

История сотрудничества ПИЯФ — ANKE.

Сотрудничество между физиками Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ, Гатчина) и Научно-исследовательского центра «Юлих» (Германия) началось в 1991 году в рамках соглашения о проведении совместных фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики и физики элементарных частиц, подписанного директорами этих институтов. Соглашение неоднократно продлевалось и в настоящее время действительно по март 2013 года. В рамках этого сотрудничества в период с 1991 по 1998 год были проведены совместные работы по проектированию, производству и отладке магнитного спектрометра ANKE для внутреннего пучка ускорителя COSY, позволяющего идентифицировать положительно и отрицательно заряженные частицы в диапазоне импульсов от 200 до 3000 МэВ/с с разрешением в среднем порядка 2%. Отличительной особенностью спектрометра является ранее разработанный в работах ПИЯФ уникальный метод детектирования K^+ -мезонов по задержанному сигналу продуктов его распада (π -мезонов или мюонов).

Параллельно с этим в 1994 году начались совместные работы по созданию источника поляризованных атомов водорода и дейтерия для проведения экспериментов по исследованию поляризационных эффектов в pp -, pd - и dd -столкновениях. В 2004 году работа была завершена, при этом была достигнута ядерная поляризация атомов водорода более 80% при интенсивности поляризованного пучка атомов $\cdot 6 \cdot 10^{16}$ атомов/с.

Основные результаты сотрудничества ПИЯФ — ANKE.

Исследование «подпорогового» рождения K^+ -мезонов

Первый цикл работ выполненный на спектрометре ANKE был связан с продолжением большого цикла работ, проводимых в ПИЯФ в 1978 — 1986 годах по исследованию рождения K^+ -мезонов. Рождение мезонов в протон-ядерных соударениях при энергиях налетающей частицы ниже порога свободного нуклон-нуклонного рождения открывает доступ к коллективным степеням свободы в ядрах, а также к высокоимпульсной части волновой функции нуклона в ядре.

На спектрометре ANKE были проведен ряд уникальных измерений дважды дифференциальных сечений рождения K^+ -мезонов на различных типах мишеней и при различных энергиях налетающих протонов. Было показано, что эффекты взаимодействий K^+ -мезонов в конечном состоянии играют значительную роль при изменении дважды

дифференциальных сечений. Измерения позволили определить значения каон-ядерного потенциала с точностью 3 МэВ, а также была показана важность учета кулоновского потенциала отталкивания.

Также в рамках этой тематики был впервые проведен корреляционный K^+d (и K^+p) эксперимент, который доказал существование двухступенчатого механизма образования K^+ -мезона на ядрах, идущего через промежуточный процесс $pn \rightarrow d\pi$. Вместе с этим были получены указания на возможность существования кластерного механизма, доля которого может составлять примерно 30% от двухступенчатого.

Исследование рождения ϕ - и ω -мезонов в pN -соударениях и экспериментальная проверка правила Окубо-Цвейга-Изуки

В рамках этого цикла исследований были произведены уникальные измерения сечений реакций типа $pp \rightarrow ppM$, и $pn \rightarrow dM$ (где $M = \omega, \phi$) в интервале энергий возбуждения до 100 МэВ.

Рождение ω -мезона изучалось в реакциях $pp \rightarrow pp\omega$ (при энергиях возбуждения 60 и 92 МэВ) и $pn \rightarrow d\omega$ (28 и 57 МэВ). Первое измерение предоставило информацию о ранее неисследованной области энергий возбуждения. Второе – было проведено впервые в мировой практике, полученные из него данные о полном сечении позволили зафиксировать ранее неизвестный знак константы связи $g_{p\omega}$ (см. *Phys. Lett. B vol.648 (2007) p.351*). Впервые проведенные точные измерения сечений реакций $pp \rightarrow pp\phi$ (при энергиях возбуждения 18.5, 34.5 и 75.9 МэВ) и $pn \rightarrow d\phi$ (в диапазоне энергий от 0 до 80 МэВ) позволили вычислить отношение выходов ω и ϕ мезонов вблизи порога их образования как функцию энергии возбуждения. Согласно правилу Окубо, Цвейга и Изуки, которое говорит о подавлении реакций с разорванными кварковыми линиями, это отношение должно составлять $R_{OZI} = \sigma_\phi / \sigma_\omega = 4.2 \cdot 10^{-3}$, что достаточно хорошо подтверждено другими экспериментами (например, в $p\bar{p}$ -взаимодействиях), за исключением аннигиляции остановившихся в водороде антипротонов. Данные исследований, проведенных на LEAR (ЦЕРН), которые характеризуются S-волновым начальным состоянием системы, показали, что отношение сечений в 30-70 раз превышает R_{OZI} . Для объяснения этого факта была предложена модель поляризованной странности нуклона. Околопороговое рождение векторных мезонов в нуклон-нуклонных взаимодействиях также характеризуется S-волновым начальным состоянием. Современные (модельно-зависимые) исследования показывают, что за счет динамики процессов и без привлечения модели поляризованной странности в нуклоне, $\sigma_\phi / \sigma_\omega$ может в 4.5 раза превышать R_{OZI} (см. *Eur. Phys. J. A vol.23 (2005) p.291*). Полученное

отношение сечений составило в среднем $(6 \pm 2) \cdot R_{OZI}$ в pp -канале и не зависело от энергии возбуждения, что находится в согласии с модельными расчетами. Для pn -начального состояния измеренное отношение выходов векторных мезонов также согласуется с теорией в рамках полученных ошибок.

Исследование парного рождения K^+ - и K^- -мезонов

В результате анализа были получены полные и дифференциальные сечения реакций: $pp \rightarrow pp \{K^+ K^-\}_{\text{non-}\varphi}$, $pp \rightarrow d \{K^+ K^-\}_{\text{non-}\varphi}$, $pp \rightarrow d K^+ K^0\text{-bar}$, $dd \rightarrow {}^4\text{He} K^+ K^-$ при малых (до 110 МэВ), ранее не исследованных энергиях возбуждения. Изучалось влияние на механизм протекания этих реакций скалярных резонансов ($a_0(980)$ и $f_0(980)$) и антикан-нуклонных (и антикаон-ядерных) взаимодействий.

Оказалось, что наблюдается S -волновое состояние пара каон-антикаон, однако, никаких других указаний на важность роли скалярных резонансов найти не удалось.

Также была показана важность учета эффектов $K^- p$ -, $K^- pp$ - и $K^- d$ -взаимодействий в конечном состоянии, измерена длина $K^- p$ -рассеяния. Также впервые был обнаружен и описан эффект $K^+ K^- \leftrightarrow K^0 K^0\text{-bar}$ перерассеяния в конечном состоянии, описание которого позволило измерить изоскалярной и изовекторный вклады (для системы $K^+ K^-$) в сечение реакции $pp \rightarrow pp \{K^+ K^-\}_{\text{non-}\varphi}$.

Исследование рождения гиперонов

Диапазон импульсов пучка синхротрона COSY позволяет проводить исследования рождения легких гиперонов Λ и $\Sigma^{0,\pm}$ в pp - и pn -соударениях.

Рождение Σ^+ -гиперонов исследовалось в реакции $pp \rightarrow n K^+ \Sigma^+$ при энергиях возбуждения ниже 130 МэВ. Поводом для проведения эксперимента послужили аномально большие значения сечений этой реакции, представленные сотрудничеством COSY-11 (см. *Phys. Lett. B vol. 643 (2006) p.251*). Результаты, полученные на спектрометре ANKE, опровергли эти измерения, причем данные были получены четыремя независимыми методами измерений. В ходе данной работы были также измерены сечения реакций $pp \rightarrow p K^+ \Lambda^0$ и $pp \rightarrow n K^+ \Sigma^0$ при ранее неисследованных энергиях возбуждения.

Исследование рождения экзотических барионов

Так как спектрометр ANKE обеспечивает хорошее выделение и идентификацию K^+ -мезонов, на нем был проведен цикл исследований странных экзотических барионов, таких как $\Lambda(1405)$ и возможность образования пентаварка $\Theta(1530)$ в протон-протонных столкновениях. В ходе исследований была получена новая информация о сечении рождения и массовом спектре $\Lambda(1405)$ -резонанса. Пентаварковое состояние не было обнаружено, но был установлен предел на сечение его образования.

Также в ходе поисковых исследований было получено указание на существование экзотического гиперонного состояния с массой $1480 \text{ МэВ}/c^2$.

Другие направления исследований сотрудничества ANKE

Помимо представленных выше результатов исследований, в которых ведущую роль играют сотрудники ОФВЭ ПИЯФ, сотрудничество ANKE выпустило ряд научных работ по другим направлениям ядерной физики и физики элементарных частиц таким как:

- физика дипротона (развал дейтрона, рождение фотонов и π -мезонов), когда два протона, регистрируемых из продуктов реакции, находятся в 1S_0 конечном состоянии;
- изучение рождения η -мезона в pp -, pn - и pd -взаимодействиях и $\eta^3\text{He}$ взаимодействия в конечном состоянии;
- изучение влияния поляризационных эффектов в реакциях упругого рассеяния, зарядового обмена и рождения π -мезонов;
- исследование деполяризации протонов на электронах при малых относительных энергиях.

Сотрудники ОФВЭ ПИЯФ принимали участие в проведении этих измерений и обсуждении их результатов.