

MPPCを用いたプロトン二重散乱の断面積測定法の評価

東北大学原子核物理 4年 本多良太郎

2009/3/31

概要

本実験は将来的に YN 散乱を観測するための実験装置群の性能評価が主な目的である。実験は東北大学の CYRIC で行われ、ビーム核種をプロトン、一次ターゲットを炭素、二次ターゲットを SciFi とした二重散乱実験である。観測する物理量は、Proton-Proton、Proton-Carbon の散乱断面積、Proton-Carbon 散乱の AnalyzingPower である。結果として、散乱断面積に関してはオーダーレベルの議論にしか至らず、AnalyzingPower に関しては弾性、非弾性散乱を分けることができず観測できなかった。

1 初めに

1.1 導入

バリオン間相互作用を探る手法の一つとして、Hyperon-Nucleon¹散乱が挙げられる。これは、自然界には安定して存在しない Strangeness Quark を含む粒子の相互作用を直接的に観測できるため、バリオン間相互作用理論への良い指標になると考えられるためである。しかし、残念な事に現在 YN 散乱を十分な統計量で観測した実験は存在しない。それは、Hyperon の寿命が非常に短いこと (10^{-10} s 程度)、生成断面積が非常に小さいことに起因する。

これらを克服するためには、大強度ビーム下で大量にハイペロンビームを生成することが必要となる。このような環境下で動作可能な ActiveTarget を開発することが、一つの解決法となり得る。本研究では、ActiveTarget となる SciFi の読み出しとして、応答の速い MPPC を用いた読み出しを研究している。その標的を用いて、我々は Proton ビームを用いた二重散乱実験を行った。本実験は 2009 年 1 月 27 日から 29 日まで東北大学 CYRIC にて行われた。実験の概念図を図 1 に示す。一次ビームとして 65MeV

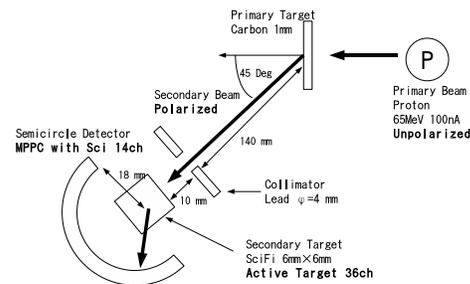


図 1: SetUp 概略図。一次ビームにエネルギー 65MeV の Proton を用い、炭素標的に衝突させる。ビーム進行方向から見て左側 45deg に二次ビームを取り出し、一次ターゲットから 140mm の位置にコリメーターを配置する。コリメーターから、更に 10mm の地点に二次ターゲットの SciFi を配置する。二次ターゲットで散乱される Proton を二次ターゲットの周囲に配置した半円状の検出器で検出する

Proton を用い、これを一次ターゲットの炭素に衝突させる。この炭素標的の厚さは 1mm である。その際 Proton は以下の式にしたがい LS 力を受ける。またその際の概念図を図 2 に示す。

$$LSForce = \nabla V_{LS}(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}) \quad (1)$$

¹以下 YN と標記する

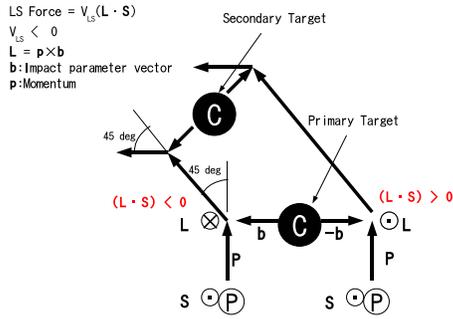


図 2: LS 力による偏極された二次ビーム取り出し。炭素 12 はスピンのゼロである。そのため、紙面上向きのスピンを持った Proton が入射した場合、炭素原子核の左右どちらの経路を通っても左側へ散乱されやすい。これを二次ビームとした場合、二次ターゲット内でも同じ現象が起き、散乱強度に左右非対称性が現れるべきである。

CYRIC のビームは偏極されていないが、65MeV、45deg 下での Proton-Carbon 弾性散乱²の AnalyzingPower は 0.988 ± 0.002 [1] であるため、偏極された二次ビームが取り出せると考えられる。一次ターゲットから 140mm の位置に、直径 4mm の穴の開いた厚さ 4mm の鉛を置き二次ビームをコリメートする。二次ビームは二次ターゲットである SciFi に衝突し散乱を起こす。SciFi は (CH)_n から成るので、観測される散乱現象は Proton-Proton³、及び pC 散乱である。

また、SciFi は MPPC で読み出しており、Active-Target として動作する。この散乱された二次ビームを、二次ターゲットの周りに配置された MPPC にシンチレーターを取り付けた検出器で観測し散乱角を決定する。

1.2 目的

将来的な展望として、我々はこのタイプの検出器群を YN 散乱実験へ応用したいと考えている。将来的に測定したい物理量としては、 Σ^+p 弾性散乱の断

²以下 pC と標記する

³以下 pp と標記する

面積、 Σ^+C 弾性散乱の AnalyzingPower である。そのためには、この検出器群は既知の物理量、具体的には pp、pC 散乱の断面積、pC 散乱における散乱断面積の左右非対称性を正しく測定できる必要がある。これらをどれだけ正しく測れるかを評価することが、本実験の最終目的となる。

1.3 MPPC

MPPC(図 3)は浜松ホトニクス社の製品名で Multi Pixcels Photon Counter の略である。この検出器は多数のガイガーモードで動作する APD を並列に接続したもので、それぞれの APD から出力される信号の大きさが決まっており、高い Photon Counting 能力を有する。その他の特性として、ゲインが高いこと ($10^5 \sim 10^6$ 倍)、半導体であるため磁場中で動作すること、小型であるため応答速度 (< 10ns) に優れることが挙げられる。動作例として、図 4 にプラスチックシンチレーターに Sr 線源のベータ線を当て、それを読み出した ADC ヒストグラムを示す。MPPC に入射した光子数に対応したピークを確認することが出来る。ベDESTAL の位置が正しくないのは、アンブの特性によるものである。本実験では、ゲインとダイナミックレンジを考慮して 400Pixels の MPPC(浜松ホトニクス社製 S10362-11-050U) を使用した。

2 検出器

2.1 二次ターゲット

二次ターゲットは断面が 1mm×1mm の SciFi を束ねて構成されている。また、Proton が SciFi 内を走る際に放出されるシンチレーション光を検出し、粒子の軌跡を観測する ActiveTarget として動作させることができる。二次ターゲットの構成図と実物の写真を図 5 に示す。ターゲットはビーム面に対し垂直方向に 6 セグメント、平行方向に 6 層の計 36ch で構成され、その一本一本を SciFi を熱収縮チューブと紫外線硬化樹脂で OpticalFiber と接合させる構造

となっており、OpticalFiberの末端には読み出し用のMPPCが取り付けられている。

また、SciFiとOpticalFiber間の接合状態を確認するためにSr線源を用いて試験実験を行った。MPPCを直接SciFiに取り付けたときの光量と、OpticalFiberを通して読み出した場合の光量を比較する事によって、SciFiとOpticalFiber間の接合状態を確認した。その概要を、図6の(a)に示す。2本のファイバーを束ね、その両端にMPPCを取り付ける。トリガー条件を $MPPCA \otimes B$ とし、両端のMPPCの信号を読み出す。その典型的なデータを図6の(b)(c)に示す。(b)では光のロスが13%程度に対して、(c)では87%減少している事が分かる。本実験で使用し

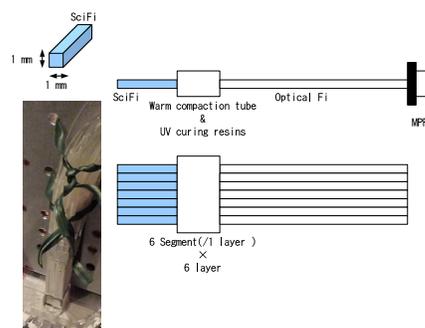


図5: 二次ターゲット概略図。SciFiを紫外線硬化樹脂と熱収縮チューブで接合し、OpticalFiberの末端にMPPCを取り付ける。それを横方向に6本まとめて1レイヤーとし、6層分重ねる。写真は実際にセットアップした場面である。

た二次ターゲットは、接合面での光子数減少が10～20%程度の比較的良好なファイバーを集めて作られている。

2.2 半円状検出器 バレル

二次ターゲットの後方に置かれた検出器は、半円状の形をしており散乱角を決定するとともに、散乱イベントをOnlineで取り出すためのトリガーカウンターとして用いられる。また、中央の2つの検出器で二次ビームの数を計測するためにも用いられる。この検出器を我々はバレル⁴と呼んでいる。バレルはMPPCにシンチレーターを取り付けた検出器を、半円状に14ch分配置することで構成されている。その実物の写真を図7の(a)に、詳細を(b)に示す。MPPCに取り付けられたシンチレーターの大きさは、縦3mm横3mm奥行き5mmで光電面とはOpticalGreaseで接合され、白ペンキで固定されている。二次ターゲット中心からシンチレーターの頭までは18mm離れており、実験室系に置ける1ch辺りの立体角は28msrである。角度分解能は実験室系で12.4deg、1chのAcceptanceは9.5deg、全体で-80～80degまで測定可能である。しかしながら、MPPCの大きさが5mm

⁴以後バレルと標記があった場合、この検出器を指す

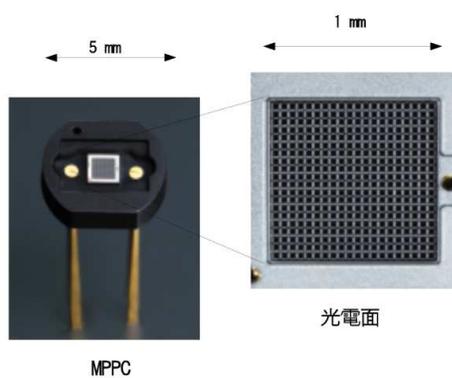


図3: MPPC外見。黒いセラミックの土台の中央に光電面が存在する。

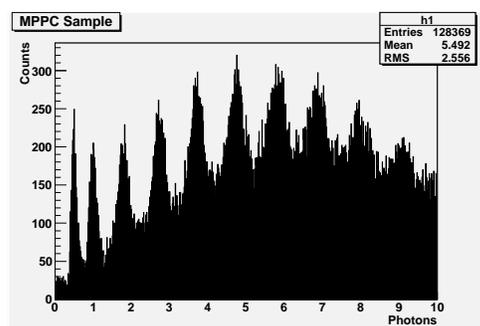


図4: MPPC例。MPPCにプラスチックシンチレーターを取り付けてβ線を入射させた時のヒストグラム。

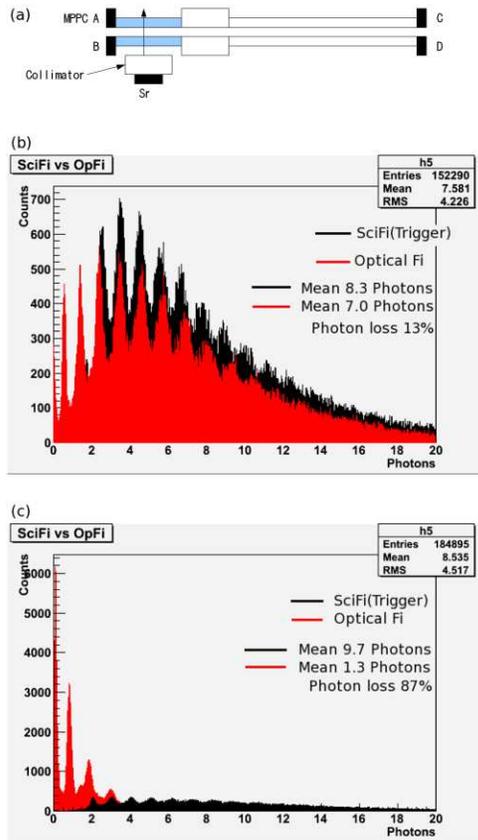


図 6: 二次ターゲット用ファイバーの試験実験。(a) 実験概要を示す。トリガーは AB のコインシデンスとする。(b) 接合の良好なファイバー。(c) 接合の悪いファイバー。

であることからシンチレーター間に若干のデッドスペースが存在する。ただし、二次ビーム正面の 2ch に関しては、二次ビーム数を計測するためにシンチレーターの先端を接触させている。

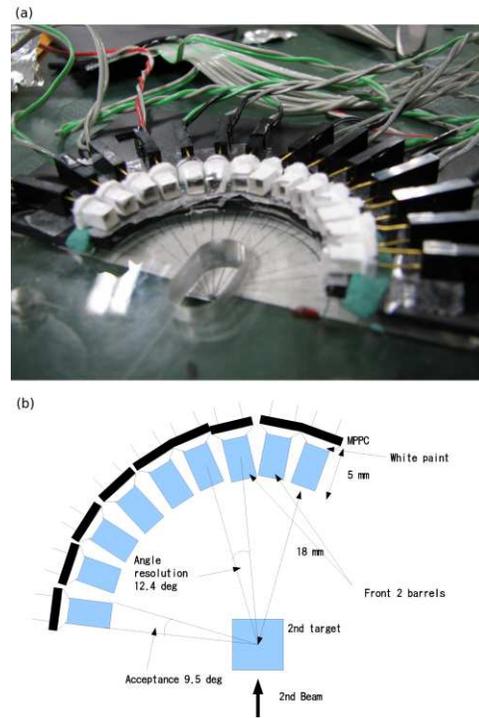


図 7: バレル概略図。(a) バレル写真。(b) 詳細図。MPPC に長さ 5mm のプラスチックシンチレーターを白ペンキで固定する。それを二次ターゲットの中心からシンチレーターの頭までが 18mm の位置になるよう半円状に配置する。一つの MPPC 辺りの Acceptance が 9.5deg、角度分解能が 12.4deg(共に実験室系)である。

3 実験

3.1 配置

実際に検出器を配置した状態の写真を図 8、図 9 として示す。加速器から送られる Proton を直接検出するため、検出器群は全て真空チェンバー内に納め、読み出し用のフラットケーブルのみ外へ引き出す。一次ターゲットは昇降可能なホルダーに取り付けられ、真空チェンバーを開けることなく LabView でターゲットを変えることが可能である。ターゲットホルダーには厚さ 1mm、2mm、3mm の炭素標的を取り付けた。バレルはまずアクリル板で挟まれ、二次ターゲットの支えとなるアルミケースとネジで固定される。更にケースをネジで真空チェンバー内

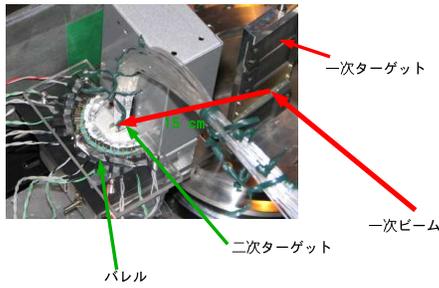


図 8: 二次ターゲット周りセットアップ写真。一次ターゲット中心から二次ターゲット中心までは 15cm

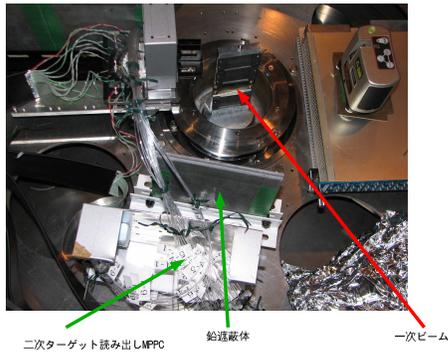


図 9: 真空チェンバー全体の配置。

の台座に固定しており、一次ターゲット中心から見て左側 45 度の位置に配置される。そこへ二次ターゲットをネジリ子で固定し、アルミケースの裏側に鉛のコリメーターと遮蔽体を配置する。セットアップを行う際にレーザーを用いて位置を決定した検出器はバレルのみで、二次ターゲットとコリメーター中心は二次ビームの中心に精度良く合わせられてはいない。二次ターゲットの読み出し用 MPPC は一次ビーム上流側にまとめて配置し、鉛遮蔽体で囲った。また、図中には示されていないが最終的にはバレル周辺に鉛板を配置し遮蔽体とした。

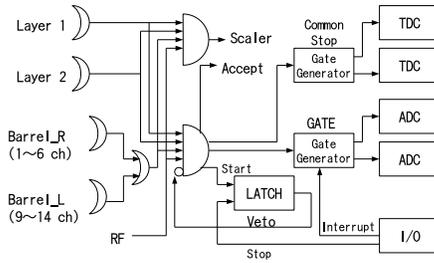


図 10: トリガー回路。NormalRun でのトリガーはレイヤー 1 OR \otimes レイヤー 2 OR \otimes バレル OR \otimes RF、である。

3.2 トリガー回路

トリガーを作るモジュール論理回路を図 10 として示す。二次ビームから見て、二次ターゲットの上流側がレイヤー 1、右側がセグメント 1、バレルの右側がチャンネル 1 となっている。Normal RUN でのトリガーはレイヤー 1OR \otimes レイヤー 2OR \otimes バレル OR \otimes RF となっている。ただし、散乱イベントを選ぶため、バレルの超前方にあたる 7ch8ch はトリガーに参加しない。図 10 には示されていないが、トリガータイミングを調整するために適宜 delay を行っている。タイミング調整を行った後のオシロスコープ画像を図 11 として示す。一番上の波形が RF で、

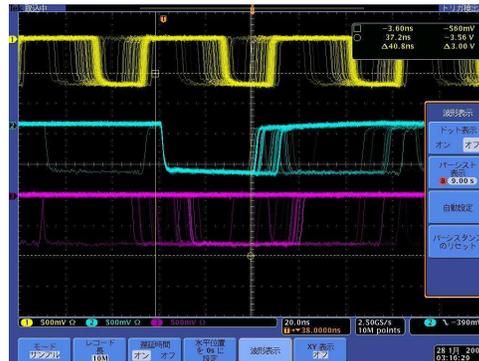


図 11: タイミング調整を行った後のオシログラフ。上から RF、Lyaer1、バレルとなっている。RF がトリガータイミングを決めている事が分かる。

これがタイミングを決定するように調整を行った。

3.3 ノイズ

MPPCは回路起因のノイズに対して非常に弱く、ノイズが数フォトン分の波高に達することも珍しくない。そのため、慎重にノイズ除去を行う必要がある。本実験においては、アーシングとアルミホイルによる電磁遮蔽を行い、グラウンドループが起こらないようにも注意した。その結果、回路起因のノイズは1フォトンの波高以下になり、無視できる値となった。

3.4 加速器

本実験で使用した一次ビームは、核種プロトン、エネルギー 65MeV。ビーム強度は当初 100nA で行うはずであったが、加速器本体室の放射線レベルが高くなることから、殆どの RUN で 80nA のビームを使用した。

3.5 データサマリー

定常 RUN で使用した一次ターゲット厚は 1mm で、得ることのできたイベント数は約 800 万イベントであった。本実験では二次ターゲットとバレルの間に減速材を置く RUN も予定されていたが、真空チャンバー内で問題が起こり、データを得ることが出来なかった。RUN スケジュールを表1としてまとめる。また Minimum Bias RUN を Min RUN と表記する。

3.6 Dead-channel

本実験ではフルセットアップで 50ch の読み出しを想定していたが、MPPC の故障や、ADC 不動などで読み出しできないチャンネルが存在した。具体的には、二次ターゲットのレイヤー 1 のセグメント 1、6、バレル 1ch が MPPC 不動であり、当然の事ながら、このチャンネルを粒子が通過してもトリガーさ

れない。しかし、レイヤー 1 のセグメント 1、6 はコリメーターの外であるため、データ収集にそれ程は影響を与えない。また、バレルの 14ch は MPPC は動作していたが、ADC が不動で ADC のデータが存在しない。

4 解析

4.1 Raw Data

まず、典型的な実験データを示す。図 12 は Min RUN に於けるバレルのセグメント 3 の ADC であり、赤線は反応を起こさずに通り抜けたビームスルーイベントである。ビームスルーイベントでの ADC のピークが以下のベテブロッホの式に従って計算したエネルギー損失になるようにエネルギー校正を行っている。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \times \left[\ln \left(\frac{2m\gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right] \quad [\text{MeV/cm}] \quad (2)$$

N_A はアボガドロ数、 r_e は古典電子半径、 m は電子の質量、 ρ は物質の質量密度、 Z は物質の原子番号、 A は物質の原子質量、 z は入射粒子の電荷、 v は入射粒子の速度、 c は光速 β は入射粒子の v/c 、 γ は $1/\sqrt{1-\beta^2}$ 、 W_{max} は一回の衝突に於ける最大のエネルギー移行、 I は平均励起エネルギーである。図 13 は定常 RUN におけるバレルの典型的な ADC ヒストグラムである。バレル 5ch⁵には Proton とと思われるピークがハッキリと見て取れる。しかし、9ch に関しては回路の V_{th} とと思われる部分で切れており、正しいピークの形状を確認することができない。本実験において、殆どのバレルはこの様な ADC 分布をしている。なぜこの様な分布になるかに関する調査は行っていない。また、本実験では pC 散乱の弾性、非弾性散乱 ($Q=-4.44\text{MeV}$) の識別をバレルの ADC

⁵ビーム上流から見て右手側がチャンネル 1 である

RUN	一次ビーム	一次標的厚	二次ビーム数	トリガー数	トリガー条件	コメント
Normal	85 nA	1 mm	59 kHz	580 Hz	Normal	RUN80~84
Beam through	84 nA	無し	140 Hz	29 Hz	Normal	
Minimum Bias	82 nA	1 mm	53 kHz	98 kHz	Minimum	

表 1: RUN スケジュール。トリガー条件の Normal とは レイヤー 1OR ⊗ レイヤー 2OR ⊗ パレル OR ⊗ RF であり、Minimum とは レイヤー 1OR ⊗ レイヤー 2OR である。

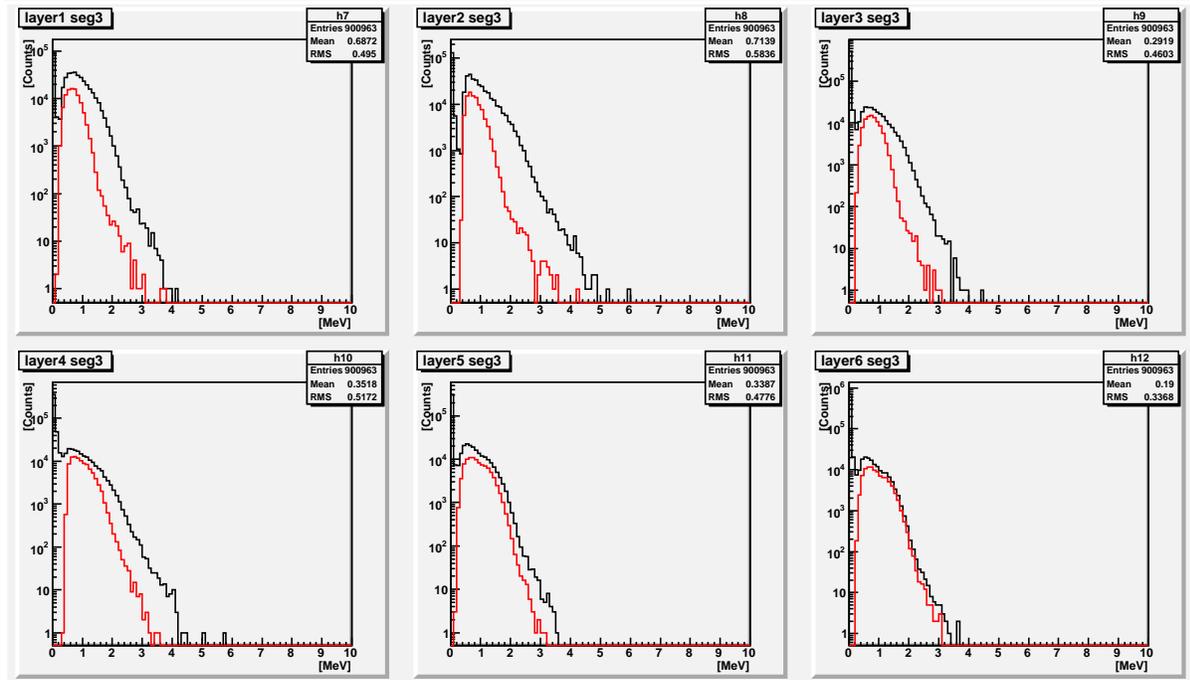


図 12: Min RUN に於ける二次ターゲットセグメント 3 の ADC。黒線は全イベント、赤線は反応を起こさず 6 レイヤーを通り抜けたイベントである。

で行うはずであったが、残念ながらピークは分かれていない。

図 14 は定常 RUN のスケーラー分布である。左から 1ch になっていることに注意していただきたい。真のイベントに関する計測数を求めるために、一次ターゲットを外して計測を行った RUN のスケーラーデータを RUN タイムで規格化し Normal RUN のデータから引いている。図から、パレルの前方 2ch が正しく二次ビーム数をカウントしていることが分かる。また、2ch と 14ch など端のチャンネル程計測数が多い

のは、それぞれビーム上流とビームダンプに近いのでバックグラウンドが多いためである、と予測できる。

これらのデータから視覚的に散乱イベントを見ることができ、それは図 15 のようになる。我々はこのプログラムをイベントディスプレイと呼んでいる。画像の中央に置かれている柵目状の正方形が二次ターゲットであり、その周りを囲っている長方形がパレルである。色が付いている部分が RF と同期した TDC が存在したことを示している。散乱が pC か pp かは、散乱点から伸びているトラックの本数で判別す

ることができる。しかしながら、全イベントを人間がより分けることはできないので、プログラムを作りそれに散乱イベントを発見させた。

4.2 バックグラウンド

一次ターゲットを取り外した RUN⁶におけるスケーラー分布を図 16 にして示す。トリガー条件は Normal RUN と同じなので、この分布は全てアクシデンタルなバックグラウンドと考えられるが、何に起因するかは特定することはできない。ただし、6ch に関しては約 3 万カウント ADC にピークが存在し、トラックも存在する。これは恐らく一次ビームのハローがターゲットホルダーのアルミに散乱された事に起因するピークで、6ch が一次ターゲットを直接覗いていること示唆している。Normal RUN とブランク RUN のスケーラー比を表 2 に示す。バックグラウンドは高々 10% 程度であることが分かる。ただし、これは二次ビーム起因のバックグラウンドが含まれていないことに注意しなければならない。

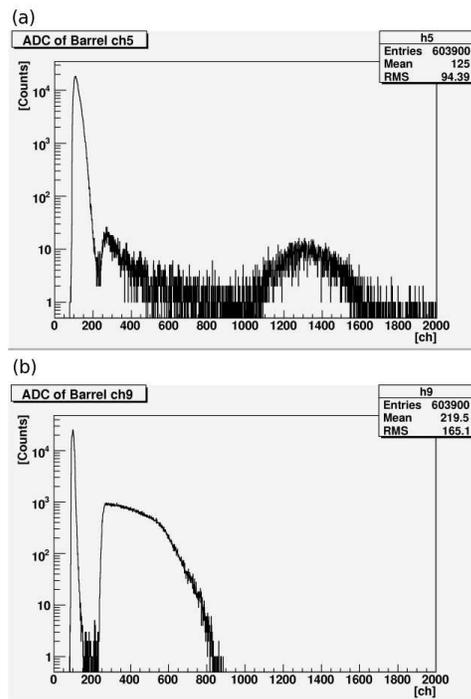


図 13: バレル ADC。(a) はバレル ch5 に対応し、(b) バレル ch9 はの ADC である。(a) では Proton に対するピークが見て取れるが、(b) ではそれらしきピークが見られない。急激にカットされている部分は回路上の閾値によるものである。

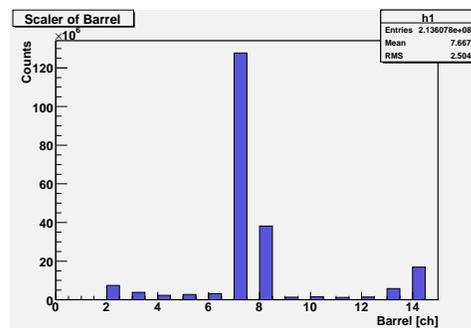


図 14: 定常 RUN のバレルスケーラー分布。7、8ch に二次ビームに対応するピークを確認する事が出来る。

⁶以後ブランク RUN と標記する

4.3 解析プログラム

まず、解析プログラムの概要としては

- 散乱点を発見する
- どのバレルに信号があったかを探す
- 散乱点とバレルの間に正しいトラックが有るかを判定する

と、なっている。粒子がある地点を通ったかどうかは、RF 同期の TDC が存在しているかどうかで判別する。以下、図 18 に沿って説明を行う。

- pp、pC 共通の部分。

1. 図 18 の (a)、散乱点の限定。

今回探す散乱点はレイヤー 3 のセグメント 3、4、レイヤー 4 のセグメント 3、4 に限定した。これは散乱点からのトラック判定をなるべく精度良く行いたいためである。

2. 図 18 の (b)、直線と散乱点の要求。

斜めから入った粒子を除くことで、散乱角の決定を容易にし、アクシデンタルなイベントを除去する。直線からズレた位置にヒットがあった場合、直線の先頭を散乱点とする。図中では、レイヤー 3、セグメント 3 が散乱点となる。

3. 図 18 の (b2)、pp、pC の区別。

直線から両側にヒットがあった場合、そのイベントは pp として後述の方法で解析を行う。

- pC 散乱の場合。

1. 図 18 の (c)、バレルヒットの要求とトラック範囲の決定。

散乱点とヒットのあったバレルを線で結び、その中に入るセグメントと実際に TDC が存在したセグメントの比をとる。図中では青色のセグメントが、粒子が通りうる場所である。その結果を図 17 として示す。pC

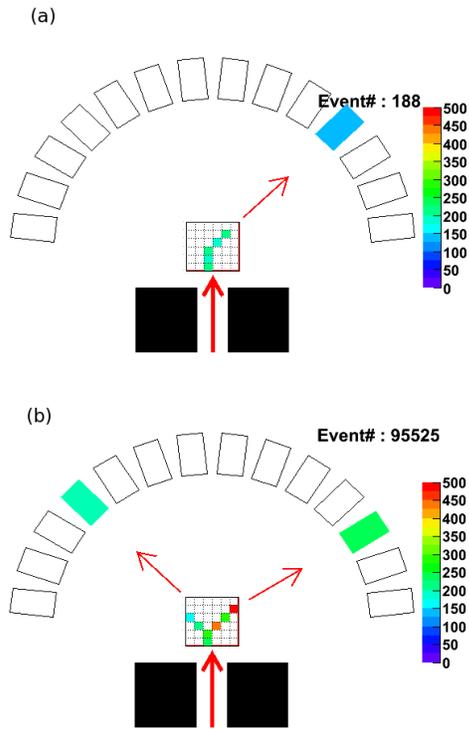


図 15: イベントディスプレイ。(a)に pC 散乱および (b)pp 散乱の典型的なイベントを示す。

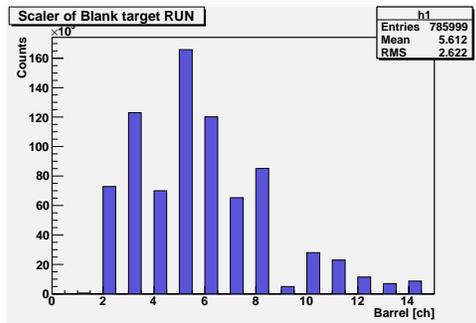


図 16: ブランク RUN のスケーラー分布。ほぼ全てアクシデンタルなイベントだが、6ch には 3 万イベントほど ADC にもピークが存在する。

のヒストグラムに於いて、比が 0.25 付近で一度極小値を取る。この点でアクシデンタルなイベントと、正しいイベントが混在すると考え、0.25 以上でトラックがあると仮定した。緩いカット条件であるが、この後に更に厳しい条件をかけるのでここでは緩くカットをかけている。pp に関しては、カット条件がヒストグラムからは判断出来ないため、pC と同じ 0.25 を用いた。

2. 図 18 の (d)、トラックの中心点を要求。散乱点からバレルの中心を結んだ線上のセグメントにヒットがあるかを調べる。これにより、CrossTalk や、(c) だけでは判定の難しかったアクシデンタルイベントを除去できるようになる。図中では黄色のセグメントがトラックの中心である。これらを全

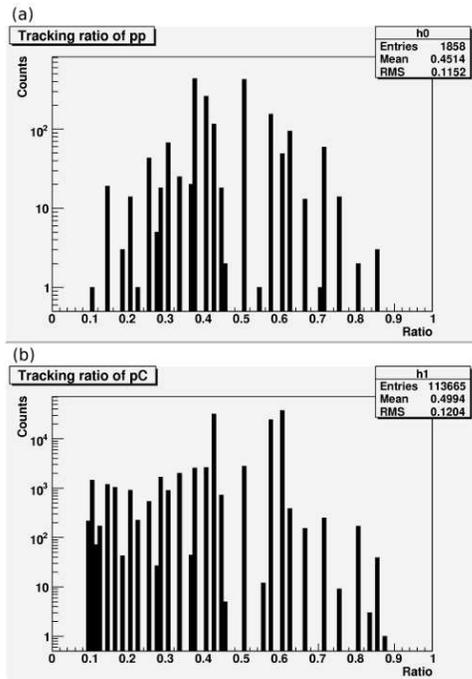


図 17: トラックの範囲を指定したとき、どれだけセグメントが鳴っているかを求めた比。(a) が pp の場合で (b) が pC の場合。pC で 0.25 付近で極小値を取っているため、ここがアクシデンタルなイベントの減り始めと思われる。

てパスしたイベントを pC とする。

- pp 散乱の場合。
pp においては 2 つのバレルに TDC が存在する事が少なく、pC の方法を二回繰り返すだけではイベントを判定をすることができない。そこで、

1. 仮想ヒットの要求。
(b) において pp と判定されたイベントに関しては、まず片方のトラックについては pC の場合と同じように判定を行う。そこで、トラックがある場合、TDC が存在したバレルから 90 度逆方向のバレル 3 つへ向かうトラックがあるかどうかを判定する。それが図 18 の (e) で、この場合青色のバレルへ向かうトラックがあるかどうかを判定する。トラックの判定方法は pC の場合と同じである。

2. 仮想ヒットの選別。
トラックが存在する場合、トラックに対する点数評価を行って 3 つのバレルの内、一番点数の高いバレルを仮想ヒットとする。以後仮想ヒットがあったバレルには、TDC が存在した場合と同じ解析が適用される。

図 18 の (f) が、pC 散乱の場合、図 18 の (g) が、pp の場合の正しく抜き出されたイベントの例である。

4.4 Efficiency

今回見積もるべき Efficiency は、プログラムとバレルのトリガー Efficiency である。しかしながら、実際にはプログラムの Efficiency が見積もることができず、後述のバレルのトリガー Efficiency もいくつかの ch に関しては見積もることができなかった。特にバレル TDC に関しては直接断面積の導出に関わってくる上に誤差が非常に大きくなったので、ch によって相当なばらつきが存在する。

バレルのトリガー Efficiency は Min RUN のデータを用いて求めた。まず、プログラム中で TDC によってバレルヒットを要求していた部分を ADC カットに

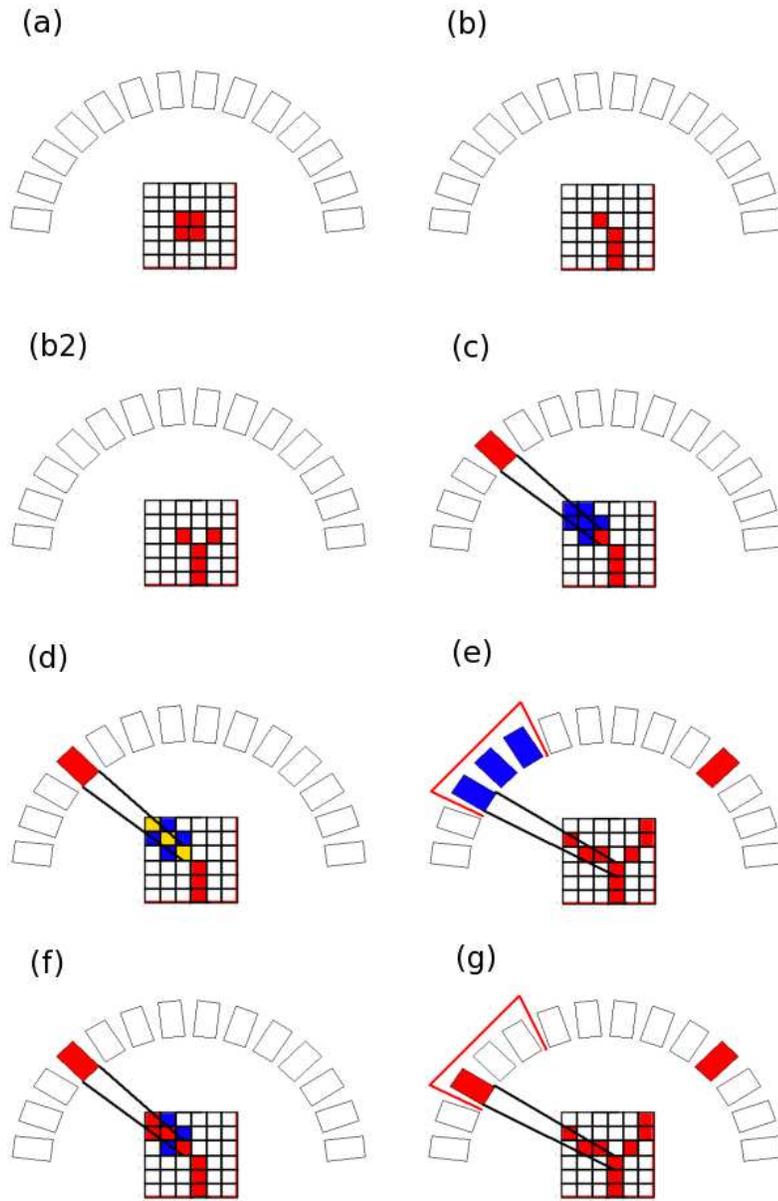


図 18: 解析プログラムの論理図。赤が実際に TDC が存在する ch、青と黄は TDC が存在するかを調べる ch である。

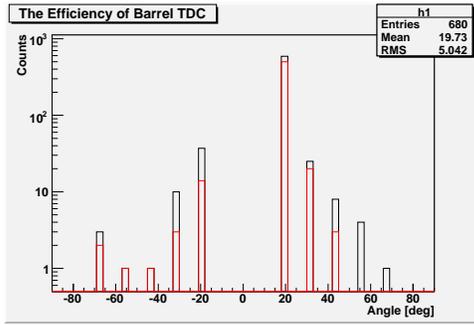


図 19: バレル TDC Efficiency を見積もるための角度分布グラフ。二次ビーム中心から右側を正、左側を負としてプロットしている。黒が ADC カットで発見した全イベント、赤がその内 TDC が存在したイベントである。

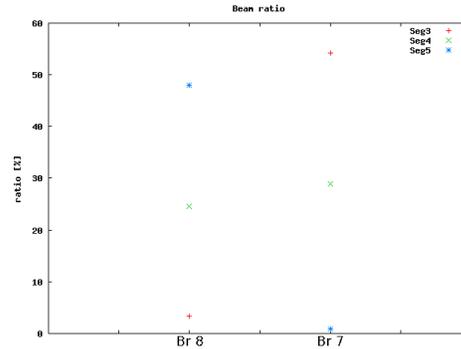


図 20: 二次ビームの分布。それぞれの点は、バレルの 7、8ch にヒットがあったとき、それぞれのセグメントを通っている確立を示している。セグメント 4 を通るビームは、7、8ch にほぼ均等に到達している事が分かる。

替えて散乱イベントを探す。この際の ADC の閾値は回路上の V_{th} よりも低く、かつ同時に何 ch も鳴らないような値である。トラックがあると判断されたイベントに関しては、ADC でヒットが見つかったバレルに TDC があるかを探す。ここで比、 $withTDC/ADC$ を求める。これをバレルのトリガー Efficiency とする。図 19 に上記の方法で解析した後の散乱角度分布を示す。図を見ても分かるように、統計数が十分でない。また、まったく TDC の存在しない ch もあり、このような ch に関しては見積もることができなかった。この結果を表 2 に示す。この Efficiency による誤差の評価は後述する。またこれは pC 散乱に関する Efficiency であり、pp 散乱に関しては求めることができなかった。

4.5 二次ビーム中心

本実験では二次ビームを使用しているの、コリメーターを用いてはいるものの、二次ターゲットに届くビームに幅とある程度の角度のばらつきが存在する。レーザーを用いて正確に位置を出した物はバレルのみであり、二次ターゲット、コリメーターは目分量で設置されている。そのため、二次ビームの中心がどこであるかを幾何的には求められない。そこで、それを調べるために Min RUN のデータを用いて、超前方の 7ch、8ch のうちどちらかにヒットがあ

る時、どのセグメントを通して入射しているか、またそのバレルへ直線を引いて入射しているか (アクシデンタルでないか) を解析する。二次ビームの中心にあたるセグメントならば、7ch8ch へ均等にビームが振り分けられているはずである。その結果を図 20 として示す。図より、セグメント 4 を通る二次ビームが均等に左右のバレルに届いている事がわかる。そのため、以後セグメント 4 を二次ビーム中心として、散乱断面積もこのセグメントに入射したビームのみで導出を行う。

4.6 微分散乱断面積の導出

これまでの結果を用いて、pp 散乱と pC 散乱の微分散乱断面積を導出する。解析プログラムが使用する二次ビームの入射位置はセグメント 4 に限定しており、反応点はレイヤー 3、レイヤー 4 に絞っており、また、反応点によって散乱角に若干の違いが発生するが、バレルの角度分解能に対して小さい値なので無視する。解析する RUN は Normal RUN 全てで、凡そ 800 万イベント存在する。

まず、解析プログラムが発見した散乱イベントの角度分布を図 21 として示す。pp 散乱に関して、前方方向の散乱数が少ないのは、大きい角度へ散乱された Proton は非常にエネルギーが小さくトラック

チャンネル	スケーラー比 (%)	Efficiency(%)	コメント
1	nan	nan	MPPC 不動
2	1.92	nan	TDC 無し
3	5.95	nan	TDC 無し
4	5.74	37.50	
5	10.92	80.00	
6	7.02	84.92	
7	0.10	nan	トリガーを作らない
8	0.44	nan	トリガーを作らない
9	7.09	37.84	
10	3.61	30.00	
11	3.53	100.00	1 イベントのみ
12	1.56	100.00	1 イベントのみ
13	0.24	66.67	
14	0.11	nan	ADC 不動

表 2: スケーラー比と、バレルのトリガー Efficiency。

を殆ど残さないためである。散乱角が 65 度を越えると、Proton は平均して二次ターゲット内を 1mm 以上走らないため、ヒットするセグメントの数が足りず、プログラムは正しくイベントを判別できない。そのため、pp 散乱に於いては、45 度周り 3ch、左右合わせて 6ch のみしか解析結果が正しくないと云えるので、断面積もこの 6ch に対して導出する。

pC 散乱に関しては、明らかに正しく計測できていない ch が存在する。これはプログラムによる物ではなく、この ch によってトリガーされたイベント自体が少ないことに起因する。何故、そのようなバレルが存在するかについては不明である。

次に、この結果から以下の式を用いて断面積を導出する。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N_{scat}/(Eff_{br} \cdot Eff_{prog})}{N_{inbr7} \cdot P.br7_{seg4} + N_{inbr8} \cdot P.br8_{seg4}} \times \frac{1}{lifetime} \frac{1}{N_{target}} \frac{1}{Solid} \quad (3)$$

N_{scat} はプログラムが探し出したある散乱角への散乱数、 Eff_{br} はバレルの TDC Efficiency Eff_{prog}

は解析プログラムの Efficiency、ただしこれは見積もる事ができなかったため、100%で計算をしている。 $N_{inbr7,8}$ はバレル 7ch、8ch のスケーラーの値、 $P.br7,8_{seg4}$ はセグメント 4 を通ってバレル 7、8ch に到達する確率。そのため、第一項の分母がセグメント 4 へのフラックスとなる。また N_{target} は二次ターゲット中の $1cm^2$ あたりの Proton、Carbon の個数、 $Solid$ は実験室系での立体角である。また、Efficiency の段落でも述べたように、TDC Efficiency を求めることができたのは pC 散乱のみであったため、pp 散乱に於いては 100%としている。

その計算結果を図 22 に示す。(a) 青い点は論文 [1] に於けるデータをプロットしたもので、入射する Proton のエネルギーが 54.4MeV の時のデータであり、角度は実験室系である。本実験に於ける散乱時の二次ビームのエネルギーは 56MeV 程度であると見積もることが出来るので、十分近い値である。論文 [1] のデータと比較すると、オーダーレベルでしか一致が見られない。(c) は論文 [2] のデータで、本実験で用いた二次ビームよりもエネルギーが高い。そのため厳密な比較はできないが、明らかにオーダーが

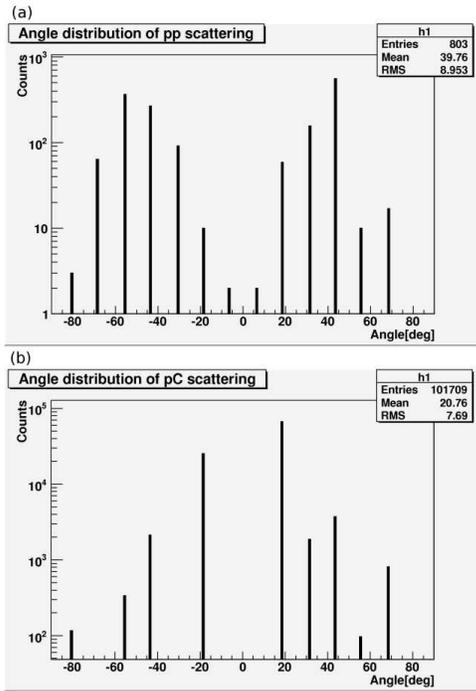


図 21: pp, pC 散乱の散乱角分布。 角度は実験室系である。pp 散乱に於いて前方が少ないのは、散乱角が大きい Proton はすぐ止まってしまい、トラック判定では pC 散乱と区別できないためである。pC 散乱に於いて明らかに数の足りていない ch が存在する事は、そもそもその ch でトリガーされるイベントの絶対数が少ないことに起因し、プログラムが原因ではない。

つ足りていないことだけは読み取ることができる。実験値の誤差を決めている物は、横軸方向がバレルのアクセプタンス、縦軸方向が散乱数の統計誤差、バレルの TDC Efficiency、セグメント 4 ヘフラックスを決める確立の系統誤差の 4 つである。縦軸方向の誤差棒の大きさにバラつきが存在するのは、TDC Efficiency を求めることができたかどうかの違いである。統計数が足りていないので、Efficiency を求めることのできた ch では大きな誤差棒が付いている。そのため、縦軸方向の誤差を決めているのはこれであると言える。

また、pC 散乱に於ける AnalyzingPower の導出も本実験の目標の一つであったが、弾性、非弾性が判別できていないので求めることはできなかった。

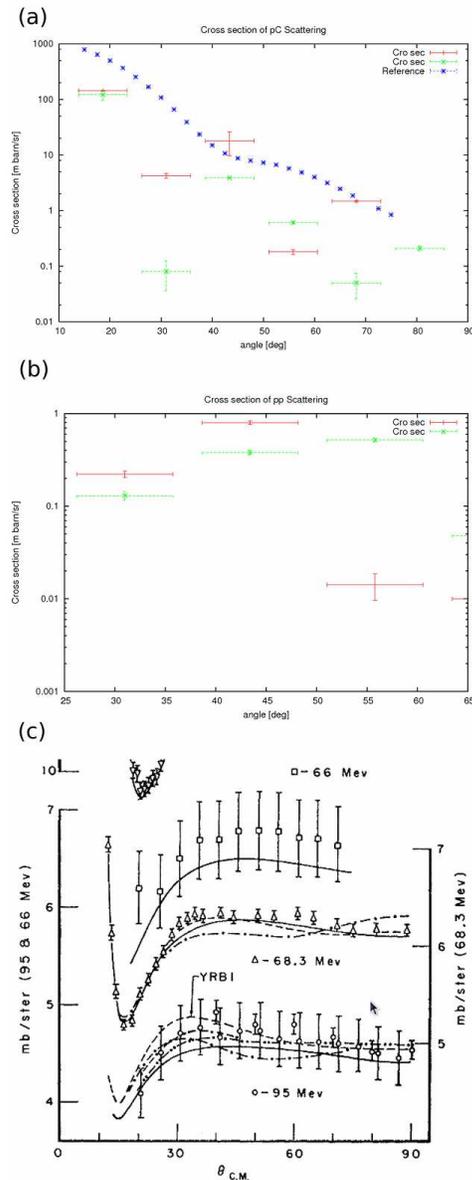


図 22: pp, pC 散乱の微分散乱断面積。赤がバレル右側、緑が左側である。また (a) の青は論文 [1] からデータをプロットした点であり、Proton のエネルギーが 54.4MeV の時のデータである。(c) は論文 [2] より転載した。角度は (a)(b) が実験室系であり、(c) 重心系である。

5 結果

5.1 まとめ

本実験の目的は、将来的に YN 散乱にこの検出器システムを応用できるかどうかを試験するために、

既知の pC、pp 散乱の微分散乱断面積と pC 散乱の AnalyzingPower を測定する事である。そのために、減速剤無しと有りの RUN を予定していたが、真空曹内の問題により減速剤有りの RUN は行えなかった。よって、弾性、非弾性散乱を区別することができず、AnalyzingPower の測定は行えなかった。微分散乱断面積は、解析プログラムを用いて正しいイベントを抜きだし導出したが、pC ではオーダーレベルで正しいという程度、pp 散乱に至ってはオーダーが一つ足りなかった。

5.2 課題

現段階での測定精度では、到底実験を行うことはできない。それらを改善するために、最低二つの事柄を改善する必要がある。まず、本実験に於いて散乱粒子の持つエネルギーが分からないということが、解析上大きな問題となった。そのため、今後改善する必要があるとすれば、まずカロリメーターを導入する事である。これにより、どんな場合でも弾性、非弾性を区別できるようにする。また、Min バイアス RUN の統計量が足りなかったこと、減速剤有りの RUN が行えなかったこと、この 2 つも大きな問題であった。よって、以後の実験ではこの点を改善するよう配慮する必要がある。

6 謝辞

本論文の作成にあたり大変多くの方のご協力を頂きました。指導教官の田村教授には、原子核物理の基礎からその面白さまで多岐に渡って学ばせて頂きました。小池助教には半導体検出器の基礎について、丁寧にご指導頂きました。三輪助教には直接本実験の指揮を取っていただいたり、解析の手法をご指導頂いたり、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。白鳥先輩にはノイズ落としの方法と、注意点を学ばせて頂き、実際に低ノイズ環境を構築して頂きました。細見先輩によって改良された OnLine Analyzer のおかげで快適に実験を行う事が

出来ました。佐藤先輩にはシンチレーター磨きを手伝って頂きました。山本先輩に作成して頂いたイベントディスプレイは解析時に非常に役立ちました。最後に、スタッフの皆様、先輩方、同期の方々に、実験の準備から計測までバックアップしていただいたことを、深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] T.Naro, H.Ikegami, Nucl. Phys. **A257**, 253-278 (1987).
- [2] G.Breit, M.H.Huli Jr, K.E.Lassila, K.D.Pyatt Jr, Phys. Rev. **120**, 2227 (1960).