

CERN PS における DIRAC 実験 (PS212) 用 dE/dx 検出器用 プラスチックシンチレータの性能評価

平成 23 年 5 月 27 日受付

青 垣 総一郎
京都産業大学コンピュータ理工学部

要 約

CERN PS からの陽子ビームを用い、 $\pi\pi$ 原子の寿命測定などのために今まで改良を重ねてきたスペクトロメータにさらに高強度のビーム中で働くよう、dE/dx 検出器に改良を加え、国際共同研究 PS212 (DIRAC) グループと共に、 $\pi\pi$ 原子の励起準安定状態の同定・計数が出来るようにし Lamb shift の測定を行う。本稿では改良版 dE/dx 検出器で使用されるプラスチックシンチレータの性能測定と仕様の決定について述べる。

1. はじめに

現在我々は、CERN PS において国際共同研究 PS212 (DIRAC) に京都産業大学を中心とした日本グループとして参加している。CERN PS からの陽子ビームを用い、今まで改良を重ねてきたスペクトロメータにさらに高強度のビーム中で働くよう、主に dE/dx 検出器に改良を加え、他のグループと共に、 $\pi\pi$ 原子の励起準安定状態の同定・計数が出来るようにし Lamb shift の測定の準備を行っている [1, 2]。現在、図 1 に示されている様な検出器の制作を考えているが、使用するプラスチックシンチレータの性能が鍵となる。DIRAC 実験では電荷の異なる 2 種類の中間子 π^+ と π^- がクーロン力でゆるく結合しあたかも原子の様にふるまう二中間子原子 ($A_{\pi\pi}$) を作る。この原子は強い相互作用によって $A_{\pi\pi} \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ と崩壊し寿命は 10^{15} 秒程度と非常に短い。この崩壊寿命を直接測定する事は現在の実験技術においても不可能である。しかしながら、もしこれを測定できれば崩壊寿命の逆数が $\pi\pi$ の S 波散乱長 (ここでは $|a_0 - a_2|$, 添字は isospin) に比例することから、従来 π 粒子と核内核子との散乱 $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ などから測定していた $\pi\pi$ 散乱長を核子の寄与なくモデルに依存しない方法で精度良く得ることができる。[3] 一方、理論的には低エネルギーでの散乱は非摂動領域での QCD 計算を必要とするため一般的には正確な計算が難しいのであるが、 $\pi\pi$ 散乱長はカイラル摂動計算により例外的に高い精度で

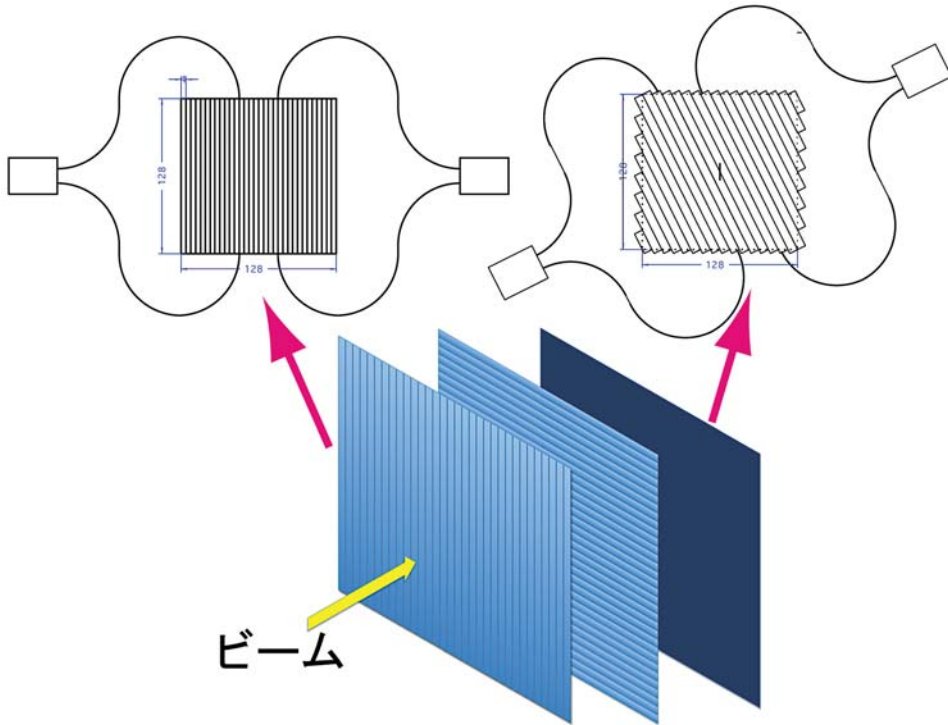


図 1 dE/dx 検出器の模式図。短冊状のプラスチックシンチレータで板を作成し、その一本一本をファイバーで読み出す。縦横斜め向きの三層を使用することで位置分解能を高める。

求めることができ、現在では計算手法の進歩によって $\pi\pi$ では 1.5% 程度の精度で散乱長が得られている。[4] それゆえ二中間子原子の崩壊寿命測定実験から理論と同程度の精度で散乱長が得られれば、QCD 理論の中でまだ実験的に十分に検証されていない低エネルギー非摂動領域での QCD の有効なテストになることが期待できる。

1985 年 L. Nemenov は巧妙な方法によって $A_{\pi\pi}$ の寿命を測定する方法を考案した。[5] $A_{\pi\pi}$ は標的に陽子を当てて生成させるが、この標的に重い金属を用い、走っている $A_{\pi\pi}$ が崩壊する前に強制的に解離を起こさせる。 $A_{\pi\pi}$ の生成断面積と $A_{\pi\pi}$ の解離の確率は信頼度の高い計算が可能であるから、標的の厚さが分かれば実験的に $A_{\pi\pi}$ 起源の解離した π^+ と π^- を数えることによって $A_{\pi\pi}$ 原子の寿命を測定することができるというものである。

この実験の難しいところは $A_{\pi\pi}$ の生成断面積は小さいので大強度の陽子ビームが必要なこと、また、そこから生成される大量のバックグラウンド粒子の中から $A_{\pi\pi}$ 起源の解離した π^+ と π^- を同定するためには高位置分解能と高時間分解能を持つ検出器 = ホドスコープが必要であることである。

高い時間分解能はプラスチックシンチレータと速い光電子増倍管を使用することでクリアで

きる。位置分解能については図1の様な形で作成した検出器を用いることでクリアできる。4 mm × 128 mm のプラスチックシンチレータを 32 枚並べて板を作成する。その短冊状の一本一本をファイバーで読みだしてやることでどのプラスチックシンチレータに入射したかがわかる。それを縦横斜めにシンチレータの向きがなるように、三層構造にする事で高い位置分解能を得られる。ここで一つ問題となるのがプラスチックシンチレータの厚みである。厚ければその分 π 中間子が入射したさいに放出する光の量が増えるため、入射した π 中間子が一つだけなのか二つなのかの判別が容易となる。しかしながら、厚ければその分 π 中間子からエネルギーが失われるため dE/dx 検出器よりも下流にある検出器での検出に影響が出てしまう。そこで、本稿ではどの程度の厚さのプラスチックシンチレータであれば十分に入射した π 中間子の検出が可能であるかという事を検証する。

2. 実験方法

厚さの異なる幅 4 mm、長さはまちまちのプラスチックシンチレータの両端からオプティカルファイバーを使用して光を読み出す (図 2)。その後、光電子増倍管によって両端からの光を集約して読み出し PC 上でデータ解析を行う。こうする事によって減衰等を原因とする位置による光の強弱を無視できるはずだからである。使用したプラスチックシンチレータの厚みと長さは 1.5 mm × 109 mm, 2.0 mm × 163 mm, 2.0 mm × 128 mm の三種類である。

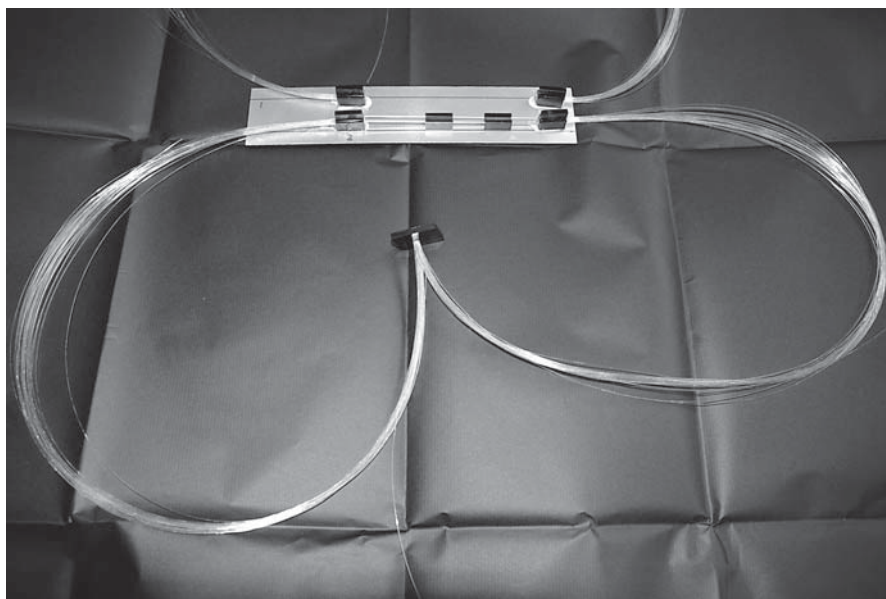


図 2 上部のアルミ板の上にプラスチックシンチレータを接着。その両端からファイバーで光を読み出している。中央で一つにまとまっているのがわかる。

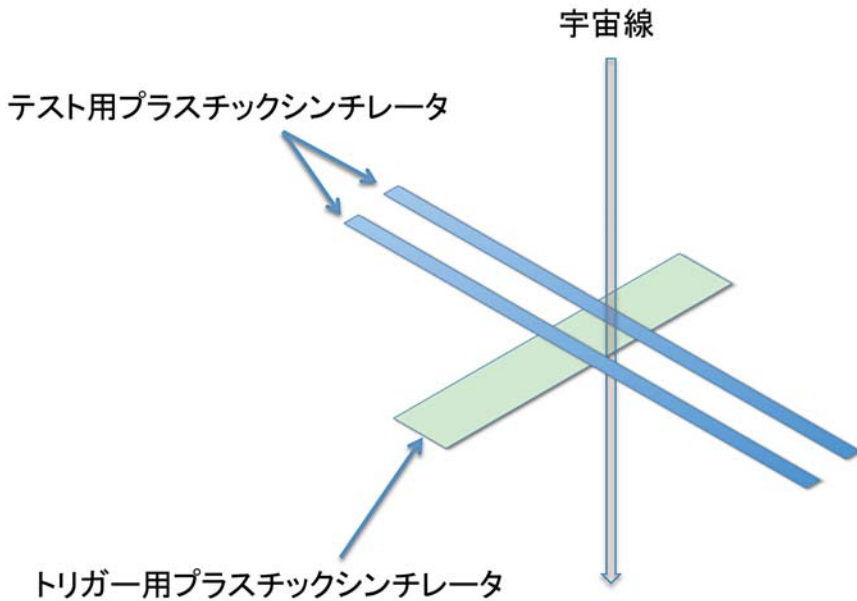


図3 宇宙線を用いたシンチレータのテスト模式図。テストされるシンチレータとトリガー用は直行配置。

実験は二度にわたって行われた。一回目は $1.5 \text{ mm} \times 109 \text{ mm}$ と $2.0 \text{ mm} \times 163 \text{ mm}$ の二枚を用いて図3に示されているようにして宇宙線を用いて行った。テストに使用したプラスチックシンチレータに上から入ってきた宇宙線からの結果を見たかったため、テスト用のプラスチックシンチレータの下にもう一枚トリガー用の $150 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ のプラスチックシンチレータを置きテスト用とトリガー用が同時に光った場合のデータのみを使用している。使用されたプラスチックシンチレータはたまたま、実験室にあったものを使用しているため長さがまちまちであるが、切断研磨による劣化を考えそのまま使用した。使用した光電子増倍管は浜松フォトニクスの H6568 である。この光電子増倍管は 16 ch の独立したアノードをもっており、16 本の光電子増倍管の様に使用する事が可能である。我々は dE/dx 検出器を作成するさいにはこの光電子増倍管を使用する予定である。使用した ADC は F1-TDC-ADC[8] である。

二回目の実験では $2.0 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$ 、バイクロン製のものを使用した。トリガー用の検出器として $1 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$ のものを使用した。この実験においては図4の様にシンチレータ同士を平行に置いた。時間がなかったため、カウンティングレートをあげる必要があったためシンチレータ全体で宇宙線を検出できるようにセットアップした。使用した光電子増倍管はこちらも浜松フォトニクス製の H6568。使用した ADC は豊伸電子製の C009-H を用いた。この ADC は

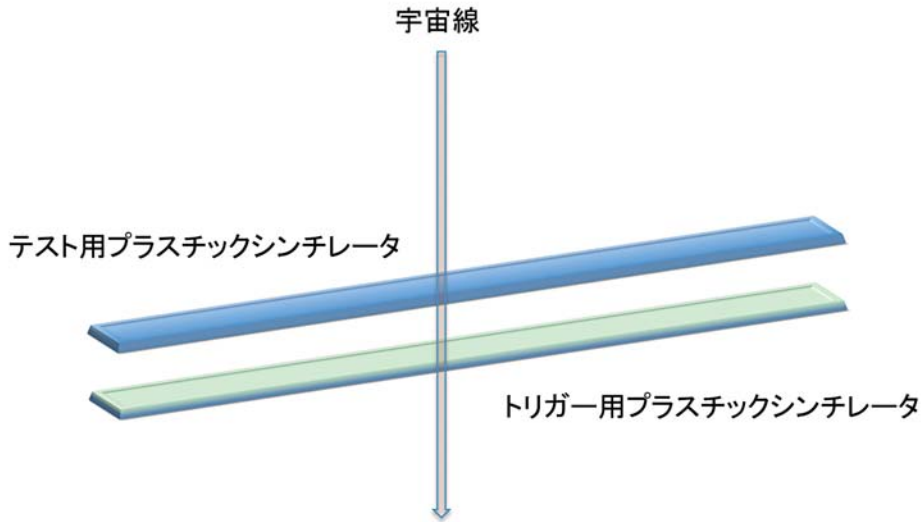


図4 宇宙線を用いたシンチレータのテスト模式図。テストされるシンチレータとトリガー用は並行に配置。

CAMAC モジュールであり、PC とのデータのやりとりは CAMAC クレートコントローラ等を介して行われた。一回目の実験では F1-TDC-ADC から USB 接続で PC へとデータを転送した。使用したオプティカルファイバーはクラレ製の CLEAR-PS の直径 0.5 mm のものを使用した。

3. 実験結果

図5に一回目の実験の厚さ 1.5 mm のものの結果を、図6に 2.0 mm のものの結果を示す。横軸は ADC から返ってきた値 (ch) で縦軸は各 ch での頻度である。F1-TDC-ADC はその特性から光電子一つのピークを測定する事が困難なため、実験で得られたピークをポアソン分布であるとして、ガウス分布でフィッティングした μ と σ から光電子の数を決定している。結果は 1.5 mm で光電子が 7 個、2.0 mm で 11.4 個である。平均が光電子 7 個であればポアソン分布であるとして、シンチレータは光ったが我々が検出できない、最終的に検出される光電子の数が 0 になる確率は 0.1% 程度で、11.4 個であれば 0.001% である。検出ロスをなくすという観点からは厚さが 1.5 mm でも問題はない。しかしながら、dE/dx 検出器は中間子が一つ入射したか二つ入射したかの判断をしなくてはならない。単純に図5の結果から考えると一つでのピークが 32 ch なので、二つ入射したときのピークは 64 ch にくる事になり、判別するのは難しい。また、厚さ 2 mm の図6で考えても、実際に DIRAC 実験で使用する際にはピークがランダウテールをもつため 104 ch に二つ目のピークが来たとする、判別は多少難しい。そのため検出できる光電子の

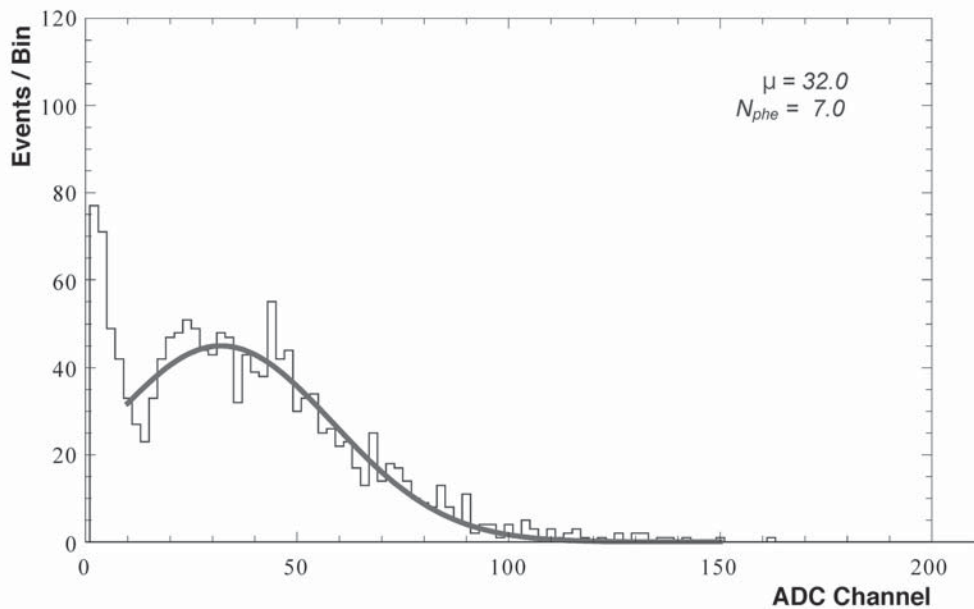


図 5 厚さ 1.5 mm のパルス波高分布。横軸は ADC ch、縦軸は各ビンの頻度。ピークはガウス分布でフィットされており、その μ は 32.0 ch。光電子数に換算して 7.0 個である。

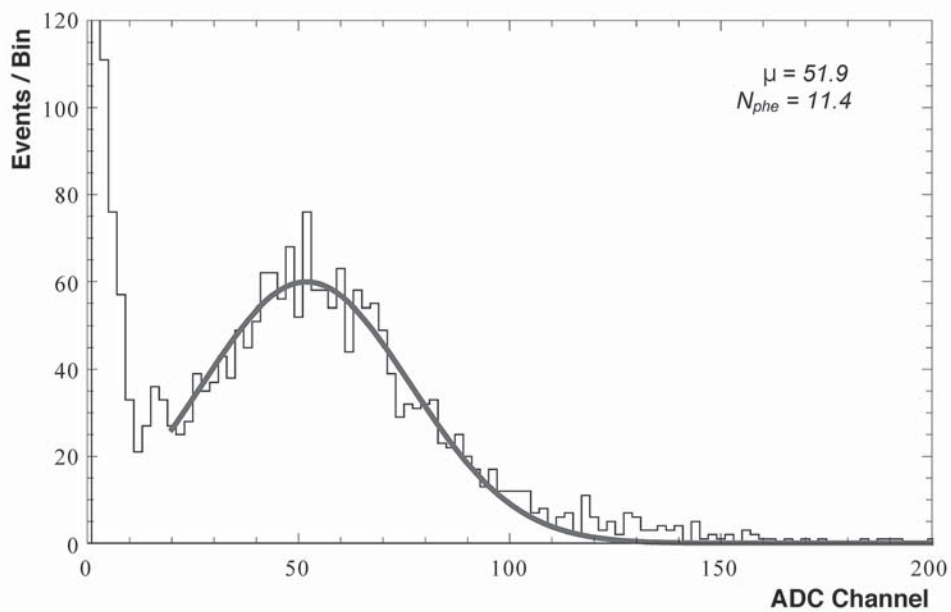


図 6 厚さ 2.0 mm のパルス波高分布。横軸は ADC ch、縦軸は各ビンの頻度。ピークはガウス分布でフィットされており、その μ は 51.9 ch。光電子数に換算して 11.4 個である。

数をさらに増やさなくてはならない。光電子増倍管の光電面に到達する光子が減る要因は色々と考えられるが、シンチレータの周りに反射材を巻くなどの方法で検出数を増加させる事は非常にポピュラーな方法であり試す必要がある。シンチレータを厚くして検出数を稼ぐ方法もあるが、先に述べたようにエネルギーロスが多いためとりあえず2 mm を使用していく事とする。

次に二度目の実験を行った。これは実際に dE/dx カウンタを作成する際に使用する予定のサイズのもの (4 mm × 128 mm × 2 mm) を使用した。まずは検出した光電子の数を確認するために、光電子一つの場合のピークを測定した (図 7)。測定にあたっては、レーザーをアノードへ入射させ、そのレーザーをフィルターを使用して徐々に弱めた。使用したレーザーは浜松フォトニクス製の PLP-02 である。ガウス分布でピークをフィットしており、左側の切れているピークはベダスタルである。ベダスタルの位置は 1137 ch のため、光電子一つのピークは 23 ch である。図 8 が宇宙線を使用して実験を行った結果である。これを光電子の数に換算し、ピークの部分だけを表示したのが図 9 である。ピークの中心すなわち検出された光電子の数は 16.3 個と一度目の実験よりも光電子の数が増えているがピークの幅が広がっており、これでは入射した π 中間子が一つであるか、二つであるかの判別が非常に難しい。ポアソン分布において中心が 16.3 のときの 0 が出る確率は $8.33 \times 10^{-6}\%$ と非常に小さくこの点は当然問題ない。ピークの幅を広げている原因として考えられるのが入射位置による影響である。理想的には両読み出しのため、入射位置による影響で検出できる光電子の数は変わらないはずであるが、光学的に完璧

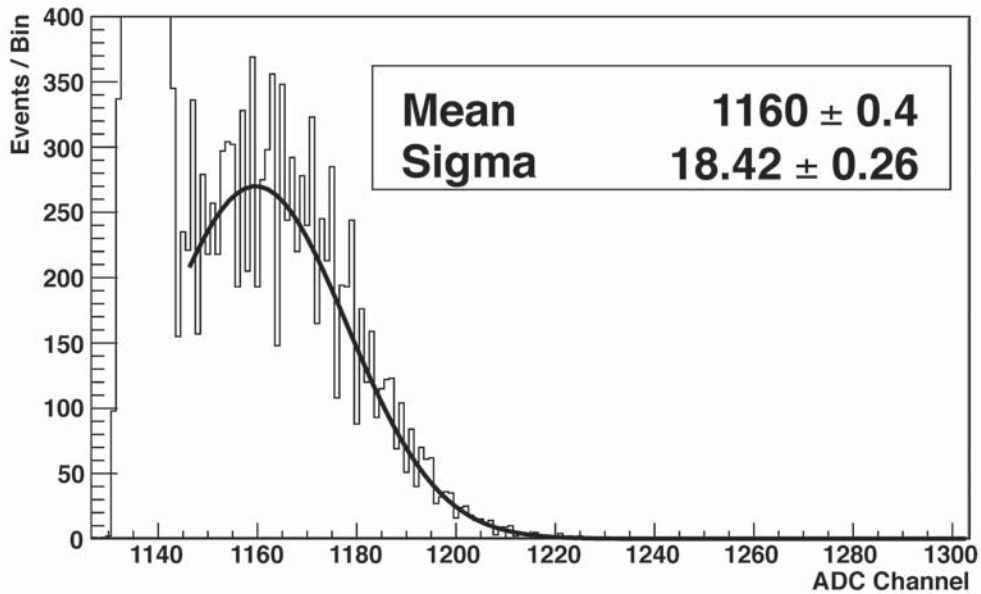


図 7 実験を行った H6568 のアノードの光電子一つの時のピーク。ベダスタルは 1137 ch のため、光電子一つにつき 23 ch である。

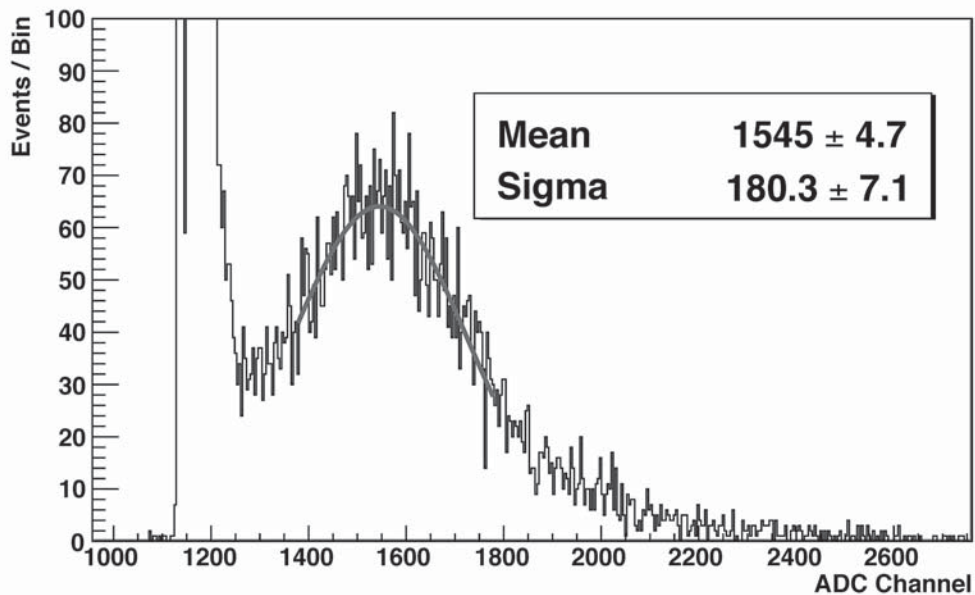


図8 宇宙線を使用して測定した波高分布。横軸がADC ch、縦軸が各ビンの頻度。

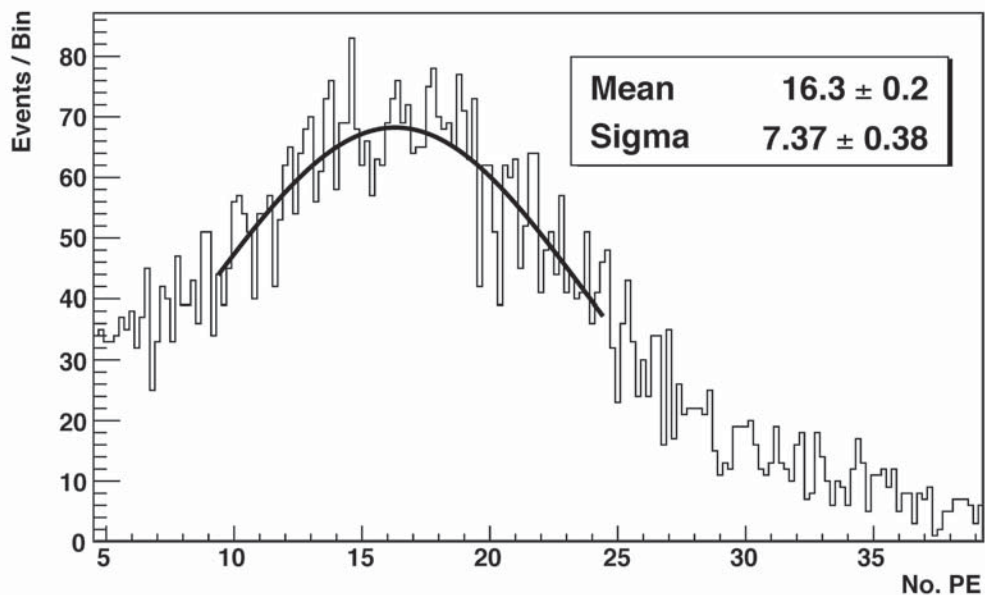


図9 図8の横軸を光電子数に換算し、ピーク部分だけを切り出したヒストグラム。

ではないため入射位置による影響が出たと考えられる。ただし、これは悪いことではなく両端の読み出しをそれぞれ別の光電子増倍管で行うようにすれば検出される光電子の数から位置の情報を得る事も可能となってくるはずである。表1で厚さと光電子数の対応を示す。

表1 プラスチックシンチレータの厚さと検出された光電子の数

厚さ (mm)	1.5	2.0 (長さ 163 mm)	2.0 (長さ 128 mm)
光電子数	7.0	11.4	16.3

4. 結論と今後の課題

前節までの結果から、新たに作成する dE/dx カウンタで使用するプラスチックシンチレータの厚さは 2 mm とした。また、読み出し方法は両端を一つの光電子増倍管で読み出すのではなく別々のものとする。この事によるデメリットは使用する光電子増倍管の数が二倍になるというだけである。検出される光子の数はシンチレータ内を通過していく過程で減衰していくため、両端の光電子の数の比からある程度の位置情報を得ることが可能となる。光電子増倍管 H6568 は 16 ch のアノードを持っており、それぞれのサイズは 4 mm × 4 mm の正方形である。それに対してファイバーは 4.9 mm の円形に固めて光電子増倍管にマウントしている (図 10)。正方形

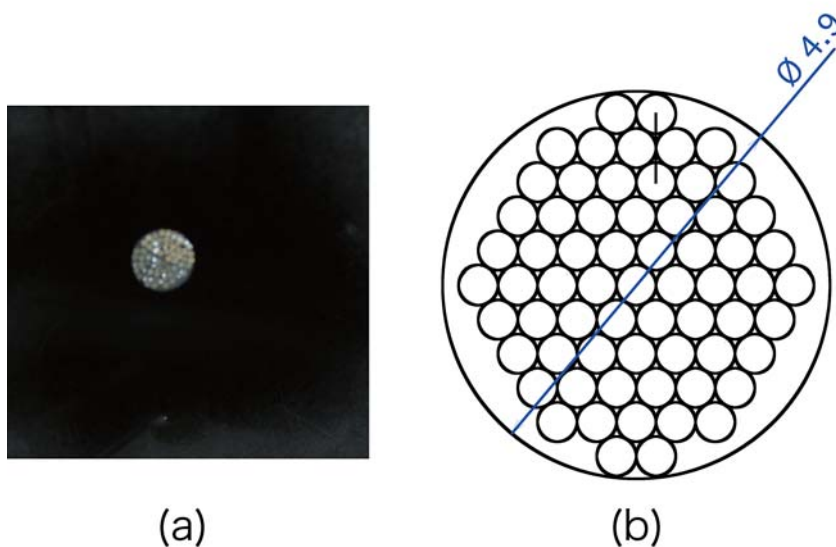


図 10 (a) 光電子増倍管 H6568 にマウントするために固められたファイバー
(b) ファイバーと穴の関係。穴の直径は 4.9 mm。

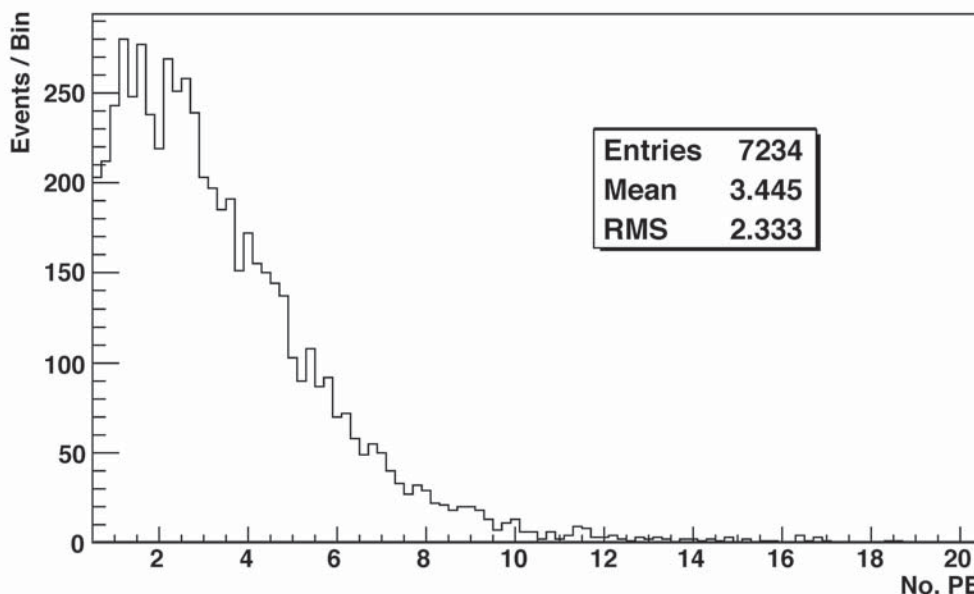


図 11 ファイバーがマウントされているアノード周辺のアノードで検出した光電子の数のヒストグラム。横軸は光電子の数で縦軸は各ビンの頻度。

に固めたとしてもちょうど 4 mm 角となり、各アノード間には 0.5 mm しか余裕が無いため工作が非常に難しくなり、光の漏れも無視できない。二回目の実験で周囲に漏れ出していた光を知るためにファイバーをマウントしている周囲のアノードから検出された光電子を合計したヒストグラムを作成した (図 11)。H6568 のデータシートによれば周囲に漏れ出す光はせいぜい 3% であり、当然ながら非常に多くの光が漏れ出している事がわかる。dE/dx 検出器を作成するにあたっては 16 ch 全てを使って読み出す予定であり、アノード間のクロストークは極力少なくしたい。そのためにも、両端からの読み出しを別々の H6568 で行うことによりマウントされるファイバーの直径は 3.5 mm となりクロストークの影響はかなり少なくなる。

今後は両端を別々に読み出すスタイルでの性能評価を行う。現在、テスト用の検出器の作成はある程度済んでおり、宇宙線を用いて実験中である。また、電子ビームを使用して粒子が複数個通過した際の判別等についても検証を行う予定である。

参考文献

- [1] F. Takeuchi and S. Horikawa, Read-out using F1-TDC-ADC of the newSFD X plane (and dE/dx counter), Bull. Res. Inst. of Adv. Tech, Kyoto Sangyo University VII 2008

- [2] F. Takeuchi, Evaluation of the new dE/dx counter (new IH) prototype for the DIRAC experiment at CERN PS, Bull. Res. Inst. of Adv. Tech, Kyoto Sangyo University IX 2010
- [3] J. Gasser et al., Decays of the $\pi^+\pi^-$ atom, Phys. Rev., D64:016008, 2001
- [4] G. Colangelo, J. Gasser, H. Leutwyler, The $\pi^+\pi^-$ S-wave scattering lengths, Phys. Lett. B 488, 2000
- [5] L. Nemenov, Sov. J. Nucl. Phys. 41, 629
- [6] F. Takeuchi, Read-out of the DIRAC newSFD using F1-TDC-ADC, Bull. Res. Inst. of Adv. Tech, Kyoto Sangyo University VIII 2009

