

¹⁷B クラスター構造の探索

渡辺靖

2003年2月24日

目次

| | | |
|------------|--|-----------|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 第2章 | 実験 | 4 |
| 2.1 | ^{17}B 核の生成 | 4 |
| 2.2 | 実験セットアップ | 5 |
| 2.3 | ビームと標的 | 5 |
| 2.4 | 二次ビーム測定 | 5 |
| 2.5 | PPAC(parallel plate avalanche counter) | 7 |
| 2.6 | 荷電粒子の測定 | 7 |
| 2.7 | ドリフトチェンバー (FDC1,FDC3) | 7 |
| 2.8 | プラスチックシンチレーター (Hodoscope) | 8 |
| 2.9 | トリガーについて | 9 |
| 第3章 | 解析 | 10 |
| 3.1 | 二次ビームの測定 | 11 |
| 3.2 | 二荷電粒子の測定 | 12 |
| 3.3 | Hodoscopeの解析 | 13 |
| 3.4 | ドリフトチェンバー FDC3の解析 | 15 |
| 3.4.1 | STC(space time caribration) | 15 |
| 3.4.2 | $Z = 4$ における質量の識別 | 19 |
| 3.4.3 | $Z = 3$ における質量の識別 | 22 |
| 第4章 | 結果 | 26 |
| 4.1 | Be-H,Li-Beの断面積 | 27 |
| 4.2 | Beの質量の識別 | 28 |
| 4.3 | Liの質量の識別 | 29 |
| 第5章 | まとめ | 31 |

目次

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | 原子核図表 | 1 |
| 1.2 | ^{15}B ハロー | 2 |
| 1.3 | AMD によるクラスター構造をもつようになる様子 | 2 |
| 2.1 | RIPS の概形 | 4 |
| 2.2 | 実験セットアップ | 6 |
| 2.3 | トリガーについて | 9 |
| 3.1 | 粒子の識別 | 11 |
| 3.2 | TOF-エネルギー損失 ΔE | 13 |
| 3.3 | $Z(\text{multiplicity}=2)$ | 14 |
| 3.4 | Z_1, Z_2 相関 | 14 |
| 3.5 | ターゲットなしのバックグラウンド $Z = 4$ | 15 |
| 3.6 | バックグラウンドを引いた図 10 の投影図 | 15 |
| 3.7 | drift time1 | 17 |
| 3.8 | ドリフト時間とドリフト距離 | 18 |
| 3.9 | 補正後のドリフト距離とドリフト時間の関係 | 19 |
| 3.10 | 横軸は $x_3 - x_t$, 縦軸は θ | 20 |
| 3.11 | 図 3.10 の回転図 | 20 |
| 3.12 | $B\rho - TOF(Z=4)$ | 21 |
| 3.13 | TOF- $B\rho(Z=4)$ | 21 |
| 3.14 | 図 3.13 の縦軸への投影 | 21 |
| 3.15 | ターゲットなしのバックグラウンド | 22 |
| 3.16 | バックグラウンドを引いた図 3.13 の投影図 | 22 |
| 3.17 | $x_3 - x_t, \theta_3$ | 23 |
| 3.18 | 図 12 を回転させた図 | 23 |
| 3.19 | TOF- $B\rho(Z=3)$ | 23 |
| 3.20 | $B\rho$ -TOF($z=3$) | 23 |
| 3.21 | ターゲットなしのバックグラウンド | 24 |

| | | |
|------|--------------------------------------|----|
| 3.22 | バックグラウンドを引いた図 3.20 縦軸への投影図 | 24 |
| 3.23 | バックグラウンドを引いた図 3.20 の投影図 | 25 |
| 4.1 | Z_1, Z_2 の相関 | 27 |
| 4.2 | ガウシアンでフィットした図 3.16 | 28 |
| 4.3 | ガウシアンフィットした図 3.20 の縦軸への投影図 | 30 |

表 目 次

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Zの分解能 | 15 |
| 4.1 | Be-H,Li-Heの断面積 | 27 |
| 4.2 | FDC3の検出効率 | 28 |
| 4.3 | ${}^{9\sim 12}\text{Be}$ の断面積 | 29 |
| 4.4 | ${}^{9\sim 12}\text{Be}$ の分解能 | 29 |
| 4.5 | ${}^{7\sim 9}\text{Li}$ の断面積 | 29 |
| 4.6 | ${}^{7\sim 9}\text{Li}$ の分解能 | 30 |

概要

近年、重イオン加速器の発達に伴い、大強度の不安定核ビーム生成が可能となり、非束縛限界(ドリップライン)に至る中性子過剰核の研究が急速に進展しつつある。こうした中性子過剰核の中には安定線付近の原子核にはない中性子ハローや中性子スキンと呼ばれる特異構造が発見され、さらにはクラスター構造の可能性も指摘されている。ここでは、2 荷電粒子への分解反応断面積によるクラスター構造解析法の確立を目指し、 ^{17}B の 2 荷電粒子への分解反応断面積を測定する。

実験は理化学研究所にある加速器研究施設 (RARF) の入射核破砕片分離装置 RIPS において行われた。RIPS によって得られた ^{17}B を ^{12}C 二次標的に入射させ、荷電分解反応を起こし、二個の破砕片を生成する。この破砕片を 7 本の Hodoscope で検出し、原子番号 Z を同定した。さらに H-Be および Li-He への分解反応断面積や、特定の Z にたいする質量の識別を行い、 $^{9-14}\text{Be}+\text{He}$ 、 $^{7-9}\text{Li}+\text{He}$ への分解反応断面積を求めることを試みた。

第1章 序論

近年、重イオン加速器の発達に伴い、不安定核ビームを大強度で生成することが可能となり、中性子束縛限界(中性子ドリップライン)付近の原子核構造についての研究が進展しつつある。これらの原子核には安定線付近の原子核とは異なる現象が発見され注目されている。

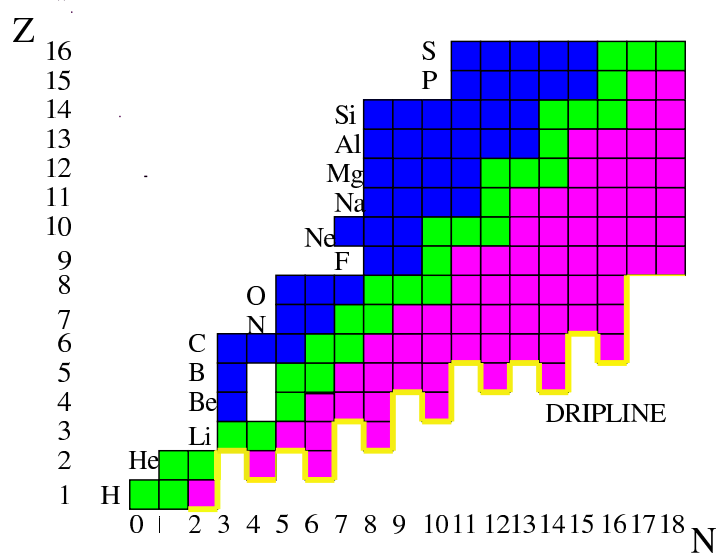


図 1.1: 原子核図表

特に、図 1.1 に黄色のラインで示した中性子ドリップライン近傍では、中性子ハローという構造を持つことが報告されている。中性子ハローとは、中性子が原子核のまわりに薄く広がって分布している構造であり、安定線付近ではみられない現象である。中性子過剰核 ^{17}B もこうした構造を

持つのではないかと指摘されている。例えば、図 1.2 に示すように、 ^{15}B のまわりに中性子二つが薄く広がって分布しているハロー構造であると考えられている。

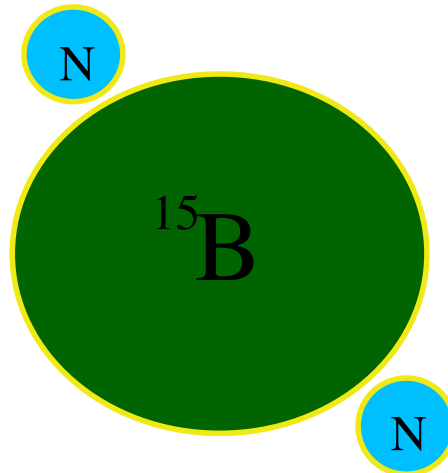


図 1.2: ^{15}B ハロー

一方では、中性子過剰な B では原子核が He と Li の二体にわかれて分布しているような、クラスター構造を持っているのではないかという理論もある。下の図 AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics) の計算が示すように中性子過剰になるにつれてクラスター構造をもつようになる様子がわかる。[1]

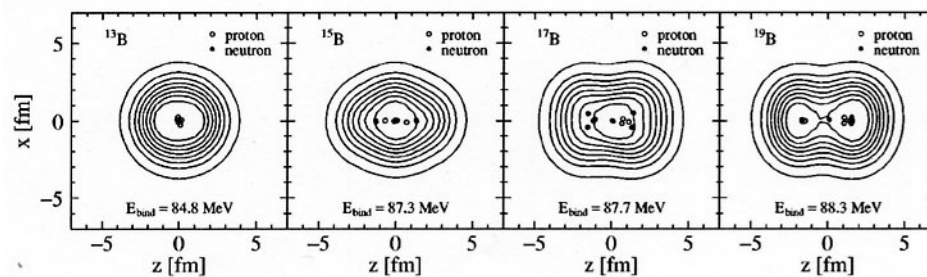


図 1.3: AMD によるクラスター構造をもつようになる様子

本研究では、2 荷電粒子への分解反応断面積によるクラスター構造解析法の確立を目指している。ここでは、 ^{17}B の 2 荷電粒子への分解反応

断面積に焦点を絞り、研究を行った。実験は理化学研究所の加速器研究施設 RARF(RIKEN Accelerator Research Facility) の入射核破砕分離装置 RIPS(RIKEN Projectile Fragment Separator) において行われた。RIPS によって不安定核ビーム ^{17}B を生成、分離し、この ^{17}B と C 標的との反応による、2 荷電粒子への分解反応断面積の測定と特定の Z における質量 A の識別を試みた。

第2章 実験

2.1 ^{17}B 核の生成

^{17}B の核構造を調べるには、これを人工的に生成する必要がある。本実験では理化学研究所の加速研究施設 RARF にある、入射核破碎分離装置 RIPS を用い、不安定核ビームの生成を行っている。本施設ではリングサイクロトロンを主加速器としており、 $A/Z = 2$ の重イオンが最大エネルギー 135MeV/nucleon 、最大強度 $0.1\sim 1\mu\text{A}$ のビームを生成することができる。

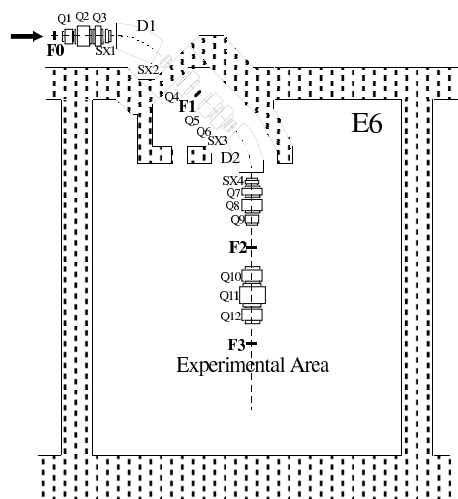


図 2.1: RIPS の概形

リングサイクロトロンによって 110MeV に加速された ^{22}Ne を一次ターゲットである Be に入射させ、入射核破碎反応により不安定核を生成する。この生成された不安定核は、様々な核種を含んでいるが、RIPSによって、粒子の磁気硬度 (magnetic rigidity) の違いと、エネルギー減衰版でのエネルギー損失の違いを利用し、目的とする核種について、空間的広がりや

エネルギーの広がりを収束させることができる。(付録)

2.2 実験セットアップ

この節では実験に使用したビーム、一次、二次標的と、使用した検出器について説明する

図2.2に実験セットアップを示す。RIPS で得られた ^{17}B ビームを二次標的 ^{12}C に入射させると、核反応により分解反応を起し、荷電粒子が生成される。この荷電粒子を Hodoscope で検出した。二次標的で生成された荷電粒子は二次ビームとほぼ同じ速度で進みながら双極子電磁石によってその軌道を曲げられ、ドリフトチェンバー (FDC3) で各粒子の飛跡が測定される。次に、Hodoscope により粒子が検出される。

2.3 ビームと標的

サイクロトロンにより加速された一次ビーム ^{22}Ne (110MeV/nucleon) を一次標的 (Be 厚さ 6mm) に入射し、入射核破碎反応によって不安定核ビームを生成した。こうして得られた核を RIPS によって分離し、二次ビームとして ^{17}B (75MeV/nucleon) を得た。これを二次標的 C (厚さ 377mg/cm) に入射させた。

2.4 二次ビーム測定

- プラスチックシンチレーター (SF2) 二次ビームを測定するために、プラスチックシンチレーター (SF2) を図2.1に示す RIPS の F2 チェンバー内 (二次標的の上流 5529mm) に設置した。このシンチレーターは厚さ 1mm、面積 $80 \times 80\text{mm}^2$ で、波高と時間信号を読み出す。
- サイクロトロンの加速タイミング (RF)
プラスチックシンチレーター (SF2) に加え、サイクロトロンの加速タイミング (RF) も測定した。これと SF2 との時間差から、一次標的 - SF2 間の TOF (Time of flight) を知ることができる。

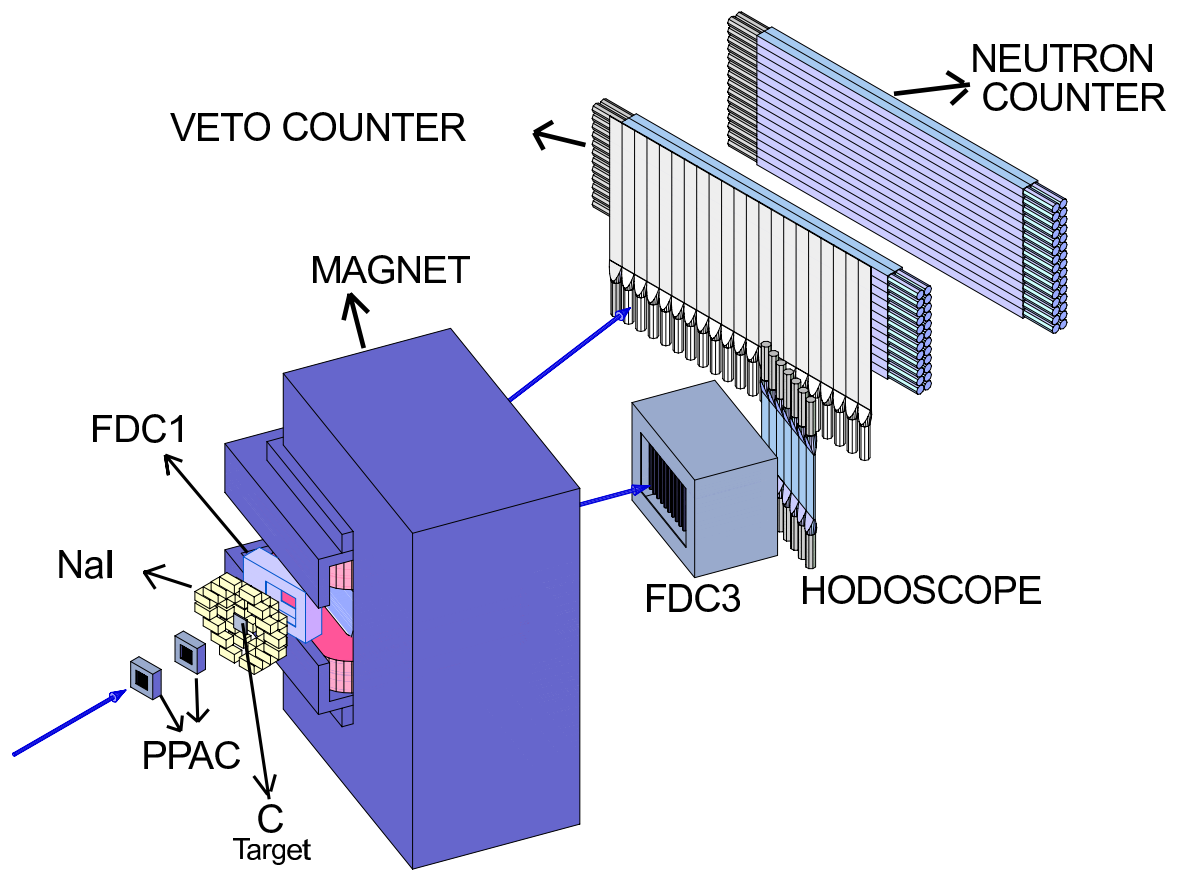


図 2.2: 実験セットアップ

2.5 PPAC(parallel plate avalanche counter)

PPACは、左右(または上下の)時間信号の差から荷電粒子の通った位置を測定するガスカウンターである。三枚の電極から構成されており、陽極が二つの陰極間に4mmの間隔を開けて、delay-line でつながっている。一つの陰極は、幅2.40mmのストリップ40本で構成され、ストリップ同士は0.15mmの間隔をあけてある。この陰極の上下;左右の時間信号の差から $100 \times 100 \text{mm}^2$ の範囲について、荷電粒子の通った位置を測定することができる。二つのPPAC(PPAC-a,b)を二次標的の上流に300mmの間隔を開けて配置し、両方の位置の外挿から二次標的に入射する位置を求めた。

2.6 荷電粒子の測定

二次標的から放出された荷電粒子は、双極子電磁石によってその軌道を曲げられて、二つのドリフトチェンバー(FDC1,FDC3)とプラスチックシンチレーター(Hodoscope)で検出される。FDC3はその下流にあるHodoscopeとともにビームラインに対し20度傾けてあり、双極子電磁石により軌道を変えられた荷電粒子を測定する。

2.7 ドリフトチェンバー (FDC1,FDC3)

双極子電磁石の上流側にはFDC1、下流側にはFDC3の二つドリフトチェンバーを配置した。FDC1は水平方向を測定するためのワイヤーを鉛直に40mm間隔で12本張った面が4面あり、FDC3は水平方向を測定するために鉛直に40mmの間隔で16本のワイヤーを張った面が5面と鉛直方向を測定するために水平方向に16本張った面が4面ある。荷電粒子がワイヤー間を通過するときカウンター内のガスをイオン化する。各々のワイヤー間には電圧がかけてあるためイオン化により発生した一次電子は加速され、アノードワイヤー付近で電子雪崩れによる増幅が起こり、大きなパルス信号となる。各々アノードワイヤーからは時間信号DT(Drift Time)が返される。得られた時間信号から各々ワイヤーと粒子間の距離を割り出し、荷電粒子がどのような飛程をたどったか、最小二乗法により求めることができる。

2.8 プラスチックシンチレーター (Hodoscope)

FDC3 の下流には、7本のプラスチックシンチレーター (Hodoscope) を配置した。厚さ 10mm 面積 $100 \times 800 \text{mm}^2$ のシンチレーターに光電子増倍管を上下につけ、波高と時間信号を読み出す。

2.9 トリガーについて

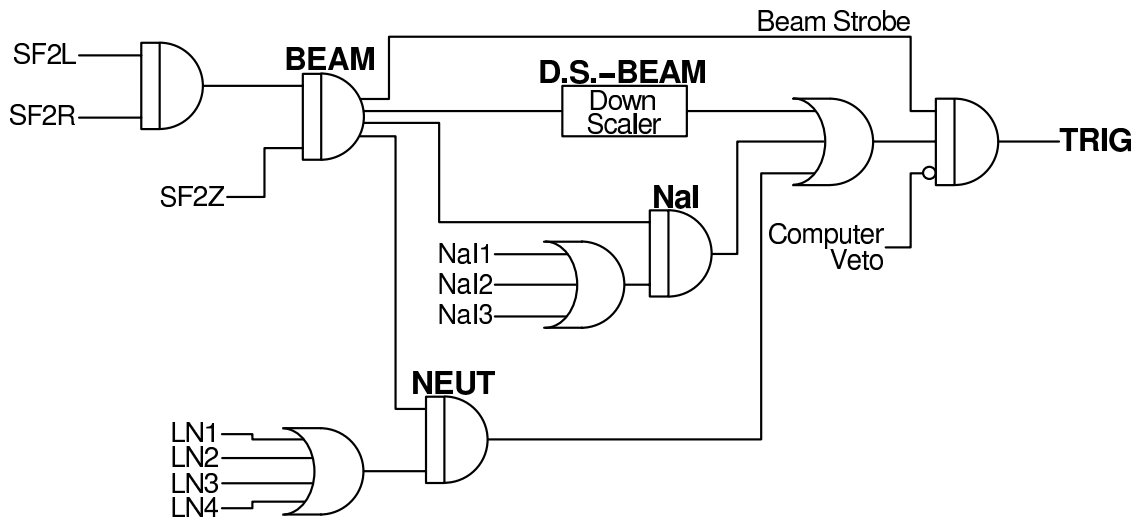


図 2.3:

図には実験に使用したトリガー回路をしめす。ここで使用している記号の意味は以下の通りである。

- SF2L,R:SF2 で二次ビームが検出された
- SF2Z:SF2 で特定の波高が検出された
- LN1-4:Neutron counter の 1-4 面で検出された
- NaI1-3:NaI(Tl) シンチレーターの 1-3 層で検出された
- Computer Veto:コンピューターがデータを取り込み中である

第3章 解析

本解析では

1. 二次ビームの識別
2. 原子番号 Z の同定
3. Be、Li、の質量の識別

をイベントごとに行う。

二次ターゲット C に入射した ^{17}B は、C から核力を受けて 2 つの荷電粒子に分解する。Hodoscope では特にこの二粒子の波高と時間信号の測定を行い、陽子数 Z と質量数 A を求め、FDC3 については飛跡解析を行い粒子の $B\rho$ 値を求める。さらにこの $B\rho$ 値と TOF の相関により質量を識別する。この章では、その解析の詳細をプラスチックシンチレーター (Hodoscope) とドリフトチェンバー (FDC3) にわけて述べる。

3.1 二次ビームの測定

二次ビームは、RIPSによって生成、分離され、特定の核種を選択することができる。しかし、目的としていないほかの核種もある程度混じる。したがって、二次ビームの核種をイベントごとに識別する必要がある。このため、プラスチックシンチレータ SF2 の波高、またサイクロトロン の RF 信号と SF2 間の時間差から飛行時間 (TOF) を求め、これらの情報から粒子の識別を行った。SF2 中でのエネルギー損失 ΔE は粒子の速度を v とすると

$$\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2} \quad (3.1)$$

の関係がある。また RIPS によって、磁気硬度 $B\rho$ を選択しているが、この $B\rho$ は、式 3.2 の関係がある。

$$B\rho \propto \frac{A}{Z}v \quad (3.2)$$

但し、 A は粒子の質量数である。SF2 の波高をエネルギー損失とし、これらの関係から、SF2 の波高と RF-SF2 間の TOF の相関を調べることに より、図 3.1 のように、核種を区別することができる。これにより、二次ビーム中に含まれる ^{17}B の割合は 86% であることが分かった。

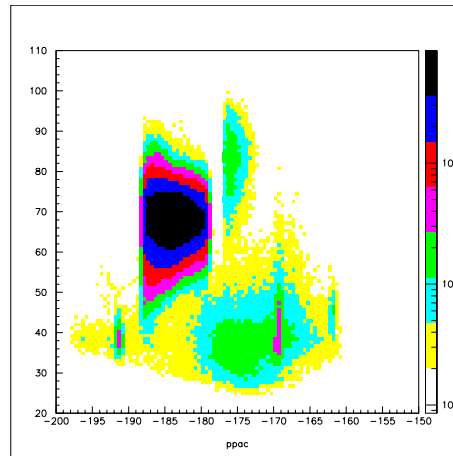


図 3.1: 横軸は-TOF 縦軸はエネルギー損失 (Pulse Hight)。黒く密集している部分やその周りが ^{17}B

3.2 二荷電粒子の測定

次に、荷電分解反応を起し、二次標的から放出される2荷電粒子の核種を

- 原子番号 Z ,
- 質量数 A の識別

によって、イベントごとに識別する。 Z は、プラスチックシンチレーター (Hodoscope) で測定する波高と $\text{TOF} \propto \frac{1}{v}$ の関係を用いて、式 (3.3) の関係

$$\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2} \quad (3.3)$$

から識別することができる。

また、質量 A の識別にはドリフトチェンバー FDC3 で得られる情報を用いる。ドリフトチェンバー FDC3 で得られる位置 x_3 と角度 θ_3 、二次標的上での位置 x_t , さらに磁気硬度 $B\rho$ の間には (付録参照)

$$\frac{\Delta B\rho}{B\rho_0} = -\frac{1}{c}(x_3 - x_t) - \frac{b}{c}\theta_3 \quad (3.4)$$

の関係があるので、 x_3-x_t, θ_3 を測定することにより、 $B\rho$ を求めることができる。さらに $B\rho \propto \frac{A}{Z}v$ という関係を利用し、Hodoscope で得られる v と Z の情報から、 A を識別することができる。しかし、本実験の FDC3 の電圧設定は $Z=5$ の粒子に合わせてあるため、 Z が小さくなるにつれ、検出効率が下がり位置分解能が悪くな。特に、 $Z=2,1$ では、識別が困難なため、FDC3 においては $Z=4,3$ についてのみ解析を行う。以下では、放出された2荷電粒子について、Hodoscope、FDC3 の解析による粒子識別について述べる。

3.3 Hodoscopeの解析

Zは、Hodoscope で得られる波高と二次標的-Hodoscope 間の TOF から識別する。(ただし、ここではHodoscope1~3は ^{17}B のバックグラウンドの影響が非常に大きいため、解析の対象としなかった。)式(3.2)で説明したように $\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2}$ の関係からZを求めることができる。図3.2はHodoscopeにおいて測定されたTOFと、エネルギー損失 ΔE (pulse Hight)をプロットしたものである。

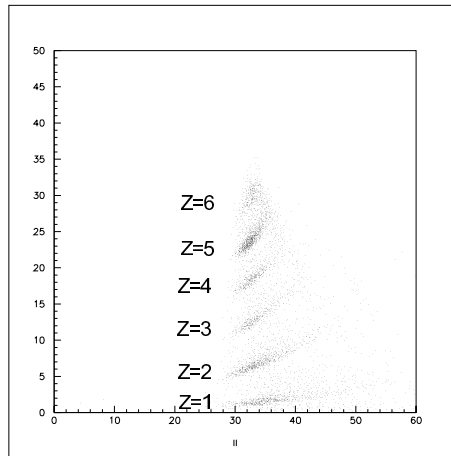


図 3.2: 横軸は TOF、縦軸はエネルギー損失 ΔE を表す

ΔE と TOF によって粒子を下から Z=1,2,3,4,5,6 に分離できることが分かる。

しかしプラスチックシンチレーターの性能上、Pulse Hight(A)は ΔE が大きくなるにつれて正確にAに比例しなくなる。そこでまず、Aを近似的に補正する必要がある。その近似式は

$$A' = \frac{A}{1 - \alpha A} \quad (3.5)$$

で、 α は定数である

次に、補正した A' を用いてZを近似的に求める。近似式は

$$Z = \frac{A'}{a(T^2 - b)^c} + \beta \quad (3.6)$$

とする。 a, b, c は、定数である。 $\text{multiplicity}=2$ の場合に、これをプロットしたのが図3.3である。

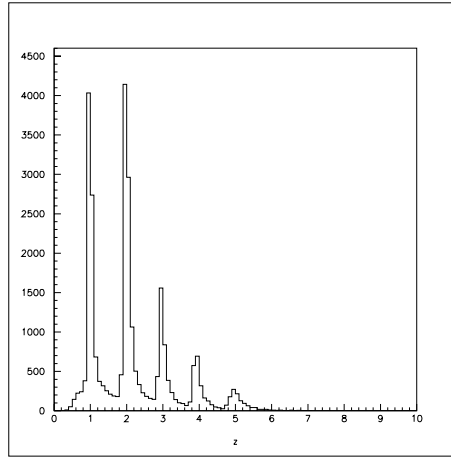


図 3.3: 測定された $\text{multiplicity}=2$ における Z 。横軸は Z 縦軸はカウント数

$\text{multiplicity}=2$ のフラグメント Z_1 、 Z_2 のうち、片方を横軸に Z_1 、もう片方を縦軸に Z_2 をとったのが、図3.4である。

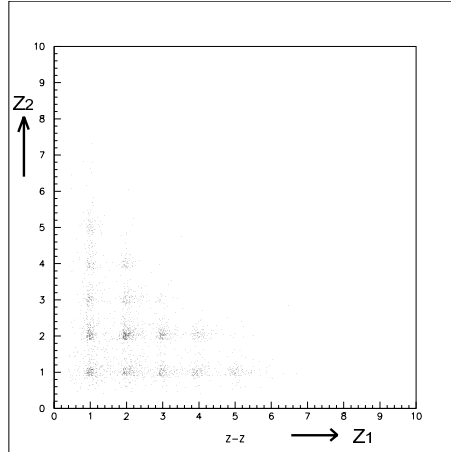


図 3.4: 横軸に Z_1 , 縦軸に Z_2 をとった図

また、二次標的無しの場合の事象を差し引くことにより、標的外の反応によるバックグラウンドを除去することができる。図3.5は二次標的なしの場合の multiplicity=2 における Z 分布で、その分を図3.3から引いたのが図3.6である。

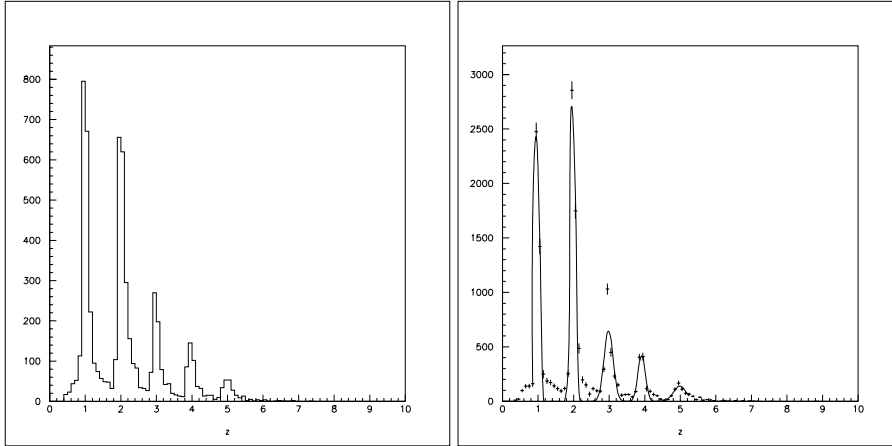


図 3.5: ターゲットなしのバックグラウンド。横軸は Z 縦軸はカウント数をとったもの
 図 3.6: 図3.3からバックグラウンドを引いた図。横軸は Z 縦軸はカウント数

| 陽子数 Z | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|------|----|------|------|-----|
| 分解能 $Z/\Delta Z$ | 17.5 | 16 | 11.3 | 11.3 | 5.7 |

表 3.1: Z の分解能

3.4 ドリフトチェンバーFDC3の解析

3.4.1 STC(space time caribration)

ドリフトチェンバーでは、アノードワイヤーごとに時間信号が得られる。その時間(ドリフト時間)をドリフトチェンバー中を通った荷電粒子の位置とワイヤーとの距離(ドリフト距離)に変換し、トラッキングを行い、荷電粒子が通った飛跡を知ることができる。ここではまず、ドリフト

時間をドリフト距離に変換する必要がある。ドリフト時間の分布は、図 3.7 のようになる。

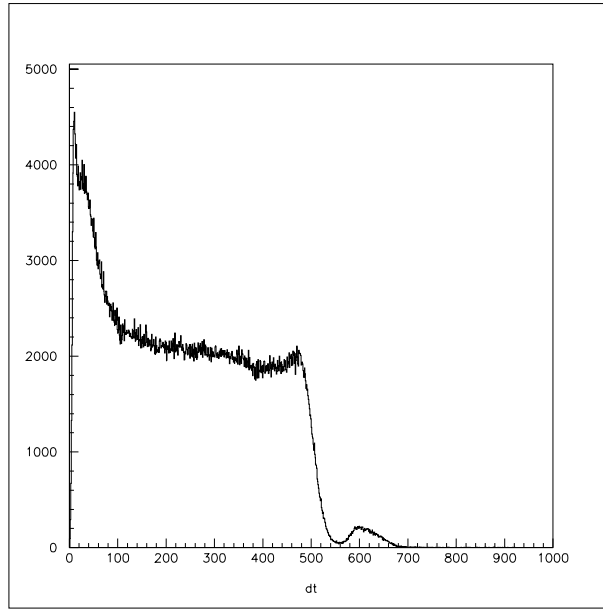


図 3.7: 横軸にチャンネルスケールの Drift-Time、縦軸にカウント数をとったもの

或ドリフト時間での計数は厳密には $\frac{dN}{dt}$ である。この dN/dt は、

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3.7)$$

と書けるが、ビームが一様にドリフトチェンバーに当たっている場合には、計数はドリフト距離によらないので、式 3.8 のようになる。

$$\frac{dN}{dx} = const. \rightarrow x(t) = C \int_0^t \frac{dN}{dt} dt \quad (3.8)$$

こうして得られたドリフト距離 $x_{distance}$ を用いてトラッキングを行う。トラッキングによって得られた $x_{tracking}$ と、ドリフト距離 $x_{distance}$ の差をみると図 3.8 のようになる。図 3.8 をみて分かるように、ドリフト時間によって差が生じている。これは、ドリフト時間がドリフト距離に完全に対応していないことを意味する

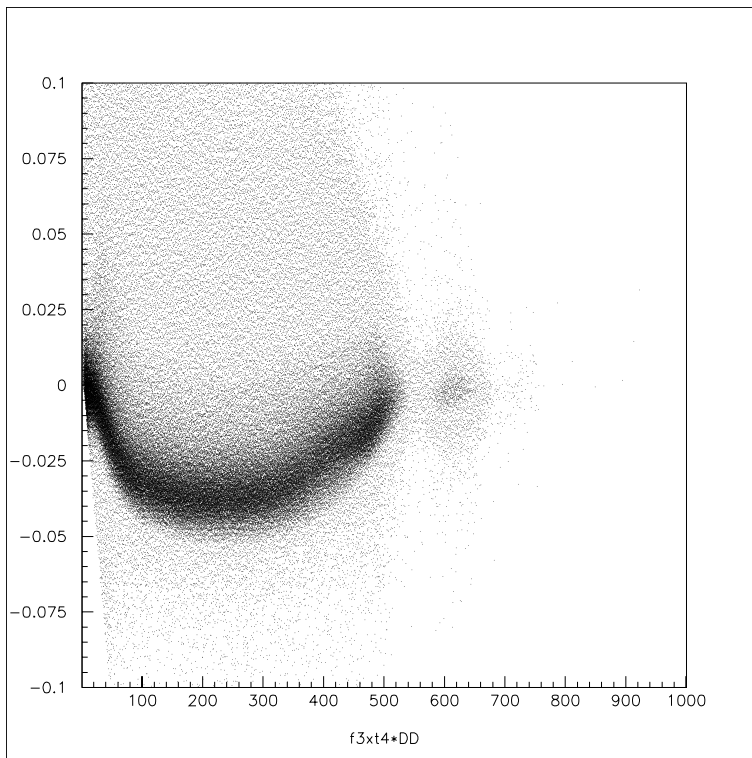


図 3.8: ドリフト距離 $x_{distance}$ とトラッキングで得た $x_{tracking}$ の差を表した
もの。横軸にチャンネルスケールの Drift-Time、縦軸にチャンネルスケール
の距離を表したもの

したがって、そのドリフト距離を用いて、再びトラッキングを行う。この
操作を繰り返すことによって、 $\frac{dN}{dx_{distance}}$ が一定になるように補正する。補
正すると、図 3.9 の様になる。

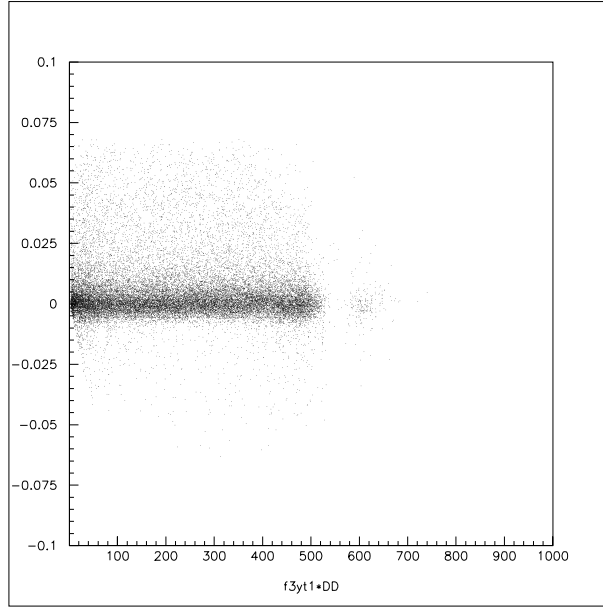


図 3.9: 補正後のドリフト距離とドリフト時間の関係。 $x_{tracking}$ と $x_{distance}$ の差が減少した

3.4.2 $Z = 4$ における質量の識別

ここでは、2 荷電分解粒子のうち $Z_1 = 4, Z_2 = 1$ と $Z_1 = 3, Z_2 = 2$ のイベントにたいして、それぞれ、 $Z = 3, Z = 4$ の粒子の質量数 A を識別する。はじめに $Z = 4$ の場合における質量数 A の識別を行う。

STC を行った後、横軸にトラッキングで得られた位置 x_3 から二次標的での位置 x_t を引いた値、縦軸にトラッキングで得られた、角度 θ_3 を見ると図 3.10 のようになる。

図 3.10 を見ると、磁気硬度 $B\rho$ の違いを区別することができる。細かい議論二次標的から放出された粒子の位置 x_t と FDC3 で測定した位置と角度 $(x_3 - x_t, \theta_3)$ また、粒子の磁気硬度 $\Delta B\rho/B\rho_0$ には、式 3.10 の関係がある。

$$x_t = ax_3 + b\theta_3 + c \frac{\Delta B\rho}{B\rho_0} \quad (3.9)$$

ここで、 $a = 1$ と仮定すると、式 10 は

$$\frac{\Delta B\rho}{B\rho_0} = -\frac{1}{c}(x_3 - x_t) - \frac{b}{c}\theta_3 \quad (3.10)$$

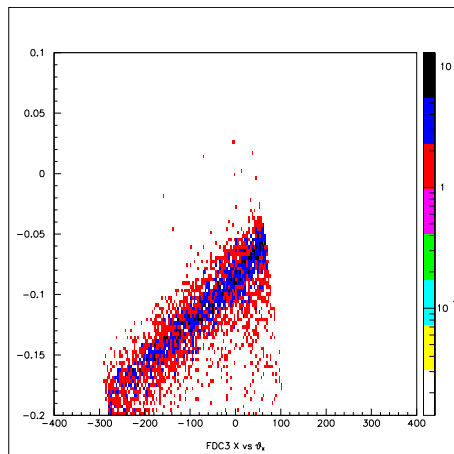


図 3.10: 横軸は $(x_3 - x_t)$, 縦軸は $FDC3$ で観測された角度 θ

となる。よって、 $(x_3 - x_t, \theta_3)$ の図を回転させることにより、 $\Delta B\rho/B\rho_0$ (以下 $B\rho$) の大きさを示す量を座標軸とする図 3.11 に変換できる。

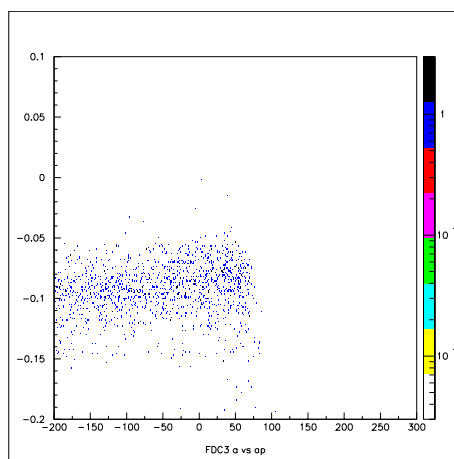


図 3.11: 図 3.10 を回転させた図、横軸は θ 、縦軸は $B\rho$

この操作により $B\rho$ を求められる。さらに $B\rho$ と二次標的—Hodoscope 間の TOF を見ると図 3.12 のようになる。

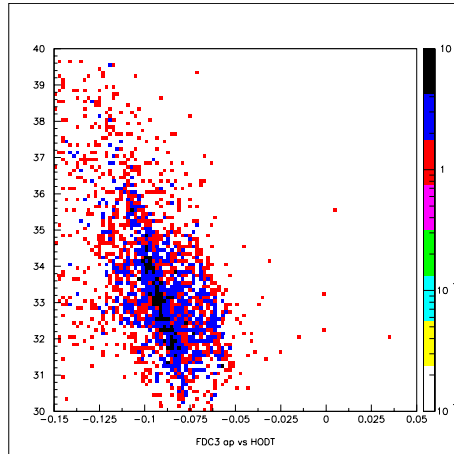


図 3.12: 横軸は $B\rho$ 縦軸は TOF

この図 3.12 から $B\rho \propto A/Zv$ が v によって別れ、さらに Hodoscope で得られる Z と合わせることで A を区別することができる。 $(x_3 - x_t, \theta_3)$ を回転させた操作と同様に、図 3.12 を回転させ質量 A を表す軸を縦軸とする図 3.13 に変換する。これを縦軸へプロジェクションしたのが図 3.14 である。また、二次標的なしの場合を除くことにより、二次ビームによ

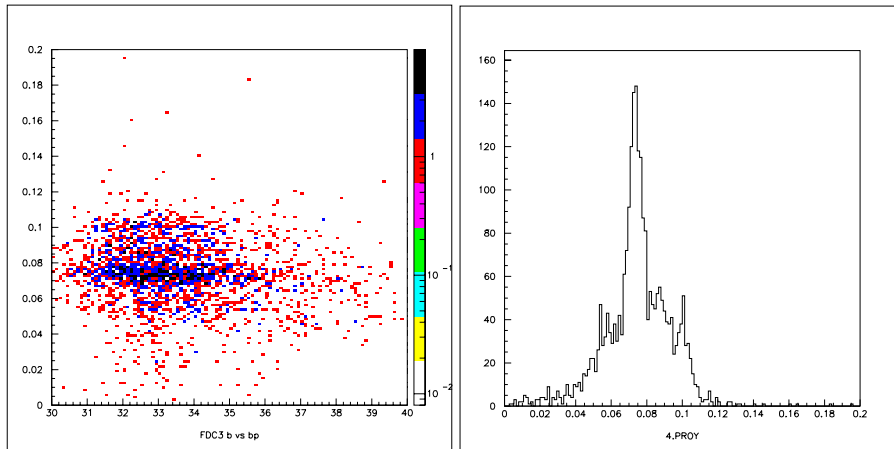


図 3.13: 横軸は TOF , 縦軸は $B\rho$ 図 3.14: 図 3.13 の縦軸への投影

るバックグラウンドを取り除くことができる。

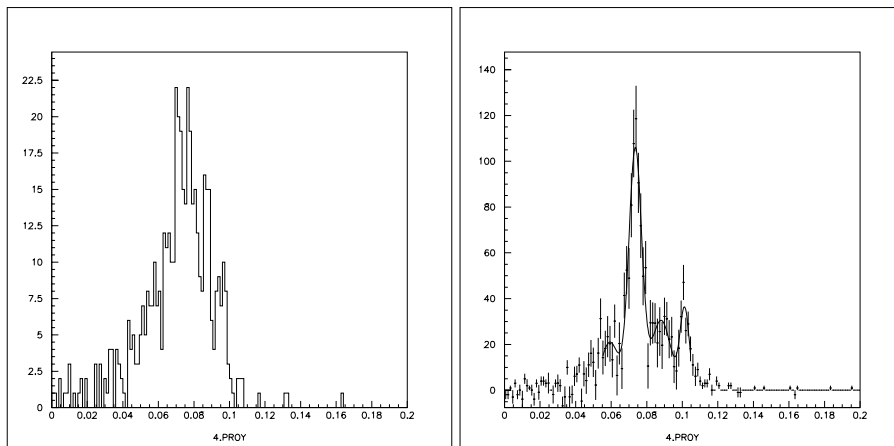


図 3.15: ターゲットなしのバックグラウンド:横軸は $B\rho$ 縦軸はカウント数を表したもの
 図 3.16: バックグラウンドを引いた 3.13 図。横軸は $B\rho$ 縦軸はカウント数を表したもの

3.4.3 $Z = 3$ における質量の識別

つぎに $Z = 3$ の場合について質量数を識別する。 $Z = 4$ の時と同様に、まず、 $x_3 - x_t$ と角度 θ_3 の関係を見ると、図 3.17 のようになる。つぎに、 $(x_3 - x_t, \theta_3)$ の図を回転して、 $B\rho$ の大きさを示す量を縦軸とする、図 3.18 に変換する。

この操作により、 $B\rho$ が求まる。続いて、 $B\rho$ と TOF の関係を見ると図 3.19 のようになる。 $Z=4$ と同様に図 3.19 を回転させ、 A を表す軸を縦軸とする図 3.20 に変換する。

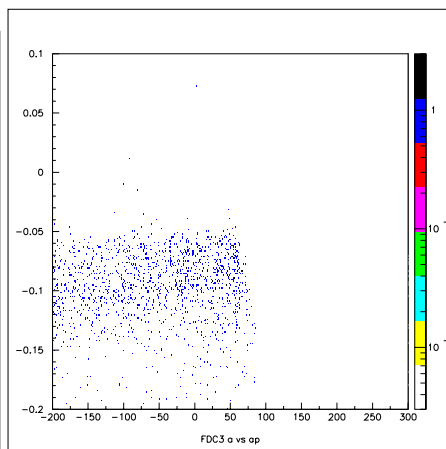
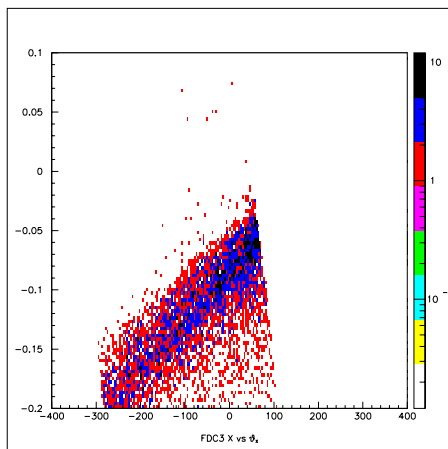


図 3.17: 横軸は TOF 、縦軸は $B\rho$ 図 3.18: 図 3.17 を回転させた図。
横軸は TOF 縦軸は $B\rho$

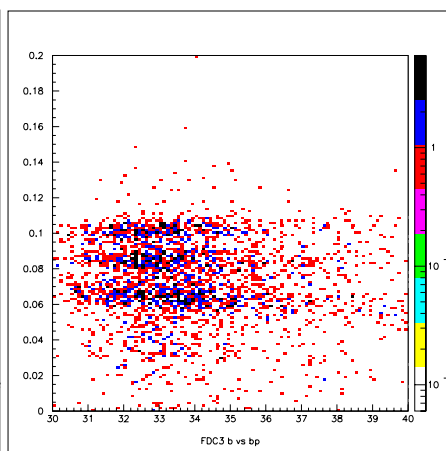
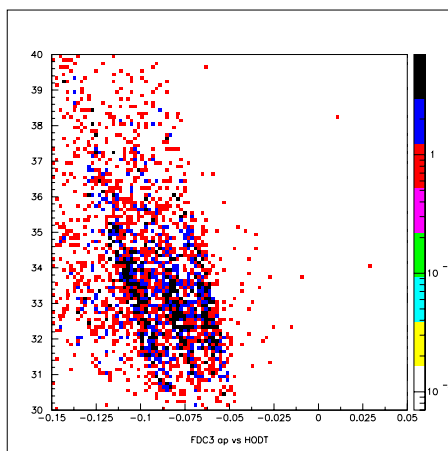


図 3.19: 横軸は $B\rho$ 、縦軸は TOF 図 3.20: 図 3.19 を回転させた図

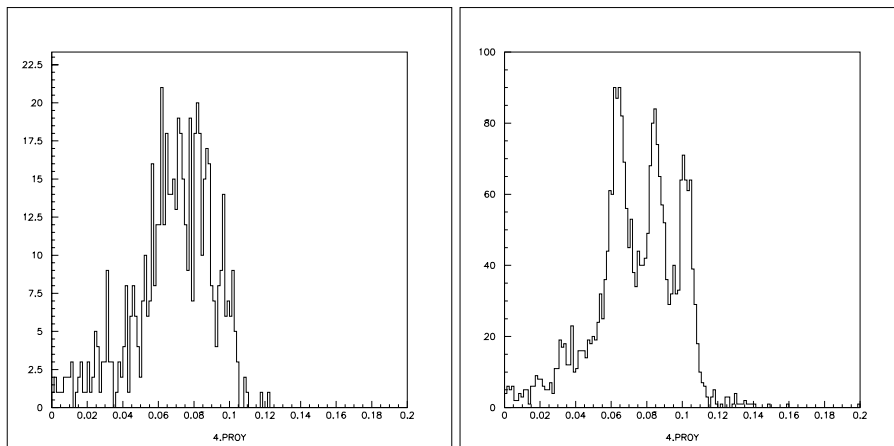


図 3.21: ターゲットなしのバックグラウンド:横軸は $B\rho$ 縦軸はカウント数
 図 3.22: 図 3.20 の縦軸への投影:横軸は $B\rho$ 縦軸はカウント数を表す。

また、二次標的なしの場合を除くことにより、二次ビームによるバックグラウンドを取り除く。

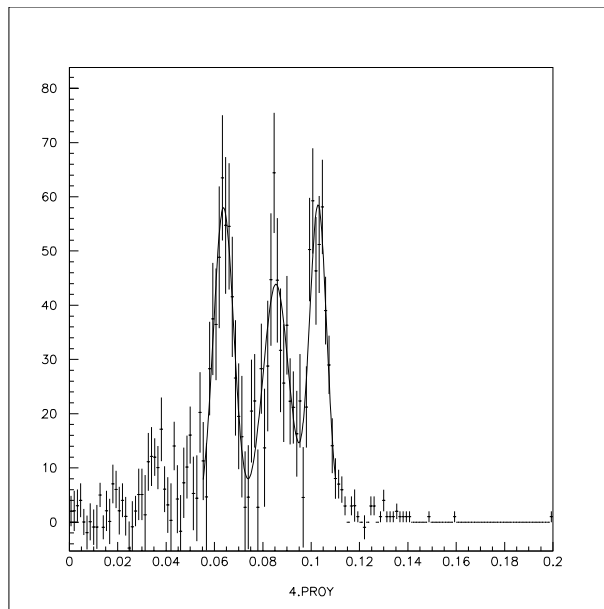


図 3.23: バックグラウンドを引いた図 3.20 の縦軸への投影図

第4章 結果

ここでは解析から得られる情報から

- ビームトリガーである。
- 二次標的に入射する核種は ^{17}B
- PPAC で求められた二次標的に入射する位置が二次標的の大きさ ($40 \times 31 \text{mm}^2$) におさまっている。
- Hodoscope、1,2,3 は使用しない。
- 1 イベントにたいして下流で検出された Z は (4,1) と (3,2) の組み合わせである。

という条件のもとでの二つの荷電粒子への分解断面積を導くことと、さらに上の条件にある $Z_1, Z_2 = (4,1), (3,2)$ のうち、 $Z=4$ では $^{14}\text{Be}, ^{12}\text{Be}, ^{11}\text{Be}, ^{10}\text{Be}$ の断面積を、 $Z=3$ では $^9\text{Li}, ^8\text{Li}, ^7\text{Li}$ の断面積を求めることを試みる。

4.1 Be-H,Li-Be の断面積

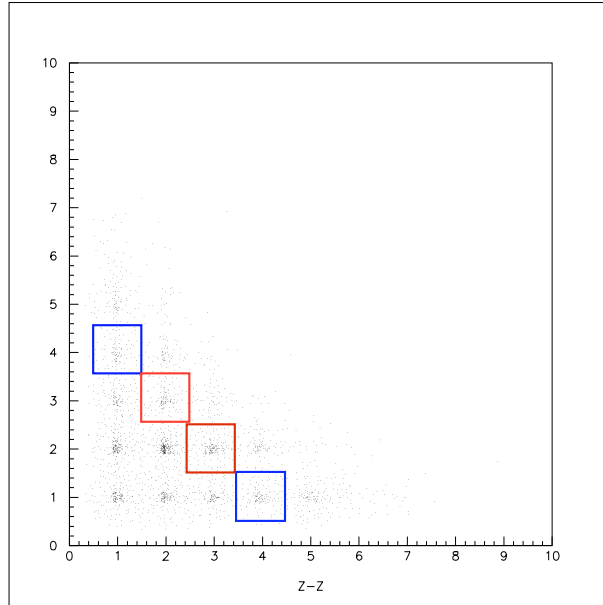


図 4.1: Z_1, Z_2 の相関 : 青い四角の領域は $z=(1,4)$ の組み合わせ、赤い四角の領域は $z=(2,3)$ の組み合わせ

| | 断面積 |
|--------------------|--|
| $Z_1 = 4, Z_2 = 1$ | $\{4.9 \pm 1.4(mb)\} / \varepsilon_{Hod}(Z_1=4, Z_2=1)$ |
| $Z_1 = 3, Z_2 = 2$ | $\{10.5 \pm 1.8(mb)\} / \varepsilon_{Hod}(Z_1=3, Z_2=2)$ |

表 4.1: Be-H,Li-He の断面積

Hodoscope のアクセプタンスに起因する検出効率 ε_{Hod} は現段階では解析されていない。今後はモンテカルロ法などによるシミュレーションによりアクセプタンスを求めることが課題である。仮に $\varepsilon_{Hod}(Z_1=4, Z_2=1)$ と $\varepsilon_{Hod}(Z_1=3, Z_2=2)$ が等しいとすると $\sigma_{(Be-H)} > \sigma_{(Li-Be)}$ という AMD の計算を定性的に支持する結果となる。

| | Efficiency |
|---------------------------|------------|
| $\varepsilon_{FDC3(Z=4)}$ | 65% |
| $\varepsilon_{FDC3(Z=3)}$ | 44% |

表 4.2: FDC3 の検出効率

4.2 Beの質量の識別

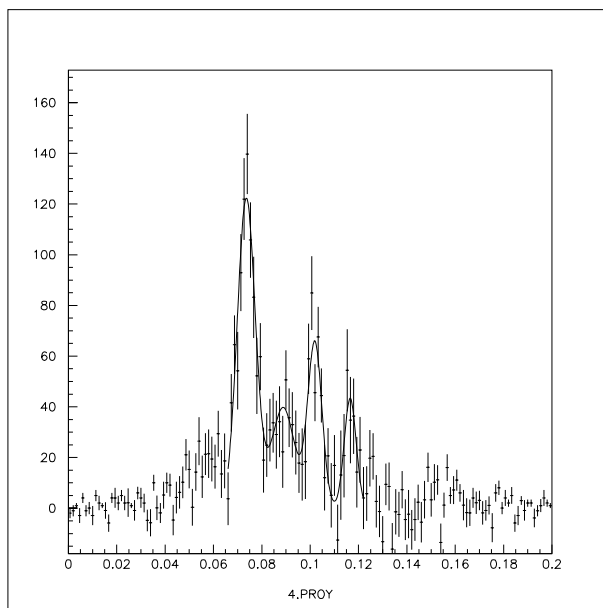


図 4.2: バックグラウンドを引いた図 3.16 の投影図左から ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{12}\text{Be}$

次に、(Be,H)の組み合わせのデータについて、質量数の解析を行う。HはFDC3における検出効率が低く、解析は困難なためBeの質量の識別についてのみ解析を行った。図4.2はそれぞれのBeの質量の分布をガウシアンフィットしたものである。図4.2からそれぞれ積分を行い、断面積を求めた。積分値は表4.3に示す。しかし、 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{11}\text{Be}$ 、 ${}^{12}\text{Be}$ の検出効率 $\varepsilon_{9,11,12}$ については解析できなかった。だが、 ${}^{10}\text{Be}$ 、や ${}^{12}\text{Be}$ に特に大きなピークがみられ、これは偶奇性を反映していると考えられる。今後は検出効率を求めることにより、理論とのより定量的な議論が可能となる。

| 質量 A | ${}^9\text{Be}$ | ${}^{10}\text{Be}$ | ${}^{11}\text{Be}$ | ${}^{12}\text{Be}$ |
|--|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 断面積/ $\varepsilon_{Hod}(Z_1=4, Z_2=1)$ | $(0.3 \pm 0.09) / \varepsilon_9$ | $\{4 \pm 0.2(\text{mb})\}$ | $(0.6 \pm 0.1) / \varepsilon_{11}$ | $(0.3 \pm 0.09) / \varepsilon_{12}$ |

表 4.3: ${}^9\sim{}^{12}\text{Be}$ の断面積

| 質量 A | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|
| 分解能 $A/\Delta A$ | 3.6 | 2.3 | 4.8 | 5.5 |

表 4.4: ${}^9\sim{}^{12}\text{Be}$ の分解能

${}^9\sim{}^{12}\text{Be}$ の分解能

4.3 Liの質量の識別

| 質量 A | ${}^7\text{Li}$ | ${}^8\text{Li}$ | ${}^9\text{Li}$ |
|---|-----------------|-----------------|---------------------------------|
| 断面積/ $\varepsilon_{Hod}(Z_1=3, Z_2=2)$ (mb) | 2.3 ± 0.2 | 3.7 ± 0.2 | $(2.1 \pm 0.2) / \varepsilon_9$ |

表 4.5: ${}^7\sim{}^9\text{Li}$ の断面積

次に、(Li-He)の組合わせのデータについての質量数の解析を行う。HeはFDC3における検出効率が低いため解析の対象としなかった。図4.3はそれぞれのLiの質量の分布をガウシアンフィットしたものである。図4.3からそれぞれの質量に対し積分を行い、断面積を求めた。積分値は表4.5に示す。 ${}^9\text{Li}$ の検出効率 ε_9 はバックグラウンドの影響のため解析できなかった。しかし、 ${}^7\text{Li}, {}^9\text{Li}$ に ${}^8\text{Li}$ より大きなピークがみられ、これは偶奇性を反映しているものと考えられる。今後は検出効率を求めることにより理論とのより定量的な議論が可能となる。

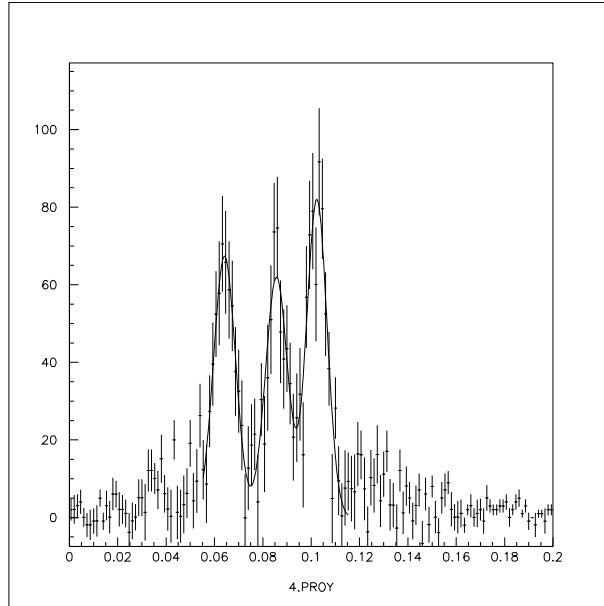


図 4.3: バックグラウンドを引いた図 3.20 の縦軸への投影図左から ${}^7\text{Li}, {}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}$

| | | | |
|------------------|-----|-----|-----|
| 質量 A | 7 | 8 | 9 |
| 分解能 $A/\Delta A$ | 4.6 | 3.4 | 4.9 |

表 4.6: ${}^7\sim{}^9\text{Li}$ の分解能

第5章 まとめ

理化学研究所の不安定核ビームラインRIPSで得られる不安定核 ^{17}B ビームをC標的に入射させ、二個の荷電粒子への分解反応断面積を測定した。その結果 Be-H については $\{4.9 \pm 1.4(\text{mb})\} / \varepsilon_{\text{Hod}(Z_1=4, Z_2=1)}$ 、Li-He については $\{10.5 \pm 1.8(\text{mb})\} / \varepsilon_{\text{Hod}(Z_1=3, Z_2=2)}$ を測定した。この結果、 $\varepsilon_{\text{Hod}(Z_1=4, Z_2=1)}$ 、 $\varepsilon_{\text{Hod}(Z_1=3, Z_2=2)}$ が等しいとすると、Be-H クラスター断面積より Li-He クラスター断面積が多きい兆候があるといえる。

ここで、検出効率 (efficiency)、 $\varepsilon_{\text{Hod}(Z_1=4, Z_2=1)}$ 、 $\varepsilon_{\text{Hod}(Z_1=3, Z_2=2)}$ 、 $\varepsilon_{\text{FDC3}}$ についての不定性が残る。原因は Hodoscope においてターゲット以外で発生するバックグラウンドが高く、その量は C ターゲットで分解反応を起した粒子の 93% にもおよんだことによる。このため、もっともバックグラウンドが多かった Hodoscope1~3 は解析不能となった。

この高いバックグラウンドは magnet 中を満たした He バックやウインドウ膜で分解反応を起した粒子による増加と考えられる。さらに Hodoscope 自身がターゲットの役割を果たし、 ^{17}B が Hodoscope 内部で分解反応を起したことによりバックグラウンドが増加した。以後の実験において、粒子が通過する部分をすべて真空にすることや、Hodoscope 間を仕切り、反跳粒子をカットする改善が必要である。さらに、分解反応を起こしても 2 粒子が同じ Hodoscope に当たってしまうと反応が起きていないと判断されてしまうため、Hodoscope 一本あたりの幅を狭くする必要がある。

FDC3 にたいしては今回解析できなかった $Z=1, 2$ の飛跡も検出できるよう、ストリップ型シリコン検出器などに変える必要がある。

第6章 付録

一次標的を通過した直後の粒子の位置、角度、磁気硬度 $(x_1, \theta_1, \Delta B\rho_1/B\rho_0)$ と、二次標的に入射する粒子の位置、角度、磁気硬度 $(x_2, \theta_2, \Delta B\rho_2/B\rho_0)$ の関係を簡単に表すと、

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \\ \frac{\Delta B\rho_2}{B\rho_0} \end{pmatrix} = AB \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ \frac{\Delta B\rho_1}{B\rho_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ \frac{\Delta B\rho_1}{B\rho_0} \end{pmatrix}$$

となる。ここで、A、BはRIPSの二つの双極子電磁石によるものである。RIPSは、この $(x_2, \theta_2, \Delta B\rho_2/B\rho_0)$ を収束させるようにA、Bを選んでいる。ドリフトチェンバーの解析にもこれを応用している。二次標的での粒子の位置、角度、磁気硬度 $(x_2, \theta_2, \Delta B\rho_2/B\rho_0)$ と、FDC3での粒子の位置、角度、磁気硬度 $(x_3, \theta_3, \Delta B\rho_3/B\rho_0)$ の関係は、

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ \theta_3 \\ \frac{\Delta B\rho_3}{B\rho_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t \\ \theta_t \\ \frac{\Delta B\rho_t}{B\rho_0} \end{pmatrix}$$

$$x_3 = ax_t + b\theta_t + c\frac{\Delta B\rho_t}{B\rho_0} \quad (6.1)$$

$$\theta_3 = dx_t + e\theta_t + f\frac{\Delta B\rho_t}{B\rho_0} \quad (6.2)$$

$$\frac{\Delta B\rho_3}{B\rho_0} = \frac{\Delta B\rho_t}{B\rho_0} \quad (6.3)$$

となる。

関連図書

[1] H.Takemoto.Phys.Rev.C,63,34615,(2000)

謝辞

この研究を行うにあたって、沢山の人の御協力、助言をいただきました。指導教官である中村隆司助教授には、解析を進める上で丁寧かつ的確なご指導により、今まで良く理解できていなかった物理に知識が鮮明になり、また論文の書き方も夜遅くまでご指導していただいたこともありました。また、同研究室助手の佐藤義輝氏、先輩の杉本崇氏、三浦元隆氏、石川和宏氏、近藤洋介氏、にはコンピューターの使い方をはじめ、沢山のことを教わりました。