

Важнейшие достижения Института ядерных исследований Российской академии наук в третьем квартале 2017 года

По теме «Разработка теоретических проблем физики элементарных частиц, фундаментальных взаимодействий и космологии»:

Исследована модель с низким масштабом нарушения суперсимметрии легчайшим суперпартнером - гравитино для поиска проявлений такого класса моделей на Большом адронном коллайдере - событий с одним джетом и кажущимся невыполнением закона сохранения импульса, который уносится гравитино. Был проведён анализ такого рода событий по данным эксперимента CMS с учётом возможного присутствия лёгкого суперпартнера гравитино – сголдстино, когда в конечном состоянии образуются сголдстино и адронная струя, при этом сголдстино распадается в пару гравитино. Показано, что присутствие лёгких сголдстино усиливает ограничение на масштаб нарушения суперсимметрии в 1.5 раза по сравнению со случаем очень тяжёлых сголдстино.

Проведён анализ влияния нестандартных нейтринных взаимодействий на распространение нейтрино с энергией 1-1000 ГэВ, возникающих от аннигиляции частиц тёмной материи в Солнце. Показано, что в случае достаточно больших значений диагональных параметров нестандартных нейтринных взаимодействий в центре Солнца флейворные состояния нейтрино являются собственными состояниями гамильтониана в веществе. Показано, что в этом случае возможно выполнение условий для нового резонанса Михеева-Смирнова-Вольфенштейна, который оказывает сильное влияние на распространение нейтрино не только в Солнце, но и в Земле, и результирующие потоки мюонных нейтрино на уровне Земли могут значительно отличаться от полученных в стандартном случае.

Сделан краткий обзор прогресса понимания проявления конформной симметрии и конформной аномалии в соотношении между аналитическими расчётами рядов теории возмущений в КХД для извлекаемой из экспериментальных данных коллаборацией COMPASS (ЦЕРН, Швейцария) и ускорителя Лаборатории Джефферсона JLAB (США) характеристики поляризованного глубоконеупругого лептон-адронного рассеяния - правила сумм Бьеркена, и извлекаемой из данных электрон-позитронных коллайдеров ИЯФ РАН, Китая и Японии функции Адлера. Описаны теоретические следствия данного соотношения, полученные в четвёртом порядке теории возмущений в работах Катаева-Михайлова (2012-2016) и Катаева-Цветича (2016). Указано на некорректное использование данного соотношения в работах Бродского (США) и его китайских коллег (2012-2016) и приведён вывод нового представления для функции Адлера, правила сумм Бьеркена и обобщённого соотношения Крютера в 4-м порядке теории возмущений в виде двойного разложения по степеням конформной аномалии и константы связи КХД. Выделены схемно-независимые члены данного разложения, удовлетворяющие свойству конформной симметрии. Результаты позволяют лучше понять связь между наблюдаемыми физическими величинами и наметить возможность их экспериментальной проверки.

Опубликованы новые результаты по обнаруженному в 1993 Бродхарстом и Катаевым обобщённому соотношению между треугольной аксиально-векторно-векторной трёхточечной функцией Грина и характеристиками поляризованного глубоконеупругого лептон-нуклонного рассеяния - правилом сумм Бьеркена и характеристикой электрон-позитронной аннигиляции в адроны - функции Адлера, показывающие, что свойство факторизации конформной аномалии выполняется для калибровочно-инвариантных схем перенормировок. Показано, что развиваемая в работах Бродского (США) и его соавторов из Китая новая процедура фиксации масштабного произвола в КХД – принцип максимальной конформности - на самом деле противоречит свойству конформной симметрии за счёт возникновения зависимости новых масштабных параметров от

коэффициентов ренорм-групповой функции КХД и связанной с нарушением конформной симметрии бегущей константой сильных взаимодействий.

Получено новое аналитическое выражение в 4-м порядке теории возмущений для поляризованного правила сумм Бьёркена в активно изучаемой в настоящее время за рубежом (Англия, Германия, Австралия, Голландия) калибровочно-зависимой специфической схеме перенормировок, предполагающей использование специфического импульсного вычитания и связь бегущей константы связи этой схемы КХД с бегущей константой связи КХД в калибровочно-независимой схеме минимальных вычитаний. Использование этой калибровочно-неинвариантной схемы вычитаний стало актуальным вследствие обнаружения связи этой процедуры с аналогичной схемой перенормировок, используемой в компьютерных численных вычислениях с решёточной регуляризацией. Показано, что несмотря на зависимость от калибровочного параметра, обнаруженная в 1993 г Бродхарстом и Катаевым свойство факторизации ренорм-групповой бета-функции в соотношении между характеристиками поляризованного глубоконеупругого рассеяния и электрон-позитронной аннигиляции, выполняющееся в калибровочно-инвариантных схемах перенормировки, продолжает выполняться в четвёртом порядке теории возмущений и в этой специфической калибровочно-зависимой процедуре при фиксации поперечной калибровки, известной в литературе как калибровка Ландау. Поставлен вопрос о причинах выделенности калибровки Ландау в данных рассмотренных, связанных со свойством факторизации конформной аномалии (подобная теоретическая выделенность калибровки Ландау ранее наблюдалась и в других более простых вычислениях в КХД).

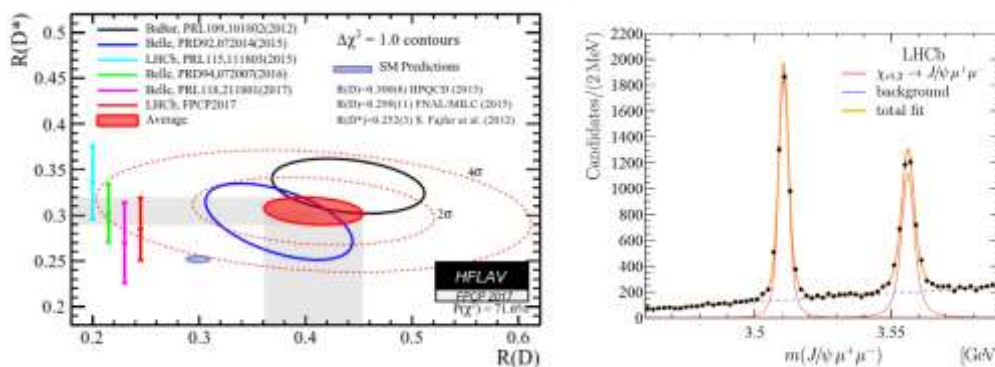
По теме «Аксионные миникластеры»: Физическая природа тёмной материи, составляющей около 27% массы Вселенной, до сих пор остается неизвестной. В качестве возможных кандидатов на роль тёмной материи рассматриваются различные гипотетические частицы, в том числе, аксионы. Изначально аксионное поле было введено в физику элементарных частиц для объяснения отсутствия СР-нарушения в квантовой хромодинамике, но кванты этого поля, аксионы, оказались перспективными кандидатами также и на роль частиц тёмной материи. В работе (Kolb, Tkachev 1994) было предсказано существование сгустков тёмной материи, состоящих из аксионов - аксионных миникластеров. Пролёт такого сгустка через Землю является очень редким событием, происходящем раз в тысячи лет. Однако, было показано (Tinyakov, Tkachev, Zioutas 2016), что часть сгустков в гало Галактики разрушается при взаимодействии со звёздами, и образующиеся из разрушенных сгустков протяжённые шлейфы тёмной материи могут наблюдаться в наземных детекторах примерно один раз в 20 лет. В недавней работе (Докучаев, Ерошенко, Ткачев 2017) был выполнен новый расчёт процесса разрушения аксионных сгустков с учётом двух дополнительных эффектов. Во-первых, было учтено, что орбиты сгустков в гало Галактики отличаются от круговых, и за свою историю жизни сгусток может пересекать диск Галактики на различных расстояниях от его центра. Оказалось, что разрушение аксионных сгустков существенно зависит от профиля плотности гало Галактики. В частности, для изотермического профиля плотности гало разрушение сгустков примерно в 2-3 раза более эффективно, чем в случае стандартного профиля плотности Наварро-Френка-Уайта. Во-вторых, было учтено разрушение сгустков звёздами центральной сфероидальной части Галактики (балджа) и звёздами гало. Этот эффект существенно увеличивает общую эффективность разрушения аксионных сгустков. Проведенный расчёт предсказывает возможную частоту наблюдения в наземных детекторах шлейфов аксионной тёмной материи на уровне 1-2 события за 10 лет.

По теме «Модели рыхлой ядерной материи»: разработан вариант теоретической модели, основанный на резонансном взаимодействии протонов с α -частицами. Эти взаимодействия, проявляющиеся в лабораторных экспериментах в виде нестабильных ядер, таких как ${}^5\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$ и других, могут приводить к образованию квазистационарных и, возможно, даже

стабильных ядерно-молекулярных кристаллических структур, связанных коррелированными парами протонов в условиях солнечных недр и могут играть важную роль в формировании процессов солнечной активности.

Сотрудниками Лаборатории электронных методов детектирования нейтрино за период наблюдения за Галактикой по данным Артёмовского сцинтилляционного 100-тонного детектора с ноября 1977г. по сентябрь 2017г. получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 17.3 года на 90% уровне достоверности. По данным работы Российско-итальянской установки LVD с 1992 по 2017 год (24.5 года) предел на частоту гравитационных коллапсов звёзд в Галактике составляет менее, чем одно событие за 10.64 года на 90% уровне достоверности. Получены вариации интенсивности мюонов за 25 лет набора данных установки LVD. Амплитуда модуляция мюонного потока составляет 1.5% с периодом 1 год и максимумом в начале июля. Имеется чёткая корреляция с изменениями температуры атмосферы.

По теме «Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb» проведён тест «лептонной универсальности» используя полуплеитонные тау-распады «чарм»-«бьюти» мезонов. Измерение величины отношения вероятностей различных распадов показало отличие от предсказаний Стандартной модели на 2 стандартных отклонения:



Получено наиболее точное в мире значение, измеренное в отдельном эксперименте, угла γ матрицы смешивания взаимодействия кварков СКМ, из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов, см.рис. Впервые в мире наблюдался редкий распад B^0 мезона на протон-антипротон на уровне достоверности 5.3 стандартных отклонений. Получены результаты измерений масс мезонов, состоящих из пар с-кварков с разными значениями спинов и углового момента, используя впервые наблюдаемый каскадный распад, см.рис. Полученные значения сравнимы по точности и находятся в хорошем совпадении с лучшими предыдущими измерениями других экспериментов, выполненными по другим методикам.

По теме «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)» модернизирована программное обеспечение для тестирования одновременно до 8 модулей электромагнитного калориметра установки на космических мюонах перед их окончательным монтажом на установке.

По теме «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях на CERN SPS (эксперимент NA61)» проведены физические сеансы по измерению выходов заряженных частиц в соударениях протонов и пионов с лёгкими ядрами. Проведён эксперимент по исследованию выходов частиц с большими поперечными импульсами в реакции столкновения протонов с ядрами свинца при энергии налетающих протонов 30 ГэВ. Предложена новая концепция калориметра, которая позволит использовать его в экспериментах при интенсивностях пучков в 10 раз превышающих

интенсивность пучков ядер в текущих экспериментах, что необходимо для будущих экспериментов на установке NA61.

По теме «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI» проведён тестовый сеанс по исследованию отклика супермодуля (сборки 3x3 из 9 модулей), на тестовом пучке, исследован отклик калориметра (линейность и энергетическое разрешение) на пучках протонов и пионов в диапазоне импульсов 2-6 ГэВ/с. Проведено тестирование модулей калориметра с опытными образцами аналоговой и цифровой электроники для считывания сигналов, которые планируется использовать в передних адронных калориметрах будущих установок CBM и BM@N. Проведено исследование отклика модуля калориметра с использованием облученных лавинных фотодиодов различными потоками нейтронов вплоть до 3×10^{12} н/см². Эти исследования важны для калориметра установки CBM, которая будет работать в условиях высоких радиационных доз.

По теме «Эксперимент MPD/NICA» продолжена работа по созданию переднего адронного калориметра FHCAL для многоцелевого детектора MPD: изготовлено 15 индивидуальных модулей калориметра из 7 продольных секций, обеспечивающих 4 ядерных длины. Эта длина достаточна для детектирования фрагментов ядер с максимальной энергией 5.5 ГэВ.

По теме «Новые методы регистрации нейтронов» выполнены исследования характеристик нейтронного пучка 1-го канала на различных пролетных базах реактора ИБР-2. В качестве детекторов нейтронов использовались счетчики СМ-18 и камера деления со слоем урана-235. Время вспышки нейтронов определялось при помощи:

- регистрации быстрых нейтронов и гамма квантов вспышки,
- измерения времени, соответствующего известным нейтронным резонансам,
- измерения времяпролётного спектра нейтронов дифракции.

По теме «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов» проведены исследования чувствительности поиска тяжёлых стерильных нейтрино в интегральном и дифференциальном режиме.

По теме «Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов» проведён анализ накопленных данных сеансов измерений с тритием и статистики спектров бета-электронов, модернизированы и отлажены отдельные элементы вакуумной и крио-систем. Выполнен цикл калибровок нового прототипа многоканального детектора для регистрации бета электронов от распада трития. Прототип был откалиброван и испытан на трёх источниках электронов, включая электроны от распада трития.

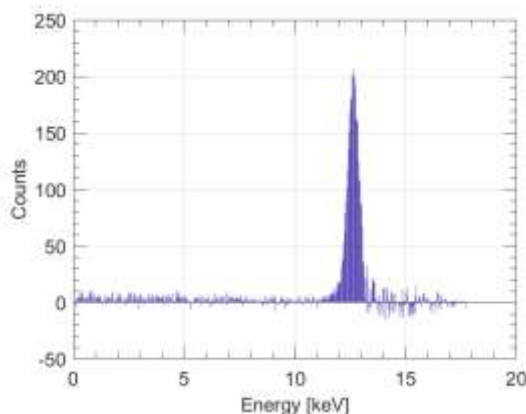


Рис. Дифференциальный спектр электронов от распада трития при энергии 12.5 кэВ измеренный с помощью прототипа детектора из 7-ми пикселей.

По теме «Поиск редких мюонных процессов с нарушением лептонных чисел (эксперимент Mu2e)» проведены подготовительные работы по разработке и изготовлению электроники с низким уровнем шумов, предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех, изготовлен образец материнской платы на 8 каналов электроники и проведены тестовые измерения.



Рис. 2. Образец материнской платы на 8 каналов.

По теме «Исследование подпорогового рождения легких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях» написан обзор V. Metag, M. Nanova, E.Ya. Paryev “Meson-nucleus potentials and the search for meson-nucleus bound states” в журнал Progress in Particle and Nuclear Physics, опубликован в архиве: ArXiv:1706.09654 [nucl-exp]. Для нужд планируемого эксперимента CBM на ускорительном комплексе FAIR (Германия) получены зависимости от величины импульса абсолютных сечений рождения J/ψ мезонов в протон-ядерных реакциях при околопороговых и подпороговых начальных энергиях протонов (8-23 ГэВ). Для этого была разработана соответствующая физическая модель, учитывающая как поглощение J/ψ мезонов в ядерном веществе, так и ренормализацию их массы, предсказываемой современными, основанными на КХД адронными моделями, в ядерной материи. Численные расчёты показали (см. рис.), что из данных по импульсной зависимости абсолютных сечений рождения J/ψ мезонов на ядрах, полученных в области малых импульсов при околопороговых начальных энергиях протонов, можно достаточно надежно определить величину сдвига массы J/ψ мезонов в ядерной среде, представляющего в настоящее время значительный интерес.

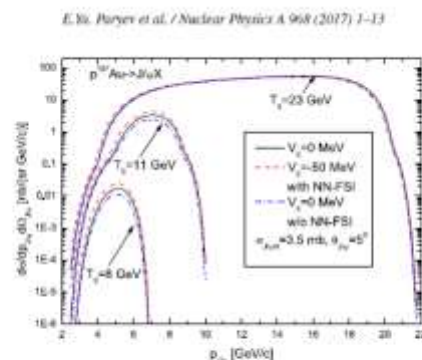


Fig. 3. (Color online.) Double differential cross section for production of J/ψ mesons from primary $pN \rightarrow pN J/\psi$ reactions proceeding on off-shell target nucleons for protons of kinetic energies $T_0 = 8, 11$ and 23 GeV incident on Au target nucleus. The curves are calculations for $\sigma_{NN} = 3.5$ mb and outgoing J/ψ laboratory angle $\theta_{J/\psi} = 5^\circ$ with an in-medium J/ψ mass shift of $V_0 = -50$ MeV at normal nuclear matter density and without it as well as with and without elementary NN-FSI effects.

По теме «Изучение роли собственной энергии в переходах нейтрон-антинейтрон. Осцилляции частиц в поглощающей среде. Регенерация каонов»: показано что в области, отвечающей применимости теории возмущений расчёты, основанные на точном решении и

диаграммной технике, дают одинаковый результат. Этот факт является проверкой развиваемого подхода в целом.

По теме «Свойства барионов и ядер в топологических солитонных и других моделях»: установлено, что рескейлинг квантованных скирмионов (то есть изменение их размеров – расширение за счёт центробежных сил, либо сжатие при связывании тяжёлого мезона, имеющего флейвор очарование, или прелесть) существенно уменьшает их энергию (массу). Этот эффект замечен уже для нуклона и важен для Дельта-изобары (1232). Рескейлинг существен для «очарованных» барионов, весьма важен для барионов, имеющих флейвор «прелесть», но приводит к относительно небольшим поправкам в случае странных барионов. Рассчитано влияние рескейлинга на массы пентакварков с положительной чётностью и «скрытым» флейвором (странностью, очарованием или прелестью).

По теме «Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-ТРОНС ОЭФ ИЯИ РАН»: исследована совместная работа основных систем экспериментального и ускорительного комплексов при организации режимов работы РАДЭКС, см. рис.

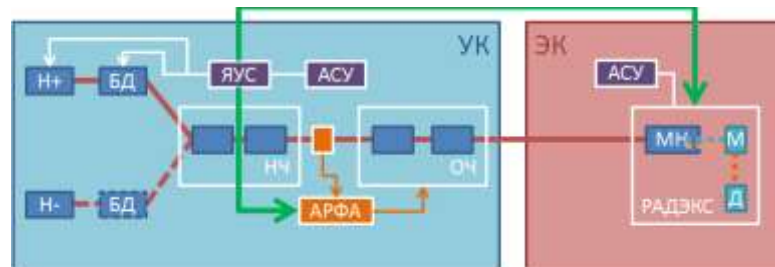


Рисунок. Основные системы ускорительного (УК) и экспериментального (ЭК) комплексов, участвующие в организации работы нейтронного времяпролётногo спектрометра РАДЭКС: инжекторы ионов H^+ , H^- ; БД – быстросрабатывающий дефлектор; ЯУС – ячейка управления и синхронизации оборудования; АСУ – автоматизированная система управления; АРФА – система автоматической регулировки фазы и амплитуды начальной (НЧ) и основной (ОЧ) частот ускорителя; МН – нейтронная мишень РАДЭКС; М – исследуемая мишень; Д – диагностическое оборудование РАДЭКС.

Проведено математическое моделирование формирования спектров РАДЭКС системами УК и ЭК.

По теме «Поиск кварк–глюонной материи при столкновении ультрарелятивистских ядер»:

На установке АЛИСЕ выполнена настройка функции отклика детектора T0 и параметров моделирования методом Монте-Карло при помощи генераторов событий EPOS_LHC и DPMJET для протон-протонных и p-Pb взаимодействия в системе центра масс нуклонов с энергиями 13 и 8.12 ТэВ соответственно. Получено хорошее совпадение результатов по эффективности срабатывания триггеров в зависимости от множественности события и координатам точки взаимодействия, см. рис.; результаты моделирования согласуются с точностью до 2%.

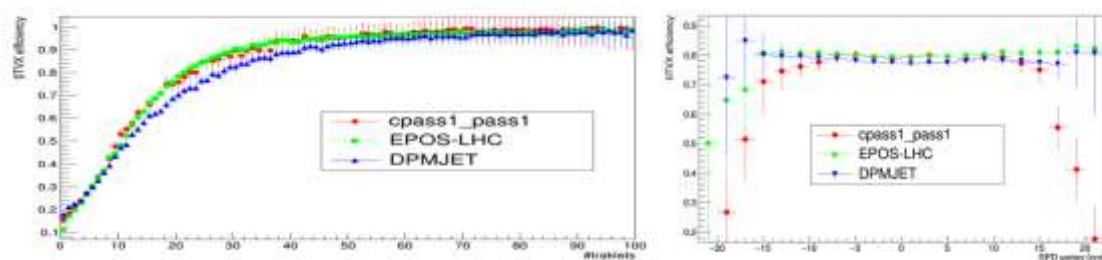


Рис. Эффективность срабатывания триггера в зависимости от множественности и от вершины взаимодействия.

Выполнена предварительная обработка экспериментальных данных сеанса 245407 столкновений ядер свинца ^{208}Pb , проходившего в 2015 году на установке ALICE на БАК.

В 3 квартале завершена разработка конструкторской документации для производства прототипа механической конструкции детектора ФИТ-С и по этой документации на 3-D принтере напечатана половинка механической конструкции:



Для создания программно-аппаратного комплекса установки, построенного на основе системы TRB3 readout board, подготовлено необходимое оборудование, см. блок PC1 на схеме, рис.1.

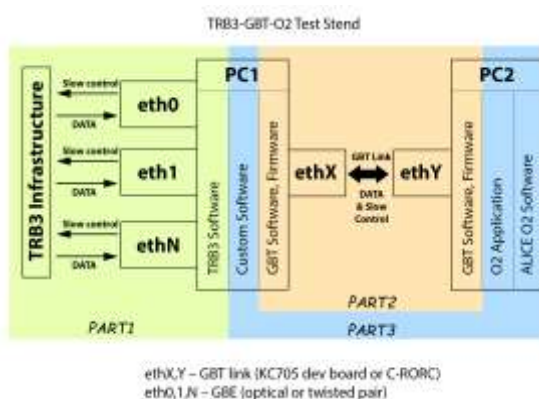


Рис 1: Структура стенда TRB3-O2

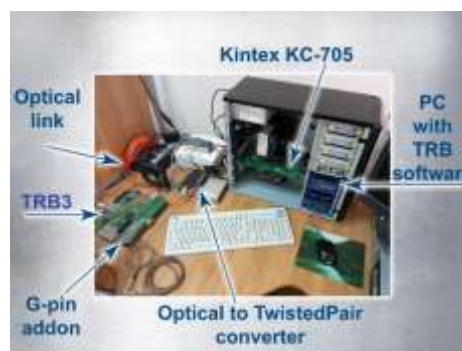


Рис 2: Собранный стенд TRB3-O2

Собран стенд для выполнения работ по связи TRB3 с проектом O2 ALICE (on-line-off-line), см. рис2, установлено и настроено программное обеспечение, созданы запускающие программы.

По теме «Сильноточный линейный ускоритель ионов водорода»:

Проведены ремонтно-профилактические работы, а также работы по модернизации оборудования ускорителя и экспериментального комплекса. Исследована транспортировка пучка протонов в канале между инжектором и RFQ с учётом компенсации объёмного заряда ионного пучка на выходе инжектора, которая была измерена с помощью специально разработанного устройства.

Решением Минобрнауки России центр коллективного пользования «Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН» признан победителем в конкурсе проектов по поддержке и развитию центров коллективного пользования научным оборудованием в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Продолжены работы по разработке и исследованию ускоряющих структур с целью замены (модернизации) первого резонатора основной части ускорителя. В частности,

изучались возможности адаптации существующих мостовых устройств связи с новой ускоряющей структурой CDS. Получены предварительные результаты, показывающие применимость существующих мостовых устройств.

Продолжены работы по разработке и созданию элементов ускорителей для ведущих ускорительных центров.

- В рамках научного сотрудничества между ИЯИ РАН и ОИЯИ по разработке, созданию и внедрению источников поляризованных частиц созданный с участием ИЯИ РАН источник использовался в ускорительных сеансах НУКЛОТРОНа в 2016 и 2017 гг. для выполнения физических экспериментов по спиновой ядерной физике (рис.3). В третьем квартале проводились работы по его исследованию и усовершенствованию с целью повышения интенсивности.



Рис.3. Источник поляризованных и неполяризованных дейтронов и протонов, установленный в инжекторном помещении НУКЛОТРОНа ОИЯИ.

Рис. 4 Ячейки резонатора дефлектора для установки REGAE, разработанного в ИЯИ РАН.

- По теме: «Исследование, разработка и запуск электродинамических систем стенда фотоинжектора для исследования формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости», выполняемой по соглашению с лабораторией ДЕЗИ, Цойтен, Германия, проведены ВЧ измерения разработанного устройства согласования. Исследования показали, что это позволит понизить уровень отраженной ВЧ мощности до допустимого уровня, определённого спецификацией применённого клистрона.

- В лаборатории ДЕЗИ, Гамбург, Германия завершено изготовление ячеек резонатора дефлектора установки REGAE, разработанного в ИЯИ РАН в рамках соглашения с ДЕЗИ: «Разработка конструкции и ВЧ настройка резонатора дефлектора с минимизированным уровнем абберраций» (рис. 4).

- Продолжены работы по теме: «Исследование стабильности источника электронов с высокой частотой посылок для исследовательской установки CLARA/VELA при медленном изменении параметров резонатора», выполняемой по соглашению с лабораторией STFC, Даресбури, Англия.

- Продолжены работы по разработке и созданию измерителей формы сгустков. В частности, в рамках работы по соглашению с комплексом FRIB Мичиганского университета, США по теме: «Разработка, изготовление, поставка и наладка Измерителя Формы Сгустков для Комплекса пучков редких изотопов (FRIB) MSU», выполнен этап поставки, сборки и подготовки к испытаниям (рис. 5).



Рис. 5. Собраный измеритель формы сгустков в чистой комнате для сборки оборудования ускорителя FRIB MSU.

Рис. 6. Измеритель формы сгустков, установленный в лаборатории GSI в тестовой зоне после демонстрационной секции ускорителя CW-linac.

- В июле 2017 г., универсальный вариант измерителя, разработанный и изготовленный ранее в ИЯИ РАН для линейных ускорителей проекта FAIR GSI (Дармштадт, Германия), был успешно использован специалистами GSI и Майнцкого университета им. Гельмгольца для настройки демонстрационной сверхпроводящей секции ускорителя тяжёлых ионов непрерывного действия CW-Linac (Рис. 6).

По теме «Радиоизотопные исследования»: в совместных исследованиях с фирмой Zevacor Molecular, США изучена возможность одновременного получения медицинских изотопов стронций-82 и германий-68 путем облучения протонами с начальной энергией 70 МэВ рубидиевой и мишеней GaNi. Проанализированы различные сценарии облучения и поведения вещества мишени и входного вакуумного окна под интенсивным пучком протонов с учетом имеющейся схемы охлаждения мишеней. Расчёты подтверждаются полученными экспериментальными данными.

Изучен механизм процессов в сорбенте генератора рубидия-82 при клиническом применении в генераторной колонке с сорбентом, активированным путём обработки исходного сухого гидратированного диоксида олова (IV) раствором модельного вещества (pH = 11,5). Показано, что в результате такой обработки ион-обменная ёмкость сорбента на основе гидратированного оксида олова увеличивается в 4 раза.

Совместно с НИИ НПО «Луч» Госкорпорации Росатом и ООО «Термионика» разработано техническое задание для изготовления пробных мишеней металлического тория в оболочке из металлического ниобия для получения актиния-225, а также установки диффузионной сварки для изготовления высокопроизводительной рабочей мишени аналогичного типа.

Были исследованы возможности химических схем разделения ^{225}Ac и ^{213}Bi с использованием неорганических сорбентов производства компании «Термоксид» и выявлены возможности существенного улучшения «прямого» и «обратного» $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генераторов.

Учёный секретарь ИЯИ РАН А.Д.Селидовкин