

Адронная физика в эксперименте COMPASS

COMPASS – современный эксперимент с неподвижной мишенью на вторичном пучке ускорителя SPS в ЦЕРН, в задачи которого входит изучение внутренней структуры адронов и адронная спектроскопия с использованием мюонных и адронных пучков высокой интенсивности. Физическая программа эксперимента включает в себя следующие темы:

- изучение внутренней структуры нуклона (измерение спин-зависимых функций партонных распределений в процессах глубоко-неупругого рассеяния (DIS) и Дрелла-Яна (DY), измерение обобщённых партонных распределений в реакциях глубоко-виртуального комптоновского рассеяния (DVCS) глубоко-виртуального рождения мезонов (DVMP)) (**не входит в данный проект**);
- проверка предсказаний киральной теории в реакциях Примакова с использованием пионного пучка;
- адронная спектроскопия: изучение механизмов рождения адронов, поиск экзотических адронных состояний, в том числе мультикварковых состояний, глюболов и гибридов, с использованием пионных, протонных и мюонных пучков;
- ядерная модификация структуры нуклонов (EMC-эффект).

В настоящее время реализуется вторая фаза эксперимента COMPASS, одобренная в ЦЕРН на период 2012-2018 гг.

Установка COMPASS представляет собой универсальный спектрометр, построенный на базе двух спектрометрических магнитов. Условно она может быть разделена на три части: пучковую часть, отвечающую за реконструкцию трека и идентификацию налетающей частицы, спектрометр больших углов LAS (Large Angle Spectrometer) и спектрометр малых углов SAS (Small Angle Spectrometer). В состав каждого из спектрометров входят помимо трековых детекторов электромагнитный и адронный калориметр, а также система идентификации мюонов. В состав LAS входит детектор черенковских колец RICH, обеспечивающий идентификацию вторичных адронов. Третий электромагнитный калориметр ECAL0 введён в строй в 2016 году и расположен непосредственно за мишенью.

В различных сеансах использовались следующие мишени: поляризованные ${}^6\text{LiD}$, NH_3 (DIS, DY), жидководородная (DVCS, адронная спектроскопия), и ядерные мишени, такие как C, Ni, Pb, W (адронная спектроскопия, примаковские реакции), окружённые детекторами протонов отдачи. Кроме того, вольфрамовый адронный поглотитель, используемый в

сеансе по набору данных для процесса Дрелла-Яна, может использоваться в качестве дополнительной мишени для изучения ЕМС-эффекта. В разных сеансах использовались пучки положительных (160 ГэВ/с и 200 ГэВ/с) и отрицательных (190 ГэВ/с), мюонов, а также пучки адронов с энергией 190 ГэВ, положительных (~75% протонов, ~24% пионов) и отрицательных (~97% пионов, ~2% каонов). Большой набор комбинаций «пучок-мишень» позволяет эффективно решать широкий класс задач по изучению свойств адронов, адронных взаимодействий и адронной спектроскопии. В таблице представлена информация по основным выборкам данных, полученным в период 2002-2016.

Year	Target	Beam particle	Beam momentum, GeV/c
2002	${}^6\text{LiD}$	μ^+	160
2003	${}^6\text{LiD}$	μ^+	160
2004	${}^6\text{LiD}$	μ^+	160
2006	${}^6\text{LiD}$	μ^+	160
2007	NH_3	μ^+	160
2008	Liquid H_2	π^-, K^-	190
2009	Liquid $\text{H}_2, \text{Ni}, \text{W}, \text{Pb}$	π^-, K^-, μ^-	190
2010	NH_3	μ^+	160
2011	NH_3	μ^+	200
2012	$\text{Ni}, \text{C}, \text{W}, \text{Pb}$	π^-, K^-, μ^-	190
2014	$\text{NH}_3, \text{W}, \text{Al}$	π^-	190
2015	$\text{NH}_3, \text{W}, \text{Al}$	π^-	190
2016	Liquid H_2	μ^\pm	160
2017	Liquid H_2	μ^\pm	160 (planned)

План работы группы ОИЯИ на 2017-2019 гг.

Приоритетом для группы ОИЯИ, участвующей в эксперименте COMPASS в рамках данного проекта, в 2017-2019 г. является анализ физических данных, полученных в 2002-2018 годах, участие в разработке физической программы с адронным пучком для следующей стадии эксперимента (2020+) и выработка предложений по соответствующей модернизации экспериментальной установки.

1) Прецизионное измерение электрической и магнитной поляризуемостей заряженного пиона.

В 2015 году коллаборацией COMPASS опубликованы результаты измерения поляризуемостей заряженного пиона α_π и β_π , полученные в предположении $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$ из анализа данных сеанса 2009 года. В настоящее время

эти результаты являются самыми точными в мире. Анализ экспериментальных данных, полученные в ходе сеанса 2012 года позволяет значительно повысить точность такого рода измерений, уменьшив как статистическую, так и систематическую ошибки. Кроме того, увеличенная статистика событий процесса $\pi Z \rightarrow \pi Z \gamma$ и расширенный кинематический диапазон позволит осуществить независимое измерение величин α_π и β_π . Присутствие незначительного количества каонов в адронном пучке позволяет надеяться на первое в мире наблюдение комптоновского рассеяния виртуального фотона на заряженном каоне $K Z \rightarrow K Z \gamma$ и на первое измерение поляризуемостей каона. Результаты по измерению поляризуемостей пиона и каона являются принципиально важными для проверки предсказательной силы низкоэнергетических феноменологических моделей КХД и прежде всего киральной теории возмущений (ChPT).

2) Измерение константы $F_{3\pi}$ реакции $\pi Z \rightarrow \pi Z \pi^0$

Константа $F_{3\pi}$ реакции $\pi Z \rightarrow \pi Z \pi^0$, как и константа распада нейтрального пиона, связана с гипотезой киральной аномалии. Точное измерение данной величины служит проверкой правильности предсказаний киральной теории (ChPT). Точность измерений, выполненных более 30 лет назад на установках FRAMM (ЦЕРН) и SIGMA (Протвино), в настоящее время является недостаточной для подобного рода проверок. Статистика событий данной реакции, набранная в 2009 и 2012 годах, в десятки раз превосходит статистику предыдущих экспериментов. Кроме того, предложенные недавно методы, позволяют использовать для извлечения указанной константы не только данные вблизи порога реакции, но и данные с массой системы $\pi\pi^0$ соответствующей рождению и распаду ρ -мезона. Достаточная статистика событий аналогичной реакции $\pi Z \rightarrow \pi Z \eta$ позволит уточнить оценку константы $F_{\pi\pi\eta}$, впервые измеренную на установке VES в Протвино.

Для киральной теории представляет также интерес измерение динамики сечений примаковских реакций с большим числом заряженных и нейтральных пионов в конечном состоянии.

Ожидаемые результаты являются важными для всех феноменологических моделей КХД в области низких энергий.

3) Поиск и изучение эксклюзивного лепто(фото)рождения экзотических чармониев

За последние 15 лет открыто свыше десятка чармоний-подобных состояний с массой выше 3.8 ГэВ, свойства и природа которых в настоящее время остаются неизвестными. Существует множество интерпретаций таких состояний: тетракварки, мезонные молекулы и т. д. До настоящего времени все они наблюдались либо в распадах более тяжёлых частиц, либо в e^+e^- аннигиляции,

либо инклюзивно в адронных соударениях. Огромная статистика по мюон-нуклонному рассеянию позволяет впервые исследовать эксклюзивное лепто(фото)рождение таких частиц, что могло бы служить важным источником уникальной информации об их природе. Группа ОИЯИ является инициатором исследований в данном направлении. Коллаборация COMPASS уже опубликовала в 2015 году результаты поиска эксклюзивного фоторождения заряженного адрона $Z_c(3900)$. В настоящее время активно изучается фоторождение чармоний-подобного состояния $X(3872)$. На очереди поиск фоторождения более тяжёлых заряженных и нейтральных XYZ состояний. Отдельно следует отметить потенциальную возможность наблюдения эксклюзивного фоторождения пентакварков P_c^+ , открытых коллаборацией LHCb в 2015 году, в реакции $\mu p \rightarrow \mu P_c^+ \rightarrow \mu p J/\psi$ (s-канал).

4) Наблюдение EMC-эффекта в процессе Дрелла-Яна.

Зависимость функций партонных распределений нуклона от атомного номера ядра, в котором нуклон находится, так называемый EMC-эффект, достаточно хорошо изучена в реакциях глубоко-неупругого рассеяния. Однако, несмотря на это, общепризнанной универсальной теоретической модели данного эффекта по-прежнему не существует. Особенность EMC-эффекта в процессе Дрелла-Яна с участием отрицательного пиона заключается в том, что доминирующий вклад вносят функции партонных распределений u-кварка, в то время как случае глубоко-неупругого рассеяния вклады u и d-кварков сопоставимы. Представляет интерес и наблюдение EMC-эффекта в рождении J/ψ -мезона. В данном случае вклад вносит не только процесс $q \bar{q} \text{bar} \rightarrow J/\psi$, но и процесс $g g \rightarrow J/\psi$. Так образом, можно получить косвенную информацию о ядерной модификации глюонных функций распределения в нуклоне. Поскольку COMPASS имеет самую большую в мире статистику DY-событий для эксперимента с неподвижной мишенью, данные измерения можно назвать уникальными.

5) Выработка предложений по физической программе и модернизации установки для следующей фазы эксперимента

В настоящее время ведётся активное обсуждение возможной будущей физической программы эксперимента COMPASS на период после 2020 года. Обсуждается возможность работы с радиосепарированным адронным пучком высокой интенсивности, обогащённым каонами и антипротонами. Изучение каон-фотонных взаимодействий в примаковских реакциях может стать новым важным шагом в проверке феноменологических моделей КХД в области низких энергий.

Система из трёх электромагнитных калориметров даёт возможность изучения редких процессов с фотонами в конечном состоянии, таких, например, как рождение быстрых фотонов (prompt photons). Изучение рождения быстрых

фотонов с использованием мадронных пучков позволит получить важную информацию о глюонной структуре нуклонов, пионов и каонов (для последних такая экспериментальная информация практически отсутствует).

В ходе реализации данного проекта будут подготовлены и представлены коллаборации предложения по дальнейшей физической программе эксперимента.

Ожидаемая модернизация установки может быть связана как её дополнением новыми детекторами, так и с заменой уже существующих детекторов. Координатные детекторы на основе мини-дрейфовых трубок (MDT), созданные в ОИЯИ и работающие в системе идентификации мюонов LAS, выработали значительную часть своего ресурса. В будущем они либо должны будут подвергнуться существенной модернизации, либо заменены на новые. В том числе возможна замена и на детекторы другого типа (GEM, RPC, Micromegas и др.).

В ходе выполнения проекта будут проведены необходимые методические исследования и подготовлены предложения по модернизации соответствующих подсистем установки COMPASS.