトリガーが残る割合から、私が用いたビーム veto カウンターのしきい値で、解析に使える事象は無駄に除去されていないということがわかる。 E+ カウンターが電子ビームのエネルギーが高いほど $\overline{EG}$ トリガーの事象に対してよく効いているのは、高いエネルギーの光子ほど、ラジエーターの中で電子対生成を起こしやすいからである。

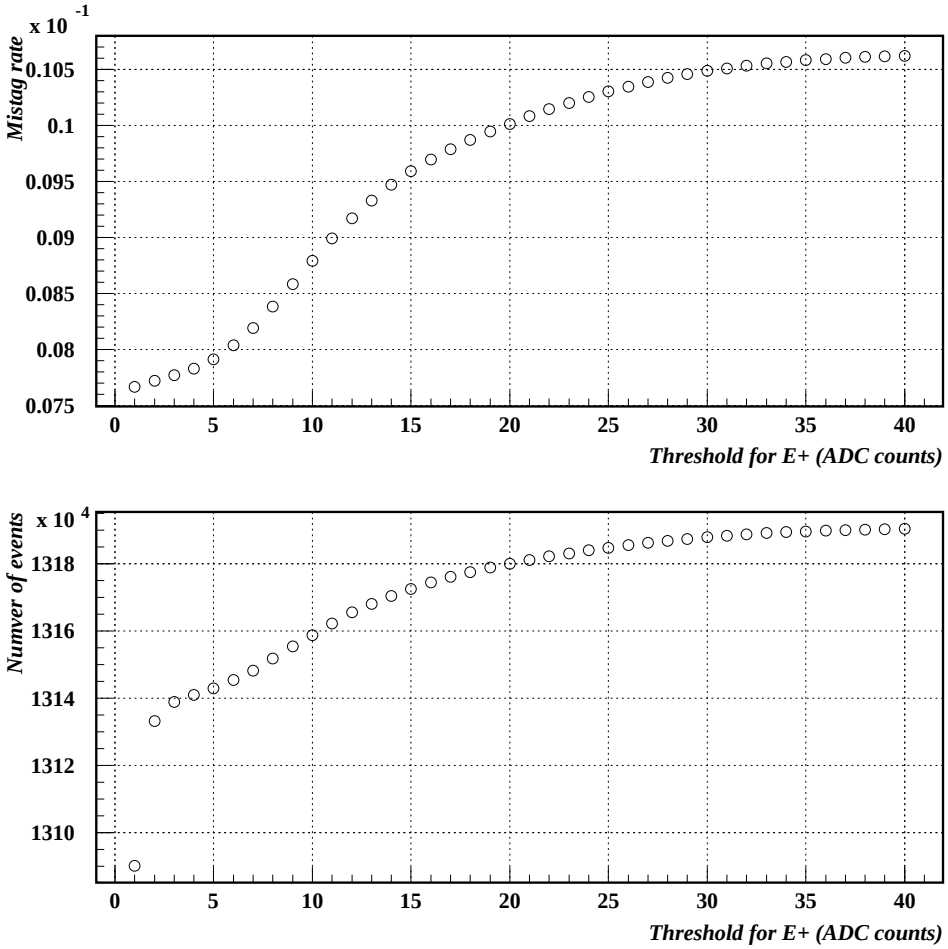


図 21: Mistag 事象の割合とビーム *veto*（ E+ ）を通過した事象の数

430 MeV Run			
veto カウンターの種類	veto のカットにより信号が残る割合		
	$Tag\Sigma$	$\overline{EG}$	Accidental
HU	0.995	0.996	0.995
HD	0.990	0.988	0.990
E+	1.000	0.947	1.000
MU	0.981	0.952	0.984
MD	0.995	0.972	0.996
AU1	0.985	0.926	0.998
AU2	0.995	0.943	0.999
AU3	0.982	0.894	0.997
AU4	0.992	0.924	0.998
AD1	0.996	0.994	0.996
AD2	0.993	0.989	0.995
AD3	0.995	0.989	0.996
AD4	0.992	0.983	0.995

表 8: 電子ビームのエネルギーが 430 MeV の時の、ビーム veto のカットにより、信号が残る割合。それぞれの veto カウンターだけをカットに用いた時の結果である。誤差は 0.1 % 以下である。

750 MeV Run			
veto カウンターの種類	veto のカットにより信号が残る割合		
	$Tag\Sigma$	$\overline{EG}$	Accidental
HU	0.988	0.988	0.988
HD	0.976	0.974	0.976
E+	1.000	0.821	1.000
MU	0.988	0.975	0.999
MD	0.998	0.980	1.000
AU1	0.997	0.987	0.998
AU2	0.998	0.995	0.999
AU3	0.996	0.983	0.998
AU4	0.995	0.988	0.996
AD1	0.994	0.993	0.994
AD2	0.986	0.985	0.990
AD3	0.989	0.987	0.990
AD4	0.987	0.985	0.989

表 9: 電子ビームのエネルギーが 750 MeV の時の、ビーム veto のカットにより、信号が残る割合。それぞれの veto カウンターだけをカットに用いた時の結果である。誤差は 0.1 % 以下である。

1100 MeV Run			
veto カウンターの種類	veto のカットにより信号が残る割合		
	$Tag\Sigma$	$\overline{EG}$	Accidental
HU	0.995	0.993	0.993
HD	0.985	0.980	0.981
E+	1.000	0.608	1.000
MU	0.988	0.981	0.999
MD	0.997	0.985	0.999
AU1	0.997	0.988	0.997
AU2	0.996	0.994	0.996
AU3	0.997	0.988	0.998
AU4	0.991	0.987	0.992
AD1	0.997	0.997	0.995
AD2	0.990	0.993	0.992
AD3	0.994	0.994	0.993
AD4	0.991	0.993	0.992

表 10: 電子ビームのエネルギーが 1100 MeV の時の、ビーム veto のカットにより、信号が残る割合。それぞれの veto カウンターだけをカットに用いた時の結果である。誤差は 0.1 % 以下である。

4.3 中性子の選別

この章では、中性子検出器の時間情報と、光子と中性子の信号の形の違いを用いて、中性子の選別の仕方を説明する。

4.3.1 時間情報による中性子の選別条件

光子と中性子を判別するのに、時間情報は強力な手段である。中性子と光子が同じ運動エネルギーを持つ時、光速で走る光子に比べ、 939 MeV の質量を持つ中性子の速さはかなり遅いからである。たとえば、 10 MeV の運動エネルギーを持つ中性子の速さは、真空中での光速の 14 % しかない。この差により、カロリーメーターから 20 cm 離れた中性子検出器に到達するまでに、光子と中性子とで数 $nsec$ の時間差が生じる。この時間差を利用して、光子が計測された事象を背景事象としてとり除く。

図 22 は中性子検出器の TDC [h] の分布である。光子の信号が 0 nsec に来るように、調節している。8 $nsec$ 付近に中性子の山が見える。 TDC 条件の下限は光子の山と中性子の山が交わっているあたりの、 4 nsec とした。上限は、図 22 を Double Gaussian でフィットしたとき、中心値から 3σ 離れている点として 30 nsec とした。

したがって、

$$\underline{4\ \text{nsec} \quad \leq \quad \text{TDC(Neutron Detector)} \quad \leq \quad 25\ \text{nsec}}$$

の条件を満たす事象を、中性子とした。

4.3.2 エネルギー情報による中性子の選別条件

エネルギー情報による光子と中性子の判別には、中性子検出器からの信号の形の違いを利用する。

シンチレーターを用いる実験では、粒子が荷電粒子の通過により分子を励起しその分子が元の状態に戻る時に出す光をシンチレーション光として測定している。このシンチレーション光には、励起された分子が早く基底状態にもどる fast component とよばれる成分と、遅く基底状態に戻る slow component とよばれる成分とがある。そして、 slow component の割合は荷電粒子の dE/dx が大きいほど多くなる [4]。

図 23 に光子と中性子の信号の違いを示す。光子と中性子では、中性子の方が slow component が多くなり、出てくる信号は時間が長い方に尾を引くような形になる。そこで、今回、中性子検出器の ADC のゲートの幅を 80 nsec (narrow) と 240 nsec (wide) の、２種類を用意した。実際の信号はゲートが始まってから 40 nsec 遅らせて入れた。これは、 ADC(narrow) のゲートを作るのに用いたゲートジェネレーターが短いゲートを作る時の、ゲートの長さが不安定であったからである。

判別の過程を図 24 にしめす。光子と中性子の信号の形の違いから、２種類の ADC のカウント数の値に違いが出てくる。したがって、中性子と光子を判別するには ADC(narrow) と ADC(wide) の値の

[h] TDC とは Time to Digital Converter の略で、時間情報を見るためのモジュールである。

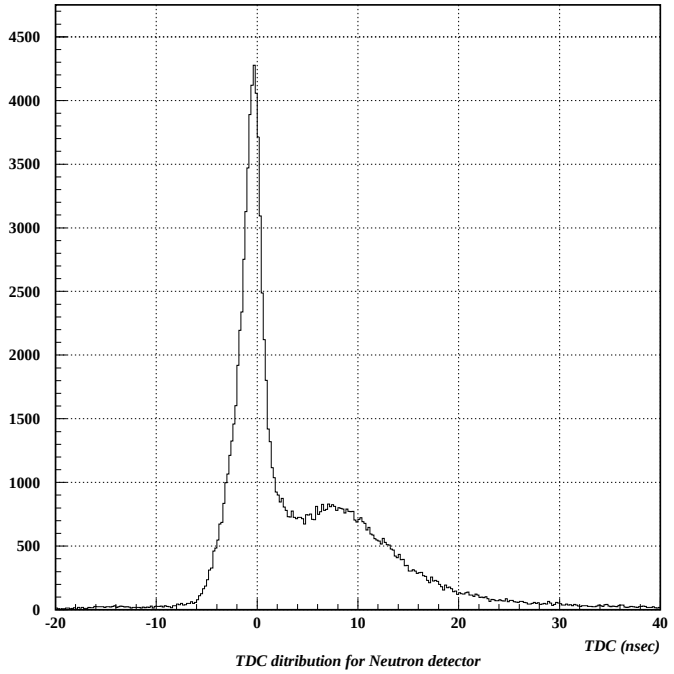


図 22: 中性子検出器の TDC 分布

比を調べればよい。図 25 は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで電子エネルギーが 750 MeV での実験での、中性子検出器の ADC(narrow) と ADC(wide) をプロットしたものである。図 25 で 2 本見える直線のうち、上の直線が光子によるもの、下の直線が中性子によるものである。このプロットからよりよく光子と中性子を分別するために、今回は共同実験者である大阪大学の森が考案した AUN [6] という値を使った。

まず、 ADC(narrow) に入る信号の大きさと ADC(wide) に入る信号の大きさをそれぞれ三角形で近似し、ディスクリミネーターのタイムウォークの[i] 影響も考慮した上で、 ADC(narrow) と ADC(wide) の関係を

$$ADC(narrow) = a + bADC(wide) + c\sqrt{ADC(wide)} - dADC(wide)^2 + eADC(wide)^{\frac{3}{2}} \qquad (3)$$

という曲線の関数でフィットする。 a 、 b 、 c 、 d 、 e はフィットの時のパラメーターである。このフィットを中性子と光子に対してそれぞれ行ない、ある点から中性子の曲線までの距離と光子の曲線まで距離の差を数値化したものが AUN という値である。 AUN が 1 に近いときは中性子、 0 に近いときは光子となるように規格化されている。

[i] タイムウォークとは、ディスクリミネーターに入る信号の大きさによって、ディスクリミネーターから出る信号のタイミングがずれる現象である。

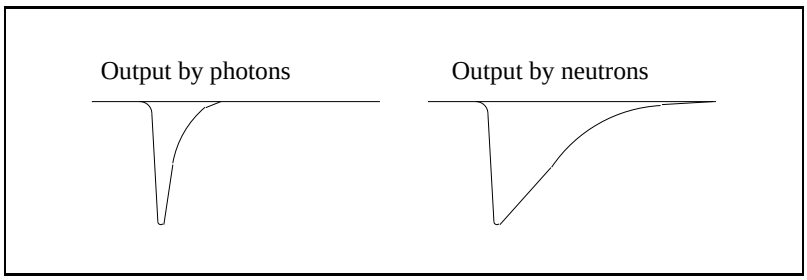


図 23: 中性子と光子の信号の形の違い

図 26 に $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験で、電子ビームのエネルギーが 750 MeV の時の $\overline{EG}$ トリガーの事象の AUN の分布を示す。 0. 付近に光子の事象が分布し、 1. 付近に中性子の事象の分布が見える。中性子を要求する条件として AUN の下限を、二つの山が交わる 0.45 、上限を Double Gaussian でフィットした時に、中性子の山の中心値から約 3 σ 離れた点である 2.5 に決めた。

エネルギー情報による条件として

$$\underline{0.45 \ \leq \ \text{AUN} \ \leq \ 2.5}$$

を満たす事象を中性子がでた事象とした。

図 27 は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験で、電子ビームのエネルギーが 750 MeV の実験での時間情報とエネルギー情報（ AUN ）の条件である。箱の中に含まれる事象を中性子として計測した。

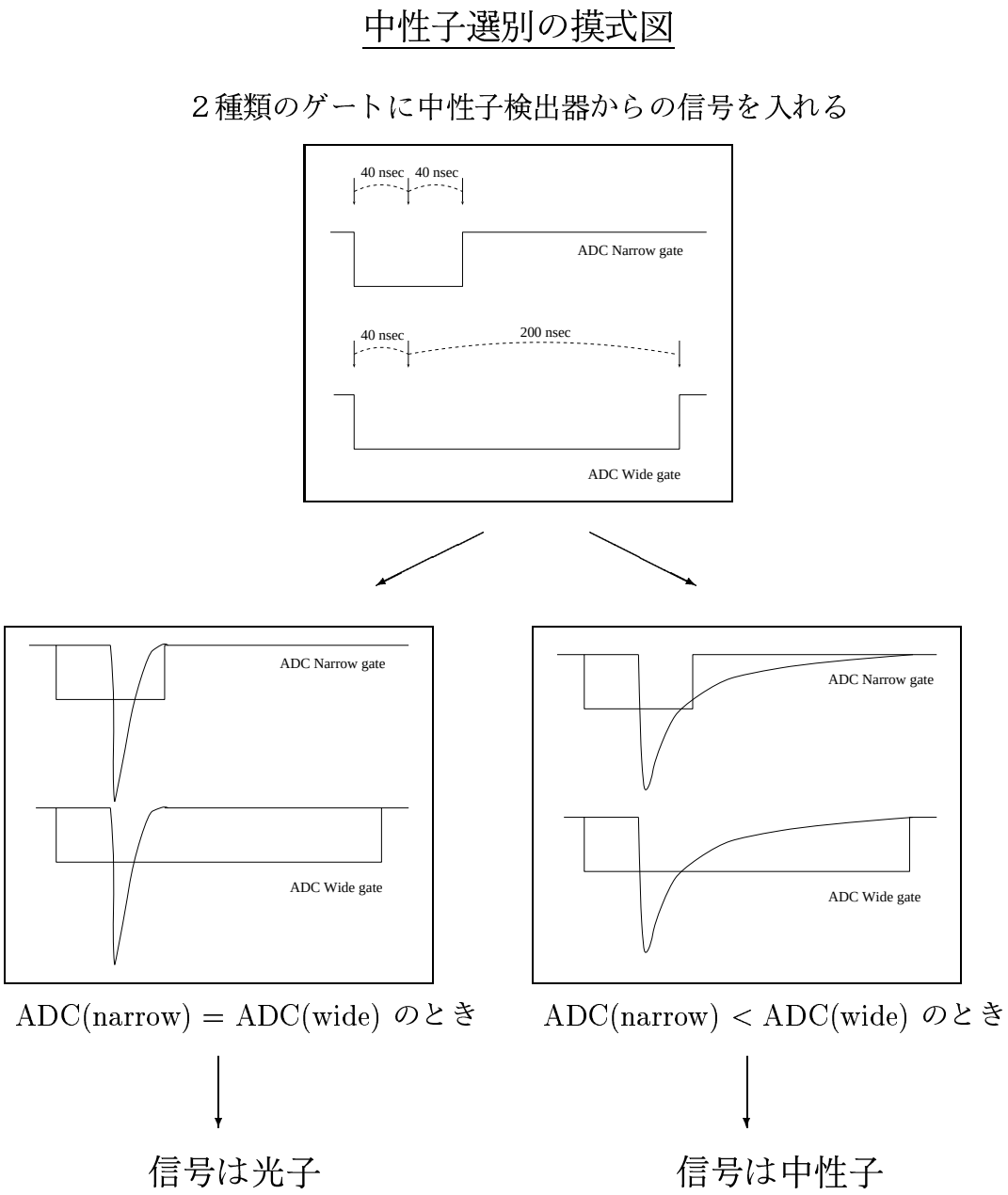


図 24: 中性子と光子を判別する原理

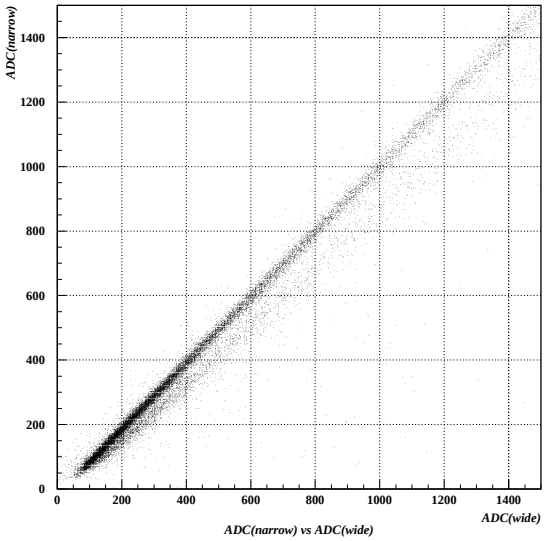


図 25: $\overline{EG}$ トリガーの事象に対する、中性子検出器の ADC(narrow) と ADC(wide) の分布

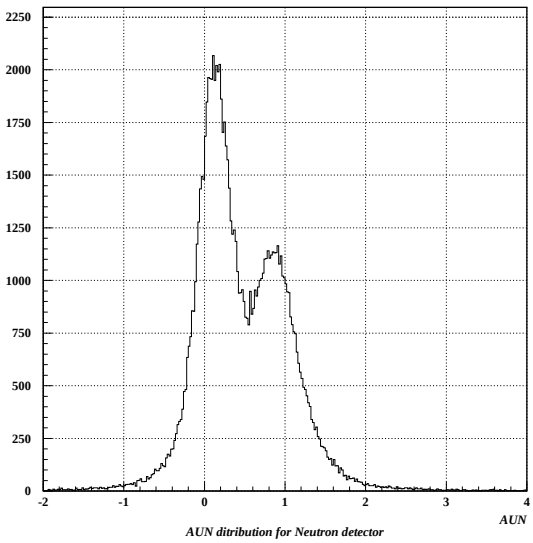


図 26: $\overline{EG}$ トリガーの事象に対する、 AUN の分布

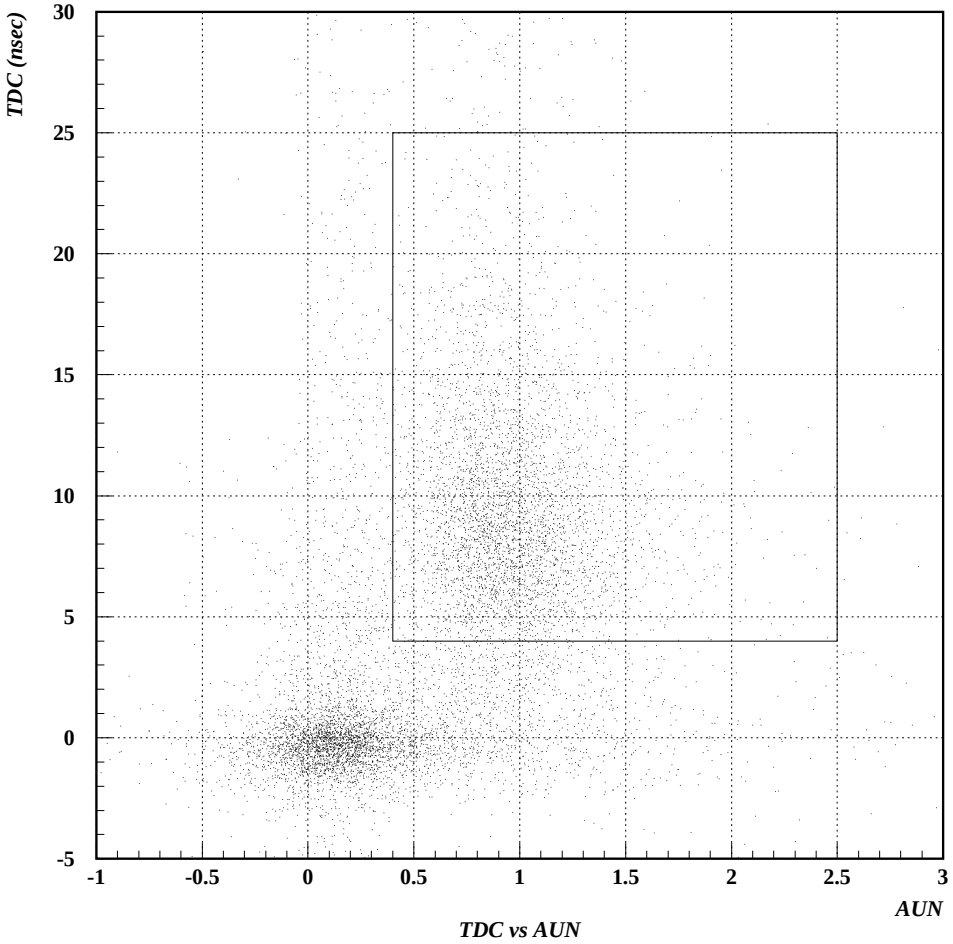


図 27: 中性子検出器の AUN と TDC の分布。箱の中に含まれる事象を中性子が出た事象とした。

4.4 不感率の算出

不感率を算出するには、全事象の数、不感事象の数、中性子検出器の検出効率の三つがわかっていればよい。この節では、まず、入射光子数の数え方を説明し、次に光核反応を起こした事象の選び方を説明する。そのあと、その選び方を用いて不感事象の数、中性子の検出効率の見積もり方を説明する。

4.4.1 入射光子の数の数え方

実験で得ることができる、 $Tag\Sigma$ トリガーの事象数と $\overline{EG}$ トリガーの事象数を用いて、全入射光子の数を計算する。ちらのトリガーの事象に対しても、4.2 節の veto カウンターの条件を満たした事象を数えている。 $Tag\Sigma$ トリガーは、事象数にプリスケール係数をかけたものを用い、 $\overline{EG}$ トリガーに対してはプリスケールされていないので、そのまま数を数える。この二つの数の合計が、全入射光子の数となる。

今回の実験での全入射光子の数を表 11 に示す。

4.4.2 光核反応を起こした事象の判別

光核反応を起こしたことを見分ける要素は、2.1 章でも説明したように二つある。一つは光子がカロリーメーターに落すエネルギーが小さいこと、もう一つはカロリーメーターから出てきた中性子が観測されることである。

まず、カロリーメーターに落すエネルギーが小さいという条件を満たすために、 $\overline{EG}$ トリガーの事象を使った。 $\overline{EG}$ トリガーだけでは、電磁相互作用を起こしたが、カロリーメーターに落したエネルギーが小さい事象が $\overline{EG}$ トリガーのしきい値を越えずに混ざってくる可能性がある。そこで、カロリーメーターに落すエネルギー Ecal が入射光子のエネルギー Etag の半分以下であるという条件

$$Ecal/Etag < 0.5 \tag{4}$$

という条件をつけた。以上の条件で電磁相互作用を起こした事象は除去できる。

中性子が観測されるという条件は、4.2 の中性子の選別条件を用いて見分けた。

さらに、中性子の数が少なくとも二つ以上計測されているという条件をつけた。これは、アクシデンタルな背景事象や、 π 中間子の光生成で、中性子検出器が一つしか鳴らなかった事象を除去するためである。この条件では、光核反応の後に一つだけ中性子が計測された事象も除去されるが、その効果は中止し検出器の検出効率を使って補正することができる (4.4.4 節)。

図 28 は E-cal が 1 MeV 以下の事象で、中性子を一つだけ観測した事象の、中性子検出器の TDC 分布である。4.5 節で述べた中性子選別の条件 (4 < TDC(nsec) < 25) の領域に、先ほど述べた理由により、低い中性子の山が見える。しかし、中性子が出たすべての事象の分布に比べて平らである。このことは中性子を一つだけ観測した事象がアクシデンタルな背景事象が多く含んでいることを示している。電子ビームのエネルギーが 430 MeV のデータについては、光核反応を起こした事象も多く除去されている。しかし、同時にアクシデンタルな背景事象も確実に除去することができ、結果をほかの電子ビームのエネルギーの結果と比較することを考慮して、すべての電子エネルギーの実験で、観測した中性子数が二個以上という条件のもとで解析を行なうことにした。

光子エネルギー	全入射光子数		
430 MeV Run	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	$40\ cm\ Scintillator$
53.95 - 91.47	9230584	8273259	2649459
91.47 - 128.99	5175661	4782703	1519414
128.99 - 166.55	3500127	3323801	1068954
166.51 - 204.03	2603234	2511191	825060
204.03 - 241.55	2065630	1987476	658531
241.55 - 279.07	1688782	1662326	546999
279.07 - 316.59	1417145	1382320	464970
750 MeV Run	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	scintblock
333.23 - 370.75	16965924	15383625	8294222
370.75 - 408.27	14374248	13167423	7123698
408.27 - 445.79	12481152	11406213	6204083
445.79 - 438.31	11341663	10510977	5708814
483.31 - 520.83	10417992	9655731	5318822
520.83 - 558.35	9698218	8850958	4858345
558.35 - 595.87	8989505	8159124	4519858
595.87 - 633.39	8030392	7316545	4043255
1100 MeV Run	$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$	
679.73 - 717.25	18955552	6418643	
717.25 - 754.77	17316372	5938710	
754.77 - 792.29	15857077	5454554	
792.29 - 829.81	15146905	5183911	
829.81 - 867.33	14552230	5020138	
867.33 - 904.85	13969478	4789908	
904.85 - 942.37	13194737	4494997	
942.37 - 979.89	12073433	4099094	

表 11: 全入射光子数。 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの値は $Punch\ Though$ 事象の数を引いた値である。

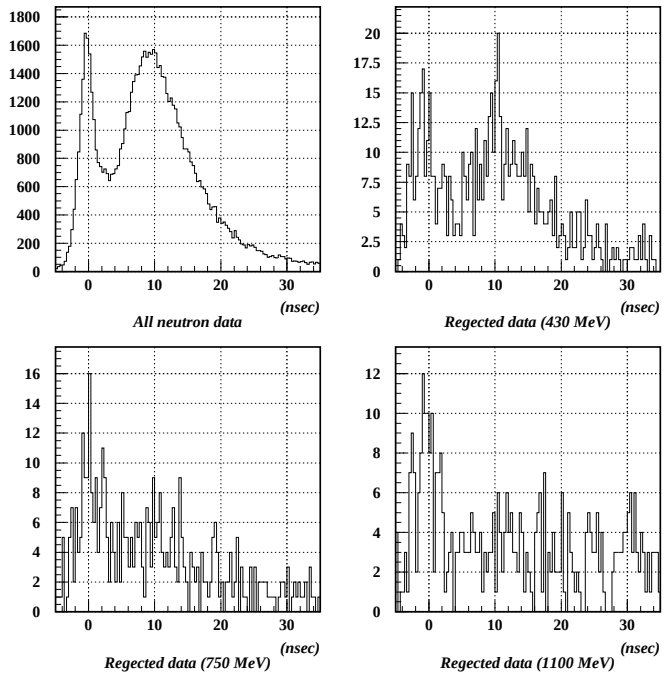


図 28: 中性子を一つだけ観測した事象の TDC 分布。左上は $0.45 \leq AUN \leq 2.5$ という条件のもとで中性子を一つ以上観測した事象、残りの三つは中性子を一つしか観測しなかった事象。それぞれの電子ビームエネルギーのデータ。

以上の条件にもとずいて、4.4.3 節、4.4.4 節の解析を行なった。光核反応を判別する条件をまとめておく。

1. $\overline{EG}$ トリガーの事象である。
2. $Ecal/Etag < 0.5$ である。
3. 中性子を少なくとも二つ以上計測する。

4.4.3 不感事象の数の見積もり

この小節では、光核反応での不感事象の数の見積もり方を説明する。

今回の解析で、実際の実験で使用する時のことを考えて、光子検出器の 5 種類のしきい値に対して不感率を求めることにした。しきい値は 1 MeV 、 3 MeV 、 5 MeV 、 10 MeV 、 30 MeV である。4.4.2 節の条件を満たした事象を集め、カロリーメーターの測定エネルギー E-cal の分布をつくった。分布は各電子エネルギーごとに、それぞれ八つの光子のエネルギー領域に区切って作った。図 29 から図 36 に

分布を示す。 E-cal が高いところで分布が消えているのは、式 4 ($Ecal/Etag \leq 0.5$) の条件のせいである。

これらの分布のしきい値以下の事象数を直接数えることで、不感事象の数とした。また、電子エネルギーが 750 MeV の実験で、入射光子のエネルギーが 400 MeV あたりから下で、サンプリングカロリーメーターの E-cal の分布に二つピークが見えるが、これについては 6.1 節で考える。

光子のエネルギーが 16.43 MeV から 53.95 MeV の領域のデータは $\overline{EG}$ のしきい値のふらつきなどにより、電磁気相互作用を起こしたものもはいってきていると考えられるので、これ以降は使わないことにした。

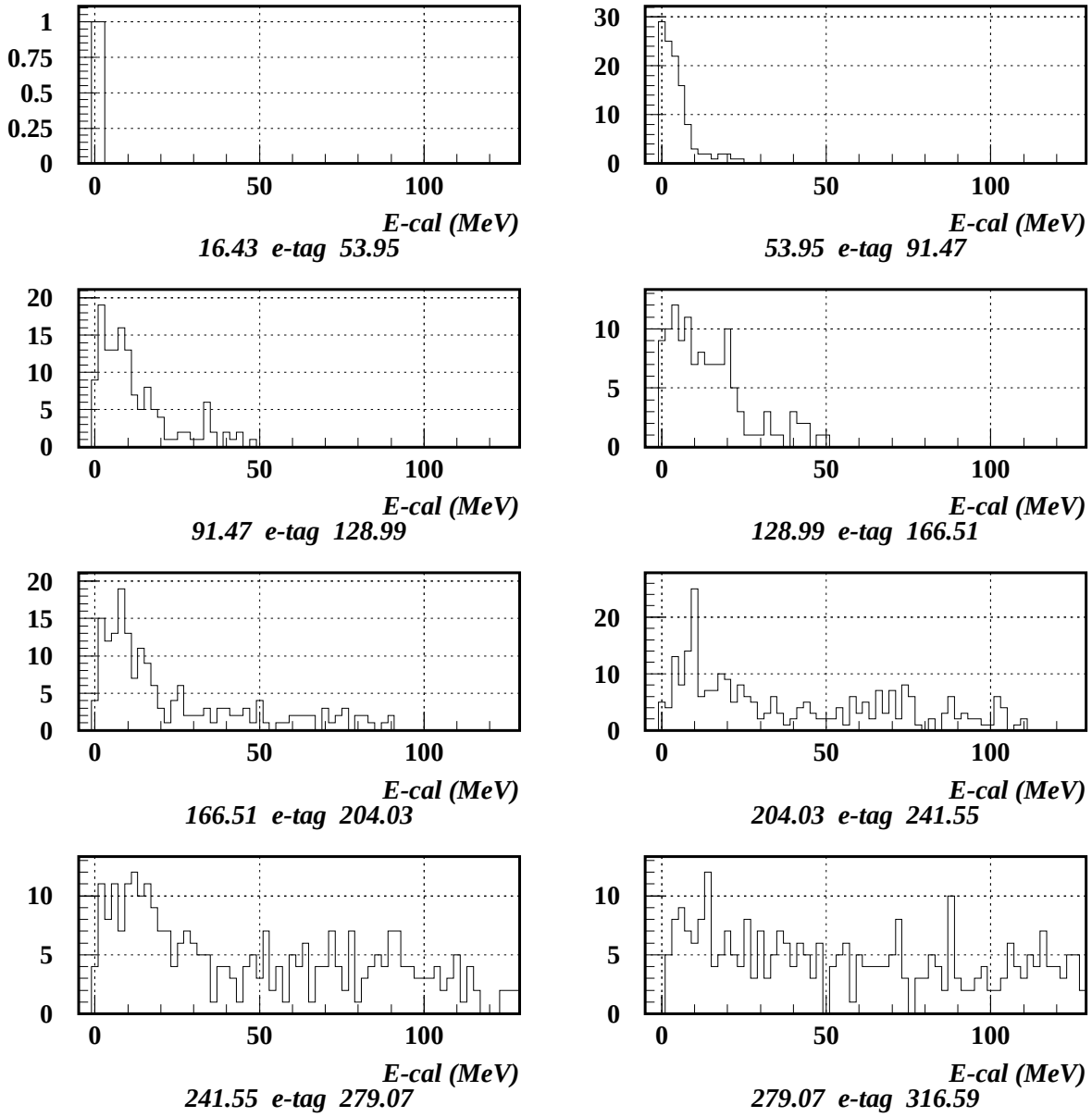


図 29: 430 MeV の電子エネルギーで $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

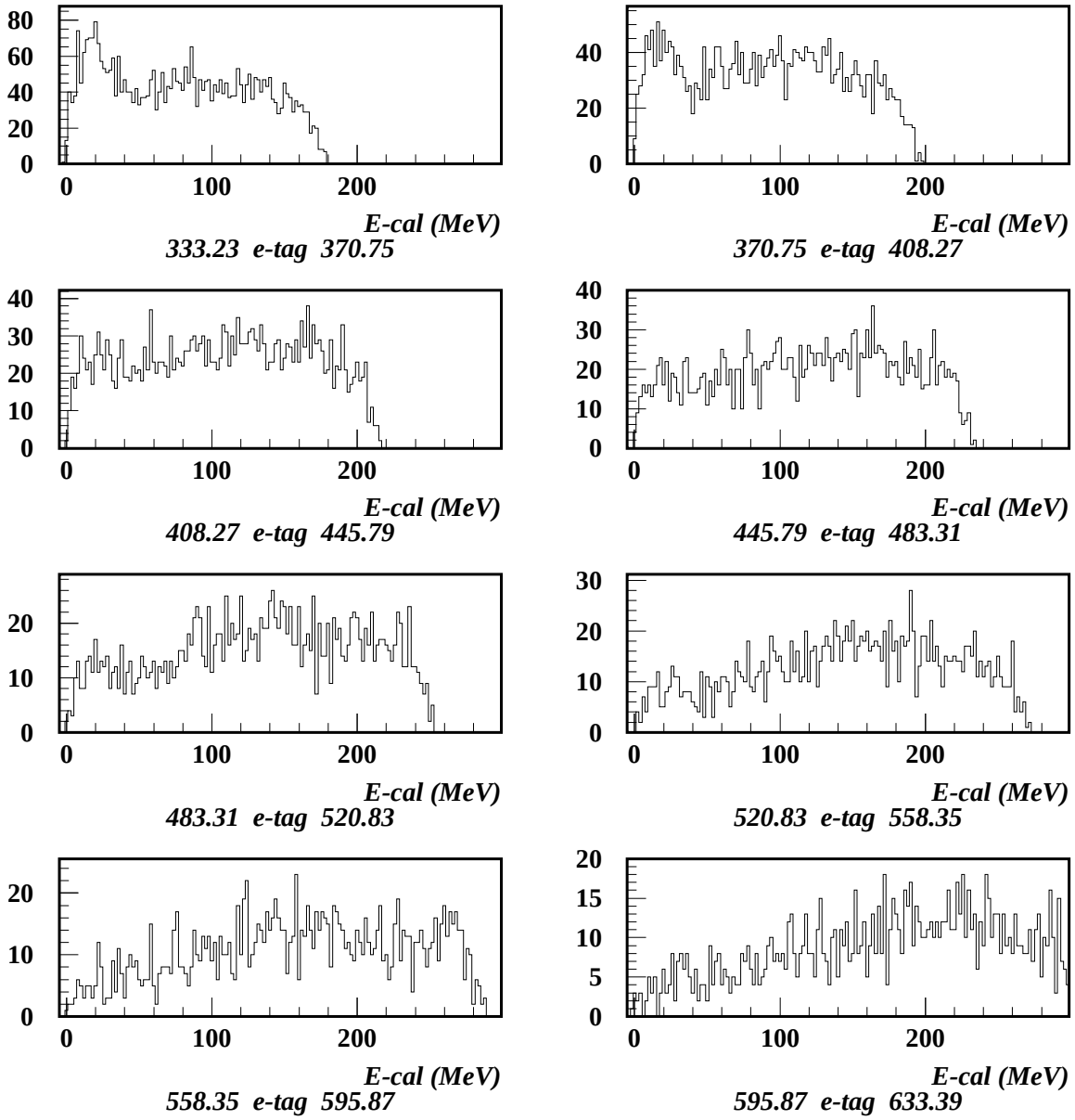


図 30: 750 MeV の電子エネルギーで $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

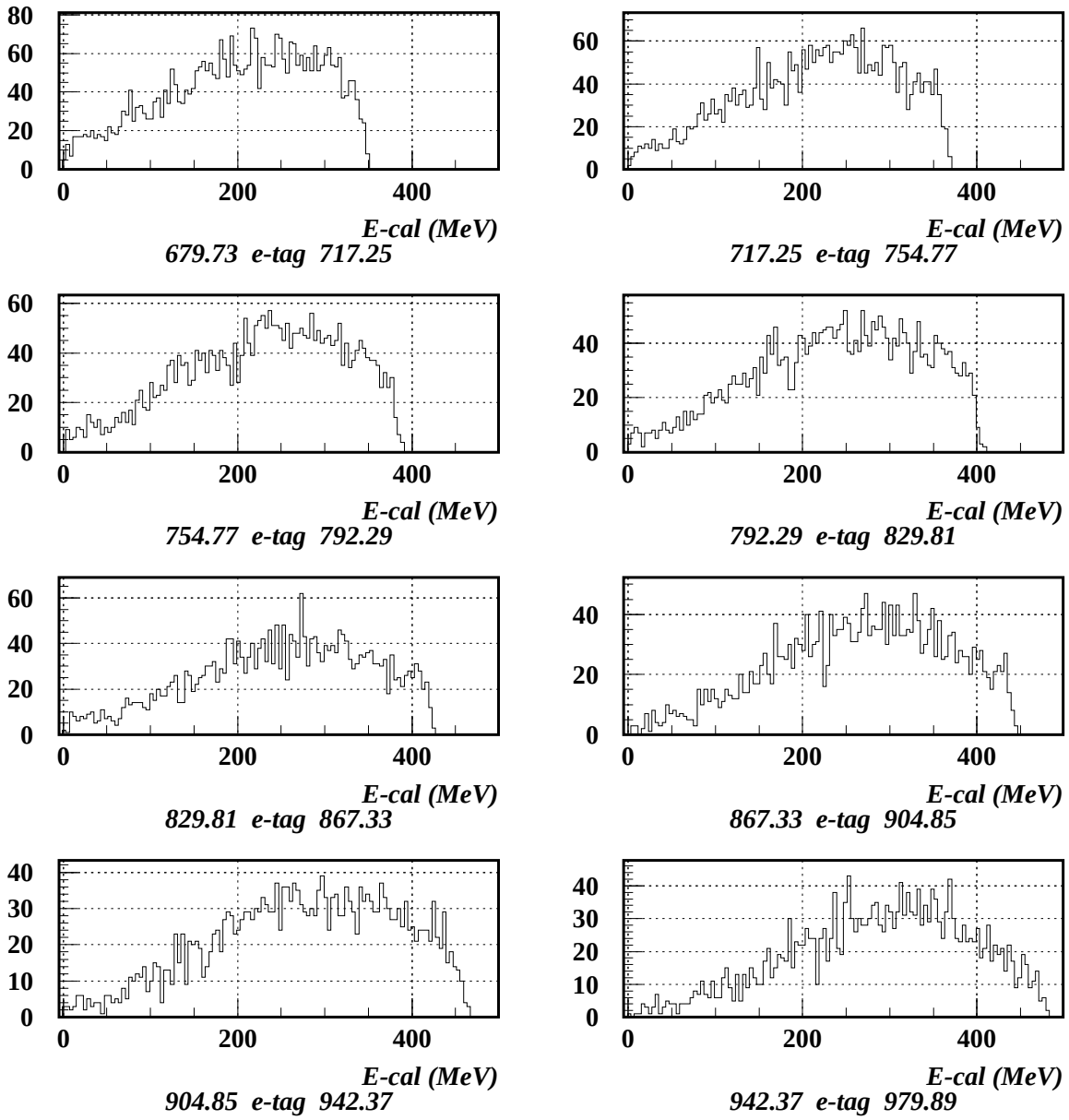


図 31: 1100 MeV の電子エネルギーで $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

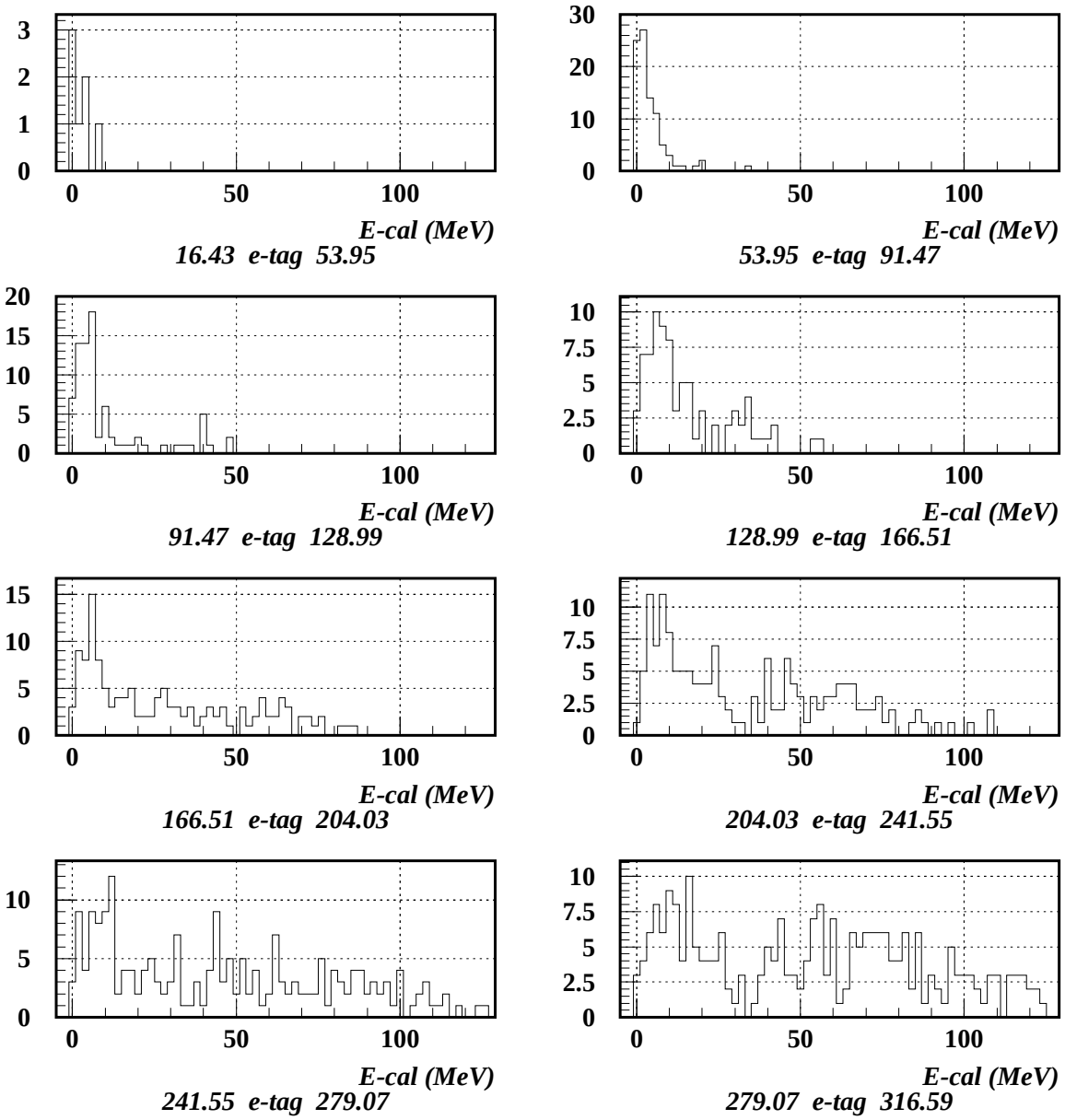


図 32: 430 MeV の電子エネルギーで $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

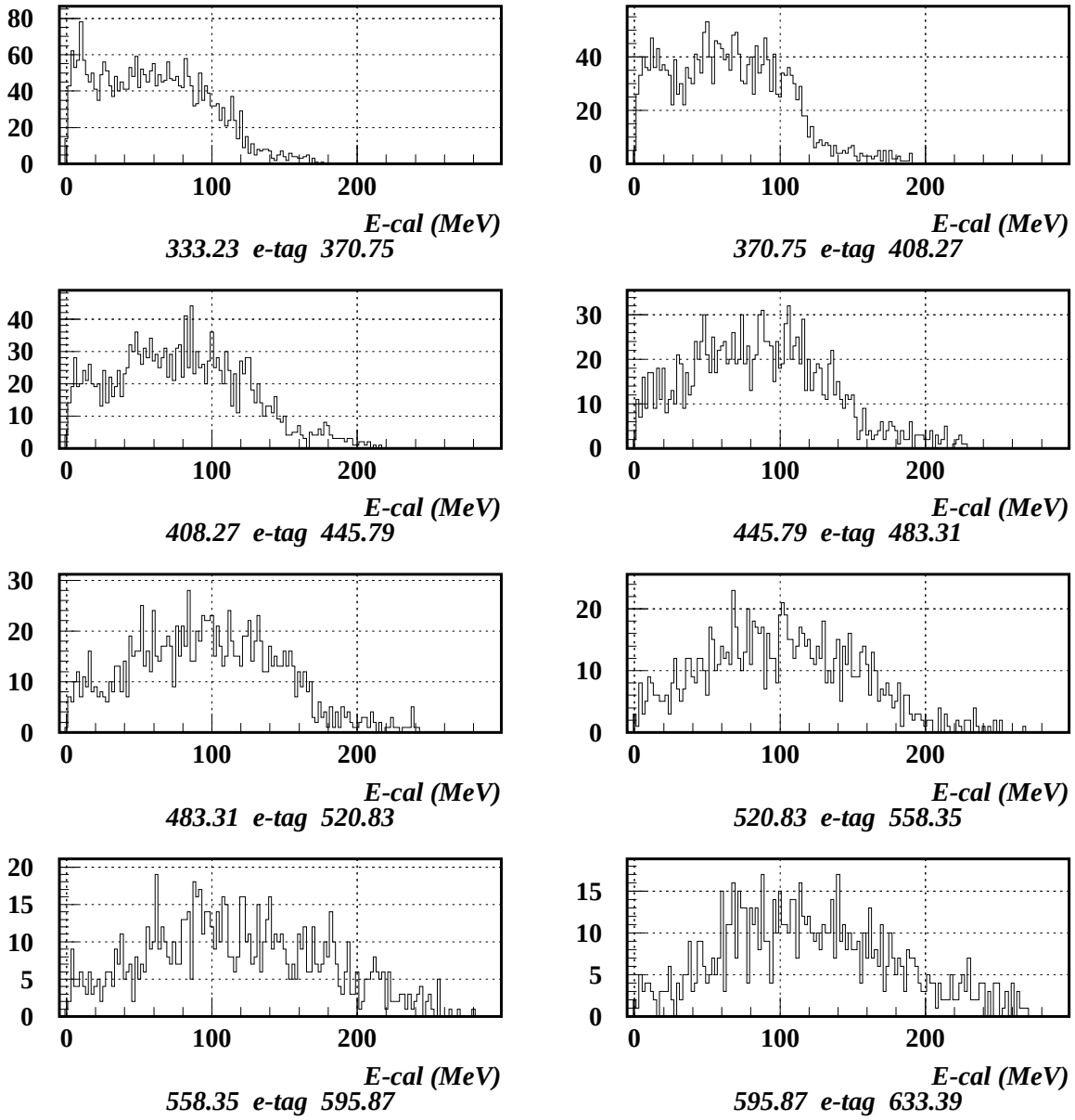


図 33: 750 MeV の電子エネルギーで $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

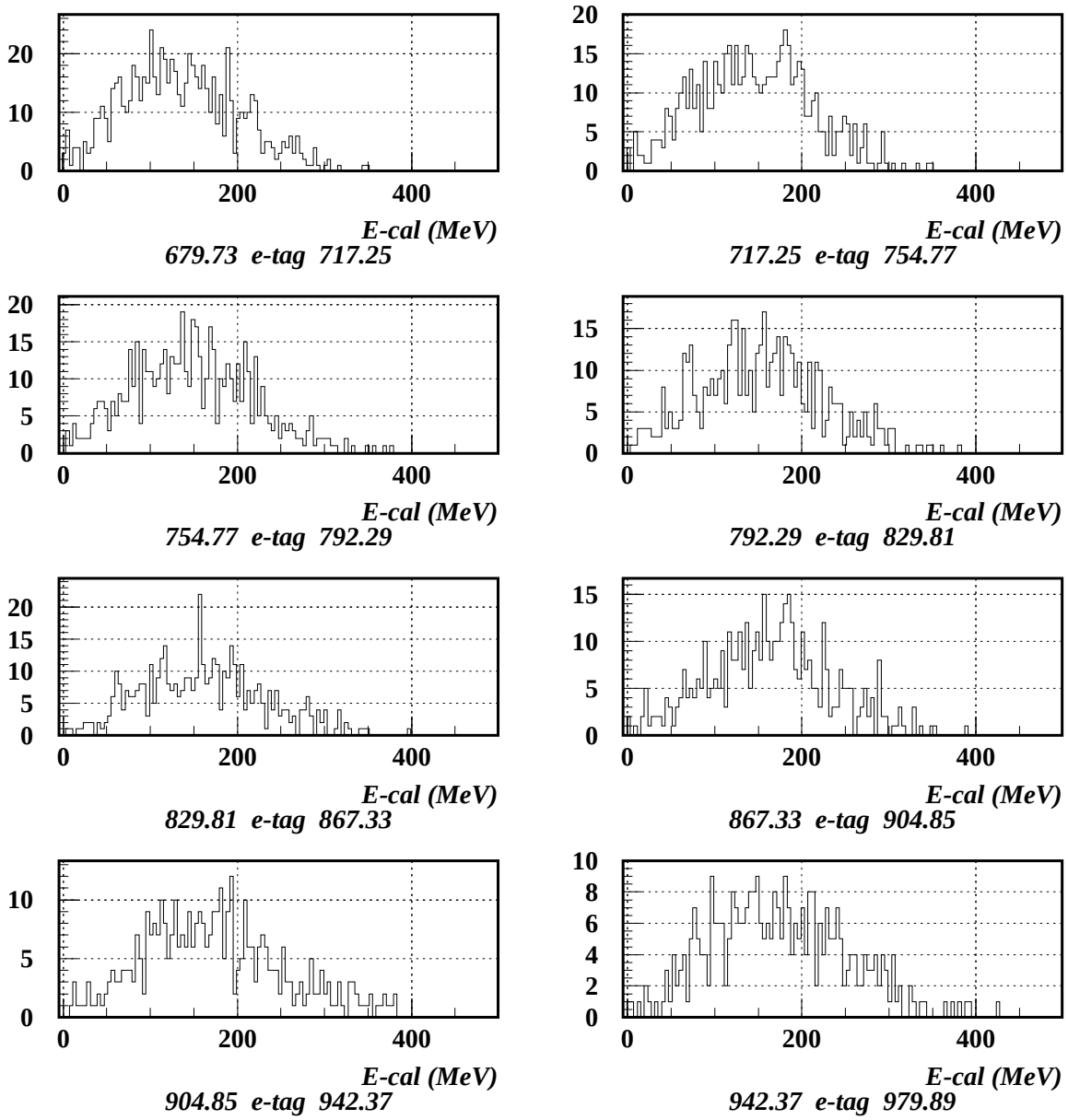


図 34: 1100 MeV の電子エネルギーで $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

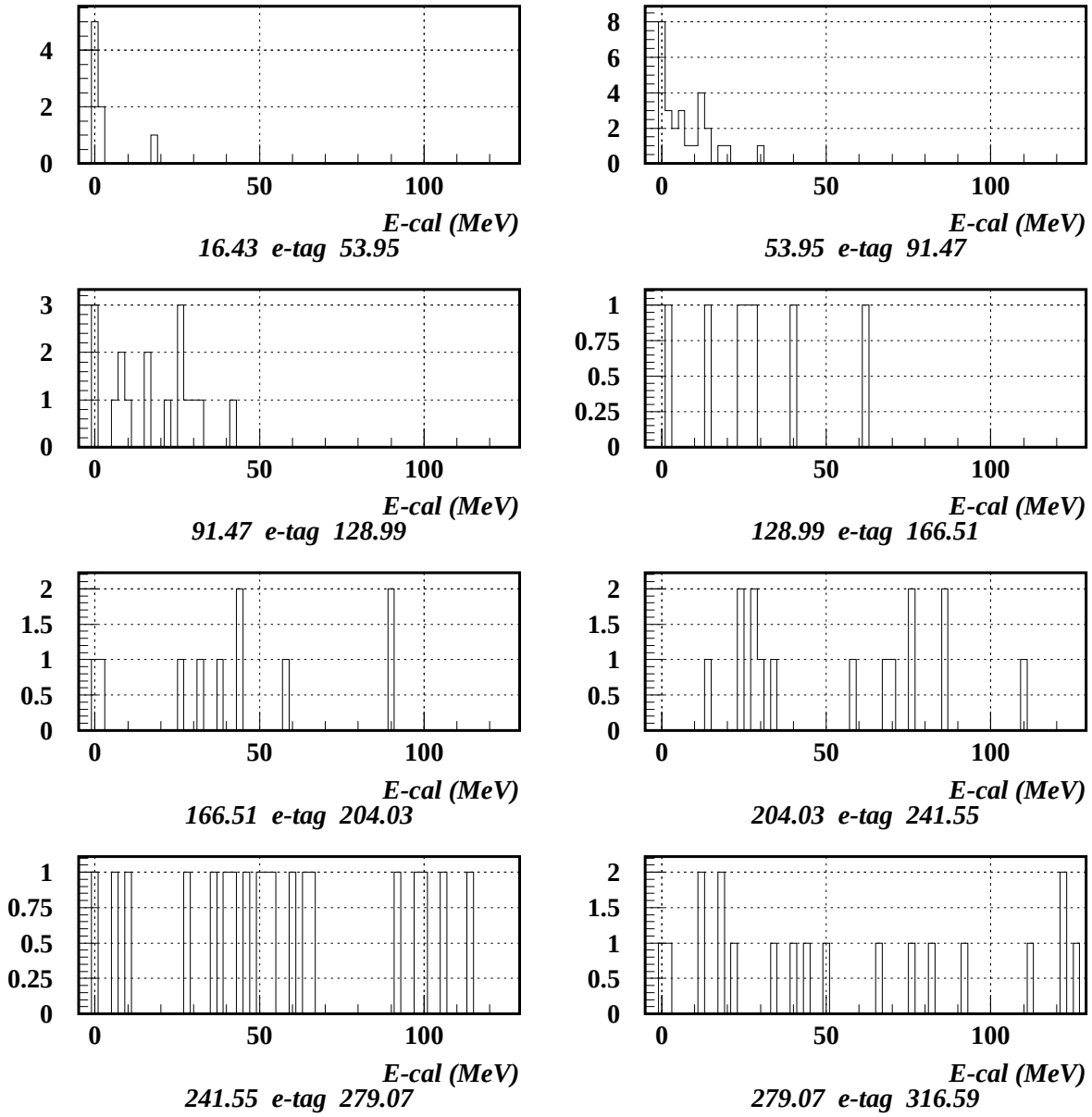


図 35: 430 MeV の電子エネルギーで 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

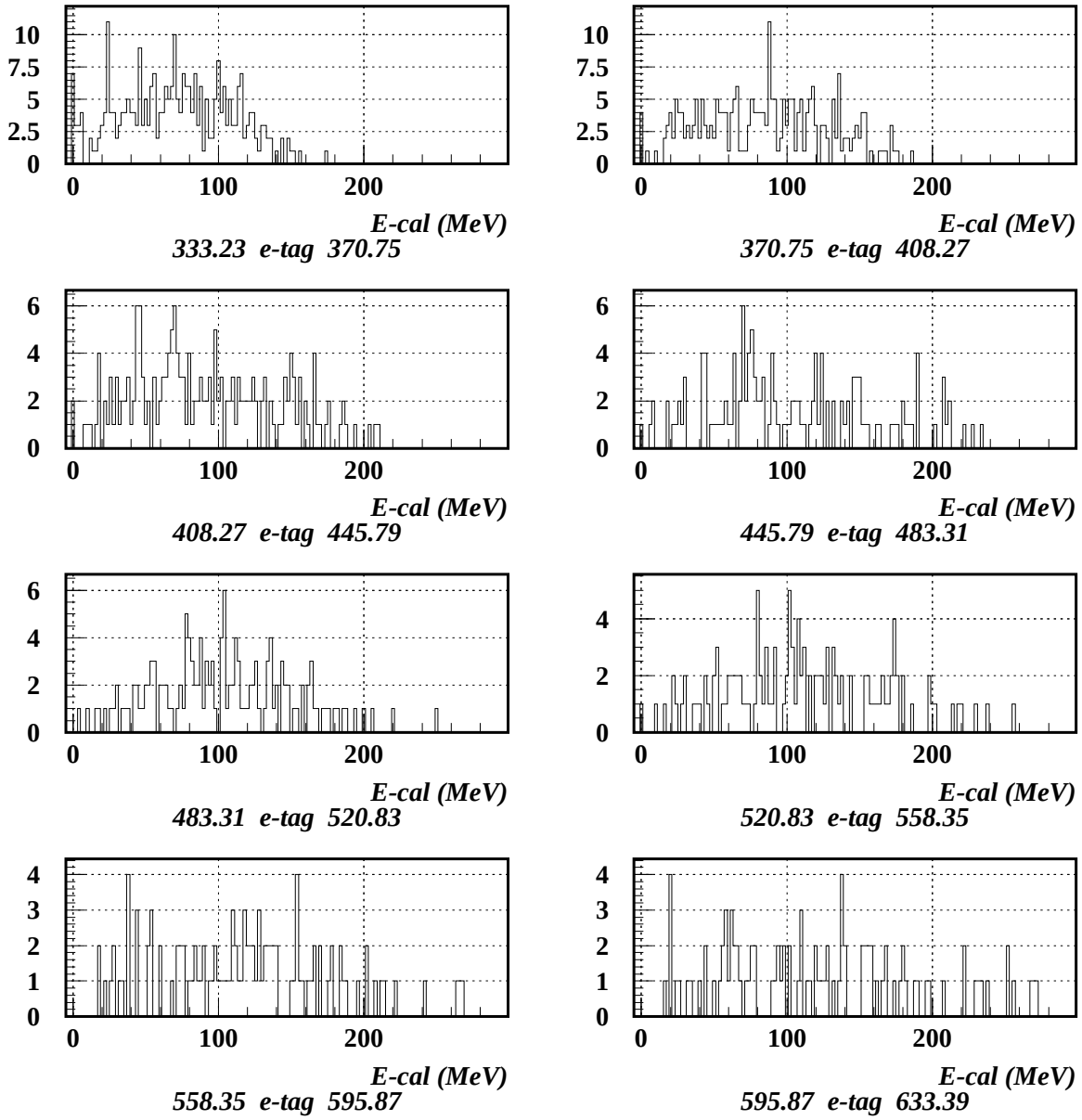


図 36: 750 MeV の電子エネルギーで 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの二つ以上の中性子を要求した時のエネルギー分布

4.4.4 中性子の検出効率の見積もり

中性子の計測数を二つ以上という条件のもとで、入射光子エネルギーの領域ごとに中性子の計測数の分布を見たのが図 38 から図 44 である。これを Poisson 関数でフィットして平均値 μ を求めた。

つぎに、中性子の計測数の平均値 μ が E-cal のしきい値への依存性を調べた。ここでは、$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターについて、 E-cal の分布に二つのピークが見える、入射光子のエネルギーが $333\ MeV \leq E{-}tag \leq 371\ MeV$ のデータと、 E-cal の低エネルギー側にあるピークがなくなっている入射光子のエネルギーが $680\ MeV \leq E{-}tag \leq 717$ のデータを例にとる。(ほかのすべてのデータについては付録 C に載せる。)

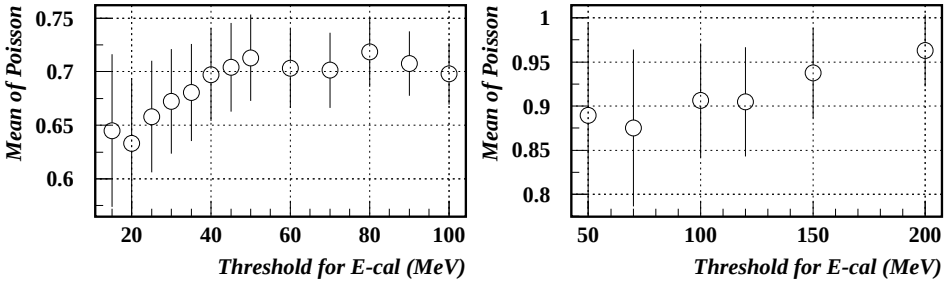


図 37: μ と E-cal のしきい値の相関 (右が入射光子のエネルギーが $333\ MeV \leq E{-}tag \leq 371\ MeV$ 、左が入射光子のエネルギーが $680\ MeV \leq E{-}tag \leq 717$ のデータ)

図 37 は二つの入射光子のエネルギーに対し E-cal のしきい値以下の事象に対して求めた μ の値を示したものである。このプロットを直線でフィットして、 μ の値をしきい値の関数として用いた。フィットの結果は付録 C.1 に載せる。

電子ビームのエネルギーが 430 MeV の実験に関しては事象の数が少ないので、すべての事象を使って μ を求めることにした。また、$40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターについては、光子が $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターで $Punch\ Though$ したあと、後ろの $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで光核反応が起こる場合がある。しかし、このような事象が $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターに落すエネルギーは小さいと考え、 E-cal が 5 MeV 以上の事象を用いて μ を求めた。この仮定の正当性については 6.2 節で説明する。

$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の実験における E-cal の各しきい値に対する μ を図 45 と図 46 にしめす。 E-cal のしきい値による μ 変化は小さいが、入射光子のエネルギーが大きくなるにつれて、 μ の値も大きくなっていることがわかる。これは、入射光子のエネルギーが大きいと、光核反応で出てくる中性子の数も増えることを示している。また、入射光子のエネルギーが $\sim 350\ MeV$ で、 μ が大きくなっているのは、そのあたりに π 中間子の光生成の共鳴ピークがあるからである。

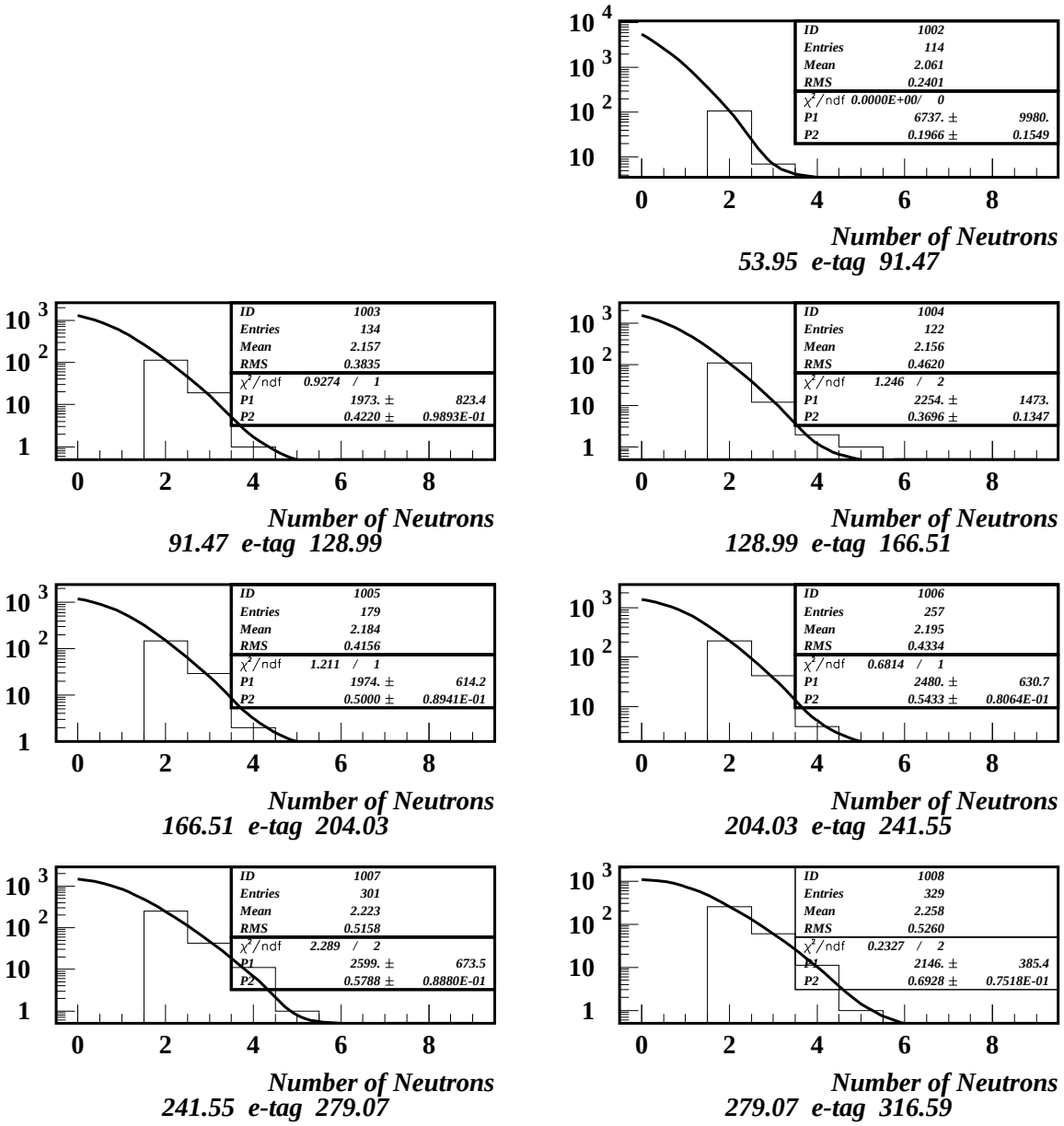


図 38: 430 MeV Run での $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布。 Poisson 関数でフィットしている。

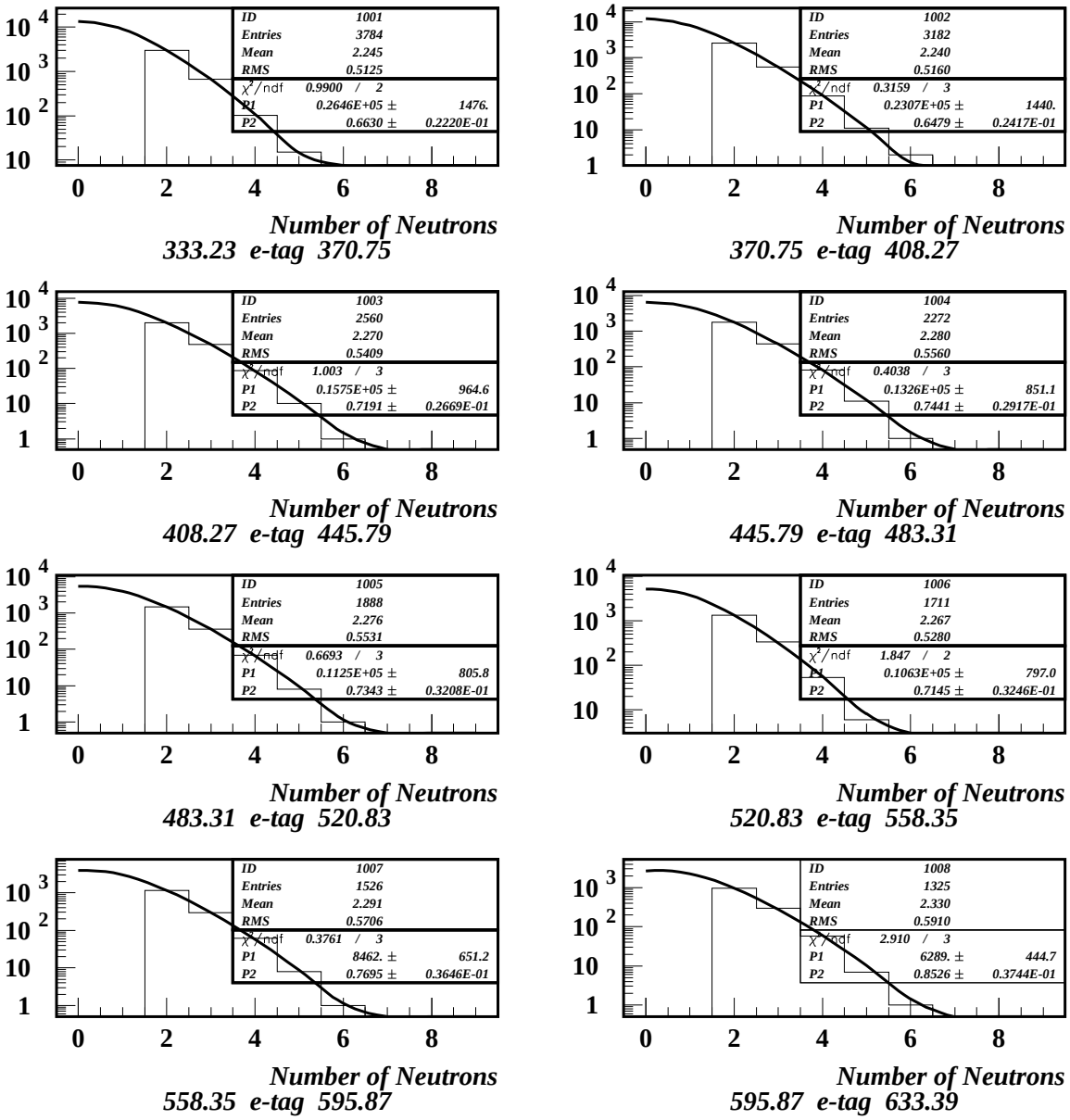


図 39: 750 MeV Run での $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布。 Poisson 関数でフィットしている。

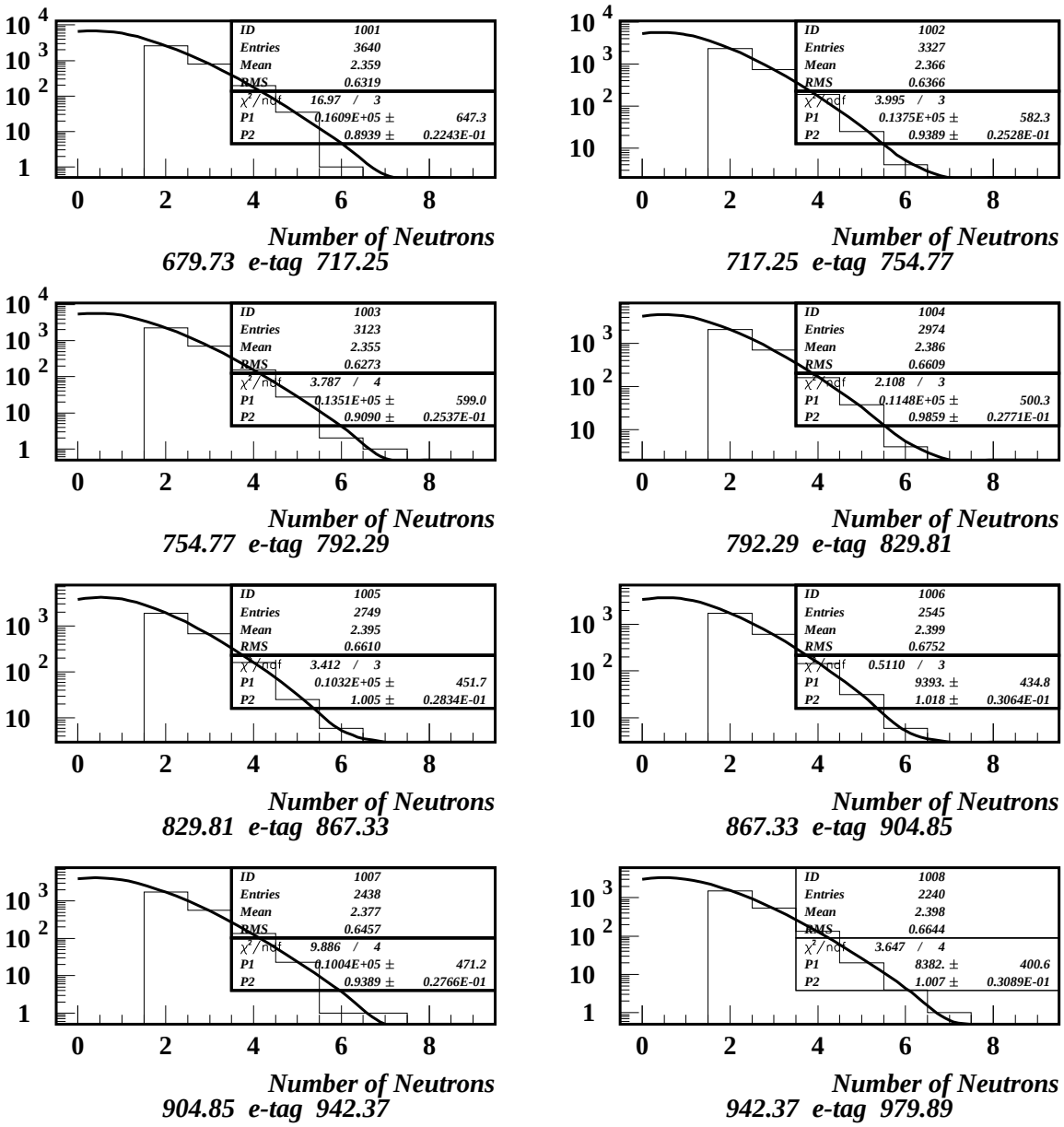


図 40: 1100 MeV Run での $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布。 Poisson 関数でフィットしている。

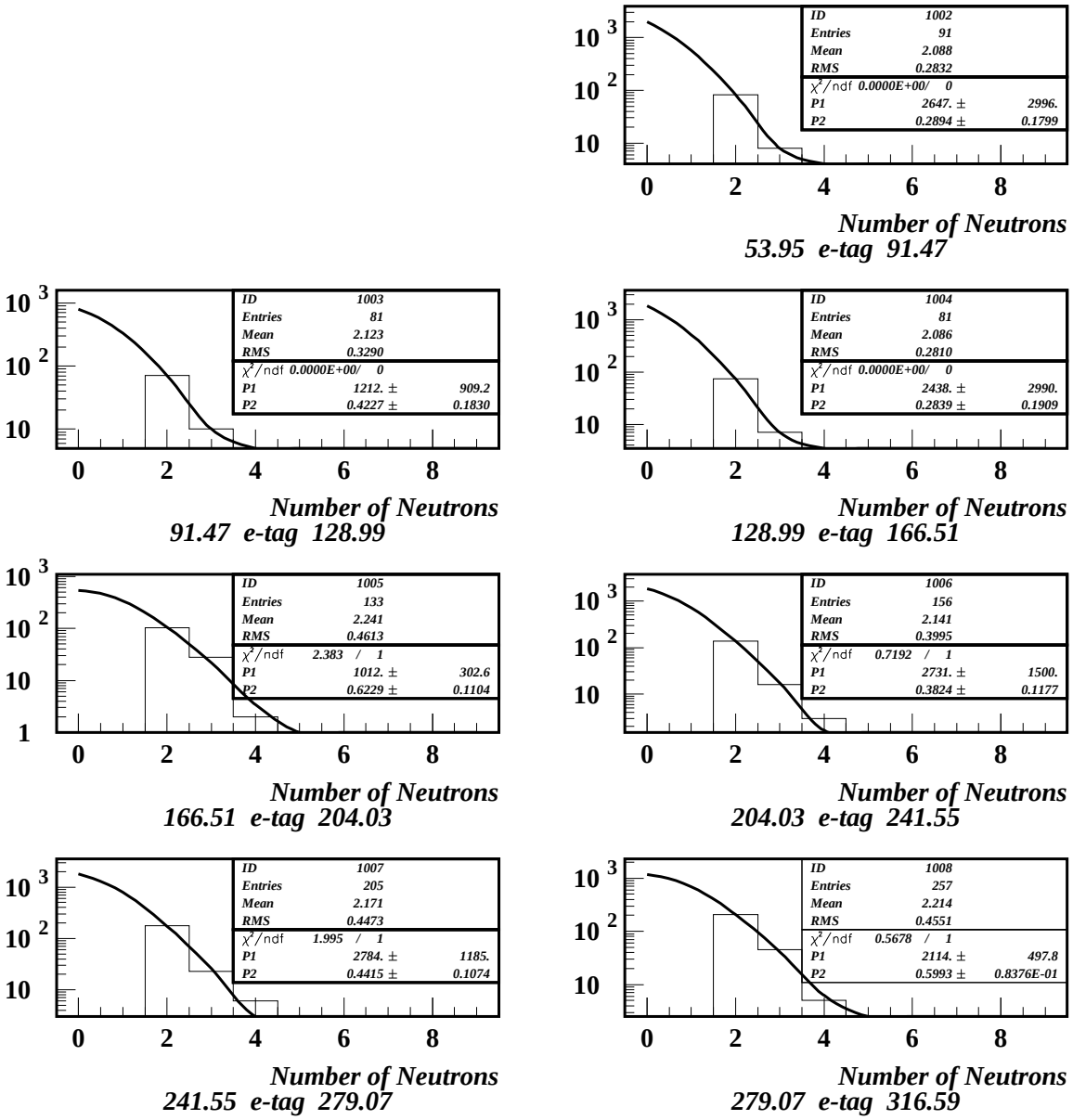


図 41: 430 MeV Run での $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布。Poisson 関数でフィットしている。

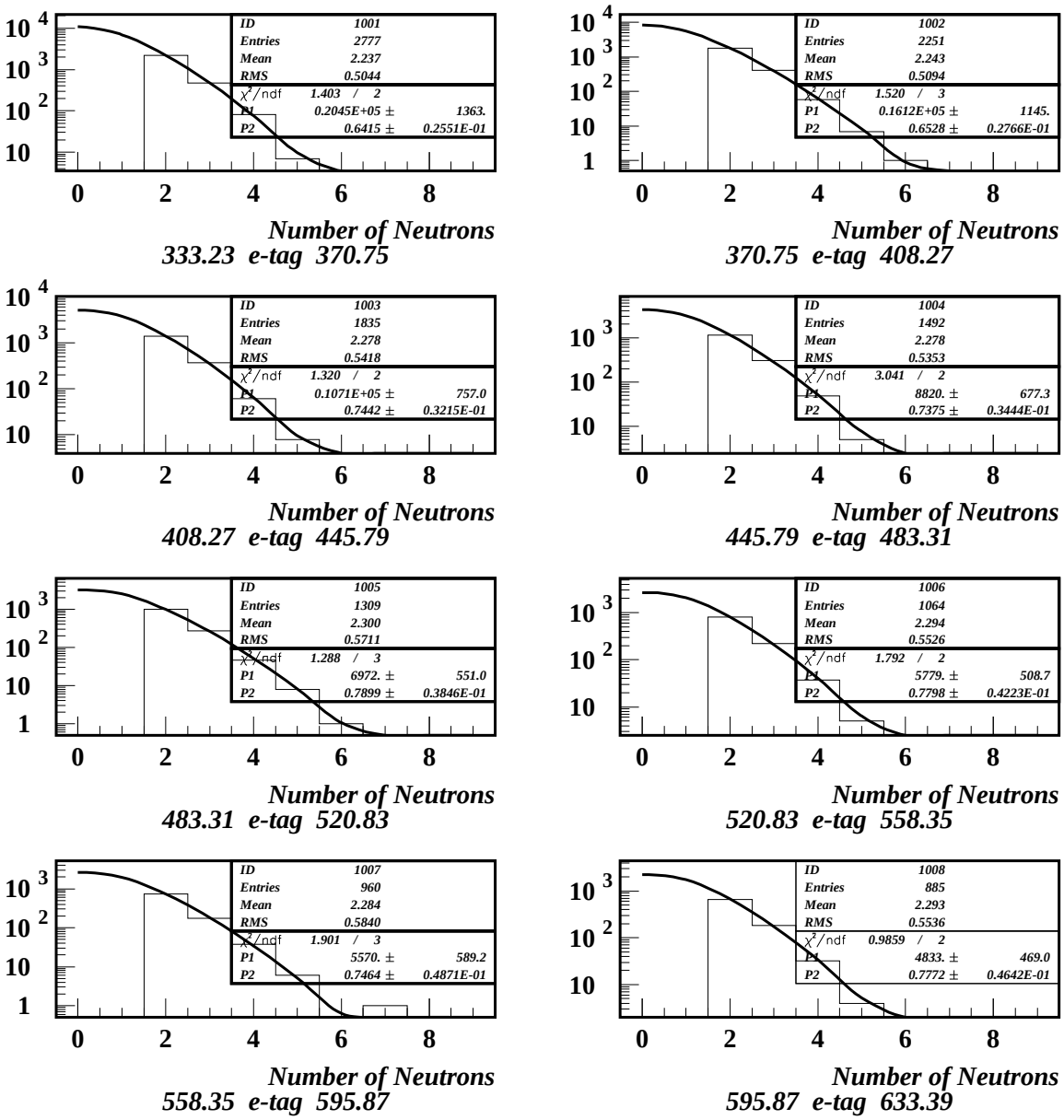
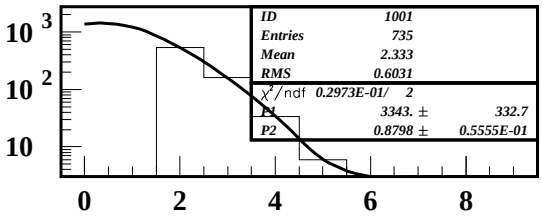
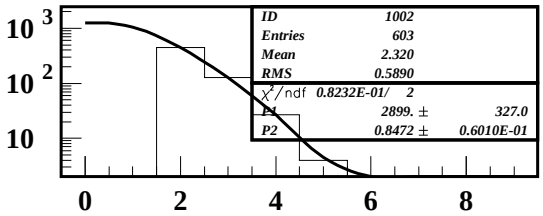


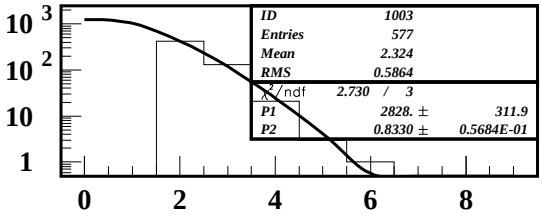
図 42: 750 MeV Run での $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布。Poisson 関数でフィットしている。



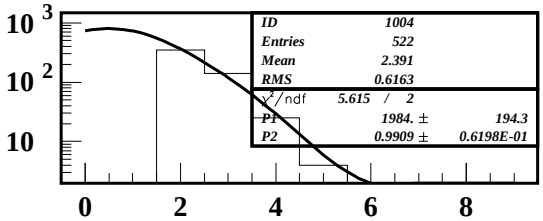
679.73 e-tag 717.25



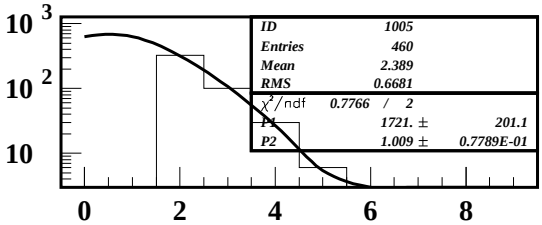
717.25 e-tag 754.77



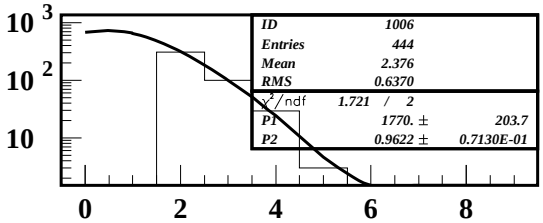
754.77 e-tag 792.29



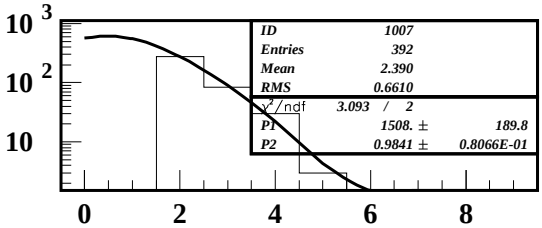
792.29 e-tag 829.81



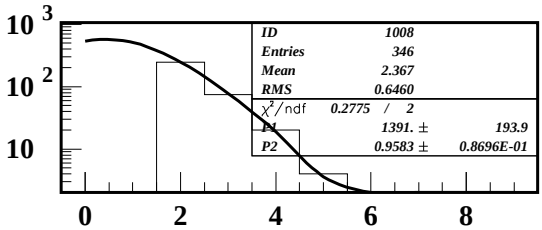
829.81 e-tag 867.33



867.33 e-tag 904.85



904.85 e-tag 942.37



942.37 e-tag 979.89

図 43: 1100 MeV Run での $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子計測数の分布。Poisson 関数でフィットしている。

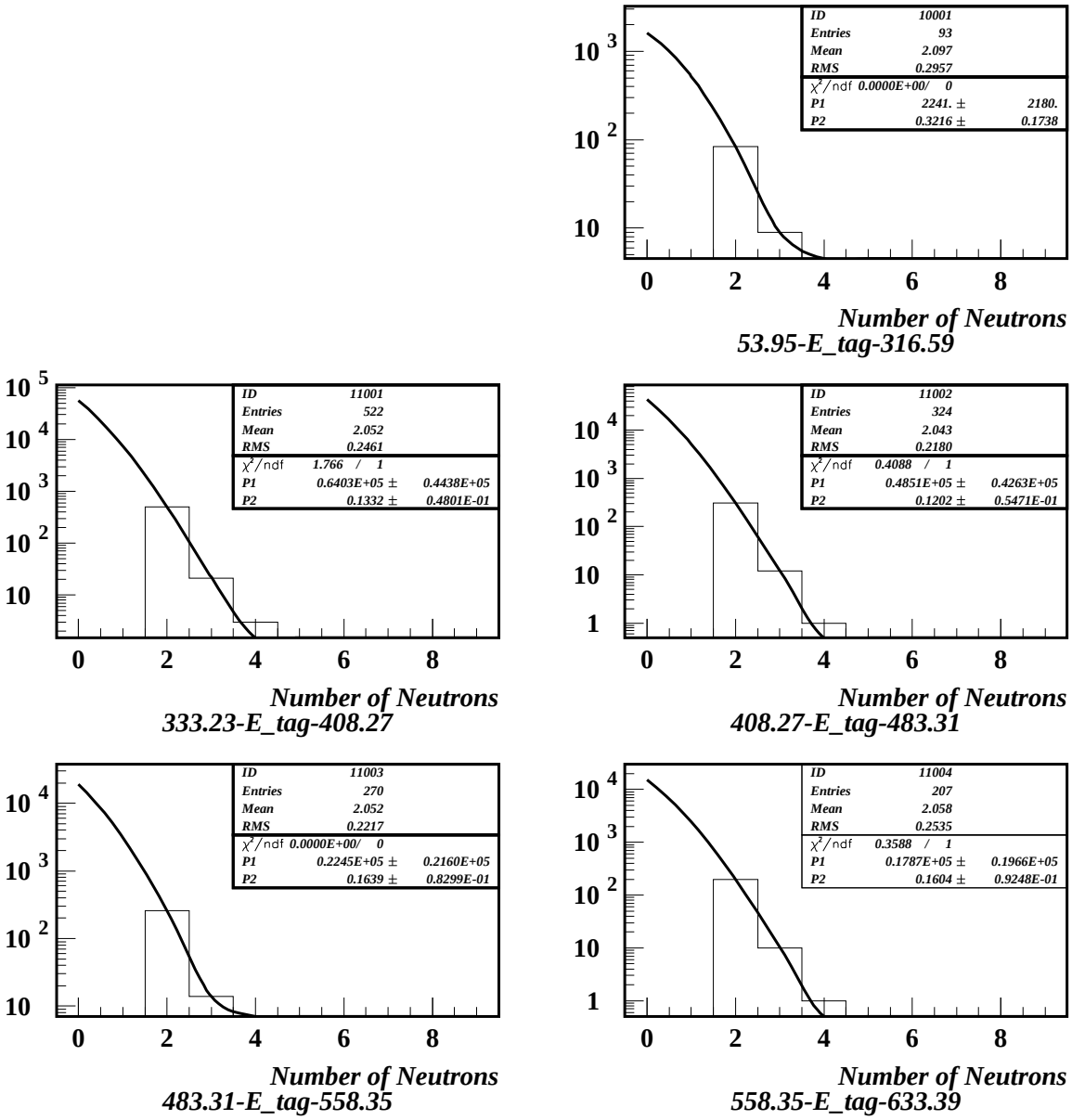


図 44: 430 MeV Run 、 750 MeV での 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの中性子計測数の分布。Poisson 関数でフィットしている。

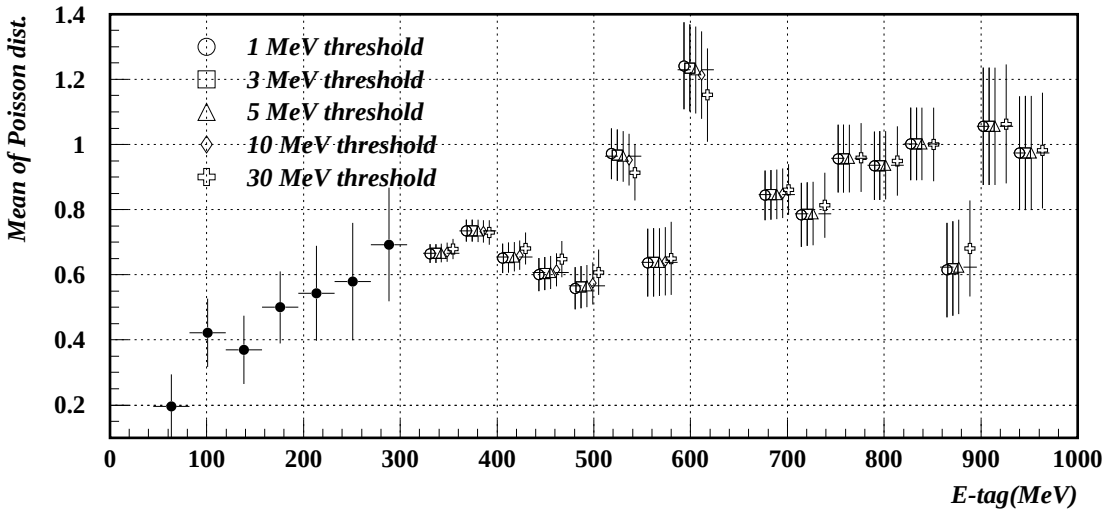


図 45: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのしきい値に対する μ の変化。入射光子のエネルギーが 300 MeV 以下ではすべての E-cal のしきい値に対し、入射光子のエネルギーに対応する黒点で示されている μ を用いた。

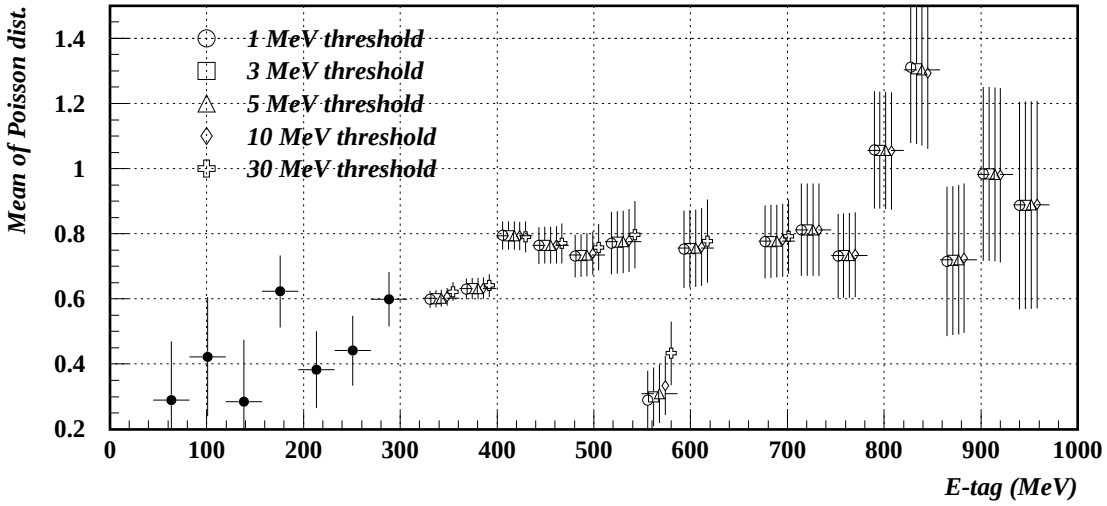


図 46: $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのしきい値に対する μ の変化。入射光子のエネルギーが 300 MeV 以下ではすべての E-cal のしきい値に対し、入射光子のエネルギーに対応する黒点で示されている μ を用いた。

4.5 背景事象について

この節では、今までの解析で除去できていない背景事象の大きさを見積もる。

4.5.1 *Punch Though* による背景事象 ($0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$)

この背景事象は $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの実験で、光子がそれらのカロリーメーターを *Punch Though* 事象で通り抜けた後、うしろの $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで光核反応を起こしたものである。摸式図を図 47 にしめす。この背景事象の数は、$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験のデータから見積もることができる。

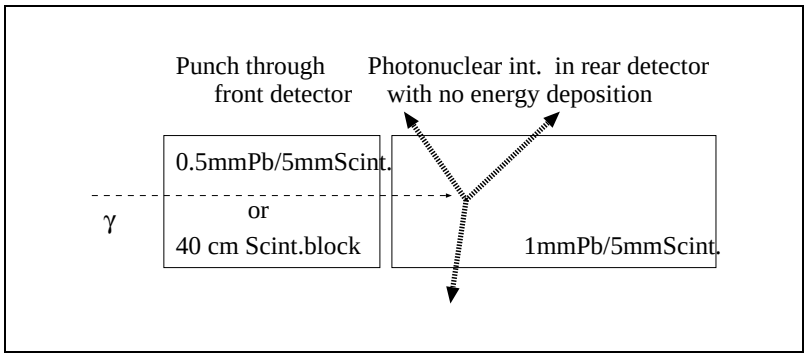


図 47: *Punch Though* のあと後ろの $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中で光核反応を起こした事象

$0.5mm\ Pb/5mm\ Scint.$、$40\ cm\ Scintillator$ の実験で *veto* カウンターとしての $1mm\ Pb/5mm\ Scint.$ カロリーメーターのしきい値は 1 MeV である。そこで、この背景事象の数を $N_{B.G.}$ とすると次の式が成り立つ。

$$N_{B.G.} = N_{punch} \times R_{nodep} \tag{5}$$

ここで、 R_{nodep} は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験で、中性子を 2 個以上計測し、かつ、カロリーメーターに 1 MeV 以下のエネルギーしか落さなかった事象の全事象数に対する割合、N_{punch} は $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$ を *Punch Though* した事象数をあらわす。*Punch Though* の事象の条件は $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターで 1 MeV 以上のエネルギーを落さなかった事象すべてである。

実際のデータから計算した $N_{B.G.}$ の値と、光核反応を起こしたという条件を課した時の E-cal が 1 MeV 以下の事象数を表 12 に示す。これらの背景事象の大きさは無視できないので、不感率の計算の時に、これらの背景事象の数を引くことにする。

光子エネルギー	0.5*mm Pb/ 5mm Scint.*		40 *cm Scintillator*	
430 MeV Run	背景事象	データ	背景事象	データ
53.95 - 91.47	5.43	25	10.8	8
91.47 - 128.99	1.43	7	3.29	3
128.99 - 166.55	1.13	3	3.19	0
166.51 - 204.03	0.45	3	1.39	1
204.03 - 241.55	0.53	1	1.68	0
241.55 - 279.07	0.42	3	1.37	1
279.07 - 316.59	0.	3	0.	1
750 MeV Run	背景事象	データ	背景事象	データ
333.23 - 370.75	1.23	14	5.40	7
370.75 - 408.27	0.73	5	4.05	4
408.27 - 445.79	0.16	4	0.89	2
445.79 - 438.31	0.31	2	1.80	1
483.31 - 520.83	0.16	1	0.90	0
520.83 - 558.35	0.	3	0.	1
558.35 - 595.87	0.08	1	0.45	0
595.87 - 633.39	0.35	2	1.78	0
1100 MeV Run	背景事象	データ		
679.73 - 717.25	0.060	1		
717.25 - 754.77	0.026	2		
754.77 - 792.29	0.	0		
792.29 - 829.81	0.079	0		
829.81 - 867.33	0.027	0		
867.33 - 904.85	0.	1		
904.85 - 942.37	0.	0		
942.37 - 979.89	0.	1		

表 12: 1*mm Pb/ 5mm Scint.* で光核反応をおこした背景事象の数の見積もり。データは中性子の数を二つ以上要求した時の、カロリーメーターの測定エネルギーが 1 MeV 以下の事象数。

4.5.2 中性子の判別条件を満たす光子の数

中性子検出器の中性子の判別条件 $0.45 \leq AUN \leq 2.5$ 、 $4 \leq TDC(nsec) \leq 25$ を満たす光子の事象数を見積もった。はじめに、中性子検出器の TDC 条件の境界から入ってくる背景事象 (図 48 の A)、つぎに中性子検出器の AUN 条件の境界からはいってくる背景事象 (図 48 の B) について、見積もる。

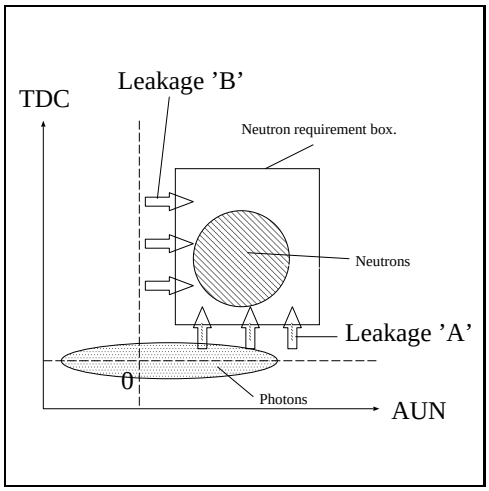


図 48: 中性子の判別条件の中にはいってくる光子

TDC 条件の境界からはいってくる光子の数の見積もり。(図 48 の A) 図 49 は、中性子判別の AUN の条件 ($0.45 \leq AUN \leq 2.5$) を課した時の中性子検出器の TDC 分布である。 0 nsec 付近の事象が光子、 10 nsec 付近の事象が中性子によるものである。

この分布を Double Gaussian でフィットすることによって見積もった結果、どの電子ビームエネルギーでも光子の山の標準偏差 σ は 1 nsec 程度であった。また、光子の山の中心値はほぼ 0 nsec にある。したがって、中性子を判別するための TDC 条件 ($4 \leq TDC(nsec) \leq 25$) の領域にある事象のうち、光子の占める割合は表 13 のようになる。

電子ビームのエネルギー (MeV)	混じってくる光子の数の割合
430	2.3×10^{-5}
750	1.0×10^{-5}
1100	2.8×10^{-5}

表 13: 中性子の判別条件の AUN 条件 (図 48 の B) から中性子の判別条件に入ってくる光子の数の割合。

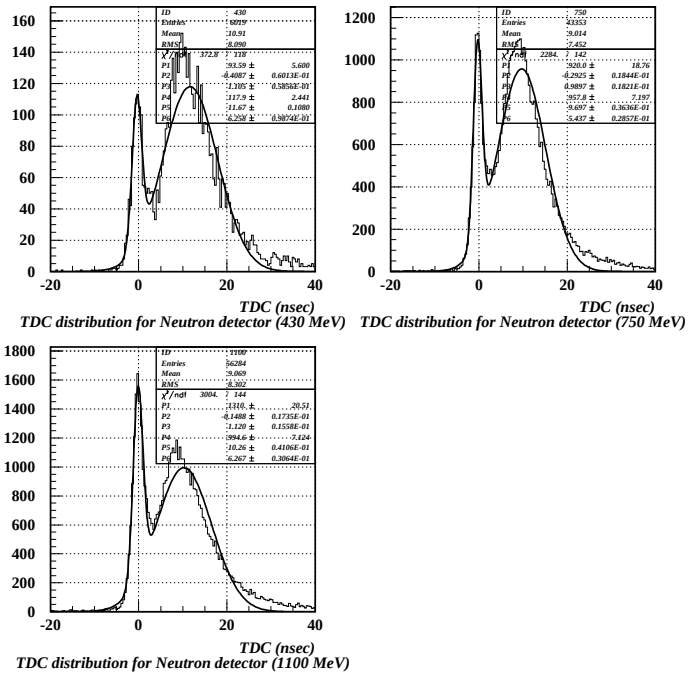


図 49: $0.45 \leq AUN \leq 2.5$ を満たす事象の中性子検出器の TDC 分布。電子ビームのエネルギーが 430 MeV 、 750 MeV 、 1100 MeV の場合。 Double Gaussian でフィットしており、媒介変数は光子、中性子の山に対してそれぞれ (P1, P4 : Const)、(P2, P5 : Mean)、(P3, P6 : Sigma) である。

AUN 条件の境界からはいってくる光子の数の見積もり (図 48 の B) 図 50 に、中性子判別の TDC 条件 ($4 \leq TDC(nsec) \leq 25$) を課した時の中性子検出器の AUN 分布をしめす。 AUN の値が 0. 付近に光子の山が、 1. 付近に中性子の山が見える。

TDC 条件の境界から入ってくる光子の数を見積もった時と同じように Double Gaussian でフィットすることで、 AUN 条件の境界から入ってくる光子の数を見積もった。どの電子エネルギーでも光子の山の標準偏差 σ は ~ 0.2 程度である。 AUN 条件 ($0.45 \leq AUN \leq 2.5$) の領域にある事象のうち、光子が占める割合を計算した結果が表 14 である。

以上の考察から、中性子に間違えられる光子の割合は $\sim 10^{-3}$ で、非常に小さいので無視できる。

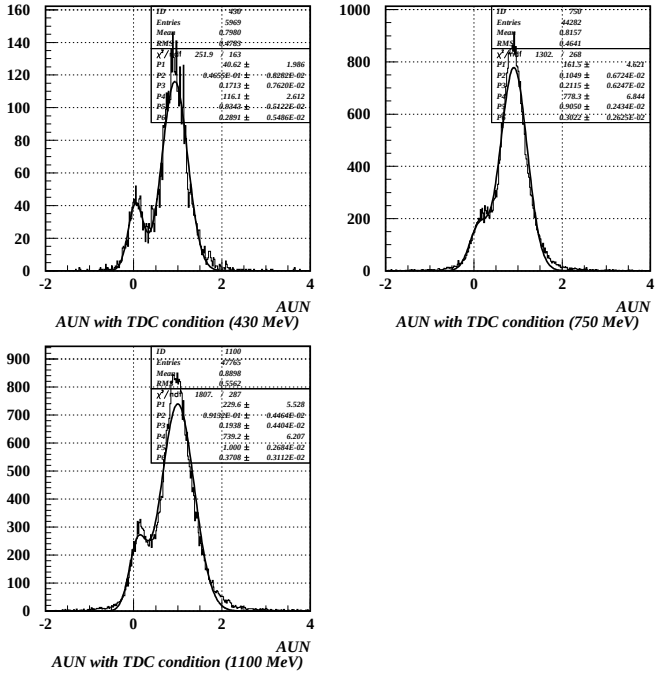


図 50: を $4 \leq TDC(nsec) \leq 25$ 満たす事象の中性子検出器の AUN 分布。電子ビームのエネルギーが 430 MeV 、 750 MeV 、 1100 MeV の場合。 Double Gaussian でフィットしており、媒介変数は光子、中性子の山に対してそれぞれ (P1, P4 : Const)、(P2, P5 : Mean)、(P3, P6 : Sigma) である。

電子ビームのエネルギー (MeV)	混じってくる光子の数の割合
430	1.0×10^{-3}
750	2.2×10^{-3}
1100	1.5×10^{-3}

表 14: 中性子の判別条件の TDC 条件 (図 48 の B) から中性子の判別条件に入ってくる光子の数の割合。

4.5.3 宇宙線による背景事象

タギングカウンターに電子は入ったのに光子が来なかった、つまり Mistag 事象のトリガーがかかった時に、偶然宇宙線ミューオンが中性子検出器に入ってきて光核反応を起こした事象と見わけがつかなくなることがある。このような事象が起こる確率を見積もる。

１２個の中性子検出器を上から見た時の断面積は約 6500 cm^2 である。宇宙線ミューオンは、１秒あたり 100 cm^2 あたり 1 個の割合で降ってきている。したがって、約 65 Hz で宇宙線ミューオンが中性子検出器にはいってきていることになる。一方、トリガーのうち Mistag の割合は ~1/100 である。また、私が設定した中性子の判別条件で、中性子検出器の TDC の幅は 20 nsec 程度である。

したがって、宇宙線ミューオンが Mistag のトリガーのタイミングで中性子検出器に入る確率は、

$$20\times10^{-9}(sec)\times65(Hz)\times\frac{1}{100} = 1.3\times10^{-8} \tag{6}$$

となる。さらに、私は二つ以上の中性子を計測することを要求していること、中性子検出器の検出効率、ほかに、 AUN の条件を課すこと、を考えると、私が求める不感事象に宇宙線ミューオンによる背景事象が混じってくる割合はさらに小さくなる。

私が調べようとしている不感率は $\sim10^{-6}$ なので、宇宙線ミューオンが背景事象としてはいってくることは、無視できる。

5　結果

4.1 節で説明した方法で、図 29 から図 36 を用いて不感事象の数を数え、図 38 から図 44 で求めた μ と式 2 を用いて η をもとめた。それらの値と、表 11 と表 12 の値を使って不感率を算出した。$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターと $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの結果を図 51 に、 40 $cm\ Scintillator$ カロリーメーターの結果を図 52 に示す。カロリーメーターの測定エネルギー E-cal のしきい値として 1 MeV 、 3 MeV 、 5 MeV 、 10 MeV 、 30 MeV の 5 種類を設定した。 E-cal のしきい値以下に事象がなかったところ、もしくは負の事象数になったところについては、 90 % C.L. での上限値を矢印で示している。

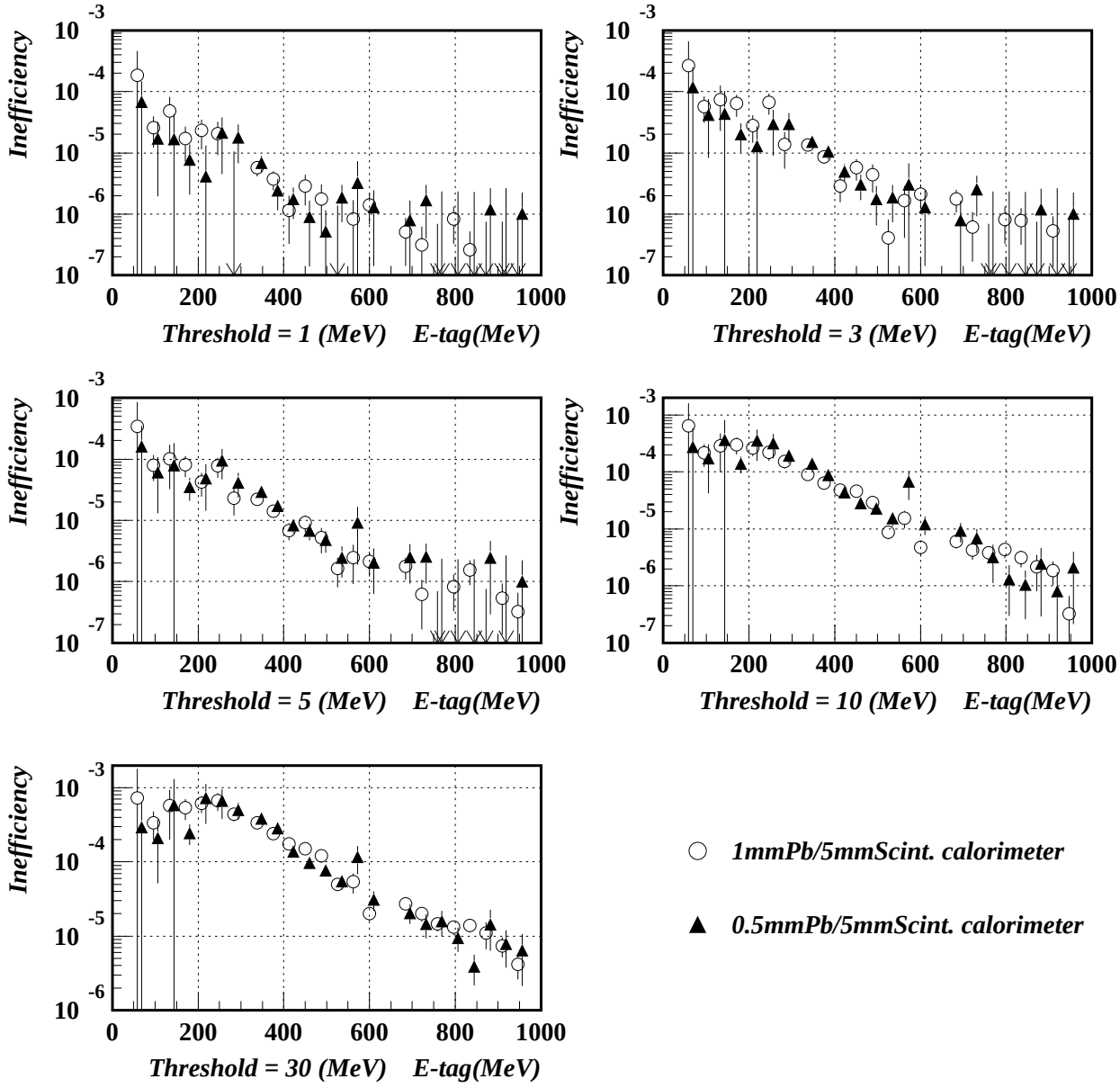


図 51: onefive カロリーメーター、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの光核反応による不感率。白丸は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの不感率、黒い三角は $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの不感率を示す。

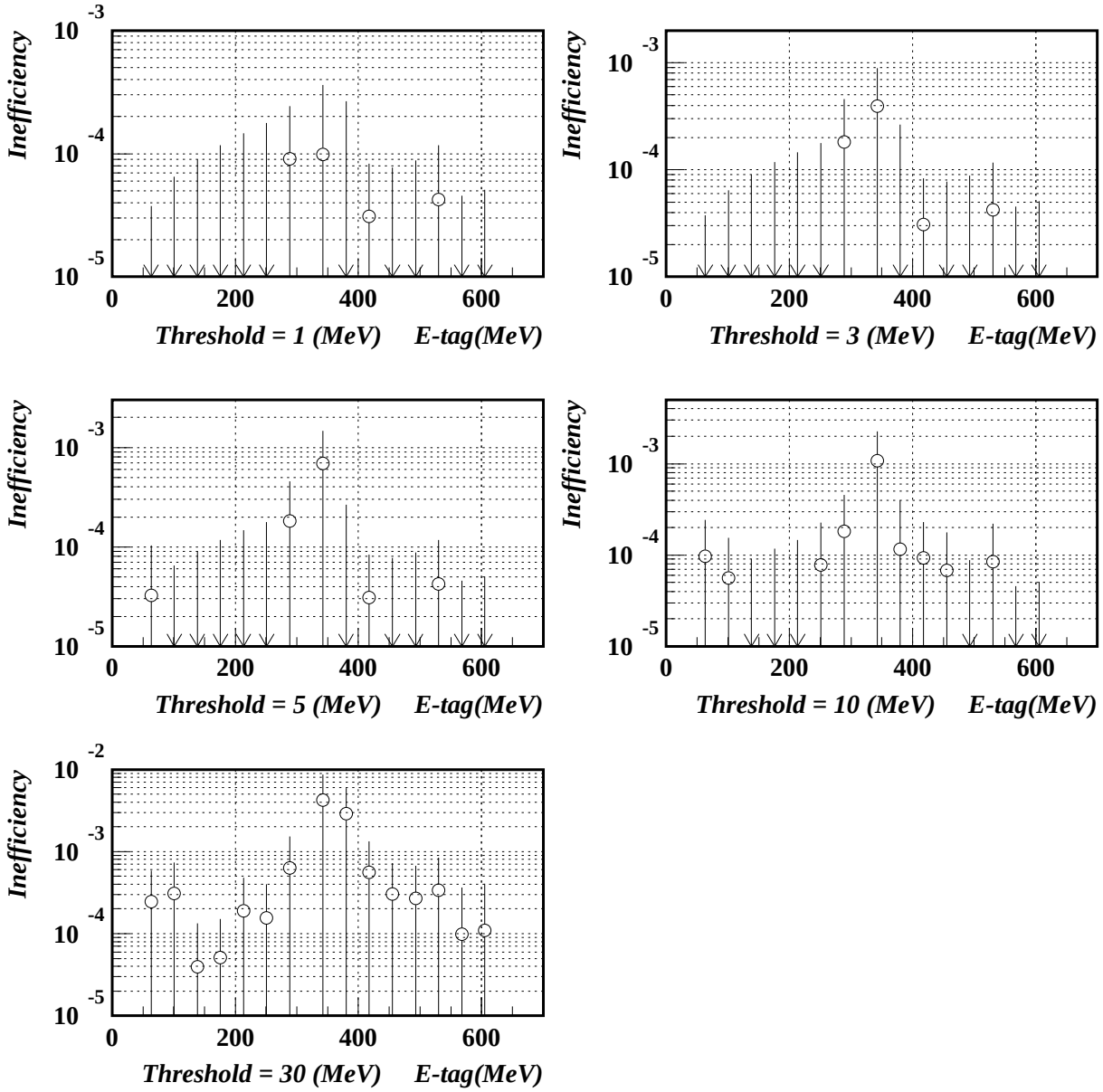


図 52: 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの光核反応による不感率

6 考察

この章では、入射光子のエネルギーが 400 MeV あたり以下のサンプリングカロリーメーターの E-cal 分布に見える二つのピークの意味を考える。次に 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの不感率の測定結果について考察し、最後に 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの不感率の測定結果をふまえて、サンプリングカロリーメーターの不感率の測定結果について考察する。

6.1 サンプリングカロリーメーターの E-cal の分布に見える山について

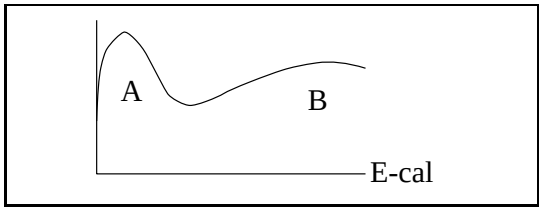


図 53: サンプリングカロリーメーターの E-cal の分布に現れる二つの山 A と B

図 53 のようにサンプリングカロリーメーターの E-cal の分布には、二つのピークが現れる。これは、40 *cm Scintillator* カロリーメーターの E-cal 分布には現れていないので、私は鉛の中で起こった現象が原因であると考えた。

私の推論は次のようなものである。

A のピーク (0 ∼ 30 MeV) は 光子と中性子しか放出されなかった光核反応によるもの

B のピーク (70 ∼ 150 MeV) は陽子または π 中間子が放出された光核反応によるもの

まず B のピークについて理由と説明する。陽子は電荷を持っているため、クーロン障壁にじゃまされて原子核から出にくい（付録 A）。そのため、トンネル効果を経て放出された時は、数十 MeV 以上の高いエネルギーを持つ。陽子は物質中での飛程が短いために全エネルギーが観測されて高い領域に分布するようになる。 π 中間子の光生成が起こった場合も、生成粒子は観測され、同じようなところに分布する。

また付録 C.1 の、E-cal のしきい値以下の事象の中性子の計測数の平均を見ると、 B (70 ∼ 150 MeV) の領域を含めたた時、中性子の計測数がすこし小さくなっている。これは、陽子や π 中間子を放出したために中性子が放出されるためのエネルギーが減ったからだと考えられる。図 53 の二つピークの間の谷のところで中性子の計測数が一番多くなっているので、そのあたりまでは陽子はでて来ることができず、中性子によって光核反応のエネルギーが放出されている。

次に A (0 ∼ 30 MeV) のピークの理由を説明する。このピークは光核反応で生じた主に、低エネルギーの光子と、中性子が落したエネルギーである。中性子は陽子と違ってクーロン障壁を感じることがないので、入射光子のエネルギーが低くても放出されやすい。だから、 A のピークは、入射光子のエネ

ルギーが低いところから現れている。入射光子のエネルギーが大きくなると、陽子や π 中間子を放出しやすくなるので、それらの割合が大きくなり A のピークは消えていく。

光核反応は核子放出のしきい値を越えると、光子よりも核子の放出の方が起こりやすい。したがって、放出されるそれぞれの光子のエネルギーは、常に核子放出のしきい値程度だと考えると、入射光子のエネルギーが何であっても、光核反応を起こしたあとに放出される光子の全エネルギーはほぼ一定ということになる。つまり、 A のピークの位置は入射光子のエネルギーによらず、一定である。

また、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの A のピークの位置は $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの A のピーク位置より約２倍大きい。この差は、サンプリング効果が原因である。各カロリーメーターの較正係数にはサンプリング効果の、補正も含まれている。 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで鉛の中とシンチレーターの中で落すエネルギーの比は７対３、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ では５．５対５である。つまり、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターであればシンチレーターの中で落したエネルギーを７／３倍することで入射光子エネルギーとしている。しかし、光核反応が起こった時のように、低エネルギーの光子がカロリーメーター内に入った時は、何枚も鉛の板を貫通するということはなく、サンプリング効果をそれほど起こしてない。実際に測定しているエネルギーは較正係数をかけているので、本来の光子のエネルギーが７／３倍になって見えている。このことが起こっているならば、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの A ピーク位置は $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのピーク位置の

$$\frac{7/3}{5.5/5} = 2.1$$

のところにあるはずである。実際にデータと比べてみると、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターでの A のピーク位置が約 20 MeV 、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターでの A のピーク位置が約 10 MeV で、私の考察の結果と一致する。

次に、光核反応の事象が６個それぞれのカロリーメーターで落したエネルギーの割合を見てみた。図 55 は A のピーク (E-cal $\leq 30\ MeV$) の事象について、図 56 は B のピーク (E-cal $\geq 70\ MeV$) についてのデータである。横軸は全エネルギー損失を 1 として、各カロリーメーターに落したエネルギーを規格化した値である。反応数が一番多い一番目のカロリーメーターに注目すると、図 55 では図 56 に比べて分布がエネルギー損失の割合が 1 から小さい方に広がっている。このことは、飛程の長い粒子が複数ののカロリーメーターに渡ってエネルギーを落していることを表す。このことも、 A のピークの事象が中性子を含んでいることを示している。

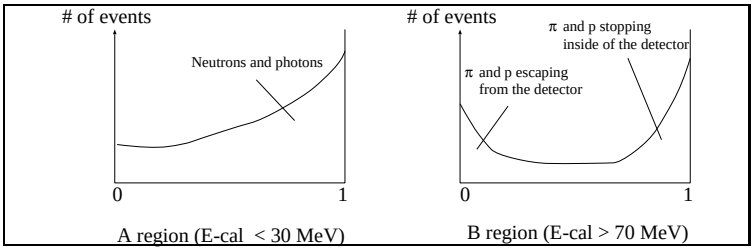


図 54: 各 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの測定エネルギーの割合の分布の説明

また、図 56 の一番目のカロリーメーターでは、図 55 とは違って 0. 付近に事象数が多い。これは、 B のピークに含まれる高エネルギーの陽子などの荷電粒子が、カロリーメーターの外に逃げた事象である。荷電粒子は止まる直前に大量のエネルギーを落すので、図 56 の一番目のカロリーメーターの分布図では、カロリーメーター内にすべてのエネルギーを落した事象の山が 1. 付近に、荷電粒子がカロリーメーターの外に逃げた事象の山が 0. 付近に現れている。図 54 に図 55 と図 56 の内容の違いを示す。

以上が、サンプリングカロリーメーターの E-cal の分布に現れるピークの原因に対する私の考察である。

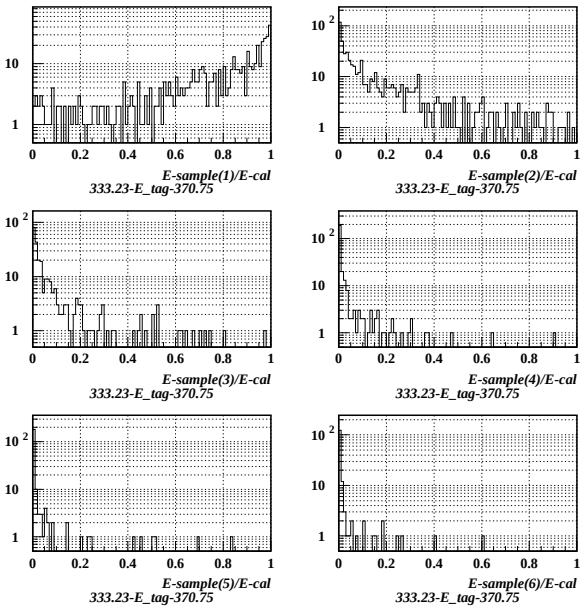


図 55: E-cal が 30 MeV 以下の事象に対する、各カロリーメーターの測定エネルギーの割合

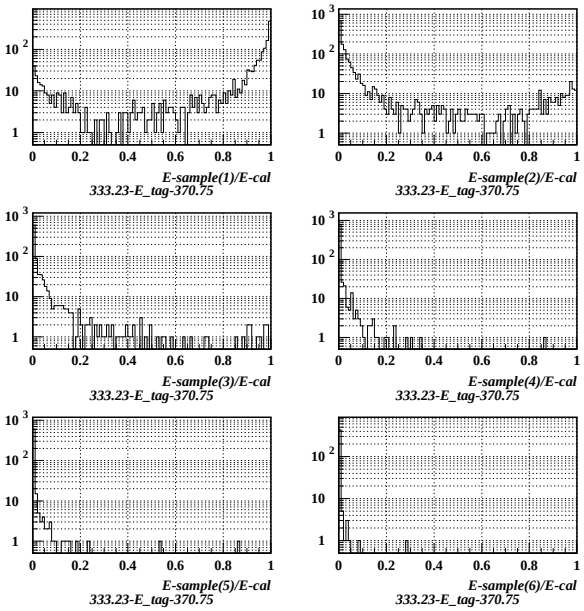


図 56: E-cal が 70 MeV 以下の事象に対する、各カロリーメーターの測定エネルギーの割合

6.2 40 *cm Scintillator* カロリーメーターについて

6.2.1 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* からのしみ込み

この小節で考察するのは、 40 *cm Scintillator* の実験で、後ろの 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* で起こった光核反応より発生した核子が 40 *cm Scintillator* にしみ込んできた場合である。簡単にまとめると以下のような場合である。

光子が 40 *cm Scintillator* を *Punch Though* する。

↓

後ろの 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* カロリーメーターの中で光核反応を起こす。このとき、1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* では測定エネルギーは 1 MeV 以下である。(40 *cm Scintillator* 中の光核反応と判断される。)

↓

1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* の中で光核反応を起こして出た核子および光子が 40 *cm Scintillator* に入ってきてエネルギーを落す。

この場合の摸式図を図 57 にあらわす。

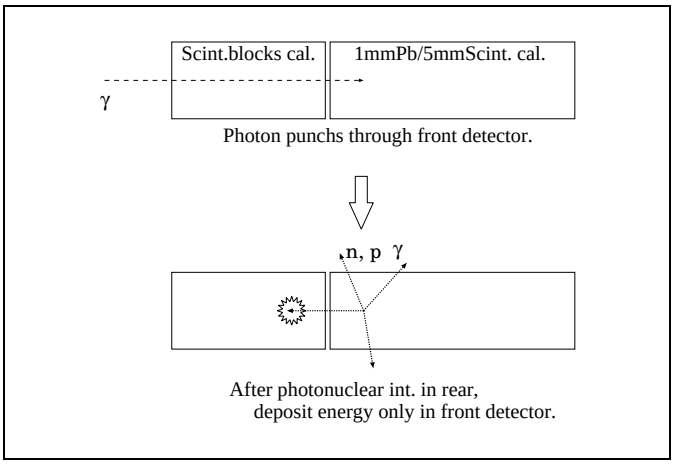


図 57: 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* で光核反応が起こった後、放出された粒子が 40 *cm Scintillator* の中だけでエネルギーを落す場合の摸式図

このような事象は *Punch Though* を起こしたとみなされていないので 4.5.1 節で考察した *Punch Though* による背景事象には含まれない。このような事象がどのくらいあるのか、次のような方法で見積もった。

40 *cm Scintillator* カロリーメーターの不感率を算出する時は、4 個のカロリーメーターすべてを

使ったが、光子ビームの上流から２個だけ、３個だけを用いて不感率の算出と同じ方法で、それぞれ解析を行なった。

もし、上で述べたような $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターからのしみ込みがあるとしたら、$40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターを上流の３個だけ使った時は４個使った時よりも $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターから見た立体角が小さいので、しみこみの数も小さくなる、つまり、不感率も小さくなるはずである。上流の２個だけ使った場合はさらに数が減るはずである。

ところが、図 58 の二つの不感率と図 8 のしきい値が 30 MeV の不感率を比べてみると、これら三つの不感事象数に相関があるので誤差だけでは判断できないが、非常に近い値である。つまり、後ろの $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターから余計な事象が入ってきていないということになる。

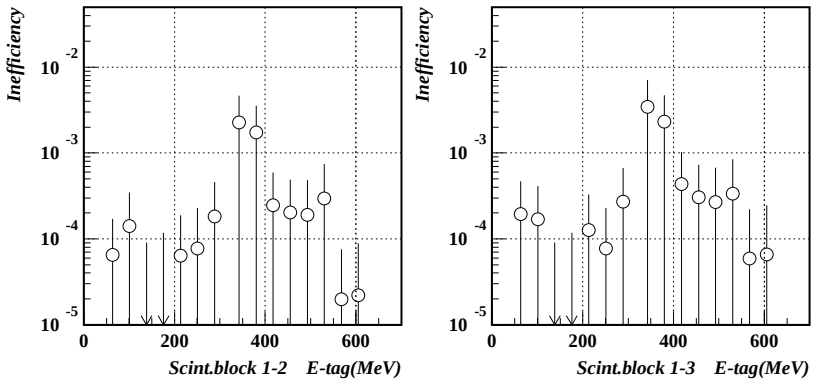


図 58: 上流の２個（左）および３個（右）のカロリーメーターだけを使って算出した $40\ cm\ Scintillator$ の不感率の結果。カロリーメーターのしきい値は 30 MeV である。

つぎに、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの中で起こった光核反応の数が、４個のカロリーメーターによって、どのように異なるか調べてみた。もし後ろの $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターから $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターへのしみ込みがあれば、４番目のカロリーメーターだけでエネルギーを落している事象の数、つまり、４番目のカロリーメーターで光核反応を起こしたように見える事象の数が多くなるはずである。

一つのカロリーメーターの中で光核反応が起こったという条件は、そのカロリーメーターの測定エネルギーが 1 MeV 以上、ほかの３個のカロリーメーターの測定エネルギーが 1 MeV 以下であることとした。表 15 に計算結果と実際のデータから得た値を示す。２番目のカロリーメーターの中で起こった光核反応の数が 1. となるように規格化している。計算には、物質を放射長 x 進んだ時の光子の数が $e^{-\frac{7}{9}\frac{x}{X_0}}$ に比例しているということを利用した。

１番目のカロリーメーターの値を除くと、ほかのカロリーメーターに対する値は実験と計算が一致している。データの値で１番目のカロリーメーターの中で起こる事象の割合が大きいのは、カロリーメー

	Scint.block 1	Scint.block 2	Scint.block 3	Scint.block 4
計算	1.20	1.00	0.82	0.68
データ	1.63	1.00	0.83	0.67

表 15: 4 個の 40 *cm Scintillator* カロリーメーターそれぞれで起こった光核反応の事象数の比。2 番目のカロリーメーターにで起こった事象数を 1. となるように規格化している。

ターの中で光核反応が起こった後、光子の入射面から逃げていく事象が多いからである。

以上のことを考慮すると、後ろの 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* カロリーメーターからしみこむような事象はほとんどない。これは、同じように後ろに 1*mm Pb*/ 5*mm Scint.* カロリーメーターを使っている 0.5*mm Pb*/ 5*mm Scint.* カロリーメーターの実験でもいえることである。

6.2.2 π_0 の光生成による背景事象

π_0 の光生成は 40 *cm Scintillator* カロリーメーターに対して大きな背景事象となる。

光と核子との反応の中で π 中間子の光生成がある。原子核が光子を吸収した後、そのエネルギーを π 中間子の放出として失う現象で、核子の放出を伴う。 π 中間子の光生成はその質量をしきい値として 140 MeV あたりから反応断面積が大きくなり、 300 $\sim$ 350 MeV に大きな共鳴のピークを持つ。ピークの高さは核子あたり 400 $\mu barns$ くらいである。

π^+ や π^- などの荷電粒子が出た場合は観測しやすいので背景事象とはなりにくいが、 π^0 が出た時が問題になる。 π^0 は 8.4×10^{-17} 秒の短い時間で、ほとんどが $\pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma$ 崩壊でふたつの光子に崩壊する。サンプリングカロリーメーターの場合は光子をとらえるのに十分な厚みがあるので問題にはならない。しかし 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの場合は、中心から側面までの距離が 0.18 放射長とかなり短く、これらの光子を見逃すことでこれが背景事象となる。

π^0 の質量は 135 MeV なので、光生成が起こった場合には、 π^0 が光子のエネルギーを持っていった分、同時に放出される中性子の数は少なくなることが予想されるが、複数の中性子を放出する事象もあり、4.4.2 節で触れたように要求する中性子の数を二つにしてもこの背景事象を完全には取り除けない。

π^0 の光生成を含む光核反応の反応断面積 (図 59) を見ると、 300 $\sim$ 350 MeV に π 中間子の光生成の共鳴のピークが見える。 40 *cm Scintillator* カロリーメーターの不感率 (図 52) に見えるピークと比べてみると、不感率のピークの位置は π 中間子の光生成の共鳴のピークの位置と一致する。したがって、このピークは π^0 の光生成から生じたものである。

40 *cm Scintillator* カロリーメーターの実験は、サンプリングカロリーメーターの中で、シンチレーター内で起こった光核反応の大きさを見積もるために行なった。しかし、 40 *cm Scintillator* ではサンプリングカロリーメーターでは見逃さないはずの π^0 中間子の光生成を不感事象として数えている。したがって、6.3 節でサンプリングカロリーメーターのシンチレーター中の光核反応の寄与の考察では、エネルギーが π^0 中間子の光生成のしきい値より上の領域のデータは使えない。

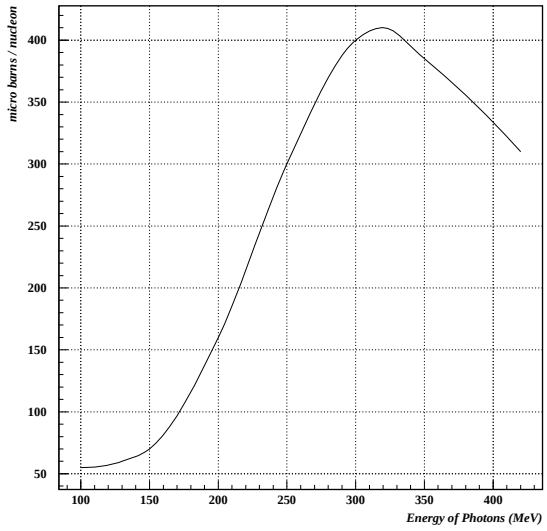


図 59: π^0 中間子の光生成を含む、光核反応の反応断面積。横軸は入射光子のエネルギー、縦軸は核子あたりの反応断面積。[7]

6.3 サンプリングカロリーメーターの不感率について

6.3.1 シンチレーターの中での光核反応の効果

サンプリングカロリーメーターの実験では、鉛の中で光核反応が起こった場合とシンチレーターの中で光核反応が起こった場合とで中性子検出器の検出効率が違う。このときの検出効率を鉛の中で起こった光核反応の効果とシンチレーターの中で起こった光核反応の効果が混ざった状態で、一つの検出効率と考えるとサンプリングカロリーメーターの不感率の結果を正しく得ていない可能性がある。そこで、鉛の中およびシンチレーターの中で起こる光核反応の比率を見積もってみた。

$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターと $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの不感率測定の結果とを例にとって考える。また、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターでは、6.2.2 節で述べた π 中間子の光生成による背景事象が、入射光子のエネルギーが 140 MeV 以上で混じってくるので、入射光子のエネルギーが約 140 MeV 以下の不感率を用いた。 E-cal のしきい値は 30 MeV のものを用いた。

$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、 $40\ cm\ Scintillator$ カロリーメーターの不感率をそれぞれ $Ineff_{1/5}$ 、$Ineff_{Scint}$ と表すと次の式が成り立つ。

$$Ineff_{1/5} = \frac{N_{Pb}\sigma_{\gamma N}^{Pb}(\eta_{Pb}/\eta_{1/5}) + N_{Scint}\sigma_{\gamma N}^{Scint}(\eta_{Scint}/\eta_{1/5})}{N_{Pb}(\sigma_{\gamma N}^{Pb} + \sigma_{EM}^{Pb}) + N_{Scint}(\sigma_{\gamma N}^{Scint} + \sigma_{EM}^{Scint})} \tag{7}$$

$$Ineff_{Scint} = \frac{\sigma_{\gamma N}^{Scint}}{\sigma_{EM}^{Scint} + \sigma_{\gamma N}^{Scint}} \tag{8}$$

ここで、

N_{Pb}, N_{Scint} ： 鉛／シンチレーターの組一組での 1 cm^2 あたりのそれぞれの原子数

$\sigma_{\gamma N}^{Pb}, \sigma_{\gamma N}^{Scint}$ ： 光核反応の反応断面積

$\sigma_{EM}^{Scint}, \sigma_{EM}^{Scint}$ ： 電磁気相互作用の反応断面積

η_{Pb}, η_{Scint} ： 中性子検出器の検出効率

$\eta_{1/5}$ ： $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの実験で得た中性子検出器の検出効率

ただし、添字の Pb は鉛での値、 Scint はシンチレーターでの値を示す。

式 (7) の分子の $N_{Pb}\sigma_{\gamma N}^{Pb}$ と $N_{Scint}\sigma_{\gamma N}^{Scint}$ の比が $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中での、鉛とシンチレーターの中で起こった光核反応の事象数の比になる。

$\sigma_{\gamma N}^{Scint}$ は式8から計算できる。η_{Pb}の値はわからない。しかし、$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ 、$0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子の計測数の平均値は互いに近い値であるのに比べ 40 $cm\ Scintillator$ カロリーメーターの検出効率は非常に小さいので、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの検出効率は鉛での検出効率に近いと仮定し、 $\eta_{Pb} \sim \eta_{1/5}$ として計算を進める。

ここで、入射光子のエネルギーが 100 MeV の時に、鉛の中での光核反応の反応断面積以外の数値を代入して計算すると、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの鉛の中で光核反応を起こす割合は表 60 となる。

入射光子のエネルギー (MeV)	鉛の中で光核反応を起こす割合
65	0.98 ± 1.11
100	0.93 ± 0.16
135	1.00 ± 0.44

図 60: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターで鉛の中で光核反応が起こった割合

入射光子が 65 MeV の時に誤差が大きいのは、 $\eta_{1/5}$ の誤差 $\Delta\eta_{1/5}/\eta_{1/5}$ が $\sim 75\ \%$ と、大きいからである。表60 結果と、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ と $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの中性子の計測数の平均 μ の値が近く、逆に 40 $cm\ Scintillator$ カロリーメーターの μ はとても小さいことを考えると、サンプリングカロリーメーターで起こった光核反応は大半が鉛の中で起こっている。

6.3.2 鉛とシンチレーターの厚さの比について

6.3.1 節の議論から、ここではサンプリングカロリーメーターの中のシンチレーター内での光核反応の寄与は小さいので、鉛とシンチレーターの効果を一体として算出した $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリー

メーターと、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの光核反応による不感率の測定結果は正しいとして、議論を進める。

図 51 の $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの点と $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの点の二つを見比べると誤差の範囲で一致しているが、入射光子のエネルギーが $\sim 200\ MeV$ 以下の領域では E-cal のしきい値にかかわらず、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの結果の方が低い不感率を維持している傾向がある。この原因は、 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターと $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの間の鉛の板の厚さの差からくる、サンプリング効果[j] の差によるものである。

6.3.1 節で述べたように、サンプリングカロリーメーターの入射光子のエネルギーが 400 MeV あたりから下の時に、 E-cal の分布に見える二つのピークのうち低エネルギー側のものは、光核反応で生じた低エネルギーの光子と中性子によるものである。 $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの鉛の厚さは $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの鉛の厚さの２倍あるので、低エネルギーの光子を吸収しやすい。つまり、 E-cal が 0 MeV 近辺の事象の全事象数に対する割合は $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの方が $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターのそれよりも大きくなる。

この E-cal が低い方に現れるピークは、入射光子エネルギーが大きくなると、次第に消えていく。したがって、不感率も $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターと $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの間では、差がなくなっていく。

[j] サンプリング効果とは、低エネルギーの光子などがサンプリングカロリーメーターの中に入り、鉛の中で全エネルギーを落として観測できなくなる効果である。

7　結論

$1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター、 $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーター共に、カロリーメーターのしきい値を 5 MeV 以下に設定した場合に、光核反応による不感率は、表 1 で示されている「 KAMI 」実験で要求されている値を十分に満たす。

光核反応の不感率は、サンプリングカロリーメーターの鉛の厚さが 1 mm の時と 0.5 mm の時とで、誤差の範囲で一致している。(図 51)。入射光子のエネルギーが∼ 200 MeV 以下のエネルギー領域ではサンプリング効果により $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ カロリーメーターの方が不感率が小くなる傾向が見える。

サンプリングカロリーメーターでのシンチレーター内で起きた光核反応による不感率への寄与は 10 % 以下である。

謝辞

はじめに、私が学部生のころから３年間、高エネルギー物理学実験にたずさわる機会を与えて下さった長島順清先生に篤く感謝します。私の高エネルギー物理学に対する興味を満たし、知識を広げることができた充実した日々を過ごすことができました。ありがとうございました。

いつも私の疑問に答えていただき、直接ご指導してくださった山中卓先生、ありがとうございました。常に斬新なアイディアやヒントを与えてくださり、私の物事に対する考え方の幅も広がりました。また、物理学を研究するための姿勢も学ぶことができました。いつも身近なところで私を支援してくださり、今回の実験でよい結果を得ることができました。深く感謝しています。

瀧田正人先生は、ゼミでいろんな知識を与えて下さったことをはじめ、私のちょっとした質問にも丁寧につき合っていただき、いつも的確なお答えをくださいました。ありがとうございました。

羽澄昌史先生は、ミーティングなどにおいて、私の研究に対してよくご意見をくださいました。研究を進めるにあたって、羽澄先生の御意見は非常に参考になりました。ありがとうございました。

原隆宣先生には、いつも私のいたらない質問に答えていただき、お世話になりました。どんな質問にも親切に答えていただき、研究を進める上で大きな助けとなりました。また、研究以外の場でもいろいろとお世話していただき、楽しい思いをすることができました。

秘書の続木さんは、事務で私の身の回りのことをお世話してくださり、心地よく研究を進めることができました。御迷惑をおかけしたこともありましたが、時にはお話相手にもなっていただき、楽しく過ごすことができました。ありがとうございました。

鈴木一郎さんには、特に今回の実験についての質問に対して、細かいところまで答えていただきました。解析の上で、困難な状況に陥った時にはいつでも相談にのっていただき、手助けをしてくださいました。ありがとうございました。

Karim Trabelsi さんは、欧州原子核研究所の Aleph における高エネルギー物理学実験についてお話しを聞かせてくださり、また、研究以外の場でもいろいろ楽しいお話のお相手になってくださいました。ありがとうございました。国際実験の多い高エネルギー物理学の世界の楽しさを知ることができました。

この論文で取り上げた ES 171 実験の関係者の方々にもたいへん感謝しています。 KEK の稲垣先生、新川先生、佐藤先生、奥野先生、佐賀大学の塚本先生、渡辺君、宮原君、大阪大学核物理研究センターの中野先生、松村さん、米国フェルミ加速器研究所の Bob Hsiung 先生、カリフォルニア工科大学の有坂先生、ありがとうございました。 ES 171 実験を通じて、たくさんの貴重な御意見、御助言をいただいたこと、また、いろんな議論を交わすことができたことは、私が解析進める上でなくてはならないことでした。

大阪大学博士過程に在学中の川崎さん、貞本さん、千代さん、住澤さん、日高さん、柳幸さんには、あらゆることで相談にのっていただきました。先輩方の研究の手を止めてしまったこともありましたが、快く私の相手をしてくださいました。ありがとうございました。

修士過程２年生の火口君、北條君、山田君、森君には公私に渡ってお世話になりました。良き友としていろいろと相談にものっていただき、楽しい研究生活を送ることができました。ありがとうございました。

修士過程１年生の新田君、原君、真鍋君、三宅君、および４年生のみなさんにとっては、先輩としていたらないところもありましたが、みなさんのおかげで、よい雰囲気のもとで研究を続けることができ

ました。ありがとうございました。
　最後になりましたが、研究室技官の金子先生、および回路室、計算機室、原子核実験グループの方々、そして私が研究生活の中でお世話になったすべての方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

A　光核反応

A.1　光核反応の原理

光核反応とは原子核が光を吸収し、そのエネルギーを核子や、低エネルギーの光子の放出という形で失う現象である。

その過程として次の二つがある。

1. 光によるイオン化の過程
2. 光子が原子核の中の陽子と中性子の組に反応する過程

1. は光電効果と同じで、原子核に光子が吸収された後、一つの核子が高いエネルギーをもらい、核外に飛び出してくる過程である。この場合、光子は原子核の中の一つの核子にだけ反応するので、光子のエネルギーが上がると飛び出してくる核子のエネルギーも上がる。光電効果と同じように、運動量保存のために飛び出す核子の運動量を残った原子核が受け持たないといけないので、光子のエネルギーが大きくなると、この反応の割合は減ってくると思われる。

2. の効果は３つの過程に分けることができる。「光子の吸収」「核子の熱化」「冷却過程」である。

光子が原子核の中にはいってくると、核の中の陽子は光子の電場を感じて図 61 のように、一方に引きずられる。このとき、中性子は重心を保つために陽子とは反対の方向へ移動する。このようにして、光子のエネルギーを吸収することで、原子核内で分極した状態となる。

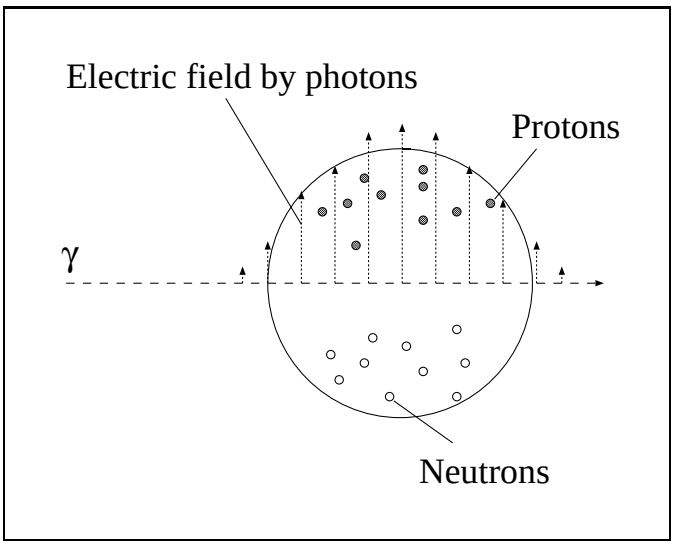


図 61: 光子を吸収して分極した原子核

次にこれらの核子は互いに核子の中で衝突を繰り返すことで、すべての核子が平均的なエネルギーを持つようになる。これが、熱化の過程である。

最後に核子や、低いエネルギーの光子を放出することで、原子核は冷却される。1. の過程と違って多くの粒子に光子のエネルギーが分配されるので、光子のエネルギーが変わると、飛び出してくる粒子の数は変わるが、それらのエネルギーは一定である。

私が今回実験を行なった光子のエネルギー領域では、 2. の効果による光核反応を主に見ていたと考えられる。

A.2　中性子放出と陽子放出の違い

付録 A.1 の議論では、中性子と陽子に差はない。しかし、私の考察では、陽子の方が中性子に比べて放出されにくい。この節でそのことについて説明する。

中性子と陽子の決定的な違いは電荷である。そのため、原子核から外に飛び出していく時、中性子は核力のポテンシャルしか感じないが、陽子は核力のポテンシャルのほかにクーロンポテンシャルも感じることになる。

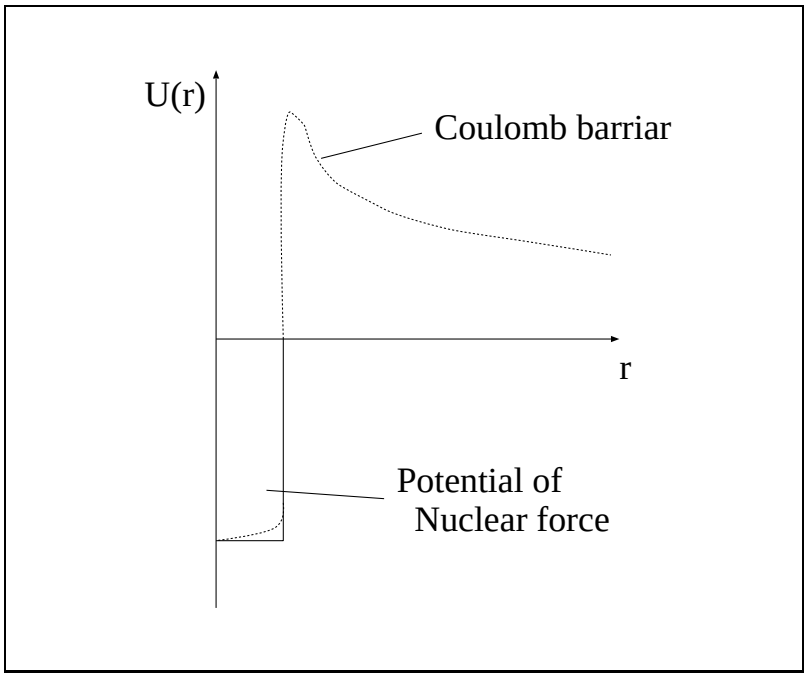


図 62: 陽子が感じるクーロン障壁。実線の部分が核力のポテンシャル、点線がクーロンポテンシャル。

図**??**で、中性子の場合は核力のポテンシャルを越えると核外に出ることができる。しかし、陽子の場合はクーロン障壁があるので、トンネル効果の結果出てくることになる。このことから陽子は中性子に比べて原子核から出にくく、出てくる陽子の平均的なエネルギーは中性子のそれよりも高くなると考えることができる。

また、以上のことを考えると同じエネルギーの光子が吸収された場合、陽子が出ると中性子の放出数

が少なくなるということが言える。陽子の放出には中性子の放出よりもエネルギーを要する。そのため、陽子がエネルギーを持っていくことで、中性子の放出に必要なエネルギーが少なくなり、中性子の放出数が減る。π 中間子が放出された時も同じことがいえる。実際に付録 C.1 でも、カロリーメーターの測定エネルギー E-cal が大きい部分では μ が少しだが小さくなる傾向が見られる。わたしは、これは上に述べた理由からだと考えた。

B　タギングシステムの較正

となりあうタギングカウンターに入る電子の運動量の差は、もともと、 10 MeV/c という設計だった。しかし、解析を進めるにつれ、この値が本当に正しいのか疑わしくなってきた。この値を正確に求めるために、タギングカウンターの較正を行なった。

ふつう、タギングカウンターはカロリーメーターの較正を行なう時のものさしの役目をするのだが、そのものさし自体の較正を行なうので、基準が存在しない。そこで、もっとも構造が単純である、KTeVCsI カロリーメーターの較正も兼ねて、同時にフィッテイングで較正を行なうことにした。較正には $Tag\Sigma$ トリガーの事象を使った。

較正に用いた KTeVCsI カロリーメーターについて　今回タギングシステムの較正に用いる KTeVCsI カロリーメーターは幅が縦横 5 cm 、奥行きが 50 cm (27 放射長) の直方体の pure CsI の結晶で、同じものを 9 個、図 63 のように積み上げて使用した。

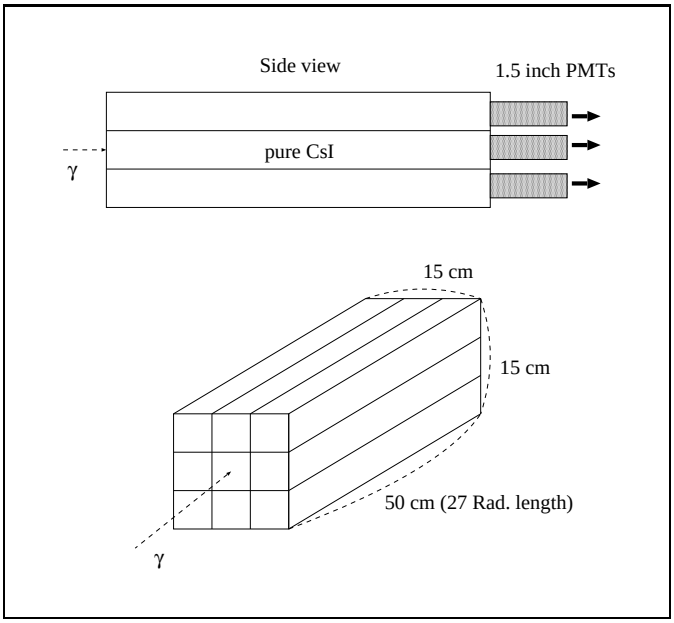


図 63:　KTeVCsI カロリーメーターの構造と実験時の配置

B.1　KTeVCsI カロリーメーターの電子ビームエネルギーのスピルタイミング依存の補正

KTeVCsI カロリーメーターのデータで、加速器から取り出した電子ビームのエネルギーのスピルタイミングとの依存性が見えた。そこで、この効果を補正することにした。

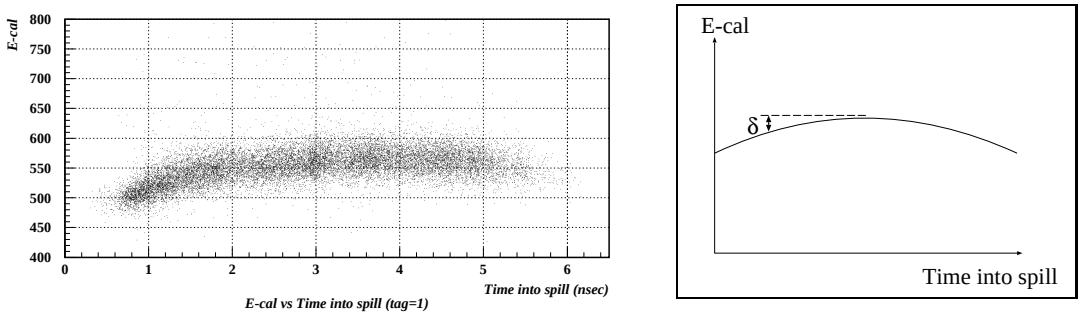


図 64: E-cal のスピルのタイミングの依存性。右はタギングカウンター 1 に入った事象を集めた。左のように正弦波でフィットしピークとの差 δ を補正項とした。

図 64 は KTeVCsI カロリーメーターの実験においてカロリーメーターの測定エネルギー E-cal とその事象のスピル中のタイミングの相関を示したものである。電子ビームの引き出しによって正弦波の形となった電子ビームのエネルギーの分布の形が E-cal に現れている。この分布の形を平らにするために、図 64 のように、正弦波でフィットした後、ピーク位置との差を補正項として較正の時に用いることにした。

B.2 タギングシステムの較正

KTeVCsI カロリーメーターのスピルタイミングの補正の後、タギングカウンターの補正を行なった。

付録 B.2 の電子ビームのエネルギーのスピルタイミング依存性の補正を考慮した上で、光子のエネルギー E_γ とタギングカウンターの番号 Itag の間には次の関係が成り立っている。

$$E_\gamma = (E_{beam} \times 0.99) - (E_0 + Itag \times \Delta E_{tag}) \tag{9}$$

E_γ ： 光子のエネルギー

E_{beam} ： 電子ビームの運動量

E_0 ： 0 番目のタギングカウンターに入る電子の運動量

Itag : タギングカウンターの番号

ΔE_{tag} ： 隣り合うタギングカウンターに入るの電子の運動量の差

δ ： 電子ビームのエネルギースピル時間依存の補正項

E_{beam} にかかっている 0.99 という数は、ビームをシンクロトロンから引き出す時のエネルギー損失が 1 % 程度であるということを考慮した数である [8]。また、0 番目のカウンターとは、図 65 のように 1 番目のカウンターのとなりに便宜上作った仮想のカウンターである。

いま、定まっていないのは、 E_0 、 ΔE_{tag} と KTeVCsI カロリーメーターの較正係数である。そこで、E_0 、 ΔE_{tag} と 3 種類の電子ビームエネルギーに対する KTeVCsI カロリーメーターの較正係数を媒介

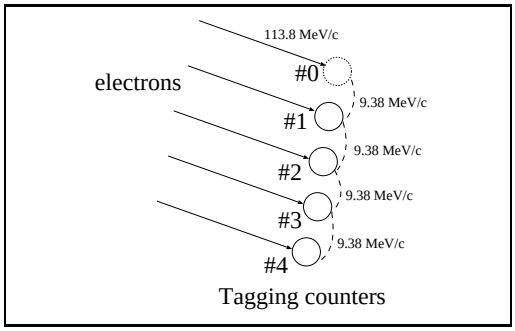


図 65: タギングカウンターに入ってくる電子の運動量

変数として式 10 を用いてフィットを行なった。 G は KTeVCsI カロリーメーターの較正係数である。

$$E_\gamma \times G = (E_{beam} \times 0.99 - \delta) - (E_0 + Itag \times \Delta E_{tag}) \tag{10}$$

媒介変数	フィットの結果
E_0 (MeV)	113.8 ± 0.1
ΔE_{tag} (MeV)	9.383 ± 0.003

表 16: フィットで求めた E_0 と ΔE_{tag} の値

δ は 電子ビームのエネルギースピル時間依存の補正項である。フィットの結果を表 16 に示す。もともとの、設計値は E_0 が 90 MeV 、 ΔE_{tag} が 10 MeV だったので、大きくずれていたことがわかった。私は今回の解析でここで新たに得た値を用いた。図 66 に較正後の、タギングカウンターで測定した光子のエネルギーと KTeVCsI カロリーメーターで測定した光子のエネルギーの相関を示す。きれいな直線性を保っており、原点を通る直線との比は、 1 % 以内である。

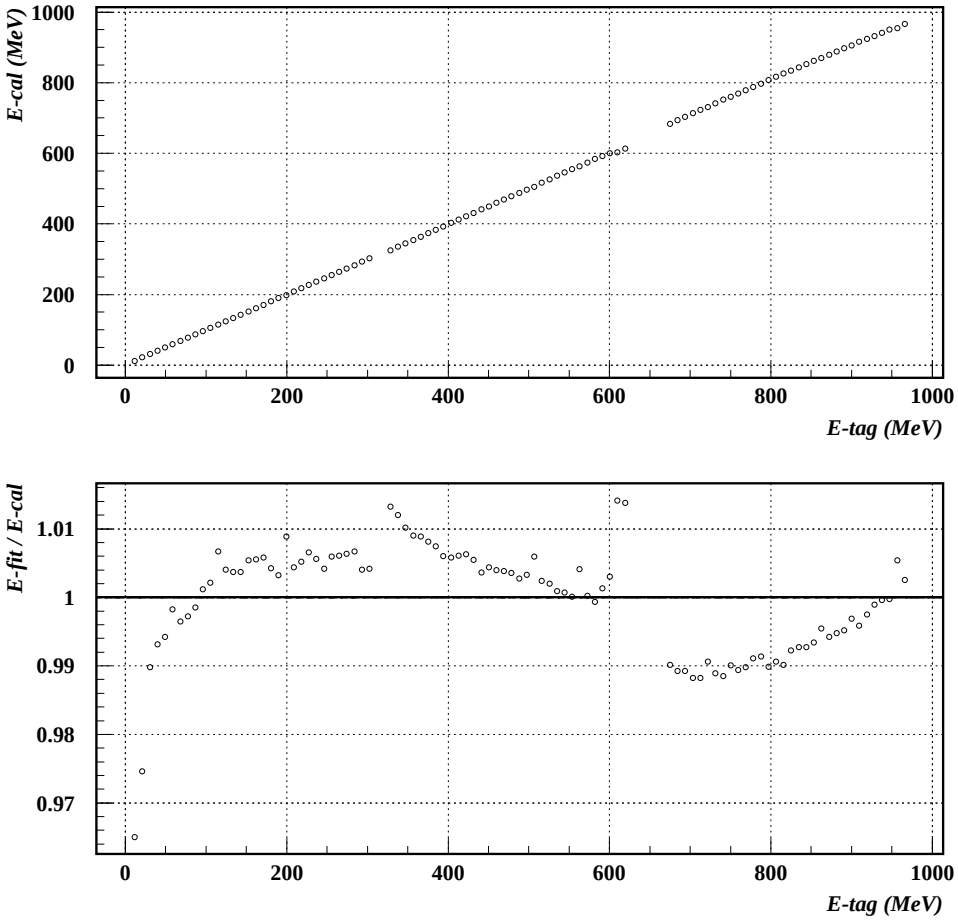


図 66: 較正後のタギングカウンターから計算した光子のエネルギーと KTeVCsI カロリーメーターの光子の測定エネルギーの関係 (上)。上のプロットを原点を通る直線でフィットしたあと、フィットの値と実際のデータの比をとったプロット (下)。

C　中性子検出器の検出効率に関するデータ

C.1　E-cal のしきい値以下の事象の検出効率の分布をとった時の、しきい値に対する平均値 μ の相関

E-cal に設定したしきい値以下の事象に対して、中性子の計測数の分布を作り、それを Poisson 分布でフィットした。その時の平均値 μ のしきい値による依存を図 67 から図 72 に示す。

電子ビームのエネルギーが 430 MeV のデータについては、事象数が少なく μ の変化も小さいのですべての事象を使って求めた μ を使った。

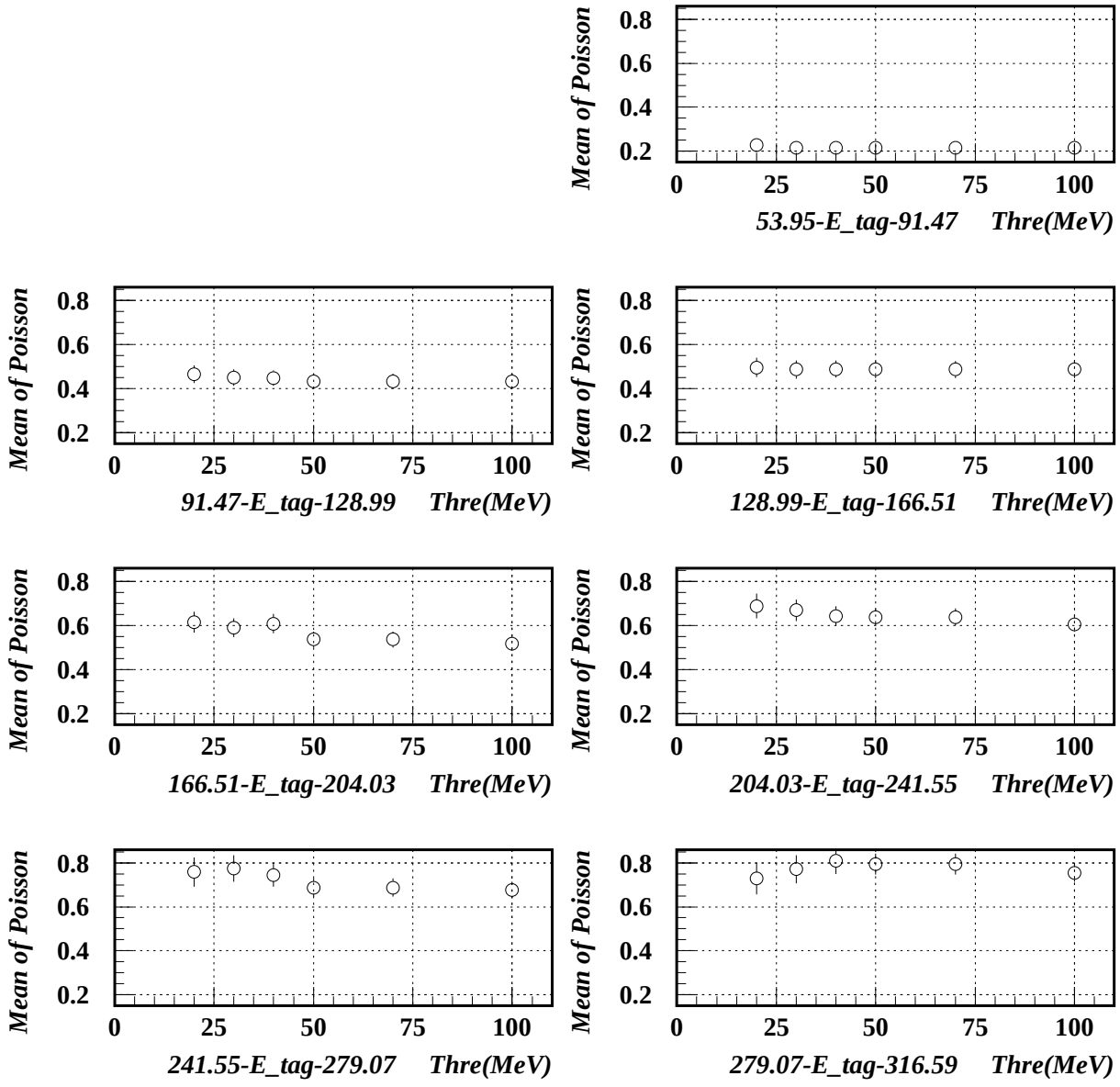


図 67: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 430 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化。カロリーメーターの測定エネルギーのしきい値を変化させている。

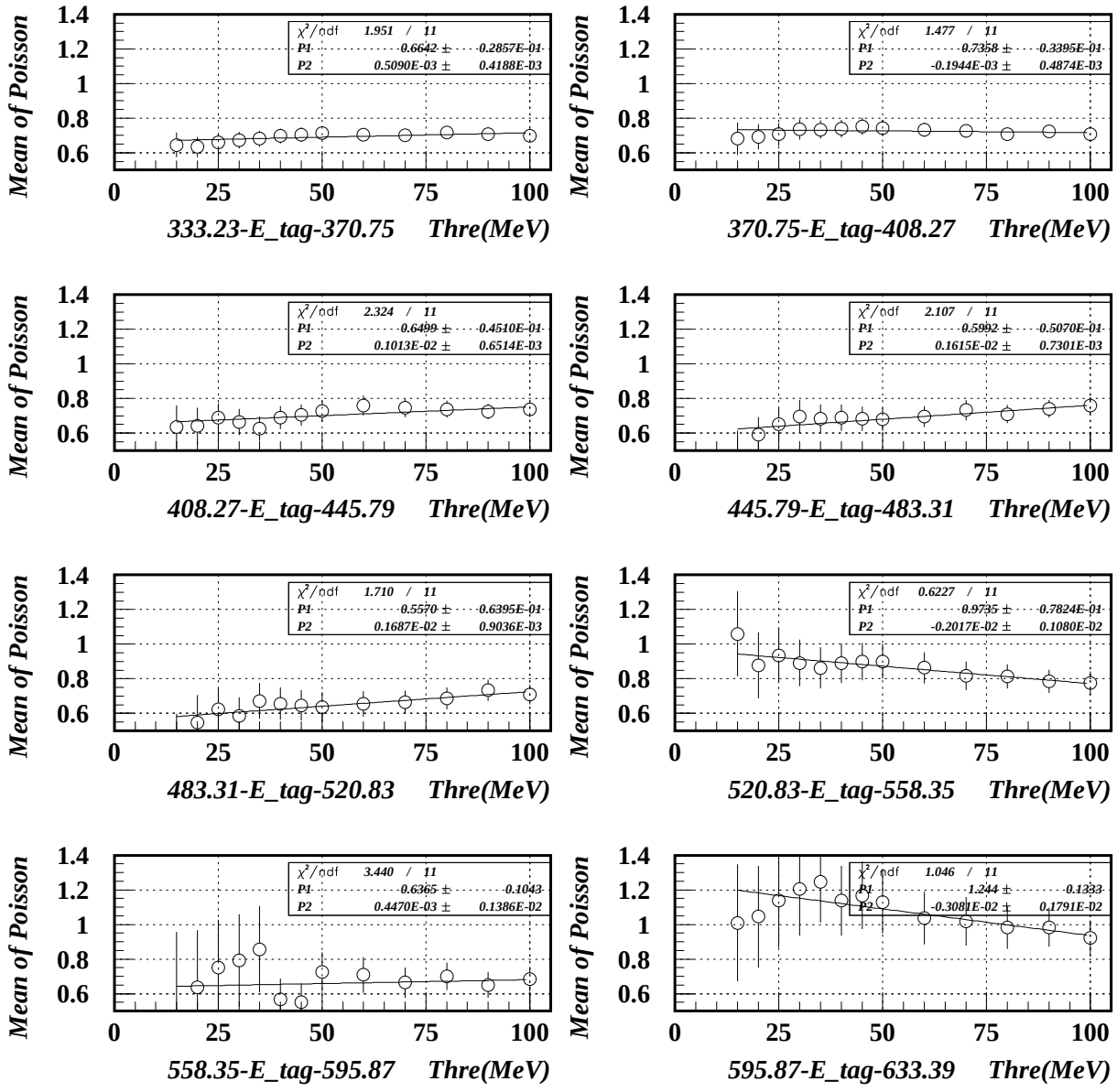


図 68: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 750 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化。カロリーメーターの測定エネルギーのしきい値を変化させている。

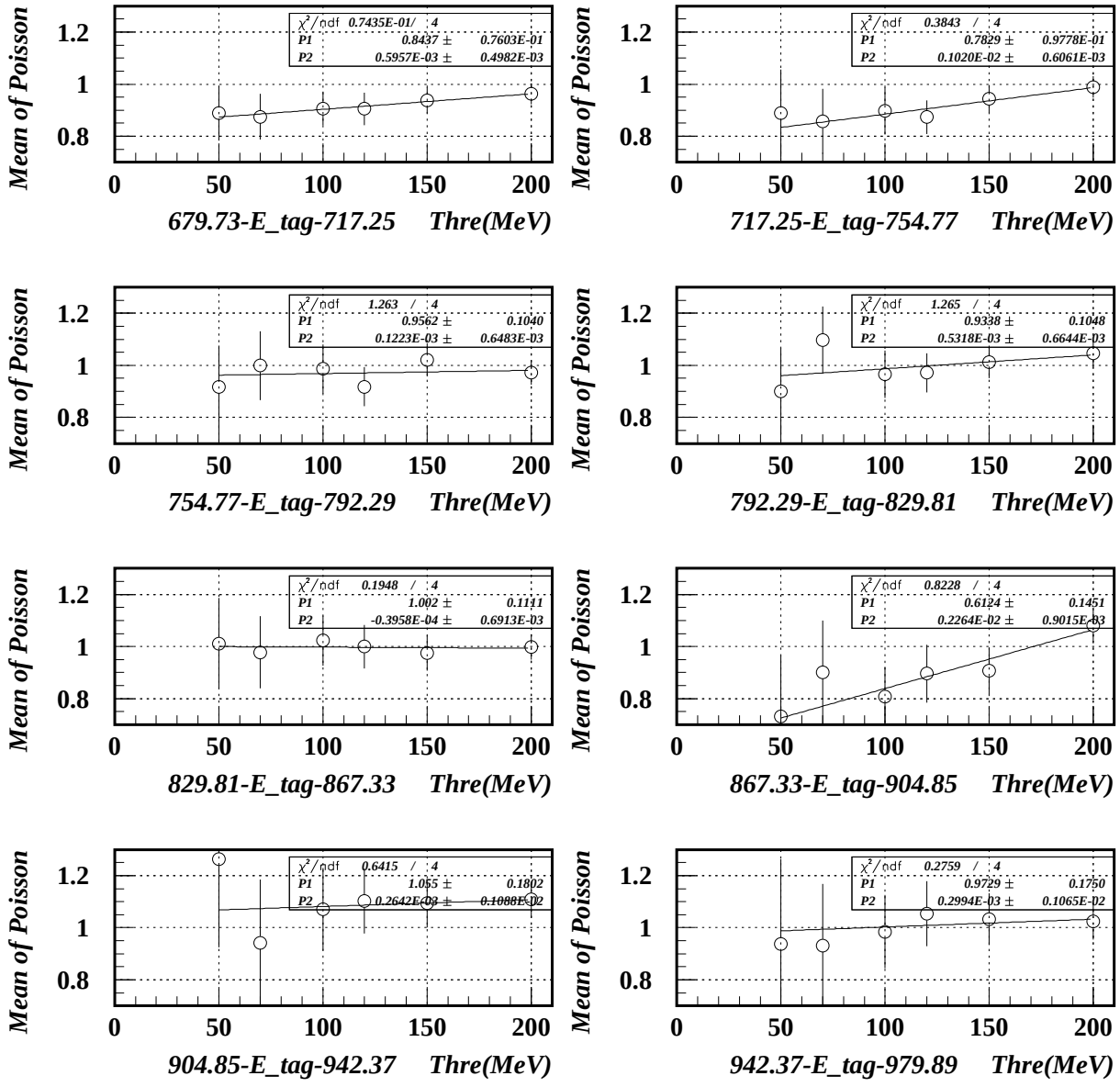


図 69: $1mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 1100 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化。カロリーメーターの測定エネルギーのしきい値を変化させている。

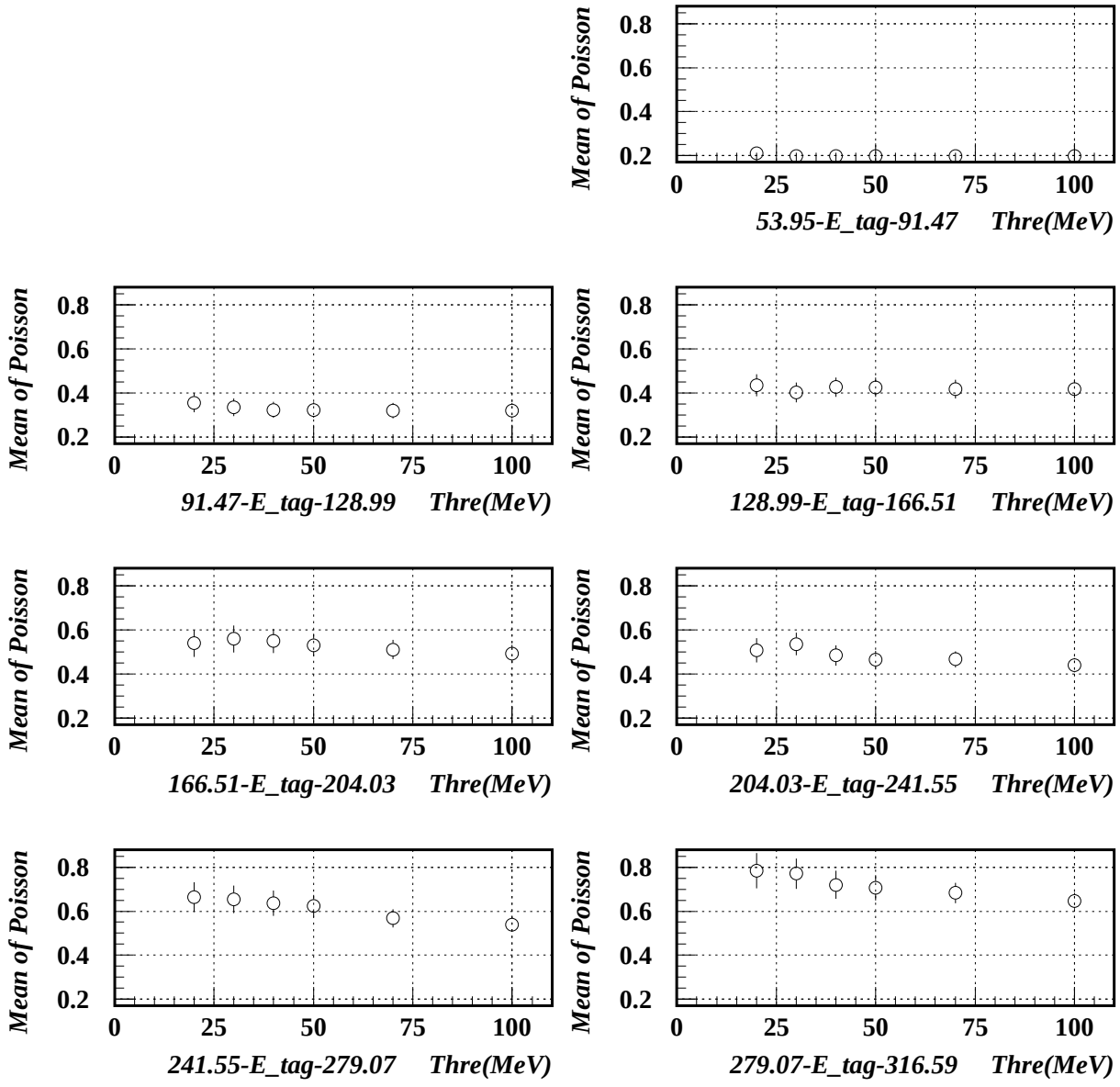


図 70: $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 430 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化。カロリーメーターの測定エネルギーのしきい値を変化させている。

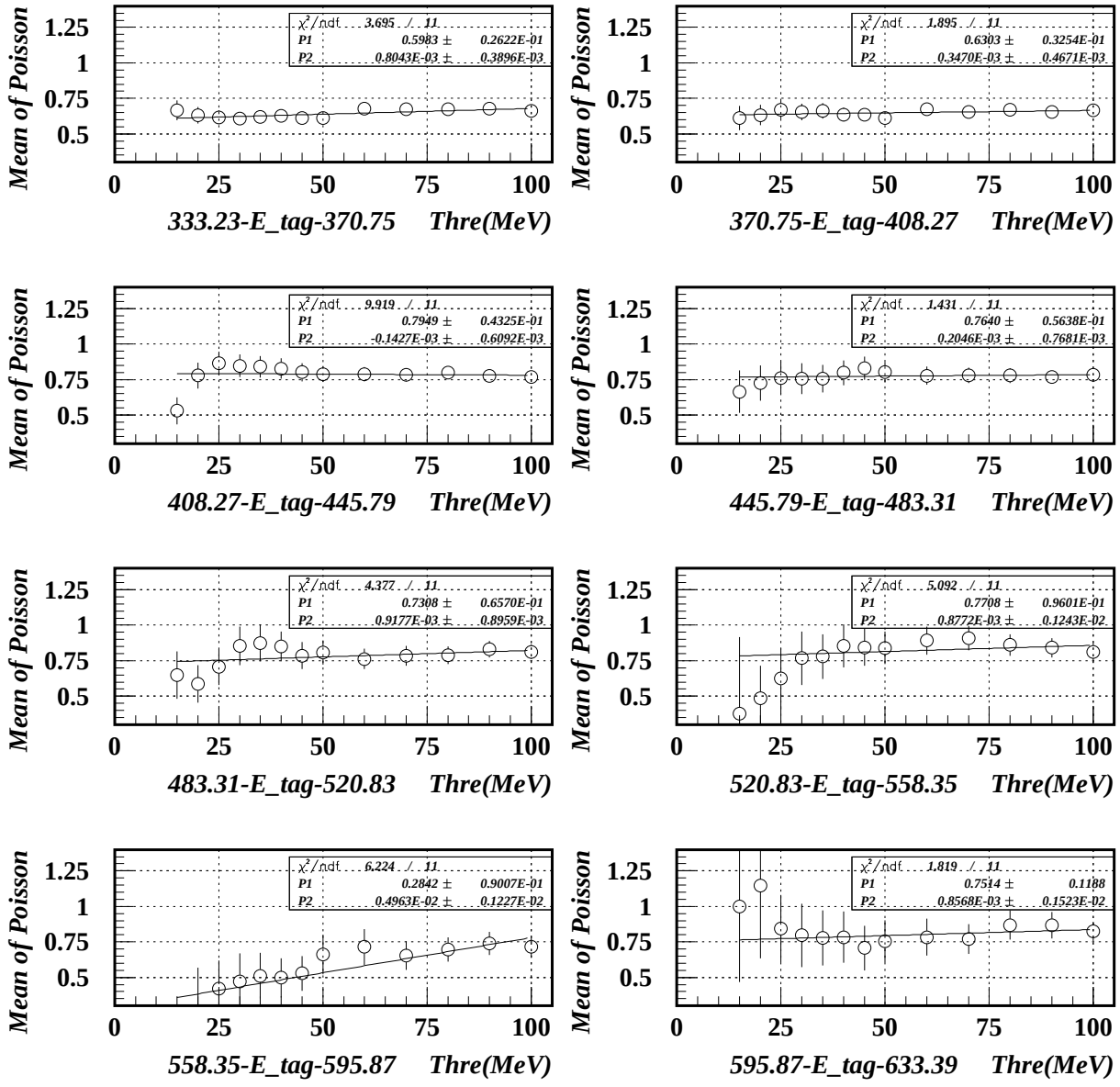


図 71: $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 750 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化。カロリーメーターの測定エネルギーのしきい値を変化させている。

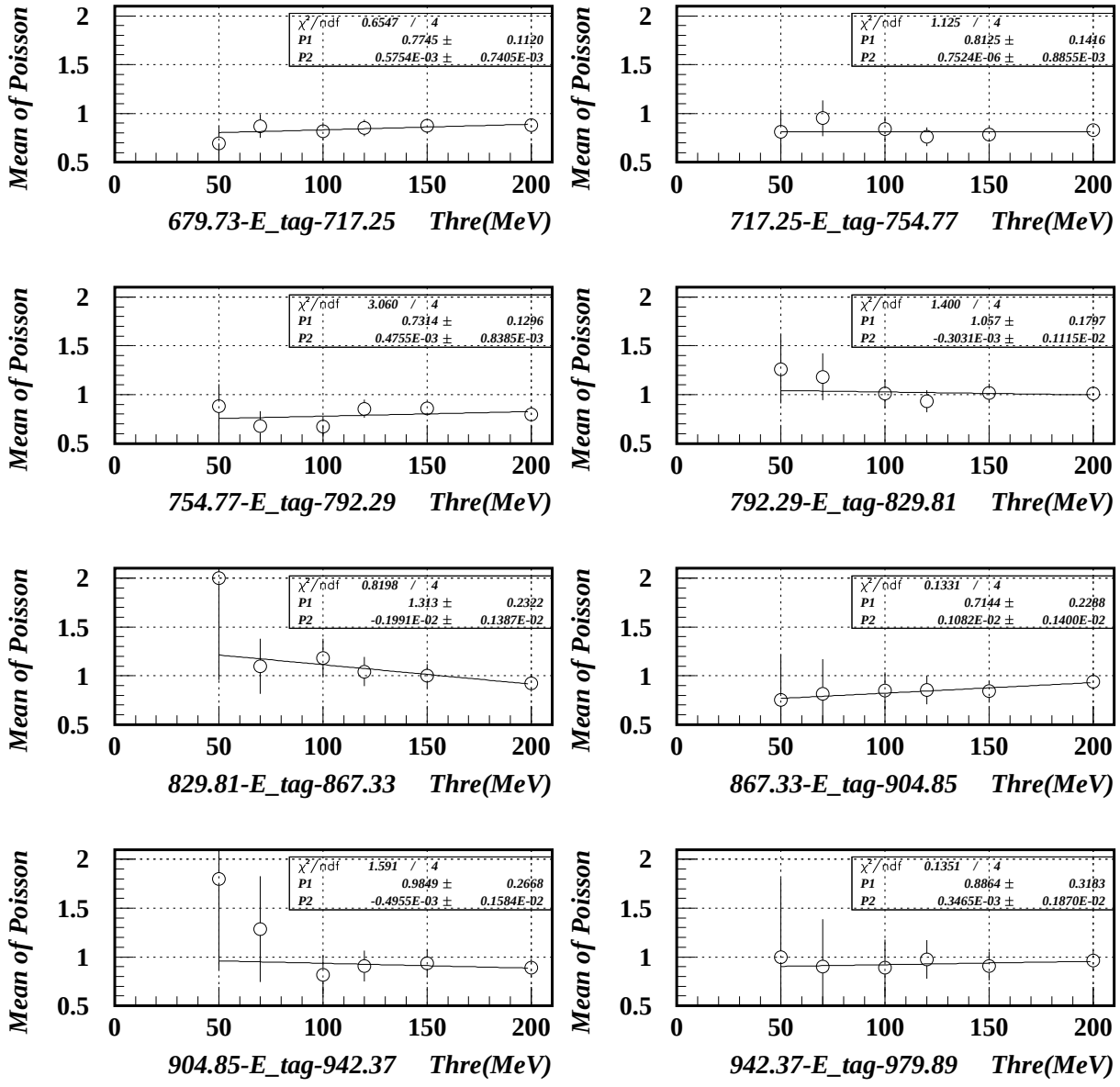


図 72: $0.5mm\ Pb/\ 5mm\ Scint.$ の 1100 MeV Run における、 Poisson 分布の平均値の変化。カロリーメーターの測定エネルギーのしきい値を変化させている。

参考文献

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

[2] 花垣 和則 Search for the Decay $K_L \longrightarrow \pi^0 \nu\overline{\nu}$ 大阪大学大学院博士論文 (1998).

[3] KAMI Collaboration, KAMI EOI September (1997).

[4] W.R.Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.

[5] 小田 稔, 宇宙線 裳華房.

[6] 森 浩二, CsI 光子検出器の光核相互作用に由来する不感率の測定 大阪大学大学院修士論文 (1999).

[7] C.Chollet et al., Phys. Lett. **127B** (1983) 331.

[8] M.Muto J. Sci. Hiroshima Univ., Ser. A **Vol.51**. No. 2 pp 187-219. August (1987).