

2015 年度
学士論文

荷電フラグメントの粒子識別用ホドスコープの 開発



東京工業大学 理学部 物理学科
学籍番号 12B12253
氏名 平山 晃大

指導教官 中村 隆司

2016/05/10

概要

不安定核を対象とした分解反応実験で使用する荷電フラグメント用ホドスコープの開発を行った。分解反応実験は中性子過剰核の構造を研究する手段の一つであり、不安定核を炭素や鉛などの標的と反応させ、不変質量を測定し励起エネルギーを導出するために行われる。不変質量を導出するためには、反応後に放出される粒子の識別と運動量の測定が必要であり、エネルギー損失 (ΔE) や時間情報を精度よく測定できる検出器の開発が重要である。

我々はクーロン分解反応を用いて ^{79}Se や ^{93}Zr などの原子核の光吸収断面積を導出することを目的とした実験を行った。これまでの ^{22}C や ^{26}O の非束縛状態を調べる実験では陽子数 Z が 10 近傍での使用を想定したプラスチックホドスコープを用いていた。しかし、今回の研究対象となった ^{79}Se や ^{93}Zr は $Z \simeq 40$ であるためこれまでの検出器は適していない。そこで本研究では $Z \simeq 40$ の原子核を対象とし、 ΔE の分解能の向上を目指したプラスチックホドスコープ検出器の開発を行った。具体的には厚さのばらつきを $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内にするこゝで、厚さの非一様性による ΔE の広がりが 2% 以下になるようにし、 ΔE の位置依存性を小さくした。開発した検出器を ^{79}Se , ^{93}Zr などのクーロン分解反応実験で使用し、 ΔE と時間の分解能を導出して性能評価を行った。本論文ではプラスチックホドスコープの開発と時間分解能、 ΔE の位置依存性について議論する。

目次

第 1 章	序	1
1.1	不変質量法	2
1.2	荷電粒子検出器	2
第 2 章	クーロン分解反応実験による性能評価	3
2.1	実験のセットアップ	3
第 3 章	プラスチックシンチレータホドスコープ (HODS) の設計と制作	9
3.1	設計	9
第 4 章	解析	15
4.1	ビーム上流の粒子識別	15
4.2	HODS の TDC の時間較正	16
4.3	HODS の QDC のゼロ点の較正	16
4.4	HODS のゲインの相対的調整	18
4.5	FDC2	20
4.6	位置依存性	21
4.7	Q の分解能	26
4.8	Z の分離	28
4.9	時間分解能	31
第 5 章	まとめと今後の展望	35
参考文献		37

目次

1.1	クーロン分解反応の概念図	2
2.1	BigRIPS のセットアップ	3
2.2	SAMURAI の全体図	4
2.3	ICB の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。	5
2.4	BDC の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。	5
2.5	FDC1 の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。	6
2.6	SAMURAI マグネットの概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。	7
2.7	FDC2 の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。	7
3.1	HODS の構造。ビーム入射側から見て左から ID1-7 とした。	9
3.2	シンチレータを遮光する前。	10
3.3	シンチレータを遮光した後。	10
3.4	シンチレータの厚さの測定位置。	11
3.5	ホドスコープの回路図。	12
4.1	SAMURAI 上流の粒子識別	15
4.2	キャリブレーション結果	16
4.3	ホドスコープ ID1 の上側の TDC の時間較正	16
4.4	ID と上側の PMT の信号のペDESTAL	17
4.5	ID と下側の PMT の信号のペDESTAL	17
4.6	ID1 のホドスコープの上側のペDESTAL	17
4.7	HOD の ID1 の上下の PMT の発光量の相関 (ゲイン調整を行う前)	18
4.8	HOD の ID1 の上下の PMT の発光量の相関 (ゲイン調整を行った後)	18
4.9	^{79}Se ビームが中心にあたっている条件でゲートをかけた時の上下の PMT の発光量の相関	19
4.10	図 4.9 の x 軸方向への射影	19
4.11	図 4.9 の y 軸方向への射影	19
4.12	FDC2 の x,y の分布	20
4.13	FDC2 における x 座標と入射角度	21
4.14	FDC2 における y 座標と入射角度	21
4.15	FDC2 の x,y 軸	21
4.16	ホドスコープの ID3 の平均発光量とビームの位置の相関。	22
4.17	^{79}Se のビームでゲートをかけた時のホドスコープの ID3 の平均発光量とビームの位置の相関。青線はピーク。	22

4.18	ID3 のホドスコープについて補正後の発光量と位置の相関。	23
4.19	図 4.16 を y 軸に射影したヒストグラム	23
4.20	図 4.18 を軸に射影したヒストグラム。	23
4.21	ID3 について Q_{av} の y 依存性のみ補正し x 依存性を補正前の Q_{av} と位置 x_{HOD} の相関	24
4.22	ID3 について Q_{av} の x,y 依存性を補正後 Q_{av} と位置 x_{HOD} の相関	24
4.23	図 4.22 を軸に射影したヒストグラム。ピークを左からピーク 1,2,3 とする。	25
4.24	全ての ID の x 依存性を見た結果	26
4.25	補正を行った後の T_{av} と Q_{av} の相関	27
4.26	ID6 のホドスコープの T_{av} と Q_{av} の相関。	28
4.27	ID3 について補正後の Q_{av} と T_{av} の相関。	29
4.28	図 4.27 の y 軸への射影	30
4.29	ID3 についての Z と Q_{av} の channel 値の対応	30
4.30	陽子数 Z のヒストグラム。ガウシアンでフィットした。	31
4.31	ID3 について ^{79}Se ビームにゲートをかけたときの Q_{av} と T_{av} の相関。	32
4.32	図 4.31 を y 方向に射影したヒストグラム	32
4.33	図 4.31 を表 4.11 の値 $\pm 5(\text{ch})$ の範囲を x 軸方向に射影したヒストグラム。	32

表目次

1.1	LLFP の例とその半減期	1
2.1	BigRIPS の各パラメータ	4
3.1	プラスチックシンチレータの仕様。[?]	10
3.2	シンチレータの厚さの実測値	11
3.3	光電子増倍管の仕様。	12
3.4	光電子増倍管の印加電圧	12
4.1	各 ID とベDESTAL の値	18
4.2	ビームが中心にあたったイベントのチャンネル	20
4.3	フィットパラメータ	22
4.4	y 補正後のピークの中心値と標準偏差。ただし ID7 についてはフィットすることができなかつたため示していない。	24
4.5	x と y 依存性補正後のピークの広がり	25
4.6	ID2 と ID7 の厚さ	26
4.7	射影する領域	27
4.8	補正前後の分解能	28
4.9	フィットパラメータ	29
4.10	標準偏差	31
4.11	ID とピークの位置	32
4.12	それぞれの ID のピークの標準偏差	33

第 1 章

序

本研究では陽子数が 40 近傍の原子核である ^{79}Se や ^{93}Zr の分解反応実験に使用する荷電粒子検出器の開発を行った。 ^{79}Se や ^{93}Zr は半減期が長く、原子炉で生成される長寿命核分裂生成物 (LLFP) と呼ばれているもので、現在核変換技術を目的とした核反応データ取得の実験研究が進められている。我々のグループでは、核反応データの中でも LLFP の光吸収断面積に着目している。光吸収断面積はクーロン分解反応を測定することで導出が可能であるため、LLFP を不安定核ビームとし鉛と炭素を標的とした分解反応を測定した。分解反応によって生成された荷電粒子は SAMURAI スペクトロメータによって粒子識別、運動量測定がなされる。これまで使用してきた荷電粒子検出器は主に質量数が 20 近傍で使用することを考えて開発されたものであるが、本研究では測定対象を ^{79}Se や ^{93}Zr のような陽子数の大きな荷電粒子に広げることを目標とした荷電粒子検出器の開発を行った。

1.0.1 LLFP のクーロン分解反応実験

長寿命核分裂生成物 (LLFP: Long Life Fission Products) は ^{235}U の核分裂片に含まれる長寿命核で原子炉中で放射性廃棄物としてつくられる。LLFP の半減期は表 1.0.1 に示すように非常に長く、廃棄物として処理するためには様々な問題が存在するため、LLFP を短寿命核化あるいは安定核化する技術の開発が期待されている。その技術の一つとして核反応によって原子核を他の原子核に変換する、核変換技術がある。この核変換技術を研究会はるするためには、LLFP やその周辺核に対する様々な核反応データが必要である。我々のグループでは、核反応データの中でも光吸収断面積に着目し、光吸収断面積を導出することが可能なクーロン分解反応を LLFP に対して行った。クーロン分解反応

核種	^{79}Se	^{93}Zr	^{135}Cs	^{107}Pb
半減期 (10^4 year)	29.5	153	230	650

表 1.1 LLFP の例とその半減期

は高エネルギーの重イオンビームを重標的に照射することで起こる反応である。図 1.1 にクーロン分解反応の概念図を示した。入射粒子が重標的の傍を高速で通過することで電磁場により仮想光子を吸収する。仮想光子を γ 線とみなすことで光吸収反応 (γ, n) を起こすことができる。このクーロン分解断面積を σ 、励起エネルギーを E_x 、仮想光子数を N と書くと光吸収断面積との関係は

$$\frac{d\sigma}{dE_x} = N(E_x) \frac{\sigma_\gamma(E_x)}{E_x} \quad (1.0.1)$$

と表せる。この関係を用いることで実験により測定されたクーロン分解反応断面積から光吸収反応の断面積を導出することができる。

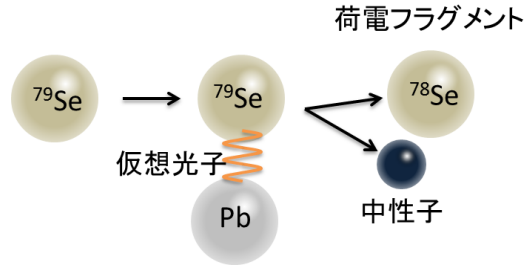


図 1.1 クーロン分解反応の概念図

1.1 不変質量法

前節のクーロン分解反応の例を考える。 ^{79}Se の励起状態の不変質量を M とすると、これは分解後の ^{78}Se と中性子のエネルギー $E_{78\text{Se}}, E_n$ と運動量ベクトル $\mathbf{p}_{78\text{Se}}, \mathbf{p}_n$ を用いて、

$$M = \sqrt{(E_{78\text{Se}} + E_n)^2 - (\mathbf{p}_{78\text{Se}} + \mathbf{p}_n)^2} \quad (1.1.1)$$

と表せる。またエネルギー保存則から相対エネルギー E_{rel} は不変質量と ^{78}Se と中性子の静止質量 $m_{78\text{Se}}, m_n$ を用いて

$$E_{rel} = M - (m_{78\text{Se}} + m_n) \quad (1.1.2)$$

と表せる。また励起エネルギー E_x と一中性子分離エネルギー S_n を用いて、

$$E_x = E_{rel} + S_n \quad (1.1.3)$$

と表せる。この不変質量法を用いることで励起エネルギー E_x を導出することができる。

不変質量を導出するためには粒子の運動量ベクトルの測定をする必要がある。運動量の測定には飛行時間 TOF (Time Of Flight) の測定が必要である。また粒子の識別には磁気硬度 $B\rho$ 、エネルギー損失 ΔE 、飛行時間 TOF を測定する必要がある。粒子の速度 β 、陽子数 Z 、運動量 p 、質量数 A 、電荷 Q を用いて粒子識別に用いられる式は次のように書くことができる。

$$\begin{cases} TOF \propto \beta \\ \Delta E \propto \frac{Z^2}{\beta^2} \\ B\rho = \frac{p}{Q} \propto \frac{A}{Q}\beta \end{cases} \quad (1.1.4)$$

この関係を用いることによって $B\rho, TOF, \Delta E$ から Z, A を決定する。

1.2 荷電粒子検出器

これまで我々のグループで使用されていた荷電粒子検出器 HODF は HODS と同様に粒子の飛行時間 TOF と粒子のエネルギー損失の測定を行うための検出器である。HODF は陽子数 Z が小さい領域での適用を想定した検出器である。HODF を陽子数が大きい領域で適用するとシンチレータの厚さのばらつきの影響が大きく、エネルギー損失の分解能が悪くなってしまう。

このため陽子数の大きな領域で適用を想定したホドスコープ HODS の設計と制作を行った。設計の際にはプラスチックシンチレータの厚さのばらつきを $\pm 100\mu\text{m}$ 以内にすることで、厚さの非一様性による ΔE の広がりが 2% 以内になるようにし、 ΔE の位置依存性を小さくした。

第 2 章

クーロン分解反応実験による性能評価

2.1 実験のセットアップ

実験は理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) で行った。 ^{79}Se 、 ^{93}Zr などの 2 次ビームの生成、分離には BigRIPS を用いた。セットアップを図 2.1 に、BigRIPS の各パラメータを表 2.1 に示す。リングサイクロトロンを用いて ^{238}U を核子あたり 235 MeV まで加速して厚さ 2mm の Be 標的に打ち込み、飛行核分裂反応により二次ビームを生成する。F3 焦点面までの第一ステージで磁気硬度 $B\rho$ 、エネルギー損失 ΔE の違いを用いて粒子の選別を行う。また、F3 から F13 のビームラインにおいて、磁気硬度 $B\rho$ 、F13 に置かれたイオンチェンバーを用いてエネルギー損失 ΔE を測定し、F7 と F13 に置かれたプラスチックシンチレータを用いて F3-F7 間の飛行時間 TOF を測定して核種の識別を行う。SAMURAI では二次標的を設置し、標的と入射粒子のクーロン分解反応を起こし、反応後の粒子の 4 元運動量の測定と粒子の識別を行い不変質量を導出する。今回開発を行ったホドスコープはこの粒子識別に用いる。以降では各実験装置について説明する。

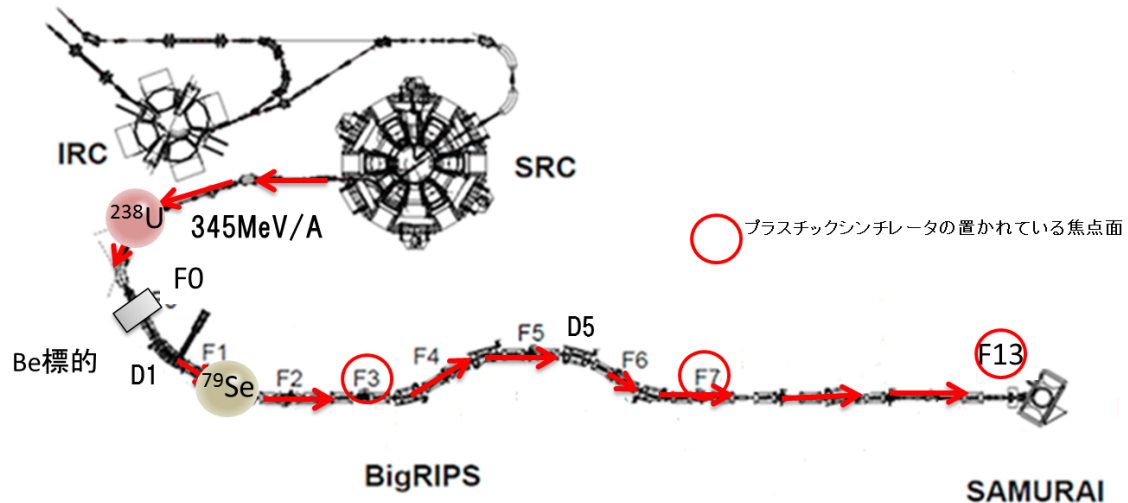


図 2.1 BigRIPS のセットアップ

Be 標的	2mm
F1Al-エネルギー減速板	6mm
F1 slit	±1mm
F5 slit	±10mm
F7 slit	±10mm
F1 Al-エネルギー減速板	6mm
F5 Al-エネルギー減速板	3.5mm
D1 $B\rho$	6.8092Tm
D5 $B\rho$	5.4978Tm
D6 $B\rho$	5.4559Tm

表 2.1 BigRIPS の各パラメータ

2.1.1 SAMURAI

多種粒子測定装置 SAMURAI (Superconducting Analyzer for MUlti-particle from RAdio Isotope Beams) は SAMURAI マグネットと呼ばれる超伝導双極電磁石、入射ビーム検出器、荷電粒子検出器、中性子検出器から構成されており、粒子の 4 元運動量ベクトルを計測する大立体角スペクトロメータである。図 2.2 に SAMURAI の全体図を示す。以下では各検出器の詳細について述べる。

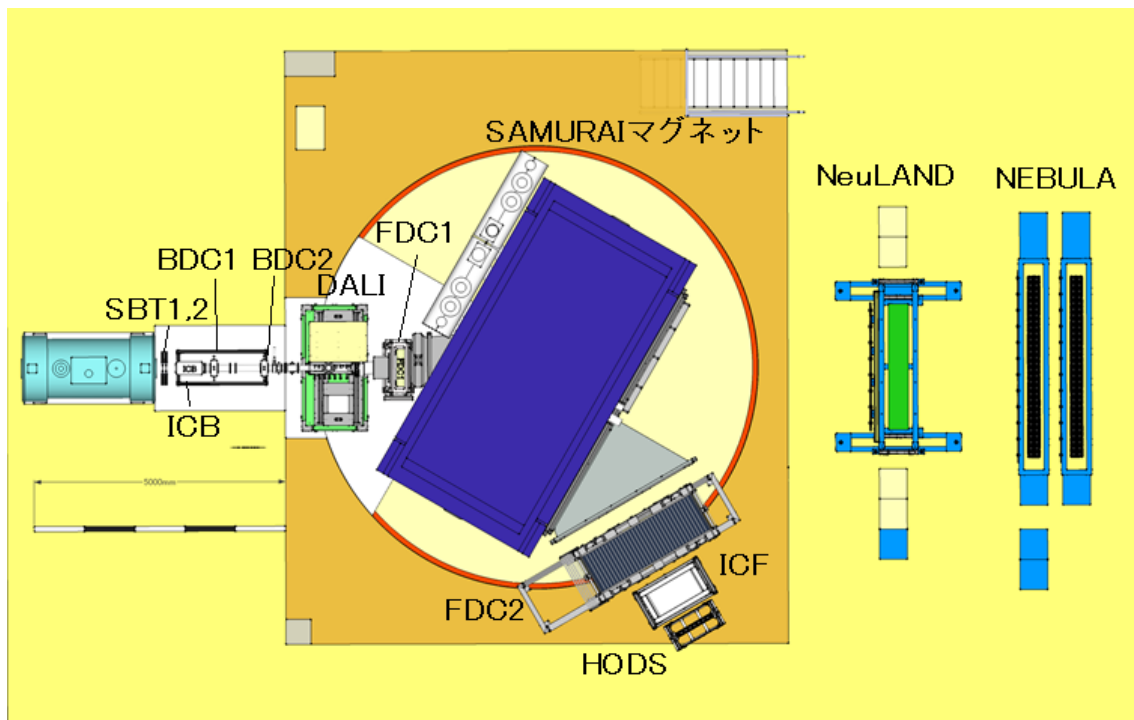


図 2.2 SAMURAI の全体図

SBT1、SBT2

SBT1、SBT2 は厚さ 0.5 mm のプラスチックシンチレータである。それぞれ両端に PMT が取り付けられている。この信号をトリガーとして用いる。

ICB

ICB は 10 層のアノード面と 11 層のカソード面からなるイオンチェンバーで各アノード面から得られるエネルギー損失 ΔE_i の平均を用いて全エネルギー損失 ΔE を高分解能で得るための検出器である。封入されているガスは Ar+10%CH₄ ガスで 760Torr の圧力である。TOF の情報と合わせて用いることで 2 次ビームの陽子数 Z の識別に用いた。図 2.3 に ICB の概略図を示す。

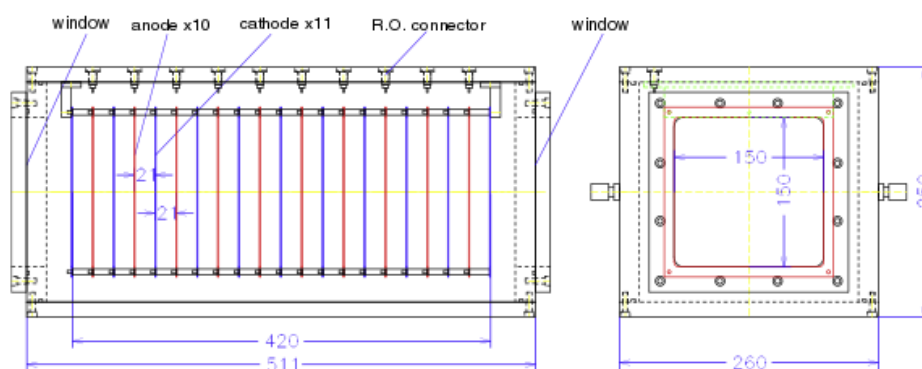


図 2.3 ICB の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。

BDC1、BDC2

BDC1、BDC2 は入射ビームの位置と角度を測定するのに用いられるドリフトチェンバーである。封入されているガスは i-CH₄ で圧力は 50Torr である。図 2.4 に BDC の概略図を示す。

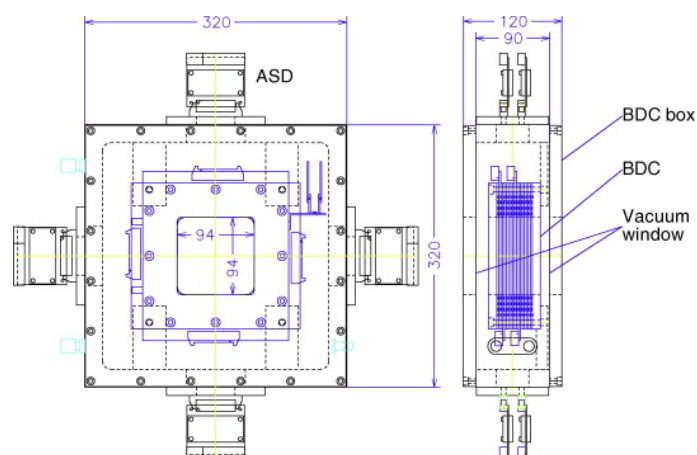


図 2.4 BDC の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。

DALI2

DALI2 は RI ビームを用いたインビーム γ 線分光実験のために設計された γ 線検出器群であり、多数の NaI(Tl) シンチレータから構成されている。この実験では 140 個のシンチレータを使用した。反応標的で生成される荷電フラグメントが励起状態にある場合、これが脱励起する際に発せられる γ 線のエネルギーを測定する。

FDC1

FDC1 は反応標的直後、SAMURAI マグネットの入り口に設置されている。FDC1 は荷電フラグメントの入射角度と入射位置を測定するドリフトチェンバーである。図 2.5 にその概略図を示す。ワイヤーが鉛直方向に張られた層が 6 層、それに対し $\pm 30^\circ$ 傾けた層 (U,V) がそれぞれ 4 層の計 14 層からなっている。アノードワイヤーは 1 層あたり 32 本が 10 mm の間隔で張られている。封入ガスは $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ガスで圧力は 50 Torr である。

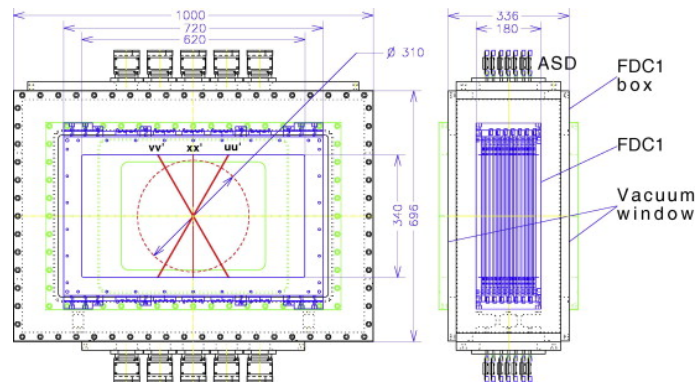


図 2.5 FDC1 の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。

SAMURAI マグネット

SAMURAI マグネットは最大磁束密度 3.1 T でありこれにより高い運動量分解能を得ることができる。また有効磁極間距離 80 cm を持っておりこのギャップにより大きな角度アクセプタンスを持つ。SAMURAI マグネットにより荷電フラグメントと中性子を分離する。SAMURAI マグネットの概略図を図 2.6 に示す。

FDC2

FDC2 は SAMURAI マグネットの出口直後に設置されたドリフトチェンバーである。図 2.7 に概略図を示す。FDC1 と同様に鉛直方向にワイヤーが鉛直方向に張られた層が 6 層、それに対し鉛直方向に $\pm 30^\circ$ 傾けた層 (U,V) がそれぞれ 4 層の計 14 層からなっている。アノードワイヤーは各層あたり 112 本、20 mm 間隔で張られている。封入ガスは $\text{He}+60\%\text{CH}_4$ で圧力は $\text{He}+60\%\text{CH}_4$ で 760 Torr である。

ICF

ICF はイオンチェンバーで FDC2 の下流に置かれている。縦 400 mm、横 750 mm の 12 面のアノード面と 13 面のカソード面からできており、20 mm おきに交互に並んでいる。これを用いて二次標的と反応後の粒子のエネルギー損失 ΔE を測定する。封入されているガスは $\text{Ar}+10\%\text{CH}_4$ ガスで 760 Torr の圧力である。

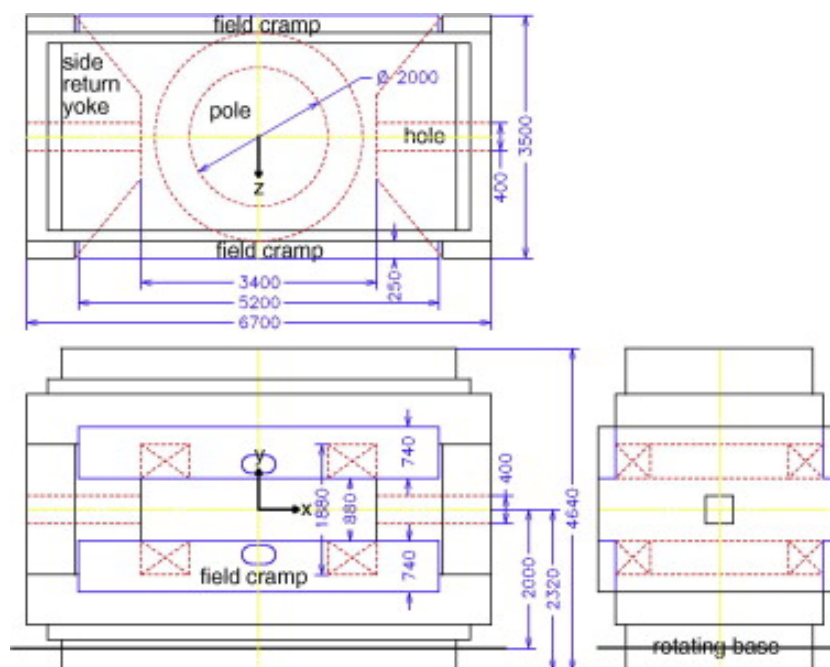


図 2.6 SAMURAI マグネットの概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。

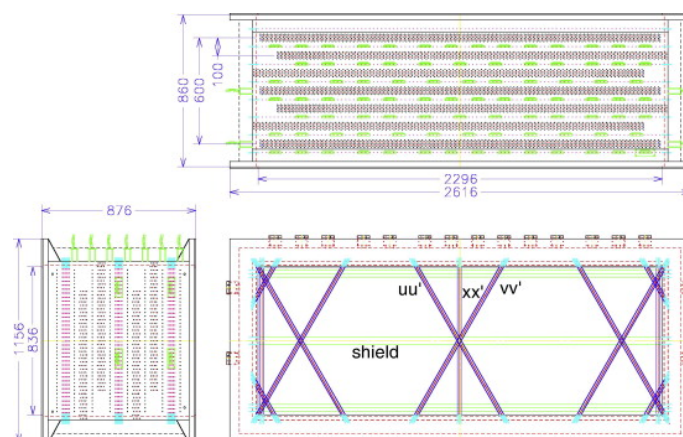


図 2.7 FDC2 の概略図 [1]。図中の数値の単位は mm。

HODS

ホドスコープ HODS は次章で詳述するが、横 100 mm、縦 500 mm、厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータを 7 本並べた検出器である。HODS で検出した粒子のエネルギー損失、時間情報から荷電フラグメントの識別をする。

中性子検出器群

NeuLAND は横 250 cm、縦 5 cm、厚さ 5 cm のプラスチックシンチレータを縦方向に 50 本重ねたものを 1 層とし、またこれを 90° 回転させたものを 2 層目としてこれらを 2×20 層 400 本並べた中性子検出器である。

NEBULA は横 250 cm、縦 180 cm、厚さ 12 cm、のプラスチックシンチレータを横方向に 30×2 列並べたものを 1 つの層として、計 2 層 120 本のプラスチックシンチレータから構成されている大型中性子検出器である。

第3章

プラスチックシンチレータホドスコープ (HODS) の設計と制作

3.1 設計

ホドスコープ HODS は図 3.1 のように 7 本のプラスチックシンチレータから構成されていて有感面積は鉛直方向 500 mm、水平方向 700 mm である。それぞれのプラスチックシンチレータには、その両端にライトガイド、光電

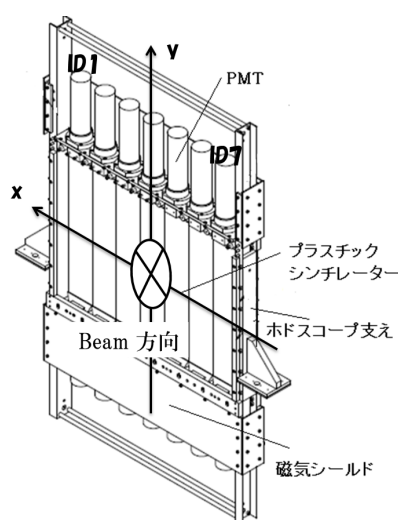


図 3.1 HODS の構造。ビーム入射側から見て左から ID1-7 とした。

子増倍管が接着されていて、図 3.2 のように反射シートに覆われている。全てのシンチレータは図 3.3 のようにまとめて遮光してある。1 本ずつ遮光を行わず全体を遮光した理由は一本ずつ遮光を行った時に生じる遮光シートの厚さ $0.2 \text{ mm} \times 2$ の隙間を作らずにシンチレータ間の隙間をできるだけ少なくするためである。反射シートは厚さ $12 \mu\text{m}$ で $214 \text{ mm} \times 497 \text{ mm}$ の Al マイラーを用い、遮光シートは厚さ 0.1 mm 、 $580 \text{ mm} \times 740 \text{ mm}$ の大きさである。1 本ずつ遮光を行わずにまとめて遮光を行った理由は 1 本ずつ遮光を行うことにより生じるホドスコープ間の隙間を作らないようにするためである。

ホドスコープが置かれるのは SAMURAI マグネットの近くであるため信号が磁場の影響で変化してしまう可能性がある。この影響をなくすために磁気シールドで光電子増倍管全体を覆った。

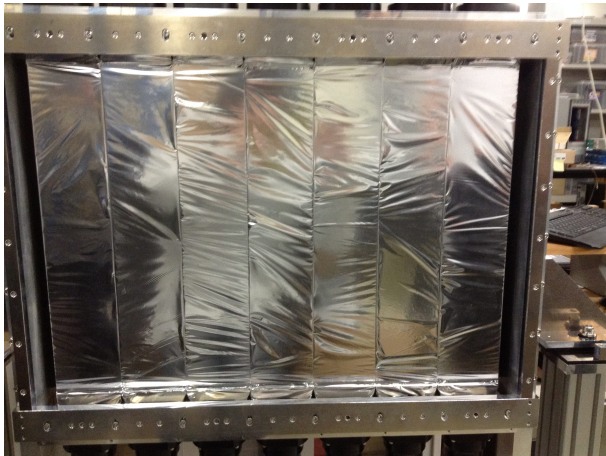


図 3.2 シンチレータを遮光する前。



図 3.3 シンチレータを遮光した後。

3.1.1 プラスチックシンチレータ

今回使用したプラスチックシンチレーターは一枚の大きさが厚さ 5 mm、縦 500 mm、幅 100 mm で ELJEN Technology 社製の型番 EJ200 のものを使用した。厚さの均一性が $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内になるようにし、荷電フラグメントのエネルギー損失 ΔE の分解能の向上を目指した。シンチレータの仕様を表 3.1 に示す。シンチレータの厚さのばら

型番	EJ200
寸法	100 mm×5 mm×500 mm
屈折率	1.58
パルスの立ち上がり時間	0.9 ns
密度	1.023 g/cm ³

表 3.1 プラスチックシンチレータの仕様。[?]

つきを確認するために、マイクロメータを用いて厚さの測定を行った。測定は図 3.4 に示すよう 1 から 9 までの位置を 50 mm おきにシンチレータの片側につき 9 ヶ所ずつ計 18 ヶ所測定を行った。その結果を表 3.2 に示す。

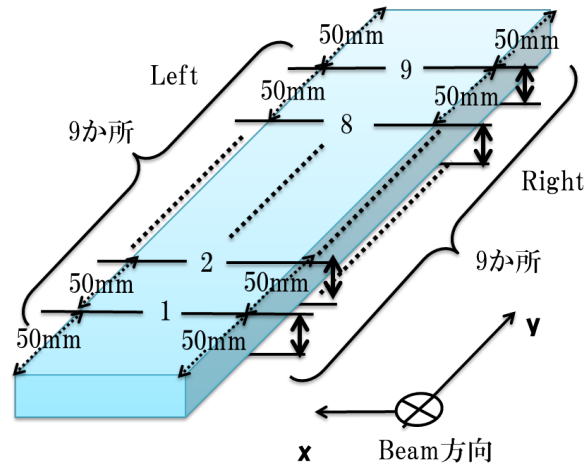


図 3.4 シンチレータの厚さの測定位置。

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ID1	Right(mm)	5	5	5	4.97	4.96	4.96	4.96	4.92	4.98
	Left(mm)	5.01	5.02	5.02	5.03	5.01	5.01	5.00	4.98	5.01
ID2	Right(mm)	5.03	5.00	5.03	5.04	5.04	5.03	5.04	5.01	5.01
	Left(mm)	4.99	4.97	4.99	4.98	4.98	5.00	5.01	5.01	5.00
ID3	Right(mm)	4.97	4.97	4.97	4.96	4.95	4.98	5.00	4.99	5.00
	Left(mm)	5.00	5.00	5.00	4.99	4.98	5.02	5.01	5.00	5.00
ID4	Right(mm)	5.00	5.01	5.01	5.01	5.01	5.03	5.03	4.99	4.97
	Left(mm)	5.00	4.98	4.98	4.99	5.00	5.00	5.01	4.99	4.99
ID5	Right(mm)	5.00	5.00	5.00	5.00	4.97	4.96	4.96	4.95	4.95
	Left(mm)	5.01	5.01	5.02	5.01	5.00	5.01	5.00	4.99	5.00
ID6	Right(mm)	5.01	5.02	5.02	5.02	5.01	5.01	5.01	4.99	5.01
	Left(mm)	4.99	4.99	4.99	4.93	4.93	4.97	4.96	4.96	4.99
ID7	Right(mm)	5.01	5.00	5.01	5.01	5.01	5.02	5.02	5.02	5.00
	Left(mm)	4.97	4.94	4.94	4.93	4.96	5.00	5.01	5.00	5.00

表 3.2 シンチレータの厚さの実測値

3.1.2 光電子増倍管

光電子増倍管は浜松トニクス社製の型番 H1161 のものと H7195 のものを使用した。この 2 つの仕様は H1161 が MHV 端子、H7195 が SHV 端子であること以外は同じである。その仕様を表 3.3 に示す。

型番	H7195, H1161
受光面径	φ46 mm
光電面	バイアルカリ
パルスの立ち上がり時間	2.7 ns

表 3.3 光電子増倍管の仕様。

光電子増倍管の印加電圧

光電子増倍管の印加電圧はビームを用いて調節した。200MeV の ⁷⁹Se ビームが損失するエネルギーのピークが上下の PMT で 1000ch にくるように設定した。

	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7
UP(V)	1170	1190	1200	1150	1220	1200	1120
Down(V)	1170	1420	1170	1150	1220	1160	1210

表 3.4 光電子増倍管の印加電圧

3.1.3 ホドスコープの回路

光電子増倍管から送られる信号を処理する回路について説明する。ホドスコープの回路図を図 3.5 に示す。上下の光電子増倍管から得られる信号はスプリッターによってアナログ信号とデジタル信号のラインに分けられる。一方の信号

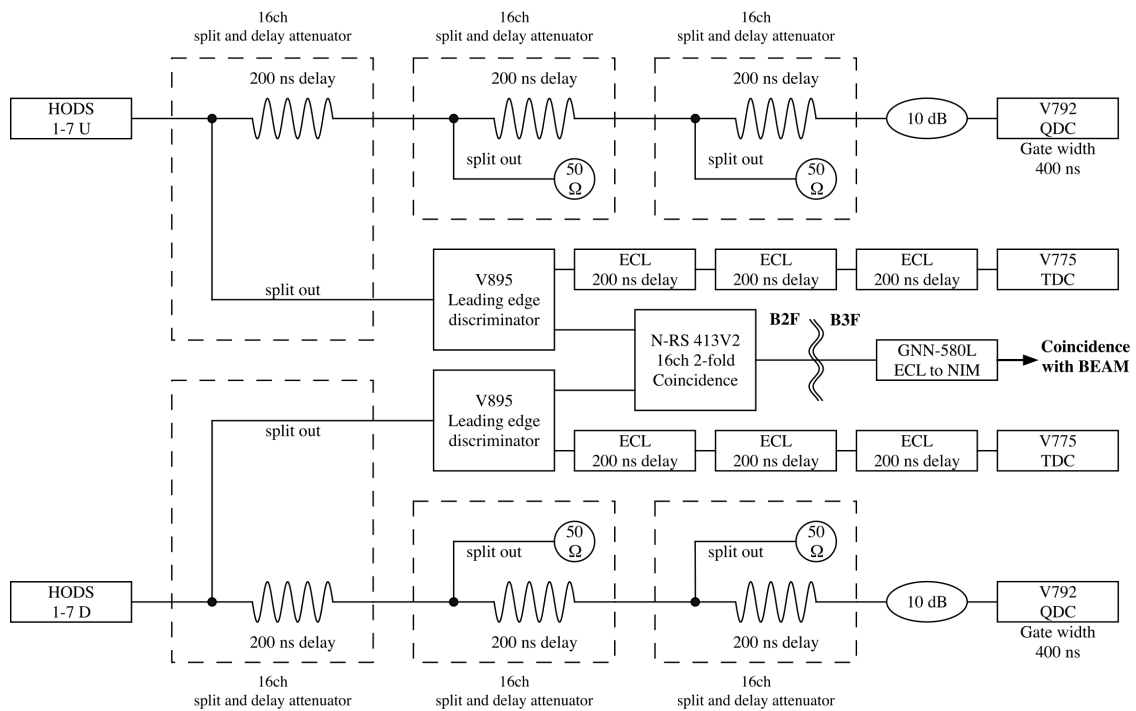


図 3.5 ホドスコープの回路図。

はアナログ信号のまま 200 ns ケーブルディレイを 3 つ、計 600 ns のディレイと 10 db のアッテネータを通り QDC に送られ、信号の積分値が記録される。もう一方の信号は discriminator でスレッシュホールドを越えた信号のみデジタル信号が生成され、2 つの信号に分かれる。一方は 200 ns のロジックディレイを 3 つ、計 600 ns のディレイを通り TDC に到達しストップ信号を生成する。もう一方は coincidence に到達して上下の光電子増倍管の信号のコインシデンスをとる。7 本のシンチレータの coincident の OR 信号はデータ収集のトリガーに使用される。

Discriminator

Discriminator は設定したスレッシュホールドの値を超える信号が来た時にロジック信号を出力する。今回は CAEN の V895 を使用し、本実験ではスレッシュホールドを 30mV に設定した。

ECL ロジックディレイ

ECL はロジック信号のディレイに用いる。Discriminator で作られたロジック信号をディレイさせるために用いた。林栄精器株式会社の RPV-090 を用いた。

QDC

QDC は信号の積分値を記録するものである。今回使用したモジュールは CAEN の V792 である。QDC ゲート幅は 300ns とした。

TDC

TDC はスタート信号とストップ信号の差を記録する。CAEN の V775 を用いた。TDC のスタート信号として SBT の信号を用い、ホドスコープの各 PMT の信号をストップとした。

coincidence

coincidence は各ホドスコープの上下の光電子増倍管から得られた信号のコインシデンスをとりトリガーを作る。モジュールはテクノランドコーポレーションの N-RS413V2 を用いた。

第 4 章

解析

この章ではまず上流のビームの粒子識別について説明し、次にホドスコープの時間較正、ゲインの調整などの説明を行う。その後時間分解能の評価、発光量の位置依存性、粒子識別の分解能の評価を行う。今回解析を行うのは SAMURAI マグネットの磁場を 2.45 T から 2.75 T へ徐々に変化させてホドスコープ全体にビームをあたるようにした、ターゲット empty の run である。

4.1 ビーム上流の粒子識別

SAMURAI の標的より上流の位置での粒子の識別について説明する。粒子の飛行時間 TOF と粒子のエネルギー損失 ΔE を測定することで粒子識別を行う。TOF の測定には F3 に置かれたプラスチックシンチレータと F13 の SBT の間の時間を用いた。粒子のエネルギー損失 ΔE は F13 の ICB での値を用いた。粒子の識別図を図 4.1 に示す。キャ

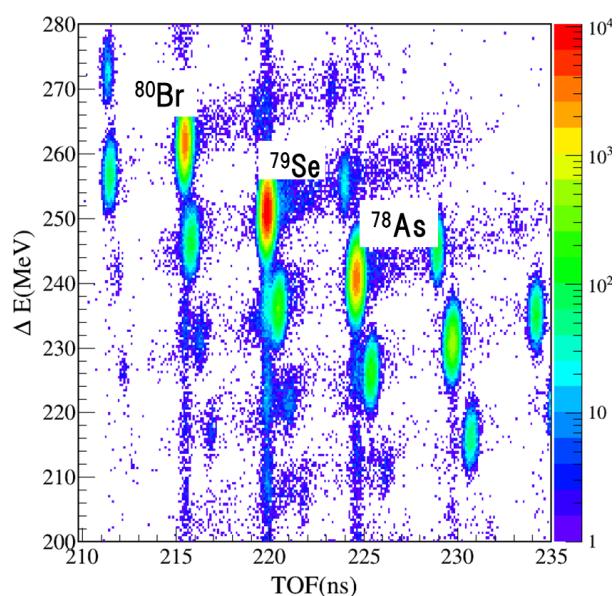


図 4.1 SAMURAI 上流の粒子識別

リブレーションにはシミュレーションソフト LISE++ を使い粒子の TOF のシミュレーションを行うことで T_{F3-F13} のオフセットを調整した。また、 ΔE をシミュレーションから得られた値を使ってキャリブレーションした。キャリブレーションには図 4.1 中の ^{80}Br , ^{79}Se , ^{78}As の ΔE を用いた。それによって得られた channel 値と MeV の対応を図 4.1 に示す。

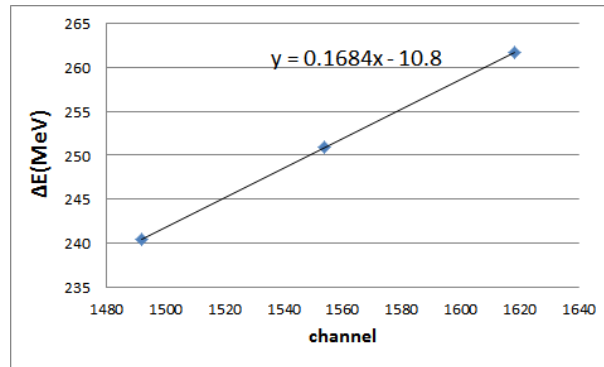


図 4.2 キャリブレーション結果

4.2 HODS の TDC の時間較正

TDC によってスタートトリガーからの時間差の情報が channel 値で得られるのでこれを実際の時間 (ns) に較正する必要がある。時間の較正には TDC キャリブレータを用いた。図 4.3 は ID1 のホドスコープの上側の PMT について TDC キャリブレータの信号を TDC で取得したものである。各ピークの間隔は 10ns に対応している。各ピークの channel を求め、時間 (ns) との対応を図 4.3 のように線形フィットすることにより各 PMT の時間較正を行った。

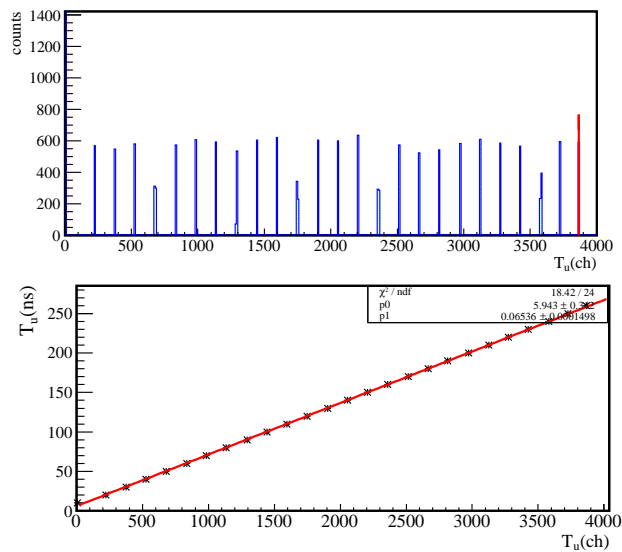


図 4.3 ホドスコープ ID1 の上側の TDC の時間較正

4.3 HODS の QDC のゼロ点の較正

QDC から得られる信号の積分値は実際の信号のみに依存する値ではなくペダスタルと呼ばれるオフセットを持っている。このペダスタルを電荷のゼロ点として用いる。

ペダスタルの値を見積もるために、1kHz のクロック信号をトリガーとして用いることでペダスタルを取得した。図 4.4 に上側の PMT からの信号に対応した QDC のペダスタル、図 4.5 に下側の PMT からの信号に対応した QDC の

ペDESTALを ID ごとに示す。その中の例として図 4.6 に ID1 のホドスコープの上側の QDC のペDESTALをガウシアンでフィットしたものを示す。同様に各 QDC に対してフィットしてそのピークの位置を導出した。その結果を表 4.1 に示す。

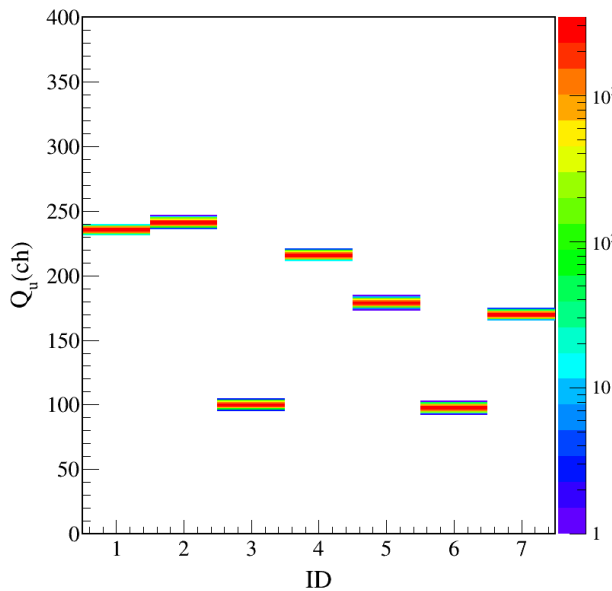


図 4.4 ID と上側の PMT の信号のペDESTAL

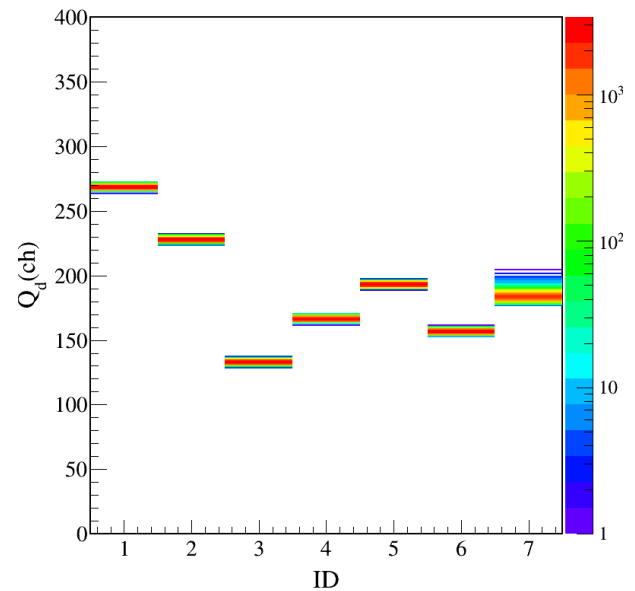


図 4.5 ID と下側の PMT の信号のペDESTAL

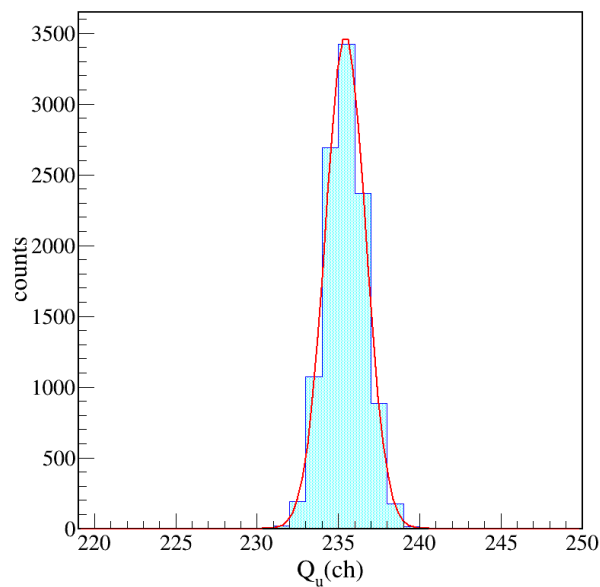


図 4.6 ID1 のホドスコープの上側のペDESTAL

この値を各チャンネルのゼロ点として用いるため、このペDESTALの値を各 Q から差し引いた。

しかし、このままでは信号が来ていない時もペDESTALが蓄積されていくのでデータ量が膨大になってしまう。これを防ぐためにペDESTALサプレッションを行う必要があった。ペDESTALサプレッションを行うために QDC のスレッシュホールドをフィットの中心値 + 5σ とした。

	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7
UP のペDESTALの値 (ch)	235	241	99.8	216	179	97.4	170
Down のペDESTALの値 (ch)	268	228	133	166	193	157	184

表 4.1 各 ID とペDESTALの値

4.4 HODS のゲインの相対的調整

それぞれのホドスコープに対して上下の PMT の電荷の相関を見た。ID1 について見たものが図 4.7 である。ホドスコープの中心にビームが当たるイベントを上下の PMT の TDC の信号の時間差が ± 0.1 ns にゲートをかけることで選んだ。このゲートによってそれぞれの HODS の発光量を各 PMT で等しくなるように調整した。ホドスコープの y 方向の中心にビームが当たっているかつビームが ^{79}Se であるイベントについて上下の PMT の発光量の相関をみたものが図 4.9 である。中心にヒットしたイベントでは発光量は上下で等しくなるはずなので、この場合 Q_u 、 Q_d は等しくなるべきである。このことからこれを x 軸、y 軸に射影して中心の値を出した。x 軸に射影したものが図 4.10、y 軸に射影したものが図 4.11 である。これらをガウシアンでフィットして中心の値をだした。図 4.7 が調整前、図 4.8 が調整後である。

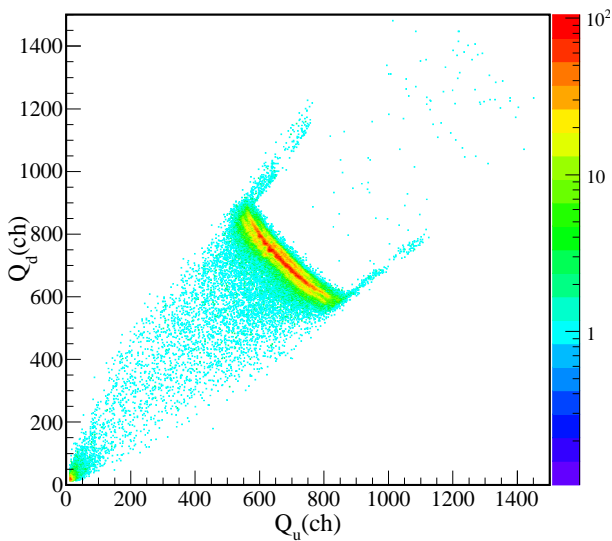


図 4.7 HOD の ID1 の上下の PMT の発光量の相関 (ゲイン調整を行う前)

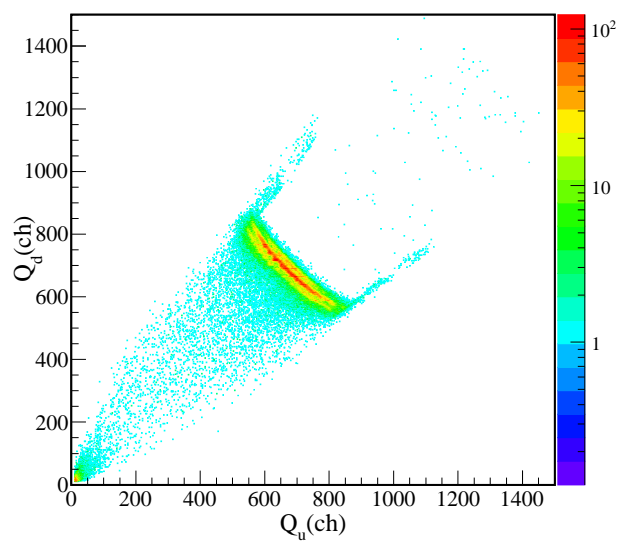


図 4.8 HOD の ID1 の上下の PMT の発光量の相関 (ゲイン調整を行った後)

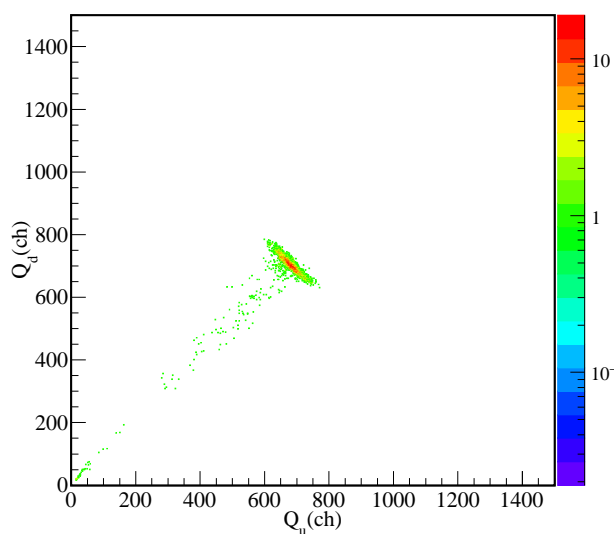


図 4.9 ^{79}Se ビームが中心にあたっている条件でゲート
をかけた時の上下の PMT の発光量の相関

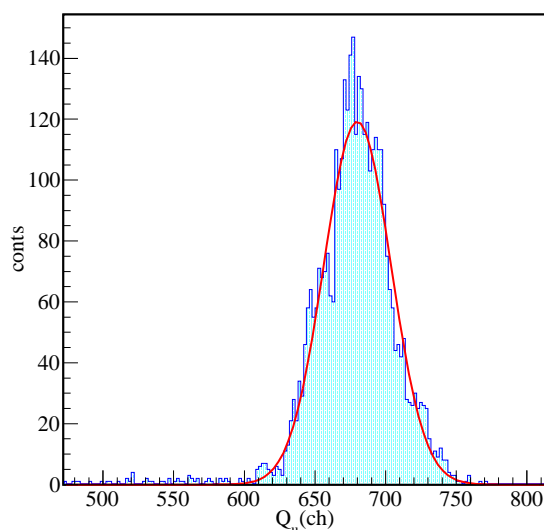


図 4.10 図 4.9 の x 軸方向への射影

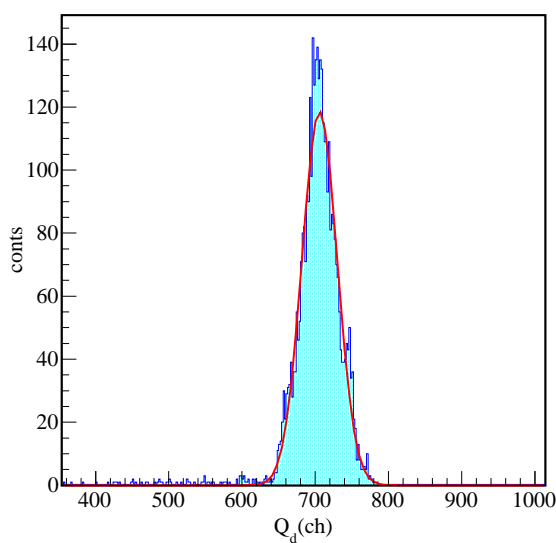


図 4.11 図 4.9 の y 軸方向への射影

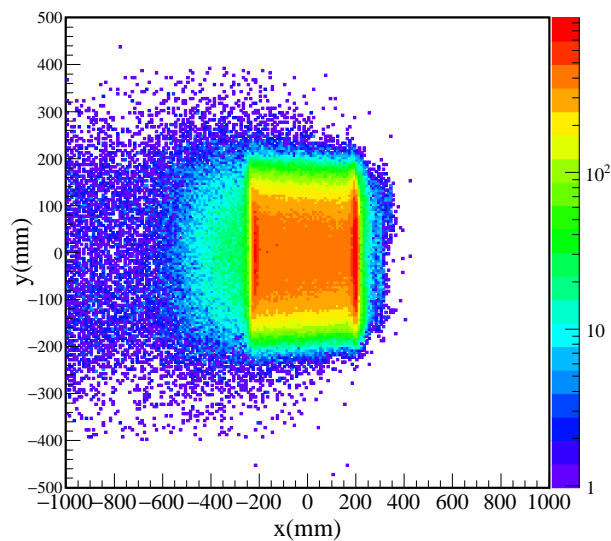
各ホドスコープごとに中心を求めた結果が次の表である。全ての ID について中心での発光量が ID1 の Q_u の値 680 ch になるよう Q_u, Q_d の値を表 4.2 の値で割り 680 をかけることでゲインの調整を行った。このゲイン調整によって上下の PMT の電荷 Q_u, Q_d の相乗平均 $Q_{av} = \sqrt{Q_u \times Q_d}$ は理想的にはビームの入射位置に依らず一定値になる。

ID	1	2	3	4	5	6	7
Q_u	680	759	846	738	797	857	837
Q_d	707	729	970	850	793	913	740

表 4.2 ビームが中心にあたったイベントのチャンネル

4.5 FDC2

FDC2 は粒子の飛跡を測定する検出器である。今回は FDC2 におけるビームの入射位置と角度を得ることで、ホドスコープでのビームの入射位置を外挿により求めることができる。得られた xy の位置の分布を図 4.12 に示す。また入

図 4.12 FDC2 の x, y の分布

射ビームの位置 x (mm) と入射角度 θ_x (mrad) の相関を図 4.13 に示し、位置 y (mm) と入射角度 θ_y (mm) の相関を図 4.14 に示す。ここで FDC2 の座標 x, y 軸を図 4.15 に示す。

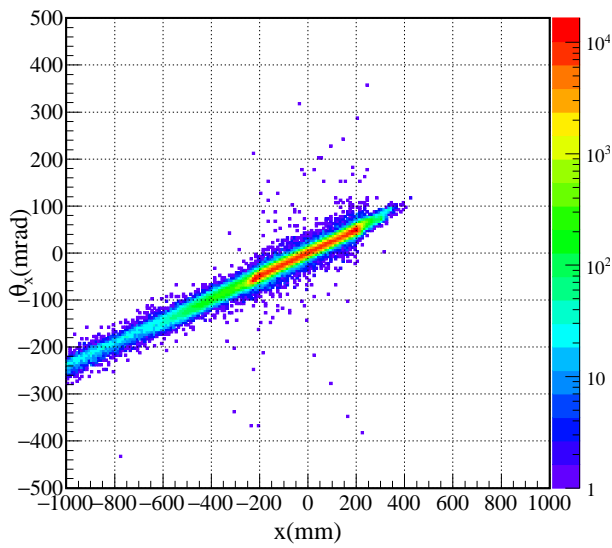


図 4.13 FDC2 における x 座標と入射角度

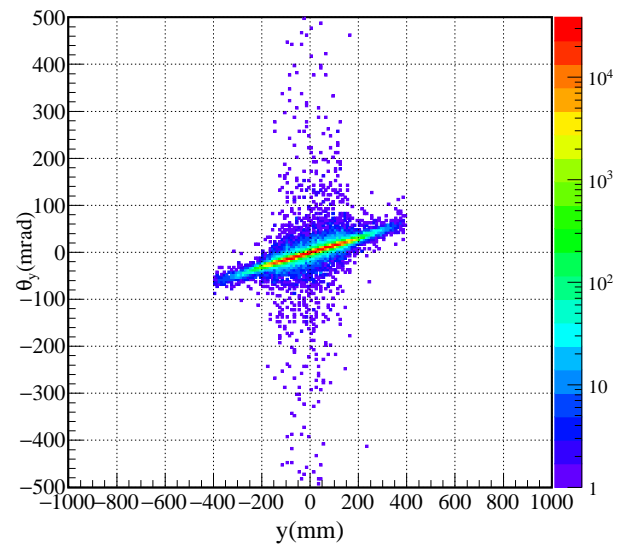


図 4.14 FDC2 における y 座標と入射角度

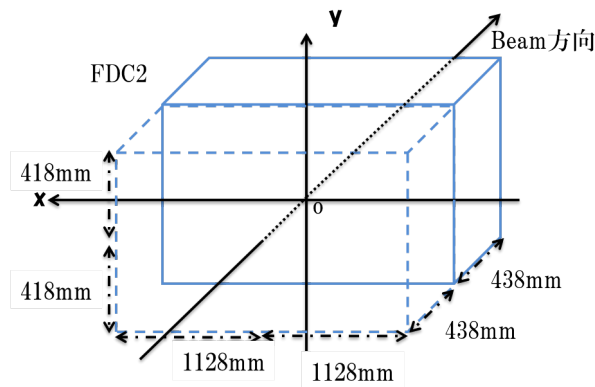


図 4.15 FDC2 の x,y 軸

FDC2 でのビームの入射位置 x, y とホドスコープにおけるビームの入射位置 x_{HOD} (mm), y_{HOD} (mm) には

$$x_{HOD} = x + 1713 \tan \theta_x \quad (4.5.1)$$

$$y_{HOD} = y + 1713 \tan \theta_y \quad (4.5.2)$$

の関係がある。この関係を用いてホドスコープの位置の導出を行った。

4.6 位置依存性

前章のプラスチックシンチレータの厚さの実測から、シンチレータの厚さは位置によってばらつきがあることが分かった。このばらつきがどれだけ影響しているかを本節で確認する。

4.6.1 y 依存性

ホドスコープに粒子が入射した粒子が落とすエネルギーはシンチレータの厚さで変わってくる。そのため厚さのばらつきによって生じる発光量のばらつきの補正を行う。図 4.16 に ID3 のホドスコープの上下の発光量の平均とホドスコープのビームのあたる位置 (y_{HOD}) の相関を示し、図 4.17 に ^{79}Se のビームでゲートをかいた時のホドスコープの上下の PMT の発光量の相乗平均とホドスコープのビームのあたる位置 (y 座標) の相関を示す。図 4.17 の青線はピーク的位置である。上流のビームの解析によって図 4.16 のピークは上からそれぞれ陽子数 $Z=35,34,33$ に対応していることが分かった。

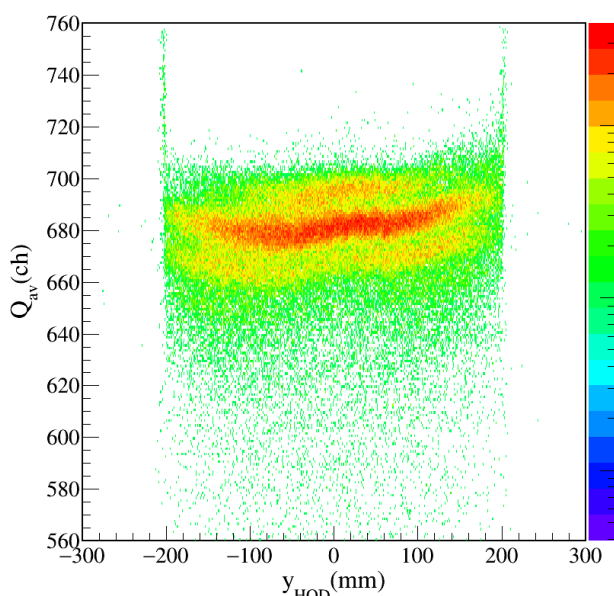


図 4.16 ホドスコープの ID3 の平均発光量とビームの位置の相関。

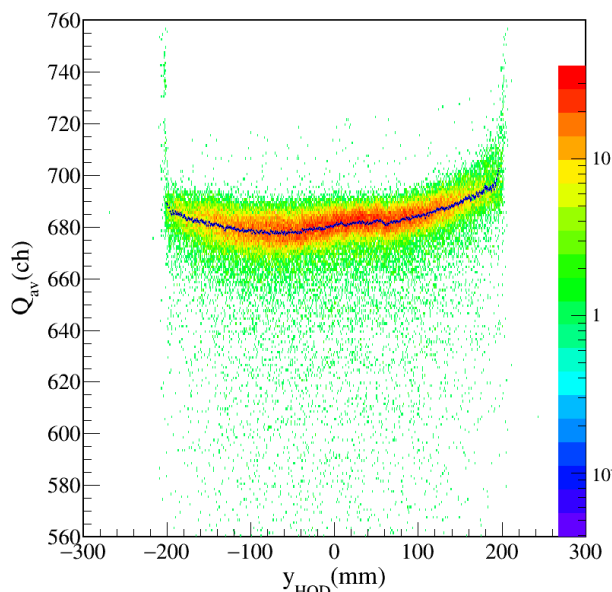


図 4.17 ^{79}Se のビームでゲートをかいた時のホドスコープの ID3 の平均発光量とビームの位置の相関。青線はピーク。

図 4.16、4.17 をみると発光量 Q_{av} に位置依存性があることが分かる。この依存性をなくすためにフィットした関数を Q_{av} から引くことでこの位置依存性の補正を行う。今回 4 次関数をフィット関数として用いた。ID1 から ID7 までのパラメータを次表に示す。 p_i は y_{HOD} の i 次の係数である。フィットした関数を差し引いて位置の依存性の補正を

	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7
p_0	679	681	679	677	681	680	683
p_1	940×10^{-5}	673×10^{-4}	301×10^{-4}	-216×10^4	205×10^4	206×10^{-4}	422×10^{-4}
p_2	997×10^{-7}	696×10^{-7}	110×10^{-6}	145×10^{-6}	-686×10^{-7}	278×10^{-7}	871×10^{-7}
p_3	733×10^{-10}	-309×10^{-9}	278×10^{-10}	989×10^{-9}	-120×10^{-9}	249×10^{-9}	-669×10^9
p_4	373×10^{-11}	775×10^{-11}	537×10^{-11}	495×10^{-11}	584×10^{-11}	695×10^{-11}	382×10^{-11}

表 4.3 フィットパラメータ

行ったものを図 4.18 に示す。補正を行っていないものを行ったものをそれぞれ y 軸に射影したものをそれぞれ図 4.19、図 4.20 に示す。

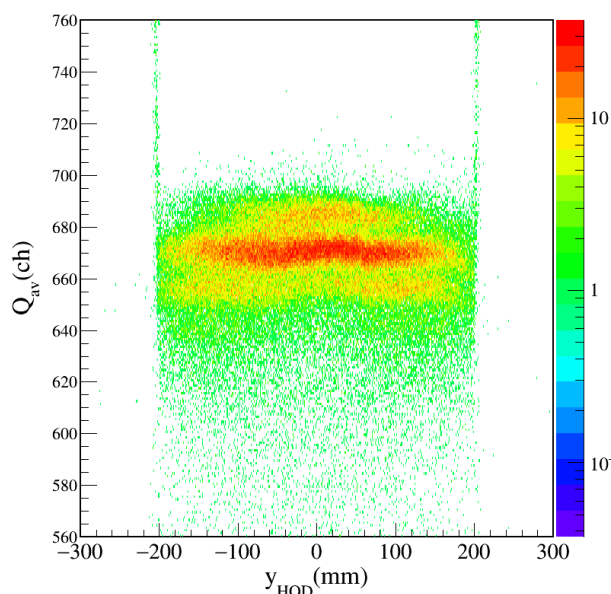


図 4.18 ID3 のホドスコープについて補正後の発光量と位置の相関。

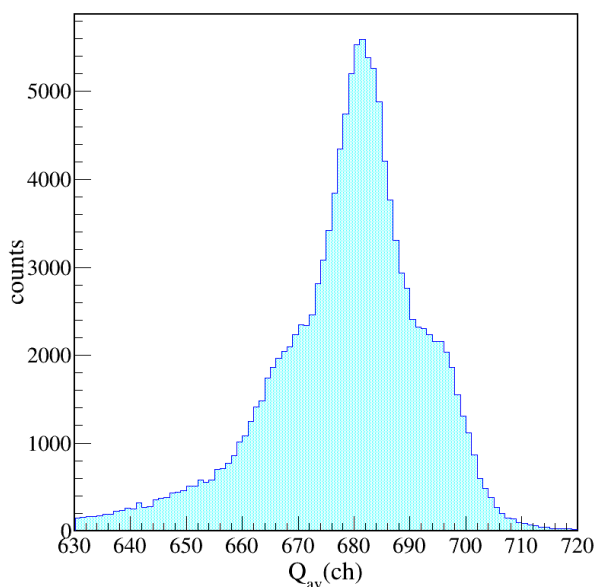


図 4.19 図 4.16 を y 軸に射影したヒストグラム

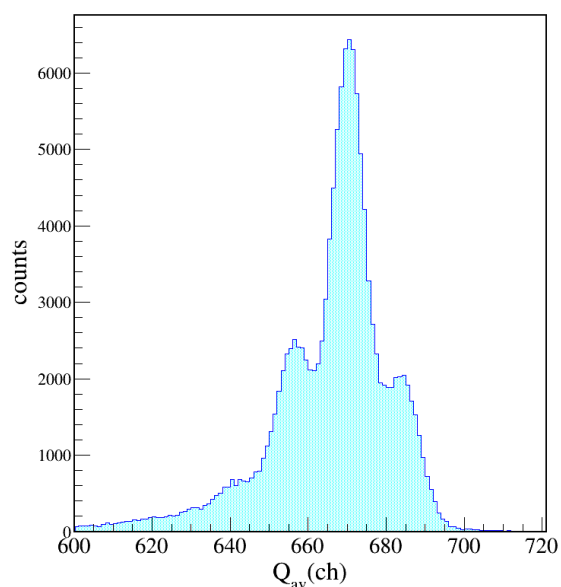


図 4.20 図 4.18 を軸に射影したヒストグラム。

y 依存性の補正によって 3 つのピークの分離が良くなっていることが分かる。この 3 つのピークをガウシアンでフィットしてピークの位置と標準偏差 σ を導出した。各 ID についてフィットを行った結果とピークの中心値がどれだけ分離できているかを評価するためにピーク間の距離を σ^2 で割ったものを表 4.4 に示す。ID7 については y 依存性の補正を行ってもピークの分離ができなかったため表 4.4 には示していない。

	σ^1 ($Z=33$)	σ^2 ($Z=34$)	σ^3 ($Z=35$)	1と2のピーク位置の差 σ_2	2と3のピーク位置の差 σ_2
ID1	4.76	4.16	4.11	3.01	3.26
ID2	4.7	3.7	3.863	2.86	3.53
ID3	5.25	4.11	4.82	2.68	3.27
ID4	6.07	4.71	5.53	2.27	2.77
ID5	5.94	4.58	4.53	2.54	3.14
ID6	5.76	4.02	4.42	2.52	3.43
ID7					

表 4.4 y 補正後のピークを中心値と標準偏差。ただし ID7 についてはフィットすることができなかったため示していない。

4.6.2 x 依存性

前節では y 方向の依存性を見たが、本節では x 方向の位置依存性を見て、補正を行う。

x 依存性についても同様に 4 次関数でフィットしてそれを差し引くことで補正を行った。ID3 について補正を行った図を図 4.21、図 4.22 に示す。

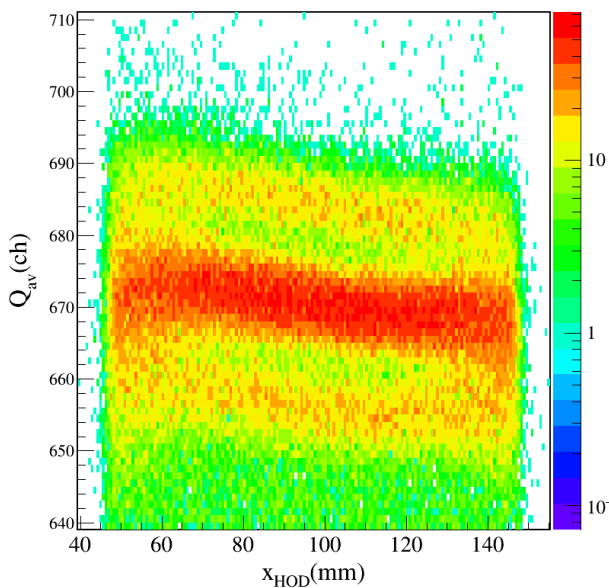


図 4.21 ID3 について Q_{av} の y 依存性のみ補正し x 依存性を補正前の Q_{av} と位置 x_{HOD} の相関

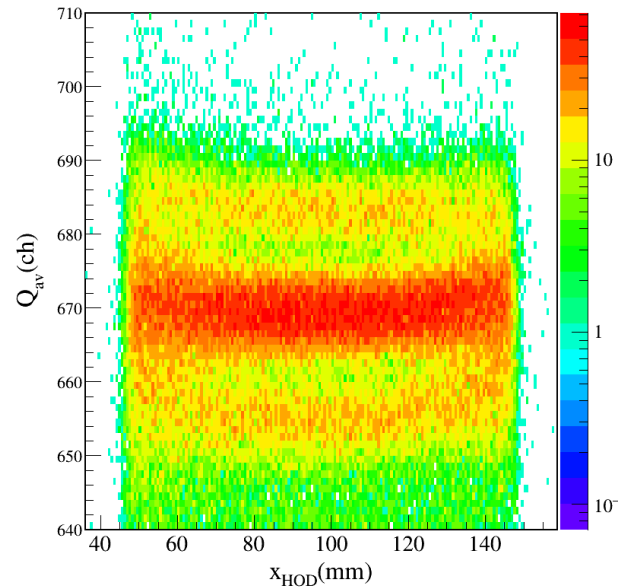


図 4.22 ID3 について Q_{av} の x,y 依存性を補正後 Q_{av} と位置 x_{HOD} の相関

x と y の補正をどちらも行った図 4.22 を軸に射影したヒストグラムを図 4.23 に示す。この x,y 依存性を補正した結果も y 依存性の補正と同様に表 4.5 に示す。

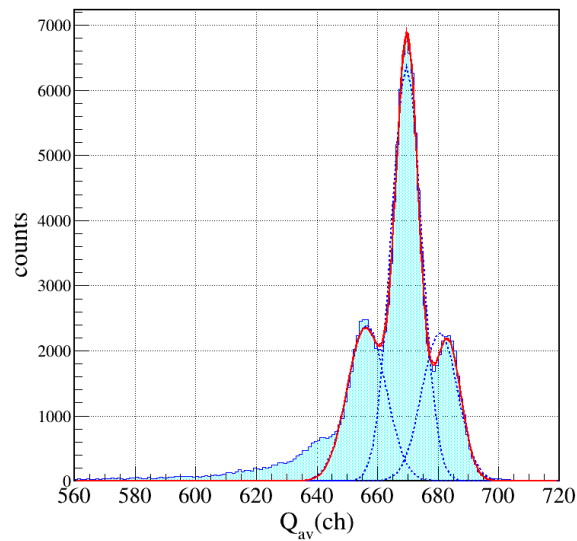


図 4.23 図 4.22 を軸に射影したヒストグラム。ピークを左からピーク 1,2,3 とする。

	σ_1 ($Z=33$)	σ_2 ($Z=34$)	σ_3 ($Z=35$)	1 と 2 のピークの位置の差 $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	2 と 3 のピーク位置の差 $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$
ID1	4.07	3.42	3.41	3.93	3.78
ID2	4.39	3.7	3.94	3.71	3.57
ID3	5.03	3.94	4.27	3.57	3.43
ID4	5.05	3.85	4.22	3.78	3.62
ID5	5.67	3.93	4.24	3.65	3.52
ID6	5.53	3.83	4.42	3.70	3.55
ID7	8.42	3.92	7.53	2.96	3.03

表 4.5 x と y 依存性補正後のピークの広がり

表 4.4 と表 4.5 をみると y のみ補正した場合よりも x,y どちらも補正した場合の方が分離がよくできていることが分かる。3 σ から 4 σ の分離ができていることが分かる。

図 4.24 にすべての ID について HOD の発光量と位置依存性を見たものを示す。

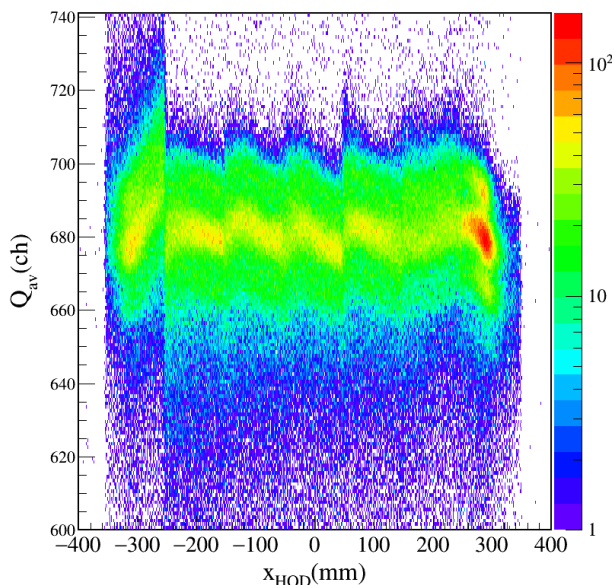


図 4.24 全ての ID の x 依存性を見た結果

これを実際に厚さを測定したものと比較を行う。ビームが当たっている位置は y 座標の中心に多く当たっている。このため中心付近における厚さの効果が大きい。ID2, ID7 について厚さを見たものが表 4.6 である。ID7 についてみると図 4.24 では x 正側で発光量が大きくなっている事が分かる。また表 4.6 から x 正側で厚くなっておりエネルギー損失がより大きいためこのような相関が得られたと考えられる。しかし ID2 についてみると x 正側で発光量が大きくなっていることが分かるが、厚さは x 正側で薄くなっている。このことから厚さによる依存性はあるがどう依存しているかを簡単には示すことはできない。

		$y=-50\text{mm}$	$y=0\text{mm}$	$y=+50\text{mm}$
ID2	x 正側	4.99	4.98	5
	x 負側	5.03	5.04	5.04
ID7	x 正側	4.93	4.96	4.96
	x 負側	5.01	5.01	5.01

表 4.6 ID2 と ID7 の厚さ

4.7 Q の分解能

Q の分解能について評価を行う。そのために時間の範囲が狭い領域を選ぶことで時間広がりの影響を小さくする。ここで図 4.25 に xy 依存性を補正したときの Q_{av} と T_{av} の相関を示す。ここで T_{av} は SBT の時間情報との差をとったもので、

$$T_{av} = T_{hod} - T_{sbt} + offset \quad (4.7.1)$$

と書くことができる。offset はケーブルの長さの違いなどによって生じる定数である。 T_{sbt}, T_{hod} はそれぞれ

$$T_{sbt} = \frac{T_{sbt1} + T_{sbt2}}{2} = \frac{T_{sbt1L} + T_{sbt1R} + T_{sbt2L} + T_{sbt2R}}{4} \quad (4.7.2)$$

$$T_{hod} = \frac{T_{up} + T_{down}}{2} \quad (4.7.3)$$

と書くことができ SBT1, SBT2 の時間信号の平均、ホドスコープの時間信号の平均を表している。この T_{av} は SBT-HODS 間の TOF に相当している。

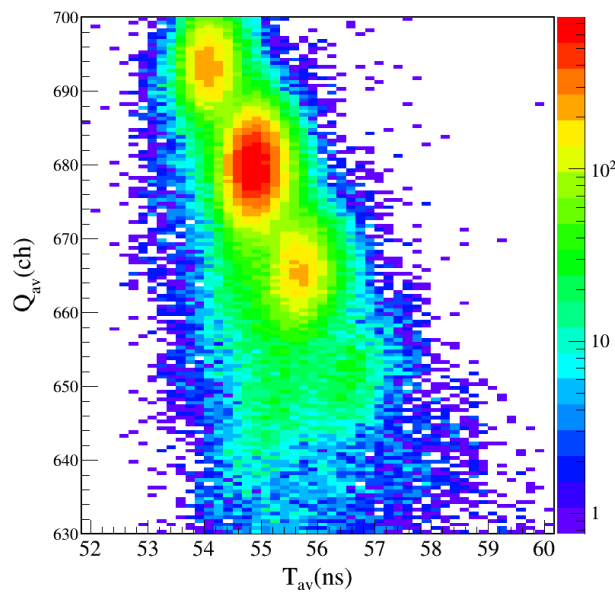


図 4.25 補正を行った後の T_{av} と Q_{av} の相関

粒子を ^{79}Se を選び、T の幅は 0.3 ns の幅で選ぶことで時間の広がり効果を少なくした領域を y 軸方向に射影しガウシアンでフィットすることでピークの位置と標準偏差を導出した。射影する領域を表 4.7 に示す。このピークをガウシアンでフィットしてピーク位置と広がりを見る。その結果を表 4.8 に示す。補正をすることで目標としていた $\sigma/\text{mean} < 1$ を達成することができた。

	領域
ID1	(59.4,59.7)
ID2	(55.4,55.7)
ID3	(54.9,55.2)
ID4	(54.9,55.2)
ID5	(55.1,55.4)
ID6	(55.4,55.7)
ID7	(59.1,59.4)

表 4.7 射影する領域

	Mman	σ (位置補正なし)	σ (x,y 補正後)	σ/mean (補正なし)	σ/mean (x,y 補正後)
ID1	668.4	5.07	3.74	0.00759	0.00560
ID2	681.2	10.2	4.15	0.0150	0.00609
ID3	669.9	6.35	4.52	0.00948	0.00674
ID4	668.1	8.25	5.13	0.0123	0.00768
ID5	704.4	5.71	6.08	0.00812	0.00863
ID6	671	8.00	5.97	0.0119	0.00890
ID7	673.7	11.6	10.3	0.0172	0.0152

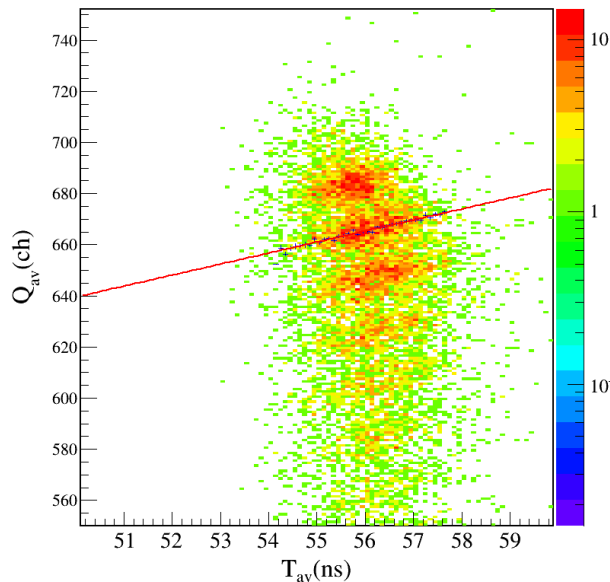
表 4.8 補正前後の分解能

4.8 Z の分離

ID6 について Z の分離をみる。炭素標的を用いた run を解析することで補正の為のパラメータを導出した。図 4.26 に ID6 の Q_{av} と T_{av} の相関を示す。ベータプロットの式から得られる関係

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z}{\beta^2} \quad (4.8.1)$$

からエネルギー損失 ΔE は Z/β^2 に比例するので、ある Z の粒子に注目すると速度が遅いほど発光量が大きくなっている。この速度依存性を補正することにより Z の識別が可能となる。この相関を補正するために赤線で線形フィットした。

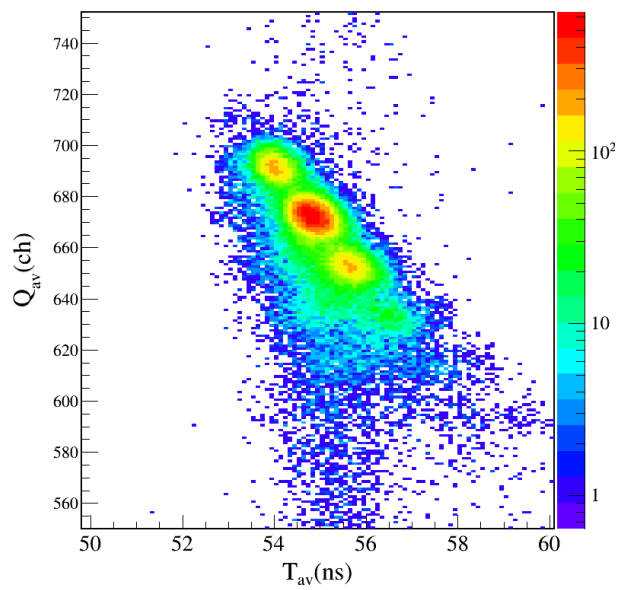
図 4.26 ID6 のホドスコープの T_{av} と Q_{av} の相関。

この 1 次関数の傾きを差し引くことで Q の速度依存性をなくして陽子数 Z の分離を行った。補正のパラメータは ID1 から ID4 では ID5 から求めたものを用い、ID7 は ID6 で求めたものを用いた。それを表 4.9 に示す。

	p_1
ID1-ID5	6.065
ID6-ID7	3.985

表 4.9 フィットパラメータ

次にこの補正を行って標的のない run で Z の分離をみる。この補正を行った後に標的の無い run の解析で得られた ID3 の Q_{av} と T_{av} の相関を図 4.27 に示す。図 4.27 を y 軸方向に射影しガウシアンでフィットすることでピークの位置をだしたものを図 4.28 に示す。

図 4.27 ID3 について補正後の Q_{av} と T_{av} の相関。

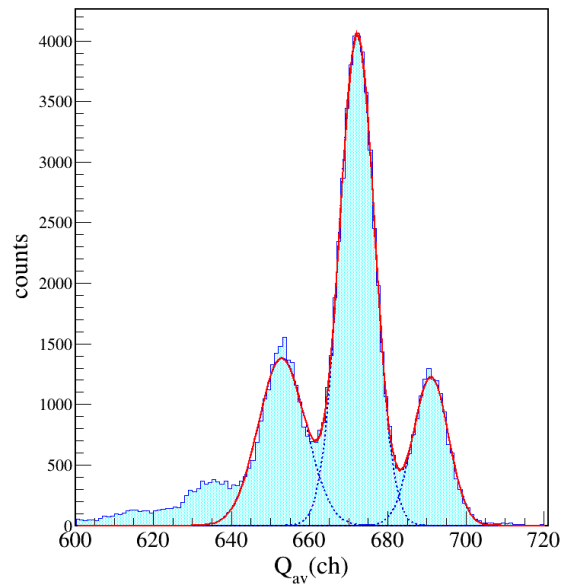


図 4.28 図 4.27 の y 軸への射影

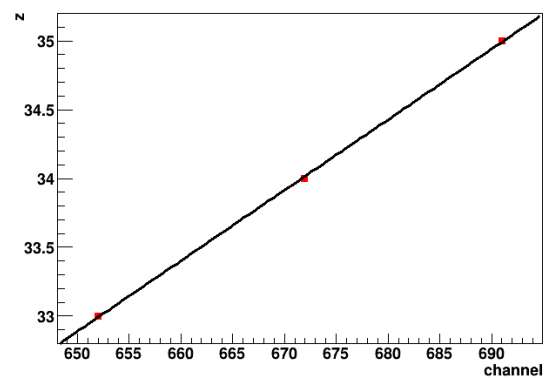


図 4.29 ID3 についての Z と Q_{av} の channel 値の対応

図 4.28 のピークは左から $Z = 33, 34, 35$ であるからこれを用いてキャリブレーションを行う。ID3 についてキャリブレーションを行った結果を図 4.29 に示す。キャリブレーション結果を用いて粒子の陽子数 Z の分離がどれだけできているかをみる。図 4.30 に陽子数 Z のヒストグラムを示す。このヒストグラムを 3 つのガウシアンフィットによって分解能を求めた。結果を表 4.10 に示す。

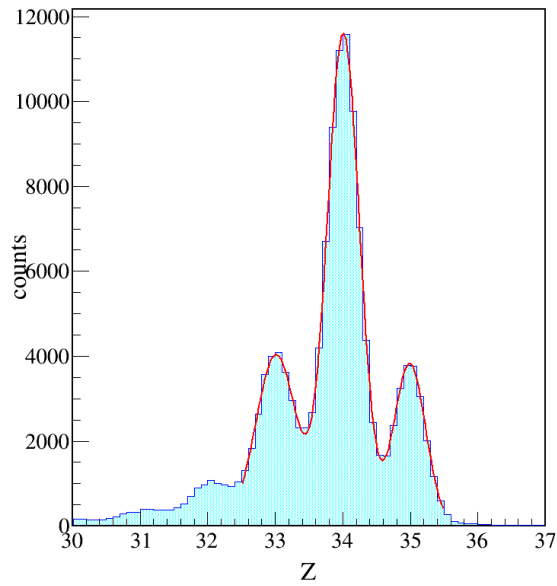


図 4.30 陽子数 Z のヒストグラム。ガウシアンでフィットした。

	$\sigma(Z = 33)$	$\sigma(Z = 34)$	$\sigma(Z = 35)$
ID1	0.249	0.231	0.218
ID2	0.268	0.258	0.257
ID3	0.298	0.241	0.235
ID4	0.283	0.247	0.237
ID5	0.435	0.31	0.282
ID6	0.319	0.264	0.265
ID7	0.380	0.298	0.380

表 4.10 標準偏差

この結果から 4σ から 3σ の分離ができている事が分かる。

4.9 時間分解能

時間分解能を評価する。ビームの運動量の広がりを減らすため F3F13 間の TOF を用い 2ns の幅でゲートをかけ、かつ ^{79}Se にゲートをかけた時の ID3 の Q_{av} と T_{av} の相関を図 4.31 に示す。また図 4.32 を y 軸方向に射影しガウシアンでフィットしたヒストグラムを図 4.33 に示す。

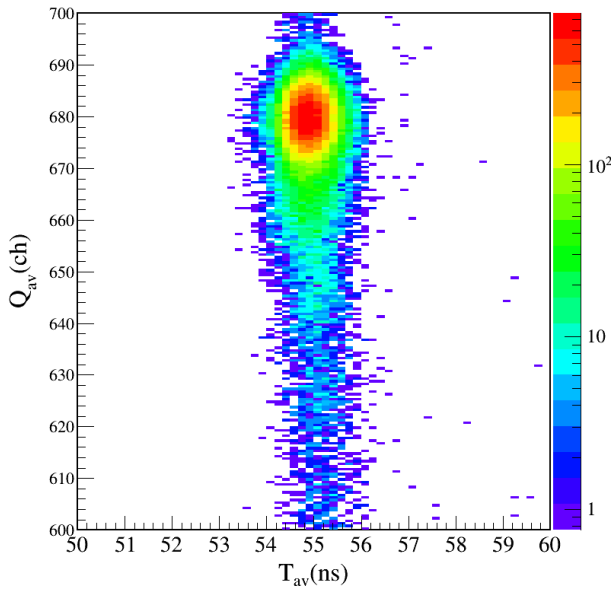


図 4.31 ID3 について ^{79}Se ビームにゲートをかけたときの Q_{av} と T_{av} の相関。

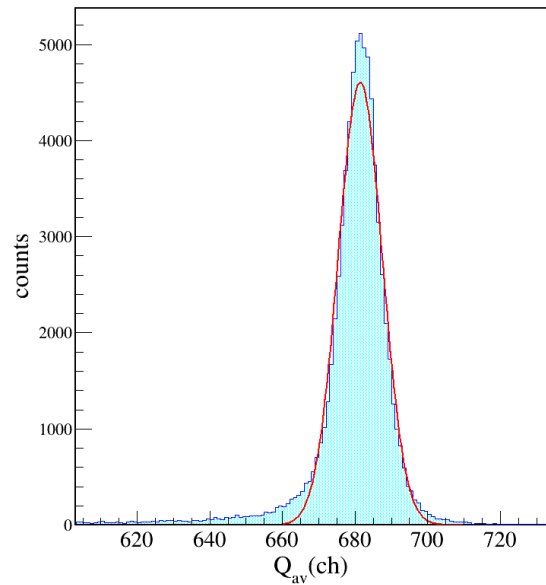


図 4.32 図 4.31 を y 方向に射影したヒストグラム

図 4.32 からピークの位置を求め、図 4.31 で求めたピーク位置 ± 5 ch を x 軸方向に射影したヒストグラムを図 4.33 に示す。各 ID で Q_{av} のピーク位置を表 4.11 に示す。

ID	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7
ピークの channel	680	683	681	680	680	681	685

表 4.11 ID とピークの位置

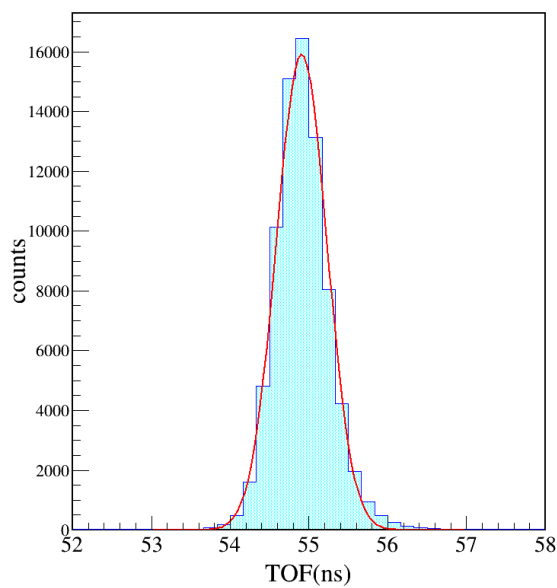


図 4.33 図 4.31 を表 4.11 の値 $\pm 5(\text{ch})$ の範囲を x 軸方向に射影したヒストグラム。

Q の広がりが狭い範囲を射影することで時間分解能の評価を行う。表に各 ID のピーク位置とその標準偏差 σ を示す。

ID	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7
標準偏差 σ (ns)	0.342	0.422	0.295	0.425	0.316	0.470	0.306

表 4.12 それぞれの ID のピークの標準偏差

第 5 章

まとめと今後の展望

不安定核分解反応実験で使用する荷電フラグメント検出器ホドスコープを製作した。

シンチレータの厚さの非一様性を $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内に納めることができた。

^{79}Se ビームを用いて性能評価を行った。発光量の分解能が良いものは 1.12% を達成し、TOF の分解能は $\sigma = 0.306 \text{ ns}$ を達成した。

また、発光量の速度依存性を補正することにより Z の識別を行い、 Z の分解能は 1.2% を達成した。

シンチレータの厚さのばらつきが $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内という目標は達成されたが、これでは発光量に位置依存性があることが分かったのでより良い均一性を持ったシンチレータを制作する事が今後課題である。

参考文献

- [1] T. Kobayashi et al., Nucl. Instr. Meth. B 317, 294-304 (2013)
- [2] 生越駿, 修士論文, 東京工業大学 (2013)
- [3] 小林信之, 卒業論文, 東京工業大学 (2007)
- [4] 浜松ホトニクスホームページ <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html>
- [5] <http://www.eljentechnology.com/index.php/component/content/article/31-general/48-ej-200>

謝辞

本研究を進めるにあたり多くの方々からご指導、助言をいただきました。中村隆司教授には研究の進め方や物理の知識、プレゼンテーションの仕方など多くのことを教えていただきました。

産学官連携研究員の武内聡氏にはホドスコープ開発段階から解析に至るまでさまざまなことを教えていただきました。また助教の近藤洋介氏には解析を行う上で疑問にいつでも答えてくださいました。特任助教の梅野泰宏氏には解析のアドバイスをくださいました。理研仁科センターの千賀信幸氏にはホドスコープの制作を一から教えて下さいました。四方瑞紀氏、坪田潤一氏、尾崎友志氏、齊藤敦美氏の先輩方には研究の質問や研究室の生活の質問などにも答えていただきました。また同期の斗米貴人氏にはホドスコープの開発を一緒に行いました。本研究にご協力頂いた方々にこころより感謝いたします。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。