

平成 27 年度卒業論文

高強度レーザー場における真空複屈折性
検知にむけた γ 線偏光波長計の開発

広島大学理学部物理科学科
クオーク物理学研究室
B125627 沖中 香里

平成 28 年 2 月 29 日
指導教官 杉立徹 教授
主査 本間 謙輔 助教
副査 檜垣 浩之 准教授

概要

本研究では、真空複屈折性探索に用いる γ 線偏光波長計の開発を行った。真空複屈折性とは、真空空間に直線偏光した電磁場を加えた場合に生じる性質である。この性質が現れている真空に、直線偏光したプローブ光を入射すると、複屈折性により偏光度の変化が起こる。プローブ光の入射前後の偏光度変化をみることで、真空複屈折性は検知できる。この偏光度変化を計測するものが、本研究で開発する偏光波長計である。今回は、高強度レーザー場を用いて真空複屈折性を発生させ、プローブ光として 1 GeV の直線偏光 γ 線を用いた手法を前提とした開発を行った。本研究の目的は、 γ 線偏光波長計の偏光及び運動量再構成の精度を調べること、そして偏光波長計に搭載予定であるピクセルセンサー INTPIX4 の基本性能調査を行うことである。シミュレーションでは、粒子反応シミュレータである Geant4 を用いて、偏光波長計の偏光及び運動量分解能を調べた。結果、偏光度 1.0 の条件において、センサーの厚み 50 μm の時 0.43、センサーの厚み 260 μm 時には 0.09 の偏光分解能を得た。また、本研究で開発する偏光波長計は 70MeV 直線偏光 γ 線を用いたテスト実験を今後行う予定である。このテストに向けた準備として、70MeV のプローブ光に対応させた偏光波長計内でのセンサーの配置を再構成した。その上でセンサー厚み 50 μm 、偏光度 1.0 の条件のもと偏光分解能を求めたところ、統計量に応じて 0.1~0.15 という値を得た。

ピクセルセンサーの基本性能調査では、搭載予定の INTPIX4 のペDESTAL と積分時間の関係をまず調べ、その後荷電粒子が観測可能であることを β 線を用いて確認した。つづいて、パルスレーザーを用いて外部トリガーの動作確認を行い、宇宙線観測を行った。宇宙線観測では MIP の分布を得ることに成功し、そこから ADC チャンネルとエネルギーの対応関係を求めることができた。

目次

1	序論	7
1.1	真空複屈折性	7
1.2	レーザーを用いた真空複屈折性の検知手法	7
1.3	光子と物質の反応	9
1.3.1	対生成	9
1.4	荷電粒子と物質の反応	10
1.4.1	原子との非弾性散乱	10
1.4.2	原子核との弾性散乱	11
1.4.3	制動放射	11
1.5	γ 線偏光波長計の設計	12
1.6	研究目的	13
2	γ線偏光波長計のシミュレーション	14
2.1	Gent4 について	14
2.2	運動量再構成手法	14
2.3	偏光再構成手法	16
2.4	偏光分解能計算手法	18
2.5	入射エネルギー 70MeV 時のセンサー配置	19
2.6	結果	21
2.6.1	運動量再構成	21
2.6.2	センサーの厚みごとの偏光分解能	21
2.6.3	偏光再構成	22
2.6.4	入射エネルギー 70MeV 時の偏光再構成	23
2.7	考察	25
2.7.1	運動量誤差の分布について	25
2.7.2	運動量分解能のピークのずれについて	26
2.7.3	偏光分解能とセンサーの厚みの関係	26
2.7.4	入射エネルギー 70MeV 時の偏光分解能	26
2.7.5	電子陽電子の xy 分布	27
2.7.6	不変質量の再構成	28
3	ピクセルセンサーを用いた宇宙線の計測	29
3.1	実験概要	29
3.2	INTPIX4	29
3.3	セットアップ	30
3.4	ペDESTAL計測	31
3.5	β 線計測	33
3.6	トリガーモジュールの確認	35

3.7	宇宙線の計測	38
3.8	結果	39
3.9	考察	41
3.9.1	任意の同一 entry における複数ピクセルの反応について	41
3.9.2	同一ピクセルの複数回反応について	41
3.9.3	宇宙線の MIP	42
3.9.4	負に偏っている σ について	42
4	結論	44
5	今後の展開	45

目次

1	仮想電子対の分極	7
2	1GeV 偏光 γ 線生成の様子	8
3	偏光 γ 線偏光度変化	8
4	光子と物質の反応 [7]	9
5	電子と物質の反応による損失エネルギー [7]	10
6	原子のイオン化	10
7	励起状態への変位	10
8	原子核との弾性衝突	11
9	多重散乱の様子 [7]	11
10	制動放射 [9]	11
11	偏光波長計概観	12
12	電子対の曲率	15
13	曲率半径を求める	15
14	三角形 AOB	16
15	本来の入射点	16
16	本来の入射角	17
17	θ 再構成	17
18	偏光を求める	18
19	偏光測定	18
20	センサーの再配置	19
21	テスト実験用偏光波長計概観	20
22	電子の運動量再構成	21
23	陽電子の運動量再構成	21
24	センサー厚み 50 μm 時と 260 μm 時の偏光再構成	22
25	センサー厚み 50 μm 時と 260 μm 時の偏光分解能	22
26	偏光度 1.0 時と 0.5 時の偏光比較	23

27	偏光度 1.0 時と 0.5 時の偏光分解能比較	23
28	入射エネルギー 70 MeV における 10000 ペア対生成時の偏光 分解能	24
29	入射エネルギー 70 MeV における 50000 ペア対生成時の偏光 分解能	24
30	入射エネルギー 70 MeV における 100000 ペア対生成時の偏 光分解能	24
31	電子の運動量分解能	25
32	陽電子の運動量分解能	25
33	入射エネルギー 70 MeV における 10000 ペア対生成時の偏光 分解能 (bin 数 100)	27
34	センサー厚み 50um での再構成された電子の xy 分布	27
35	センサー厚み 260um での再構成された電子の xy 分布	27
36	対生成直後の電子の xy 分布	28
37	再構成運動量と実際の運動量での不変質量再構成の比較	28
38	銅におけるミューオンの透過距離当たりの電離損失	29
39	INTPIX4 写真	30
40	INPIX4 の図 [8]	30
41	実験セットアップ概略図	30
42	実験セットアップ写真	31
43	xilinx ケーブル	31
44	INTPIX4 から得られるヒストグラムの例	31
45	INTPIX4 における 100us 時のペDESTAL の 2 次元ヒストグラム	32
46	INTPIX4 における 100us 時のペDESTAL の 1 次元ヒストグラム	32
47	INTPIX4 における 1000us 時のペDESTAL の 2 次元ヒストグ ラム	32
48	INTPIX4 における 1000us 時のペDESTAL の 1 次元ヒストグ ラム	32
49	INTPIX4 における 10ms 時のペDESTAL の 2 次元ヒストグラム	32
50	INTPIX4 における 10ms 時のペDESTAL の 1 次元ヒストグラム	32
51	β 線源配置	33
52	β 線観測時の 1 次元ヒストグラム	33
53	β 線観測時の 2 次元ヒストグラム	33
54	β 線入射時と未入射時のピクセルにおける 1 次元ヒストグラム の比較	34
55	β 線と思われる信号	34
56	ペDESTAL の揺らぎが大きなピクセル	34
57	パルスレーザー照射の様子	35
58	外部トリガーの動作確認	36

59	パルスレーザーとセンサーのタイミングチャート	37
60	外部トリガー導入時の INYPIX4 における 2次元ヒストグラム	37
61	外部トリガー未導入時の INYPIX4 における 2次元ヒストグラム	37
62	外部トリガー導入時の INYPIX4 における 1次元ヒストグラム	37
63	外部トリガー未導入時の INYPIX4 における 2次元ヒストグラム	37
64	宇宙線トリガー	38
65	宇宙線トリガー上から見た場合	38
66	宇宙線トリガー横から見た場合	38
67	宇宙線トリガー入力セットアップ	39
68	宇宙線観測 1次元ヒストグラム	39
69	宇宙線観測 2次元ヒストグラム	39
70	ペDESTアルの揺らぎの外に位置する宇宙線の信号	40
71	MIP 分布	41
72	複数回反応ピクセルをカットした MIP 分布	42
73	ペDESTアルを差し引いた ADC 値	43

1 序論

1.1 真空複屈折性

複屈折性とは、直交するある二方向で屈折率が異なる性質のことを示し、結晶の光学的性質としても知られている。文章が書かれた上にのせると、文字が二重に見える方解石などが複屈折性をもつ代表的な例としてあげられる。真空は一般的に何もない空間と考えられているが、光などを入射することで相互作用が加わった場合仮想電子対が現れる。この真空空間に直線偏光した電磁場を加えると、図1のように真空内の仮想電子対が印加された電磁場の偏光方向に依存して、ある一定方向に分極し、複屈折性が生じる。このようにして真空に生じる複屈折性のことを「真空複屈折性」とよぶ。

これまでいくつかの研究グループによって、真空複屈折性の検知が試みられてきたが、未だに観測がなされていない。これは、真空複屈折による2方向の屈折率変化 Δn が非常に小さいためである。たとえば、先行研究の1つである PVLAS 実験の場合、偏光変化率は $\Delta n = 4 \times 10^{-23}$ [2] と微小である。

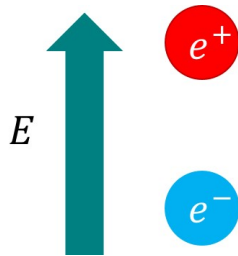


図 1: 仮想電子対の分極

1.2 レーザーを用いた真空複屈折性の検知手法

真空複屈折性は、強い電磁場を与えた真空空間にプローブ光を入射することで検知することができる。プローブ光として直線偏光を真空に入射すると、複屈折性により直線偏光の偏光度が変化する。これより入射前後のプローブ光の偏光度変化 $\Delta\varphi$ を計測することで、真空複屈折性を検知できる。

$\Delta\varphi$ は式 (1) で表される。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda} \quad (1)$$

このとき Δn は屈折率変化、 d 光路長、 λ はプローブ光の波長を示す。 $\Delta\varphi$ は真空への入射前後の偏光 γ 線の偏光度を計測することで間接的に求めることができる [3]。偏光 γ 線の偏光度は式 (2) で表される。このとき N_{\parallel} と N_{\perp} は、レーザー場の直線偏光方向に対して、それぞれ水平方向、垂直方向である

直線 γ 線の数である。

$$P_l = \frac{N_{\parallel} - N_{\perp}}{N_{\parallel} + N_{\perp}} \quad (2)$$

真空複屈折性探索の先行研究では、これまで可視光領域のプローブ光が用いられてきた。屈折率変化が微小なため、光路長 d を大きくすることで $\Delta\varphi$ を大きくし、検知を目指してきた [1][6]。近年、ELI をはじめとする高強度レーザー場の発展により、より強い電磁場を真空空間に印加し屈折率変化 Δn を大きくすることが可能となった。本研究で前提としている実験では、高強度レーザー場を用いて真空中に直線偏光した電磁場を印加することで、真空複屈折性の検知を目指す。真空中に強い電磁場を与えるポンプレーザーには、ELI-NP に導入予定の 10PW レーザーを用いる。ELI-NP は 2018 年に完成予定の施設であり、ELI プロジェクトにおけるものである。[5] この場合、10PW という高い強度を持つポンプレーザーを用いることで、先行研究では $\Delta n = 4 \times 10^{-23}$ であった偏光度変化を $\Delta n \sim 10^{-10}$ という値にできると考えられている。さらに、光路長 d を大きくする代わりに 1 GeV という高いエネルギーのプローブ光を組み合わせることで、 λ の値を小さくする。これにより、先行研究では偏光度変化 $\Delta\varphi = 5 \times 10^{-11}$ であったものに対して、 $\Delta\varphi \sim 1$ を実現できると考えている。

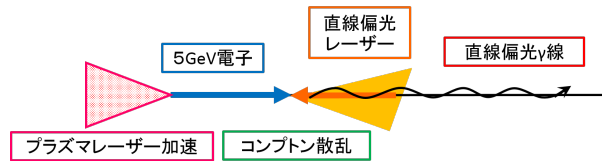


図 2: 1GeV 偏光 γ 線生成の様子

プローブ光として用いる 1GeV の直線偏光 γ 線は、図 2 のように直線偏光レーザーとプラズマレーザー加速させた無偏光のエネルギー 5GeV 電子をコンプトン散乱させることで生成する。高強度レーザー場が与えられた真空空間を通過する、直線偏光 γ 線の偏光度変化の様子を図 3 に示す。コンプトン散乱により生成する直線偏光 γ 線の偏光度は $P_l = 0.97$ と予測され、レーザー場通過後は $P_l = 0.53$ となることが予測されている。[1] 本研究では、この偏光計測に必要な γ 線偏光波長計の開発を行った。

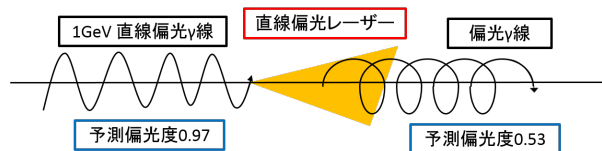


図 3: 偏光 γ 線偏光度変化

1.3 光子と物質の反応

偏光波長計の開発をするにあたり、考慮しなければならない光子と物質の反応として、対生成がある。対生成はコンバータで起こる現象であり、偏光波長計では対生成された電子対を利用して γ 線の偏光度、波長を測定する。

1.3.1 対生成

対生成とは、光子が電子と陽電子の対に変換されるものである。光子のエネルギーが電子陽電子の質量 $2m_e c^2$ より大きくなると生じる現象であり、主に MeV 以上のスケールにおいて支配的な光子と物質の反応である。エネルギー、運動量の保存則により、基本的には真空中では起こらない反応であるが、光を入射するなど相互作用を発生させるとエネルギーにゆらぎが生じ、発生することができる。真空複屈折性は、この現象により生成された電子陽電子の分極により具現する。

図 5 は、光子と鉛 ($Z=82$) の各種反応における反応断面積を光子のエネルギーごとに表した図である。エネルギー 1GeV の γ 線においては、数十 barn の反応断面積をもつ。

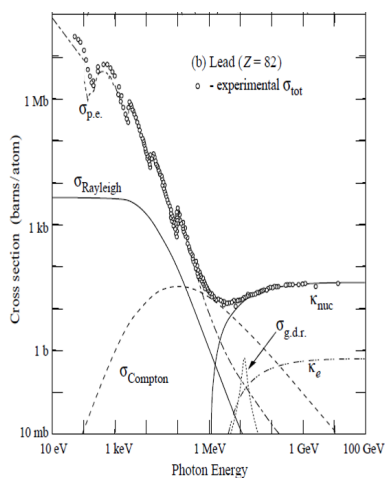


図 4: 光子と物質の反応 [7]

1.4 荷電粒子と物質の反応

偏光波長計内のピクセルセンサーでは、原子核の非弾性散乱によって通過する粒子のエネルギーを測定している。また、多重散乱は偏光や運動量を再構成する際に必ず考慮しなければならない反応である。これらの荷電粒子と物質の反応について、以下で説明していく。

1.4.1 原子との非弾性散乱

これは、荷電粒子と物質中の原子内の電子が、電磁相互作用により散乱する反応である。この過程では、物質中の電子が荷電粒子よりエネルギーを受け取り、その原子は図7のように励起状態、または図6イオン化される。

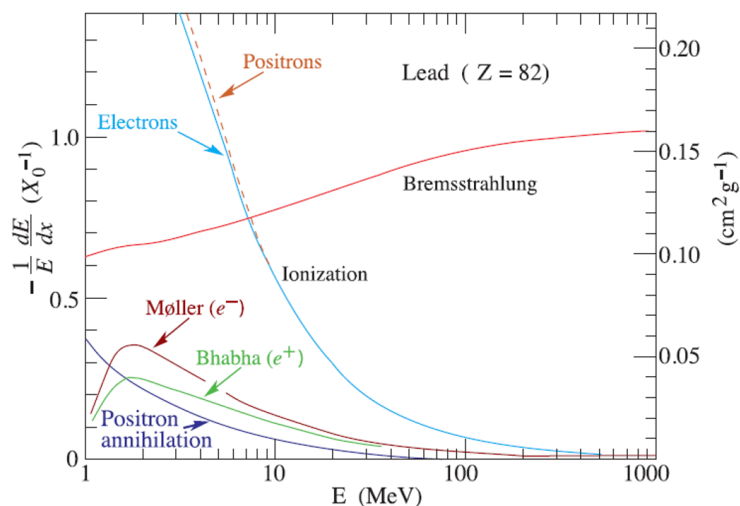


図 5: 電子と物質の反応による損失エネルギー [7]

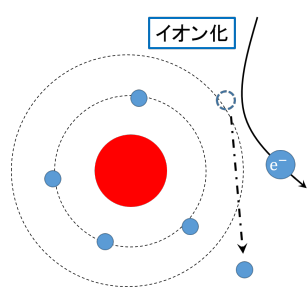


図 6: 原子のイオン化

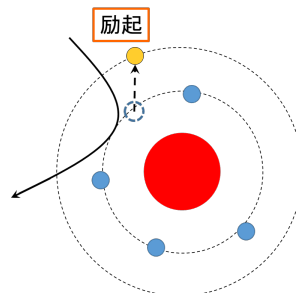


図 7: 励起状態への変位

1.4.2 原子核との弾性散乱

これは、電磁相互作用による物質内の原子核と荷電粒子の弾性散乱反応である。代表的な弾性散乱現象である、ラザフォード散乱の図を、図8に示す。一般的にはクーロン散乱とも呼ばれる。

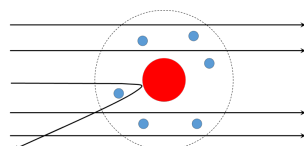


図 8: 原子核との弾性衝突

荷電粒子は、物質内をいくつもの微小角散乱を起こしながら通過するが、この多くがクーロン散乱によるものである。また、この効果を多重散乱とよぶ。微小角散乱の場合は、図9における角 θ はガウス分布に従う。偏光波長計内では、コンバータとピクセルセンサーにおいて、通過する電子陽電子が多重散乱の影響を受ける。

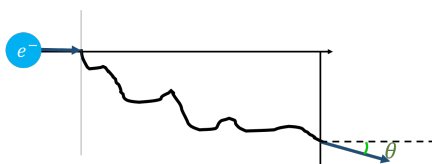


図 9: 多重散乱の様子 [7]

1.4.3 制動放射

図10のように、物質中の原子との電磁相互作用により荷電粒子の進行方向が変化すると、電磁波が荷電粒子から放出される。この現象を制動放射とよぶ。

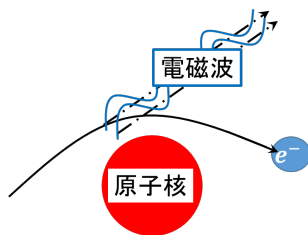


図 10: 制動放射 [9]

また、制動放射に関連する現象として、電磁シャワーがある。これは制動放射によって放出された高エネルギーの光子が対生成をし、さらに対生成された電子陽電子がそれぞれ制動放射によって光子を生成するということが繰り返されることで、電子陽電子と光子がねずみ算式に生成されていく現象である。

1.5 γ 線偏光波長計の設計

本研究で取り扱う γ 線偏光波長計の設計は、図 11[1][4]となっている。この偏光波長計は、高強度レーザー場における真空複屈折性探索を目的としたものであり、その用途に特化した設計となっている。大きな特徴としては、真空空間を維持しなければならないこと、1GeVの γ 線の計測に対応することがある。

偏光波長計内に直線偏光 γ 線が入射すると、コンバータで対生成が発生する。対生成された電子対は、磁場によりそれぞれ曲げられてセンサーへ入射する。このセンサーへのヒット情報から、偏光及び γ 線のエネルギーを計測する。

真空複屈折性探索のために用いるため、偏光波長計内は真空空間でなければならない。電磁石などの電極の使用は真空の保持を難しくし、熱の発生源ともなる。このためこの偏光波長計では、磁場の生成には電磁石でなく作成した永久磁石を用い、ピクセルセンサーも必要最小限の枚数のコンパクトな作りとなっている。

対生成を生じさせるコンバータには、2 μm 金薄膜をもちいる。対生成発生効率を考慮すると、原子番号 Z の値が大きい物質が好ましい。また、多重散乱の影響を減らし、一回の入射につき多数の電子対が生成されることを防ぐため、薄膜にすることが可能な金を用いている。ピクセルセンサーも、多重散乱による影響を減らすため、より厚みの小さなものが好ましい。さらに、プローブ光である直線偏光 γ 線のエネルギーが1GeVと非常に高いため磁場による曲率が非常に小さく、高い分解能を持ったピクセルセンサーである必要がある。これらの理由より搭載するピクセルセンサーにはINTPIX4を軸としたものを用いることとした。センサーの配置は、生成された電子対のセンサーへの入射が多くなるよう電子対の入射飛跡を考慮したうえで設定してある。

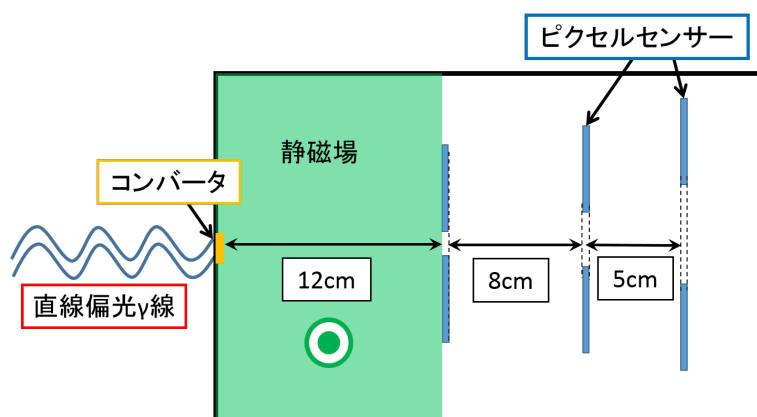


図 11: 偏光波長計概観

1.6 研究目的

本実験の目的は、真空複屈折探索に必要となる偏光波長計の性能調査である。現段階での設計においてシミュレーションを行い、開発する偏光波長計の偏光及び運動量の再構成精度を調べ、設計に改善の余地がないか考察を行う。また偏光波長計のテスト実験に向けて、入射するプローブ光のエネルギーが70MeV時の偏光波長計内のセンサーの配置を設定し、この設定においてテスト実験が可能であるか検証する。ピクセルセンサー INPIX4の検証では、センサーの基本性能を調査する。偏光波長計に搭載予定の INTPIX4だが、このセンサーを元に今後実際に偏光波長計に用いるセンサーを開発していく予定である。本研究ではその第一段階として、ペDESTALにおけるノイズの影響と荷電粒子の観測、外部トリガーの導入実験を行った上で、宇宙線の電離損失を観測し大まかな ADC チャンネルのエネルギー較正を行う。

2 γ 線偏光波長計のシミュレーション

現段階での偏光波長計の設計は、12ページの図11で表したようになっていいる。まず、センサーでのヒット情報から運動量と偏光度を再構成する手法を確立し、この設計での偏光波長計の計測の精度を確認する。本研究では、現段階での設計の偏光波長計において、1GeV直線偏光 γ 線を入射したときのセンサーへのヒット情報をシミュレートし、その値から運動量及び偏光を再構成し、分解能を求める。また、偏光波長計に搭載するピクセルセンサーは、厚み260 μm のINTPIX4を前提として考えているが、センサーが厚くなるほど多重散乱の影響から偏光再構成の精度は下がると考えられている。このためセンサーはより薄いものが好ましい。現在センサーとしての機能が確認されているもので、厚み50 μm のセンサーが存在する。センサーの厚みを変更することも考慮し、本研究では、センサーの厚みの変化がどのように偏光分解能に影響するか確認する。

また、今後偏光波長計のテスト実験を、エネルギー70MeVの直線偏光 γ 線を用いて行う予定である。偏光波長計内の静磁場は永久磁石を用いて作るため、磁場はエネルギー1GeVの γ 線での実験と同じ値でテスト実験を行うことを前提としている。磁場が一定の場合、入射エネルギーが変わると運動量も変化するため、テスト実験用の検出器の配置を計算し、決定した配置での偏光分解能を検証していく。

2.1 Gent4について

Geant4はCERNによって開発された粒子反応シミュレータープログラムである。これを用いることで、粒子が物質中を通過する際に生じる相互作用過程を正確にシミュレートすることができる。高エネルギー原子核物理だけでなく、医学や宇宙科学分野においても世界的に用いられている。本実験では、設計された γ 線偏光波長計によって計測されるセンサーでのヒット情報を求めるために用いる。

シミュレーションの設定には、12において述べた偏光波長計の設計と実際に実験でもちいる検出器INTPIX4(P30参照)の情報をを用いる。

2.2 運動量再構成手法

入射された γ 線のエネルギーは、対生成後の電子陽電子の運動量から求めることができる。そのためシミュレーションによって得た情報より対生成された電子陽電子の運動量を再構成する。

図12のように、荷電粒子はx方向の静磁場によって曲率をもってセンサーに入射する。このときの粒子の運動量は $P[\text{GeV}/c]=0.3qB[\text{T}]R[\text{m}]$ によって表される。Rは曲率半径を示し、qは荷電量、Bは磁場の大きさを示す。荷

電量、磁場は定まっていることから、運動量を求めるには曲率半径を求める必要がある。

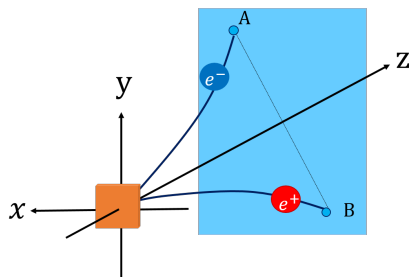


図 12: 電子対の曲率

図 12 を yz 平面から見たものが図 13 である。曲率半径 R をもって、電子または陽電子が入射した場合を示しており、点 B は対生成箇所、点 A は 1 層目のセンサーにおける入射点である。 α は点 A における半径 R の円の接線の傾きであり、1 層目と 2 層目のセンサーの電子の入射位置から求められる。 β は対生成点から A への入射角であり、こちらもセンサーのヒット情報から求められる。

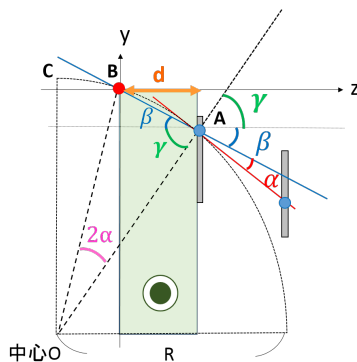


図 13: 曲率半径を求める

赤線は半径 R の接線のため式 (3) が成り立ち

$$\alpha + \beta + \gamma = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

三角形 AOB はの二等辺三角形より

$$\angle OAB = \beta + \gamma \quad (4)$$

$$\angle AOB = \pi - 2(\beta + \gamma) \quad (5)$$

式 (3), (5) より式 6 が成り立つ。

$$\angle AOB = 2\alpha \quad (6)$$

また線分 $AB=r$ とおいたとき、図 14 の三角形 AOB に注目すると $R \sin \alpha = \frac{r}{2}$ が成り立ち、式 (7) が導ける。

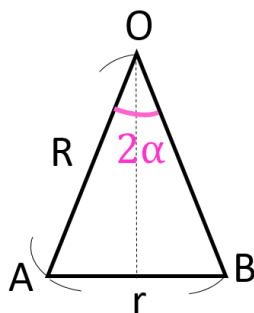


図 14: 三角形 AOB

$$R = \frac{r}{2 \sin \alpha} \quad (7)$$

静磁場 $B = 0.6T$ 、電荷は 1 であり、また $r = \frac{d}{\cos \beta}$ より、運動量 P は式 (8) であらわされる。

$$P[\text{GeV}/c] := 0.3 \times 0.6 \frac{d}{2 \cos \beta \sin \alpha} \quad (8)$$

2.3 偏光再構成手法

偏光度測定は、対生成平面を用いる。図 15 をみると、電子は点 A, B に入射しており、センサーのヒット情報には A, B の座標が入っている。しかし、これらは磁場の影響を受けた入射点であり、磁場の影響が無かった場合に得られる本来の入射点は点 A', B' となる。よって、偏光を再構成する際は点 A', B' の座標を用いる。まず、この二点の座標再構成を行う。

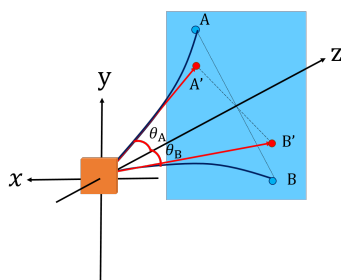


図 15: 本来の入射点

図 15 の一部を yz 平面から見た図が、図 16 である。図の濃紺の線は実際の入射経路をしめし、赤線は磁場の影響がない場合の入射を表す。 B' の再構成を例として考える。図からわかるように、入射点 B' を再構成するには本来

の入射角 θ_B を用いる。B' の z 座標を z_B とすると、B' の y 座標は $y_{B'} = z_B \times \tan \theta_B$ と求めることが出来る。このとき x 方向には磁場の影響はないため、再構成は y 座標のみ行えばよい。

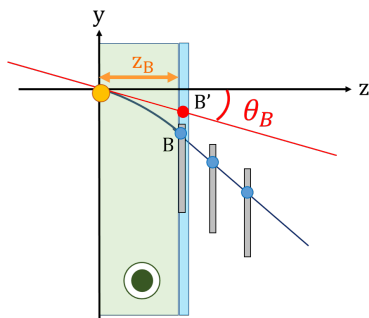


図 16: 本来の入射角

この本来の入射角 θ は α 、 β を用いて求められる。図 17 より、 $\angle COA = \alpha + \beta$ であり、 $\angle BOA$ は式 (6) より 2α である。よって式 (9) が成り立つ。先述の通り、 α, β ともにセンサーへのヒット情報から求めることができ、 θ の値は計算できる。

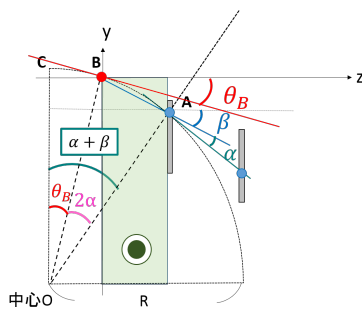


図 17: θ 再構成

$$\theta = \beta - \alpha \quad (9)$$

A' B' の xy 座標が求められたところで、偏光を調べる。偏光は電子陽電子ベクトルの角度から測定することができる。角度の始点及び方向を明らかにするために、任意に定めた xy 平面上のベクトルと電子陽電子ベクトルの内積を用いて偏光を計測する。図 18 のように、x 軸ベクトルを n 、電子陽電子対ベクトルを v と定める。この二つのベクトルの内積より、式 (10)(11) に従い角 φ を求める。このとき始点が電子か陽電子かによって偏りが生じるため、ランダムに陽電子→電子、電子→陽電子のベクトルを作成する。図のベクトルは陽電子→電子ベクトルを表している。

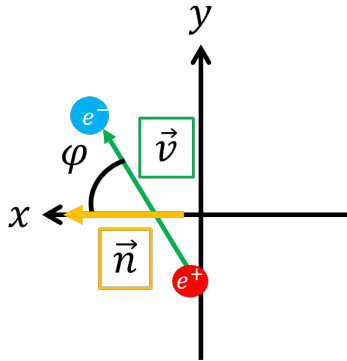


図 18: 偏光を求める

$$v \cdot n = |v||n| \cos \varphi \quad (10)$$

$$\varphi = \arccos \frac{v \cdot n}{|v||n|} \quad (11)$$

このようにして求めた角 φ を用いて、偏光を求める。

2.4 偏光分解能計算手法

先述のように偏光再構成を行って角 ϕ を求め、横軸 ϕ 、縦軸その ϕ をもつ電子対数とすると、図 19 のようなグラフが得られる。

このグラフの関数は式 (12) に従う。これより、 p_0, p_1 をフリーパラメータと

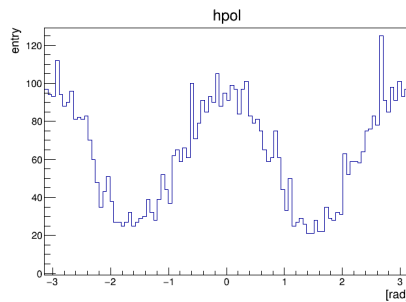


図 19: 偏光測定

して式 (13) で fitting を行うと、 $p_1 = \text{Polalization} \times \text{Analizingpower}$ となる。今回は偏光度 Polalization を設定した上でシミュレーションを行い偏光再構成することで、偏光分解能 AnalizingPower を求める。

$$N = N_{unpol} [1 + \text{Polalization} \times \text{Analizingpower} \times \cos(2\varphi)] \quad (12)$$

$$N = p_0 [1 + p_1 \times \cos(2\varphi)] \quad (13)$$

2.5 入射エネルギー 70MeV 時のセンサー配置

入射エネルギー 70MeV の場合、生成される電子対の運動量は減少するため、磁場が一定の場合曲率半径が小さくなる。よって 1GeV と同じ設計では電子対がセンサーへ入射できないため、ピクセルセンサーの位置を再設定する。エネルギー保存則、運動量保存則より、エネルギー 70MeV の γ 線から対生成された電子対はそれぞれ約 35MeV のエネルギーを持つ。今回は、エネルギー 35MeV を電子対が持っていた場合に、電子対がそれぞれセンサーの中央を通過するように配置を計算した。

まず、磁場により持つ曲率半径を計算した。運動量再構成時と同様に、 $P[\text{GeV}/c] = 0.3qBR$ より、35MeV のエネルギーを持った電子の曲率半径 R は求められる。図 20 のように対生成箇所から、1 層目のセンサーまでは z 軸方向に 12cm あるため、角 θ は式 (14) から求められる。

$$12\text{cm} = R \sin \theta \quad (14)$$

この角 θ の値と曲率半径 R が分かれば、35MeV のエネルギーを持つ電子が $z = 12\text{cm}, 20\text{cm}, 25\text{cm}$ において、 y 座標がいくつの位置を通るか式 (15), (16) より求められる。このようにして各センサーの最適位置が求められる。

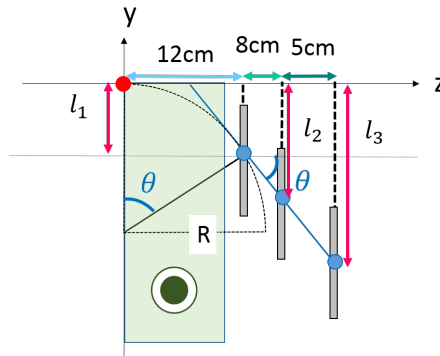


図 20: センサーの再配置

$$l_1 = R - R \cos \theta \quad (15)$$

$$l_2 = l_1 + 8\text{cm} \times \tan \theta \quad (16)$$

$$l_3 = l_1 + 13\text{cm} \times \tan \theta \quad (17)$$

計算の結果、電子対の各入射エネルギーが 35MeV 時の各センサーの最適位置は以下のように求められた。これを元に再構成した偏光波長計が図 21 と

なる。

$$l_1 = 41.5[mm] \quad (18)$$

$$l_2 = 104.0[mm] \quad (19)$$

$$l_3 = 143.5[mm] \quad (20)$$

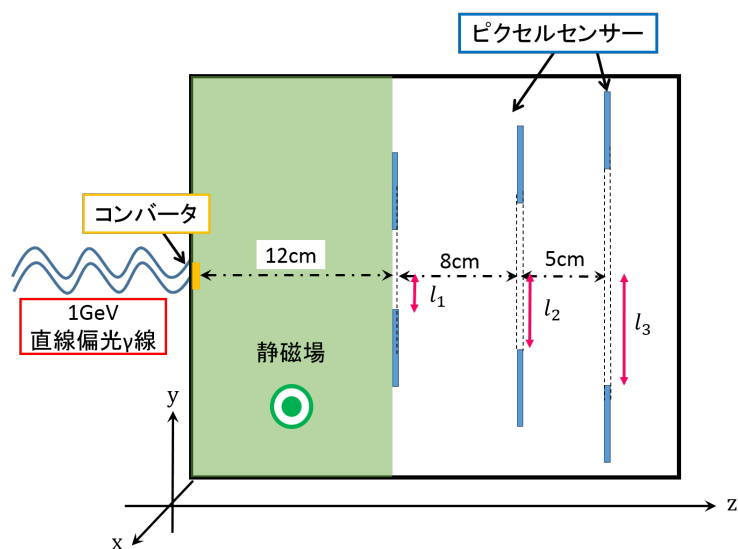


図 21: テスト実験用偏光波長計概観

2.6 結果

2.6.1 運動量再構成

入射された γ 線の波長は電子対の運動量に依存しているため、波長の再構成精度は、電子陽電子の運動量再構成精度に依存する。シミュレーションによって算出された運動量と再構成された運動量との誤差の関係を、横軸 $dp/p = \frac{\text{再構成運動量}-\text{シミュレーションが計算した運動量}}{\text{シミュレーションが計算した運動量}}$ 、縦軸 entry 数とした図 22,23 に示す。この再構成は、センサー厚み 260 μm 、入射する γ 線エネルギー 1 GeV、生成される電子対 10000 ペアの条件でシミュレーションしたものである。

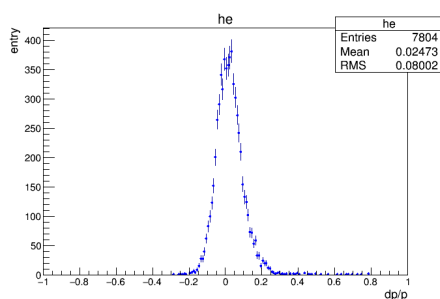


図 22: 電子の運動量再構成

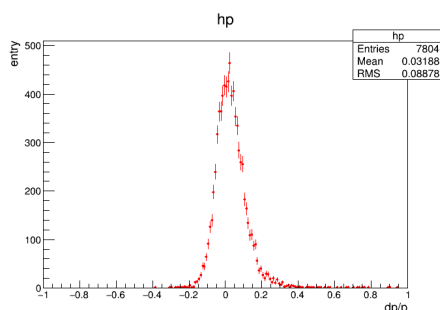


図 23: 陽電子の運動量再構成

2.6.2 センサーの厚みごとの偏光分解能

偏光波長計に搭載予定の INTPIX4 の厚みは 260 μm であるが、センサーが厚くなるほどセンサー内での多重散乱の影響を電子及び陽電子は大きく受けるためセンサーはできる限り薄いものが好ましい。現在、機能が保障されているセンサーの中で 50 μm という厚みのものが存在している。今後センサーの厚みをより薄いものにする可能性も踏まえて、ピクセルセンサーの厚みが、260 μm と 50 μm の場合での偏光を求めた。

この再構成は、入射エネルギー 1GeV、生成される電子対 10000 ペア、偏光度 1.0 の条件のものである。図 24 において、青線がセンサー厚み 50um 時、赤線がセンサー厚み 260um 時の再構成された偏光となっている。

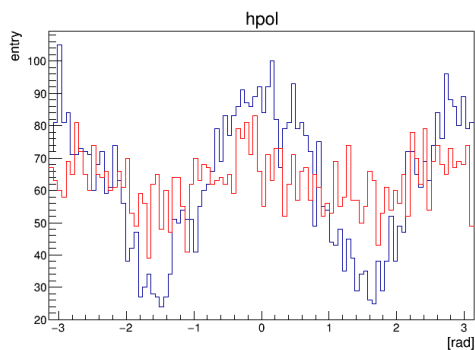


図 24: 偏光再構成

図 24 を式 (13)(P18 参照) で fitting したものが、図 25 である。

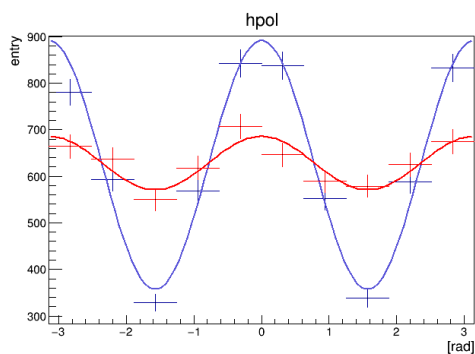


図 25: 偏光分解能

図 25 から、偏光分解能はセンサーの厚み 50um 時は 0.43、260um 時は 0.09 と求められた。センサーの厚み 260um 時の偏光分解能では他の偏光度での再構成が難しいため、INTPIX4 をそのまま用いた場合センサーの厚みは 260um であるが、今回はセンサー厚み 50um 時での偏光について考察を進めていく。

2.6.3 偏光再構成

偏光度 1.0、偏光度 0.5 の場合で、再構成された偏光を比較した。再構成グラフを図 26 に示す。青線が偏光度 1.0、赤線が偏光度 0.5 の条件で再構成された偏光であり、横軸 φ [rad] 縦軸 entry のグラフとなっている。

この再構成は、センサー厚み 50um、 γ 線の入射エネルギー 1GeV、生成される電子対 10000 ペアの条件でのものである。

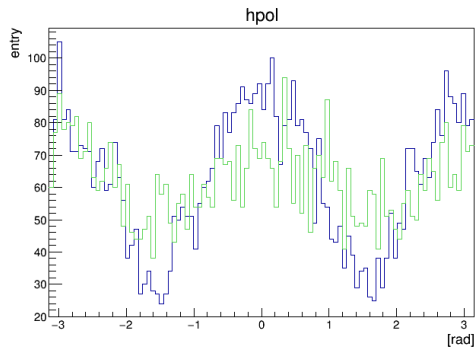


図 26: 偏光再構成

図 26 をそれぞれ式 (13)(P18 参照) でフィッティングしたものが図 27 である。

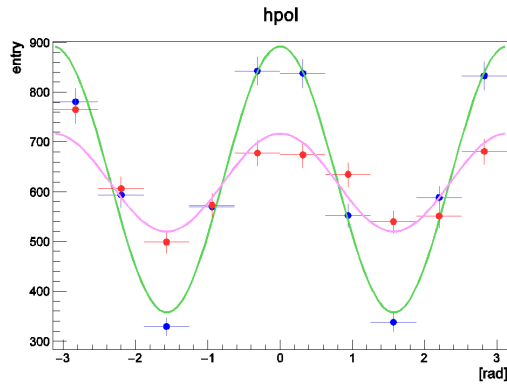


図 27: 偏光分解能

このとき、 $p_1 = \text{偏光度} \times \text{偏光分解能}$ より、偏光度 1.0 において偏光分解能が 0.43 に対して、偏光度 0.5 の場合偏光分解能は 0.35 であった。

2.6.4 入射エネルギー 70MeV 時の偏光再構成

図 21 の検出器の配置でシミュレートした情報を用いて、入射エネルギーを 70MeV としたときの偏光を再構成した。図 28～30 は、対生成がコンバータにおいて 1000 ペア、50000 ペア、100000 ペア生成された場合に再構成した偏光を 18 ページの式 (13) で fitting したものである。

これより、対生成 10000 ペアの場合偏光分解能 0.15、50000 ペアの場合偏光分解能 0.14、100000 ペアの場合偏光分解能 0.11 となった。

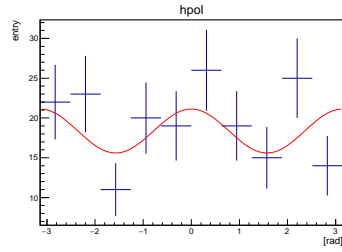


図 28: 10,000 ペア対生成時

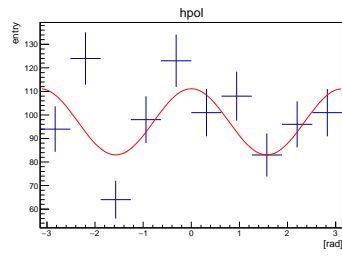


図 29: 50,000 ペア対生成時

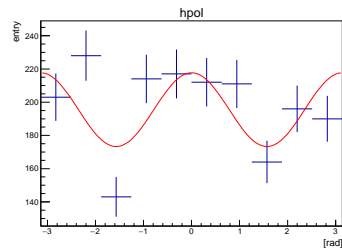


図 30: 100,000 ペア対生成時

2.7 考察

2.7.1 運動量誤差の分布について

16 ページの式 (8) より運動量の誤差 Δp は、一定値である静磁場 B とセンサー間距離 d の誤差を無視すると式 (21) で表される。特に今回は α, β ともに微小であり、 $\sin \alpha \sim \alpha$ 、 $\cos \beta \sim 1$ と近似できるため、式 (22) のように表すことができる。 α はセンサー内での多重散乱の影響を受ける。多重散乱によって粒子は、入射角度に対しガウシアン分布をもつて物質を通過する。このため、角 α はガウス分布に従い、運動量を再構成した結果の誤差もガウス分布に従う。図 31、32 より、運動量誤差はガウス分布であり予測と一致した。また、ガウス分布の幅から運動量分解能を求めることができ、7% の分解能を持つことがわかった。

$$\Delta p \propto \frac{1}{\Delta \cos \beta \Delta \sin \alpha} \quad (21)$$

$$\Delta p \propto \frac{1}{\Delta \alpha} \quad (22)$$

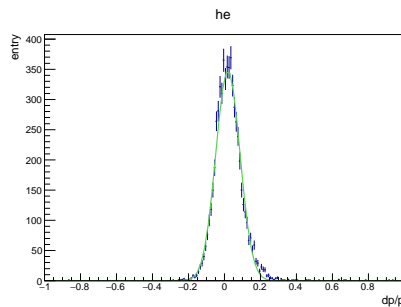


図 31: 電子の運動量分解能

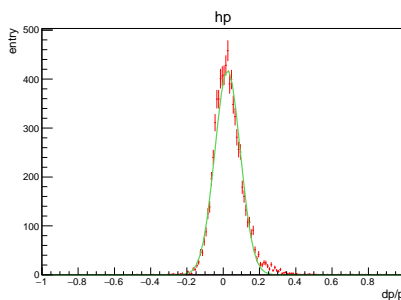


図 32: 陽電子の運動量分解能

2.7.2 運動量分解能のピークのずれについて

誤差のピークは本来 $dp/p = 0$ に立つはずである。しかし、図 31、32 をみると、ともにピークが正によっていることが分かる。これは誤差伝播の過程に原因がある。

先ほど式 (22) で表したように、 Δp は $\frac{1}{\Delta\alpha}$ に応じた値をもつ。 α が正の場合、 α が $\pm\alpha$ の誤差を持ったとしても、 $\frac{1}{\alpha+\Delta\alpha}$ は正の値に収まる。磁場の影響があるため、多くの場合 α は正の値をとる。このため、 Δp は正の値に偏った分布をもつこととなる。

2.7.3 偏光分解能とセンサーの厚みの関係

結果より、図 25 から分かるようにセンサーの厚みを大きくすると偏光分解能が減少することが分かった。これは、センサー内での多重散乱の影響が大きくなったことによると考えられる。

本研究ではセンサーのヒット情報から偏光を再構成しているが、このヒット情報は多重散乱の影響を含んだものである。多重散乱は、序論で述べたように原子と荷電粒子のクーロン散乱であり、物質の厚みが大きいほど散乱によって受ける影響は大きくなる。そして多重散乱の影響が大きいほど偏光分解能は落ちるため、厚みが大きい 260 μm の場合が 50 μm の場合と比較して、偏光分解能が減少したと考えられる。

2.7.4 入射エネルギー 70MeV 時の偏光分解能

70MeV 時の場合偏光分解能は、0.1~0.15 であり γ 線の入射エネルギー 1GeV での結果が同じ偏光度 1.0 において偏光分解能 0.43 と比較して減少していることがわかる。この原因の 1 つは、曲率が大きくなった結果センサーに入射する電子対が減少したことにある。コンバータにおける対生成数が同じ 10000 ペアの場合でも、1GeV でのシミュレーションにおいては 6000 ペアの電子対が再構成できたのに対して、70MeV 時では再構成できた電子対は 200 ペアに達していない。もう 1 つ考えられる原因として、入射角度の変化があげられる。 γ 線の入射に対してセンサーを垂直に置いている場合、曲率が大きいほど角度の大きな斜め入射となる。斜め入射をするということは、センサー内を通過する距離が大きくなり、より多重散乱の影響を受けたと考えられる。また、今回統計量ごとに偏光分解能を求めた。統計量に応じたおおきな変化はなく、さらに統計が増えたにもかかわらず分解能は減少していた。分解能の値だけみれば、10000 ペア生成時がもっともよい値であるが、図 33 のように 10000 ペアにおいて fitting する際には bin 数によって大きく分解能が変化していた。これより、50000 ペア以上の統計は必要であると推察される。

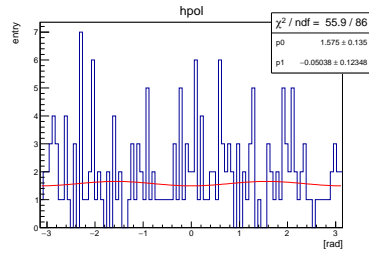


図 33: bin 数 100 の場合の fitting

2.7.5 電子陽電子の xy 分布

センサーの厚みによる偏光の再構成の精度は偏光分解能からだけでなく、磁場がない場合の再構成した電子対の xy 平面上の分布を比較することからも考察できる。図 34、35 は 16 ページでの図 15 における再構成した電子の座標 A' を全電子分 xy 分布にプロットしたものである。それぞれセンサーの厚み 50um、260um 時のプロットであり、偏光度 0.0、 γ 線の入射エネルギー 1GeV という条件での再構成の結果を表している。

3 つ目の図 36 は、対生成直後のコンバータ内での電子の xy 分布である。この分布は再構成を経たものではなく磁場がない場合の本来の xy 分布である。スケールは異なっているがこれら 3 つの図を比較したところ、対生成直後では円状の分布であったものが、再構成されると y 軸方向を長軸にもつ楕円上に変形していることが分かる。これは、磁場によって曲げられた電子の入射を補正しきれていないために生じた変形である。この分布の歪みが偏光分解能に影響しており、厚み 260um のものが 50um 時に比べ変形が強いことから、センサーの厚みによる偏光分解能の減少が理解できる。

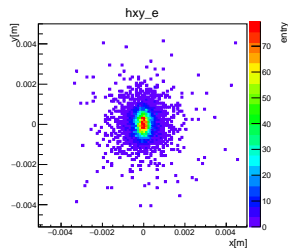


図 34: センサー厚み 50um 時

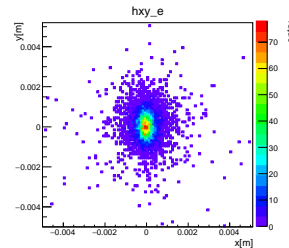


図 35: センサー厚み 260um 時

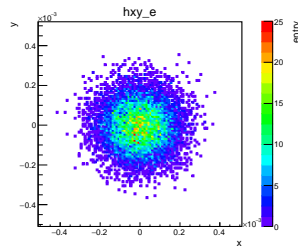


図 36: 対生成直後

2.7.6 不変質量の再構成

電子陽電子の運動量から不変質量を求めた。このとき、センサーから得た情報から再構成した運動量と、シミュレーションが計算した運動量をそれぞれで不変質量を再構成した。図 37 がこの 2 つの場合を比較したものである。青線がシミュレーションによって計算した不変質量であり、赤線が再構成した運動量から求めた不変質量である。図より、再構成したものでは大きな不変質量がカットされていることがわかる。これは不変質量が大きい場合、再構成するための電子対がそろわないためである。不変質量が大きいということは、電子陽電子それぞれがもつ運動量の偏りも大きくなる。この偏りの結果片方の運動量が小さい場合、磁場による曲率が大きくなってしまいセンサーに入らない。または、一方の運動量が大きすぎる場合も曲率が小さすぎてセンサーに入ることがない。よって再構成は、センサーに入った電子対からのみ再構成されるため、不変質量が大きなものは含まれない。

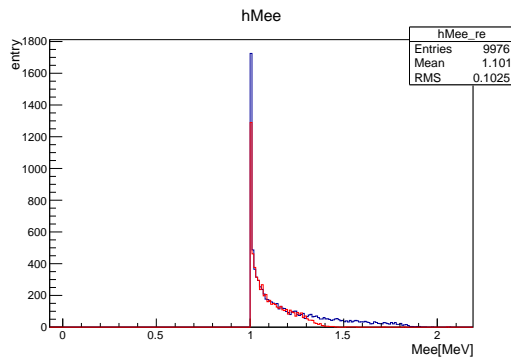


図 37: 不変質量再構成

3 ピクセルセンサーを用いた宇宙線の計測

3.1 実験概要

偏光波長計に搭載するピクセルセンサーである INTPIX4 の基本性能調査を行った。この INTPIX4 は開発段階にあるピクセルセンサーであるため、まずペDESTALにおけるノイズの影響を調べた。また、偏光波長計内で用いる際に検出できなければならない荷電粒子が観測可能であるかを、 β 線源を用いて実験で確認した。宇宙線の電離損失は、図 38 に従う。図 38 は、銅における横軸宇宙線の運動量、縦軸損失エネルギーである。本計測で測る宇宙線は、数 GeV のオーダーのため、図 38 での Minimum ionization 最小電離損失の範囲に当たる運動量をもつ。このような運動量範囲をもつ粒子を Minimum Ionization Particle 最小電離損失粒子とよび、通称 MIP と呼ばれる。MIP は厚さ当たりのエネルギー損失が一定のため、最終的に宇宙線の計測を行うことで、INTPIX4 の ADC チャンネルとエネルギーの絶対ゲインの関係を求める。偏光波長計に実際に搭載する際は、現在の INTPIX4 をさらに改良したものを搭載予定であり、本研究の結果を今後のピクセルセンサー開発に反映していく。

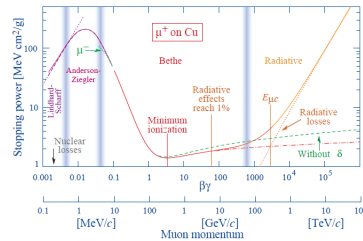


図 38: 銅におけるミューオンの透過距離当たりの電離損失

3.2 INTPIX4

本研究では、KEK が開発したピクセルセンサー INTPIX4 をもちいる。INTPIX4 は KEK が開発した積分型放射線センサーをもつ SOI ピクセル検出器である。17 μ m 角のピクセルを $512 \times 832 = 425984$ 持っており、約 40 万画素となっている。本研究で開発する偏光波長計は、入射エネルギー 1GeV という非常に高いエネルギーの γ 線に対応する必要がある。よってより高い分解能と低い多重散乱確率をもつピクセルセンサーが必要となる。

INTPIX4 の外形は 10.2mm \times 15.4mm。厚さが 260 μ m となっている。

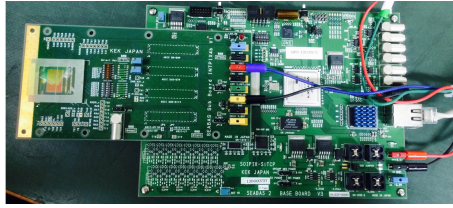


図 39: INTPIX4 写真

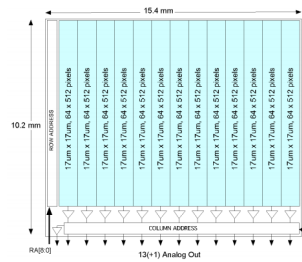


図 40: INPIX4 の図 [8]

3.3 セットアップ

まず、INTPIX4 を用いた計測を行うため、図 41 のように必要機器のセットアップを行った。

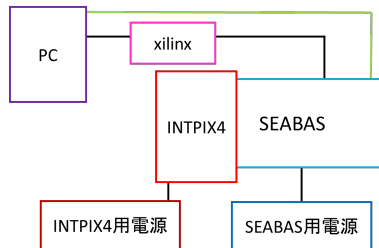


図 41: 実験セットアップ概略図

実際のセットアップのセンサー部分の写真が図 42 である。暗箱内に読み出しボードと共に入れており、実験時にはふたを閉めた状態で計測を行った。

情報を読み出しボードの SEABAS2 から PC に送るときに、PC から読み出しボードの SEABAS2 へ FPGA を介して読み出しの指示を出す。このとき FPGA と PC を接続するために、図 43 の xilinx のコードを用いる。また、読み出したデータは LAN ケーブルを通して PC に入力している。

INTPIX4 では各ピクセルに落とされたエネルギーを ADC チャンネルの値として得ることができる。図 3.3 は計測の結果得ることができる 1 次元、2 次元ヒストグラム の例である。1 次元ヒストグラムは各ピクセルにおける ADC チャンネル値を足し合わせたものであり、横軸 ADC チャンネル、縦軸はそ

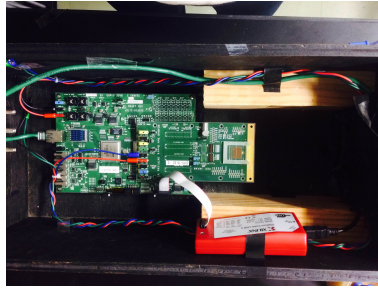


図 42: 実験セットアップ写真



図 43: xilinx ケーブル

の ADC チャンネルをもつ entry の数である。2次元ヒストグラムは、実際のセンサーの画像であり、横軸 832 ピクセル×縦軸 512 ピクセルとなっている。colz 表示することで各ピクセルにおける ADC チャンネル値を比較できる。

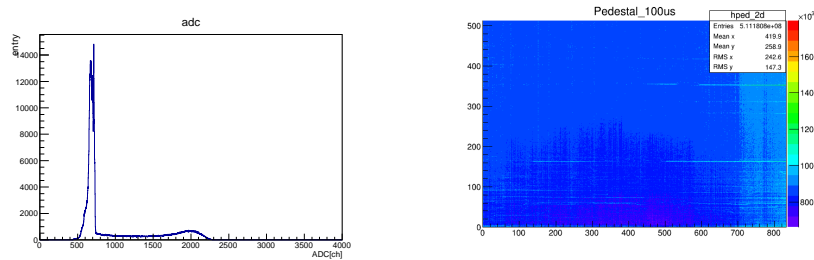


図 44: INTPIX4 から得られるヒストグラムの例

3.4 ペDESTAL計測

センサーを用いて計測を行う際、考慮しなければならないものとして積分時間がある。ピクセルセンサーではまず、設定された時間各ピクセルに落とされるエネルギー量が計測され、そのデータが読み出しボードに渡される。エネルギーが計測される単位時間のことを積分時間と呼ぶ。データの読み出しに毎回時間を必要とするので、この積分時間が長いほど早く統計量を貯めることができる。一方で、積分時間を延ばすとノイズも増え、目的の信号がノイズに埋もれてしまう恐れがある。これを回避するため、信号を入れない状況で積分時間ごとのペDESTALを計測し、積分時間とノイズの関係を調べた。

図 45～50 は積分時間が 100us、1000us(1ms)、10ms 時のペDESTALの結果である。積分時間の増加に伴って、ペDESTALの値とは異なるチャンネルの反応が大きくなっている。これよりノイズが増加していることがわかった。

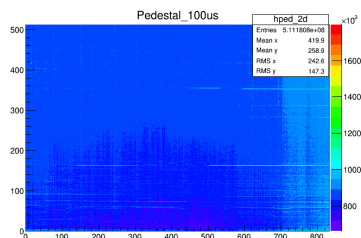


図 45: 100us 時のペDESTAL

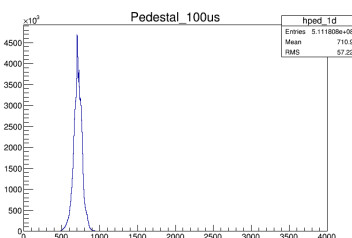


図 46: 100us 時のペDESTAL

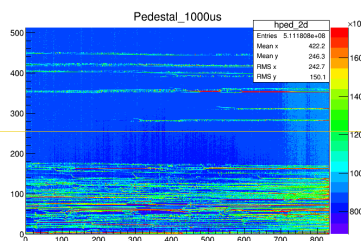


図 47: 1000us 時のペDESTAL

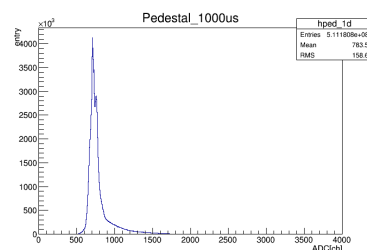


図 48: 1000us 時のペDESTAL

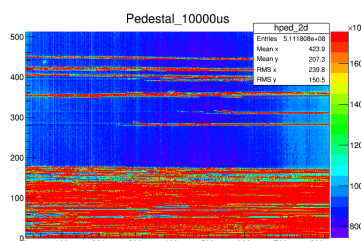


図 49: 10ms 時のペDESTAL

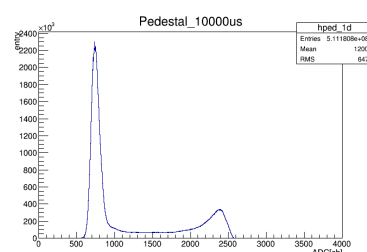


図 50: 10ms 時のペDESTAL

3.5 β 線計測

γ 線の偏光及び波長を計測する際は、荷電粒子である電子対をセンサーで観測する必要がある。実際に、荷電粒子が INTPIX4 で観測可能か確認するため、放射線源ストロンチウムを用い、 β 線の観測を INTPIX4 で行った。センサーの積分時間を 5ms とし、暗箱を使用する実験条件での計測を行った。セットアップは基本的に 31 ページの図 42 と同様で、線源を図 51 のようにセンサーの下に配置することで計測を行った。

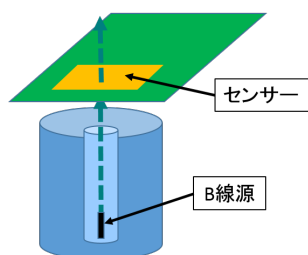


図 51: β 線源配置

積分時間 5ms の計測を 1000entry 行い、得られたデータからペDESTALを引いたところ図 53 の 2次元ヒストグラムが得られた。Z 軸は各ピクセル各 entry 時の ADC 値から、ペDESTALを引いた値を 1000entry 分各ピクセルにつめたものである。各ピクセル各 entry での ADC 値-ペDESTAL値を全 entry \times 全ピクセル分プロットしたものが、横軸 ADC チャンネル縦軸 entry 数の図 52 の 1次元ヒストグラムである。この 1次元ヒストグラムにおいて、高い ADC チャンネルの値であったものは、ペDESTALと比較して高い信号が入っていたということであり β 線の信号の可能性が高い。

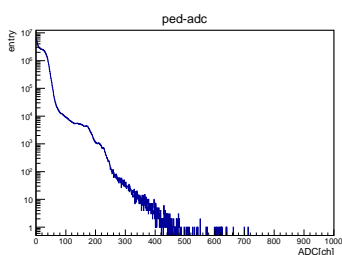


図 52: 1次元ヒストグラム

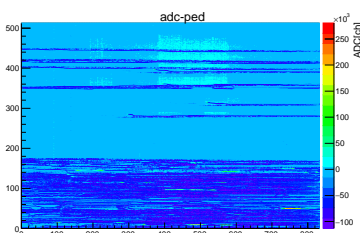


図 53: 2次元ヒストグラム

図 52 において高い ADC チャンネルをもっているピクセルに注目し、 β 線入射時と、未入射時 (ペDESTAL) の ADC チャンネルを比較した。図 54 において赤線が β 線を入射したときのもの、青線がペDESTALの値である。未入射時のヒストグラムから 600~700ch 付近がこのピクセルのペDESTALであると考えられる。一方で β 線が入射したときのみ、 10σ 以上はなれた位置に信号が 1 つだけ入っていた。

この ADC1100ch の信号は、1199entry 目での信号であった。図 53 から

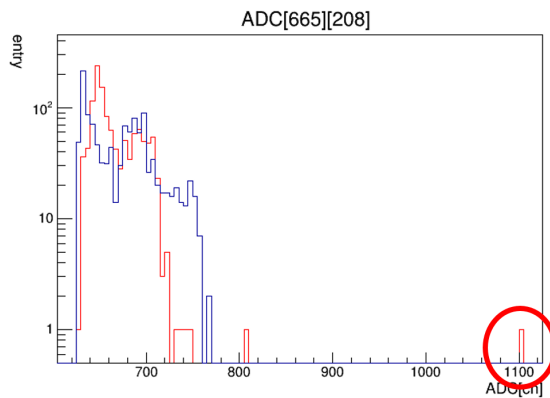


図 54: ペDESTALとの比較

1199entry の情報のみプロットしたものが図 55 左の 2 次元ヒストグラムであり、このヒストグラムにおいて、ピクセル [665][208] 周辺にズームしたものが右図である。周囲のピクセルと比較して大きく値が異なっていることが図から分かる。さらにこのピクセルにおいて、ペDESTALと比較し高い ADC 値をもった信号が 1 つのみということから、この信号がノイズとは考えづらく、この信号は β 線といえる。

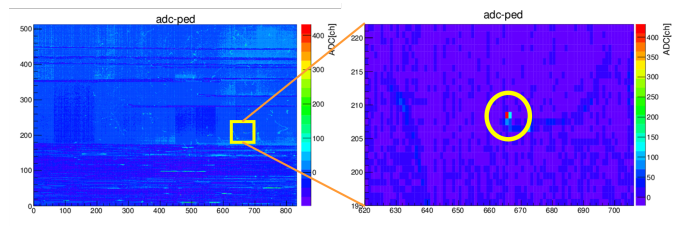


図 55: β 線と思われる信号

参考に、ある別のピクセルにおける β 線入射時と、未入射時の ADC チャンネルを比較したものを図 56 に表す。図 52 において高い ADC チャンネルをもっていたとしても、このようにペDESTALの揺らぎが大きいピクセルの場合は β 線が入ったとはいえない。

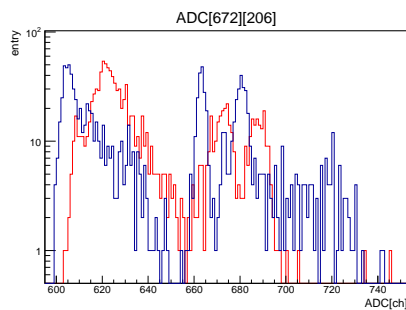


図 56: ペDESTALの揺らぎが大きなピクセル

図 54 の信号のように、ペDESTALのゆらぎと比較して十分大きな値を持っているものを β 線と識別したところ、計測時間に比例して増加する β 線の信号が確認できた。

3.6 トリガーモジュールの確認

荷電粒子が観測可能なことが確認できたところで、続いて宇宙線の計測を目指した。宇宙線は平均して 1s あたり 1cm^2 に 1 つ降ってくる。降ってくる全ての宇宙線を計測できれば、MIP 計測に必要な統計量は十分たまるが、実際には宇宙線通過時にセンサーが開いているとは限らない。また、宇宙線がはいっていない場合も含めてデータを取得し続けた場合、データ容量が非常に膨大になってしまうため解析の効率を考えると現実的でない。これらの問題を解決するために、宇宙線がセンサーを通過したときのみデータを読み出す外部トリガーの作成を試みた。

まず、パルスレーザーを用いて外部トリガーの動作確認を行った。このとき外部トリガーを用いた実験のために、FPGA のソースを変更する必要がある。今回は、すでに開発されたソースファイルをもらいうけ、そのソースを用いて実験を行った。

ペDESTAL計測時から図 57 のようにセットアップを変更した。パルスレーザーを INTPIX4 の中心に照射している。また、図 58 のように、SEBAS2 にはパルスレーザーと同期した外部トリガーを入力した。トリガーはパルスジェネレーターを用いて作成した。これにより、レーザーが照射されたときのみセンサーのデータを取得できるようになった。



図 57: パルスレーザー照射の様子

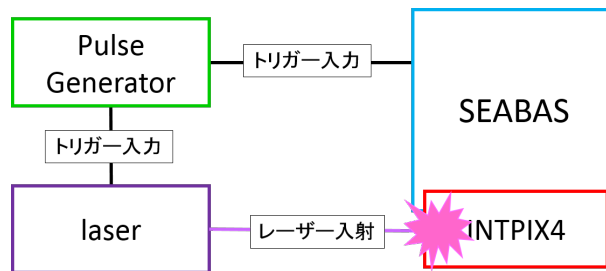


図 58: 外部トリガーの動作確認

レーザーとセンサーの読み出しのタイミングチャートを図 59 に示す。トリガーの信号は 1Hz、パルスレーザーはそのうちの 10ms 照射される。積分時間 5ms と重なった時間入射されたレーザーのエネルギーの値が、ADC チャンネルに変換された上で PC に入力される。

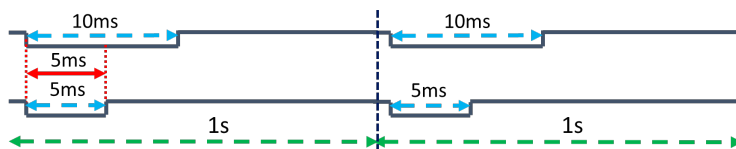


図 59: パルスレーザーとセンサーのタイミングチャート

トリガー入力時、未入力時の 2 次元ヒストグラムを図 60～図 63 に示す。1 次元ヒストグラムは全てのピクセルの ADC 値を足し合わせた値。一方、2 次元ヒストグラムは各ピクセルの ADC チャンネル値からペDESTAL を差し引いたものをピクセルごとにプロットしている。これらの図はレーザー照射時のものであり、外部トリガーが動作していることがこれらのヒストグラムから確認できる。

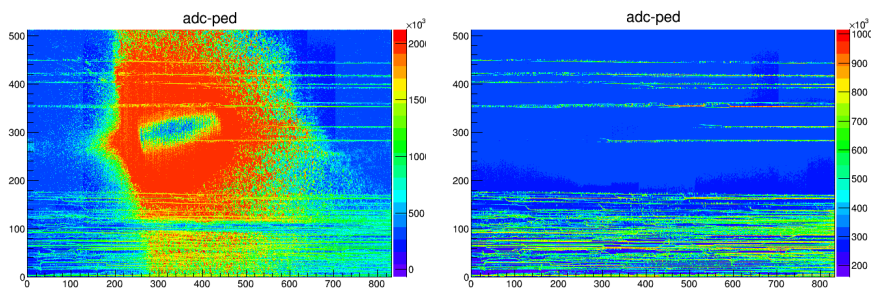


図 60: トリガー有り

図 61: トリガー無し

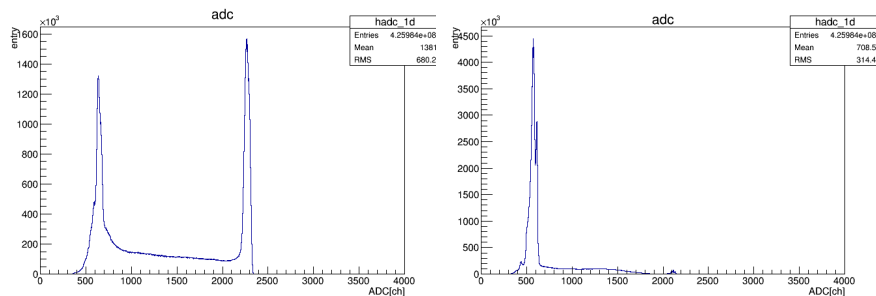


図 62: トリガー有り

図 63: トリガー無し

3.7 宇宙線の計測

宇宙線の計測を行うにあたり、まず宇宙線がセンサーを通過したときのみデータの読み出しを行うための外部トリガーを作成した。

図 64 のようにセンサーの上下に光電子増倍管とつなげたシンチレータを設置した。図 65 はセンサーを上から見た図である。横から見た図を図 66 に示す。シンチレータのサイズは $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ となっており、センサーの中心部の上下を挟むようにシンチレータを配置している。

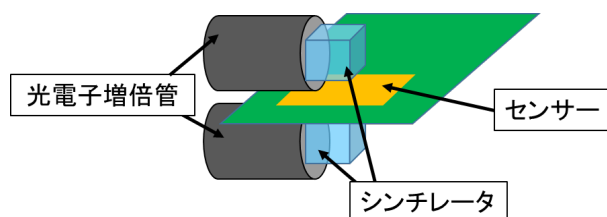


図 64: 宇宙線トリガー

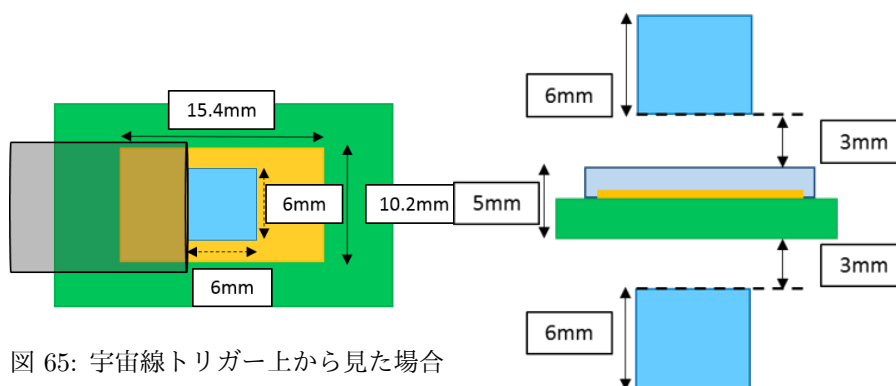


図 65: 宇宙線トリガー上から見た場合

図 66: 宇宙線トリガー横から見た場合

これにより、上下のシンチレータが共に反応したときはセンサーに宇宙線が通過していると考え、2つの光電子増倍管の coincidence を外部トリガーとする。トリガー入力までの流れは図 67 の通りである。光電子増倍管のアナログ信号を Discriminator を通して NIM 信号に変換後、coincidence を作成した。その後、GateGenerator を通しパルス幅を $1\mu\text{s}$ に広げ、読み出しボード SEABAS2 に入力した。このとき GateGenerator を用いたのは、coincidence からの出力そのままではパルス幅が小さく、トリガーとして SEABAS2 に認識されなかったためである。このようにして宇宙線がセンサーを通過したとき、データの読み出しを行う系が作成できた。

計測は、暗箱を用い部屋を暗室状態にした上で行った。センサーの積分時間は 5ms と設定した。毎計測ごとに calibration を 100entry 行い、このデータをベダスタルとして扱うこととした。

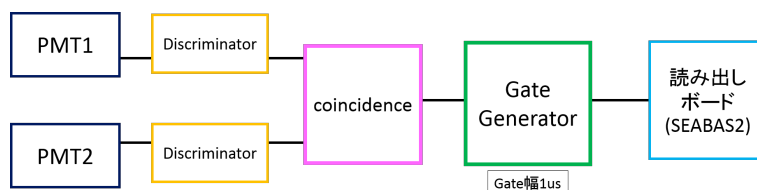


図 67: 宇宙線トリガー入力セットアップ

3.8 結果

計測結果、図 68 のような 1 次元ヒストグラムが得られた。横軸 ADC チャンネル値、縦軸が横軸の値をもつ entry 数であり、ADC 値は事前に計測したペDESTAL 値を差し引いたものである。log プロットにしたところ、100ch 以降に特徴的な分布があることがわかる。ペDESTAL を引いて 100ch 以上の ADC 値をもつ、ある特定のエントリーのピクセルに注目した 2 次元ヒストグラム図 69 を作成した。このとき、赤丸で囲ったピクセルが大きく反応していることがわかる。

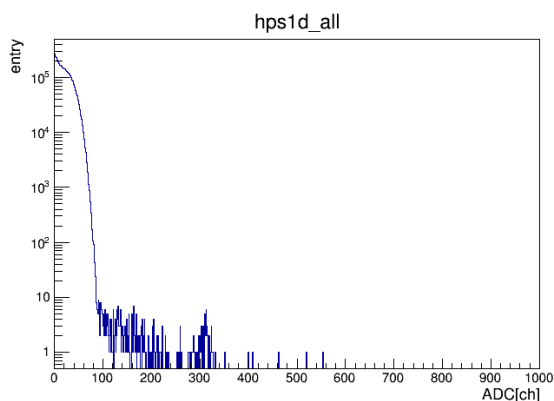


図 68: 宇宙線観測 1 次元ヒストグラム

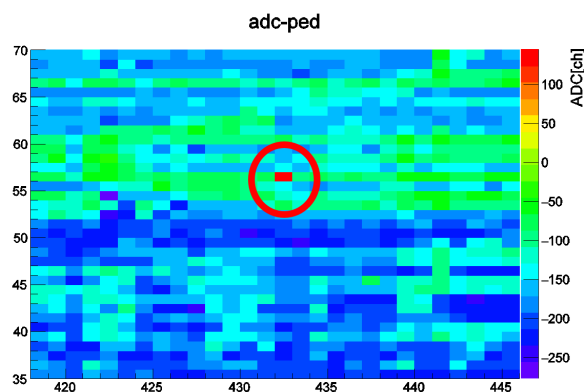


図 69: 宇宙線観測 2 次元ヒストグラム

図 68 での 100ch 以降の信号のように、宇宙線の信号であればペDESTAL と比較して大きな ADC チャンネルをもつ。ただし、ペDESTAL の揺らぎが大きな場合、図 68 での ADC 値が大きなものだとしても、宇宙線とはいえない。そこで、各ピクセルのペDESTAL の揺らぎに対して、計測した ADC 値が何 σ 離れているかを求めることから、宇宙線の信号を探した。

まず、式 (23) を用いて各ピクセルにおけるペDESTAL の σ を求める。 Ped_{ave} はペDESTAL 平均値であり、ペDESTAL の総計 $\sum_{i=1}^n Ped_i$ をペDESTAL の entry 数で割って求めた。 n はペDESTAL の総 entry 数であり、本実験では $n = 100$ となる。式 (24) のように、計測した ADC 値からペDESTAL 平均値を引いたものを求めた σ_{Ped} で割れば、ADC 値のペDESTAL に対して何 σ 離れているかが分かる。

$$\sigma_{Ped} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ped_i - Ped_{ave})^2}{n}} \quad (23)$$

$$\text{Sigma} = \frac{\text{Cosmicray} - Ped_{ave}}{\sigma_{Ped}} \quad (24)$$

このように求めた各ピクセルでの値 Sigma を一次元ヒストグラムにプロットしたものが、図 70 である。

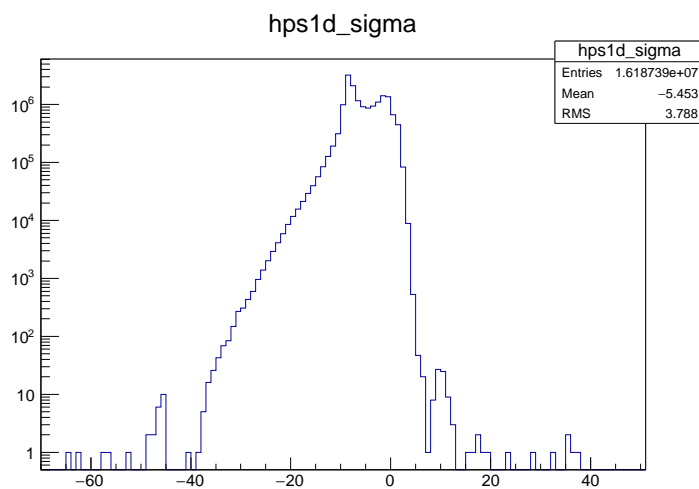


図 70: ペDESTAL の標準偏差に対して何 σ 離れたかを示すヒストグラム

宇宙線の信号はペDESTAL の揺らぎの範囲より大きな値を持っているはずであり、正でかつ大きな Sigma の値であると考えられる。図 70 において 15σ 以上の値を持つ信号の ADC チャンネル値を図 71 に示す。この ADC 値は各信号の ADC チャンネルからペDESTAL 平均値を引いた値である。

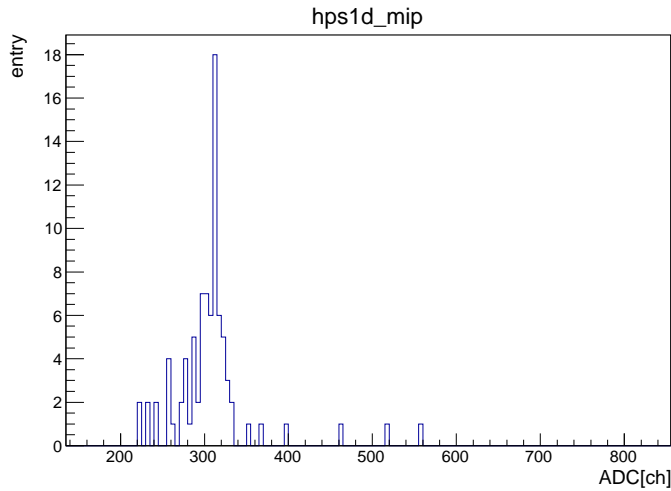


図 71: MIP 分布

3.9 考察

3.9.1 任意の同一 entry における複数ピクセルの反応について

各 entry での反応をみると、1つでなく複数のピクセルが高い ADC チャンネル値を持っている場合があった。宇宙線の入射レートを考えると、1つの計測 5ms の間に複数入射があるとは考えづらい。しかしながら、宇宙線つまりミューオンは式 (25) に従って崩壊することがある。また、制動放射による電磁シャワーが起こる可能性もある。

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (25)$$

よって 1つの宇宙線により、複数ピクセルが反応することは十分起こりえる。

3.9.2 同一ピクセルの複数回反応について

計測結果の中には、複数の entry において 100ch 以上の ADC 値をとっているピクセルが複数あった。40 万ピクセルがある中で、同じピクセルに何度も宇宙線が入射するとは考えにくい。このことから、複数 entry において反応しているピクセルは宇宙線以外のものに対して反応していると考えられる。

また、ある計測途中で部屋の電気をつけた際、スケーラーをみると数分のうちに coincidence が複数入っていた。このときどのピクセルが反応していたか調べたところ、何度も反応がみられていたピクセルであった。計測はセンサーを暗室で暗箱にいれているため、光が入射するとは考えにくい。宇宙線レートを考えると、これは宇宙線ではなく電気をつけた際に何らかの反応があったと思われる。しかしトリガーが入っているということは、シンチ

レータに何らかの粒子が入ったということをしめしており、この原因の解明にはさらなる検証が必要である。

3.9.3 宇宙線の MIP

先述の通り、宇宙線以外の反応と思われるものが混じっていることがわかった。この信号を取り除いた場合の、MIP の 1 次元ヒストグラムを図 72 に示す。ここでは、図 68 で 100ch 以上の ADC 値を持っていたピクセルのうち、100ch 以上の信号が二回以上入ってきたものを除いている。この分布より、宇宙線の MIP に対応する ADC 値は約 300ch に相当することが分かり、INTPIX4 の ADC チャンネルはおよそ 3~4[eV/ch] であることが分かった。

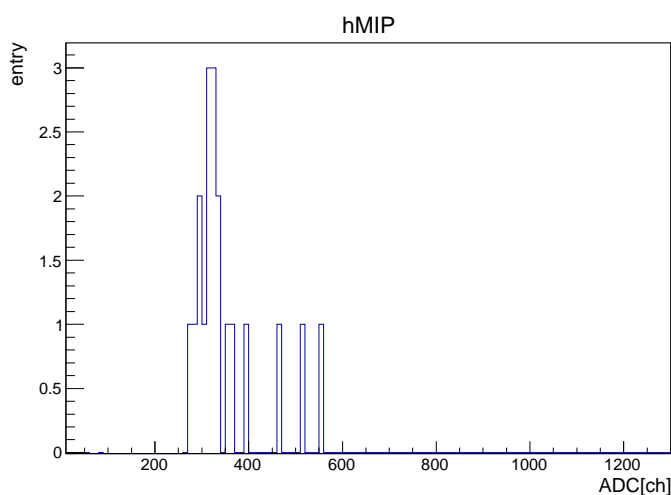


図 72: 複数回反応ピクセルをカットした MIP 分布

3.9.4 負に偏っている σ について

本来、全体のうちほとんどの割合を占める宇宙線が入っていないピクセルではベデスタルが観測されるため、Sigma の値は 0 をピークに持つグラフとなる。しかしながら、図 70 をみると、負の方向に大きな値をもっている信号が多くある。これは、ピクセルごとのベデスタルの中心値に対して宇宙線が通過したときの信号の方が、ADC 値が小さいピクセルが多くあることを示している。

この現象は、各 entry で ADC 値からベデスタル平均値を引いた 1 次元ヒストグラム図 73 からわかる。図をみると、ベデスタルを差し引いた値が負のものも多く、ベデスタル平均値が宇宙線トリガーが入ったときの ADC 平均値より大きなことが分かる。

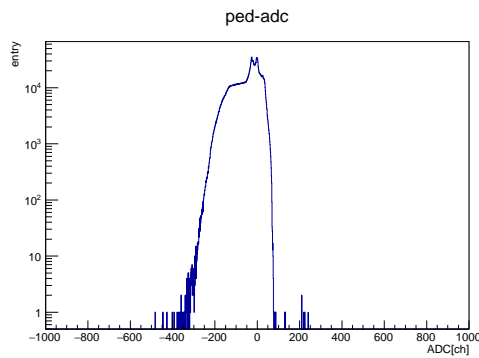


図 73: ペDESTALを差し引いた ADC 値

考えられる原因としては、calibration 時には点灯している PC 画面が時間の経過により宇宙線のトリガーが入力されたときには切れているため、PC の光の影響分ペDESTAL値があがったということがある。

この影響を除く解析手法としては、各ピクセルにおいて宇宙線トリガーがかかった entry をペDESTALとみなして同様の解析を行うということがあげられる。十分な統計量があれば、ペDESTAL平均値や σ の値に宇宙線の信号の影響は出ない。さらにこの解析手法であれば、何度も反応していたピクセルの信号を除くことができる。

4 結論

本研究では、シミュレーションを用いて、真空複屈折探索に用いる偏光波長計の偏光及び運動量の分解能を求めた。結果、1GeV 直線偏光 γ 線の運動量及び偏光を再構成することができ、運動量分解能は 7%、偏光分解能については偏光度 1.0 の条件において、センサーの厚み 50 μm の時 0.43、センサーの厚み 260 μm 時には 0.09 の偏光分解能を得た。真空複屈折性検知のための計測では、直線偏光 γ 線の偏光度は高強度レーザー場に入射前で偏光度 0.97、入射後は偏光度 0.53 になると予測されており、本研究よりセンサーが 50 μm の厚みであれば偏光度計測が可能であると考えられる。さらに偏光波長計のテスト実験に向けて、入射する γ 線エネルギーが 70MeV の場合の偏光波長計内のセンサー配置を電子対の飛跡を計算の上設定し、その上でセンサー厚み 50 μm 、偏光度 1.0 の条件のもと偏光分解能を求めた。結果、統計量に応じて 0.1~0.15 という値を得た。70MeV 直線偏光 γ 線でのテスト実験では電子対の曲率が大きくなるために、1GeV の本実験の場合と比較して分解能が減少したと考えられる。テスト実験では偏光度 1.0 の場合のみで偏光波長計の動作確認を行うため、センサー厚みが理想的な 50 μm であれば計測確認に問題はないと思われる。これより、今後 INTPIX4 の開発を進め、厚み 50 μm のセンサーを実現することで、 γ 線偏光波長計のテスト実験及び本実験が可能となることが分かった。

INTPIX 4 の基本性能の調査では、積分時間に応じてペDESTALにおけるノイズが増加することを確認し、計測に応じて適切な積分時間を設定できるようになった。つづいて、 β 線源を用いて INTPIX4 による荷電粒子の観測が可能であることを確認した。パルスレーザーの観測と宇宙線の観測において外部トリガーを導入し、その動作確認を行ったところ、パルスレーザー宇宙線ともに観測に成功した。これより、外部トリガーを用いた計測が可能なることを確認できた。また、本研究の宇宙線計測及び β 線計測の結果から、INTPIX4 の ADC チャンネルの大まかな絶対ゲインが分かった。

5 今後の展開

本研究での偏光再構成より、センサーの厚みが計測の精度に大きく影響しており、今後の課題となることがわかった。これまでに厚み 50 μm のピクセルセンサーが動作することが確認されている。本研究における γ 線偏光波長計の計測においても、今後 INTPIX4 を軸として搭載するピクセルセンサーの開発を進めていく。

また、テスト実験でも同様の課題が生じている。本研究では偏光波長計内の静磁場に永久磁石を用いるため、磁場を変更せずセンサーの配置を変更する手法をとったが、静磁場をエネルギーに比例して設定すれば現在のセンサー配置でも計測は可能である。センサーでなく静磁場を変更すれば電子対の曲率は大きくなり、対生成する電子対のうちセンサーに入射する電子対の割合は大きく増加するため、偏光分解能もより大きな値になると考えられる。検証の必要はあるが、磁場を変更する手法をとれば、厚さ 260 μm のセンサーでもテスト実験は可能であると思われる。一方で、静磁場を変更するためにはテスト実験用に別途永久磁石を作成するか、電磁石を用いる必要がある。特に電磁石を使用すると、本番の実験では考慮する必要のない電気による熱や、真空空間の保持の問題が生じてしまう。これらの問題点やセンサーの開発を考慮した上で、テスト実験に向けた準備を進める必要がある。

INTPIX4 の調査では、外部トリガーが機能することが確認できたが、長時間計測時を行うには FPGA プログラムに問題があることが分かった。また、データの読み出しにおいて、不明瞭な部分が残っている。これらの問題を今後解決していく必要がある。

参考文献

- [1] Yoshihide Nakamiya, Kensuke Homma, Toseo Moritaka, and Keita Seto "Probing vacuum birefringence under a high-intensity laser field with gamma-ray polarimetry at the GeV scale", arxiv:1512.00636
- [2] F. Della Valle et al., Phys. Rev. D 90, 092003 (2014).
- [3] V. Dinu, T. Heinzl, A. Ilderton, M. Marklund and G. Torgrimsson, Phys. Rev. D 90, 045025 (2014).
- [4] K. Homma, O. Tesileanu, L. D'Alessi, T. Hasebe, A. Ilderton, T. Moritaka, Y. Nakamiya, K. Seto, H. Utsunomiya "HIGHLIGHTS OF RA5: COMBINED LASER-GAMMA EXPERIMENTS", To be published in Romanian Report in Physics (2016)
- [5] ELI-NP webpage <http://www.eli-np.ro/>
- [6] 高エネルギー物理学研究者会議 山崎 高幸 "高エネルギーニュース volume 34 Number 2", pp.102-104, (2015)
- [7] Particle Data Group, "Review of Particle Physics", July (2006)
- [8] Yasuo Arai "INTPIX4 User's Manual", June, (2013)
- [9] 永江知史, 永宮正治共著 "原子核物理学" 裳華房
- [10] レーザー学会、超高強度レーザーの学術応用調査専門委員会, "高強度レーザーの学術応用調査専門委員会報告"

謝辞

本研究で行いました研究は、主査である本間先生のご指導の上で成り立ちました。指導中に伺った研究を取り組む上での姿勢や考え方などは、今後の研究生活にも生かされるものだと思います。解析におきましてもたくさんの助言をいただき感謝いたします。三好先生には、セミナーの授業において原子物理学を学ばせていただきました。杉立先生、志垣先生には研究室でのミーティングにおいて、助言、ご指摘をいただき、毎回多くの気づきを得ることができました。本研究室のOBでもあり、本研究のテーマでもある γ 線偏光波長計の設計をされた中宮義英さんには、偏光の再構成において生じた様々な問題を相談させていただきました松浦さんには、修士論文の執筆で忙しい中、初めて扱う Geant4 の導入から応用まで質問に答えていただき感謝しております。同室の信廣さん、山川さんには細かな疑問点を逐一質問させていただきました。同期の4年生との議論も、成長につながったと思います。改めて、本研究においてご協力いただきました全ての方に感謝いたします。