

$d(K^-, n) \pi^0 \Sigma^0$ 反応による $\Lambda(1405)$ の研究

大阪大学核物理研究センター野海研究室

川崎 新吾

目次

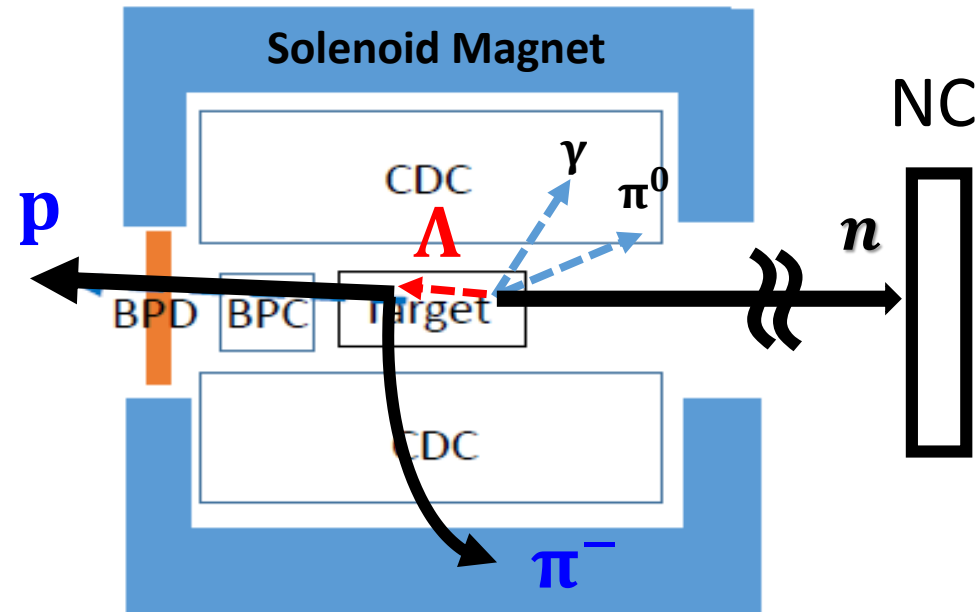
- $d(K^-, n) \pi^0 \Sigma^0$ missing mass スペクトラムの解析
 - $\pi^0 \Sigma^0, \pi^0 \Lambda$ & $\pi^- \Sigma^+$ モードの特定
 - $\pi^0 \Sigma^0$ と $\pi^0 \Lambda$ の分離
 - スペクトラムの結果とアイソスピン関係
- まとめ

$d(K^-, n) \pi^0 \Sigma^0$ スペクトラムの解析

$$\pi^0 \Sigma^0 \rightarrow \pi^0 \Lambda \gamma \rightarrow \pi^0 p \pi^- \gamma$$

解析の手法

- $p\pi^-$ invariant mass から Λ の再構成
- $d(K^-, n \Lambda) \pi^0 \gamma$ missing mass の同定



解析の評価

- $d(K^-, n \Lambda) \pi^0$ フィッティング応答関数の再現性
- 井上解析のアイソスピン分離との比較
 - $\pi^0 \Sigma^0$ vs $(\pi^+ \Sigma^+ - \pi^- \Sigma^-) / 2 (I=0)$
 - $d(K^-, n) \pi^0 \Lambda$ vs $d(K^-, p) \pi^- \Lambda$

後方陽子解析の反応と特定方法

	反応	ID1 = Λ, Σ^+ のID	ID2 = 終状態が Σ^0 か Λ かの弁別
1	$K^-d \rightarrow n \pi^0 \Sigma^0$	IM. ($p \pi^-$) = $M(\Lambda)$	MM. $d(K^-, n\Lambda)X$, $X = \pi^0 \gamma$
2	$K^-d \rightarrow n \pi^0 \Lambda$	IM. ($p \pi^-$) = $M(\Lambda)$	MM. $d(K^-, n\Lambda)X$, $X = \pi^0$
3	$K^-d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+$	MM. $d(K^-, n\pi^-)X$ $X = \Sigma^+$ (Σ^+ の排除)	

IM. = Invariant mass
MM.= missing mass

1 : シグナル

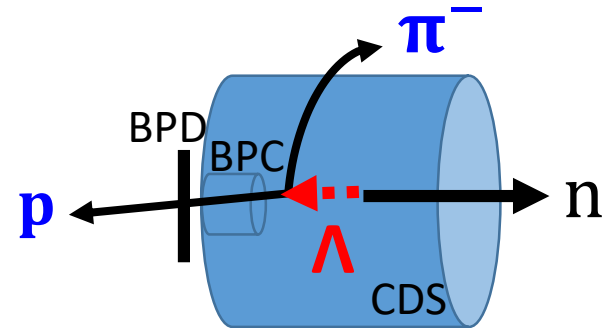
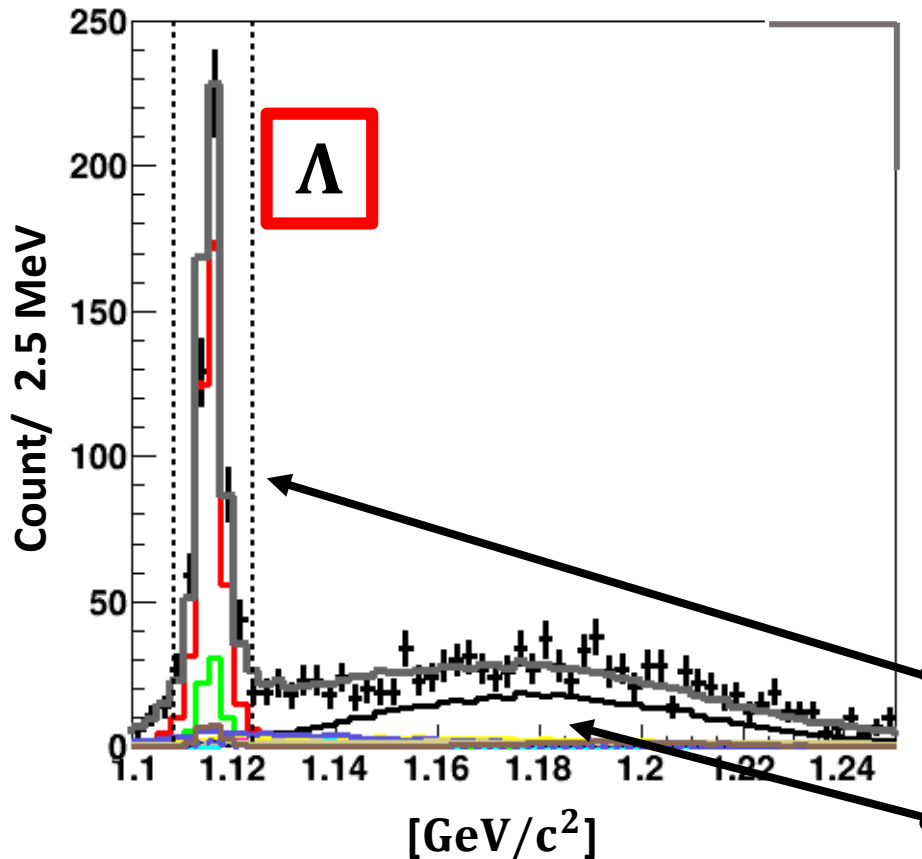
2,3 : 終状態の測定粒子(p, n, π^-)が同じになる主要な BG 反応

- ID1 で 1,2 と 3 を分離
- ID2 で 1 と 2 を分離

ID1 : Λ の同定と BG 分布

(p, π^-) invariant mass スペクトラムから再構成

IM. ($p \pi^-$)

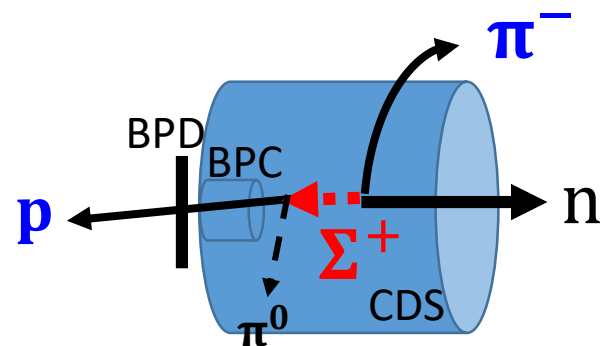
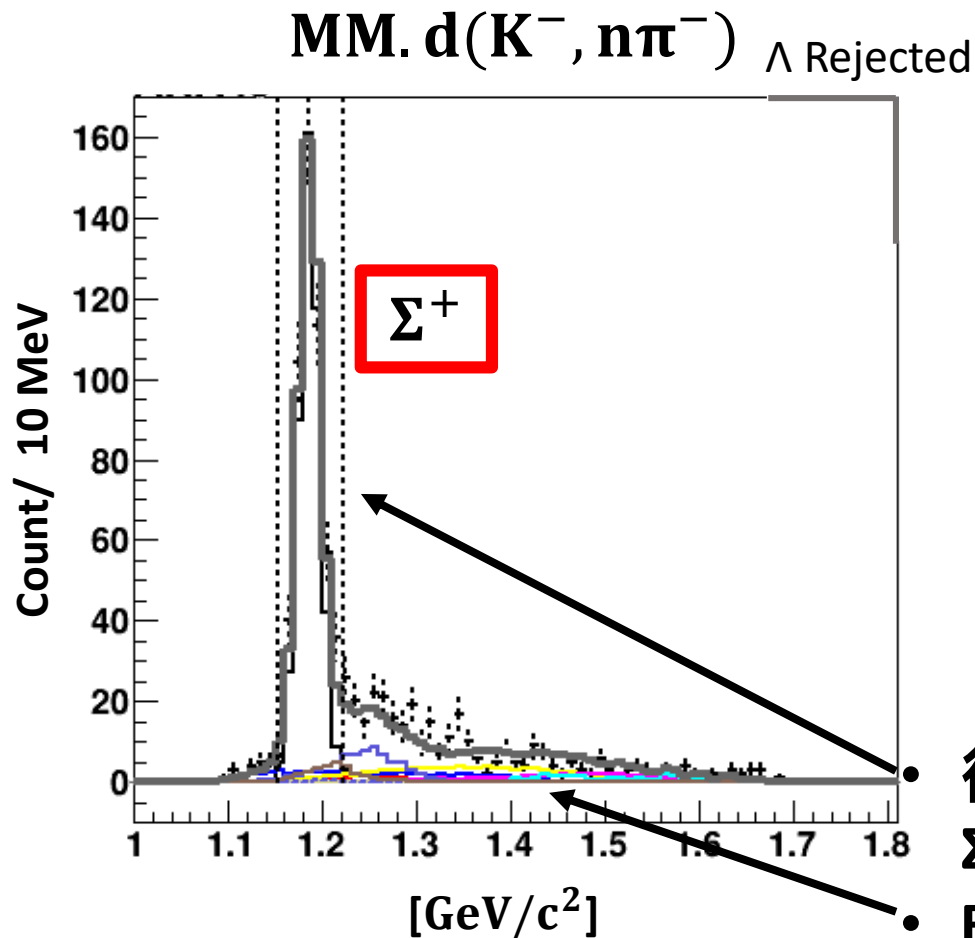


- † Data
- SIM All
- $K-d \rightarrow n \pi^0 \Sigma^0$
- $K-d \rightarrow n \pi^0 \Lambda$
- $K-d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+$

後方検出器で測定した陽子から Λ の同定に成功。
BG成分をよく再現できている。

ID1 : Σ^+ の同定と BG 分布

$d(K^-, n\pi^-)$ missing mass スペクトラムから再構成



† Data

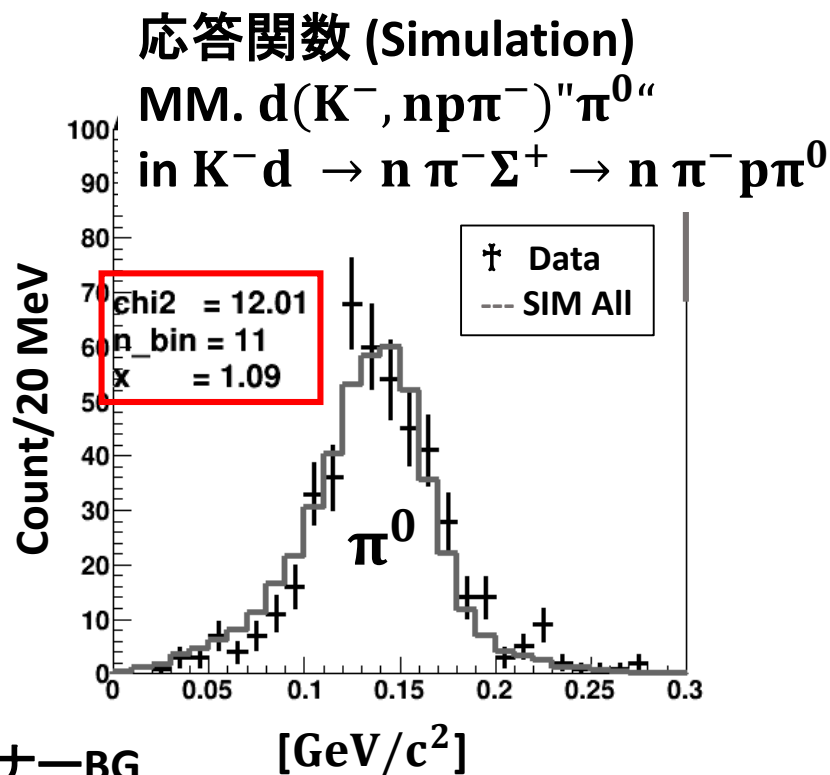
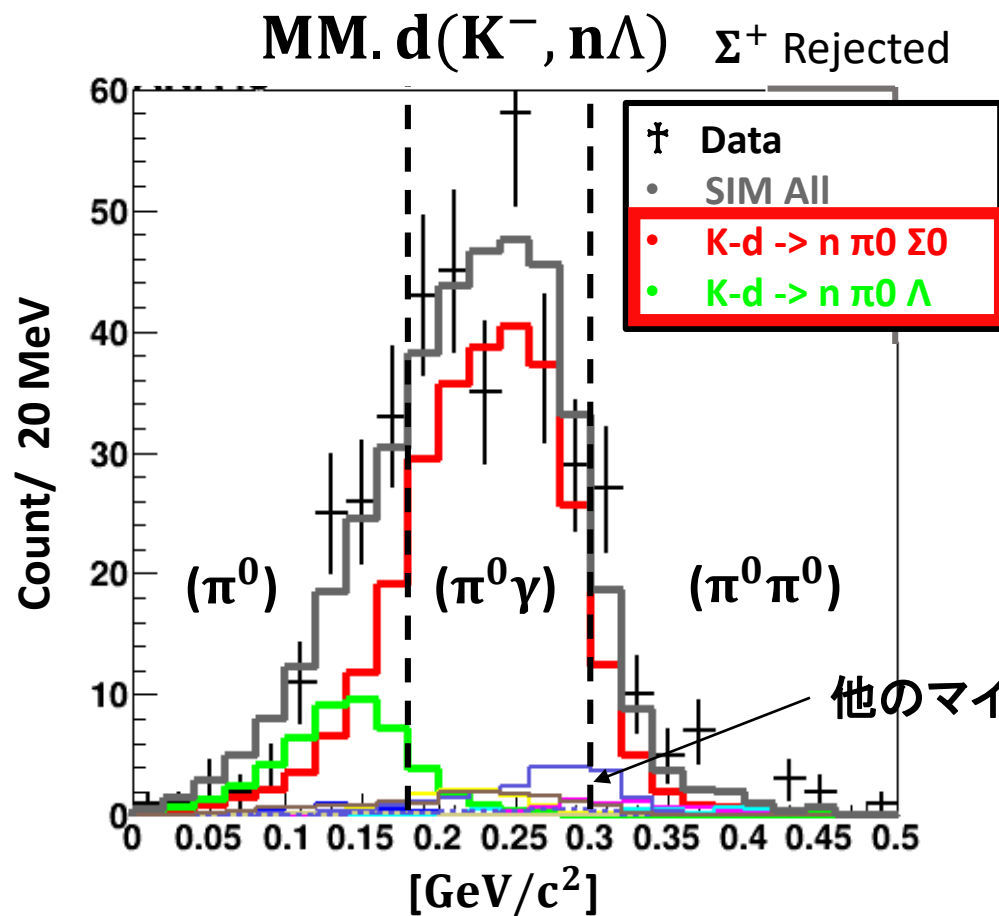
• SIM All

• $K-d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+$

後方検出器で測定した陽子から Σ^+ の同定に成功。
BG成分をよく再現できている。

ID2: $\pi^0 \Sigma^0$ と $\pi^0 \Lambda$ の分離

$d(K^-, n\Lambda)$ missing mass スペクトラムのフィッティング

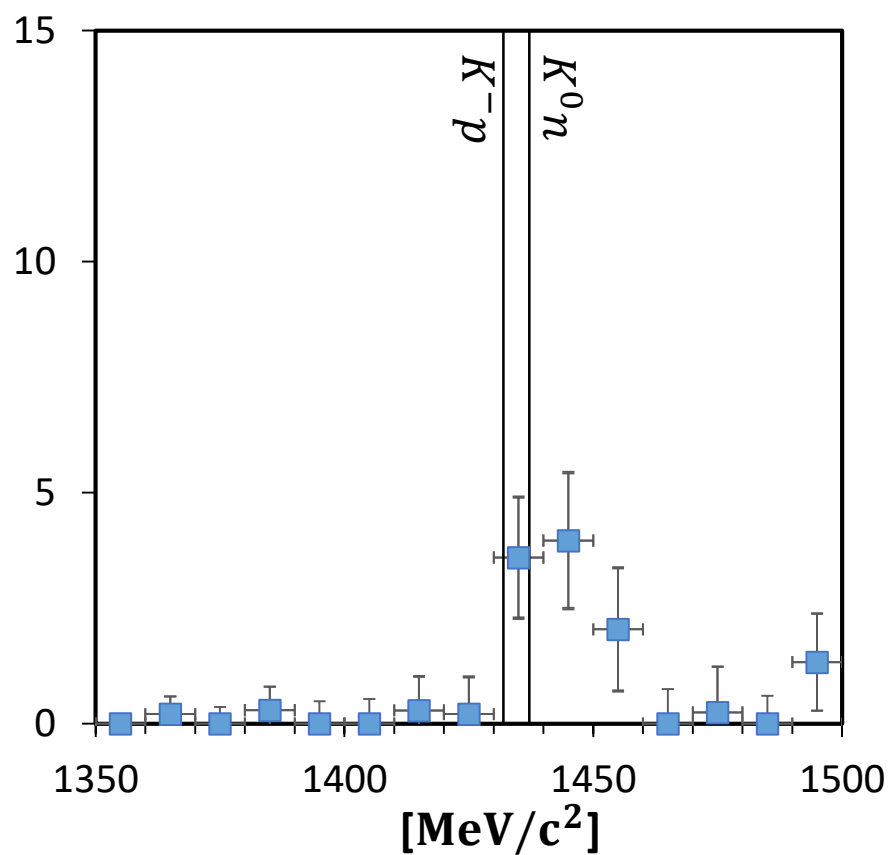
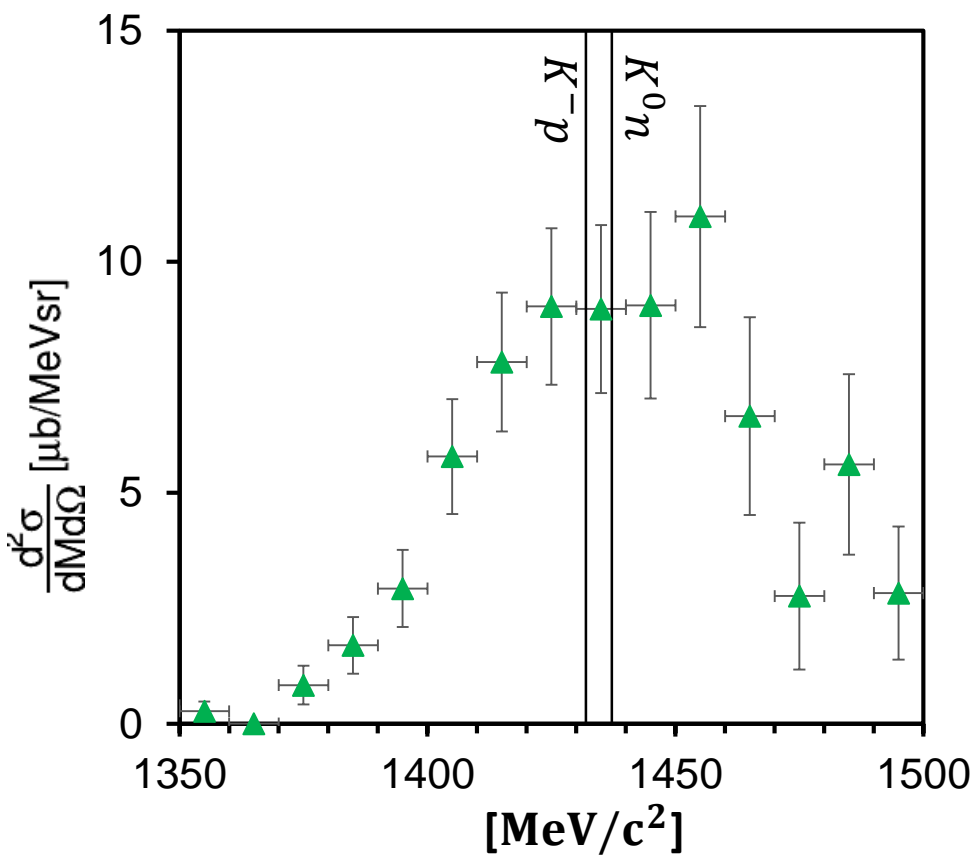


- SIM は測定した $K^- d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+$ における $d(K^-, n\pi^-) \pi^0$ を良く再現している。

- $\pi^0 \Sigma^0$ ($\pi^0 \gamma$) イベントが支配的

$d(K^-, n) \pi^0 \Sigma^0$

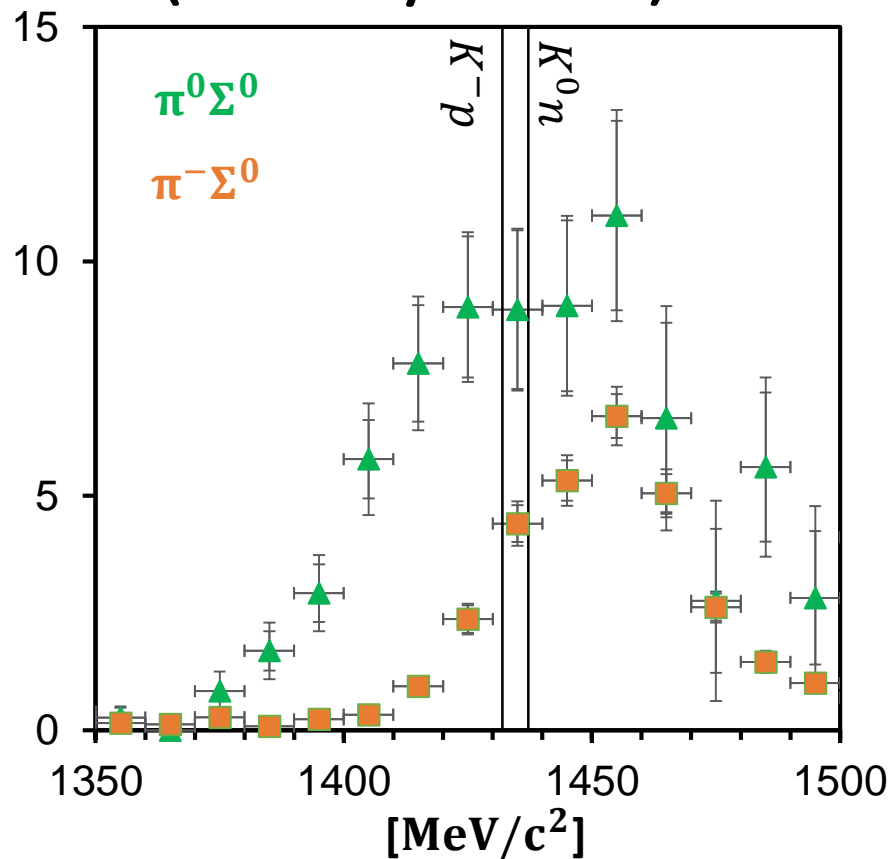
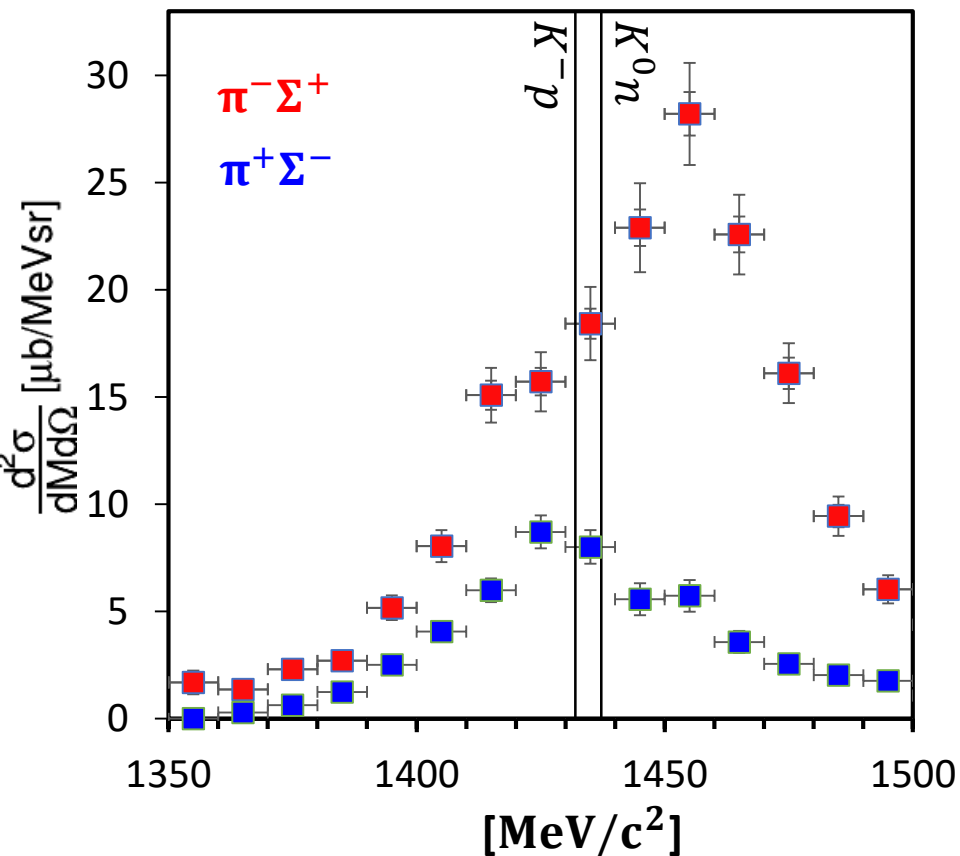
$d(K^-, n) \pi^0 \Lambda$



アイソスピン $I = 0, I = 1$ のスペクトラムを得ることができた。

$\pi^+\Sigma^-/\pi^-\Sigma^+$ ($I = 0, 1$)
(Ana. by Inoue)

$\pi^0\Sigma^0$ ($I = 0$)
(Ana. by Kawasaki)
 $\pi^-\Sigma^0$ ($I = 1$)
(Ana. by Inoue)



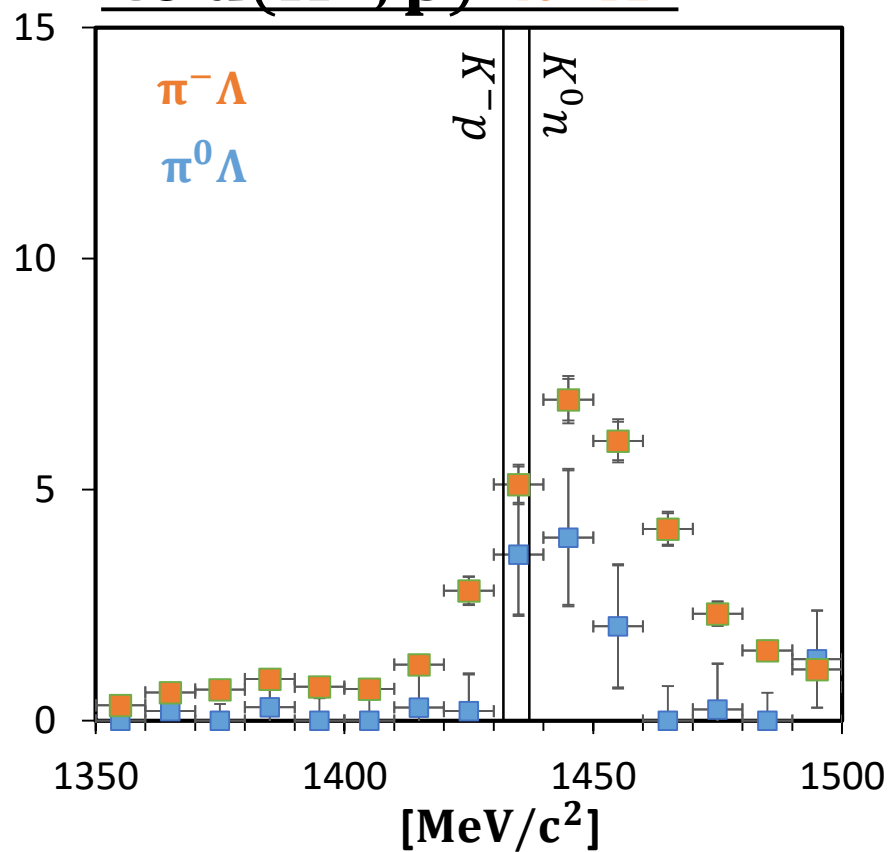
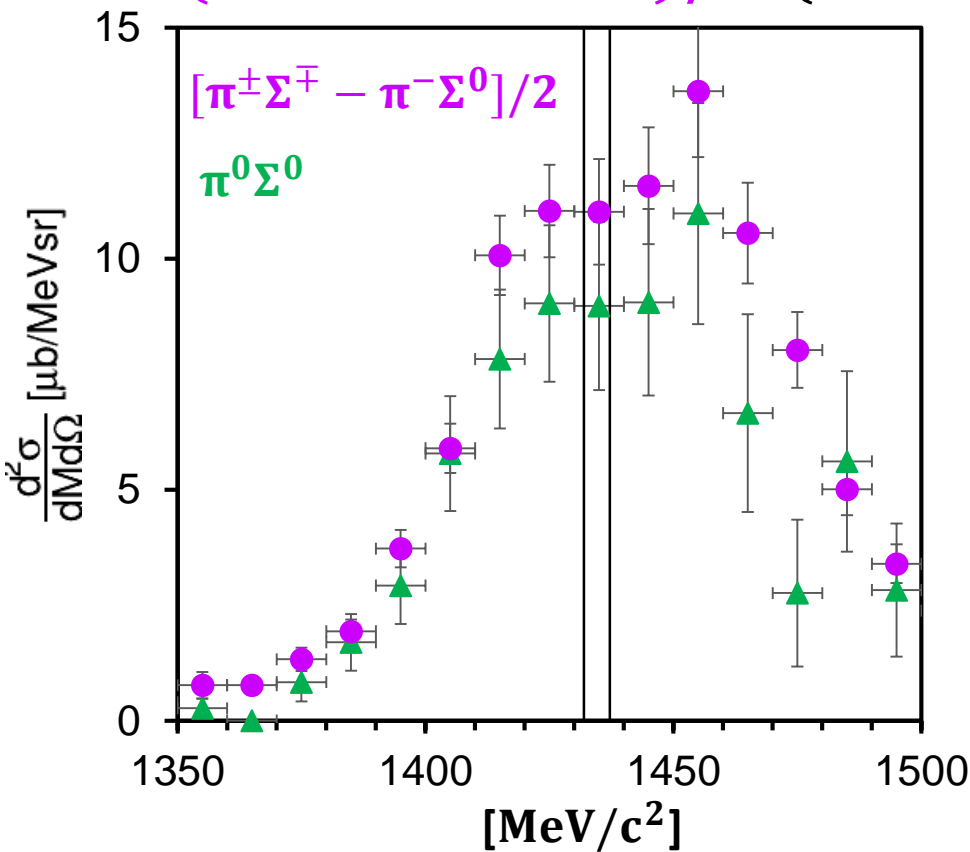
全終状態 $\pi^\mp\Sigma^\pm$ ($I=0,1$), $\pi^0\Sigma^0$ ($I=0$) 及び $\pi^-\Sigma^0$ ($I=1$) から
アイソスピンの分離を行う。

$d(K^-, n) \pi^0 \Sigma^0$

$d(K^-, n) \pi^0 \Lambda$

vs $(\pi^{\mp} \Sigma^{\pm} - \pi^{-} \Sigma^0) / 2$ ($I = 0$)

vs $d(K^-, p) \pi^{-} \Lambda$



$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dm} (\pi^0 \Sigma^0) \sim \frac{d^2 \sigma}{d\Omega dm} (\pi^{\mp} \Sigma^{\pm} - \pi^{-} \Sigma^0) / 2$$

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dm} (\pi^0 \Lambda) \sim \frac{1}{2} \frac{d^2 \sigma}{d\Omega dm} (\pi^{-} \Lambda)$$

両方ともアイソスピン関係を満たす。

まとめ

- 我々は J-PARC E31 実験を行い

$d(K^-, n) \pi^0 \Sigma^0$ スペクトラムを得た。

- $\pi^0 \Sigma^0, \pi^0 \Lambda$ は $d(K^-, n p \pi^-)$ のテンプレートフィットにより分離でき SIM による応答関数は $K^- d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+$ の $d(K^-, n p \pi^-) \pi^0$ からよく再現できていることを確かめた。

- E31 実験では $\Lambda(1405)$ 全終状態 $\pi^0 \Sigma^0 (I=0)$, $\pi^\mp \Sigma^\pm (I=0, 1)$ 及び $\pi^- \Sigma^0 (I=1)$ を測定した。

スペクトラムの $I=0, 1$ の分離を行い

アイソスピン関係が成り立っていることを示すことができた。

BACK UP

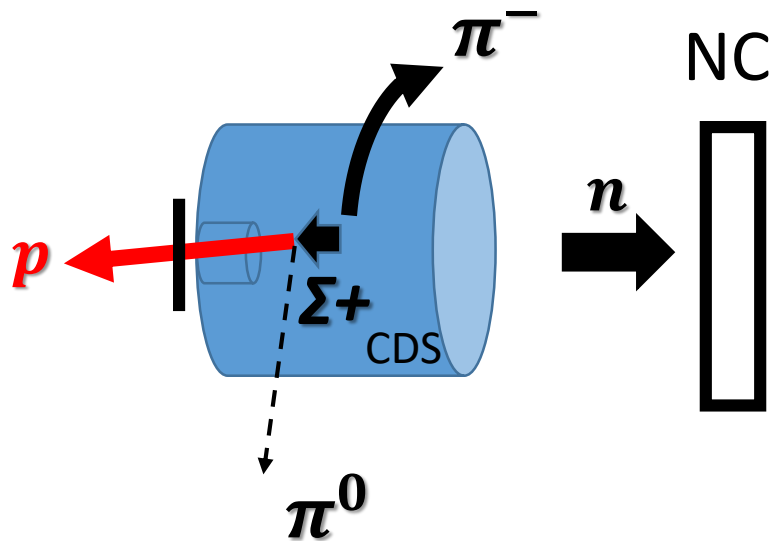
$$K^- d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+$$

$$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0 \text{ (Ana. by Kawasaki)}$$

$$\text{vs } \Sigma^+ \rightarrow n \pi^+ \text{ (Ana. by Inoue)}$$

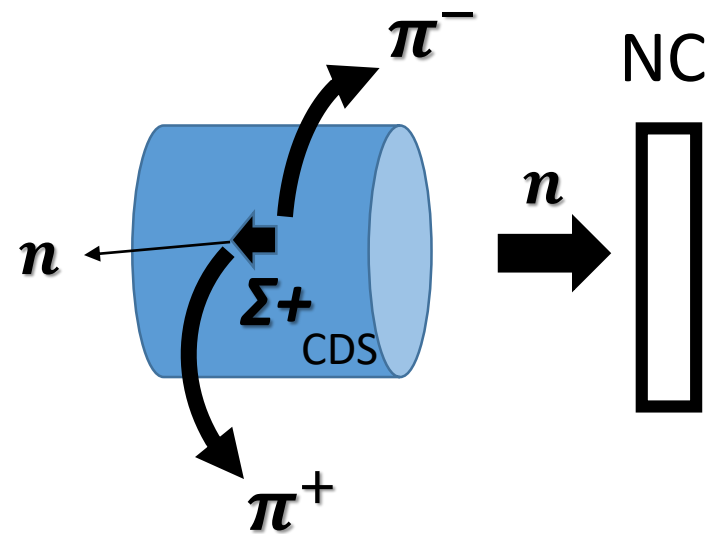
$$K^- d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+ \rightarrow n \pi^- p \pi^0$$

(Kawasaki)



$$K^- d \rightarrow n \pi^- \Sigma^+ \rightarrow n \pi^- n \pi^+$$

(Inoue)

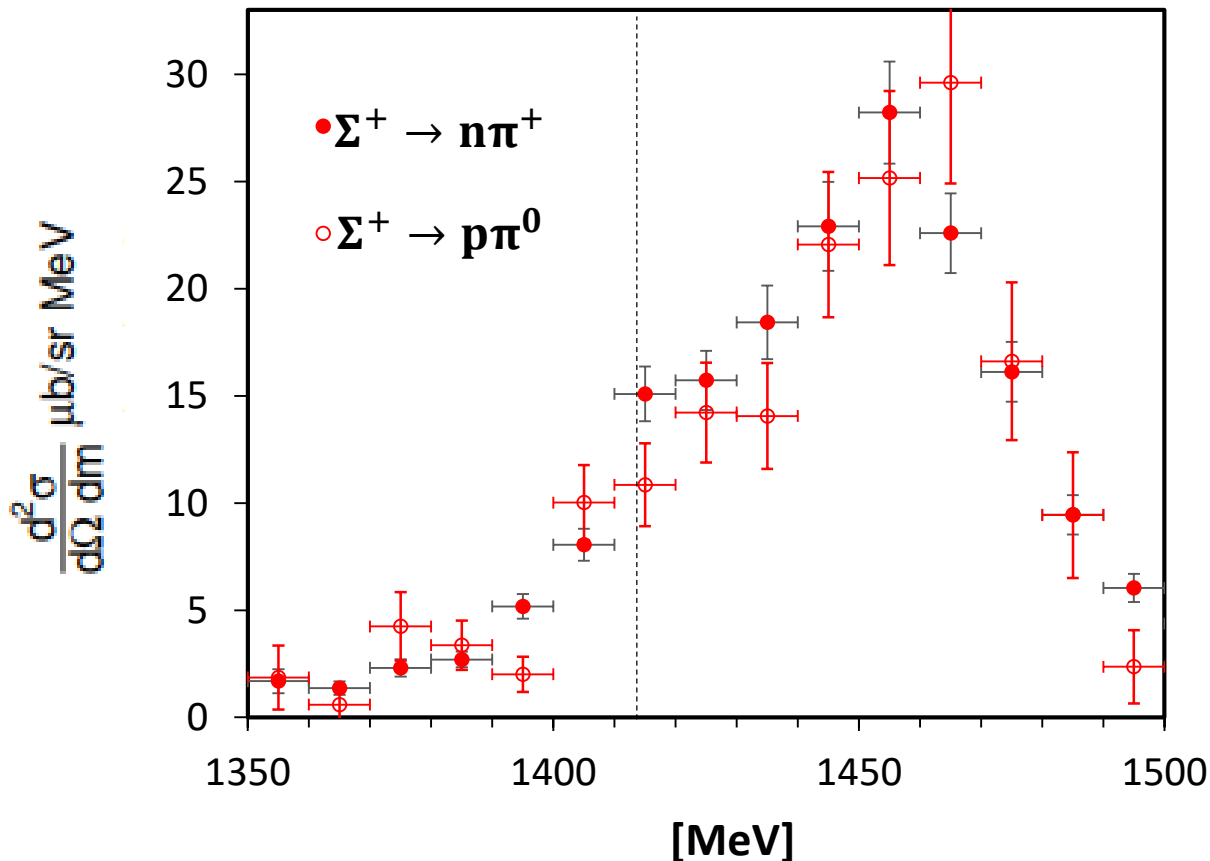


$$\mathbf{K}^- \mathbf{d} \rightarrow \mathbf{n} \mathbf{\pi}^- \mathbf{\Sigma}^+$$

$$\mathbf{\Sigma}^+ \rightarrow \mathbf{p} \mathbf{\pi}^0 \text{ (Ana. by Kawasaki)}$$

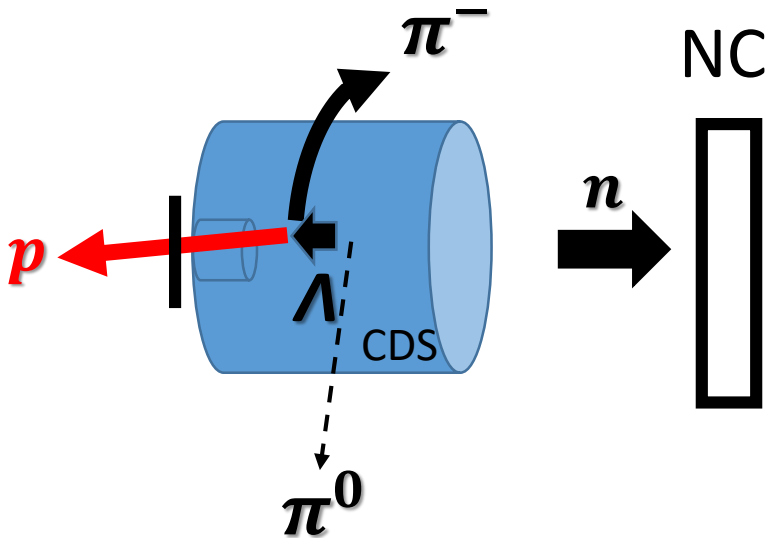
$$\mathbf{vs} \mathbf{\Sigma}^+ \rightarrow \mathbf{n} \mathbf{\pi}^+ \text{ (Ana. by Inoue)}$$

- 2つの解析スペクトラムは一致。

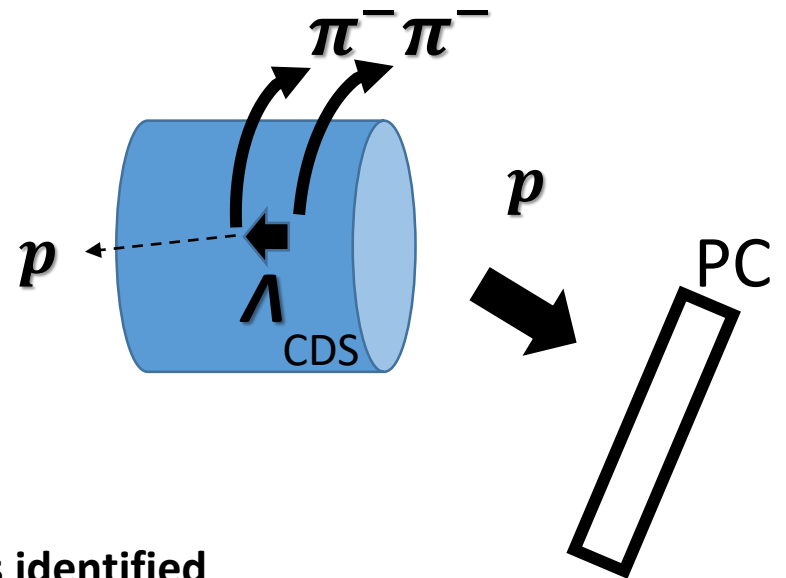


$d(K^-, n) \pi^0 \Lambda$ vs $d(K^-, p) \pi^- \Lambda$

$K^- d \rightarrow n \pi^0 \Lambda \rightarrow n \pi^0 \mathbf{p} \pi^-$
 (Backward proton)



$K^- d \rightarrow p \pi^- \Lambda \rightarrow p \pi^- p \pi^-$
 (w/o Backward proton)

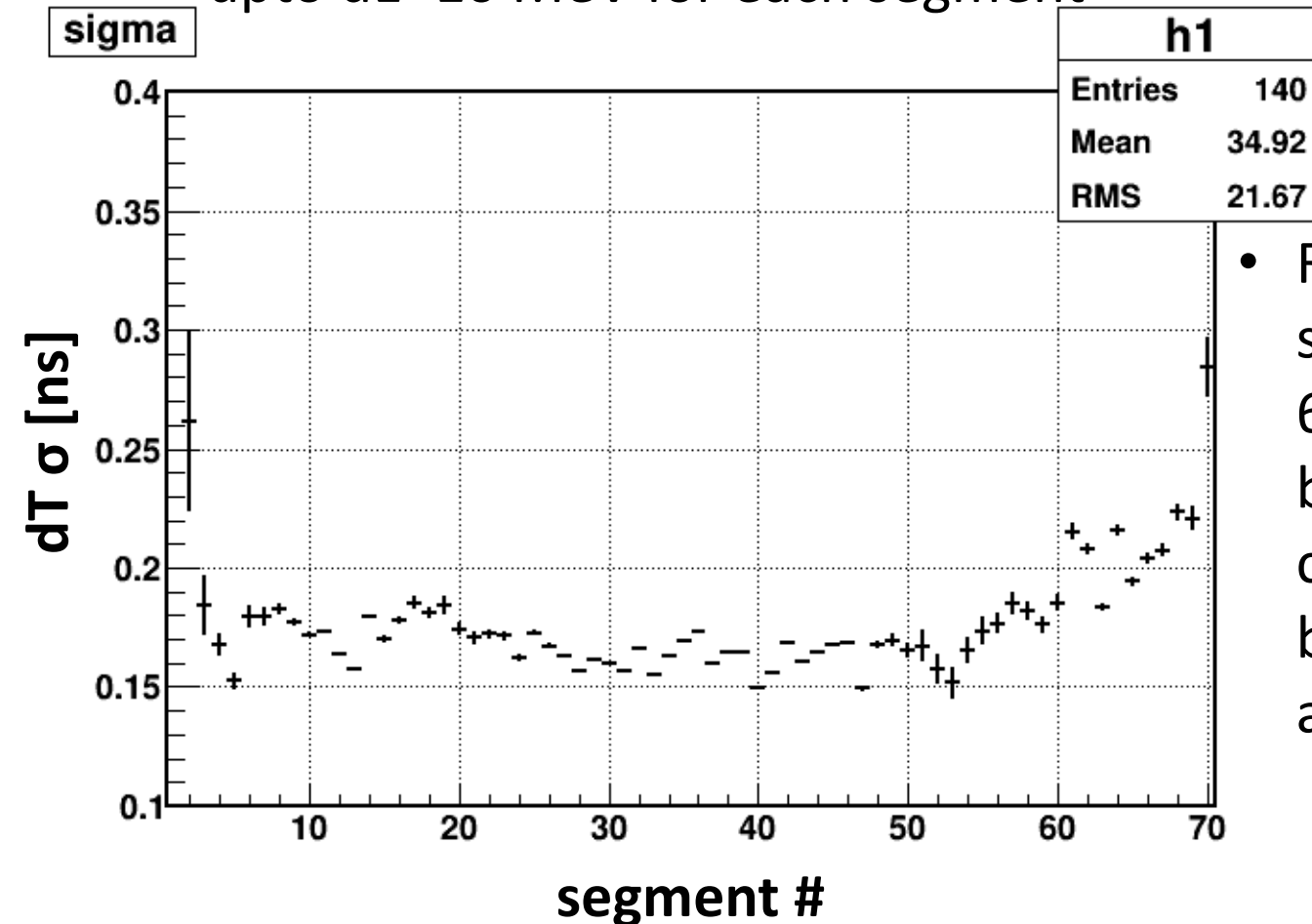


p is identified
 from MM. $d(K^-, p \pi^- \pi^-) X$

BPD time resolution ($dE > 3$ MeV)

evaluated by using beam-through data

- Run by run time offset corrections for each segment
- Careful slewing correction over wide energy deposit (dE) range upto $dE \sim 10$ MeV for each segment



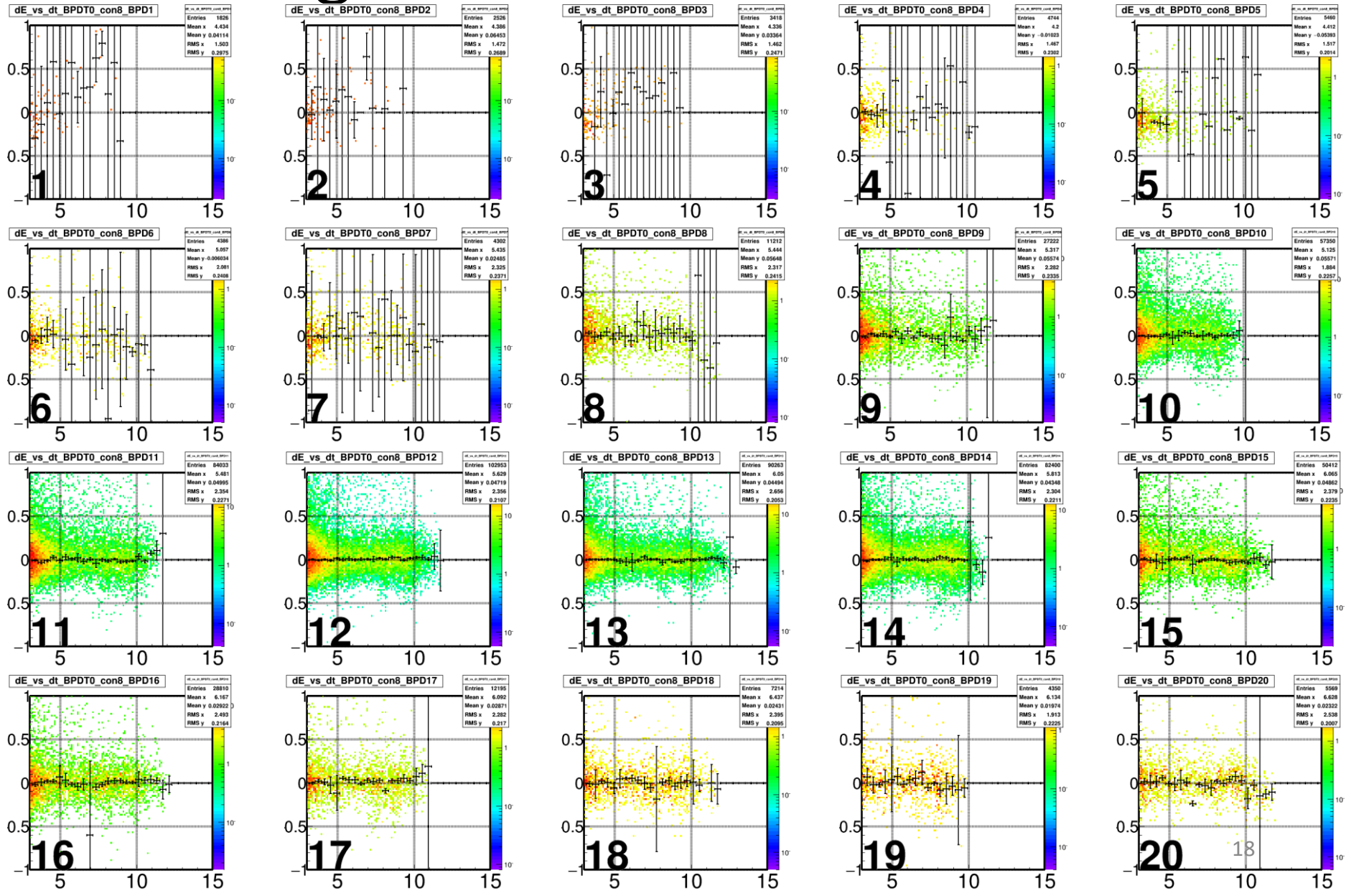
- Resols. For the edge segments (#1~5, 66~70) are not good, but they do not contribute the results because of out of acceptance.

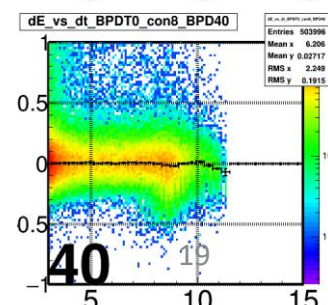
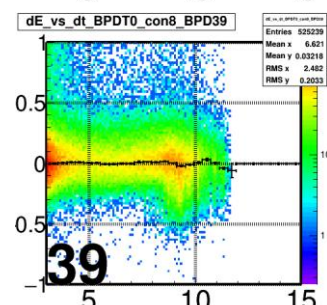
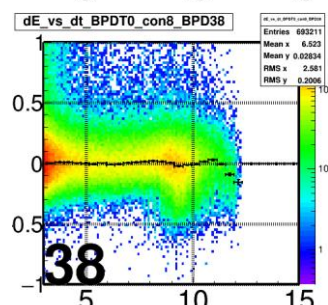
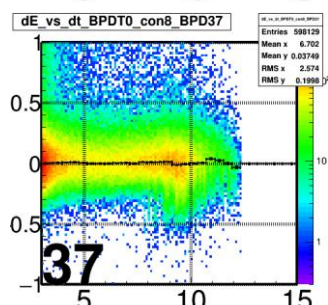
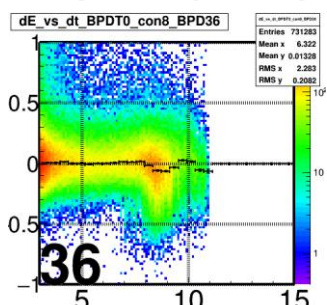
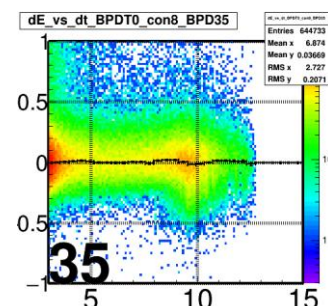
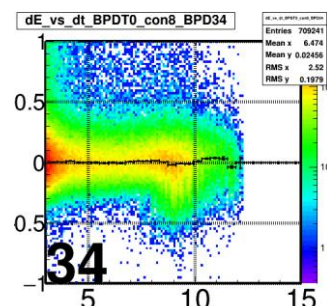
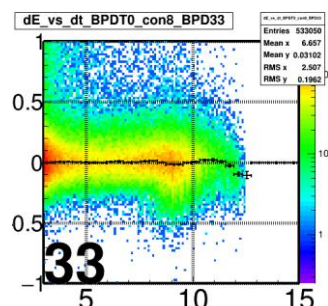
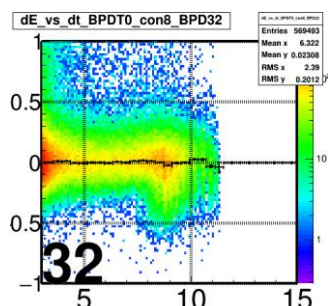
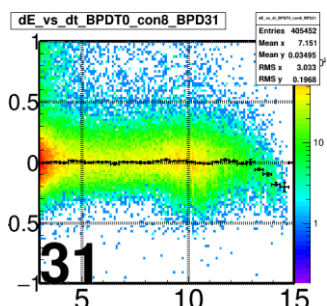
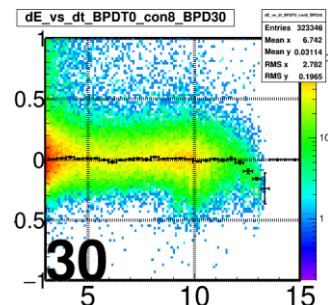
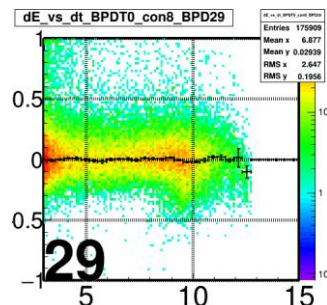
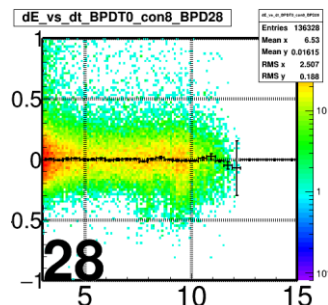
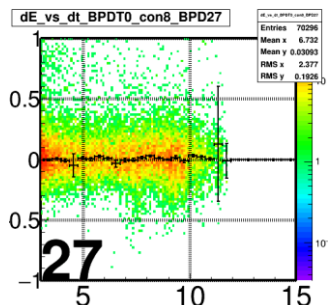
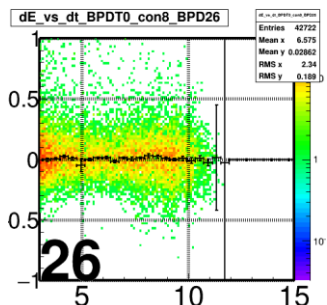
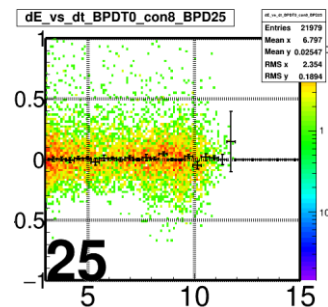
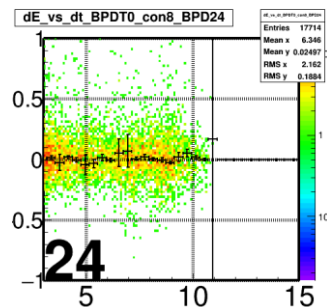
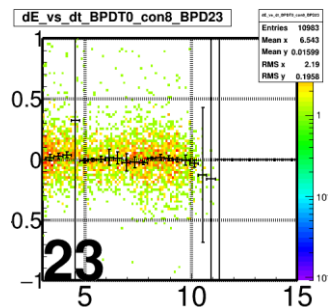
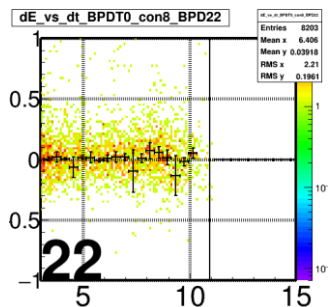
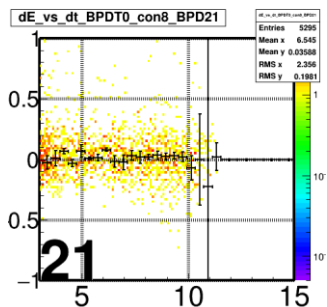
$K^-d \rightarrow Y\pi N$ vs $K^0d \rightarrow Y\pi N$ (Isospin Relation)

Init. State	Final State	Amplitude	Outa D	Init. State	Final State	Amplitude	Guess
K^-p	$\Sigma^0\pi^0$	$\frac{1}{2\sqrt{3}}T_0^{00}$	0.162	K^0n	$\Sigma^0\pi^0$	$\frac{1}{2\sqrt{3}}T_0^{00}$	0.162
	$\Sigma^+\pi^-$	$-\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}T_0^\pm + \frac{1}{2\sqrt{2}}T_1^\pm\right)$	0.276		$\Sigma^+\pi^-$	$\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}T_0^\pm - \frac{1}{2\sqrt{2}}T_1^\pm\right)$	0.098
	$\Sigma^-\pi^+$	$-\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}T_0^\mp - \frac{1}{2\sqrt{2}}T_1^\mp\right)$	0.098		$\Sigma^-\pi^+$	$-\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}T_0^\mp + \frac{1}{2\sqrt{2}}T_1^\mp\right)$	0.276
	$\Lambda\pi^0$	$\frac{1}{2}T_1^{L0}$	0.069		$\Lambda\pi^0$	$-\frac{1}{2}T_1^{L0}$	0.069
K^-n	$\Sigma^0\pi^-$	$\frac{1}{2}T_1^{0-}$	0.05	K^0p	$\Sigma^0\pi^+$	$\frac{1}{2}T_1^{0+}$	0.05
	$\Sigma^-\pi^0$	$-\frac{1}{2}T_1^{-0}$	0.05		$\Sigma^+\pi^0$	$-\frac{1}{2}T_1^{-0}$	0.05
	$\Lambda\pi^-$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}T_1^{L-}$	0.138		$\Lambda\pi^+$	$\frac{1}{\sqrt{2}}T_1^{L-}$	0.138

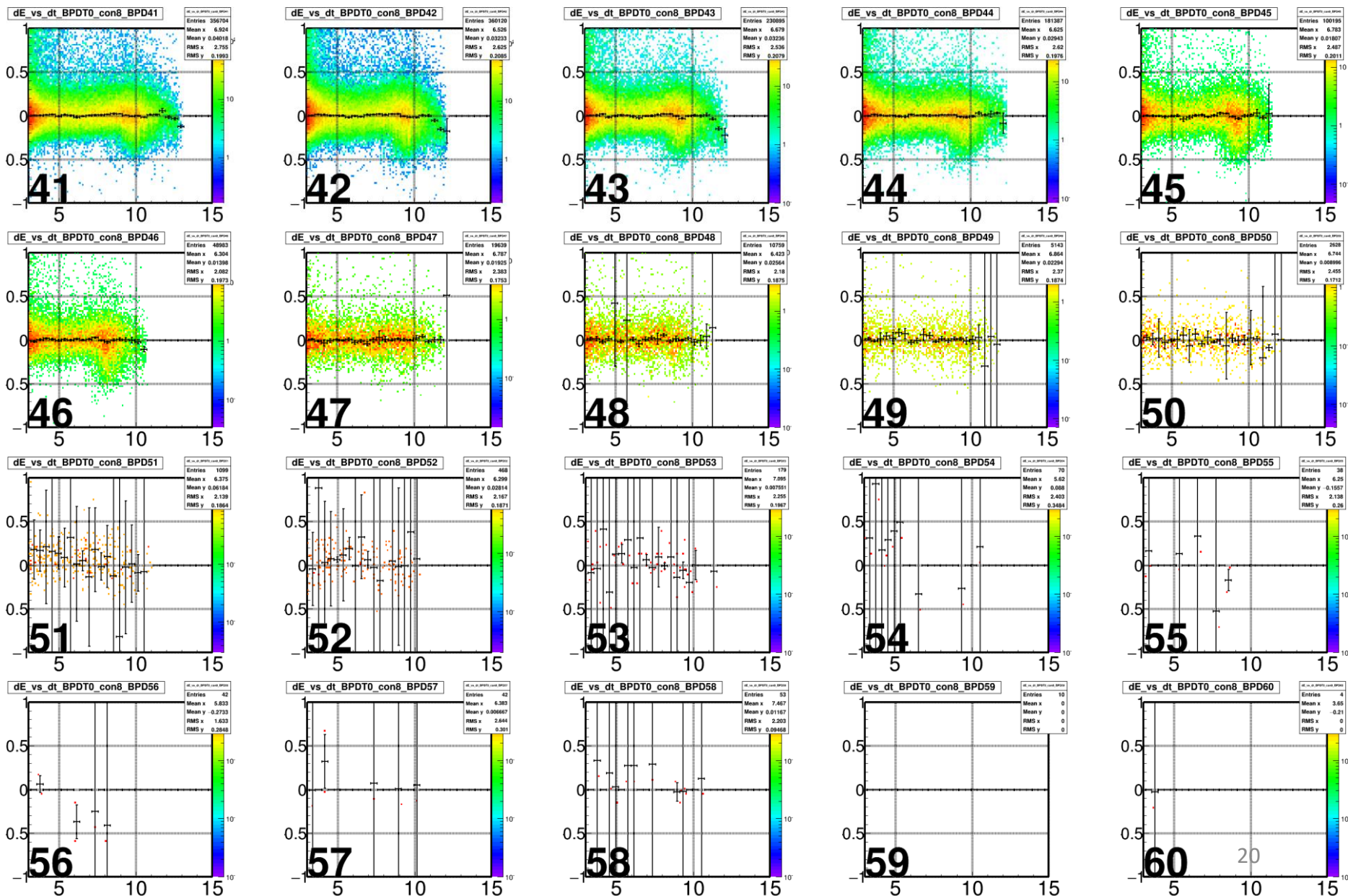
BR of $\Sigma^+\pi^-$ & $\Sigma^-\pi^+$ in $K^0d \rightarrow Y\pi N$ is opposite of $K^-d \rightarrow Y\pi N$

Slewing Correction > 3 MeV





Slewing Correction > 3MeV looks good

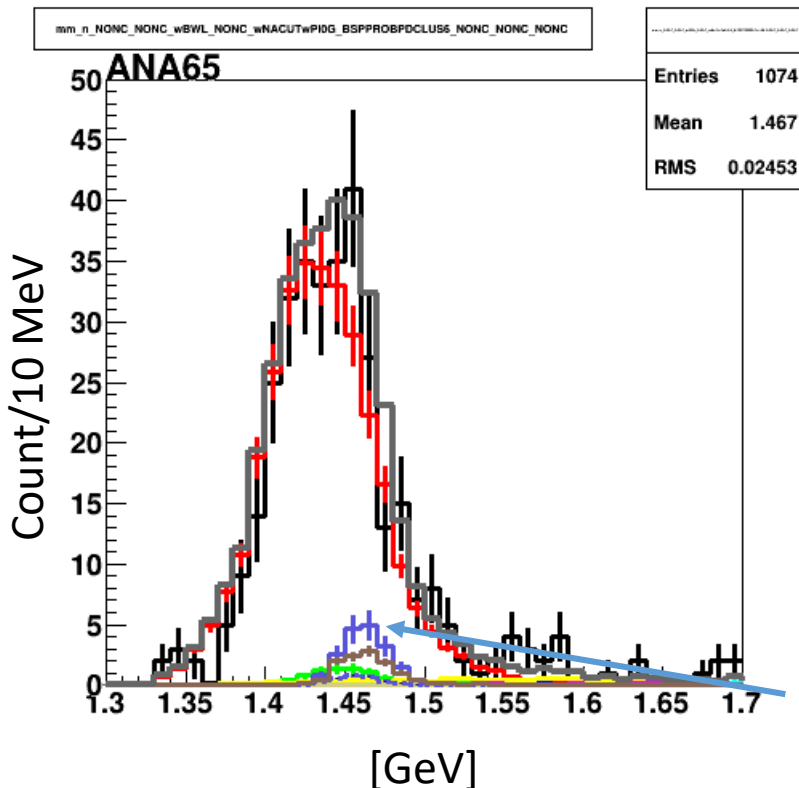


$\pi^0\Lambda$ and BG contaminations in $\pi^0\Sigma^0$

Cut condition

- CDS π^-
- BPD proton
- NC neutron

- Λ from IM.(p, π^-) is selected
- $0.18 < d(K^-, n p \pi^-) < 0.30$
- Mom n < 1.35 GeV



† Data

- K-d \rightarrow n Σ^+ π^-
- K-d \rightarrow n Σ^0 π^0
- K-d \rightarrow n Λ π^0
- K-d \rightarrow p Υ π
 - K-d \rightarrow p Λ π^-
 - K-d \rightarrow p Σ^0 π^-
 - K-d \rightarrow p Λ $\pi^-\pi^0$
 - K-d \rightarrow p Σ^0 $\pi^-\pi^0$
- 2 successive (Constant)
 - 2step Stopped K (TSSK)
 - 1step Inflight K (dot.) (OSIK)
 - 1step Inflight K0 (OSIK0)
- K-d \rightarrow p Σ^- π^0

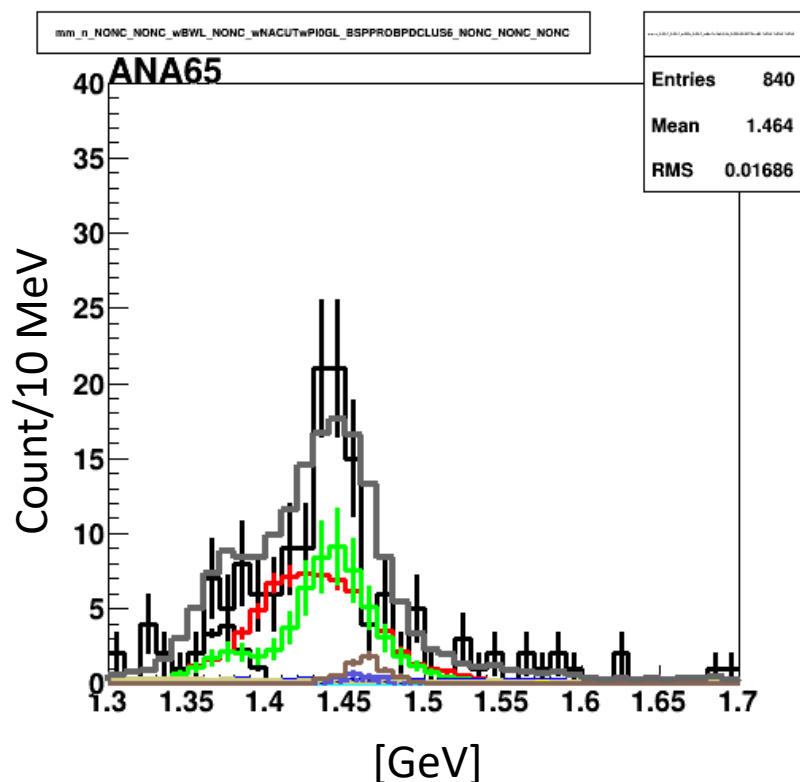
The biggest fitting error except for $\Sigma^0\pi^0$ is TSSK, which is small enough compared w/ data's one.

$\pi^0\Sigma^0$ and BG contaminations in $\pi^0\Lambda$

Cut condition

- CDS π^-
- BPD proton
- NC neutron

- Λ from IM.(p, π^-) is selected
- $0.00 < d(K^-, n p \pi^-) < 0.18$
- Mom n < 1.35 GeV



† Data

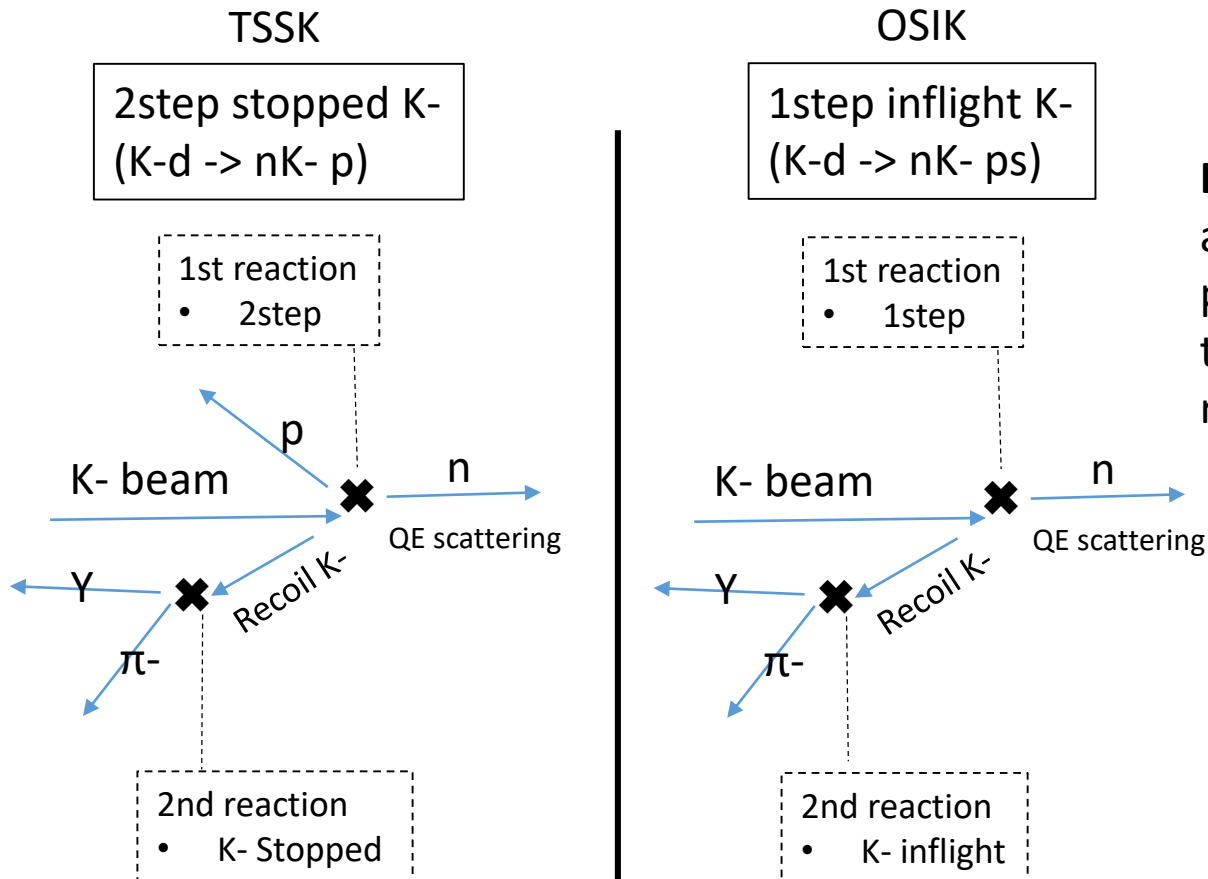
- K-d \rightarrow n Σ^+ π^-
- K-d \rightarrow n Σ^0 π^0
- K-d \rightarrow n Λ π^0
- K-d \rightarrow p Υ π
 - K-d \rightarrow p Λ π^-
 - K-d \rightarrow p Σ^0 π^-
 - K-d \rightarrow p Λ $\pi^-\pi^0$
 - K-d \rightarrow p Σ^0 $\pi^-\pi^0$
- 2 successive (Constant)
 - 2step Stopped K (TSSK)
 - 1step Inflight K (dot.) (OSIK)
 - 1step Inflight K^0 (OSIK0)
- K-d \rightarrow p Σ^- π^0

Fitting error except for $\Lambda\pi^0$ is negligible.

BG2 : 2 successive 反応

K- reaction

- K- “n” → K- n ; “n” is bound in a deuteron (1st)
- K- “p(n)” → Y π ; “p(n)” is in different deuteron (2nd)

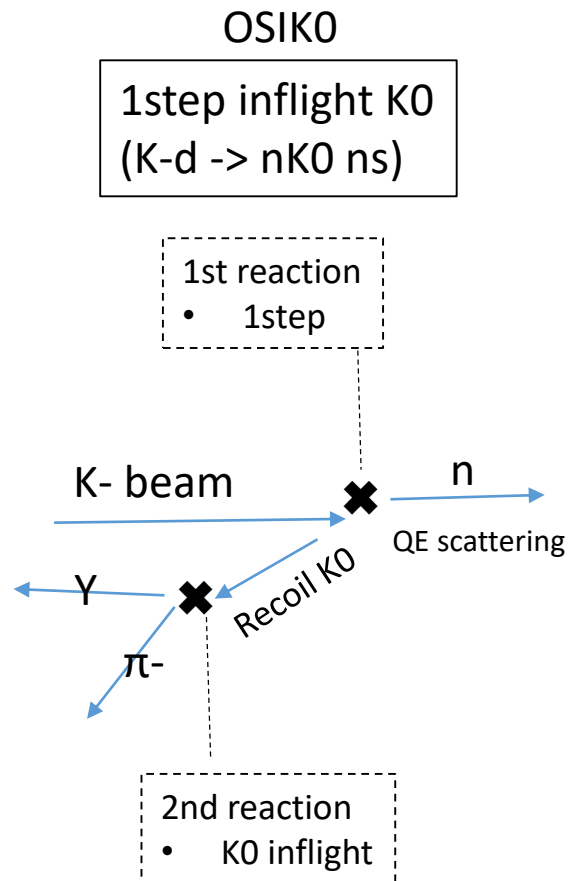


BG2: “2 successive” p
a hyperon
production induced b
the d(K-,n)
reaction reacts with a

BG2 : 2 successive 反応

K0 reaction

- K- “p” \rightarrow K0 n ; “n” is bound in a deuteron (1st)
- K0 “p(n)” \rightarrow Υ π ; “p(n)” is in different deuteron (2nd)



BG3: $K^- d \rightarrow p \Sigma^- \pi^0$ in IM. (n, π^-) spectrum

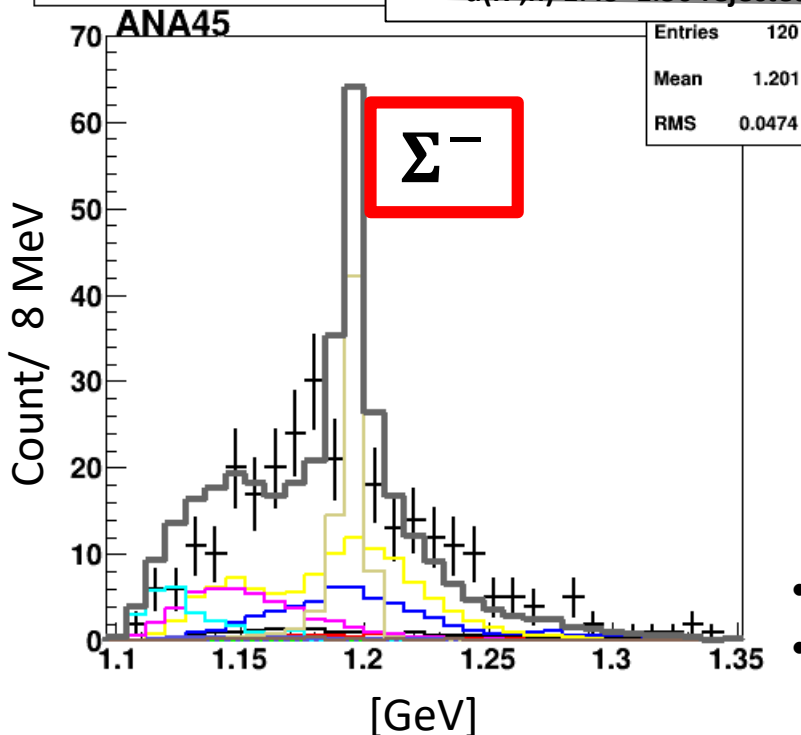
Cut condition

- CDS π^-
- BPD proton
- NC neutron

- Σ^- from IM. (n, π^-) rejected
- Σ^+ from MM. d(K-, n π^-) rejected
- Λ from IM. (p, π^-) rejected
- $0 < d(K-, n\pi^-)$ (BPD miss ID π^- cut)
- Mom n < 1.35 GeV (2NA cut)
- d(K-, n) 1.43~1.50 rejected (QE region)

† Data

- K-d \rightarrow n Σ^+ π^-
- K-d \rightarrow n Σ^0 π^0
- K-d \rightarrow n Λ π^0
- K-d \rightarrow p Υ π
 - K-d \rightarrow p Λ π^-
 - K-d \rightarrow p Σ^0 π^-
 - K-d \rightarrow p Λ $\pi^- \pi^0$
 - K-d \rightarrow p Σ^0 $\pi^- \pi^0$
- 2 successive
 - 2step Stopped K (TSSK)
 - 1step Inflight K (dot.) (OSIK)
 - 1step Inflight K0 (OSIK0)
- K-d \rightarrow p Σ^- π^0



- ID of Σ^- from IM.(n, π^-) seems to be good.
- BG seems to be explained successfully.

$\Lambda(1405)$ の研究背景

- $\Lambda(1405)$

$\Lambda^*(1405)$ [uds]

$I = 0, J^P = \frac{1}{2}^-$, $m = 1405.1 \pm 1.3$ (MeV) $< N^*(1440)$

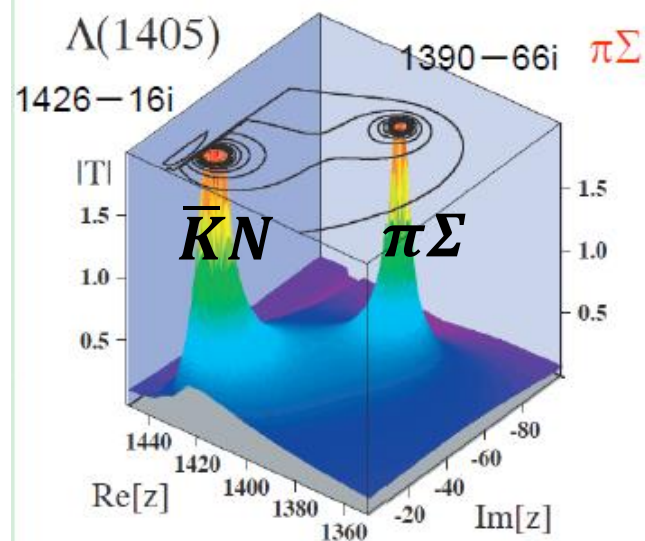
$\Gamma = 50.5 \pm 2.0$ (MeV) (PDG-2017)

3クォーク? $\bar{K}N$ の束縛状態?

カイラルユニタリーモデルによる
 $\bar{K}N, \pi\Sigma$ 共鳴状態による2極構造

励起状態ハドロン内部構造の理解

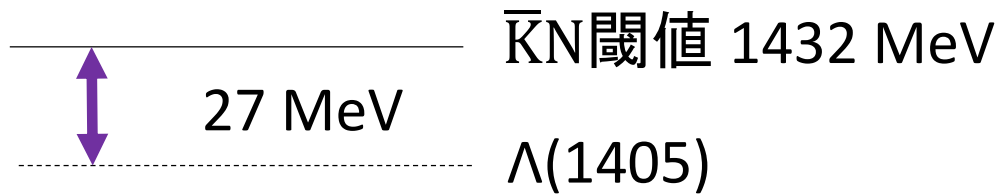
クォーク→ハドロン形成の理解



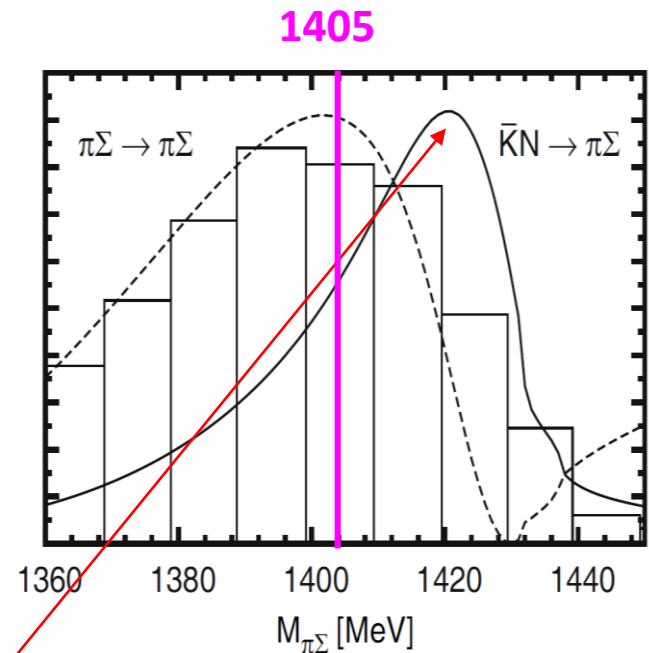
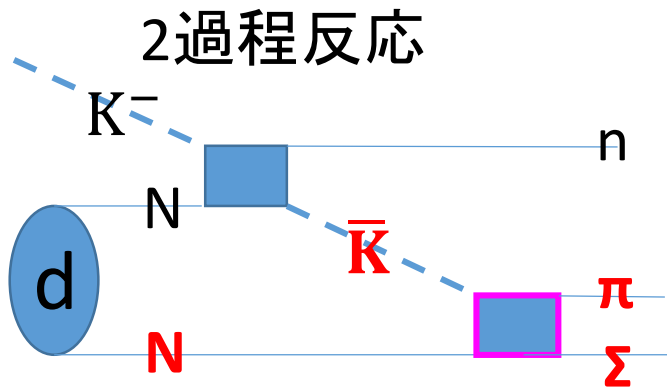
T.Hyodo and W.Weise,
Phys.RevC77,035204(2008)

- $\bar{K}N \rightarrow \pi\Sigma$ での $\Lambda(1405)$ スペクトラムの形状を探る

自由空間では反応できない



➡ **$d(K^-, n)$ 反応**
 $\bar{K}N$ からの直接生成



D.Jido et al,
 Eur. Phys. J. A42('09)257

この反応により $\bar{K}N$ 極($\sim 1420 \text{ MeV}/c^2$)を強く反映した散乱状態が期待される

BGの評価

- **BG** : Invariant mass.(IM.) (π^-, p) “ Λ ” ,
Missing Mass.(MM.) $d(K^-, n\pi^-)$ “ Σ^+ ” の BG成分

BG1 : $K^- d \rightarrow p \pi^- Y(\pi^0)$

- BGのQF成分以外

- $p \pi^- Y(\pi^0) \rightarrow p \pi^- n \pi^0 (\gamma)(\pi^0)$

- ① $p \pi^- \Lambda$, ② $p \pi^- \Lambda \pi^0$, ③ $p \pi^- \Sigma^0$, ④ $p \pi^- \Sigma^0 \pi^0$.

- MM. $d(K^-, p\pi^-)$ “ $Y(\pi^0)$ ” のフィッティングから4つの大きさを決める。

BG2 : 2 successive 反応

- BGのQF成分

- MM. $d(K^-, n)$ のQFまわりのフィッティングから大きさを決める。

- **BG3** : IM. (π^-, n) “ Σ^- ”

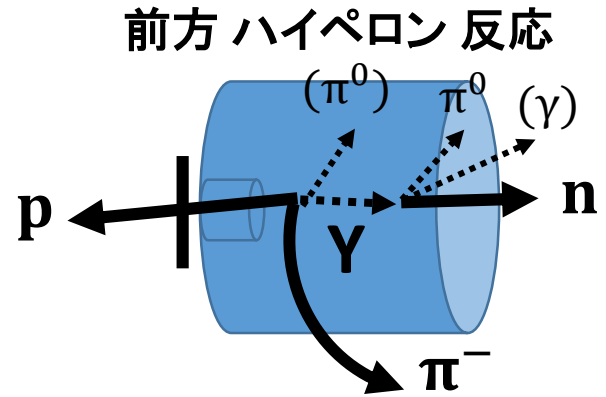
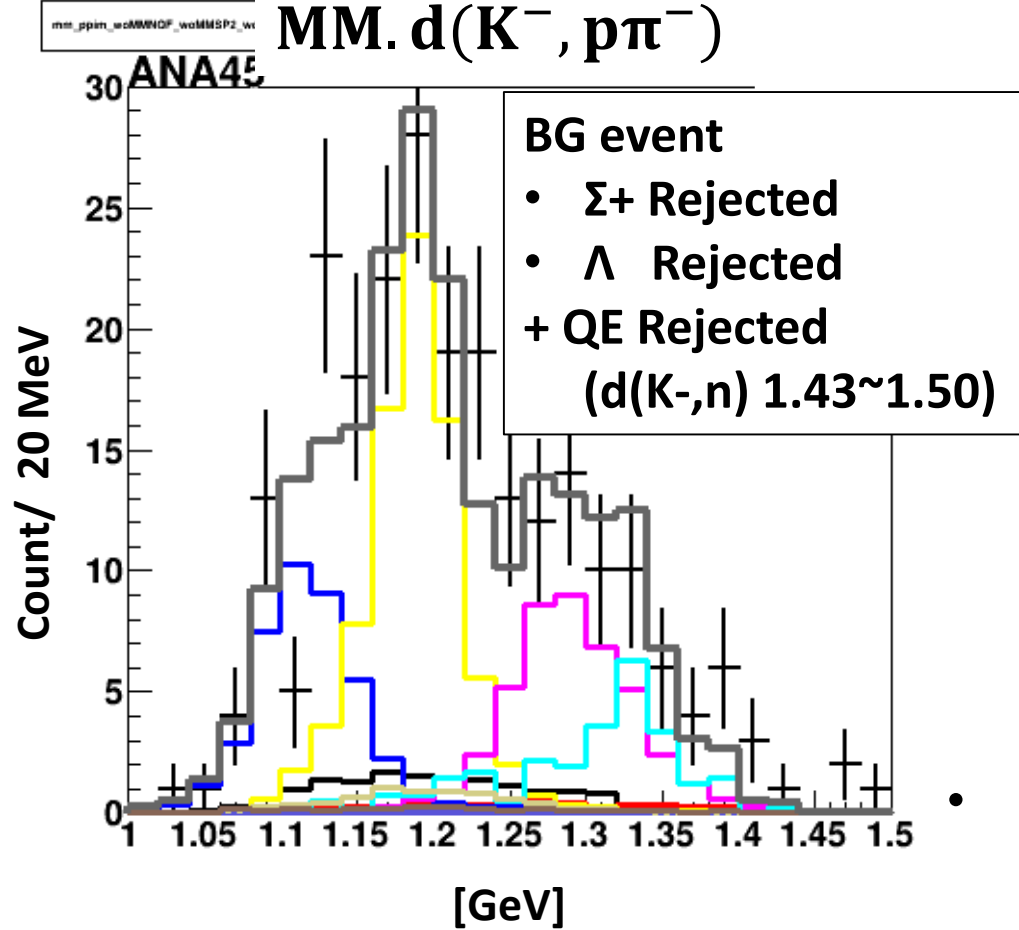
- $K^- d \rightarrow p \Sigma^- \pi^0$

- $p \Sigma^- \pi^0 \rightarrow p n \pi^- \pi^0$

BGの評価

BG1: MM. $d(K^-, p\pi^-)$ スペクトラムのフィッティングによる $p\pi^-Y(\pi^0)$ の成分分解

IM. = Invariant mass
MM.= missing mass



- † Data

 - $K-d \rightarrow p\pi^- Y(\pi^0)$
 - $K-d \rightarrow p\pi^- \Lambda$
 - $K-d \rightarrow p\pi^- \Sigma^0$
 - $K-d \rightarrow p\pi^- \Lambda\pi^0$
 - $K-d \rightarrow p\pi^- \Sigma^0\pi^0$

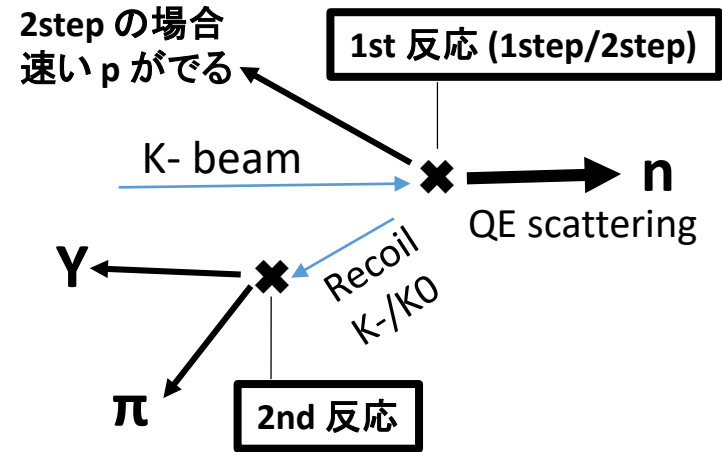
• BG (w/o QE)は $K-d \rightarrow p\pi^- Y(\pi^0)$ によってよく再現できている。

BG2:MM. $d(K^-,n)$ スペクトラムのフィッティングによる 2 successive 反応の評価

2 successive 反応

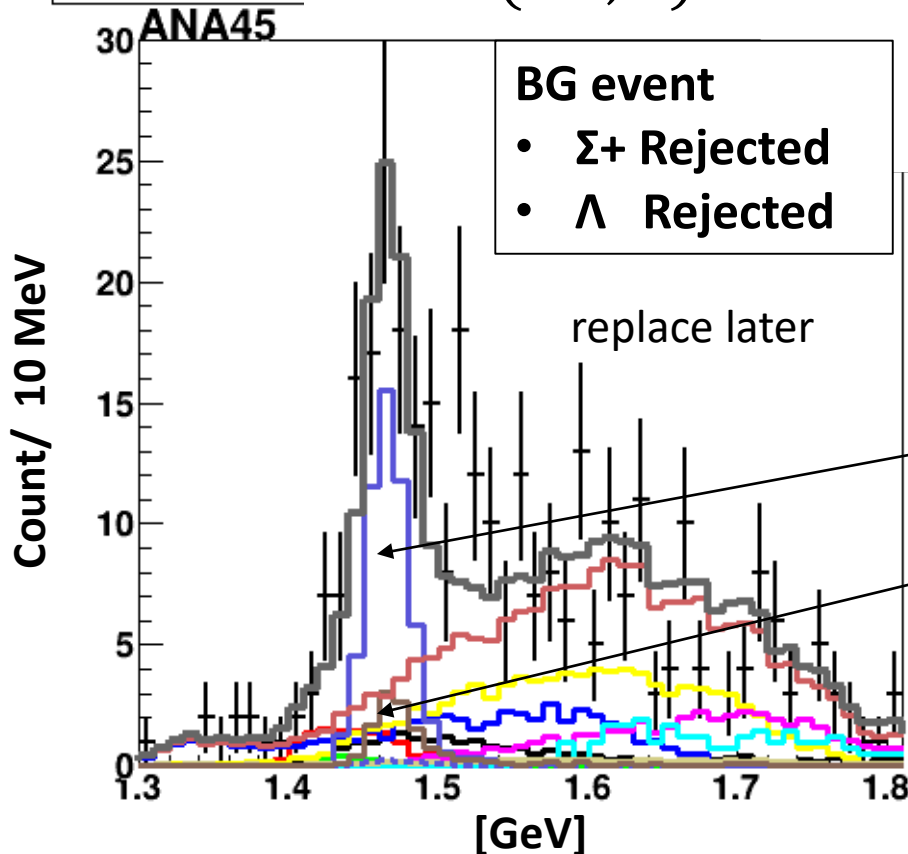
1st : $K^- \text{ "n/p" } \rightarrow K^- \text{ n/K0 n}$

2nd : $K^-/\text{K0 "p(n)" } \rightarrow \gamma \pi$



mm_n_NONC_woMMSP2_woBWL_woF:

MM. $d(K^-, n)$



† Data

- $K^- \text{ d } \rightarrow p\pi^- \text{ } \gamma(\pi^0)$

- 2 successive

- 2step Recoil K^-

- 1step Recoil K^- (dot.)

- 1step Recoil K^0

- 1step の反応の大きさは別に測定したCS からもとめ、2step の大きさをフィッティングにより決める。