

第7回高エネルギー物理春の学校

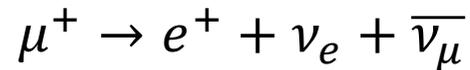
正負ミューオンの寿命差測定と
電荷識別のための
ドリフトチェンバーの製作及び性能評価

2017/5/19 名古屋大学M1 林田 翔太

ミューオンの寿命 τ

ミューオンは単位時間当たり一定の割合（崩壊率 λ ）で崩壊して
る。

例えば…正ミューオンが陽電子とニュートリノに崩壊



初期状態 $t=0$ で N_0 個あった粒子のある時間 t に存在している粒
子の数 $N(t)$ とすると、

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \lambda N(t) \Delta t$$

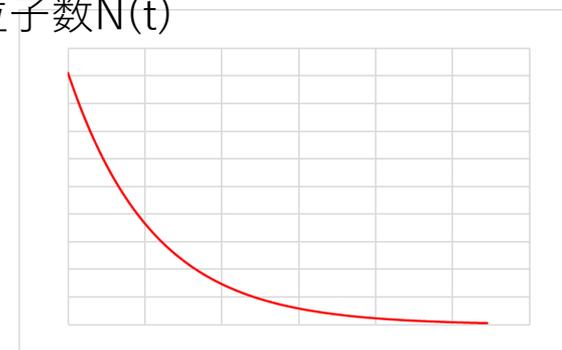
Δt 秒間に崩壊した粒子数

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

つまり、寿命 τ は崩壊率の逆数で表したものの。

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

粒子数 $N(t)$



時間 t

正負ミューオンの寿命差

ミューオンの寿命は $2.197 \mu\text{s}$ である。
物質中では、正負ミューオンの寿命が異なる。
この原因は μ^\pm の崩壊の違いにある。

μ^+ の崩壊は1パターンある。

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{崩壊率 } \lambda_+$$

μ^- の崩壊は2パターンある。

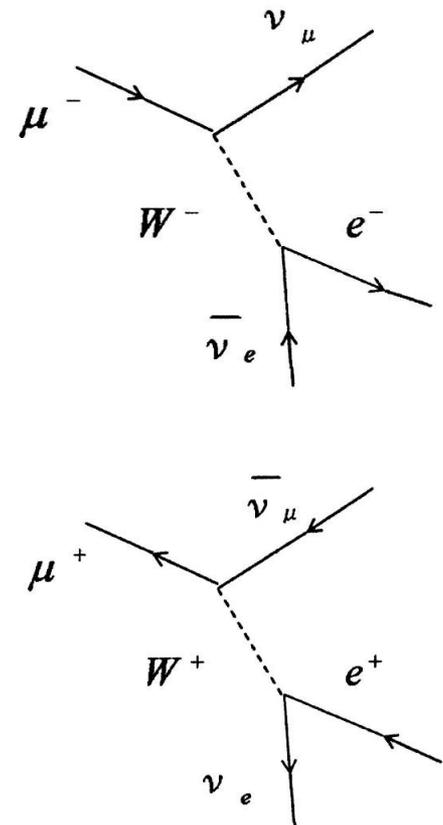
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{崩壊率 } \lambda_-$$

$$\mu^- + p \rightarrow \nu_\mu + n \quad \text{崩壊率 } \Gamma$$

$$\tau_+ = \frac{1}{\lambda_+}, \quad \tau_- = \frac{1}{\lambda_- + \Gamma}$$

→ μ^- の寿命は見かけ上短くなる。

例えば、Al : $\tau_- 0.88 \mu\text{s}$ and Cu : $\tau_- 0.16 \mu\text{s}$



実験装置の設計

μ^\pm の寿命差を測定する装置の設計

電荷識別装置

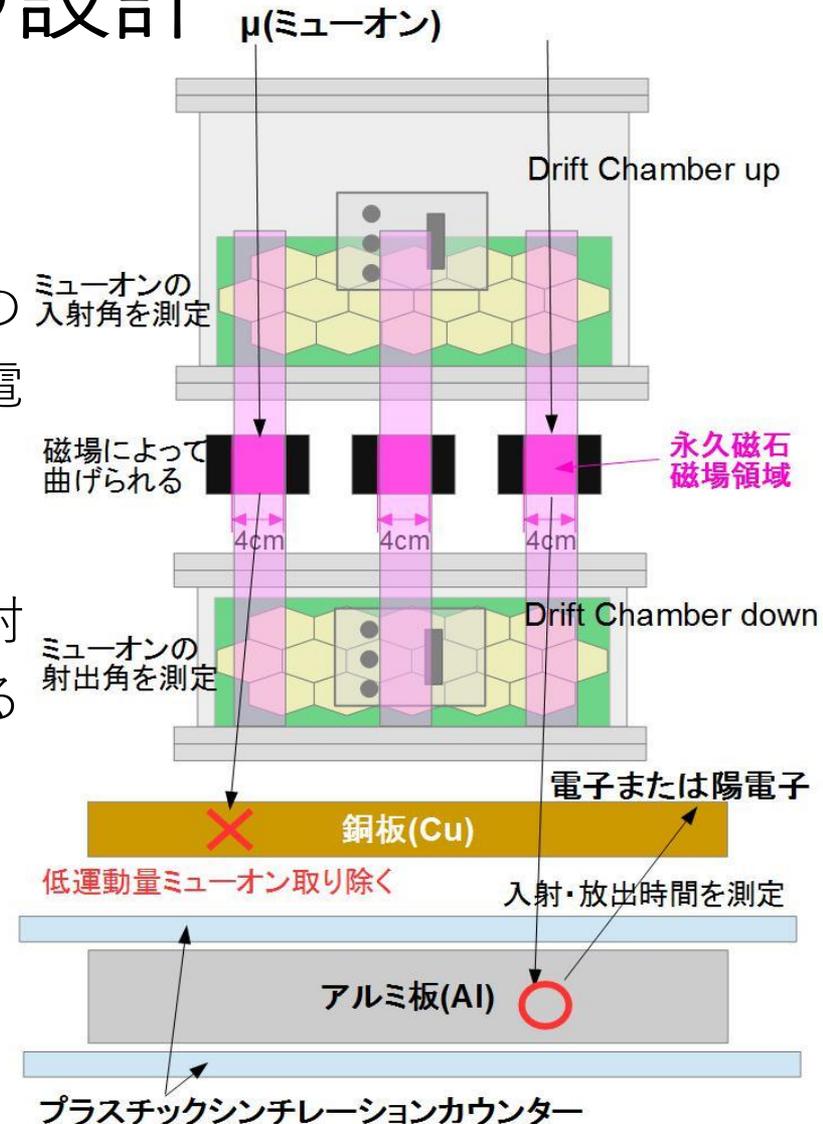
上下のドリフトチェンバーで荷電粒子の飛跡を再構成し、磁場で曲げられた荷電粒子の角度を測定する。

寿命測定装置

アルミ板に捕獲されたミューオンの入射時間と電子・陽電子放出時間を測定することで寿命を測定する。

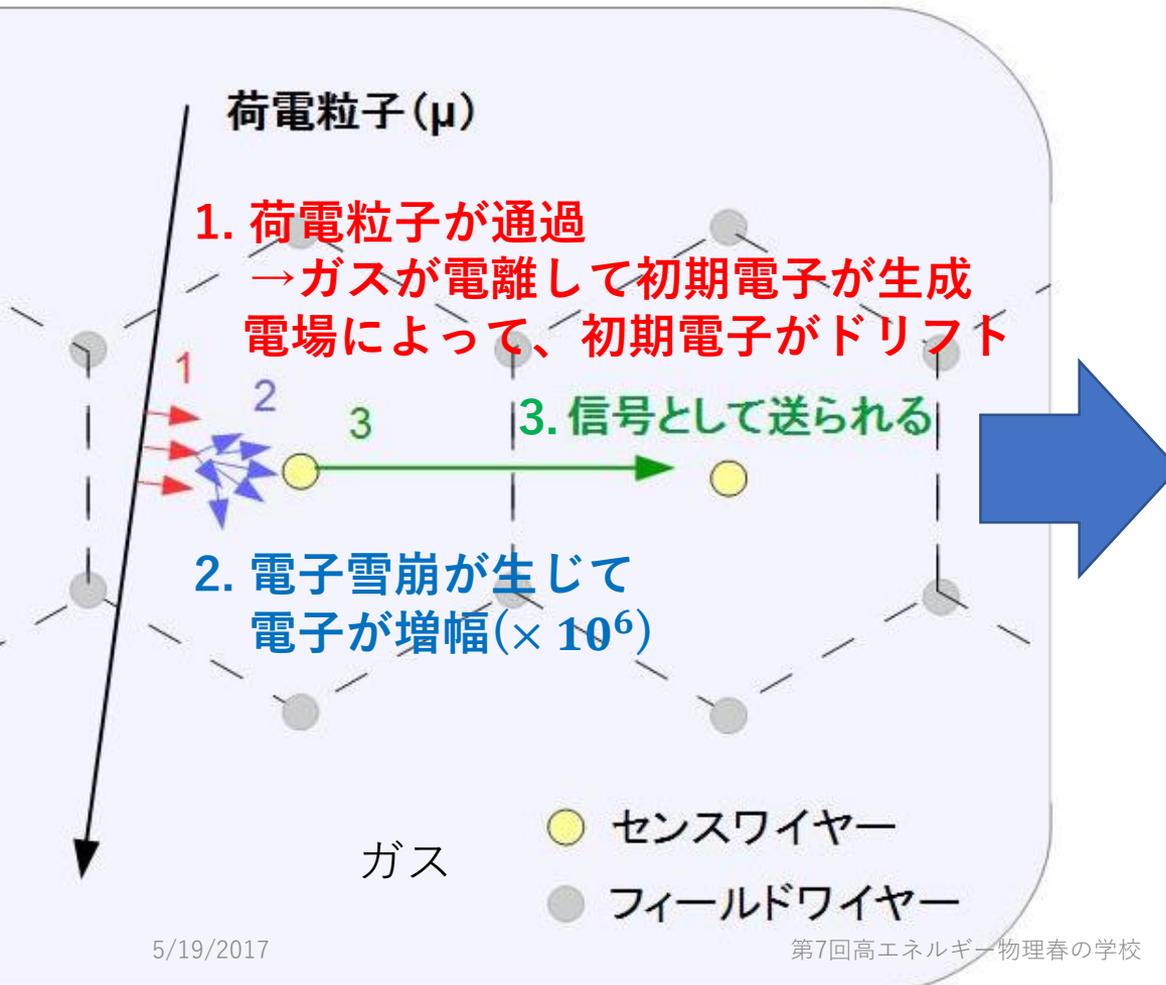
研究の内容

この装置を製作して、電荷を識別し
 μ^\pm の寿命をそれぞれ求めることを目標

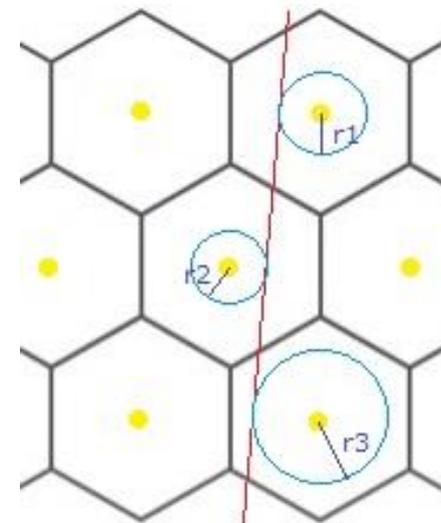


ドリフトチェンバーの原理

ドリフトチェンバーは荷電粒子の飛跡を再構成する装置



ドリフト時間を測定して、
ドリフト距離を求める。
各層で求めたドリフト距離
から、飛跡を再構成する。



電荷識別に必要な分解能

電荷識別装置において永久磁石を用いて、磁場の製作を行った。
磁場中でミューオンの電荷によって、ローレンツ力の働く向きが異なる。

→電荷を識別することができる。

製作した磁場の強さは以下の値を満たす。

$$B[T]\ell[m] > 90 \text{ Gauss} \cdot \text{m}$$

この条件からドリフトチェンバーの必要な角度分解能を求める。

$$B[T]\ell[m] \geq \frac{p[\text{GeV}] \sin \theta}{0.3}$$

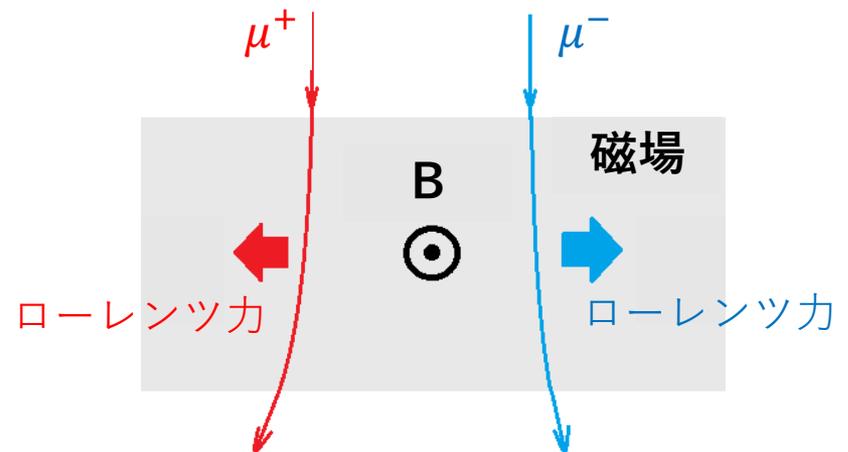
2 σ の精度で電荷を識別するには、

$$\text{角度分解能} \leq 13.5 \text{ mrad}$$

1 σ の精度で電荷を識別するには、

$$\text{角度分解能} \leq 27.0 \text{ mrad}$$

を満たす必要がある。



ドリフトチェンバーの構造

ドリフトチェンバーは1段構造で製作した。

→2次元での飛跡再構成が可能

有感領域： $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} = 900\text{ cm}^2$

チャンネル数：16 channel

ワイヤー数：64本

内部ガス：Ar: CH₄ = 90:10

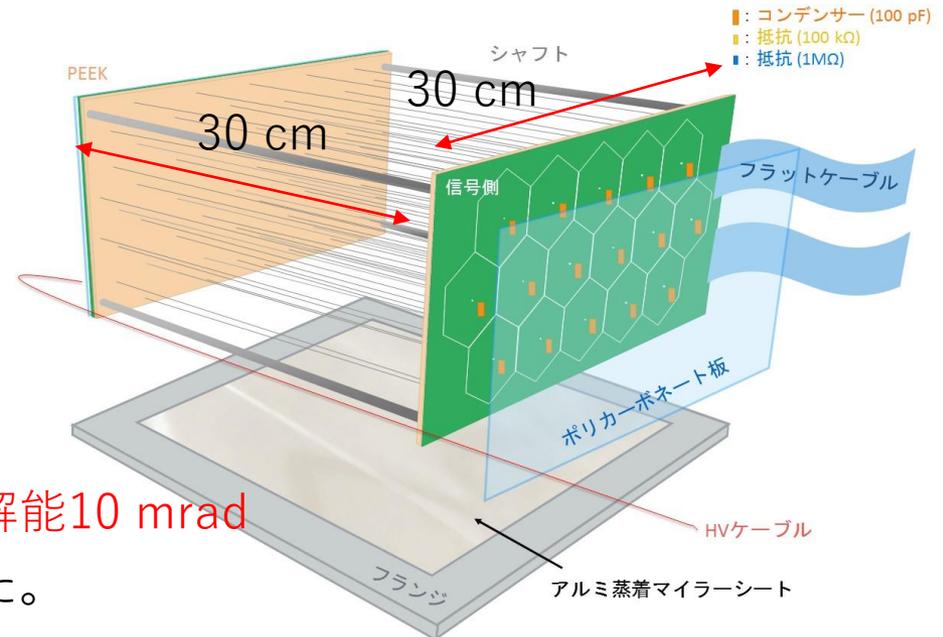
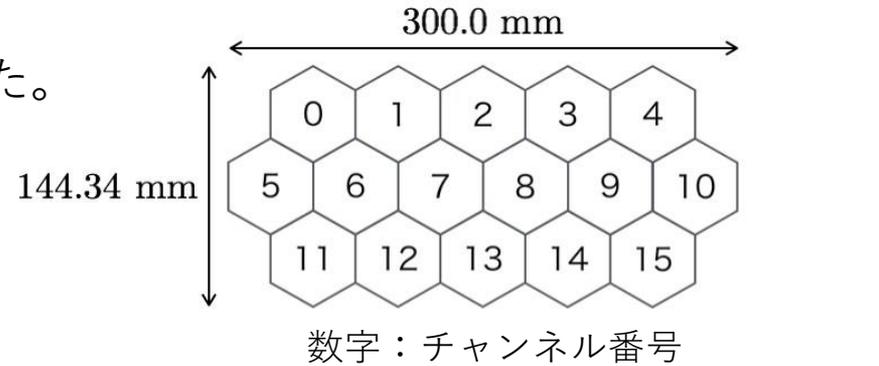
内部ガス圧力：1 atm

ドリフトチェンバーの分解能が

角度分解能：2.0 mrad

→多重散乱を考慮した角度分解能10 mrad

を目標にして2つ製作を行っていった。

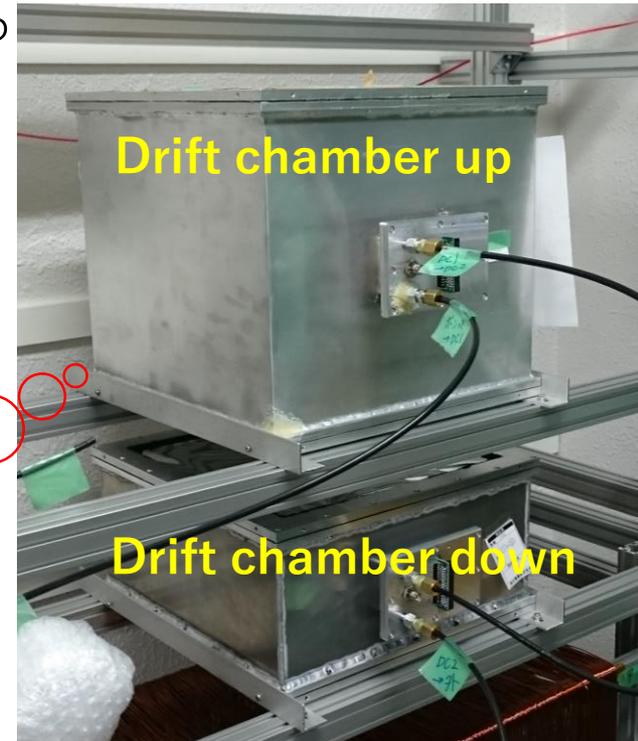
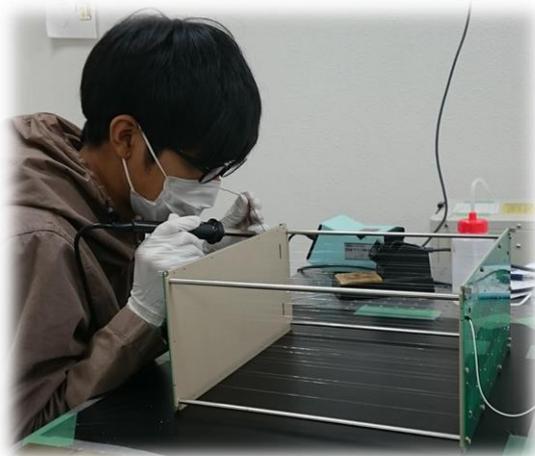


1段構造のドリフトチェンバー

ドリフトチェンバーの製作

ドリフトチェンバーの製作過程

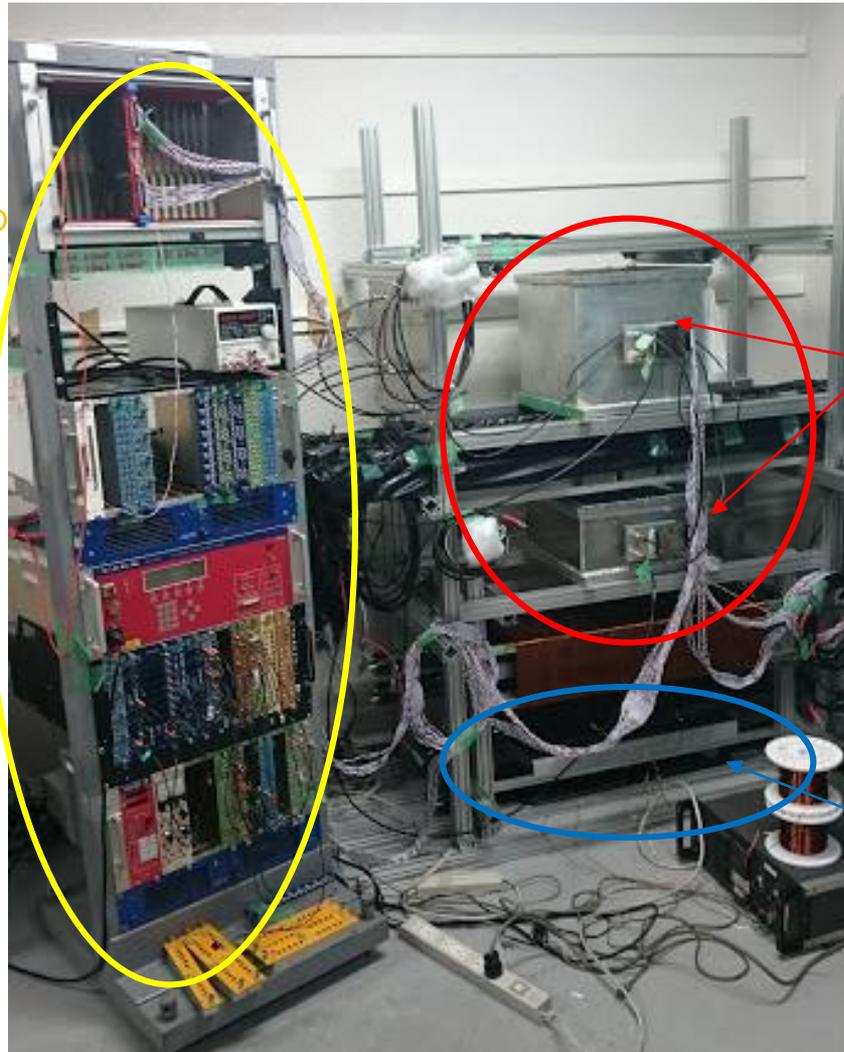
- 基板に抵抗・コンデンサーを取り付ける
- センスワイヤーとフィールドワイヤーを張る
(重りでテンションをかけながら)
- 製作した基板を容器にいれ、組み立てる



ワイヤー張りの作業風景（共同実験者の伊藤君）

製作した実験装置

測定に使用する
モジュール



電荷識別装置

製作した
ドリフトチェンバー

寿命測定装置

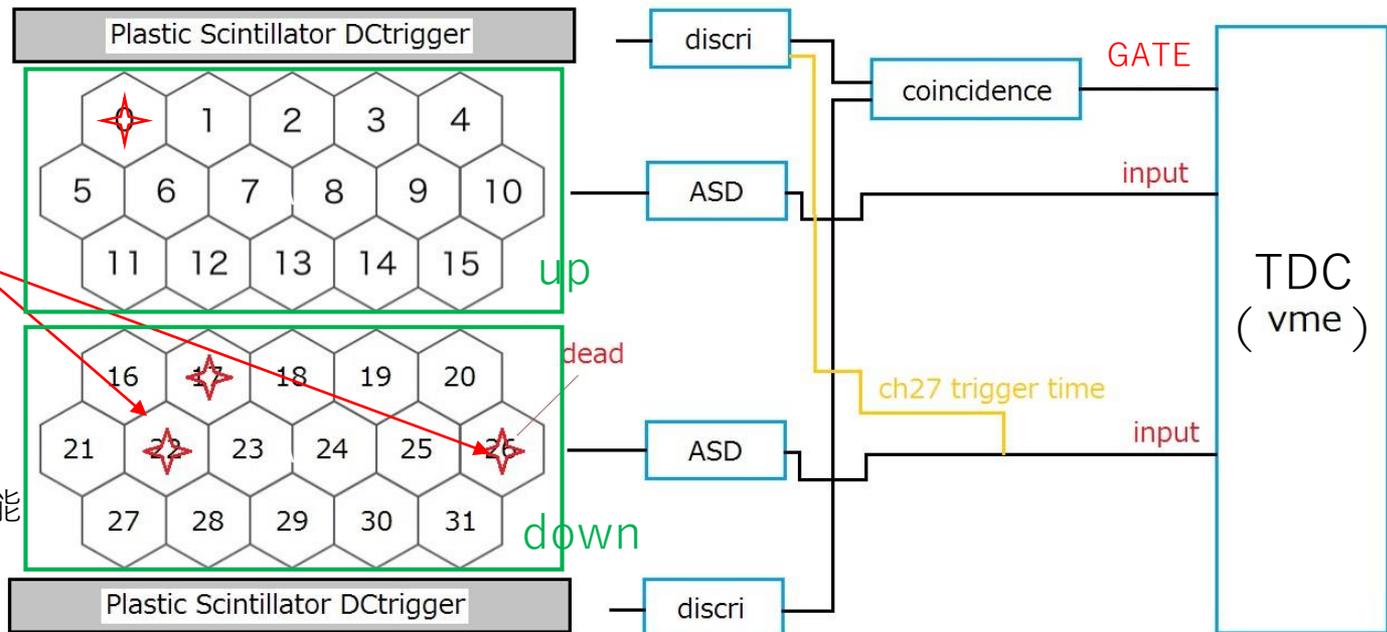
ドリフトチェンバーの性能評価

製作したドリフトチェンバーの性能評価を宇宙線を用いて行った。

- TDC時間原点の補正 (磁場なしで行う)
- ドリフト時間とドリフト距離の関係 (r-t曲線)
- 位置分解能の測定
- 角度分解能の測定 ← 発表



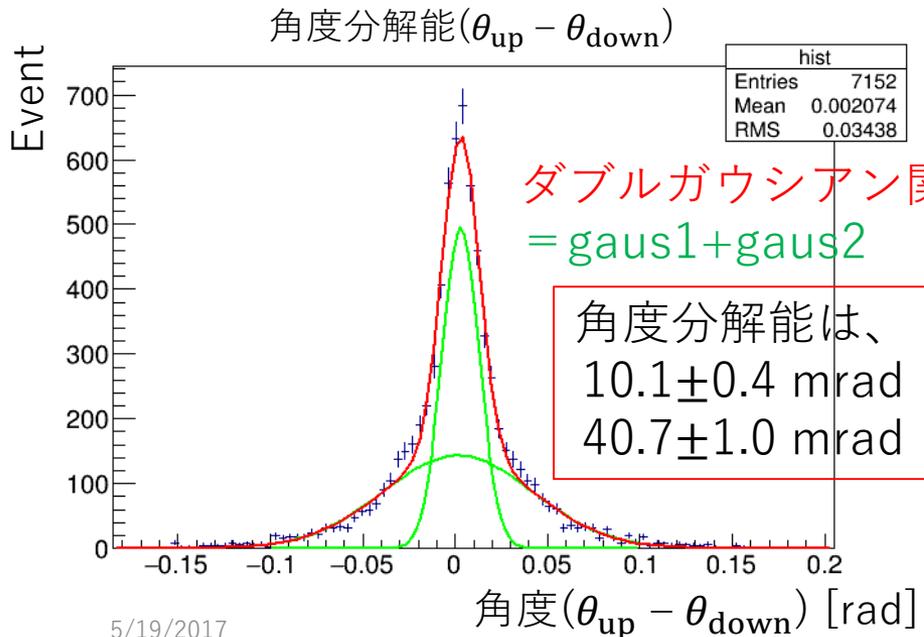
読み出し回路の不具合で測定不能



角度分解能

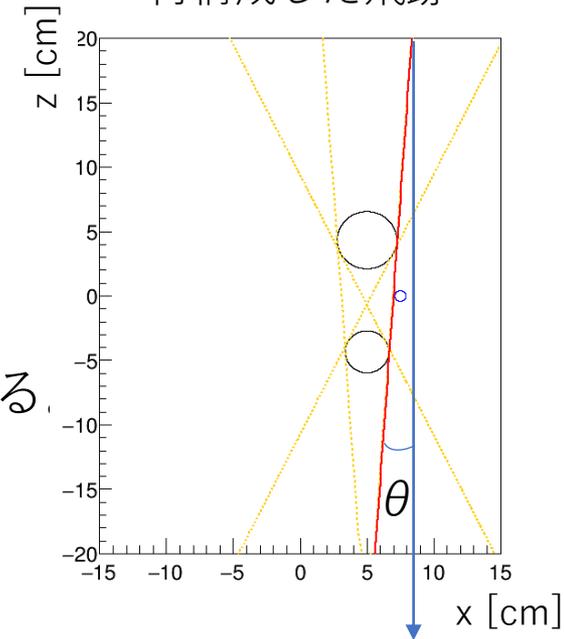
角度分解能の測定方法を以下に示す。

- ① 飛跡を再構成し、その飛跡の角度 θ を求める。
- ② ドリフトチェンバーupとdownで求めた角度の差($\theta_{\text{up}} - \theta_{\text{down}}$) 分布を求める。
- ③ ガウス関数でフィッティングし標準偏差を求める。



5/19/2017

再構成した飛跡



角度分解能が良いヒットパターン
と悪いヒットパターンが存在



良いヒットパターンのみ使用
すれば 2σ の条件を満たしている。

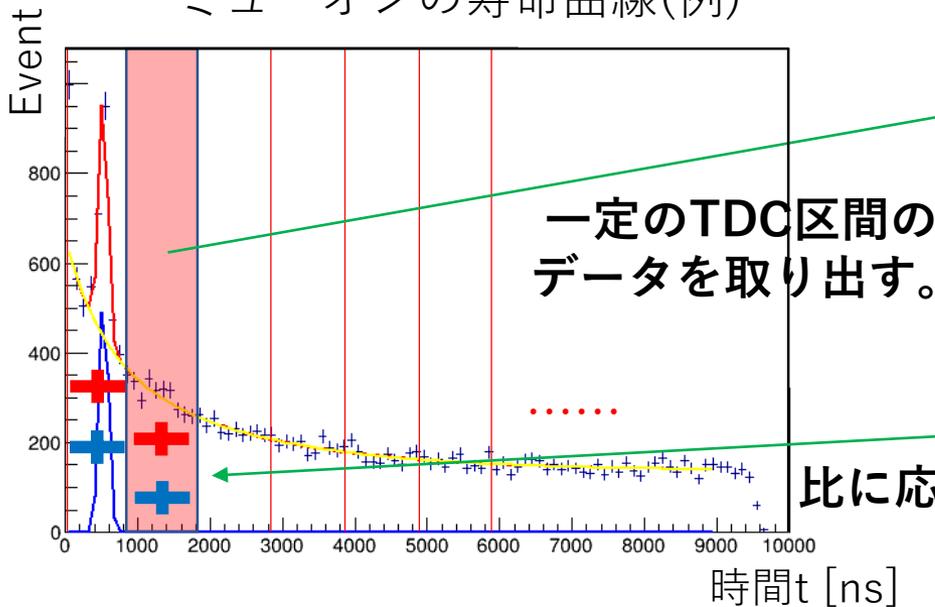
11/18

寿命差測定 of 解析方法

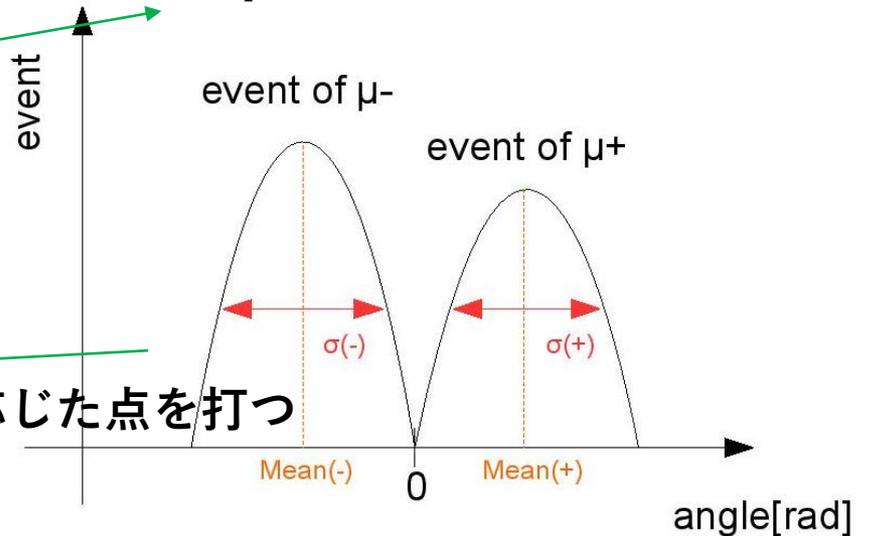
- ミューオン寿命曲線で一定のTDC区間毎の μ^\pm の比を調べる。
- 比に応じて、プロットする。
- μ^\pm それぞれの寿命曲線が描ける。

$$N(t) = \exp(p_0 + p_1 t) \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{1}{p_1}$$

ミューオンの寿命曲線(例)



$(\theta_{\text{up}} - \theta_{\text{down}})$ 分布を調べる。



つづき

μ^\pm の比を求める式

$$N_{(t)} = \underbrace{\frac{p_3}{1+p_0} \exp\left(-\frac{(t-p_1)^2}{2p_2^2}\right)}_{\mu^- \text{'s event}} + \underbrace{\frac{p_0 p_3}{1+p_0} \exp\left(-\frac{(t-p_4)^2}{2p_5^2}\right)}_{\mu^+ \text{'s event}}$$

Free parameter

p_0 : μ^\pm のイベント数の和($\mu^+ + \mu^-$)をあらわす。

p_3 : μ^\pm のイベント数の比(μ^+ / μ^-)をあらわす。

Fix parameter

$p_2 = \sigma(-) = 0.0112$
 $p_5 = \sigma(+) = 0.0112$] : 角度分解能に磁場の非一様性、
運動量の測定範囲を加えた分解能

$p_1 = \text{Mean}(-) = -0.0182$: μ^- の曲げられる平均角度

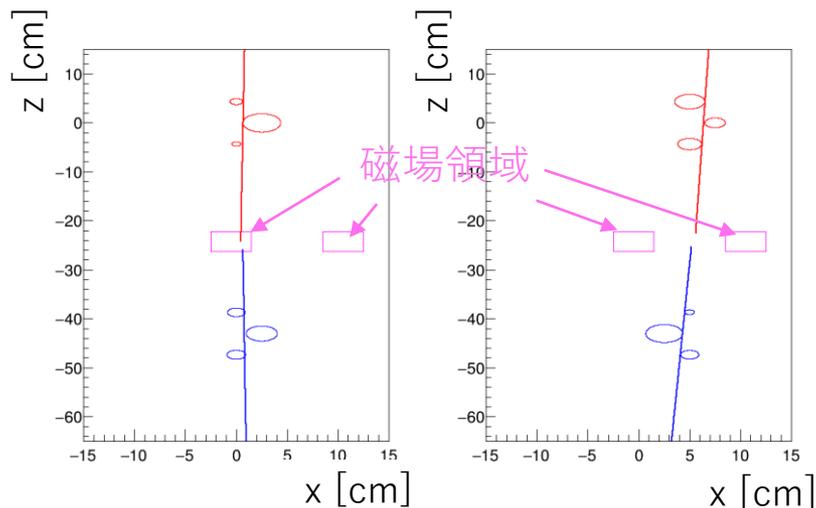
$p_4 = \text{Mean}(+) = 0.0182$: μ^+ の曲げられる平均角度

電荷識別装置の結果

電荷識別装置のみで取得したデータの解析を行った。

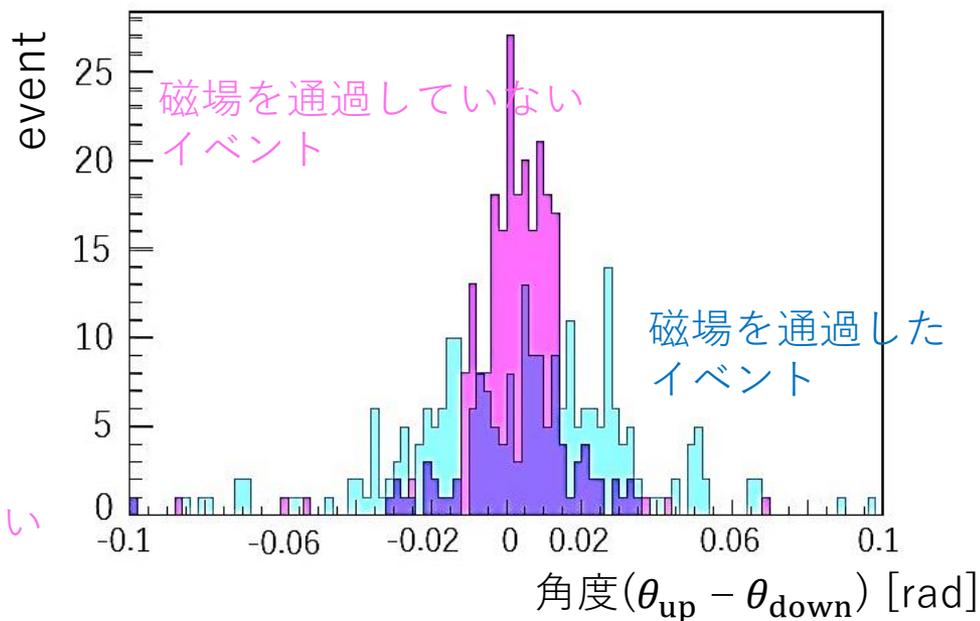
磁場領域を通過したイベントと通過していないイベントを分け、角度の差($\theta_{\text{up}} - \theta_{\text{down}}$)分布を調べた。(ヒットパターンでの区別なし)

($\theta_{\text{up}} - \theta_{\text{down}}$) 分布



磁場を通過した
イベントの再構成

磁場を通過していない
イベントの再構成



磁場によって飛跡が曲げられていることがわかる。

寿命測定装置のみの結果

寿命測定装置のみで取得したデータの解析を行った。

宇宙線ミューオンの入射時間と電子・陽電子放出時間の差のTDC分布を次の式でフィッティングを行った。

$$N_{(t)} = \exp(p_0 + p_1 t) + \exp(p_2 + p_3 t) + p_4 + p_5 \exp\left(-\frac{(t - p_6)^2}{2p_7^2}\right)$$

μ^- の寿命曲線

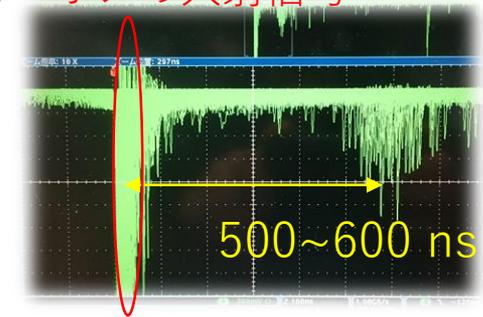
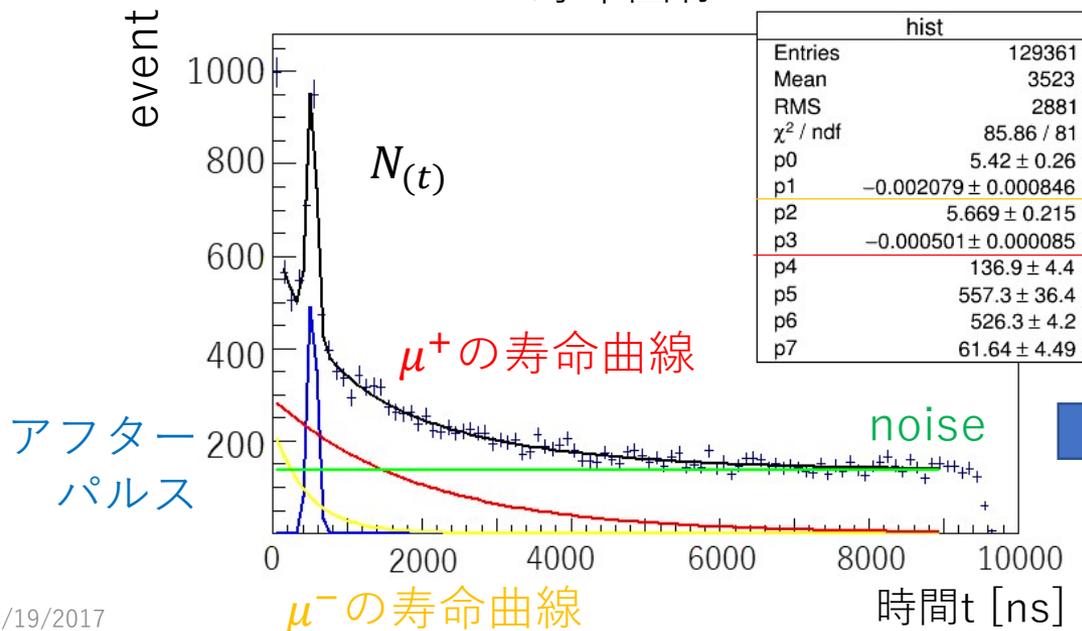
μ^+ の寿命曲線

noise

アフターパルス

寿命曲線

ミューオンの入射信号



$$\tau_- = 0.48 \pm 0.20 \mu\text{s}$$

$$\tau_+ = 2.00 \pm 0.34 \mu\text{s}$$

文献値 $\tau_- = 0.88 \mu\text{s}$
 $\tau_+ = 2.19 \mu\text{s}$

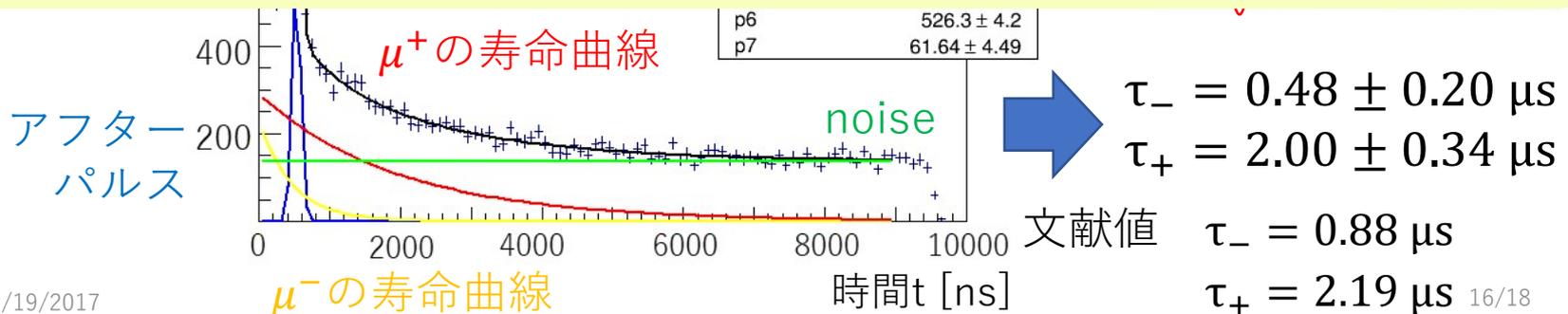
寿命測定装置のみの結果

寿命測定装置のみで取得したデータの解析を行った。

宇宙線ミューオンの入射時間と電子・陽電子放出時間の差のTDC分布を次の式でフィッティングを行った。

$$\left((t - p_6)^2 \right)$$

ここから更に一定のTDC区間毎の μ^\pm の比を求め、 μ^\pm それぞれの寿命曲線を描く
→ μ^\pm の寿命を求めていく。

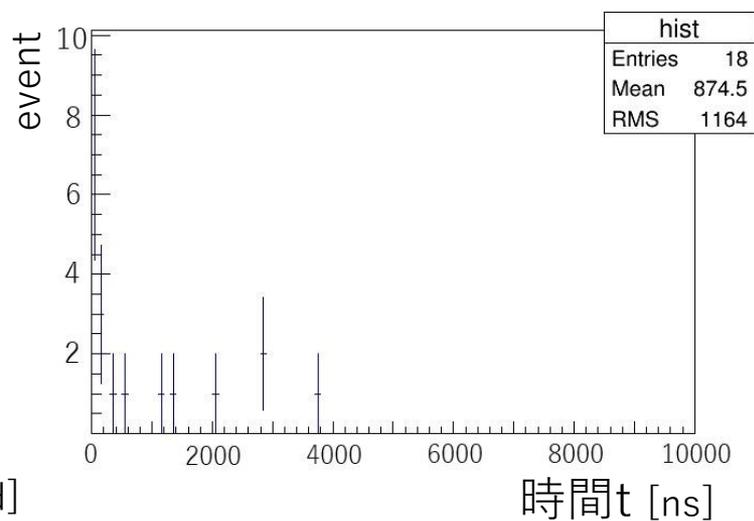
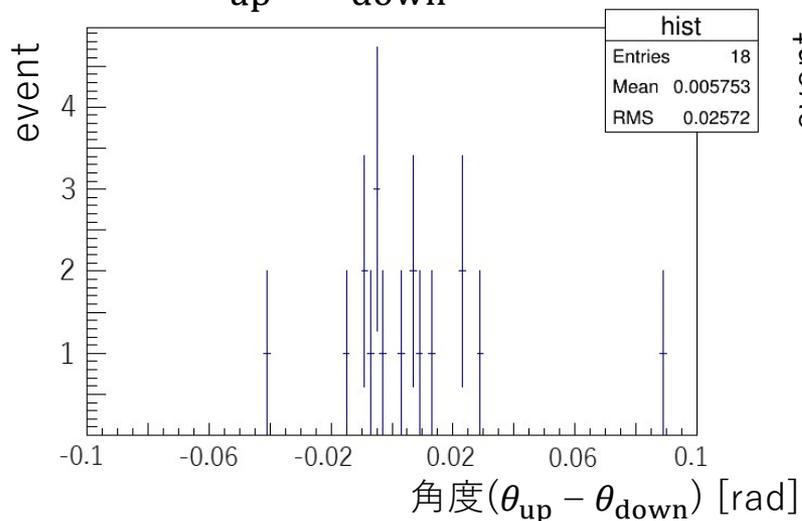


寿命差測定の結果

取得したデータのうち、電荷が識別できているかつ寿命が測定できているイベントを取り出す (ヒットパターンでの区別なし)

$(\theta_{\text{up}} - \theta_{\text{down}})$ 分布

寿命曲線



まだ、18イベント (200時間) しか取得できていないため測定不能。

→ イベントが貯まれば測定は可能だと考えられる。

ただ、ドリフトチェンバーの不具合で磁場領域中1/3しか使用できなかったなので、修理する必要がある。→統計が3倍になる。

まとめ

- ドリフトチェンバーを2つ製作した。
 - 2次元での飛跡再構成のため1段構造をもつ
- ドリフトチェンバーの性能評価を行った。
 - 角度分解能が 10.1 ± 0.4 mrad, 40.7 ± 1.0 mrad
- 寿命差測定のための実験装置を製作し、電荷識別装置と寿命測定装置それぞれの結果を得ることができた。
 - 電荷識別が 2σ の精度で測定可能(ヒットパターン区別が必要)
 - 寿命が $\tau_- = 0.48 \pm 0.20 \mu\text{s}$
 $\tau_+ = 2.00 \pm 0.34 \mu\text{s}$
- 正負ミューオンの寿命差測定のデータは、18イベントしか取得することができず測定できなかった。
 - データを貯めることで測定可能だと考えられる。
 - ドリフトチェンバーを修理することで改善されると期待

Back up

ミューオンの寿命差

物質中は、 μ^+ の時間 Δt での崩壊数は、 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \lambda_+ N(t) \Delta t$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda_+ t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_+}}$$

$$\frac{1}{\tau_+} = \lambda_+ \rightarrow \tau_+ = \frac{1}{\lambda_+}$$

μ^- の時間 Δt での崩壊数は、 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ $\mu^- + p \rightarrow \nu_\mu + n$

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \lambda_- N(t) \Delta t + \Gamma N(t) \Delta t$$

$$N(t) = N_0 e^{-(\lambda_- + \Gamma)t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_-}}$$

$$\frac{1}{\tau_-} = \lambda_- + \Gamma \rightarrow \tau_- = \frac{1}{\lambda_- + \Gamma}$$

よって、見かけ上寿命が短くなる。

ミューオンの電荷識別

電荷識別装置において永久磁石を用いて、磁場の製作を行った。
磁場中でミューオンの電荷によって、ローレンツ力の働く向きが異なる。

→電荷を識別することができる。

製作した磁場の強さは以下の式を満たした。

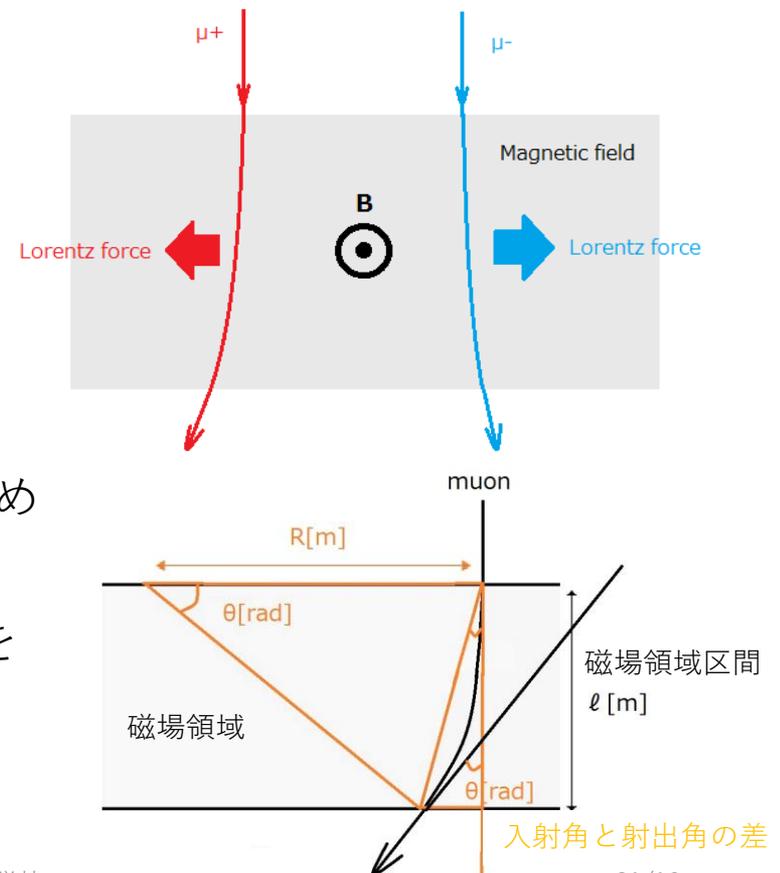
$$p[\text{GeV}] = 0.3B[\text{T}]R[\text{m}]$$

$$R[\text{m}] = \frac{\ell}{\sin \theta}$$

$$B[\text{T}]\ell[\text{m}] \geq \frac{p[\text{GeV}] \sin \theta}{0.3} = 61.3[\text{Gauss} \cdot \text{m}]$$

ここで、 θ は 2σ の精度で電荷を識別するため
 $\theta = 2\sigma$ とした。 σ はドリフトチェンバーの
角度分解能と空気中などの多重散乱の影響を
含んだ値である。 $\sigma = 9.19\text{mrad}$

$$B[\text{T}]\ell[\text{m}] > 90[\text{Gauss} \cdot \text{m}]$$



ドリフトチェンバー検出効率測定

測定方法

1. トリガーとして用いる層を2つ決める。
2. 測定したい層がヒットがあるイベントの数を測定する。

結果

$$\text{efficiency} = \frac{\text{event count}}{\text{trigger count}} \times 100$$

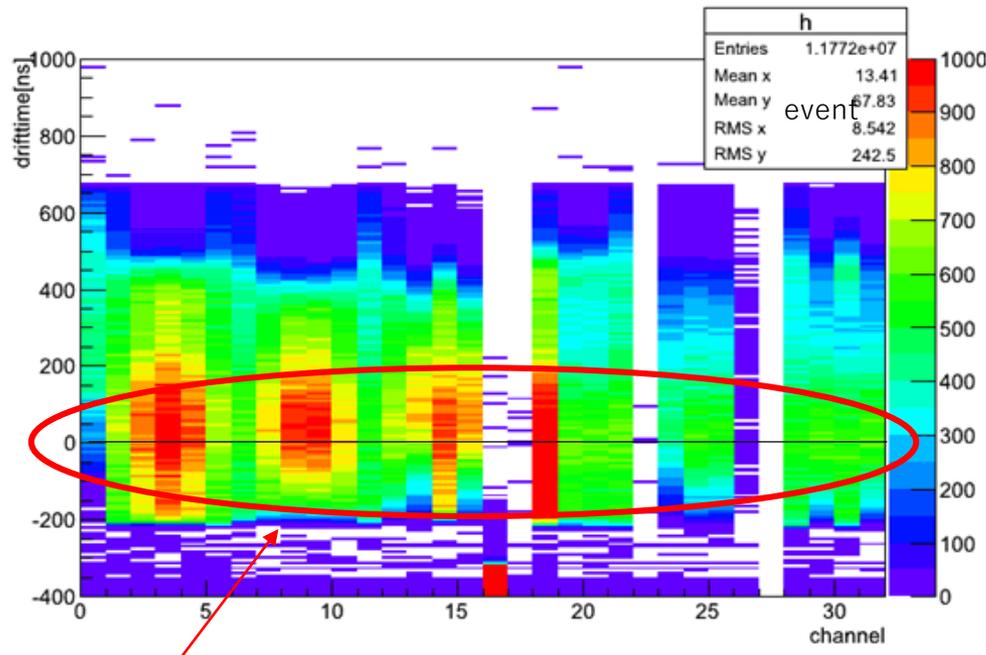
| Drift Chamber | trigger count | event count | efficiency[%] |
|---------------|---------------|-------------|---------------|
| 1. ①②③ | 197642 | 188297 | 95.27±0.05 |
| 2. ④⑤⑥ | 146766 | 90698 | 61.80±0.13 |
| 3. ①②③④⑤⑥ | 124246 | 62221 | 50.08±0.14 |
| 4. ①②⑥ | 124246 | 115441 | 92.91±0.07 |
| 5. ①③⑥ | 124246 | 108084 | 86.99±0.10 |
| 6. ①④⑥ | 124246 | 119114 | 95.87±0.06 |
| 7. ①⑤⑥ | 124246 | 75633 | 60.87±0.14 |

⑤の層の2つチャンネルが測定不能なため、検出効率が落ちている。

○ means trigger layer.

ドリフトチェンバー時間原点

ドリフト時間のTDC分布を表示する。



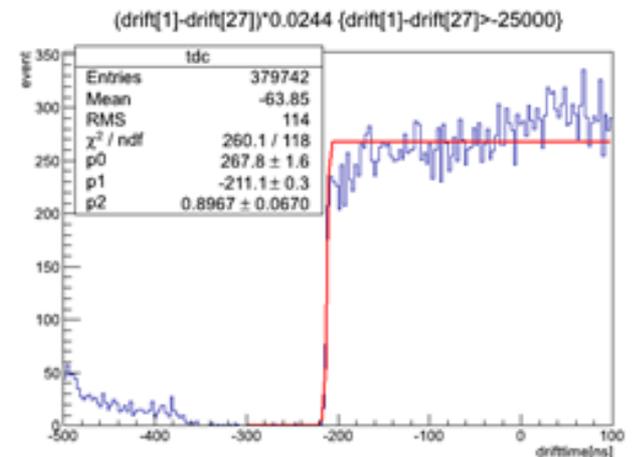
信号の立ち上がりが大きくゼロからずれている。
これは、読み出し回路（TDC内の回路など）の影響でずれが生じる。

→ずれを補正する必要がある。

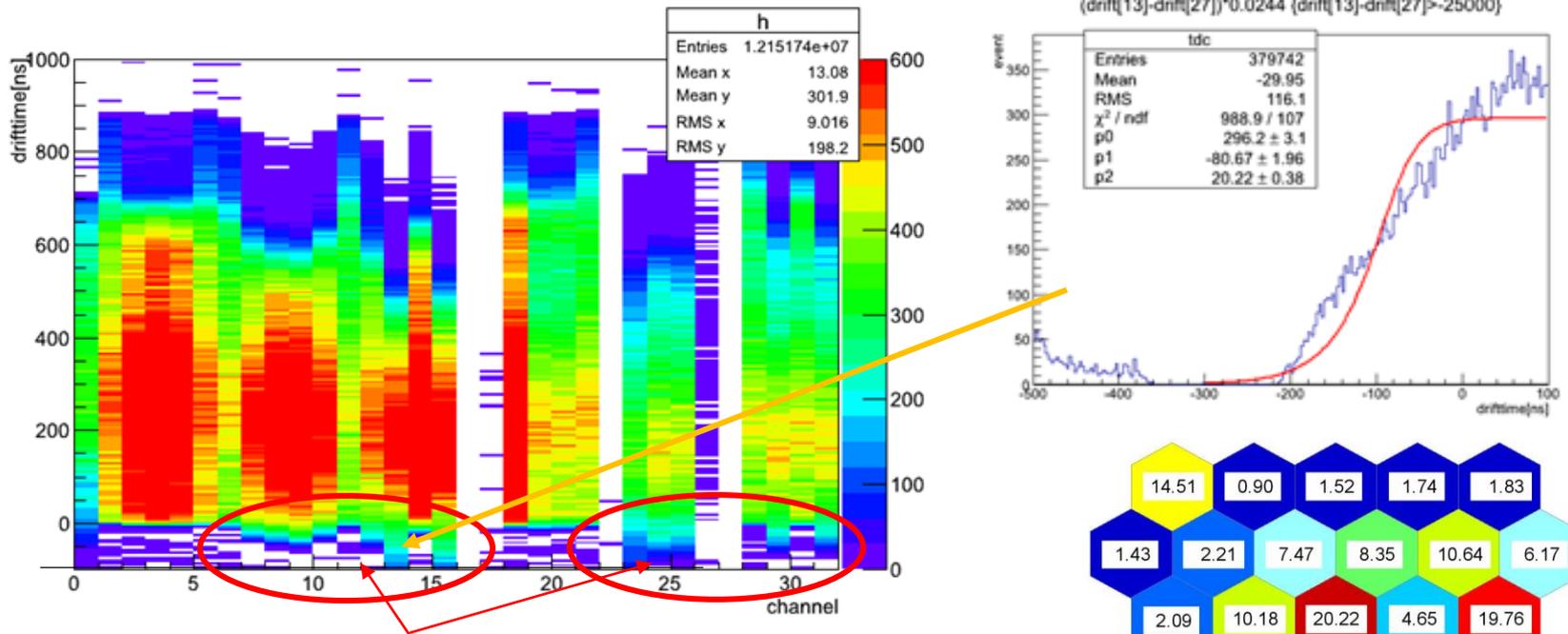
フィッティング関数

$$y = \frac{p_1}{\sqrt{\exp\left(\frac{t - p_0}{p_2}\right) + 1}}$$

p_0 : 時間原点



補正後のTDC分布



多くのチャンネルをゼロにあわせることができた。
 しかし、一部のチャンネルがまだずれたままになっている。
 →これらのチャンネルは信号の立ち上がりが緩やか
 つまり、時間分解能が悪いチャンネル

原因不明：エレキの問題？電場の乱れ？

r-t 曲線

ドリフト時間 t と距離 r の関係 (r-t 曲線)を求める。

$$r = \int v(t') dt'$$

セル内の電場が一様であると仮定する。

$$r = vt$$

また、宇宙線がセルに対して一様に分布すると仮定する。 イベント数 $N(r)$

$$N(r) \propto r^2$$

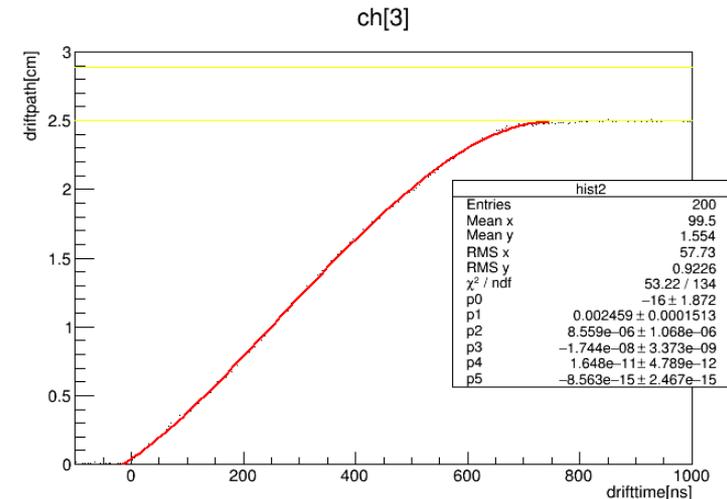
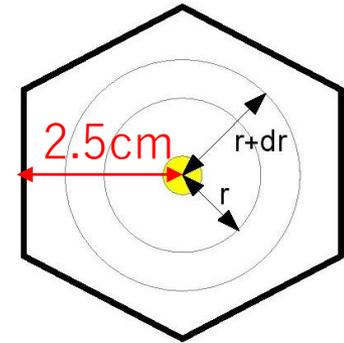
$$N(r) \propto t^2 \quad (\text{2次の関係})$$

電場が一様ではない効果も考慮して、
フィッティング関数は5次関数とした。

$$CN(r) = P_5(t - P_0)^5 + P_4(t - P_0)^4 + P_3(t - P_0)^3 + P_2(t - P_0)^2 + P_1(t - P_0)$$

$CN(r)$ は最大ドリフト距離とした。

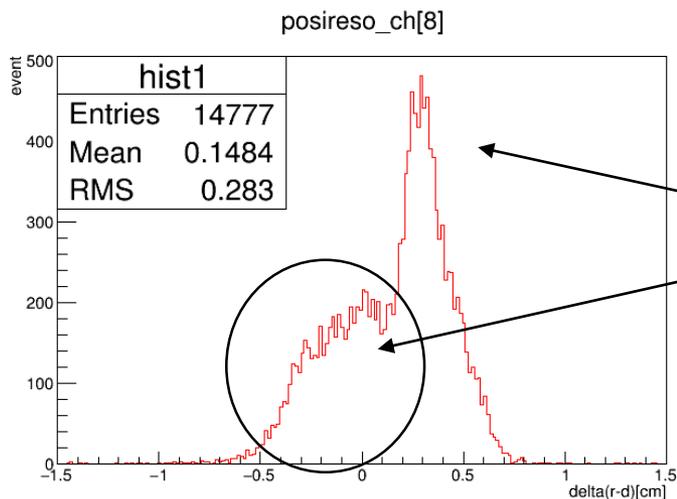
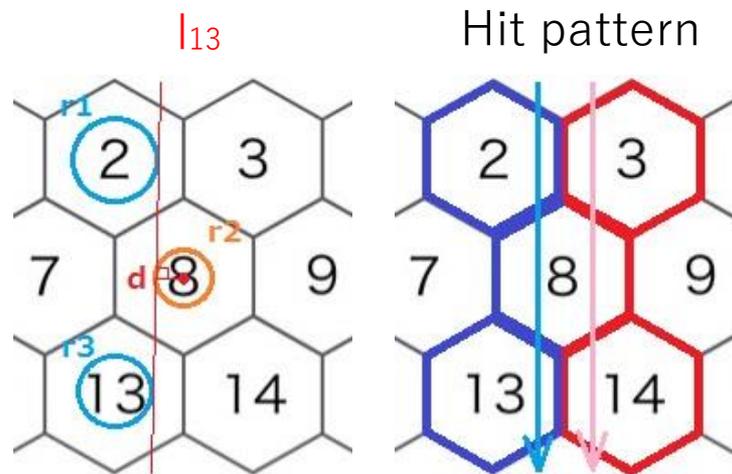
$$CN(r) = r_{max} = 2.500cm$$



ドリフトチェンバー位置分解能

位置分解能の測定方法を以下に示す。

- ① 1層目と3層目のドリフト距離から共通接線 l_{13} を求める。
- ② 求めた共通接線 l_{13} とセンスワイヤーとの距離 d を求め、実際の2層目のドリフト距離 r_2 との差 $(d - r_2)$ 分布を表示する。
- ③ ガウス関数でフィッティングし標準偏差を求める

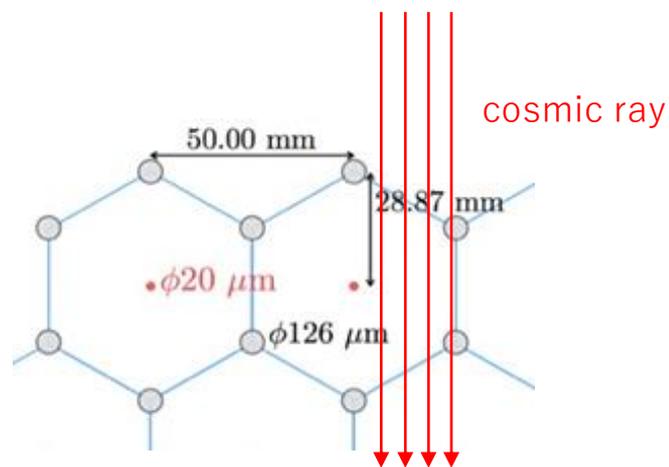
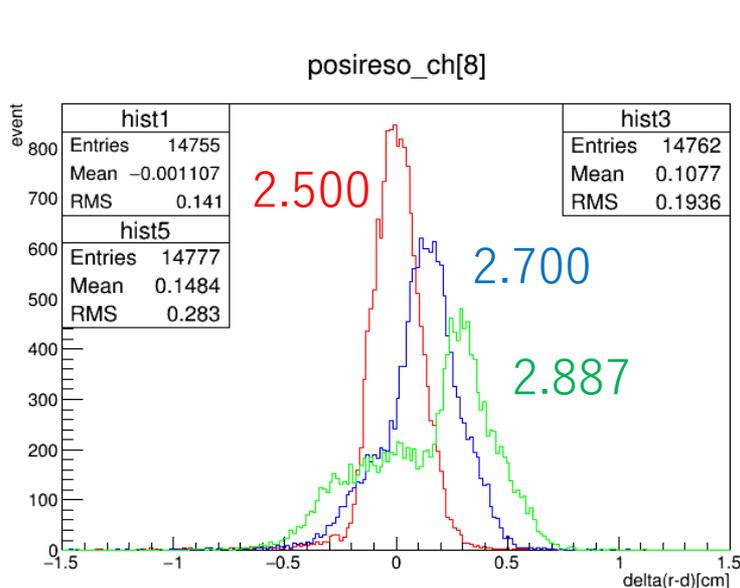


ピークの位置がゼロからずれている。
テールがあらわれている。

➡ 最大ドリフト距離が間違っている？

最大ドリフト距離の考察

最大ドリフト距離別での位置分解能分布を調べてみる。



検出される宇宙線の多くが垂直入射



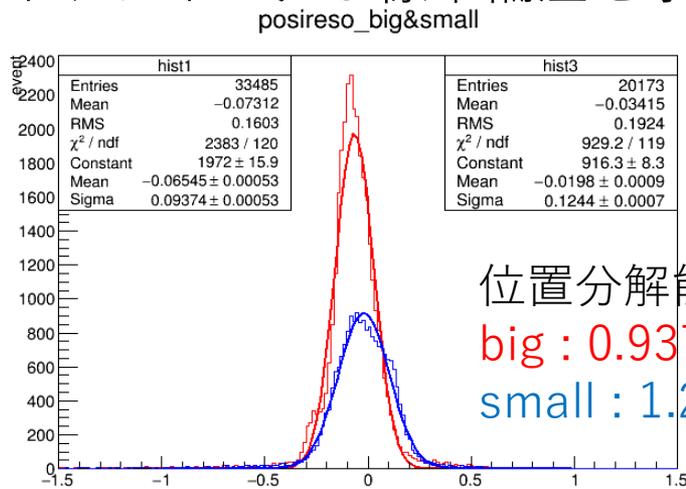
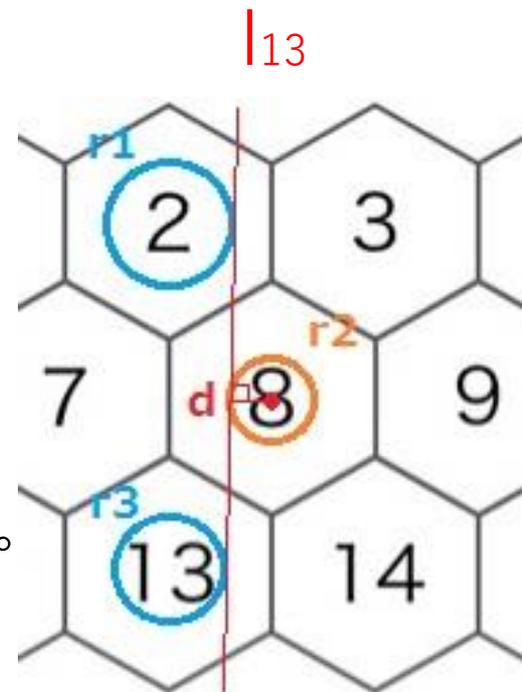
最大ドリフト距離は2.500cmが適切

最大ドリフト距離を2.500cmとして以後測定を行った。

位置分解能

位置分解能の測定方法を以下に示す。

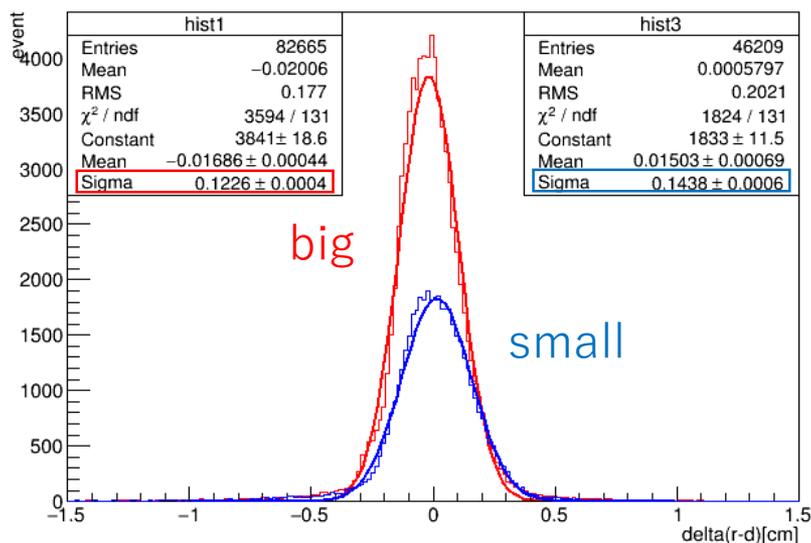
- ① 1層目と3層目のドリフト距離から共通接線 l_{13} を求める。
- ② 求めた共通接線 l_{13} とセンスワイヤーとの距離 d を求め、実際の2層目のドリフト距離 r_2 との差 $(d - r_2)$ 分布を表示する。
- ③ ガウス関数でフィッティングし標準偏差を求める。



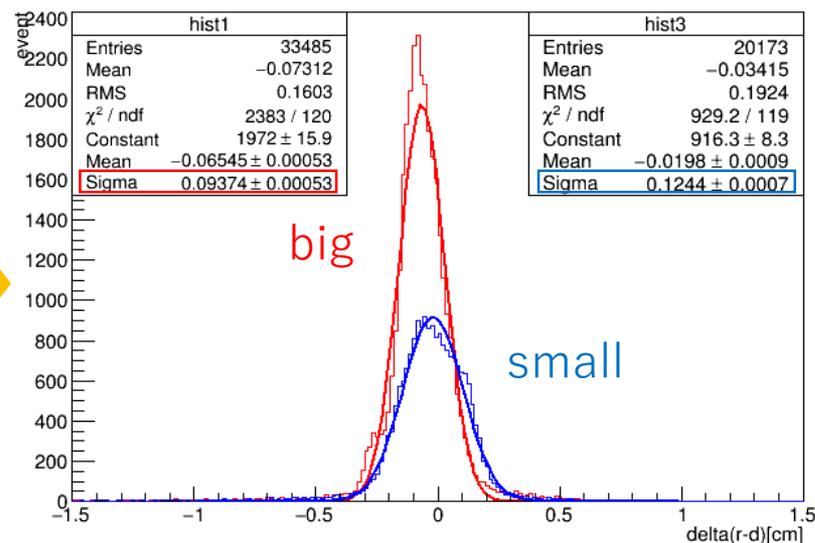
位置分解能は、
big : $0.9374 \pm 0.0053 \text{ mm}$
small : $1.244 \pm 0.007 \text{ mm}$

位置分解能フィッティング結果

Position resolution



Position resolution ($-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$)



位置分解能の結果

big : $1.226 \pm 0.004 \text{ mm}$
 small : $1.438 \pm 0.006 \text{ mm}$

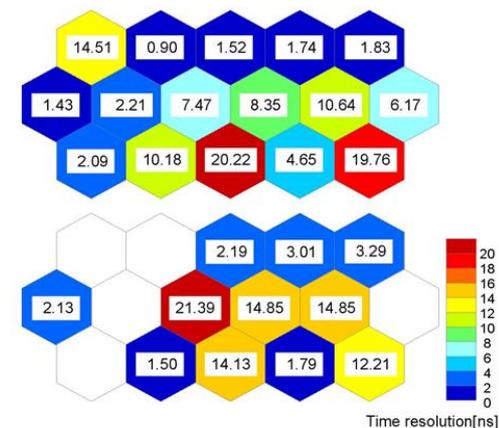
位置分解能($-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$)の結果

big : $0.9374 \pm 0.0053 \text{ mm}$
 small : $1.244 \pm 0.007 \text{ mm}$

各チャンネルにおける位置分解能

| channel | Resolution[mm] | channel | Resolution[mm] |
|---------|---------------------|---------|---------------------|
| | | 0,5,11 | × |
| 0,6,11 | × | 1,6,12 | 0.6764 ± 0.0231 |
| 1,7,12 | 0.677 ± 0.015 | 2,7,13 | 0.6729 ± 0.0097 |
| 2,8,13 | 0.7688 ± 0.0111 | 3,8,14 | 0.8489 ± 0.0081 |
| 3,9,14 | 0.8727 ± 0.0083 | 4,9,15 | 0.6973 ± 0.0100 |
| 4,10,15 | 0.6456 ± 0.0087 | | |

| channel | Resolution[mm] | Channel | Resolution[mm] |
|----------|---------------------|----------|---------------------|
| | | 16,21,27 | × |
| 16,22,27 | × | 17,22,28 | × |
| 17,23,28 | × | 18,23,29 | 1.49 ± 0.02 |
| 18,24,29 | 0.8588 ± 0.0104 | 19,24,30 | 1.138 ± 0.012 |
| 19,25,30 | 1.246 ± 0.012 | 20,25,31 | 0.9563 ± 0.0118 |
| 20,26,31 | × | | |

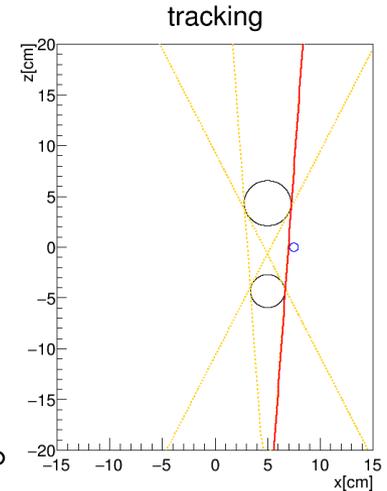


時間分解能が悪いチャンネルがあると、角度分解能が大きく悪くなる傾向がある。

ドリフト速度は
 0.04 mm/ns.
 $\rightarrow 0.04 \text{ mm/ns} \times 20 \text{ ns}$
 $= 0.8 \text{ mm}$
 だいたい、位置分解能が
 0.8 mm 悪くなる。

角度分解能

再構成した飛跡



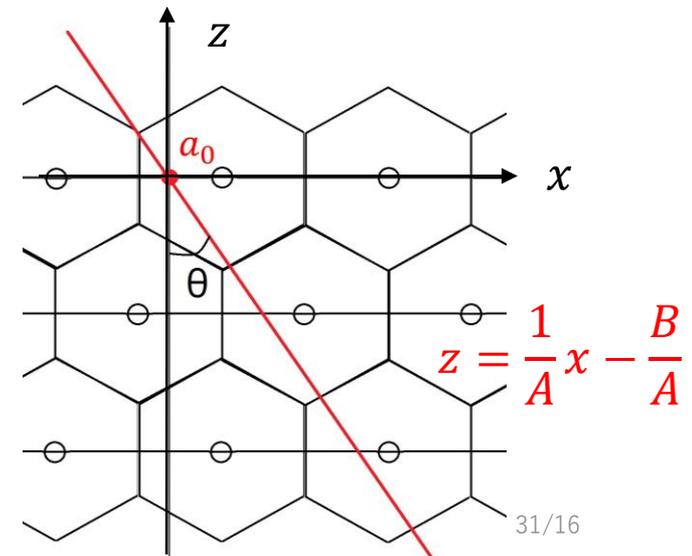
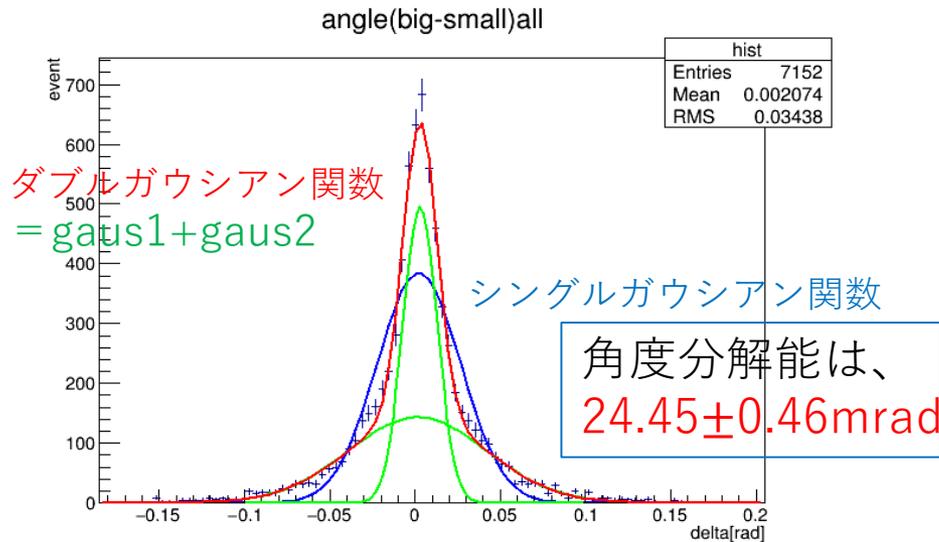
角度分解能の測定方法を以下に示す。

① 飛跡を再構成し、その飛跡の角度を求める。

$$\theta = \arctan(A)$$

② ドリフトチェンバーBigとSmallで求めた角度の差($\theta_{big} - \theta_{small}$) 分布を求める。

③ ガウス関数でフィッティングし標準偏差を求める。

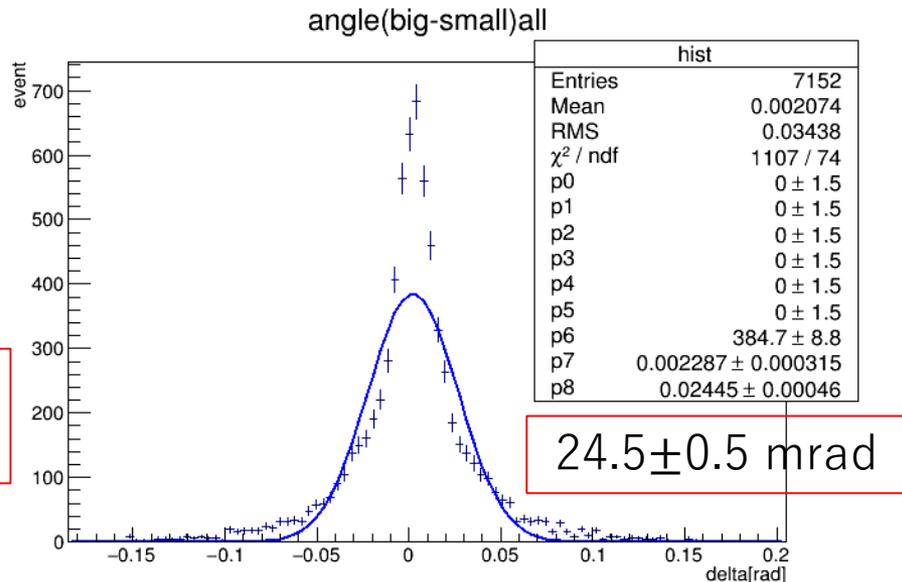
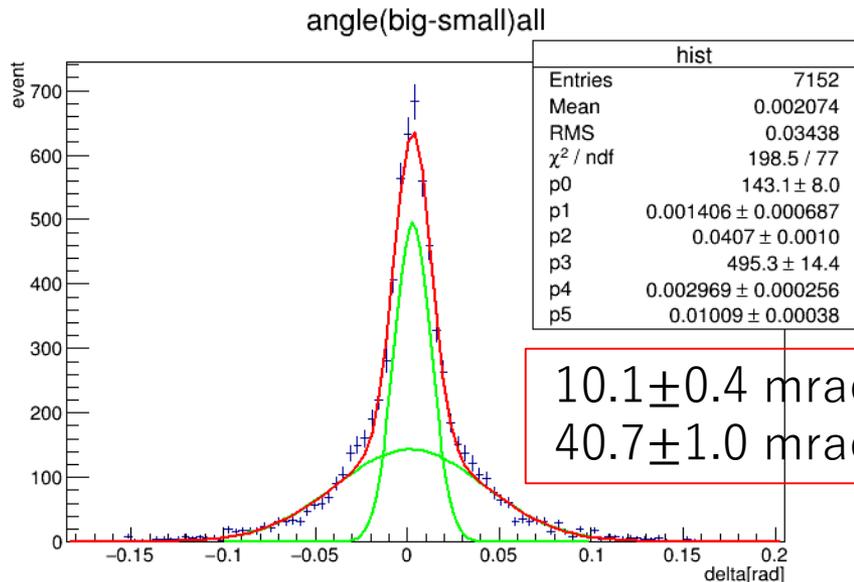


角度分解能フィッティング

- 角度分解能が悪いチャンネルと良いチャンネルがあるため、分布がダブルガウシアン関数となった。

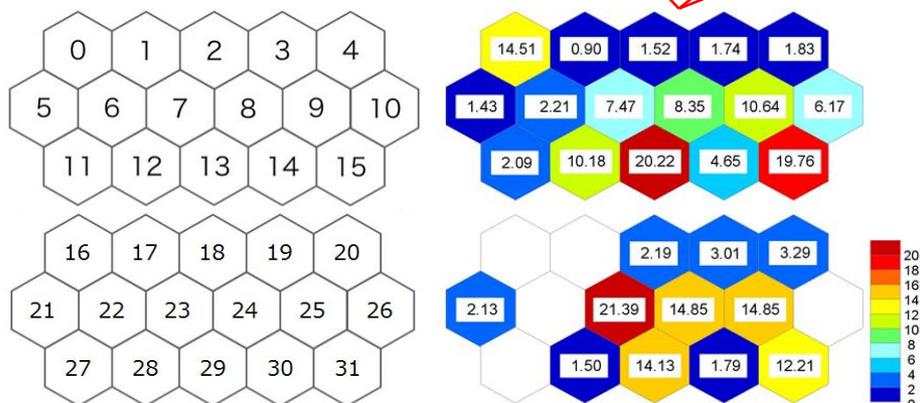
本来ならば、データを悪いチャンネルと良いチャンネルとで分けて解析を行いたい。

しかし、統計量が足りないので一括りで行うことにした。



各チャンネルにおける角度分解能

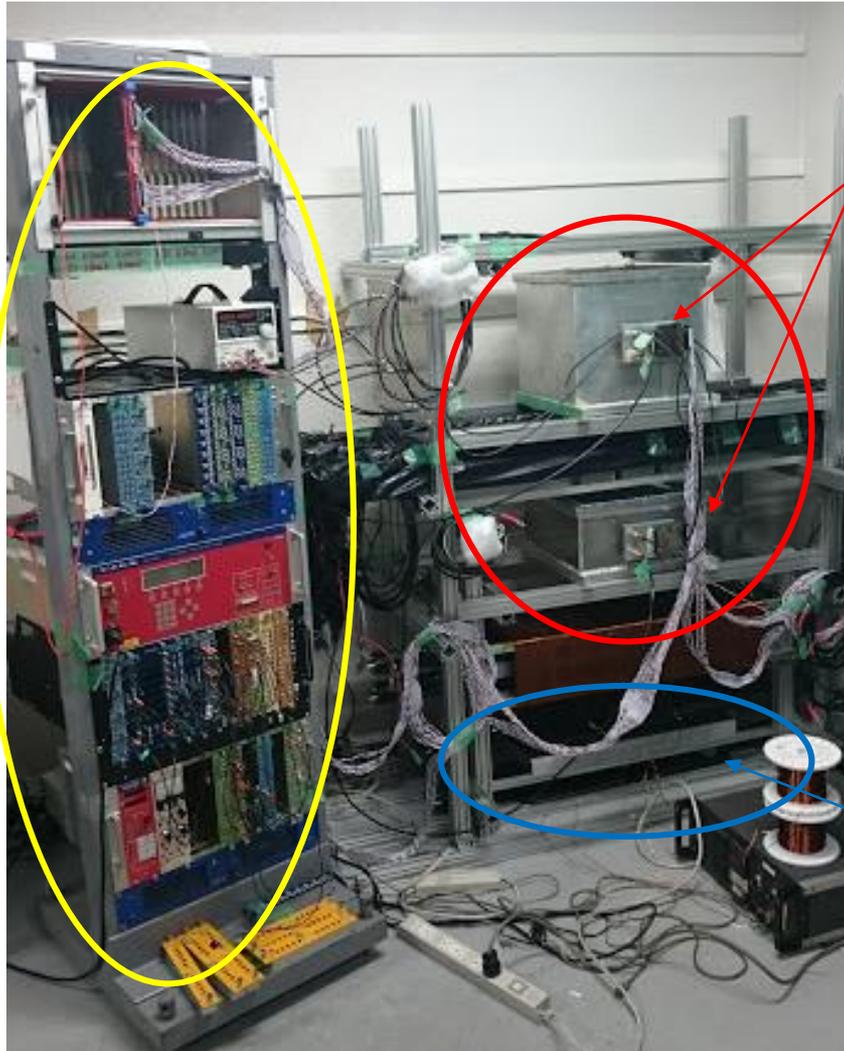
| channel | Angular resolution[mrad] | channel | Angular resolution[mrad] |
|------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| | | 0,5,11,16,21,27 | × |
| 0,6,11,16,22,27 | × | 1,6,12,17,22,28 | × |
| 1,7,12,17,23,28 | × | 2,7,13,18,23,29 | 28.82±0.82 |
| 2,8,13,18,24,29 | 31.44±0.88 | 3,8,14,19,24,30 | 7.276±0.204 |
| 3,9,14,19,25,30 | 7.151±0.250 | 4,9,15,20,25,31 | 27.05±0.70 |
| 4,10,15,20,26,31 | × | | |



時間分解能が悪いチャンネルがあると、角度分解能が大きく悪くなる傾向がある。

製作したMPMD

MPMDで使用するモジュール



製作したドリフトチェンバー
この装置での角度分解能は、
 $24.45 \pm 0.46 \text{ mrad}$

必要な磁場は、
 2σ の精度：

$$B[\text{Gauss}]l[\text{m}] \geq 163$$

$$1\sigma\text{の精度} : B[\text{Gauss}]l[\text{m}] \geq 82$$

製作したのは、

$$B[\text{Gauss}]l[\text{m}] \geq 90$$

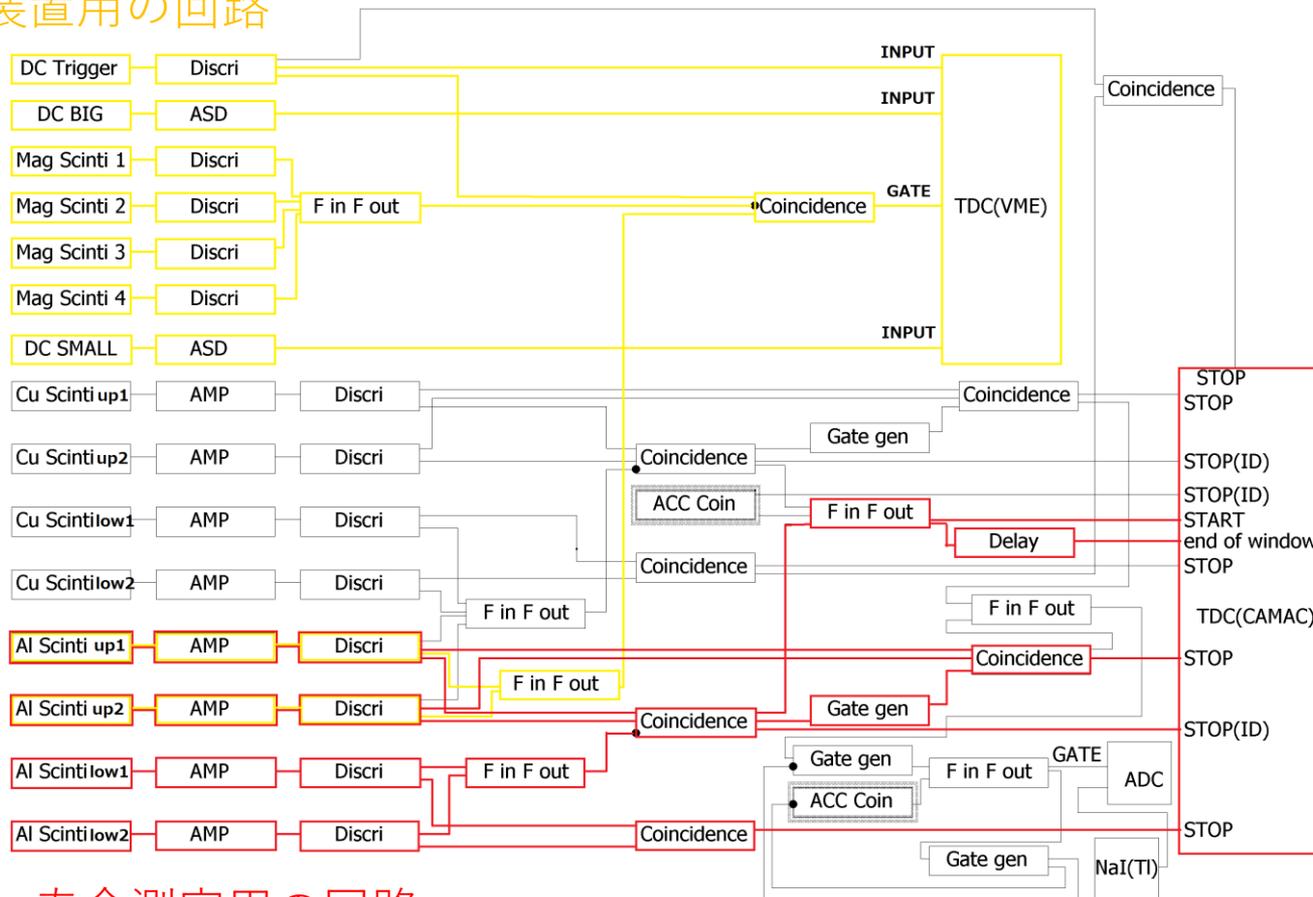
よって、

1σ の精度での測定が可能

寿命測定装置

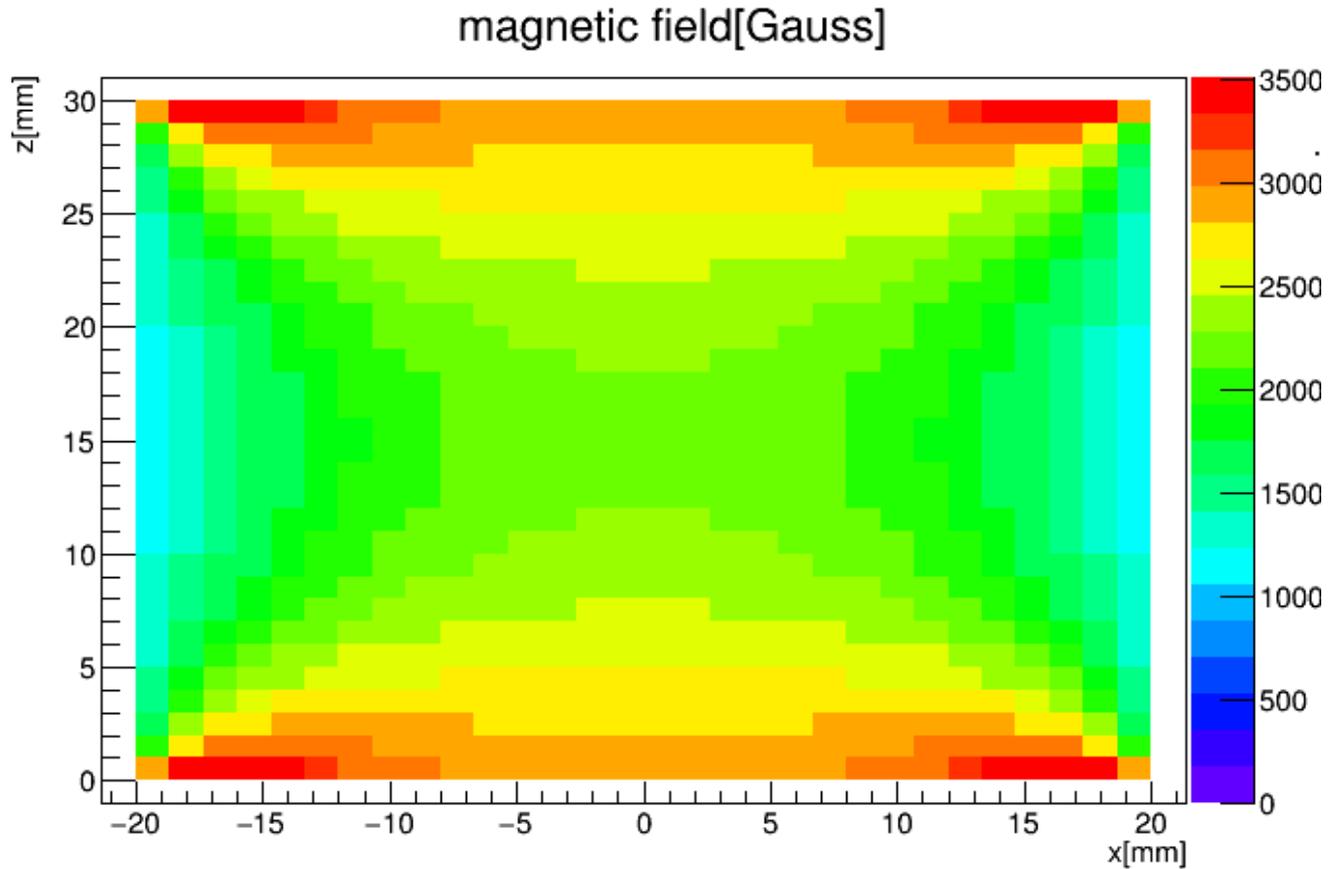
本測定セットアップ

電荷識別装置用の回路



寿命測定用の回路

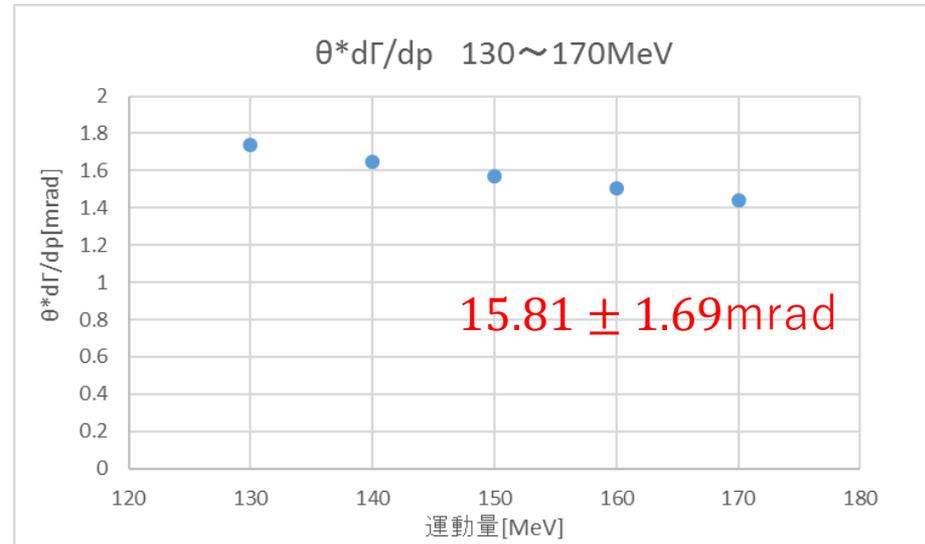
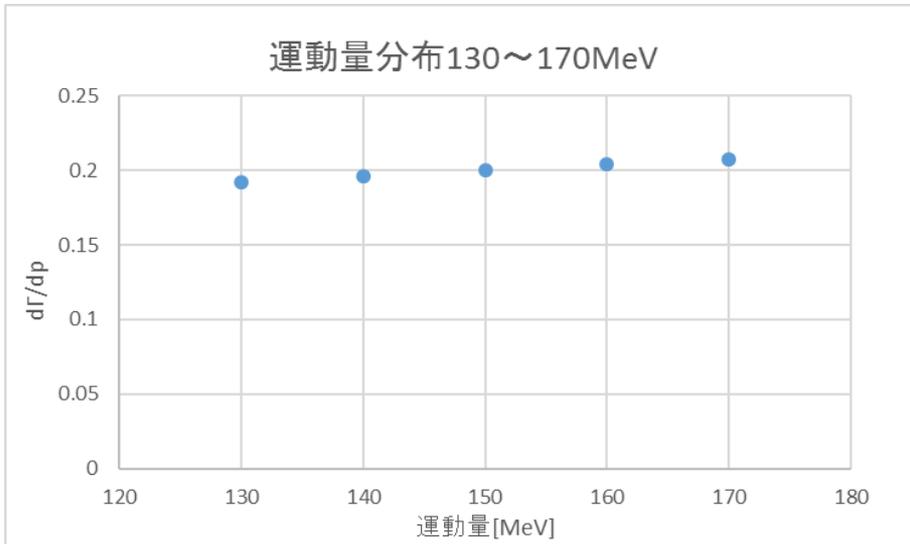
磁場領域 (中央)



$1963.5 \pm 548.8 \text{ Gauss}$ \longrightarrow 分解能 4.4 mrad

運動量分布 $\frac{d\Gamma}{dp}$

運動量分布は以下のようなグラフになる。



この値を用いて、フィッティングのパラメーターを設定した。

電荷識別の解析

磁場領域を通過したイベントを次の式でフィッティングを行った。

$$N(t) = \underbrace{\frac{p_3}{1 + p_0} \exp\left(-\frac{(t - p_1)^2}{2p_2^2}\right)}_{\mu^- \text{'s event}} + \underbrace{\frac{p_0 p_3}{1 + p_0} \exp\left(-\frac{(t - p_4)^2}{2p_5^2}\right)}_{\mu^+ \text{'s event}}$$

フリーパラメーター $p_0 : \frac{\mu^+}{\mu^-}$ の比、 p_3

磁場で荷電粒子(130~170MeV)が曲げられる平均角度

$$\int \Delta\theta \times \frac{d\Gamma}{dp} dp = 0.01581$$

$$p_1 = -0.01581, \quad p_3 = +0.01581$$

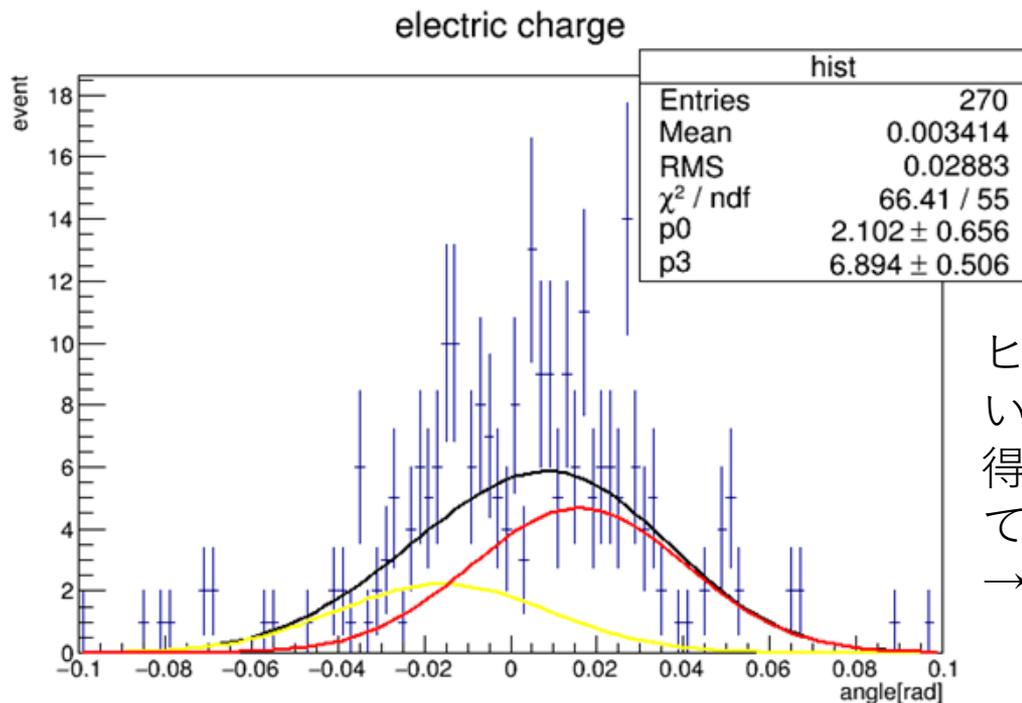
装置の角度分解能と測定する運動量分解能

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{DC}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_{mag}^2} = 24.90 \text{ mrad}$$

$$p_2 = p_5 = 0.02490$$

ジングルガウシアン
での計算

電荷識別の結果



ヒットパターンを区別していないため、シングスガウシアンで得た分解能24.45 mradを使用している。
→ここから磁場の計算をすると1 σ の精度でしか電荷識別ができていない。

この結果から、全イベントでの μ^\pm の比は、

$$\frac{\mu^+}{\mu^-} = 2.10 \pm 0.66 \pm 0.67$$

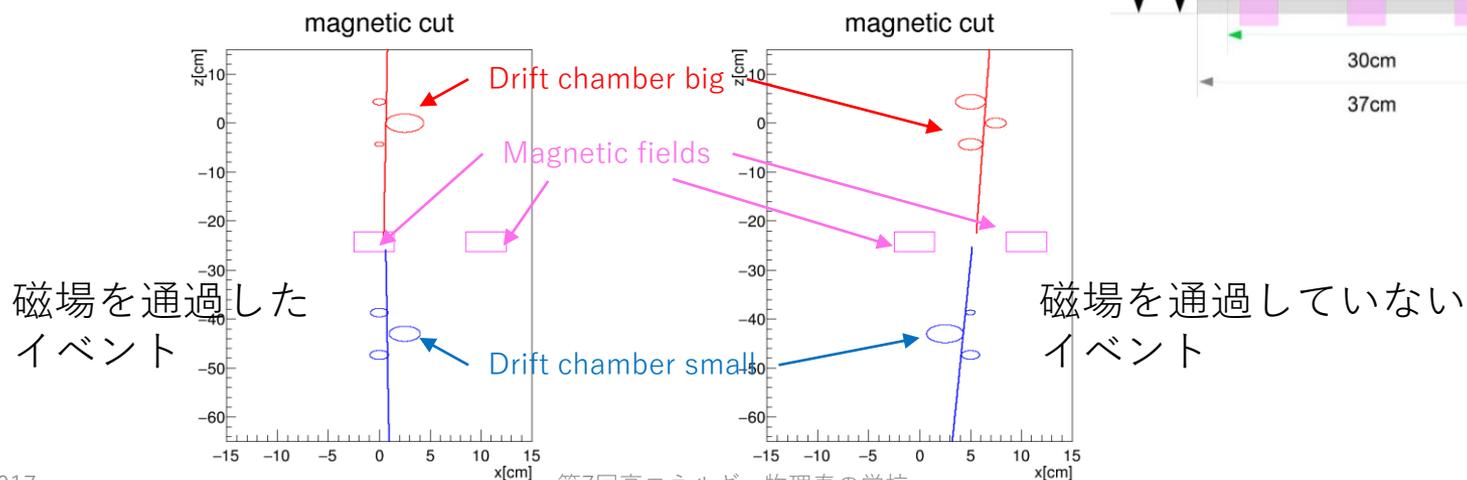
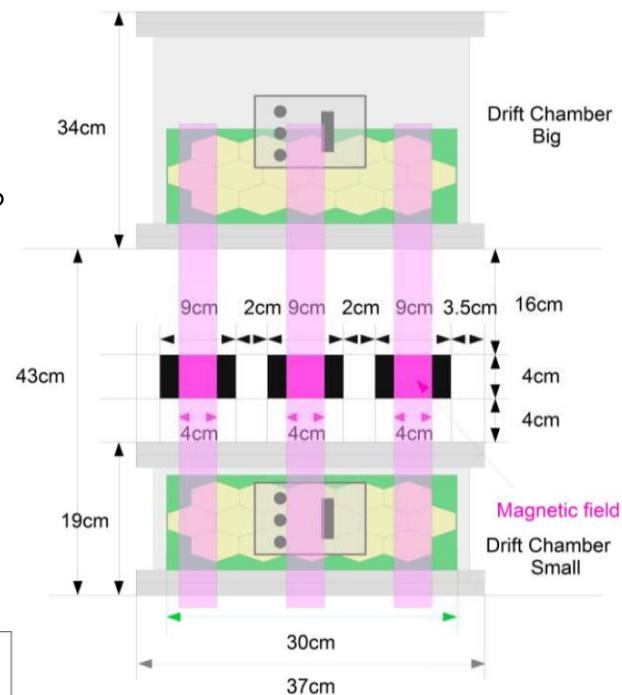
ヒットパターンを分けることで、より精度よく測定できる。

データセレクション

MPMDで約200時間データを取得した。

データセレクション

- ドリフトチェンバーの各層にヒットがある。
- 磁場領域を通過している。
飛跡を再構成して確認する。
- アルミ板に捕獲される。
アルミストップの信号があるかどうか

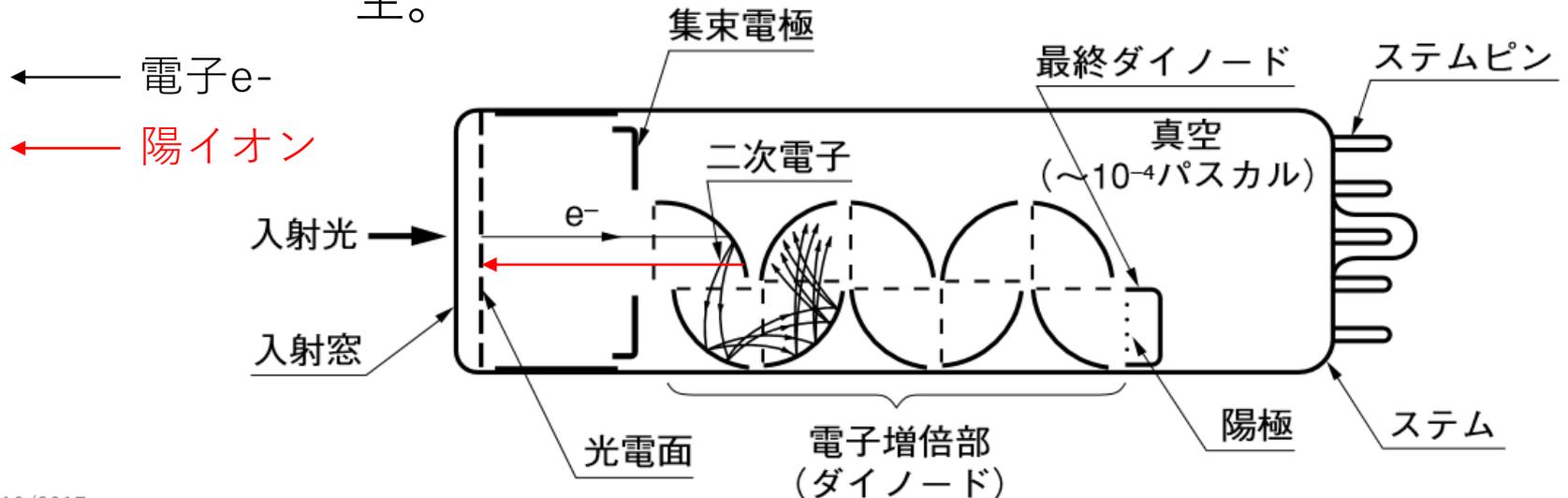


アフターパルス

- アフターパルスは二種類ある。

数ns～数十ns：第一ダイノードでの弾性散乱電子によって発生。

数百ns～数us：光電子がPMT内に残っている分子をイオン化し発生した陽イオンが、電場によって加速されて光電面に衝突し、電子を発生させることで発生。



アフターパルスの計算

- 数百ns～数usの見積もり

$$Ma = eE = e \frac{V}{d}$$

M : ガス分子の質量数、 a : ガス分子の加速度

d : 光電面からダイオードまでの距離

V : ダイオード間にかかる電圧

$$d = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \frac{eV}{dM} t^2$$

$$t = d \sqrt{\frac{2M}{eV}}$$

M : He, $d=0.03\text{m}$, $V=100\text{V}$



$$t \approx 610 \text{ ns}$$