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性能評価

東北大 RARiS[A], 理研[B], 東大理[C], 高エ研[D], 阪大 RCNP[E]

大髙駿輔[A]， 大西宏明[A]， 木村佑斗[A,B]， 市川真也[B]， 木野量子[B]， 佐久間史典[B]，
中須賀さとみ[B]， 橋本直[B]， 馬越[B]， 堤祐人[C]， 藤田真奈美[C]， 山我拓巳[D]， 赤石貴也[E]

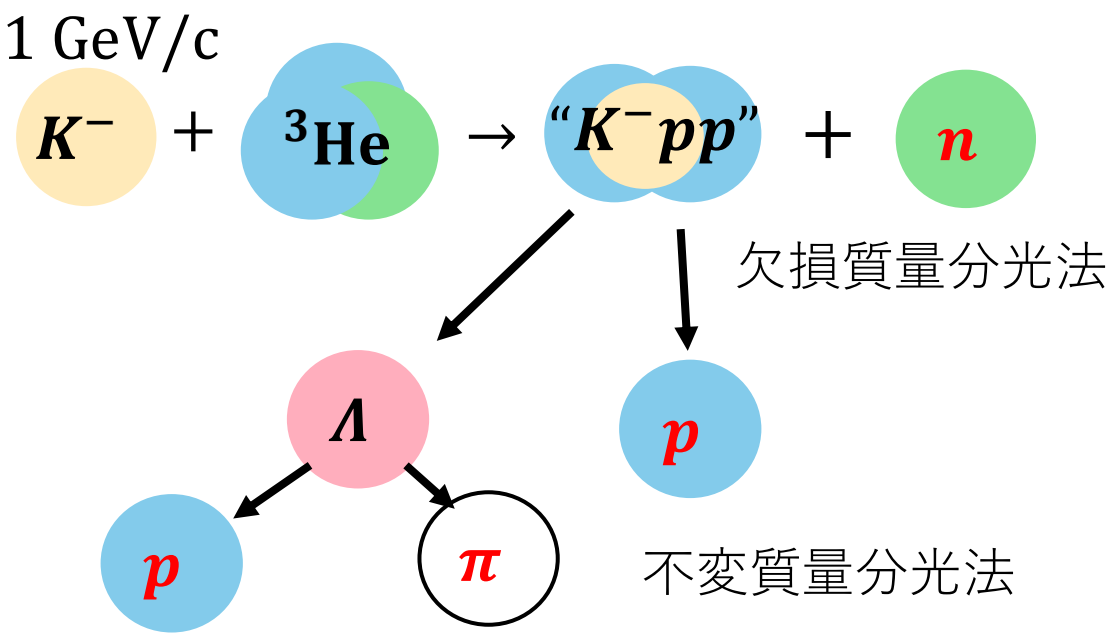
東北大先端量子ビーム科学研究センター

M2 大高駿輔

for the J-PARC E80,E89 collaboration

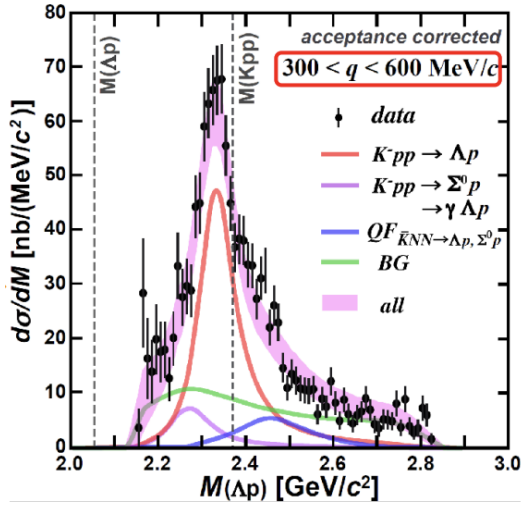
背景

J-PARC E15 実験



排他的測定
＝ 終状態の全粒子検出
バックグラウンド抑制

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



"K^-pp" を閾値下で観測

新たな課題

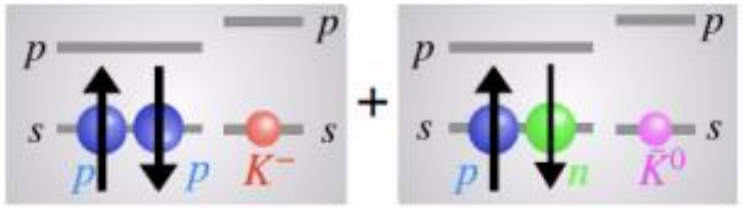
"K^-pp" の内部構造はどうなっているのか?

→ 基本的量子数は未観測である。

課題

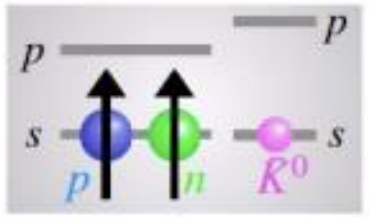
$\bar{K}NN$の取りうる量子状態

$J^P = 0^-$



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

$J^P = 1^-$



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

$\bar{K}N(I=0)$ 結合が支配的

$\Lambda(1405)$: $\bar{K}N(I=0)$の準束縛状態として理解
→この相互作用が強い引力的な性質を持つ。

"K^-pp" は$J^P = 0^-$であることが有力候補。
→ 実験による検証
J^P決定により内部構造に対して新たな知見を与える。

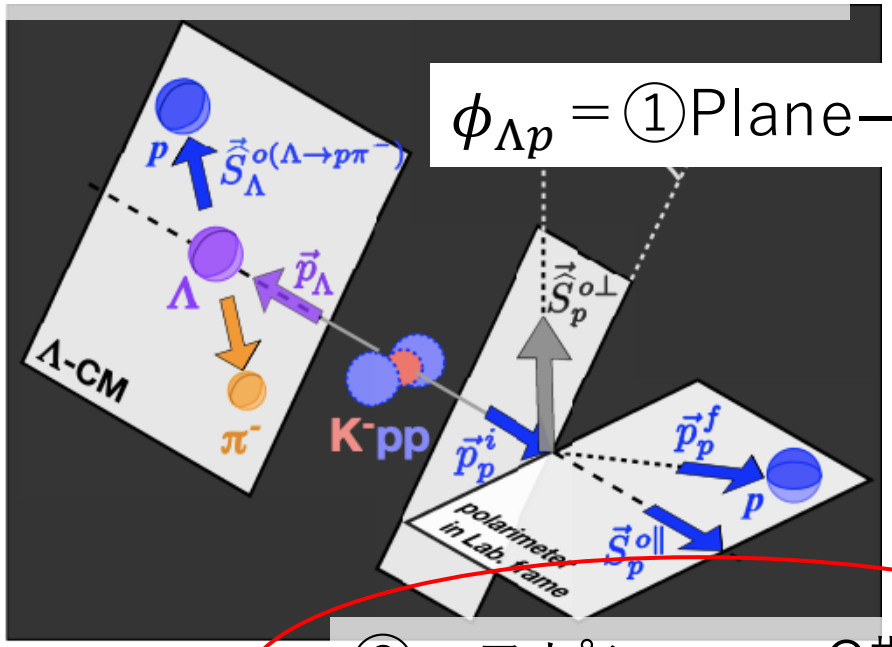
J^Pの決定手法@J-PARC E89

Beam time
90 kW
8 week

スピン相関($\alpha_{\Lambda p}$)の測定

$$N(\phi_{\Lambda p})/N_0 = 1 + r\alpha_{\Lambda p}\cos\phi_{\Lambda p}$$

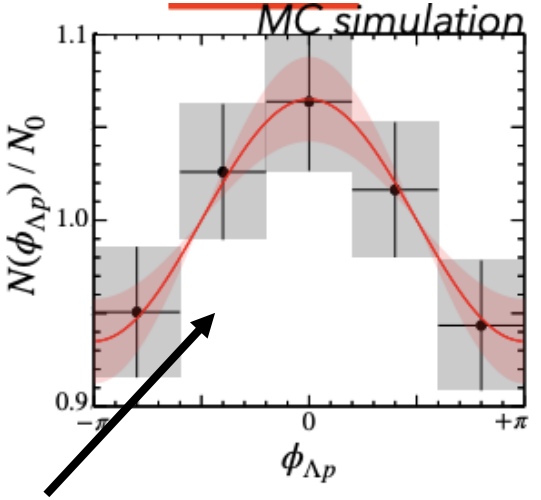
① Λスピン：弱崩壊のP対称性の破れから生まれる非対称性を利用



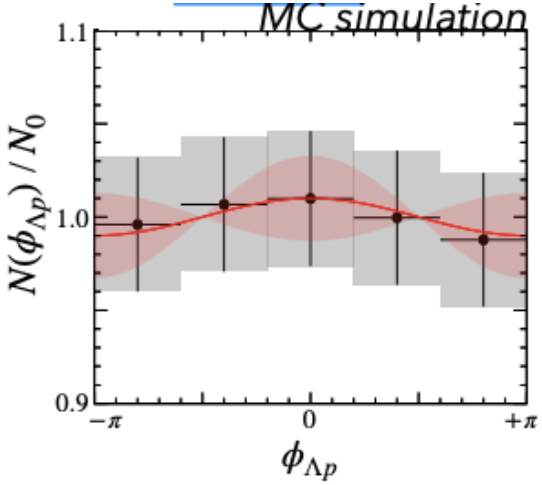
$\phi_{\Lambda p}$＝①Plane–②Plane⊥

② pスピン： p -C散乱から生まれる非対称性を利用

$J^P = 0^-$



$J^P = 1^-$

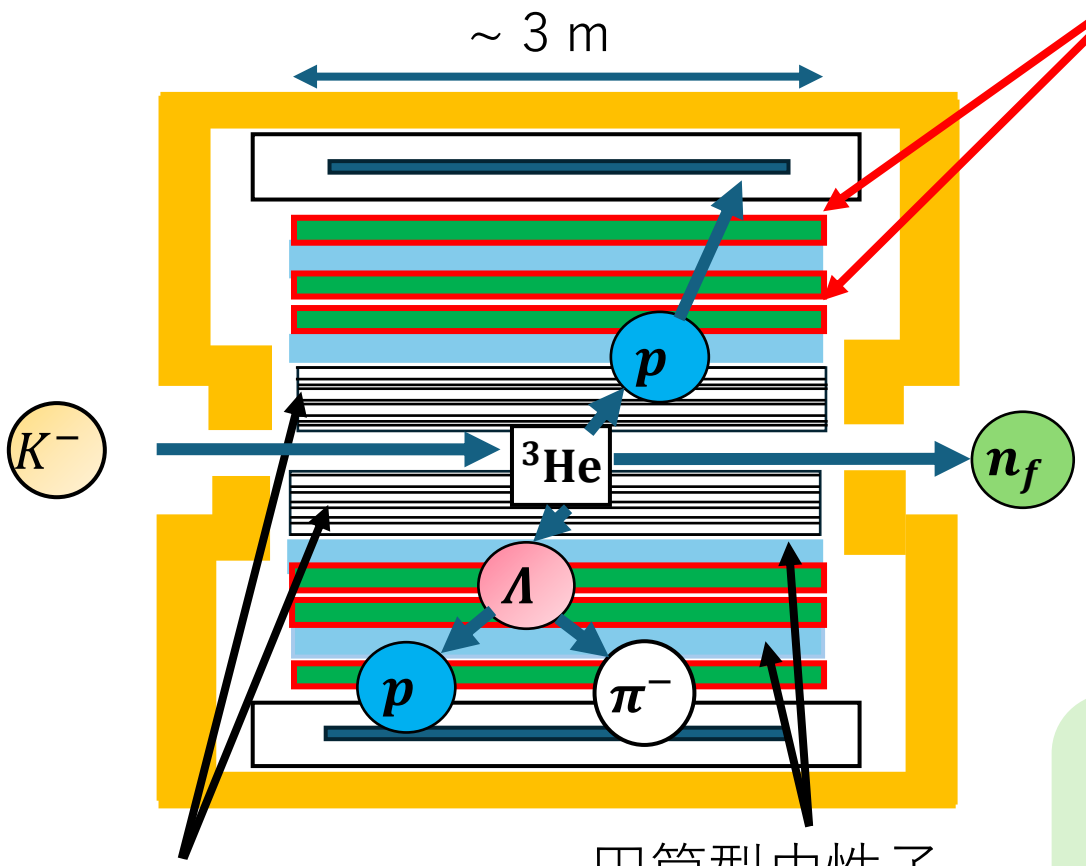


$S_{\Lambda p} = 1$より２粒子間は完全に相関($\alpha_{\Lambda p} = 1$)
→ 振幅が最大となる

本測定では散乱陽子の
トラッキングが非常に重要となる

ポラリメータートラッカーの要求条件

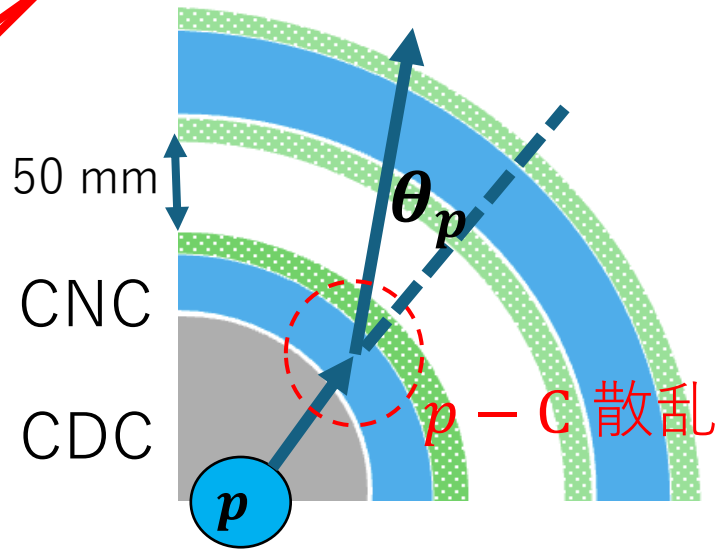
円筒型検出器システム（CDS）



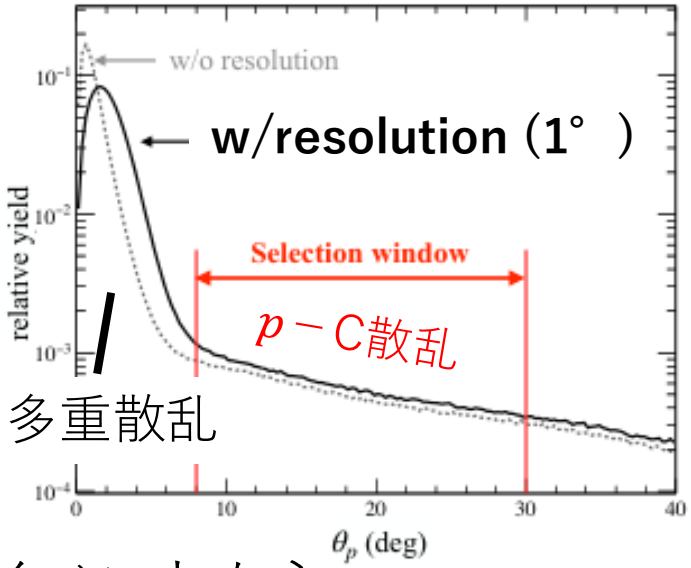
円筒型ドリフト
チェンバー(CDC)

円筒型中性子
検出器(CNC)
300 cm × 6 cm × 6 cm
× 138本

ポラリメータートラッカー



MC simulation



多重散乱バックグラウンドイベントから
$p-C$散乱イベントを選ぶために…

- 角度分解能 (~1°)
  → トラック距離が50 mmの時、位置分解能 (~1 mm)
- 高い陽子検出効率(~99%)　最大 3 層 x 2 方向のため
- 広面積と狭い空間に合わせた設置が可能な構造

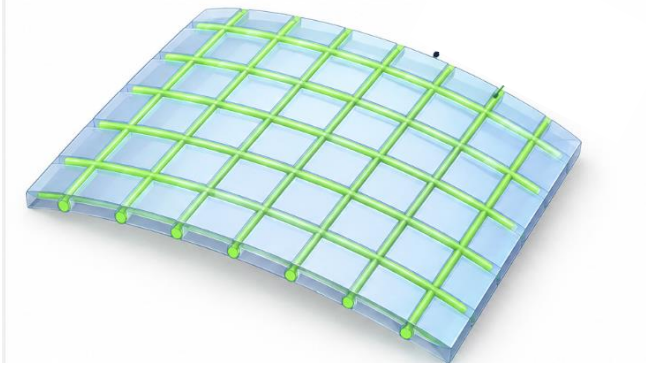
ポラリメータートラッカーのコンセプト

主な位置検出器

ドリフトチェンバー：中性子検出器間のスペースに追加することは困難
ファイバートラッカー：広面積のため膨大なチャンネル数の処理が必要

ポラリメータートラッカー：プラスチックシンチレータ
＋波長変換ファイバー

- 少ない読み出しチャンネル数で済む
- 円筒型検出器システム内の狭い空間と広い面積に合わせて設置可能

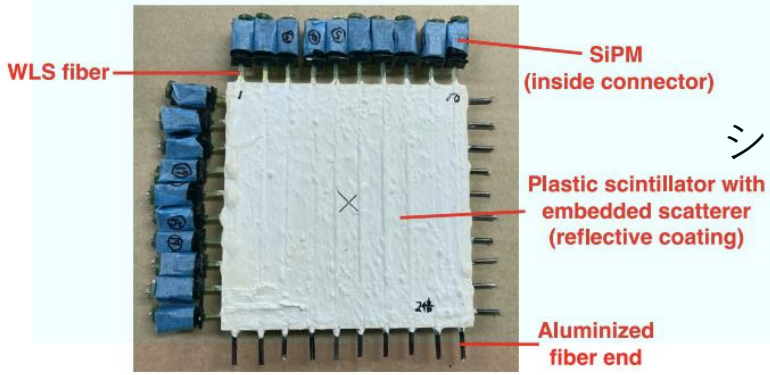


要求性能（位置分解能と検出効率）の評価が必要

先行研究

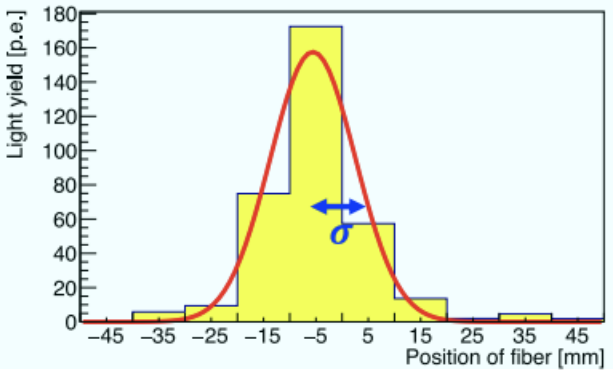
N .Otani, et al., Design and performance of a monolithic plastic scintillator tracker with embedded scatterers, NuclearInst. and Methodsin Physics Research, A 1091 (2026) 171791

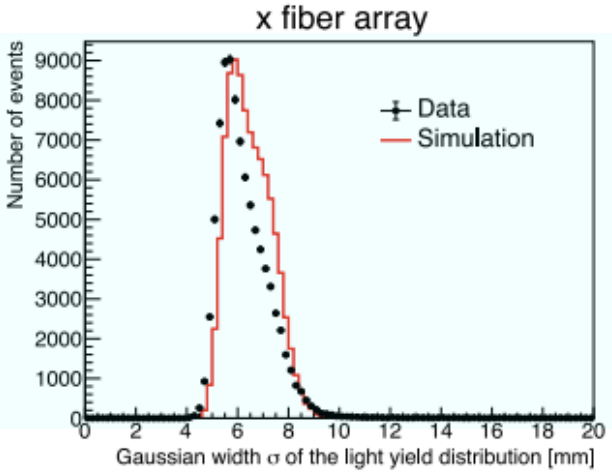
検出器構成



ファイバー間隔
10mm
シンチレーション厚
10mm

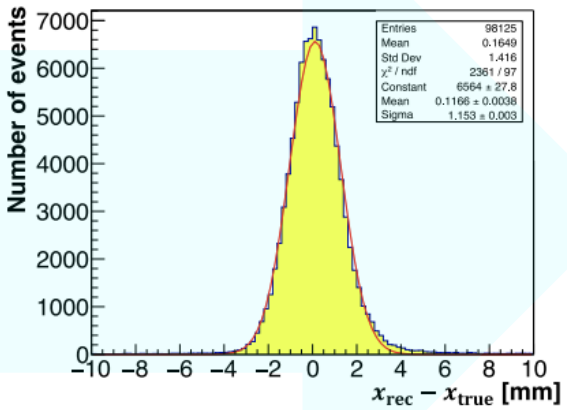
光量分布とガウスフィットのσ分布





残差分布

得られた光量分布の重心をとり位置を再構成。
真位置との残差を取る。

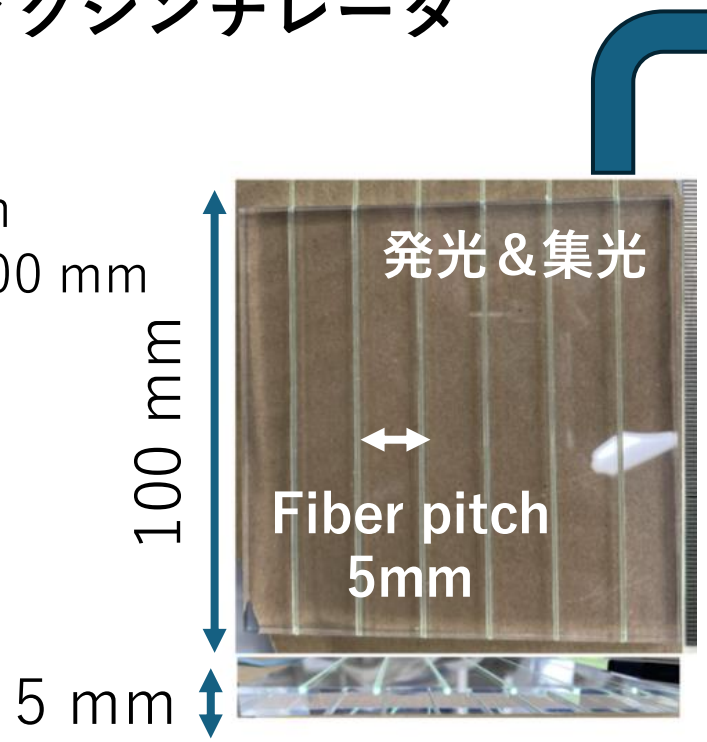


(a) $\theta_x = 0°$

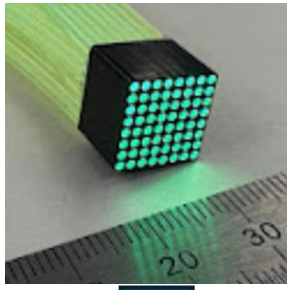
位置分解能 1.44 mm
このような構成で位置検出が可能

試作検出器について

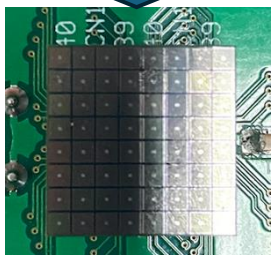
プラスチックシンチレータ
- ELJEN製
- EJ-200
- 厚さ：5mm
- 100 mmx100 mm



光伝搬



光→電子
読み出し



波長変換ファイバー
- Kuraray製
- Y11
- W clad
- ϕ ＝1 mm
- シンチ溝に5mm間隔で配置

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

反射材
- 白塗料　（ELJEN）
- ESR
- 黒塗料

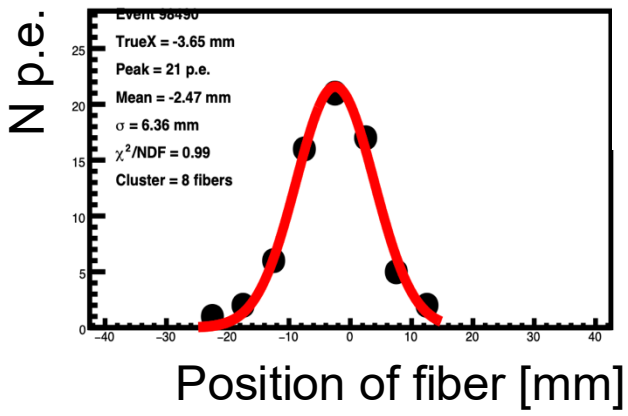
要求性能達成のために
適切な条件を調査を行う。

MC simulation

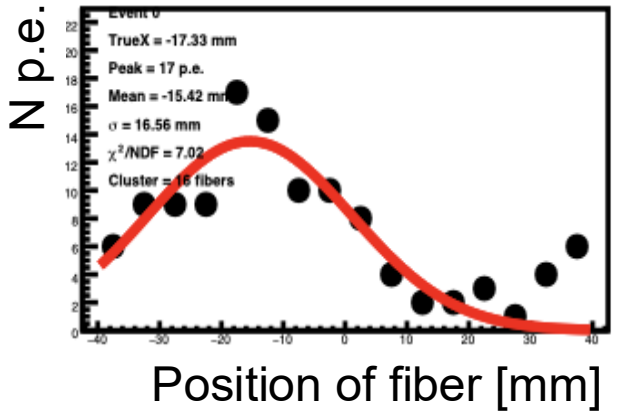
宇宙線をシンチ面中心から±5mmに垂直に入射したとき、

光量分布 event/event

白塗料
(反射率 95%,乱反射)

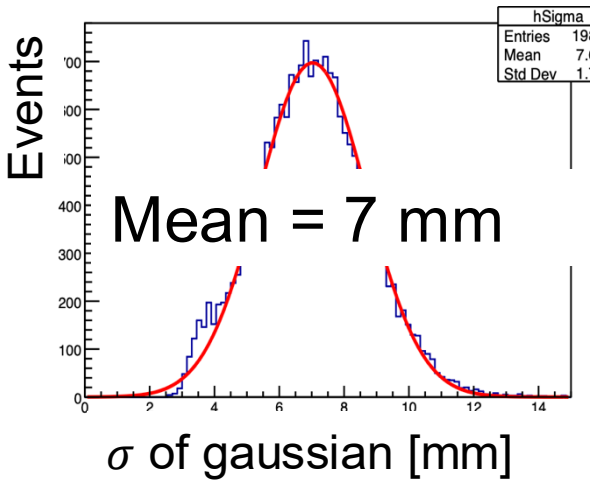


ESR
(反射率 99%,鏡面反射)

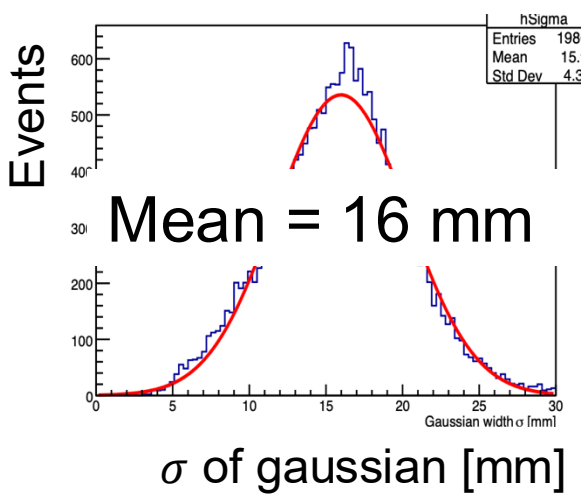


Gaussian fit 時の σ 分布

白塗料



ESR



重心位置

$$= \sum_i \frac{(\text{fiber}[i]\text{の光量})^2 \times (\text{fiber}[i]\text{の位置})}{\sum_i (\text{fiber}[i]\text{の光量})^2}$$

残差分布の σ

白塗料: 0.95 ± 0.01 mm
ESR: 2.11 ± 0.01 mm

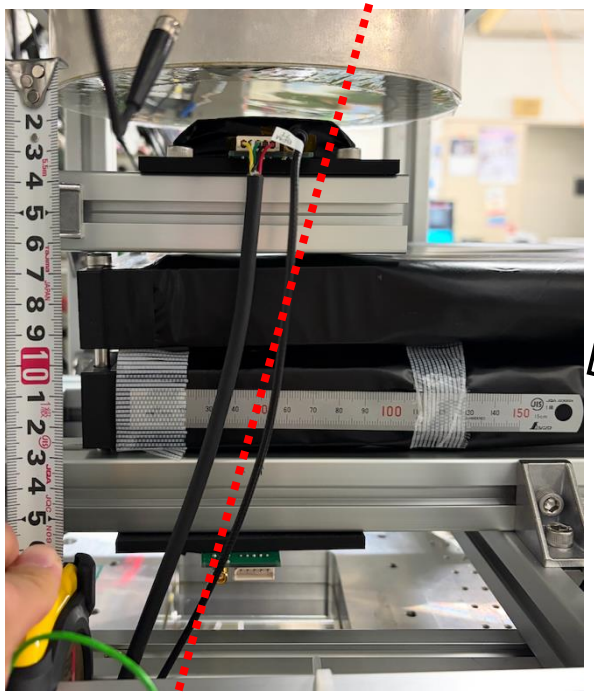
白塗料では集光率がよく、位置分解能 ~1 mm を達成することが見込まれる。

検出器セットアップ

宇宙線

プラスチックシンチレータ
＋PMT両読み

Coincidence
宇宙線信号の選別



ワイヤーチェンバー

試作器を貫いたイベントの取得

試作検出器

NIM-EASIROC (Ω)を用いて
MPPC読み出しを行う。

プラスチックシンチレータ
＋PMT両読み

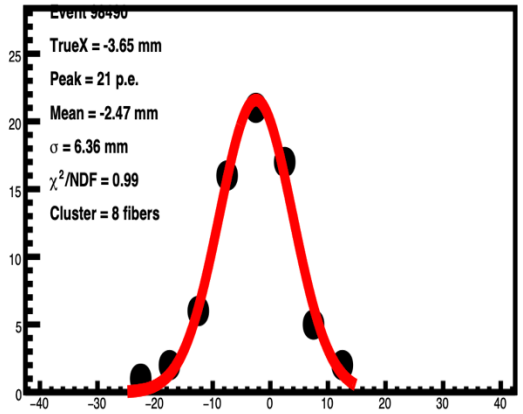
解析結果の項目

①光量
②Multiplicity
③検出効率
④光の広がり方

これらの反射材（白塗料、黒塗料、ESR）依存について調べた。

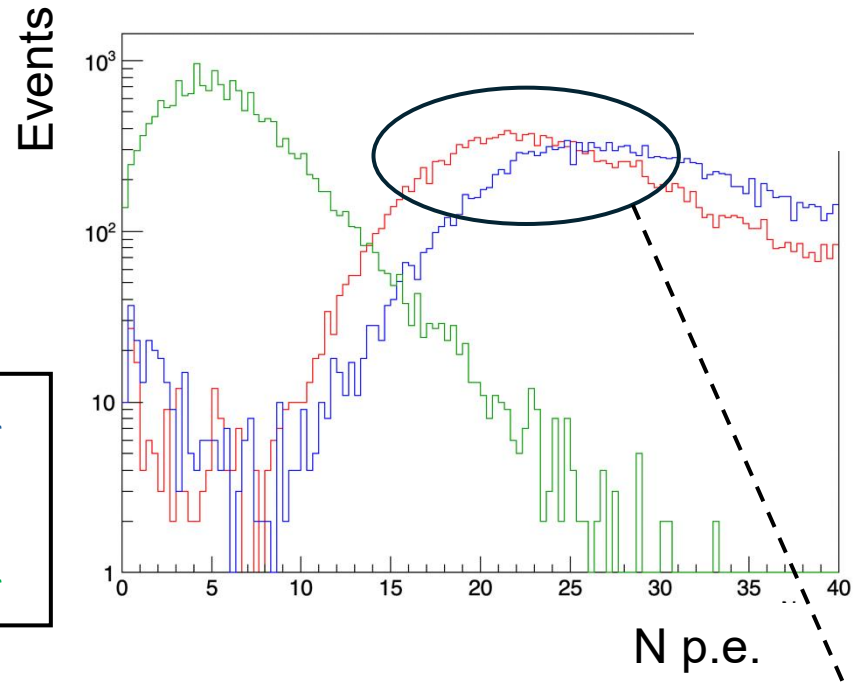
光量比較

光量分布（例）

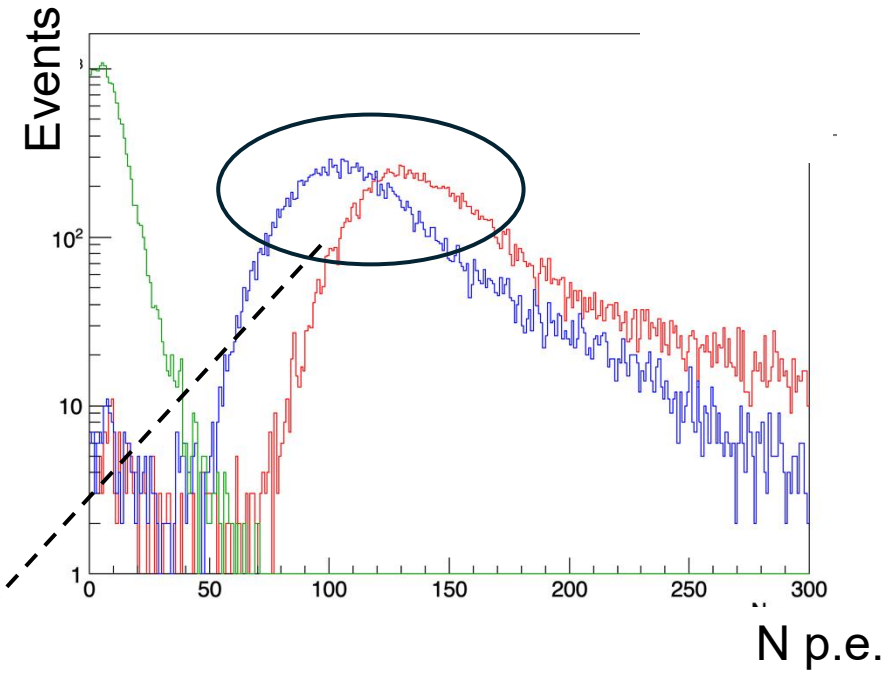


白塗料
ESR
黒塗料

反射材ごとの最大光量分布



反射材ごとの合計光量分布



白塗料、ESR： 多くの光量得られている。光量の大小が反転

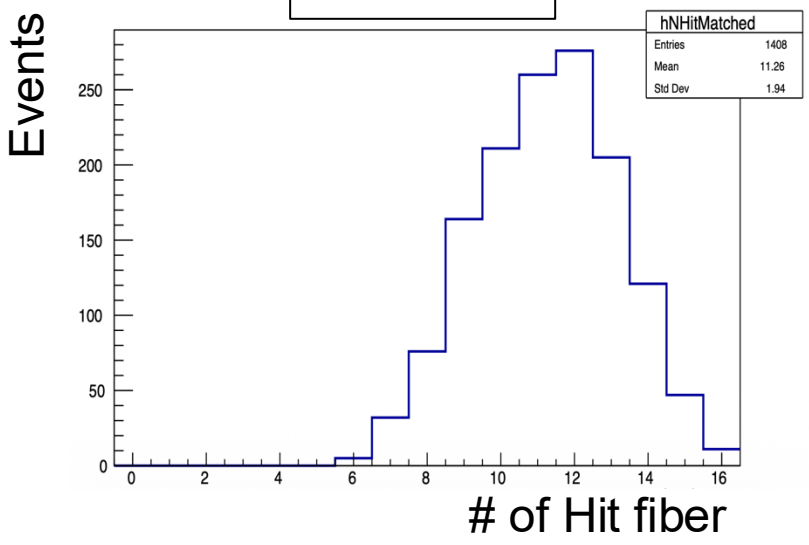
黒塗料： 一番光ったファイバーの光量少なく、合計しても少ない。

シンチ面での光り方に違いは？

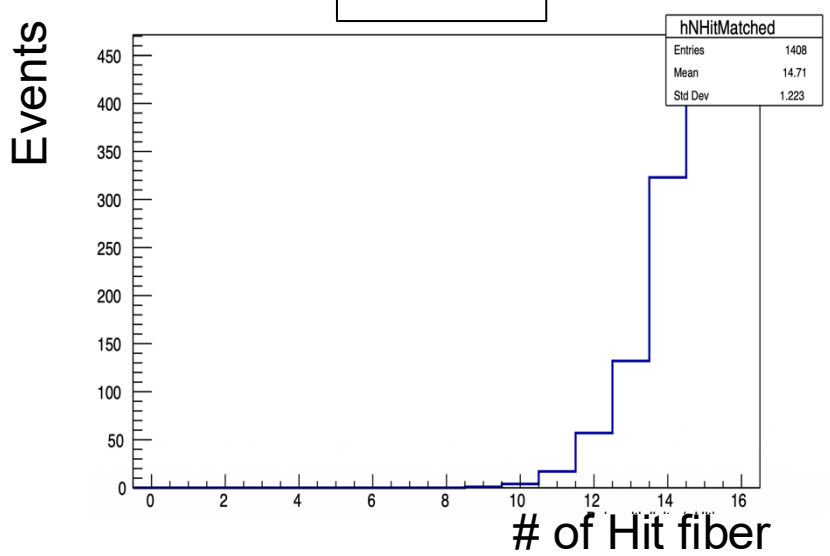
Multiplicity

上下のワイヤーチェンバーによるトラックが試作検出器を貫いた時の、
試作検出器のfiberから1.5p.e.以上の光量が得られた数

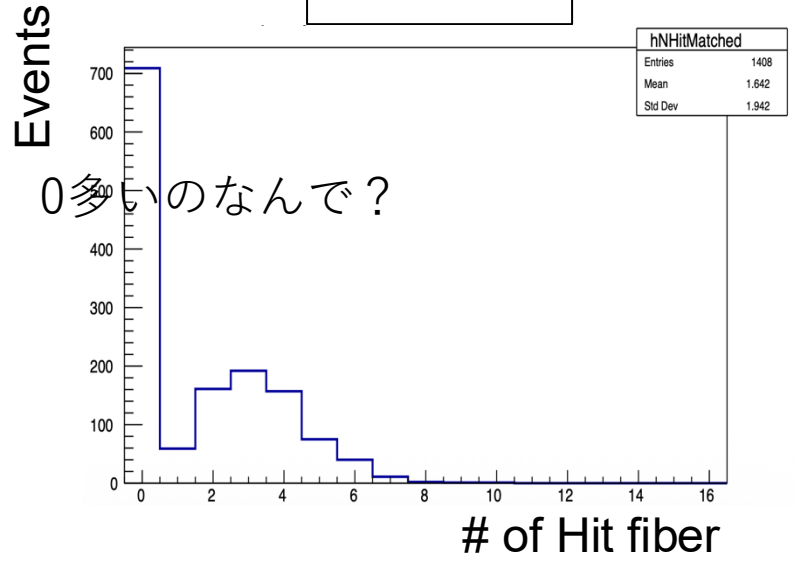
白塗料



ESR



黒塗料



0多いのなんで？

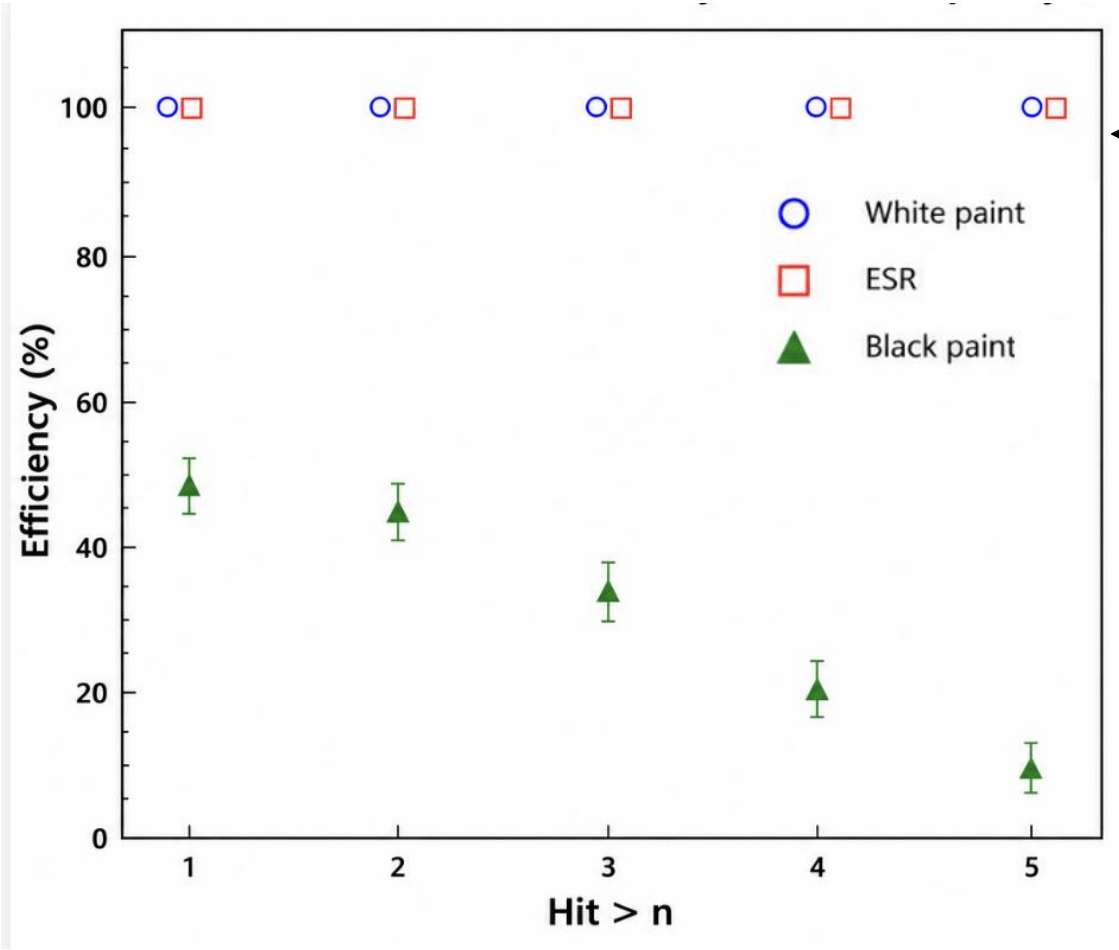
白塗料に比べ、ESRでは一面に渡ってヒットしている。

0ヒットが支配的
少ないFiber本数でヒット

検出効率

= Multiplicity>nHit / Tracking events

光量重心により要求位置分解能の達成を目指す。
→ 複数ファイバーによるヒットが求められる。



← **> 99 %**

• ESRと白塗料では５本を計算に用いても検出効率は悪化しない。

• 黒塗料は検出効率が悪く、重心計算に向いていない。

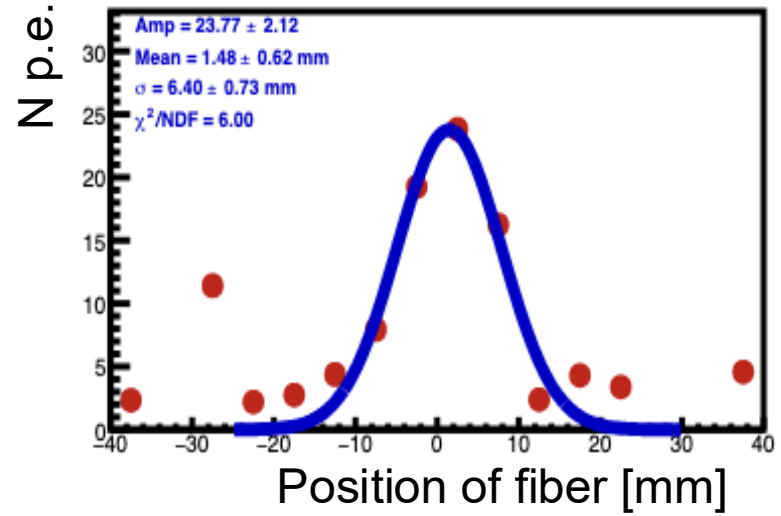
ESRと白塗料の反射材条件で位置分解能評価に向けた比較を行う。

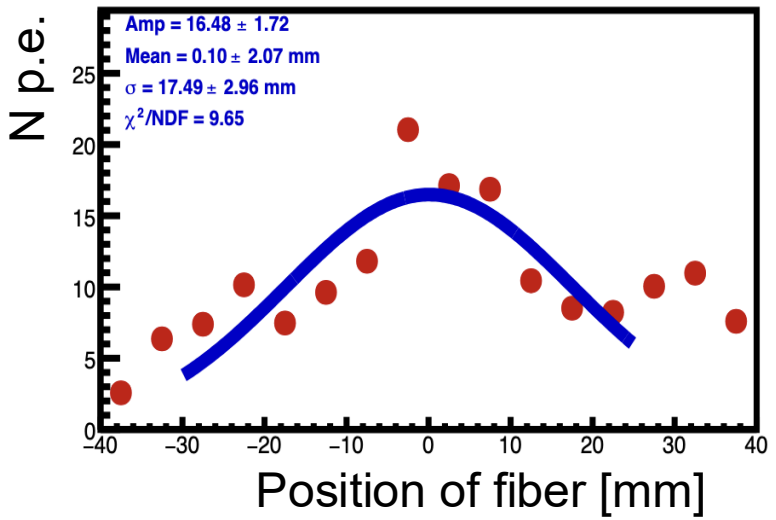
光の広がり方の比較

白塗料

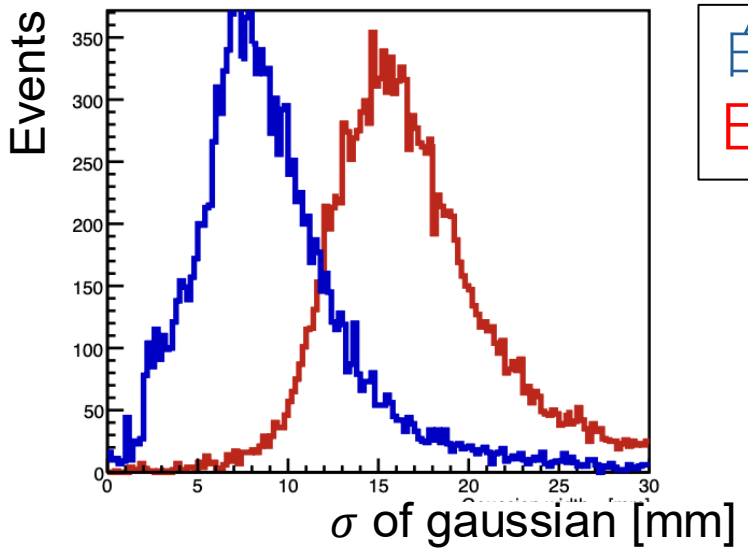
ESR

イベントディスプレイ





Gaussian fit による σ 分布



白塗料 ：光の広がり方 → 局所的
ESR ：光の広がり方 → 広範囲

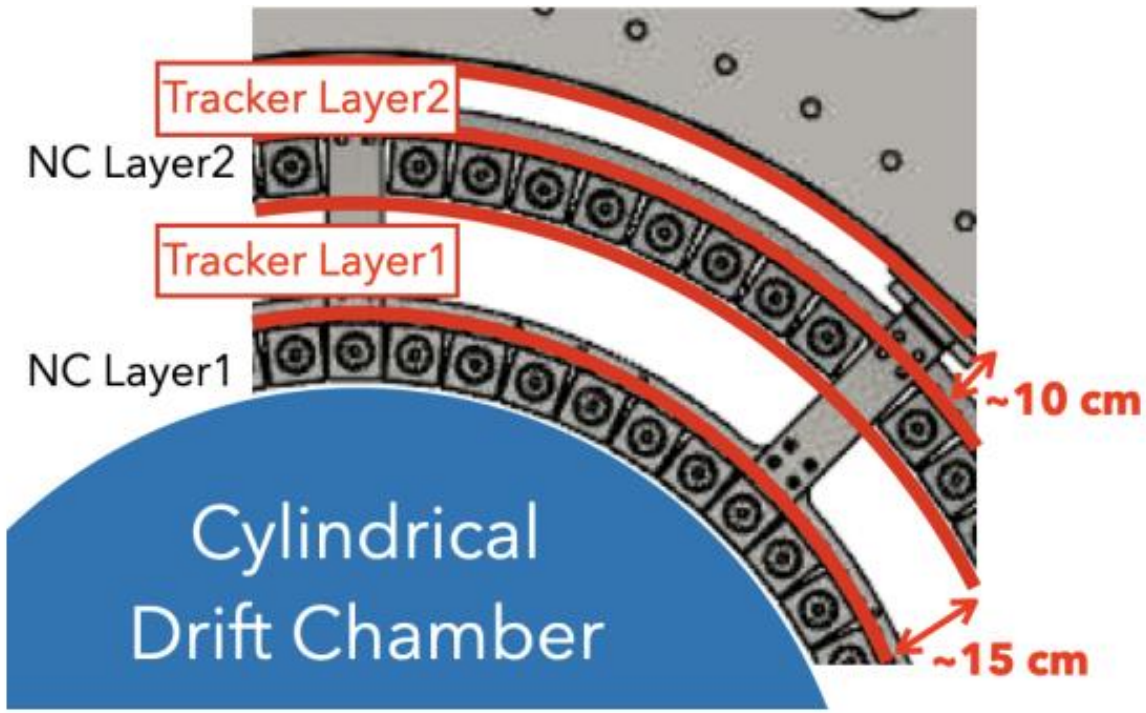
Simulationと同様の傾向が得られた。
白塗料で要求位置分解能の達成が期待される。

まとめ

- K中間子原子核の次世代実験（スピン•パリティの決定）
- 測定手法：崩壊 Λ と p のスピン相関を測定
- ポラリメータートラッカーの要求性能

  散乱陽子の検出効率 ~99 % , 位置分解能 1 mmで測定
- 試作検出器で宇宙線によるテスト（反射材依存）
  - 検出効率：白塗料とESRで要求を満たす。
  - 位置分解能：光の広がり方やsimulationとの照合より白塗料で要求達成の見込み。
- 今後の展望
  - シンチの厚さやファイバー間隔の依存性
  - 入射角度依存性

Back up


Tracker Layer2
NC Layer2
Tracker Layer1
NC Layer1
~10 cm
~15 cm
Cylindrical
Drift Chamber

先行研究について

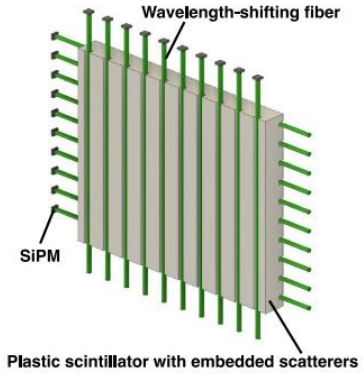


Fig. 2. Conceptual design of FROST.

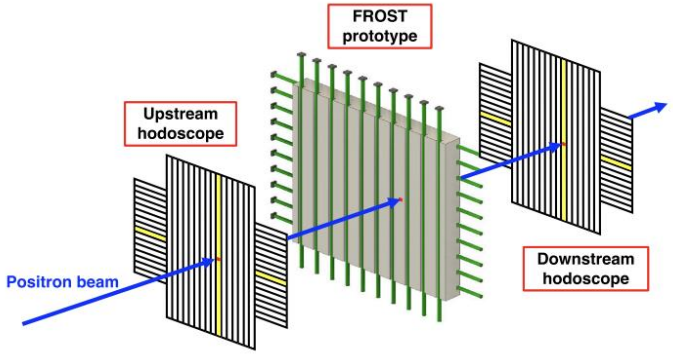


Fig. 13. Single-particle event selection with the hodoscopes and the determination of the reference beam position on the FROST prototype.

Table 3
Position resolution for MIP-like tracks and its breakdown. The resolution components are defined in Section 5.6.2.

(a) x direction					
		Breakdown			Position resolution
Prototype	θ_x	$\sigma_{\mathrm{stat,MIP}}$ [mm]	σ_{ang} [mm]	σ_{other} [mm]	$\sigma_{\mathrm{pos,MIP}}$ [mm]
M1	0°	1.34	0	0.90	1.61
M2		1.13			1.44
M3		1.12			1.44
T2		1.12			1.44
M3	15°	1.20	0.20		1.51
	30°	1.22	0.46		1.58
	45°	1.41	0.79		1.85

Simulation情報

Gain calibration

Gain calibration (^{90}Sr data)

ADCから光電子数の変換を行った。

