

波長変換ファイバーを用いたエアロゲルチェレンコフ検出器開発 における基礎研究：宇宙線ミュオンによる検証実験

2016年 3月14日 伊藤博士

概要

シリカエアロゲルを用いたチェレンコフ検出器をエアロゲルチェレンコフ検出器と呼び、識別粒子の速度しきい値の要求に応えるために屈折率を1.003~1.26の範囲で任意に決定できる利点をもつことが知られている。波長変換ファイバーを用いたライトガイドを用いることで磁場中でもPMTで動作し、設計の自由度が向上する。ファイバーを縞状にした方式は、エアロゲルの下流直後に波長変換ファイバーシートを設置した設計で、応答したストリップの本数から粒子識別する。宇宙線ミュオンをエアロゲルに通過させ、チェレンコフ光を波長変換ファイバーで読み出す測定から、平均光電子数分布および反応ストリップ数のエアロゲル厚さ依存性を調べ、実用性について評価した。

目次

1 はじめに	1
2 波長変換ファイバーシート作成	2
3 セットアップ	4
3.1 トリガー設計	4
3.2 データ収集回路設計	5
4 解析結果	7
4.1 宇宙線ミュオンの鉛直流量	7
4.2 トリガーシンチの光電子数	7
4.3 シリカエアロゲルからのチェレンコフ光による光電子数	8
4.4 粒子識別能力評価	10
5 考察とまとめ	10

1. はじめに

エアロゲルチェレンコフ検出器は輻射体のシリカエアロゲルの屈折率を1.03~1.26までの広い屈折率を設定できることから高エネルギーの粒子識別(2 GeV $\pi/K id$)から重粒子の識別(500 MeV $\pi/p id$)などに必要がある。チェレンコフ放射は荷電粒子の速度に発光条件をもつため、データ収集段階で2粒子を識別することができる。

実験の性質上そして既存検出器群の設計から従来のチェレンコフ検出器を導入することが困難なことが報告され、そのたび集光システムを考案されてきた。そのひとつに wavelength shifter (波長変換材: WLS)を用いた集光システムだ。WLS はピーク波長 420 nm の光を吸収し、ピーク波長 450 nm の光を等方的に再発光する。つまり WLS は一度吸収した光の波長を伸ばし(Shit)、再発光する性質をもつ。チェレンコフ光はただでさえ少ないのに(5~10 p.e.)、WLS で集光することで光量が 1%以下に減少してしまうと報告された。

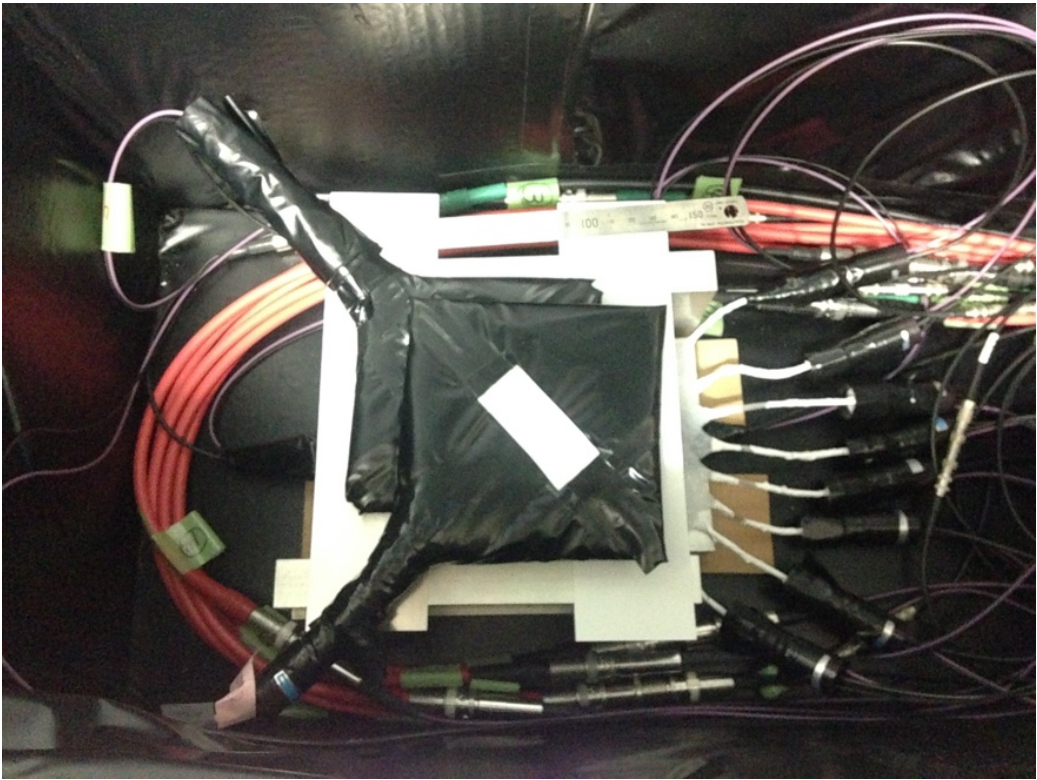
WLS では限界であると判断された原因は集光効率が低すぎるためだった。なぜかというところ WLS ブロックの表面境界における全反射条件から集光される割合が決定される。このため我々が目をつけたのが波長変換ファイバー(WLSF: wavelength shifting fiber)である。荷電粒子がファイバーに直撃しないように反射板でファイバーに集光する方式では集光効率が約 8%まで達成した。しかし、それでも観測される光電子数が少ないので根本的な改善が必要である。

2. 波長変換ファイバーシート作成

波長変換ファイバーをエアロゲルの下流直後に置き、荷電粒子が通過したファイバーはおそらく反応し、チェレンコフ放射した場合粒子が通過しなかったファイバーも反応する。つまり、応答したファイバー本数をしきい値にした粒子識別装置を提案する。ファイバーは縞状にして 1~8ch のストリップを連番で繰り返すことで PMT のチャンネル数を節約した。

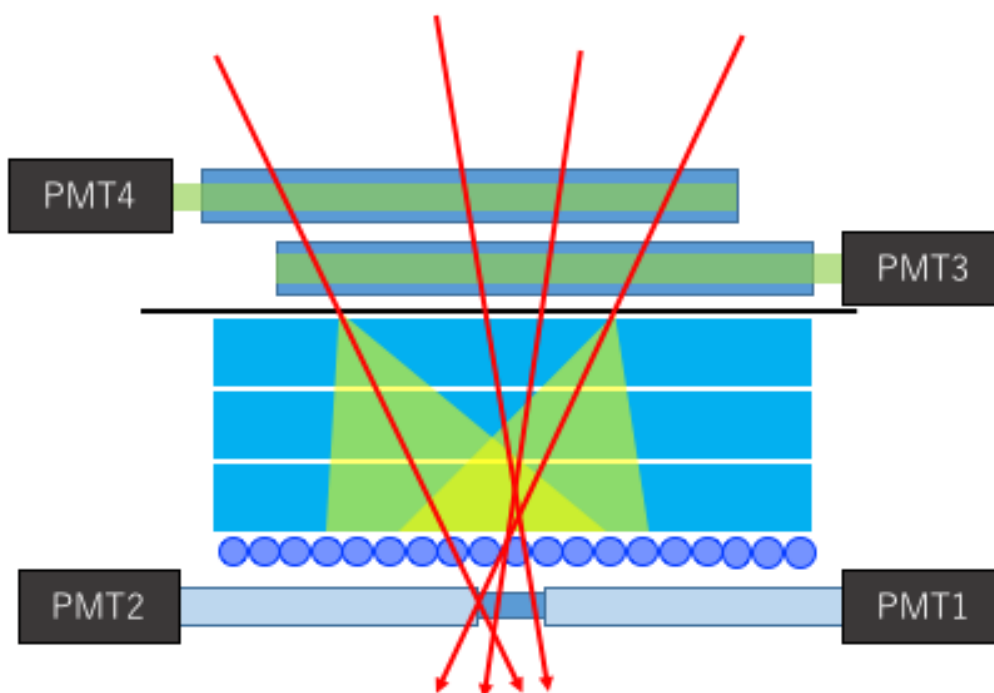
波長変換ファイバーはクラレ社の B-3(300)MJ: ϕ 0.2 mm を使用した。B-3 はピーク波長 350 nm の光を吸収し、ピーク波長 400 nm の光を等方的に発する。そして再発光しかつコアとクラッドの全反射条件(この効率をとラッピング効率という)を満たした光は両末端まで伝播され PMT で読み出される。ファイバーシートの仕様は以下に示す。

1. B-3(300)MJ: 直径 0.2 mm、計 560 本
2. 1 層片側読み出し
3. 有効面積: 100 mm \times 100 mm
4. 70 本 1 ストリップ: 80 本のうち 10 本ずつ割り振り 7 箇所から結う
5. PMT 読み出し部分: 8 個
6. 下地は黒紙: 反射光は除去する目的



3. セットアップ

宇宙線ミュオンをシンチレーション検出器で検出し、その軌道上にシリカエアロゲルと波長変換ファイバーを設置する。使用するシリカエアロゲルは屈折率 1.045、波長 400 nm の可視光に対して 45 mm の透過長をもつ。シリカエアロゲルはサイズ 90 mm×90 mm×10 mm のタイル状で 3 枚重ねて厚さ 30 mm の輻射体とした。シリカエアロゲルの下流に波長変換ファイバーシートを設置し、読出部に光電子増倍管(PMT: R9880U-210)を接続した。シリカエアロゲル上流には黒色の紙を置き空気チェレンコフ光の影響を受けないように設計した。



3.1. トリガー設計

宇宙線ミュオンが飛来してきた事象をデータ収集のトリガーとして採用する。この測定のエッセンスは高エネルギー荷電粒子(速度比: $\beta \sim 1$)がエアロゲル物質内を必ず通過した事象の純度を向上させることだ。単位時間・単位面積・単位立体角において宇宙線由来のミュオンのフラクックスは $180 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ と考えられている。

サイズ 10 mm×10 mm×5 mm のプラスチックシンチレータの両側面に直径 10 mm のアクリルライトガイドが取り付けられている。この両末端に PMT1, 2 がそれぞれ接続され、シンチレーション検出器 1(trigger 1)が構成される。

エアロゲル上流も同様にシンチレーション検出器を設計したが、イベント頻度の関係から変更した。サイズ 100 mm×100 mm×5 mm のプラスチックシンチレータの 4 側面を波長変換ファイバー(Y-11(300)MJ: ϕ 0.2 mm)のシート 4 層を貼り付け、両末端をまとめて一つの PMT3 に接続してシンチレーション検出器 2 (Trigger 2)を構成した。同様に PMT4 に接続して構成されたものをシンチレーション検出器 3 (Trigger 3)と呼ぶ。

Trigger 2 と 3 をちょうど 80 mm×80 mm の面積が重なるように結合し、シリカエアロゲルの上流に設置した。Trigger 1 はシリカエアロゲル下流の中心に設置する。Trigger 1 と Trigger 2, 3 の距離は 70 mm に設定したので宇宙線ミュオンを検出できる立体角によるアクセプタンスは 0.265 と計算された。

3.2. データ収集回路設計

トリガー信号は PMT 1~4 が同時に応答した事象を用いる。PMT から出力されるアナログ信号はディバイダーで分岐され、一方はディスクリミネータで NIM 規格の論理信号に変換されコインシデンスによって AND 演算され、他方は 30~50 ns ほど遅延され CAMAC ADC の各チャンネルに入力される。コインシデンスからの出力信号を CAMAC ADC Gate に入力し、信号が High である時間におけるそれぞれアナログ信号の積分値をデジタル値に変換 (Analog Digital Convert)する (図 2 を参照)。

それぞれの信号のタイミングは ^{90}Sr 線源を用いて調整された。Trigger 1, 2, 3 を接触させベータ線を入射させる娘核の ^{90}Y から放出されるベータ線は最大運動エネルギー 2.28 MeV なので 3 つのシンチレータを通過し、この事象からトリガー用の PMT の信号を同期した。またチェレンコフ光読み出し用の PMT の信号も下流のシンチレーション検出器をトリガーにして、ベータ線が通過したファイバーストリップの各チャンネルの信号のタイミングも調整した。全ての PMT の種類が R9880U-210 (表 1 を参照) であることから、アナログ信号は論理演算処理にかかる時間の分だけ同軸ケーブルを使用して 40~50 ns ほど遅延させた。

CAMAC ADC は豊伸電子株式会社の 16CH 積分型 ADC C009 を使用した。ゲート時間を開いている間の各チャンネルの電圧積分値をデジタル値に変換する。校正測定した結果、平均 0.26 pC/ADC の変換係数を得た。CRATE CONTROLLER は東洋テクニカ株式会社の CC/7700 を使用した。PC とは 40 pin フラットケーブルによる IO 制御を可能にし、ドライバソフト: Camdrv を使用してデータ収集を実行した。

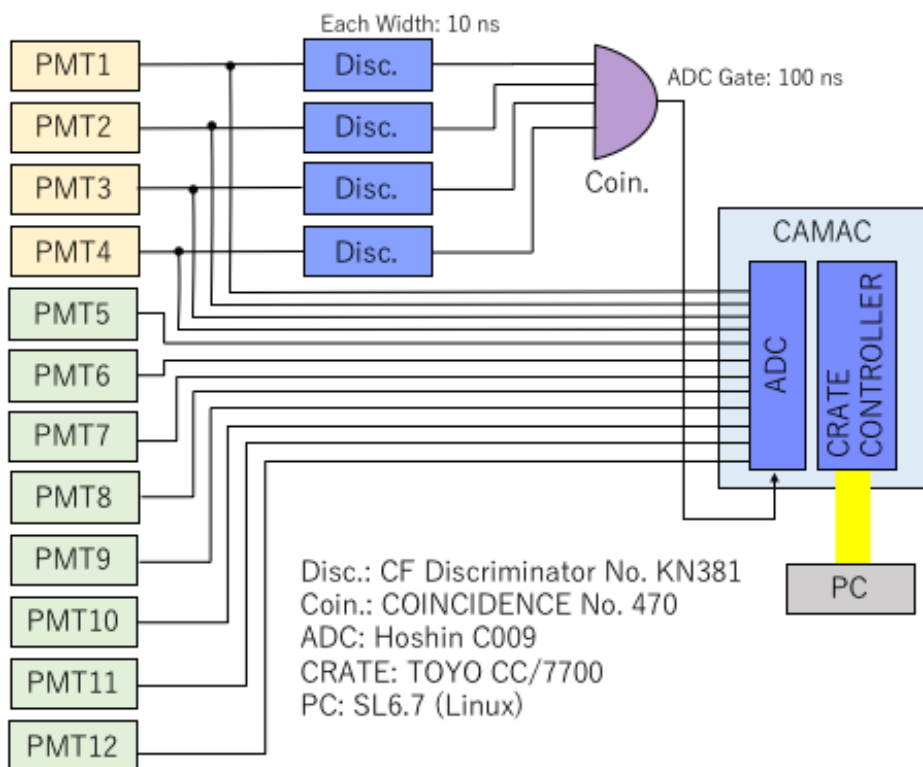


図 2. データ収集回路図

Chann el	Serial No.	application	HV(V)	Gain	Disc. Thre.
1	BAC7232	Tr1 R	1200	$(1.36 \pm 0.02) \times 10^7$	-38 mV
2	BAC6791	Tr1 L	1300	$(0.77 \pm 0.01) \times 10^7$	-38 mV
3	BAF2123	Tr2	1200	$(1.47 \pm 0.02) \times 10^7$	-38 mV
4	BAF2829	Tr3	1200	$(2.10 \pm 0.02) \times 10^7$	-38 mV
5	BAF2107	WLSF 1	1200	$(1.00 \pm 0.10) \times 10^7$	—
6	BAF2866	WLSF 2	1200	$(1.35 \pm 0.01) \times 10^7$	—
7	BAF2965	WLSF 3	1200	$(1.44 \pm 0.01) \times 10^7$	—
8	BAF3063	WLSF 4	1200	$(1.81 \pm 0.02) \times 10^7$	—
9	BAF3090	WLSF 5	1200	$(1.64 \pm 0.01) \times 10^7$	—
10	BAF3141	WLSF 6	1200	$(1.47 \pm 0.01) \times 10^7$	—
11	BAF3142	WLSF 7	1200	$(2.15 \pm 0.02) \times 10^7$	—
12	BAF3145	WLSF 8	1200	$(1.81 \pm 0.01) \times 10^7$	—

表 1. 使用した PMT 一覧

4. 解析結果

4.1. 宇宙線ミュオンの鉛直流量

トリガー間の距離とトリガーシンチレータの面積を変えて、測定時間、観測事象数から宇宙線ミュオンのフラックスを測定した。トリガー間の距離は 7 cm で、上流は 8 cm × 8 cm で下流は 1 cm × 1 cm の有効面積を持つのでこの時の立体角は 2.42×10^{-3} で、7 時間 17 分測定して 26 事象観測した。そのためフラックスはイベント頻度を立体角と面積で割って、 $3.27 \pm 0.64 \text{ sec}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ と評価できる。同様に計算された結果を表に示す。

Run	事象数	測定時間 (hr : min)	トリガー頻度 (cps)	立体角 (sr)	面積 (mm ²)	鉛直流量 (sec ⁻¹ m ⁻² sr ⁻¹)
1	26	7:17	$(9.9 \pm 1.9) \times 10^{-4}$	3.03	100	3.3 ± 0.6
2	73	17:18	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	3.03	100	3.9 ± 0.5
3	15	3:06	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	3.03	100	4.4 ± 1.2

表 2. 宇宙線ミュオンのトリガー頻度と鉛直流量

4.2. トリガーシンチの光電子数

トリガーシンチレーションの ADC 分布を図 3 に示す。赤線はペDESTAL 事象としてデータ取得した。全 4ch はディスクリミネータの閾値 -38 mV によって論理信号を形成している。0, 1 ch の ADC 分布は 5-10 p.e. の平均光電子数を、2, 3 ch の ADC 分布は 3-5 p.e. の光電子数を観測できた。下流のトリガーシンチは $1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$ のプラスチックシンチレータに直接ライトガイドが取り付けられ PMT に接続されているのに対し、上流のトリガーは $10 \times 10 \times 0.5 \text{ cm}^3$ のプラスチックシンチの側面に波長変換ファイバーを貼り付けているので読み出される光電子数は下流より少ない。トリガーとしては上流、下流共に十分の光電子数を観測している。

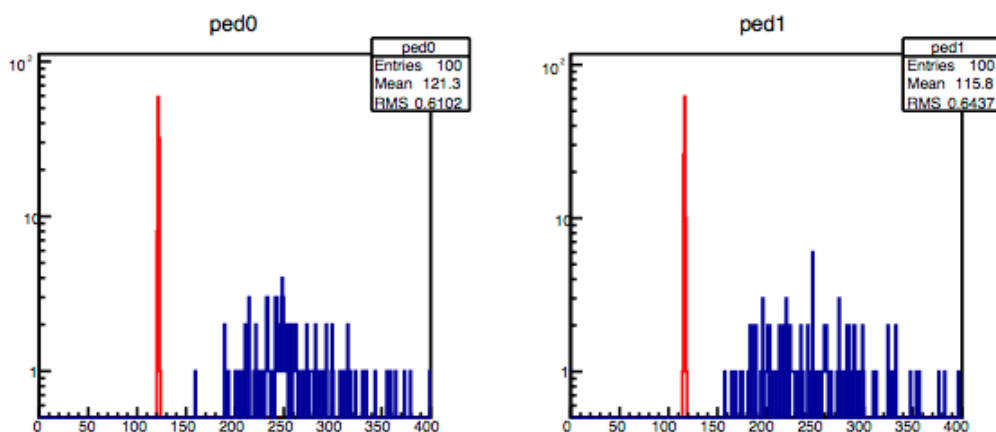


図 3(1). トリガーシンチ ADC 分布(下流)

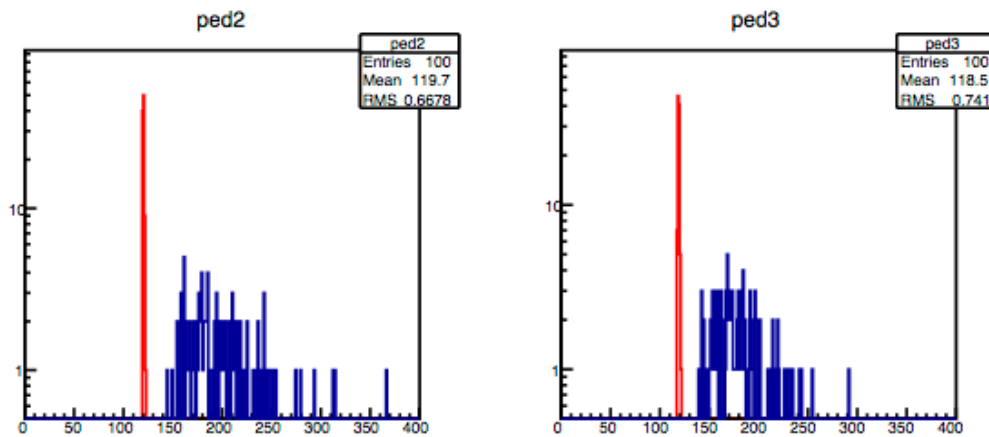


図 3(2). トリガーシンチ ADC 分布(上流)

4.3. シリカエアロゲルからのチェレンコフ光による光電子数

宇宙線ミュオンがファイバーシートを通過する事象なので、ファイバー 1 本は光らせてしまうだろう。予想としては粒子が通過したファイバーは高い光電子数で、周りのファイバーは 1-2 p.e.ではないか。エアロゲル下流の WLSF シートから接続されている 8 本の PMT の ADC 分布を図 4 に示す。

ぱっとみで良くないことが明らかな結果が得られた。どう見ても粒子が通過したファイバーが必ず光るとは言えなさそうだし、かといって周りのファイバーがチェレンコフ光を吸収できていないことがわかってしまう。

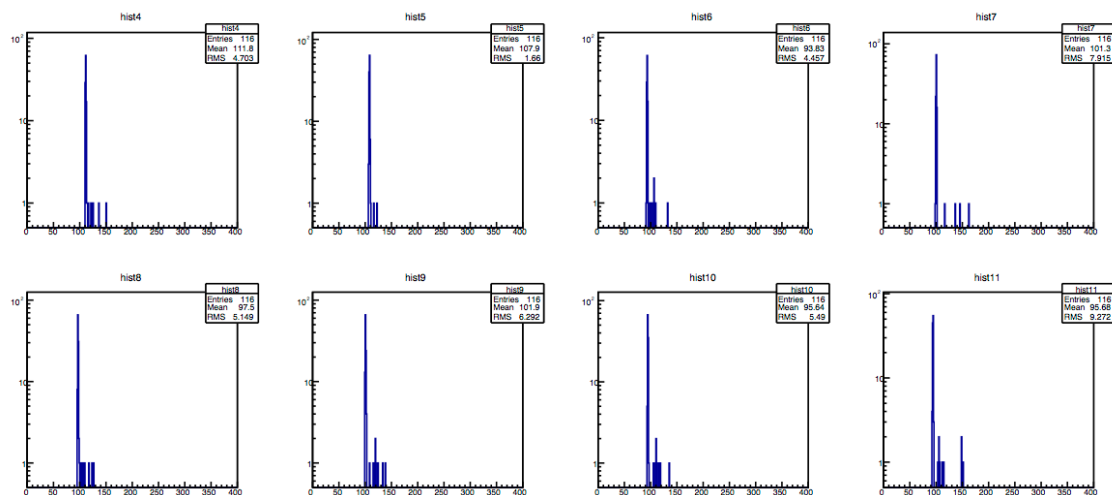


図 4. AC with WLSF の各 PMT の ADC 分布

屈折率 1.045、透明度 45 mm @400 、厚さ 30 mm のシリカエアロゲルを速度比 $\beta=1$ の荷電粒子(Q=e)が通過した場合、波長 350-400 nm のチェレンコフ光は約 45 個放射されると概算される。ただし、この波長領域は WLSF(B-3)が吸収できる領域に設定された。ここで WLSF のトラッピング効率(片側 5.3%)と PMT 量子効率(40%@400 nm)、そして透過長からファイバー経由で読み出される平均光電子数は 0.5 p.e.と計算できる。検出効率 0.38 ± 0.06 がえられたことから、平均光電子数は 0.48 ± 0.09 p.e.相当であると評価され矛盾しない。いやまったく、測定する前に概算しておけという意見が聞こえてきそうだ。

チェレンコフ光の光量は輻射体の厚さ、屈折率に依存することから、屈折率 1.25 のシリカエアロゲルを使用してどのくらい光量が得られたか調べる。このエアロゲルの厚さ 10 mm では同様の波長領域のチェレンコフ光は約 31 個放射される。そして同様にファイバーを経由して読み出される平均光電子数は 0.53 と計算できる。検出効率 0.55 ± 0.10 から平均光電子数は 0.80 ± 0.20 p.e.と評価される。

ここで、疑問に思っしてほしい。エアロゲルがない場合は純粋にファイバーに粒子が直撃した事象なのだから、ここから差し引いた値がエアロゲルからのチェレンコフ光の光電子数に等しい。図 5 に全光電子数分布を示す。青が屈折率 $n=1.045$ ($d=30$ mm)、赤が $n=1.25$ ($d=10$ mm)、緑がエアロゲルなしをそれぞれ示す。エアロゲルがない場合、検出効率は 0.41 ± 0.05 で、平均光電子数は 0.53 ± 0.09 p.e.だ。つまり、この結果では $n=1.045$ のエアロゲルと WLSF(B-3)ではチェレンコフ光を誤差の範囲内で観測できなかったと言える。また、 $n=1.25$ のゲル 10 mm で差分が 0.27 p.e.ということになる。この装置の動作実証のためには非常に悲しい結果である。

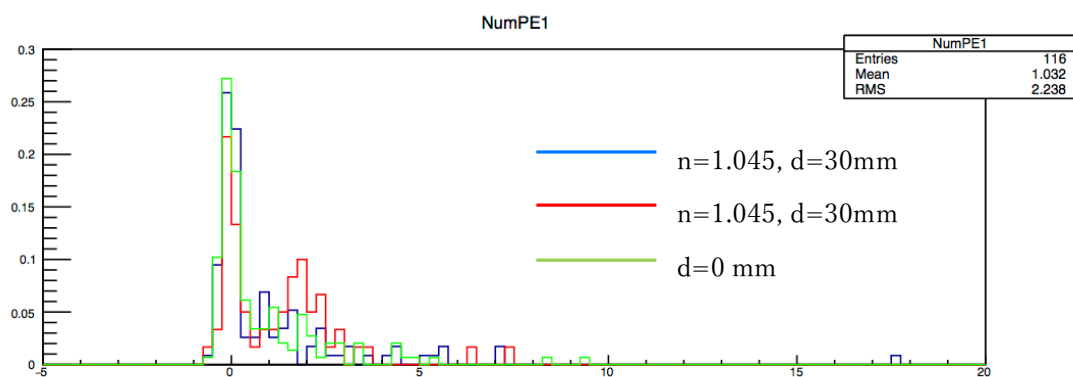


図 5. AC with WLSF の全光電子数分布

4.4. 粒子識別能力評価

粒子識別はファイバーが何本反応したかで決定する仕様だ。しかし、全光電子数分布からあまり期待していないだろう。図 6 に反応したファイバー本数の分布を示す。ヒストグラムの色は図 5 と同様に、青が $n=1.045$ 、赤が $n=1.25$ 、緑がエアロゲルなしである。 $n=1.25$ の結果が厚さを増やしたら期待できそうに見えるが、根本的な改善にはつながらないだろう。

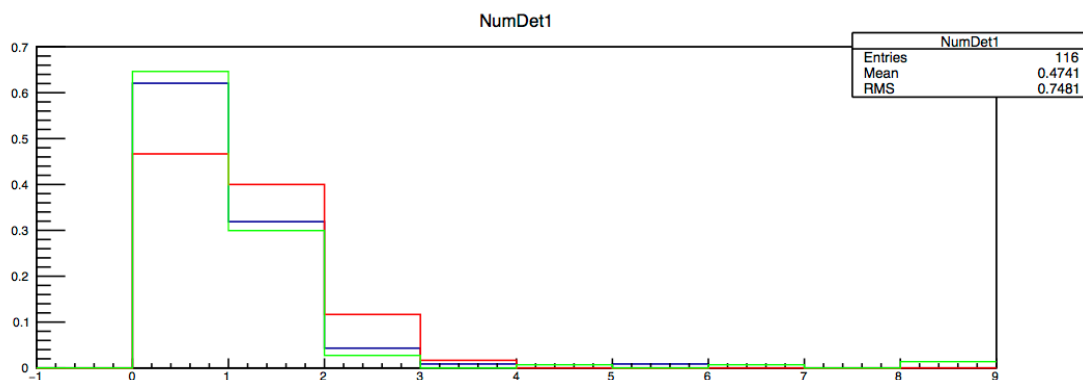


図 5. AC with WLSF の反応ファイバー本数分布

5. 考察とまとめ

エアロゲルの屈折率をあげても、厚さをあげてもこれ以上は良くならなそうな結果が得られた。根本的な解決はやはり、波長変換ファイバーの種類を変えることではないか。B-3 よりももしかしたら Y-11 のほうが吸収光量が多いのではないか。次回の測定(3 月中)では Y-11 を同様に測定するつもりだ。また、ファイバーシートの下地には反射板を設置して光量を少しでも稼ぐ設計を考えている。ただし、アルミマイラーは反射率が高いが、マイラー面でチェレンコフ放射するため却下、従って白色の紙かアルミホイルの 2 択だろう。エアロゲル上流の黒色の紙も反射板に変更しよう。

今回しようした $n=1.045$ のエアロゲルはすでに表面がボロボロで透明度が悪いこともあり、在庫にあるエアロゲルで透明度の高いゲルを使用するつもりだ。最悪、アクリル板で同様の実験をしてみても良くない結果が得られた場合、このアイデアは諦めるかもしれない。