

Реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  и  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$   
с образованием  $^1S_0$  дипротона  
при промежуточных энергиях 0.35–0.8 ГэВ

Выступающий: Д.А. Цирков  
Руководитель: д.ф.-м.н., г.н.с. В.И. Комаров

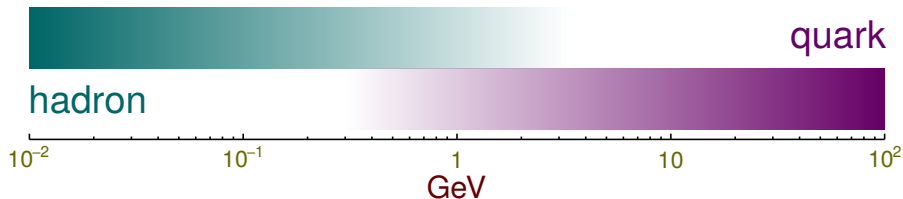
Объединённый институт ядерных исследований  
Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова

Дубна, 2020

- 1 Введение
- 2 Экспериментальная установка
- 3 Измерения и обработка данных
- 4 Реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$   
в околопороговой области
- 5 Реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$   
в  $\Delta$ -резонансной области
- 6 Реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$
- 7 Итоги диссертационной работы

# Введение

# Изучение $NN$ -взаимодействий при промежуточных энергиях



- ▶ Отсутствие теоретического понимания адронных взаимодействий при промежуточных энергиях;
- ▶ Ключ к проблеме адронной структуры и спектроскопии лежит в промежуточной области энергий;
- ▶ Изучение может оказаться полезным для понимания адронного потенциала, отталкивающего кора, конфайнмента кварков и т. д.;
- ▶ **Требуются дополнительные экспериментальные данные.**

## Дипротон: $pp$ -пара в $^1S_0$ -состоянии

- ▶ Квазибинарная реакция: упрощенная кинематика, возможен PWA;
- ▶ Дипротон — спин-изоспиновый партнер дейтрона;
- ▶ Ограничение  $E_{pp} < 3$  МэВ: только конечное  $pp$  спин-синглетное  $^1S_0$ -состояние;
- ▶ Простая спиновая структура: половина промежуточных угловых моментов запрещена — упрощается теоретический анализ;
- ▶ Максимально возможные переданные импульсы: короткодействующее взаимодействие (на расстояниях порядка размеров бариона).

## Цель работы

Целью работы является исследование свойств адронных взаимодействий на малых расстояниях при промежуточных энергиях путём изучения реакций с образованием в конечном состоянии  $^1S_0$  дипротона  $\{pp\}_s$ , а именно,  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  и  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ .

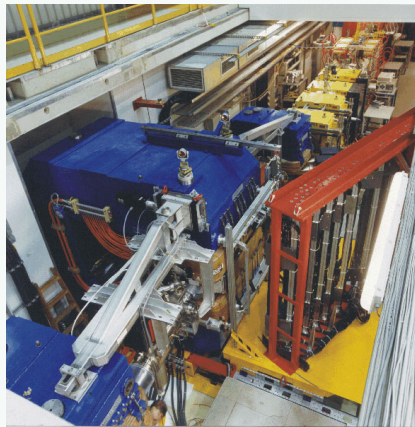
# Экспериментальная установка

# Экспериментальная установка

## Синхротрон COSY



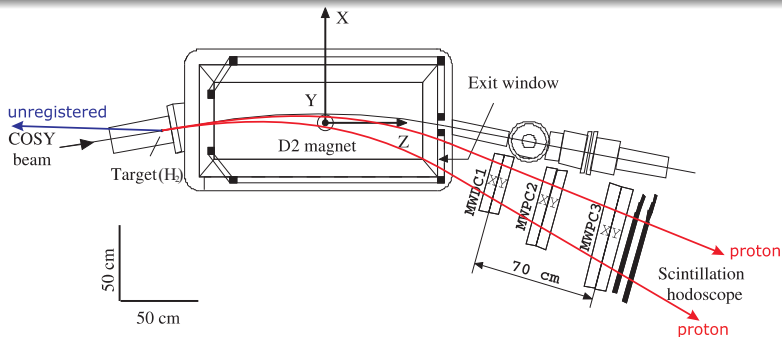
## Спектрометр ANKE





# Экспериментальная установка

- ▶ Передний детектор спектрометра ANKE
- ▶ Неполяризованный или поперечно поляризованный протонный пучок, внутренняя водородная мишень

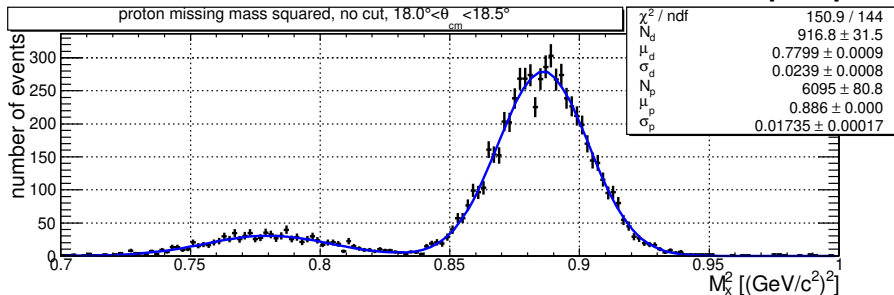
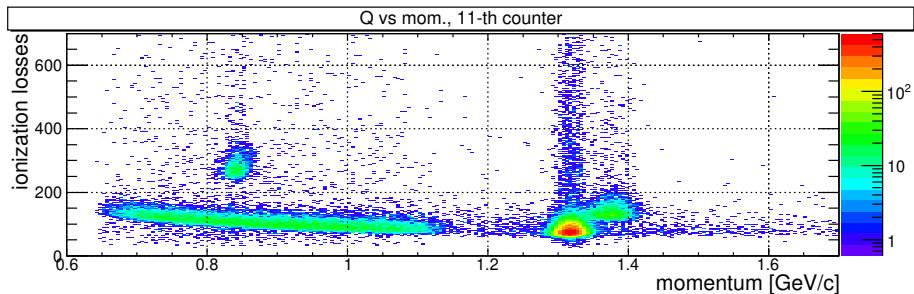


Точность восстановления треков

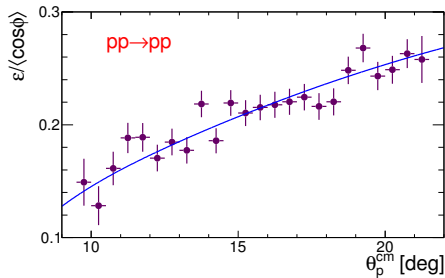
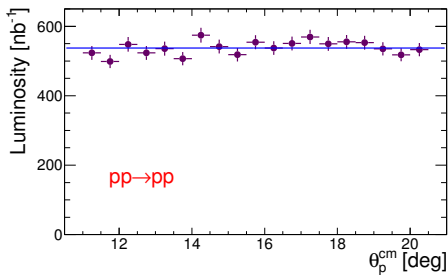
$$\sigma(p)/p \approx 1\%, \quad \sigma(\theta) \approx 0.2^\circ$$

# Измерения и обработка данных

# Идентификация однотрековых событий



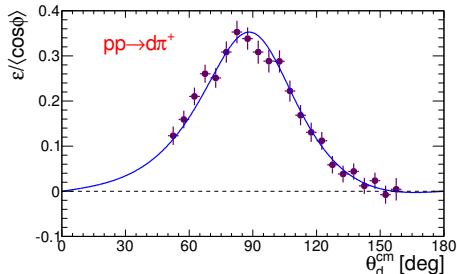
# Определение интегральной светимости и поляризации пучка



$$L = \frac{N^*}{d\sigma/d\Omega \cdot \Delta\Omega}$$

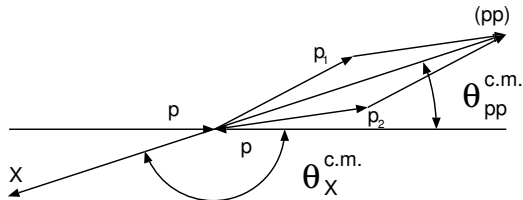
$$P = \frac{\epsilon}{\langle \cos \phi \rangle} A_y^{-1}$$

(пример для 353 МэВ)

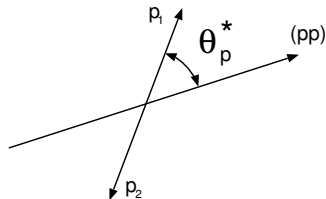


# Кинематика двухтрековых событий

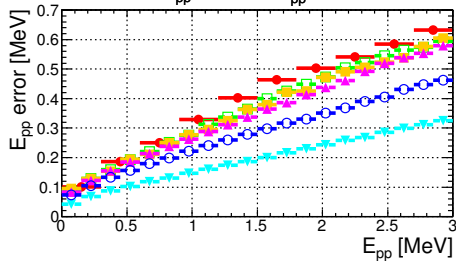
center-of-mass frame



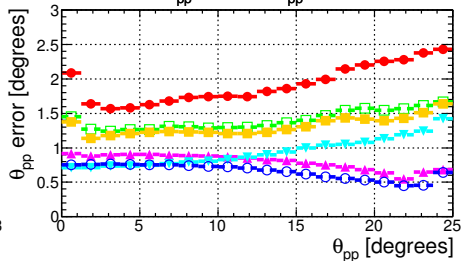
proton-pair rest frame



$E_{pp}$  error vs.  $E_{pp}$

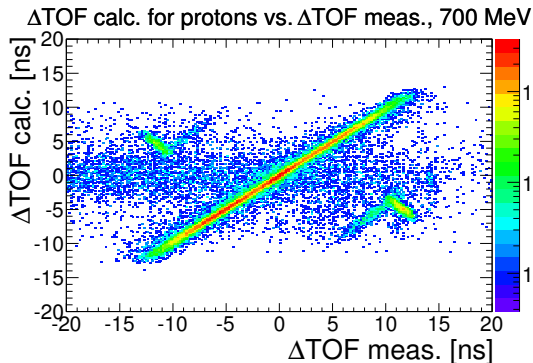


$\theta_{pp}$  error vs.  $\theta_{pp}$



# Идентификация двухтрековых событий

## ► Выделение протон-протонных пар



Разность времён пролёта: измеренная и рассчитанная из траекторий и импульсов в предположении, что обе частицы — протоны

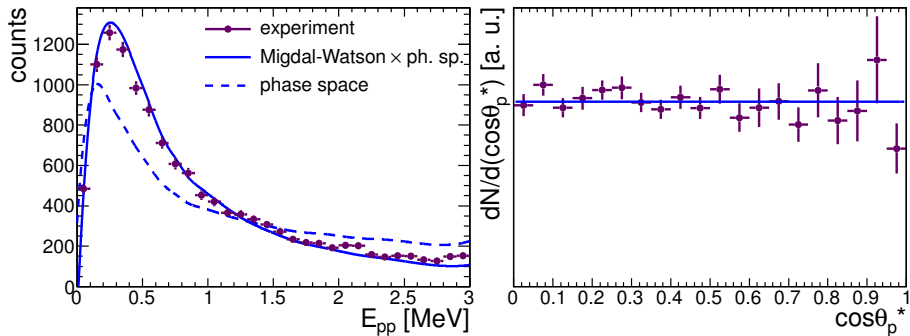
## ► Выделение $^1S_0$ -состояния

Ограничение по  $E_{pp} = 3$  МэВ

Ошибка измерения  $E_{pp}$ : 0.05–0.4 МэВ

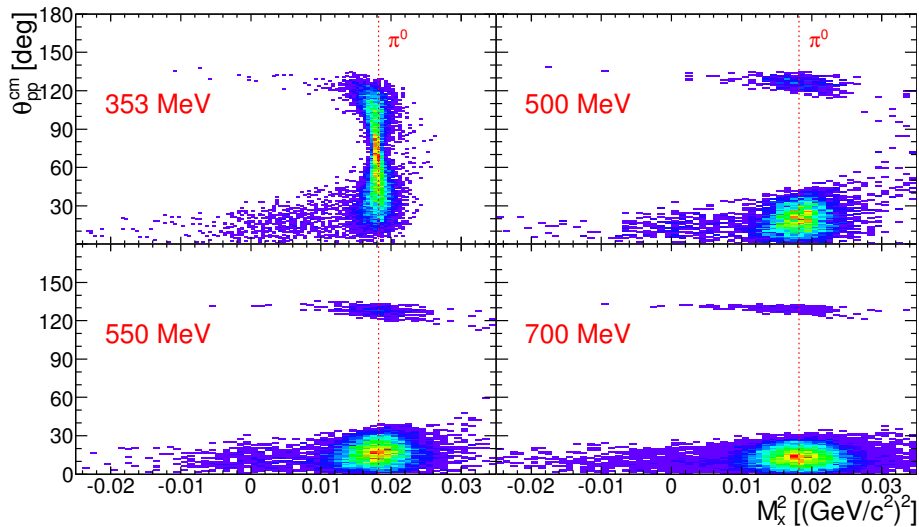
# Проверка на доминирование $^1S_0$ -состояния

Распределения  $E_{pp}$  и  $\theta_p^*$  (353 МэВ)



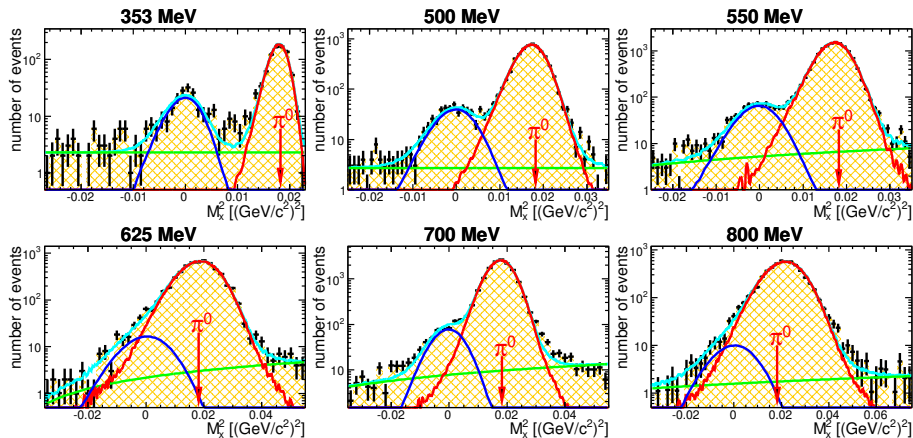
- a) Взаимодействие в конечном состоянии
  - b) Изотропия в системе центра масс  $pp$ -пары
- ⇒  $^1S_0$ -состояние

# Двухтрековый акцептанс переднего детектора



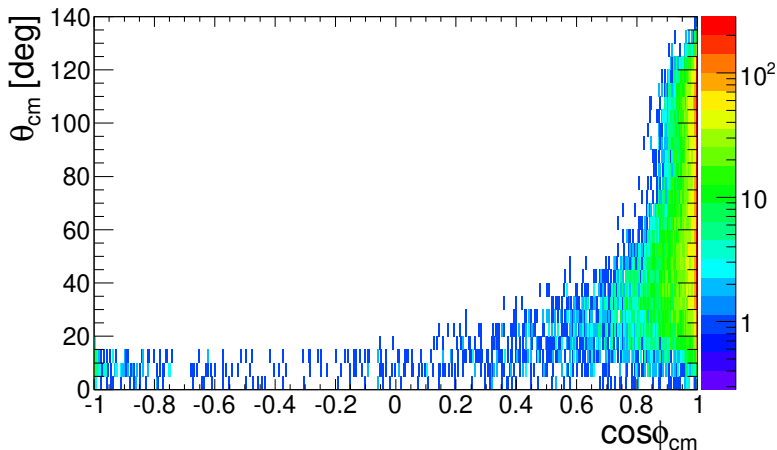


# Разделение каналов $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$



# Измерение анализирующей способности

$$A_y = \frac{N_{\uparrow}^* - N_{\downarrow}^*}{N_{\uparrow}^* + N_{\downarrow}^*} \cdot \frac{1}{P \langle \cos \phi_{pp}^{\text{cm}} \rangle}$$



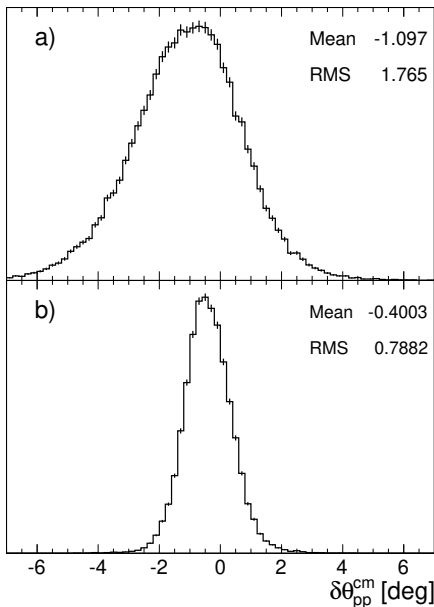
# Кинематический фит

$$\chi^2(\mathcal{P}) = \sum_{i=1}^k \left( \frac{x_i(\mathcal{P}) - x_i^m}{\sigma_i} \right)^2,$$

$$\phi(\mathcal{P}) = |\mathcal{P}_{\text{initial}} - \mathcal{P}|^2 - M_x^2 \stackrel{!}{=} 0,$$

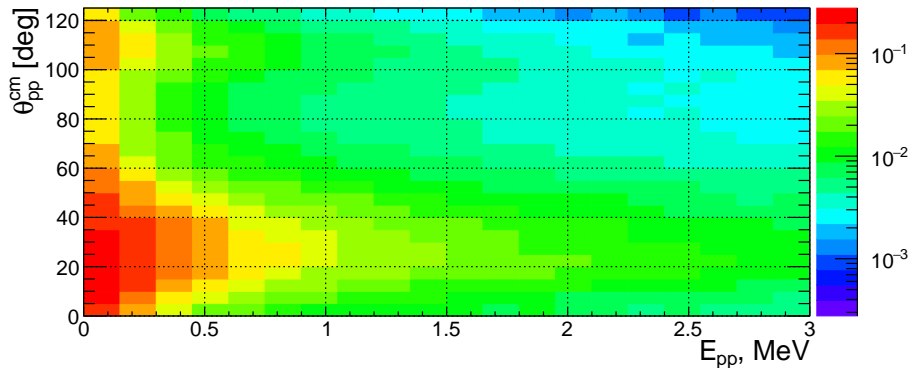
$$F(\mathcal{P}) = \chi^2(\mathcal{P}) + T \sum_{i=1}^m \phi_i^2(\mathcal{P}),$$

$$T \rightarrow \infty.$$



# Определение сечения

$$d\sigma/d\Omega = \frac{\sum_i \xi_i \cdot A_i(E_{pp}, \theta_{pp})^{-1}}{L \cdot \Delta\Omega},$$



Реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$   
в околопороговой области

- ▶ Расширение применимости киральной теории возмущений (ChPT) в область выше порога мезообразования;
- ▶ Информация о  $p$ -волновой амплитуде рождающегося пиона требуется для получения контактного члена  $NN \rightarrow NN\pi$  в ChPT;
- ▶ Для извлечения информации о  $p$ -волне нужно знать интенсивности  $s$ - и  $d$ -волн;
- ▶ Амплитуды  $s$ - и  $d$ -волн могут быть получены из сечения и анализирующей способности реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ .

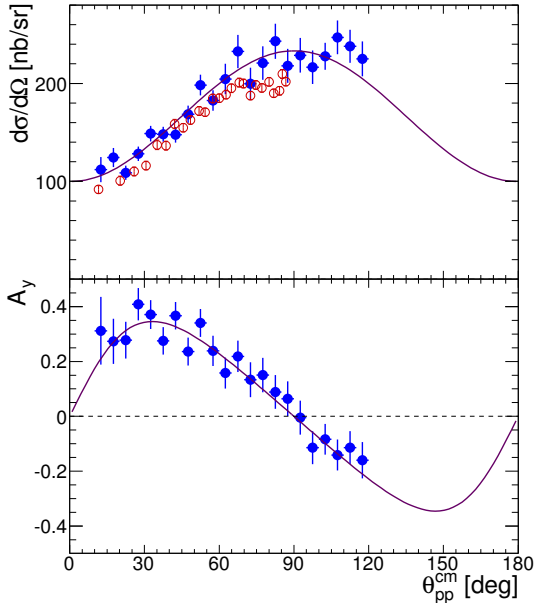
$$\begin{aligned}M &= AS \cdot \hat{p} + BS \cdot \hat{k} \\ \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_0 &= \frac{k}{4p} (|A|^2 + |B|^2 + 2 \operatorname{Re}[AB^*] \cos \theta_{pp}) \\ A_y \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_0 &= \frac{k}{4p} (2 \operatorname{Im}[AB^*] \sin \theta_{pp})\end{aligned}$$

$\ell \leq 2$  — три возможных перехода:

$${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0s, \quad {}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0d, \quad {}^3F_2 \rightarrow {}^1S_0d.$$

$$\begin{aligned}A &= M_s^P - \frac{1}{3}M_d^P + M_d^F \left( \cos^2 \theta_{pp} - \frac{1}{5} \right) \\ B &= \left( M_d^P - \frac{2}{5}M_d^F \right) \cos \theta_{pp}\end{aligned}$$

# Угловые зависимости сечения и $A_y$



ANKE PLB 712 370

WASA NPA 693 633

Пионные  $s$  и  $d$  волны:

$$M_s^P = (55.3 \pm 0.4) - (14.7 \pm 0.1)i \sqrt{\text{nb/sr}}$$

$$M_d^P = -(26.6 \pm 1.1) - (8.6 \pm 0.4)i \sqrt{\text{nb/sr}}$$

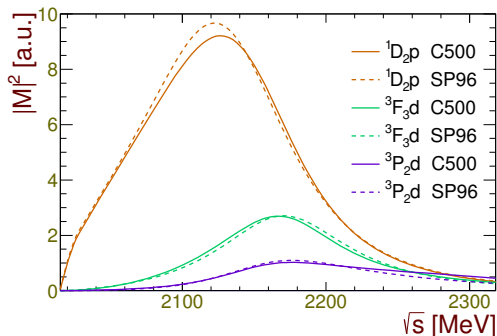
$$M_d^F = (5.3 \pm 2.3) \sqrt{\text{nb/sr}}$$



# Научная новизна и практическая значимость

- ▶ Впервые измерена векторная анализирующая способность  $A_y$  реакции  $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$  при энергии протонного пучка  $T_p = 353$  МэВ в полном угловом интервале;
- ▶ Впервые напрямую показан значительный вклад перехода  ${}^3P_2d$  в канал  $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$  при энергии протонного пучка  $T_p = 353$  МэВ (в противоречии с имевшимися ранее предсказаниями);
- ▶ Полученные угловые зависимости  $d\sigma/d\Omega$  и  $A_y$  были необходимы для проведения совместного парциально-волнового анализа процессов  $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$  и  $pn \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$  при энергии 353 МэВ;
- ▶ Теоретики, работающие в рамках ChPT, планируют использовать результаты этого анализа для определения низкоэнергетического параметра  $d$  контактного  $(NN)2\pi$  взаимодействия.

Реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$   
в  $\Delta$ -резонансной области

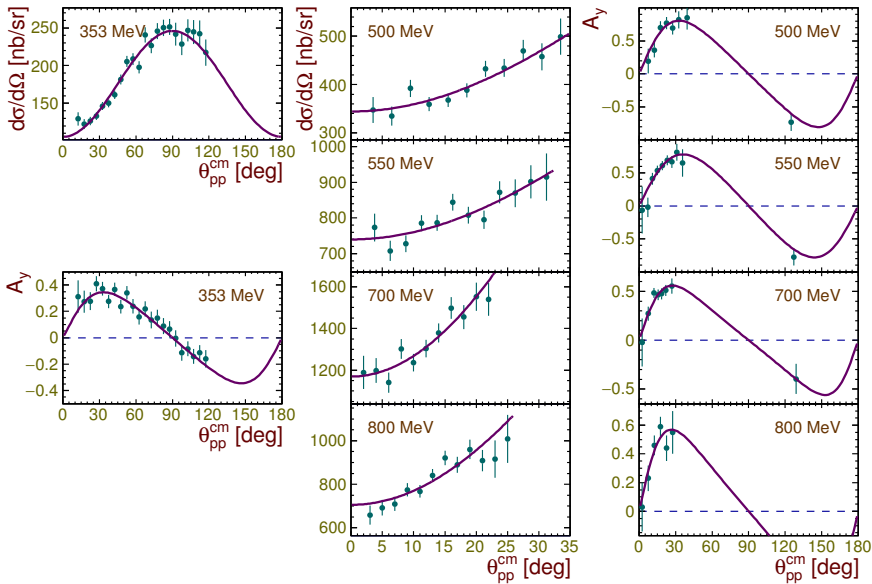


- ▶ Известны три основных резонансных перехода:  $^1D_2$ ,  $^3F_3$ ,  $^3P_2$  ( $^{2S+1}L_J$  для  $pp$ -пары);
- ▶  $^1D_2$ ,  $^3F_3$  — хорошо известны из PWA реакций  $pp \rightarrow pp$  и  $pp \rightarrow d\pi^+$ ;
- ▶  $^3P_2$  — значительные неточности.

## Протонные пары в конечном $^1S_0$ -состоянии

- ▶ Нечётные пионные ( $p, f \dots$ ) волны запрещены, чётные ( $S, D \dots$ )  $\Delta N$ -состояния запрещены;
- ▶ Из трёх доминирующих дибарионных резонансных переходов разрешён только наименее интенсивный  $^3P_2$ .

# Угловые зависимости сечения и $A_y$



## Фитирующие функции

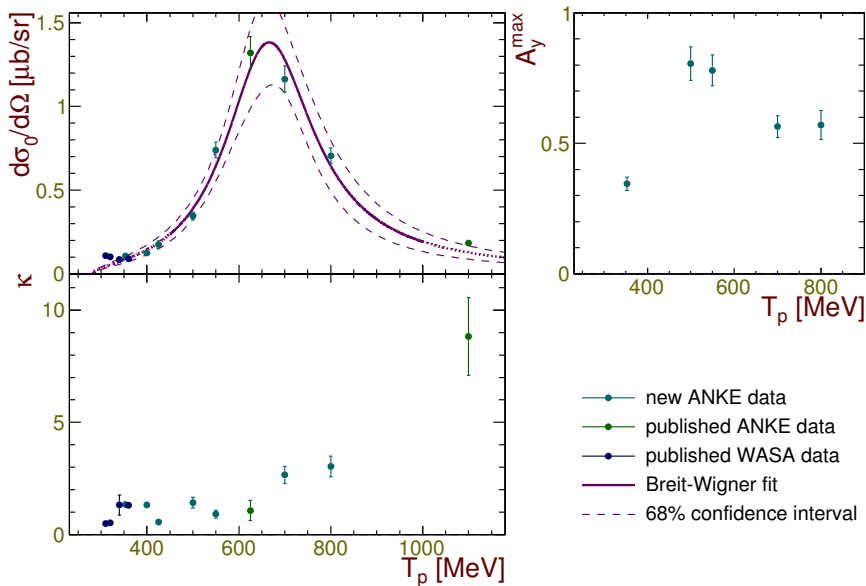
$$\begin{aligned}\frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{k}{4p} (a_0 + a_2 \cos^2 \theta_{pp} + a_4 \cos^4 \theta_{pp} + \dots) \\ A_y \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{k}{4p} \sin \theta_{pp} \cos \theta_{pp} (b_2 + b_4 \cos^2 \theta_{pp} + \dots)\end{aligned}$$

Для моментов импульса пиона  $\ell \leq 2$  можно выбрать параметризацию:

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{d\sigma_0}{d\Omega} (1 + \kappa \sin^2 \theta_{pp}) \\ A_y &= \frac{A_y^{\max} \sqrt{1 + \kappa} \sin 2\theta_{pp}}{1 + \kappa \sin^2 \theta_{pp}}\end{aligned}$$

- ▶  $d\sigma_0/d\Omega$  — дифференциальное сечение при нулевом угле;
- ▶  $\kappa$  — угловой наклон дифференциального сечения;
- ▶  $A_y^{\max}$  — максимум векторной анализирующей способности.

# Энергетические зависимости сечения и $A_y$



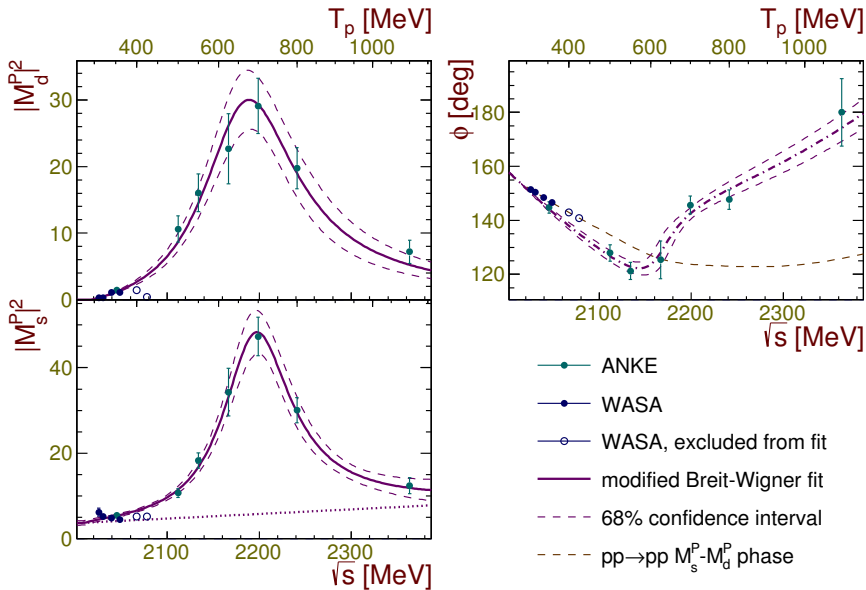
## Парциально-волновой анализ

- ▶  $\ell \leq 2$  — три возможных перехода:  
 ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0s$ ,  ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0d$ ,  ${}^3F_2 \rightarrow {}^1S_0d$ ;
- ▶  ${}^3F_2 \rightarrow {}^1S_0d$  считается пренебрежимо малым;
- ▶ Два основных перехода  ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0s$ ,  ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0d$ ;
- ▶  $|M_s^P|$ ,  $|M_d^P|$  — амплитуды переходов,  $\phi$  — разность фаз;
- ▶  $\{d\sigma_0/d\Omega, \kappa, A_y^{\max}\} \rightarrow \{|M_s^P|, |M_d^P|, \phi\}$ .

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(\hbar c)^2 k}{64\pi^2 s p} \left[ \left( |M_s^P|^2 + \frac{4}{3} |M_s^P| |M_d^P| \cos \phi + \frac{4}{9} |M_d^P|^2 \right) + \left( -2 |M_s^P| |M_d^P| \cos \phi - \frac{1}{3} |M_d^P|^2 \right) \sin^2 \theta_{pp} \right],$$

$$A_y \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(\hbar c)^2 k}{64\pi^2 s p} |M_s^P| |M_d^P| \sin \phi \sin 2\theta_{pp},$$

# Энергетические зависимости амплитуд ${}^3P_0s$ и ${}^3P_2d$



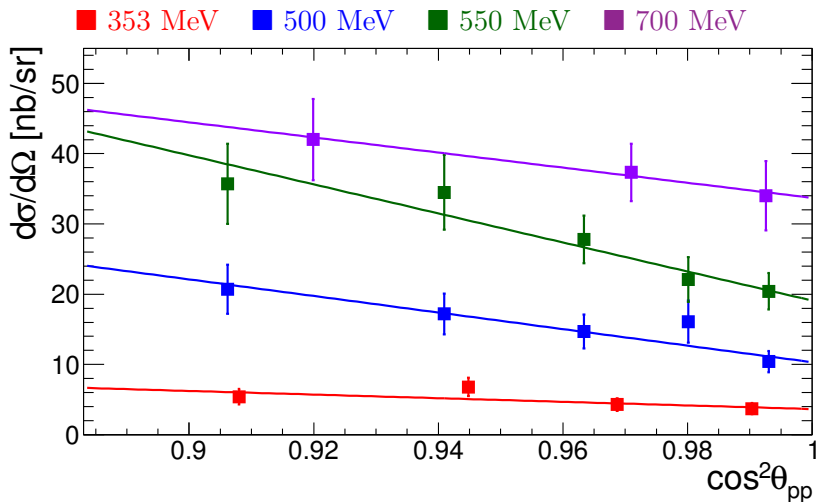


# Научная новизна и практическая значимость

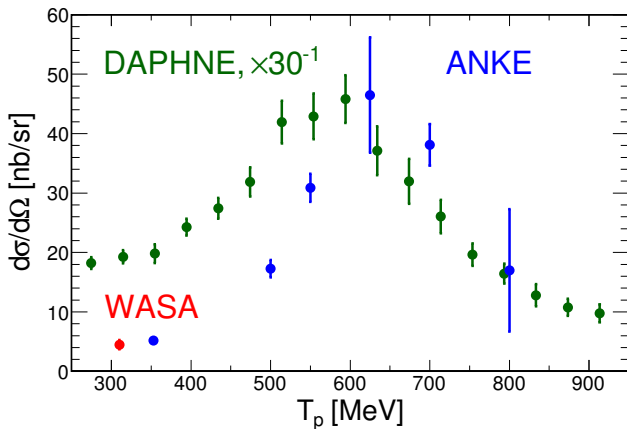
- ▶ Впервые измерены энергетические и угловые зависимости  $d\sigma/d\Omega$  и  $A_y$  для процесса  $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$  под малыми полярными углами в области возбуждения  $\Delta(1232)$ -резонанса;
- ▶ Впервые обнаружены нетривиальные особенности наблюдаемых реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ : выраженный пик в  $d\sigma_0/d\Omega$  в области возбуждения  $\Delta(1232)$ -резонанса, положительный наклон  $\kappa$  и значительные, достигающие в максимуме до  $\approx 0.8$ , величины  $A_y$ ;
- ▶ Впервые проведён парциально-волновой анализ реакции, особенности наблюдаемых объяснены интерференцией переходов  ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0s$  и  ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0d$ ;
- ▶ Уточнены параметры резонанса  ${}^3P_2$ :  $E_R = 2197 \pm 8 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\Gamma = 130 \pm 21 \text{ MeV}/c^2$  с  $\chi^2/\text{ndf} = 8.4/6$ ;
- ▶ Впервые обнаружено резонансное поведение  ${}^3P_0s$ , измерены его параметры:  $E_R = 2201 \pm 5 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\Gamma = 91 \pm 12 \text{ MeV}/c^2$  с  $\chi^2/\text{ndf} = 7.6/6$ ;
- ▶ Уточнение параметров  ${}^3P_2d$  дибариона, а также параметры нового дибариона  ${}^3P_0s$  важны для развития теории дибарионных резонансов и их роли в адронных взаимодействиях на малых расстояниях.

Реакция  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$

# Угловая зависимость дифференциального сечения



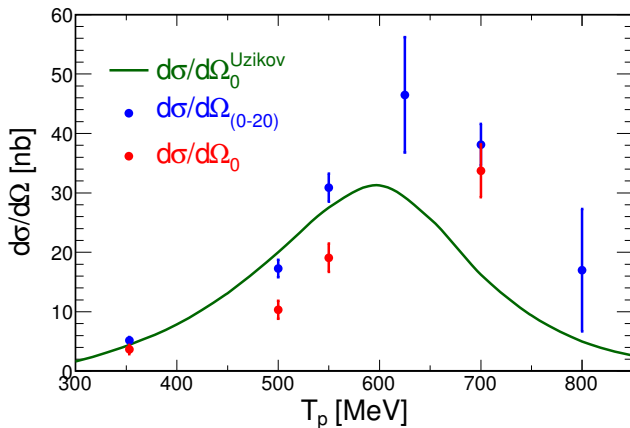
# Энергетическая зависимость сечения вперёд



$pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$      $d\sigma(0^\circ - 20^\circ)/d\Omega$     ● WASA-PROMICE  
 ● ANKE

$pn \rightarrow d\gamma$      $d\sigma(20^\circ)/d\Omega$     ● DAPHNE,  $\times 30^{-1}$

Простая модель однопионного обмена  
предсказывает пик в области возбуждения  $\Delta(1232)$



Yu.N. Uzikov arXiv:0812.4661v1 [nucl-th] 26 Dec 2008

# Научная новизна и практическая значимость

- ▶ Впервые зарегистрирована реакция излучения жёсткого гамма-кванта с образованием  $^1S_0$  дипротона  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$  при энергиях выше порога мезообразования и измерена энергетическая зависимость её дифференциального сечения  $d\sigma/d\Omega$  под малыми полярными углами при энергиях пучка от 353 до 800 МэВ;
- ▶ Угловой наклон дифференциального сечения показывает, что  $\sigma(E1) \approx 0.5 \cdot \sigma(E2)$  в диапазоне 353–550 MeV (если предположить  $\sigma(M2)$  пренебрежимо малым);
- ▶ Энергетическая зависимость  $d\sigma_0/d\Omega$  для  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$  имеет пик в области возбуждения  $\Delta(1232)$ -изобары;
- ▶ Он значительно (в 100–20 раз) подавлен и смещён в сторону высоких энергий в сравнении с пиком  $pn \rightarrow d\gamma$ ;
- ▶ Измеренные сечения реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$  полезны для теоретического изучения динамики жёсткого гамма-излучения, в частности, механизмов возбуждения  $\Delta(1232)$ -пика.

# Итоги диссертационной работы

Были решены следующие задачи:

- 1 Подготовлены и проведены эксперименты с неполяризованным и поляризованным протонным пучком и водородной кластерно-струйной мишенью на установке ANKE;
- 2 Разработана и отлажена методика и программное обеспечение для обработки экспериментальных данных реакций с образованием  ${}^1S_0$  дипротона в конечном состоянии;
- 3 Получено дифференциальное сечение  $d\sigma/d\Omega$  и векторная анализирующая способность  $A_y$  реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ ;
- 4 Проведён парциально-волновой анализ реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ ;
- 5 Получено дифференциальное сечение  $d\sigma/d\Omega$  реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ ;
- 6 Сделаны выводы из полученных результатов.



## Публикации в журналах, индексируемых Scopus, Web of Science и РИНЦ

- ① Energy dependence of forward  $^1S_0$  diproton production in the  $pp \rightarrow pp\pi^0$  reaction / V. Kurbatov, ..., D. Tsirkov, [et al.] // Phys. Lett. B. — 2008. — Vol. 661. — P. 22–27.
- ② Observation of Inverse Diproton Photodisintegration at Intermediate Energies / V. Komarov, ..., D. Tsirkov, [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 101. — P. 102501.
- ③ Energy dependence of hard bremsstrahlung production in proton–proton collisions in the  $\Delta(1232)$  region / D. Tsirkov [et al.] // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. — 2010. — Vol. 37. — P. 105005.
- ④ Differential cross section and analysing power of the  $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$  reaction at 353 MeV / D. Tsirkov [et al.] // Phys. Lett. B. — 2012. — Vol. 712. — P. 370–374.
- ⑤ Evidence for excitation of two resonance states in the isovector two-baryon system with a mass of 2.2 GeV/ $c^2$  / V. Komarov, D. Tsirkov, [et al.] // Phys. Rev. C. — 2016. — Vol. 93. — P. 065206.

- ▶ 6 докладов на конференциях ОИЯИ;
- ▶ 9 докладов на иных международных конференциях;
- ▶ 2 статьи в трудах конференций;
- ▶ 6 статей для ежегодных отчётов коллаборации ANKE.

# Личный вклад I

- ▶ Участвовал в проведении экспериментов, наборе данных, разработке методики обработки экспериментальных данных;
- ▶ Разработал методику разделения пиков  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  и  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$  в спектре недостающих масс;
- ▶ Написал код для надёжного выполнения данной задачи в случае частичного и значительного перекрытия пиков;
- ▶ Написал часть ПО для обработки экспериментальных данных:
  - Для корректного учёта краевых эффектов акцептанса;
  - Для финального этапа получения  $d\sigma/d\Omega$  и  $A_y$ ;
- ▶ Доработал код моделирования акцептанса с учётом особенностей установки;
- ▶ Обработал все рассмотренные данные, получил  $d\sigma/d\Omega$  и  $A_y$  реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  и  $d\sigma/d\Omega$  реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ ;
- ▶ Написал код для парциально-волнового анализа реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ , получил результаты;

- ▶ Участвовал в написании публикаций по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК;
- ▶ Написал годовые отчёты коллаборации ANKE и статьи в труды конференций.

---

\* Диссертационная работа выполнена при поддержке грантов BMBF (грант ANKE COSY-JINR), RFBR (09-02-91332), DFG (436 RUS 113/965/0-1) и COSY-FEE.

- 1 Результаты исследования реакции  $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  при околороговой энергии  $T_p = 353$  МэВ: измерение дифференциального сечения  $d\sigma/d\Omega$  и анализирующей способности  $A_y$  в полном угловом интервале; парциально-волновой анализ полученных данных, впервые напрямую показавший значительный вклад перехода  ${}^3P_2d$  в данный канал.

- ② Результаты исследования реакции  $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$  при энергиях в области возбуждения  $\Delta(1232)$ -резонанса: измерение дифференциального сечения  $d\sigma/d\Omega$  и анализирующей способности  $A_y$  под малыми полярными углами; характерное поведение этих величин; парциально-волновой анализ полученных данных; обнаруженный в результате новый дибарионный резонанс в переходе  ${}^3P_0s$ , значения его массы и ширины, уточнённые параметры ранее известного дибарионного резонансного состояния  ${}^3P_2d$ .

- 3 Первое наблюдение реакции  $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$  при энергиях выше порога мезообразования; измерение энергетической и угловой зависимости её дифференциального сечения  $d\sigma/d\Omega$  под малыми полярными углами при энергиях от 353 до 800 МэВ; обнаруженное резонансное поведение сечения, показавшее ведущий вклад промежуточного состояния  $\Delta(1232)N$  в сечение процесса при соответствующих энергиях.

**Спасибо за внимание!**