

# シグマ陽子散乱実験のための 散乱陽子検出器群の開発

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
赤澤 雄也

## 研究目的

核力の性質は核子が重なるような  $\sim 1$  fm よりも近い距離ではクォーク間相互作用によって理解すべきである。そのためには  $u, d$  クォークのみから構成される核子系だけでなく、 $s$  クォークを加えたハイペロンを含めた  $SU_f(3)$  空間に拡張してバリオン間力を調べることが重要である。 $SU_f(3)$  に拡張されたバリオン間力では新たに 4 つのスピンのフレバー多重項が現れ、核力とは異なる振る舞いをする事が予想されており、それらを調べることでバリオン間力の理解につなげることができる。

そこで我々は  $\Sigma p$  散乱実験 (J-PARC E40) において、 $\Sigma^+ p, \Sigma^- p, \Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$  の各チャンネルの微分断面積を高統計で測定することを計画している。クォーク模型に基づく理論計算によると、 $\Sigma^+ p$  チャンネルでは系に含まれる 4 つの  $u$  クォークのうち 2 つが同じスピン、カラーを持つ確率が高く、クォークレベルでのパウリ斥力によって非常に大きな斥力芯が存在すると予想されている。E40 実験では  $\Sigma^+ p$  チャンネルにおいて、微分断面積の測定および位相差の導出によって、この斥力の大きさを定量的に決定することを目標としている。また  $\Sigma^+ p, \Sigma^- p, \Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$  の各チャンネルの測定を通して、未だに定量的に理解されていない  $\Sigma N$  相互作用を精密に調べる。

図 1 に E40 実験のセットアップを示す。

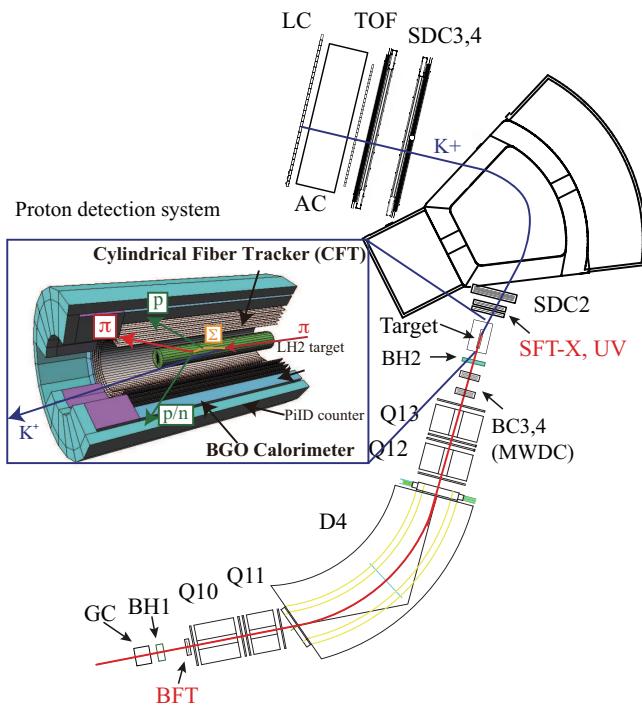


図 1:  $\Sigma p$  散乱実験 (E40 実験) のセットアップの図。

本実験では液体水素標的に  $\pi$  ビームを照射し  $\pi^\pm + p \rightarrow K^+ + \Sigma^\pm$  反応を用いて  $\Sigma$  を生成する。生成された  $\Sigma$  と標的内の陽子を再び散乱させ、散乱陽子及び  $\Sigma$  の崩壊粒子を測定することで  $\Sigma p$  散乱断面積を測定する。 $\Sigma p$  散乱事象を同定するために、標的前後のスペクトロメータから生成  $\Sigma$  の運動量ベクトルを求める。さらに液体水素標的を囲う飛跡検出器で散乱陽子の飛跡を測定し、 $\Sigma p$  散乱の運動学を仮定すると散乱陽子の運動エネルギー ( $E_{p'calc}$ ) を求めることができる。飛跡検出器のさらに外側に設置するカロリメータにて実際に運動エネルギー ( $E_{p'measure}$ ) を測定し  $\Delta E = E_{p'calc} - E_{p'measure}$  を評価することで散乱事象とバックグラウンドを分離する。

実際の測定では飛跡検出器として円筒形ファイバートラッカーを、カロリメータとして BGO カロリメータを使用する。本研究では散乱陽子検出器群の試作機として実機と同程度の大きさの BGO カロリメータ及び円筒形ファイバートラッカーを開発し性能評価を行った。

## BGO カロリメータ

BGO カロリメータは散乱事象を同定するために、散乱陽子のエネルギーを 80 MeV において 3% の精度で測定する必要がある。予想される散乱陽子のエネルギー領域は  $\sim 150$  MeV までの領域である。さらにビーム方向に 400 mm の大きさを持つ飛跡検出器を取り囲むために試作品の BGO カロリメータは  $32 \times 25 \times 400$  mm<sup>3</sup> の BGO 結晶を使用し、読み出しには光電子増倍管を用いた。性能評価のために、2013 年 5 月に東北大学サイクロトロン RI センターにおいて 80 MeV の陽子ビームを BGO カロリメータに照射する実験を行い、エネルギー分解能を測定した。

私は BGO 結晶の反射材、読み出し PMT、信号処理の回路等の接続を行い、データ測定のための DAQ プログラムを作成した。また、実験中の手順やセットアップを考え、実験遂行のために必要となる準備を行った。実験中においても私が主導となって実験を行い、実験中や実験後には取得したデータの解析を行った。

その結果、80 MeV 陽子に対するエネルギー分解能 1.2% ( $\sigma$ ) が得られ、要求分解能を十分に満たしていることが確認された。また、カロリメータの上流にディグレーダを設置し、カロリメータへ入射する陽子のエネルギーを変更して測定を行った。各エネルギーに対するエネルギー分解能を図 2 に示す。<sup>137</sup>Cs 線源からの 661 keV の  $\gamma$  線で測定した結果も重ねて示す。図 2 に示した線は、ポアソン分布で予想される分解能のエネルギー依存性  $\frac{1}{\sqrt{E}}$  でフィットした結果である。要求分解能である 80 MeV で  $\sigma = 3\%$  のグラフを同時に示す。このグラフより、分解能のエネルギー依存性が妥当であることが確認でき、測定領域において要求分解能を十分に満たしているという結果が得られた。

Energy resolution of BGO calorimeter

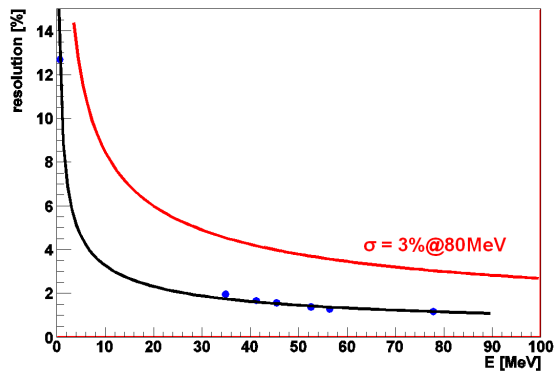


図 2: 入射エネルギーに対する BGO のエネルギー分解能 ( $\sigma$ )。

また、BGO 結晶が大型であるので、照射位置によって集光率や光の減衰及び発光量の差が現れるかを調べるために、結晶へのビーム照射位置を水平方向に 40 mm 刻みに変更して測定を行ったところ、図 3 の結果が得られた。ここでは片方の端面を  $z = 0$ 、逆側の端面を  $z = 400$  mm と定義している。結晶へのビーム入射位置によって両端の PMT が同時に同様のふるまいを示すことから、BGO 結晶内での発光量に位置依存性があると考えられる。

gain ratio, z[mm]

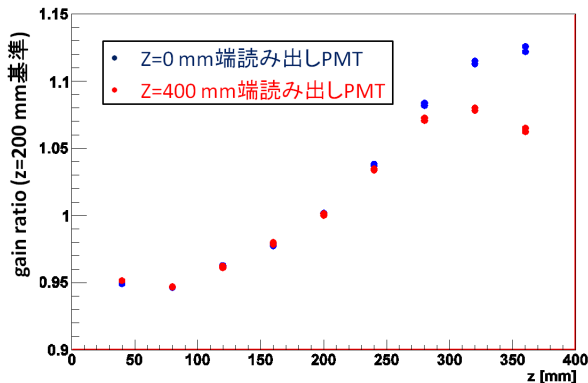


図 3: 陽子ビームを用いて BGO カロリメータの検出光量の位置依存性を測定した結果。横軸は BGO への照射位置、縦軸は  $z = 200$  mm を基準とした検出光量の比である。

入射位置の情報がないとエネルギー分解能は悪化するが、本実験ではカロリメータに到達する前に飛跡検出器で飛跡を測定し、入射位置が求まるため、この位置依存性は補正することが可能である。

## 円筒形ファイバートラッカー (CFT)

散乱陽子の飛跡を検出するための円筒形ファイバートラッカー (Cylindrical Fiber Tracker, 以下 CFT) は、実機では円筒軸に平行な方向にファイバーを張る層 ( $\Phi$  層) が 4 層、円筒に沿うようにらせん状に張る層 (U・V 層) が 4 層の計 8 層を計画しているが、試作機として  $\Phi$  層が 2 層、U 層が 1 層の計 3 層で構成され、実機と同様の大きさ (円柱軸に 400 mm の測定領域) をもつ CFT を製作した。直径 0.75 mm の円形シンチレーションファイバーを合計約 1200 本使用し、

ファイバー毎に  $1 \text{ mm}^2$ 、400 pixel の MPPC で読み出した。製作が困難と考えられていた円筒形の形状について、位置精度を保证するための製作手法として、 $\Phi$  層に関してはファイバー一本ずつ通る穴のあいたフレームを用いた製作方法を、U,V 層に関してはさらに、45 度おきに設置した治具柱にファイバーを固定してらせん状に張る方法をそれぞれ確立し、試作機を完成させることができた。

私の貢献として CFT 製作の一端を担い、製作手法の模索及び実際の製作を行った。フレームの組み立てを行い、主に  $\Phi$  層のファイバーを固定する作業を担当した。ファイバーを一本ずつフレームに固定し、ファイバーをまっすぐに張る手段として重りを用いることを提案し、試作機を完成させることに成功した。図 4 に製作した CFT の写真を示す。

また、CFT の動作に関わる部分も私が行い、ケーブルの配線や読み出し MPPC の調整などを行った。データ処理の部分については同グループの者の協力を得た。

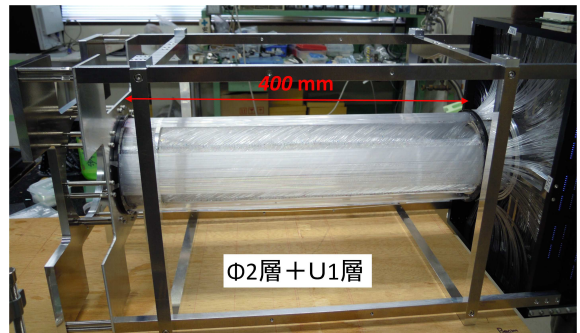


図 4: 製作した CFT の試作機。

データ解析については、J-PARC K1.8 ビームライン実験グループにおいて使用されている解析コードをもとに私が CFT に対応する解析コードを作成し、解析を行った。

CFT について宇宙線を測定し検出光量を測定したところ、ファイバー一本あたり平均約 19 個という十分な光電子数が得られた。検出効率は一層あたり約 86% という結果が得られたが、光量から予想される検出効率よりも低い値であった。これはファイバー間の隙間が原因と考えられ、製作精度の向上が必要である。

以上より問題点は残るものの、円筒形ファイバートラッカーの製作が実現可能であることを示すことができた。本研究を基に実機製作での改善を図る。

## pp, pC 散乱実験による散乱陽子検出器群としての性能評価

製作した BGO カロリメータ及び CFT の試作機を組み合わせて、散乱陽子検出器群としての性能評価を行った。2013 年 7 月に東北大学サイクロトロン RI センターにて pp 及び pC 散乱実験を行い、CFT の角度分解能、散乱陽子検出器群としての散乱事象同定能力を評価した。試作機では層数が少ないため散乱陽子を CFT の円筒の外側から入射させ CFT の円筒側面を突き抜けるように設置し、さらに CFT の後方に BGO カロリメータを設置した。この配置によって CFT は実質 6 層分として評価される。標的にはポリエチレン ( $200 \mu\text{m}$  厚) を使い、80 MeV の陽子ビームを照射した。

私はこれらの実験セットアップについて設置位置、設置方法を考え、台や標的の製作、測定を行い、さら

に事前に測定レートなどを計算によって予想し、ビーム強度の目安を決定した。ビーム使用時の測定プランを立て、私が主導となって測定や解析を行った。また、今回のテスト実験を Geant4 シミュレーション上で再現し、得られた結果が妥当であるかの評価も私が行った。以下の結果は私がデータ解析、シミュレーションを行った結果である。

CFTの角度分解能は、CFTで測定した飛跡によって求めた vertex 分布(ビーム方向に  $\sigma = 13.7$  mm)をシミュレーションで再現することによって見積もった。その結果、角度分解能は  $1.0^\circ(\sigma)$  という値が見積もられた。これは、ジオメトリカルに予想される角度分解能  $0.77^\circ(\sigma)$  よりも悪く、ファイバーのたるみによる位置精度の悪化が原因であると考えられる。

次に、散乱陽子検出器群の散乱事象同定能力を評価した。検出器群で測定した運動エネルギーと散乱角度の相関を図5に示す。 $pp, pC$  弾性散乱の運動学によって決まる散乱角度と運動エネルギーの関係を重ねて示す。この相関図より  $pp, pC$  散乱が確認できた。

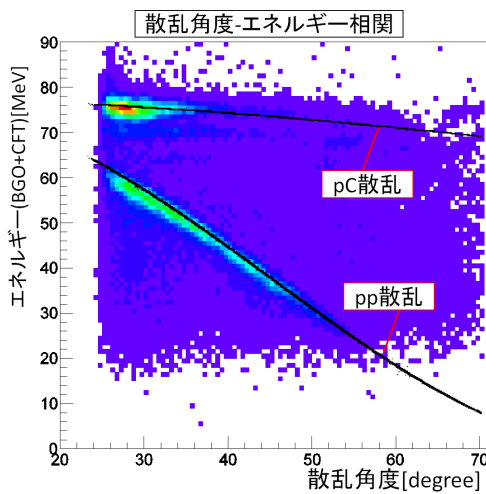


図5: BGO カロリメータと CFT によって測定された散乱陽子の運動エネルギーの和と、CFT で測定された散乱角度の相関図。重ね書きした線はそれぞれ  $pp, pC$  散乱の運動学から決まる角度とエネルギーの相関である。

散乱事象同定能力の評価として、計算値と測定値の差  $\Delta E = E_{calc} - E_{measure}$  を求めたところ、 $pp$  散乱に対して図5に示す  $\Delta E$  の分解能が得られた。 $pp$  散乱全体では、分解能  $1.8$  MeV( $\sigma$ )であった。図6にはシミュレーションでの見積りも同時に載せている。シミュレーションではそれぞれの検出器のエネルギー分解能を考慮しており、理想的な CFT の角度分解能を想定した場合と、測定より求めた角度分解能を用いた場合の2種類を示した。

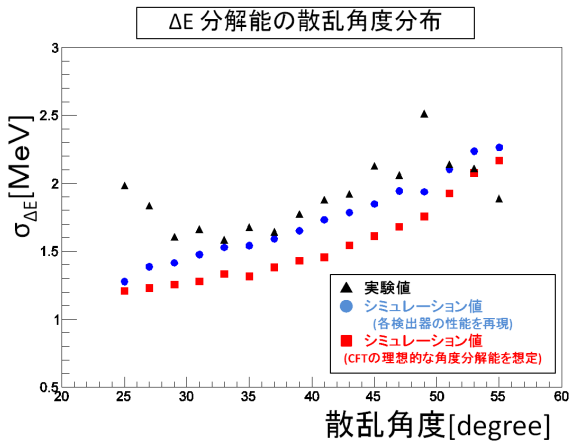


図6:  $\Delta E = E_{calc} - E_{measure}$  の分解能の分布。

現実的な角度分解能を考慮したシミュレーションによって実験値をよく再現しているといえる。ただし、散乱角度前方においてシミュレーションと一致しないのは散乱陽子が BGO を固定するアルミフレームを通過するためと考えられる。実機において理想的な分解能が得られるように、CFT の製作を改善する必要がある。

また、今回の実験結果から  $pC$  弾性散乱、及び  $pp$  散乱に対する散乱微断面積  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  を導出した。 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  は以下の式で表される。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N_{scatt}/(\epsilon_{DAQ}\epsilon_{analysis})}{N_{beam}N_{Target}\epsilon_{acceptance}d\Omega} \quad (1)$$

$\Delta E = 0$  のピークに含まれるイベントの数が  $N_{scatt}$  に対応する。 $\epsilon_{DAQ}$  は DAQ 効率、 $\epsilon_{analysis}$  は解析効率、 $N_{beam}$  は標的へ入射した陽子数をそれぞれ表しており、 $N_{Target}$  はビームに垂直な単位面積あたりの標的の数であり  $pp$  散乱では標的中の水素の、 $pC$  散乱では炭素のそれぞれの原子核の面積密度である。 $\epsilon_{acceptance}$  は立体角の補正項、 $d\Omega$  は立体角である。以上のそれぞれの項を測定結果及びシミュレーションを用いて求めたが、ビーム量の測定の不確かさ及び、標的以外の物質の寄与により、絶対値の評価はできず、図7に示すように相対値として散乱断面積の角度分布を過去の実験値と比較した。

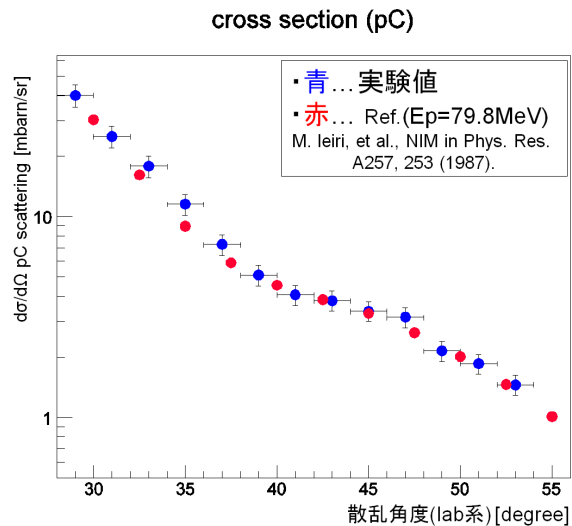


図7:  $pC$  散乱についての散乱微断面積。青点が今回の実験で測定した結果であり、過去の実験値との比較をするためにビーム量、標的以外の物質の寄与によって生じる不確定量を補正するようにファクターをかけている。赤点は過去の実験値を示している。

図7より相対値として、散乱断面積の角度分布は過去の実験値と良い一致を示した。この結果より、CFTでの角度測定及び散乱陽子検出器群としての散乱事象の同定が十分に行われていることが示された。

## まとめ

本論文では散乱陽子検出器群の試作機の性能評価を行った。BGO カロリメータに関しては  $80$  MeV 陽子に対して  $1.2\%(\sigma)$  の十分なエネルギー分解能を得ることができた。CFT に関しては、製作が困難と考えられていた円筒形の形状を新たな製作手法を確立することで実現し、試作機の角度分解能は  $1.0^\circ(\sigma)$  と得られた。 $\Delta E$  の分解能としては  $pp$  散乱全体で  $1.8$  MeV( $\sigma$ ) という値が得られた。理想的な分解能からは劣っており、CFT のファイバーの位置精度の向上を

必要とするものの、弾性散乱事象の同定には十分な分解能であった。散乱断面積を導出したところ、角度分布は過去の実験値と良い一致を示した。以上の結果か

ら、検出器群は散乱事象を十分に同定することが可能であることが示された。