

Σp 散乱実験のための MPPC 多チャンネル読み出しシステムの開発

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻
塩崎 健弘

研究目的

核力 (NN 間力) をハイペロン核子 (YN) 間力に拡張して調べることは核力をクォークの描像から理解することに繋がる。特に $\Sigma^+ p$ 相互作用ではクォークレベルでのパウリ効果により非常に強い斥力芯が予想されており、散乱実験を通してこの斥力芯の強さを調べることで核力の斥力芯の起源を調べることに繋がる。

我々は高統計で Σp 散乱の微分散乱断面積を求める実験 (J-PARC E40 実験) を計画している。本実験は液体水素標的に二次 π ビームを入射し Σ を生成する。 Σ の生成及び Σp 散乱事象の同定は、図 1 に示すように周囲の検出器群で行う。従来用いられていた画像解析による散乱事象の同定に代わり、標的周囲の検出器の情報から運動学を解くことによる同定を行うため、大強度のビームを用いることができる。

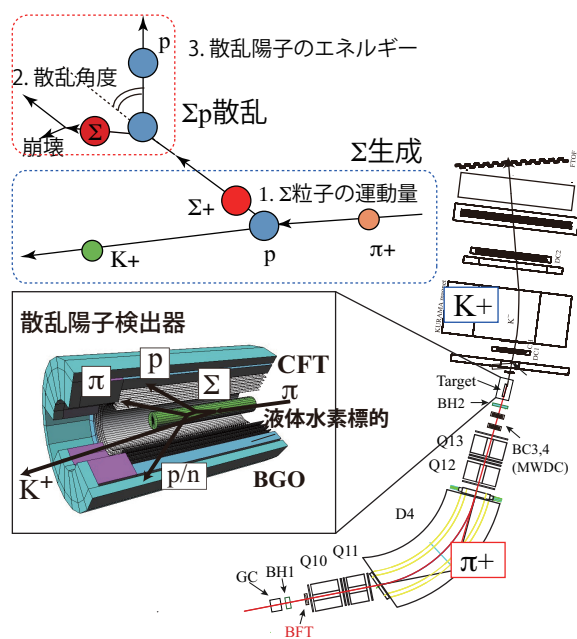


図 1 図 1: J-PARC E40 実験セットアップ。

本実験では散乱陽子の飛跡を測定するために円筒形にシンチレーションファイバーを配置したファイバートラッカーである Cylindrical Fiber Tracker (CFT) を用いる。CFT はそれぞれのファイバーを個別に半導体光検出器である Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) で読み出す。そのために、約 5000 ch という大量のチャンネル数を読み出す必要がある。本研究の目的は、この多チャンネルの MPPC を読み出すためのシステムである、VME-EASIROC ボードの開発である。

VME-EASIROC ボードの開発

図 2 に本研究で製作した MPPC 多チャンネル読み出しボード VME-EASIROC の写真を、図 3 に本ボードのブロックダイアグラムを示す。本ボードは 64 ch の MPPC の ADC、TDC を取得し Ethernet

経由で PC にデータ転送を行うボードである。以下に本ボードの ADC、TDC、データ転送系の性能について述べる。

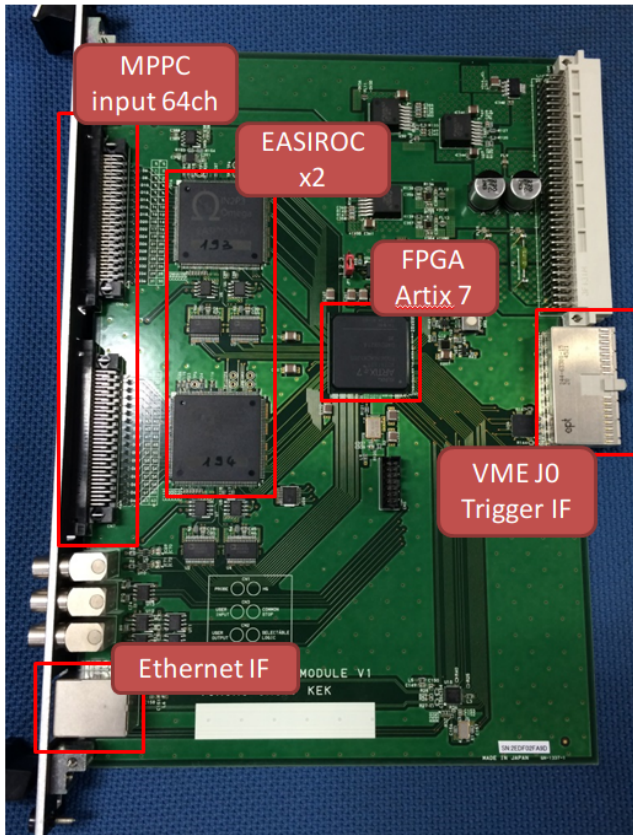


図2 VME-EASIROC 写真。

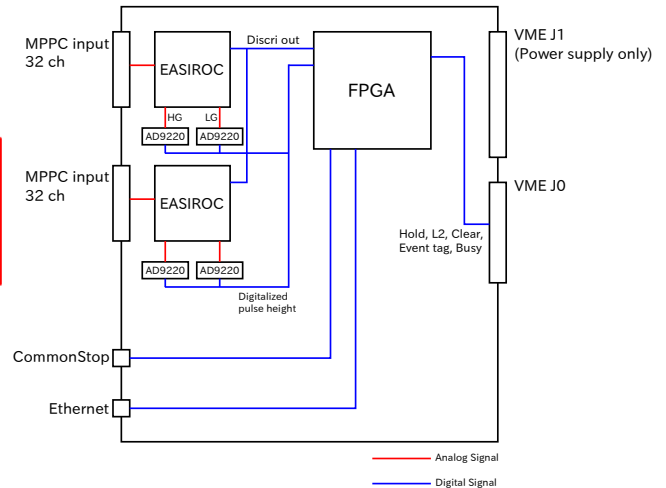


図3 VME-EASIROC ブロックダイアグラム。

MPPC 多チャンネル読み出しシステムを構築するにあたり、1 ボードで多チャンネルの MPPC の信号処理と制御 (波形の整形増幅、バイアス電圧の調節) を行う必要がある。そのため、ASIC を用いた集積化が必須であり、32 ch の MPPC 読み出し用 ASIC である EASIROC を使用することとした。1 ボードに EASIROC を 2 chip 搭載した、64 ch の MPPC 読み出しボードを開発した。

我々の実験で CFT によって検出される粒子は Minimum Ionizing Particle(MIP) の π 粒子から、低エネルギーの陽子まで、様々なエネルギーをもつ。これらの粒子のエネルギー損失 ΔE をファイバーにて測定した情報を用いて粒子識別を行う。MIP 粒子による検出光電子数は 20 p.e. 程度、陽子によるそれは、エネルギー損失が大きい場合で、300 p.e. 程度である。EASIROC はゲインの異なる 2 つの系統の回路 (High Gain、Low Gain) を内蔵しているため、広いダイナミックレンジを持ち、これらの要求に充分に応えることができる。本ボードでは、EASIROC に内蔵された電圧保持回路からシリアルに出力される MPPC の波高情報を、パイプライン型 ADC である AD9220 に入力することによって、波高検出型 ADC とした。図 4 に 400 pixel の MPPC に対して LED で微少光を入射した時の、本ボードで取得した ADC スペクトルを示す。このように、MPPC の持つ高い photon counting 能力も損なわれないことが分かった。

次に本ボードでの時間測定について述べる。CFT を含むファイバー検出器はドリフトチェンバーと比較して非常に良い時間分解能を持つ。そのため、トリガーされたイベントとアクシデンタルなバックグラウンドを良い S/N で弁別することができる。ファイバーの時間分解能は 600 ps (σ) 程度であるため、オフライン解析において数 ns の time gate を設定する。EASIROC から平行に出力される Discriminator 出力を FPGA 内に実装した TDC に接続し時間情報を取得することとした。250 MHz の 4 相クロックを

用い、 $LSB = 1 \text{ ns}$ の TDC を実装することによって、上述した要求を満たすことができる。MPPC の暗電流によるヒットの発生を考慮し、 $1 \mu\text{s}$ のタイムウィンドウ中に 16 hit/event の depth を持つ Multi-hit TDC (MHTDC) とした。さらに、EASIROC の Discriminator は Update 型であるために波高と Time over Threshold (ToT) に相関がある。ToT を補助的な波高情報として使用するために leading、trailing の両エッジの取得を行うこととした。本ボードに対して一定のタイミングでテストパルスを入力する試験によって TDC の時間分解能 450 ps (σ) が得られた。

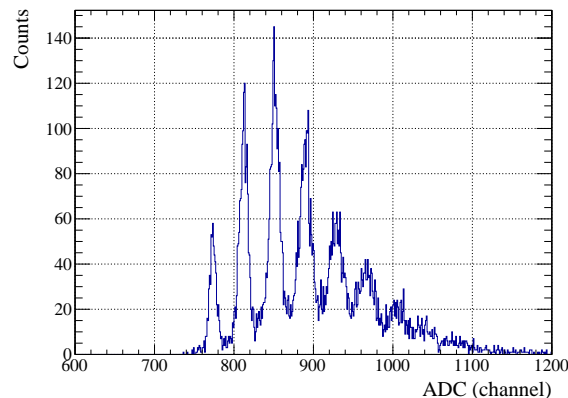


図 4: 400pixel MPPC に LED の微少光を入射したときの High Gain 系統の ADC スペクトル (VME-EASIROC ボードにて取得)。

本ボードはトリガー情報として、1st-level-trigger、2nd-level-trigger、Fast clear、イベントの同期をとるために使用されるイベントタグを受け取る。これらのトリガー情報の配布はボード後方の VME J0 バスを介して行われ、KEK VME クレート内のすべてのボードに対して同一の情報が配布される。本ボードから PC へのデータ転送は SiTCP(100 Mbps) による Ethernet 通信によって行われる。データ転送系の負荷を軽減するために ADC にはペDESTAL サプレッション機能を実装した。J-PARC E40 実験で予想されるトリガーレートは 2~3 kHz であるため、これよりも十分早い時間でデータ収集を行うことを目標とする。デッドタイム削減のため、ADC の読み出しクロックの高速化、Double buffer の実装によるデータ収集系とデータ転送系の並列動作の実現によって、本ボードは典型的なデッドタイム $12 \mu\text{s}$ を達成した。

ファイバートラッカーを用いた性能評価

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) にて VME-EASIROC と CFT 試作機による高光子数に対する応答を調べる実験を行った。この実験では 80 MeV の陽子を、ディグレーダーによってエネルギーを変えながら、CFT 試作機に入射し、VME-EASIROC によって読み出しを行った。CFT 試作機は 0.75 mm 径のファイバーを円柱状に配置した Φ 層を 4 層用い、4 層のエネルギー損失を測定した。また、後方に BGO カロリメーターを配置し CFT 試作機通過後の陽子のエネルギーを測定した。この配置は J-PARC E40 実験にて陽子と Σ の崩壊による π の粒子識別に使用する検出器の構成に近いものであるため、この実験によって陽子/ π の分離能についても調べることができる。

ファイバーでのエネルギー損失 ΔE と BGO で測定されるエネルギー E の関係として図 5 に示す結果が得られた。陽子のエネルギーが低い領域ではファイバーのエネルギー損失が飽和しているが、ボード単体に対するテスト電荷の注入試験ではこの領域に対しても線形性を示しているため、この飽和は MPPC によるものであると考えられる。

また、80 MeV の陽子を入射した際のファイバーでのエネルギー損失の分解能は、2.1 MeV に対して 0.23 MeV (σ) である。MIP の π 粒子によるエネルギー損失は 0.56 MeV であるため、光子数の統計のみを考慮すると、この場合のエネルギー分解能は 0.12 MeV (σ) と求まる。よって、80 MeV の陽子と MIP

の π 粒子を 4.3 の分離能で分離できるという結果が得られた。この結果は先行研究によって明らかになっている値と整合するものであり、本ボードでも先行研究と同等の性能が得られることが確認された。

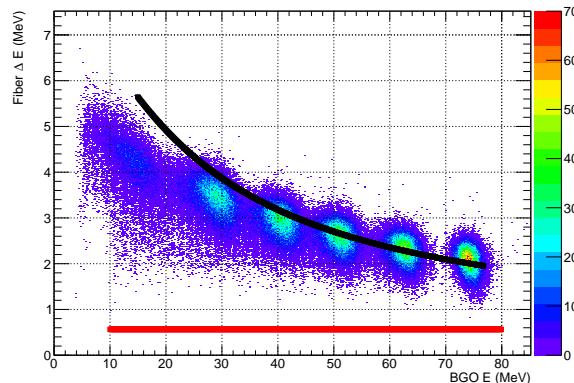


図 5: BGO で測定したエネルギー E とファイバーで測定したエネルギー ΔE の関係。黒線は計算によって求めた E と ΔE の関係であり、赤線は MIP 粒子が通過した際のファイバーでのエネルギー損失を示している。

前述の実験とは別に、CYRIC にて 80 MeV 陽子をファイバー径 0.5 mm の平面型ファイバートラッカーである SFT に入射しファイバーを含めた系における時間分解能の試験も行った。陽子を SFT に入射し、その後方に配置したプラスチックシンチレーターを TDC の時間の基準にした。このデータからファイバーを含めたシステムにおける時間分解能が 1.2 ns (σ) であることが分かった。この値は既知の SFT の時間分解能と同程度であった。

さらに、ToT を補助的な波高情報として用いることによる陽子/ π 分離能の試験を CYRIC にて行った。この実験は円筒形ファイバートラッカーである CFT と、その周りを囲む BGO カロリメーターを用いた。ファイバーでもエネルギー損失 dE と BGO で測定されたエネルギー E の二次元相関から陽子/ π の分離を行う。その結果、ファイバー 1 層を用いた場合、 2.9 ± 0.8 の分離能が得られた。J-PARC E40 実験においては使用する層数が 8 倍になるため、統計のみを考慮すると分離能は $2\sqrt{2}$ 倍に向上することが期待される。この性能は J-PARC E40 実験において陽子/ π を行うために十分な分離能であり、ToT を用いた場合でも十分にこれら粒子の分離を行うことが出来ることが示された。

まとめ

J-PARC E40 実験のため MPPC 多チャンネル読み出しボードである VME-EASIROC を開発した。このボードは 64 ch の MPPC の ADC、MHTDC データを取得し、Ethernet 経由で PC に転送を行うボードである。本ボードは MPPC の photon counting 能力を損ねることなく ADC データを取得することができ、CFT 試作機と組み合わせることで 80 MeV の陽子と MIP の π 粒子に対して 4.3 の分離能を持つことが分かった。時間分解能はボード単体で 450 ps (σ)、ファイバーを含めたシステムで 1.2 ns (σ) であった。陽子/ π の分離能は、ToT を補助的な波高情報として利用した場合でも、2.9 という値を達成することが出来た。また、典型的なデッドタイムは 12 μ s であった。これらいずれの性能も本実験を行うにあたり十分なものである。