

**Исследование структуры нуклонов и адронов в ЦЕРН
(ПРОЕКТ COMPASS-II, тема 02-0-1085-2017/2019)
продление на 3 года**

АБСТРАКТ

Эксперимент COMPASS нацелен на изучение структуры нуклонов и адронной спектроскопии с помощью мюонных и адронных пучков высокой интенсивности и выполняется на супер протонном синхротроне SPS в ЦЕРН с 2001 года. Физический набор данных для изучения структуры нуклонов с 160 ГэВным мюонным пучком и поляризованной ${}^6\text{LiD}$ («дейтериевой») мишенью начался летом 2002 года и продолжался до осени 2004 года. После одного года остановки в 2005 году, КОМПАСС возобновил набор дейтериевых данных с пучком мюонов в 2006 году. 2008 и 2009 годы были посвящены программе COMPASS-II по адронной спектроскопии с пионным и протонным пучками. В 2007 и 2011 годах были выполнены измерения спиновых структурных функций на поляризованной NH_3 («протонной») мишени.

В 2010 году продление физической программы COMPASS-II было одобрено в ЦЕРН. Программа КОМПАСС-II включала серию измерений для изучения Обобщенных Партоновых Распределений (GPD) в нуклонах через глубоко-неупругое виртуальное Комптоновское рассеяние и через процессы с эксклюзивным рождением мезонов (HEMP), зависящих от поперечного импульса партоновых распределений (TMD PDFs) в полуинклюзивных процессах (SIDIS), и TMD PDFs в реакциях Дрелла-Яна с поляризованной мишенью. Также предусматривались дальнейшие исследования в области адронной спектроскопии. В январе 2013 был подписан новый Меморандум о взаимопонимании для выполнения этой программы. В 2012 были набраны данные для изучения реакций Примакова. Также был выполнен первый (пробный) набор данных для измерения обобщенных партоновых распределений. Первое измерение реакций Дрелл-Яна с пучком отрицательных пионов и с поляризованной протонной мишенью было выполнено в 2015 году. Экспериментальная установка было модифицирована для набора данных для GPD в 2016 и 2017 годах с жидко-водородной мишенью и мюонным пучком.

На протяжении всего периода проведения эксперимента, а также на стадии подготовки его отдельных частей в его реализации участвовала и участвует группа сотрудников ОИЯИ.

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 только 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, 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 изучения процесса Дрелла-Яна, может использоваться в качестве дополнительной мишени для изучения EMC-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 ниже представлена информация по основным выборкам данных, полученным в период 2002-2016.

Год	Мишень	Пучок	Импульс, 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	K^- , π^-	190
2009	Liquid H_2 , Ni, W, Pb	μ^- , K^- , π^-	190
2010	NH_3	μ^+	160
2011	NH_3	μ^+	200
2012	Ni, C, W, Pb	μ^- , K^- , π^- 190	
2014	NH_3 , W, Al	π^-	190
2015	NH_3 , W, Al	π^-	190
2016	Liquid H_2	μ^\pm	160
2017	Liquid H_2	μ^\pm	160 (план)
2018	NH_3 , W, Al	π^-	190 (план)

В предыдущие годы сотрудники группы ОИЯИ внесли существенный вклад в получение новых результатов по спиновой асимметрии A_1^P и продольной структурной функции g_1^P . Эти результаты были получены сотрудничеством COMPASS, используя, пучок 200 ГэВных поляризованных мюонов, который взаимодействовали с продольно поляризованной NH_3 мишенью. Данные были собраны в 2011 году и были дополнены данными, набранными в 2007 году с 160-ГэВным пучком, преимущественно для малых значений x -Бьеркена. Они улучшили статистическую точность $g_1(x)$ приблизительно в два раза в области для x менее 0,02. Было выполнено фитирование g_1 в следующем за лидирующем порядке КХД. Это привело к новому определению вклада кварков в спин нуклона, $\Delta\Sigma$, который оказался в пределах от 0,26 до 0,36, и к переоценке первого момента g_1 . Неопределенность в измерении $\Delta\Sigma$ связана со значительной неопределенности в определении глюонных спинзависимых распределений $\Delta g/g = 0,113 \pm 0,038$ (стат.) $\pm 0,036$ (сист.). Новая оценка правила сумм Бьеркена, основанная на результатах COMPASS по изучению несинглетной структурной функции $g_1(x)$, дает новое значение аксиальной и векторной констант связи $|g_A/g_V| = 1,22 \pm 0,05$ (стат.) $\pm 0,10$ (сист.), которое подтверждает правило сумм с точностью приблизительно 9%.

Измерения по программе COMPASS-II были начаты в 2012 году изучения поляризуемости пиона/каона через реакции Примакова и с тестами на выполнимость программы измерений GPD с использованием частично модернизированного спектрометра. Дальнейшие измерения были продолжены в 2014 году после завершения остановки ускорительного комплекса ЦЕРН. Эти измерения были сфокусированы на исследованиях распределений, зависящих от поперечного импульса (TMD) партонов в процессах Дрелл-Яновского рождения лептонных пар (2014-2015 и в 2018 годы), и на исследованиях обобщенных распределений партонов (GPDs) в процессах жесткого эксклюзивного рождения мезонов, а также в процессах DVCS (2016-2017) (Рис. 1). Программа измерений COMPASS-II в 2012-2018 годах представлена на рисунке 1.

Параллельно с программой GPD будут изучаться полуниклюзивные реакции с высокой статистической точностью.

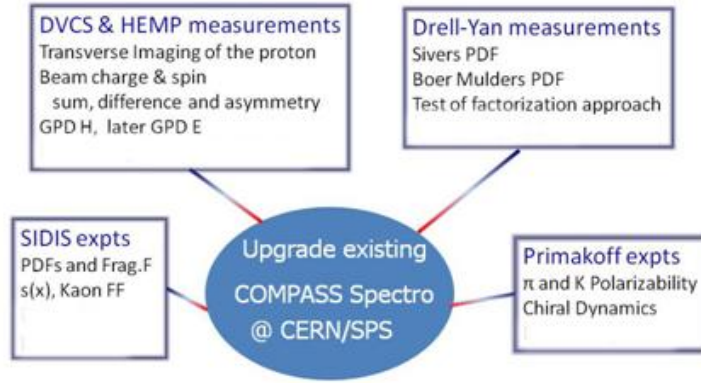


Рисунок 1: Схематический вид программы измерений эксперимента COMPASS-II в 2012-2018 годах.

Один из результатов, опубликованных коллаборацией КОМПАСС - измерение поляризуемости пиона, подтверждающее предсказание киральной теории сильного взаимодействия. Так киральная эффективная теория (КЭТ) предсказывает для заряженного пиона - одного из легчайших адронов, значения поляризуемостей: $\alpha_\pi = (2.9 \pm 0.5) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$ и $\beta_\pi = (-2.8 \pm 0.5) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$ соответственно. Из анализа 63000 событий, поляризуемость пиона равна $\alpha_\pi = (2.0 \pm 0.6 \pm 0.7) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$ с предположением, что $\alpha_\pi = -\beta_\pi$, которое связывает электрические и магнитные поляризуемости. Значения этих поляризуемостей могут быть непосредственно извлечены из дифференциального сечения комптоновского рассеяния.

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 $KZ \rightarrow KZ \gamma$ 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).

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 измеренной 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 феноменологических моделей КХД в области низких энергий.

В первой части физической программы COMPASS-II в 2017-2019 годах будут изучать Обобщенные Партоновые Распределения через измерение рассеяния поляризованных мюонов на жидко-водородной мишени, вокруг которой создан детектор отдачи и новый электро-магнитный калориметр ECAL0.

Калориметр, предложенный и разработанный группой ОИЯИ, является уникальным прибором, типа “шашлык” (сцинтиллятор, свинец), в котором вместо традиционных фотоэлектронных умножителей применены самые современные фотоприемники – микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД) с ультравысокой плотностью пикселей (до 15 тыс./мм²).

В марте - апреле 2016 года ECAL0 был полностью собран, проверен и включен в состав установки COMPASS, и в данный момент успешно используется для набора данных. Основные свойства нового калориметра можно сформулировать таким образом: ECAL0 эффективно регистрирует прямые фотоны от реакций DVCS и DVMP в широком диапазоне энергий (0,2– 40,0 ГэВ). Вместе с ECAL1 (Рис.2) эффективно регистрирует π^0 , что позволяет существенно снизить вклад фоновых процессов, идущих от распадов π^0 . Такие свойства созданного прибора существенно расширяют диапазон измерений с минимальными систематическими неопределенностями.

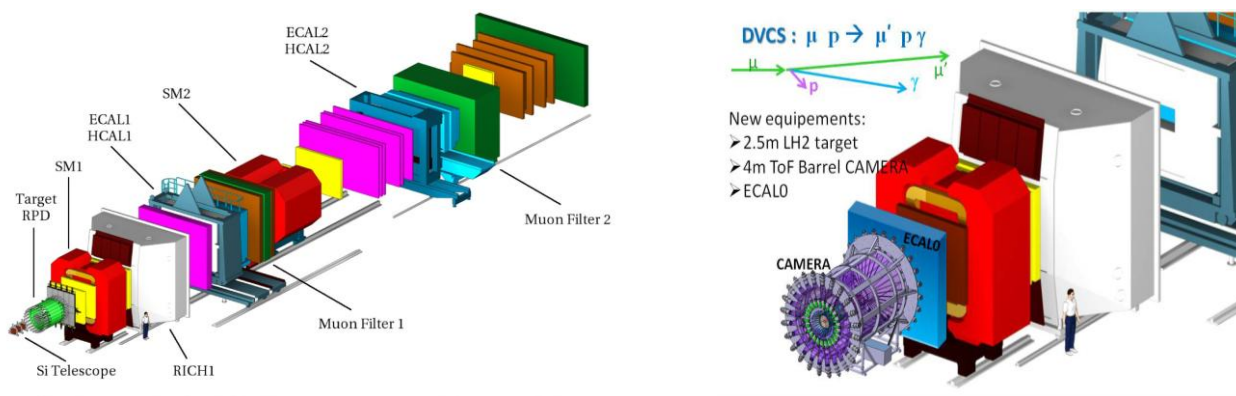


Рисунок 2: Экспериментальная установка COMPASS (слева) и передняя часть спектрометра.

Набор данных по программе GPD начался в 2016 и будет продолжен в 2017. Первые предварительные результаты будут скоро представлены. Главные задачи исследований GPD в жестких эксклюзивных процессах с рождением мезонов (HEMP) и фотонов следующие:

- измерения t -наклона DVCS и поперечного сечения HEMP (поперечные распределения партонов);
- исследования сумм и разностей амплитуд Re (TDVCS) и Im (TDVCS) для определения GPD H) через измерения асимметрий, зависящих от заряда и спинового состояния пучков;
- измерения продольного вклада векторных Мезонов ρ_0 , ρ^+ , ω , Φ (GPD H);
- измерения суммарных вкладов ρ_0 (GPDs E и E_T).

Запланированная точность измерений t -наклона для двухлетнего набора данных представлена на Рис. 3.

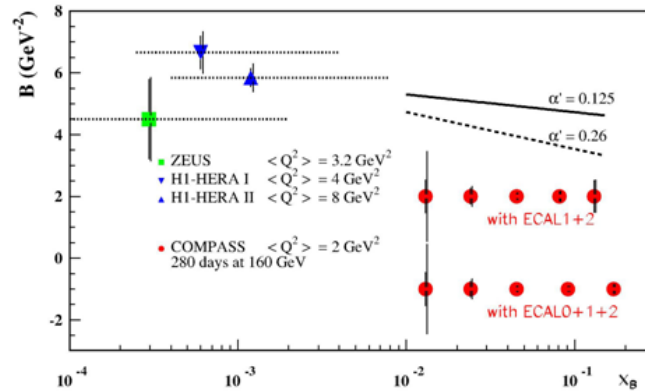


Рисунок 3: Запланированные точности измерений x_B зависимости t -наклона параметра B (красные заполненные точки), использование только ECAL1 и ECAL2 (верхний ряд) и с дополнительным калориметром ECAL0 (нижний ряд).

Результаты измерений DVCS с неполяризованной мишенью, главным образом, предоставят информацию о GPD H . Запланированная точность для одного из интервалов по x_B для зарядовой и спиновой пучковых асимметрий показана на Рис.4.

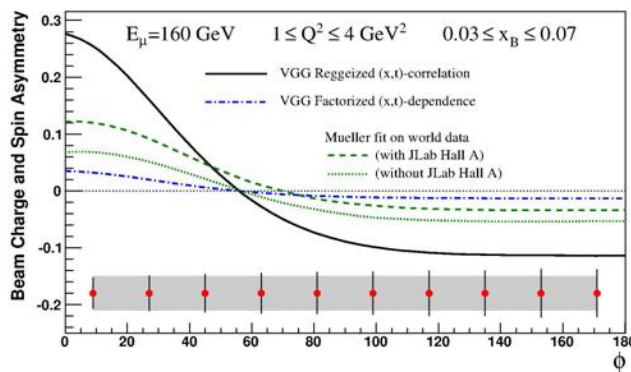


Рисунок 4: Запланированная точность измерений зарядовой и спиновой асимметрий, также показаны различные модельные предсказания для этих асимметрий.

Исследования реакций SIDIS (Полуинклюзивное Глубоко- неупругое Рассеяние Неэластичное Рассеивание) являются одной из самых продвинутых задач физической программы COMPASS-II. В процессе анализа данных, набранных в 2002-2010 годах были получены следующие результаты:

- По изучению поперечных распределений:
 - измерены асимметрии Коллинза с поляризованной дейтронной и протонной мишенью в реакция с рождением h^\pm , π^\pm и K^\pm ;
 - изучены распределения и асимметрии для данных с поляризованной протонной и дейтронной мишенями в реакциях с рождением двух адронов (h^\pm , π^\pm , K^\pm);
 - изучено взаимодействие между асимметриями Коллинза и асимметриями в процессах с рождением двух адронов;
- По изучению TMD партонных распределений:
 - измерены асимметрии Сиверса;
 - изучены 6 (transverse single asymmetry) TSA асимметрий для данных с поляризованной дейтронной и протонной мишенями в реакциях с рождением одного выделенного заряженного адрона h^\pm , π^\pm , K^\pm ;

- измерены глюонные асимметрии Сиверса для данных с поперечно поляризованными протонной и дейтронной мишенями в реакциях с рождением J/ψ и в реакциях с рождением адронных пар с большими значениями p_T ;
- изучены азимутальные асимметрии для данных с неполяризованной дейтронной мишенью в реакциях с рождением адронов.
- По изучению адронных множественностей:
 - выполнены исследования в реакциях с рождением одного адрона в зависимости от p_T^2 для данных с дейтронной мишенью;
 - выполнены исследования в реакциях с рождением двух.

В ближайшее время ожидается получение следующих результатов на основе уже набранных экспериментальных данных:

- взвешенные асимметрии, зависящие от p_T и распределения Бесселя, из данных с поперечно поляризованной протонной мишенью;
- азимутальные асимметрии, в реакциях с рождением двух адронов, из данных с неполяризованной дейтронной мишенью;
- функции для поляризованных распределений Дрелла-Яна (тест знака) из данных, набранных в 2014-2015 годах.

Вышеупомянутые исследования продолжатся с новыми данными, набранными в 2016-2017 годах с неполяризованной протонной мишенью (параллельно с DVCS).

Во второй части физической программы коллаборация выполнила исследования структуры адронов в процессах рождения Дрелл-Яна лептонных пар через измерения рассеяния пионов на поляризованной водородной мишени для получения данных по распределениям, зависимым от поперечного импульса распределения партона и сравнить их с такими же распределениями, полученными в SIDIS. Будут изучены распределения типа Сиверса, Бура-Мулдерса и "предцелосити". Набор данных по этой программе будет продолжен и в 2018 году.

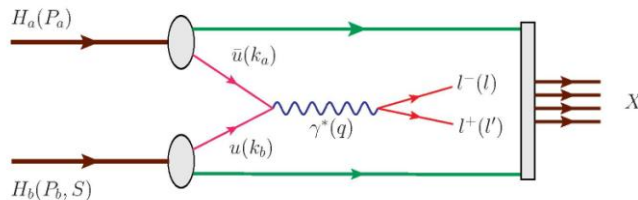


Рисунок 5: Диаграмма процесса Дрелла-Яна.

Поляризованный процесс Дрелла-Яна (Рис.5) является альтернативным методом получения информации по TMD партонным распределениям. Его преимущество по сравнению с реакциями SIDIS состоит в отсутствии функций фрагментации, а измеряемые спиновые асимметрии выражаются (конволюция) только через два TMD партонных распределения. В лидирующем порядке КХД, для поперечно поляризованного случая, сечение процессов Дрелла-Яна может быть записано через азимутальные асимметрии следующим образом:

$$\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} = \frac{\alpha^2}{Fq^2} \hat{\sigma}_U \left\{ (1 + D_{[\sin^2 \theta]} A_{UU}^{\cos 2\phi} \cos 2\phi) + |\vec{S}_T| \left[A_{UT}^{\sin \phi_S} \sin \phi_S + D_{[\sin^2 \theta]} \left(A_{UT}^{\sin(2\phi + \phi_S)} \sin(2\phi + \phi_S) + A_{UT}^{\sin(2\phi - \phi_S)} \sin(2\phi - \phi_S) \right) \right] \right\}$$

Измерения четырех азимутальных асимметрий дают возможность получить данные по следующим конволюциям партонных распределений (Рис.6):

- пионное TMD Бура-Мулдерса и протонное Бура-Мулдерса - для $A_{UU}^{\cos 2\phi}$;
- пионное неполяризованное TMD и протонное TMD Сиверса - для $A_{UT}^{\sin \phi_S}$;
- пионное TMD Бура-Мулдерса и протонное TMD "предцелосити" - для $A_{UT}^{\sin(2\phi+\phi_S)}$;
- пионное TMD Бура-Мулдерса и протонное TMD поперечность - для $A_{UT}^{\sin(2\phi-\phi_S)}$.

$$\begin{aligned}
 d\sigma(\pi^- p^\uparrow \rightarrow \mu^+ \mu^- X) = & \\
 = 1 + \overline{h}_1^\perp \otimes h_1^\perp \cos(2\phi) & \\
 + |S_T| \overline{f}_1 \otimes \overline{f}_{1T}^\perp \sin \phi_S & \\
 + |S_T| \overline{h}_1^\perp \otimes h_{1T}^\perp \sin(2\phi + \phi_S) & \\
 + |S_T| \overline{h}_1^\perp \otimes h_1 \sin(2\phi - \phi_S) &
 \end{aligned}$$

beam target
pion proton

Рисунок 6: Сечение процессов Дрелл-Яна в реакциях на поперечно поляризованной мишени, представленное через партонные распределения.

Одной из задач группы ОИЯИ в 2017-2019 года является изучение EMC эффекта в процессах 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 $q \bar{q} \rightarrow J/\psi$, 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.

В дополнение к вышеуказанным работам физиков ОИЯИ, есть еще одна задача - 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 тяжелых частиц, либо в e^+e^- аннигиляции, либо инклюзивно в адронных соударениях. Огромная статистика по мюоннуклонному 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 тяжелых 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).

В соответствии с меморандумом обязательства ОИЯИ заключаются в поддержке HCAL1, MW1, и нового электромагнитного калориметра ECAL0.

Меморандум понимания вступил в силу с 1 января 2013 года и будет действовать до 31 декабря 2017 года. Продление меморандума без изменений на следующие три года было одобрено FRC по рекомендации SPSC (Комитет по экспериментам на ускорительных комплексах SPS and PS в ЦЕРН).

В 2017-2019 COMPASS-II планирует набрать экспериментальные данные на мюоном (2017, и это возможно в 2018), и на пионом пучках (это возможно в 2018). Анализ экспериментальных данных будет продолжен, и будет продолжена работа над подготовкой предложения новой физической программы после 2020. План работ представлен ниже и в таблице 2.

2017:

Участие в наборе экспериментальных данных;
Техническое обслуживание детекторов HCAL1, MW1 и ECAL0;
Развитие программного обеспечения для MW1/HCAL1/ECAL0;
Участие в анализе экспериментальных данных;

2018:

Участие в наборе экспериментальных данных;
Техническое обслуживание детекторов HCAL1, MW1 и ECAL0;
Развитие программного обеспечения для MW1/HCAL1/ECAL0;
Участие в анализе экспериментальных данных;

2019:

Участие в анализе экспериментальных данных;

Общие расходы ОИЯИ во время этапа проекта в 2014-2016 годах (тема 1085) были равны 770 тысячам долларов США. \$130 тысяч были выделены ЦЕРН (NA58, COMPASS-II) для поддержки командирования экспертов от ОИЯИ в ЦЕРН. Коллаборация NA58 выделяет 40 тысяч швейцарских франков в год для оплаты общих работ, выполняемых инженерами ОИЯИ в ЦЕРН во время подготовки и поддержки эксперимента, и в процессе набора данных. За три года \$25 тысяч были потрачены из грантов Чешской Республики. Средства темы 1085 расходовались также на проведение международных рабочих совещаний в г. Суздале (май 2015).

Сумма необходимого финансирования на 2017 - 2019 равна 737 тысячам долларов США из бюджета ОИЯИ. Главная часть этих расходов требуется для участия физиков ОИЯИ в наборе данных на установке COMPASS в ЦЕРН, для обслуживания детекторов и вкладов в общий фонд коллаборации согласно обязательствам MoU. Ресурсы, необходимые для реализации проекта по годам, представлены далее в таблице 1. План работы по годам представлен в Таблице 2.

Таблица1: Полная сметная стоимость проекта COMPASS-II (в тыс. долларов США).

#	Item	Total	2017	2018	2019
1.	design bureau (man-h)				
2.	workshops (man-h)				
3.	Materials	45	20	15	10
4.	Equipment	75	25	25	25
5.	Subcontracts (collab common fund)	222	72	75	75
6.	Travels, including outside RUSSIA	380	150	130	100
	inside RUSSIA	15	5	5	5
	Total K\$	737	272	250	215

Таблица2: План работ в 2017-2019 годах.

№	Название	Год											
		2017				2018				2019			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	Набор данных												
2	Подготовка ECAL0/HCAL1												
3	Обслуживание ECAL0												
4	Обслуживание HCAL1												
5	Обслуживание MW1												
6	Система низковольт.питания и подготовка MW1												
7	MW1/HCAL1/ECAL0 программное обеспечение												
8	Анализ данных												