



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2010-14
ОЭФ

Г.Д. Алексеев¹, С.Л. Белостоцкий², А.В. Бухаров³,
А.Н. Васильев, А.С. Водопьянов¹, А.С. Герасимов⁴,
В.Х. Додохов¹, Е.К. Кошурников¹, Ю.Ю. Лобанов¹,
Д.А. Морозов, В.В. Мочалов, А.Г. Ольшевский¹,
А.В. Рязанцев, А.А. Семёнов³, П.А. Семёнов,
П.В. Федорец⁴, В.Д. Чернецкий⁴

Российские институты в эксперименте ПАНДА

Направлено в АЭ

¹Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна

²Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова (ПИЯФ), Гатчина

³Московский энергетический институт (МЭИ), Москва

⁴Государственный научный центр Институт теоретической и экспериментальной физики (ГНЦ ИТЭФ), Москва

Протвино 2010

Аннотация

Алексеев Г.Д. и др. Российские институты в эксперименте ПАНДА: Препринт ИФВЭ 2010-14. – Протвино, 2010. – 22 с., 3 рис., библиогр.: 35.

Одним из ключевых экспериментов в Европейском исследовательском центре ионов и антипротонов является эксперимент ПАНДА, который находится в стадии разработки в ГСИ близ Дармштадта в Германии. Физическая программа эксперимента ПАНДА направлена на поиск экзотических частиц и изучение свойств адронов, в том числе адронной спектроскопии, структуры нуклона, эффектов ядерной среды, гиперядер и на другие интересные исследования. Большой интерес представляют новые экстремальные формы материи, такие экзотические адроны, как предсказывает теория: глюболы и гибриды. Они не были наблюдаемы до сих пор.

Установка ПАНДА будет собрана в накопительном кольце пучка антипротонов (HESR). Антипротоны будут накапливаться в кольце с энергиями в диапазоне от 1,5 до 15 ГэВ. Ожидается до $2 \cdot 10^7$ взаимодействий в секунду на внутренней водородной (кластерной или корпускулярной) мишени. В дополнение к высокой светимости эксперимента ($2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$), пучок будет высокомонохроматическим. Из-за стохастического и электронного охлаждения импульсное разрешение пучка ожидается на уровне $10^{-4} - 10^{-5}$, что делает возможным измерение массы частиц с рекордным разрешением 100 кэВ. Российские институты участвуют в работах по восьми детекторам и узлам установки ПАНДА. Российский вклад в эксперимент ПАНДА составляет примерно одну треть от стоимости всей установки.

Abstract

Alexeev G.D. et al. Russian Institutes in PANDA: IHEP Preprint 2010-14. – Protvino, 2010. – p. 22, figs. 3, refs.: 35.

The PANDA experiment is one of the key experiments at the Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) which is under construction at GSI near Darmstadt in Germany. Physics program of the PANDA experiment aims at search for exotic particles and study of hadron properties including hadron spectroscopy, nucleon structure, nucleus medium effects, hypernuclei, and other interesting investigations. Of great interest are new extreme forms of matter, such as predicted by theory exotic hadrons: glueballs and hybrids. They have not been still observed up to now.

The PANDA setup will be mounted at the antiproton beam storage ring (HESR). The antiprotons will be stored in the ring with energies in the range from 1.5 to 15 GeV. Up to $2 \cdot 10^7$ interactions per second on an internal hydrogen (cluster or pellet) target are anticipated in PANDA. In addition to high luminosity of the experiment ($2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$), the HESR beam will be highly monochromatic. Due to stochastic and electron cooling, fractional energy spread of the beam is expected to be on the level of $10^{-4} - 10^{-5}$ thus making it feasible a record mass measurement resolution of 100 keV. Russian institutes are involved in working out of eight detectors and installation units of PANDA. Russian contribution to the PANDA experiment is about one-third of the cost of the entire system.

1. Введение

Физическая программа эксперимента ПАНДА нацелена на поиск новых экстремальных форм материи, таких, например, как предсказываемые теорией экзотические адроны: глюболы и гибриды. Глюболы состоят из переносчиков сильных взаимодействий – глюонов. Гибриды являются смесью кварков и глюонов.

Помимо этой сверхзадачи, программа эксперимента охватывает широкий спектр исследований в области адронной и ядерной физики. Это, в частности, изучение узких состояний чармония выше порога образования пар $D\bar{D}$ -мезонов. Другое важное направление – исследование гипер-ядер (в том числе – двойных) и чарм-ядер, когда странная (одна или две) или очарованная частица «вживляется» в ядро вместо обычного нуклона.

Поиск новых форм материи при взаимодействии антивещества с веществом в эксперименте ПАНДА будет уникальным дополнением к исследованиям, проводимым при ультравысоких энергиях на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

Исследования предполагается проводить на антипротонном пучке накопительного кольца HESR при энергиях антипротонов до 15 ГэВ с использованием методов электронного и стохастического охлаждения. Ожидается рекордная в мировой практике интенсивность чистого антипротонного пучка, обеспечивающая до $2 \cdot 10^7$ взаимодействий в секунду на внутренней водородной мишени. Помимо высокой интенсивности, пучок антипротонов будет беспрецедентным для адронных пучков по степени монохроматичности. Монохроматичность пучка ожидается на уровне $10^{-4} - 10^{-5}$, высокое энергетическое разрешение измерительного комплекса (пучок антипротонов + ПАНДА-детектор) позволит надежно идентифицировать неизученные до сих пор состояния, массы которых будут измеряться с рекордной точностью 100 кэВ. При аннигиляции протонов и антипротонов на установке ПАНДА не будет никаких ограничений на квантовые числа прямо рождающихся частиц в отличие от e^+e^- -коллайдеров, где могут рождаться только частицы с квантовыми числами 1^- .

Нигде в России нет и в обозримом будущем не планируется получение подобного уникального антипротонного пучка. Участие российских учёных в эксперименте ПАНДА даст возможность проведения экспериментальных исследований самых актуальных проблем физики микромира в течение 2–3 десятилетий, что существенно обогатит российскую науку. Принципиально новая сверхбыстрая электроника и система сбора данных, создаваемые для этого эксперимента, будут хорошей базой для приобретения опыта создания подобных систем в России; нашим специалистам будет также открыт доступ к работе с электроникой нового поколения. В подготовке эксперимента ПАНДА уже участвуют более 400 ученых из ~60 институтов 17 стран. Участие России в этом престижном проекте открывает огромные возможности привлечения молодых российских специалистов, аспирантов и студентов к работе в самых современных международных научных исследованиях, где они смогут быстро повысить свой научный потенциал.

При создании установки ПАНДА будут использованы самые современные технологии, что позволит достичь запланированных высоких разрешений по массам, энергиям и импульсам, идентификации и детектированию частиц в почти полном телесном угле. Установка будет способна измерять импульсы заряженных частиц в диапазоне

от 100 МэВ/с до 8 ГэВ/с. При взаимодействии высокоэнергетических антипротонов с ядрами мишени во многих случаях рождаются очарованные мезоны, а также странные барионы и мезоны. Их длины распада (расстояния от точки рождения до точки распада) варьируются в интервале от десятков микрон до сантиметров. Для идентификации таких событий предполагается использование микровершинного детектора, расположенного в непосредственной близости от места взаимодействия антипротонного пучка с мишенью и обладающего достаточно высоким пространственным разрешением. Ключевым детектором установки является электромагнитный калориметр с высоким энергетическим разрешением. Для идентификации каонов, пионов и мюонов в состав установки входят черенковские счетчики и детекторы времени пролета.

Установка ПАНДА схематически показана на рис. 1. Она состоит из двух магнитных спектрометров. Это **спектрометр мишени**, окружающий область взаимодействия и расположенный внутри сверхпроводящего соленоида с разделенной обмоткой для измерения импульсов заряженных частиц, и **передний спектрометр** с широкоапертурным дипольным магнитом для регистрации высокоэнергичных частиц, летящих вперед в диапазоне вертикальных и горизонтальных углов $\pm 5^\circ$ и $\pm 10^\circ$ соответственно.

В рамках участия в проекте ПАНДА ГНЦ ИФВЭ отвечает за создание центрального электромагнитного калориметра из вольфрамата свинца, переднего электромагнитного калориметра типа «шашлык» и принимает участие в создании переднего вершинного кремниевого детектора. ОИЯИ отвечает за разработку и создание ядра сверхпроводящего соленоида, детектирующих модулей на основе кварцевых радиаторов центрального черенковского детектора полного внутреннего отражения и мюонной системы всего эксперимента ПАНДА. ГНЦ ИТЭФ совместно с МЭИ участвуют в разработке и создании внутренней корпускулярной водородной мишени. Ученые из ПИЯФ ответственны за разработку и создание переднего детектора времени пролета. Эти восемь конкретных детекторов и узлов установки ПАНДА являются согласованным с международным научным сообществом ПАНДА вкладом российских институтов. Ниже дается краткое описание нескольких направлений по развитию новых и высоких технологий, необходимых для создания данных детекторов и узлов.

Спектрометр мишени

Передний спектрометр

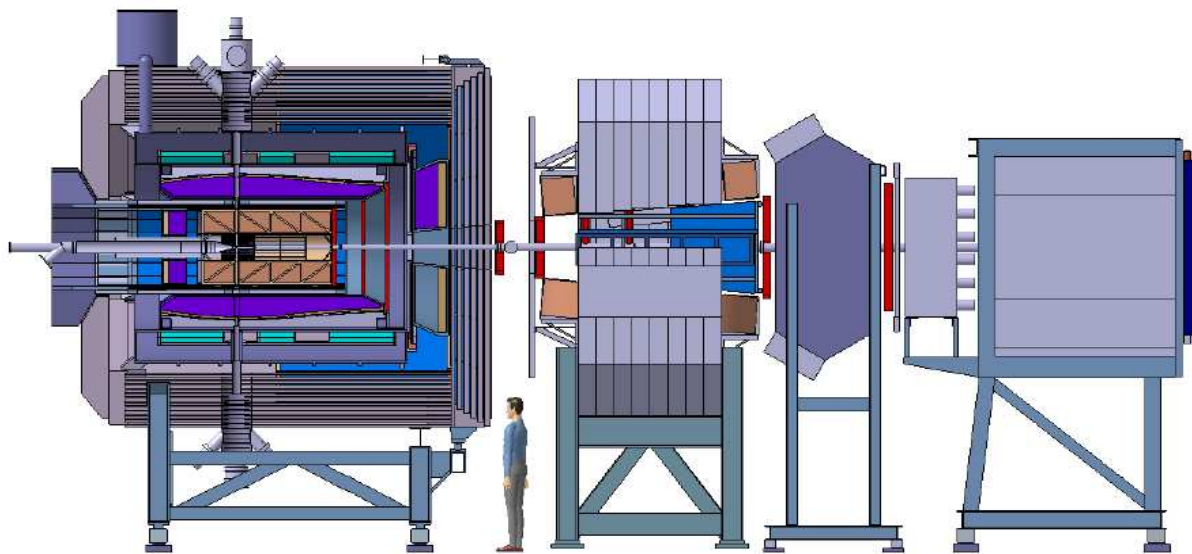


Рис. 1. Экспериментальная установка ПАНДА состоит из двух частей – спектрометра мишени и переднего спектрометра. Спектрометр мишени служит для регистрации частиц, вылетающих из мишени под углами $10^\circ - 140^\circ$, а передний спектрометр – для регистрации частиц, вылетающих из мишени вперед, под углами менее 10° . Спектрометр мишени расположен внутри соленоида, в центре которого находится небольшая область взаимодействия антипротонного пучка с корпускулярной (pellets) или кластерной мишенью. Пучок частиц мишени (pellets или кластеры) направлен вертикально сверху вниз. Окружает область взаимодействия вершинный детектор (MVD). Затем располагаются времяпроекционная камера (TPC), черенковский детектор полного внутреннего отражения, электромагнитный калориметр из вольфрамата свинца и за соленоидом – центральный мюонный фильтр (MF). В переднем спектрометре находятся диполь, трековая система, детектор времени пролета (TOF), электромагнитный калориметр типа «шашлык» и передний мюонный фильтр (MF). Перед TOF возможно размещение черенковского детектора (RICH).

2. Спектрометр мишени

2.1. Соленоид

Для эксперимента ПАНДА будет создан универсальный магнитный спектрометр мишени, основой которого является сверхпроводящий соленоид с разделенной обмоткой [1–3]. Особенности данного соленоида являются необходимость обеспечения высокой однородности магнитного поля в большом объеме и имеющиеся ограничения на величину поля в местах, где будут располагаться чувствительные к полю детекторы и турбомолекулярные насосы. Выполнение этих жестких требований необходимо

обеспечить при минимальной плотности тока для гарантии стабильности обмотки и при минимальных механических напряжениях в ее изоляции и элементах конструкции. Кроме того, необходимо обеспечить минимальные деформации магнита для точной установки в нем криостата со сверхпроводящей обмоткой и набора различных детекторов. Сложность данной задачи определяется тем, что весь соленоид весом около 350 тонн должен иметь возможность перемещения в экспериментальном зале из области сборки в область пучка и обратно.

Уникальность соленоида заключается еще и в том, что через сверхпроводящую обмотку и оболочку криостата будет проходить вставка с механизмом ввода и извлечения внутренней мишени. Это накладывает серьезные ограничения на конструкцию магнита и предъявляет высокие требования к расчетам магнитного поля и механических напряжений в обмотке и криостате. Для доступа к детекторам полюсы магнита будут выполнены в виде раздвигающихся дверей.

Помимо формирования необходимого магнитного поля, обеспечиваемого определенной формой и размерами магнитопровода, магнитопровод служит в качестве составной части системы детектирования μ -мезонов в спектрометре ПАНДА. Это осуществляется посредством размещения в нем панелей детекторов, разделенных слоями из стали для сепарации π -мезонов. Для этой цели цилиндрическая часть магнитопровода и передний полюс магнита будут иметь ламинированную структуру, т.е. состоять из отдельных стальных пластин, соединенных между собой определенным образом. Кроме того, магнитопровод является несущей основой для криостата со сверхпроводящей катушкой и для всех детекторов, требования к точности установки которых накладывают, в свою очередь, определенные ограничения на точность изготовления деталей магнитопровода и на величины его деформаций, возникающих под действием магнитных сил, сил гравитации, возможных сейсмических нагрузок. Для увеличения жесткости магнитопровода и для обеспечения полного сохранения его формы после разборки, перевозки, многократных циклов включения и выключения электропитания магнита, а также при его длительной эксплуатации магнитопровод будет укреплен снаружи специальной обвязочной рамой, являющейся его составной частью. Участие ОИЯИ в создании магнитной системы детектора ПАНДА заключается в разработке, проектировании

и изготовлении описанного магнитопровода. Потенциальным исполнителем является Савеловский машиностроительный завод.

2.2. Корпускулярная (pellet) мишень

Для обеспечения светимости $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, необходимой в экспериментах ПАНДА [4], в качестве внутренней мишени предполагается использовать разработанную в ИТЭФ и МЭИ криогенную корпускулярную мишень.

Корпускулярная мишень обладает следующими важнейшими свойствами, отличающимися от мишеней других типов: высокой плотностью; возобновляемостью мишени; малыми размерами частиц (диаметры порядка десятков микрон); стабильностью размеров и траектории движения [5–6].

Ниже представлены основные принципы работы мишени. Жидкая криогенная струя вытекает из генератора капель в вакуумную камеру. Под действием специального возмущения, накладываемого на жидкую струю, струя распадается на одинаковые капли [7]. В вакуумной камере за счет интенсивного испарения происходит охлаждение капель, капли замерзают и становятся твёрдыми гранулами. Монодисперсные твёрдые гранулы через систему отверстий (шлюзов) поступают в рабочую камеру, где происходит взаимодействие с пучком ускорителя.

Для получения криогенных мишеней с минимальным разбросом по размерам и скорости движения необходимо выполнить следующие условия: устранить внешние вибрации со стороны системы охлаждения; жидкая струя, из которой получают капли, а затем и гранулы, должна быть ламинарной; температурный градиент при ожигении газа и формировании жидкой струи должен быть минимальным. Для выполнения условий монодисперсного распада разработана специальная безвибрационная схема охлаждения.

К настоящему моменту силами объединённой группы сотрудников МЭИ, ГНЦ ИТЭФ (Москва) и Института ядерной физики (Юлих, Германия) создан прототип корпускулярной мишени [8]. Он состоит из следующих систем: основного криостата, криостата-ловушки, вакуумной системы, системы обеспечения рабочими газами, системы обеспечения криогенными жидкостями и диагностической системы. На прототипе криогенной корпускулярной мишени проведены тестовые эксперименты по получению

монодисперсных капель и гранул из жидкого водорода, азота и аргона [8]. Впервые получен монодисперсный распад тонких струй водорода, азота и аргона и определены их характеристики. В экспериментах по получению гранул были получены потоки твердых гранул водорода с диаметрами 20–40 мкм. Измерена угловая расходимость потока и распределение гранул по скорости.

Исследуется другой вариант изготовления мишени. Проведенные исследования условий, необходимых для процесса формирования потока пеллетов, позволили приступить в ГНЦ ИТЭФ к разработке мишени, использующей в качестве криогенератора кулер нового поколения – с так называемой пульсационной трубой. Обладая всеми достоинствами классической схемы МакМагона (разнесением компрессорного и расширительного устройств, требуемыми значениями холодопроизводительности на температурном уровне 14 К, малыми размерами криогенератора, большим сроком безотказной непрерывной работы), машины указанного типа, в расширительном устройстве которых отсутствует кривошипно-шатунный механизм и связанный с ним поршень-вытеснитель, имеют амплитуду колебаний, по крайней мере, на порядок меньшую, чем машины классической схемы.

Кроме этого, последние два года в ГНЦ ИТЭФ проводились компьютерные эксперименты по моделированию работы корпускулярного генератора для будущей внутренней мишени. Так, были выполнены детальные газодинамические расчёты как дозвуковых потоков буферного газа (водорода, гелия или их смеси) в камере формирования капель и в шлюзе, так и сверхзвуковых потоков в вакуумной камере за шлюзом. Полученные таким образом данные о распределениях температуры, плотности и скорости в потоках буферного газа использовались затем в детальных траекторных расчётах движения водородных капель/pellets под воздействием данных газодинамических полей.

2.3. Центральный электромагнитный калориметр (barrel) из вольфрамата свинца

На установке ПАНДА в числе прочего предполагается изучать редкие распады, содержащие одиночные фотоны, π^0 - и η -мезоны в диапазоне энергий от 10 МэВ до 10 ГэВ. Необходимым прибором для отделения распадов, идущих с низкой вероятностью, от фоновых процессов является электромагнитный калориметр (ЭМК) [9].

Калориметр, состоящий из счетчиков на основе кристаллов вольфрамата свинца (PWO_4), обеспечит требуемые высокие энергетическое и координатное разрешения [10]. Кристаллы из вольфрамата свинца отличаются высокой плотностью, малой радиационной длиной, быстрым сигналом и хорошей радиационной стойкостью [11]. В ЭМК детектора ПАНДА около 16 тысяч таких кристаллов. ЭМК состоит из центральной части, переднего и заднего калориметров. В создании самой большой центральной части ЭМК, состоящей из 11360 кристаллов, решающую роль играет ГНЦ ИФВЭ (при участии Курчатовского института). Следует особо подчеркнуть и роль российской промышленности в производстве PWO_4 -кристаллов. Нигде в мире, кроме России (г. Богородицк Тульской области), не развито массовое производство этих кристаллов. Так, более 80 тыс. кристаллов было изготовлено в России для эксперимента CMS в ЦЕРН. К настоящему времени ~7000 кристаллов для калориметра ПАНДА уже сделаны в Богородицке и отправлены в Германию.

В настоящее время в ГНЦ ИФВЭ выполнен цикл систематических исследований различных параметров кристаллов вольфрамата свинца (например, световыход и радиационные и оптические свойства) при разных температурах, в результате которых была обнаружена сильная зависимость от окружающей температуры процессов образования и восстановления радиационных повреждений в кристаллах и уровней сигналов [12-15]. Был выявлен также эффект глубокого подавления восстановительных процессов в кристаллах при отрицательных температурах [16]. Несмотря на это, в качестве рабочей температуры для кристаллов вольфрамата свинца в детекторе ПАНДА, который ориентирован на регистрацию низкоэнергетических фотонов, следует всё же выбрать отрицательную температуру близкую к $-25^{\circ}C$.

В ГНЦ ИФВЭ в специальном помещении завершено создание автономной установки для исследования радиационной стойкости различных материалов и узлов детекторов с непрерывным контролем процесса облучения в режиме реального времени. Установка сможет работать круглосуточно в течение всего года. В ГНЦ ИФВЭ ведется проектирование всей механической конструкции центральной части ЭМК. Так как калориметр детектора ПАНДА находится в сильном магнитном поле, в качестве фотодетекторов предполагается использовать лавинные фотодиоды.

2.4. Микровершинный детектор

Микровершинный детектор [17] – это самый первый детектор, окружающий область взаимодействия антипротонного пучка с внутренней мишенью. Основная задача этого детектора состоит в регистрации вершин распада различных частиц, причем эти вершины смещены относительно точки первичного взаимодействия антипротонов с протонами. Микровершинный детектор состоит из пяти центральных слоев и шести дисков для регистрации частиц, вылетающих вперед. ГНЦ ИФВЭ отвечает за создание передней части вершинного детектора.

В основу создания микровершинного детектора заложена модульная концепция. Основным элементом детектора является кремниевый сенсор с активной и пассивной зонами. Заряженные частицы, проходящие через активную зону, образуют пары электроны–дырки. Сбор этого сгенерированного заряда дает сигнал с детектора. Сигнал сразу же поступает в электронику (front-end), расположенную на детекторе, и, в конце концов, передается по оптическим каналам в компьютер. Минимальная единица детектора в полной сборке – это модуль вершинного детектора. Он независим от других модулей по электронике. Модуль состоит из сенсора с электроникой на нем. Несколько модулей образуют супермодуль, который представляет механически независимую единицу.

Разные части вершинного детектора скомпонованы определенным размещением супермодулей. Все эти супермодули крепятся к механической несущей конструкции всего детектора. Вершинный детектор состоит из передней части и центральной части, которая, в свою очередь, состоит из двух полукруглых половинок. Центральная часть, состоящая из этих половинок, полностью независима от передней части. Из-за того, что ионопровод ускорителя-накопителя HESR проходит через вершинный детектор, он должен состоять из двух половинок, расположенных вокруг этой вакуумной трубы. Передняя часть детектора состоит из двух внешних полудисков. При этом сначала, ближе к области взаимодействия, расположены пиксельные полудиски, а затем стрипповые полудиски. ГНЦ ИФВЭ отвечает за создание стрипповых полудисков переднего вершинного детектора.

Предполагается, что кремниевые сенсоры (полудиски) будут изготовлены в НИИМВ в городе Зеленограде, а соисполнителем станет НИИЯФ МГУ, имеющий двадцатилетний опыт работы в области создания кремниевых детекторов. Возможно участие Санкт-Петербургского физико-технического института им. Иоффе. ГНЦ ИФВЭ конкретно отвечает за создание нужных сенсоров (скорее всего, двухсторонних с толщиной ~ 200 мкм) и механической структуры переднего вершинного детектора.

2.5. Центральный черенковский детектор полного внутреннего отражения

Идентификация частиц – адронов и лептонов – необходима для решения детектором ПАНДА поставленных физических задач. Электроны и мюоны в спектрометре мишени установки ПАНДА хорошо определяются электромагнитным калориметром и мюонной системой. Однако нет достаточно простого способа идентификации таких заряженных адронов, как π - и K -мезоны. Сложность в том, что для идентификации заряженных частиц в спектрометре мишени ПАНДА нужен тонкий детектор, который должен работать в узком пространстве между трековым детектором и калориметром в сильном магнитном поле ~ 2 Т внутри соленоида. Поэтому здесь идентификация заряженных адронов в диапазоне полярных углов $22 \div 140^\circ$ будет осуществляться детектором DIRC (DIRC – аббревиатура английской фразы Detection of Internally Reflected Cherenkov light) – новым типом черенковского счетчика с регистрацией черенковского кольца [18]. Особенность DIRC состоит в том, что в нем для генерации черенковского излучения используются твердые радиаторы из плавленого синтетического кварцевого стекла и многократное полное внутреннее отражение света в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне для переноса изображения черенковского кольца к фотоприемникам. Высокое качество обработки поверхности и точность геометрических параметров кварцевых радиаторов позволяют сохранить информацию об угле черенковского излучения и его интенсивности при многократных отражениях в кварце, поэтому изображение черенковского кольца передается на специальную двумерную матрицу фотодетекторов без искажений.

Структура детектора DIRC – физические размеры, радиационная длина и механическая жесткость – наилучшим образом соответствует геометрии спектрометра

мишени ПАНДА. Первый и пока единственный детектор такого типа был создан для эксперимента ВаВаг на ускорителе SLAC [19], где он успешно проработал с 1996 г. по 2008 г.

Новая версия детектора, в основе которой лежит некоторое изменение оптической схемы и использование новейших фотоумножителей и новых материалов, будет создана для эксперимента ПАНДА объединенными усилиями ученых из институтов Австрии, Германии, Италии и России (ОИЯИ) [20].

ОИЯИ планирует изготовить 16 модулей черенковского детектора DIRC для спектрометра мишени. Модулем здесь мы называем герметичный контейнер, который представляет собой самостоятельную сборочную единицу детектора. Каждый контейнер содержит шесть оптически изолированных друг от друга кварцевых стержней размером $17 \times 35 \times 240$ мм, которые служат одновременно и радиаторами и световодами черенковского излучения. Шестнадцать таких модулей будут вставляться в узкое пространство механической структуры установки ПАНДА перед электромагнитным калориметром, образуя баррель черенковского счетчика. Оптическая связь модулей с отдельным блоком, который содержит матрицу фотоприемников, осуществляется через воздушный зазор шириной ~ 1 мм.

Как показал опыт работы детектора DIRC в установке ВаВаг, одной из основных проблем при создании детектора является массовое производство кварцевых радиаторов. В частности, процедура полировки радиаторов довольно сложная и требует специального оборудования и опыта, которые можно найти лишь на нескольких предприятиях в мире. Важными характеристиками качественных радиаторов, обеспечение которых вызывает трудности у оптиков, являются: 1) острые кромки, 2) высокий уровень полировки граней ($R_q = 10 \div 20 \text{ \AA}$) и 3) точность углов между гранями ($90^\circ \pm 0.25$ мрад). Несмотря на то, что с точки зрения оптических стандартов основные геометрические требования на качество поверхности довольно умеренные, радиаторы, удовлетворяющие всем трём условиям, очень сложно изготовить за приемлемую цену в масштабах массового производства для оптических элементов таких больших размеров и сложной формы.

Полировка кварцевых радиаторов проводилась в ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла» (ЛЗОС, г. Лыткарино, Московская область), где имеется большой опыт производства крупногабаритных оптических элементов, в частности астрофизических зеркал больших размеров. На первом этапе ОАО ЛЗОС изготовил 10 опытных радиаторов из отечественного синтетического, особо чистого радиационностойкого кварцевого стекла КС4-В с размерами $17 \times 35 \times 300$ мм³, оптические характеристики которых соответствовали спецификациям, установленным для детектора ПАНДА. Оценка уровня шероховатости поверхности радиаторов осуществлялась методом атомной силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе со сканирующим датчиком Solver P47. Было найдено, что этот метод отвечает поставленной задаче. Измерения показали, что уровень полировки был лучше, чем требуемые 20 Å.

В результате, на прототипах длиной 300 мм был разработан технологический процесс тонкой шлифовки и полировки крупногабаритных оптических элементов с достижением требуемого уровня шероховатости, что позволит использовать разработанную технологию для массового производства радиаторов длиной от 900 до 1200 мм для детектора ПАНДА. В настоящее время в ОАО ЛЗОС по данной технологии изготавливается опытная партия из четырех полномасштабных радиаторов размером $17 \times 35 \times 900$ мм³, которые будут использованы для создания прототипа модуля черенковского детектора.

3. Передний спектрометр

3.1. Передний электромагнитный калориметр типа «шашлык»

Электромагнитный калориметр (ЭМК) переднего спектрометра установки ПАНДА является одной из частей калориметрической системы детектора ПАНДА. Как часть системы он выполняет те же функции, что и центральный калориметр, расположенный в спектрометре мишени, и должен обладать близкими свойствами. На этом сходство этих приборов заканчивается. Механически ЭМК переднего спектрометра представляет собой независимый детектор, расположенный вне магнитного поля

почти в восьми метрах от точки взаимодействия. Он работает при комнатной температуре и не имеет столь жестких требований к компактности, как центральный калориметр. Это калориметр сэмпингового типа с тонкой сегментацией и съемом света с помощью спектросмещающих волокон, проходящих через объем калориметра. Такая структура калориметра известна физикам под термином «шашлык» [21-25].

За создание ЭМК переднего спектрометра установки ПАНДА полностью отвечает ГНЦ ИФВЭ, и при его изготовлении будет применяться технология, также разработанная в ГНЦ ИФВЭ. Эта технология, основанная на производстве пластического сцинтиллятора методом литья под давлением, позволяет создавать сравнительно недорогие детекторы с чувствительным объемом до сотен тонн. Рабочая поверхность ЭМК переднего спектрометра ПАНДА составляет 4 м². Число каналов – около 1500. Вес детектора вместе с системой перемещения – порядка 15 тонн. В ГНЦ ИФВЭ имеется вся необходимая инфраструктура, чтобы сделать этот калориметр «под ключ».

Процесс изготовления калориметров типа “шашлык” состоит из следующих этапов. Пластины сцинтиллятора изготавливаются на участке сцинтилляторов ИФВЭ методом литья под давлением на термопластавтоматах из полистирола марки BASF143E с добавлением сцинтиллирующих примесей. Пластины свинца штампуются в опытно-производственном отделе ИФВЭ из поставляемого с завода проката. Чередующиеся пластины свинца и сцинтиллятора собираются и обжимаются на стапеле для получения заданных размеров модуля и стягиваются крепежными стальными струнами. Через отверстия в свинце и сцинтилляторе пропускаются спектросмещающие оптические волокна, которые собираются в обойму на заднем торце модуля, обрезаются и шлифуются, формируя порт выхода сигнала с модуля калориметра. Для повышения светосбора модуль оборачивается полимерным материалом типа Тувек, что уменьшает утечку света с торцов пластин сцинтиллятора.

В рамках подготовки Технического проекта ЭМК переднего спектрометра ПАНДА для исследования характеристик калориметра и оптимизации размеров ячейки в ИФВЭ были созданы два прототипа калориметра с ячейками 110x110 мм² (см. рис. 2) и 55x55 мм². В течение нескольких сеансов были проведены исследования этих прототипов на пучках ускорителя У-70. Полученные результаты были использованы

для настройки системы компьютерного моделирования работы калориметра методом Монте-Карло GEANT3, которая использовалась для выбора оптимальных геометрических параметров ячейки калориметра. Требуемые для программной модели параметры были выбраны из сравнения измеренных свойств прототипа калориметра с большим размером ячейки. Моделировалась ячейка размером $110 \times 110 \text{ мм}^2$, состоящая из 380 слоев свинцовых и сцинтилляционных пластин толщиной 0.3 и 1.5 мм соответственно. В сцинтилляторе и свинце расположены 144 (12x12) отверстия диаметром 1.5 мм, через которые проходят 1-миллиметровые спектросмещающие оптические волокна.

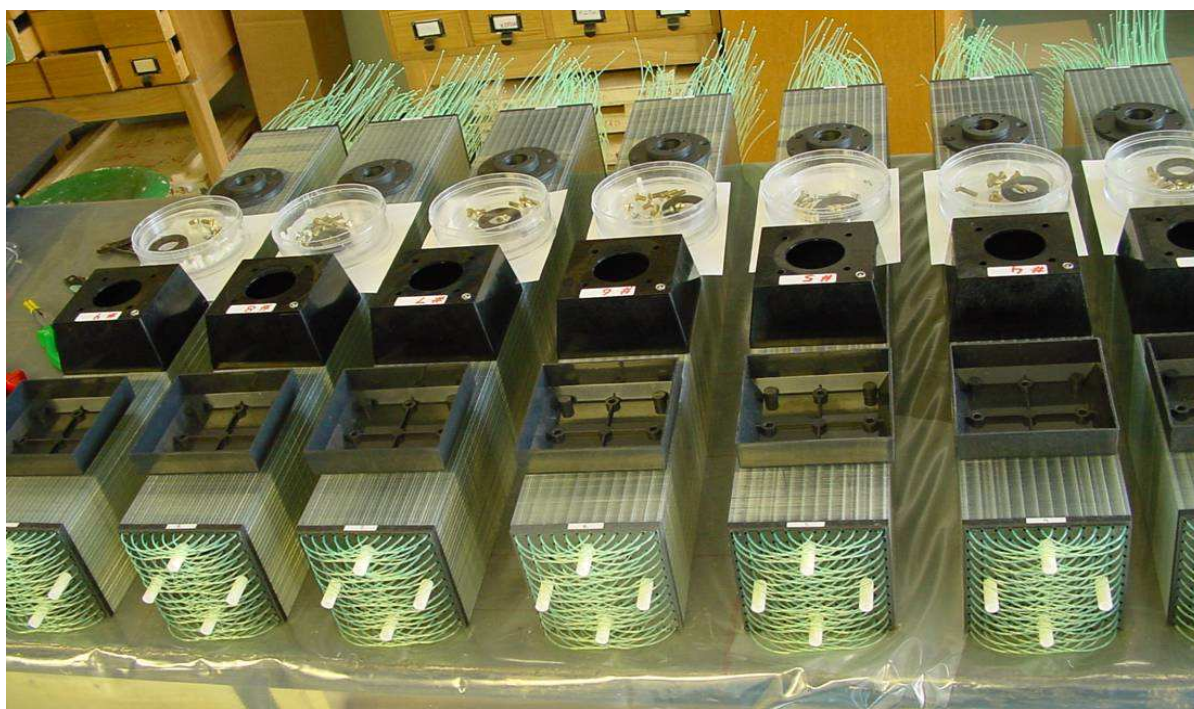


Рис. 2. Прототип электромагнитного калориметра типа «шашлык».

Исходя из результатов математического моделирования для эксперимента ПАНДА, было решено использовать передний калориметр с более мелкой ячейкой. Прототип калориметра с мелкой ячейкой, состоявший из 64 счетчиков с поперечными размерами $55 \times 55 \text{ мм}^2$ и длиной 20 радиационных длин, был собран и размещен на канале 2Б ускорителя У-70. Прототип исследовался на двух типах пучков – пучке

электронов и пучке пионов. Для исследования возможностей реконструкции нейтральных пионов с помощью прототипа калориметра с выбранными параметрами была проведена методическая программа исследований на пионах, когда при взаимодействии пионного пучка с энергией 28 ГэВ с мишенью, расположенной перед прототипом, регистрировались образованные π^0 -мезоны с целью определения разрешения прототипа по массе. Обработка измерений на прототипе с мелкой ячейкой показала, что он имеет такое же высокое энергетическое разрешение, как и прототип с крупной ячейкой. Координатное разрешение при измерениях на пучке электронов 19 ГэВ в центре мелкой ячейки получилось в два раза лучше: 3 мм вместо 6 мм для крупной ячейки. Соответственно и разрешение по массе π^0 -мезона значительно лучше у прототипа с мелкой ячейкой.

В ИФВЭ разработана концепция механической опорной конструкции ЭМК переднего спектрометра с параметрами, соответствующими общим требованиям к детекторам переднего спектрометра ПАНДА. Эта механическая опорная конструкция состоит из разъемной рамы, задней фиксирующей плоскости из двух частей, системы боковых пластин для минимизации зазоров между модулями и системы перемещения для обслуживания детектора.

Немаловажную для калориметра роль играет и фотодетектор. Электромагнитный калориметр переднего спектрометра установки ПАНДА располагается вне сильного магнитного поля, состоит из относительно небольшого количества каналов и не имеет жестких требований к компактности. Кроме того, загрузка в ближайших к вакуумной трубе ускорителя-накопителя HESR счетчиках может достигать до 1 МГц, а диапазон регистрируемых энергий превышает три порядка. Все это дает основания рассматривать в качестве основного варианта фотодетектора фотоэлектронный умножитель.

3.2. Мюонная система

Мюоны в установке ПАНДА требуется измерять в широком диапазоне импульсов: от долей одного ГэВ до 10 ГэВ. Процессы, идущие с мюонами в конечном состоянии, имеют малые сечения в сравнении с фоновыми процессами. Чтобы увеличить величину соотношения сигнал/шум, нужно очень хорошо идентифицировать мюоны.

Идентификация мюона может быть осуществлена различными системами детектора и различными методами. Для этого, например, могут использоваться: мюонный трекер, позволяющий получить хорошую сигнатуру (признак) следа мюона даже в присутствии адронного ливня; калориметрия, как электромагнитная так и адронная, для измерения ионизационных потерь энергии dE/dx ; сцинтилляционные счётчики для времяпролётных измерений; черенковские счётчики.

Самым удобным и адекватным методом обнаружения мюонов является измерение длины пробега. В установке ПАНДА это осуществляется с помощью системы слоистых детекторов, имеющих гранулярность близкую к разбросу (флуктуации) пробегов мюонов в железном поглотителе. В мишенном спектрометре (TS) в этом качестве используется железо магнитного ярма, совмещая, таким образом, две функции – магнитопровода и поглотителя. Измерение длин пробегов – это хорошо известное решение как для обнаружения мюонов, остановленных в поглотителе, так и для мюонов, проходящих «навывлет».

Спектрометр мишени (TS) имеет две части: баррель/«бочку» (B) и «крышку» (EC). Мюонный фильтр (MF) имеет практически такую же механическую структуру, как TS_EC, и служит для достижения двух целей: во-первых, он увеличивает толщину поглотителя для промежуточных углов, что улучшает эффективность регистрации мюонов, и, во-вторых, является дополнительным магнитным экраном между соленоидом TS и диполем переднего спектрометра (FS).

В объеме барреля грануляция поглотителя равна 3 сантиметрам. Такая толщина была выбрана из-за малых энергий мюонов, входящих в баррель (ниже или около 1 ГэВ). Фактически, эта толщина соответствует разбросу пробегов мюонов в железе. В EC и MF 6-сантиметровый поглотитель выбран для лучшей эффективности поглощения и регистрации мюонов более высоких энергий. Система измерения длин пробегов в переднем спектрометре FRS имеет пластины поглотителя толщиной 6 сантиметров и служит для регистрации мюонов с энергией до 10 ГэВ. Мюоны с энергией выше 1,5 ГэВ будут регистрироваться без оценки их полной энергии, а остановленные мюоны меньших энергий могут быть здесь измерены.

Важной особенностью системы измерения длин пробегов является тот факт, что она может служить также и в качестве слоистого адронного калориметра с умеренным разрешением. Это особо ярко проявляется в области FRS, куда адроны могут попадать с энергиями до 10 ГэВ. Общая толщина системы измерения пробегов по железу в переднем спектрометре установки ПАНДА равняется на сегодня 1 метру (16 слоев по 6 сантиметров каждый), что составляет 5 ядерных длин поглощения.

В качестве оптимального выбора детекторов для мюонной системы [22] группа ОИЯИ предложила коллаборации ПАНДА мини-дрейфовые трубки (MDT). Основания для такого выбора были следующими:

- детектор MDT имеет хорошие пространственное и временное разрешения, простую и гибкую конструкцию, позволяющую покрывать большие и сложные поверхности, он прочен, надёжен и имеет большой срок эксплуатации;

- MDT хорошо зарекомендовали себя при использовании в таких больших экспериментах, как D0 в Национальной Лаборатории Ферми [26-30] (6 300 детекторов, 50 000 каналов считывания информации) и COMPASS в ЦЕРН [31] (1500 детекторов, 12 000 каналов считывания информации);

- группа специалистов из ОИЯИ может разработать, изготовить, произвести монтаж и обеспечить обслуживание основанной на MDT мюонной системы установки ПАНДА, так как имеет для этого необходимый опыт и достаточную производственную базу.

Детектор на основе мини-дрейфовых трубок представляет собой модификацию трубок Иароччи (стримерных трубок) [32] и имеет аналогичные геометрические параметры. При этом он работает в пропорциональном режиме, а пластиковый высокоомный катод заменен в нём на металлический, что позволяет намного увеличить срок эксплуатации такого детектора в условиях радиационной загрузки.

Детектор MDT (рис. 3) состоит из следующих частей: металлического катода, алюминиевого профиля (в сечении напоминающего расчёску), нержавеющей стальной крышки, анодной проволоки и пластикового пенала для герметичности. Стандартная толщина стенки профиля может быть более 0.45 мм (с допуском около ± 0.05 мм). Пластик может быть нескольких типов (PVC, ABS, Noryl) в зависимости от требований безопасности в конкретной лаборатории. Шаг сигнальных проволок равен 10 мм.

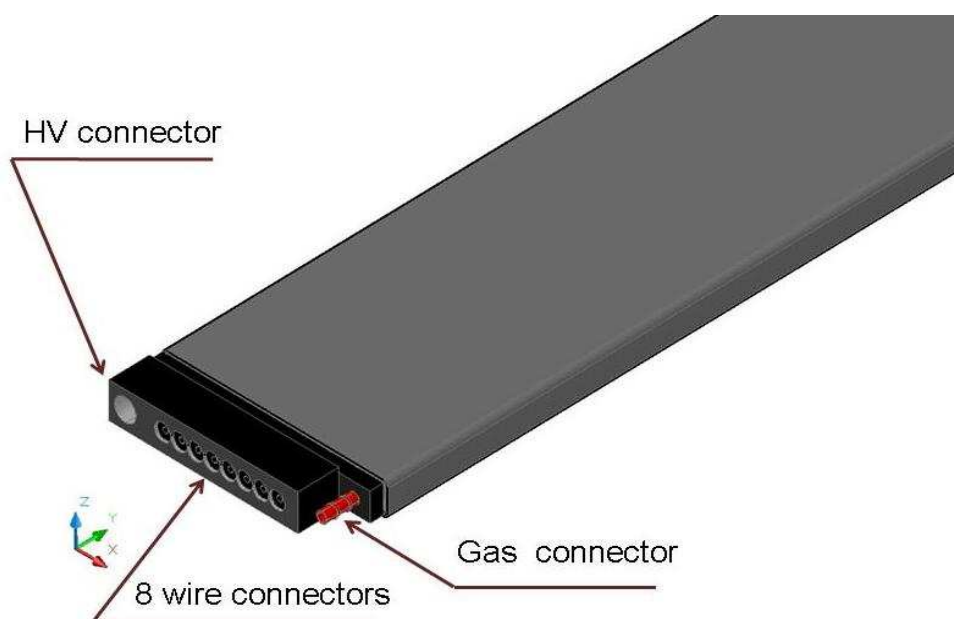


Рис. 3. Мини-дрейфовая трубка.

В настоящее время детекторы MDT успешно используются в качестве дрейфовых камер в проекте D0/FNAL и как пропорциональные камеры в эксперименте COMPASS/CERN. Но и в том и в другом случае они используются лишь как однокоординатные детекторы.

Конструкция MDT позволяет также использовать данный детектор и как двухкоординатный при считывании индуцированного на внешних электродах сигнала. Для этого при монтаже детектора крышка из нержавеющей стали не устанавливается. Для мюонной системы установки ПАНДА измерение второй координаты обязательно, так как это даёт информацию о полном пробеге мюонов в железном поглотителе. Однако для оптимизации считывания второй координаты требуется провести дополнительные исследования, так как индуцируемый сигнал очень слаб в такой геометрии MDT. Предварительные данные, полученные при стендовых испытаниях небольшого прототипа, показали перспективность данного направления [33, 34].

Группа ОИЯИ несёт ответственность за разработку, производство и настройку как детекторов MDT, так и аналоговой электроники, которая усиливает сигналы с проволочек и стрипов (полосковых электродов) и преобразует их в логические сигналы (LVDS-уровни) для дальнейшей обработки цифровой частью электроники.

Предварительные результаты моделирования методом Монте-Карло показывают, что из-за пределов, налагаемых многократным рассеянием, для большей части установки с проволочек и стрипов можно использовать только цифровое считывание – «да / нет».

Плата ADB-32 [35] будет использована с некоторыми модификациями для большей части каналов считываний. В дальнейшем планируется использовать один каскад (микросхему Ampl-8.3) сразу на стрипе, чтобы заранее усилить сигнал и послать его на стандартную плату ADB-32, которая работает на считывание с проволочек и со стрипов.

3.3. Передний детектор времени пролета

Для идентификации частиц в переднем спектрометре предусмотрены дипольный магнит, времяпролётный детектор, электромагнитный и адронный калориметры (роль последнего калориметра выполняет система измерения длин пробегов мюонов и адронов). ПИЯФ (Гатчина) является ответственным за изготовление времяпролётного детектора высокого временного разрешения (Forward ToF Wall). Детектор представляет собой сборку (или как её ещё называют «стенку») из сцинтилляционных пластин с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) на обоих концах каждой пластины. Эта стенка из вертикально установленных пластин располагается за дипольным магнитом на расстоянии 7 метров от места взаимодействия пучка антипротонов с мишенью и имеет высоту и ширину 1.4 м и 5.6 м соответственно. Центральная часть стенки, где будут наибольшие загрузки, состоит из 20 пластин, имеющих ширину 5 см. Эта часть детектора соответствует горизонтальному акцептансу $\pm 3.8^\circ$. Левая и правая части стенки состоят из 24 и 22 пластин соответственно. Ширина этих пластин в 2 раза больше – 10 см. Высота всех 66 пластин данного детектора 1.4 м.

Силами ПИЯФ должны быть проведены тестовые испытания прототипа детектора и все работы по его изготовлению в окончательно утверждённой конфигурации. Заказ обработанных пластин сцинтилляционных счётчиков планируется разместить в фирме Saint-Gobain. Предполагается использование модели 2” ФЭУ Hamamatsu с оптимальным собственным временным разрешением. Сборка, герметизация и стендовые испытания сцинтилляционных счётчиков будут проведены

сотрудниками лаборатории малонуклонных систем ПИЯФ. Механическая платформа (ферма) для монтажа готовых счётчиков должна быть спроектирована и изготовлена в ПИЯФ.

В ПИЯФ создан тестовый стенд, на котором проведены первые испытания прототипа сцинтилляционного счётчика (пластик марки VICRON-408 размером 140x5x1.5 см, оборудованный 1” ФЭУ Hamamatsu R4998) с использованием электронов низких энергий от бета-источника (Sr-90). Тестовая станция была переведена на стандарт VME и доукомплектована TDC CAEN V775 с временным разрешением 35 пикосекунд на канал и высокочувствительным QDC CAEN V792. Указанный прототип прошёл тестовые испытания на пучке протонов с энергией 730 МэВ. Было продемонстрировано, что с использованием данного оборудования возможно достижение требуемых параметров, а именно временного разрешения сцинтилляционных счётчиков не хуже 100 пикосекунд. Было установлено, что для дальнейшего улучшения разрешения до уровня 70–80 пикосекунд желательно увеличение толщины пластин с 1.5 до 2.5 см.

Заключение

Эксперимент ПАНДА при относительно высокой энергии антипротонов будет иметь большой потенциал для открытий в дополнение к LHC и, вместе с тем, с помощью сканирования по энергии сможет определять ширины резонансов с точностью линейного коллайдера. Детектор ПАНДА создается с использованием самых современных достижений науки и техники (в том числе – разработанных российскими учеными) и обеспечивает регистрацию и идентификацию нейтральных и заряженных частиц почти в полном телесном угле и в диапазоне энергий от 1 до 15 ГэВ.

Эксперимент ПАНДА относится к стартовой части программы реализации проекта ФАИР, и начало экспериментов на пучке антипротонов накопительного кольца NESTR предполагается в 2018 году. Ожидается, что российский вклад в создание установки ПАНДА по стоимости будет составлять более трети от стоимости всей установки. Российские институты планируют участвовать в создании восьми детекторов и узлов установки ПАНДА.

Список литературы

- [1] E.K. Koshurnikov et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Vol. 16, Issue 2, June 2006.
- [2] A.A. Efremov et al. // NIM. A 585 (2008).
- [3] W. Erni et al. // Technical Design Report for the PANDA Solenoid and Dipole Spectrometer Magnets, <http://arxiv.org/abs/0907.0169/>, 2009.
- [4] FAIR Baseline Technical Report, vol. 3B, 37 (2006).
- [5] B. Trostell. Vacuum injection of hydrogen micro-sphere beams. // NIM. A 362, 41-52 (1995).
- [6] C. Ekström and The CELSIUS/WASA Collaboration. The CELSIUS/WASA Pellet Target System. // Physica Scripta. T 99, 169 (2002).
- [7] Rayleigh, Lord. On the instability of a cylinder of viscous liquid under capillary force. // Phil. Mag. 34, 145–154 (1982).
- [8] A. Boukharov, M. Buscher, A.S. Gerasimov, V.D. Chernetsky, P.V. Fedorets, I.N. Maryshev, A.A. Semenov, A.F. Ginevskii. Dynamics of Cryogenic Jets: Non-Rayleigh Breakup and Onset of Nonaxisymmetric Motions. // Phys. Rev. Let., 100, 174505 (2008).
- [9] Technical Design Report for PANDA Electromagnetic Calorimeter – e-print ar Xiv: 0810.1216.
- [10] V.A. Batarin et al. // NIM A510 (2003), pp. 248-261.
- [11] V.A. Batarin et al. // NIM A512 (2003), pp. 484-501.
- [12] P.A. Semenov et al. // NIM A582 (2007), pp. 575-580.
- [13] R.W. Novontny et al. // IEEE Transactions on nuclear science. Vol. 55, No.3, June 2008, pp. 1283-1288.
- [14] P.A. Semenov et al. // NIM A598 (2009), pp. 224-228.
- [15] А.Н. Васильев и др. // ПТЭ 5(2009), с. 58-65.
- [16] S.F. Burachas et al. // Functional Materials. Vol. 16. No 1 (2009), pp. 76-81.
- [17] T. Stockmanns. The micro-vertex-detector of the PANDA experiment at FAIR. // NIM A565 (2006), pp. 294-300.
- [18] PANDA Technical Progress Report, FAIR-ESAC, February 2005.

- [19] I. Adam et al. The DIRC particle identification system for the BABAR experiment. // NIM. A 538 (2005), p. 281–357.
- [20] C. Schwarz et al. The barrel DIRC of the PANDA experiment. // NIM. A595 (2008), p. 112–115.
- [21] L. Aphecetche et al. PHENIX calorimeter. // NIM. A499, 521-536 (2003).
- [22] G.S. Atoian et al. // NIM. A584 (2008), 291.
- [23] Yu.V. Kharlov et al. // NIM. A606 (2009), 432–438.
- [24] D.A. Morozov et al. // 2009 J. Phys.: Conf. Ser. 160 012021.
- [25] V.A. Batarin et al. // NIM. A510 (2003), 211–218.
- [26] V. Abramov et al. Forward muon system for the D0 detector upgrade. // NIM. A419 (1998) 660.
- [27] T. Zhao et al. D0 Forward-Angle Muon Tracking Detector and Its Gas System. // IEEE Trans.on Nucl.Science, vol. 49, no. 3, p. 1092, June 2002.
- [28] V.M. Abazov et al. (D0 Collaboration). The muon system of the Run II D0 detector. // NIM. A552 (2005) 372.
- [29] В.М. Абазов и др. Стенды испытания мини-дрейфовых трубок. // ПТЭ, 2007, т. 50, №1, с. 47-57.
- [30] В.М. Абазов и др. Результаты испытания мини-дрейфовых трубок для передней мюонной системы установки D0. // ПТЭ, 2007, т. 50, №1, с. 58-68.
- [31] P. Abbon et al. (COMPASS Collaboration). The Compass Experiment at CERN. // NIM. A 577 (2007), 455.
- [32] E. Iarocci. // NIM, 217 (1983), 30.
- [33] В.М. Абазов и др. Сравнительный анализ работы мини-дрейфовых трубок различной конструкции. // ПТЭ, 2010, №3, с. 42-48.
- [34] В.М. Абазов и др. Координатная точность мини-дрейфовых трубок при регистрации наведенного сигнала. // ПТЭ, 2010, №5, с. 32-36.
- [35] G.D. Alexeev et al. The D0 forward angle muon system front-end electronics design. // NIM. A 473 (2001), 269.

Рукопись поступила 24 ноября 2010 г

Г.Д. Алексеев и др.

Российские институты в эксперименте ПАНДА.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 25.11.2010. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ. л. 1,5. Уч.- изд. л. 2,3. Тираж 80. Заказ 23. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2010-14, ИФВЭ, 2010
