

CERN PS における DIRAC 実験 (PS212) 用 dE/dx 検出器の宇宙線を用いた性能評価

平成 25 年 5 月 24 日受付

青 垣 総一郎
京都産業大学 コンピュータ理工学部
岡 田 憲 志
京都産業大学 コンピュータ理工学部
竹 内 富士雄
京都産業大学 先端科学技術研究所

要 旨

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 [1] において得られた情報を基に new dE/dx 検出器の設計ならびに宇宙線を用いた性能評価実験の結果を述べる。この検出器を通過した粒子の個数が二つ以上であるか否かを弁別するため Minimum Ionization Particle (MIP) が光電子数換算で 20 個以上の形で検出される事が要求され、それを達成した事を本稿において述べる。本稿では検出器の性能として信号の大きさ、すなわち光量に対して焦点を絞り述べる。

キーワード： $\pi^+\pi^-$ 原子、Lamb shift、dE/dx ホドスコープ、PSPM、ファイバーライトガイド

1 はじめに

現在我々は、欧州原子核研究機構 (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、 $K\pi$ 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 [2, 3]。

現在まで使用してきた dE/dx 検出器は厚さ 1mm、幅 8mm で長さ 128mm のシンチレータストリップで構成されている [4]。高強度のビーム下においては高い検出効率が求められ、デッドタイムを減らすためシンチレータの幅を 3.5mm に減らし使用する枚数を増加させる。またこの検出器は通過した粒子の個数を弁別する役割を担っており、その情報は光量により決定される。MIP で光電子換算 20 個あれば通過したのが一つか二つ以上の弁別が容易であると考え厚さを 2mm と決定した [1]。また光量を稼ぐ事からシンチレータストリップの両端(3.5mm × 2mm の面) から光を読み出す。

2 実験機材

2.1 シンチレータ

使用したのは Eljen 社製プラスチックシンチレータ EJ-228。サイズは 122mm × 3.5mm × 2mm である。切断加工は CERN のシンチレータラボにおいて加工してもらった。これを 32 枚並べて一面とし、全部で四面使用するため、信号は全部で 256ch となる。各シンチレータ間には光学的遮蔽材としてアルミナイズドマイラーを挿入している。ただし、各面間の遮蔽は行っていないため図 1 では剥き出しの様に見える。放出される蛍光の波長は 391nm をピークとして 375nm から 425nm 辺に分布している。これは使用している光電子増倍管の量子効率が良い部分に相当している。

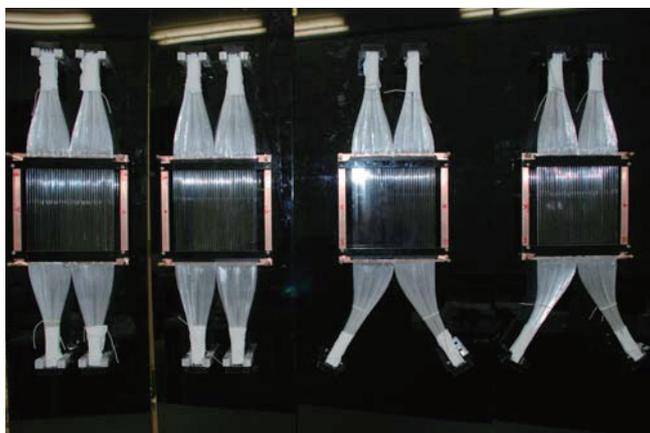


図 1 シンチレータを 32 枚並べた面が四枚ある。それぞれの上下についているのはクリアファイバーであり、これを介してシンチレータからの光を読み出す。シンチレータ面の大きさは 112mm × 122mm である。

2.2 光電子増倍管

使用したのは浜松ホトニクス社製の H6568-MOD3 という位置検出型の光電子増倍管である。この光電子増倍管は位置検出方法がほぼ独立した 16 個の光電子増倍管を 4×4 の行列状に並べたもので各チャンネルに独立して光を入力させる事でそれぞれの光量の情報を得ることができる。スペースの節約や金銭的成本を削減する事ができる上、この光電子増倍管は非常に信号の立ち上がり立下りが早い事も特徴である。

2.3 クリアファイバー

シンチレータより光電子増倍管までのライトガイドとしてクラレ社製のクリアファイバー Clear-PSM を使用した。断面は円形で直径は 0.5mm である。シンチレータの断面が四角形であるためライトガイドも四角形であればシンチレータの端面を全てカバーでき、また円形に比べ図 2 の様に並べるのも容易となる。しかしながら断面が四角形のクリアファイバーはコアの周りのクラッドが一層のものしか無く、マルチクラッドの円形の物の方が光を搬送する際のロスが少ないため円形のものを採用した。シンチレータとクリアファイバー間はサンゴバン社より購入したオプティカルセメント BC-600 を使用した。各部材の屈折率はクリアファイバーが 1.59、オプティカルセメントが 1.56、プラスチックシンチレータが 1.58 である。全て非常に近い値であり屈折率が問題となって光の伝搬が阻害される事はほぼ無い。

光電子増倍管とは図 3 の様に黒いプラスチック製のディスクに穴を開け、各チャンネルの中心に光が入射するようにした。穴の直径は 3.1mm で各穴は 4.5mm 間隔で開いている、これは H6568 の各チャンネルのサイズ (4mm 角で 4.5mm ピッチ) に合わせて作られている。カップリング方法はオプティカルグリッドを使用するのが一般的であるが、今回はメンテナンスの容易さを重視して何も使わずにただ押し付ける形でカップリングを行なっている。

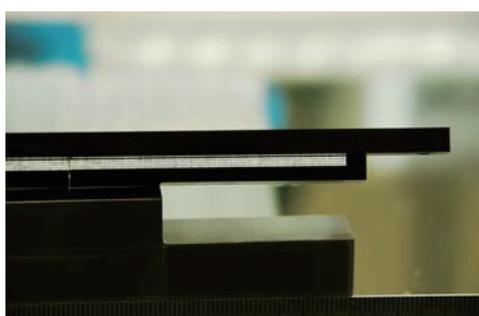


図 2 直径0.5mmの丸型ファイバーを 4×7 (2mm \times 3.5mm) に配置したブロックを並べている。各ブロックの間には光学的遮蔽材としてアルミナイズドマイラーを挿入している。この面がシンチレータとオプティカルセメントを使用して接合される。



図 3 クリアファイバーの光電子増倍管 (H6568) との接合部分。角穴の直径は 3.1mm で穴同士の距離は 4.5mm である。図はクリアファイバーを CD 研磨用のコンパウンド液で磨いた作業後を撮影したものである。

3 検出器の設計

検出器全体は黒いプラスチックによって作成されている (図 4)。この図における側面は厚さが 10mm、底面ならびに天板は 4mm の厚さである。非常に奇妙な形をしているが、これは当検出器を設置する場所がビームを逃がすためのパイプが通っている場所の直上にありこの様な形にせざるを得なかった。粒子が通過する窓の部分にはくりぬいてあり、東レ製の遮光紙を使用して遮光してある。

光電子増倍管の電磁シールドとして厚さ 4.5mm の軟鉄を使用している。形は四角柱で、H6568 はサイズが 30mm 角のため光電面より前方へは 30mm ほど突き出ている。先に述べたように光電面とクリアファイバーとの間にオプティカルグリッドを使用しないため押し付ける必要がある。そのため電磁シールドのおしり側から切ったウレタンゴムを押し込む事によって押し付けている。この方法は光の遮蔽という面からも選択された。

シンチレータで構成された面は全部で 4 枚ある。うち 2 枚が x 方向で、残りの 2 枚が y 方向の位置を検出する為に用いられる。それぞれ x 面と x' 面、 y 面と y' 面と呼ぶ。同方向の 2 枚は 1.75mm ずれて設置されていて、より詳細な位置情報を得る事が可能である。各面は面の中心から中心で 32mm 離れており、順番は上流側から $x > y > x' > y'$ となっている (図 5)。

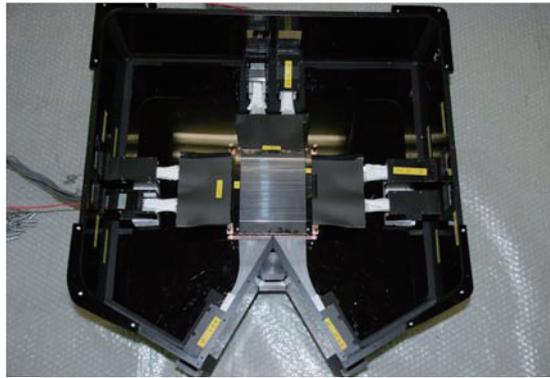


図 4 検出器全体図。中央に見えているのがシンチレータ面である。それぞれのファイバーが各方向に伸び光電子増倍管と接続されている。外周は厚さ 10mm の黒いプラスチックで作成されている。この図でいう底板は厚さ 4mm のプラスチックである。外周部には設置用のネジ穴などもあるが今回は全て塞いで使用している。

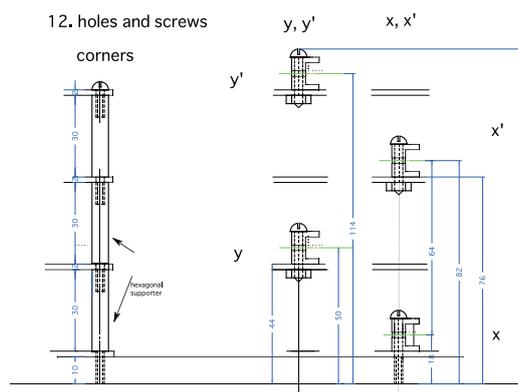


図 5 シンチレータ面を重ねる際の設計図の一部。各面は 32mm 間隔で並んでいる。最初の面は外箱の外から 15mm 離れた所に中心が来ている。

4 実験方法

実験データは全て CAMAC と VME を介してコンピュータに記録した。使用した CAMAC モジュールを以下に挙げる、ADC は豊伸電子社製 C009H、TDC はフィリップス社製 7187 である。全面 256ch 分のデータを一度に取り込むことが実験を行った段階では不可能であったため、半分の 128ch ずつを取り込んで解析を行った。トリガー条件は $x \cap x'$ か $y \cap y'$ である (図 6)。宇宙線を使用して数週のオーダーで放置してデータを取得した。検出器はビームが入射してくる面を天に向けて地表と平行に設置した。

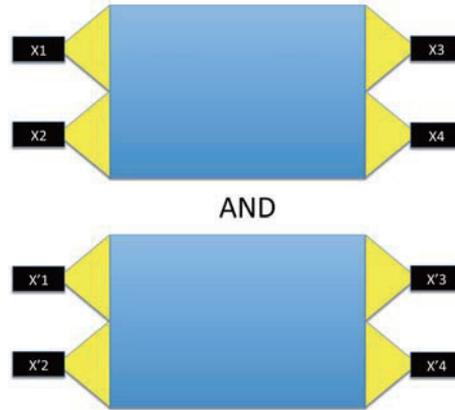


図 6 上図の X1 などとはそれぞれ最初の文字が読み出している面 (X 面)、数字がそのうちのどの光電子増倍管かを表している。データ取得のトリガーは X1, X2, X3, X4 の X 面を読み出している 4 つの光電子増倍管の OR と X'1, X'2, X'3, X'4 の OR 信号との AND をとってそれを条件としている。Y と Y' も同様にしてデータ取得を行った。

5 実験結果

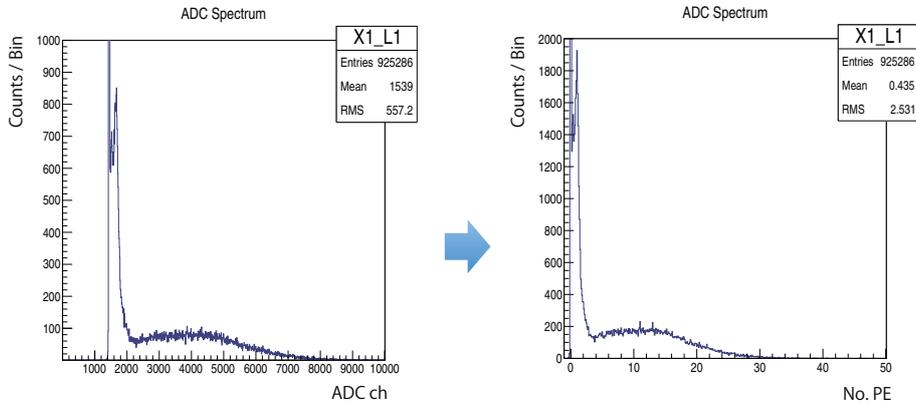


図 7 ADC スペクトラム。左が ADC チャンネルで表したもので、右が光電子数で表したもの。一番左にある細く上が切れている線の様なものがペダスタル。その右にあるのがシングルフォトエレクトロンピークである。その右側にあるピークが MIP である。

図 7 はシングルフォトエレクトロンピークとペダスタルとが見えている ADC スペクトラムである。H6568 の特徴としてシングルフォトエレクトロンピークとペダスタルとがはっきりわかれて見えるというのがある。シングルフォトエレクトロンピークとペダスタルをそれぞれガウス分布でフィットしそれらの平均の差の ch 数をシングルフォトエレクトロンの値として扱う。

こうする事によって両端から読みだした光量の情報をノーマライズしてやりそれを足しあわせて MIP が平均いくつのフォトエレクトロン数の所にあるかを計算していく。

図 8 は両端からの情報を足しあわせた ADC スペクトラムである。これは最も良いシンチレータの情報である。表 1 に各シンチレータ面の MIP の光電子数を示す。この表からもわかるように光電子数で 20 以上あり、当初の目的を達成したかのように見える。しかしながらこれは宇宙線を使用した実験結果であり、実際の使用環境とは違う。宇宙線は様々な入射角を持っているが、実際の使用環境下では入射してくる粒子はシンチレータ面に対してほぼ垂直に入射してくる。そのため角度による経路長の補正が必要になるのだが、今回平行なシンチレータ同士の面をコインシデンス条件としてトリガーに使用したためどの様な角度で入射してきた宇宙線であるかの推定ができない。そこでシンチレータ面より上の 2π 方向全体から一様分布で降り注いできたと仮定して、経路長の分布をシミュレートした。その結果、経路長全体の平均は 2.6mm の為、単純に 2.6 で割った値を表 1 に示す。また、最も頻度の高い距離は 2.2mm であるためその場合も表 1 に示す。実際には地表に斜めに入射する宇宙線の割合は角度が傾けば傾くほど減少するので 2.6 で割ったものよりも良い結果が実際の使用状況下で得られる事が確実である。

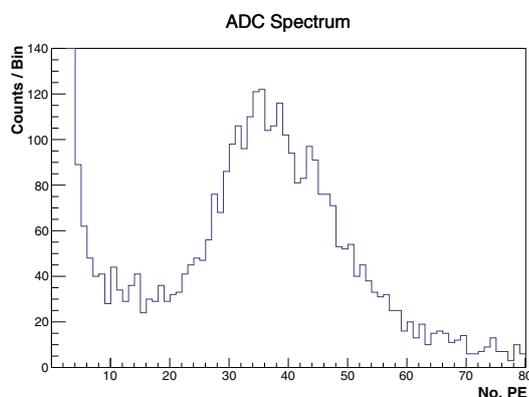


図 8 ある一つのシンチレータスラブの両端から光を読みだしたときの ADC スペクトラム。横軸は光電子数、縦軸は各ビンのカウント数。MIP が光電子数 36 辺にあり、非常に光量が多いことがわかる。

表 1 各面の MIP における平均光電子数。各スラブの値を平均した。

	実験データ	補正データ (2 / 2.6)	補正データ (2 / 2.2)
X	30.0	23.1	27.3
X'	31.9	24.5	29.0
Y	29.2	22.5	26.5
Y'	29.0	22.3	26.4

6 結論

上記のように当初考えていた性能を光量の面で上回る大変良い検出器を作成できた。粒子が一つないし二つ通過した際にどのようなスペクトラムが得られるかシミュレーションを行ったものが図 9 である。これは角度補正を行わない実験結果をシングル MIP としそれを基にダブル

の物を作成した。そのため、実際の実験においては一定の角度（経路長）で粒子が通過するためよりピークの幅が狭くなる事が确实であり、より弁別が容易となる。この検出器は今後2014年以降、新たな DIRAC 実験において使用される予定である。

検出器の性能評価として他に時間分解能や検出効率の問題がある。この点に関しては CERN のイーストホール T8 で我々が参加している DIRAC 実験 (PS212) のビームを使用し 2012 年の秋にデータを取得した。現在鋭意この結果を解析中である。

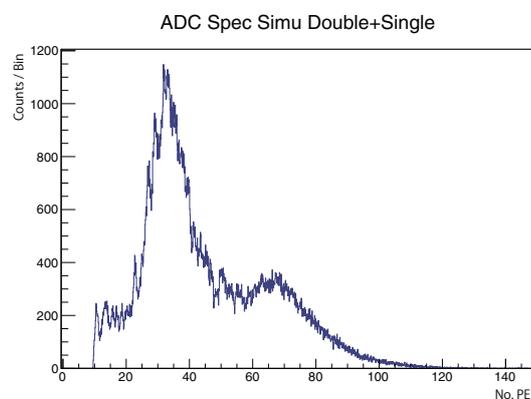


図9 左の一番高いピークが実際の実験で得られた MIP の結果。それを基に粒子が二つ通過した際をシミュレートして元の実験データに重ね合わせたものが右側（光電子数 65 前後）にあるピーク。

謝辞

本検出器製作ならびに実験は研究課題名「4次元トポロジカル検出器の開発と応用（課題番号 C1008）」の予算を使用して行われた。本検出器製作にあたって多大な協力をしていただいた IHEP の Dr. A. Ryazantsev、京都産業大学理学部並びにコンピュータ理工学部技手藤井氏に著者一同厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 青垣総一郎 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, Bull. Res. Inst. of Adv. Tech, Kyoto Sangyo University X 2011
- [2] F. Takeutchi 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
- [3] F. Takeutchi, 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
- [4] B. Adeva, et al. First measurement of the $\pi^+ \pi^-$ atom lifetime, Phys. Let. B, 619, 2005

Performance test of the new dE/dx counter using cosmic ray

Soichiro AOGAKI

Kenji OKADA

Fujio TAKEUTCHI

Abstract

A new dE/dx counter to be used in an intense beam was designed for the DIRAC experiment. A performance test was carried out using the cosmic ray at Kyoto Sangyo University. The test revealed that the light guide using clear fibers gives an excellent ability of light transmission. A performance test of counting efficiency and time resolution was carried out in the DIRAC spectrometer at CERN. The result is reported in a separate paper.

Keywords: $\pi^+ \pi^-$ atom, Lamb-shift, ionization hodoscope, PSPM, fiber light guide