

第 1 章

MAIKo TPC

1.1 MAIKo TPC とは

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 1.1 に TPC でトラックを検出するイメージを示す。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 1.1 中上向き) により読み出し面にドリフトさせる。読み出し面に電子が到達した時間を記録し、記録された時間差からドリフト方向の距離を測定する。2 次元平面でドリフトしてきた電子を読み出すことで、3 次的にトラックを検出できる。

TPC の有感領域中で入射粒子と標的粒子が散乱することで、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可能となる。図 1.2 は検出器中で入射中性子と ^{12}C との散乱によって、3 つの α 粒子が放出されたイベント表す。有感領域中で散乱することで、3 つの α 粒子を全て検出できる。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 として我々は MAIKo TPC を開発した。MAIKo TPC, は検出ガスを封入するチェンバー (MAIKo チェンバー) 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 1.3 に、MAIKo チェンバーを図 1.4 に示す。ドリフトケージは MAIKo チェンバー内に設置して用いる。

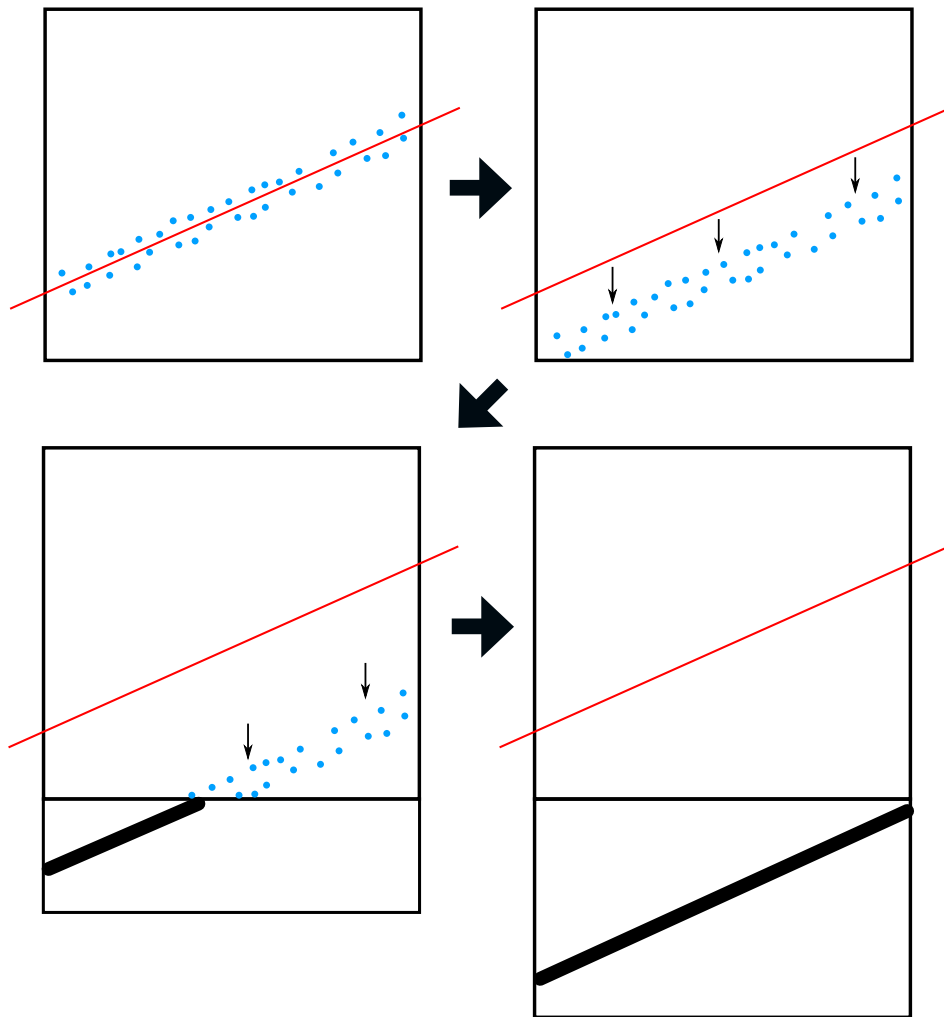


図 1.1: TPC でトラックを検出するときのイメージ. 赤い実線は荷電粒子のトラック, 青い点はイオン化で生成された電子, 黒く太い実線は検出されたトラックを表す.

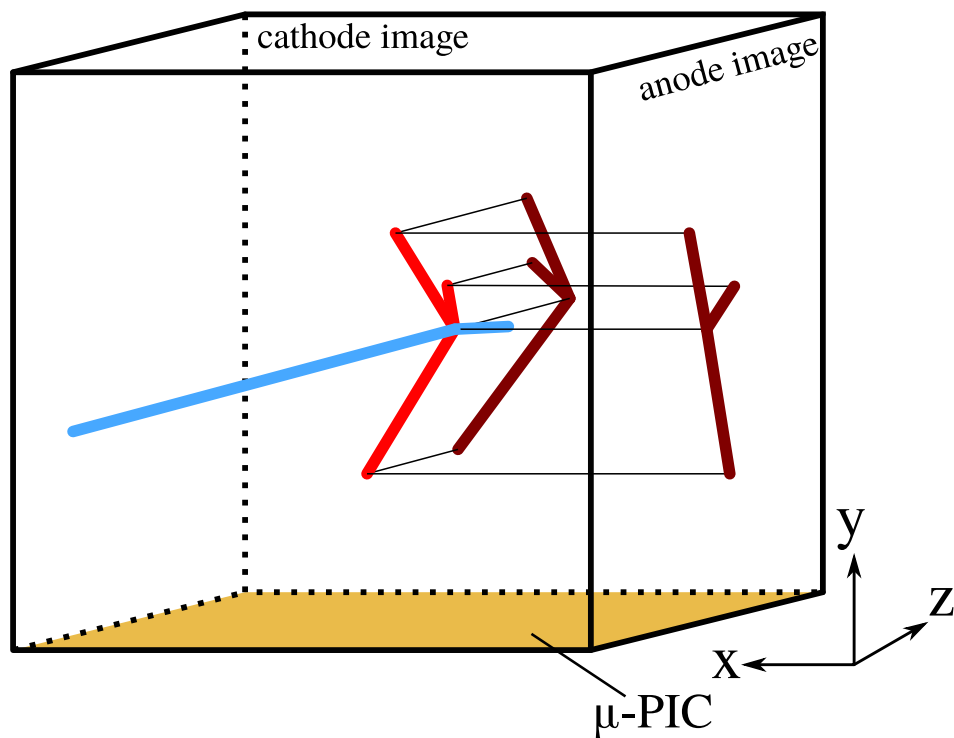


図 1.2: MAIKo TPC の概観図. 図では紙面手前から入射した中性子 (青) が TPC 中の ^{12}C と散乱して 3 つの α 粒子 (赤) に崩壊した事象を表す. anode image (zy 平面) と cathode image (xy 平面) の 2 平面に荷電粒子のトラックが射影される. 中性子は電荷を持たないため anode, cathode image にトラックとして検出されない.

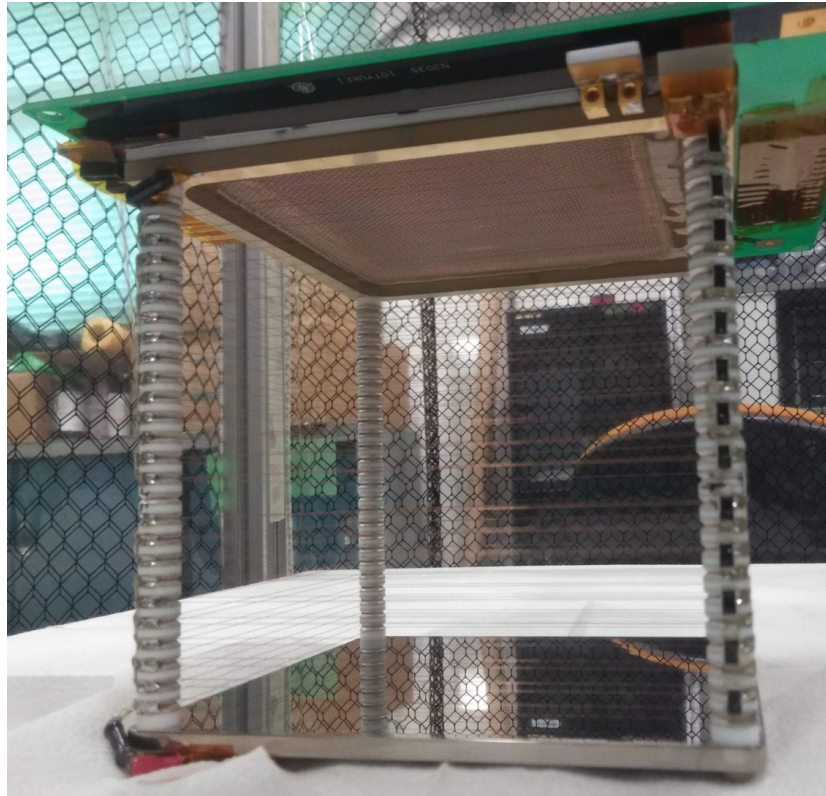
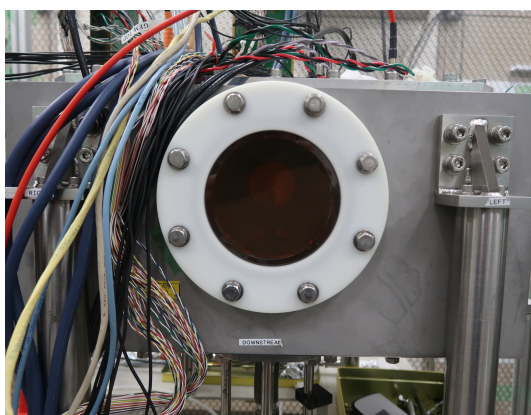
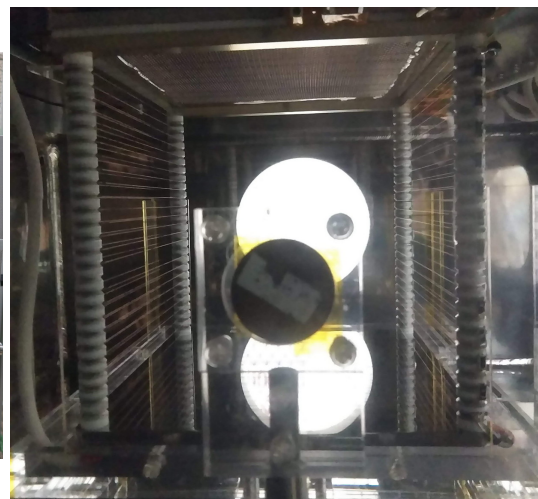


図 1.3: ドリフトケージの概観. 図 1.2 の模式図とはドリフト方向が上下が反転している.



(a) 外側.



(b) 内側.

図 1.4: MAIKo チェンバー.

図 1.5 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, grid 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。ドリフト領域は y 軸方向に 140 mm であり, 読み出し面の大きさが $102.4\text{ mm} \times 102.4\text{ mm}$ であるので, 有感領域の大きさは $102.4\text{ mm} \times 102.4\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ となる。

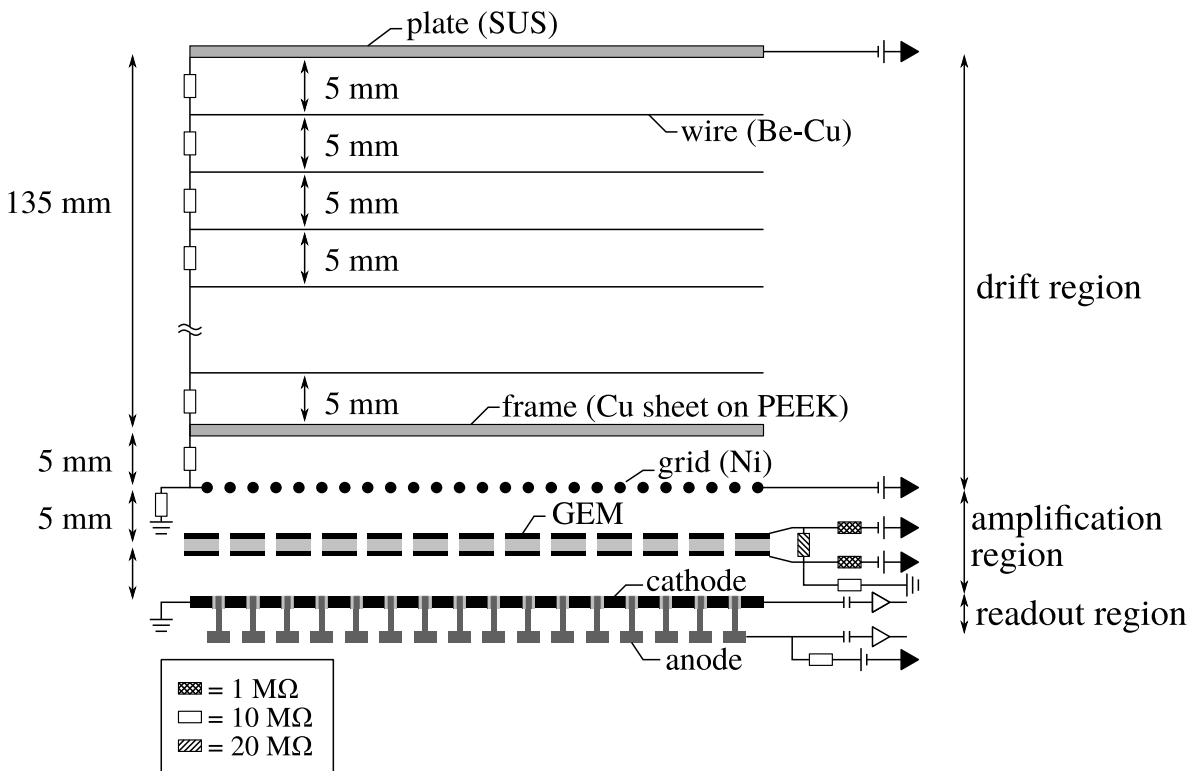


図 1.5: ドリフトケージの構造。

1.1.1 ドリフト領域

grid から plate の方向 (図 1.5 では上向き) にドリフト電場を作ることによってトラックの周囲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。均等にドリフトしない場合, 正しくトラックを検出することができなくなってしまう。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 [?].

1.1.2 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 1.6 のようにポリマーのフィルムの表面を銅で被覆し、直径 $70\mu\text{m}$ の穴を $140\mu\text{m}$ 間隔で 1mm^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穴を通過する際に増幅される．

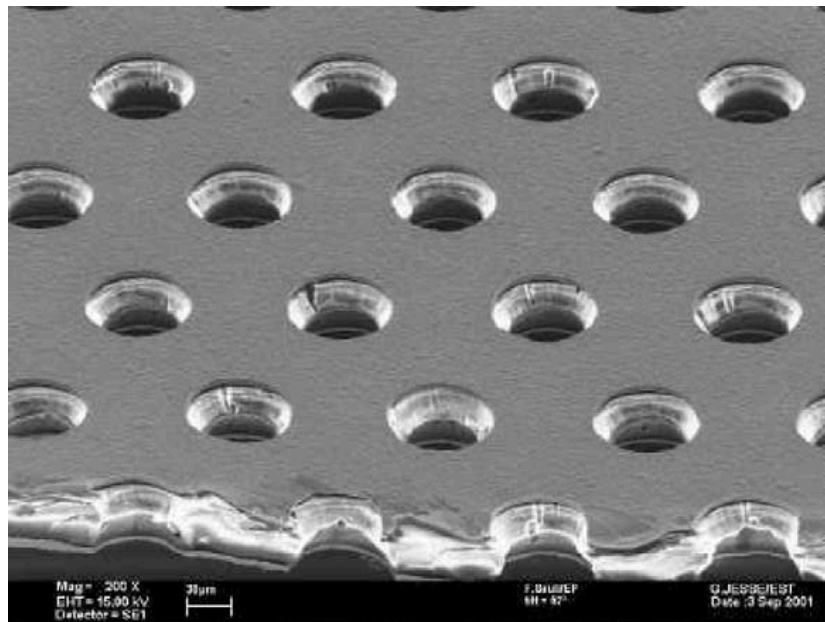


図 1.6: GEM の拡大図 [?].

μ -PIC は図 1.7 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 とともに $400\mu\text{m}$ 間隔でそれぞれ 256 ch 分割されている．直径 $50\mu\text{m}$ の円柱状の anode 電極に高電圧を印加し、cathode 電極を接地す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．

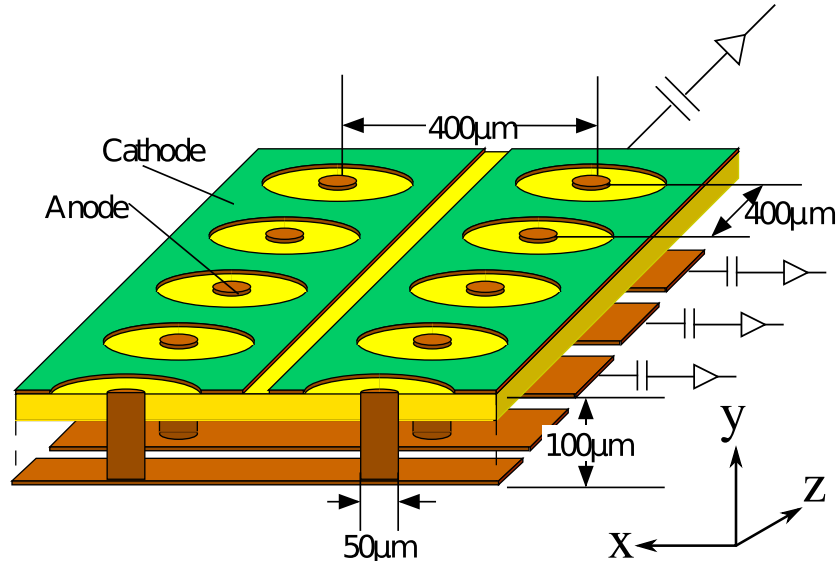


図 1.7: μ -PIC の概観図 [?]. 図中の横方向に anode strip, 奥行き方向に cathode strip が配置されている.

1.1.3 読み出し領域

図 1.2 中で anode strip が x 軸, cathode strip が 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とイオンを anode strip と cathode strip により読み出すことで, z 座標, x 座標を検出することができる. また, anode strip と cathode strip で検出される信号の時間分布により y 座標を決定することができる.

MAIKo TPC からは図 1.2 のようにトラックが anode strip に垂直な面 (zy 平面) に射影された anode image と cathode strip に垂直な面 (xy 平面) に射影された cathode image の 2 つの画像が出力される. MAIKo TPC から得られる画像の 1 例を図 1.8 に示す. anode strip と cathode strip はそれぞれ 256 ch で構成され, 各ストリップの信号は 100 MHz で 1,024 samples 測定し, 設定した閾値に対する time over threshold (TOT) を取得する. TOT は閾値以上を 1, 以下を 0 としたものである. よって, 出力されるデータは解像度が $256 \times 1,014$ pixels の白黒画像となる. また, anode strip, cathode strip とともに 32 ch ごとにまとめて信号波形を 25 MHz で FADC で取得している. FADC で取得した信号の一例を図 1.9 に示す.

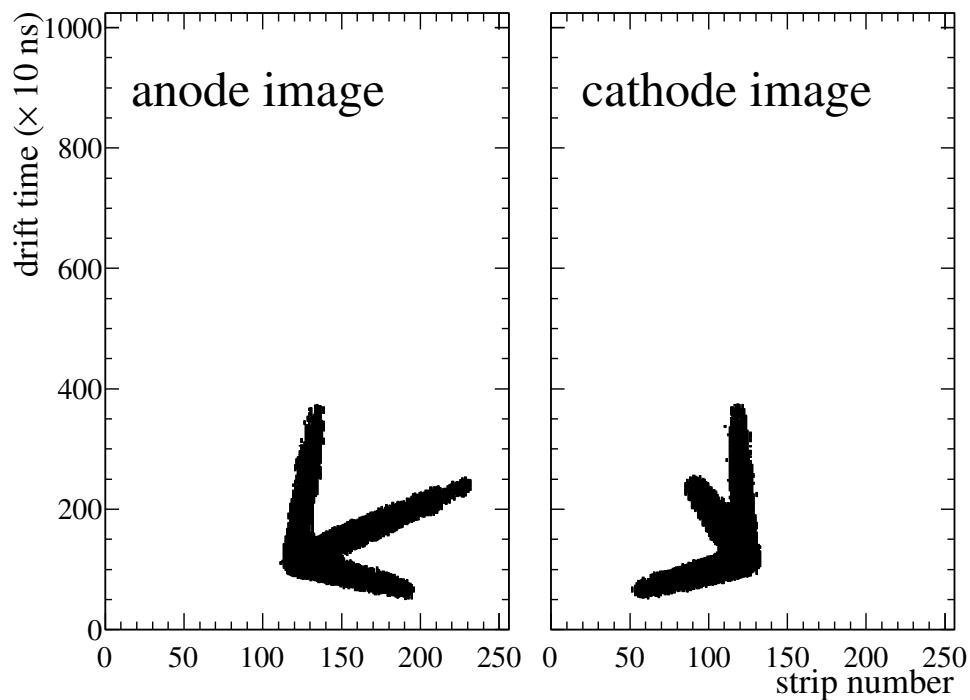


図 1.8: MAIKo TPC から得られる画像データの一例. このイベントは ??章で述べるシミュレーションによって生成したデータである.

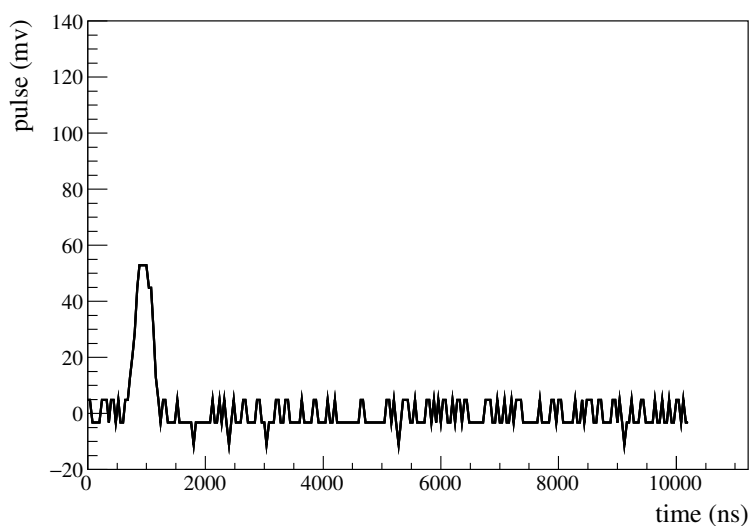


図 1.9: FADC で取得された μ -PIC の波形の一例. この波形は iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) を検出ガスに用いて, α 線源でテストした際のものである.

1.2 検出ガスの選出

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と背景事象となるが、陽子または ^4He と 14 MeV の中性子の散乱で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。代表的な炭化水素に、メタン (CH_4) やエタン (C_2H_6)、イソブタン (iso- C_4H_{10}) がある。また、水素ガスやヘリウムガスと炭化水素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。(安定な TPC の運用)
- α 粒子のエネルギー損失 (dE/dx) が適切である。(トラックを正しく抽出)
- 適切なドリフト速度を達成できる。(有感領域を効率的に使用)
- ディフュージョンの効果が小さい。(複数のトラックを正しく抽出)
- ^{12}C の量が少なくない。(散乱標的の量)

これらの項目を基準に検出ガスの種類と圧力を決定する。

1.2.1 α 粒子のエネルギー損失

MAIKo TPC では荷電粒子のトラックの長さや方向からエネルギーと運動量を決定するため、トラックを正しく抽出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で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。そこで、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 の有感領域中で停止する α 粒子を検出可能な α 粒子とする。3 つの α 粒子を検出できたイベントの割合を検出率とする。図??に示した微分断面積の角度分布を仮定したときの検出率の圧力依存性を図 1.10 に示す。ここでは、ビーム軸が有感領域の中央を通り、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 1.10 から分かるように、50 hPa で検出効率が最大となっている。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、表 1.1 に示した 6 つを検出ガスの候補とした。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．

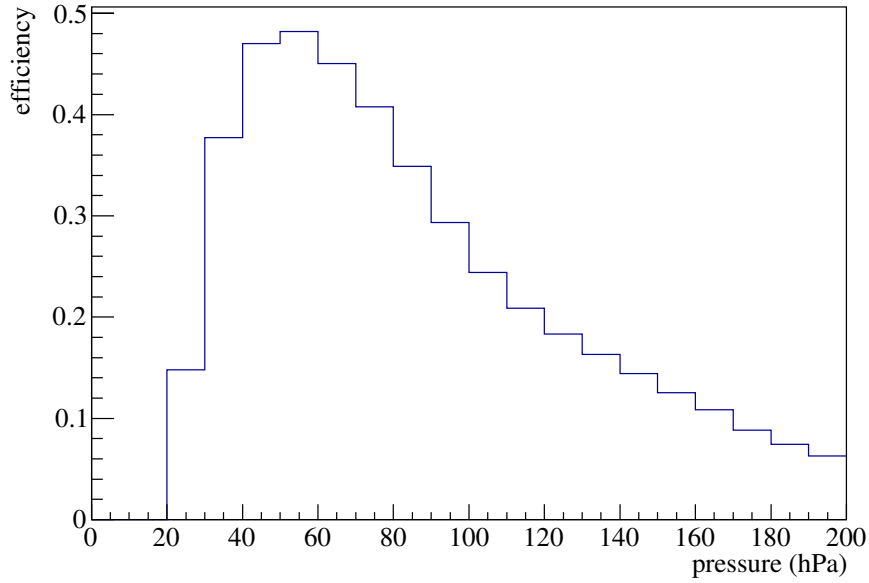


図 1.10: CH_4 の圧力による検出効率の分布． α 粒子は図??に示した微分断面積の角度分布を仮定した．

表 1.1: 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．エネルギー損失は E_α が 0.5 MeV の α 粒子が 10 mm で落とすエネルギーを表す．電場は Magboltz による計算で 0.014 mm/ns となる値である．

gas	pressure (hPa)	density (g/cm ³)	dE/dx (MeV)	電場 (V/mm)
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_4H_{10}	15	3.58×10^{-5}	0.102	0.644
iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9)	100	3.13×10^{-5}	0.122	6.80
iso- C_4H_{10} (1) + He (9)	100	3.86×10^{-5}	0.102	3.26

1.2.2 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 $10.24 \mu\text{s}$ 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 $140 \text{ mm}/10.24 \mu\text{s} \sim 0.014 \text{ mm/ns}$ に調整する必要がある。Magboltz [?] によって求めたドリフト電場とドリフトスピードの関係を図 1.11 に示す。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 1.1 に示す。図 1.11 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。

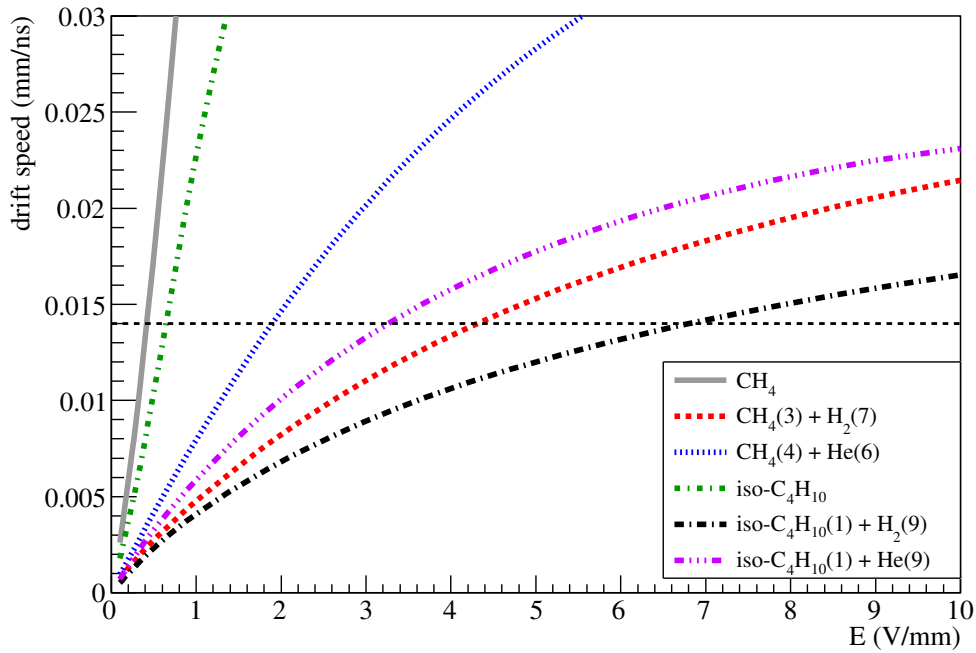


図 1.11: ドリフト電場とドリフトスピードの関係。CH₄ は 50 hPa, iso-C₄H₁₀ は 15 hPa, その他は 100 hPa である。横方向の破線は 0.014 mm/ns を示す。

1.2.3 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 1.12 のように広がりながらドリフトする．この効果が大きくなると，図 1.12 の左のように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，トラックが太く検出される．トラックが太くなると，複数のトラックを分離することが難しくなる．そのため，図 1.12 の右のようにディフュージョンの効果が小さいことが望まれる．

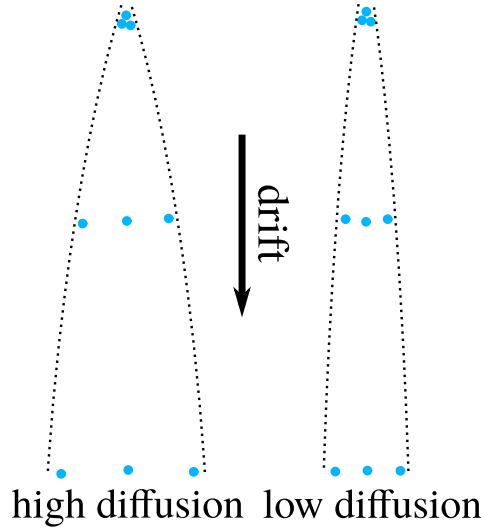


図 1.12: 電子が拡散するイメージ．同じ位置で生成された電子でもドリフトする間に位置が拡散する．

Ref [?] によると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．熱運動の平均速度 v は Maxwell 分布より

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_e}} \quad (1.1)$$

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

$$\frac{N_0}{\sqrt{4\pi D \Delta t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D \Delta t}\right) \quad (1.2)$$

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

$$D = \frac{1}{3} v \lambda \quad (1.3)$$

と表せる．これは電子の速度が遅いほど，ガスとの散乱が少ないほど遠くまで移動できるため，ディフュージョンの効果が大きくなることを表す．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 ，圧力 p のもとで

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{k_B T}{\sigma_0 p} \quad (1.4)$$

と表される．式 1.1, 1.3, 1.4 より，

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{p\sigma_0} \sqrt{\frac{(k_B T)^3}{m_e}} \quad (1.5)$$

となる．式 1.5 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，

$$\Delta t = \frac{L}{v_{\text{drift}}} \quad (1.6)$$

となる．距離 L における分散 $\sigma(L)$ は

$$\sigma(L) = \sqrt{2D\Delta t} \quad (1.7)$$

$$= \sqrt{\frac{2D}{v_{\text{drift}}}} \times \sqrt{L} \quad (1.8)$$

$$= D_{\text{Magboltz}} \times \sqrt{L} \quad (1.9)$$

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 1.2 に示す．表 1.2 中の D_t はドリフト電場に対して垂直な方向への拡散， D_l は平行な方向への拡散の係数を表す． CH_4 および $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ 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． $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (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 $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 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．

表 1.2: 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)
CH ₄	0.433	0.547	0.418
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	0.214	0.171	4.31
CH ₄ (4) + He (6)	0.270	0.248	1.89
iso-C ₄ H ₁₀	0.357	0.414	0.644
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	0.196	0.145	6.80
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	0.246	0.197	3.26