

将来の $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験のためのアクティブ
コンバーターを用いた光子ペアスペクトロ
メーターの開発
(Development of Photon Pair
Spectrometer with Active Converter
for Future $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ Search
Experiment)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
素粒子物理国際研究センター 森研究室

池田 史
2023年1月

概要

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は、新物理に対する良いプローブである。現在、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は発見されていない。MEG II 実験での発見されるされないに関わらず、将来実験により $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の崩壊分岐比により強い制限をかけるあるいは崩壊を詳細に観測することは、非常に重要である。PSIにおけるHIMB計画により、さらなる高強度のミューオンビームを用いた実験を行える可能性がある。検出器としては、ガンマ線検出器が鍵となり、MEG/MEG II 実験での全吸収型カロリメーターでは限界があるため、ここでは、将来実験ではペアスペクトロメーターを用いることを検討した。

また、従来のペアスペクトロメーターでは、コンバーター中でのエネルギー損失が無視できないため、アクティブなコンバーターを用いることを検討した。アクティブな素材としては、シミュレーションによる検討では、LYSOが最も良い検出効率を与えた。LYSOは、宇宙線試験の結果から、目標とするエネルギー分解能は到達可能であり、時間分解能は改善が必要であることがわかった。ビーム試験の結果から、結晶の形と読み出し方法を変えることで、目標とする時間分解能は、さらなる最適化を施すことで、到達可能であると考えている。

目次

第 1 章	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の物理と探索の現状	6
1.1	標準模型における $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$	6
1.2	新物理における $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$	6
1.3	現状での探索結果	6
第 2 章	将来の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索実験	7
2.1	将来実験で目指すこと	7
2.2	HiMB 計画	7
2.3	将来実験でのディテクターコンセプト	7
第 3 章	アクティブコンバーター型光子ペアスペクトロメーター	8
3.1	アクティブコンバーターの概要	8
3.2	アクティブコンバーターの素材	8
3.2.1	アクティブコンバーターへの要求	8
3.2.2	アクティブコンバーターの素材の候補	8
3.3	シミュレーションによるアクティブコンバーターの素材の検討	9
3.3.1	シミュレーションのセットアップ	9
3.3.2	磁場を導入しない場合のシミュレーション	9
3.3.3	磁場の導入	13
第 4 章	タイル状の LYSO 結晶を用いた宇宙線による性能評価	14
4.1	概要	14
4.2	要請	14
4.3	試験方法 (線源)	14
4.4	試験方法 (時間分解能の測定)	15
4.5	セットアップ	15
第 5 章	バー状の LYSO 結晶を用いたビームによる性能評価	17
5.1	宇宙線試験のときからの変更	17
5.1.1	結晶の形の変更	17
5.1.2	読み出し方法の変更	17
5.2	PF-AR テストビームライン	17
5.3	セットアップ	18
5.4	取得したデータセット	18
5.5	波形	19
5.6	ノイズ	20
5.7	行った解析の流れ	20

5.8 LEのスレッシュホルドの最適化	22
5.9 TOTのスレッシュホルドの最適化	23
5.10 得られた時間分解能	23
第6章 結論	25

目次

3.1	シミュレーションのセットアップ	9
3.2	LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際のイベントディスプレイの例 (1)	10
3.3	LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際のイベントディスプレイの例 (2)	10
3.4	4mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際の制動放射光子の数の分布	11
3.5	1mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータから出ていくコンバージョンペア (電子・陽電子) の運動量分布。	11
3.6	5mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータから出ていくコンバージョンペア (電子・陽電子) の運動量分布。	11
3.7	5mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータ内での deposit energy。	12
3.8	5mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータ内での deposit energy とコンバータを飛び出る電子・陽電子ペアのエネルギーの和	12
3.9	52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際の材質・厚さごとのコンバージョン確率	12
3.10	材質・厚さごとの 52.8 MeV イベントの検出効率。	13
3.11	複数層のアクティブコンバータにおける材質・厚さごとの 52.8 MeV イベントの検出効率。	13
4.1	LYSO タイルの寸法	16
4.2	セットアップ	16
5.1	ビームプロファイル	17
5.2	セットアップ a	18
5.3	セットアップ b	19
5.4	波形	19
5.5	ノイズ波形	20
5.6	ノイズのテンプレート波形	20
5.7	タイミングリファレンスカウンターの波高分布	21
5.8	LE のスレッシュホールドスキャン結果 (LYSO)	22
5.9	TOT のスレッシュホールドスキャン結果 (LYSO)	23

表 目 次

3.1	アクティブコンバータの素材の候補	8
3.2	シミュレーションに使用した物理モデル	9
4.1	線源とそれらの長所および短所	15
5.1	取得したデータ	18

第1章 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の物理と探索の現状

1.1 標準模型における $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

荷電レプトンフレーバーの保存を破る過程で、標準模型 (SM) では禁止されている。SM に加えてニュートリノ振動を考慮しても、ニュートリノの質量が小さいために、崩壊分岐比は観測不可能なほど小さい。

1.2 新物理における $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

超対称大統一理論などのいくつかの新物理 (BSM) では、観測可能な程度の崩壊分岐比を预言する。モデルにもよるが、崩壊分岐比の大きさは $O(10^{-12}) - O(10^{-14})$ と予想されている。媒介過程は、光子によるものとそうでないものがある。

ニュートリノ振動の入った SM では観測不可能なので、発見できれば BSM の証拠となる。発見できなくても崩壊分岐比に制限を付けるだけで、BSM のモデル選別が可能となる。これは、稀な崩壊によって超高エネルギーの物理を、間接的に探っているということで、いわゆる王道である新粒子を直接生成して探索する方法とは相補的な手段となっている。

1.3 現状での探索結果

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊はいまだ発見されていない。崩壊分岐比の上限値は、MEG 実験が 2016 年に与えた。現在は、アップグレード実験である MEG II 実験が、探索中である。2025 年までの DAQ で、感度 6×10^{-14} を目指している。

第2章 将来の $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験

2.1 将来実験で目指すこと

この論文では、MEG II 実験よりさらに感度をあげて探索する実験を検討したい。前章で述べた通り、新物理から予言される崩壊分岐比は $O(10^{-12}) - O(10^{-14})$ で、かつ、MEG II での目標探索感度は 6×10^{-14} なので、すでに予言領域に突入している。したがって、将来実験の意義としては、仮に MEG II 実験で発見されなかった場合は、予言領域を広く調べ尽し、また、仮に MEG II で発見された場合は、精密測定 of 段階となる。さらに、MEG/MEG II 実験では難しかった崩壊の角分布を調べることができれば、さらにモデルを絞り込むことができる。サーフェスミューオンは原理的には 100% 偏極しており、BSM モデルによって、崩壊の角分布が異なる。しかしながら、MEG/MEG II 実験ではアクセプタンスが制限されており、角分布の測定が困難である。

2.2 HiMB 計画

PSI での μ^+ ビームレートの増強計画 (HiMB 計画) では、2026-2027 年の建設を予定している。したがって、2028 年以降に、MEG II 実験を超える $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験を実施できる可能性がある。

2.3 将来実験でのディテクターコンセプト

アクシデンタルなバックグラウンドが支配的な中で、高レート下で探索を行うためには、ディテクターのレゾリューションが大事である。とくに、ガンマ線検出器が鍵となるが、MEG/MEG II 実験で用いられていた全吸収型カロリメーターでは、分解能に限界がある。そこで、ここでは、MEG 実験以前の MEGA 実験で用いられていたペアスペクトロメーターを検討する。ペアスペクトロメーターは、トラックターにより運動量も位置もを精度良く測定できるので、カロリメーターを超える良いレゾリューションが期待される。ただし、問題があって、それは、コンバーター中でのエネルギーロスと検出効率の低さである。エネルギーロスはエネルギー分解能に悪影響を与える。検出効率を上げるために、コンバーターを厚くしたいが、エネルギーロスのために、むやみに厚くできない。もし、コンバーターがアクティブであれば、これら 2 点の問題を改善することができると考えられる。そこで、この論文では、アクティブコンバーターの可能性について検討する。

第3章 アクティブコンバーター型光子ペアスペクトロメーター

3.1 アクティブコンバーターの概要

従来の光子ペアスペクトロメーターでは、対生成された電子陽電子対の、コンバーター中でのエネルギー損失を無視できない。また、したがって、検出効率を稼ぐために、コンバーターの厚みを大きくすることも難しい。そこで、コンバーターそれ自身をエネルギー損失を測定可能な(アクティブな)素材とすることで、検出効率を稼ぐために厚みを大きくしつつも、良いエネルギー分解能を出せる可能性がある。

3.2 アクティブコンバーターの素材

3.2.1 アクティブコンバーターへの要求

アクティブコンバーターの素材の候補には、以下の三点の要求がある。

- 検出効率(ガンマ線との相互作用)
- エネルギー分解能
- 時間分解能

3.2.2 アクティブコンバーターの素材の候補

ここでは、アクティブコンバーターの素材として、以下のものを検討した(表 3.1)。

- Cerium doped Lutetium Yttrium Orthosilicate (LYSO)
- Cerium doped Yttrium Aluminum Perovskite (YAP)
- Silicon
- Plastic Scintillator (e.g. PolyVinylToluene)

表 3.1: アクティブコンバーターの素材の候補

材質	密度 [g/cm ³]	クリティカルエネルギー [MeV]
LYSO	7.4 [1]	12
YAP	5.37 [2]	23
Si [3]	2.329	40
PolyVinylToluene [4]	1.032	94

3.3 シミュレーションによるアクティブコンバータの素材の検討

シミュレーションには Geant4 を用いた。

3.3.1 シミュレーションのセットアップ

シミュレーションのセットアップとしては、大きな板状のコンバータを仮定し、10cm 離れた場所から 52.8MeV のガンマ線を垂直入射した (図 3.1)。

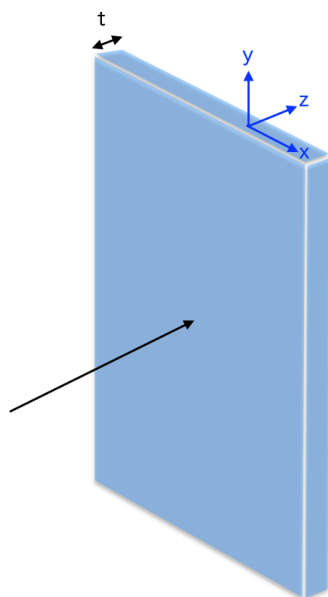


図 3.1: シミュレーションのセットアップ

使用した物理モデルは表 3.2 に挙げた。

表 3.2: シミュレーションに使用した物理モデル

物理過程	モデル
Gamma Conversion	G4LivermoreGammaConversionModel
Gamma Photo absorption	G4LivermorePhotoElectricModel
Gamma Compton	G4LivermoreComptonModel
Electron Scatter	G4eMultipleScattering
Electron Ionization	G4LivermoreIonisationModel
Electron Bremsstrahlung	G4LivermoreBremsstrahlungModel
Positron Annihilation	G4eplusAnnihilation

3.3.2 磁場を導入しない場合のシミュレーション

まず、磁場がゼロの場合のシミュレーションを行った。ガンマ線を垂直入射してコンバータとの相互作用を見た。

図 3.2 と図 3.3 にイベントディスプレイの例を 2 つ挙げた。

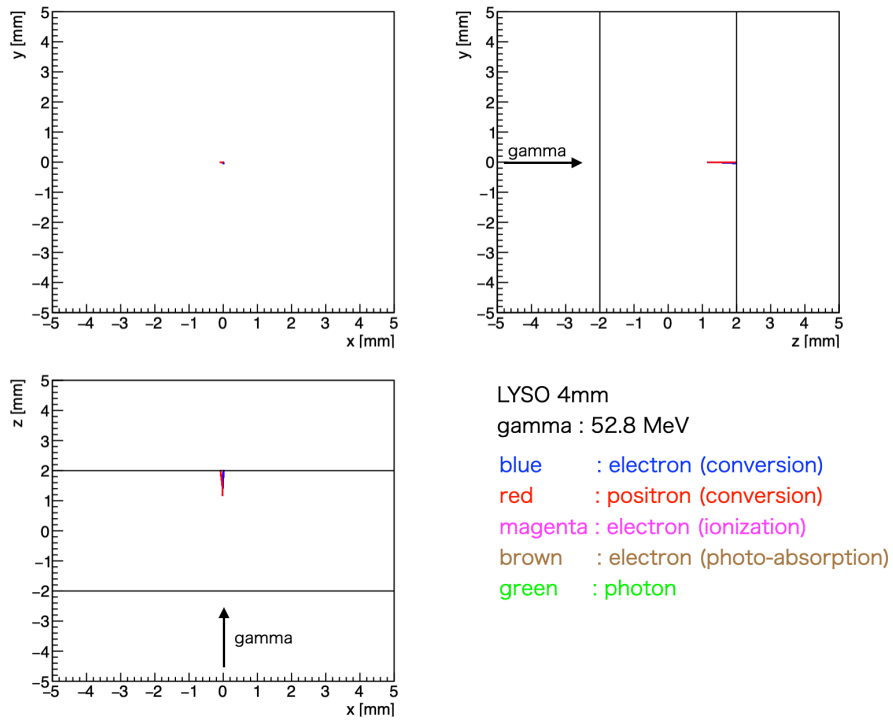


図 3.2: LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際のイベントディスプレイの例 (1)

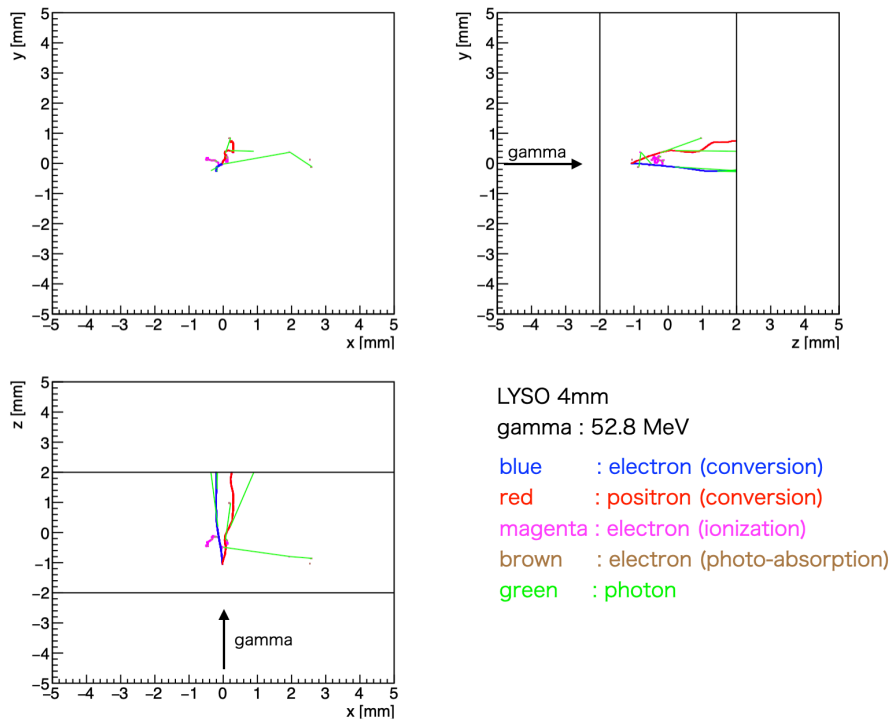


図 3.3: LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際のイベントディスプレイの例 (2)

ここでは例として、アクティブコンバーターに LYSO を選んだときのシミュレーションの結果を、図 3.4, 図 3.5, 図 3.5, 図 3.7, 図 3.8 に挙げる。

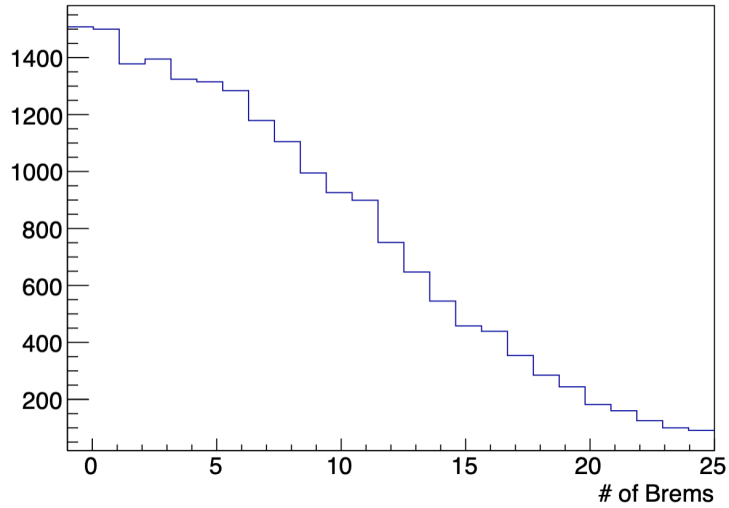


図 3.4: 4mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際の制動放射光子の数の分布

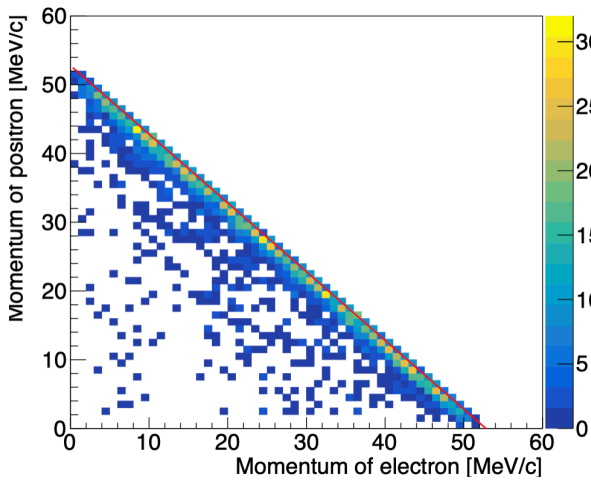


図 3.5: 1mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータから出ていくコンバージョンペア (電子・陽電子) の運動量分布。

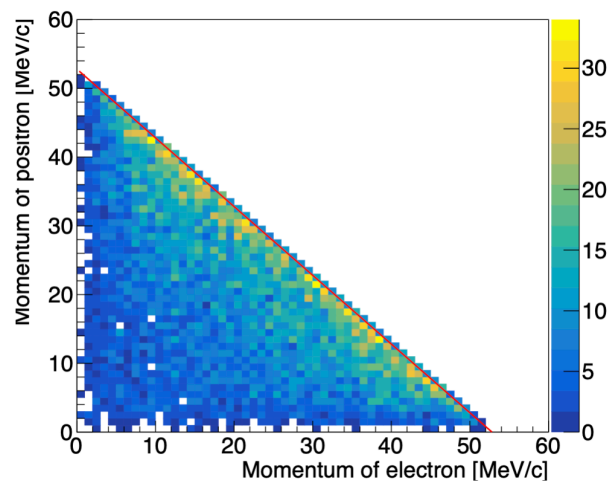


図 3.6: 5mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータから出ていくコンバージョンペア (電子・陽電子) の運動量分布。

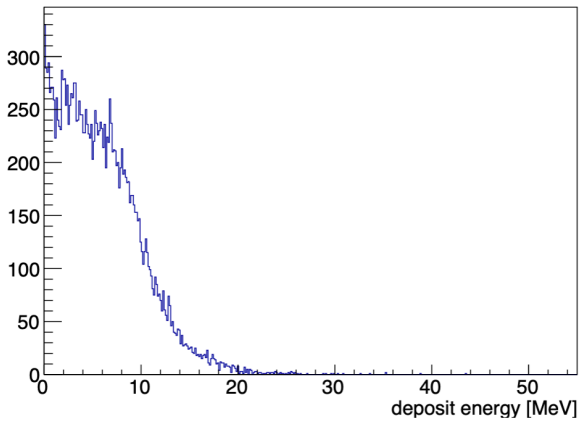


図 3.7: 5mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータ内での deposit energy。

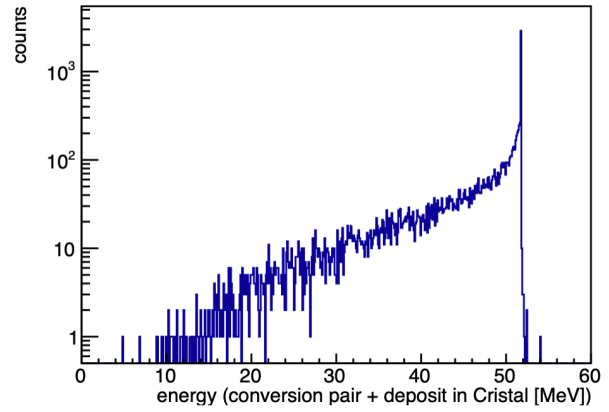


図 3.8: 5mm 厚の LYSO に 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射場合の、コンバータ内での deposit energy とコンバータを飛び出る電子・陽電子ペアのエネルギーの和

4つの材質について、厚さを変えたときに、52.8 MeV のガンマ線のコンバージョン確率がどのように変わるか、シミュレーションによる結果を示した (図 3.9)。

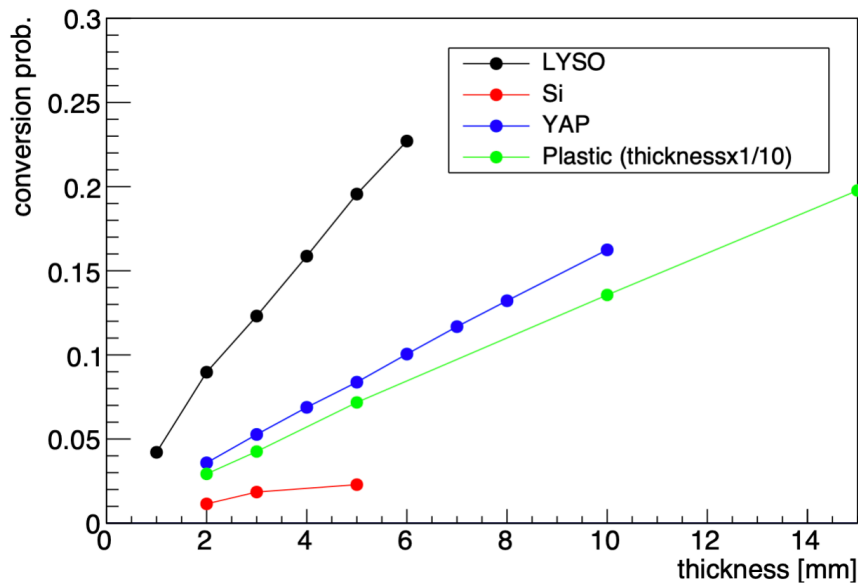


図 3.9: 52.8 MeV のガンマ線を垂直入射した際の材質・厚さごとのコンバージョン確率

また、図 3.10 には、検出効率を示した。ここでは、制動輻射で失われたものを除くエネルギーが 51.7 から 51.9 MeV のものを、検出可能なイベントとして、検出効率を計算した。ちなみに、52.8 MeV のうち、1022 keV は電子・陽電子の生成に使用される。

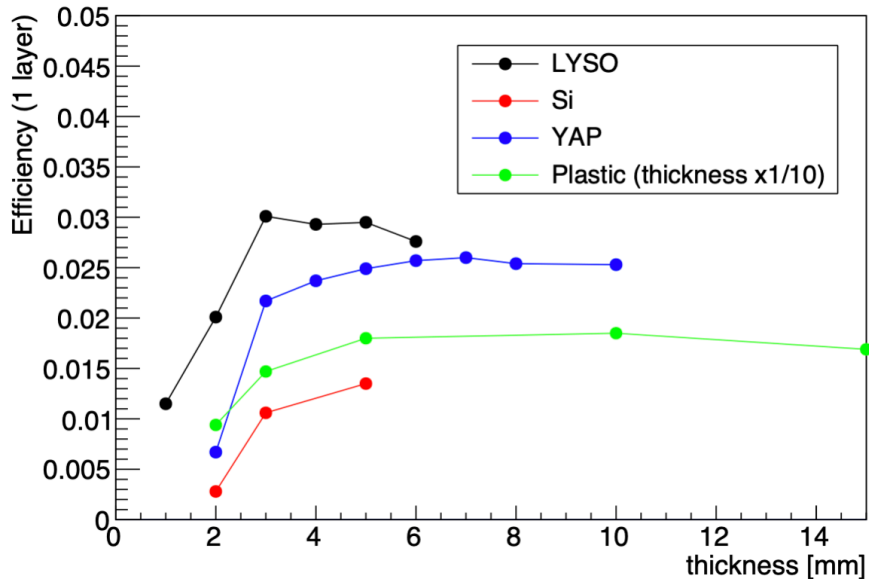


図 3.10: 材質・厚さごとの 52.8 MeV イベントの検出効率。

図 3.10 から分かるように、単層の場合に検出効率は非常に低いので、コンバージョン層を複数にした場合の、検出効率を図 3.11 に示した。

ここでは、各素材について、単層で最もパフォーマンスが高い厚さを選択した。

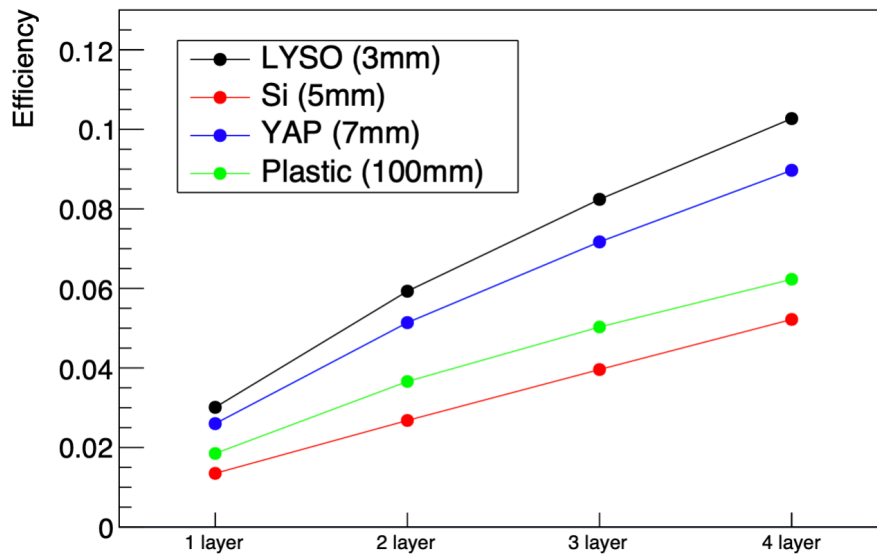


図 3.11: 複数層のアクティブコンバータにおける材質・厚さごとの 52.8 MeV イベントの検出効率。

図 3.10 と図 3.11 より、LYSO が最も検出効率が高く、コンバータの材質として最も適していることがわかる。

3.3.3 磁場の導入

磁場がある場合については、以前の研究があり、磁場がある場合にも、LYSO が最も検出効率が高いことがわかっている。

第4章 タイル状のLYSO結晶を用いた宇宙線による性能評価

4.1 概要

前章で述べたように、アクティブコンバーターのアクティブな素材としては、検出効率の観点から、LYSO結晶が有望であることがわかった。そこで、実際にLYSO結晶をSiPMで読み出すことで、エネルギー分解能および時間分解能の性能がどれほどであるかを試験した。

4.2 要請

光子ペアスペクトロメーター全体での目標エネルギー分解能は、信号領域で0.4%@52.8 MeVである。参照する文献にもよるが、たとえば、LYSO結晶の $\langle dE/dx \rangle = 1.12 \text{ MeV/mm}$ である。また、検出効率の観点から、LYSO結晶の厚みはおよそ4 mm程度を考えている。信号領域のミュオンから対生成される電子(陽電子)はおよそMIPであることから、 $dE/dx = 1.5 \text{ MeV/mm}$ と近似できる。したがって、アクティブコンバーターとしてのエネルギー分解能0.4%信号領域@9.0 MeV程度のエナジーデポジットに対して、360 keV程度を識別できる能力を要請することになる。

エネルギー分解能は、最終的にSiPMによって読み出される検出光子数によって、統計的に制限される(式4.1)。

$$\sigma(E) \geq 1/\sqrt{N_{p.e.}} \quad (4.1)$$

したがって、目標エネルギー分解能0.4%@信号領域を達成するためには、MIP程度の荷電粒子によるエナジーデポジットに対して、少なくとも625個の検出光子数が必要となる。

時間分解能については、光子ペアスペクトロメーター全体での目標時間分解能は30 psである。信号ガンマ線の時間測定は、信号ガンマ線から対生成された電子陽電子ペアがトラッカーを通過し再びコンバーターに戻ってくるさいに、電子と陽電子それぞれに対し2回独立に行うことができる。したがって、アクティブコンバーターをタイミングレイヤーとしても用いる場合、アクティブコンバーターの1セグメントに対する要求は、 $30 \text{ ps} \times \sqrt{2} = 42 \text{ ps}$ である。

4.3 試験方法(線源)

ラボにおいて、LYSO結晶にMIP程度の荷電粒子によるエネルギーを付与するやり方は、アルファ線あるいは宇宙線を用いることで実現できる。表4.1に、ラボにおいて比較的容易に利用可能な線源と、それらの長所および短所の一覧をまとめる。

アクティブコンバーターをタイミングレイヤーとしても用いることを考えると時間分解能も評価したいが、時間分解能を測定するためには、入射粒子は、時間の基準を決めるためのカウン

表 4.1: 線源とそれらの長所および短所

線源	宣言	ビット幅
文字型	char	8
整数型	int	32
倍精度実数型	double	64
倍々精度実数型	long double	96

ター (以下、タイミングリファレンスカウンターと呼称する) を通過する必要がある。アルファ線は、 dE/dx が比較的大きく、物質中で容易にエネルギーを失い止まってしまうので、タイミングリファレンスカウンターと LYSO 結晶の両方を通過させることは困難である。

いっぽうで、宇宙線の場合には、エネルギーが非常に大きいため、容易にタイミングリファレンスカウンターと LYSO 結晶の両方を容易に貫通する。したがって、エネルギーに関する性能と時間に関する性能の両方を同時に測定できることから、今回の試験では、宇宙線を線源として用いた。

4.4 試験方法 (時間分解能の測定)

いま、まったく同じ時間分解能 $\sigma(T)$ を持つ検出器を 2 つ並べ足底を行うことで、2 つの検出器による検出時刻の時間差分布の広がりとして $\sigma'(T)$ を得たとする。すると、

$$\sigma'^2(T) = \sqrt{\sigma^2(T) + \sigma^2(T)} \quad (4.2)$$

$$= 2\sigma(T) \quad (4.3)$$

だから、

$$\sigma(T) = \sigma'(T)/2 \quad (4.4)$$

となる。したがって、2 つのカウンターを同様の手順で製作することで同等の時間分解能であることを期待すれば、それらのカウンター間の検出時刻の差を見ることで、タイミングリファレンスカウンターを使用せずに、カウンターの時間分解能を見積もることができる。

4.5 セットアップ

試験には、図 4.1 に寸法を示す、 $30 \times 30 \times 4$ mm のサイズの LYSO タイルを用いた。また、この LYSO タイルには、窪み (以下、ディンプルと呼称) が掘られている。この LYSO タイルに対して、3 通りの方法で SiPM を配置し、読み出した。ここでは例として、1 つの配置についての結果を示す。LYSO と SiPM とからなるカウンターを 2 つ重ね、各チャンネルのコインシデンスをセルフトリガーとすることで、データ取得を行った。

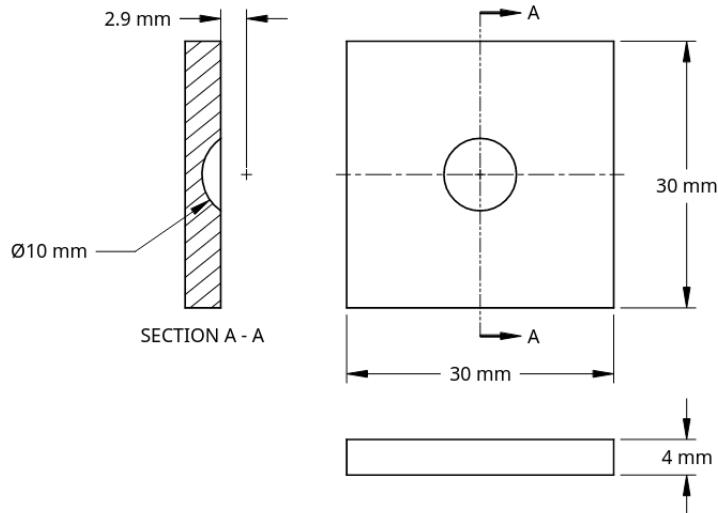


図 4.1: LYSO タイルの寸法

図 4.2 に示すように、LYSO タイルの両側面に、受光面 $2.0 \times 2.0 \text{ mm}^2$ ピクセルピッチ 50 mm の SiPM(浜松ホトニクス製 S13360-2050VE) を 1 個ずつ配置した。

SiPM の信号は、信号の増幅および波形シェーピングを行うアンプを通過後、波形デジタルライザに入力された。

波形デジタルライザには、DRS Evaluation board が用いられた。

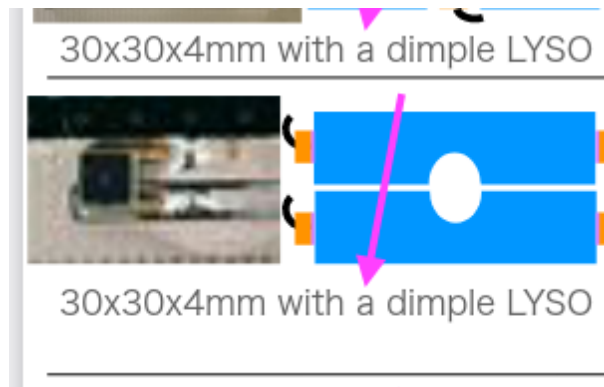


図 4.2: セットアップ

結果は、検出光子数としては、2200 p.e. で、時間分解能は 135 ps であった。アクティブコンバーターの目標性能としては、検出光子数 600 p.e. で時間分解能 42 ps なので、検出光子数は十分であるが、時間分解能は改善が必要であることがわかった。

第5章 バー状のLYSO結晶を用いたビームによる性能評価

5.1 宇宙線試験のときからの変更

前章で、検出光子数としては十分であることがわかったが、時間分解能には改善が必要なことがわかった。それなので、結晶の形と読み出し方法を変更して、ビームによる試験を行った。

5.1.1 結晶の形の変更

LYSO結晶の形状を、タイルからバーへと変更した。実際のペアスペクトロメーターでは、 ϕ 方向にセグメントを細かくした方が、パイルアップを削減できる。

また、先行例として、CMS実験でのMIPタイミングディテクターでは、アクティブコンバーターと同程度の厚み3, mmのLYSOバーを両サイドから読み出すことで、30 psという非常に良い時間分解能を得ている。

5.1.2 読み出し方法の変更

良い時間分解能を得るためには、発生したシンチレーション光のうち、最初に到達する光子たちを、良いS/Nで見ることが重要であると考えられる。そのため、読み出しエレキのゲインを上げることにした。読み出しエレキのダイナミックレンジを超えるために波高は分からなくなるので、TOTを用いてウォークを補正することにした。

5.2 PF-ARテストビームライン

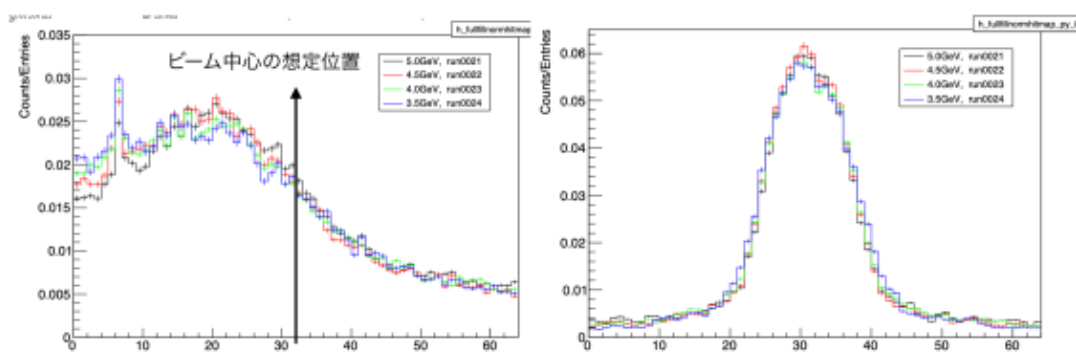


図 5.1: ビームプロファイル

KEKのPF-AR測定器開発テストビームラインにて、MIP電子ビームを用いた試験を行った。ビームのモーメントは0.5–5 GeVであった。ビームのレートは150 Hzであった。▼図5.1に、ビームのプロファイルを示す。

5.3 セットアップ

測定にはノーマルタイプと速いタイプの2種類のLYSO結晶を用いた。LYSO結晶のサイズは $3 \times 3 \times 50 \text{ mm}^3$ であった。SiPMによって両サイドから読み出した。読み出しに用いたSiPMの受光面積は $3 \times 3 \text{ mm}^2$ で、ピクセルピッチは50 μm と15 μm の2種類を使用した。LYSO結晶にはリフレクターとしてESRを巻いた。

タイミングリファレンスカウンターには、 $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ のプラスチックシンチレーターを、受光面積 6 mm^2 のSiPM1個で読み出しているものを使用した。

LYSOとタイミングリファレンスカウンターの波形は、シェーピングアンプを通過させてから、サンプリング速度1.6 GHzの波形ディジタイザで記録した。

LYSOとタイミングリファレンスカウンターは、図のように配置された。2個のLYSOは重ねて配置した。タイミングリファレンスカウンターは、鉛直方向について、およそビームの中心に置かれるようアライメントされた。

LYSOは、駆動装置によって垂直方向に動かせるようになっている。

5.4 取得したデータセット

表 5.1: 取得したデータ

データセット	ピクセルピッチ	セットアップ	位置スキャン	V_{op}	ノイズデータ
データ1	50 μm	セットアップ a	5点	ノミナル	有
データ2	50 μm	セットアップ a	2点	ノミナルより高め	無
データ3	15 μm	セットアップ b	1点	ノミナル	無
データ4	15 μm	セットアップ b	3点	ノミナル	無

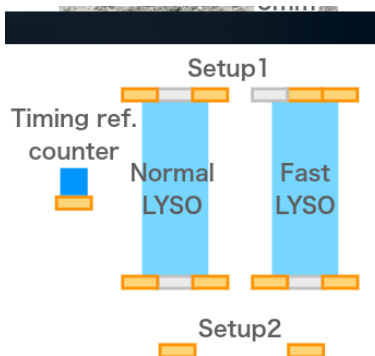


図 5.2: セットアップ a

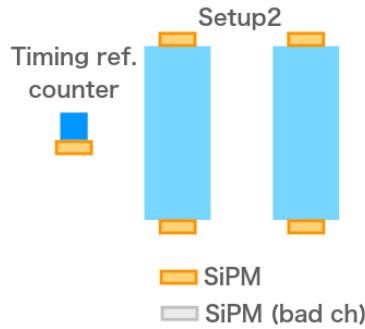


図 5.3: セットアップ b

表 5.1 に、取得したデータの一覧を示す。また、図 5.2 および図 5.3 に、表 5.1 中でのセットアップ a および b それぞれを示す。

表 5.1 でのデータ 1 および 2 については、図 5.2 に示した 50 μm ピッチ MPPC 計 8ch (12ch のうち計 4ch はデッドチャンネル) で読み出した。表 5.1 でのデータ 3 および 4 については、図 5.3 に示した 15 μm ピッチ MPPC 計 4ch で読み出した。

解析は、このうち表 5.1 でのデータ 1 での、ビームを LYSO の長手方向の中央に照射した場合について、行った。したがって、以降は、そのデータだけを対象とする。

5.5 波形

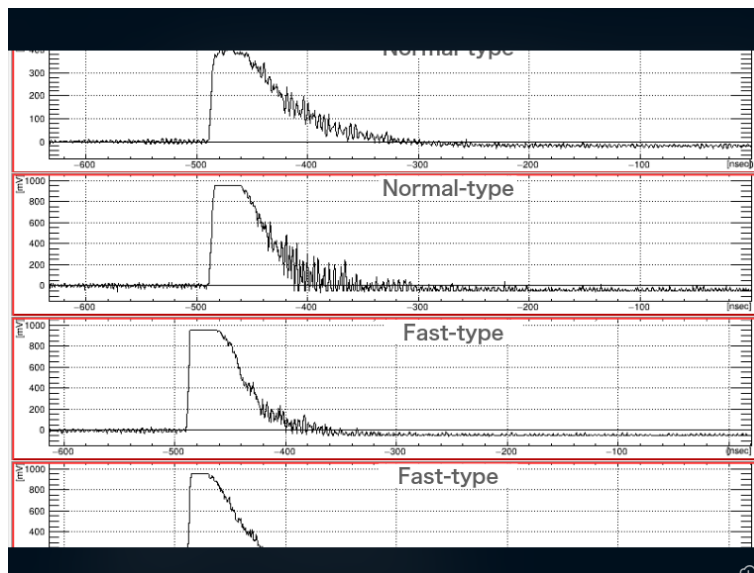


図 5.4: 波形

図 5.4 に、ビームイベントでの波形の一例を示す。波形ディジタイザのレンジは -50 mV から 950 mV であるため、波形の頭は打ち切られている。上二つは NORMAL タイプの LYSO の波形。下二つは FAST タイプの LYSO の波形。また、波形のテール部分には後述するノイズが載っている。

5.6 ノイズ

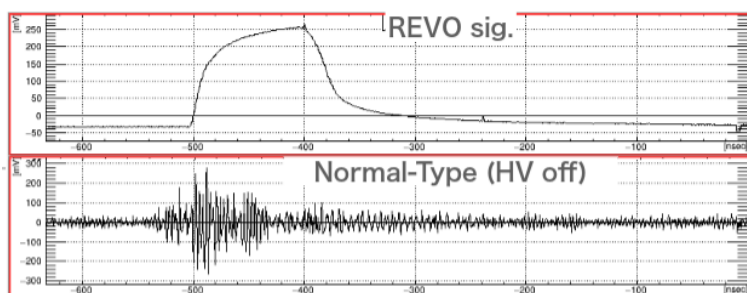


図 5.5: ノイズ波形

図 5.5 は、加速器信号を入力した ch と、MPPC の HV をオフにしたときの MPPC をつないだ ch の、波形の様子である。ここで、加速器信号とは、放射光用の蓄積電子リングの周回周期 1.2 us に同期した、ゲート信号 (REVOLUTION 信号) のことである。ノイズは、加速器信号に同期していることが確認された。また、このノイズは、テストビームラインへのビーム取り出しを行っていなくても、確認された。

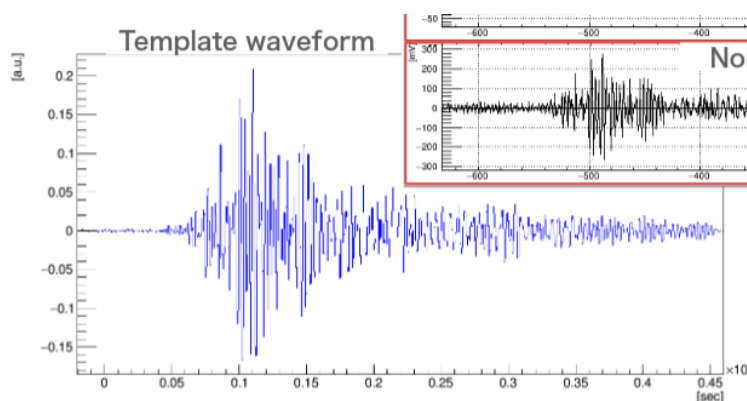


図 5.6: ノイズのテンプレート波形

図 5.6 は、ノイズの波形を集めて生成した、テンプレート波形である。ノイズは、REVO 信号に同期していたので、ノイズデータの取得は、加速黄信号をトリガーとすることで取得した。複数の波形を足し合わせても、ノイズの時間構造が見えることから、加速器に同期したノイズは、位相が揃っていることがわかる。ノイズのテンプレート波形を用いることで、ビームイベントの波形から、ノイズの影響を削減することが可能と思われる。なお、この加速器に同期したノイズについては、同時に測定を行っていた他グループでは確認されなかった。

5.7 行った解析の流れ

解析は、次の手順で行った。

1. タイミングリファレンスカウンターにヒットを要求することでイベントを選別する
2. タイミングリファレンスカウンター含む各 SiPM での検出時刻を、Leading Edge 法 (LE) によって取得する

- LEのスレッシュホールドの値を変えることで、スレッシュホールドの値を最適化する
3. タイミングリファレンスカウンター含む各SiPMの検出時刻のTime-Walkを、Time-Over-Threshold(TOT)によって補正する
 - TOTのスレッシュホールドの値を変えることで、スレッシュホールドの値を最適化する
 4. LYSOの時間分解能を2通りの手順で評価する
 - 両サイドのSiPMの検出時刻の時間差分布
 - タイミングリファレンスカウンターとの検出時刻の時間差分布

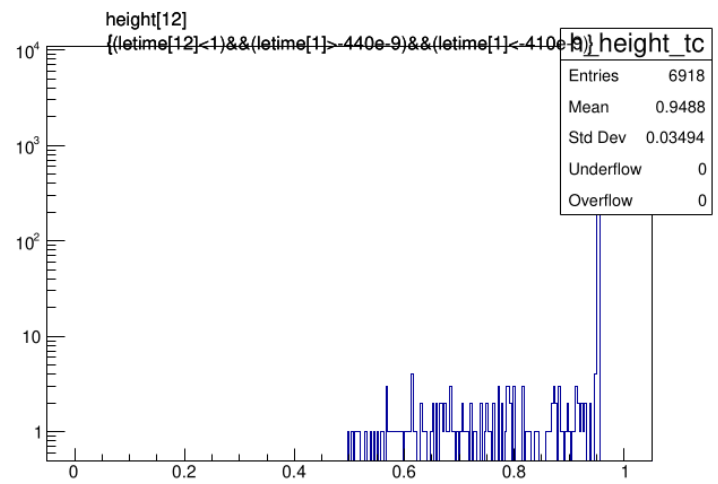


図 5.7: タイミングリファレンスカウンターの波高分布

図 5.7 に、タイミングリファレンスカウンターのは高分布を示す。タイミングリファレンスカウンターへのヒットは、タイミングリファレンスカウンターの波高 $height_{TC}$ に対して、 $height_{TC} > XXX$ を要求することで行った。

Leading-Edge 法 (LE) は、波形に対して (検出) 時刻を定義する方法のひとつである。これは、ある決められたスレッシュホールド $thre_{LE}$ に対して、波形の立ち上がり部分が $thre_{LE}$ を上回った時刻を、その波形による (検出) 時刻 t_{LE} だとするものである。

一般的に、この LE 法では、立ち上がりの時間スケールがある一定の値で特徴づけられる複数の波形を考えたときに、真に同一のある検出時刻 t_{true} をもつ波形同士であっても、波高が異なれば t_{LE} は異なる。このずれ $\Delta t_{TW} := t_{LE} - t_{true}$ は、波高に対する依存性が分かれば、補正することが可能である。そして、このずれ Δt_{TW} のことを、Time-Walk(あるいは単に Walk) と呼ぶ。

ところで、いま、SiPM からの信号波高は波形ディジタイザのダイナミックレンジよりも大きい場合、わからない。しかしながら、あるスレッシュホールド $thre_{TOT}$ を設定して、波形がこのスレッシュホールドを上回っている時間 TOT を考えると、これは、波高と相関があるため、波高に代わるパラメータとして利用することができる。この時間 TOT を Time-Over-Threshold と呼ぶ。

上述のように、LE と TOT のための 2 つのスレッシュホールドは、それぞれ、検出時刻および波高に対して良い相関をもつよう、設定することが望ましい。そのため、LE および TOT のスレッシュホールド値をそれぞれいくつか試すことで、最適化を図った。

時間分解能については、次の2通りの方法で計算を行った。一般的に分解能とは、基準となるある既知の入力に対して、系の出力の揺らぎのことを言う。知りたい時間分解能はLYSOを両サイドのSiPMで読み出すカウンターとしての時間分解能 $\sigma(t_{\text{LYSO}})$ である。カウンターには2ch分のSiPMが存在するから、カウンターの検出時刻 t_{LYSO} を、2chの平均検出時刻 $(t_{\text{SiPM}_a} + t_{\text{SiPM}_b})/2$ で定義することにする。すると、カウンターの検出時刻 t_{LYSO} とタイミングリファレンスカウンターの検出時刻 t_{TC} との時間差分布の広がりを見て、タイミングリファレンスカウンターの時間分解能の寄与を差し引くことで、

$$\sigma(t_{\text{LYSO}}) = \sigma(t_{\text{LYSO}} - t_{\text{TC}}) \ominus \sigma(t_{\text{TC}}) \quad (5.1)$$

$$= \sigma((t_{\text{SiPM}_a} + t_{\text{SiPM}_b})/2) \ominus \sigma(t_{\text{TC}}) \quad (5.2)$$

となる。

いっぽうで、カウンターそれ自身だけでも、

$$\sigma(t_{\text{LYSO}}) = \sigma((t_{\text{SiPM}_a} - t_{\text{SiPM}_b})/2) \quad (5.3)$$

のように、両サイドのSiPM同士の検出時刻の差の広がりを見ることで、タイミングカウンターの時間分解能の影響を排除して、カウンターの時間分解能 $\sigma(t_{\text{LYSO}})$ を評価することができる。

上記の2通りの方法での評価結果は、必ずしも一致するとは限らないから、2つの結果を比較することで、コンシステンシィのチェックになる。

5.8 LEのスレッシュホールドの最適化

LEのスレッシュホールドについては、前節で述べたように、時間分解能の観点からは、立ち上がりのはじめの最初を見たほうが有利であると同時に、S/Nも同様に重要であるから、スレッシュホールド値をS/Nの許す限り低い値に設定したほうが良いことが期待できる。

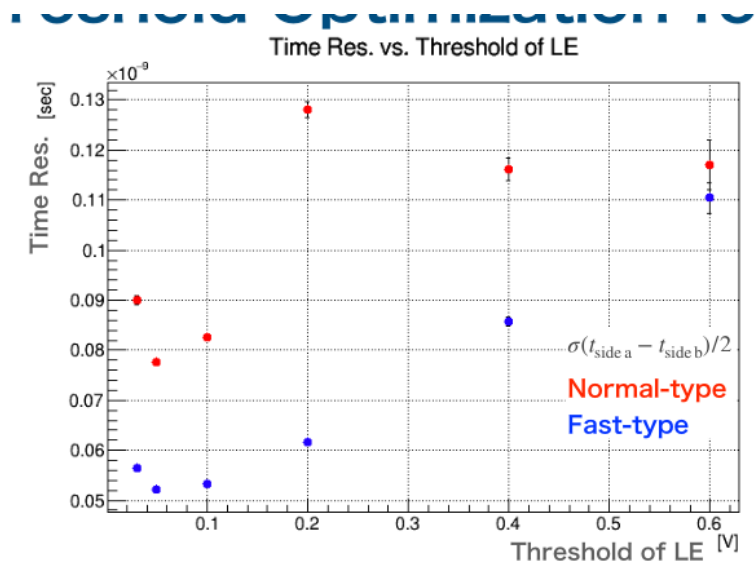


図 5.8: LEのスレッシュホールドスキャン結果 (LYSO)

図 5.8 は、横軸をLEのスレッシュホールド値、縦軸を両サイドの時間差から算出した時間分解能にとったプロットである。傾向としては、LEのスレッシュホールドは低いほうが時間分解能は良い

が、あるところでまで低くすると、かえって時間分解能は悪化することがわかる。以降の解析では、SiPMの両サイドの波形に対して、LEを適用する際のスレッシュホールドは、スキャンした点の中では最も良い時間分解能を与えた50 mVを採用した。

タイミングリファレンスカウンターについても同様のスレッシュホールドスキャンを行い、以降の解析では、タイミングリファレンスカウンターの波形に対して、LEを適用する際のスレッシュホールドは、スキャンした点の中では最も良い時間分解能を与えた450 mVを採用した。

5.9 TOTのスレッシュホールドの最適化

TOTのスレッシュホールドについては、前節で述べたように、波高に対して良い相関をもつような値に設定したい。

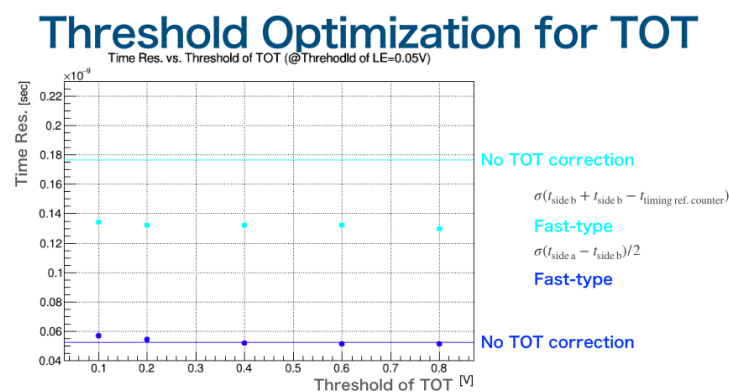


図 5.9: TOT のスレッシュホールドスキャン結果 (LYSO)

図 5.9 は、横軸を TOT のスレッシュホールド値、縦軸を時間分解能にとったプロットである。青色の点は両サイドの時間差から算出した時間分解能を表し、横軸はタイミングリファレンスカウンターとの時間差から算出した時間分解能を表す。また、青色および水色の実線は、それぞれの方法で算出した時間分解能について、TOT による補正を施す前の値である。両サイドの時間差から算出した時間分解能については、TOT 補正の効果がほとんど見えない。これは、いま、ビームは LYSO の長手方向の中心、つまり両サイドの SiPM それぞれから等距離の位置に入射しているため、2つの SiPM での光量は同程度となることが期待される。したがって、2つの SiPM の波形は同程度の波高を持ち、Time-Walk による影響も両者の波形に対して同程度となる。このため、両サイドの時間差を見た場合には、TOT による Time-Walk の補正の効果はないと考えられる。

いっぽうで、タイミングリファレンスカウンターとの時間差をみた場合には、タイミングリファレンスカウンターと LYSO との2つのカウンターそれぞれで、同一の粒子が通過したとしてもそれぞれのカウンターに落とされるエネルギーは独立な確率分布によって揺らぐため、発生する光量は相関を持たないから、Time-Walk の補正の効果を受ける。

以降では、LYSO に対して、TOT のスレッシュホールド値 800 mV を使用した。

5.10 得られた時間分解能

LYSO およびタイミングリファレンスカウンターの LE と TOT のスレッシュホールドを最適化したのちに、2通りの方法で時間分解能を算出した。まず、両サイドでの時間差分布から算出し

た時間分解能は、

$$\sigma(t_{\text{LYSO}}) = \sigma((t_{\text{SiPM}_a} - t_{\text{SiPM}_b})/2) \quad (5.4)$$

$$= 52 \text{ ps} \quad (5.5)$$

であった。

いっぽう、タイミングリファレンスカウンターとの時間差分布から算出した時間分解能は、

$$\sigma(t_{\text{LYSO}}) = \sigma((t_{\text{SiPM}_a} + t_{\text{SiPM}_a})/2) - \sigma(t_{\text{TC}}) \quad (5.6)$$

$$= 79 \text{ ps} \quad (5.7)$$

であった。ところで、いま、LYSOの両サイドの2つおよびタイミングリファレンスカウンターの、計3つのカウンタが存在するから、3のカウンタから2つ選んでそれらの間の時間差分布を見ることで、以下の3つの時間分解能を得ることができる。

$$\sigma((t_{\text{SiPM}_a} - t_{\text{TC}})) = 104 \text{ ps} \quad (5.8)$$

$$= \sqrt{\sigma^2((t_{\text{SiPM}_a}) + \sigma^2((t_{\text{TC}}))} \quad (5.9)$$

$$\sigma((t_{\text{SiPM}_b} - t_{\text{TC}})) = 93 \text{ ps} \quad (5.10)$$

$$= \sqrt{\sigma^2((t_{\text{SiPM}_b}) + \sigma^2((t_{\text{TC}}))} \quad (5.11)$$

$$\sigma((t_{\text{SiPM}_a} - t_{\text{SiPM}_b})) = 104 \text{ ps} \quad (5.12)$$

$$= \sqrt{\sigma^2((t_{\text{SiPM}_a}) + \sigma^2((t_{\text{SiPM}_b}))} \quad (5.13)$$

これらは、3つのカウンターの時間分解能 $\sigma((t_{\text{TC}}))$, $\sigma((t_{\text{SiPM}_a}))$, $\sigma((t_{\text{SiPM}_b}))$ を未知変数とする3本の連立方程式であるから、これを解くことで、

$$\sigma((t_{\text{TC}})) = 66 \text{ ps} \quad (5.14)$$

$$\sigma((t_{\text{SiPM}_a})) = 81 \text{ ps} \quad (5.15)$$

$$\sigma((t_{\text{SiPM}_b})) = 66 \text{ ps} \quad (5.16)$$

が得られる。こうして得られたタイミングリファレンスカウンターの時間分解能得 $\sigma((t_{\text{TC}}))$ の寄与を差し引けば、

$$\sigma(t_{\text{LYSO}}) = \sigma((t_{\text{SiPM}_a} + t_{\text{SiPM}_a})/2 - \sigma(t_{\text{TC}})) \ominus \sigma(t_{\text{TC}}) \quad (5.17)$$

$$= 43 \text{ ps} \quad (5.18)$$

を得た。

したがって、LYSOの時間分解能としては、52 ps あるいは 43 ps という値が得られており、SiPMの種類や読み出しエレキ等を改善することで、目標としている時間分解能 42 ps は到達可能であると考えている。

第6章 結論

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は、新物理に対する良いプローブである。現在、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は発見されていない。MEG II 実験での発見されるされないに関わらず、将来実験により $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の崩壊分岐比により強い制限をかけるあるいは崩壊を詳細に観測することは、非常に重要である。PSIにおける HIMB 計画により、さらなる高強度のミュオンビームを用いた実験を行える可能性がある。検出器としては、ガンマ線検出器が鍵となり、MEG/MEG II 実験での全吸収型カロリメーターでは限界があるため、ここでは、将来実験ではペアスペクトロメーターを用いることを検討した。

また、従来のペアスペクトロメーターでは、コンバーター中でのエネルギー損失が無視できないため、アクティブなコンバーターを用いることを検討した。アクティブな素材としては、シミュレーションによる検討では、LYSO が最も良い検出効率を与えた。LYSO は、宇宙線試験の結果から、目標とするエネルギー分解能は到達可能であり、時間分解能は改善が必要であることがわかった。ビーム試験の結果から、結晶の形と読み出し方法を変えることで、目標とする時間分解能は、さらなる最適化を施すことで、到達可能であると考えている。

関連図書

- [1] 株式会社ネオトロン web page. <http://www.neotron.co.jp/crystal/12/LYSO.html>.
- [2] Crytur web page. <https://www.crytur.cz/materials/yap-ce/>.
- [3] Particle data group web page. https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/HTML/silicon_si.htm
- [4] Particle data group web page. <https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/HTML/polyvinyltoluen>