

2019 年度 修士論文

MAIKo TPC を用いた

$^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の

断面積測定に向けた実験条件の検討



京都大学大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室
原子核・ハドロン物理学研究室
土井 隆暢

概要

宇宙元素合成において、 ^{12}C 原子核は 3 つの α 粒子から直接合成される（トリプルアルファ反応）。トリプルアルファ反応では主に 3α 崩壊閾値近傍に位置する 3α 共鳴状態である 0_2^+ (7.65 MeV) 状態 (Hoyle 状態) を経由する。大半の 0_2^+ 状態は 3 つの α 粒子に崩壊するが、稀に γ 線を放出して脱励起することで、安定した ^{12}C 原子核となる。トリプルアルファ反応は ^{12}C より重い元素を合成するための戸口反応であり、宇宙元素合成において最も重要な原子核反応の一つである。しかし、 $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$ のような高密度環境下では、 γ 崩壊に加え、他の粒子との非弾性散乱による脱励起が増加しトリプルアルファ反応を劇的に促進することが指摘されている。特に中性子は電荷を持たずクーロン力の効果を受けないため、脱励起を促進する効果が大きいと考えられている。

脱励起の反応率の計算には、 ^{12}C が中性子との散乱により $^{12}\text{C}(0_2^+)$ へ励起する断面積が必要となる。特に、 0_2^+ 状態へ励起させることができる中性子エネルギーの閾値付近 ($E_{\text{lab}} = 8.3 \text{ MeV}$) における断面積が重要となる。しかし、 $E_{\text{lab}} = 8.3 \text{ MeV}$ 付近における g.s. $\rightarrow 0_2^+$ 状態の断面積は測定されていない。そこで、我々は中性子ビームを用いて $^{12}\text{C}(0_2^+)$ へ励起し、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ 状態から崩壊した 3 つの低エネルギー α 粒子を測定することで、崩壊元の状態を特定し g.s. $\rightarrow 0_2^+$ 状態反応の断面積を決定することを計画している。このためには、3 つの α 粒子を全て測定するための大きな立体角を多く、低エネルギー α 粒子を効率的に検出することのできる検出器が必要となる。この要求を満たす検出器に MAIKo TPC がある。

MAIKo TPC では、検出器のガス中を通過した荷電粒子のトラックが画像として検出される。検出器中のトラックの長さと方向から荷電粒子のエネルギーと運動量を決定するため、画像から α 粒子のトラックを正しく抽出することが必要となる。MAIKo TPC で検出されるトラックの分解能が検出ガスの種類によって大きく変わる。そこで、どのような検出ガスが測定に適しているか、その時の検出効率は十分か、 0_2^+ 状態を識別するのに十分な分解能が達成できるかを現実的な実験条件を仮定して検討する必要がある。

本研究では、MAIKo TPC で用いる検出ガスの候補を複数選出し、 α 線源を用いた性能試験を行った。また、それらの検出ガスについて、中性子との散乱で ^{12}C 原子核が 3 つの α 粒子に崩壊するイベントの画像を、シミュレーションによって生成した。さらに、シミュレーションで生成した画像に対して解析を行い、検出効率、エネルギー分解能、角度

分解能を評価した。シミュレーションによる検討の結果、100 hPa の iso-C₄H₁₀ (1)+H₂ (9) を検出ガスに用いれば、計画中の実験を遂行するのに十分な検出効率および¹²C の励起エネルギー分解能を実現できることが推定された。

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	宇宙での元素合成過程	1
1.2	高温高密度中でのトリプルアルファ反応	3
1.3	測定を行う中性子のエネルギー	5
1.4	大阪大学 14 MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN)	8
1.5	測定に用いる実験装置	9
1.6	本研究の目的	14
第 2 章	MAIKo TPC	15
2.1	MAIKo TPC とは	15
2.2	検出ガスの候補	22
第 3 章	シミュレーション	29
3.1	α 線源を用いた測定	29
3.2	シミュレーションによる線源データの再現	36
3.3	トリプルアルファ反応のシミュレーション	39
第 4 章	解析	43
4.1	解析の概要	43
4.2	eye-scan	44
4.3	検出ガスの決定	52
第 5 章	中性子コリメータ	53
5.1	ビームサイズを制限する必要性	53
5.2	立体角と検出効率によるビームサイズの決定	54

5.3	コリメータの材質	55
5.4	中性子の収量	58
第 6 章	iso-C ₄ H ₁₀ (10) + H ₂ (9) を用いたとき	59
6.1	ドリフトスピード	59
6.2	電子増幅率	60
6.3	電子のディフュージョン効果	65
6.4	検出効率の散乱位置, 散乱角依存性	67
6.5	期待される収量	69
第 7 章	まとめと今後の展望	71
付録 A	中性子検出器	75
A.1	液体シンチレータ	75
A.2	n- γ 弁別	76
A.3	SCINFUL-CG による中性子の検出効率	80
付録 B	ドリフトスピード	83
B.1	水分のドリフトスピードへの影響	83
B.2	ガスフローによるガス中の水分の変化	86
付録 C	PHITS のインプットファイル	89
参考文献		95

第 1 章

はじめに

1.1 宇宙での元素合成過程

身の回りには多種多様な物質が存在している。これらの物質は原子が組み合わさることで形成される。現在の地球には水素（原子番号 1）からウラン（原子番号 92）までの元素が天然で存在する。原子は更に小さい原子核と電子で構成されており原子核は陽子と中性子で構成されることが知られている。現在までに天然と人工を合わせて 118 種類の元素が確認されている。しかし、ビッグバン直後には水素とヘリウムと僅かな軽元素しか存在しなかったと考えられている。これは、質量数 (A) が 5 及び 8 の安定な原子核が存在しないことに由来する。 ^4He 原子核 (α 粒子) は非常に安定な原子核である。2 つの α 粒子が反応し ^8Be が生成されても、2 つの α 粒子に分裂するほうが安定であるためすぐに崩壊してしまう。同様に $A = 5$ の原子核が生成してもすぐに軽い核 2 つに分裂してしまう。

ヘリウムに比べて水素の方が多いため、宇宙初期では水素を主成分とする恒星しか存在しなかったと考えられる。このような恒星が重力により収縮し中心温度が 10^7 K を超えると、陽子（水素）同士が反応して α が合成されるようになる (pp チェイン)。pp チェインでは図 1.1 に示した 3 つの系列が重要とされる。どの系列も最終的に 4 つの陽子から 1 つの α 粒子が生成される。pp チェインのような陽子が順番に原子核に吸収される反応では、 $A = 5, 8$ の壁を超えることはできない。この壁を超えるためには $A = 4$ 以下の原子核から $A = 9$ 以上の原子核が直接生成されなければならない。

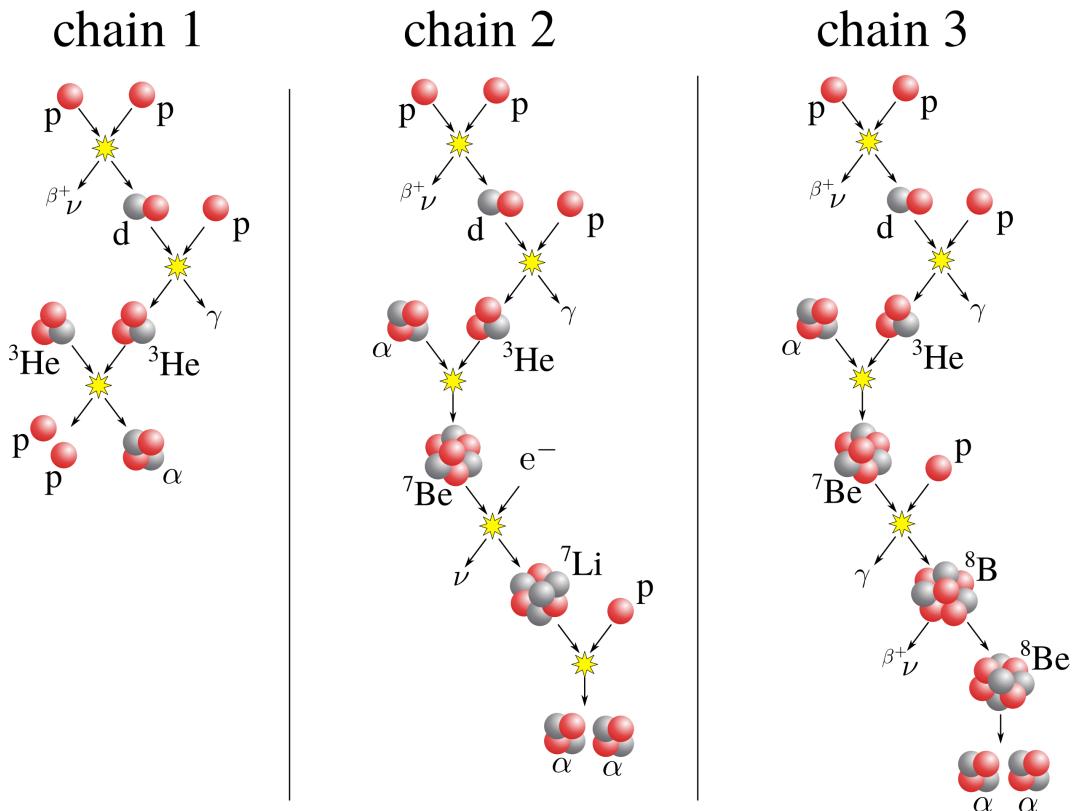


図 1.1: 代表的な pp チェイン. pp チェインでは 4 つの陽子から 1 つの α が生成される.

pp チェインにより α が十分に生成された恒星では水素よりも重い α 粒子がより恒星の中心に集まり He コアを生成する. He コアが重力により圧縮され温度がおよそ 10^8 K に達するとヘリウム燃焼が始まる. He コアには十分な量の α が存在するため, 図 1.2 のように 2 つの α から ⁸Be が合成され, さらに, 崩壊するより早くもう 1 つ α が融合して ¹²C* が生成される. このときに作られる ¹²C* の多くは Fred Hoyle が予言した 3α の共鳴状態 (Hoyle 状態, $Ex = 7.65$ MeV, 0_2^+) [1] である. $^{12}\text{C}(0_2^+)$ が γ 線を放出し脱励起することで安定な ¹²C になる (図 1.2 左). この 3 つの α 粒子から ¹²C が直接合成される反応はトリプルアルファ反応と呼ばれる. トリプルアルファ反応が恒星中で起こることで $A = 4$ から $A = 12$ へと直接移るため, $A = 5, 8$ の壁を乗り越えることができる. 生成された ¹²C が更に α を吸収することで O や Si などの更に重い核の合成へ進んでいく. そのため, トリプルアルファ反応は宇宙元素合成において重要な原子核反応の 1 つである.

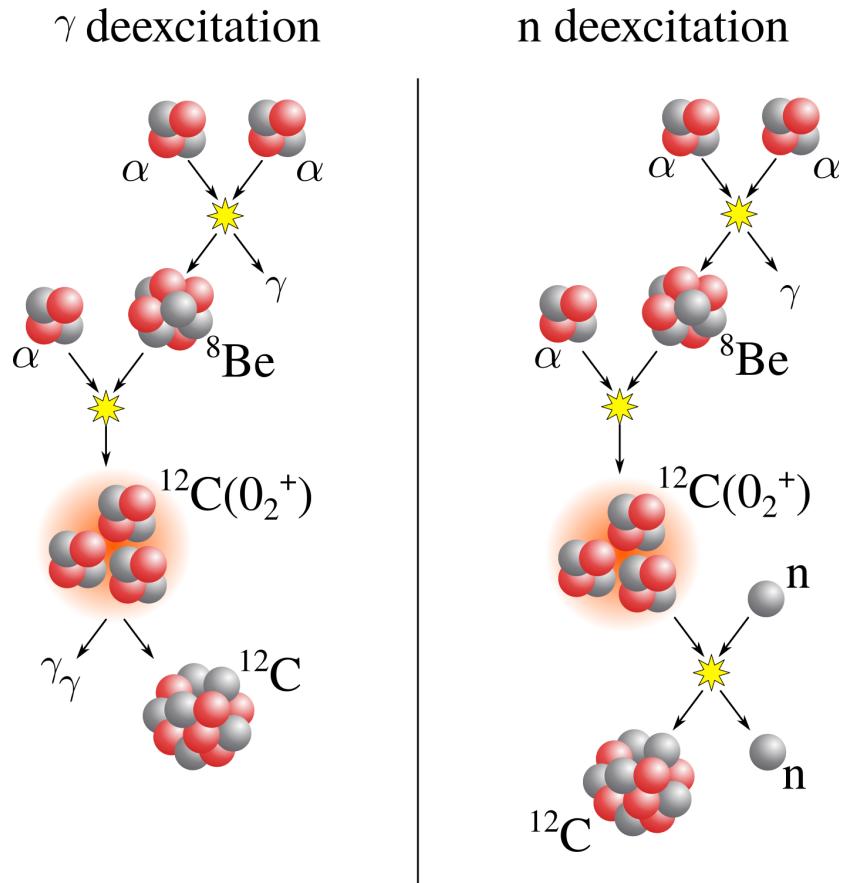


図 1.2: トリプルアルファ反応. 左は γ 線を放出して脱励起するルート, 右は中性子との散乱により脱励起するルートを表す.

1.2 高温高密度中のトリプルアルファ反応

通常, トリプルアルファ反応で生成された 3α 共鳴状態は図 1.2 の左のように γ 線を放出することによって脱励起し, 安定な ^{12}C の基底状態 (g.s.) になる. 近年, 高密度領域では γ 線による脱励起以外に, 図 1.2 (右) のように粒子 (陽子, 中性子, α 粒子など) との非弾性散乱による脱励起が増加することが指摘されている [2]. これにより g.s. や $2_1^+(Ex = 4.44 \text{ MeV})$ への脱励起が増加し, トリプルアルファ反応が促進されると考えられている. 粒子の中でも中性子は電荷を持っておらず, クーロン斥力を受けずに反応することができるため, 脱励起を促進する効果が大きいと考えられる.

脱励起と逆反応である $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ の反応率は

$$r = N_n N_{^{12}\text{C}} \langle \sigma v \rangle \quad (1.1)$$

で与えられる。ここで、 N_n は中性子の個数密度、 $N_{^{12}C}$ は ^{12}C の個数密度を表す。 σ は中性子との散乱により始状態(g.s. または 2_1^+)から 0_2^+ 状態へ励起する全断面積であり、 v は中性子と ^{12}C の相対速度である。相対速度が Maxwell 分布に従うとすると、 $^{12}C(n, n')^{12}C(0_2^+)$ では

$$\langle \sigma v \rangle_{nn'} = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{kT} \right)^{3/2} \int_0^\infty E' \sigma_{n,n'}(E') \exp(-E'/kT) dE' \quad (1.2)$$

となる。 T は温度、 μ は換算質量、 $\sigma_{n,n'}$ は ^{12}C の中性子非弾性散乱断面積である。我々が考える反応は上記の逆過程 $^{12}C(0_2^+)(n', n)^{12}C$ なので、

$$\langle \sigma v \rangle_{n'n} = \left(\frac{2I + 1}{2I' + 1} \right) \exp(-Q/kT) \langle \sigma v \rangle_{nn'} \quad (1.3)$$

となる。ここで、 I および I' はそれぞれ始状態(g.s. または 2_1^+)および終状態(0_2^+ 状態)のスピンである。 Q は -7.65 MeV (始状態が g.s. の場合) または -3.21 MeV (始状態が 2_1^+ の場合) となる。 $^{12}C(0_2^+)$ の中性子非弾性散乱による脱励起の寿命は

$$\tau_{n'n}(^{12}C(0_2^+)) = (N_n \langle \sigma v \rangle_{n'n})^{-1} \quad (1.4)$$

となる。

中性子非弾性散乱による脱励起の寿命と γ 線による脱励起の寿命 ($\tau_\gamma = 1.710 \times 10^{-13} \text{ s}$) との比を R とすると、

$$R = 6.557 \times 10^{-6} \times \rho_n T_9^{-1.5} C_{\text{spin}} \int_0^\infty \sigma_{nn'}(E)(E - Q) \exp(-11.605E/T_9) dE \quad (1.5)$$

と表される。 E は c.m. 系のエネルギー、 ρ_n は中性子の質量密度 (g/cm^3)、 $\sigma_{nn'}(E')$ は断面積 (mb)、 T_9 は温度 (10^9 K) である。 C_{spin} は g.s. からの場合 1、 2_1^+ からの場合 5 となる。式 (1.5) からわかるように、中性子によって脱励起する過程は特に温度に大きく依存する。Beard らによる R と温度の依存性の計算結果 [2] を図 1.3 に示す。図 1.3 は $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$ の場合の結果を示している。 $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$ という高密度下では γ 線による脱励起に対し、粒子による脱励起の寄与が大きくなることが分かる。特に、中性子による寄与は γ 線による寄与の 40–100 倍ととても大きい。

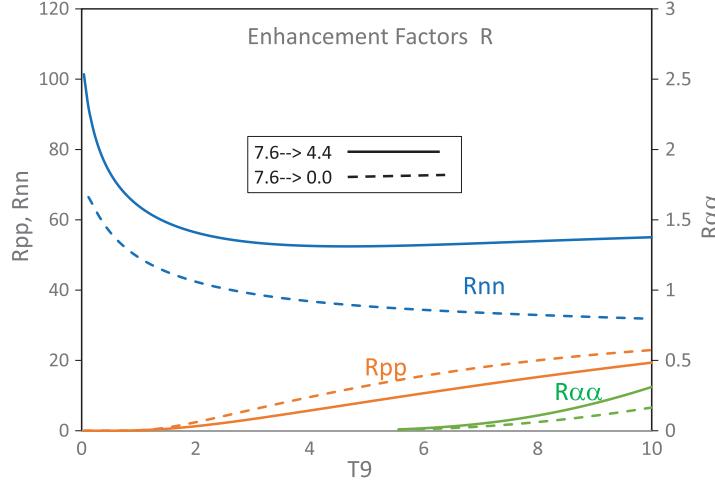


図 1.3: γ 線による脱励起の寿命と粒子散乱による脱励起の寿命の比 [2]. R_{nn} , R_{pp} , $R_{\alpha\alpha}$ はそれぞれ中性子, 陽子, α 粒子と散乱した際の寿命の比を表す.

$\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$ のような高密度環境は宇宙の何処にあるだろうか. 一つの候補として超新星爆発が考えられる. $10\text{--}30 M_\odot$ 程度の大質量星は, 重力崩壊を起こして星の一生を終える. 重力崩壊の際に恒星の中心にある鉄コアの温度が急激に上昇する. 極めて高い温度では高エネルギーの光子によって鉄コアの原子核が陽子や中性子に分解される(光分解反応). また, 密度が非常に高いため式 (1.6) のように陽子が中性子へ変わる電子捕獲が起きる.



すると, 恒星の中心に原始中性子星が形成される. 重力によって中心に降ってくる物質は原始中性子星で跳ね返りが起こる. この物質の跳ね返りが超新星爆発である. 崩壊前の恒星が持っていた重力エネルギーが熱エネルギーに変換されるので, 原始中性子星の表面温度は 10^{10} K に達する. 跳ね返った物質が膨張することで温度が下がっていき, $7 \times 10^9 \text{ K}$ ほどになると 2 つの陽子と 2 つの中性子が融合し α 粒子が生成される. このとき, α 粒子と中性子が高密度かつ高温で存在する環境ができるのである.

1.3 測定を行う中性子のエネルギー

式 (1.5) から分かるように寿命の比 R を計算するためには, 中性子と ^{12}C の非弾性散乱断面積 ($\sigma_{nn'}(E)$) のエネルギー分布が必要となる. 特に, 天体中で ^{12}C と散乱した後に中性子が持つエネルギー領域を狙う必要がある. Beard ら [2] が考えているような $T \sim 10^9 \text{ K}$

では, $k_B T \sim 100 \text{ keV}$ である。このような中性子が Hoyle 状態 ($E_{\text{Ex}} = 7.65 \text{ MeV}$) の ^{12}C と散乱すると, 散乱後の中性子は $E_{\text{n}} \sim 8 \text{ MeV}$ となる。つまり, 式 (1.4) に示した脱励起の寿命の計算には数 MeV のエネルギーを持つ中性子と ^{12}C との断面積のエネルギー分布が必要となる。しかし, 図 1.4 (上) からも分かるように, 数 MeV の領域における g.s. \rightarrow Hoyle 状態のデータがない。そのため, このエネルギー領域での $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ の断面積の測定が必要である。

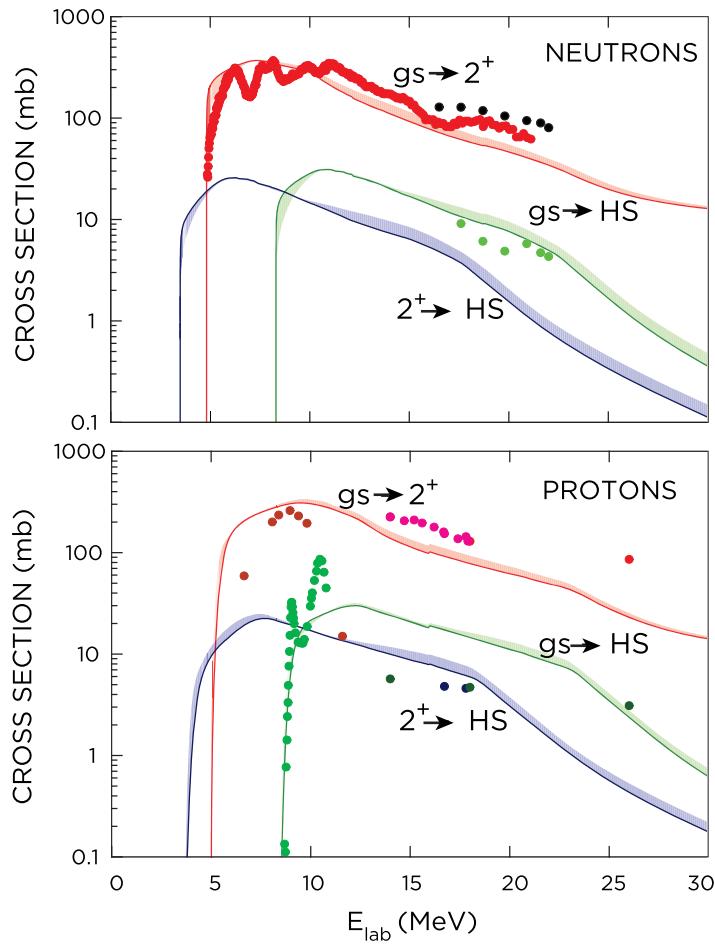


図 1.4: ^{12}C と中性子 (上段) および陽子 (下段) との非弾性散乱断面積 [2]。実線は TALYS [3] を用いた理論計算, 点は測定値を表す。

本研究ではその第一歩として $E_{\text{n}} = 14 \text{ MeV}$ の中性子を用いて断面積の測定を行い, $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積測定の実現可能性を確認する。14 MeV は式 (1.7) に示す DT 反応を用いて生成可能なエネルギーである。この反応は 2 体反応であるため, 单色エ

エネルギーの中性子となる。



単色エネルギーの中性子を用いることで、中性子のエネルギー測定を行う必要が無くなる。ITER [4] などの核融合炉ではこの DT 反応を用いて質量エネルギーを取り出す。核融合炉の中で生成される 14 MeV の中性子は構造材の原子核と反応し損傷させるため、構造材の中に多く含まれる炭素との反応が詳しく調べられている。そのため、既知の 14 MeV の中性子と ^{12}C との断面積のデータと、本研究での測定結果を比較することが可能となる。単色エネルギーの中性子を生成可能であること、他データと測定結果の比較が可能であることの 2 点より、測定方法の検証として 14 MeV の中性子で断面積の測定を行う。 $E_n = 14 \text{ MeV}$ での $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*$ の散乱断面積は Ref. [5, 6] によりすでに測定されている。 $^{12}\text{C}(n, n' + 3\alpha)$ 反応の全断面積は 209 mb、分岐比は表 1.1 の通りである。微分断面積の角度分布は図 1.5 [6] のようである。これらの測定値と比較することによって測定方法の妥当性を確認することが可能となる。

表 1.1: $^{12}\text{C}(n, n' + 3\alpha)$ 反応のチャンネルとその分岐比。 ^{12}C の励起状態から 3α に、 ^9Be の励起状態から 2α に崩壊する。

Reaction channel	Branching ratio (%)
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(7.65 \text{ MeV})$	4
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(9.64 \text{ MeV})$	33
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(10.3 \text{ MeV})$	16
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(10.84 \text{ MeV})$	6
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(11.83 \text{ MeV})$	4
$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}^*(1.68\text{--}3.05 \text{ MeV})$	24
$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}^*(4.7 \text{ MeV})$	13



図 1.5: $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ の微分断面積の角度分布 [6].

1.4 大阪大学 14 MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN)

大阪大学工学研究科の OKTAVIAN [7] では DT 反応により 14 MeV の中性子を発生させることができる。図 1.6 に OKTAVIAN の施設図を示す。OKTAVIAN は 1981 年から運転を開始し、核融合中性子工学研究に用いられてきた。コッククロフト・ワルトン型加速器を用いて加速したデューテリウムをトリチウムターゲットに照射することで、14 MeV の中性子を生成する。OKTAVIAN にはパルスビームラインと DC ビームラインの 2 つのビームラインがある。パルスビームラインは大実験室に設置されたトリチウムターゲットを用いて、DC ビームラインは重照射室に設置されたトリチウムターゲットを用いて中性子を生成する。

DC ビームラインで生成された中性子はトリチウムターゲットを中心に放射状に重照射室へ放出される。この中性子を大実験室側へ取り出すための直径約 100 mm の取り出し穴が図 1.7 のように重照射室と大実験室を隔てる壁に開いている。この取り出し穴から中性子を取り出すことで直径が約 100 mm にコリメートされた DC 中性子ビームを用いた測定を行うことができる。ただし、DC ビームであるため中性子が入射した時間情報を得ることはできない。一方で、パルスビームラインでは図 1.8 のように大実験室中にトリチウム標的が設置されているため、中性子をコリメートすることができない。その反面、パルス状に中性子が発生するので、中性子の時間情報を得ることができる。本測定では、実験室

内で反射した中性子によるバックグラウンドイベントを低減することや、中性子の入射領域を制限できることから、DC ビームラインを用いて測定を行う予定である。また、取り出し穴に任意の形状のコリメータを入れることで、ビームの形状を制御することができる。

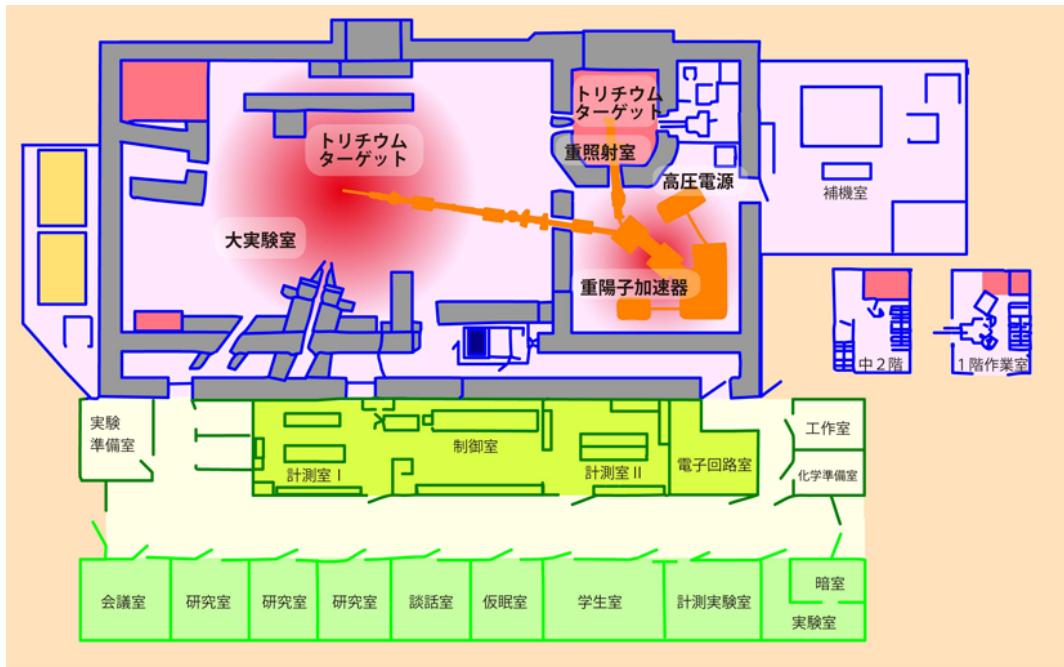


図 1.6: OKTAVIAN の施設図 [7]. パルスビームラインと DC ビームラインがそれぞれ大実験室と重照射室に伸びている。

1.5 測定に用いる実験装置

本研究では $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から崩壊して生成した 3 つの α 粒子の直接測定を行う。 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子は図 1.9 のようなエネルギーの分布を持つ。横軸は入射中性子のエネルギー、縦軸は崩壊後の α 粒子のエネルギーである。図 1.9 から中性子のエネルギーに関わらず約 0.1 MeV が最大値となっていることが分かる。1 MeV より大きい領域は重心運動と同じ方向に放出された α 粒子がブーストされエネルギーが大きくなっている。それに対し、重心運動と異なる方向に放出された α 粒子は、あまりブーストされずに典型的には励起エネルギーと 3α 崩壊閾値の差分を 3 等分したエネルギー ($0.38 \text{ MeV} \div 3 \sim 0.1 \text{ MeV}$) を持つ。図 1.5 から分かるように前方散乱の断面積が大きく、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ が重心運動方向と異なる方向に散乱される確率が高い。そのため、 α 粒子はあまり重心運動によるブーストの



図 1.7: 大実験室側から DC 中性子の取り出し穴のある壁を見たときの様子。

効果を受けずに、中性子のエネルギーに関わらず 0.1 MeV 付近で最大となる。図 1.10 は中性子のエネルギーが 14 MeV のときの分布である。図 1.10 の塗りつぶし部分は最大値を中心に全体の 8 割となる領域を示しており、 $0\text{--}0.6\text{ MeV}$ の範囲である。このような低エネルギーの α 粒子を効率よく検出するためには、標的中で α 粒子が停止しないようにしなければならない。例えば、 500 keV の α 粒子ではおよそ $350\text{ }\mu\text{g/cm}^2$ の炭素箔標的で停止してしまう。更に低いエネルギーの α 粒子も検出しようとするとき、更に標的を薄くしなければならない。このような低エネルギー粒子の測定には、検出器そのものが標的となるアクティブ標的が有効である。

図 1.11 は α 粒子の実験室系での角度分布である。横軸は入射中性子のエネルギー、縦軸は α 粒子の入射中性子の運動方向に対する角度を表す。 α 粒子のエネルギー分布と同様に入射中性子のエネルギーにあまり依存していない。図 1.12 は入射中性子が 14 MeV のときの角度分布である。図 1.12 の塗りつぶしは最大値を中心に全体の 8 割となる領域を示しており、 $0.13\text{--}1.31\text{ rad}$ である。このような広い角度に放出される 3 つの α 粒子す



図 1.8: 大実験室およびパルスビームライン。写真中央にパルスビームラインのトリチウムターゲットが設置されている。写真右手前から加速されたデューテリウムが照射される。

べてを効率的に検出するためには大立体角を覆う検出器が必要となる。このような要求を満たす検出器として MAIKo TPC (μ -PIC based active target for inverse kinematics . time projection chamber) [8, 9] がある。MAIKo TPC は TPC の検出ガスを散乱標的として用いた TPC であり、低エネルギーの荷電粒子を大立体角で検出することができる検出器である。MAIKo TPC を用いることで低エネルギーの α 粒子を 4π の立体角で検出することができる。よって、本研究では MAIKo TPC を用いて $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応を測定する。

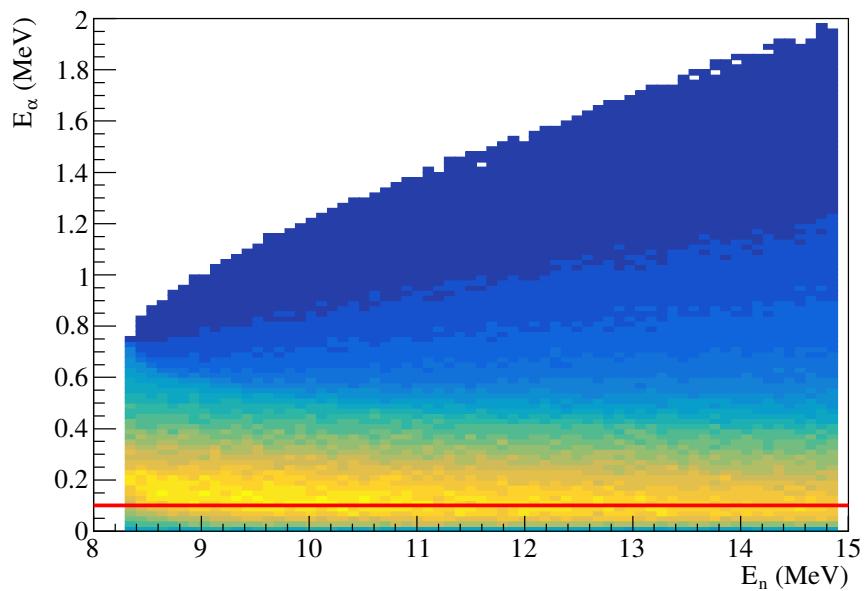


図 1.9: $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子のエネルギー分布. 横軸は入射中性子のエネルギー, 縦軸は崩壊後の α 粒子のエネルギーである. 赤い実線は $E_\alpha = 0.1$ MeV を表す.

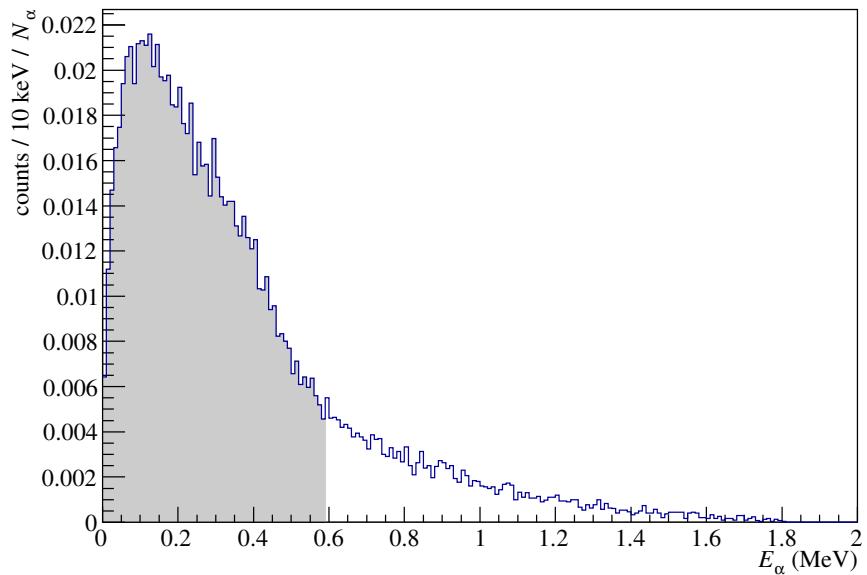


図 1.10: $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子のエネルギー分布. 入射中性子のエネルギーが 14 MeV のときの分布. ^{12}C から放出される 3 つの α 粒子すべての分布を表している.

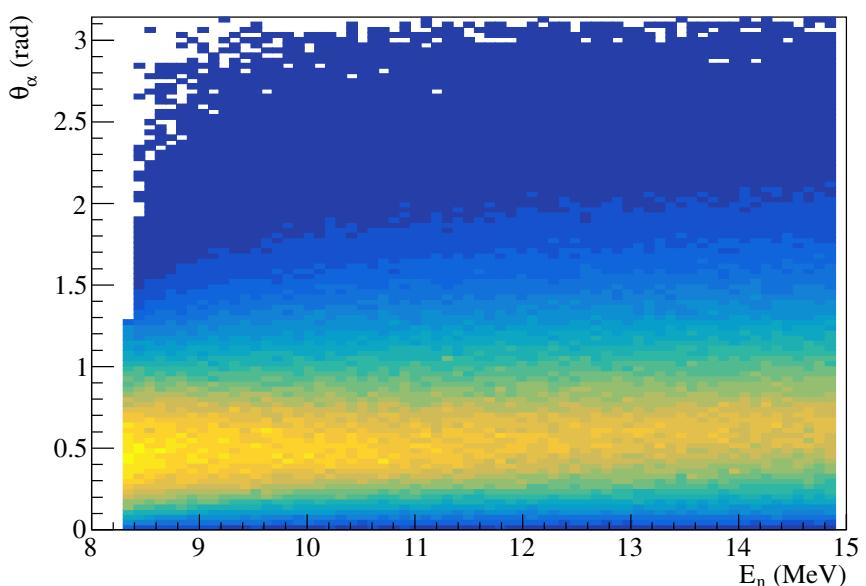


図 1.11: $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子の角度分布.

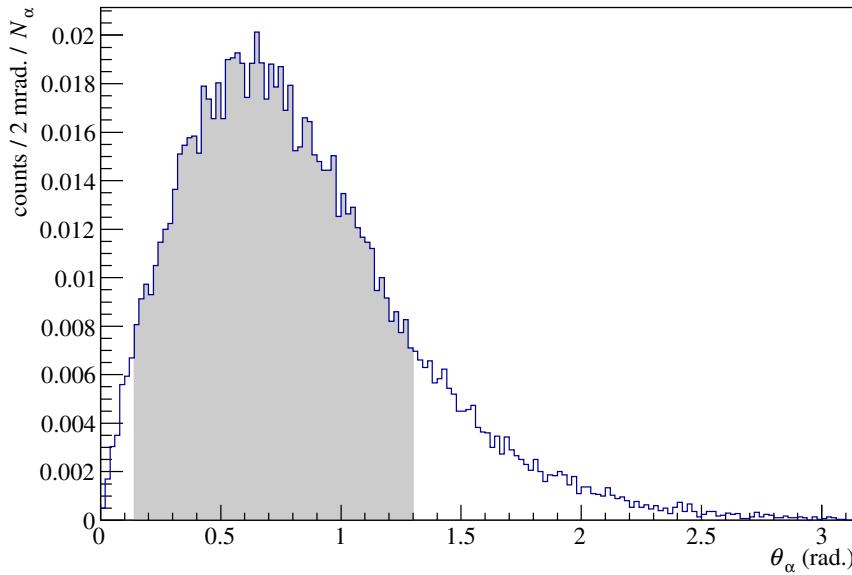


図 1.12: $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子の角度分布。入射中性子のエネルギーが 14 MeV のときの分布。 ^{12}C から放出される 3 つの α 粒子すべての分布を表している。

1.6 本研究の目的

MAIKo TPC を用いた $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積測定のためには、低エネルギーの α 粒子を検出する必要がある。1.5 節で述べたように、MAIKo TPC を用いることで効率的に 3 つの低エネルギー α 粒子を検出することが可能となる。しかし、崩壊してきた 3 つの α 粒子が持つ運動エネルギーは広がりを持ち、それぞれの α 粒子が持つ運動エネルギーが数十倍違うこともある。そのため、より効率的に全ての粒子を測定するための条件を検討する必要がある。MAIKo TPC では使用する検出ガスの種類、圧力、電圧等の多くのパラメータを調整することができる。本研究では効率的に α 粒子を検出することができる検出ガスの候補を複数選出し、 α 線源を用いて性能試験を行う。それらのガスについて中性子との散乱で ^{12}C 原子核が 3 つの α 粒子に崩壊するイベントをシミュレートし、MAIKo TPC から得られるであろう画像を生成する。シミュレーションで生成した画像に対して解析を行い、検出効率、エネルギー分解能、角度分解能を評価する。評価結果から実験で用いる検出ガスを決定する。また、正しく解析を行える割合やこの測定方法で期待される収量の評価を行い、実験の実現可能性を検討する。

第 2 章

MAIKo TPC

2.1 MAIKo TPC とは

Time Projection Chamber (TPC) は荷電粒子のトラックを検出するために広く用いられているガス検出器である。図 2.1 に TPC の模式図を示す。荷電粒子が TPC の検出ガス中を通過するとき、トラックの周囲の粒子をイオン化させる。イオン化で発生した電子をドリフト電場(図 2.1 中 y 軸方向)により読み出し面にドリフトさせることでトラックを検出する。図 2.1 のように TPC の有感領域中で入射粒子と標的粒子が反応することで、散乱点の周りを有感領域で覆うことができる。そのため、散乱で放出される低エネルギーの荷電粒子を大立体角で検出することができる。これを実現する方法として、検出器そのものを標的として用いるアクティブ標的がある。アクティブ標的を用いた TPC として MAIKo TPC が開発された。MAIKo TPC は検出ガスを封入するチャンバー(MAIKo チャンバー)とドリフト電場を形成するケージ(ドリフトケージ)とからなる。ドリフトケージを図 2.2 に示す。MAIKo チャンバーの外側を図 2.3a に、チャンバーの内側を図 2.3b に示す。

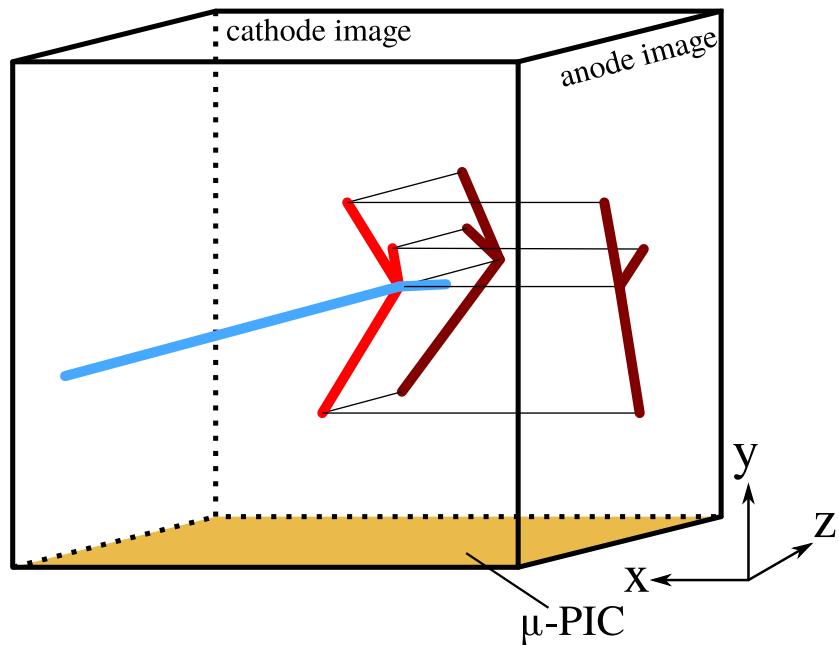


図 2.1: MAIKo TPC の概観図. 図では紙面手前から入射した中性子 (青) が TPC の中の ^{12}C と散乱して 3 つの α 粒子 (赤) に崩壊した事象を表す. anode image (zy 平面) と cathode image (zy 平面) の 2 平面に荷電粒子のトラックが射影される. 中性子は電荷を持たないため anode & cathode image にトラックとして検出されない.

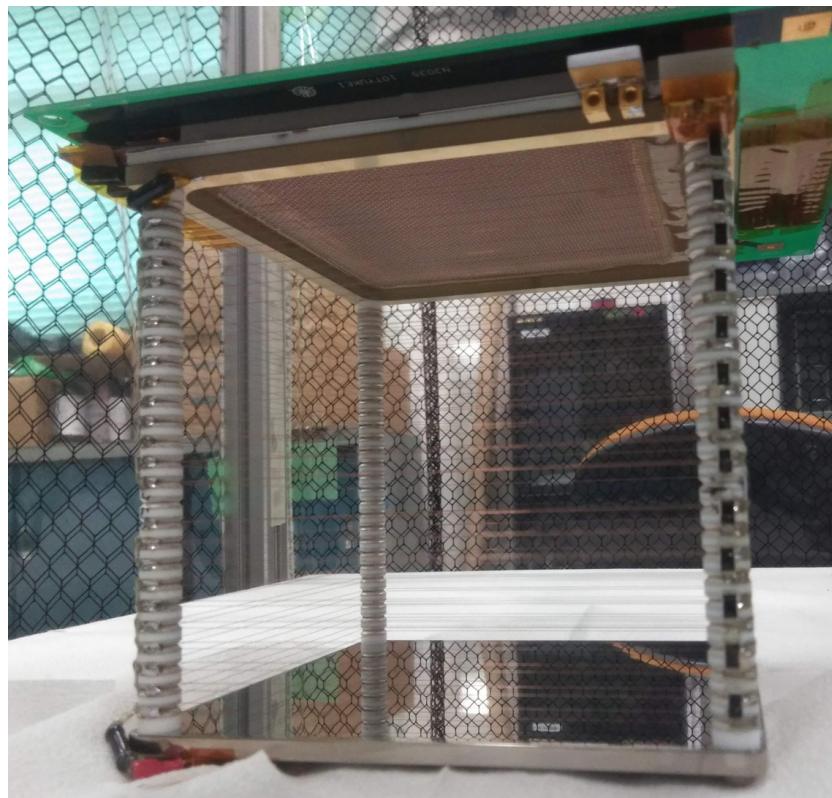


図 2.2: ドリフトケージの概観. 図 2.1 の模式図とはドリフト方向が上下が反転している.

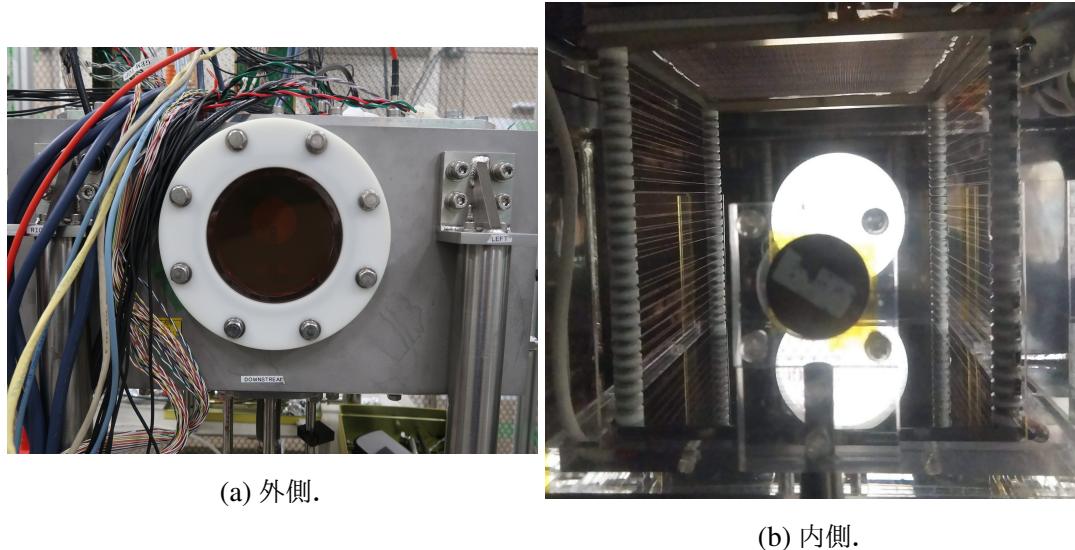


図 2.3: MAIKo チェンバー.

図2.4にドリフトケージの構造を示す。ドリフトケージは plate, wire, grid, GEM (gas electron multiplier), μ -PIC からなる。plate, grid, GEM, μ -PIC に HV が接続されている。plate, wire, gird の間は $10\text{ M}\Omega$ の抵抗で繋がれている。GEM と HV は $1\text{ M}\Omega$ と $20\text{ M}\Omega$ の抵抗で繋がれている。plate から grid の間の領域をドリフト領域, grid から μ -PIC の間の領域を増幅領域, μ -PIC の周囲を読み出し領域と呼ぶ。

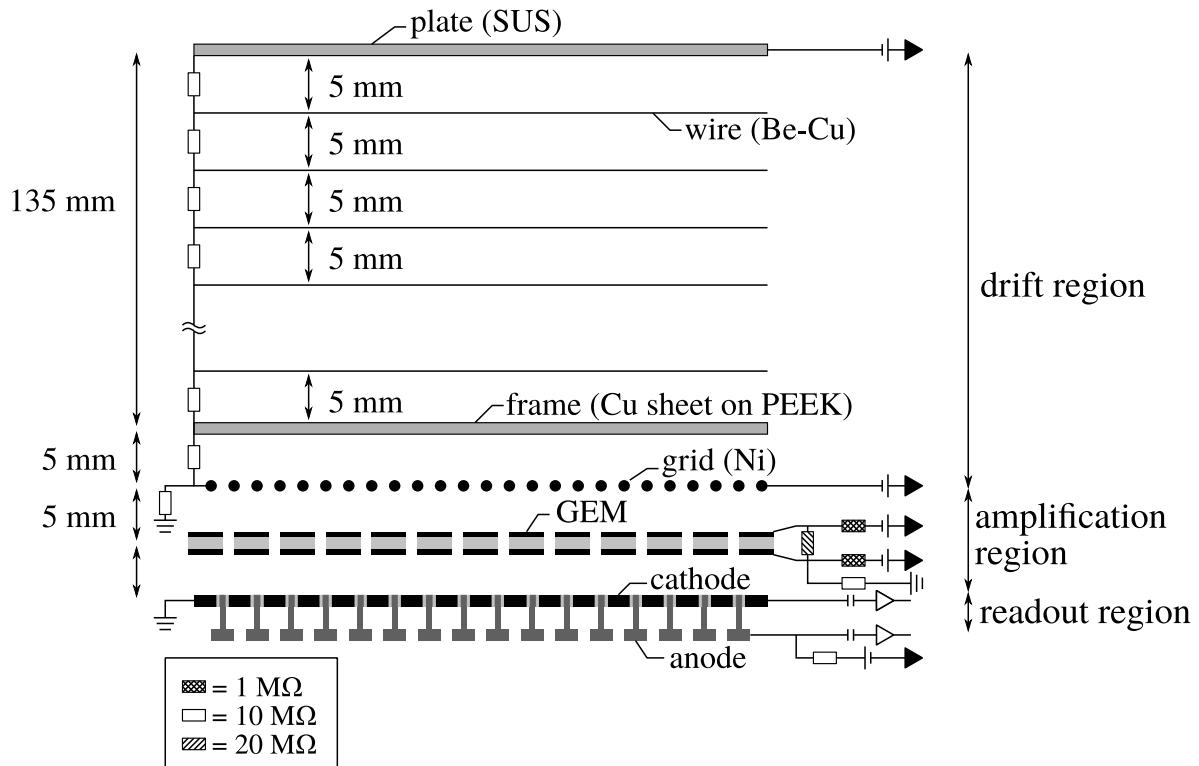


図2.4: ドリフトケージの構造。

2.1.1 ドリフト領域

grid から plate の方向 (図2.4では上向き) にドリフト電場を作ることでトラックの周りに発生した電子を増幅領域へドリフトさせる。plate と grid にそれぞれ高電圧を印加することでドリフト電場を形成する。ドリフト電場の一様性が高いほど、電子を均等にドリフトすることができる。ドリフト電場を一様に形成するために $10\text{ M}\Omega$ の抵抗で接続された wire が 5 mm 間隔で巻かれている [10]。ドリフト領域はドリフト電場の方向に 140 mm である。この plate, grid, wire で囲まれた領域が MAIKo TPC の有感領域となる。

2.1.2 増幅領域

MAIKO TPC では GEM と μ -PIC を用いて電子の増幅を行う。GEM は、図 2.5 のようにポリマーのフィルムの表面を銅で被覆し、直径 $70\text{ }\mu\text{m}$ の穴を $140\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で 1 mm^2 あたり 100 個の密度で開けたものである。銅の 2 つの層はポリマーによって絶縁されている。銅の両面に電圧を印加することによって、穴の中に高電場が形成されドリフトしてきた電子が増幅される。

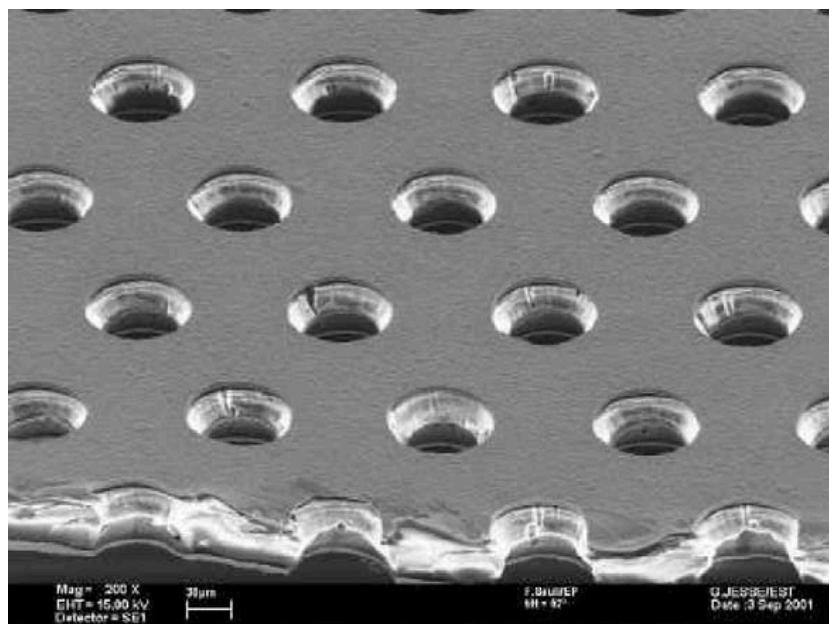


図 2.5: GEM の拡大図 [11]。

μ -PIC は図 2.6 のように anode strip と cathode strip が直交するように配置されている。anode strip, cathode strip ともに $400\text{ }\mu\text{m}$ 間隔でそれぞれ 256 ch 分割されている。直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ の円柱状の anode 電極に高電圧をかけることで高電場を形成することができ、 μ -PIC によって信号が読み出される直前に電子が増幅される。

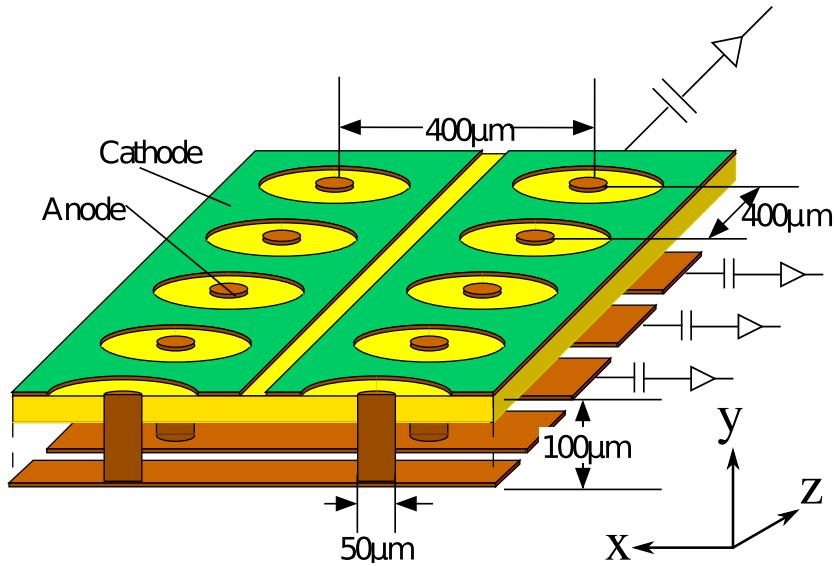


図 2.6: μ -PIC の概観図. 図中の横方向に anode strip, 奥行き方向に cathode strip が配置されている.

2.1.3 読み出し領域

図 2.1 中で anode strip は x 軸, cathode strip は z 軸と平行になるように μ -PIC が配置されている. GEM と μ -PIC により増幅された電子を anode strip, cathode strip により読み出し, それぞれ z 座標, x 座標を検出することができる. また, anode strip, cathode strip で検出される信号の時間分布により y 軸座標を決定することができる.

MAIKo TPC からは図 2.7 のようにトラックが anode strip に垂直な面 ($z - y$ 平面) に射影された anode image と cathode strip に垂直な面 ($x - y$ 平面) に射影された cathode image の 2 つの画像が出力される. anode strip と cathode strip はそれぞれ 256 ch で構成され, 読み出される信号波高の時間変化は 100 MHz で 1,024 samples 測定されるため, 出力される画像の解像度は $256 \times 1,014$ pixels となる. また, anode strip, cathode strip とともに 32 ch ごとにまとめて信号を波形として FADC で取得している. 32 ch ごとにまとめられるため, anode strip, cathode strip ともに 8 ch ずつ FADC でデータを取得している. FADC で取得した信号の一例を図 2.8 に示す. FADC は 25 MHz で波形を取得する.

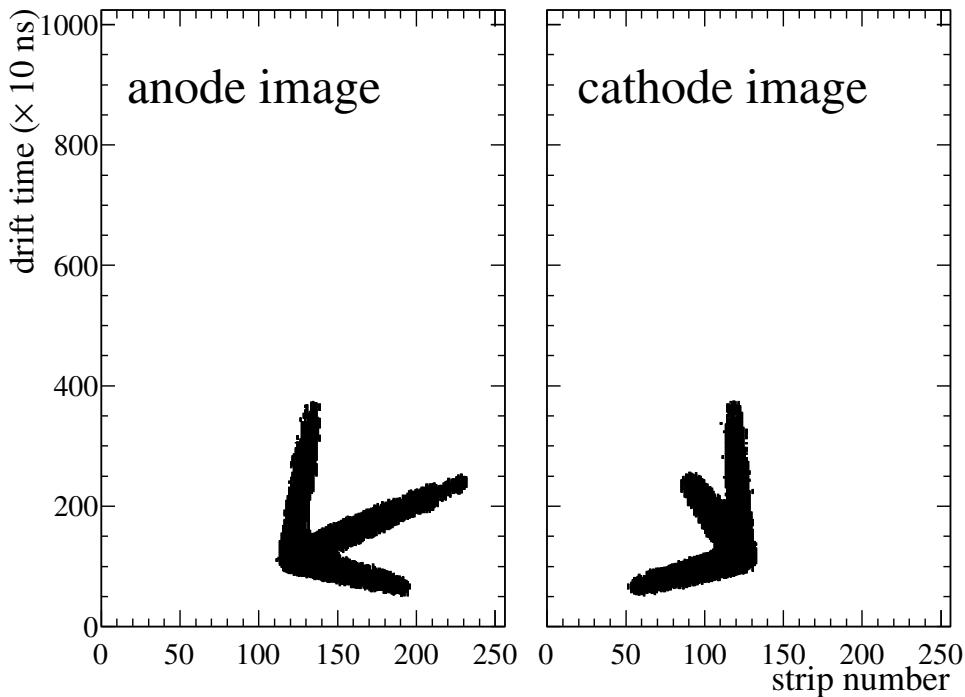


図 2.7: MAIKo TPC から得られる画像データの一例. このイベントは
3 章で述べるシミュレーションによって生成したデータである.

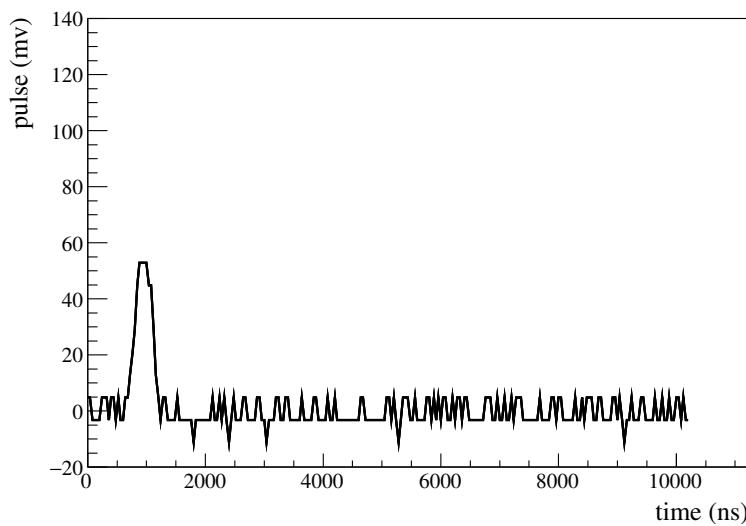


図 2.8: FADC で取得された μ -PIC の波形の一例. この波形は iso-
 C_4H_{10} (1) + H_2 (9) を検出ガスとして求めた際のものである.

2.2 検出ガスの候補

標的に ^{12}C を用いるため、分子中に炭素を含むガスを検出ガスに用いる必要がある。 ^{12}C 以外の原子核が含まれるガスを用いると背景事象となる。陽子、 ^4He と 14 MeV の中性子の散乱は複数の荷電粒子に崩壊しないため、トラックの本数から背景事象を取り除くことができる。そこで、水素と炭素以外の原子が含まれない炭化水素を検出ガスに用いる。代表的な炭化水素は、メタン (CH_4) やエタン (C_2H_6)、イソブタン ($\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$) である。また、水素ガスやヘリウムガスとの混合ガスも用いることができる。検出ガスとして求められる性能には以下のようなものがある。

- 放電しにくい。
- α 粒子のエネルギー損失 (dE/dx) が適切である。
- 適切なドリフト速度を達成できる。
- 適切なドリフト電場のもとでディフュージョンが小さい。
- ^{12}C の量が少なくない。

これらの項目を基準に検出ガスの種類と圧力の決定を行う。

2.2.1 エネルギー損失

本実験では荷電粒子のエネルギー、運動量をトラックの長さから決定するため、トラックの長さ、方向を正しく識別することが必要となる。荷電粒子のエネルギー損失 (dE/dx) が大きくなりすぎると検出ガス中の飛行距離が短くなり、トラックとして識別することが難しくなる。また、 dE/dx が小さくなりすぎるとトラックが有感領域で止まらず、トラックの長さを決定することができなくなる。検出する対象である α 粒子の dE/dx が適切な大きさとなるガスの種類と圧力の候補を選出する。

まず、代表的な炭化水素である CH_4 を考える。ガス中で 10 mm 以上飛行し、MAIKo TPC の有感領域内で停止する α 粒子を検出可能な α 粒子とする。図 1.10 に示したエネルギー分布の α 粒子のうち、検出できた割合の圧力依存性を図 2.9 に示す。このとき、散乱点がビーム軸上に一様に分布していると仮定した。図 2.9 から分かるように、50 hPa で最大となっている。50 hPa のときの CH_4 の dE/dx と同程度となる、他の検出ガスを考える。表 2.2 に示した 6 つを候補とした。括弧内はガスの混合の割合を示す。これらの 6 種類の候補から検出ガスを選ぶ。

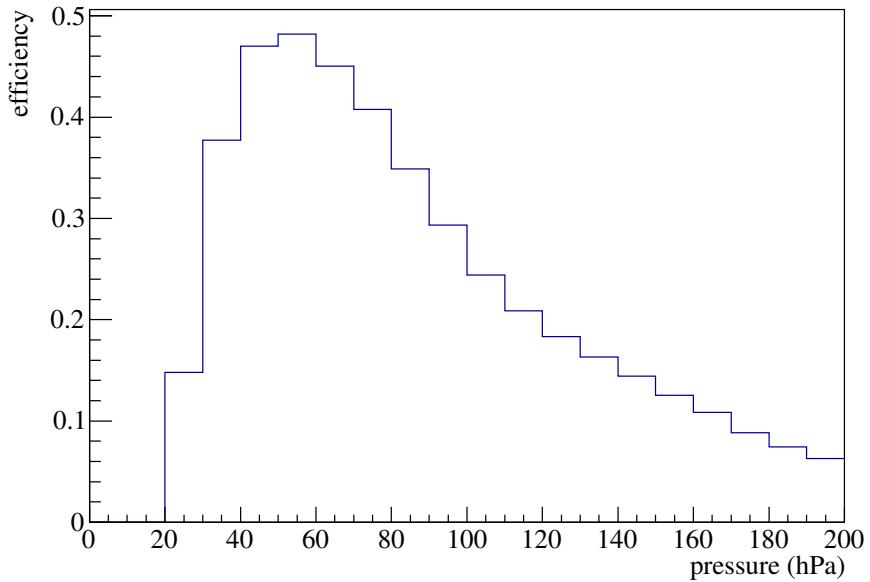


図 2.9: CH_4 の圧力による検出効率の分布. α 粒子は図 1.10 に示したエネルギー分布を仮定した.

50 hPa のときの CH_4 の各種の値は表 2.1 のとおりである.

表 2.1: 50 hPa のときの CH_4 のパラメータ.

項目	値
密度	$3.29 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$
dE/dx ($E_\alpha = 0.5 \text{ MeV}$, 10 mm)	0.107 MeV
飛距離 ($E_\alpha = 0.5 \text{ MeV}$)	65.6 mm

表 2.2: ガスの混合パターン, 圧力, dE/dx . 括弧内はガスの混合の割合を示す.

gas	pressure (hPa)	density (g/cm ³)	dE/dx (MeV) $E_\alpha = 0.5$ MeV 10 mm	ドリフト電場 (V/mm) @ 0.014 mm/ns
CH ₄	50	3.29×10^{-5}	0.107	0.418
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	100	2.55×10^{-5}	0.107	4.31
CH ₄ (4) + He (6)	100	3.62×10^{-5}	0.109	1.89
iso-C ₄ H ₁₀	15	3.58×10^{-5}	0.102	0.644
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	100	3.13×10^{-5}	0.122	6.80
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	100	3.86×10^{-5}	0.102	3.26

2.2.2 ドリフトスピード

MAIKo TPC では 100 MHz で 1,024 samples データを取得するため, ドリフト方向は 10.24 μs のタイムウィンドウが開いている. ドリフトケージの大きさ (140 mm) を可能な限りタイムウィンドウに収めるためには, ドリフトスピードを 140 mm/10.24 μs ~ 0.014 mm/ns に調整する必要がある. Magboltz [12] によって計算したドリフト電場とドリフトスピードの関係を図 2.10 に示す. Magboltz ドリフトスピードが 0.014 mm/ns となるドリフト電場の値を表 2.2 に示す. 図 2.10 の横方向の点線は 0.014 mm/ns を表す. 以降, これらのドリフト電場で評価を行う.

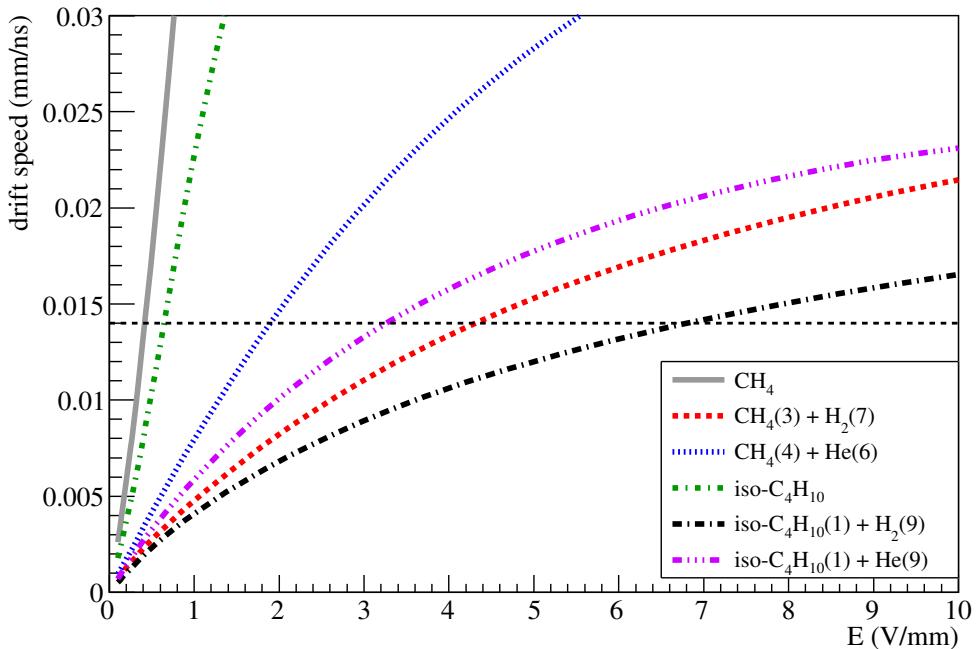


図 2.10: ドリフト電場とドリフトスピードの関係. CH_4 は 50 hPa, $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ は 15 hPa, その他は 100 hPa である. 横方向の点線は 0.014 mm/ns を示す.

2.2.3 電子のディフュージョンの効果

ドリフト電場によって電子が移動する間に検出ガスとの散乱と電子の熱運動により, 図 2.11 のように広がりながらドリフトする. 電子が広がることをディフュージョンと呼ぶ. この効果が大きくなると, 荷電粒子によって同じ場所に生成された電子が μ -PIC に到達するまでに広がるため, トランクが太く検出される. トランクが太くなると, 複数のトランクを分離することが難しくなる. そのため, ディフュージョンの効果が小さいことが望まれる.

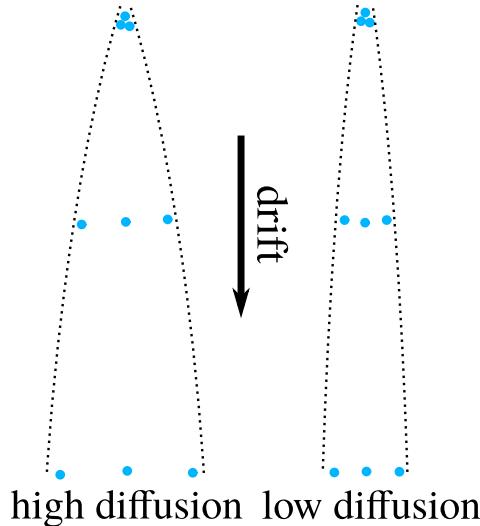


図 2.11: ディフュージョンによって電子が拡散するイメージ. 同じ位置で生成された電子でもドリフトする間に位置が拡散する.

ドリフト電場がない場合のディフュージョンは以下のように理解できる. 電子は熱運動により発生点から拡散する. 热運動の平均速度 v は Maxwell 分布により

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.1)$$

と表せる. ここで k_B はボルツマン定数, T は温度, m は粒子の質量である. 電子が発生した時刻から Δt 後では,

$$\frac{N_0}{\sqrt{4\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.2)$$

のガウス分布で電子が広がる. ここで N_0 は全粒子数, x は発生した点からの距離, D はディフュージョン係数を表す. ディフュージョン係数 D は電子の平均自由工程 λ を用いて

$$D = \frac{1}{3} v \lambda \quad (2.3)$$

と表せる. 理想気体において平均自由工程 λ は, ガスとの散乱の全断面積 σ_0 , 壓力 p のもとで

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{k_B T}{\sigma_0 p} \quad (2.4)$$

と表される. 式 2.1, 2.3, 2.4 により,

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{p\sigma_0} \sqrt{\frac{(k_B T)^3}{m}} \quad (2.5)$$

となる。式 2.5 より、同じガスでは圧力が高いほど、温度が低いほどディフュージョン係数が小さいことが分かる。

ドリフト電場がある場合、発生点からの距離を L 、ドリフトスピードを v_{drift} とすると、

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{drift}}} \quad (2.6)$$

となる。式 2.2 の分散 $\sigma(L)$ は

$$\sigma(L) = \sqrt{2D\Delta t} \quad (2.7)$$

$$= \sqrt{\frac{2D}{v_{\text{drift}}}} \times \sqrt{L} \quad (2.8)$$

$$= D_{\text{Magboltz}} \times \sqrt{L} \quad (2.9)$$

となる。Magboltz によってディフュージョン係数 D_{Magboltz} が得られる。Magboltz によって計算したディフュージョン係数を表 2.3 に示す。表 2.3 中の D_t はドリフト方向に對して垂直な方向への拡散、 D_l は電子の運動方向への拡散の係数を表す。CH4 および iso-C₄H₁₀ の単体ではディフュージョン係数が大きく、同じドリフトスピードのとき、ドリフト電場が大きいほどディフュージョン係数が小さいことが分かる。

表 2.3: Magboltz で計算したディフュージョンの係数。ディフュージョンの大きさはドリフト電場に依存するため、ここではドリフトスピードが 0.014 mm/ns になるドリフト電場での値を示す。 D_t , D_l はそれぞれ運動方向に垂直、平行方向のディフュージョン。

gas	D_t ($\sqrt{\text{mm}}$)	D_l ($\sqrt{\text{mm}}$)	ドリフト電場 (V/mm)
<chem>CH4</chem>	0.433	0.547	0.418
<chem>CH4</chem> (3) + <chem>H2</chem> (7)	0.214	0.171	4.31
<chem>CH4</chem> (4) + <chem>He</chem> (6)	0.270	0.248	1.89
iso-C ₄ H ₁₀	0.357	0.414	0.644
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + <chem>H2</chem> (9)	0.196	0.145	6.80
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + <chem>He</chem> (9)	0.246	0.197	3.26

iso-C₄H₁₀ (1) + H2 (9) が最もディフュージョン係数が小さく、検出ガスの最有力候補である。シミュレーションにより生成した $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ イベントを解析し、その解析効率により検出ガスを決定する。

第3章

シミュレーション

3.1 α 線源を用いた測定

2.2 節で考えた各ガスについて、シミュレーションの基準となるトラックを測定した。また、それらのデータから各ガスにおけるドリフトスピード、ガス増幅率、トラックの幅を測定した。測定には ^{241}Am の α 線源を用いた。図3.1に α 線源のトラックの一例を示す。図3.1では検出ガスに iso-C₄H₁₀(1) + H₂(9) を用いた。2.2 節では6種類の候補を考えたが、ここからは単体の iso-C₄H₁₀ を除いた5種類について考えていく。これはディフュージョン係数が大きくトラックが太くなると予測されることと、圧力が15 hPaと低く安定したTPCの動作が難しいと予測されるためである。

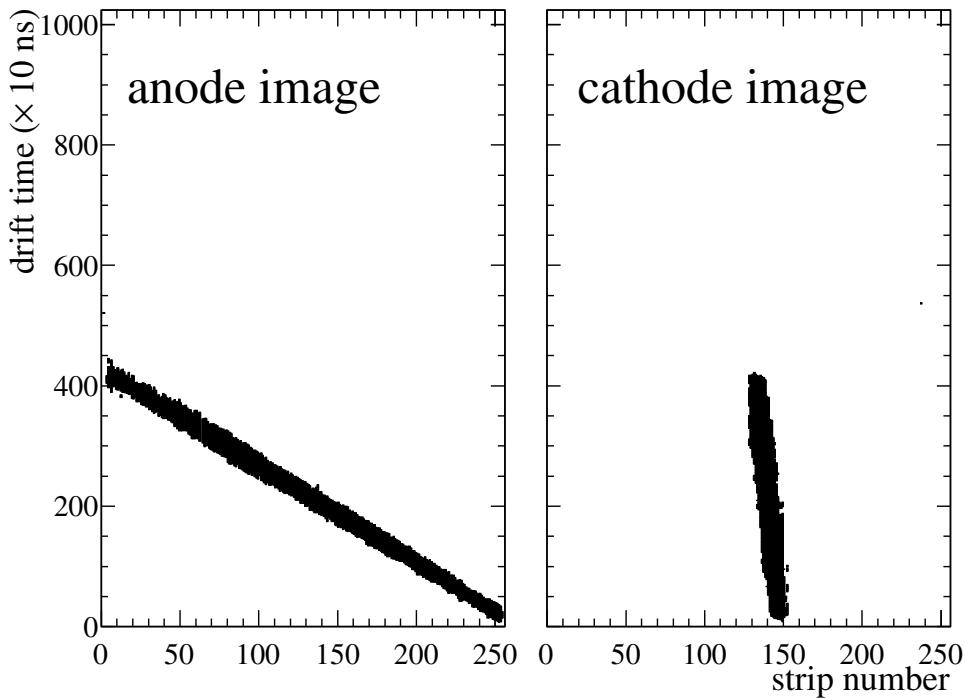


図 3.1: α 線源で測定したトラックの一例. 検出ガスは iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) を用いた.

3.1.1 ドリフトスピード

電子のドリフトスピードを線源によって得られるトラックから求める. 測定には図 3.2 のような線源コリメータを用いる. このコリメータはアクリルで作られており, 1 つの 0° , 4 つの 30° の穴が開いている. このコリメータを用いることで α 線を 0° と 30° の方向に限定することができる. 図 3.3 の右のようにドリフト方向に Δy , それと垂直な方向に Δz 移動するとき,

$$\Delta y = \tan(30^\circ) \Delta z \quad (3.1)$$

となる. MAIKo TPC で取得したトラックの横方向の変分を $\Delta strip$, 縦方向の変分を Δt , ドリフトスピードを $drift_v$ とすると,

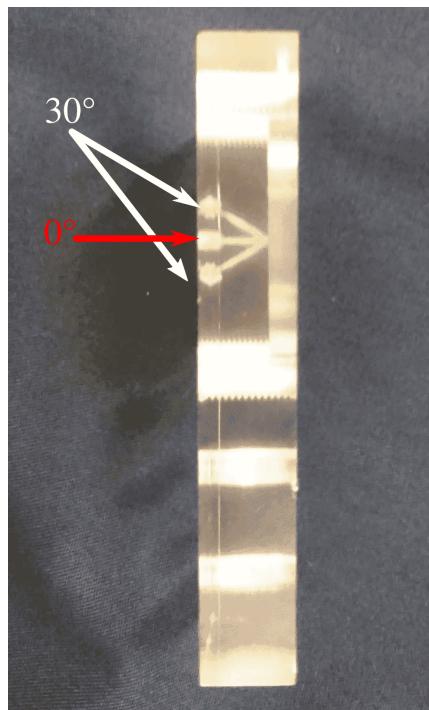
$$\frac{\Delta z}{0.4 \text{ mm}} = \Delta strip \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta y}{drift_v} = \Delta t \quad (3.3)$$

式 (3.1, 3.2, 3.3) より

$$drift_v = \frac{\tan(30^\circ) \Delta strip \times 0.4 \text{ mm}}{\Delta t} \quad (3.4)$$

とドリフトスピードが求まる。



(a) 側面.



(b) 正面.

図 3.2: 線源コリメータ. 中央に 0° , 上下左右に 30° の穴が開いている. 0° の穴と 1 つの 30° の穴を除いてカプトンテープで塞ぐことで, 余計な α 線が出ないようにしている.

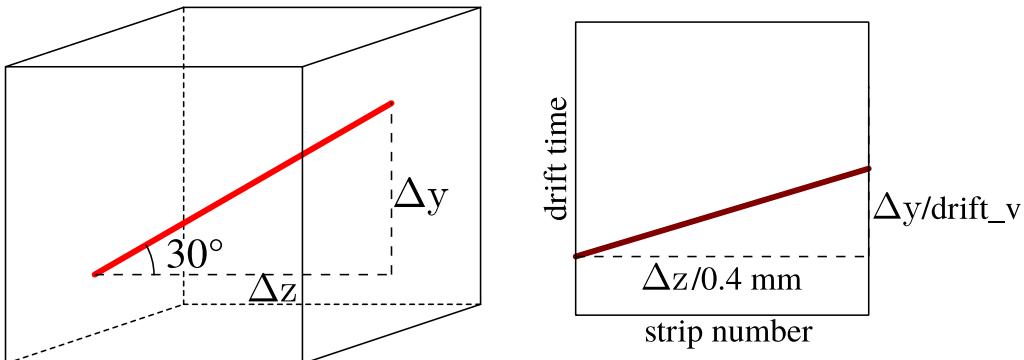


図 3.3: 30° に方向を限定した α 線 (左) と取得される画像データ (右) のイメージ.

α 線源を用いて測定したドリフトスピードと Magboltz で求めた値を表 3.1 に示す。 α 線源を用いて測定したドリフトスピードと Magboltz を用いて計算したドリフトスピードがおおよそ一致していることが分かる。 CH_4 は実測と Magboltz とがずれているが、ガスに含まれる水分の影響が考えられる。 CH_4 のみ 50 hPa とその他のガスと比較して圧力が半分であるため、不純物の影響が大きく出ていると考えられる。

表 3.1: 実測したドリフトスピードと Magboltz で求めたドリフトスピードの比較。

gas	ドリフト電場 (V/mm)	実測 (mm/ns)	Magboltz (mm/ns)
CH_4	0.429	0.0126	0.0145
CH_4 (3) + H_2 (7)	4.32	0.0140	0.0140
CH_4 (4) + He (6)	1.89	0.0135	0.0140
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H_2 (9)	6.82	0.0137	0.0140
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	3.29	0.0139	0.0141

3.1.2 電子增幅率

電圧パラメータを変更させたときの增幅率の変化を測定した。增幅率を計算するためには荷電粒子が検出ガス中を通過した際に発生する電子数 (N_e) と增幅後に μ -PIC によって収集された電子数 (N'_e) の比を取る。 N_e はガス中での荷電粒子のエネルギー損失とガスの W 値から求める。 N'_e は μ -PIC で収集した電荷から求める。詳しい計算方法について以下

で述べる。

ガス中で荷電粒子がエネルギーを落とすと、W 値あたり平均 1 個の電子を電離する。そのため、荷電粒子のエネルギー損失を W 値で割ることで N_e が求まる。各ガスのエネルギー損失と W 値 [13, 14] を表 3.2 に示す。測定に用いた α 線源からは平均 4.2 MeV の α 粒子が出ていることが他の測定によりわかっている。エネルギー損失は 4.2 MeV の α 粒子が μ -PIC 32 strip 分の距離 (12.8 mm) で落とすエネルギーを示している。

表 3.2: 検出ガスの W 値 [13, 14] とエネルギー損失と N_e 。エネルギー損失は荷電粒子がガス中を 12.8 mm 進んだ時のものである。

gas	W 値 (eV)	energy loss (keV)	N_e
CH ₄	29.1	56.5	1.94×10^3
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	34.2	53.4	1.56×10^3
CH ₄ (4) + He (6)	39.2	59.3	1.51×10^3
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	35.4	62.0	1.75×10^3
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	44.0	58.0	1.32×10^3

μ -PIC からの信号波形は 32 strips まとめて図 2.8 のような FADC 情報として取得している。この信号波形を時間で積分することによって 32 strips で収集した電荷量を計算することができる。 μ -PIC で取得した電気信号は読み出し回路内部で 800 倍に増幅され、入力インピーダンス 50Ω で電流値を電圧値に変換して取得している。よって、式 (3.5) で求めることができる。 e は電荷素量である。

$$N'_e = \frac{\int V(t)dt}{50 \times 800 \times e} \quad (3.5)$$

各ガスの増幅率を表 3.3 に示す。ここでは、GEM と μ -PIC の両方による増幅率となっている。

表 3.3: 各ガスの電子增幅率.

gas	増幅率(倍)
CH ₄	700
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	354
CH ₄ (4) + He (6)	322
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	272
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	392

3.1.3 幅

本実験の目的である 3α に崩壊するイベントではトラックが太いと複数のトラックを区別できなくなり、トラックの抽出を正しくできなくなる。 0° の α 粒子によるトラックで幅を測定した。図 3.4 に示すように、トラックの幅には anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる。このようにして決定したトラックの幅を表 3.4、図 3.5 に示す。図 3.5 から分かるようにトラックの幅とディフュージョン係数には相関がある。ディフュージョン係数、トラックの幅とともに iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) が最も小さいことが分かる。

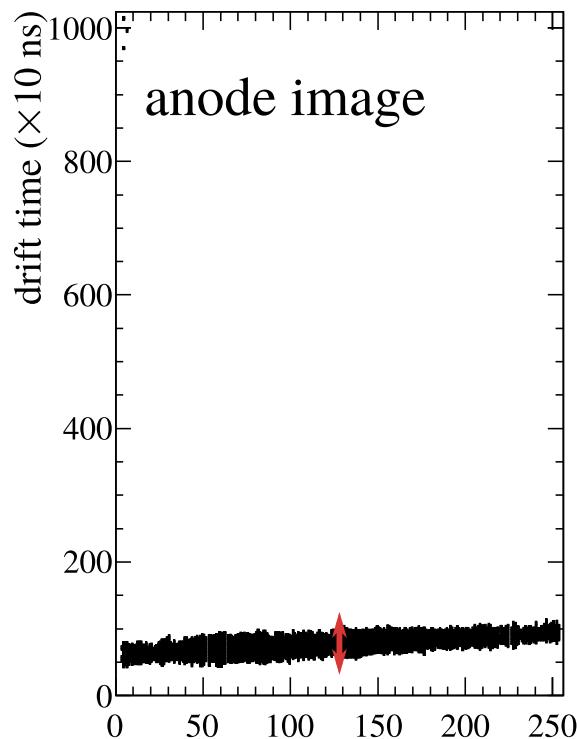


図 3.4: ト ラックの幅の決定方法のイメージ. ト ラックの幅は有感領域の中央である anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる.

表 3.4: 各ガスのト ラックの幅.

gas	ト ラックの幅 ($\times 10$ ns)
CH ₄	91.1
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	42.3
CH ₄ (4) + He (6)	62.5
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	35.4
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	54.9

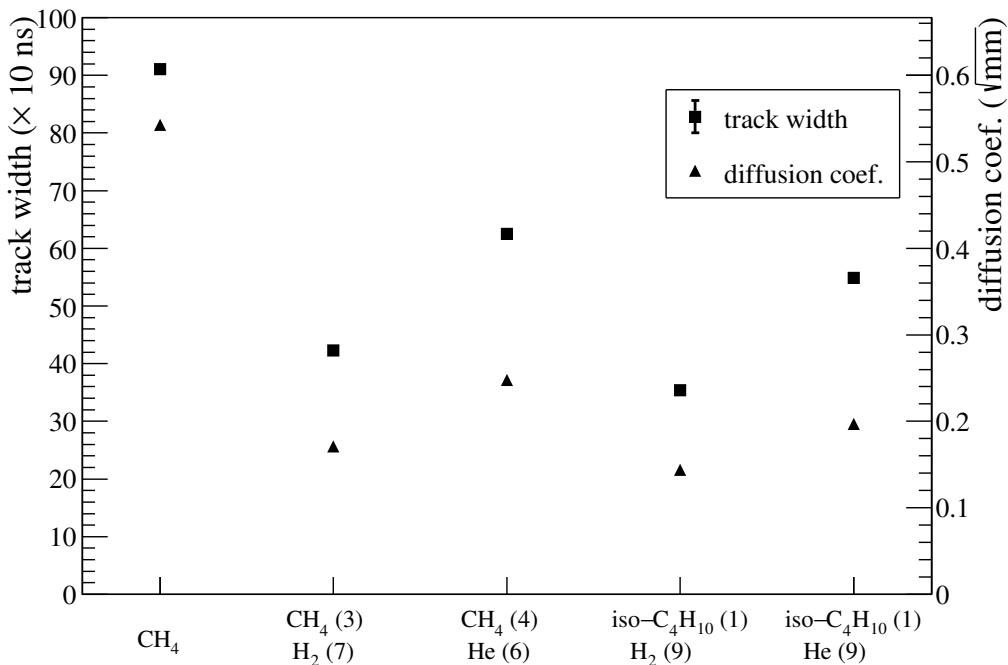


図 3.5: Magboltz で求めたディフュージョン係数とトラックの幅.

3.2 シミュレーションによる線源データの再現

MAIKo TPC から得られるトラックを Garfield++ [15] と Magboltz [12] を用いたシミュレーションにより再現した。シミュレーションでは、ドリフト電場, W 値, 電子増幅率, 検出ガスの密度を fixed parameters, TOT の閾値を free parameter とした。シミュレーションは以下の手順で行った。

1. トラックを生成する荷電粒子のエネルギー, 運動量を決定し, Garfield++ の SrimTrack に登録する。
2. SrimTrack によりトラックの周囲に電子を生成する。
3. 電子を Magboltz で求めたドリフトスピードで読み出し領域へドリフトさせる。
4. 読み出し領域に到達した電子 1 つにつき図 3.6 にあるような電気信号を各 strip の信号波形に追加する。
5. 設定した閾値により, 信号波形を TOT に変換し anode image と cathode image を作る。

TOT の閾値は 0.1 mV とした。 α 線源を用いた場合のシミュレーションと測定の比較を図 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 に示す。それぞれの検出ガスで α 線源によるトラックを、シミュレーションで再現できていることが分かる。

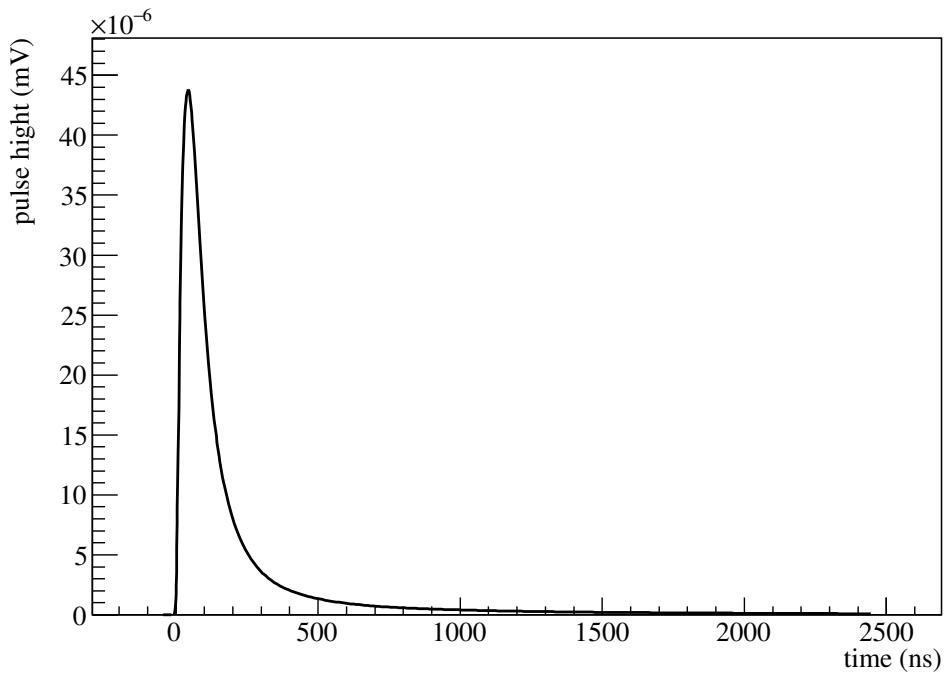
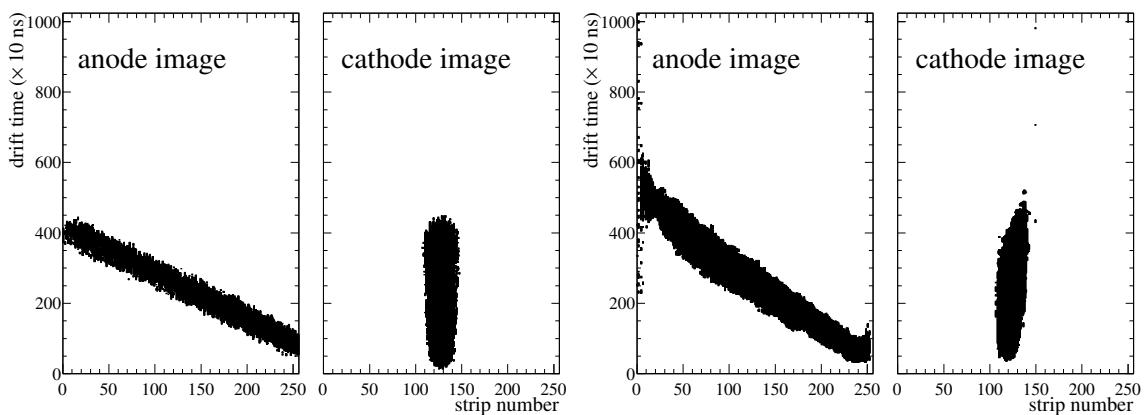


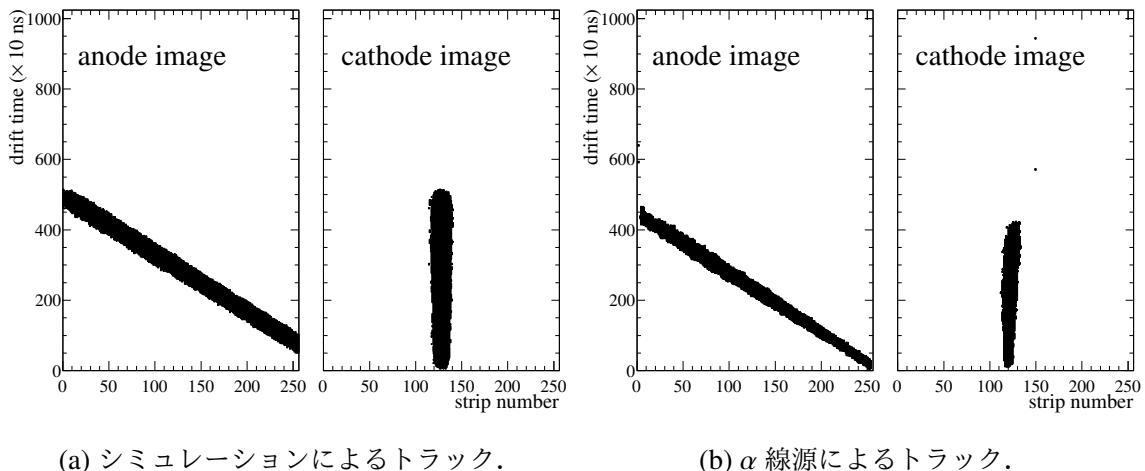
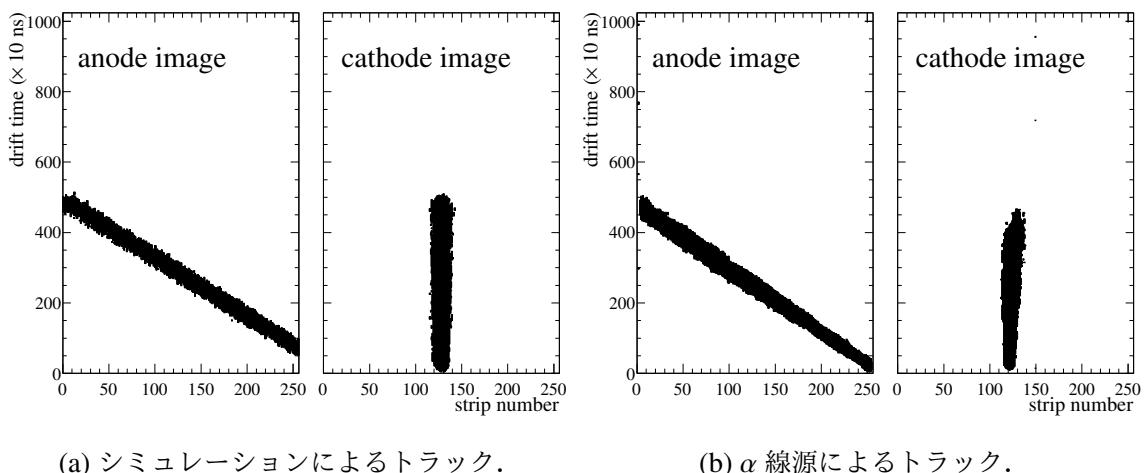
図 3.6: 1 電子が μ -PIC に到達した時に読み出される電気信号。

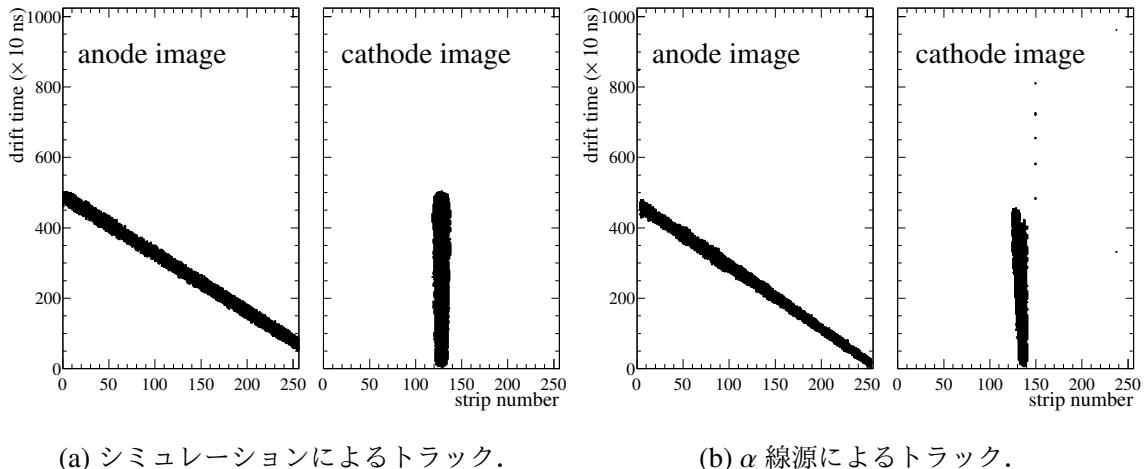
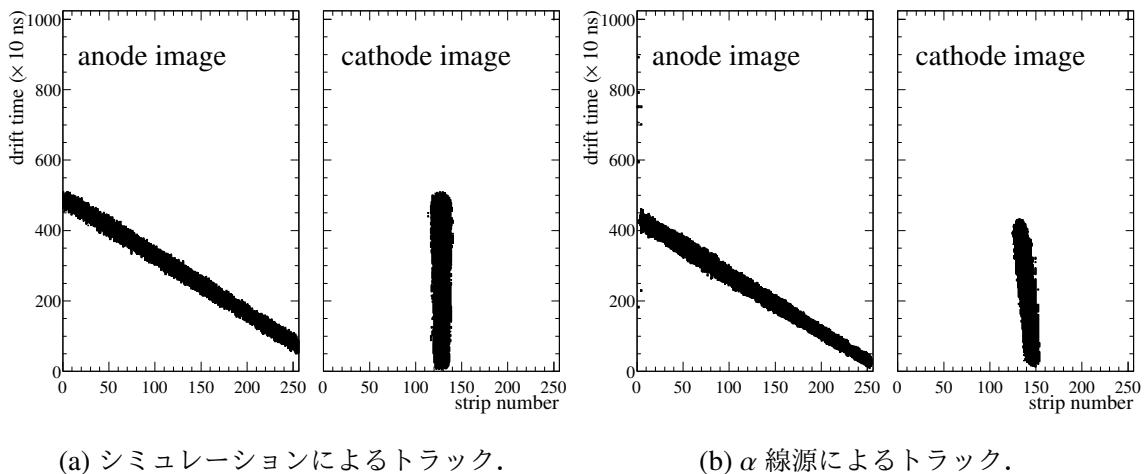


(a) シミュレーションによるトラック。

(b) α 線源によるトラック。

図 3.7: CH_4 の場合。

図 3.8: CH_4 (3) + H_2 (7) の場合.図 3.9: CH_4 (4) + He (6) の場合.

図 3.10: iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) の場合.図 3.11: iso-C₄H₁₀ (1) + He (9) の場合.

3.3 トリプルアルファ反応のシミュレーション

α 線源のトラックを再現することができたので、同じ設定で $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$ のシミュレーションを行う。このシミュレーションでは以下のように 3 つの α 粒子を生成した。

1. ^{12}C が 14 MeV の中性子との散乱により 0_2^+ 状態に励起させる。この際、重心系で一様な散乱角で散乱させる。

2. $^{12}\text{C}(0_2^+)$ を α 粒子と ^8Be に位相空間で一様に崩壊させる。
3. 崩壊してできた ^8Be を 2 つの α 粒子に位相空間で一様に崩壊させる。

このようにして生成した 3 つの α 粒子を元にトラックを生成する。トラックの生成方法は前節で述べた通りである。生成したトラックを図 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 に示す。ここでは、3 つのトラックを確認できたイベントを選んで示した。

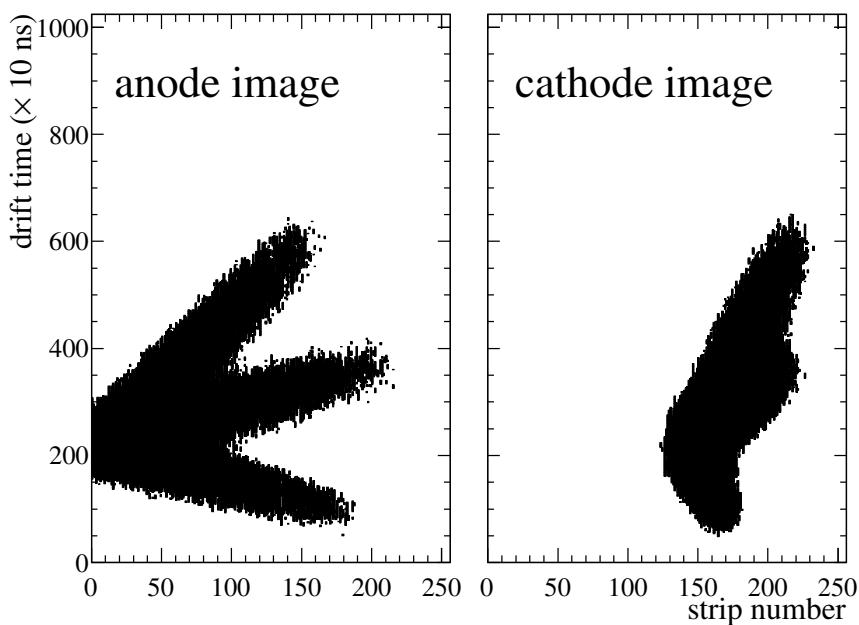
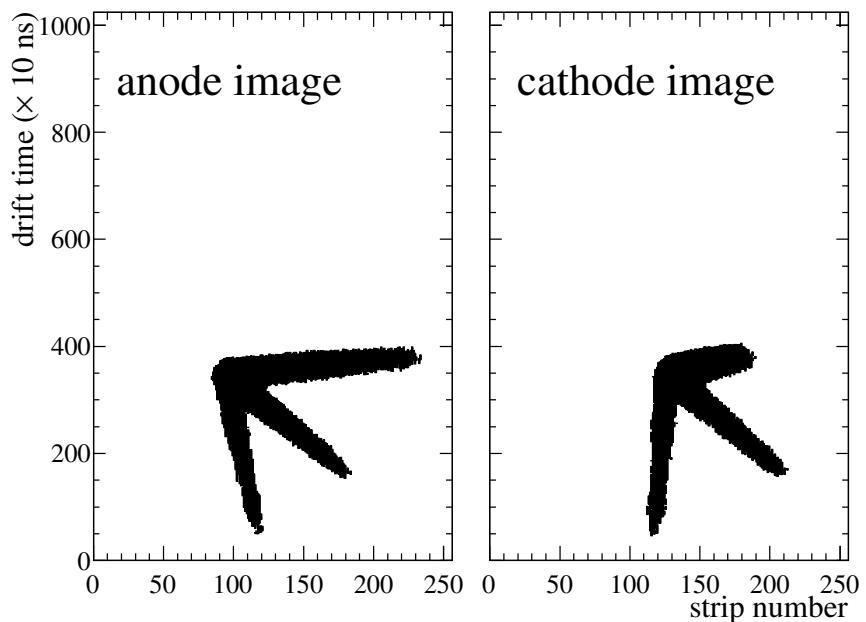
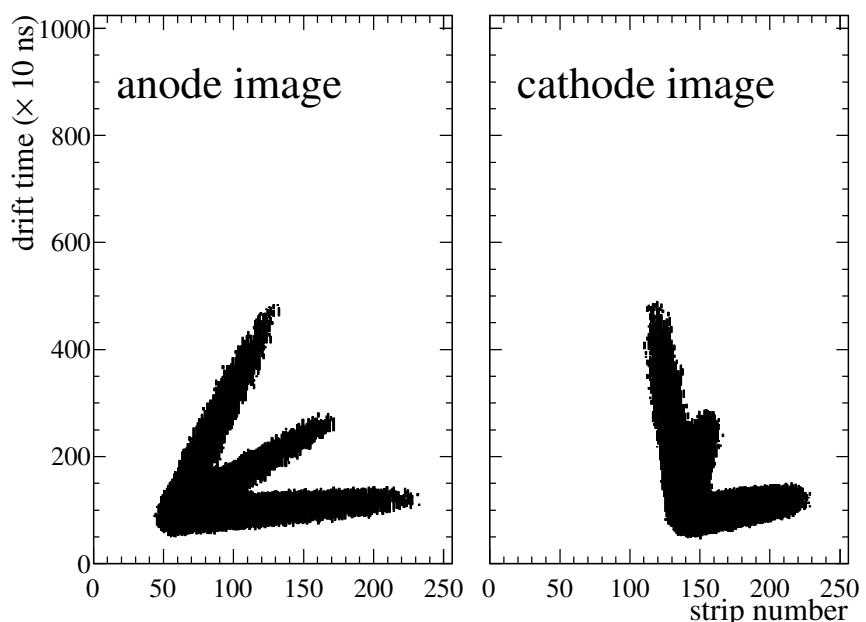


図 3.12: CH_4 の場合。

図 3.13: CH_4 (3) + H_2 (7) の場合。図 3.14: CH_4 (4) + He (6) の場合。

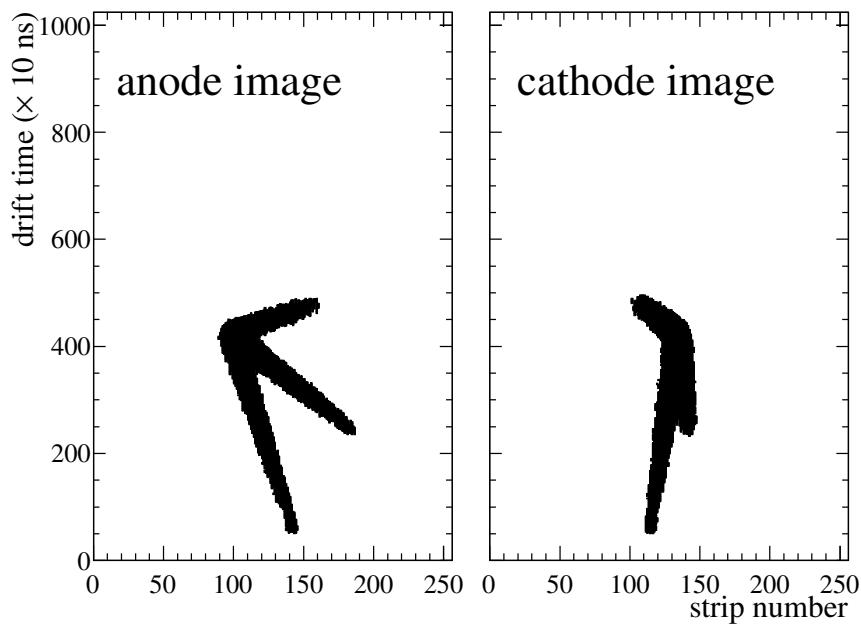


図 3.15: iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) の場合.

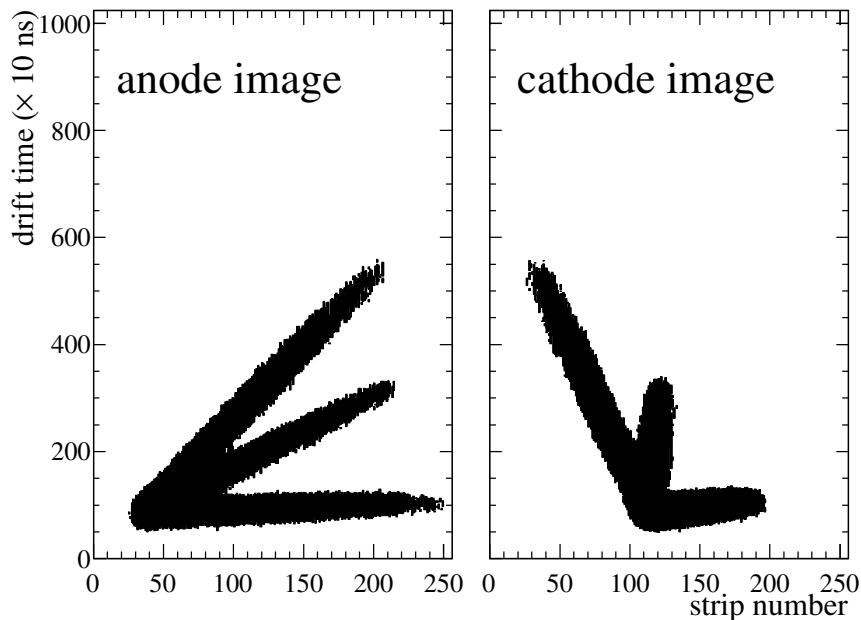


図 3.16: iso-C₄H₁₀ (1) + He (9) の場合.

第 4 章

解析

4.1 解析の概要

MAIKo TCP の解析では背景事象の除去とトラック情報の抽出の 2 つが必要となる。検出ガスには ^{12}C だけでなく、陽子や ^4He が含まれる。そのため、中性子と陽子、 ^4He との散乱事象を取り除く必要がある。その後、中性子と ^{12}C との散乱事象に対してトラックの情報を抽出する。トラックの情報は中性子と ^{12}C とが散乱した座標、 α 粒子が停止した座標である。anode image から z, y 座標を、cathode image から x, y 座標を決定することができる。 x, z 座標は μ -PIC の信号を検出した strip のチャンネル番号に $400 \mu\text{m}$ をかけることで求めることができる。TPC では、 y 座標を荷電粒子が通過した位置から読み出し面に到達するまでの時間として測定する。そのため、anode image, cathode image の clock にドリフトスピードをかけることで y 座標を求めることができる。このようにして決定した anode image, cathode image の座標を合わせることで、3 次元の座標を求めることができる。

散乱点と停止点の座標から粒子が飛行した方向ベクトルと距離が決定される。粒子が分かれば、飛行距離から運動エネルギーが決まる。図 4.1 に $\text{CH}_4(50 \text{ hPa})$ 中での荷電粒子の飛行距離と運動エネルギーの対応を示す。飛行距離と運動エネルギーの相関は SRIM [16] を用いて求めた。SRIM は、荷電粒子が物質中を通過する際の、イオンの飛程、エネルギーロス等を算出するシミュレーションソフトウェアである。この対応関係から粒子の運動エネルギーを決定する。粒子の運動エネルギーを T 、質量を m 、単位方向ベクトルを

(dx, dy, dz) とすると、粒子の4元運動量は

$$p = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T + m \\ \sqrt{(T+m)^2 + m^2} dx \\ \sqrt{(T+m)^2 + m^2} dy \\ \sqrt{(T+m)^2 + m^2} dz \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

となる。決定した3つの α 粒子の4元運動量を足し合わせることで、 ^{12}C の4元運動量を再構成できる。このようにして求めた4元運動量から、 ^{12}C の運動エネルギー、散乱角度、励起エネルギーを求めることができる。

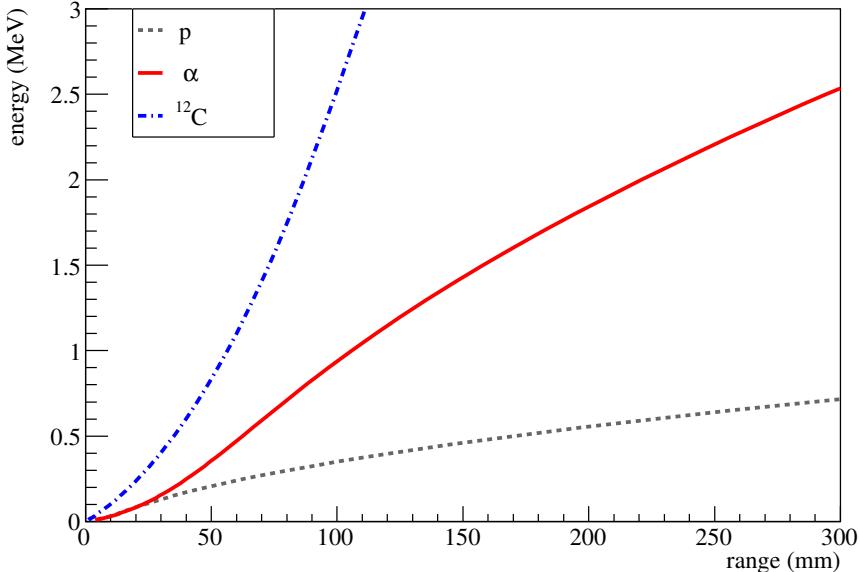


図 4.1: $\text{CH}_4(50 \text{ hPa})$ 中での荷電粒子 ($p, \alpha, ^{12}\text{C}$) の飛行距離と運動エネルギー。この相関は SRIM を用いて求めた。

4.2 eye-scan

本研究では MAIKo TPC から得られたトラックの解析を人間の目 (eye-scan) で行った。eye-scan では、トラックの本数の識別と散乱点、停止点の抽出を行った。ここではトラックの本数が3本であるイベントを $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$ イベントとした。本研究では $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$ イベントに対して解析を行った。検出ガスの決定のために、3.3節のシミュレーションで生成したデータに対して解析を行った。

4.2.1 解析効率

実際には $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$ イベントであっても、各 α 粒子のエネルギーと放出角度、トラックの太さによっては 3 つのトラックを区別することができず、 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$ イベントとして認識できない場合がある。そこで、eye-scan によって正しくトラックが 3 本と認識できる割合（解析効率）を評価する。eye-scan は各検出ガスについて 100 events ずつ行った。eye-scan によって決定したトラックの本数を表 4.1 に示す。表 4.1 の 3 本の割合が解析効率となる。 CH_4 単体と $\text{CH}_4(4) + \text{He}(6)$ 以外は約 90 % の解析効率となっている。

表 4.1: eye-scan によって決定したトラックの本数の割合。

gas	3 本 (%)	2 本 (%)	1 本 (%)
CH_4	55	37	8
$\text{CH}_4(3) + \text{H}_2(7)$	91	9	0
$\text{CH}_4(4) + \text{He}(6)$	78	22	0
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{H}_2(9)$	87	11	2
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{He}(9)$	90	10	0

4.2.2 エネルギー分解能

α 粒子の飛行距離の分解能により、エネルギー分解能が決まる。そこで、eye-scan による α 粒子のエネルギー分解能を評価する。シミュレーションで粒子を生成した時に決定した α 粒子の運動エネルギー (E_{ideal}) と eye-scan によって決定した α 粒子の運動エネルギー ($E_{\text{eye-scan}}$) の相関を図 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 に示す。縦軸がシミュレーションで決定した運動エネルギー、横軸が eye-scan で決定した運動エネルギーである。この相関に対して 1 次関数 ($E_{\text{ideal}} = p_0 \times E_{\text{eye-scan}} + p_1$) でフィットした結果を表 4.2 にまとめる。どの検出ガスについても、ほぼ $E_{\text{ideal}} = E_{\text{eye-scan}}$ となっている。

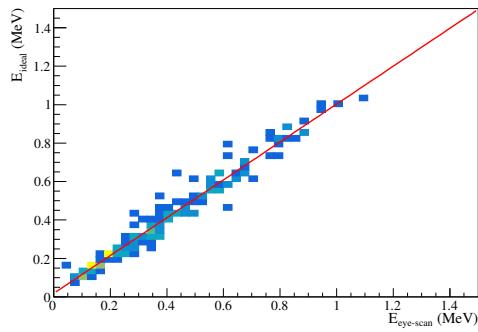


図 4.2: CH_4 の場合の
 $E_{\text{eye-scan}}$ と E_{ideal} の相
関.

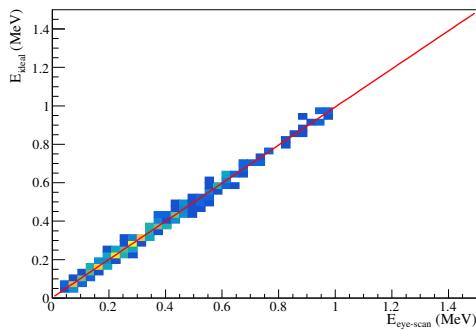


図 4.3: CH_4 (3) +
 H_2 (7) の場合の
 $E_{\text{eye-scan}}$ と E_{ideal} の相
関.

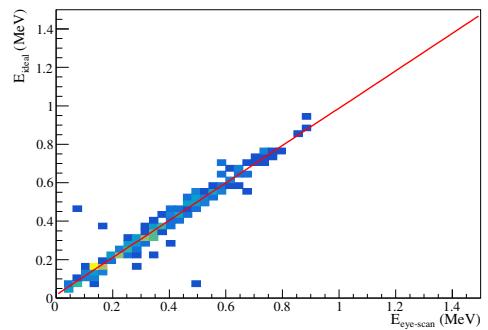


図 4.4: CH_4 (4) +
 He (6) の場合の
 $E_{\text{eye-scan}}$ と E_{ideal} の相
関.

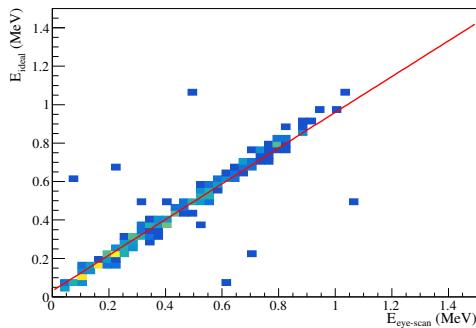


図 4.5: iso-
 C_4H_{10} (1) + H_2 (9)
の場合の $E_{\text{eye-scan}}$ と
 E_{ideal} の相関.

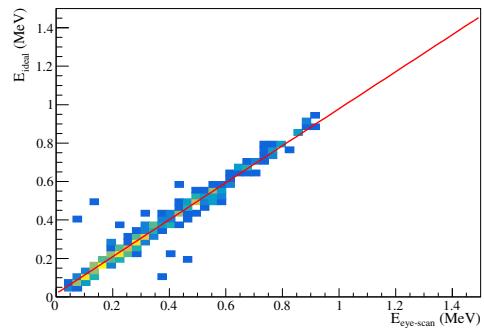
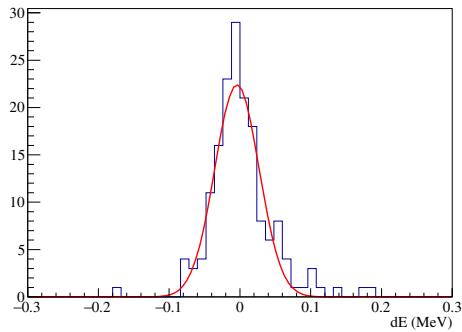
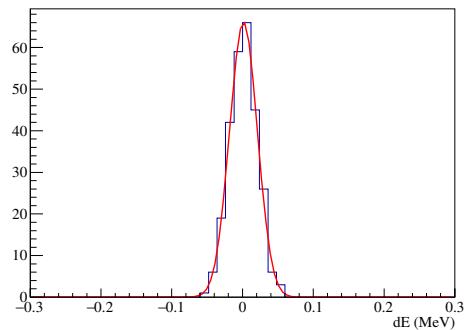
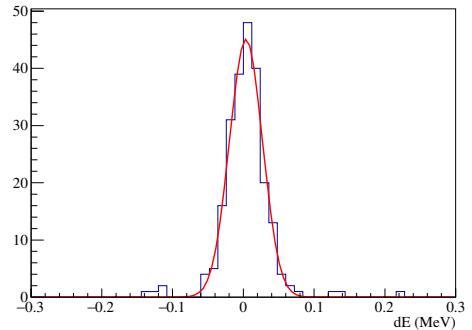
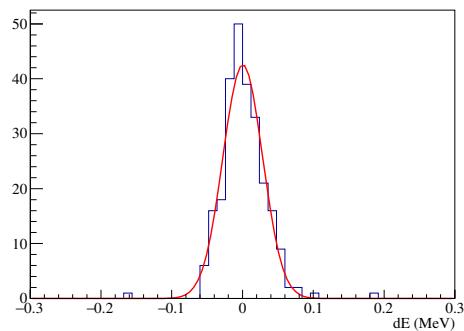
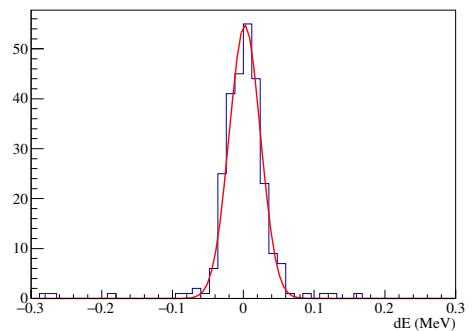


図 4.6: iso-
 C_4H_{10} (1) + He (9)
の場合の $E_{\text{eye-scan}}$ と
 E_{ideal} の相関.

表 4.2

gas	p_0	p_1
CH_4	0.985	0.0179
CH_4 (3) + H_2 (7)	0.991	0.00260
CH_4 (4) + He (6)	0.972	0.0157
iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9)	0.929	0.0309
iso- C_4H_{10} (1) + He (9)	0.962	0.0166

$E_{\text{eye-scan}}$ をフィットした 1 次関数 ($f(x)$) で補正したエネルギーと E_{ideal} と差分を dE ($= E_{\text{ideal}} - f(E_{\text{eye-scan}})$) とする. 各検出ガスでの dE の分布を図 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 に, ガウス分布でフィットした中心値と分散を表 4.3 に示す. エネルギー分解能は, CH_4 (3) + H_2 (7) の場合に最も小さいことが分かる.

図 4.7: CH_4 の場合 $\mathcal{O} dE.$ 図 4.8: CH_4 (3) +
 H_2 (7) の場合の dE .図 4.9: CH_4 (4) +
He (6) の場合の dE .図 4.10: iso-
 C_4H_{10} (1) + H_2 (9) の
場合の dE .図 4.11: iso-
 C_4H_{10} (1) + He (9) の
場合の dE .

4.2.3 角度分解能

シミュレーションで決定した α 粒子の角度と eye-scan での角度の差分を $d\theta$ とする。各検出ガスでの $d\theta$ の分布を図 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 に、ガウス分布でフィットした中心値と分散を表 4.3 に示す。角度分解能は、CH₄ 単体の場合に大きいことが分かる。

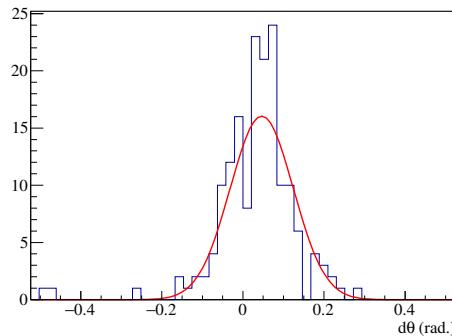


図 4.12: CH₄ の場合
の角度差。

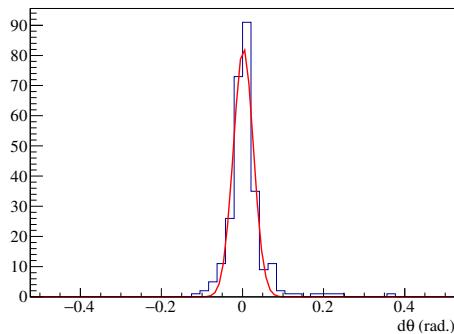


図 4.13: CH₄ (3) +
H₂ (7) の場合の角度
差。

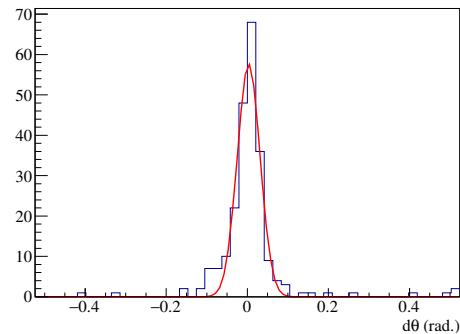


図 4.14: CH₄ (4) +
He (6) の場合の角度
差。

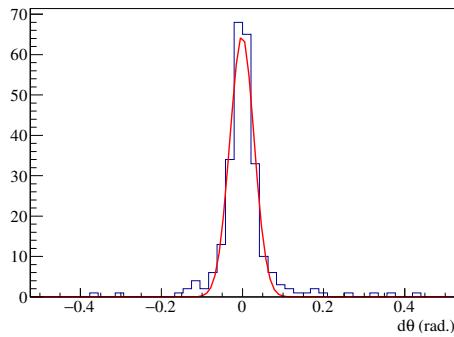


図 4.15: iso-
 C_4H_{10} (1) + H_2 (9) の
場合の角度差.

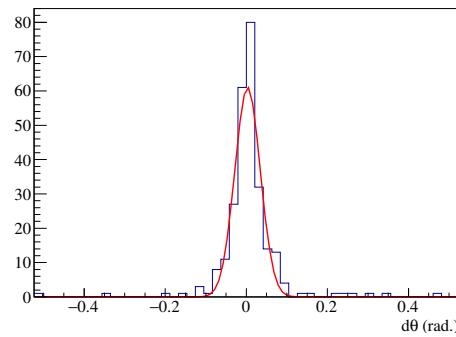


図 4.16: iso-
 C_4H_{10} (1) + He (9) の
場合の角度差.

4.2.4 励起エネルギー分解能

測定で ^{12}C , 励起エネルギーの分解能が悪ければ各励起状態を特定することができない. シミュレーションでは 0_2^+ 状態経由での崩壊を考えているので, ^{12}C の励起エネルギーは 7.65 MeV となっている. eye-scan で決定した ^{12}C の不变質量から基底状態の ^{12}C の質量を引くことで励起エネルギーを求め, 7.65 MeV を再構築できるか評価する. 各検出ガスで再構成した励起エネルギーを図 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 表 4.3 に示す. どの検出ガスにおいても 0_2^+ 状態を再構成できていることが分かる. 0_2^+ 状態と隣り合う ^{12}C の励起状態は 2_1^+ の 4.44 MeV と 3_1^- の 9.64 MeV であるので, 分解能も隣り合う励起状態と分けるのに十分良いことも分かる.

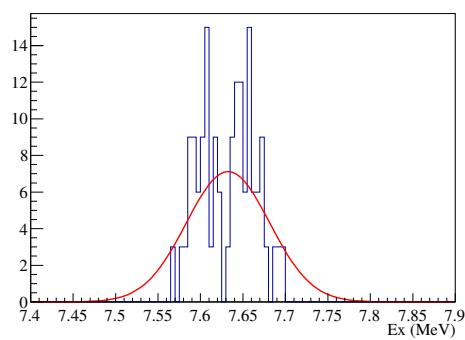


図 4.17: CH_4 の場合
の ^{12}C の励起エネルギー.

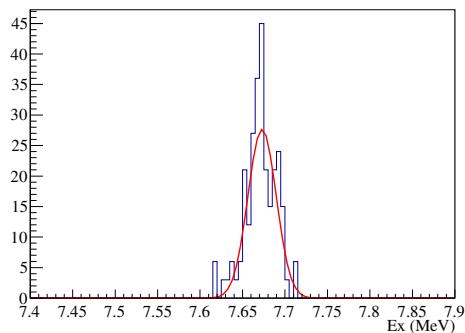


図 4.18: CH_4 (3) +
 H_2 (7) の場合の ^{12}C
の励起エネルギー.

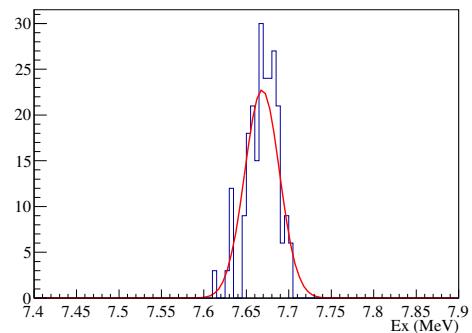


図 4.19: CH_4 (4) +
 He (6) の場合の ^{12}C
の励起エネルギー.

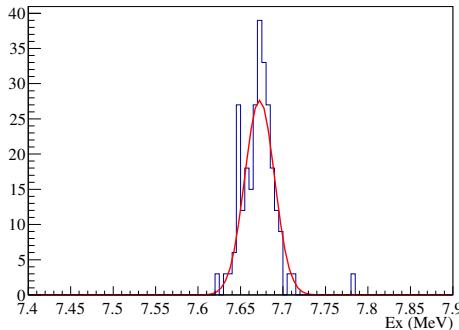


図 4.20: iso-
 C_4H_{10} (1) + H_2 (9) の
場合の ^{12}C の励起エ
ネルギー.

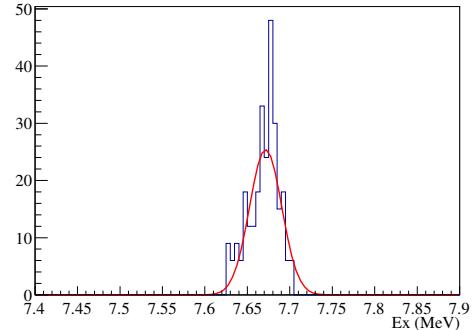


図 4.21: iso-
 C_4H_{10} (1) + He (9) の
場合の ^{12}C の励起エ
ネルギー.

表 4.3: 各ガスの解析効率と分解能. それぞれ 100 events ずつ eye-scan
によって解析を行った.

gas	解析効率 (%)	$dE \pm \sigma$ (keV)	$d\theta \pm \sigma$ (mrad)	$Ex \pm \sigma$ (MeV)
CH_4	55	$-4.21 \times 10^{-3} \pm 3.13 \times 10^{-2}$	46.4 ± 77.9	$7.63 \pm 4.91 \times 10^{-2}$
CH_4 (3) + H_2 (7)	91	$1.36 \times 10^{-3} \pm 1.97 \times 10^{-2}$	2.10 ± 24.6	$7.67 \pm 1.66 \times 10^{-2}$
CH_4 (4) + He (6)	78	$3.75 \times 10^{-3} \pm 2.34 \times 10^{-2}$	3.34 ± 28.2	$7.67 \pm 2.05 \times 10^{-2}$
iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9)	87	$3.75 \times 10^{-4} \pm 2.80 \times 10^{-2}$	-1.27 ± 29.8	$7.67 \pm 1.75 \times 10^{-2}$
iso- C_4H_{10} (1) + He (9)	90	$2.14 \times 10^{-3} \pm 2.20 \times 10^{-2}$	3.05 ± 31.4	$7.67 \pm 1.90 \times 10^{-2}$

4.3 検出ガスの決定

ディフュージョンとトラックの幅の観点では CH_4 (3) + H_2 (7), iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) が良い. 解析効率は CH_4 (3) + H_2 (7), iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9), iso- C_4H_{10} (1) + He (9) が良い. α 粒子のエネルギー分解能の観点では CH_4 (3) + H_2 (7) が良い. 角度分解能の観点では CH_4 (3) + H_2 (7), iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) が良い. これらから考えると, CH_4 (3) + H_2 (7) または iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) が適すると判断できる. CH_4 (3) + H_2 (7) と iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) とで含まれる ^{12}C の量を比較すると, iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) の方が $4/3$ 倍多い. よって, 検出ガスには iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9)(100 hPa) を用いる.

第 5 章

中性子コリメータ

5.1 ビームサイズを制限する必要性

中性子ビームは可能な限り細いのもが望ましい。例えば、半径 50 mm の幅を持つて いる中性子ビームを用いると、散乱点が y 軸方向に 100 mm の幅を持つ。grid の座標を $y = 0 \text{ mm}$, plate の座標を $y = 140 \text{ mm}$ とし、ビームの中心が $y = 70 \text{ mm}$ の位置にあるとすると、中性子ビームは $y = 20\text{--}120 \text{ mm}$ の範囲に入射する。この時 $y = 120 \text{ mm}$ の位置で 散乱が起きると、見かけ上の有感領域は grid 方向に 120 mm, plate 方向に 20 mm となる。 反対に、 $y = 20 \text{ mm}$ の位置で散乱が起きると、見かけ上の有感領域は grid 方向に 20 mm, plate 方向に 120 mm となる。しかし、MAIKo TPC は y 座標をトラックの周囲に発生した電子の読み出し面に到達する時間差を用いて検出しているため、 y 座標の絶対値を決定することができない。すると、図 5.1 のように、 $y = 120 \text{ mm}$ と $y = 20 \text{ mm}$ のどちらで散乱が起きたのかを区別できない。どちらの場合でも確実に有感領域内で停止したと保証するためには、散乱点から y 軸方向に $\pm 20 \text{ mm}$ を実質の有感領域としなければならない。

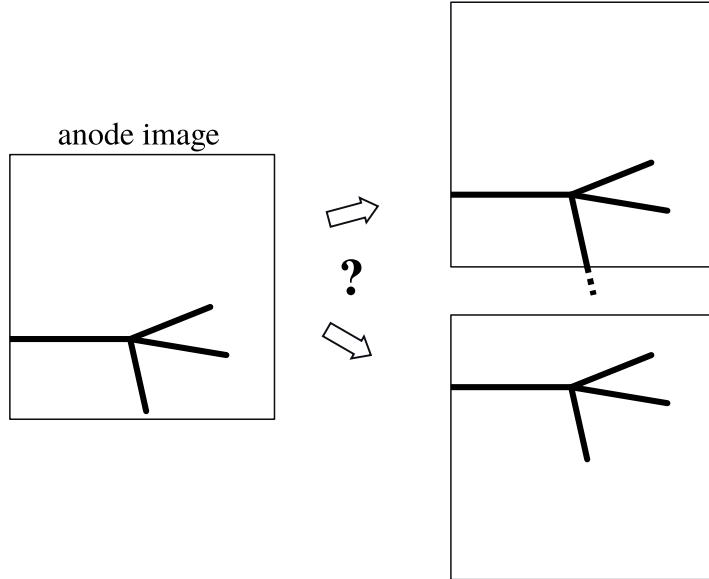


図 5.1: ビームサイズが大きいときの散乱事象. 右上のように領域外にトラックが出ているのか, 左下のように領域内で停止したのか区別ができない.

有感領域が小さいと領域外に出ていく α 粒子の数が増えてしまい, 検出効率が低下する. そのため, 中性子ビームの y 軸方向のサイズは可能な限り小さいのもが望ましい. その反面, ビームを細くすると標的で生成された中性子を制限することになるので, 中性子の入射量が低下する.

5.2 立体角と検出効率によるビームサイズの決定

重照射室内的トリチウムターゲットから中性子は 4π に等方的に放出していると仮定する. すると, 中性子の収量はコリメータの立体角で決定される. トリチウムターゲットから重照射室の大実験室側の壁までの距離は 1.46×10^3 mm, 壁の厚さは 1×10^3 mm である. コリメータの半径を r mm とすると, 立体角は $\pi \times r^2 / (2.46 \times 10^3)^2$ となる.

MAIKo TPC ではトラックの長さと方向からエネルギーと運動量を決定するため, トラック全体を正しく抽出することが必要となり, MAIKo TPC の有感領域内で停止しない α 粒子は解析に用いることができない. ここで, MAIKo TPC の有感領域内で全ての α 粒子が停止する割合を検出効率とする. 検出効率が大きくなるような実験条件が望ましい. 図 1.10 のエネルギー分布, ビームの通る円柱内で一様な散乱点を仮定して, α 粒子の検出効率を求めた.

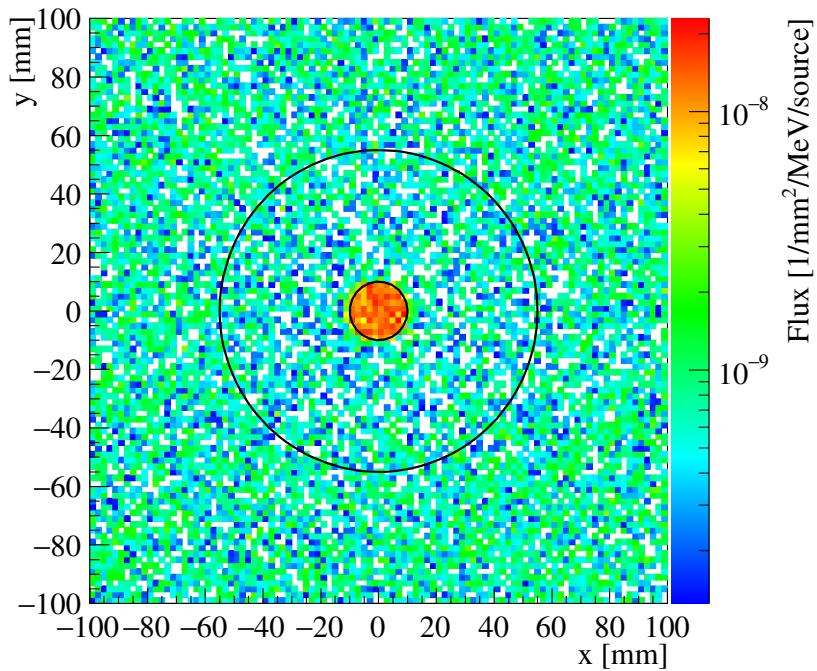
5–50 mm でのコリメータの立体角の割合と検出効率を表 5.1 に示す。検出効率は 10 mm 以下ではあまり変化がない。5 mm と 10 mm を比較すると、立体角は 4 倍 10 mm の方が大きい。大きな検出効率を持ちつつ立体角が大きい 10 mm のコリメータを用いる。

表 5.1: コリメータの半径とコリメータの立体角、検出効率。

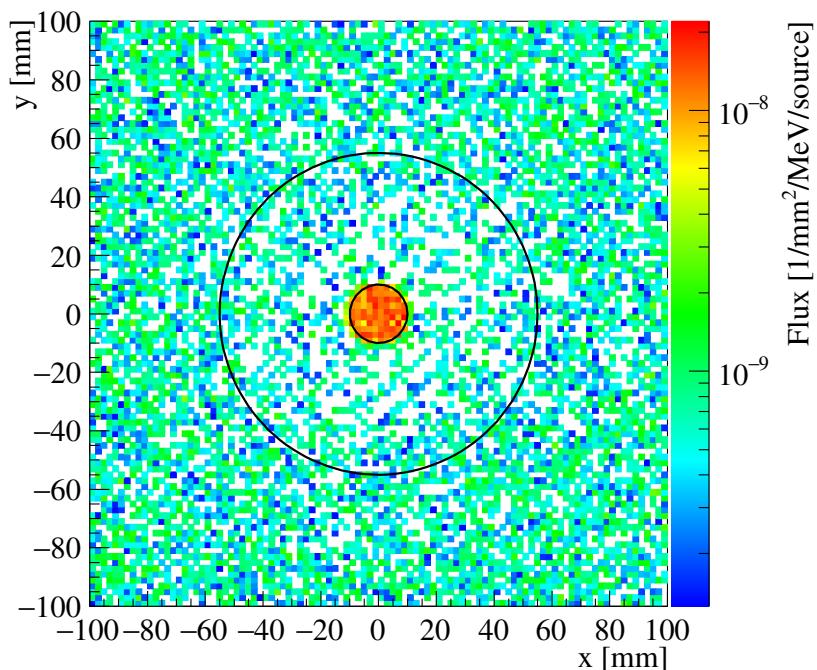
コリメータの半径 (mm)	立体角 (sr)	検出効率 (%)
5	1.30×10^{-5}	48.7
10	5.19×10^{-5}	48.2
20	2.08×10^{-4}	46.6
30	4.67×10^{-4}	39.2
40	8.31×10^{-4}	26.3
50	1.30×10^{-3}	10.3

5.3 コリメータの材質

中性子を遮蔽する材料として、陽子を多く含むポリエチレンや吸収断面積が大きいホウ素が広く用いられている。ポリエチレンとホウ素入りポリエチレンでの中性子の遮蔽度合いを PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) ver. 3.14 [17] を用いて計算した。PHITS は原子力機構が中心となって開発を行っている物質中の放射線の挙動をシミュレートするモンテカルロ計算コードである。PHITS の入力ファイルを付録 C に示す。図 5.2 は 14 MeV の中性子がコリメータを通過したときの位置分布である。2 つの中性子の分布に大きな差異は見られない。図 5.3a, 5.3b はコリメータを通過した後の中性子のエネルギー分布である。青色のヒストグラムは 0–10 mm の範囲の中性子、赤色のヒストグラムは 10–55 mm の範囲の中性子のエネルギー分布である。コリメータの穴の部分に対してポリエチレンまたはホウ素入りポリエチレンの部分は中性子が遮蔽されていることが分かる。ポリエチレンとホウ素入りポリエチレンでは同程度にコリメートできているので、本実験ではコストの面からポリエチレンを用いたコリメータを作成した。実際に作成したコリメータを図 5.4 に示す。このコリメータは半径 55 mm、高さ 100 mm の円柱の中心に半径 10 mm の穴を開けた構造になっている。壁の厚さが 1000 mm であるため、このコリメータ 10 個を中性子の取り出し穴に挿入する。

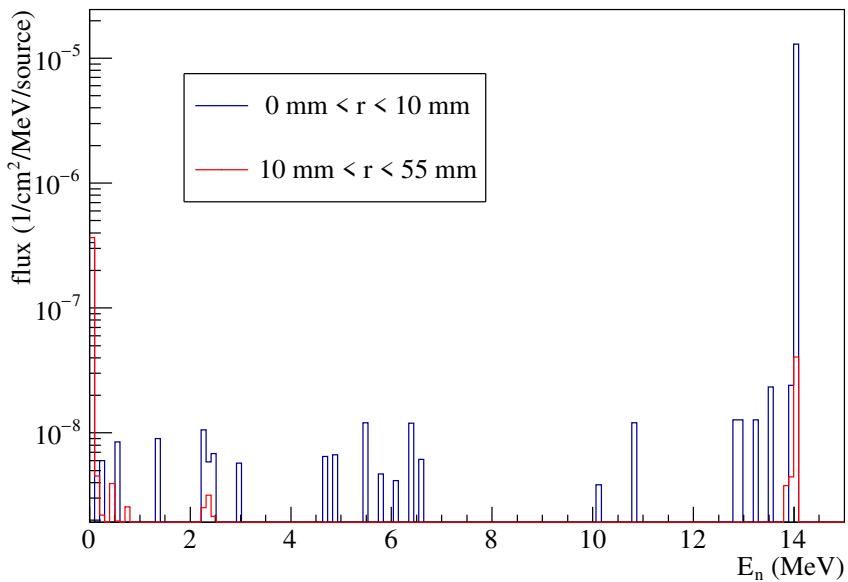


(a) ポリエチレンの場合.

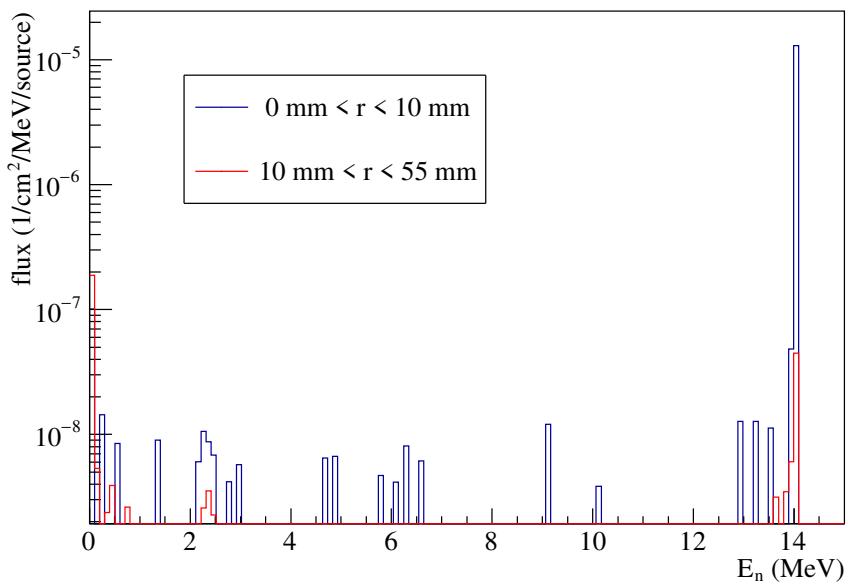


(b) ホウ素入りポリエチレンの場合.

図 5.2: コリメータ通過後の中性子の位置分布. 2つの円はコリメータの穴と外縁を表す.



(a) ポリエチレンコリメータの場合.



(b) ホウ素入りポリエチレンコリメータの場合.

図 5.3: 中性子のエネルギー分布. $0\text{--}10\text{ mm}$ はコリメータの穴の部分,
 $10\text{--}55\text{ mm}$ はコリメータの部分である.



図 5.4: ポリエチレンで作成したコリメータ。

5.4 中性子の収量

PHITSによる計算では0–10 mmの範囲の13.9–14.1 MeVの中性子は 4.07×10^{-5} /MeV/sourceとなる。OKTAVIANのDCビームラインで生成される中性子が 5×10^9 /sであるとすると、コリメータを通過してくる中性子の収量は 4.07×10^4 /sとなる。

第 6 章

iso-C₄H₁₀ (10) + H₂ (9) を用いたとき

本章では検出ガスとして用いる iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) の特性について述べる。

6.1 ドリフトスピード

ドリフトスピードのドリフト電場依存性を調べた。Magboltz でドリフトスピードが 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スピードと Magboltz により求めたドリフトスピードを図 6.1 に示す。線源を用いて測定したドリフトスピードと Magboltz で求めたドリフトスピードがおよそ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スピード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スピードの変化は付録 B で述べる。

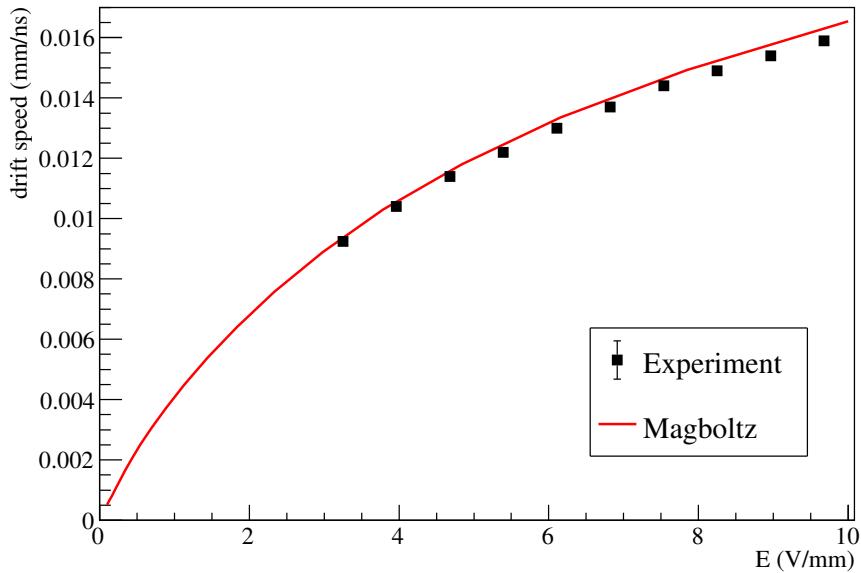


図 6.1: ドリフトスピードの電場依存性. 点は測定したドリフトスピード, 実線は Magboltz で求めたドリフトスピードを示す.

6.2 電子增幅率

電子の增幅率は GEM, μ -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增幅されずに吸収されてしまう. そこで, 電子增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 ΔV_{GEM} , GEM の μ -PIC 側と μ -PIC との電位差を $\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$, μ -PIC の anode 電極の電圧を $V_{\mu\text{-PIC}}$ とする. μ -PIC の cathode 電極は接地されている. 表 6.1 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 6.1 は 3 章でドリフトスピードを測定したときの構成である. 増幅率の測定方法は 3 章で述べた通りである. 本測定では GEM, μ -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 6.1: 基準となる電圧構成.

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

6.2.1 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 [10]. $\Delta V_{\text{grid-GEM}}$ 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 6.2 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. $\Delta V_{\text{grid-GEM}} = 700$ 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.

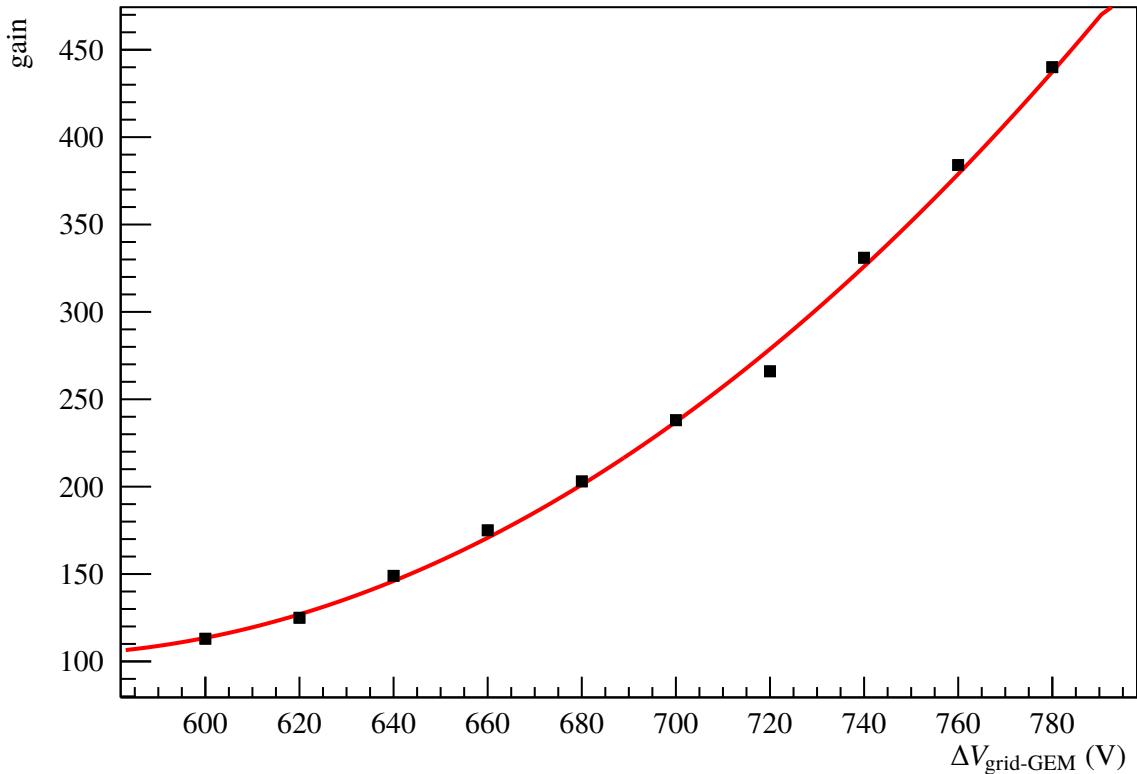
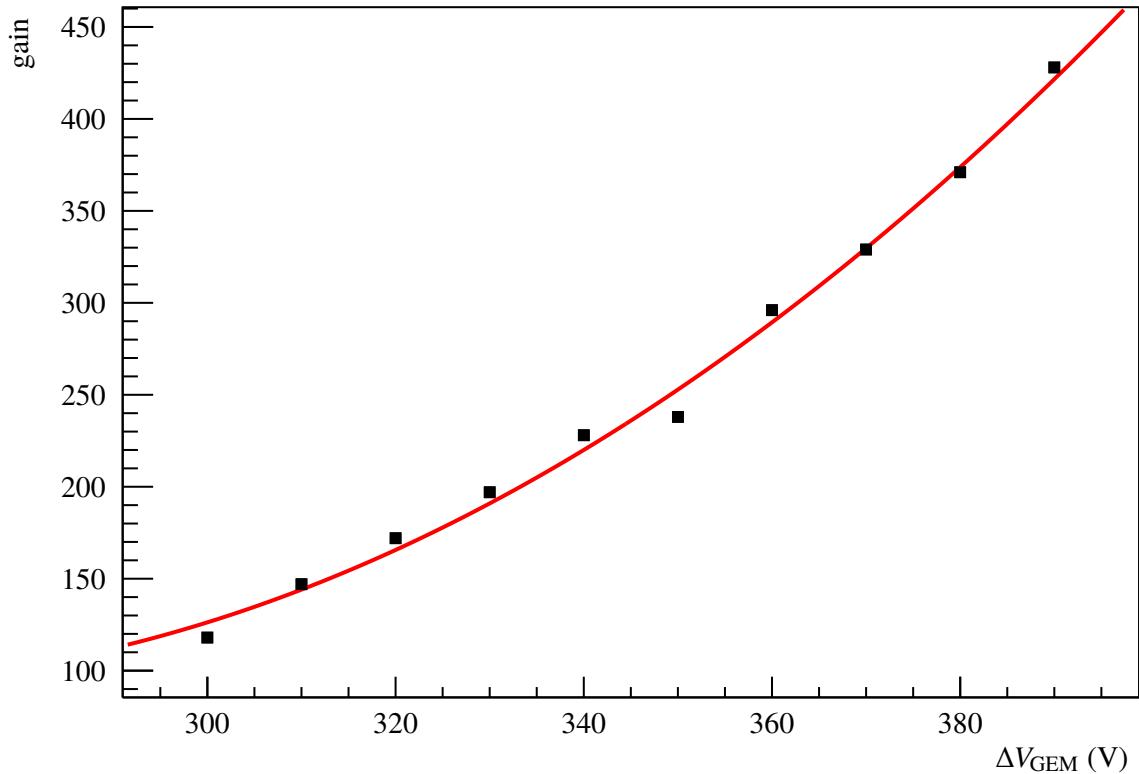


図 6.2: 電子増幅率の $\Delta V_{\text{grid-GEM}}$ 依存性.

6.2.2 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、微細な穴を開けたものである。GEM の各面に電圧をかけることで高電場を形成し、電子のアバランシェ増幅を起こす。 ΔV_{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 ΔV_{GEM} による変化を図 6.3 に示す。増幅率の変化は $gain = 0.0188 \times \Delta V_{\text{GEM}}^2 - 0.67 \times \Delta V_{\text{GEM}} + 1340$ と表すことができる。 ΔV_{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 6.3: 電子増幅率の ΔV_{GEM} 依存性.

6.2.3 GEM と μ -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 μ -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 10 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 6.4 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 μ -PIC に電子が輸送されたと考えられる。

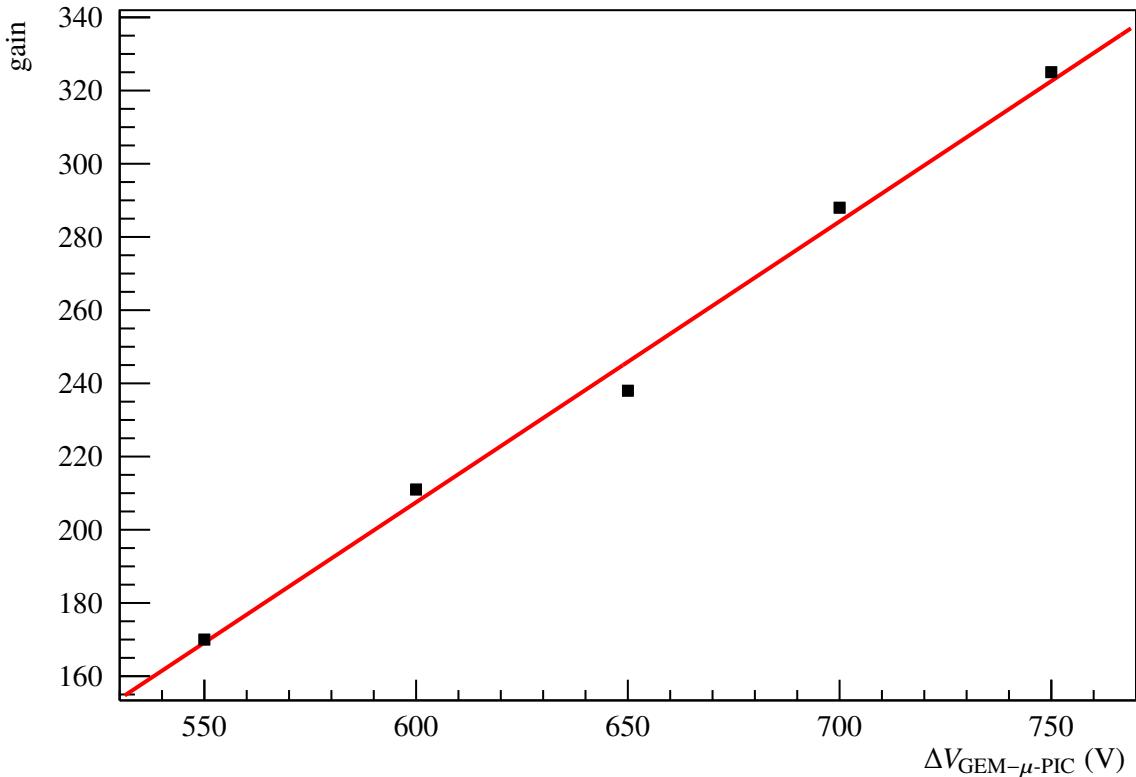
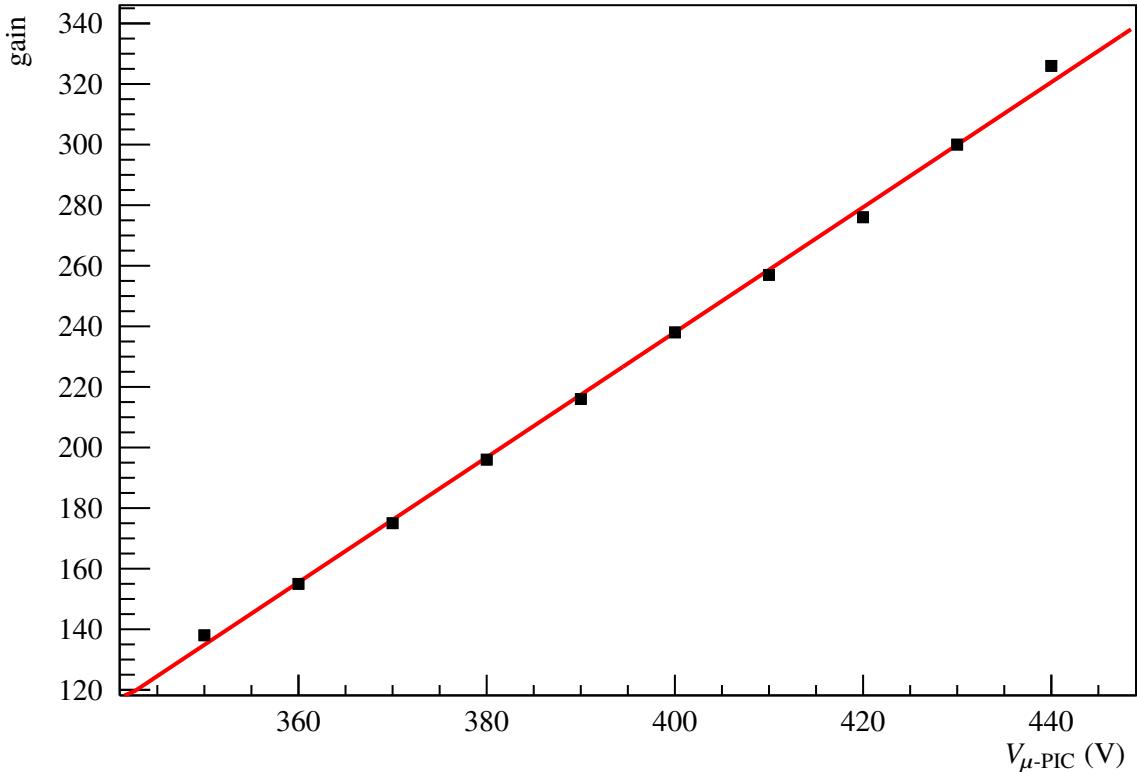


図 6.4: 電子増幅率の $\Delta V_{\text{GEM}-\mu\text{-PIC}}$ 依存性.

6.2.4 μ -PIC による電子増幅率

電子は μ -PIC で読み出される直前に, μ -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 6.5 に示す. 増幅率の変化は $gain = 2.06 \times V_{\mu\text{-PIC}} - 253$ と表すことができる. μ -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 6.5: 電子増幅率の $V_{\mu\text{-PIC}}$ 依存性.

6.3 電子のディフュージョン効果

ドリフトスピードが一定である場合は、電子の拡散は \sqrt{L} に比例する。線源は線源導入機によって、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 [18] で開発された。図 6.6 に線源導入機の先に線源を取り付けた様子を示す。図 6.6 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、track width $\sim \sqrt{L}$ となる。トラックの太さと線源の位置との依存性を図 6.7 に示す。図 6.7 の L は線源コリメータの 0° 穴と grid とのドリフト方向の距離である。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_{width} は $12.700(273) \text{ ns}/\sqrt{\text{mm}}$

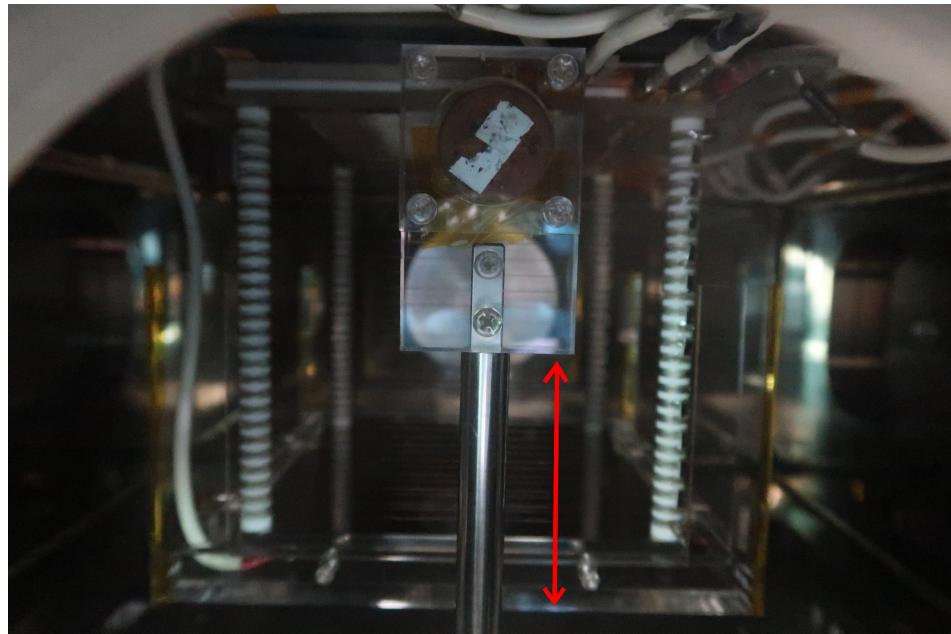


図 6.6: 線源導入機に取り付けたれた線源. 矢印の方向に移動させることができ.

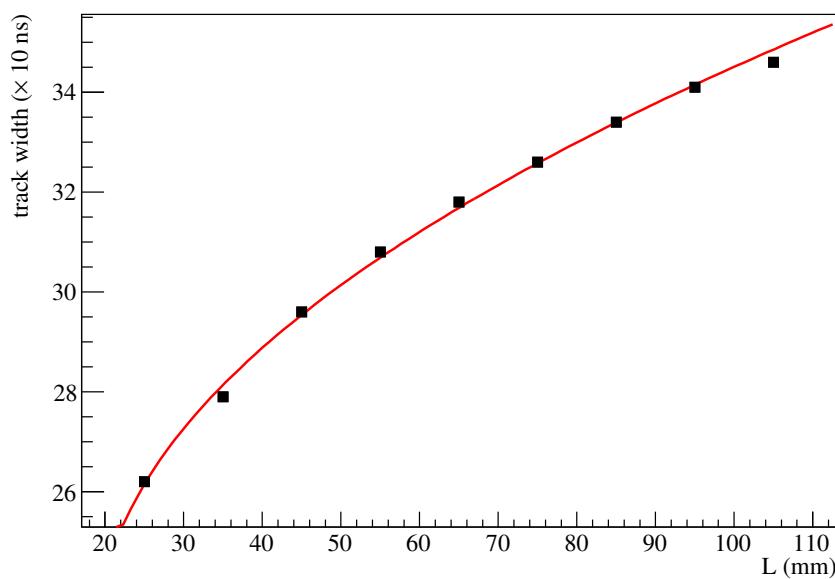


図 6.7: ト ラックの太さの位置依存性.

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_{clk}) として取得される.

y_{clk} を mm 単位 (y_{length}) へ変換するには (6.1) のように, ドリフトスピード v_{drift} (mm/ns) を掛けねば良い.

$$y_{\text{length}} = y_{\text{clk}} \times 10 \times v_{\text{drift}} \quad (6.1)$$

同様に測定より得られた係数 (D_{width}) にドリフトスピードを掛けることで, 長さに変換できる. ドリフトスピード v_{drift} は 1.37×10^{-2} mm/ns なので, $D_{\text{length}} = 0.174\,00(375) \sqrt{\text{mm}}$ となる. Magboltz で得られるディフュージョン係数は $0.144 \sqrt{\text{mm}}$ である. 測定で得られたディフュージョン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 μ -PIC の周囲では一様電場ではない. 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.

6.4 検出効率の散乱位置, 散乱角依存性

測定されたトラックの長さから粒子のエネルギーを決定する. しかし, 散乱点や粒子の運動エネルギー, 角度によっては MAIKo TPC の有感領域から外に出てしまう. 有感領域の外へ出てしまった粒子のトラックの長さは決定することができないので, その粒子の運動エネルギーと運動量を決定できなくなってしまう. 第 5 章で有感領域内で停止する割合(検出効率)を考えた.

散乱点および 3 つの停止点が有感領域にある時に検出可能とすると, 検出効率は 48.2 % であった. 検出効率の散乱点の z 座標依存性を図 6.8 に, ^{12}C の重心系での散乱角依存性を図 6.9 に示す. 図 6.8 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, 崩壊してきた α 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 6.9 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 α 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.

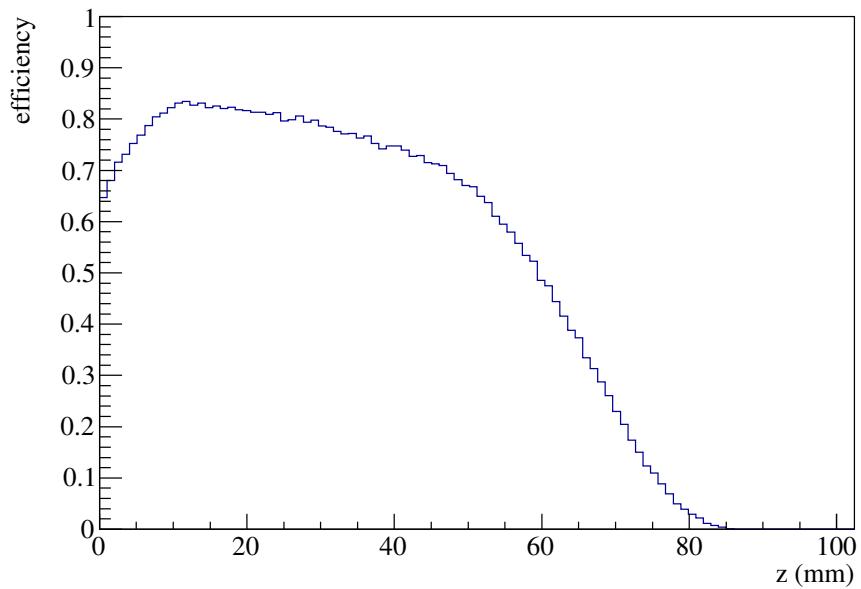
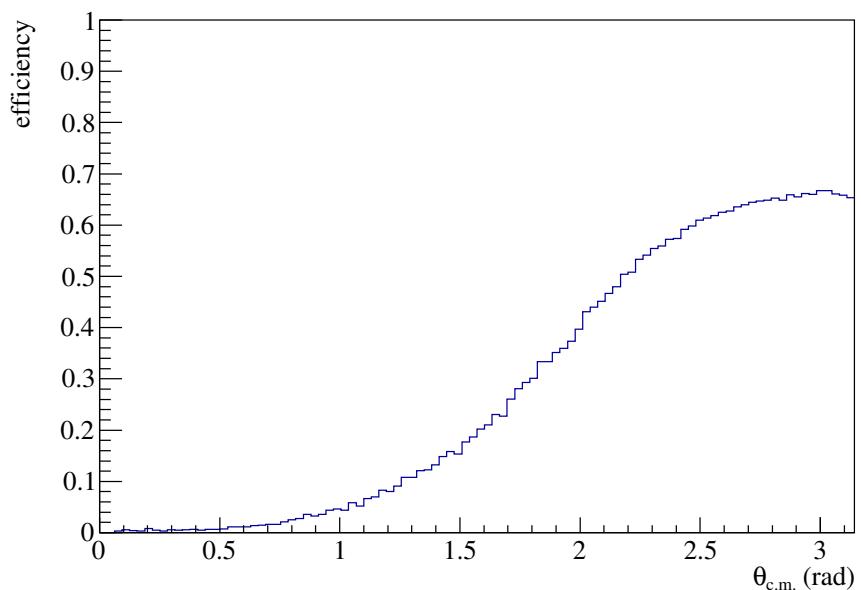
図 6.8: 検出効率の散乱点の z 座標依存性.

図 6.9: 検出効率の重心系での散乱角依存性.

6.5 期待される収量

Ref. [5, 6] によると $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ の断面積 (σ) は 8.36 mb である。OKTAVIAN で現在得られるビーム量 (N_b) は最大で 4π 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 $1.95 \times 10^4/\text{s}$ 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。iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9)(100 hPa) における ^{12}C の面密度 (N_t) は $1.01 \times 10^{17}/\text{mm}^2$ である。この時、 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の収量は

$$\begin{aligned} Y &= N_t \times N_b \times \sigma \times \varepsilon_{\text{det.}} \times \varepsilon_{\text{ana.}} \\ &= 1.01 \times 10^{17}/\text{mm}^2 \times 5 \times 10^9/\text{s} \times 8.36 \text{ mb} \times 48.2\% \times 87\% \\ &= 6.82 \times 10^{-4}/\text{s} \end{aligned} \quad (6.2)$$

となる。24 時間の測定で、収量が 58.9 events と期待される。

第 7 章

まとめと今後の展望

本研究では $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積測定のための実験条件を検討した。 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応において、崩壊してできる α 粒子の持つエネルギーが数百 keV と小さいことが分かった。また、広い角度に放出されることも分かった。そこで、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出される 3 つの低エネルギー α 粒子をすべて検出するために、低エネルギーの荷電粒子を大立体角で検出できる MAIKo TPC を用いて測定を行うことを決定した。最終的には断面積の中性子のエネルギー分布を測定するが、まずははじめに検証実験として単色エネルギーで生成可能な 14 MeV の中性子を用いた測定を行う。そのため、14 MeV の中性子と ^{12}C との反応に主眼をおいて検討を進めた。

MAIKo TPC では α 粒子のエネルギーを取得されたトラックの長さから決定するため、 α 粒子が MAIKo TPC の有感領域で停止する必要となる。しかし、トラックが短くなるとトラックを識別できなくなるため、適当な物質厚が必要となる。そのようなガスとして、 CH_4 (50 hPa), CH_4 (3) + H_2 (7) (100 hPa), CH_4 (4) + He (6) (100 hPa), $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (9) (100 hPa), $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + He (9) (100 hPa) の 5 種類を検出ガスの候補とした。検出ガスの種類によっては電子のディフュージョン効果が大きく、荷電粒子のトラックが太く検出される。太いトラックでは 3 つの α 粒子を正しく識別できないため、ディフュージョンの効果が小さいことが求められる。ディフュージョンの効果において、 CH_4 (3) + H_2 (7) と $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (9) が有力であることが分かった。また、実際の測定で取得されるであろうトラックをシミュレーションにより生成し、実際に解析を行うことで検出ガスの評価を行った。評価の結果、 CH_4 (3) + H_2 (7) と $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (9) では大きな優劣の差は見られなかった。そこで、体積当たりの ^{12}C の含有量の多い $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (9) を検出ガスとして決定した。

$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (9) を検出ガスに用いることで、 ^{12}C の励起状態を識別するのに十分

な分解能を達成できることができることが分かった。また、検出器中で3つの α 粒子が停止する割合は48.2%，それらのイベントから正しく α 粒子のトラックを抽出できる割合は87%であることが分かった。これらを考慮して， $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の収量を見積もると，24時間で58.9 eventsであると期待される。

2/25–28の4日間でOKTAVIANで測定を行う予定である。本研究で決定した検出ガスを用いて測定を行う。

謝辞

付録 A

中性子検出器

A.1 液体シンチレータ

$^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積の測定には MAIKo TPC に入射した中性子の数を測定する必要がある。中性子は電荷をもっておらず検出器中でエネルギーを落とさないため、直接検出することができない。そのため、中性子と散乱した検出器中の陽子を検出することによって間接的に中性子を検出する。より効率的に中性子と陽子が散乱するように、中性子検出器には水素が多く含まれる有機シンチレータが用いられる。OKTAVIAN での測定では NE213/BC501 液体シンチレータを用いる。図 A.1 に中性子検出器の模式図を示す。液体シンチレータの有感体積は、直径 200 mm, 厚さ 50 mm の円柱である。容器はアルミニウム製であり、シンチレーション光の反射率を高めるために酸化マグネシウムで容器の内側はコーティングされている。シンチレーション光は光電子増倍管で電気信号に変換されて読み出される。

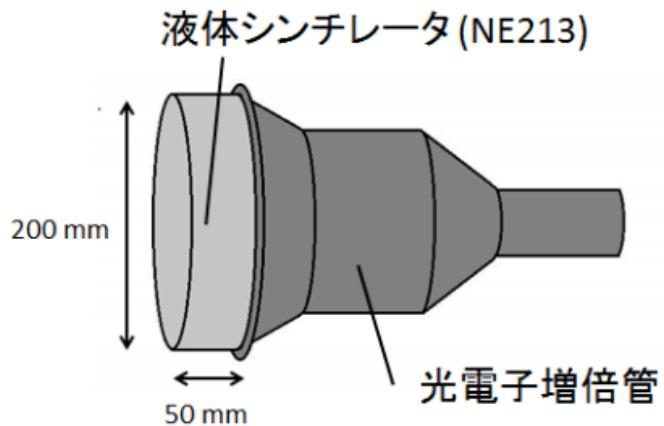


図 A.1: 中性子検出器の模式図.

A.2 n - γ 弁別

液体シンチレータを用いた測定では中性子だけでなく背景 γ 線も検出される。そのため、中性子と γ 線の識別が必要となる。中性子と γ 線では液体シンチレータの発光の波形が異なることが知られている。図 A.2 に中性子と γ 線の波形の違いの模式図を示す。中性子の方がテールが長く引いた波形となる。図 A.2 に示すように、波形全体を覆う区間 (region 1) とテール部分を覆う区間 (region 2) の 2 つの積分区間を用いて波形を積分することで、中性子と γ 線とを区別する。

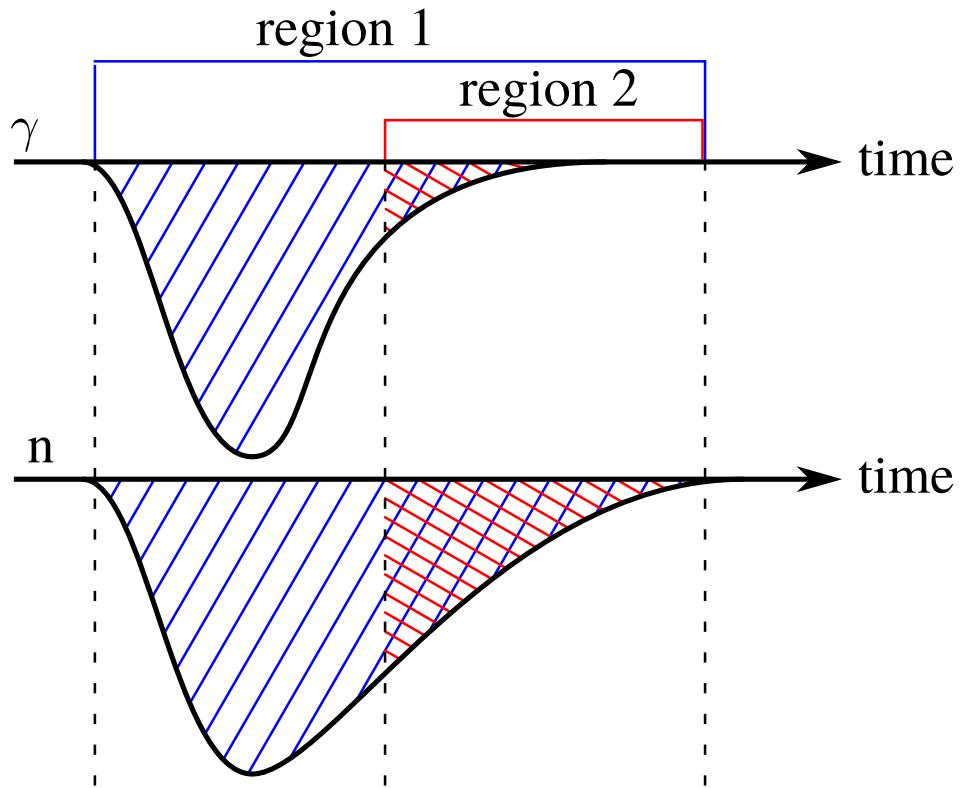


図 A.2: 液体シンチレータから得られる中性子および γ 線の波形の違いと 2 つの積分区間. 全体を覆う区間 (region 1) とテール部分を覆う区間 (region 2) とにより波形を識別する.

中性子検出器から得られる信号は CAEN V1742 を用いて取得した. CAEN V1742 は入力信号の波形をそのまま取得することができるモジュールである. 信号の取得周波数は 5 GHz から 750 MHz である. CAEN V1742 で取得した波形の 1 例を図 A.3 に示す. 図 A.3 は AmBe 中性子線源を用いて測定をした. 取得周波数は 5 GHz である.

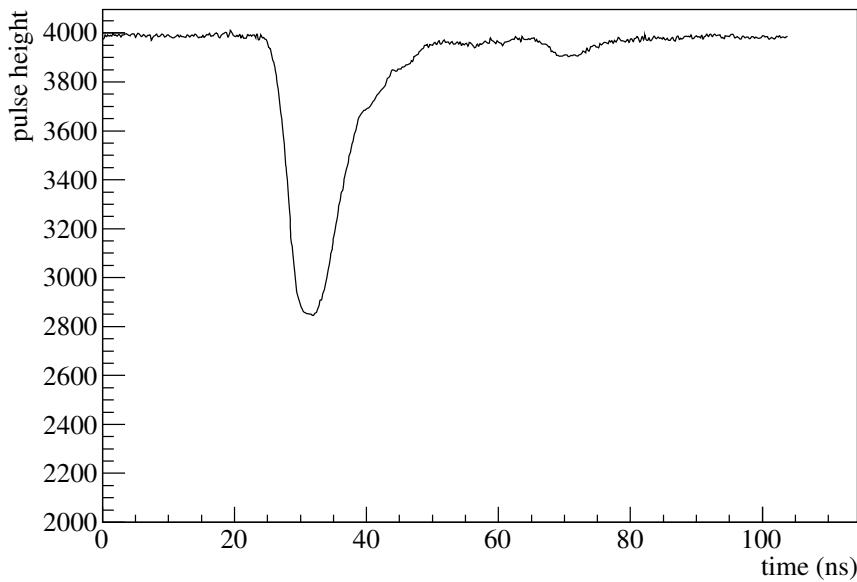


図 A.3: V1742 で取得した波形の 1 例.

V1742 によって取得した波形のピーク位置に対して $-15\text{--}45\text{ ns}$ (region 1) と $10\text{--}45\text{ ns}$ (region 2) の 2 つの区間で波形を積分した。AmBe 中性子線源で取得した region 1 と region 2 の相関を図 A.4 に示す。図 A.4 中、上が中性子、下が γ 線である。中性子の中心となる位置を直線近似し(図 A.4 中の赤線)、region 2 との差分を取ったものが図 A.5 である。図 A.5において、中性子側のピーク(0付近のピーク)をガウス分布でフィットすることで中性子の検出数を決定する。

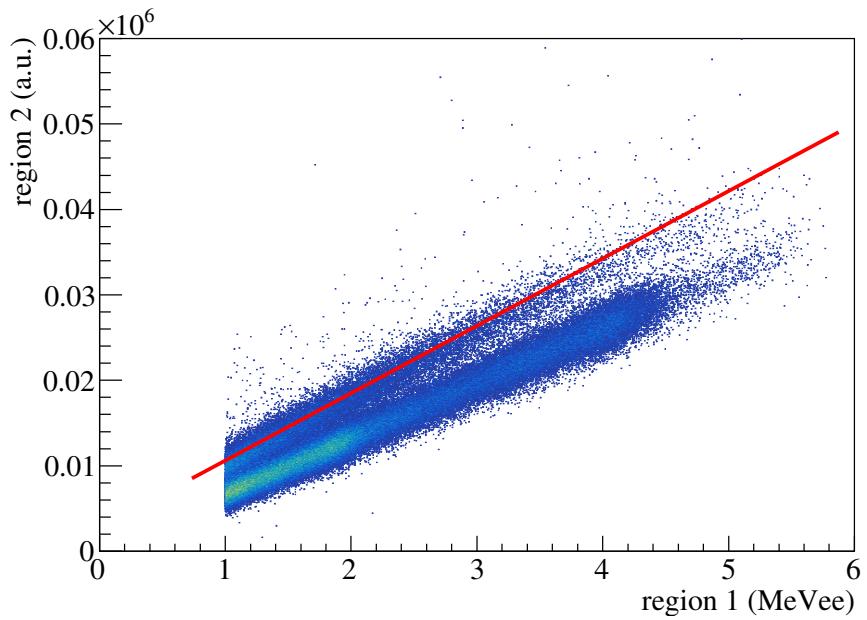


図 A.4: region 1 と region 2 と 2 つの区間での積分値の相関. AmBe 中性子線源を用いて測定した. 1 MeVee 以下は取り除いた. また, 信号が V1742 のダイナミックレンジを超えたものは取り除いた.

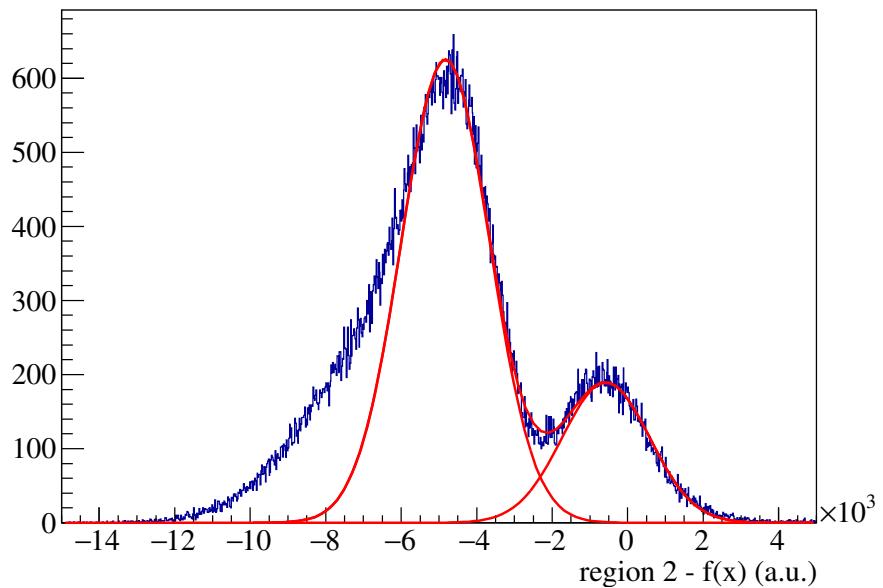


図 A.5: region 2 と中性子の近似直線との差分.

A.3 SCINFUL-CG による中性子の検出効率

検出器中に入射した中性子が陽子と反応しない場合は検出されない。そのため、検出器に入射した中性子の絶対数を求めるためには検出効率が必要である。液体シンチレータの検出効率 SCINFUL-CG [19] を用いる。SCINFUL-CG は任意形状の中性子用シンチレータに対する応答関数を計算するコードである。中性子の検出効率は発光量の閾値により変化する。図 A.6 に閾値が 0.5, 1.0, 1.5 MeV のときの検出効率を示す。ここでは単色の中性子が入射しているとして計算した。図 A.6 から分かるように閾値を高くすると検出効率が低下する。また、高エネルギーの中性子ほど検出効率が低下する。

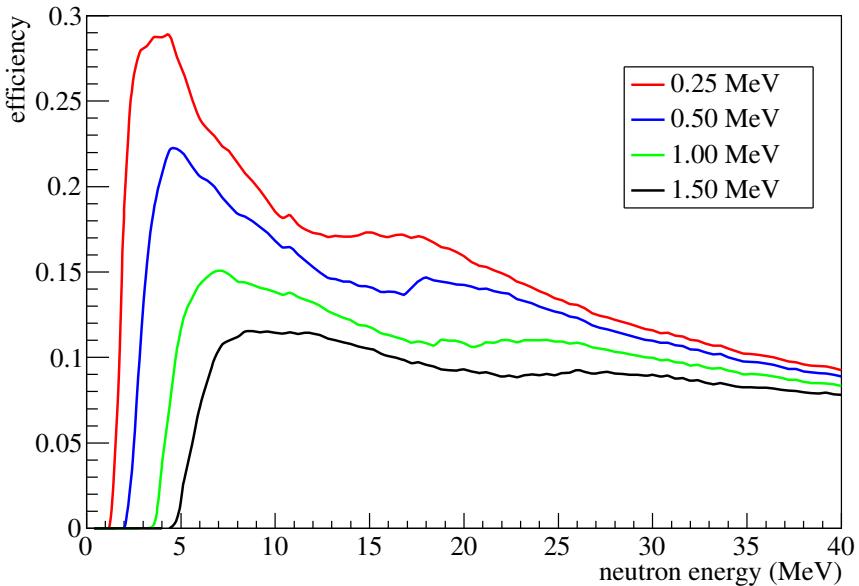


図 A.6: SCINFUL-CG で求めた中性子の検出効率。閾値が高いほど、中性子のエネルギーが大きいほど検出効率は小さくなる。

中性子検出器で測定した中性子数 (N_{detect}) を SCINFUL-CG で求めた検出効率 (ε) で式 A.1 のように補正することで、実際に入射した中性子数 (N_{in}) を求めることができる。

$$N_{\text{in}} = \frac{N_{\text{detect}}}{\varepsilon} \quad (\text{A.1})$$

実際の測定で用いる 14 MeV の単色中性子に対する検出効率は表 A.1 の通りとなる。

表 A.1: 14 MeV の単色中性子に対する検出効率.

閾値 (MeV)	検出効率
0.25	0.171
0.50	0.144
1.00	0.122
1.50	0.108

付録 B

ドリフトスピード

B.1 水分のドリフトスピードへの影響

本研究では用いた検出ガスは低圧であるため、水分などの不純物からの影響が大きいと考えられる。そこで、チャンバー中の水分をモニターしながらドリフトスピードの変化を測定した。水分は露点計で測定した。露点温度と水分濃度と蒸気密度の対応を表 B.1 に示す。露点温度は水が凝結を始める温度であるので、高いほど含まれる水分が多いことを示す。測定には本文で検討した 5 種類の検出ガスのうち CH_4 を用いた。これは、候補とした検出ガスのうち最も圧力が低く、堆積あたりの分子数が少ないので、不純物による影響が現れやすいと考えたためである。この測定での各部の電圧は表 B.2 の通りである。測定時は、検出ガスに入れるために可能な限り検出器中の水分を取るために、半日ほど真空ポンプで真空引きを行った。

表 B.1: 露点温度と水分濃度と蒸気密度の対応. ppm は parts per million の略であり, 10,000 ppm = 1 % となる.

露点温度 °C	水分濃度 (ppm)	蒸気密度 g/m ³
-80	0.540	0.000613
-70	2.581	0.00279
-60	10.67	0.0109
-50	38.84	0.0382
-40	126.7	0.1199
-30	375.0	0.339
-20	1019	0.884
-10	2565	2.14
0	6032	4.85

表 B.2: 測定で用いた電圧の構成.

電位差 (V)	
$\Delta V_{\text{plate-grid}}$	80
$\Delta V_{\text{grid-GEM}}$	710
ΔV_{GEM}	410
$\Delta V_{\text{GEM-}\mu\text{-PIC}}$	325
$V_{\mu\text{-PIC}}$	175

時間経過によって, MAIKo TPCを入れているチャンバー表面に吸着されていた水分が検出ガス中に放出される. それによって, 検出ガスの露点温度が上昇する. また, 露点温度の上昇に伴ってドリフトスピードが減少する. 露点温度とドリフトスピードの時間経過を図 B.1 に示す. 表 B.2 に示したドリフト電場のとき, Magboltz によるドリフトスピードは 0.0208 mm/ns である. また, 露点温度とドリフトスピードの相関を図 B.2 に示す.

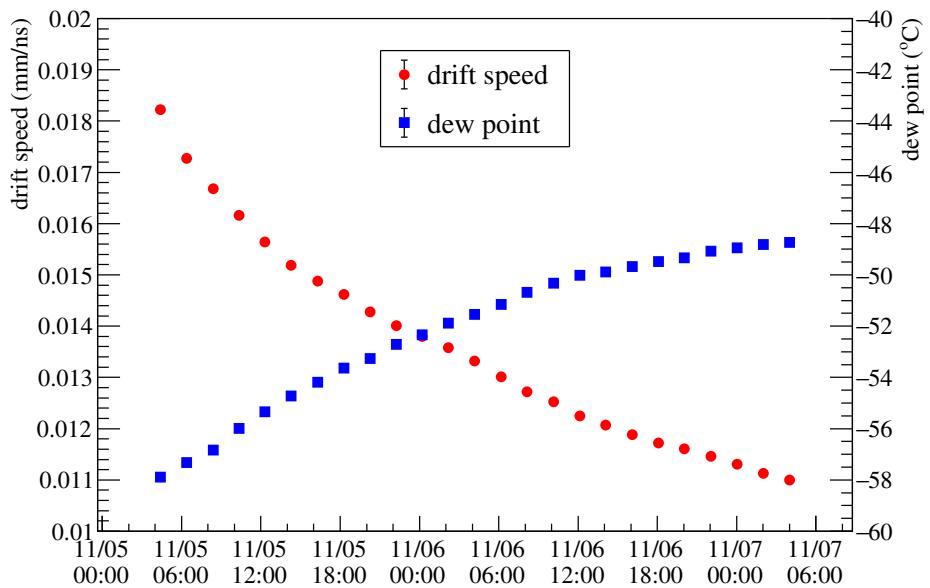


図 B.1: ドリフトスピードと露点温度の時間変化. 横軸は日時を表す.

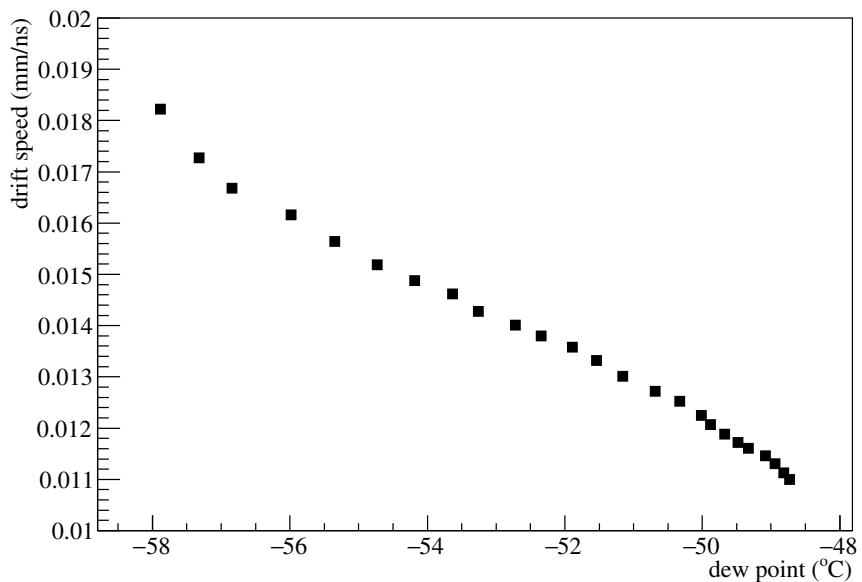


図 B.2: ドリフトスピードの露点温度依存性.

B.2 ガスフローによるガス中の水分の変化

前節で述べたように時間経過とともにチェンバー表面から水分が放出される。検出ガスをフローさせて測定、この影響を低減を試みた。図 B.3 に示すように、チェンバーにガスの入口と出口を付け、ガスが長時間チェンバー中に留まらないようにした。図 B.3 中の“MFC”, “PV”, “MV”, “FM”, “SP”はそれぞれ、マスフローコントローラ、ピエゾバルブ、メータリングバルブ、フローメータ、スクロールポンプを表す。ピエゾバルブとメータリングバルブで検出ガスの流量を調整してスクロールポンプで引くことで、チェンバー内の圧力を一定に保ったまま検出ガスを循環させた。図 B.4 にドリフトスピードと露点温度の時間経過を示す。点線より右側では検出ガスを循環させて、左側では循環させずに測定した。検出ガスを循環させることで露点温度、ドリフトスピードともに変化が小さいことが分かる。

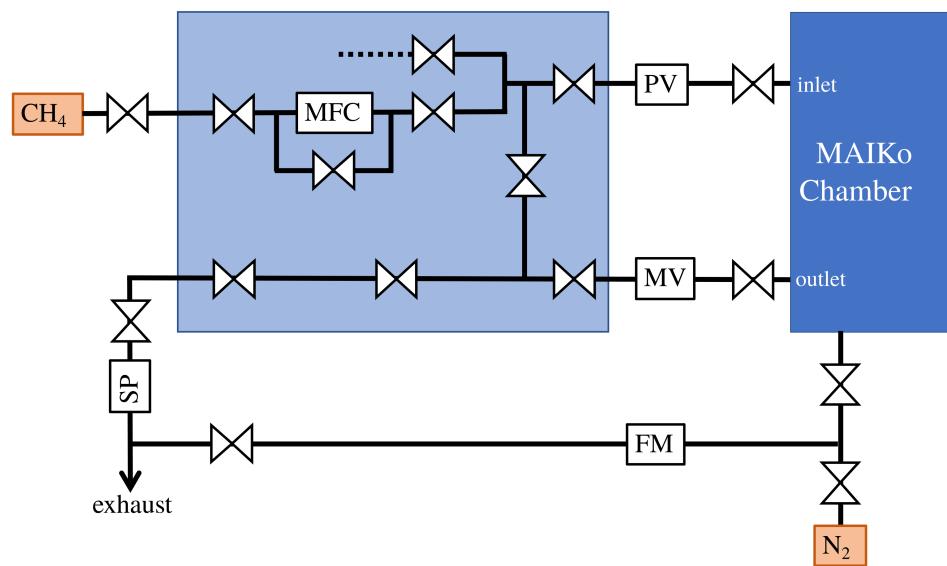


図 B.3: ガス配管の概観図。

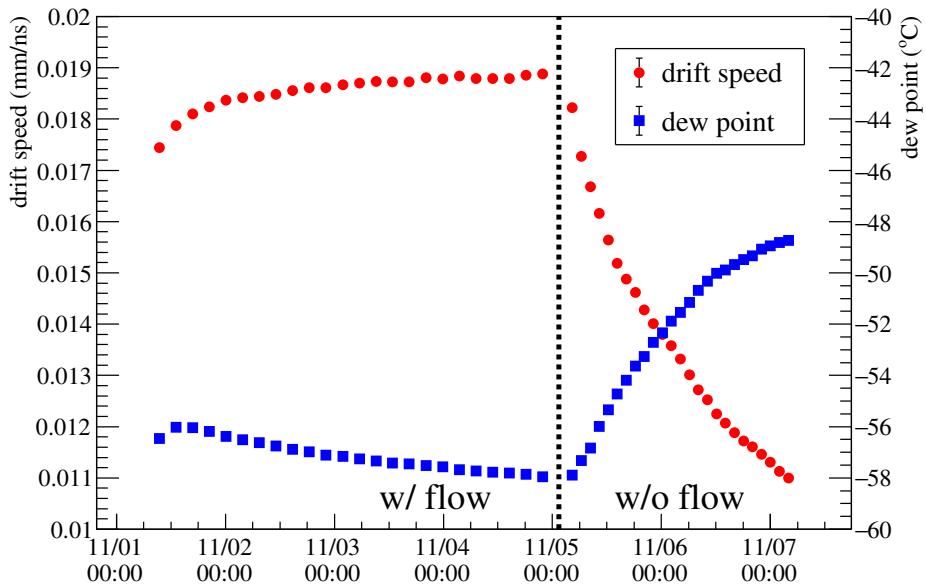


図 B.4: ドリフトスピードと露点温度の時間経過.

連続した測定で検出ガスの循環の有無で露点温度とドリフトスピードの変化の違いが分かった。このことより、チャンバー表面から多くの水分が検出ガスに放出されていることが確認された。また、ドリフトスピードが Magboltz で求めた値より小さくなる主な原因が検出ガス中に含まれる水分であることが分かった。この影響を抑える方法として、今回行ったガスを循環させる方法が有効である。他の方法として、チャンバー中の水分を長時間に渡ってポンプで引くことで、チャンバー表面の水分量を減らすことも有効であると考えられる。さらに、この 2 つの方法のどちらも行うことで、低い露点温度で安定して測定を行うことができると考える。

付録 C

PHITS のインプットファイル

PHITS のインプットファイルを以下に示す。ポリエチレンのコリメータの場合のシミュレーションである。

```
[ T i t l e ]
simulation for neutron collimator

[ P a r a m e t e r s ]
icntl    = 0
itall    = 1
maxcas   = 5000000
maxbch   = 50
file(6)  = phits.out

[ S o u r c e ]
s-type   = 1
proj     = neutron
dir      = all
r0       = 0.
z0       = -146.4
z1       = -146.4
e0       = 14.

[ M a t e r i a l ]
mat[1] $ Air
N 8 O 2
mat[2] $ Polyethylene
C 2 H 4
mat[3] $ Concrete
O -0.52 Si -0.325 Ca -0.06
```

```
Na -0.015 Fe -0.04 Al -0.04
mat[4] $ Acrylic
    C 5 O 2 H 8
mat[5] $ Methane
    C 1 H 4

[ S u r f a c e ]
$ colimator
    100    cz    5.5
    101    cz    1.
    102    pz    0.
    103    pz   100.
$ wall
    104    rpp   -100. 100. -100. 100. 0. 100.
$ frange
    110    cz    5.5
    111    pz   102.
    112    pz   104.
$ detector
    120    pz   110.
$ room
    200    rpp   -100. 100. -100. 100. -200. 300.

[ C e l l ]
$ collimator
    100    2    -0.9   -100 +101 +102 -103
$ wall
    200    3    -2.5     -104 +100
$ frange
    300    4    -1.18   -110 +111 -112
$ detector
    400    5    -0.000717 -110 +112 -120
$ room
    1000   1    -0.0012   -200 #100 #200 #300 #400
$ void
    2000   -1           +200

[ T - C r o s s ]
    title = Energy distribution in r-z mesh (front)
    mesh = r-z
    r-type = 1
    nr = 3
        0. 1. 5.5 10
```

```
z-type = 1
nz = 0
102.
e-type = 2
ne = 150
emin = 0.
emax = 15.
unit = 2
axis = eng
file = cross_eng_f.out
output = f-curr
part = all neutron
gshow = 1
epsout = 1

[ T - C r o s s ]
title = Energy distribution in r-z mesh (rear)
mesh = r-z
r-type = 1
nr = 2
0. 1. 5.5
z-type = 1
nz = 0
104.
e-type = 1
ne = 3
0. 13.5 14.5 20.
unit = 2
axis = eng
file = cross_eng_r.out
output = f-curr
part = all neutron
gshow = 1
epsout = 1

[ T - C r o s s ]
title = Posision distribution in xyz mesh (front)
mesh = xyz
x-type = 2
nx = 100
xmin = -10.
xmax = 10.
y-type = 2
```

```
      ny =    100
      ymin = -10.
      ymax =  10.
      z-type = 1
      nz =    0
                  102.
      e-type = 2
      ne =    1
      emin =  0.
      emax = 20.
      unit =   1
      axis =  xy
      file = cross_xy_f.out
      output = f-curr
      part = all neutron
      gshow = 1
      epsout = 1

[ T - C r o s s ]
      title = Posision distribution in xyz mesh (rear)
      mesh = xyz
      x-type = 2
      nx =    100
      xmin = -10.
      xmax =  10.
      y-type = 2
      ny =    100
      ymin = -10.
      ymax =  10.
      z-type = 1
      nz =    0
                  104.
      e-type = 2
      ne =    1
      emin =  0.
      emax = 20.
      unit =   1
      axis =  xy
      file = cross_xy_r.out
      output = f-curr
      part = all neutron
      gshow = 1
      epsout = 1
```

```
[ T - 3 D s h o w ]
    output = 3
material = 4
    2 3 4 5
    x0 = 0.
    y0 = 0.
    z0 = 0.
    e-the = 40.
    e-phi = 45.
    e-dst = 500.
    l-the = 150.
    l-phi = 30.
    l-dst = 80.
    w-wdt = 80.
    w-hgt = 100.
    w-dst = 300.
heaven = x
    line = 2
shadow = 2
    resol = 2
    file = 3dshow.out
    title = Check geometry
    epsout = 1
```

[Mat Name Color]

mat	name	color
1	Air	pastelblue
2	Polyethylene	red#yellow
3	Concrete	camel
4	Acrylic	blue

[E n d]

参考文献

- [1] F. Hoyle: *Astrophysical Journal Supplement* **1** (1954) 121.
- [2] M. Beard, S. M. Austin, and R. Cyburt: *Physical Review Letters* **119** (2017) 1.
- [3] A. Koning, S. Hilaire, and M. Duijvestijn: In O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jaccqmin, and S. Leray (eds), *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, 01 2007, pp. 211–214.
- [4] ITER 計画. www.fusion.qst.go.jp/ITER/index.html (available: 2020/1/3).
- [5] A. Takahashi, E. Ichimura, Y. Sasaki, and H. Sugemoto: *Journal of Nuclear Science and Technology* **25** (1988) 215.
- [6] K. Kondo, I. Murata, K. Ochiai, N. Kubota, H. Miyamaru, C. Konno, and T. Nishitani: *Journal of Nuclear Science and Technology* **45** (2008) 103.
- [7] オクタビアン(OKTAVIAN)の紹介. www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeqr/seeqr/facility.html (available: 2020/1/3).
- [8] T. Furuno, T. Kawabata, H. J. Ong, S. Adachi, Y. Ayyad, T. Baba, Y. Fujikawa, T. Hashimoto, K. Inaba, Y. Ishii, S. Kabuki, H. Kubo, Y. Matsuda, Y. Matsuoka, T. Mizumoto, T. Morimoto, M. Murata, T. Sawano, T. Suzuki, A. Takada, J. Tanaka, I. Tanihata, T. Tanimori, D. T. Tran, M. Tsumura, and H. D. Watanabe: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **908** (2018) 215.
- [9] A. Ochi, T. Nagayoshi, S. Koishi, T. Tanimori, T. Nagae, and M. Nakamura: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **471** (2001) 264.
- [10] 古野達也: Master's Thesis, 京都大学 (2013).
- [11] C. Altunbas, M. Capéans, K. Dehmelt, J. Ehlers, J. Friedrich, I. Konorov, A. Gandi, S. Kappler, B. Ketzer, R. De Oliveira, S. Paul, A. Placci, L. Ropelewski, F. Sauli,

- F. Simon, and M. Van Stenis: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **490** (2002) 177.
- [12] S. Biagi. Magboltz. <https://habboltz.web.cern.ch/> (available: 2020/1/3).
- [13] W. Binks: Acta Radiologica **41** (1954) 85.
- [14] C. Patrignani et al.: Chinese Physics C **40** (2016).
- [15] K. Baraka, A. Folkestad, E. Frolov, K. Heijhoff, P. M. Vila, J. Mott, D. Pfeiffer, J. Renner, H. Chindler, A. Sheharyar, N. Shiell, R. Veenhof, and K. Zenker. Garfield++. <https://garfieldpp.web.cern.ch/> (available: 2020/1/3).
- [16] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, and J. P. Biersack: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **268** (2010) 1818.
- [17] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Ichiro Abe, T. Kai, P. E. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, and K. Niita: Journal of Nuclear Science and Technology **55** (2018) 684.
- [18] 森本貴博: Master's Thesis, 京都大学 (2016).
- [19] 遠藤章, E. Kim, and 山口恭弘: JAERI-Data/Code 2001-027 (2001).