

粒子ビームを用いたシャワー型検出器の 性能評価

吉田浩司*

(平成 16 年 7 月 15 日 受理)

Abstract

The performance of a lead/scintillator sandwich-type detector with a wave length shifter fiber readout has been tested by using 0.4–2.0 GeV/c electrons and pions. It has been fabricated as a prototype counter for the KEK E391a experiment. For electrons the prototype counter provides a very linear response to the incident energy. The energy resolution is obtained to be $\sigma/E (\%) = 5.10 \pm 0.03/\sqrt{E} (\text{GeV}) \oplus 0.00 \pm 0.26$. A light yield of 5.75 ± 0.03 photoelectrons/MeV is obtained for the incident energy of γ rays. It corresponds to a light yield of 19.6 ± 0.1 photoelectrons/MeV for the energy deposit in a plastic scintillator. These values ensure the detection inefficiency of 10^{-4} for photon veto counters of the E391a experiment.

1 序論

KEK E391a 実験のために、Wave Length Shifter (WLS) Fiber を集光系に採用したサンドイッチ型電磁シャワーカロリメーターを試作し、 π 、 e などの粒子ビームを用いて性能評価実験をおこなった。本論文ではその実験結果について報告する。

KEK E391a 実験は、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応の存在を探索し、K 崩壊におけるその反応の分岐比を測定しようとするものである [1][2]。標準理論により予想されている分岐比は 10^{-11} 程度と大変小さいものであるが [3][4]、一方で理論計算による不定性も数%程度と大変小さいと考えられている [5][6]。したがって、この反応の分岐比測定は、CKM 行列要素の $\text{Im}V_{td}$ に関して大変クリー

*Department of Physics, Faculty of Science, Yamagata University, Yamagata 990-8560, Japan. (Phone: +81-23-628-4570; Fax: +81-23-628-4567; E-mail: yoshida@sci.kj.yamagata-u.ac.jp)

んな情報を提供することができる。また理論的な不定さをほとんど含まずに、直接項 ($\Delta S = 1$ 遷移) の振幅を決定することができるので、CP の破れの起源の解明に重要な手がかりを与えることができると考えられている。(標準理論では top quark を介するペンギンダイヤグラムによって K の崩壊に虚部の振幅を持ち込むことができるが、super weak 理論などは $\Delta S = 2$ の相互作用なので $\Delta S = 1$ 遷移では CP の破れを作ることはできない。)

近年 K 中間子の稀崩壊の物理では重要な発見、報告が続いてきている。1999 年には FNAL KTeV グループや CERN NA48 グループによる ε'/ε の測定により、直接 CP 対称性を破る過程の存在が確実になってきた [7][8]。さらに 2002 年には BNL E787 グループによって $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の分岐比が 1.57×10^{-10} と決定された [9]。一方で $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分岐比の上限値は 2000 年に 5.9×10^{-7} と報告されるにとどまっておらず [10]、さらなる物理の理解のために $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分岐比の精密測定の重要性がさらに高まってきている。

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応に関わる粒子は全て電氣的に中性であるので、この反応は、測定器内において

$$\begin{aligned} K_L^0 &\rightarrow \pi^0 + \text{nothing} \\ \pi^0 &\rightarrow \gamma\gamma \end{aligned}$$

の事象があったことを観測することによって同定される。すなわち 2 つの γ の位置 (方向) とエネルギーが精密に測定され π^0 の kinematics が定まり、且つ、 K_L^0 の崩壊領域の全てを覆う測定器系によって *nothing* が保証されなければならない [1][2]。Fig.1 に E391a 実験の測定器配置の概略図 (側面図) を示す。測定器は K_L^0 Beam Line について円筒対称に配置されている。 K_L^0 崩壊による π^0 からの 2 つの γ 線は、Endcap 部に配置された γ Calorimeter (pure-CsI 結晶などからなる) によって検出される。残りの領域は全て Veto Counter で覆われており、それらは上式の *nothing* を保証するために用いられる。測定器内の崩壊領域で Decay vertex が確認でき、且つ π^0 の横向き運動量が $120 \text{ MeV}/c \leq P_T \leq 230 \text{ MeV}/c$ であったとき、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応であることが同定される。このように、この実験では観測された 2γ 事象に対してしか厳しい運動学的な制限をかけることができないので、Veto Counter によるバックグラウンド事象の排除が大変重要である。特に $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊の分岐比は $(9.14 \pm 0.34) \times 10^{-4}$ と比較的高く、この崩壊によるバックグラウンドを 10^{-11} のレベルで排除するためには、入射 γ 線 1 個あたりの不感率が 10^{-4} 程度でなければならない。測定系の統計が Poisson 分布に従うこと、光電子増倍管 (PMT) の暗電流による影響を免れる程度にしきい値を設定すること等を考慮すると、この不感率 10^{-4} という数字は、PMT における平均獲得光電子数が 10 個程度に相当する¹。またサンドイッチ型検出器の不感率は S. Ajimura らによって詳細に調べられている [11]。その値は同様に 10^{-4} 程度

¹Poisson 分布は平均獲得光電子数 \bar{N} の 1 変数のみによってその分布の形が決まる。与えられた \bar{N} に対して光電子数が 0 または 1 となる確率は $R = e^{-\bar{N}} (1 + \bar{N})$ と表される。例えば $\bar{N} = 10$ に対しては $R = 4.99 \times 10^{-4}$ 、 $\bar{N} = 12$ に対しては $R = 7.99 \times 10^{-5}$ となる。

であり、*photonuclear interaction* 後の中性子放出に、その主要因があることが明らかになっている。したがって Photon Veto Counter の要求される性能は、検出エネルギー領域²において「平均獲得光電子数が10個以上」ということになる。

このため Prototype Counter を試作し、加速器ビームを用いて性能評価をおこなった。

2 Prototype Counter の製作

Fig.1 に示した、長さ 5m 以上内径 2m 以上の崩壊領域の全てを CsI などの結晶で覆うのは、コスト的に現実的ではないので、Photon Veto Counter は必然的にサンドイッチ型電磁シャワー検出器としてデザインされることになった。そして以下の2点が開発の焦点になった。

(1) 5m 以上の長さのプラスチックシンチレーター

従来の Casting 法で製造可能なプラスチックシンチレーターの長さは 4.1m であり [12], E391a に必要な長さには足りない。またこの製法で製造された、ポリスチレンやポリビニルトルエンをベースにしたシンチレーターの機械的強度は弱く、E391a のような大きな測定器の加重に耐えられない。したがって新たなプラスチックシンチレーターの開発が必要である。

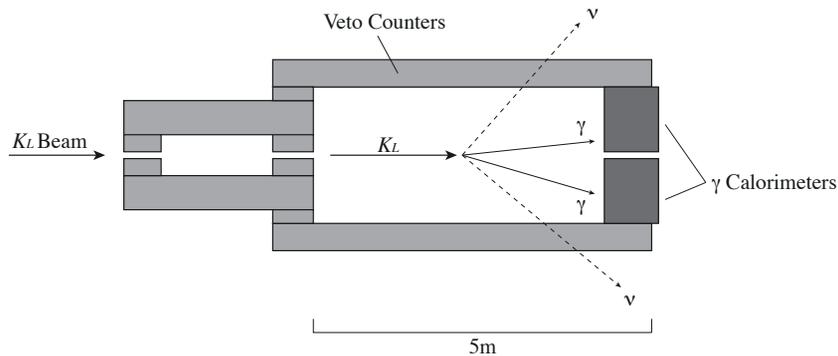


Fig. 1. E391a 実験の測定器配置の概略図 (側面図)

(2) 長いシンチレーター内におけるシンチレーション光の減衰

厚さ数 mm の長いプラスチックシンチレーター内をシンチレーション光が伝播するうちに減衰し、検出器端に装着された PMT にまで到達し

² $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ からのバックグラウンドの排除という点についていえば、この反応の kinematics の P_T balance などから、Photon Veto Counter の検出エネルギー領域はおおよそ $E_\gamma > 100\text{MeV}$ と想定されている [1]。

ないおそれが大きいこと。

我々の実験グループでは、機械的強度が比較的強いMS樹脂³をベースとしたプラスチックシンチレーターの開発を行ってきたので [13], (1) についてはその成果を生かし、機械的強度も強く、発光量をそれほど損なわない5m超のシンチレーターの製造方法（押し出し成形法による）を開発することができた。また(2)に関しては、プラスチックシンチレーターにWave Length Shifter (WLS) Fiberを埋め込み、シンチレーション光をFiber内でいったん波長変換した後、そのFiberを使ってPMTまで光を伝送する方式を採用することにした。

押し出し成形法によって製造された厚さ5mmのMS樹脂ベースのプラスチックシンチレーターのAttenuation Lengthが45.3cmであるのに対して、例えばBicron社製のWLS Fiber, BCF-91AのAttenuation Lengthは447cmと実測され、光の減衰に関しては1桁性能に優れている [14][15]。一旦WLS Fiberに吸収されたシンチレーション光は、それより長波長の光に変換され等方に放出される。したがって、Fiberの全反射角内に放出された光を全てFiber内に捕らえることができる。また、光の波長が長くなるのも、Fiber物質内を伝播する上での利点になっている。¹⁰⁶Ruからの β 線を用いたベンチテストでは、プラスチック内で発生したシンチレーション光のうちおよそ3%–6%が波長変換されてFiber内に取り込まれると見積もることができた。（なお同様の開発はBNL E926 KOPIOグループでも試みられていることが報告されている [16][17]。）

EGS4やGEANT4といったシミュレーションコードを用いたエネルギー応答に着目した概念設計、反射材、WLS Fiber, PMT, その他の材料やデバイスに関する研究に一定の見通しが立ったところで、テスト用のprototype counterを製作することにした。理由は以下の3点。

(i) 獲得光電子数（検出効率）の検証

検出器に入射した粒子と測定器の相互作用（1次的なエネルギーのやりとり）の様子は、EGS4やGEANT4などのシミュレーションコードによってある程度推測することが可能である。しかしそのエネルギーが光子に変換されPMTというデバイスに到達する過程は複雑であり、シミュレーションすることは難しい。前述したように、獲得光電子数と統計と検出器の検出効率とは不可分の関係がある。必要十分な光電子数が得られなかった場合には、検出器のデザインを根本的に変更しなければならない。

³メチルメタクリレート・スチレン樹脂（methyl-methacrylate styrene resin）の略称であり、スチレン系樹脂のひとつ。無色透明で、ポリスチレンとメタクリル樹脂の中間の特性を有している。

(ii) 製作手順の洗い出し

E391aの本実験で使用される検出器の重量は1モジュールあたり1tを超える。部品点数も多く、構造も複雑であるので、まずは長さ1m程度の実機を製作し、設計上の問題、製造過程における問題を洗い出しておく必要がある。

(iii) 強度テスト

E391aのPhoton Veto Counterの総重量は50tを超える。その重量を長時間にわたって各検出器モジュールが支え合うことになる。製作した実機に、様々な外力を加えてみて、検出器の強度や歪みなどをテストし、その結果を本実験用検出器の設計に生かす。

Prototype Counterは、1層あたり、鉛1mm + プラスティックシンチレーター5mmのサンドイッチ型とし、計86層（輻射長 $16.3X_0^4$ ）の構成とした。Fig.2に1層の断面図を示す。プラスチックシンチレーターは押し出し成形法で製造された長さ1mのMS樹脂ベースのもの（PPO 1%, popop 0.02%）で、片面には幅深さ共に1mmの溝が10mm間隔で長手方向に掘られている。この溝に直径1mmのBicron社製のWLS Fiber, BCF-91Aを埋め込んだ。また紫外線硬化タイプのアクリル系接着剤を溝に埋め、Fiberとシンチレーターとを接着した。反射材には、熱に強く機械的強度もあるTiO₂PETシート（厚さ0.188mm）を採用し、シンチレーターを挟み込んだ。WLS Fiberは両端ともシンチレーター端から約70cm出たところでカットした。11層あるいは10層毎（220–300本程度）にそれらを束ね、ダイヤモンドカッターによって端面を切り揃えた後、Optical Cementを使って2"φPMT Hamamatsu H1161に接着した。獲得光電子数を測定するのが目的なので、使用されるPMTは全てphoton counting type（1個の光子にも感度があるもの）でなければならない。

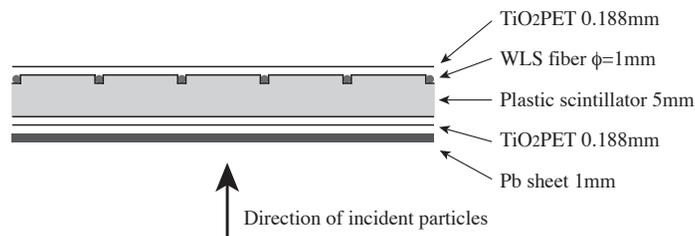


Fig. 2. Prototype Counter 1層の断面図

Fig.3にPrototype Counterの外形図を示す。鉛シート、シンチレーターの幅は1枚毎に徐々に広げられ、側面図のように台形になるように積層されている。これは下流部に行くにしたがって電磁シャワーのサイズが成長する

⁴¹ 輻射長, $X_0 = 31.6\text{mm}$ である。

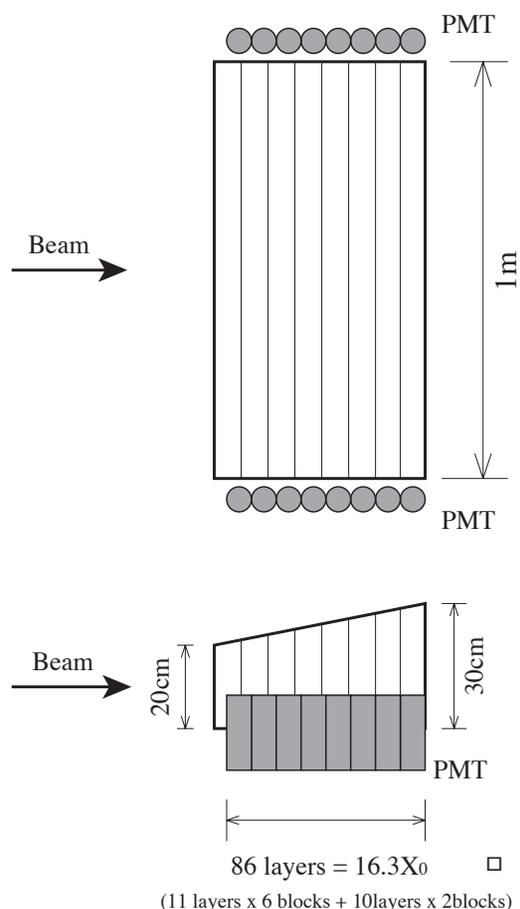


Fig. 3. Prototype Copunter の外形図 (top view および side view)

ことに対応している。シンチレーターからの光はファイバーの両端に装着された16本のPMTによって検出される。上流部12本のPMTはそれぞれ11層からのシンチレーション光の読み出しを、下流部のものはそれぞれ10層からのシンチレーション光の読み出しを行うようにFiberが束ねられている。Fig.4にPrototype Counterの写真を示しておく。

3 粒子ビームを用いたテスト実験

ビームテストはKEK-PS T1 Beam Lineで行われた。このBeam Lineは、PS Main Ring内のInternal Targetから散乱された2次粒子をビームとして使用できるようにしたもので、運動量0.4–2.0 GeV/cの範囲の正負荷電粒子を実験に供することができる。

E391aのPhoton Veto Counterが想定している、カスケードシャワーが十分に成長できるエネルギー領域では、Prototype Counterの輻射長も十分

粒子ビームを用いたシャワー型検出器の性能評価



Fig. 4. 上段の写真は、鉛シート、TiO₂PETシート、プラスチックシンチレーターを積層している様子である。左右からWLS Fiberが出ている。中段の写真は、WLS FiberにPMTを装着した写真で、全ての光シールドを終え、架台に据え付けられた状態が下段の写真である。

に大きいので、入射 γ 線と入射電子線に対するカロリメーターのエネルギー応答特性はほぼ同じと考えられる。運動量の決定、位置情報や時間情報の測定などは、 γ 線よりも荷電粒子をビームとして用いた方が実験が比較的容易である。またハドロン (π , p など) に対しても同じ Beam Line で実験ができるので、今回は電子線に対する Prototype Counter のエネルギー応答特性を測定することとした。

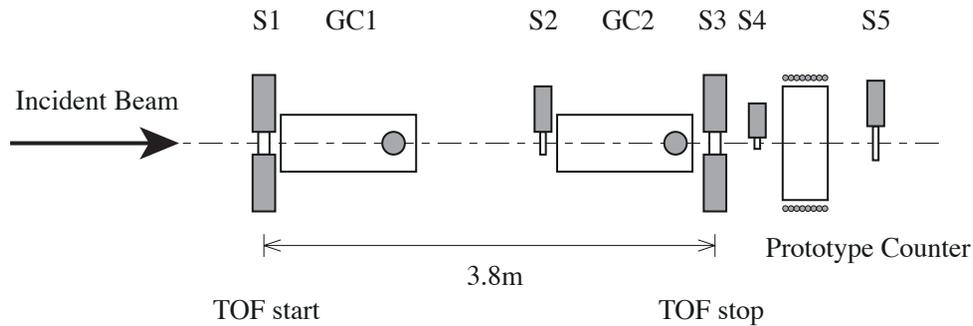


Fig. 5. 実験のセットアップ図 (top view)

Fig.5 に実験のセットアップ図を示す。

S1-S5 はプラスチックシンチレーターを表している。3.8m の距離を隔てて置かれた S1 と S3 はビーム粒子の Time of Flight (TOF) の測定に使用される。カウンターのサイズはそれぞれ、 $150^W \times 50^H \times 30^T \text{mm}^3$, $70^W \times 50^H \times 10^T \text{mm}^3$ である。両カウンターとも、左右 2 本の PMT からシンチレーション光を読み出せるようになっており、時間情報の場所依存性、波高依存性を解析することも可能なようになっている。S2 ($50^W \times 50^H \times 10^T \text{mm}^3$) は 2 台の GC を通るビーム粒子の acceptance を制限するために置かれている。S4 ($30^W \times 20^H \times 5^T \text{mm}^3$) は Prototype Counter の直前に置かれ、実験で使用されるビームサイズを実質的に決めている。ビーム軸と S4 の中心軸と Prototype Counter 前面の中心軸とは一致するように設置された。また S5 ($100^W \times 100^H \times 5^T \text{mm}^3$) は Prototype Counter を突き抜けてくる粒子の事象 (例えば π^- の punch through event) を識別するために置かれている。

GC1, GC2 は Threshold 型のガスチェレンコフカウンターであり、Trigger 段階の $e-\pi$ 識別に用いられる。使用ガスは 1 気圧の空気または二酸化炭素であり、実験時の気温 20°C での π の運動量しきい値は、それぞれのガスに対して、 $5.8\text{GeV}/c$, $4.9\text{GeV}/c$ である。

実験では以下に示す 3 種類の Trigger Logic を適宜切り替えながら、データ収集をおこなった。

- (1) Electron Trigger: S1 · S2 · S3 · S4 · (GC1 · GC2)

e^- を入射ビームとして実験するときの Trigger Logic である。実験中の Trigger Rate は 1-3/spill であった (1spill=2sec)。また Prototype

Counter の ADC データの Off-line 解析から、 $e-\pi$ の分離は 99.96% 程度で実現できていたと考えられる。

(2) Hadron Trigger (S5 ON): $S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot \overline{(GC1 + GC2)} \cdot S5$

主に π^- を入射ビームとして実験するときの Trigger Logic である。(ほとんどの π^- は Prototype Counter を突き抜ける。) Trigger Rate は 10-200/spill であった。

(3) Hadron Trigger (S5 OFF): $S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot \overline{(GC1 + GC2)}$

主に陽子 (p), 重陽子 (d) を入射ビームとして実験するときの Trigger Logic である。(Prototype Counter に入射した p や d は, カウンター内で止まってしまう。) Trigger Rate は 100-700/spill であった。

T1 Beam Line の運動量は, D 型, Q 型の各電磁石の電流値を変更することによって, 変えることができる。このビーム運動量の較正は, 実験で測定された π^+ , p , d の TOF の差を用いておこなうことができる。また電磁石を転極することによって, ビーム粒子の電荷の正負を切り替えることができる。

全てのカウンターの PMT の出力は, その電荷情報は ADC によって, その時間情報は TDC によって取り込まれた。ADC のゼロ点の時間変動を測定するため, Trigger 入力を Clock 信号に切り替え, 定期的に Pedestal Run をおこなった。また Prototype Counter の PMT の Gain の時間的変動をモニターするため, 定期的に LED の光を PMT に送り込み, その ADC データを取得した。

4 実験結果と議論

4.1 PMT の Gain の較正

Prototype Counter の応答特性を調べるのが実験目的であるので, Prototype Counter に装着されている 16 本の PMT の Gain は揃えておかなければならない。本実験では以下に述べる手順で, PMT の Gain を揃え, Energy Calibration をおこなった。

1. ビーム実験中の Gain 調整 (HV 調整)

GeV/c 領域における π^- のような粒子は Minimum Ionizing Particle (MIP) と呼ばれ, 物質中を通過する際の単位長さあたりの電離損失 (dE/dx) は最小であるので, Prototype Counter に入射しても容易に突き抜け得る。MIP の dE/dx はプラスチックシンチレーターに対して約 2MeV/cm であり, Prototype Counter を突き抜けた π^- は, プラスティックシンチレーター 86 層の各々にほぼ等しいエネルギーを与え得る。したがって 11 層を読み出している PMT の出力と 10 層を読み出

しているPMTの出力とを、あるPMTを基準として、そのパルス波高が11:10になるようにHVを調整すれば、PMTのGainが揃ったことになる。

2. Off-line解析での Energy Calibration

鉛に対するMIPの dE/dx は約12.7MeV/cmである。したがってPrototype Counterを突き抜けるMIPは、195MeVものエネルギーを通過中に失うことになる。実験に使用しているビームの運動量は高々1GeV/c前後なので、Prototype Counterの各層におけるエネルギー吸収とPMTから出力される電荷量との相関にはOff-line解析での詳細な検討が必要であることは明らかである。

そこでTrigger CounterとPrototype Counterの物質条件と幾何学条件を整備し、シミュレーションコードGEANT4を用いて、Prototype CounterのプラスチックシンチレーターにおけるMIPのエネルギー損失を計算し、実験で得られたPMTのADCデータと比較した。Fig.6は1GeV/cの π^- をPrototype Counterに入射したときのPMTのADCのヒストグラムである。(Pedestalを差し引いてある。) GEANT4で計算できるのは、物質中におけるエネルギー損失の分布そのものだけであり、測定器系の統計変動やノイズによる分解能の劣化は計算結果に含まれていない。図中実線はGEANT4の計算結果をガウス関数でfoldingし、ADCデータにフィットしたものである。Foldingに際しては、ガウス関数の標準偏差がGEANT4で求められたエネルギー損失の平方根に比例しているという仮定だけを置いた。GEANT4の計算結果が実験値をよく再現していることがわかる。

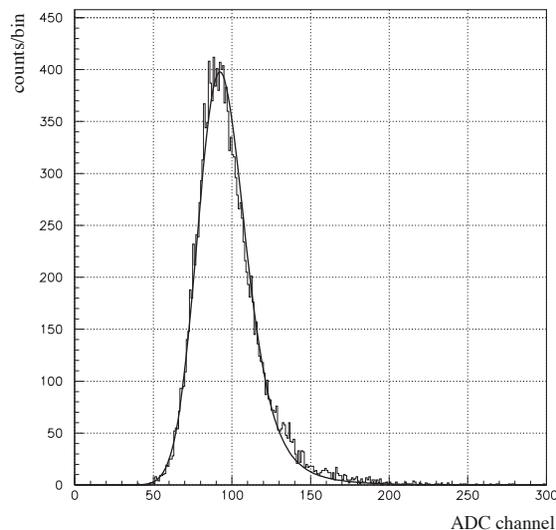


Fig. 6. 1GeV/cの π^- をPrototype Counterに入射したときのPMT 1本のADCのヒストグラム

こうして16本のPMTのADCデータの全てに共通のEnergy Scaleを入れることができた。入射運動量0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5GeV/cの π^- eventsについて、上述のEnergy Calibrationをおこない、その結果は $\pm 0.5\%$ の範囲で一致した。

4.2 入射電子に対する応答

1GeV/cの電子をPrototype Counter中央に垂直入射したときの16本のPMTのADCスペクトルをFig.7に示す。横軸はEnergy calibration後のADC、縦軸はCount数である。ビーム進行方向右側のPMTのデータについては上流側からNo.1-No.8、左側のPMTについては上流側からNo.9-No.16と番号がふってある。この図からPrototype Counter内での電磁シャワーの成長の様子が見て取れる。これら16本のPMTのEnergy Responseを足し合わせ2で割ったものが、Prototype CounterのEnergy Responseとなる。

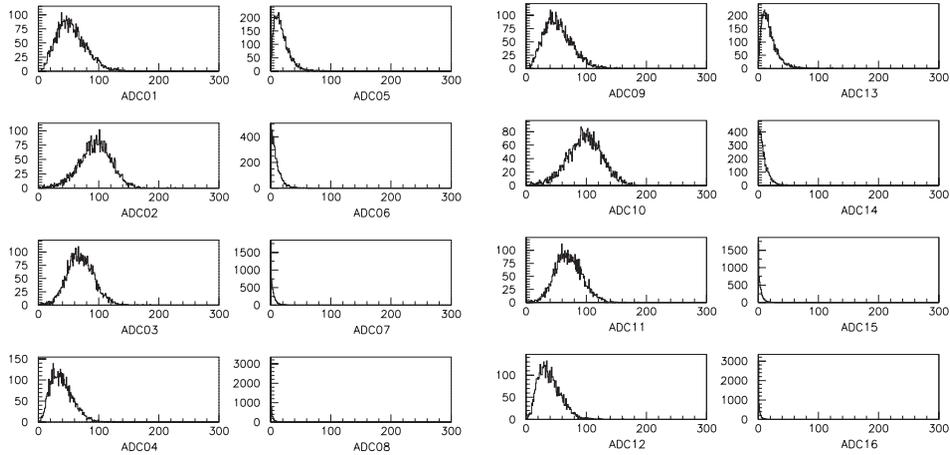


Fig. 7. 1GeV/cの電子をPrototype Counter中央に垂直入射したときのPMT16本のADCスペクトル

入射運動量0.4, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2GeV/cに対するEnergy Response分布をFig.8に示す。これらの分布にガウス関数によるFittingをおこない、中央値と分解能を評価した。中央値についてのプロットをFig.9に、分解能についてのプロットをFig.10に示す。エネルギー分解能の誤差 $\Delta(\sigma/E)$ は、それぞれのエネルギーにおけるカウント数を N として、 $\Delta(\sigma/E) = \left(1/\sqrt{N}\right)(\sigma/E)$ と評価した。ビームの状態がPrototype Counterの分解能に及ぼす程度を知るために、Beam Line SlitをFull Openしたときのデータも合わせてプロットしてある。Prototype CounterのEnergy Responseの中央値は

$$\text{Energy Response (GeV)} = (0.293 \pm 0.001) \times \text{Incident Energy (GeV)}$$

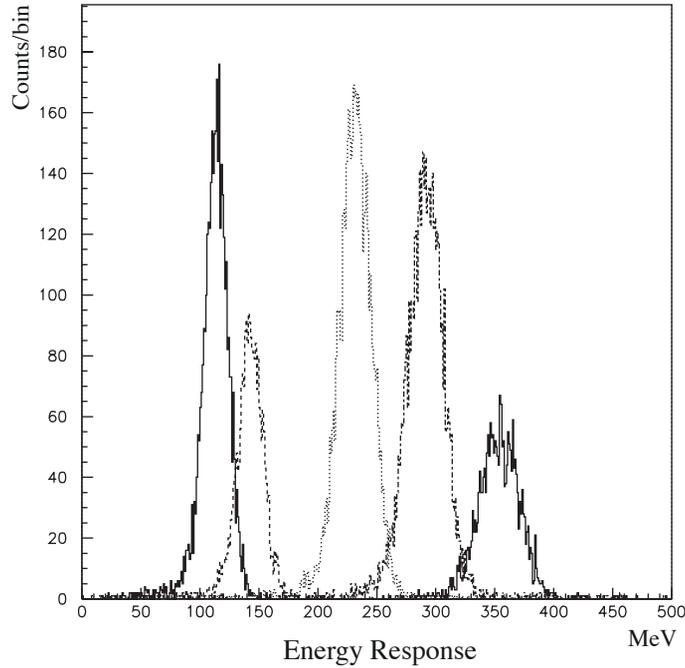


Fig. 8. さまざまな入射運動量に対する Porototype Counter の Energy Response 分布。
(左から入射運動量 0.4, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2GeV/c に対応している。)

と優れた直線性を示した。(上式の誤差は Fitting Error である。) 分解能については、統計項と定数項を含む式でフィットを行い、以下の結果を得た。

$$\frac{\sigma}{E} (\%) = \frac{5.10 \pm 0.03}{\sqrt{E} (\text{GeV})} \oplus 0.00 \pm 0.26 \quad (\text{Slit Close})$$

$$\frac{\sigma}{E} (\%) = \frac{5.22 \pm 0.02}{\sqrt{E} (\text{GeV})} \oplus 0.00 \pm 0.22 \quad (\text{Slit Open})$$

示されている誤差は Fitting Error である。また記号 \oplus は、自乗和の平方根を取ってデータを評価したことを表している⁵。実験中の Pedestal Peak の幅および時間的変動は 2-3ch であり、これは Energy Deposit にして高々 0.2-0.3MeV 程度である。したがって分解能の評価式には、特段ノイズ項を加える必要は無いと判断した。“Slit Close” とは T1 Beam Line Slit の幅を 20mm に設定して取得した実験データであり、“Slit Open” とはこの Slit を全開にして取得した実験データである。両者における入射電子の TOF スペクトルを

⁵すなわち $\sigma/E = \sqrt{(a/\sqrt{E})^2 + b^2}$ という式で評価した。この形の式でデータを評価しているにも関わらず、その結果を $\sigma/E = a/\sqrt{E} + b$ という形式で記載している文献もあり注意が必要である。本論文では、いくつかのカロリメーターの論文での慣用に従い、記号 \oplus を用いている。

比較すると, Slit Open の方が, Slit Close よりピークの幅が2倍程度広がっている。しかしこれはビーム運動量の広がり $\Delta p/p$ が2倍になったということの意味するわけではない。入射電子の速度はほとんど $\beta = 1$ なので, TOF データから運動量を決定することはできないからである。むしろビームライン上における電子の発生点の違いなどが TOF スペクトルに現れる。もちろん Slit Open の方が, さまざまな由来の電子を Beam Acceptance 内に加え込むので, ビームの質は $\Delta p/p$ も含めて悪化する。Slit の開閉による統計項への寄与は, Fitting の中央値を見る限りでは, $0.1 (\%) / \sqrt{E (\text{GeV})}$ 程度と見積もられる。特に 0.5 GeV でのデータが, 分解能の評価に影響を及ぼしていることが, Fig.10 のプロットから推察される。またビーム運動量の中心値が Slit の開閉により影響を受けているであろうことは, Fig.9 の 2.0 GeV のデータプロットから推測される。1.0–1.5 GeV の範囲で5点について GEANT4 によるシミュレーションをおこない, σ/E について評価してみたところ

$$\frac{\sigma}{E} (\%) = \frac{5.07 \pm 0.40}{\sqrt{E (\text{GeV})}} \oplus 0.00 \pm 1.42 \quad (\text{GEANT4})$$

という結果が得られた。比較するに, 実験で得られた分解能の統計項, 定数項はともにシミュレーションにより得られた結果の誤差の範囲内であった。

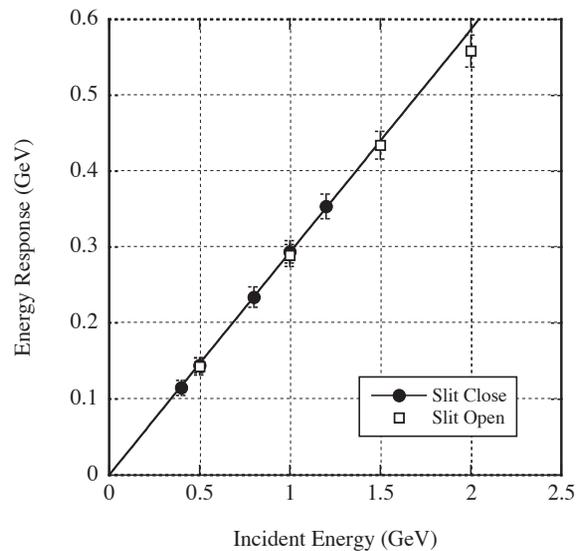


Fig. 9. 入射エネルギーに対する Porototype Counter の Energy Response の中央値

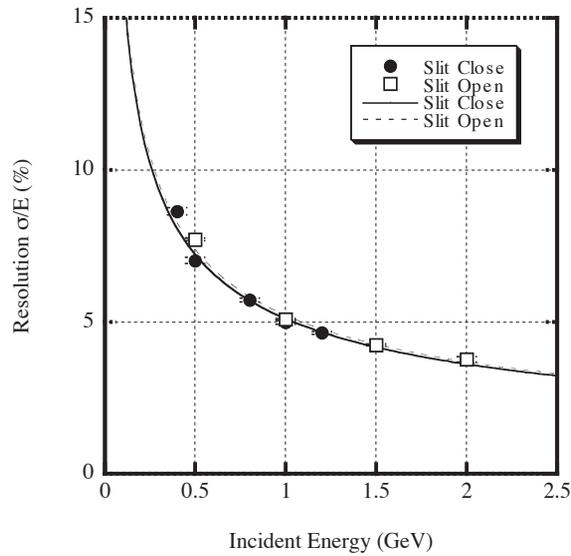


Fig. 10. 入射エネルギーとエネルギー分解能の関係

4.3 獲得光電子数の見積もりと性能評価

前述したように、検出器の不感率と PMT における光電子数に関する統計は不可分の関係にあるので、実験データから獲得光電子数を求めることが必要である。そこで PMT の光電子数と ADC channel の相関を測定した。いわゆる PMT の Gain Curve の測定である。

1. Single Photon 測定

- (a) LED を微弱に発光させ、それを光ファイバーで PMT に導く。
- (b) PMT の出力を ADC で測定すると、Single Photoelectron のピークが観測される。
- (c) スペクトルは Poisson 分布に仕上がっているので、Poisson 分布関数の Fitting から、ADC スペクトル上の Single Photoelectron の位置が正確に決まる。
- (d) その位置から Pedestal Peak channel を差し引いた channel 数が、光電子 1 個に相当する ADC の channel 数となる。すなわちその印加電圧における PMT の電流増倍率 (Gain) を決めたことになる。
- (e) PMT の印加電圧を変え、以上の測定を繰り返す。

こうして得られた Gain Curve を Fig.11 に示す。図中、黒丸が Single Photon 測定によるデータである。

2. LED 発光量を増やした測定

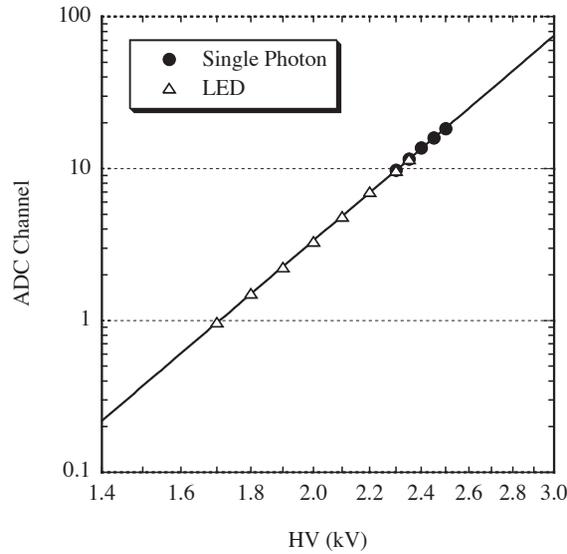


Fig. 11. PMT の Gain Curve (Single Photoelectron に対する ADC Channel)

ビーム実験中に PMT に印加されていた電圧 1700–1800V では、上記の Single Photon 測定をおこなうことは不可能である。そこで LED の発光量を増やして、そのピークを ADC で観測する。発光量の変動しないことに細心の注意を払いながら、PMT の印加電圧を変えていき Gain Curve を得る。2300V と 2350V では、Single Photon 測定も可能であったので、光電子 1 個に相当する channel 数もわかる。したがって発光量を増やした LED ピークの光電子数を求めることができ、2つの Gain Curve を接続することができる。こうして LED の発光量を増やして測定した結果を、Single Photon 測定で規格化してプロットした結果が Fig.11 の三角の点である。(Pedestal は引いてある。)

このようにして、Prototype Counter の Energy Response を獲得光電子数に換算し、以下の関係式を得た。(誤差は Fitting Error である。)

$$\text{Photoelectron Yield} = (5.75 \pm 0.03) \times 10^3 \times \text{Incident Energy (GeV)}$$

すなわち γ 線に対して、入射エネルギーあたり 5.75 ± 0.03 個/MeV の光電子数を得ることができる。この値をプラスチックシンチレーターにおける Deposit Energy あたりに換算すると 19.6 ± 0.1 個/MeV となる。厚さ 5mm のプラスチックシンチレーターに対する MIP の Energy Deposit は 1MeV であるので、この値は MIP の入射に対して、Prototype Counter 1 層あたりに得られる光電子数と同じである。MIP がシンチレーター 11 層の片側の PMT に与える光電子数は 108 個程度と計算できるが、この数は Fig.6 で観測される π^- のピークと一致している。

1GeV/c の π^- 入射に対して得られる光電子数を、16本全てのPMTについて求め、Prototype Counterの均一性について調べてみた。Fig.12は16本のPMTについての「PMT 1本あたり Deposit Energy あたりの獲得光電子数分布」である。分布の平均値は10.7個/MeVである。16本について分布の極端なばらつきも無く、WLS Fiber 読み出しを含めたPrototype Counterの基本構成に問題は見られないと考えられる。このグラフは獲得光電子数に換算されているので、各PMTの電流増倍率に左右されずにPrototype Counterの均一性について考察することができる。不均一性を生じる原因については以下の3点が考えられる。

- (1) 経験則であるが、WLS Fiber 端面の加工具合と接着具合により最大20-30%のばらつきが生じることがある。
- (2) PMT 光電面の感度の Uniformity は最大で30%程度変動する。したがって光電面上 WLS Fiber の装着箇所によって感度のばらつきが生じる。
- (3) その他、シンチレーターの溝の加工具合や、WLS Fiber とシンチレーターの接着具合の不均一性なども考えられる。(定量的な評価は難しい。)

この種の不均一性は、他の種類の検出器一般にも見られるものであるが、前述したように Energy Calibration から応答特性まで、この Prototype Counter の性能には全く影響が見られなかった⁶。

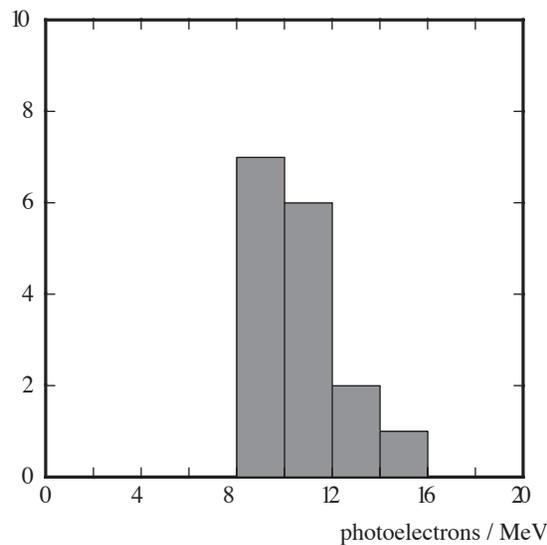


Fig. 12. 16本のPMTについての「PMT 1本あたり Deposit Energy あたりの獲得光電子数分布」

⁶なお、上記(1),(2)についてはライトガイド接合ジグの工夫や、ライトミキサーの使用などである程度回避することが可能で、E391aのFront Barrel Counter, Main Barrel Counterでは、本論文の経験を生かしてそのような措置が取られた。

この獲得光電子数に関する実験結果から、E391a で想定される Photon Veto Counter において得られるであろう光電子数について見積もってみる。Photon Veto Counter のひとつ Main Barrel Counter (MB) の長さは 5.5m である。シンチレーター端から PMT までの WLS Fiber の長さを 75cm とすると、カウンター中心から PMT までの距離は 3.5m となる。この実験で使用した Prototype Counter の中心から PMT までの距離は約 1.2m である。シンチレーション光の読み出しに使用された WLS Fiber の減衰長は 4.47m であるので [15], MB のカウンター中心を粒子が通過した事象に対して、カウンターの両側から信号を読み出したとすれば、シンチレーターへの Energy Deposit に関して 11.7 個/MeV の光電子数が得られる計算になる。すなわち MIP に対しては厚さ 5mm のプラスチックシンチレーター 1 層で、 10^{-4} の不感率を達成できている勘定になる。また γ 線に対しては入射エネルギーあたり 3.44 個/MeV の光電子数が得られる計算となる。これは平均 3.5 個程度の電子対生成について 10^{-4} の不感率が達成されている勘定になっている。E391a では新型の PMT を開発し、WLS Fiber 読み出しの場合、獲得光電子数を 1.8 倍程度まで増やすことが可能になっている [18]。したがってこの新型 PMT を使用すれば、 γ 線に対して 6.18 個/MeV の光電子数を得ることができ、平均 2 個程度の電子対生成について 10^{-4} の不感率を達成することが可能と考えられる。(以上の議論は、発光量と電磁シャワーとの相関に議論を限定したものである。Photo-nuclear Reaction による効果や、カウンター構造からくる Sampling Effect などに関する不感率については別種の実験や議論が必要である。)

5 まとめ

KEK E391a 実験のために、WLS Fiber を集光系に採用したサンドイッチ型電磁シャワーカロリメーターの Prototype Counter を試作し、 π 、 e などの粒子ビームを用いて性能評価実験をおこなった。Prototype Counter は、1 層あたり、鉛 1mm + プラスチックシンチレーター (MS 樹脂ベース) 5mm のサンドイッチ型とし、計 86 層 (輻射長 $16.3X_0$) の構成とした。

Prototype Counter の応答は、入射電子に対して大変良好な直線性を示した。またエネルギー分解能は $\sigma/E (\%) = 5.10 \pm 0.03 / \sqrt{E (\text{GeV})} \oplus 0.00 \pm 0.26$ であり、シミュレーションから予想される性能に遜色の無いものであった。得られた光電子数は、 γ 線の入射エネルギーあたり 5.75 ± 0.03 個/MeV であり、プラスチックシンチレーターにおける Deposit Energy あたりに換算すると 19.6 ± 0.1 個/MeV であった。これらの実験結果は、Prototype Counter の基本デザインを踏襲して、KEK E391a の Photon Veto Counter を製作したとしても、十分な性能、不感率 10^{-4} を達成できることを示している。また π^- 入射に対する応答から Prototype Counter の均一性についても確認ができた。

Acknowledgements

本論文をまとめるにあたり，研究全般にわたって，山形大学理学部物理学教室クォーク核物理学研究グループのスタッフ，加藤静吾氏，岩田高広氏，田島靖久氏のお世話になった。高エネルギー加速器研究機構の E391a の共同実験者の方々，稲垣隆雄氏，吉村喜男氏，奥野英城氏，GeiYoub Lim 氏とは日々有益な共同研究ができ，お礼申し上げたい。東北大学原子核理学研究施設の清水肇氏からは研究上の親切な助言をいただいた。また三浦明夫氏，有賀雄一氏をはじめとする，歴代クォーク核物理学研究グループの学生の皆さんからは真摯な研究協力をいただいた。心から感謝したい。

References

- [1] T. Inagaki et al., *Proposal of an experiment at the KEK 12GeV proton synchrotron "Measurement of the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ "*, KEK Internal **96-13** (1996).
- [2] K. Abe et al., *Contributed paper for ICHEP2000 "Status of the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at KEK (E391a)"*, KEK Preprint **2000-89** (2000).
- [3] W.J Marciano and Z. Parsa, *Physical Review* **D53** (1996) R1–R5.
- [4] G. Buchalla and A.J. Buras, *Physical Review* **D54** (1996) 678–6789.
- [5] G. Buchalla and A.J. Burasa, *Nuclear Physics* **B398** (1993) 285–300.
- [6] G. Buchalla and A.J. Burasa, *Nuclear Physics* **B400** (1993) 225–239.
- [7] A. Alavi-Harati et al., *Physical Review Letters* **83** (1999) 22–27.
- [8] V. Fanti et al., *Physics Letters* **B465** (1999) 335-348.
- [9] S. Adler et al., *Physical Review Letters* **88** (2002) 041803-1–4.
- [10] A. Alavi-Harati et al., *Physical Review* **D61** (2000) 072006-1–5.
- [11] S. Ajimura et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A435** (1999) 408–422.
- [12] Bicron Corp. scintillator catalog.
- [13] Y. Yoshimura et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A406** (1998) 435–441.

- [14] Y. Yoshimura, E391a Tech. Note **157** (2004) 1–18.
- [15] A. Miura, Master Thesis “Performance test of the 1m veto counter module for K0 rare decay experiment” (in Japanese); Department of Physics, Yamagata University, 2001.
Y. Aruga, Master Thesis “Performance of the barrel counters for KEK E391a experiment” (in Japanese); Department of Physics, Yamagata University, 2002.
E391a Collaboration, to be published.
- [16] Yu.G. Kudenko et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A469** (2001) 340–346.
- [17] O. Mineev et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A494** (2002) 362–368.
- [18] M. Itaya et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A522** (2004) 477–486.