

## 第 1 章

# iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (10) + H<sub>2</sub> (9) の検出ガス特性

### 1.1 ドリフト速度

ドリフト速度のドリフト電場依存性を調べた。Magboltz を用いた計算によるとドリフト速度が 0.014 mm/ns となるドリフト電場は 6.80 V/mm である。ドリフト領域の長さは 140 mm であるので、plate と grid の電位差は 952 V となる。調整の行いやすさを考え 955 V を中心に 100 V 間隔で 455–1455 V の範囲で変化させて計 10 点測定した。線源を用いて測定したドリフト速度と Magboltz を用いて計算したドリフト速度を図 1.1 に示す。線源を用いて測定したドリフト速度と Magboltz を用いて計算したドリフト速度が概ね一致していることが分かる。ただ、全体的に測定値のドリフト速度の方が小さくなっている。これは測定で用いた検出ガスに水分などの不純物が含まれていることが原因と考えられる。水分によるドリフト速度の変化は付録??で述べる。

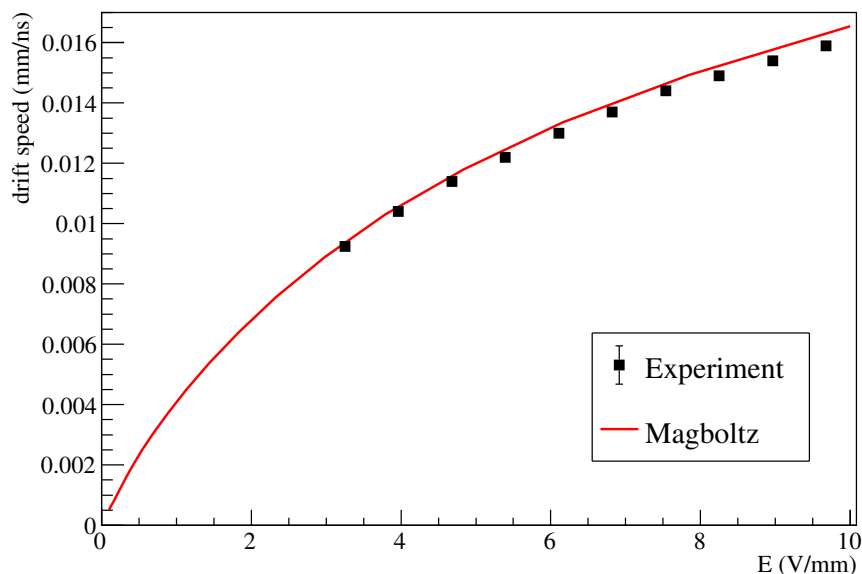


図 1.1: ドリフト速度の電場依存性. 黒い四角は測定したドリフト速度, 実線は Magboltz を用いて計算したドリフト速度を示す.

## 1.2 電子増幅率

電子の増幅率は GEM,  $\mu$ -PIC の電圧によって変化する. また, grid や GEM を通過する際に電子の一部が増幅されずに吸収されてしまう. そこで, 電子増幅率の電位差依存性を調べる. grid と GEM との電位差を  $\Delta V_{\text{grid-GEM}}$ , GEM の両面間の電位差を  $\Delta V_{\text{GEM}}$ , GEM の  $\mu$ -PIC 側と  $\mu$ -PIC との電位差を  $\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$ ,  $\mu$ -PIC の anode 電極の電圧を  $V_{\mu\text{-PIC}}$  とする.  $\mu$ -PIC の cathode 電極は接地されている. 表 1.1 にあるような電位差を基準として, 各項目の電位差依存性を調べた. 表 1.1 は??章でドリフト速度を測定したときの構成である. 増幅率の測定方法は??章で述べた通りである. 本測定では GEM,  $\mu$ -PIC の増幅率や電子の収集効率をそれぞれで求めることができないので, それらを畳み込んだ増幅率として求める.

表 1.1: 基準となる電圧構成.

項目	電位差 (V)
$\Delta V_{\text{grid-GEM}}$	700
$\Delta V_{\text{GEM}}$	350
$\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$	650
$V_{\mu\text{-PIC}}$	400

### 1.2.1 grid と GEM との電位差による電子の増幅率

grid と GEM の間の電位差によって電子がドリフト領域から増幅領域へ移動する効率が変化することがわかっている [?].  $\Delta V_{\text{grid-GEM}}$  を 20 V 間隔で 600–780 V の範囲で変化させて計 10 点測定した. 電子の増幅率の  $\Delta V_{\text{grid-GEM}}$  による変化を図 1.2 に示す. 増幅率の変化は  $gain = 0.00704 \times \Delta V_{\text{grid-GEM}}^2 - 7.92 \times \Delta V_{\text{grid-GEM}} + 2330$  と表すことができる. ドリフト電場に対して増幅領域の電場を強くすることで, 電子をより強く増幅領域へ吸い出すことができるため, 増幅率が増加したと考えられる.  $\Delta V_{\text{grid-GEM}} = 700 \text{ V}$  のとき, 140 V/mm であり, ドリフト電場の約 20 倍となっている.

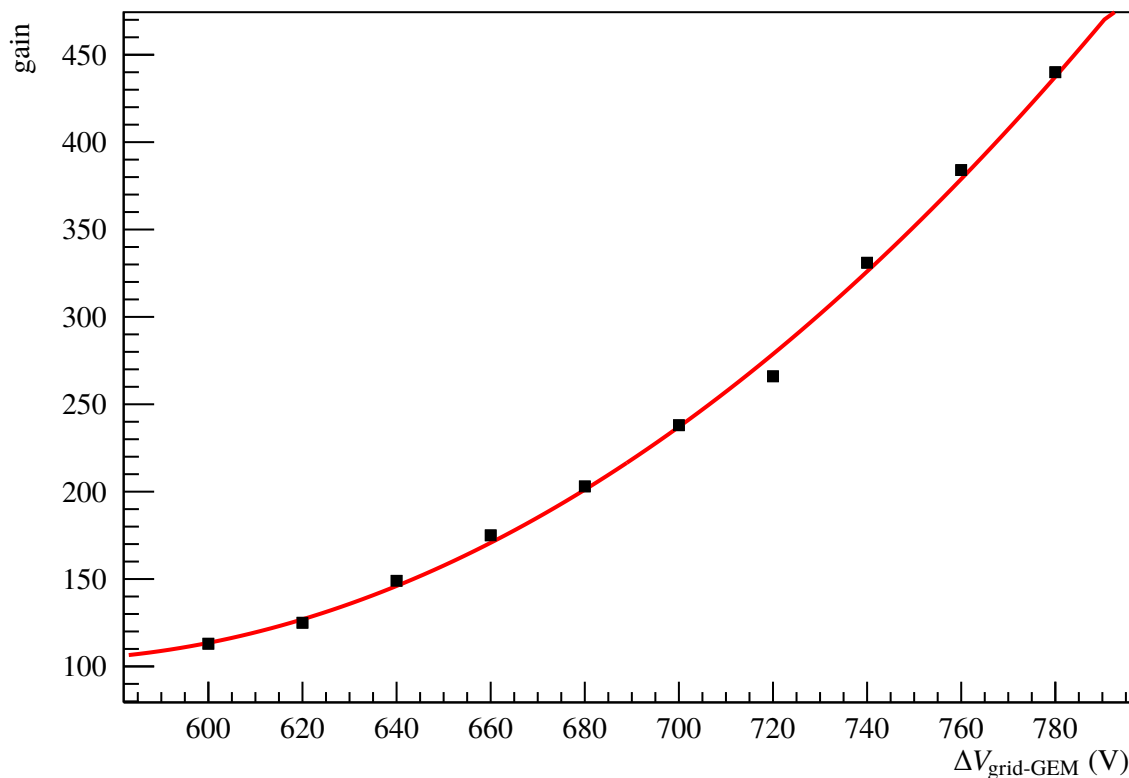


図 1.2: 電子増幅率の  $\Delta V_{\text{grid-GEM}}$  依存性.

### 1.2.2 GEM による電子増幅率

GEM は絶縁体のフィルムの両面を銅で被覆し、微細な穴を加工したものである。GEM の各面に電圧を印加することで高電場を形成し、電子が穴を通過する際にアバランシェ増幅を起こす。  $\Delta V_{\text{GEM}}$  を 10 V 間隔で 300–390 V の範囲で変化させて計 10 点測定した。電子の増幅率の  $\Delta V_{\text{GEM}}$  による変化を図 1.3 に示す。増幅率の変化は  $\text{gain} = 0.0188 \times \Delta V_{\text{GEM}}^2 - 0.67 \times \Delta V_{\text{GEM}} + 1340$  と表すことができる。  $\Delta V_{\text{GEM}}$  を大きくして、GEM の穴の中に生成される電場を強くすることでより強く増幅されることが確認された。

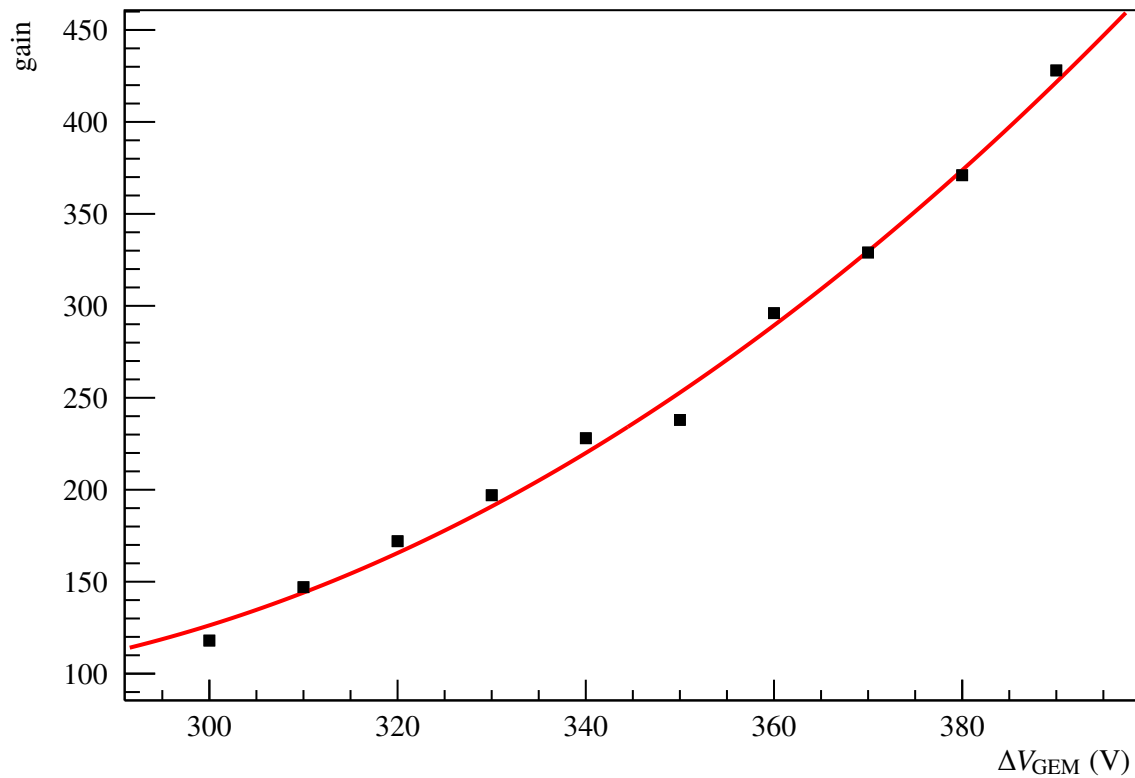


図 1.3: 電子増幅率の  $\Delta V_{\text{GEM}}$  依存性.

### 1.2.3 GEM と $\mu$ -PIC との電位差による電子の増幅率

$\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$  によって GEM で増幅された電子の  $\mu$ -PIC による収集率が変化する.  $\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$  を 50 V 間隔で 550–750 V の範囲で変化させて計 5 点測定した. 電子の増幅率の  $\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$  による変化を図 1.4 に示す. 増幅率の変化は  $gain = 0.767 \times \Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$  と表すことができる. GEM で増幅された電子をより強い電場で移動させることで, 効率よく  $\mu$ -PIC に電子が輸送されたと考えられる.

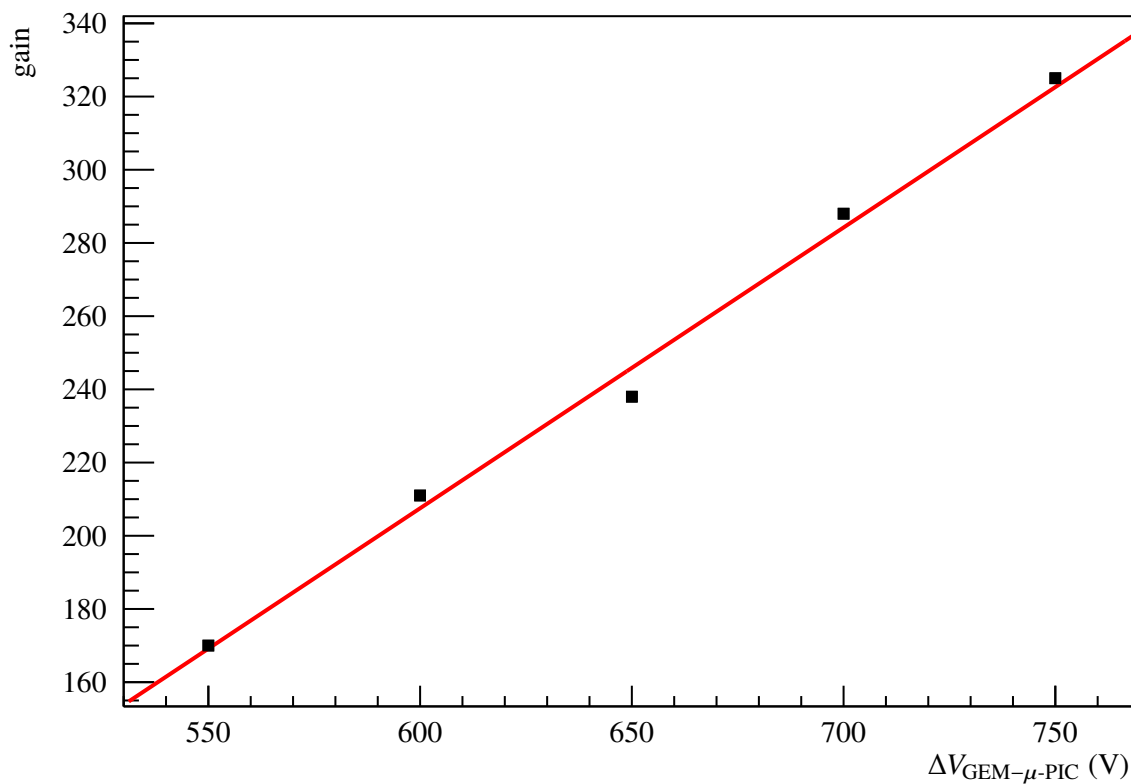


図 1.4: 電子増幅率の  $\Delta V_{\text{GEM}-\mu\text{-PIC}}$  依存性.

#### 1.2.4 $\mu\text{-PIC}$ による電子増幅率

電子は  $\mu\text{-PIC}$  で読み出される直前に、 $\mu\text{-PIC}$  によって作られた高電場によって増幅される。  $V_{\mu\text{-PIC}}$  を 10 V 間隔で 350–440 V の範囲で変化させて計 10 点測定した。 電子の増幅率の  $V_{\mu\text{-PIC}}$  による変化を図 1.5 に示す。 増幅率の変化は  $\text{gain} = 2.06 \times V_{\mu\text{-PIC}} - 253$  と表すことができる。  $\mu\text{-PIC}$  の anode 電極の周りにより強い電場が形成されることで、より強く電子が増幅されることが確認された。

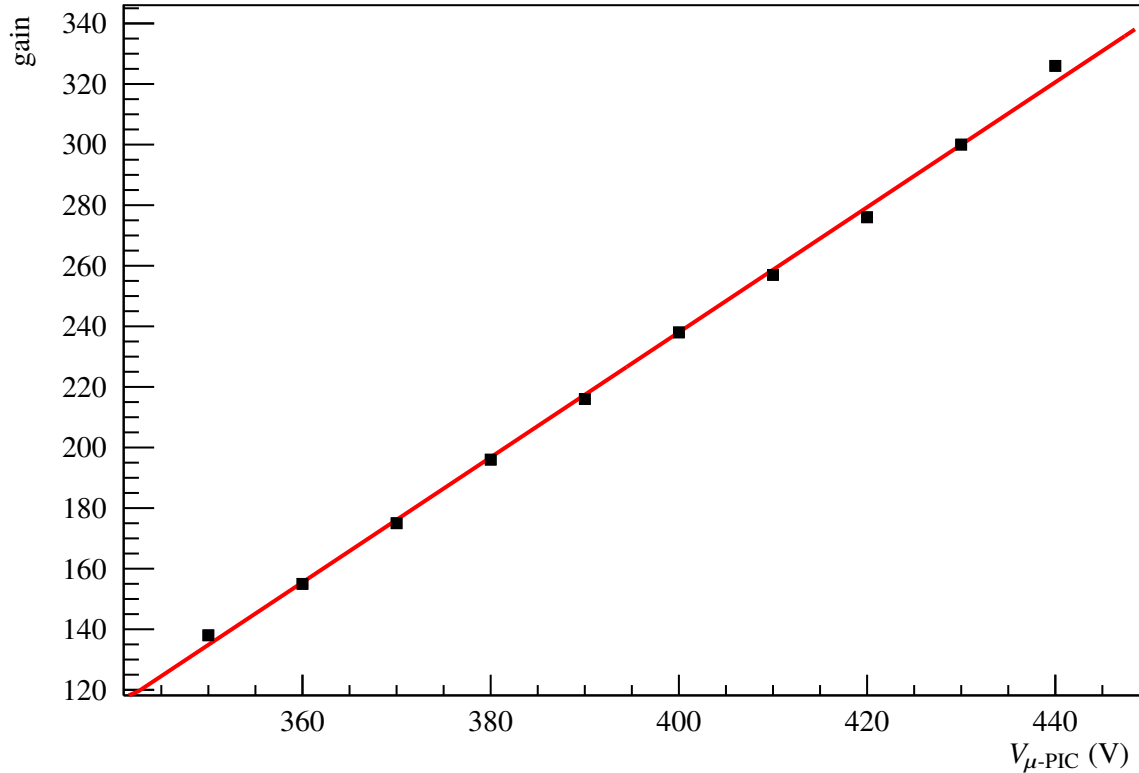


図 1.5: 電子増幅率の  $V_{\mu\text{-PIC}}$  依存性.

### 1.3 電子の拡散効果

ドリフト速度が一定である場合は、電子の拡散は  $\sqrt{L}$  ( $L$  は電子のドリフト距離) に比例する。線源は線源導入機によって、MAIKo チェンバーの気密性を保持したまま電子のドリフト方向に移動可能である。線源導入機は 2016 年度の森本修論 [?] で開発された。図 1.6 は線源導入機の先に線源を取り付けたときの様子である。図 1.6 中の矢印の方向に線源を移動させることができる。線源導入機によって線源の位置を変化させることで、拡散効果の  $L$  依存性を調べることができる。拡散効果とトラックの太さが比例していると仮定すると、 $\text{track width} \sim \sqrt{L}$  と期待される。トラックの太さと線源の位置との依存性を図 1.7 に示す。図 1.7 の  $L$  は線源コリメータの  $0^\circ$  穴と grid とのドリフト方向の距離である。この測定では表 1.2 の電圧で測定を行った。

表 1.2: 拡散効果の距離依存性を測定したときの電圧設定.

電位差 (V)	
$V_{\text{drift}}$	955
$V_{\text{grid-GEM}}$	700
$V_{\text{GEM}}$	350
$V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$	650
$V_{\mu\text{-PIC}}$	400

track width =  $1.27 \times \sqrt{L} - 19.2 + 23.1$  となり,  $\sqrt{L}$  に比例していることが確認された.  
 トラックの幅の  $\sqrt{L}$  に対する係数  $D_{\text{width}}$  は  $(12.7 \pm 0.3) \text{ ns}/\sqrt{\text{mm}}$  である.

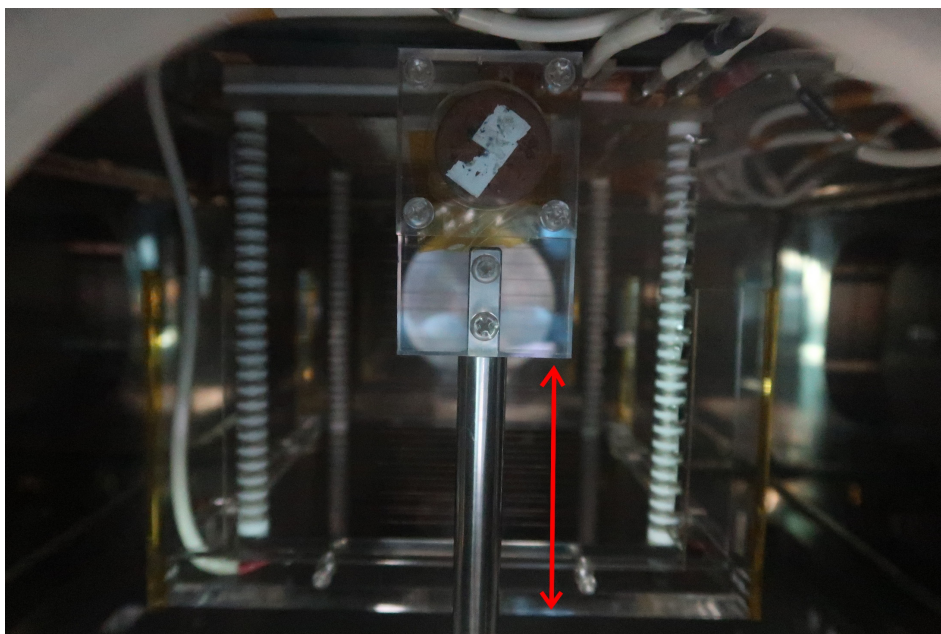


図 1.6: 線源導入機に取り付けたれた線源. 矢印の方向に移動させることができる.



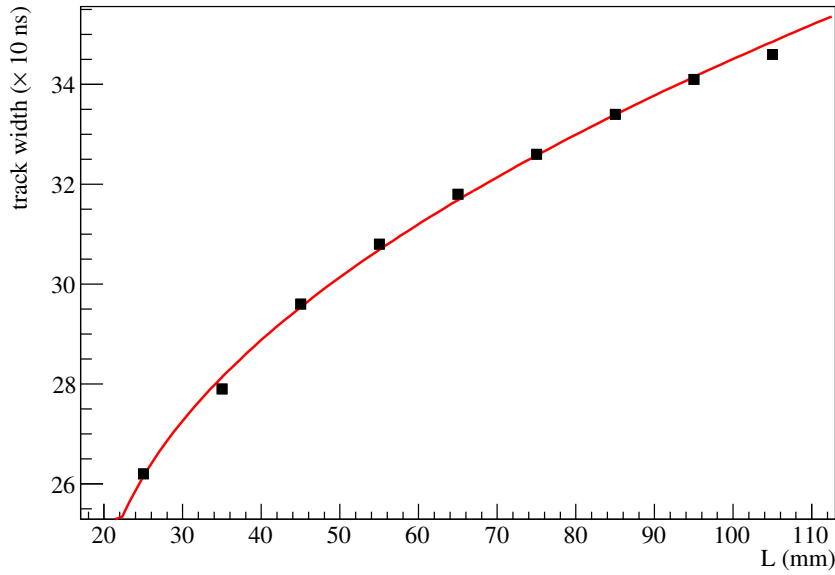


図 1.7: トラックの太さの位置依存性.

TPC から得られるトラックの  $y$  軸は、10 ns 単位の時間として ( $y_{\text{clk}}$ ) として取得される。 $y_{\text{clk}}$  を mm 単位 ( $y_{\text{length}}$ ) へ変換するには (1.1) のように、ドリフト速度  $v_{\text{drift}}$  (mm/ns) を掛ければ良い。

$$y_{\text{length}} = y_{\text{clk}} \times 10 \times v_{\text{drift}} \quad (1.1)$$

同様に測定より得られた係数 ( $D_{\text{width}}$ ) にドリフト速度を掛けることで、Magboltz を用いた計算から得られる拡散係数の次元 ( $D_{\text{exp}}$ ) に変換できる。ドリフト速度  $v_{\text{drift}}$  は  $1.37 \times 10^{-2}$  mm/ns なので、 $D_{\text{exp}} = (0.174 \pm 0.004) \sqrt{\text{mm}}$  となる。Magboltz を用いた計算から得られた拡散係数は  $0.144 \sqrt{\text{mm}}$  である。測定で得られた拡散係数の方が大きくなっている。Magboltz で係数を求めた際には、一様な電場を仮定しているが実際には GEM や  $\mu$ -PIC の周囲では一様な電場ではない。また、電子によって誘起される信号も有限の幅を持つ。これらの効果を考慮しきれていないため、計算値より実測値のほうが大きくなっていると考えられる。

## 1.4 検出効率の散乱位置依存性と散乱角依存性

??章で考えた 10 mm のコリメータを用いたときの検出効率は 48.2 % であった。検出効率は散乱点、散乱角度に依存していると予想される。検出効率の散乱点の  $z$  座標依存性を図 1.8 に、 $^{12}\text{C}$  の重心系での散乱角依存性を図 1.9 に示す。 $\theta_{\text{c.m.}}$  は入射中性子の運動方向

に対する  $^{12}\text{C}$  の極角である．図 1.8 から分かるように， $z$  座標が小さいまたは大きい場所で反応が起きた場合に，崩壊してできた  $\alpha$  粒子が有感領域から出やすくなるため検出効率が低下している．また，図 1.9 から分かるように， $\theta_{\text{c.m.}}$  が小さいところで検出効率が低下している．これは， $\theta_{\text{c.m.}}$  が小さいところでは後方散乱となり中性子から多くのエネルギーを受け取り，崩壊した  $\alpha$  粒子が全体的に  $z$  軸正の方向にブーストされることで有感領域から出ていきやすくなるためである．

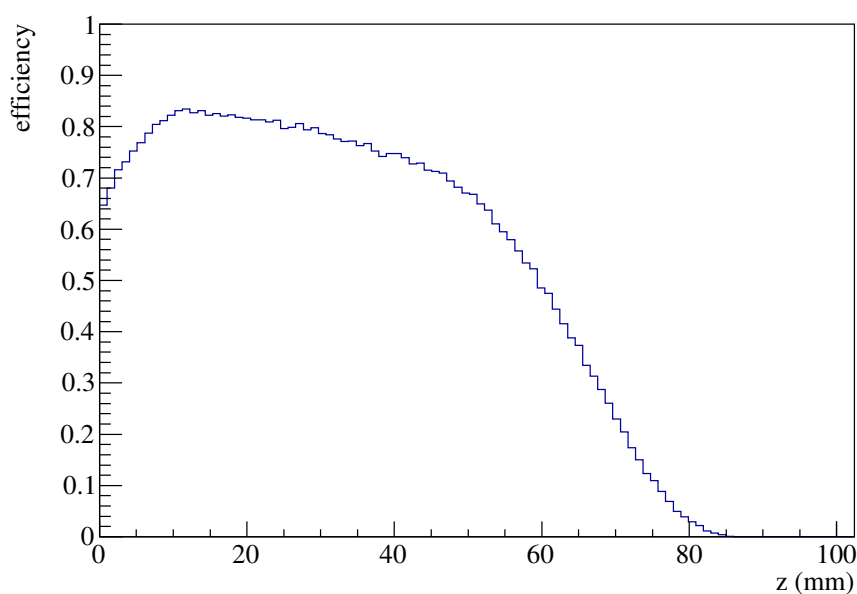


図 1.8: 検出効率の散乱点の  $z$  座標依存性．

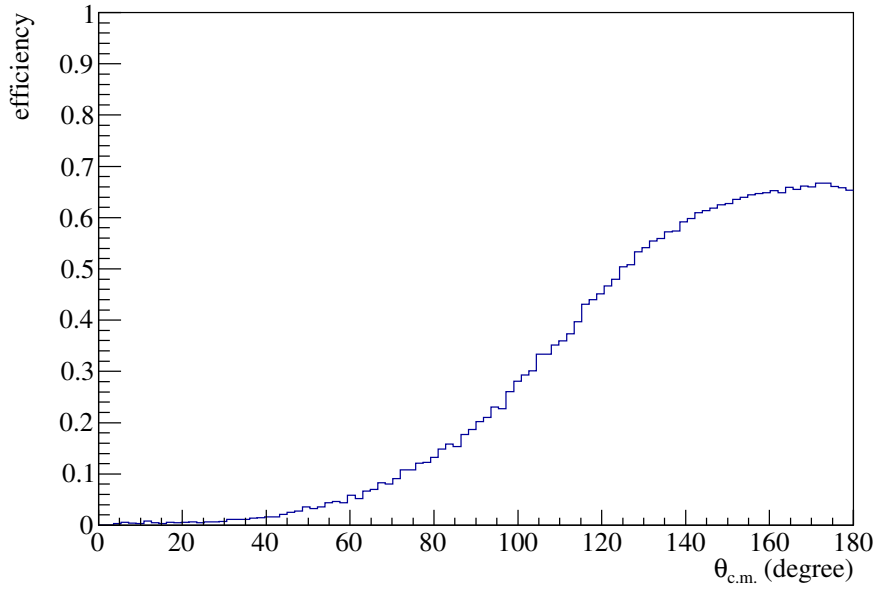


図 1.9: 検出効率の重心系での散乱角依存性.

## 1.5 期待される収量

Ref. [?, ?] によると  $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$  の断面積 ( $\sigma$ ) は 8.36 mb である. OKTAVIAN で現在得られるビーム量は最大で  $4\pi$  に  $5 \times 10^9/\text{s}$  である. この時, 半径 10 mm のコリメータからは,  $N_b = 1.95 \times 10^4/\text{s}$  の中性子が得られる. 検出効率 ( $\varepsilon_{\text{det.}}$ ) が 48.2 %, 解析効率 ( $\varepsilon_{\text{ana.}}$ ) が 87 % である. 100 hPa の iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) における有感領域中の  $^{12}\text{C}$  の面密度 ( $N_t$ ) は  $1.01 \times 10^{17}/\text{mm}^2$  である. この時,  $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$  反応の収量は

$$\begin{aligned}
 Y &= N_t \times N_b \times \sigma \times \varepsilon_{\text{det.}} \times \varepsilon_{\text{ana.}} \\
 &= 1.01 \times 10^{17}/\text{mm}^2 \times 1.95 \times 10^4/\text{s} \times 8.36 \text{ mb} \times 48.2 \% \times 87 \% \\
 &= 6.90 \times 10^{-4}/\text{s}
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

となる. 24 時間の測定で, 収量が 58.9 events と期待される.