

第 1 章

MAIKo TPC

1.1 MAIKo TPC とは

我々のグループでは低エネルギー荷電粒子を大立体角で検出するために、アクティブ標的 TPC である MAIKo TPC [?] を開発してきた。MAIKo TPC は検出ガスを封入する密封容器 (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) からなる。図 1.2 に示すドリフトケージを MAIKo チェンバー内に設置して用いる。図 1.3 は MAIKo TPC 中で入射中性子と ^{12}C の散乱によって、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から 3 つの α 粒子が放出されたイベントを表す。MAIKo TPC は検出ガスを標的ガスとして用いるアクティブ標的であるため、 α 粒子を大立体角で検出することができる。MAIKo TPC では荷電粒子のトラックを 2 つの 2 次元平面に射影した画像として得られる。また、電荷を持たない中性子のトラックは検出されない。

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 1.4 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 1.4 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。さらに、2 次元平面でドリフトしてきた電子の位置を測定することで、3 次元的にトラックを検出できる。MAIKo TPC では 3 次元のトラックを 2 つの平面に射影した画像として取得する。

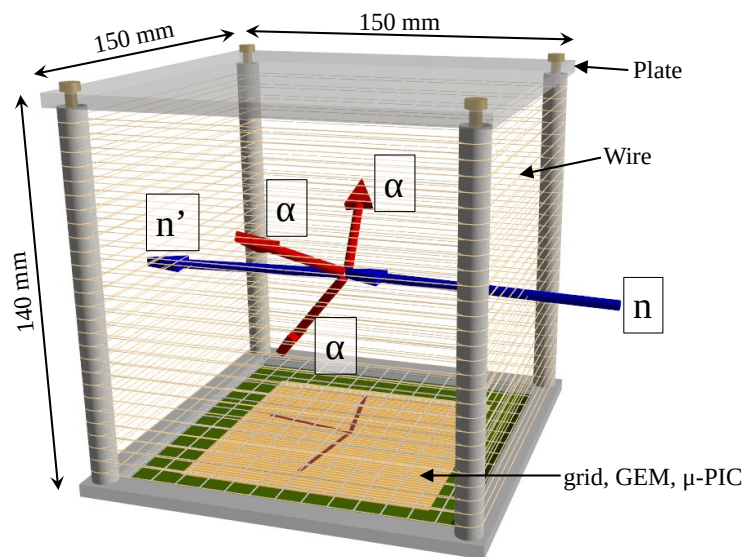


図 1.1: MAIKo TPC の概観図. 検出ガスに含まれる ^{12}C が右から入射した中性子（青色）と散乱し 3 つの α 粒子に崩壊したときを模している.

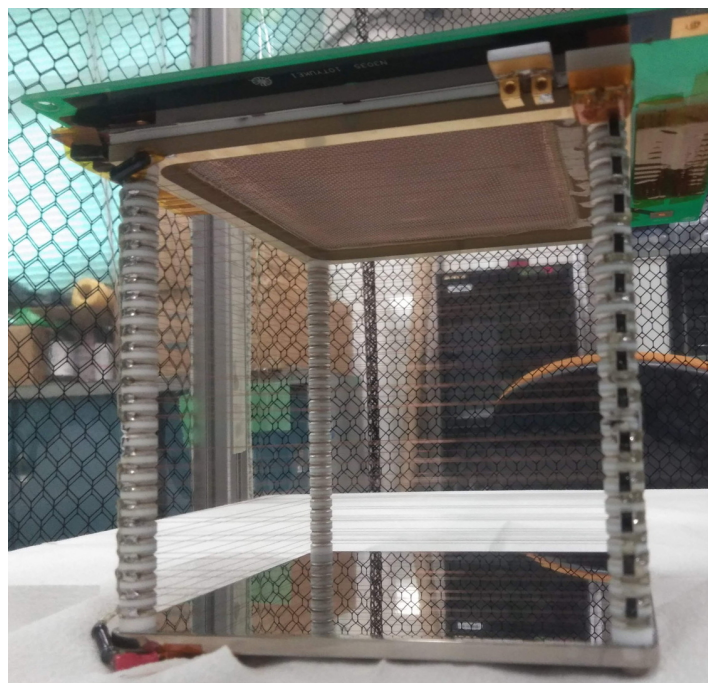


図 1.2: ドリフトケージの概観. ケージの上側に読み出し面が取り付けられている. 図 1.1 とは上下が反転している.

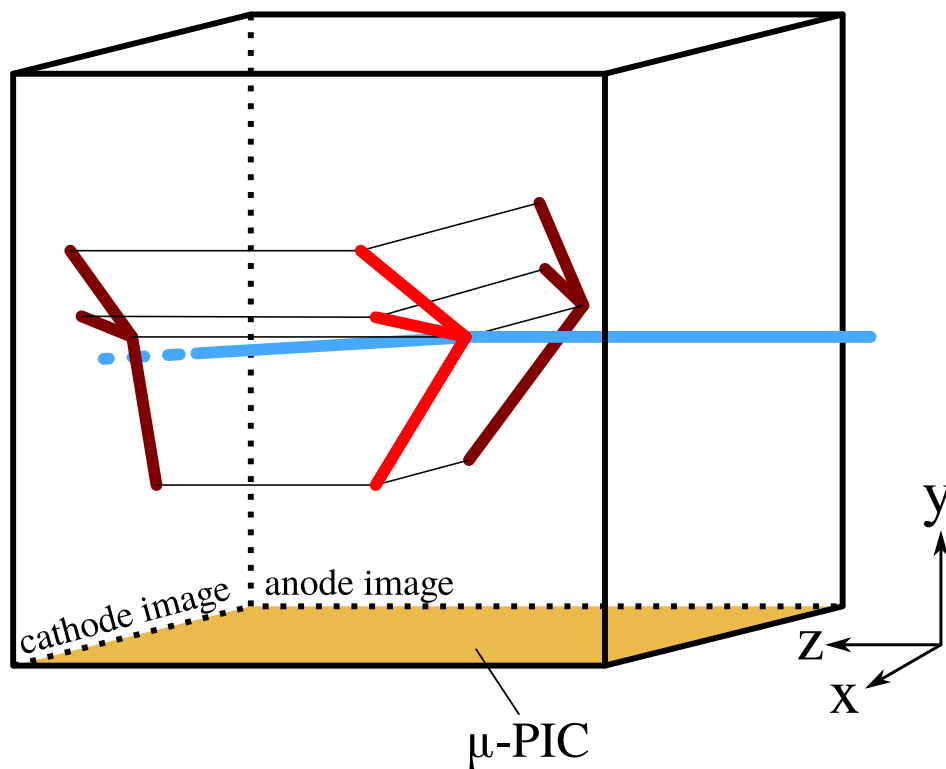


図 1.3: MAIKo TPC 図 1.3 の模式図とはドリフト方向が上下が反転している．図では TPC 中の ^{12}C が右から入射した中性子 (青) と散乱し，3 つの α 粒子 (赤) に崩壊した事象を表す．anode image (zy 平面) と cathode image (xy 平面) の 2 平面に荷電粒子のトラックが射影される (茶色の線)．中性子は電荷を持たないため anode, cathode image にトラックとして検出されない．

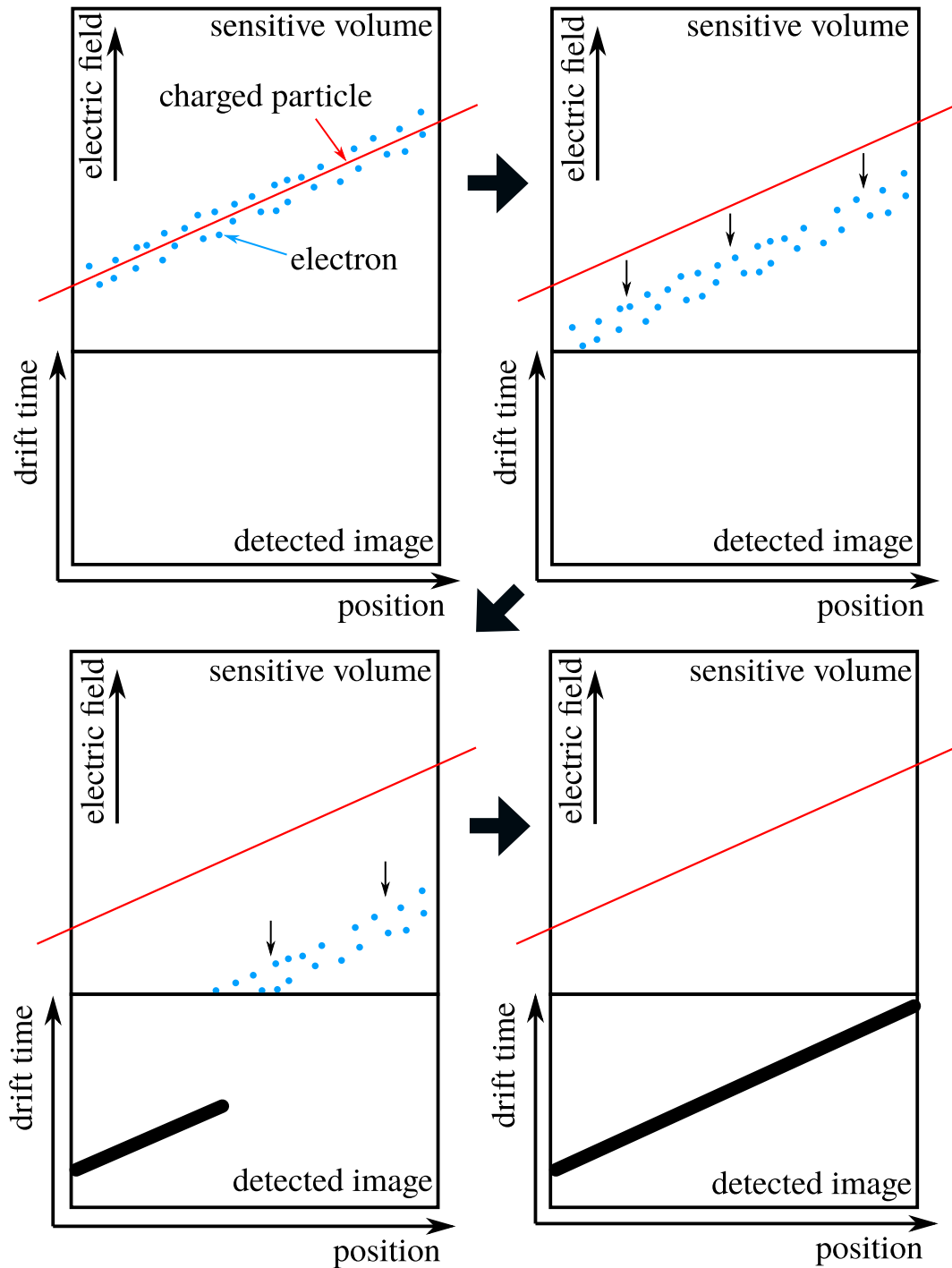


図 1.4: TPC でトラックを検出するときのイメージ。赤い実線は荷電粒子のトラック、青い点はイオン化で生成された電子、黒く太い実線は検出されたトラックを表す。トラックは電子が読み出し面に到達した時間として記録される。

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, gas electron multiplier (GEM), μ -PIC [?] からなる。plate, grid, GEM, μ -PIC に高圧電源 (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（ドリフト領域）で発生した電子が grid に向かってドリフトし, grid から μ -PIC の間の領域（増幅領域）にある GEM と μ -PIC によって増幅され, μ -PIC（読み出し領域）によって増幅された電子の 2 次元位置を読み出す。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。

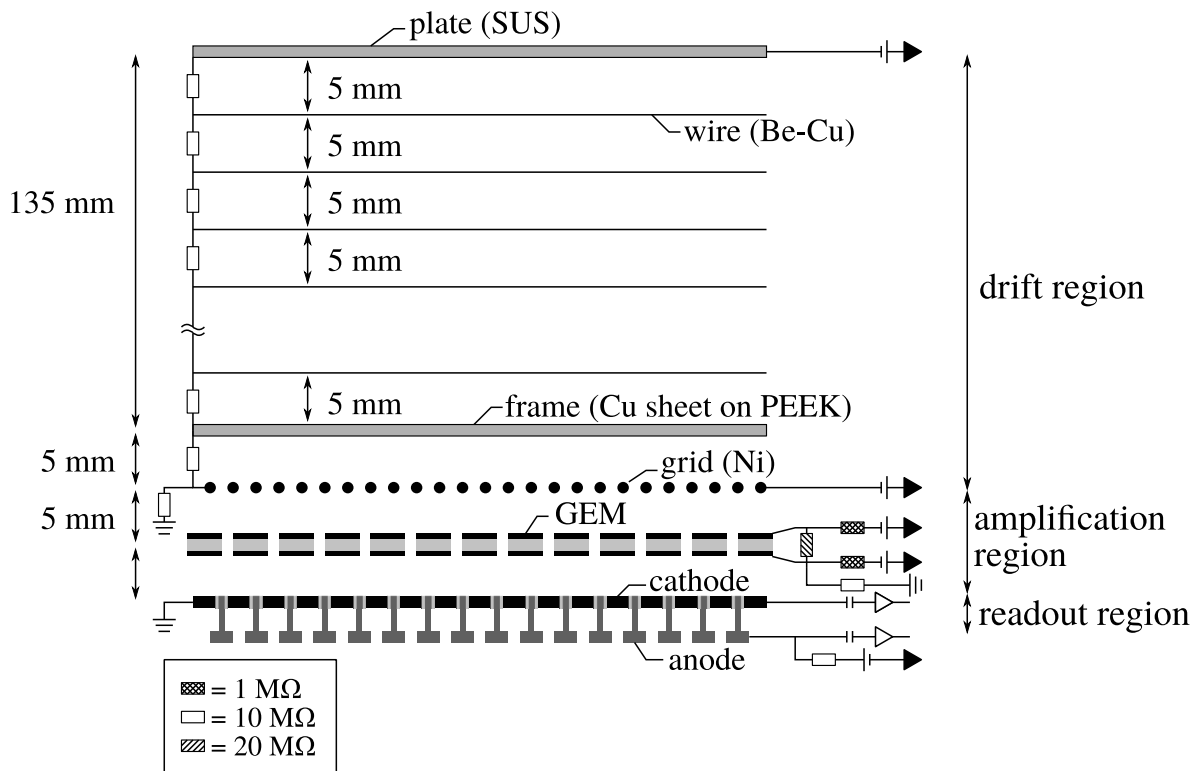


図 1.5: ドリフトケージの構造.

1.1.1 ドリフト領域

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し, grid から plate の方向 (図 1.5 では上向き) にドリフト電場を形成することで入射した荷電粒子の周囲に発生した電子を増幅領域へドリフトさせる。ドリフト電場の一様性が高いほど, トラック

の周囲に発生した電子雲の形状を保ったまま、電子をドリフトさせることができる。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直径 $125\text{ }\mu\text{m}$ の Be-Cu wire が 5 mm 間隔で二重で巻かれている [?].

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 $70\text{ }\mu\text{m}$ 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穴を通過する際に増幅される。MAIKo TPC では厚さ $100\text{ }\mu\text{m}$ の約 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ の GEM を用いている。

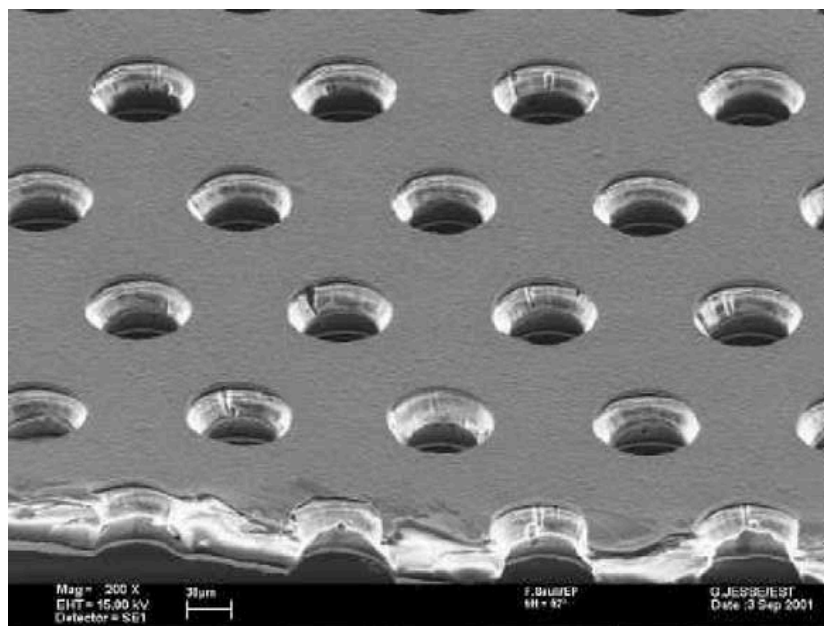


図 1.6: COMPASS 実験で用いられた GEM の拡大図 [?].

μ -PIC [?] は京都大学宇宙線研究室で開発された Micro Pattern Gas Detector の一種である。 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 $400\text{ }\mu\text{m}$ 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 電極に高電圧を印加し、cathode 電極を接地することで anode 電極付近に強い電場を形成することができ、GEM で増幅された電子が μ -PIC によって更

に増幅される。

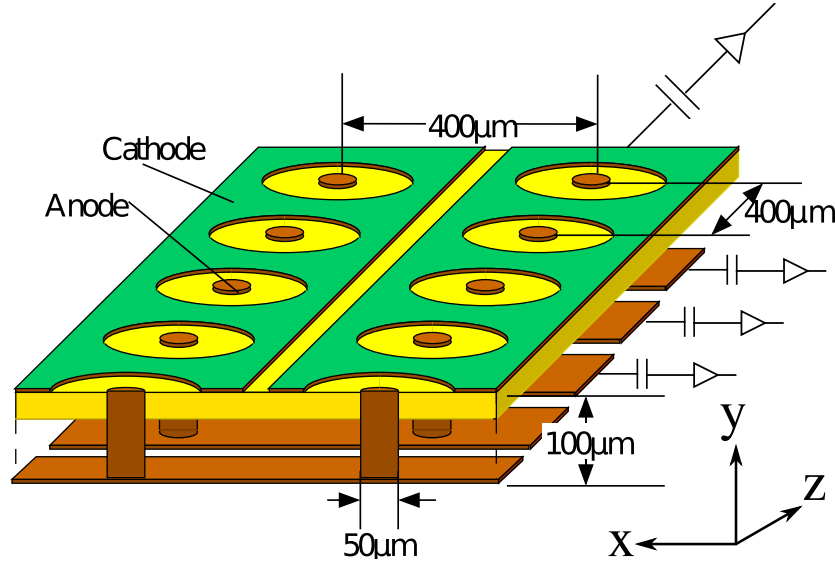


図 1.7: μ -PIC の概観図 [?]. 図中の横方向に anode strip, 奥行き方向に cathode strip が配置されている。

1.1.3 読み出し領域

図 1.3 と図 1.7 中では 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 1.3 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 つの画像が取得される. 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, 信号波形が設定した閾値よりも高い場合に 1, 低い場合に 0 として記録される. 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 ごとにまとめた信号の波形を 25 MHz のサンプリング率を持つ 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.

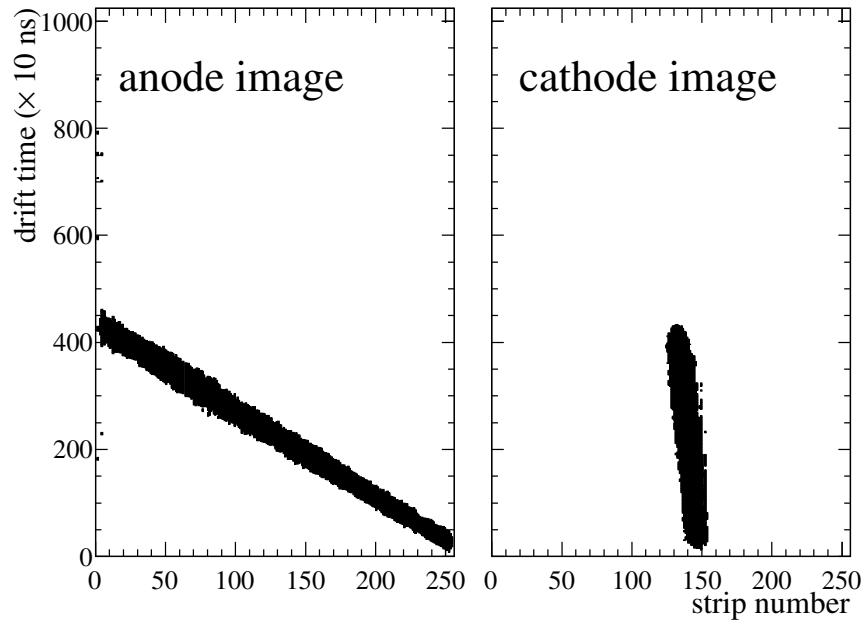


図 1.8: MAIKo TPC から得られる画像データの一例. このイベントは ?? 章で述べる線源を用いて測定したデータである.

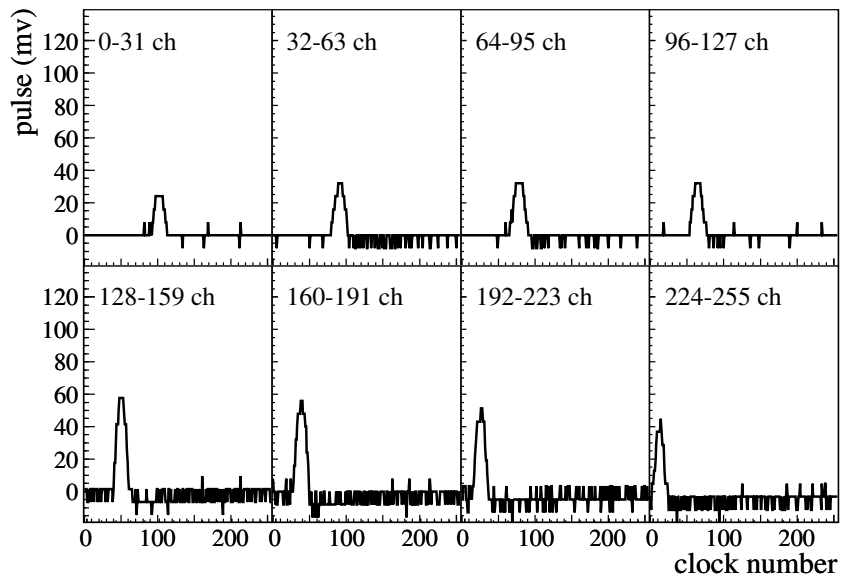


図 1.9: FADC で取得された μ -PIC の波形の一例. この波形は図 1.8 の anode 側の信号である.

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)
- 電子の拡散効果が小さい。(複数のトラックを正しく抽出)
- 測定を行うのに十分な量の ^{12}C を含む。(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、取得した画像から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荷電粒子が有感領域で停止せず、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決定する必要がある。

まず、代表的な炭化水素である CH_4 を考える。 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ からの崩壊 α 粒子が、ガス中で 10 mm 以上飛行し、MAIKo TPC の有感領域中で停止するとき、その α 粒子を検出可能な α 粒子とする。 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ の全崩壊イベント数に対する、3 つの α 粒子が全て検出可能であるイベント数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。 α 粒子の飛程の計算には SRIM [?] を用いた。また、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.

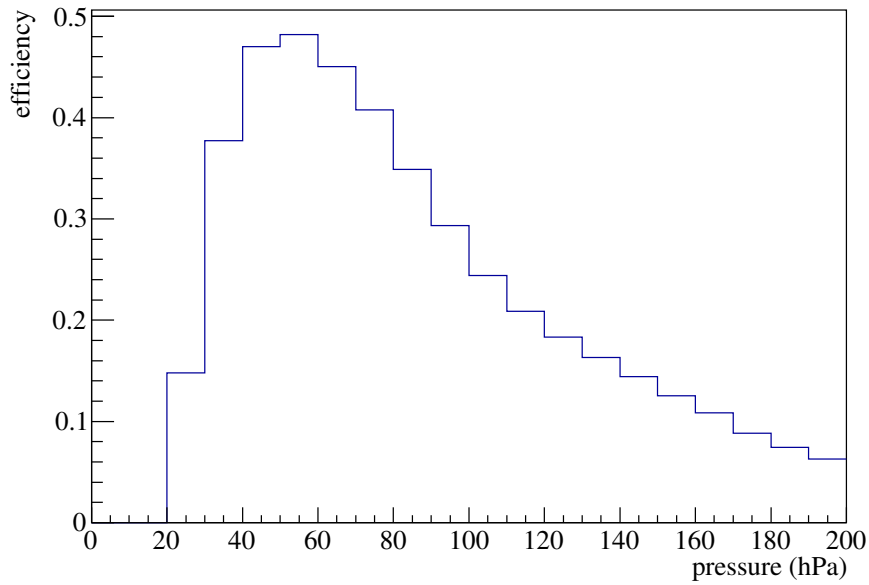


図 1.10: CH_4 の圧力による検出効率の分布. α 粒子は図??に示した微分断面積の角度分布を仮定した.

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 [?] による計算でドリフト速度が 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 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

1.2.2 ドリフト速度

MAIKo TPC では 100 MHz で 1,024 samples データを取得するため, ドリフト方向には 10.24 μ 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, ドリフト速度を 140 mm/10.24 μ s \sim 0.014 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速度の関係を図 1.11 に示す. ドリフト速度が 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.

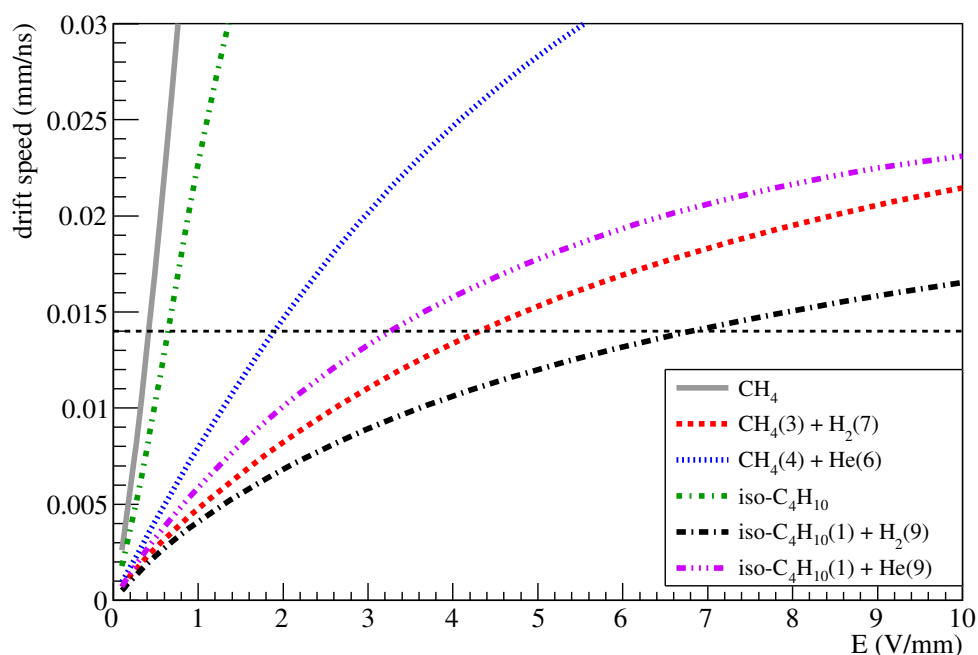


図 1.11: ドリフト電場とドリフト速度の関係. CH_4 は 50 hPa, $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ は 15 hPa, その他は 100 hPa である. 横方向の破線は 0.014 mm/ns を示す.

1.2.3 電子の拡散の効果

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 のように電子は拡散しつつドリフトする. 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読み出し面に到達するまでに拡散する, トラックが太く検出される. トラックが太くなると, $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から崩壊した 3 つの α 粒子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 の右のように拡散の効果が小さいことが望まれる.

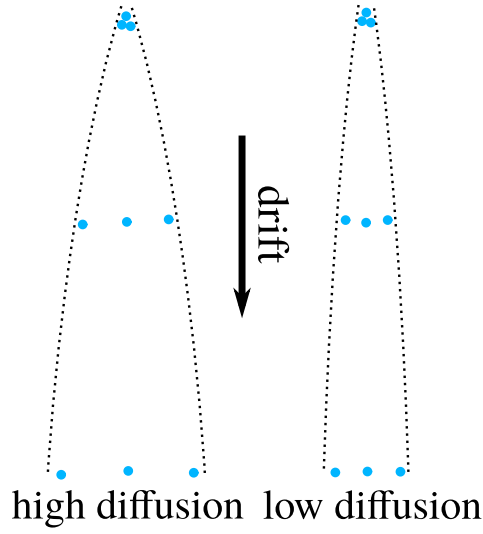


図 1.12: 電子が拡散するイメージ. 同じ位置で生成された電子でもドリフトする間に位置が拡散する.

文献 [?] によるとドリフト電場がない場合の電子の拡散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 は拡散係数を表す. 拡散係数 D は電子の平均自由行程 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, 拡散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行程 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，温度が低いほど拡散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 ，ドリフト速度を 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．計算コード Magboltz [?] によって得られた拡散係数 (D_{Magboltz}) 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 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ の単体では拡散係数が大きく，同じドリフト速度のとき，ドリフト電場が大きいほど拡散係数が小さいことが分かる． $\text{iso-C}_4\text{H}_{10} (1) + \text{H}_2 (9)$ の拡散係数が最も小さく，検出ガスの最有力候補である．次章では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 で計算した拡散係数. 拡散の大きさはドリフト電場に依存するため, ここではドリフト速度が 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, 平行方向の拡散係数.

gas	圧力 (hPa)	D_t ($\sqrt{\text{mm}}$)	D_l ($\sqrt{\text{mm}}$)	ドリフト電場 (V/mm)
CH ₄	50	0.433	0.547	0.418
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	100	0.214	0.171	4.31
CH ₄ (4) + He (6)	100	0.270	0.248	1.89
iso-C ₄ H ₁₀	15	0.357	0.414	0.644
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	100	0.196	0.145	6.80
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	100	0.246	0.197	3.26