多チャンネルシンチレーションファイバーとシリアル読み出し回路 (SPIROC-A) を用いた飛跡検出器の開発

松本　祐樹

2011 年

目次

1 **序論** 4

1.1 ストレンジネス核物理 4

1.2 シグマ陽子散乱実験 4

1.2.1 実験の setup 4

1.2.2 解析 5

1.3 卒業研究の目的 6

2 **検出器** 6

2.1 Scintillaton fiber 6

2.2 MPPC 6

2.2.1 APD(Avalanche Photo Diode) 7

2.2.2 MPPC の動作原理 8

2.2.3 MPPC の基本特性 8

2.3 読み出し回路 9

2.3.1 SPIROC-A 9

2.3.2 FPGA 10

3 SPIROC-A **の** gain **テスト** 11

4 SPIROC-A **を用いた** 1ch **の読み出し** 12

4.1 fiber の光量測定 13

4.1.1 光子数の見積もり 13

4.1.2 測定結果・考察 14

4.2 時間分解能測定 14

4.2.1 Pulse height correction 15

4.2.2 測定結果・考察 15

5 Fiber Tracker **を用いた多チャンネルの読み出し** 15

5.1 Fiber Tracker 16

5.2 2 次元 (Y 面) での飛跡検出 16

5.2.1 実験の setup 16

5.2.2 測定結果・考察 17

図目次

1 ハイパー核 4
2 Σp 散乱の概略図 5
3 target まわりの検出器群 5
4 Σp 散乱実験の setup 6
5 APD の動作原理 7
6 APD ピクセルの等価回路 (左) とガイガーモードのサイクル (右) [2] 8
7 MPPC ピクセルの等価回路 8
8 SPIROC-A ボード 9
9 SPIROC-A chip の回路 10
10 High gain preamplifier 10
11 SPIROC-A 制御ソフトのフロントパネル 11
12 FPGA のプログラミングの例 11
13 high gain の出力 12
14 実験の setup 12
15 光量測定の回路図 13
16 gaussian で fitting したヒストグラムの例 13
17 光量分布 14
18 時間分解能測定の回路図 15
19 Fiber Tracker 15
20 Fiber Tracker 16
21 fiber の読み出し方 16
22 2 次元での飛跡検出の setup 17
23 Y 面 3 later の光量 17

表目次

1　使用した MPPC の仕様 7

1 序論

1.1 ストレンジネス核物理

物質を構成する基本的な最小単位である原子は、原子核と電子から構成される。原子核は核子と呼ばれる陽子 (proton) と中性子 (neutron) から成り、その組み合わせによって多様な原子をつくる。さらに、核子は第 1 世代のクォークである up と down から構成されることが示されている。また、高エネルギー実験の発展に伴い、第 2 世代のクォークである strange を含む hyperon が発見された（図 1)。

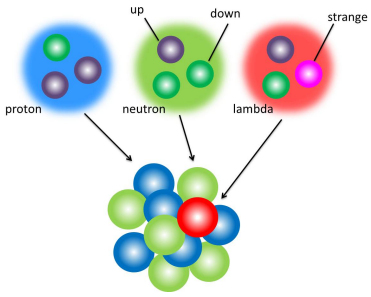

図 1　ハイパー核

hyperon は Pauli の排他律の影響を受けないので、原子核の深い束縛状態を調べるための probe として用いることができる。そのため、ハドロン間の相互作用を理解するためには up と down だけでなく、strange クォークを含んだ hyperon との相互作用を研究することが重要となる。

1.2 シグマ陽子散乱実験

高統計で low-energy の hyperon と proton の散乱断面積を決定する実験を計画している [1]。以下の 3 つの反応について測定を行う。

- $\Sigma^- p$ 弾性散乱
- $\Sigma^+ p$ 弾性散乱
- $\Sigma^- p \to \Lambda n$ 非弾性散乱

$\Sigma^- p$ は陽子に崩壊するチャンネルがないため、崩壊 p のバックグラウンドのない $\Sigma^- p$ 散乱から行う。$\Sigma^- p$ 散乱は図 2 のような反応である。液体水素標的はハイペロンの生成と、ハイペロンと陽子の散乱の target と役割をする。

1.2.1 実験の setup

Σp 散乱実験は J-PARC の K1.8 beam line にて行われる。πbeam は beam line spectrometer で、K^+ は SKS spectrometer でそれぞれ運動量が測定される。散乱した p、π は液体水素 target の周りの検出システムで測定される。これは Drift Chamber と Fiber Tracker で散乱粒子を検出し、その後段に配置された Calorimeter で散乱された陽子のエネルギーを測定するシステムである。検出器群を図 3 に示す。実験の全体

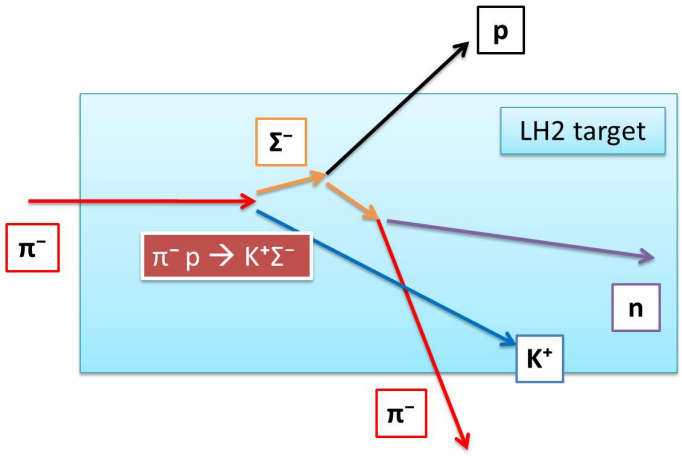

図 2　Σp 散乱の概略図

の setup を図 4 に示す。

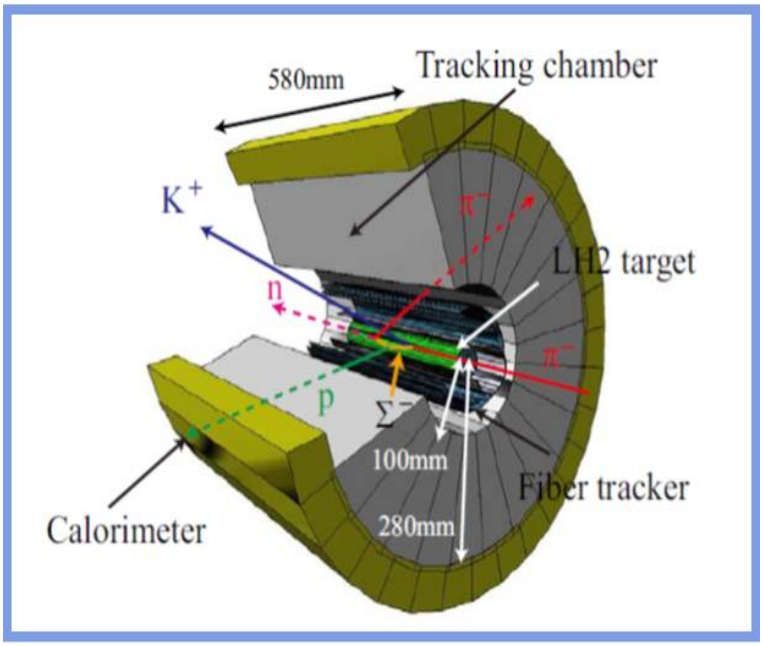

図 3　target まわりの検出器群

1.2.2　解析

以下の式で表される ΔE を求めることで Σp 散乱イベントの選択を行う。

$$\Delta E = E_{measure} - E_{calculate} \tag{1}$$

$E_{measure}$ は fiber と calorimeter によって測定される散乱陽子の運動エネルギーであり、$E_{calculate}$ は Σ

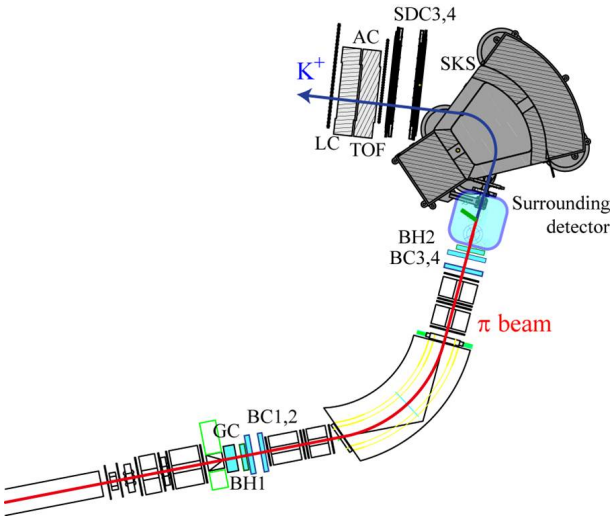

図 4　Σp 散乱実験の setup

beam の運動量と陽子の散乱角から計算された運動エネルギーである。Σp 散乱イベントであれば、$\Delta E = 0$ になる。

1.3　卒業研究の目的

Σp 散乱実験において、散乱された陽子と生成したハイペロンからの崩壊粒子の飛跡検出を行うため、scintillation fiber、小型の光検出器 MPPC、多チャンネル MPPC の読み出しに特化したシリアル読み出し回路 (SPIROC-A) を用いた飛跡検出器の開発を目的として卒業研究を行った。

2　検出器

2.1　Scintillaton fiber

Scintillaton Fiber は、プラスチックシンチレーターに波長変換ファイバーを加えたものである。プラスチックシンチレーターで発生したシンチレーション光を波長変換ファイバーで再度発光させて伝播する構造をしている。多数の Scintillaton fiber を並べたものに荷電粒子が通過すると、通過した fiber のみ発光するので、その光を検出することで粒子の飛跡を見ることができる。

2.2　MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photo Counting) はピクセル状に敷き詰められた複数の APD(Avalanche Photo Diode) をガイガーモードで動作させる光半導体検出器である [2]。scintillation fiber の読み出しには MPPC を用いる。以下に主な特長を示す。

- 常温で動作する
- 1ns 以下の時間分解能

- 常温、低電圧 (∼70V) で動作
- 増倍率が $10^5 \sim 10^6$
- 磁場の影響を受けない
- 真空中でも使用できる

今回使用した MPPC は主に 2 種類使用し、その仕様を表 2.2 に示す。

型名	受光面サイズ	パッケージ	ピクセルサイズ (μ m)	ピクセル数	感度波長範囲 (nm)
S10362-11-050C	1×1	セラミック	50×50	400	320∼900
S10362-11-100C	〃	〃	100×100	100	〃

表 1　使用した MPPC の仕様

2.2.1　APD(Avalanche Photo Diode)

APD は高い逆電圧を印加することでアバランシェ増倍を生じ、受光感度を高くするフォトダイオードである。APD の動作原理を図 5 に示す。

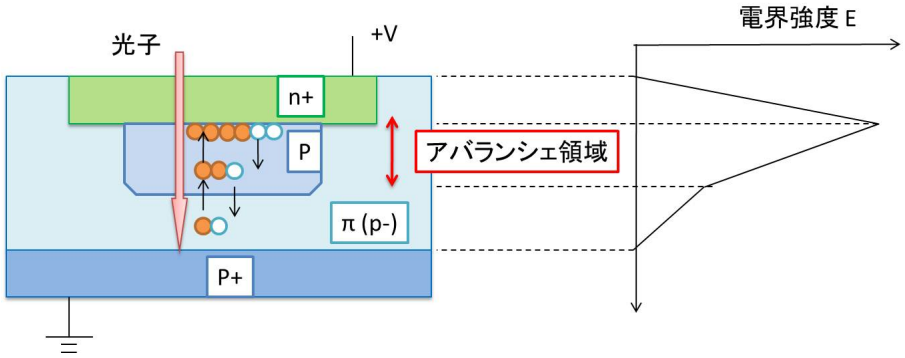

図 5　APD の動作原理

n 型半導体と p 型半導体の接合部では、それぞれのキャリア（ホール、電子）が互いに拡散し、打ち消しあうことで空乏層が形成される。APD に逆電圧を印加すると、この空乏層がさらに π 層まで広がり、図 5 に示すような電界を生じる。このような構造をとった APD の π 層に光子が入射すると、電子が励起されて電子ホール対を生成する。この電子が電界に沿って p 層に入ると高電界によって急激に加速され、半導体の原子と衝突電離を起こす。こうして弾き出された電子は電界によって加速され、さらに衝突電離を起こす。これが繰り返されることで電子が雪崩的に発生する現象をアバランシェ増倍という。

APD に印加する逆電圧をある一定以上の電圧にすると内部電界が高くなり、増倍率が非常に大きくなる ($10^5 \sim 10^6$)。このような状態で APD を動作させることをガイガーモードといい、このときの電圧を降伏電圧という。ガイガーモードで APD を動作させると、わずかな光の入射に対しても放電が起こり（ガイガー放電)、入射フォトン数に依らない電荷量 Q が出力される。電荷量 Q は以下の式のように表される。

$$Q = C(V_{bias} - V_{bd}) \tag{2}$$

ここで、C は APD ピクセルのキャパシタンス、V_{bias} は逆電圧、V_{bd} は降伏電圧である。APD は一度放電を起こすと接続されているクエンチング抵抗によって電圧降下が起き、クエンチされる。この時間は APD ピクセルのキャパシタンス C とクエンチング抵抗の抵抗値 R の積 $C \times R$ に比例する。この後、再充電されて逆電圧が降伏電圧以上になり、ガイガーモードに戻る。

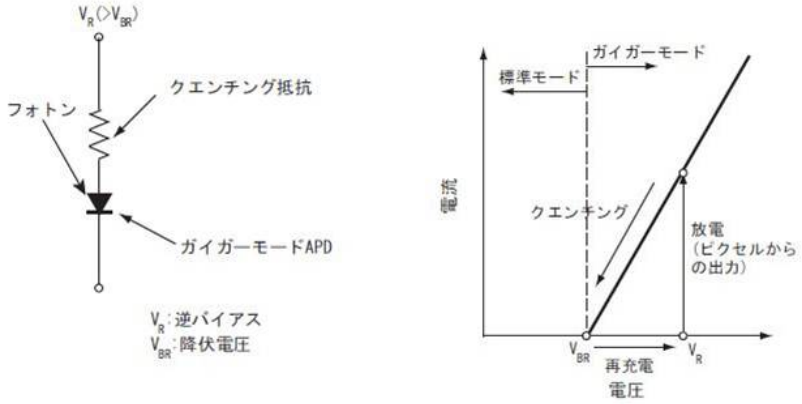

図 6　APD ピクセルの等価回路 (左) とガイガーモードのサイクル (右) [2]

2.2.2　MPPC の動作原理

MPPC は、1mm 角程度の受光面に、APD ピクセルが敷き詰められた構造をしている。APD ピクセルは 2 次元に並列接続した構造になっており、全てのピクセルにおいて共通の電圧供給、読み出しチャンネルにつながっている (図 7)。そのため、それぞれの APD ピクセルから出力される電荷量 Q の総和 Q_{total} が MPPC から出力され、以下の式で表される。

$$Q_{total} = N_{fired} \times Q \tag{3}$$

ここで、N_{fired} は光子を検出した APD ピクセルの数である。微弱な光の場合、このピクセルの数は入射した光量に比例する。

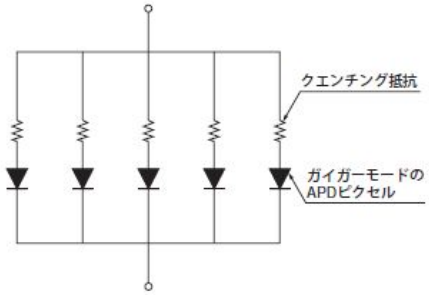

図 7　MPPC ピクセルの等価回路

2.2.3　MPPC の基本特性

MPPC は以下の特性を持つ。

- アフターパルス
- クロストーク
- ダークカレント

アフターパルスは、発生したキャリアが半導体の結晶欠陥にトラップされ、それが遅れて解放されたときに本来の信号とは別の信号を発生させてしまう現象である。

クロストークは、アバランシェで発生した光子が別の APD ピクセルに入射して新たなアバランシェが形成されることで起きる。このときの MPPC の出力は、検出された光子数より大きくなる。

ダークカレントは、半導体素子の熱励起によってキャリアが発生し、それがガイガー放電を起こすことで光子が入射したときと同等のパルスが出力されることである。

2.3 読み出し回路

本実験では多チャンネルの読み出しを行うため、専用の評価ボードを用いる。ボードには SPIROC-A、FPGA、ADC が備わっており、MPPC で測定したデータをシリアルで読み出すことができる (図 8)。ボードのインターフェイスは USB である。

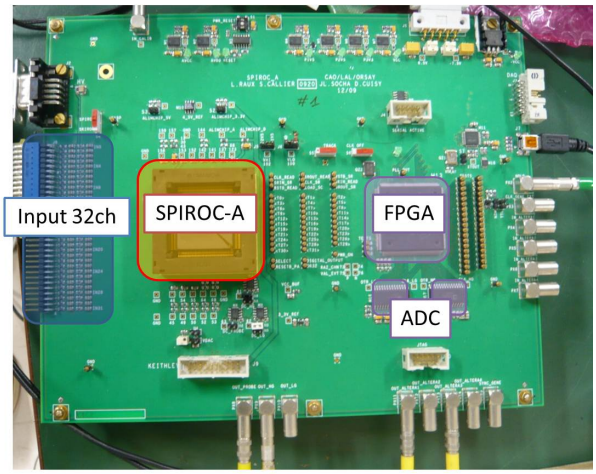

図 8　SPIROC-A ボード

2.3.1 SPIROC-A

SPIROC-A(Silicon PM Integrated Read Out Chip - Analogue) はフランスの Laboratoire de l'Accelerateur Lineaire で開発された ASIC である [3]。主な特徴を以下に示す。

- 32 チャンネルの読み出しが可能
- 内部の Amp、Shaper でシグナルの増幅・整形をする
- チャンネル毎のバイアス電圧を 4.5V-8bit で調整する

SPIROC-A の回路を図 9 に示す。discriminator の threshold は全チャンネル共通で 10bit で調整することができる。Slow shaper からの出力は以下の式に従う。

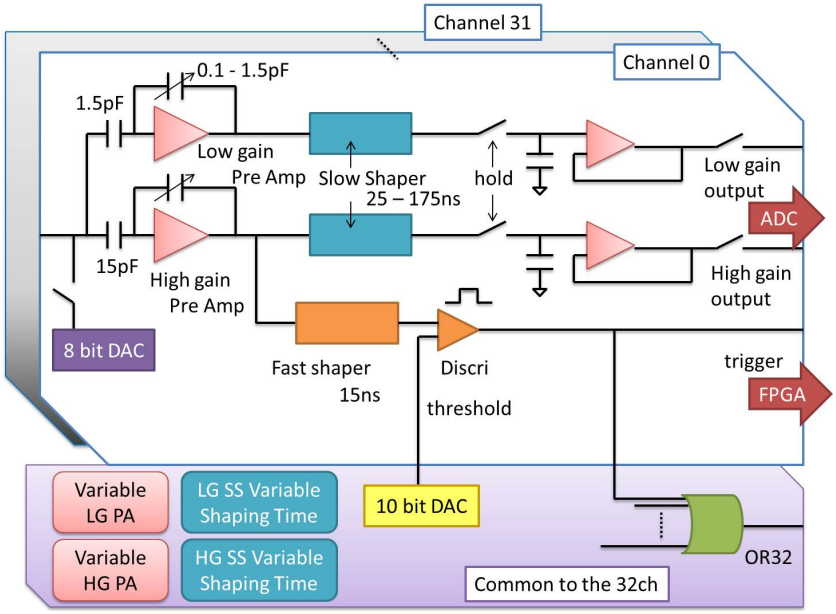

図 9　SPIROC-A chip の回路

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{C_f}{C_{input}} \tag{4}$$

式中の V_{in}、V_{out}、C_f、C_{input} については図 10 に示す。

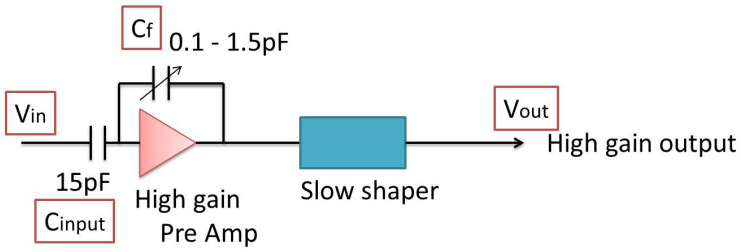

図 10　High gain preamplifier

SPIROC-A の各 register は図 11 のようなフロントパネルから変更できる。

2.3.2　FPGA

FPGA(Field Programmable Gate Array) は PLD(Programmable Logic Device) と呼ばれるデバイスの一種である。内部の論理回路を独自でプログラムすることができ、また書き換えを短時間で行うことができる。再プログラムが可能な柔軟性に加え、低価格化、高性能化したため幅広く使用されている [4]。

SPIROC-A ボードには ALTERA 社の FPGA が備わっており、QuartusII というソフトウェアによってプログラムを行う。図 12 のように論理ゲートをつないで回路を作成する。

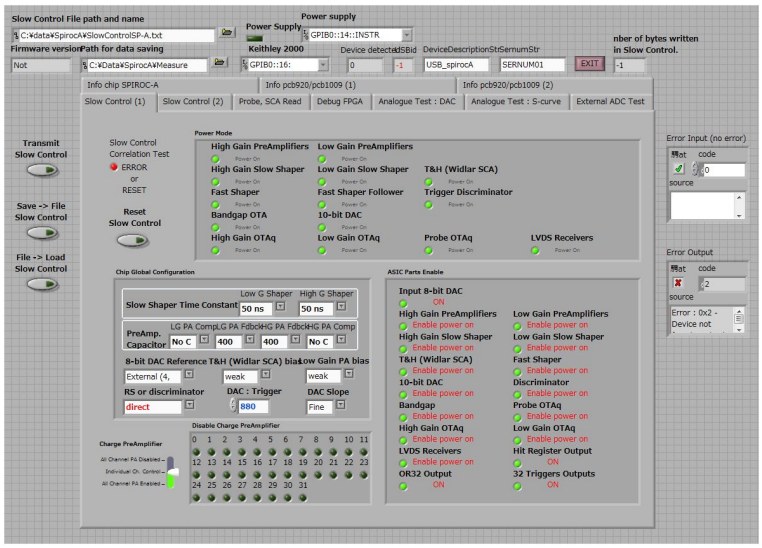

図 11　SPIROC-A 制御ソフトのフロントパネル

図 12　FPGA のプログラミングの例

3　SPIROC-A の gain テスト

擬似的な MPPC の出力を input し、SPIROC-A の high gain の出力を確かめた。SPIROC-A ボードには MPPC の代わりにインジェクターを利用して電荷を input した。インジェクターは 100pF のコンデンサーを信号線に対して直列に接続され、MPPC からのシグナルを再現できる。インジェクターの入力電圧を 1.6mV したとき、電荷量は $1.6[\mathrm{mV}]\times10^6\times100[\mathrm{pF}]=100\mathrm{fC}$ になる。これは、MPPC の gain を 10^6 としたときの 1p.e. の電荷量に相当する。また、このとき SPIROC-A からの出力は 10mV であった。

測定では Clock モジュールから適当なシグナルを出力し、1p.e.、10p.e.、20p.e.…相当のパルスに attenuate して SPIROC-A に input した。その測定結果を図 13 に示す。

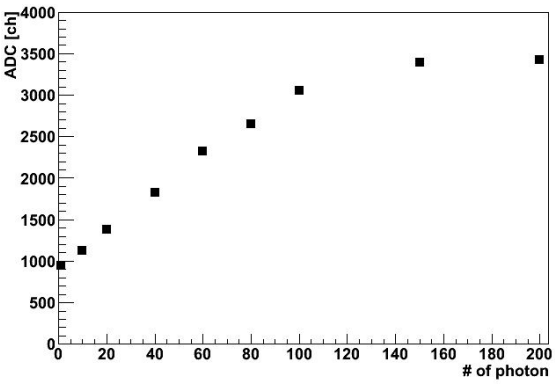

図 13　high gain の出力

測定結果から、100photon 程度までは linearity があると考えられる。

4　SPIROC-A を用いた 1ch の読み出し

多チャンネルの scintillation fiber の読み出しを行う前に、1ch のみを用いて MIP(Minimun Ionizing Particle) に対するの光量と、logic 回路を通した際の時間分解能を測定した。scintillation fiber と MPPC は専用のコネクターで接続し、オプティカルグリス等は使用しなかった。線源は ^{90}Sr を使い、暗箱の中で行った。実験の setup を図 14 に示す。

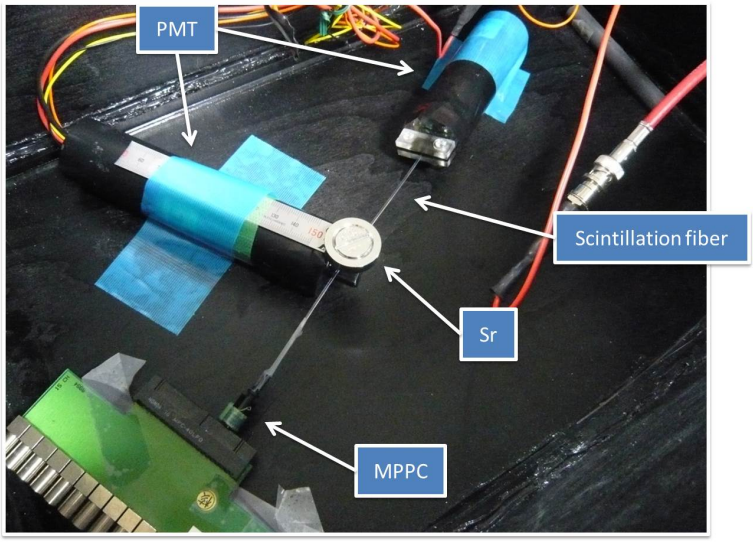

図 14　実験の setup

4.1 fiber の光量測定

scintillation fiber は断面が 1mm 角と 0.5mm 角のものを、MPPC は 100 ピクセルと 400 ピクセルのものをそれぞれ組み合わせて光量を測定した。測定時の簡略化した回路図を図 15 に示す。

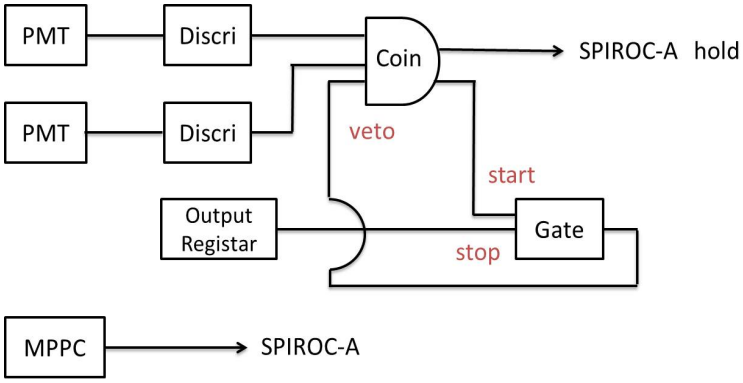

図 15　光量測定の回路図

4.1.1 光子数の見積もり

ADC で得たヒストグラムの pedestal と 1p.e. の部分を gaussian で fitting し、平均値を求める (図 16)。fitting して得た値を以下の式に代入して光子数を見積もった。

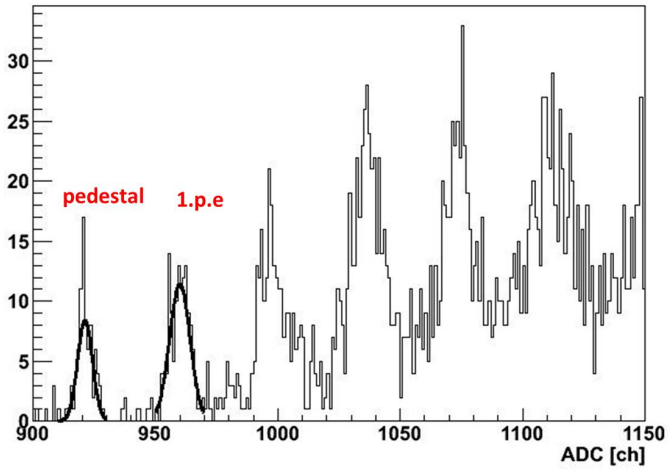

図 16　gaussian で fitting したヒストグラムの例

$$Number\,of\,photon = \frac{ADC - pedestal}{1p.e. - pedestal} \tag{5}$$

4.1.2 測定結果・考察

測定結果を図 17 に示す。

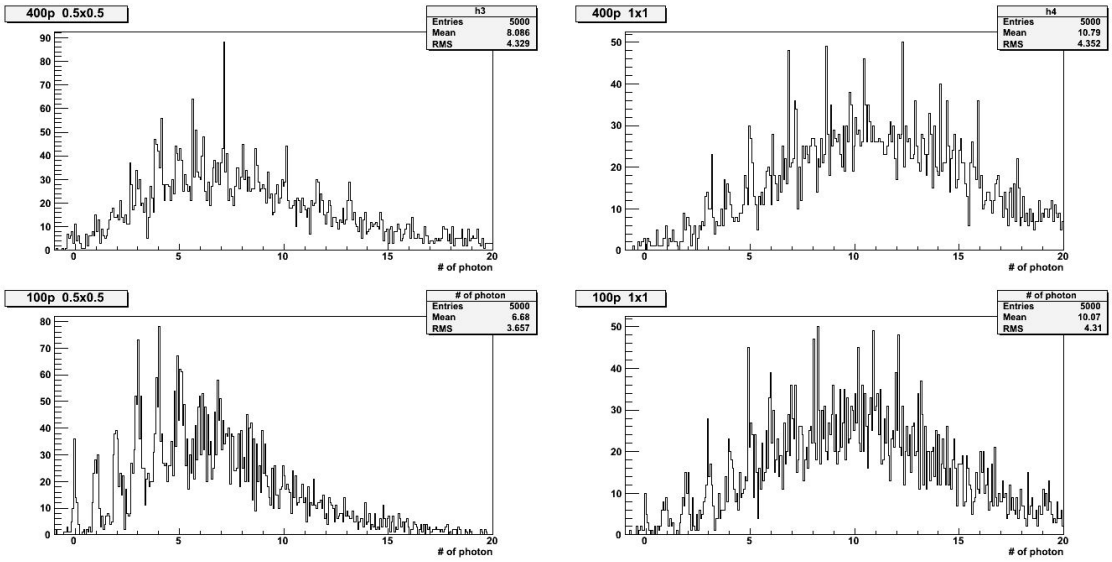

図 17　光量分布

図 17 より、ピクセルの数が同じであれば fiber の断面積が大きい方が得られる光量は多くなった。これは断面積が大きいほど光子数が増加するという予想と一致する。

MPPC の受光面は APD を 2 次元に敷き詰めた構造をしているので、ピクセル数が少ないほど光子を検出する面積は大きくなり、この実験のように検出する光子数が少ないときは、100 ピクセルの MPPC の方が光量を多く検出できると考えられる。しかし、結果では fiber の断面積が同じであるとき、400 ピクセルの MPPC の方が多く光子を検出した。

4.2 時間分解能測定

断面が 1mm 角 scintillation fiber と受光面が 1mm 角で 100 ピクセルと 400 ピクセルの MPPC をそれぞれ組み合わせて時間分解能を測定した。測定時の簡略化した回路図を図 18 に示す。2 つの PMT の coincidence を TDC の start にして、各検出器の stop time を測定した。

時間分解能は Pulse hight correction を行った値を以下の式に代入して求めた。

$$\begin{cases} \sigma_{MPPC-PMT_f} = \sqrt{\sigma^2_{MPPC} + \sigma^2_{PMT_f}} \\ \sigma_{MPPC-PMT_t} = \sqrt{\sigma^2_{MPPC} + \sigma^2_{PMT_t}} \\ \sigma_{PMT_f-PMT_t} = \sqrt{\sigma^2_{PMT_f} + \sigma^2_{PMT_t}} \end{cases} \tag{6}$$

ここで、PMT_f は fiber を読み出す PMT であり、PMT_t は fiber の下に置かれた trigger counter 用の PMT である。$\sigma_{MPPC-PMT_f}$ は $MPPC$ と PMT_f の TDC 分布の広がりの差である。その他も同様である。

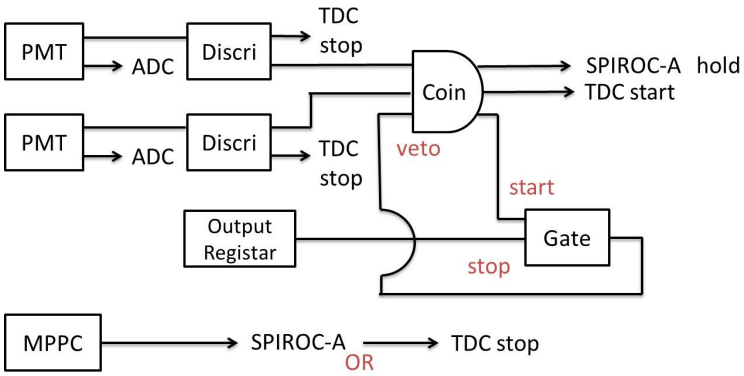

図 18　時間分解能測定の回路図

4.2.1　Pulse height correction

測定する信号の立ち上がりは有限であるため、discriminator の threshold の値を超えるまでの時間はその信号の大きさに依存する。こうした出力タイミングの遅れを出力の大きさによって補正することを Pulse height correction という。補正式を以下に示す。

$$TDC_{cor} = TDC - \left(\frac{a}{\sqrt{ADC}} + b \right) \tag{7}$$

4.2.2　**測定結果・考察**

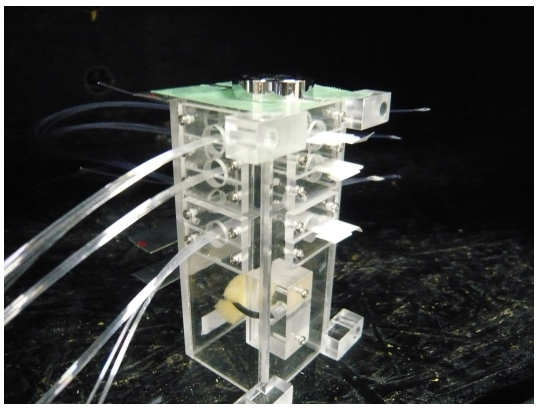

図 19　Fiber Tracker

5　Fiber Tracker を用いた多チャンネルの読み出し

試作の Fiber Tracker を用いて多チャンネルシンチレーションファイバーの読み出しをし、粒子の飛跡検出を行った。

5.1 Fiber Tracker

今回使用した試作の Fiber Tracker は以前製作されたものであり、図 20 のようなものである。アクリルのフレームによって支えられ、それぞれの fiber はアクリルに開けられた隙間に挿入されている。fiber は断面が 0.5mm 角のものを 2 本合わせ、引きのばした先を 1 つの MPPC で読み出す。X 面、Y 面はそれぞれ 3layer ずつあり、1layer ごと 4 つの MPPC で読み出す。Y 面は 2 本ずつまとめられているが、X 面に関しては図 21 のようにまとめられてある。これは fiber をそのまま全てを 2 本ずつでまとめると、4 本目と 5 本目の間が layer の中心になってしまい、位置情報が左右に偏ってしまうためである。このように 1st layer と 3rd layer をずれるように読み出すと、粒子が中心を通ったときの情報が得られる [5]。

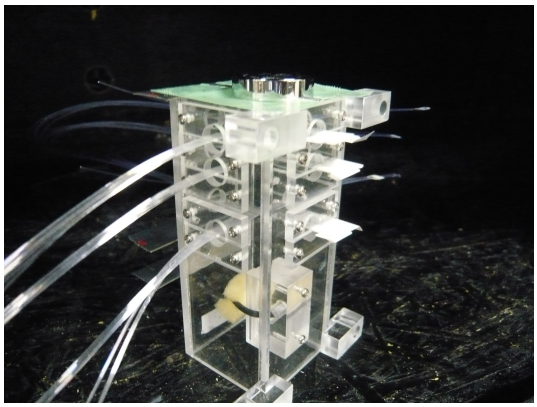

図 20　Fiber Tracker

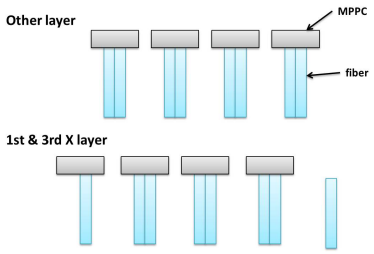

図 21　fiber の読み出し方

5.2 2 次元 (Y 面) での飛跡検出

Y 面のみの読み出しを行い、粒子の飛跡検出と各 layer の光量を測定した。

5.2.1 実験の setup

図 22 のように Fiber Tracker と MPPC がまとめられたコネクターをつなげた。Y 面のみ 12 個の MPPC の出力を SPIROC-A で読み出した。MPPC は 400 ピクセルのものを使用した。線源は ^{90}Sr を使用し、collimate させて fiber にあてた。

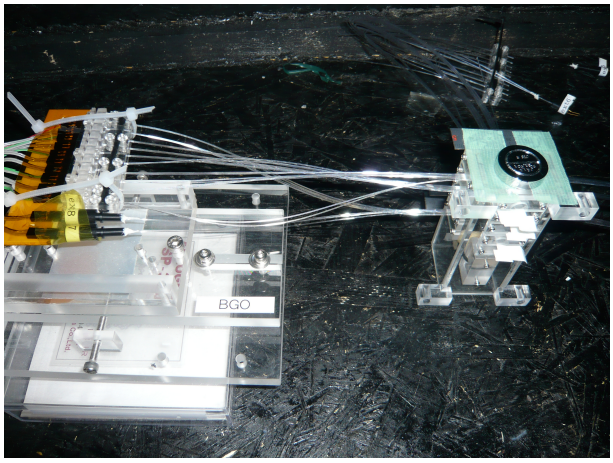

図 22　2 次元での飛跡検出の setup

5.2.2　測定結果・考察

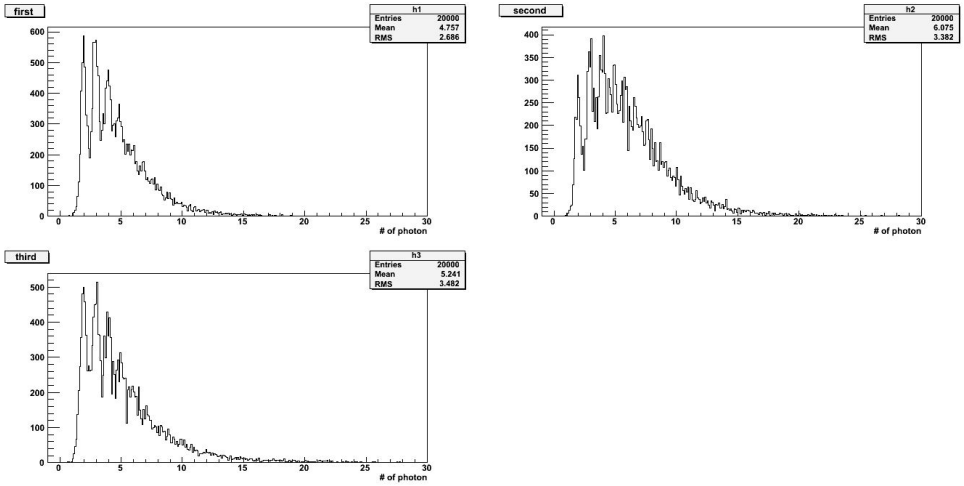

図 23　Y 面 3 later の光量

参考文献

[1] K.Miwa, *et al.*, Proposal for an experiment at the 50-MeV PS 'Mesurement of cross section of Σp scattering'

[2] 浜松ホトニクス 技術資料 http://jp.hamamatsu.com

[3] http://omega.in2p3.fr/

[4] 日本アルテラ http://www.altera.co.jp

[5] 本多良太郎, 修士論文：マルチファイバー飛跡検出器による陽子測定システムを用いた Σp 散乱実験