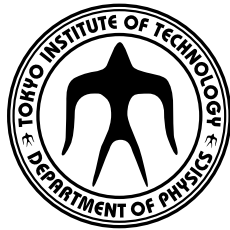


修士論文

# 不安定核反応実験のための 入射粒子飛跡検出器の開発

中山佳晃

学籍番号 07M01171



東京工業大学 大学院理工学研究科基礎物理学専攻  
平成21年2月9日

## 概要

不安定核 (RI) ビームを用いた非弾性散乱実験においては、入射粒子の運動量ベクトルと、出射粒子の運動量ベクトルを測定し、散乱角度分布を求めることが、スピン・パリティを同定する上で重要となる。我々は  $^{23,24}\text{O}$  核の非束縛励起準位の探索を行なうために、陽子標的を用いた非弾性散乱実験を 2009 年度に行なう予定である。 $^{23,24}\text{O}$  核をビームとして用いる逆運動学条件下では、散乱角度は実験室系で約  $2^\circ$  以下に分布するため、入射運動量ベクトルを  $0.1^\circ$  程度の角度分解能で測定しなければならない。

我々は高精度で入射運動量ベクトルを決定する目的で、多線式ドリフトチェンバー (通称 NDC) の開発を進めている。本論文では、カウンターガスとして  $\text{Ar}(90\%)\text{-C}_2\text{H}_6(10\%)$  および  $\text{He}(50\%)\text{-C}_2\text{H}_6(50\%)$  を使い、 $\beta$  線、宇宙線を利用した NDC の性能テスト実験とその結果について述べる。特に検出効率、適正動作電圧、位置分解能、角度分解能について調べた。その結果、 $\text{Ar}(90\%)\text{-C}_2\text{H}_6(10\%)$  で宇宙線を用いた場合、位置分解能は  $191.3 \pm 4.3 \mu\text{m}$  であるとわかった。一方、 $\text{He}(50\%)\text{-C}_2\text{H}_6(50\%)$  で宇宙線を用いた場合では、 $118.5 \pm 2.8 \mu\text{m}$  と得られた。この位置分解能では  $^{23}\text{O}$  ( $^{23}\text{O}$ ) 実験において角度分解能  $\Delta\theta_{Lab} = 0.052^\circ$  ( $0.049^\circ$ ) に相当するので、十分な性能が得られたと結論付けられる。(ただし、液体水素標的およびターゲットホルダーにおけるクーロン多重散乱は考慮していない。)

## Abstract

In inelastic scattering experiments with a radioactive beam, the angular distribution of the inelastically scattered particle provides information on the angular momentum transfer. This feature is useful to deduce the spin and parity of an observed state. It is scheduled to perform the  $^{23,24}\text{O}(p,p')$  experiment in inverse kinematics to search low-lying states of  $^{23,24}\text{O}$ . In inverse kinematics, the scattering angles are distributed within about 2 degrees in the lab. system. Hence, high angular resolution about 0.1 degrees is required for the tracking detector to determine the scattering angle.

As a tracking detector to determine them with high angular resolution for the experiment, we developed a multi-wire drift chamber (NDC). In this thesis, I investigate the performance of NDC using  $\beta$  and cosmic rays. When we use Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) as a counter gas, the position resolution of  $191.3 \pm 4.3 \mu\text{m}$  has been obtained. On the other hand, when we use He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%), we have achieved the resolution of  $118.5 \pm 2.8 \mu\text{m}$ , which corresponds to the angular resolution  $\Delta\theta_{Lab}$  of 0.052 (0.049) degrees (r.m.s.) for  $^{23}\text{O}$  ( $^{24}\text{O}$ ). I thus conclude that the performance of NDC sufficient to determine the angular distribution has been achieved.

# 目次

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>序論</b>  | <b>6</b>  |
| 1.1          | 研究の目的  | 6         |
| 1.2          | $^{23,24}\text{O}$ 核の非束縛励起準位の探索実験                          | 6         |
| 1.2.1        | 実験の概要  | 6         |
| 1.2.2        | 実験手法   | 6         |
| 1.3          | ドリフトチェンバーの開発の目的  | 8         |
| <b>第 2 章</b> | <b>多線式ドリフトチェンバー NDC の仕様</b>                                | <b>11</b> |
| 2.1          | NDC 仕様   | 11        |
| 2.1.1        | 概要   | 11        |
| 2.1.2        | 構造   | 12        |
| 2.1.3        | センス面   | 15        |
| 2.1.4        | カソード面  | 15        |
| 2.1.5        | Window 面   | 15        |
| 2.1.6        | 高電圧供給配線  | 15        |
| 2.1.7        | アノード信号読み出しの結線  | 16        |
| 2.1.8        | NDC 基板   | 17        |
| 2.1.9        | NDC 内部のガスの流れ   | 20        |
| 2.1.10       | 電位分布   | 22        |
| 2.2          | 角度分解能の評価   | 23        |
| 2.2.1        | クーロン多重散乱   | 23        |
| 2.2.2        | 角度分解能  | 27        |
| <b>第 3 章</b> | <b>オフライン実験</b>   | <b>29</b> |
| 3.1          | トリガーカウンター  | 30        |
| 3.2          | 測定回路   | 32        |
| 3.3          | ガス処理系  | 33        |
| 3.4          | $\beta$ 線測定  | 34        |
| 3.4.1        | $\beta$ 線測定、ガス Ar(90%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10%) | 35        |
| 3.4.2        | $\beta$ 線測定、ガス He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%)      | 38        |
| 3.5          | 宇宙線測定  | 41        |
| 3.5.1        | 飛跡解析方法   | 43        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 3.5.2        | ドリフトチェンバーの分解能と観測量の関係 . . . . .                                 | 47        |
| 3.5.3        | 宇宙線測定、ガス Ar(90%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10%) . . . . . | 49        |
| 3.5.4        | 宇宙線測定、ガス He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%) . . . . .      | 50        |
| 3.6          | オンライン実験での適正電圧の予測 . . . . .                                     | 52        |
| <b>第 4 章</b> | <b>まとめと今後の展望</b>   | <b>57</b> |
| <b>第 5 章</b> | <b>APPENDIX</b>  | <b>58</b> |
| 5.1          | ドリフトチェンバーの動作原理 . . . . .                                       | 58        |
| 5.1.1        | 電子雪崩の形成 . . . . .  | 58        |
| 5.1.2        | 充填ガス . . . . .   | 59        |
| 5.1.3        | ガス置換 . . . . .   | 60        |
| 5.2          | ガスの流量と置換率 . . . . .  | 61        |
| 5.3          | クーロン多重散乱 . . . . .   | 63        |
| 5.4          | 位置検出器の分解能と観測量の関係、通過粒子の位置、角<br>度分解能 . . . . .                   | 64        |
| 5.5          | プラスチックシンチレータ中での $\beta$ 線の飛程 . . . . .                         | 67        |
| 5.6          | 使用したモジュール等と各種設定 . . . . .                                      | 67        |
| 5.7          | 各測定におけるノイズレベル . . . . .  | 70        |
| 5.8          | 2山の TDC スペクトルと multiplicity . . . . .                          | 72        |
| 5.9          | $V_{\text{thre}}$ を変えたときの検出効率の変化 . . . . .                     | 75        |

# 目次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | 散乱角度と遷移断面積の関係および運動学的収束を解釈するためのダイアグラム  | 8  |
| 1.2  | 散乱角度  | 10 |
| 2.1  | NDC 正面図・下面図   | 13 |
| 2.2  | sense 面のワイヤ構成   | 14 |
| 2.3  | ASD カードの写真  | 16 |
| 2.4  | X-1 または Y-1 面の基板  | 17 |
| 2.5  | X-2 または Y-2 面の基板  | 18 |
| 2.6  | X'-1 または Y'-1 面の基板  | 19 |
| 2.7  | X'-2 または Y'-2 面の基板  | 19 |
| 2.8  | NDC 内部のガスの流れ  | 21 |
| 2.9  | NDC 電位分布  | 22 |
| 2.10 | 仮定した NDC の配置の概略図。   | 24 |
| 3.1  | トリガーカウンター   | 31 |
| 3.2  | 測定回路図   | 32 |
| 3.3  | ガス処理系   | 33 |
| 3.4  | $\beta$ 線測定時のセットアップ   | 34 |
| 3.5  | 検出多重度に依らない各面の全検出効率 (Ar-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10 %), $V_{thre} = -1.0$ V) | 36 |
| 3.6  | 検出効率と検出多重度の関係 (Ar-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10 %), $V_{thre} = -1.0$ V)      | 37 |
| 3.7  | 検出多重度に依らない各面の全検出効率 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50 %), $V_{thre} = -1.0$ V) | 39 |
| 3.8  | 検出効率と検出多重度の関係 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50 %), $V_{thre} = -1.0$ V)      | 40 |
| 3.9  | 宇宙線測定時のセットアップ   | 42 |
| 3.10 | 第 0 次 STC の例。   | 45 |
| 3.11 | 残差補正の例。   | 46 |
| 3.12 | 各面の位置分解能の加重平均 $\Delta x_{mean}$ (Ar(90%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10%))     | 50 |
| 3.13 | 各面の位置分解能の加重平均 $\Delta x_{mean}$ (He(50%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%))     | 52 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.14 | X1、X2 面に見られる残差のワイヤ左右依存性 . . . . .  | 53 |
| 3.15 | スレッシュヨルド設定値 ( $V_{thre}$ ) の違いによる検出効率曲線<br>の変化 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%)、X3 面) . . . . . | 54 |
| 3.16 | スレッシュヨルド設定 (波高と仮定) と $\epsilon = 50\%$ となる電圧<br>値の関係 . . . . .   | 55 |
| 3.17 | $\epsilon = 50\%$ となる電圧値の変化 $\Delta V$ と波高の増倍率 (MF_PH)<br>の関係 . . . . .                                | 55 |
| 3.18 | He(0.5 atm)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (0.5 atm) 中でのエネルギー損失 . . . . .                               | 56 |
| 5.1  | クーロン多重散乱 . . . . .   | 63 |
| 5.2  | 2 山の TDC スペクトルと multiplicity . . . . .   | 73 |
| 5.3  | 2 山の TDC スペクトルとワイヤ同士の correlation . . . . .  | 74 |
| 5.4  | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (Ar(90 %)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10 %),<br>$V_{thre} = -0.75$ V) . . . . .    | 76 |
| 5.5  | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (Ar(90 %)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10 %),<br>$V_{thre} = -1.5$ V) . . . . .     | 77 |
| 5.6  | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (Ar(90 %)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10 %),<br>$V_{thre} = -2.0$ V) . . . . .     | 78 |
| 5.7  | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50 %), $V_{thre} =$<br>$-0.75$ V) . . . . .        | 79 |
| 5.8  | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50 %), $V_{thre} =$<br>$-1.5$ V) . . . . .         | 80 |
| 5.9  | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50 %), $V_{thre} =$<br>$-2.0$ V) . . . . .         | 81 |
| 5.10 | 検出効率 と 検出多重度 の関係 (He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50 %), $V_{thre} =$<br>$-2.5$ V) . . . . .         | 82 |

# 表 目 次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | ワイヤ・膜の項目表   | 12 |
| 2.2  | ASD カードのピン番号 (図 2.3 参照) とアノードチャンネルの対応関係                     | 16 |
| 2.3  | 主な物質の放射長  | 25 |
| 2.4  | NDC の構成要素別の $x/X_0$   | 26 |
| 2.5  | ビーム上流側の NDC から真空隔壁までにある物質の $x/X_0$ (ただし NDC は除く)            | 26 |
| 2.6  | 二次ビーム情報   | 27 |
| 2.7  | クーロン多重散乱角   | 27 |
| 2.8  | 全体の角度分解能  | 28 |
| 3.1  | トリガーカウンターの寸法  | 30 |
| 3.2  | 変数の定義   | 47 |
| 3.3  | 印加電圧による分解能の変化 (Ar(90%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10%)) | 49 |
| 3.4  | 印加電圧による分解能の変化 (He(50%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%)) | 51 |
| 5.1  | 種々のガスに対する W 値 ([1] より引用)                                    | 60 |
| 5.2  | 電子捕獲率 (標準状態)。 [2] より引用。                                     | 61 |
| 5.3  | n 回置換でのガス置換率  | 61 |
| 5.4  | n 回置換でのガス置換率  | 63 |
| 5.5  | 使用したモジュール等  | 68 |
| 5.6  | AMT-TDC の設定   | 68 |
| 5.7  | ディスクリ設定   | 68 |
| 5.8  | 測定 I のときのノイズレベル (単位: mV)                                    | 71 |
| 5.9  | 測定 II のときのノイズレベル (単位: mV)                                   | 71 |
| 5.10 | 測定 III のときのノイズレベル (単位: mV)                                  | 71 |
| 5.11 | 測定 IV のときのノイズレベル (単位: mV)                                   | 71 |



# 第1章 序論

## 1.1 研究の目的

不安定核 (RI) ビームを用いた非弾性散乱実験においては、入射粒子の運動量ベクトルと、出射粒子の運動量ベクトルを測定し、散乱角度分布を求めることが、スピン・パリティを同定する上で重要となる。我々は $^{23,24}\text{O}$ 核の非束縛励起準位の探索を行なうために、陽子標的を用いた非弾性散乱実験を2009年度に行なう予定である。 $^{23,24}\text{O}$ 核をビームとして用いる逆運動学条件下では、散乱角度は実験室系で約 $2^\circ$ 以下に分布するため、入射運動量ベクトルを $0.1^\circ$ 程度の角度分解能で測定しなければならない。この要請のために、我々は入射運動量ベクトルを測定するために用いる検出器として、多線式ドリフトチェンバー NDC (飛跡検出器) の開発を行なった。

## 1.2 $^{23,24}\text{O}$ 核の非束縛励起準位の探索実験

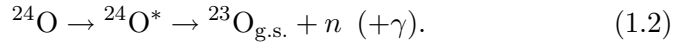
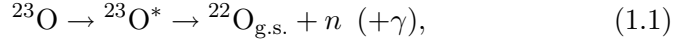
### 1.2.1 実験の概要

我々は $^{23,24}\text{O}$ 核の非束縛励起状態の探索実験を2009年度に行なう予定である。この実験の目的は、陽子数  $Z = 8$ 、中性子数  $N = 16$  である $^{24}\text{O}$ 核とそれよりも中性子数がひとつ少ない $^{23}\text{O}$ 核の新しい低励起準位を不変質量法を用いて観測し、中性子過剰な酸素同位体における中性子数  $N = 16$  のシェルギャップの大きさを決定し、新魔法数  $N = 16$  の実験的確認を得ることである。

### 1.2.2 実験手法

我々は不変質量法を用いて $^{23,24}\text{O}$ 核の励起準位を測定する。標的核である陽子との非弾性衝突により励起され共鳴状態を形成した $^{23,24}\text{O}$ 核は、粒子放出により二体、あるいは多体の終状態チャンネルに崩壊する。すな

わち、以下の崩壊チャンネルである：



このように主として 1 中性子崩壊チャンネルが起こるが娘核  ${}^{22}\text{O}({}^{23}\text{O})$  が励起状態の場合は  $\gamma$  線も放出される。

不変質量法について説明する。放出される粒子の 4 元運動量ベクトル  $(E_i, \vec{P}_i)$  を測定することにより、励起状態 ( ${}^{23}\text{O}^*$ ,  ${}^{24}\text{O}^*$ ) の不変質量  $M_{\text{inv}}$  は次式により求められる：

$$M_{\text{inv}} = \sqrt{\left(\sum_i E_i\right)^2 - \left(\sum_i \vec{P}_i\right)^2}. \quad (1.3)$$

放出粒子の間の相対エネルギー  $E_{\text{rel}}$  は、次式で表される：

$$E_{\text{rel}} = M_{\text{inv}} - \sum_i M_i, \quad (1.4)$$

と表される。ここで、 $M_i$  は終状態を形成する各粒子の質量である。測定で求められた  $E_{\text{rel}}$  と、ある終状態チャンネルへの崩壊閾値  $E_S$  (中性子分離エネルギー) を用いて、共鳴準位への励起エネルギー  $E_{\text{ex}}$  が次式により表される：

$$E_{\text{ex}} = E_S + E_{\text{rel}} (+E_\gamma). \quad (1.5)$$

$E_\gamma$  の測定が必要となるのは娘核が励起準位に生成された場合である。対象となる不安定核をビームとして用いる逆運動学条件下では、不変質量法は、以下に示すような特徴のため、非束縛共鳴準位の良い分光学的手法となっている。

1. 相対エネルギーが入射粒子の運動量ベクトルによらず、崩壊粒子の運動量ベクトルの測定のみによって得られるため、二次ビームである入射粒子の運動量ベクトルの広がりによって分解能が損なわれることがない。
2. 相対エネルギーが 1 MeV で 約 100~200 keV (rms 値) 程度と、高い分解能が得られる。
3. 崩壊粒子が前方に集中するため、比較的小さな検出器系で実験的に大きなアクセプタンスが得られる (運動学的収束)。

しかしながら、特徴 3 で挙げた運動学的収束は必ずしも良い側面だけではない。非束縛状態のスピン・パリティを同定する上で、重要な散乱角度測定が運動学的収束のため困難となるためである。このことについてはドリフトチェンバーの開発の目的と合わせて次節で述べる。

### 1.3 ドリフトチェンバーの開発の目的

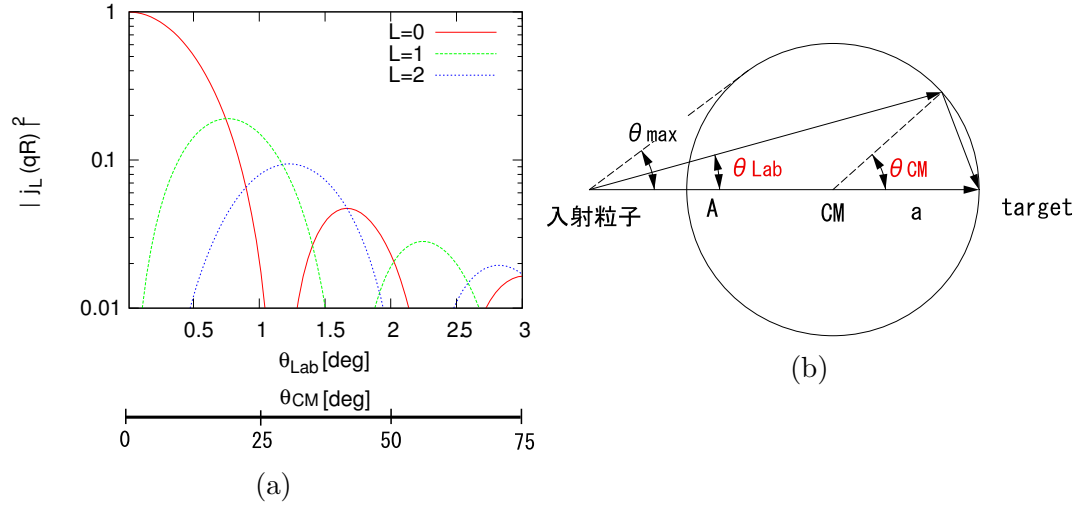


図 1.1: (a) 運動学的収束効果を幾何学的に解釈するためのダイアグラム。簡単のため古典的弾性散乱について描いた。(b) 非束縛共鳴準位への遷移断面積と  $\theta_{Lab}$  (または  $\theta_{CM}$ ) の関係。

対象となる原子核をビームとして用いた逆運動学条件下では、崩壊粒子が前方に集中する。この運動学的収束効果を幾何学的に解釈するためのダイアグラムを図 1.1 (a) に示す。簡単のため非相対論的な弾性散乱を考えると、実験室系での散乱角度  $\theta_{Lab}$  と CM 系での散乱角度  $\theta_{CM}$  の間には、以下の関係式が成り立つ。

$$\theta_{CM} = \theta_{Lab} + \arcsin\left(\frac{A}{a} \sin \theta_{Lab}\right). \quad (1.6)$$

ここで  $A$  は入射核の質量数、 $a$  は標的核の質量数である。 $^{24}\text{O} + \text{p}$  反応の場合、入射核  $^{24}\text{O}$  と標的核  $\text{p}$  の質量比 ( $A/a$ ) が大きいため、散乱角度  $\theta_{Lab}$  がおよそ  $2^\circ$  以下の範囲に制限される。

図 1.1(b) に、非束縛共鳴準位への遷移断面積と散乱角度の関係を示す。このように散乱角度分布のパターンは、その遷移における移行角運動量に関する情報を含んでいるため、スピン・パリティを同定する上で重要な指標となる。しかしながら、上述のように散乱角度が実験室系でおよそ  $2^\circ$  以下に分布するため、角度分解能  $0.1^\circ$  程度で角度分布を測定する高い角度分解能を持つ検出器が必要不可欠となる。角度分布の測定には二次ビームの角度および各崩壊粒子の角度を決定する必要がある。すなわち、 $^{24}\text{O}$

の非弾性散乱の場合、 $\vec{P}(^{24}\text{O})$  と  $\vec{P}(^{23}\text{O}) + \vec{P}(\text{n})$  の方向の差から散乱角度を求める (図 1.2)。

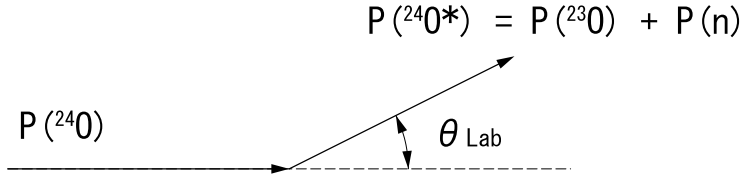


図 1.2: 散乱角度の求め方。 $^{24}\text{O}$  の非弾性散乱の場合、 $\vec{P}(^{24}\text{O})$  と  $\vec{P}(^{23}\text{O}) + \vec{P}(\text{n})$  の方向の差から散乱角度を求める。

放出粒子側については、その角度分解能は  $\vec{P}(^{23}\text{O}) \gg \vec{P}(\text{n})$  のため、 $\vec{P}(^{23}\text{O})$  の角度測定が重要となる。我々はすでに放出荷電粒子用の飛跡検出器として多線式ドリフトチェンバー MDC (Multitrack Drift Chamber) を開発済みであり、すでに  $^{14}\text{Be}$ 、 $^{19}\text{C}$  の非弾性散乱実験 [3] などでの高い性能が示されている。本論文では、MDC に加えて入射粒子側  $\vec{P}(^{24}\text{O})$  の角度の精密測定を行なうためのドリフトチェンバー NDC を製作し、角度分布の精度の向上を目指している。

MDC と同程度の角度分解能  $0.10^\circ$  [4] が得られれば、 $^{24}\text{O}$  の非弾性散乱でのスピンパリティの同定が可能となる。本論文では同機の製作を行ない、さらに適正動作電圧の測定等の性能テストを行なっている。本論文では第 2 章に多線式ドリフトチェンバー NDC の仕様、第 3 章にオフライン実験、そして第 4 章にまとめと今後の展望を述べる。

## 第2章 多線式ドリフトチェンバー NDC の仕様

本章ではまず、不安定核反応実験のための入射粒子飛跡検出器として開発した、多線式ドリフトチェンバー NDC の仕様について述べる。また NDC の角度分解能の評価について述べる。

### 2.1 NDC 仕様

#### 2.1.1 概要

多線式ドリフトチェンバー NDC は、不安定核反応、特に中性子過剰核の非弾性散乱における入射粒子の飛跡測定に用いる検出器である。NDC は荷電粒子の位置情報を高精度 (半値幅  $100\ \mu\text{m}$  以下) で得ることを目標として開発した。NDC の特長は、多数のワイヤを用いて有感面積を分割することにより、広い面積における荷電粒子の検出位置情報を高計数率で取得可能な点である。

想定している非弾性散乱実験では、NDC は標的直前に 2 台配置され、2 台の NDC の荷電粒子検出位置情報から、標的への入射運動量ベクトルを決定する。当検出器は X 方向 (鉛直方向) に sense wire (anode wire) が張られた sense 面と、Y 方向 (水平方向) に sense wire が張られた sense 面をそれぞれ四面ずつ有する。

### 2.1.2 構造

NDCの正面図と下面図を図2.1に、またワイヤ配置を図2.2に示す。またワイヤ・膜の材質等を表2.1に示す。本検出器は互いに平行、かつ等間隔な八面の sense (anode) 面と九面の cathode 面で構成される。

X 面および X' 面は sense wire (anode wire) が鉛直方向に張られた面で、粒子の水平方向の位置を測定するのに用いる。Y 面および Y' 面は sense wire (anode wire) が水平方向に張られた面で、粒子の鉛直方向の位置を測定するのに用いる。プライムを付した面は、プライムを付さない面に対して半セル分だけワイヤの位置をずらした配置とする。各 sense wire の間、並びに、端に位置する sense wire の外側には、potential wire が sense wire に平行に張られる。これら X 面、X' 面、Y 面、および Y' 面は共通の cathode 面 (cathode 膜が張られた面) を隔てて互いに隣り合う。

検出器の有感領域は 96 mm × 96 mm である。

|        |   |
|--------|---|
| 有感領域   | 96 mm × 96 mm   |
| セルサイズ  | anode-potential : 3 mm<br>anode-cathode : 3 mm  |
| サイズ・材質 | anode wire : 20 $\mu$ m $\phi$ Au-W/Re<br>potential wire : 80 $\mu$ m $\phi$ Au-Al<br>cathode film : 7.5 $\mu$ m Al-Kapton<br>window film : 7.5 $\mu$ m Al-Kapton |
| 数量     | anode wire : 16 本/面 × 8 面<br>potential wire : 17 本/面 × 8 面<br>cathode film : 1 枚/面 × 9 面<br>window film : 1 枚/面 × 2 面   |

表 2.1: ワイヤの項目表。NDC の有感領域・セルサイズ、ワイヤの直径/膜の厚さ・材質・数量について記す。

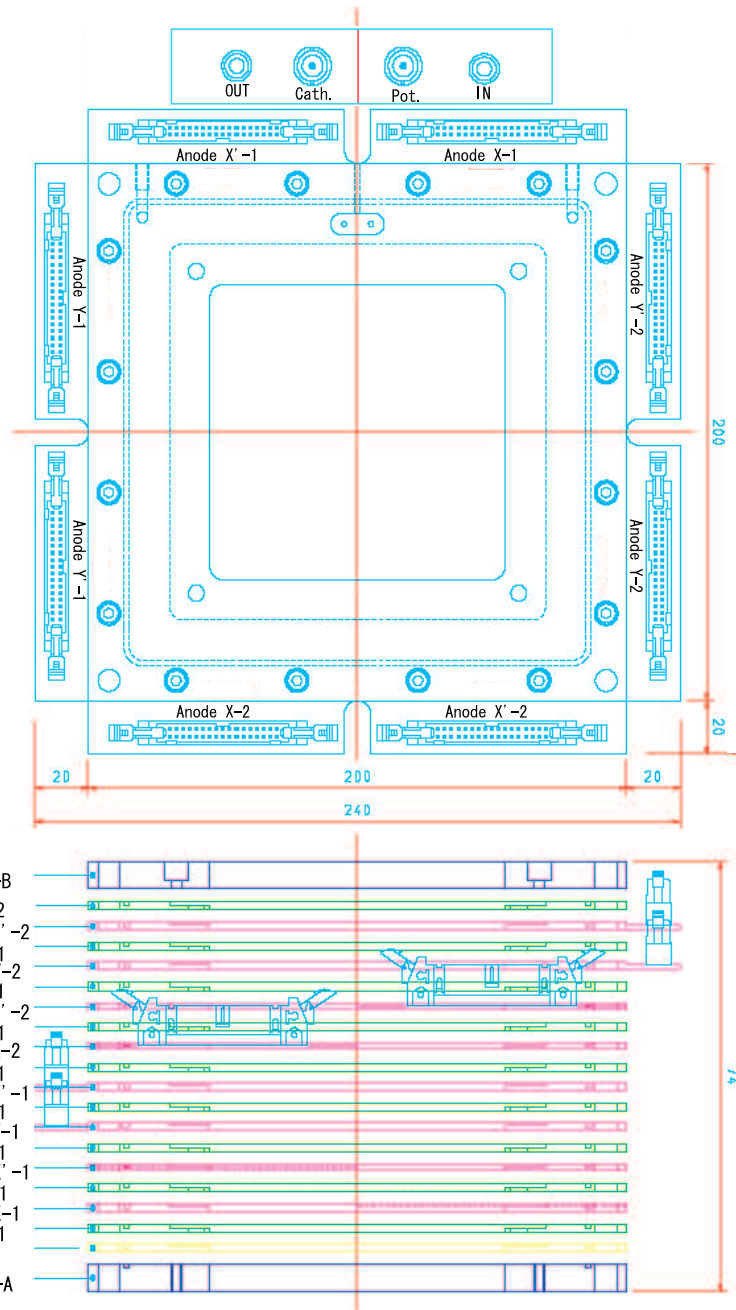


図 2.1: 上図は NDC を正面から見た図、下図は NDC を下から見た図。ASD (Amp Shaper Discr) カードは anode flame に取り付けられたオスコネクターに直接取り付ける。ガスの出入口と cathode・potential への高電圧供給経路は X-1 面、X'-1 面の信号を読み出している側面についている。



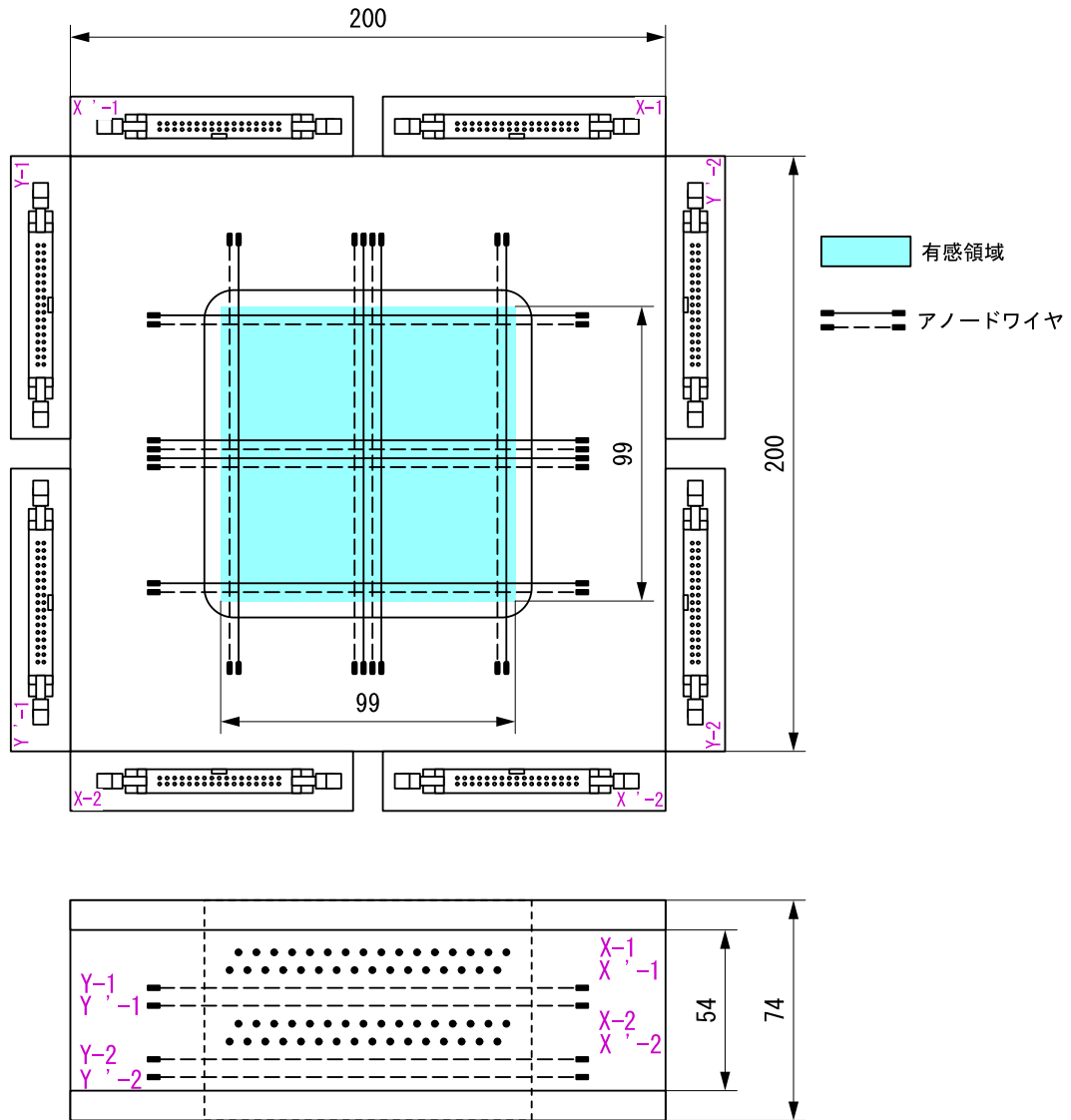


図 2.2: sense 面のワイヤ構成。anode wire のみ記載し、potential wire は省略している。上図は NDC をビーム入射方向から見た図。色が塗られている部分が有感領域を表す。下図は NDC を上から見た図。鉛直に貼られたワイヤによって荷電粒子の X 方向の入射位置を測定し、水平に貼られたワイヤによって Y 方向の入射位置を測定することができる。' を付した面は ' を付さない面に対してワイヤ位置を半セルずらしている。

### 2.1.3 センス面

センス面は、センスワイヤ（アノードワイヤ）とポテンシャルワイヤが交互に平行に等間隔に張られたワイヤ面である。八つのセンス面は、粒子の入射方向から順に X1-面、X1'-面、Y1-面、Y1'-面、X2-面、X2'-面、Y2-面、Y2'-面と呼ぶ。プライムを付した面は、プライムを付さない面に対して半セル分だけワイヤの位置をずらした配置とする。これはドリフト方向における左右の不定性の問題を解決するためである。センスワイヤ（アノードワイヤ）とポテンシャルワイヤの間隔は、どのセンス面でも 3 mm である。

### 2.1.4 カソード面

カソード面は、カソード膜から成り、センス面に対して平行で、センス面のビーム上流側と下流側にセンス面から 3.0 mm の間隔を隔ててそれぞれ一面ずつ配置される（隣り合うセンス面は同一のカソード面を共有する）。カソード面の面数は全部で九面である。カソード膜は 7.5  $\mu\text{m}$  の Kapton に両面 200 nm（2000 オングストローム）の Al を蒸着、さらに両面に数オングストロームのクロムメッキ（酸化防止のため）を施したものを使用している。

### 2.1.5 Window 面

NDC と外界を区切る Window 面の材質はカソード面と同じアルミナイズドカプトン 7.5  $\mu\text{m}$  である。Window 面はグランド電位に保たれているため、外界と遮断されノイズ低減効果がある。

### 2.1.6 高電圧供給配線

センスワイヤ（アノードワイヤ）は、プリアンプを通じてグランド電位に保たれる。高電圧はポテンシャルワイヤとカソード膜に印加される。電圧供給経路はカソード用とポテンシャル用の二系統である。カソード用については九面を個別に結線し、それぞれ 1 M $\Omega$  W のロード抵抗を介して一本にまとめ SHV コネクタに接続する。ポテンシャル用については八面を個別に結線し、それぞれ 1 M $\Omega$  W のロード抵抗を介して一本にまとめ SHV コネクタに接続する。

### 2.1.7 アノード信号読み出しの結線

アノードワイヤからの信号はアノードフレームに垂直に取り付けられたコネクタを介して、図 2.3 の ASD (Amp Shaper Discr) カードに接続するものとする。ASD カードの型番は TRH ASD AD TYPE34+10 である。信号出力形式は LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 形式である。図 2.3 の ASD カードのピン番号と、アノードチャンネルの対応関係は表 2.2 に示す。

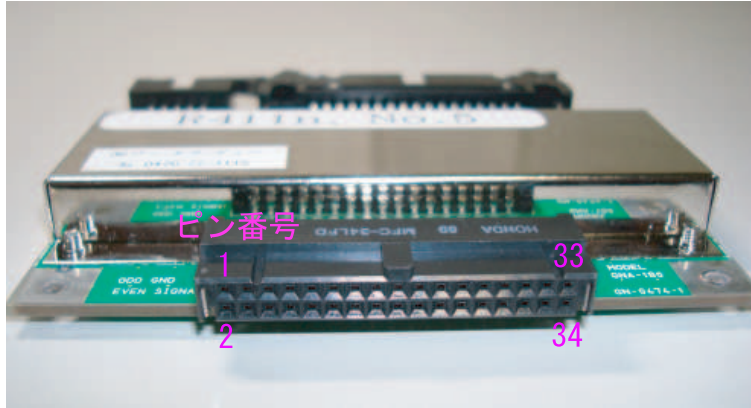


図 2.3: ASD(Amp Shaper Discr) カードの写真。本増幅器は、素粒子物理学実験、及び原子核物理実験に使用される MWPC や MWDC 用の信号処理カードである。アンプ、シェーパー、ディスクリミネーターの機能を持ち検出器に取り付けやすいように設計されている。信号出力は LVDS 形式。写真中のピン番号と anode チャンネルの対応は表 2.2 を参照。

| グラウンド | ピン番号 | ピン番号 | アノードチャンネル |
|-------|------|------|-----------|
| GND   | 1    | 2    | ch1       |
| ⋮     | ⋮    | ⋮    | ⋮         |
| GND   | 31   | 32   | ch16      |
| GND   | 33   | 34   | GND       |

表 2.2: ASD カードのピン番号 (図 2.3 参照) とアノードチャンネルの対応関係

### 2.1.8 NDC 基板

アノードワイヤ ch と NDC の X 方向 Y 方向の有感領域の中心との位置関係は以下の通りである。この中心については図 2.1 や図 2.4～図 2.7 において十字線で示している。

- X、Y-1 → 8.25 ch
- X、Y-2 → 8.75 ch
- X'、Y'-1 → 8.75 ch
- X'、Y'-2 → 8.25 ch

なお、例えば 8.25 ch とは 8 ch、9 ch の wire を 1 : 3 に内分する点という意味である。

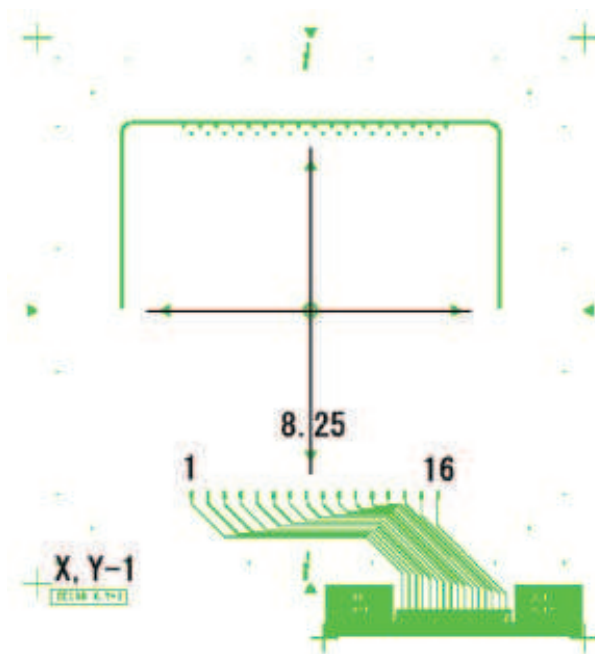


図 2.4: X-1 または Y-1 面の基板。基板の裏側から見た図 (ASD カードが飛び出る方を基板の表側と定義する)。有感領域の中心は 8.25 ch。

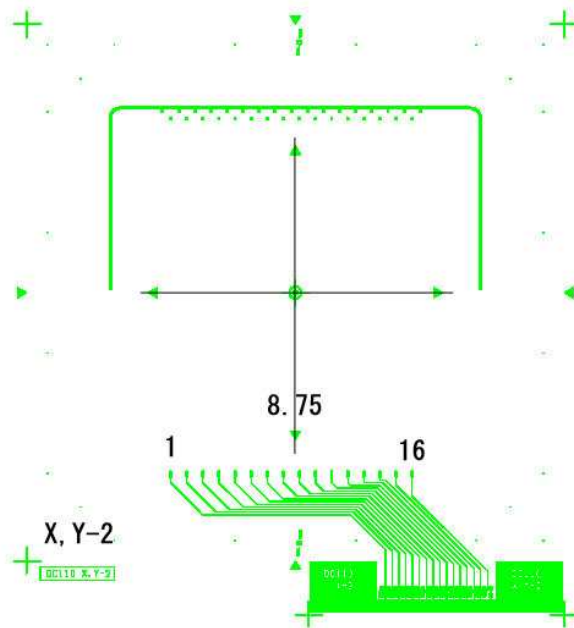


図 2.5: X-2 または Y-2 面の基板。基板の裏側から見た図 (ASD カードが飛び出る方を基板の表側と定義する)。有感領域の中心は 8.75 ch。

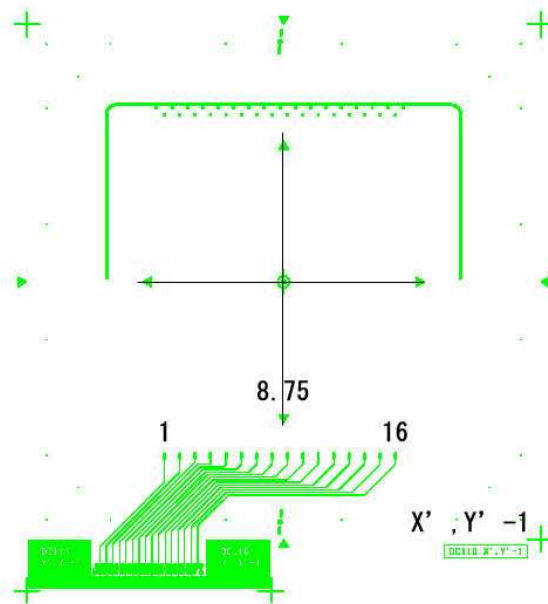


図 2.6: X'-1 または Y'-1 面の基板。基板の裏側から見た図 (ASD カードが飛び出る方を基板の表側と定義する)。有感領域中心は 8.75 ch。

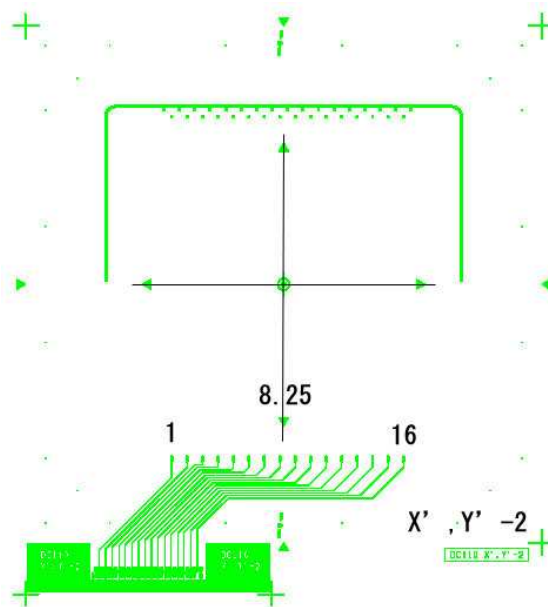


図 2.7: X'-2 または Y'-2 面の基板。基板の裏側から見た図 (ASD カードが飛び出る方を基板の表側と定義する)。有感領域の中心は 8.25 ch。

### 2.1.9 NDC 内部のガスの流れ

NDC の Cathode 面は アルミナイゾドカプトンフィルムで構成されている。そのため、ガスを導入し、チェンバー内全体に充満し、排気する機構が特殊な構造になっている。以下にガス導入から、排気までのガスの流れについて示す(図 2.8 参照)。

1. Window-A Flame からガスを導入する。
2. 隣接する Spacer Flame に彫られた溝(幅 3.5 × 深さ 1.5) を介して、Flame の中心方向へガスが流れる。
3. Window-A Flame と Cathode-1 Flame の間にガスが充満する。
4. Cathode-1 Flame の 四隅に空けられた  $4 \times \phi 6.0$  のキリ穴から隣の面の方へガスが流れる。
5. Cathode-1 ~ Anode-X1 ~ Cathode-1 の間にガスが充満する。
6. 他の面でも【4】と【5】が繰り返されて、最後に Window-B Flame 手前の Cathode-2 Flame にガスが辿り着く。
7. Cathode-2 Flame に彫られた溝(幅 3.5 × 深さ 1.5) を介して、Flame の隅の  $\phi 3.5$  のキリ穴にガスが流れる。ただし、この溝は、【2】の溝とは反対側、つまりガス排気側に彫られている。
8. 各 Flame には、【7】の  $\phi 3.5$  のキリ穴に対応する箇所と同じく、 $\phi 3.5$  のキリ穴が空いているため、Window-A Flame の排気口へとガスのトンネル(?) がつながる。このトンネルを通して、ガスが排気される。

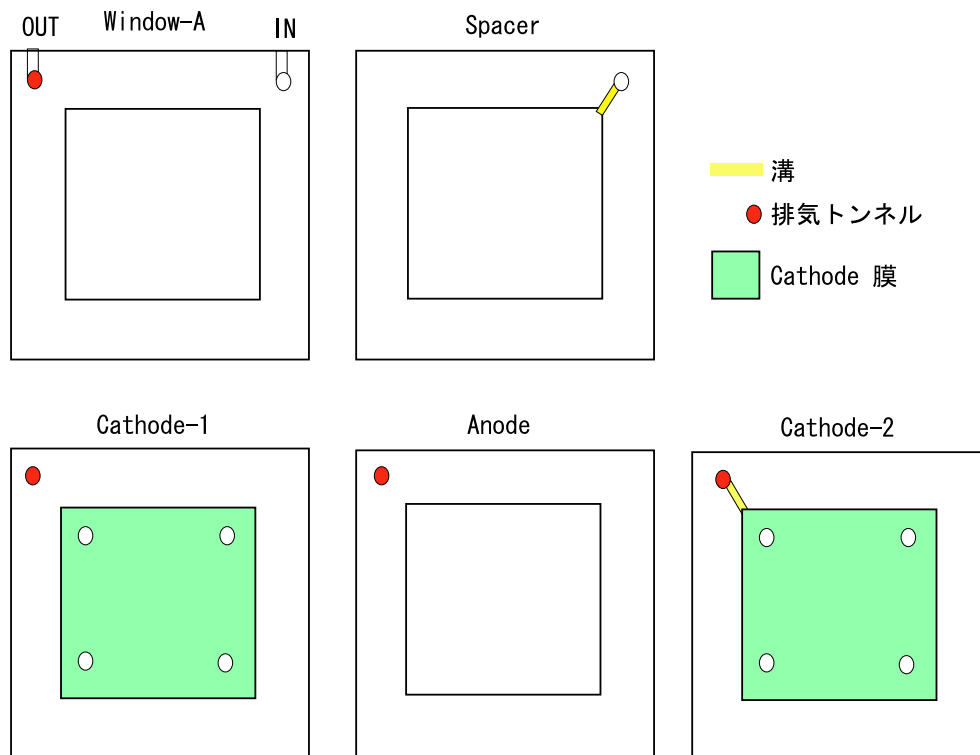
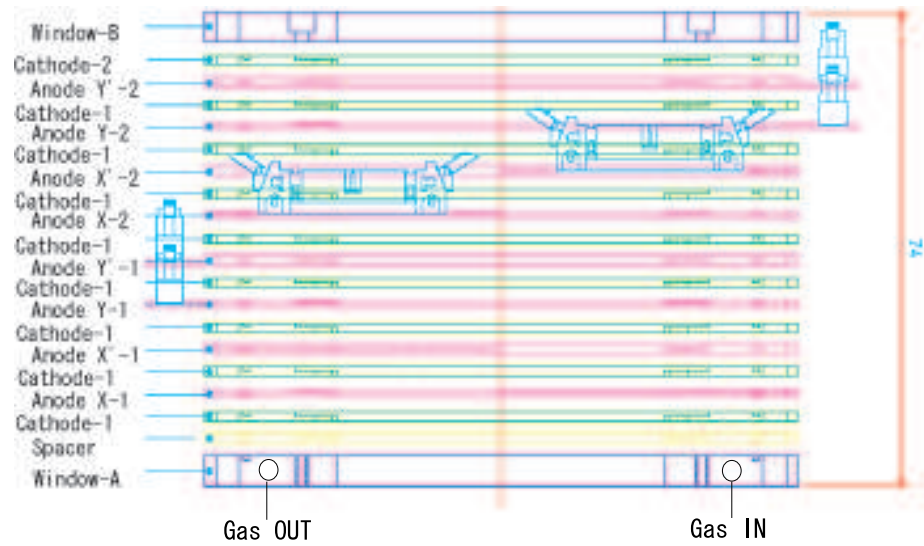


図 2.8: NDC 内部のガスの流れ。Window-A Flame からガスを導入し、Spacer Flame の溝を通り NDC 中央方向にガスが流れる。次に Cathode 膜の四隅に空いた穴から隣の面の方へにガスが流れる。最後に Cathode-2 Flame の溝から排気トンネルを通して、Window-A Flame からガスが排気される。



### 2.1.10 電位分布

NDC の 1 セルの電位分布の例を図 2.9 に示す。

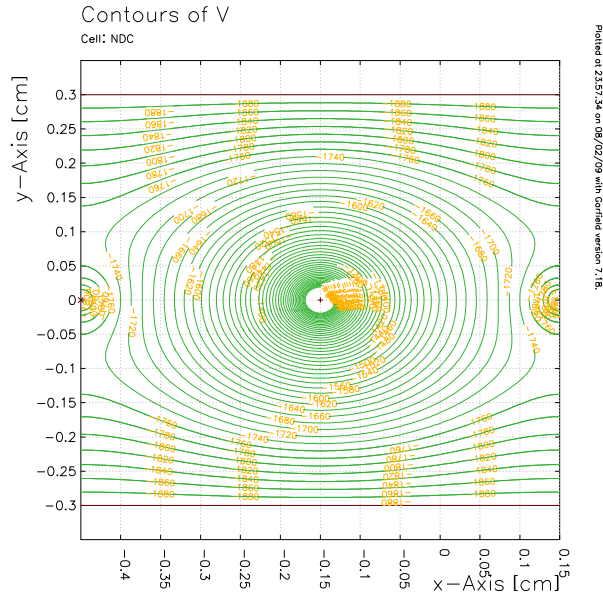


図 2.9: NDC 電位分布 (garfield-7( [5] ) による計算)。カウンターガスに He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> を用いた際に、最も良い位置分解能が得られた  $V_{cathode} = V_{cathode} = -1900 \text{ V}$  のときの電位分布である。座標は anode wire :  $(x,y)=(-0.15, 0.0)$ 、potential wire :  $(x,y)=(-0.45, 0.0)$ 、 $(0.15, 0.0)$ 、cathode 膜 :  $y=\pm 0.3$  となっており、横軸および縦軸の単位は cm である。

## 2.2 角度分解能の評価

本節では、予定している  $^{23,24}\text{O}$  の非束縛励起状態の探索実験で想定している実験セットアップに対し、二次ビーム  $^{23,24}\text{O}$  の角度分解能を評価する。図 2.10 に想定している実験のセットアップを示す。上流から NDC1、He Bag、NDC2、真空ダクト、液体水素標的と配置する。NDC1、と NDC2 は大気中にあるため NDC1 の上流、NDC2 の下流には真空を区切る膜がある。表 2.4 には構成要素の物質量を示す。

二次ビーム  $^{23,24}\text{O}$  の角度分解能は以下の量に依存する：

- クーロン多重散乱
  - NDC 中でのクーロン多重散乱
  - He Bag 中でのクーロン多重散乱 (He Bag なしの場合も評価)
  - Target chamber の真空隔壁でのクーロン多重散乱
  - NDC ~ Target Chamber までの大気でのクーロン多重散乱
- NDC 固有の位置分解能

以降、角度分解能を評価するために、まずクーロン多重散乱による角度偏向  $\theta_0$  を計算し (2.2.1)、次に NDC 固有の位置分解能を  $100\ \mu\text{m}$  と仮定して角度分解能  $\sigma_{\theta NDC}$  を計算し (2.2.2)、最後に  $\theta_0$  と  $\sigma_{\theta NDC}$  を考慮した Total の角度分解能  $\sigma_{Total}$  を計算する (2.2.2)。

### 2.2.1 クーロン多重散乱

以下に入射ビームのエネルギーやセットアップなどの実験条件を示す。その条件のもと、クーロン多重散乱による角度偏向  $\theta_0$  が求められる。

- 二次ビーム：  $^{23}\text{O}$  (T=71 MeV/A) および  $^{24}\text{O}$  (T=72 MeV/A)
- NDC の window 面間距離 54 mm、充填ガスは window 面間に完全に充満している。
- 充填ガスは He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) とする。
- クーロン多重散乱を抑えるため、2台の NDC 間に長さ 380 mm の He Bag を置く。He Bag の出入口は、マイラー  $4\ \mu\text{m}$  とする。
- ターゲットチェンバーからビーム下流側の NDC の直後まで、真空ダクトが伸びている。真空ダクトの入口の膜には、カプトン  $50\ \mu\text{m}$  を用いる。

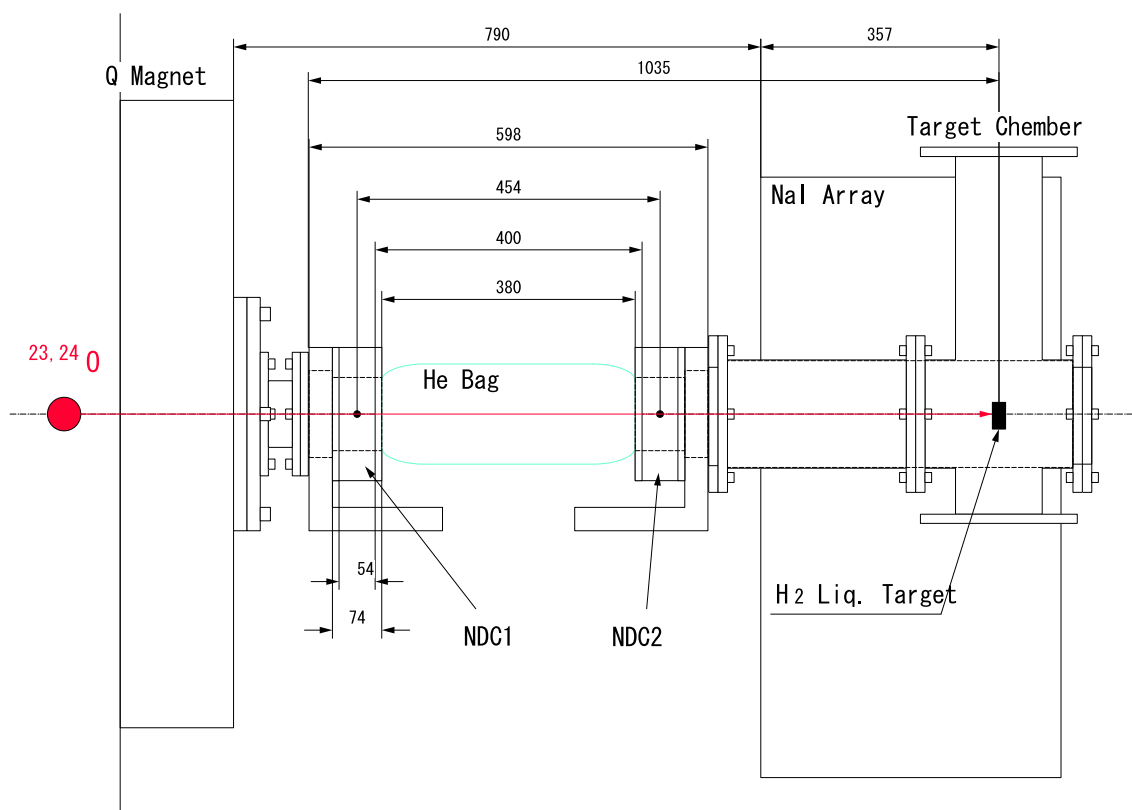


図 2.10: 仮定した NDC の配置の概略図 (側面図)。理化学研究所の不安定核ビーム生成ライン RIPS を用いて生成・選別された  $^{23,24}\text{O}$  は RIPS の最下流に位置する Q magnet を抜け、実験エリアへ入射する。Q magnet の直後に配置された 2 台の NDC により 二次標的への  $^{23,24}\text{O}$  の入射運動量ベクトルを測定する。

クーロン多重散乱による角度偏向は次式で与えられる (詳細は APPENDIX 参照) :

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z_{inci} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right] \quad [\text{rad}]. \quad (2.1)$$

$\beta c$  : 速度  $Z_{inci}$  : 入射粒子の電荷  $x$  : 物質の厚さ  $X_0$  : 物質の放射長

式中の  $x/X_0$  が、ある物質のクーロン多重散乱を特徴づける量になる。そこで表 2.3 に主な物質の放射長を、また表 2.4 には NDC の構成要素別の  $x/X_0$ 、および NDC 全体の  $x/X_0$  を示す。表 2.5 には NDC 以外の部分 (He Bag、真空隔壁、大気) の  $x/X_0$  を示す。

| 物質  | 放射長 $X_0$ (g/cm <sup>2</sup> ) | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---|--------------------------------|-------------------------|
| He (20 °C、1 atm)                            | 94.32                          | $1.66 \times 10^{-4}$   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (20 °C、1 atm) | 45.66                          | $1.26 \times 10^{-3}$   |
| Ar (20 °C、1 atm)                            | 19.55                          | $1.66 \times 10^{-3}$   |
| 大気 (20 °C、1 atm)                            | 36.62                          | $1.20 \times 10^{-3}$   |
| W   | 6.77                           | 19.3                    |
| Al  | 24.01                          | 2.70                    |
| カプトン  | 40.58                          | 1.42                    |
| マイラー  | 39.95                          | 1.40                    |

表 2.3: 主な物質の放射長 ([6] 参照)。実験エリアにおいて、Target Chamber より上流で二次ビームが通過する物質について載せた。また実験では NDC の充填ガスは He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を使用するが、オフライン実験ではテスト用ガスとして Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) も使用したので参考までに Ar の放射長も載せている。

| 構成要素   | 主な材質 | $x/X_0$               |
|--|------|-----------------------|
| He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%) (20 °C、1 atm) | -    | $0.79 \times 10^{-4}$ |
| anode (× 8)  | W    | $1.20 \times 10^{-4}$ |
| potential(× 8)                                       | Al   | $0.75 \times 10^{-4}$ |
| cathode (× 9)  | カプトン | $2.36 \times 10^{-4}$ |
| window (× 2)   | カプトン | $0.53 \times 10^{-4}$ |
| NDC + He-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%)         | -    | $5.63 \times 10^{-4}$ |

表 2.4: NDC の構成要素別の  $x/X_0$ 。ワイヤの場合の計算では、厚み  $x$ (cm) を、 $x = \pi R_w^2 / C$  として計算した。 $R_w$  はワイヤの半径で、 $C$  はセルサイズ。つまり、セルサイズの中でワイヤを一様に分布させている。(なお、角度分解能に影響を与える物質は NDC1 の出口以後の物質であるとして計算している。そのため NDC1 の物質量は計算に含んでいない。その理由は NDC1 で飛跡を決定したあとのビームが、NDC2 のどの位置で検出されたかにより、ビームへの入射角度が決定されるためである。)

| 構成要素                     | 主な材質                     | $x/X_0$               |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| ①大気 380 mm (20 °C、1 atm) | -                        | $12.5 \times 10^{-4}$ |
| ②大気 65 mm (20 °C、1 atm)  | -                        | $2.14 \times 10^{-4}$ |
| ③He 380 mm (20 °C、1 atm) | -                        | $0.67 \times 10^{-4}$ |
| ④ヘリウムバッグ出入口              | マイラー 4 $\mu\text{m}$ × 2 | $0.28 \times 10^{-4}$ |
| ⑤真空隔壁                    | カプトン 50 $\mu\text{m}$    | $1.75 \times 10^{-4}$ |
| ヘリウムバッグなし (①+②+⑤)        | -                        | $16.4 \times 10^{-4}$ |
| ヘリウムバッグあり (②+③+④+⑤)      | -                        | $4.84 \times 10^{-4}$ |

表 2.5: ビーム上流側の NDC から真空隔壁までにある物質の  $x/X_0$  (ただし NDC は除く)。②は NDC 固定装置の領域など、ヘリウムバッグを詰められない領域にある大気を意味する。

表 2.6 には  $^{23,24}\text{O}$  の運動エネルギー  $T$ 、およびクーロン多重散乱の式 2.1 に必要な  $^{23,24}\text{O}$  の運動量  $p$  と  $\beta$  を示す。

| 二次ビーム           | $T$      | $p$               | $\beta$ |
|-----------------|----------|-------------------|---------|
| $^{23}\text{O}$ | 71 MeV/A | 371.8 MeV/(c · A) | 0.368   |
| $^{24}\text{O}$ | 72 MeV/A | 374.5 MeV/(c · A) | 0.371   |

表 2.6: 二次ビーム情報。クーロン多重散乱の式 2.1 に必要な  $^{23,24}\text{O}$  の運動量  $p$  と  $\beta$  を示す。

以上の NDC の  $x/X_0$  (表 2.4)、He Bag · 真空隔壁 · 大気の  $x/X_0$  (表 2.5)、 $^{23,24}\text{O}$  の運動量  $p$  と  $\beta$  (表 2.6) の値を式 2.1 に代入して得られたクーロン多重散乱角を表 2.7 に示す。

| 二次ビーム           | He Bag あり/なし | $x/X_0$               | クーロン多重散乱角 $\theta_0$ |
|-----------------|--------------|-----------------------|----------------------|
| $^{23}\text{O}$ | なし           | $22.0 \times 10^{-4}$ | 1.24 mrad            |
| $^{23}\text{O}$ | あり           | $10.5 \times 10^{-4}$ | 0.83 mrad            |
| $^{24}\text{O}$ | なし           | $22.0 \times 10^{-4}$ | 1.18 mrad            |
| $^{24}\text{O}$ | あり           | $10.5 \times 10^{-4}$ | 0.78 mrad            |

表 2.7: クーロン多重散乱角。二次ビームが  $^{23}\text{O}/^{24}\text{O}$  のとき、He Bag あり/なし の場合について示す。

### 2.2.2 角度分解能

ここでは、NDC 固有の位置分解能が角度分解能にどう作用するかを説明する。次に NDC 固有の位置分解能を  $100 \mu\text{m}$  と仮定して角度分解能  $\sigma_{\theta NDC}$  を計算し、最後にクーロン多重散乱角  $\theta_0$  と  $\sigma_{\theta NDC}$  を考慮した全体の角度分解能  $\sigma_{Total}$  を示す。

以下に仮定した条件を示す。

- NDC の厚み方向の中心における位置分解能 :  $100 \mu\text{m}$
- 2 台の NDC 間の中心間距離  $l$  :  $454 \text{ mm}$  (図 2.10)

二次ビームの飛跡は NDC1、2 の各中心点上の 2 点  $(x_1, x_2)$  を結んで決める。二次ビームは、ほぼ垂直に NDC に入射するため粒子の角度  $\theta$  は次式のように近似できる :

$$\theta \sim \tan \theta = \frac{|x_1 - x_2|}{l}. \quad (2.2)$$

このとき飛跡を引いて得られる粒子の入射角度の分解能  $\sigma_{\theta NDC}$  は、次式で表される :

$$\sigma_{\theta NDC} = \frac{\sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}}{l}. \quad (2.3)$$

NDC の位置分解能  $\sigma_x$  を  $\sigma_x = \sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = 100 \mu\text{m}$  と仮定したので、 $\sigma_{\theta NDC}$  は、

$$\sigma_{\theta NDC} = \frac{\sqrt{2} \times 100 \mu\text{m}}{454 \text{ mm}} = 0.31 \text{ mrad}, \quad (2.4)$$

となる。

最後に、全体の角度分解能  $\sigma_{Total}$  を表 2.8 に示す。

| 二次ビーム           | He Bag あり/なし | $\sigma_{Total}$ |
|-----------------|--------------|------------------|
| $^{23}\text{O}$ | なし           | 1.28 mrad        |
| $^{23}\text{O}$ | あり           | 0.89 mrad        |
| $^{24}\text{O}$ | なし           | 1.22 mrad        |
| $^{24}\text{O}$ | あり           | 0.84 mrad        |

表 2.8: 全体の角度分解能。二次ビームが  $^{23}\text{O}$  /  $^{24}\text{O}$ 、He Bag あり/なしの場合について示す ( $\sigma_{Total} = \sqrt{\sigma_{\theta NDC}^2 + \theta_0^2}$ )。

## 第3章 オフライン実験

本章では、NDC の性能評価について述べる。まずはじめに、テスト用ガス Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を使用した場合の検出効率、位置分解能に関する動作特性を調べ、次に、オンライン実験時と同じ He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を使用した場合について調べる。最後に、これらの測定で得られた情報をもとに、オンライン実験時の適正動作電圧を予測する。

検出効率測定には、容易に統計が得られる  $\beta$  線を用いた。一方、 $\beta$  線は質量が小さく、クーロン多重散乱の影響が大きいため、位置分解能の測定には適さない。そこで、位置分解能測定には宇宙線を用いた。

行なった測定の時系列は、以下の通りである (本論文の構成順とは異なる)。

1. 充填ガスに Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いた  $\beta$  線測定
2. 充填ガスに Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いた宇宙線測定
3. 充填ガスに He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いた  $\beta$  線測定
4. 充填ガスに He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いた宇宙線測定

NDC は上流用と下流用の 2 台ある。ラベルを NDC1、NDC2 と付ける。今回は NDC2 について性能テストを行なった。

ここからは便宜上、各面の名称を以下のように変更する。(ただし、セットアップの図、図 3.4 および図 3.9 を除く。

- X1 → X1
- X'1 → X2
- X2 → X3
- X'2 → X4
- Y1 → Y1
- Y'1 → Y2



- Y2 → Y3
- Y'2 → Y4

### 3.1 トリガーカウンター

トリガーカウンターには、プラスチックシンチレータを使用し、2枚のシンチレータでNDCを挟み込むように配置し、そのコインシデンス信号をトリガーとした(図3.4、図3.9参照)。ただし、宇宙線測定時ではプラスチックシンチレータの寸法が異なる(表3.1、図3.1)。これは宇宙線測定時にはより大きな立体角を利用して計数率を高めるためである。

|             | Plastic scinti. | 寸法                      |
|-------------|-----------------|-------------------------|
| $\beta$ 線測定 | PL1 $_{\beta}$  | 30 mm × 30 mm × 1 mm    |
|             | PL2 $_{\beta}$  | 45 mm × 45 mm × 5 mm    |
| 宇宙線測定       | PL1 $_{\mu}$    | 100 mm × 100 mm × 10 mm |
|             | PL2 $_{\mu}$    | 100 mm × 100 mm × 10 mm |

表 3.1: トリガーカウンターの寸法。PL1 は NDC 手前のプラスチックシンチレータ、PL2 は NDC 後方のプラスチックシンチレータを表す。添字  $\beta$  と添字  $\mu$  は、それぞれ  $\beta$  線測定用と宇宙線測定用を示す。

今回、 $\beta$ 線測定に使用した $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 線源( $Q_{\beta^-} = 2.282 \text{ MeV}$ )から放射される $\beta$ 線の最大飛程はプラスチックシンチレータ中で約1 cm (APPENDIX 参照)であるため、できる限り $\beta$ 線の減衰を抑えるために、NDC手前のプラスチックシンチレータの厚みは1 mmにした。また $\beta$ 線の質量は核子の質量の約1840分の1と小さいため、クーロン多重散乱角が大きい。そのため $\beta$ 線がNDCの有感領域内(99 mm × 99 mm)を通過したことを保証するため、 $\beta$ 線測定に使用するプラスチックシンチレータはNDCの有感領域に対して十分小さいサイズにした。

一方、宇宙線測定では、上述の $\beta$ 線に見られる問題は無い。しかし、宇宙線の計数率は手の平のサイズに毎秒1個程度と少ない。そのため、宇宙線測定で使用するプラスチックシンチレータのサイズはNDCの有感領域と同程度の100 mm × 100 mm (10 mm 厚)にし、計数率を高めた。(その結果、宇宙線トリガー計数率は0.13 cps程度だった)。

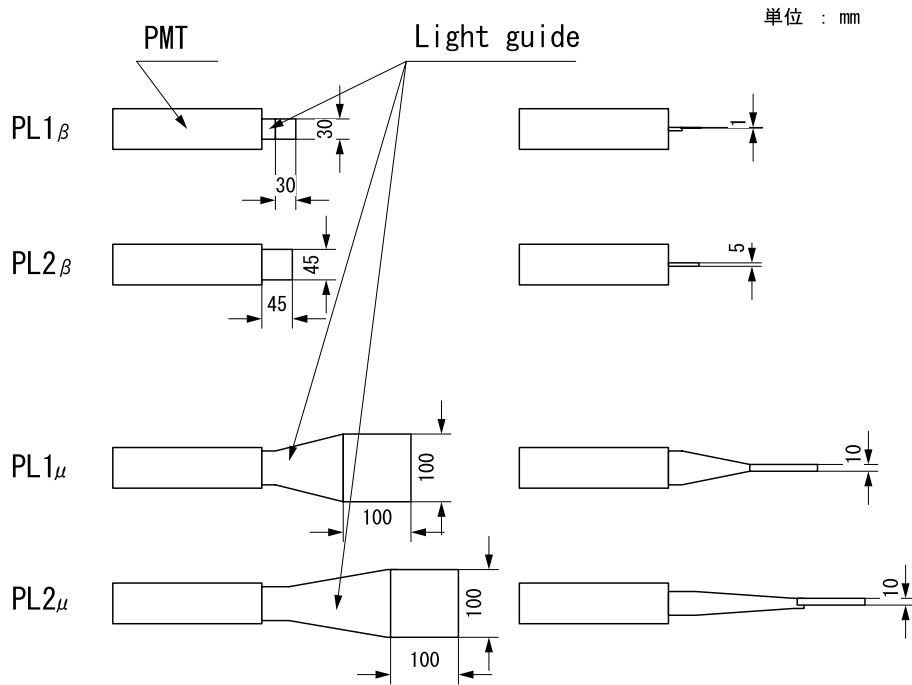


図 3.1: トリガーカウンター。PL1 は NDC 手前のプラスチックシンチレータ、PL2 は NDC 後方のプラスチックシンチレータを表す。添字  $\beta$  と添字  $\mu$  は、それぞれ  $\beta$  線測定用と宇宙線測定用を示す。

### 3.2 測定回路

回路図を図3.2に示す。測定回路は $\beta$ 線測定と宇宙線測定で同じだが、プラスチックシンチレータ、光電子増倍管の印加電圧、CFDの設定、Delay時間は異なる。これらの設定値については、APPENDIXに載せた。また使用したモジュール等の情報もAPPENDIXに載せた。TDCのTime rangeは $3.2\ \mu\text{s}$ で、common stopモードでデータを取得した。

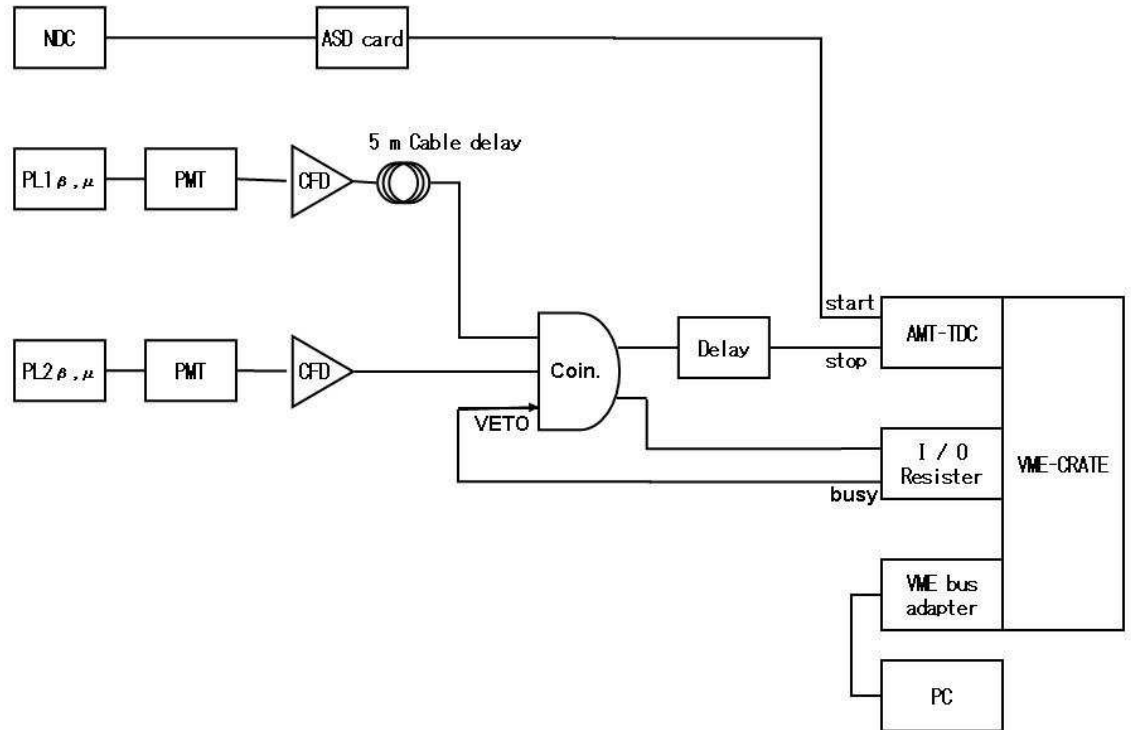


図 3.2: 測定回路図。NDCからの信号をAMT-TDCのstartに入れ、PL1 $\beta$ , $\mu$ とPL2 $\beta$ , $\mu$ のcoincidence信号を遅らせてAMT-TDCのcommon stopに入れる。coincidence信号を $2\ \mu\text{s}$ 程度遅らせるためのDelayは、(好ましくないが)gate generatorで代用している。またcoincidenceモジュールのVETOには、input/output resisterからのbusy信号を入れる。

### 3.3 ガス処理系

ガス処理系を図 3.3 に示す。ガス処理系は基本的に 1/4 インチ規格を使用している。しかしながら NDC の出入口は 4 mm であるため、4 mm → 1/4 インチの変換タッチジョイントコネクタを介して接続している。

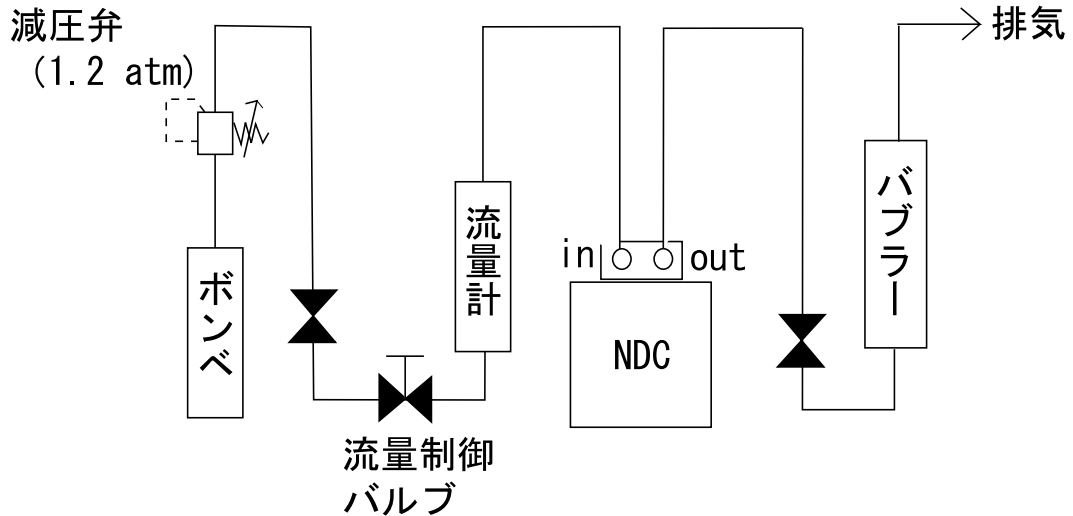


図 3.3: ガス処理系。ポンペ内の気体を減圧弁で 1.2 atm に減圧してガスを流す。流量計に備え付けられた流量調整バルブ (ニードルバルブ) で流量を調節する。バブラーのリターンを見て、正しく排気が行なわれていることを確認する。

ガス置換中は、20 cc/min 程度でオペレートし、ガス置換が終わった後 (10 回置換後) は、流量計の目盛で読めないくらい少ない流量 (バブラーのリターンが 10 ~ 20 秒に 1 回くらいある程度) でオペレートした。

なお、バブラーの液体には Apiezon oil を使用しており、バブラーの管の内径は 6 mm である (数分の 1% 程度のガス圧の変化がドリフトチャンバーのパルスの波高にゆらぎを追加する場合もあり、本当はこの内径の大きさは好ましくない。)

### 3.4 $\beta$ 線測定

NDC の動作電圧を決定するため、検出効率の測定を行なった。測定には、統計が容易に得られる  $\beta$  線源を用いた。使用した  $\beta$  線源は  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  で、 $Q_\beta$  値は 2.282 MeV である。ただし、線源の表面には厚さ 0.1 mm の Al 膜があり、放射される  $\beta$  線の最大エネルギーは幾分これより小さくなる。

$\beta$  線測定時のセットアップを図 3.4 に示す。NDC は  $\beta$  線の入射側から X1 面、X'1 面、Y1 面、Y'1 面、X2 面、X'2 面、Y2 面、Y'2 面 となるように配置した。

$\beta$  線測定では、各設定電圧毎に 5000 イベント以上、測定を行なった。検出効率は次式より得た：

$$\text{検出効率 } \epsilon = \frac{\text{NDC (各面)}}{\text{PL1}_\beta \otimes \text{PL2}_\beta} \quad (3.1)$$

式中の検出器名は各検出器で信号が検出されたイベント数を意味する。

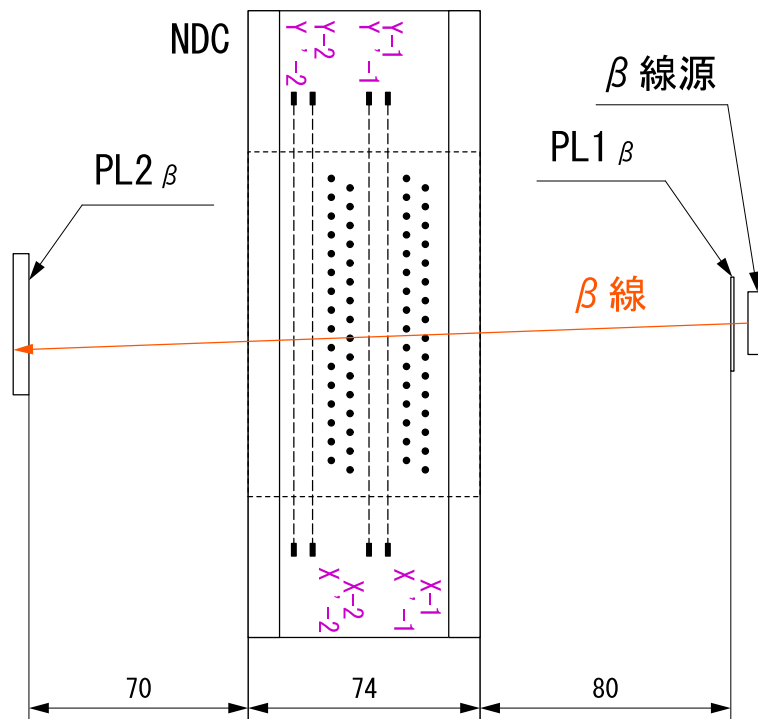


図 3.4:  $\beta$  線測定時のセットアップ。線源は  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  を用いた。 $\beta$  線は NDC に X1 面側から入射する。

### 3.4.1 $\beta$ 線測定、ガス Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%)

cathode wire と potential wire に印加する電圧をそれぞれ  $V_c$ 、 $V_p$  で表し、リークカレントを  $I_c$ 、 $I_p$  で表す。 $V_c = V_p = -1300$  V のとき  $I_c = 10 \sim 20$  nA、 $I_p = 40 \sim 50$  nA であるが、 $V_c = V_p = -1350$  V のとき  $I_p \sim 500$  nA まで一気にリークカレントが増加する。この時点で放電が起きていると考えられるので、充填ガスが Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) のときには、 $|V_c|$  および  $|V_p|$  を 1300 V 以下に設定した。

ASD カードに供給するスレッシュホールド電圧  $V_{thre}$  は、VME クレートの電源が OFF の状態では、 $V_{thre} \lesssim -200$  mV でホワイトノイズは見られなくなるが、VME クレートの電源を ON にすると、 $V_{thre}$  をおよそ -1.0 V にしなければホワイトノイズが消えなかった。(特に X1 面と X2 面にはノイズがのりやすい傾向がある。これは、X1 面と X2 面の基板に接続した ASD カードの近くに、cathode 電圧と potential 電圧の高電圧供給ラインがあることが可能性のひとつとして考えられる。) ホワイトノイズが 10 kcps 程度であれば、TDC の Time range  $3.2 \mu s$  の間にホワイトノイズが入り込む割合は 0.032 であるため、ソフトウェア上で TDC の ch にゲートを設けるなどの対応で十分無視できるようになる。実際にデータを取得してみて、 $V_{thre} \lesssim -750$  mV であればノイズを無視できた。

図 3.5 に検出多重度に依らない各面の全検出効率を示す ( $V_{thre} = -1.0$  V)。どの面も電圧が高いほど検出効率も高くなる。これは、電圧が高いと、セルの端で発生した電子も検出できるようになるためである。そして、 $V_c = V_p = -1200$  V でプラトーに達した。

図 3.6 に検出効率と検出多重度の関係を示した。赤線が全検出効率を表し、緑線と青線がそれぞれの面での検出多重度が 1 (M1) である場合と 2 (M2) である場合の検出効率を表している。X1 面と X2 面の M1 の検出効率が低くなっているが、 $V_{thre} \leq -1.5$  V にすると、X1 面と X2 面の M1 の検出効率は他の面と同程度まで上昇する (APPENDIX 参照)。

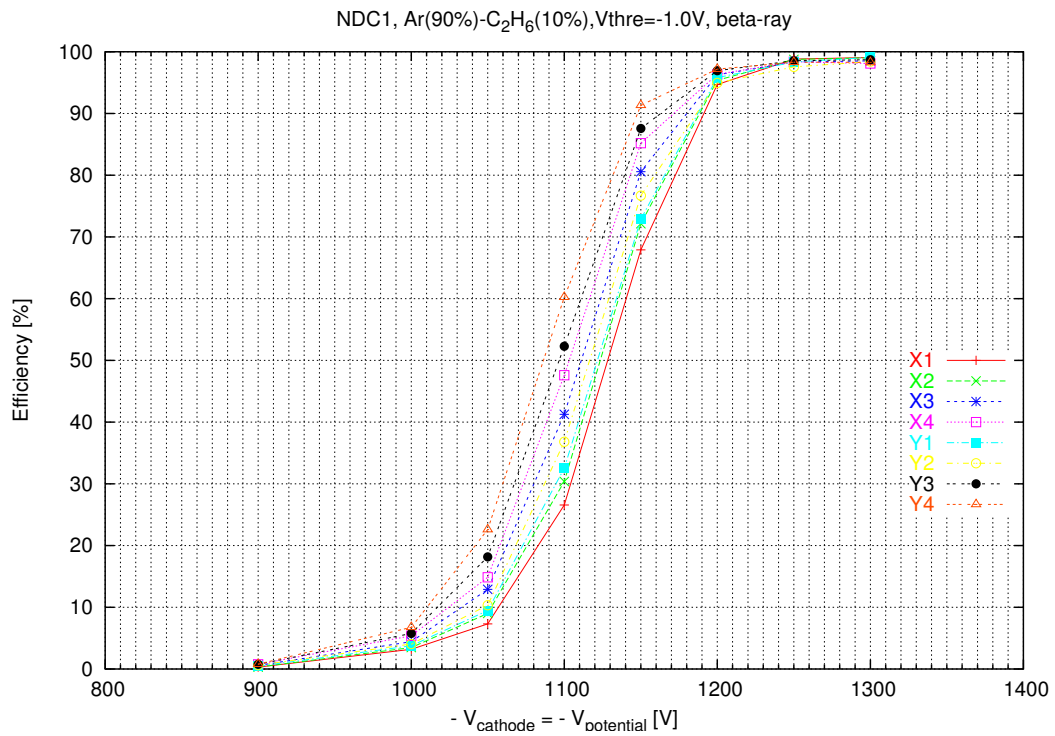


図 3.5: 検出多重度に依らない各面の全検出効率 (Ar-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (10 %), V<sub>thre</sub> = -1.0 V)。V<sub>c</sub> = V<sub>p</sub> = - 1200 V でプラトーに達した。

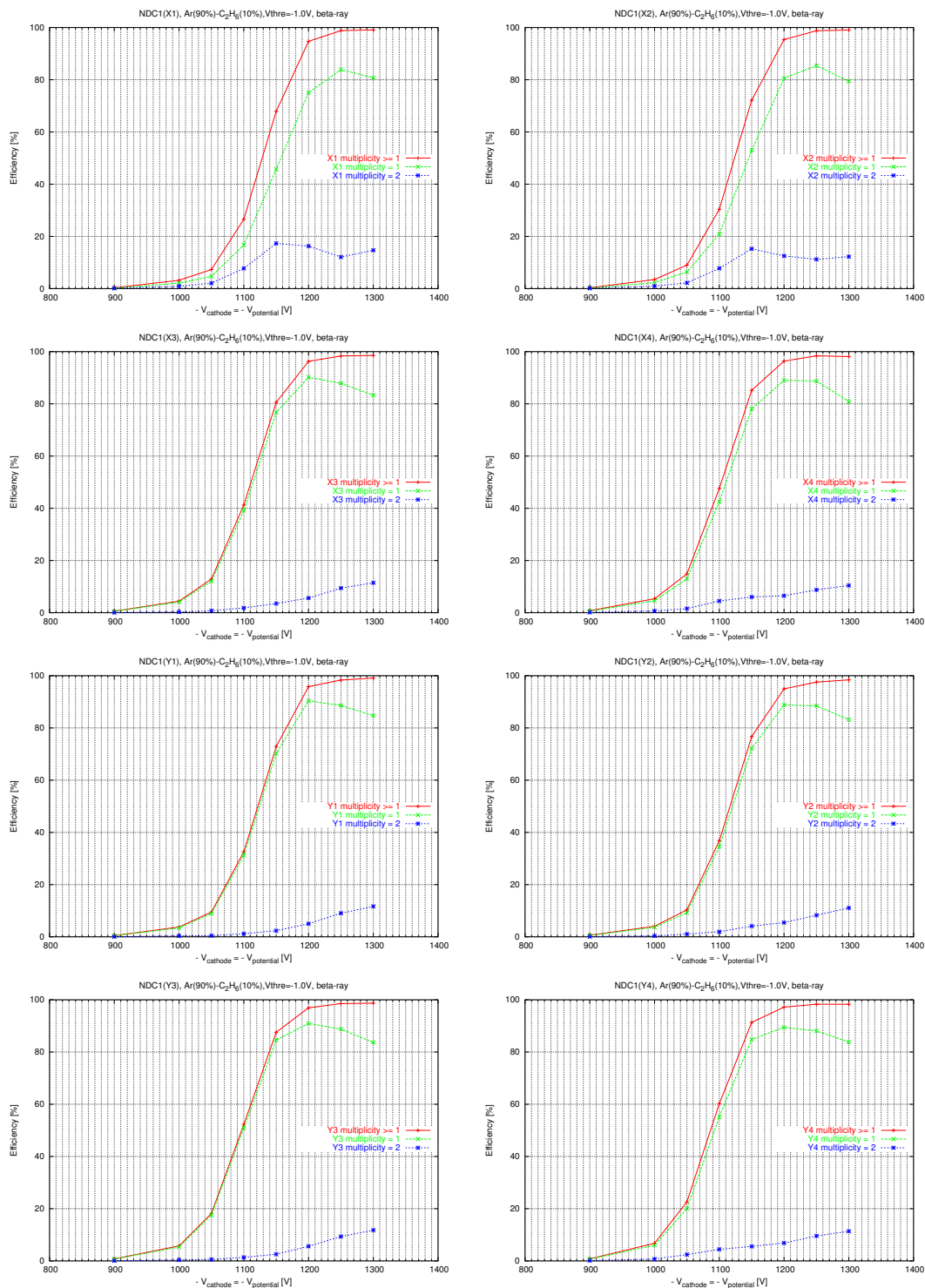


図 3.6: 検出効率と検出多重度の関係 (Ar-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (10%), V<sub>thre</sub> = -1.0 V)。赤線が全検出効率、緑線が multiplicity 1 の検出効率、青線が multiplicity 2 の検出効率を表す。



### 3.4.2 $\beta$ 線測定、ガス He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%)

He は高速電子に対する W 値が 41.3 (eV/イオン対) であり、Ar の 26.4 (eV/イオン対) と比較すると大きい。そのため印加電圧を高くしなければならないが、混合した quench gas の割合が 50% と高いため、Ar (90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (10%) よりも放電しにくい。

電圧を上げるにつれ、緩やかにリークカレントが増加し、 $V_c = V_p = -1900$  V のとき  $I_c = 10 \sim 20$  nA、 $I_p = 120 \sim 150$  nA であるが、 $V_c = V_p = -1950$  V のとき  $I_p \sim 200$  nA までリークカレントが増加する。そのため充填ガスが He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) のときには、 $|V_c|$  と  $|V_p|$  は -1900 V 以下に設定した。

図 3.7 に検出多重度に依らない各面の全検出効率を示す ( $V_{\text{thre}} = -1.0$  V)。  $V_c = V_p = -1600$  V でプラトーに達した。

図 3.8 に検出効率と検出多重度の関係を示した。赤線が全検出効率を表し、緑線と青線が M1 と M2 の検出効率を表している。

充填ガスに Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いた際の検出効率曲線 (図 3.6) とは異なり、He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いた際には、X1 面だけが他の面と異なり M1 の検出効率が低くなっており、X2 面は他の面と同程度になっていた。このため、X1 面と X2 面に見られる M1 の検出効率の低下は、ノイズレベルが他の面に比べて高いことが原因だと考えられる。(各測定でのノイズレベルについては APPENDIX を参照。)

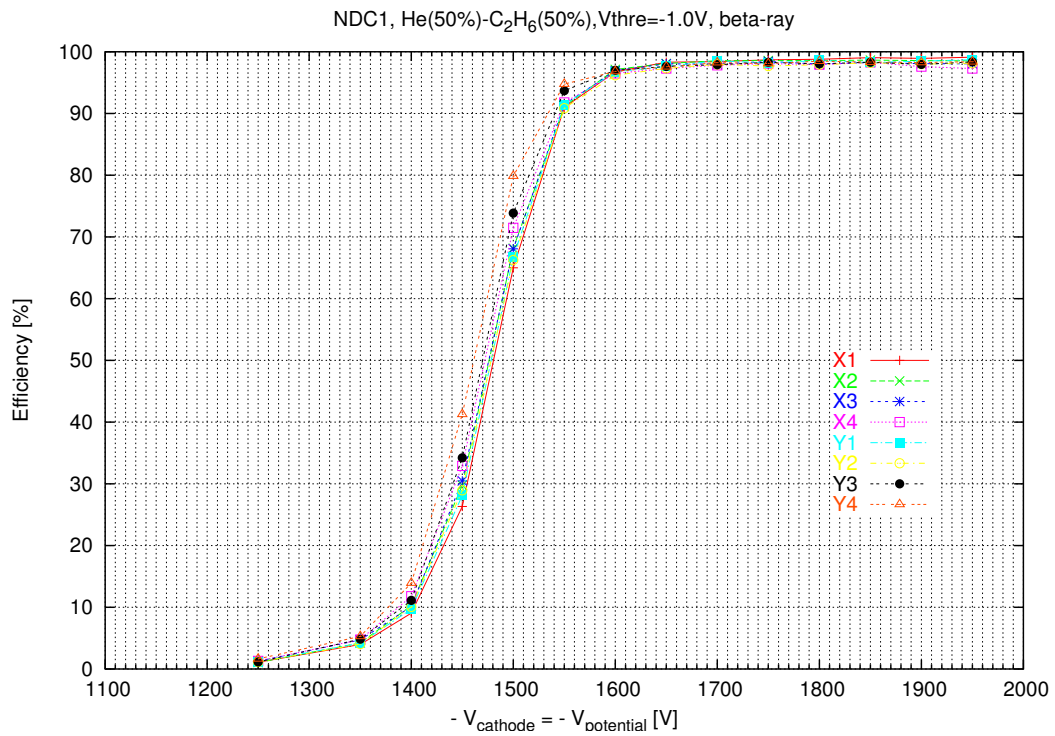


図 3.7: 検出多重度に依らない各面の全検出効率 (He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50 %), V<sub>thre</sub>= -1.0 V)。V<sub>c</sub> = V<sub>p</sub> = - 1600 V でプラトーに達した。

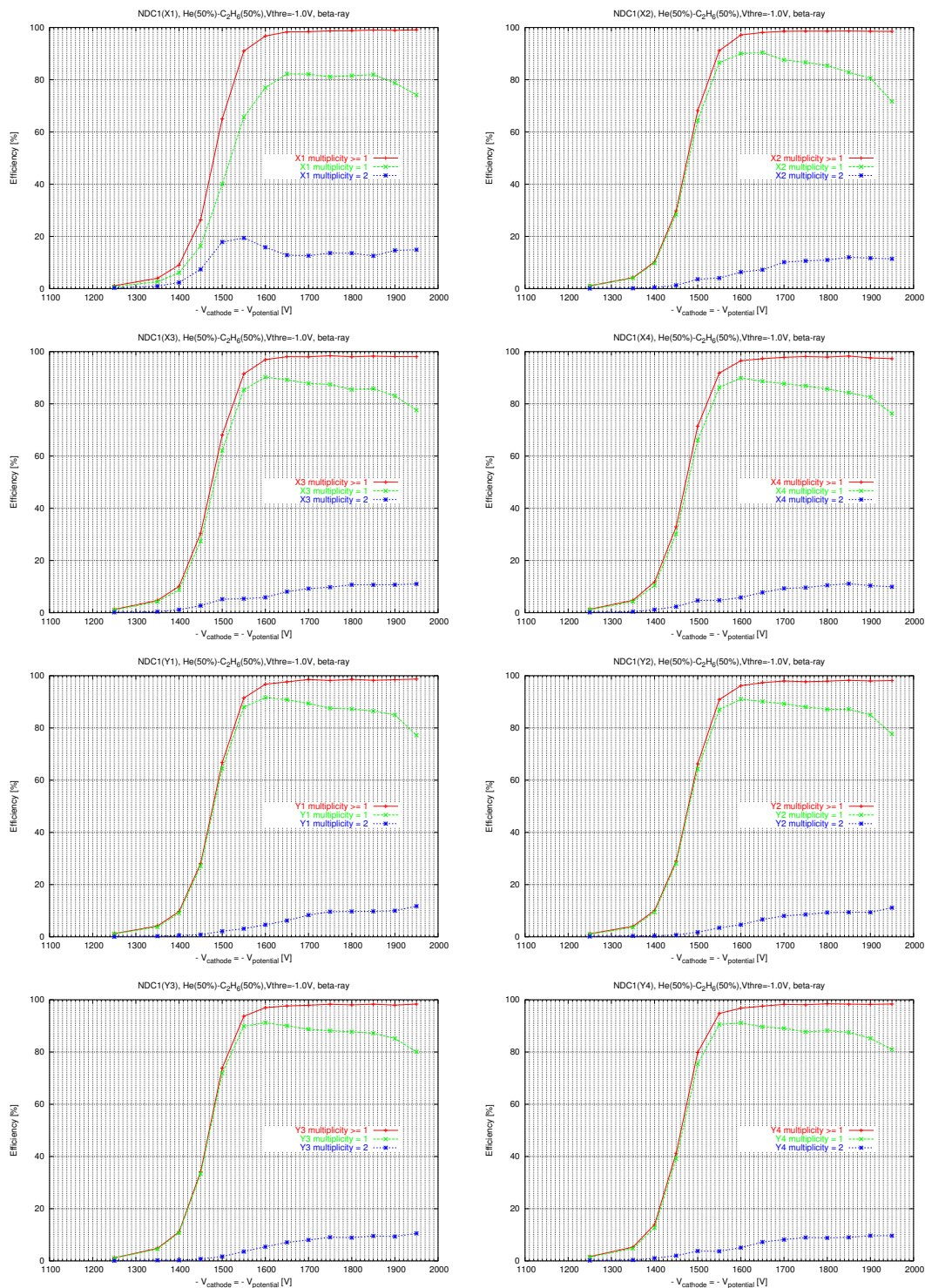


図 3.8: 検出効率と検出多重度の関係 (He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50%), V<sub>thre</sub> = -1.0 V)。赤線が全検出効率、緑線が multiplicity 1 の検出効率、青線が multiplicity 2 の検出効率を表す。

### 3.5 宇宙線測定

NDC の動作電圧を決定するため、宇宙線を用いた位置分解能測定を行なった。先に述べたように NDC 固有の位置分解能は、荷電粒子の入射位置・入射角度の分解能に効くため重要な量であり、NDC の動作電圧を決定する最大の要因となる。

宇宙線測定では、各設定電圧毎に 10000 イベント以上、測定を行なった。宇宙線測定時のセットアップ図を図 3.9 に示す。宇宙線トリガーカウンtrate は 0.13 cps 程度であった。

ここでは、まず、TDC スペクトルから荷電粒子の通過位置に変換する飛跡解析方法について説明し (3.5.1)、次に飛跡解析で得られた観測量からドリフトチェンバーの分解能を求める方法について説明する (3.5.2)。最後に、充填ガスに Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いた際の NDC の位置分解能 (3.5.3)、充填ガスに He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いた際の NDC の位置分解能 (3.5.4) を示す。

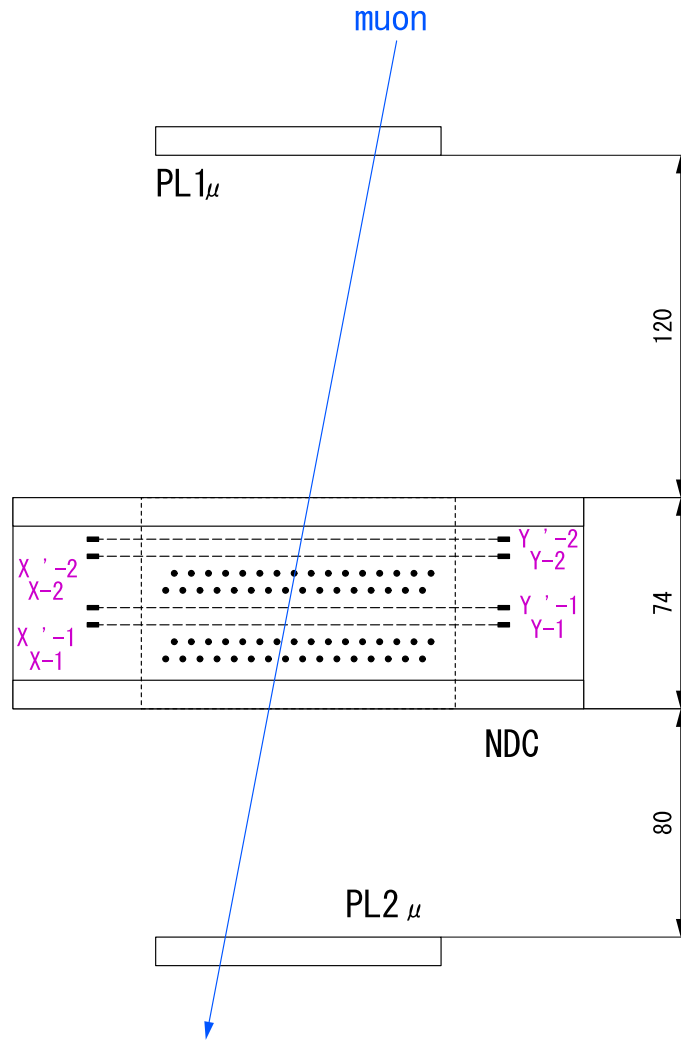


図 3.9: 宇宙線測定時のセットアップ。β線測定時とは反対に、Y'2 面側から宇宙線が入射するように NDC を置いた。

### 3.5.1 飛跡解析方法

飛跡解析は、golden event (各面で  $M = 1$  のイベント) の場合について行なった。

ドリフト時間分布から位置情報への変換 (STC : Space to Time Conversion) の方法を示す。

- 第 0 次 STC

宇宙線が NDC に一様に入射していると仮定すると、計数されるイベント数は宇宙線の入射位置によらず一定である :

$$\frac{dN}{dx} = C \text{ (const.)} . \quad (3.2)$$

$x$  は anode wire を原点にとったときの水平方向 ( $x$  方向) の距離、もしくは鉛直方向 ( $y$  方向) の距離を表す。このときドリフト時間分布は、次式で表せる :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN}{dx} \frac{dx}{dt} = C \frac{dx}{dt} . \quad (3.3)$$

よってドリフト時間分布を積分すると ドリフト距離が得られる :

$$x(t) = C' \int_0^t \frac{dN}{dt'} dt' \quad (C' = \text{const.}) . \quad (3.4)$$

なお TDC は common stop 方式なので、式中の  $t$  は TDC の ch  $T$  とは以下のような関係になる :

$$t = -T + t_0 . \quad (3.5)$$

$t_0$  は  $t$  がゼロ点から立ち上がるように決めたオフセットである。

こうして得られたドリフト距離を第 0 次 STC と呼び、 $X_0(t)$  と表す。しかしながら  $X_0(t)$  はあくまで anode wire からの  $x$  方向距離、または  $y$  方向距離であり、現段階では anode wire の左右どちら側を通過したか不定性が残っている。 $x$  面 ( $y$  面) は 4 面あるので、ひとつの飛跡につき anode wire の左右どちら側を通過したか  $x$  面 ( $y$  面) に関して  $2^4$  通りある。この 4 面の情報を直線で fit し、fit で得られた位置と測定値との差の  $\chi^2$  が最も小さい組合せを真の飛跡とする。

- 残差補正

飛跡を直線  $x(z) = a_0 + a_1z$  で fit して得られた位置と測定で得られた位置との残差 ( $dx = x_i - a_0 + a_1z_i$ 、添字  $i$  は  $i$  面上での位置を表す) は位置依存性を持つため、これを補正する必要がある。残差の位置依存性を補正した後の STC を STC1 と呼び、 $X_1(t)$  と表す。残差分布を  $dX_0(x)$  と表すと、STC1 は次式で与えられる：

$$X_1(t) = X_0(t) - dX_0(X_0(t)) . \quad (3.6)$$

この補正を繰り返し、残差分布を  $dX = 0$  に収束させる。

なお、残差分布のフィッティング関数には、セルの端とアノードワイヤの位置でゼロとなるように束縛条件を加えた多項式、

$$dX_0(X_0(t)) = (X_0 - 0)(X_0 - 3.0)(P_1 + P_2 \times X_0 + \dots + P_6 \times X_0^5) , \quad (3.7)$$

を用いた。

- 飛跡解析の図例

図 3.10 に第 0 次 STC、図 3.11 に残差補正の例を示す。この例は、ガス He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%)、印加電圧  $V_c = V_p = -1900$  V のときの X 面の例である。

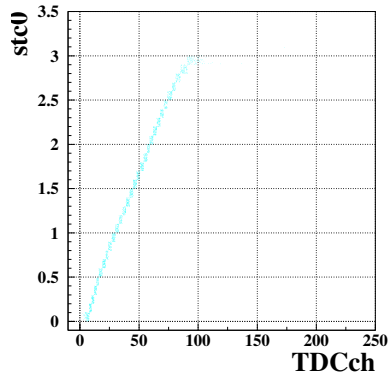
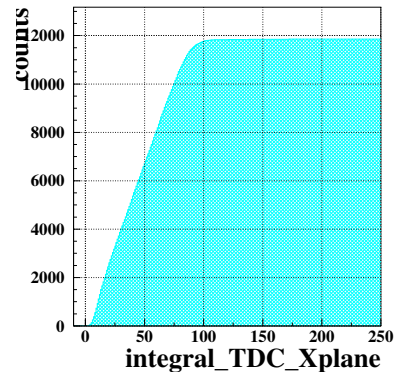
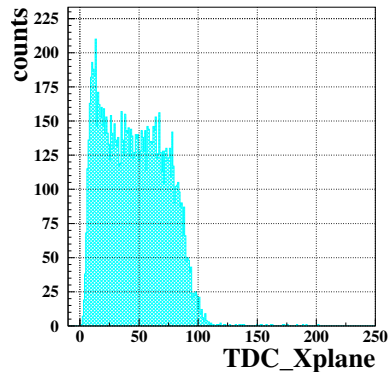


図 3.10: 第 0 次 STC の例。印加電圧  $V_c = V_p = -1900 \text{ V}$ 、ガス  $\text{He}(50\%)\text{-C}_2\text{H}_6(50\%)$ 、 $V_{thre} = -1.0 \text{ V}$  のときの X 面について図示した。左上の図は X 面の各面の golden event の TDC スペクトル (オフセット後) を足しあわせたもの。右上の図は左上の TDC スペクトルを積分したもの。左下の図は TDC スペクトルの積分値を半セルサイズで規格化し TDC の ch を荷電粒子の入射位置に対応させたもの (第 0 次 STC)。



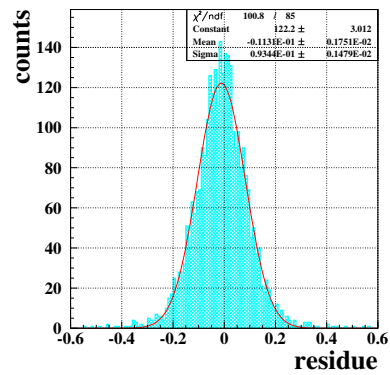
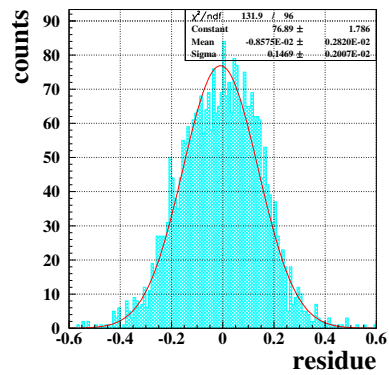
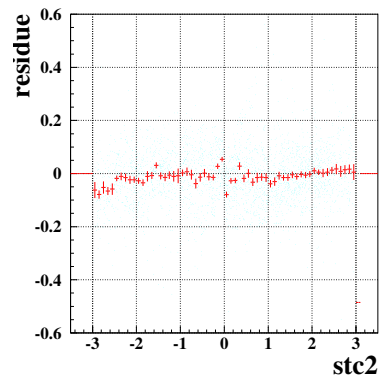
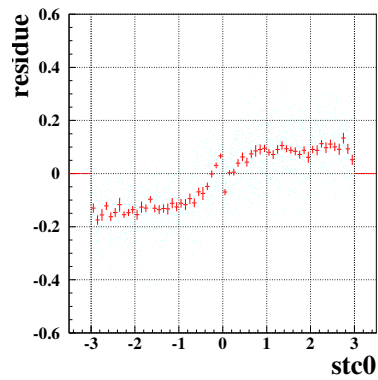


図 3.11: 残差補正の例。印加電圧  $V_c = V_p = -1900$  V、ガス He(50%)- $C_2H_6$  (50 %),  $V_{thre} = -1.0$  V) のときの X3 面について図示した。左側の図は補正前、右側の図は残差補正後の図である。上の図は、残差の位置依存性を表している。赤い表示は、青い点で表される残差分布を X 軸で輪切りにし gaussian で fit したときの中心値を表している。下の図は上の図を Y 軸に投影したもの (残差) であり、赤線は gaussian による fit を表す。

### 3.5.2 ドリフトチェンバーの分解能と観測量の関係

詳細は APPENDIX を参照。

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| $n$          | 面の数                  |
| $z_i$        | 原点から $i$ 面目の距離       |
| $a_0$        | 原点での通過位置             |
| $a_1$        | ドリフトチェンバーへの入射角度      |
| $\Delta x_i$ | $i$ 面の位置分解能          |
| $S_1$        | $\sum_{i=1}^n 1$     |
| $S_z$        | $\sum_{i=1}^n z_i$   |
| $S_{zz}$     | $\sum_{i=1}^n z_i^2$ |
| $D$          | $S_1 S_{zz} - S_z^2$ |
| $r_i$        | $i$ 面の残差             |

表 3.2: 変数の定義

粒子の軌道は、直線

$$x = a_0 + a_1 z, \quad (3.8)$$

で表記する。分散  $\Delta r_k$  は面当りの分解能を一定 ( $\Delta x_i = \Delta x$ ) とすると以下のように書ける：

$$\Delta r_k = \sqrt{1 - \frac{S_{zz} - 2S_k z_k + S_1 z_k^2}{D}} \Delta x .$$

$\Delta r_k$  は  $k$  面の残差分布を gaussian でフィッティングしたときの  $\sigma$  として得られる (観測量)。

また最小二乗法による  $(a_0, a_1)$  の決定精度は以下のように書ける：

$$\Delta a_0 = \sqrt{\frac{S_{zz}}{D}} \Delta x,$$

$$\Delta a_1 = \sqrt{\frac{S_1}{D}} \Delta x.$$

NDC の場合、X 面は

$$n = 4, z_1 = -21, z_2 = -15, z_3 = 3, z_4 = 9$$

$$S_1 = 4, S_z = -24, S_{zz} = 756$$

$$D = 2448$$

$$\Delta r_1 \sim 0.618\Delta x$$

$$\Delta r_2 \sim 0.786\Delta x$$

$$\Delta r_3 \sim 0.786\Delta x$$

$$\Delta r_4 \sim 0.618\Delta x$$

$$\Delta a_0 \sim 0.556\Delta x$$

$$\Delta a_1 \sim 0.0404\Delta x$$

(3.9)

Y 面は

$$n = 4, z_5 = -9, z_6 = -3, z_7 = 15, z_8 = 21$$

$$S_1 = 4, S_z = -24, S_{zz} = 756$$

$$D = 2448$$

$$\Delta r_5 \sim 0.618\Delta x$$

$$\Delta r_6 \sim 0.786\Delta x$$

$$\Delta r_7 \sim 0.786\Delta x$$

$$\Delta r_8 \sim 0.618\Delta x$$

$$\Delta a_0 \sim 0.556\Delta x$$

$$\Delta a_1 \sim 0.0404\Delta x$$

(3.10)

となる。

### 3.5.3 宇宙線測定、ガス Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%)

宇宙線測定はプラトーの電圧 ( $V_c = V_p = -1200 \text{ V}$ 、 $-1250 \text{ V}$ 、 $-1300 \text{ V}$ ) について行なった。飛跡解析において STC の残差補正は 2 回行なった。2 回の補正で残差は収束し、またそれ以上補正を行なうと、セルの中心とセルの端のイベント数が減少するという問題が生じるため残差補正は 2 回にすると決めた。

飛跡解析により得られた位置分解能を表 3.3 に示す。表 3.3 中の  $\Delta x_k$  は各面の位置分解能を表し、式 3.9、式 3.10 により導出した。 $\Delta x_{mean}$  は各面の位置分解能  $\Delta x_k$  の加重平均をとった値である。 $\Delta a_0$  と  $\Delta a_1$  は式 3.9、式 3.10 に  $\Delta x_{mean}$  を代入して得られた値である。なお、直線 fit の式  $x = a_0 + a_1 z$  における原点 ( $z=0$ ) は NDC 中央の cathode 面の位置としている。

| 電圧                                  |    | - 1200 V         | - 1250 V         | -1300 V         |
|-------------------------------------|----|------------------|------------------|-----------------|
| $\Delta x_k$ [ $\mu\text{m}$ ]      | X1 | 376.6 $\pm$ 7.5  | 284.3 $\pm$ 3.8  | 211.1 $\pm$ 2.9 |
|                                     | X2 | 368.6 $\pm$ 8.9  | 283.1 $\pm$ 4.0  | 210.8 $\pm$ 2.8 |
|                                     | X3 | 344.7 $\pm$ 7.1  | 241.7 $\pm$ 3.3  | 189.1 $\pm$ 2.6 |
|                                     | X4 | 346.7 $\pm$ 6.0  | 244.9 $\pm$ 3.4  | 187.9 $\pm$ 2.7 |
|                                     | Y1 | 397.2 $\pm$ 5.5  | 271.8 $\pm$ 3.1  | 193.2 $\pm$ 2.5 |
|                                     | Y2 | 385.7 $\pm$ 6.8  | 267.1 $\pm$ 3.1  | 192.6 $\pm$ 2.5 |
|                                     | Y3 | 311.5 $\pm$ 4.5  | 227.8 $\pm$ 2.6  | 178.6 $\pm$ 2.3 |
|                                     | Y4 | 318.3 $\pm$ 4.2  | 231.0 $\pm$ 2.7  | 179.8 $\pm$ 2.4 |
| $\Delta x_{mean}$ [ $\mu\text{m}$ ] |    | 346.6 $\pm$ 12.1 | 251.7 $\pm$ 7.8  | 191.3 $\pm$ 4.3 |
| $\Delta a_0$ [ $\mu\text{m}$ ]      |    | 192.7 $\pm$ 6.8  | 139.9 $\pm$ 4.4  | 106.3 $\pm$ 2.4 |
| $\Delta a_1$ [ $\mu\text{m}^{-1}$ ] |    | 14.00 $\pm$ 0.49 | 10.16 $\pm$ 0.32 | 7.73 $\pm$ 0.17 |

表 3.3: 印加電圧による分解能の変化 (Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%))。  $\Delta x_k$  は各面の位置分解能を表し、式 3.9、式 3.10 により導出した。 $\Delta x_{mean}$  は各面の位置分解能  $\Delta x_k$  の加重平均をとった値である。 $\Delta a_0$  と  $\Delta a_1$  は式 3.9、式 3.10 に  $\Delta x_{mean}$  を代入して得られた値である。

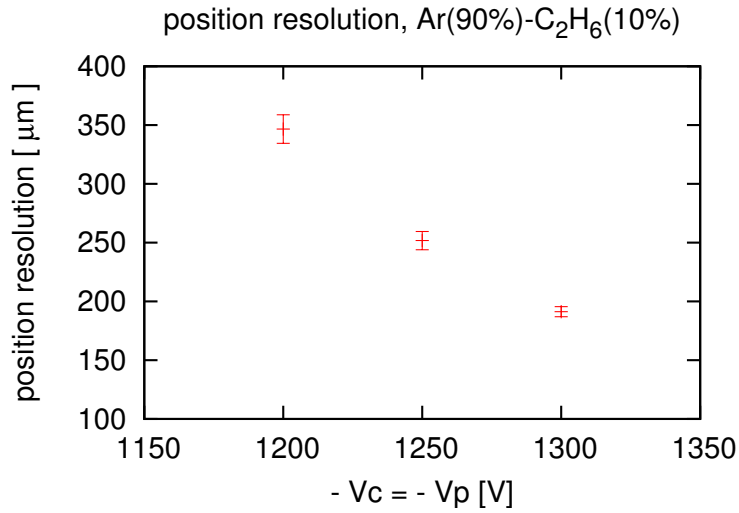


図 3.12: Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いたときの各面の位置分解能の加重平均  $\Delta x_{mean}$

### 3.5.4 宇宙線測定、ガス He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%)

宇宙線測定はプラトーの電圧 ( $V_c = V_p = -1700 \text{ V}$ 、 $-1800 \text{ V}$ 、 $-1900 \text{ V}$ ) について行なった。

印加電圧  $V_c = V_p = -1900 \text{ V}$  のとき リークカレントは  $I_c \lesssim 10 \text{ nA}$ 、 $I_p = 50 \text{ nA}$  であった。 $\beta$  線測定時よりもリークカレントが小さいのは、宇宙線の rate が低いためである。しかしながら、HV Supply の設定ではリークカレントが  $1 \mu\text{A}$  以上流れた場合 trip するようにしていたが、通常  $I_p = 50 \text{ nA}$  であったにも関わらず、電圧設定してから数時間 ~ 20 時間後に突発的に trip するという問題があった。そのため  $V_c = V_p = -1900 \text{ V}$  では定常的な運転には向かないかもしれないが、さらに Aging を行なうことにより改善する可能性はある。

飛跡解析により得られた位置分解能を表 3.4 に示す。表 3.4 中の  $\Delta x_k$  は各面の位置分解能を表し、式 3.9、式 3.10 により導出した。 $\Delta x_{mean}$  は各面の位置分解能  $\Delta x_k$  の加重平均をとった値である。 $\Delta a_0$  と  $\Delta a_1$  は式 3.9、式 3.10 に  $\Delta x_{mean}$  を代入して得られた値である。なお、直線 fit の式  $x = a_0 + a_1 z$  における原点 ( $z=0$ ) は NDC 中央の cathode 面の位置としている。

表 3.4 を見ると、X1 面と X2 面の値が  $15 \mu\text{m}$  程度悪い。今回、残差補

正では、残差のワイヤからの距離 (絶対値) 依存性を補正した。しかしながら、X1 面と X2 面の残差分布は、ワイヤの左右で非対称になっていたため (図 3.5.4)、残差補正が完全ではない。よって残差補正の際、ワイヤの左右で異なる fit parameter を適用する、もしくは X1 面と X2 面用の STC table を用意するなどの対策が必要である。その他、X1 面、X2 面のノイズレベルの高さが分解能を悪化させている可能性があるため、X1 面と X2 面に関してさらにノイズを落とすための方法を考える必要がある。

| 電圧                                  |    | - 1700 V          | - 1800 V          | -1900 V           |
|-------------------------------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\Delta x_k$ [ $\mu\text{m}$ ]      | X1 | 184.1 $\pm$ 2.2   | 151.3 $\pm$ 1.8   | 132.8 $\pm$ 1.9   |
|                                     | X2 | 181.3 $\pm$ 2.1   | 150.0 $\pm$ 1.7   | 131.8 $\pm$ 1.9   |
|                                     | X3 | 170.3 $\pm$ 2.0   | 135.5 $\pm$ 1.6   | 118.8 $\pm$ 1.8   |
|                                     | X4 | 174.5 $\pm$ 2.1   | 136.9 $\pm$ 1.6   | 116.7 $\pm$ 1.8   |
|                                     | Y1 | 170.0 $\pm$ 2.2   | 131.0 $\pm$ 1.7   | 112.6 $\pm$ 1.7   |
|                                     | Y2 | 169.4 $\pm$ 2.1   | 129.8 $\pm$ 1.6   | 112.4 $\pm$ 1.7   |
|                                     | Y3 | 168.4 $\pm$ 2.1   | 128.5 $\pm$ 1.5   | 113.1 $\pm$ 1.6   |
|                                     | Y4 | 168.1 $\pm$ 2.0   | 127.9 $\pm$ 1.5   | 115.5 $\pm$ 1.7   |
| $\Delta x_{mean}$ [ $\mu\text{m}$ ] |    | 173.1 $\pm$ 2.2   | 135.4 $\pm$ 3.2   | 118.5 $\pm$ 2.8   |
| $\Delta a_0$ [ $\mu\text{m}$ ]      |    | 96.3 $\pm$ 1.20   | 75.3 $\pm$ 1.8    | 65.9 $\pm$ 1.6    |
| $\Delta a_1$ [ $\mu\text{m}^{-1}$ ] |    | 6.996 $\pm$ 0.087 | 5.472 $\pm$ 0.127 | 4.789 $\pm$ 0.114 |

表 3.4: 印加電圧による分解能の変化 (He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%))。  $\Delta x_k$  は各面の位置分解能を表し、式 3.9、式 3.10 により導出した。  $\Delta x_{mean}$  は各面の位置分解能  $\Delta x_k$  の加重平均をとった値である。  $\Delta a_0$  と  $\Delta a_1$  は式 3.9、式 3.10 に  $\Delta x_{mean}$  を代入して得られた値である。 X1 面と X2 面の値が 15  $\mu\text{m}$  程度悪い。 X1 面と X2 面の残差分布は、ワイヤの左右で非対称になっていたため、残差補正の際、ワイヤの左右で異なる fit parameter を適用する、もしくは X1 面と X2 面用の STC table を用意するなどの対策が、今後必要である。

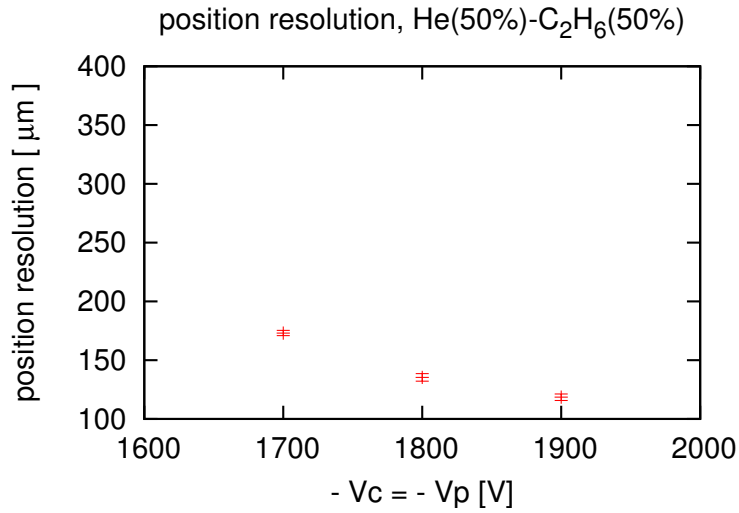


図 3.13: He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いたときの各面の位置分解能の加重平均  $\Delta x_{mean}$

### 3.6 オンライン実験での適正電圧の予測

この節では、 $\beta$ 線測定、宇宙線測定の結果から、オンライン実験時の適正電圧を予測する。オンライン実験での二次ビーム、NDC の充填ガスは以下の通りである。

- 二次ビームは  $^{23,24}\text{O}$  で、エネルギーは約 70 MeV/nucleon。
- NDC の充填ガスは He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%)。

以下に適正電圧の予想方法を示す。

1. いろいろなスレッシュホールド電圧設定で検出効率曲線を測定する (図 3.15)。
2. スレッシュホールド設定の違いを波高の違いだと仮定して (検出効率が 50%のときの) 設定電圧値の変化  $\Delta V$  と波高の増倍率 MF\_PH の関係を調べる (図 3.16、図 3.17)。
3. 70 MeV/nucleon の  $^{23,24}\text{O}$  のエネルギー損失は、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  からの  $\beta$ 線や宇宙線などの最小電離粒子に比べ、約 310 倍大きい (図 3.18) この 310 倍の差は、 $\text{MF\_PH} = 2^{(\Delta V/49)}$  の関係から、電圧の差  $\sim 410$  V に相当する。

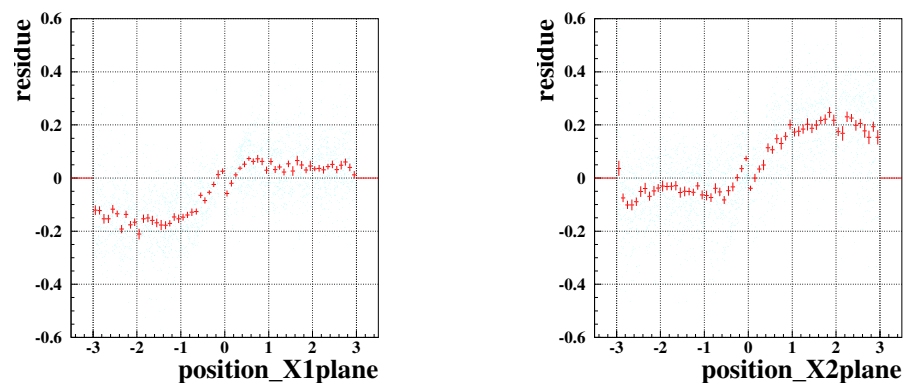


図 3.14: X1、X2 面に見られる残差のワイヤ左右依存性。印加電圧  $V_c = V_p = -1900 \text{ V}$ 、ガス  $\text{He}(50\%)\text{-C}_2\text{H}_6(50\%)$ 、 $V_{thre} = -1.0 \text{ V}$  のときの X1 面の残差の位置依存性 (補正前) を左図に、X2 面の残差の位置依存性 (補正前) を右図に示す。赤い表示は、青い点で表される残差分布を X 軸で輪切りにし gaussian で fit したときの中心値を表している。



プラトーに達した電圧 -1700 V、-1800 V、-1900 V (スレッシュヨルド設定値は -1.0 V) について宇宙線測定で位置分解能を調べた結果、位置分解能が最も良くなる電圧は-1900 V であることがわかった。そのため、最小電離粒子に対する適正電圧を -1900 V と見積もると、70 MeV/nucleon の  $^{23,24}\text{O}$  に対する適正電圧は、 $-1900\text{ V} + 410\text{ V}$  で、およそ -1490 V が適正電圧と予想される。

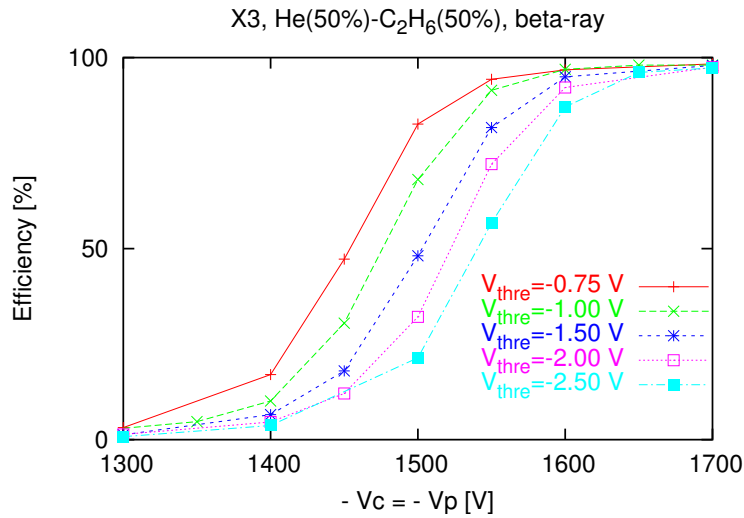


図 3.15: スレッシュヨルド設定値の違いによる検出効率曲線の変化 (He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%), X3 面)。検出効率が 50% になるときの印加電圧 ( $V_{\text{cathode}} = V_{\text{potential}}$ ) は、 $V_{\text{thre}} = -0.75\text{ V}$  のとき -1454 V、 $V_{\text{thre}} = -1.0\text{ V}$  のとき -1476 V、 $V_{\text{thre}} = -1.5\text{ V}$  のとき -1503 V、 $V_{\text{thre}} = -2.0\text{ V}$  のとき -1523 V、 $V_{\text{thre}} = -2.5\text{ V}$  のとき -1540 V となる。

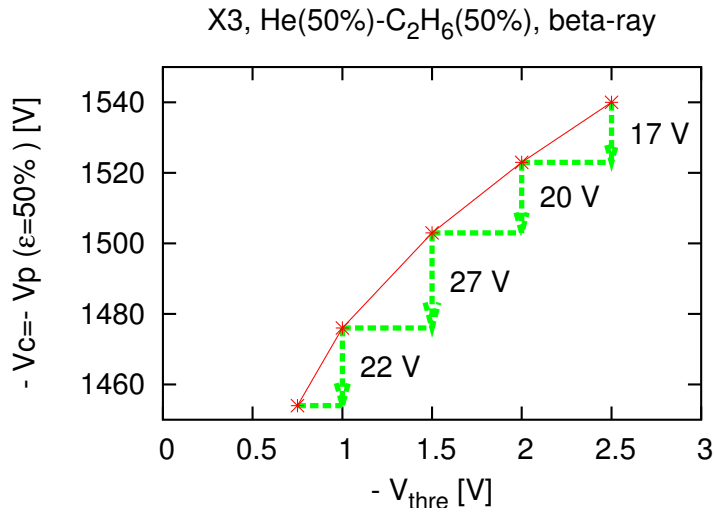


図 3.16: スレッシュヨルド設定 (波高と仮定) と  $\epsilon = 50\%$  となる電圧値の関係。(He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%), X3 面)。

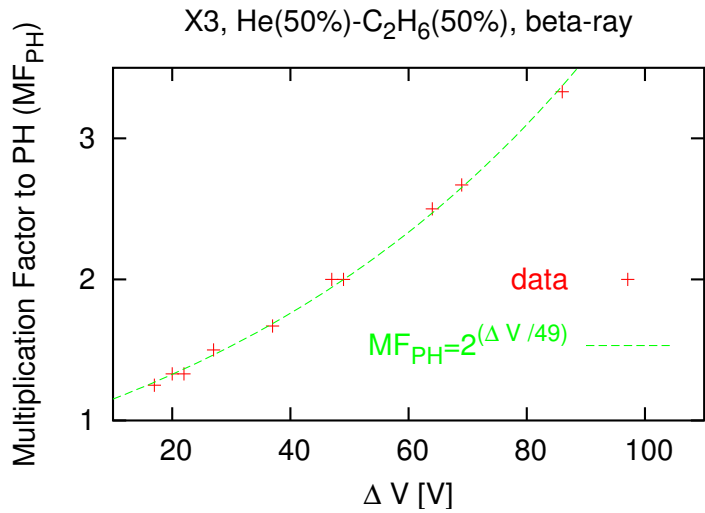


図 3.17:  $\epsilon = 50\%$  となる電圧値の変化  $\Delta V$  と波高の増倍率 (MF<sub>PH</sub>) の関係。(He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%), X3 面)。波高の増倍率 (MF<sub>PH</sub>) は、スレッシュヨルド設定を波高だと仮定して得られた値 (例:  $V_{thre} = -0.75V \rightarrow -1.5V$  ならば  $MF_{PH} = 2$  と仮定)。 $\Delta V$  と MF<sub>PH</sub> の関係を fit した値を緑線で示した ( $MF_{PH} = 2^{(\Delta V/49)}$ )。

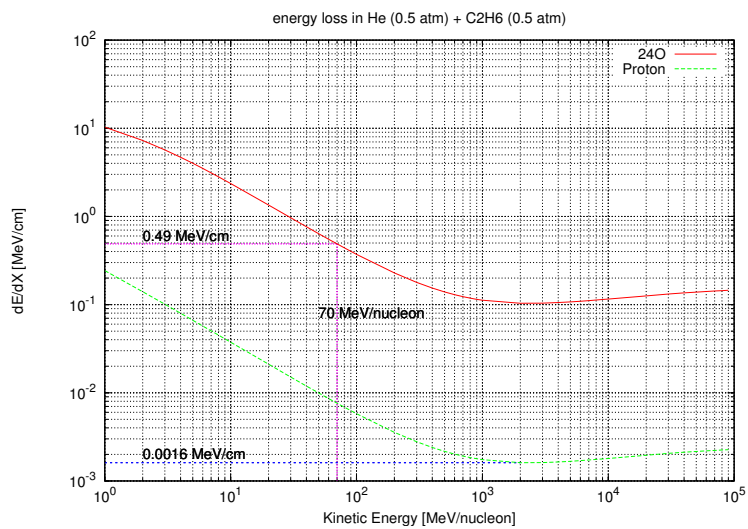


図 3.18: He(0.5 atm)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(0.5 atm) 中での  $^{24}\text{O}$  と陽子のエネルギー損失。70 MeV/nucleon の  $^{23,24}\text{O}$  のエネルギー損失量 0.49 MeV/cm は、最小電離粒子のエネルギー損失量 0.0016 MeV/cm の約 310 倍となる。

## 第4章 まとめと今後の展望

不安定核反応実験のための入射粒子飛跡検出器としてドリフトチェンバー (通称 NDC) を開発し、性能評価を行なった。特に検出効率、適正動作電圧、位置分解能、角度分解能について調べた。He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%)を用いた宇宙線測定から、位置分解能に関して最適な動作電圧は -1900 V であることがわかり、このときの位置分解能は  $118.5 \pm 2.8 \mu\text{m}$  であった。この位置分解能では、<sup>23</sup>O (<sup>24</sup>O) 実験において角度分解能  $\Delta\theta_{Lab} = 0.052^\circ$  ( $0.049^\circ$ ) に相当するので、十分な性能が得られたと結論付けられる。(ただし、二次標的である液体水素標的およびターゲットホルダーでのクロン多重散乱は考慮していない。)

2009 年度実施予定の <sup>23,24</sup>O 実験において、入射運動量ベクトルを測定するために NDC を用いる。この実験で <sup>23,24</sup>O 核の非束縛励起準位を発見し、さらにスピン・パリティを同定することが期待される。

実験に先駆けて、NDC に対してやるべき残る課題は三つ挙げられる。① cathode と potential で印加電圧を変えて位置分解能を測定し、最適な動作電圧を探ること、② X1 面と X'1 面の位置分解能の低下の原因究明、③ potential wire の突発的なリークカレントの増加の原因究明をすることである。X1 面と X'1 面の位置分解能の低下に関しては、ノイズを低減すること、飛跡解析の残差補正の方法を修正するといった対策を施す必要がある。potential wire の突発的なリークカレントの増加の問題に関しては、さらに Aging を行うことで、改善する可能性があるため経過観察が必要である。それでも改善が見られなければ、potential への印加電圧を下げ、cathode への印加電圧を上げることで、分解能を大幅に落とすことなく突発的なリークカレントの増加による trip を抑えることができるだろう。

## 第5章 APPENDIX

ガスの流量と置換率 (5.2 節)、クーロン多重散乱 (5.3 節)、位置検出器の分解能と観測量の関係、通過粒子の位置、角度分解能 (5.4 節) については、東北大学大学院理学研究科物理学専攻原子核物理の渡辺極之氏 [7] や篠原督和氏 [8] の修士論文に詳しい記述がある。

### 5.1 ドリフトチェンバーの動作原理

ドリフトチェンバーは、気体の電離を利用した放射線検出器の一種である。チェンバー内を通過する荷電粒子は、その飛跡に沿ってチェンバー内のガスを電離する。電離により生じた電子は、チェンバー内に生成された電場によって sense wire に向かってドリフトし、sense wire 近傍の高電場領域で加速され雪崩現象を起こして増幅される。この際、sense wire にパルス電流が発生するが、この信号を検出し、電離電子のドリフト時間を測定することにより、荷電粒子の位置情報を得ることが出来る。

チェンバーに入射した荷電粒子により、時刻  $t_0$  に発生した一次電子はドリフト速度  $v$  で電場内を移動し、時刻  $t_1$  に雪崩増幅を起こして sense wire にたどり着く。このとき、電子のドリフト経路長  $x$  は次式で表せる：

$$x = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt. \quad (5.1)$$

電子のドリフト速度は、ガスの種類、ガス圧、電場強度に依存する量であり、電場による加速で得たエネルギーと原子との衝突で失うエネルギーのつり合いが取れるところで、ドリフト速度は一定となる。電子のドリフト速度は一般的に  $5 \mu\text{m/s}$  程度になる。

#### 5.1.1 電子雪崩の形成

ドリフトチェンバーは荷電粒子や X 線、 $\gamma$  線によりガス中に生成される一次電子を、ガス増幅させることにより、はじめてパルスとして検出できるだけの電荷量を得る。以下、ガス増幅について述べる。

ガス中の電場を十分高い値にすると、ガス増幅が起こる。低い電場では入射放射線によって作られた電子とイオンはそれぞれの電極へ単に移動するだけである。この電荷が移動する間に中性ガス分子と多数の衝突を行なう。イオンはその移動度が小さく (cm/ms オーダー)、衝突間にほとんどエネルギーを得ることが出来ない。一方、電子は電場によって容易に加速され、衝突時には大きな運動エネルギーを持ちうる。このエネルギーが中性ガス分子のイオン化エネルギーより大きい場合にはイオン対がさらに追加して作られる (2次電離)。衝突間の電子の平均エネルギーは電場とともに増大し、2次電離を起こす電場の閾値を越えたところでガス増幅が始まる。1気圧の通常用いられるガスではこの閾値は  $10^6$  V/m 程度である。

この2次電離過程で作られた電子も電場によって加速される。この電子もドリフト中に中性ガス分子と衝突してさらに電離を起こす。したがってこの電離過程はタウンゼント型電子雪崩 (Townsend avalanche) と呼ばれ、同じ過程を繰り返しさらに多数の自由電子をつくる。単位長さ当りの電子の電子の増倍率は次のタウンゼントの式に従う：

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (5.2)$$

$\alpha$  はガスに対する第1タウンゼント係数 (first Townsend coefficient) と呼ばれ、閾値以下の電場に対して0であり電場強度とともに増加する。電場分布は sense wire からの距離に依存するので  $\alpha$  も sense wire からの距離の関数  $\alpha(x)$  として記述される。ガス増幅率  $M$  は  $\alpha(x)$  を積分して得られる：

$$M = \exp\left(\int_a^{r_C} \alpha(x) dx\right) \quad (5.3)$$

積分はガス増幅の可能な半径の全領域にわたって行なう。つまり sense wire の半径  $a$  から、それ以上では電場強度が小さくなり過ぎてガス増幅を行ないない臨界半径  $r_C$  まで積分する。

こうして適当な条件下では、入射放射線によって作られた1次電子はガス増幅によって、sense wire に辿り着きパルスとして検出される。なお、出力パルスを直接検出するには  $10^5$  程度の増幅率が適当である。[1]

### 5.1.2 充填ガス

充填ガスの選択には低い動作電圧、高いガス増幅率、高い計数率などを加味する必要がある。また、充填ガスは通常、2種類のガスを混合して用いられる。

その主成分のひとつは、Base gas と呼ばれ、主に Ar をはじめとする希ガスが一般的に選択される。希ガスは単一元素分子であるため、自由電子との衝突により得られたエネルギーは振動・回転エネルギーに使われることなく、効率的に電離エネルギーに変換され、高いガス増幅率を持つ。また入射粒子に依らない W 値 (生成イオン対当りに入射粒子が失う平均エネルギー) を持つという観点からも希ガスが選択される。しかしながら、検出ガスとして希ガスのみを用いた場合、連続的な放電を起こすことなく得られる増幅率は  $10^3 \sim 10^4$  程度までである。その原因は、avalanche の過程で生じる励起原子からの脱励起紫外線 (Ar の場合 11.6 eV) である。高エネルギーの光子は cathode 面をイオン化することにより光電子を生成し、さらなる avalanche を引き起こす。この効果が大きくなると連続的な放電を引き起こす。

もうひとつの主成分は、Quench gas と呼ばれ、上述の光電子を抑えるために加えられる。Quench gas にはメタンやアルコールなどの多原子分子気体が用いられる。これらの気体は、光子放出を伴わない幅広い励起準位 (回転準位、振動準位など) を持ち、またイオン化を伴わない非弾性衝突を起こして、希ガスから放出される幅広いエネルギーの光子を吸収することができる。

充填ガスに Base gas と Quench gas を混合して用いることにより、連続的な放電を起こすことなく十分なガス増幅率を得られる電圧を印加することができるようになる。 [9]

| ガス              | 一次電離ポテンシャル (eV) | W 値 (eV/イオン対) |             |
|-----------------|-----------------|---------------|-------------|
|                 |                 | 高速電子          | $\alpha$ 粒子 |
| Ar              | 15.7            | 26.4          | 26.3        |
| He              | 24.5            | 41.3          | 42.7        |
| H <sub>2</sub>  | 15.6            | 36.5          | 36.4        |
| N <sub>2</sub>  | 15.5            | 34.8          | 36.4        |
| Air             |                 | 33.8          | 35.1        |
| O <sub>2</sub>  | 12.5            | 30.8          | 32.2        |
| CH <sub>4</sub> | 14.5            | 27.3          | 29.1        |

表 5.1: 種々のガスに対する W 値 ([1] より引用)

### 5.1.3 ガス置換

ドリフトチェンバーに電圧を印加する際、検出器内部の空気の置換が 99.99% 以上完了していなければならない。その理由は以下の通りである。

検出器内に生成された電子は、中性のガス分子に付着して陰イオンを形成する。基本的に希ガスや水素は電子の捕獲率  $h$  が 0 である。一方で、空気中に含まれる O や H<sub>2</sub>O は電気陰性度が高く、表 5.2 に示されるように電子の捕獲率  $h$  は有限の値をとる。表中の  $N$  は単位時間当りの衝突数、 $t$  は平均捕獲時間を表し、 $t = (hN)^{-1}$  の関係がある。

そのため、極微量の電気陰性ガスが増幅率を大きく減少させ、パルスの波高にゆらぎを追加する。

以上の理由から、ドリフトチェンバーに電圧を印加する際、ガス置換率は 99.99% 以上でなければならない。なお、ガスの置換回数と置換率の関係は表 5.3 で与えられる。

| ガス               | $h$                  | $N$ (sec <sup>-1</sup> ) | $t$ (sec)             |
|------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| CO <sub>2</sub>  | $6.2 \times 10^{-9}$ | $2.2 \times 10^{11}$     | $0.71 \times 10^{-3}$ |
| O <sub>2</sub>   | $2.5 \times 10^{-5}$ | $2.1 \times 10^{11}$     | $1.9 \times 10^{-7}$  |
| H <sub>2</sub> O | $2.5 \times 10^{-5}$ | $2.8 \times 10^{11}$     | $1.4 \times 10^{-7}$  |
| Cl               | $4.8 \times 10^{-4}$ | $4.5 \times 10^{11}$     | $4.7 \times 10^{-9}$  |

表 5.2: 電子捕獲率 (標準状態)。 [2] より引用。

| $n$                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10     |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
| $\epsilon(nT)$ [%] | 63.2 | 86.5 | 95.0 | 98.2 | 99.3 | 99.8 | 99.9 | 99.97 | 99.99 | 99.995 |

表 5.3:  $n$  回置換でのガス置換率

## 5.2 ガスの流量と置換率

容積  $V$  のドリフトチェンバーに、単位時間当りの流量  $v$  でガス  $G$  を流してから、ある時間  $t$  だけ経過したときのガス  $G$  の置換率  $\epsilon(t)$  を求める。

全容積中でガス  $G$  の占める体積を  $x(t) \equiv V\epsilon(t)$  と定義する。初期条件は  $x(0) = 0$  である。

流入したガス  $G$  は一様に拡散すると仮定し、ドリフトチェンバーの Window 膜の膨らみを無視すると、以下のような式が成立する。

$$dx = vdt - \frac{x + vdt}{V} \times vdt \quad (5.4)$$



ここで、第1項は微小時間  $dt$  中のガス G の流入量を、第2項は微小時間  $dt$  中のガス G の排気量を表している。 $dt$  の二次の項を無視して、条件  $V \gg vdt$  のもと変形すると、

$$\begin{aligned} dx &= vdt - \frac{x}{V} \times vdt \\ \frac{1}{v} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{V} x &= 1 \end{aligned} \quad (5.5)$$

となり、(左辺) = 0 の一般解は

$$x = Ae^{kt} \quad k = -\frac{v}{V} \quad (5.6)$$

であり、一方、 $\frac{dx}{dt} = 0$  の特解は、

$$x = V \quad (5.7)$$

である。よって式 (5.5) の解は、

$$x = Ae^{kt} + V \quad (5.8)$$

と書ける。ここで、初期条件  $x(0) = 0$  より、 $A = -V$  となり、

$$\begin{aligned} x(t) &= V(1 - e^{kt}) \\ &= V(1 - e^{-\frac{v}{V}t}) \end{aligned} \quad (5.9)$$

と求まる。

以上より、ガス置換率は

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \frac{x(t)}{V} \\ &= 1 - e^{-\frac{v}{V}t} \end{aligned} \quad (5.10)$$

と求まり、1回置換するのにかかる時間  $T = \frac{V}{v}$  を使って、 $n$  回置換でのガス置換率を書き直すと、最終的に以下の式が得られる：

$$\epsilon(nT) = 1 - e^{-n} \quad (5.11)$$

これを表にすると以下のようなになる。

ドリフトチェンバーに高電圧を印加する際は 99.99%以上 (つまり 9 回以上) ガスが置換されるのを待たなければならない。

| n                  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10     |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
| $\epsilon(nT)[\%]$ | 63.2 | 86.5 | 95.0 | 98.2 | 99.3 | 99.8 | 99.9 | 99.97 | 99.99 | 99.995 |

表 5.4: n 回置換でのガス置換率

### 5.3 クーロン多重散乱

荷電粒子が物質中を通過するとき、小角散乱が繰り返し起こることにより粒子の軌道がそれる。この軌道のずれの主な原因は、物質中の原子核によるクーロン散乱である。そのため、この軌道のずれをクーロン多重散乱と呼ぶ。クーロン多重散乱はモリエール Moliere の理論によく従い、その角度分布は散乱角が小さいところでは、ほぼガウス分布で表される。その rms(平均二乗平方根) は次式で与えられる [10] :

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z_{inci} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right) \right] \quad [\text{rad}] \quad (5.12)$$

$\beta c$  : 速度  $Z_{inci}$  : 入射粒子の電荷  $x$  : 物質の厚さ  $X_0$  : 物質の放射長  
放射長とは物質固有の量で、(a) 高エネルギーの電子が制動放射によりエネルギーを失い、エネルギーが  $1/e$  に減少するまでの平均距離 (b) 高エネルギーの光子による対生成過程における平均自由行程の  $7/9$  の距離を表す。

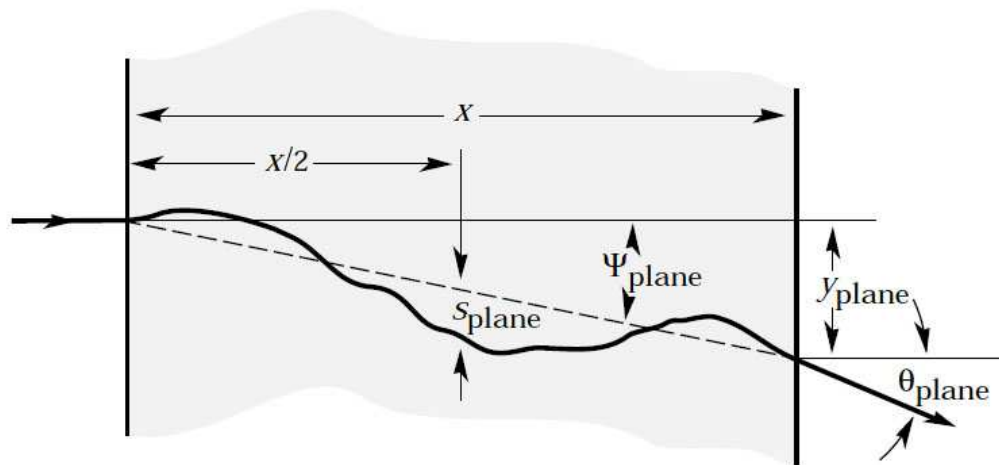


図 5.1: クーロン多重散乱を描写する各種の量。添字 plane は 2 次元を意味する。式 5.12 のクーロン多重散乱角  $\theta_0$  は図中の  $\theta_{plane}$  に対応している。

また、図 5.1 で示した量は次式で関連付けられる：

$$\psi_{plane}^{rms} = \frac{1}{\sqrt{3}}\theta_{plane}^{rms} = \frac{1}{\sqrt{3}}\theta_0, \quad (5.13)$$

$$y_{plane}^{rms} = \frac{1}{\sqrt{3}}x\theta_{plane}^{rms} = \frac{1}{\sqrt{3}}x\theta_0, \quad (5.14)$$

$$s_{plane}^{rms} = \frac{1}{4\sqrt{3}}x\theta_{plane}^{rms} = \frac{1}{4\sqrt{3}}x\theta_0. \quad (5.15)$$

式 (5.12) からわかるように、 $x/X_0$  はクーロン多重散乱を特徴付ける量であり、 $x/X_0$  が小さい方がクーロン多重散乱を抑えることができる。

## 5.4 位置検出器の分解能と観測量の関係、通過粒子の位置、角度分解能

一面当り  $\Delta x$  の位置分解能を持つ位置検出器を用いたとき、観測量から位置分解能がどのように決まるか評価する方法を示す。

|              |              |
|--------------|--------------|
| n            | 面の数          |
| $z_i$        | 原点から i 面目の距離 |
| $x_i$        | i 面目での検出位置   |
| $\Delta x_i$ | i 面の位置分解能    |

粒子の軌道は、直線

$$x = a_0 + a_1 z \quad (5.16)$$

で表記する。 $a_0$  は原点での位置、 $a_1$  は角度に対応している。

最小二乗法で  $(a_0, a_1)$  を求める場合、一般的な方法では、

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - (a_0 + a_1 z_i)}{\Delta x_i} \right)^2 \quad (5.17)$$

として、 $S$  の偏微分が 0 となる条件

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0 \quad (5.18)$$

を解けば良い。ここで、各面の位置分解能が一定 ( $\Delta x_i = \Delta x$ ) とし、行列式で書き直すと、

$$\begin{pmatrix} \sum x_i \\ \sum x_i z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum 1 & \sum z_i \\ \sum z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

と簡略化できる。また右辺の行列要素は、面の構成 ( $z_i$ ) が分かるので計算できて、ここでは

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_{i=1}^n 1 \\ S_z &= \sum_{i=1}^n z_i \\ S_{zz} &= \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{aligned} \quad (5.20)$$

と書き表しておく。行列式  $D = S_1 S_{zz} - S_z^2$  を用いて  $(a_0, a_1)$  を求めると、

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{D} \begin{vmatrix} \sum x_i & S_z \\ \sum x_i z_i & S_{zz} \end{vmatrix} = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^n (S_{zz} - z_j S_z) x_j \\ a_1 &= \frac{1}{D} \begin{vmatrix} S_i & \sum x_i \\ S_z & \sum x_i z_i \end{vmatrix} = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^n (S_1 z_j - S_z) x_j \end{aligned} \quad (5.21)$$

次に上の式を使って  $(a_0, a_1)$  の決定精度を求める。

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_0}{\partial x_j} &= \frac{1}{D} (S_{zz} - z_j S_z), \\ \frac{\partial a_1}{\partial x_j} &= \frac{1}{D} (S_1 z_j - S_z). \end{aligned} \quad (5.22)$$

を使う。今、 $z$  方向の誤差はないとすると、

$$\Delta a_0 = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_j} \right) \Delta x_j. \quad (5.23)$$

と表せ、これを自乗すると

$$\Delta a_0^2 = \frac{1}{D^2} \left( \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_j} \right)^2 \Delta x_j^2 + 2 \sum_{l < m} \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_l} \right) \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_m} \right) \Delta x_l \Delta x_m \right). \quad (5.24)$$

となる。

$x_l, x_m$  がそれぞれ独立であり、正規分布に従うとすると、それらの誤差の積  $\Delta x_l \Delta x_m$  は正值、負値をとる確率が等しくなり、

$$\sum_{l < m} \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_l} \right) \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_m} \right) \Delta x_l \Delta x_m \rightarrow 0.$$

となる。よって式 (5.24) は以下のように表せる：

$$\begin{aligned}\Delta a_0^2 &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial a_0}{\partial x_j} \right)^2 \Delta x_j^2 \\ &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n (S_{zz} - z_j S_z)^2 \Delta x_j^2,\end{aligned}\quad (5.25)$$

$\Delta a_1$  についても同様にして次式で表せる：

$$\begin{aligned}\Delta a_1^2 &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial a_1}{\partial x_j} \right)^2 \Delta x_j^2 \\ &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n (S_1 z_j - S_z)^2 \Delta x_j^2,\end{aligned}\quad (5.26)$$

面ごとの分解能が同じとき ( $\Delta x_j = \Delta x$ ) にはさらに次のように変形できる：

$$\begin{aligned}\Delta a_0^2 &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n (S_{zz}^2 - 2z_j S_z S_{zz} + z_j^2 S_z^2) \Delta x^2 \\ &= \frac{1}{D^2} (S_1 S_{zz}^2 - S_{zz} S_z^2) \Delta x^2 \\ &= \frac{S_{zz}}{D} \Delta x^2\end{aligned}\quad (5.27)$$

$$\begin{aligned}\Delta a_0^2 &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n (S_1^2 z_j^2 - 2S_1 z_j S_z + S_z^2) \Delta x^2 \\ &= \frac{1}{D^2} (S_1^2 S_{zz} - S_1 S_z^2) \Delta x^2 \\ &= \frac{S_1}{D} \Delta x^2\end{aligned}\quad (5.28)$$

したがって ( $a_0$ ,  $a_1$ ) の決定精度は以下のようになる：

$$\Delta a_0 = \sqrt{\frac{S_{zz}}{D}} \Delta x \quad (5.29)$$

$$\Delta a_1 = \sqrt{\frac{S_1}{D}} \Delta x \quad (5.30)$$

$$D = S_1 S_{zz} - S_z^2 \quad (5.31)$$

最後に、残差分布から面当りの分解能を求める式を導く。残差  $r_k$  は、次

式で表される。

$$\begin{aligned}
r_k &= x_k - (a_0 + a_1 z_k) \\
&= x_k - \frac{1}{D} \left( \sum_{j=1}^n (S_{zz} - z_j S_z) x_j + \sum_{j=1}^n (S_1 z_j - S_z) x_j \cdot z_k \right) \\
&= \frac{1}{D} \sum_{j=1}^n \left( \delta_{jk} D - (S_{zz} - z_j S_z) - (S_1 z_j - S_z) z_k \right) x_j
\end{aligned} \tag{5.32}$$

$\Delta a_0$ 、 $\Delta a_1$  を導出したときと同様にして残差  $r_k$  の分散は以下のようにになる：

$$\begin{aligned}
\Delta r_k^2 &= \frac{1}{D^2} \sum_{j=1}^n \left( \delta_{jk} D - (S_{zz} - z_j S_z) - (S_1 z_j - S_z) z_k \right)^2 \Delta x^2 \\
&= \frac{1}{D^2} \left( D(D - S_{zz}) + 2DS_k z_k - DS_1 z_k^2 \right) \Delta x^2
\end{aligned} \tag{5.33}$$

よって最終的に、面当りの分解能は次式で表される：

$$\Delta r_k = \sqrt{1 - \frac{S_{zz} - 2S_k z_k + S_1 z_k^2}{D}} \Delta x \tag{5.34}$$

## 5.5 プラスチックシンチレータ中での $\beta$ 線の飛程

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  ( $Q_{\beta^-} = 2.282 \text{ MeV}$ ) から放射される  $\beta$  線の最大飛程  $R$  は Feather の経験式 (5.35) から、 $1.10 \text{ g/cm}^2$  となる。

$$R = \begin{cases} 0.542 \times E - 0.133 & 3 \text{ MeV} > E > 0.8 \text{ MeV} \\ 0.407 \times E^{1.38} & 0.8 \text{ MeV} > E > 0.15 \text{ MeV} \end{cases} \tag{5.35}$$

単位  $R$  : [ $\text{g/cm}^2$ ]、 $E$  : [ $\text{MeV}$ ]

そのため、密度  $1.032 \text{ g/cm}^3$  のプラスチックシンチレータ中を通過すると  $\beta$  線は  $1.07 \text{ cm}$  以下で止まってしまう。そこで NDC 手前のプラスチックシンチレータの厚みを  $1 \text{ mm}$  にして、極力、減衰を抑えた。

## 5.6 使用したモジュール等と各種設定

測定に使用したモジュール等と各種設定を以下の表にまとめた。

| 種別                            | 型番              | 製造者                       |
|-------------------------------|-----------------|---------------------------|
| ASD card                      | GNA-180 (以下省略)  |                           |
| PMT (PL1 $_{\beta}$ 用)        | RC5940          | HAMAMATSU                 |
| PMT (PL2 $_{\beta}$ 用)        | RC555           | HAMAMATSU                 |
| PMT (PL1 $_{\mu}$ 用)          | RA3639          | HAMAMATSU                 |
| PMT (PL2 $_{\mu}$ 用)          | RA5066          | HAMAMATSU                 |
| ASD 専用電源                      | GNN-450 (以下省略)  |                           |
| DUAL POWER SUPPLY             | TKY-0020        | 富士ダイヤモンド                  |
| 200 MHz Quad CFD              | Model 454       | CANBERRA                  |
| 3CH 4-FOLD 1-VETO Coincidence | N-TM 103        | Technoland corpotation    |
| 4CH Logic Fanin/Fanout        | N-TM 102        | Technoland corpotation    |
| VME CRATE                     | SIS3000         | Struck Innovative Systeme |
| PCI-VME bus adapter           | Model 620       | SBS Technologies          |
| 16CH I/O Resister             | V977            | CAEN                      |
| AMT-TDC                       | KEK-AMS-TDC-VME | AMSC                      |

表 5.5: 使用したモジュール等

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| Edge detection    | rising edge           |
| Common start/stop | common stop           |
| Time range        | 3.2 $\mu$ s = 4096 ch |
| バッファ方式            | シングルバッファ方式            |

表 5.6: AMT-TDC の設定

| ガス  | Plastic scinti. | 印加電圧    | Thre.  | Width  | Z/C    |
|---|-----------------|---------|--------|--------|--------|
| Ar(90%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (10%) | PL1 $_{\beta}$  | -1300 V | -35 mV | 50 ns  | -15 mV |
|   | PL2 $_{\beta}$  | -1250 V | -35 mV | 100 ns | -15 mV |
|   | PL1 $_{\mu}$    | -1450 V | -30 mV | 50 ns  | -15 mV |
|   | PL2 $_{\mu}$    | -1400 V | -30 mV | 100 ns | -15 mV |
| He(50%)-C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (50%) | PL1 $_{\beta}$  | -1400 V | -25 mV | 50 ns  | -12 mV |
|   | PL2 $_{\beta}$  | -1350 V | -30 mV | 100 ns | -22 mV |
|   | PL1 $_{\mu}$    | -1500 V | -30 mV | 50 ns  | -13 mV |
|   | PL2 $_{\mu}$    | -1250 V | -30 mV | 100 ns | -13 mV |

表 5.7: ディスクリ設定

PL1<sub>μ</sub> と PL2<sub>μ</sub> の信号には、反射が見られたため、PMT の一方の出力端子を 50 Ω でターミネートしていたが、He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) の宇宙線測定の際には、PL2<sub>μ</sub> の信号のベースラインが±10 mV 程度の範囲でふらついていたため、ターミネータを取り外すとふらつきがなくなったので、その状態で使用した。



## 5.7 各測定におけるノイズレベル

以下の I ~ IV の各測定におけるノイズレベルを、記録していた範囲で、表 5.8~表 5.11 に示す。ここで示すノイズレベルの定義は、ホワイトノイズが消えるときの ASD カードのスレッシュホールド電圧  $V_{thre}$  である。

- I 充填ガスに Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いた  $\beta$  線測定
- II 充填ガスに Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) を用いた宇宙線測定
- III 充填ガスに He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いた  $\beta$  線測定
- IV 充填ガスに He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) を用いた宇宙線測定

ここでノイズレベルを調べる手順に問題があったことを注意書きしておく。ノイズレベルを調べる手順は、以下の通りである。

1. cabling を行ない、X1 面の ASD カードと LVDS/NIM 変換を 16 ch フラットケーブルで接続し、その NIM 信号をビジュアルスケーラに入れる。
2. VME OFF の状態で  $|V_{thre}|$  を下げていき、ビジュアルスケーラのカウントが 0 になる  $V_{thre}$  を記録する。
3. VME クレートの電源を ON にしてビジュアルスケーラのカウントが 0 になる  $V_{thre}$  を記録する。
4. LVDS/NIM 変換からフラットケーブルを取り外し、TDC と接続する。
5. 次に X2 面の cabling を行ない、X1 面のときと同様に VME OFF 時、VME ON 時のノイズレベルを記録した後、LVDS/NIM 変換からフラットケーブルを取り外し、TDC と接続する。
6. X3 面、X4 面、Y1 面、Y2 面、Y3 面、Y4 面の順に同じ作業を行なう。

この手順でノイズレベルを調べると、最初の方に cabling した X1 面、X2 面などのノイズレベルは、全部で 8 本の 16 ch フラットケーブルを TDC に接続した段階では、記録した段階のノイズレベルよりも大きくなっている可能性が高い。本来、全てのケーブルを繋ぎ終わった後に、もう一度、X1 面から Y4 面のノイズレベルを調べ直すべきだった。

| VME | X1     | X2     | X3     | X4     | Y1     | Y2     | Y3     | Y4     |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| OFF | 約 -500 | 約 -500 | 約 -200 | 約 -200 | 約 -200 | 約 -200 | 約 -200 | 約 -200 |
| ON  | ?      | ?      | ?      | ?      | ?      | ?      | ?      | ?      |

表 5.8: 測定 I のときのノイズレベル (単位 : mV)。VME ON のときは記録してなかった。

| VME | X1    | X2    | X3   | X4   | Y1   | Y2   | Y3   | Y4   |
|-----|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| OFF | -350  | -350  | -140 | -105 | -85  | -120 | -70  | -145 |
| ON  | -1000 | -1400 | -350 | -470 | -370 | -430 | -500 | -600 |

表 5.9: 測定 II のときのノイズレベル (単位 : mV)

| VME | X1    | X2    | X3   | X4    | Y1   | Y2   | Y3   | Y4   |
|-----|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| OFF | -270  | -430  | -410 | -200  | -210 | -300 | -130 | -130 |
| ON  | -1000 | -1100 | -780 | -1000 | -550 | -960 | -670 | -390 |

表 5.10: 測定 III のときのノイズレベル (単位 : mV)

| VME | X1    | X2   | X3   | X4   | Y1   | Y2   | Y3   | Y4   |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| OFF | -320  | -250 | -155 | -110 | -95  | -110 | -83  | -165 |
| ON  | -1220 | -810 | -555 | -310 | -225 | -205 | -160 | -340 |

表 5.11: 測定 IV のときのノイズレベル (単位 : mV)。この測定では全てのケーブルを繋ぎ終わった後に、ノイズレベルを調べ直した。

## 5.8 2山の TDC スペクトルと multiplicity

印加電圧を高くすると TDC スペクトルが 2 山現れると同時に multiplicity が異常に高くなるという問題がある (Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(90%) では  $V_c = V_p = -1300$  V 程度から現れ始め、He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) では  $V_c = V_p = -1900$  V 程度から現れ始める)。原因は調査中であるが、以下にわかっていることを示す。

- TDC スペクトルの 2 山目は 1 山目の 約 500 ch 後に peak を持つ (早く検出された方の peak (ch の大きい方) を 1 山目と定義する)。それはガスを変えても変わらない。
- 2 山目が大きくなると、面の multiplicity が 50 以上のイベントが出てくる。
- multiplicity は全てのワイヤでほぼ一様である (図 5.2 の左下の図)。
- ch 1 のワイヤと ch 16 のワイヤでも correlation が見られる (図 5.3)。

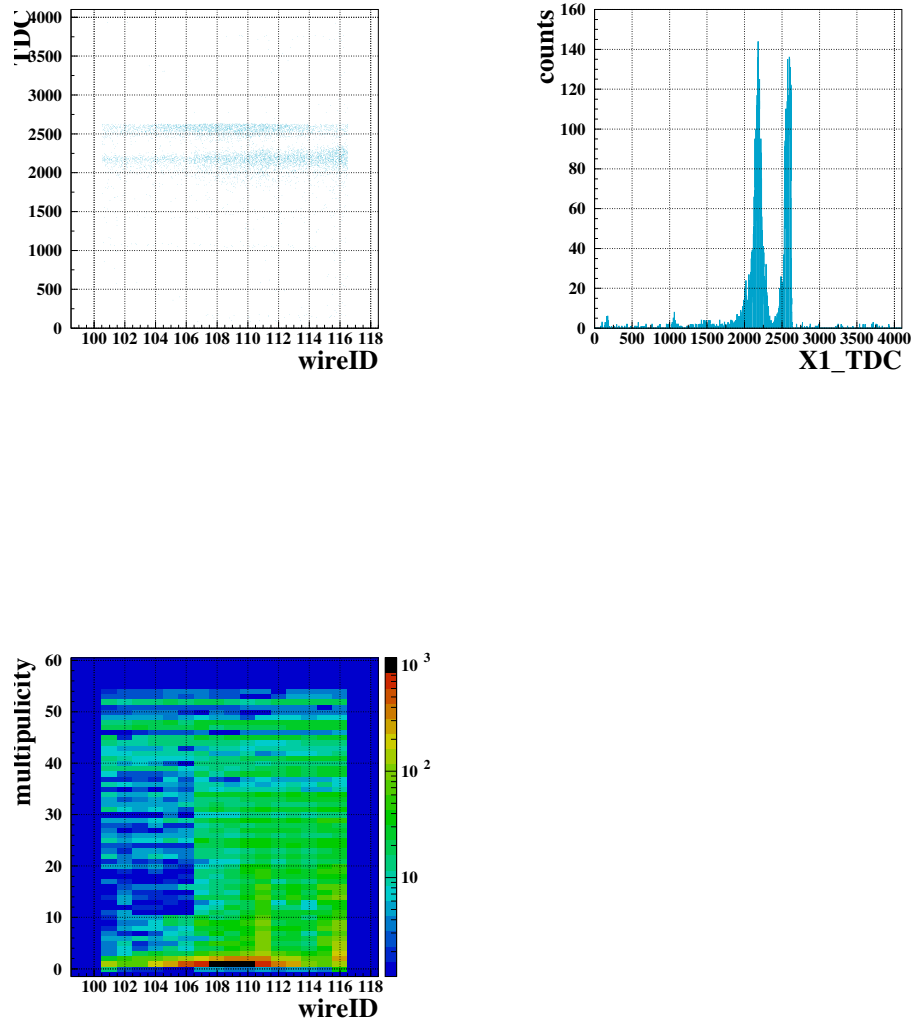


図 5.2: 2 山の TDC スペクトルと multiplicity。common stop なので ch の大きい方が早く検出されている (早い方を 1 山目と定義する)。左上の図は横軸が wire ID、縦軸が TDC の ch である。右上の図は左上の図を y 軸に射影したもの。左下の図は横軸が wire ID、縦軸が multiplicity である。

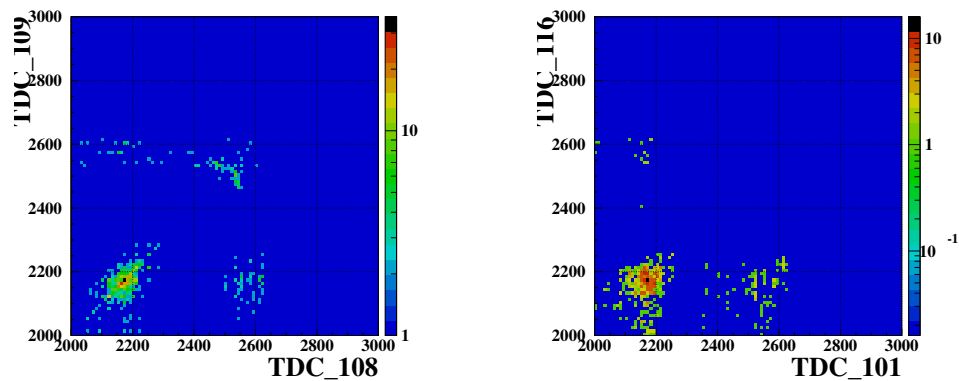


図 5.3: 2 山の TDC スペクトルとワイヤ同士の correlation。左上の図は横軸 X1 面の wire 8 の TDC の ch、縦軸が X1 面の wire 9 の TDC の ch である。右上の図は横軸が X1 面 wire 1 の TDC の ch、縦軸が X1 面 wire 16 の TDC の ch である。隣合うワイヤ同士では TDC スペクトルの 1 山目に correlation がある (左図)。これはセルの端で発生した電子が隣のワイヤでも検出されたことを意味している。しかし、2 山目は面の両端のワイヤ同士でも correlation しており、その原因は調査中である (右図)。

## 5.9 $V_{\text{thre}}$ を変えたときの検出効率の変化

充填ガスが Ar(90%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%) の場合と He(50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%) の場合について、 $V_{\text{thre}}$  を変えたときの検出効率の変化を示す。

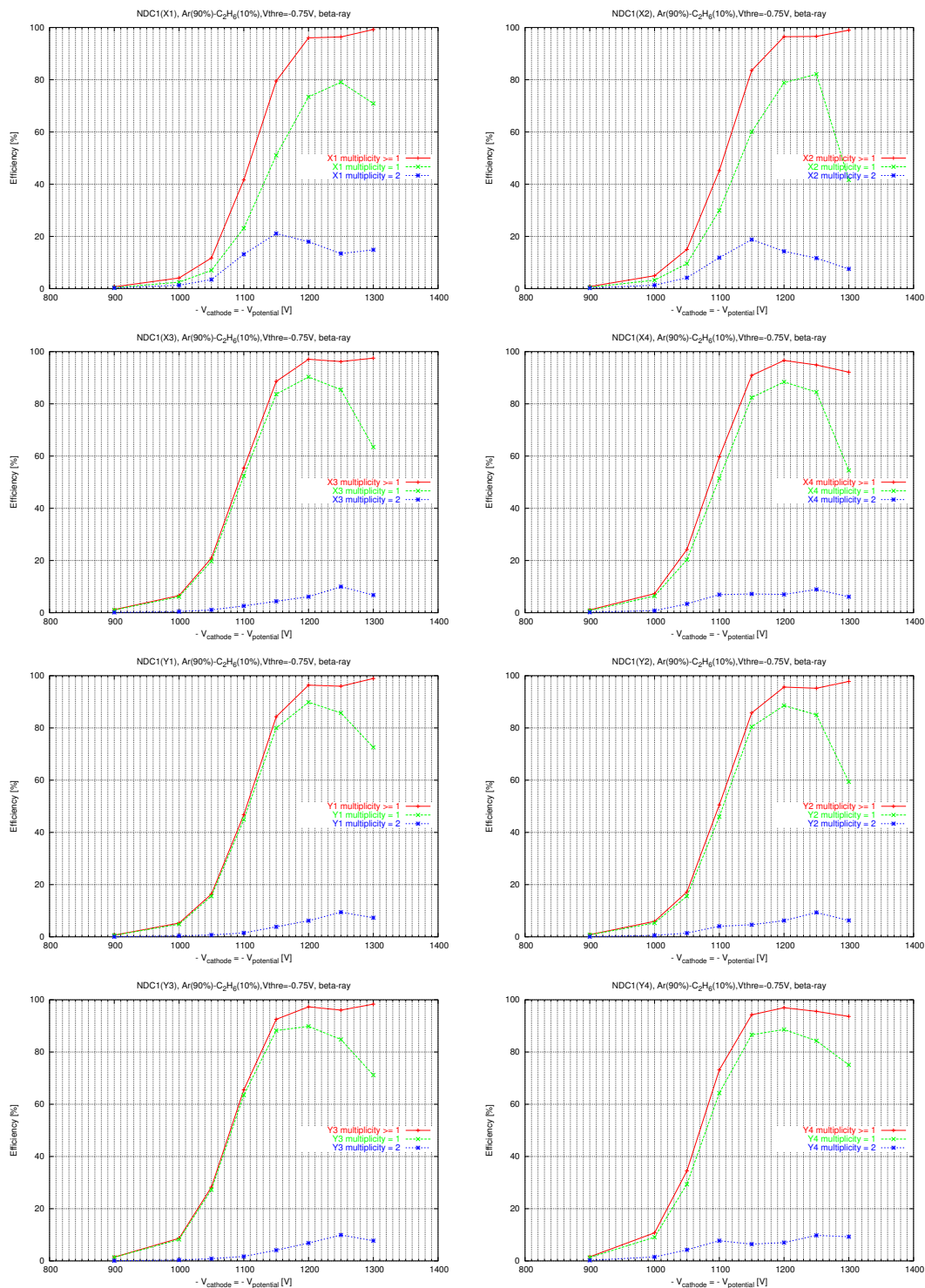


図 5.4: 検出効率と検出多重度の関係 (Ar(90%) - C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%), V<sub>thre</sub> = -0.75 V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。

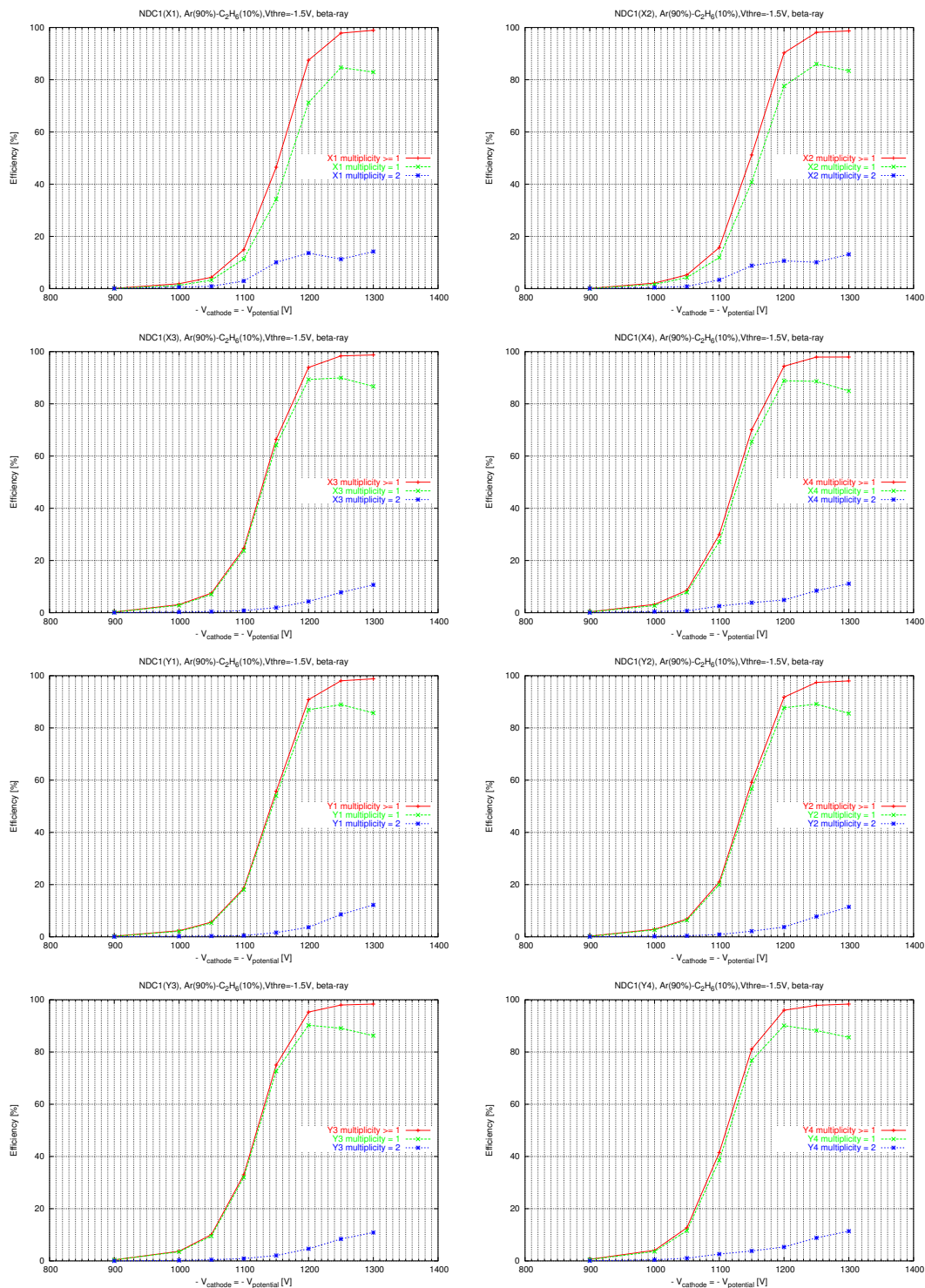


図 5.5: 検出効率と検出多重度の関係 (Ar(90%) - C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%), V<sub>thre</sub> = -1.5 V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。



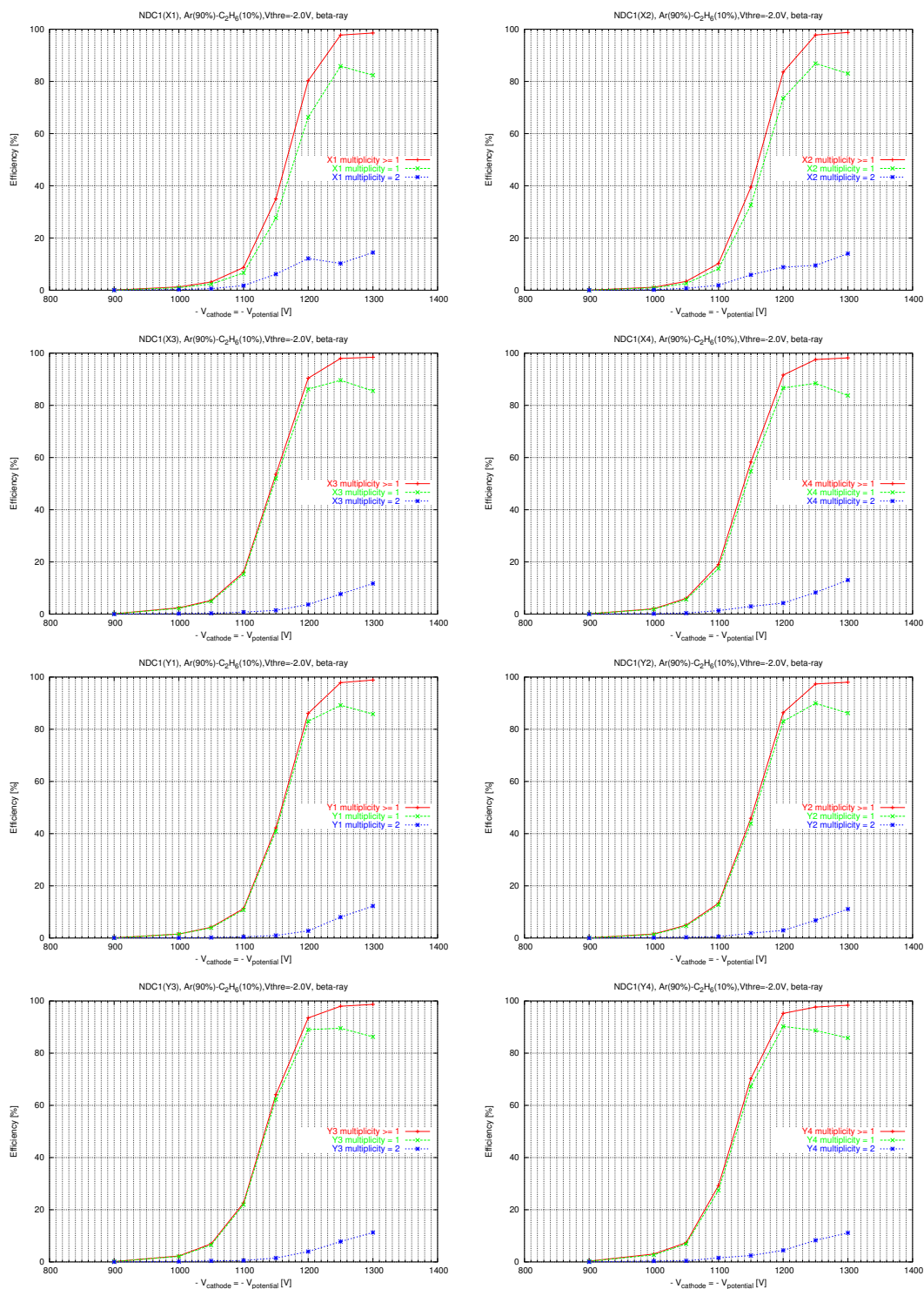


図 5.6: 検出効率と検出多重度の関係 (Ar(90%) - C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(10%),  $V_{\text{thre}} = -2.0$  V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。

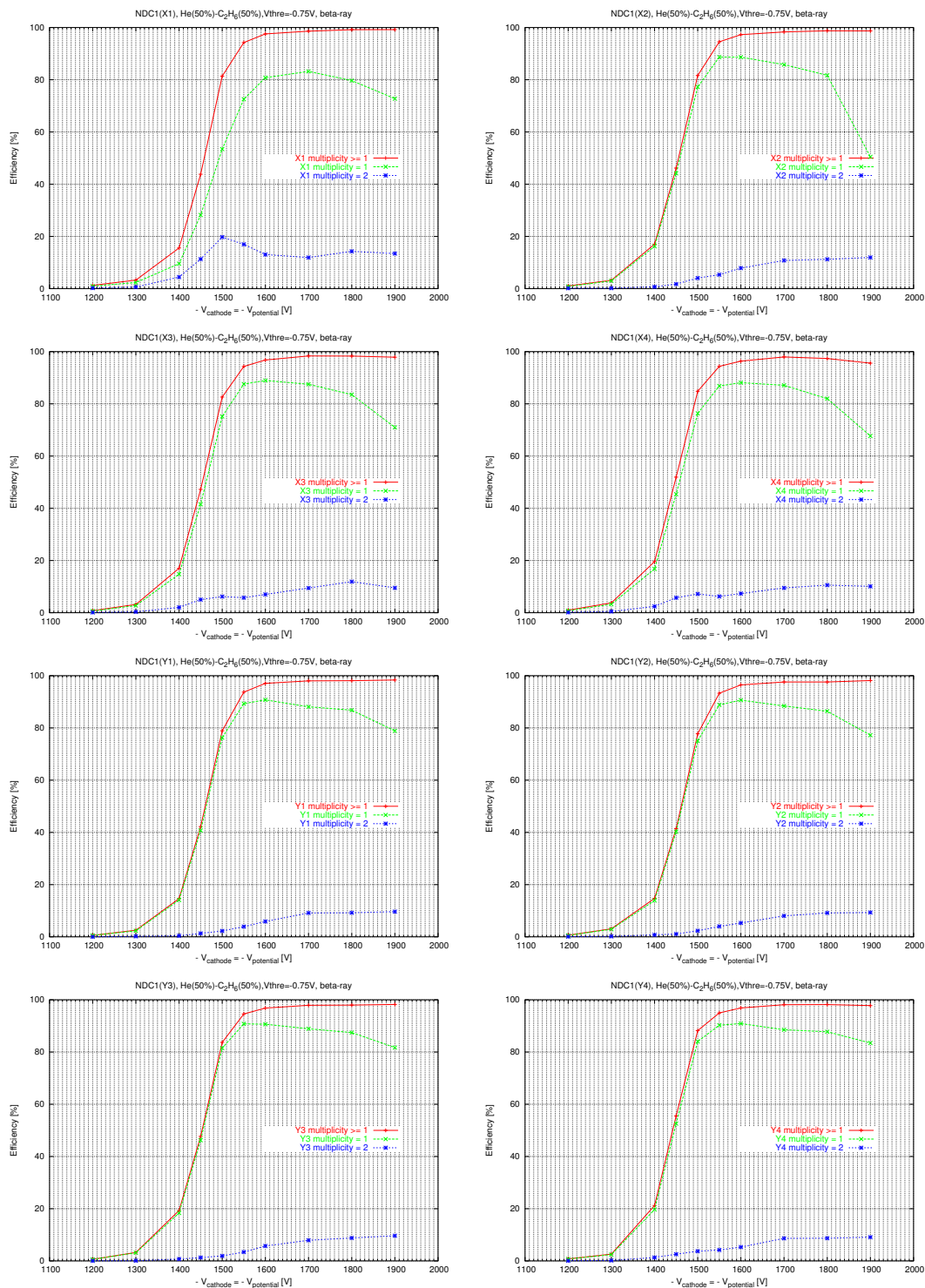


図 5.7: 検出効率と検出多重度の関係 (He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50%), V<sub>thre</sub> = -0.75 V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。

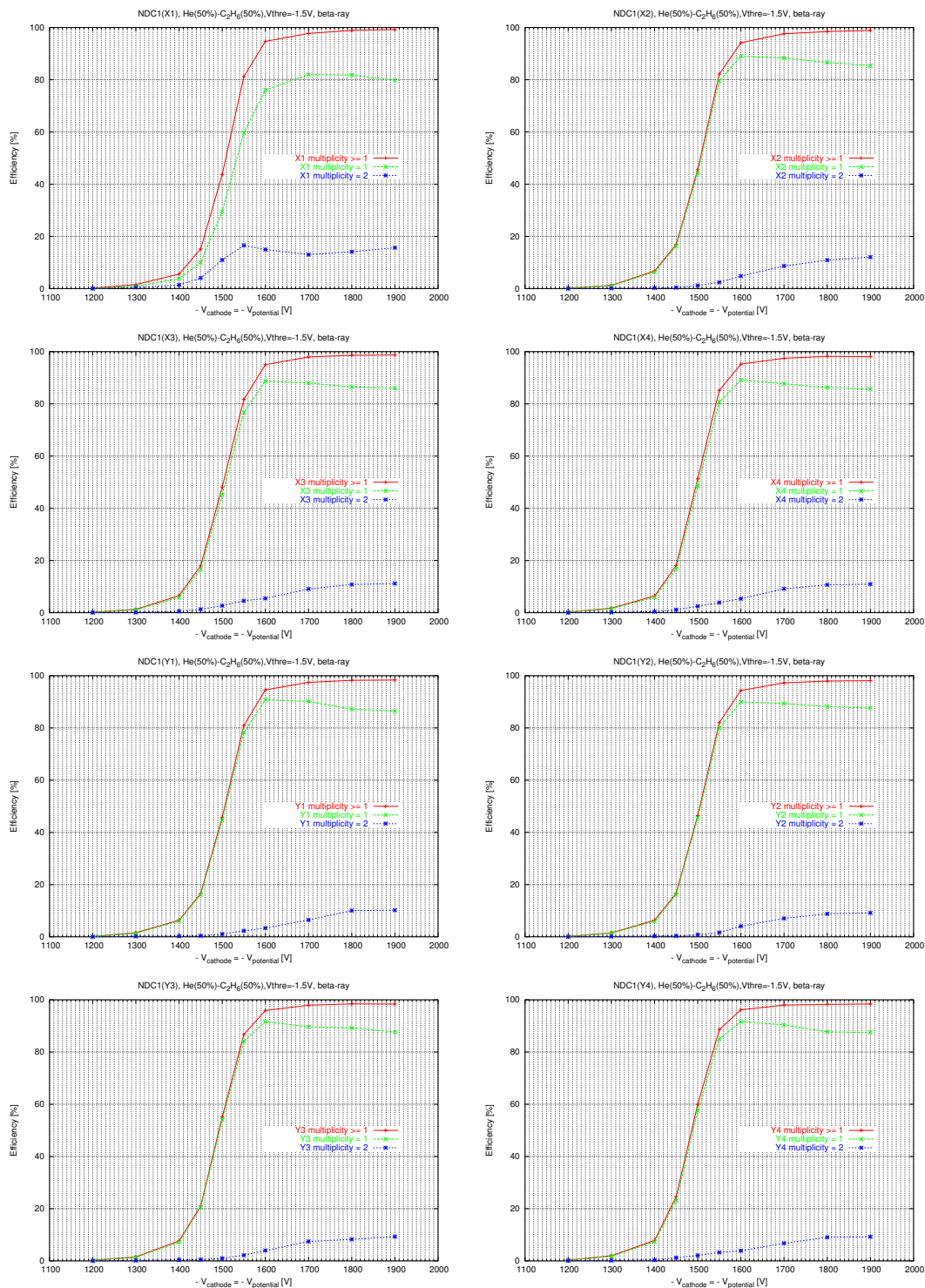


図 5.8: 検出効率と検出多重度の関係 (He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50%), V<sub>thre</sub> = -1.5 V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。

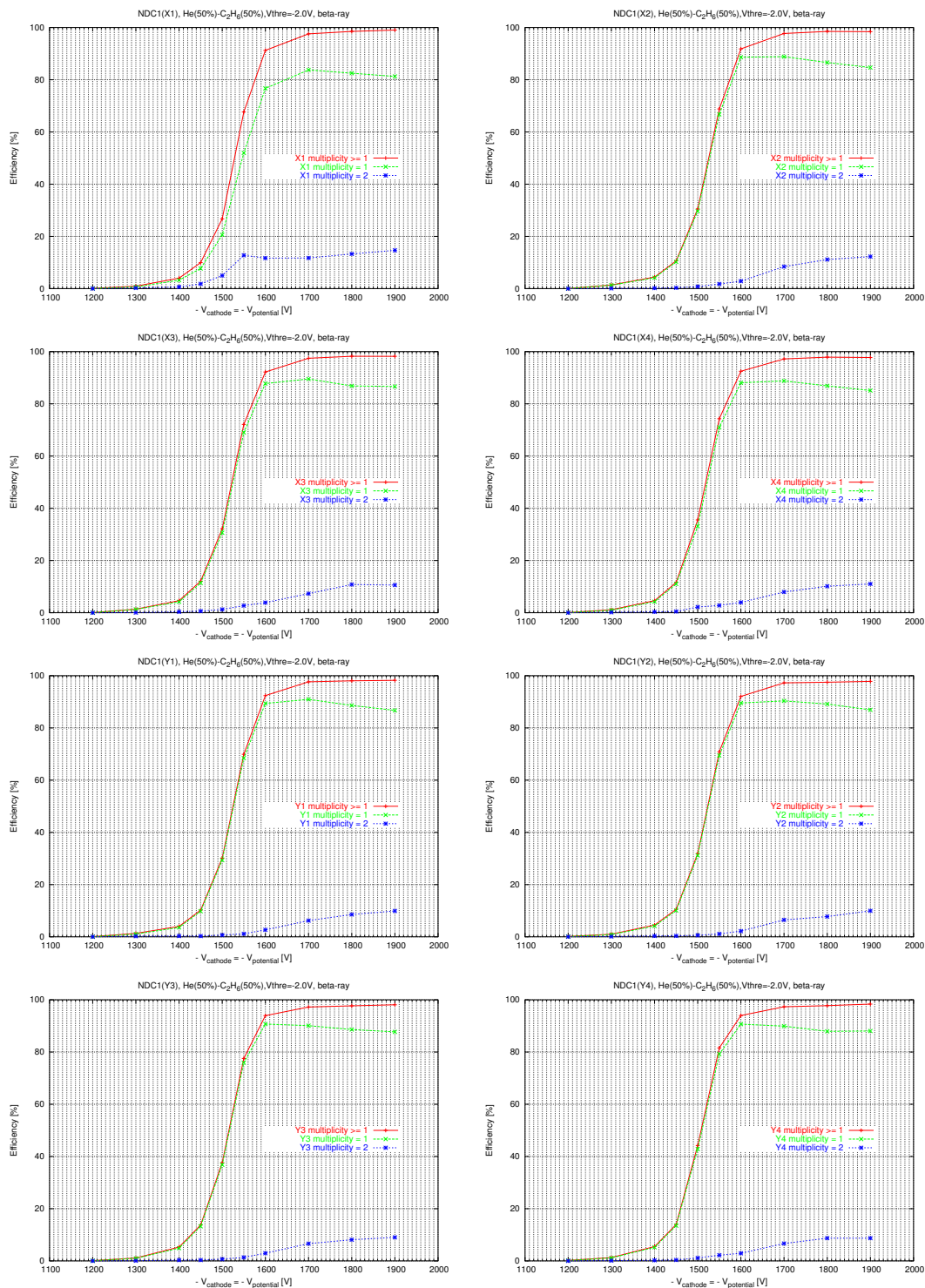


図 5.9: 検出効率と検出多重度の関係 (He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50%), V<sub>thre</sub> = -2.0 V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。

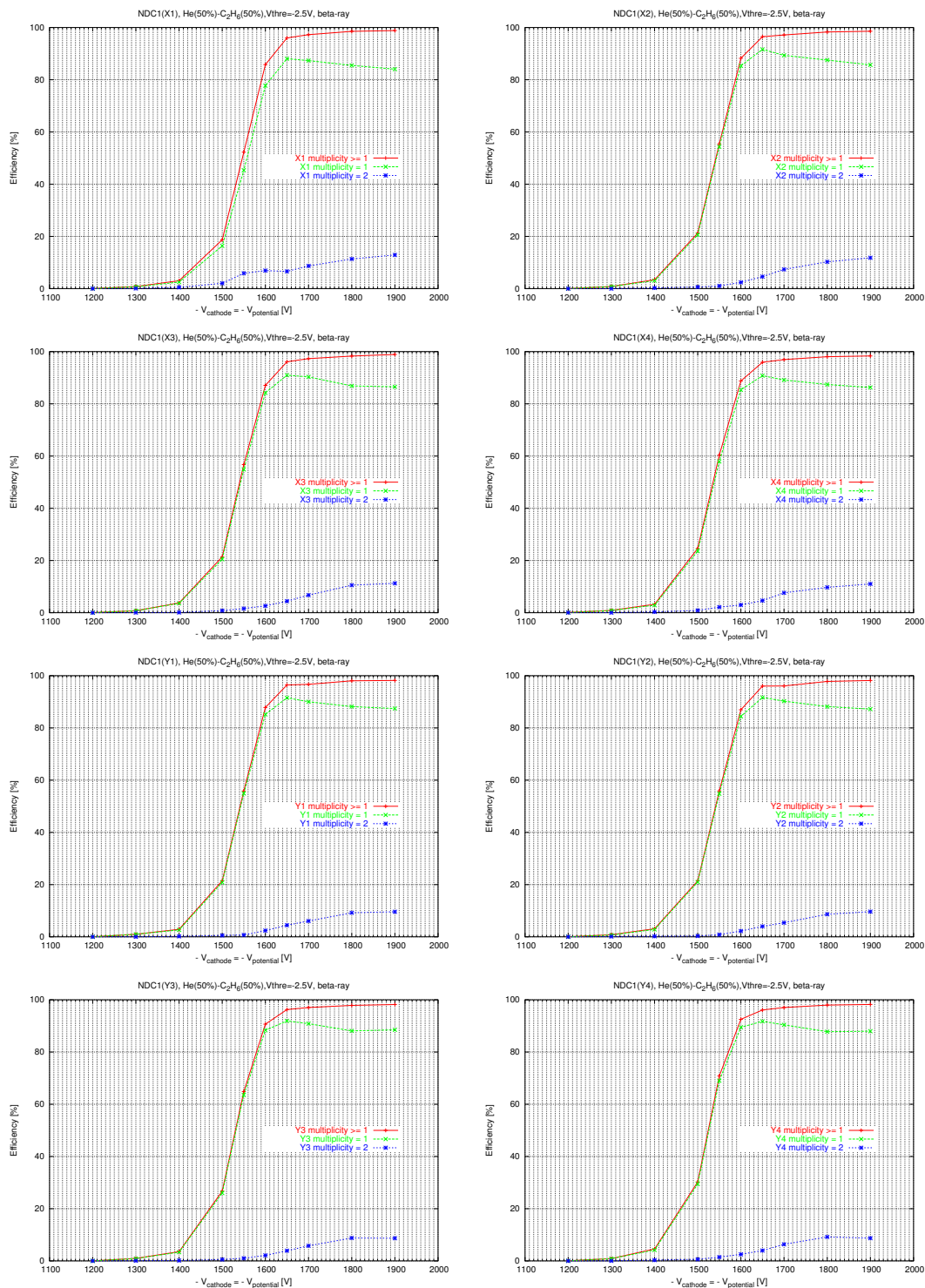


図 5.10: 検出効率と検出多重度の関係(He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50%),  $V_{\text{thre}} = -2.5$  V)。赤線は全検出効率、緑線は multiplicity 1、青線は multiplicity 2 の検出効率を表す。



## 参考文献

- [1] Glenn F. Knoll. 放射線計測ハンドブック 第3版. 日刊工業新聞社, 2001.
- [2] F. Sauli. *Principle of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*. Lecture given in the Academic Training Programme of CERN, 1975-1976.
- [3] Y. Satou. Unbound excited states in  $^{19}, ^{17}\text{C}$ . *Phys. Lett. B*, 2008.
- [4] 松井信行. 不安定核の直接反応測定用多線式ドリフトチェンバーの開発. Master's thesis, 東京工業大学, 2005.
- [5] garfield-7.
- [6] Atomic and nuclear properties of materials. Technical report, Particle Data Group, <http://pdg.lbp.gov/2007/AtomicNuclearProperties/>.
- [7] 渡辺極之. 六角セル型ドリフトチェンバーとそのガス特性の研究. Master's thesis, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻原子核物理, 2002.
- [8] 篠原督和. 低圧力 hrbdc の開発と動作特性の評価. Master's thesis, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻原子核物理, 2004.
- [9] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments (Second Revised Edition)*. Springer-Verlag, 1998.
- [10] H. Bichsel (University of Waxhington), D.E. Groom (LBNL), and S.R. Klein (LBNL). 27. passage of particles through matter. Technical report, Particle Data Group, <http://pdg.lbp.gov/2008/reviews/passagerpp.pdf>, 2005 (Revised).

## 謝辞

本研究を行なうにあたり、多くの方々に御協力頂きました。指導教官である中村隆司教授には、研究の事のみならず多岐にわたり大変お世話になりました。佐藤義輝助手には、その原理から操作法まで一から丁寧な御指導をして頂きました。中村研究室の島村智之氏には、研究生活から私生活まで様々な相談にのって頂きました。小林信之氏には VME system を立ち上げて頂き、大変感謝しています。中性子検出器の開発を進める田中佳奈氏には、研究が遅れ当初予定していた NDC を用いた中性子検出器の位置分解能評価まで行なうことが出来なかったことを、ここでお詫び致します。一緒に NDC の性能評価を行なった出口茂樹氏にはいろいろと手伝って頂きました。また、旭・中村研究室の皆様のおかげで充実した生活を送ることができました。ありがとうございました。