

K^- multi-nucleon absorption cross
sections and branching ratios in Λp and
 $\Sigma^0 p$ final states

2023/6/28 木村佑斗

1. Intro

- 低エネルギー領域のQCDは摂動が使えない。→実験の重要性。
- $\bar{K}N$ のポテンシャルは基本的な問題を調べる上でも重要。 (e.g. 高バリオン密度の内部でのカイラル対称性の部分的回復や、低温高密度物質内でのK中間子の振る舞いなど。)

1. Intro

• この研究の目的 低エネルギーK中間子と終状態 Λp または $\Sigma^0 p$ を用いた $K^-2NA, 3NA, 4NA$ のBRsとcross sectionsの包括的な測定。

• K^- の ^{12}C への吸収のデータを用いた。
of the KLOE detector
the DAΦNE collider)

• KLOE=Kaon LOng(K_L^0) Experiment $\phi \rightarrow K^+K^-$ or $K_S^0K_L^0$

• 長さ6m、直径7mの円筒形でDCがEMカロリメーターに囲まれている。
inner DCは3.3m、直径4mで52,000本のワイヤーで構成。粒子の軌跡の精度は0.3%。カロリメーターのエネルギー分解能は15%。
([https://en.wikipedia.org/wiki/KLOE_\(experiment\)](https://en.wikipedia.org/wiki/KLOE_(experiment)))

• アクセプタンスは98%. 4π

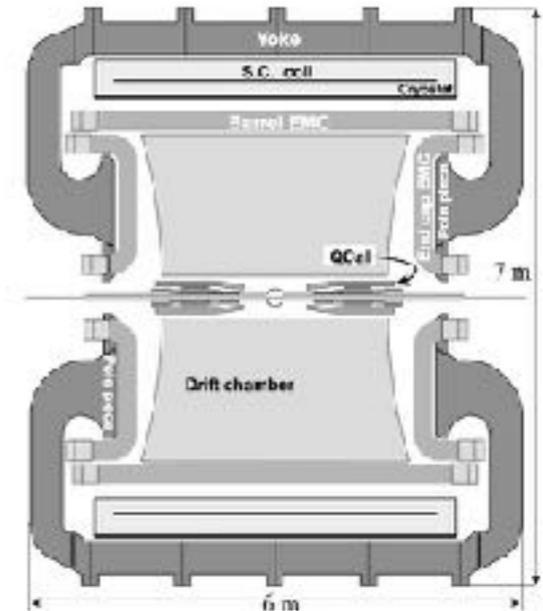


Figure 3 Cross-sectional view of the KLOE experiment, showing the interaction region, the drift chamber (DC), the electromagnetic calorimeter (EMC), the superconducting (S.C.) coil, and the return yokes of the magnets.

2. set up

- ϕ decayによって低運動量 K^- が作られる。Back to backで $K^+ \leftarrow \text{tag}$
- KLOE内での K^- 吸収は81%がCarbon fibre、19%がAl foil。
- 実験的にはこの2つは見分けられないので、81% \gg 19%としてCarbonだけを考慮した。
- K^- at-restとin-flightがある。前者はhighly excited atomic orbitに吸収され、cascadeして最終的に原子核に吸収。後者は最初から原子核に吸収(Kaonの平均運動量100MeV/c)。

3. Λp event selection

- まずは $\Lambda(1116)$ (normal Λ)をid。 $\Lambda \rightarrow \pi^- p$ 64% DC wireのdE/dxとカロリメータのEdepを使って $\pi^- p$ の軌跡を得る。 p の候補は170MeV/c(Lob)より大きいものが良い (π との区別がしやすくなる)。
- $\pi^- p$ の交点を探す。 invariant mass $m_{\pi^- p}$ は1115MeV/c²、分解能0.5MeV/c²を示す。
1112 < $m_{\pi^- p}$ < 1118のカットを適用。 → Λ decay vertexを決定。
- 次はK-hadronic interaction vertexを再構築。

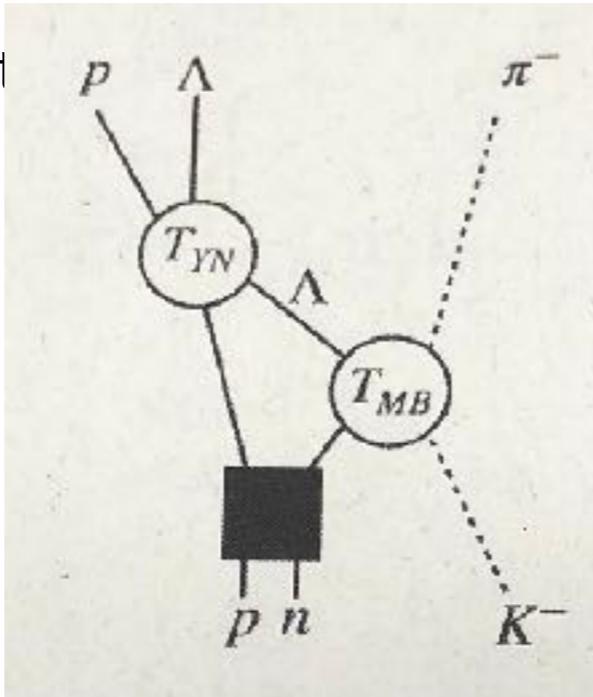
3. Λp event selection

- Primary protonにも同様のカットを適用。(Why?)
- Λp hadronic vertices のビームパイプとの直交方向 $\rho_{\Lambda p}$ の制限は $25\text{cm} \pm 1.2\text{cm}$ 。DC内のガスとの反応の影響を抑えるため。(DCのinner wallの半径は25cm)
- 1核子吸収がBG。過去の実験から1核子：複数核子=8:2。1核子吸収は終状態が $Y\pi$ 。もしも Λp のhadronic vertexと関わりを持つ π^\pm が見つければ、それは1核子吸収つまりBGとなる(16%&6%)。
- 1核子吸収の場合はprimary protonのようなpは K^- hadronic absorptionでできたものではなく、 Λ と残核とのFSIで生まれたもの。

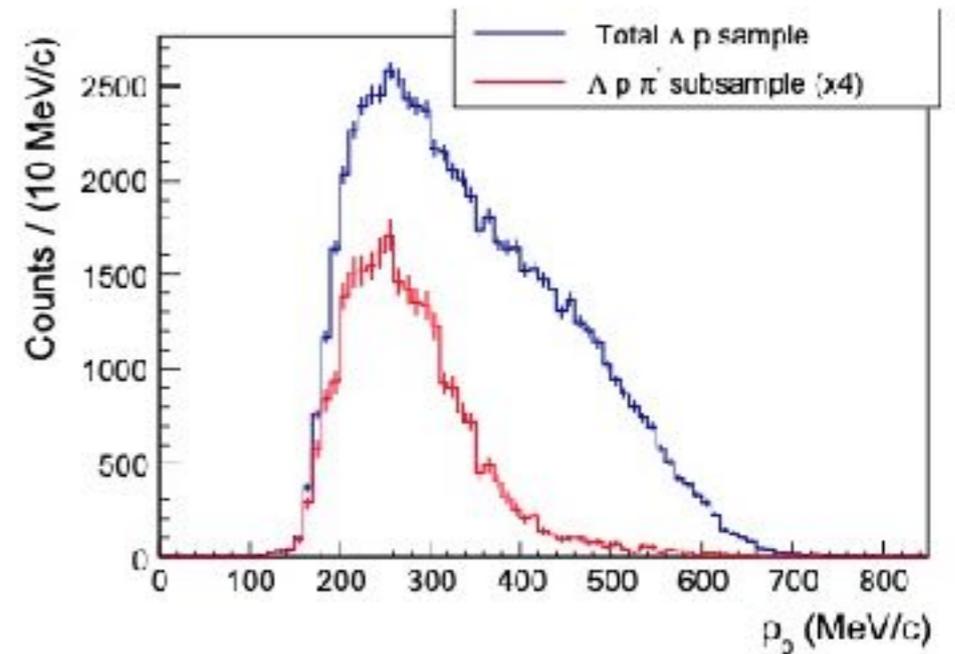
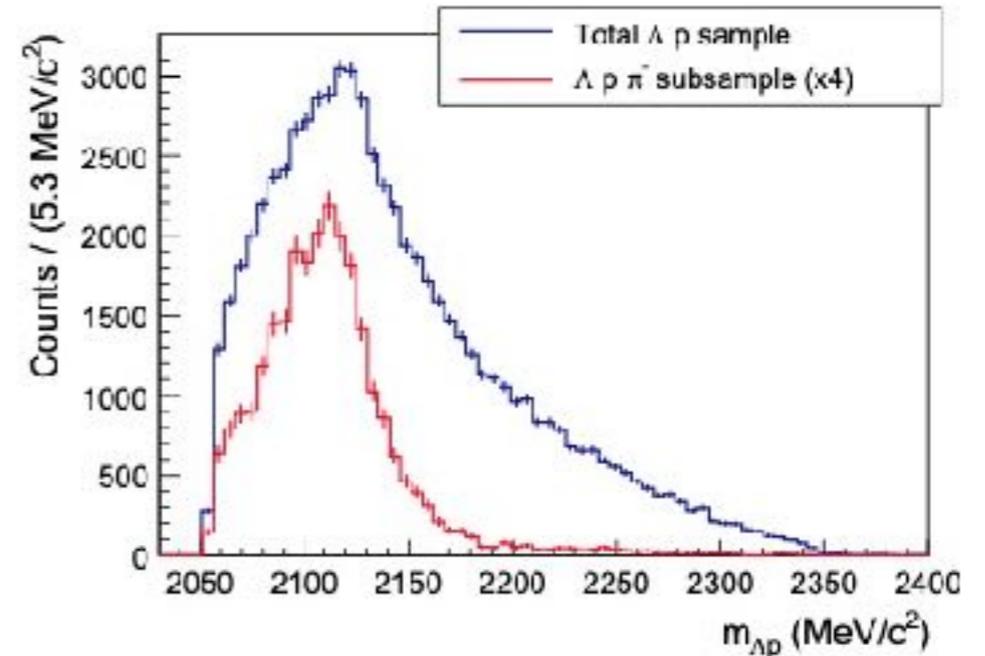
3. Λp event selection

- 赤線つまりFSIでてきたpは残核からのpなので、フェルミ運動量220MeV/cくらいになっている。
- KLOE detector のエネルギー-threshold 240MeV/cに設定。
→final Λp に対して π^\pm processを2%まで減らせる。

- 本実験のfit

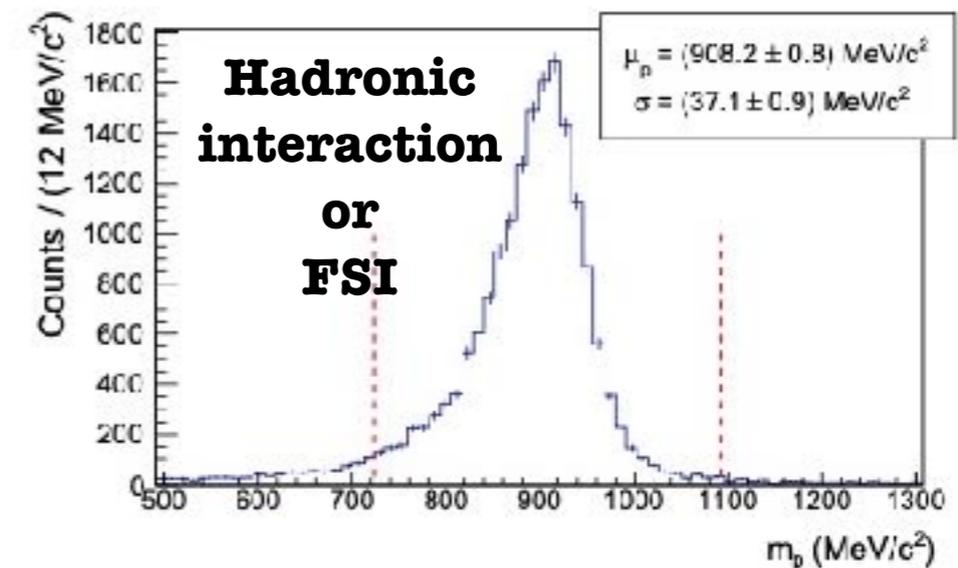
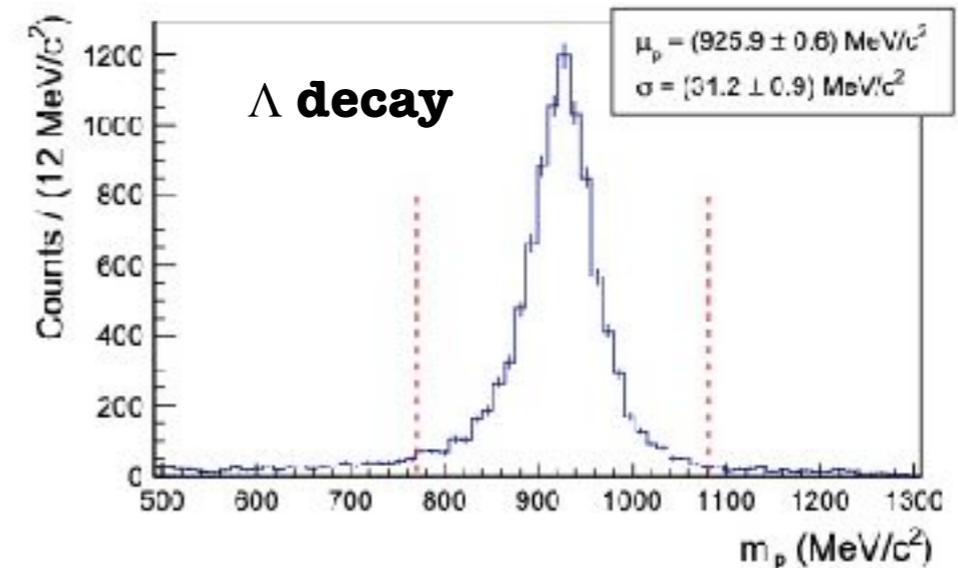


1核子吸収の例



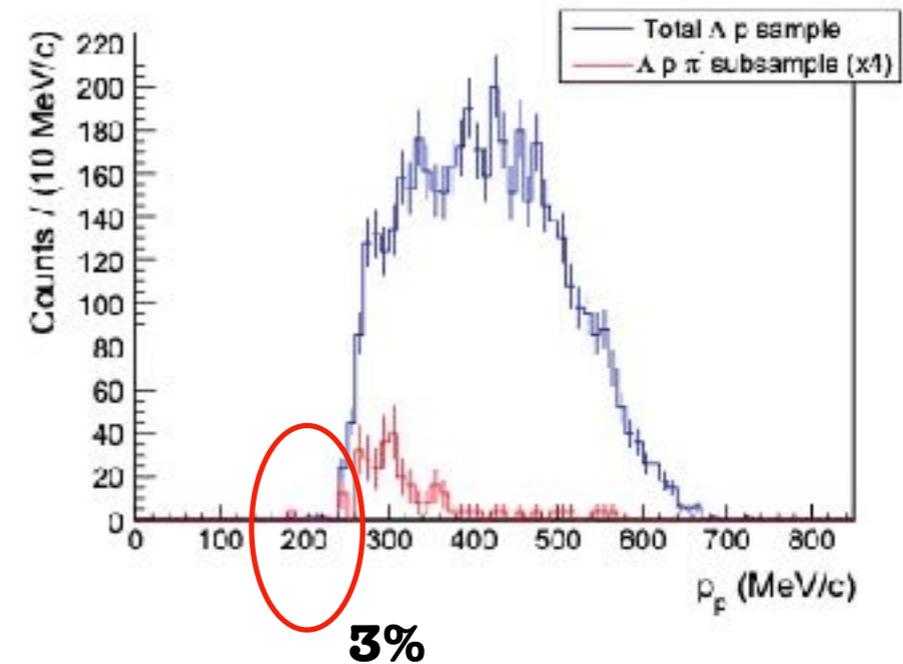
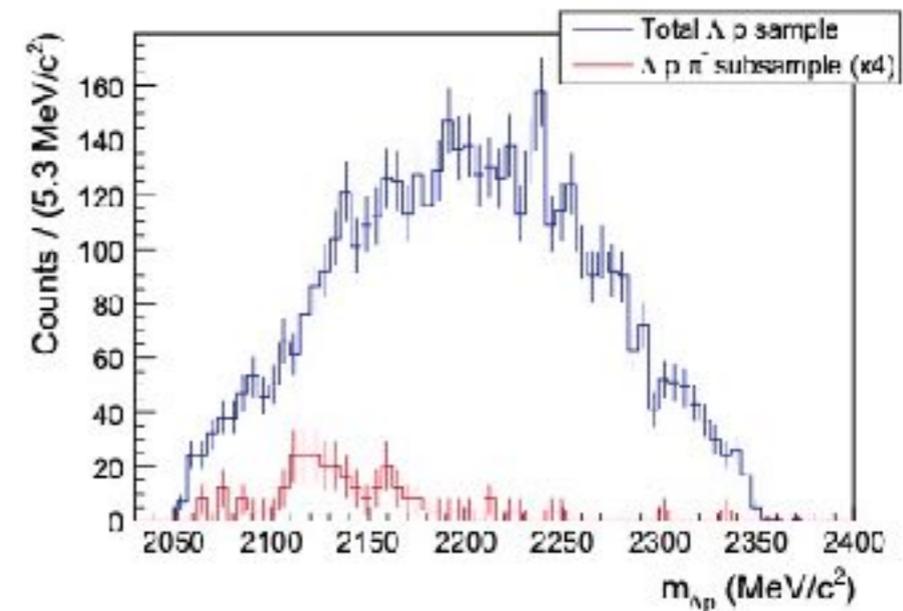
3. Λp event selection

- TOF情報を利用してpを2つに分けて（DC内でできたものとinner wallでできたもの）質量を測定。 どちらのmeanも $938\text{MeV}/c^2$ より小さい。 → energy loss effect
- 特にinner wallで生まれたpがenergy loss effectが大きい。
- "In order to measure the mass of the protons by TOF both protons must have an associated cluster in the calorimeter." ??



3. Λp event selection

- Total Λp sampleで Λp invariant massとpの運動量を比較。
 - 3%はremove
(in order to avoid biases due to the calorimeter threshold for low energy protons).
- かつ、 K^+ でtagできたものに絞ると、最終的に残った Λp event数は4543!



4. Monte Carlo simulations

- シミュレーションの目的：実験データをフィットしてBRs(Branching Ratios)とCSs(Cross Sections)を得るための準備
- 考慮した反応 in 2NA：(1)終状態 Λp w/wo elastic FSIs、(2)終状態 $\Sigma^0 p \rightarrow \gamma \Lambda p$ w/wo ela FSIs、(3)inelastic scattering $\Sigma N \rightarrow \Lambda N'$ (conversion of the Σ into Λ)
Residual nucleons
- 残核が励起状態になる可能性もあり $\rightarrow M_{\Lambda p}$ が小さくなる。
- これらの反応の相対振幅は全て自由なパラメタ。
- GEANFI：Monte Carlo simulationのプログラム。インプットは (p_Y, p_p) 。 $p_{Yp} = p_Y + p_p$ 。この分布関数 $P(p_{Yp})$ は以下のように定義される。
$$P(p_{Yp})dp_{Yp} = |T(m_{Yp})|^2 |F(p_{Yp})|^2 d\rho$$
Phase space element
- T：K multi-nucleon absorption transition amplitudes \rightarrow const
- F：form factor, containing "all" the nuclear physics

4. Monte Carlo sim

Replace the single proton wave function with two, three and four nucleons wave function

$$A = \int d\mathbf{r} \Phi_{\Sigma}^*(r) \Phi_{\pi}^*(r) T(K^- p \rightarrow \Sigma \pi) \Phi_p(r) \Phi_K(r) \sim T(M_{\Sigma\pi}) F^p(P_{\Sigma\pi})$$

A : capture amp

$$F^p(P_{\Sigma\pi}) = \int d\mathbf{r} \Phi_{\Sigma}^*(r) \Phi_{\pi}^*(r) \Phi_p(r) \Phi_K(r).$$

$$\langle |F^p(P_{\Sigma\pi})|^2 \rangle \sim \frac{P_{\Sigma\pi}^2}{\alpha^2} e^{-\frac{P_{\Sigma\pi}^2}{\alpha^2}} \left[8 \left(\frac{5}{2} - \frac{P_{\Sigma\pi}^2}{2\alpha^2} \right)^2 + \frac{3P_{\Sigma\pi}^4}{\alpha^4} \right]$$

Phase space element

$$d\rho = \rho dM_{\Sigma\pi} = P_{\Sigma\pi} \sqrt{E_0 - M_{\Sigma} - M_{\pi} + \frac{P_{\Sigma\pi}^2}{2(M_{\Sigma} + M_{\pi})}} dM_{\Sigma\pi}$$

where $E_0 = M_p + M_K - E_p^{\text{binding}}$, E_p^{binding} is the binding energy of the absorbing proton (and kaon)

$$P(M_{\Sigma\pi}) dM_{\Sigma\pi} = |T(M_{\Sigma\pi})|^2 \langle |F^p(P_{\Sigma\pi})|^2 \rangle \rho dM_{\Sigma\pi}$$

R. Del Grande, K. Piscicchia, S. Wycech, Formation of π pairs in nuclear captures of K^- mesons. Acta Phys. Pol. B **48**, 1881 (2017)

4. Monte Carlo sim

- at-rest Kは2p軌道に捕獲される。
- 3d,2pに捕獲されたat-rest Kの波動関数の Λp invariant mass依存性は無視できる(Ref.[42] V.K. Magas, E. Oset, A. Ramos, H. Toki, A critical view on the deeply bound state Kpp system. Phys. Rev. C 74, 025206 (2006))
- in-flight Kの波動関数はRef.[57]K. Piscicchia, S. Wycech, C. Curceanu, On the K^- - $^4\text{He} \rightarrow \pi^-$ - ^3He resonant and non-resonant processes. Nucl. Phys. A **954**, 75-93 (2016)を参考にした。
- Ref.[60](First measurement of the $K^-n \rightarrow \pi^-$ non-resonant transition amplitude below threshold. Phys. Lett. B **782**, 339-345 (2018))によれば、中性子に吸収される量はat-restとin-flightで誤差の範囲内で等しく、本論文ではこの中性子吸収は系統誤差に含めている。
- Kの運動量はhadronic吸収が起きる直前の値を使っている。

5. Fit of the data

- 測定された分布をフィットするための関数形

$$\mathcal{F}^q(q_n) = \sum_{i=1}^{N_{par}} \alpha_i \cdot h_i^q(q_n)$$

h_i^q : **i**番目の過程の分布の形

α_i : 相対強度

q_n : 変数 q の**n**番目のビン

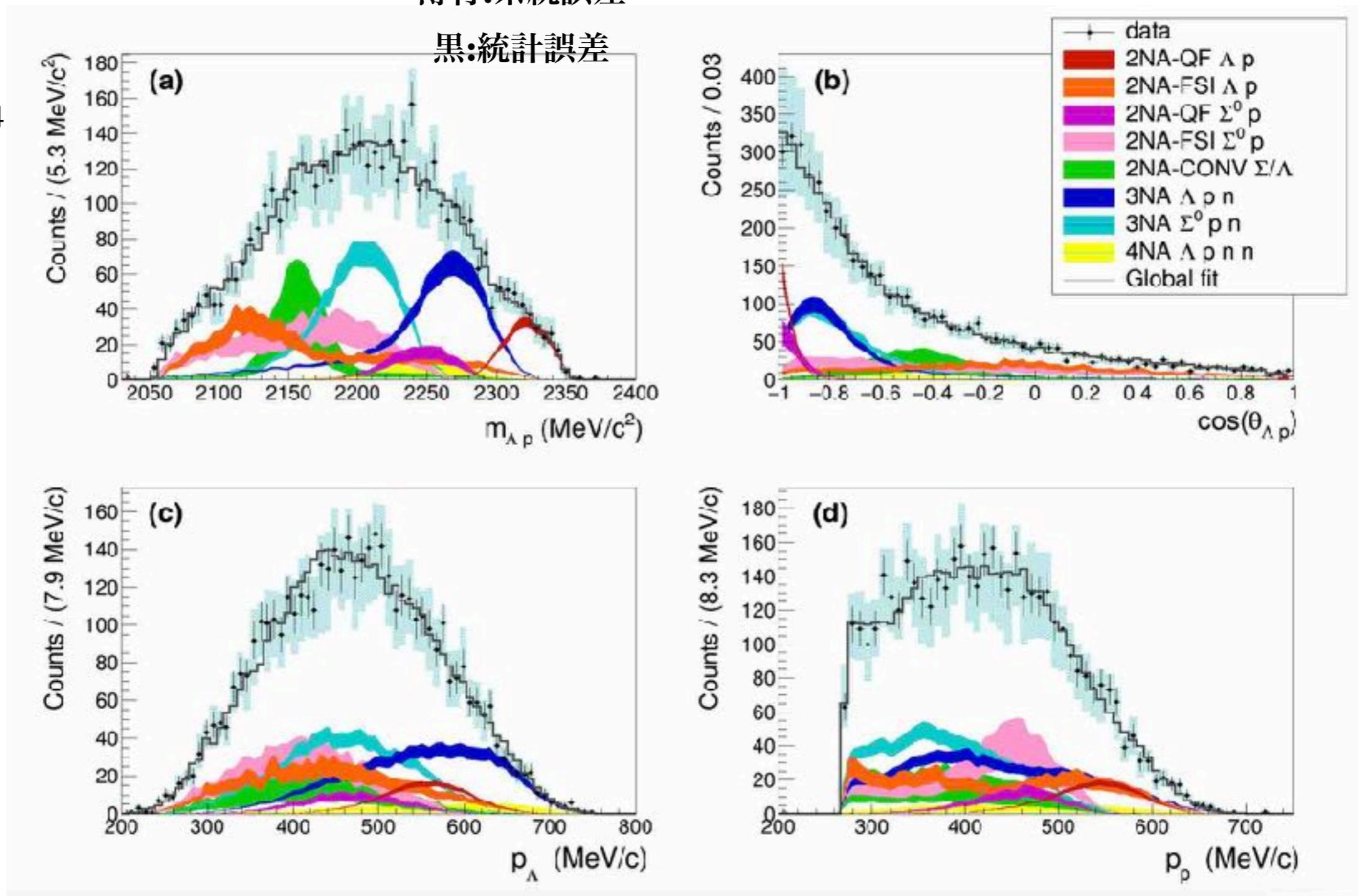
- χ^2 フィットはSIMPLEX, MIGRAD, MINOS routines of ROOTで為された。

5. Fit of data

薄青:系統誤差

黑:統計誤差

$$\chi^2 = 0.94$$



5. Fit of data

BRsとCSsの評価には**検出効率**が関わってくる。それぞれ、

2NA-QF Λp	2NA-QF Σp	3NA Λpn	3NA Σpn
2.49±0.02 %	1.24±0.26 %	1.77±0.01 %	0.65±0.01%

検出効率は粒子(proton)のエネルギー（運動量）に依存し、増加とともに検出効率も良くなる。

だから2NA-QF Λp の効率が他より高くなっている。

前ページの図を参照。

3%未満という低検出効率の理由はTOF測定で

$\Lambda \rightarrow \pi p$ と hadronic vertex でできる p の 2 個の p の TOF が 必要

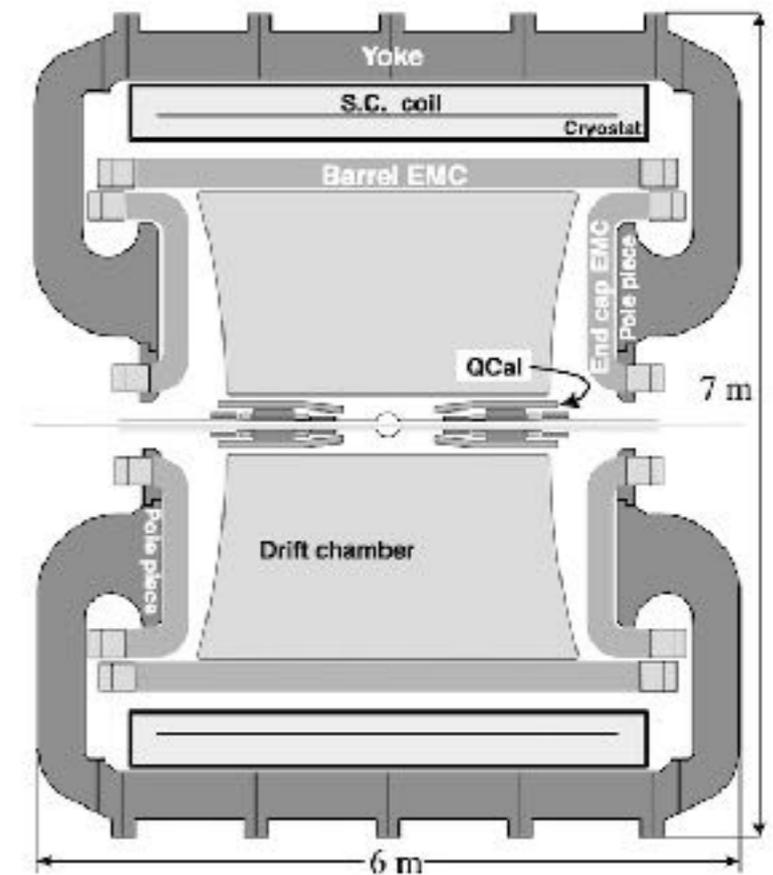


Figure 3 Cross-sectional view of the KLOE experiment, showing the interaction region, the drift chamber (DC), the electromagnetic calorimeter (EMC), the superconducting (S.C.) coil, and the return yoke of the magnet.

5. Fit of data

ほぼ静止状態かつprocess i で捕獲されたイベント数

$$BR_i = \frac{N_i^{\text{at-rest}}}{N_{K^- \text{ stop}}},$$

inner wallで止まった K^- の数。 K^+ でタグ・分析

$$\sigma_i = \frac{N_i^{\text{in-flight}}}{N_{K^-}^{\text{projectiles}} \cdot n \cdot L},$$

Inner wallに突き刺さった（勢いよく入射）した K^- の数

Table 1 Branching ratios (for the K^- absorbed at-rest) and cross sections (for the K^- absorbed in-flight) of the K^- multi-nucleon absorption processes. The K^- momentum is evaluated in the centre of mass refer-

ence frame of the absorbing nucleons, thus it differs for the 2NA and 3NA processes. The statistical and systematic errors are also given

Process	Branching ratio (%)	σ (mb)	@	p_K (MeV/c)
2NA-QF Λp	0.25 ± 0.02 (stat.) $^{+0.01}_{-0.02}$ (syst.)	2.8 ± 0.3 (stat.) $^{+0.1}_{-0.2}$ (syst.)	@	128 ± 29
2NA-FSI Λp	6.2 ± 1.4 (stat.) $^{+0.5}_{-0.6}$ (syst.)	69 ± 15 (stat.) ± 6 (syst.)	@	128 ± 29
2NA-QF $\Sigma^0 p$	0.35 ± 0.09 (stat.) $^{+0.13}_{-0.06}$ (syst.)	3.9 ± 1.0 (stat.) $^{+1.4}_{-0.7}$ (syst.)	@	128 ± 29
2NA-FSI $\Sigma^0 p$	7.2 ± 2.2 (stat.) $^{+4.2}_{-5.4}$ (syst.)	80 ± 25 (stat.) $^{+46}_{-60}$ (syst.)	@	128 ± 29
2NA-CONV Σ/Λ	2.1 ± 1.2 (stat.) $^{+0.9}_{-0.5}$ (syst.)	—		
3NA Λpn	1.4 ± 0.2 (stat.) $^{+0.1}_{-0.2}$ (syst.)	15 ± 2 (stat.) ± 2 (syst.)	@	117 ± 23
3NA $\Sigma^0 pn$	3.7 ± 0.4 (stat.) $^{+0.2}_{-0.4}$ (syst.)	41 ± 4 (stat.) $^{+2}_{-5}$ (syst.)	@	117 ± 23
4NA Λpnn	0.13 ± 0.09 (stat.) $^{+0.08}_{-0.07}$ (syst.)	—		
Global $\Lambda(\Sigma^0)p$	21 ± 3 (stat.) $^{+5}_{-6}$ (syst.)	—		

6. Systematic errors(さっぱりわからないので手抜きになってしまった)

6 Systematic errors

The systematic uncertainties for the measurements are obtained by performing variations of each cut applied for the Λp event selection described in Sect. 3. The systematic error to the parameter α_i introduced by the variation of the j -th cut is given by:

$$\sigma_{sist.,i}^j = \alpha_i^j - \alpha_i, \quad (9)$$

where α_i^j is the value obtained from the new fit. The total, positive and negative, systematic errors are obtained summing in quadrature, separately, the positive and negative systematics.

In Table 2, the standard selection cuts for the kinematic variables which are found to significantly contribute to the systematic errors are summarised.

- ・ カット条件を色々変えた時に元のカット条件の時とでパラメータがどれだけずれるかを見ている？

Table 2 Cuts of the optimised Λp event selection that significantly contribute to the systematic errors. See Fig. 2 for further details about the cuts applied to the mass of the protons

Hadronic vertex radial coordinate:	$23.8 \text{ cm} < \rho_{\Lambda p} < 26.2 \text{ cm}$
Primary proton mass:	$723 \text{ MeV}/c^2 < m_p < 1093 \text{ MeV}/c^2$
Proton from the Λ decay mass:	$771 \text{ MeV}/c^2 < m_p < 1081 \text{ MeV}/c^2$
Primary proton momentum:	$p_p \geq 270 \text{ MeV}/c$

The $\rho_{\Lambda p}$ cut variations are performed in order to select $\pm 15\%$ of events. For the proton TOF mass cuts we relied on the standard deviation of the mass distribution fits ($\pm 2\sigma$) and the systematic on the proton momentum cut is evaluated by removing it. Two important additional contributions to the systematic errors are also considered, related to the assumptions of the event modelling, namely the ansatz on the equal in-flight/at-rest contribution, which is varied to 40/60% and 60/40%, and the contribution of the single nucleon absorptions, evaluated performing the fit with additional pionic contributions.

- ・ in-flightとat-restの寄与の割合も変えてみた
- ・ 1核子吸収の寄与の仮定も変えてみた
(additional pionのfitへの寄与)

7.1. 多核子吸収のBRsとCSs

- 4NAは3NAとphase spaceの重なりが大きく、fitからは明確なはっきりとした結果は得られなかった。しかも4NA- Λ pでは相関が見られない（cosの図を参照）。
- 2NA-QFと3NAは図からも分かるとおり、綺麗な結果が得られた。
- 全BRsの和はbubble chamberの実験データとコンシステントだった。

7.2. K^-p coupling to $\Lambda(1405)$

$$\mathcal{R} = \frac{\text{BR}(K^-(pp) \rightarrow \Lambda p)}{\text{BR}(K^-(pp) \rightarrow \Sigma^0 p)} = \frac{\text{BR}(K^-(p) \rightarrow \Lambda \pi^0)}{\text{BR}(K^-(p) \rightarrow \Sigma^0 \pi^0)}$$

$$= 0.7 \pm 0.2(\text{stat.})_{-0.3}^{+0.2}(\text{syst.})$$

- π^0 exchange model
- K^- 交換も許される(pionの30%)が、上の比の式はそのまま使用できる。
- dynamicalな寄与を考えず、Phase spaceのみでこの比を計算すると、

$$\mathcal{R}' = \frac{\sum_{\mathbf{R}} \cdot w_{\mathbf{R}} \cdot \int |F(p_{\Lambda p})|^2 \cdot d\rho_{\Lambda p}}{\sum_{\mathbf{R}'} \cdot w_{\mathbf{R}'} \cdot \int |F(p_{\Sigma^0 p})|^2 \cdot d\rho_{\Sigma^0 p}} = 1.22$$

- 実際は $\Lambda(1405)$ の過程が支配的と解釈できる。

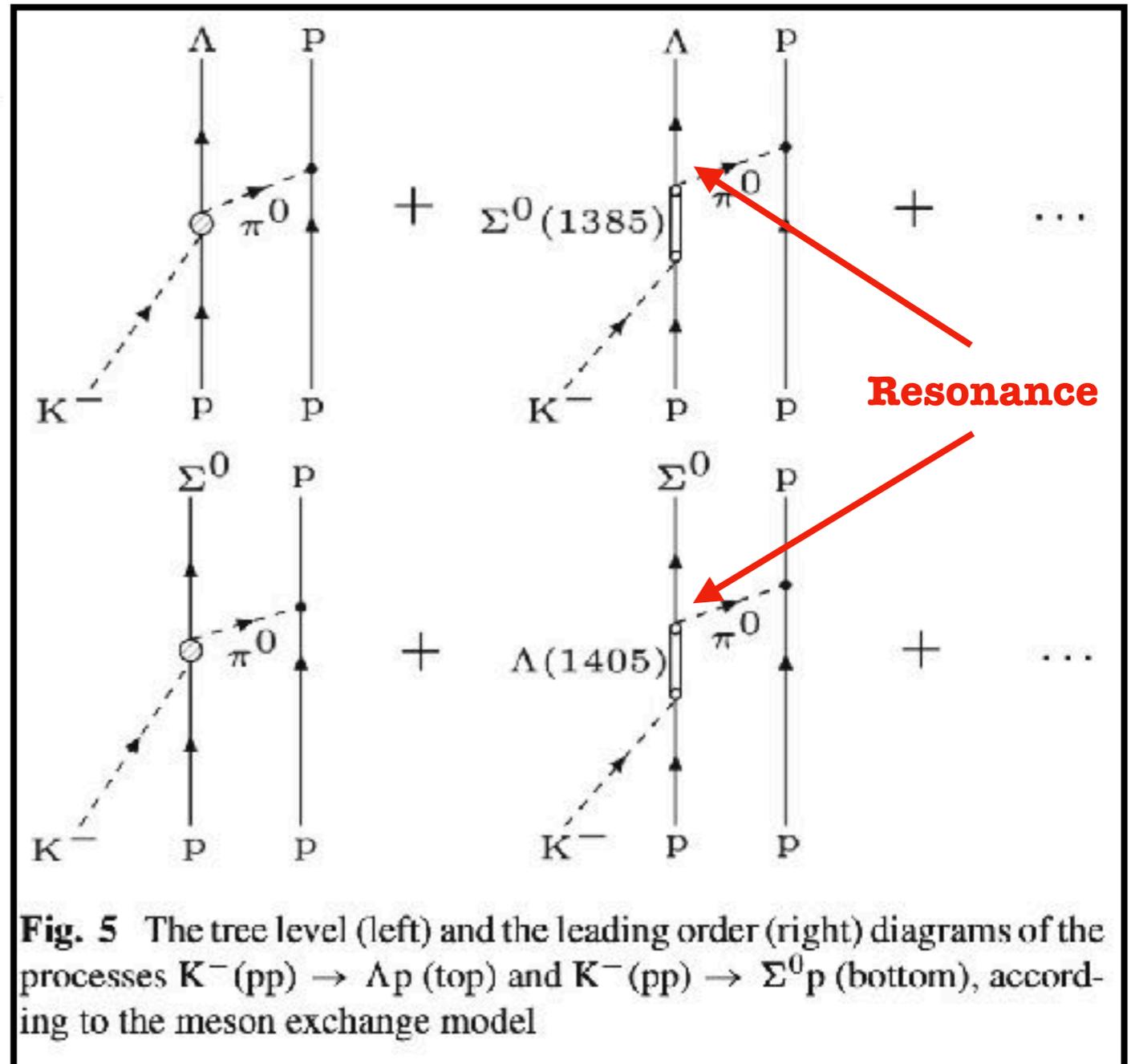


Fig. 5 The tree level (left) and the leading order (right) diagrams of the processes $K^-(pp) \rightarrow \Lambda p$ (top) and $K^-(pp) \rightarrow \Sigma^0 p$ (bottom), according to the meson exchange model

7.3. Search for a K^-pp bound state

2NAと区別できない

Table 3 Experimental BE and Γ of the K^-pp bound state measured by the FINUDA, OBELIX, DISTO, E27 and E15 (first run) experiments

Experiment	BE (MeV)	Γ (MeV/c ²)
FINUDA [33]	115^{+6}_{-5} (stat.) $^{+3}_{-4}$ (syst.)	67^{+14}_{-11} (stat.) $^{+2}_{-3}$ (syst.)
OBELIX [34]	160.9 ± 4.9	$< 24.4 \pm 8.0$
DISTO [36]	103 ± 3 (stat.) ± 5 (syst.)	118 ± 8 (stat.) ± 10 (syst.)
E27 [39]	95^{+18}_{-17} (stat.) $^{+30}_{-21}$ (syst.)	162^{+87}_{-45} (stat.) $^{+66}_{-78}$ (syst.)
E15 (first run) [41]	15^{+6}_{-8} (stat.) ± 12 (syst.)	110^{+19}_{-17} (stat.) ± 27 (syst.)

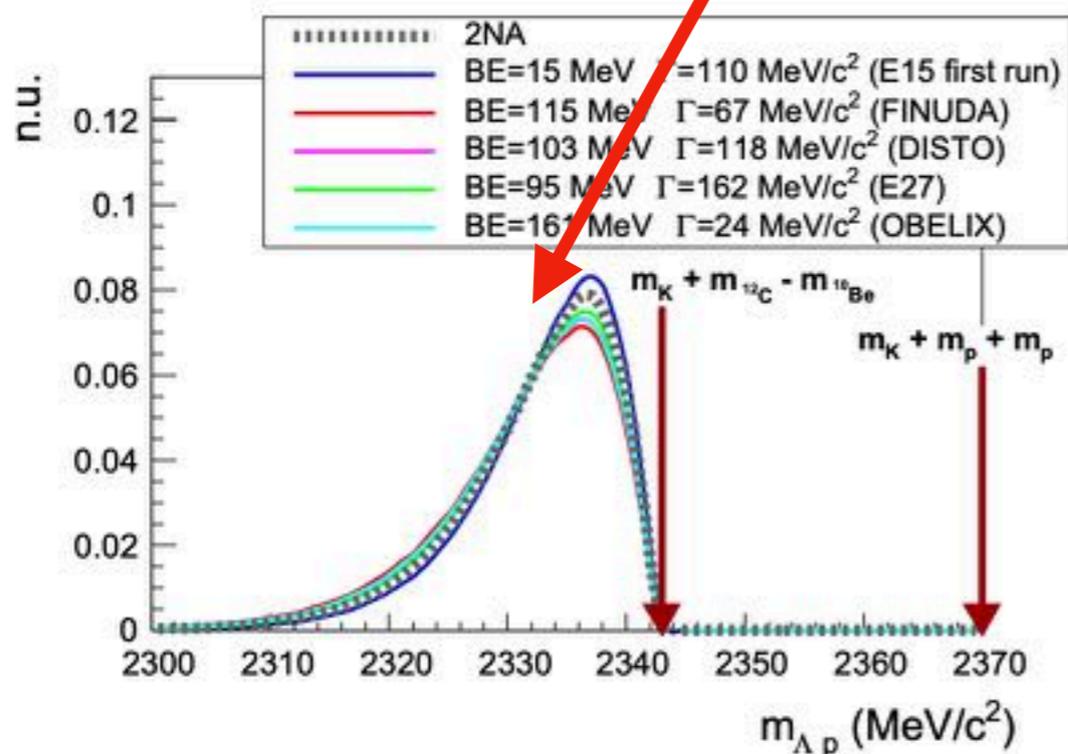


Fig. 6 Calculated invariant mass distributions of the Λp pairs from the K^-pp bound state decay, produced in K^- absorption on ^{12}C . The line shape of the 2NA (gray line) is shown for comparison together with the shapes obtained for the simulation of a bound state having binding energy and width selected according to the measurements of E15 first run (blue line), FINUDA (red line), DISTO (magenta line), E27 (green line) and OBELIX (cyan line). The areas of the distributions are normalised to unity

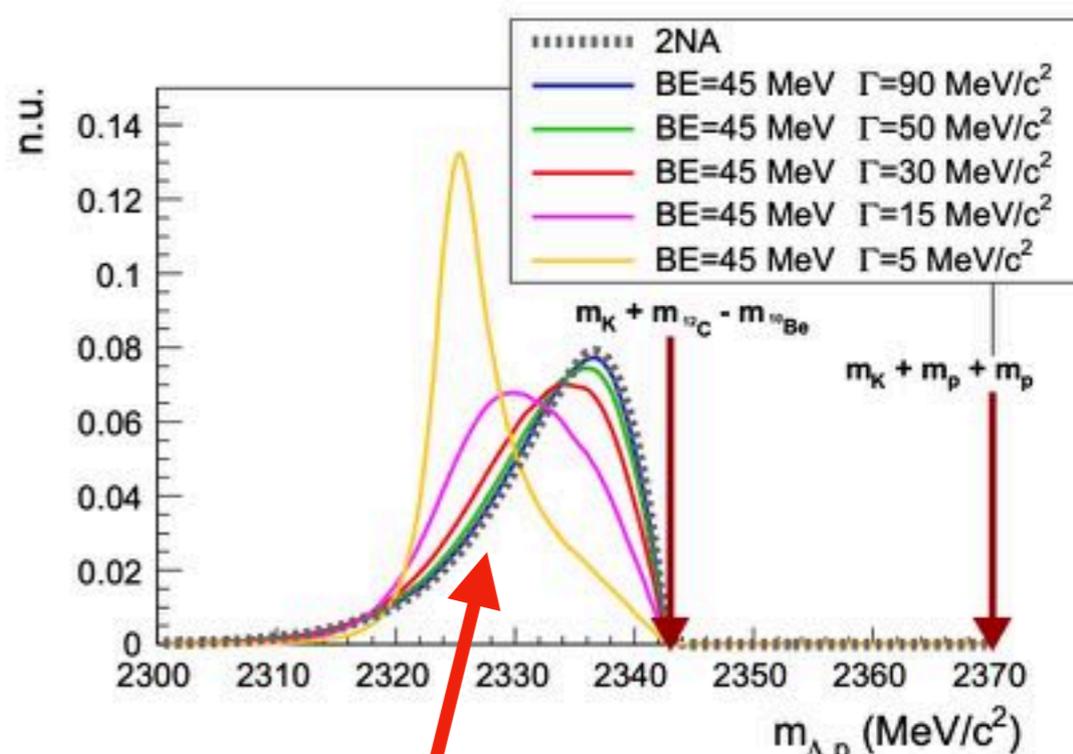


Fig. 7 Calculated Λp invariant mass distributions for the process $K^- + ^{12}\text{C} \rightarrow K^-pp + ^{10}\text{Be} \rightarrow \Lambda + p + ^{10}\text{Be}$, for a bound state having $\text{BE} = 45$ MeV and $\Gamma = 5, 15, 30, 50$ and 90 MeV/c² (yellow, magenta, red, green and blue curves respectively). The gray curve is the shape of the 2NA-QF. The areas of the distributions are normalised to unity

崩壊幅が狭ければ2NAと識別できる

7.4. FINUDAとの比較

- FINUDAで使われたターゲットは ^{12}C , ^6Li , ^7Li で51%, 35%, 14%だが、反応も ^{12}C がdominantだった。pの多さとFSIする確率の高さが要因。
- 直接比較するために、back-to-backの Λp の角度方向について同様のカットをした。
- FINUDAと互換性あり。
- $\cos \theta_{\Lambda p} < -0.8$

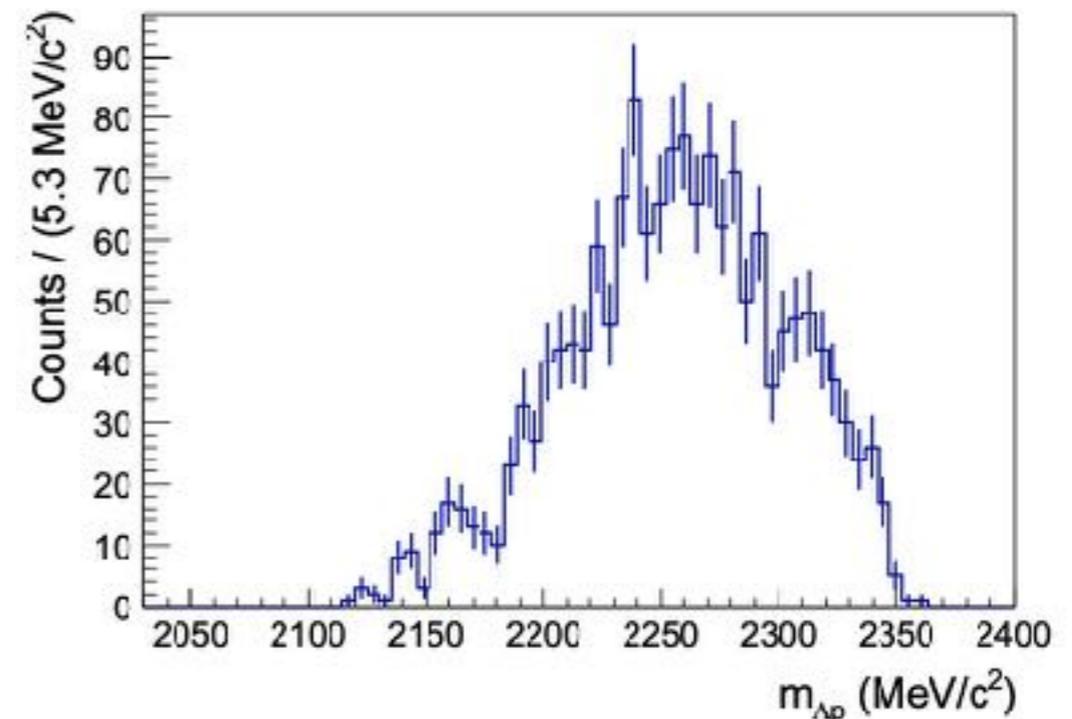


Fig. 8 The experimental Λp invariant mass spectrum obtained selecting back-to-back Λp events ($\cos \theta_{\Lambda p} < -0.8$), in analogy with the data analysis performed by FINUDA in Ref [33]

7.4. FINUDAとの比較

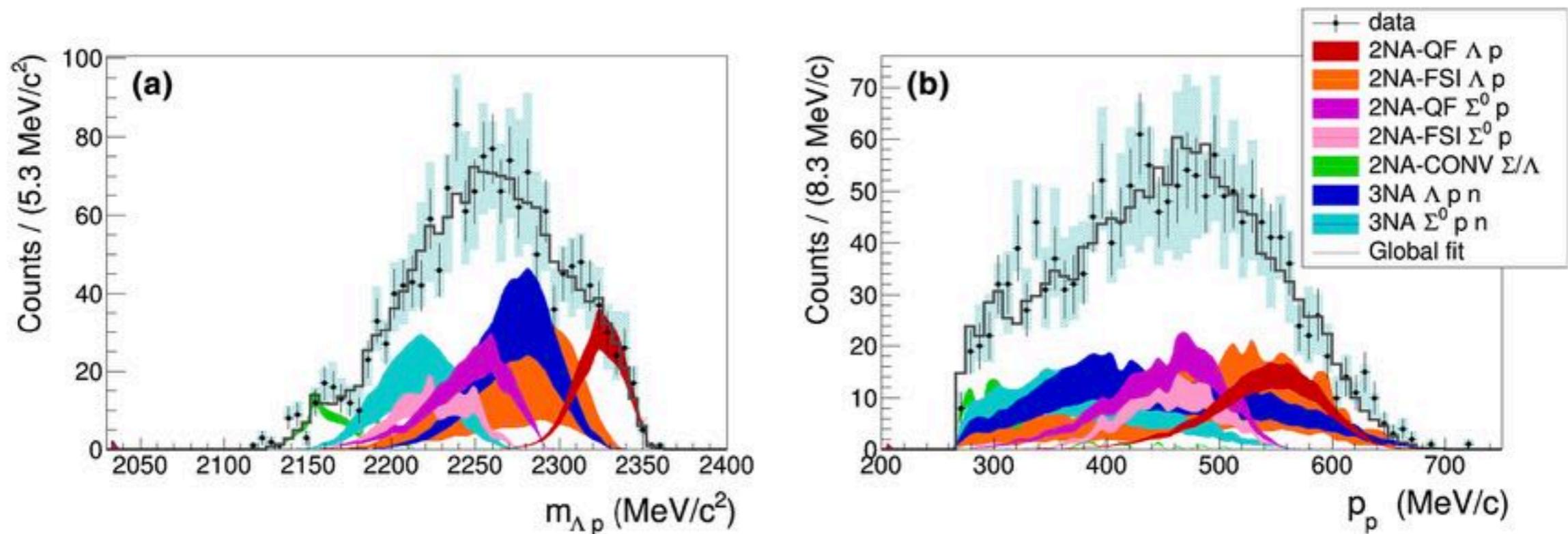


Fig. 9 Λp invariant mass (a) and proton momentum (b) spectra. Black points represent the data, black error bars correspond to the statistical errors, cyan error bars correspond to the systematic errors. The gray line

distributions represent the global fitting functions. The color legend for the different contributing processes is shown in the figure

$$\chi^2/\text{ndf} = 123/130 = 0.94$$

- どちらの分布も多核子吸収でよく説明できる(だいたいprobabilityは60%くらいか(next page))。

7.4. FINUDAとの比較(このスライドではcos cut前後の比較)

Table 4 The branching ratios of K^- multi-nucleon absorptions for a back-to-back (a la FINUDA) selection of Λ and p are reported together with the statistical and systematic errors

Process	Branching ratio (%)
2NA-QF Λp	$0.20 \pm 0.04(\text{stat.}) \pm 0.02(\text{syst.})$
2NA-FSI Λp	$3.8 \pm 2.3(\text{stat.}) \pm 1.1(\text{syst.})$
2NA-QF $\Sigma^0 p$	$0.54 \pm 0.20(\text{stat.})^{+0.20}_{-0.16}(\text{syst.})$
2NA-FSI $\Sigma^0 p$	$5.4 \pm 1.5(\text{stat.})^{+1.0}_{-2.7}(\text{syst.})$
2NA-CONV Σ/Λ	$22 \pm 4(\text{stat.})^{+1}_{-12}(\text{syst.})$
3NA Λpn	$1.1 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 0.2(\text{syst.})$
3NA $\Sigma^0 pn$	$1.9 \pm 0.7(\text{stat.})^{+0.8}_{-0.4}(\text{syst.})$

Table 1 Branching ratios (for the K^- absorbed at-rest) and cross sections (for the K^- absorbed in-flight) of the K^- multi-nucleon absorption processes. The K^- momentum is evaluated in the centre of mass refer-

Process	Branching ratio (%)
2NA-QF Λp	$0.25 \pm 0.02(\text{stat.})^{+0.01}_{-0.02}(\text{syst.})$
2NA-FSI Λp	$6.2 \pm 1.4(\text{stat.})^{+0.5}_{-0.6}(\text{syst.})$
2NA-QF $\Sigma^0 p$	$0.35 \pm 0.09(\text{stat.})^{+0.13}_{-0.06}(\text{syst.})$
2NA-FSI $\Sigma^0 p$	$7.2 \pm 2.2(\text{stat.})^{+4.2}_{-5.4}(\text{syst.})$
2NA-CONV Σ/Λ	$2.1 \pm 1.2(\text{stat.})^{+0.9}_{-0.5}(\text{syst.})$
3NA Λpn	$1.4 \pm 0.2(\text{stat.})^{+0.1}_{-0.2}(\text{syst.})$
3NA $\Sigma^0 pn$	$3.7 \pm 0.4(\text{stat.})^{+0.2}_{-0.4}(\text{syst.})$
4NA Λpnn	$0.13 \pm 0.09(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.07}(\text{syst.})$
Global $\Lambda(\Sigma^0)p$	$21 \pm 3(\text{stat.})^{+5}_{-6}(\text{syst.})$

- 2NA-CONV Σ/Λ はカットの影響を大きく受けて、エラーが大きくなってしまった。
- 結論として、高い相関を持つ Λp 生産のイベントを選んでも K^-pp bound stateを考えることなく、多核子吸収だけでスペクトルの説明ができた。

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/ichi/chi-square-distribution.pdf>

χ²分布表

ν α	0.995	0.99	0.975	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
1	0.0000	0.0002	0.0010	0.0039	0.0158	0.0358	0.0642	0.1015	0.1485	0.2059	0.2750	0.3573	0.4549	0.5707	0.7083
2	0.0100	0.0201	0.0506	0.1026	0.2107	0.3250	0.4463	0.5754	0.7133	0.8616	1.0217	1.1957	1.3863	1.5970	1.8326
3	0.0717	0.1148	0.2158	0.3518	0.5844	0.7978	1.0052	1.2125	1.4237	1.6416	1.8692	2.1095	2.3660	2.6430	2.9462
4	0.2070	0.2971	0.4844	0.7107	1.0636	1.3665	1.6488	1.9226	2.1947	2.4701	2.7528	3.0469	3.3567	3.6871	4.0446
5	0.4117	0.5543	0.8312	1.1455	1.6103	1.9938	2.3425	2.6746	2.9999	3.3251	3.6555	3.9959	4.3515	4.7278	5.1319
6	0.6757	0.8721	1.2373	1.6354	2.2041	2.6613	3.0701	3.4546	3.8276	4.1973	4.5702	4.9519	5.3481	5.7652	6.2108
7	0.9893	1.2390	1.6899	2.1673	2.8331	3.3583	3.8223	4.2549	4.6713	5.0816	5.4932	5.9125	6.3458	6.8000	7.2832
8	1.3444	1.6465	2.1797	2.7326	3.4895	4.0782	4.5936	5.0706	5.5274	5.9753	6.4226	6.8766	7.3441	7.8325	8.3505
9	1.7349	2.0879	2.7004	3.3251	4.1682	4.8165	5.3801	5.8988	6.3933	6.8763	7.3570	7.8434	8.3428	8.8632	9.4136
10	2.1559	2.5582	3.2470	3.9403	4.8652	5.5701	6.1791	6.7372	7.2672	7.7832	8.2955	8.8124	9.3418	9.8922	10.4732
11	2.6032	3.0535	3.8157	4.5748	5.5778	6.3364	6.9887	7.5841	8.1479	8.6952	9.2373	9.7831	10.3410	10.9199	11.5298
12	3.0738	3.5706	4.4038	5.2260	6.3038	7.1138	7.8073	8.4384	9.0343	9.6115	10.1820	10.7553	11.3403	11.9463	12.5838
13	3.5650	4.1069	5.0088	5.8919	7.0415	7.9008	8.6339	9.2991	9.9257	10.5315	11.1291	11.7288	12.3398	12.9717	13.6356
14	4.0747	4.6604	5.6287	6.5706	7.7895	8.6963	9.4673	10.1653	10.8215	11.4548	12.0785	12.7034	13.3393	13.9961	14.6853
15	4.6009	5.2293	6.2621	7.2609	8.5468	9.4993	10.3070	11.0365	11.7212	12.3809	13.0297	13.6790	14.3389	15.0197	15.7332
16	5.1422	5.8122	6.9077	7.9616	9.3122	10.3090	11.1521	11.9122	12.6243	13.3096	13.9827	14.6555	15.3385	16.0425	16.7795
17	5.6972	6.4078	7.5642	8.6718	10.0852	11.1249	12.0023	12.7919	13.5307	14.2407	14.9373	15.6328	16.3382	17.0646	17.8244
18	6.2648	7.0149	8.2307	9.3905	10.6649	11.9463	12.8570	13.6753	14.4399	15.1738	15.8932	16.6108	17.3379	18.0860	18.8679
19	6.8440	7.6327	8.9065	10.1170	11.6509	12.7727	13.7158	14.5620	15.3517	16.1089	16.8504	17.5894	18.3377	19.1069	19.9102
20	7.4338	8.2604	9.5908	10.8508	12.4426	13.6039	14.5784	15.4518	16.2659	17.0458	17.8088	18.5687	19.3374	20.1272	20.9514
21	8.0337	8.8972	10.2829	11.5913	13.2396	14.4393	15.4446	16.3444	17.1823	17.9843	18.7683	19.5485	20.3372	21.1470	21.9915
22	8.6427	9.5425	10.9823	12.3380	14.0415	15.2788	16.3140	17.2396	18.1007	18.9243	19.7288	20.5288	21.3370	22.1663	23.0307
23	9.2604	10.1957	11.6886	13.0905	14.8460	16.1219	17.1865	18.1373	19.0211	19.8657	20.6902	21.5096	22.3369	23.1852	24.0689
24	9.8862	10.8564	12.4012	13.8484	15.6567	16.9686	18.0618	19.0373	19.9432	20.8084	21.6525	22.4908	23.3367	24.2037	25.1063
25	10.5197	11.5240	13.1197	14.6114	16.4734	17.8184	18.9398	19.9393	20.8670	21.7524	22.6156	23.4724	24.3366	25.2218	26.1430
26	11.1602	12.1931	13.8439	15.3792	17.2919	18.6714	19.8202	20.8434	21.7924	22.6975	23.5794	24.4544	25.3365	26.2395	27.1709
27	11.8076	12.8735	14.5734	16.1514	18.1139	19.5272	20.7030	21.7494	22.7192	23.6437	24.5440	25.4368	26.3363	27.2569	28.2141
28	12.4613	13.5647	15.3079	16.9279	18.9392	20.3857	21.5880	22.6572	23.6475	24.5909	25.5093	26.4195	27.3362	28.2740	29.2486
29	13.1211	14.2565	16.0471	17.7084	19.7677	21.2468	22.4751	23.5666	24.5770	25.5391	26.4751	27.4025	28.3361	29.2908	30.2825
30	13.7867	14.9535	16.7908	18.4927	20.5992	22.1103	23.3641	24.4776	25.5078	26.4881	27.4416	28.3858	29.3360	30.3073	31.3159
100	67.3276	70.0649	74.2219	77.9295	82.3581	85.4406	87.9453	90.1332	92.1289	94.0046	95.8078	97.5744	99.3341	101.1149	102.9459
120	83.8516	86.9233	91.5726	95.7046	100.6236	104.0374	106.8056	109.2197	111.4186	113.4825	115.4645	117.4041	119.3340	121.2850	123.2890
140	100.6548	104.0344	109.1369	113.6593	119.0293	122.7476	125.7581	128.3800	130.7657	133.0027	135.1490	137.2475	139.3339	141.4413	143.6043
160	117.6793	121.3456	126.8700	131.7561	137.5457	141.5475	144.7834	147.5988	150.1582	152.5564	154.8555	157.1019	159.3338	161.5868	163.8977
180	134.8844	138.8204	144.7413	149.9688	156.1526	160.4206	163.8682	166.8653	169.5879	172.1373	174.5799	176.9652	179.3338	181.7234	184.1732
200	152.2410	156.4320	162.7280	168.2786	174.8353	179.3550	183.0028	186.1717	189.0486	191.7409	194.3193	196.8359	199.3337	201.8526	204.4337
240	187.3243	191.9899	198.9839	205.1354	212.3856	217.3736	221.3936	224.8819	228.0458	231.0041	233.8348	236.5955	239.3337	242.0928	244.9181

(註) νは自由度、αは確率を示す。

8. まとめ

- 1核子吸収のイベントをTOFでなるべく取り除くことで、綺麗な多核子吸収のデータが得られた。
- カロリメータでのprotonの運動量thresholdは $p > 240 \text{ MeV}/c$ 。 pion productionでできるprotonの運動量よりも大きい。これでも残った1核子吸収はsys errorに含めた。
- QFとFSIも切り分けてfitできた。
- Total BRは過去のデータ (bubble chamber) とともコンシステントだった。
- Phase space的には2NA-QFにおいて終状態は Σp よりも Λp の方が好まれる($R'=1.22$)が、実際に測定された $R=0.7$ からするに、実際は終状態は $\Sigma p > \Lambda p$ と考えることができる。これは $\Lambda(1405)$ が中間状態として存在していて、別の中間状態 $\Sigma(1385)$ よりも支配的であることを示唆する。
- K^-pp bound stateが Λp 生成への寄与を調べた。
- 2NA-QFは K^-pp とごくわずかなものを除いて、完全に重なることがわかった。??