修士論文

プラスティックシンチレーター・波長変換ファイバー読みだし検出器開発の為の基礎的研究

京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻
物理学第 2 分野 高エネルギーグループ 修士課程 2 年
横山弘和

平成 16 年 1 月 29 日

概 要

現在の高エネルギー実験では、検出器をより大面積、大容量にすることが必要とされている。そのため、安価でかつ性能のよい検出器を開発することは、現在の高エネルギー実験においては必要不可欠である。

プラスティックシンチレータは、安価で、かつ、発光スピードも速く、これからの高エネルギー実験において必要不可欠な検出器のひとつである。しかし、プラスティックシンチレータを用いて大型の検出器を作るには、シンチレータ内での限られた光の減衰長のため、１、２メートル規模の物が限界であった。近年その欠点を補うため、プラスティックシンチレータに波長変換ファイバーを埋め込んで用いる方法が注目されている。この方法では、荷電粒子の通過によって発生するシンチレーション光をいったん波長変換ファイバーで吸収し再発光させファイバー内を伝搬させることによってより長い光の減衰長を得ることができる。一方この方法では、シンチレーション光をファイバーに吸収させなければならないので、必要な光量を得るにはいかに効率よくシンチレーション光をファイバーに到達させ、かつ吸収・再発光させるか、また、そのファイバーの発光をいかに効率よく光検出器でとらえるかと言う点が重要になる。そのため、プラスティックシンチレータ、波長変換ファイバーそれぞれの発光および吸収波長の整合性、波長変換ファイバーの発光波長と光検出器の波長感度との整合性がとれた組合せを考えなければならない。また、シンチレーション光を効率よくファイバーに吸収させるため、シンチレータ自身に塗る反射材をどのようにするのがよいのか、プラスティックシンチレータと波長変換ファイバーの結合部分をどのようにするのがよいのかも検討課題である。

本論文では、上述の問題を検討するため ^{90}Sr 線源の電子を用いて以下の光量測定を行った。まず、緑色の発光波長をもつ波長変換ファイバー Y11(200)M-S 型と、標準的な青色発光をするプラスティックシンチレータである EJ-212 とを組み合わせて、標準的な PMT である H7415 を用いて光量を測定した。次に、光電面の量子効率がより緑色の側で高い PMT である H8643MOD、および、そのプリズムタイプである H8643EGPMOD を用いて測定し、光量がどれだけ増加するかを検証した。また、H8643EGPMOD を用いたとき、反射材として何も塗らない場合、アルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) をまいた場合、酸化チタンのペイント (EJ-510) を塗った場合それぞれの光量を測定し、反射材の効果およびどれだけ光量が増えるかを検証した。また、シンチレータの溝と ファイバーの間をオプティカルグリースで埋める場合と埋めない場合での光量の差も測定した。

次に、青色の発光波長をもつ波長変換ファイバー B2(200)M-S 型と、紫外発光をするプラスティックシンチレータである EJ-230 を組み合わせて、同様に、H7415、H8643MOD、H8643EGPMOD でそれぞれ光量を測定した。この場合も同様に、反射材として何もないもの、アルミナイズドマイラー、酸化チタンのペイントをそれぞれ試し、また、シンチレータの溝をオプテティカルグリースで埋める場合と埋めない場合をそれぞれ試した。

また、緑色発光の波長変換ファイバーである Y11 と青色発光の波長変換ファイバーである B2 の発光速度の比較も行った。さらに、波長変換ファイバーを一本一本 PMT(H8643EGPMOD) で測定することによってシンチレータ内での光の広がりを各組合せで測定した。

以上の各測定を比較検討し、光量がもっとも得られる組合せを求め、光の広がりやファイバーの発光速度等の条件を考慮して、どのようなタイプの実験ではどのような組合せで検出器を構成するのが最適かを検証した。

目 次

第 1 章　序章 **7**

1.1　現在の高エネルギー実験 7

1.2　シンチレータ 7

1.2.1　無機シンチレータ 7

1.2.2　有機シンチレータ 7

1.2.3　プラスティックシンチレータとその特徴、利点 8

1.2.4　旧来のプラスティックシンチレータ検出器の問題点 8

1.3　プラスティックシンチレータ・ 波長変換ファイバー読みだし検出器 8

1.4　本論文の構成について 9

第 2 章　プラスティックシンチレーター、波長変換ファイバーおよび光検出器 **10**

2.1　プラスティックシンチレーター・波長変換ファイバー読みだし検出器について 10

2.2　プラスティックシンチレータ 12

2.2.1　EJ-212 12

2.2.2　EJ-204 13

2.2.3　EJ-230 14

2.2.4　CI(Extruded) 16

2.3　波長変換ファイバー 16

2.3.1　Y11(200)M-S 型:1.5mm φ 16

2.3.2　B2(200)M-S 型:1.5mm φ 17

2.4　光検出器 17

2.4.1　H7415 20

2.4.2　H8643MOD 20

2.4.3　H8643EGPMOD 22

2.5　プラスティックシンチレータの表面に用いる反射材 23

2.5.1　EJ-510 23

2.5.2　EJ-590/B10 23

2.6　プラスティックシンチレータと波長変換ファイバーのコンタクト 23

2.7　波長変換ファイバーと光電子増倍管とのコンタクト 25

第 3 章　光電子増倍管の基本特性 **29**

3.1　測定の目的 29

3.2　測定のセットアップ 29

3.2.1　LED 29

3.3 測定の手順 31
3.4 相対的な量子効率の測定およびゲインの測定結果 31
3.5 結果の考察 32

第 4 章 光量の測定 **33**
4.1 プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器の構成 . 33
4.2 測定の種類 34
4.3 測定方法 36
4.3.1 測定装置のセットアップ 36
4.3.2 トリガーカウンターについて 39
4.3.3 データ収集系およびそのトリガーロジック 39
4.4 測定手順 39
4.5 データ解析の手順 41
4.6 ^{90}Sr 線源を用いた場合と宇宙線ミューオンを用いた場合の差 41
4.6.1 シミュレーションの結果 43
4.6.2 宇宙線ミューオンを用いた測定の結果と ^{90}Sr 線源を用いた場合との比較 44
4.7 測定結果および考察 48
4.7.1 測定結果 48
4.7.2 まとめと考察 49

第 5 章 プラスティックシンチレータ内での光の広がり **53**
5.1 宇宙線ミューオンを用いた場合と ^{90}Sr 線源を用いた場合の比較 53
5.2 シンチレータの違いによる光の広がりの比較 53
5.3 反射材の違いによる光の広がりの比較 56
5.4 シンチレータの溝にオプティカルグリースがある場合とない場合での差 . . 58
5.5 結果のまとめと考察 58

第 6 章 時間情報 **62**
6.1 Y11(200)M-S 型、B2(200)M-S 型の発光スピード 62

第 7 章 結論 **66**

第 8 章 今後の課題 **68**

参考文献 **70**

表 目 次

2.1 EJ-212 の特性、諸性質 12
2.2 1EJ-204 の特性、諸性質 13
2.3 EJ-230 の特性、諸性質 15
2.4 今回用いた PMT アセンブリ 20
2.5 R6427 の特性 21
2.6 R7899-01 の特性 22

3.1 PMT の相対量子効率およびゲイン 32

4.1 各 PMT のシリアルナンバーと HV の対応表 33
4.2 光量測定の結果 49

5.1 宇宙線と ^{90}Sr 線源とのシンチレータ内での光の広がりの比較 53
5.2 シンチレータの種類による光の広がりの比較 56
5.3 反射材の差による光の広がりの比較 (EJ-212) 57
5.4 反射材の差による光の広がりの比較 (EJ-230) 58
5.5 オプティカルグリースのあるなしによるシンチレータ内での光の広がりの比較 58

図 目 次

2.1 プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器の概略図 10
2.2 EJ-212 の発光スペクトラム 13
2.3 EJ-204 の発光スペクトラム 14
2.4 EJ-230 の発光スペクトラム 15
2.5 Y11 の吸収・発光スペクトラム 17
2.6 Y11(200)S の発光スペクトラム 18
2.7 Y11(200) の Transmission loss 18
2.8 B2 の吸収・発光スペクトラム 19
2.9 B2(200)S の発光スペクトラム 19
2.10 B2(200) の Transmission loss 20
2.11 H7415 の概観図およびベースの回路図 21
2.12 H8643MOD の概観図およびベースの回路図 22
2.13 プリズムタイプの光電面の概念図 24
2.14 H8643EGPMOD の概観図およびベースの回路図 25
2.15 今回使用した PMT の光電面の写真 26
2.16 EJ-510 の反射率の波長属性 27
2.17 B2(200)M-S 型の端面写真 28

3.1 ゲインおよび相対量子効率測定装置のセットアップ 30

4.1 セットアップの模式図 (側面図１) 36
4.2 セットアップの模式図 (側面図２) 37
4.3 セットアップの模式図 (上面図) 37
4.4 光量測定のセットアップの写真 38
4.5 測定のデータ収集系 40
4.6 典型的な 1 p.e ピークの例 42
4.7 各トリガーカウンターの TDC 分布 42
4.8 ^{90}Sr 線源のエネルギースペクトラム 44
4.9 1.4MeV、1.6MeV、1.8MeV、2.0MeV、2.2MeV の入射電子がおとすエネルギーのモンテカルロシミュレーション 45
4.10 ^{90}Sr 線源と宇宙線ミューオンのシンチレータに落すエネルギーのモンテカルロシミュレーション 46
4.11 宇宙線ミューオンを用いた測定と ^{90}Sr 線源を用いた測定でのたばね読みでの ADC 分布 47

4.12 測定 (E) での ADC 分布 48

5.1 各 PMT の ADC 分布 54
5.2 光量の分布 55
5.3 宇宙線と ^{90}Sr 線源との光量の分布の差 56
5.4 EJ-212、EJ-204、EJ-230、CI の光量の分布 57
5.5 反射材の違いによる光量の分布の差:EJ-212 の場合 59
5.6 反射材の違いによる光量の分布の差:EJ-230 の場合 60
5.7 オプティカルグリースのあるなしによる光量の分布の差 61

6.1 発光が時間的に分解してしまっているときのオシロスコープの画像 (Y11(200)M-S 型) の発光 63
6.2 波長変換ファイバーの発光をオシロスコープで読んだときの画像 64
6.3 Y11、B 2 のオシロスコープの画像 65
6.4 Y11、B 2 のオシロスコープの画像 65

To my Dad. I wish so very much that I could tell how grateful I am for his love and guidance.

第1章　序章

1.1　現在の高エネルギー実験

現在の高エネルギー実験では、実験の規模が大きくなり、より事象数の少ない現象を、より精度よく測定しようとするため、検出器を均一な状態でより大面積、大容量にすることが必要とされている。例えば、事象数の少ない現象を実験的に正確にとらえるためには、検出器の容量を可能な限り大きくかつ均一にして不感領域をなくす必要がある。そのため、安価でかつ性能のよい検出器を開発することは必要不可欠である。その候補として、プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器が上げられる。

1.2　シンチレータ

シンチレータは、今日、高エネルギー実験、原子核実験においてもっともよく使われている放射線検出器のひとつである。また、それ以外の医療分野などでも幅広く用いられている。
シンチレータの歴史は、ラザフォードがアルファー線を用いてラザフォード散乱現象を発見した時代にまでさかのぼる。しかしこの時代はごく弱い光であるシンチレーション光をとらえる光検出器が存在していなかったため、ほとんど用いられなかった。２０世紀中ごろに入り、光電子増倍管が発明されると、効率が良く、信頼性の高い検出器として、一気に放射線検出器の主役となるようになった。その後はつぎつぎと新しい発展や改良がなされ、今ではもっとも便利で信頼性の高い放射線検出器のひとつとなっている。
シンチレータには、無機シンチレータと有機シンチレータがある。

1.2.1　無機シンチレータ

無機シンチレータは、多くはアルカリハロゲン化合物の結晶に光量を増やすため小量の不純物を混ぜたものである。$\mathrm{NaI(Tl)}$、$\mathrm{CsI(Tl)}$、CsI、$\mathrm{CsF_2}$、などがある。無機シンチレータはエネルギー精度の良い電磁カロリメータとして、また、医療分野でも非常に一般的に用いられている。

1.2.2　有機シンチレータ

有機シンチレータはベンゼン環構造をもつ有機物でシンチレーション光を発光する物質のことである。有機シンチレータの特徴はその発光スピードの速さで数ナノ秒かそれ以下で発光する。有機シンチレータには、有機結晶、液体シンチレータ、プラスティックシン

チレータがある。

1.2.3 プラスティックシンチレータとその特徴、利点

プラスティックシンチレータは、プラスティックのベースに有機シンチレータを混ぜ込んだものである。ベースとしては、ポリスチレン、ポリビニルトルエン、ポリフェニルベンゼンなどがある。また、多くの場合シンチレータの他に POPOP などの波長変換材も混ぜられている。

プラスティックシンチレータの利点としては、まず安価なことが上げられる。さらに製造・加工も容易であるため、無機結晶のシンチレータと比べるとはるかに大型のものを簡単に安価に作ることができる。大きな一様なものを作れるということはその分光検出器の数を減らすことができるということであり、さらにコストを下げるのに役立つ。さらに、近年用いられるようになった押し出しシンチレータを用いればさらに安価に製造することができる。

また、無機シンチレータと比べて圧倒的に発光スピードが速い。多くの場合、液体シンチレータと比べても若干発光スピードが速い。エネルギー分解能については無機シンチレータより劣るものの、鉛などとサンドイッチ構造をとってサンプリングカロリメータとして用いれば十分良いエネルギー分解能も得ることができる。

これら優れた特徴をもつことから、プラスティックシンチレータは現在そしてこれからの高エネルギー実験において必要不可欠な検出器のひとつである。

1.2.4 旧来のプラスティックシンチレータ検出器の問題点

プラスティックシンチレータの問題点としては、プラスティックシンチレータを用いて大型の検出器を作るには、プラスティックシンチレータ内での限られた光の減衰長のため、より大型のものを作ることができないところであった。大きなものを作ると必要な光量が得られなくなるばかりでなく、場所による発光の一様性が確保できなくなる。それを回避するためには光検出器の数を増やしてやらなくてはならず、それらの要因のため一般的には 1 、 2 メートル規模のものが限界であった。

1.3 プラスティックシンチレータ・ 波長変換ファイバー読みだし検出器

近年その欠点を補うため、プラスティックシンチレータに波長変換ファイバーを埋め込んで用いる方法が注目されている。この方法では、荷電粒子の通過によって発生するシンチレーション光をいったん波長変換ファイバーで吸収し再発光させファイバー内を伝搬させることによってより長い光の減衰長を得ることができる。光の減衰長がプラスティックシンチレータより十分長いため一様性もより保証できる。また、ファイバーを何本も束ねて読み出すことにより光検出器の数を減らすことができ、それによってもコストを下げることができる。一方この方法では、光をファイバーに吸収させなければならず、また、吸収させることができたとしても、波長変換ファイバー光の捕獲効率が数%程度であるため、

必要な光量を得るにはいかに効率よくシンチレーション光をファイバーに到達させ、かつ吸収させるか、そしてその光をいかに効率良く光検出器で検出するかという点が重要になる。そのため、プラスティックシンチレータの発光波長と波長変換ファイバーの吸収波長の整合性、波長変換ファイバーの発光波長と光検出器の波長感度との整合性がとれたプラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、光検出器の組合せを考えることは非常に重要である。また、光量を増やすための方法も探求しなければならない。
本論文では、これらの点について系統的に検討するために、^{90}Sr 線源を用いて光量の測定を行った。

1.4 本論文の構成について

本論文の構成は、以下の通りである。まず第 2 章で本研究で取り扱うプラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、および光電子増倍管について説明する。次に第 3 章で本研究で用いた光電子増倍管のゲインおよび相対的量子効率の測定について説明する。第 4 章で光量測定の方法および結果を述べ、さらに、光電子増倍管を標準タイプの H7415 を用いる場合と比べ、光電面の量子効率が緑色側で高い PMT である H8643MOD を用いる場合、そのプリズムタイプである H8643EGPMOD を用いる場合でどれだけ光量が増えるか検証する。また、反射材の効果、オプティカルグリースの効果、および、プラスティックシンチレータの種類による光量の違いについても述べ、もっとも光量を得る方法を検証する。第 5 章では、プラスティックシンチレータ内での光の広がりついて述べる。第 6 章では、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型を用いる場合と B2(200)M-S 型を用いる場合での発光スピードの比較を行う。最後に第 7 章で結論を述べ、第 8 章で今後の予定を述べる。

第2章　プラスティックシンチレーター、波長変換ファイバーおよび光検出器

2.1　プラスティックシンチレーター・波長変換ファイバー読みだし検出器について

プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器とは、図 2.1 のように、板上のプラスティックシンチレータに溝を掘って、そこに波長変換ファイバーを埋め、ファイバーをプラスティックシンチレータの外まで引き出して、ファイバー端からでてくる光を光検出器で読み出すものである。

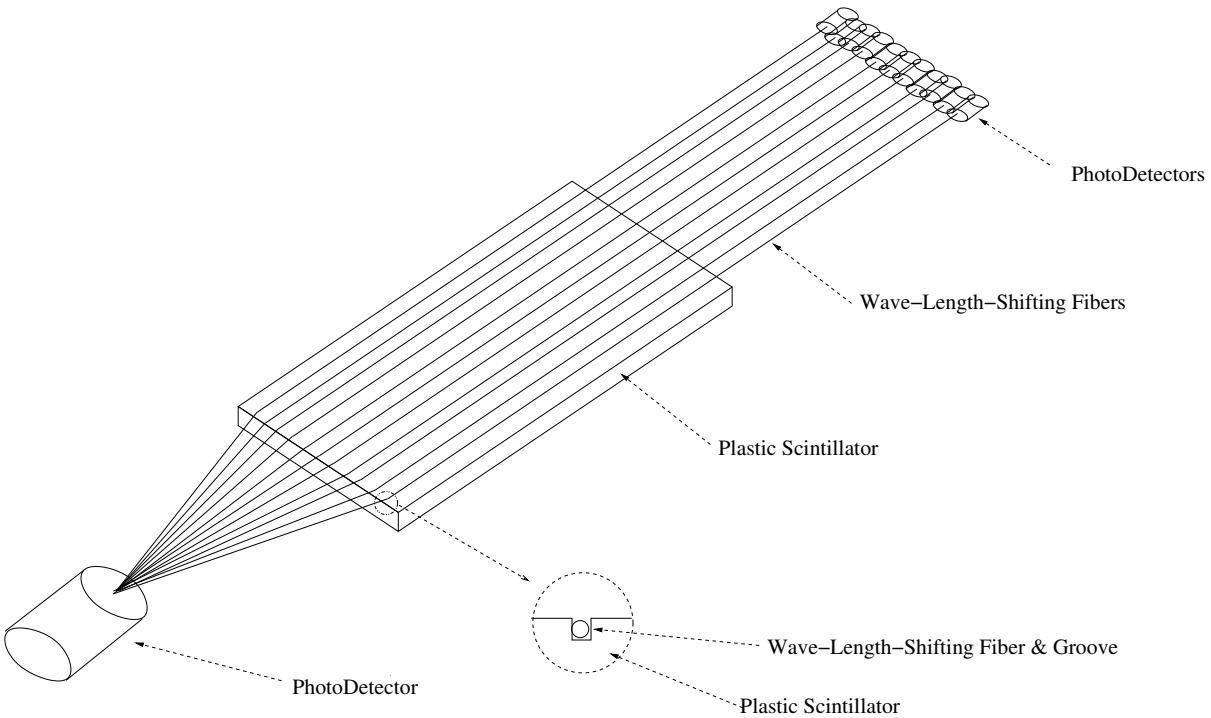

図 2.1: プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器の概略図

プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器を製作するにあたって、必要な光量、時間分解能、および位置分解能を得るには、それを構成するプラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、および光検出器の組合せが非常に重要である。

プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器においては、単位厚

さあたりでの荷電粒子が通過したことによって発生するシンチレータのシンチレーション光の光量は一定であるので、その光をいかに集めるかということがそのまま得られる光量ということになる。シンチレーション光は、光検出器に到達するまでにさまざまな過程によって失われ、減少する。以下にその主な過程を列挙すると、

1. 光のシンチレータ内での減衰。(散乱および吸収)
2. シンチレータ外への光の洩れ。
3. シンチレータから波長変換ファイバーへ光が入るときの損失。
4. シンチレータの発光波長と波長変換ファイバーの吸収波長とのミスマッチによる損失。
5. 波長変換ファイバーの光の捕獲効率。
6. 波長変換ファイバー内での減衰。
7. 波長変換ファイバーから光検出器に入るときの光の損失。
8. 波長変換ファイバーの発光波長と光検出器の検出感度 (量子効率) とのミスマッチによる損失。

があげられる。
これらのうち、1、4 はプラスティックシンチレータの選択をどうするかという問題である。2 についてはプラスティックシンチレータの反射材をどうするかという問題である。3 はプラスティックシンチレータと波長変換ファイバーのコンタクトをどうすれば良いかという問題である。4、5、6、8 については波長変換ファイバーをどのように選択するかという問題である。7 については波長変換ファイバーと光検出器のコンタクトの問題である。8 は、さらに光検出器選択の問題でもある。よって、検出器の構成要素を考えるにあたってはそれらの観点から検討する必要がある。
本研究では、これらの観点から実際に測定するプラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、光検出器の組合せを選んだ。なお、各要素の詳細については次節で説明する。
まず、1 の観点から、プラスティックシンチレータは、少なくとも今回テストしたサイズである 10cm×20cm[1]の長さ以上の減衰長を持つものを選んだ。また、2 の観点を理解するため、いくつかの反射材をテストした。3 の観点を理解するため、プラスティックシンチレータの溝にオプティカルグリースを塗る場合をテストした。また、4 の観点から、プラスティックシンチレータと波長変換ファイバーの組合せとして、青色発光をするプラスティックシンチレータである EJ-212 および EJ-204 と青色を吸収し緑色発光する波長変換ファイバーである Y11 の組合せ、および、紫外発光するプラスティックシンチレータである EJ-230 と紫外光を吸収して青色発光する波長変換ファイバーである B2 の組合せで測定することとした。5 の観点から波長変換ファイバーはマルチクラッドのものを選んだ。6 の観点については、波長変換ファイバーの減衰長は今回試した 60cm 程度[2]よりは十分長いた

[1]最終的には 1m 以上の大きなものをテストしたいがまず最初はこのサイズからはじめることとした。
[2]今回テストしたプラスティックシンチレータのサイズが 10cm×20cm であるので光検出器への波長変換ファイバーの引き出しの長さをあわせて長さが 60cm 程度のものを用いる。

め、考慮しなかった。しかし、大きな検出器を作る段階になった場合は非常に重要な要素である。7 の点をよくするため、波長変換ファイバーと光検出器のコンタクト部分にはオプティカルグリースを用いた。8 の観点を試すため、波長によって量子効率の違いのあるとされる 3 つの光電子増倍管 (PMT) をテストした。

次節より、本研究でテストした プラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、光検出器、反射材、およびプラスティックシンチレータと波長変換ファイバーとのコンタクトの方法について概説する。

2.2 プラスティックシンチレータ

本論文では、第 2.1 節で述べたような観点にしたがって、波長変換ファイバー Y11(200) の吸収波長にあうものとして EJ-212、EJ-204 を、また、波長変換ファイバー B2(200) の吸収波長にあうものとして EJ-230 をテストした。また、押しだしシンチレータもテストした。すべてのプラスティックシンチレータの大きさは 10cm×20cm×0.51cm で、そこに幅、深さがともに 1.6mm の溝が 1cm 間隔で 9 本掘られている。
以下に各プラスティックシンチレータの概説をする。

2.2.1 EJ-212

EJ-212は ELJEN Technology 社製のプラスティックシンチレータで、Nuclear Enterprise 社製の NE-102A や Bicron 社製の BC-400 と同等である。プラスティックシンチレータの中でももっとも標準的とされておりさまざまな実験で汎用的に用いられている。ポリビニルトルエンをベースとしている。EJ-212 の発光量、最大発光波長、減衰長、立上り時間、減衰時間、屈折率、密度は表 2.1 の通りである。また、EJ-212 の発光スペクトルを図 2.2 に示す。

発光量	65% anthracene 10000 photons/1MeV e^-
最大発光波長	423 nm
減衰長	250 cm
立上り時間	0.9 nsec
減衰時間	2.4 nsec
屈折率	1.58
密度	1.03 g/cc

表 2.1: EJ-212 の特性、諸性質 [1]

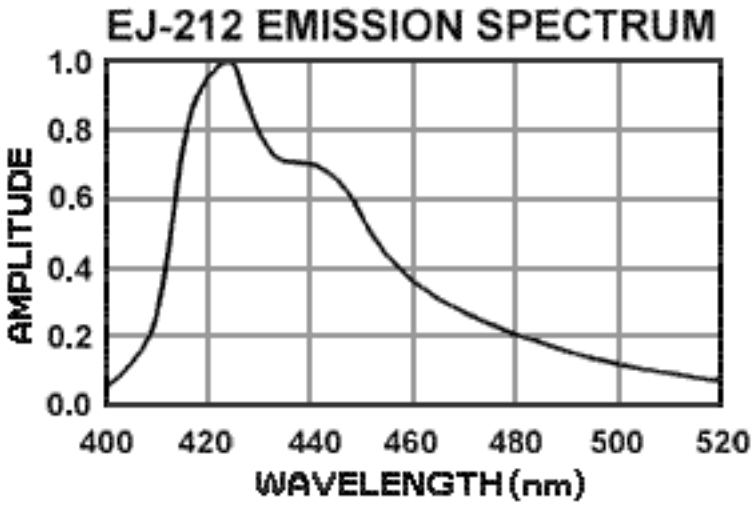

図 2.2: EJ-212 の発光スペクトラム

2.2.2 EJ-204

EJ-204は ELJEN Technology 社製のプラスティックシンチレータで、Nuclear Enterprise 社製の NE-104 や Bicron 社製の BC-404 と同等である。ELJEN Technology 社が扱っているプラスティックシンチレータの中でもっとも発光量が多くまた発光スピードも速い。また、発光波長が若干紫外よりであるため、直接光電子増倍管などで読み出す場合は紫外光を透過する UVT のライトガイドを使う必要がある。また、シンチレータ内での減衰長も EJ-212 に比べて短い。そのため、緑色の波長変換ファイバーで読み出す方が適したプラスティックシンチレータである[3]。EJ-212 同様ポリビニルトルエンをベースとしている。EJ-204 の発光量、最大発光波長、減衰長、立上り時間、減衰時間、屈折率、密度は表 2.2 の通りである。また、EJ-204 の発光スペクトルを図 2.3 に示す。

発光量	68% anthracene 10400 photons/1MeV e^-
最大発光波長	408 nm
減衰長	160 cm
立上り時間	0.7 nsec
減衰時間	1.8 nsec
屈折率	1.58
密度	1.032 g/cc

表 2.2: EJ-204 の特性、諸性質 [1]

[3]また、今回は試せなかったが、EJ-204 とほぼ同じプラスティックシンチレータに EJ-204A がありこれのほうが緑色発光の波長変換ファイバーに適合するとされている。

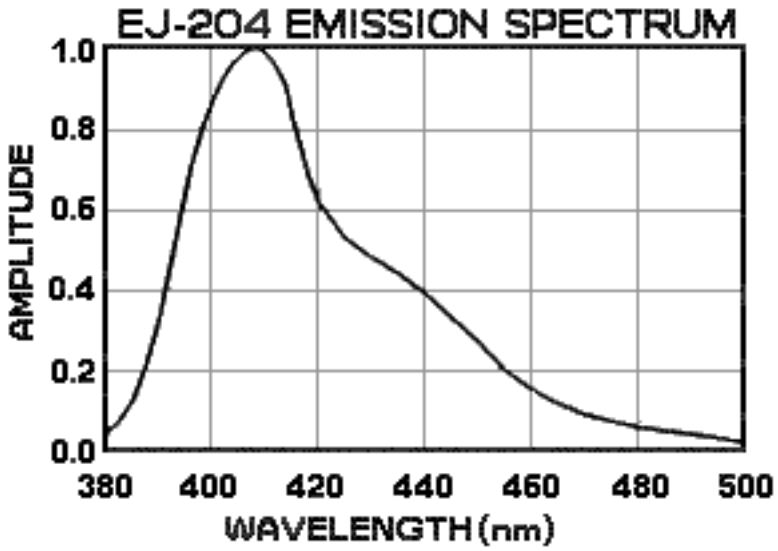

図 2.3: EJ-204 の発光スペクトラム

2.2.3 EJ-230

EJ-230は ELJEN Technology 社製のプラスティックシンチレータで、Nuclear Enterprise 社製の Pilot U2 や Bicron 社製の BC-420 と同等である。他のプラスティックシンチレータと違って発光波長が紫外領域にある。一般に紫外領域に発光波長をもつプラスティックシンチレータは発光スピードが速く、時間情報が重要な場合やカウンティングレートが高い場合に適している。一方紫外光は減衰が速いため小さなプラスティックシンチレータしか実用的に用いることができない。ELJEN Technology 社製のプラスティックシンチレータで 紫外領域に発光波長をもつものは、他に、EJ-228、EJ-232 があるが、EJ-230 は他のものと比べてシンチレータ内での減衰長が 120cm と長く、また発光波長も EJ-232 と比べてより波長変換ファイバー B2 の吸収波長に近いため、今回は EJ-230 を選んだ。EJ-230 の特徴としては発光スピードが速いためタイミングを出す必要があるときには有利であることである。また、波長変換ファイバーと組み合わせる場合、紫外光を青色に変換する青色発光の波長変換ファイバーを用いることができる。一般的に光検出器として用いられる光電子増倍管はより青色側に高い量子効率をもつので緑色発光の波長変換ファイバーを用いる場合と比べ青色発光の波長変換ファイバーを用いることができれば、より多くの光量を得られると期待される。一方紫外発光であるため、EJ-212 などと比べるとシンチレータ内での減衰長が短く、その分シンチレーション光を波長変換ファイバーまで到達させるのには不利である。また、同様に紫外発光のため、プラスティックシンチレータにもちいる反射材は紫外光を反射するものでなくてはならない。EJ-230 の発光量、最大発光波長、減衰長、立上り時間、減衰時間、屈折率、密度は表 2.3 の通りである。また、EJ-230 の発光スペクトルを図 2.4 に示す。

発光量	64% anthracene 9700 photons/1MeV e^-
最大発光波長	391 nm
減衰長	120 cm
立上り時間	0.5 nsec
減衰時間	1.5 nsec
屈折率	1.58
密度	1.02 g/cc

表 2.3: EJ-230 の特性、諸性質 [1]

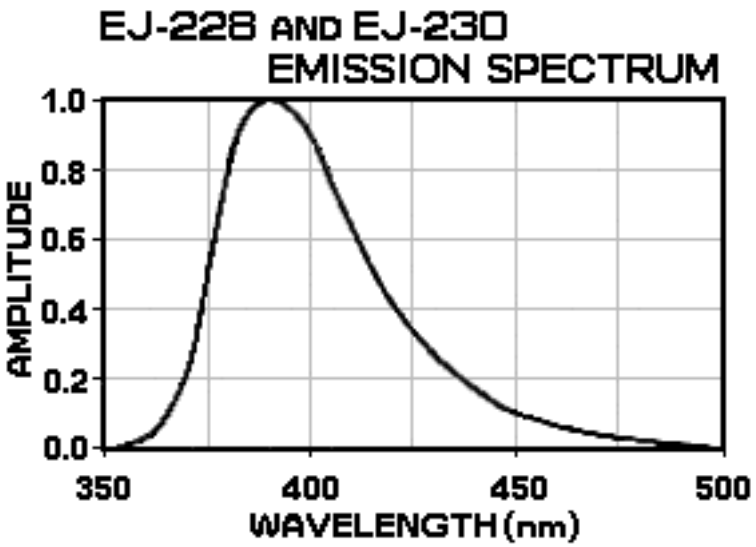

図 2.4: EJ-230 の発光スペクトラム

2.2.4 CI(Extruded)

本論文で、CI と呼ぶ プラスティックシンチレータは シーアイ工業社製の押し出しシンチレータ (Extruded Scintillator) である。押し出しシンチレータとは、従来のキャストタイプのプラスティックシンチレータと違って押し出し法によって作られたシンチレータである。製造工程が簡単になるため安価に大きなシンチレータを作ることが出来き、近年注目されている[4]。しかし、一般に発光量、減衰長などはキャストタイプのプラスティックシンチレータより劣る。今回測定したものは試作品のため特性等の詳細は明らかでない。

2.3 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、コアの部分に波長変換材 (ある波長域の光を吸収してそれより長い波長域の光を等方的に再発光する物質) が混ぜ込まれたプラスティック製の光ファイバーである。光ファイバーに側面から入ってきた光は通常全反射条件を満たすことができないためそのまま外部にでて行く。よってその光を伝送することはできない。しかし、波長変換材を混ぜ込むことによって、外部から入ってきた光を波長変換材が吸収し等方的に再発光するので、再発光された光のうち全反射条件を満たすものはファイバーの中を伝搬することができる。入射光のうち再発光され全反射条件を満たしファイバー内に捕獲される光の割合を捕獲効率 (Trapping Efficiency) とよぶ。Trapping Efficiency は シングルクラッドのファイバーの場合 3.1%、マルチクラッド[5]のファイバーの場合 5.4% [3] である。本研究では、Y11(200)M-S 型と B2(200)M-S 型の種類の波長変換ファイバーをテストした。なお、Y11(200)M-S 型は緑色の領域に発光波長をもつため、一般的な光検出器である光電子増倍管 (PMT) の量子効率の高い領域 (青色の領域) とはあまりマッチしない。しかし、緑色の波長変換ファイバーの方が一般的に減衰長が長いと考えられ、大型の検出器を作ることを考えると Y11(200)M-S 型は非常に重要であるので、本研究で取り上げた。

2.3.1 Y11(200)M-S 型:1.5mm φ

Y11(200)M-S 型は、クラレ社製の緑色領域に発光波長をもつ波長変換ファイバーで、現在さまざまな実験でもっともよく使われている。「Y11」は波長変換材の種類[6]を表し、「(200)」は混ぜ込まれた波長変換材の濃度とファイバーの径の積 (単位は ppm・mm)、「M」はマルチクラッドをあらわす。また、波長変換ファイバーには S 型と non-S 型[7]があり今回は S 型を用いた。図 2.5 に波長変換材 Y11 の吸収・発光スペクトラムを載せた。また、図 2.6 に Y11(200)S [8]ファイバーを励起光によって光らせたときの発光スペクトラム、す

[4]たとえば [2] を参照

[5]シングルクラッドとはコアの外側に 1 重にクラッドがあるファイバーのことで、マルチクラッドとは 2 重にクラッドがあるファイバーのことである。

[6]ほかに緑色発光の波長変換材としては、Y7、Y8、Y9、Y10 などが、他の色のものとしては B2 の他、B1、B3、O2、R3、R4 などがあり、それぞれ吸収、発光波長帯が違う。

[7]S 型とはファイバーのコアを構成しているポリスチレン分子の方向がそろえられており曲げに対して強いが光の減衰長は短くなる。一方 non-S 型 (標準型) はポリスチレンの分子の方向がそろっておらずその分光学的に等方的で光の減衰は少ないが、曲げに対しては弱い。

[8]S はシングルクラッドをあらわす。発光スペクトラムそのものはシングルクラッドでもマルチクラッドでも基本的にはかわらない。

なわち、ファイバーの中を伝搬した後の発光スペクトラムを載せた。図から分かるように波長変換材の発光スペクトラムのピークは 476nm 付近にあるが、その領域は実際には吸収領域でもあり、その領域の波長はファイバー内ではあまり伝搬できず、ファイバーの発光スペクトラムのピークはより長い波長側となる。
一方、波長変換ファイバーの性質を特徴づける他の要素として光の減衰長がある。図 2.7 に Y11(200) の Transmission loss のデータを載せた。この図よりファイバーを伝搬する間にどの波長の光がどれくらい減衰するかがわかる。

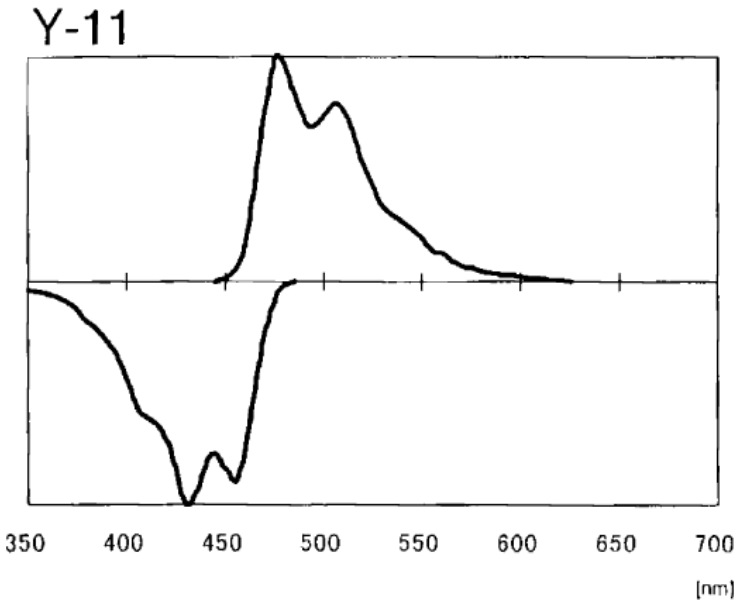

図 2.5: Y11 の吸収・発光スペクトラム [3](上が発光スペクトラム、下が吸収スペクトラム)

2.3.2 B2(200)M-S 型:1.5mm φ

B2(200)M-S 型は、クラレ社製の青色領域に発光波長をもつ波長変換ファイバーで、同じ青色発光をする波長変換ファイバーである B シリーズ (B1、B2、B3) の中ではもっともよく使われている。図 2.8 に波長変換材 B2 の吸収・発光スペクトラムを載せた。図から分かるようにこのファイバーは紫外領域に吸収波長域がある。また、図 2.9 に B2(200)S ファイバーを励起光によって光らせたときの発光スペクトラム、すなわち、ファイバーの中を伝搬した後の発光スペクトラムを載せ、図 2.10 には B2(200) の Transmission loss のデータを載せた。

2.4 光検出器

本研究では、光検出器として量子効率の違うとされている H7415、H8643MOD、H8643EGPMOD の 3 種類の光電子増倍管 (PMT) を使用した。次節で順次述べるとおり、H7415(1-1/8 inch)

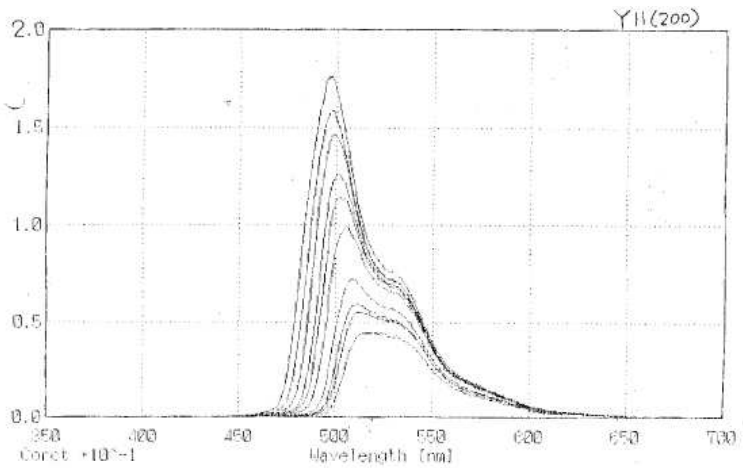

図 2.6: 430nm の励起光で光らせたときの Y11(200)S の発光スペクトラム [4](高いものから順にそれぞれ、2.5cm、5cm、10cm、20cm、30cm、50cm、100cm、150cm、200cm、300cm の地点を励起光で光らせたときのスペクトラムである。)

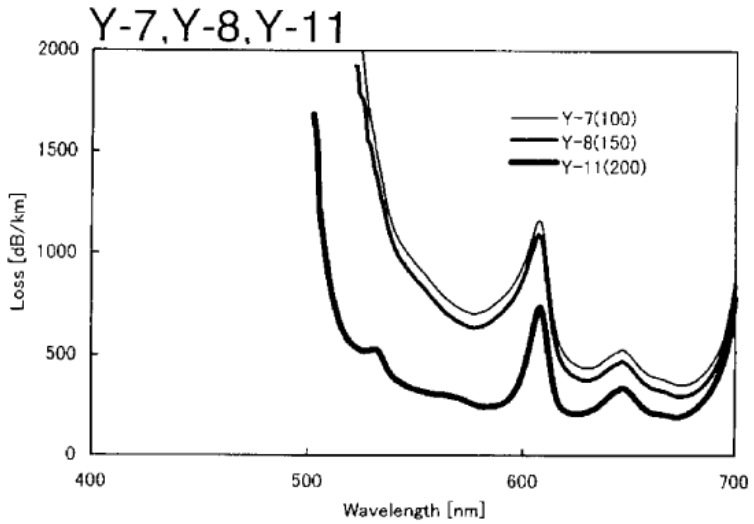

図 2.7: Y11(200) の Transmission loss [3]

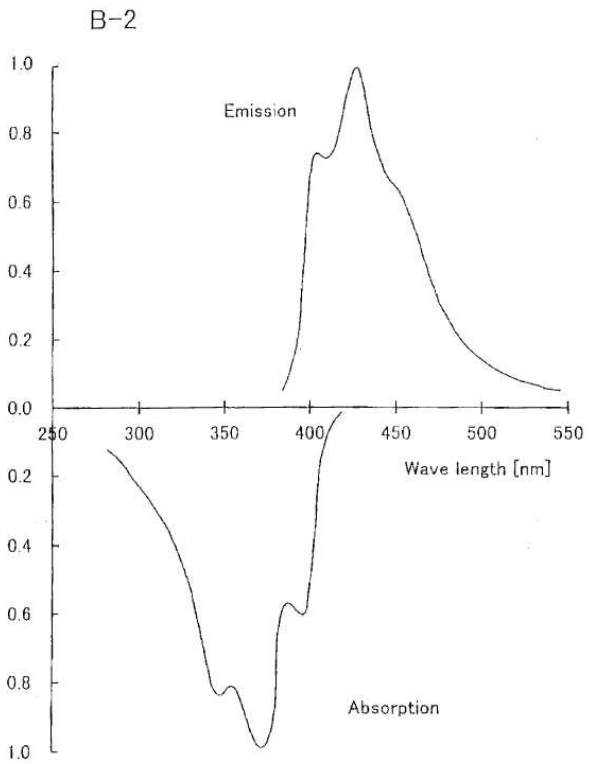

図 2.8: B2 の吸収・発光スペクトラム [4]

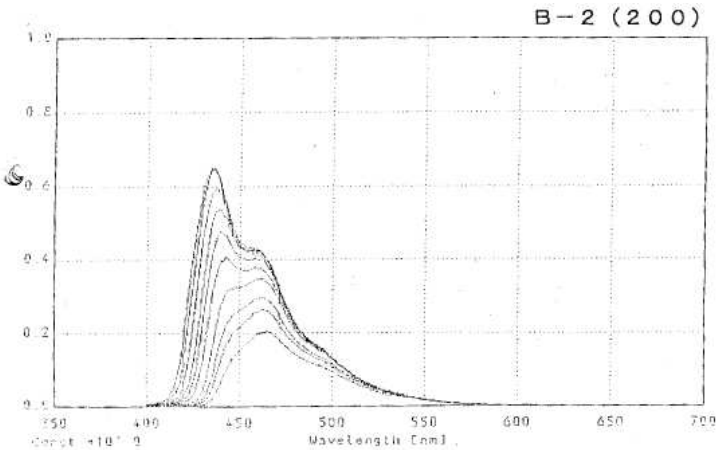

図 2.9: 370nm の励起光で光らせたときの B2(200)S の発光スペクトラム [4](高いものから順にそれぞれ、2.5cm、5cm、10cm、20cm、30cm、50cm、100cm、150cm、200cm、300cm の地点を励起光で光らせたときのスペクトラムである。)

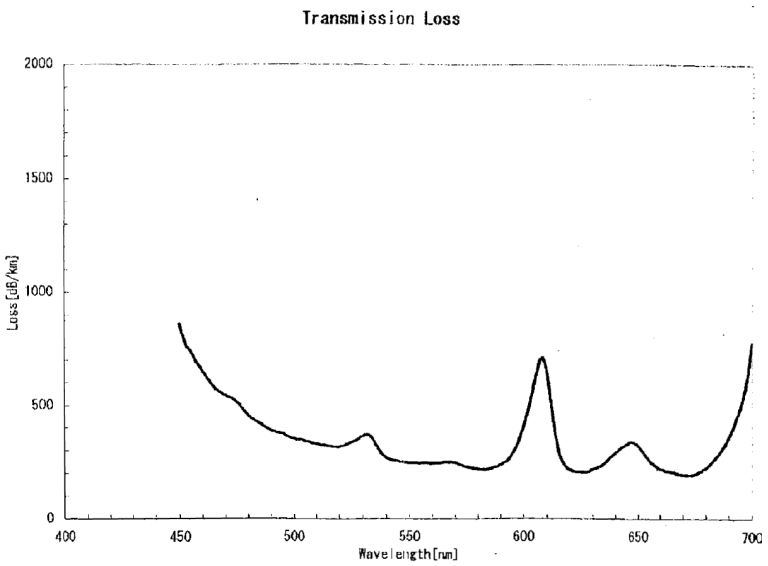

図 2.10: B2(200) の Transmission loss [4]

および H8643MOD(1 inch) は標準的なバイアルカリの光電面をもつ PMT、H8643EGPMOD(1 inch) は緑色領域の感度を増強しさらにプリズムタイプにした光電面をもつ PMT である。表 2.4 にこれらの PMT についてまとめた。

PMT アッセンブリ名	受光面のサイズ	PMT 自身の名前	最大定格電圧	光電面
H7415	1-1/8 inch	R6427	2000	通常のバイアルカリ
H8643MOD	1 inch	R7899-01	1800	通常のバイアルカリ
H8643EGPMOD	1 inch	R7899-01EGP	-1800	緑色感度を増強したプリズムタイプ

表 2.4: 今回用いた PMT アセンブリ

以下に各 PMT の簡単な説明をする。

2.4.1 H7415

H7415 は浜松フォトニクス社製のアセンブリタイプの光電子増倍管でベースをのぞいた PMT 自身は R6427 である。R6427 の諸特性をまとめを表 2.5 に示した。また、H7415 の概観図およびベースの回路図を図 2.11 に示した。

2.4.2 H8643MOD

H8643MOD は浜松フォトニクス社製のアセンブリタイプの光電子増倍管でベースをのぞいた PMT 自身は R7899-01 である。R7899-01 の諸特性をまとめを表 2.6 に示した。ま

パラメータ	説明 / 値	単位
受光面サイズ	25ϕ	mm
感度波長範囲	300-650	nm
最高感度波長	420	nm
光電面種類	バイアルカリ	-
材質	硼硅酸ガラス	-
ダイノード構造	リニアフォーカス	-
ダイノード段数	10	-
最大定格電圧	2000	V

表 2.5: R6427 の特性 [5]

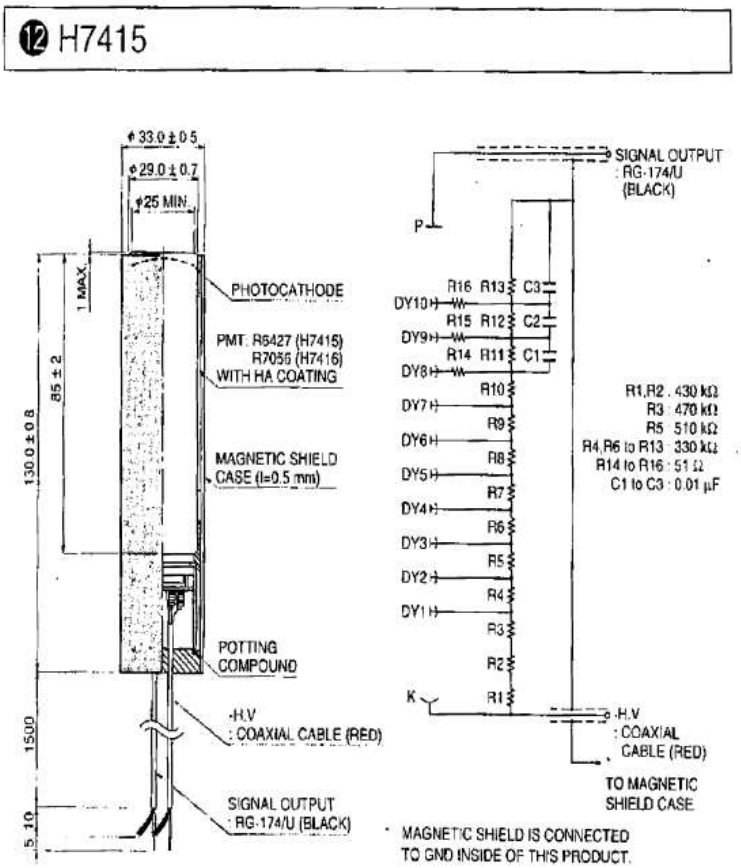

図 2.11: H7415 の概観図およびベースの回路図

た、H8643MOD の概観図およびベースの回路図を図 2.12 に示した。

パラメータ	説明 / 値	単位
受光面サイズ	22ϕ	mm
感度波長範囲	300-650	nm
最高感度波長	420	nm
光電面種類	バイアルカリ	-
材質	硼硅酸ガラス	-
ダイノード構造	リニアフォーカス	-
ダイノード段数	10	-
最大定格電圧	1800	V

表 2.6: R7899-01 の特性 [5]

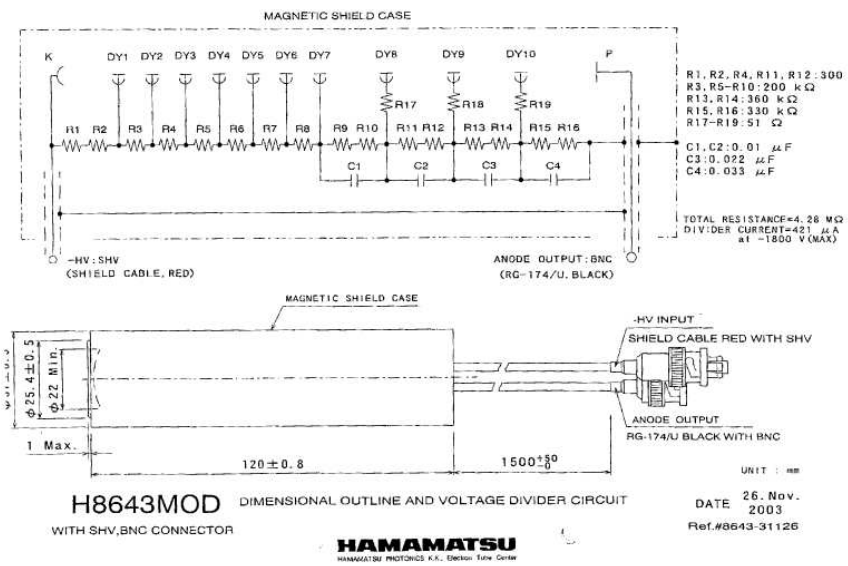

図 2.12: H8643MOD の概観図およびベースの回路図

2.4.3 H8643EGPMOD

H8643EGPMOD は H8643MOD をグリーンエクステンディッド、プリズムタイプにしたものである。グリーンエクステンディッドとは、同じバイアルカリの光電面ではあるが、光電面を構成する物質の構成比を変えることによってその仕事関数を低くし、よりエネルギーの低い緑色の光でも光電効果を起こして検出できるようにした (すなわち量子効率を高めた) ものである。プリズムタイプとは、光電窓の内側の表面を、図 2.13 のように山型

の凹凸をつける (プリズム型にする) ことによって、入射光が光電面内をより長い距離通ることができるようにし、その結果光電効果を起こして光電子を放出する確率を上げたタイプである。光電面の厚さはプリズムでないタイプと同じままにしてプリズムの表面を 45 度傾けているので、まっすぐ入射した光に対しては $\sqrt{2}$ 倍光電子のでる確率が増えると期待される。なお、おなじ EGP タイプの 2inch の PMT は KEK-E391a 実験で用いられる予定である [6]。
H8643EGPMOD の概観図およびベースの回路図を図 2.14 に示した。また、図 2.15 に今回用いた PMT の光電面の写真をのせておく。

2.5 プラスティックシンチレータの表面に用いる反射材

本章の最初で述べたように、光が失われる過程としてシンチレータからの光の洩れがあげられるが、これをより少なくするためにもっともよく用いられる方法はプラスティックシンチレータの表面に反射材を塗り、より多くの光を波長変換ファイバーまで到達させる方法である。この方法では、反射材はプラスティックシンチレータの発光波長に適した波長領域で高い反射率をもっている必要がある。

今回は、反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) を塗る場合とアルミナイズドマイラーフィルム (EJ590/B10) を表面にまく場合、およびなにもしない場合を試した。

2.5.1 EJ-510

EJ-510 は ELIJEN Technology 社製の反射材で酸化チタンの顔料 (白色) が水溶性のペイントに混ぜ込まれていて、ハケ等で直接 プラスティックシンチレータに塗り付けることができる。乾燥後は水溶せずはがれにくい。図 2.16 に反射率の波長特性を載せた。図より分かるように波長が 400nm あたりより短い領域で反射率が急激に落ちる。そのため、紫外発光をするプラスティックシンチレータには用いることが難しい。

2.5.2 EJ-590/B10

EJ-590/B10 は非常に薄いポリエステルのフィルムの両面にアルミを蒸着したものである。厚さは 2.0μm で 2 枚 (4.0μm) で 20keV の電子が止まる厚さである。アルミを蒸着した場合は一般的には紫外光も反射されるので今回用いる紫外発光のプラスティックシンチレータである EJ-230 の発光波長域では十分に反射率があると考えられる。

2.6 プラスティックシンチレータと波長変換ファイバーのコンタクト

プラスティックシンチレータには、1cm 間隔で幅、深さが 1.6mm の溝が掘られている。そこに、1.5mm 径の波長変換ファイバーを埋め込む。今回使用した波長変換ファイバーのコア、内側のクラッド、外側のクラッド、およびプラスティックシンチレータの屈折率

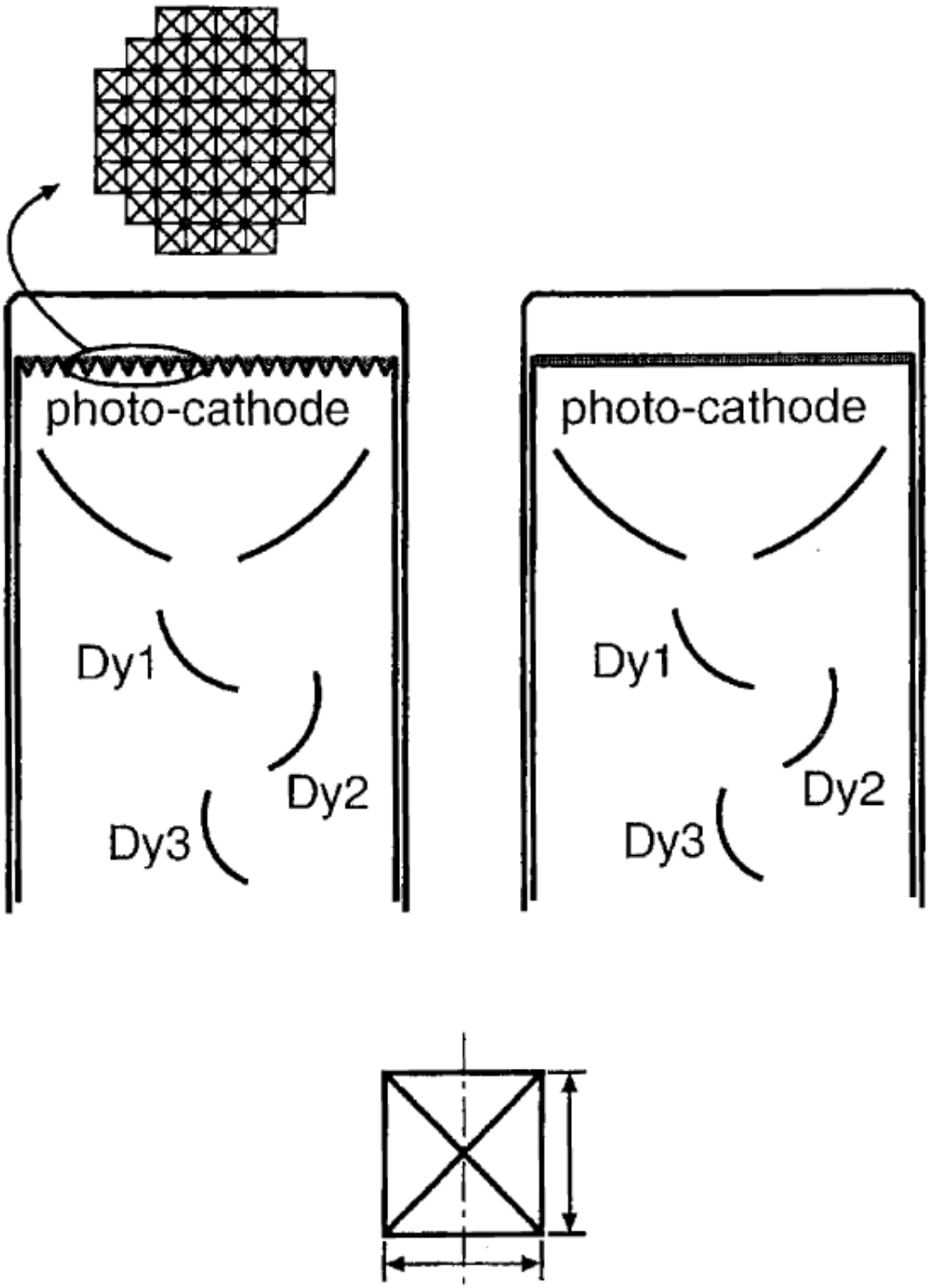

図 2.13: プリズムタイプの光電面の概念図 ([6] より抜粋)

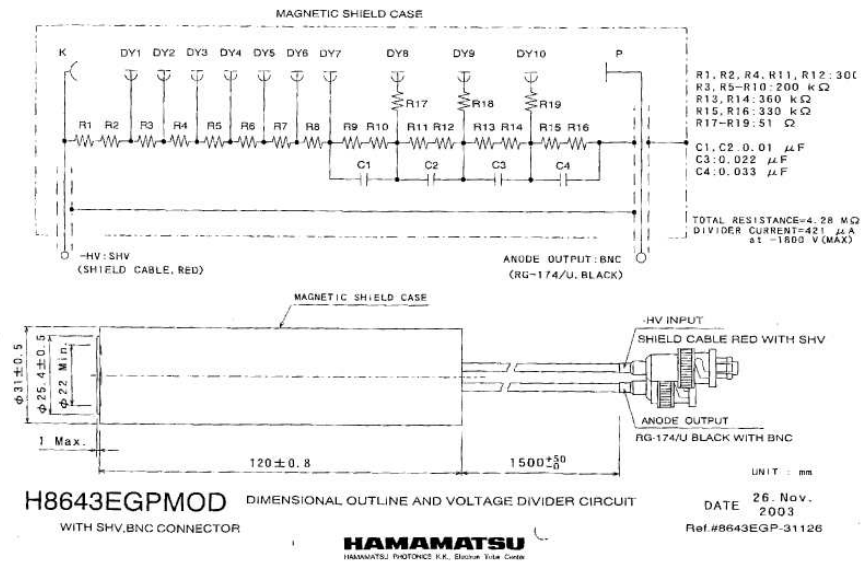

図 2.14: H8643EGPMOD の概観図およびベースの回路図

は、それぞれ 1.59、1.49、1.42、1.58 であるので、屈折率が外側のクラッドとプラスティックシンチレータに近いもので溝を埋めればより光量が得られることが期待される。今回その候補としてオプティカルグリースを使用した。使用したのは GE 東芝シリコーン社製の TSF-451-5M で、屈折率は 1.402 である。

2.7 波長変換ファイバーと光電子増倍管とのコンタクト

波長変換ファイバーの端面は直径 2cm の透明なアクリル製のクッキーに 1.6mm 径の穴を開けてファイバーを通してオプティカルセメント[9]で接着した後、ヤスリで研磨した。図 2.17 は波長変換ファイバーの端面を磨いたあとの写真である。
光電子増倍管とのコンタクト部分にはオプティカルグリース[10]を塗った。

[9]日本エイブルスティック社製の STYCAST 1266 (A/B)。
[10]GE 東芝シリコーン社製の TSF-451-5M:シンチレータと波長変換ファイバーのコンタクトに用いたのと同じもの。

図 2.15: 今回使用した PMT の光電面の写真 (H7415(左)、H8643MOD(中央)、H8643EGPMOD(右))

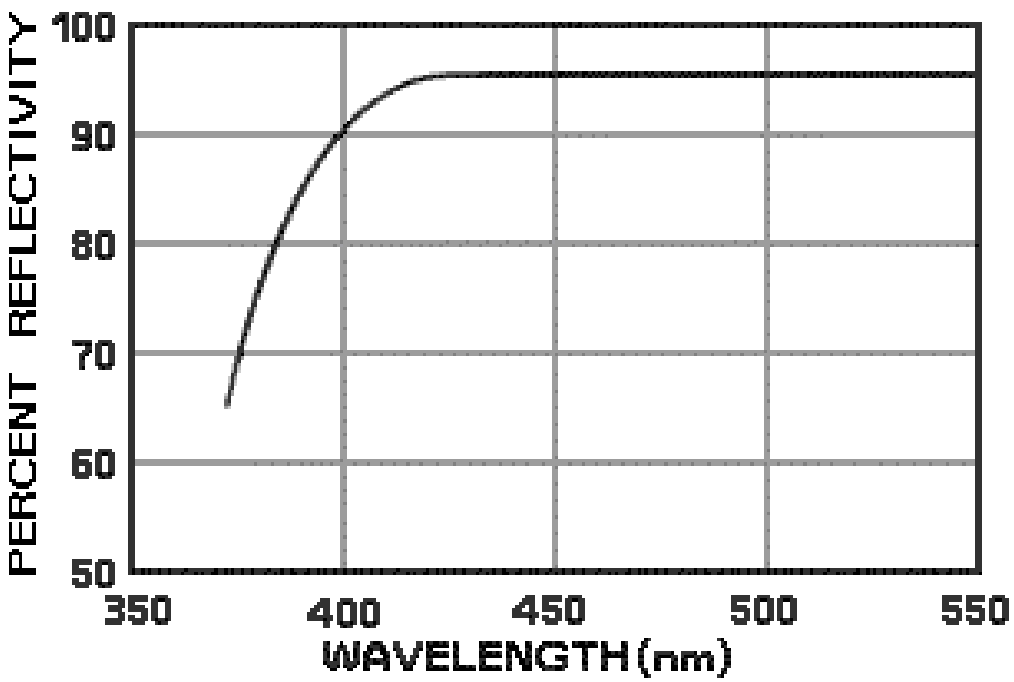

図 2.16: EJ-510 の反射率の波長属性(紫外領域で急激に反射率が悪くなる)

図 2.17: B2(200)M-S 型の端面写真:このうち中央の 5 本に PMT(H8643EGPMOD) がマウントされる

第3章　光電子増倍管の基本特性

プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器において、光量をより得るためには光検出器である光電子増倍管 (PMT) の波長変換ファイバーの発光波長域での感度 (量子効率) がより高いものを選べばよい。一般的に PMT の量子効率は紫外から青色の領域で高く緑色の領域では悪くなる。一方、波長変換ファイバー Y11(200)M-S 型の発光波長域は緑色の領域にあるのでその領域でも量子効率のあまり悪くならない PMT があれば非常に良い。今回はこの観点から、Y11 の発光波長域である緑色 (500nm 付近) で量子効率の高いとされているグリーンエクステンディッド・プリズムタイプの PMT である H8643EGPMOD を試した。
本章では、使用する各 PMT のゲインおよび量子効率の特性を知るための測定とその結果について述べる。

3.1　測定の目的

本測定の目的は、

- 1 p.e. ピークを読むことによって供給電圧に応じたゲインの測定をする。
- 同じ量の光を外部光源 (LED) を用いて入れて、その出力光量を比較することによって相対的な量子効率を知る。

の 2 点である。

3.2　測定のセットアップ

図 3.1 にセットアップの概略図を示す。図の右の四角の場所に測定対象の PMT をおいて測定する。なお、この PMT をおく場所には移動ステージが設置してあって測定対象の PMT の光電面のどのあたりに光を当てるか調製することができる。測定対象の PMT の前にはしぼり (0.6mmϕ で使う) があって光源からの光をしぼるのに用いられている。なお、光源としては波長の異なる 2 種類の LED を使用している。Reference PMT とは光源の光量を測定しモニターするためにおかれた PMT である。光源の光を Reference PMT で見るために光をハーフミラー (Half Mirror) によって分けている。

3.2.1　LED

今回測定で用いた LED は以下の通りである。

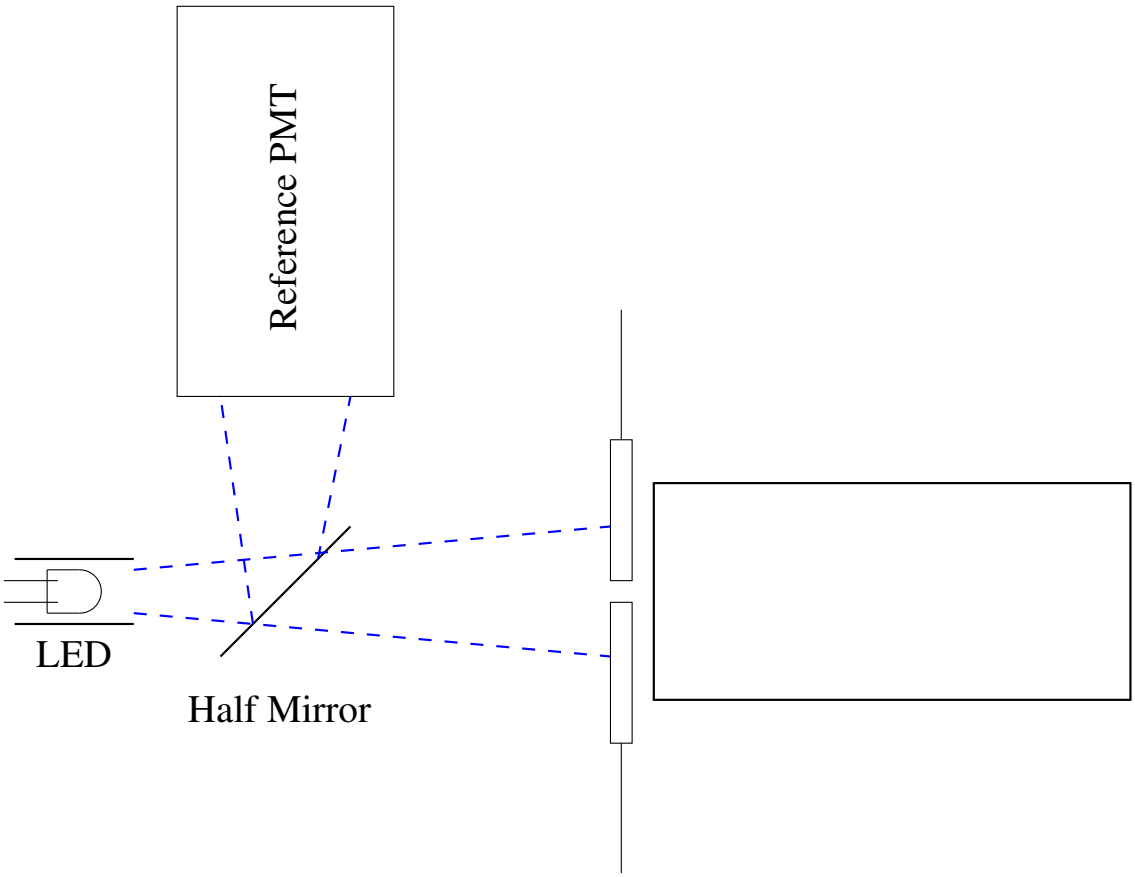

図 3.1: ゲインおよび相対量子効率測定装置のセットアップ
Reference PMT は光源の光量を測定しモニターするためにおかれている。
Half Mirror は光源の光を Reference PMT で見るためにおかれている。

NSPB500(S) NICHIA CORPORATION 社製の青色の LED。発光波長は 470nm。青色であるが、B2(200)M-S 型や一般のプラスティックシンチレータの発光よりはより緑色に近い波長域である。

NSPE500(S) NICHIA CORPORATION 社製の青緑色の LED。発光波長は 510nm。

3.3 測定の手順

測定の手順は以下の通りである。

位置の最適化 対象となる PMT を自動ステージの上におく。LED を一定光量で光らせ自動ステージを動かして、有効な光電面の範囲を調べる。その中心の場所で以下の測定を行う。

ゲイン測定 以下の手順でゲインを測定する。

1. LED の光量を測定対象の PMT で読んで 0.05 p.e 程度になるように調整する。
2. その光量で 100k トリガー分のデータをとる。 1 p.e. ピークをフィットして測定対象の PMT のゲインを求める。

相対量子効率の測定 次に以下の手順で相対量子効率を測定する。

1. 順次光量を変えていって、測定対象の PMT の ADC と光量モニター用の PMT(Reference PMT) の ADC とを読む。
2. 横軸にモニター用 PMT の ADC の値、縦軸に測定対象の PMT の光量子数 (ADC の値を先に求めたゲインで割ったもの) をとり、各光量での値をプロットする。
3. それを直線でフィットしその傾き (すなわちモニター用 PMT の ADC の値が 1 の時の測定対象の PMT の光量子数) をもとめる。ここでは、その値をその PMT の「単位光量」と呼ぶことにする。

PMT の取り換え 測定対象の PMT を取り換えて 位置最適化からもう一度順次測定する。

LED の取り換え 全ての PMT の測定が終ったら、LED を取り換えて (青色から青緑色に) 同様にすべての PMT について測定する。

ここで求めた「単位光量」の比の値が相対的な量子効率の値である。

3.4 相対的な量子効率の測定およびゲインの測定結果

表 3.1 に相対的な量子効率の測定結果および測定手順 2 で求めたゲイン[1]の値をまとめた。なお、H8643EGPMOD、および H8643MOD はゲインが低いため PMTAMP[2]をもち

[1] このときの HV の値は、H7415 は 1850V、それ以外は 1700V である。
[2] 8ch PM AMP(REPIC RPN-090)

いた。また、PMTAMP を用いるとシグナルに DC オフセットがのるため、PMTAMP の出力と ADC の間にハイパスフィルター[3]を入れた。

PMT の種類	PMT serial No.	青色 LED	青緑色 LED	ゲイン (ADC count/p.e.)
H8643EGPMOD	ZL1638	1.30±0.05	1.46±0.09	18.94±0.53
	ZL1747	1.38±0.03	1.54±0.09	15.78±0.19
	ZL1706	1.66±0.04	2.00±0.05	10.51±0.25
	ZL1751	1.23±0.02	1.15±0.03	15.62±0.19
	ZL3135	1.15±0.02	1.14±0.06	19.56±0.14
	ZL3123	1.30±0.02	1.24±0.02	9.29±0.138
H8643MOD	AA2201	1.13±0.02	1.05±0.03	15.38±0.20
	AA2202	1.19±0.03	1.03±0.05	12.11±0.14
	AA2203	1.19±0.03	1.15±0.06	10.36±0.13
	AA2204	1.11±0.02	1.01±0.05	11.23±0.15
	AA2171	1.05±0.02	1.00±0.01	13.63±0.17
H7415	LA0763	1.07±0.02	1.04±0.01	17.54±0.21

表 3.1: PMT の相対量子効率 (H7415(LA0768) を 1 とした時) およびゲイン
ゲインの値は H7415 は HV=1850V で測定したときの、H8643EGPMOD および H8643MOD については HV=1700V で PMTAMP を用いたときの値である。

3.5 結果の考察

表 3.1 から分かるように同じ H8643EGPMOD でも各 PMT によって相対的な量子効率は大きく違う。一方 H8643MOD は比較的個体差が少ない。この理由は明らかではないがプリズムタイプになると量子効率がばらつくようである[4]。

各 PMT の平均をとると H8643EGPMOD は、470nm の光で 1.15 倍、510nm の光で 1.43 倍 H7415 より量子効率が高い。同じく H8643MOD は、470nm の光で 1.15 倍、510nm の光で 1.06 倍量子効率が高い。また、同じ H7415 でも、5%程度は量子効率の差があることが分かる。
なお、次章の光量測定では H8643EGP は測定した 6 本すべてを、H8643MOD は AA2201 のみを使用している。

[3]条件を同じにするため H7415 の測定のときにもハイパスフィルターを用いている。
[4]プリズムタイプになると量子効率がばらつく理由のひとつとしては今回の測定では非常に小さなスポットサイズで測定したためプリズムのどの場所に光があたるかによって結果が左右されていると考えられるが、別途位置依存性を測定した結果では今回の測定のばらつきを説明する程ではない。

第4章　光量の測定

第2章で述べたプラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器の構成要素を組み合わせてどれくらいの光量が得られるかを知るために光量測定をおこなった。本章ではその測定および結果について述べる。

4.1　プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器の構成

第2章で述べたプラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、光電子増倍管 (PMT) を組み合わせて検出器を構成する。シンチレータの片面に 1cm 間隔で 1.6mm の深さ、幅の溝が 9 本掘られており、その全ての溝に波長変換ファイバーを埋める。よって波長変換ファイバーは合計 9 本ある。溝にオプティカルグリースを用いる場合は、グリースを塗ったのち、ファイバーを埋める。波長変換ファイバーの端面のうち片側は 9 本を束ねてクッキーに接着し、その後研磨する。そして束ね読み用の PMT をマウントする。マウント時にはオプティカルグリースをつける。もう一方の端面は、ファイバー 1 本ごとにクッキーに接着し、その後研磨する。そして 9 本のうち中央の 5 本を PMT(H8643EGPMOD) にマウントする[1]。
今回用いた PMT のシリアルナンバーおよび実際の測定のときの HV の値は表 4.1 のようである。

PMT の種類	PMT Serial No.	Value of HV(V)	本論文での呼び方
H8643EGPMOD	ZL1638	−1581	PMT(1)
	ZL1474	−1610	PMT(2)
	ZL1706	−1711	PMT(3)
	ZL1751	−1620	PMT(4)
	ZL3135	−1574	PMT(5)
	ZL3123	−1756	PMT-All
H8643MOD	AA2201	−1756	PMT-All
H7415	LA0763	−1842	PMT-All

表 4.1: 各 PMT のシリアルナンバーと HV の対応表 (PMT(1) ~ PMT(5) がファイバー毎に個別に読み出す用の PMT、PMT-All がいずれもたばね読み用の PMT)

[1] これらファイバーを一本ずつ個別に読み出す PMT は全ての測定で同じである。

4.2 測定の種類

以下の１５種類の測定を行った。この節ではすべて

プラスティックシンチレータの種類 ： 波長変換ファイバーの種類 ： PMT の種類

のように記述する。なおここであげられている PMT はすべてたばね読み側の PMT のことである。

青色発光のプラスティックシンチレータ + 緑色発光の波長変換ファイバー

- EJ-212 : Y11 : H8643EGPMOD (標準)

  プラスティックシンチレータに EJ-212、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型、光検出器にグリーンエクステンディッド・プリズムタイプの光電子増倍管 H8643EGPMOD を用いて測定した。このなかで、さらに

  - 反射材を何も塗らないもの (グリースなしを測定 (A)、グリースありを測定 (B) と呼ぶ)
  - 反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) を用いたもの (グリースなしを測定 (D)、グリースありを測定 (E))
  - 反射材としてアルミナイズドマイライラー (EJ-590/B10) を用いたもの (測定 (C))

  の測定を行った。また、反射材を塗らないもの、EJ-510 を用いたものについてそれぞれ、プラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間をオプティカルグリースで埋めるものと埋めないものそれぞれの測定を行った。

- EJ-212 : Y11 : H8643MOD

  プラスティックシンチレータに EJ-212、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型、光検出器にノーマルタイプの光電子増倍管 H8643MOD を用いて測定した (測定 (F))。このときプラスティックシンチレータは反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) が塗られておりプラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間はオプティカルグリースで埋められてある。

- EJ-212 : Y11 : H7415

  プラスティックシンチレータに EJ-212、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型、光検出器にノーマルタイプの光電子増倍管 H7415 を用いて測定した (測定 (G))。このときプラスティックシンチレータは反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) が塗られておりプラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間はオプティカルグリースで埋められてある。

- EJ-204 : Y11 : H8643EGPMOD

プラスティックシンチレータに EJ-212、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型、光検出器にグリーンエクステンディッド・プリズムタイプの光電子増倍管 H8643EGPMOD を用いて測定した (測定 (H))。このときプラスティックシンチレータは反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) が塗られておりプラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間はオプティカルグリースで埋められてある。

紫外発光のプラスティックシンチレータ+ 青色発光の波長変換ファイバー

- EJ-230 : B2 : H8643EGPMOD(標準)

  プラスティックシンチレータに EJ-230、波長変換ファイバーに B2(200)M-S 型、光検出器にグリーンエクステンディッド・プリズムタイプの光電子増倍管 H8643EGPMOD を用いて測定した。このなかで、さらに

  - 反射材を何も塗らないもの (グリースなしを測定 (Q)、グリースありを測定 (K))
  - 反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) を用いたもの (グリースなしを測定 (L)、グリースありを測定 (M))
  - 反射材としてアルミナイズド マイラー (EJ-590/B10) を用いたもの (測定 (N))

  の測定を行った。また、反射材を塗らないもの、EJ-510 を用いたものについてそれぞれ、プラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間をオプティカルグリースで埋めるものと埋めないものそれぞれの測定を行った。

- EJ-230 : B2 : H8643MOD

  プラスティックシンチレータに EJ-212、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型、光検出器に ノーマルタイプの光電子増倍管 H8643MOD を用いて測定した (測定 (O))。このときプラスティックシンチレータは反射材としてアルミナイズド マイラー (EJ-590/B10) でおおわれておりプラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間はオプティカルグリースで埋められてある。

- EJ-230 : B2 : H7415

  プラスティックシンチレータに EJ-212、波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型、光検出器に ノーマルタイプの光電子増倍管 H7415 を用いて測定した (測定 (P))。このときプラスティックシンチレータは反射材としてアルミナイズド マイラー (EJ-590/B10) でおおわれておりプラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間はオプティカルグリースで埋められてある。

押しだしプラスティックシンチレータ + 緑色発光の波長変換ファイバー

- CI(Extruded) : Y11 : H8643EGPMOD

  プラスティックシンチレータにシーアイ工業製の押し出しシンチレータ, 波長変換ファイバーに Y11(200)M-S 型, 光検出器にグリーンエクステンディッド・プリズムタイプの光電子増倍管 H8643EGPMOD を用いて測定した。このなかでさらに、

– 反射材を何も塗らないもの (測定 (I))

– 反射材として酸化チタンのペイント (EJ-510) を用いたもの (測定 (J))

の測定を行った。このときプラスティックシンチレータの溝と波長変換ファイバーの間はオプティカルグリースで埋められてある。

4.3 測定方法

4.3.1 測定装置のセットアップ

測定装置のセットアップを図 4.1、4.2、4.3 に示した。また、図 4.4 にセットアップの全体写真、および波長変換ファイバーをプラスティックシンチレータに埋め込んでいる部分の写真を載せた。

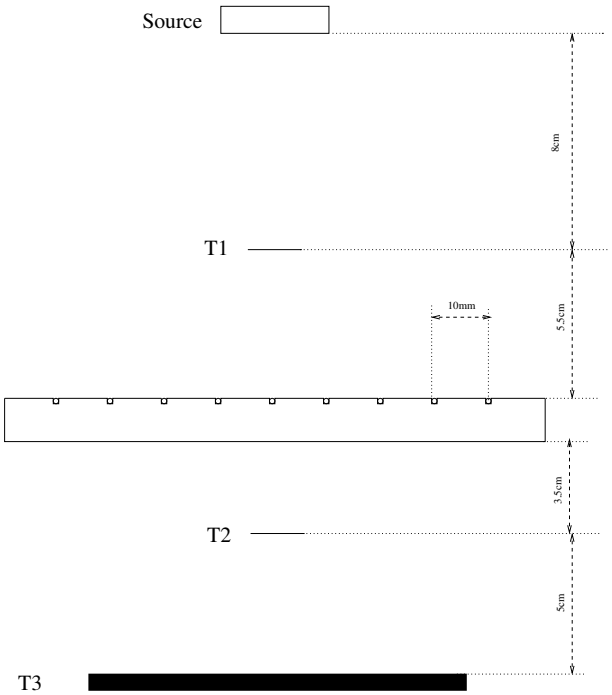

図 4.1: 測定装置のセットアップの模式図 (Side View 1)

宇宙線ミューオンで測定するときは、^{90}Sr 線源を取り除く。プラスティックシンチレータの下には遮光用の黒紙が敷かれており、プラスティックシンチレータの上部にもファイバーを溝に埋めた後、遮光用の黒紙をおく。さらにその上に、^{90}Sr 線源からの電子をコリメートするために 7mm 厚のプラスティックを図のようにおいた。これは、このコリメータがないとトリガーカウンターを通る電子よりずっと多くの電子がプラスティックシンチレータに照射されることになり、たばね読み PMT のレートが著しく上昇してしまうからである。第 3 章で述べたように今回用いた PMT はゲインが低く、PMTAMP を用いた。今回用いた PMTAMP の出力には DC オフセットがのるため、PMTAMP の出力と ADC の

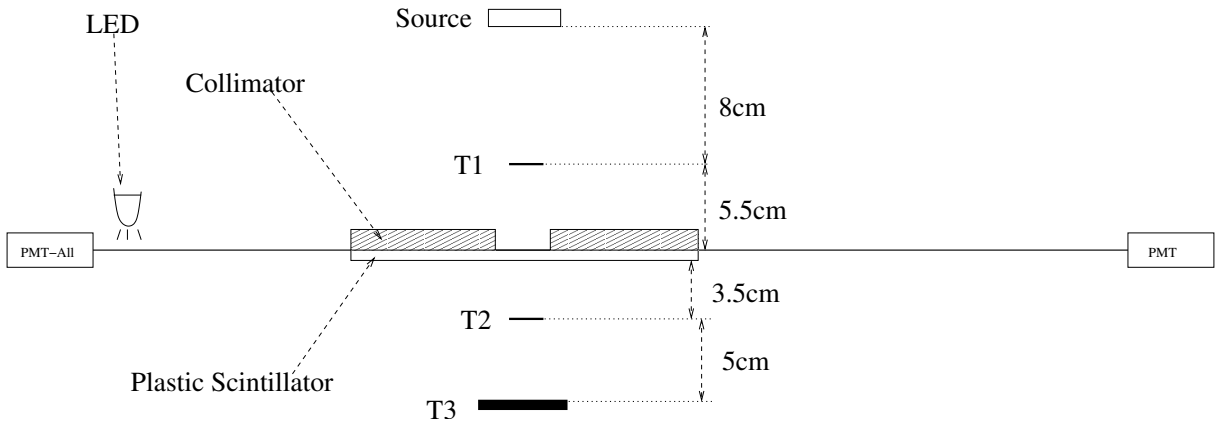

図 4.2: 測定装置のセットアップの模式図 (Side View 2)

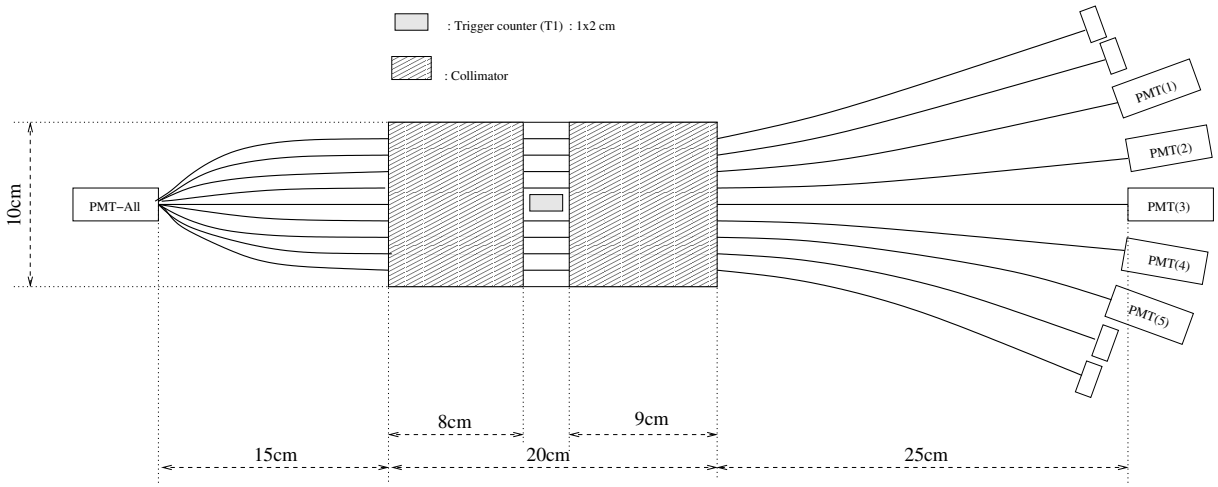

図 4.3: 測定装置のセットアップの模式図 (Top View)

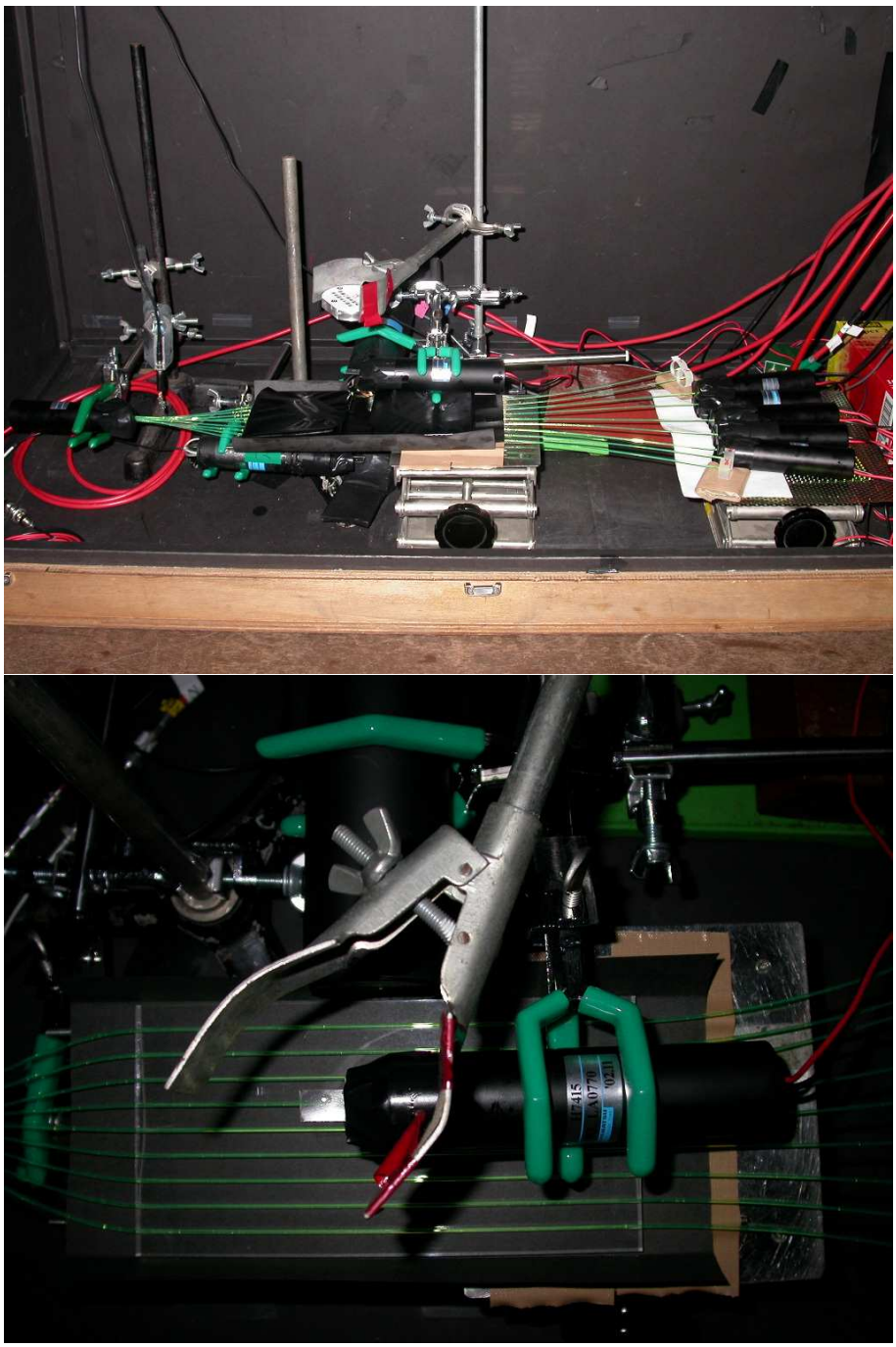

図 4.4: 光量測定の測定装置のセットアップの全体写真 (上) および波長変換ファイバーをプラスティックシンチレータに埋め込んでいる部分の写真 (下)(実際の測定はこの上に黒紙とコリメータがおかれる)

間にハイパスフィルターを入れた。そのため、レートが高くなると、ハイパスフィルターの減衰時間内に次のイベントがきてしまい、結果としてペデスタルがマイナス側にテールを引くようになる。よって、問題のない程度までレートを落す必要があったためコリメータを置くこととした。
また、各 PMT のゲインを知るとともに測定中のゲインの変化をモニターするため LED を図のように設置した。
プラスティックシンチレータの中心 (すなわちトリガーカウンターのある位置) からたばね読み PMT(PMT-All) までの距離は 25cm、各ファイバー毎に読み出す PMT(PMT(1) から PMT(5)) までの距離は 35cm である。その距離分だけ、光はファイバーの中を伝搬することになる。

4.3.2 トリガーカウンターについて

本測定では、3 つのトリガーカウンターを用いた。それらを上から T1、T2、T3、と呼ぶことにする。

T1 および T2 10mm×20mm×0.2mm のごく薄いシンチレータを 1-1/8 inch のノーマルタイプの PMT である H7415 にマウントしたものである。ごく薄いシンチレータを用いた理由は、第 4.6 節で説明する。

T3 50mm×70mm×5mm のプラスティックシンチレータを 2 inch のノーマルタイプの PMT である H1161 にマウントしたものである。

4.3.3 データ収集系およびそのトリガーロジック

図 4.5 に本測定におけるデータ収集系の概略を示した。トリガーは基本的に 3 つのトリガーカウンターのコインシデンス信号 (Coin A) によって作られ、それが、ADC のゲート、TDC のスタート信号となる。また、コインシデンス条件をゆるめたトリガーでもデータをとるために「Coin B」、「Coin C」、「Coin D」も用意しコインシデンスユニット「E」でトリガーの種類をまぜたり選んだり出来るようになっている。「F」もコインシデンスユニットでトリガーカウンターからのトリガーと LED を光らせるタイミングを与えている「Clock Generator」からのトリガーををまぜるのに用いている。なお、^{90}Sr 線源を用いた測定では、トリガーは「Coin A」と「Clock Generator」からのトリガーをまぜており、宇宙線ミューオンを用いた測定では、「Coin A」、「Coin B」、「Coin C」、「Coin D」および「Clock Generator」からのトリガーをまぜて使っている。「Input Resister」はそれらのどのトリガータイプであったかを知るために用いた。

4.4 測定手順

測定の手順は次の通りである。

1. プラスティックシンチレータの溝にオプティカルグリスを塗る測定の場合はあらかじめ塗ったものを準備する。

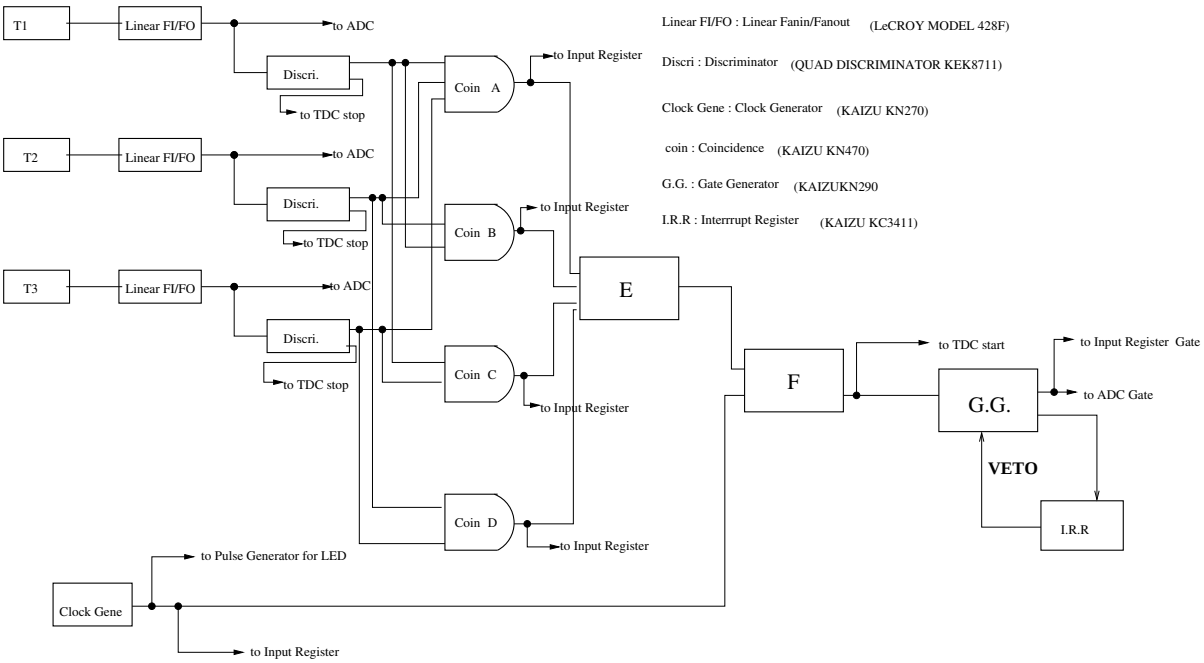

図 4.5: 測定のデータ収集系およびトリガーロジック
T1、T2、T3 を組み合わせたコインシデンスでトリガーをつくる。
図で E、F はコインシデンスユニットでトリガーの種類を選んだりまぜたりするのに用いている。また、Input Register はトリガーの種類を知るために用いている。

2. プラスティックシンチレータ用のフォルダーの上に遮光用の黒紙を置き、その上にシンチレータを載せる。次にファイバーを溝に埋めて行く。このとき、気泡を端に追い込むようにして埋めて行く。

3. アルミナイズドマイラーをまく場合はシンチレータの上面部分のアルミナイズドマイラーをおく[2]。

4. その上に遮光用の黒紙をおき、その上にコリメータをおく。

5. 暗箱をしめ、PMT の HV を on にする。

6. トリガーをクロックでかけて ADC のペデスタルのデータを取る。

7. 同じくトリガーをクロックでかけて、そのタイミングで LED を光らせてファイバーを照らす。LED の光量を PMT の 1 p.e. ピークが見えるぐらいに調整してデータを取る。それを全 PMT(6 本) 分順番に取る。このデータでこの測定時の PMT のゲインを知ることができる。

8. トリガーを T1・T2・T3 のコインシデンスに切替えて、データを取る。イベント数は 20k イベント (またはそれ以上) 取った[3]。

[2]この場合下面部にはあらかじめアルミナイズドマイラーをシンチレータにまいておく。
[3]イベントレートは代表的なもので 3Hz ぐらいなので 2 時間程度でとり終る。

9. もう一度クロックでトリガーをかけて、LED を光らせて、もう一度各 PMT のゲインを測定する。

10. 暗箱を開けて、シンチレータを取り出し、次の測定にうつる。

11. PMT を取り換える場合は、プラスティックシンチレータ等はそのままにして束ね読みの PMT のみ取り換える。また、波長変換ファイバーを取り換える場合は、プラスティックシンチレータを取り出した上で、全ての PMT をファイバーのクッキーから取り外して、ファイバーを入れ換え、その後すべての PMT をもう一度マウントして、そののち、シンチレータを置いて上記の測定順で測定をはじめる。

4.5 データ解析の手順

以下の手順で光量測定のデータ解析を行った。

1. 各 PMT について LED でごく小量の光をいれた測定のデータから 1 p.e. ピークを読んでゲインをもとめる。代表的な 1 p.e. ピークの例を図 4.6 にのせる。このとき 1 p.e. ピークをガウス分布でフィットし、そのときの誤差と、本測定の前後の LED でのゲイン測定でのずれ、およびフィット範囲を変えたときのフィットの MEAN のずれを系統誤差として、その足し合わせたものをゲインの誤差とした。

2. 各トリガーカウンターの TDC 分布のピークをガウス分布でフィットする。ある測定セットでの 3 つのトリガーの TDC 分布を図 4.7 にのせる。

3. T2、T3 についてフィットした TDC 分布のピークから± 1σ のイベントを取り出す。

4. 残ったイベントの ADC の MEAN を求めたゲインで割って p.e. 数を求める。

5. 光量の誤差は、統計誤差と 1 p.e ピークを読みとるときの系統誤差を足し合わせたものである。

4.6 ^{90}Sr 線源を用いた場合と宇宙線ミューオンを用いた場合の差

本研究では、全ての測定は ^{90}Sr 線源を用いて行った。^{90}Sr 線源を用いる以外の方法として

- 宇宙線ミューオンを用いる
- パイオンまたは電子ビームを用いる

が考えられる。これらと比べて ^{90}Sr 線源を用いる場合の利点は

- ビームを用いる場合はビームテストを行える場所に移動しなければならず、またビームタイムも通常限られているため一度測定をして結果を考察し再び条件を変えるなどして測定をするということを行うのが極めて困難である。それに対し、^{90}Sr 線源

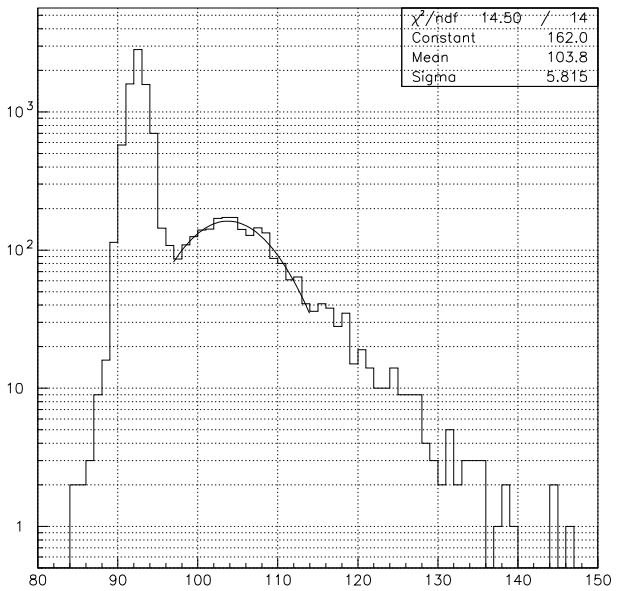

図 4.6: 典型的な 1 p.e ピークの例

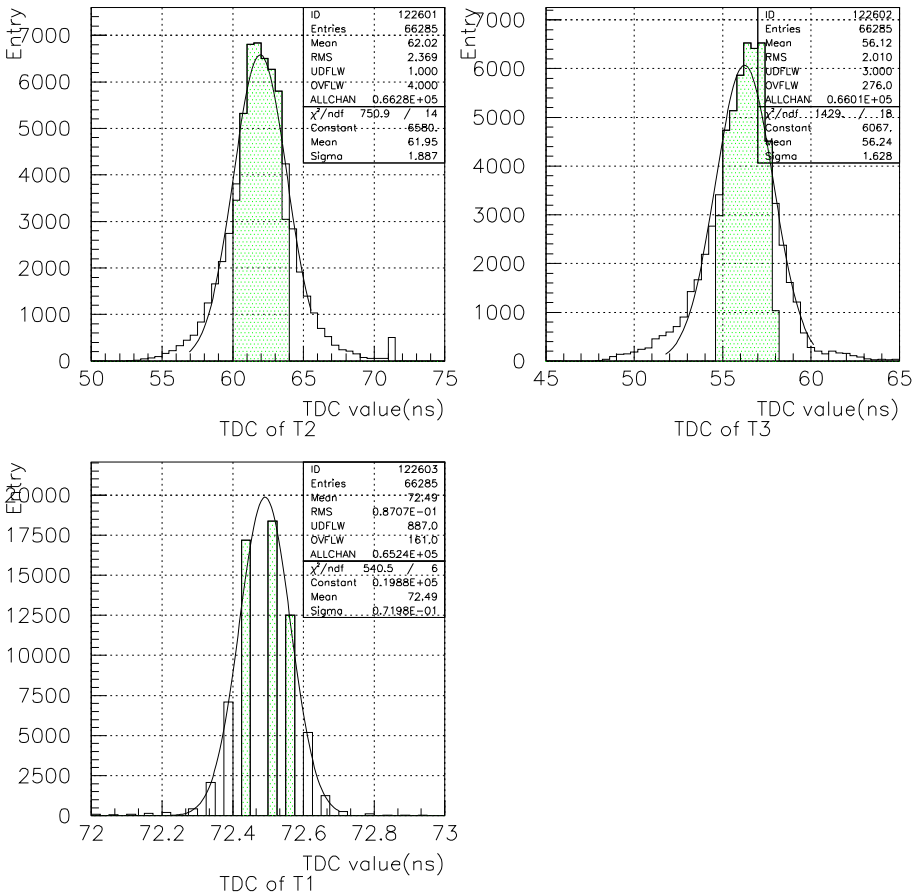

図 4.7: 各トリガーカウンターの TDC 分布

を用いれば実験室で簡易に行えるため、何度も測定、考察、フィードバックをかけるという行為が可能である。したがって、簡易にさまざまなパラメータを変えて何度も測定を行うことができる。

- 宇宙線ミューオンを用いる場合は ^{90}Sr 線源を用いる場合と同じように実験室で簡易に行えるが数が非常に少ないため十分な統計量を貯めるには非常に長い時間がかかる。とくに、今回のように粒子を当てる面積を 2 cm^2 のように狭い領域に限定する場合はなおさらである。よって、宇宙線ミューオンを用いる場合はいろいろなパラメータを変えて測定することは困難である。それに対し ^{90}Sr 線源を用いれば数は宇宙線ミューオンの数百倍[4]あるため、パラメータを変えて測定することは容易であり、かつ、測定し考察をし、そのフィードバックをかけてまた測定するということが可能である。

などがある。逆に欠点としては、

- ^{90}Sr 線源から来る電子は低エネルギーの電子のため、トリガーカウンターでのエネルギー損失が無視できず、測定対象となるプラスティックシンチレータをつき抜ける粒子が非常に少なくなってしまう。

- ^{90}Sr 線源からくる電子は低エネルギーの電子のため、多重散乱を起こしやすくまっすぐつき抜けていない粒子を測定してしまう可能性がある。そのため通過位置のばらつきが大きくなりシンチレータ内の光の分布をみるには誤差が大きくなる。

- ^{90}Sr 線源から来る電子は宇宙線ミューオンなどのつき抜けの粒子と比べてシンチレータに落すエネルギーが大きめである。

などがある。
上記の 1 番目の点については、4.3.2 節で述べたように 0.2mm 厚というごく薄いシンチレータでトリガーカウンターを構成することによって回避した。また、3 番目の点については、本研究の範囲内で ^{90}Sr 線源での測定が 宇宙線ミューオンを用いた場合との差を把握するためシミュレーションをおこなった。また、測定 (E)(EJ-212、Y11、H8643EGPMOD、反射材 EJ-510、オプティカルグリース使用) と同じセットで宇宙線ミューオンを用いて測定を行った。
なお 2 番目の点については第 5 章で述べる。

4.6.1 シミュレーションの結果

シミュレーションは、GEANT3 を用い以下の手順で行った。

1. Table of Isotope より ^{90}Sr のエネルギースペクトルを調べ、、その中で 1.4MeV、1.6MeV、1.8MeV、2.0MeV、2.2MeV のイールド数をもとめる。(図 4.8 参照)

[4] ^{90}Sr 線源については本測定の代表的なトリガーレートの値を、宇宙線ミューオンについては一般的に知られている 1cm^2 あたり毎分 1 個という値を用いた。

2. 1.4MeV、1.6MeV、1.8MeV、2.0MeV、2.2MeV の電子をそれぞれ 10^6 個入射し、つき抜けた事象 (ここでは、T3 に少しでもエネルギーを落した場合をつき抜けた事象とした) がプラスティックシンチレータで落すエネルギーの分布をもとめた。それを図 4.9 に示す。

3. こうして求めたエネルギー分布を 1 番目で求めたイールドの重みをかけて足し合わせた。それが図 4.10 の上のグラフである。

4. 宇宙線ミューオンについては、1GeV のミューオンを入射して、プラスティックシンチレータで落すエネルギー分布を求めた。それが、図 4.10 の下のグラフである。

図 4.10 からわかるように、^{90}Sr 線源の落すエネルギーは宇宙線ミューオンの落すエネルギーに比べて、10%程度大きい。
よって、本測定でもとめる光量は、宇宙線ミューオンなどのつき抜け粒子のときの光量と比べて 10%程度大きな値となると予想される。

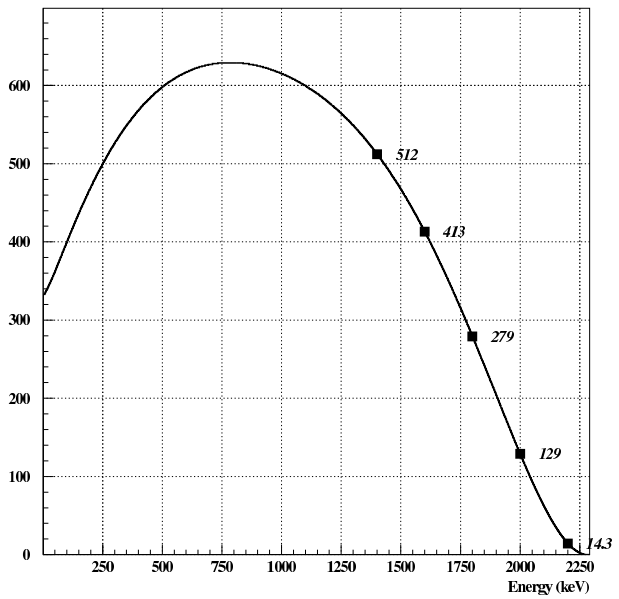

図 4.8: ^{90}Sr 線源のエネルギースペクトラム

4.6.2 宇宙線ミューオンを用いた測定の結果と ^{90}Sr 線源を用いた場合との比較

図 4.11 に宇宙線ミューオンを用いた測定と ^{90}Sr 線源を用いた測定でのたばね読みでの ADC 分布である。宇宙線のデータの統計量が少ないため詳しいことはいえないが、モンテカルロシミュレーションの結果である 10%程度 ^{90}Sr 線源の方が落すエネルギーが大きいというものとほぼ一致している。

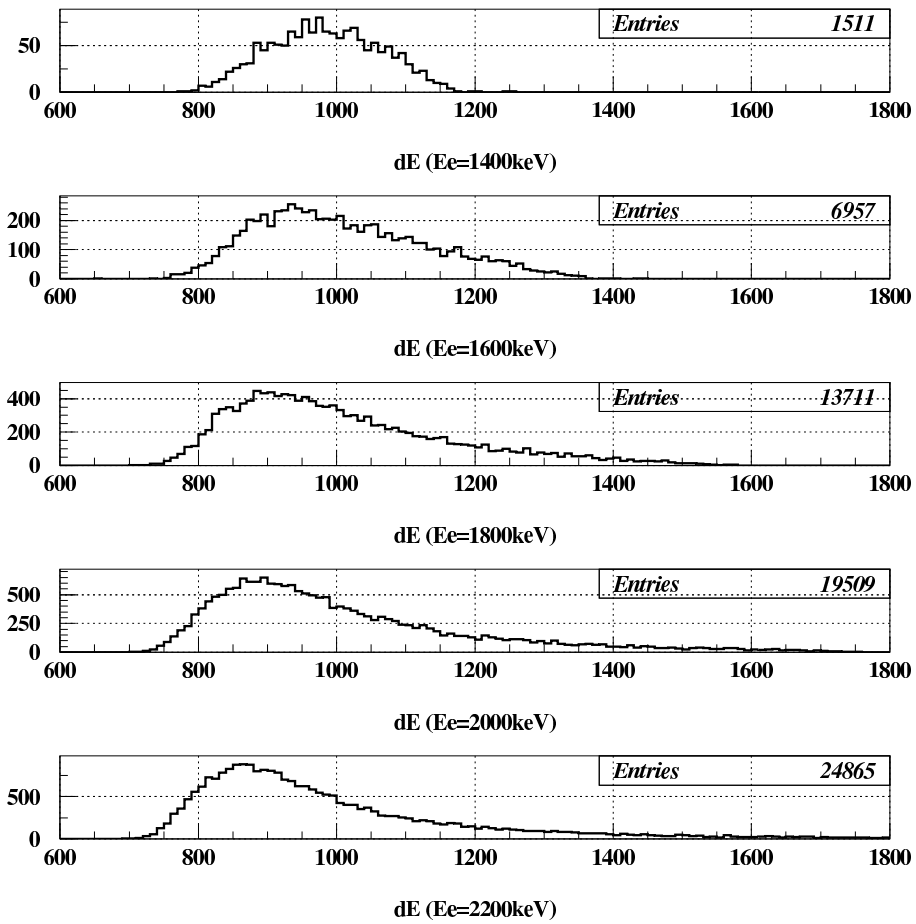

図 4.9: 1.4MeV、1.6MeV、1.8MeV、2.0MeV、2.2MeV の入射電子がおとすエネ ルギーのモンテカルロシミュレーション (横軸の単位は [keV])

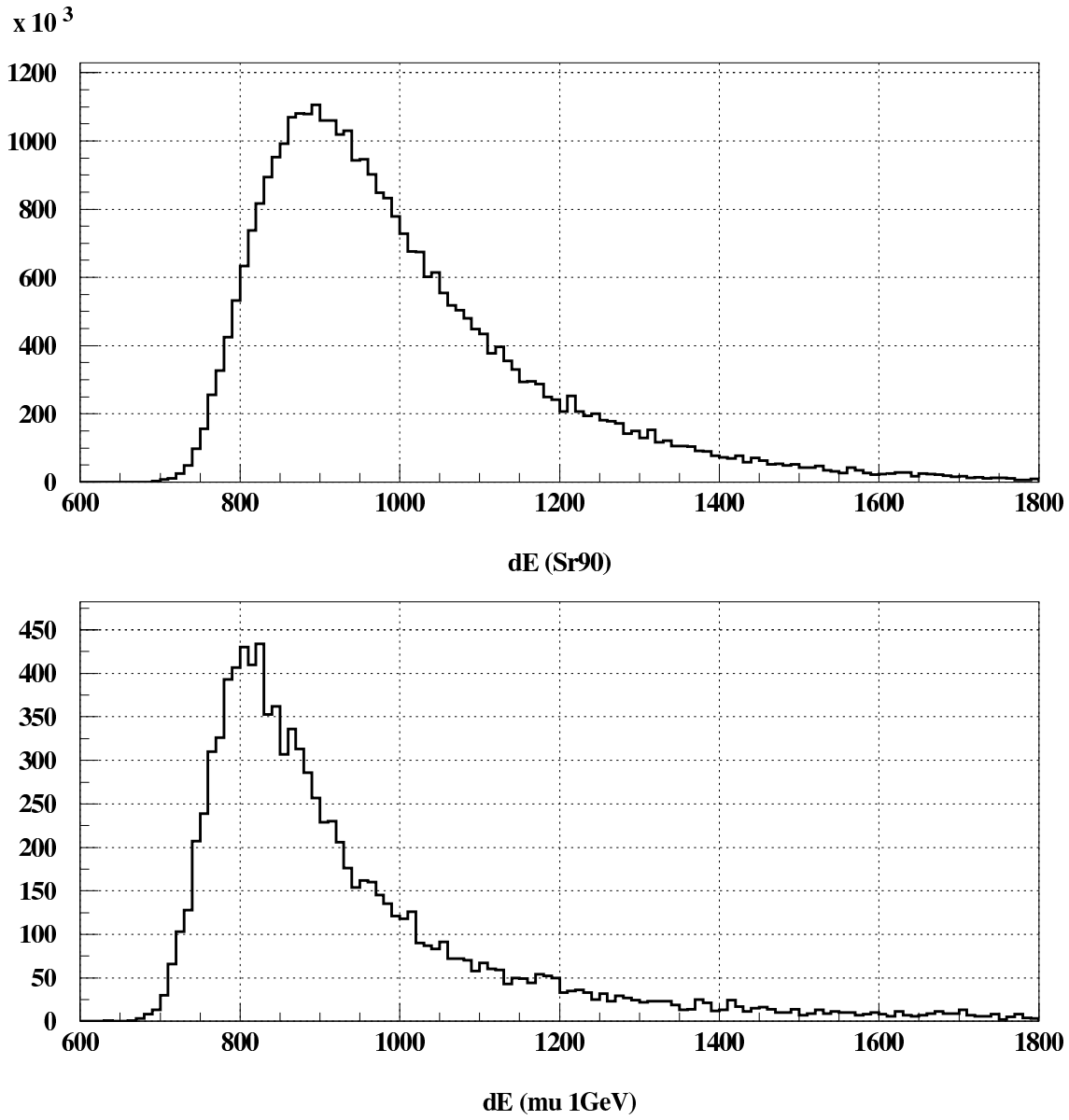

図 4.10: ^{90}Sr 線源 (上) と宇宙線ミューオン (下) のシンチレータに落すエネルギーのモンテカルロシミュレーション (横軸の単位は [keV])

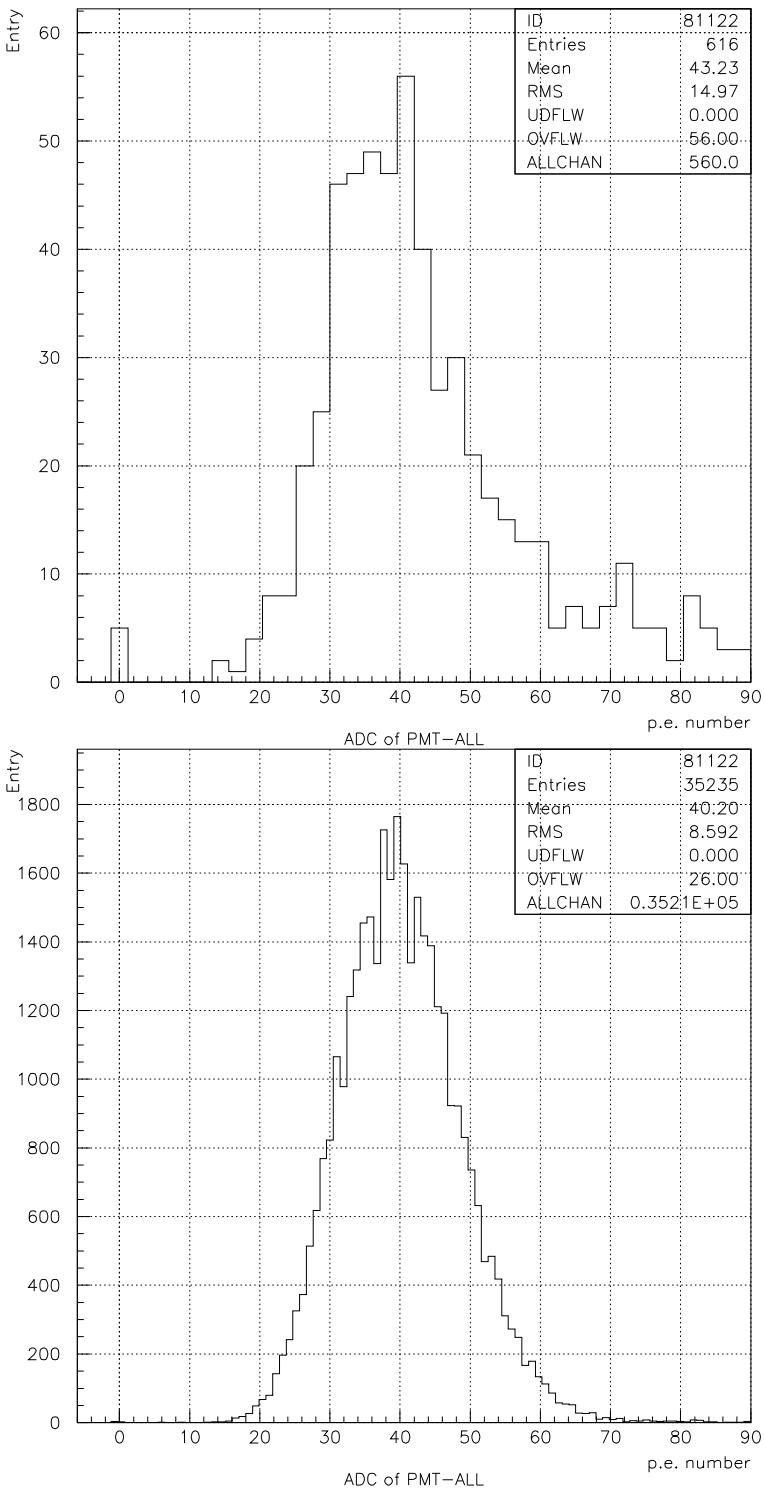

図 4.11: 宇宙線ミューオンを用いた測定 (上) と ^{90}Sr 線源を用いた測定 (下) でのたばね読みでの ADC 分布

4.7　測定結果および考察

4.7.1　測定結果

図 4.12 は、測定 (E)(EJ-212 : Y11 : H8643EGPMOD : TiO2 反射材ペイント : グリースあり) でのトリガー TDC カット後の束ね読み (H8643EGPMOD:ZL3123) の ADC 分布である。ペデスタルは引かれてあり、横軸は先に 1p.e. のピークから求めたゲインの値を用いて p.e. 数になおしてある。誤差は統計誤差と 1 p.e. を読むときの誤差を合わせたものである[5]。

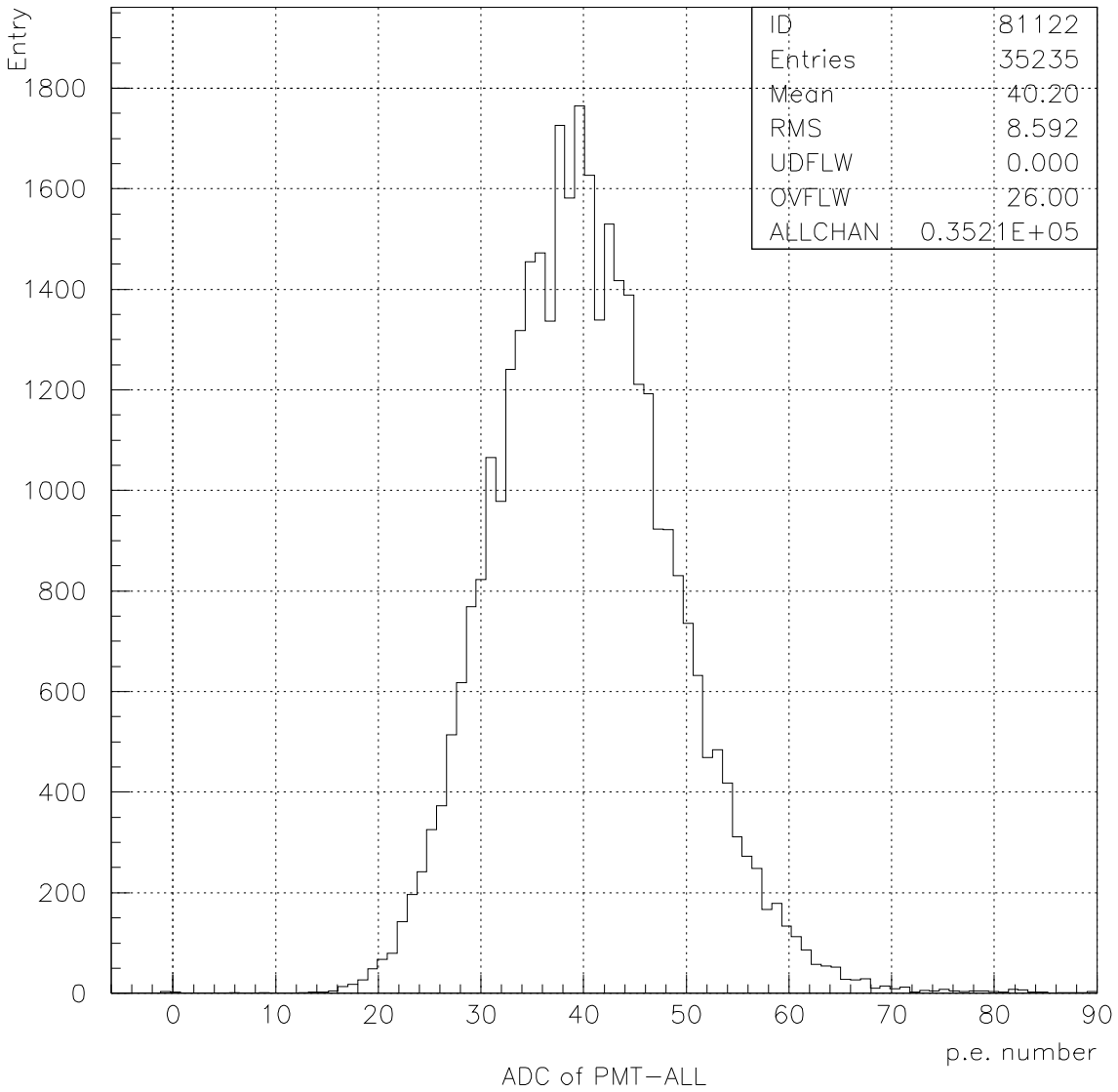

図 4.12: 測定 (E)(EJ-212 : Y11 : H8643EGPMOD : TiO2 反射材ペイント : グリースあり) でのたばね読みの ADC 分布 (全データのうち一部を取り出したもの)

[5]誤差の大きいものは PMT のゲインのふらつきが測定中に大きかったものである。

他の測定でも同様にして光量を求めた。結果を表 4.2 にまとめた。

測定名	シンチレータ	反射材	グリース	PMT	光量
(A)	EJ212	なし	なし	H8643EGPMOD	21.3±0.7
(B)	EJ212	なし	あり	H8643EGPMOD	33.7±1.1
(C)	EJ212	アルミマイラー	あり	H8643EGPMOD	46.2±1.6
(D)	EJ212	酸化チタン	なし	H8643EGPMOD	32.8±1.1
(E)	EJ212	酸化チタン	あり	H8643EGPMOD	40.0±0.5
(F)	EJ212	酸化チタン	あり	H8643MOD	37.1±0.2
(G)	EJ212	酸化チタン	あり	H7415	31.0±0.4
(H)	EJ204	酸化チタン	あり	H8643EGPMOD	37.3±1.3
(I)	CI(Extruded)	なし	あり	H8643EGPMOD	18.1±0.6
(J)	CI(Extruded)	酸化チタン	あり	H8643EGPMOD	26.0±0.7
(K)	EJ230	なし	なし	H8643EGPMOD	24.5±1.5
(L)	EJ230	酸化チタン	なし	H8643EGPMOD	12.9±0.3
(M)	EJ230	酸化チタン	あり	H8643EGPMOD	20.2±0.5
(N)	EJ230	アルミマイラー	あり	H8643EGPMOD	56.7±2.0
(O)	EJ230	アルミマイラー	あり	H8643MOD	48.8±0.8
(P)	EJ230	アルミマイラー	あり	H7415	49.7±2.5
(Q)	EJ230	なし	あり	H8643EGPMOD	40.6±1.0

表 4.2: 光量測定の結果 (全てたばね読み (ファイバーの片側読みだし) の結果)

4.7.2 まとめと考察

光量測定の結果より得られることをここにまとめる。

Y11(200)M-S 型を用いたときの PMT の違いによる光量の差

測定 (E)、(F)、(G) の比較により、Y11(200)M-S 型で読みだしたときの光量は、PMT に H8643EGPMOD(ZL3123) を用いると H7415 の 1.3 倍、H8643MOD(AA2201) を用いると H7415 の 1.2 倍となる。これによって、Y11(200)M-S 型の発光を 25 cm の距離でみたときの発光波長では、グリーンエクステンディッド・プリズムタイプの PMT である H8643EGPMOD ではノーマルな光電面の H7415 より 1.3 倍量子効率が高いことがわかる。また、H8643MOD も H7415 に比べると少し (1.2 倍) 緑色側の量子効率が高いことがわかる。これは、第 3.4 節で測定した LED を用いた相対的量子効率の結果 (H8643EGPMOD は 470nmLED で 1.2 倍、510nmLED で 1.2 倍、H8643MOD は 470nmLED で 1.1 倍、510nm-LED で 1.0 倍) とは一致しない。この理由としては第 3.4 節では光電面の非常に狭い範囲に光を当てて (光をしぼって) 測定したのに対し、波長変換ファイバーのたばね読みの場合約 5mmϕ 程度の範囲に光があたっている上、その場所と相対量子効率測定で光を当てた場所とは必ずしも一致していない可能性があることが考えられる。また、ファイバーから

の光はファイバー内を全反射して伝わってくるので最大３０度程度の角度をもって入射するのに対し、LED の光は直線的に入射するので、実質的な量子効率には差がでる可能性も考えられる。

B2(200)M-S 型を用いたときの PMT の違いによる光量の差

測定 (N)、(O)、(P) の比較により、B2(200)M-S 型で読みだしたときの光量は、PMT に H8643EGPMOD を用いると H7415 の 1.15 倍、H8643MOD を用いると H7415 とほぼ同量となる。これによって、B2(200)M-S 型の発光を 25cm の距離でみたときの発光波長 (すなわち一般的なプラスティックシンチレータやシンチレーティングファイバーの発光波長と同じ波長) では、H8643MOD も H7415 も同程度の量子効率をもつことがわかる。また、プリズムタイプの H8643EGPMOD は、この波長領域でもノーマルタイプの光電面に比べて 1.15 倍量子効率が高い。

EJ-212 と EJ-204 との比較

EJ-212 より EJ-204 の方が若干発光量が多いとされているが、測定 (E)、と測定 (H)、を比較すると、EJ-204 の方が若干少ない。これは、波長変換ファイバーとの相性によるものと考えられる。

CI(Extruded) の発光量

測定 (E) と測定 (J) を比べると CI(Extruded) シンチレータの発光量は、EJ-212 の 65%程度である。これは、発光量そのものがすくない可能性があるほか、シンチレータ内での減衰長の短さ、シンチレータの発光波長と Y11 の吸収波長との整合性、等さまざまな要因が考えられる。

EJ-212(通常のシンチレータ) と Y11 を組み合わせる場合と EJ-230(紫外発光のシンチレータ) と B2 を組み合わせる場合の比較

EJ-212 でもっとも光量のでたのは測定 (C) の 46.2 p.e. で、EJ-230 でもっとも光量のでたのは測定 (N) の 56.7 p.e. である。よって、今回用いたサイズの検出器では紫外発光のプラスティックシンチレータと B2(200)M-S 型波長変換ファイバーを組み合わせるほうが光量を稼ぐことが出来ることがわかる。しかし、大型の検出器を作る場合には波長変換ファイバーの減衰長も問題になってくる。一般的には青色光のほうが緑色光よりも減衰が短いとされているのでどちらが良いかはその検出器のサイズによることになる。しかし、クラレ社によると B2(200)M の減衰長は B2 に混ぜ込まれている第 2 蛍光材である SCSF81 できまり、クラレのデータシート [3] によれば、シンチレーティングファイバー SCSF81 の減衰長は 3.5m 以上となっている。一方 Y11(200)M の減衰長は K2K 実験における Scibar 検出器の建設のために測定されており [7] それによると減衰長は 3.5m 程度である。また、クラレのデータシートには Transmission loss のデータもあり (図 2.7、および図 2.10 参

照)、それによるとY11とB2の伝搬する光の波長域では減衰の量はあまりかわらないようである。よってY11とB2を比較した場合には、減衰長はあまり差がない可能性がある。これは、今後測定するべき課題である。

反射材の効果 (EJ-212 の場合)

測定 (C) と測定 (B) の比較によりアルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) を用いると何も用いない場合と比べて、1.4 倍になる。また、測定 (E) と測定 (B)、測定 (D) と測定 (A) の比較により、反射材として酸化チタンのペイント (BJ-510) を用いた場合、グリースがあるときは、1.2 倍、ないときは 1.5 倍となる。グリースのあるなしによって光量の増え方が違うのは、グリースがある場合にはシンチレーション光が 波長変換ファイバーに十分入りやすいため、反射を重ねたのちファイバーに到達するという光があまりないためと考えられる。つまり、まだまだ光量が増える余地がある場合は反射材の効果は十分あるものの、他の作用 (今の場合はオプティカルグリースのあるなし) によってすでに光量が増やされている場合には、その効果は限定的になる。したがって、今回の測定条件ですでに集めることができる光の多くの部分を集められていると予想できる。実際、今回プラスティックシンチレータに 5mm 幅で溝を 9 本きった (つまりプラスティックシンチレータの中央に 9 本の溝が集まっているタイプの) プラスティックシンチレータ (大きさは、10mm のものと同じ) での光量も別途測定したが、その光量は、10mm 幅で溝をきったものとたばね読みではほぼ同じであり、ファイバー毎に読み出しているPMTでは、10mm 幅のプラスティックシンチレータの場所が対応するファイバーの光量とくらべて、どのファイバーでも光量は減少していた。これは、光は既に十分に集められてより、ファイバー間にさらにファイバーを置いても全体の光量はもはやあまり増加しないことを示している。また、液体シンチレータの波長変換ファイバーよみだしの結果ではあるが、[8] によると 2.3cm×2.3cm×50cm のセルに 2 本の波長変換ファイバーを入れた場合は 1 本を入れた場合の 0.8 倍にしかならないという結果もある。

反射材の効果 (EJ-230 の場合)

測定 (L) からわかるように、酸化チタンの反射材は、紫外光を反射することができず、むしろ吸収し光量を減少させている。アルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) を反射材として用いると光量は何も用いないときと比べて 1.4 倍に増える。これは、EJ-212 の場合とほぼ同程度である。

オプティカルグリースの効果

測定 (E) と測定 (D)、測定 (B) と測定 (A)、測定 (M) と測定 (L)、測定 (K) と測定 (Q)、をそれぞれ比較すると光量は、1.2 倍、1.6 倍、1.6 倍、1.7 倍となる。よって、反射材がないか、あっても機能していなくて光量が増える余地が十分にある場合は、約 1.6 倍に増えることがわかる。また、EJ-212 で反射材があるときは、約 1.2 倍増える。

もっとも光量の多い組み合わせ

たばね読み (つまり波長変換ファイバーの片側読みだし) でもっとも光量のでる組み合わせは、測定 (N) の組み合わせ、すなわち、プラスティックシンチレータに EJ-230、波長変換ファイバーに B2(200)M-S 型を用い、プラスティックシンチレータの溝とと 波長変換ファイバーの間にはオプテイカルグリースを埋め、反射材としてはアルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) を用いる場合である。このときの値、56 p.e./5mm 厚は、単純に計算すると 11p.e /1mm 厚であり、これはシンチレータの厚さをまだまだ薄くできうることを示している。プラスティックシンチレータを薄くできるということは重要である。例えばシンチレータに落すエネルギーが非常に少ない粒子 (例えば、π^- が短い距離を進んだ後原子核に吸収されるような場合) をとらえることが必要な場合、そのエネルギーを検出しつつ、つき抜け粒子のような大きなエネルギーを測定できなければならない。その場合検出器のダイナミックレンジが問題となるため、プラスティックシンチレータはできる限り薄く、かつ必要な光量は得られるようにしておかなくてはならない。このような場合はシンチレータの厚さをなるべく薄くする必要がある。

第5章　プラスティックシンチレータ内での光の広がり

4.1 節で説明したように本測定では波長変換ファイバーの片側には 5 本の光電子増倍管 (H8643EGPMOD) をファイバー 1 本 1 本にマウントしてファイバー毎に光量を読みだした。これらによって、荷電粒子がプラスティックシンチレータを通過したときに発生するシンチレーション光がプラスティックシンチレータ内でどのように広がるかをみることができる。

図 5.1 に測定 (E) での各 PMT の ADC の分布を示した。横軸はたばね読みのときと同様に、あらかじめ LED で光を入れて 1 p.e. ピークを読みとってゲインをもとめておいて、ADC の MEAN の値をそのゲインで割って求めた p.e. 数に直してある。

また、図 5.2 に同じ測定 (E) での光量の分布を示した。

5.1　宇宙線ミューオンを用いた場合と ^{90}Sr 線源を用いた場合の比較

まず最初に、光量測定のときと同じように宇宙線ミューオンを用いたときと ^{90}Sr 線源を用いたときでの光の広がりの差を知るため、図 5.3 に宇宙線ミューオンを用いて測定したときと ^{90}Sr 線源を用いて測定したときのシンチレータの光の分布のグラフをのせた。なお、このときの測定セットは、プラスティックシンチレータが EJ-212、波長変換ファイバーが Y11(200)M-S 型、PMT が H8643EGPMOD、酸化チタンの反射材 (EJ-510) およびオプティカルグリースを使用した。これらのグラフより分布の RMS を読んでこれを広がりをあらわす指標としてもちいる。その結果を表 5.1 にまとめた。これからわかるように、光の広がりに差はほとんどない。

	宇宙線ミューオン	^{90}Sr 線源
RMS の値 [cm]	1.187	1.168

表 5.1: 宇宙線と ^{90}Sr 線源とのシンチレータ内での光の広がりの比較

5.2　シンチレータの違いによる光の広がりの比較

図 5.4 に EJ-212(測定 (E))、EJ-204(測定 (H))、EJ-230(測定 (N))、CI(測定 (J)) シンチレータの光の分布のグラフを載せた。

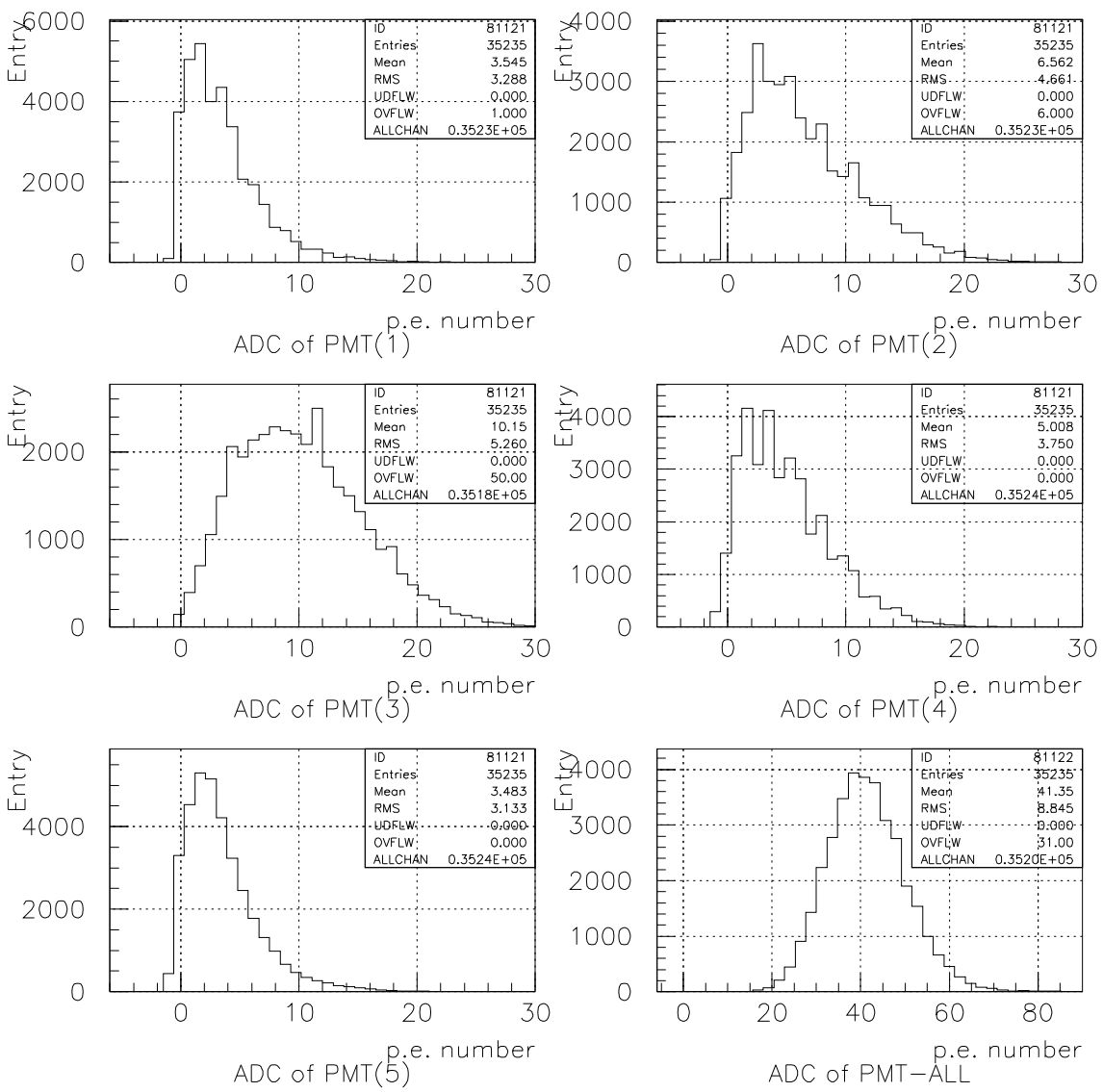

図 5.1: 各 PMT の ADC 分布 (EJ-212、酸化チタン反射材 (EJ-510)、グリースあり)

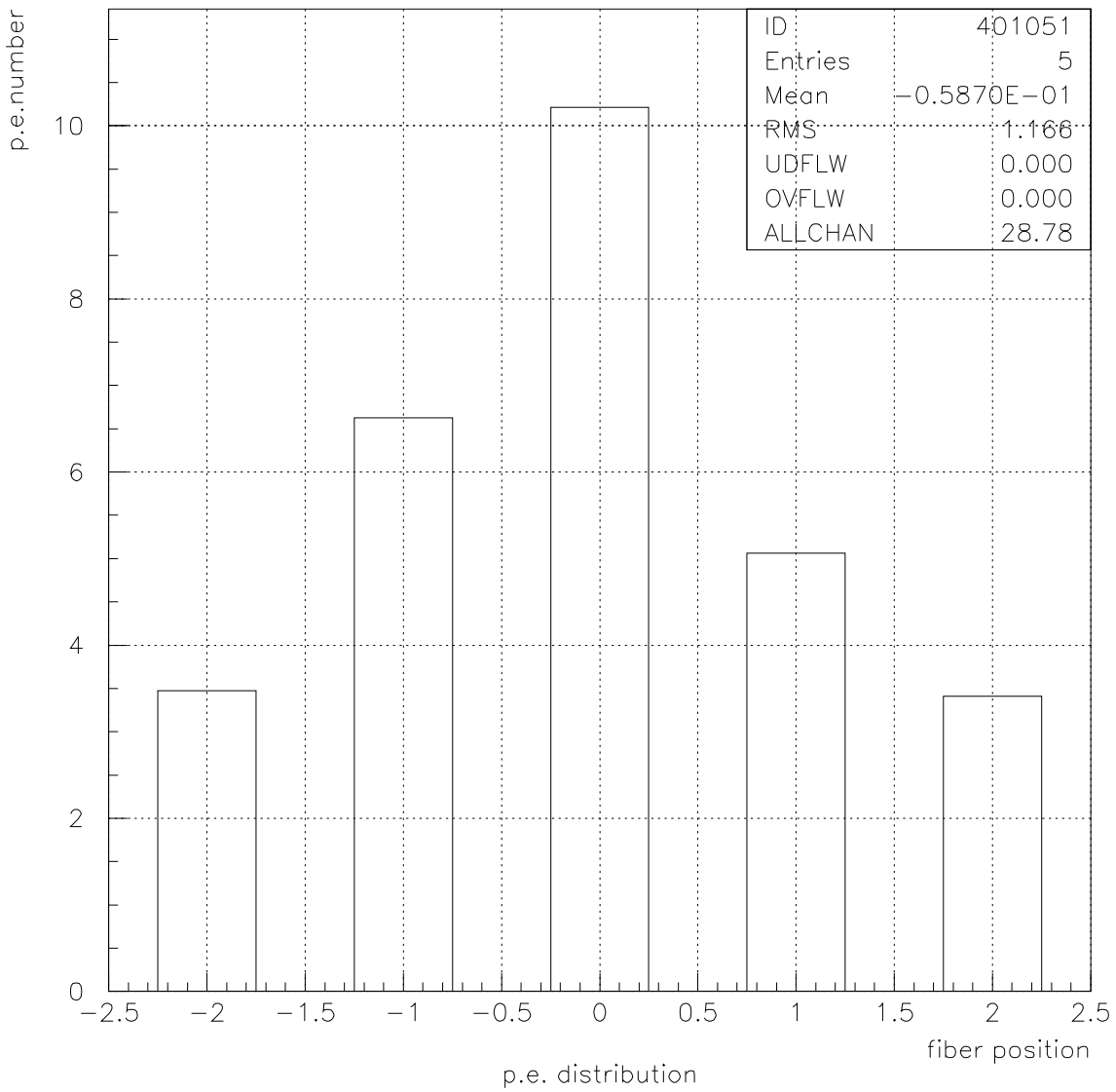

図 5.2: 光量の分布 (EJ-212、酸化チタン反射材 (EJ-510)、グリースあり)(横軸の単位は [cm])

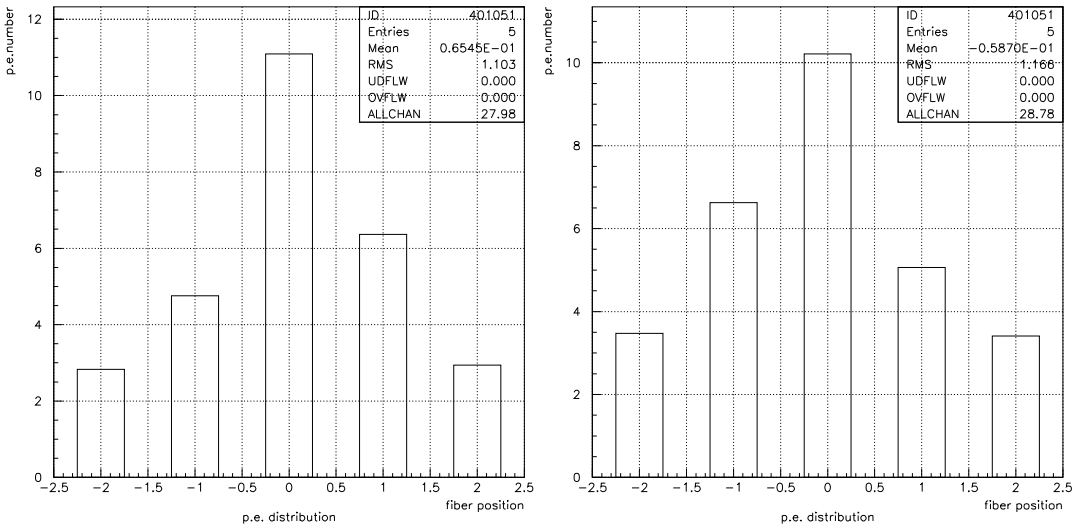

図 5.3: 宇宙線と ^{90}Sr 線源との光量の分布の差
EJ-212、酸化チタン反射材、オプティカルグリース使用の場合 (左が宇宙線、右が ^{90}Sr 線源)(横軸の単位は [cm])

また、それぞれのグラフから読みとれる RMS を表 5.2 にまとめた。これらからわかるように、EJ-204 の端のファイバーの光量が若干少なく、CI(Extruded) の端のファイバーの光量はさらに少ないように見えるものの有意な差はみられない。今回試した ELIJEN 社製のプラスティックシンチレータは紫外発光の EJ-230 も含めて、すべて減衰長の長さがある程度長いものばかりであるので、今回の測定のように 1cm 間隔で 5 本読みだした程度では有意な差はでないものと考えられる。また、CI のプラスティックシンチレータはあらかじめデータがなかったが、減衰長はこの測定のレベルではそれほど悪くないことがわかる。

	EJ-212	EJ-204	EJ-230	CI
RMS の値 [cm]	1.166	1.129	1.181	1.119

表 5.2: シンチレータの種類による光の広がりの比較

5.3 反射材の違いによる光の広がりの比較

図 5.5 にそれぞれ EJ-212 での反射材なし (測定 (B))、酸化チタン反射材 (EJ-510) を用いたもの (測定 (E))、アルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) を用いたもの (測定 (C))、の光量の分布のグラフを載せた。また、それぞれのグラフから読みとれる RMS を表 5.3 にまとめた。

これらから、反射材を用いない場合とアルミナイズドマイラーを用いる場合の光の広がりに差はなく、酸化チタンの反射材を用いた場合は若干光の広がりが小さくなる。また、

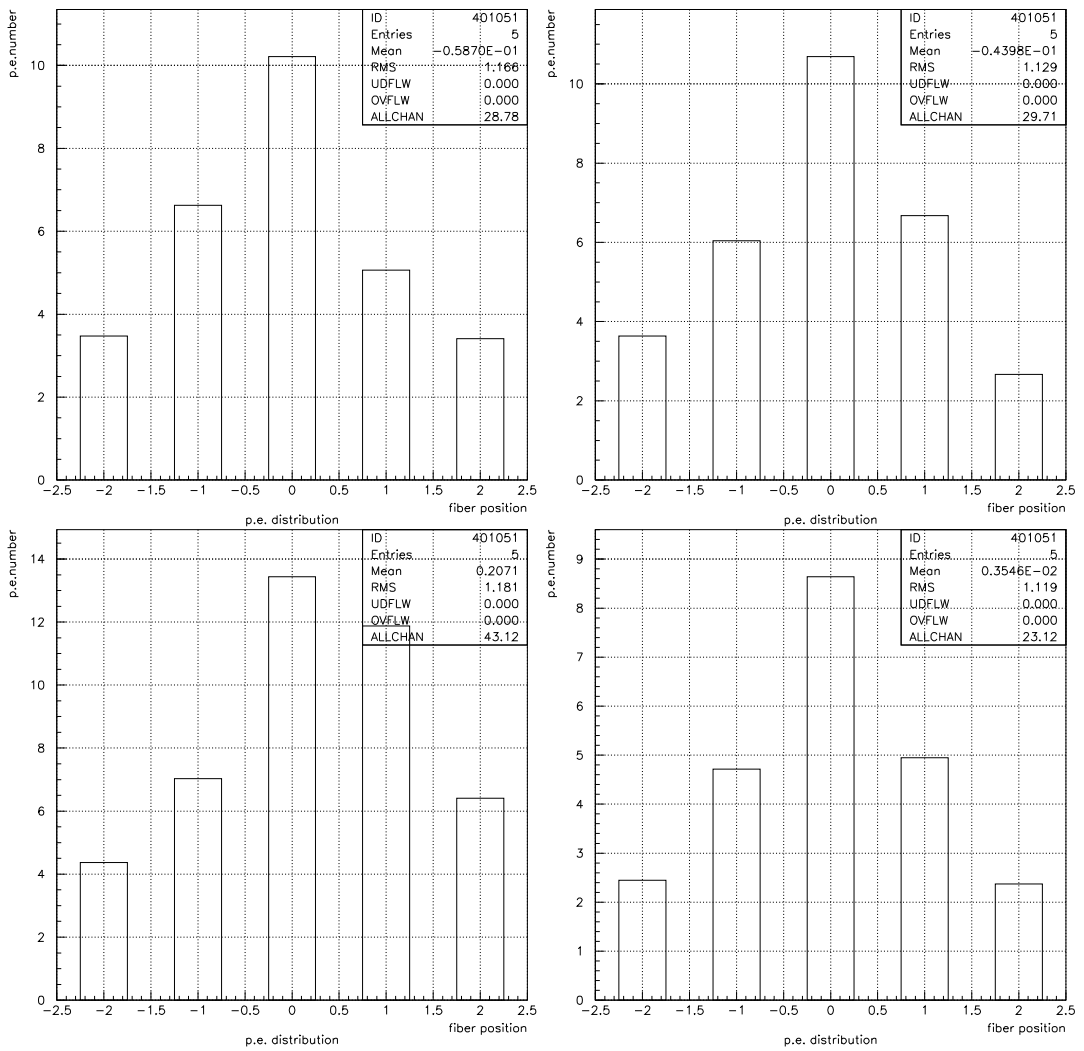

図 5.4: EJ-212、EJ-204、EJ-230、CI の光量の分布
左上が EJ-212、右上が EJ-204、左下が EJ-230、右下が CI(Extruded)(横軸の単位は [cm])

	反射材なし	EJ-590/B10	EJ-510
RMS の値 [cm]	1.235	1.225	1.166

表 5.3: 反射材の差による光の広がりの比較 (EJ-212)

図 5.6 にそれぞれ EJ-230 での反射材なし (測定 (Q))、酸化チタン反射材 (EJ-510) を用いたもの (測定 (M))、アルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) をもちいたもの (測定 (N))、の光量の分布のグラフを載せた。また、それぞれのグラフから読みとれる RMS を表 5.4 にまとめた。

	反射材なし	EJ-590/B10	EJ-510
RMS の値 [cm]	1.190	1.181	1.069

表 5.4: 反射材の差による光の広がりの比較 (EJ-230)

これらから、EJ-230 の場合も EJ-212 と同様に何も用いない場合とアルミナイズドマイラーを用いる場合に差はなく、酸化チタンの反射材を用いた場合は若干光の広がりがおさえられる。その程度は、EJ-212 に比べると顕著である。
これらのことから、参加チタンの反射材を用いると若干光の広がりはおさえられるものの基本的には反射材を用いても光の広がりはほとんどかわらないことがわかる。

5.4 シンチレータの溝にオプティカルグリースがある場合とない場合での差

図 5.7 にそれぞれ EJ-212、酸化チタン反射材での測定で、プラスティックシンチレータの溝をオプティカルグリースで埋める場合と埋めない場合での光量の分布のグラフを載せた。また、それぞれのグラフから読みとれる RMS を表 5.5 にまとめた。

	グリースなし	グリースあり
RMS の値 [cm]	1.186	1.168

表 5.5: オプティカルグリースのあるなしによるシンチレータ内での光の広がりの比較

これらよりグリースのあるなしで光の広がりはかわらない。

5.5 結果のまとめと考察

以上の結果により、プラスティックシンチレータ内での光の広がりは、プラスティックシンチレータの種類にあまりよらず、反射材による影響も酸化チタンを用いた場合には若干あるものの少なく、また、プラスティックシンチレータの溝にオプティカルグリースを塗る場合と塗らない場合でもかわらない。よって、今回のようにプラスティックシンチレータ内である程度光が伝われば光の広がり方はほぼ一定になるということがわかる。この光の広がりは、それによって位置情報を得ようとする場合に直接的に影響する。もし位置分解能をより上げたいならば、光の広がりを押えなければならない。文献 [9] によるとプラスティックシンチレータに酸化チタンをまぜシンチレータ内の光の広がりを押える試みがなされており、シンチレータに混ぜる物質や濃度をうまく選べば光量を落さずに横方向の

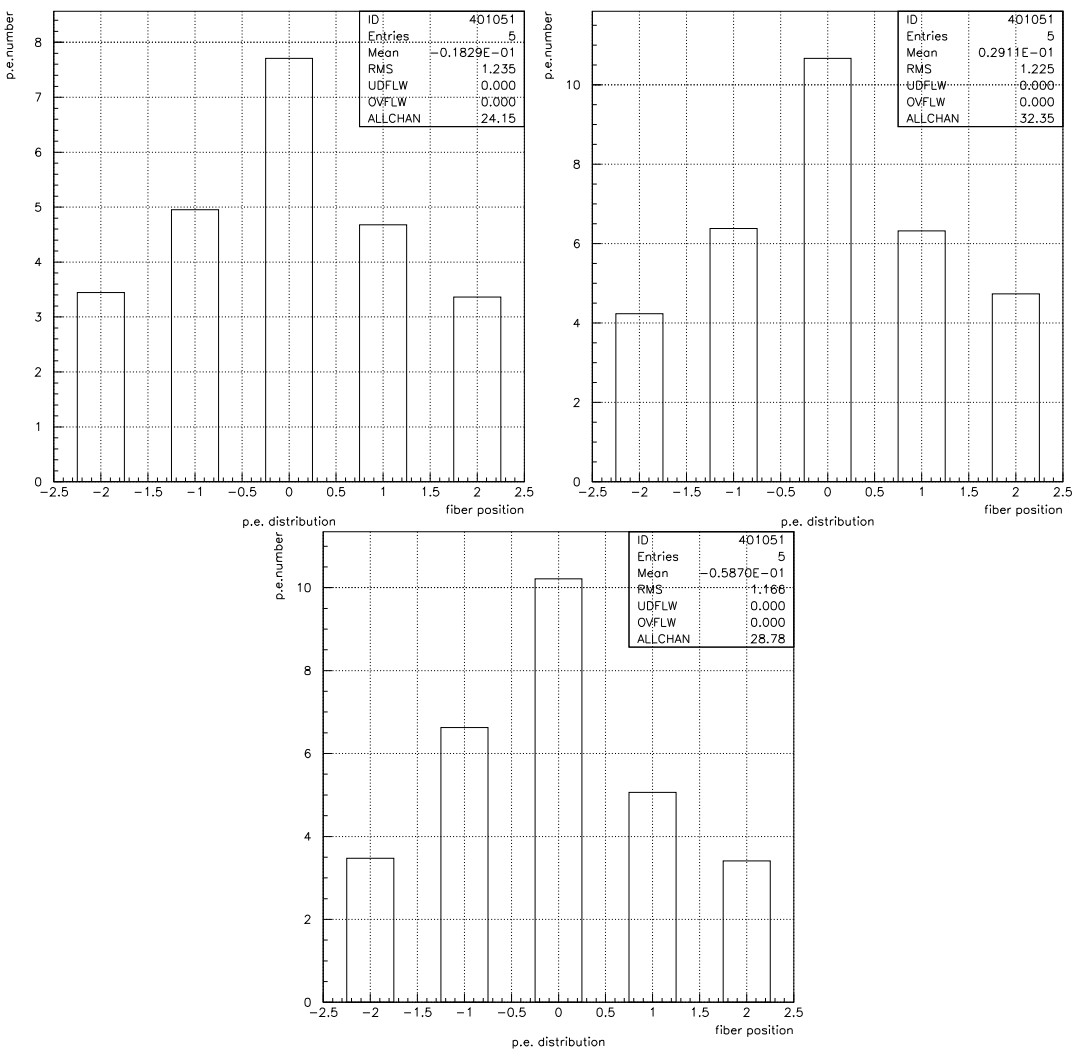

図 5.5: 反射材の違いによる光量の分布の差:EJ-212 の場合
左上が何も塗らないとき、右上がアルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) のとき、下が酸化チタン反射材 (EJ-510) を塗ったとき (横軸の単位は [cm])

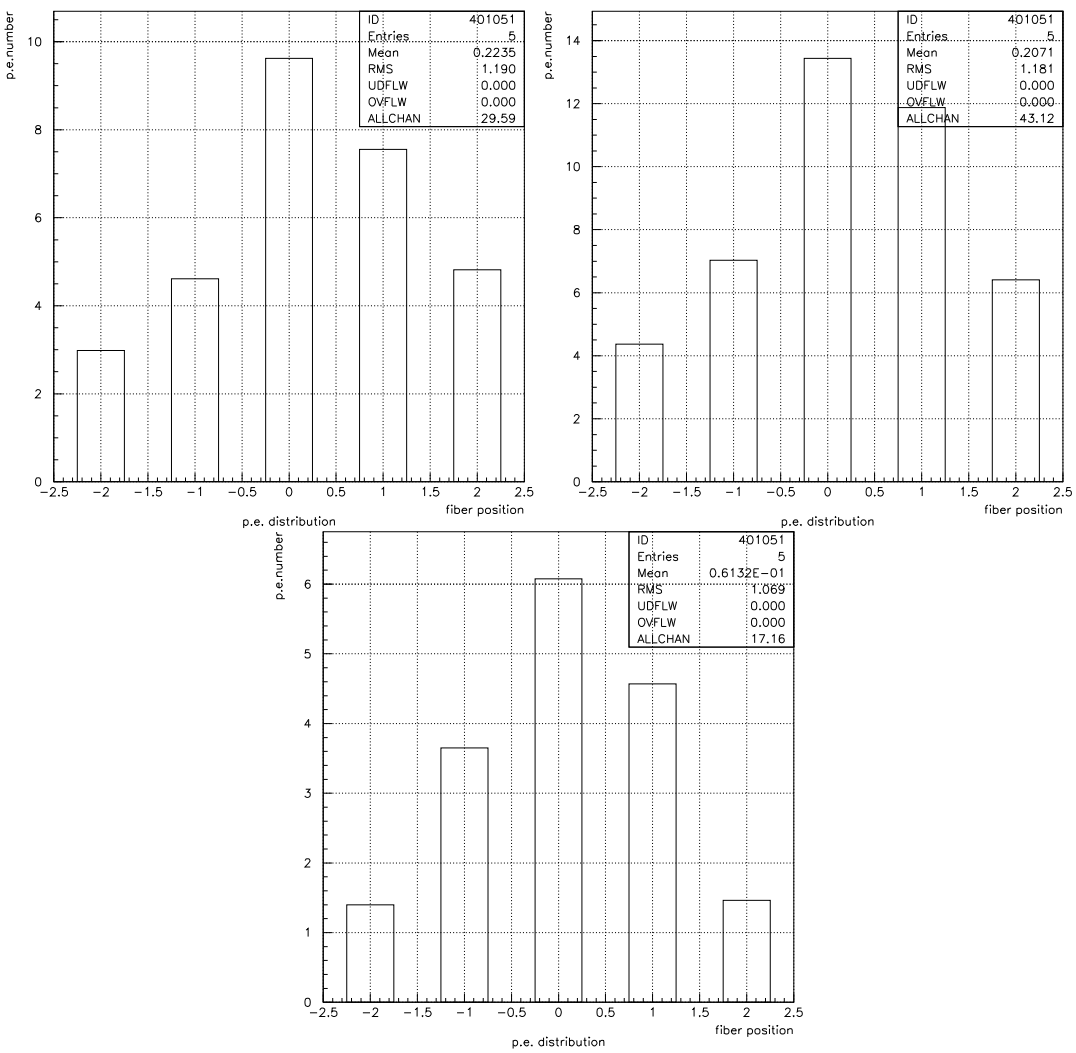

図 5.6: 反射材の違いによる光量の分布の差:EJ-230 の場合
左上が何も塗らないとき、右上がアルミナイズドマイラー (EJ-590/B10)、のとき、下が酸化チタン反射材 (EJ-510) を塗ったとき

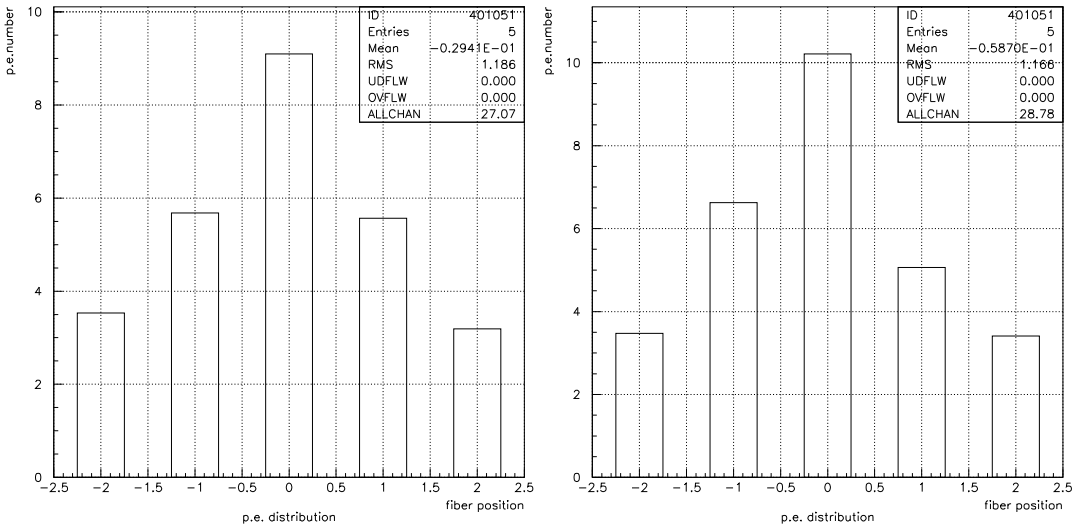

図 5.7: オプティカルグリースのあるなしによる光量の分布の差
EJ-212、酸化チタン反射材使用の場合 (左がグリースなし、右がグリースあり)(横軸の単位は [cm])

位置分解能をある程度まで良くできる可能性がある。

第6章　時間情報

プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器を実際の実験で用いる場合、時間情報は非常に有益であり必要不可欠な場合が多い。特に今日の高エネルギー実験は非常にハイレートな実験が多く、イベントを区別するためには時間情報は必要不可欠である。

時間情報の精度は一般に、

- シンチレータの発光の立上り時間
- シンチレーション光が波長変換ファイバーまで到達する時間
- 波長変換ファイバーの吸収・発光の立上り時間
- PMT の立上り時間

によって決まる。しかし、光量が少なくなってくると、最終的な波長変換ファイバーの発光は 1 p.e. レベルに分解されてしまい (図 6.1 参照)、減衰時間のどのタイミングで発光が起こるかは確率過程となる。また、そのように分解されてしまった場合は、原理的にそれが 1 粒子起源なのか複数の粒子によるものか区別がつかなくなる。よって、特に光量が少ないときにハイレートで実験を行う場合は、できるだけ発光のスピード (すなわち減衰時間) が速い方が、時間情報の精度も良くなるとともに、粒子識別の点でも有利である。発光スピードはシンチレータの発光スピードと波長変換ファイバーの発光スピード、および、シンチレーション光が波長変換ファイバーまで到達する時間によって決まる。前者 2 要素については、プラスティックシンチレータの発光スピードは長くても 2、3nsec なのに対し[1]、波長変換ファイバーの発光スピードは一般にそれより長いため、結果的に波長変換ファイバーの発光スピードが決めることとなる。シンチレーション光がシンチレータ内を伝わって波長変換ファイバーまで到達する時間は、反射材等の条件によってかわる。
ここでは、Y11(200)M-S 型を用いた測定 (測定 (E)) と B2(200)M-S 型を用いた測定 (測定 (N)) のたばね読みの PMT(PMT-All) のシグナルと、もっとも粒子の通過点に近いファイバーを読みだしている PMT(PMT(3)) のシグナルを比較することによってどちらが時間情報の点で有利となるかを検討した。

6.1　Y11(200)M-S 型、B2(200)M-S 型の発光スピード

図 6.2 は、Y11(200)M-S 型を用いた測定 (測定 (E)) のたばね読みのシグナルおよび B2(200)M-S 型を用いた測定 (測定 (N)) のたばね読みのシグナルをオシロスコープで読

[1] 第 2.2 節参照

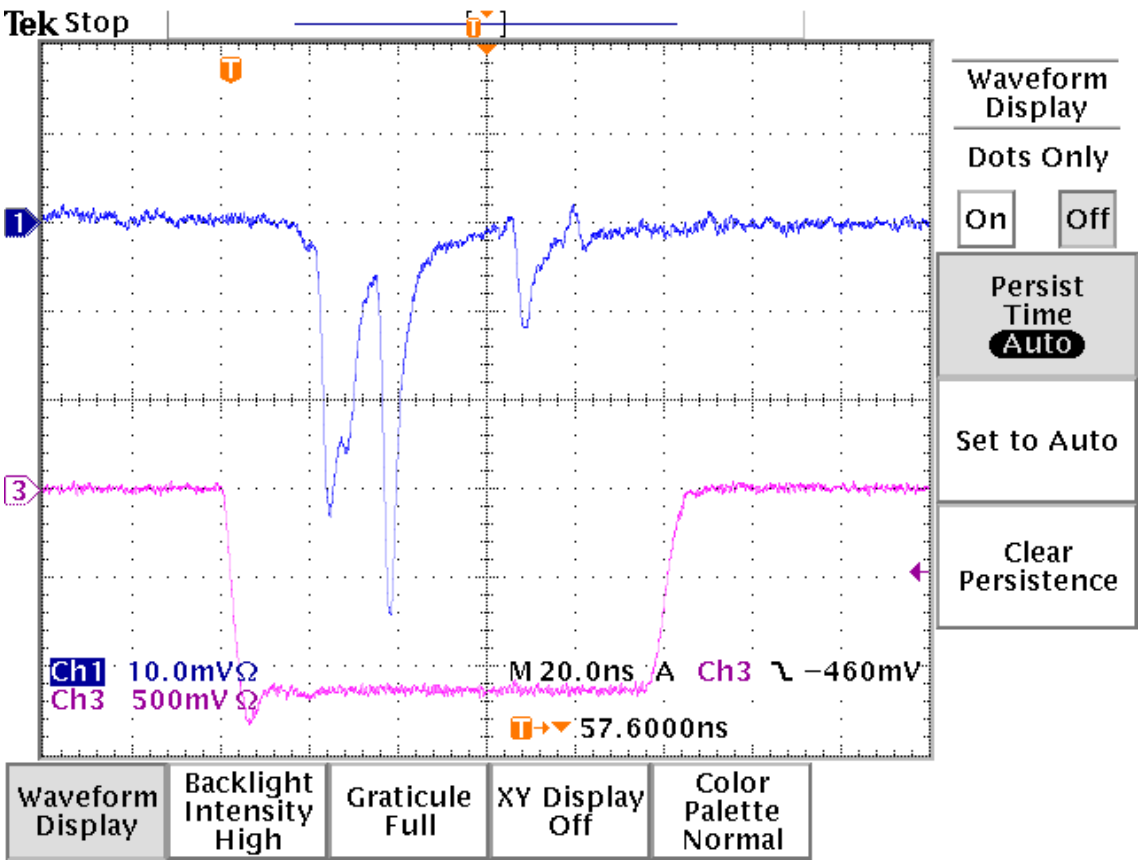

図 6.1: 発光が時間的に分解してしまっているときのオシロスコープの画像 (Y11(200)M-S 型) の発光

んだときのものである。それぞれ、上が 512 秒間アベレージをとったもの、下が数秒間積算したときの画像である。この比較によって波長変換ファイバーの発光スピードとシンチレータ内での伝搬時間をあわせて考えた場合 (つまりより実機に近い条件で) の時間情報の比較ができる。
また、図 6.3 は、同じ測定での真中のファイバー (PMT(3)) のシグナルをオシロスコープで読んだときのものである。これらの比較によって、シンチレータ内での伝搬時間に比較的よらずに時間情報の比較ができる。

また、参考までに光量の少ない場合の Y11(200)M-S 型、B2(200)M-S 型の発光の様子の画像も載せた。

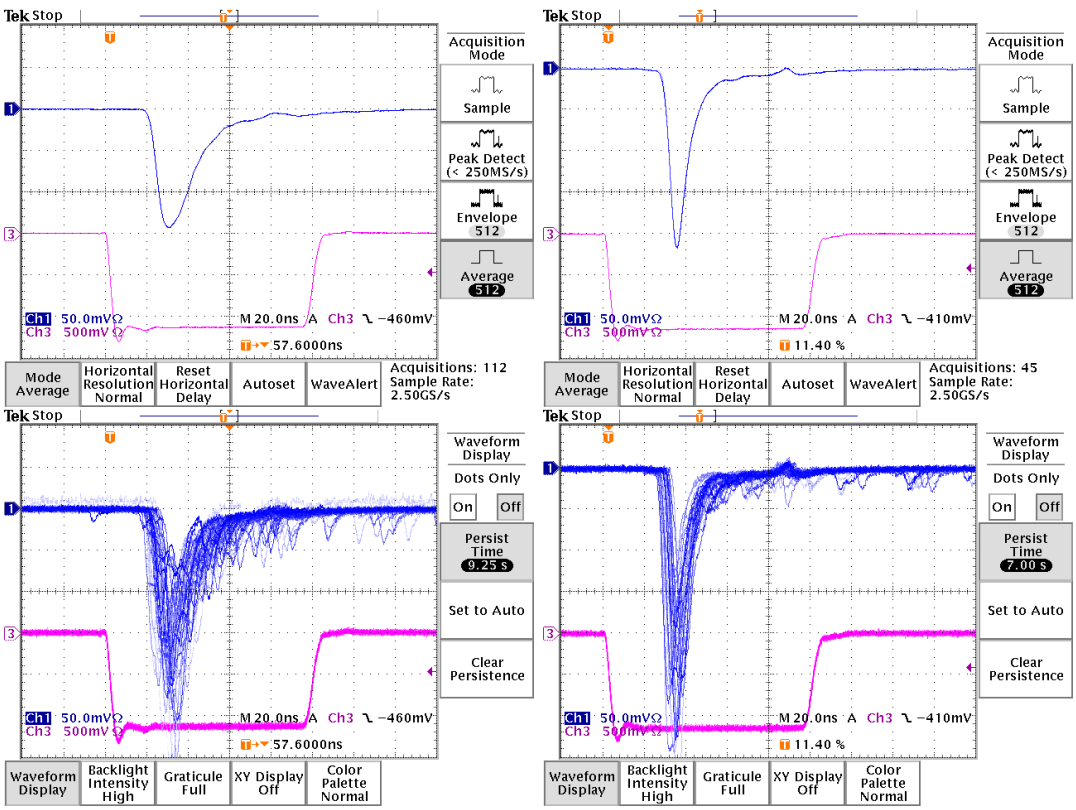

図 6.2: 波長変換ファイバーの発光をオシロスコープで読んだときの画像
左上が Y11(200)M-S 型のたばね読みの PMT(average mode)、左下が Y11(200)M-S 型のたばね読みの PMT(accumulate mode)、右上が B2(200)M-S 型のたばね読みの PMT(average mode)、右下が B2(200)M-S 型のたばね読みの PMT(accumulate mode)

これらオシロスコープの画像からわかるように、B2 の方が Y11 よりほぼ 2 倍速いことがわかる。よって、時間精度のより必要な場合には、B2 を用いるほうが有利である。

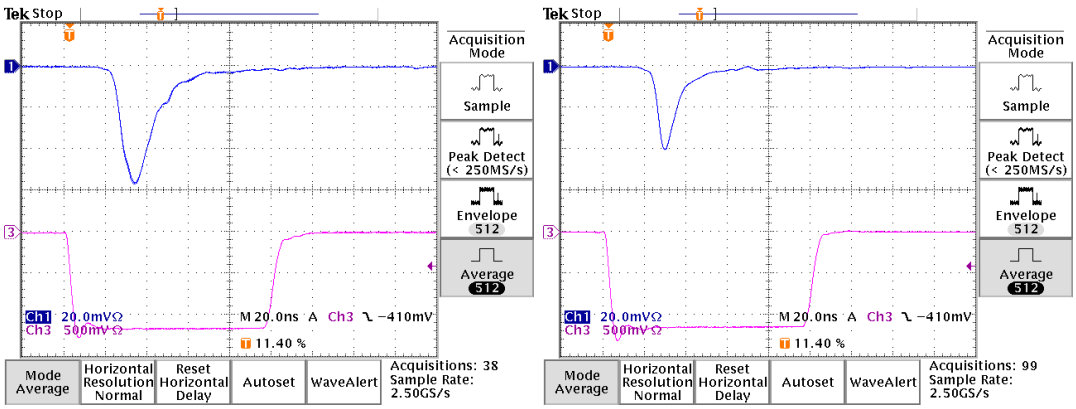

図 6.3: Y11、B2 のオシロスコープの画像 (PMT(3))左が Y11、右が B2

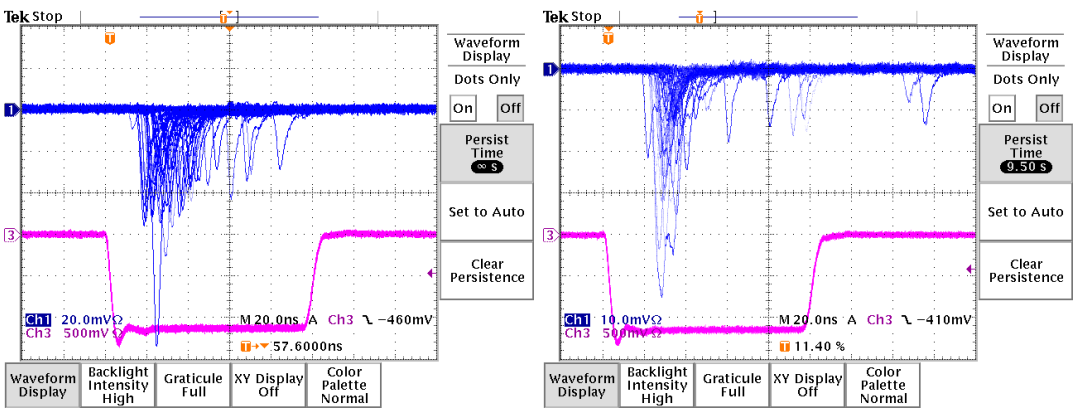

図 6.4: Y11、B2 のオシロスコープの画像 (光量が少ないとき)左が Y11、右が B2

第7章　結論

今日の高エネルギー実験は大型化の一途をたどっており、安価でかつ性能の良い検出器を開発することは必要不可欠である。プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器はその候補としてもっとも注目されている検出器のひとつである。プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー検出器は、荷電粒子の通過によって発生するシンチレーション光をいったん波長変換ファイバーで吸収し再発光させファイバー内を伝搬させることによって長い減衰長を得ることができる。一方この方法では、シンチレーション光をファイバーに吸収させなければならず、吸収させることができても波長変換ファイバーの光の捕獲効率が 5%程度であるため、必要な光量を得るためにはいかに効率良くシンチレーション光をファイバーに到達させ、かつ吸収・再発光させるか、また、そのファイバーの発光をいかに効率良く光検出器でとらえるかという点が重要になる。

本研究では、いろいろなプラスティックシンチレータ、波長変換ファイバー、光電子増倍管の組合せおよび、プラスティックシンチレータに塗る反射材やプラスティックシンチレータの溝を埋めるオプティカルグリースの条件を変えて光量を測定し比較した。その結果、もっとも光量を得るには、波長変換ファイバーに B2(200)M-S 型ファイバーを用いプラスティックシンチレータに紫外発光をする EJ-230 を用いるのが一番よいことが分かった。ただし、酸化チタンの反射材は紫外光を反射しないので、アルミナイズドマイラーなどの紫外領域まで反射率の高い反射材を用いなければならない。
また、3 種類の PMT(H8643EGPMOD、H8643MOD、H7415) で光量を測定し比較した結果、Y11(200)M-S 型の場合 H8643EGPMOD は H7415 の 1.3 倍、H8643MOD は H7415 の 1.2 倍、B2(200)M-S 型の場合 H8643EGPMOD は H7415 の 1.15 倍、H8643MOD は H7415 とほぼ同量、の光量が得られた。よって、プリズムタイプの光電面は Y11(200)M-S 型の発光域でも B2 の発光域でも量子効率が良いことがわかり、かつ、H8643MOD は、Y11(200)M-S 型の発光波長である緑色の領域でも H7415 に比べて量子効率が高いことがわかった。また、反射材、オプティカルグリースの効果についても調べ、反射材はアルミナイズドマイラー (EJ-590/B10) の場合プラスティックシンチレータが標準的な EJ-212 でも紫外発光をする EJ-230 でも約 1.4 倍の効果が、酸化チタンの反射材 (EJ-510) の場合 EJ-212 では、オプティカルグリースなしでは 1.5 倍、あるときには 1.2 倍であることがわかった。オプティカルグリースはそれ単独では、約 1.6 倍の効果があり反射材と組み合わせると、両者あわせて EJ-212 で約 2 倍、EJ-230 で約 2.3 倍の効果があることがわかった。

次にプラスティックシンチレータ内での光の広がりについて調べ、光の広がりはプラスティックシンチレータの種類、反射材の種類、オプティカルグリースでプラスティックシンチレータの溝を埋める、埋めないには、あまり関係ないことがわかった。

最後に、時間情報の点では、B2(200)M-S 型ファイバーの方が、Y11(200)M-S 型ファイバーとくれべて約 2 倍速く、その分有利であることがわかった。

以上の点からプラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器を構成するには、ファイバーの光の減衰が気にならないような小さな検出器では、プラスティックシンチレータに EJ-230 のような紫外発光をするものを用い、波長変換ファイバーに B2(200)M-S 型を用いるのが光量の面でも時間性能の面でも良いことがわかった。また、大型の検出器を作るにあたっても B2(200)M-S 型波長変換ファイバーの減衰長が使用に耐えうる程度に長ければ、おなじくプラスティックシンチレータに紫外発光のものを用い、波長変換ファイバーに B2(200)M-S 型を用いるのが有利である、また、そうでない場合でも減衰長が長いとされる Y11(200)M-S 型を用いて最大 46.2 p.e./5mm 厚 (片側読みだし) の光量が得られることがわかったので、これを用いて大型の検出器建設を目指すことも十分可能である。

本研究は以上の結果により今後のプラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器の開発への指針を与えることとなったといえる。次はより実用面にそくした開発に移ることができる。

第8章　今後の課題

本章では、プラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだし検出器を開発するのための今後の課題をあげる。

減衰長の測定　今回はプラスティックシンチレータが 20cm 程度、波長変換ファイバーが 60cm 程度のものを試したため問題にならなかったが、大型の検出器を作ることを考えると波長変換ファイバーの減衰長がどれくらいであるのかと言う点は非常に重要である。とくに、B2(200)M-S 型の減衰長を測ることは必要不可欠である。

光量を増やす方法　今回は光量を増やすために反射材やオプティカルグリースを試した。これらは、作業としてはさほど難しいものではない。しかしそのほかにも、ファイバーの径、溝の数、溝の形状の変更、などを調整することによって光量を増やせる可能性がある。これらのパラメータをうまくえらべば、より簡単にまた安価なもので必要な光量を得られるはずである。これらを全てテストしてもっとも簡単に必要な光量を得る方法の探求が必要である。

薄いシンチ　今回光量は十分得られることがわかったので、今回の 5mm 厚から、さらにプラスティックシンチレータを薄くしても使用に耐えうる検出器を作ることが出来ると考えられる。実際に薄いものをテストして、それを確認する必要がある。

押し出しプラスティックシンチレータを作る　大型の検出器を作るにはコストを下げる必要があるためプラスティックシンチレータは押しだしで作れることが望ましい。きちんと光量の得られる押しだしシンチレータの開発が必要である。とくに、B2(200)M-S 型を用いる場合、紫外発光のシンチレータが必要でありこれを押し出しで作ることが出来れば非常に有望な検出器の候補となる。

散乱体入りプラスティックシンチレータ　第 5 章の最後で述べたように散乱体をプラスティックシンチレータにまぜることによって光量を落さずに横方向の位置分解能を上げることが出来ればこれも有望な検出器となりうる。

光検出器のさらなるテスト　今回は、グリーンエクステンディッドタイプの PMT を用いたが、我々のグループではさらに量子効率が高い PMT モジュールとして H7422P-40 のテストを行っている。H7422P-40 は GaAsP/GaAs 光電面をもち特に長い波長域で量子効率が高く (波長 580nm の光で量子効率 40%)、Y11 などの長い波長域で発光するものを読み出すのに特に有利である。この PMT モジュールを用いてプラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー読みだしでの光量等の各パラメータを測定し、実際にプラスティックシンチレータ・波長変換ファイバー検出器の光検出器として用いることができるか確かめる必要がある。

謝辞

本論文を書くにあたっては、本当にたくさんの人にお世話になりました。お礼申し上げます。指導教官の笹尾登教授には、本研究を行う機会を与えてくださり、随所随所に貴重なアドバイスをして頂きました。また、ながらく病気で休まざるをえなかった時期にも、暖かく見守っていてくださいました。本当にありがとうございました。同じく指導教官の野村正助手には、実験および論文作成の細部に至るまで、丁寧に御指導頂きました。些細なことでもいつもいやな顔ひとつせず対応してくださいました。ありがとうございました。高エネルギー研究室の溝内健太郎さん、森井秀樹さん、白井健雄さん、谷口七重さんは、いつも議論や愚痴の話あいてになってくださり、また、実験面でも多大なサポートをしてくださりました。ありがとうございました。実験系秘書の中尾文美さんには、ほぼ毎日私のたわいのないはなしにつきあってくださいました。ありがとうございました。いつも暖かく見守ってくださった高エネルギー研究室の皆さん、事務の方々はじめ物理学教室の皆さん、友達、そして母と姉に感謝致します。最後に、この論文を天国の父に捧げます。

2004 年 1 月 29 日 横山弘和

参考文献

[1] ELIJEN データシート、available at apace-science web page http://www.apace-science.com/eljen/index.htm

[2] D.F.Anderson et.al, Development of a Low-Cost Extruded Scintillator with Co-Extruded Reflector for the MINOS Experiment,FERMILAB-Conf-00/261-E,Octorber 2000

[3] KURARAY,SCINTILLATION MATERIALS

[4] KURARAY データシート

[5] HAMAMATSU PHOTONICS K.K., PHOTOMULTIPLIER TUBES AND ASSEMBLIES FOR SCINTILLATION COUNTING & HIGH ENERGY PHYSICS

[6] M.Itaya et.al, Development of a New Photomultiplier Tube with High Sensitivity for a Wavelength-shifter, KEK Preprint 2003-36, July 2003

[7] 森田太智 修士論文「K2K 長基線ニュートリノ振動実験全感知型シンチレータ飛跡検出器における波長変換ファイバー読み出しシステムの性能評価」、京都大学大学院理学研究科、2004

[8] 前坂比呂和、修士論文「K2K 長基線ニュートリノ振動実験における全感知型シンチレータ飛跡検出器のバックブラウンドと長期安定性の測定」、京都大学大学院理学研究科、2002

[9] 西山正吾、修士論文「散乱体入りシンチレーターを用いたファイバー読みだし粒子飛跡検出器の開発」、神戸大学大学院自然科学研究科、2002