

千葉大学大学院理学研究科2014年度修士論文発表会

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

2015/02/09

粒子線物理学研究室
学籍番号: 13SM2103
伊藤博士



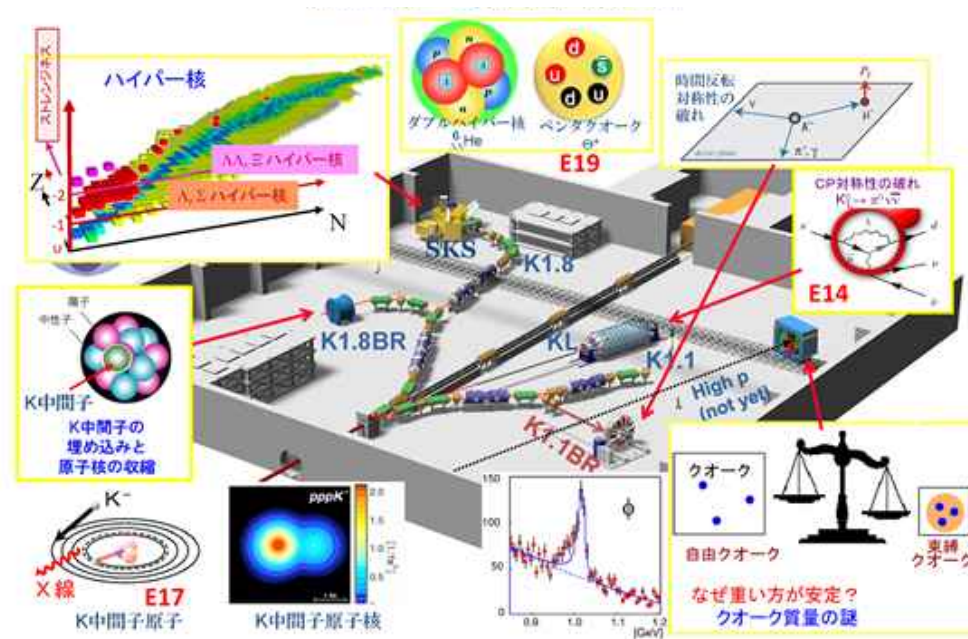
Thanks for constructive feedback and support
from Prof. Kawai and PPL members.

ハドロン物理学

ハドロン ... クォークが構成する複合粒子
 $q\bar{q}$: メソン
 qqq : バリオン
 「エキゾチック粒子の探索」

千葉大が参加しているプロジェクト

- J-PARC E03 ... Measurement of X Rays from Ξ^- Atom
- J-PARC E16 ... カイラル対称性の回復と中間子の質量変化
- J-PARC E34 ... 異常磁気能率 $g-2$ 精密測定
- J-PARC E14,15 ... KOTO, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 事象による CP-Violation
- T2K ... ニュートリノ振動
- WLS Fiber と MPPC を用いた医療用 PET 検出器の開発
- ..



J-PARCにおけるハドロン物理

高汎用性しきい値型PID装置

	E36 TREK	FOREST	LEPS II	^{90}Sr Counter
PID	e/μ	p/π	π/K	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
Moment(GeV/c)	0.23 - 0.24	1.0 - 2.0	1.5 - 2.4	
aerogel index	1.08	1.14	1.03	1.045
motivation	R_K 精密測定	エキゾチック粒子 $N^*(1670)$	エキゾチック粒子 Θ^+	東日本大震災復興
Facility	J-PARC	東北大学電子光物理学研究センター	SPring-8	Chiba Univ.
Physics Run Start	2014 - 2015年度	2015年度~	2016?	2012~

LEPS II: Laser Electron Photon Experiment at SPring-8

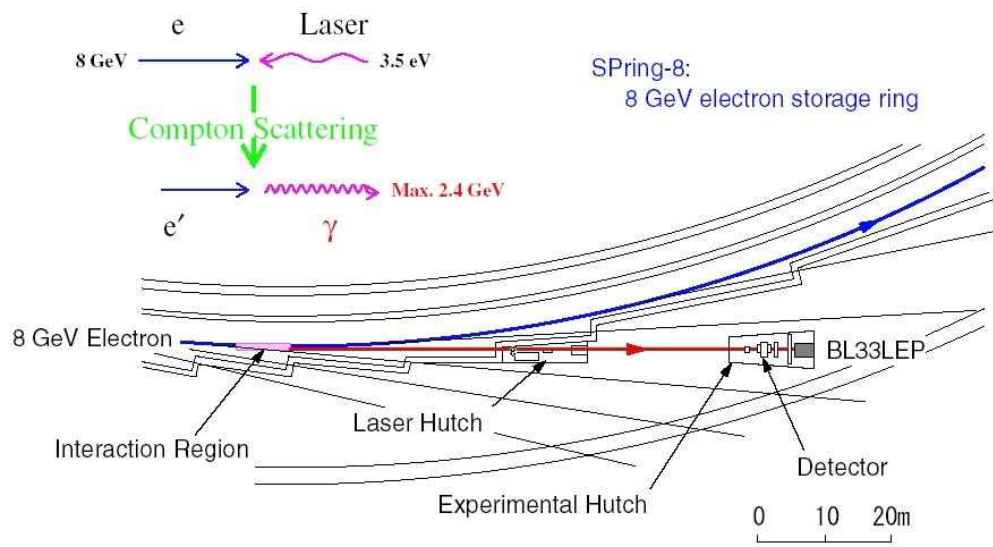


大強度放射光施設SPring-8の航空写真

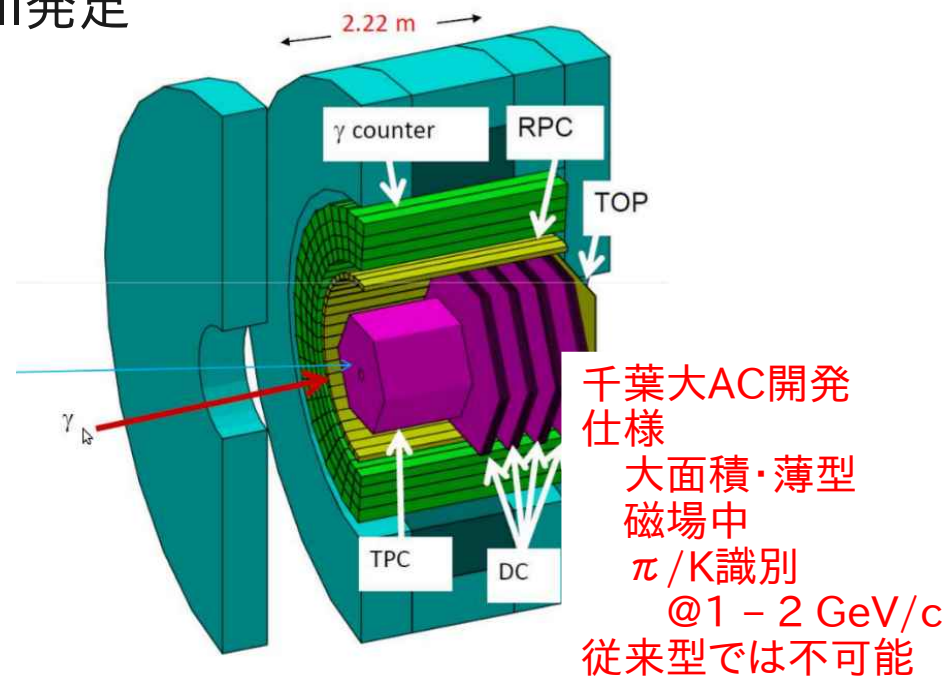
◎「エキゾチック粒子 Θ^+ の探索」
2003: LEPSグループ Θ^+ の世界初発見報告

CLASグループは Θ^+ 確認できず
→ ホントにあるの？

新しい検出器で存在の有無を確認しよう！
LEPS II発足

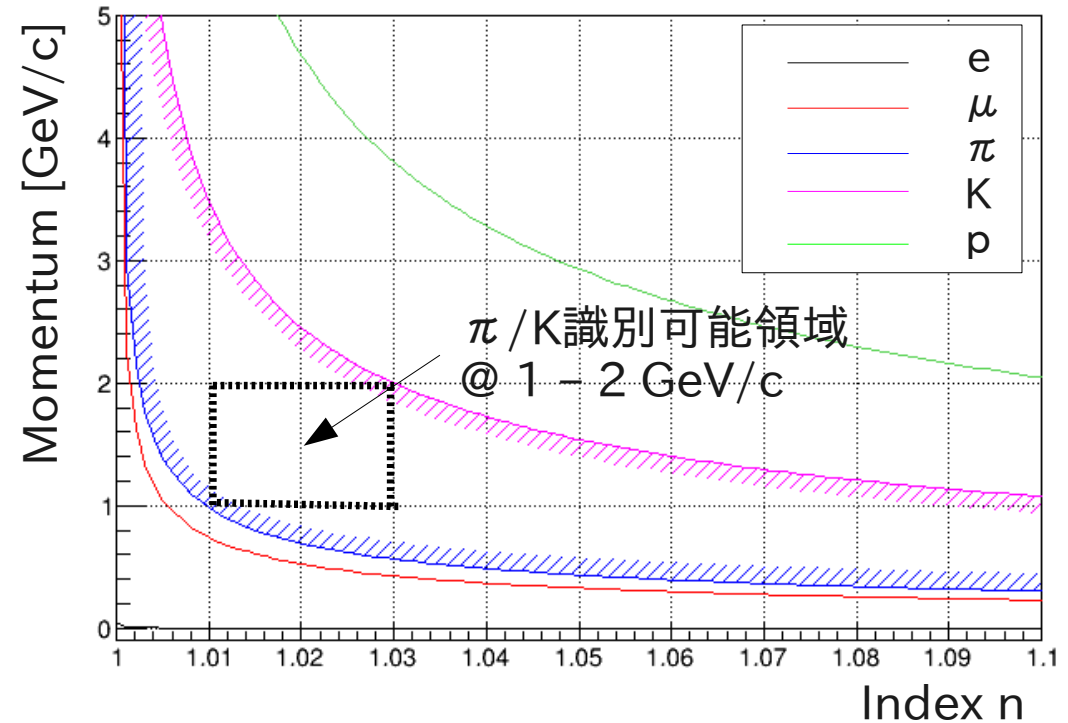
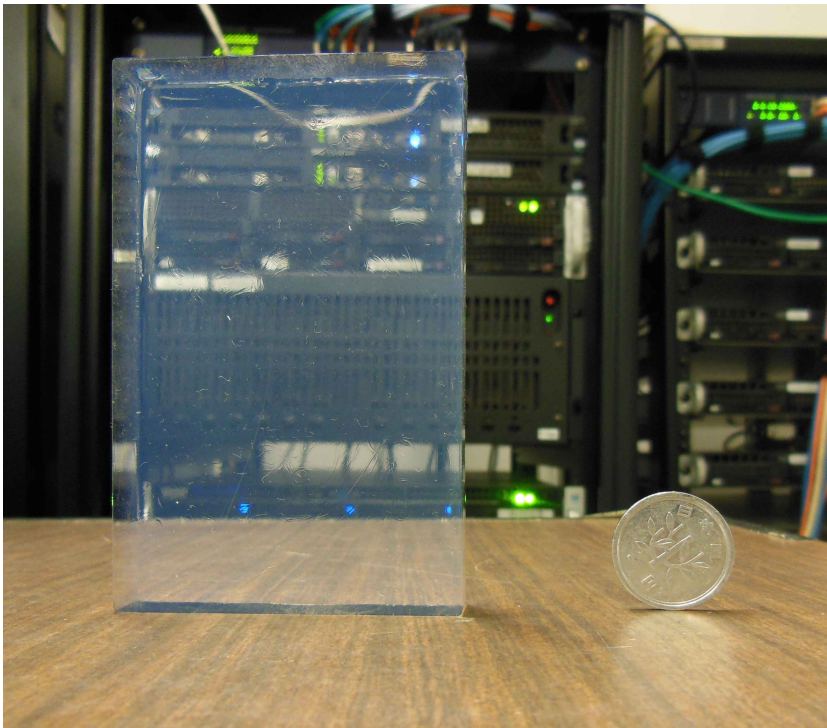


LEPSビームライン



LEPS II detector: M. Niyama et al., Nucl. Phys. A 914 (2013) 543 - 552.

シリカエアロゲル と エアロゲルチェレンコフカウンター(AC)

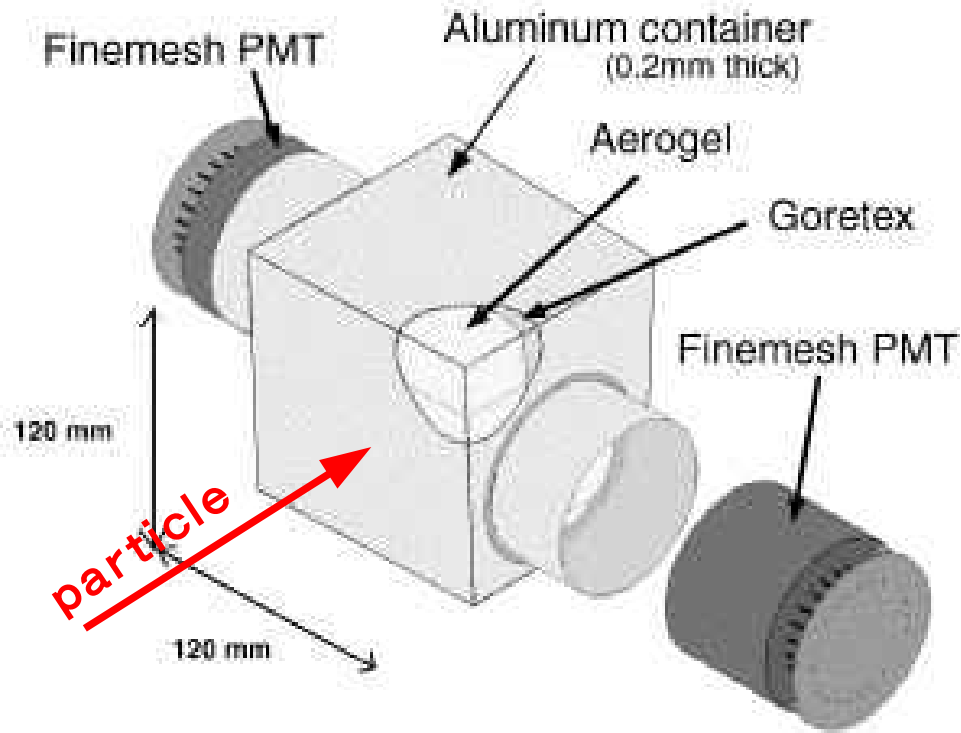


シリカエアロゲル

- SiO₂と空気の配合で屈折率(1.003 - 1.26)
- ピンホール乾燥、高屈折率
- 疎水化处理 - 数十年劣化なし
- 千葉大特任研究員田端が製作: 透明度高い
日本で唯一透明なゲルを製作する職人(千葉大卒)

$$p > \frac{m/n}{\sqrt{1 - (1/n)^2}} = \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} = p_{th}$$

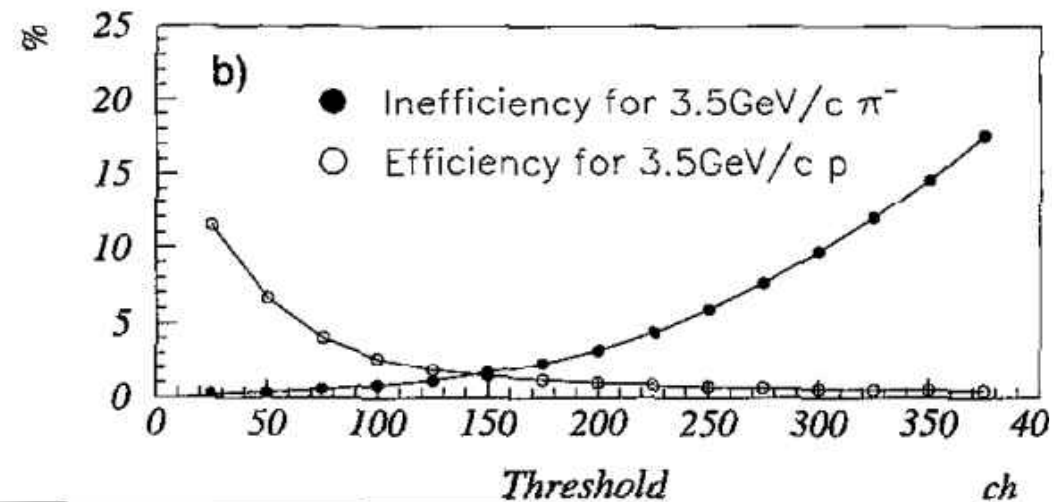
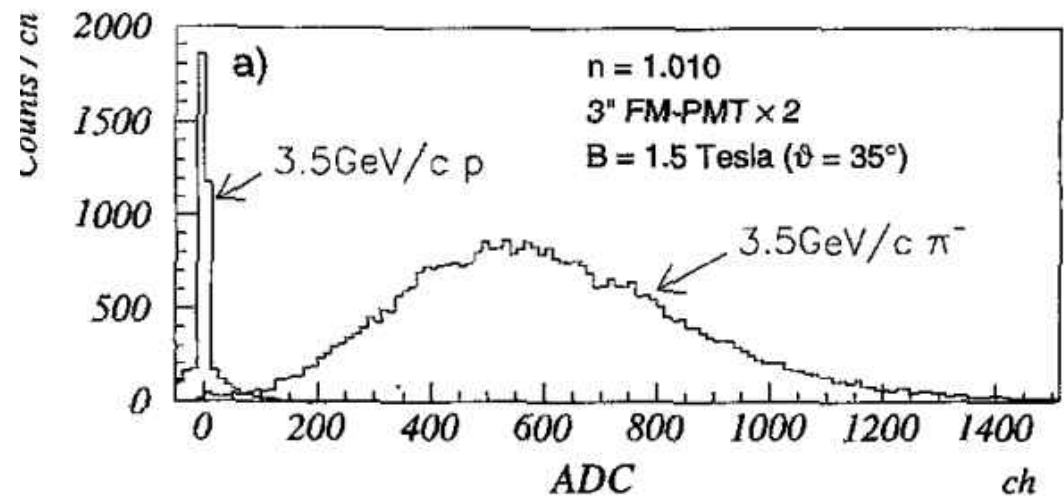
しきい値型AC



Belle ACのデザイン、T. Iijima et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 453 (2000) 321-325

しきい値型AC仕様

1. 装置厚さ ~ PID面積
2. 装置サイズ = PID面積 + PMT設置空間
3. 識別能力97 - 98%が限界
4. PMT磁場中動作困難



T. Iijima et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 379 (1996) 457 - 459.

研究目的

LEPS II ACの開発

仕様： π / K識別 @1 -2 GeV/c

形状トロイダル型

狭い空間、薄型、強磁場中

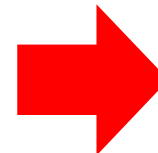
→ 高汎用性が求められている!

研究方針:

高汎用性のアイデア提案 ←

1. 実験室系の評価測定
2. ビームテストによる評価測定
3. 試作製作

改善点発見



究極の汎用性AC
に近づく

高汎用性しきい値型PID装置

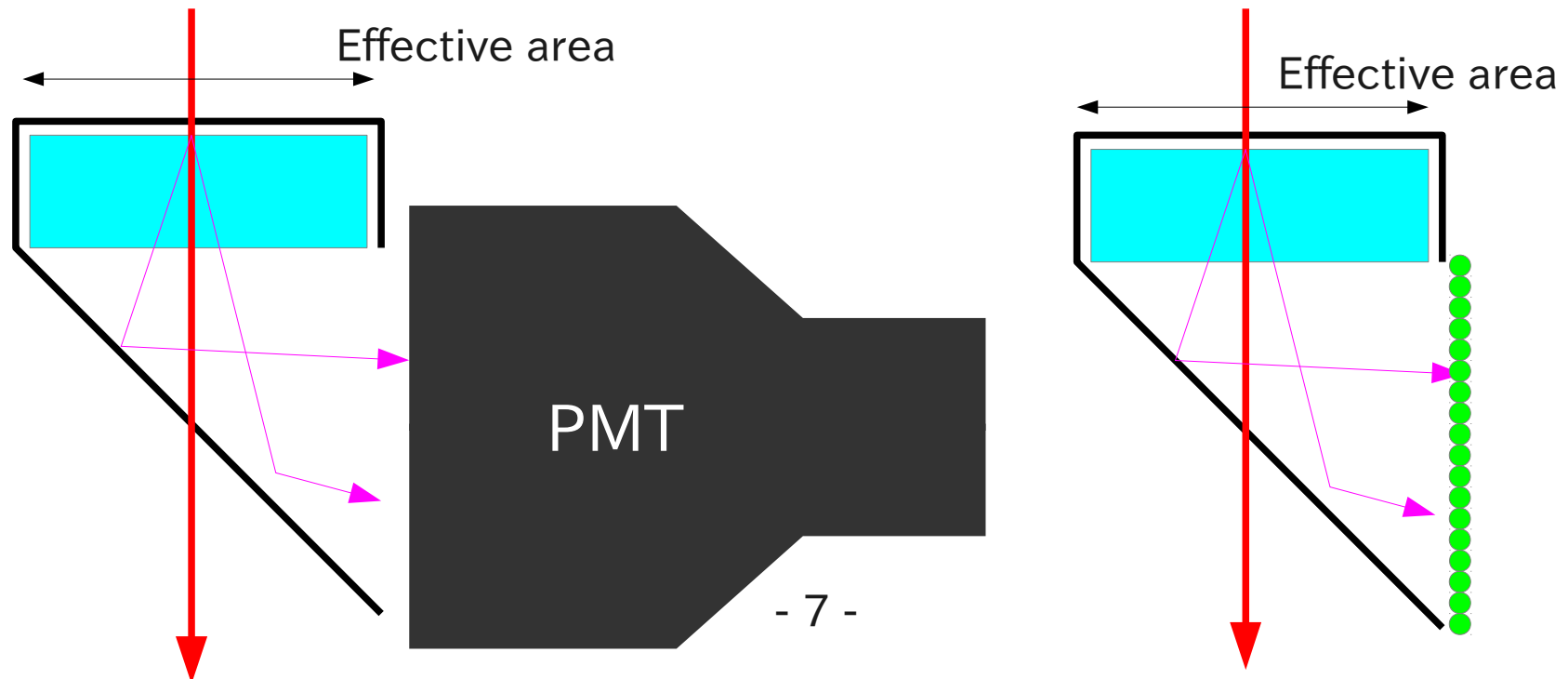
- 波長変換ファイバーを用いた方式

先行研究

2010年 関根:修士論文、WLS用いた粒子識別装置の提案

2011年 久保:IEEE NSS 2011 NP3. M-34, WLSとWLSF($\phi 1\text{mm}$)を比較

2012年 久保: 修士論文、LEPS2のためのWLSF($\phi 1\text{mm}$)4種類の集光システム考案とビームテスト評価



高汎用性しきい値型PID装置

- 波長変換ファイバーを用いた方式

先行研究

2010
2011
2012
テム考

～大型PMTの代わりに波長変換ファイバー～

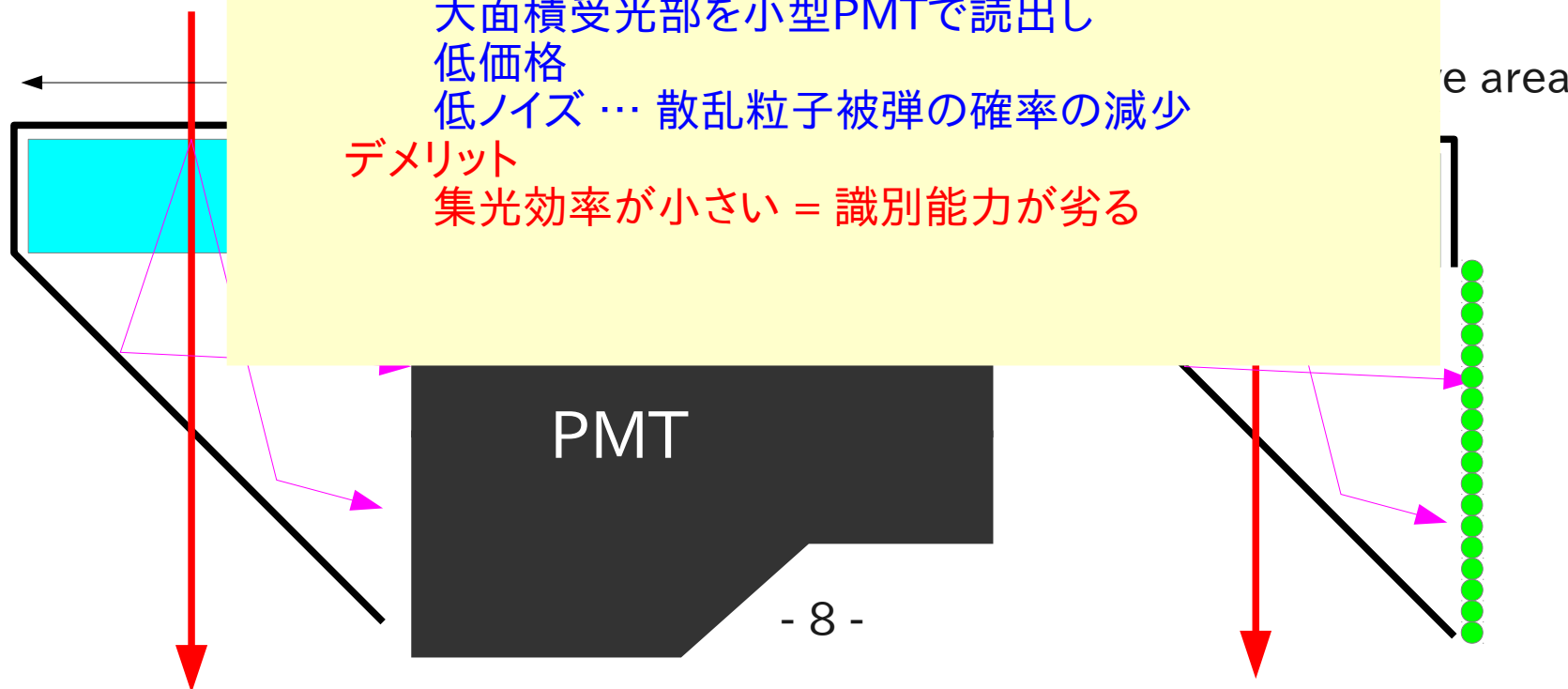
を比較
集光シス

メリット

PMT設置空間を排除
大面積受光部を小型PMTで読出し
低価格
低ノイズ … 散乱粒子被弾の確率の減少

デメリット

集光効率が小さい = 識別能力が劣る



波長変換ファイバー WLSF: Wavelength Shifting Fiber

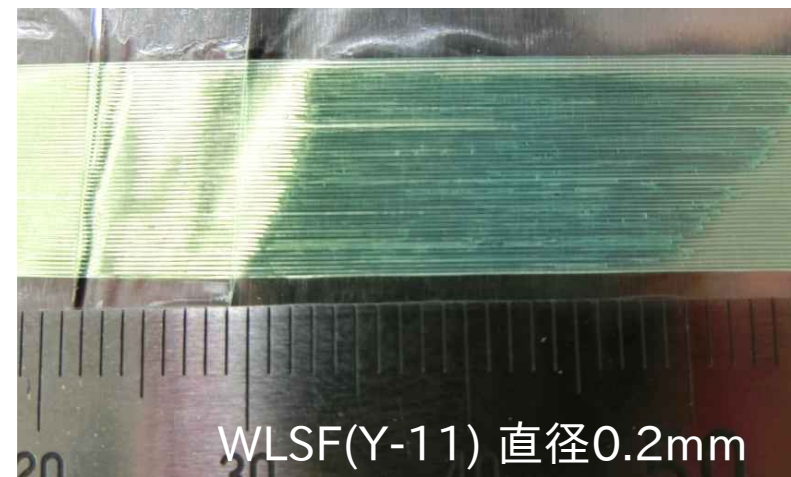
クラレ社

波長変換ファイバー(WLSF)

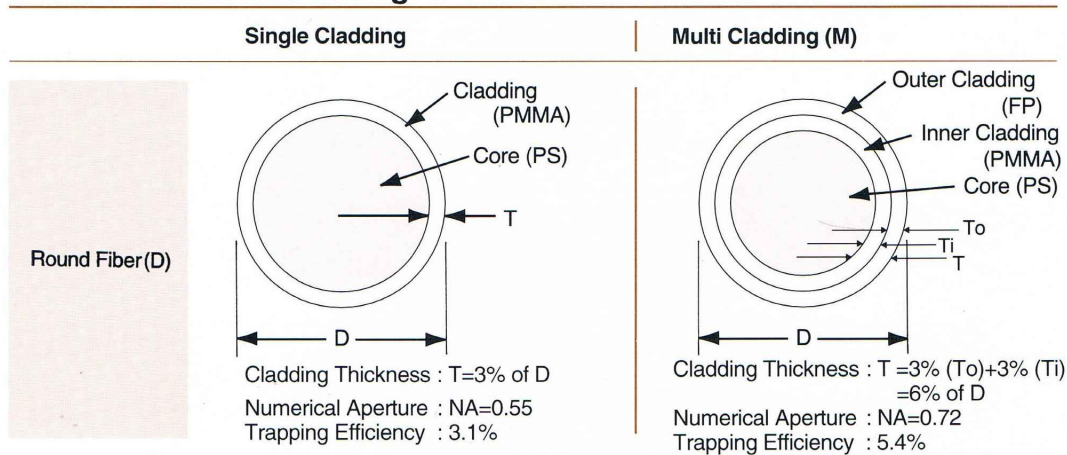
… ファイバー側面から受光して両端に伝搬する性質。

露出面が受光部に相当

トラッピング効率: 波長変換された光の伝搬する割合



Cross-section and Cladding Thickness



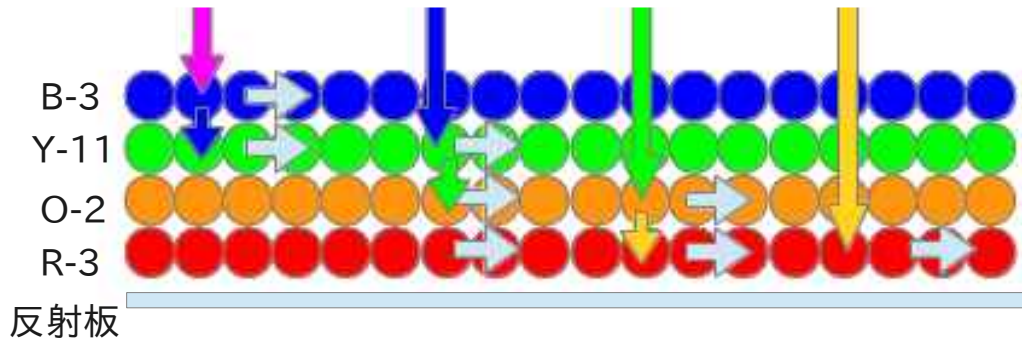
$$\varepsilon_{trap} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_1} \sin \theta d\theta$$

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

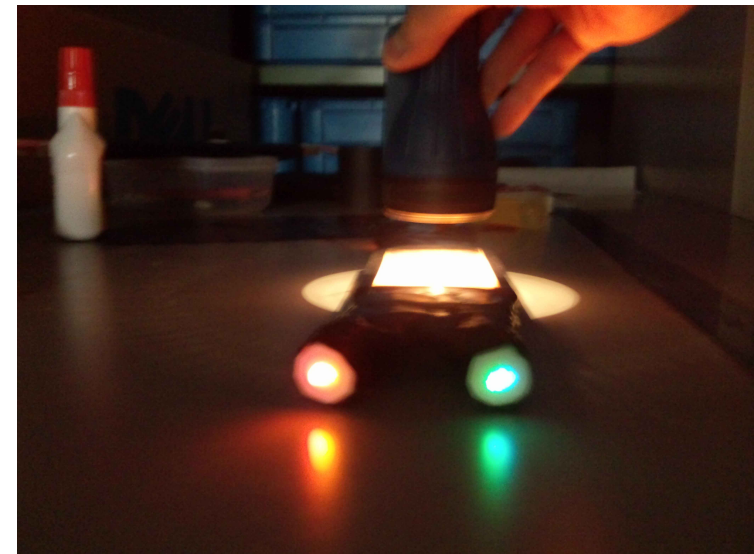
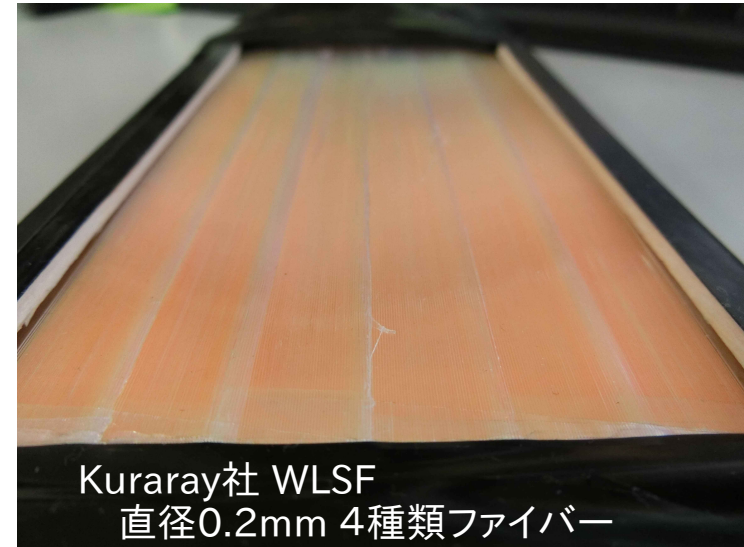
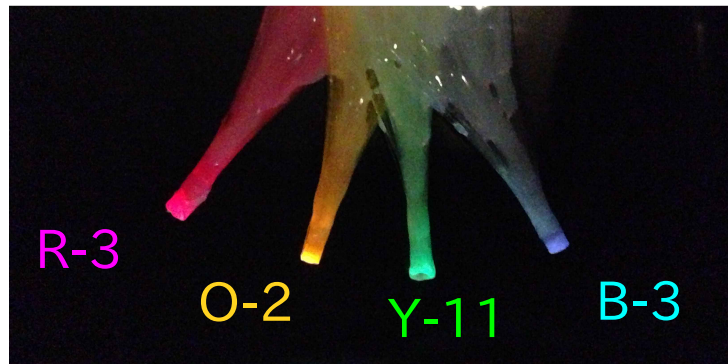
クラレ社のシングルクラッドとダブルクラッドのトラッピング効率比は計算上、**約1.7倍**

WLSFライトガイド集光システム

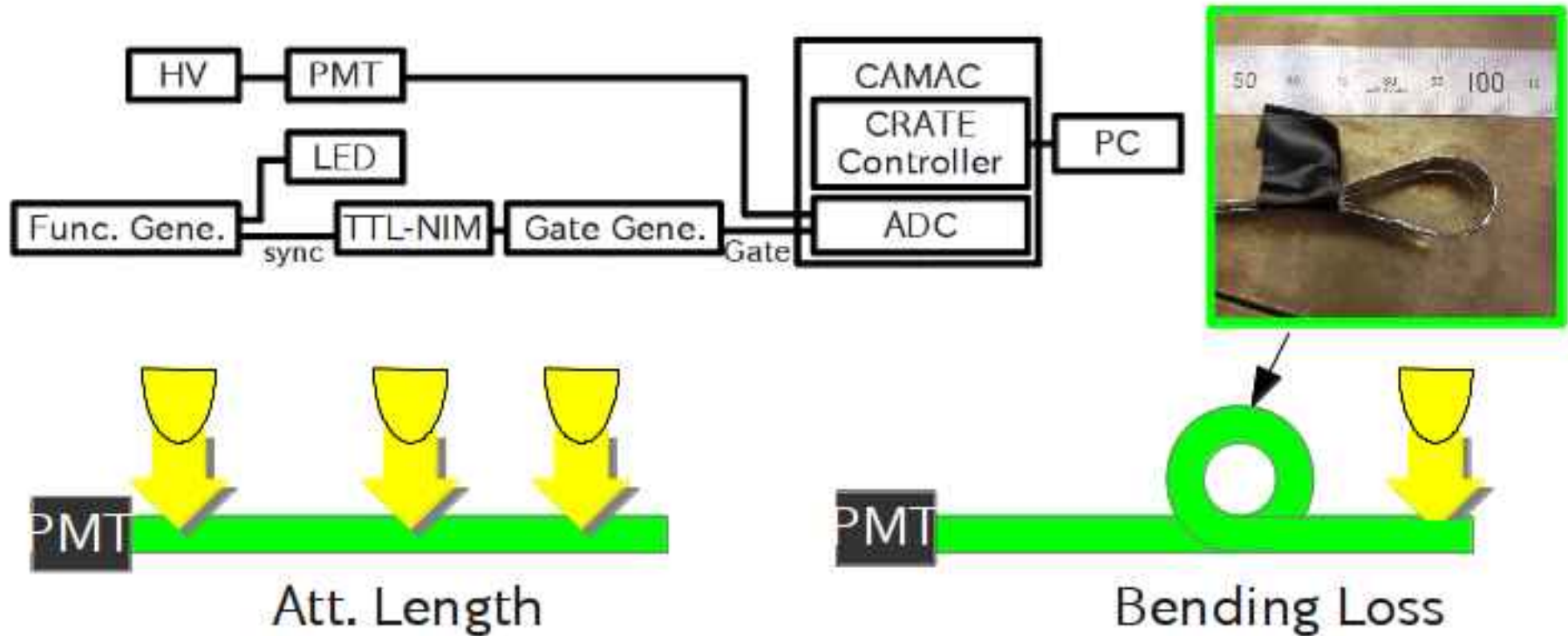
チェレンコフ光: 波長の2乗に反比例した
スペクトラム



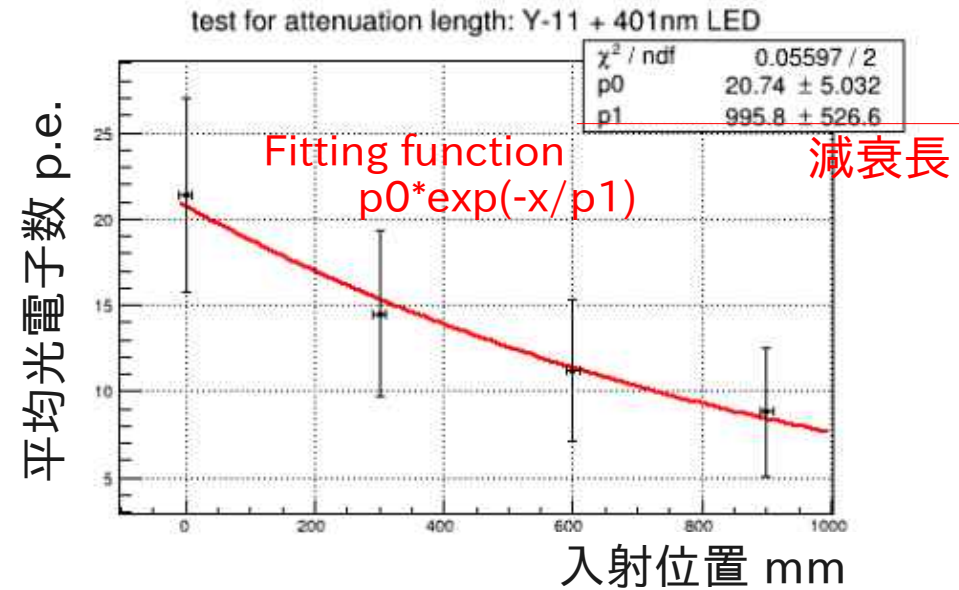
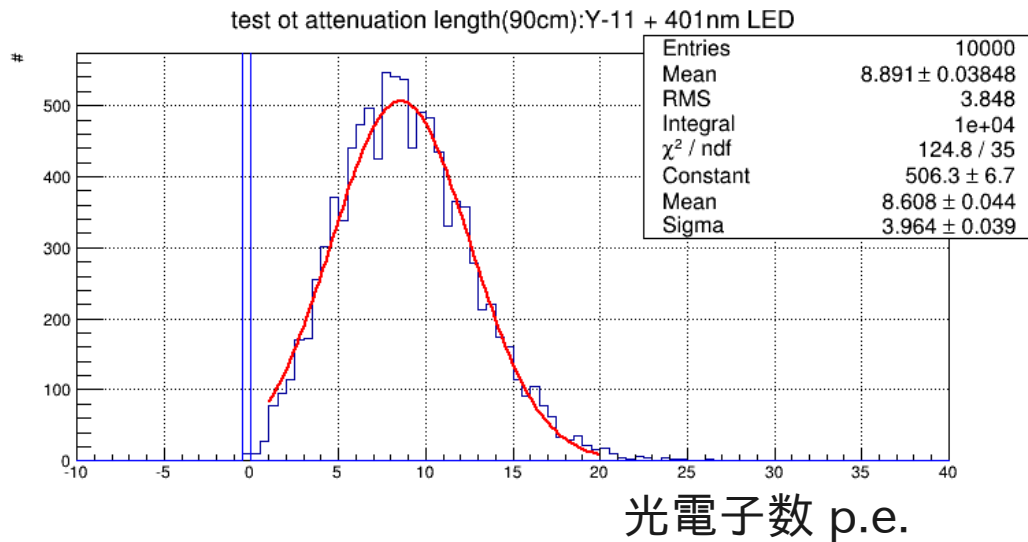
型番	ピーク吸収波長 [nm]	ピーク発光波長 [nm]
B-3(300)MJ	350	450
Y-11(300)MJ	440	470
O-2(300)MJ	540	550
R-3(300)MJ	570	610



LEDを用いたWLSFシート性質評価測定



LEDを用いたWLSFシート性質評価測定



LEDによるWLSFシート性能評価測定結果

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

定義:

減衰長

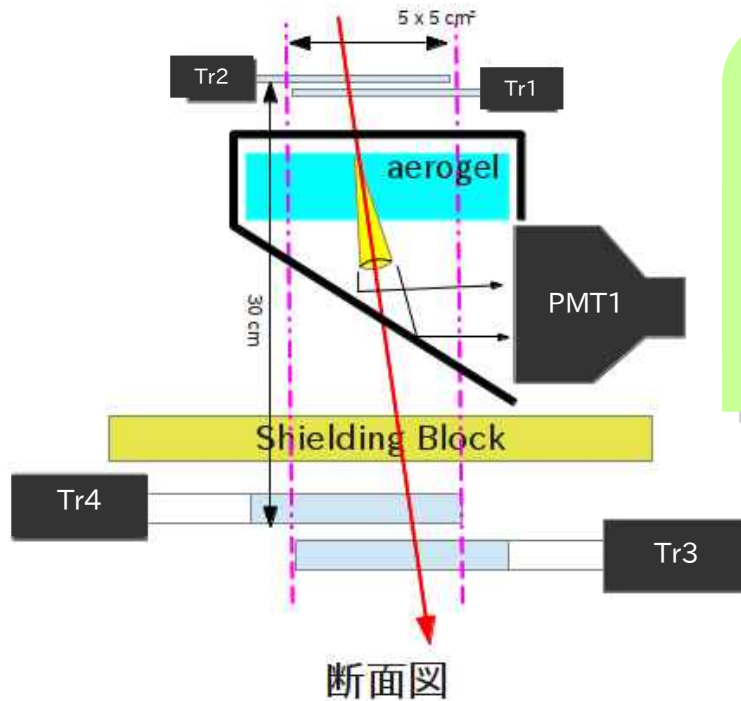
… 光量が1/eになる長さ

曲げ損失最小半径

… 光量損失が1dB未満である最小半径

宇宙線によるWLSF性能評価

セットアップ



測定方針

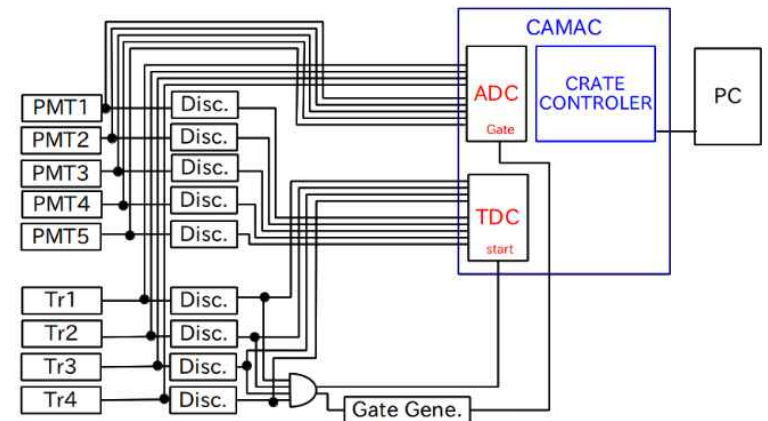
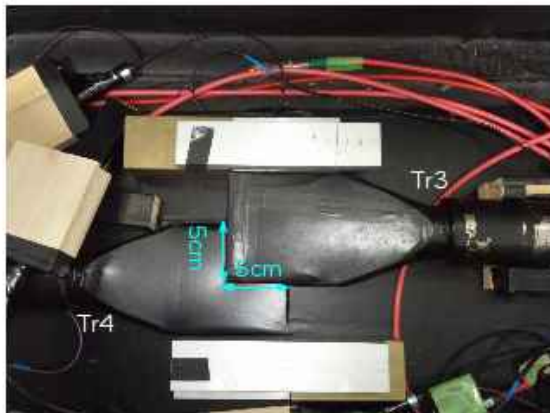
1. 直接PMTでチェレンコフ光N_{pe}の観測
2. WLSFライトガイドを経由したN_{pe}の観測
3. エアロゲルの厚さに比例するか？
4. 直接読出しと比較 → 収集効率を評価
5. WLSF組み合わせ比較BYOR, BBYY

エアロゲル

屈折率1.05

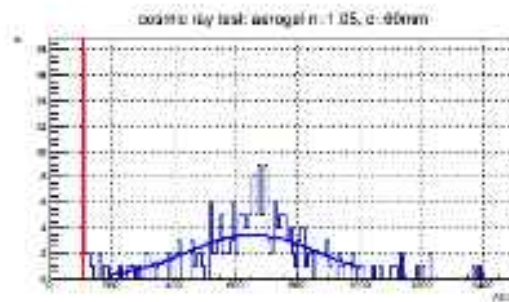
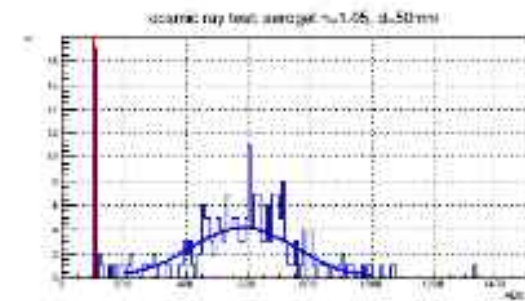
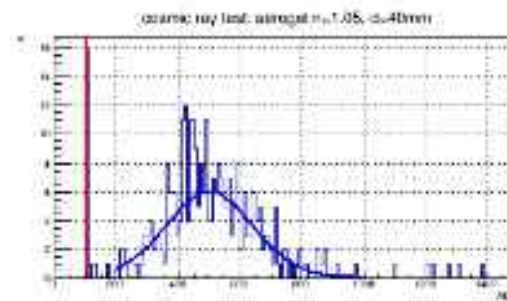
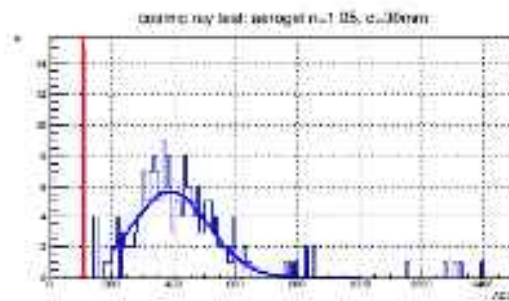
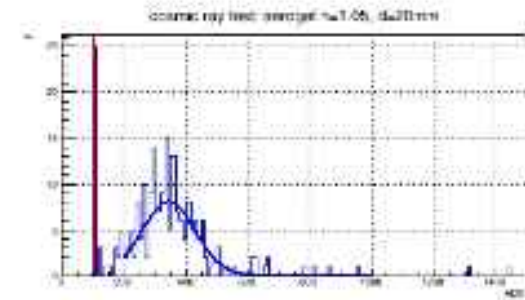
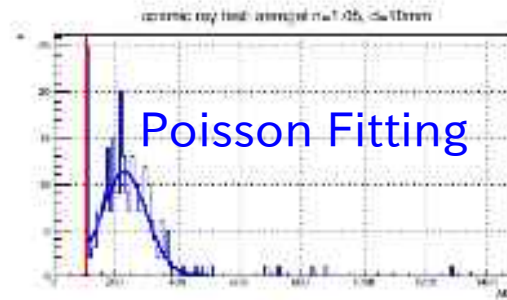
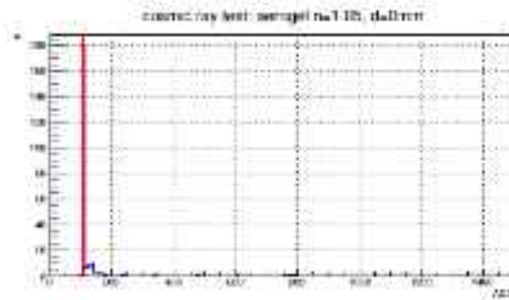
透過長35 mm @ 405nm

厚さ d = 0 - 60 mm



宇宙線によるWLSF性能評価

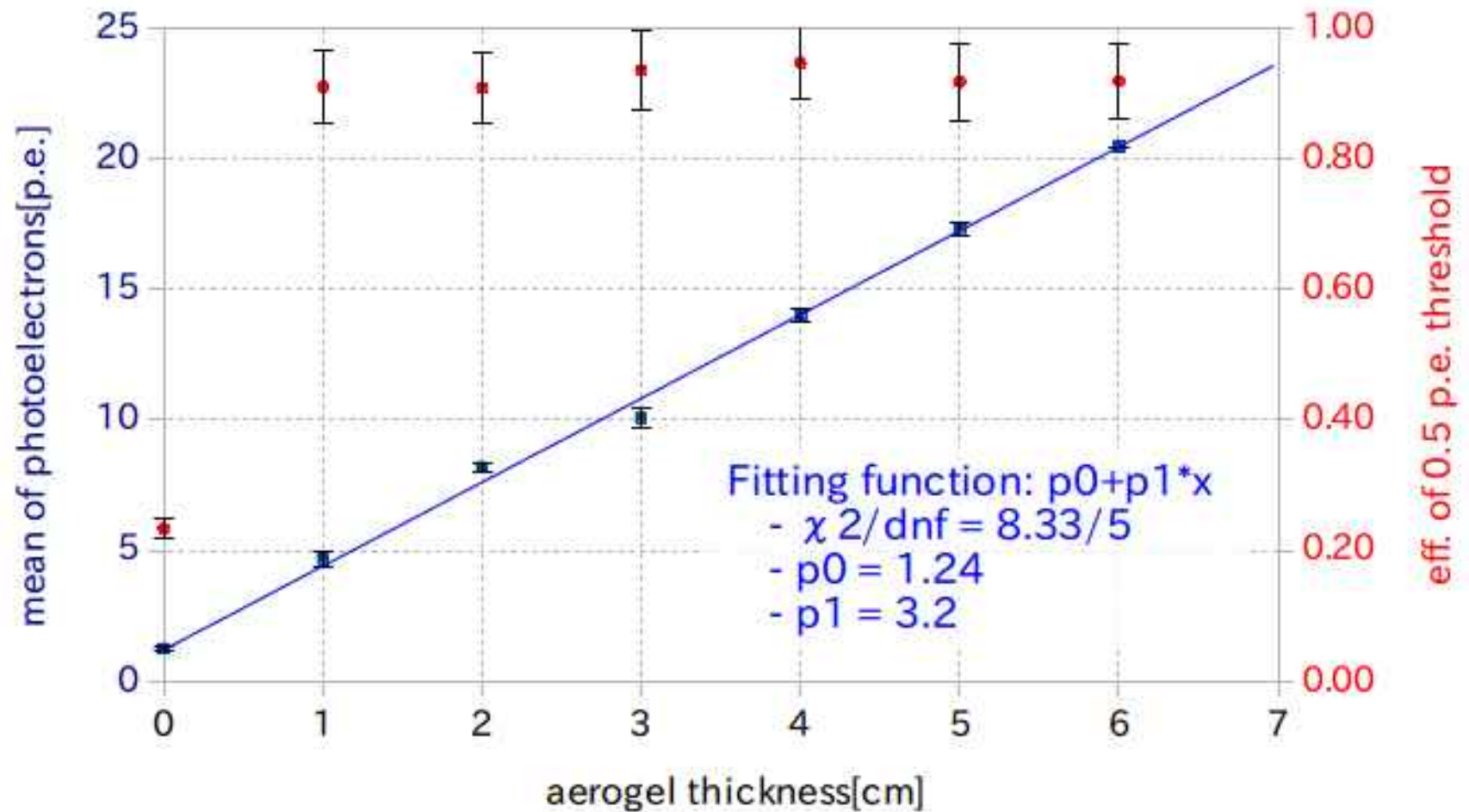
直接PMTでチェレンコフ光Npeの観測



thickness[cm]	mean of p.e.	error	eff	error
0	1.24	0.08	0.233	0.015
1	4.68	0.28	0.909	0.055
2	8.18	0.19	0.908	0.055
3	10.07	0.42	0.935	0.062
4	14.01	0.27	0.946	0.055
5	17.27	0.27	0.917	0.060
6	20.44	0.31	0.918	0.059

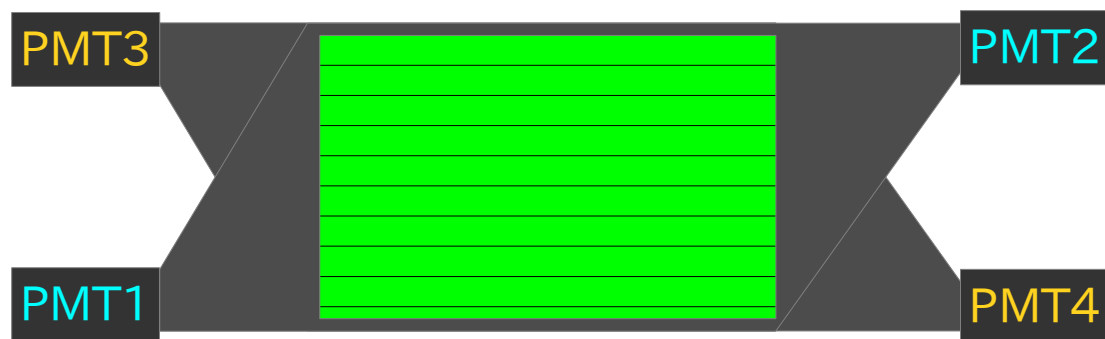
宇宙線によるWLSF性能評価

直接PMTでチェレンコフ光N_{pe}の観測



宇宙線によるWLSF性能評価

WLSFライトガイドを經由したNpeの観測



WLSFの発光波長領域に応じてPMTを使用した

PMT1, 2: R9880U-210

… バイアルカリカソード

感度波長:短波長(400 nm)

WLSF:B-3, Y-11

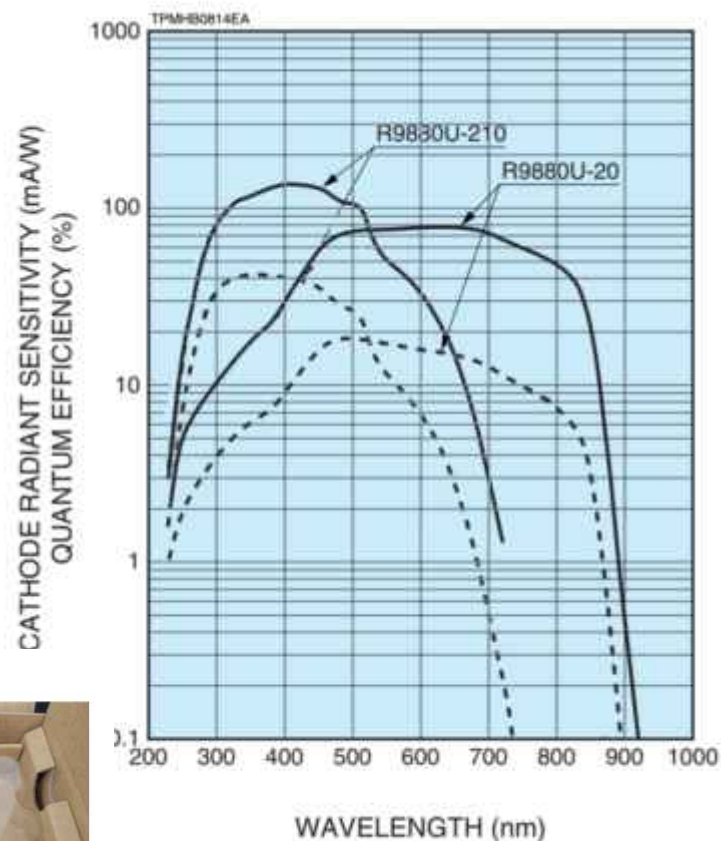
PMT3, 4: R9880U-20

… マルチアルカリカソード

感度波長:長波長(600 nm)

WLSF:O-2, R-3

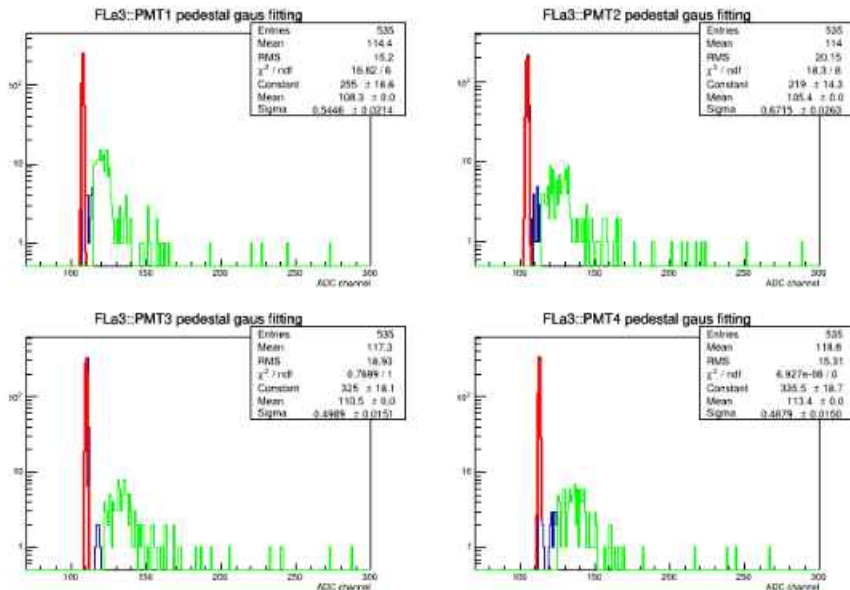
解析はPMTのそれぞれの光量の和を取



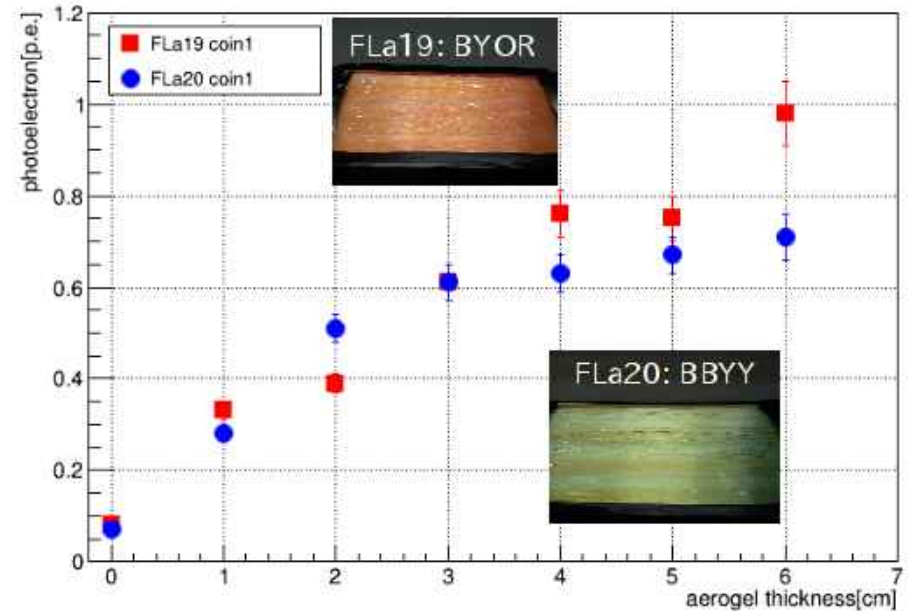
R9880Uシリーズ
浜松ホトニクス社
有感面積: $\phi 8$ mm

宇宙線によるWLSF性能評価

WLSFライトガイドを經由したNpeの観測



Cosmic ray test: FLA19 vs. FLA20



ライトガイド(BYOR)の光電子数

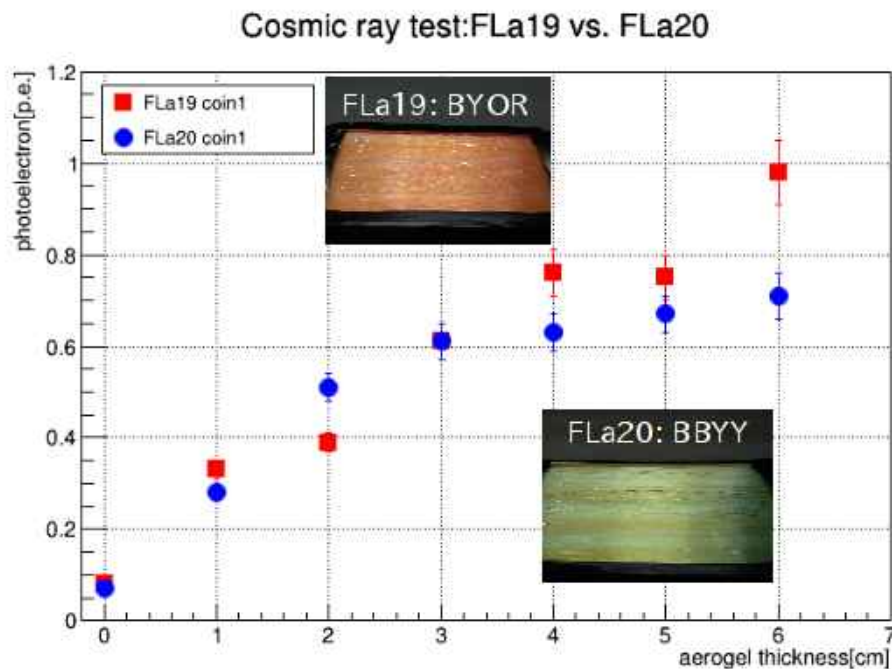
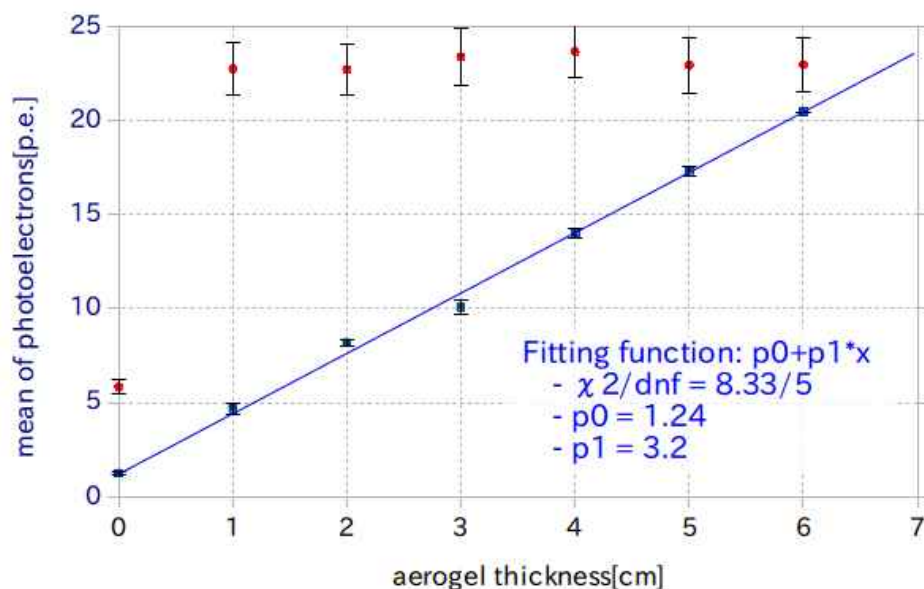
	PMT1	PMT2	PMT3	PMT4	$4C_1$ OR Logic
Gain	1.80E+07	2.57E+07	3.55E+07	3.41E+07	
efficiency	0.32 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.63 ± 0.03
mean num. of p.e.	0.38 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.24 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.98 ± 0.07

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。

日本物理学会 2013 年度秋季大会 [22aSM-10]

宇宙線によるWLSF性能評価

ライトガイド(BYOR)の集光効率 / WLSF組み合わせ比較BYOR, BBYY



ライトガイド(BYOR)の集光効率

$$\varepsilon_{\text{coll}} \sim 0.98 \div 21$$

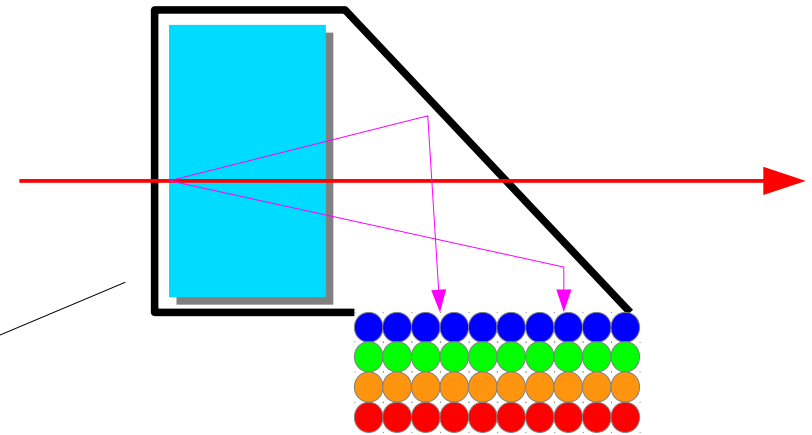
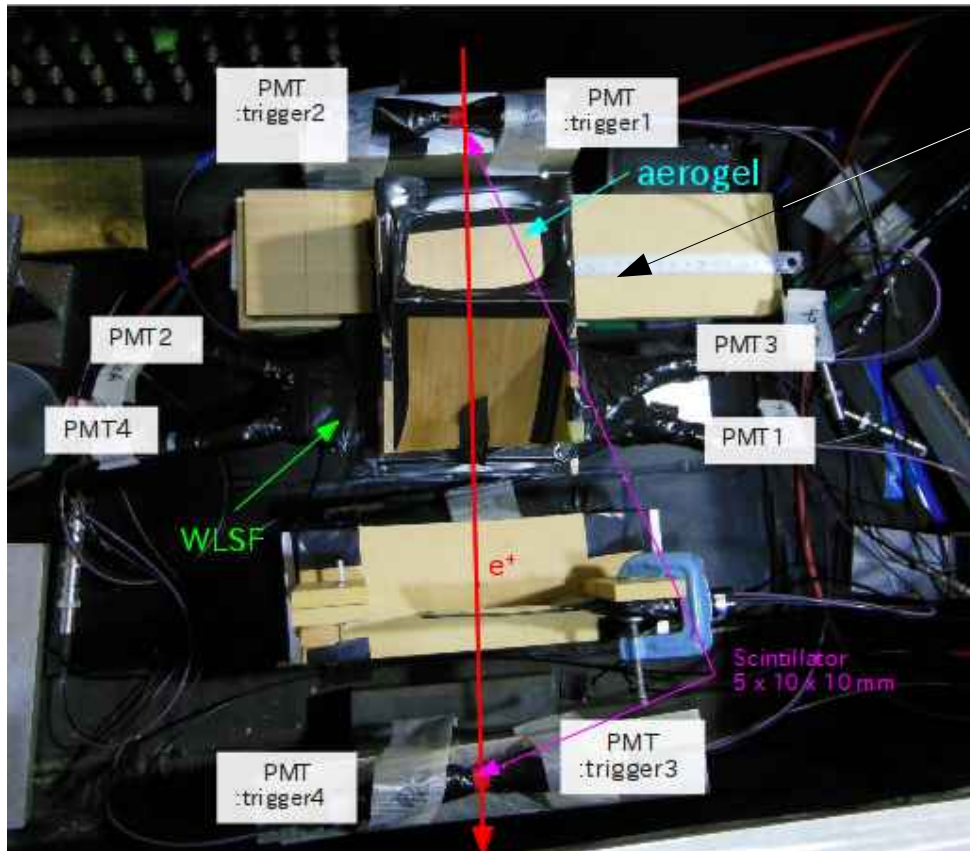
$$\sim 5\%$$

WLSFの組み合わせにおける収集効率比較

ライトガイドBYOR > BBYY

東北大ビームテスト setup

東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)
- 宮城県仙台市三神峯
- $\gamma p \rightarrow e^+e^-p$ の e^+ (300 - 400 MeV/c)
ビームを使用



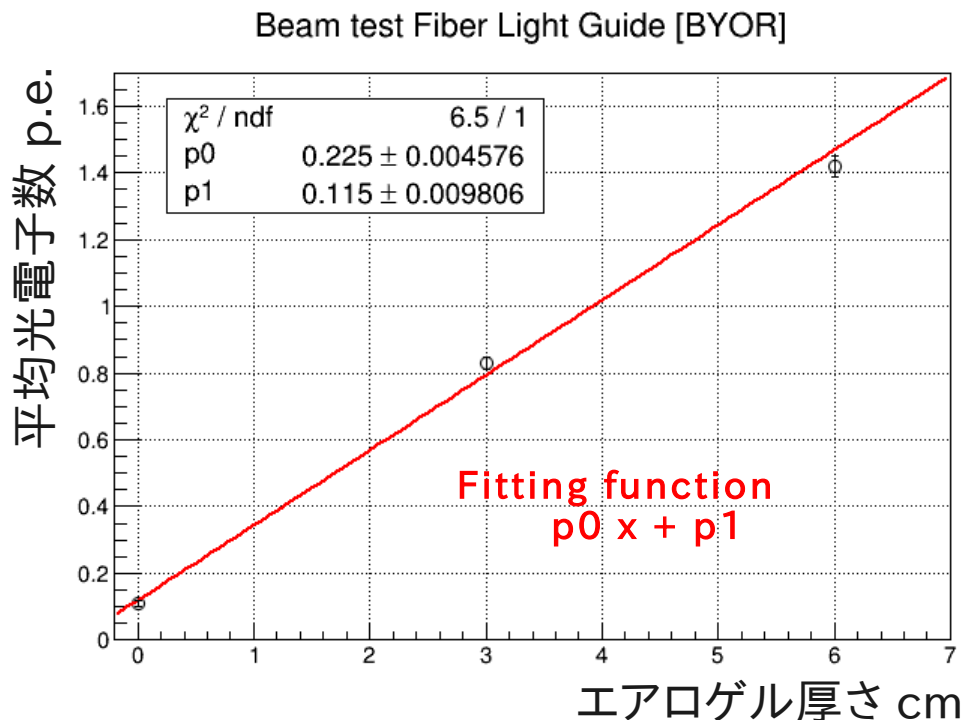
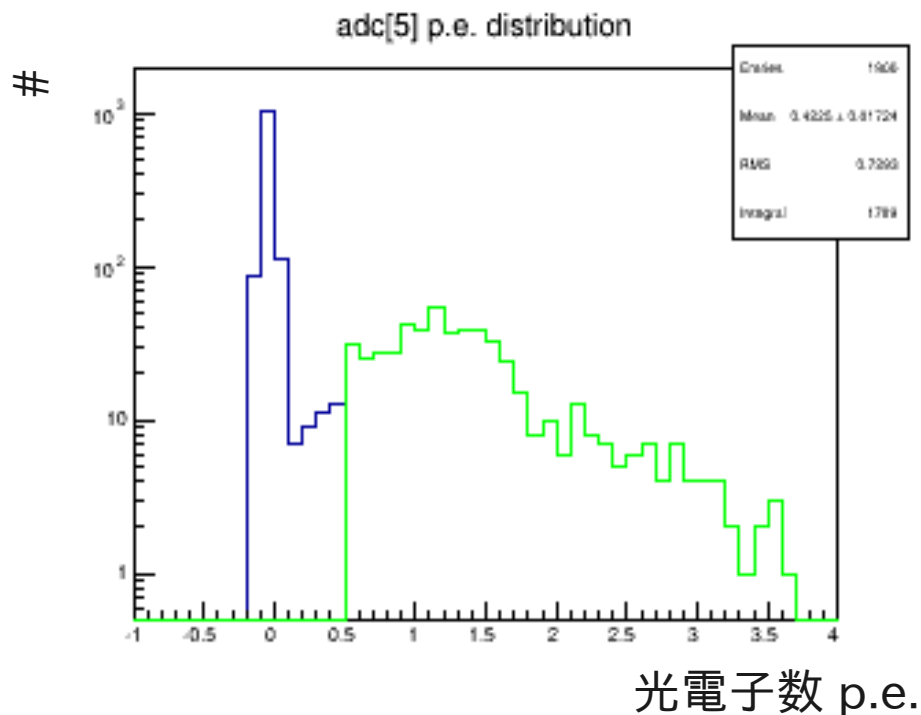
エアロゲル
屈折率1.05
透過長35 mm @ 405nm
厚さ $d = 0 - 60$ mm

測定方針

1. WLSFライトガイドによるNpe観測
2. エアロゲルの厚さに比例するか?
3. 直接読出しと比較 → 収集効率を評価
4. WLSF組み合わせ比較BYOR, BBYY
5. 試作機の性能評価測定

東北大ビームテスト

解析方法 / エアロゲル厚さと光電子数



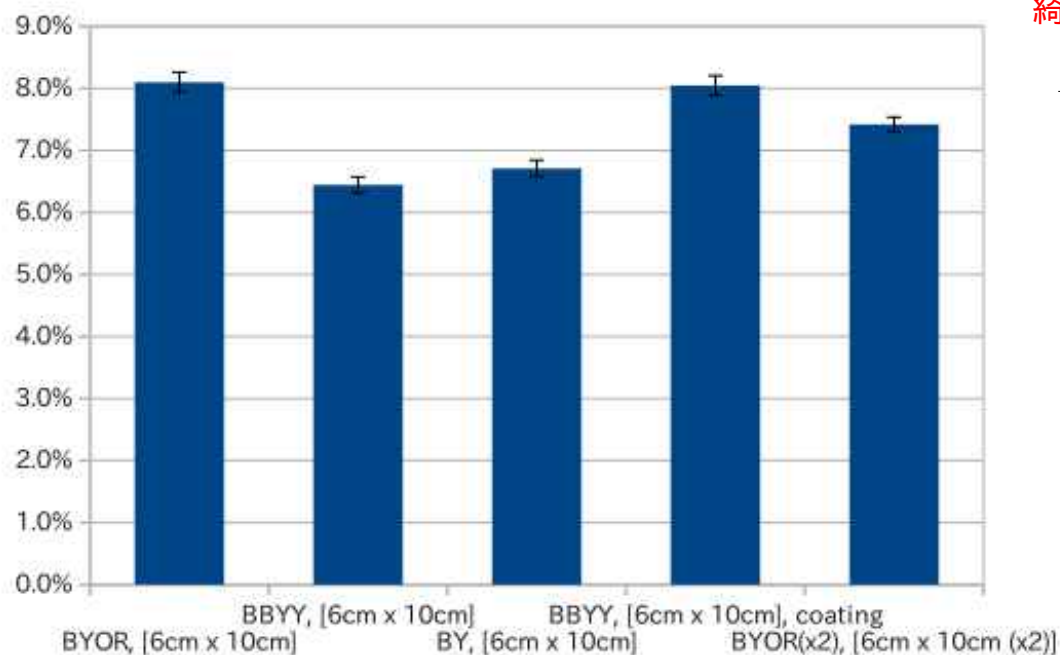
各PMTは0.5 p.e.をしきい値に検出
 4つのPMTの ${}_4C_1$ OR論理演算
 ファイバーの発光波長に応じたPMTを使用

- 波長変換ファイバーを用いてエアロゲルからのチェレンコフ光観測を確認[OK]
 … 1次関数でフィッティング
 エアロゲル屈折率1.05

東北大ビームテスト PMT直接読出し/ライトガイド収集効率

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	01.31 ± 0.03	$7.4 \pm 0.1\%$
PMT direct	1.05/ 60	1.00 ± 0.00	17.71 ± 0.06	

※corting:シート製作時に受光面をPVAL接着剤を用いて綺麗にまとめたもの。



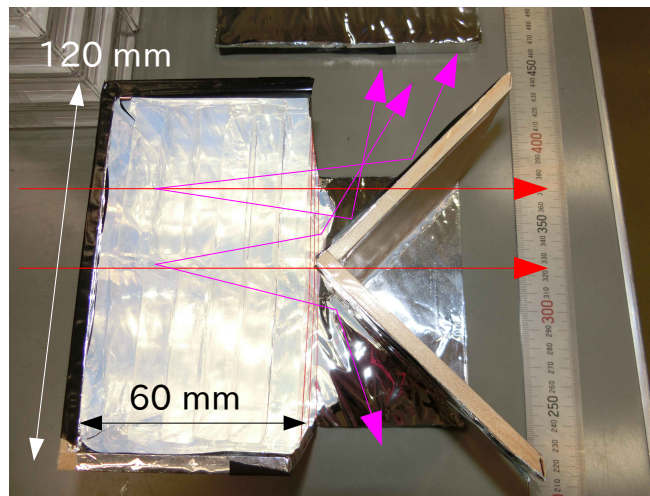
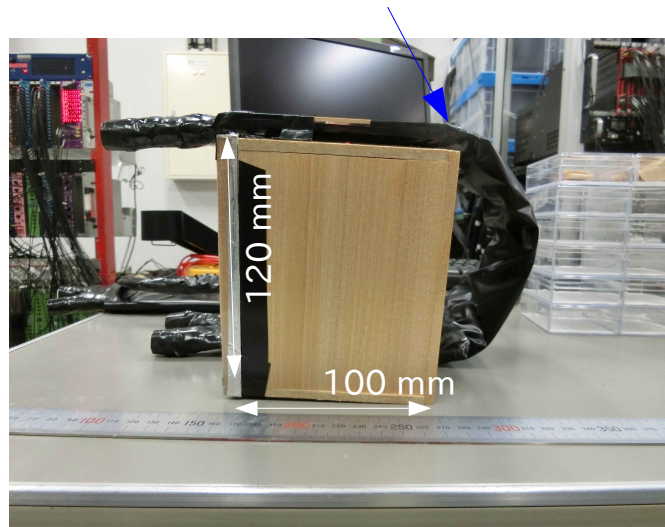
結果

1. BYOR > BBYY
2. BBYY corting ~ BYOR

Coll. eff. ~ $8.1 \pm 0.2\%$

WLSFシート性質
減衰長～1000 mm
曲げ損失最小半径～15 mm

東北大ビームテスト 試作器の性能評価測定



～試作機の仕様～

有効面積: 120 x 100 mm

シリカエアロゲル

屈折率 1.05

厚さ 60 mm

透過長 35 - 40 mm @405 nm

WLSFライトガイド

有効面積 60 x 100 mm (x2)

WLSF組み合わせ BYOR

U字型

PMT接続部 (x4)

反射板<字型

評価項目

1. WLSF集光効率
2. 平均光電子数と検出効率
3. 入射位置一様性
4. チェレンコフ光検出時刻のゆらぎ

結果

WLSF coll. Eff.	$7.4 \pm 0.1\%$
detection eff.	0.69 ± 0.03
mean num. p.e.	1.16 ± 0.09
position uniformity	93%
timing fluctuation	0.3 ns

ここまでの結果

試作器性能結果

$n=1.05$

$\pi/K @ 1 - 1.5 \text{ GeV}/c$

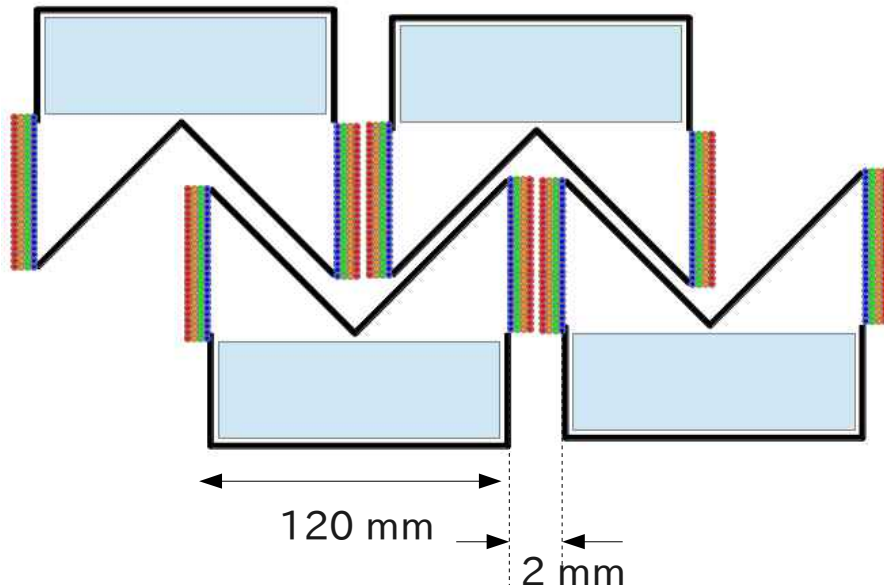
WLSF coll. Eff.	$7.4 \pm 0.1\%$
detection eff.	0.69 ± 0.03
mean num. p.e.	1.16 ± 0.09
position uniformity	93%
timing fluctuation	0.3 ns

[ここまでの結論]

波長変換ファイバー方式は

- 装置面積におけるPMT設置空間を排除
- 減衰長を考慮して1デバイス当たり最大PID面積 1 m^2

入れ子方式



[考察]

識別能力: eff. $\sim 99\%$ ($N_{pe} > 4.6$) のために
aerogel (1.05) $d=19 \text{ cm}$ が必要

入れ子方式ではPID面積拡張における薄型化が可能

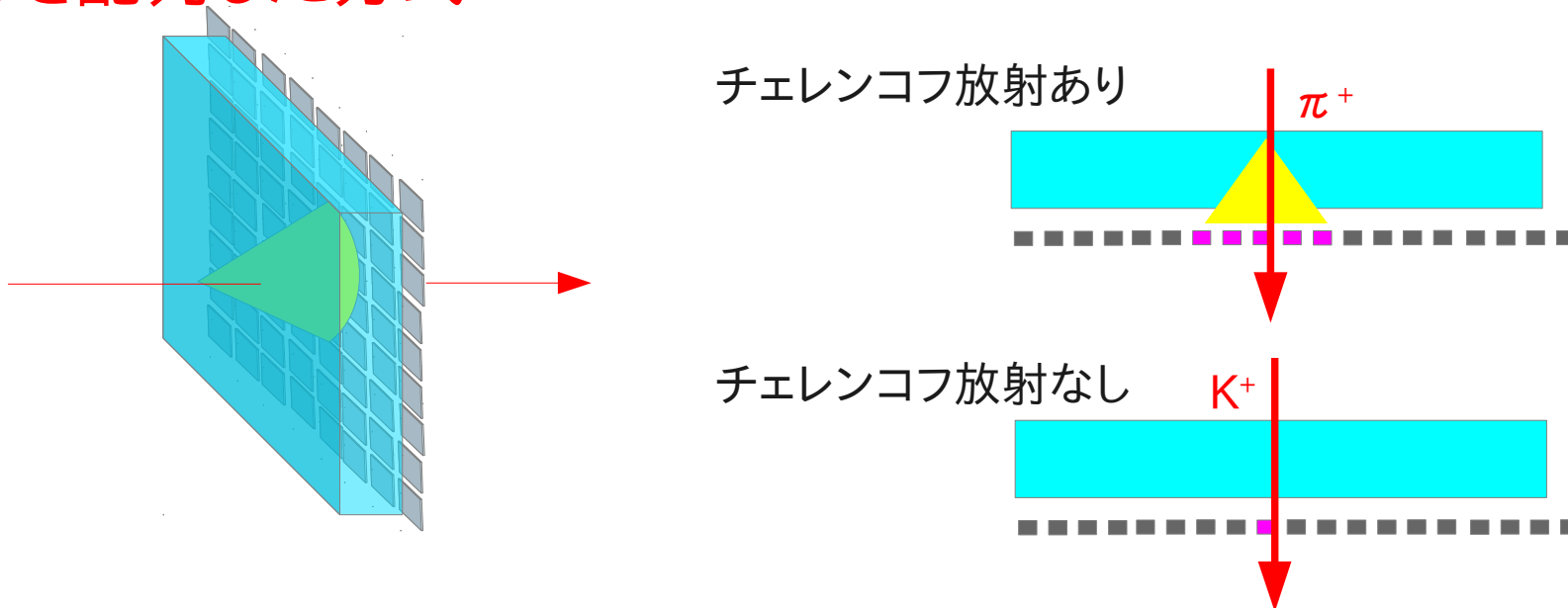
ライトガイドの厚さ $\sim 1 \text{ mm}$ 未満
(例) PID面積 $100 \times 120 \text{ mm}$
 \rightarrow 不感領域 $2 \div 122 \sim 1.6\%$

[課題]

奥行きに関して改善が必要

高汎用性しきい値型PID装置の新たな設計

- MPPCを配列した方式

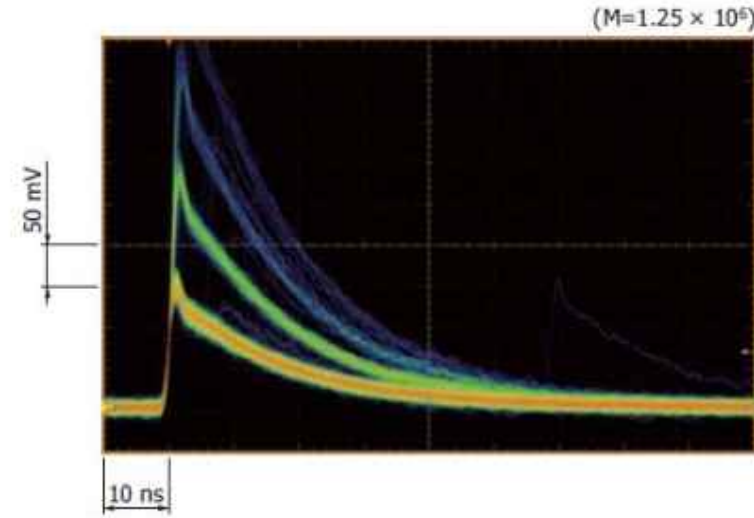
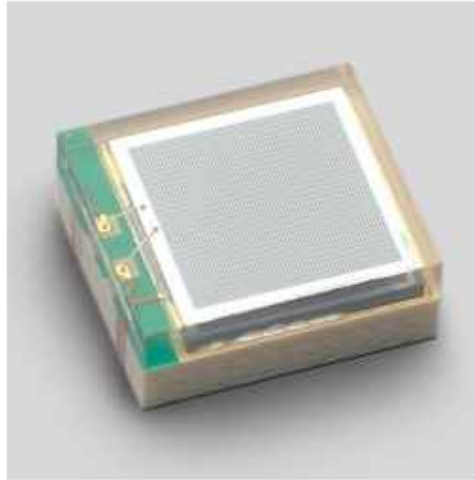


～仕様～

- エアロゲルの下流直後にMPPC2次元配列
- MPPC反応個数しきい値型PID
- 薄型:「エアロゲルの厚さが支配的」
- 任意形状
- 磁場中動作

MPPC[®]: Multi-pixel Photon Counter

浜松ホトニクス社製



MPPC特性

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

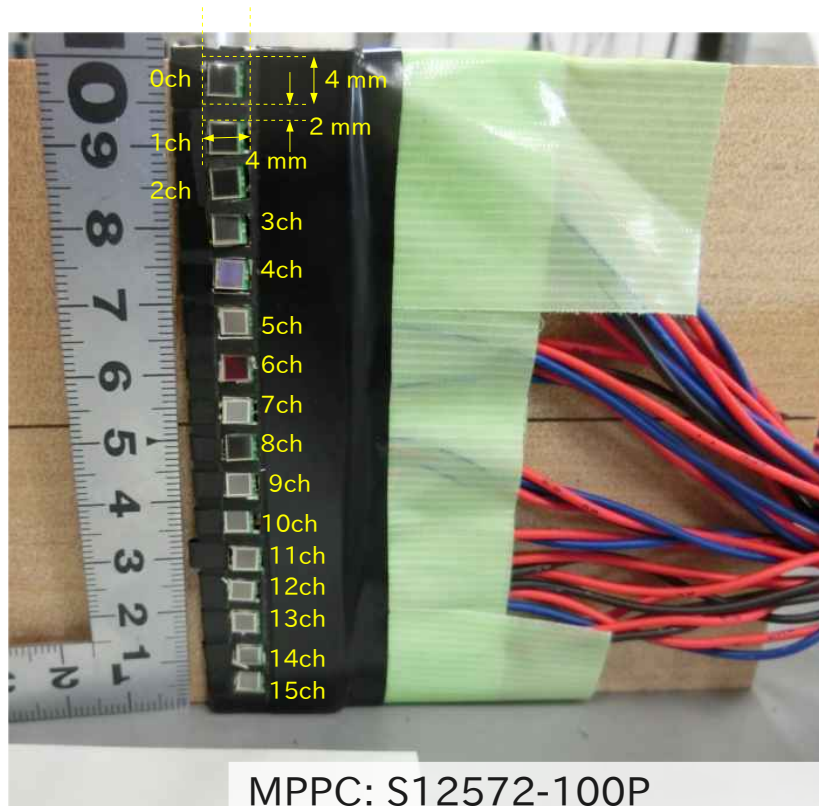
- MPPCはガイガーモードAPDのピクセル化

- APD … アバランシェ・フォトダイオード:逆バイアスをかけて電子雪崩で増幅される..

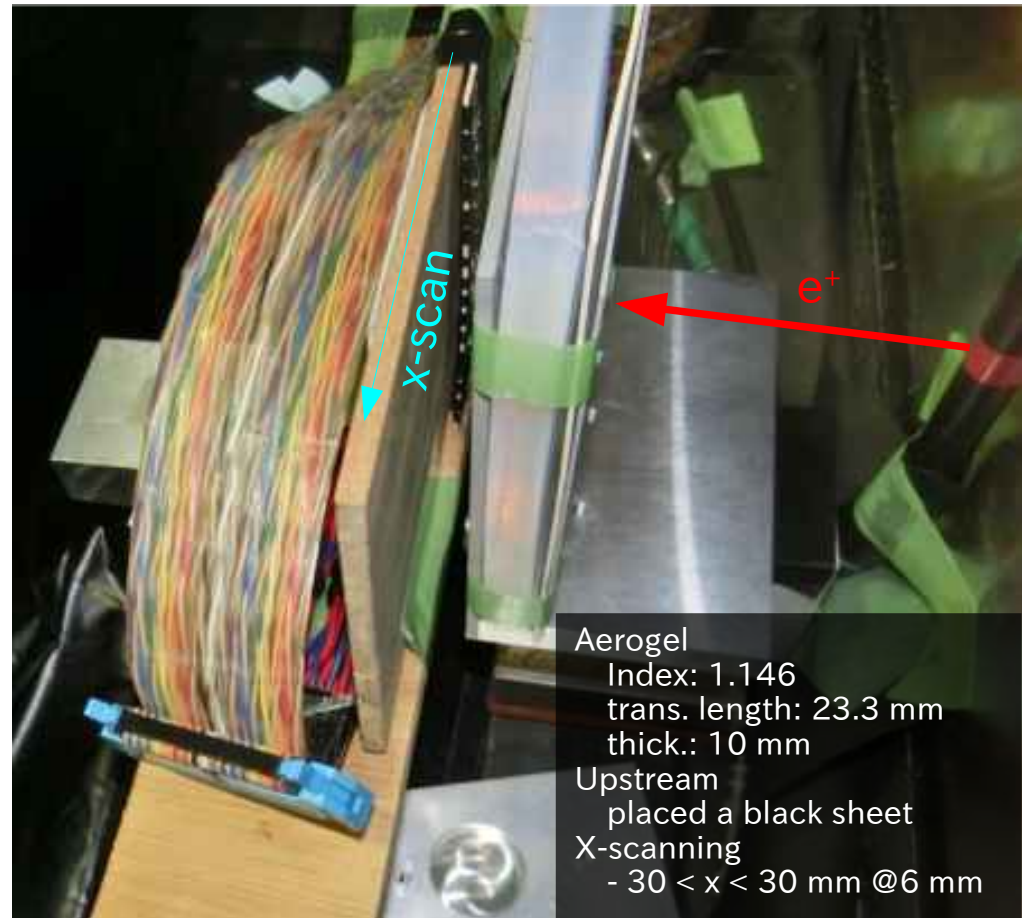
- ガイガーモードAPD … 逆バイアス値が高く飽和状態.

東北大ビームテスト setup

MPPC 1次元配列スキャンング



MPPC: S12572-100P
eff. area: $\square 3$ mm
Outside area: $\square 4$ mm
Scanning acceptance 0.25

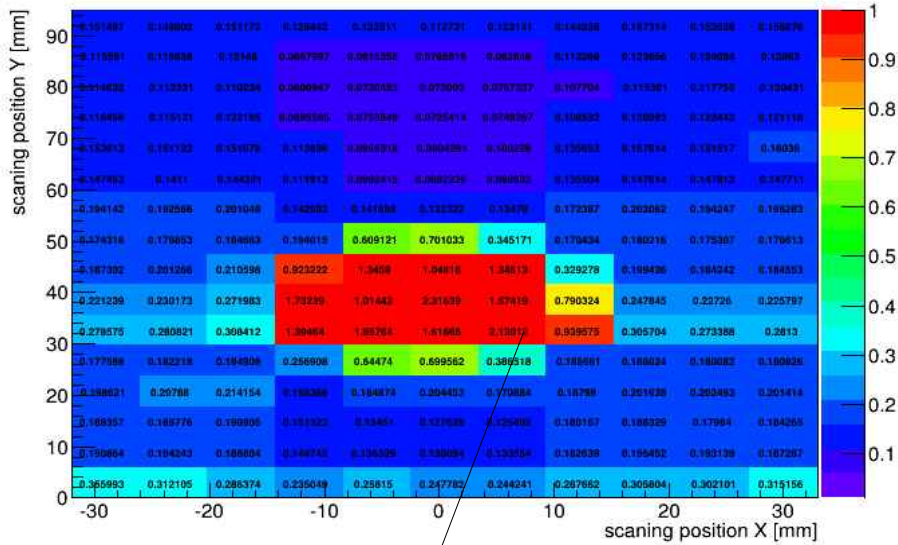


Aerogel
Index: 1.146
trans. length: 23.3 mm
thick.: 10 mm
Upstream
placed a black sheet
X-scanning
- $30 < x < 30$ mm @6 mm

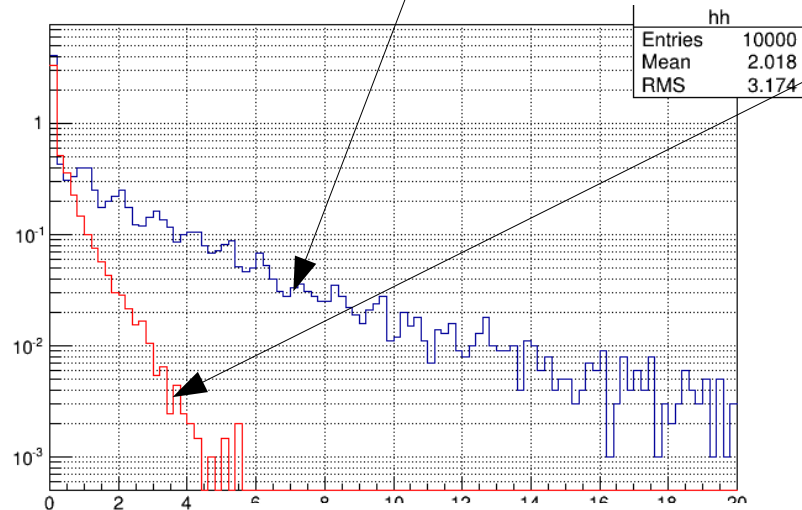
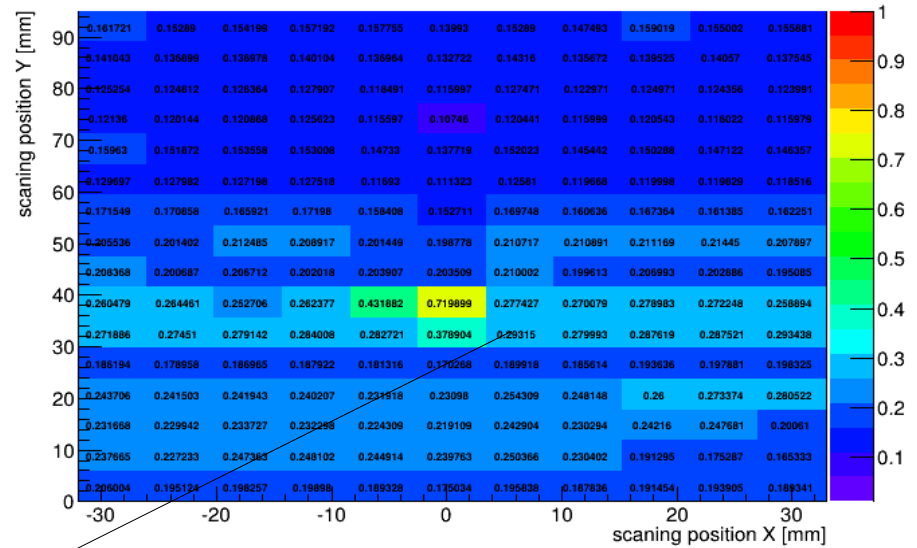
東北大ビームテスト analysis

MPPC平均検出光子数分布

mean num. of detection photon @12 mm



mean num. of detection photon @100 mm

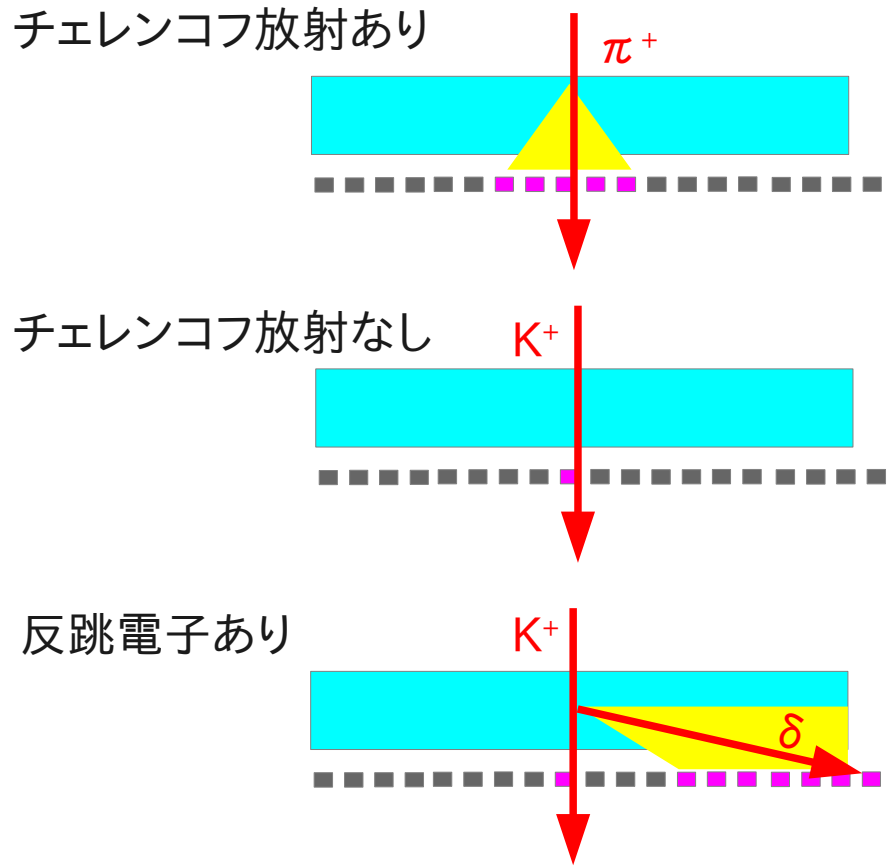


MPPC検出光子数分布

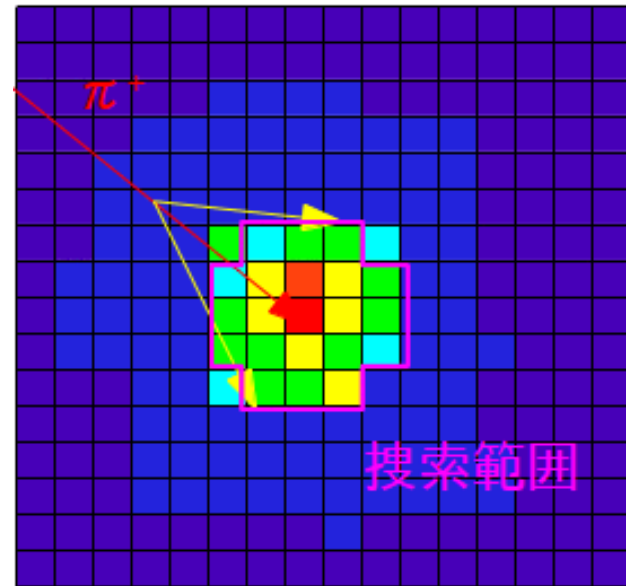
スキャン結果

- 縦軸: MPPC平均検出光子数
- ゲルあり・なしで明らかなチェレンコフ・リング広がりを観測
- ゲルなし: 粒子入射位置広がり $1 \times 1 \text{ cm}^2$
- 横にうっすらとスジ

今後の展望



- データ収集段階PID 90%以上
- オフライン解析 PID 検索範囲を設定
→ 反跳電子事象除去
→ 99%達成可能かも?



粒子識別概念図

まとめ

ハドロン物理:エキゾチック粒子の探索

任意環境下におけるAC開発
- 薄型・大面積・任意形状・磁場中動作

WLSF方式PID装置開発研究

[実験]

1. LEDテスト:シート性質評価
2. 宇宙線を用いた性能評価測定
3. ELPHビームテストによる性能評価測定

[結論]

波長変換ファイバー方式では

- 装置サイズにおいてPMT設置空間の排除
- 減衰長を考慮して1デバイス当たり最大PID面積 1 m^2

[課題]

奥行きについて改善が必要

WLSF方式の課題克服のため...

[展望]高汎用性しきい値型PID装置の新たな設計

- エアロゲルの下流直後にMPPC2次元配列
- MPPC反応個数しきい値型PID
- 薄型:「エアロゲルの厚さが支配的」
- 任意形状
- 磁場中動作

[実験]

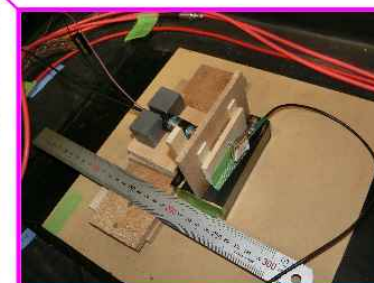
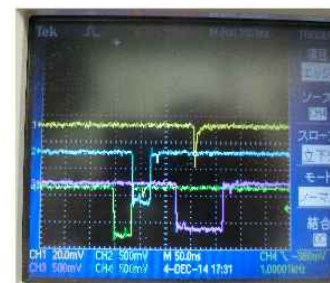
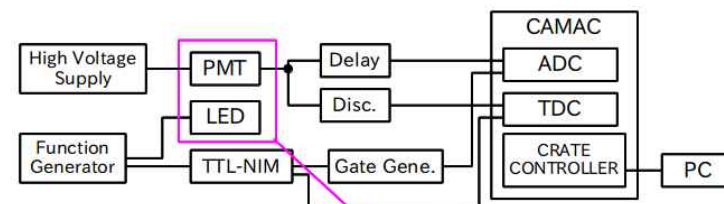
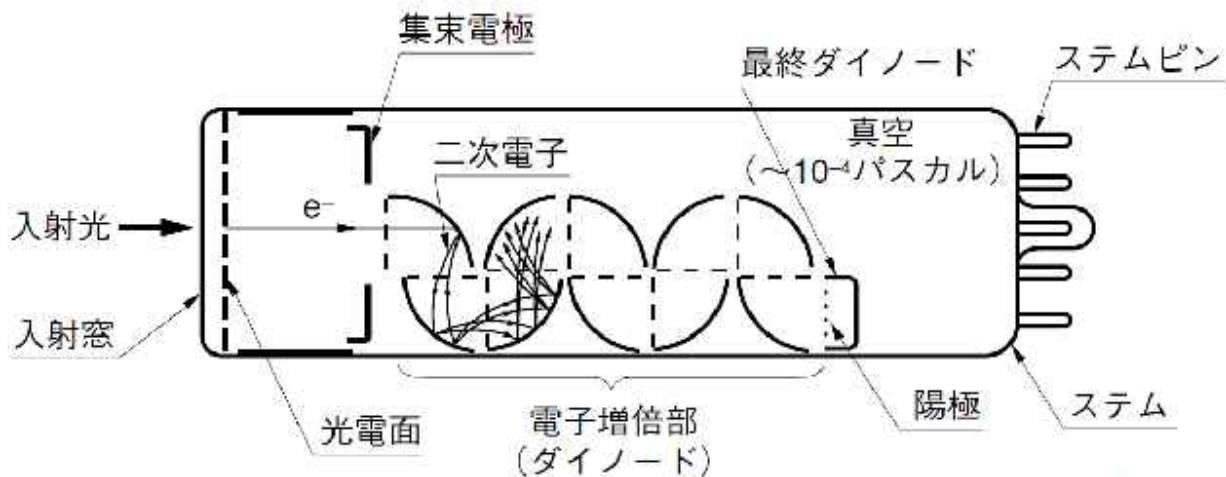
1. ELPHビームテスト: MPPC1次元配列スキャン
- ゲルあり/なしで明らかなチェレンコフ分布確認

Backup

Index

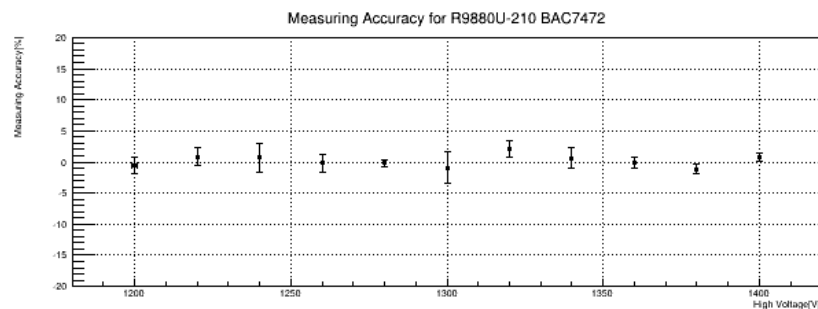
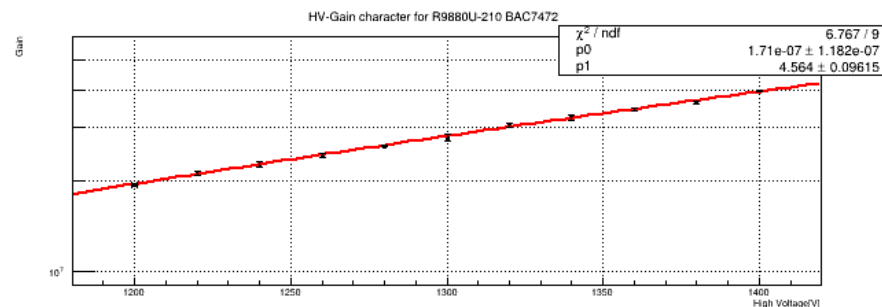
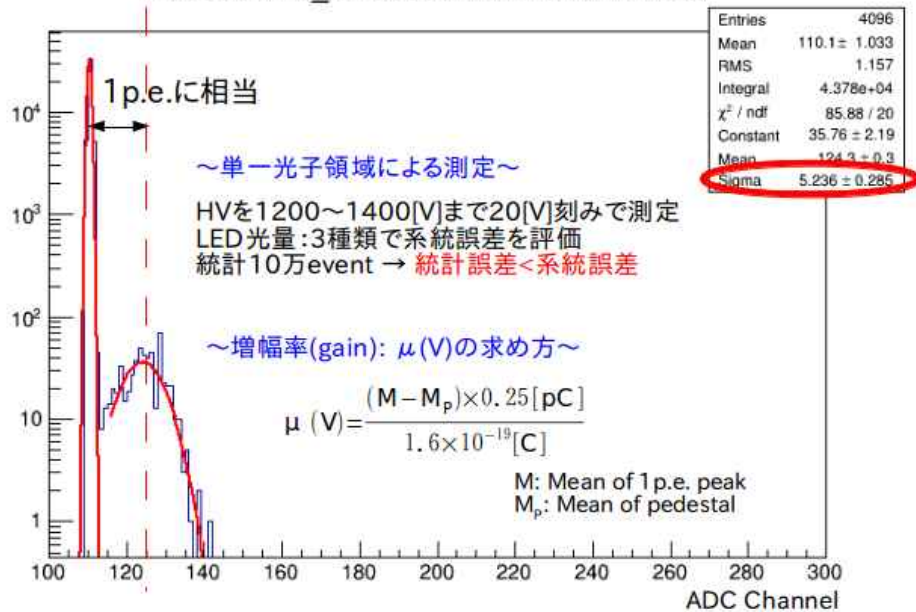
- PMT Calibration
- LEDを用いたWLSF性能評価 Att. Length
- LEDを用いたWLSF性能評価 Bending Loss
- 宇宙線ミューオンのフラックス
- 試作機の性能評価測定
- LEPS/LEPS II
- 1次元スキャン測定:PID評価

光電子増倍管 (PMT) のキャリブレーション

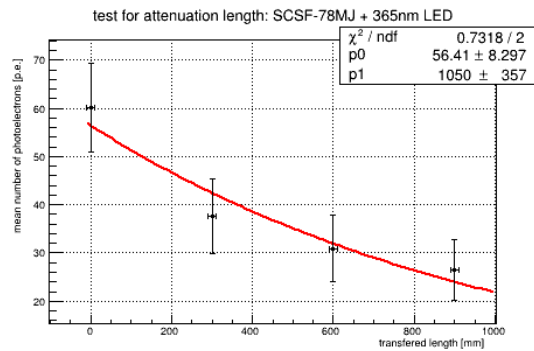
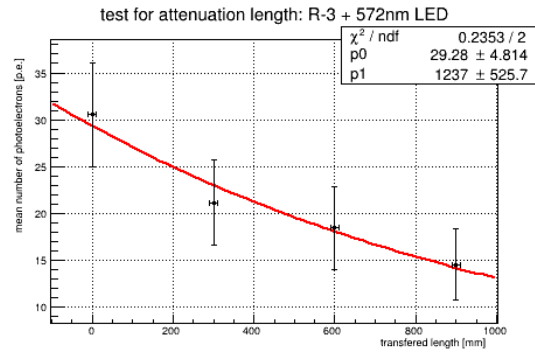
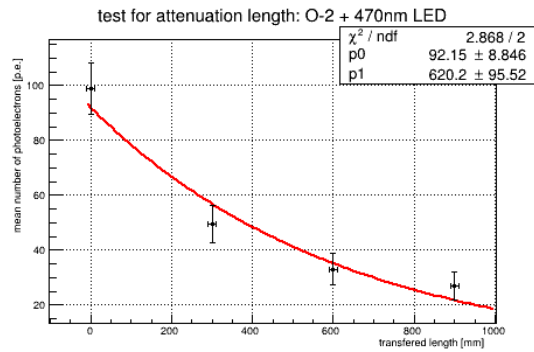
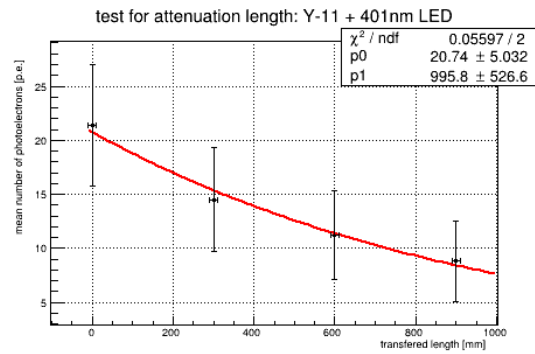
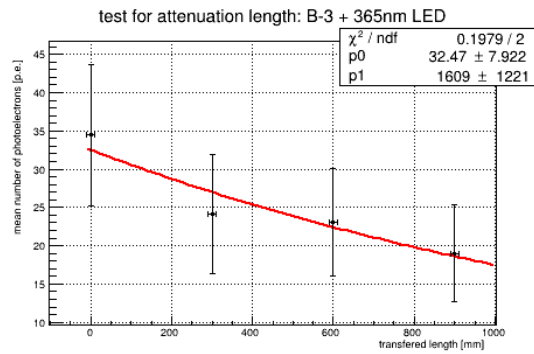


THBV3 0201JA

R9880U-210_BAC0996 hv1240led1.44.dat

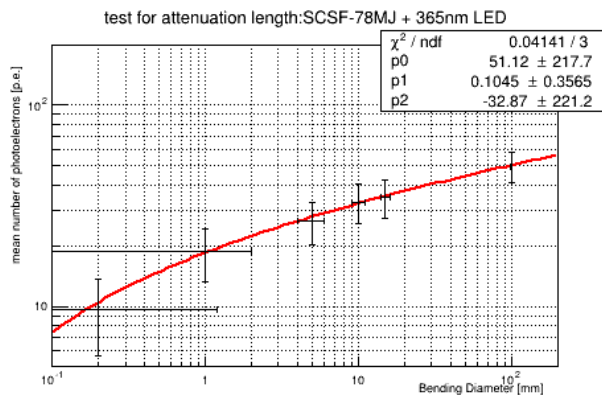
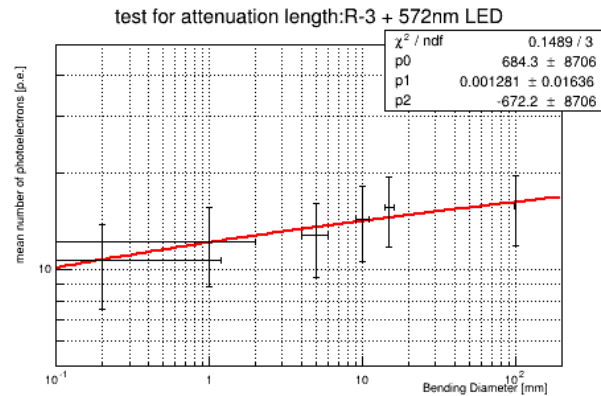
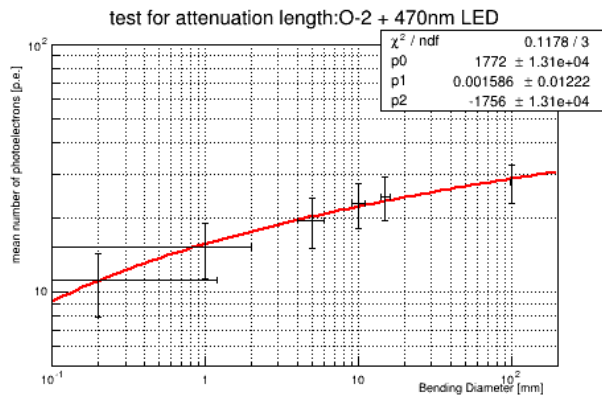
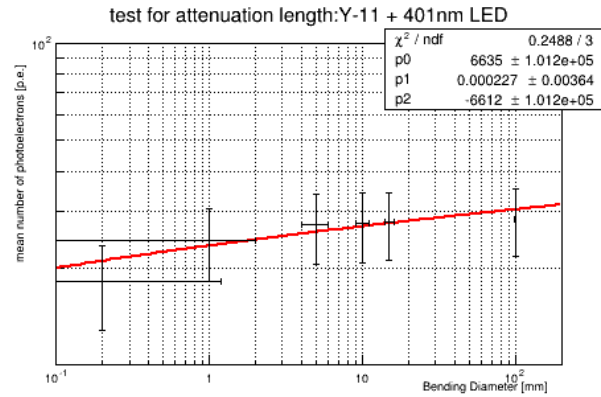
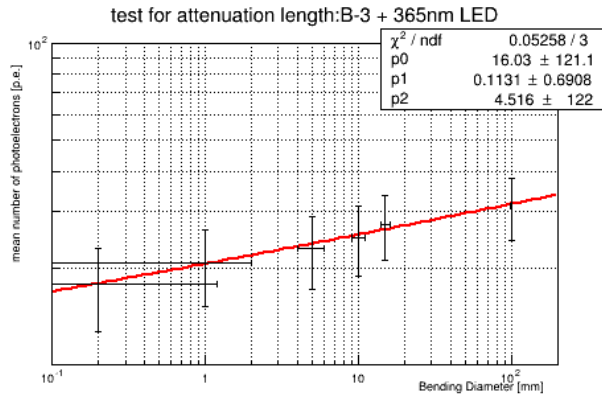


LEDを用いたWLSFシート性質評価測定 Att. Length



fitting Function
 $p0 \cdot \exp(-x/p1)$

LEDを用いたWLSFシート性質評価測定 Bending Loss



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。

- 宇宙線ミュオンのフラックス

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

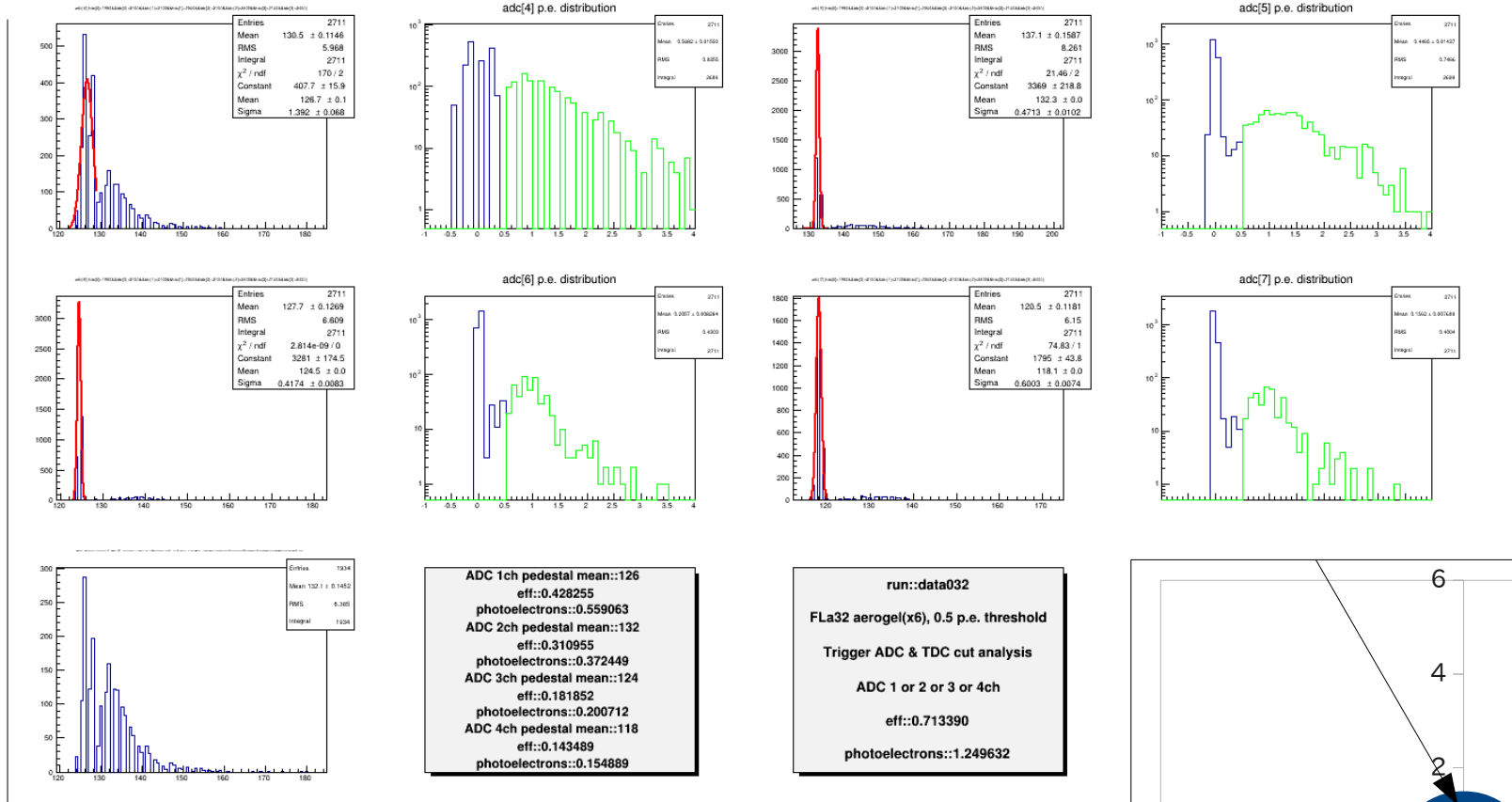
今回の測定では実験室系つまり建物のコンクリートでエネルギー損失および、真鍮による遮蔽で低エネルギー・ミュオンを除去したことが原因であろう。したがって、本測定で検出したミュオンはエアロゲル通過時で高エネルギーで、安定したチェレンコフ放射による光子数の供給を裏付けている。

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

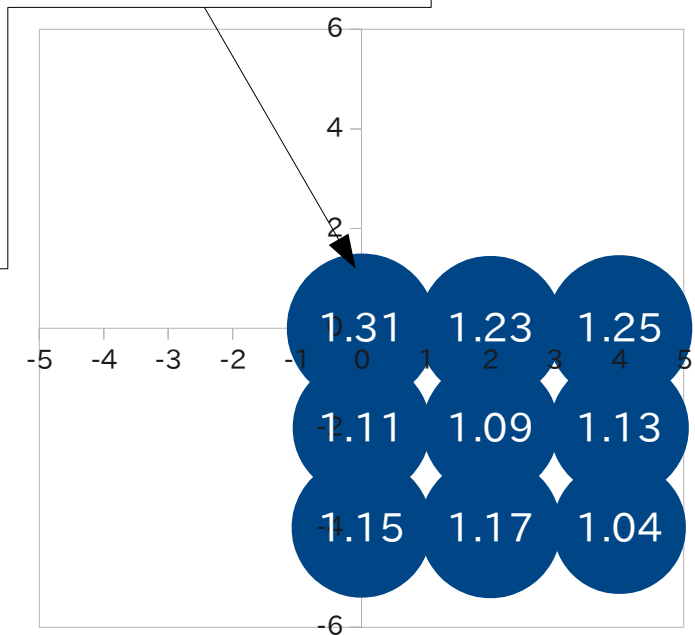
試作機の性能評価測定

真ん中

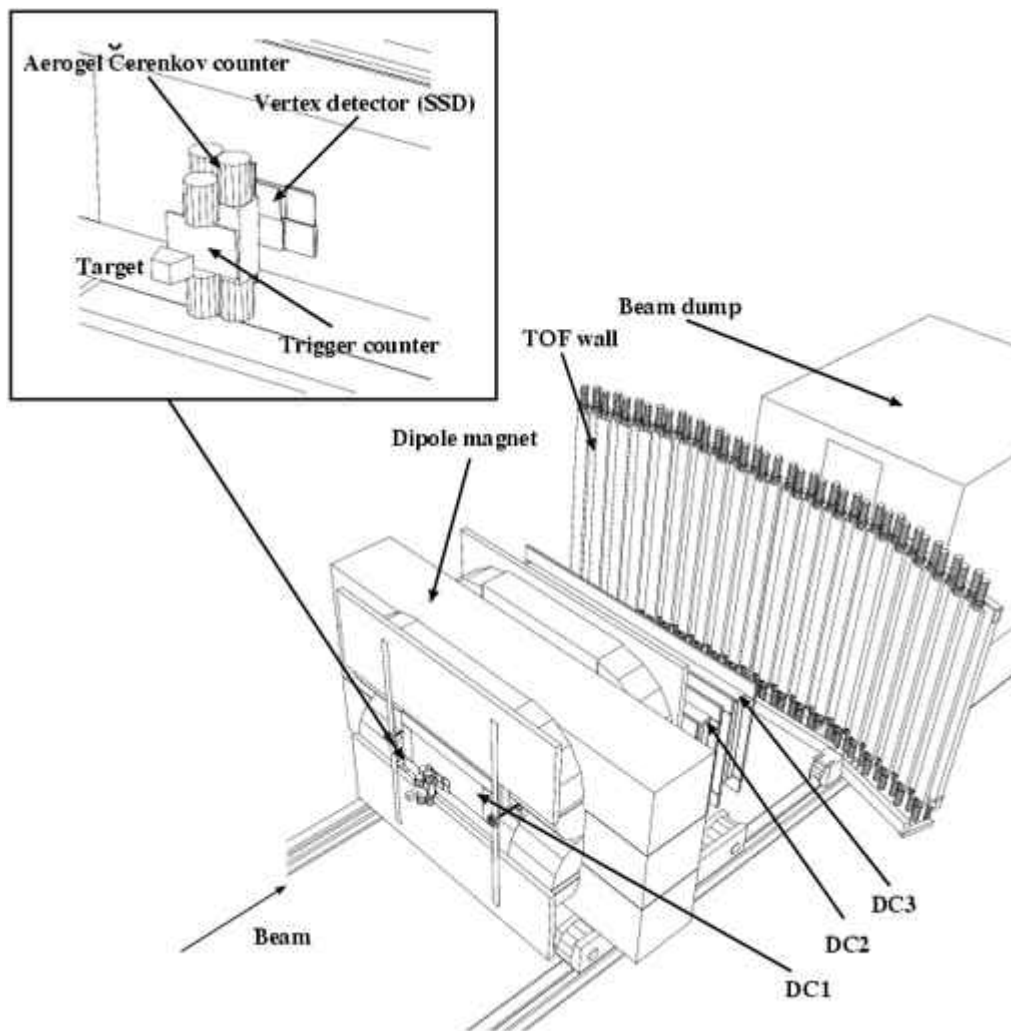


一様性測定
1 - sigma/mean
sigma=stdev

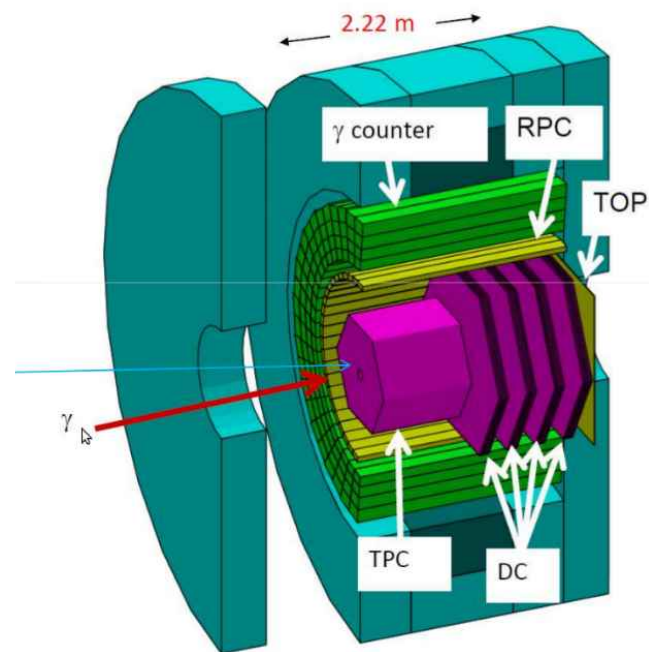
	1.31
	1.23
	1.25
	1.11
	1.09
	1.13
	1.15
	1.17
	1.04
Mean	1.16444444
sigma	0.08530989
uniformity	0.92673769



LEPS/LEPS II



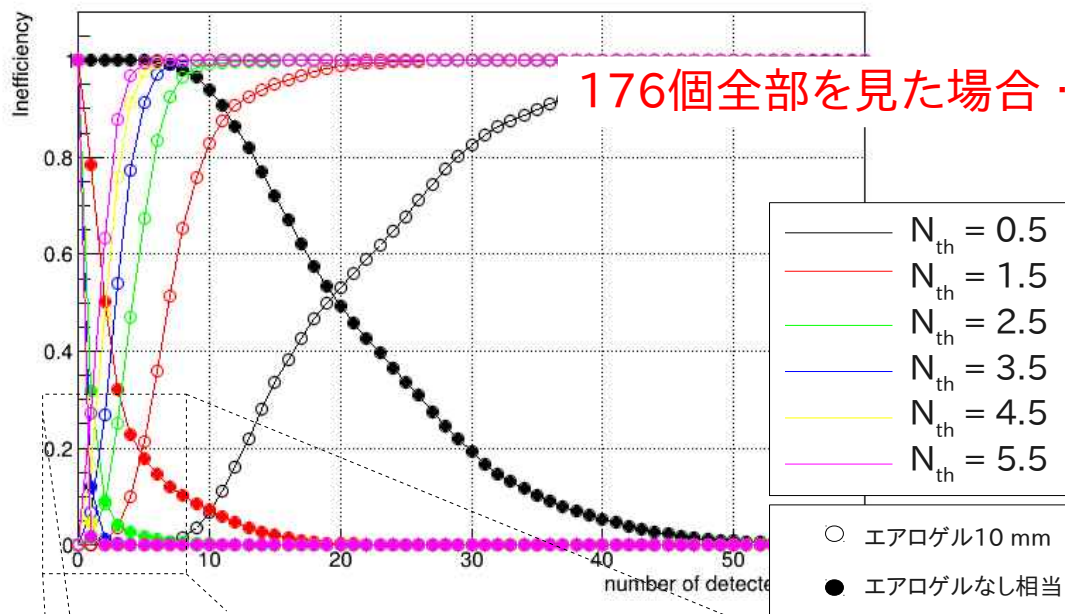
前方角度実験



中後方角度実験

1次元スキャン測定:PID評価

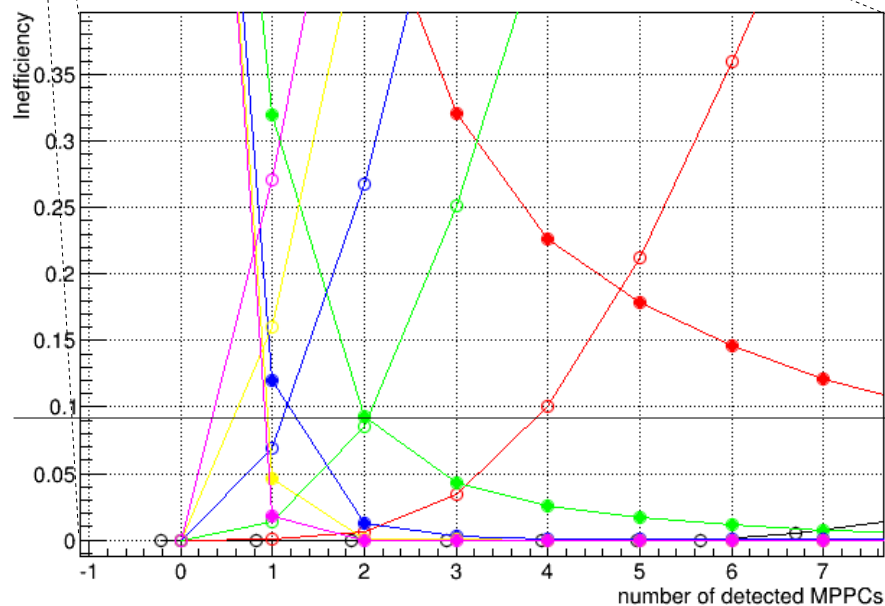
Inefficiency of threshold number of detected MPPCs



MPPCのノイズを考慮して2種類のしきい値を設ける。

- N_{th} : MPPCの検出光子数しきい値
- N_{MPPC} : 検出MPPC数しきい値

Inefficiency of threshold number of detected MPPCs



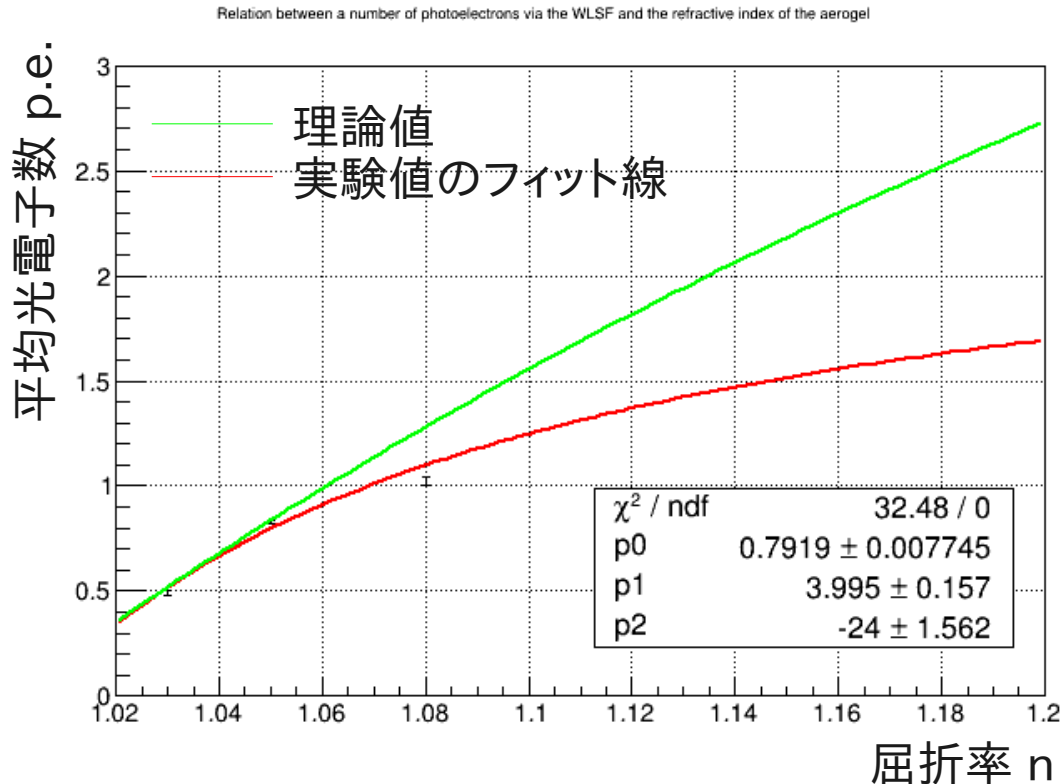
本測定の結果

$$N_{th} = 2.5$$

$$N_{MPPC} = 2$$

誤認識 9% → 91%

東北大ビームテスト エアロゲル屈折率と光電子数



屈折率と光量の関係

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

実験値はn=1.03 - 1.05は一致
n=1.08付近からは不一致

[考察]波長変換ファイバーを経由すると、
直接読みだす場合と性質が異なる？

使用したシリカエアロゲル

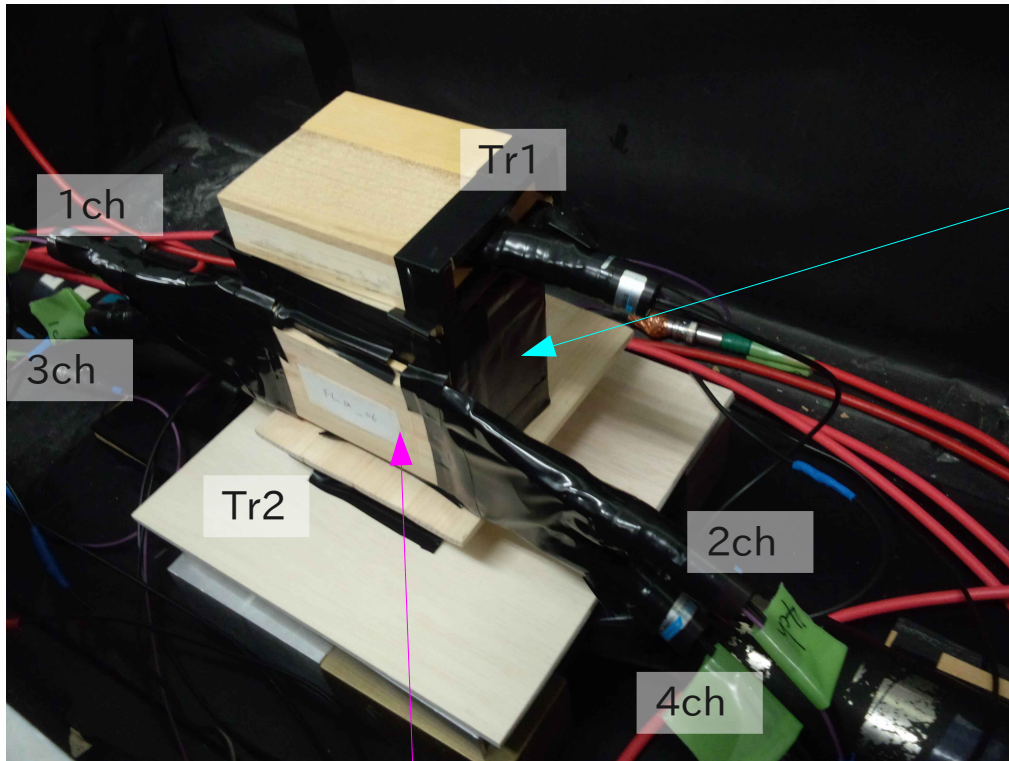
厚さ 30 mm
屈折率 1.03, 1.05, 1.08
透過長 35 - 40 mm @405 nm

フィッティング関数

$$F(n) = p0 * \frac{1 - 1/((n\beta + p1)^2 + p2)}{1 - 1/((1.05 * \beta + p1)^2 + p2)}$$

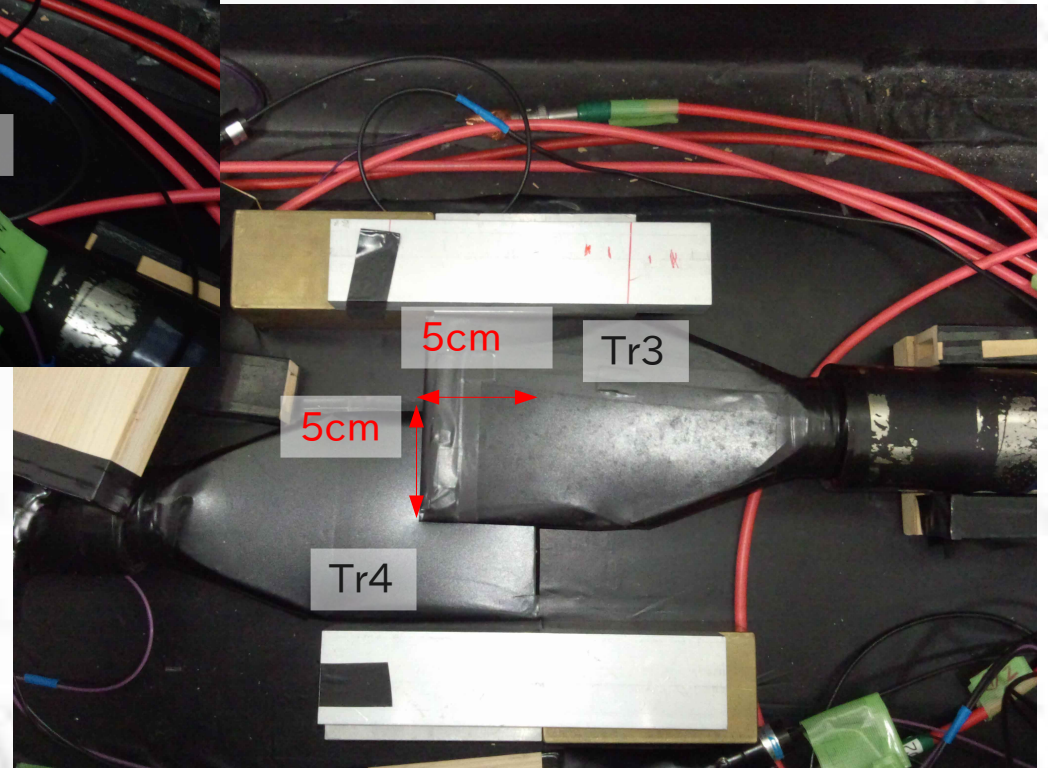
Primary test of fiber light guide

1. Cosmic ray test



Silica Aerogel

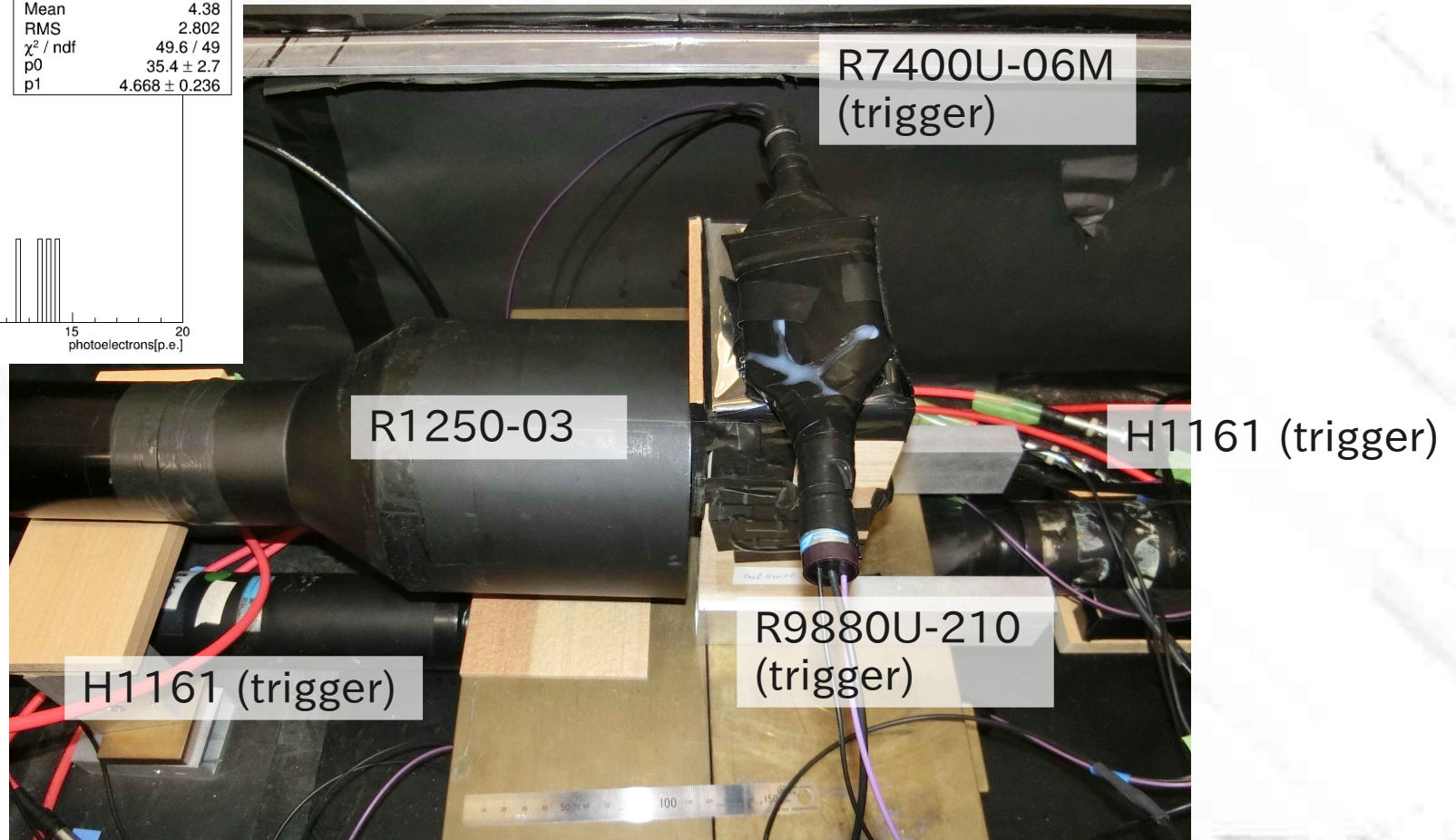
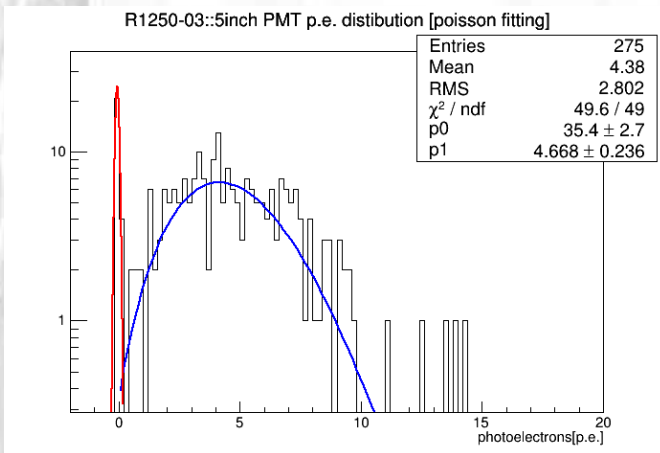
WLSF Light Guide

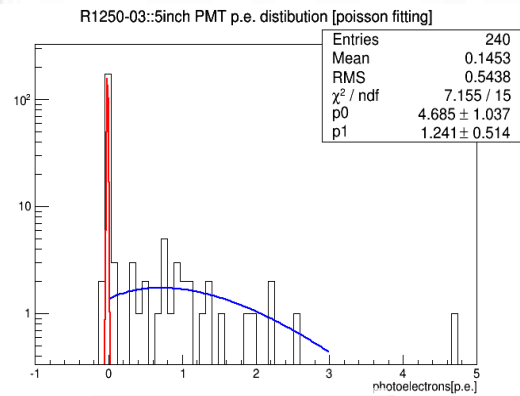


Primary test of fiber light guide

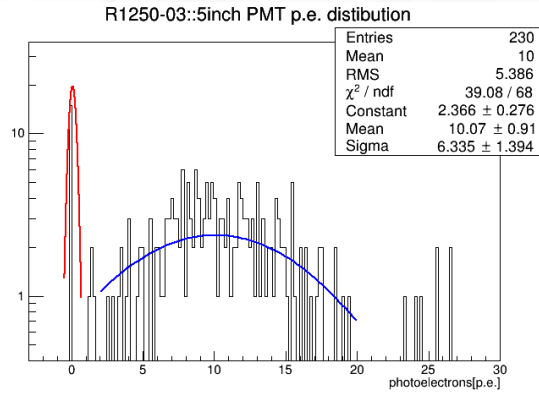
1. Cosmic ray test

PMT direct reading Cherenkov test

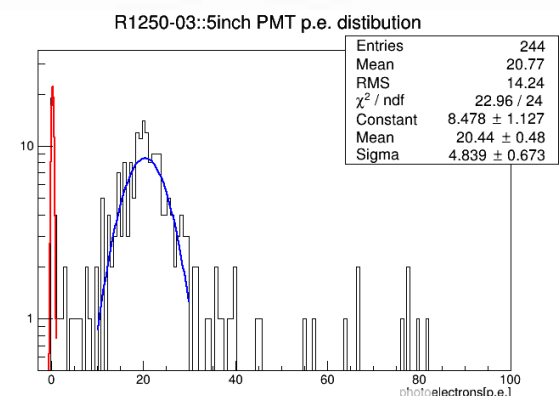




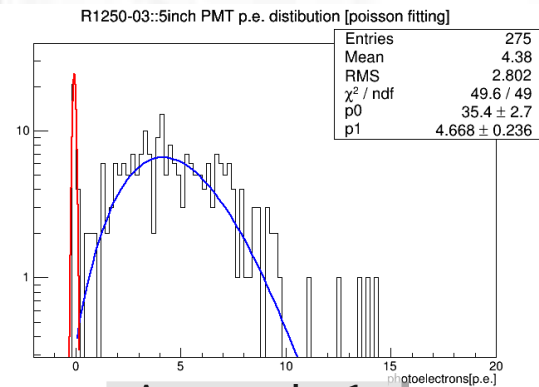
Aerogel x0



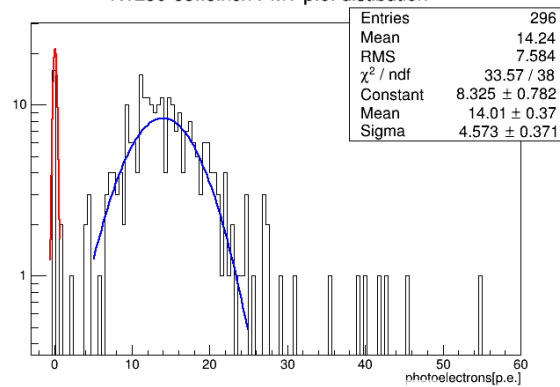
Aerogel x3



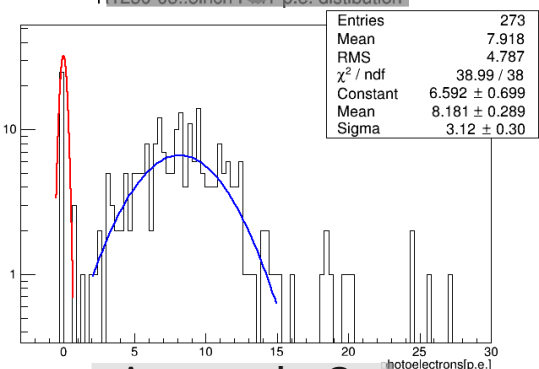
Aerogel x6



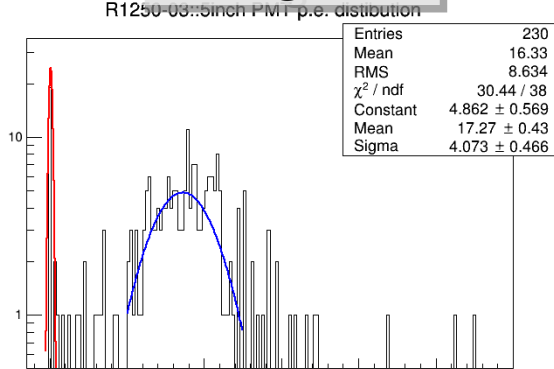
Aerogel x1



Aerogel x4



Aerogel x2



Aerogel x5

