$GeV-\gamma$ 解析ノート No.51 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の性能評価 II

K. Suzuki

2007 Jun. 19th

目 次

| 1 | エネルギー $457~{ m MeV}$ の電子を入射させた実験 | 2 |
|---|--|------|
| | 1.1 実験セットアップ | . 2 |
| | 1.2 チェレンコフ光の検出 | . 2 |
| | 1.2.1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の ADC 分布とゲイン調整 | . 2 |
| | 1.2.2 電子の検出効率 | . 4 |
| 2 | エネルギー 80 MeV の陽子を入射させた実験 | 7 |
| | 2.1 実験セットアップ | . 7 |
| | 2.2 トリガーに使用したプラスチックシンチレータの ADC 分布 | . 8 |
| | 2.3 陽子による光の検出 | . 8 |
| | 2.3.1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の ADC 分布とゲイン調整 | . 8 |
| | 2.3.2 陽子の検出効率 | . 10 |
| 3 | 検出された平均光子数 | 11 |
| 4 | まとめ | 12 |

 ${
m GeV}$ - γ 解析ノート No. ${
m 49}^1$ で報告した実験によれば、シリカエアロジェルと乱反射材のミリポアメンブレンフィルターを使用した組み合わせでは 90% 程度の電子の検出効率が得られた。しかし、光電子増倍管にかけた電圧を $+2000~{
m V}$ としたため少々ゲインが小さかった。そこで新たに光電子増倍管 (PMT) にかける電圧を $+2300~{
m V}$ (カタログでの最大定格) にし、同様の実験を行った。

また今までの実験はチェレンコフ光を出す運動量の電子を入射粒子として使用したが、チェレンコフ光を出さない運動量の陽子に対する応答も見た。東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) において、エネルギー 80 MeV の陽子を入射粒子として使用し実験を行った。これらの結果について報告する。

 $^{^{1}}$ K. Suzuki, GeV- γ 解析ノート No.**49** シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の性能評価 I (2007).

1 エネルギー 457 MeV の電子を入射させた実験

 ${\rm GeV}$ - γ 解析ノート No. ${\bf 49}^2$ で報告したの実験は各 PMT にかけた電圧が $+2000~{\rm V}$ と低かったため、電圧を $+2300~{\rm V}$ として電子によるチェレンコフ光の検出効率が上がるかを確認した。

1.1 実験セットアップ

使用したシリカエアロジェルは LNS4-6、LNS4-9 であり、実験セットアップは前回とほぼ同じである 3 。異なる点は、PMT にかけた電圧はすべて +2300~V (カタログ上の最大定格) にしたことと、信号 増幅のために使用する増幅器 (PMT AMP) を PMT の直後に置いたことである。今回の実験は

- 1 シリカエアロジェルとミリポアメンブレンフィルターを使用した場合
- 2 シリカエアロジェル無しでミリポアメンブレンフィルターのみを使用した場合
- 3 シリカエアロジェル無しでかつ乱反射材も使用しない場合

の三つのセットアップで実験を行った。トリガーに使用したファイバーシンチレータの情報は同じであるため省略する。

1.2 チェレンコフ光の検出

ここでは取得したデータと電子が通過して発生するチェレンコフ光の検出効率について議論する。

1.2.1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の ADC 分布とゲイン調整

この実験では PMT にかけた電圧が、一律 +2300~V のためゲインは合っていない。まずはゲインを一定にするようなファクターを決定した。各 PMT の ADC 分布のうち高いチャンネルの部分を $y=\exp(a+bx)$ でフィットし、スロープパラメータ b を求めた。このスロープパラメータがゲインの逆数に比例するとして、PMT 1 を基準としたファクターを求めた。各セットアップで求めたゲインファクターを表 1 にまとめる。ただし、セットアップ 3 はゲインファクターを求めるほど ADC 分布に広がりがないため、セットアップ 1、2 の平均を用いた。

表 1: 各 PMT のゲインファクターとスロープパラメータ。PMT 1 のスロープパラメータを基準にゲインファクターを求めた。

| | セットアップ | PMT 1 | PMT 2 | PMT 3 | PMT 4 |
|---------|--------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | ファクター1 | 1.0 | 0.390 | 1.31 | 1.53 |
| ファクター 2 | | 1.0 | 0.367 | 0.958 | 0.799 |
| | スロープ 1 | -0.00960 ± 0.00032 | -0.00378 ± 0.00007 | -0.01256 ± 0.00057 | -0.01470 ± 0.00069 |
| | スロープ 2 | -0.02596 ± 0.00172 | -0.00954 ± 0.00070 | $-0.02486{\pm}0.00139$ | -0.02074 ± 0.00145 |

図 1–3 に各セットアップでの ADC 分布をフィットした様子とゲインを調節した後の ADC 分布を示す。どの PMT の ADC 分布も、+2000 V かけた前回の実験と同様の傾向が見られる。また増幅器を光電子増倍管の直後に置いたため、前回の実験よりペデスタルが 1/5 程度細くなっている。

²K. Suzuki, GeV- γ 解析ノート No.49 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の性能評価 I (2007).

 $^{^3}$ K. Suzuki, GeV- γ 解析ノート No.49, シリカエアロジェル検出器の性能評価 I (2007).

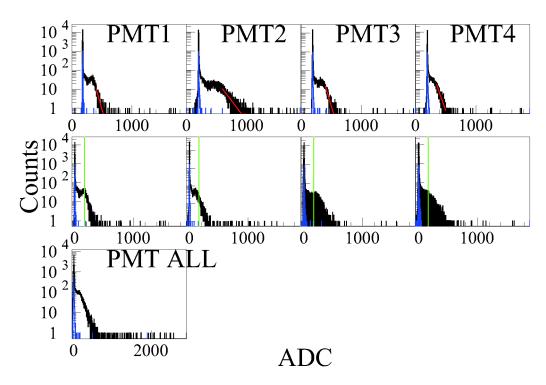


図 1: 実験セットアップ 1 での各 PMT のゲイン調整の様子。上段が各 PMT の ADC 分布の高い部分 を $y = \exp(a + bx)$ でフィットした様子であり、中段がゲインを調節しペデスタルが 0 になるようにした ADC 分布である。一定の場所に示した緑の線のあたりにピークがありゲイン調整はうまくいっている。下段がゲイン調整後、4 つの PMT の ADC 和の分布である。それぞれペデスタルランのヒストグラムを青く上書きしている。

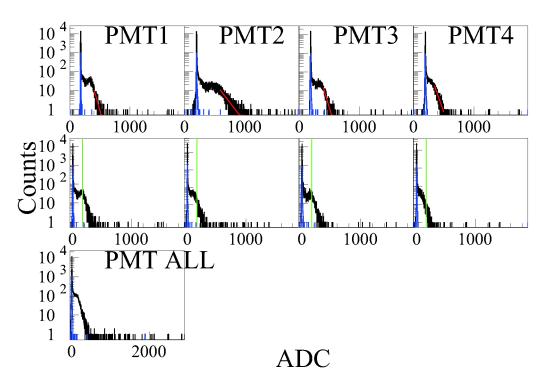


図 2: 実験セットアップ 2 での各 PMT のゲイン調整の様子。上段が各 PMT の ADC 分布の高い部分 を $y = \exp(a+bx)$ でフィットした様子であり、中段がゲインを調節しペデスタルが 0 になるようにした ADC 分布である。一定の場所に示した緑の線のあたりにピークがありゲイン調整はうまくいっている。下段がゲイン調整後、4 つの PMT の ADC 和の分布である。それぞれペデスタルランのヒストグラムを青く上書きしている。

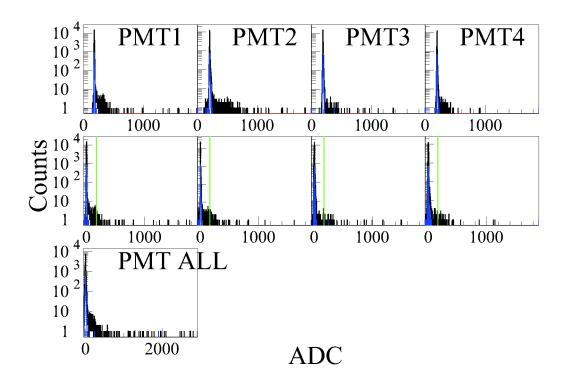


図 3: 実験セットアップ 3 での各 PMT の ADC 分布の様子。この分布ではフィットが難しいため、セットアップ 1、2 のゲイン調整ファクターを平均して適用した。中段がゲインを調節しペデスタルが 0 になるようにした ADC 分布である。下段がゲイン調整後、4 つの PMT の ADC 和の分布である。それぞれペデスタルランのヒストグラムを青く上書きしている。

1.2.2 電子の検出効率

各 PMT i (i=1–4) のペデスタルとなる ADC 分布の中心値 $\mu^i_{\rm ped}$ と幅 $\sigma^i_{\rm ped}$ を使用して、ADC 値が $\mu^i_{\rm ped}+1.0\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+1.5\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+2.5\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+2.5\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+3.0\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合にその PMT でチェレンコフ光を検出したものとした。図 4 にチェレンコフ光を検出した PMT の個数分布を示す。1 つ以上の PMT でチェレンコフ光を検出した場合を電子の検出した 場合を電子の検出力率として表 2 に、2 つ以上の PMT でチェレンコフ光を検出した場合を電子の検出効率として表 3 にまとめる。

表 2: 1 つ以上の PMT でチェレンコフ光を検出した時の電子の検出効率 (%)。

| | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.5\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 2.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{ m ped}^i + 2.5 \sigma_{ m ped}^i$ | $\mu_{\rm ped}^i + 3.0\sigma_{\rm ped}^i$ |
|----------|---|---|---|--|---|
| セットアップ 1 | 98.7±0.3 | $98.3 {\pm} 0.3$ | 98.1±0.3 | $98.0 {\pm} 0.3$ | $97.9 {\pm} 0.3$ |
| セットアップ 2 | $53.1 {\pm} 0.2$ | $44.7{\pm}0.2$ | $36.6{\pm}0.2$ | $33.0 {\pm} 0.2$ | $30.9 {\pm} 0.2$ |
| セットアップ 3 | $30.3{\pm}0.2$ | $21.4 {\pm} 0.2$ | 12.8 ± 0.1 | $9.5{\pm}0.1$ | $6.8 {\pm} 0.1$ |

表 3: 2 つ以上の PMT でチェレンコフ光を検出した時の電子の検出効率 (%)。

| | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.5\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 2.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{ m ped}^i + 2.5 \sigma_{ m ped}^i$ | $\mu_{\rm ped}^i + 3.0\sigma_{\rm ped}^i$ |
|----------|---|---|---|--|---|
| セットアップ 1 | $88.6{\pm}0.3$ | $85.5 {\pm} 0.3$ | $84.2 {\pm} 0.3$ | $83.2 {\pm} 0.3$ | $82.6{\pm}0.3$ |
| セットアップ 2 | $22.1{\pm}0.2$ | $13.9 {\pm} 0.1$ | $7.6 {\pm} 0.1$ | $5.6 {\pm} 0.1$ | $4.4 {\pm} 0.1$ |
| セットアップ 3 | $12.4{\pm}0.1$ | $6.3 {\pm} 0.1$ | $2.1{\pm}0.0$ | $1.1 {\pm} 0.0$ | $0.4{\pm}0.0$ |

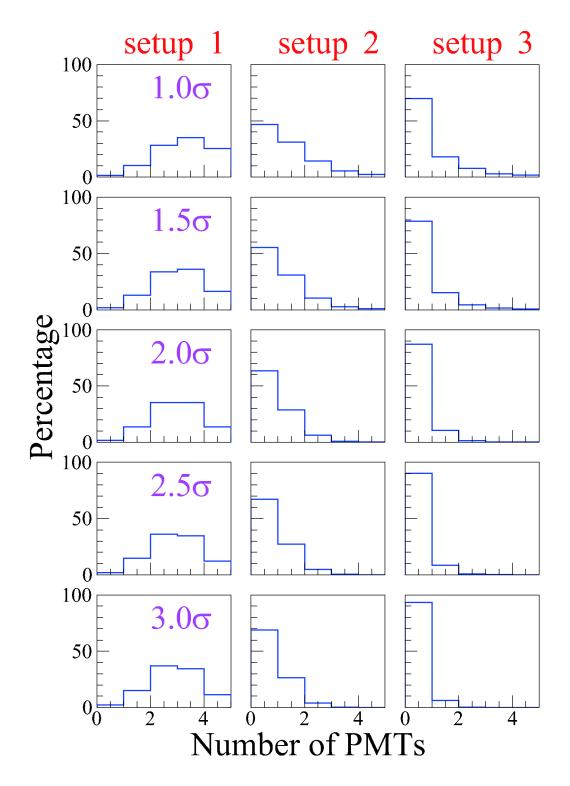


図 4: 各セットアップでチェレンコフ光を検出した PMT の数。左から 1 列目はセットアップ 1 (シリカエアロジェルとミリポアメンブレンフィルター)、2 列目はセットアップ 2 (ミリポアメンブレンフィルターのみ)、3 列目はセットアップ 3 (シリカエアロジェルも乱反射材もない) の ADC 値が閾値を越えた PMT の数の分布である。各セットアップとも、上から 1 段目は ADC 値が $\mu^i_{\rm ped}+1.0\sigma^i_{\rm ped}$ 、2 段目は $\mu^i_{\rm ped}+1.5\sigma^i_{\rm ped}$ 、3 段目は $\mu^i_{\rm ped}+2.0\sigma^i_{\rm ped}$ 、4 段目は $\mu^i_{\rm ped}+2.5\sigma^i_{\rm ped}$ 、5 段目は $\mu^i_{\rm ped}+3.0\sigma^i_{\rm ped}$ 以上のときチェレンコフ光を検出したものとした場合のチェレンコフ光を検出した PMT 個数分布である。

また PMT それぞれの ADC 値の合計で検出効率を議論する。ゲインを調整した ADC 値から、ペデスタルランにおける PMT 4 つの ADC 値の和の分布の中心値 $\mu_{\rm all}$ 、幅 $\sigma_{\rm all}$ を使って、ADC 値の和が $\mu_{\rm all}+1.0\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+1.5\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+2.0\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+2.5\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+2.0\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+2.0\sigma_{\rm all}$ を越えた場合に電子を検出したものとした。このときの電子の検出効率を表 4 にまとめる。

表 4: ゲインを一定にした 4 つの PMT の ADC 値の和が閾値を越えた時の電子の検出効率 (%)。

| | $\mu_{ m all} + 1.0\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 1.5\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 2.0\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 2.5 \sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 3.0\sigma_{ m all}$ |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| セットアップ 1 | 97.7±0.3 | $97.3 {\pm} 0.3$ | $97.0 {\pm} 0.3$ | $96.6 {\pm} 0.3$ | 96.3±0.3 |
| セットアップ 2 | $39.5{\pm}0.2$ | $32.1 {\pm} 0.2$ | $29.1 {\pm} 0.2$ | $26.3 {\pm} 0.2$ | $25.2{\pm}0.2$ |
| セットアップ 3 | $13.7{\pm}0.1$ | $6.5{\pm}0.1$ | $4.1 {\pm} 0.1$ | $2.7 {\pm} 0.1$ | $1.7 {\pm} 0.0$ |

どの場合においても、前回の実験と比べ検出効率が高くなった。セットアップ 3 では検出効率が非常に低く、ミリポアメンブレンフィルターのみの時も光を発しているという傾向は変わらなかった。セットアップ 2 ではミリポアメンブレンフィルター自体が光を発している可能性と空気によるチェレンコフ光が発生している可能性の二通り考えられる。2 個以上の PMT が反応した場合の検出効率では 80% 強の値が得られた。

2 エネルギー 80 MeV の陽子を入射させた実験

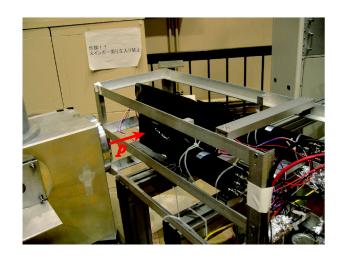
今まで電子を用いてシリカエアロジェルチェレンコフ検出器をテストしてきた。今回の実験ではチェレンコフ光を出さない運動量を持つ陽子に対して、シリカエアロジェルチェレンコフ検出器がどの様な応答を示すか調べた。

2.1 実験セットアップ

CYIRIC においてエネルギー 80 MeV の陽子を入射ビームとして用い実験を行った。使用したシリカエアロジェルは \S 1 と同様に LNS4-6、LNS4-9 である。シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の前後に、縦横 80 mm、厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータを設置し、データ取得のトリガーをチェレンコフ検出器の直後に設置し、データ取得のトリガーを

(直前に置いたプラスチックシンチレータ) ⊗ (直後に置いたプラスチックシンチレータ)

とした。ただしペデスタルを取得する場合はトリガーをポケットパルサーによる周期的な信号に変更した。実験セットアップを図 5 に示す。



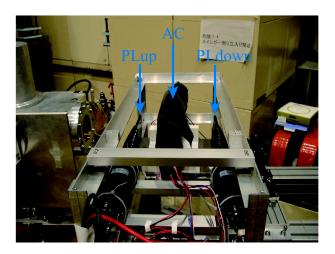


図 5: 実験セットアップの様子。左図はビーム上流から見た図であり、右図はビーム真横から見た図である。シリカエアロジェルチェレンコフ検出器 (AC) の前後にプラスチックシンチレータ (PLup、PLdown) をはさむようにして設置した。

実験は

- 1 シリカエアロジェルとミリポアメンブレンフィルターを使用した場合
- 2 シリカエアロジェル無しでミリポアメンブレンフィルターのみを使用した場合

の 2 つのセットアップで行い、ペデスタルも各セットアップごとに取得した。この実験でシリカエアロジェルチェレンコフ検出器につけた光電子増倍管からの信号は ADC のみで TDC は取得しなかったが、トリガーレートは $300~\rm{Hz}$ 程度であるため、アクシデンタルバックグラウンドの混入は無視できた。また $4~\rm{Oo}$ 2 かまでででに電圧 $+2300~\rm{V}$ をかけた。

2.2 トリガーに使用したプラスチックシンチレータの ADC 分布

ここではトリガーに使用した プラスチックシンチレータの ADC 分布を確認した。図 6 にプラスチックシンチレータの ADC 分布を示す。

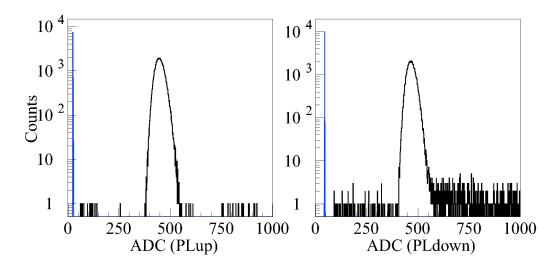


図 6: プラスチックシンチレータの ADC 分布。左図がシリカエアロジェルの直前に置いたシンチレータの ADC 分布であり、右図がシリカエアロジェルの直前に置いたシンチレータの ADC 分布である。青いヒストグラムはペデスタルランの分布である。どちらも陽子による突き抜けのピークがはっきり見える。

どちらのプラスチックシンチレータも陽子による突き抜けのピークがはっきり見え、正常に動作していた。

Bethe-Bloch によるエネルギー損失の式によれば、エネルギー 80 MeV の陽子が厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータを突き抜ける場合約 5 MeV のエネルギーを損失する 4 。エネルギー 80 MeV の陽子は、トリガーに使用した厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータ $2 \text{ 枚とシリカエアロジェルチェレンコ フ検出器を突き抜けるには十分のエネルギーを持っている。$

2.3 陽子による光の検出

ここでは取得したデータと陽子が通過して発生する光の検出効率について議論する。

2.3.1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の ADC 分布とゲイン調整

この実験でも PMT にかけた電圧は一律 +2300~V のためゲインは合っていない。§ 1.2.2 と同様に ADC のゲインファクターを求め、表 5 にまとめる。図 7、8 に各セットアップでのフィットした様子と ゲインを調節した後の ADC 分布を示す。

⁴William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Bethe-Bloch では density effect correction と shell correction まで入れた.

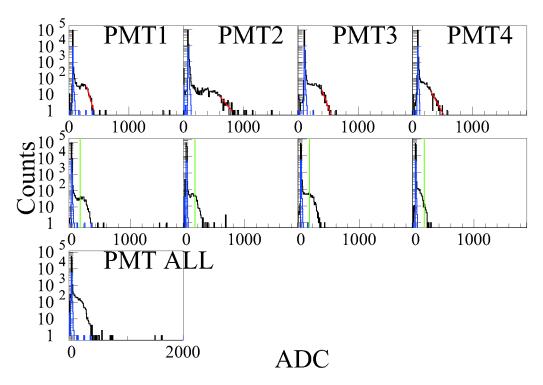


図 7: 実験セットアップ 1 での各 PMT のゲイン調整の様子。上段が各 PMT の ADC 分布の高い部分 を $y = \exp(a+bx)$ でフィットした様子であり、中段がゲインを調節しペデスタルが 0 になるようにした ADC 分布である。一定の場所に示した緑の線のあたりにピークがありゲイン調整はうまくいっている。下段がゲイン調整後、4 つの PMT の ADC 和の分布である。それぞれペデスタルランのヒストグラムを青く上書きしている。

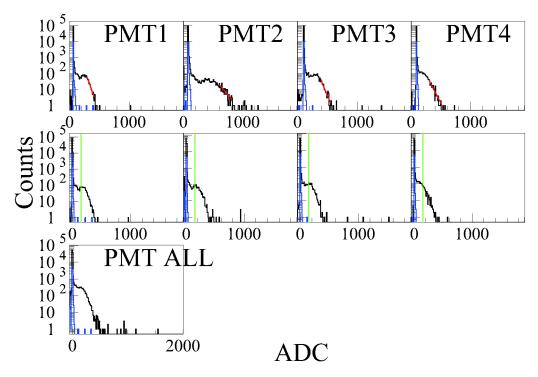


図 8: 実験セットアップ 2 での各 PMT のゲイン調整の様子。上段が各 PMT の ADC 分布の高い部分 を $y=\exp(a+bx)$ でフィットした様子であり、中段がゲインを調節しペデスタルが 0 になるようにした ADC 分布である。一定の場所に示した緑の線のあたりにピークがありゲイン調整はうまくいっている。下段がゲイン調整後、4 つの PMT の ADC 和の分布である。それぞれペデスタルランのヒストグラムを青く上書きしている。

表 5: 各 PMT のゲインファクターとスロープパラメータ。PMT 1 のスロープパラメータを基準として ゲインファクターを求めた。

| セットアップ | ットアップ PMT 1 PMT 2 | | PMT 3 | PMT 4 |
|---------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| ファクター 1 1.0 0 | | 0.344 | 0.766 | 0.535 |
| ファクター? | 1.0 | 0.411 | 0.834 | 0.677 |
| スロープ 1 | -0.02940 ± 0.00488 | -0.01011 ± 0.00283 | -0.02252 ± 0.00413 | -0.01572 ± 0.00438 |
| スロープ 2 | -0.02417 ± 0.00331 | -0.00994 ± 0.00177 | -0.02017 ± 0.00274 | -0.01635 ± 0.00303 |

2.3.2 陽子の検出効率

各 PMT i (i=1–4) のペデスタルとなる ADC 分布の中心値 $\mu^i_{\rm ped}$ と幅 $\sigma^i_{\rm ped}$ を使用して、ADC 値が $\mu^i_{\rm ped}+1.0\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+1.5\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+2.0\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+2.5\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合、 $\mu^i_{\rm ped}+3.0\sigma^i_{\rm ped}$ を越えた場合にその PMT で光を検出したものとした。図 9 に光を検出した PMT の個数分布を示す。1 つ以上の PMT で光を検出した場合を陽子の検出効率として表 6 に、2 つ以上の PMT で光を検出した場合を陽子の検出効率として表 7 にまとめる。

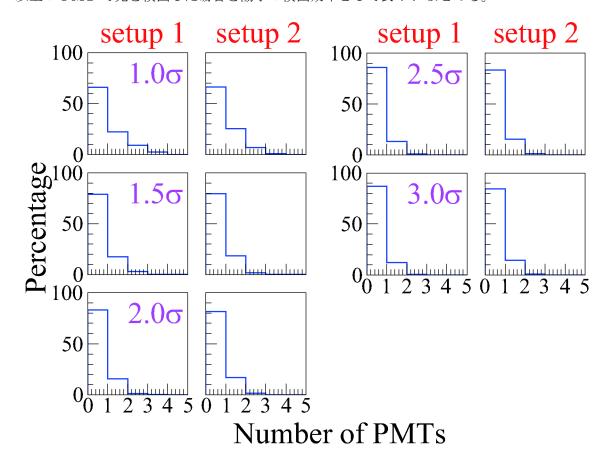


図 9: 各セットアップで光を検出した PMT の数。左から 1 列目はセットアップ 1 (シリカエアロジェルとミリポアメンブレンフィルター)、2 列目はセットアップ 2 (ミリポアメンブレンフィルターのみ) の ADC 値が閾値を越えた PMT の数の分布である。各セットアップとも、上から 1 段目は ADC 値が $\mu_{\rm ped}^i+1.0\sigma_{\rm ped}^i$ 、2 段目は $\mu_{\rm ped}^i+1.5\sigma_{\rm ped}^i$ 、3 段目は $\mu_{\rm ped}^i+2.0\sigma_{\rm ped}^i$ 、4 段目は $\mu_{\rm ped}^i+2.5\sigma_{\rm ped}^i$ 、5 段目は $\mu_{\rm ped}^i+3.0\sigma_{\rm ped}^i$ 以上のとき光を検出したものとした場合の光を検出した PMT 個数分布である。

表 6:1 つ以上の PMT で光を検出した時の陽子の検出効率 (%)。

| | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.5\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 2.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 2.5\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\rm ped}^i + 3.0\sigma_{\rm ped}^i$ |
|----------|---|---|---|---|---|
| セットアップ 1 | $34.0{\pm}0.2$ | $21.0 {\pm} 0.1$ | $17.0 {\pm} 0.1$ | $14.1 {\pm} 0.1$ | $13.0 {\pm} 0.1$ |
| セットアップ 2 | $33.7{\pm}0.2$ | $20.4{\pm}0.1$ | $18.4{\pm}0.1$ | $16.4{\pm}0.1$ | $15.5 {\pm} 0.1$ |

表 7: 2 つ以上の PMT で光を検出した時の陽子の検出効率 (%)。

| | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 1.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\rm ped}^i + 1.5\sigma_{\rm ped}^i$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 2.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 2.5\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ | $\mu_{\mathrm{ped}}^{i} + 3.0\sigma_{\mathrm{ped}}^{i}$ |
|----------|---|---|---|---|---|
| セットアップ 1 | $11.9 {\pm} 0.1$ | $3.4{\pm}0.1$ | $1.4{\pm}0.0$ | $0.9 {\pm} 0.0$ | $0.7{\pm}0.0$ |
| セットアップ 2 | $8.4{\pm}0.1$ | 1.9 ± 0.0 | 1.5 ± 0.0 | 1.1 ± 0.0 | 1.0 ± 0.0 |

このゲインファクターで調整した ADC 値から、ペデスタルランにおける PMT 4 つの ADC 値の和の分布の中心値 $\mu_{\rm all}$ 、幅 $\sigma_{\rm all}$ を使って、ADC 値の和が $\mu_{\rm all}+1.0\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+1.5\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+2.5\sigma_{\rm all}$ を越えた場合、 $\mu_{\rm all}+3.0\sigma_{\rm all}$ を越えた場合に電子を検出したものとした。このときの陽子の検出効率を表 8 にまとめる。

表 8: ゲインを一定にした 4 つの PMT の ADC 値の和が閾値を越えた時の陽子の検出効率 (%)。

| | $\mu_{ m all} + 1.0\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 1.5\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 2.0\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 2.5\sigma_{ m all}$ | $\mu_{ m all} + 3.0\sigma_{ m all}$ |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| セットアップ 1 | 21.8 ± 0.1 | 11.8 ± 0.1 | $7.7{\pm}0.1$ | $6.2{\pm}0.1$ | 5.4±0.1 |
| セットアップ 2 | $22.7{\pm}0.2$ | $13.5{\pm}0.1$ | $11.0 {\pm} 0.1$ | $10.0{\pm}0.1$ | $9.3{\pm}0.1$ |

どの結果もセットアップ 1 よりもセットアップ 2 の方が高い結果となった。これからミリポアメンブレンフィルターが陽子により光を発しており、シリカエアロジェルをいた場合、シリカエアロジェルの半透明性のため光の透過率が落ちて検出効率が下がると考えられる。ただし、表 6、8 では陽子の検出効率が 10% 程度であるのに対し、表 7 では検出効率が非常に少ない結果となった。陽子でシリカエアロジェルチェレンコフ検出器が応答せずに、電子の検出効率を上げるためには PMT が 2 つ以上反応したとするのが良い。

また、セットアップ 2 では、電子により 25% 程度の検出効率があり、陽子では 10% 程度の検出効率となったことから、電子においては空気によるチェレンコフ光が発生し、陽子においてはシンチレーションなどにより光が発生していると考えられる。

3 検出された平均光子数

ここでは予想される放出光子数と検出された平均光子数について議論する。単位長さ、単位波長あたり発生するチェレンコフ光子数は

$$\frac{d^2N}{d\lambda\,dx} = \frac{2\pi z^2\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right)$$

であり 5 、屈折率 1.01 のシリカエアロジェルにおいて PMT で検出できる波長のチェレンコフ光は平均 130 個程度発生する。屈折率 1.000292 の空気においては 5 個程度発生し、シリカエアロジェルと比べ 1/30 倍である。

⁵W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments Second Revised Edition (1994), §2.4 式 (2.63).

また、 \S 1.2 セットアップ 1 (シリカエアロジェルとミリポアメンブレンフィルターの組み合わせ) での電子の検出効率は 97% 程度であり、 $GeV-\gamma$ ノート No.496 の式 (4) から

$$0.97 = 1 - P(0) - P(1) = 1 - (1 + \nu) \exp(-\nu)$$

となり、検出される平均光子数 ν は 5.2 個と求まる。セットアップ 2 (ミリポアメンブレンフィルターのみであるが、空気が入っている) での検出効率は 25% 程度なので、検出される平均光子数は 1.0 個となる。予想されるチェレンコフ光子数より多いのはミリポアメンブレンフィルターから発する光があるためと思われる。

4 まとめ

これらの実験より、陽子でシリカエアロジェルチェレンコフ検出器が応答せずに、電子の検出効率を上げるためには、PMT が 2 つ以上反応したとするのが良い。このときの電子単体の検出効率は 83% 程度であり、陽子の検出効率は 1% 未満である。電子陽電子がシリカエアロジェルチェレンコフ検出器に入射するならば 96% の検出効率となる。今後は他の乱反射材を試すなど、もっと検出効率が上がるよう工夫する必要がある。

 $^{^6}$ K. Suzuki, GeV- γ 解析ノート No.49 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の性能評価 I (2007).