

K中間子原子核のスピンパリティ 測定に向けた試作飛跡検出器の 位置分解能評価

東北大 RARiS, 理研^A, 東大理^B, 高工研^C
大高駿輔, 市川真也^A, 大西宏明, 木野量子^A, 木村佑斗^A,
佐久間史典^A, 堤祐人^B, 橋本直^A, 藤田真奈美^B, 馬越^A, 山我拓巳^C

東北大先端量子ビーム科学研究センター

M1 大高駿輔

for the J-PARC E80,E89 collaboration

目次

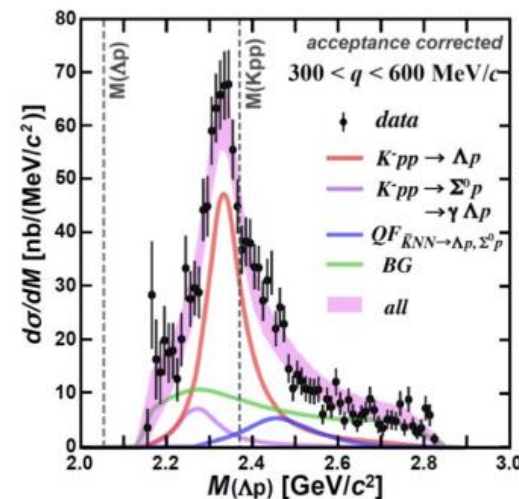
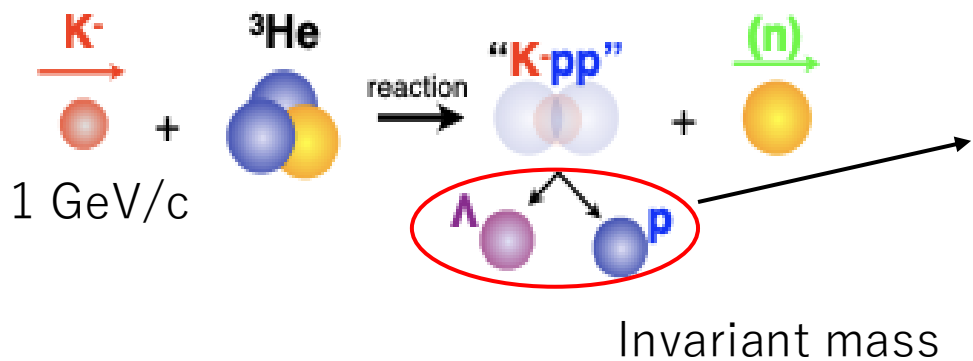
1. 反K中間子原子核
2. 次世代実験 (J-PARC E89 実験)
3. Polarimeter Tracker の要求性能
4. 試作検出器の基本構成
5. ビームテスト @J-PARC K1.8BR
6. 結果・考察 (検出効率・位置分解能)
7. まとめと展望

1. 反K中間子原子核

反K中間子($\bar{K}$)と核子(N)の強い引力相互作用によって形成される束縛状態

PLB789(2019)620., PRC102(2020)044002.

• J-PARC E15実験



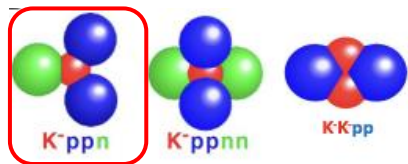
“ K^-pp ” 束縛状態の観測に成功

束縛エネルギー ~ 40 MeV
崩壊幅 ~ 100 MeV

次世代実験 …

① 系統的研究

- K^-ppn の測定
→ J-PARC E80実験(2027年開始予定)

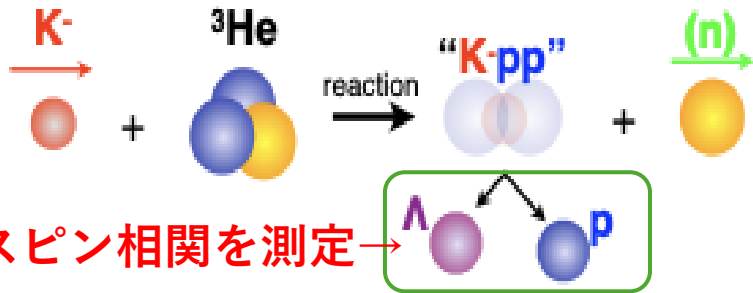


② $\bar{K}NN$ の内部構造の解明

- アイススピンパートナー $\bar{K}^0nn$ の観測
- スピン・パリティの測定
- J-PARC E89実験(2028年開始予定)

2. スピンパリティの決定

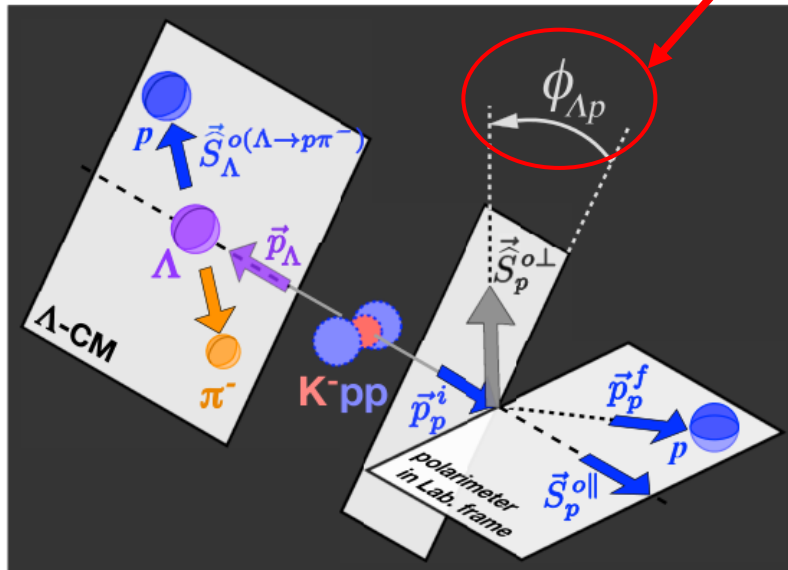
J-PARC E89実験



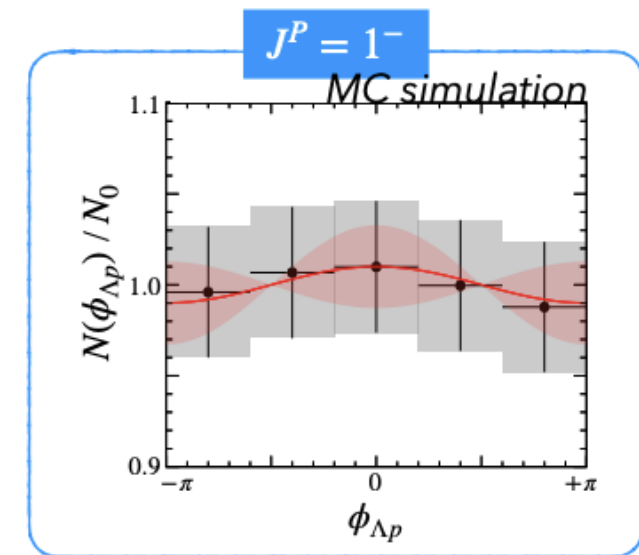
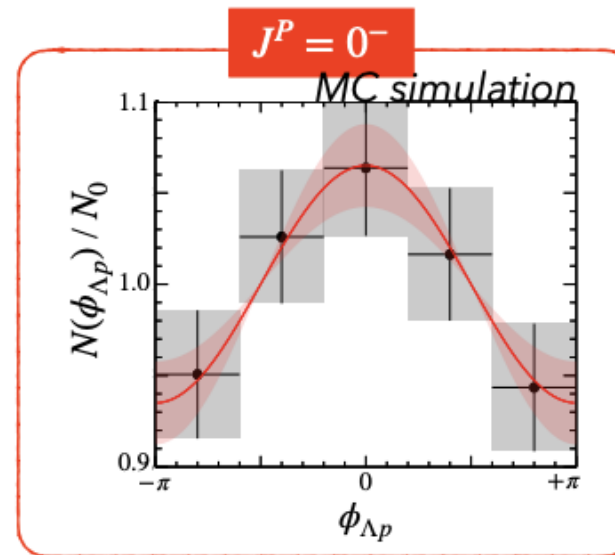
$\phi_{\Lambda p}$ 分布 (① - ②の垂直面)

$$N(\phi_{\Lambda p}) = N_o(1 + r\alpha_{\Lambda p} \cos \phi_{\Lambda p})$$

① 弱崩壊による平面



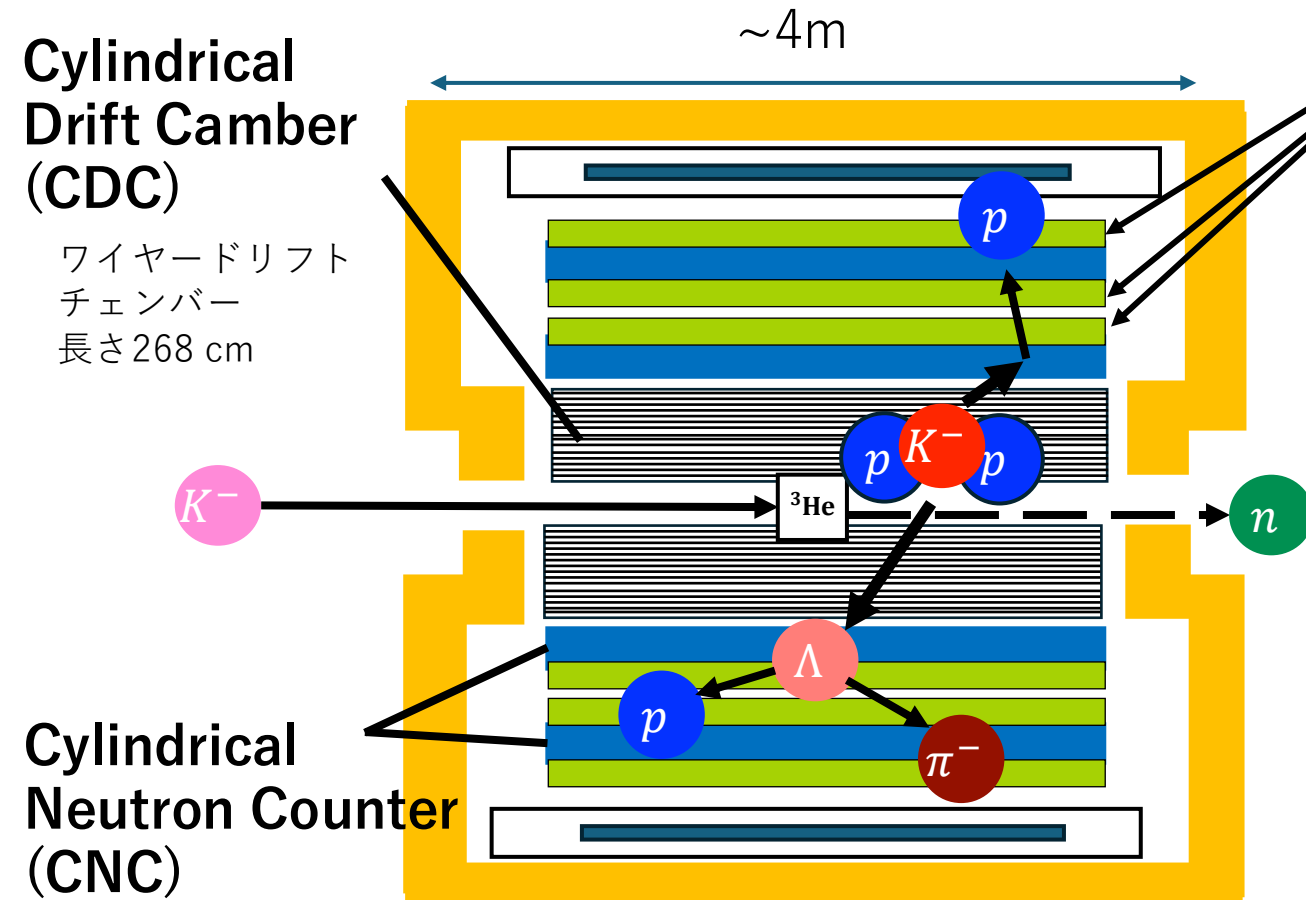
② $p - C$ 散乱による平面



➤ $\phi_{\Lambda p}$ 分布よりスピン相関 $\alpha_{\Lambda p}$ がわかる。

3-1. Cylindrical Detector System (CDS)

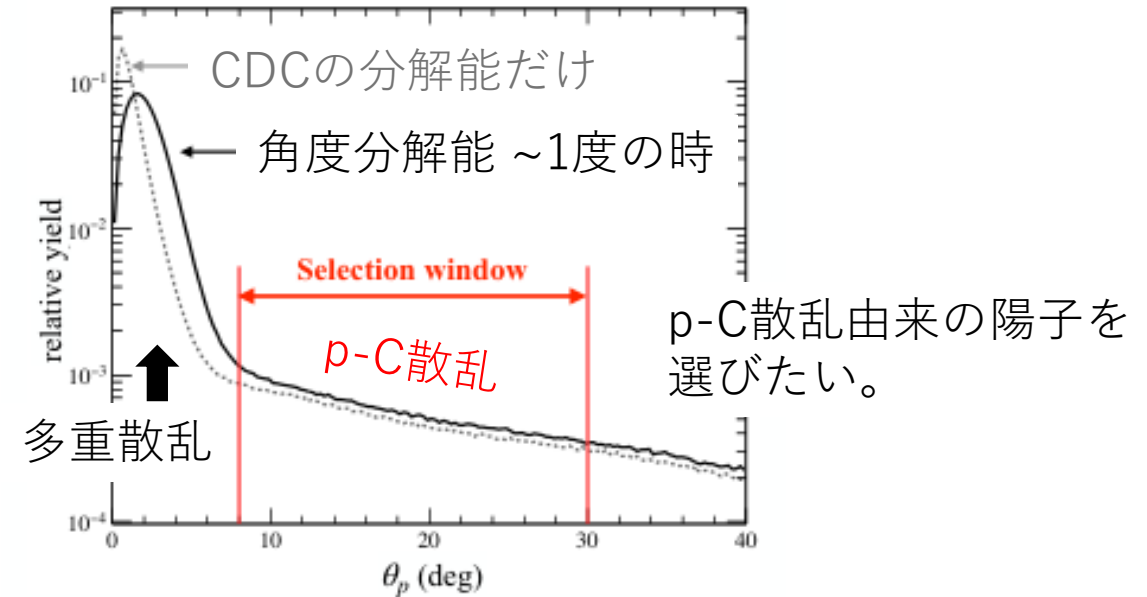
J-PARC E89実験



Polarimeter Tracker

内側NCからの散乱陽子を測定
陽子の飛跡を決める

MC simulation



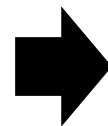
$$\frac{\text{位置分解能}}{2 \text{ 層間の距離}} < \frac{1}{50} \text{ rad}$$

- 角度分解能 ~ 1 度
- 位置分解能 1mm

3-2.Polarimeter Tracker の作り

実際に設置するにあたって…

- 中性子検出器の間の限られたスペース
- 大面積を覆う必要がある



比較的薄くコスパの良い作りはないか？

プラスチックシンチレータ + 波長変換ファイバー

- 単純なファイバーのみに比べて読み出すチャンネル数も少なく低コスト

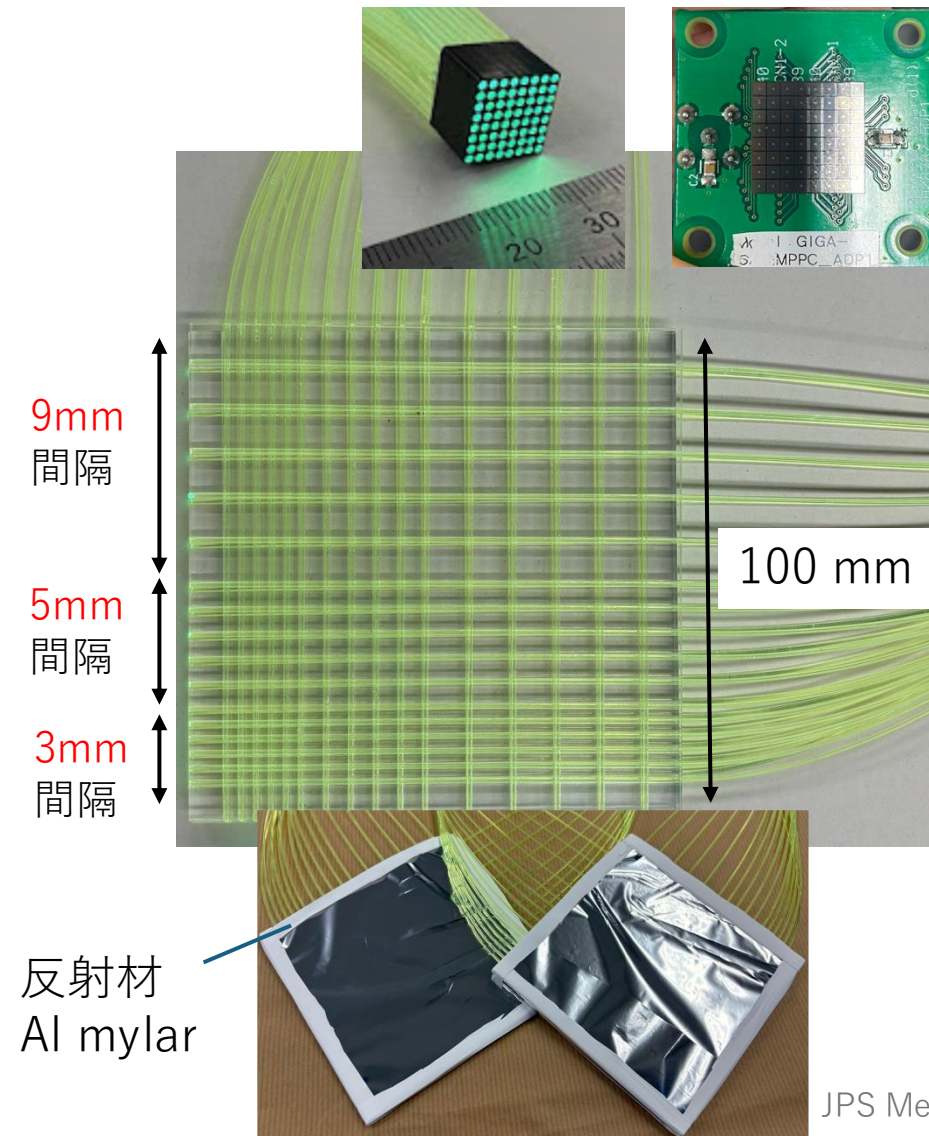
ではパフォーマンスは？

- 1番光ったファイバーの位置で見た時に期待される分解能（一様分布） $\frac{\text{ファイバー間隔}}{\sqrt{12}}$

例えば間隔 5mmでは、要求分解能 1mmには足りないことが予想される。

複数ファイバーの光量を重みとした加重平均などを用いてカバー

4. 試作検出器の基本構成



MPPC

- HAMAMATSU製
- S14826
- 1.3 mm角の8x8 array

波長変換ファイバー

- Kuraray製
- Y11
- W clad
- $\phi = 1 \text{ mm}$
- シンチ溝に**3mm間隔**,
5mm間隔, **9mm間隔**で配置

プラスチックシンチレータ

- ELJEN製
- 100 mmx100 mm
- 厚さ：**3mm**, **5mm**

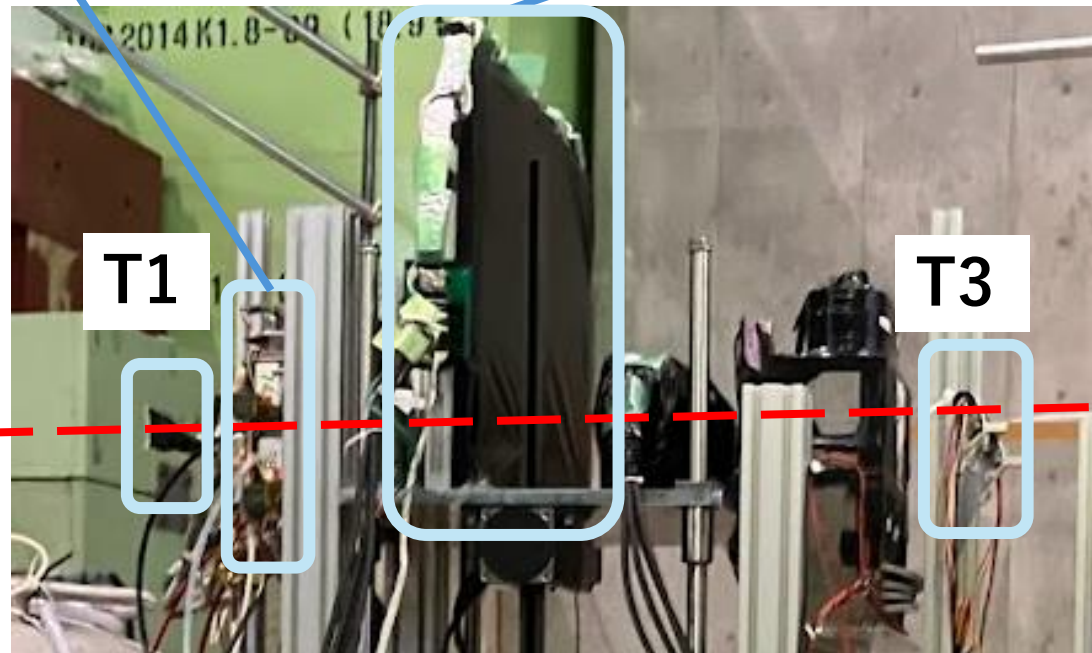
シンチ厚：どのくらいの光量が必要か

ファイバー間隔：位置を決める上でどのくらい空けて良いか

5. ビームテスト @J-PARC K1.8BR

(2025年11月)

ワイヤーチェンバー 試作検出器



20 cm

16 cm

55 cm

T1, T3

ビームの通過を確認する。

ワイヤーチェンバー

飛跡を記録する。

試作検出器

ヒットした位置を光量から計算する。

本ビームテストでは

- 検出効率・Multiplicity
- 位置分解能 (光量重心あり・なし)

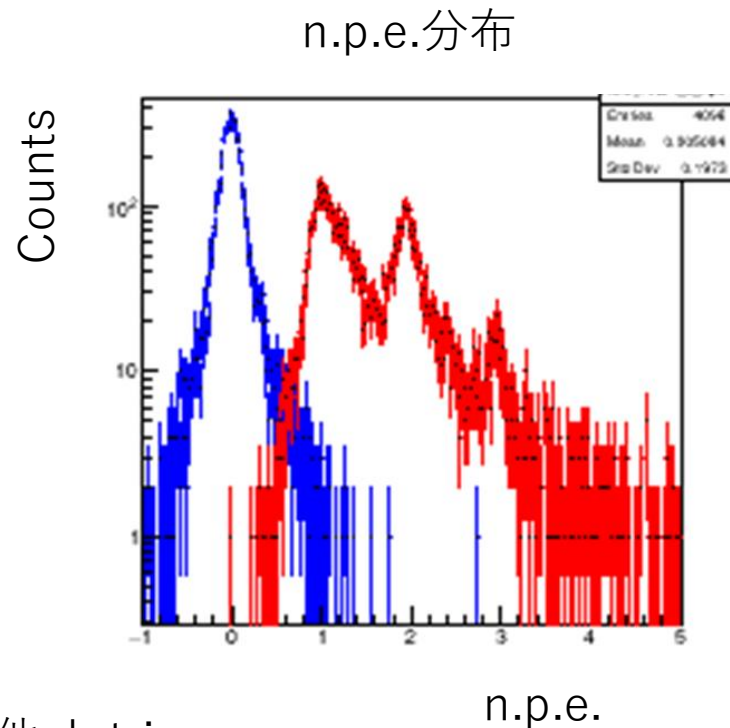
について評価を行った。

6-1. キャリブレーション

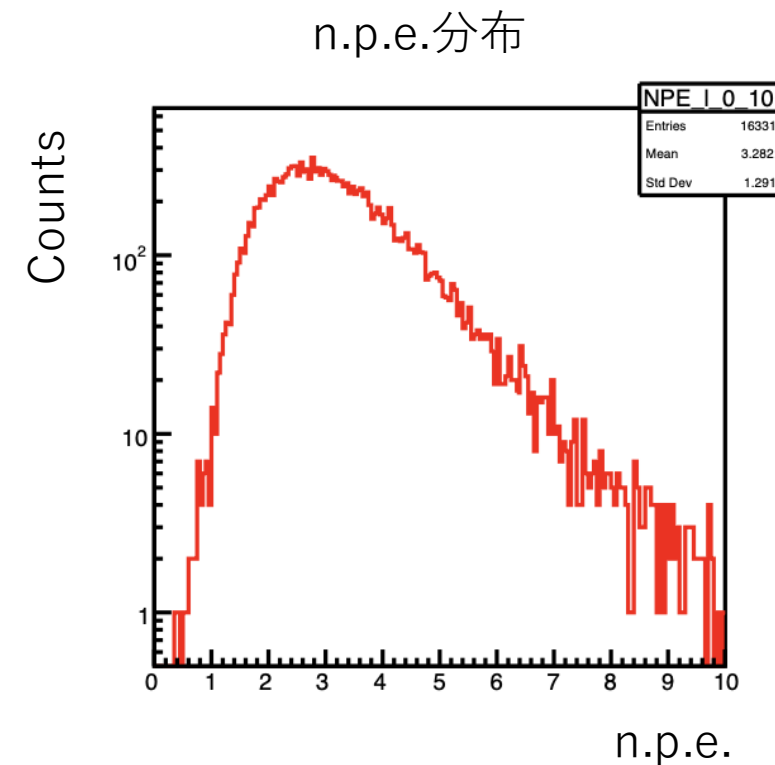
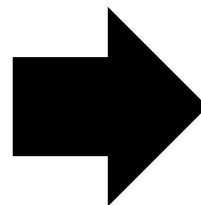
MPPC バイアス電圧 55.9 V

暗電流によるADC→n.p.e変換

ビームデータ

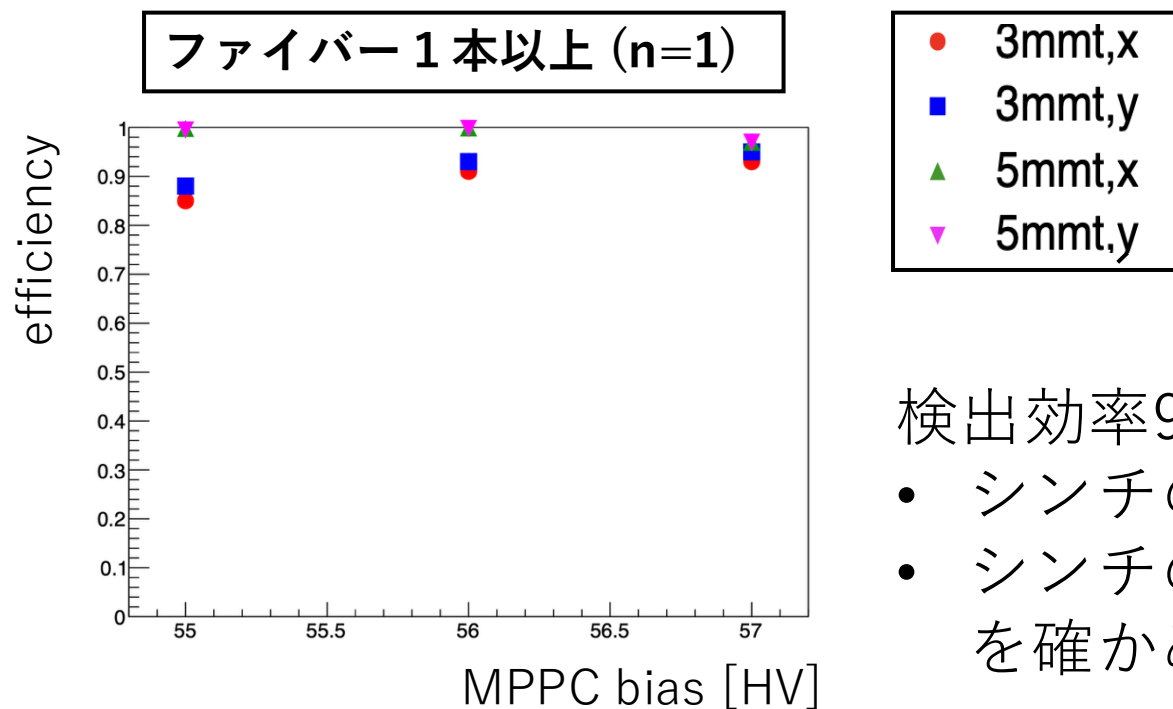


ゲインの決定(100ch $\approx$ 1p.e)



6-2. 検出効率

$$\varepsilon_{proto} = N_{fiber \geq \text{nhit}} / (N_{T1} \otimes N_{T3})$$



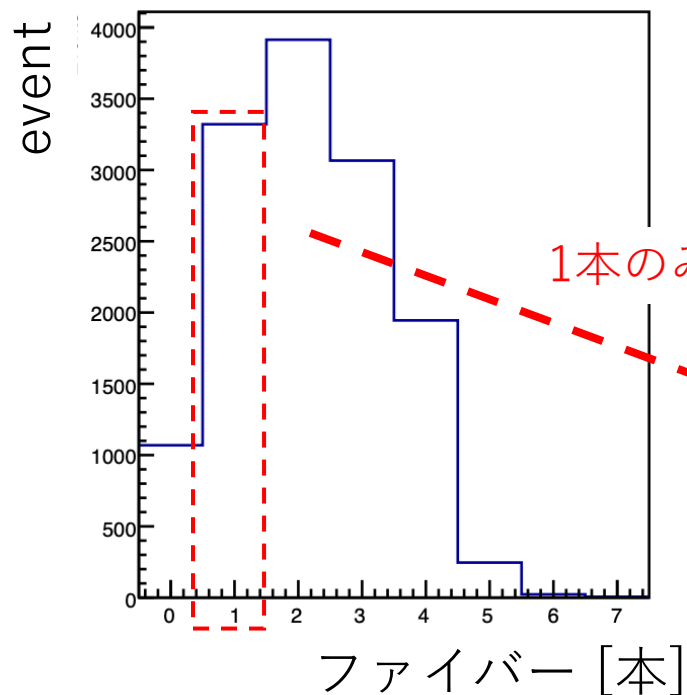
検出効率99%以上欲しいため、

- シンチの厚さ3mmは低いと言える。
- シンチの厚さ5mmでは高い検出効率であることを確かめた。

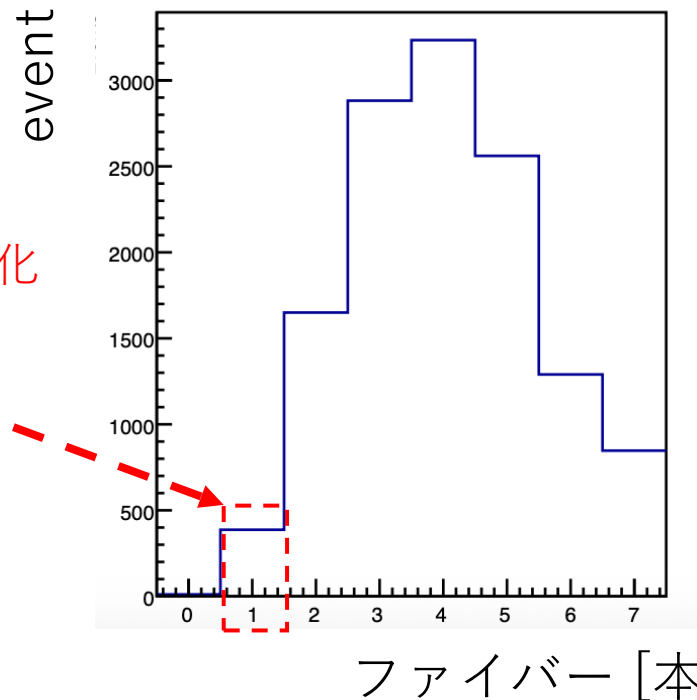
6-3. Multiplicity

シンチレータの厚さによる変化

厚さ3mm X方向



厚さ5mm X方向

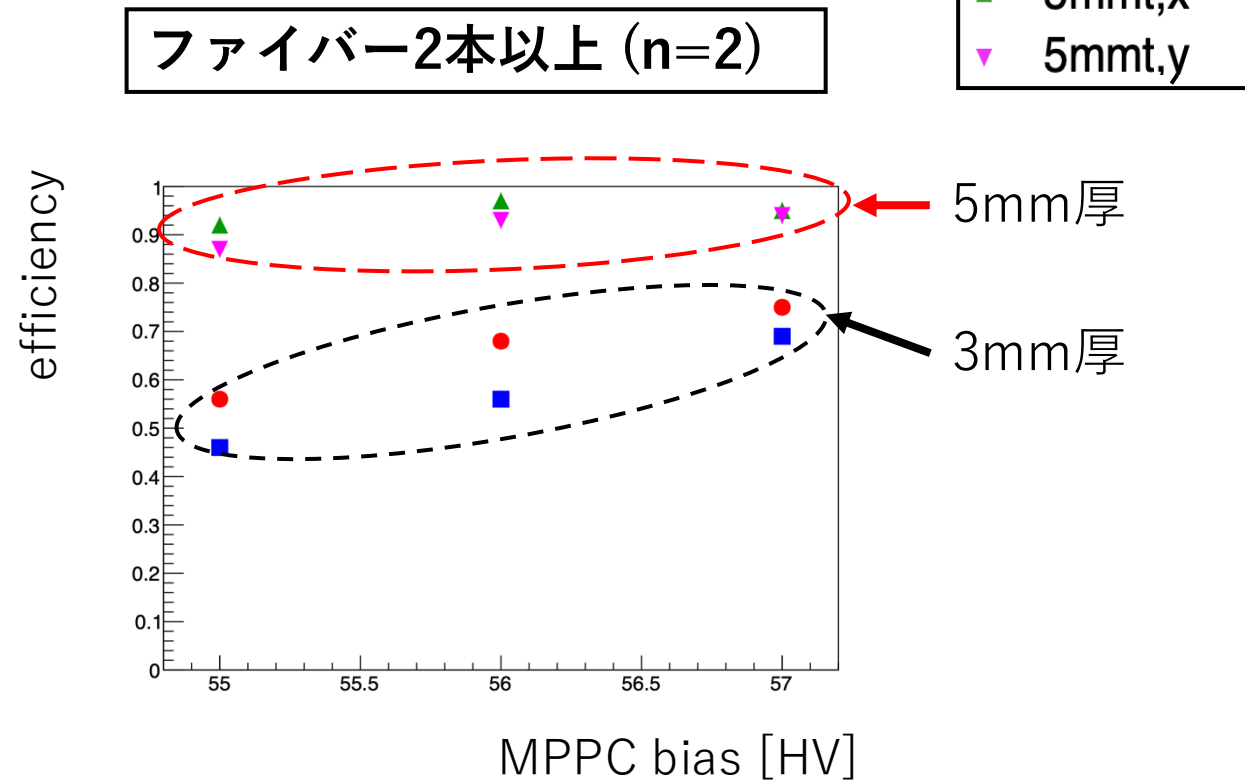
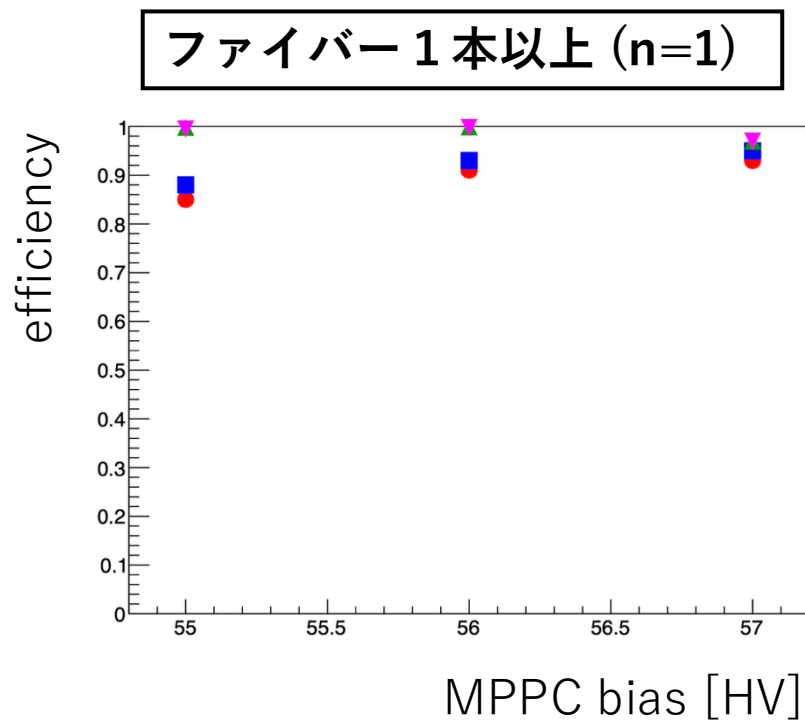


シンチが薄いと1本のみのヒットが多くなり検出効率に影響がでる。

➤ 厚さ 3mmでは少本数で反応

➤ 厚さ 5mmでは多本数で反応

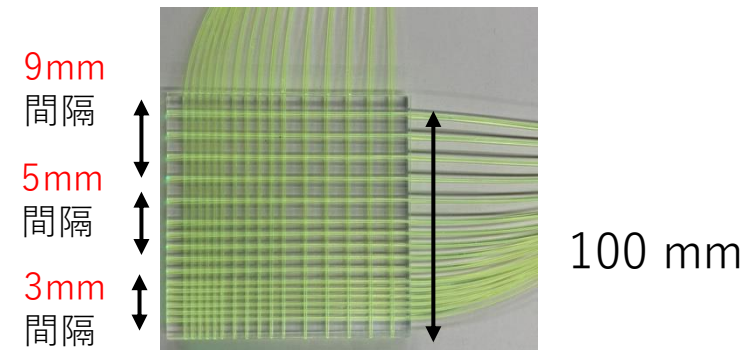
6-4. 検出効率のまとめ



2 本以上では検出効率の差が
顕著に出る。

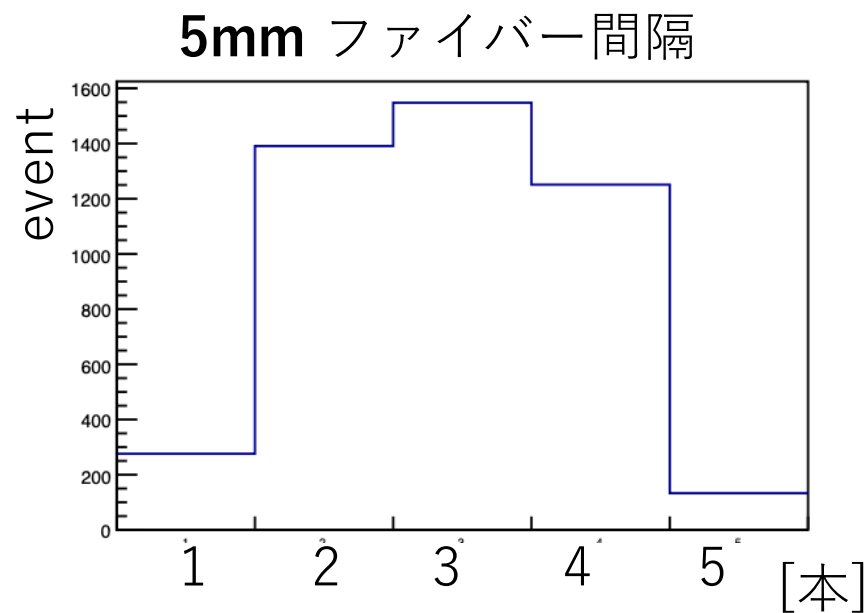
6-5. Multiplicity

ファイバーの間隔による変化

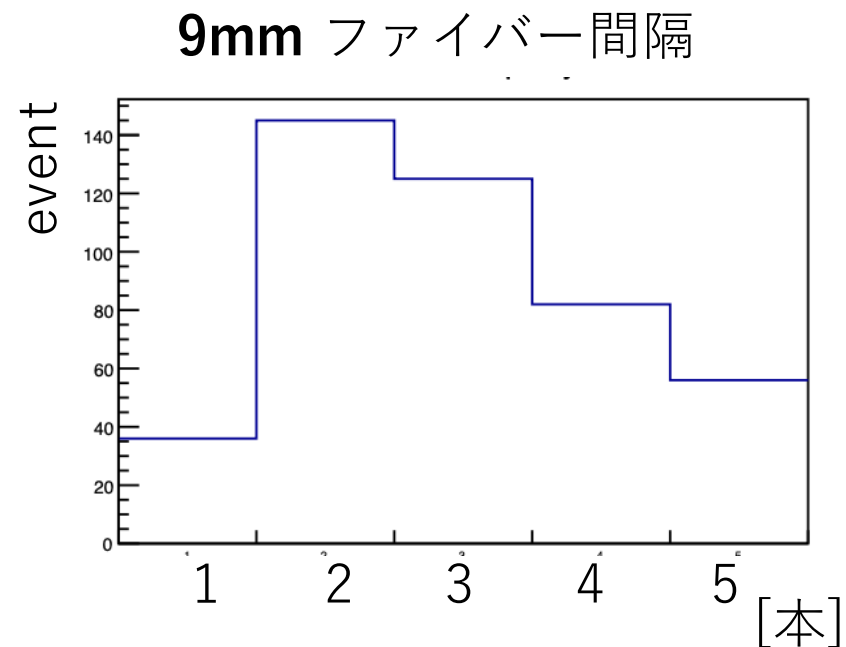


イベント選択：TDCのヒットの塊が該当ファイバー間隔に収まっているもの。

厚さ5mm X方向



間隔 5mmでは多本数で反応



間隔 9mmでは少本数で反応

6-6. 位置分解能評価

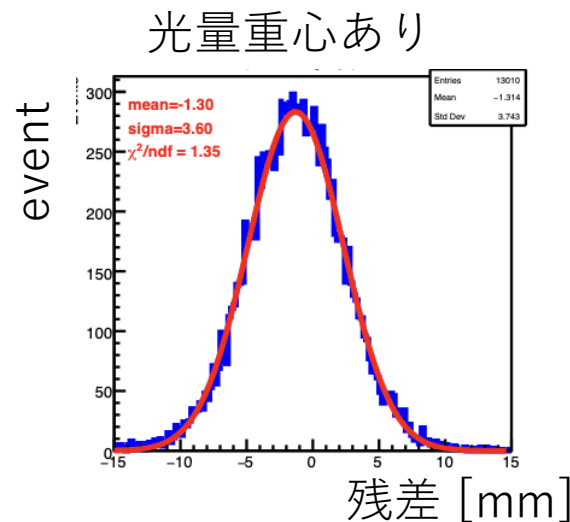
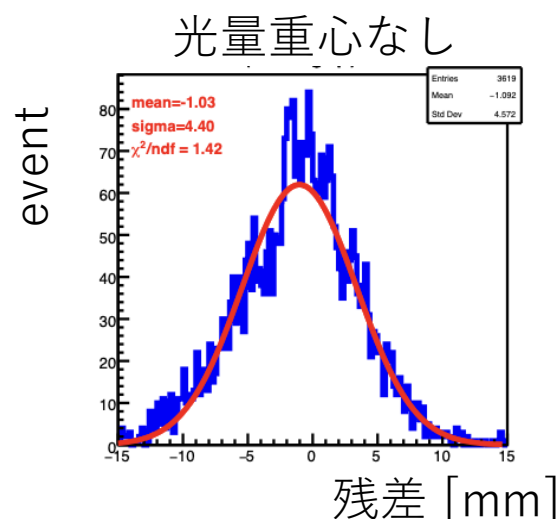
シンチ厚 5mm

残差分布(チェンバー飛跡外挿位置—試作検出器重心位置)

ワイヤーチェンバー
のトラック分解能

$$\sigma_{track}(Y) = 2.7 \text{ mm}$$

Y方向
5mm間隔

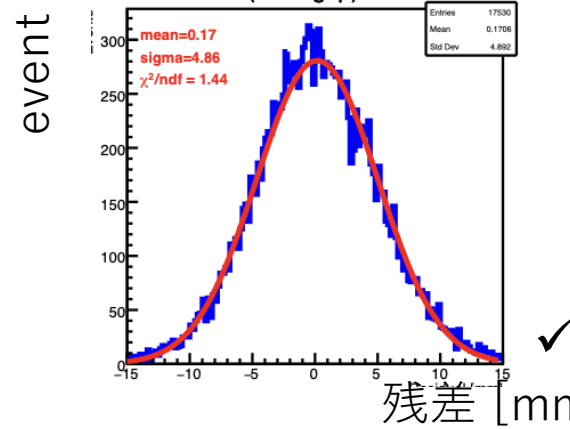
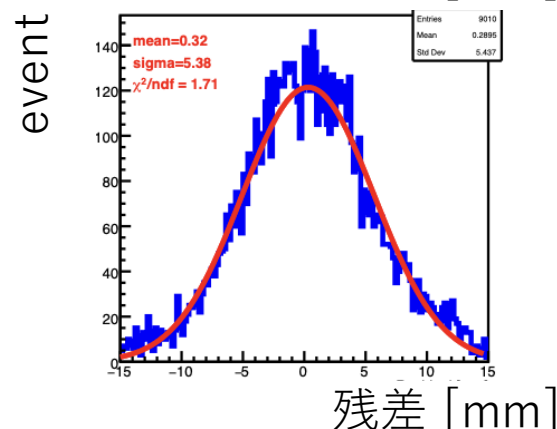


光量重心なし(1番光ったファイバー)
ファイバー間隔

$$5 \text{ mm} : \sigma_y = 3.5 \text{ mm}$$

$$9 \text{ mm} : \sigma_y = 4.7 \text{ mm}$$

Y方向
9mm間隔



光量重心あり
ファイバー間隔

$$5 \text{ mm} : \sigma_y = 2.4 \text{ mm}$$

$$9 \text{ mm} : \sigma_y = 4.0 \text{ mm}$$

✓ 光量重心を用いる方が分解能は向上する。

7. まとめ

- 反K中間子原子核の次世代実験（スピンパリティの測定）
- Polarimeter Tracker: 散乱陽子を位置分解能 1mmで測定する。
- **試作検出器でビームテスト (J-PARC)**
 - シンチ厚による検出効率の違い。（厚さ5mmが良い）
 - 光量重心法の有用性を確かめた。（ファイバー間隔5mmが良い）
- 試作検出器の検出効率や位置分解能のさらなる評価を行う。

Back up

reduction factorについて

$\emptyset_{\Lambda p}$ -distribution

$$N(\emptyset_{\Lambda p}) = N_o(1 + r\alpha_{\Lambda p} \cos \emptyset_{\Lambda p})$$

r : asymmetry reduction factor defined by ;

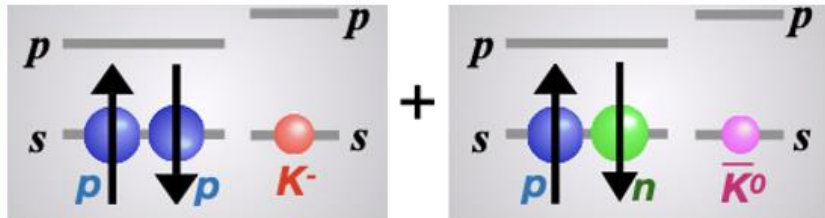
α_- : Λ asym. Parameter	B : magnetic field
A_{PC} : analyzing power	$B_{\bar{K}}$: Binding energy
$f_{\vec{s}_\Lambda}$: spin distribution	q : momentum transfer

N_o is mean number of events a bin of $N(\emptyset_{\Lambda p})$ spectrum

スピンパリティについて

There are two possible of J^p of the $\bar{K}NN$ grand state

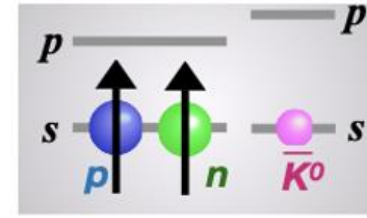
$$J^p = 0^-$$



$$\frac{|I_{\bar{K}N=0}|^2}{|I_{\bar{K}N=1}|^2} = \frac{3}{1}$$

Deeper bound expected

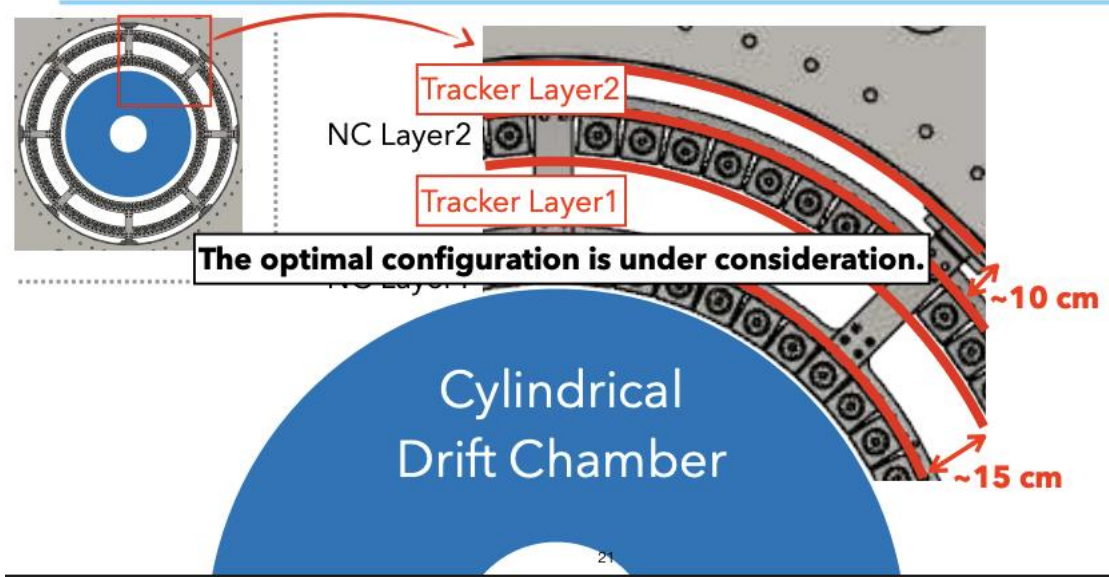
$$J^p = 1^-$$



$$\frac{|I_{\bar{K}N=0}|^2}{|I_{\bar{K}N=1}|^2} = \frac{1}{3}$$

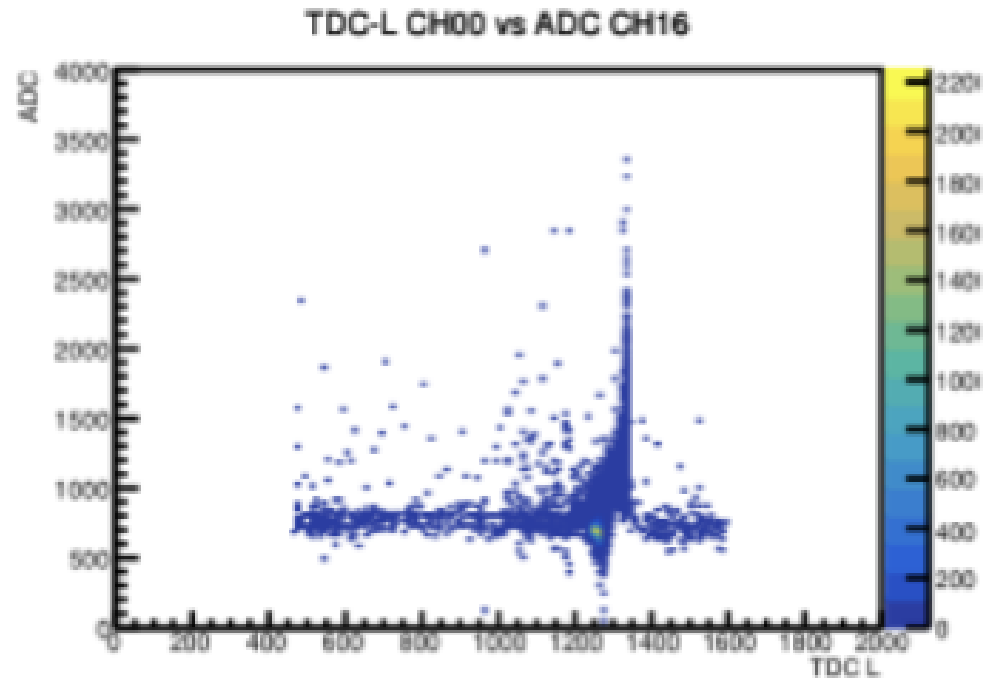
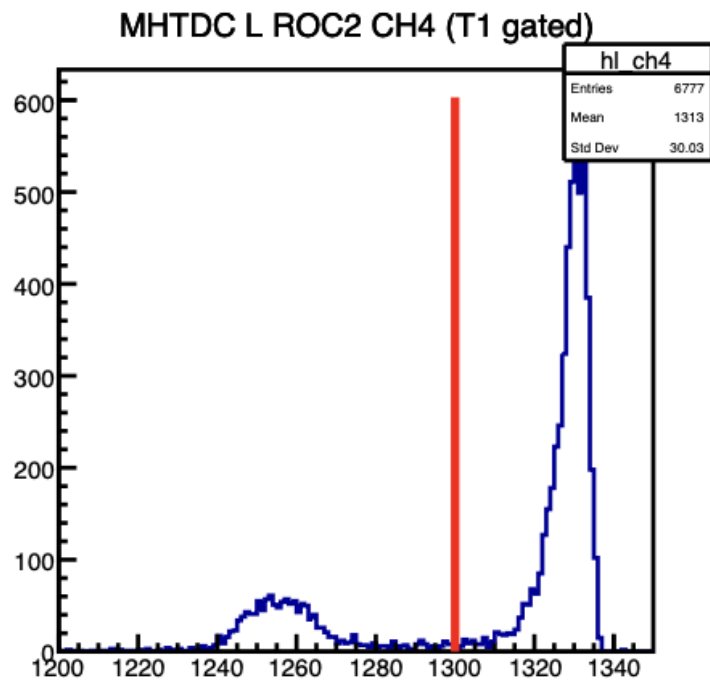
Shallower bound expected

P.T.の検出効率について



検出効率についてはCNC2層目散乱を考えるとZとRを決める2層が3組、計6層
なので散乱角度を計算できる効率はlayer efficiencyが6乗で効いてくる
layer eff. 99% -> 94%
layer eff. 98% -> 88%

TDC>1300とした理由

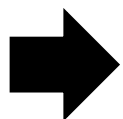


ワイヤーチェンバー

X,Y軸方向の各4層からの飛跡により位置を決定。

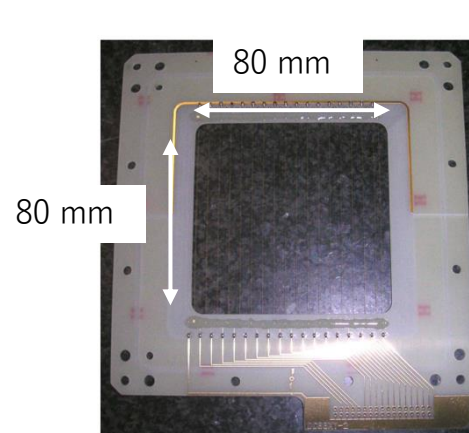
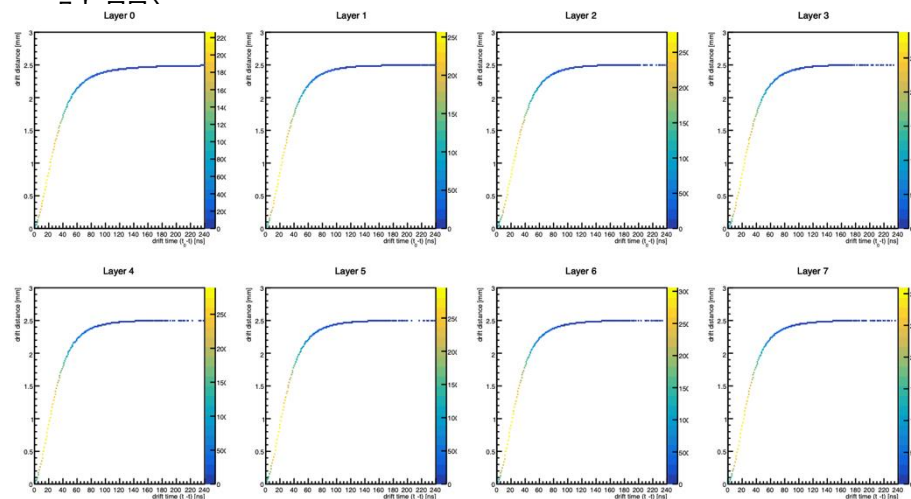
- Efficiency :

$$E_{\text{wire}} = N_{\text{wire} \geq 3\text{hit}} / (N_{T1} \otimes N_{T2})$$

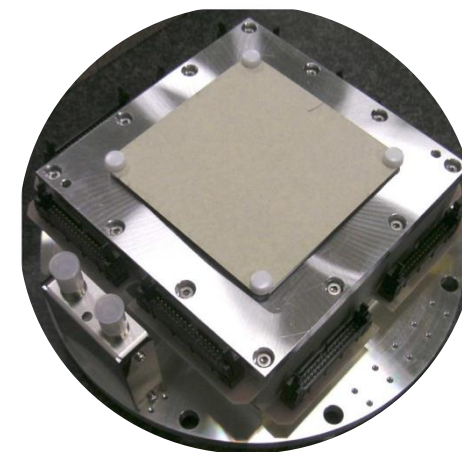


X : 98.70 %
Y : 99.59 %

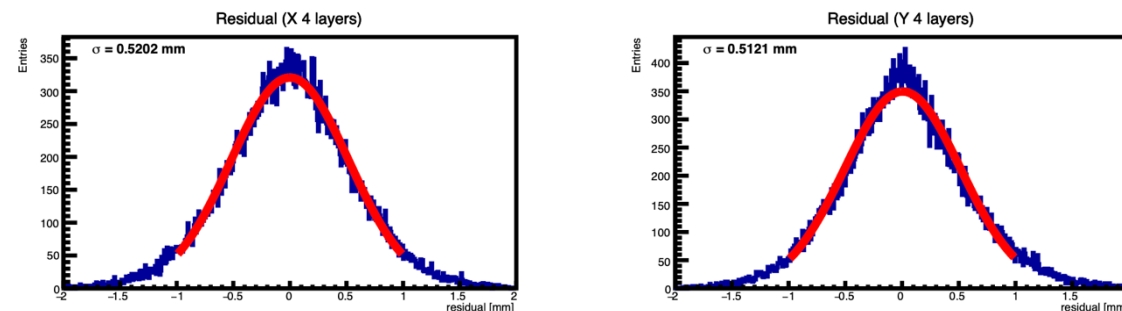
各層XT カーブ (ドリフト距離 vs ドリフト



8 layer (XX'-YY'-XX'-YY')
ワイヤー間隔 5mm

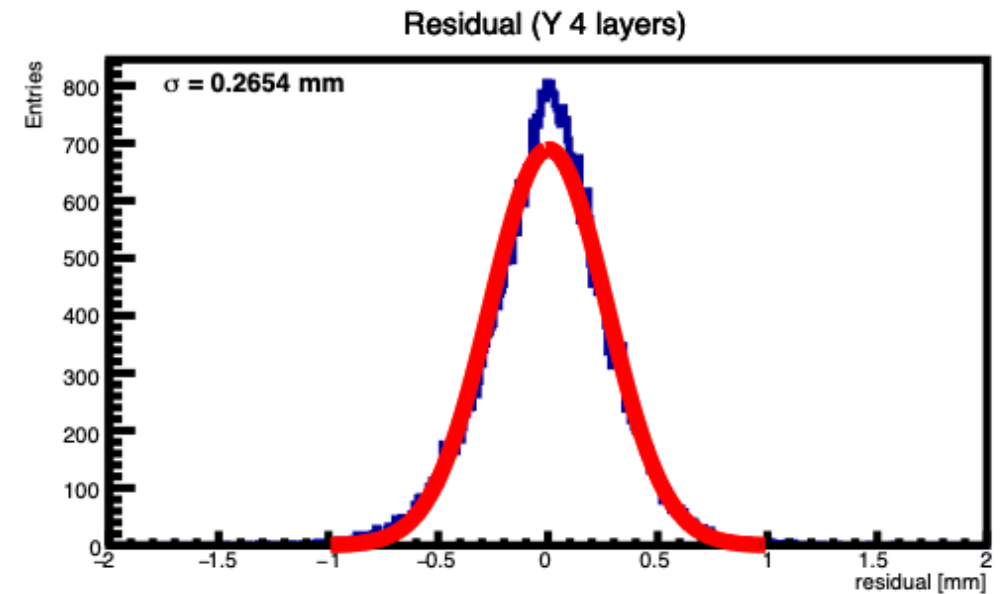
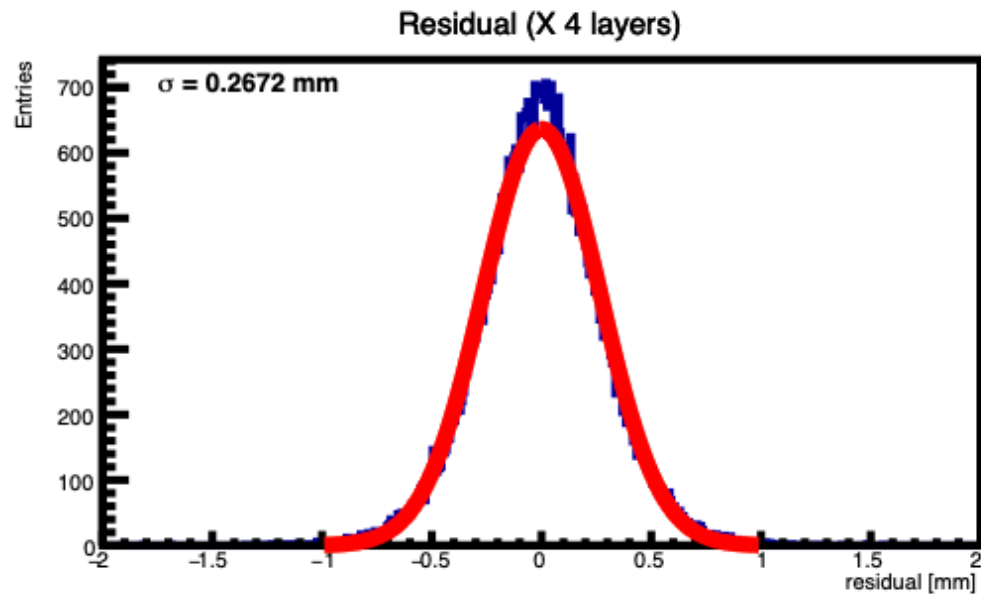


自己バイアスなし残差 (X,Y)



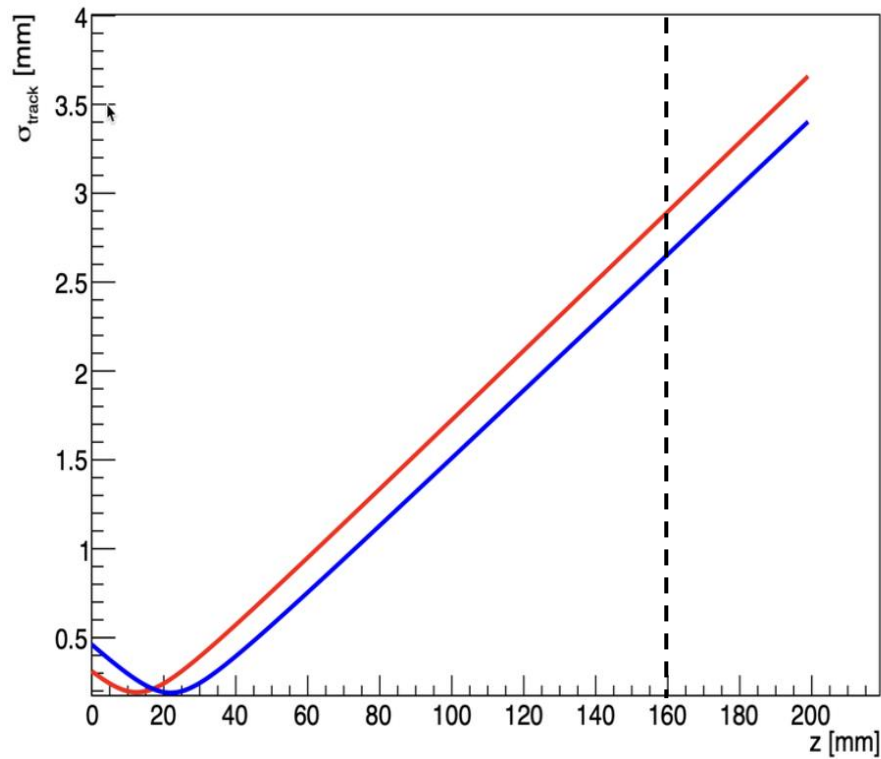
→ $\sigma_{\text{unbias}} \simeq 0.52 \text{ mm}$

バイアス付き残差



$$\rightarrow \sigma_{wire} = \sqrt{\sigma_{unbias}^2 - \sigma_{bias}^2}$$

飛跡距離による分解能変化



$$\begin{aligned}\sigma_{\text{track}(X)} &= 2.89 \text{ mm} \\ \sigma_{\text{track}(Y)} &= 2.65 \text{ mm} \\ &\quad (z = 160 \text{ mm})\end{aligned}$$