

KEK 測定器開発室優秀修士論文賞 論文概要

高汎用性しきい値型粒子識別装置の開発

千葉大学大学院 理学研究科 基盤理学専攻物理学コース

伊藤博士

指導教員 河合秀幸

2015年2月27日

1 はじめに

我々は粒子識別装置の輻射体であるシリカエアロゲルを製作している。シリカと空気の配合率によって任意屈折率 (1.003 - 1.26) を調節することができるので、幅広い粒子識別のしきい値を設定できる。

1.1 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エアロゲル・チェレンコフカウンター (AC) の開発を目的とし、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く、我々は波長変換ファイバーと半導体光検出器を新たに導入して以下の高汎用性の仕様を目指す。

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

本文では EASIROC モジュールの動作確認と校正測定、MPPC キャリブレーション、波長変換ファイバーの性質評価測定、ビームテストを実施し、高汎用性の仕様における PID の性能を考察する。

1.2 LEPS/LEPS II

LEPS II は大強度放射光施設 (SPring-8) において光生成原子核実験 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。CLAS は同様の反応で Θ^+ を探索したが狭いピークは確認されず、存在の有無がはっきりしなくなった。そこで LEPS II は以前の検出器とは異なる実験系において Θ^+ を再度観測することで存在を明確にすることを目指している。検出器に導入する AC は高磁場中 (1 T) のトロイダル磁石の中の、FDC と TPC の狭い領域に設置され、 $\pi/K @ 1 - 2 \text{ GeV}/c$ が要求されている。

1.3 FOREST

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 の識別装置導入が提案された。AC は周りをカロリメータで囲われ、PMT を設置する空間が存在しない空間に導入する計画である。また、後方のカロリメータでのエネルギー分解能を損なわないために低密度を要求されている。

AC 導入により新たに $f_0(500)$ の物理測定が可能になる。 $f_0(500)$ は量子数 $I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{++})$ でありながら、質量が 400 - 600 MeV/ c^2 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。 $f_0(500)$ 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。

2 高汎用性の仕様

2.1 波長変換ファイバー方式

従来型の大型 PMT に代わって波長変換ファイバーライトガイドを用いた設計を試みる (図 1)。輻射体を粒子が通過し、チェレンコフ放射したとき、反射板でほぼ 1 回の反射回数で受光面に入射する。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性質を持つ。この性質からこの装置の特

徴を以下に示す:

メリット

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

デメリット

6. 低い収集効率

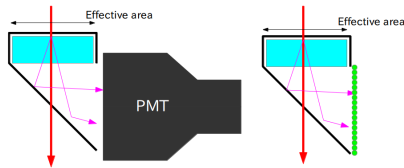


図 1: 従来型 AC(左)、波長変換ファイバー方式 (右)

2.2 MPPC 反応個数しきい値型

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に貼り付ける設計を提案する (図 2)。チェレンコフリングの広がりによって検出した MPPC の個数をしきい値にして PID を行う。チェレンコフ光は入射粒子に依存した指向性を持つので、放射分布を予測できる。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と考えた。この設計の特徴を以下に示す:

メリット

1. MPPC の反応個数をしきい値にした 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. 反跳電子事象除去による PID > 99%

デメリット

6. ノイズによる課題が残る
7. 高価格

3 EASIROC モジュール

東北大学と KEK は汎用 MPPC 読み出し回路を共同で開発し、それを 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。

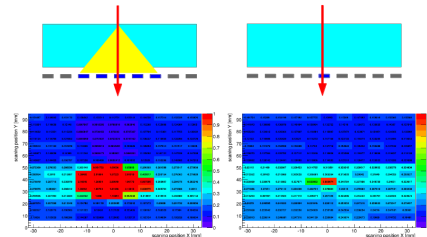


図 2: MPPC 反応個数しきい値型

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 3)。EASIROC モジュールの ADC はピークホールド型のため、Slow Shaper 時定数と PreAmp 増幅率を適正に設定する必要がある。

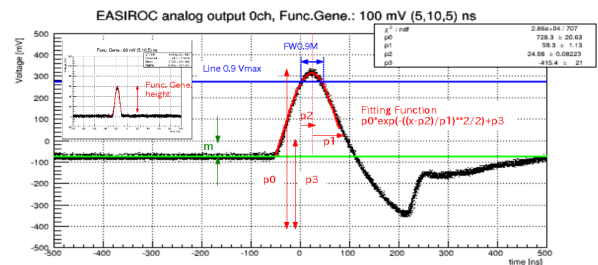


図 3: EASIROC analog output 信号

4 MPPC キャリブレーション

LED を用いて MPPC の供給電圧と増幅率の関係を調べた。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 4 に示す。

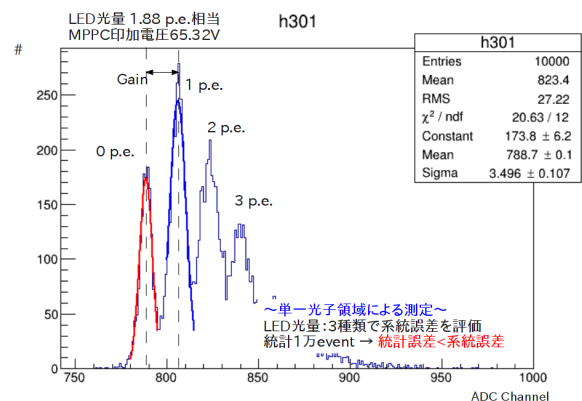


図 4: 単一光子領域の MPPC の ADC 分布

MPPCのADC分布は0, 1, 2...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。 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

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

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 0.2 mV/ADC である。

5 WLSF シートの性質

波長変換ファイバー (WLSF) 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。

WLSF をシート状にしたライトガイドには 2 つの性質: 減衰長と曲げ損失をもち、AC を大面積・任意形状化させるために重要である。LED を用いて WLSF の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。ここで、曲げ損失については損失が 1dB 未満である最小半径として定義する。

表 1: performance of fiber sheet

型番	減衰長 [mm]	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

6 ELPH 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) において、 e^+ ビームラインによる性能評価測定を実施した。

6.1 エアロゲル厚さと光電子数の関係

エアロゲルの厚さと WLSF を経由した光電子数の関係について測定した。WLSF 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。

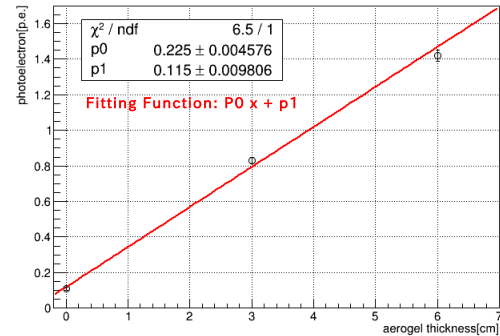


図 5: エアロゲルの厚さとチェレンコフ光の平均光電子数の関係

直接チェレンコフ光を読み出した結果平均光電子数はエアロゲル 60 mm で 17.71 ± 0.06 だった。したがって、試作したライトガイドの収集効率率は 8.1% と評価できる。

6.2 WLSF 方式試作器の性能評価

WLSF 方式 AC を試作し、ビームテストで性能評価測定をした。これには、屈折率 1.05、透過長約 37 mm (@400 nm)、厚さ 60 mm のエアロゲルが封入されている。入射位置における検出され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。

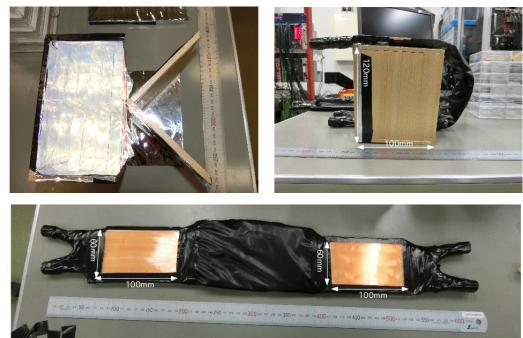


図 6: WLSF を用いた AC 試作器 (上)。WLSF ライトガイド (下)。

6.3 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に MPPC を一列に並べ、平行移動させてチェレンコフ光分布を観測した。エアロゲルの上流には黒シートを設置し空気チェ

WLSF 収集効率	$7.4 \pm 0.1\%$
検出効率	0.69 ± 0.03
平均光電子数	1.16 ± 0.09
入射位置一様性	93%
タイミングゆらぎ	0.3 ns

表 2: WLSF を用いた AC 試作器の性能評価

レンコフの影響を除いた。本測定 of MPPC のアクセプタンスは 0.25 である。

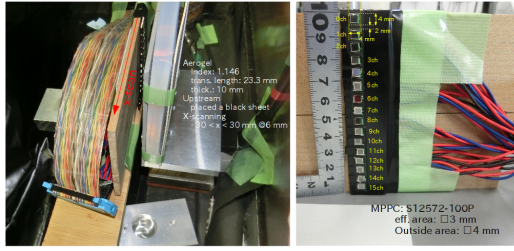


図 7: x 軸スキャンのセットアップと MPPC 配置図

シリカエアロゲルと MPPC の間隔 $L = 12$ mm, 100 mm 離れた場合におけるチェレンコフ光分布を図 8 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

$$R = \begin{cases} 10.0 \pm 2.7 \text{ mm} & (L = 12 \text{ mm}) \\ 63.7 \pm 2.7 \text{ mm} & (L = 100 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2)$$

と計算できる。本測定のセットアップでは $L = 100$ 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。

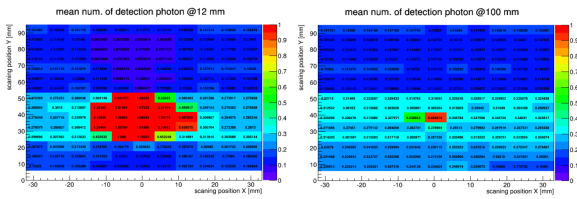


図 8: 屈折率 1.14、厚さ 10 mm、間隔 12 mm 離れたスキャン結果 (左) と間隔 100 mm 離れたスキャン結果 (右): MPPC 検出光子しきい値ごとの検出効率の分布

7 考察・結論

7.1 波長変換ファイバー方式

WLSF 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。また、

小型 PMT を用いて大面積の受光面積を読み出す利点をもつ。試作機は受光面積 S_{det} と PMT 有感面積 S_{PMT} の割合 η は

$$\eta = S_{det}/S_{PMT} \sim 60 \quad (3)$$

を獲得した。また、ファイバーの収集効率は約 7% で、入射一様性 90% 以上を獲得した。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。

7.2 MPPC 反応個数しきい値型

本測定では 1 次元配列によるスキャン測定なので、2 次元における事象は同期されていない。ここで、仮想的に 2 次元配列のデータとして扱い識別能力を推定することにした。MPPC は比較的ノイズが多いので、光電子数しきい値 N_{th} と反応した MPPC 個数のしきい値 N_{MPPC} を設ける。

全 176 個の MPPC の N_{th} と N_{MPPC} における in-efficiency を図 9 に示す。これらの図から最小な in-eff. は

$$inefficiency = \begin{cases} 9\% & (N_{th} = 4.5, N_{MPPC} = 1.1) \\ 10\% & (N_{th} = 3.5, N_{MPPC} = 1.6) \end{cases} \quad (4)$$

とわかる。

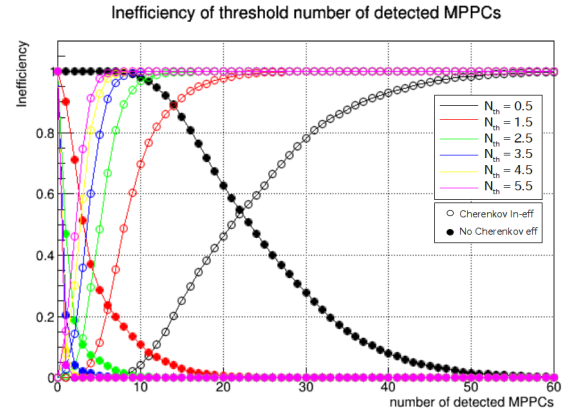


図 9: N_{th} における N_{MPPC} と in-efficiency の関係。

積分 MPPC 数が全 176 個分をオンライン、21 個をオフライン解析相当として識別能力を評価した。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される。