



Изучение процесса $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ вблизи порога с образованием 1S_0 протонных пар в поляризационном эксперименте на установке ANKE-COSY

В.В. Шмакова

Дубна, 3 февраля 2017

Содержание

- Постановка задачи
- Установка
- Эксперимент с поляризованным протонным пучком, $pd \rightarrow \{pp\}_s \pi^- p_{\text{spec}}$
 $d\sigma/d\Omega, A_y$ для $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$
- Эксперимент с двойной поляризацией, $dp \rightarrow \{pp\}_s \pi^- p_{\text{spec}}$
 $d\sigma/d\Omega, A_y, A_{x,x}$ для $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$
 $A_{x,x'}, A_{y,y}$ для $pn \rightarrow d\pi^0$
- Результаты
- Заключение

Киральная теория

- ✂ Киральная теория – эффективная теория КХД
- ✂ Руководящий принцип – спонтанно нарушенная киральная симметрия
  разложение по теории возмущений
- ✂ Эффективные степени свободы: пионы, нуклоны
- ✂ Малый параметр разложения: Q/Λ_χ , $Q \sim m_\pi$, $\Lambda_\chi \sim 1$ ГэВ
- ✂ Структура операторов взаимодействия диктуется киральной симметрией, сила взаимодействия определяется параметрами теории
их необходимо извлекать из экспериментальных данных
- ✂ Константа d определяет силу контактного члена $(NN)\pi\pi$
переход NN пары: ${}^3S_1 \leftrightarrow {}^1S_1$, p -волновой $\pi\pi$
- ✂ Одинакова для $NN \rightarrow NN\pi$, $\mu d \rightarrow nn\nu$, $pp \rightarrow de\nu$, ...
- ✂ d с большой ошибкой для распада ${}^3\text{H}$, ожидается MuSan \rightarrow
проверка самосогласованности теоретического подхода
- ✂ Чистый доступ к константе d в процессе $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ вблизи порога

Разложение по спиновым амплитудам

✂ Два протона в конечном состоянии преимущественно находятся в 1S_0 состоянии.

✂ Спиновая структура $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-: \frac{1}{2}^+ \frac{1}{2}^+ \rightarrow 0^+ 0^-$

✂ Только 2 спиновые амплитуды

$$\mathcal{M} = S \cdot (A\hat{p} + B\hat{k})$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \frac{k}{4p} (|A|^2 + |B|^2 + 2\text{Re}[AB^*] \cos \theta_\pi),$$

$$A_y^P \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \frac{k}{4p} (2\text{Im}[AB^*] \sin \theta_\pi),$$

$$A_{x,x} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \frac{k}{4p} (|A|^2 + |B|^2 \cos 2\theta_\pi + 2\text{Re}[AB^*] \cos \theta_\pi),$$

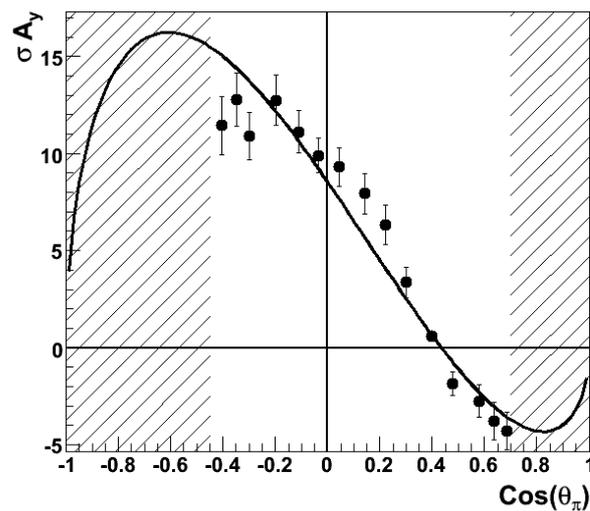
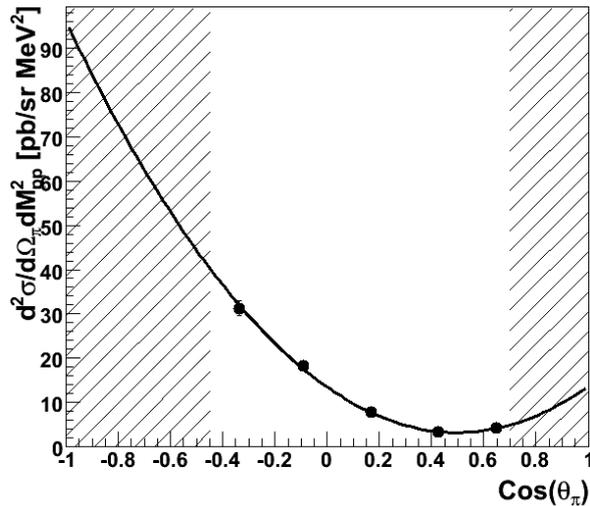
$$A_{x,z} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = -\frac{k}{4p} (2|B|^2 \sin \theta_\pi \cos \theta_\pi + 2\text{Re}[AB^*] \sin \theta_\pi),$$

$$A_y^Q = A_y^P, A_{y,y} = 1, A_{z,z} = A_{x,x}, A_{z,x} = A_{x,z}.$$

[Uzikov, Y.N. Phys. Atom. Nuclei \(2014\) 77: 646.](#)

✂ Цель работы – получить данные для парциально-волнового анализа и выделения р-волновых амплитуд

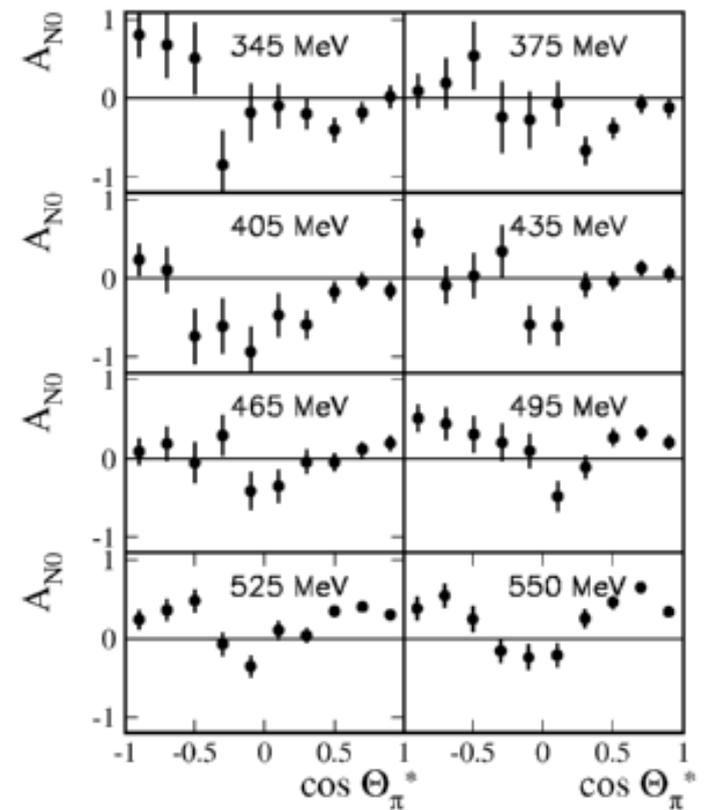
Существующие данные для $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$



TRIUMF при **353 МэВ** ($E_{pp} < 1,5$ МэВ)

H. Hahn et al., Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2258,

F. Duncan et al., Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 4390



PSI ($E_{pp} < 6$ МэВ)

M. Daum et al., Eur. Phys. J. C 25 (2002) 55

Цель эксперимента:

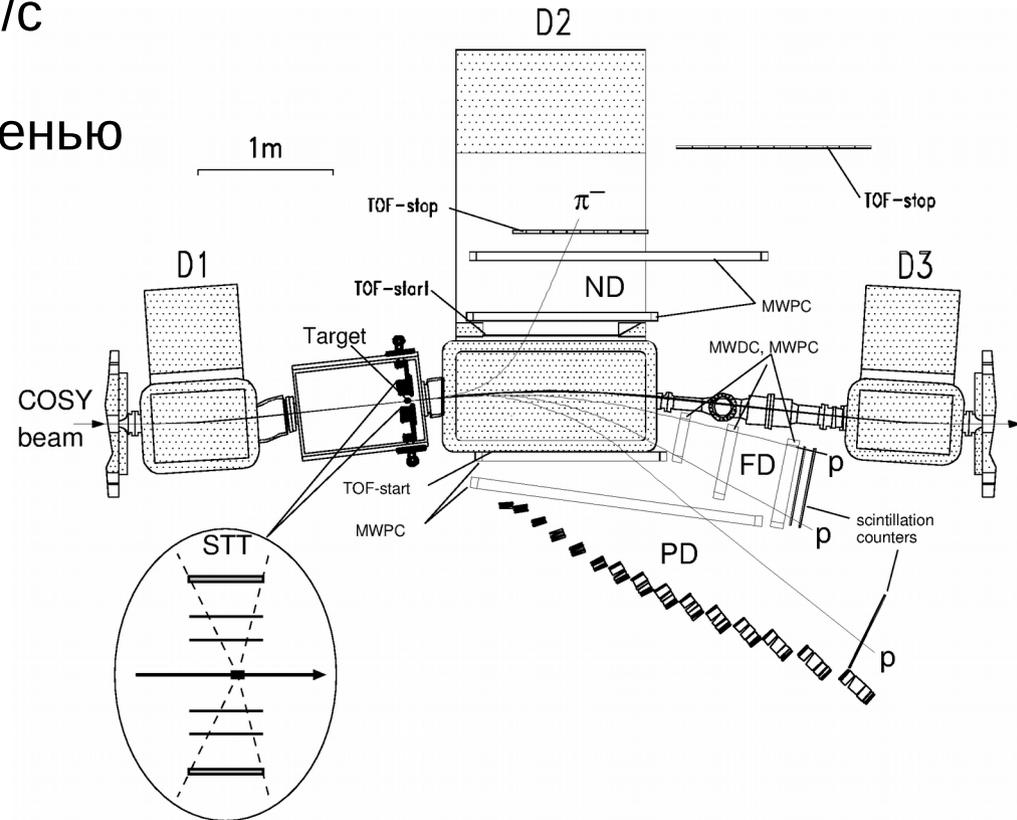
$d\sigma/d\Omega, A_y, A_{x,x}$

Постановка эксперимента: ANKE@COSY

Ускоритель COSY (Юлих, Германия):
пучки **поляризованных протонов** и **дейтронов**
в импульсных пределах 600-3700 МэВ/с

Спектрометр ANKE с внутренней мишенью
позволяет регистрировать:

- Быстрые положительно и отрицательно заряженные частицы вылетающие вперед в переднем детекторе, детекторах положительных частиц и отрицательных частиц (FD, PD, ND)
- Медленные положительно заряженные частицы в вершинном детекторе (STT)



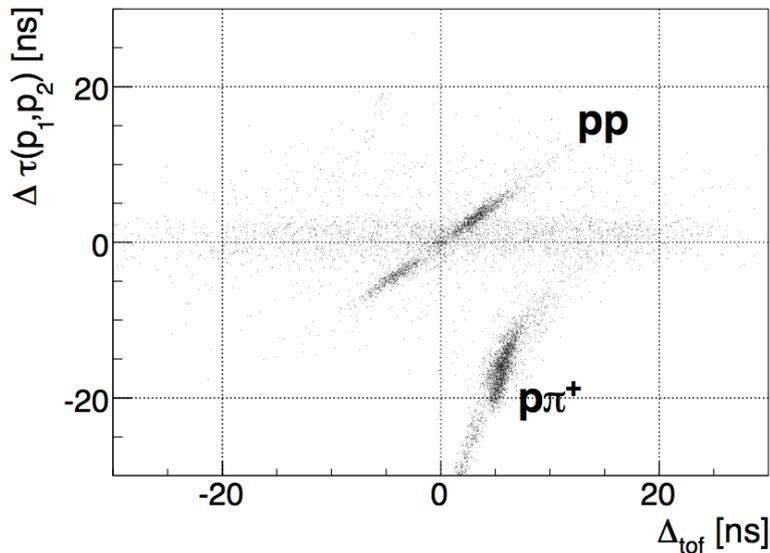
Мишени:

- Кластерная дейтериевая мишень
- Внутренняя поляризованная (H) мишень с накопительной ячейкой

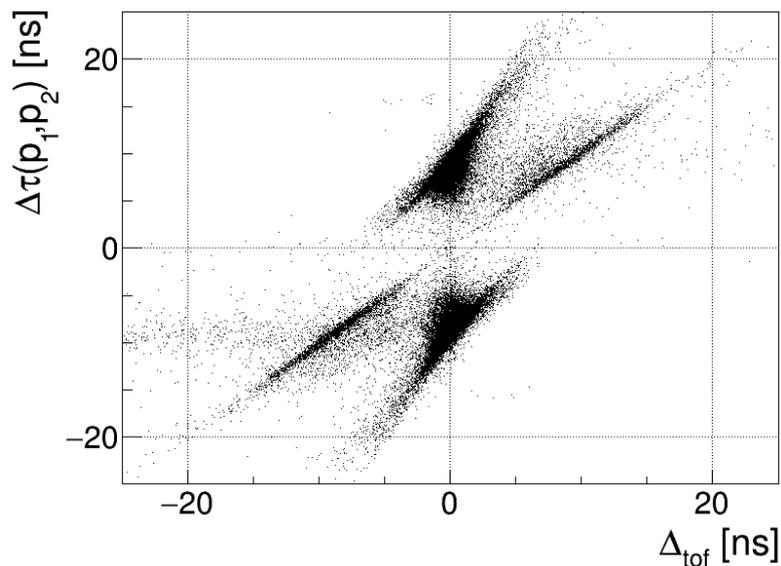
Методы идентификации частиц

Идентификация частиц по разности времён пролёта

Два протона в детекторе PD:

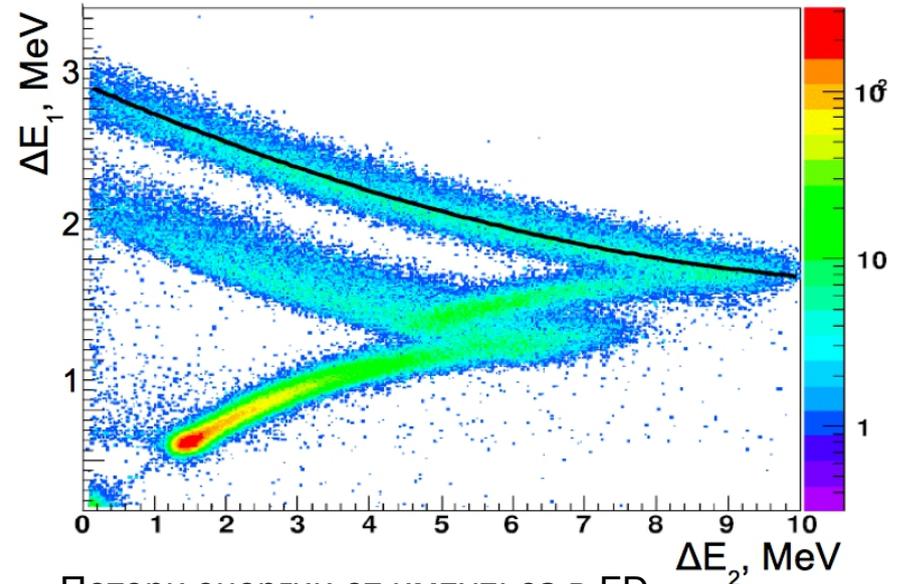


Протон и дейтрон в FD:

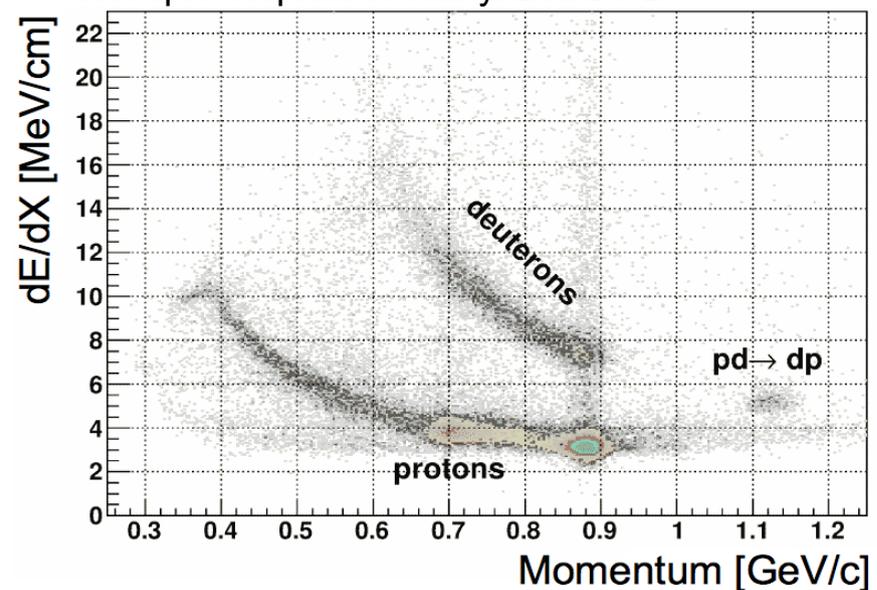


Идентификация частиц в STT

Потери энергии в первом и втором слоях детектора STT:



Потери энергии от импульса в FD



Эксперимент: $d\sigma/d\Omega, A_y^p$ для $\vec{p}d \rightarrow \{pp\}_s \pi^- + p_{\text{спец}}$

Поляризованный протонный пучок: $P_y = 65\%$

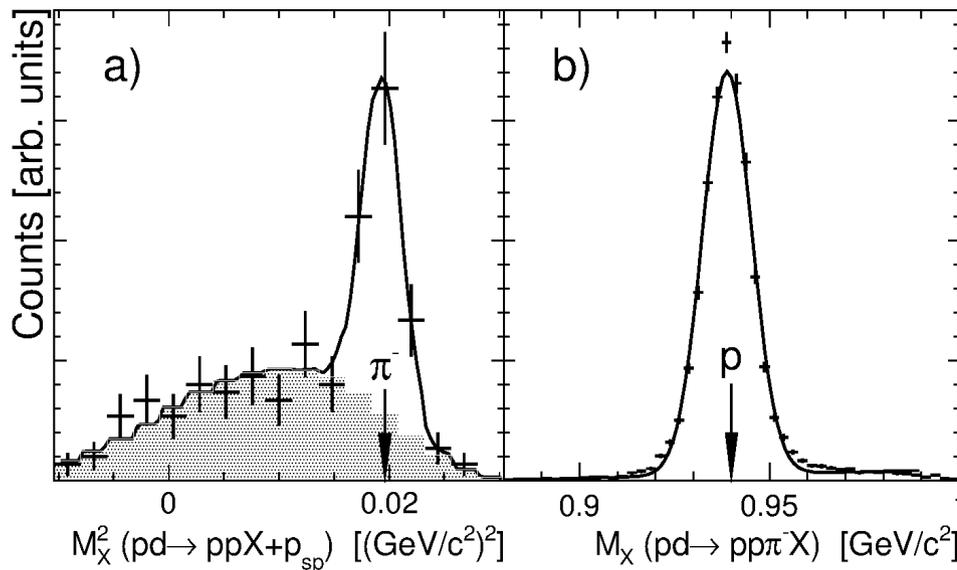
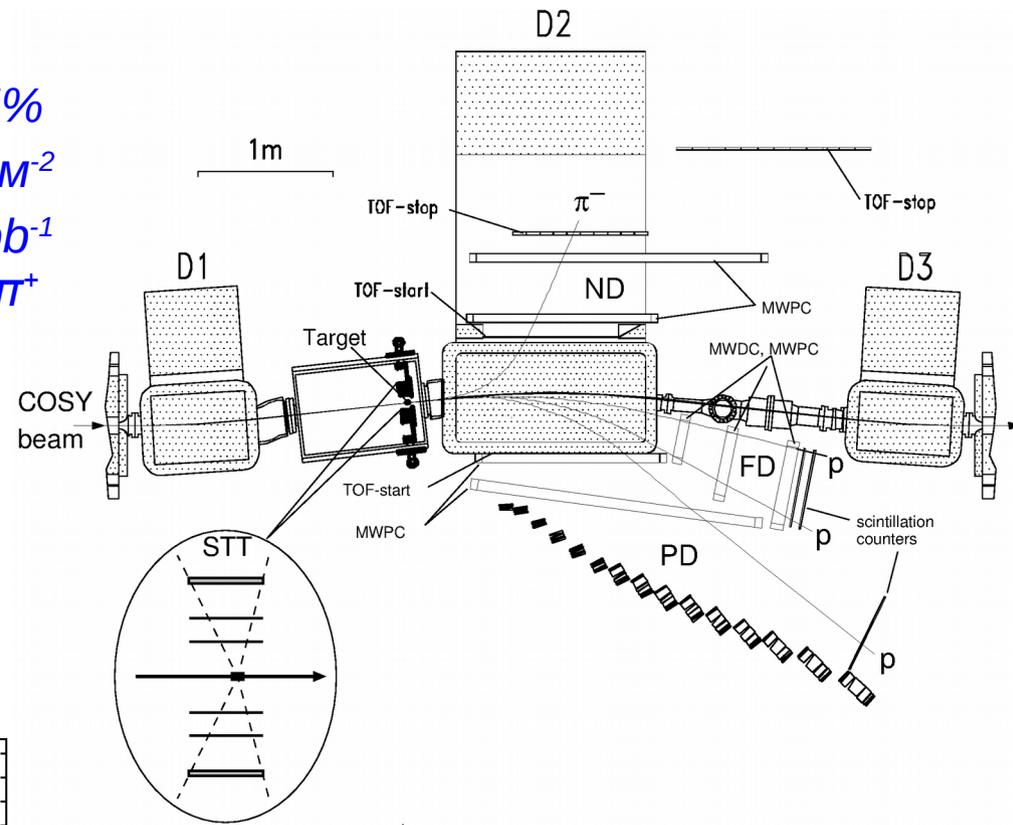
D_2 кластерная мишень: $d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^2$

Интегральная светимость: $L = 1.5 \text{ pb}^{-1}$

Поляриметрия, нормировка: $pp \rightarrow d\pi^+$

Регистрировались частицы:

$\{pp\} + p_{\text{спец}}$ или π^-

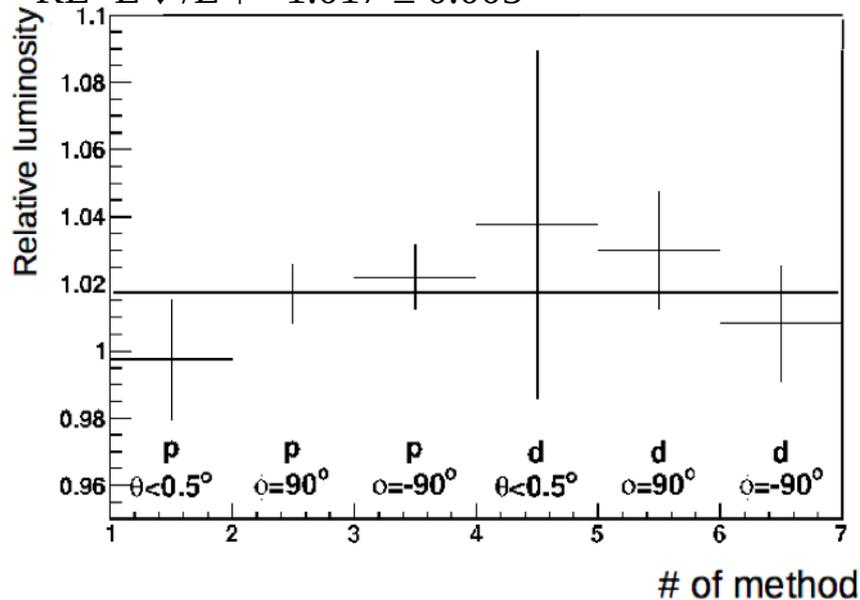


- Спектаторный протон останавливается в STT L2, идентификация по dE/dX
- Протонная пара и π^- идентифицируются по **разнице во времени пролета**
- Квазисвободная кинематика: $T_{\text{сп}} < 6 \text{ MeV}$

Светимость, поляризация по $\vec{p}n \rightarrow d\pi^0$

Относительная светимость, определённая для каждой группы нормировочных событий.

$$RL = L_{\downarrow} / L_{\uparrow} = 1.017 \pm 0.005$$



$$d\sigma/d\Omega(pn \rightarrow d\pi^0) = 1/2 d\sigma/d\Omega(pp \rightarrow d\pi^+)$$

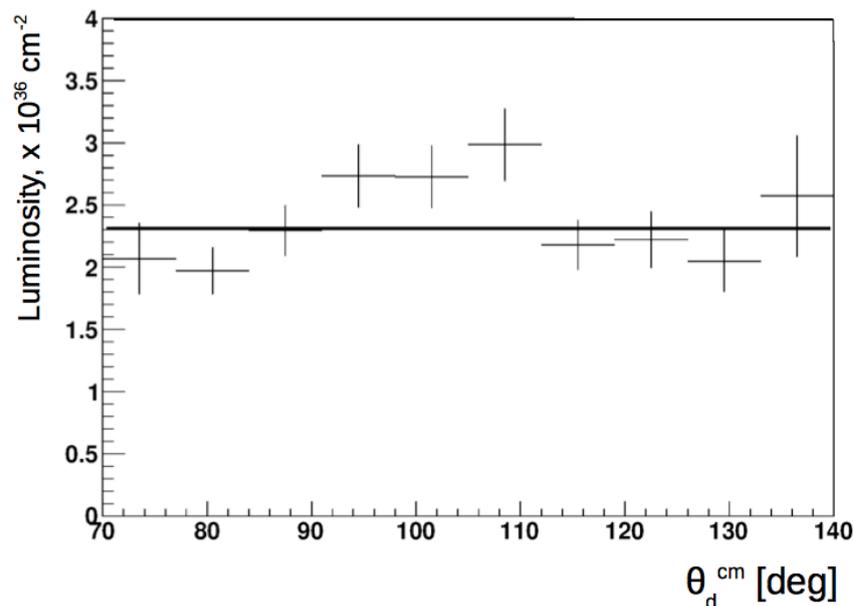
$$A_y(pn \rightarrow d\pi^0) = A_y(pp \rightarrow d\pi^+)$$

Фазовый анализ SAID

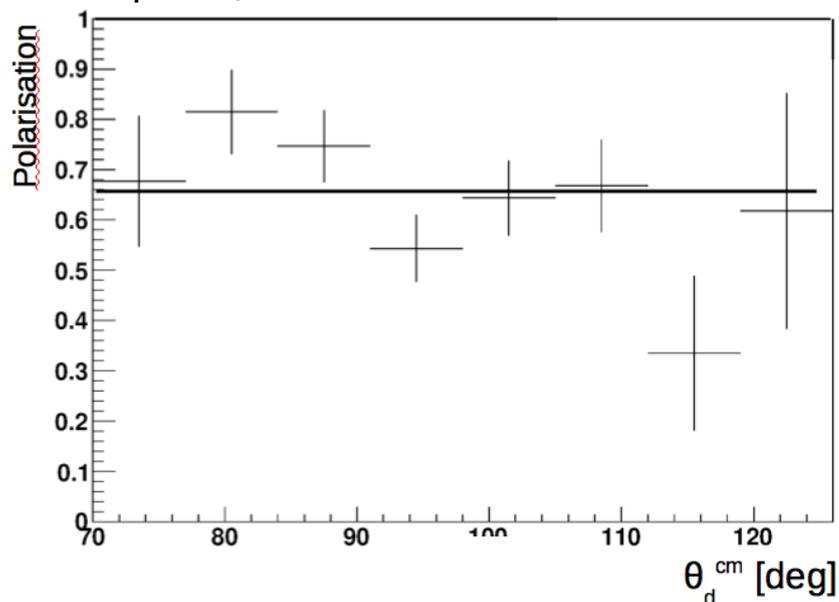
<http://gwdac.phys.gwu.edu>

Интегральная светимость

$$L = (2312 \pm 110) \text{nb}^{-1}$$



Поляризация $P = 0.66 \pm 0.06$

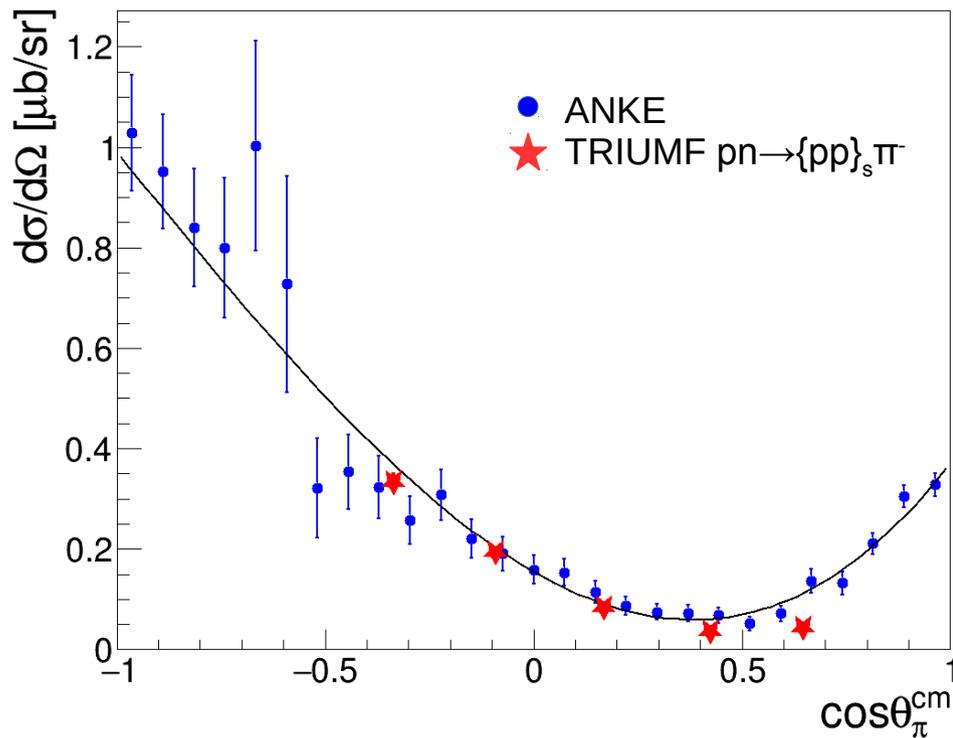


$$P = \frac{\xi}{A_y^p \cdot \langle \cos\phi \rangle}$$

$$\text{где } \xi = \frac{N_{\uparrow} \cdot RL - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} \cdot RL + N_{\downarrow}} \quad \text{—}$$

наблюдаемая асимметрия

Результаты: $d\sigma/d\Omega$ и A_y для $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$



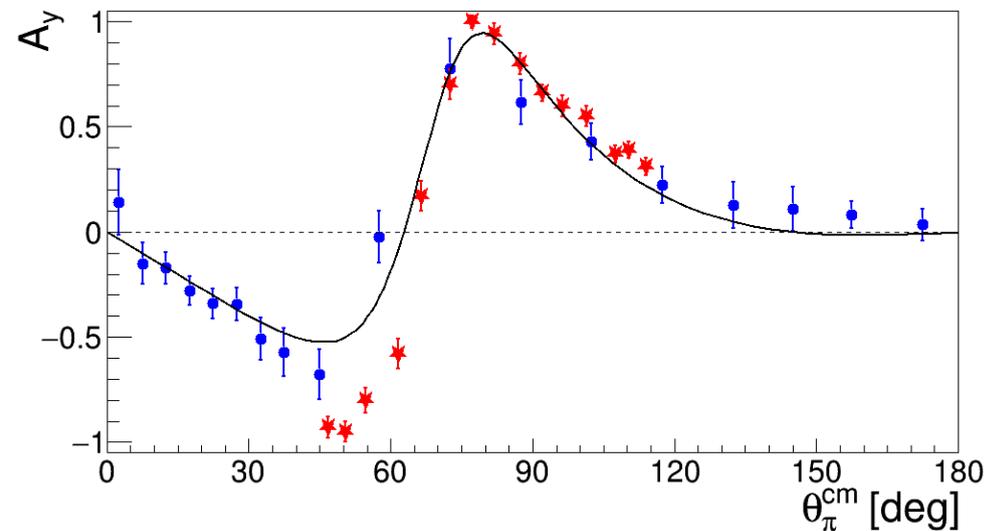
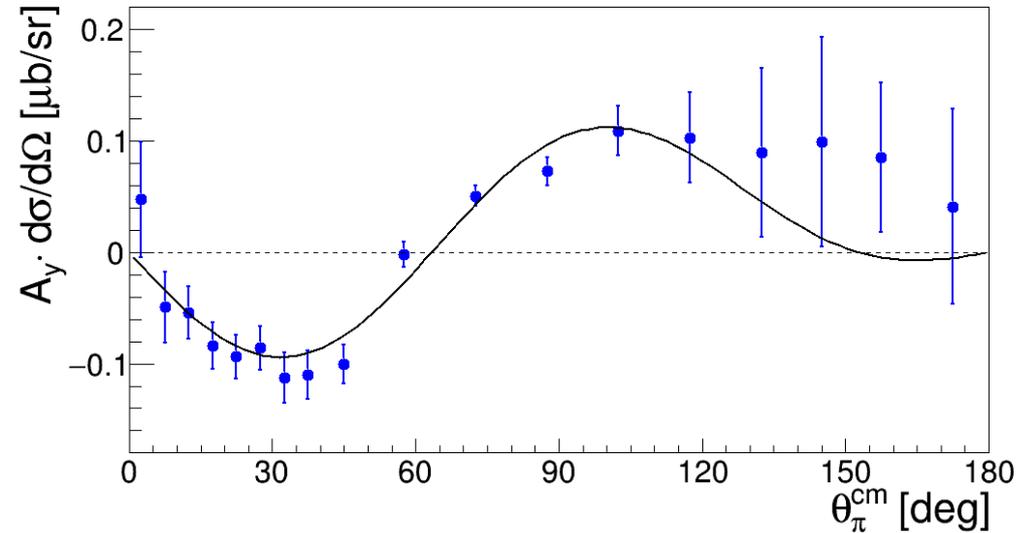
данные с TRIUMF:

H. Hahn et al., Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2258,

F. Duncan et al., Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 4390

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \frac{k}{4p} \sum_{n=0} a_n \cos^n \theta_\pi,$$

$$A_y \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \frac{k}{4p} \sin \theta_\pi \sum_{n=0} b_{n+1} \cos^n \theta_\pi$$



S.Dymov, V. Shmakova et al., Phys. Lett. B 712, 375 (2012)

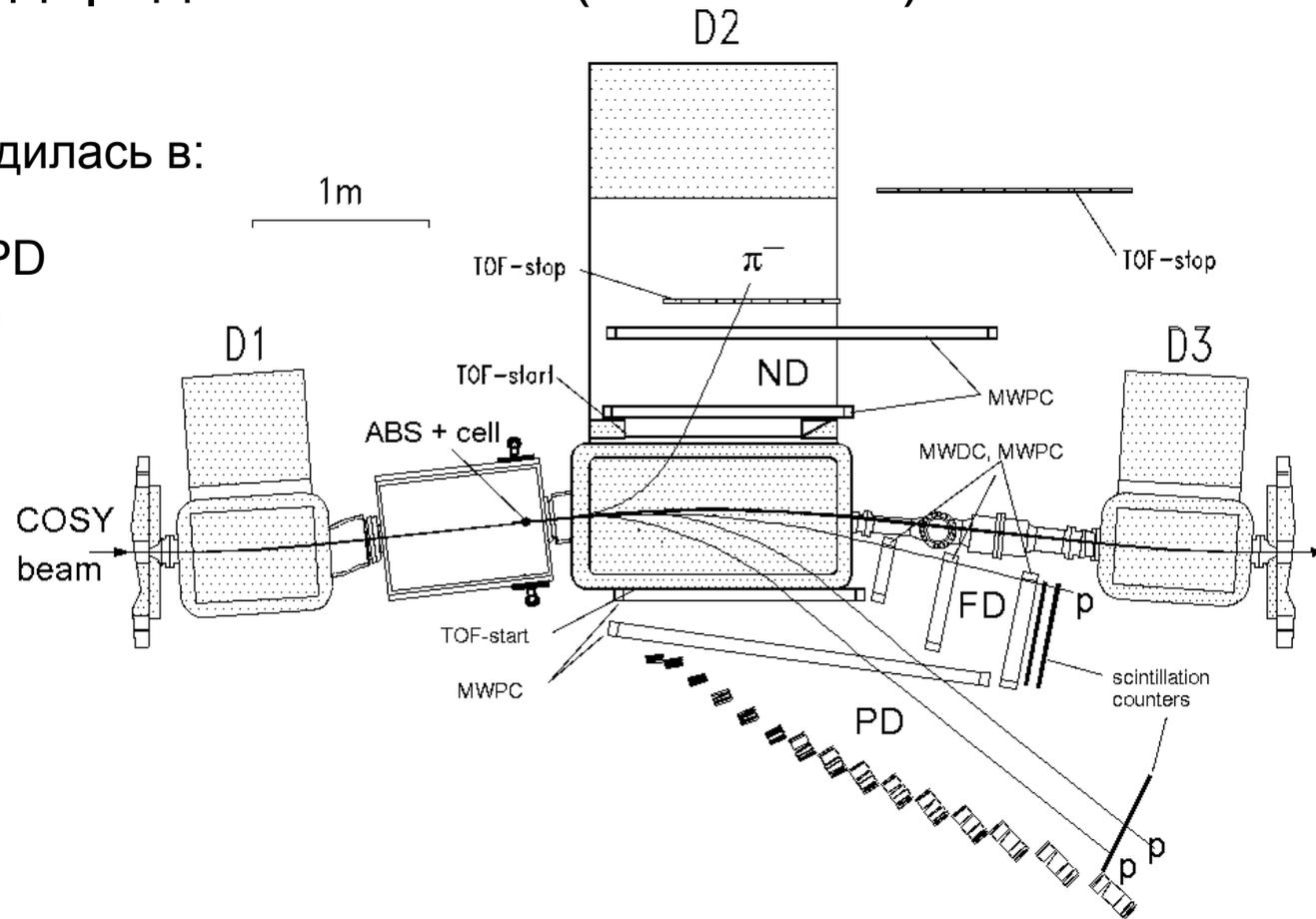
Измерения: $A_{x,x}$ и $A_{y,y}$ для $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$

Пучок поляризованных дейтронов ($P=50-60\%$)
 + поляризованная водородная мишень ($Q=70-80\%$)

Регистрация частиц производилась в:

- $\{pp\}_s$ регистрировалась в PD
- Спектаторный протон в FD
- В нормировочной реакции $np \rightarrow d\pi^0$ d, p в FD

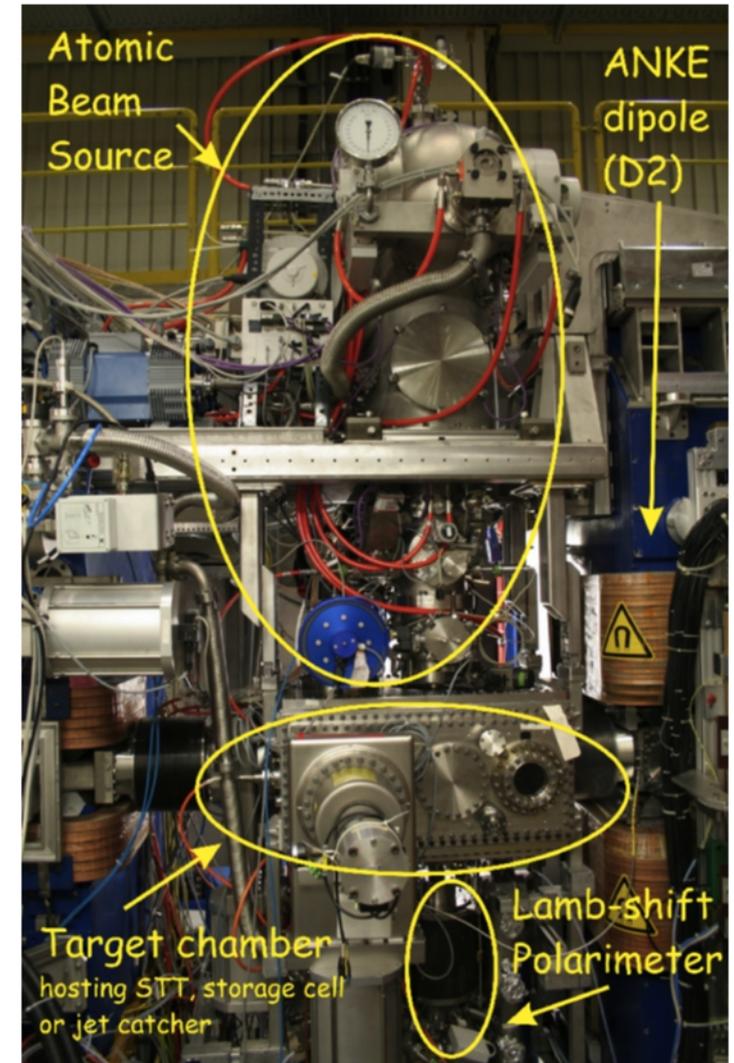
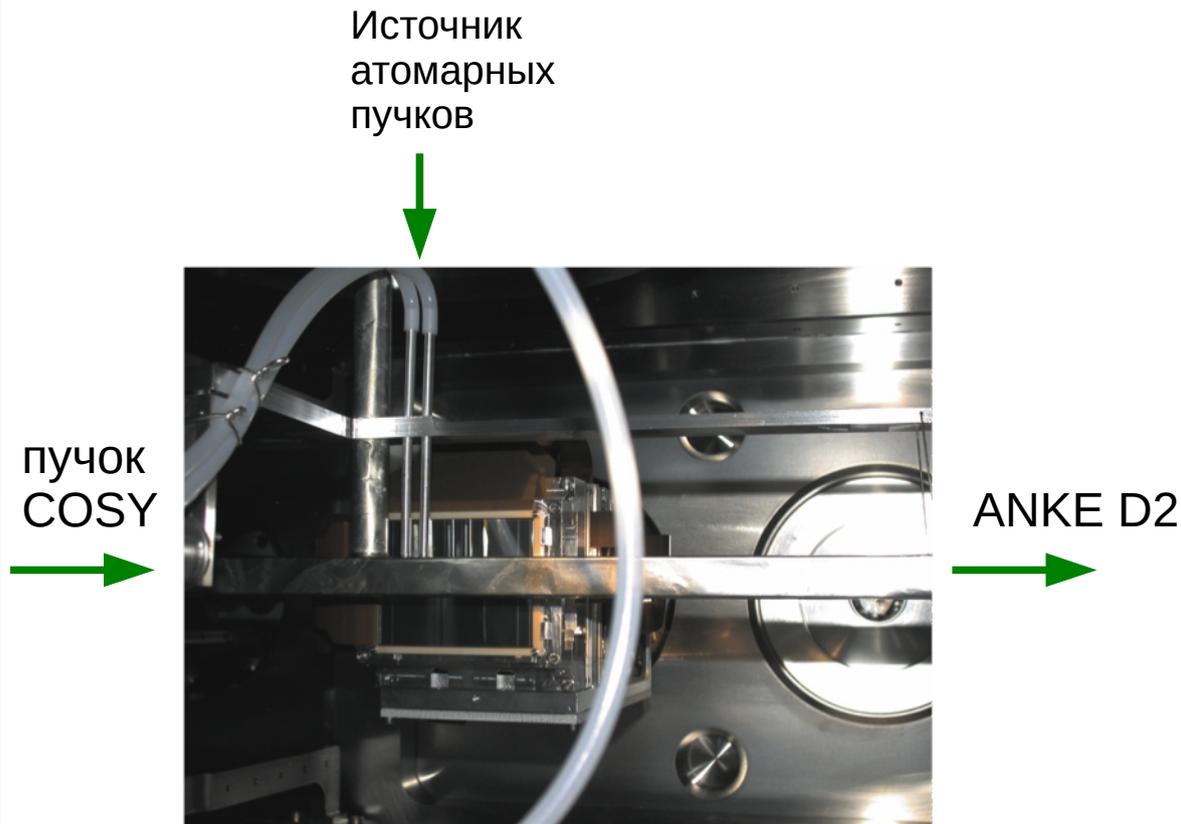
- $E_{pp} < 3$ МэВ
- $T_{\text{spec}} < 6$ МэВ



Поляризованная мишень

Источник атомарных пучков, накопительная ячейка

- Плотность мишени с ячейкой $d_t = 1.34 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$
- Материал ячейки: 25 мкм Al + 5 мкм тефлона
- был главным источником фона

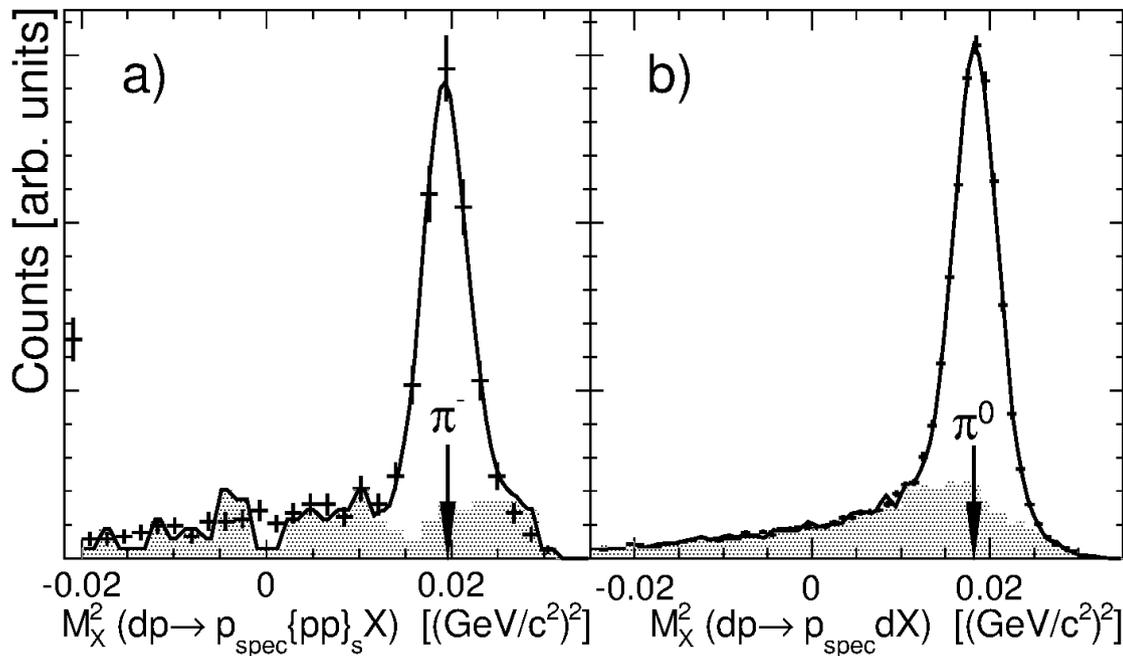


Измерения: $\vec{d}p \rightarrow p_{sp}\{pp\}_s\pi^-$

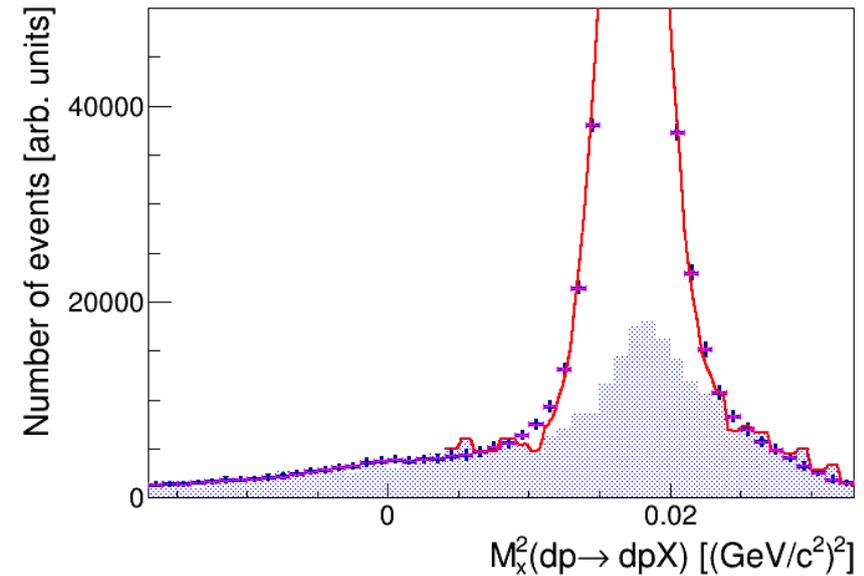
- Идентификация частиц
- проводилась **по времени пролета**
- Процессы идентифицировались **по недостающей массе**
- Форма фона получена из измерений с N_2

$$dp \rightarrow p_{sp}\{pp\}_s\pi^-$$

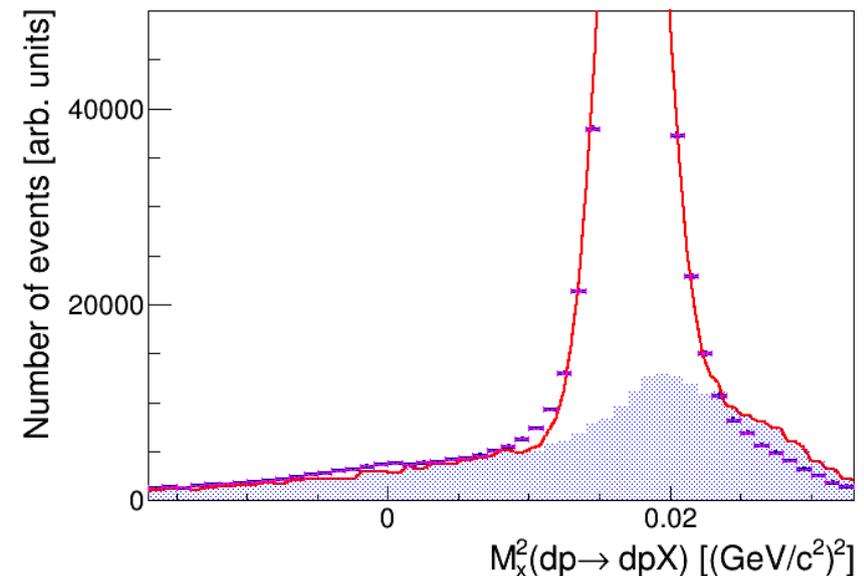
$$dp \rightarrow d\pi^0 + p_{sp}$$



Фон от пустой ячейки

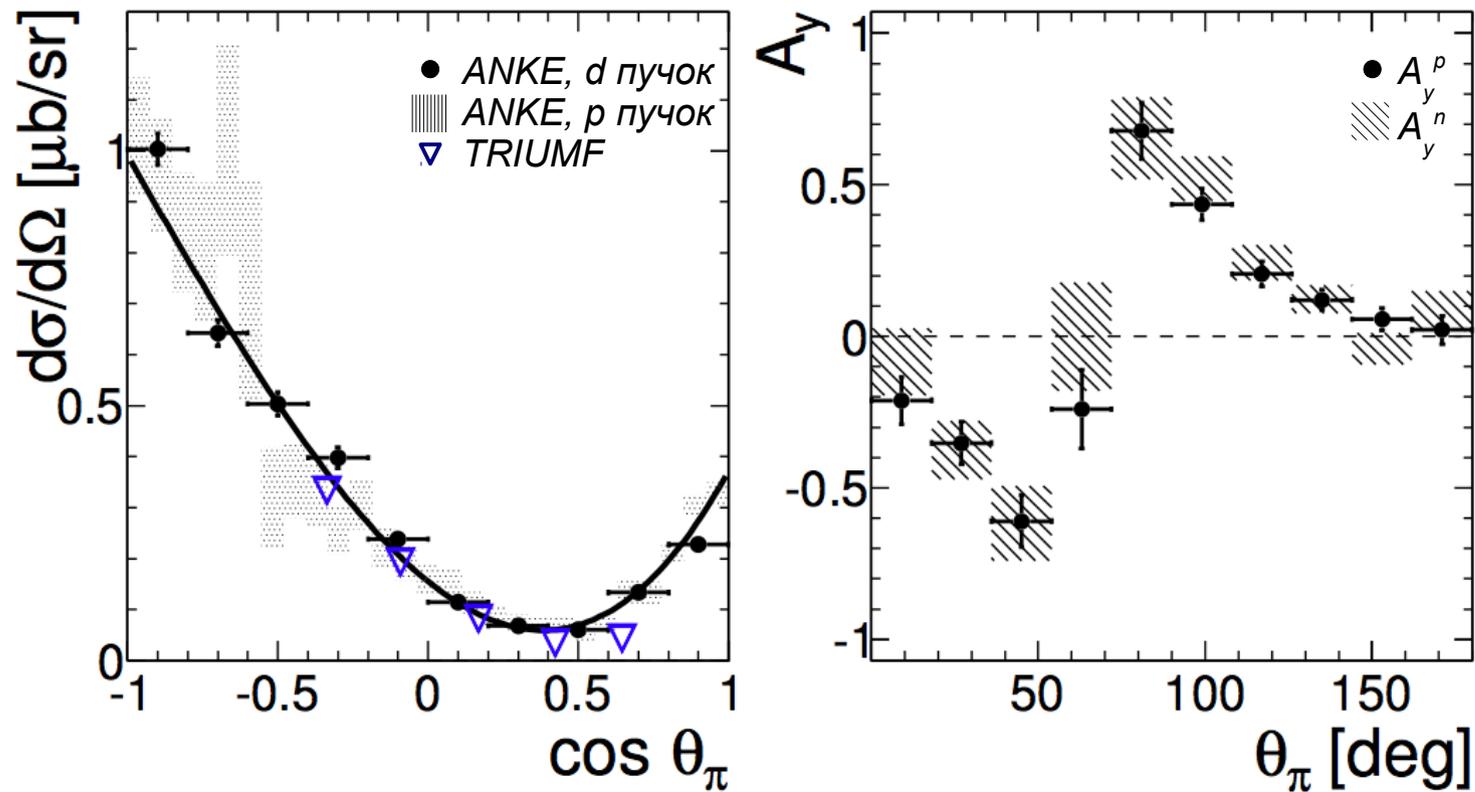


Фон из азотной мишени



Результаты: $d\sigma/d\Omega$, A_y $n\bar{p} \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$

✦ Полученные A_y и форма сечения процесса согласуются с данными, полученными в эксперименте с одиночной поляризацией!

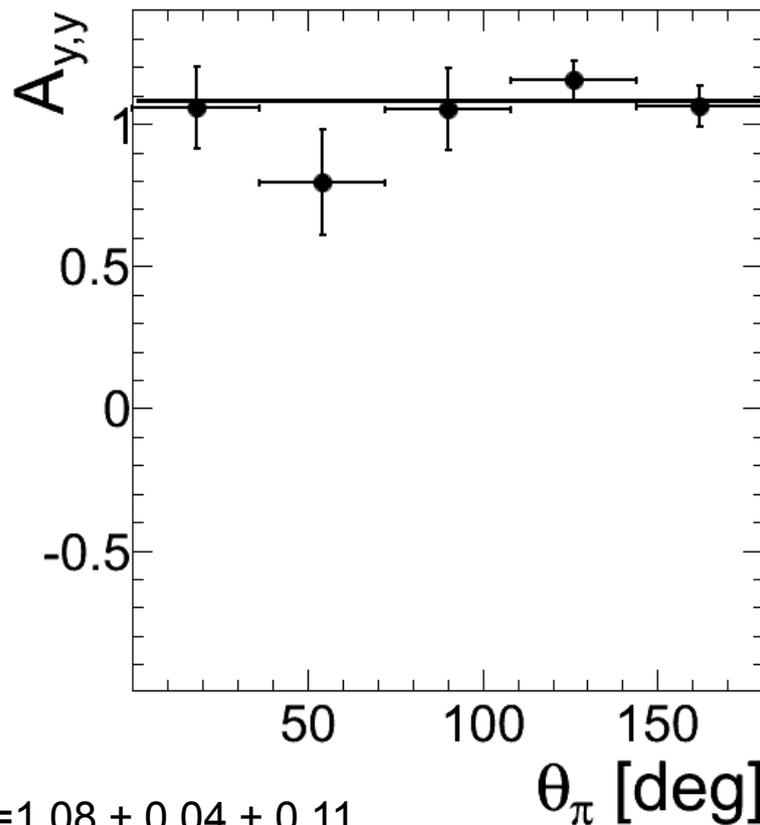


S. Dymov, V. Shmakova et al., PRC 88, 014001 (2013)

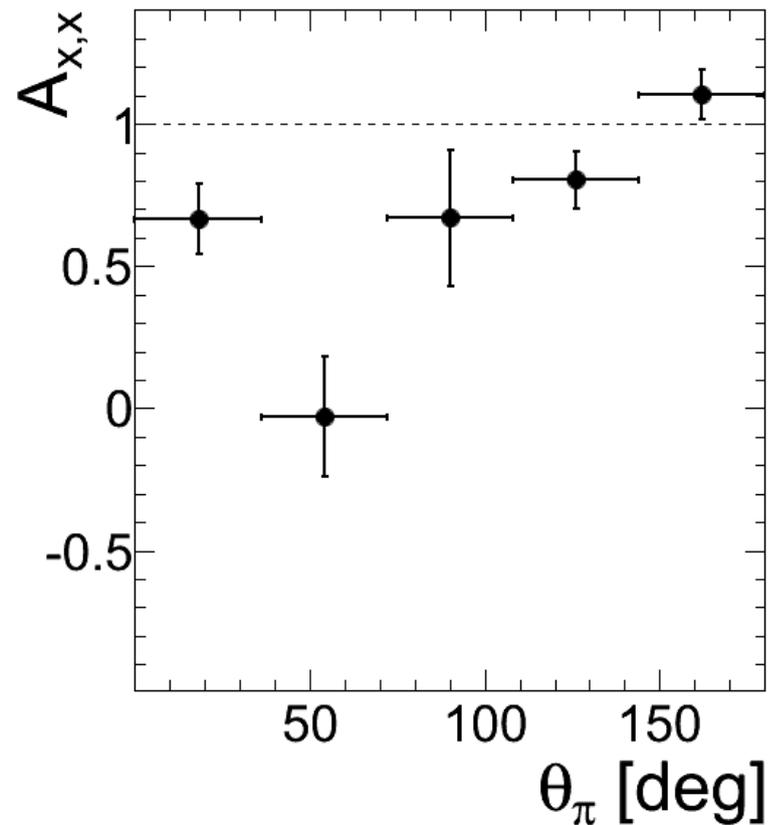
Результаты: $A_{x,x}$ и $A_{y,y}$

$$\Sigma_1 = N_{\uparrow\uparrow} + N_{\downarrow\downarrow}, \quad \Sigma_2 = N_{\uparrow\downarrow} + N_{\downarrow\uparrow}$$

$$\xi = \frac{\Sigma_1 - \Sigma_2}{\Sigma_1 + \Sigma_2} = PQ(A_{x,x} \sin^2 \phi_\pi + A_{y,y} \cos^2 \phi_\pi)$$



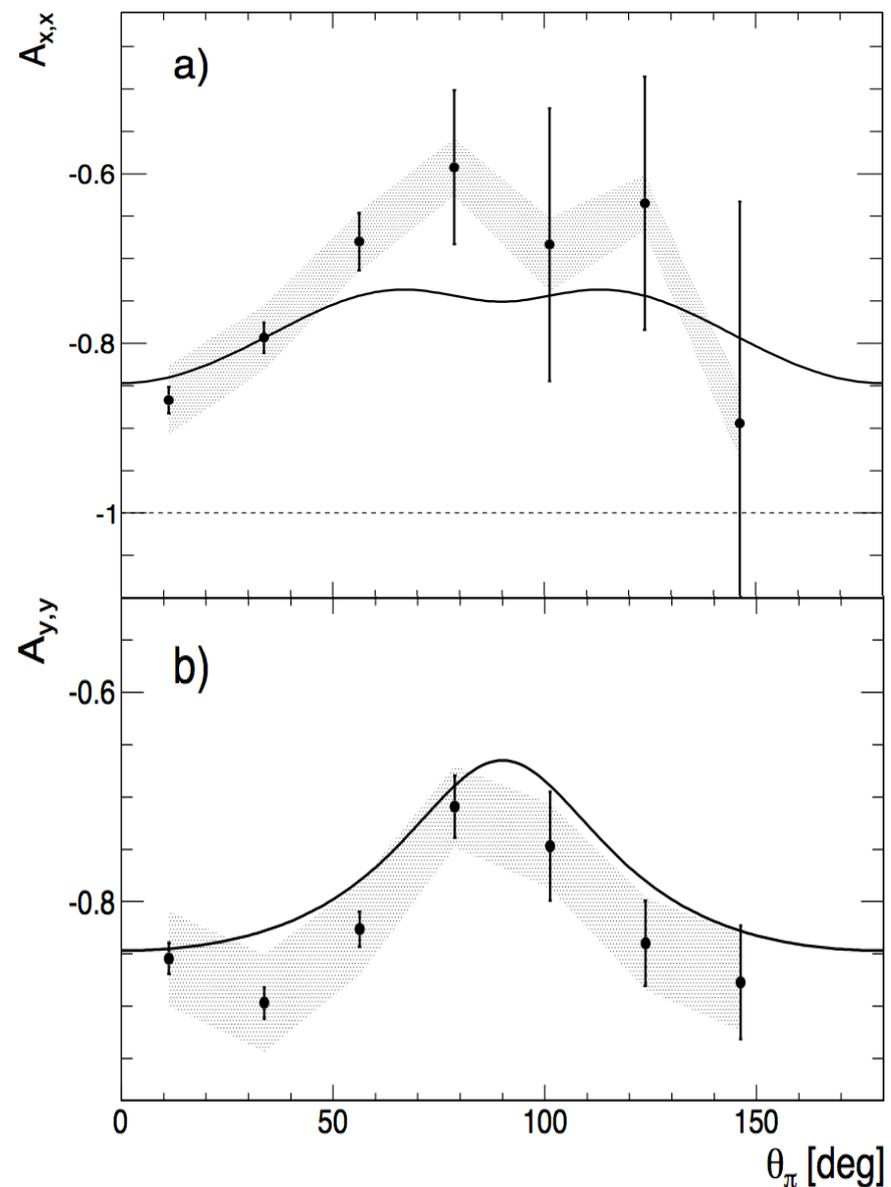
$$A_{y,y} = 1,08 \pm 0,04 \pm 0,11$$



S. Dymov, V. Shmakova et al., PRC 88, 014001 (2013)

Дополнительные результаты: $A_{x,x}$ и $A_{y,y}$ для $np \rightarrow d\pi^0$

- d и p_{sp} регистрировались в Fd
- Идентификация частиц по разнице времен пролета
- $T_{spec} < 6$ МэВ
- Идентификация процесса $dp \rightarrow dp_{sp} X$ по недостающей массе $M_x(dp)$



V. Shmakova et al., PLB 726 (2013) 637

Парциально-волновой анализ данных

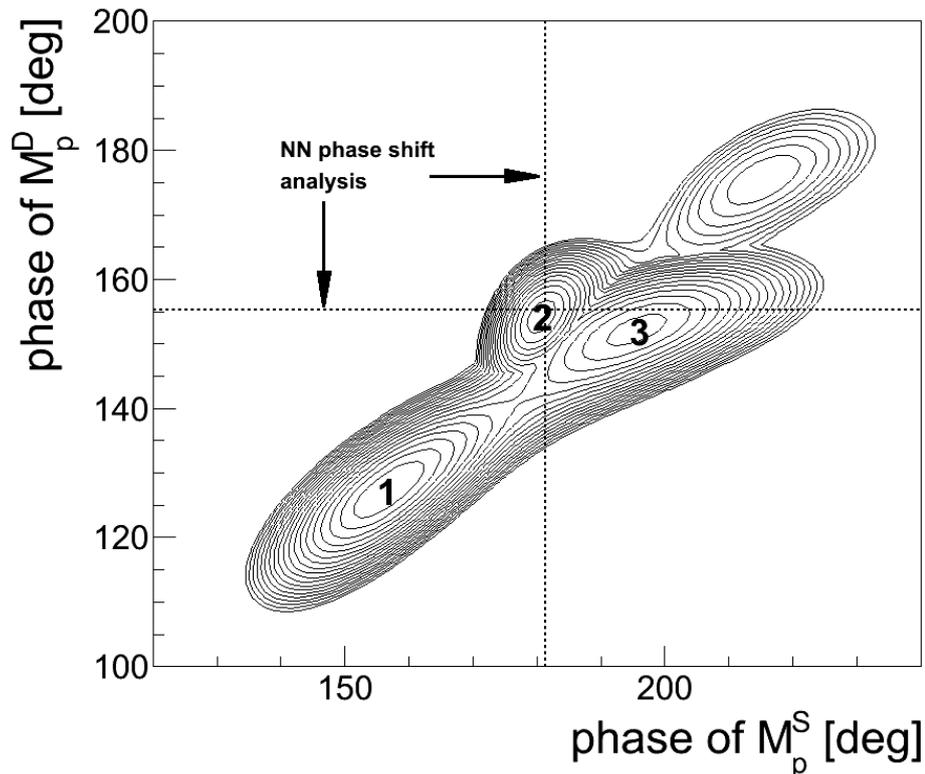
$I=1$ $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0 s$ $({}^3P_2 - {}^3F_2) \rightarrow {}^1S_0 d$: M_s^P, M_d^P, M_d^F
 $I=0, 1$ $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^- + ({}^3S_1 - {}^3D_1) \rightarrow {}^1S_0 p$: M_p^S, M_p^D

$d\sigma/d\Omega, A_y$ и $A_{x,x}$ для $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$

$d\sigma/d\Omega, A_y$ для $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$

(D. Tsirkov et al., Phys. Lett. B 712, 370 (2012))

$$\chi^2 = \delta_i M^{-1}_{ij} \delta_j$$



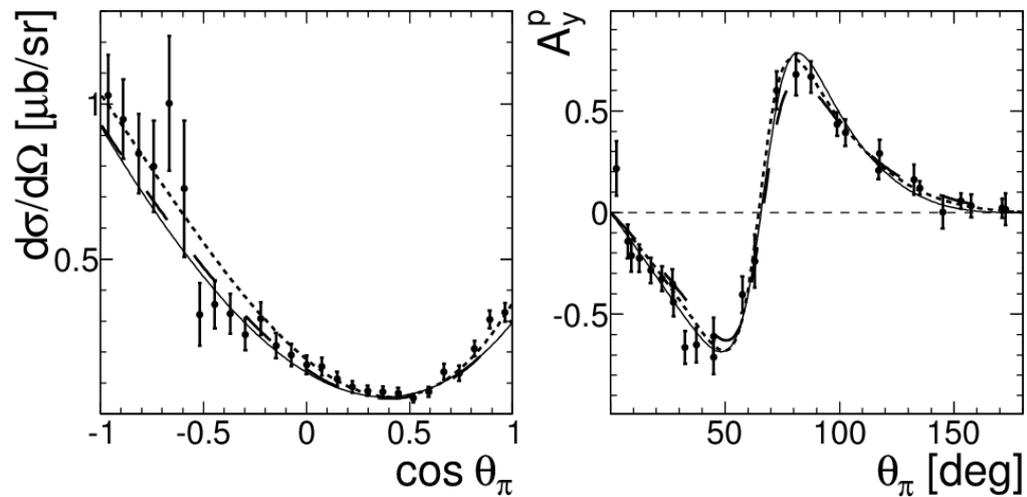
Amplitude	Real	Imaginary	Im/Re
Solution 1: $\chi^2/ndf = 101/82$			
M_s^P	53.4 ± 1.0	-14.1 ± 0.3	
M_d^P	-25.9 ± 1.4	-8.4 ± 0.4	
M_d^F	-1.5 ± 2.3	0.0 ± 0.0	
M_p^S	-37.5 ± 1.7	16.5 ± 1.9	-0.44 ± 0.06
M_p^D	-93.1 ± 6.5	122.7 ± 4.4	-1.32 ± 0.11

Solution 2: $\chi^2/ndf = 103/82$			
M_s^P	52.7 ± 1.0	-13.9 ± 0.3	
M_d^P	-28.9 ± 1.6	-9.4 ± 0.5	
M_d^F	3.4 ± 2.6	0.0 ± 0.0	
M_p^S	-63.7 ± 2.5	-1.3 ± 1.6	0.02 ± 0.03
M_p^D	-109.9 ± 4.2	52.9 ± 3.2	-0.48 ± 0.03

Solution 3: $\chi^2/ndf = 106/82$			
M_s^P	50.9 ± 1.1	-13.4 ± 0.3	
M_d^P	-26.3 ± 1.5	-8.5 ± 0.5	
M_d^F	2.0 ± 2.5	0.0 ± 0.0	
M_p^S	-25.4 ± 1.9	-7.3 ± 1.5	0.20 ± 0.07
M_p^D	-172.2 ± 5.6	92.0 ± 6.2	-0.53 ± 0.04

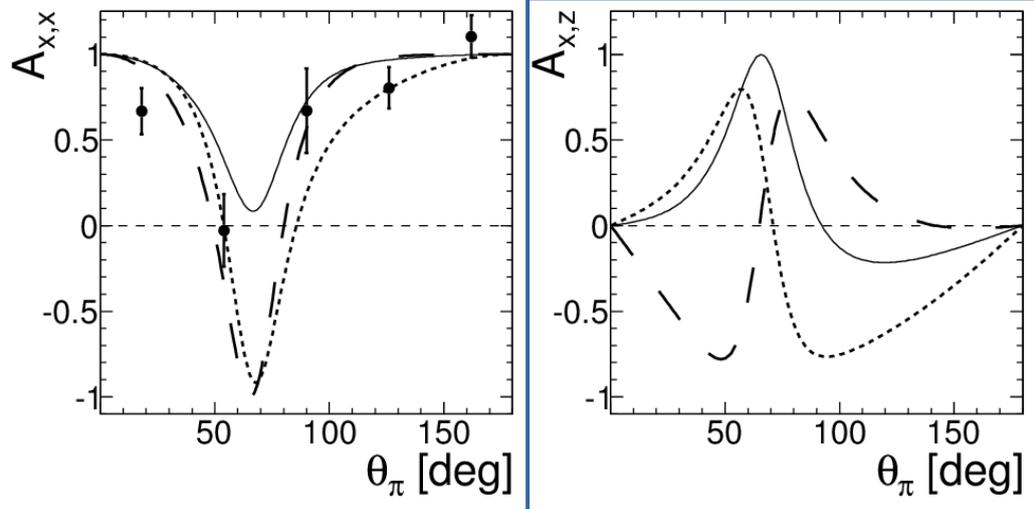
Парциально-волновой анализ данных

Наблюдаемые для $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$



Решения

- 1 —————
- 2 - - - - -
- 3 ·······



Измерение $A_{x,z}$ для $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^- \Rightarrow$ выбор среди трех решений

Практическая ценность работы

- Получение экспериментальных данных, необходимых для теоретического анализа в рамках КПТ с целью определения контактного d-члена
- Результаты анализа показали необходимость измерения $A_{x,z}$ и соответствующее предложение эксперимента было выдвинуто на COSY
- Результаты фазового анализа могут применяться в описании процесса $pd \rightarrow \{pp\}_s n$ с большой передачей импульса при 353 МэВ
- Разработанная методика измерений с накопительной ячейкой может применяться для получения других результатов
 - $dp \rightarrow \{pp\}_s n$ *S. Dymov et al., Phys. Lett. B 744, 391 (2015)*
 - $dp \rightarrow {}^3\text{He} \pi^0$ *S. Dymov et al., Phys. Lett. B 762, 102 (2016)*

Заключение

- Измерены дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ и протонная анализирующая способность A_y для процесса $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$
- Сечение $d\sigma/d\Omega$ и протонная A_y^p и нейтронная A_y^n анализирующие способности определены для процесса $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$
- Измерены спиновые корреляционные коэффициенты $A_{x,x}$ и $A_{y,y}$ для реакции $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ и $pn \rightarrow d\pi^0$
- Комбинация всех полученных спиновых наблюдаемых и сечения позволила провести парциально-волновой анализ амплитуд реакции

Публикации и апробация результатов

Работа основана на публикациях:

- *S. Dymov, V. Shmakova et al., Phys. Lett. B 712, 375 (2012),*
- *S. Dymov, V. Shmakova et al., Phys. Rev. C 88, 014001, (2013),*
- *V. Shmakova et al., Phys. Lett. B 726, 4–5, 549-928, (2013),*
- *V. Shmakova, EPJ Web of Conferences 37, 01020 (2012),*
- *V. Shmakova, Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei 45, 117-119 (2014);*

и доложена на международных конференциях:

- ✂ *SPIN'2012,*
- ✂ *MESON'12,*
- ✂ *заседаниях немецкого физического общества (ФРГ),*
- ✂ *рабочих совещаниях пользователей синхротрона COSY.*

Предположения, сделанные в PWA:

- ▶ Несвязанная фаза M_S^P фиксировалась по теореме Ватсона (связь фазы взаимодействия в начальном состоянии с упругим pp рассеянием)

$$\delta^3 P_0 = -14.8^\circ$$

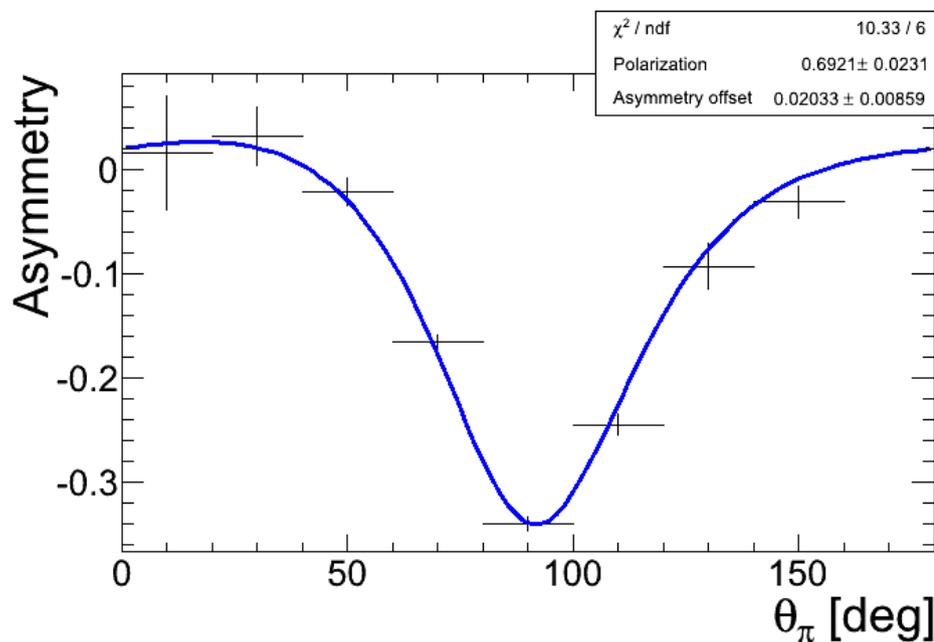
- ▶ Пренебрежение параметром смешивания для связанного канала 3P_2 - 3F_2 , фазы M_d^P , M_d^F фиксировались по теореме Ватсона

$$\delta^3 P_2 = 17.9^\circ, \delta^3 F_2 \sim 0^\circ$$

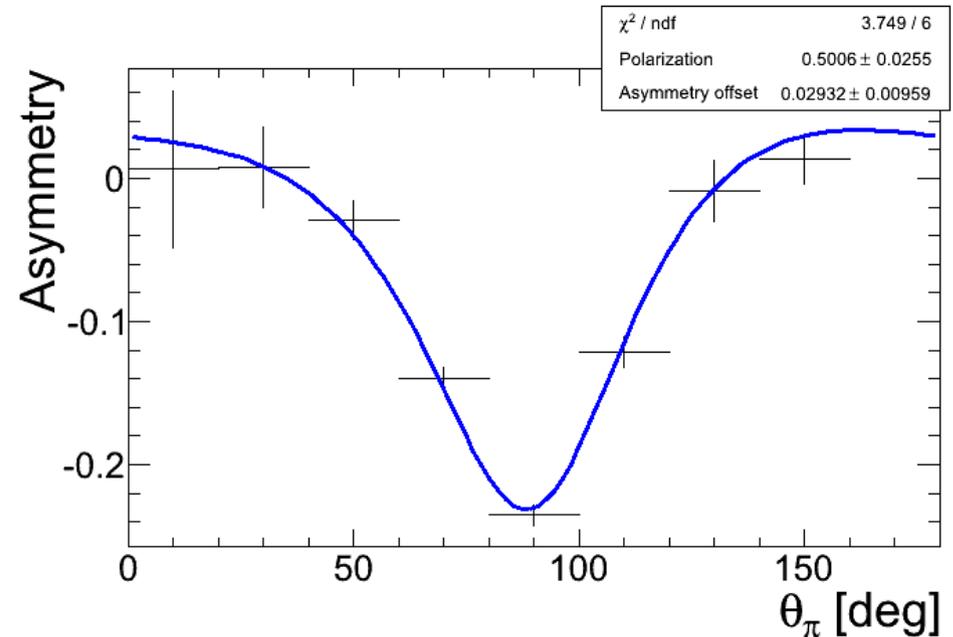
[R. A. Arndt, I. I. Strakovsky, and R. L. Workman, Phys. Rev. C 62, 034005 \(2000\).](#)

Данные с неполяризованным пучком и/или мишенью
➔ Получена поляризация для обоих направлений спина для пучка и мишени

A_y ($np \rightarrow d\pi^0$) из SAID предсказаний



Поляризация мишени, $Q=69 \pm 2\%$



Поляризация пучка, $P=50 \pm 3\%$

Еще слайд
