

2018年度 学位論文

Si半導体検出器を用いた
ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索

東京理科大学 理工学部 物理学科4年
学籍番号 6215085

釣 希夢

指導 石塚 正基 准教授

平成31年1月10日

質量を求める

に言える

概要

ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊とは、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合の崩壊モードである。通常、二重 β 崩壊では、2つの電子と2つのニュートリノが放出される。マヨラナ粒子とは、物質が反物質と区別がつかないマヨラナ粒子である。ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、ニュートリノ自身が反ニュートリノであるため、二重 β 崩壊時にニュートリノが放出されないモードが存在すると考えられる。このニュートリノを伴わない二重 β 崩壊を観測することは、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを説明するだけでなく、ニュートリノの質量階構造や、シーケンス機構、レプトジェネシスなどを説明することに繋がる。これは、標準模型を超える新たな模型への発展を意味する。

本研究では、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊を探索するため Si 半導体検出器と、二重 β 崩壊する同位体 ^{82}Se を用いて探索を行う。先の研究でニュートリノを伴わない二重 β 崩壊を探索するための研究は行われてきた。それらの研究における検出器構造は大きく分けて2種類に分類できる。検出器と二重 β 崩壊する同位体が同一構造を持つものと、二重 β 崩壊で出てきた電子の軌跡とそのエネルギーを検出器で観測する構造のものがあった。本研究で考える構造は、検出器と同位体をレイヤー状に配置し、二重 β 崩壊で放出される2電子のエネルギーのみを観測する構造である。このレイヤー構造 Si 検出器をシミュレーションし、性能評価を本研究における目標とする。

て新しい方法も実証す了。

実験始め

目 次

概要	i
第 1 章 物理背景	1
1.1 ニュートリノ	1
1.1.1 ニュートリノの発見	1
1.1.2 ニュートリノ振動	1
1.1.3 ニュートリノの質量	3
1.2 マヨラナ粒子	4
1.2.1 マヨラナ粒子	4
1.2.2 シーソー機構	5
1.2.3 レプトジェネシス	5
1.3 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊	5
1.3.1 二重 β 崩壊	5
1.3.2 二重 β 崩壊の 2 つの崩壊モード	6
1.3.3 半減期と有効質量	7
1.3.4 主なニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索実験	8
第 2 章 検出器	10
2.1 概要	10
2.2 Si 半導体検出器	10
2.3 同位体 ^{82}Se	11
2.4 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のためのレイヤー構造検出器	12
第 3 章 解析	13
3.1 電子のエネルギー損失シミュレーションと効率	13
3.2 Si 半導体検出器の評価	14
3.3 レイヤー構造 Si 検出器の評価	15
3.4 電子・ γ 線の識別	16
3.5 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊シミュレーション	18
第 4 章 結果	19
4.1 Si 半導体検出器の評価	19
4.1.1 Si 半導体検出器の厚み依存性	19
4.1.2 Si 半導体検出器の角度依存性	21
4.1.3 読み出し用 Al 薄膜による依存性	23
4.2 レイヤー構造 Si 検出器の性能評価と電子・ γ 線の識別	24
4.3 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊シミュレーション	67
まとめと将来展望	68

謝辞

i

関連図書

ii

表 目 次

1.1	二重 β 崩壊する原子核の例 [4]	6
2.1	Se 同位体の不安定同位体の例	11
3.1	レイヤ構造 Si 検出器 1 層のときのシミュレーション設定値	13
3.2	レイヤ構造 Si 検出器性能評価シミュレーション設定値	16
3.3	二重 β 崩壊の Event 数	18
4.1	読み出し用 Al 薄膜による効率	23
4.2	レイヤ構造 Si 検出器性能評価と電子・ γ 線識別のシミュレーション設定値	24
4.3	E_1 と E_2 の Layer と効率	38
4.4	二重 β 崩壊シミュレーションにおける設定値	67

図 目 次

1.1 質量階層構造	3
1.2 標準模型	4
1.3 二重 β 崩壊する原子核のエネルギー準位例 (^{82}Se)	6
1.4 $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ の Feynman Diagram	7
1.5 $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ で生じる電子のエネルギー和	7
2.1 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のための検出器構造の例	10
2.2 (a) 絶縁体,(b) 半導体,(c) 金属のエネルギーバンドの模式図 [14]	10
2.3 Si 半導体検出器の種類例 [5]	11
2.4 レイヤー構造 Si 検出器の概念図	12
3.1 レイヤー構造 Si 検出器 1 層のときの Energy Deposit のヒストグラム	13
3.2 Si 半導体検出器の厚み依存性の概念図	14
3.3 Si 半導体検出器の角度依存性の概念図	15
3.4 Si 検出器厚み依存性・電子の初期依存性・磁場依存性シミュレーション概念図	16
3.5 (a) 光電効果 (b) コンプトン散乱 (c) 電子対生成の概念図	17
3.6 (a)Electron(b)Gamma のレイヤー構造 Si 検出器でのシミュレーション概念図	17
4.1 Si 半導体検出器の厚み依存性と効率	19
4.2 Si 半導体検出器の厚み依存性のヒストグラム	20
4.3 Si 半導体検出器の角度依存性と効率	21
4.4 Si 半導体検出器の厚み依存性のヒストグラム (0° から 50°)	22
4.5 Si 半導体検出器の角度依存性のヒストグラム (60° から 80°)	23
4.6 読み出し用 Al 薄膜による依存性のヒストグラム	24
4.7 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	24
4.8 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	25
4.9 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	25
4.10 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	25
4.11 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	26
4.12 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	26
4.13 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	26

4.14 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	27
4.15 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	27
4.16 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	27
4.17 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	28
4.18 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム	28
4.19 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	29
4.20 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Color map	29
4.21 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	29
4.22 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	30
4.23 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Color map	30
4.24 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	30
4.25 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	31
4.26 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Color map	31
4.27 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	31
4.28 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	32
4.29 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Color map	32
4.30 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Color map	32
4.31 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency	33
4.32 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency	33
4.33 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency	34
4.34 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency	34
4.35 (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency	34

4.36 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	35
4.37 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	35
4.38 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	35
4.39 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	36
4.40 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	36
4.41 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	36
4.42 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における各 Layer の Efficiency	37
4.43 Electron と Gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	39
4.44 Electron と Gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	40
4.45 Electron と Gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	41
4.46 Electron と Gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	42
4.47 Electron と Gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	43
4.48 Electron と Gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	44
4.49 Electron と Gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	45
4.50 Electron と Gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	46
4.51 Electron と Gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	47
4.52 Electron と Gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	48
4.53 Electron と Gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	49
4.54 Electron と Gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム	50
4.55 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	51
4.56 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	52
4.57 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	53

4.58 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	54
4.59 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	55
4.60 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	56
4.61 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	57
4.62 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	58
4.63 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	59
4.64 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	60
4.65 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	61
4.66 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map	62
4.67 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	63
4.68 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	63
4.69 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	63
4.70 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	64
4.71 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	64
4.72 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	64
4.73 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	65
4.74 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	65
4.75 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	65
4.76 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	66
4.77 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	66
4.78 (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 1.0$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における E_1 と E_r の Color map	66

第1章 物理背景

1.1 ニュートリノ

1.1.1 ニュートリノの発見

ニュートリノとは1930年にW.Pauliによって提唱された素粒子である。当時、 β 崩壊過程は、(1.1)式のような中性子 n が陽子 p に崩壊するとき電子 e^- (β 線)を放出する反応過程であると考えられていた。



~~β 崩壊過程で放出される β 線のエネルギーは、エネルギー保存則より崩壊の前後で保存される。電子は原子核の持つ固有のエネルギーで放出されるため、~~ β 線のエネルギーは一定の値となるはずである。しかし、放射線研究の過程での実際の β 線エネルギースペクトルは、広がりを持った連続スペクトルであった。この問題を解決するためにW.Pauliは、電荷を持たない中性の粒子がエネルギーを持ち去っているという仮説を提唱した。^[1] それが今のニュートリノである。(1.2)式参照。

Vが~ニ~ト~リ~と表す。 $\bar{\nu}_e$ は反電子ニ~ト~リ~と呼ぶ。ニ~ト~リ~の1種であ~。
ニュートリノは電荷を持たないという性質から、長年確認されていなかった。1956年にF.Reines
らによって原子炉から放射される反電子ニュートリノと陽子との反応



の観測から存在が確認された。

1.1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノには ν_e, ν_μ, ν_τ の3種とその反粒子が存在する。1962年に牧、中川、坂田らによってこの3種のフレーバーが変化するニュートリノ振動を提唱した。ニ~ト~リ~振~動~とは、ニ~ト~リ~の3種のフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$, ($\alpha = e, \mu, \tau$) が質量固有状態 $|\nu_i\rangle$, ($i = 1, 2, 3$) の重ね合わせであることにより、飛程又は時間によって異なるフレーバー状態に変化することである。フレーバー固有状態と質量固有状態の重ね合わせは、(1.4)のように書くことができる。

$$表示。どのくらい質量を持つ? $|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.4)$$$

ここでユニタリ行列 $U_{\alpha i}$ はMNS(Maki-Nakagawa-Sakata)行列呼ばれ

$$\begin{aligned} U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \quad (1.5) \end{aligned}$$

と表される。ここで $\cos \theta_{ij} = c_{ij}, \sin \theta_{ij} = s_{ij}$ と置き、 θ_{ij} は質量固有状態 i, j の混合角、 δ は複素位相とした。

簡単のためニュートリノが 2 種しかない場合のニュートリノ振動を考える。2 つのフレーバー固有状態 ν_a と ν_b と質量固有状態 ν_1 と ν_2 が混合角 θ で混ざっているとすると

$$\begin{pmatrix} \nu_a \\ \nu_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

と表せる。よって

$$|\nu_a\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \quad (1.7)$$

$$|\nu_b\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \quad (1.8)$$

となる。質量固有状態の時間発展は、粒子の運動量を p_j 、質量を m_j とし、 $E_j = \sqrt{p_j^2 + m_j^2}$ を用いて

$$|\nu_j(t)\rangle = \exp(-iE_j t) |\nu_j(0)\rangle \quad (1.9)$$

と書ける。よってフレーバー a の時間発展は

$$\begin{aligned} |\nu_a\rangle &= \cos \theta |\nu_1(t)\rangle + \sin \theta |\nu_2(t)\rangle \\ &= \cos \theta e^{-iE_1 t} |\nu_1(0)\rangle + \sin \theta e^{-iE_2 t} |\nu_2(0)\rangle \\ &= \cos \theta e^{-iE_1 t} (\cos \theta |\nu_a\rangle - \sin \theta |\nu_b\rangle) + \sin \theta e^{-iE_2 t} (\sin \theta |\nu_a\rangle + \cos \theta |\nu_b\rangle) \\ &= (\cos^2 \theta e^{-iE_1 t} + \sin^2 \theta e^{-iE_2 t}) |\nu_a\rangle + \sin \theta \cos \theta (e^{-iE_1 t} - e^{-iE_2 t}) |\nu_b\rangle \end{aligned} \quad (1.10)$$

と表せる。(1.10) より $\nu_a(t)$ の時間発展に ν_b 成分が含まれており、ニュートリノ振動することがわかる。

~~以上よりニュートリノ振動する確率は~~

$$\begin{aligned} P(\nu_a \rightarrow \nu_b) &= |\sin \theta \cos \theta (e^{-iE_1 t} - e^{-iE_2 t})|^2 \\ &= \frac{1}{4} \sin^2 2\theta (2 - 2 \cos(E_2 - E_1)t) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta E t}{2} \right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

となる。ここでエネルギー差 $\Delta E = E_2 - E_1$ とした。

$$\begin{aligned} \Delta E = E_2 - E_1 &= \sqrt{p_2^2 + m_2^2} - \sqrt{p_1^2 + m_1^2} \\ &\sim \left(p_2 + \frac{m_2^2}{2p_2} \right) - \left(p_1 + \frac{m_1^2}{2p_1} \right) \\ &\sim \frac{\Delta m^2}{2E} \end{aligned} \quad (1.12)$$

ここで、(1.12)において $m_j \ll p_j, p_j \sim E, \Delta m = m_2^2 - m_1^2$ とした。ニュートリノが光速で運動しているとみなす ν_a が距離 $L = ct$ 進んだときのニュートリノ振動確率は

$$P(\nu_a \rightarrow \nu_b) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [eV] L [km]}{E [\text{GeV}]} \right) \quad (1.13)$$

となる^[3]。

以上より、ニュートリノのエネルギー E とその頻度の測定することにより、振幅から質量固有状態の混合角 θ 、周期から質量二乗差 Δm^2 を知ることができる。

~~反応の率を~~

1.1.3 ニュートリノの質量

順

ニュートリノの有効質量を予言するモデルとして、階層型 (Normal Hierarchy)、逆階層型 (Inverted Hierarchy)、準縮退型 (Quasi Degenerate) の 3 種の質量階層構造が考えられている。

$\Delta m_{21}^2 \sim 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $|\Delta m_{32}^2| \sim 2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ といふ値が研究にあつた。

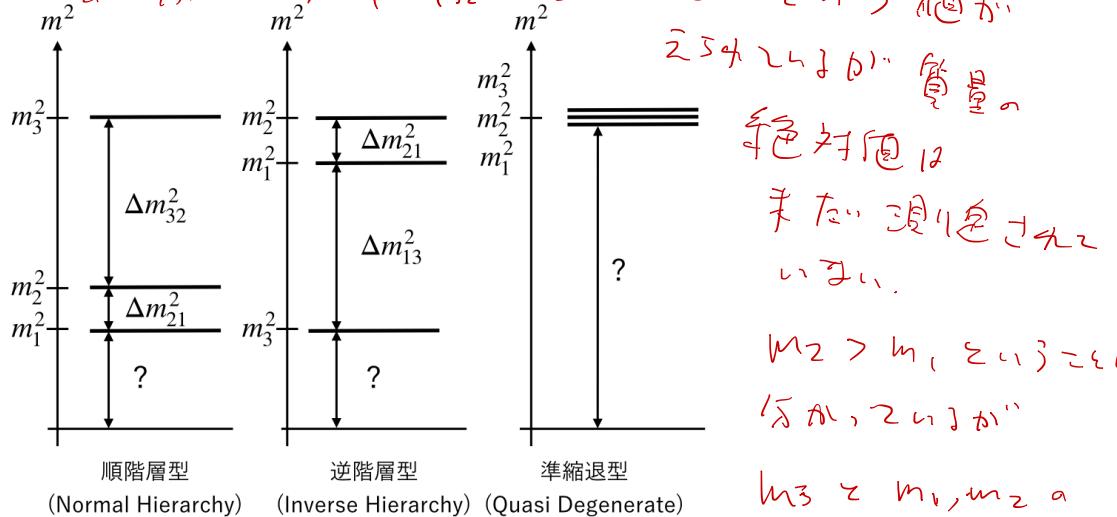


図 1.1: 質量階層構造

1. 順階層型 (Normal Hierarchy)

この場合、

$$m_1 < m_2 \ll m_3$$

(1.14)

電子 ニュートリノ有効質量 ~~0.01 eV~~ 以下と予言される。これは制限がつけられており、極端に小さいことあり得る。

2. 逆階層型 (Inverse Hierarchy)

$$m_3 \ll m_1 < m_2$$

(1.15)

ニユートリノ有効質量 ~~0.02 eV~~ ~~0.01 eV~~ と予言される。

3. 準縮退型 (Quasi Degenerate)

$$m_1 \sim m_2 \sim m_3$$

(1.16)

質量固有値の絶対値が大きく、質量固有値の差が小さいとき、ニユートリノ有効質量 ~~0.1 eV~~ と予言される。

この場合、 $|\Delta m_{32}^2|$ の値が電子の有効質量に下限値をもたらす。

ニユートリノ振動現象の研究で調べられるのは質量二乗差であり、ニユートリノの質量の絶対値は得られない。そこで他のアプローチが必要となり、その一つとしてニユートリノを伴わない二重 β 崩壊がある。

有効質量
1/2
制限が
ある。

1.2 マヨラナ粒子

1.2.1 マヨラナ粒子

スピン $1/2$ のフェルミ粒子のうち粒子と反粒子の区別がつく粒子をディラック粒子、区別がつかない粒子をマヨラナ粒子と呼ぶ。電子や μ 粒子は電荷を持ち、粒子と反粒子の区別がつくためディラック粒子である。ニュートリノは電荷を持たないためマヨラナ粒子である可能性がある。弱い相互作用の反応から、ニュートリノは左巻きのスピンのみを持ち、反ニュートリノは右巻きのスピンを持つことがわかっている。フェルミ粒子のラグランジアンにおける質量項 L は、ニュートリノのディラック質量 m_D 、左巻きの粒子場 Φ_L と右巻き粒子場 Φ_R を用いて表すことができる。[\(1.17\) 参照](#)

$$L = m_D \bar{\Phi}_R \Phi_L$$

もし、ニュートリノがマヨラナ粒子であった場合、粒子と反粒子の変換が可能である。よって(1.18)のように左巻きの粒子場のみで記述ができる。

$$L = m_L (\bar{\Phi}_L)^C \Phi_L \quad (1.18)$$

ここで m_L は左巻きニュートリノの質量である。同様にして、未発見ではあるが、右巻き粒子場の記述もできる。右巻きニュートリノの質量を m_L とすると

$$L = m_R (\bar{\Phi}_R)^C \Phi_R \quad (1.19)$$

と書ける。以上のように、ニュートリノがマヨラナ粒子であった場合、右巻きと左巻きで独立な質量を与えられる。

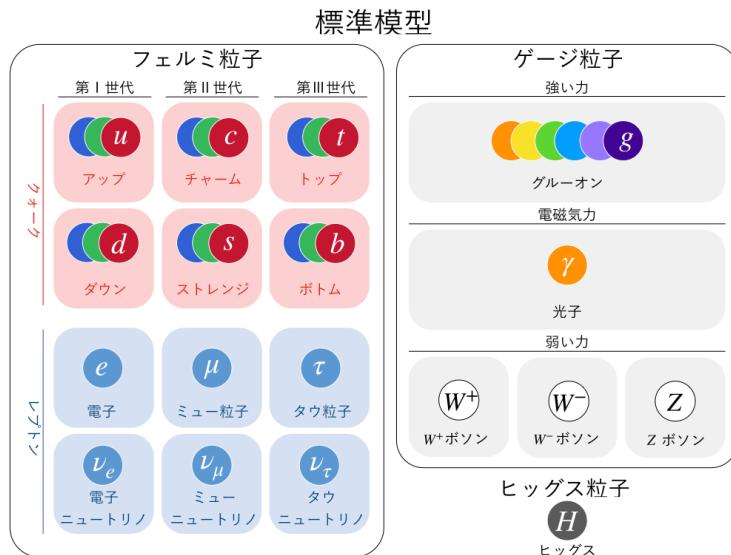


図 1.2: 標準模型

標準模型においてニュートリノの質量は0である。しかし、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊が観測されると、ニュートリノの質量についても説明ができる。

△ が決定され、
後述の(1,2)の関係からこの寿命はす

い場合、極端に軽い左巻きニュートリノの質量が説明できず。

1.2.2 シーソー機構

シーソー機構とは、1979年に Gell-Mann、柳田らによって提唱された機構である。ニュートリノのラグランジアンにおける質量行列は

$$M = \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

と書くことができる。対角化すると

$$\text{と } M \sim \text{GeV} \quad m_L = \frac{m_D^2}{m_R} \quad (1.21)$$

となる。ディラック質量は一定であるため、左巻きニュートリノの質量が小さいと右巻きニュートリノの質量が大きくなる。この右巻きと左巻きの質量の関係をシーソー機構という。観測される左巻きニュートリノの質量は他の粒子に比べて非常に小さいことがわかっている。この理論が正しいとすると、左巻きニュートリノの質量から右巻きニュートリノの質量はスケールは $\sim 10^{16}$ GeV となり、大統一理論のスケールとなる。これは、右巻きニュートリノが未だ観測されておらず、非常に観測が困難であることを説明できる。

1.2.3 レプトジェネシス

レプトジェネシスは、現在の宇宙に反粒子がほとんど存在しない原因を説明する有力な候補として考えられている。宇宙初期には、粒子と反粒子は同数存在していたとされているが、現在の宇宙では粒子が優勢である。これは、宇宙において粒子と反粒子は非対称性を持つことを指す。シーソー機構で宇宙初期を考えると、右巻きニュートリノが左巻きニュートリノ同様に存在していたと考えられるが、重い右巻きニュートリノは崩壊していく。この崩壊を通じて、レプトン数とバリオン数の非対称性が生じる。これがレプトジェネシスの考え方である。ニュートリノがマヨラナ粒子であると観測できること、レプトジェネシス機構も説明ができる。

場合、宇宙初期にレプトジルカ生成エネ^{自然}に説明でき、

1.3 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊

1.3.1 二重 β 崩壊

二重 β 崩壊とは、 β 崩壊が原子核内で同時に起こる現象である。すなわち (1.22) で表すような電子 2 つが同時に飛び出し、原子番号を 2 つ大きくする反応過程である。



二重 β 崩壊は、原子番号が 1 つ大きい原子核のエネルギーの方が大きく、通常の β 崩壊が起こらない場合に起きる(図 1.3)参照。ここで、 (Z, A) と $(Z + 2, A)$ は安定した偶-偶核でなければならない。二重 β 崩壊の起こる原子核の例を表 1.1 にまとめた。

準位

元の原子核

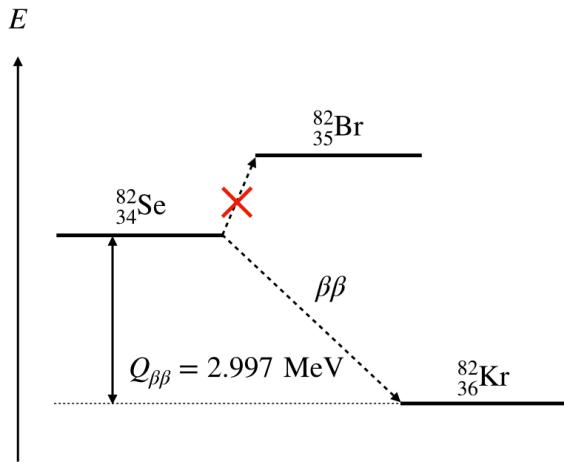


図 1.3: 二重 β 崩壊する原子核のエネルギー準位例 (^{82}Se)

表 1.1: 二重 β 崩壊する原子核の例 [4]

原子核	$T_{1/2}^{0\nu}$ [year]	$Q_{\beta\beta}$ [MeV]	存在比 [%]
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.4×10^{19}	4.271	0.187
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	1.8×10^{21}	2.040	7.8
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	96×10^{19}	2.995	9.2
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	7.1×10^{18}	3.034	9.6
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.7×10^{21}	2.533	34.5
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.1×10^{22}	2.479	8.9
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	9.2×10^{18}	3.367	5.6

1.3.2 二重 β 崩壊の 2 つの崩壊モード (= 2-トドモード) を伴わない二重 β 崩壊

二重 β 崩壊には 2 つの崩壊モードがあると考えられている。

1つは、通常の同一原子核内で β 崩壊が同時に 2 つ起こる崩壊過程モードである。(1.22) 参照。以下、このモードの事を $2\nu\beta\beta$ と呼ぶ。

もう 1 つは、ニュートリノがマヨナ粒子である場合に生じるニュートリノを放出しない崩壊過程モードである。原子核内の中性子が陽子に崩壊する過程で、電子 e^- と反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を生じるが、反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ が電子ニュートリノ ν_e のように振る舞うため、もう一方の崩壊過程に電子ニュートリノが吸収される。すなわち、(1.23) のように崩壊過程においてニュートリノが放出されない。以下、このモードの事を $0\nu\beta\beta$ と呼ぶ。

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- \quad (1.23)$$

図 1.4 に $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ の 2 つの崩壊モードの Feynman Diagram を示す。

(1.22) が示すように通常の二重 β 崩壊 ($2\nu\beta\beta$) に加え、二重 β 崩壊マヨナ粒子である場合は、二重 β 崩壊を放さない二重 β 崩壊過程がある。

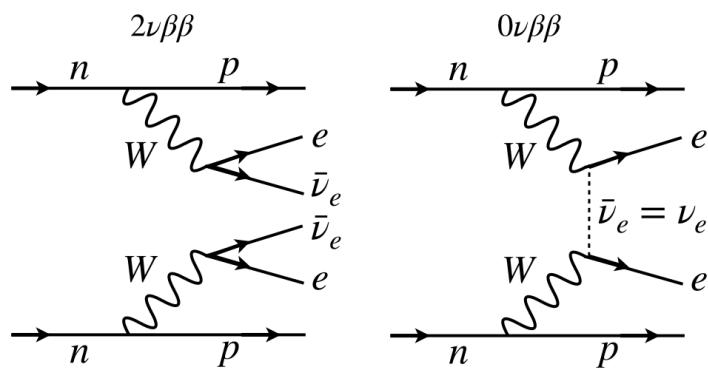


図 1.4: $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ の Feynman Diagram

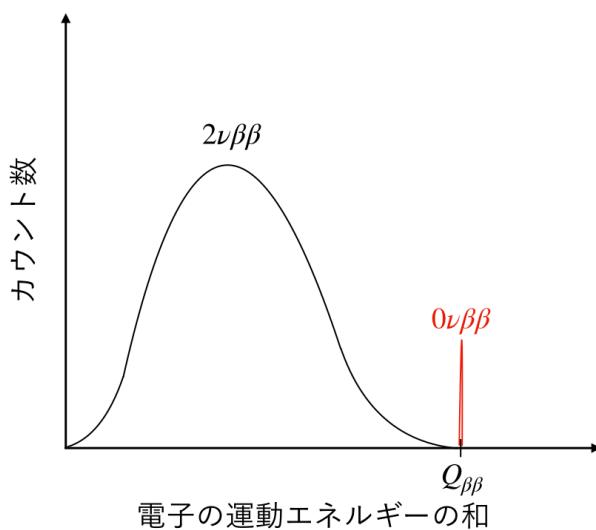


図 1.5: $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ で生じる電子のエネルギー和

$2\nu\beta\beta$ の電子の運動エネルギースペクトルは、ニュートリノが運動エネルギーを持ち去るため広がりを持つ連続スペクトルとなる。一方 $0\nu\beta\beta$ では、ニュートリノが出てこず、エネルギースペクトルは 2 電子のみに依存するため、一定となる。すなわち、観測するエネルギースペクトルは鋭いピークを持つ。ピークのエネルギー値を $Q_{\beta\beta}$ 値と呼ぶ。

されず

1.3.3 半減期と有効質量

$2\nu\beta\beta$ の半減期は (1.24) で表される。

$$\left(T_{1/2}^{0\nu} \right)^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 < m_{\beta\beta} >^2 \quad (1.24)$$

前項前後。原核の質量元は電子のエネルギーに変換されたもの
このエネルギーは一定となる

12

ここで $G^{0\nu}$ は位相空間因子、 $M^{0\nu}$ は核行列要素である。 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ ニュートリノの有効質量であり、以下のように与えられる。

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_i U_{ei}^2 m_{\nu i} \right| \quad (1.25)$$

ここで U_{ei} は MNS 行列、 $m_{\nu i}$ はニュートリノの絶対質量である。

1.3.4 主なニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索実験

先に行われてきたニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索実験を紹介する。

- HDM

HDM(Heidelberg Moscow) 実験は、約 10kg の濃縮 ^{76}Ge を用いた実験で、半減期 $T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) = 2.23_{-0.31}^{+0.44} \times 10^{25}$ year、有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.35 \text{ eV}$ が得られている。検出器はイタリアの国際グラン・サッソ研究所の地下施設にあり、エネルギー分解能～3 keV を達成している [6]。

- IGEX

IGEX(The International Glonass) 実験は、HDM 実験と同じく ^{76}Ge を用いた実験で、半減期 $T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) = 1.57 \times 10^{25}$ year、有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.33 \text{ eV} \sim 1.35 \text{ eV}$ が得られている。

- MAJORANA

米国サウスダコタ州の地下約 1.5 km の深さに位置する研究所、Sanford Underground Research Laboratory での実験。約 30kg の約 86% 濃縮 ^{76}Ge を用いた実験である。将来的に 1 トンの濃縮 ^{76}Ge を用い、 $Q_{\beta\beta} = 2039 \text{ keV}$ の周り 4 keV 領域で 1 count/ton · year を目標としている [7]。

- GERDA

GERDA(GERmanium Detector Array) 実験は、35.6 kg の約 87% 濃縮 ^{76}Ge を用いた実験で、IGEX 実験で用いた coaxial 検出器と BEGe(Broad Energy Germanium) 検出器を用いた観測。半減期の下限 $T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) > 8.0 \times 10^{25}$ year で BEGe 検出器におけるバックグラウンド $1.0_{-0.4}^{+0.6} \times 10^{-3} \text{ cts}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{yr})$ が得られている。将来計画として 200kg の高濃度 ^{76}Ge を用いた LGEND(Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay) 実験ある。MAJORANA 実験とコラボレーションし、更なる低バックグラウンドを目指す [8]。

- NEMO-3 · SuperNEMO

NEMO(Neutrino Ettore Majorana Observatory) コラボレーションが行う SuperNEMO 実験と、その前身である NEMO-3 実験は、フランスとイタリア国境の Fréjus トンネルにある地下実験施設 Fréjus underground laboratory で行われている実験である。 ^{100}Mo を 6.9 kg、 ^{82}Se を 0.93 kg、 ^{130}Te を 0.45 kg、 ^{100}Cd を 0.40 kg 等、7 種類のソースを円筒状に配置した構造を持つ。磁場をかけることによる電子の軌跡とプラスチックシンチレータによるエネルギーの検出による探索実験である。NEMO-3 実験では、 ^{100}Mo で半減期 $T_{1/2}^{0\nu}(^{100}\text{Mo}) > 5.8 \times 10^{23}$ year、有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.6 \text{ eV} \sim 1.3 \text{ eV}$ 、 ^{82}Se で $T_{1/2}^{0\nu}(^{82}\text{Se}) > 2.1 \times 10^{23}$ year、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 1.2 \text{ eV} \sim 2.2 \text{ eV}$ が得られている [9]。

- CANDLES

CANDLES(CAlcium fluoride for studies of Neutrino and Dark matters by Low Energy Spectrometers) 実験は、 $Q_{\beta\beta} = 4.271 \text{ MeV}$ を持ち、低バックグラウンドが実現できる ^{42}Ca を含む CaF_2 を用いた実験である。天然存在比が 0.187% であるため ~~高濃縮された生産するための~~ ^{42}Ca の装置設計建設を進めている [10]。

手法の開発

^{42}Ca も

アラカル

- SNO+

SNO(Sudbury Neutrino Observatory) 実験は、重水を用いた水チレンコフ検出器を用いた実験。太陽ニュートリノ観測において知られている。 ^{150}Nd を含むネオジウム 1 トンを液体シンチレータ検出器に入れ替えることによって $0\nu\beta\beta$ 探索を行うのが、SNO+計画である。

- NEXT

NEXT(Neutrino Experiment with a high-pressure Xe TPC) 実験は、90% の濃縮 ^{136}Xe を用いた TPC(time projection chamber) 方式検出器を用いた実験である。将来計画として NEXT-100 実験を考えられており、バックグラウンド $5 \times 10^{-4} \text{ counts}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{year})$ において半減期 $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 7 \times 10^{25} \text{ year}$ を目指す。 \times [11]。

- EXO-200,1000

EXO(Enriched Xenon Observatory)-200 実験は、約 80% に濃縮された液体 ^{136}Xe を 200 kg を用いた実験である。米国ニューメキシコ州にある核廃棄物隔離施設の地下実験施設ある。半減期 $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) < 1.9 \times 10^{25} \text{ year}$ が得られている。 \times [12]。

- KamLAND-Zen

KamLAND-Zen(Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector-Zero neutrino double beta decay search) 実験は神岡鉱山地下実験施設の 100 トン液体シンチレータを用いた低放射能環境における実験である。バルーンの中に、天然存在比 8.9% の ^{136}Xe を 90% に濃縮させ、液体シンチレータの中に溶かして導入する手法を用いている。将来計画として、1000 kg の ^{136}Xe を用いた KamLAND2-Zen があり、有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 200 \text{ meV}$ を目指す。KamLAND2-Zen に移行する中段階として 800 kg の ^{136}Xe を用いた計画があり、そこでは $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 30 \text{ meV} \sim 40 \text{ meV}$ が達成できると見積もっている。 \times [13]。

これでこの研究に付)

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ year}$$

こう世界最高。測定結果を報告している。

ref: Phys. Rev. Lett. (17, 082503)

A. Gando et al. (KamLAND-Zen
(collaboration))

第2章 検出器

2.1 概要

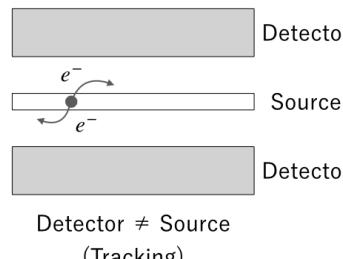
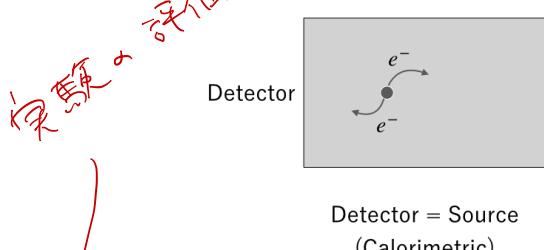


図 2.1: ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のための検出器構造の例

本実験では、Geant4 を用いた粒子シミュレーションを行い、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索を行う。Geant4 とは、物質中を通過するときの相互作用過程をシミュレーションするソフトウェアである。

今まで行われてきたニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のための検出器構造は、大きく分けて 2 種類ある。一つは、図 2.1 の (a) のように検出器がそのまま二重 β 崩壊するソースとなっているタイプがある。もう一つは、(b) のように検出器とソースが分かれており、二重 β 崩壊したときの電子の軌跡を観測するタイプがある。本実験では、検出器とソースが分かれているが、電子の軌跡を観測は行わず、単純に電子の運動エネルギーの和を観測することにより二重 β 崩壊を観測する。

2.2 Si 半導体検出器

本研究で評価した検出器の
設計には

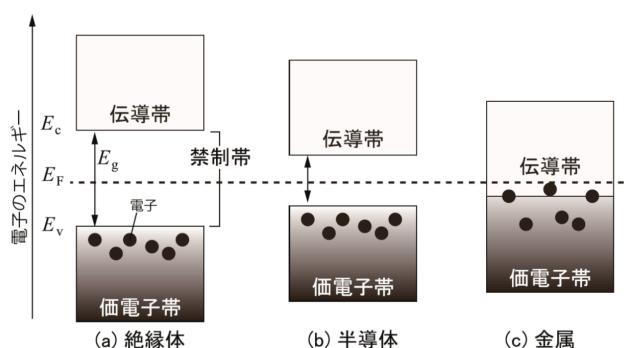


図 2.2: (a) 絶縁体,(b) 半導体,(c) 金属のエネルギーバンドの模式図 [14]

物質は図 2.3 のようにエネルギー帯における電子の占有状態により、金属 (metal)、半導体 (semiconductor) または絶縁体 (insulator) として分類される。エネルギー帯には、電子の占めることができないエネルギー領域があり、禁制帯 (band gap) と呼ばれる。物質中の電子は、価電子帯に存在し、エネルギーを与えると伝導帯に励起される。電子が励起されることにより物質は電気伝導性を示す。

半導体検出器は、放射線が通過すると電子正孔対が生成し電気伝導性を示す。すなわち、検出器に入射した放射線が検出器内で損失したエネルギーを検出することができる。半導体検出器は、他の放射線検出器に比べてエネルギー分解能が高く、放射能測定に広く用いられている。

本研究では Si 半導体検出器を用いて、原子核が二重 β 崩壊する際に放出する 2 電子のエネルギー損失を測定する。Si 半導体検出器は、図 2.3 のように読み出し方法・読み出しブロック・読み出し位置で大きく分類される。シミュレーションでは、読み出し用に Si 検出器にアルミニウム (以下 Al) を用いているとし、1mm の Al 薄膜を Si 検出器の両面に取り付ける。

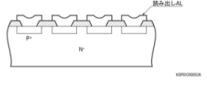
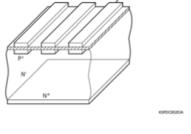
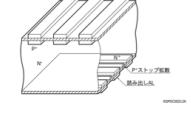
読み出し方法	読み出しブロック	読み出し位置
DC読み出し型 0.01mm?	全チャンネル読み出し型 	片面SSD (SSSD : Single-side SSD) 
AC読み出し型	容量分割読み出し型 	両面SSD (DSSD : Double-side SSD) 

図 2.3: Si 半導体検出器の種類例 [5]

2.3 同位体 ^{82}Se

セレン (Se) の同位体のうち天然に存在するものは 6 種類 ($^{74}\text{Se}, ^{76}\text{Se}, ^{77}\text{Se}, ^{78}\text{Se}, ^{80}\text{Se}, ^{82}\text{Se}$) あり、そのうち $^{74}\text{Se}, ^{76}\text{Se}, ^{77}\text{Se}, ^{78}\text{Se}, ^{80}\text{Se}$ は安定同位体である。不安定同位体は 23 種見つかっており、その例を表 2.1 に示す。ここで EC は電子捕獲による崩壊、 γ は γ 線を放出して崩壊する γ 崩壊、 β は β 崩壊、そして $\beta\beta$ は二重 β 崩壊を表す。本実験においては、二重 β 崩壊して自然に存在する ^{82}Se を崩壊ソースとして用いる。

二重 β 崩壊核種 2-
めう

表 2.1: Se 同位体の不安定同位体の例

同位体核種	N	Decay Mode	$T_{1/2}$	Decay Energy
^{72}Se	38	EC/ γ	8.4 day	- / 0.046 MeV
^{75}Se	41	EC/ γ	119.779 day	- / 0.264 MeV, 0.136 MeV, 0.279 MeV
^{79}Se	45	β	3.27×10^5 year	0.151 MeV
^{82}Se	48	$\beta\beta$	1.08×10^{20} year	2.995 MeV

2.4 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のためのレイヤー構造検出器

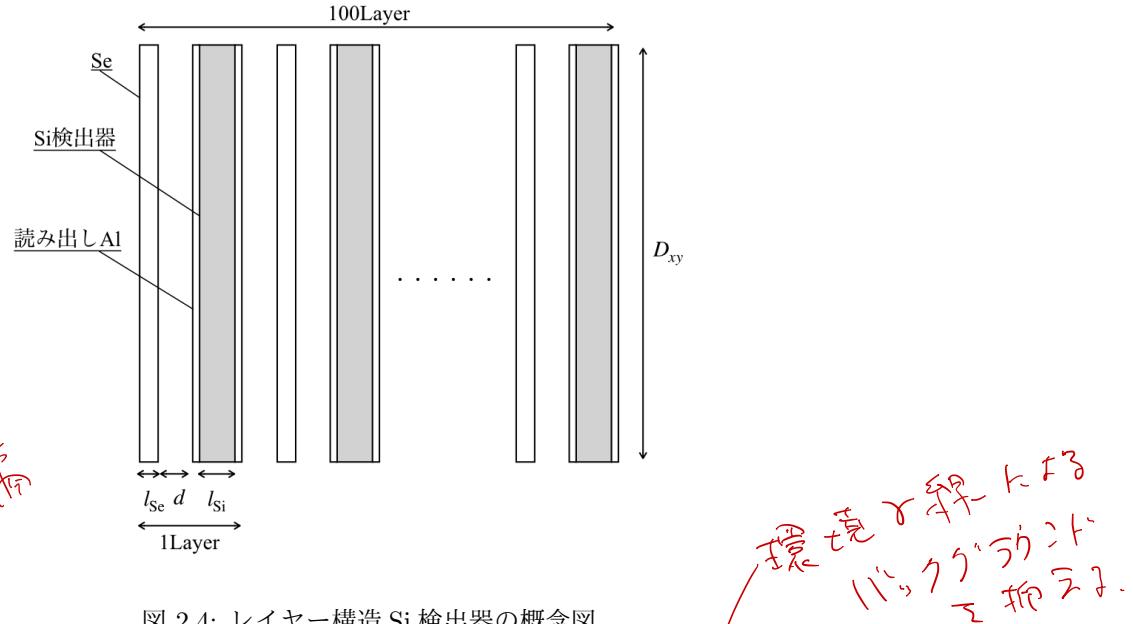


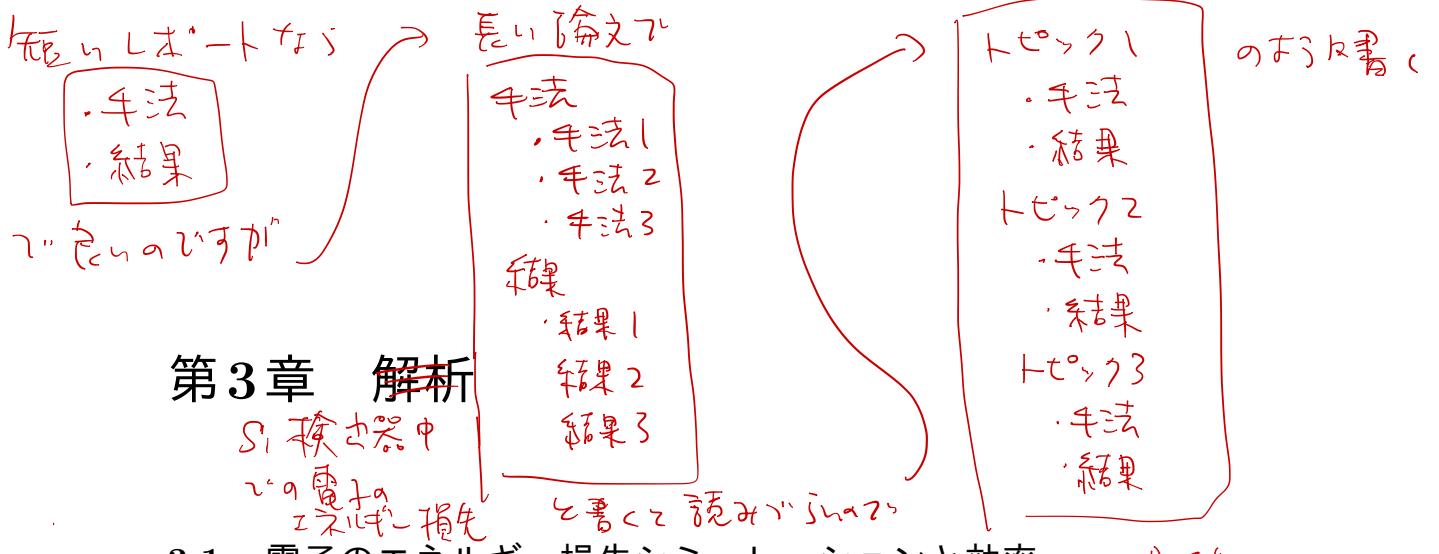
図 2.4: レイヤー構造 Si 検出器の概念図

本研究では、Si 検出器と二重 β 崩壊する ^{82}Se のソースの組み合わせを 1Layer とし、100Layer 重ねるレイヤー構造の検出器を考える(図 2.4 参照)。ここでこのレイヤー構造 Si 検出器を構成する要素について、Si 半導体検出器の厚みを l_{Si} 、 ^{82}Se ソースの厚みを l_{Se} 、それらの面積を D_{xy} 、Si 検出器と ^{82}Se ソースの間を d とする。

二重 β 崩壊によって放出される電子の運動エネルギーを観測するため、 d を小さく設定し、放出された電子をすぐ Si 検出器で捕獲する。また、 l_{Si} を薄く設定することで、環境放射線によって得られてしまうエネルギーを少なくする。ただ l_{Si} を薄くするだけでは、二重 β 崩壊によって放出された電子も Si 検出器をすぐ通過し、十分な運動エネルギーを得られない。そこで検出器に一定磁場をかけ、電子を磁場の影響により検出器内で円の軌跡を描かせることによって、何度か Si 検出器を通過させる。環境放射線は磁場の影響をほとんど受けないため、Si 検出器をすぐに通過する。よって環境放射線の影響を小さくし、二重 β 崩壊によって得られる電子の影響を大きくする。これらの要素を組み合わせることにより、純粋な電子の運動エネルギー和を得ることを目指す。

次章において、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のためのレイヤー構造検出器の具体的な解析方法を説明する。

また、一般に Si 半導体検出器は
 て多くあるエビゲン分解が無いから
 てよく取り扱いやすいから
 一層引けなくなつ。



第3章 解析

Si 検出器中

電子の
エネルギー損失

3.1 電子のエネルギー損失シミュレーションと効率

Geant4 ソフトウェアを用い、Si 検出器内での電子のエネルギー損失を観測する。Genat4においてエネルギー損失は、Energy Deposit といい、放出された電子が物質 (Si 検出器) 内で相互作用ステップ毎で損失するエネルギー損失の和が得られる。

^{82}Se は $Q = 2.995 \text{ MeV}$ であるため、簡単のため二重 β 崩壊で放出される電子のエネルギーは Q 値の半分の値 1.5 MeV であると仮定をし、シミュレーションを行う。

レイヤー構造 Si 検出器を 1 層あるときの Energy Deposit のヒストグラムを図 3.1 に示す。シミュレーション時のそれぞれ変数においての設定値を表 3.1 に示す。

表 3.1: レイヤー構造 Si 検出器 1 層のときのシミュレーション設定値

変数	設定値
B	1.0 T
d	1.0 mm
l_{Si}	1.0 mm
l_{Se}	0.01 mm
D_{xy}	$100 \times 100 \text{ cm}^2$

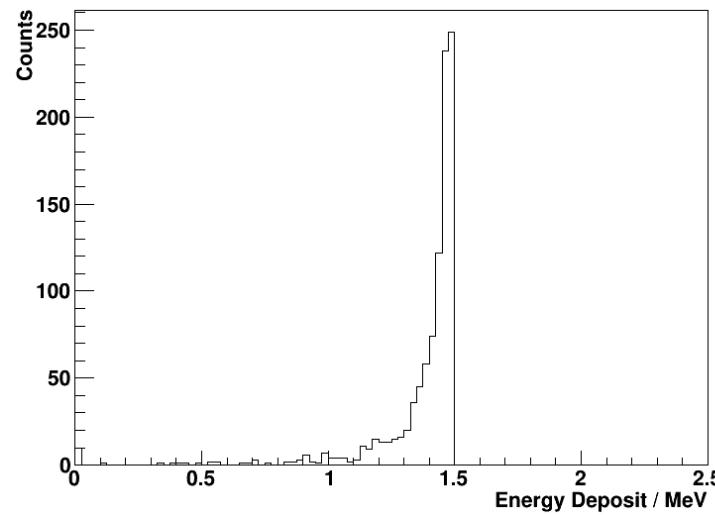


図 3.1: レイヤー構造 Si 検出器 1 層のときの Energy Deposit のヒストグラム

観測された Energy Deposit のヒストグラムから、レイヤー構造 Si 検出器において二重 β 崩壊によって放出された電子が観測されたと決定するための効率 Efficiency を下記のように設定する。

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{1.25 MeV から } 1.75 \text{ MeV 間の Energy Deposit の粒子数}}{\text{入射粒子数}} \quad (3.1)$$

（測定）は 実験によっても もうすでに使った。

3.2 Si 半導体検出器の評価

レイヤー構造 Si 検出器に用いる Si 半導体検出器の電子の Energy Deposit を評価するため、下記のシミュレーションを行う。

3.2.1

Si 半導体検出器の厚み依存性

検出器の厚み l_{Si} を 0.5 mm から 4.0 mm 間を 0.5 mm 間隔で変化させ、それぞれ Energy Deposit を測定した。図 3.2 のようにそれぞれの変数を設定した。Si 半導体検出器のみの検出効率を観測するため、読み出し用 Al 薄膜は取り付けていない。それぞれの厚みにおいてのヒストグラムを作成し、効率 Efficiency と l_{Si} のグラフを作成した。

3.2.2

Si 半導体検出器の角度依存性

検出器に入射する電子の角度を直角に入射している角 0° とし 10° 間隔で 80° まで変化させ、それぞれの Energy Deposit を測定した。図 3.3 のようにそれぞれの変数を設定した。Si 半導体検出器のみの検出効率を観測するため、読み出し用 Al 薄膜は取り付けていない。それぞれの角度においてのヒストグラムを作成し、効率 Efficiency と角度 θ のグラフを作成した。

3. 読み出し用 Al 薄膜による依存性

読み出し用 Al 薄膜を Si 半導体検出器に取り付けたときと、取り付けていないときの Energy Deposit の変化を観測する。厚み 0.01 mm の Al の薄膜を取り付けたときを考える。初期粒子の位置 $d = 1.0 \text{ mm}$ 、Si 半導体検出器の厚み $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$ として Energy Deposit を測定した。それぞれ膜ありと膜なしでヒストグラムを作成し、効率 Efficiency を出した。

これらの依存性をシミュレーションする際の概念図を図 3.2, 3.3 に示す。ここで、初期電子のエネルギーを 1.5 MeV、Event 数を 1000 とした。

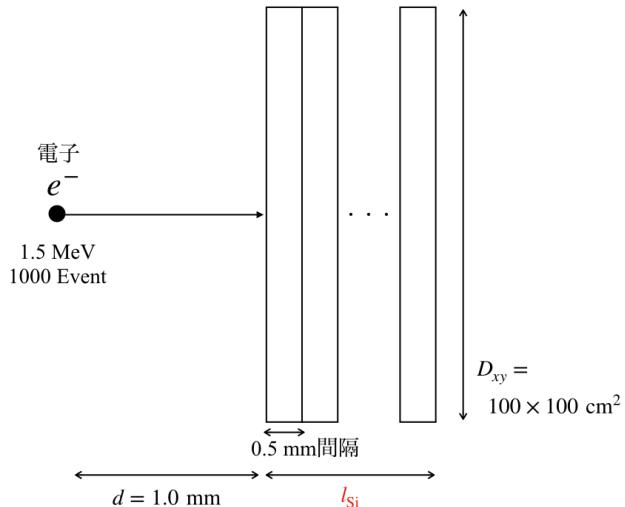


図 3.2: Si 半導体検出器の厚み依存性の概念図

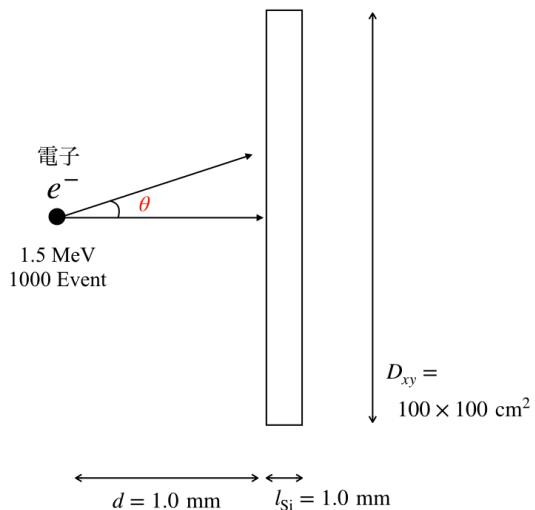


図 3.3: Si 半導体検出器の角度依存性の概念図

4章

~~3.3 レイヤー構造 Si 検出器の評価~~

~~3.1 構造の評価~~

レイヤー構造 Si 検出器の性能を評価するため、下記の依存性をシミュレーションする。に

1. Si 検出器厚み依存性

Si 検出器の厚みによって捕獲できる電子のエネルギー和が変わる。二重 β 崩壊による電子のエネルギーを多く、環境放射線による電子のエネルギーを少なくできる厚みを決定するために行う。

2. 電子の初期位置依存性

電子の初期位置、つまり Si 検出器と ^{82}Se ソースの間 d の依存性を測定する。レイヤー構造 Si 検出器の 1 層毎の幅を決定するために行う。検出器内が磁場なし真空状態であれば、二重 β 崩壊によって出てきた電子は直進し、そのまま Si 検出器に入る。本実験では、環境放射線の影響を考え、磁場をかけているため電子は直進せず螺旋を描く。よって、初期位置の依存性は磁場の影響によって変化する事が予測される。

3. 磁場依存性

磁場の影響で電子の軌道が変わることによる Energy Deposit の変化を見る。電子のエネルギーをより多く捕獲するための適切な磁場を決定するために行う。

これらの依存性を見るための変数とその設定値を表 3.2 に示す。

磁場 B は、磁場がある状態とない状態の依存性と、磁場の大きさによる依存性を見るために、3 つのパターンでのシミュレーションを行う。Si 検出器と ^{82}Se の間 d を大きくしすぎると実際のレイヤー構造 Si 検出器は、磁場をかけた状態を想定するため電子が Si 半導体検出器まで届かなくなる。また、Si 検出器の厚み l_{Si} は、環境放射線の影響を出来るだけ排除するため、薄いものを考える。したがって、 d と l_{Si} は小さいことが前提として 2 つのパターンで考える。

変数 $l_{\text{Se}} = 0.01 \text{ mm}$, $D_{xy} = 100 \times 100 \text{ cm}^2$ は固定する。初期粒子は 50 層目 (中心) から一方向に向けて角度と発生点を ^{82}Se ソース上で Random に発生させた。今回は Layer の番号 50 から番号が増

えていく方向へ向けて電子を発生させている。初期粒子のエネルギーは 1.5 MeV で固定した。この変数でのシミュレーションをレイヤー構造 Si 検出器で行う。

解析としては、レイヤー構造 Si 検出器の評価のため、この設定値における Energy Deposit のヒストグラムのプロットと効率を求めた。

表 3.2: レイヤー構造 Si 検出器性能評価シミュレーション設定値

変数	設定値		
l_{Si}	0.5 mm	1.0 mm	
d	0.5 mm	1.0 mm	
B	0.0 T	0.5 T	1.0 T

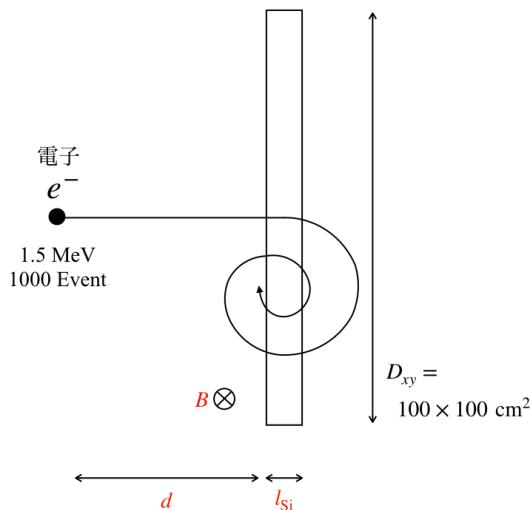


図 3.4: Si 検出器厚み依存性・電子の初期依存性・磁場依存性シミュレーション概念図

5章

3.4 電子と γ 線の識別

(ことは後で読む)

< 4, 2 はここ

本研究では、電子が Si 検出器で損失したエネルギーを測定し、二重 β 崩壊を探査する手法をとっている。ここで、環境放射線など二重 β 崩壊するソース以外からの電子の影響を考える必要がある。ここでは γ 線による影響を考える。 γ 線と物質の相互作用には光電効果、コンプトン散乱、電子対生成等がある。

- 光電効果

光電効果とは、 γ 線が物質に入射したとき、原子内の束縛されている電子に全エネルギーを渡し、電子が原子から飛び出す現象のことである。図 3.5(a) 参照。

- コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、 γ 線が原子内の自由電子に衝突することにより、 γ 線はエネルギーの一部を失うことによって波長が長くなり散乱され、電子が飛び出す現象。図 3.5(b) 参照。

- 電子対生成

電子対生成は、 γ 線が 1.02 MeV より大きい場合、 γ 線が原子核近傍で消滅し、陽電子・電子対を生成させる現象である。図 3.5(c) 参照。

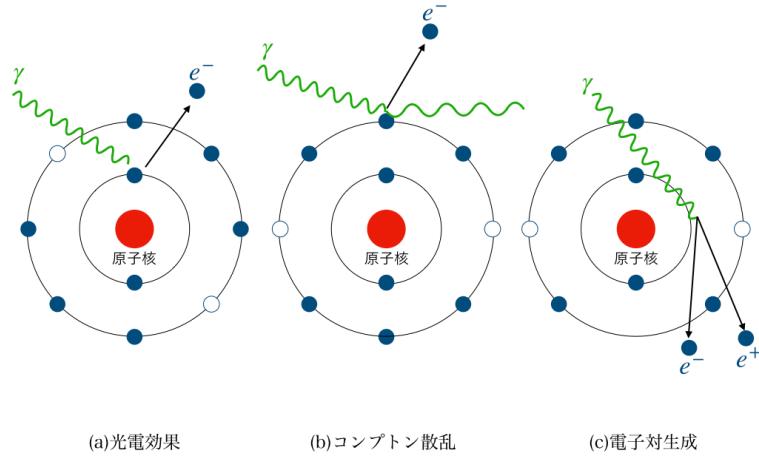


図 3.5: (a) 光電効果 (b) コンプトン散乱 (c) 電子対生成の概念図

上記のコンプトン散乱を考慮し、 γ 線がレイヤー構造 Si 検出器を通過したときの概念図を図 3.6 に示す。二重 β 崩壊による電子は、1 枚の ^{82}Se ソースのみから電子が放出され、Si 検出器の Hit は 100 層の中で連続して現れる。ここで Hit とは Efficiency 値の評価によって決まる。 γ 線による電子は、散乱後も検出器内を進み、非連続的に Hit を出すと考えられる。レイヤー構造 Si 検出器における電子と γ 線の Hit の現れ方の違いからそれぞれの識別を行う。

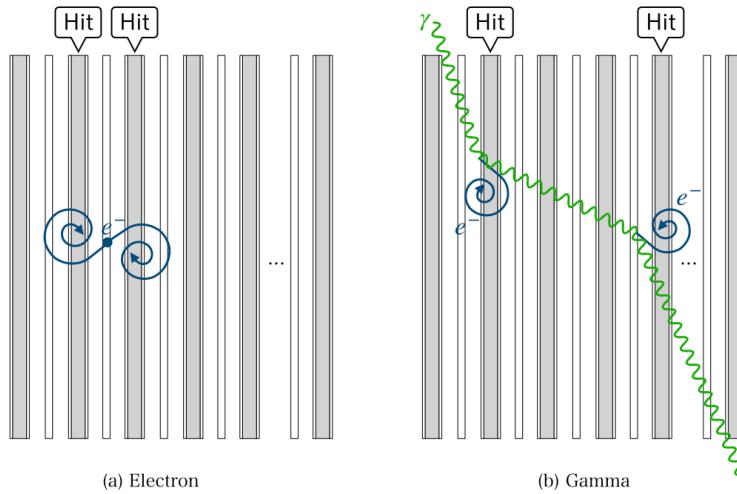


図 3.6: (a)Electron(b)Gamma のレイヤー構造 Si 検出器でのシミュレーション概念図

電子と γ 線の識別のために下記のグラフからレイヤー毎の評価を行う。

1. Layer 每に 0.25 MeV 間隔のしきい値に落ちた数を Count し、Layer-Energy Deposit-Counts での Color map。
2. 最も Energy Deposit の検出があった Layer の Energy Deposit の値を E_1 とし、2 番目に検出

があった Layer の Energy Deposit の値を E_2 とした。そのときの E_1 と E_2 の Energy Deposit のヒストグラム。

3. 比 E_2/E_1 とその Count 数のヒストグラムと、 E_1 と E_2 についての Colormap。

4. E_1 の周り ± 5 Layer 分の Count 数の和を E_r とし、 E_1-E_r とその Count 数の Color map。

上記の識別を表 3.2 の設定値において行い、電子と γ 線の識別効率の良いレイヤー構造 Si 検出器の探索を行った。

このとき、簡単のため二重 β 崩壊で出てくる電子はレイヤー構造 Si 検出器の中心 (50 層目) の ^{82}Se ソースからのみと考え、シミュレーションを行った。レイヤー構造 Si 検出器の評価のときと同様に、変数 $l_{\text{Se}} = 0.01 \text{ mm}$, $D_{xy} = 100 \times 100 \text{ cm}^2$ は固定し、初期粒子は 50 層目 (中心) から一向方に向けて角度と発生点を ^{82}Se ソース上で Random に発生させた。

初期粒子の Energy は電子が 1.5 MeV、 γ 線は 1.0 MeV ~ 3.0 MeV で Random に発生させた。また、初期粒子数は電子が 1000Event、 γ 線は 100000Event とする。 γ 線は、Efficiency を決定するために設定したしきい値 (1.25 MeV ~ 1.75 MeV) 間に落ちる数が少ないと考え、Event 数を 100 倍に設定した。

3.5 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊シミュレーション

二重 β 崩壊の 2 つのモード $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ の比較を行う。この 2 つのモードについて放出される電子の初期運動エネルギーと飛び出す運動方向を初期設定値として与え、シミュレーションを行う。二重 β 崩壊シミュレーションにおいてのレイヤー構造 Si 検出器構成要素の設定値は、前節における検出器の性能評価から決定した値を用いる。

$2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ の Event 数は表 3.3 のように設定をした。 $0\nu\beta\beta$ の Event 数は $2\nu\beta\beta$ の 1/10 とした。それぞれの結果として Energy Deposit のヒストグラムをプロットし比較を行う。

表 3.3: 二重 β 崩壊の Event 数

	Event 数
$2\nu\beta\beta$	10000
$0\nu\beta\beta$	1000

第4章 結果

4.1 Si 半導体検出器の評価

4.1.1 Si 半導体検出器の厚み依存性

図 4.1 に Si 半導体検出器の効率 Efficiency と厚み l_{Si} の結果を示す。

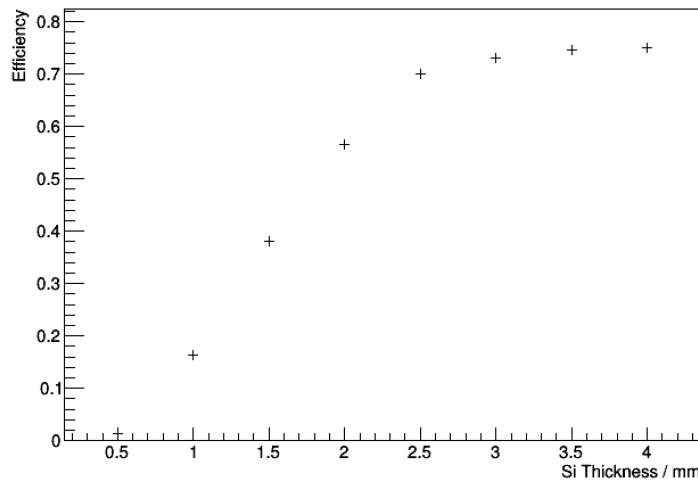


図 4.1: Si 半導体検出器の厚み依存性と効率

厚みが厚くなるにつれて Efficiency が大きくなっていることが分かる。厚い方が、電子が Si 半導体検出器内を通過する距離が長くなるため Energy Deposit が初期エネルギー値に近くなる。2.5 mm 以上で一定値を取ったということは、電子の Si 半導体検出器での飛距離が平均 2.5 mm 程度であることを意味する。レイヤー構造 Si 検出器を実際に用いる際は、磁場をかけ Si 半導体検出器を通過してしまった粒子を再度同一検出器入射させるため、Si 半導体検出器は 2.5 mm より薄くて良いことがわかる。

図 4.2 に Si 半導体検出器の厚み依存性のヒストグラムをそれぞれの厚みでプロットした結果を示す。

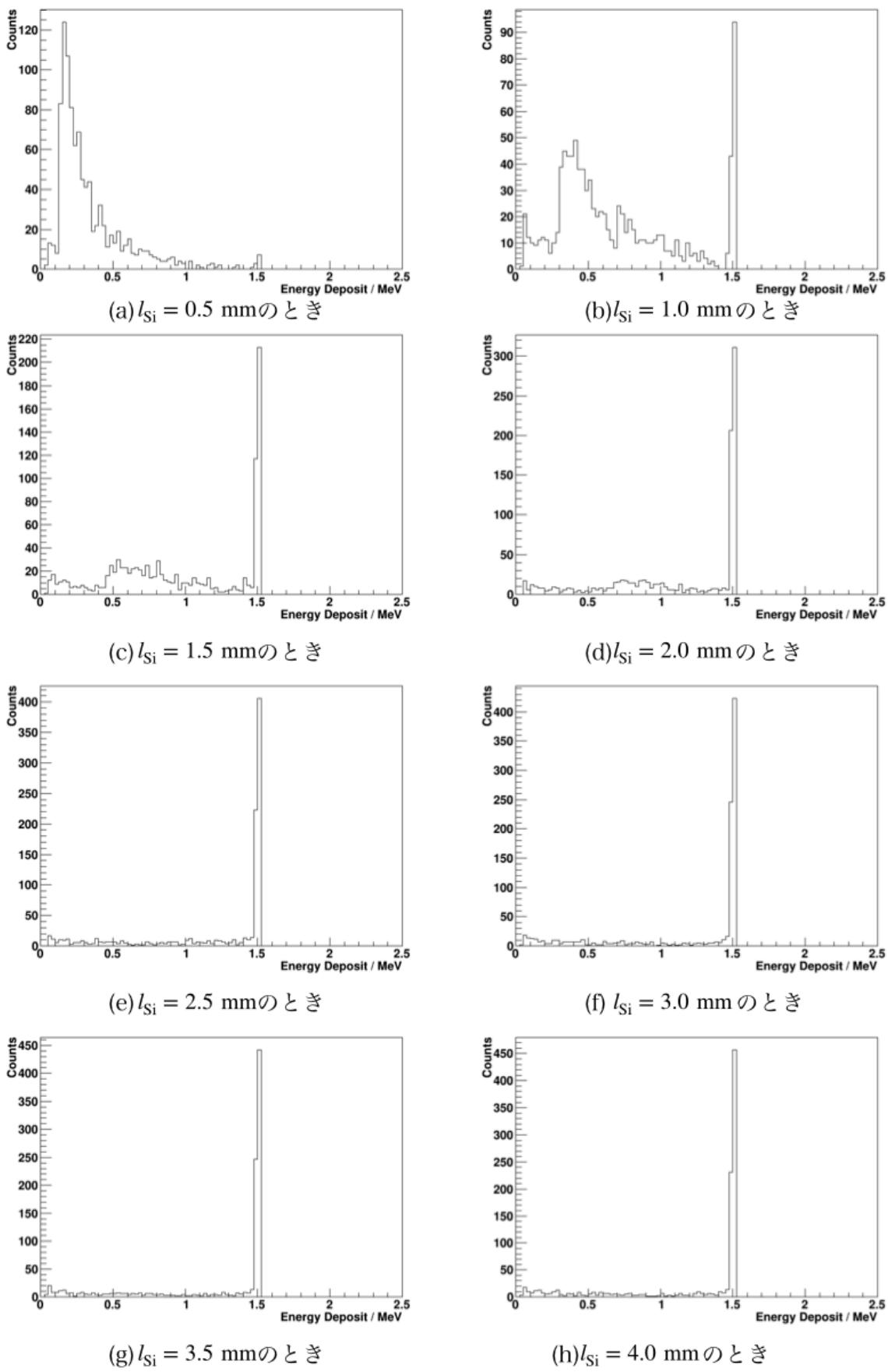


図 4.2: Si 半導体検出器の厚み依存性のヒストグラム

4.1.2 Si 半導体検出器の角度依存性

図 4.3 に Si 半導体検出器の効率 Efficiency と角度 Angle の結果を示す。

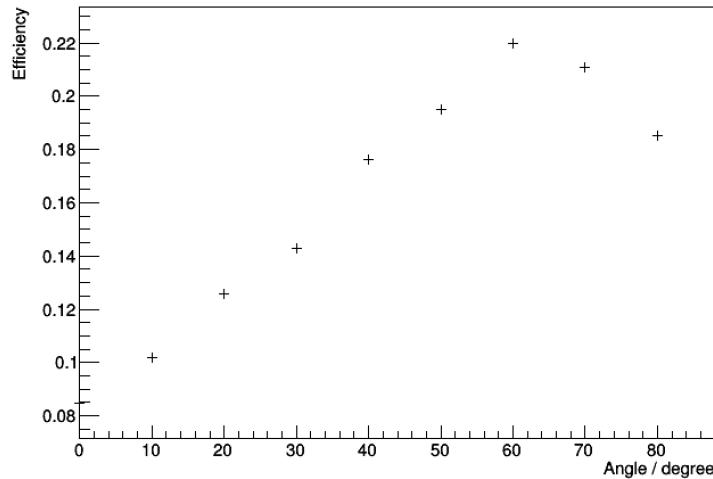


図 4.3: Si 半導体検出器の角度依存性と効率

角度 60° で最も良い Efficiency を得られた。Si 半導体検出器への入射角が鋭い方が、電子が Si 半導体検出器内を通過する距離が長くなるため Energy Deposit が初期エネルギー値に近くなる。また、電子は Si 半導体検出器で跳ね返ってしまい、検出器に入らない場合も考えられる。角度が鋭くなりすぎると Si 半導体検出器に入らず反射した電子が多くなったため、 60° より大きい角度では Efficiency が減少したと考える。

図 4.4、図 4.5 に Si 半導体検出器の角度依存性のヒストグラムをそれぞれの角度でプロットした結果を示す。

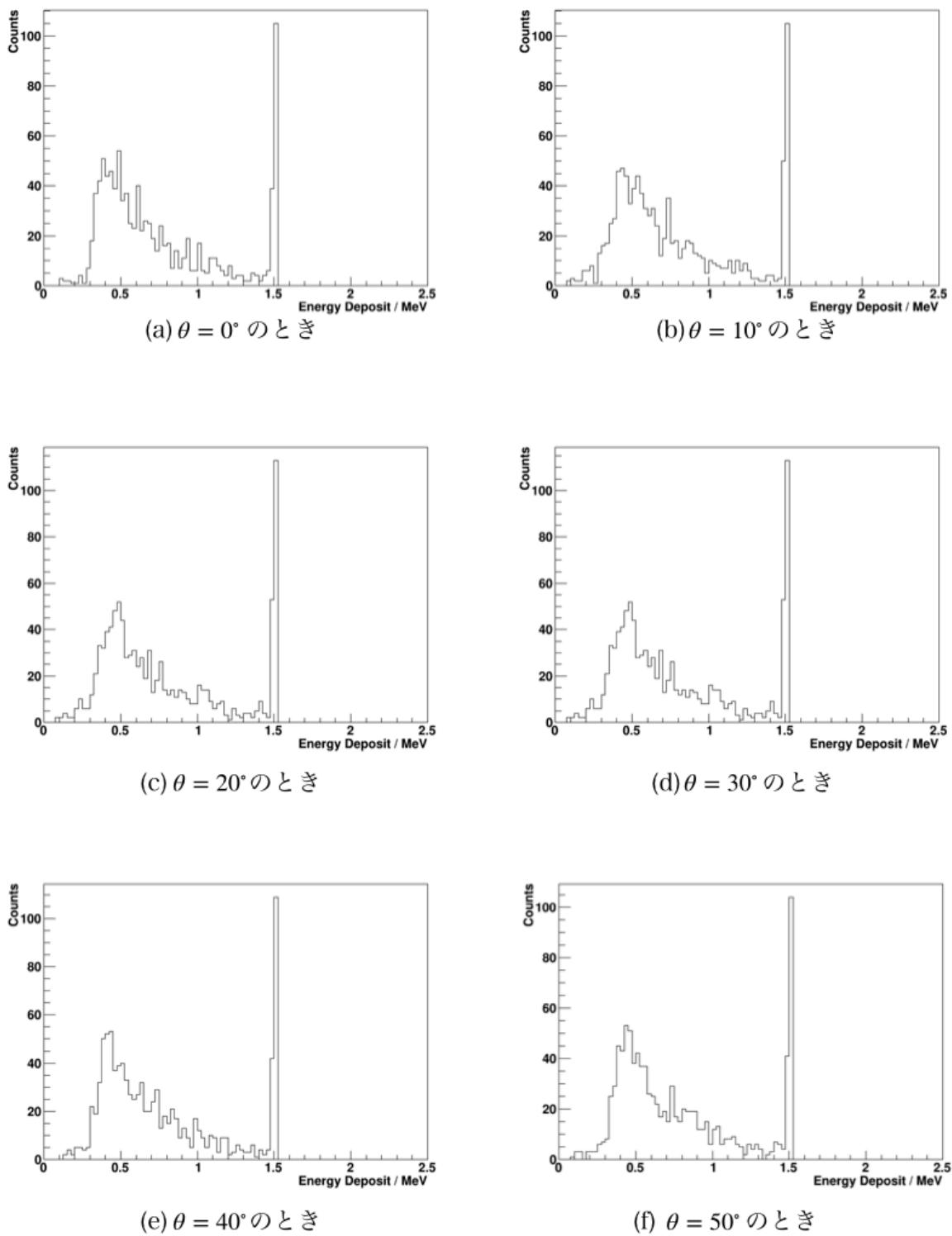


図 4.4: Si 半導体検出器の厚み依存性のヒストグラム (0° から 50°)

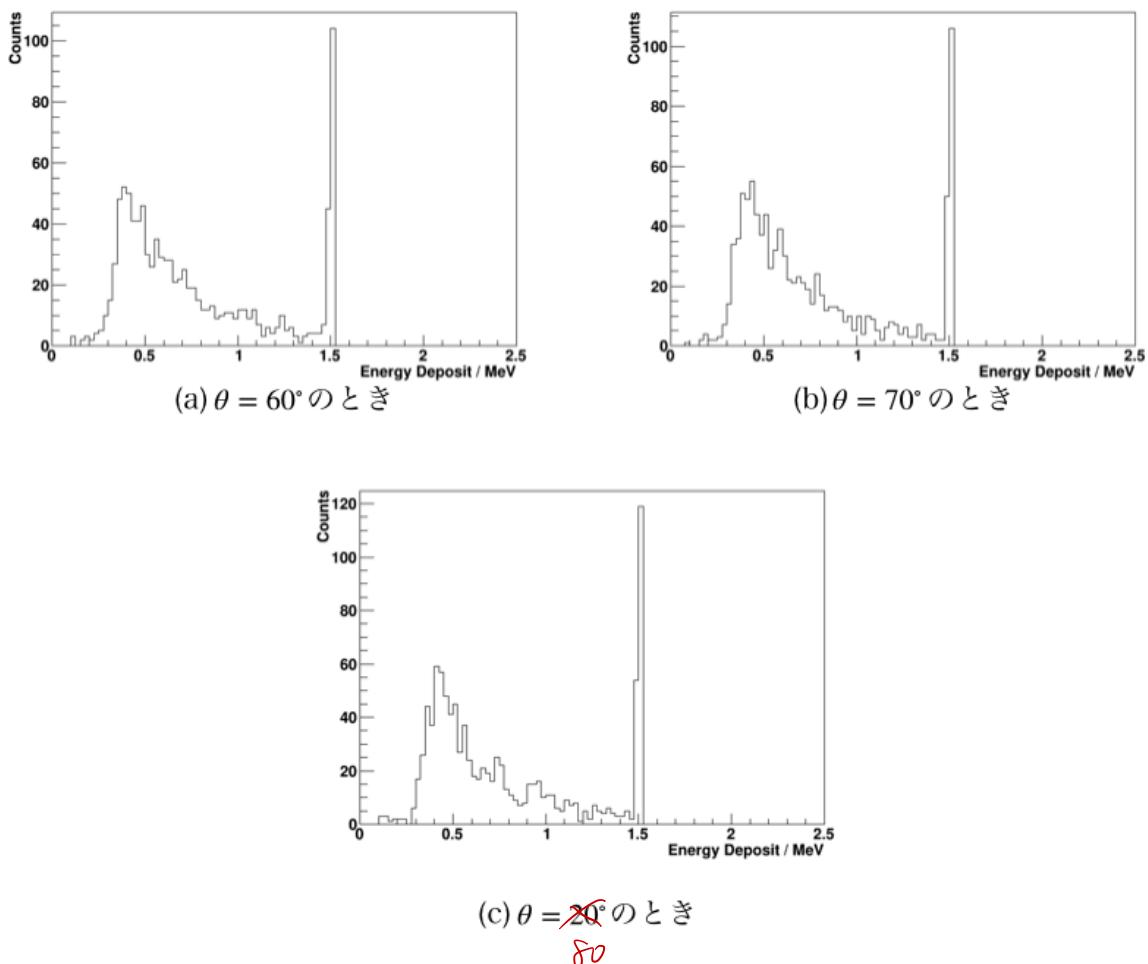


図 4.5: Si 半導体検出器の角度依存性のヒストグラム (60° から 80°)

4.1.3 読み出し用 Al 薄膜による依存性

0.01 mm の厚みの読み出し用 Al 薄膜を Si 検出器に取り付けた時の依存性を見るため、表 4.1 に効率をまとめた。

表 4.1: 読み出し用 Al 薄膜による効率

	Efficiency
Al 薄膜なし	0.177
Al 薄膜あり	0.085

（改字ありますか？）
（次のページ参照）

薄膜がありの方が、Efficiency が高くなかった。Si 半導体検出器に膜があると、電子が膜で反射し、Efficiency が下がると予測していたが、実際には高くなかった。これは、Si 半導体検出器内に入射した電子が膜で反射し、検出器内に閉じ込められたからであると考えた。検出器に入射する電子と出て行く電子では、入射電子の方がエネルギーを持っているため、入射で反射された電子と出て行くときに反射された電子では出て行く時のはうが反射電子が多くなったと考えられる。

図 4.6 に読み出し用 Al 薄膜のある場合とない場合のヒストグラムをプロットした。

>14%

>14% に見え?

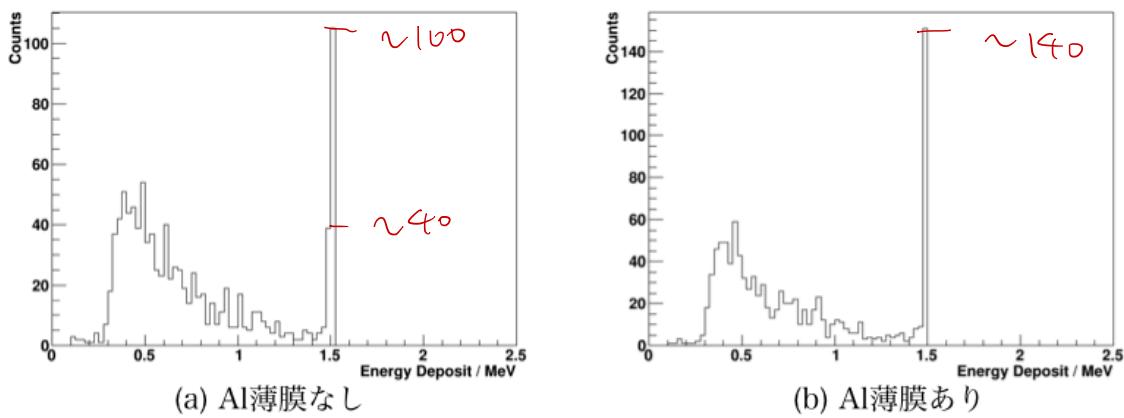


図 4.6: 読み出し用 Al 薄膜による依存性のヒストグラム

4.2 レイヤー構造 Si 検出器の性能評価と電子・ γ 線の識別 (ここは後で見る)

はじめに、各設定値ごとにシミュレーションを行った結果を示す。全レイヤーの Total Energy Deposit の和におけるヒストグラムをプロットした。本シミュレーションでの設定値を表 4.2 に示す。

表 4.2: レイヤ構造 Si 検出器性能評価と電子・ γ 線識別のシミュレーション設定値

変数	設定値		Electron	Gamma
l_{Si}	0.5 mm, 1.0 mm	Event 数	1000	100000
d	0.5 mm, 1.0 mm	初期エネルギー	1.5 MeV	1.5 MeV~3.0 MeV Random
B	0.0 T, 0.5 T, 1.0 T	初期位置	50 Layer	50 Layer
D_{xy}	$100 \times 100 \text{ cm}^2$	初期運動方向	角度 $0^\circ \sim 180^\circ$ Random	角度 $0^\circ \sim 180^\circ$ Random
l_{Se}	0.01 mm			

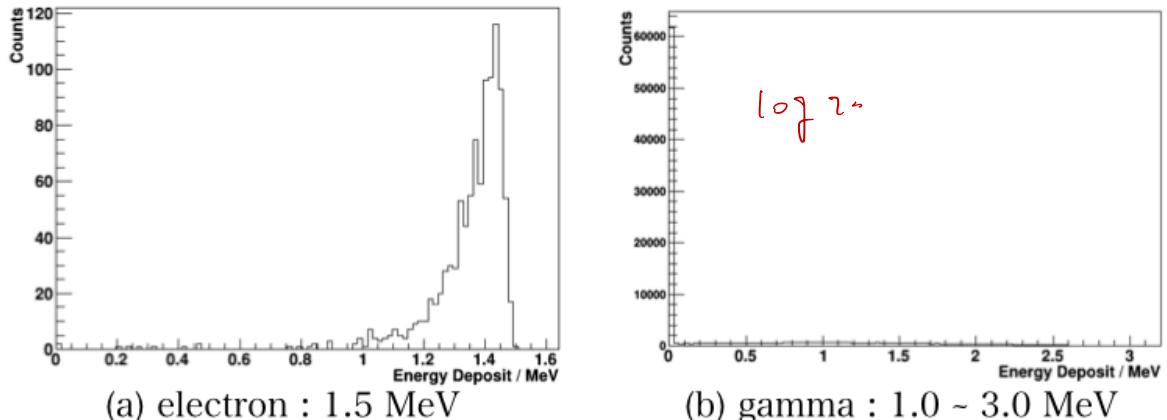


図 4.7: (a)electron(b)gamma の $l_{Si} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

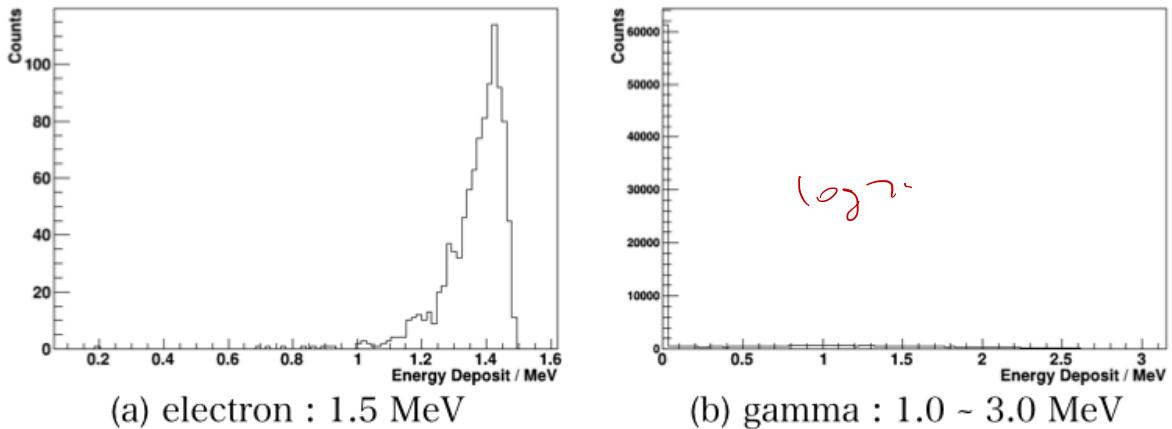


図 4.8: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

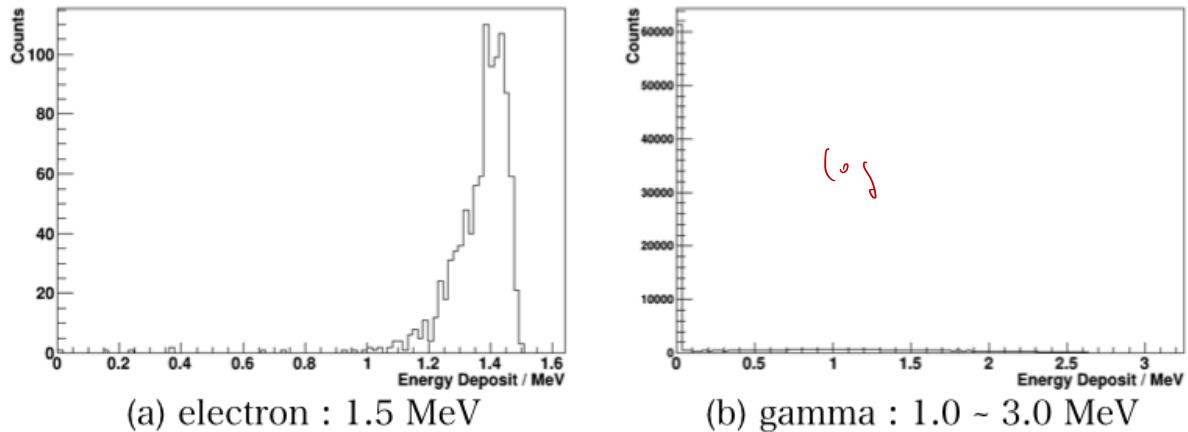


図 4.9: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

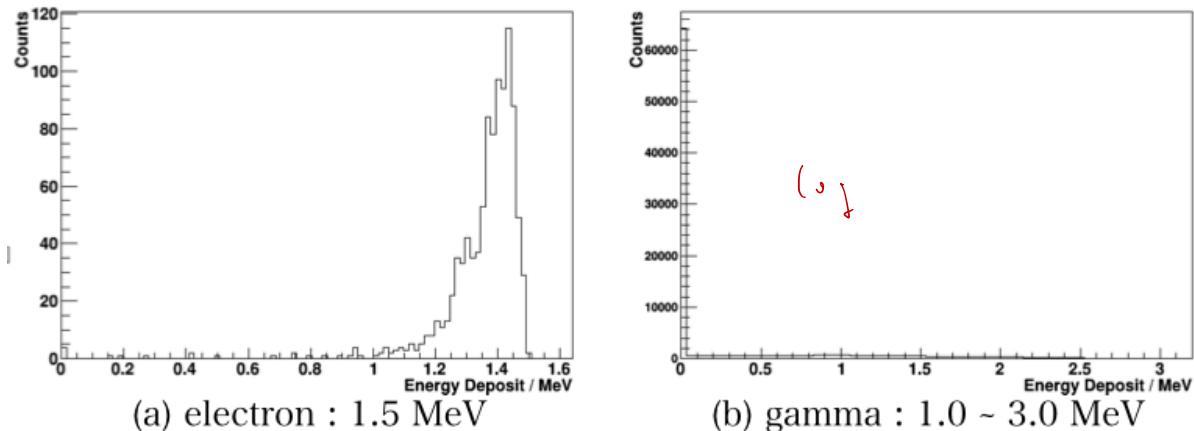


図 4.10: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

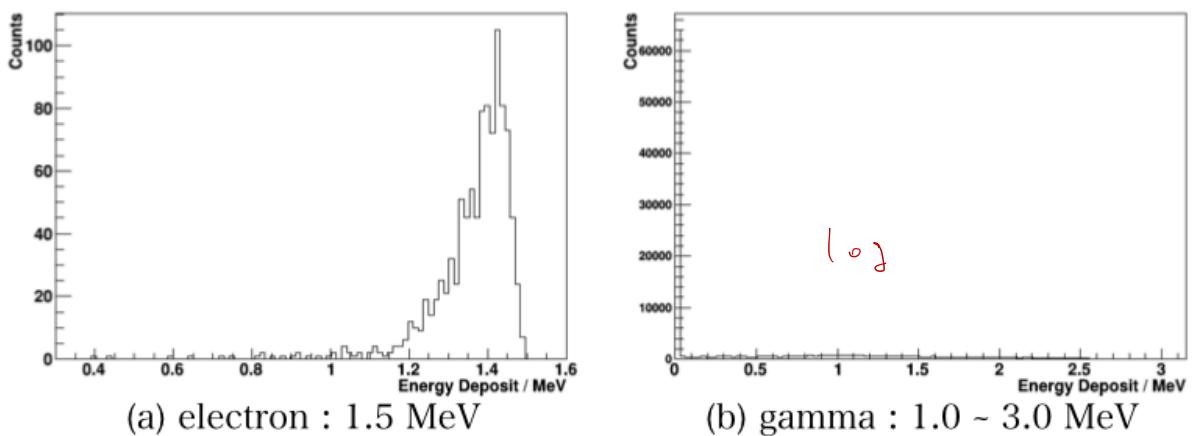


図 4.11: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

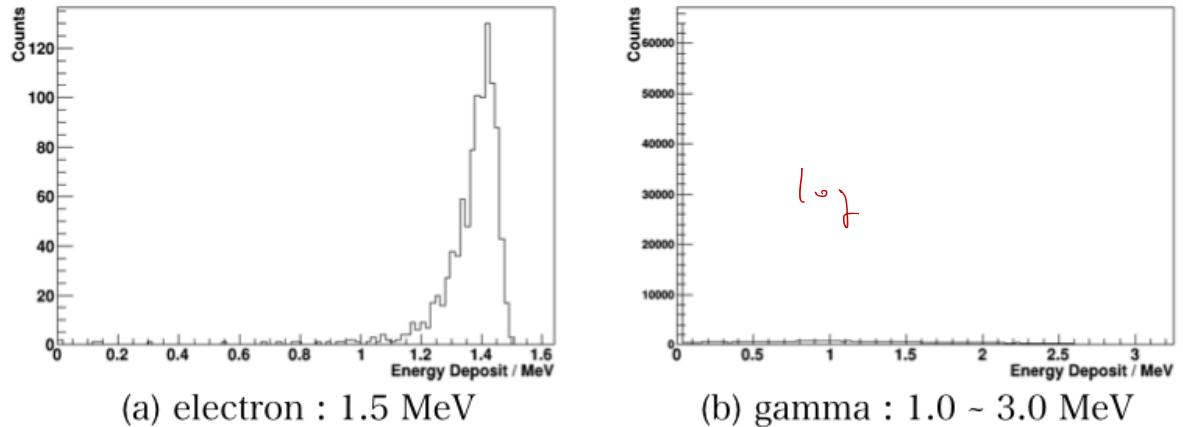


図 4.12: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

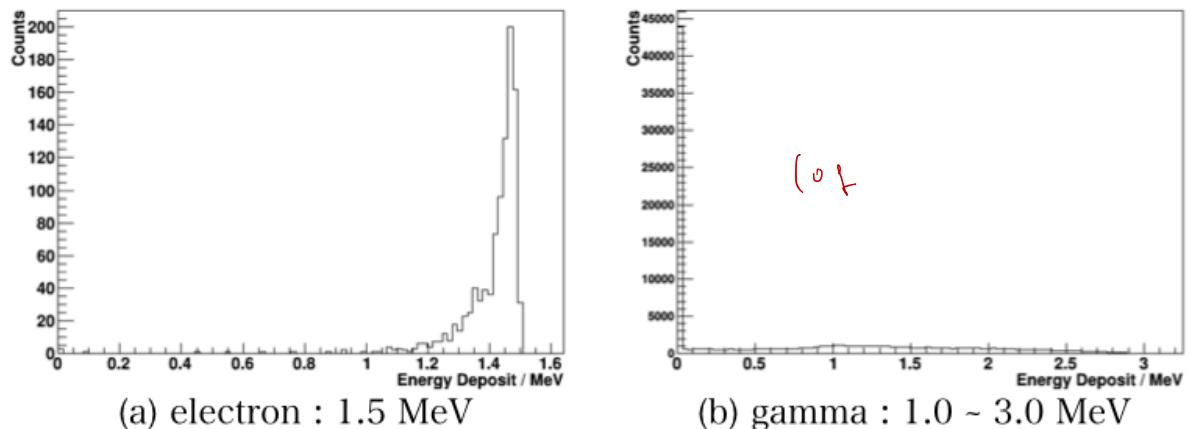


図 4.13: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

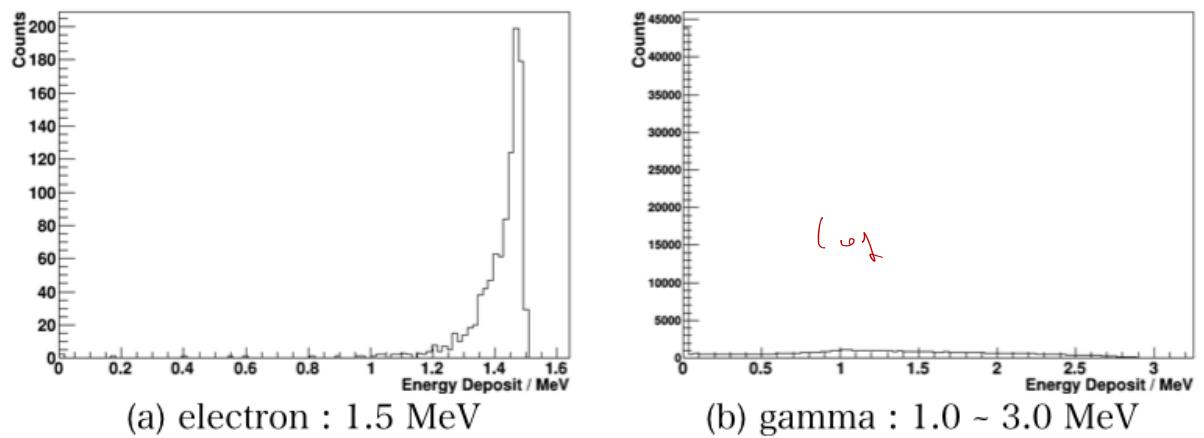


図 4.14: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

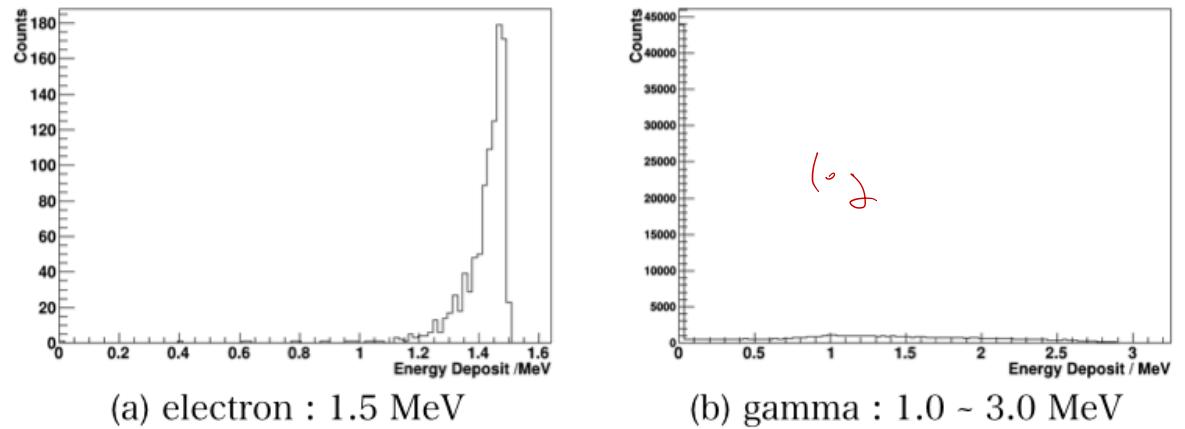


図 4.15: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

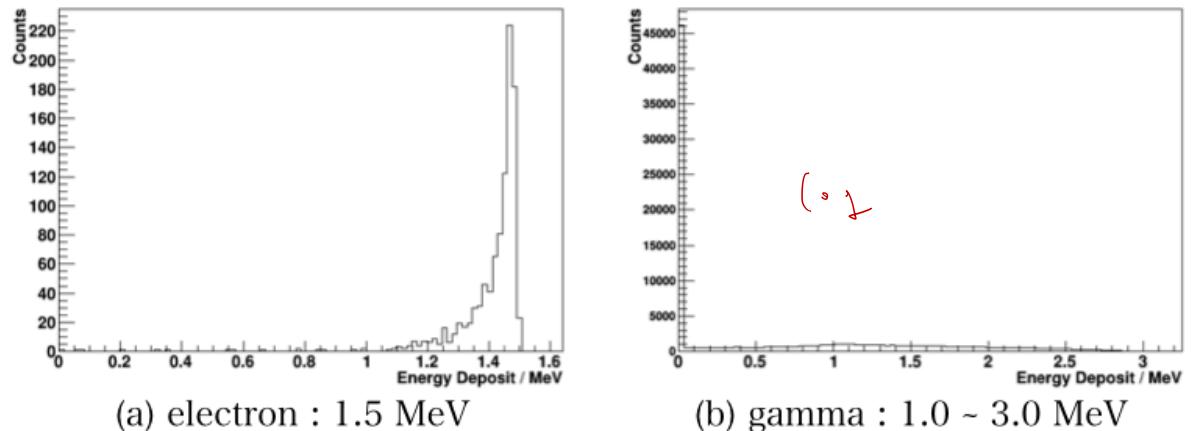


図 4.16: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

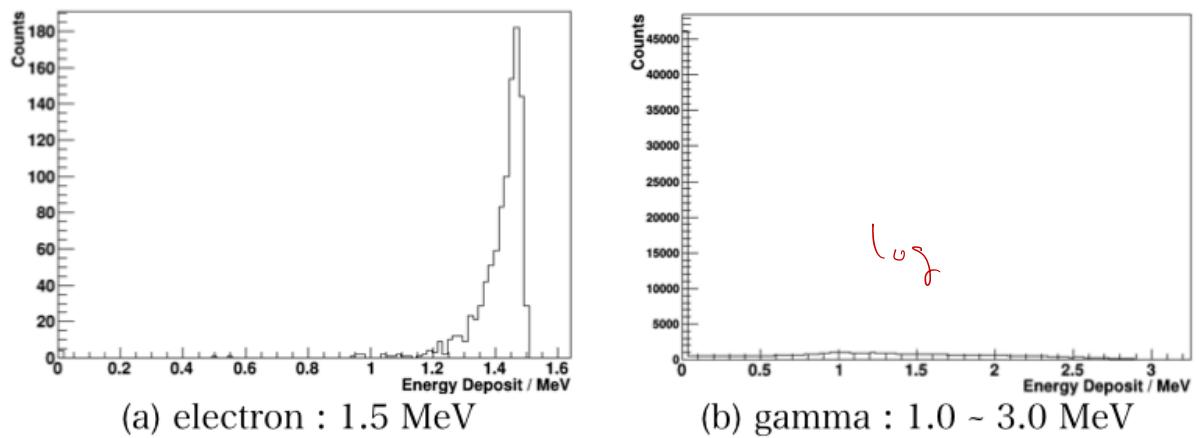


図 4.17: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

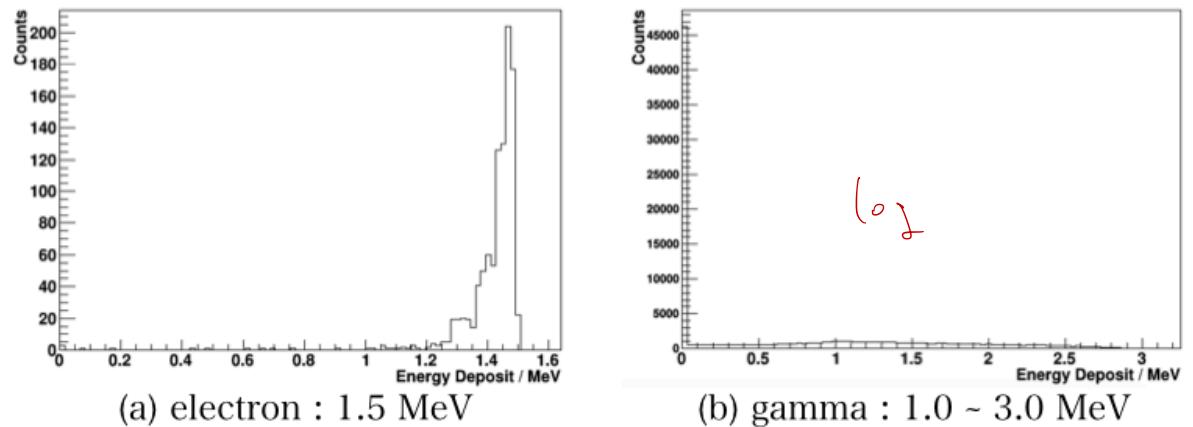


図 4.18: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Total Energy Deposit のヒストグラム

次に、Layer 毎に 0.25MeV 間隔のしきい値に落ちた Count 数と Layer と Energy Deposit を Color map にプロットした。結果を下記に示す。

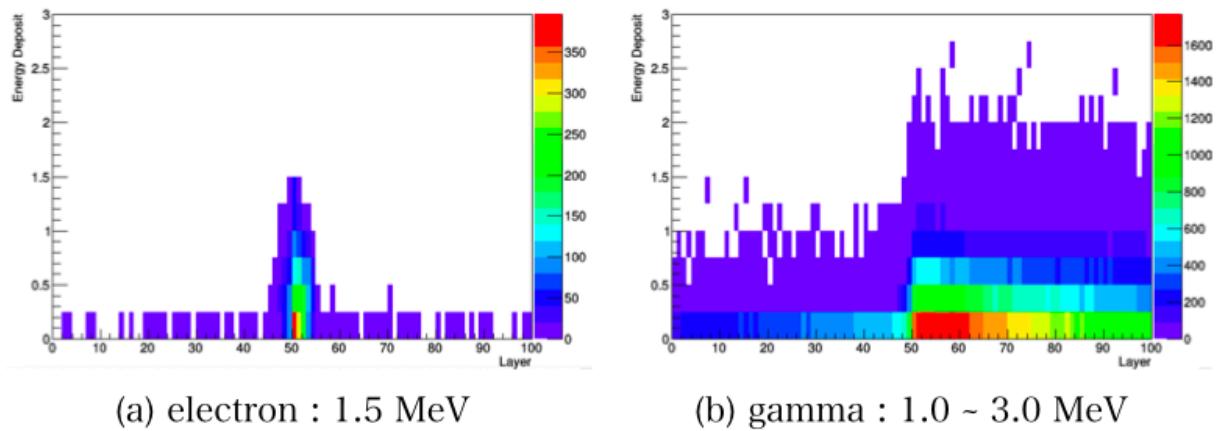


図 4.19: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における Color map

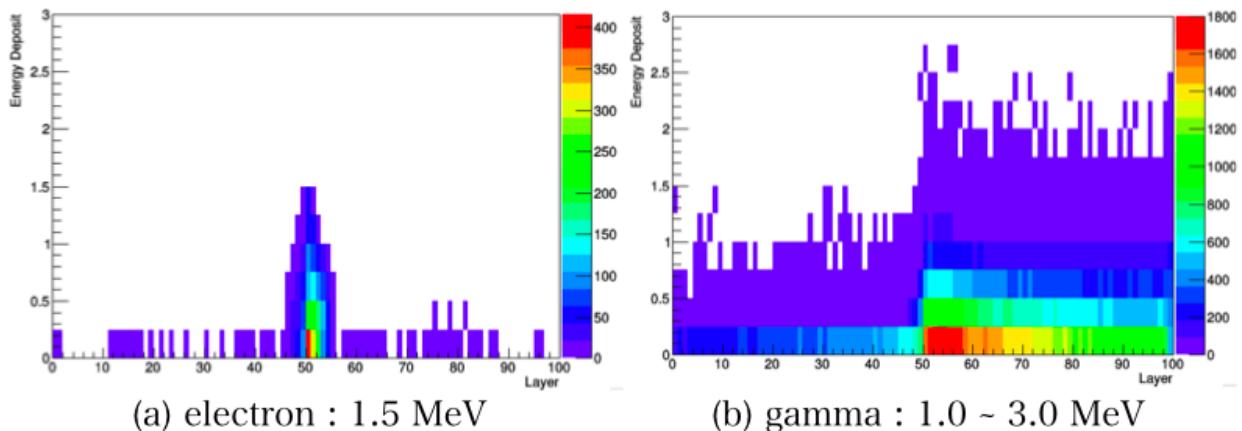


図 4.20: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における Color map

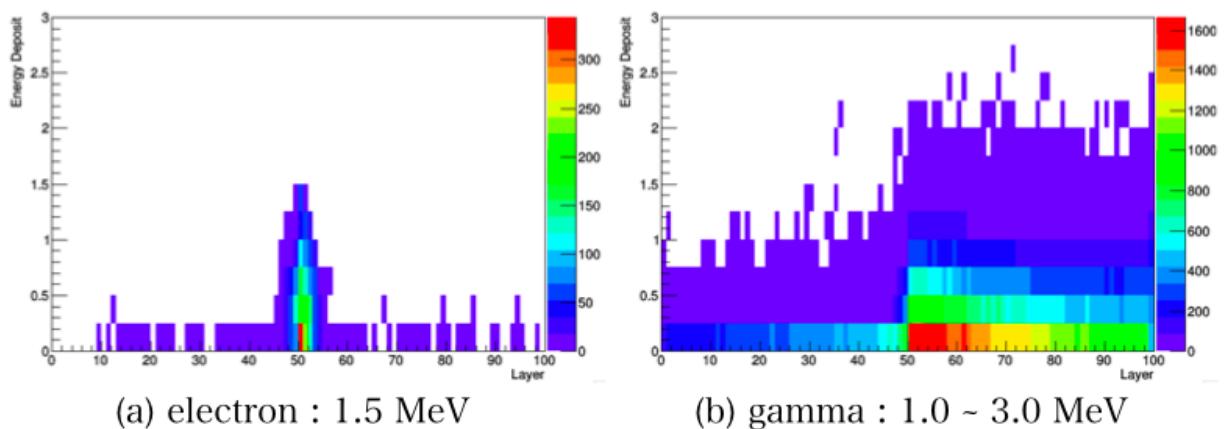


図 4.21: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における Color map

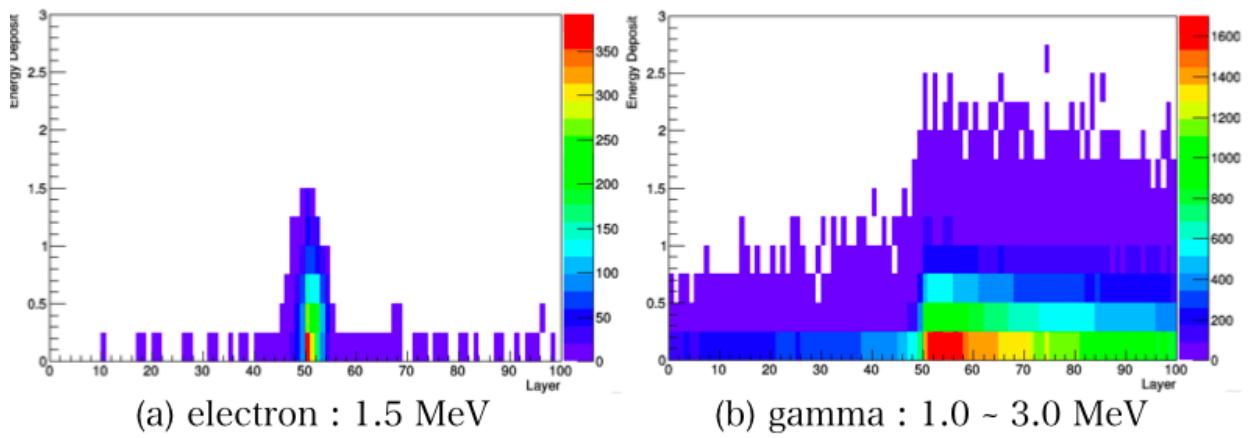


図 4.22: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}, d = 1.0 \text{ mm}, B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Color map

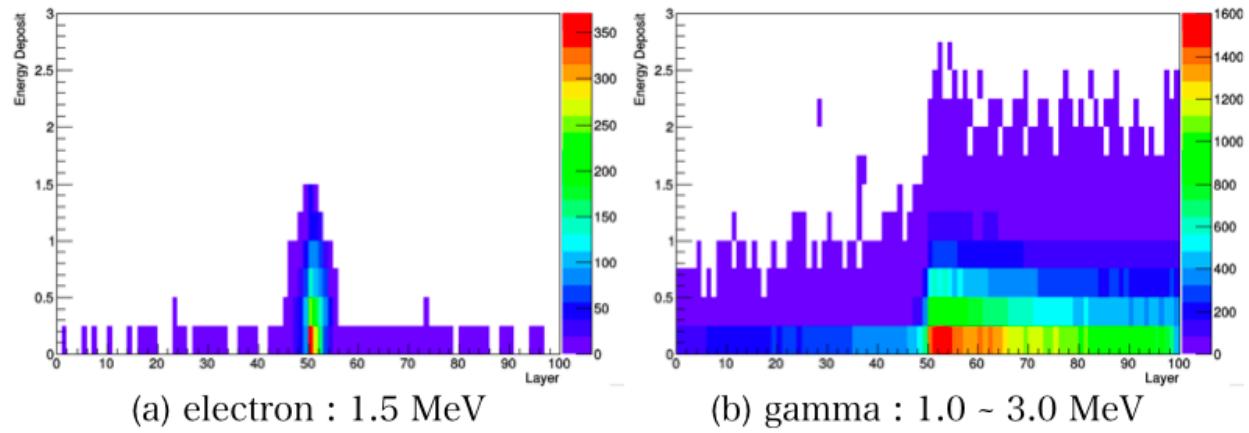


図 4.23: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}, d = 1.0 \text{ mm}, B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Color map

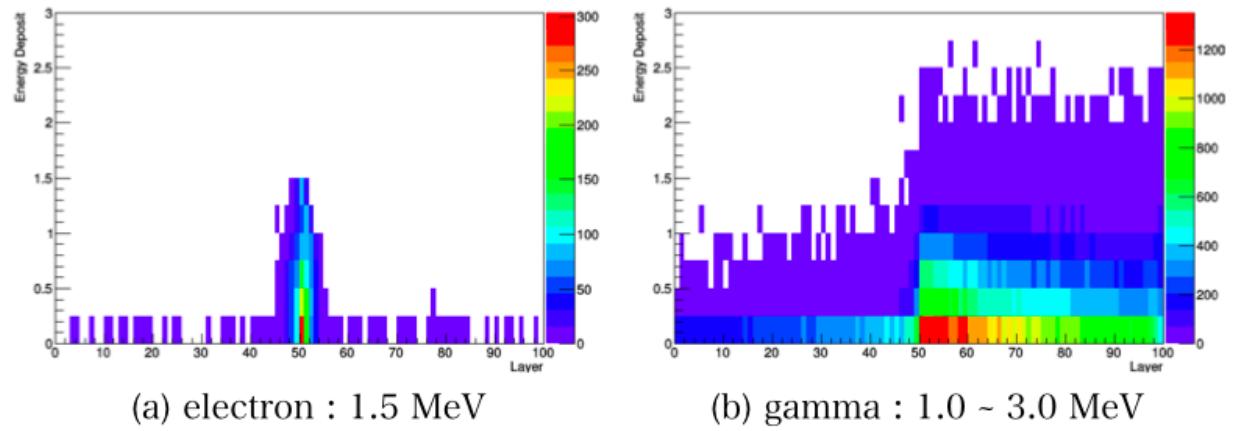


図 4.24: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}, d = 1.0 \text{ mm}, B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Color map

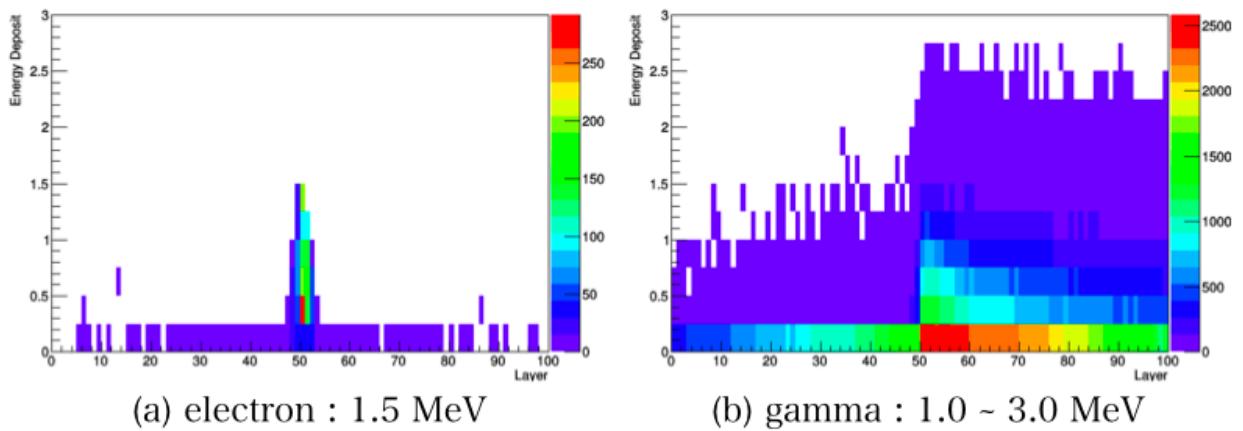


図 4.25: (a)electron(b)gamma $\circ l_{\text{Si}} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における Color map

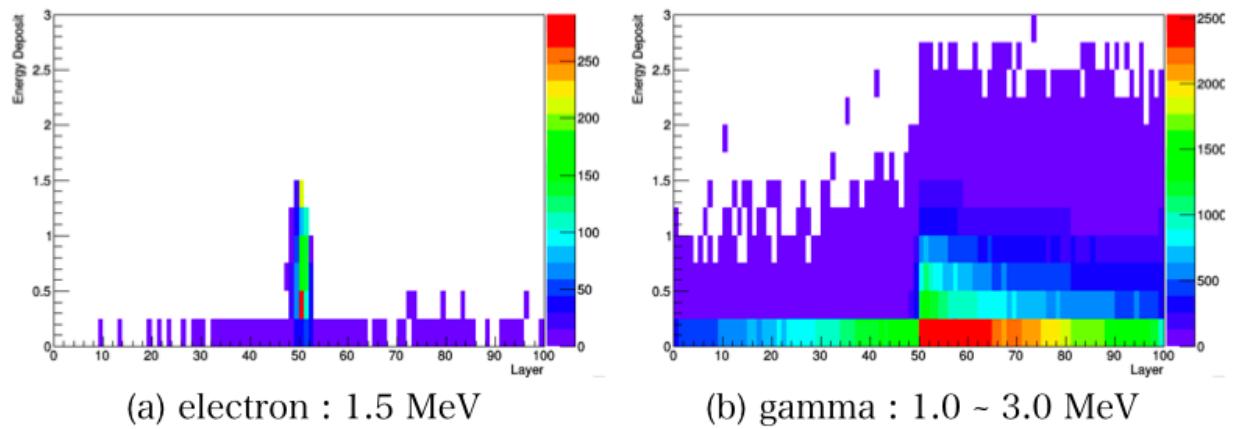


図 4.26: (a)electron(b)gamma $\circ l_{\text{Si}} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における Color map

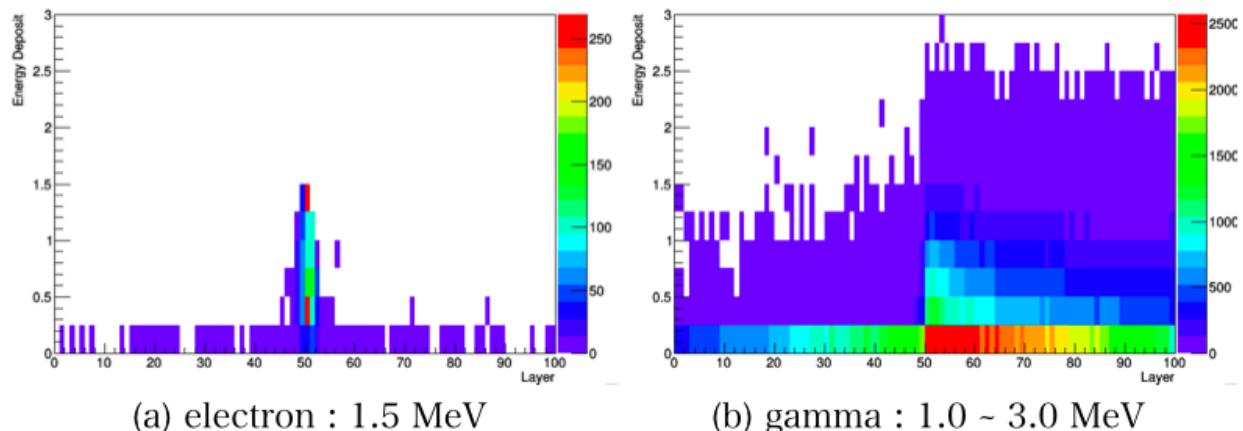


図 4.27: (a)electron(b)gamma $\circ l_{\text{Si}} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 1.0$ T の設定値における Color map

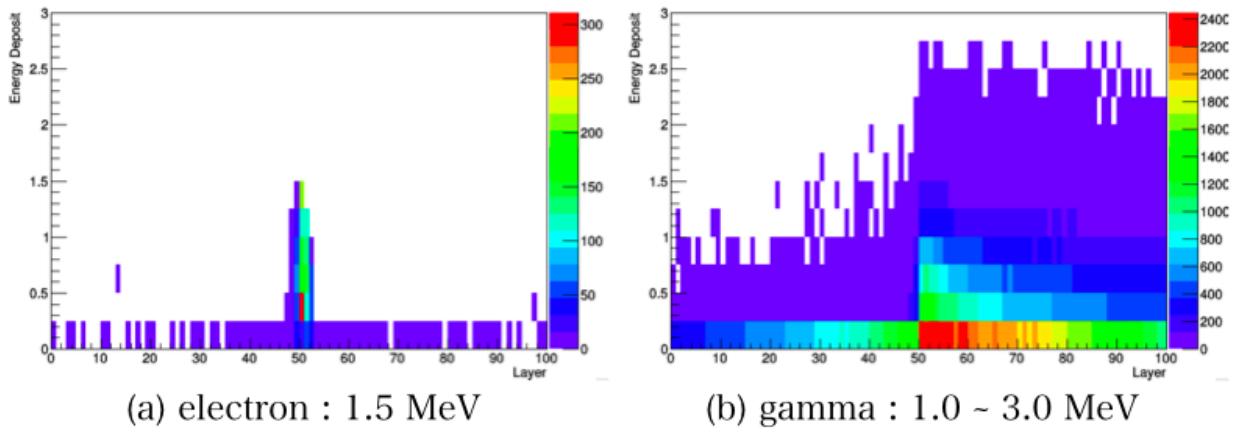


図 4.28: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における Color map

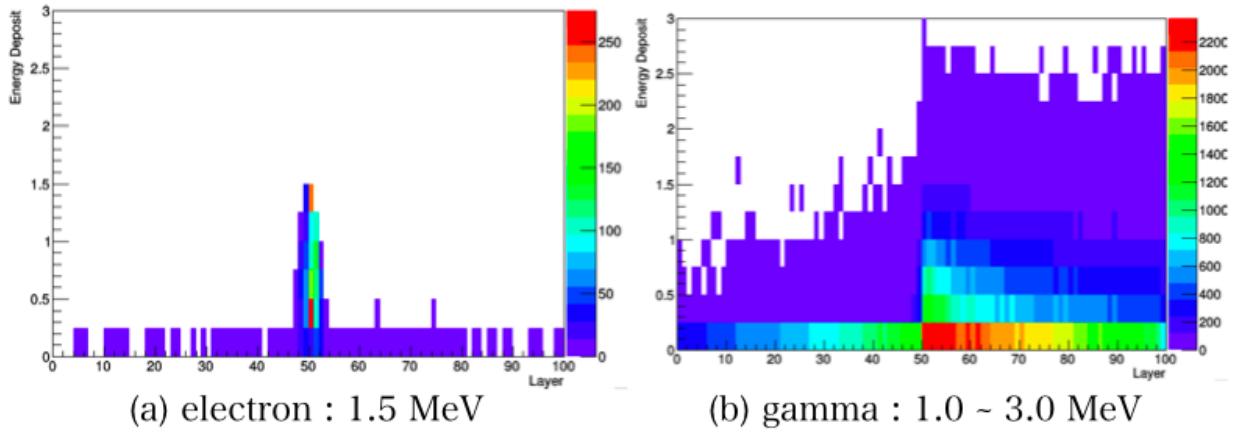


図 4.29: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における Color map

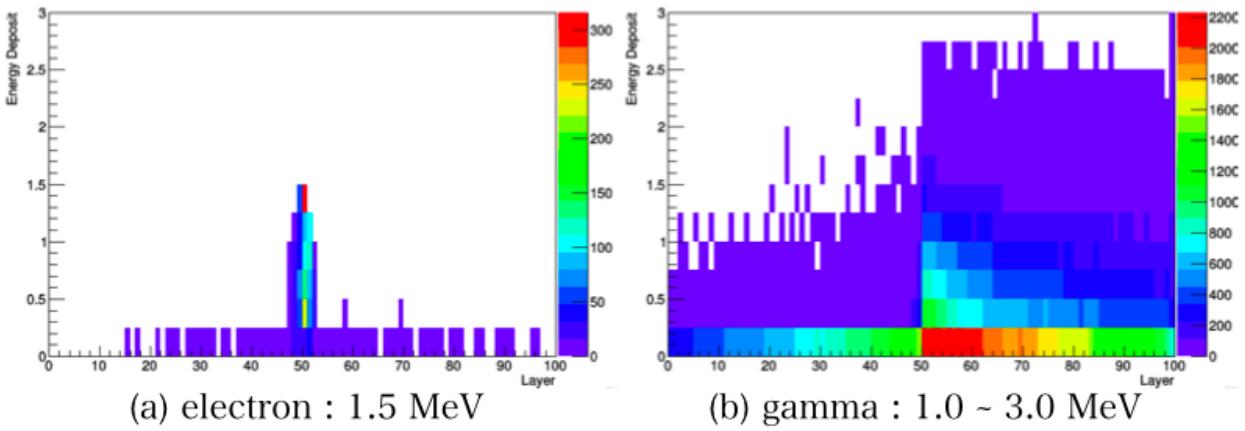


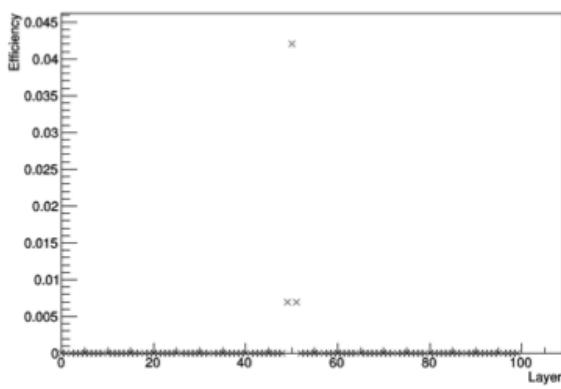
図 4.30: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における Color map

図 4.30 から図 4.30 の Color map からレイヤー構造 Si 検出器での Layer 每の Energy Deposit の分布がわかる。電子は初期位置にピークが立ち、 γ 線は放射方向に一様に分布をしている。電子の

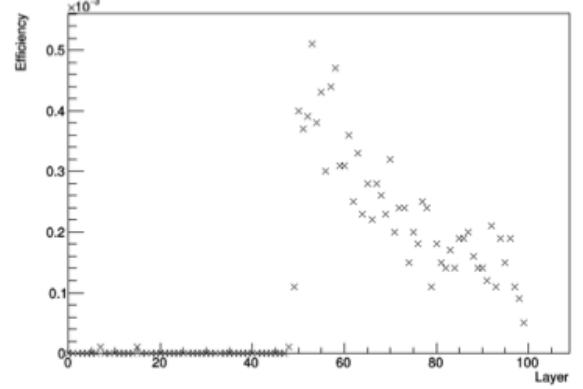
Color map では、磁場をかけると Energy Deposit の値が大きいところに落ちている電子が多くなっていることがわかる。また、Si 半導体検出器の厚み l_{Si} が厚くなるとピークが鋭くなっている。すなわち、Efficiency 1.25 MeV から 1.25 MeV 間の Energy Deposit が観測される Layer 数が減っている。 γ 線では広く Efficiency の間の Energy Deposit が観測されているため、電子と γ 線での識別が Layer の分布によってできることがわかる。

次に、これらの結果について各 Layer について見ていく。

各 Layer の Efficiency を求め、各 Layer における Efficiency をグラフにプロットした。このシミュレーションでの初期粒子は、レイヤー番号 50 からレイヤー番号が大きくなる方向に放出している。

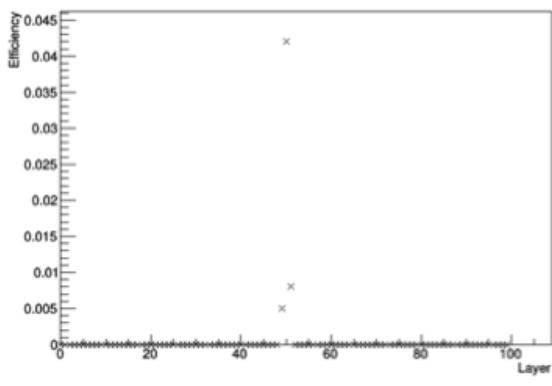


(a) electron : 1.5 MeV

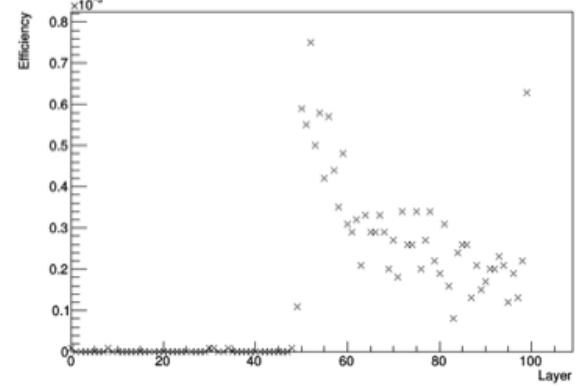


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

図 4.31: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency



(a) electron : 1.5 MeV



(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

図 4.32: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

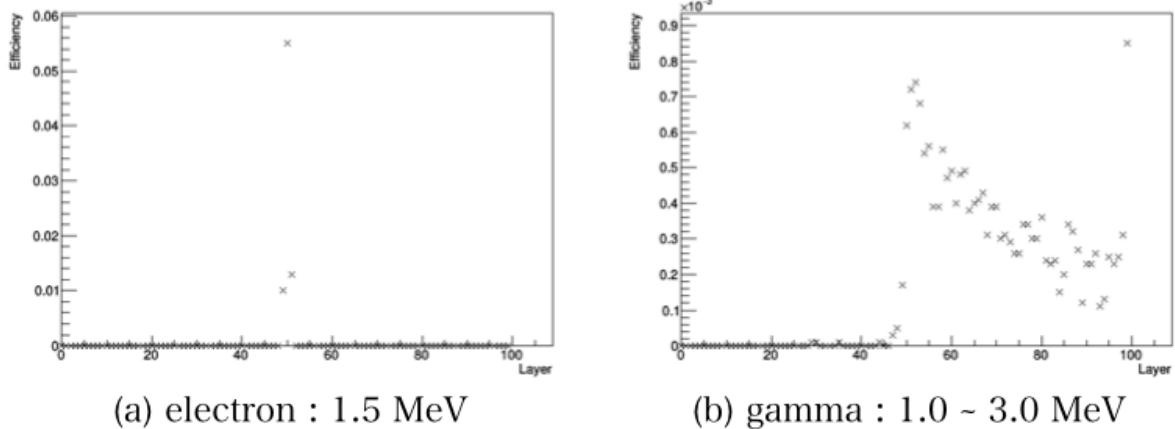


図 4.33: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

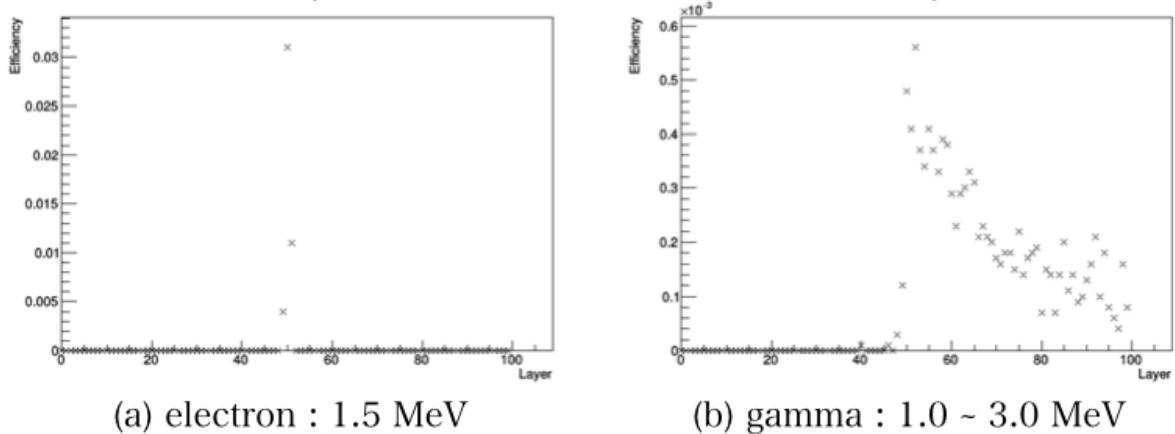


図 4.34: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

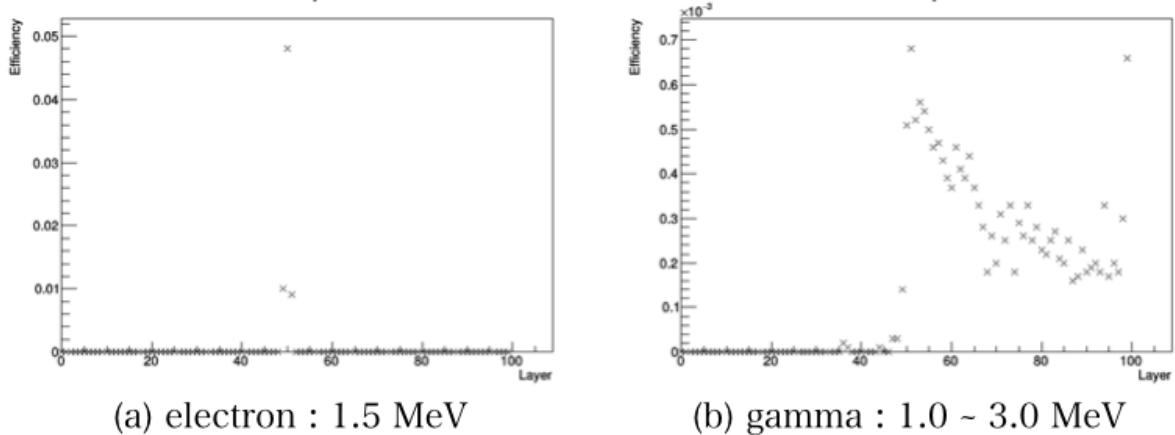


図 4.35: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

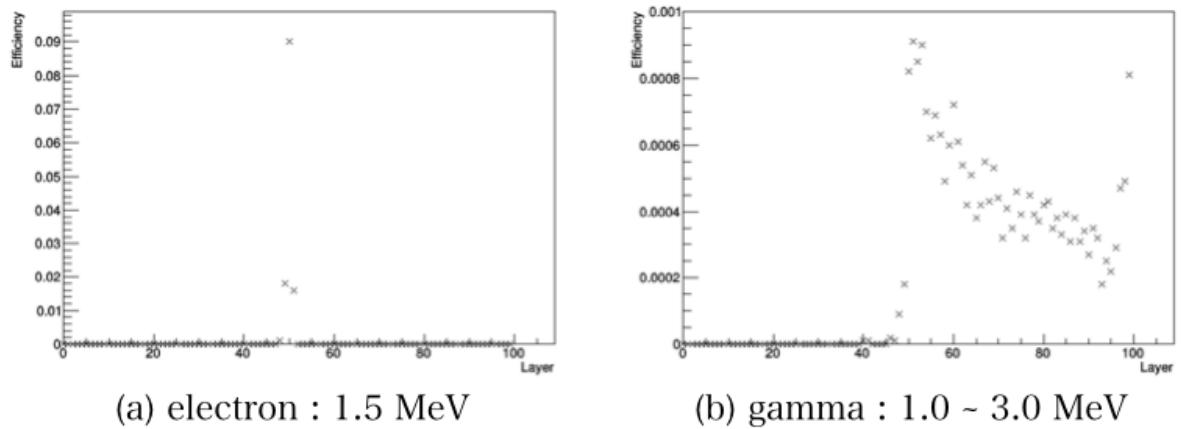


図 4.36: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

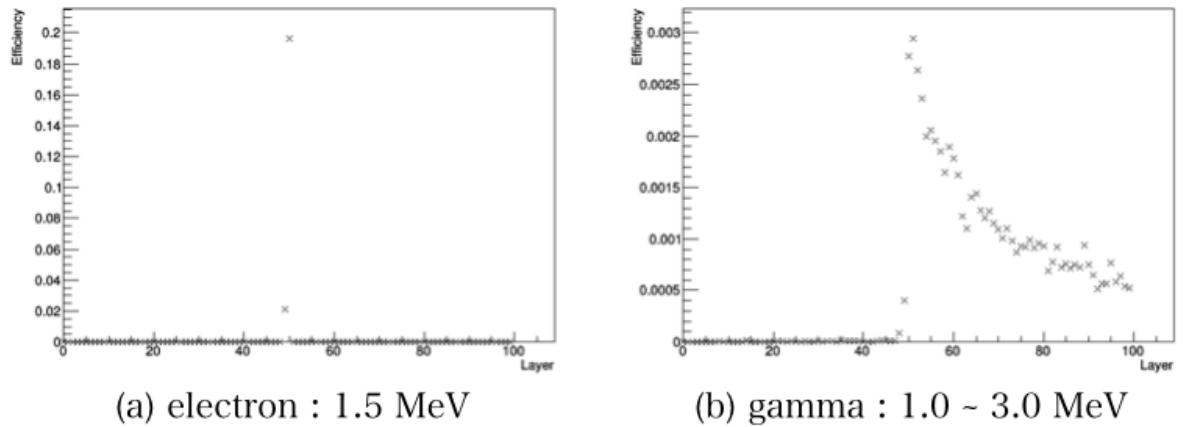


図 4.37: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

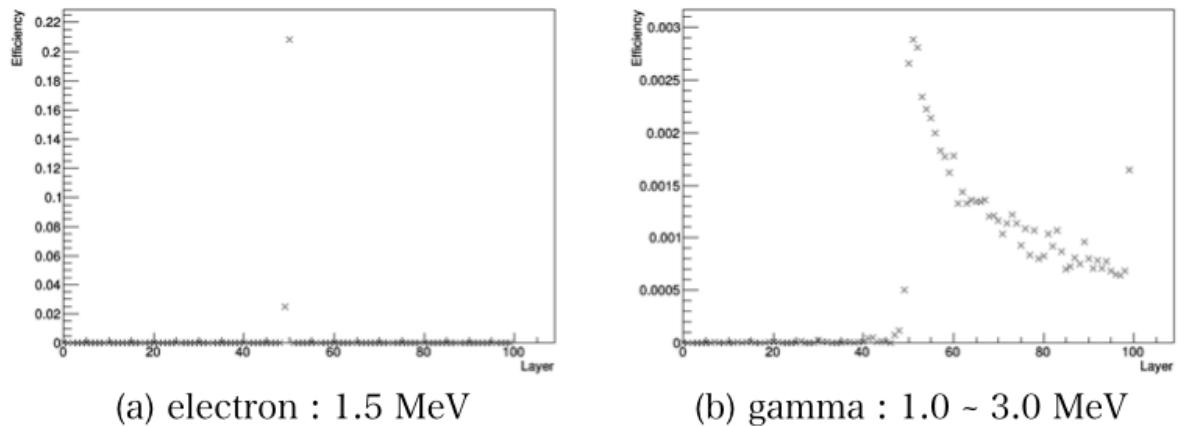


図 4.38: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

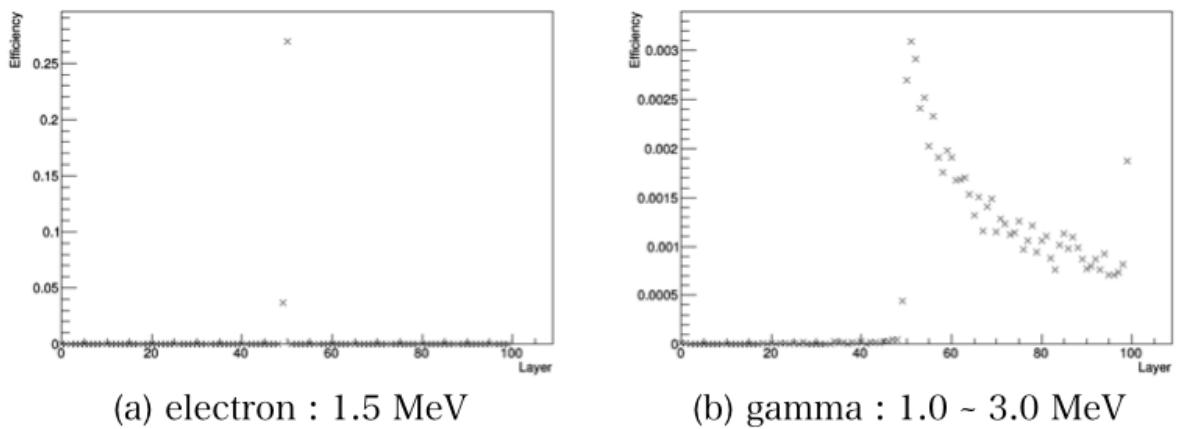


図 4.39: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

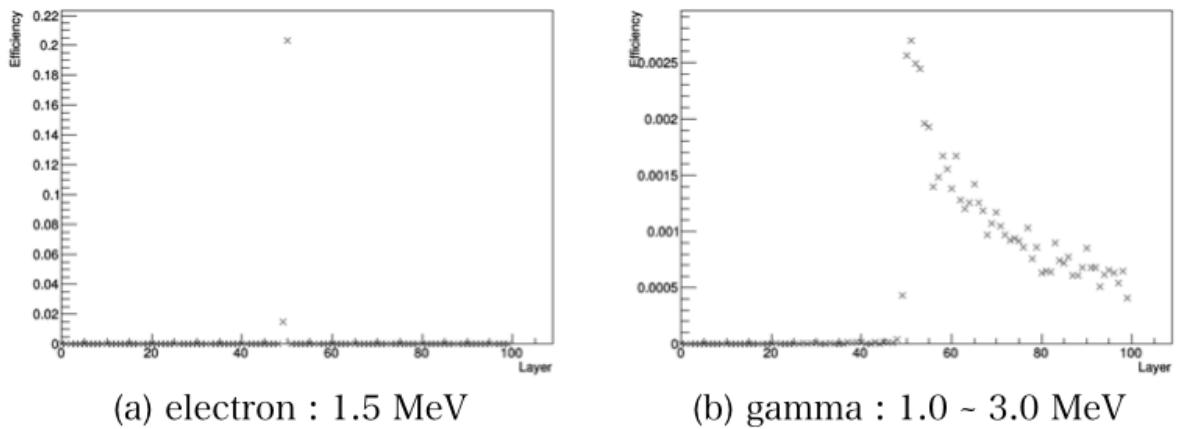


図 4.40: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

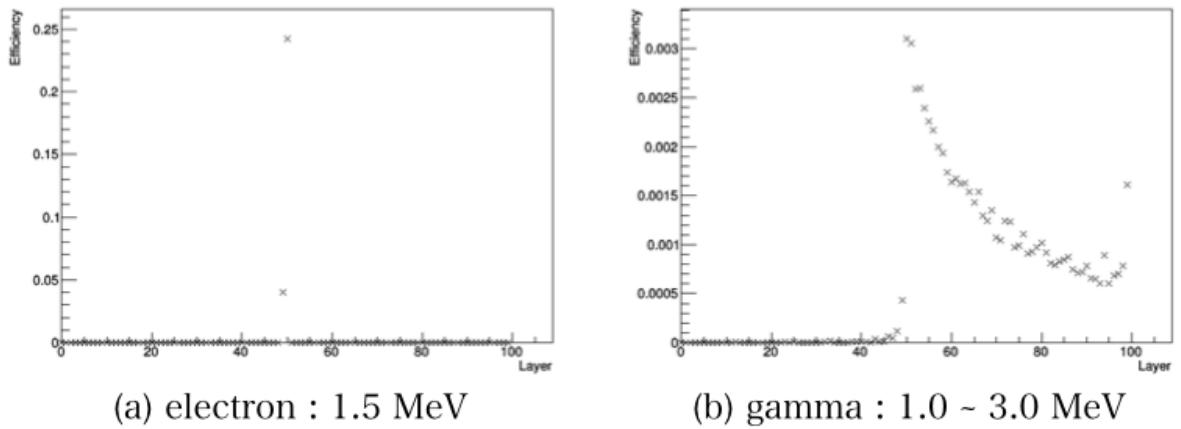


図 4.41: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

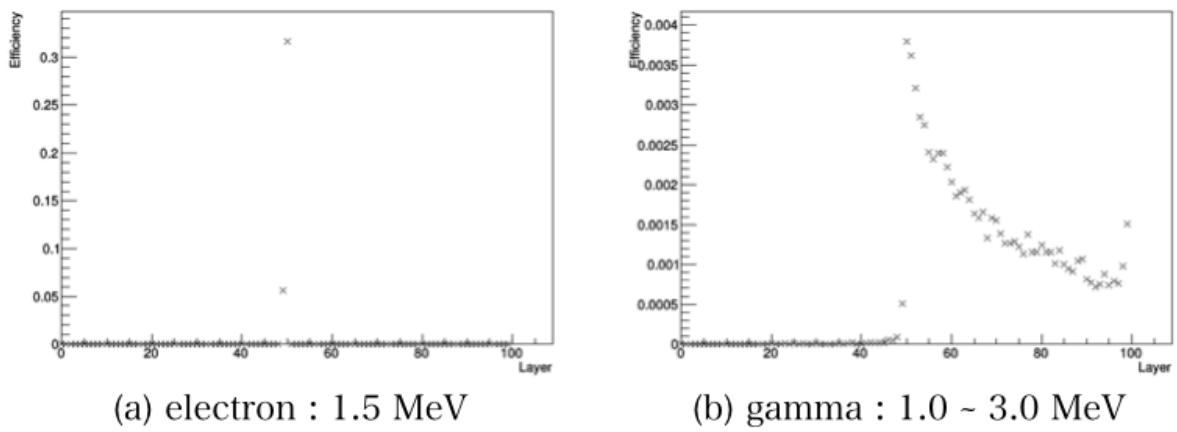


図 4.42: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における各 Layer の Efficiency

Energy Deposit と Layer の Color map 同様、Efficiency の分布も電子はピークをもち、 γ 線は放射方向に連続的に分布していることが分かる。Efficiency の値を比べると、電子が放出されたときの Efficiency の方が大きい。電子と γ 線が同時に発生した場合、優位的に観測されるのは電子である。

ここで、各 Layer 毎に Energy Deposit が観測された数を Count し、Count 数が最も多い Layer を E_1 、2 番目に多い Layer を E_2 とし、それぞれ E_1, E_2 のレイヤー番号を求めた。

表 4.3 に E_1 と E_2 の Layer とその Layer における効率 Efficiency をまとめた。

表 4.3: E_1 と E_2 の Layer と効率

l_{Si}	d	B	Electron		Gamma		
			Layer	Efficiency	Layer	Efficiency	
0.5 mm	0.5 mm	0.0 T	E_1	50	0.042	52	0.00039
			E_2	51	0.007	54	0.00038
0.5 mm	0.5 mm	0.5 T	E_1	50	0.042	52	0.00075
			E_2	51	0.008	53	0.00050
0.5 mm	0.5 mm	1.0 T	E_1	50	0.055	52	0.00074
			E_2	51	0.013	51	0.00072
0.5 mm	1.0 mm	0.0 T	E_1	50	0.031	53	0.00037
			E_2	51	0.011	52	0.00056
0.5 mm	1.0 mm	0.5 T	E_1	50	0.048	52	0.00052
			E_2	51	0.009	53	0.00056
0.5 mm	1.0 mm	1.0 T	E_1	50	0.090	52	0.00085
			E_2	51	0.016	51	0.00091
1.0 mm	0.5 mm	0.0 T	E_1	50	0.196	51	0.00294
			E_2	51	0.000	52	0.00264
1.0 mm	0.5 mm	0.5 T	E_1	50	0.208	51	0.00288
			E_2	51	0.000	52	0.00281
1.0 mm	0.5 mm	1.0 T	E_1	50	0.269	51	0.00309
			E_2	51	0.000	52	0.00291
1.0 mm	1.0 mm	0.0 T	E_1	50	0.203	51	0.00269
			E_2	51	0.000	52	0.00249
1.0 mm	1.0 mm	0.5 T	E_1	50	0.242	51	0.00306
			E_2	51	0.000	50	0.00310
1.0 mm	1.0 mm	1.0 T	E_1	50	0.316	50	0.00379
			E_2	51	0.000	51	0.00362

E_1 と E_2 の Energy Deposit のヒストグラムを電子・ γ 線においてプロットをした。縦軸は対数をとった。

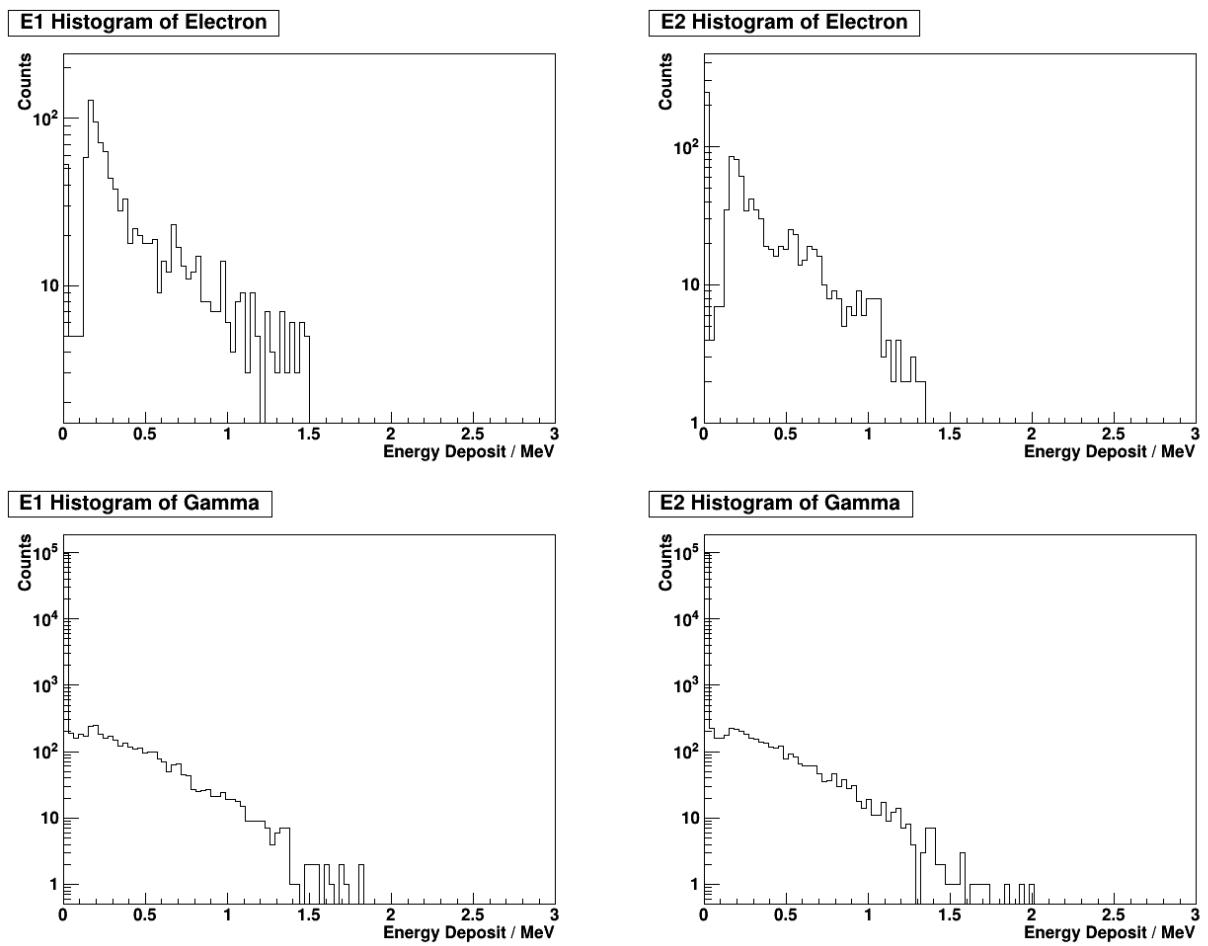


図 4.43: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

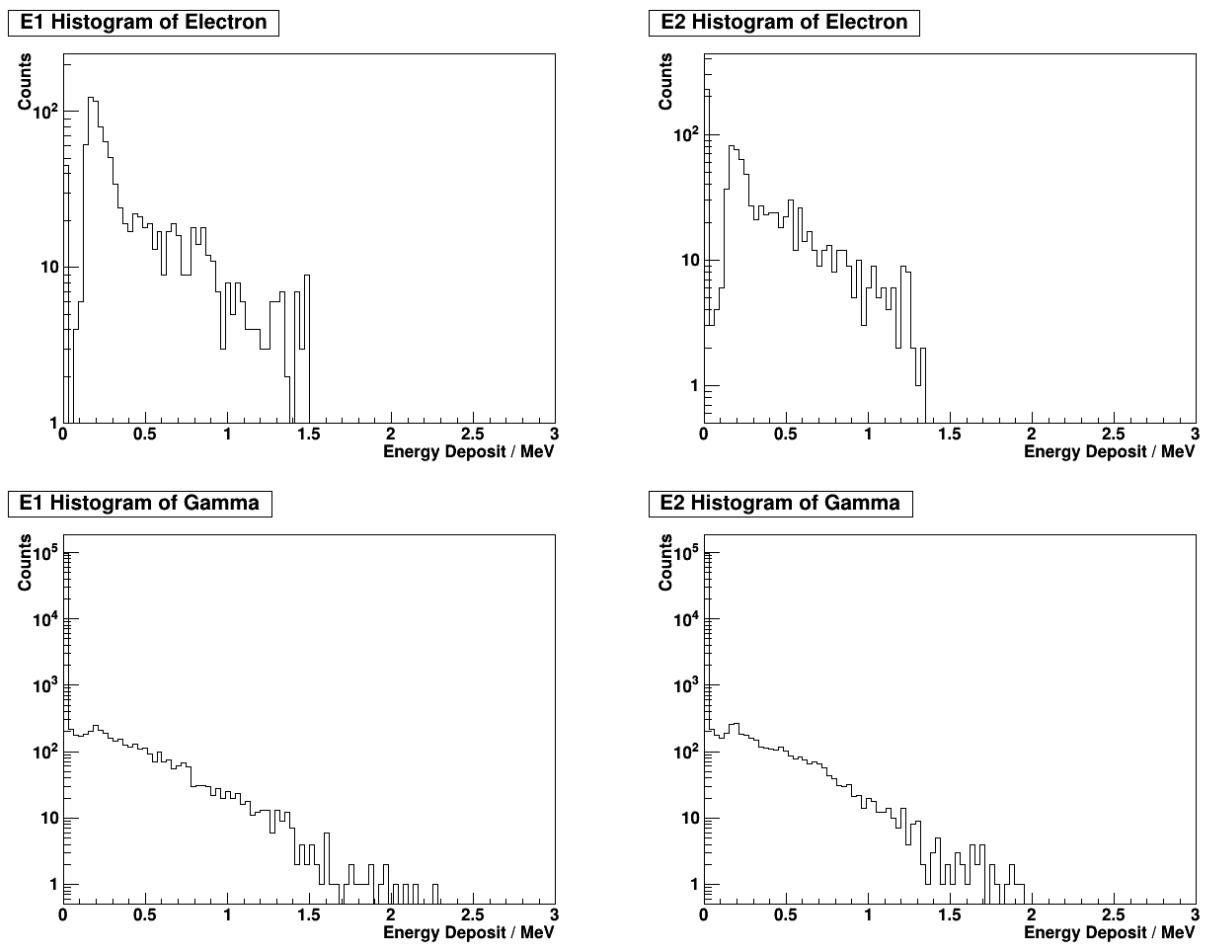


図 4.44: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

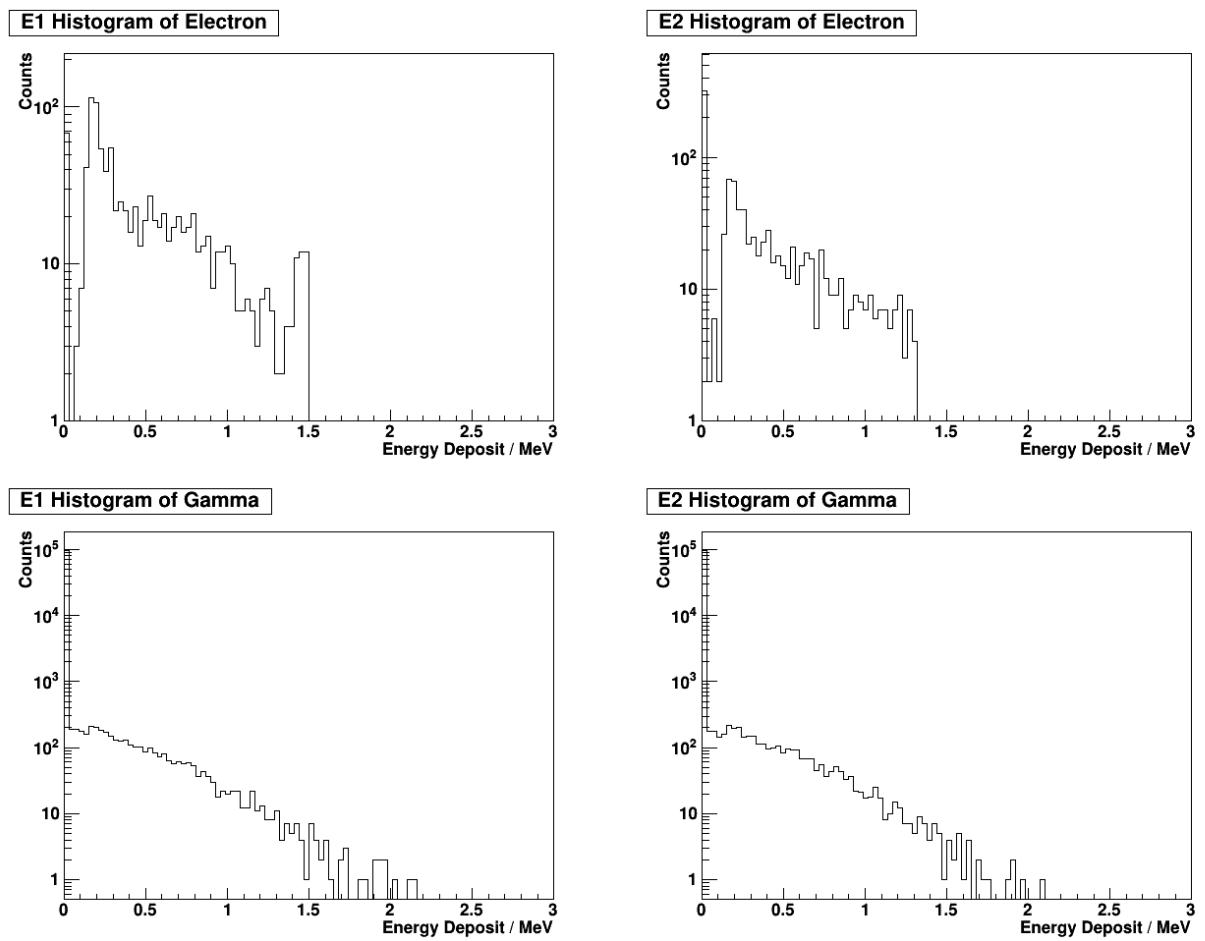


図 4.45: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

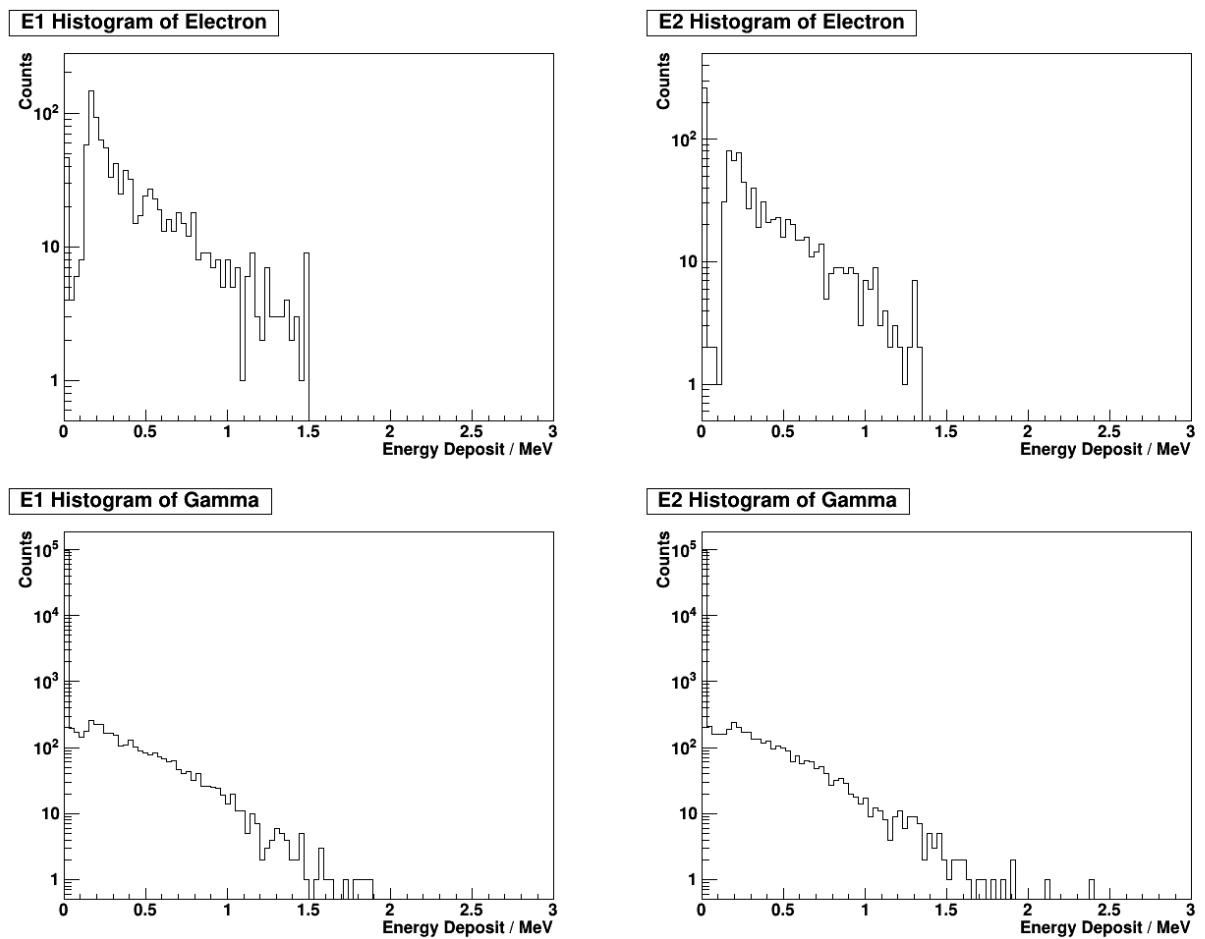


図 4.46: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

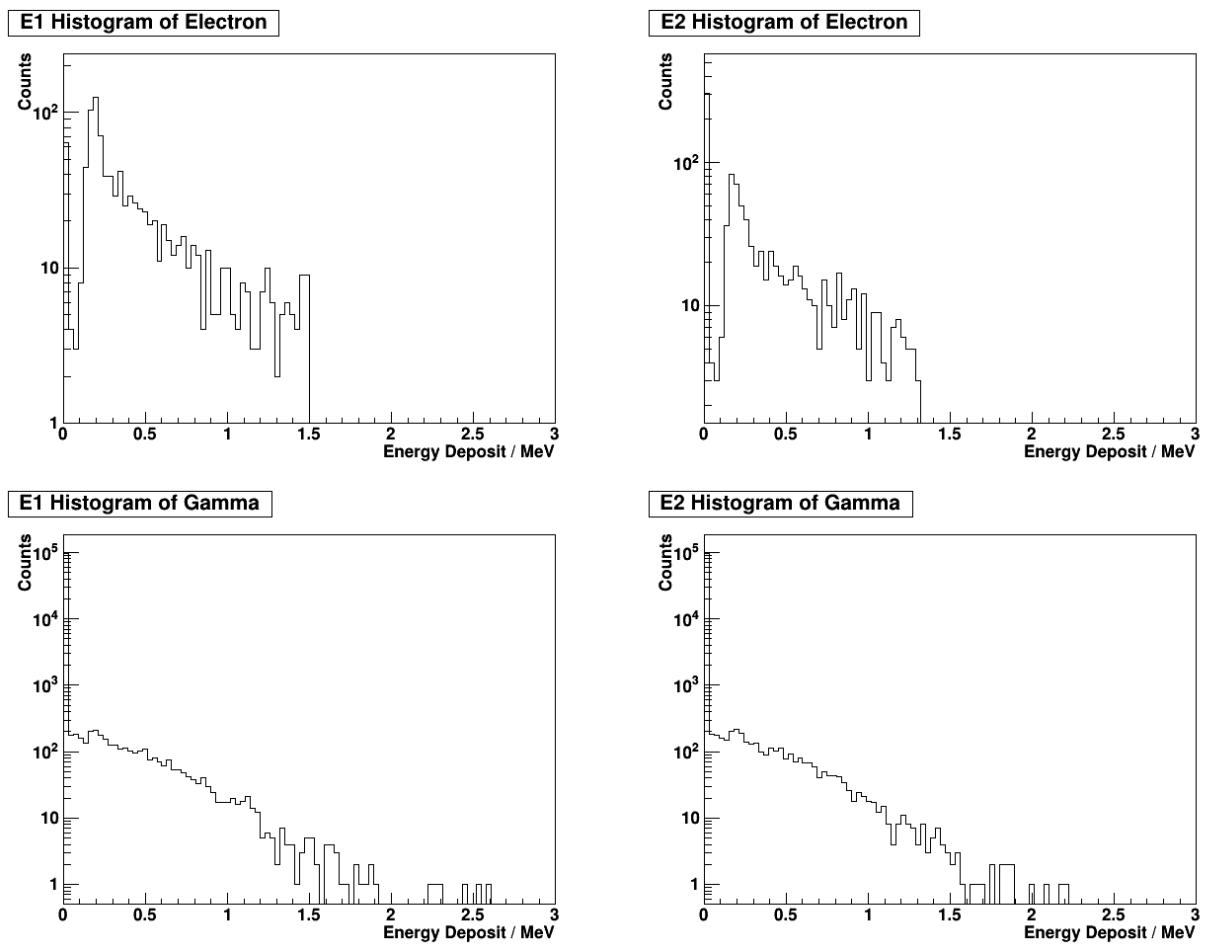


図 4.47: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

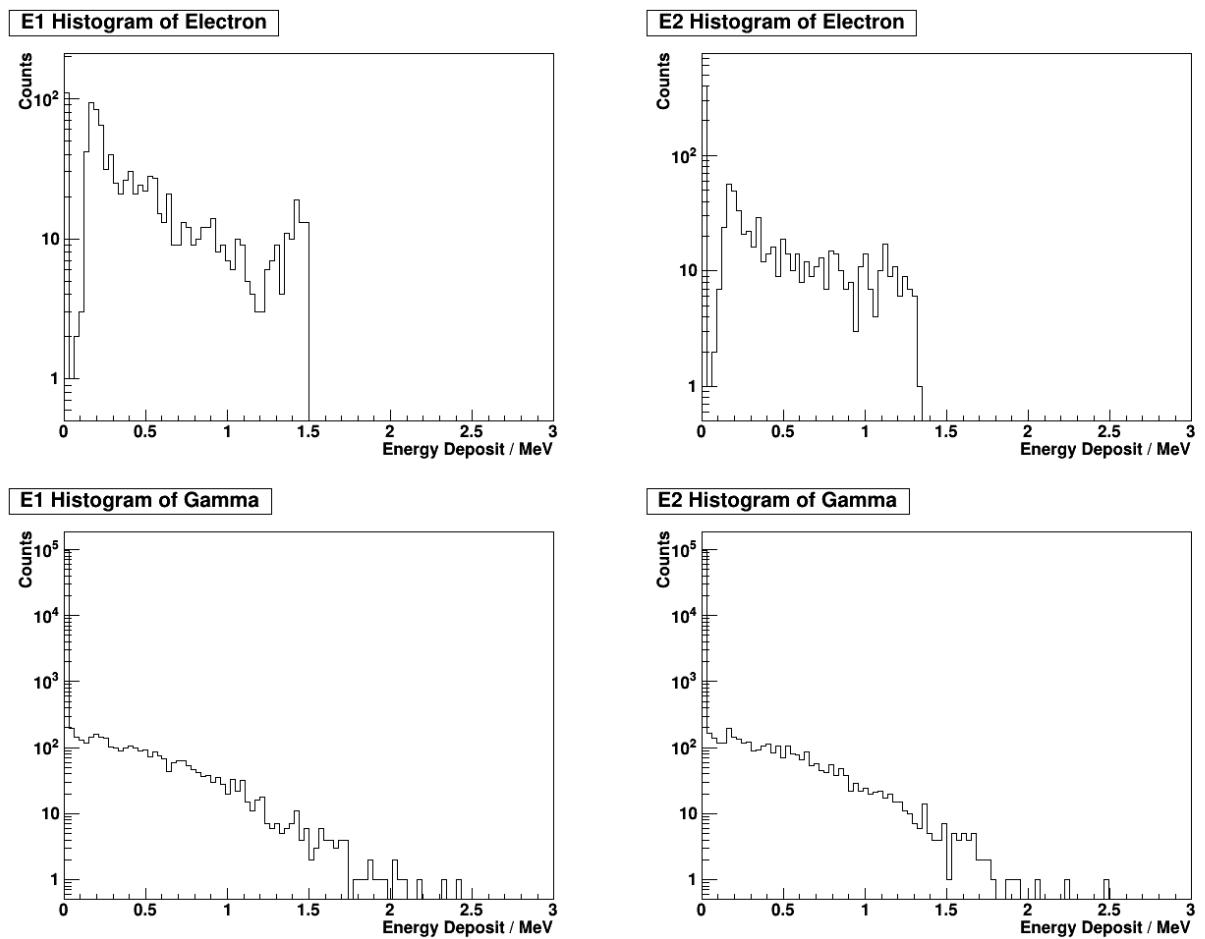


図 4.48: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

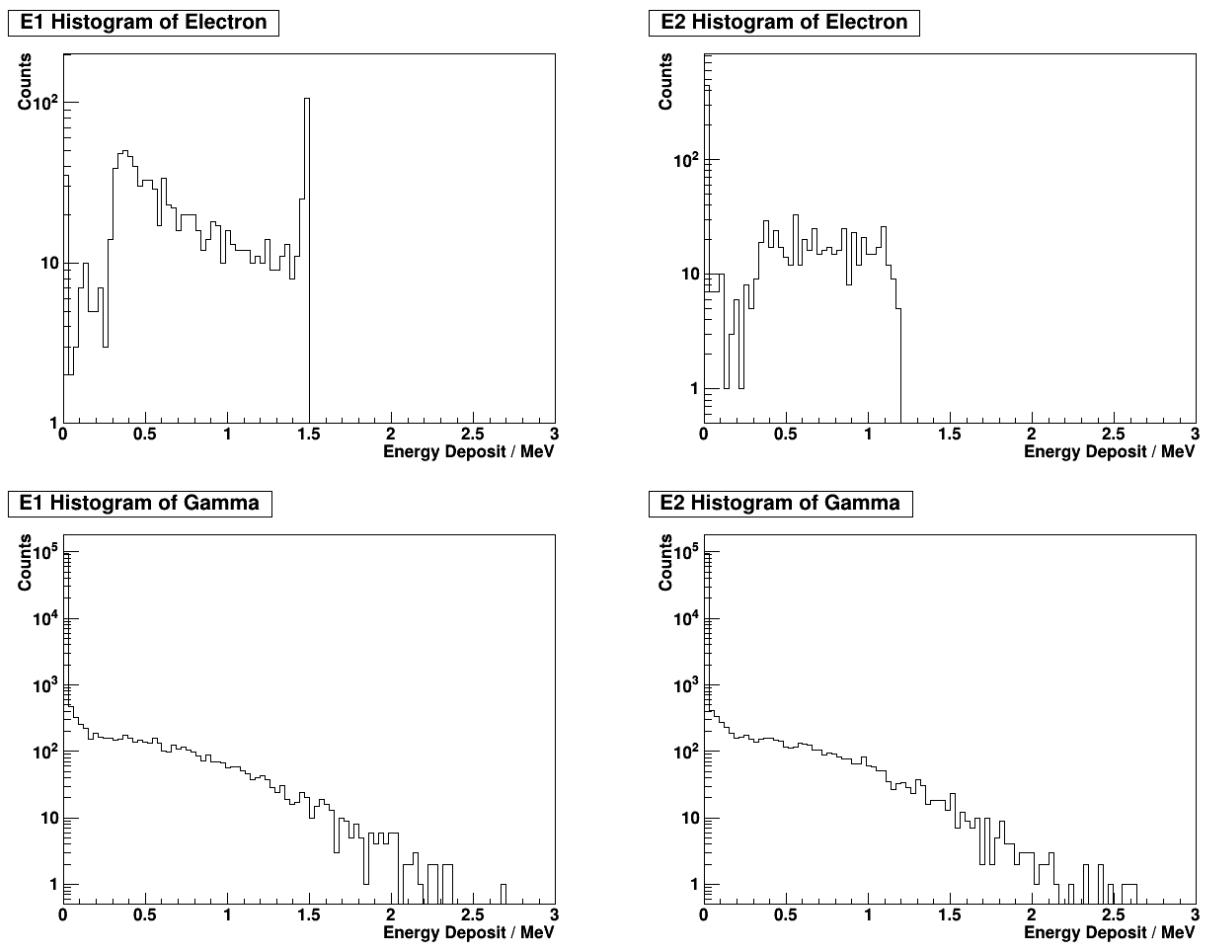


図 4.49: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

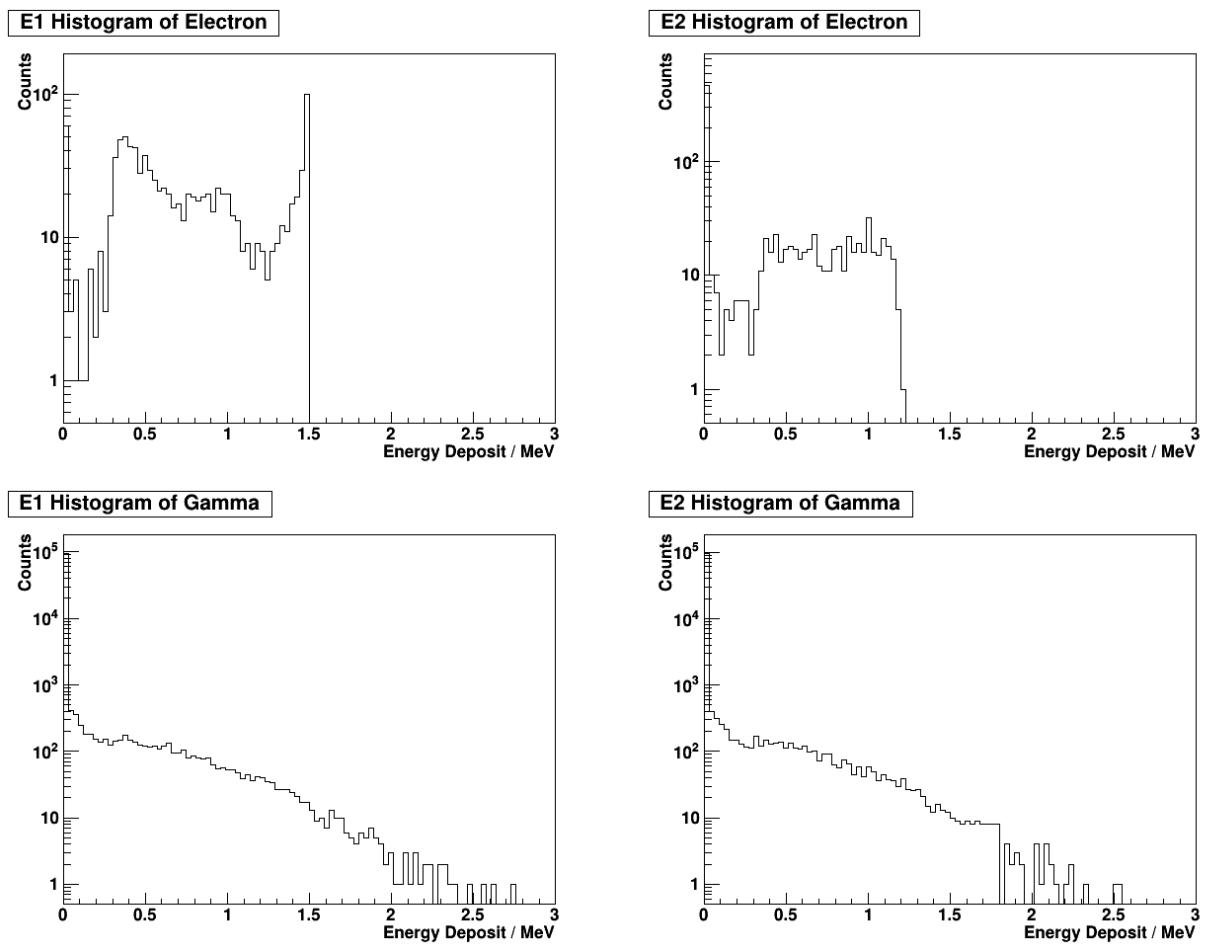


図 4.50: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

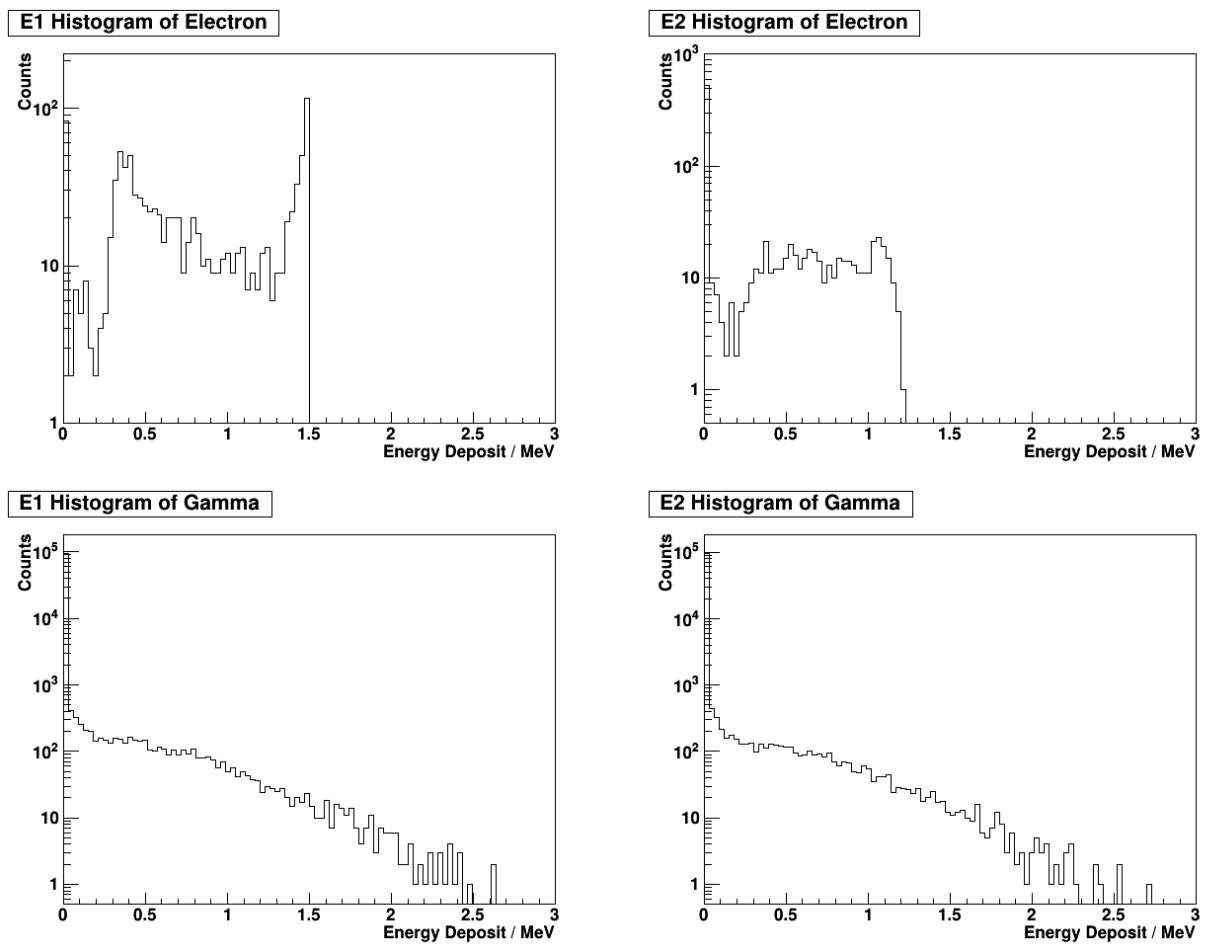


図 4.51: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

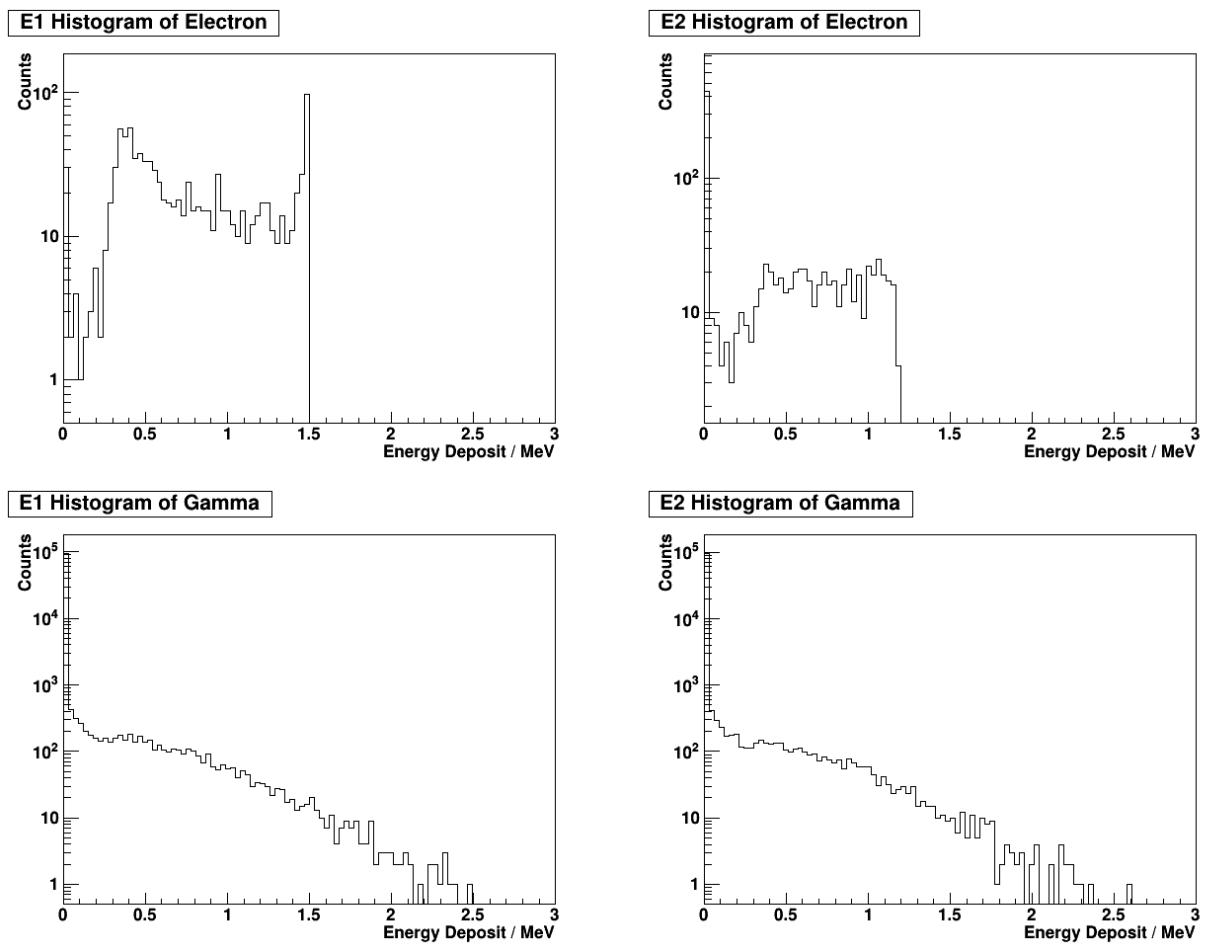


図 4.52: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

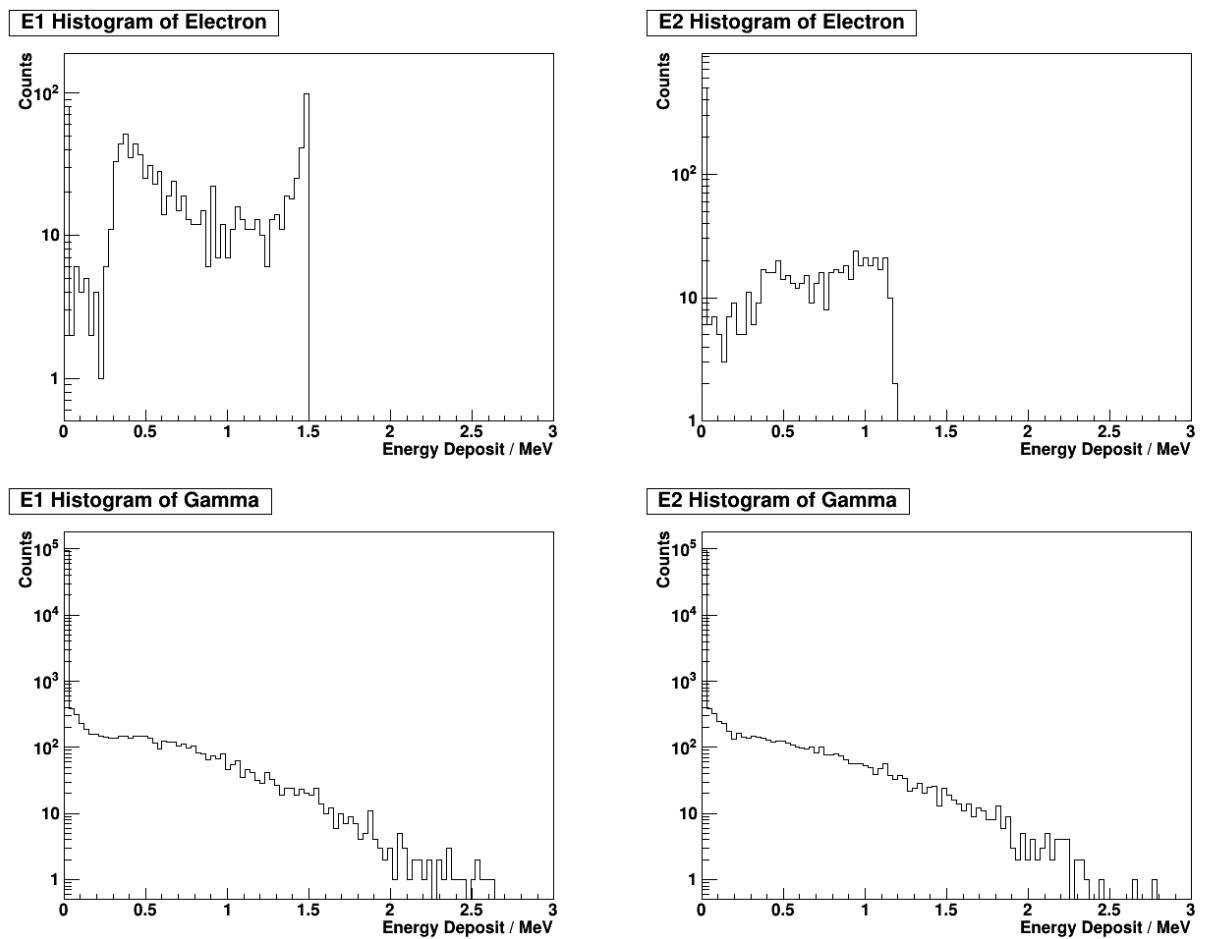


図 4.53: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

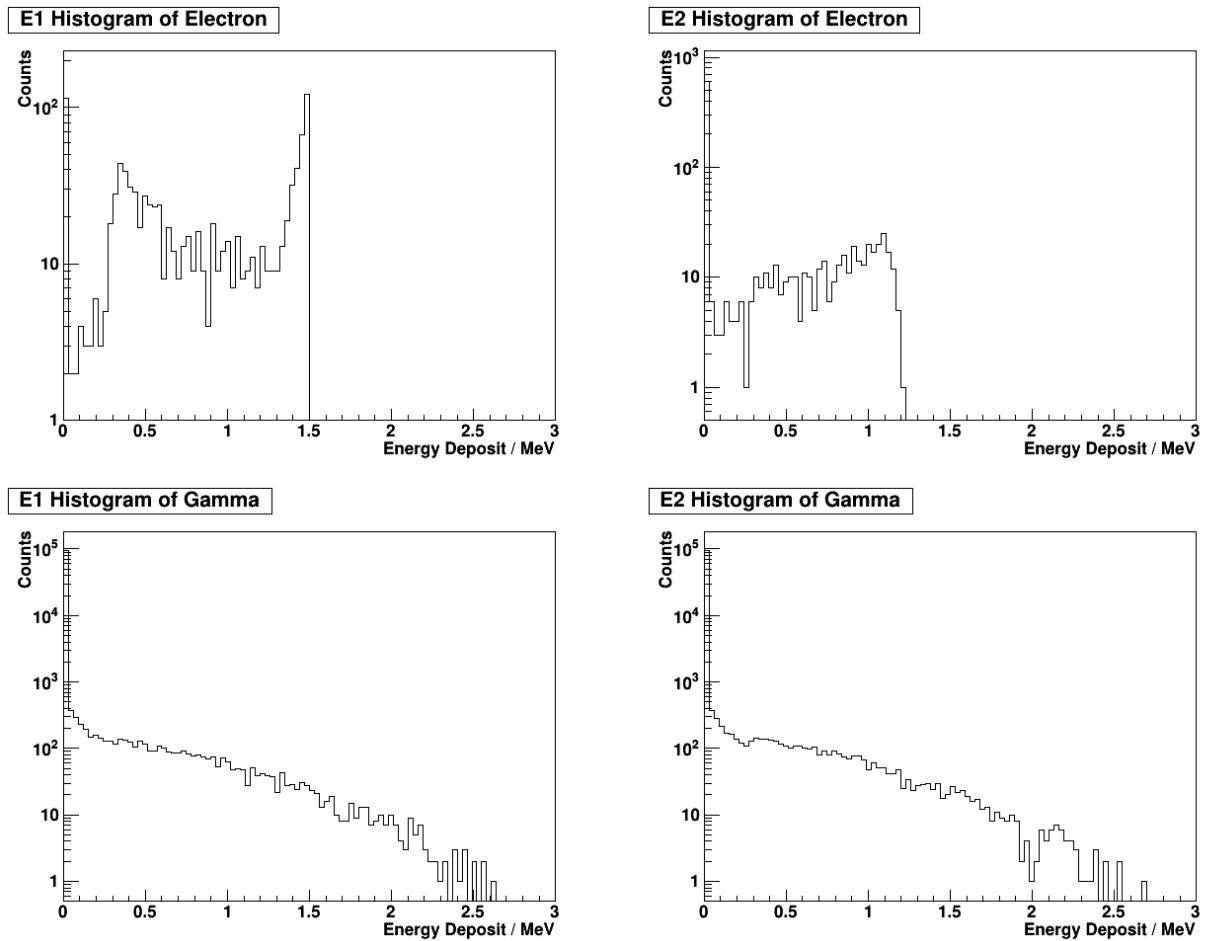


図 4.54: Electron と Gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_2 のヒストグラム

ここで求めた E_1 と E_2 について比較を行う。比較のために、比 E_2/E_1 とその Count 数のヒストグラムと、 E_1 と E_2 についての Colormap をプロットした。

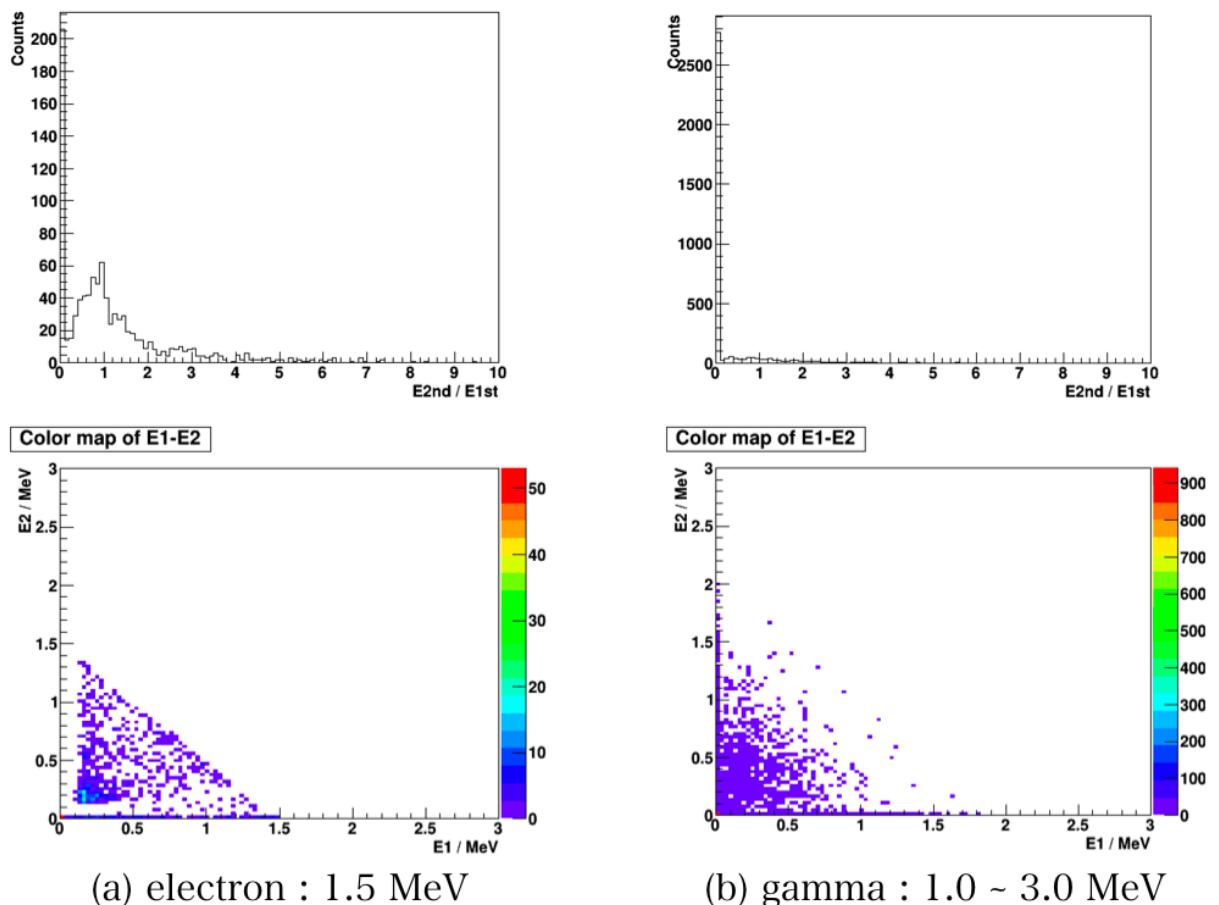


図 4.55: (a) electron (b) gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}, d = 0.5 \text{ mm}, B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

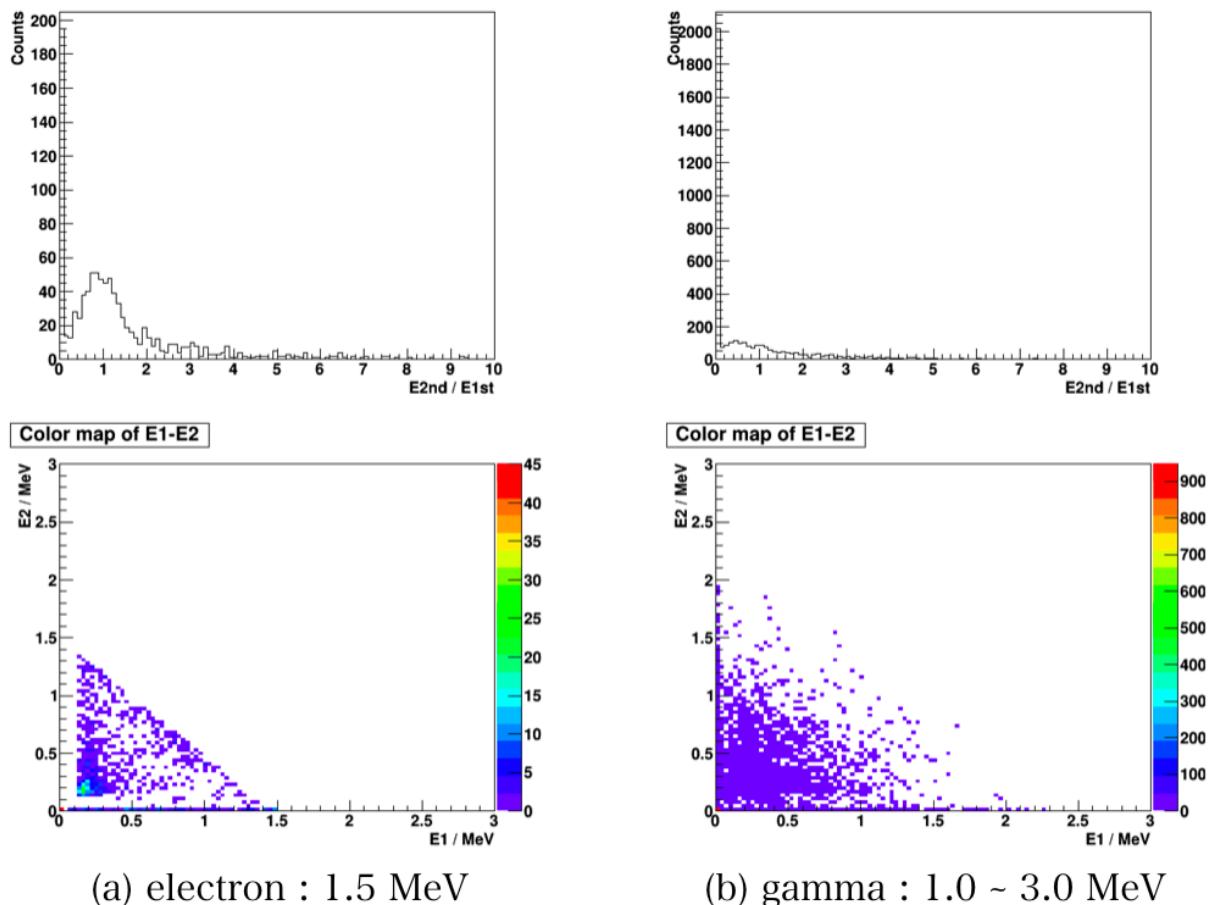
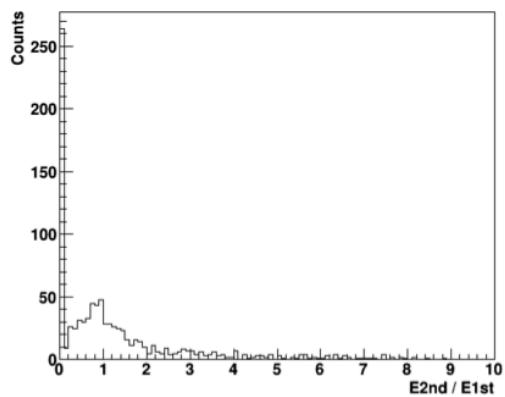
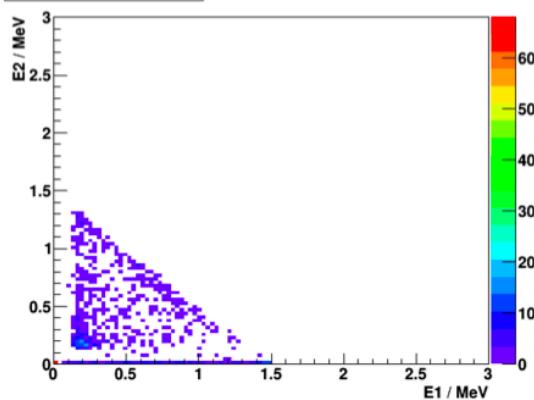


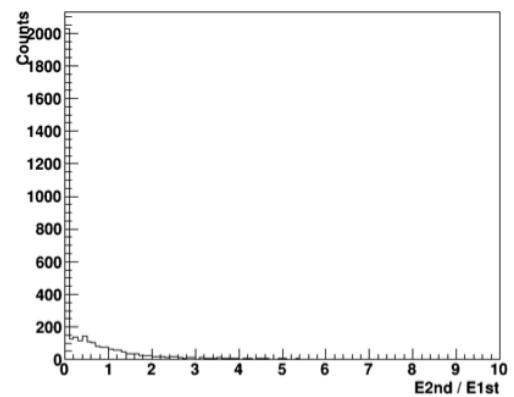
図 4.56: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}, d = 0.5 \text{ mm}, B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map



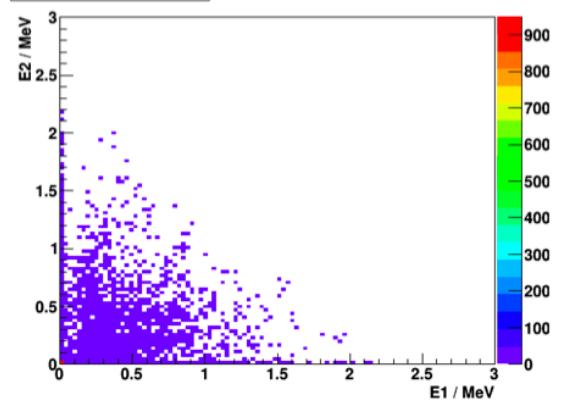
Color map of E1-E2



(a) electron : 1.5 MeV

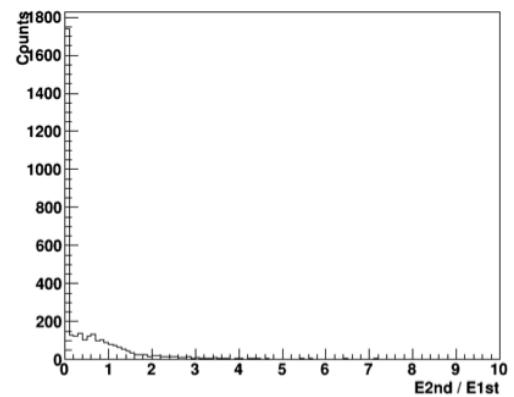
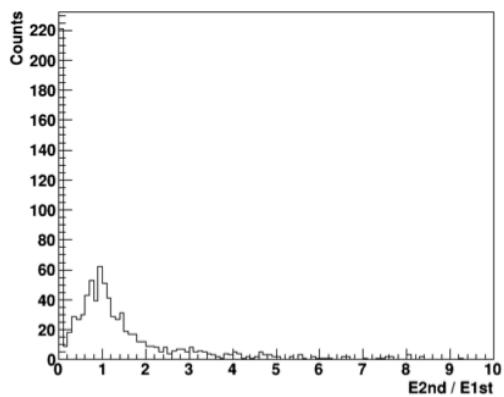


Color map of E1-E2

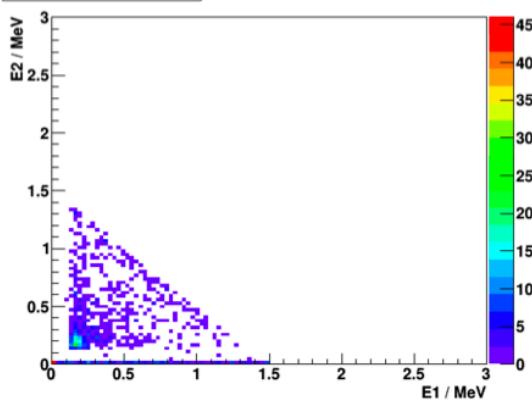


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

図 4.57: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

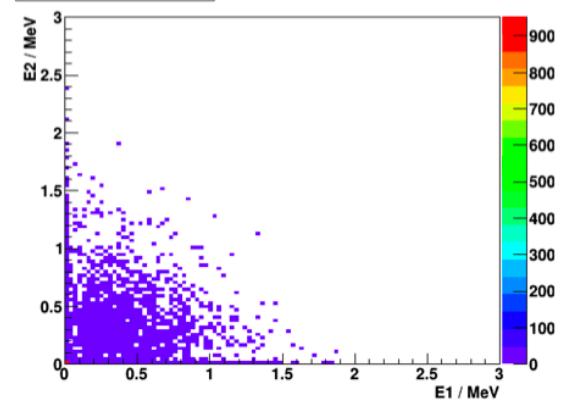


Color map of E1-E2



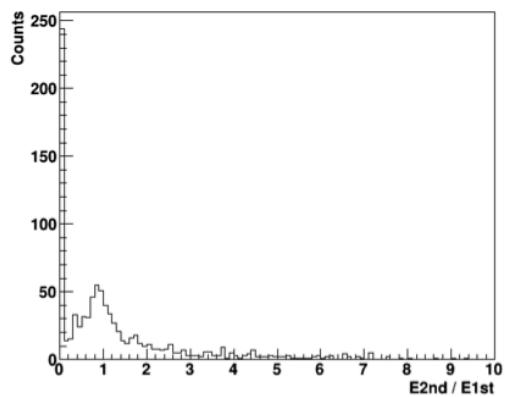
(a) electron : 1.5 MeV

Color map of E1-E2

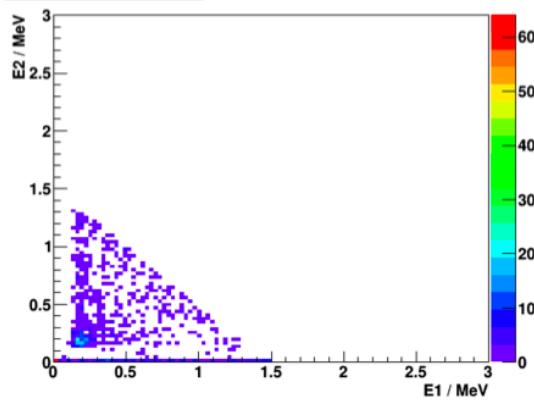


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

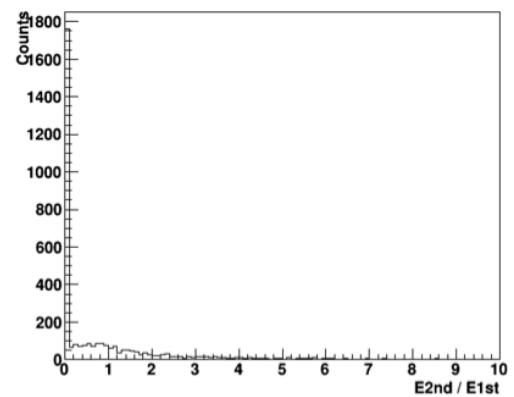
図 4.58: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map



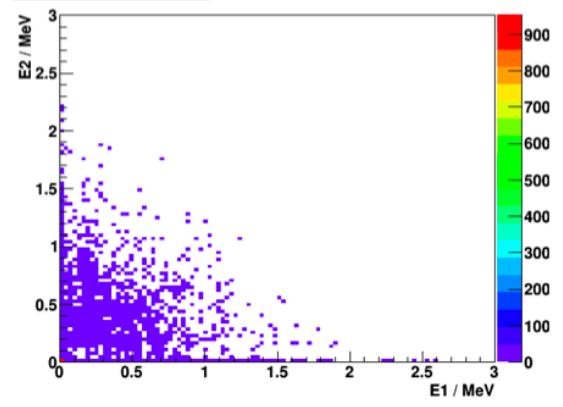
Color map of E1-E2



(a) electron : 1.5 MeV



Color map of E1-E2



(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

図 4.59: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5$ mm, $d = 1.0$ mm, $B = 0.5$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

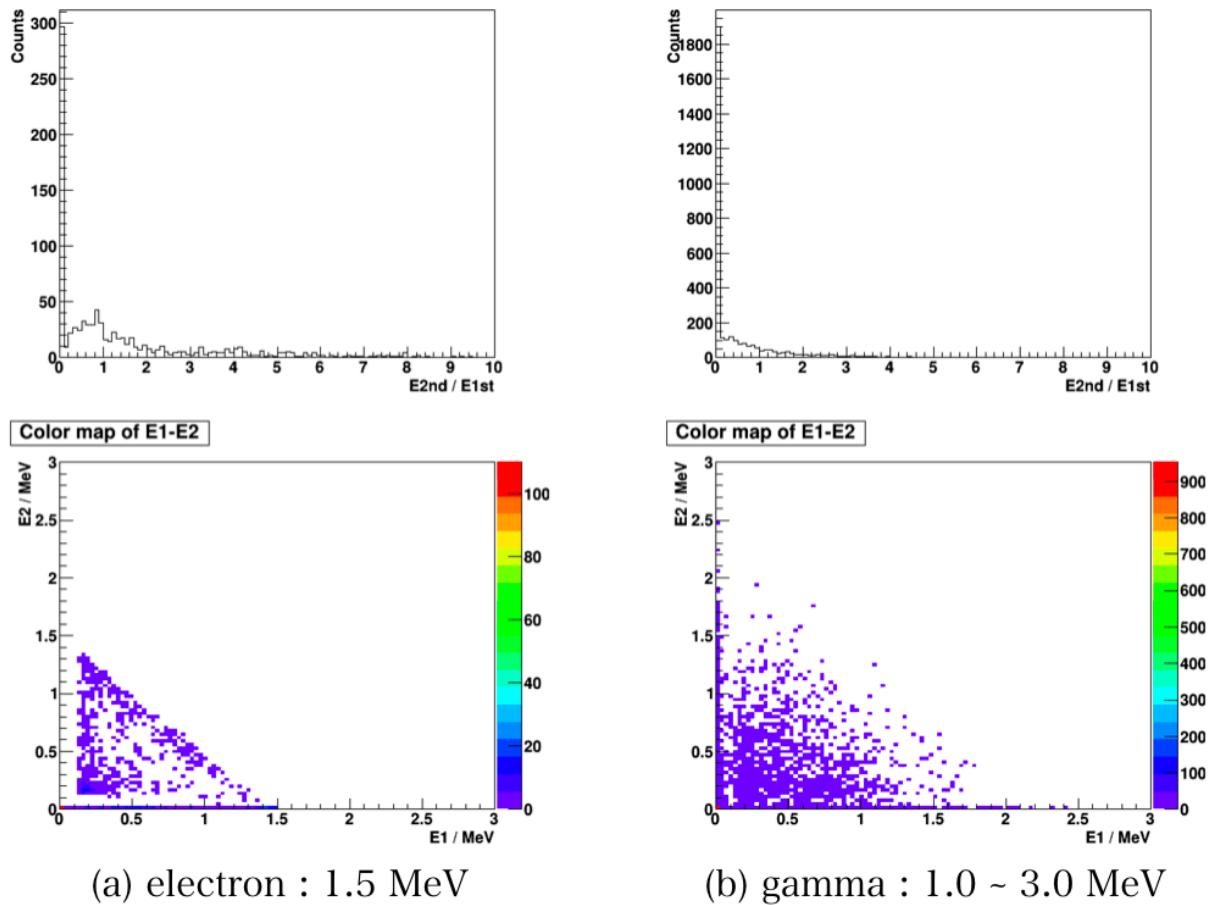
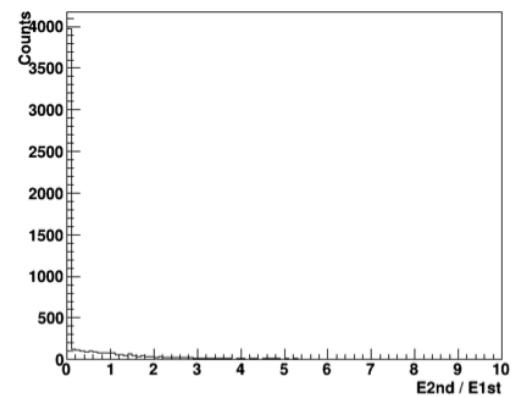
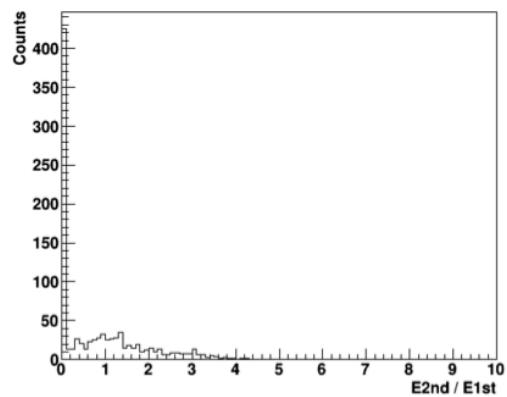
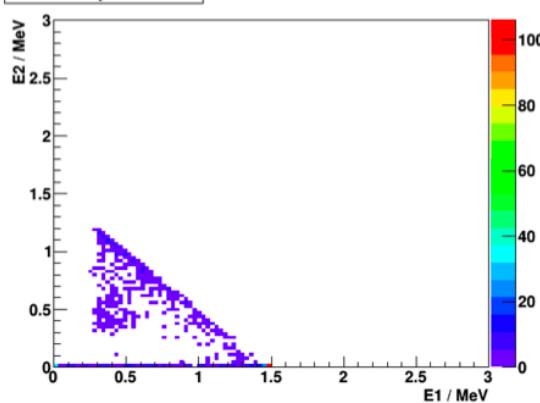


図 4.60: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}, d = 1.0 \text{ mm}, B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

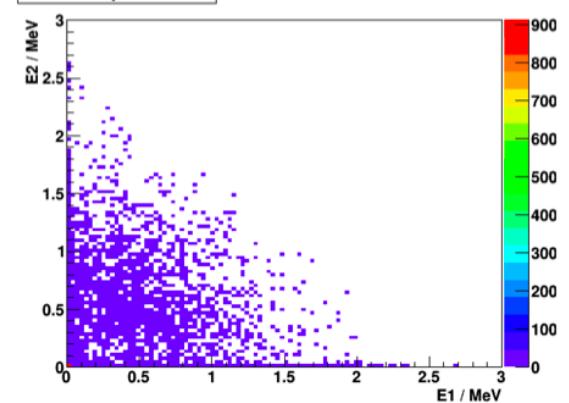


Color map of E1-E2



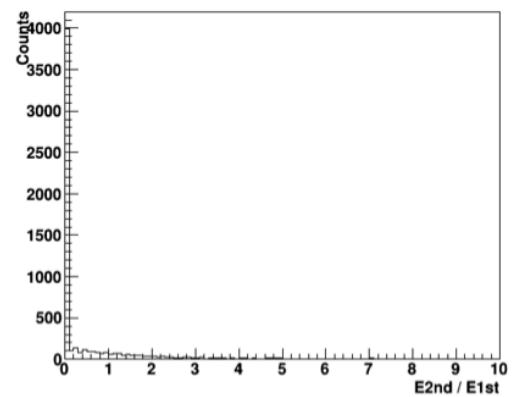
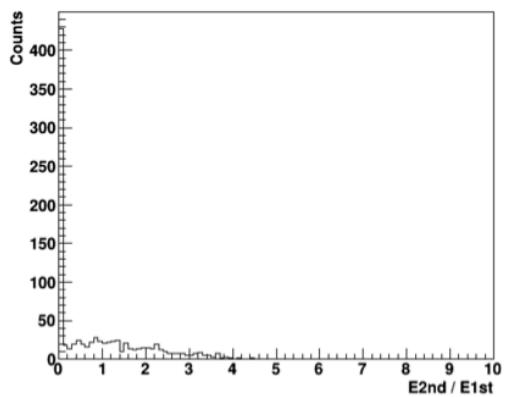
(a) electron : 1.5 MeV

Color map of E1-E2

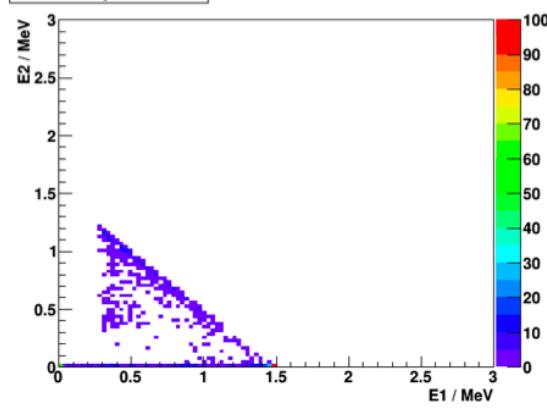


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

図 4.61: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 1.0$ mm, $d = 0.5$ mm, $B = 0.0$ T の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

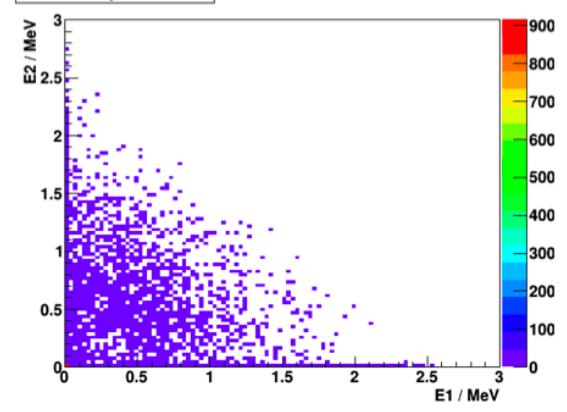


Color map of E1-E2



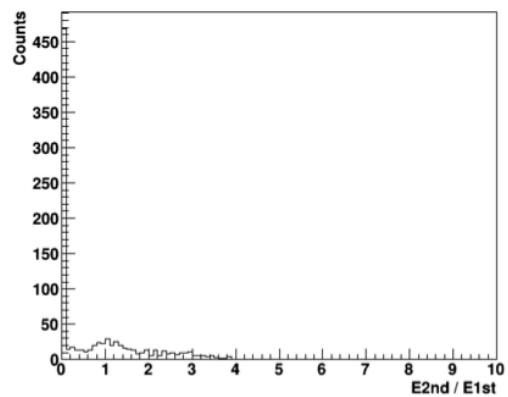
(a) electron : 1.5 MeV

Color map of E1-E2

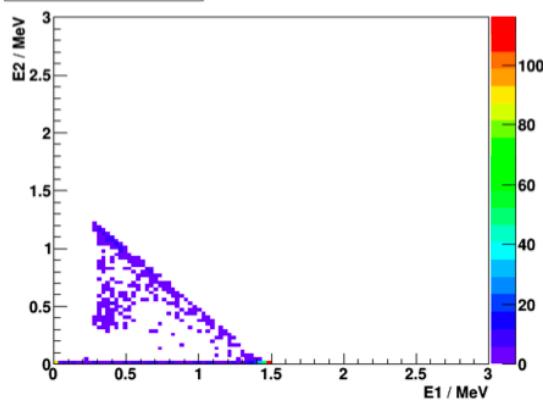


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

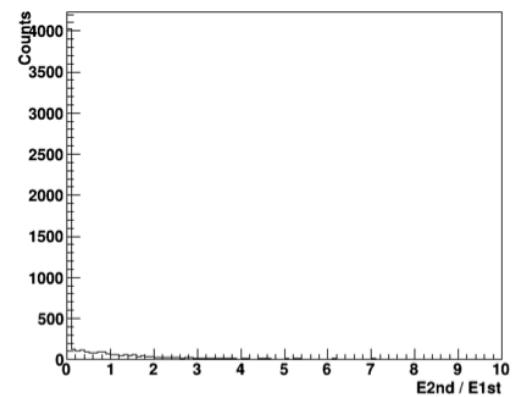
図 4.62: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}, d = 0.5 \text{ mm}, B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map



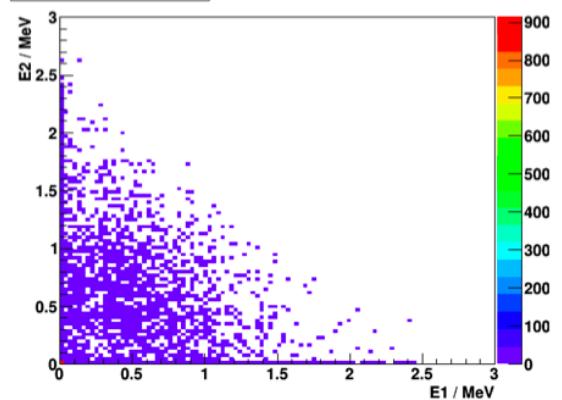
Color map of E1-E2



(a) electron : 1.5 MeV

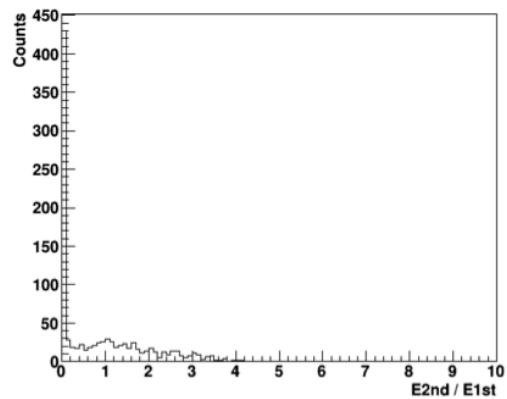


Color map of E1-E2

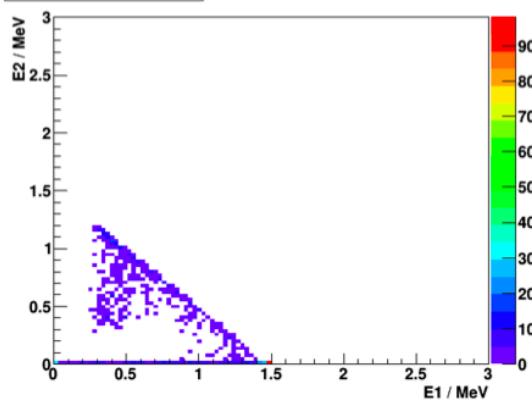


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

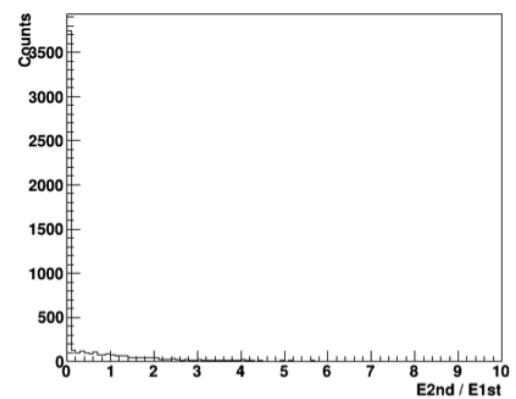
図 4.63: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}, d = 0.5 \text{ mm}, B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map



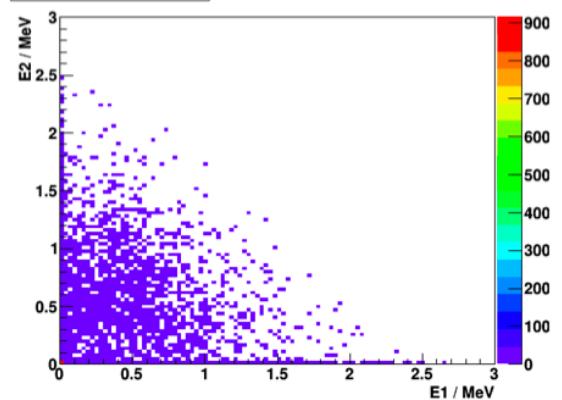
Color map of E1-E2



(a) electron : 1.5 MeV

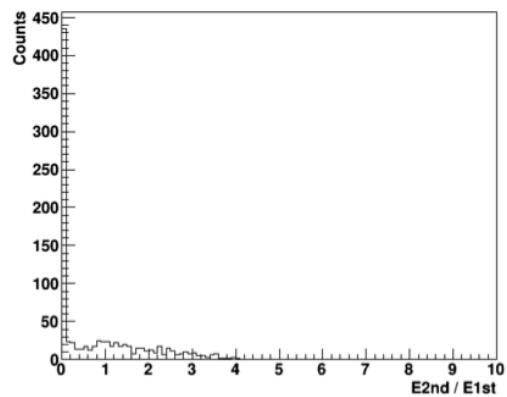


Color map of E1-E2

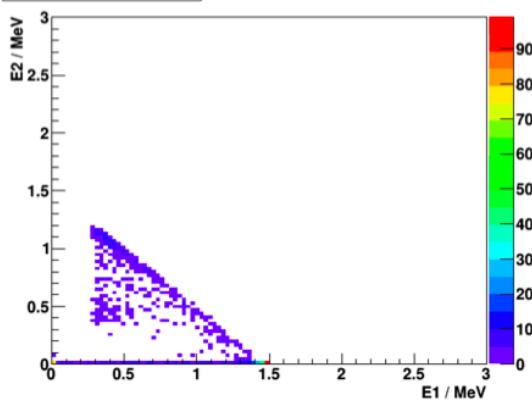


(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

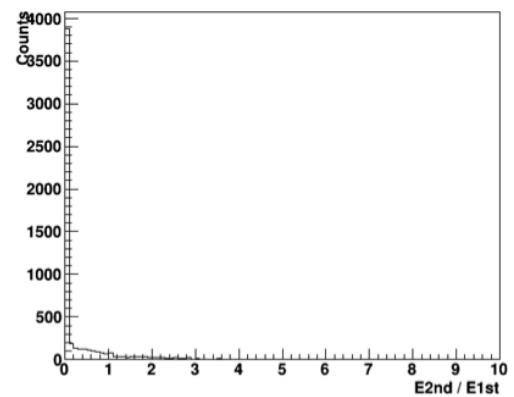
図 4.64: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}, d = 1.0 \text{ mm}, B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map



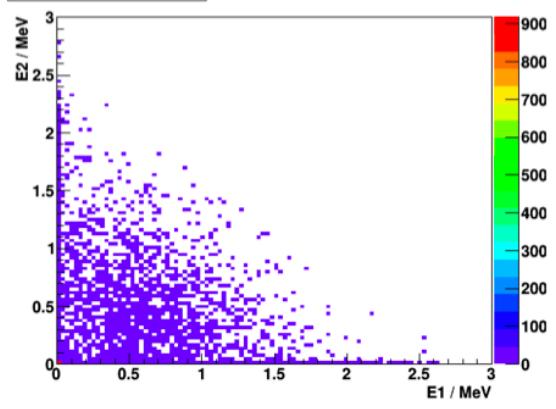
Color map of E1-E2



(a) electron : 1.5 MeV



Color map of E1-E2



(b) gamma : 1.0 ~ 3.0 MeV

図 4.65: (a)electron(b)gamma $\odot l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}, d = 1.0 \text{ mm}, B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

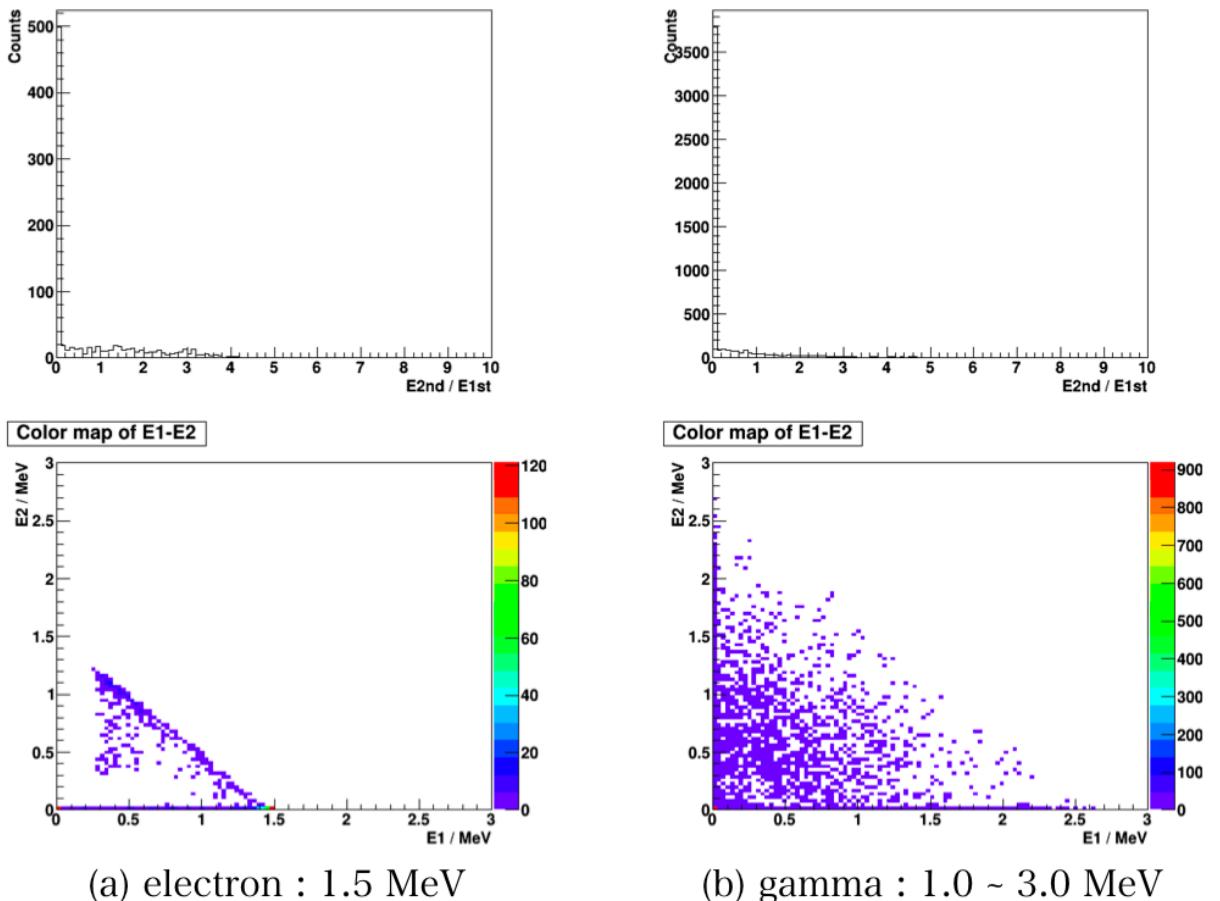


図 4.66: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1/E_2 のヒストグラムと E_1 と E_2 の Color map

E_1 と E_2 の Color map を電子と γ 線について比較をする。

γ 線はどの場合でも原点を中心に Random に分布しているように見える。

一方電子は、 E_1 の Energy Deposit の大きさを E_2 では超えていないことが分かる。また、Si 半導体検出器の厚みが厚い場合、 E_1, E_2 共に Energy Deposit が小さい分布が減っている。前節の議論も合わせると、Si 半導体検出器の厚みは 1.0 mm 以上 2.5 mm 以下が良いと考える。Si 半導体検出器の厚みが 1.0 mm の図 4.61 から図 4.66 を比較すると、磁場を大きくすると E_1 から E_2 にかけて直線状に分布している箇所がシャープになっていることが分かる。 d を大きくすることでも、直線がシャープになっている。この直線状の分布を生かし、Energy Deposit の大きさでカットをかけるだけでなく、 E_1 と E_2 の関係でしきい値を決めることで、更に識別効率を上げることにつながる。

次に、 E_1 と E_2 だけでなく、 E_1 周り ± 5 Layer 分の Count 数の和 E_r との Color map を作成した。今までの議論では、Layer の中で Count 数が多く、Efficiency が最も大きい Layer で電子が保守つされると考えてきた。電子の Energy Deposit の Layer における分布は、電子発生 Layer にピークを持つため、最も Count 数の多い Layer、すなわち E_1 周辺での分布を見る必要がある。

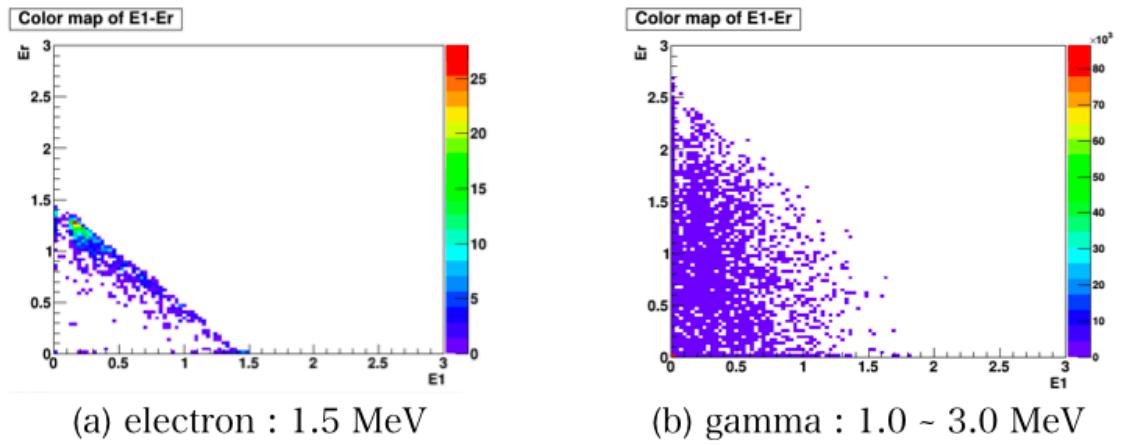


図 4.67: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

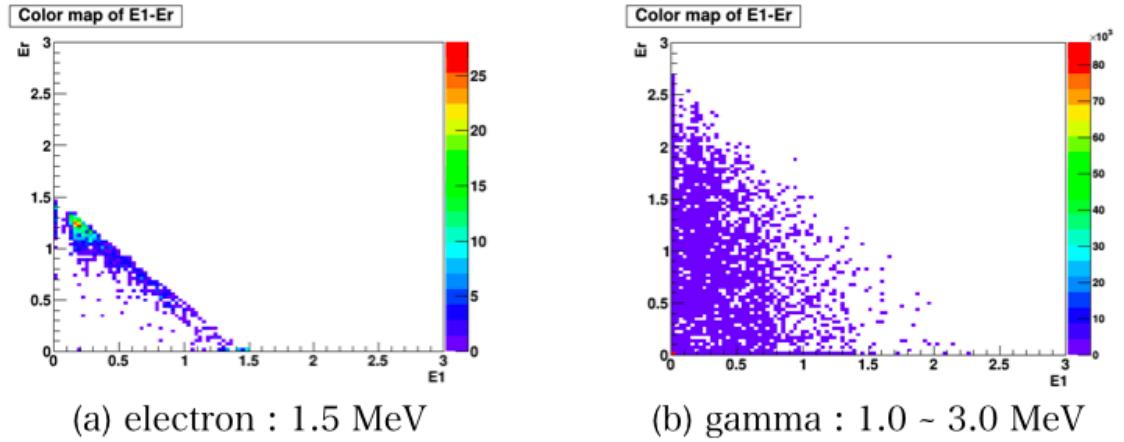


図 4.68: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

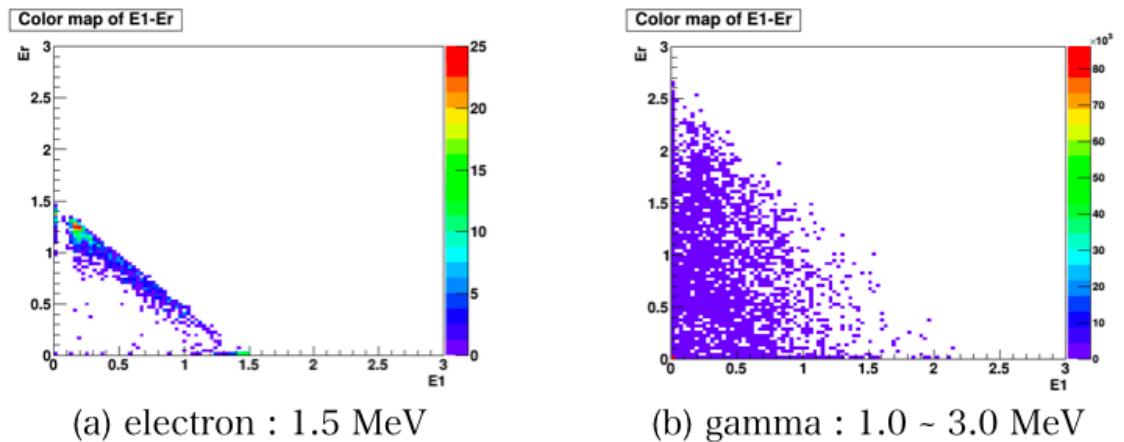


図 4.69: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

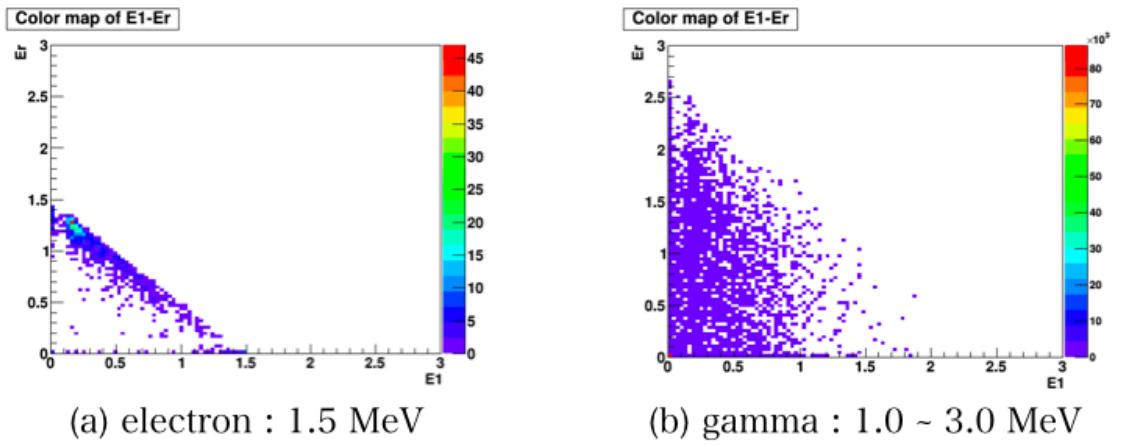


図 4.70: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

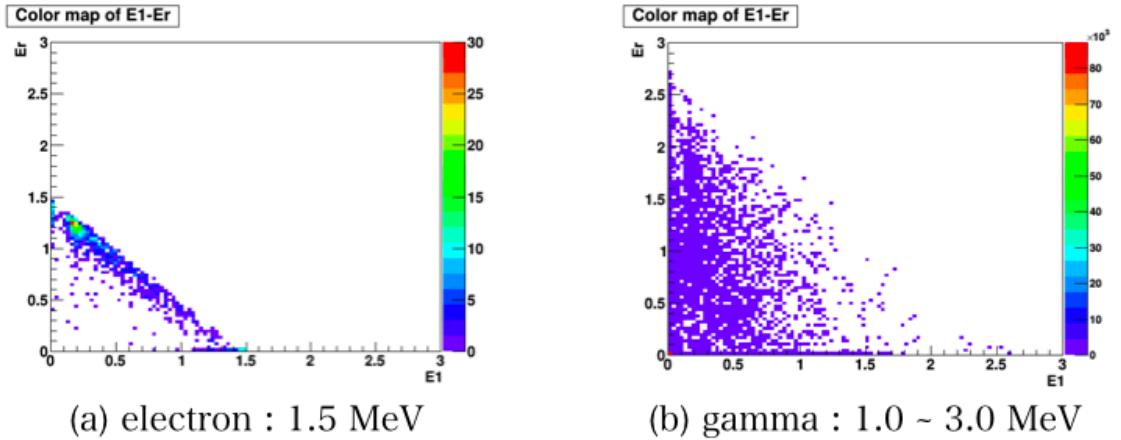


図 4.71: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

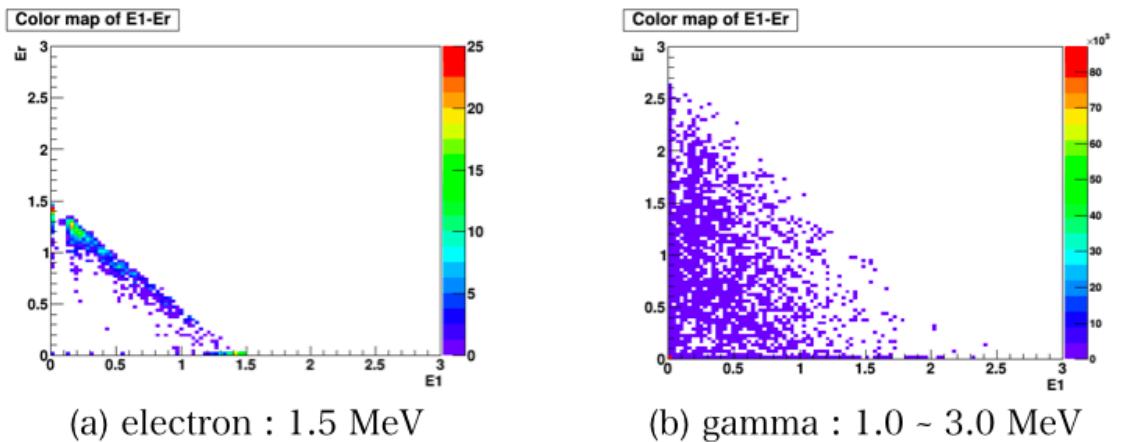


図 4.72: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 0.5 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

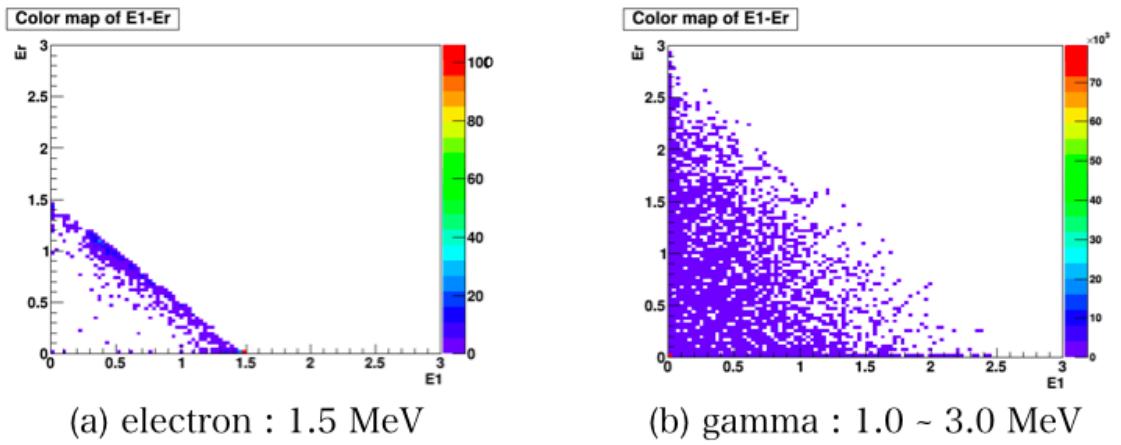


図 4.73: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

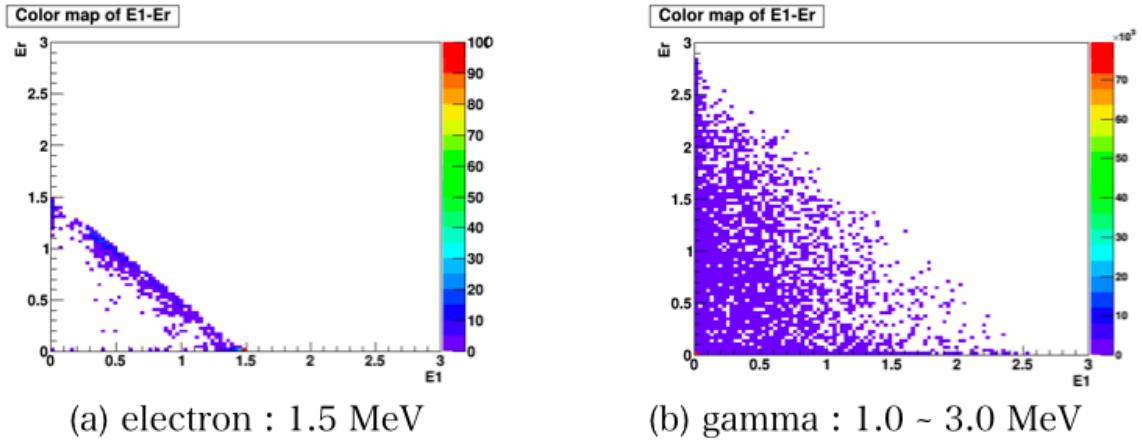


図 4.74: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

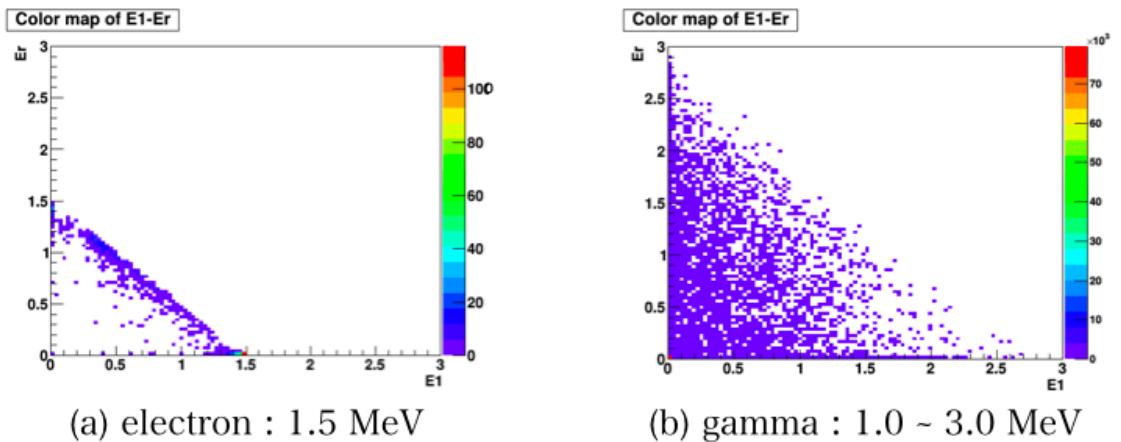


図 4.75: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

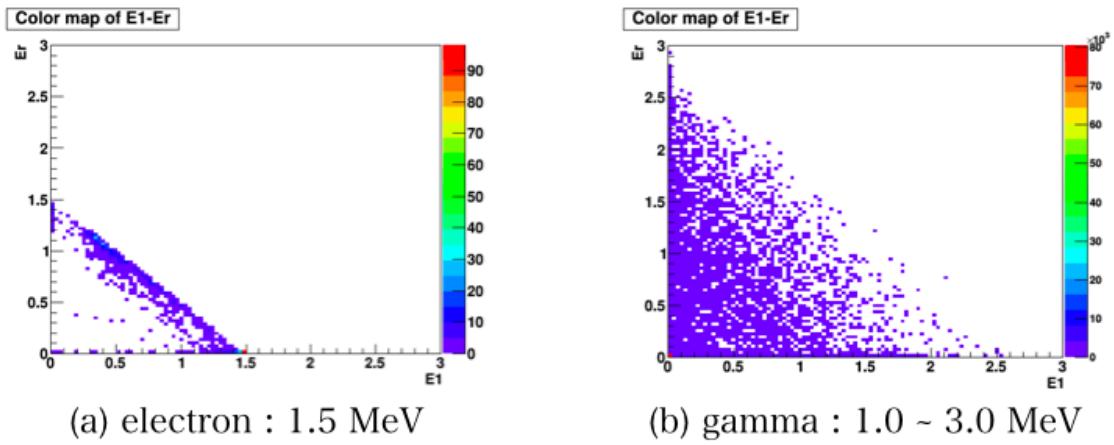


図 4.76: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

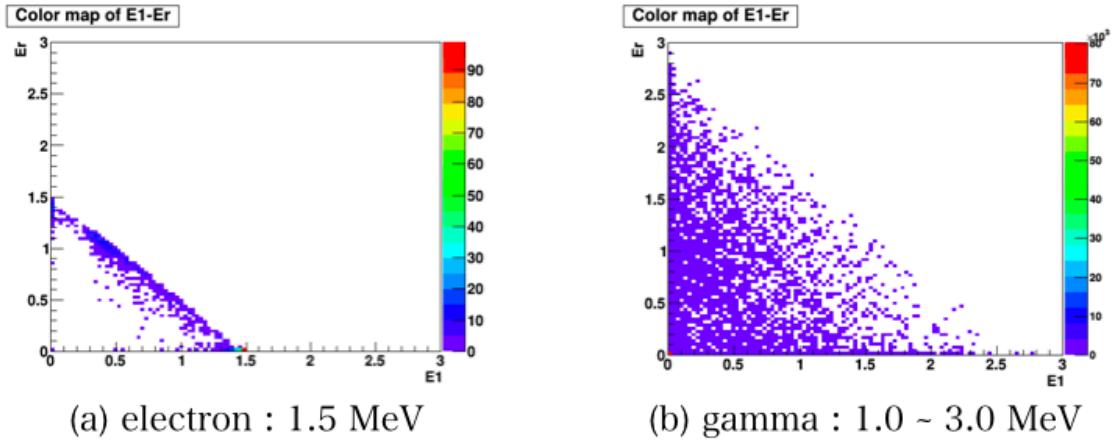


図 4.77: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 0.5 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

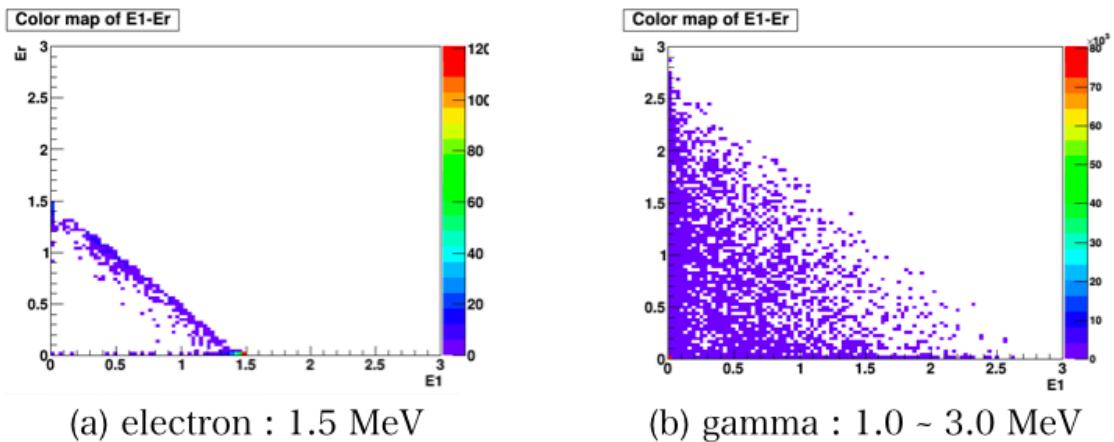


図 4.78: (a)electron(b)gamma の $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ の設定値における E_1 と E_r の Color map

E_1 と E_2 の Color map 同様に、 γ 線は原点を中心に Random に発生しているが、電子は E_1 から E_r にかけて直線状の分布を持つ。また、 E_1 と E_2 の分布の時より直線上に落ちている Count 数が多くなっていることから、電子が落ちている Layer 周辺での分布も E_2 と同様であることが分かった。

今までの議論から、100 Layer の中から、Count 数の多い Layer を取り出し、Efficiency を求める。その Layer 周辺 5 Layer 分の Efficiency を求め、Count 数の多い Layer を中心に対称なピークがたつかを見る。また、その Layer と Layer 周辺の Count 数分布が直線状に分布していることを条件として、電子と γ 線の識別とする。

この条件に当てはまっており、Efficiency が最も大きい値を取っていた設定値 $l_{\text{Si}} = 1.0 \text{ mm}$, $d = 1.0 \text{ mm}$, $B = 1.0 \text{ T}$ を用い、次節のニュートリノを伴わない二重 β 崩壊のシミュレーションを行う。

4.3 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊シミュレーション

前節の結果から、二重 β 崩壊の 2 つのモード $2\nu\beta\beta, 0\nu\beta\beta$ のシミュレーションを行った。シミュレーションにおける設定値を表 4.4 に示す。

表 4.4: 二重 β 崩壊シミュレーションにおける設定値

Event 数	
$2\nu\beta\beta$	10000
$0\nu\beta\beta$	1000
変数 設定値	
l_{Si}	1.0 mm
d	1.0 mm
B	1.0 T

2 つのモードのシミュレーションにおける結果をヒストグラムに重ねてプロットした。ここで $0\nu\beta\beta$ は $2\nu\beta\beta$ の $1/10$ の Event 数でシミュレーションを行っているため比較しやすいよう $2\nu\beta\beta$ のヒストグラムの縦軸を $1/10$ としてプロットをしている。

まとめと将来展望

本研究では、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のため Si 半導体検出器と ^{82}Se を用い、レイヤー構造を持つ検出器考え、シミュレーションを行った。検出器を構成する要素の依存性を解析することによるレイヤー構造 Si 検出器の性能評価を目的とした。ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊モード($\nu\beta\beta$)を検出するためには、環境放射線の影響をなるべく排除し、クリーンな環境での検出が必要であると考え、磁場や Si 半導体検出器の厚み、ソースと Si 半導体検出器の間の依存性を解析した。環境放射線は γ 線による影響が大きいと考え、 γ 線と電子の識別をすることによって、クリーンな実験を目指した。

しかし、検出器を構成する要素を簡単にするため省略をしていることや、他の環境放射線などレイヤー構造 Si 検出器の性能を見積もる要素はまだある。~~そしてそれら解析を行えていないことから、本研究はレイヤー構造 Si 検出器の評価が十分とは言えない。~~

~~ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索のためのレイヤー構造 Si 検出器の将来展望としては、さらなる検出器の性能評価とニュートリノを伴わない二重 β 崩壊の寿命をシミュレーションを行うことが必要である。~~

~~にアリ~~ に詳細に 検出器構造を定義し 検出效率とバックグラウンドに影響を与える要素も必要か ある

シミュレーションによる研究の結果、 O_{nn} の厚さと Si 検出器

と O_{nn} の厚さの ^{82}Se ソースを互いに構造に O_T の布設場所をかけたところ 9% の検出效率で確認された。

磁場をかけない場合、向構造構造では検出效率は 0% となる。

次に向構造構造の検出率 $\sim 1.5\text{MeV}$ の電子 $(0 < E_e < Q\text{MeV})$ の
エネルギーの識別と評価した。○という条件で
電子を除外した場合、 0% の検出效率が得られるに拘る
電子のバックグラウンドは 0% まい抑えられる。

謝辞

本論文を書くにあたり、多くの方にご指導・助言賜りましたことを心より感謝申し上げます。

指導教官である石塚正基先生には研究面だけでなく進路・学業についてもご指導頂きました。ニュートリノや二重 β 崩壊の知識がない私に、参考となる論文を紹介や、直接ご教授頂くなど大変お世話になりました。大学院進学の相談をさせて頂いた際には、面接時の注意事項や、試験への心構えなど助言いただきました。深く感謝申し上げます。

石塚研究室、大学院生の松本先輩、同級生の小林さんには、プログラミングや Geant4 の使い方を教えて頂きました。私が初めてプログラミングを勉強し始めたときに松本さんには C++ 言語の 1 から丁寧に教えていただきました。小林さんには、Geant4 の参考資料や、プログラムの組み方等、様々なことを教えて頂きました。また、石塚研究室の先輩・同級生の皆様と楽しい時間を過ごすことができ、充実した生活を過ごすことができました。心より感謝申し上げます。

最後に、生活面で支えてくれた家族に感謝を申し上げ謝辞とさせて頂きます。

関連図書

- [1] W. Pauli. Letter to L. Meitner and her colleagues (letter open to the participants of the conference in Tubingen)(1930)
- [2] F.Reines, C.L. Cowan, Jr.,Nature 178,446-449 (1956)
- [3] 横澤孝章, ”スーパーカミオカンデにおける検出器較正と超新星爆発ニュートリノバーストの探索”, 東京大学大学院物理学専攻修士論文 (2010)
- [4] 五十嵐春紀,”3次元飛程検出器 DCBA による二重ベータ崩壊核種 ^{100}Mo の半減期測定と検出器開発”, 首都大学東京大学院学位論文 (2011)
- [5] 浜松ホトニクス HP, 第 10 章高エネルギー粒子用 Si 検出器,”https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/10_handbook.pdf”
- [6] Latest Results from the Heidelberg-Moscow Double-Beta-Decay Experiment*(2001)
- [7] The MAJORANA Neutrinoless Double-beta Decay Experiment,”<https://www.npl.washington.edu/majorana/majorana-experiment>”
- [8] Searching Neutrinoless Double Beta Decay with Gerda Phase II(2017)
- [9] Searching for Neutrinoless Double Beta Decay,”<http://supernemo.org/>”
- [10] CANDLES,”<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/candles/index.html>”
- [11] J.J. Gomez-Cadenas,The NEXT experiment(2016)
- [12] J. Cosmol. Astropart. Phys. 04, 029 ,Cosmogenic Backgrounds to $0\nu\beta\beta$ decay in EXO-200(2016)
- [13] 丸藤 祐仁, 井上 邦雄, 東北大学ニュートリノ科学研究センター,KamLAND-Zen 実験 (2011)
- [14] 東京理科大学, 物理学実験 3 テキスト,”半導体”