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

K. Suzuki

2007 Feb. 16th

目 次

1	シリカエアロジェルチェレンコフ検出器	2				
	1.1 シリカエアロジェルの形状	2				
	1.2 作成の様子	2				
2	実験セットアップ	4				
3	トリガーに使用したファイバーの動作確認	4				
4 チェレンコフ光の検出						
	4.1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の ADC 分布	6				
	4.2 電子の検出効率	8				
	4.3 検出された平均光子数	10				
5	まとめ	11				

中性 *K* 中間子スペクトロメータ NKS 2 は生成エネルギー閾値付近での K^0 光生成反応を研究する ため、東北大学大学院理学研究科附属原子核理学研究施設 (核理研)に建設された。NKS 2 のビームラ インでは高エネルギー γ 線を入射ビームとして使用しており、ビームライン上の標的を含む様々な物質 で電子・陽電子対生成が起こる。NKS 2 のトリガーを構成するインナーホドスコープとアウターホドス コープの信号はほとんどがこの対生成によるものである。この電子・陽電子対生成イベントを除去する ことにより、 $\gamma + n \rightarrow K^0 + \Lambda$ 反応などのハドロン生成イベントを効率的に取得できる。そこで電子・ 陽電子対生成イベントをトリガー信号の段階で除去するため、屈折率 1.01 のシリカエアロジェルチェレ ンコフ検出器の導入を提案する。この屈折率のシリカエアロジェルでは、運動量 1.0 GeV/*c* 以下の π^{\pm} 、 3.5 GeV/*c* 以下の K^{\pm} 、6.6 GeV/*c* 以下の陽子はチェレンコフ光を発生しないめ、 $\gamma + n \rightarrow K^0 + \Lambda$ 反応

NKS 2 のストロードリフトチェンバー (SDC) と円筒型ドリフトチェンバー (CDC) の間には約 50 mm の隙間があり、シリカエアロジェルチェレンコフ検出器を設置することが可能な空間の一つとなってい る。チェレンコフ光はほぼビーム軸に沿って出るため、チェレンコフ光が直接入る位置に光電子増倍管 を置くことや、鏡により全反射させ光電子増倍管に導くことが、チェレンコフ光を検出する上で効率的 である。しかし、ビームライン上に物質を置くことは出来る限り避けたいため、乱反射材をもちいて光 電子増倍管にチェレンコフ光を導くことを目指す。またチェレンコフ光を検出する光電子増倍管は磁場 中で使用しなければならないため、ファインメッシュ型が必要であり、なるべく広い検出面を稼ぐため 大きい径のものが望ましい。 チェレンコフ光の単位長さx、単位波長 λ ごとの発生光子数Nは

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

と表される¹。ただし、α は微細構造定数、β は入射粒子の速度、z は入射粒子の電荷、n は屈折率であ る。式 (1) より発生するチェレンコフ光は波長が短いほど発生率が高くなるため、波長の短い光子を検 出できるクォーツ窓の光電子増倍管を用いるのがよい。例えば屈折率 1.01 で厚さ 44 mm の物質を運 動量 500 MeV/c の電子が通り抜けた場合、式 (1) からクォーツ窓の光電子増倍管が検出できる波長が 200-600 nm とするとチェレンコフ光は約 130 個発生する。発生したチェレンコフ光は乱反射材により 半球状に一様に反射されると考えれば、口径 39 mmφ の光電子増倍管 4 つを 66 mm 離れた場所に置い たときの集光率は約 20% であり、26 個程度の光子が光電子増倍管に入射する。ファインメッシュ型の 光電子増倍管の量子化効率を約 20% とすると最終的に約 5 個程度の光子が検出されるはずである。

核理研の電子・陽電子テストビームラインにおいて、試作したシリカエアロジェルチェレンコフ検出 器の性能テストを行った。シリカエアロジェルは千葉大の田端誠氏らが作成したものであり、光電子増 倍管は高磁場用 1.5 インチのクォーツ窓ファインメッシュ型 4 個とした。このノートではシリカエアロ ジェルチェレンコフ検出器の性能について報告する。

1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器

ここでは使用したシリカエアロジェルのスペックと検出器の作成の様子をまとめる。

1.1 シリカエアロジェルの形状

使用したシリカエアロジェルの形状、屈折率を表1にまとめる。どのシリカエアロジェルも縦132 mm、 横132 mm、厚さ22 mm、屈折率1.01程度となっている。

	LNS4-3	LNS4-4	LNS4-6	LNS4-9		
縦 (mm)	131.6	131.5	131.8	131.8		
横 (mm)	131.9	131.4	131.8	131.8		
厚さ (mm)	21.7	21.8	22.1	21.9		
密度 (g/cm ³)	0.0362	0.0362	0.0371	0.0375		
屈折率	1.0099	1.0099	1.0101	1.0102		

表 1: シリカエアロジェルの形状と屈折率。

1.2 作成の様子

ここでは検出器の作成過程を説明する。まず市販の黒いケント紙 (厚さ約 0.15 mm)を枠組みとして使用した。枠組みの大きさは、高さ、幅、厚さそれぞれ 233、133、44 mm である。次に光電子増倍管²を発砲スチロールで固定し、チェレンコフ光を乱反射させるため、内側にミリポアメンブレンフィルター³または乱反射ペンキ⁴を塗ったスーパーインシュレータ⁵を貼り付けた。光電子増倍管の窓の面には全反射

¹William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.

²浜松ホトニクス H8409-70QB, 光電子増倍管の直径 45 mm, 長さ 80 mm, クォーツ窓の直径 39 mm, +H.V. 使用. ³日本ミリポア, カタログ番号 HAWP00010, 孔径 0.45 µm, 厚さ 150µm, 空隙率 79%.

⁴サンゴバン, BC-620

⁵ポリエステル部 6.4 µm, アルミ部 0.05-0.06 µm, エンボス有り.

させるため、光電面の部分だけ円形にくり抜いたアルミナイズドマイラーを貼り付けた。その後、合計 2 つ目のシリカエアロジェルを挿入した。ミリポアメンブレンフィルターと同時に使用したシリカエアロ ジェルは表1にある LNS4-6、LNS4-9 であり、乱反射ペンキと同時に使用したものは LNS4-3、LNS4-4 である。最後に黒いケント紙で全体を覆い完成となる。ただし黒いケント紙一枚では遮光が完全に出来 ないため、黒い樹脂製のシートで覆った。黒いケント紙を二重にすればほぼ遮光は出来るが、この実験 では光漏れの影響をなくすため黒い樹脂製のシートを使った。作成時の様子を図1に示す。



図 1: シリカエアロジェルチェレンコフ検出器作成の様子。①黒いケント紙で枠組みを作成、円形にく りぬいた部分は光電子増倍管の設置場所である。枠組みは高さ、幅、厚さがそれぞれ 233、133、44 mm である。②4 つの光電子増倍管を固定し、ミリポアメンブレンフィルターまたは乱反射ペンキを塗った スーパーインシュレータを貼り付けた (写真はミリポアメンブレンフィルター)。光電子増倍管の窓の面 には、光電面の部分だけ円形にくり抜いたアルミナズドマイラーを貼り付けた。③1 つ目のシリカエア ロジェルを挿入、シリカエアロジェルの大きさは縦、横、厚さそれぞれ約 132、132、22 mm である。④ 2 つ目のシリカエアロジェルの挿入、1 つ目とほぼ同じ大きさである。⑤黒いケント紙でシリカエアロ ジェルを包んだ。⑥黒いケント紙一枚では完全に遮光できないため、黒い樹脂製のシートで覆った。

2 実験セットアップ

シリカエアロジェルチェレンコフ検出器のテストには運動量 457 MeV/c (**RTAGX** 電流 230 A) の電 子を入射ビームとして使用した。16×16 の 3 mm 角シンチレーティングファイバーをシリカエアロジェ ル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

 $(x 位置を特定するファイバー 16 本 の OR) \otimes (y 位置を特定するファイバー 16 本 の OR)$

とした。ただしペデスタルを取得する場合はトリガーをクロック信号に変更した。実験セットアップを 図 2 に示す。



図 2: 実験セットアップの様子。シリカエアロジェルチェレンコフ検出器を 16×16 のシンチレーティン グファイバーの直前に設置した。

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と乱反射ペンキを使用した場合

3 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のを使用した場合

4 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4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 2-3 kHz 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 つの光電子増倍管すべてに電圧 +2000 V をかけた。

3 トリガーに使用したファイバーの動作確認

ここではトリガーに使用した 16×16 のシンチレーティングファイバーの ADC 分布を確認した。図 3 にファイバーの ADC 分布を示す。どのファイバーも電子の突き抜けによるピークが確認でき、正常に 動作していた。これらのファイバーにより x 位置と y 位置を特定し、ビームのプロファイルを確認した。図 4 に電子ビームのプロファイルを示す。



図 3: シンチレーティングファイバーの ADC 分布。上の 16 個が *x* 位置を特定するためのファイバー の ADC 分布であり、下の 16 個が *y* 位置を特定するためのファイバーの ADC 分布である。黒いヒス トグラムで各ファイバーの ADC 分布を表し、赤いヒストグラムで TDC 情報がある場合の ADC 分布 を上書きしている。どのファイバーも電子の突き抜けによるピークが除去されないように正しくディス クリミネータの閾値が設定されている。



図 4: 電子ビームのプロファイル。座標はマディソン規約に従っている。

4 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。

4.1 シリカエアロジェルチェレンコフ検出器の ADC 分布

セットアップ 1-4 の各場合の ADC 分布を図 5-8 に示す。光電子増倍管 (PMT) には一律に +2000 V かけたためゲインは同じではなかった。特に PMT 1 と PMT 2 に比べ PMT 3 と PMT 4 はゲインが 低かった。



図 5: 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) の場合の ADC 分布。左 の 4 つは各 PMT の、一番右のヒストグラムは 4 つの ADC 値の和の分布である。どの図も黒いヒス トグラムがファイバーをトリガーにした ADC 分布であり、青いヒストグラムはクロックをトリガーに したペデスタルランの ADC 分布である。赤いヒストグラムはペデスタルの中心値 μ 、ペデスタルの幅 σ から μ + 2.0 σ より大きい ADC 値の時のファイバーをトリガーにした ADC 分布である。



図 6: セットアップ 2 (シリカエアロジェルと乱反射ペンキ) の場合の ADC 分布。左の 4 つは各 PMT の、一番右のヒストグラムは 4 つの ADC 値の和の分布である。どの図も黒いヒストグラムがファイ バーをトリガーにした ADC 分布であり、青いヒストグラムはクロックをトリガーにしたペデスタルラ ンの ADC 分布である。赤いヒストグラムはペデスタルの中心値 μ 、ペデスタルの幅 σ から μ + 2.0 σ より大きい ADC 値の時のファイバーをトリガーにした ADC 分布である。



図 7: セットアップ 3 (ミリポアメンブレンフィルターのみ) の場合の ADC 分布。左の 4 つは各 PMT の、一番右のヒストグラムは 4 つの ADC 値の和の分布である。どの図も黒いヒストグラムがファイ バーをトリガーにした ADC 分布であり、青いヒストグラムはクロックをトリガーにしたペデスタルラ ンの ADC 分布である。赤いヒストグラムはペデスタルの中心値 μ 、ペデスタルの幅 σ から μ + 2.0 σ より大きい ADC 値の時のファイバーをトリガーにした ADC 分布である。



図 8: セットアップ 4 (シリカエアロジェルも乱反射材もない) の場合の ADC 分布。左の 4 つは各 PMT の、越えた一番右のヒストグラムは 4 つの ADC 値の和の分布である。どの図も黒いヒストグラムがファ イバーをトリガーにした ADC 分布であり、青いヒストグラムはクロックをトリガーにしたペデスタル ランの ADC 分布である。赤いヒストグラムはペデスタルの中心値 μ 、ペデスタルの幅 σ から μ + 2.0 σ より大きい ADC 値の時のファイバーをトリガーにした ADC 分布である。

4.2 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 μ_{ped}^i と幅 σ_{ped}^i を使用して、ADC 値が $\mu_{ped}^i + 1.0\sigma_{ped}^i$ を越えた場合、 $\mu_{ped}^i + 1.5\sigma_{ped}^i$ を越えた場合、 $\mu_{ped}^i + 2.0\sigma_{ped}^i$ を越えた場合、 $\mu_{ped}^i + 2.5\sigma_{ped}^i$ を越えた場合、 $\mu_{ped}^i + 3.0\sigma_{ped}^i$ 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 9 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 場合を電子の検出効率として表 2 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 (%)。

	$\mu^i_{\rm ped} + 1.0\sigma^i_{\rm ped}$	$\mu^i_{\rm ped} + 1.5\sigma^i_{\rm ped}$	$\mu^i_{ m ped} + 2.0\sigma^i_{ m ped}$	$\mu^i_{ m ped} + 2.5 \sigma^i_{ m ped}$	$\mu^i_{ m ped} + 3.0 \sigma^i_{ m ped}$
セットアップ1	$94.5{\pm}0.3$	$89.5{\pm}0.3$	$83.5{\pm}0.3$	$76.4{\pm}0.3$	$68.9{\pm}0.3$
セットアップ 2	$74.5{\pm}0.2$	$60.6{\pm}0.2$	$49.7{\pm}0.2$	$40.6{\pm}0.2$	$32.5{\pm}0.1$
セットアップ 3	$70.2{\pm}0.6$	$54.8{\pm}0.4$	$41.5{\pm}0.3$	$31.5{\pm}0.3$	$23.9{\pm}0.3$
セットアップ 4	41.3 ± 0.2	$25.4{\pm}0.2$	$14.0{\pm}0.1$	$8.1{\pm}0.1$	$4.7{\pm}0.1$

また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 μ_{all} 、幅 σ_{all} を使って、ADC 値 の和が $\mu_{all} + 1.0\sigma_{all}$ を越えた場合、 $\mu_{all} + 1.5\sigma_{all}$ を越えた場合、 $\mu_{all} + 2.0\sigma_{all}$ を越えた場合、 $\mu_{all} + 2.5\sigma_{all}$ を越えた場合、 $\mu_{all} + 2.0\sigma_{all}$ 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 3 にまとめる。



図 9: 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 (シリカエアロジェルと乱反 射ペンキ)、3 列目はセットアップ 3 (ミリポアメンブレンフィルターのみ)、4 列目はセットアップ 4 (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 $\mu_{ped}^{i} + 1.0\sigma_{ped}^{i}$ 、2 段目は $\mu_{ped}^{i} + 1.5\sigma_{ped}^{i}$ 、3 段目は $\mu_{ped}^{i} + 2.0\sigma_{ped}^{i}$ 、 4 段目は $\mu_{ped}^{i} + 2.5\sigma_{ped}^{i}$ 、5 段目は $\mu_{ped}^{i} + 3.0\sigma_{ped}^{i}$ 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。

どちらの場合においても、セットアップ1とセットアップ2を比較すると検出効率が大幅に上がって おり、乱反射材として乱反射ペンキよりもミリポアメンブレンフィルターのほうが優れている結果となっ た。またセットアップ4では検出効率がほとんどなく、セットアップ3では多少の検出効率があるため、 ミリポアメンブレンフィルター自身も光を発生させている可能性があり、閾値を高く設定する必要があ

 $\mu_{\rm all} + 1.0\sigma_{\rm all}$ $\mu_{\rm all} + 1.5\sigma_{\rm all}$ $\mu_{\rm all} + 2.0\sigma_{\rm all}$ $\mu_{\rm all} + 2.5\sigma_{\rm all}$ $\mu_{\rm all} + 3.0\sigma_{\rm all}$ セットアップ1 $94.1 {\pm} 0.3$ $91.9 {\pm} 0.3$ $89.1 {\pm} 0.3$ $86.1{\pm}0.3$ 82.6 ± 0.3 セットアップ 2 $65.7{\pm}0.2$ $59.6 {\pm} 0.2$ $53.6 {\pm} 0.2$ $49.1 {\pm} 0.2$ $44.7 {\pm} 0.2$ セットアップ3 $29.0{\pm}0.3$ $22.2{\pm}0.3$ 17.9 ± 0.2 14.7 ± 0.2 12.3 ± 0.2 セットアップ4 $15.3 {\pm} 0.1$ $7.3 {\pm} 0.1$ $3.7{\pm}0.1$ $1.7{\pm}0.0$ $0.9{\pm}0.0$

表 3:4 つの PMT の ADC 値の和が閾値を越えた時の電子の検出効率(%)。

る。ミリポアメンブレンフィルターからの光の検出効率を 1% 以下に抑えるためには、セットアップ 1 において閾値を $\mu_{all} + 6.0\sigma_{all}$ とする必要があり、そのときの電子の検出効率は 59.9±0.2% となる。

トリガーとして使用したファイバーは 3 mm 角であり、x、y とも 3 mm 単位で入射した電子の位置 情報がわかる。電子の検出効率に位置依存性があるか調べた。表 4 にファイバーで特定した各位置ごと の検出効率をまとめる。この結果から y 方向の位置依存性は見られないが、x 方向の位置依存性は見ら れた。これは、x 方向の位置により乱反射されたチェレンコフ光が PMT に入射する立体角が変わるた めと考えられる。-x 方向に設置した PMT 3、PMT 4 は +x 方向に設置した PMT 1、PMT 2 のゲイ ンより低いため、ゲインの低い PMT に入る立体角が大きくなれば検出効率を落とすと考えられる。

表 4: ファイバーで特定した各位置ごとの検出効率 (%)。ただしどの場合もセットアップ 1 の条件で、 4 つの PMT の ADC 値の合計が $\mu_{all} + 2.0\sigma_{all}$ を越えた場合の検出効率とした。

	$-6 \le x < +6$	$-18 \le x < -6$	$+6 \le x < +18$	$-6 \le x < +6$	$-6 \le x < +6$
	$-6 \le y < +6$	$-6 \leq y < +6$	$-6 \leq y < +6$	$-18 \le y < -6$	$+6 \le y < +18$
セットアップ 1	$85.4{\pm}0.9$	$82.6{\pm}1.0$	$88.7{\pm}0.9$	$84.9{\pm}1.1$	$85.2{\pm}1.0$

4.3 検出された平均光子数

ここではチェレンコフ光が PMT で検出された平均の個数を実験結果から推定する。

検出される平均光子数は少ないため、ポアソン分布に従っていると仮定する。検出される平均光子数 を λ として、光子数 n ごとの検出確率 P(n) は

$$P(n) = \frac{\nu^n \exp(-\nu)}{n!} \tag{2}$$

とあらわされる。いま電子によるチェレンコフ光の検出効率が 90% であるとすると、1 つも光子が検出 されない確率 P(0) を使用して

$$0.9 = 1 - P(0) = 1 - \exp(-\nu) \tag{3}$$

となる。これから検出される平均光子数 νは 2.3 個と求まる。

ただし、ファインメッシュ型の PMT では 1 つの光電子で反応した場合のピークがはっきりと検知で きないため、1 つの光電子のみでは反応したかわからない場合がある。今 2 つ以上の光電子で反応する と仮定すれば、同様に

$$0.9 = 1 - P(0) - P(1) = 1 - (1 + \nu) \exp(-\nu)$$
(4)

から、検出される平均光子数 λ は 3.9 個となる。

これらは序で述べた検出される光子数の予想と大きな矛盾はない。

5 まとめ

NKS 2 で電子・陽電子対生成イベントをトリガーの段階で除去するためのシリカエアロジェルチェレンコフ検出器を製作し、その性能を電子・陽電子テストビームラインで測定した。チェレンコフ光の乱反射材として乱反射ペンキよりミリポアメンブレンフィルターを用いた場合の方が電子の検出効率が高かった。この場合電子単独で約83%の検出効率となった。実際のNKS 2 の使用では電子・陽電子両方が検出器るので、検出効率は約97%となる。ミリポアメンブレンフィルターが発生する光を抑えるためADC 値に高い閾値を要求した場合、電子単独で60%、電子・陽電子両方で84%の検出効率となった。

今回の実験では PMT に一定の電圧として +2000 V しかかけなかったため、ゲインが低い PMT が存在した。かける電圧を高くすることによりもっと電子の検出率が上がると期待できる。今後より高い検出効率を得るため、ミリポアメンブレンフィルター以外の乱反射材でもテストを行う。