

平成 25 年度

卒業論文

## ダブルベータ崩壊の探索

神戸大学 理学部物理学科

打桐 烈

海老 憂哉

中井 巧也

橋本 隆

藤田 黎

山内 悟

# 目次

<b>第1章</b>	<b>ダブルベータ崩壊観測の理論的背景</b>	<b>1</b>
	(担当:打桐烈)	
1.1	ダブルベータ崩壊 . . . . .	1
1.1.1	ベータ崩壊 . . . . .	1
1.1.2	ダブルベータ崩壊 . . . . .	1
1.2	マヨラナニュートリノ . . . . .	2
1.2.1	マヨラナ粒子とシーソー機構 . . . . .	2
1.3	$\beta\beta$ 崩壊の観測 . . . . .	3
1.3.1	$0\nu\beta\beta$ の観測と問題点について . . . . .	3
1.3.2	実験で使用する原子核及びイベントレート . . . . .	4
1.4	バックグラウンドの考察 . . . . .	5
1.4.1	主要なバックグラウンド . . . . .	5
1.4.2	モリブデンの放射性同位体 . . . . .	6
1.4.3	放射性不純物や環境放射線 . . . . .	6
1.5	第1章まとめ . . . . .	6
<b>第2章</b>	<b>実験の概略・装置説明 (担当:海老憂哉)</b>	<b>7</b>
2.1	ダブルベータ崩壊実験の概要 . . . . .	7
2.1.1	装置への要請 . . . . .	8
2.2	線源の配置に関する提案 . . . . .	8
2.2.1	エネルギー損失 . . . . .	8
2.2.2	線源の配置法 . . . . .	9
2.3	高温時電源遮断装置の製作 . . . . .	11
2.3.1	システム構成 . . . . .	11
2.4	実験の概略・装置説明のまとめ . . . . .	15
<b>第3章</b>	<b>磁石の磁場計算・磁場測定</b>	<b>16</b>
3.1	磁場計算 (担当:中井 巧也) . . . . .	16
3.1.1	計算方法 . . . . .	16
3.1.2	計算結果および測定値(タカノ技研)との比較 . . . . .	20
3.1.3	磁場の一様性 . . . . .	28
3.2	磁場測定 (担当:山内 悟) . . . . .	30
3.2.1	測定器および固定器具 . . . . .	30
3.2.2	測定方法 . . . . .	33
3.2.3	測定結果および計算値との比較 . . . . .	34
3.3	磁場計算・磁場測定のまとめ . . . . .	42

<b>第 4 章</b>	<b>検出器の性能評価 (担当: 藤田)</b>	<b>43</b>
4.1	検出器概要	43
4.1.1	$\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)[16]	43
4.1.2	GEM(Gas Electron Multiplier)[17]	44
4.1.3	$\mu$ -TPC(Micro Time Projection Chamber)	44
4.1.4	読み出し回路	45
4.2	エネルギースペクトル測定	46
4.2.1	セットアップ	46
4.2.2	エネルギースペクトル測定の方法	46
4.2.3	エネルギースペクトル測定の測定結果	47
4.3	ゲインカーブの測定	48
4.3.1	ガス利得の計算方法	48
4.3.2	ガス利得の測定結果	48
4.3.3	ガス利得測定のみとめ	49
4.4	電子の多重散乱角の測定	50
4.4.1	飛跡の検出について	50
4.4.2	散乱角の大きさ	50
4.4.3	多重散乱角の測定方法	51
4.4.4	考察	54
4.4.5	多重散乱角測定のみとめ	56
<b>第 5 章</b>	<b>電子の運動エネルギー測定法の検討</b>	
	<b>(担当: 橋本 隆)</b>	<b>57</b>
5.1	運動エネルギー測定原理	57
5.1.1	運動エネルギー測定のみと	57
5.1.2	シミュレーション	57
5.1.3	電子の飛跡	57
5.1.4	曲率半径の導出	58
5.1.5	電子の運動エネルギー	59
5.1.6	誤差	59
5.2	運動エネルギー導出法	60
5.2.1	$\delta$ 測定点の選択	60
5.2.2	電子の運動方向依存	61
5.2.3	ガス圧力依存	63
5.3	まとめ	64

# 第1章 ダブルベータ崩壊観測の理論的背景

(担当:打桐烈)

## 1.1 ダブルベータ崩壊

### 1.1.1 ベータ崩壊

ベータ崩壊は原子核内の中性子が弱い相互作用により、電子と反ニュートリノを放出してより安定な原子核に遷移する過程のことである。ベータ崩壊の式は以下ようになる。

$$(Z, A) = (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

ここで  $Z$  は原子番号、 $A$  は質量数である。また実際には次のような反応が原子核内で起こる。

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

### 1.1.2 ダブルベータ崩壊

ダブルベータ崩壊は原子核内の2つの中性子が同時にベータ崩壊する現象である。 $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc}$ のように、シングルベータ崩壊後の原子核の方がエネルギー準位が高い場合ベータ崩壊を起こす事はできないが、 $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ のようにダブルベータ崩壊後の原子核のエネルギー準位が低ければ、この過程は可能である。

また、ダブルベータ崩壊には2つのモードがある。1つは原子核内で通常のベータ崩壊が2度同時におこる過程で、2つの電子と2つの反電子ニュートリノがそれぞれ生じる。この場合レプトン数の保存も満たしており、標準理論の枠組みである。これが  $2\nu\beta\beta$  と呼ばれるモードで、様々な原子核で観測されている。この崩壊過程は質量数  $A$ 、陽子数  $Z$  とすると以下ようになる。

$$(Z, A) = (Z + 2, A) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

もう1つは2つの電子のみを生じる過程で、 $0\nu\beta\beta$  と呼ばれるモードである。この崩壊過程は、以下のように表される。

$$(Z, A) = (Z + 2, A) + 2e^-$$

この過程ではレプトン数が保存しておらず、この過程が可能になるための条件として、

- ニュートリノの質量が0でない
- ニュートリノがマヨラナ粒子である

ことが挙げられる。 $2\nu\beta\beta$  は現在、10種類の原子核で確認されている。 $0\nu\beta\beta$  は現在のところ未発見である。

原子核	Q 値 [MeV]	$2\nu\beta\beta$ の寿命 (測定値)[ $\times 10^{21}$ 年]	$0\nu\beta\beta$ の寿命 (下限値)[ $\times 10^{21}$ 年]	天然存在比 [%]	$0\nu\beta\beta$ を探索中 の実験
$^{48}\text{Ca}$	4.271[3]	0.043[3]	> 13[3]	0.187[7]	CANDLES ELEGANT VI
$^{76}\text{Ge}$	2.039[4]	2.5[4]	> 27000[4]	7.8[7]	Heidelberg-Moscow IGEX GERDA
$^{82}\text{Se}$	2.995[5]	0.096[5]	> 360[5]	9.2[7]	NEMO3
$^{96}\text{Zr}$	3.348[7]	0.03[1]	> 9.2[2]	2.8[7]	NEMO3
$^{100}\text{Mo}$	3.034[5]	0.57[5]	> 1100[5]	9.7[7]	NEMO3
$^{116}\text{Cd}$	2.80[7]	0.04[1]	> 100[1]	7.5[7]	COBRA NEMO3
$^{128}\text{Te}$	0.867[7]	3600[1]	> 11000[2]	31[7]	無し
$^{130}\text{Te}$	2.53[7]	1.3[1]	> 200[2]	34[7]	COBRA Cuoricino
$^{150}\text{Nd}$	3.37[7]	0.2[1]	> 1.6[2]	5.6[7]	NEMO3
$^{238}\text{U}$	1.14[7]	2.9[1]	不明	99.3[7]	無し
$^{136}\text{Xe}$	2.476[6]	> 10(未発見)[6]	> 5700[6]	8.9[7]	KamLAND-Zen EXO-200

表 1.1:  $\beta\beta$  崩壊する原子核の例とその Q 値及び寿命等の一覧

## 1.2 マヨラナニュートリノ

### 1.2.1 マヨラナ粒子とシーソー機構

ニュートリノ振動が発見されたことにより、ニュートリノに質量が存在することが確認された。ニュートリノ振動とは、3種類の質量固有状態と、フレーバーの固有状態が混合して振動する現象である。しかしながら、ニュートリノの質量は他のレプトンに比べて異常に軽い。標準模型の枠組みではニュートリノの質量の有無は問題にならないが、他のレプトンに比べ軽すぎるニュートリノを同じ理論で記述するには無理があると考えられる。

重いマヨラナニュートリノを導入したシーソー模型が有効な解決策となる。マヨラナ粒子とは、粒子=反粒子な粒子であり、マヨラナ粒子は自ら質量を持つことができる。他のレプトン質量と同等の標準模型ウィークボゾンと結合する Left-handed ニュートリノと質量の大きな Right-handed マヨラナニュートリノが存在し混合していると考えられる模型である。また、レプトン数の保存は標準模型のニュートリノに対する要請であり、標準模型の枠組みの外にあるマヨラナニュートリノ

には適用されない。

標準模型のニュートリノとマヨラナニュートリノの混合のラグランジアンは以下のように表される。

$$-\mathcal{L}_\gamma = [\bar{N}_1, \bar{N}_2](i\gamma^\mu\partial_\mu + \mathbf{M}) \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix}$$

ここで  $\mathbf{M}$  は

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & m_D \\ m_D & m_M \end{bmatrix}$$

の質量行列、 $N_1, N_2$  は

$$N_1 = \frac{\psi_L + (\psi_L)^c}{\sqrt{2}}, N_2 = \frac{\psi_R + (\psi_R)^c}{\sqrt{2}}$$

である。ただし  $\psi_{L,R}$  はそれぞれ、Left-handed Right-handed カイラリティをもつ任意のスピンル場である。

ここで  $m_D$  はディラック質量と呼ばれ、電弱スケール (100GeV 程度) と仮定する。

また、 $m_M$  はマヨラナ質量と呼ばれ、GUT スケール ( $10^{16}$ GeV 以上) と仮定する。

$\mathbf{M}$  の固有値を計算すると、

$$m_D \ll m_M$$

の近似から、

$$|\lambda_+| \approx m_M$$

$$|\lambda_-| \approx m_D^2/m_M$$

が得られる。現在、ニュートリノ振動で観測された質量の 2 乗の差から自然に導かれるニュートリノ質量の上限値は  $|\lambda_-|$  の項と考えられ、実際  $m_D^2/m_M \approx \text{meV}$  となり、よく一致する。

この理論は重いマヨラナ質量のためにニュートリノ質量が軽くなっていることから、シーソー機構と呼ばれている。もし  $0\nu\beta\beta$  の反応を確認することができれば、ニュートリノがマヨラナ粒子であることの証拠となり、ニュートリノ質量が他のレプトンに比べ異常に軽いという問題を解決することができる。

## 1.3 $\beta\beta$ 崩壊の観測

### 1.3.1 $0\nu\beta\beta$ の観測と問題点について

前節までで見てきたようなマヨラナニュートリノがもし存在するのであれば、以下のような  $0\nu\beta\beta$  のダイアグラムを書くことができる。

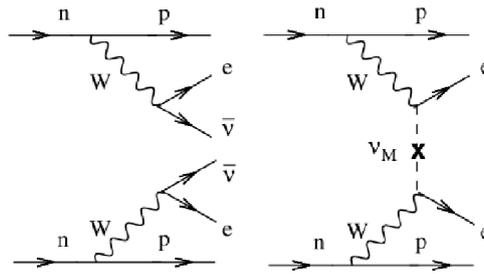


図 1.1:  $\beta\beta$  崩壊の feynman diagram 左: $2\nu\beta\beta$  右: $0\nu\beta\beta$

また、 $2\nu\beta\beta$  の場合は検出の困難なニュートリノが運動エネルギーを持ち去るため、放出される電子の運動エネルギーの総和を測ると連続スペクトルになる。 $0\nu\beta\beta$  の場合には電子が運動エネルギーのすべてを持つのでスペクトルにはピークが立ち、それぞれを見分けることができる。

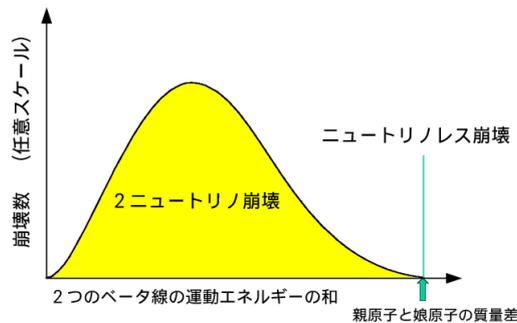


図 1.2: 予想される  $2\nu\beta\beta$  と  $0\nu\beta\beta$  のエネルギースペクトル (出典:[8])

実際の検出においては  $0\nu\beta\beta$  のレートは非常に少ない上、現在のところ未発見である。表 1.1 参照。

$0\nu\beta\beta$  のピークを見分けるためには数%以下のエネルギー分解能が必要となり、実現困難であるため本研究では後学のため  $2\nu\beta\beta$  の観測を目的とする。

### 1.3.2 実験で使用する原子核及びイベントレート

本実験ではモリブデンを用いる。モリブデンのうち  $\beta\beta$  崩壊する同位体は  $^{100}\text{Mo}$  であり、原子番号  $Z = 42$  質量数  $A = 100$  である。 $^{100}\text{Mo}$  は  $^{100}\text{Ru}$  に崩壊する。このとき、始状態と終状態でのエネルギー差 (Q 値) は  $3.03\text{MeV}$  となる。このため、 $\beta\beta$  崩壊で放出される電子は合計で  $\leq 3.03\text{MeV}$  のエネルギーをもつ。

$^{100}\text{Mo}$  の平均寿命は  $2\nu\beta\beta$  で  $0.57 \times 10^{21}$  年 (測定値) である。また、天然存在比は  $9.67\%$  で、原子量は  $99.91\text{g/mol}$  である。モリブデンの平均密度は  $10.28\text{g/cm}^3$  であるので、天然モリブデン単位体積あたりの  $^{100}\text{Mo}$  数は

$$10.28\text{g/cm}^3 \times 1\text{cm}^3 \times 0.0967 \div 99.91\text{g/mol} \times 6.02 \times 10^{23}\text{個/mol} = 5.99 \times 10^{21}\text{個/cm}^3$$

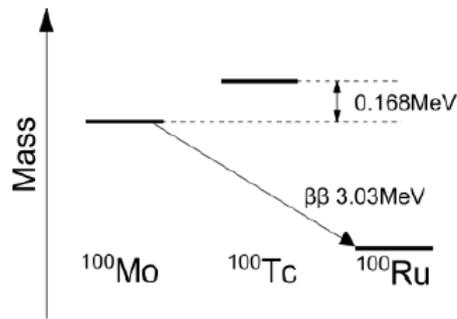


図 1.3:  $^{100}\text{Mo}$  の  $\beta\beta$  崩壊における崩壊様式 [7]

となる。時間  $dt$  で崩壊する原子核数の平均は

$$dN = -\lambda N dt$$

( $\lambda$ : 崩壊定数,  $N$ : 原子核数)

であり、 $t$  秒後の原子核数は

$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$$

このとき、 $2\nu\beta\beta$  の崩壊率は 1 ヶ月あたりで

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{5.99 \times 10^{21}}{0.57 \times 10^{21}} \times \frac{1}{12} \simeq 0.88 \text{ 回/月}$$

である。第 2 章で具体的な話をする。なお、 $^{100}\text{Mo}$  の  $0\nu\beta\beta$  の場合には寿命は  $1.1 \times 10^{24}$  年 (下限値) であり、

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{5.99 \times 10^{21}}{1.1 \times 10^{24}} \simeq 5.45 \times 10^{-3} \text{ 回/年}$$

であるので、 $10^3 \text{ cm}^3 \times 10.28 \text{ g/cm}^3 \simeq 10 \text{ kg}$  のモリブデンを用意しても、年に 5 回程度の崩壊しか見ることができないことがわかる。

## 1.4 バックグラウンドの考察

### 1.4.1 主要なバックグラウンド

前述のように、電子が 2 つ同時に合計  $\leq 3.03 \text{ MeV}$  で放出された信号を観測することができれば、 $2\nu\beta\beta$  の証拠となる。実際には  $1 \text{ MeV}$  程度の電子を想定している。想定されるバックグラウンドとして、

- 線源の放射性同位体
- 線源や実験機器に含まれる放射性不純物や環境放射線、宇宙線

が挙げられる。

### 1.4.2 モリブデンの放射性同位体

モリブデンの同位体のうち、 $\beta$ 崩壊するものとして  $^{99}\text{Mo}$  が存在するが、これは人工同位体であり、天然には含まれない。天然に存在するモリブデンの同位体を以下の表に記す。

同位体	$^{92}\text{Mo}$	$^{94}\text{Mo}$	$^{95}\text{Mo}$	$^{96}\text{Mo}$	$^{97}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}$	$^{100}\text{Mo}$
崩壊モード	安定	安定	安定	安定	安定	安定	$\beta\beta$ 崩壊のみ
天然存在比 [%]	14.8	9.23	15.9	16.7	9.56	24.2	9.67

表 1.2: 天然に存在するモリブデン原子核の同位体と崩壊モード [7]

このうち  $^{100}\text{Mo}$  以外は安定な同位体であるので、モリブデンの同位体はバックグラウンドとして考慮する必要はない。

### 1.4.3 放射性不純物や環境放射線

線源及び実験機器に含まれる放射性不純物について考察を行う。放射性不純物によるバックグラウンドの形態として、

- $\beta$  崩壊によって放出された電子とモリブデン中の自由電子のメラー散乱
- $\beta$  崩壊によって放出された電子が遷移する際に放出した  $\gamma$  線とモリブデン中の自由電子のコンプトン散乱

により、電子が2つ同時に観測される事象が考えられる。

前述のように本研究で想定している電子は 1MeV 程度であるため、Q 値が 1MeV 以下の  $\beta$  崩壊による事象は閾値の設定によって容易に排除できる。放射性不純物として考えられる  $^{40}\text{K}$  や、アクチニウム系列の娘原子核のうち  $\beta$  崩壊するものはいずれも Q 値が低いいため、バックグラウンドにはなり得ない。

しかし放射性不純物のウラン・トリウム系列のうち、 $\beta$  崩壊する  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{208}\text{Tl}$  の Q 値はそれぞれ 3.270MeV, 4.992MeV であり、これらの  $\beta$  崩壊により、他の電子事象と偶然同時計測された場合にバックグラウンドとして観測される可能性がある。

実際、NEMO 3 実験でのシミュレーションでは  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{208}\text{Tl}$  によるバックグラウンドが目的とする信号と同等のレートで観測されるという結果が得られている。[5]

## 1.5 第1章まとめ

$\beta\beta$  崩壊には  $2\nu\beta\beta$  と  $0\nu\beta\beta$  のモードが存在し、 $0\nu\beta\beta$  の探索はニュートリノ質量などの物理学上の問題を解決する手段として期待される。検出器の精度や規模の問題から、本研究では  $2\nu\beta\beta$  の観測を目的とする。使用する同位体は  $^{100}\text{Mo}$  であり、0.88 事象/月/ $\text{cm}^3$  の崩壊が期待される。検出において宇宙線の  $\mu$  粒子の崩壊、放射性不純物のうちウラン・トリウム系列の  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{208}\text{Tl}$  の  $\beta$  崩壊がバックグラウンドとなる。

## 第2章 実験の概略・装置説明 (担当：海老憂哉)

第2章ではダブルベータ実験の概要、装置の説明を行う。2.1節でダブルベータ実験の概要について説明し、2.2節で線源の配置に関する提案、2.3節で実験の安全性を高めるシステムについて説明する。

### 2.1 ダブルベータ崩壊実験の概要

本実験は、 $^{100}\text{Mo}$  から同時に放出された2つの電子を磁場によって曲げ、その飛跡から運動エネルギーを測定することによってダブルベータ崩壊の観測を行う。装置は、電子を曲げるための電磁石と、電子の位置・時間情報を測定する  $\mu\text{-TPC}$  ( $\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_4$  ガス、 $\mu\text{-PIC}$ 、GEM) によって構成される。 $\mu\text{-TPC}$  を用いた電子の位置、時間情報の測定に関しては第5章で説明する。図2.1に装置の写真を示す。

本実験では  $2\nu$  モードのダブルベータ崩壊の観測を目標とし、観測対象とする電子の運動エネルギー、その分解能はそれぞれ  $1\text{MeV}$ 、 $20\%$  とする。第1章で説明があったように、 $2\nu$  モードの電子の運動エネルギーは連続スペクトルを示すため、エネルギー分解能に対する要請値はそれほど厳しいものではない。本実験では  $20\%$  の精度としており、運動エネルギーについても、 $1\text{MeV}$  をターゲットとして観測するものとしている。

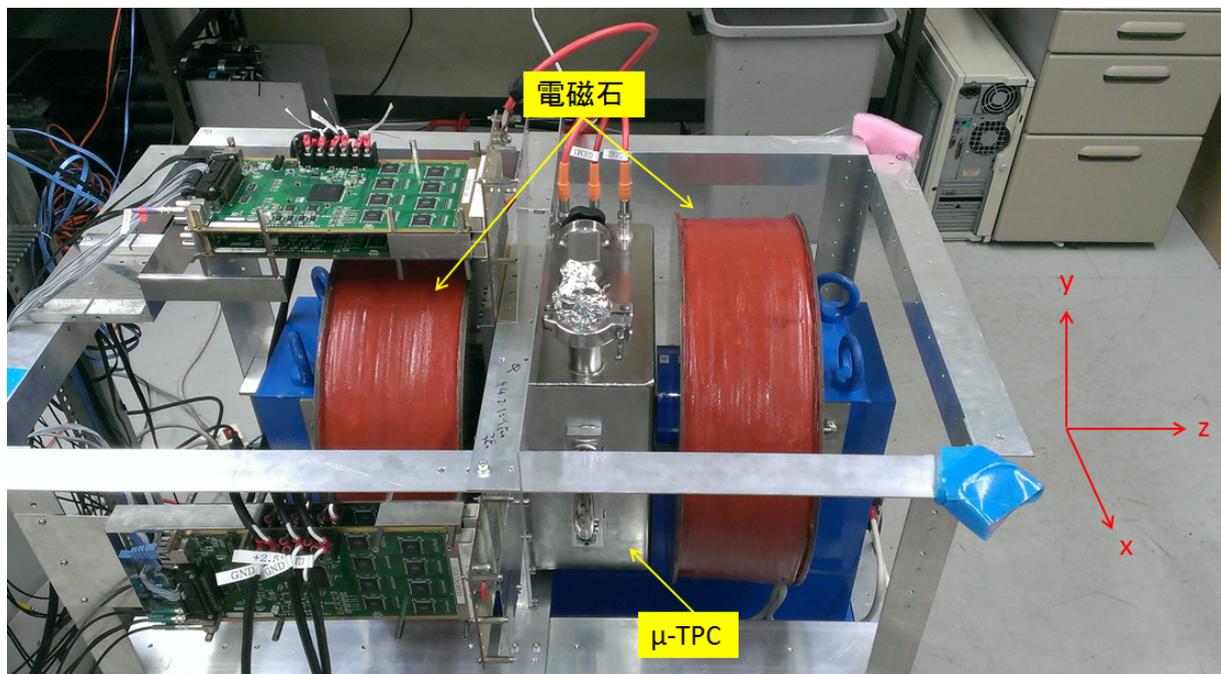


図 2.1: 実験装置の全体図

### 2.1.1 装置への要請

本実験を行うために、2012年度の卒業研究で得られた装置に対する要請を述べる [9]。

本実験での検出範囲は  $10\text{cm}^3$  であり、放出された電子が曲率半径  $5\text{cm}$  程度で運動するように磁場を印加したい。曲率半径と、運動エネルギーが  $1\text{MeV}$  という条件より、印加する磁場の値  $0.1\text{T}$  が求められる。

$\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_4$  ガス中を電子が通過する際、電子はガスの原子核によって多重クーロン散乱する。この散乱の散乱角が小さいほどエネルギー分解能がよくなり、気圧を下げ、ガスの物質量を小さくすることで散乱角を小さくすることができる。エネルギー分解能 20%の精度で測定をするために求められる気圧は  $0.2$  気圧以下である。

ガス中でのエネルギー損失から、 $\mu\text{-PIC}$  の 1 ストリップ ( $400\mu\text{m}$ ) あたりに落とされる電子の数が求められる。 $1\text{MeV}$  の電子を観測するために、この電子の数と装置のスレッシュホールドを比較することで、ガス利得  $(2 \times 10^4) / P$  ( $P$ : 気圧) 以上が装置に求められる。

実験で用いる電磁石は間に  $\mu\text{-TPC}$  を設置できるよう磁極間に  $15\text{cm}$  の間隔が求められるため検出領域に様に磁場を印加することは難しい。エネルギー分解能 20%の精度での観測を実現するために、中心からの磁場強度のずれが  $\pm 20\%$  以内となる電磁石を設計した。第 3、4 章で磁場の計算・測定について述べる。

## 2.2 線源の配置に関する提案

エネルギー損失を考慮して、使用する線源の配置を検討した。

### 2.2.1 エネルギー損失

はじめに、ダブルベータ崩壊によって放出された電子のモリブデン中でのエネルギー損失を計算する。単位長さあたりのエネルギー損失は Bethe-Bloch の式 [10]

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{n}{m_e v^2} \left( \ln \frac{2m_e v^2}{I \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} - 1 \right) \quad (2.1)$$

$e$ : 素電荷,  $\epsilon_0$ : 真空の誘電率,  $n$ : 電子数密度,  $m_e$ : 電子質量,  $v$ : 電子速度  
 $I$ : イオン化エネルギー,  $c$ : 光速

から求められる。計算のため、(2.1) 式を

$$-\frac{dE}{dx} \equiv 4\pi \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \right)^2 \frac{n (\hbar c)^2}{m_e c^2} \left( \frac{c^2}{v^2} \ln \frac{2m_e c^2}{I} \frac{\frac{v^2}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right)$$

と書き換える。ここで

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \simeq \frac{1}{137}, \quad m_e c^2 \simeq 0.511 [\text{MeV}] \quad (2.2)$$

であり、イオン化エネルギー  $I$  は、原子の原子数を  $Z$  として

$$I \simeq 10Z [\text{eV}] \quad (2.3)$$

で近似でき [10]、また

$$\frac{2m_e c^2}{I} \simeq \frac{1\text{MeV}}{10Z\text{eV}} \simeq \frac{10^5}{Z} \quad (2.4)$$

となる。電子数密度  $n$  は、質量密度  $\rho[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、質量数  $A[\text{g}/\text{mol}]$ 、アボガドロ数  $N_A[\text{mol}^{-1}]$  によって

$$n[\text{cm}^{-3}] = \frac{Z}{A[\text{g}/\text{mol}]} \rho[\text{g}/\text{cm}^3] N_A[\text{mol}^{-1}] \quad (2.5)$$

と表され、 $\beta = v/c$  と置き換えて、(2.1) 式は

$$-\frac{dE}{dx} \simeq 0.32 \frac{Z}{A} \rho \left( \frac{1}{\beta^2} \ln \frac{10^5}{Z} \frac{\beta^2}{1-\beta^2} - 1 \right) [\text{MeV}/\text{cm}] \quad (2.6)$$

となる。(2.6) 式にモリブデンの各パラメータ ( $Z = 42$ ,  $A = 95.96[\text{g}/\text{mol}]$ ,  $\rho = 10.28[\text{g}/\text{cm}^3]$ ) と電子の運動エネルギーが 1MeV であることから求められる  $\beta = 0.94$  を代入することで、モリブデン中でのエネルギー損失

$$-\frac{dE}{dx} \simeq 9.88[\text{MeV}/\text{cm}] \quad (2.7)$$

が得られる。

## 2.2.2 線源の配置法

第 1 章で述べたように、 $^{100}\text{Mo}$  の  $2\nu$  ダブルベータ崩壊の崩壊率は  $0.876[\text{回}/\text{月} \cdot \text{cm}^3]$  である。これを用いて、月 1 回程度の崩壊率が得られる配置を検討する。

本実験でのエネルギー分解能に対する要請値が 20% であることから、モリブデン中での電子のエネルギー損失は、対象とする電子の運動エネルギー 1MeV の 20%、つまり 200keV 以下にする必要がある。2.2.1 節で求めた単位長さあたりのエネルギー損失が  $9.88\text{MeV}/\text{cm}$  であることより、線源であるモリブデンの厚さの上限は  $200\mu\text{m}$  となる。よって、図 2.2 のように  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 200\mu\text{m}$  のモリブデン箔を  $z$  軸方向に数枚並べるよう  $\mu\text{-TPC}$  内に配置することで高い崩壊率が得られると考えられる。

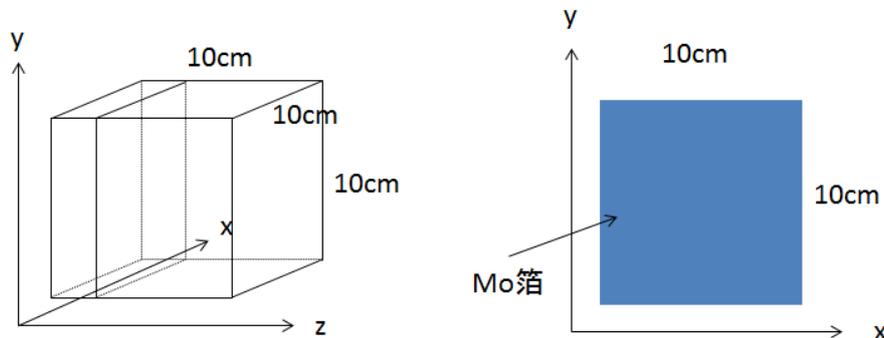


図 2.2: 配置法概略図 1

しかし、このような配置では、放出された電子によるガスの電離によって生じた電子が、近接して配置された箔に吸収されてしまうため、 $\mu\text{-PIC}$  に信号が出なくなってしまう。また、箔を  $z$  軸

に平行に並べると、 $\mu$ -TPC のドリフト電場が乱れてしまい、 $z$  軸方向の位置測定ができなくなってしまう。これらを防ぐため、図 2.3 のように、装置と電氣的に接続がないよう、絶縁体を用いた外枠に、直径  $200\mu\text{m}$  のモリブデンワイヤーを  $y$ - $z$  平面に一定間隔で張り、これを  $x$  軸方向に数枚並べる配置法を提案する。

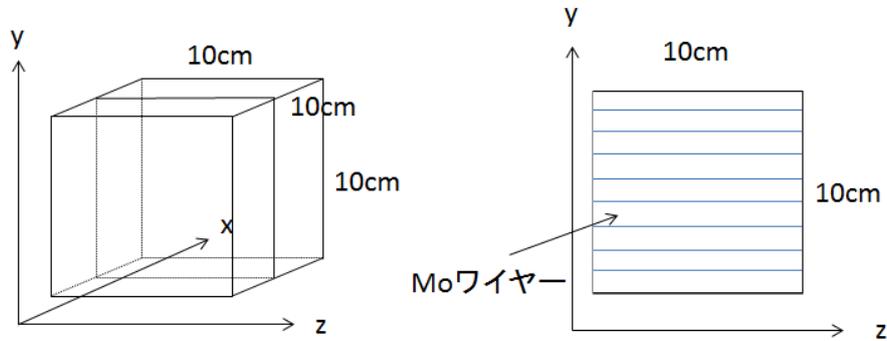


図 2.3: 配置法概略図 2

ここで、崩壊率への条件を満たし、かつ、電子の衝突を防げるだけの隙間を持った枠が必要とされる。隙間と崩壊率の関係を評価するために、平面 ( $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ) に対してどれだけワイヤーが満たしているかを表す占有率 [%] を導入する。占有率 [%] はワイヤーの本数を  $x$  として

$$\text{占有率 [\%]} = \frac{10[\text{cm}] \times 0.02[\text{cm}] \times x}{10[\text{cm}] \times 10[\text{cm}]} \times 100 = 0.2x \quad (2.8)$$

となり、崩壊率 [回/月] は

$$\text{崩壊率 [回/月]} = 0.876[\text{回/月} \cdot \text{cm}^3] \times 10[\text{cm}] \times \pi \times (0.01[\text{cm}])^2 \times x \simeq 2.75 \times 10^{-3}x \quad (2.9)$$

となる。平面に対するワイヤーの占有率と崩壊率の関係を図 2.4 に示す。

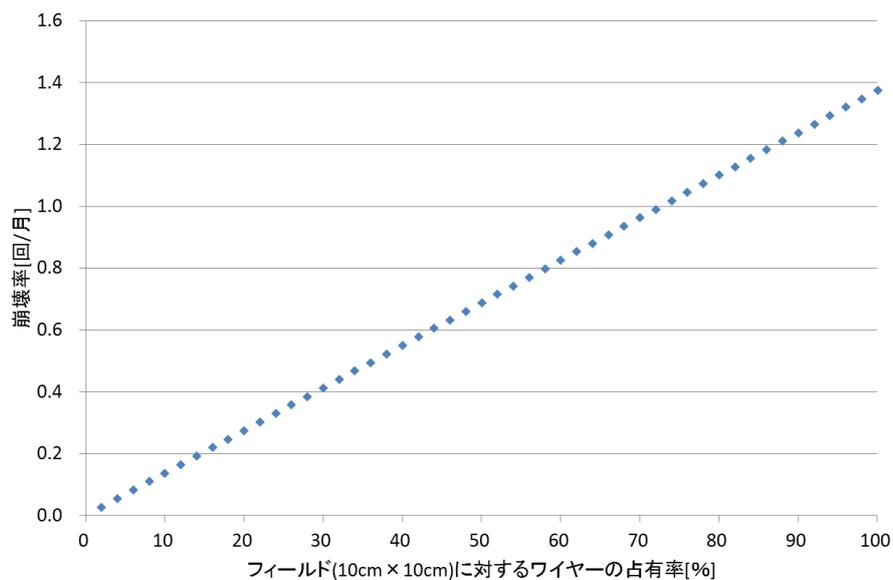


図 2.4: 占有率と崩壊率の関係

占有率 20%とすれば、電子の衝突を十分に防ぐことができると考える。この場合、ワイヤー数 100 本で崩壊率 0.275[回/月] となり、これを 5 枚並べることで崩壊率 1.36[回/月] が得られ、崩壊率への条件を満たす。

ワイヤー 100 本を 10cm に等間隔に並べることになるため、ピッチは 1mm となる。

## 2.3 高温時電源遮断装置の製作

前節で述べたように、装置のサイズなどから、 $^{100}\text{Mo}$  の 2 $\mu$  ダブルベータ崩壊の崩壊率は月 1 回程度に制限されるため、長時間の連続測定が必要とされる。しかし、電子を曲げるために用いる電磁石は時間と共に温度が上昇し、内部で何らかの異常が発生した場合、磁石が焼き切れてしまう可能性がある。これを防ぐために、電磁石の温度が設定温度まで達した場合に電磁石への電力供給を止めるシステムが必要とされ、アナログ回路を用いたシステムの構築を行った。

### 2.3.1 システム構成

図 2.5 にシステムの構成を示す。システムは大きく分けて 3 つの部分に分けられ、1 つ目が磁石の温度を電圧に変換する温度電圧変換部分 (図 2.5 赤枠部分)、2 つ目が設定した電圧と温度から変換した電圧を比較する出力比較部分 (図 2.5 緑枠部分)、3 つ目が比較部分からの信号を受けてスイッチングを行い、電磁石の電源オン/オフをするスイッチング部分 (図 2.5 青枠部分) である。以降、各部分について説明する。

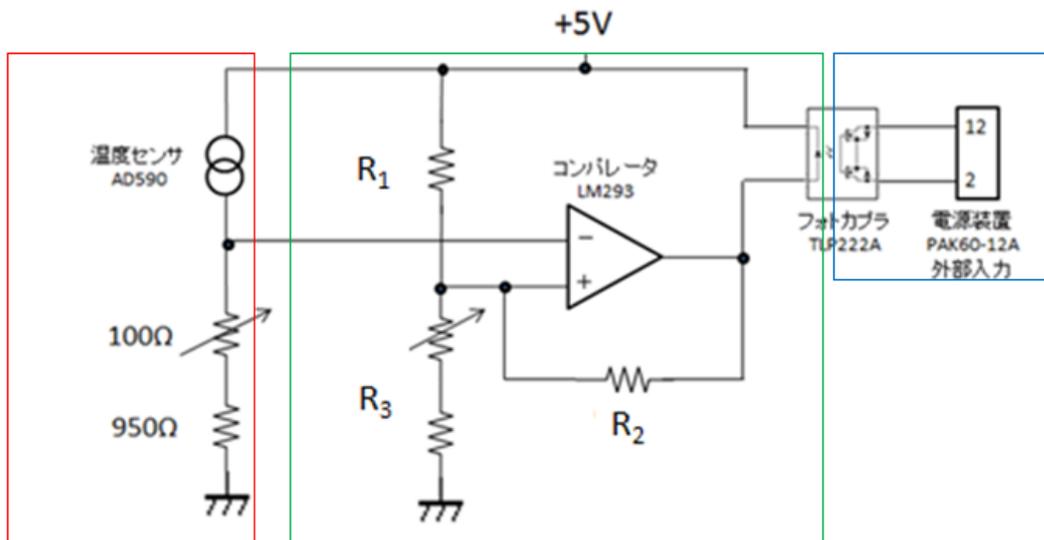


図 2.5: 電源遮断装置のシステム構成

#### (1) 温度電圧変換部分

温度を測定するための温度センサーには ANALOG DEVICES 製 AD590[11] を使用した。このセンサーは、半導体のバンドギャップが温度に比例することで、2 つのトランジスタのベース、エ

ミッタ間の差電圧が温度に比例する（PTAT 電圧）特性を用いており、センサー内部の温度係数の小さな薄膜抵抗により、 $1\mu\text{A}/\text{K}$  の温度に比例する電流値として出力されるよう調整されている。

センサー出力を電圧値として使用するために、図 2.5 赤枠内のように抵抗を配置することで、出力が  $1\text{mV}/\text{K}$  となるようにした。また、可変抵抗によって  $0\text{ }^\circ\text{C}$  が  $273\text{mV}$  に対応するようにした。図 2.5 赤枠内の回路を用いてセンサーの温度電圧変化を測定した。結果を図 2.6、図 2.7 に示す。なお、測定は市販のカイロを用いて行い、温度の計測には水銀温度計を用いた。

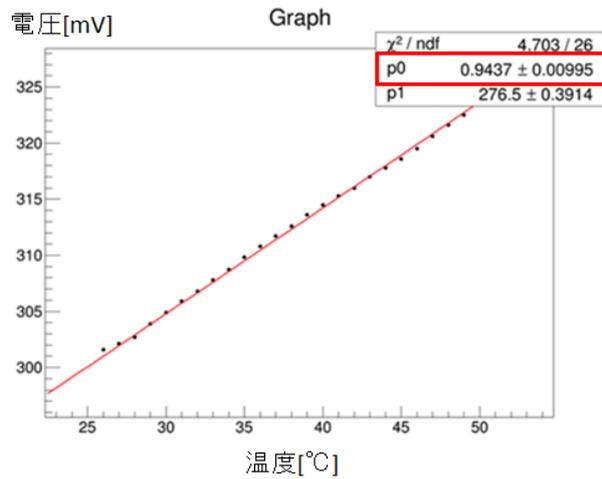


図 2.6: AD590 温度電圧特性 (磁石 N 極用)

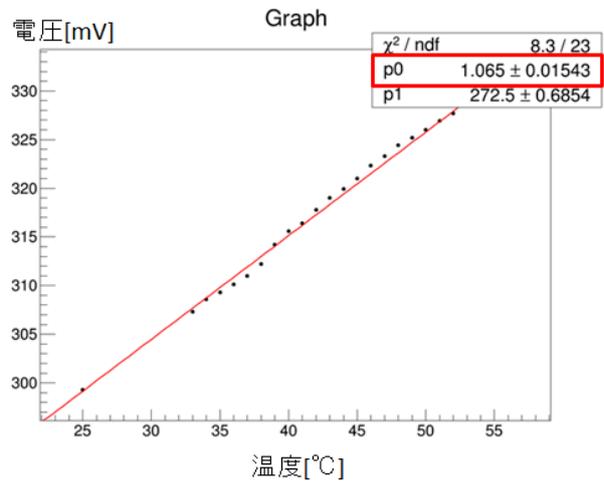


図 2.7: AD590 温度電圧特性 (磁石 S 極用)

以降のシステム設計では、この測定で得られた温度-電圧の変換式を用いた。

次に、この回路を用いて電磁石の時間経過に伴う温度変化を測定した。結果を図 2.8 に示す。なお、電磁石には典型的な電流値  $4\text{A}$  を流して測定を行い、また、電磁石からセンサーへの熱伝導をよくするために、両者の間に熱伝導率  $8.2\text{W}/\text{M}\cdot\text{K}$  のシルバーグリス (バリューウェーブ製 SG-77010) を塗った。

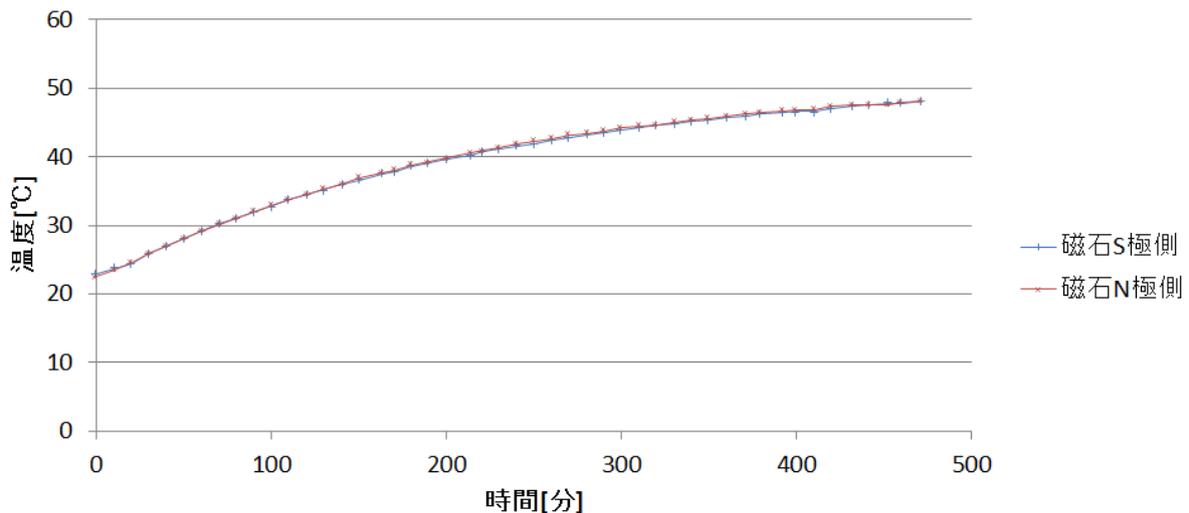


図 2.8: 電磁石温度変化

この結果から、システムは  $50\text{ }^\circ\text{C}$  で電源が切れるように設定するものとした。

## (2) 出力比較部分

出力比較部分ではコンパレータ (TEXAS INSTRUMENTS 製 LM393N[12]) を用いて温度から変換した電圧と、設定電圧 (323mV:50 °C) とを比較する。温度計からの電圧が設定電圧よりも低い場合、コンパレータは High レベルで出力し、逆の場合は Low レベルで出力する。Low レベルの場合、フォトカプラ (東芝製 TLP222A[13]) 内のダイオードが発光する仕組みになっている。

設定温度付近で出力 ON/OFF が繰り返し行われるのを防ぐために、図 2.5 緑枠内のように抵抗を配置することでヒステリシスを設けた。ヒステリシスを設けた場合の入出力の関係を図 2.9 に示す。ここで、 $V_{OUT}$  はコンパレータの出力電圧、 $V_-$  は温度から変換した電圧、 $V_{+L}$  は電源が OFF から ON になる時の設定電圧、 $V_{+H}$  は電源が ON から OFF になる時の設定電圧を表しており、 $V_{+L} = 303\text{mV}(30\text{ }^\circ\text{C})$ 、 $V_{+H} = 323\text{mV}(50\text{ }^\circ\text{C})$  と設定した。

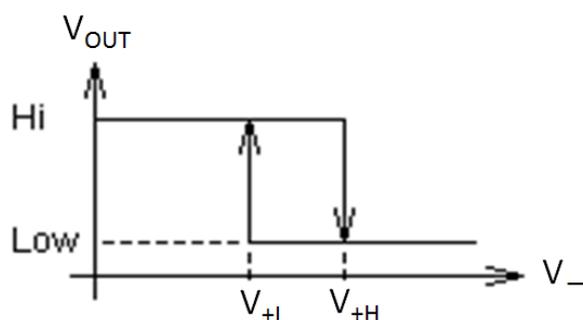


図 2.9: ヒステリシスを設けた場合の入出力電圧の関係

設定電圧での電源 ON/OFF を実現するために各抵抗の値を設定した。コンパレータ出力 High レベルの場合に  $V_{OUT} = V_{IN}$  ( $V_{IN}$ : コンパレータ電源電圧 5.22V) と仮定すれば  $V_{+H}$  は、

$$V_{+H} = \frac{R_3}{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} + R_3} V_{IN} \quad (2.10)$$

となり、コンパレータ出力 Low レベルの場合に  $V_{OUT} = V_{+L}$  と仮定すれば  $V_{+L}$  は

$$V_{+L} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_{IN} \quad (2.11)$$

となる。(2.10)、(2.11) 式に、 $V_{+H} = 323\text{mV}$ 、 $V_{+L} = 303\text{mV}$ 、 $V_{IN} = 5.22\text{V}$  を代入し、 $R$  について解くことで、

$$R_1 = 7.04 \times 10^{-2} R_2 \quad (2.12)$$

$$R_3 = 6.16 \times 10^{-2} R_1 \quad (2.13)$$

の関係が得られる。コンパレータに流すことのできる電流が 10mA のオーダーであるため、 $R_2 = 68\text{k}\Omega$  と設定して (2.12) 式に代入することで、 $R_1 = 4.8\text{k}\Omega$  となり、これを (2.13) 式に代入することで  $R_3 = 296\Omega$  となる。

図 2.5 緑枠内の回路を用いて設定した抵抗値でテストを行ったところ、フォトカプラが故障してしまっ。原因としては  $R_3$  の抵抗値が小さいことでフォトカプラ内のダイオードに過電流が流れてしまったことが考えられる。これを防ぐために  $R_1 = R_2 = 68k\Omega$  として、(2.10) 式に代入し  $R_3$  の抵抗値を  $R_3 = 2.2k\Omega$  と設定した。この抵抗値でテストを行ったところ正常に動作し、 $R_3$  の可変抵抗で  $50^\circ\text{C}$  付近でコンパレータ出力が High から Low となるよう調整した。

### (3) スイッチング部分

出力比較部分での出力を受けてフォトカプラのダイオードが発光することで電源装置につながる回路が導通し、電源が OFF となる。測定に用いる電源装置 (菊水電子工業製 PAK60-12A[14]) は外部入力によって制御を行える仕様となっており、図 2.10 のように接続することで OUTPUT の制御を行う。

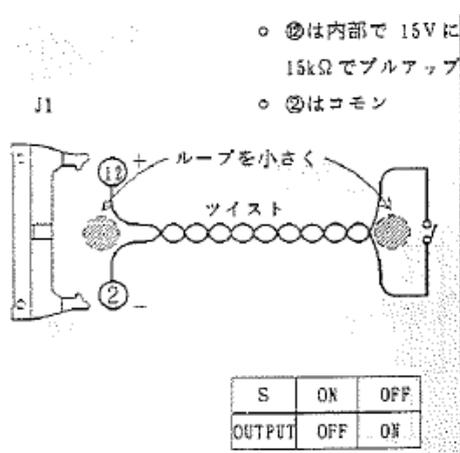


図 2.10: 電源装置 OUTPUT の制御 [14]

### (4) システムの動作確認

リボンヒーターを用いてシステムの動作確認を行った。動作確認の手順は、

1. 電源装置の出力によってリボンヒーターを温める
2. 銅板の温度を温度センサーが測定 (温度センサーの電圧値をテスターでモニター)
3. 設定温度 ( $V_{+H}$ ) まで温度が上がると電源装置の OUTPUT が OFF となり、リボンヒーターへの出力がストップ
4. 銅板の温度が下がり、設定温度 ( $V_{+L}$ ) に達したところで再び電源装置の OUTPUT が ON
5. 1 から 4 を繰り返す

である。動作確認の様子を図 2.11 に示す。この結果、 $50^\circ\text{C}$  で OUTPUT が OFF となり、 $40^\circ\text{C}$  で再び OUTPUT が ON となることを確認した。

$40^\circ\text{C}$  -  $50^\circ\text{C}$  の間でヒステリシスを設けることに成功したが、当初の目標であった  $30^\circ\text{C}$  -  $50^\circ\text{C}$  の間でのヒステリシスは実現されていない。今後、様々な抵抗値での確認を行い、抵抗値と設定温度、ヒステリシスの関係を導き出すことが求められる。

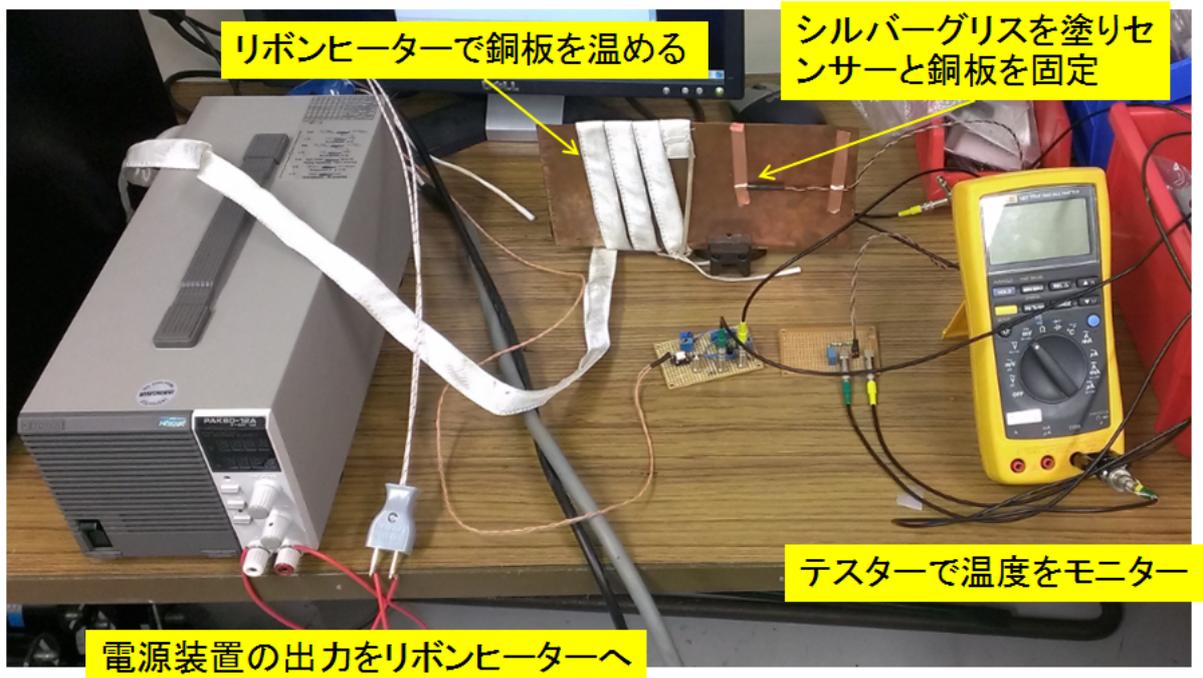


図 2.11: 動作確認の様子

## 2.4 実験の概略・装置説明のまとめ

- 線源の配置についてを検討した。エネルギー分解能の要請値と線源内のエネルギー損失を考慮し、直径  $200\mu\text{m}$  のモリブデンワイヤーを  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$  に  $1\text{mm}$  ピッチで張ったものを 5 枚並べた場合に  $1.36[\text{回}/\text{月}]$  の崩壊率が得られる配置を提案した。
- 長時間測定での安全性を高めるシステムを設計、製作した。  
温度センサー (ANALOG DEVICES 製 AD590[11])、コンパレータ (TEXAS INSTRUMENTS 製 LM393N[12])、フォトカプラ (東芝製 TLP222A[13])、電源装置 (菊水電子工業製 PAK60-12A[14]) を用いて、 $40^\circ\text{C}$ - $50^\circ\text{C}$  の間で電磁石への電源出力 ON/OFF を行うシステムを実現した。

## 第3章 磁石の磁場計算・磁場測定

本実験では、検出器 ( $\mu$ -TPC) を磁場中に設置し、曲率半径を測定することで電子の運動エネルギーを測る。このとき磁場の一様性がエネルギー分解能に影響するが、本実験で用いた磁石では一様な磁場は実現できていない。磁場の非一様性の影響を考えるためには詳細な磁場分布を知り、モンテカルロシミュレーションに組み込む必要があるため磁場の計算を行った。また、この計算結果の信頼性を確かめるために磁場測定を行った。

### 3.1 磁場計算 (担当: 中井 巧也)

#### 3.1.1 計算方法

本実験では Maxwell 3D[15] という電磁場解析ソフトを用いて磁場の計算を行った。このソフトでは有限要素法を用いて電磁場を解析し磁束密度などを計算する。また、場の振る舞いを視覚的にみることができ直感的な理解も可能である。図 3.1.1 に本シミュレーションでの磁石のモデルを示す。具体的な規格については、図 3.3 に基づいて実際の磁石にできるだけ近い形を目指した。

磁石モデルのパラメタは以下の通りである。

- 鉄 : 比透磁率 $\sim$ 2000
- 銅線部分 (図のトーラス部分)  
: 比透磁率 $\sim$ 0.999991

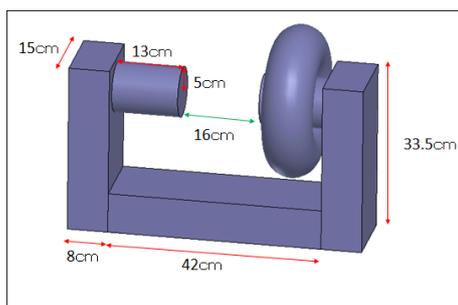


図 3.1: 本計算における磁石モデル

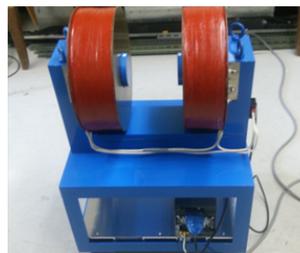


図 3.2: 本実験で使用する磁石

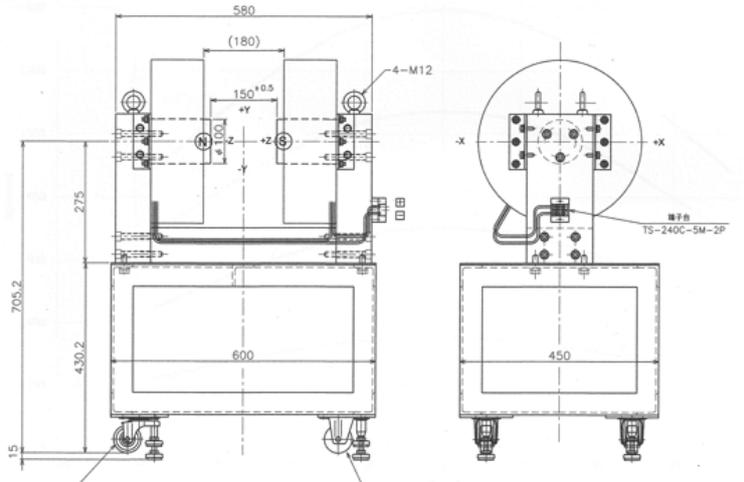


図 3.3: 磁石の図面

本実験では、TPC を磁極の間に置き、そこで電子を検出する。従って、磁場の値で重要になるのは TPC を置く領域である。TPC が入るのは図 3.4 に示すように一辺 10cm の立方体の領域である。よってこの領域を含む一辺 15cm の領域を計算領域とした。この領域を 3cm 間隔で  $6 \times 6 \times 6$  (216) 点計算する。なお、TPC は非磁性体で作っているため、磁場への影響はないものと考え、本実験では TPC による磁場への影響は考慮に入れていない。また、図 3.5 に示すように軸を設定した。

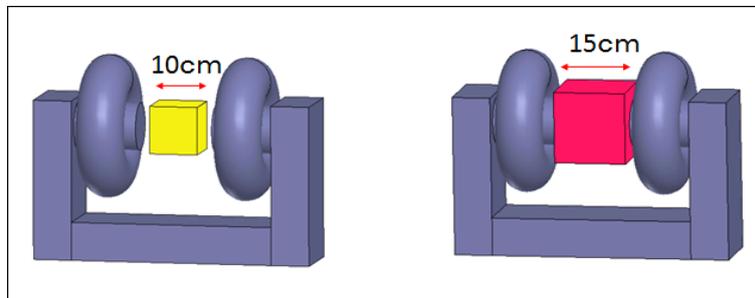


図 3.4: TPC の領域 (左)、計算する領域 (右)

- Z 軸 : 磁場の向き
- Y 軸 : 鉛直上向き
- X 軸 : Z 軸、Y 軸より系が右手系になる向き

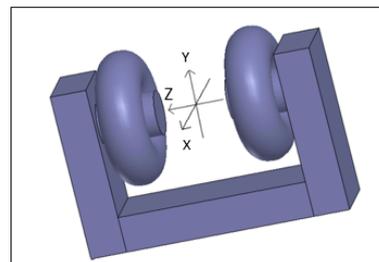


図 3.5: 軸の取り方

次に、磁石に流す電流の値を検討した。本実験で用いた磁石はコイル部分に電流を流すことで磁場を発生させる。磁石定格電流は6Aであるが、コイルの巻き数が不明であった。そのため、この計算では原点での磁場の値が製作会社（タカノ技研）の測定値(0.1071T)と一致するように電流の総和を決定した。ここで、電流の総和とは、電流の値とコイルの巻き数の積である。図3.6に、原点での磁場の値の電流の総和依存を示す。これより電流の総和を8.8kAとした。

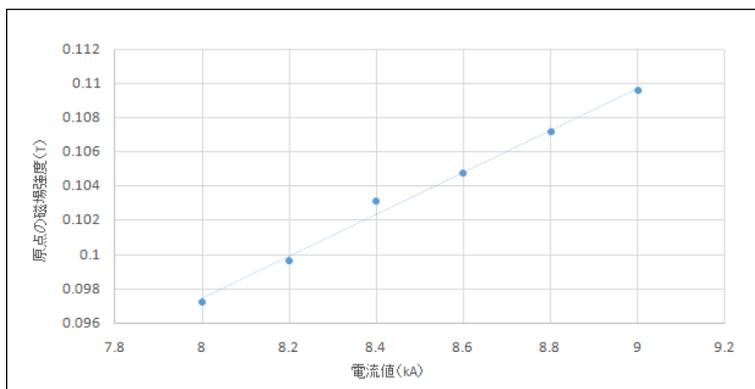


図 3.6: コイルに流す電流値に対する原点での磁場の変化

次に、計算する上での工夫点について述べる。計測する点に仮想点として半径5mmの空気の球をおいて計算を行った。この工夫によって、物体がある部分をより細かく計算するというソフトの性質を利用し、計測点まわりでの計算の精度を上げることを可能とした。

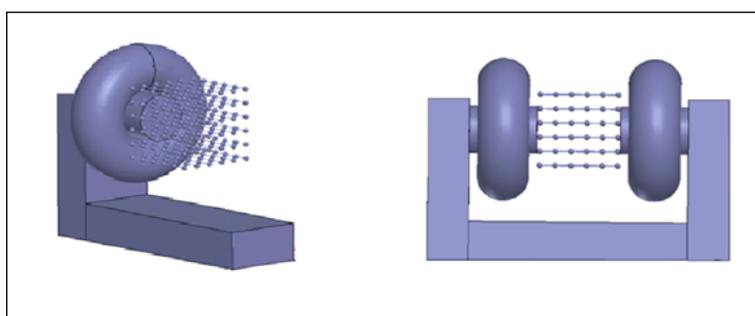


図 3.7: 空気の球を置いた図

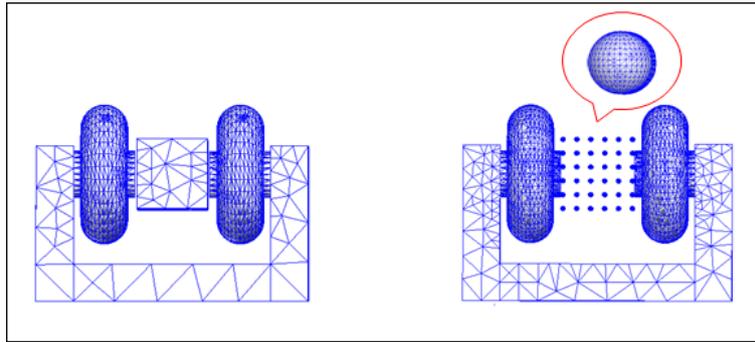


図 3.8: 空気の球を置かなかった場合（左）と置いた場合（右）のメッシュの図

図 3.8 のメッシュの交点が計算点となる。したがって、メッシュが細かい部分ほど計算点が多く、計算の精度が高い。空気の球を置くことで、計測点まわりのメッシュが細かくなっている様子が確認できる。図 3.9 に空気の球を置いた場合と置かなかった場合の X 軸、Y 軸、Z 軸上での磁場の分布をそれぞれ示す。空気の球を置くことで、値のばらつきが軽減されている。

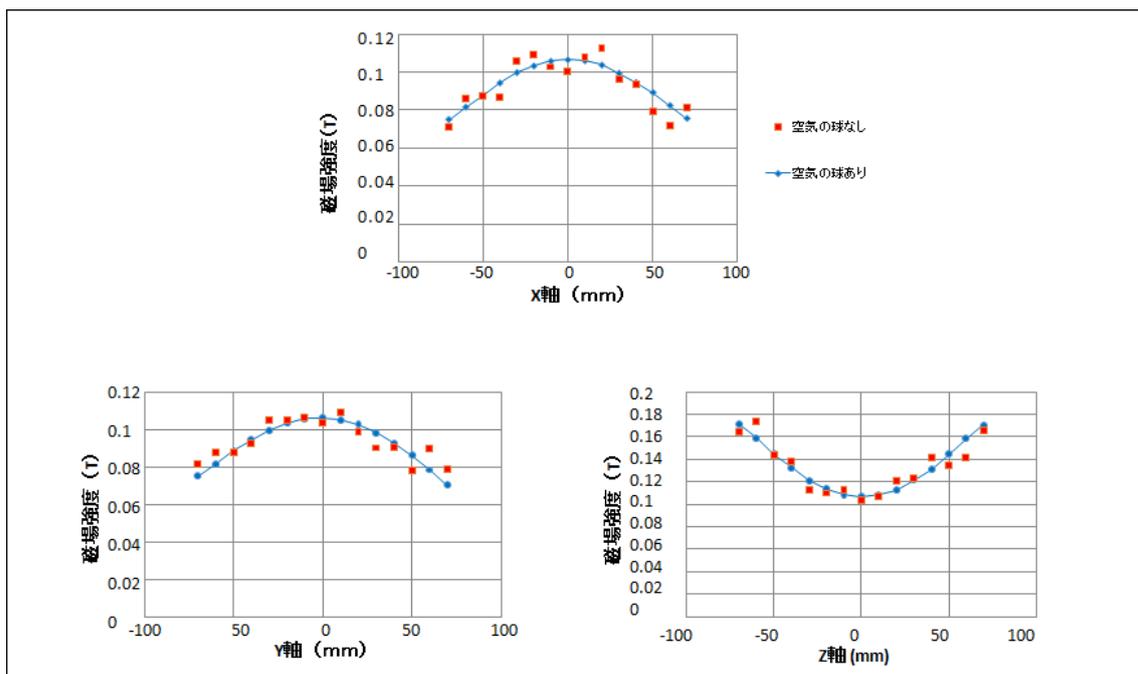


図 3.9: 空気の球を置かなかった場合（赤）と置いた場合（青）の比較

### 3.1.2 計算結果および測定値 (タカノ技研) との比較

計算結果の正確性を考察するために、本実験で用いた磁石の製作元であるタカノ技研の測定結果と比較した。X 軸、Y 軸、Z 軸上での磁場強度について本実験の計算値とタカノ技研の測定値を図 3.10 から図 3.12 に示す。

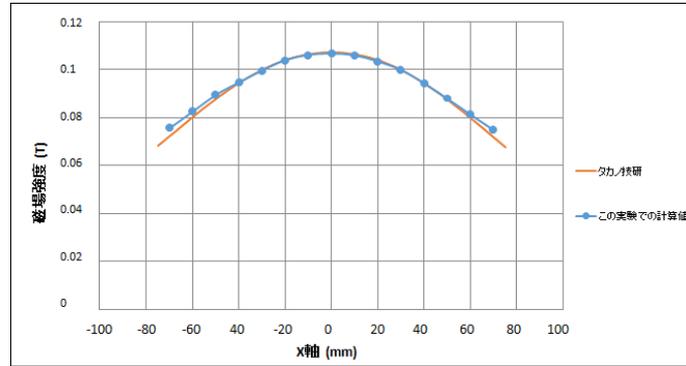


図 3.10: X 軸上の磁場分布

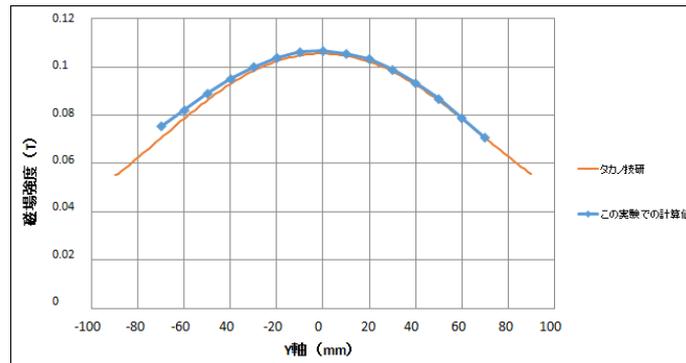


図 3.11: Y 軸上の磁場分布

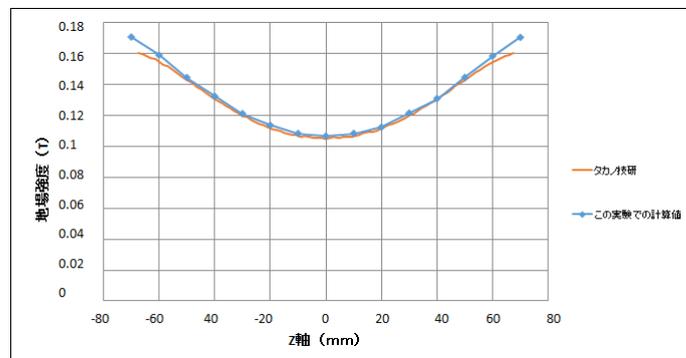


図 3.12: Z 軸上の磁場分布

X 軸上においてタカノ技研の測定値に対する計算値のずれが  $X=-70$  mm（以下全て同じ）の点で 5.0 %、 $X=70$  の点で 5.2 %であった。Y 軸では、 $Y=-70$  の点で 7.3 %であった。Z 軸では、 $Z=-60$  の点で 2.9 %、 $Z=60$  の点で 2.5 %であった。ずれが生じた原因は、電流を流すトーラスの部分の形状の違いと磁石の下の鉄の台を計算に含めなかったことが考えられる。このうち、台を計算に入れないことは、計算値が測定値よりも小さくなることが予想されるが、本計算ではそれに反しているため、これによる影響は考えにくい。タカノ技研の測定における誤差は考慮できないが、ズレが数%と小さいこと、ズレは磁極に近い部分で大きく中心付近の TPC の領域ではほとんどないことから、本実験による磁場の見積もりは正確であると判断し、具体的な計算を行い、評価した。216 点の磁場の計算結果を表 3.1～3.6 に示す。

表 3.1: 磁場計算の結果 (Y=-7.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	By[mT]	Bz[mT]
7.5	-7.5	7.5	-33.65	41.97	33.49
7.5	-7.5	4.5	-18.52	24.29	43.61
7.5	-7.5	1.5	-4.31	5.55	45.23
7.5	-7.5	-1.5	7.25	-9.39	47.81
7.5	-7.5	-4.5	19.92	-24.33	41.38
7.5	-7.5	-7.5	36.64	-41.24	32.27
4.5	-7.5	7.5	-34.72	65.15	48.71
4.5	-7.5	4.5	-20.53	36.41	64.07
4.5	-7.5	1.5	-4.59	8.42	60.03
4.5	-7.5	-1.5	4.19	-9.38	54.95
4.5	-7.5	-4.5	18.84	-35.92	58.72
4.5	-7.5	-7.5	35.62	-65.57	50.94
1.5	-7.5	7.5	-13.53	103.29	65.09
1.5	-7.5	4.5	-8.96	45.98	73.77
1.5	-7.5	1.5	-2.26	11.41	70.10
1.5	-7.5	-1.5	2.35	-13.28	63.75
1.5	-7.5	-4.5	7.77	-46.19	75.94
1.5	-7.5	-7.5	19.45	-101.69	68.81
-1.5	-7.5	7.5	20.39	95.22	63.87
-1.5	-7.5	4.5	7.78	44.73	73.82
-1.5	-7.5	1.5	1.70	10.38	69.43
-1.5	-7.5	-1.5	-1.44	-9.92	68.87
-1.5	-7.5	-4.5	-8.37	-45.70	71.28
-1.5	-7.5	-7.5	-18.17	-102.17	69.57
-4.5	-7.5	7.5	35.84	73.45	51.87
-4.5	-7.5	4.5	18.19	38.23	60.51
-4.5	-7.5	1.5	5.22	11.88	56.72
-4.5	-7.5	-1.5	-4.44	-9.80	58.70
-4.5	-7.5	-4.5	-19.56	-33.59	56.72
-4.5	-7.5	-7.5	-36.33	-65.62	51.52
-7.5	-7.5	7.5	34.06	41.33	28.22
-7.5	-7.5	4.5	18.66	22.67	46.12
-7.5	-7.5	1.5	5.89	7.60	47.28
-7.5	-7.5	-1.5	-4.59	-6.51	43.09
-7.5	-7.5	-4.5	-17.17	-22.17	41.75
-7.5	-7.5	-7.5	-38.60	-44.21	34.44

表 3.2: 磁場計算の結果 (Y=-4.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	By[mT]	Bz[mT]
7.5	-4.5	7.5	-61.20	42.78	50.99
7.5	-4.5	4.5	-30.18	24.30	59.86
7.5	-4.5	1.5	-9.18	7.79	59.58
7.5	-4.5	-1.5	7.30	-6.23	59.56
7.5	-4.5	-4.5	32.07	-23.03	62.97
7.5	-4.5	-7.5	56.12	-43.14	50.84
4.5	-4.5	7.5	-92.03	89.62	112.33
4.5	-4.5	4.5	-31.35	33.35	90.69
4.5	-4.5	1.5	-5.79	6.07	78.13
4.5	-4.5	-1.5	9.77	-10.30	82.20
4.5	-4.5	-4.5	36.51	-36.42	95.04
4.5	-4.5	-7.5	98.00	-99.35	104.42
1.5	-4.5	7.5	-37.96	42.12	220.03
1.5	-4.5	4.5	-12.12	31.38	117.34
1.5	-4.5	1.5	-3.14	12.24	88.60
1.5	-4.5	-1.5	3.83	-11.06	94.90
1.5	-4.5	-4.5	13.15	-36.51	120.45
1.5	-4.5	-7.5	34.36	-109.50	257.66
-1.5	-4.5	7.5	39.18	124.04	254.10
-1.5	-4.5	4.5	13.02	39.13	118.61
-1.5	-4.5	1.5	3.72	12.15	91.30
-1.5	-4.5	-1.5	-2.61	-8.82	89.79
-1.5	-4.5	-4.5	-12.94	-40.59	116.33
-1.5	-4.5	-7.5	-31.56	-91.61	260.01
-4.5	-4.5	7.5	90.57	93.34	93.52
-4.5	-4.5	4.5	30.02	33.78	94.28
-4.5	-4.5	1.5	9.11	10.52	75.52
-4.5	-4.5	-1.5	-10.79	-11.63	79.79
-4.5	-4.5	-4.5	-29.44	-31.40	91.51
-4.5	-4.5	-7.5	-100.02	-103.70	105.10
-7.5	-4.5	7.5	56.90	42.80	45.59
-7.5	-4.5	4.5	28.51	18.13	61.80
-7.5	-4.5	1.5	6.55	5.20	62.63
-7.5	-4.5	-1.5	-11.61	-9.96	63.32
-7.5	-4.5	-4.5	-27.94	-21.26	56.75
-7.5	-4.5	-7.5	-52.65	-40.47	47.97

表 3.3: 磁場計算の結果 (Y=-1.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	By[mT]	Bz[mT]
7.5	-1.5	7.5	-91.90	27.23	66.92
7.5	-1.5	4.5	-40.38	13.11	76.29
7.5	-1.5	1.5	-10.64	2.32	71.26
7.5	-1.5	-1.5	10.59	-2.00	72.17
7.5	-1.5	-4.5	40.01	-9.41	75.15
7.5	-1.5	-7.5	89.67	-21.41	68.62
4.5	-1.5	7.5	-76.74	11.86	322.65
4.5	-1.5	4.5	-39.19	14.62	123.79
4.5	-1.5	1.5	-7.75	5.66	91.25
4.5	-1.5	-1.5	-6.67	1.75	85.05
4.5	-1.5	-4.5	39.33	-9.37	119.34
4.5	-1.5	-7.5	156.64	-50.54	223.19
1.5	-1.5	7.5	-4.50	3.90	178.10
1.5	-1.5	4.5	-10.98	13.97	140.23
1.5	-1.5	1.5	-3.40	2.37	106.04
1.5	-1.5	-1.5	4.07	-3.77	106.53
1.5	-1.5	-4.5	11.24	-7.89	136.08
1.5	-1.5	-7.5	5.01	-8.91	185.64
-1.5	-1.5	7.5	4.81	4.62	183.73
-1.5	-1.5	4.5	12.38	15.78	137.61
-1.5	-1.5	1.5	4.07	5.37	105.35
-1.5	-1.5	-1.5	-2.02	-2.28	106.24
-1.5	-1.5	-4.5	-9.51	-9.56	142.03
-1.5	-1.5	-7.5	-3.98	-2.48	180.25
-4.5	-1.5	7.5	77.92	22.50	286.66
-4.5	-1.5	4.5	38.04	11.14	117.40
-4.5	-1.5	1.5	10.34	4.92	90.83
-4.5	-1.5	-1.5	-11.11	-3.45	93.39
-4.5	-1.5	-4.5	-34.02	-16.34	111.58
-4.5	-1.5	-7.5	-107.93	-41.83	255.75
-7.5	-1.5	7.5	89.42	17.08	69.09
-7.5	-1.5	4.5	39.35	12.43	72.67
-7.5	-1.5	1.5	11.05	3.14	74.00
-7.5	-1.5	-1.5	-11.88	-2.73	72.58
-7.5	-1.5	-4.5	-39.06	-10.77	72.78
-7.5	-1.5	-7.5	-79.37	-22.55	67.72

表 3.4: 磁場計算の結果 (Y=1.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	By[mT]	Bz[mT]
7.5	1.5	7.5	-85.11	-23.04	66.46
7.5	1.5	4.5	-37.62	-10.27	74.65
7.5	1.5	1.5	-11.68	-1.49	73.15
7.5	1.5	-1.5	9.47	1.11	73.04
7.5	1.5	-4.5	38.03	4.85	78.82
7.5	1.5	-7.5	82.17	11.30	63.07
4.5	1.5	7.5	-101.42	-35.27	241.22
4.5	1.5	4.5	-37.80	-9.59	125.48
4.5	1.5	1.5	-12.45	-4.22	94.33
4.5	1.5	-1.5	8.49	3.51	90.30
4.5	1.5	-4.5	38.71	14.47	116.49
4.5	1.5	-7.5	97.23	30.06	303.50
1.5	1.5	7.5	-2.56	-1.59	179.58
1.5	1.5	4.5	-10.50	-9.92	135.63
1.5	1.5	1.5	-3.43	-2.72	108.80
1.5	1.5	-1.5	2.66	1.78	107.52
1.5	1.5	-4.5	10.98	9.95	137.49
1.5	1.5	-7.5	4.57	3.61	176.85
-1.5	1.5	7.5	4.50	-5.74	183.85
-1.5	1.5	4.5	9.79	-11.80	129.50
-1.5	1.5	1.5	4.13	-2.71	108.13
-1.5	1.5	-1.5	-3.34	3.44	106.93
-1.5	1.5	-4.5	-10.70	14.08	138.50
-1.5	1.5	-7.5	-4.29	4.71	183.62
-4.5	1.5	7.5	94.16	-30.41	260.48
-4.5	1.5	4.5	34.61	-10.76	116.97
-4.5	1.5	1.5	8.80	-3.24	92.91
-4.5	1.5	-1.5	-11.48	4.01	96.11
-4.5	1.5	-4.5	-34.76	7.03	115.48
-4.5	1.5	-7.5	-98.07	36.29	241.69
-7.5	1.5	7.5	89.05	-19.97	71.43
-7.5	1.5	4.5	37.20	-5.29	71.21
-7.5	1.5	1.5	9.65	-1.87	71.97
-7.5	1.5	-1.5	-9.96	2.14	71.92
-7.5	1.5	-4.5	-34.83	8.99	76.68
-7.5	1.5	-7.5	-85.48	16.39	71.21

表 3.5: 磁場計算の結果 (Y=4.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	By[mT]	Bz[mT]
7.5	4.5	7.5	-52.58	-34.84	51.81
7.5	4.5	4.5	-33.24	-19.10	66.83
7.5	4.5	1.5	-9.80	-5.76	65.75
7.5	4.5	-1.5	9.25	6.34	60.78
7.5	4.5	-4.5	27.46	19.43	61.84
7.5	4.5	-7.5	59.83	32.68	50.93
4.5	4.5	7.5	-98.78	-96.98	98.27
4.5	4.5	4.5	-27.28	-25.64	87.26
4.5	4.5	1.5	-7.84	-8.55	78.09
4.5	4.5	-1.5	7.27	8.03	77.78
4.5	4.5	-4.5	26.39	27.68	86.36
4.5	4.5	-7.5	89.13	90.50	99.23
1.5	4.5	7.5	-20.80	-57.41	264.21
1.5	4.5	4.5	-10.37	-32.93	121.41
1.5	4.5	1.5	-3.59	-11.97	95.51
1.5	4.5	-1.5	2.23	5.88	91.28
1.5	4.5	-4.5	13.05	39.98	113.26
1.5	4.5	-7.5	36.46	105.20	243.59
-1.5	4.5	7.5	39.26	-114.36	257.05
-1.5	4.5	4.5	12.15	-40.13	119.97
-1.5	4.5	1.5	3.78	-9.69	96.39
-1.5	4.5	-1.5	-3.36	11.40	92.07
-1.5	4.5	-4.5	-11.65	36.01	115.28
-1.5	4.5	-7.5	-34.47	110.10	270.87
-4.5	4.5	7.5	93.75	-87.25	96.76
-4.5	4.5	4.5	34.65	-31.39	98.94
-4.5	4.5	1.5	9.95	-8.96	83.49
-4.5	4.5	-1.5	-6.58	5.80	82.35
-4.5	4.5	-4.5	-30.68	26.51	95.99
-4.5	4.5	-7.5	-100.64	88.01	117.29
-7.5	4.5	7.5	59.69	-41.11	50.02
-7.5	4.5	4.5	26.49	-18.45	63.06
-7.5	4.5	1.5	6.10	-4.24	62.65
-7.5	4.5	-1.5	-6.55	4.53	62.97
-7.5	4.5	-4.5	-26.93	18.50	61.22
-7.5	4.5	-7.5	-63.57	39.05	59.42

表 3.6: 磁場計算の結果 (Y=7.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	By[mT]	Bz[mT]
7.5	7.5	7.5	-31.20	-30.77	32.95
7.5	7.5	4.5	-18.00	-18.09	45.24
7.5	7.5	1.5	-6.85	-6.71	53.23
7.5	7.5	-1.5	6.15	6.62	49.41
7.5	7.5	-4.5	17.90	19.56	44.69
7.5	7.5	-7.5	34.92	33.11	33.78
4.5	7.5	7.5	-31.66	-53.54	48.21
4.5	7.5	4.5	-18.10	-31.54	60.38
4.5	7.5	1.5	-5.69	-9.65	61.23
4.5	7.5	-1.5	5.25	8.79	63.63
4.5	7.5	-4.5	20.35	31.75	59.44
4.5	7.5	-7.5	33.44	56.36	45.55
1.5	7.5	7.5	-13.28	-91.74	64.61
1.5	7.5	4.5	-8.52	-42.76	82.14
1.5	7.5	1.5	-1.98	-10.61	71.54
1.5	7.5	-1.5	2.34	10.95	68.94
1.5	7.5	-4.5	7.39	38.34	72.47
1.5	7.5	-7.5	19.14	87.48	67.10
-1.5	7.5	7.5	23.32	-98.94	69.82
-1.5	7.5	4.5	7.71	-39.03	74.86
-1.5	7.5	1.5	2.76	-11.94	74.62
-1.5	7.5	-1.5	-2.07	8.01	68.47
-1.5	7.5	-4.5	-5.54	34.20	73.43
-1.5	7.5	-7.5	-13.75	81.68	59.19
-4.5	7.5	7.5	34.07	-54.07	46.25
-4.5	7.5	4.5	15.37	-27.17	60.40
-4.5	7.5	1.5	4.55	-6.96	60.06
-4.5	7.5	-1.5	-5.25	7.84	65.41
-4.5	7.5	-4.5	-18.24	30.33	66.47
-4.5	7.5	-7.5	-41.56	62.48	55.54
-7.5	7.5	7.5	30.44	-33.25	35.73
-7.5	7.5	4.5	19.79	-20.09	46.97
-7.5	7.5	1.5	6.46	-6.61	51.30
-7.5	7.5	-1.5	-3.94	4.03	51.71
-7.5	7.5	-4.5	-19.54	21.03	45.36
-7.5	7.5	-7.5	-32.30	34.98	32.07

### 3.1.3 磁場の一様性

本実験では磁場の一様性がエネルギー分解能に影響するため、TPC 領域における磁場の一様性について考察する。計算した各点での磁場の  $z$  成分 ( $B_z$ ) と原点での  $B_z$  とのずれを考え、 $Z=\pm 7.5$ ,  $\pm 4.5$ ,  $\pm 1.5$ [cm] の XY 平面での 2 次元ヒストグラムで表した。

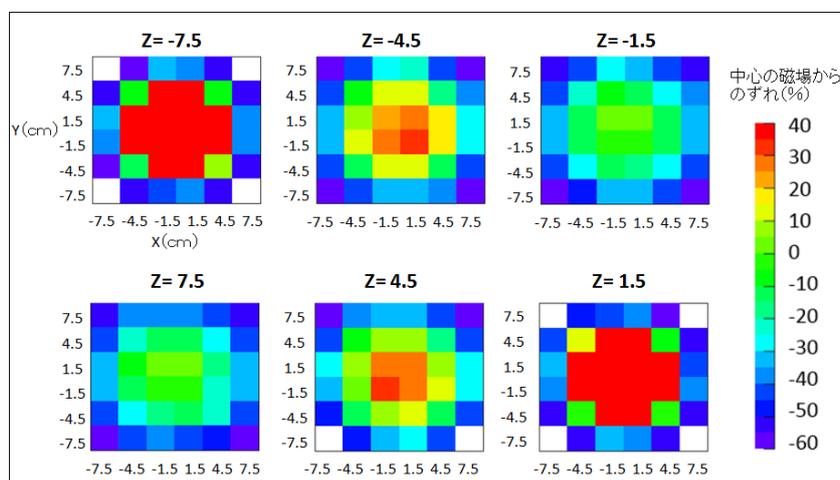


図 3.13:  $B_z$  の中心からのずれを表すヒストグラム

ヒストグラムより、磁極に近い  $Z=\pm 7.5$ [cm] の面では中心からのずれが 40 %以上の部分もあり、かなりずれが大きいことがわかる。しかし中心に近づくにつれてずれは小さくなり、TPC の領域ではほとんどの部分でずれが  $\pm 30$  %に収まっている。また、X,Y 方向についても原点に近い部分ほどずれは小さく、原点から離れるにつれてずれが大きくなる様子が確認される。

次に、各点での原点からのずれをヒストグラムで表す。ここでは TPC の領域に入る部分を赤で示す。このヒストグラムから、中心の  $B_z$  からのズレが  $\pm 10$  %の部分は TPC の領域のうち 30 %であり、ズレが  $\pm 20$  %の部分は TPC の領域のうち 77 %であることが分かった。本実験では、電子のエネルギー分解能 20 %を目指しているので、磁場の非一様性補正をしない場合でも磁場  $B_z$  の中心からのズレが  $\pm 20$  %であればよいと考える。よって、TPC の領域のうち 77 %がこれを満たしていることが確認された。また、本計算結果を用いてエネルギー補正を行うことでさらに広い領域を検出可能領域とできる可能性がある。

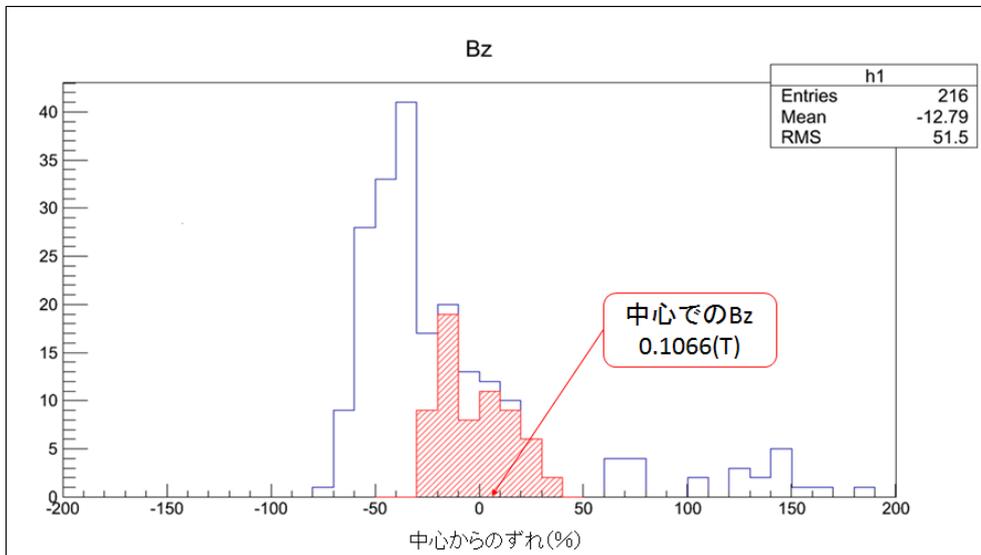


図 3.14: 各点での中心からのずれを表すヒストグラム

## 3.2 磁場測定 (担当：山内 悟)

前節で、計算結果とタカノ技研の測定結果との比較によって、軸上の磁場強度についての計算結果の信頼性を確認した。より詳細に計算結果の信頼性を確かめるために、Maxwell 3D と同様に、磁極間の中心に一辺 15cm の立方体を考えて、その中の 3cm 間隔の格子点の磁場の各成分をそれぞれ測定した。

### 3.2.1 測定器および固定器具

磁場の測定には、図 3.15 に示す Gauss/テスラメーターを用いた。Gauss/テスラメーターの詳細は以下のとおりである。

- ・ 製造会社：F.W.BELL
- ・ 型番：4048
- ・ 測定範囲：～2[T]
- ・ 分解能：0.01[mT]



図 3.15: Gauss/テスラメーター

Gauss/テスラメーターのプローブは 2 種類あり、測定する磁場の方向が異なる (図 3.16)。番号 1418 のプローブは赤い面に垂直な方向の磁場を測定する。番号 1423 のプローブは先端から根元に向かう磁場を測定する。有感部は赤い部分の先端である。プローブについている黒色のボタンを目印にして、測定の回転角を決定した。今回の測定では、1418 を  $B_z, B_x$  の測定に、1423 を  $B_y$  の測定に用いた。

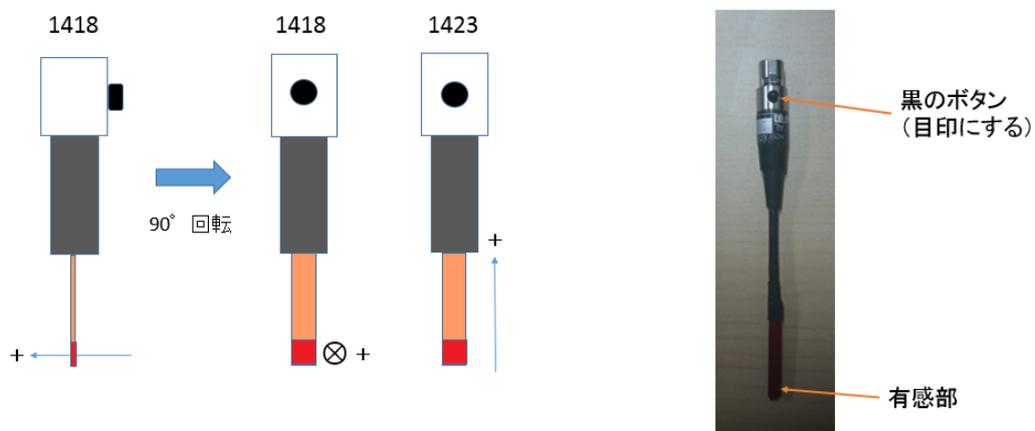


図 3.16: プローブが測定する磁場の方向

プローブの位置と向き、つまり、測定点の座標と測定する磁場の成分を正確に決定するための器具を、CAD(コンピュータによる設計支援ツール)を用いて設計した。これらの器具は、磁場に影響を与えないようにするために、すべてアルミニウム製とした。

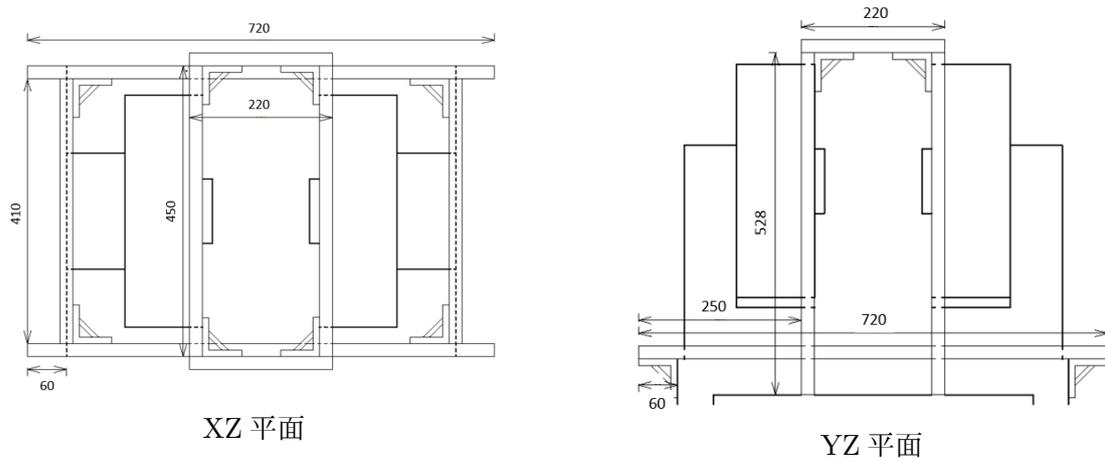


図 3.17: 固定器具の図面 1(フレーム) ※太い線は電磁石を示している

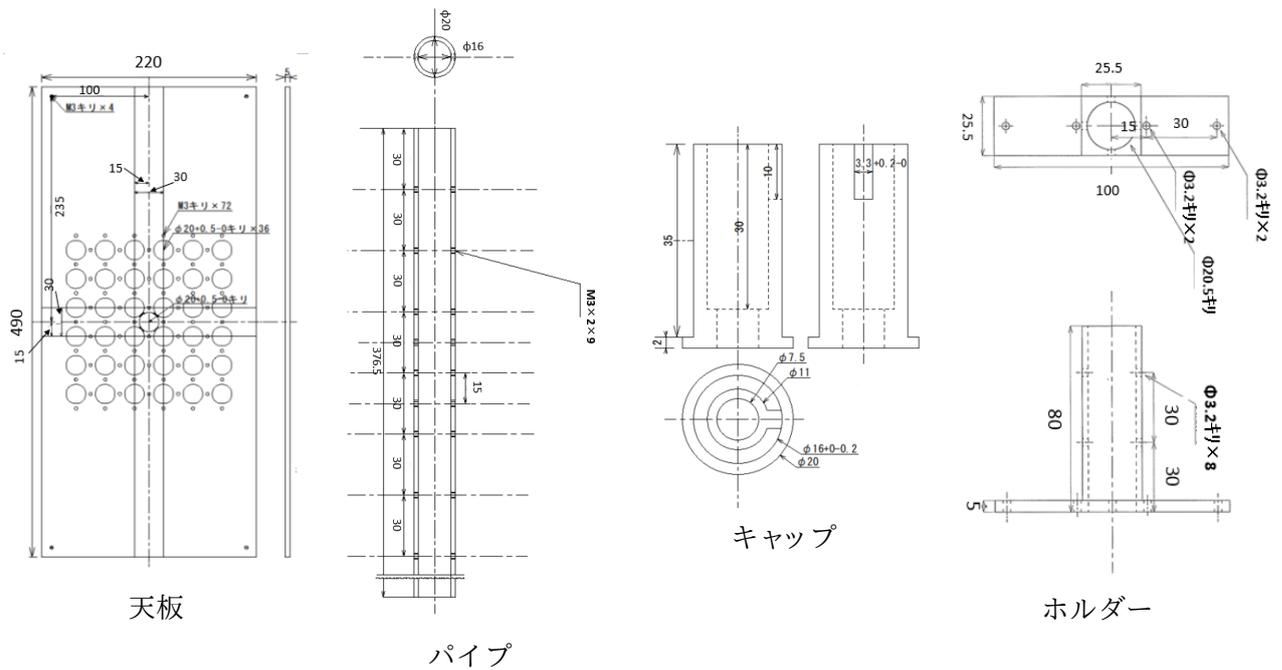


図 3.18: 固定器具の図面 2

図 3.17、図 3.18 の器具を組み合わせ、図 3.19 のようにプローブを固定した。フレームを電磁石の土台に取り付け、天板をフレームの上部に固定する。キャップをパイプの先端に装着する。天板の穴にパイプを通し、ホルダーを用いてそれらを固定する。プローブをパイプに通して、パイプの先端に装着してあるキャップに引っ掛けることでプローブを固定する。



図 3.19: プローブの固定

測定点の座標を決定するために、プローブを各方向に 3cm 毎に動かす構造が求められる。このために、天板にパイプを通す穴が 3cm 間隔で空いている (図 3.20 左)。また、パイプにホルダーと固定するためのねじ穴が 3cm 間隔で空いている (図 3.20 中)。(※原点の磁場を測定するために余分に穴が空いている)

番号 1418 のプローブで  $B_z$  と  $B_x$  を測定するので、プローブを 90° 回転させる構造が求められる。このために、図 3.20 右の要領で  $B_z$  と  $B_x$  の測定を行った。

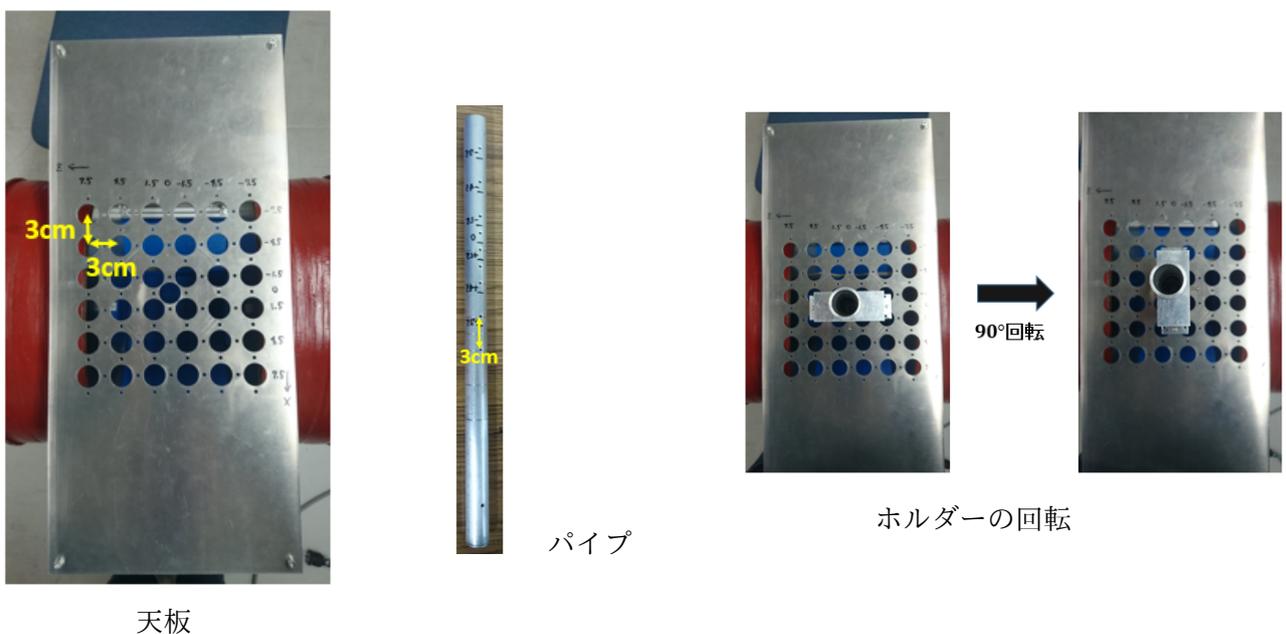
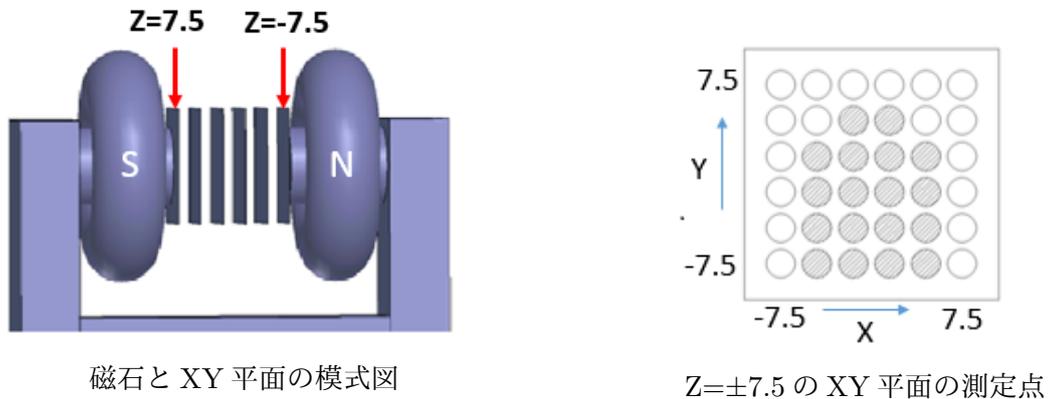


図 3.20: プローブの位置や向きを変える構造

測定器具の構造上、測定できない点が36点あった（図 3.21 の斜線部）。これらの点は TPC の領域外であるため、主目的には影響を与えないと判断した。



磁石と XY 平面の模式図

Z=±7.5 の XY 平面の測定点

図 3.21: 磁場測定位置の模式図

### 3.2.2 測定方法

プローブの有感部付近の細い部分が柔らかいので、測定軸が曲がってしまうという問題点があった。この影響を無視できる大きさにするための条件を考えた。原点での磁場は、

$$\vec{B} = (B_x, B_y, B_z) = (0, 0, 100)[\text{mT}] \quad (3.1)$$

であるはずだが、測定軸が曲がることで、 $B_z$  の一部を  $B_x, B_y$  として測定してしまう。これより、0.5% を漏れ込みの許容量として、原点において

$$B_x = 0 \pm 0.5[\text{mT}], B_y = 0 \pm 0.5[\text{mT}] \quad (3.2)$$

で測定できることを測定条件とし、以下の手法で軸の決定を行った。

1. 原点での磁場を測定し、(3.2) を満たすようにプローブの軸を調整する。
2. プローブをパイプの先に固定したままパイプを差しなおし、原点の磁場を 5 回測定する。これらの測定値が全て (3.2) を満たせば軸を決定できたとみなし、測定を開始する。

※測定中にプローブの軸を曲げてしまった場合には、軸の決定をやり直す。

この手法で軸を決定してから、原点の磁場の各成分をそれぞれ30回測定した。全ての測定値が $\pm 0.5\text{mT}$ の範囲内に収まったので(図 3.22)、軸の決定の方法は適していると判断した。

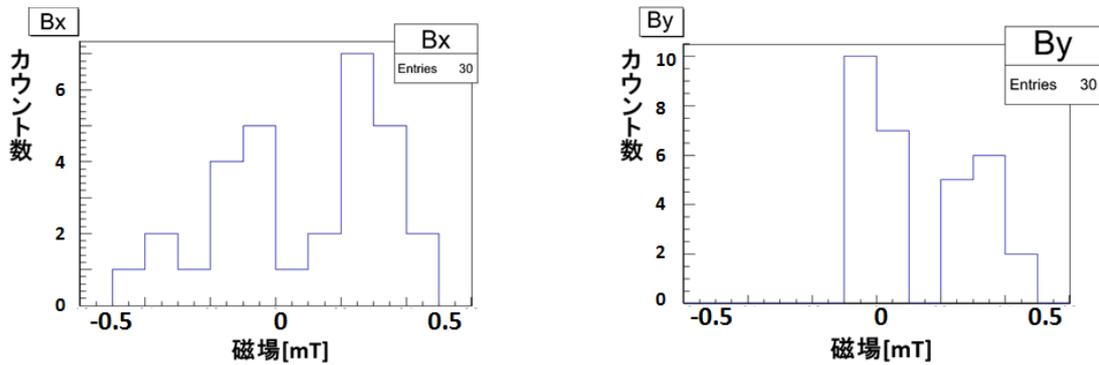


図 3.22: 原点の磁場の測定値のヒストグラム

また、番号 1423 のプローブの軸が曲がっていたため、 $B_y$  を正確に測定できないという問題があった。プローブの黒いボタンを $\pm X$ 方向に向けて測定すると、 $B_x$ の一部を $B_y$ として測定してしまう。プローブの向きを $180^\circ$ 回転させると、 $B_x$ の寄与が反転するので、黒いボタンを $+X$ 方向、 $-X$ 方向に向けて測定した測定値の平均をとることで $B_y$ を求めることにした。

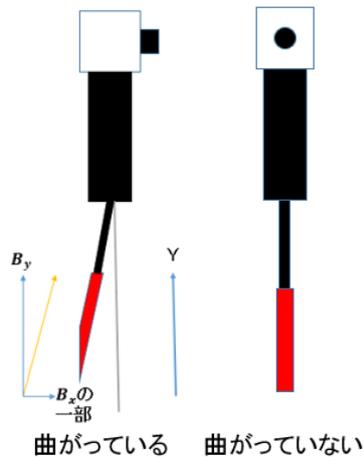


図 3.23: 番号 1423 のプローブの曲がりと  $B_y$  測定への影響

### 3.2.3 測定結果および計算値との比較

前節に述べた手法で、全点での測定を行った。結果を表 3.7～表 3.12 に示す。分解能は $0.01\text{mT}$ であるが、 $20.0\text{mT}$ を超えると、メーターの表示が $0.1\text{mT}$ 刻みとなる。したがって、有効数字は、 $0.00\sim 19.99\text{mT}$ では小数点以下2桁、 $20.0\text{mT}$ 以上では小数点以下1桁となっている。また、 $B_y$ は計算により求めるが、有効数字は小数点以下2桁とした。

表 3.7: 磁場測定の結果 (Y=-7.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	Bz[mT]	by-[mT]	by+[mT]	By[mT]
7.5	-7.5	7.5	-36.3	39.0	40.1	35.0	37.55
7.5	-7.5	4.5	-22.0	45.9	23.8	21.3	22.55
7.5	-7.5	1.5	-7.05	46.5	7.35	6.71	7.03
7.5	-7.5	-1.5	5.70	46.3	-7.79	-6.53	-7.16
7.5	-7.5	-4.5	20.9	44.9	-24.8	-21.4	-23.10
7.5	-7.5	-7.5	36.0	40.0	-41.2	-35.9	-38.55
4.5	-7.5	7.5					
4.5	-7.5	4.5	-21.5	63.2	36.0	34.1	35.05
4.5	-7.5	1.5	-6.55	60.2	10.42	10.16	10.29
4.5	-7.5	-1.5	4.54	59.5	-10.78	-9.35	-10.07
4.5	-7.5	-4.5	17.34	61.9	-37.0	-33.6	-35.30
4.5	-7.5	-7.5					
1.5	-7.5	7.5					
1.5	-7.5	4.5	-8.37	78.2	45.8	45.7	45.75
1.5	-7.5	1.5	-2.32	69.1	12.11	12.62	12.37
1.5	-7.5	-1.5	1.56	67.8	-12.38	-11.27	-11.83
1.5	-7.5	-4.5	7.02	74.5	-45.9	-43.5	-44.70
1.5	-7.5	-7.5					
-1.5	-7.5	7.5					
-1.5	-7.5	4.5	9.84	76.6	43.8	47.1	45.45
-1.5	-7.5	1.5	3.16	68.1	11.67	13.13	12.40
-1.5	-7.5	-1.5	-2.22	66.6	-11.95	-11.39	-11.67
-1.5	-7.5	-4.5	-9.83	72.4	-42.8	-43.4	-43.10
-1.5	-7.5	-7.5					
-4.5	-7.5	7.5					
-4.5	-7.5	4.5	23.6	60.2	32.5	36.7	34.60
-4.5	-7.5	1.5	6.97	58.0	9.40	10.96	10.18
-4.5	-7.5	-1.5	-5.18	56.9	-9.17	-9.37	-9.27
-4.5	-7.5	-4.5	-20.3	57.8	-31.6	-33.9	-32.75
-4.5	-7.5	-7.5					
-7.5	-7.5	7.5	39.0	35.3	34.0	39.5	36.75
-7.5	-7.5	4.5	23.9	42.2	20.3	23.8	22.05
-7.5	-7.5	1.5	8.08	43.6	6.43	7.68	7.06
-7.5	-7.5	-1.5	-5.59	43.4	-6.13	-6.72	-6.43
-7.5	-7.5	-4.5	-20.6	41.3	-19.07	-22.1	-20.59
-7.5	-7.5	-7.5	-35.7	34.7	-32.5	-36.9	-34.70

表 3.8: 磁場測定の結果 (Y=-4.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	Bz[mT]	by-[mT]	by+[mT]	By[mT]
7.5	-4.5	7.5	-62.7	53.6	42.0	32.3	37.15
7.5	-4.5	4.5	-34.2	62.6	22.7	17.47	20.09
7.5	-4.5	1.5	-10.59	60.2	6.58	5.05	5.82
7.5	-4.5	-1.5	8.29	60.0	-6.48	-5.56	-6.02
7.5	-4.5	-4.5	32.3	62.3	-23.3	-18.38	-20.84
7.5	-4.5	-7.5	62.0	51.0	-44.3	-34.3	-39.30
4.5	-4.5	7.5					
4.5	-4.5	4.5	-35.3	98.6	35.1	31.4	33.25
4.5	-4.5	1.5	-9.69	80.3	9.15	7.74	8.45
4.5	-4.5	-1.5	6.55	79.4	-9.19	-8.08	-8.64
4.5	-4.5	-4.5	30.1	96.8	-35.1	-31.5	-33.30
4.5	-4.5	-7.5					
1.5	-4.5	7.5					
1.5	-4.5	4.5	-10.92	123.6	37.0	36.1	36.55
1.5	-4.5	1.5	-3.83	92.5	10.00	9.46	9.73
1.5	-4.5	-1.5	2.20	91.7	-9.67	-9.78	-9.73
1.5	-4.5	-4.5	9.82	118.9	-36.6	-35.9	-36.25
1.5	-4.5	-7.5					
-1.5	-4.5	7.5					
-1.5	-4.5	4.5	13.22	121.6	36.2	37.7	36.95
-1.5	-4.5	1.5	4.26	91.4	10.03	9.76	9.90
-1.5	-4.5	-1.5	-3.17	89.9	-9.29	-9.90	-9.60
-1.5	-4.5	-4.5	-11.65	115.4	-35.5	-37.2	-36.35
-1.5	-4.5	-7.5					
-4.5	-4.5	7.5					
-4.5	-4.5	4.5	38.1	93.1	30.4	35.3	32.85
-4.5	-4.5	1.5	9.70	77.0	7.92	8.94	8.43
-4.5	-4.5	-1.5	-7.32	75.3	-7.32	-8.67	-8.00
-4.5	-4.5	-4.5	-31.9	87.4	-29.1	-33.7	-31.40
-4.5	-4.5	-7.5					
-7.5	-4.5	7.5	65.1	47.5	30.4	40.3	35.35
-7.5	-4.5	4.5	36.4	56.7	16.93	21.7	19.32
-7.5	-4.5	1.5	10.85	55.4	5.16	6.27	5.72
-7.5	-4.5	-1.5	-7.81	55.6	-4.55	-6.20	-5.38
-7.5	-4.5	-4.5	-30.7	55.7	-15.72	-20.8	-18.26
-7.5	-4.5	-7.5	-58.2	46.5	-28.7	-37.7	-33.20

表 3.9: 磁場測定の結果 (Y=-1.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	Bz[mT]	by-[mT]	by+[mT]	By[mT]
7.5	-1.5	7.5	-102.1	68.6	22.3	9.80	16.05
7.5	-1.5	4.5	-52.1	78.2	10.18	4.62	7.40
7.5	-1.5	1.5	-13.60	70.6	2.95	1.00	1.98
7.5	-1.5	-1.5	10.03	71.2	-2.69	-1.77	-2.23
7.5	-1.5	-4.5	40.8	79.6	-10.16	-5.61	-7.89
7.5	-1.5	-7.5	96.3	66.6	-23.8	-11.39	-17.60
4.5	-1.5	7.5					
4.5	-1.5	4.5	-37.3	122.0	12.81	7.90	10.36
4.5	-1.5	1.5	-10.84	94.0	3.76	1.77	2.77
4.5	-1.5	-1.5	7.23	94.6	-3.19	-2.89	-3.04
4.5	-1.5	-4.5	32.9	125.6	-12.13	-9.45	-10.79
4.5	-1.5	-7.5					
1.5	-1.5	7.5					
1.5	-1.5	4.5	-8.25	134.8	9.15	7.36	8.26
1.5	-1.5	1.5	-3.02	106.3	3.51	2.49	3.00
1.5	-1.5	-1.5	2.99	107.1	-2.96	-3.48	-3.22
1.5	-1.5	-4.5	8.40	137.1	-8.61	-8.84	-8.73
1.5	-1.5	-7.5					
-1.5	-1.5	7.5					
-1.5	-1.5	4.5	7.87	133.5	8.49	8.53	8.51
-1.5	-1.5	1.5	4.20	104.4	3.11	2.88	3.00
-1.5	-1.5	-1.5	-3.35	105.0	-2.42	-3.85	-3.14
-1.5	-1.5	-4.5	-10.78	136.4	-7.73	-10.12	-8.93
-1.5	-1.5	-7.5					
-4.5	-1.5	7.5					
-4.5	-1.5	4.5	46.1	112.8	9.10	12.36	10.73
-4.5	-1.5	1.5	13.72	88.0	2.55	3.12	2.84
-4.5	-1.5	-1.5	-5.99	88.2	-1.75	-3.71	-2.73
-4.5	-1.5	-4.5	-34.7	113.2	-8.00	-13.21	-10.61
-4.5	-1.5	-7.5					
-7.5	-1.5	7.5	90.4	56.8	9.41	20.7	15.06
-7.5	-1.5	4.5	46.2	66.6	4.84	9.62	7.23
-7.5	-1.5	1.5	13.87	62.9	1.65	2.50	2.08
-7.5	-1.5	-1.5	-8.30	62.9	-1.04	-2.94	-1.99
-7.5	-1.5	-4.5	-37.3	64.9	-4.25	-9.61	-6.93
-7.5	-1.5	-7.5	-80.0	52.9	-8.63	-19.65	-14.14

表 3.10: 磁場測定の結果 (Y=1.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	Bz[mT]	by-[mT]	by+[mT]	By[mT]
7.5	1.5	7.5	-85.8	65.8	-15.58	-25.7	-20.64
7.5	1.5	4.5	-45.2	76.4	-7.37	-12.38	-9.88
7.5	1.5	1.5	-12.38	69.5	-1.62	-3.69	-2.66
7.5	1.5	-1.5	10.68	70.1	2.34	2.85	2.60
7.5	1.5	-4.5	38.9	78.3	8.68	11.33	10.01
7.5	1.5	-7.5	84.3	61.8	17.61	25.6	21.61
4.5	1.5	7.5					
4.5	1.5	4.5	-41.5	119.8	-11.51	-17.73	-14.62
4.5	1.5	1.5	-10.89	92.5	-2.83	-5.03	-3.93
4.5	1.5	-1.5	7.79	93.1	4.08	3.28	3.68
4.5	1.5	-4.5	33.3	122.6	12.77	14.74	13.76
4.5	1.5	-7.5					
1.5	1.5	7.5					
1.5	1.5	4.5	-11.58	134.2	-10.34	-13.76	-12.05
1.5	1.5	1.5	-4.09	105.1	-3.71	-5.04	-4.38
1.5	1.5	-1.5	3.36	105.6	4.55	3.25	3.90
1.5	1.5	-4.5	8.00	136.2	12.32	10.99	11.66
1.5	1.5	-7.5					
-1.5	1.5	7.5					
-1.5	1.5	4.5	8.36	133.0	-12.13	-12.94	-12.54
-1.5	1.5	1.5	3.60	102.7	-3.34	-4.99	-4.17
-1.5	1.5	-1.5	-3.80	103.1	5.28	2.75	4.02
-1.5	1.5	-4.5	-11.67	134.4	13.95	10.16	12.06
-1.5	1.5	-7.5					
-4.5	1.5	7.5					
-4.5	1.5	4.5	40.3	109.5	-16.03	-13.96	-15.00
-4.5	1.5	1.5	10.96	86.3	-3.46	-4.40	-3.93
-4.5	1.5	-1.5	-8.38	86.3	4.88	2.20	3.54
-4.5	1.5	-4.5	-34.9	108.7	17.00	10.55	13.78
-4.5	1.5	-7.5					
-7.5	1.5	7.5	83.6	55.0	-23.0	-16.44	-19.72
-7.5	1.5	4.5	42.7	65.2	-12.26	-7.66	-9.96
-7.5	1.5	1.5	12.45	62.0	-2.83	-2.62	-2.73
-7.5	1.5	-1.5	-9.15	61.6	3.47	1.39	2.43
-7.5	1.5	-4.5	-37.2	63.9	11.04	6.17	8.61
-7.5	1.5	-7.5	-77.3	52.9	21.9	12.87	17.39

表 3.11: 磁場測定の結果 (Y=4.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	Bz[mT]	by-[mT]	by+[mT]	By[mT]
7.5	4.5	7.5	-58.0	50.1	-34.5	-39.9	-37.20
7.5	4.5	4.5	-33.9	60.6	-18.15	-22.8	-20.48
7.5	4.5	1.5	-10.54	59.2	-5.04	-6.81	-5.93
7.5	4.5	-1.5	7.73	59.7	6.10	5.68	5.89
7.5	4.5	-4.5	29.4	61.3	20.7	21.7	21.20
7.5	4.5	-7.5	55.4	50.3	36.7	40.5	38.60
4.5	4.5	7.5	-88.1	86.5	-91.6	-99.6	-95.60
4.5	4.5	4.5	-35.3	90.9	-32.4	-37.8	-35.10
4.5	4.5	1.5	-9.33	77.7	-7.94	-10.37	-9.16
4.5	4.5	-1.5	6.44	78.2	8.96	7.58	8.27
4.5	4.5	-4.5	28.1	93.1	34.7	34.3	34.50
4.5	4.5	-7.5	81.1	84.2	104.5	101.4	102.95
1.5	4.5	7.5					
1.5	4.5	4.5	-15.12	113.2	-38.8	-43.6	-41.20
1.5	4.5	1.5	-3.93	88.7	-9.74	-12.17	-10.96
1.5	4.5	-1.5	1.85	89.2	10.53	8.52	9.53
1.5	4.5	-4.5	9.93	115.3	41.0	37.8	39.40
1.5	4.5	-7.5					
-1.5	4.5	7.5					
-1.5	4.5	4.5	11.13	109.7	-40.4	-43.6	-42.00
-1.5	4.5	1.5	3.18	86.9	-10.15	-11.27	-10.71
-1.5	4.5	-1.5	-3.39	87.1	10.60	8.35	9.48
-1.5	4.5	-4.5	-12.22	110.8	41.7	36.5	39.10
-1.5	4.5	-7.5					
-4.5	4.5	7.5	80.8	72.2	-90.2	-91.3	-90.75
-4.5	4.5	4.5	32.0	82.3	-34.6	-34.5	-34.55
-4.5	4.5	1.5	8.67	72.7	-7.91	-9.31	-8.61
-4.5	4.5	-1.5	-6.91	72.6	9.09	6.95	8.02
-4.5	4.5	-4.5	-28.7	81.7	34.2	29.2	31.70
-4.5	4.5	-7.5	-75.1	67.9	85.2	79.4	82.30
-7.5	4.5	7.5	54.1	44.8	-37.0	-34.7	-35.85
-7.5	4.5	4.5	31.3	53.4	-20.8	-19.22	-20.01
-7.5	4.5	1.5	9.68	53.3	-5.81	-6.10	-5.96
-7.5	4.5	-1.5	-7.20	52.9	6.38	4.14	5.26
-7.5	4.5	-4.5	-26.8	52.4	20.7	16.38	18.54
-7.5	4.5	-7.5	-51.5	44.2	36.2	30.6	33.40

表 3.12: 磁場測定の結果 (Y=7.5[cm])

X[cm]	Y[cm]	Z[cm]	Bx[mT]	Bz[mT]	by-[mT]	by+[mT]	By[mT]
7.5	7.5	7.5	-33.7	36.6	-33.4	-36.9	-35.15
7.5	7.5	4.5	-21.1	43.5	-19.47	-22.7	-21.09
7.5	7.5	1.5	-7.08	45.6	-5.69	-7.64	-6.67
7.5	7.5	-1.5	5.20	45.5	7.26	6.49	6.88
7.5	7.5	-4.5	18.04	44.0	22.1	22.0	22.05
7.5	7.5	-7.5	32.0	36.4	35.6	37.2	36.40
4.5	7.5	7.5	-33.5	48.5	-57.5	-60.8	-59.15
4.5	7.5	4.5	-19.06	58.0	-31.3	-34.1	-32.70
4.5	7.5	1.5	-6.29	57.3	-8.52	-10.94	-9.73
4.5	7.5	-1.5	4.18	57.4	10.31	8.31	9.31
4.5	7.5	-4.5	16.13	58.3	33.5	32.5	33.00
4.5	7.5	-7.5	31.2	47.9	61.2	60.6	60.90
1.5	7.5	7.5	-16.16	56.9	-83.7	-86.2	-84.95
1.5	7.5	4.5	-7.99	68.3	-41.0	-43.8	-42.40
1.5	7.5	1.5	-2.59	64.5	-10.90	-12.96	-11.93
1.5	7.5	-1.5	1.49	64.6	12.28	10.35	11.32
1.5	7.5	-4.5	6.69	68.5	42.4	40.5	41.45
1.5	7.5	-7.5	13.55	56.2	87.3	84.7	86.00
-1.5	7.5	7.5	13.60	54.9	-82.8	-85.0	-83.90
-1.5	7.5	4.5	6.53	65.9	-41.0	-42.6	-41.80
-1.5	7.5	1.5	2.13	63.0	-11.06	-12.84	-11.95
-1.5	7.5	-1.5	-1.95	63.0	11.97	10.34	11.16
-1.5	7.5	-4.5	-6.85	66.0	41.9	39.5	40.70
-1.5	7.5	-7.5	-14.66	54.5	83.7	81.4	82.55
-4.5	7.5	7.5	31.5	44.5	-58.3	-57.3	-57.80
-4.5	7.5	4.5	17.60	53.4	-32.8	-32.6	-32.70
-4.5	7.5	1.5	5.69	53.7	-10.08	-10.27	-10.18
-4.5	7.5	-1.5	-4.20	53.6	9.62	7.90	8.76
-4.5	7.5	-4.5	-16.21	53.2	32.4	29.2	30.80
-4.5	7.5	-7.5	-30.8	44.0	57.0	53.5	55.25
-7.5	7.5	7.5	31.8	32.7	-35.2	-33.9	-34.55
-7.5	7.5	4.5	20.7	39.3	-20.9	-20.5	-20.70
-7.5	7.5	1.5	6.65	41.1	-6.39	-6.65	-6.52
-7.5	7.5	-1.5	-4.77	41.0	6.98	5.38	6.18
-7.5	7.5	-4.5	-17.04	38.4	21.1	18.06	19.58
-7.5	7.5	-7.5	-30.3	31.6	34.4	31.1	32.75

X 軸、Y 軸、Z 軸に近いそれぞれの直線上での磁場の z 成分について、測定値と計算値を比較した。測定した磁場の振る舞いと計算された磁場の振る舞いがおおよそ一致していることが確かめられた (図 3.24)。

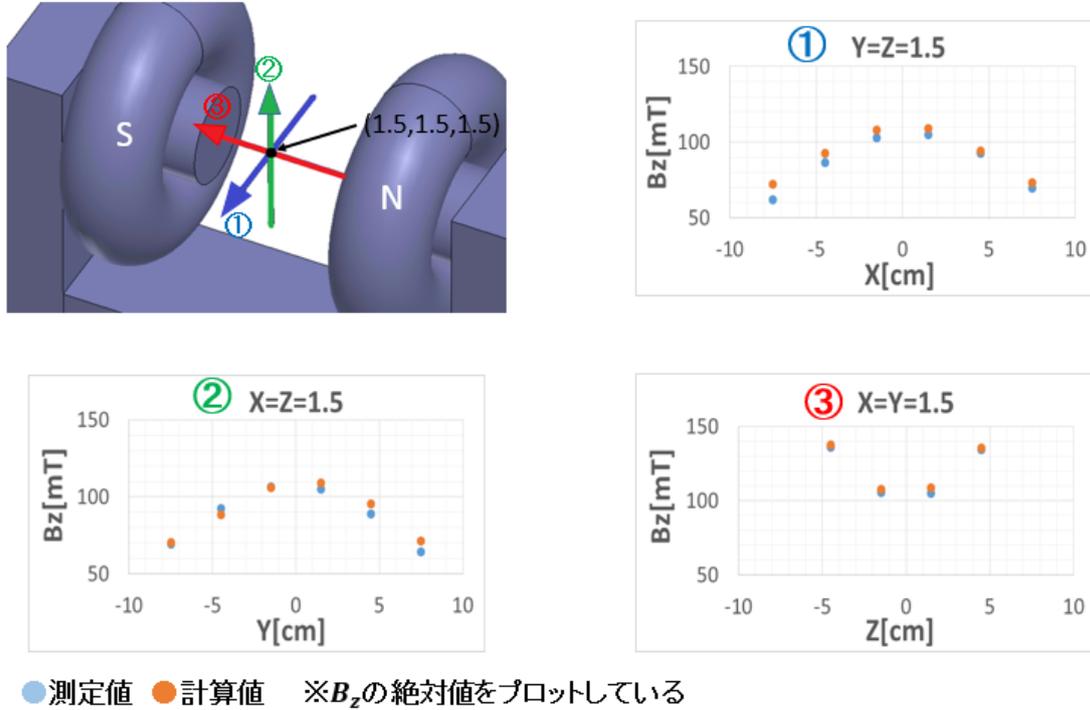


図 3.24: 磁場の z 成分の測定値と計算値の比較

測定値の計算値からのズレの大きさを評価するために、測定値と計算値の差が計算値の磁場強度の何%に相当するかを考えた。各座標、各成分について (3.3) を計算した。

$$\frac{|\text{測定値}| - |\text{計算値}|}{\text{磁場強度の計算値}(B)} \times 100[\%] \quad (3.3)$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.4)$$

(3.3) により求められた値を、XY 平面での 2 次元ヒストグラムで表した (図 3.25)。測定領域の端の方では計算値と測定値の違いが大きいが、黒枠で囲った TPC の範囲内で考えると、

±5.0 % に収まる測定点の割合 ;  $B_x$ :91 %,  $B_y$ :92 %,  $B_z$ :69 %

±10.0 % に収まる測定点の割合 ;  $B_x$ :100 %,  $B_y$ :100 %,  $B_z$ :91 %

±15.0 % に収まる測定点の割合 ;  $B_x$ :100 %,  $B_y$ :100 %,  $B_z$ :100 %

となった。よって、磁場の計算結果は十分に信頼できるといえる。

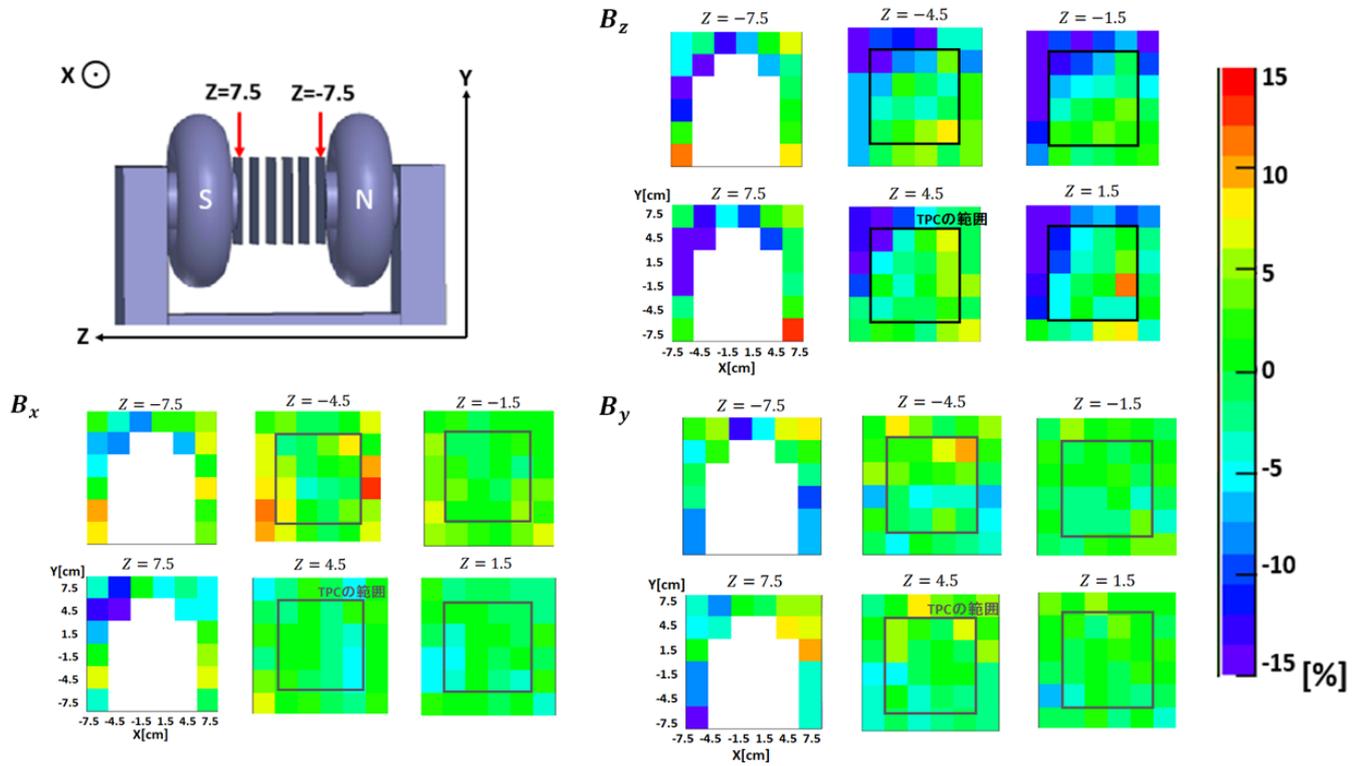


図 3.25: 測定値の計算値からのズレ

### 3.3 磁場計算・磁場測定のまとめ

- Maxwell 3D を用いて磁場の計算を行った。領域内での磁場の  $z$  成分が原点での磁場の  $z$  成分の  $\pm 20\%$  に収まる領域は、TPC の領域内で  $77\%$  であった。
- Maxwell 3D による磁場の計算結果の信頼性を確かめるために、領域内の磁場の各成分を測定し、計算結果と比較した。これにより、磁場の計算結果は十分に信頼できると確かめられた。
- 今後、計算によって得られたデータを Geant4 に組み込むことで、磁場の非一様性を考慮したシミュレーションを行うことができる。

## 第4章 検出器の性能評価（担当：藤田）

### 4.1 検出器概要

本研究では、粒子の飛跡の検出のために  $\mu$ -TPC を用いる。 $\mu$ -TPC は図 4.1 のような構成になっており、本節では、 $\mu$ -PIC・GEM および、 $\mu$ -TPC の概要と検出原理について示す。

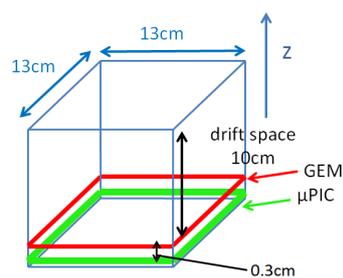


図 4.1:  $\mu$ -TPC の構成

#### 4.1.1 $\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)[16]

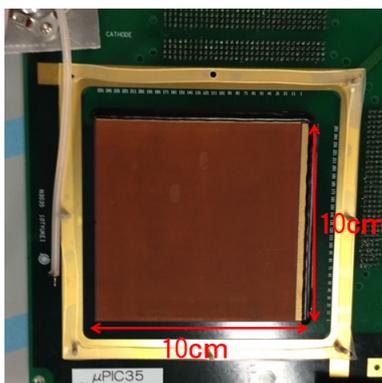


図 4.2:  $\mu$ -PIC の概形

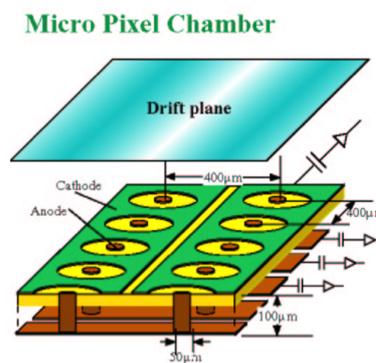


図 4.3:  $\mu$ -PIC の構造

本実験では、主ガス増幅器及び二次元画像装置として  $\mu$ -PIC を用いた [16]。図 4.2 に示すように本実験に用いた  $\mu$ -PIC は、 $10 \times 10\text{cm}^2$  の検出面積を持ち、図 4.3 に示すように、直交する 256 本のストリップが  $400\mu\text{m}$  間隔で基板の両面に形成されている。中心の陽極付近の強い電場により電子が加速され、ガス分子をイオン化させる。そのことによって生じた電子が、また同じように加速されてガス分子をイオン化させる。これを繰り返して電子雪崩を起こし大きな電気信号に増幅することによって荷電粒子を検出する。目的に適した読み出し回路と組み合わせることで、二

次元画像装置や三次元飛跡検出器の読み出しとして用いることが可能になる。 $\mu$ -PIC のガス利得は最大 $\sim 10^4$ である。

#### 4.1.2 GEM(Gas Electron Multiplier)[17]

本実験に用いた GEM は厚さ  $100\mu\text{m}$  の液晶ポリマーの両側に、厚さ  $5\mu\text{m}$  の銅電極が蒸着されており、直径  $70\mu\text{m}$  の穴が  $140\mu\text{m}$  間隔であけられている。両側の電極に電位差を与えることで、穴を通る電子が電子雪崩によって増幅される。GEM のガス利得は最大で $\sim 10^2$ であり、 $\mu$ -PIC とあわせるとガス利得は $\sim 10^5$ である。

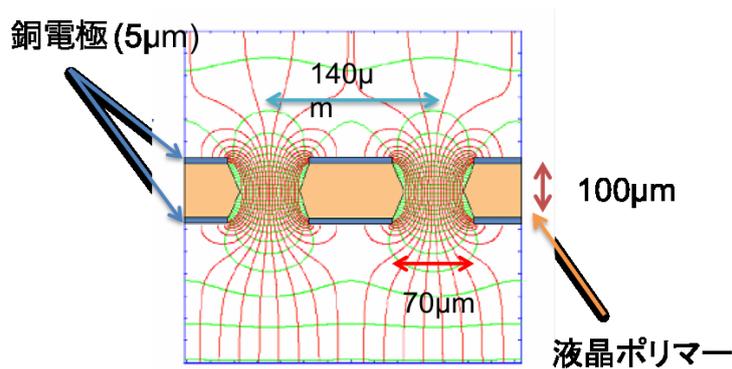


図 4.4: GEM の構造 [18]

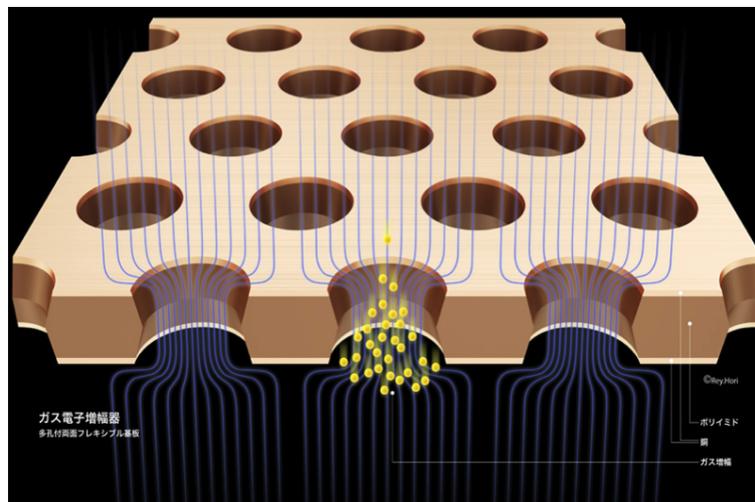


図 4.5: GEM による電子雪崩の様子 [19]

#### 4.1.3 $\mu$ -TPC(Micro Time Projection Chamber)

本実験に用いた真空容器は  $30 \times 30 \times 13\text{cm}^3$  で上面及び側面が厚さ  $3\text{mm}$  のステンレス、下部は厚さ  $16.7\text{mm}$  のアルミニウムで構成されている。ドリフト空間は  $13 \times 13 \times 10\text{cm}^3$  で上部は厚さ  $5\text{mm}$  の PTFE と銅メッシュ、側面は厚さ  $8\text{mm}$  の PEEK で構成されている。図 4.1 のように GEM

と  $\mu$ -PIC が 0.3cm の間隔で配置されている。側面には、1cm 間隔で銅線が張られており、ドリフト空間に一定の電場がかかるようになっている。検出器内を荷電粒子が通ると、チェンバー内に満たされているガスが電離される。電離された電子は、ドリフト空間の一定電場によって一定の速度でドリフトされ、GEM と  $\mu$ -PIC により増幅される。増幅された電子は、アノードとカソードのストリップで電気信号として捉えられ、 $\mu$ -PIC から  $xy$  平面上での位置を、時間情報 (100MHz) からドリフトした距離を求めることによって  $z$  軸方向の位置を得ることができる。このようにして荷電粒子の 3 次元飛跡を再構成することができる。

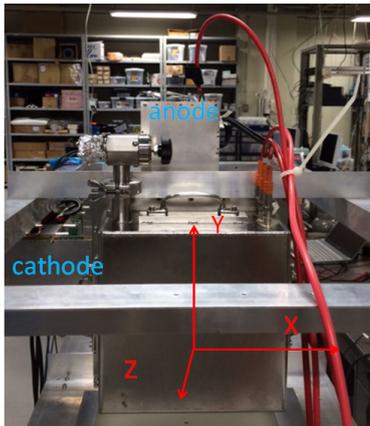


図 4.6: チェンバーの概形

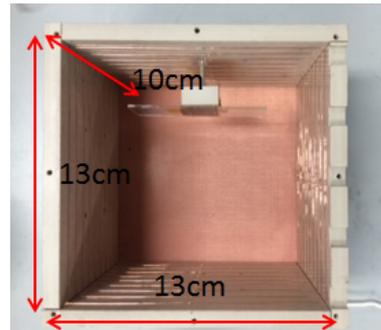


図 4.7:  $\mu$ -TPC の構造

#### 4.1.4 読み出し回路

飛跡検出の読み出し回路の概要を図 4.8 に示す。まずアノード (X)、カソード (Y) の各ストリップからの信号がアンプ (FE2009bal) に送られる。アンプからは増幅されたアナログ信号と閾値で 2 値化されたデジタル信号の 2 系統の信号が出力される。本実験ではデータ取得システムの制限上、アナログ信号もしくはデジタル信号どちらかのみを取得した。以下、i) エネルギー情報取得モード、ii) 飛跡情報取得モードについて述べる。i) 増幅されたアナログ信号の 32ch が sum され、VME 上の FADC (RPV-160 : 100MHz clock、入力電圧 -1V ~ 0、8bit) に送られる、FADC による電荷の情報から粒子のエネルギーが得られる。ii) デジタル信号は FPGA に送られ座標、時間、立ち上がり・立ち下りの情報が LAN 経由で PC に送られ粒子の飛跡が得られる。ここで立ち上がりはスレッシュホールドをこえたとき、立ち下りはスレッシュホールドを下回ったときのことである。

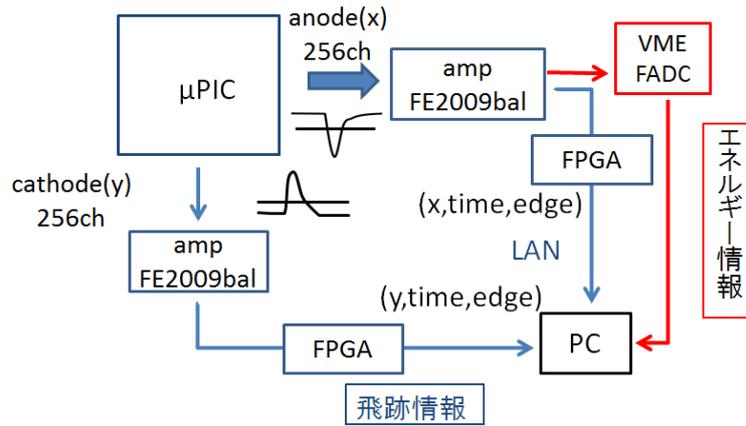


図 4.8: 装置のデータ取得の概略図

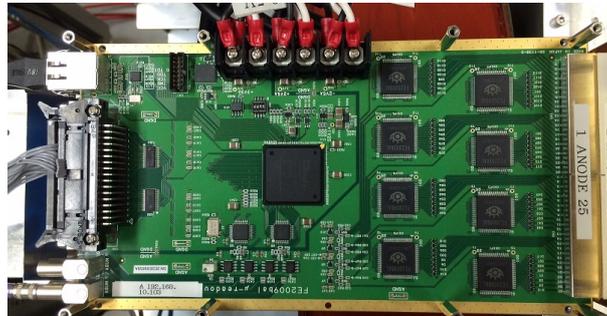


図 4.9: FE2009bal を搭載したアンプボード。写真の右に見える 8 個の IC が FE2009bal で 1 チップあたり 16 チャンネルの処理を行う。

## 4.2 エネルギースペクトル測定

### 4.2.1 セットアップ

ガス利得の測定を行うために、 $^{55}\text{Fe}$  のエネルギースペクトルの測定を行った。用いたガスは  $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 9 : 1$  の混合ガスで、チェンバーのドリフト長を 1cm にしてガスフローで測定を行った。また図 4.8 に示すエネルギー情報取得モードで測定を行った。

### 4.2.2 エネルギースペクトル測定の方法

FADC を用いて記録される波形から電荷  $Q$  は、

$$Q[\text{C}] = \left( \frac{\text{FADC 値を積分した値}}{256} \right) [\text{V}] \times (10 \times 10^{-9}) [\text{sec}] \times \frac{1}{50[\Omega]} \quad (4.1)$$

となる。FADC で記録した波形の積分について次のように計算した。まず図 4.10 の様に、まずベースラインを信号以外の部分の平均をとって決定し、そこからスレッシュホールドを設定した。次にス

レッシュヨルドを上回った範囲のベースラインから上の部分を積分した。用いたFADCは8ビットなのでFADC値を積分したものを256で割ると出力される電圧となる。また入力抵抗は50Ωであるので、電圧を抵抗値で割ったものが電流となる。FADCは100MHzのものを用いたので、1clockが10nsでありそれをかけたものが、信号の電荷となる。

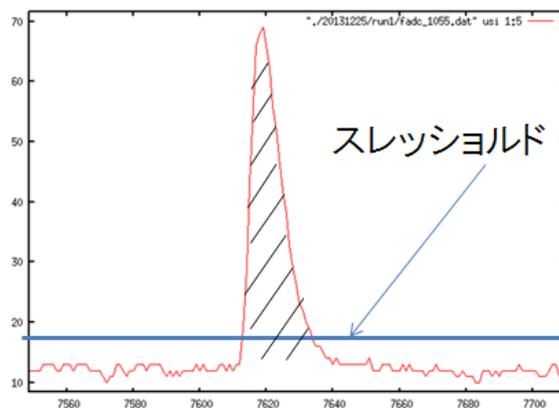


図 4.10: FADC による波形と積分の概略図

#### 4.2.3 エネルギースペクトル測定の測定結果

アノードの印加電圧 500V のときの  $^{55}\text{Fe}$  のエネルギースペクトルを図 4.11 に示す。測定の結果、 $^{55}\text{Fe}$  のエスケープピークと 5.9keV のピークが観測された。5.9keV でのエネルギー分解能 40%(FWHM)であった。

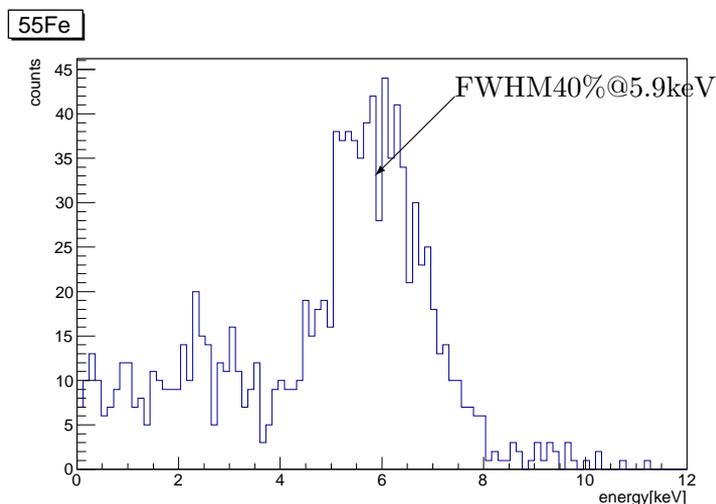


図 4.11: アノードの印加電圧 500V での  $^{55}\text{Fe}$  のエネルギースペクトル

## 4.3 ゲインカーブの測定

### 4.3.1 ガス利得の計算方法

4.2 節に示した結果の検出された電荷とエネルギーから、ガス利得の計算を行った。Ar の W 値は 26[eV]、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> の W 値は 26[eV] なので、<sup>55</sup>Fe から放射される X 線によって電離される電子の電荷は、

$$\frac{5.9[\text{keV}]}{26[\text{eV}]} \times (1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]) = 3.6 \times 10^{-17}[\text{C}] \quad (4.2)$$

となり、FADC を用いて記録される波形と電荷の関係は、

$$3.6 \times 10^{-17} \cdot G_{\text{gas}} \cdot G_{\text{amp}} = Q \quad (4.3)$$

と表される。ここで  $G_{\text{gas}}$  はガス利得で  $Q = 2.5 \times 10^{-10}$  のとき  $10^4$  となり、 $G_{\text{amp}}$  はアンプによる利得で  $G_{\text{amp}} = 700$  である。

### 4.3.2 ガス利得の測定結果

ガス利得の図 4.12 に示すアノード、インダクション、 $\Delta$ GEM の電圧依存について調べた。測定した電荷のヒストグラムから中心値をガウスフィットして求め、先ほどの (4.3) 式に代入することでガス利得を求めた。この結果を縦軸に log scale でガス利得、横軸に電圧としてプロットした (図 4.13)。アノード、 $\Delta$ GEM に関しては電子雪崩によりガス利得が指数関数的に変化するが、インダクションについては電子雪崩が起こらないので指数関数的に変化しない。よって正しい測定結果が得られていると考えられる。またガス利得が  $\sim 2 \times 10^4$  得られた。

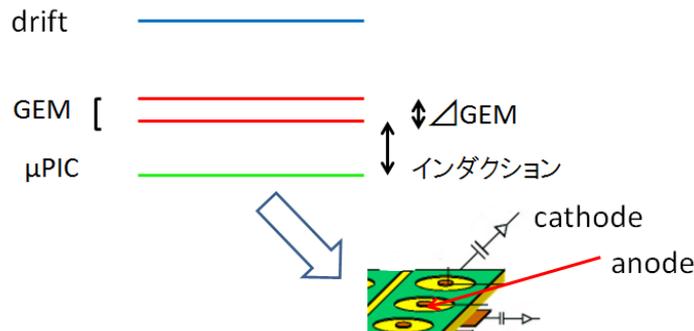


図 4.12: セットアップ模式図

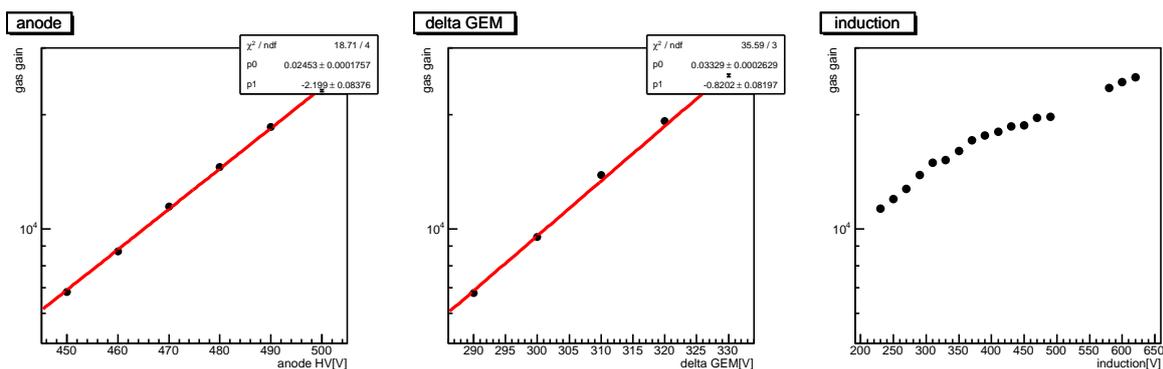


図 4.13: ガス利得の電圧依存性 (左からアノード、 $\Delta$ GEM, インダクション)

### 4.3.3 ガス利得測定のおまとめ

1気圧の  $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 9 : 1$  の混合ガスで、線源  $^{55}\text{Fe}$  を用いてガス利得測定を行った。その結果、アノードと  $\Delta$ GEM に関してガス利得が指数関数的に変化し、要請値であるガス利得  $2 \times 10^4$  を達成した。

## 4.4 電子の多重散乱角の測定

本研究では、電子を磁場中で曲げてその曲率半径から運動エネルギーを求める。しかし電子はガス中で多重散乱を起こすために分解能が悪くなる。そこで多重散乱角の測定を行い実際の測定で用いるガスの圧力に対して要請を与える。

### 4.4.1 飛跡の検出について

図 4.8 の飛跡情報取得モードを用いて、測定を行った。飛跡情報取得モードを用いると  $\mu$ -PIC からアノードとカソードについてそれぞれ座標と時間が記録されるので、時間情報からドリフト時間を求めることで  $(x,z), (y,z)$  が得られる。この 2 つの情報から三次元での飛跡の再構成が可能となる。図 4.14 に得られる飛跡の例を示す。左下と右上が生データでそれぞれ  $(x,z), (z,y)$  になっており、赤が立ち上がり、青が立下りを示している。

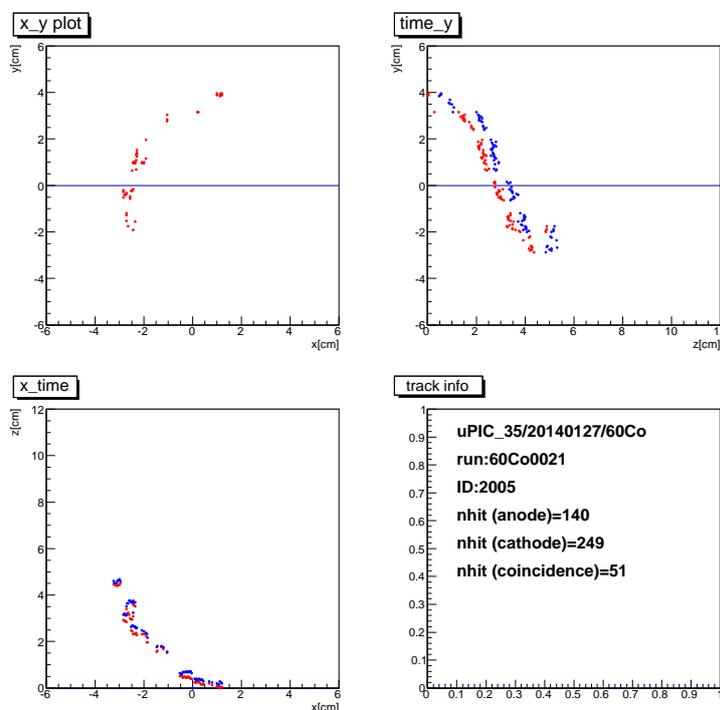


図 4.14:  $^{60}\text{Co}$  を用いた電子の飛跡 (0.2 気圧) の例 (赤 : 立ち上がり、青 : 立下り)

### 4.4.2 散乱角の大きさ

物質中を通る荷電粒子は、小さな角度の散乱を繰り返すことによって曲がっていく。このほとんどが原子核とのクーロン散乱によって起こり、その効果はクーロン多重散乱と呼ばれる。小さな角度においては散乱角の分布はおおよそガウス分布になるが、(4.4) 式で定義される  $\theta_0$  の数倍より大きな角度ではラザフォード散乱のように振る舞い、多重散乱の分布より広いテールを持つ。三次元の角度分布  $\theta_{\text{space}}$  を二次元の分布  $\theta_{\text{plane}}$  に射影した分布を、

$$\theta_0 = \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{\text{space}}^{\text{rms}} \quad (4.4)$$

と定義すると、大角度の散乱でない場合角度分布は、ほとんどガウス近似で十分でその広がりは、

$$\theta_0 = \frac{13.6[\text{MeV}]}{\beta c p} \cdot z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.0038 \ln(x/X_0)] \quad (4.5)$$

$$X_0 = \frac{716.4[\text{gcm}^{-2}]\text{A}}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (4.6)$$

となる [20]。ここで Z は電荷、A は質量数、 $X_0$  は放射長、x は物質の厚さ、p は運動量、 $\beta c$  は粒子の速度である。1 気圧の  $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 9 : 1$  の混合ガス中で運動量 1MeV の電子が 1cm 走ったときは、 $\theta_0 = 6.44 \times 10^{-2}[\text{rad}]$  である ( $X_0 = 19.3[\text{g}/\text{cm}^2], x=1[\text{cm}], p=1.4[\text{MeV}], \beta=0.89$  を用いた)

#### 4.4.3 多重散乱角の測定方法

線源に  $^{60}\text{Co}$  を用いて電子の飛跡を検出した。 $^{60}\text{Co}$  は図 4.15 のように崩壊し  $\gamma$  線を放射する。放射された  $\gamma$  線は、チェンバー内でガス中の電子とコンプトン散乱を起こす。 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 9 : 1$  の混合ガス 1 気圧のときのコンプトン散乱で散乱された電子の飛跡を検出した。

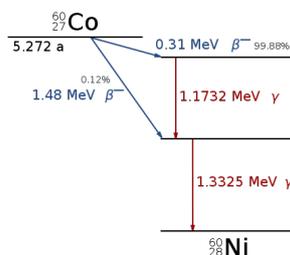


図 4.15:  $^{60}\text{Co}$  の崩壊図 [7]

散乱角を図 4.16 のように定義し、(4.6) 式の x を 1cm、2cm、3cm としたときの多重散乱角を求めた。図 4.17 のように、始点から 3 点と始点から x[cm] 進んだ点から 3 点を直線でフィットし、それを用いて始点のベクトル  $(x_{\text{initial}}, y_{\text{initial}}, 1)$  と x[cm] 進んだ点のベクトル  $(x_{\text{final}}, y_{\text{final}}, 1)$  を求めて内積を計算することにより、三次元の散乱角を求めた。次に (4.4) 式を用いて、三次元の散乱角から二次元に射影した角度を求め、これをヒストグラムにすることで  $\theta_0$  が得られる。

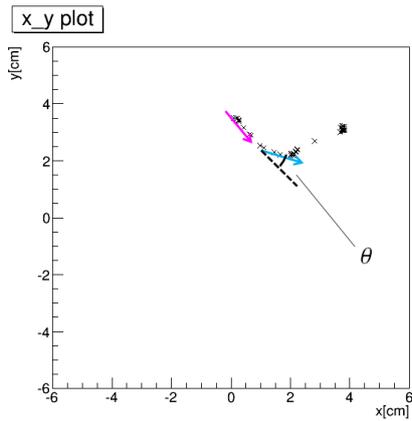


図 4.16:  $\theta$  の取り方 (ピンク : 始点、水色 : 1cm 進んだ点)

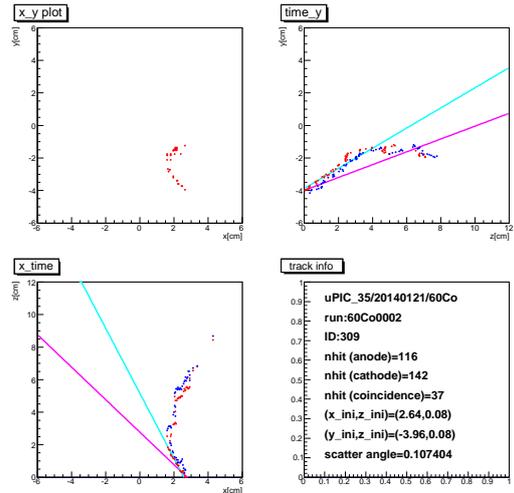


図 4.17: xz,zy 平面でのフィット (ピンク : 始点、水色 : 1cm 進んだ点)

$x=1[\text{cm}], 2[\text{cm}], 3[\text{cm}]$  のときの散乱角の理論的なヒストグラムを図 4.18、図 4.20、図 4.22 に測定値の散乱角のヒストグラムを図 4.19、図 4.21、図 4.23 に示す。小角散乱と見られる細いピークが広いピークに乗っている結果が得られた。小さいほうの散乱を  $\sigma_1$ 、大きいほうを  $\sigma_2$  としダブルガウス分布でフィットした。

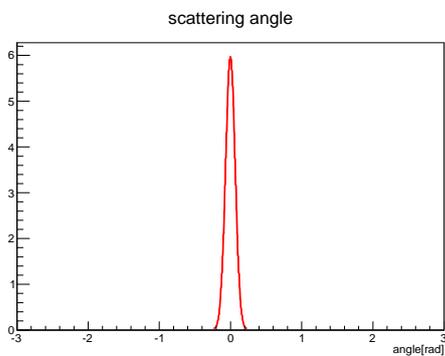


図 4.18: 電子がガス中を 1cm 進んだときの散乱角の理論的なヒストグラム

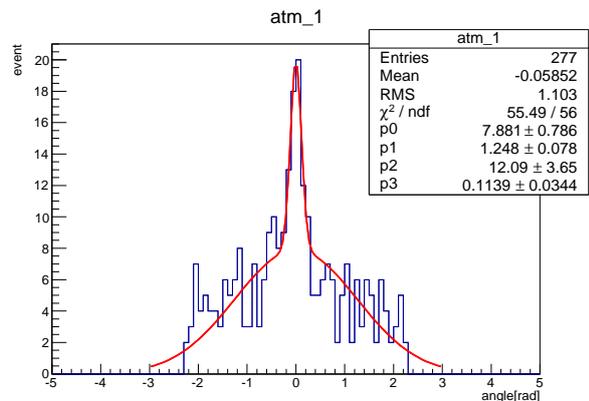


図 4.19: 電子がガス中を 1cm 進んだときの散乱角のヒストグラムとダブルガウスでのフィッティング

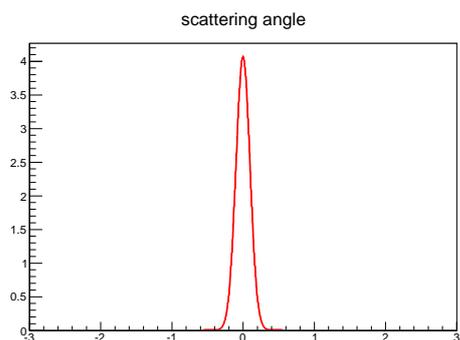


図 4.20: 電子がガス中を 2cm 進んだときの散乱角の理論的なヒストグラム

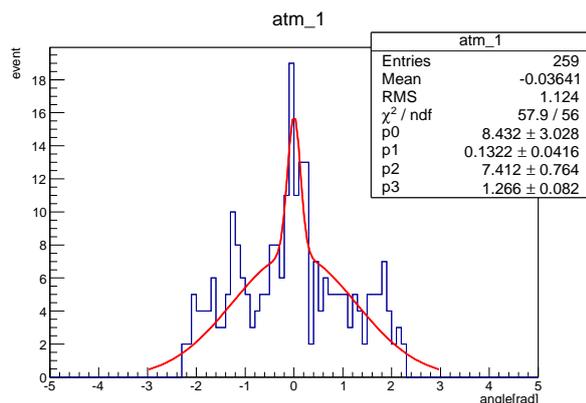


図 4.21: 電子がガス中を 2cm 進んだときの散乱角のヒストグラムとダブルガウスでのフィッティング

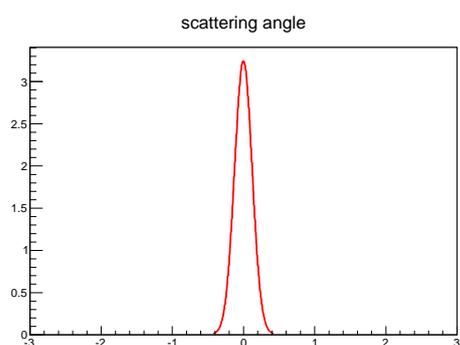


図 4.22: 電子がガス中を 3cm 進んだときの散乱角の理論的なヒストグラム

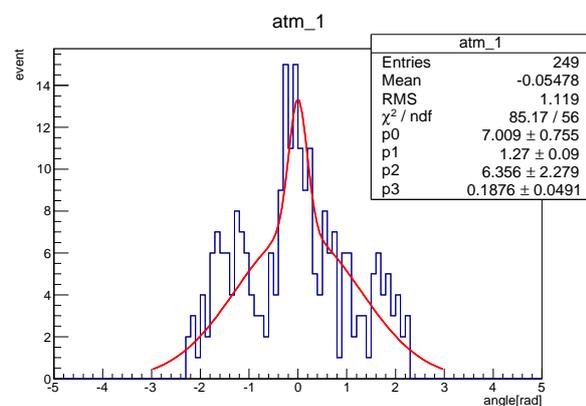


図 4.23: 電子がガス中を 3cm 進んだときの散乱角のヒストグラムとダブルガウスでのフィッティング

理論の  $\theta_0$  と得られた  $\sigma_1$  を表 4.1 に示す。また横軸に  $x[\text{cm}]$ 、縦軸に散乱角  $[\text{rad}]$  をとり  $\sigma_1$  と理論値をプロットしたものを図 4.24 に示す。図 4.24 を見ると  $\sigma_1$  に距離依存があることがわかるが、どの  $x$  においても理論値よりも大きい値が得られた。

表 4.1: 多重散乱角の理論値と測定値の比較

$x[\text{cm}]$	理論の $\theta_0[\text{rad}]$	$\sigma_1[\text{rad}]$
1	$6.44 \times 10^{-2}$	$(1.14 \pm 0.34) \times 10^{-1}$
2	$9.82 \times 10^{-2}$	$(1.32 \pm 0.41) \times 10^{-1}$
3	$1.23 \times 10^{-1}$	$(1.88 \pm 0.49) \times 10^{-1}$

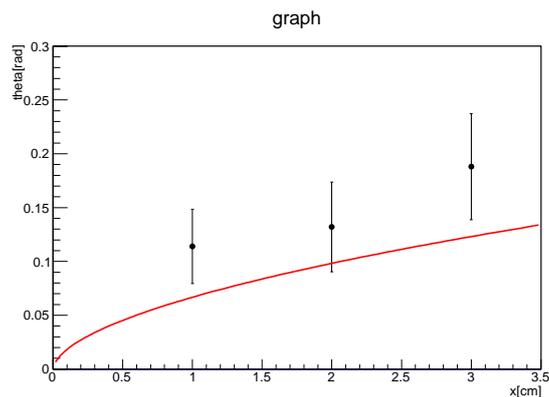


図 4.24: 多重散乱角の距離依存 (赤:理論、黒: $\sigma_1$ )

#### 4.4.4 考察

得られたヒストグラムの  $\sigma_2$  は多重散乱の理論の  $\theta_0$  からかなりずれているので多重散乱のイベントではないと考えた。散乱角が大きなイベントの原因としては、フィットする点をうまく選ばなかったことが考えられる。図 4.25、図 4.26 のように 1つの  $z$  座標に対して複数のヒットがある、もしくは折り返しがあるようなイベントはフィットがうまくできずに散乱角を大きく計算してしまっていた。これはデータが  $z$  座標の小さい順に並んでいるために起こるので、データをトラック通りに並び替えることができれば解消できると思われる。

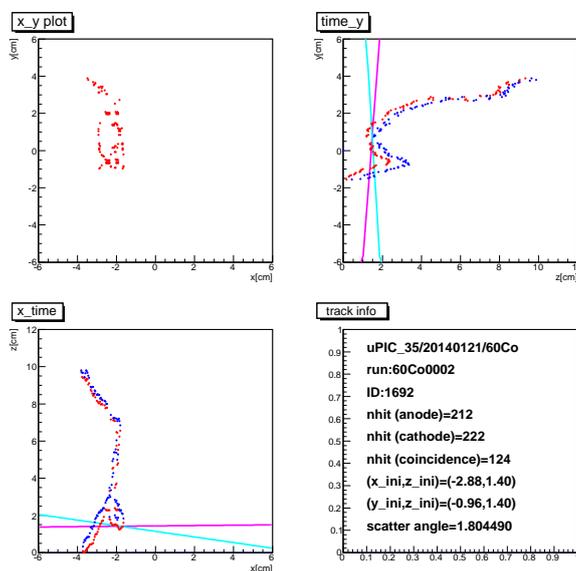


図 4.25: フィットする点をうまく選ばなかったイベント例 1

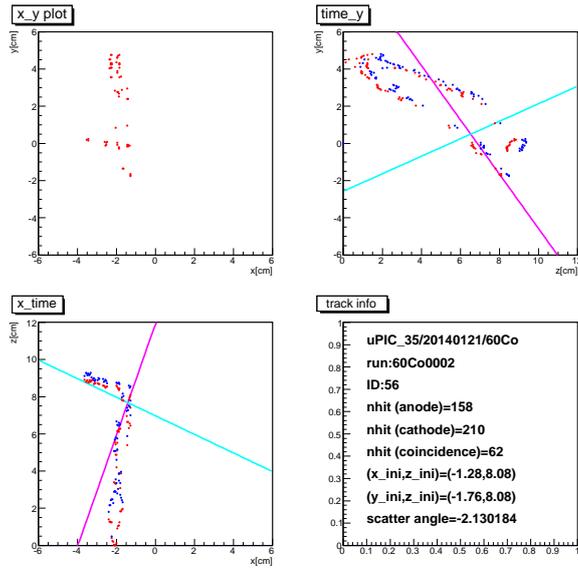


図 4.26: フィットする点をうまく選べなかったイベント例 2

また  $\sigma_1$  が理論値よりも大きい値が出てしまった理由としては、フィットする点の数が少なかったことが考えられる。図 4.27 のイベントの  $zy$  平面の水色の線は、フィットする点が少ないために細かい角度のずれを拾ってしまい、その結果本来の散乱角よりも大きな値が出てしまったと考えられる。これはフィッティングの際に始点もしくは  $x[\text{cm}]$  進んだ点の周りの密度が高いときにフィットする点を増やすことにより解消できると思われる。

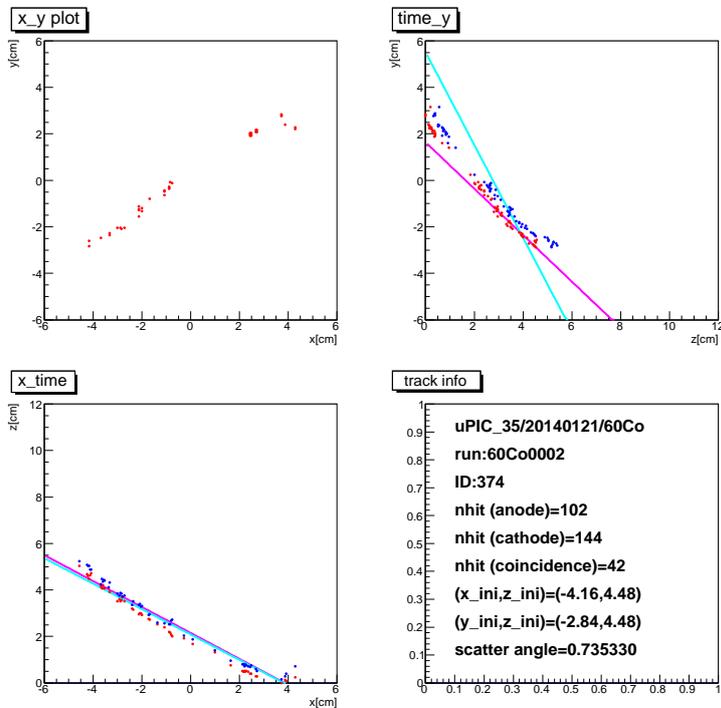


図 4.27: フィットする点が少なかった例 ( $zy$  平面の水色)

#### 4.4.5 多重散乱角測定のおとめ

電子の進んだ距離が 1cm,2cm,3cm のときの多重散乱角の測定を行った。散乱角の分布はダブルガウス分布でよくフィットされた。 $\sigma_1$  は測定したい多重散乱による分布だが、 $\sigma_2$  はフィットする点をうまく選べなかったことによるものである。これはデータが  $z$  座標の小さいものから並んでいるために起こるので、データをトラックの通りに並び替えることができれば解消できると思われる。得られた  $\sigma_1$  は理論と同様の傾向を示した。また  $\sigma_1$  は理論値より大きな値であったが、これはフィットする点を増やすことで測定値が理論値に近づくことが予想される。

## 第5章 電子の運動エネルギー測定法の検討

(担当：橋本 隆)

### 5.1 運動エネルギー測定原理

#### 5.1.1 運動エネルギー測定の概要

前章までに述べたように、ダブルベータ崩壊によって生じた電子のエネルギーを測定するために、曲率半径から運動量を求め、そこから運動エネルギーを求める。運動量  $p$  と曲率半径  $R$  の関係は、相対論的な結果は古典的な結果に一致し、

$$mv = p = qBR \quad (5.1)$$

となる。ここで  $m$  は電子の質量、 $B$  は磁場の強さ、 $q$  は電子の電荷の大きさである。

#### 5.1.2 シミュレーション

検出器のガス中での電子の運動を Geant4[21] を用いてシミュレートする。Geant4 とは、素粒子が物質中で起こす複雑な振舞や反応を正確にシミュレートする大規模ソフトウェアである。粒子が物質中で起こす振舞を、乱数を用いて計算するモンテカルロ法に基づいてシミュレーションをすることができる。Geant4 で得られた電子の飛跡を用いて、曲率半径を導出する方法を確立し、実験状況の最適化へと活かす。

#### シミュレーションの設定

シミュレーションでは、 $500 \times 500 \times 500 [\text{mm}^3]$  の 1 気圧の空気で満たされた実験室内に検出領域  $100 \times 100 \times 100 [\text{mm}^3]$  の  $\mu$ -TPC を厚さ  $5[\text{mm}]$  のアルミニウムで囲ったものを再現した。気体中の粒子の多重散乱、エネルギー損失は Geant4 によってランダムに計算される。検出領域は  $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 9 : 1$  のガスが封入されており、圧力は変更対象とした。本研究ではドリフトによる電子拡散等の効果は考慮にいていない。データは  $\mu$ -PIC に合わせて  $0.4 [\text{mm}]$  間隔で  $x, y$  座標それぞれのデータが記録され、あわせて  $z$  座標のデータが記録される。また、 $z$  軸方向に  $0.1 [\text{T}]$  の一様磁場をかけている。

#### 5.1.3 電子の飛跡

まず、得られる電子の飛跡から、解析方針を検討する。0.1 気圧のガス中での運動エネルギー  $1 [\text{MeV}]$  の電子の飛跡は図 5.1 のようになる。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 0.1 気圧

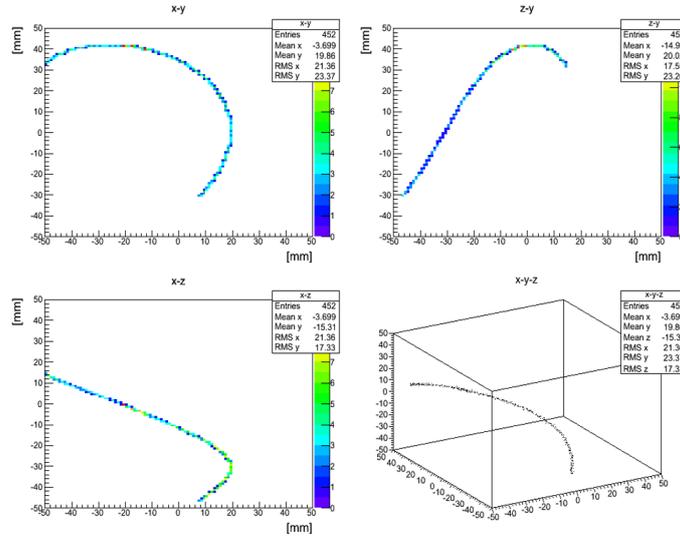


図 5.1: 一様磁場での運動エネルギー 1 [MeV] の電子の飛跡 (1event)

図 5.1 は x-y, y-z, x-z 平面、x-y-z 立方体それぞれからみた磁場中を運動する電子の飛跡である。図 5.1 をみると、電子が磁場中で螺旋運動をしているのがわかる。しかし、実際には電子が螺旋運動をしなくなる場合がある。理由は様々で、ガス中での多重散乱、検出器や Mo ワイヤ等につぶれる、ガス中を走ることによりエネルギーが低くなる、等が挙げられる。よって、電子の曲率半径を求めるためにはまず磁場中で電子が螺旋運動をしている部分を選び出す必要がある。ここで図 5.1 をみると、電子が螺旋運動している場合、飛跡が x-z または z-y 平面では直線にみえることわかる。つまり x-z, z-y 平面から直線部分を選び出し、x-y 平面から曲率半径を出せばよいのである。<sup>1</sup>

#### 5.1.4 曲率半径の導出

前節で述べたとおり本研究では、曲率半径を求める。図 5.2 に示す x-y 平面の飛跡から A, B, C の 3 点を選び、曲率半径を計算する。ここで、A は始点、B は始点から 100 番目の点、C は A と B を結んだ直線から一番離れた点である。また、 $R$  は曲率半径、 $l$  は弦の長さ、 $\delta$  は点 C と直線の距離である。100 番目の点を使った理由は、運動エネルギーの分解能が 20% に収まる程度に正確な  $\delta$  を求めるには、 $l$  がおよそ数 cm になるくらいの長さが必要となってくる。そこで、 $\mu$ -PIC のストリップの間隔 (0.4mm) であることを考慮に入れると、正確な  $\delta$  を得るために 100 点は必要であると判断したからである。将来的に螺旋部分を選び出せるようになった場合は、始点と選び出された範囲の端点を用いて  $\delta$  を得るようにする。 $\delta$  を求めると、三平方の定理より

$$\left(\frac{l}{2}\right)^2 + (R - \delta)^2 = R^2$$

$$R = \frac{1}{2\delta} \left(\frac{l^2}{4} + \delta^2\right) \quad (5.2)$$

となり、曲率半径を求めることができる。

<sup>1</sup>ただし本研究では螺旋部分を選び出すアルゴリズムは組み込んでいない。

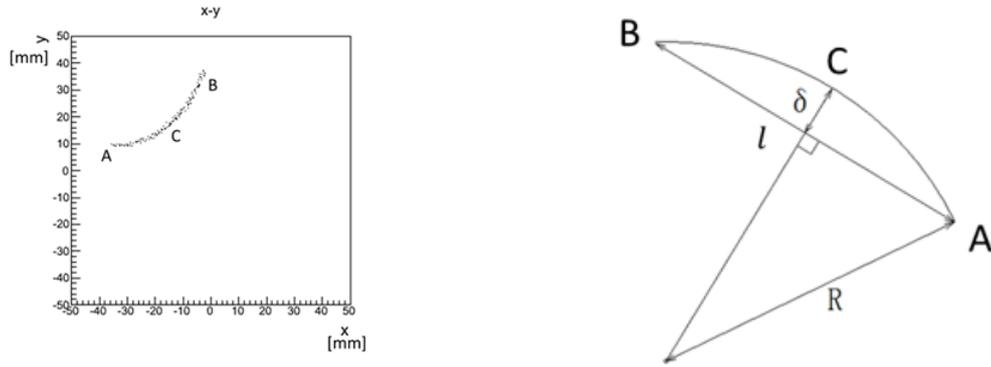


図 5.2: xy 平面での電子の飛跡のシミュレーション結果 (左) と長さの定義 (右)

### 5.1.5 電子の運動エネルギー

得られた曲率半径から、電子の運動エネルギーを求める。まず電子の運動量を求めるが、このとき使う式は

$$pc_{xy} [\text{eV}] = 3.0 \times 10^8 \cdot \frac{B}{1\text{T}} \cdot \frac{R}{1\text{m}} \quad (5.3)$$

で  $pc_{xy}$  は xy 平面での電子の運動量、 $B$  は磁場の強さ、 $R$  は電子の曲率半径である。得られた運動量は xy 平面に射影されたものなので、 $z$  成分も考える必要がある

$$pc_z = \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \times pc_{xy} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_{zx}^2 + \alpha_{zy}^2}} \times pc_{xy} \quad (5.4)$$

ここで  $\alpha_{zx}, \alpha_{zy}$  は  $zx, zy$  平面での直線の傾きである。各平面において直線の傾きは、始点から 10 点を使い最小二乗法により得たものを用いた。

こうして求められた  $pc_{xy}$  および  $pc_z$  を用いて (5.5) 式から電子の運動量  $pc$  を求められる。

$$pc = \sqrt{pc_{xy}^2 + pc_z^2} \quad (5.5)$$

電子の運動エネルギー  $T$  と運動量  $pc$  の間には (5.6) 式の関係がある。

$$T = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} - mc^2 \quad (5.6)$$

これに電子の静止質量  $mc^2 = 511 [\text{keV}]$  と得られた運動量  $pc$  を代入することにより、電子の運動エネルギー  $T$  を求めることができる。

### 5.1.6 誤差

運動エネルギー  $T$  の誤差は

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \frac{\partial T}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial \delta} \sigma_\delta \\ &= \frac{(3 \times 10^8 B)^2 \times \left(1 + \frac{1}{\alpha_{zx}^2 + \alpha_{zy}^2}\right) R}{\sqrt{(mc^2)^2 + (3 \times 10^8 B)^2 \times \left(1 + \frac{1}{\alpha_{zx}^2 + \alpha_{zy}^2}\right) R^2}} \times \left(-\frac{l^2}{8\delta^2} + \frac{1}{2}\right) \sigma_\delta \end{aligned} \quad (5.7)$$

で与えられる。一様磁場  $B=0.1$  [T] 中で、 $T=1$  [MeV] の電子に対し  $\delta=\pm 10\%$  の誤差があるとするれば

$$\sigma_T \simeq \mp 13\%$$

となる。つまり  $\delta$  に  $\pm 10\%$  の誤差があると  $T$  には約  $\mp 13\%$  の誤差が伝播する。

## 5.2 運動エネルギー導出法

### 5.2.1 $\delta$ 測定点の選択

$T=1$  [MeV] の電子を仰角 30 度、方位角 60 度の方向に発射 (出す場所はランダム) し、5.1 節に記した解析により電子の運動エネルギーを求めた。結果は図 5.3 である。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 0.1 気圧, 打ち出し方向: 仰角 30 度、方位角 60 度、位置: ランダム

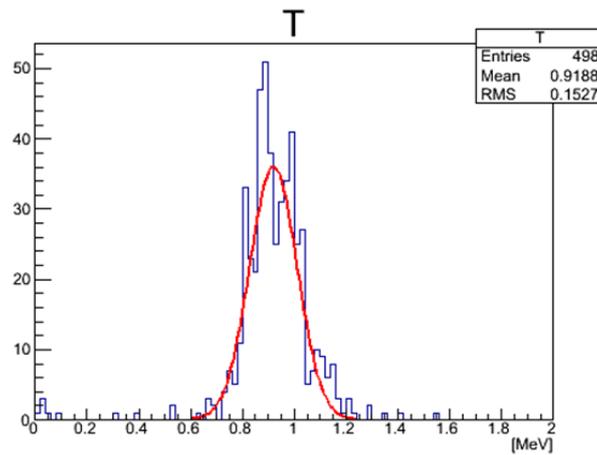


図 5.3: 電子の運動エネルギー

図 5.3 より、ガウシアンでフィットした mean の値は 0.919 [MeV] であり、 $T$  が 1 [MeV] より小さく求められた。これは図 5.4 のように測定で得られる  $\delta$  が大きいほうに引っ張られることにより、実際よりも大きい  $\delta$  が用いられ、 $T$  が小さくなるためである。

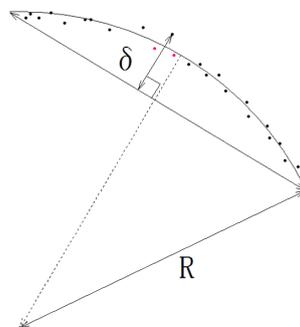


図 5.4:  $\delta$  導出の模式図

ここで改善策として  $\delta$  を求める際、前後1つずつの点(図 5.4 中の赤点) を使い距離の平均値としたものを  $\delta$  と再定義した。結果は図 5.5 である。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 0.1 気圧, 打ち出し方向: 仰角 30 度, 方位角 60 度, 位置: ランダム

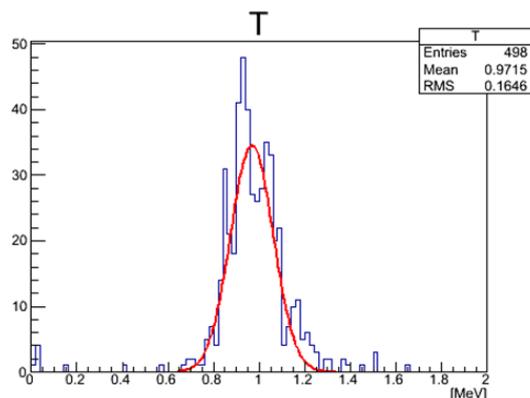


図 5.5: 電子の運動エネルギー (改善後)

ガウシアンでフィットした mean の値は 0.968 [MeV] となり、改善が見られた。この改善は有効であると判断できるため、以降の解析で  $\delta$  の導出にはこの方法を用いる。また、エネルギー分解能は  $\sigma=9\%$  となり、電子の打ち出し方向を固定した場合には、エネルギー分解能 20% という要請を満たしていることがわかる。

## 5.2.2 電子の運動方向依存

次に、実際の測定状況に近い状況を考えるため、打ち出し方向をランダムにした。結果を図 5.6 に示す。ここで、運動エネルギーは 1 [MeV]、打ち出し位置は原点である。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 0.1 気圧, 打ち出し方向: ランダム, 位置: 原点

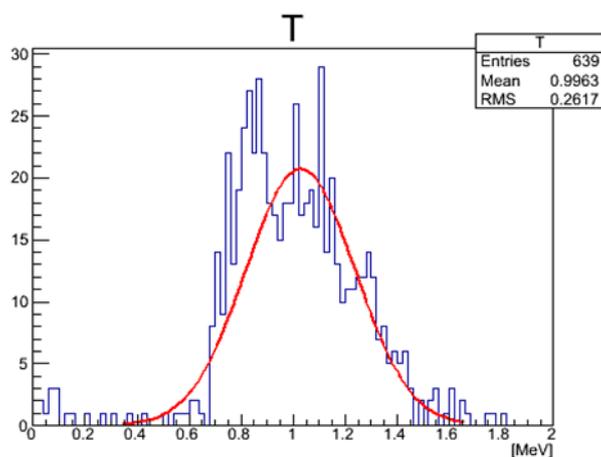


図 5.6: 打ち出し方向をランダムにした場合の電子の運動エネルギー

1 [MeV] のところにピークが立っているが、分解能は 21% で目標としている 20% 以内に収まっていない。そこで、分解能を悪くする原因を探るべく、電子の打ち出す角度の仰角、方位角をそれぞれ固定してシミュレーションを行った。まず仰角を固定して方位角を変化させた。結果を図 5.7 に示す。また、打ち出し位置は原点、仰角は 30 度とした。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 0.1 気圧, 打ち出し方向: 仰角 30 度、方位角  $\phi$  度, 位置: 原点

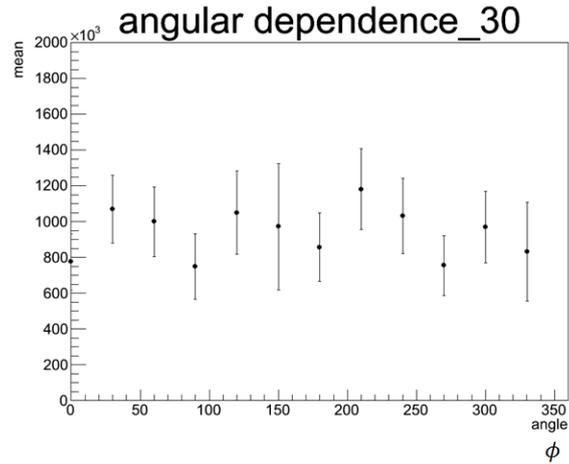


図 5.7: 得られた運動エネルギーの方位角依存性

ここで、 $\phi$  は方位角であり、エラーバーには運動エネルギーのヒストグラムをガウシアンでフィットして得た  $\sigma$  を用いた。方位角方向について、ガウシアンでフィットした mean の値に 90 度毎の角度依存性がみえた。次に、電子の打ち出す方向を仰角方向に変えてみた。結果を図 5.8 に示す。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 0.1 気圧, 打ち出し方向: 仰角  $\theta$  度、方位角 60 度, 位置: 原点

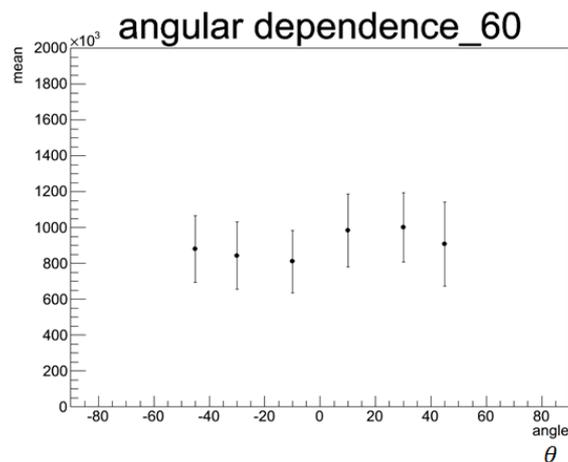


図 5.8: 得られた運動エネルギーの仰角依存性

ここで、 $\theta$  は仰角であり、エラーバーには運動エネルギーのヒストグラムをガウシアンでフィットして得た  $\sigma$  を用いた。仰角が負の場合、ガウシアンでフィットした mean の値が 1 [MeV] より小さいことがわかる。

以上の結果より、計算される運動エネルギーは方位角、仰角それぞれに依存しており、これが分解能を悪くする原因の一つであると言える。今後、角度依存について詳細を解析し、実際のダブルベータ崩壊測定では必要に応じて  $\phi$ 、 $\theta$  方向依存を持ったエネルギー算出を行う必要がある。

### 5.2.3 ガス圧力依存

ガス中での単位長さあたりの電子のエネルギー損失はガスの圧力に比例するため、ガスの圧力をあげることで検出器から得られる信号を大きくすることができる。一方、ガスの圧力を上げると、電子が受けるガス中での多重散乱の効果が大きくなる。これが、算出される電子の運動エネルギーのピークと分解能にどの程度影響を与えるかを評価する。ここでガス圧力依存を独立に議論するため、電子は原点から打ち出し、打ち出す角度は仰角 30 度、方位角 60 度に固定する。まず、ピークについての結果を図 5.9、エネルギー分解能についての結果を図 5.10 に示す。

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 打ち出し方向:仰角 30 度、方位角 60 度, 位置:原点

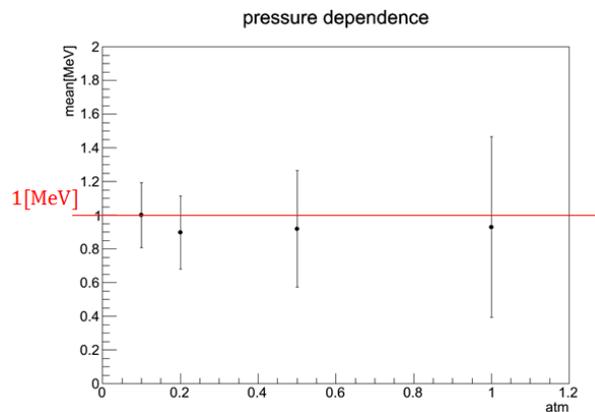


図 5.9: 運動エネルギーの気圧依存性

Ar:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1, 打ち出し方向:仰角 30 度、方位角 60 度, 位置:原点

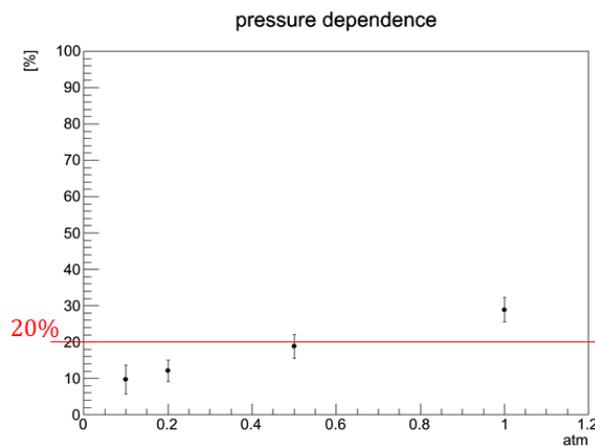


図 5.10: エネルギー分解能の気圧依存性

図 5.9 みると、ピークの位置については気圧依存性は見られないことがわかる。また、図 5.10 より、気圧を大きくすると分解能が悪くなっていくことがわかる。電子を原点から仰角 30 度、方位角 60 度に発射した場合、エネルギー分解能 20% 以下にするにはガス気圧を 0.5 気圧以下にする必要がある、という結果を得た。

### 5.3 まとめ

電子の飛跡から運動エネルギーを得る方法を開発した。また、一様磁場 0.1 [T] ではエネルギー分解能を目標としている 20% 以下にすることができた。さらに、運動エネルギーのピークの位置はガスの圧力によらず、0.5 気圧以下にするとエネルギー分解能 20% 以下にできることがわかった。

今後は

- 螺旋部分を選び出すアルゴリズムを開発する
- 角度依存について詳細を解析し、必要に応じて  $\phi$ 、 $\theta$  方向依存でエネルギー補正を行う
- 一様磁場ではなく、実際の磁場分布にしたときのエネルギー分解能について調べ、必要に応じて位置依存でのエネルギー補正を行い分解能を目標としている 20% 以下にする

等が課題になる。

## 参考文献

- [1] Average and recommended half-life values for two neutrino double beta decay:upgrade'05(Czech.J.Phys.56(2006)437-445)
- [2] The Majorana zero neutrino double beta decay experiment(LA-UR-2003-7709.PNNL-14420)
- [3] Neutrino-less double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$  studied by  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  scintillators(Phys.Rev.C78:058501,2008)
- [4] Measurement of the half-life of the two-neutrino double beta decay of  $^{76}\text{Ge}$  with the GERDA experiment(J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 40 035110)
- [5] Technical design and performances of the NEMO 3 detector(NIM A 536 (2005) 79)
- [6] Measurement of the double- $\beta$  decay half-life of  $^{136}\text{Xe}$  with the KamLAND-Zen experiment(Phys. Rev. C 85, 045504 (2012))
- [7] Table of Isotopes 7th edition ed. C. Michael Lederer & Virginia S. Shirley
- [8] KEK(<http://www.legacy.kek.jp/newskek/2004/sep/oct/doublebeta1.html>)
- [9] 磯江麻衣, 岡本慧太, 佐金拓耶, 林央樹, 矢ヶ部遼太: ダブルベータ崩壊の探索 神戸大学学部卒業論文,2013.
- [10] 真木晶弘: 高エネルギー物理学実験 丸善株式会社.
- [11] <https://www.physics.rutgers.edu/ugrad/327/AD590.pdf>.
- [12] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm193-n.pdf>.
- [13] <http://www.pci-card.com/TLP222A.pdf>.
- [14] PAK60-12A 製品取扱説明書.
- [15] 制作会社 Ansis ver.12
- [16] A.Ochi: NIM A471 (2001) 264.
- [17] M. Inuzuka et al., Nucl. Instr. and Meth. A 525 (2004) 529.
- [18] <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- [19] <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20110303160120/>
- [20] Particle Data Group:Review Of Particle Physics
- [21] S. Agostinelli et al., Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003) 250-303

## 謝辞

本実験を行うにあたり、たくさんの方々の助力をいただきましたので、この場を借りてお礼を申し上げます。

まず、本実験に携わる機会を与えてくださったことに深く感謝いたします。蔵重教授、身内准教授、越智助教には、実験背景から機器のセットアップ、解析方法まで丁寧に指導していただきました。毎週の経過報告ではもちろん、私たちが行き詰っているときにはいつでも的確なアドバイスを頂きました。竹内教授、原准教授、山崎准教授、鈴木助教には、研究室ミーティングでの発表練習の際などに、的確な御指摘を頂きました。

博士後期課程の中村さん、岸本さん、細川さん、博士前期課程の稲丸さん、大西さん、来見田さん、駒井さん、竹本さん、陳さん、長谷川さん、矢ヶ部さん、山口さん、山根さんには、気さくに接していただき、研究室での過ごし方などを教えていただき大変お世話になりました。同期の大里さんには、磁場計算のプログラミングでご尽力いただきました。特に、B5の中浦さんには、要領を得ない私たちに素粒子実験の基本的な理論や、コンピューターを用いた解析の基礎を丁寧に教えて頂きました。

たくさんの方の御協力のおかげで、この研究ができたことを深く感謝致します。