卒業論文
Water Cherenkov Counterの性能について

松村 彰彦

平成 14 年 4 月 1 日

目 次

1 目的 **1**

2 原理 **1**
2.1 チェレンコフ光 1
2.2 発光数 1

3 Counter **3**
3.1 外観 3
3.2 Reflector 4
3.3 Water 4

4 KEK での実験 **4**
4.1 セットアップ 4
4.2 回路 5

5 解析 **6**
5.1 計算値との比較 7
5.2 反射材の比較 (Water:Pure Water) 8
5.3 Water の比較 (反射材:Gore-Tex) 10
5.4 Water の比較 (反射材:Titaniumdioxide) 12
5.5 Size の比較 14
5.6 運動量依存性 16
5.7 角度依存性 17

6 考察 **26**

7 まとめ **27**

Appendix A HYCS **28**

Appendix B Particle ID **29**

図目次

1 粒子の運動量と得られる光電子数の関係 2
2 Water Cherenkov Counter 3
3 セットアップ図 4
4 回路図 5
5 Gore-Tex;Pure Water の ADC 7
6 反射材の比較 1 8
7 反射材の比較 2 9
8 Water の比較 1(反射材:Gore-tex) 10
9 Water の比較 2(反射材:Gore-tex) 11
10 Water の比較 1(反射材:Titaniumdioxide) 12
11 Water の比較 2(反射材:Titaniumdioxide) 13
12 Size の比較 1 14
13 Size の比較 2 15
14 運動量の比較 16
15 左:横から見た図 (vertical) 右:上から見た図 (horizontal) 17
16 角度依存性 1 18
17 角度依存性 2 19
18 角度依存性 3 20
19 角度依存性 4 21
20 角度依存性 5 22
21 角度依存性 6 23
22 角度依存性 7 24
23 角度依存性 8 25
24 Particle ID 29

1　目的

(e,e'K)反応を用いたハイパー核生成実験 (Jlab E01-011)において、HKS側では K^+を測定する。しかし実際は K^+よりも π^+、Pが多くなるため、K^+のデータが十分にとれない。そこで、トリガーレベルで粒子を識別するために Cherenkov Counterを用いる。Pと K^+を分離する候補として Lucite Cherenkov Counterと Water Cherenkov Counterがあるが、この論文では Water Cherenkov Counterの性能について調べる。

2　原理

2.1　チェレンコフ光

チェレンコフ光は荷電粒子が屈折率 n の物質中をその中での光の速度（c/n) よりも速い速度、すなわち v>c/n で通過する場合に発する光である。チェレンコフ光は非常に弱く、また、荷電粒子が失うエネルギーは一般的には電離損失や放射損失に比べてはるかに小さくなる。

チェレンコフ光は荷電粒子の進行方向に対し角度 θ_c($\cos(\theta_c)$=1/βn) の方向に生じる (チェレンコフ角)。その時検出できる光電子の数 $N_{p.e}$は

$$N_{p.e} = L\frac{\alpha^2 z^2}{r_e m_e c^2}\int \epsilon_{coll}(E)\epsilon_{det}(E)\sin^2\theta_c(E)dE \tag{1}$$

となる。ただし、L：radiatorの長さ、α:微細構造定数、ϵ_{coll} :チェレンコフ光が PMTに到達する確率、ϵ_{det}:量子効率、である。

2.2　発光数

式 (1) を用いて、横軸運動量として 1cmあたりどのくらいの光電子が得られるか求めたグラフが次の図 1 である。

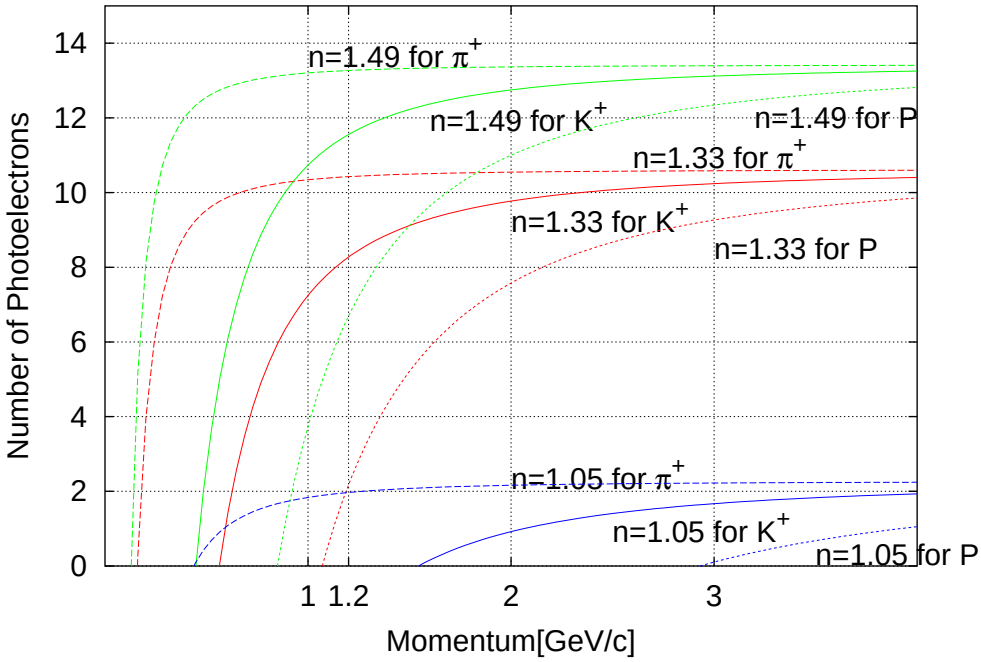

図 1: 粒子の運動量と得られる光電子数の関係

ここでは ϵ_{coll}〜33%、$\int \epsilon_{det}$dE〜0.27とした。ϵ_{coll}の値はシミュレーション (HYCS)で得られた値である。Jlabでの実験は磁場をかけて 1.2GeV/cの運動量をもった粒子を持ってくる。Water Cherenkov Counter(n=1.33)を見ると、π^+、K^+、Pのいずれも光ると考えられる。

今回作った検出器 (厚さ 8.5cm と 3.0cm)でどのくらいの光電子が得られるか計算すると次のようになる。(WLSなしの場合)

Thickness[cm]	$N_{p.e}$(P)	$N_{p.e}(K^+)$	$N_{p.e}(\pi^+)$
8.5	18.53	70.38	88.655
3.0	6.54	24.84	31.29

表 1: 予想される Number of photoelectros

3 Counter

3.1 外観

Water Cherenkov Counterはアクリル板、塩化ビニル板で作った。大きさは Large、Small の二種類を用意した。また、PMT は H7195MOD を使用している。

segment	size[cm]	PMT
Large	35×11×8.5	H7195MOD
Small	35×11×3	H7195MOD

表 2: Water Cherenkov Counter

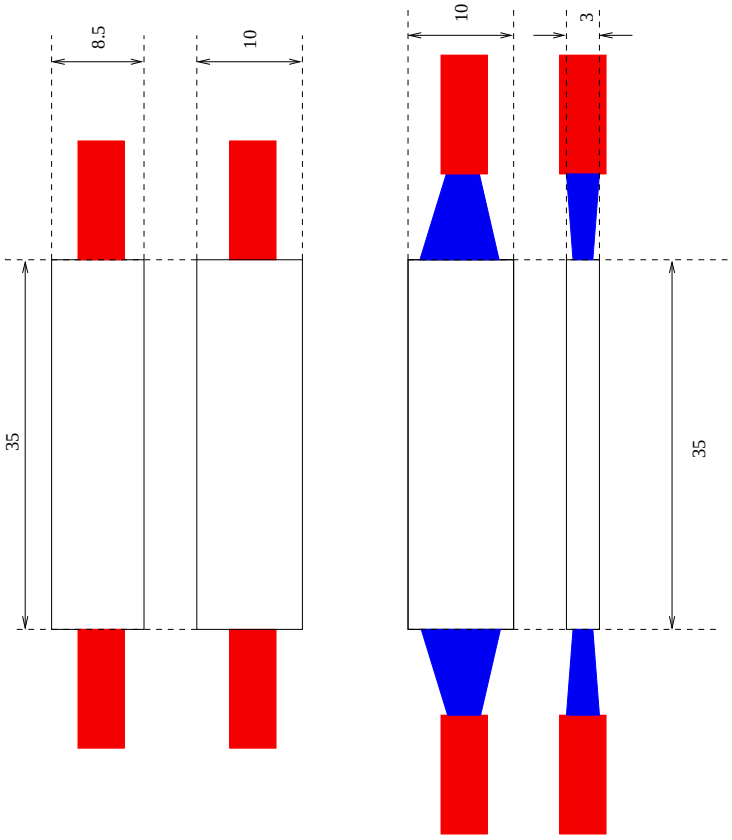

図 2: Water Cherenkov Counter

3.2 Reflector

検出器の内壁には光の反射率を高くするために Gore-Tex(紙のようなもの）, Millipore（紙のようなもの),Titaniumdioxide（ペンキ）の３種類でコーティングしてある。

3.3 Water

検出器の中に入れる液体は、超純水（18.3MΩ·cm)と超純水に Wave Length Shifter を溶かしたもの（Amino-G-Salt, Umbelliferone)の３種類を準備した。Wave Length Shifter によって PMT が感知できない波長を感知できる波長（300〜650nm)にシフトするので測定される光電子の数が増えることになる。

4 KEKでの実験

4.1 セットアップ

KEK の T1ビームラインで行なった実験のセットアップは下図のようになっている。

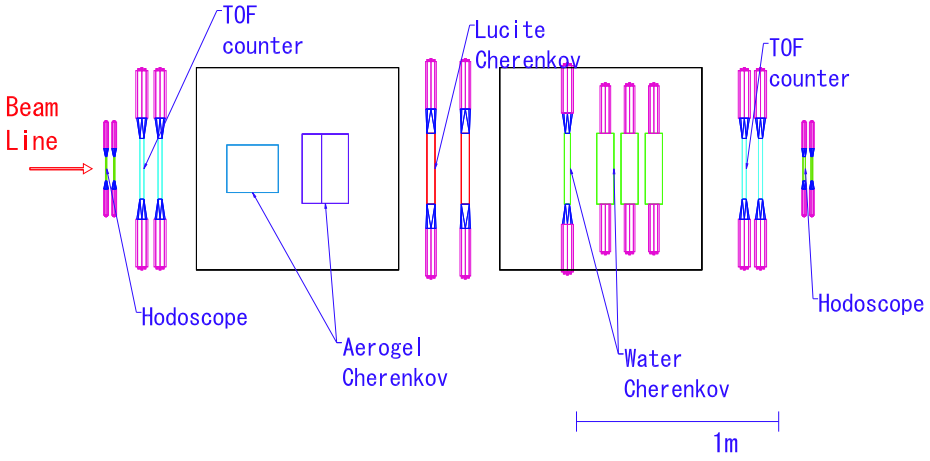

図 3: セットアップ図

4.2 回路

主な回路は下の図のようになっている。ここではトリガーと Water cherenkov counter の回路についてのみ記した。ただし Water cherenkov counter は途中で ADC のデータが大き過ぎたため、attenuator を使用した。

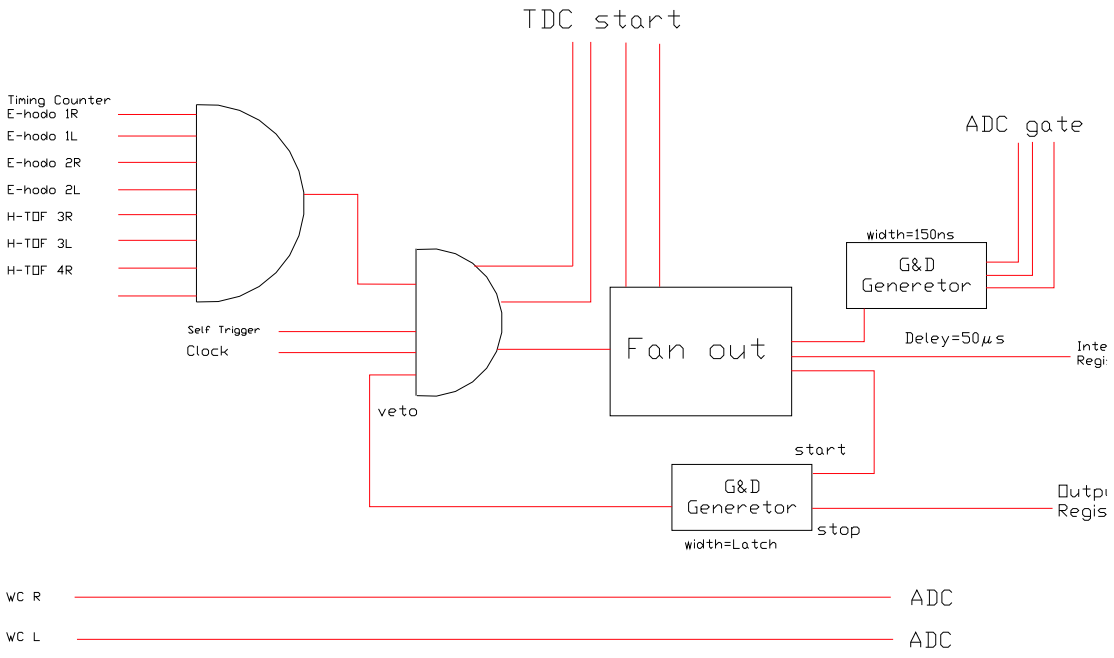

図 4: 回路図

トリガーは engeTOF1、2と HKSTOF3、4のコインシデンスでとっている。

5 解析

解析は P と K^+ がどれくらい分離できているかを調べる。最終的にはある Threshold を決定し、そこで P が何%cut できているか、また K^+ をどのくらい殺してしまうのかを調べる。Threshold を決定しやすくするために、横軸は単位を光電子数にしておく。これはそれぞれの PMT をセルフトリガーにして 1 photoelectron peak を調べ、pedestal との差を 1 photoelectron としている。

$$\texttt{Number of photoelectrons} = \frac{\texttt{ADC-pedestal}}{\texttt{1 photoelectron peak-pedestal}}$$

Particle ID は基本的には enge1 と HKS4 の TOF で行なった。しかし setup8 以前は enge の TDC が死んでいる run があったので、その場合は HKS1 と HKS4 といったように正常にデータがとれている組合せで行なった。

解析で使う主な図は以下の通りである。

1. 横軸を光電子数にした ADC のグラフ
2. 1. のグラフを K^+ の peak=1 となるよう normalize したグラフ
3. 効率 (efficiency) を求めたグラフ
4. 3. の図を比較した図

efficiency とは、ある Threshold を決定したときに何%の K^+ あるいは P が生き残っているかを調べたグラフであり、横軸 Treshold, 縦軸%になっている。%は

$$\texttt{efficiency}(\%) = \frac{\text{生き残ってる粒子数}}{\text{全粒子数}}$$

のようにしてそれぞれの粒子に対して求めた。

また 4. の図は efficiency が 50%のときの Threshold の値をそれぞれの粒子について読みとり、2 つの図で比較している。ひとつはそれぞれの値から K^+ の値を引いてどのくらい離れているか比較したもの (K^+=0 となる)。もうひとつはそれぞれの値を K^+ で割って normalize したもの (K^+=1 となる) である。

5.1 計算値との比較

Gore-Tex;Pure Water の図はつぎのようになった、

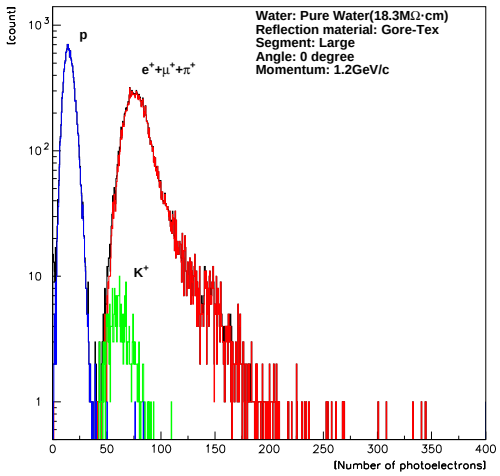

図 5: Gore-Tex;Pure Water の ADC

先に求めた計算値とこの図から得られる光電子数を比べると次のようになる。

Thickness[cm]	$N_{p.e}$(P)	$N_{p.e}(K^+)$	$N_{p.e}(\pi^+)$
8.5	18.53	70.38	88.655
EXP.	15.22	61.48	78.0
3.0	6.54	24.84	31.29
EXP.	2.167	13.46	18.25

表 3: 計算値と実験結果

5.2 反射材の比較 (Water:Pure Water)

上段:Gore-Tex, 中段:Millipore, 下段:Titaniumdioxide

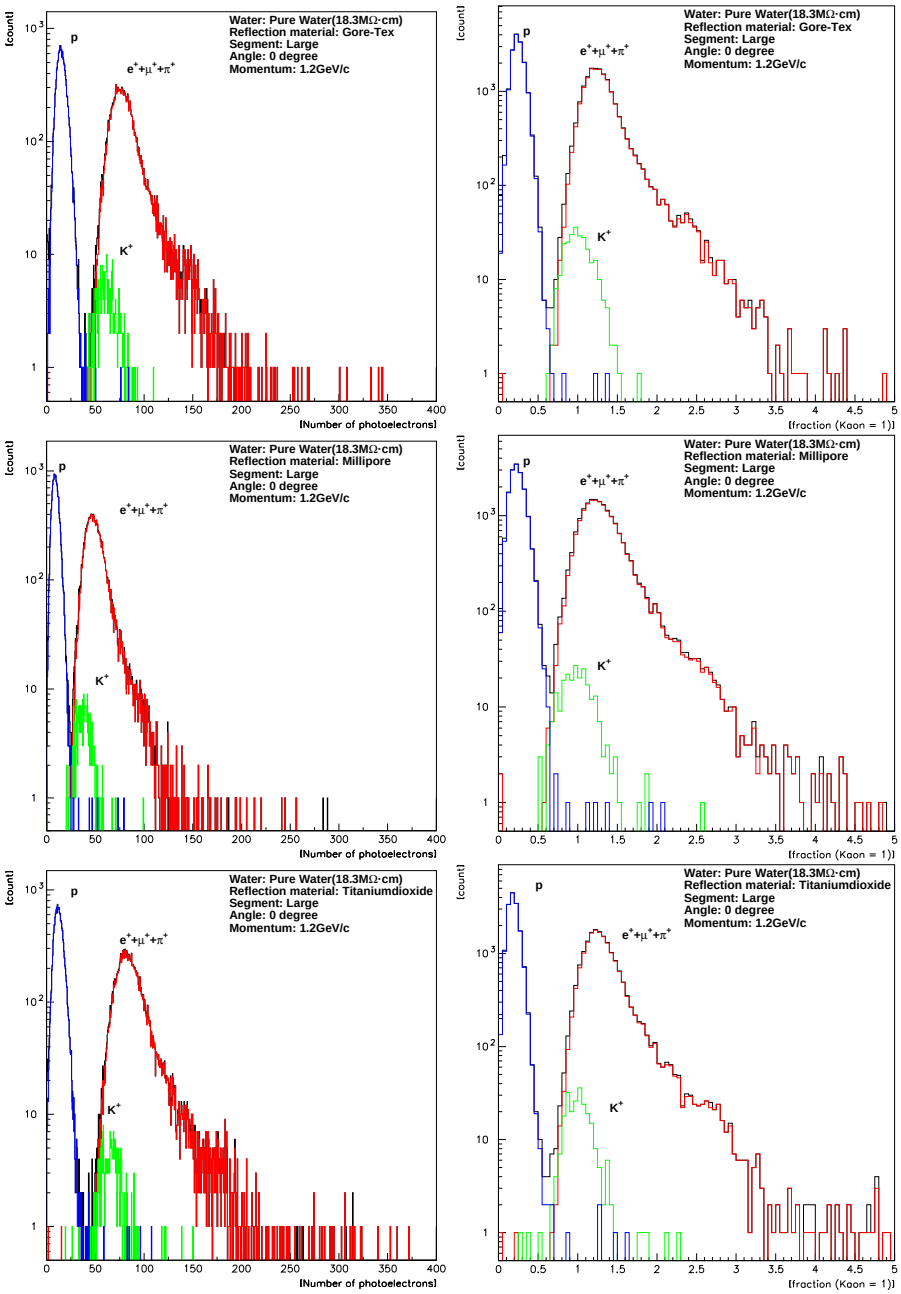

図 6: 反射材の比較 1

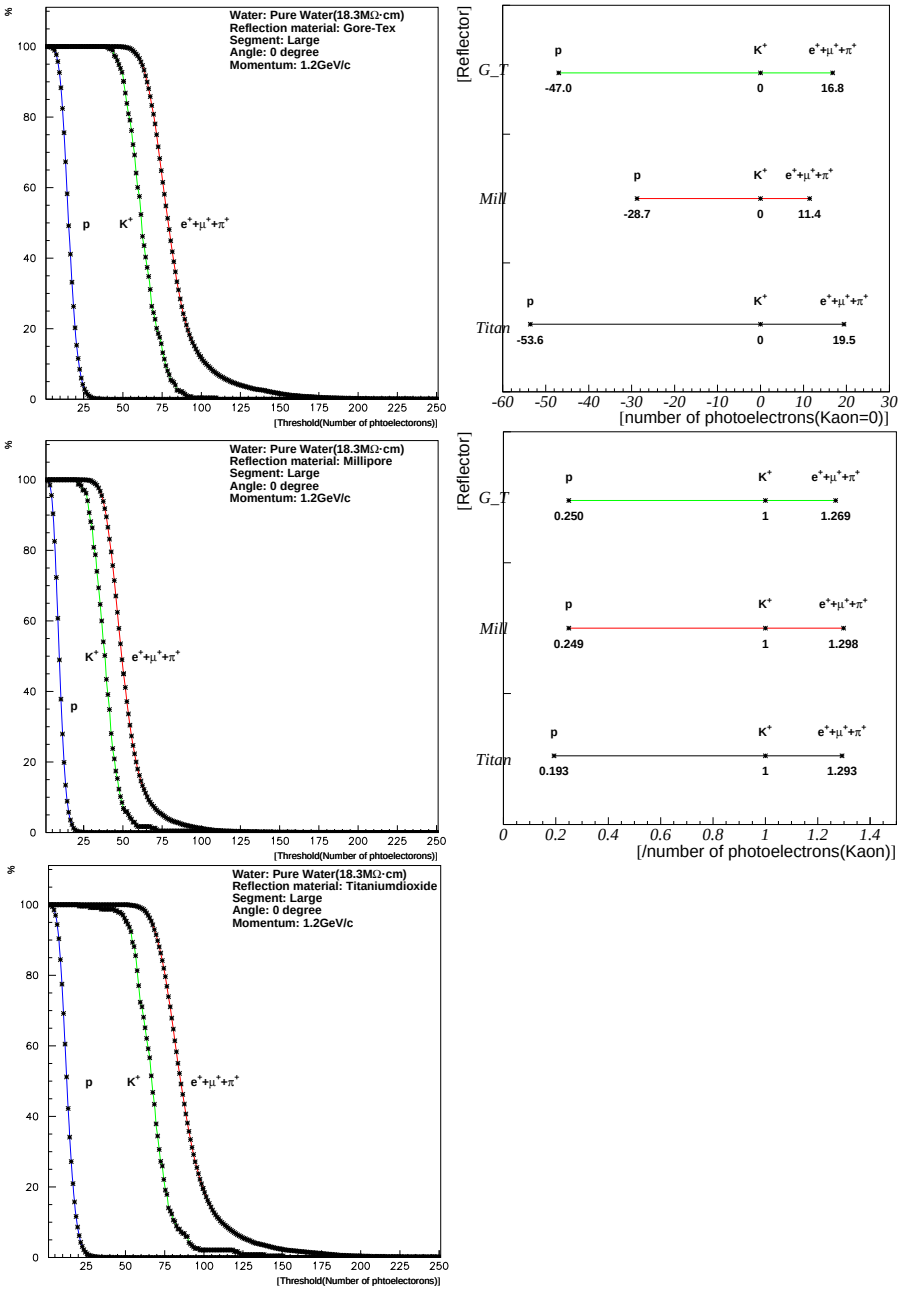
Water: Pure Water(18.3MΩ·cm)
Reflection material: Gore-Tex
Segment: Large
Angle: 0 degree
Momentum: 1.2GeV/c
%
p
K+
e++μ++π+
[Threshold(Number of phtoelectorons)]
[Reflector]
G_T
Mill
Titan
-47.0
0
16.8
-28.7
0
11.4
-53.6
0
19.5
[number of photoelectrons(Kaon=0)]
Water: Pure Water(18.3MΩ·cm)
Reflection material: Millipore
Segment: Large
Angle: 0 degree
Momentum: 1.2GeV/c
0.250
1
1.269
0.249
1
1.298
0.193
1
1.293
[/number of photoelectrons(Kaon)]
Water: Pure Water(18.3MΩ·cm)
Reflection material: Titaniumdioxide
Segment: Large
Angle: 0 degree
Momentum: 1.2GeV/c
[Threshold(Number of phtoelectorons)]

図 7: 反射材の比較 2

5.3 Water の比較 (反射材:Gore-Tex)

上段:Pure Water, 中段:Amino-G-Salt, 下段:Umbelliferone

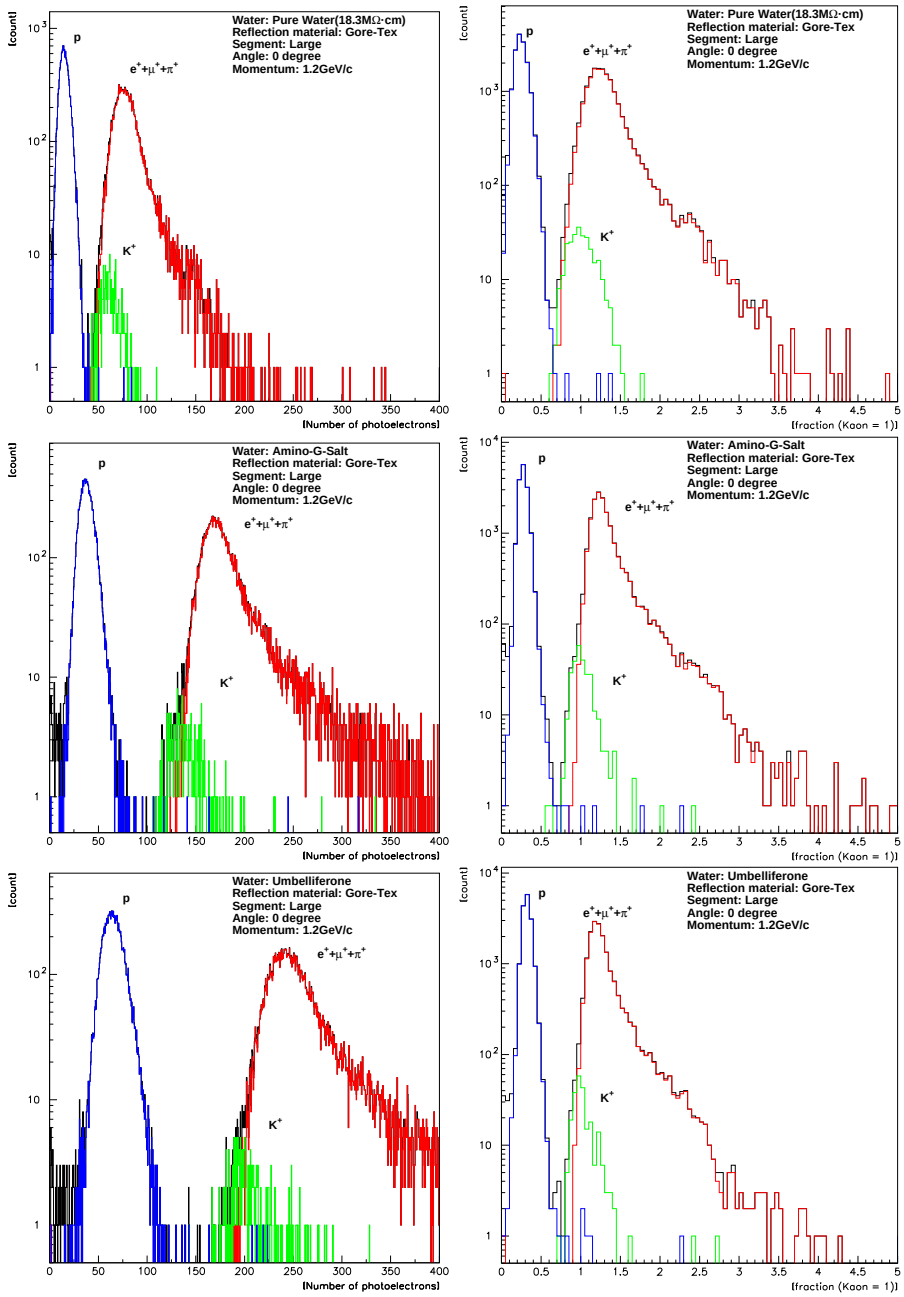

図 8: Water の比較 1(反射材:Gore-tex)

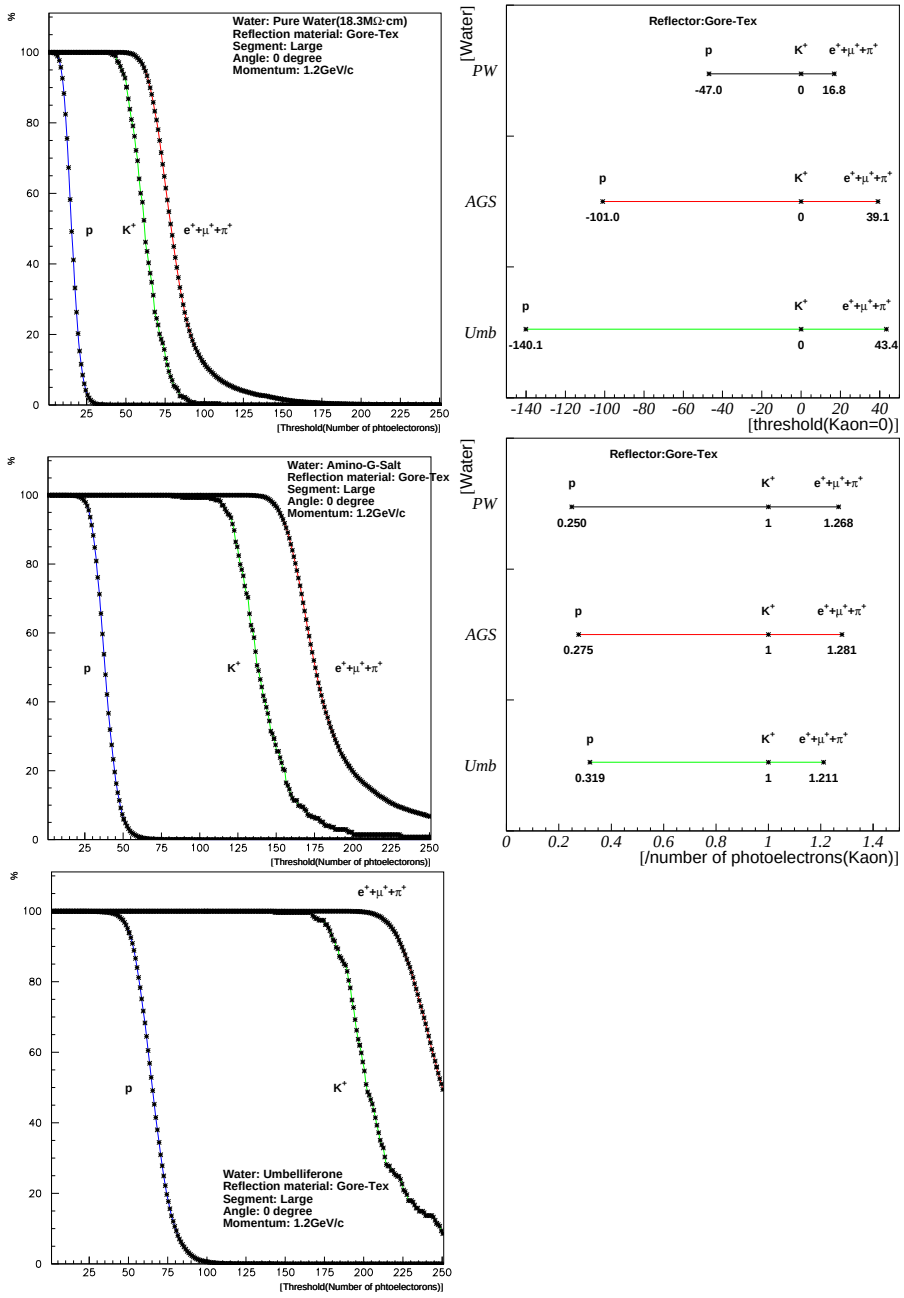

図 9: Water の比較 2(反射材:Gore-tex)

5.4 Water の比較 (反射材:Titaniumdioxide)

上段:Pure Water, 中段:Amino-G-Salt, 下段:Umbelliferone

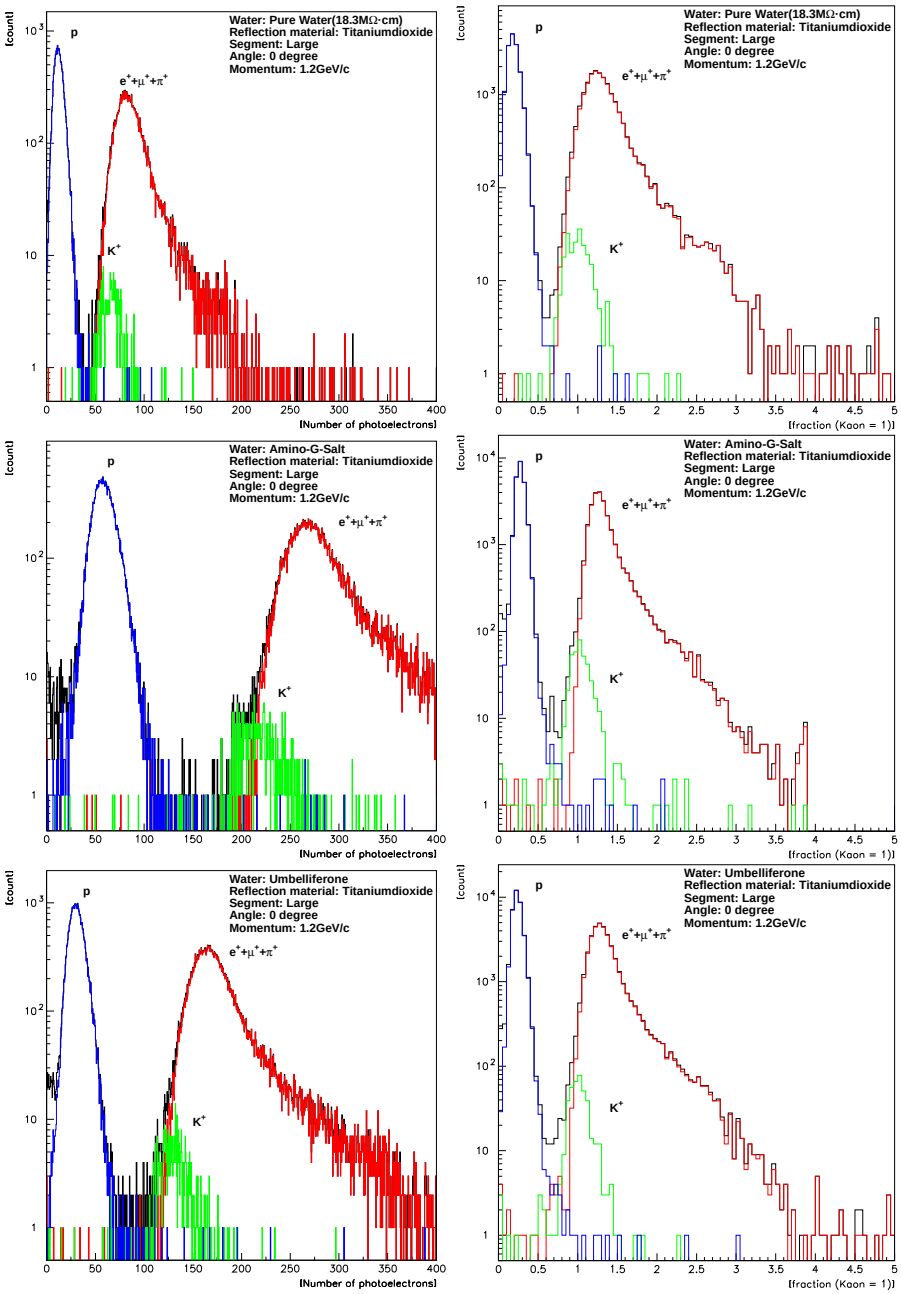

図 10: Water の比較 1(反射材:Titaniumdioxide)

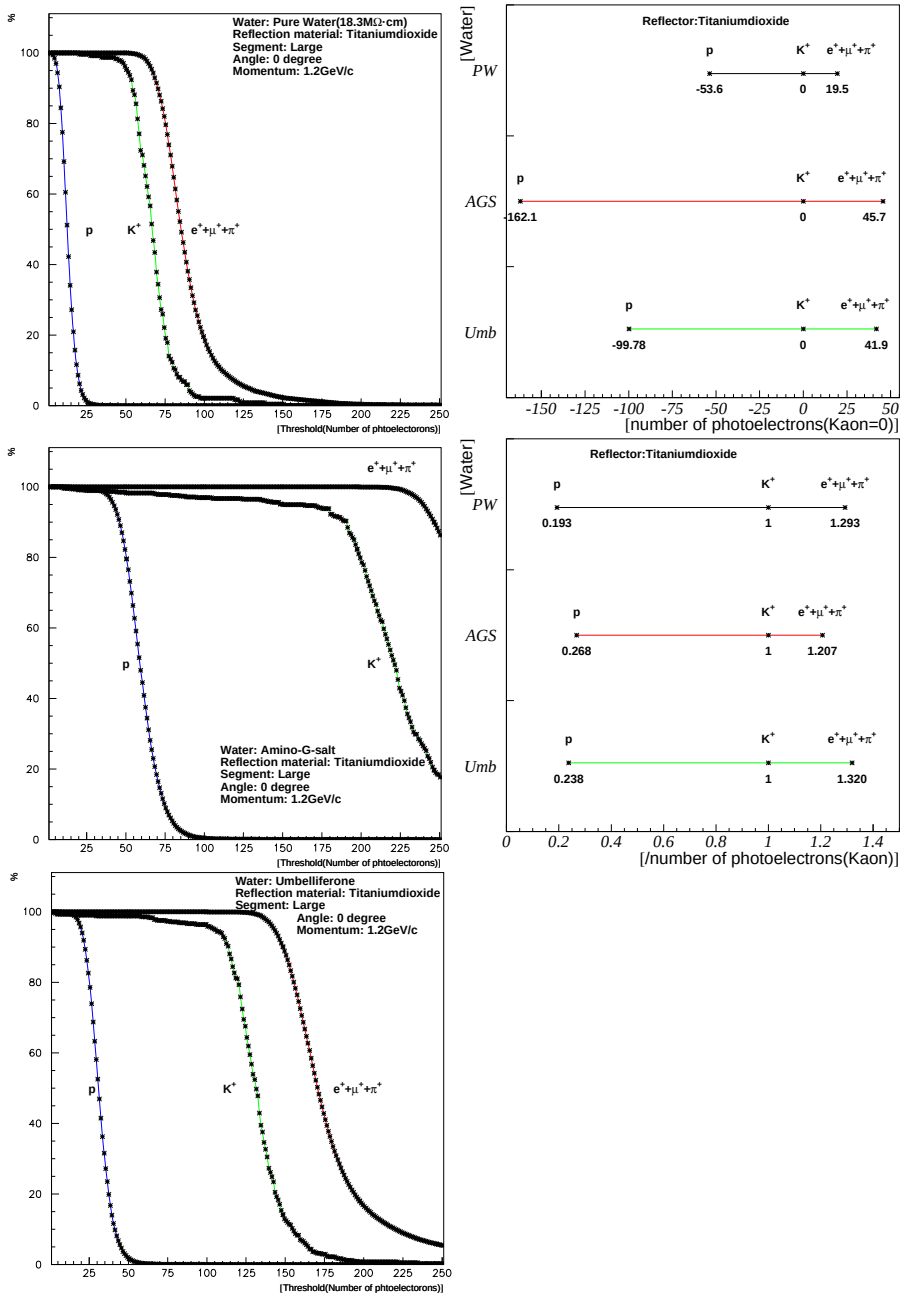

図 11: Waterの比較 2(反射材:Titaniumdioxide)

5.5 Size の比較

上段:3.0cm, 下段:8.5cm
共に反射材:Gore-Tex,Water:Pure Water

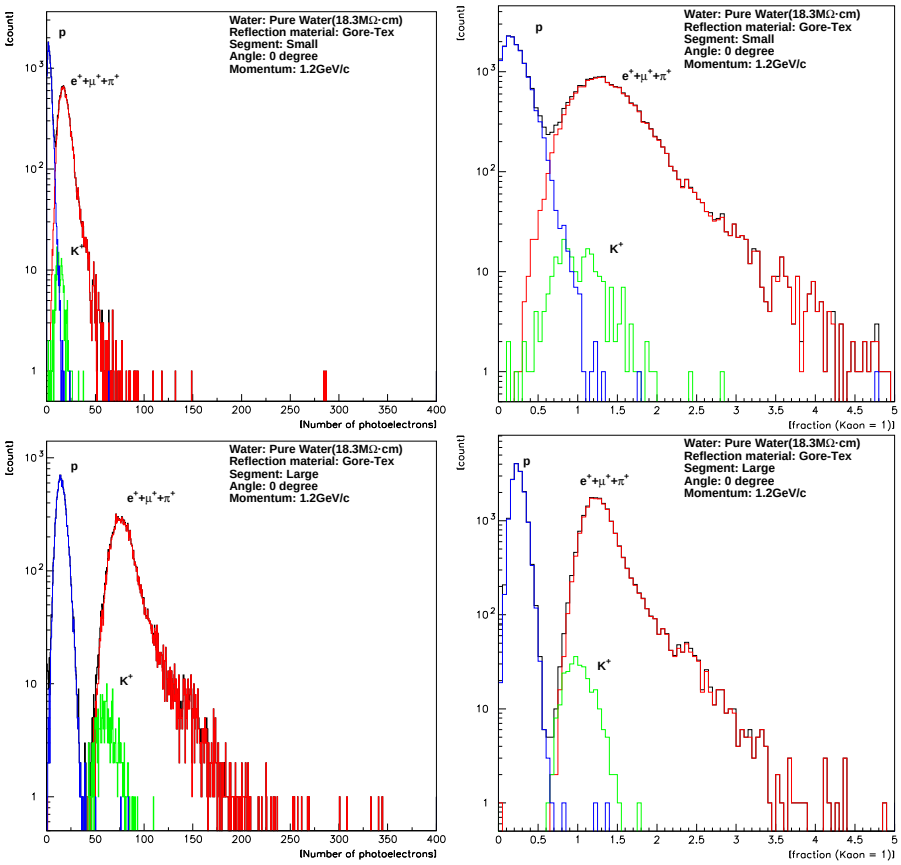

図 12: Size の比較 1

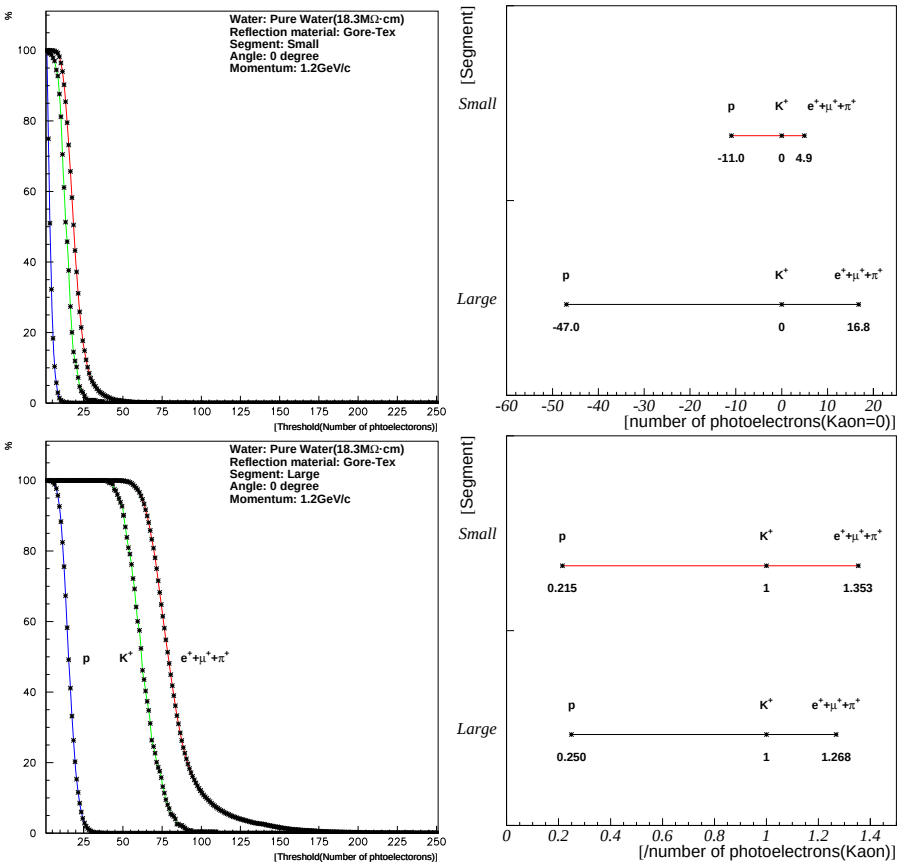

図 13: Sizeの比較 2

5.6 運動量依存性

上段:1.35GeV/c, 中段:1.2GeV/c, 下段:1.05GeV/c

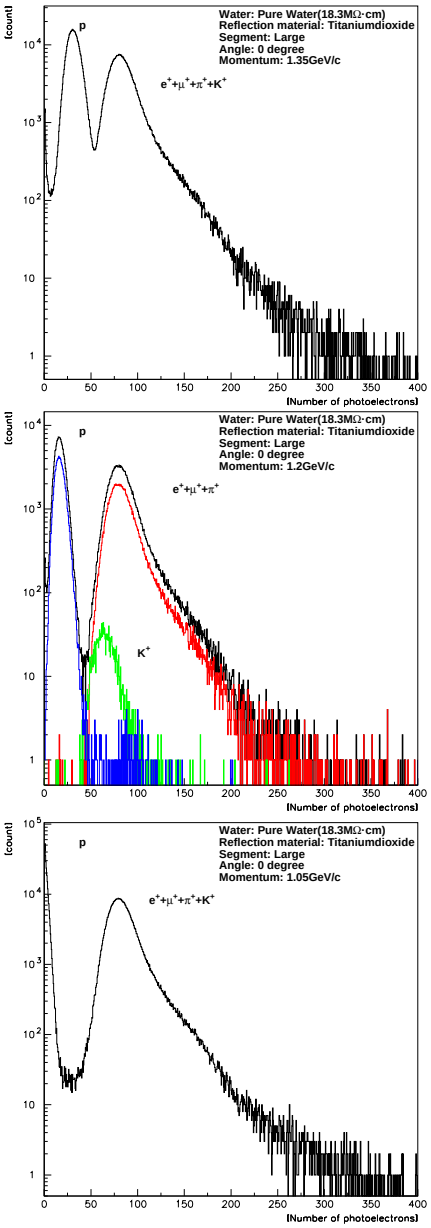

図 14: 運動量の比較

5.7 角度依存性

角度依存性についてはBeamに対して垂直方向(vertical)に傾けた場合と水平方向(horizontal)に傾けた場合の二通りを各粒子について調べた。
横軸は角度（degree)、縦軸は光電子数のグラフになっている。ただし縦軸は角度0度のときを1とした割合で表している。また、PMTはBEAM上流から見て左（LEFT)、右（RIGHT)、合計（SUM:左＋右）の三種類について調べ、3つを同時に表示したものと個別に表示したもの計4つのグラフがある。グラフ中の誤差つきの点が実験値で直線がひかれているのはシミュレーション（HYCS）で得られた値である。

パラメータの異なるシミュレーション結果を2種類用意した。変えたパラメータは反射の取り扱い方であり、一方はSEMIRANDOM型でもう一方はRANDOM型である。前者は入射角が多少反射角に影響を与え、後者はまったく影響を与えないようになっている。この2種類のシミュレーション結果と実験結果を比較してみる。

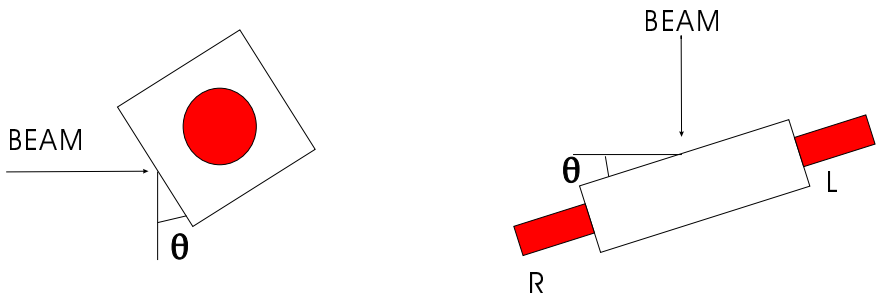

図 15: 左:横から見た図 (vertical) 右:上から見た図 (horizontal)

- vertical
- SEMIRANDOM
- Proton

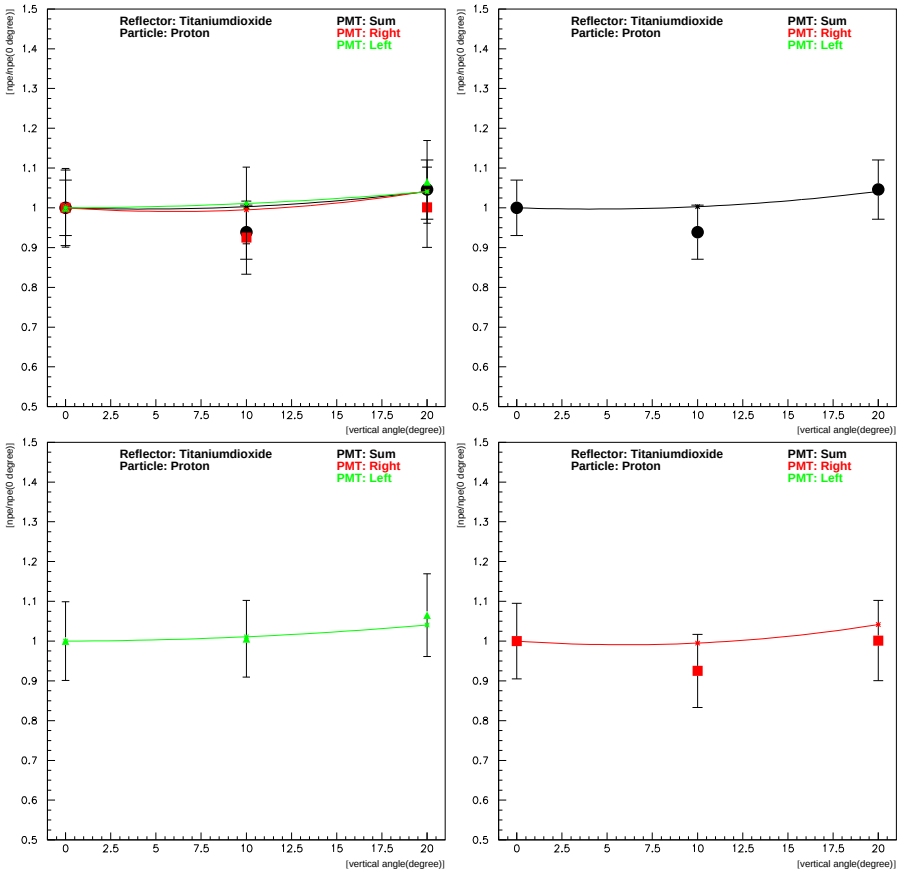

図 16: 角度依存性 1

- vertical
- RANDOM
- Proton

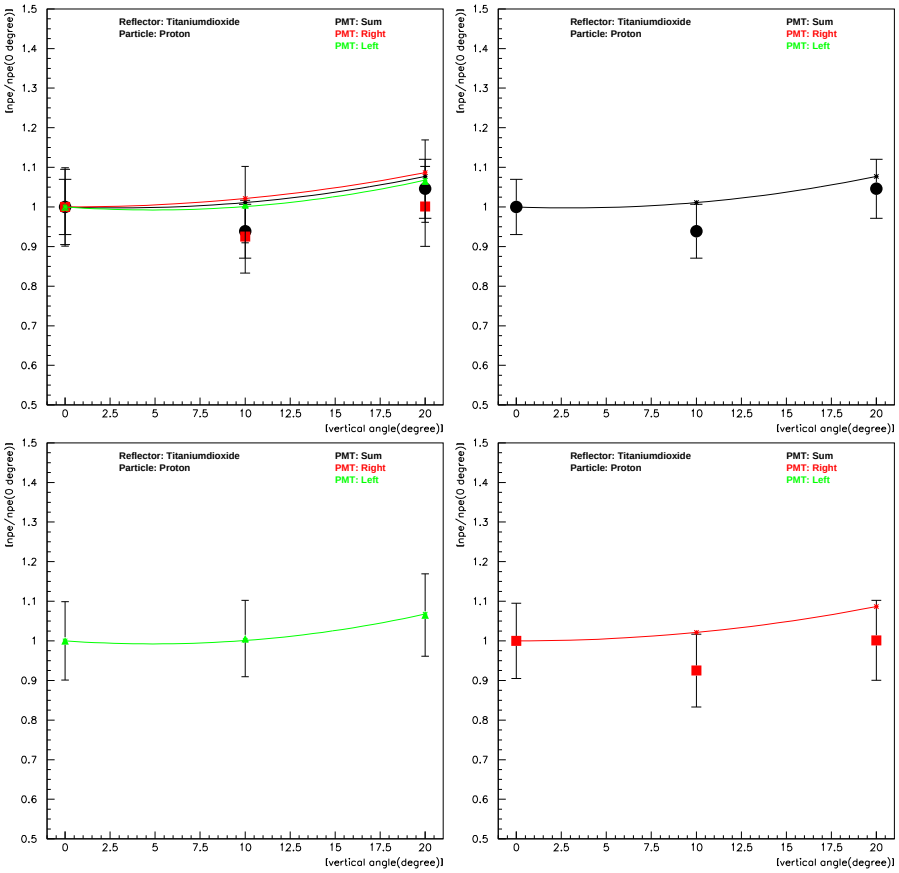

図 17: 角度依存性 2

- vertical
- SEMIRANDOM
- Kaon

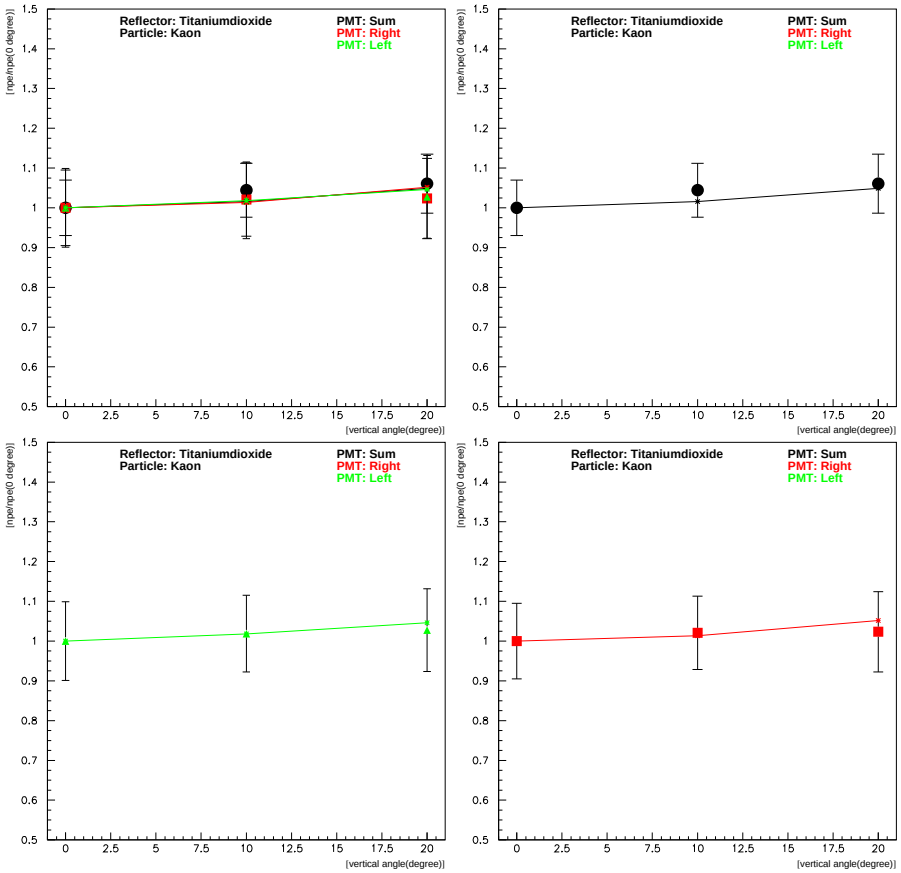

図 18: 角度依存性 3

- vertical
- RANDOM
- Kaon

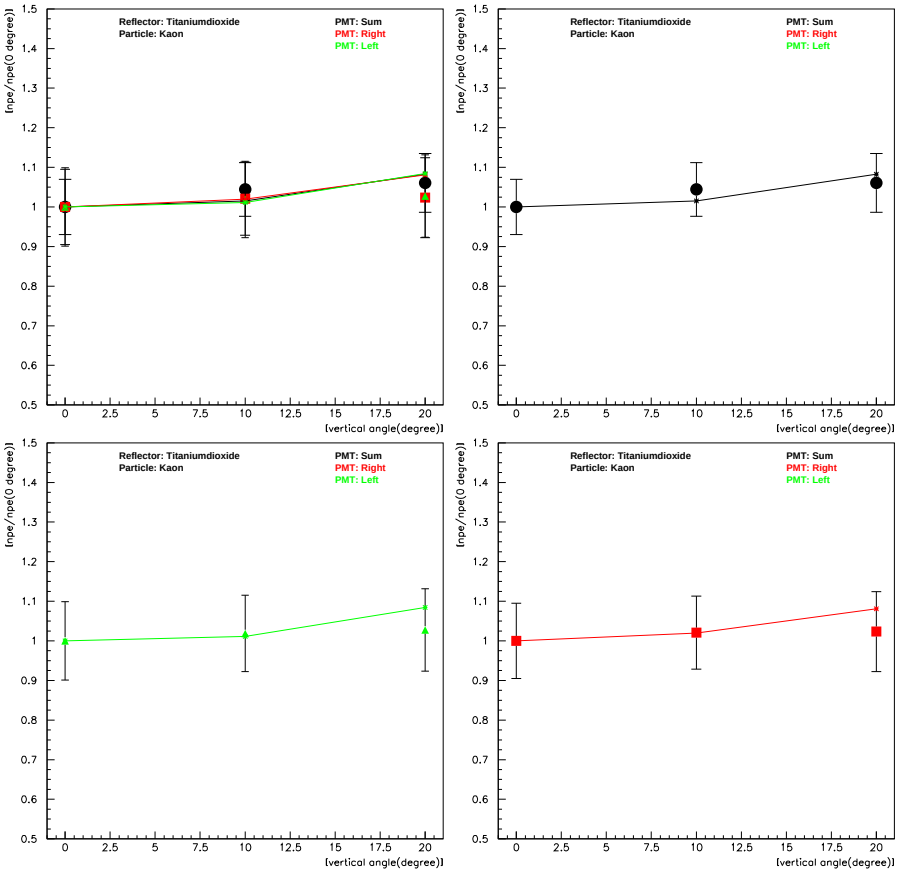

図 19: 角度依存性 4

- horizontal
- SEMIRANDOM
- Proton

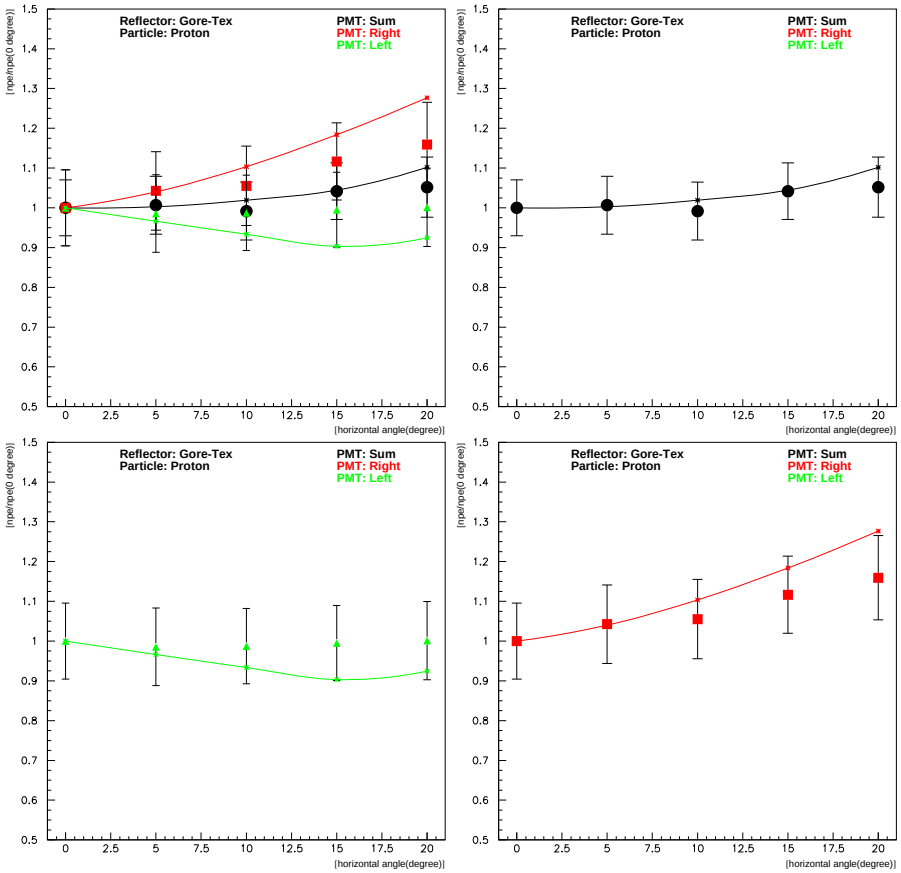

図 20: 角度依存性 5

- horizontal
- RANDOM
- Proton

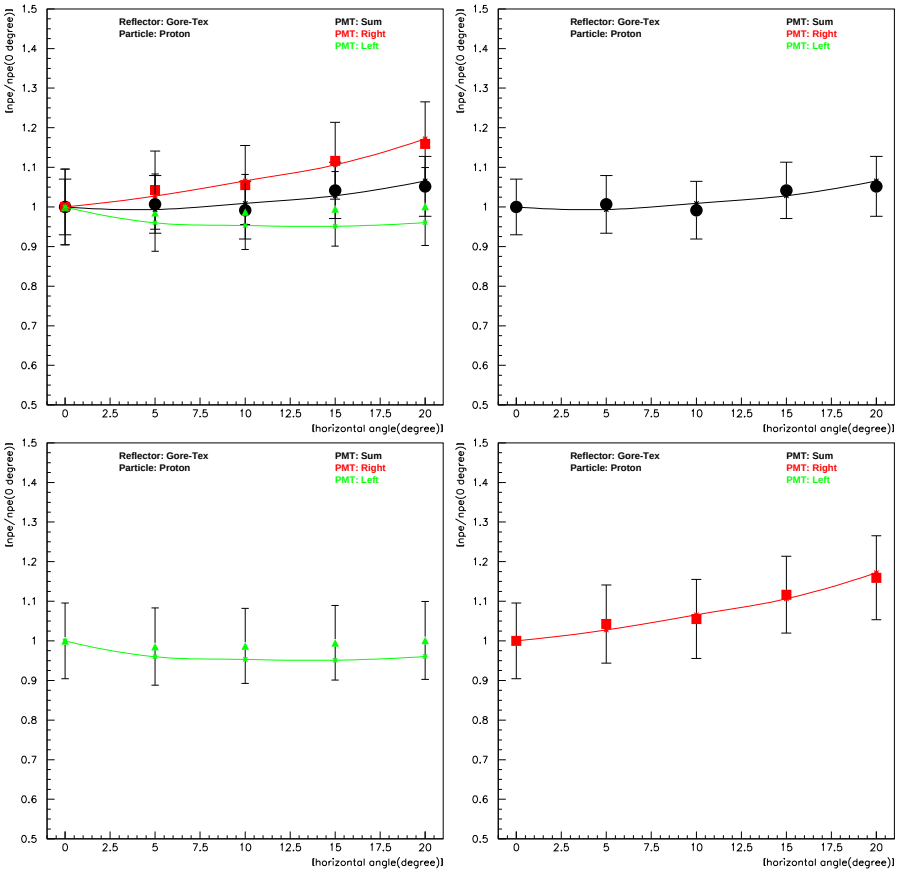

図 21: 角度依存性 6

- horizontal
- SEMIRANDOM
- Kaon

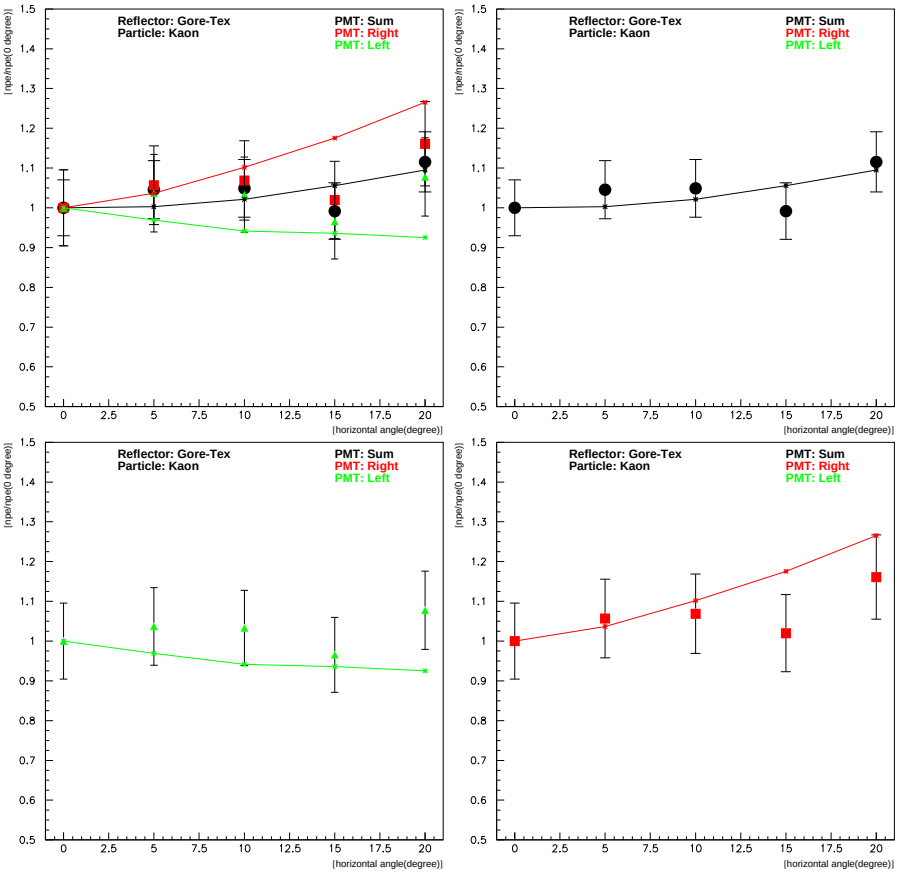

図 22: 角度依存性 7

- horizontal
- RANDOM
- Kaon

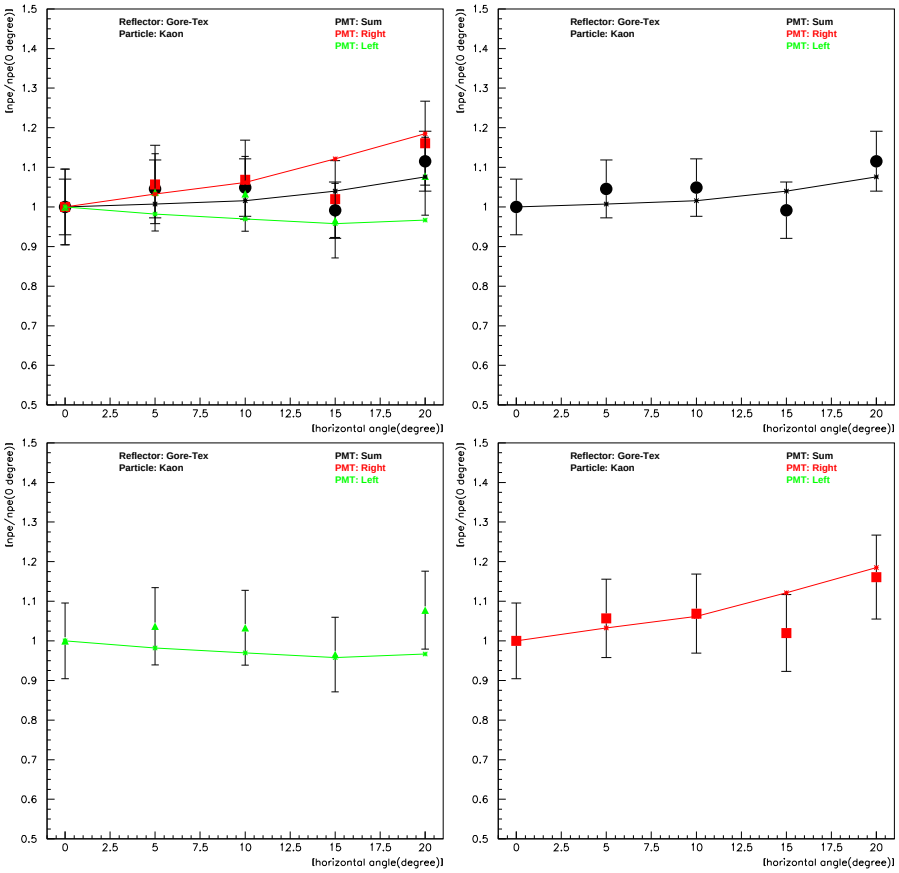

図 23: 角度依存性 8

6 考察

- 計算値との比較

計算値と実験値の差の主な原因は、実際の集光率がシミュレーションで求めたものより小さかったためだと考えられる。シミュレーションは均一な平面を形成しているが、今回作った検出器は PMT の光電面の前には透明なアクリル板があったり、また水を出し入れする部分が露出していたりととても均一とは言えないものであった。また 3.0cm の方がより差が大きくなったのは Lightguide のせいだと考えられる。黄色い新聞誌でくるまれていて、目で傷が確認できるような Lightguide では光が PMT まで到達しにくくなるようである。

- 反射材の比較

三種類の反射材を比較した結果 Gore-Tex,Titaniumdioxide が同程度の性能を示し、それに比べると Millipore はすこし劣っているように思える。

- Water の比較

基本的には Pure Water よりも WLS が入っている方が光電子数が多い。ただ、比率で見た場合は WLS が入ってないものが一番 P と K^+ を分離していると思う。反射材が Gore-Tex の場合は Umbelliferone が最も光電子数が多くなっているが、反射材が Titaniumdioxide の場合は逆に Amino-G-Salt の方が光電子数が多い。これは WLS が何かと化学変化を起こしているの可能性がある。今、このことに関しては調べている途中なのではっきりとはいえないが、Umbelliferone とアクリル板とは目で確認できるような反応が起きている（ただ、WLS としての性能が悪くなっているかどうかはわからない）。
WLS の安定性についてはこれから十分に調べてみなければならない。

- 運動量依存性

運動量によって特に Proton の光電子数が大きく変化していることがわかる。これは図 1 を見てもわかる通り 1.2GeV/c では Proton は傾きが大きくなっているからである。

- 角度依存性

角度依存性を調べると垂直方向に傾けた時より水平方向に傾けたほうが、特に個々の PMT において、変化がおおきいことがわかる。また HYCS のパラメータは SEMIRANDOM よりも RANDOM の方が実験値に近くなる（特に水平方向）。

7　まとめ

今回行なった実験で一番 P と K^+ が分離できてそうな組合せは Gore-Tex with Umbelliferone と Titaniumdioxide with Amino-G-salt であった。この 2 つで反射材のコーティングや WLS を用意する苦労を考えると、個人的には、後者の方がお勧めである。だた、先にも述べた通り長期使用した場合、WLS の安定性というものに不安が残るので、Pure Water を用いた方が無難といえる（Pure Water もしばらく使用すると純度が落ちるらしいので定期的に入れ変えが必要だと思われる）。

Jlab での実験では BEAM が水平方向に角度を持ってくるのでより角度依存が少ないように Counter を垂直（PMT が上下にくるように）に置けば良いと思う。ただ、粒子がある程度運動量の幅（1.05GeV/c〜1.35GeV/c）をもってくることを考えた場合、特に高い運動量の方では Proton が十分に Cut できないと思われる。

Appendix A

HYCS

HYCSは山口さんがチェレンコフ検出器の開発のために作ったシミュレーションである。今回は反射のパラメータを ROUGH1と ROUGH2の 2 つを使用した。

- ROUGH1

境界面での反射は SEMIRANDOM 型になる

- ROUGH2

境界面での反射は RANDOM 型になる

Appendix B

Particle IDは TOFの pulse height correctionを行なった後、下図のようにして行なった。

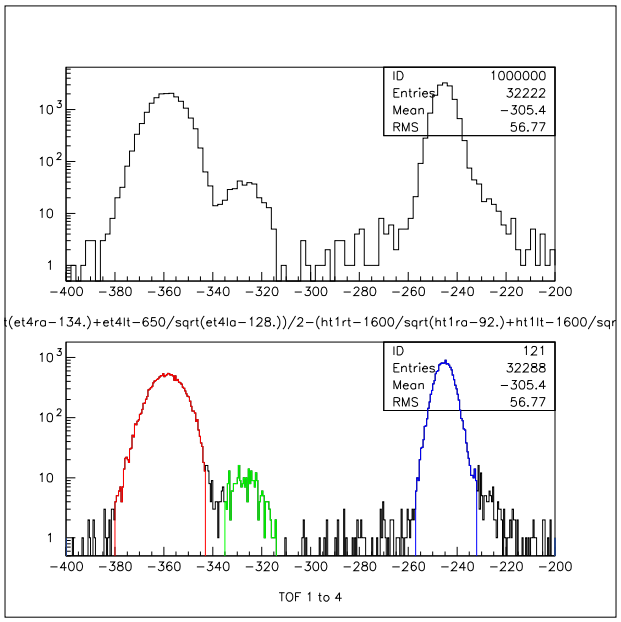

図 24: Particle ID

赤:π^+、緑:K^+、青:P である。
π^+ と K^+ は完全には分離できなかったので π^+ と考えられる粒子と K^+ と考えられる粒子だけを選び出すようにした。

参考文献

[1] K.クラインクネヒト 著/高橋嘉右、吉城肇 共著「粒子線検出器」 培風館

[2] W.R.Leo Teqniques for Nuclear and Particle Physics Experiments

[3] A.BEZAGUET et al. Nucl. Instr. 158(1979) 303-306

[4] P.NEMETHY et al. Nucl. Instr. 173(1980) 251-257

謝辞

卒業研究にあたり、KEKでの実験というすばらしい機会を与えて下さった橋本教授をはじめ、研究室の皆様に深く感謝いたします。