

シグマ陽子散乱実験のための BGO カロリーメータシステムの構築

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核物理研究室
池田 迪彦

1 研究背景と目的

二つの核子の間に働く相互作用は、豊富な核子-核子弾性散乱のデータを基に遠距離においては中間子交換モデルによりよく理解されている。しかし、核子と核子が重なるような近距離で生じる斥力については、その起源が理解されておらず、核子を構成するクォーク間の相互作用に踏み込んだ議論が必要である。核力の理解のためには、核力を u, d, s クォークを含む $SU_f(3)$ 対称性に基づくバリオン間力に拡張して理解することが有効である。

バリオン間力の中で、我々は ΣN 相互作用に着目している。特に、 $\Sigma^+(uus)$ はアイソスピンの大きさが 1 であるため 2 つの u クォークのスピンの向きが同じ向きになり、 Σ^+p の相互作用を考える時、互いの u クォークのうち少なくとも 1 組が同じスピン、カラーをもつ割合が高くなる。このとき、クォークレベルでのパウリ斥力が強く働くと考えられている。よって、 Σ^+p 相互作用からクォークレベルのパウリ効果を検証することができる。

しかし、直接的な散乱実験を行うことは、ハイペロンの寿命が短い ($\sim 10^{-10}$ s) ために非常に難しい。過去に行われた Σp 散乱実験では同定事象が数十イベントにとどまっており、 ΣN 相互作用の議論をするには実験データが不足している。

我々は、新たな手法を用いて Σp 弾性散乱の微分断面積を高統計で決定することを目的に、J-PARC E40 実験を計画している。この実験は、 π ビームを 10^7 Hz という大強度で液体水素標的に入射し、 (π^\pm, K^+) 反応により Σ^\pm 粒子を生成、標的中の陽子と弾性散乱を起こす事象として 10000 イベントの同定を目指すものである。E40 実験では、入射 Σ の運動量ベクトルと、散乱陽子の飛跡と運動エネルギーを測定することで、弾性散乱の運動学との一致から散乱事象の同定を行う。散乱 Σ を直接測定する必要がないことが実験上の利点となる。この実験のため、我々は飛跡検出器 CFT (Cylindrical Fiber Tracker) と BGO カロリーメータによって構成される散乱陽子検出器群を新たに開発してきた。

BGO カロリーメータは、CFT の外側を覆うように配置されるシンチレーションカウンターである (図 1)。BGO カロリーメータで検出する対象は 160 MeV までの連続したエネルギーの散乱陽子であり、40 kHz – 400 kHz の高計数率下で 80 MeV に対して 3% (σ) のエネルギー分解能が要求される。本研究の目的は、この要求を満たした読み出しシステムを開発し、全チャンネル (22 本) に実装して動作させることで、カロリーメータシステムの構築を完了することである。

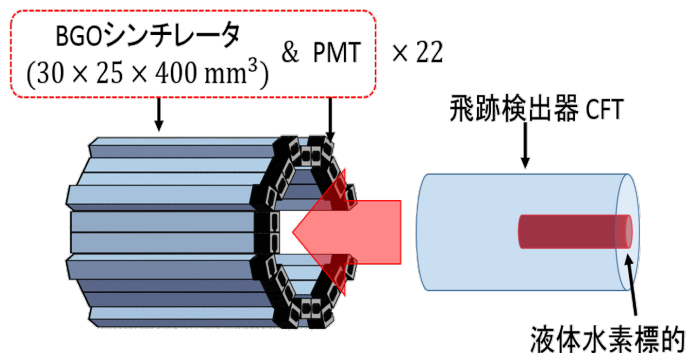


図 1: E40 実験における BGO カロリーメータの配置図。標的を囲う CFT の外側を囲う。

2 BGO カロリーメータの読み出し系

BGO のシンチレーション光は光電子増倍管 (PMT) で読み出す。BGO 結晶のシンチレーション光は時定数が 300 ns と長く、高計数率下においてパイルアップを起こす確率が高くなり、QDC による測定ではエネルギー情報が得られない。そこで、我々は Flash ADC による波形読み出し法をとることにした。Flash ADC で信号を記録し再構成するためには、細かい間隔でサンプリングする必要があるが、1 イベントのデータサイズが膨張するというデメリットがある。安易にデータサイズを増やすことは、記憶媒体への懸念を生むだけでなく、Flash ADC モジュールからのデータ転送に要する時間を増大させ、データ取得系を律速する。そのため、粗いサンプリング間隔 (数十 ns) の少ないサンプリング数 (70 サンプル程度) で波形を再構成する読み出し方法を模索した。

採用した読み出し方法は、PMT の出力信号を積分回路に通し整形した波形を Flash ADC で記録することで、オフライン解析でパイルアップ信号の分離を行い、テンプレート波形を用いたフィッティング (図 2) により波高情報に変換するというものである。

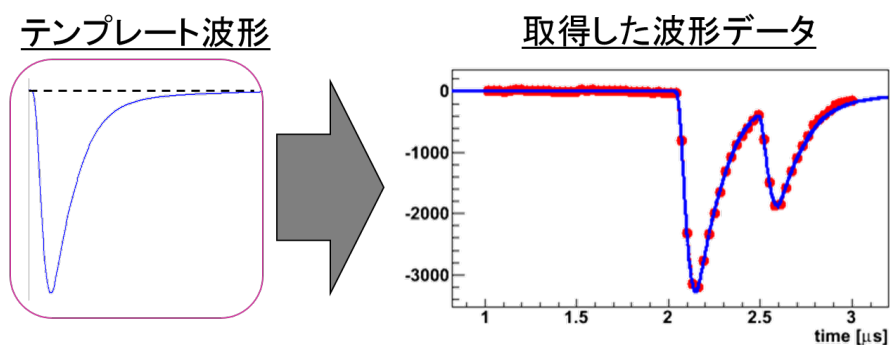


図 2: テンプレート波形によるフィッティングの様子。パイルアップ信号を分離し、それぞれの波高情報を取得できる。

Flash ADC として CAEN V1724 を用い、また、その前段に用いるアナログ回路を設計・製作して読み出しシステムを試作した。このアナログ回路には、波形再構成のための整形回路と Gain 調整のための増幅回路、そしてデータ量削減のための Veto スイッチを実装した。Veto スイッチは TTL 信号の入力により、回路出力のベースラインの制御を行い、V1724 の Zero Suppression 機能と組み合わせてデータ量の削減を試みることにした。

3 試作開発したシステムの性能評価

開発したシステムについて、30 ns 間隔でサンプリングを行い、データ量はチャンネルあたり 33 word (66 samples) に抑えるものとして、以下の評価を行った。

■高計数率下における安定性

想定する高計数率下で PMT(定格 900 V) を安定に動作させるためには、印加電圧を低く抑える必要があることがわかっている。PMT を安定に動作させ、かつ目標のエネルギー分解能を達成できる印加電圧を決定するために、東北大学サイクロトロラジオアイソトープセンター (CYRIC) にて、77.8 MeV 陽子ビームを、ビームレートを 1 kHz – 700 kHz の範囲で変えて BGO カロリメータに直接照射する実験を行った。結果として印加電圧 700 V の時に PMT の Gain 降下の影響が見られたが、600 V まで下げることで PMT の動作は十分に安定し (図 3)、450 kHz のビームレートに対してエネルギー分解能 1.3% (σ) を達成した。また、波形解析においては、40 kHz の計数率下で 99% の効率で波高情報を得られた。

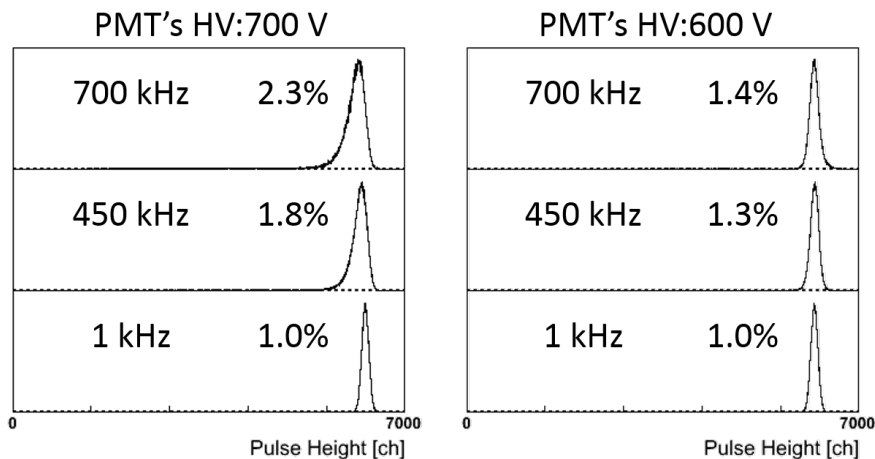


図 3: 77.8 MeV 陽子ビームを直接照射した実験の波高分布。ビームレートが高いときに表れる Gain 降下による分解能の悪化は印加電圧を 600 V まで下げることで抑制できる。図中の数字は照射したビームレートと分解能 (σ) を表す。

■エネルギー較正

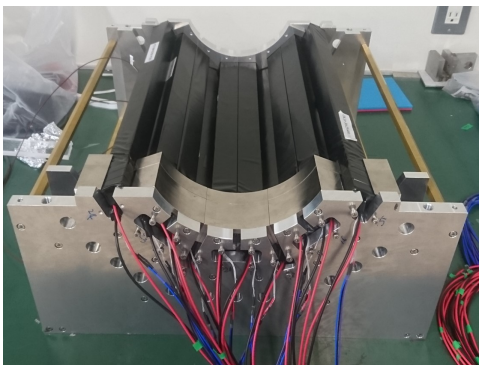
77.8 MeV 陽子ビームを銅のディグレーダーによりエネルギーを下げて BGO に入射することにより、波高とエネルギーの対応点を 4 点得た。その結果、波高とエネルギーの関係は、ある程度高いエネルギーについてはほぼ線形であることがわかった。また、低エネルギー領域における非線形な関係は現象論的に取り扱い、波高とエネルギーの較正式を決定した。較正式を評価するため、 CH_2 を標的に陽子ビームを用いて pp 散乱実験を行い、データとシミュレーションの比較を行ったところ、10 MeV 以上に対して 0.4 MeV 以下の精度で一致する結果が得られた。

4 実機の製作と評価

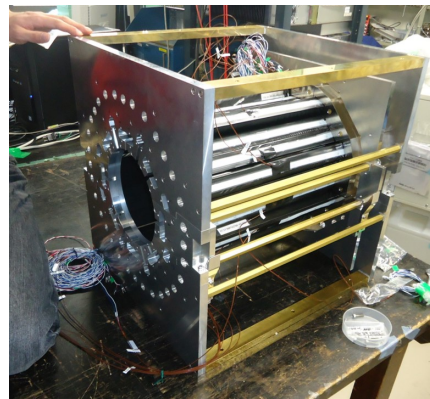
試作開発機を用いたテストにより、十分な性能があると判断した読み出しシステムを、E40 実験で使用する実機システムに実装し、カロリメータシステム全体を構築した。E40 実験に用いる BGO カロリメータの総数は 22 本である。これらを E40 実験で使用する実機架台 (図 4) に設置した上で、全チャンネル分の実機回路を製作し、読み出し系の構築を行った。この組み上げた実機システムについて、検出器性能及び DAQ の試験を行った。

^{137}Cs 線源由来の 662 keV の γ 線を用いた測定により、すべてのチャンネルで 15% (σ) のエネルギー分解能を達成した。エネルギー分解能が $\sqrt{1/E}$ に比例すると仮定すると、80 MeV において 1.4% (σ) の分解能を達成することが期待される。また、検出光量の照射位置による依存性を全ての個体について 2 cm の間隔で取得した結果、最大で 5% の差異が見られ、この補正が必須であることがわかった。

E40 実験の DAQ システムにおいて、BGO カロリメータは 1 つの独立したフロントエンドとしてデータ取得を行い、全体システムから配布されたイベントタグにより同期を図る。BGO カロリメータ全チャンネルの読み出しには V1724 を 3 台用いるため、各モジュールの読み出しを分散してデータ転送を高速化した上で、イベント同期のとれたフロントエンドを構築した。E40 実験で実際にフロントエンドが受け取るトリガーを模したランダムトリガーを生成し、DAQ 効率を測定した。DAQ 効率は request 信号の数に対する accept 信号の数である。その結果、5 kHz のトリガーレートに対して 98% の効率を得られ、想定トリガーレートにおいて十分な効率で動作することを確認した。



(a) BGO 架台の下半分の写真。



(b) BGO を架台に設置した写真。

図 4: BGO カロリメータの実機の写真。

5 結論

シグマ陽子散乱実験 (J- PARC E40 実験) に用いる BGO カロリメータの読み出しシステムを開発し、性能評価を経て、カロリメータシステム全体の構築を行った。完成したシステムは、E40 実験の環境下において要求されるエネルギー分解能を達成し、データ収集系も十分な効率で動作することがわかった。本研究により、E40 実験で使用するカロリメータシステムの構築に成功した。