

千葉大学大学院博士前期課程 2014 年度 修士論文

高汎用性しきい値型粒子識別装置の開発

Development of threshold type particle identification device
with high versatility

理学研究科 基盤理学専攻物理学コース

13SM2103

伊藤博士

指導教員 河合秀幸

2015年3月

概要

加速器のビーム強度向上に伴って高統計物理実験が可能になった。しかし TPC、MWPC などのガス検出器はデータ収集時間が数マイクロ秒程度なので高頻度測定を生かすことができない。データ収集段階における粒子識別はデータ取得頻度を MHz から kHz へ落とすことによってその欠点を補い、かつ測定精度を向上させる。現時点ではデータ収集段階における粒子識別は yes/no の簡単な出力を持つしきい値型チェレンコフカウンターをおいて他になく、輻射体としてシリカエアロゲルは任意の屈折率 (1.003 - 1.26) を持つことから多くの加速器実験の粒子識別装置に導入されている。従来の PMT を用いたエアロゲルチェレンコフカウンターでは PMT 自身の体積・物質質量によって形状と仕様を制限される。最近の半導体光検出器の開発で、よりコンパクトで安価な粒子識別装置の設計が可能になった。高屈折率領域 (1.05 - 1.2) では波長変換ファイバーを用いて比較的薄型・低密度・形状の自由度の高い・安価な粒子識別を開発している。基礎研究におけるいくつかのベンチテストの結果および評価と、東北大学電子光物理学研究センターのビームラインによる性能評価実験の結果を報告する。

目次

第1章	序論	1
1.1	データ収集段階粒子識別の必要性	1
1.2	研究の背景	1
1.2.1	LEPS/LEPS II	1
1.2.2	FOREST	2
1.3	本研究の目的	2
第2章	チェレンコフカウンター	4
2.1	チェレンコフ放射	4
2.2	閾値型チェレンコフカウンター	5
2.3	RICH	7
2.4	高汎用性の仕様	8
2.4.1	波長変換ファイバー方式	8
2.4.2	MPPC 反応個数しきい値型	9
第3章	シリカエアロゲル	11
3.1	シリカエアロゲルの製造法	11
3.2	ピンホール乾燥	12
3.3	密度と屈折率の関係	14
3.4	屈折率測定	14
3.5	透過率の測定	15
3.6	X線構造解析	15
第4章	光電子増倍管	18
4.1	光電面	18
4.2	量子効率	19
4.3	ダイノード	19
4.4	増幅率	20
4.5	時間特性	21
4.6	LEDによる光電子増倍管の校正測定と性能評価測定	21
4.6.1	供給電圧と増幅率の関係	21
4.6.2	ノイズ頻度とノイズ比	22
4.6.3	時間分解能	23
4.6.4	セットアップ	23
4.6.5	結果	23
4.7	ピコ秒ライトパルサーによる光電子増倍管の時間特性評価測定	29

第 5 章	MPPC と EASIROC	31
5.1	原理	31
5.2	検出効率	32
5.3	増幅率	33
5.4	ダークカウント	33
5.5	EASIROC モジュール	33
5.5.1	システム基本動作	33
5.5.2	アナログ出力と ADC	35
5.5.3	Slow Shaper 時定数	38
5.5.4	PreAmp 増幅率	39
5.5.5	LVDS 信号	40
5.6	EASIROC モジュールを用いた MPPC の校正測定と性能評価測定	41
5.6.1	セットアップ	41
5.6.2	印加電圧と増倍率の関係	42
5.6.3	検出光子数しきい値における印加電圧とノイズ比の関係	45
5.6.4	磁場中の動作確認	45
第 6 章	波長変換ファイバーを用いたライトガイド	47
6.1	WLSF 仕様	47
6.2	トラッピング効率	47
6.3	ファイバーシート製作	48
6.4	ファイバーシートの性質	49
6.4.1	減衰長	49
6.4.2	曲げ損失	49
6.5	チェレンコフ光集光システム	53
6.6	ファイバーライトガイド	53
第 7 章	宇宙線を用いた性能評価測定	54
7.1	大気宇宙線	54
7.2	宇宙線測定	57
7.2.1	セットアップ	57
7.2.2	宇宙線ミュオン鉛直流量	60
7.2.3	エアロゲル輻射体でのチェレンコフ放射	61
7.3	ファイバーシートの収集効率測定	62
第 8 章	ビームテスト	64
8.1	ELPH ビームライン	64
8.2	実験 1	65
8.2.1	セットアップ	65
8.2.2	エアロゲル厚さにおけるチェレンコフ光検出	65
8.2.3	屈折率におけるチェレンコフ光検出	66
8.2.4	WLSF ライトガイド収集効率	67
8.2.5	WLSF ライトガイドの粒子直撃事象	68
8.2.6	試作器の性能評価測定	69

8.2.7	結果	69
8.3	実験 2	71
8.3.1	セットアップ	71
8.3.2	エアロゲル厚さとチェレンコフ放射光子数の関係	73
8.3.3	チェレンコフ光の輻射体透過長による寄与	74
8.3.4	屈折率とチェレンコフ放射光子数の関係	76
8.3.5	1次元配列 MPPC の x 軸スキャンング	77
8.3.6	結果	81
第 9 章 考察		82
9.1	輻射体の性質と光電子数の関係	82
9.2	MPPC 反応個数しきい値型の性能評価	83
第 10 章 結論		87
10.1	波長変換ファイバー方式	87
10.2	MPPC 反応個数しきい値型	87
10.3	今後の展望	87
謝辞		89
付録		92
A	CAMAC calibration	92
B	リアルタイムストロンチウム 90 カウンター	96

第1章 序論

物質を構成する最小単位を我々は素粒子と定義する。現在の素粒子物理学において標準模型は実験結果を上手く説明し多くの成功を収めた [1]。2012年には CERN ATLAS と CMS グループが素粒子に質量を寄与すると考えられているヒッグス粒子を発見した [2, 3]。これによって標準模型はひとつの理論的な基準となり、最近では「標準模型を超える新しい物理学」をテーマに理論・実験的な研究が進みだした。

クォーク模型ではクォーク単体では存在できず必ず $q\bar{q}, qqq$ の結合状態として存在すると考えられている。この状態もしくはこの粒子を我々はハドロンと呼び、 $q\bar{q}$ の中間子 (メソン)、 qqq の重粒子 (バリオン) がハドロンに属される。クォークは3種類のカラー (R,B,G) を持ち、これらの組み合わせがちょうど白色になるような結合が安定であると考えられている。この理論では $q\bar{q}, qqq$ 以外にも結合状態が許され、これらをエキゾチック粒子と呼ぶ。実験的に発見の報告がされているが、未だ存在の有無は議論されている。

1.1 データ収集段階粒子識別の必要性

ビーム強度の向上はデータ収集時間の短縮や、したがって高統計物理測定を狙える一方、ガス検出器は光検出器と比べて不感時間は遅く (μ 秒)、そのためビーム強度向上を上手く生かしきれない。そこで粒子識別装置を導入してデータ収集段階で粒子識別することで、純度の高いデータを取得しつつ、ガス検出器の欠点を補う。

トリガー段階での粒子識別装置は現在、閾値型粒子識別において他に存在しない。第2章では粒子識別装置のひとつとしてチェレンコフカウンターについて説明する。

千葉大ではチェレンコフカウンターの輻射体としてシリカエアロゲルを製造・開発している。Belle, LEPS/LEPS II, FOREST, J-PARC E03, E06, P14, P16, E36, P42, T2K, BESS などの多くの実験グループからエアロゲルの注文が寄せられている。特に LEPS II と FOREST は千葉大と共同で粒子識別装置の開発している。

1.2 研究の背景

1.2.1 LEPS/LEPS II

2010年に LEPS II のための AC 開発が要請された。LEPS II は大強度放射光施設 (SPring-8) における光生成原子核実験 LEPS の次世代プロジェクトである。2003年に LEPS はクォーク5個から構成するペンタクォーク Θ^+ を反応 $\gamma n \rightarrow K^-\Theta^+ \rightarrow K^-K^+n$ のバリオン共鳴 Θ^+ で世界で初めて発見したと報告した [4]。統計学有意差は 5.1σ 、質量のピークは $1.5424 \pm 0.002 \pm 0.003 \text{ GeV}/c^2$ である [5]。CLAS も同様の反応で Θ^+ を探索したが狭いピークは確認されず [6]、存在の有無はわからなくなった。LEPS II は異なる実験系において Θ^+ を観測することで存在を明確にする。検出

器は内径 2.22 m、外径 2.96 m のダイポール磁石の中に、ダブルサイド・シリコンストリップ・ディテクタ (DSSD) とフォワード・ドリフトチェンバー (FDC)、Time Projection Chamber (TPC)、Time of Propagation (TOP)、resistive plate chambers (RPC - TOF)、バレル型電磁カロリメータ (EMCAL)、エアロゲルチェレコフカウンター (AC) を導入され構成される [7]。AC は高磁場中 (1 T)、FDC と TPC の狭い領域に設置され、1 - 2 GeV/c の π/K 識別を要求されている。

1.2.2 FOREST

旧核理研 (現電子光物理学研究センター)、GRALL とともに中性子標的でのみ $E_\gamma = 1030$ MeV 付近に幅の広いピークが測定された。核子のフェルミ運動や検出器の分解能を差し引くとバンプの幅は 40 MeV 程度であると推定された。この核子共鳴状態を $N^*(1670)$ と呼ぶ。 $E_\gamma = 1030$ MeV 付近では中性子標的でのみピークの見られる核子共鳴 $S_{11}(1650)$ や、 $F_{15}(1680)$ が存在する。これらの共鳴状態の幅は数百 MeV オーダと $N^*(1670)$ の幅と比べて明らかに太い。このようなことから $N^*(1670)$ はペンタクォークバリオン反 10 重厚のメンバー N_5^0 の有力な候補であると考えられている [8]。

大立体角電磁カロリメータシステム FOREST (Four-pi Omnidirectional-Response Extended Spectrometer Trio) は SCISSORS III、LEPS Backward Gamma、Rafflesia II の 3 つの電磁カロリメータで構成される。前方を覆う SCISSORS III は 192 本の CsI 結晶で構成され、極角 $30^\circ - 100^\circ$ を覆う LEPS Backward Gamma は 252 本の鉛シンチレーティングファイバー、後方を覆う Rafflesia II は 62 本の鉛ガラスチェレンコフ検出器でそれぞれ構成される。各電磁カロリメータの前面には荷電粒子識別用プラスチックシンチレータ・ホドスコープが配置される。

2011 年 3 月の東日本大震災における FOREST 検出器復旧とアップグレードのために、 π/p 識別のための AC を LEPS Backward Gamma と SCISSORS III の間に導入する。

$f_0(500)$ または σ 粒子は量子数 $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$ でありながら、質量が 400 - 600 MeV/c² の領域と比較的軽く、未だ正確な質量が決定されていない [1]。 σ 粒子が $q\bar{q}$ ならば、量子数 $I^G(J^{PC}) = 0^+(1^{--})$ である $\omega(782)$ の軌道角運動量 $L = 1$ 励起状態に現れてくる $J = 0$ でしか説明できず、これは $f_0(980)$ として観測されている。つまり、 $f_0(500)$ または σ 粒子はエキゾチック粒子の候補ではないかと考えられている。 $f_0(500)$ の崩壊モードは $\pi\pi$ または $\gamma\gamma$ が知られていて、

$$\gamma p \rightarrow X p \quad (1.1)$$

$$\rightarrow \pi^0 \pi^0 p \quad (1.2)$$

$$\rightarrow 4\gamma p \quad (1.3)$$

反応から $f_0(500)$ を検出する。そこで ρ と η からの π^\pm と反跳陽子を識別すれば、 $f_0(500)$ の研究が可能になる。

1.3 本研究の目的

本研究は LEPSII および FOREST アップグレードのための AC 開発を目的とし、新しい AC 設計を模索する。これらの性能要請は詰まるところ、任意実験環境下における仕様と等しい。最近の半導体光検出器と読み出し回路の開発に伴って、従来では困難であった設計が可能になった。高汎用性しきい値型粒子識別装置はこれらを基に以下の性能を目指す。

1. 高い粒子識別能力
2. 大面積・薄型
3. 狭い設置空間
4. 任意屈折率
5. 低密度
6. 磁場の影響を受けない
7. 低価格

第2章ではチェレンコフ放射原理とそれを応用した粒子識別の原理、本開発研究対象の仕様を説明する。第3章から第6章では装置に使用する素材としてシリカエアロゲル、光電子増倍管、MPPC、波長変換ファイバーについてそれぞれ説明する。第7章は宇宙線測定、第8章はビームテストの結果を報告する。それらを踏まえて第9章では従来型ACと新型ACの性能について考察する。

第2章 チェレンコフカウンター

この章では、チェレンコフ光検出を応用した粒子識別装置について説明する。チェレンコフカウンターには、チェレンコフ放射する/しないによる「しきい値型」、チェレンコフ角を利用した「Ring Imaging Cherenkov (RICH)」などの種類が存在する。本研究対象である高汎用性しきい値型粒子識別装置の仕様についても説明する。

2.1 チェレンコフ放射

一般に屈折率 n の媒質中 (非金属) を速度 $v = \beta c$ の荷電粒子が通過する時、その速度がその光の速度 c/n を超えた場合に、荷電粒子の進行方向を軸に円錐状に光子が放射される。この現象をチェレンコフ放射といい、その光子をチェレンコフ光と呼ぶ。この現象は荷電粒子が媒質中を移動する際に荷電粒子の進行行路上に電場を生じさせその場によって媒質が分極し、このとき発生する電磁場が後に「置いてきぼり」になり、ホイヘンスの原理により波面が重なってできた衝撃波がチェレンコフ光として観測されるためである。またチェレンコフ光は衝撃波の向きと荷電粒子の進行方向とをなす角 θ_C は以下の関係式をもつ。

$$\beta > 1/n \quad (2.1)$$

$$\cos \theta_C = 1/\beta n \quad (2.2)$$

したがって、通過荷電粒子の速度と媒質の屈折率に依存した指向性のある光として観測される。この時の角度 θ_C をチェレンコフ角 (Cherenkov cone angle) と呼ぶ。生じるチェレンコフ光の光子数 N は

$$N = 2\pi\alpha L \int \frac{\sin^2 \theta_C(\lambda) d\lambda}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

で与えられる。ただし荷電粒子の電荷は $q = \pm e$ 、 L は荷電粒子が通過した媒質の距離、 α は微細構造定数 λ は放出された光子の波長である。 θ_C は光子の波長に依る物理量だが変化量が微小であることから積分の外へ出すことが出来、

$$N \sim 2\pi\alpha L \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \int \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

と近似できる。したがってチェレンコフ光は輻射体の厚さと屈折率に依存した光子数と、波長の2乗に反比例した連続的な発光スペクトラムを持つ。このようなチェレンコフ放射を用いた粒子識別装置をチェレンコフカウンターと呼ぶ。チェレンコフカウンターにはいくつか種類があり、閾値型、Ring Imaging Cherenkov(RICH) などがある。

2.2 閾値型チェレンコフカウンター

ある粒子の運動量 p は特殊相対論によって速度 β と質量 m の関係式で表せる。

$$p = \frac{\beta m}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.5)$$

この式にチェレンコフ放射条件式 2.1 を代入して運動量閾値 p_{th} を定義する。

$$\begin{aligned} p > \frac{m/n}{\sqrt{1 - (1/n)^2}} &= \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \\ &= p_{th} \end{aligned} \quad (2.6)$$

輻射体の屈折率 n が決定すると粒子質量 m に依存してチェレンコフ放射する運動量しきい値に違いが生じる。したがって、ある運動量領域において閾値型チェレンコフカウンターはチェレンコフ放射する / しないで対象粒子を識別 (particle identification: PID) する。

加速器実験では粒子位置弁別器と超電導磁石によって粒子の軌道と運動量が一意に決定する。図 2.1 は各粒子の輻射体屈折率と運動量閾値の関係を示す。例えば 1 - 2 GeV/c の π/K 識別 (π ではチェレンコフ放射し、K ではしない) のためには輻射体の屈折率は 1.01 - 1.03 が有効で、荷電粒子の軌道の曲率半径 ρ は磁場 B と運動量 p に依存し一意に決定するので ($p = 0.3\rho B$)、適切な屈折率を用意することで精度の高い粒子識別が可能となる。

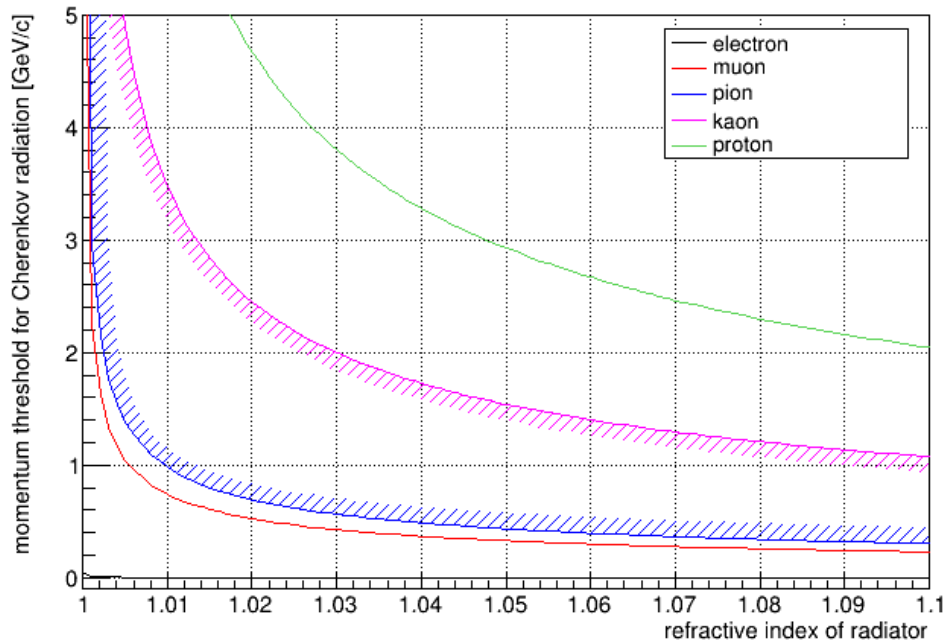


図 2.1: 各粒子 (電子、ミューオン、パイオン、K 中間子、陽子) の輻射体屈折率と運動量閾値の関係: 斜線部は π/K 識別可能領域で、例えば輻射体屈折率 1.03 の場合運動量 0.7 - 2.0 GeV の識別が可能である。

チェレンコフ光は普通、光電子増倍管 (PMT) で検出される。検出される光電子数 $N_{p.e.}$ は発生したチェレンコフ光光子数 N 、PMT に光が到達する割合 (収集効率) ε_{coll} 、PMT の量子効率 ε_{QE}

から以下で表せる。

$$\begin{aligned}
 N_{p.e.} &= \int \frac{N(\lambda)}{d\lambda} \varepsilon_{coll}(\lambda) \varepsilon_{QE}(\lambda) d\lambda \\
 &\sim 2\pi\alpha L \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \int \varepsilon_{coll}(\lambda) \varepsilon_{QE}(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda^2}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

ここで、 λ はチェレンコフ光の波長で、式 2.4 を代入した。閾値型チェレンコフカウンターの識別能力は検出光電子数の閾値設定によって検出効率と誤認識度 (mis-identification) が評価される (図 2.2)。チェレンコフ放射条件を満たさないはずの荷電粒子においても、反跳電子のチェレンコフ放射が誤認識の要因となる。したがって、閾値型では単純な設計だが用途に応じて閾値を設定する必要がある。例えば、 π 事象が多くあるデータ中から稀な K 事象を抽出する場合、 K を π と間違える確率よりも π を K と間違える確率を減らすように閾値を設定する。

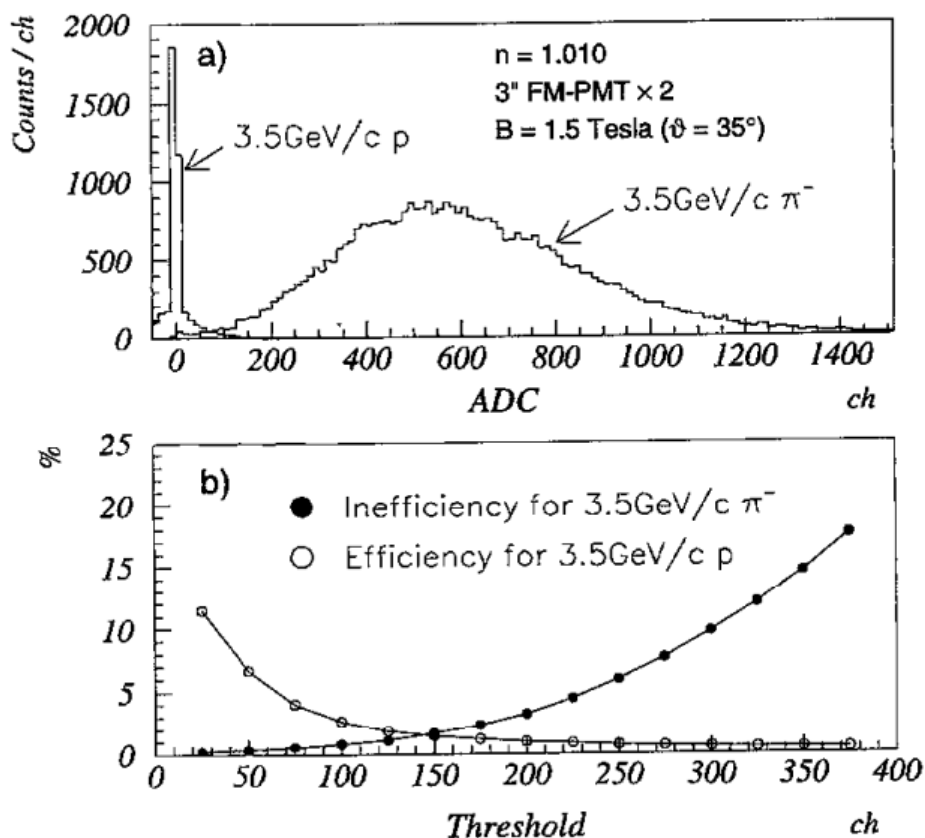


図 2.2: Belle 実験 ACC のパルスハイト分布 (上) : 屈折率 $n=1.010$ で磁場 1.5T 中に FM-PMT を 2 つ使用している。3.5GeV/c の陽子と π^- のデータ。パルスハイト閾値設定における π^- および陽子の識別能力 (下) : ADC 閾値 150 の場合 ACC の識別能力は (●) π^- の不検出効率 3%、(○) p の誤認識 3% である。つまり、これらはそれぞれ π^- を p と間違える確率および p を π^- と間違える確率を意味する [9]。

2.3 RICH

RICH (Ring Imaging Cherenkov) は荷電粒子に対するチェレンコフ角 θ を観測することで粒子識別を行う。この検出器は粒子の通過ライン上に設置され、輻射体と高位置分解能光検出器から構成する。また、光検出器は輻射体からある程度距離をとり、距離 L に対するチェレンコフリング半径 R からチェレンコフ角を観測する。半径 R は荷電粒子の通過位置を中心に、輻射体の厚さ d および屈折率 n_{rad} 、実験室系の屈折率 n_{air} 、輻射体と光検出器の距離 L に依存して以下の式で表される。

$$R = \frac{1}{2}d \tan \theta_C + L \tan \varphi \quad (2.8)$$

$$\delta R = \frac{1}{2}d \tan \theta_C \quad (2.9)$$

$$\theta_C = \cos^{-1} 1/n\beta \quad (2.10)$$

$$\sin \varphi = \frac{n_{rad}}{n_{air}} \sin \theta_C \quad (2.11)$$

ここで φ は輻射体と空気の境界における屈折角である。

得られた角度分布 θ と角度分解能 σ_θ から π/K の識別能力を以下の式で評価できる。

$$N_\sigma \sim \frac{\theta_\pi - \theta_K}{(\sigma_\pi + \sigma_K)/2}, \quad (2.12)$$

ここで、 N_σ は統計学的優位差 σ の係数である。

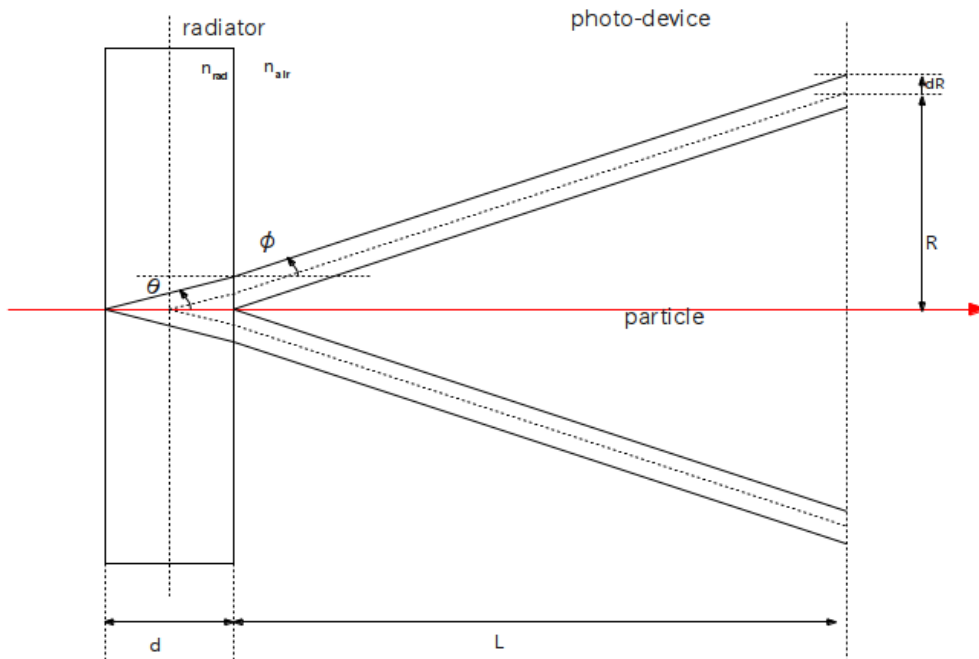


図 2.3: チェレンコフ光の軌道

2.4 高汎用性の仕様

シリカエアロゲルを用いた粒子識別装置 AC を基本にして、任意実験環境下において同じ設計方法で検出効率 99% 以上、誤認識 1% 未満の粒子識別能力を目指す。要求されている設計及び仕様を以下に示す。

1. 高い粒子識別能力
2. 大面積・薄型
3. 狭い設置空間
4. 低密度
5. 磁場の影響を受けない
6. 低価格

閾値型 AC は低密度で単純な出力なためデータ収集段階での PID が得意だが、識別能力は反跳電子によって 97% が限界である。また、PMT は粒子に直撃しない場所に設置するため識別有効面積に対して同じかそれ以上の空間が必要である。磁場中では普通 PMT は正常に動作することが出来ず、特注の FM-PMT を用いた場合では性能は一段劣る。また、大面積にするためには大型 PMT を大量に使用するため価格は膨大となる。

一方、RICH はオフライン解析で PID 98% がほぼ限界である。粒子通過位置とチェレンコフリングを区別するために PS-PMT もしくは H-APD, MPPC-Array は細かいピクセルが必要かつ、輻射体と光デバイスの間隔はある程度離す必要がある。したがって、薄型 (数 cm) はほぼ不可能である。

2.4.1 波長変換ファイバー方式

我々が開発している AC の 1 つのアイデアは、大型 PMT に代わって波長変換ファイバーを用いたライトガイドを受光部にした設計だ。図 2.4 に概念図を載せる。荷電粒子が輻射体を通過してチェレンコフ光が放射されたとき、下流の 45 度反射板でほぼ 1 回反射で受光面に入射する仕様である。受光面を PMT の代わりに波長変換ファイバーを用いたライトガイドを採用した。波長変換ファイバーは第 6 章で後述するが側面から光を吸収して両端へ伝搬する性質を持つ。この性質からこの装置の特徴を以下に示す：

1. 小型 PMT で大面積を読み出し可能
2. 狭い空間における PID が可能
3. 磁場の外へ配線可能
4. 散乱粒子におけるノイズ低減
5. 低価格
6. 低い収集効率

第6章では波長変換ファイバーを用いたライトガイドについて説明する。LEDを用いてファイバースートの性質を調べた。第7章では宇宙線ミュオンを用いて性能評価を行った。第8章ではビームテストで性能評価を行った。

2.4.2 MPPC 反応個数しきい値型

もう一つのアイデアは浜松ホトニクス社製が開発している半導体光検出器である MPPC をシリカエアロゲルの下流直後に一面貼り付けた、RICH の光検出器との間隔を狭めたような設計である (図 2.5)。チェレンコフリングは入射粒子と重なるのでリング直径による識別はせず、検出した MPPC の個数をしきい値にして PID をおこなう。チェレンコフ光は粒子の進行方向に依存した指向性を持つので、放射位置分布が予測できる。したがって粒子軌道から搜索範囲を制限することで、反跳電子の事象を除去できるのではないかと期待できる。この設計の特徴を以下に示す:

1. MPPC の反応個数しきい値にした PID
2. エアロゲル下流直後に MPPC を配置
3. PID 面積拡張と薄型を両立
4. 2次元配置の自由度
5. 反跳電子除去により PID > 99% が期待される
6. ノイズによる課題が残る
7. 高価格

第5章では MPPC と読み出し回路である EASIROC モジュールについて説明する。第8章ではビームテストで簡単な実験を行った。この結果から性能を推定する。

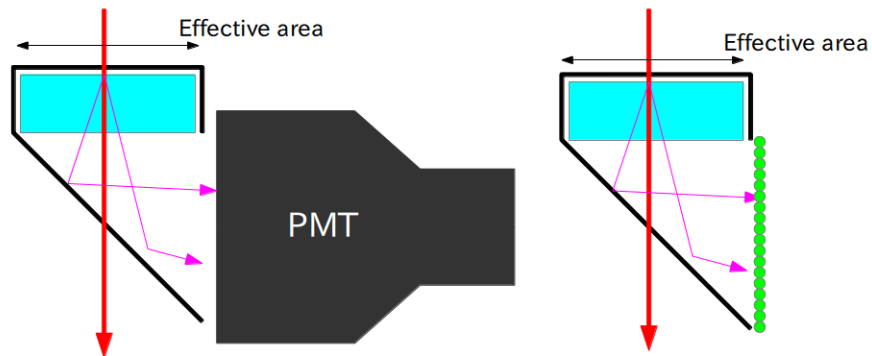


図 2.4: 従来型 AC(左)、波長変換ファイバー方式 (右)

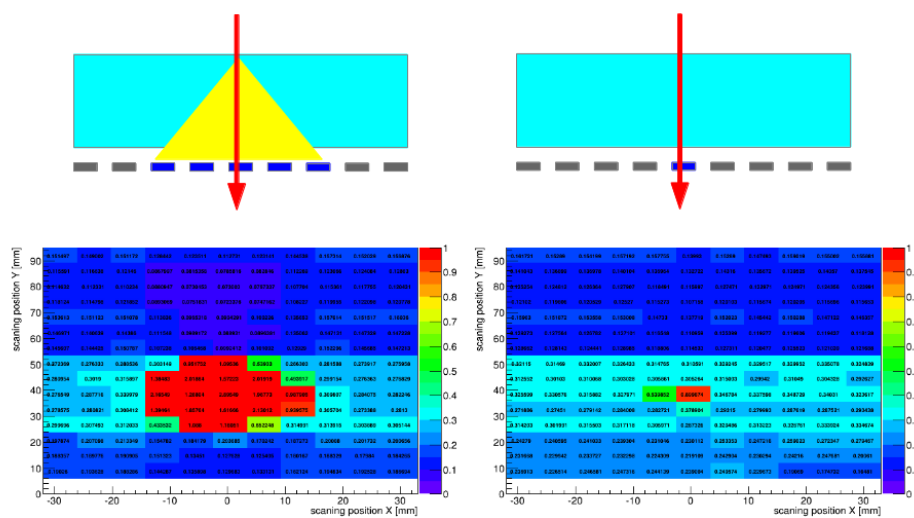


図 2.5: MPPC 反応個数しきい値型: チェレンコフ放射した場合、リングの広がった MPPC が複数反応し、チェレンコフ放射しない場合は粒子通過位置のみ MPPC が反応する。同時に反応した MPPC の個数をしきい値にした粒子識別方法。この 2 次元ヒストグラムは本論文第 8 章の結果で後述する。

第3章 シリカエアロゲル

シリカエアロゲルは体積中の90%以上が空気で占められる高多孔質な固体で、シリカ粒子(SiO_2)を主成分にしたエアロゲルの一種で、固体でありながら低密度、低屈折率、可視光において透過性がよい。空気と SiO_2 の配合率を調節することで任意の屈折率(1.003 - 1.26)を決定することが出来る[10, 11, 12, 13]。疎水化処理技術が確立したことで、十数年単位での劣化(透明度、屈折率、ひび割れ)を防止することが出来る[13]。輻射体にシリカエアロゲルを用いたチェレンコフカウンターをエアロゲルチェレンコフカウンター(AC)と呼ぶ。

3.1 シリカエアロゲルの製造法

現在シリカエアロゲルの製造法として標準的に用いられているのはKEK法と呼ばれている製法である。これはKEK(高エネルギー加速器研究機構)と松下電工(株)(現パナソニック電工(株))、千葉大学が共同で開発し確立させた製法で、特徴はメチルシリケート51(*MS51*)と呼ばれる薬品を使用する点である。*MS51*は質量の51%をシリカ粒子が有する無色透明な液体である。*MS51*を使用することで製造過程が従来と比べ簡素化される。シリカエアロゲルは調合、熟成、洗浄、疎水化、超臨界乾燥という工程を経て製造される。

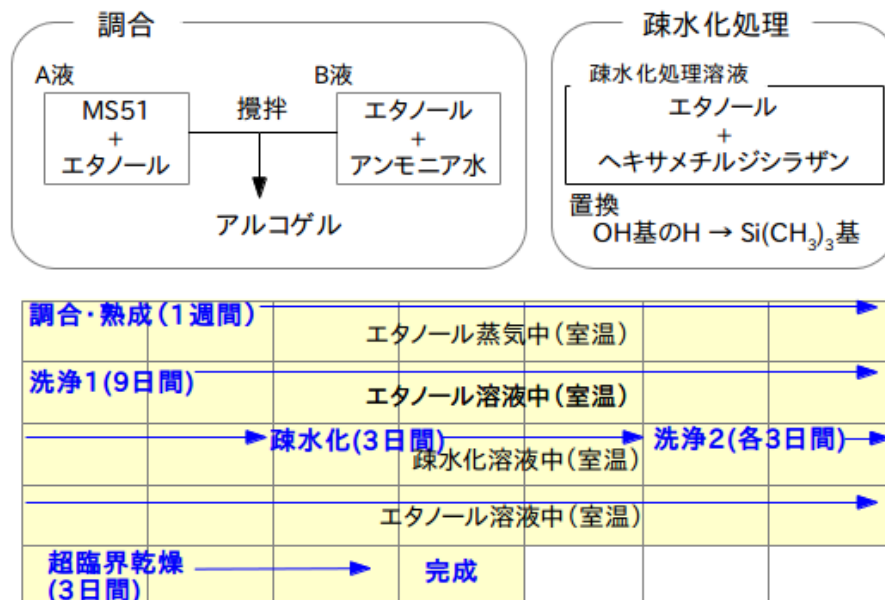
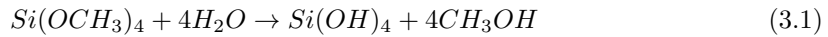
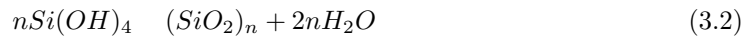


図 3.1: シリカエアロゲル製造過程概要

1. 調合：シリカエアロゲルの主成分はテトラメトキシシラン ($\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$) と蒸留水である。これらと触媒となるアンモニアをアルコール溶液で混合し、加水分解



によって水酸化ケイ素 ($\text{Si}(\text{OH})_4$) を得る。同時に主重合反応



が進行し、次第に粘度が大きくなりゲル化が進む。予め決定された調合比の MS51 とエタノールの混合液を A 液、エタノールとアンモニア水の混合液を B 液を用意する。これら 2 つを混合させ、30 - 60 秒ほど攪拌させ反応を促す。攪拌した溶液をプラスチック容器に移し、生成されるゲルをアルコゲルと呼ぶ。

2. 熟成：生成されたアルコゲルは多くの未反応溶媒を含んでおり、内部では反応は進行状態にある。そこで、エタノールを薄く貼った密封缶に移し、アルコール蒸気中で約 1 週間室温で保存し熟成させる。
3. 洗浄 1：熟成が完了したアルコゲルには水、アンモニアなどの不純物が含まれている。そこで、エタノールで満たした密封缶に 9 日ほど漬けて不純物を取り除く。
4. 疎水化処理：KEK 法で調合されたアルコゲルは OH 基を持つので、空気中の水分を吸収しやすい。これはゲルの透明度を悪化させる原因でもある。そこで、疎水化剤としてヘキサメチルジシラザン ($((\text{CH}_3)_3\text{Si})_2\text{NH}$) を使用し、 OH 基の H をトリメチルシリル基 ($\text{Si}(\text{CH}_3)_3$) に置換する。方法としては、洗浄 1 が終了したアルコゲルをプラスチック容器から金網に移し替え、エタノールとヘキサメチルジシラザンとを 9:1 に配合した液に 3 日ほど漬ける。
5. 洗浄 2：疎水化処理で出来たアンモニアを取り除くため、アルコゲルを新しいエタノールに漬ける。3 日ごとにエタノールを交換し、これを 3 回繰り返す。
6. 超臨界乾燥：アルコゲルを自然乾燥させると、アルコールが蒸発する際にゲルの微細孔で毛细管現象が生じ、ひび割れが起きることがある。そこで、超臨界乾燥の手法を用いる。一般的に物質は圧力と温度に応じて固相、液相、気相のいずれかの状態で存在するが、圧力と温度が臨界点を越えた時、液相と気相の境界がない状態となる。これを超臨界流体といい、高い拡散性・溶解性を持ち、表面張力も働かない。この状態での乾燥を超臨界乾燥という。エタノール - CO_2 の置換によりアルコゲル内のアルコールを抽出する。圧力 9 MPa で温度 20°C 程度では CO_2 は準臨界状態を形成する。徐々に温度を上げ、 80°C になると CO_2 は臨界状態になる。ここでアルコールは抽出される。オートクレーブによるアルコール抽出濃度は約 200 ppm である。そして、オートクレーブ内部の圧力はおよそ 9 時間かけて徐々に大気圧へ減少される。この全工程は約 3 日かかる [11]。

3.2 ピンホール乾燥

ピンホール乾燥 (pin-drying) はアルコゲル調合後にエアロゲルの屈折率を制御する方法で、超高屈折率 (> 1.2) かつ十分透明なエアロゲルを作成できる [14]。

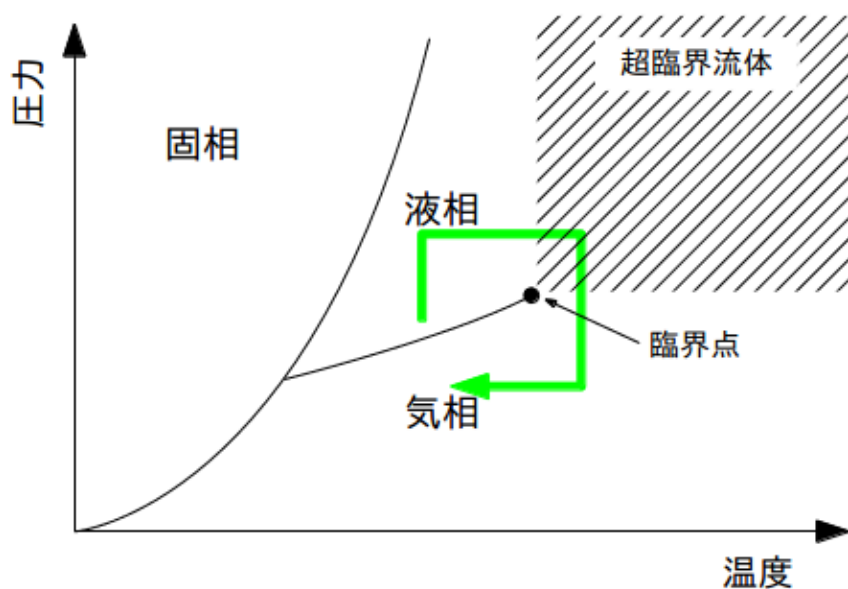


図 3.2: 物質の 3 相と超臨界状態

物質	臨界温度 [$^{\circ}C$]	臨界圧力 [atm]	臨界密度 [g/cm^3]
エチルアルコール	243.1	63.1	0.275
メチルアルコール	239.43	79.9	0.272
二酸化炭素	31.1	73.0	0.46
水	374.1	218.5	0.324
アンモニア	132.4	112.0	0.234
メタン	-82.5	45.8	0.162
窒素	-147.1	33.5	0.311
酸素	-118.8	49.7	0.430

図 3.3: 臨界点データ

ピンホール乾燥は洗浄1と疎水化処理の間に実行される。まず、溶媒のメタノールまたはDMFを用いて合成した $n=1.045 - 1.066$ のアルコゲルを洗浄3日後、アルコゲルをすぐにエタノール浴で金型から取り外す。そして、アルコゲルは $500 \mu\text{m}$ ピッチのざる (またはふるい) 上にメカス面を上にして慎重に配置される。エタノール浴から取り出したざるはピンホールを持つ容器をかぶせて半密閉状態にする (以降ピン容器と呼ぶ)。

ピンホール乾燥ではアルコゲルを収縮させる。つまり、この密度変化が屈折率に大きく影響を与える。ピンホールの数や穴の幅はアルコゲルの割れを回避するために、乾燥過程全体を通して制御され、ピン容器は乾燥が終了するまで開かれないためアルコゲルの質量は間接的に監視される。ピンホール乾燥完了まではアルコゲルの初期状態から目標の屈折率に依存して1週間から1ヶ月間かかる。疎水化処理した後、従来の方法と同様に実行させるために、アルコゲルは回復過程としてエタノールに浸漬される。

3.3 密度と屈折率の関係

エアロゲルの屈折率は密度と以下の式の間関係を持つと考えられている。

$$n(\lambda) = 1 + \alpha(\lambda)\rho. \quad (3.3)$$

ここで、 n は屈折率、 α は定数、 ρ は密度、 λ は光の波長である。純粋なエアロゲルでは、 α 値は 0.21 である [15, 16]。疎水化処理を施したエアロゲルでは、 α 値は 0.21 よりも大きくなると予測された。Belle 実験の ACC のために作った屈折率 1.010 - 1.021 のエアロゲルでは、

$$n = 0.9995 + 0.2789\rho, \quad (3.4)$$

が得られた。ここで λ は 543.5 nm で、アルコゲル合成のための溶媒はエタノールを使用した。この密度 ρ はエアロゲルの体積と質量から計算されている [17]。

アルコゲル合成ではじめに使用される溶媒がメタノールか DMF かによって、この関係式は明らかに異なる。それぞれの溶媒を使用した時の屈折率と密度の関係は以下の式として得られた [11]。

$$n = 1.006 \pm 0.001 + (0.259 \pm 0.003)\rho \dots (\lambda = 405\text{nm}, \text{Methanolsolvent}), \quad (3.5)$$

$$n = 0.998 \pm 0.001 + (0.30 \pm 0.068)\rho \dots (\lambda = 405\text{nm}, \text{DMF solvent}). \quad (3.6)$$

3.4 屈折率測定

エアロゲルの屈折率測定はレーザー・フラウンフォーファー法が採用されている。この測定では、屈折率は以下の式で計算することが出来る。

$$\theta \sim \tan^{-1} \left(\frac{x_{min}}{L} \right), \quad (3.7)$$

$$n = \sin \left(\frac{\theta + \phi}{\sin \frac{\theta}{2}} \right). \quad (3.8)$$

ここで、 L は回転台中心からスクリーンまでの距離、 x_{min} は散乱光子の最小位置、 θ は光子の散乱角度、 ϕ はエアロゲルの角の角度である。測定方法とセットアップを以下に示す (図 3.5)。スクリーンに垂直入射するようにレーザーを設置する。波長はチェレンコフ光の波長に近い 405 nm を使用する。レーザーとスクリーンの間に、エアロゲルを角が回転台の中心に来るように乗せ、エアロゲルにレーザーが当たる位置に調節する。スクリーン上の x 座標の最小値を探す。

3.5 透過率の測定

透過長は分光光度計 (日立 U-3210) を用いて測定される。光源はタングステンランプ、重水素ランプを使用し、波長 185 - 800 nm の範囲の透過長の測定が可能である。透過長 Λ はエアロゲルを d だけ通過した時の光の強度 T と、エアロゲルを抜いた時の光の強度 T_0 から以下の式で計算される。

$$\frac{T}{T_0} = \exp\left(-\frac{d}{\Lambda}\right). \quad (3.9)$$

チェレンコフ光の主な波長領域 400 nm を基準に透過長を評価する。また任意の波長における透過長は

$$\frac{T(\lambda)}{T(\lambda_{400nm})} = \exp\left(-\frac{d}{\Lambda(\lambda_{400nm})}\right), \quad (3.10)$$

によって得られる。ここで測定された透過長はエアロゲル内での散乱長と吸収長を含んだ以下の物理量である。

$$\frac{1}{\Lambda(\lambda)} = \frac{1}{\Lambda_{scat}(\lambda)} + \frac{1}{\Lambda_{abs}(\lambda)}. \quad (3.11)$$

3.6 X線構造解析

KEK の科学棟にある蛍光 X 線分析装置を使ってエアロゲルの元素組成を調べた。屈折率 1.045 - 1.065 のエアロゲルの代表的組成比は

$$Si : C : O = 29.0 \pm 1.2 : 56.7 \pm 2.4 : 14.3 \pm 1.4, \quad (3.12)$$

が得られた。Si と O の組成比およそ 1:2 を確認できる [18]。

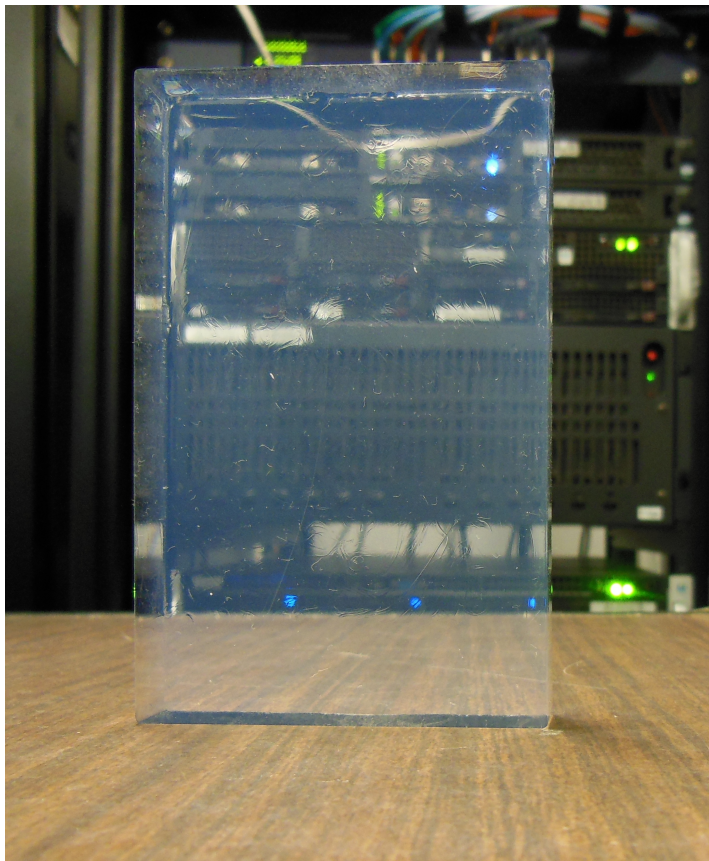


図 3.4: 屈折率 1.05 のシリカエアロゲル: サイズは 60 mm x 90 mm x 10 mm、波長 400 nm における透過長 30 - 40 mm の性質を持つ。物質自身は無色透明だが、うっすら青く見えるのはレイリー散乱による現象が原因である。

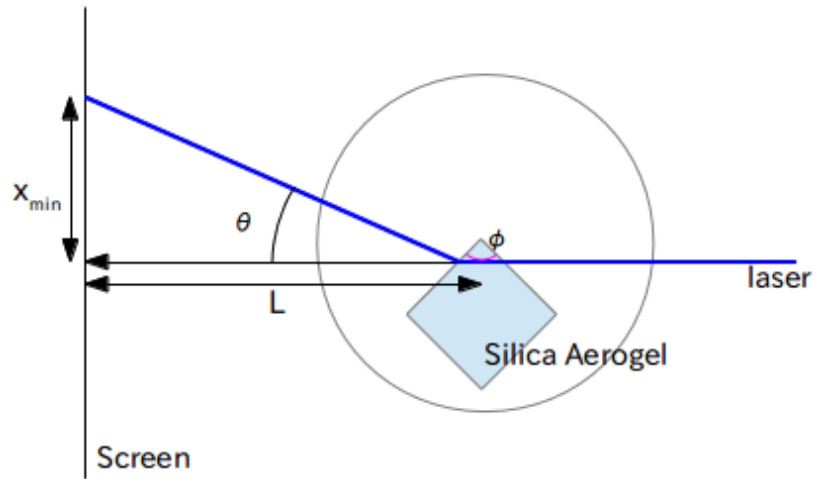


図 3.5: レーザー・フォーファア法

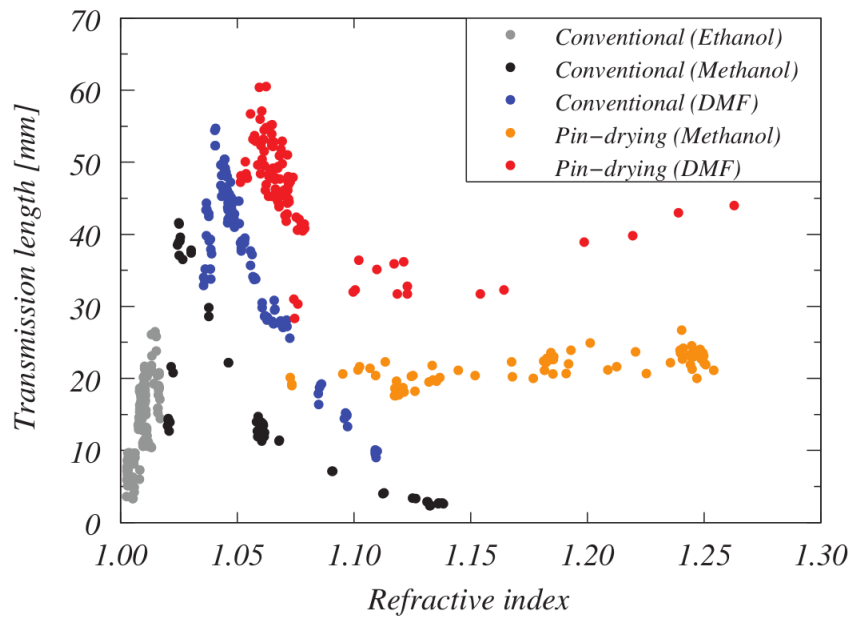


図 3.6: シリカエアロゲルの屈折率と波長 400 nm における透過長の分布図 [14]: 製作方法による違いを確認できる。屈折率 1.05 - 1.08 付近では透過長 60 mm を達成した。ピンホール乾燥によって高い屈折率領域で透明度の高いエアロゲルも製作可能になった。

第4章 光電子増倍管

光電子増倍管 (PMT: Photo Multiplier Tube) は一般にガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面、集束電極、電子増倍管、陽極より構成される。その構造を図 4.1 に示す。光電子増倍管に入射した光は以下に示す過程を経て信号出力される。

1. ガラス窓を透過する。
2. 光電面内の電子を励起し、真空中に光電子を放出 (外部光電効果) する。
3. 光電子は集束 (フォーカス) 電極で第一ダイノード上に収束され、二次電子増倍された後、引き続き各ダイノードで二次電子放出を繰り返す。
4. 最終ダイノードより放出された二次電子群は陽極 (アノード) で取り出される。

光子検出法により単一光子領域までの測定を可能な高感度、高速動作、低ノイズなどを特徴にし高エネルギー物理、天文学、医療診断 (PET 等)、血液分析、環境測定、バイオテクノロジーその他の用途に広く使用されている [19]。この章は PMT の動作原理と特徴、LED およびピコ秒ライトパルサーを用いた校正測定、性能評価測定について説明する。

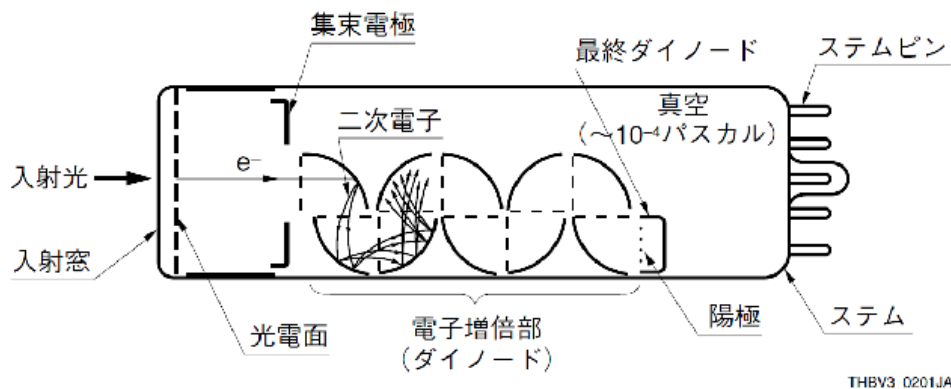


図 4.1: 光電子増倍管の構造

4.1 光電面

光電面の多くは仕事関数が低いアルカリ金属を主成分とする化合物半導体である。現在実用となっている光電面の種類は 10 種類ほどあり、しかもそれぞれに透過性と反射型があり性質が異なっている。1940 年前半に JJEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) が “S ナンバー” と呼ばれるシステムを導入し、光電面と入射ガラスの組み合わせによる分光感度を区別している。現

在は、光電面の種類が多く、材料名で表されることが多くなり、S-1、S-20 など一部を除きあまり使われていない。以下に主な光電面の材料と特性を示す。

1. バイアルカリ (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs): 二種類のアルカリ金属を使うため「バイアルカリ」と呼ばれる。透過型で紫外線から可視光に感度をもち、高感度、低暗電流。NaI(Tl) シンチレータの発光波長とよく一致しているためシンチレーションカウンティングによる放射線計測に多く使用されている。反射型は同じ材料でも製法が異なり、長波長側の感度が増強され、紫外域から 700 nm 程度の波長範囲をもつものも存在する。近年、スーパーバイアルカリ (Super Bialkali) とウルトラバイアルカリ (Ultra Bialkali) は最大量子効率がそれぞれ 35% (350 nm) と 43% (350 nm) を実現した。
2. マルチアルカリ (Sb-Na-K-Cs): 三種類以上のアルカリ金属を使用した光電面。紫外から 800 nm 程度の広波長域をもつので分光光度計などに広く使用されている。また 900 nm あたりまでのびた赤外延長型もあり、窒素酸化物の気相化学発光検出器などに使用されている。

4.2 量子効率

光電面に光子が入射すると、価電子帯の電子は光子からエネルギー ($h\nu$) を吸収・励起し、表面に拡散する。この電子は真空準位障壁を越え、光電子として真空中に放出される。これらはいずれも確率過程で示され、量子効率 (出力電子数 / 入射光子数) $\eta(\nu)$ は次式で与えられる。

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_\nu}{k} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{kL}} \right) \cdot P_S \quad (4.1)$$

ここで、 R は反射係数、 k は光子の全吸収係数、 P_ν は光吸収のうち、真空レベル以上に励起される確率、 L は励起電子の平均逸脱距離、 P_S は表面に達した電子の真空中に放出される確率、 ν は光の振動数である。

4.3 ダイノード

ダイノードには多くの種類があり構造や段数などによって、増幅率、時間応答特性、出力直線性 (バルスリニアリティ) など特徴があるため、使用目的の応じて選択する必要がある。以下に主に使用するダイノードの断面図を示し、簡単な特徴を示す。

1. ラインフォーカス型: ヘッドオン型光電子増倍管に使われており、光電子の収集効率に優れている。したがって検出効率、出力の一様性に優れている。また高速時間応答特性を有し、時間分解能に優れている。
2. メッシュ型: メッシュ状のダイノードを積み重ねた構造。コースメッシュ型とファインメッシュ型があり、リニアリティに優れ、次の影響も受けにくい。クロスワイヤーアノードやマルチアノードを使用すれば入射光の位置を検出することも可能。ファインメッシュ型は高磁界用光電子増倍管に使用される。
3. メタルチャンネルダイノード型: 電子軌道シュミレーションと微細加工技術によって、極薄型の電極を形成し、高精度で積層したもの。ダイノードが近接しているため、小型で時間特性が優れている。磁界によるゲイン変化も比較的小さい。

4. マイクロチャンネルプレート (MCP) 型: 厚さ 1 mm 以下のマイクロチャンネルプレートを使っているため特に優れた時間応答特性を有す。また磁界によるゲインへの影響も小さい。

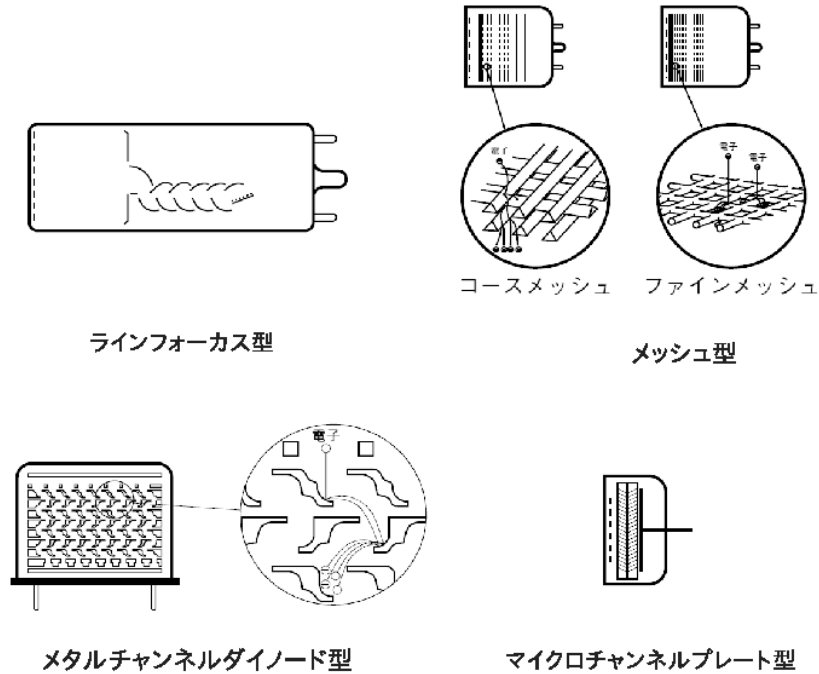


図 4.2: ダイノードの種類

4.4 増幅率

二次電子放出比 δ はダイノード間の電圧 E の関数であり、次の式で表される。

$$\delta = \alpha \times E^k \quad (4.2)$$

ここで α は定数、 k は電極の構造・材質で決まり、 $0.7 \sim 0.8$ の値をとる。光電面から放出された光電子流 I_k は、第一第一ノードに入射して二次電子流 I_{d1} を放出する。この時の第一第一ノードにおける二次電子放出比 δ_1 は次の式で表せる。

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (4.3)$$

さらに電子は第 2、第 3 ダイノードへとカスケード的に倍増される。以降第 n 段目の二次電子放出比 δ_n は

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad (4.4)$$

とあらわせる。光電子増倍管の第ノードの数を n とすると、等分割デバイダの場合、ゲイン μ の印可電圧 V に対する変化は次式になる。

$$\begin{aligned}\mu &= (\alpha \times E^k)^n \\ &= \alpha^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} \\ &= A \times V^{kn}\end{aligned}\tag{4.5}$$

ただし $A = \alpha^n / (n+1)^{kn}$ とする、この式から、ゲイン μ は印可電圧 V の kn 乗に比例することがわかる。一般に印可電圧をあげるとゲインは高くなる。

4.5 時間特性

PMT は高い時間特性を持つ。これらの時間特性は主に陰極から放出された電子が陽極まで増幅される間の走行時間によって決定される。表 4.1 にダイノード別の時間特性と特徴を示す通り、設計によって大きく影響される。上昇時間 (Rise time) は出力パルス波高値が 10% から 90% に達するまでの時間、下降時間は逆に 90% から 10% に戻るまでの時間、電子走行時間は入射光が光電面に入ってから出力パルスの頂点に達するまでの時間としてそれぞれ定義される。単一光子を入射した時の走行時間のゆらぎ (半値幅) を T.T.S. (Time Transit Spread) と呼ぶ。これらの時間特性は PMT の印加電圧と入射光子の数に依存した性質を持つ。

ダイノード	上昇時間 [ns]	下降時間 [ns]	電子走行時間 [ns]	T.T.S.[ns]
ラインフォーカス	0.7 - 3	1 - 10	16 - 50	0.37 - 1.1
メッシュ	2.5 - 2.7	4 - 6	15	- 0.45
メタルチャンネル	0.65 - 1.5	1 - 3	4.7 - 8.8	0.4
マイクロチャンネル	0.1 - 0.3	0.5 - 1	-	-

表 4.1: ダイノード別の時間特性 [19]

4.6 LED による光電子増倍管の校正測定と性能評価測定

発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode) は順方向に電圧を加えた際に発光する半導体素子のことである。発光原理はエレクトロルミネセンス (EL) 効果を利用している。Function Generator から信号を送り LED を発光させるため、抵抗 51Ω の直列接続回路を製作した。本測定では (1) 単一光子領域での印加電圧と増幅率の関係、(2) 0.5 p.e. しきい値におけるノイズレート、(3) 時間分解能の個性を評価する。発光波長は PMT の有効感度波長領域に対応して 470 nm, 520 nm の 2 種類用意した。

4.6.1 供給電圧と増幅率の関係

光電子増倍管の供給電圧と増幅率の関係を調べる。供給電圧 V を一定にしたとき光量に応じて出力値 M は変化する。光量を増やすと出力の平均値が大きくなるが、光量を減らしていくとあ

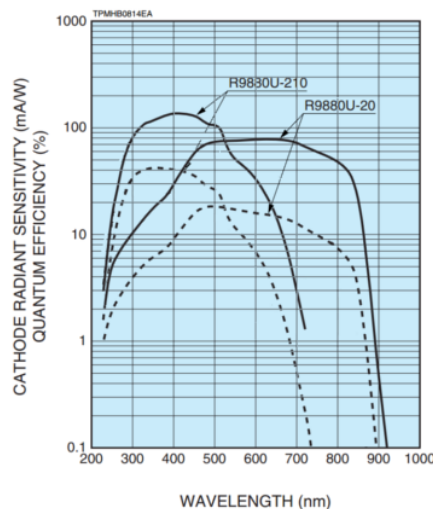


図 4.3: PMT R9880U シリーズ 写真 (左)、波長に対する量子効率 (右)

る領域でペDESTAL事象 (光を感じない事象) が確認できる。これは PMT の光電面における量子効果が現れてくるためである。この領域を単一光子領域という。ペDESTALと信号分布 (以降 1 p.e. peak と呼ぶ) を区別することで光電面から飛び出てくる光電子 1 個あたりの信号値 (増幅率 Gain) が得られる。増幅率 μ は供給電圧に依存した関数を持ち、供給電圧を増やすと増幅率も増加する。CAMAC ADC の変換係数 $C_{ADC} \sim 26pC/ADC$ (変換係数校正は付録に掲載する)、素電荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}C$ 、デジタル信号の平均値 M とペDESTAL平均値 M_{ped} を用いて増幅率 $\mu(V)$ は、

$$\mu(V) = \frac{(M - M_{ped})C_{ADC}}{e} \quad (4.6)$$

と評価される。

4.6.2 ノイズ頻度とノイズ比

ADC 分布から p.e. 分布に座標変換することで必要としていた物理量が見えてくる。これには、事前に ADC のペDESTAL平均値 M_{ped} と PMT の増幅率 $\mu(V)$ は測定されているとする。このときの PMT の出力値 M は光電子数

$$N_{p.e.} = \frac{(M - M_{ped})C_{ADC}}{\mu(V)e}, \quad (4.7)$$

に相当する。一般に光を検出する / しないは 0.5 p.e. をしきい値で決定される。

光電子増倍管は光検出器のなかでも熱雑音が比較的少ない (ランダムで数 kHz 程度)。この頻度をノイズ頻度という。電圧を供給した直後は雑音が多く、PMT の出力ピーク電圧値-25 mV しきい値でノイズ頻度は 1 - 10kHz が確認され、数十分すると徐々に 100 - 300 Hz へ落ち着く。普通実験では、PMT は粒子反事象と同期される。そのタイミング (幅 50 - 200 ns の間) に検出された熱雑音の割合をノイズ比という。ノイズ比は光源が発光していない全事象における PMT の誤認

識事象の割合で測定される。

$$\text{ノイズ比} [\%] = \frac{\text{誤認識事象}}{\text{全事象数}}, \quad (4.8)$$

また、ノイズ頻度とノイズ比の関係は以下に示すことが出来る。

$$\text{ノイズ頻度} [Hz] = \text{ノイズ比} \div \text{積分幅} [s]. \quad (4.9)$$

4.6.3 時間分解能

光電子の走行時間のゆらぎ T.T.S. を時間分解能と定義して、TDC を用いて測定評価する。Function Generator からの TTL 信号を TTL-NIM 変換後 TDC の start に、PMT からの信号を Discriminator でデジタル信号に変換した後、Delay で数十 ns 遅らせて stop に入力する。TDC では start と stop の時間差をデジタル変換する (変換係数 C_{TDC} は付録に掲載する)。PMT の時間分解能は検出光電子数が多いと良くなる傾向がある。単一光子領域における時間分解能はチェレンコフ光検出のために重要である。

4.6.4 セットアップ

共通のセットアップ：Function Generator からパルス信号を LED に送り発光させ、LED 光源からの光を光電子増倍管で測定する。LED と PMT は遮光するため暗箱内に設置。Function Generator は LED に信号を送ったと同時に TTL 規格の信号を送り、TTL-NIM で規格を変換し、Gate Generator で整形・時間のズレを調節し ADC Gate に入力する。R9880U-210、R9880U-20、H11934-100 など 7 種類、計 26 台が校正と性能評価測定された。型番のデータシートは付録に載せてあり、使用されている光電面、ダイノード、感度波長領域などを確認できる。

増幅率測定とノイズ頻度測定：PMT の信号が Gate の信号幅の内に入っているか確認する (図 4.4)。トリガーは Function Generator が LED に信号を送った事象である。LED に信号を送ったのに発光しなかった事象は存在しうるが無視できるほど稀である。PMT からの出力を Amplifier で増幅または直接 CAMAC ADC に入力、CAMAC Crate Contraller を通じて PC に送信される。

時間分解能評価測定：TTL-NIM からの信号を TDC の start に入力する。PMT の信号を分割して一方を遅延し ADC へ、他方を Discriminator でデジタル信号に変換した後、Delay で数十 ns 遅らせて stop に入力する。TDC では start と stop の時間差をデジタル変換する。ADC と TDC の情報をイベントごとに記録し検出光電子数における時間分解能を評価する。

4.6.5 結果

印加電圧を 20 V ごとに 1200 - 1400 V の領域における PMT の増幅率を測定した。図 4.5 に解析結果を示す。ペDESTAL 事象と 1 p.e. ピークをそれぞれガウス関数でフィッティングした平均値 M_{ped} と M から増幅率を計算する。また統計誤差 σ_{stat} はそれぞれの標準偏差の和 $s + s_{ped}$ を用いて評価される。

$$\sigma_{stat} = \frac{s + s_{ped}}{\sqrt{N}}. \quad (4.10)$$

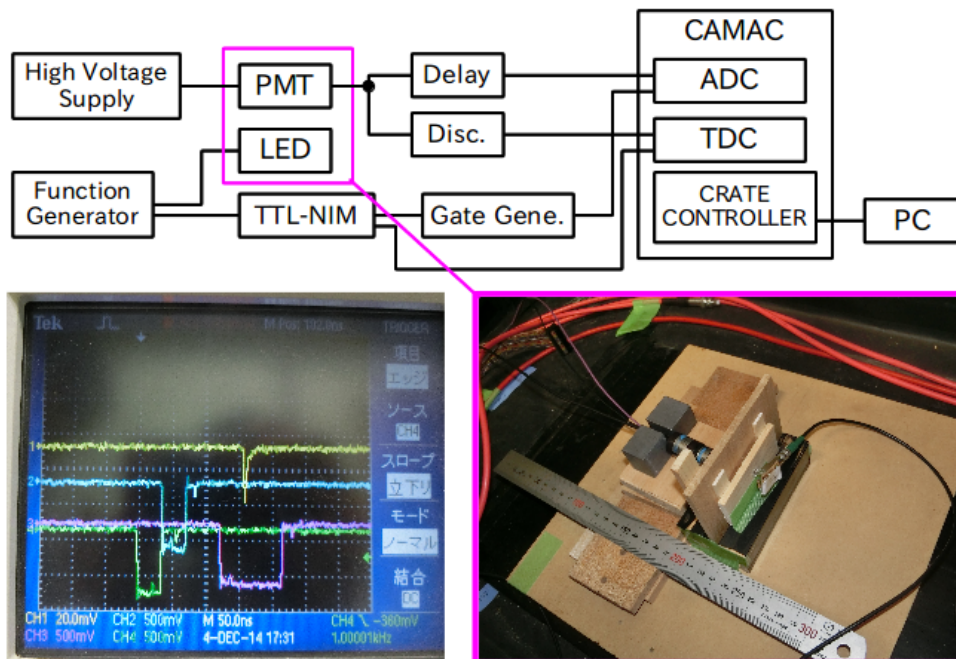


図 4.4: 回路図 (上)、セットアップ写真 (右下)、オシロスコープ信号 (左下) : Gate(紫)、信号(黄)

ここで、 N はイベント数である。系統誤差 σ_{sys} は単一光子領域において n_{LED} 種類の光量を用いたときの増幅率の標準偏差から以下で与えられる。

$$\sigma_{sys} = \frac{s}{\sqrt{n_{LED} - 1}}. \quad (4.11)$$

以上から誤差の伝搬を考慮して、最大誤差 σ は

$$\sigma = \text{sqrt}(\sigma_{stat}^2 + \sigma_{sys}^2), \quad (4.12)$$

と評価した。イベント数が 10,000 では統計誤差よりも、系統誤差のほうが支配的であった。結果として測定精度は $|(\mu - \mu_0 \pm \sigma)/\mu_0| \leq 5\%$ および $\sigma_V/dV \sim 5\%$ なので、良好な校正測定であると言える (図 4.6)。ここで、 μ_0 はフィット関数の値、 dV は供給電圧の変位、 σ_V はデジタル値 ± 1 である。供給電圧と増幅率の関係式 4.5 から A と k のパラメータを導くことができる。この値は主に PMT に使用されている素材に寄与する値である。R9880U-210 のダイノードは 10 段なので、ここで用いた PMT は $k = 0.448 \pm 0.002$, $a = 0.64 \pm 0.01$ が得られる。

PMT は電源供給直後ノイズ頻度が高く、次第に減少し安定する。個体差はあるが R9880U-210 は安定するまで $10^2 - 10^3$ 秒かかる。R9880U-20 と H11934-200 はノイズが多く、時間と共に減少はしなかった (図 4.7)。供給電圧におけるノイズ頻度は PMT のシリーズごとの差が確認された。R9880U-210 は 1kHz 未満で、HV に依存性があまり見られない。R9880U-20 は 100 kHz 程度で、HV の増加に伴って増加する傾向がある。H11934-200 は 10 kHz 程度で HV の依存性を確認できる。

時間分解能の結果を図 4.10 に示す。検出光電子数に依存して時間分解能が良くなっている様子が得られた。しかし、光量が十分な領域で分解能 2 ns はカタログ値と一致しない。PMT の時間特性とは別に光源側の揺らぎ、つまりスタート信号の揺らぎが影響しているのではないかと考えられる。Function Generator は LED に幅 30 ns、立ち上がり 5 ns、立ち下がり 5 ns のパルス波を送り発光させている。おそらくこれが原因であると考えられる。

結果 LED を用いた PMT の性能評価測定は増幅率、ノイズ頻度評価には適しているが、時間特性は測定精度が悪く適さない。時間特性の評価は時間分解能が良いピコ秒ライトパルサーの光源が適していると考えられる。

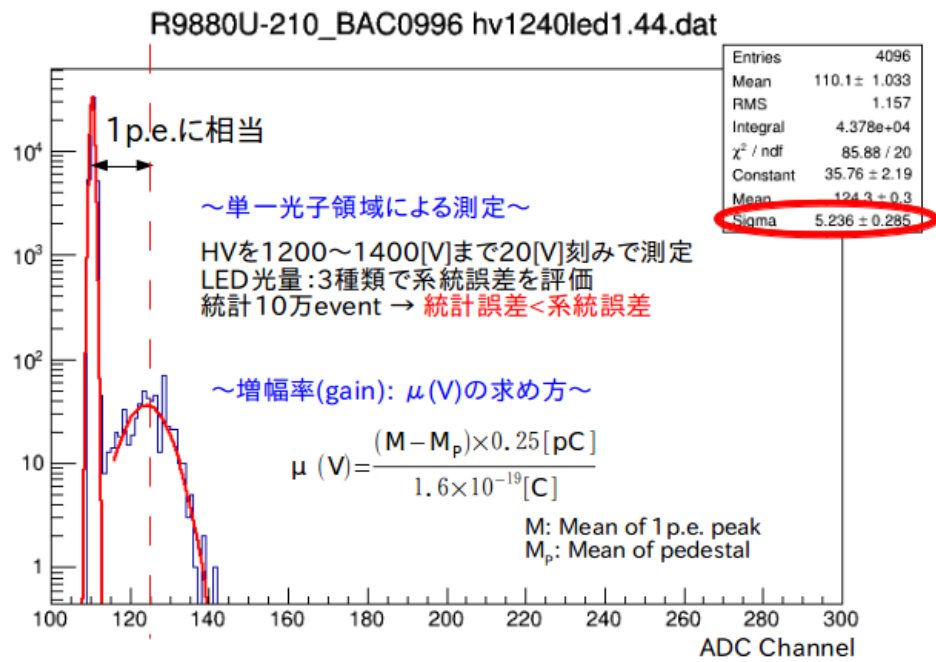


図 4.5: LED365nm の光量における PMT:H1161 RA6964 の出力を ADC で解析。縦軸:イベント数、横軸:ADC Channel

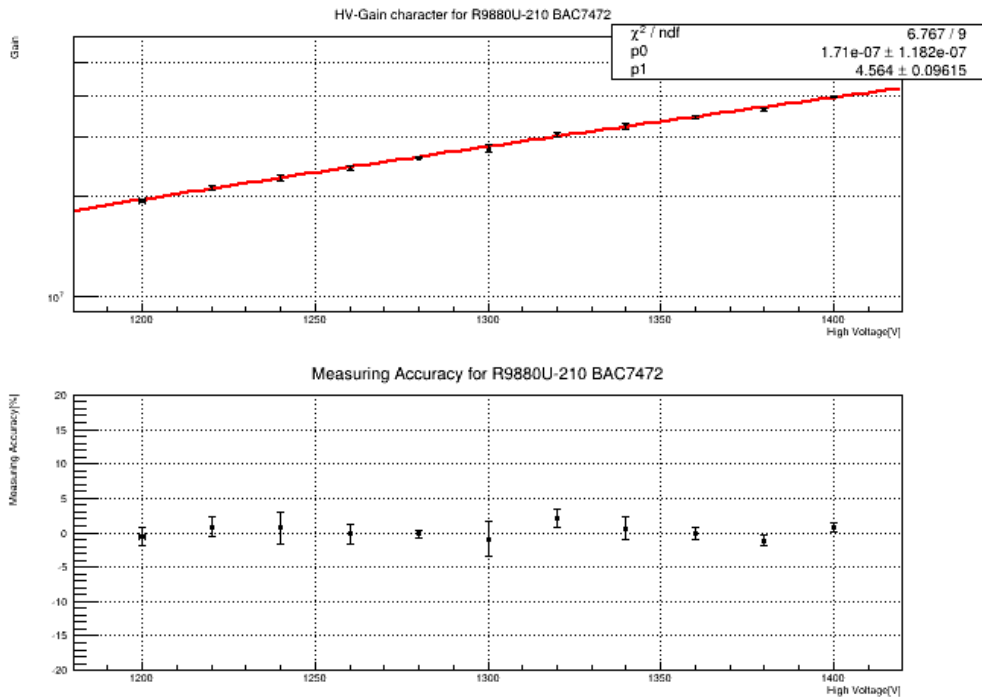


図 4.6: LED365nm の光量における PMT:H1161 RA6964 の出力を ADC で解析。縦軸:イベント数、横軸:ADC Channel

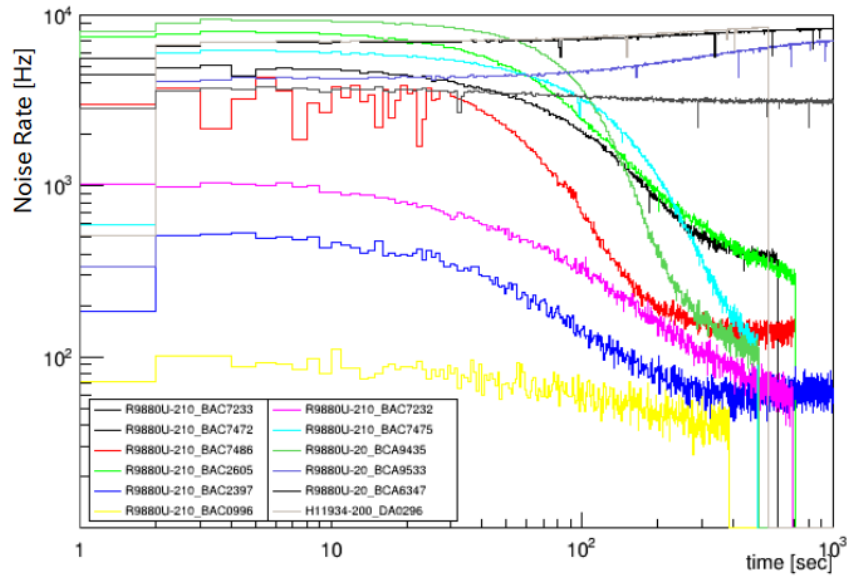


図 4.7: 電源供給直後の PMT ノイズ頻度の変化

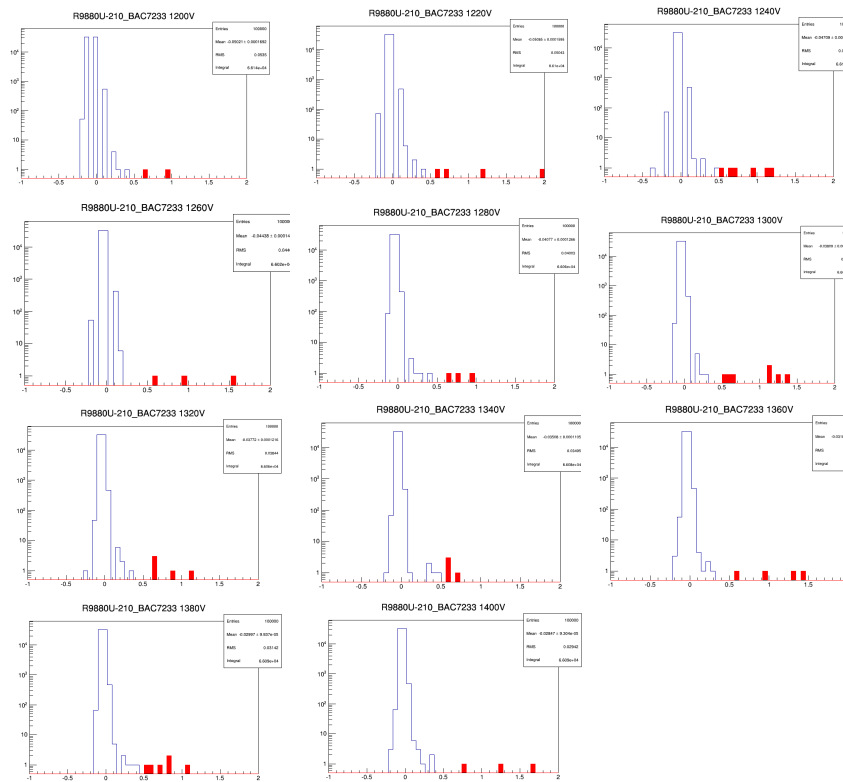


図 4.8: 暗室中の PMT 光電子数分布、0.5 p.e. しきい値による熱雑音 (赤)

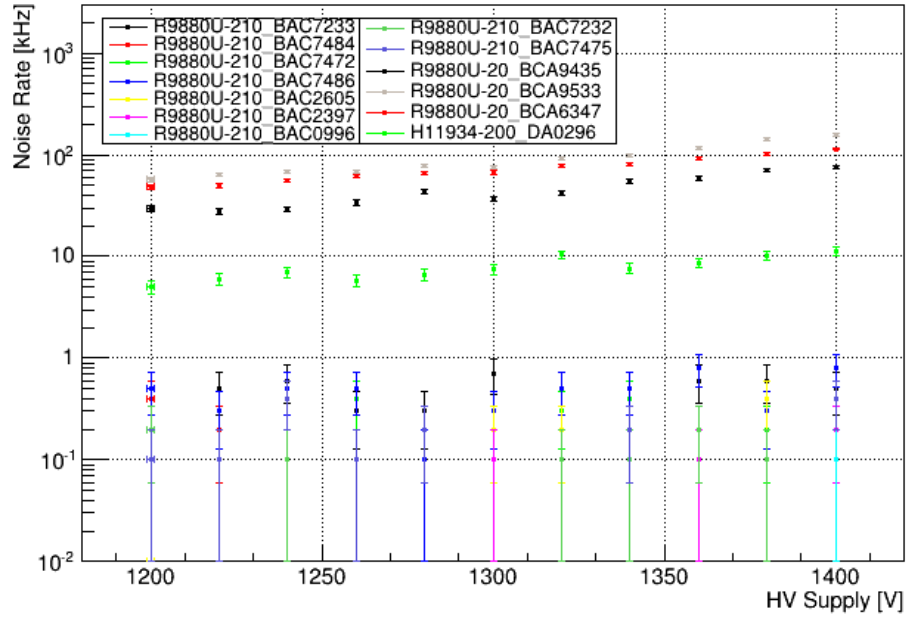


図 4.9: ノイズ頻度の供給電圧依存性、R9880U-20 と H11934-200 は HV に伴った熱ノイズの増加を確認した。R9880U-210 はノイズが低く、 10^{-2} kHz 以下はゼロとして評価されている。

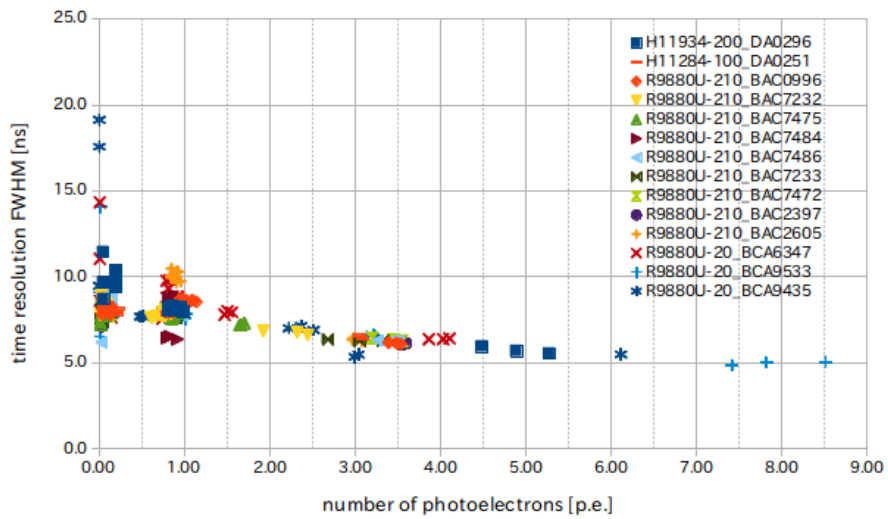


図 4.10: LED を用いた PMT 時間特性

4.7 ピコ秒ライトパルサーによる光電子増倍管の時間特性評価測定

LED を用いた評価測定では、PMT 時間特性において精度が限界であった。そこで、時間特性の早い浜松ホトニクス社製ピコ秒ライトパルサー (PLP-10-040) を用いた。これは発光波長が 405 nm のレーザーダイオードヘッドとコントローラから構成されており、本測定では R9880U-210 と H11934-200 のシリーズの時間特性を評価した。セットアップはコントローラがヘッドに信号を送ると同時に出力される sync から -500 - -700 mV の論理信号をスタートにして LED 測定と同様に ADC と TDC でデータ取得した。入射光量はレーザーと PMT の間に ND フィルターを入れて減光させた (図 4.11)。

PMT のアナログ信号の平均波形を図 4.12 に示す。速い立ち上がり (sub ns) を確認できる。検出光電子数がおよそ 1 のときの時間分解は 600 - 700 ps でカタログ値にほぼ一致する。R9880U-210 は光電子数における時間特性の変化はあまり見られなかった。H11934-200 は光量の増加に伴い時間分解能が小さくなる傾向が得られた (図 4.13)。それぞれのデータを表 4.2 に示す。

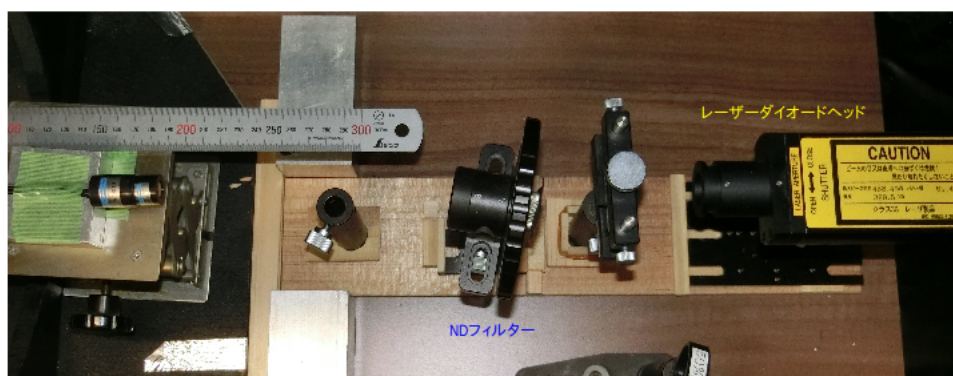


図 4.11: レーザーを用いた PMT 時間特性セットアップ

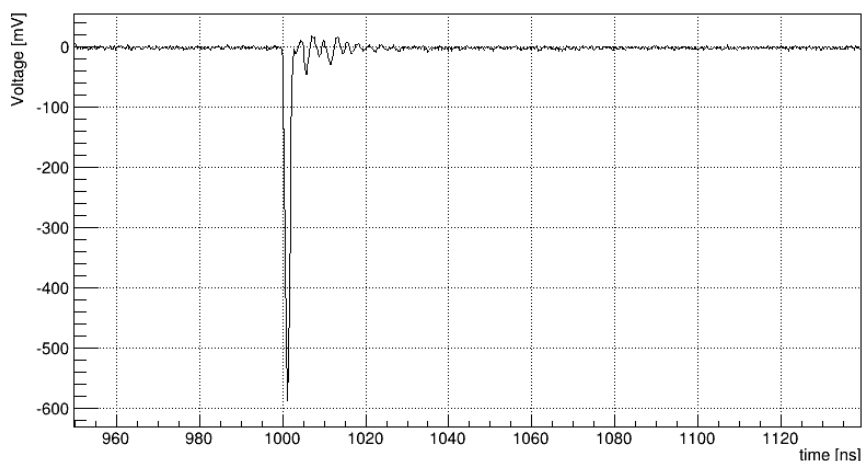


図 4.12: レーザー光源による PMT の平均波形

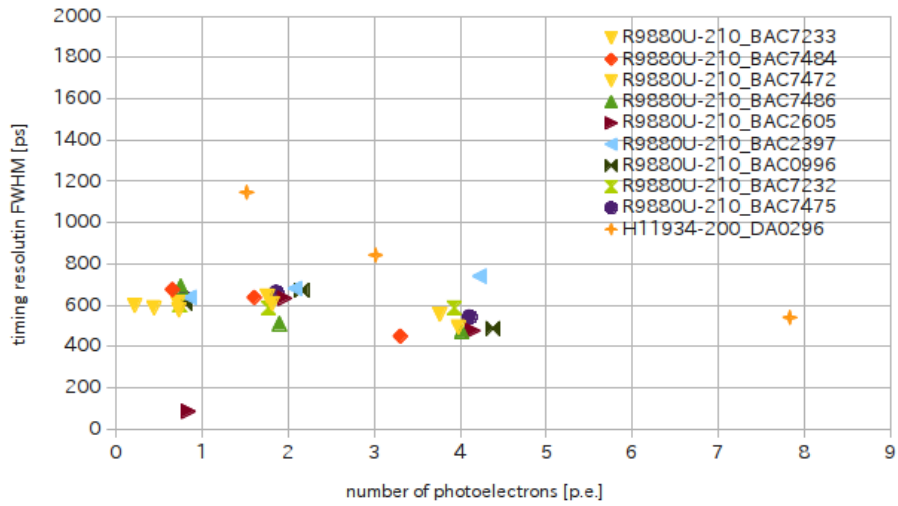


図 4.13: レーザーによる時間分解能測定

型番	T.T.S. [ps]
R9880U-210 BAC7233	608
R9880U-210 BAC7484	676
R9880U-210 BAC7472	644
R9880U-210 BAC7486	692
R9880U-210 BAC2605	634
R9880U-210 BAC2397	741
R9880U-210 BAC0996	673
R9880U-210 BAC7232	604
R9880U-210 BAC7475	661
H11934-200 DA0296	1147

表 4.2: レーザーによる単一光子領域の PMT 時間特性

第5章 MPPCとEASIROC

Multi-pixel photon counter (MPPC) は、浜松ホトニクス株式会社が開発した SiPM(silicon Photomultiplier) もしくは PPD(Pixel Photon Detector) とよばれる半導体光検出器の一つである [20]。複数のガイガーモード APD をピクセル化したデバイスで、以下の特性をもつ。

1. 高い量子効率
2. 良い線形性
3. 低電圧
4. 早い時間特性
5. 磁場の影響を受けない
6. 高雑音

汎用 MPPC 読み出し ASIC である EASIROC の出現により、SiPM の取り扱いが比較的容易になった。この章は MPPC の動作原理と特性、汎用読み出しモジュール、そしてそれを用いた MPPC の校正および性能評価測定について説明する。

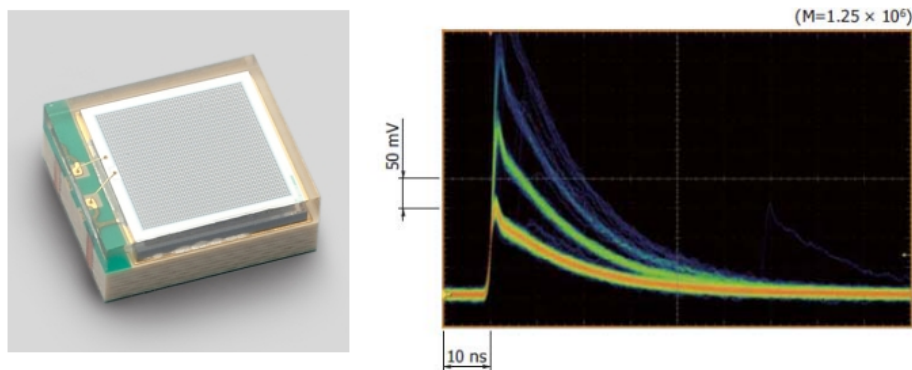


図 5.1: MPPC S12572 シリーズ (左)、光子検出信号の波形 (右) は光子数 1, 2, 3 と離散的に識別することが可能 [20]。

5.1 原理

APD に降伏電圧以上の逆バイアスを印加することをガイガーモードといい、内部電圧が非常に高く、増幅率が大きく、そして光子 1 個でも出力信号は飽和する特徴を持つ。

光子がガイガーモード APD に入射すると、アバランシェ層に電子 - 正孔対 (キャリア) を生成する。半導体内で発生したキャリアは逆電圧により加速され、半導体内の電子と衝突して新たなキャリアを生成する。この反応が繰り返される結果、電子雪崩が生じてキャリアが指数関数的に増幅される。このときの増幅率は $10^5 - 10^6$ 程度である。ガイガーモード APD はわずかな光子が入射しても放電現象を起こし、出力電流は飽和する。

APD に光子が入射し直接接続されたクエンチング抵抗に電流が流れると、逆バイアスは降伏電圧 V_{RB} まで低下する。その後、再充填され逆バイアスが V_R まで戻り、再びガイガーモードになる。この時間、光子は検出されない不感時間となる。この APD の容量を C とした時、出力する信号 Q は、

$$Q = C(V_R - V_{BR}), \quad (5.1)$$

で与えられる。MPPC はこのガイガーモード APD を並列に接続した構造を持つので、各ピクセルからの信号の和 Q は検出光子数 N_{photo} に比例する。

$$N_{photo} \propto Q = \sum_i Q_i \quad (5.2)$$

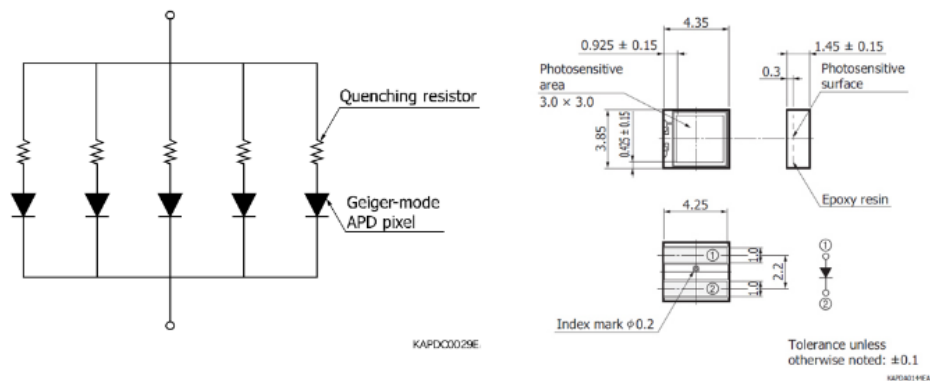


図 5.2: MPPC におけるガイガーモード APD とクエンチング抵抗の接続構造 (左) と MPPC S12572 シリーズの寸法 (右)

5.2 検出効率

検出効率 (= 検出光子数 / 入射光子数) は、開口率・量子効率・アバランシェ確率の積で表せる。開口率は MPPC のピクセル領域全体に占める光検出可能部分の割合である。MPPC の受光面にはピクセル間の配線などで光を検出できない部分が存在する。ピクセルサイズが小さいほど、開口率は低くなる傾向をもつ。量子効率はピクセルに入射した光子がキャリアを生成する確率で、入射光の波長に依存する。アバランシェ確率は光電効果によりピクセル内で生成されたキャリアがアバランシェ増倍を起こす確率で、逆電圧に依存して増加する。

5.3 増幅率

MPPC の増幅率 μ は光子 1 個あたりの出力 Q における素電荷量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C の比率として定義される。

$$\mu = \frac{Q}{e} \quad (5.3)$$

式 5.1、5.2 より、増幅率と印加電圧は比例関係をもつことがわかる。

5.4 ダークカウント

MPPC では光によって生成されたキャリアだけではなく、熱的に発生したキャリアによっても信号が発生することがある。この信号をダークパルスと呼ぶ。熱的に発生したキャリアも一定の信号 (1 p.e.) に増倍されるので、ダークパルスは光子検出信号とともに観測され、検出誤差の原因となる。観測されたダークパルスの数をダークカウントと呼び、単位時間当たりのダークパルスの数として定義される。ダークカウント N は、動作温度 T において以下の式で表せる。

$$N_{dark}(T) \propto T^{3/2} \exp(E_g/2kT) \quad (5.4)$$

ここで、 T は絶対温度 [K]、 E_g はバンドギャップエネルギー [eV]、 k はボルツマン定数 [eV/K] である。

5.5 EASIROC モジュール

東北大学と KEK が共同で開発した汎用 MPPC 読み出し回路で EASIROC モジュールと呼ぶ。2 つの EASIROC(ASIC) を埋め込んでいるので、最大 64ch の供給電源と個別のバイアス調整、PreAmp、SlowShaper、ADC の機能を内蔵している。2014 年にこの回路を入荷して動作確認と性能評価及び校正測定を実施した。

5.5.1 システム基本動作

読み出しボードのブロック図を図 5.4 に示す [21]。EASIROC モジュール本体はアナログ処理 ASIC として EASIROC チップ [22] と ASIC 及び DAQ 制御のための FPGA、そして ADC で構成されている。MPPC にはフラットケーブルを用いて 1 チップ当たり 32ch の電圧供給と読み出し可能にする。MPPC には HV 線と信号線の 2 種類が配線され、個別バイアスの調整は InputDAC によってオフセットを調節することで可能にしている。EASIROC の内部 PreAmp には HG と LG の 2 種類存在し、160 fC から 320 pC までの入力幅をもつ。これらは同時に A/D 変換が可能のため、基板上に 2 種類配線されている。EASIROC に内蔵されている Discriminator は FPGA に接続されモジュール背面の LVDS 信号として全 64ch を出力する。FPGA は EASIROC の制御、SiTCP を通して外部と通信、EASIROC からの Discriminator の信号を処理してトリガー信号を出力するなどの機能を持つ [23]。

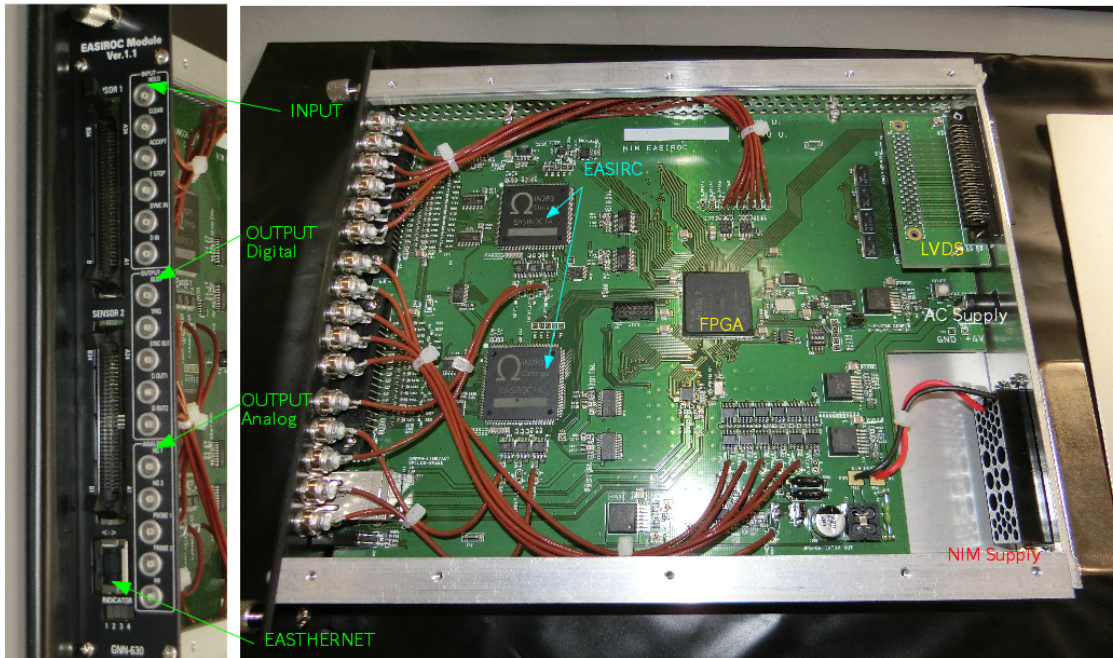


図 5.3: EASIROC モジュールの内部回路

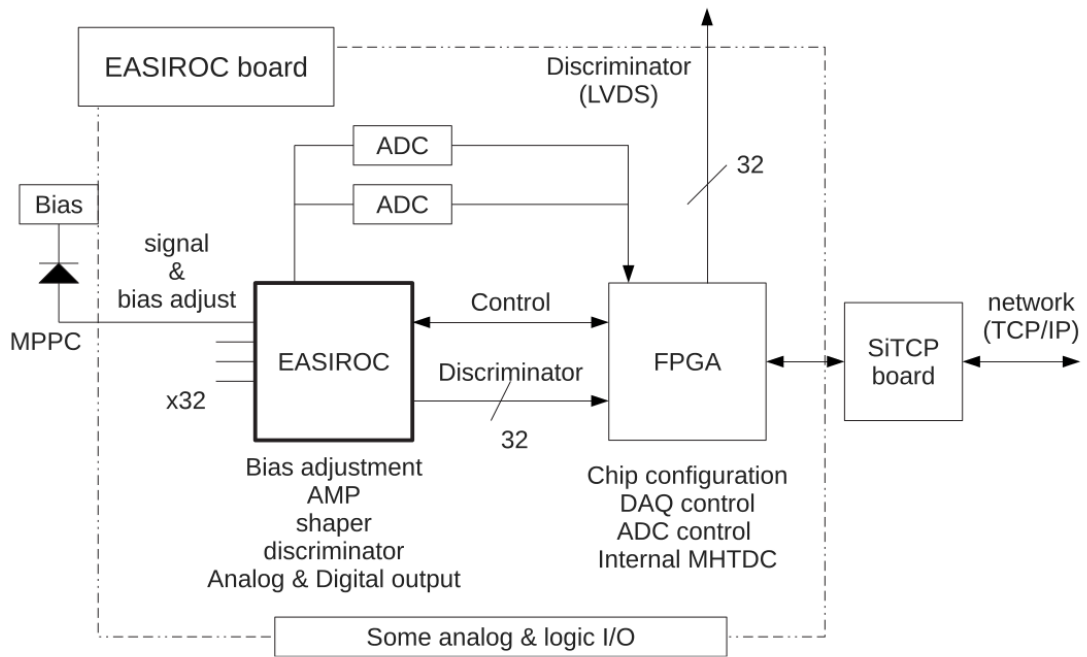


図 5.4: ボード ブロック図 [21]

5.5.2 アナログ出力と ADC

Function Generator から幅 10ns、高さ V_{in} のパルス波形をフラットケーブルを經由して入力し EASIROC モジュールのアナログ出力からオシロスコープで波形を解析した (図 5.5)。波形は Slow Shaper を通じて整形されており、オフセットラインからの高さ V_{out} の波形を出力する。EASIROC モジュールの ADC はピークホールド型で CAMAC ADC とは様子が異なる。

PreAmp 増幅率 75 倍、時定数 25 の場合における入力信号の高さにおける出力信号の高さの関係を図 5.6 に示す。直線よりも 2 次関数曲線の特性を持っている。また同様に入力信号の高さにおける ADC 分布の関係を図 5.7 に示す。EASIROC モジュールのアナログ出力信号の高さと ADC 分布の関係を図 5.8 に示す。この結果から、EASIROC 内部処理では何らかの原因で飽和現象が生じているのかもしれない。アナログ出力の高さと ADC 分布は直線性を保っていた。今回使用した 0 - 15 ch の計 16ch 分のアナログ出力高さと ADC の関係性を図 5.9 に示す。

以上から、input V_{in} は以下の 2 次関数から再構成できる。

$$V_{in} = 8 + 0.3V_{out} - 0.00017V_{out}^2 \quad (5.5)$$

$$= -51.9 + 0.073x_{ADC} - 0.000007x_{adc}^2 \quad (5.6)$$

また、 V_{out} と ADC の変換係数は 0.2 mV/ADC である。

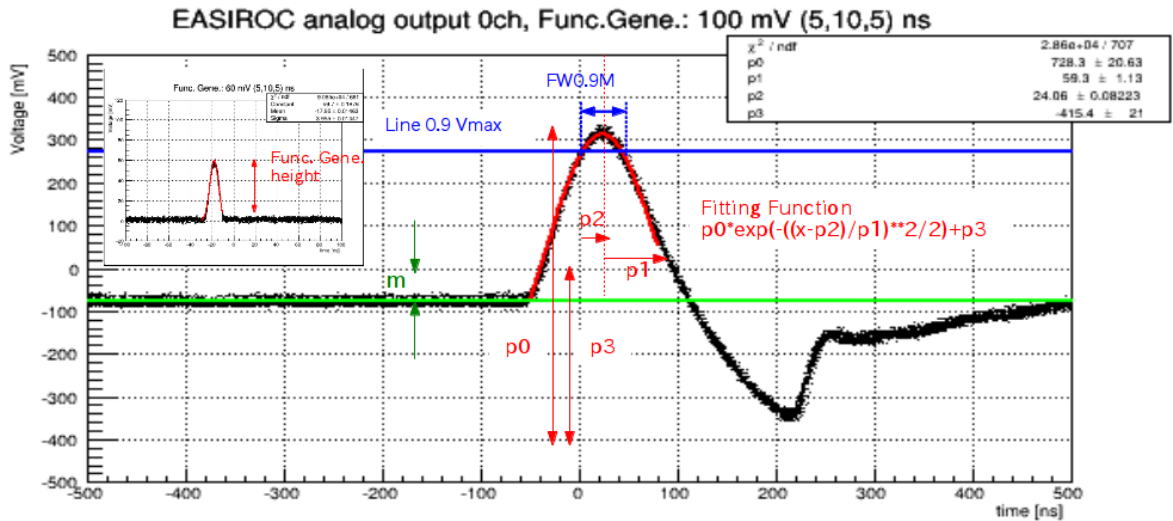


図 5.5: EASIROC analog output 信号は MPPC の生信号を Fast Shaper で整形後 Slow Shaper で鈍らせて出力する。フィッティング関数: $p_0 e^{-\frac{1}{p_1}(x-p_2)^2} + p_3$ は赤線、オフセットラインは緑線、FW0.9M は青線で示す。

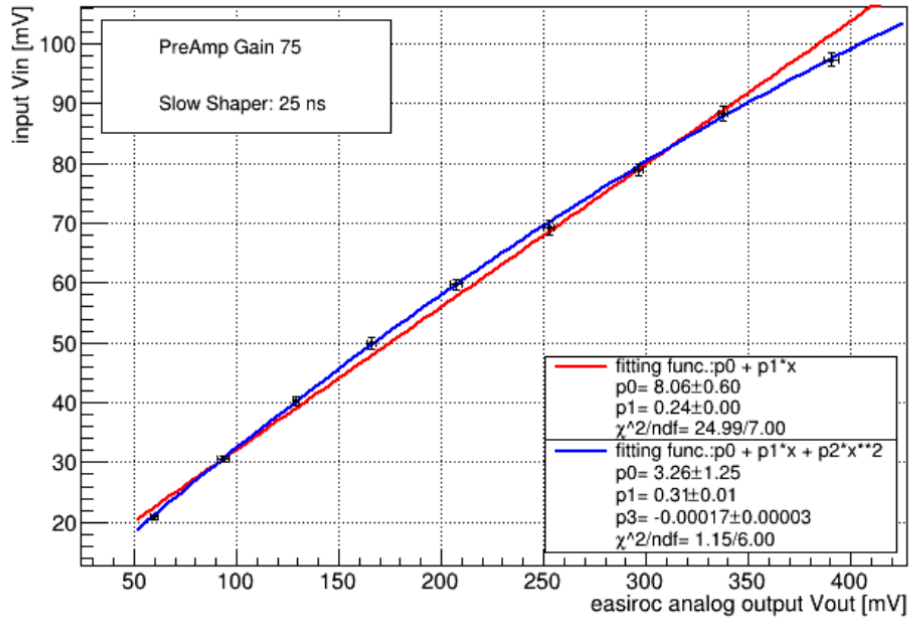


図 5.6: input V_{in} と easiroc analog output V_{out} の関係

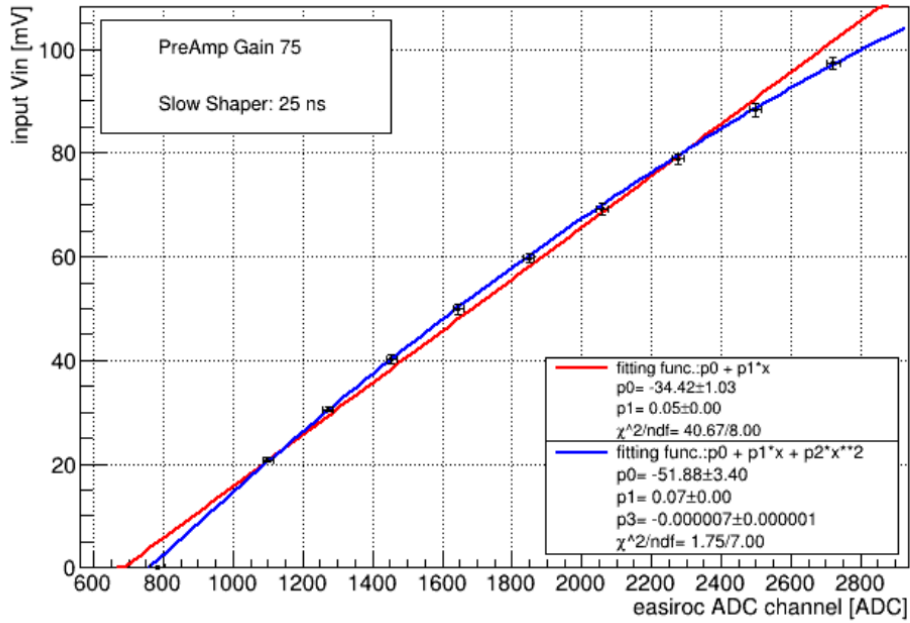


図 5.7: input V_{in} と easiroc ADC channel x_{adc} の関係

EASIROC analog output 0ch

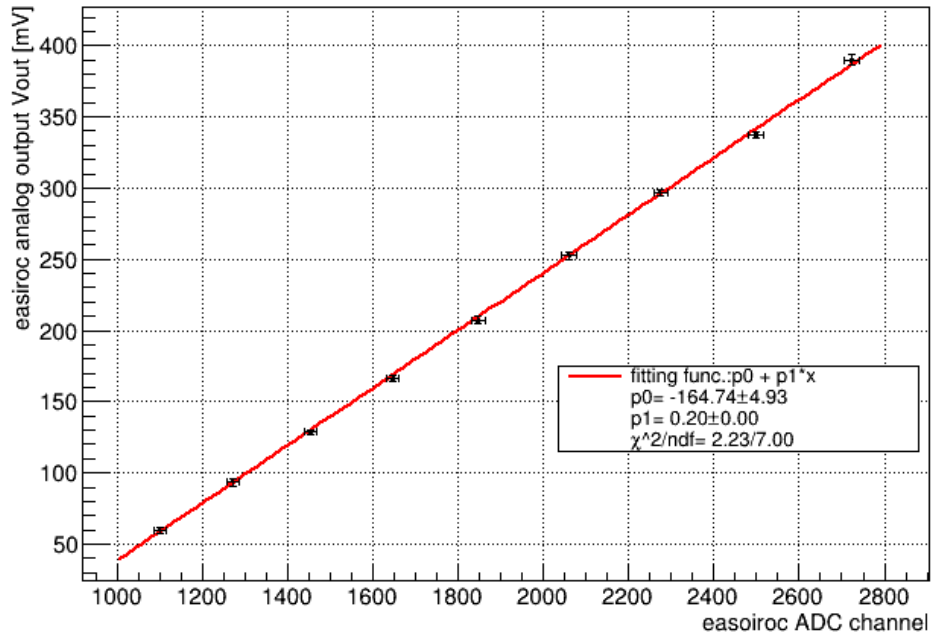


図 5.8: easiroc analog output V_{out} と easiroc ADC channel x_{adc} の関係, 0ch

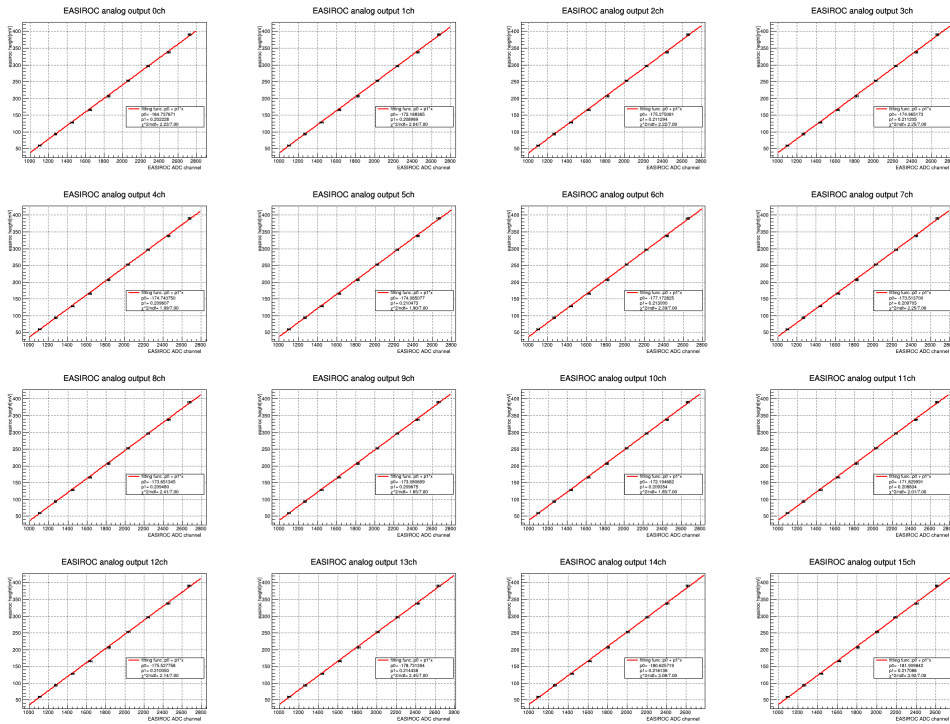


図 5.9: easiroc analog output V_{out} と easiroc ADC channel x_{adc} の関係, 0 - 15ch

5.5.3 Slow Shaper 時定数

図 5.5 の波形をホールドして A/D 変換するので頂点付近である時間は長いほうが良い。今回はピーク最高点 90% 以上を維持している時間を FW0.9M として PreAmp 増幅率と入力信号の高さを維持したまま時定数を変えて出力信号の高さと FW0.9M の関係を調べた。基本時定数を増やすと FW0.9M は増える一方ピークの高さは減る傾向を持つ (図 5.10)。時定数 25 ns を除き、ピークの高さと FW0.9M は 1 次の曲線で近似できることがわかった。

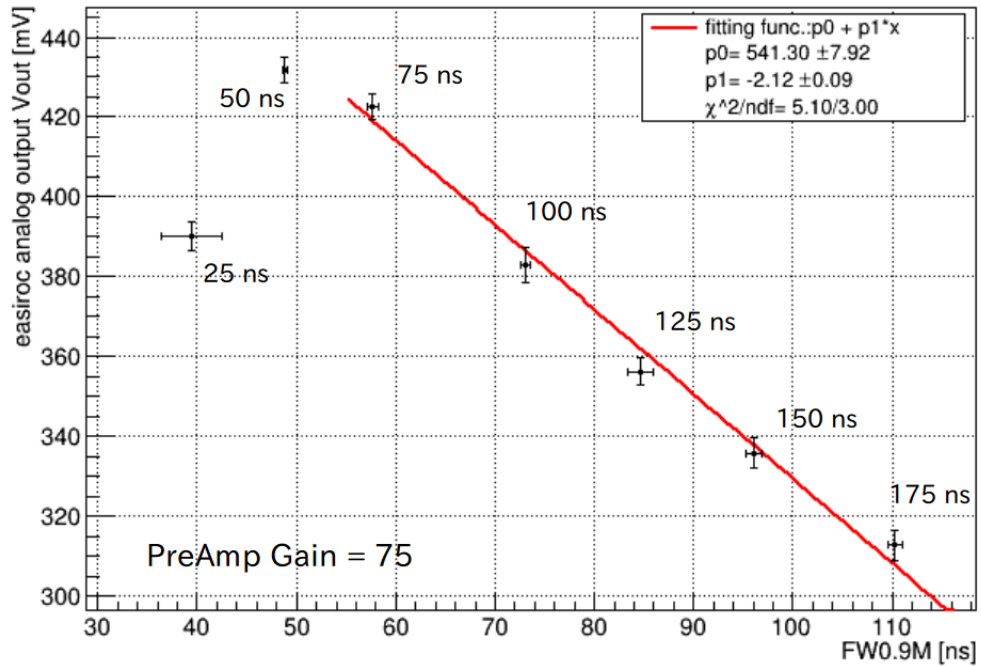


図 5.10: EASIROC 時定数における analog output V_{out} と FW0.9M の関係

5.5.4 PreAmp 増幅率

Slow Shaper の時定数を 50 ns に固定、入力値は一定にして PreAmp HG の増幅率を変更してピーク高さの関係を調べた。15 倍を除いて 2 次曲線に近似できたが、設定値との直線性は 75 倍以上から急激に悪くなる傾向がある。

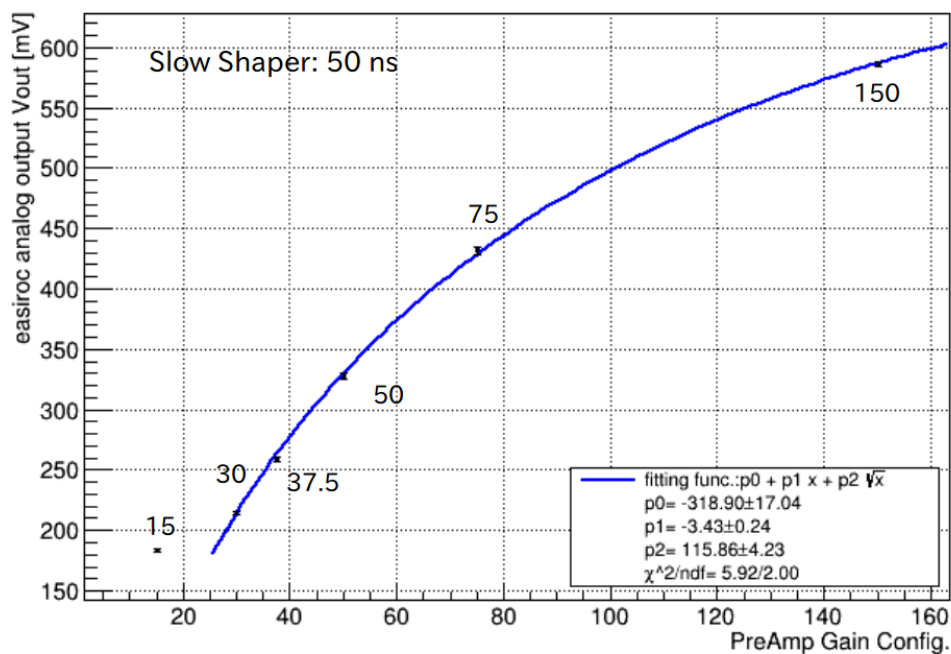


図 5.11: EASIROC PreAmp 増幅率の設置値と analog output V_{out} の関係

5.5.5 LVDS 信号

FPGA から出力された LVDS 規格の論理信号をオシロスコープで解析した (図 5.12)。LVDS は 2 対の信号の差分で低ノイズ、高周波のデジタル信号として知られている。その片方を解析した。フィッティング関数は、以下の式のようにある領域ごとに台形を描いた。

$$y = \begin{cases} \frac{p_0}{p_2}(x - p_3) + p_4 & (p_3 < x < p_3 + p_2) \\ p_0 + p_4 & (p_3 + p_2 < x < p_3 + p_1) \\ \frac{p_0}{p_2}(x - p_1 - p_3) + p_4 & (p_3 + p_1 < x < p_3 + p_2 + p_1) \end{cases} \quad (5.7)$$

このフィッティング関数の自由パラメータは、立ち上がり時間 p_2 、オフセットラインの位置 p_4 、信号の高さ p_0 、信号幅 p_1 をそれぞれ意味している。この場合、立ち下がりトリガーの時刻は $t = p_3 + \frac{1}{2}p_2$ と表すことが出来る。20 個の波形の時刻を解析してその揺らぎを時間分解能として評価した結果、平均時刻 33.8 ns、標準偏差 2.06 ns であった。したがって、時間分解能 σ は

$$\begin{aligned} \sigma &= s/\sqrt{N-1} \\ &\sim 0.49ns \end{aligned} \quad (5.8)$$

と評価できる。

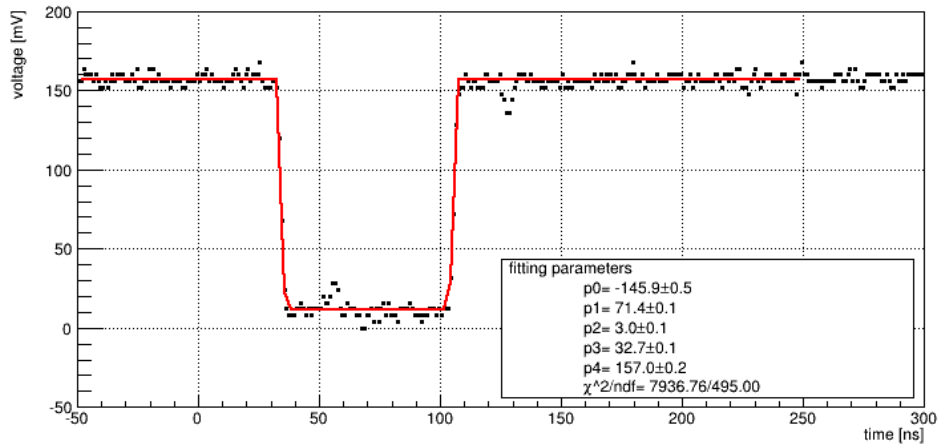


図 5.12: EASIROC LVDS 規格 Discriminator 出力波形

5.6 EASIROC モジュールを用いた MPPC の校正測定と性能評価測定

5.6.1 セットアップ

PMT 同様 LED を用いて MPPC の供給電圧と増幅率の関係を調べた。今回は EASIROC モジュールを新たに導入し、測定方法が少し異なる。セットアップを図 5.13 に示す。Function Generator から LED にパルス電圧を送り発光させる。それと同時に sync から TTL 信号を出力する。TTL-NIM で変換後、Gate Delay Generator を通して波形整形、時刻調整して EASIROC モジュールの INPUT HOLD に接続することでトリガーモードが ON になる。オシロスコープで観測した波形では MPPC の信号は fast haper で整形後、slow shaper で訛った正電圧で出力される。光子数ごとにピークの高さの層が確認できる。HOLD に NIM 信号が入力された時刻でピークが維持されるが、もちろん HOLD 時刻がずれると A/D 変換効率が悪化する。HOLD 時刻のゆらぎの許容範囲を slow shaper の時定数で設定する。§5.5.3 にあるように時定数を増やすとピーク最高点が下がり、つまり見かけの増幅率が下がる。PC とは EATHERNET で通信し制御される。MPPC には 0 - 90V までの電圧供給が可能で、MPPC の適性電圧領域 60 - 70V を設定する。

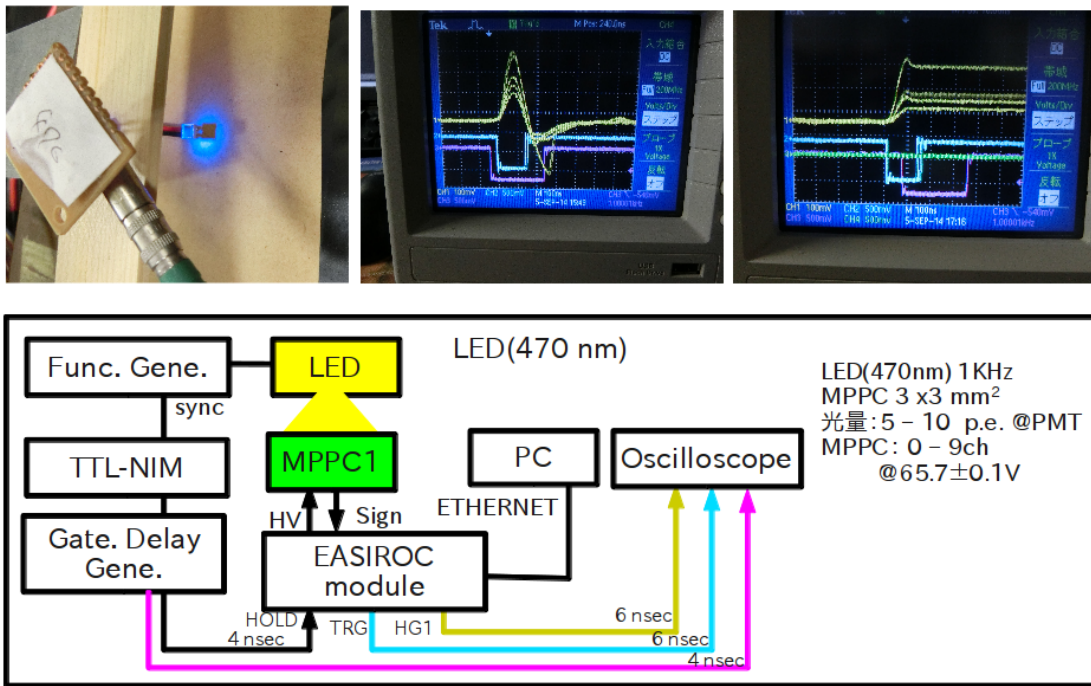


図 5.13: EASIROC モジュールを用いた LED の MPPC 校正測定セットアップ

5.6.2 印加電圧と増倍率の関係

EASIROC モジュール内蔵 PreAmp の増幅率 75 倍、時定数 25 ns で印加電圧 $V = 65.3V$ のとき単一光子領域の MPPC の ADC 分布を図 5.14 に示す。MPPC の ADC 分布は 0 個, 1 個, 2 個... と鋭いピークを持つのが特徴で、この間隔から増幅率を評価できる。PMT と検出光子数の表現を一致させるため、0 p.e., 1 p.e., 2p.e. と表記する。 n p.e. ピークの平均値 M_n と M_{n+1} の差から MPPC の増幅率 $\mu(V)$ は

$$\mu(V) = \frac{(M_{n+1} - M_n)C_{MPPC}C_{ADC}}{e}, (n = 0) \quad (5.9)$$

と評価される。ここで、 C_{MPPC} は MPPC の静電容量で型番 S12572-100P は $C_{MPPC} = 320$ pF、 C_{ADC} は EASIROC モジュールの ADC 変換係数で §5.5.2 より 0.2 mV/ADC と測定された。系統誤差 σ_{sys} は LED の光量を少し変える方法と $M_n - M_{n+1}$ の組み合わせ (例えば $M_1 - M_0, M_2 - M_1, (M_2 - M_0)/2 \dots$ など) から評価して以下で与えられる。

$$\sigma_{sys}^2 = \left\{ \frac{s_1}{\sqrt{n_{LED} - 1}} \right\}^2 + \left\{ \frac{s_2}{\sqrt{n_{p.e.} - 1}} \right\}^2 \quad (5.10)$$

ここで、 s_1 と s_2 はそれぞれ LED 光量を変えた時の $M_{n+1} - M_n$ 間隔の標準偏差と $M_1 - M_0, M_2 - M_1, (M_2 - M_0)/2$ における間隔の標準偏差、 n_{LED} は LED 光量の変化数、 $n_{p.e.}$ は上記の種類なので 3 である。最大誤差 σ は統計誤差 σ_{stat} を含めて

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_{sys}^2 + \sigma_{stat}^2} \quad (5.11)$$

と評価した。

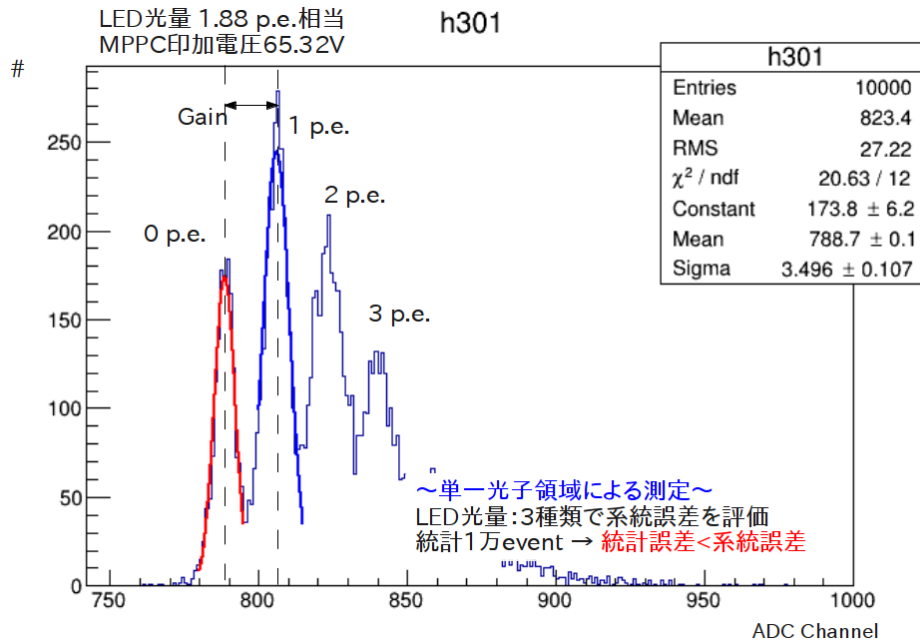


図 5.14: 単一光子領域の MPPC の ADC 分布

供給電圧と増幅率の関係を図 5.15 に示す。式 5.15.25.3 から MPPC の増倍率は供給電圧に比例し、良い直線性を持っている。測定精度はフィッティングした関数を中心にした偏りで以下の式で評価した。

$$accuracy = (\mu(V) - y(V))/y(V) \times 100 \quad (5.12)$$

$$error = \sigma(V)/y(V) \times 100 \quad (5.13)$$

したがって、S12572-100P シリアル No. 837 は 10% 未満の測定精度を持つことになる。カタログデータでは印加電圧 65.7V で増倍率 10^6 だが、PreAmp の増幅率や、フラットケーブルでの減衰を含めると、全体の増倍率 10^7 は妥当である。他 MPPC の供給電圧と増倍率の関係のリスト一覧を図 5.16 に示す。

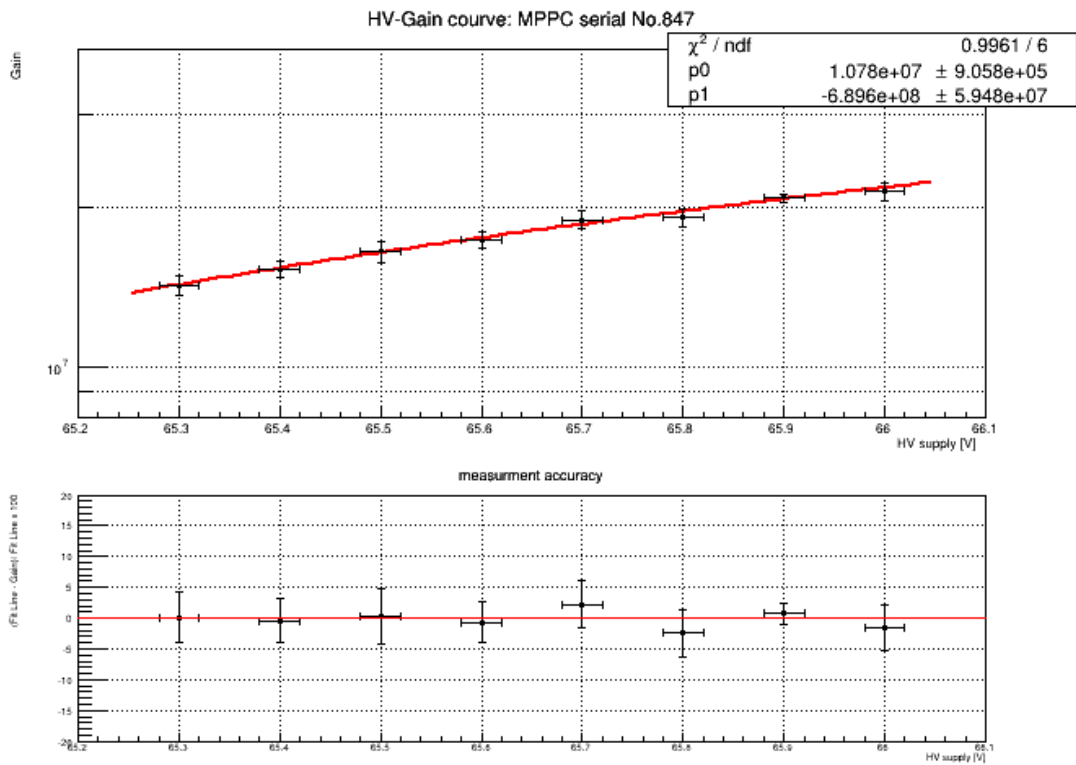


図 5.15: 供給電圧と増幅率の関係

No. 847		No. 848						
HV	Gain	error_sys	error_stat	error	Gain	error_sys	error_stat	error
65.3	1.43E+07	4.91E+05	3.33E+05	5.94E+05	1.31E+07	6.88E+05	2.80E+05	7.43E+05
65.4	1.53E+07	4.65E+05	2.82E+05	5.44E+05	1.41E+07	3.29E+05	3.23E+05	4.61E+05
65.5	1.65E+07	6.67E+05	3.13E+05	7.37E+05	1.58E+07	3.51E+05	3.33E+05	4.84E+05
65.6	1.74E+07	4.66E+05	3.32E+05	5.72E+05	1.63E+07	6.38E+05	3.36E+05	7.20E+05
65.7	1.90E+07	6.49E+05	2.88E+05	7.10E+05	1.74E+07	9.01E+05	3.37E+05	9.62E+05
65.8	1.92E+07	6.54E+05	3.68E+05	7.50E+05	1.92E+07	1.62E+06	3.52E+05	1.66E+06
65.9	2.09E+07	1.19E+05	3.49E+05	3.69E+05	1.95E+07	3.14E+05	3.42E+05	4.64E+05
66.0	2.15E+07	7.37E+05	3.30E+05	8.08E+05	2.06E+07	1.14E+06	3.85E+05	1.21E+06
No. 849		No. 850						
HV	Gain	error_sys	error_stat	error	Gain	error_sys	error_stat	error
65.3	1.42E+07	5.67E+05	3.12E+05	6.47E+05	1.48E+07	8.93E+05	2.97E+05	9.41E+05
65.4	1.59E+07	5.78E+05	3.25E+05	6.63E+05	1.55E+07	8.75E+05	3.72E+05	9.50E+05
65.5	1.66E+07	6.29E+05	2.96E+05	6.95E+05	1.58E+07	2.27E+06	4.30E+05	2.31E+06
65.6	1.72E+07	9.50E+05	3.55E+05	1.01E+06	1.76E+07	7.02E+05	3.49E+05	7.84E+05
65.7	1.87E+07	9.01E+05	3.50E+05	9.66E+05	1.79E+07	1.72E+06	6.07E+05	1.82E+06
65.8	1.94E+07	1.37E+06	3.65E+05	1.42E+06	2.00E+07	1.34E+06	5.53E+05	1.45E+06
65.9	2.07E+07	7.79E+05	4.07E+05	8.79E+05	2.10E+07	2.93E+06	6.82E+05	3.01E+06
66.0	2.10E+07	9.71E+05	4.76E+05	1.08E+06	2.07E+07	3.89E+06	5.77E+05	3.93E+06
No. 851		No. 852						
HV	Gain	error_sys	error_stat	error	Gain	error_sys	error_stat	error
65.3	1.44E+07	3.71E+05	2.79E+05	4.64E+05	1.43E+07	6.13E+05	3.80E+05	7.21E+05
65.4	1.55E+07	4.58E+05	3.17E+05	5.57E+05	1.49E+07	1.20E+06	4.74E+05	1.29E+06
65.5	1.64E+07	8.24E+05	3.06E+05	8.79E+05	1.63E+07	7.70E+05	4.29E+05	8.81E+05
65.6	1.82E+07	1.63E+06	4.41E+05	1.69E+06	1.71E+07	1.33E+06	3.59E+05	1.38E+06
65.7	1.89E+07	1.88E+06	4.70E+05	1.94E+06	1.89E+07	1.19E+06	3.83E+05	1.25E+06
65.8	1.95E+07	7.60E+05	4.08E+05	8.62E+05	1.88E+07	4.93E+05	5.23E+05	7.19E+05
65.9	2.02E+07	1.01E+06	4.24E+05	1.10E+06	2.02E+07	7.90E+05	4.58E+05	9.13E+05
66.0	2.02E+07	2.17E+06	5.48E+05	2.24E+06	1.98E+07	1.25E+06	6.30E+05	1.40E+06
No. 853		No. 854						
HV	Gain	error_sys	error_stat	error	Gain	error_sys	error_stat	error
65.3	1.46E+07	7.27E+05	2.95E+05	7.84E+05	1.47E+07	4.77E+05	2.77E+05	5.52E+05
65.4	1.50E+07	5.66E+05	4.23E+05	7.07E+05	1.58E+07	1.03E+06	2.83E+05	1.07E+06
65.5	1.67E+07	1.19E+06	3.08E+05	1.23E+06	1.70E+07	5.19E+05	3.50E+05	6.26E+05
65.6	1.79E+07	4.86E+05	4.94E+05	6.92E+05	1.83E+07	1.37E+06	4.44E+05	1.44E+06
65.7	1.87E+07	6.78E+05	4.57E+05	8.17E+05	1.91E+07	8.92E+05	3.73E+05	9.66E+05
65.8	1.95E+07	9.14E+05	5.53E+05	1.07E+06	1.94E+07	1.80E+06	4.54E+05	1.86E+06
65.9	2.03E+07	5.22E+05	3.75E+05	6.42E+05	2.09E+07	1.44E+06	4.60E+05	1.51E+06
66.0	2.11E+07	1.19E+06	4.67E+05	1.28E+06	2.12E+07	1.62E+06	4.54E+05	1.68E+06
No. 855		No. 856						
HV	Gain	error_sys	error_stat	error	Gain	error_sys	error_stat	error
65.3	1.50E+07	6.10E+05	4.13E+05	7.37E+05	1.54E+07	8.70E+05	4.06E+05	9.60E+05
65.4	1.57E+07	1.20E+06	3.38E+05	1.24E+06	1.67E+07	9.32E+05	3.69E+05	1.00E+06
65.5	1.71E+07	7.74E+05	3.37E+05	8.44E+05	1.84E+07	1.08E+06	3.81E+05	1.15E+06
65.6	1.76E+07	8.17E+05	5.56E+05	9.88E+05	2.01E+07	1.37E+06	4.80E+05	1.45E+06
65.7	1.96E+07	1.39E+06	4.31E+05	1.45E+06	2.01E+07	1.55E+06	6.81E+05	1.69E+06
65.8	1.95E+07	1.26E+06	4.82E+05	1.35E+06	2.08E+07	2.31E+06	6.06E+05	2.38E+06
65.9	2.12E+07	1.17E+06	7.03E+05	1.36E+06	2.21E+07	2.50E+06	8.95E+05	2.65E+06
66.0	2.05E+07	2.04E+06	5.66E+05	2.11E+06	2.28E+07	7.65E+05	1.12E+06	1.35E+06

図 5.16: MPPC S12572-100P の供給電圧と増幅率の関係リスト一覧

5.6.3 検出光子数しきい値における印加電圧とノイズ比の関係

MPPC は多い熱雑音が問題点である。カタログには 0.5th で 2.5 Mpc と記されている。つまり、検出光子数 0.5 p.e. しきい値の熱雑音が 2.5 MHz 存在する。PMT と同様にノイズ頻度で評価するべきだが、EASIROC モジュールの ADC はピークホールド型でトリガーの信号幅や積分幅は関係なく、ノイズ頻度では評価できない。そこで、光源がない場合で室温 20 度の環境内でトリガーとなる 1 kHz の信号が入力されたときのノイズ比で MPPC を評価した。

MPPC のノイズは当前だが、検出しきい値を上げれば雑音は減る。0.5, 1.5, 2.5 p.e. のしきい値における各 MPPC のノイズ比を測定した (図 5.17)。 $N_{p.e.} > 0.5$ では供給電圧によるノイズ比の依存は見られず、約 12% は熱ノイズでカウントしている。 $N_{p.e.} > 1.5$ では供給電圧による依存がみられて増加している。供給電圧 65.7 V では約 0.12 で $N_{p.e.} > 0.5$ と変化が見られない。 $N_{p.e.} > 2.5$ ではノイズ比が 4 – 6% に減少している。供給電圧の依存は $N_{p.e.} > 1.5$ と比べて弱い。

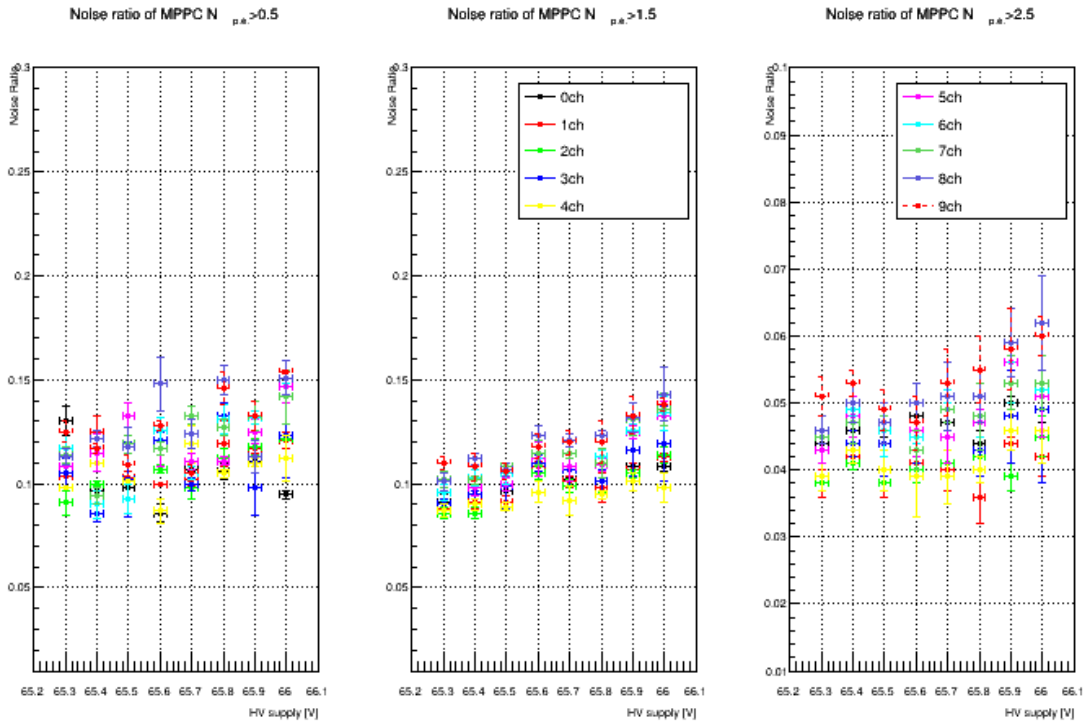


図 5.17: 供給電圧とノイズ比の関係

5.6.4 磁場中の動作確認

12.5 A の電流で 0.2 T の鉛直磁場を作るヘルムホルツコイル内で MPPC の動作確認を行った。LED 光量を一定にし、磁場の強さを 0 – 0.3 T と変化させた時の MPPC の平均検出光子数の変化を測定する。検出光子数分布を図 5.18 に示す。平均検出光子数はポアソン分布で近似できるが、

クロストークの影響を考慮して以下でフィッティングした。

$$P_{poisson}(x, \lambda) = \frac{(\lambda)^x e^{-\lambda}}{(x)!} \quad (5.14)$$

$$f(x) = p0 P_{poisson}\left(\frac{x}{p2}, p1\right) \quad (5.15)$$

ここで、 $p2$ は MPPC のクロストークによって見かけ上検出光子が倍増された係数を意味する。つまり、平均検出光子数は $N_{ph} = p1p2$ で評価した。結果を図 5.19 に示す。平均光子数約 18 のゆらぎは 7% 以下で平均光子数測定誤差の範囲内であることが確認された。

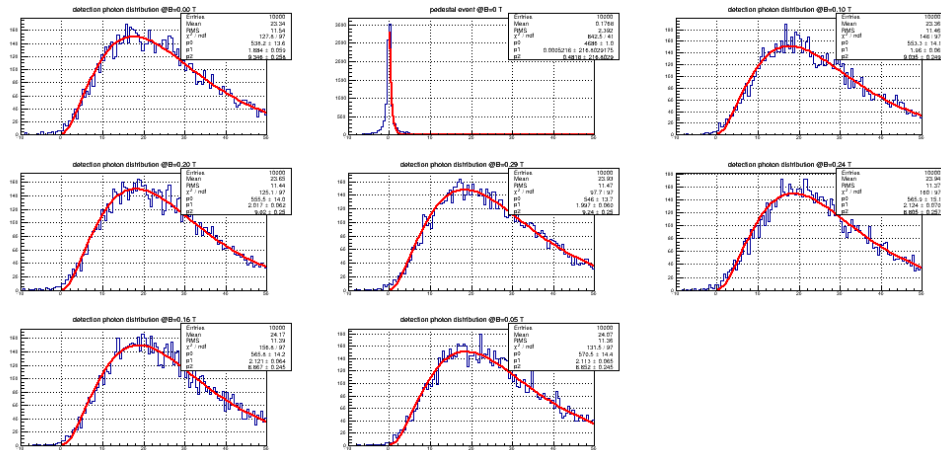


図 5.18: 磁場を変えたときの MPPC の検出光子数分布。平均光子数はポアソン分布で近似しているが、クロストークの影響を考慮している。

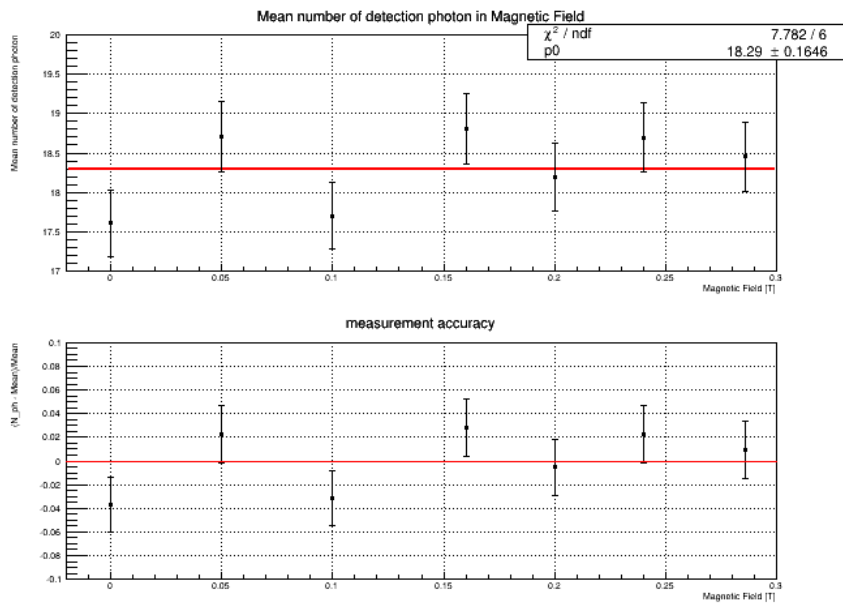


図 5.19: 磁場 $B = 0 - 0.3$ T における MPPC の平均検出光子数

第6章 波長変換ファイバーを用いたライトガイド

波長変換ファイバー (WLSF: wavelength shifting fiber) はファイバーの側面から光を吸収し、波長を伸ばして再発光する性質を持つ。再発光されかつコアとクラッドの全反射条件を満たした光はファイバーの両端へ伝搬する。Kuraray 社製の WLSF は吸収波長・発光波長領域が異なる 4 種類の材質、ダブルクラッド構造をもち、性能が良い。チェレンコフ光のためのライトガイドとして WLSF を 4 種類用いた。この章では Kuraray 社製 WLSF の仕様とファイバーシートのライトガイド原理について説明する。

6.1 WLSF 仕様

WLS の種類におけるピーク吸収波長とピーク発光波長を表 6.1 に示す。

型番	ピーク吸収波長 [nm]	ピーク発光波長 [nm]
B-3(300)MJ	350	450
Y-11(300)MJ	440	470
O-2(300)MJ	540	550
R-3(300)MJ	570	610

表 6.1: クラレ社製 WLSF のピーク吸収・発光波長

6.2 トラッピング効率

一般に光ファイバーはコアとクラッド間の並行な境界面を全反射して伝搬する。全反射角はスネルの法則:

$$\sin \theta = \frac{n_2}{n_1} \tag{6.1}$$

から決定される。ここで n_1 はコアの屈折率、 n_2 はクラッドの屈折率 ($n_1 > n_2$)、 θ は境界面の垂線と入射方向のなす角である。空気の屈折率は $n \sim 1.0$ と近似でき、もしクラッドと空気の平行度が良ければ $\sin \theta = 1/n_1$ として全反射条件は緩くなるが、実際はファイバー表面に凹凸や歪みがあるので全反射による伝搬は見込めない。

波長変換され等方的に放射されかつ全反射条件を満たす光の割合 (トラッピング効率: trapping

efficiency) ε_{trap} は、立体角から

$$\varepsilon_{trap} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_1} \sin \theta d\theta \quad (6.2)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (6.3)$$

と定義できる。ここで θ_1 はファイバーの中心軸からのなす角で全反射角ではない。ちなみに波長変換ファイバーは側面から光を吸収して両端へ伝搬するので実際にはトラッピング効率 2 倍の値が収集効率に寄与する。Kuraray 社のシングルクラッドではコアの屈折率 1.59、クラッドの屈折率 1.49 なのでトラッピング効率は約 3.14% で、ダブルクラッドはさらに外側を屈折率 1.42 のクラッドが覆っているのでトラッピング効率は約 5.35% である。したがって、ダブルクラッド構造はシングルクラッドに比べて約 1.7 倍効率が良いことがわかる [24]。

6.3 ファイバーシート製作

直径 0.2mm の波長変換ファイバーを隙間なく並べたシートを層状に重ねてライトガイドを製作する。このライトガイドは (1) ファイバー切り出し、(2) シート製作、(3) 読出し口の固定、(4) 断面研磨、(5) photo-device 接続部作成、(6) 遮光処理の過程を経て製作される。例えば、受光面積 $6 \times 10 \text{ cm}^2$ 、4 層のライトガイドは切り出しファイバーが合計 1200 本必要とされ、約 1 週間経て製作される。シートの形状固定のために PVAL(polyvinyl alcohol) 成分の接着剤を使用した。薄く伸ばした PVAL は光学的なロスには認められなかったが曲げのストレスには弱いのでファイバー束の固定には粘度の高い酢酸ビニルを含んだ接着剤を使用した。 α -シアノアクリレートを含んだ接着剤にはポリスチレンを溶かすのでファイバー固定には適さない。断面整形は使用する photo-device の受光面積に応じて対応する (PMT:R9008U シリーズ、MPPC: S12572 シリーズは対応可)。

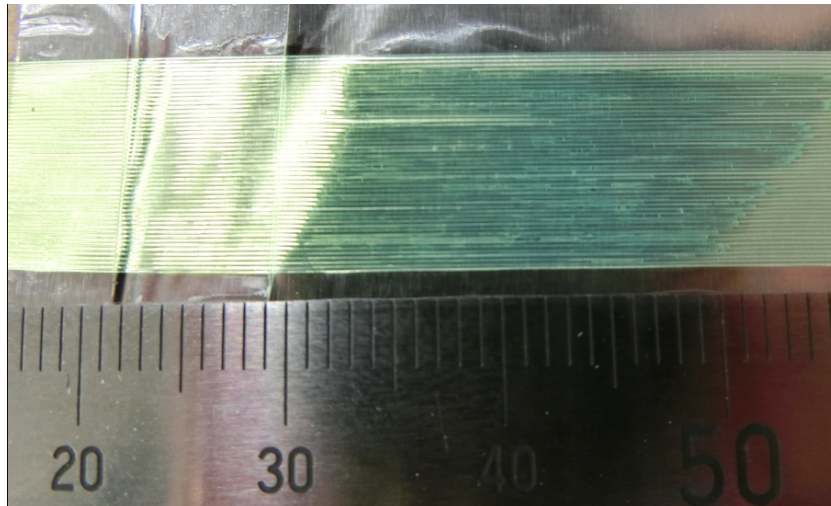


図 6.1: 直径 0.2 mm の波長変換ファイバー Y-11(300)MJ を幅 10 mm のシートに製作している様子。シートの形状固定のために PVAL(polyvinyl alcohol) 成分の接着剤を使用している。 α -シアノアクリレートを含んだ接着剤はポリスチレンを溶かすのでファイバー固定には適さない。

6.4 ファイバーシートの性質

波長変換ファイバーをシート状にしたライトガイドには2つの性質:減衰長 (Attenuation length) と曲げ損失 (Bending Loss) をもち、エアロゲルチェレンコフカウンターを大面積・任意形状化させるためには重要である。Kuraray 社型番の括弧の数字 (100, 200, 300 など) が波長変換剤の含有量を示し、この含有量が増えると発光量はもちろん増えるが減衰長は短くなる。また型番の M はダブルクラッドを示し、J もしくは S はコアのタイプを示す。コア S タイプは J と比べて発光量が減るが曲げによる損失が少ない。

LED を用いて WLS ファイバー各色とシンチレーションファイバーの減衰長と曲げ損失をそれぞれ評価した。使用したファイバーは B-3(300)MJ, Y-11(300)MJ, O-2(300)MJ, R-3(300)MJ, SCSF-78MJ で、サイズは直径 0.2 mm である。10 mm 長さ 1000 mm のシートをそれぞれ製作し PMT: R9880U-210 で波長変換された光を読み出す。

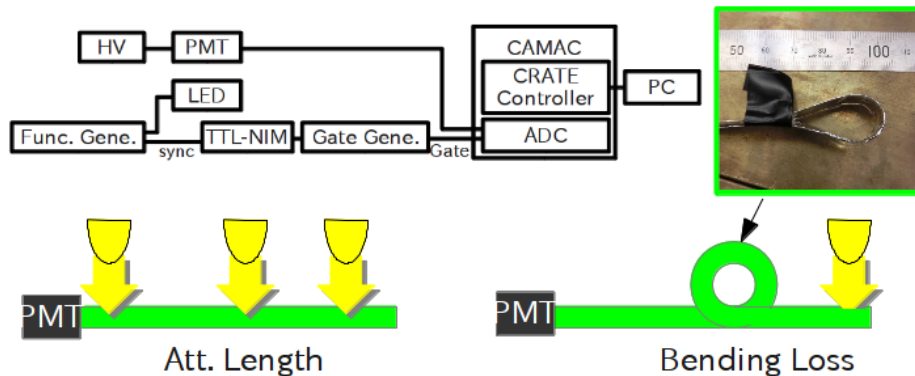


図 6.2: 減衰長と曲げ損失測定共通セットアップ

6.4.1 減衰長

WLS 特性で等方的に放出され全反射条件を満たす光は末端まで伝搬されるが、途中で吸収される事象も存在する。これは、伝搬する物質の距離に指数関数的に依存した確立分布で説明が出来る。ある位置から伝搬される光量がちょうど $1/e$ になる時の距離を減衰長と定義する。

LED 光源の入射位置を 0cm, 30cm, 60cm, 90cm と変えたときの PMT まで伝搬した光量の変化を観測した。伝搬距離に対して指数関数的に光量が減少している様子がわかる。本測定では最長距離で光電子数 5 - 8 p.e. の領域で測定した。これは単一光子領域で測定したときに現れる光電面の量子効果を考えないためである。

6.4.2 曲げ損失

一般に光ファイバーは曲げによるコアとクラッド境界の平行度が悪くなり、全反射条件が満たせず光が漏れることを曲げ損失 (Bending Loss) という。曲げ損失が 1 dB 未満である最小半径を曲げ損失半径と定義し評価する。普通、ファイバーの直径の約 100 倍が標準である。ファイバーシートに力が加えられていない時を基準にして、シートを折りたたんだ時の膨らみ幅における PMT の検

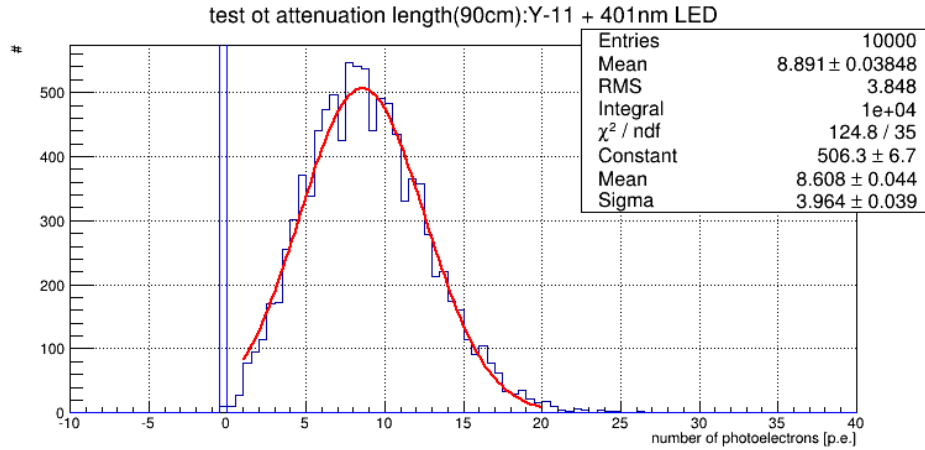


図 6.3: ピーク波長 401nm の LED 光源が Y-11 を 900 mm 伝搬したときの光電子数分布。ガウス関数フィッティングによる平均値 8.6、標準偏差 4.0 を得た。ペDESTAL イベント (青) は LED オフの時の PMT の信号。

出光電子数を測定した。得られた plot は関数: $y = p_0 * x^{p_1} + p_2$ でフィッティングでき、この自由パラメータを用いて最小曲げ損失半径 ρ は以下で与えられる。

$$\rho = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{p_0} \left(p_0 * 100^{p_1} + p_2 \right) \times 10^{-\frac{1}{20}} - p_2 \right\}^{\frac{1}{p_1}} \quad (6.4)$$

ここで、ファイバーシートを膨らみ 100 mm で折りたたんだ時とまっすぐにした時で光量が 99% 変化しなかったため、損失における基準を 100 mm とし、

$$-20 \log_{10} \left(\frac{y(x)}{y(100)} \right) < 1 \quad (6.5)$$

を満たす x を最小損失半径と計算した。

表 6.2: performance of fiber sheet

型番	減衰長 [mm]	曲げ損失最小半径 [mm]
B-3(300)MJ	1609 ± 1221	15.0
Y-11(300)MJ	995 ± 527	5.6
O-2(300)MJ	620 ± 96	16.7
R-3(300)MJ	1237 ± 526	6.8
SCSF-78MJ	1050 ± 357	26.1

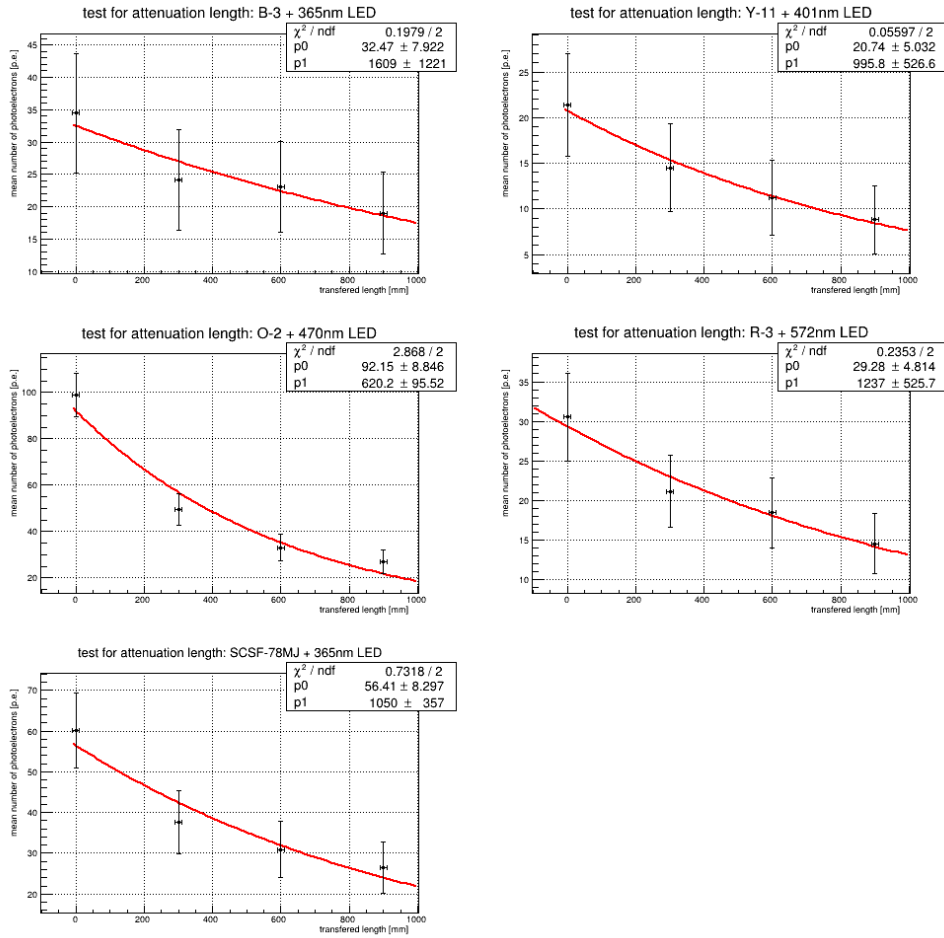


図 6.4: 4 種類の WLSF とシンチレーションファイバーの減衰長測定。PMT までの伝搬距離 900 mm の時に 10 p.e. を基準に、伝搬距離を変えて光電子数を測定した。光電子数の誤差は ADC 分布のガウス関数フィッティングの標準偏差、伝搬距離の誤差はシート露出幅 20 mm の半分である。指数関数 $p_0 \cdot \exp(-x/p_1)$ でフィッティングし、自由パラメータ p_1 は減衰長を意味する。

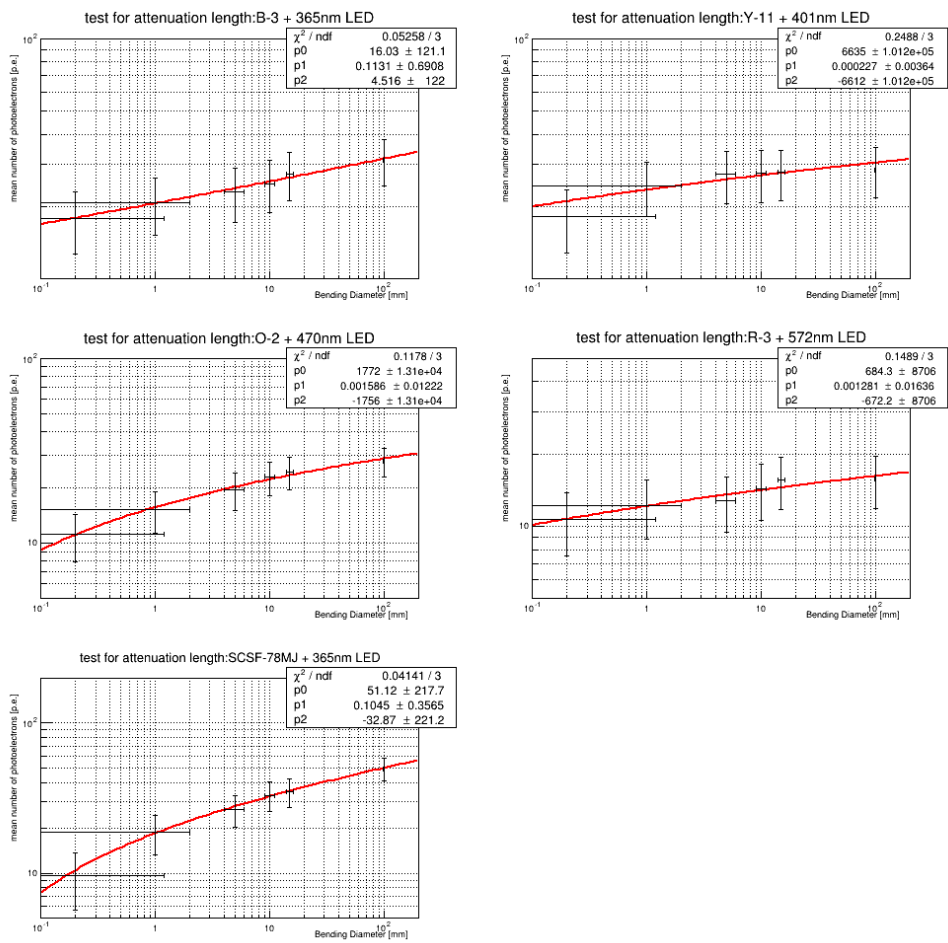


図 6.5: シート折りたみの膨らみ幅と検出光電子数

6.5 チェレンコフ光集光システム

式 2.4 からチェレンコフ光は波長に反比例した連続的な波長分布をもつ。一般に WLSF はシンチレーション光のライトガイドとして用いられるため、その発光スペクトラムに適した吸収波長分布の WLSF を用いればよかった。チェレンコフ光のためのライトガイドは 1 種類の吸収波長分布ではなく、4 種類でカバーするほうが収集効率が高いと考えた。また、表 6.1 から B-3 の発光波長領域と Y-11 の吸収波長領域が重なっていると考察でき、B-3 で収集できず外へ漏れた光は下層の Y-11 で収集される機会が与えられる。他の WLSF についても同様に回収されるならば、4 色使用することはすなわち波長領域をカバーするだけでなく本来漏れるはずだった光までも読出しに利用できると思われる [25, 26, 27]。

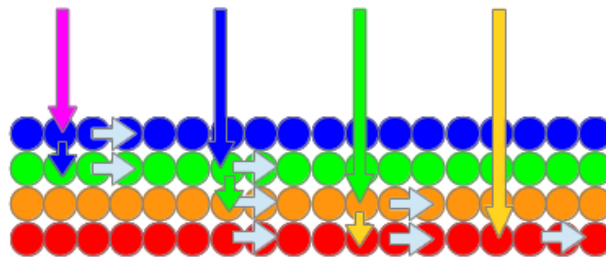


図 6.6: チェレンコフ光のための WLSF ライトガイド集光システム

6.6 ファイバーライトガイド

本研究では直径 0.2 mm の波長変換ファイバーをシート状にし、ライトガイドを試作した。このライトガイドは受光面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$ 、4 つの PMT 接続面 (直径 7 - 8 mm の断面積) をもつ。短波長領域は R9880U-210 を使って B-3, Y-11 を、長波長領域は R9880U-20 を使って O-2, R-3 をそれぞれ読みだす。第 7 章では宇宙線測定による性能評価測定、第 8 章ではビームテストによる性能評価測定を行った。

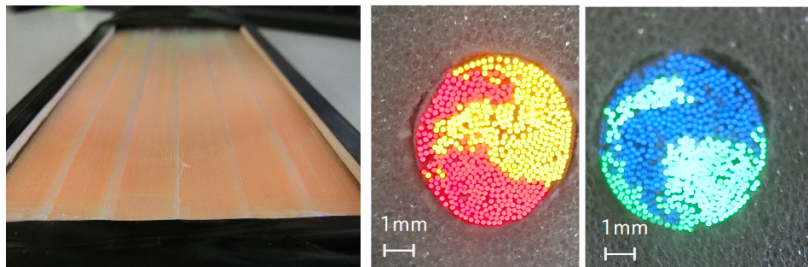


図 6.7: 直径 0.2 mm の波長変換ファイバーを B-3, Y-11, O-2, R-3 の順番でシートを重ねてライトガイドは製作されている。有効受光面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$ で、4 つのファイバー束は断面積直径 7 - 8 mm を持つ。

第7章 宇宙線を用いた性能評価測定

チェレンコフカウンターの性能評価として宇宙線を用いる。この章では、まず宇宙線の特に大気ミュオンについて説明し、セットアップ、解析、結果を説明する。

7.1 大気宇宙線

エネルギー領域が数 GeV から 100 TeV の 1 次核子の強度は以下の式で近似できる。

$$I_N(E) \sim 1.8 \times 10^4 \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}}. \quad (7.1)$$

ここで、 E は核子当たりのエネルギー（質量を含む）、 $\alpha = 1 + \gamma = 2.7$ は宇宙線流量のスペクトラム指数の差、 γ はスペクトラム指数の和である。

一次宇宙線は大気の原子核と相互作用し二次粒子を生成し、シャワーのように地球上へ降り注ぐ。図 7.1 は大気中の主な宇宙線成分における鉛直流量を示し、大気を通過する距離に依存してミュオンとミュオンニュートリノを除いた二次粒子の減衰が確認できる。実線は $E > 1$ GeV における式 7.1 の概算値、各点は負電荷ミュオンの最近の観測値を示す [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]。

ミュオンは電子の次に重たいレプトンである。質量 $105.6 \text{ MeV}/c^2$ 、平均寿命 $2.197 \times 10^{-6} \text{ s}$ の性質を持つ。ミュオンニュートリノとの弱い相互作用

$$\mu^+ \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^+, \quad (7.2)$$

による崩壊事象が主である。ニュートリノとの相互作用の断面積は比較的小さく透過性が高い。地表到達時のミュオンの平均エネルギーは 4 GeV である。エネルギースペクトラムは 1 GeV 以下ではほぼフラットで、10 - 100 GeV の領域で徐々に減少する。そしてより高エネルギー領域ではミュオン崩壊前に大気内でパイオンと相互作用する傾向が強くなるので更に急になる。 $E_\mu \gg 1$ TeV の漸近線では、大気ミュオンのエネルギースペクトラムは一次スペクトラムよりひと桁険しい。地表における鉛直方向の 1 GeV/c 以上のミュオンの全強度は約 $70 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ である [1, 35]：現在の測定は 10 - 15% まで低い規格化が支持されている [36, 37]。

図 7.2 は地表で 2 つの角度におけるミュオンのエネルギースペクトラムを示している。大きい角度では低エネルギーのミュオンは表面に届く前に減衰してしまい、高エネルギーはパイオンと相互作用して減衰する。したがって、平均のミュオンエネルギーが増加する。：したがって、10 - 100 GeV/c のミュオンが支配的となる。妥当な近似式はミュオン崩壊 ($E_\mu > 100/\cos\theta \text{ GeV}$) が無視してよく、地球の湾曲は無視でき、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} &\sim \frac{0.14 E_\mu^{-2.7}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}} \\ &\times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos\theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos\theta}{850 \text{ GeV}}} \right\}, \end{aligned} \quad (7.3)$$

ここで、2つの項はパイオンおよび荷電K中間子との寄与として与えられる。式7.2はチャームや重いフレーバー粒子からの小さい寄与は無視できる。ただし、超高エネルギーについてはこれを除く [38]。

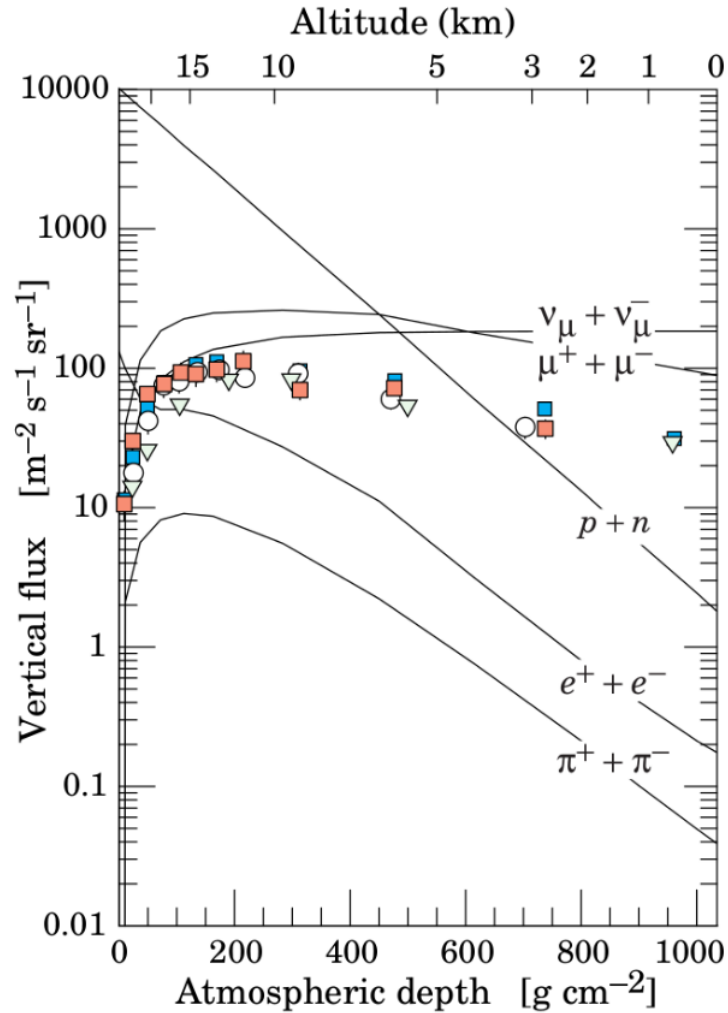


図 7.1: 大気宇宙線の鉛直流量分布 [34] : 実線は式 7.1 から計算した $E > 1$ GeV の各粒子、点は $E_\mu > 1$ GeV の負電荷ミューオンの測定値を示す。大気頂上で生成された2次粒子の内、地上まで到来する粒子はミューオンおよびミューオンニュートリノであることが確認できた。他の粒子と比較すると2桁以上流量が高いため、素性の良い性能評価測定が可能になる。

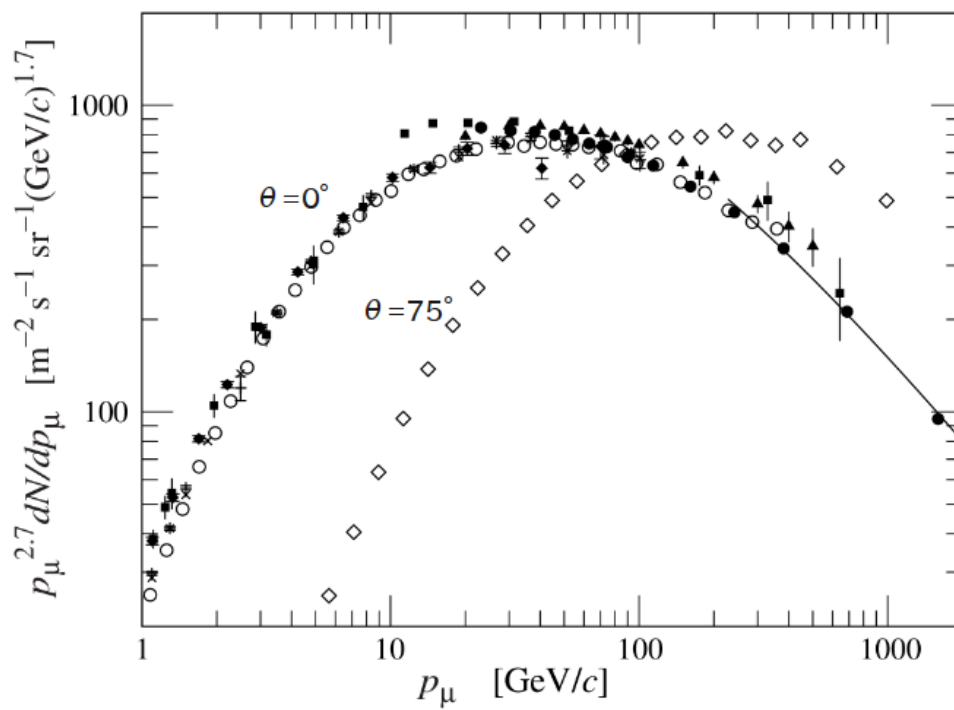


図 7.2: 入射角度 θ におけるミューオンの運動量分布 [34]: TeV 領域の実線は式 7.2 からの結果である。 $\theta = 0^\circ$ では 10 - 100 GeV 領域が支配的で、入射角度が大きくなると空気を通過する距離が伸びるため支配的な領域が右へシフトする。

7.2 宇宙線測定

7.2.1 セットアップ

宇宙線ミュオンは高エネルギー ($> 4 \text{ GeV}$) な粒子で速度はほぼ光速の 99.9% 以上である。したがって、宇宙線ミュオンは安定したチェレンコフ光を供給し、装置の性能評価が可能である。セットアップを図 7.3 に示す。4 つのトリガーカウンターが同時に反応する事象を、4 つが重なる面積・立体角をミュオンが通過したとみなす。この通過領域にシリカエアロゲルと PMT で構成した AC を設置する。トリガーカウンターの中に遮蔽用真鍮ブロックを設置した。下流トリガーカウンターまでミュオンが届いた事象において、エアロゲル通過時は必ず低エネルギーではないことをこれで証明する。チェレンコフ光は粒子の軌道に依存した指向性を持つので、45 度の反射板を設置してほぼ 1 回で PMT に入射する箱を用意した。

トリガーカウンターに使用した PMT は PMT1: R9880U-210, PMT2: R9880U-210, PMT3: H1161, PMT4: H1161 で、R9880U-210 は第 5 章で説明した。H1161 は型番 R329 のアセンブリで、光電面は直径 50 mm で、パイアルカリ・カソード、ラインフォーカス・ダイノード、適性電圧は約 1800 - 2400 V で増幅率は約 10^{7-8} の特徴を持つ。チェレンコフ光検出で使用される PMT: R1250-03 は光電面は直径 127 mm で、パイアルカリ・カソード、ラインフォーカス・ダイノード、適性電圧は約 1800 - 2200 V で増幅率は約 10^{7-8} の特徴を持つ。

データ収集回路を図 7.4(上) に示す。チェレンコフ光読出しに使用する PMT は最大 5 つまで可能である。Tr1 - Tr4 からの信号は Divide され一方を Delay して ADC に、他方を Discriminator にそれぞれ接続される。Discriminator は幅 10 ns、しきい値 -30 - -50 mV に設定され、一方を Coincidence に他方を Delay されて TDC stop に接続される。Coincidence からの信号を一方は TDC start に接続し、他方は Gate Generator で波形整形されて ADC Gate に接続される。ADC Gate は幅 200 ns に設定され、それぞれのチャンネルのアナログ信号はその間に入るようにタイミングを調整する。TDC stop 信号は必ず start 信号より遅くなるように Delay を使用して調整する(図 7.4(下))。CAMAC ADC と TDC は CRATE CONTROLLER を介して PC 制御される。

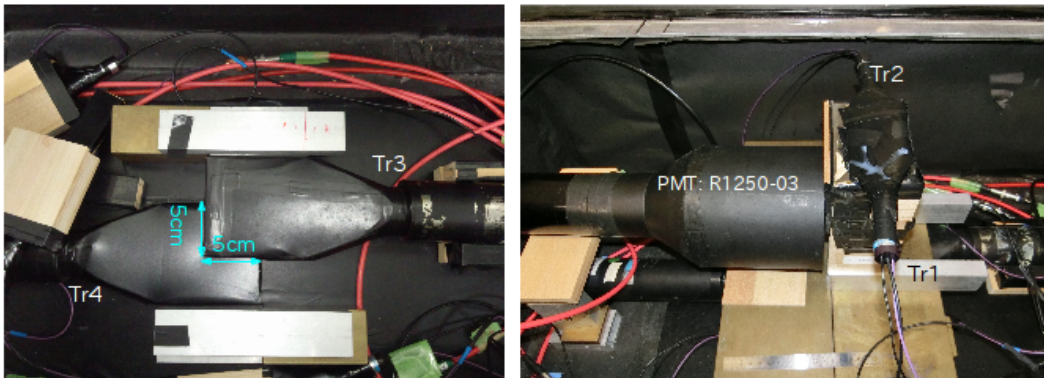
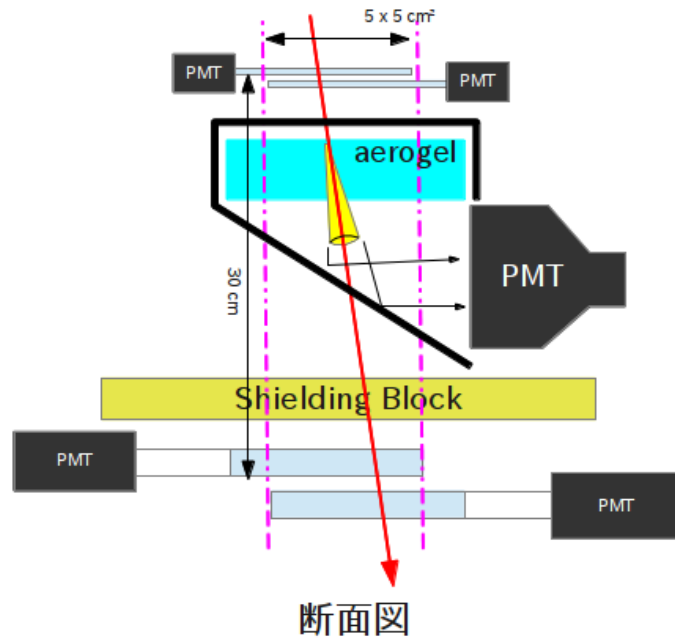


図 7.3: セットアップ: トリガーカウンター (上図)、エアロゲルチェレンコフの観測様子 (断面図)、写真 (下)。

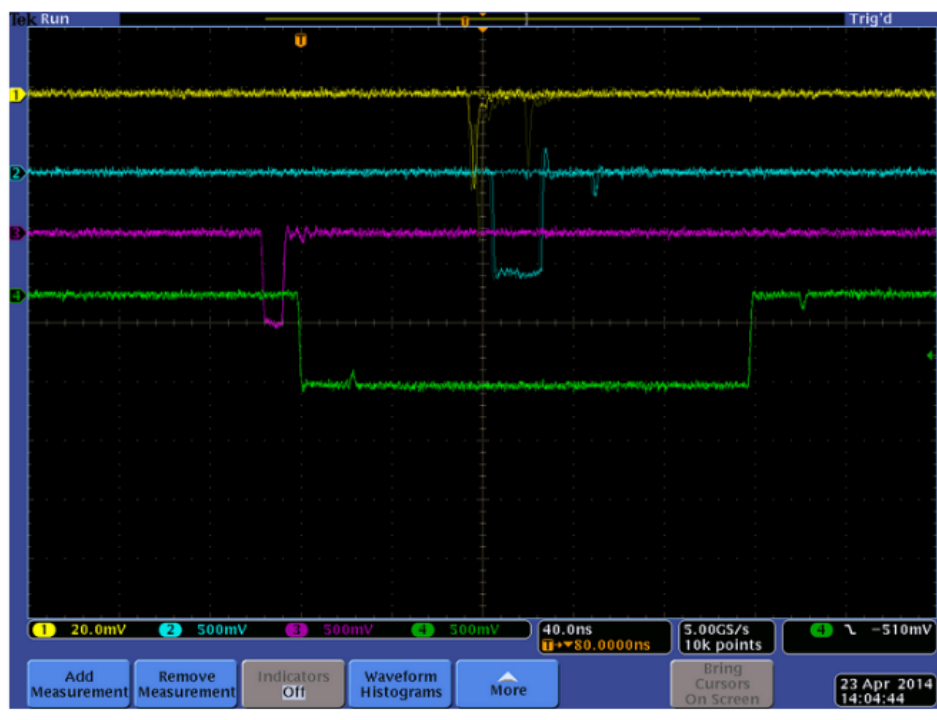
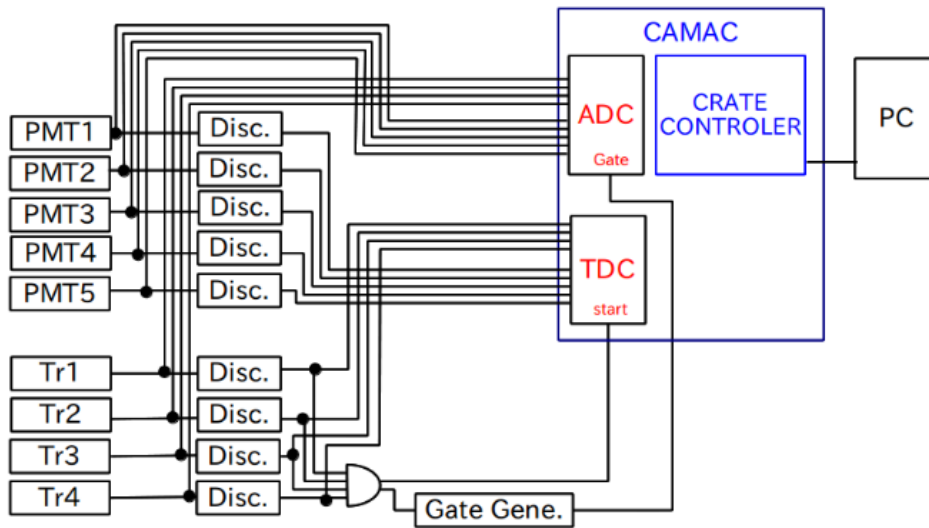


図 7.4: データ収集回路 (上)、オシロスコープで 1ch のアナログ波形 (黄) と、Discriminator による TDC ストップ信号 (シアン)、トリガー信号による ADC Gate 信号 (緑) と TDC スタート信号 (マゼンタ)(下)。

7.2.2 宇宙線ミュオンの鉛直流量

本測定で、ミュオンのトリガーレートは $(3.0 \pm 0.2) \times 10^{-3} s^{-1}$ が得られた。トリガーシンチの重なる面積は $5 \times 5 cm^2$ で立体角は $1.07 sr$ なので、得られた鉛直流量は $1.12 \pm 0.07 m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$ である。これは §7.1 で示した全強度 $70 m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$ と比べて 1-2 桁少ない結果である。

今回の測定では実験室系つまり建物のコンクリートでエネルギー損失および、真鍮による遮蔽で低エネルギー・ミュオンを除去したことが原因であろう。したがって、本測定で検出したミュオンはエアロゲル通過時で高エネルギーで、安定したチェレンコフ放射による光子数の供給を裏付けている。

count	time [hr]	count rate [s^{-1}]
224	23.5	2.88×10^{-3}
230	23.3	2.74×10^{-3}
296	25.8	3.19×10^{-3}
273	23.7	3.20×10^{-3}
273	24.6	3.08×10^{-3}
248	22.9	3.01×10^{-3}
average		3.0×10^{-3}
st. dev.		1.8×10^{-4}

表 7.1: トリガーレート

7.2.3 エアロゲル輻射体でのチェレンコフ放射

アルミマイラーで内張りされた箱に屈折率 1.05、透過長約 35 mm のシリカエアロゲルを入れたチェレンコフカウンターを作成した。宇宙線ミュオンが通過する距離 (エアロゲルの厚さ) を 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm と増やしていった時のチェレンコフ光の光電子数を測定した。式 2.4 によれば PMT の主な感度領域 350-500 nm におけるチェレンコフ放射による発生光子数は約 37 個/cm と推定できる。

光量が多い場合、メインピークにおけるガウス関数のフィッティングによって平均値と標準偏差を用いて評価する。また光量が少ない場合 ($1 < N_{p.e.} < 5$) はポアソン分布関数のフィッティングによって平均値と標準偏差を用いて評価する。さらに光量が少ない場合 ($N_{p.e.} < 1$) ポアソン分布の $k = 0$ 近似を用いて、検出効率 ε_{eff} から以下の式で平均光電子数は評価される。

$$N_{p.e.} \sim -\ln(1 - \varepsilon_{eff}). \quad (7.4)$$

エアロゲルの厚さを増やしていくと比例してチェレンコフ光の光電子数が増加している (図 7.6)。この結果は傾き 3.2, 切片 1.24 の直線でフィッティング出来る。エアロゲルがない場合での検出された光電子は、屈折率 1.0003 の空気によるチェレンコフ光、PMT の熱ノイズが主な原因である。検出効率はエアロゲル 10 mm でほぼ 90% 以上を達成した。

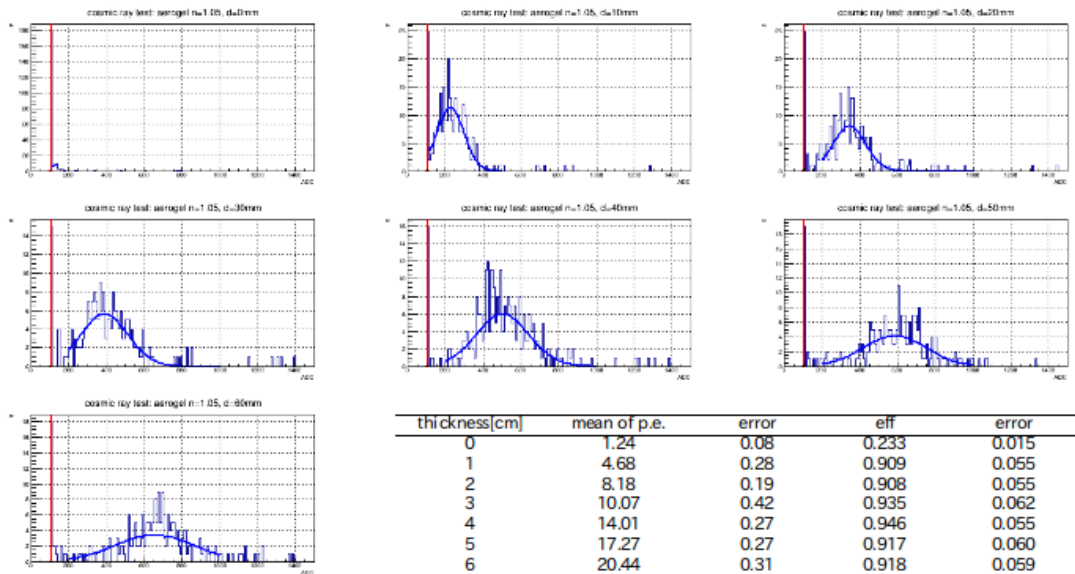


図 7.5: エアロゲル厚さごとの PMT の ADC 分布。ペダスタルのガウス関数フィッティング (赤)、チェレンコフ光事象のガウス関数フィッティング (青)

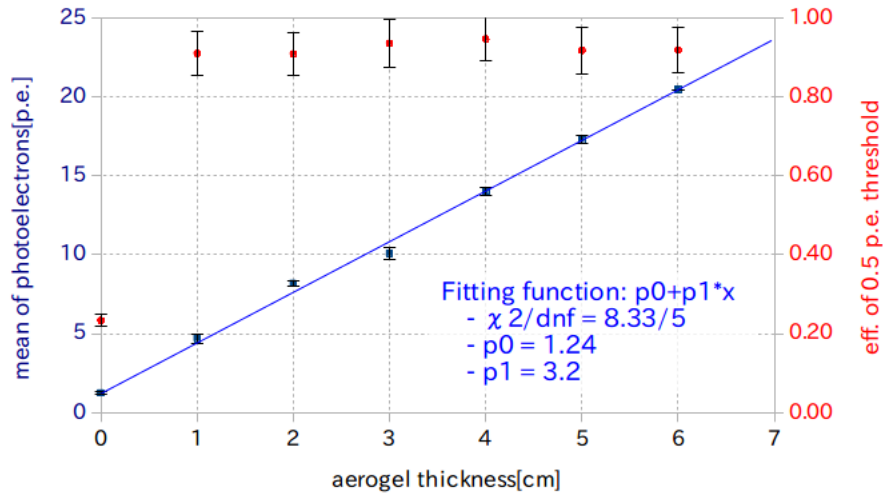


図 7.6: エアロゲル厚さにおける検出効率と検出光電子数の変化

7.3 ファイバーシートの収集効率測定

第 6 章で説明した WLSF シートのチェレンコフ光収集効率は WLSF の並べ方に依存している。本測定は宇宙線ミュオンからの安定したチェレンコフ光を用いてファイバー並べ方による光量の違いを観測する。このためにファイバーシートは 2 種類製作した。FLa19: ファイバー層 4 層、上から BYOR, 有効面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$, PMT 接続部 4 本。FLa20: ファイバー層 4 層、上から BBYY, 有効面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$, PMT 接続部 4 本。

WLSF シートの B-3 と Y-11 の束には R9880U-210 を、O-2 と R-3 の束には R9880U-20 をそれぞれ接続した。これは PMT の感度波長と WLSF の発光波長領域を合わせるためである。合計 4 本の PMT を接続されたシートの露出面をチェレンコフ光入射位置に設置する。4 つの PMT で観測した信号を事象ごとに解析して論理演算 ${}_4C_1$ OR における検出効率と平均光電子数を計算した。§ 7.2 で直接観測したチェレンコフ光の平均光電子数と比較して収集効率を評価する。

	PMT1	PMT2	PMT3	PMT4	${}_4C_1$ OR Logic
Gain	1.80E+07	2.57E+07	3.55E+07	3.41E+07	
efficiency	0.32 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.63 ± 0.03
mean num. of p.e.	0.38 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.24 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.98 ± 0.07

表 7.2: エアロゲル 60 mm、ファイバーシート FLa19 における PMT1 - 4 の検出効率と平均光電子数、そして論理演算 ${}_4C_1$ による検出効率と平均光電子数。

FLa19 を用いたライトガイドは屈折率 1.05 のエアロゲル 60 mm において光電子数 0.98 ± 0.07 、FLa20 は 0.71 ± 0.05 をそれぞれ獲得した。直接読みだした場合の光電子数は 20.44 ± 0.31 なので、収集効率はそれぞれ $4.8 \pm 0.4\%$ 、 $3.5 \pm 0.3\%$ と評価できる。したがって今回試作したシートの収集効率は 3 - 5% でファイバーの並べ方は BBYY よりも BYOR と 4 種類使用したほうが効率良く収集可能であることがわかった。

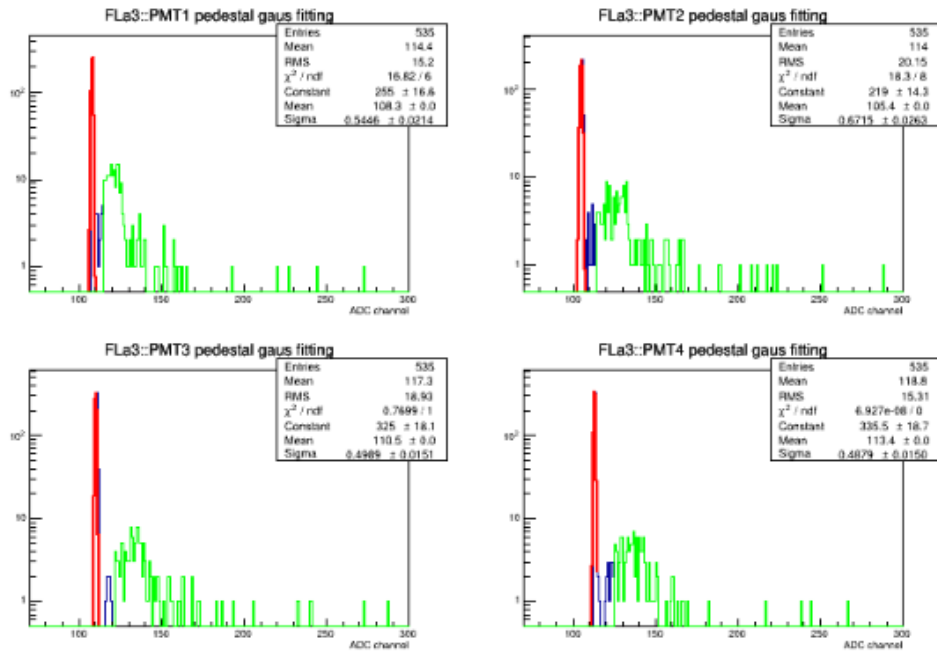


図 7.7: PMT4つの WLSF を介したチェレンコフ光の ADC 分布

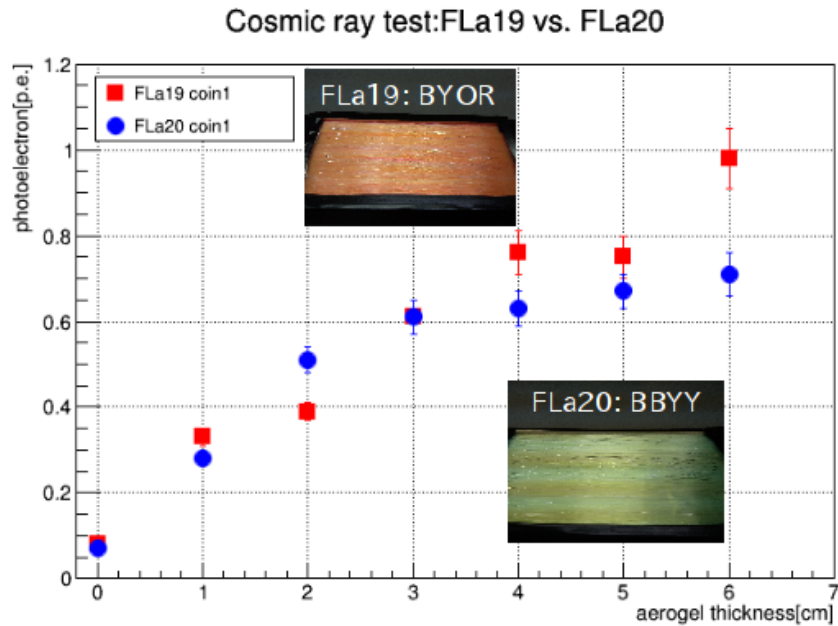


図 7.8: エアロゲル厚さに依存して検出光電子数が上昇している様子は波長変換ファイバーを用いたチェレンコフ光の観測に成功していることが確認できる。直径 0.2 mm の波長変換ファイバーシートを用いたライトガイドで初めてチェレンコフ光を観測したことを日本物理学会 2013 年度秋季大会で発表した [22aSM-10]。

第8章 ビームテスト

東北大学電子光物理学研究センター(旧核理研)(以降 ELPH)[39]において、ビームテストによる性能評価測定を2014年4月と12月の計2回行った。ELPH ビームラインの説明をして、本測定のセットアップ、結果を報告する。

8.1 ELPH ビームライン

実験室と電子線形加速器(LINAC)、ストレッチャー・ブースターリング(STBリング)の概略を図8.1に示す。STBリングは全長49.75 mで8台の偏極電磁石と20台の4極電磁石、入射、取り出し及び、軌道補正用の電磁石などで構成される。

熱電子銃で発生した電子ビームは線形加速器で約150 MeVまで加速される。この電子はSTBリングに入射後1.2 GeVまで加速され、軌道補正された後リングに蓄積される。本測定はGeV γ 照射室で行われ、STBリングを周回する電子ビームに炭素ファイバーを挿入して制動放射で発生した γ 線が e^+e^- 対生成する。本測定では磁場で曲げて500 - 700 MeVの e^+ を入射ビームとして使用した。

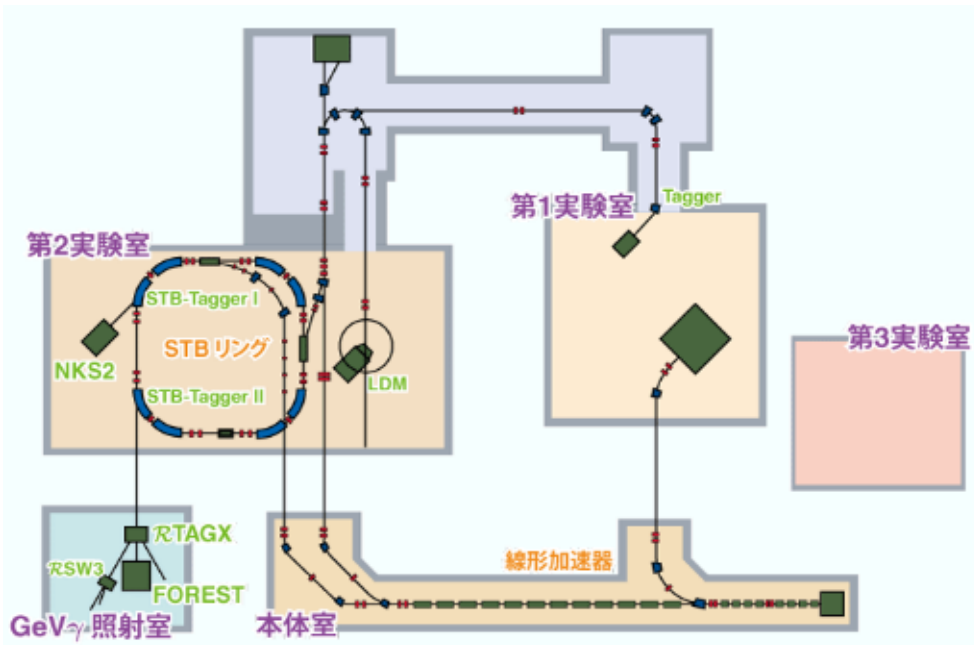


図 8.1: 東北大学電子光物理学研究センターの実験室レイアウト: ELPH ホームページから引用 [39]

8.2 実験1

2014年4月に行ったビームテスト実験で、波長変換ファイバーの並べ方によるチェレンコフ光収集効率を比較して、適切なファイバーの組み合わせを探ることが目的である。また、試作器としての性能評価測定を行った。

8.2.1 セットアップ

上流と下流のトリガーカウンターにはそれぞれサイズ $5 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ のプラスチックシンチレータから両側にアクリルライトガイドが接続されており、そしてPMTが接続されている。2つのトリガーカウンターが同時に反応した事象(4つのPMTが同時に反応した)だけを抽出してデータ収集した。この粒子通過位置にシリカエアロゲルを配置し、45度反射板を持つアルミマイラーで内張りした箱をかぶせ、下面のWLSFライトガイドに入射させる。WLSFシートには4つのPMTが接続される(図8.2)。回路は宇宙線測定と同様である(図7.4)。

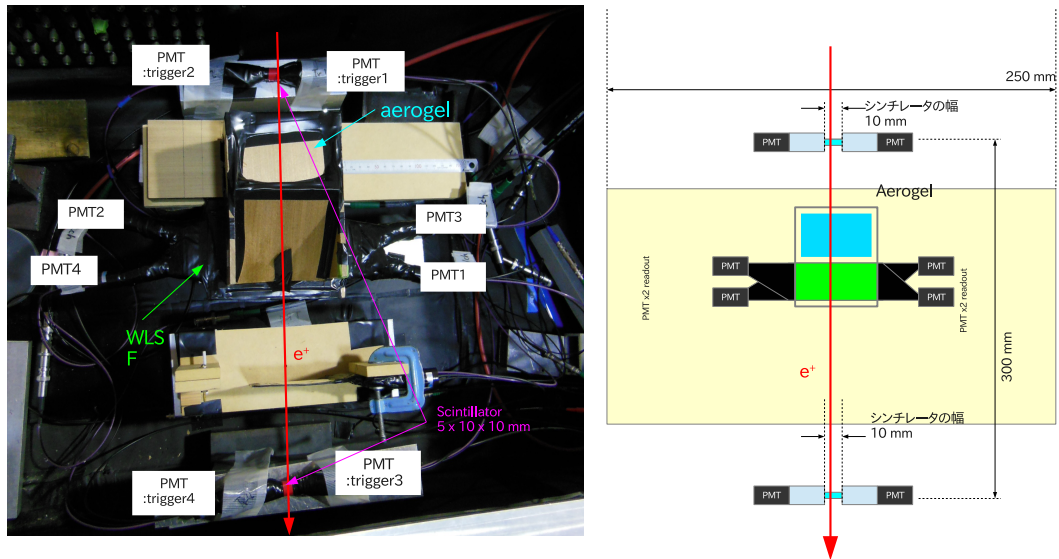


図 8.2: セットアップ

8.2.2 エアロゲル厚さにおけるチェレンコフ光検出

エアロゲルの厚さを 0, 30, 60 mm と増やした時の WLSF ライトガイド (BYOR) を経由して読み出されたチェレンコフ光の光電子数を測定した。エアロゲルの厚さに対する検出された平均光電子数の関係を図 8.3 に示す。本測定に使用したライトガイドはこのために新しく製作しなおした。ファイバーの並べ方は入射方向から B-3, Y-11, O-2, R-3 の短波長領域から順番に層構造をなしている。さらに最下層には反射板としてアルミマイラーを敷いている。

このライトガイド (BYOR) はエアロゲルの厚さに比例したチェレンコフ光を観測した。宇宙線測定と同様に波長変換ファイバーを経由してチェレンコフ光を観測することに成功した。

aerogel thickness [mm]	eff.	mean number of photoelectrons
0	0.10 ± 0.01	0.11 ± 0.01
30	0.56 ± 0.01	0.83 ± 0.02
60	0.76 ± 0.02	1.42 ± 0.03

表 8.1: エアロゲル厚さにおける WLSF ライトガイド (BYOR) を経由して検出されたチェレンコフ光

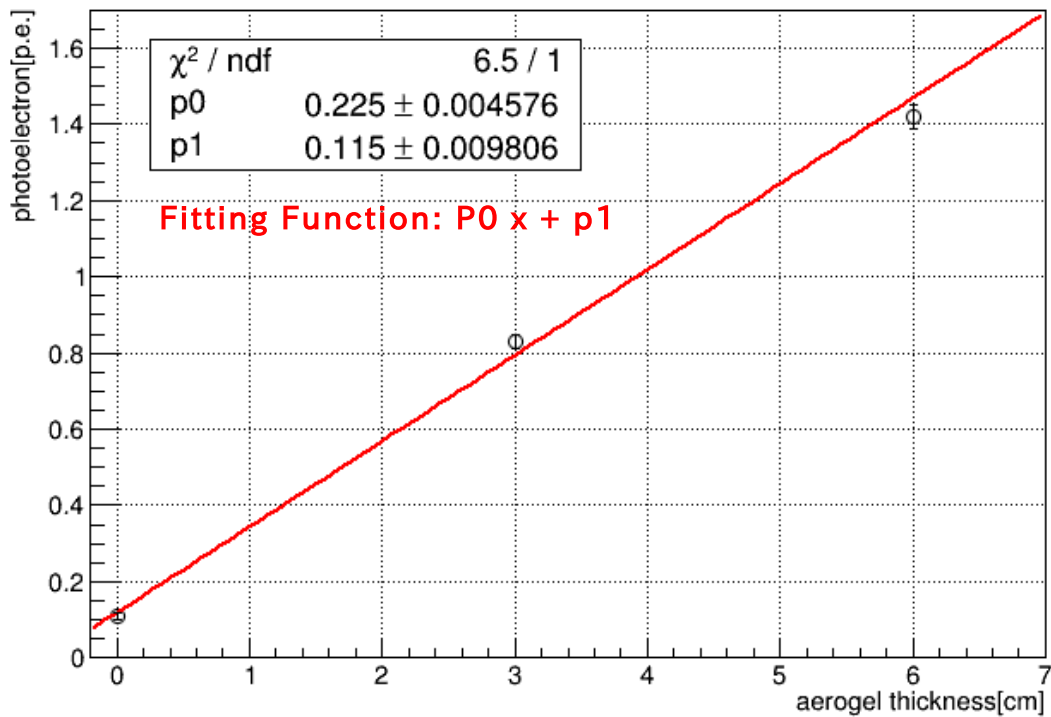


図 8.3: エアロゲルの厚さに対する検出された平均光電子数の関係

8.2.3 屈折率におけるチェレンコフ光検出

エアロゲルの厚さを 30 mm に固定して、屈折率を 1.03, 1.05, 1.08 と変えてチェレンコフ光を測定した。速度 β の荷電粒子が屈折率 n の輻射体を通じたときのチェレンコフ光の数は式 2.4 から $1 - 1/(\beta n)^2$ に比例する。エアロゲルの屈折率と光電子数の関係を図 8.4 に示す。結果、上記の理論曲線には一致しなかった。1.03 から 1.05 にかけては理論値によく一致するが、1.08 は光量が低く観測された。式 2.4 に自由パラメータを 2 つ入れて、屈折率 1.05 の光量を中心とした曲線関数

$$F(n) = p_0 * \frac{1 - 1/((n\beta + p_1)^2 + p_2)}{1 - 1/((1.05 * \beta + p_1)^2 + p_2)} \quad (8.1)$$

でフィッティングした。

使用したエアロゲルの透過長は波長 400 nm において約 35 - 40 mm であった。波長変換ファイバーを経由することで他に減衰する要因が存在するのかもしれない。

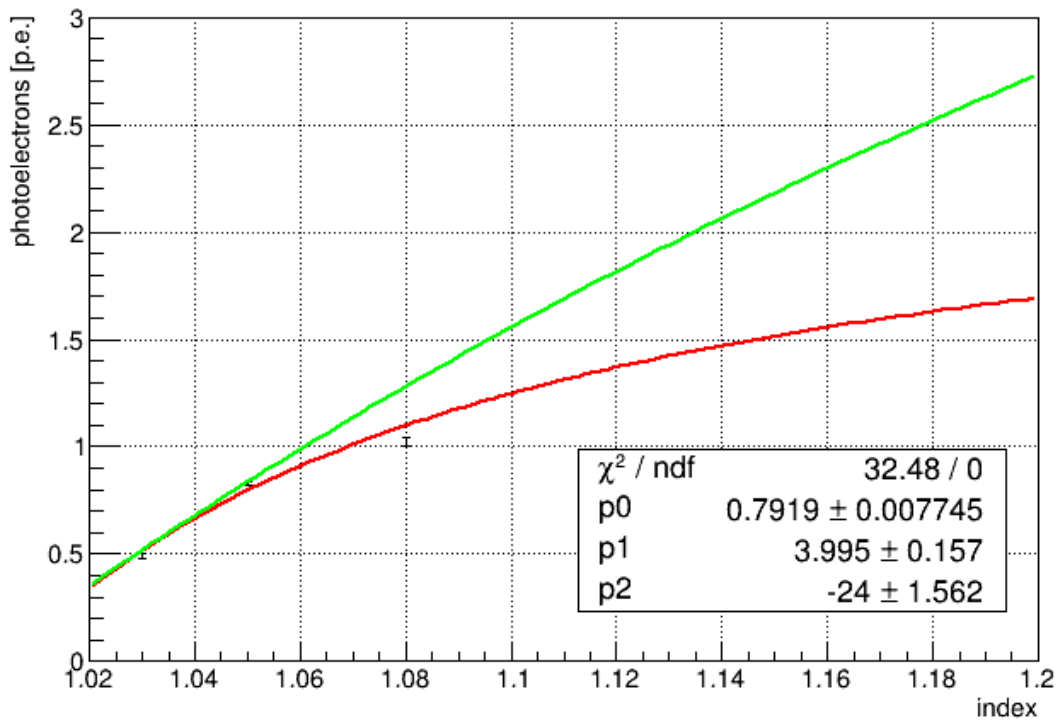


図 8.4: エアロゲルの屈折率と光電子数の関係。理論値 (緑)、フィッティング (赤)、フィッティング関数 $F(n) = p_0 * \{1 - 1/((n\beta + p_1)^2 + p_2)\} / \{1 - 1/((1.05 * \beta + p_1)^2 + p_2)\}$

8.2.4 WLSF ライトガイド収集効率

§7.3 と同様に WLSF ライトガイドにおけるファイバーの並べ方による収集効率を評価する。今回は計 5 種類のライトガイドを製作した。有効面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$ で図 8.5 に結果とともに一覧にする。大型 PMT で直接読み出した平均光電子数を分母にしてそれぞれの収集効率を評価した。使用したエアロゲルは屈折率 1.05、厚さ 60 mm、透過長約 37 mm (@400 nm) である。ライトガイド (BYOR) と (BBYY) の平均光電子数を比較すると 1.43 ± 0.03 と 1.14 ± 0.03 で明らかに (BYOR) が良かった。これで WLSF は 4 種類使用したほうが収集効率が良いことが判明した。

BBYY と BY を比較すると、 1.14 ± 0.03 と 1.19 ± 0.03 で BY のほうが良い結果となった。しかし誤差の範囲外であるが、明らかな結果とは言えない。BBYYcorting とは、WLSF ライトガイド

製作時に PVAL 接着剤で受光面を固定したものである。研究当初、ライトガイドの受光面に接着剤を塗ると遮光されてしまう可能性を危惧した。corting する / しないでは、遮光については問題がなく、逆に綺麗に束ねることによる収集効率の向上が見られた。BYOR において corting するとさらなる収集効率の向上が期待される。

BYOR(x2) は大面積にする上で、有効面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$ の受光面を 2 つ持つライトガイドである。4 つの PMT 受光部を持ち、2 つの受光面をつなぐ線は U 字のようにファイバーが配線されている。つまり、粒子識別のための有効面積は $120 \times 100 \text{ mm}^2$ をもつ。BYOR と比べて光量は 1.31 ± 0.03 なので約 8% 減衰した事になる。

直接チェレンコフ光を読み出した結果平均光電子数は 17.71 ± 0.06 だった。この子とから、今回製作したライトガイドの中で最も良い収集効率は BYOR の 8.1% であった。

Light Guide	aerogel: index/ thick.[mm]	det. eff.	mean number of p.e.	coll. eff.
BYOR	1.05/ 60	0.76 ± 0.02	1.43 ± 0.03	$8.1 \pm 0.2\%$
BBYY	1.05/ 60	0.68 ± 0.02	1.14 ± 0.03	$6.4 \pm 0.1\%$
BY	1.05/ 60	0.70 ± 0.02	1.19 ± 0.03	$6.7 \pm 0.1\%$
BBYY corting	1.05/ 60	0.76 ± 0.02	1.42 ± 0.03	$8.0 \pm 0.2\%$
BYOR(x2)	1.05/ 60	0.73 ± 0.01	1.31 ± 0.03	$7.4 \pm 0.1\%$
PMT direct	1.05/ 60	1.00 ± 0.00	17.71 ± 0.06	

表 8.2: WLSF ライトガイドの検出光電子数と収集効率

8.2.5 WLSF ライトガイドの粒子直撃事象

ライトガイド (BBYY) をエアロゲルの下流直後に設置し、粒子を直撃させる実験を行った。この実験は粒子がライトガイドを通過した際に出る「ファイバーチェレンコフ」と輻射体からの「チェレンコフ」を比べて、反射板がない場合のチェレンコフ光の光電子数を評価する。

厚さ 30 mm、屈折率 1.05、透過長約 37 mm のシリカエアロゲルを使用して、(1) 粒子 + チェレンコフ事象はエアロゲル直後にライトガイド (BBYY) を設置した。(2) 粒子のみ事象はエアロゲルとライトガイド (BBYY) の間に遮光材を敷き、粒子直撃のみの効果を測定した。得られた 2 つの光電子数の差がエアロゲルからのチェレンコフ光の寄与であると間接的に確認できる。

	eff.	p.e.
Beam + Cherenkov	0.927 ± 0.018	2.62 ± 0.25
Beam	0.822 ± 0.017	1.73 ± 0.10
Cherenkov		0.89 ± 0.35

表 8.3: WLSF ライトガイド粒子直撃事象

8.2.6 試作器の性能評価測定

WLSF を用いた AC の試作器は $120 \times 100 \text{ mm}^2$ の識別面積をもつ (図 8.6)。チェレンコフ光がほぼ 1 回で WLSF に入射するようにエアロゲル下流に V 字の反射板が設置されている。WLSF ライトガイドは面積 $60 \times 100 \text{ mm}^2$ の受光面を持ち、この間には不感となる遊びがつけられ自由度を持つ。この遊びは Bending Loss が効かない程度の領域で U 字に曲げられ、ライトガイドは 2 つの受光面が上下のチェレンコフ光窓に設置される。WLSF ライトガイドには 4 つの PMT が接続され、B-3 と Y-11 ファイバーはまとめて R9880U-210 へ、O-2 と R-3 はまとめて R9880U-20 にそれぞれ接続される。ファイバーの並べ方は BYOR であり、屈折率 1.05、透過長約 37 mm (@400 mm)、厚さ 60 mm のエアロゲルが封入されている。入射位置における光電子数の一様性、平均光電子数、単一光子における時間のゆらぎについて評価した。

size [mm^2]		120 × 100
reading items		PMT(x4), WLSF
aerogel	index	1.05
	thickness [mm]	60
result	WLSF coll. eff.	$7.4 \pm 0.1\%$
	det. eff.	0.69 ± 0.03
	mean num. p.e.	1.16 ± 0.09
	position uniforimty	93%
	timinig fructuation	0.3 ns

表 8.4: WLSF を用いた AC 試作器の性能評価

8.2.7 結果

結果を以下に示す [40]。

1. エアロゲルの厚さと WLSF を経由して観測されたチェレンコフ光はほぼ比例した関係をしめす。1 次関数近似では傾き 0.225, 切片 0.115 を獲得した。2 次以上に少し減衰項が見られる。
2. エアロゲルの屈折率変化による光量は理論値とは一致しなかった。エアロゲルの透過長、WLSF ライトガイドの収集効率の波長依存が影響しているのかもしれない。
3. WLSF のファイバー組み合わせは BYOR の順番で 4 種類の仕様が最も適し収集効率 $8.1 \pm 0.2\%$ を達成した。
4. 波長変換ファイバー方式を試作し性能評価測定を行った。結果を表 8.4 に示す。

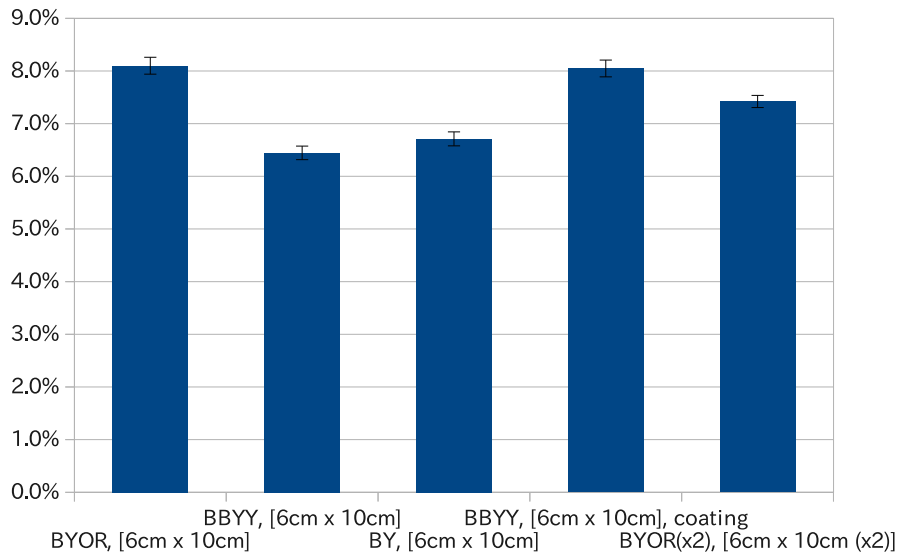


図 8.5: ライトガイドの WLSF 種類における検出効率、高電子数、収集効率

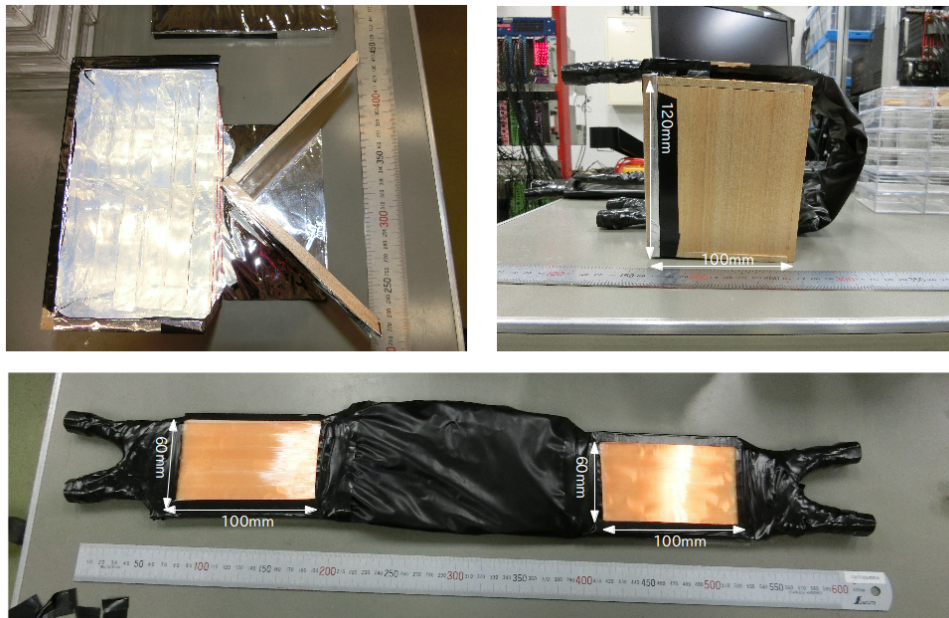


図 8.6: WLSF を用いた AC 試作器の写真(上)。WLSF ライトガイドはファイバー組み合わせ BYOR で、受光面 (60 × 100 mm) を 2 つ持ち、U 字型に曲げるための遊びが設けられている (下)。

8.3 実験2

2014年12月に同じくビームテスト実験を行った。MPPCとEASIROCをシステムに導入してPMTとの比較、MPPC Array x軸スキャンでエアロゲルからのチェレンコフ光分布を測定する。

8.3.1 セットアップ

セットアップを図8.7に示す。上流と下流の2つのトリガーカウンターが同時に反応した事象を抽出してデータ収集した。トリガーカウンターの配置はビームの向きに対して垂直かつ、2つのカウンターも垂直になるように配置した。これによって純粹にシンチレータを3次元的な直線上を通過した粒子を抽出することが可能になる。アクリルライトガイド通過によるチェレンコフ光のノイズ事象はこれで排除される。上流側をメイン実験とし、下流側をサブ実験とする。メインではMPPCを用いたACの試験を行う。サブ実験では従来型ACの基本特性を求める。

EASIROCモジュールの導入によりデータ収集回路をアップデートした(図8.8)。PMT1-4はトリガーカウンターに使用される。これらが同時にシンチレーション光を検出した事象を抽出してデータを取得する。PMT5-6はシンチファイバーに接続されるPMTでアナログ信号とデジタル信号に分けられタイミング調整後ADCとTDCに接続される。PMT7-8はサブ実験用PMTで5インチPMTで印加電圧が他とは異なるので注意が必要だ。MPPCにはEASIROCモジュールから60-70Vの電圧供給され、HOLDのタイミングで全チャンネルをAD変換する。

これらはすべてPC1がPC2とPC3そしてオシロスコープをリモートコントロールして実験を実行する。PC2は主にCAMACからのデータ収集とEASIROCモジュールの制御だ。PC3はx軸ステージの制御を遂行する。タイミング調整はビーム入射しながら常にPC1でモニタリングできるように接続され続けている。

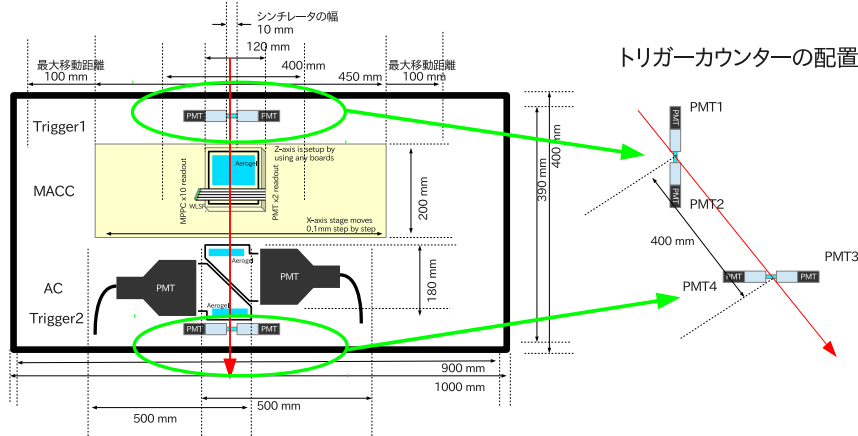


図 8.7: セットアップ

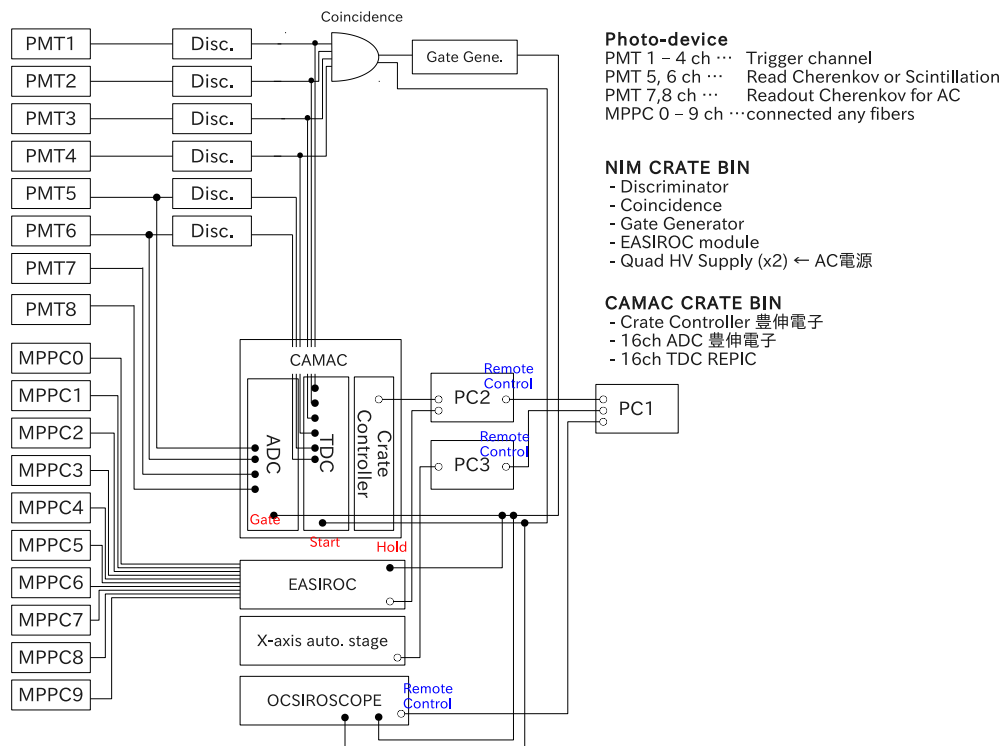


図 8.8: データ収集回路と回路の仕様: PMT1-4 はトリガー用に R9880U-210 を使用した。PMT5, 6 はチェレンコフ光読出しで用途に応じて R9880U-210 と-20 を使い分けている。PMT7 はサブ実験の AC1 に R1250-03 が使用される。PMT8 も同様にサブ実験の AC2 に H6528 が使用される。MPPC は現最大 16 ch の読出しが可能なセットアップになっている。

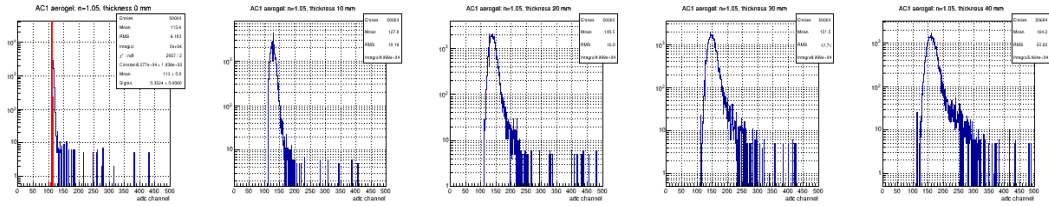
8.3.2 エアロゲル厚さとチェレンコフ放射光子数の関係

AC1はアルミマイラーで内張りされ45度反射板でほぼ1回でチェレンコフ光がPMTに入射できる箱とその中にシリカエアロゲル、そして5インチPMTで構成されている。エアロゲルの厚さにおけるチェレンコフ光の光電子数を評価した。ADC分布から光電子数に変換後、ガウス関数とポアソン分布でフィッティングたそれぞれの平均値および分布全体の平均値から系統誤差を評価した。

aerogel thickness [mm]	detection efficiency	mean number of photoelectrons
0	0.181 ± 0.001	0.20 ± 0.01
10	0.981 ± 0.001	$4.43^{+0.65}_{-0.42}$
20	0.996 ± 0.001	$8.46^{+0.87}_{-0.50}$
30	0.995 ± 0.001	$11.94^{+0.93}_{-0.66}$
40	0.986 ± 0.001	$15.68^{+0.92}_{-0.79}$

表 8.5: AC1のエアロゲルの厚さと検出効率、および光電子数の関係

ADC distribution



p.e. distribution

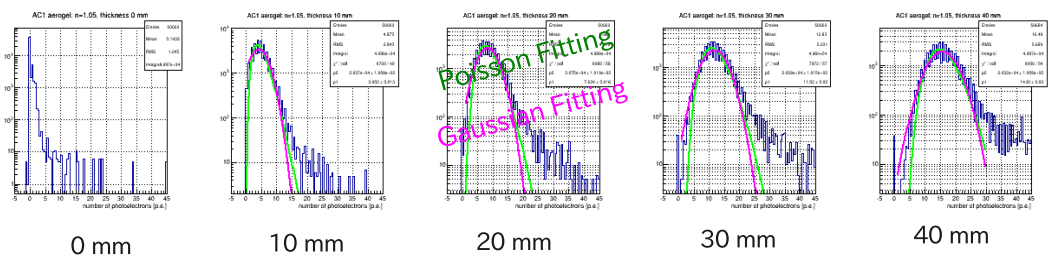


図 8.9: AC1のADC分布と光電子数分布: エアロゲル0mmにおけるADC分布のペダスタル領域のガウス関数フィッティング(赤)、エアロゲル10-40mmの光電子数分布におけるガウス関数フィッティング(マゼンタ)、ポアソン分布フィッティング(緑)

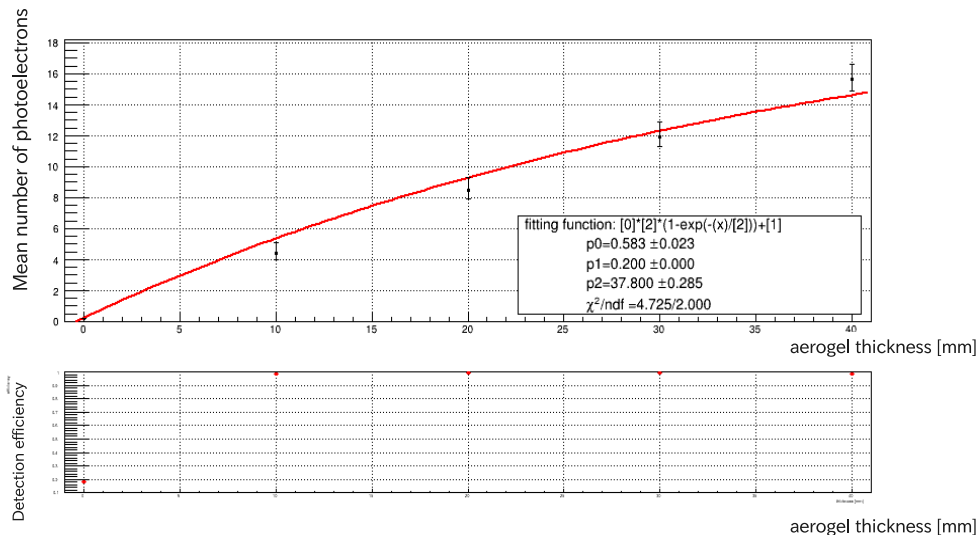


図 8.10: エアロゲル厚さによる平均光電子数と検出効率の関係

8.3.3 チェレンコフ光の輻射体透過長による寄与

AC2 は AC1 と対をなす形状をしており、チェレンコフ光は全面の反射板と後方の 45 度反射板でほぼ 2 回で PMT に入射される構造を持つ。したがって、チェレンコフ光がエアロゲルを通過する平均距離が AC1 は $\frac{1}{2}x$ 、AC2 は $\frac{3}{2}x$ 違う。この差はエアロゲルの厚さによる光電子数の関係性に影響を与えるはずである。ちなみに、 x はエアロゲルの厚さである。

図 8.11 は AC2 のエアロゲルの厚さと平均光電子数および検出効率の関係を示す。エアロゲルの透過長が波長 400 nm において約 $\lambda = 37 - 38$ mm である。チェレンコフ光発生時の光子数 I_0 はエアロゲル内を x 進むと透過した光子数 $I(x)$ は、

$$I(x) = I_0 \exp(-x/\lambda) \quad (8.2)$$

に減衰する。厚さ d のエアロゲルの各位置において発生したチェレンコフ光は最大 d を透過するので、受光面に入射する光子数 $N(d)$ は

$$\begin{aligned} N(d) &= I_0 \int_0^d e^{-x/\lambda} dx \\ &= I_0 \lambda (1 - e^{-d/\lambda}) \end{aligned} \quad (8.3)$$

ここで、AC 1 は式 8.3 で上手くフィッティングできた (図 8.10)。AC2 はエアロゲルの厚さに対してチェレンコフ光の通過距離が d から $2d$ で、あたかも透過長が 2λ のように振る舞うので、

$$\begin{aligned} N(d) &= I_0 \int_d^{2d} e^{-x/2\lambda} dx \\ &= 2I_0 \lambda (e^{-d/2\lambda} - e^{-2d/2\lambda}) \end{aligned} \quad (8.4)$$

と予測できる。図 8.11 は式 8.4 でフィッティングした。

AC1 と AC2 のどちらもパラメータ p_2 が式 8.3, 8.4 の λ に相当し、使用したエアロゲルの透過長 35 - 40 mm に領域を制限して、自由パラメータ p_0 と p_1 をもちいてフィッティングした。AC1 と AC2 の p_0 比はアルミマイラーのチェレンコフ光波超領域における反射率を反映させている。AC1 はほぼ 1 回、AC2 は 2 回で、これらの比はそのまま反射率が導き出せる。

$$p_0(n) = I_0 \varepsilon_{ref}^n - p_1(n) \quad (8.5)$$

$$\varepsilon_{ref} = \frac{p_0(n+1) - p_1(n+1)}{p_0(n) - p_1(n)} \quad (8.6)$$

したがって、アルミマイラーの反射率は 0.85 ± 0.12 と評価できる。

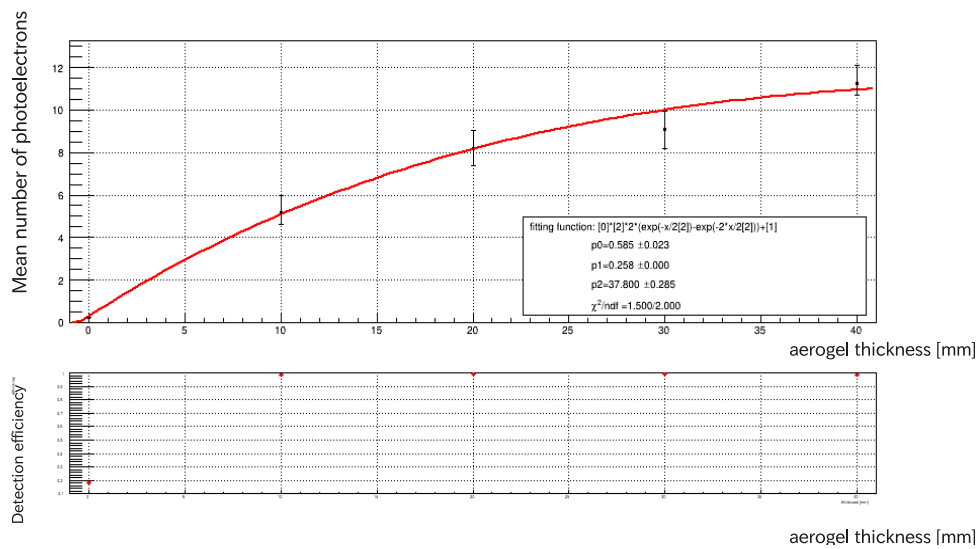


図 8.11: AC2:エアロゲルの厚さによる平均光電子数と検出効率の関係

8.3.4 屈折率とチェレンコフ放射光子数の関係

AC1においてエアロゲルの屈折率を 1.03, 1.05, 1.08 と変えた場合の光電子数の変化を測定した。エアロゲルの厚さは 10 mm で透過長は波長 400 nm においてそれぞれ 35 - 40 mm を用意した。空気の屈折率は 1.0003 なのでこれを含めてチェレンコフ光の光量は式 2.4 から $1 - 1/(n\beta)^2$ に比例すると予測できる。

図 8.12 に AC1 のエアロゲルの屈折率と平均光電子数の関係を示す。フィッティング関数:

$$p_0(1 - 1/x^2) + p_1 \quad (8.7)$$

によってよく近似できる。エアロゲルの厚さ 10 mm なので透過長の寄与を無視して屈折率に依存した影響を観測した。

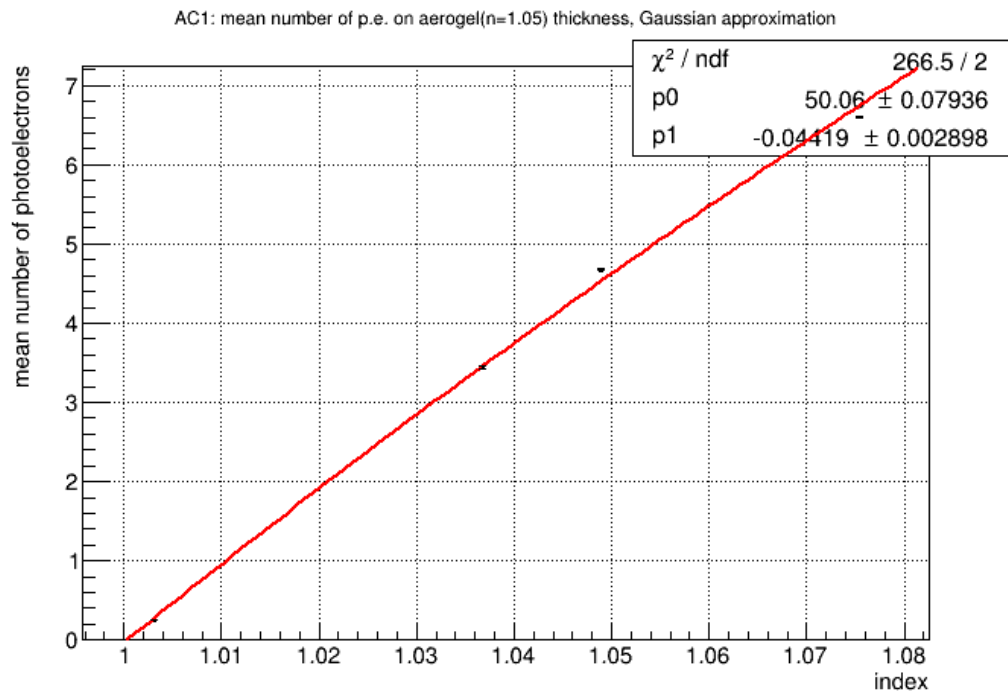


図 8.12: AC1:エアロゲルの屈折率による平均光電子数の関係

8.3.5 1次元配列 MPPC の x 軸スキャンング

厚さ 10 mm、屈折率 1.14 のシリカエアロゲルの下流 12 mm に MPPC を縦に 2 mm 間隔開けて 16 個整列させた。MPPC array は横に 6 mm ずつ移動し、エアロゲル下流の入射光子分布を観測した (図 8.13)。エアロゲルの上流には黒シートを設置し空気チレンコフの影響を除いた。

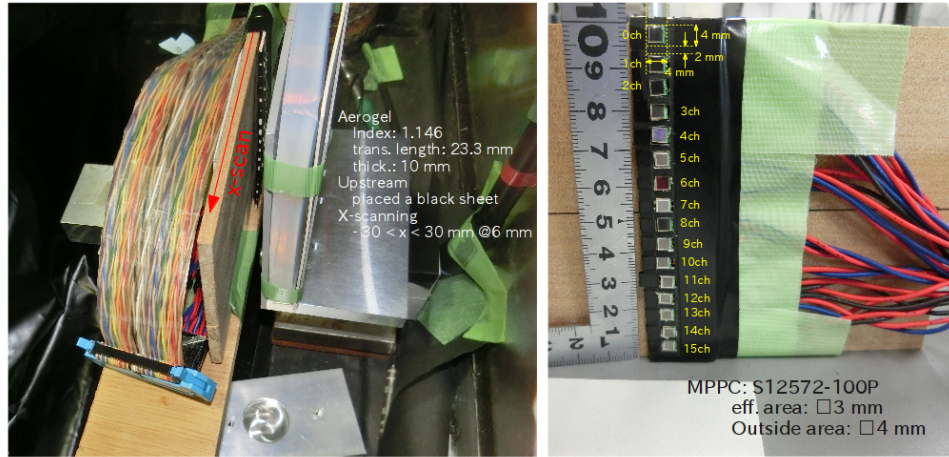


図 8.13: x 軸スキャンのセットアップと MPPC 配置図

スキャンングにおけるアクセプタンス領域は MPPC の有感領域 $S_{mppc} = 3 \times 3 \text{ mm}^2$ とスキャン面積の比で計算できる。MPPC は外形 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ で 2 mm 間隔で配置され、6 mm ステップで移動するので、1 ステップにおける MPPC1 個あたりのスキャンング面積は $6 \times 6 \text{ mm}^2$ である。したがって、アクセプタンスは 0.25 である。

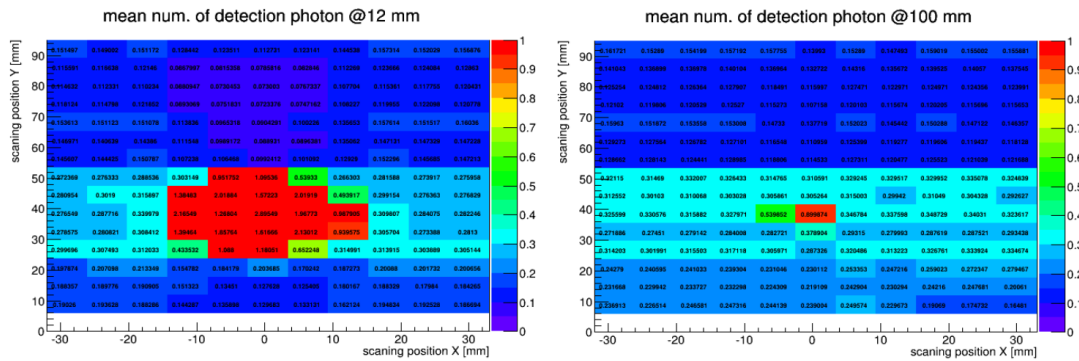


図 8.14: 屈折率 1.14、厚さ 10 mm、間隔 12 mm 離れたスキャン結果 (左) と間隔 100 mm 離れたスキャン結果 (右) : MPPC 検出光子しきい値ごとの検出効率の分布

シリカエアロゲルと MPPC の間隔 $L = 12 \text{ mm}$, 100 mm 離した場合におけるチェレンコフ光分布を図 8.14 に示す。速度がほぼ $\beta \sim 1$ の荷電粒子が通過した位置からのチェレンコフリングの半径は式 2.8 から

$$R = \begin{cases} 10.0 \pm 2.7 \text{ mm} & (L = 12 \text{ mm}) \\ 63.7 \pm 2.7 \text{ mm} & (L = 100 \text{ mm}) \end{cases} \quad (8.8)$$

と計算できる。したがって、本測定のセットアップでは $L = 100 \text{ mm}$ の場合、リングはスキャン範囲外に分布することになる。これらの分布から明らかなチェレンコフ光の広がりを観測した。 $L = 12 \text{ mm}$ の時、チェレンコフ光の広がりには粒子通過位置の周りの計 21 個が反応している。

チェレンコフ光は粒子進行方向に依存した指向性を持つので、ある範囲における光電子数を積分することで、反跳電子によるノイズを除去できると期待できる。21 個の MPPC の平均光電子数の和はそれぞれ、

$$N_{total} = \begin{cases} 23.9 \pm 0.4 \text{ mm} & (L = 12 \text{ mm}) \\ 5.6 \pm 0.1 \text{ mm} & (L = 100 \text{ mm}) \end{cases} \quad (8.9)$$

と計算できる。粒子通過位置を除いた MPPC の光電子数を計算することで高い精度で粒子識別できるが、本測定のセットアップ条件では評価は困難である。

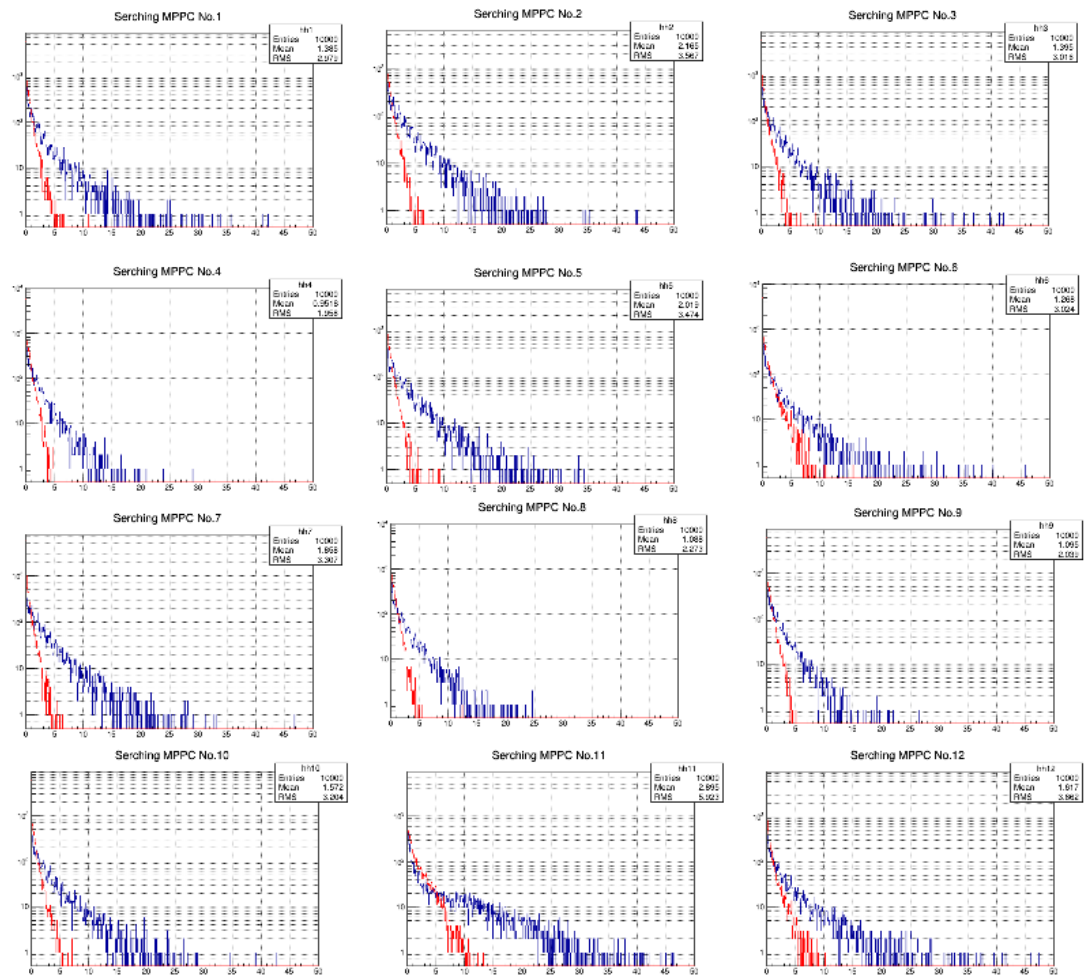


図 8.15: チェレンコフ光観測範囲内における No. 1 - 12 の MPPC の光電子数分布: $L = 12$ mm におけるチェレンコフ光観測事象 (青線)、 $L = 100$ mm におけるチェレンコフ光不観測事象 (赤線)。

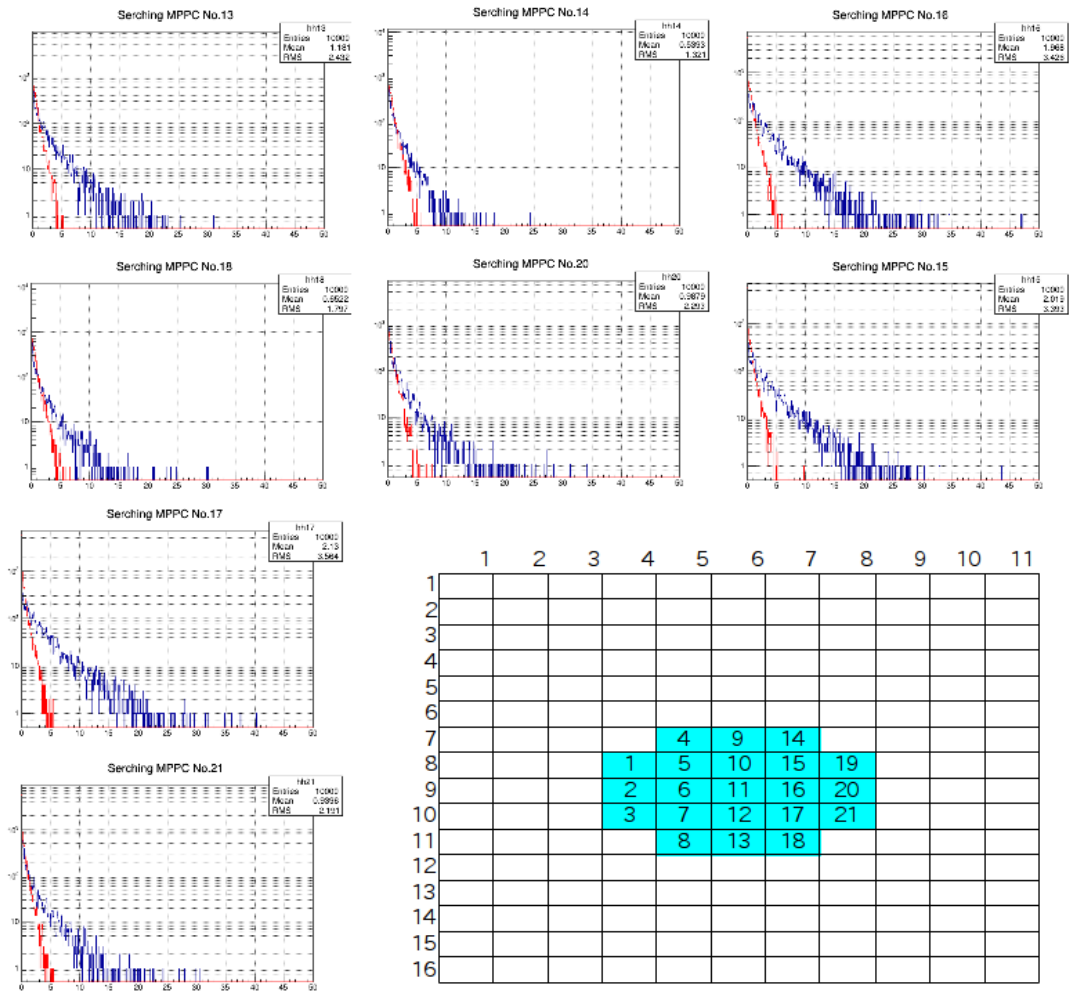


図 8.16: チェレンコフ光観測範囲内における No. 13 - 21 の MPPC の光電子数分布: $L = 12$ mm におけるチェレンコフ光観測事象 (青線)、 $L = 100$ mm におけるチェレンコフ光不観測事象 (赤線)。それぞれの No に対応する MPPC の位置 (右下): 縦軸が MPPC のチャンネル、横軸が平行移動した位置に相当する。

8.3.6 結果

1. エアロゲル屈折率 $n = 1.05$ 、透過長 $\lambda = 35 - 40$ mm におけるチェレンコフ放射光子数はエアロゲル厚さ d に関して近似式 $N_{p.e.} = 0.58\lambda(1 - e^{-x/\lambda}) + 0.2$ で示せる。反射回数を変えた場合でアルミマイラーのチェレンコフ光波長領域における反射率 $\varepsilon_{ref} = 0.85 \pm 0.12$ を導いた。検出効率はエアロゲル 10 mm で 98% 以上を達成し、粒子識別には十分な性能を持つことを確認できた。屈折率とチェレンコフ放射光子数の関係は近似式 $N_{p.e.} = 47.7(1 - 1/n^2) + 0.2$ でフィッティングでき、理論値と一致する。
2. x 軸スキャンでは厚さ 10 mm、屈折率 1.14 のシリカエアロゲルからのチェレンコフ光分布を観測した。エアロゲルと MPPC が近い場合予測範囲にチェレンコフ光の分布を確認し、遠い場合はチェレンコフ光が搜索範囲外に出てしまい、粒子通過位置のみ観測した。チェレンコフ光搜索範囲を MPPC21 個に制限した場合、光電子数は $N_{total} = 23.9 \pm 0.4$ ($L = 12$ mm), $N_{total} = 5.6 \pm 0.1$ ($L = 100$ mm) である。この差は 18.3 で、屈折率 1.14 から放射されるチェレンコフ光の光子数は式 2.4 から約 140 個で MPPC のアクセプタンスが 0.25 で、検出効率が 0.35 なので、平均光電子数は約 12 と概算できる。オーダとしては合っているが、高く見積もっている主な原因は MPPC のクロストークであろう。ここで MPPC の熱ノイズに関しては差をとっているから打ち消されていると考えている。

第9章 考察

9.1 輻射体の性質と光電子数の関係

従来型 AC において、ビームテストで屈折率 n とチェレンコフ光の関係を求めた。透過長 λ と 45 度反射板の反射率 ε_{ref} の寄与を考慮すると、厚さ d のシリカエアロゲルから得られるチェレンコフ放射の光電子数 $N_{p.e.}$ は式 8.3 と式 8.7 を内包して以下の式で表せる。

$$N_{p.e.}(n, d, \lambda, \varepsilon_{ref}, \beta) = \left\{ p_0 \lambda \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) (1 - e^{-d/\lambda}) + p_1 \right\} \varepsilon_{ref}. \quad (9.1)$$

ここで、使用した PMT の型番はそれぞれ R1250-03, H6528 である。どちらも $\phi 120$ mm のバイアルカリ光電面を持ち 420 nm に最大感度 25% を持つことから同様の量子効率 $\varepsilon_{Q.E.}$ を持つと考えている。

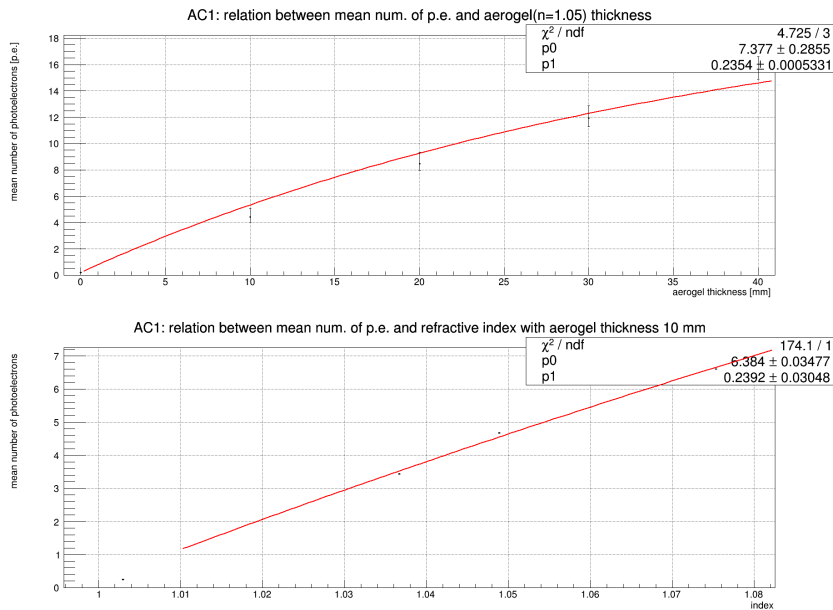


図 9.1: チェレンコフ光検出光電子数と屈折率、エアロゲル厚さ、透過長における関係

これらを図 8.10 と図 8.12 にフィッティングする図 9.1。2 種類のフィッティング・パラメータが得られた。 p_1 に関してはどちらも誤差の範囲内で 0.2 であろう。 p_0 は 2 つの平均を取るべきで、 χ^2 / NDF を用いて、より近似されているパラメータに重みを置くため、厚さにおけるフィッティ

ングパラメータは a , 屈折率のパラメータは b として以下の式で評価する。

$$x = \chi^2/NDF, \quad (9.2)$$

$$w(x) = e^{1-(\ln x)^2}, \quad (9.3)$$

$$p0 = \frac{aw(x_a) + bw(x_b)}{w(x_a) + w(x_b)}. \quad (9.4)$$

したがって、 $p0 = 7.4$ と評価される。つまり、厚さにおける近似式がより精度よく近似される。以上から、エアロゲルの厚さ d , 屈折率 n , 透過長 λ によって、PMT で得られるチェレンコフ放射の光電子数は

$$N_{p.e.}(n, d, \lambda, \epsilon_{ref}, \beta) = \left\{ 7.4\lambda \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right) \left(1 - e^{-d/\lambda} \right) + 0.24 \right\} \epsilon_{ref} \quad (9.5)$$

と近似することができる。

9.2 MPPC 反応個数しきい値型の性能評価

§8.3.5 の 1 次元配列 MPPC の x 軸スキャン測定では縦に 16 個の MPPC が取り付けられている。本来 2 次元配列 MPPC によって粒子識別能力を評価するが、本測定では推定の評価を行う。また、この評価はエアロゲルと MPPC との距離 $L = 12 \text{ mm} / 100 \text{ mm}$ におけるチェレンコフ光の分布の違いからチェレンコフ放射した/しないの事象識別であることを前提とする。つまり、反跳電子の寄与を含んだ識別能力を評価しているのである。

まず、176 個の MPPC の中から何個の HIT 事象があるかを評価する。本測定では 1 次元配列によるスキャンでの測定なので、2 次元における事象は同期していない。ここでは、縦ライン内では事象毎に同期され、全体における平均光電子数分布が得られた。チェレンコフ光はチェレンコフ角の指向性もち、その範囲内でランダムで MPPC に入射されると考えて、仮想的に 2 次元配列のデータとして扱うことにする。MPPC は比較的ノイズが多いことので HIT となるための光電子数しきい値 N_{th} と、全体の中で反応した MPPC 個数のしきい値 N_{MPPC} の 2 種類のしきい値自由度を設ける。

図 2.2 と同様に、「チェレンコフあり」の in-efficiency と「チェレンコフなし」の efficiency 分布の交点が粒子識別能力の in-efficiency に相当する。しきい値 N_{th} を 0.5, 1.5... と変えていった時のしきい値 N_{MPPC} における in-efficiency のグラフを図 9.2,9.3 に示す。 N_{th} を上げると N_{MPPC} は減るのでグラフは左にシフトし、交点の高さは下がりある所で上昇する。これらの図から最適な in-eff. は

$$inefficiency = \begin{cases} 9\% & (N_{th} = 4.5, N_{MPPC} = 1.1) \\ 10\% & (N_{th} = 3.5, N_{MPPC} = 1.6) \end{cases} \quad (9.6)$$

である。反応した MPPC が 1 個以上でチェレンコフしたと判断するのは危険なので、しきい値 $N_{th} = 3.5$, $N_{MPPC} = 1.6$ で粒子識別能力は 90% と評価できる。この結果はデータ収集段階における PID を想定した識別能力に相当する。

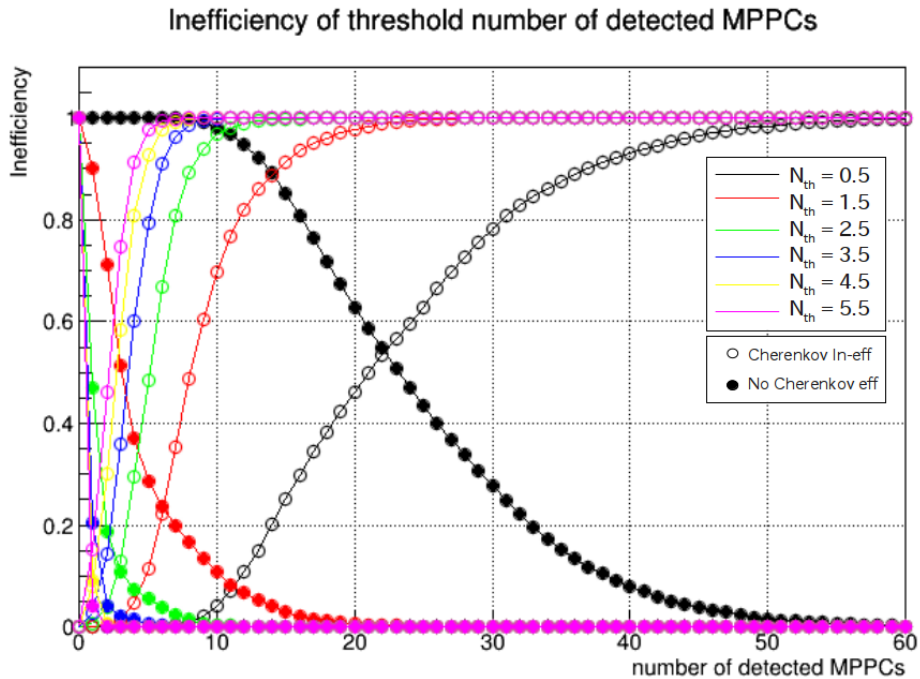


図 9.2: 全 MPPC の光電子数しきい値 N_{th} を 0.5, 1.5... と変えていった時の反応した MPPC 個数しきい値における「チェレンコフあり」の in-inefficiency と「チェレンコフなし」の efficiency 分布。

オフライン解析では、チェレンコフ光の分布範囲を探索して積分することで、他の領域での MPPC のノイズの影響を無視することができ精度の良い粒子識別を行う。図 8.14(左) でわかるとおりチェレンコフ光が観測されている MPPC 計 21 個について、詳しく解析する。図 8.16(右下) に MPPC の No に対応する位置を示す。

粒子の通過位置、個性のノイズ比が MPPC は異なるので個別にしきい値を設ける必要がある。今回 21 の自由度を持つしきい値は「MPPC の光電子数しきい値における $L = 12 \text{ mm}$ と $L = 100 \text{ mm}$ の efficiency の差が最大になる値」として設定される(図 9.4)。縦ラインの事象毎における識別能力を評価し、ライン n 個のうち r 個を ${}_n C_r OR$ 識別した全体の識別能力を評価する。各ラインの識別能力と誤認識、そして組合せた全体の識別能力を表 9.1 に示す。したがって ${}_5 C_3 OR$ の組合せで検出効率 90.2%、誤認識 7.2% であると評価出来た。

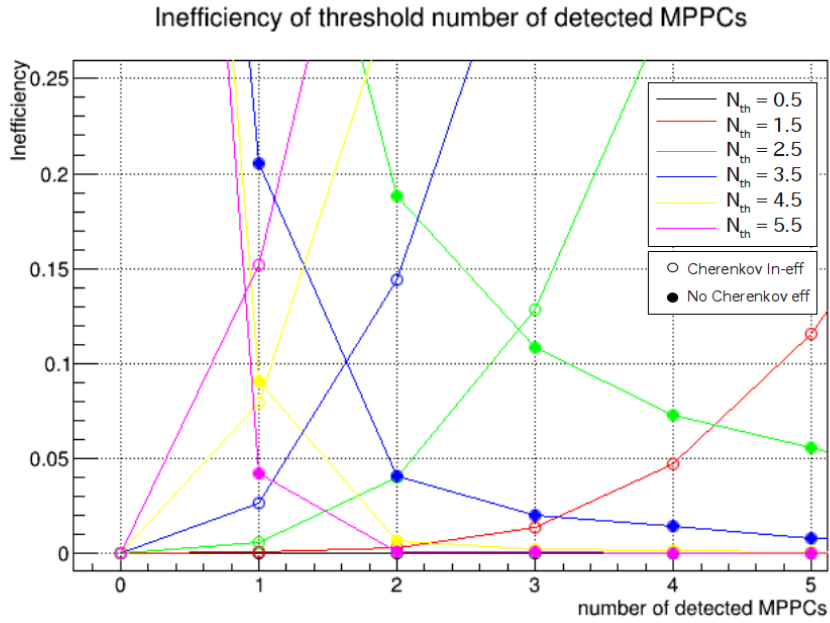


図 9.3: 全 MPPC の光電子数しきい値 N_{th} を 0.5, 1.5... と変えていった時の反応した MPPC 個数しきい値における「チェレンコフあり」の in-inefficiency と「チェレンコフなし」の efficiency 分布の詳細。

line	1	2	3	4	5
eff	70%	86%	86%	86%	38%
Mis-id	19%	28%	26%	21%	14%
combination	${}_5C_5OR$	${}_5C_4OR$	${}_5C_3OR$	${}_5C_2OR$	${}_5C_1OR$
eff	16.9%	60.0%	90.2%	98.6%	99.9%
Mis-id	0.0%	0.9%	7.2%	28.2%	71.5%

表 9.1: MPPC 反応個数しきい値の識別能力評価

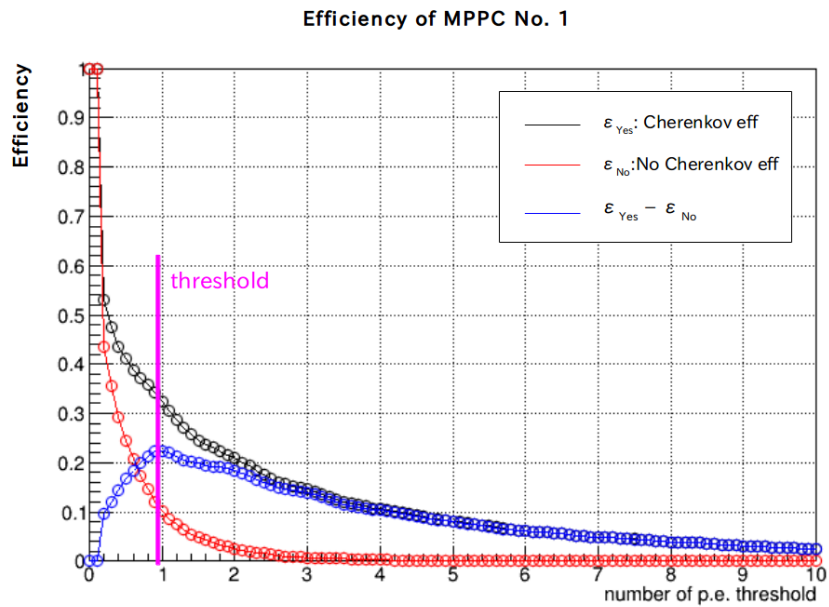


図 9.4: MPPC1 個の $L = 12 \text{ mm}$ と $L = 100 \text{ mm}$ における検出効率とその差。しきい値はこれらの差が最大となる光電子数として設定される。

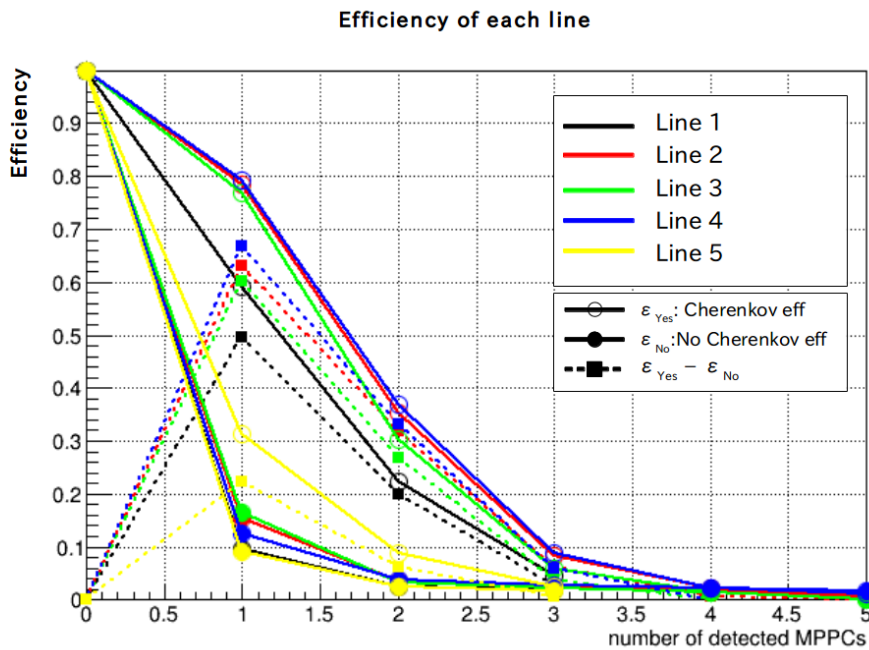


図 9.5: 各ラインの反応 MPPC しきい値における検出効率と誤認識、そしてその差。ラインごとに MPPC しきい値の数は設定される。

第10章 結論

本研究はLEPS IIとFOREST実験のためのACを始めとする、高汎用性しきい値型粒子識別装置の開発を目的としている。PMT, MPPC, EASIROCの動作確認と校正測定を行った。直径0.2 mmの波長変換ファイバーをシートにし、性質を評価した。WLSFライトガイドを用いたACを試作し、宇宙線ミュオンと東北大学ビームテストによって性能評価を行った。本測定は直径0.2 mmの波長変換ファイバーを経由してチェレンコフ光を初めて観測した事例である。MPPCの1次元配列のスキャン測定で屈折率1.14のエアロゲルからのチェレンコフ光分布を観測した。これらの結果を基に高汎用性粒子識別装置の性能について考察した。

10.1 波長変換ファイバー方式

波長変換ファイバーを用いたACは識別面積に対する余分な空間が排除できるので、狭い空間における粒子識別が可能である。直径0.2 mmのファイバーシートの性質をLED、宇宙線ミュオン、東北大ビームテストで評価した。約1 mの減衰長と15 mmの曲げ損失最小半径を持つことから自由度の高い粒子識別装置が設計可能になった。試作器はファイバーの収集効率は約7%で、入射一様性は90%以上、ライトガイド受光面積と小型PMT面積の割合は $S_{det}/S_{PMT} \sim 60$ を獲得した。十分な識別能力を得るためには数十cm程度の奥行きが必要であることが課題である。

10.2 MPPC反応個数しきい値型

エアロゲル下流直後におけるMPPCを設置した設計は高汎用性の仕様をカバー出来る。1次元配列スキャン測定の結果、オンライン解析では識別能力90%、オフライン解析では検出効率90.2%、誤認識7.2%に相当する結果が得られた。エアロゲルの厚さ、MPPCの単位面積当たりのチャンネル数、アクセプタンスなどの適性化により本測定結果を超える性能が期待できる。

10.3 今後の展望

1. 実験的にシリカエアロゲルの光学的性質と光電子数の関係を導いた。モンテカルロ・シミュレーションのためのシリカエアロゲルモデル生成に組み込み、汎用的な仕様設計を試みる。
2. 波長変換ファイバー方式では厚さ方向に課題を残した。そこで、波長変換ファイバーをエアロゲルの下流直後に廃して1本ずつ読み出し、反応したファイバーの本数をしきい値にしたPIDを提案する。MPPCを2次元に配列する方法と比べて、低価格、高放射線耐性などが期待される。

3. MPPC2次元配列の読み出し測定によって、実際の識別能力を評価する。エアロゲルの屈折率を2種類(上流から高屈折率、低屈折率、MPPCの順番)を用いてチェレンコフリングの分布を2種類設ける。これによれば、1つのシリカエアロゲルにおいてチェレンコフするかしないか、チェレンコフの広がり方で3種類のしきい値型粒子識別装置が可能になる。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの方々にご協力、ご指導いただきました。河合秀幸准教授をはじめとする、吉田滋教授、間瀬圭一助教授には本研究に参加する機会を与えてくださったことを感謝いたします。田端誠氏にはエアロゲルを提供していただき、研究に対する姿勢や研究活動に置いて多くの助言をいただき有意義な研究を行うことができました。感謝しています。東北大学電子光理学研究センターの石川貴嗣氏にはビームテストの機会を与えて下さり感謝しています。

千葉大学粒子線研究室の新田宗孝氏、飯島周多郎氏、大和久耕平氏、雲越大輔氏、児玉諭士氏、韓樹林氏、上山駿佑氏、小林篤史氏、兼子菜緒見氏、井尻寛人氏、磯部晃氏とは有意義な研究生生活を送ることが出来感謝しています。他、物理学を共に学んだ友人を含め多くの方々の支えがあって本研究を行うことができました。

最後に大学院生としての研究生生活を支えてくれた家族に心より感謝します。

参考文献

- [1] M. P. De Pascale et al., J. Geophys. Lett. Res. 98, 3501 (1993).
- [2] ATLAS Collaboration, Physics Letters B 716 (2012) 1 - 29.
- [3] CMS Collaboration, Physics Letters B 716 (2012) 30 - 61.
- [4] T. Nakano, et al., Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 0123002.
- [5] T. Nakano, et al., Phys. Rev. C79 (2009) 025210.
- [6] B. McKinnon, et al., Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 212001.
- [7] M. Niiyama et al., Nucl. Phys. A 914 (2013) 543 - 552.
- [8] 甲斐田俊、「 π^0 光生成反応によるバリオン共鳴 $N^*(1670)$ の研究」、東北大学 2010 年度修士論文.
- [9] T. Ijima et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 379 (1996) 457 - 459.
- [10] 栗原英輔、「KEK B ファクトリー実験における Belle Aerogel Cerenkov 検出器の校正と性能評価」、千葉大 2001 年度修士論文.
- [11] M. Tabata, doctor thesis in Chiba University, 2009.
- [12] 大場隆人、「BELLE における低屈折率シリカエアロジェルチェレンコフカウンターの研究及び開発」、中央大学 1998 修士論文.
- [13] M. Tabata et al., Nucl. Instr. and Meth. A 688 (2012) 64 - 70.
- [14] M. Tabata et al., Physics Procedia 37 (2012) 642 - 649.
- [15] Particle Data Group, J. Phys. G **33**, 1 (2006).
- [16] A. R. Buzykaev, et al., Nucl. Instr. And Meth. A 433 (1999) 396 - 400.
- [17] Y. Suda, doctor thesis, Tokyo Metropolitan University, 1998.
- [18] 倉谷厚志、「シリカエアロゲルを用いたリングイメージングチェレンコフカウンターの開発」、千葉大学 2007 年度修士論文.
- [19] 浜松ホトニクス株式会社, 光電子増倍管 その基礎と応用 第 3a 版 (2007).
- [20] HAMAMTSU PHOTONICS K.K., Catalog: MPPC (multi-pixel photon counter) S12572-025, -050, -100C/P, Available: <http://www.hamamatsu.com/>.
- [21] 本多良太郎, EASIROC テストボード仕様書, 2013, 東北大.

- [22] Omega group, [EASIROC DATA SHEET], (2011).
- [23] 石島直樹, 「ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験用システムの開発」, 大阪大学, 2014/2/4, 修士論文.
- [24] Kuraray Co. Ltd., Kuraray's Scintillation Materials. Product Catalog. Available: <http://kuraraypsf.jp/>.
- [25] 久保将人, 「LEPS2 のための WLS fiber と MPPC を用いたエアロゲルチェレンコフカウンターの開発研究」, 千葉大学 2012 年度修士論文.
- [26] M. Kubo et al., IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, (2011) NP3.M-34, 1103 - 1106, DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154581.
- [27] H. ITO et al., Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2013 IEEE, DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829686.
- [28] R. Bellotti et al., Phys. Rev. D53, 35 (1996).
- [29] R. Bellotti et al., Phys. Rev. D60, 052002 (1999).
- [30] M. Boezio et al., Phys. Rev. D62, 032007 (2000).
- [31] M. Boezio et al., Phys. Rev. D67, 072003 (2003).
- [32] S. Coutu et al., Phys. Rev. D62, 032001 (2000).
- [33] T. Snuki et al., Phys. Lett. B594m 35 (2004).
- [34] Particle Data Group, Chinese Phys C Vol.38, No. 9 (2014) 090001.
- [35] P. K. F. Grieder, Cosmic Rays at Earth, Elsevier Science (2001).
- [36] J. Kremer et al., Phys. Rev. Lett. 83, 4241 (1999).
- [37] SHaino et al. (BESS Collab.), Phys. Lett. B594, 35 (2004).
- [38] C. G. S. Costa, Astropart. Phys. 16, 193 (2001).
- [39] ELPH: 東北大学電子光理学研究センター Available: <http://www.lns.tohoku.ac.jp/>.
- [40] H. ITO et al., Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, proceeding, PoS(TIPP2014)325, Available: <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=213#session-24>.
- [41] S. Ijima et al., Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2013 IEEE, DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829625.
- [42] H. ITO et al., Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, June 2 - 6 2014, Amsterdam in the Netherlands, Available: <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=213#session-18>.

付録

A CAMAC calibration

ここでは CAMAC ADC と TDC の変換係数の校正測定を主に説明する。共通の測定方法は Function Generator からの信号をオシロスコープで波形解析し、その信号における ADC および TDC のデジタル値の関係性を調べる。セットアップを図 10.1 に示す。

(1)ADC 変換係数の校正測定は Function Generator で整形したパルス波計をオシロスコープで解析し ADC Gate の時間で積分して電荷を計算する。sync から出力される TTL 信号を TTL-NIM で変換後 Gate Delay Generator で ADC Gate を波形整形する (緑線)。面倒くさいが、全 16ch それぞれの ADC 校正測定を実施する。

(2)TDC 校正測定はアナログ信号は用いないので、sync から出てくる TTL 信号を TTL-NIM に変換後 Discriminator に通し、スタート信号にする。Discriminator から枝分かれした信号は少し遅延されるため Gate Delay Generator に繋がれ、そして Fan in/Fan out へ接続される。これは論理 OR 回路なので、16 個の同じタイミング信号を出力することが出来る。つまり、16ch の TDC 校正測定を一度に実行できる。

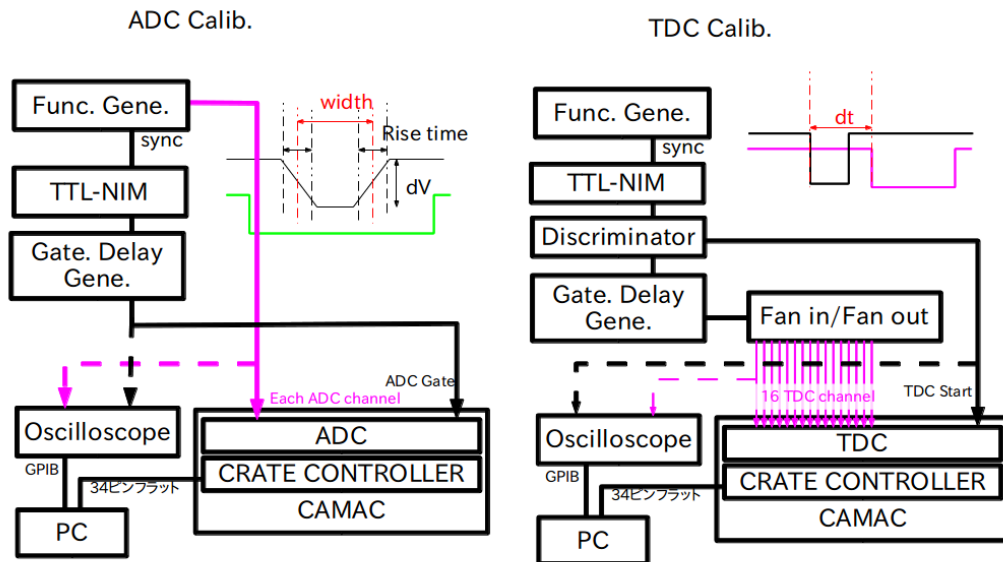


図 10.1: CAMAC Calibration test setup: ADC calib.(left) and TDC calib.(right)

ADC calibration

校正測定する ADC は豊伸電子 16CH ADC C009 で、使用したオシロスコープは Tektronix TDS2012 100MHz 1GS/s で最小サンプル時間 1 ns の性能を持つ (図 10.2(左))。この校正測定では十分な精度である。このオシロスコープは GPIB で PC から制御されデータ収集される。得られた波形を解析する上で、まずオフセットラインの決定、ゼロ点の揺らぎ、積分領域の決定、計算の丸め誤差、統計誤差について考慮する必要がある。

オシロスコープで観測した電圧の時間分布波形を積分して電荷を以下の式で計算した。

$$Q = \sum_{t=0}^{100} \frac{1}{2R} \left\{ V(t) + V(t+1) \right\} \quad (10.1)$$

ここで、 t はオシロスコープの最小サンプル時間 1ns で、 R はオシロスコープの内部抵抗 50Ω、データポイントを結んだ台形として波形の面積を計算した。

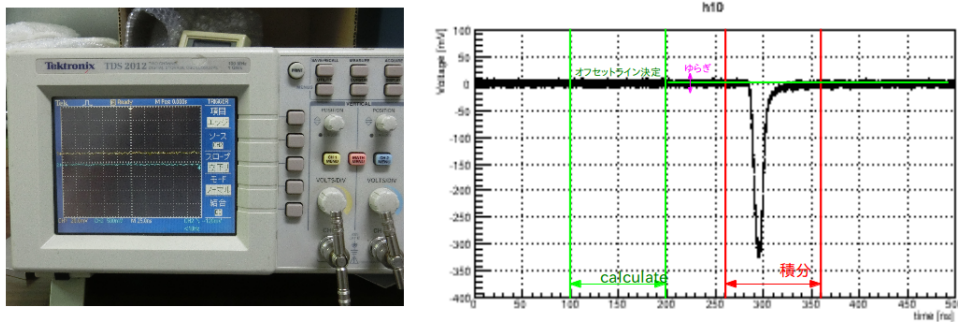


図 10.2: 使用したオシロスコープ (左) と Function Generator からの信号 (右)

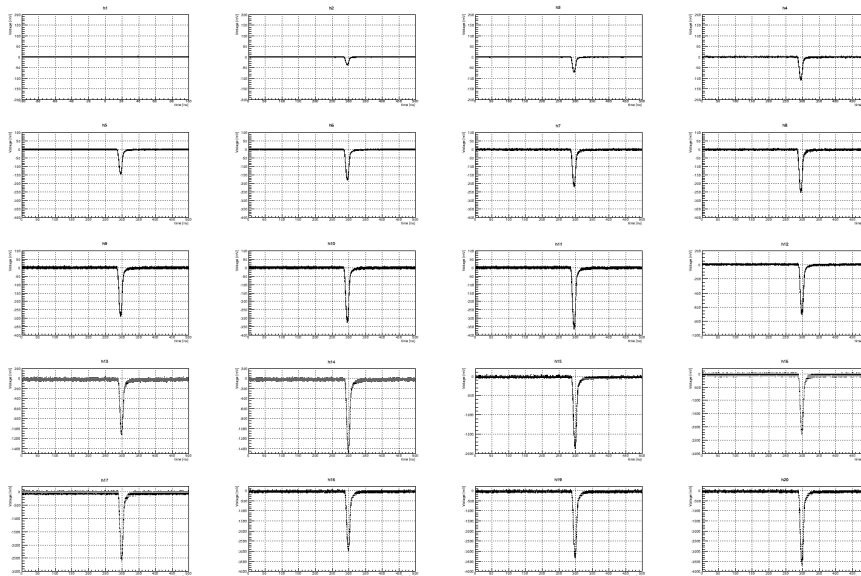


図 10.3: Function Generator からの入力電荷波形

入力電荷と ADC の関係を図 10.4 に示す。この関係性は良い線形性が確認でき、1 次関数でフィッティングできる。CAMAC ADC の変換係数は 0ch においてはフィッティング関数の傾きから 0.2625 ± 0.0026 pC/ADC と計算できる。0-15ch の平均値は 0.2571 ± 0.0007 pC/ADC と評価できる。

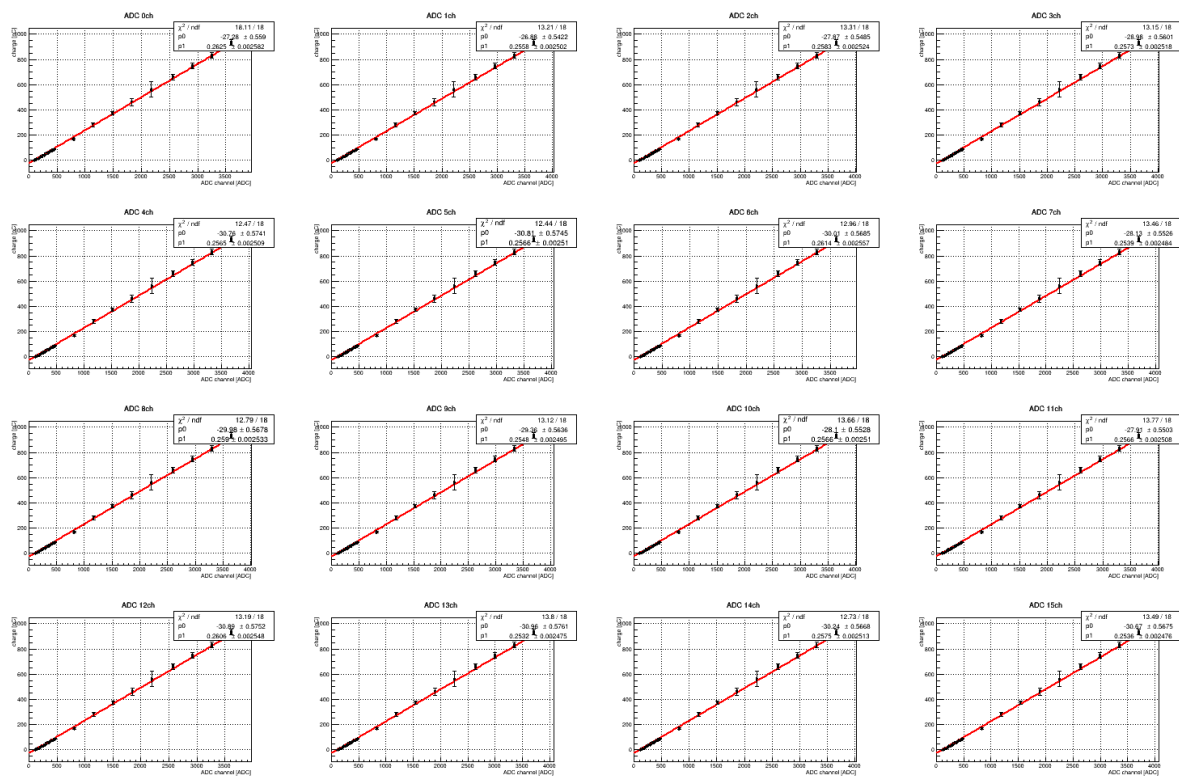


図 10.4: CAMAC ADC 0 - 15ch における ADC channel と入力電荷の関係

TDC calibration

校正する TDC は林栄精器 REPIC RPC-180 16CH TDC である。sync からの TTL 信号を TTL-NIM に変換後、Discriminator を通してスタート信号にした。一方を Gate Generator に繋がれ遅延して Fan in/Fan out を通して 16 分割してストップ信号とした。Discriminator からの NIM 信号は幅 50ns に設定して、まずオシロスコープで波形解析した。30, 60, 100, 150, 160, 200 ns と遅延したときの TDC channel を測定して変換係数を求める。

オシロスコープの波形解析の様子を図??に示す。領域ごとに以下の式でフィッティングした。

$$y = \begin{cases} \frac{p_0}{p_2}(x - p_3) & (p_3 < x < p_3 + p_2) \\ p_0 & (p_3 + p_2 < x < p_3 + p_1) \\ \frac{p_0}{p_2}(x - p_1 - p_3) & (p_3 + p_1 < x < p_3 + p_2 + p_1) \end{cases} \quad (10.2)$$

ここで、 p_0 はパルスの高さ、 p_1 はパルス幅、 p_2 は立ち上がり時間、 p_3 は立ち上がり始めの時刻を意味する。ここで、スタート時間との時間差は $\Delta t = p_3 + \frac{1}{2}p_2$ で評価する。

時間差と TDC の関係を図 10.6 に示す。この関係性は良い線形性が確認でき、1 次関数でフィッティングできる。CAMAC TDC の変換係数は 0ch においてはフィッティング関数の傾きから 54.55 ± 0.005 ps/TDC と計算できる。

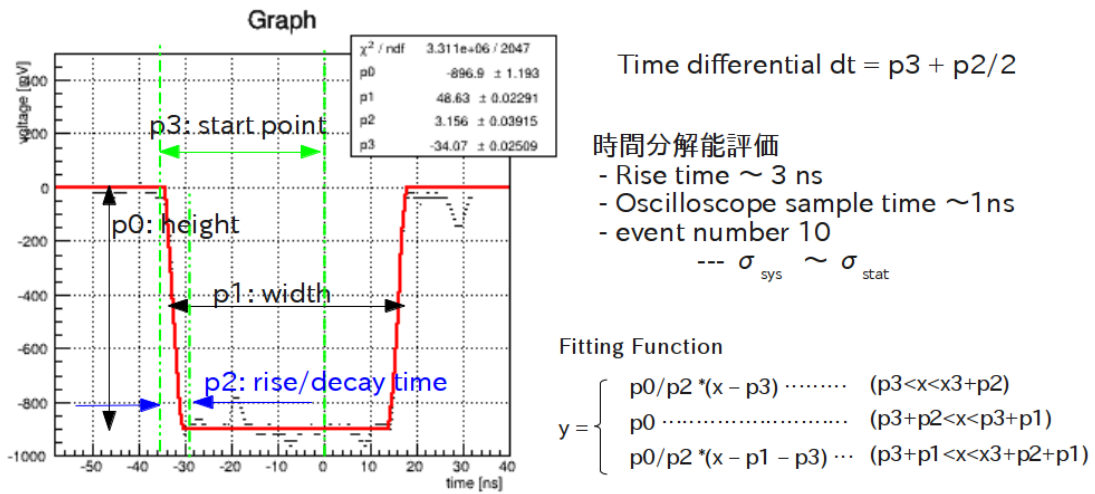


図 10.5: NIM Discriminator 論理信号の波形

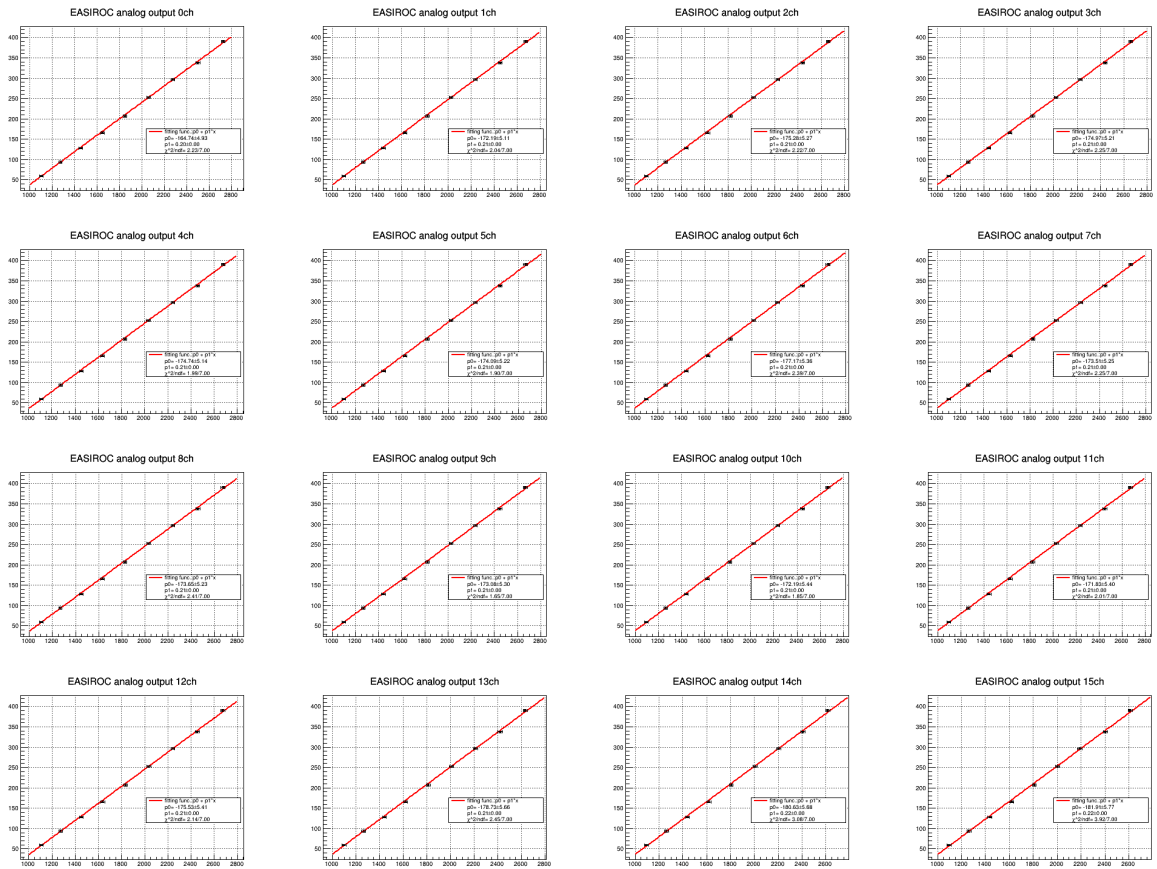


図 10.6: CAMAC TDC 0 - 15ch における TDC channel とタイミングの関係

B リアルタイムストロンチウム 90 カウンター

高汎用性しきい値型粒子識別装置の応用範囲は環境放射線測定までカバーする。そのひとつとして、ストロンチウム 90 (^{90}Sr) だけに感度が高い「リアルタイムストロンチウム 90 カウンター」を紹介する。2011 年の東日本大震災の二次災害による福島第一原子力発電所の原子炉事故で日本中に放射性物質が漏洩した。2014 年現在においてもその影響は残っており、特に半減期の長く水溶性の高い ^{90}Sr と ^{137}Cs は汚染水として問題である。

汚染水の危険性

汚染水に含まれている主な放射性物質は ^{90}Sr と ^{137}Cs で、物理学的半減期はそれぞれ 29 年と 30 年、生物学的半減期はそれぞれ 49 年と 70 日である。生物学的半減期の寄与は主に化学的性質によるものが効く。 ^{90}Sr はアルカリ土類金属で体内に吸収されると骨に蓄積される。一方 ^{137}Cs はアルカリ金属で体内に吸収されても代謝によって体外へ排出される。これら物理学的半減期 τ_{phys} と生物学的半減期 τ_{bio} を考慮した実行半減期 τ_{eff} :

$$\tau_{eff}^{-1} = \tau_{phys}^{-1} + \tau_{phys}^{-1} \quad (10.3)$$

によって体内での潜伏期間を表示する (図 10.7)。

海へ漏洩された汚染水は魚介類に蓄積された後、我々が摂取する危険性がある。特に ^{90}Sr は骨に蓄積されるのだから事故から年数が経つに従って多く蓄積している可能性を持つ。2012 年厚生労働省が規定した食品に含まれる放射性物質の基準値は 100 Bq/kg である。

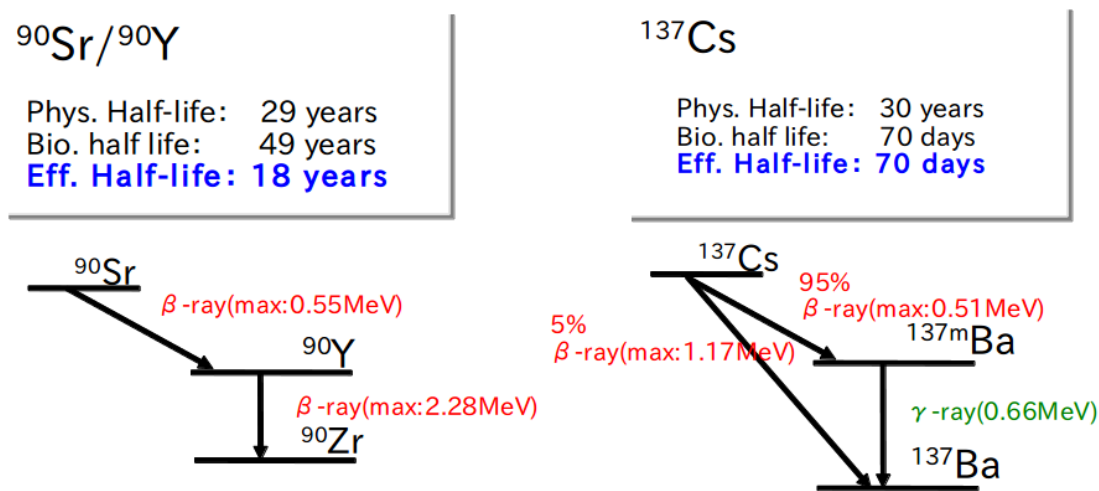


図 10.7: ^{90}Sr と ^{137}Cs の崩壊モード

放射線測定の実難易度

まず、 ^{137}Cs の崩壊モードは β 線を放出するモードと β 線と γ 線を 2 本放出するモードを持つ。 γ 線は 662keV の安定したエネルギー・スペクトラムを持っているので、これを観測することで ^{137}Cs を同定することが出来る。また、 γ 線は透過性が強く多くの β 線事象のバックグラウンドを遮蔽して測定することが可能である。一方 ^{90}Sr は β 線を放出する崩壊モードしかない。 β 線は透過性に乏しく、水 1 cm で止まり、空気中も 10 cm は飛ばない ($E_\beta < 1 \text{ MeV}$ では)。したがって、物質中に含まれる β 線放出核の測定は表面線検査でしか評価することができない。また、汚染水に含まれる ^{137}Cs からの β 線がノイズとなり正確に ^{90}Sr を同定することができない。

化学的抽出による検査

従来では ^{90}Sr の検査方法は化学的に抽出して評価する。まず試料から純粋な Sr を抽出して数週間～数ヶ月間放置して ^{90}Sr の放射平衡を待つ。その後 Y を抽出して ^{90}Y を測定することで本来試料に含まれていた ^{90}Sr を評価している。

ここで、放射平衡になるまでの時間が測定時間と測定精度に深く依存している。水産総合研究センターによる水産物ストロンチウム等調査結果 (2014 年 11 月 27 日更新) によると、検出限界 0.02 Bq/kg のためには約 3ヶ月間測定時間を要する。

リアルタイム ^{90}Sr カウンターの原理

リアルタイム ^{90}Sr カウンターは (1) シンチレーションファイバー・トリガー、(2) チェレンコフカウンター、(3) 宇宙線ベータカウンターから構成されている (図 10.10)。トリガーとチェレンコ

フカウンターだけが反応した事象が ^{90}Sr からの β 線が入射した事象であると判断しカウントする。

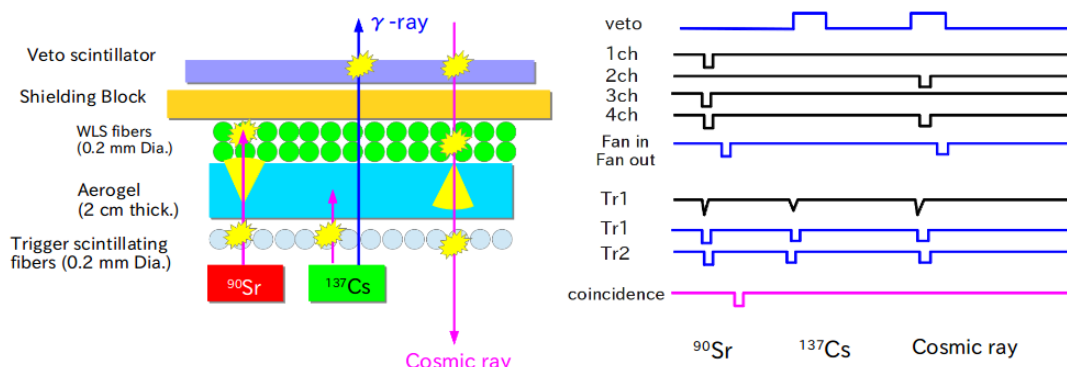


図 10.8: リアルタイム ^{90}Sr カウンターの原理

シンチレーションファイバー・トリガー

β 線は透過性が乏しいので、2 層目のチェレンコフカウンターまでにエネルギー損失を小さくするためにトリガーカウンターは薄型でなければいけない。薄型のシンチレータよりもシンチレーションファイバーのシートを用いることで取り扱いが容易になる。

直径 0.2 mm のシンチレーションファイバーを用いたトリガーカウンターは両端に PMT が接続されている。2 つの PMT が同時に反応した事象はトリガーに荷電粒子が通過したものと同定する。検出効率率は 54% を確認した。シートを厚くすれば検出効率は上昇するが、一方エネルギー損失が増えるので本測定器のためには薄型であることが重要である。

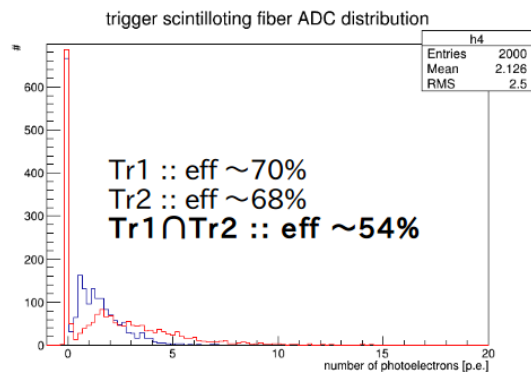
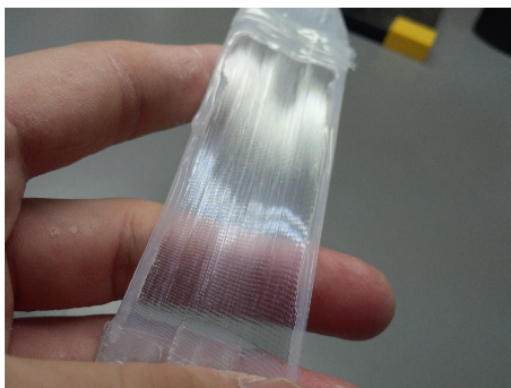


図 10.9: シンチレーションファイバー・トリガー性能評価測定

チェレンコフカウンター

β 線のエネルギー E_β と速度 β は

$$\beta = \frac{\sqrt{(m_e + E_\beta)^2 - m_e^2}}{m_e + E_\beta} \quad (10.4)$$

で表される。ここで、 m_e は電子の質量である。式 2.1 から ^{137}Cs から放射される最大 1.174 MeV の β 線でチェレンコフしないためには輻射体は屈折率 1.0492 以下が要る [41]。

表面汚染検査でありながら単位質量当たりの放射能を評価するので、大面積の感度領域が必要である。波長変換ファイバー方式を導入することで小型 PMT を使用して大面積を低コストに抑える。

宇宙線ベトーカーンター

サイズ $5 \times 200 \times 400 \text{ mm}^3$ のプラスチックシンチレータの側面を波長変換ファイバーシートが 1 周して巻きつけた設計でベトーカーンターを試作した。PMT は 1 つの角で波長変換ファイバーを束ねて接続されている。シンチレータの中心に宇宙線ミューオンが通過した場合、PMT は平均光電子数 6.6 を観測した。

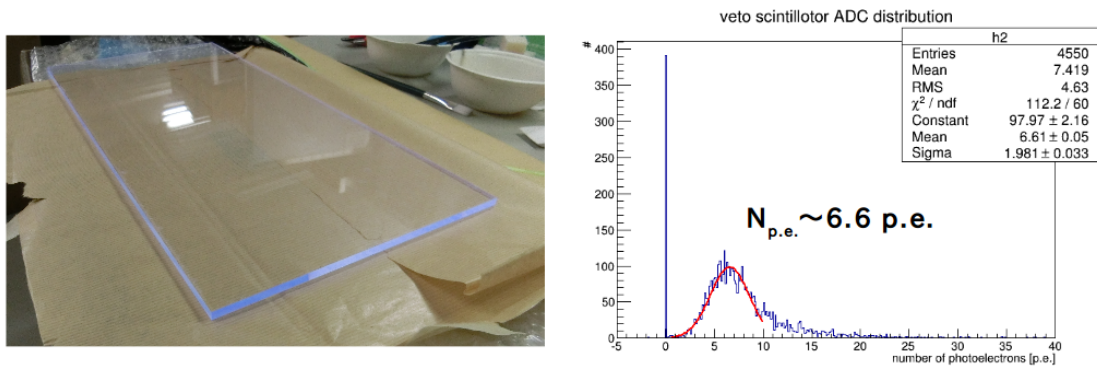


図 10.10: 宇宙線ベトーカーンター性能評価測定

リアルタイム ^{90}Sr カウンター試作機の性能評価測定

有効面積 $300 \times 100 \text{ mm}^2$ のリアルタイム ^{90}Sr カウンターを試作した。エアロゲルは屈折率 1.0485、サイズ $10 \times 90 \times 90 \text{ mm}^3$ を 3 枚並べてチェレンコフカウンターを作っている。アイソトープ協会が定義した密封放射線源 ^{90}Sr (25 kBq) と ^{137}Sr (25 kBq) を用いて性能評価測定を行った。

セットアップ: (1) トリガーに接続された 2 個の PMT の信号は幅 10 ns, threshold -25 mV に設定された Discriminator を経由して論理信号としてコインシデンスに入力される。(2) チェレンコフカウンターに接続された 4 個の PMT の信号は同様に Disc. を経由して Fan in/Fan out で OR 論理演算された後、コインシデンスに入力される。(3) ベトーカーンターに接続された PMT の信号は Disc. を経由し、 \overline{OUT} 論理信号を幅 100 に設定された Gate Generator に入力された後、コインシデンスに入力される。コインシデンスからの論理信号をスケーラに入力してカウントする。

測定方法: 1 分間線源を当てた時のカウントレートを何回か施行しヒストグラムを生成する。 ^{90}Sr 線源と ^{137}Sr 線源、そして何もなし時のカウントレート平均値をそれぞれ R_{Sr} , R_{Cs} , R_{BG} とする。このカウンターの感度 ε は密封線源の放射能 A における検出カウントレート R から

$$\varepsilon(Sr) = \frac{R_{Sr} - R_{BG}}{A_{Sr}} \quad (10.5)$$

と評価する。また、Cs/Sr の感度比 $\eta(\text{Cs}/\text{Sr})$ は

$$\eta(\text{Cs}/\text{Sr}) = \frac{R_{Cs} - R_{BG}}{R_{Sr} - R_{BG}} \quad (10.6)$$

と評価する。試作器の性能は ^{90}Sr 感度は $(5.49 \pm 0.06) \times 10^{-3}$ Hz/Bq と感度比 $\eta(\text{Cs}/\text{Sr}) = (2.0 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ が得られた。他の線源における結果も含めて表 10.1 に示す [42]。

performance	parameter
^{90}Sr 感度	$(5.49 \pm 0.06) \times 10^{-3}$ Hz/Bq
^{137}Cs 感度	$(1.12 \pm 0.66) \times 10^{-5}$ Hz/Bq
^{60}Co 感度	$(8.77 \pm 0.39) \times 10^{-5}$ Hz/Bq
^{22}Na 感度	$(5.65 \pm 0.33) \times 10^{-5}$ Hz/Bq
Background	$(1.48 \pm 0.46) \times 10^{-1}$ Hz
感度比 $\eta(\text{Cs}/\text{Sr})$	$(2.0 \pm 1.2) \times 10^{-3}$

表 10.1: リアルタイム ^{90}Sr カウンター試作機の性能評価結果 [42]

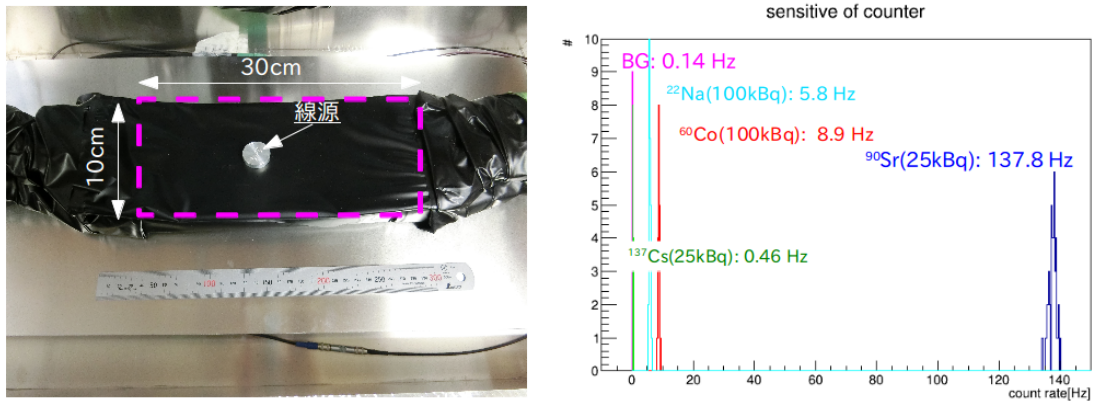


図 10.11: 試作機本体と性能評価測定におけるそれぞれのカウントレート

性能試験 2: ^{137}Cs が多く存在する環境中での動作

この装置は ^{137}Cs が多く存在する環境中で ^{90}Sr を検出しなければならない。本試験は同じ放射能レベル (25 kBq) の密封線源をいくつか使用して実験した (図 10.12)。Cs 線源 1 個では 0.46 Hz なのに対して Cs 線源 10 個では 5.2 Hz と約 10 倍の増加だ。この結果では Cs でも感度の線形性を持つと判断できる。Sr 線源だけでは 137.8 Hz なのに対して、Cs 線源 10 個と Sr 線源では 165 Hz に増加した。これは単純なカウントレートの和では説明できない。Cs が Sr よりも 10 倍存在する時、通常よりも高く Sr を見積もってしまう可能性を示唆する。

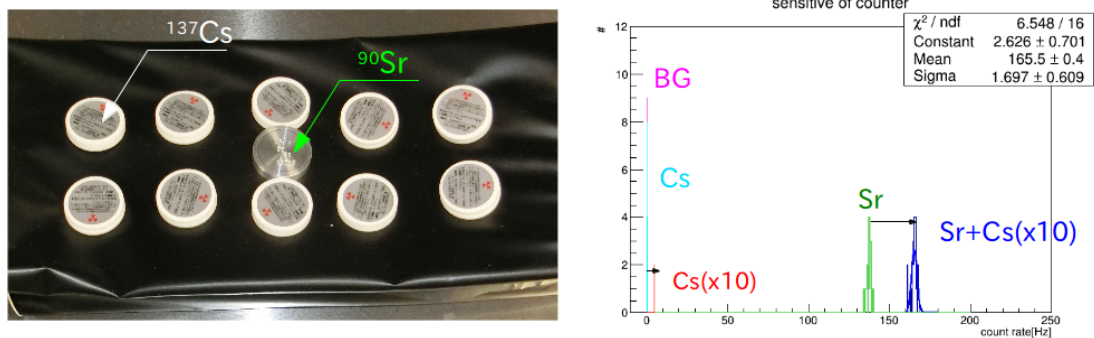


図 10.12: ^{137}Cs が多く存在する環境中での動作

性能試験 3: 入射位置の一様性

線種の違いによる性能では有感面積の真ん中で全て評価した。 ^{90}Sr の感度の一様性を調べる必要がある。この装置にはファイバーシートを採用しているため、ファイバーシートの方向に沿って位置依存性を測定する。測定方法は端から 11 点位置を変えて、1 分間のカウントレートを約 30 回繰り返しヒストグラムを生成する (図 10.13)。結果として、感度一様性が 10% 未満な有効面積は長さ 21 cm で、平均 5.2 Hz/Bq であることが確認できる。

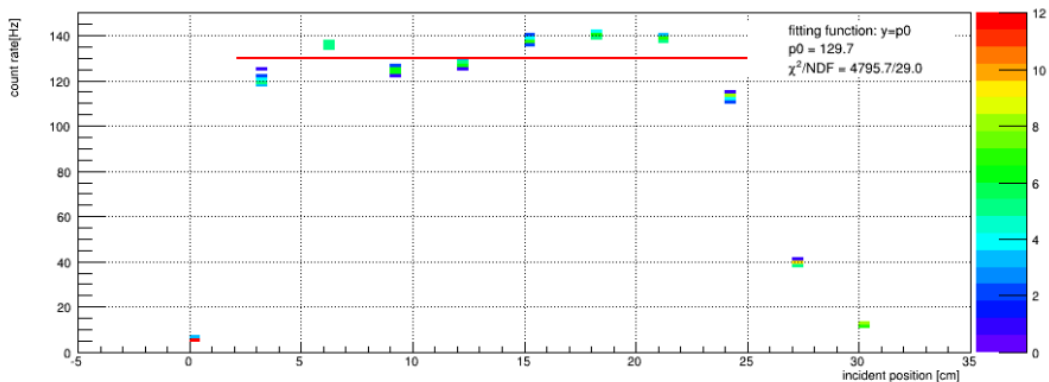


図 10.13: 入射位置の一様性

まとめ

リアルタイムストロンチウム 90 カウンターはチェレンコフカウンターを応用した装置で、 γ 線と低エネルギー ($< 1.17\text{MeV}$) の β 線には低感度で、 ^{90}Sr からの高いエネルギー (最大 2.28MeV) β 線に感度を持つ。利点は Yes/No のしきい値型ゆえ、(1) リアルタイムでの測定、(2) 波長変換ファイバーによる大面積の表面汚染検査、(3) ^{137}Cs が多く存在する中での Sr 検出。

課題: 実用化に向けていくつか課題を克服する必要がある。(1) パッケージと小型読出し回路製作、(2) 大面積に関して同時計測の時間差問題、(3) ^{137}Cs が多く存在する中での Sr の感度補正