

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

**АБСТРАКТ**

КОМПАСС – эксперимент по физике высоких энергий, который выполняется на супер протонном синхротроне SPS в ЦЕРН, в Женеве, Швейцария. Целью этого эксперимента является изучение структуры нуклонов и адронной спектроскопия с помощью мюонных и адронных пучков высокой интенсивности.

В феврале 1997 года эксперимент был одобрен в ЦЕРН и окончательный вариант меморандума о взаимопонимании был подписан в сентябре 1998 года. Спектрометр был установлен в 1999 - 2000 и введен в эксплуатацию в техническом наборе данных в 2001 году. 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 КОМПАСС по адронной спектроскопии с пионным и протонным пучками. В 2007 и 2011 годах были выполнены измерения спиновых структурных функций на поляризованной  $\text{NH}_3$  («протонной») мишени.

В 2010 году продление физической программы COMPASS 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 (NEMP), 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.

Существенный вклад также внесли сотрудники группы ОИЯИ в получение новых результатов по спиновой асимметрии  $A_1^P$  и продольной структурной функции  $g_1^P$ . Эти результаты были получены сотрудничеством КОМПАСС, используя, пучок 200 ГэВных поляризованных мюонов, который взаимодействовали с продольно поляризованной  $\text{NH}_3$  мишенью. Данные были собраны в 2011 году и были дополнены данными, набранными в 2007 году с 160-ГэВным пучком, в особенности для малых значений  $x$ . 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 к лидирующему порядку 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 определении  $\Delta\Sigma$  исходит от 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 КОМПАССа по 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%.

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 первой части физической программы COMPASS-II в 2017-2019 годах будет 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./мм<sup>2</sup>).

В марте - апреле 2016 года ECAL0 был полностью собран, проверен и включен в состав установки КОМПАСС, и в данный момент успешно используется для набора данных. Основные свойства нового калориметра можно сформулировать таким образом: ECAL0 эффективно регистрирует прямые фотоны от реакций DVSC и DVMP в широком диапазоне энергий (0,2–40ГэВ). Вместе с ECAL1 (Рис.1) эффективно регистрирует  $\pi^0$ , что позволяет существенно снизить вклад фоновых процессов, идущих от распадов  $\pi^0$ . Такие свойства нашего прибора существенно расширяют диапазон измерений с минимальными систематическими неопределенностями.

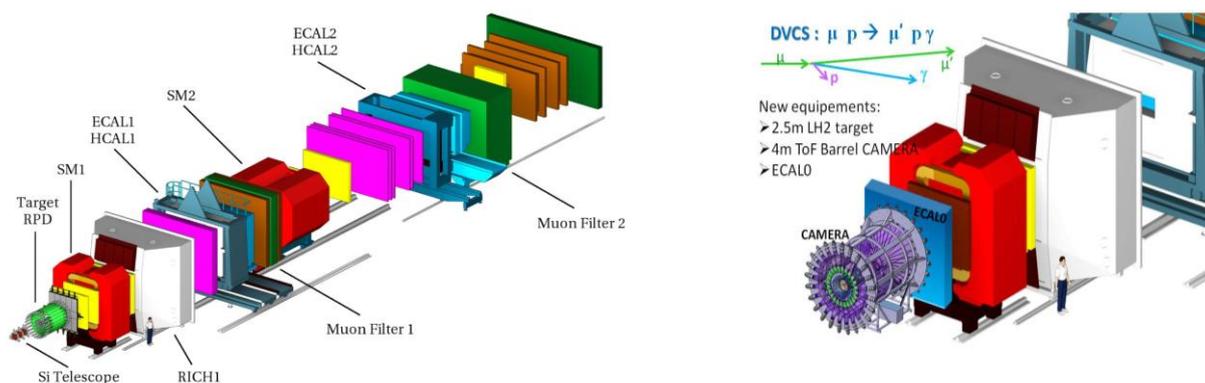


Рисунок 1: Экспериментальная установка КОМПАСС (слева) и передняя часть спектрометра.

Стабильная работа нашего калориметра уже в течение первых месяцев набора данных была отмечена коллаборацией КОМПАСС.

Важно отметить, что в разработке систем калориметра принимали участие группы из России, Германии(Мюнхен)б Польши(Варшава) и Чешской Республики (Прага).

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 чтобы получить данные по распределениям, зависимым от поперечного импульса распределениям 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 возможно будет продолжен и в 2018 году.

В 2016 была начата подготовка проекта КОМПАСА-III была. В марте в ЦЕРНе состоялось первое международное рабочее совещание “КОМПАСС после 2020». Цель этого рабочего совещания состояла в том, чтобы исследовать возможности для установок с фиксированной мишенью подобных COMPASS эксперименту в CERN после 2020. Научная программа включала обзоры различных областей физики (TMDs, GPDs, спектроскопия, экзотика, тесты ChPT, астрофизика), и обзоры результатов, ожидаемых в течении 10 последующих лет из лабораторий

мира. Более тогда 100 физиков участвовали в рабочем совещании. Основные результаты семинара следующие:

- Существующие адронные и мюонные пучки позволяют расширять текущую программу КОМПАСС-II, делая измерения эксклюзивных процессов, SIDIS и Дрелл-Яна уникальными;
- RF сепарация антипротонных/каонных пучков обеспечила бы уникальную возможность измерений для установок с фиксированной мишенью подобных COMPASS эксперименту в CERN.

Будущие GPD и Дрелл-Ян программы требуют создания нового детектора отдачи, который должен быть смонтирован внутри магнита поляризованной мишени. Группа ОИЯИ начала подготовку к R&D тестам такого детектора. Эта модернизация поляризованной мишени позволит получить данные по ОПР E через два процесса, которые могут быть измерены на мюонным пучке: DVCS ( $\mu p \rightarrow \mu p \gamma$ ) и NEMP ( $\mu p \rightarrow \mu p (\omega) \gamma$ ).

В соответствии с меморандумом обязательства ОИЯИ заключаются в поддержке HCAL1, MW1, и нового электромагнитного калориметра ECAL0. Новый меморандум содержит следующие положения:

- COMPASS сотрудничество, существующее на основе Меморандума понимания с 1998 года, и состоящее из групп сотрудничающих учреждений из членов ЦЕРН и нечленов ЦЕРН, предложило расширить оригинальную физическую программу и провести набор данных для изучения структуры адронов в глубоко-виртуальном комптоновском рассеянии, в процессах с рождением жестких эксклюзивных мезонов, полуинклюзивных реакций, а также в процессах поляризованного Дрелла-Яна и реакций Примакова.

- В конце каждого года, предварительный бюджет на следующий год устанавливается на основе предусмотренных текущих расходов и непредвиденных расходов. Бюджет утверждается Финансовым комитетом ЦЕРН (FRC). Для покрытия эксплуатационных расходов, создается фонд для поддержки текущих работ, с участием всех сотрудничающих учреждений. Вклад от каждой группы на следующий год определяется из расчета доли бюджета приходящейся "на душу" в зависимости от количества членов группы на 1 июля текущего года.

Основная активность по анализу данных в рамках проекта КОМПАСА-II сосредоточится на GPD и SIDIS исследованиях. Исследования реакций Дрелл-Яна и Примакова, главным образом, будут выполнены в рамках нового проекта, предложенного ЛЯП.

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 будет одобрено FRC по рекомендации SPSC (Комитет по экспериментам на ускорительных комплексах SPS and PS в ЦЕРН).

В 2017-2019 КОМПАСС-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. Подробный план работы представлен ниже.

#### **2017:**

- Участие в наборе экспериментальных данных;
- Техническая поддержка детекторов HCAL1, MW1 и ECAL0;
- Развитие программного обеспечения для MW1/HCAL1/ECAL0;
- Участие в анализе экспериментальных данных;
- Подготовка проекта COMPASS-III.

#### **2018:**

- Участие в наборе экспериментальных данных;
- Техническая поддержка детекторов HCAL1, MW1 и ECAL0;
- Развитие программного обеспечения для MW1/HCAL1/ECAL0;
- Участие в анализе экспериментальных данных;
- Подготовка проекта COMPASS-III.

**2019:**

- Участие в анализе экспериментальных данных;
- Подготовка проекта COMPASS-III;
- Модернизация детекторов для проекта COMPASS-III.

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

Сумма необходимого финансирования на 2017 - 2019 равна 852 тысячам долларов США из бюджета ОИЯИ. Главная часть этих расходов требуется для участия физиков ОИЯИ в наборе данных, для обслуживания детекторов и вкладов в общий фонд коллаборации согласно обязательствам от MoU. Ресурсы, необходимые для реализации проекта по годам, представлены далее в таблице.

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

#		Сумма	2017	2018	2019
1.	КОНСТРУКТ. БЮРО (чел.-ч.)	300	100	100	100
2.	ОПЫТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО(чел.-ч)	700	500	100	100
3.	Материалы	110	40	35	35
4.	Оборудование	75	25	25	25
5.	Контракты (взносы в коллабор.)	222	72	75	75
6.	Командирование				
	а) За пределы России	420	150	150	120
	б) По России	15	5	5	5
	СУММА (ТЫС.ДОЛЛ.)	842	292	290	260
	(чел.-ч.)	1000	600	200	200

№	Название	Год											
		2017				2018				2019			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	Набор данных												
2	Обслуживание ECAL0												
3	Система мониторинга и ремонт ECAL0/HCAL1												
4	Обслуживание HCAL1												
5	Обслуживание MW1												
6	Система низковольтного питания MW1												
7	MW1/HCAL1/ECAL0 программное обеспечение												
8	Анализ данных												
9	Создание системы удаленного контроля												
10	Участие в подготовке проекта COMPASS-III												
11	Модернизация детекторов для COMPASS-III												