

d(K⁻,n)反応を用いたΛ(1405)分光実験のための 陽子検出器の開発

J-PARC E31collaborator

榎本瞬^A, 石橋直哉^A, 井上謙太郎^A, 阪口篤志^A, 吉田幸太郎^A, 味村周平^A, 野海博之^A, 飯尾雅実^B, 板橋健太^B, 岩崎雅彦^B, 應田治彦^B, 大西宏明^B, 佐久間史典^B, 友野大^B, 塚田暁^B, 山崎敏光^B, 石元茂^C, 岩井正明^C, 鈴木祥仁^C, 関本美知子^C, 豊田晃久^C, 石川隆^D, 佐藤将春^D, 鈴木隆敏^D, 施赫將^C, 竜野秀行^D, 橋本直^D, 早野龍五^D, 藤原裕也^D, 松田恭幸^E, 康寛史^F, 徳田真^F, 福田芳之^F, 佐田優太^G, 永江知文^G, 平岩聡彦^G, 藤岡宏之^G, 福田共和^H, 溝井浩^H, D.Faso^I, O.Morra^I, M.Bragadireanu^J, C.Curceanu^J, C.Guaraldo^J, M.Iliescu^J, 岡田信二^J, D.Pietreanu^J, D.Sirghi^J, F.Sirghi^J, P.Behler^K, M.Cargnelli^K, 石渡智一^K, J.Marton^K, 鈴木謙^K, E.Widmann^K, J.Zmeskal^K, H.Bhang^L, S.Choi^L, H.Yim^L, P.Kienle^M, L.Busso^N, G.Beer

阪大理^A, 阪大RCNPA^A, 理研^B, KEK^C, 東大理^D, 東大教養^E, 東工大理^F, 京大理^G, 大阪電通大^H, INFN-Torino^I, INFN-LNF^J, SMI^K, ソウル国立大^L, ミュンヘン工大^M, Torino大^N, Victoria大^O

大阪大学理学研究科RCNP

榎本 瞬

content

- $d(K^-,n)$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ 分光実験
(J-PARC E31)
- $\Lambda(1405)$ 崩壊モードの同定シミュレーション
- 陽子検出器の性能評価

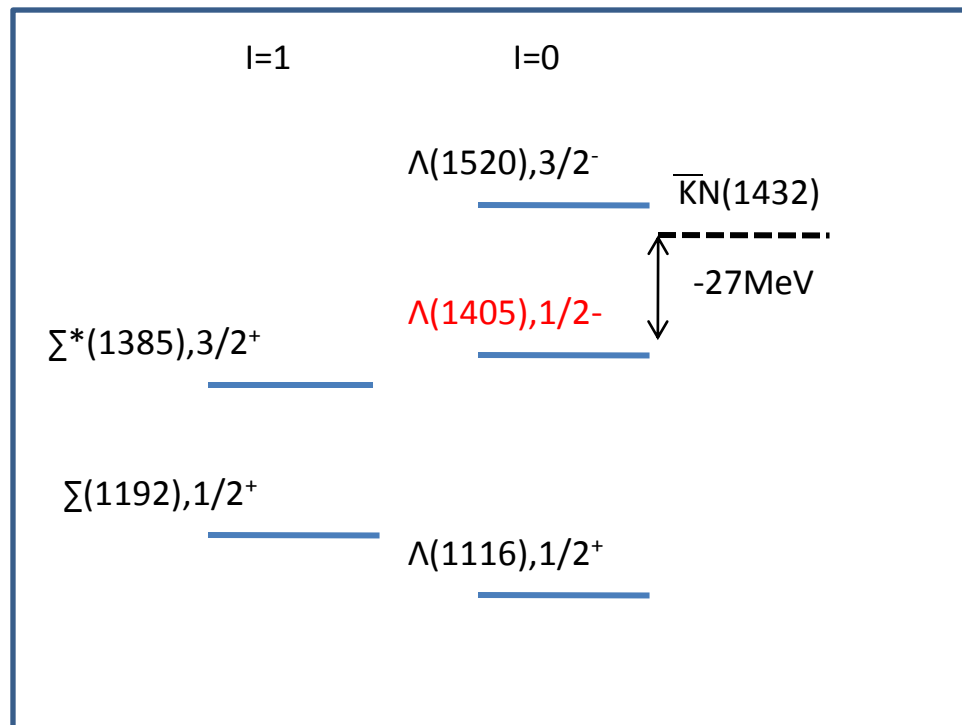
$\Lambda(1405)$

- $\Lambda(1405): J^P=1/2^-, I=0, S=-1$
- 3quark? 5quark?

- $\bar{K}N$ の束縛状態?

1405MeV/c²?(1pole?)
 → $\bar{K}N$ の強い束縛状態

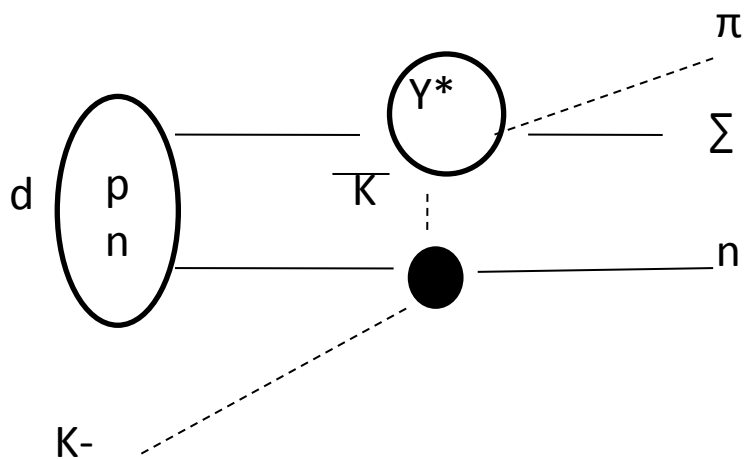
1420MeV/c²?(2pole?)
 → $\bar{K}N(1426-16i)$ と $\pi\Sigma(1390-66i)$ の重ね合わせ?



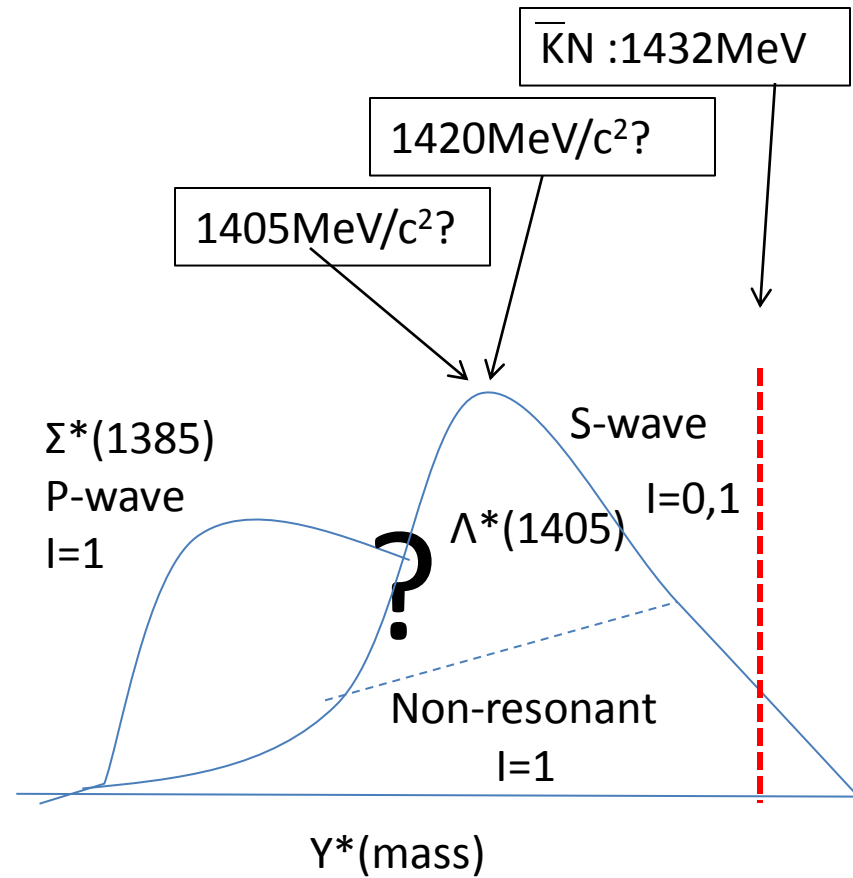
$\bar{K}N$ 束縛状態について知りたい。

→ $\bar{K}N$ の閾値以下での反応実験 $d(K^-, n)$ を行う。

($\bar{K}N$ 結合を強く反映した実験)



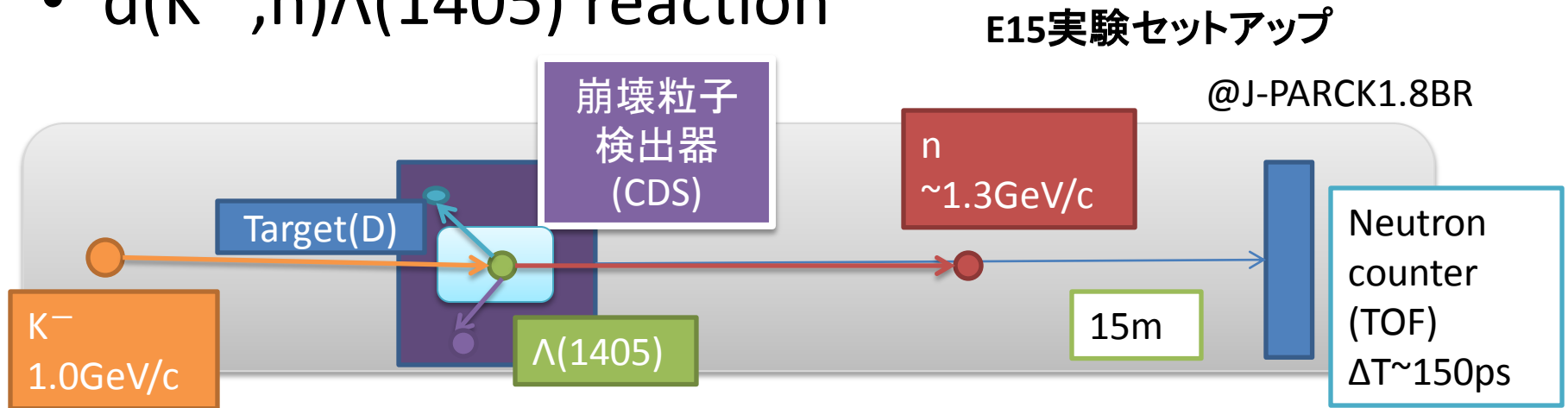
$d(K^-, n)$ 反応・・・ $\bar{K}N$ 直接反応できる。
 (自由空間では反応できない)



- S-wave, $l=0 \rightarrow \Lambda^*(1405) \rightarrow \pi^0 \Sigma^0, \pi \Sigma^+, \pi^+ \Sigma^-$
- S-wave, $l=1 \rightarrow \text{non-resonant (NR)}$
- P-wave, $l=1 \rightarrow \Sigma^*(1385) \rightarrow \pi^0 \Lambda, \pi^- \Sigma^+, \pi^+ \Sigma^-$

J-PARC E31実験@K1.8BR

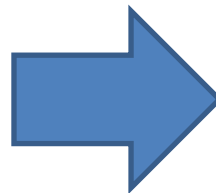
- $d(K^-, n)\Lambda(1405)$ reaction



- 質量欠損法から $\Lambda(1405)$ の質量スペクトルを測定する。

$$MM_{\Lambda(1405)} = \sqrt{(\vec{P}_K + \vec{P}_d - \vec{P}_n)^2}$$

- 崩壊粒子検出器により崩壊モードの同定。



$\Sigma^-\pi^+, \Sigma^+\pi^- \rightarrow I=0$	Λ^*
	$ I=1$ NR
	$ I=1$ Σ^*
$\Sigma^0\pi^0 \rightarrow I=0$	Λ^*
$\Lambda\pi^0 \rightarrow$	NR or Σ^*

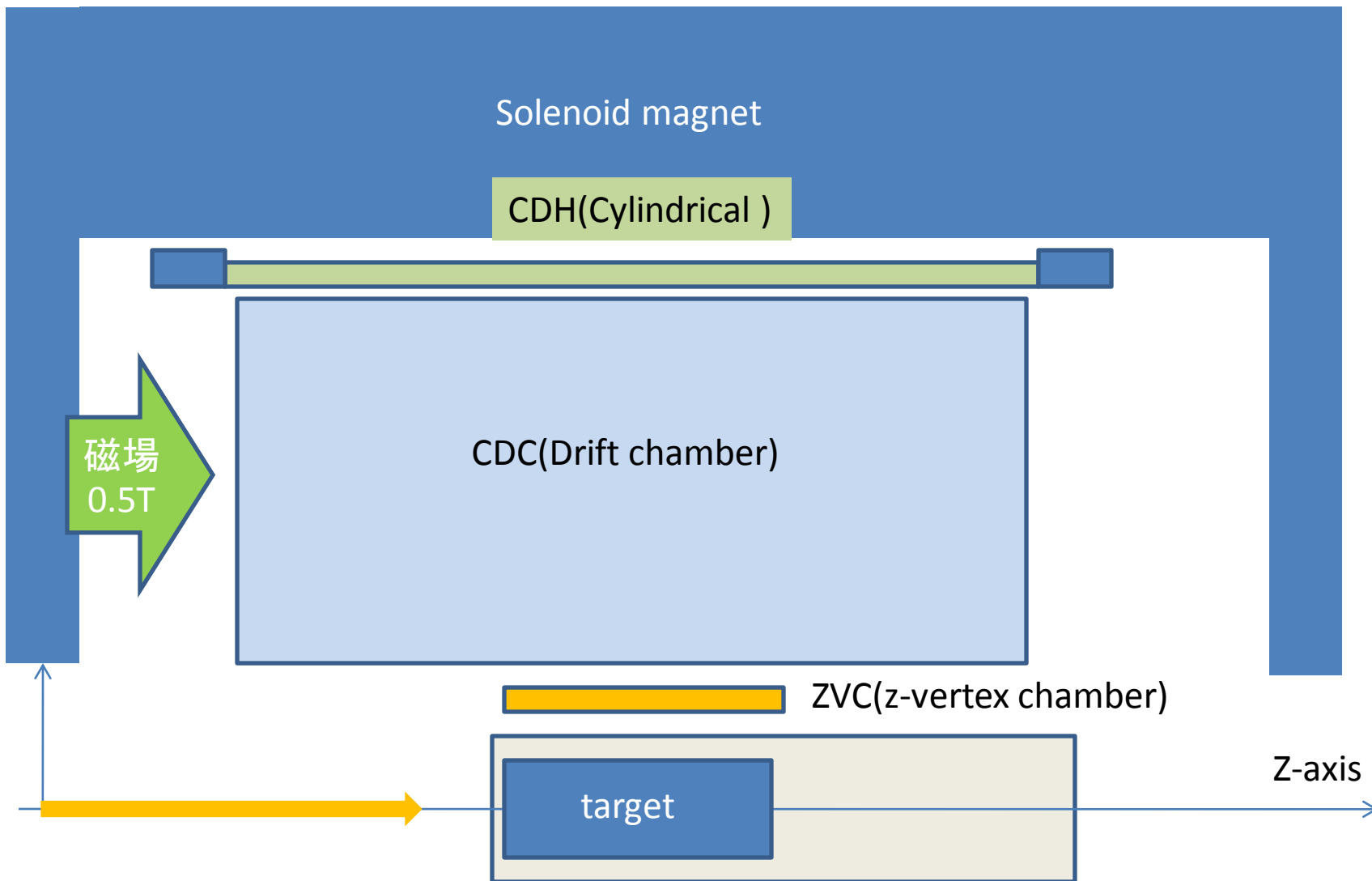
崩壊モードの同定

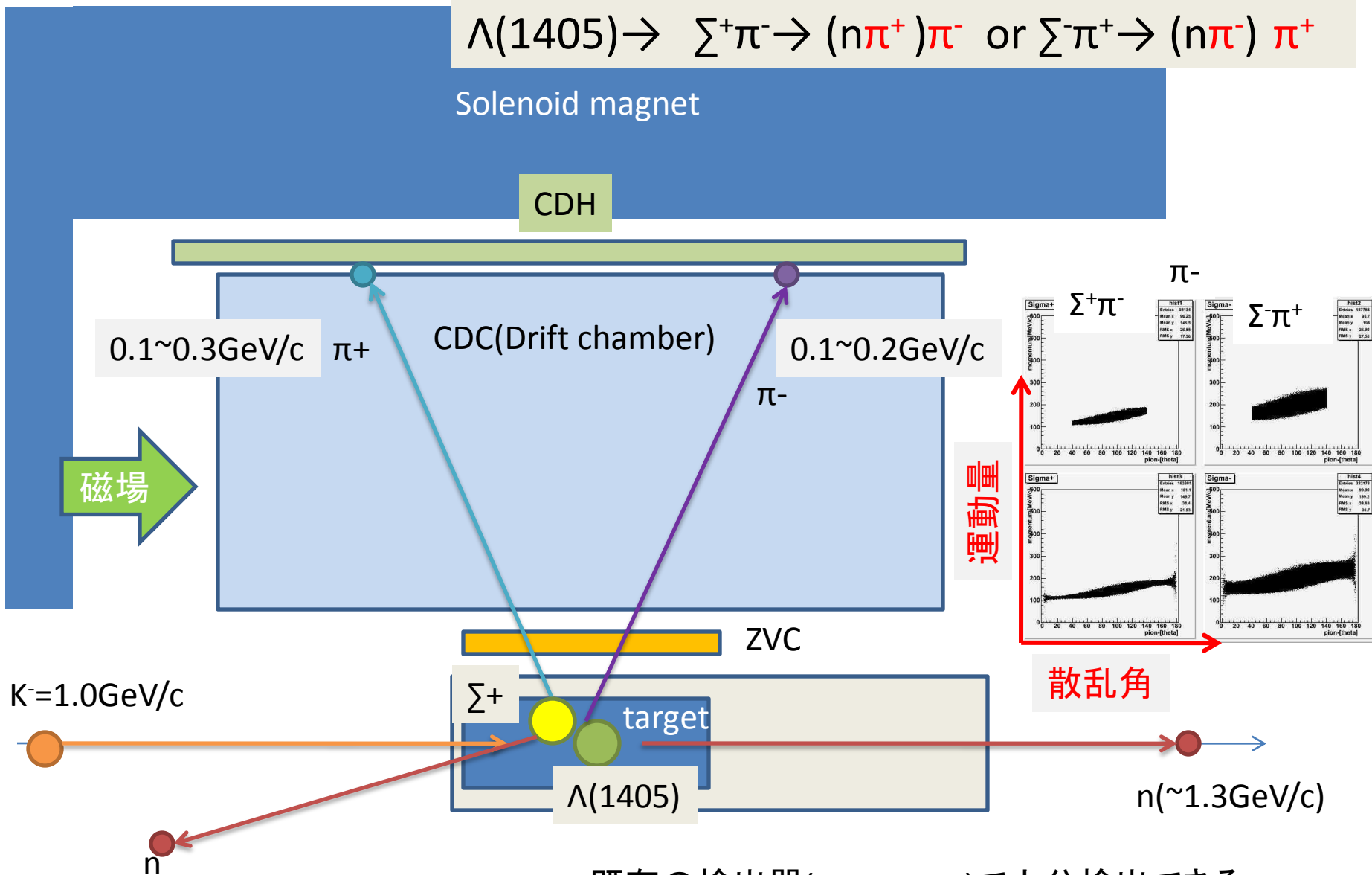
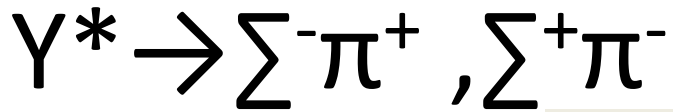
- 1: $\Lambda(1405)[I=0] \rightarrow \Sigma^+ \pi^- \rightarrow (n\pi^+) \pi^-$
 $\Sigma^- \pi^+ \rightarrow (n\pi^-) \pi^+$
- 2: $\Lambda(1405)[I=0] \rightarrow (I=0) \Sigma^0 \pi^0 \rightarrow \Lambda \gamma \pi^0 \rightarrow (p\pi^-) \gamma \pi^0$
 $NR/\Sigma(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0 \rightarrow p\pi^- \pi^0$

→1: 既存検出器(E15 set up)で十分な検出効率が得られる。

→2: **陽子検出器**を新たに加えることが有効である。

崩壊粒子検出器(CDS)





既存の検出器(E15 set up)で十分検出できる。

崩壊モードの同定

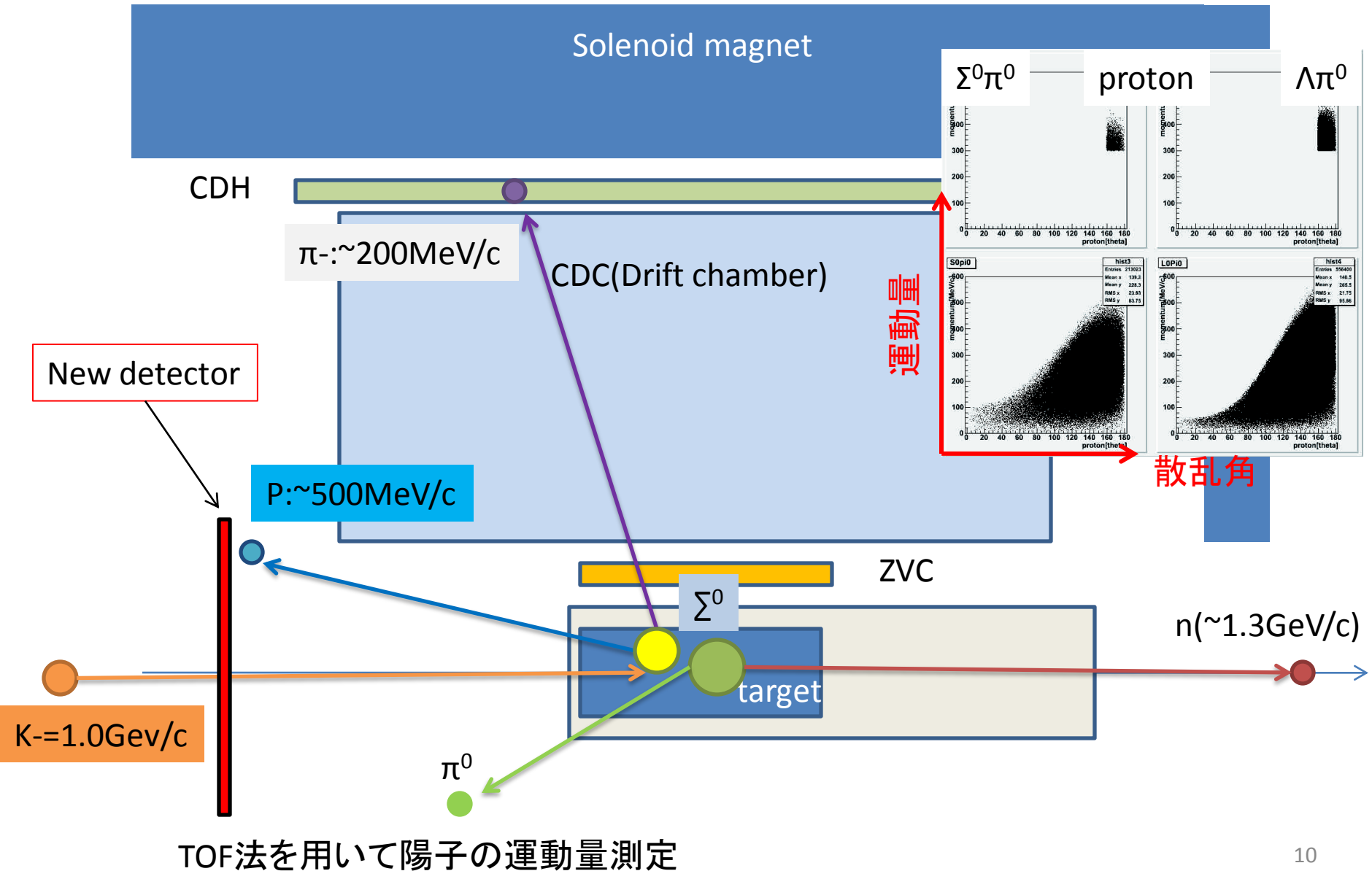
- 1: $\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^+ \pi^- \rightarrow (n \pi^+) \pi^-$
 $\Sigma^- \pi^+ \rightarrow (n \pi^-) \pi^+$
- 2: $\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^0 \pi^0 \rightarrow \Lambda \gamma \pi^0 \rightarrow (p \pi^-) \gamma \pi^0$
 $\text{NR}/\Sigma(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0 \rightarrow p \pi^- \pi^0$

→1: 既存検出器(E15 set up)で十分な検出効率が得られる。

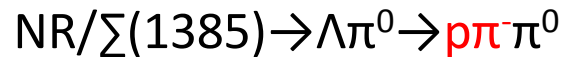
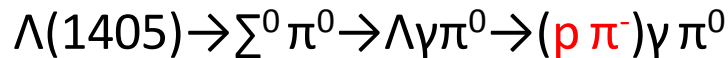
→2: **陽子検出器**を新たに加えることが有効である。

$$\Lambda^* \rightarrow \Sigma^0 \pi^0, (\Sigma^* \rightarrow \Lambda \pi^0) \quad \Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^0 \pi^0 \rightarrow \Lambda \gamma \pi^0 \rightarrow (p \pi^-) \gamma \pi^0$$

$$\text{NR}/\Sigma(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0 \rightarrow (p \pi^-) \pi^0$$

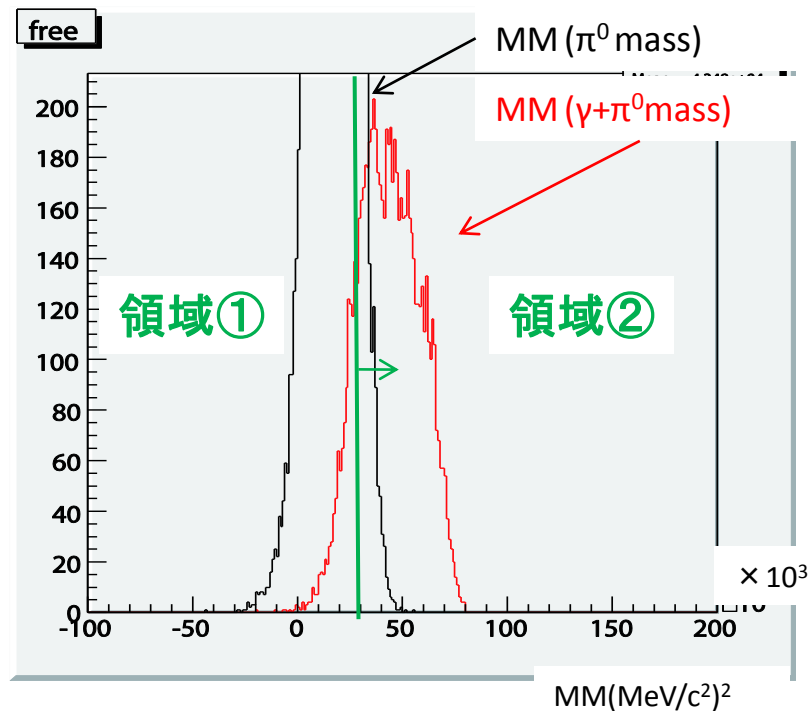


$\Sigma^0\pi^0$ の同定

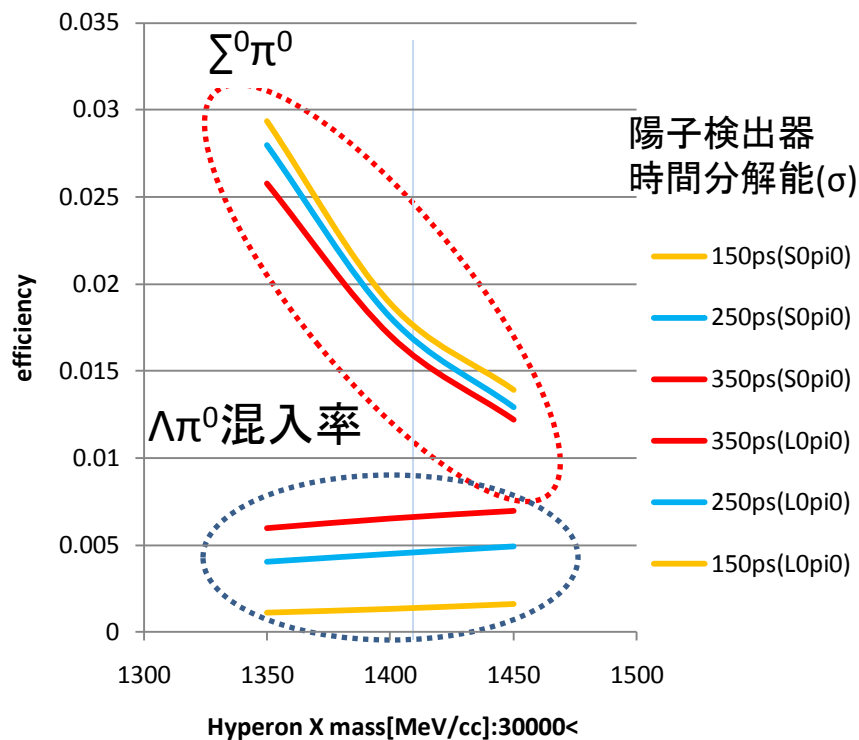


$$MM_Y^2 = (\vec{P}_Y)^2 = (\vec{P}_K + \vec{P}_d - \vec{P}_n - \vec{P}_p - \vec{P}_{\pi^-})^2$$

P:四元運動量

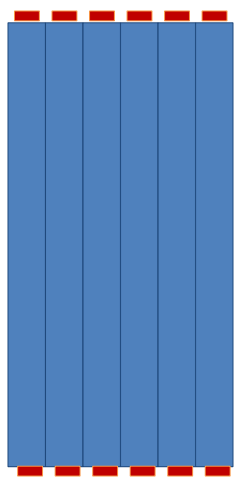
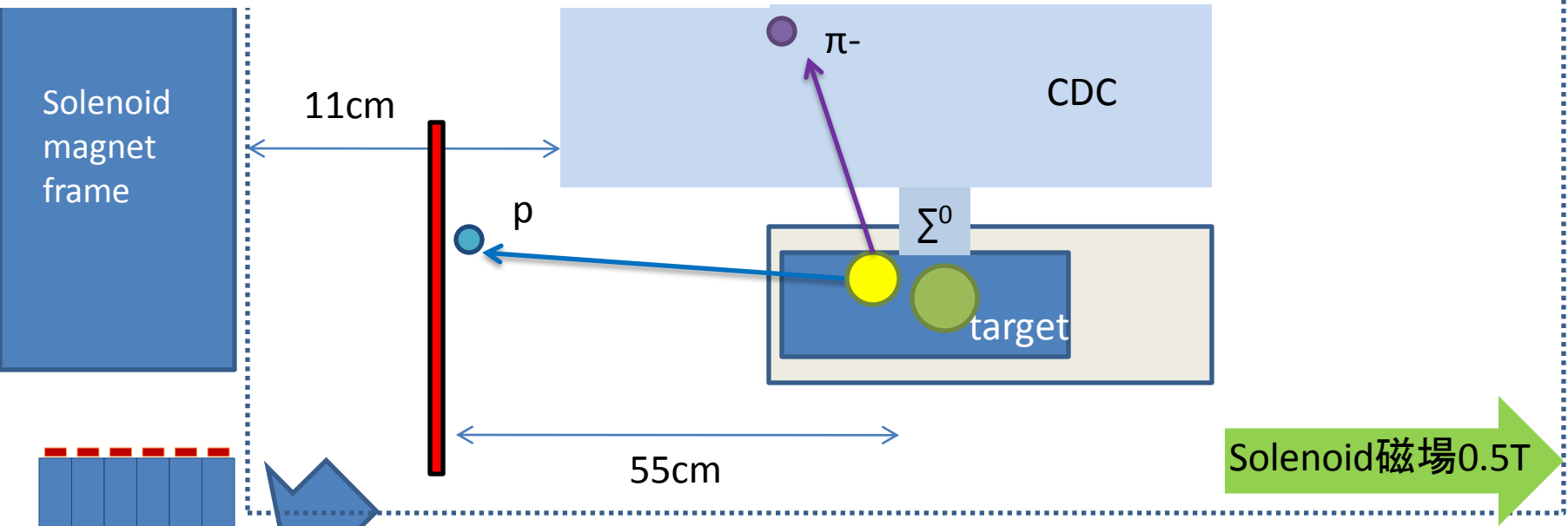


$\Gamma(\Lambda^*)/\Gamma(\Sigma^*) \sim 1$



$$\Lambda\pi^0(\text{混入率}) = (\Lambda\pi \text{ 検出数}[\text{領域②}]) / (\Lambda\pi \text{ の生成数})$$

陽子検出器の開発



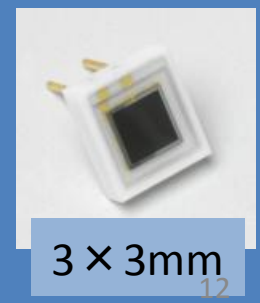
プラスチックシンチレーター
+
MPPC

TOF(Time of Flight)法を用いる。

MPPC

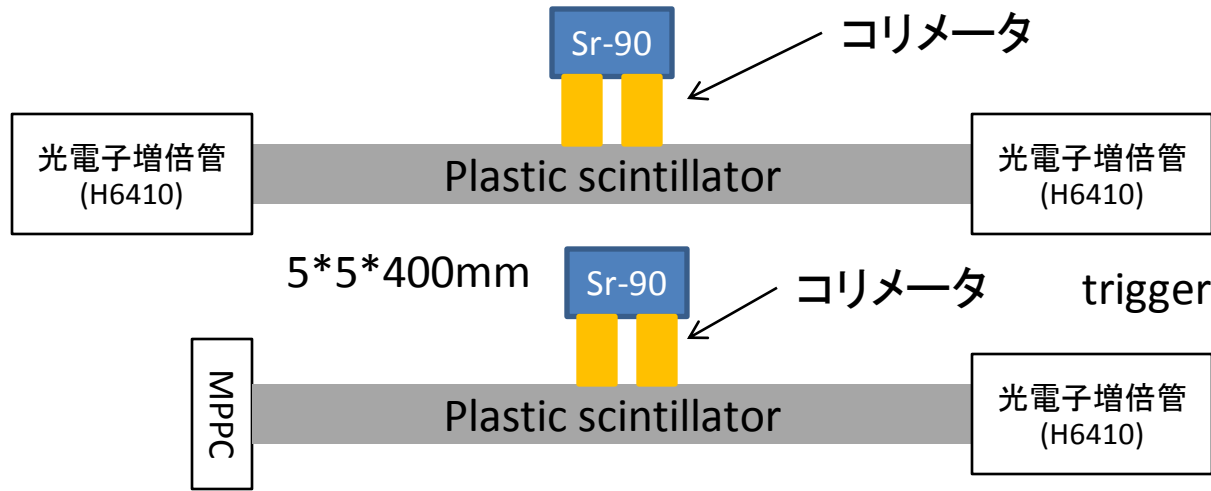
(Multi-Pixel-Photon-Counter)

- 3 × 3mm MPPC-50C
- 増幅率 (~10⁶)
- 磁場耐性
- コンパクト
- 安価 1.8万円



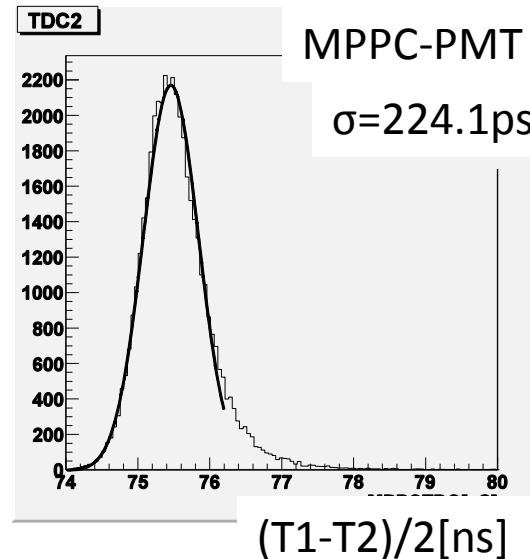
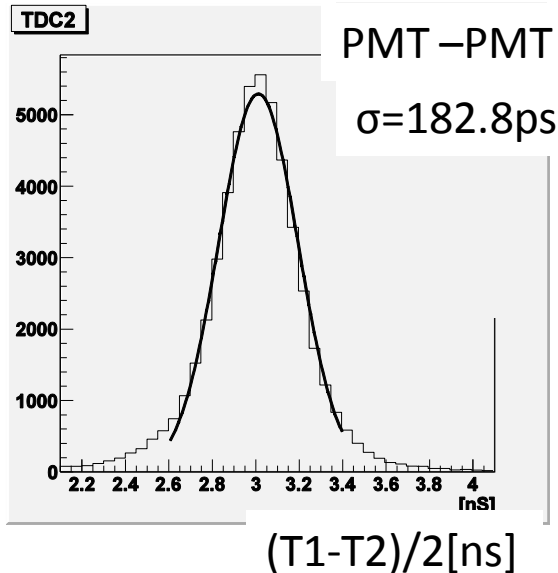
3 × 3mm

Sr-90線源による時間分解能測定



$$T \pm \sigma = (T1 - T2) \pm \sqrt{\sigma_{PMT1}^2 + \sigma_{PMT2}^2}$$

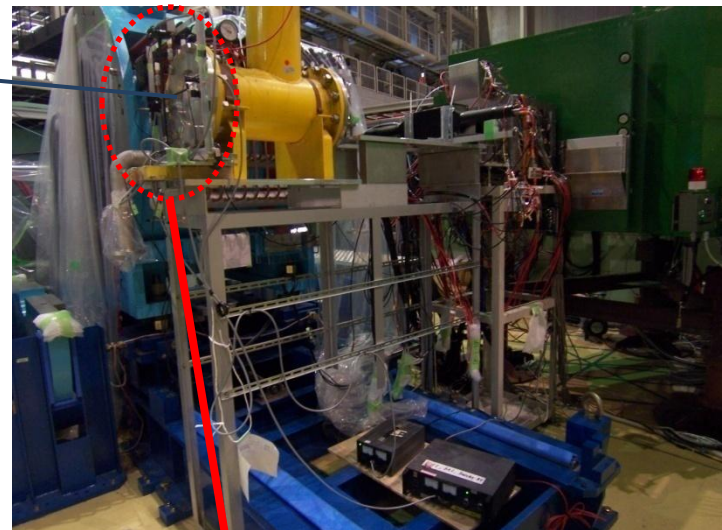
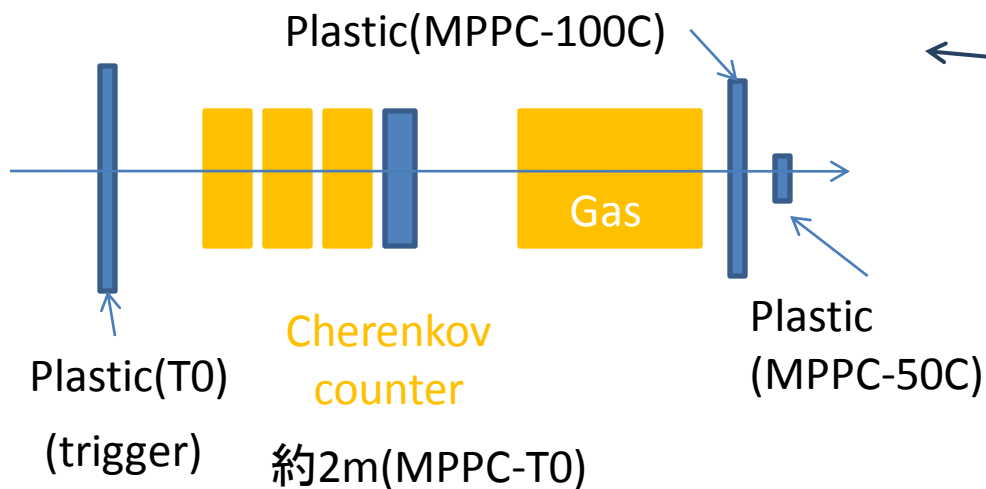
$$T \pm \sigma = (T1 - T2) \pm \sqrt{\sigma_{PMT1}^2 + \sigma_{MPPC}^2}$$



$$\sigma_{\text{PMT}} = 258 \text{ ps}$$

$$\sigma_{\text{mppc}} = 366 \text{ ps}$$

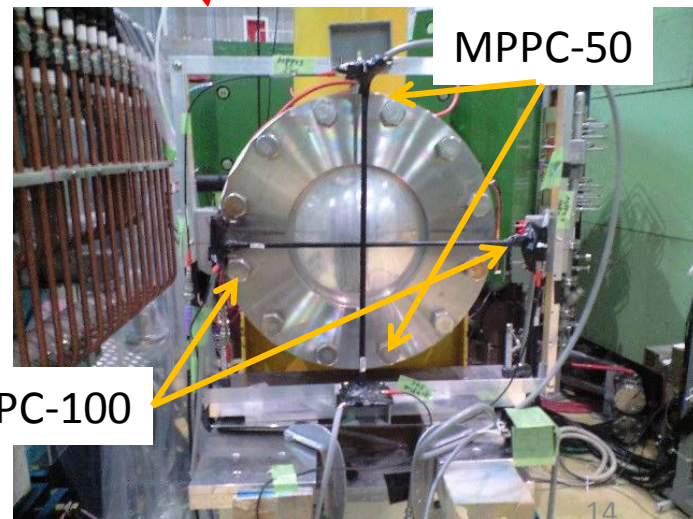
ビームテスト(@J-PARCK1.8BR)



	MPPC-50C	MPPC-100C
Pixel size	50 μ m × 50 μ m	100 μ m × 100 μ m
Pixel 数	3600	900

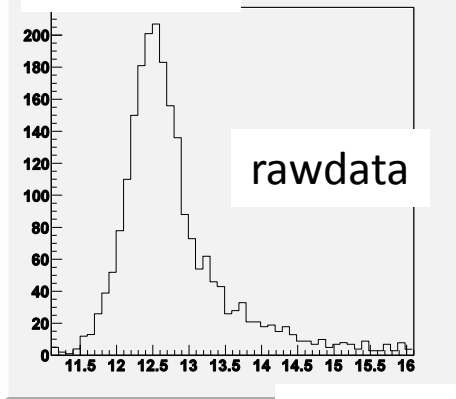
Trigger: electron
Beam: -0.75GeV/c

- minimum ionization particle
- 本実験に近いセットアップ。
→ 飛行距離(約2m)
→ 同じトリガー



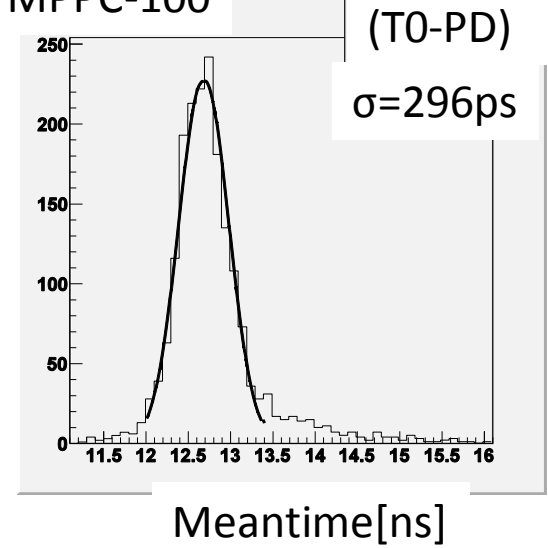
結果

MPPC-50

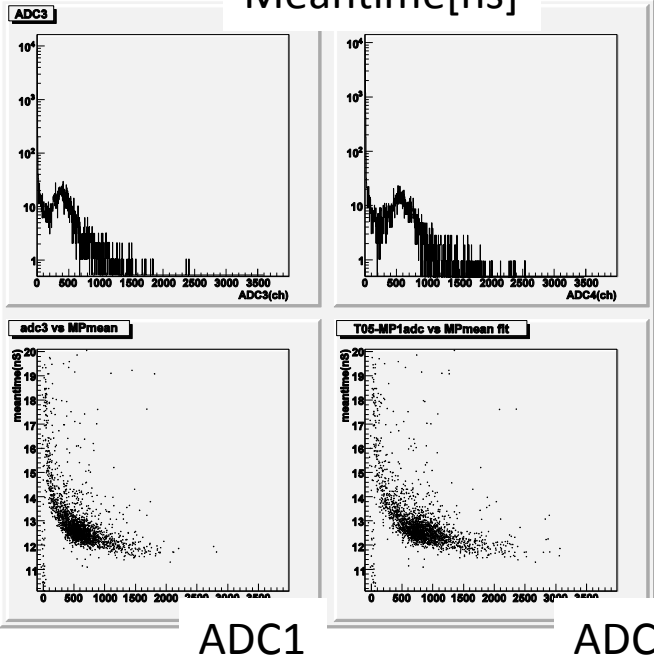


$$T \pm \sigma = \frac{(T1+T2)}{2} \pm \frac{\sqrt{(\sigma_{MPPC1}^2 + \sigma_{MPPC2}^2)}}{2}$$

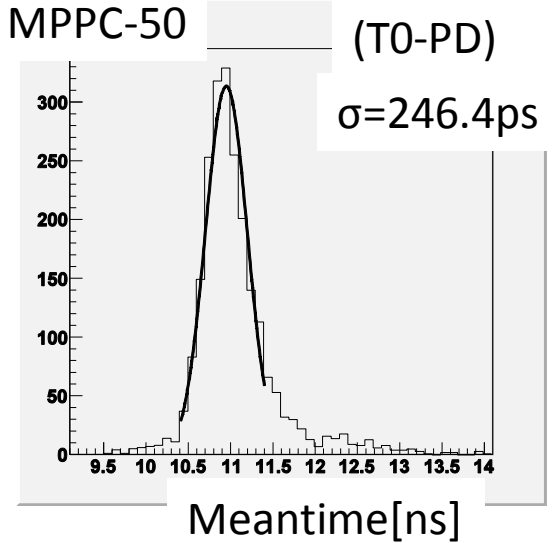
MPPC-100



Meantime[ns]



MPPC-50



まとめ

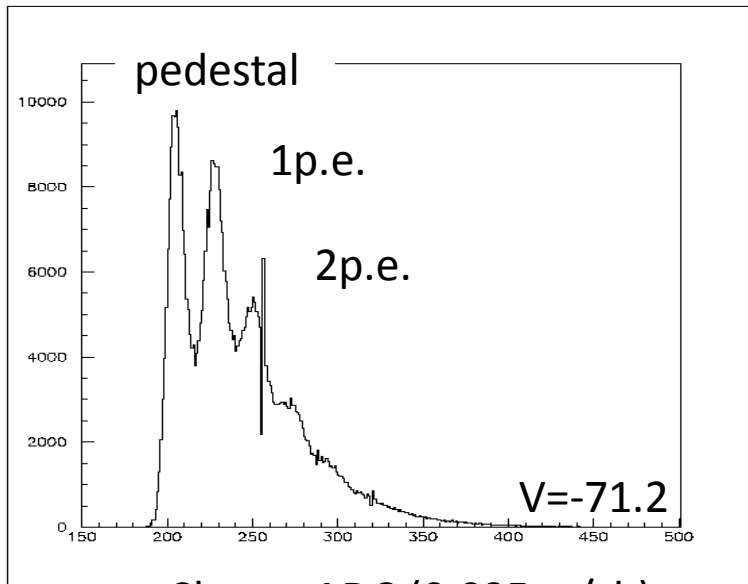
- $d(K^-, n)$ 反応を用いた $\Lambda(1405)$ 分光実験(E31実験)のためにE15実験のセットアップを想定したシミュレーションを行った。
- シミュレーション結果、 $\Lambda(1405)$ の崩壊モード $\Sigma^+\pi^-$, $\Sigma^-\pi^+$ について十分な検出効率が得られることが分かった。
- $\Sigma^0\pi^0$ を同定するために新しく陽子検出器を設置する。シミュレーションによって、陽子検出器の時間分解能(運動量分解能)に対する検出効率および $\Lambda\pi^0$ の混入率を見積もった。
- MPPCを用いた陽子検出器を開発し、J-PARCK1.8BRにおいてT0検出器との飛行時間分解能を測定した。(T0検出器の分解能を含め)MPPC-50Cで $\sigma=246\text{ps}$ 、MPPC-100Cで $\sigma=296\text{ps}$ を得た。→MPPC-50Cを用いる。
- シミュレーションと比較して $\Sigma^0\pi^0$ の検出効率は1.7%(@1405MeV/c²)
 $\Lambda\pi^0$ の混入率は0.5%(@1405MeV/c²)と見積もられた。

おわり

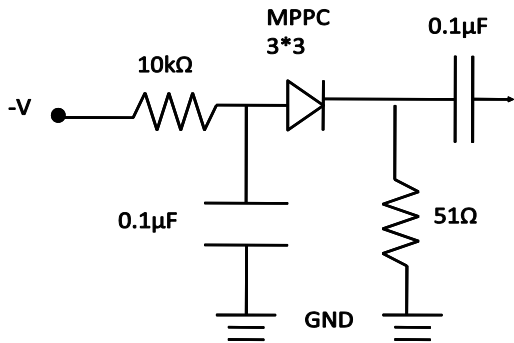
backup

MPPC-電圧特性

MPPC—50C(pixel size $50\mu\text{m}^2$)

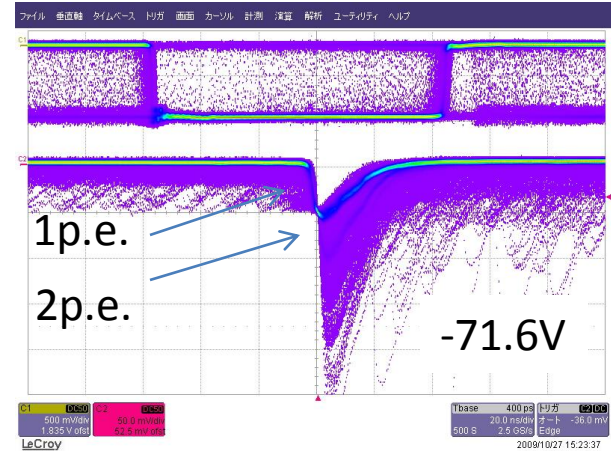


Charge ADC (0.025pc/ch)

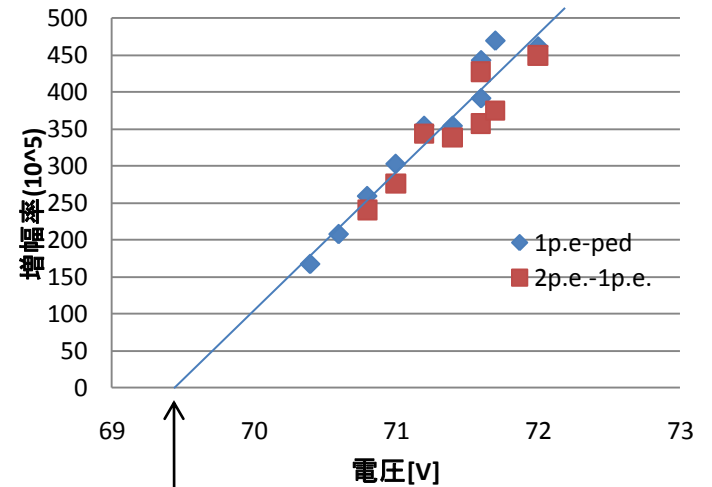


読み出し回路

$$(Q_{2p.e.} - Q_{1p.e.}) / (1.6 \times 10^{-19}) = 1\text{pixel分の増幅率}$$



MPPC+アンプ(100倍)



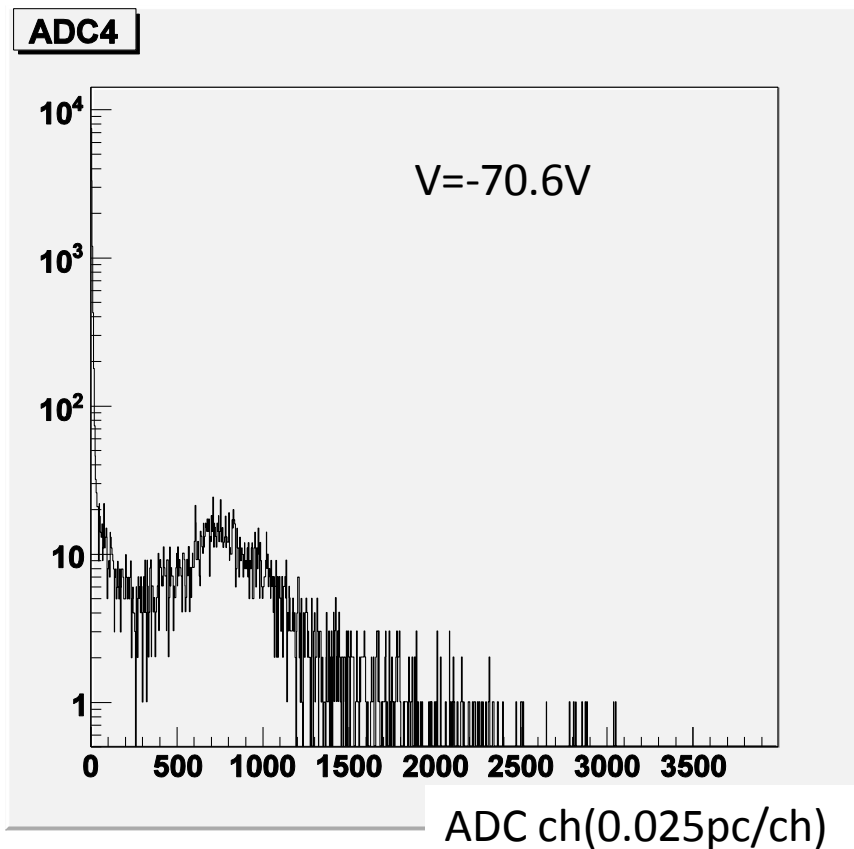
$$V_{BR} = 69.4V$$

$$Q = C(V - V_{BR})$$

Photon数

run779

MPPC-50ADC(NO.4)



13ch=1p.e.

40p.e~50p.e.

厚さ5mm(5*5*400mm)
1MeVのエネルギーロス
→9700p.e.(EJ-230)
入射面積9/25
開口率61.5%
全反射0.3etc

崩壊モード

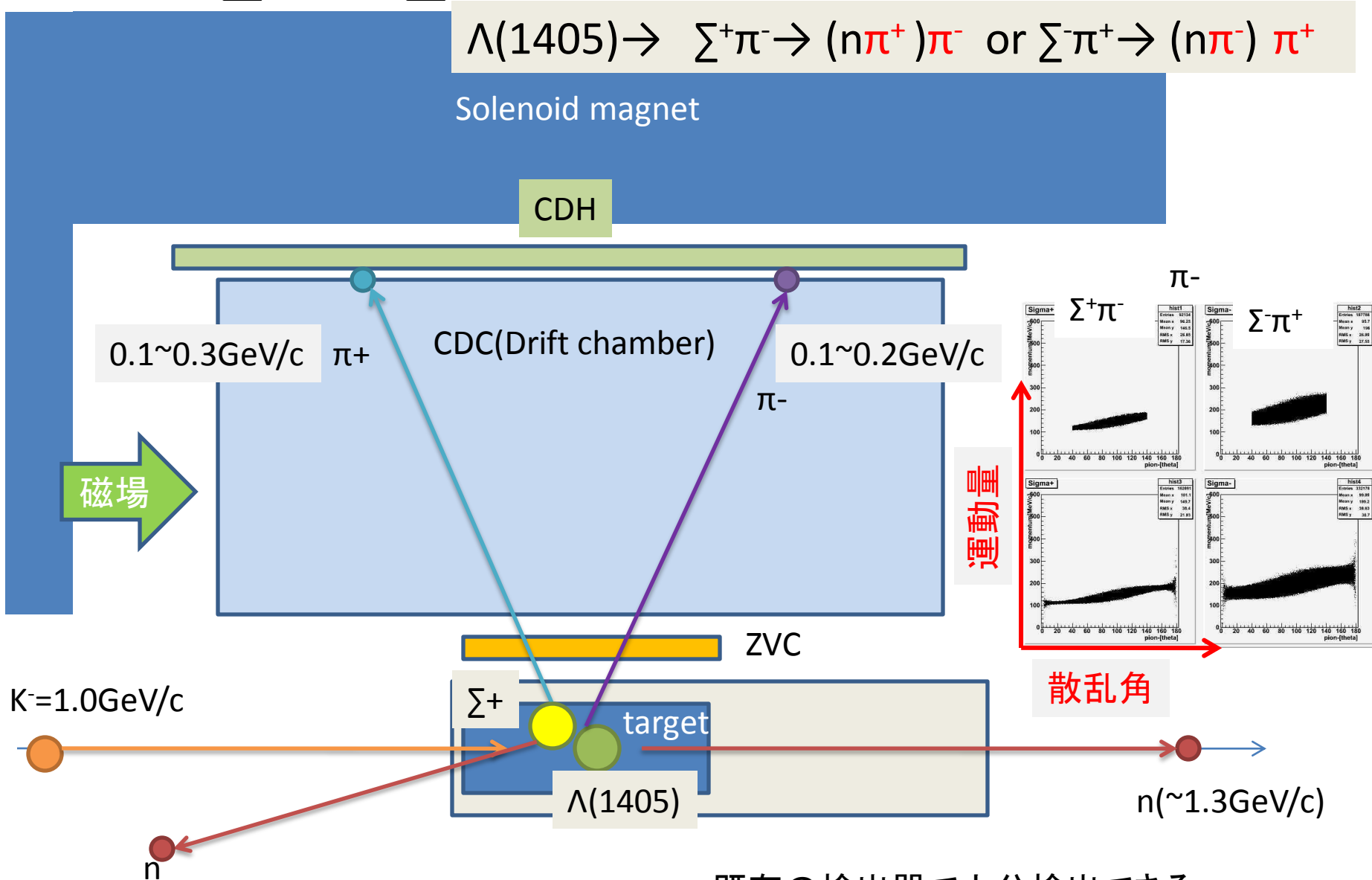
$\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^+ \pi^- \rightarrow (p \pi^0) \pi^-$ [51.57%] or $(n \pi^+) \pi^-$ [48.31%]
 $\Sigma^- \pi^+ \rightarrow (n \pi^-) \pi^+$ [99.84%]
 $\Sigma^0 \pi^0 \rightarrow \Lambda \gamma \pi^0 \rightarrow (n \pi^-) \pi^0$ [35.8%] or $(p \pi^-) \gamma \pi^0$ [63.9%]

$\Sigma(1385) \rightarrow \Lambda \pi^0$ [87.0%]
 $\Sigma \pi$ [11.7%]

- Proton(938.6MeV):300~500MeV/c
- $\beta=0.30\sim0.47$
- Pion+(139.5MeV):100~150MeV/c
- $\beta=0.58\sim0.73$

$$Y^* \rightarrow \Sigma^- \pi^+, \Sigma^+ \pi^-$$

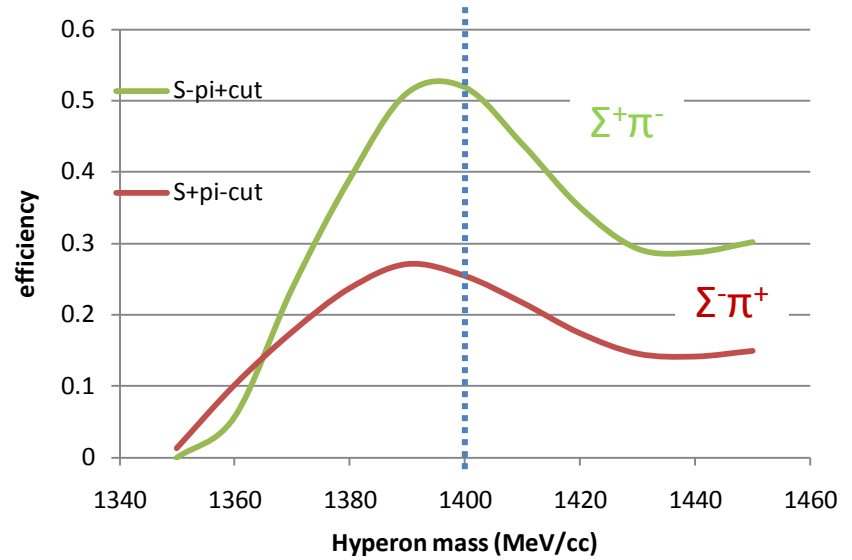
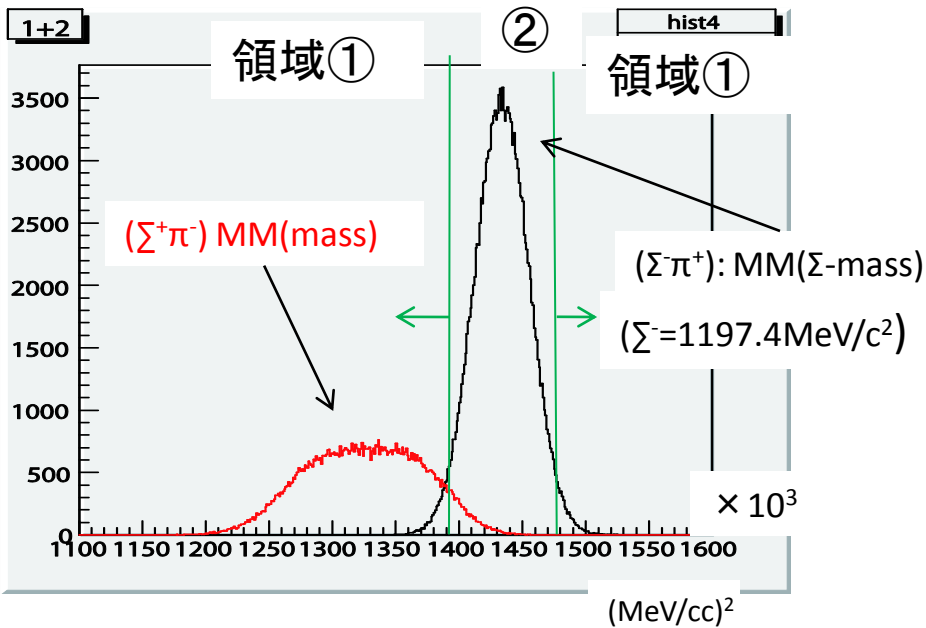
$$\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^+ \pi^- \rightarrow (n \pi^+) \pi^- \text{ or } \Sigma^- \pi^+ \rightarrow (n \pi^-) \pi^+$$



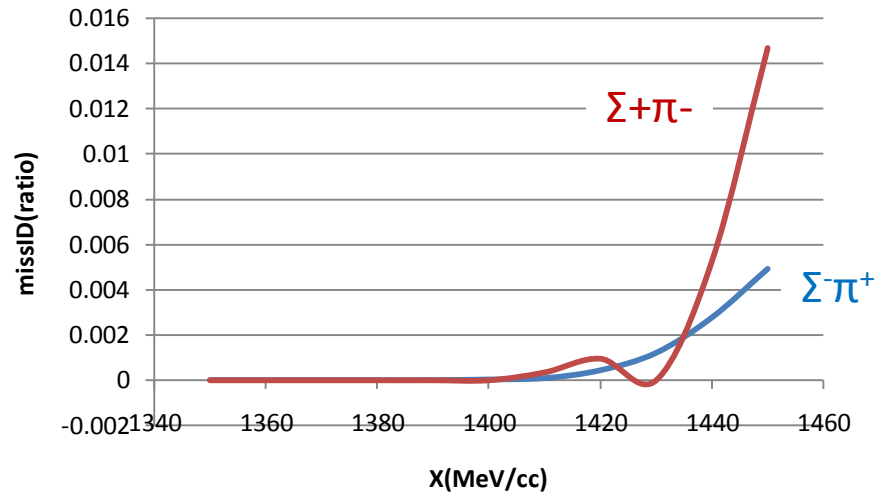
既存の検出器で十分検出できる。

$\Sigma^-\pi^+, \Sigma^+\pi^-$ modeの同定

$$MM_{\Sigma^\pm}^2 = (\vec{P}_K + \vec{P}_d - \vec{P}_n - \vec{P}_{\pi^\pm} - \vec{P}_{\pi^\mp})^2$$

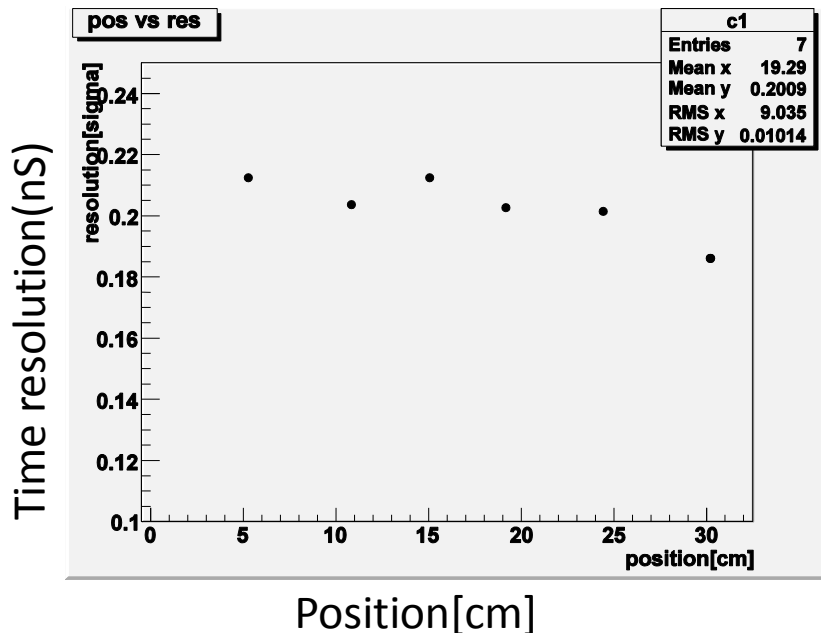
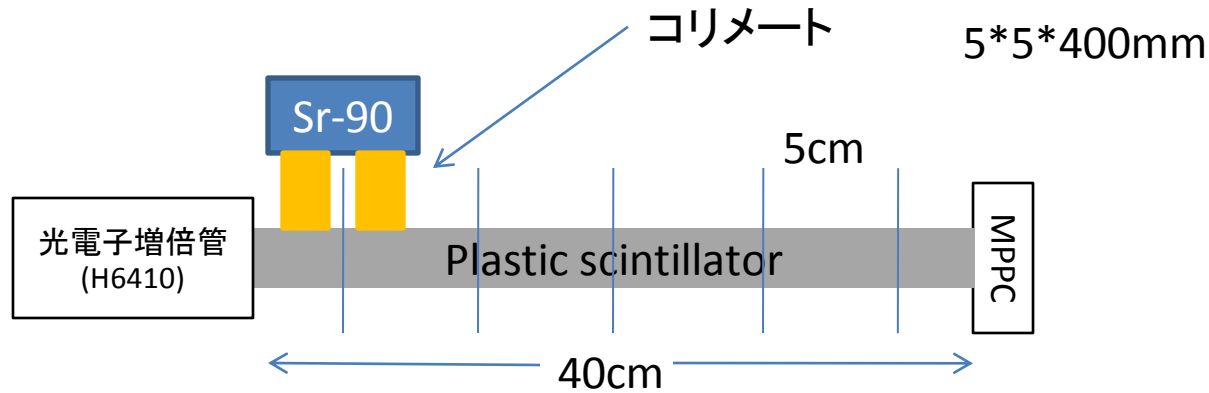


$$\Gamma(\Lambda^* \rightarrow \Sigma^+\pi^-) / \Gamma(\Lambda^* \rightarrow \Sigma^-\pi^+) \sim 1$$



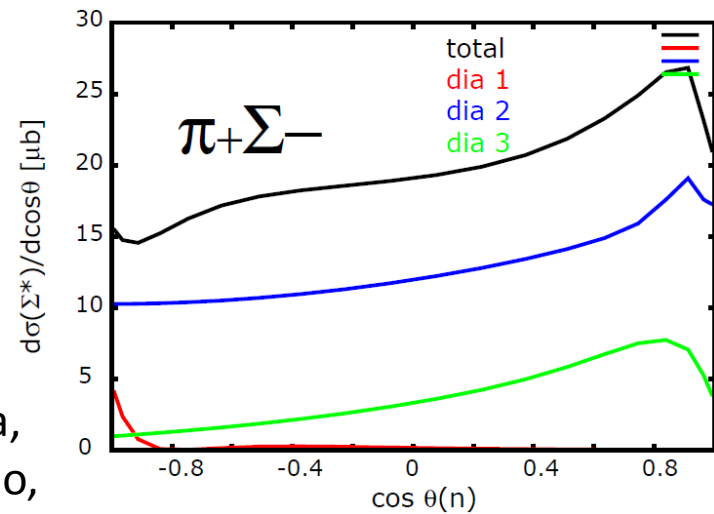
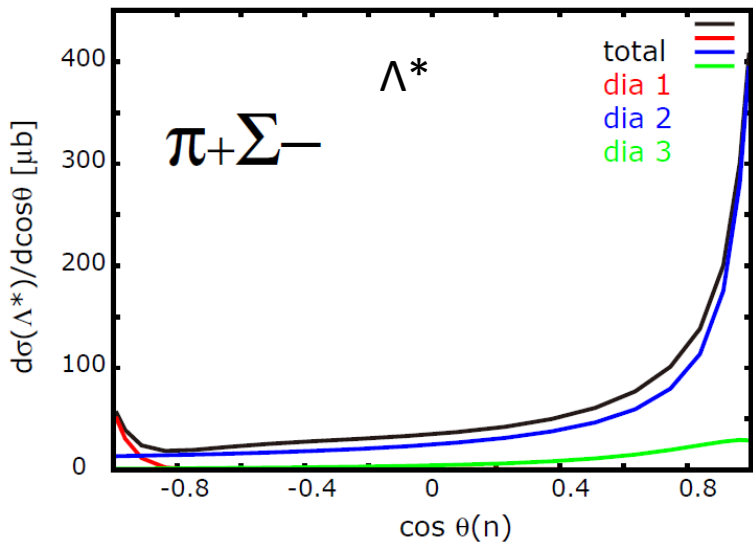
$$\text{missID}(\Sigma^+\pi^-) = (\text{①での}\Sigma^-\pi^+\text{検出数}) / (\text{①での}\Sigma^+\pi^-\text{検出数})$$

位置依存性

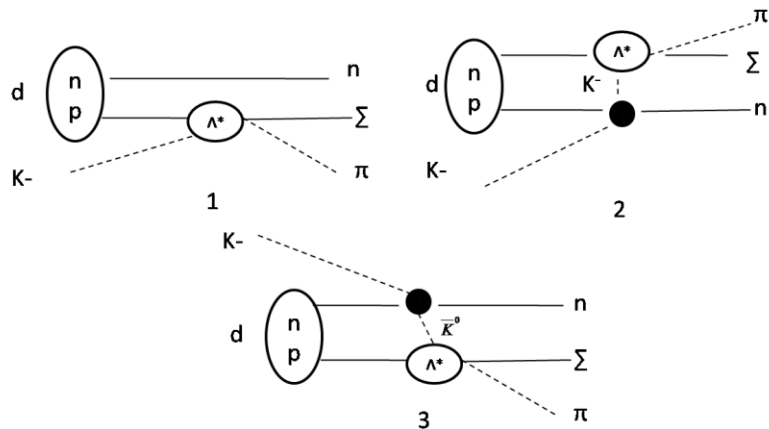


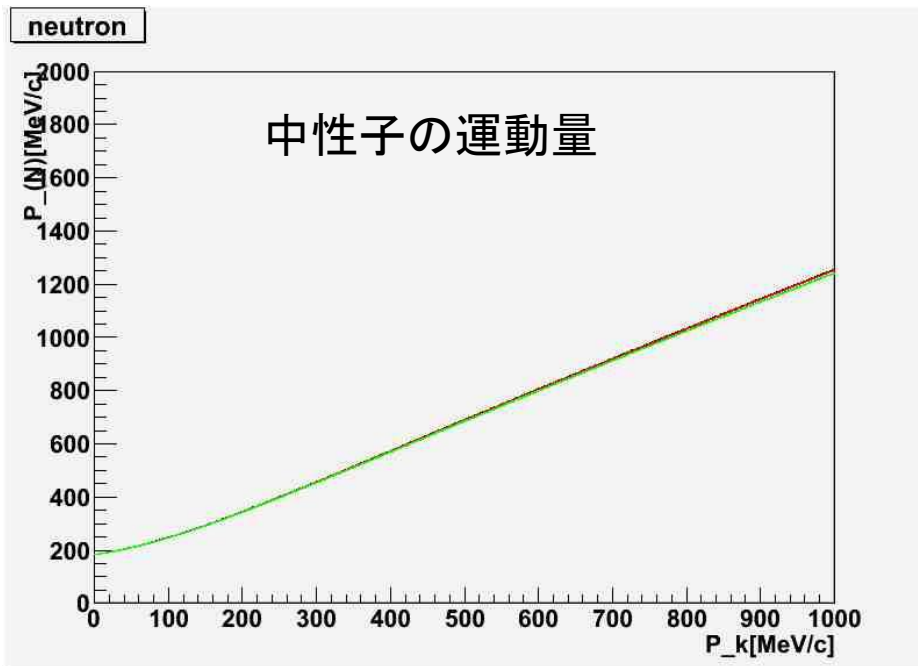
- 位置による時間分解能の悪化は見られない。
- シンチレーション光の伝達速度 1.3×10^8 [m/s] → 全反射条件による。

$D(K^-,n)\pi^+\Sigma^-$ ($P_K=800\text{MeV}/c$)



J.Yamagata-Sekihara,
T.Sekihara, and D.Jido,
paper in preparation

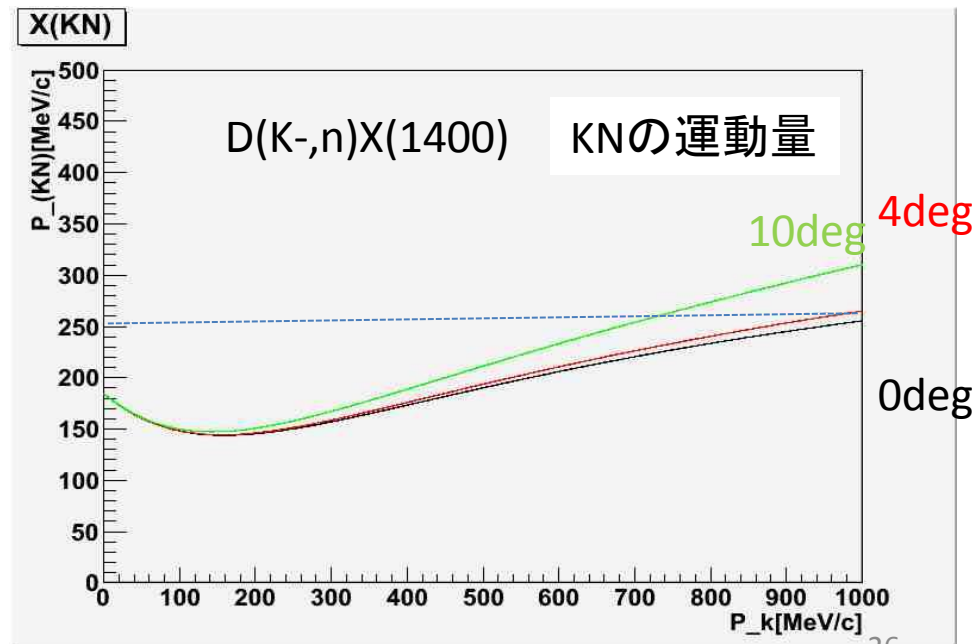


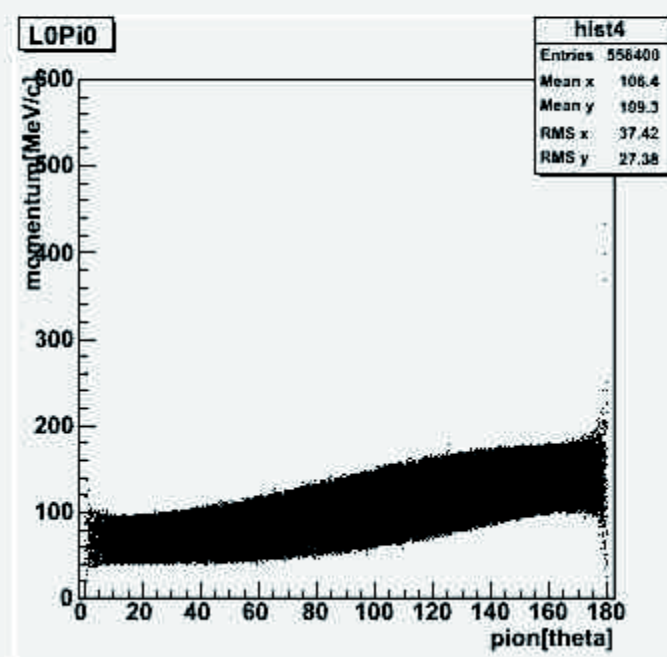
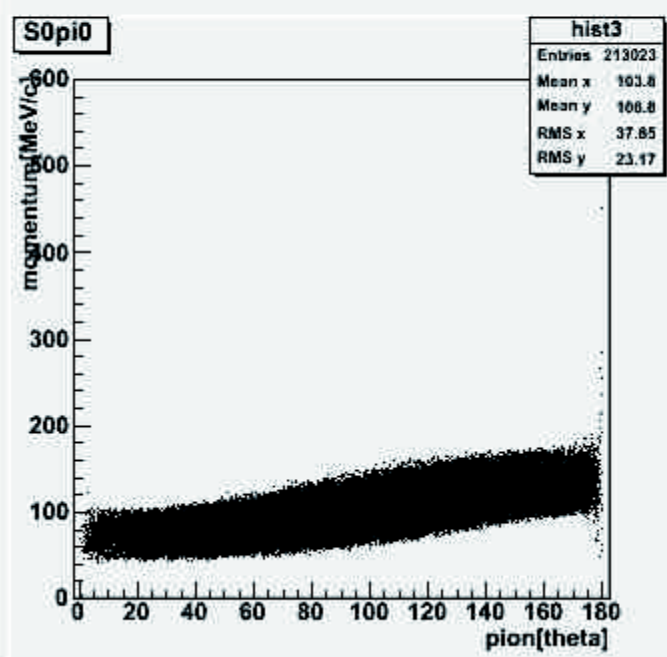
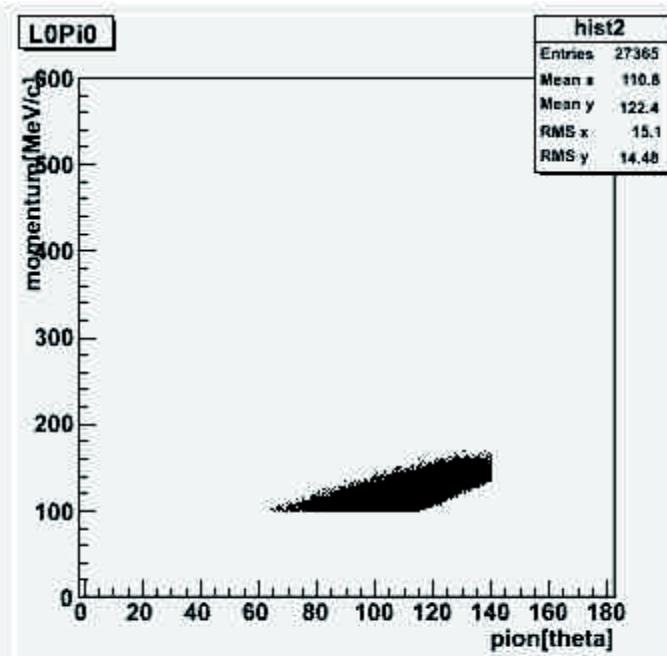
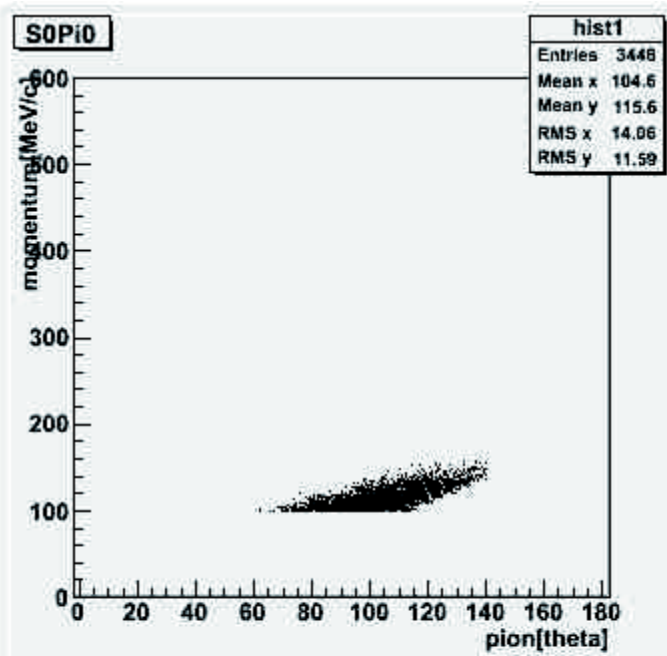


$$P_{\bar{K}N(Lab)} \sim 250 \text{ MeV} / c, P_{\bar{K}N(CM)} \sim 160 \text{ MeV} / c$$

$$L = \frac{\vec{r} \times \vec{p}}{\hbar} < 1, r \sim 1 \text{ fm}, \hbar c \sim 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

L=0, s-waveの反応断面積が大きい



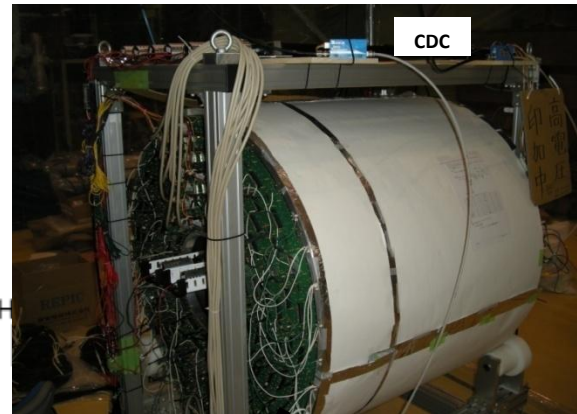




Target



Solenoid Magnet



CDC

中性子検出器

$N: \sim 1.3 \text{ GeV/c}$

Deuteron target

K-

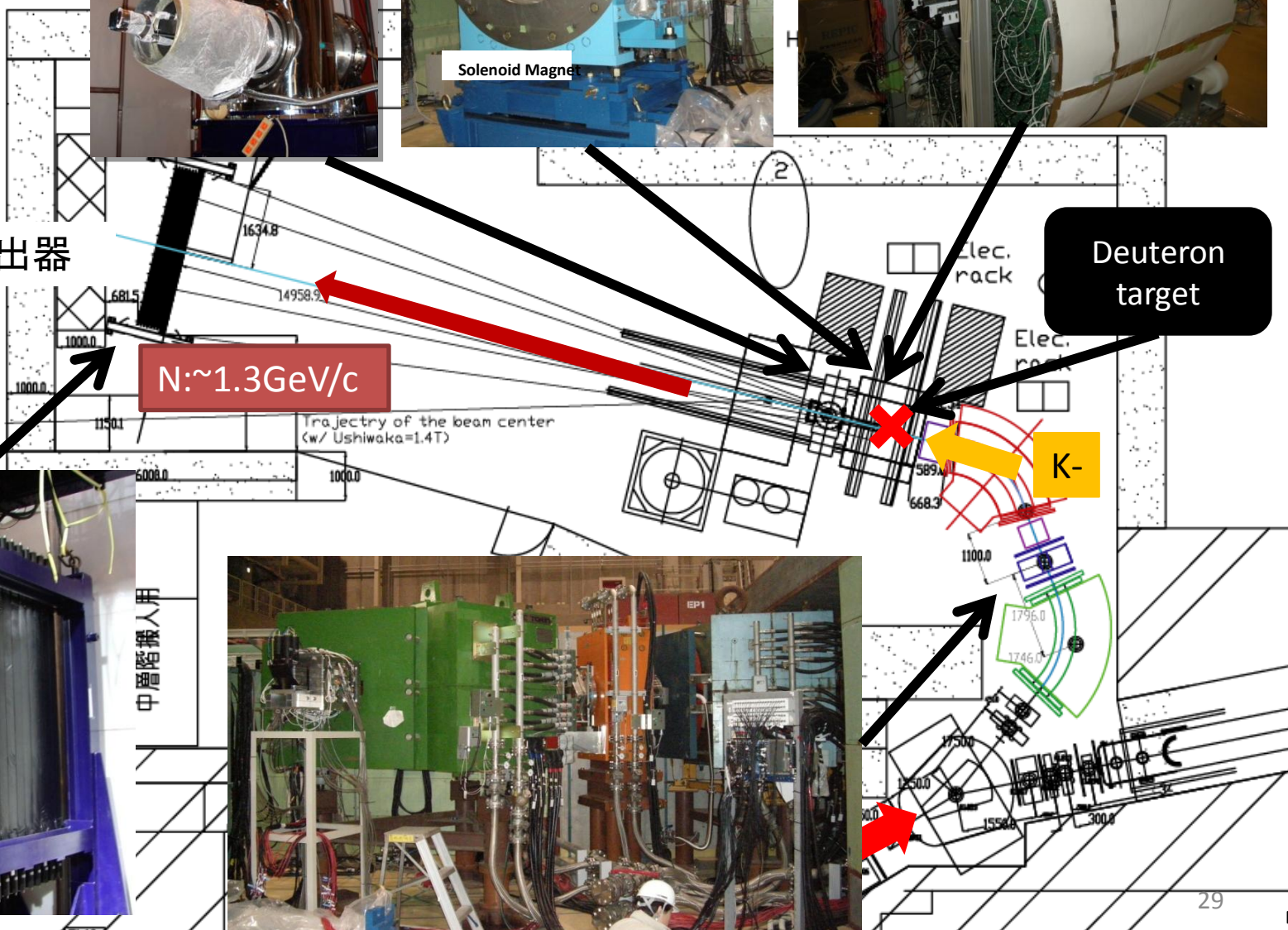


中層階搬入用

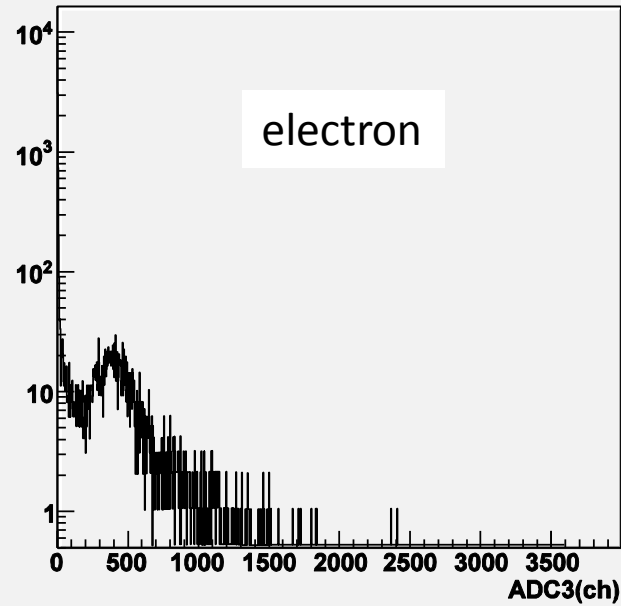
FL10



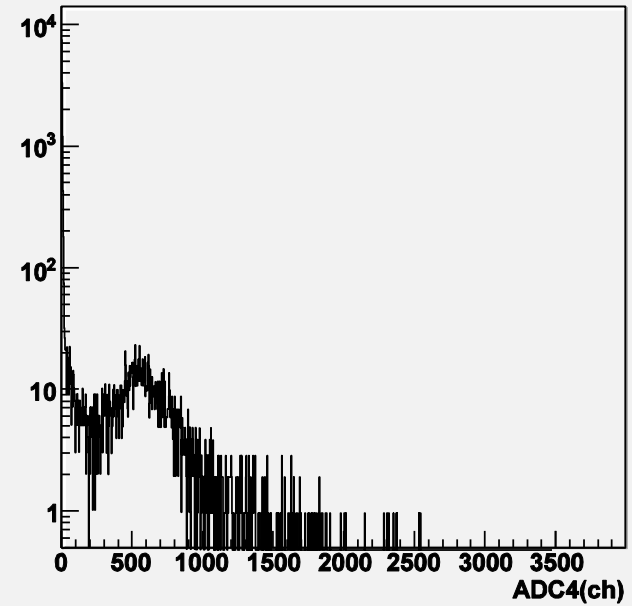
FL6



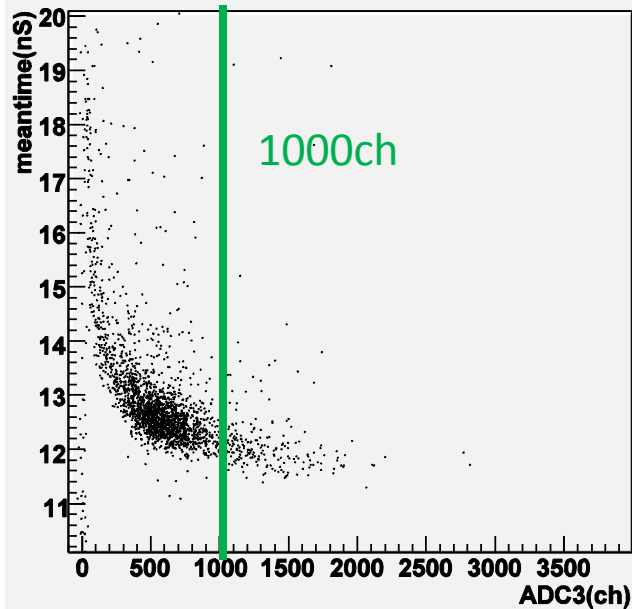
ADC3



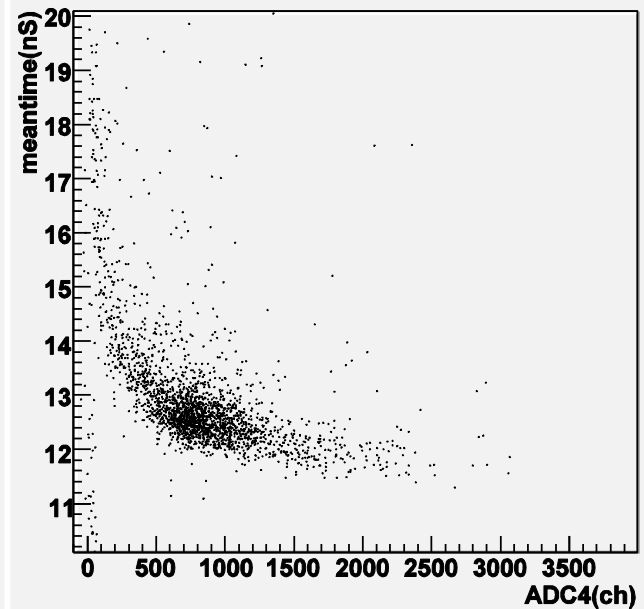
ADC4



adc3 vs MPmean



T05-MP1adc vs MPmean fit

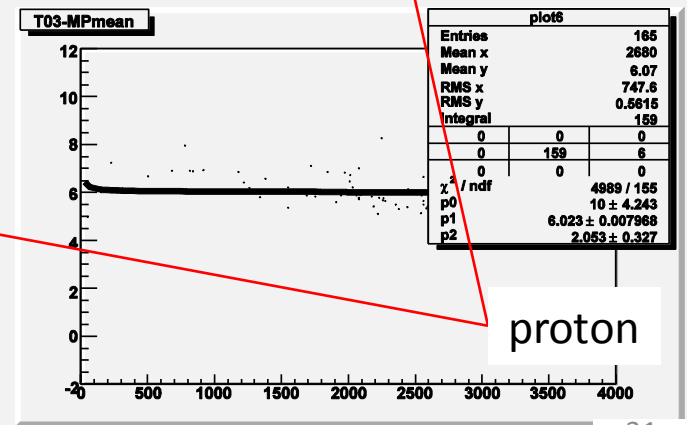
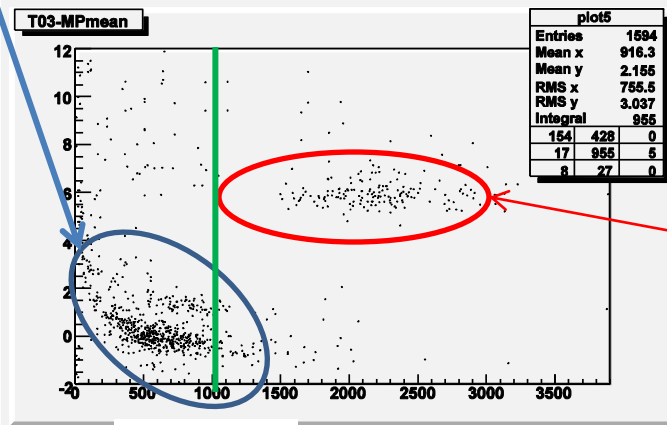
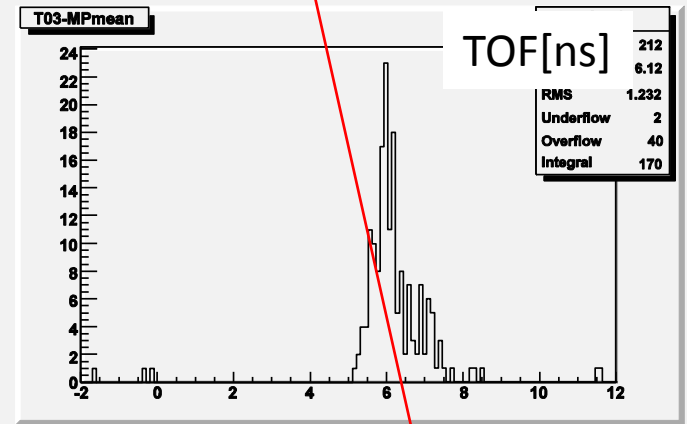
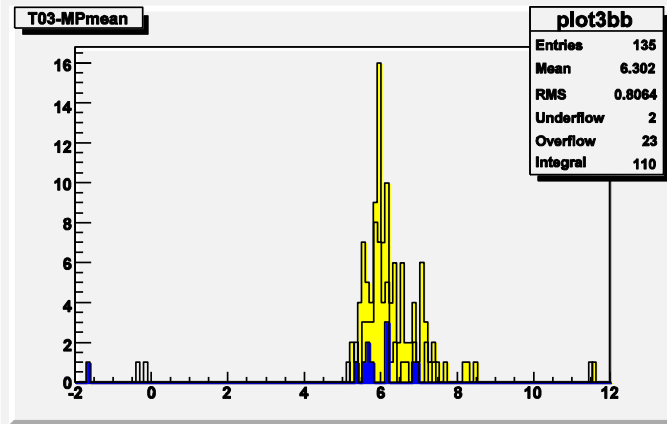
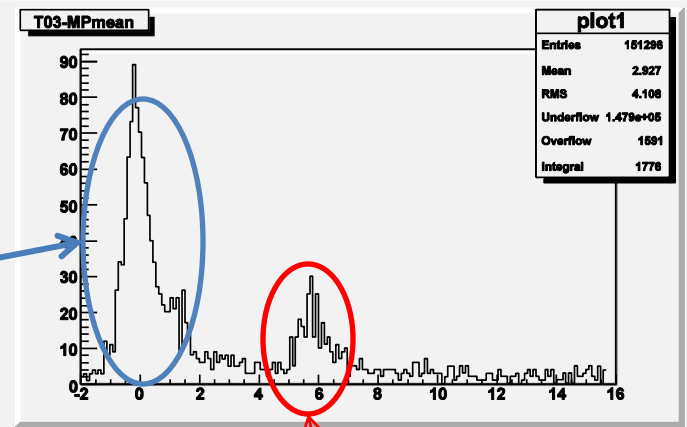
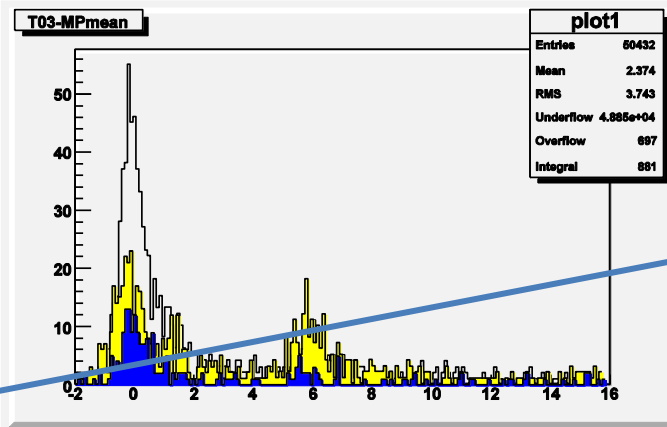


proton

π/K

TOF[ns]

1000ch

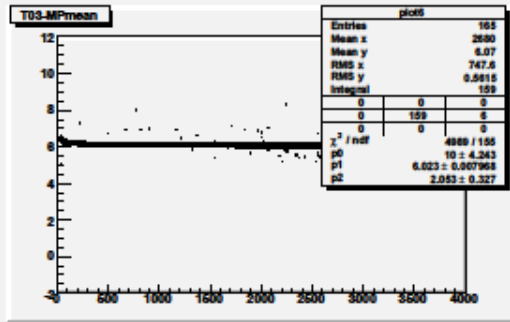
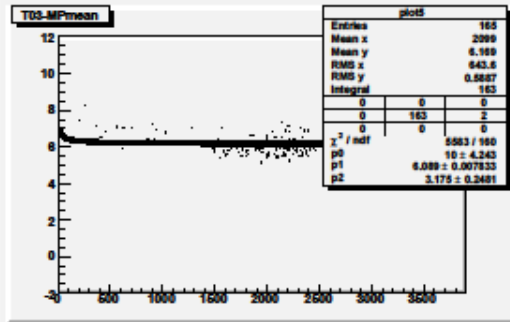
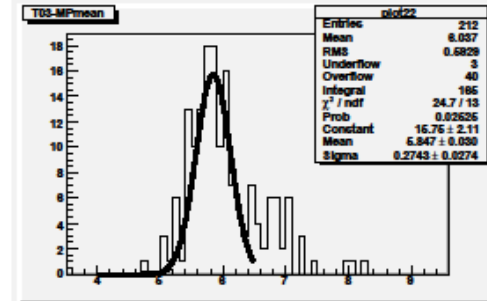
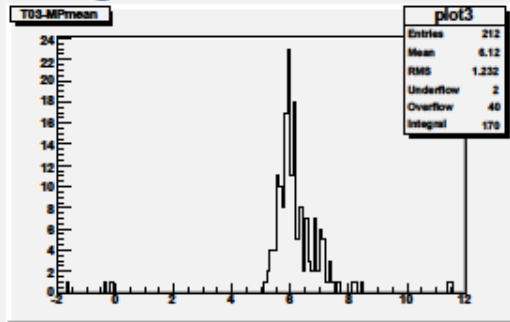
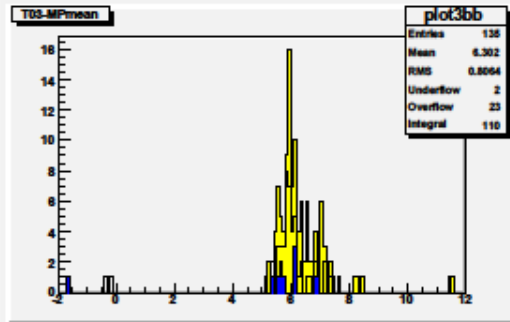
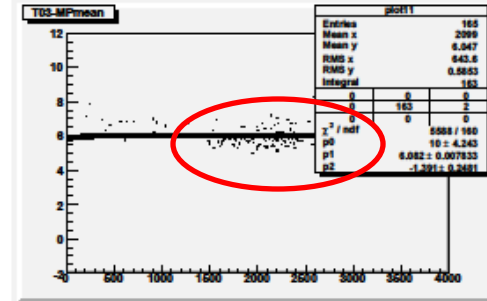
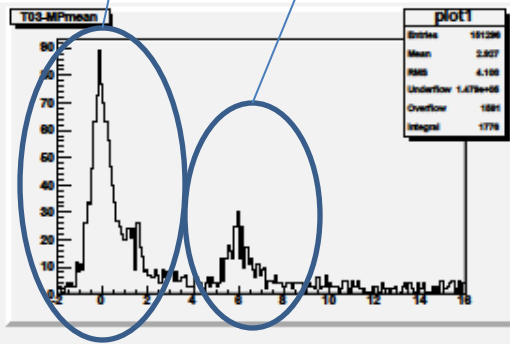
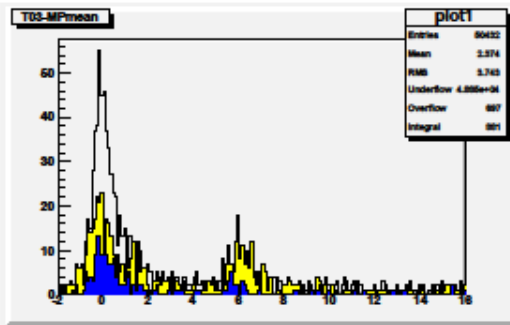


proton

run781

π/K ρ

TOF差: 約6ns



- クレプシューゴルダン係数から
- $|2\ 0\rangle = \sqrt{1/6}\pi^-\Sigma^+ \quad \sqrt{2/3}\pi^0\Sigma^0 \quad \sqrt{1/6}\pi^+\Sigma^-$
- $|1\ 0\rangle = -\sqrt{1/2}\pi^-\Sigma^+ \quad 0 \quad \sqrt{1/2}\pi^+\Sigma^-$
- $|0\ 0\rangle = \sqrt{1/2}\pi^-\Sigma^+ \quad -\sqrt{2/3}\pi^0\Sigma^0 \quad \sqrt{1/3}\pi^+\Sigma^-$
- $I=1$ から $\pi^0\Sigma^0$ に崩壊することはない。
- $\Sigma(1385)[I=1] \rightarrow \Sigma^0\pi^0$ へは×。