

СЗМ

0-292

JINR — DUBNA



1956 — 2011

СЗМ
0-292

ОБЪЕДИНЕННОМУ
ИНСТИТУТУ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ —

55 лет



150104

Объединенный институт
ДУБНА, 2011
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Авторский коллектив:

*В. А. Бедняков, А. В. Белушкин, Ю. А. Будагов, А. С. Водопьянов,
В. В. Воронов, Г. Г. Гульбекян, С. Н. Дмитриев, В. М. Жабицкий,
В. И. Загребаев, В. В. Иванов, Д. В. Каманин, В. Д. Кекелидзе,
Г. А. Козлов, Е. А. Красавин, В. А. Крылов, О. А. Куликов, Р. Ледницки,
Г. Л. Мелкумов, С. Н. Неделько, А. Г. Ольшевский, С. З. Пакуляк,
Д. В. Пешехонов, А. Г. Попеко, А. В. Рузаев, Б. М. Старченко,
Т. А. Стриж, Ю. Г. Шиманская*

Составители:

*Ю. А. Батусов, В. А. Бедняков, Ю. Н. Денисов, П. С. Исаев,
М. Г. Лоцилов, Н. А. Русакович, Н. И. Сисакян, Б. М. Старченко*

Фото

*П. Е. Колесова, Е. В. Пузыриной, Ю. А. Туманова,
а также из фотоархива ОИЯИ*

Художник

Ю. Г. Мешенков

Объединенному институту ядерных исследований — 55 лет:

О29 Сб. ст. — Дубна: ОИЯИ, 2011. — 249 с., ил.

ISBN 978-5-9530-0273-8

Издание посвящено 55-летию Объединенного института ядерных исследований. В нем рассказывается об основных научных достижениях Института за последние годы, развитии международного сотрудничества ученых, реализации инновационной и образовательной программ ОИЯИ. Широко представлены перспективные планы международного межправительственного научного центра в Дубне на ближайшее будущее.

В сборник также вошли статьи, авторы которых делятся своими воспоминаниями о жизни и работе в Дубне, впечатлениями о встречах с коллегами и друзьями.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ: РОЖДЕНИЕ НАУЧНОЙ ДУБНЫ

В 2011 г. исполняется 55 лет с момента образования Объединенного института ядерных исследований — международной межправительственной научно-исследовательской организации, расположенной в подмосковной Дубне.

Предыстория. Атом для мира

К середине прошлого столетия человечество четко осознало необходимость освоения и практического использования в мирных целях неисчерпаемых энергетических ресурсов, таящихся в атомном ядре. Становление и развитие атомной науки и техники требовало сотрудничества ученых, объединения усилий целых научных коллективов. Только огромная исследовательская работа многих сотен и тысяч ученых — физиков, посвятивших свою жизнь изучению закономерностей мира элементарных частиц и атомных ядер, позволила направить титаническую энергию атомного ядра в мирное русло, что необходимо для обеспечения энергетических потребностей человечества и повышения его благосостояния.

История развития атомной отрасли в нашей стране была неразрывно связана с достижениями в области теоретической и экспериментальной ядерной физики и физики элементарных частиц, что, в свою очередь, невозможно без сооружения уникальных по сложности и точности мощных устройств — ускорителей заряженных частиц и ядерных реакторов. Чем больше энергия пучка ускоренных частиц, находящегося в распоряжении экспериментаторов, тем глубже в недра микромира могут они проникнуть. Исследования по ядерной физике были начаты в годы Великой Отечественной войны по инициативе академика Игоря Васильевича Курчатова, который, возглавив деятельность по развитию советской атомной науки и техники, собрал в Москве своих близких учеников и ряд крупных советских ученых.

По воспоминаниям М. Г. Мещерякова, со второй половины 1944 г. в кругах советских ученых, занятых исследованиями в области ядерной физики, началось обсуждение возможности строительства в нашей стране ускорителей частиц. Несколько совещаний по этому вопросу прошло под руководством академика И. В. Курчатова в организованной им Лаборатории № 2 АН СССР, впоследствии ставшей Институтом атомной энергии АН СССР (ныне РНЦ «Курчатовский институт»). В заседаниях участвовали А. И. Алиханов, В. И. Векслер, К. Д. Синельников, И. Е. Тамм, из Ленинграда приглашались Б. А. Никитин, Л. И. Русинов, Д. В. Ефремов и М. Г. Мещеряков, руководивший тогда циклотронной лабораторией Радиевого института АН СССР. В результате дискуссий остановились на том, что для обеспечения перспективных направлений фундаментальных физических исследований в СССР необходимо построить два ускорителя на рекордные по тем временам энергии — протонный ускоритель на 450–500 МэВ с последующим увеличением энергии до 650–700 МэВ и электронный ускоритель на энергию не менее 250 МэВ.

Гидротехническая лаборатория

Мнение физиков легло в основу судьбоносного для Дубны решения Правительства СССР, согласно которому для строительства ускорителя и научного городка при нем из Госфонда был выделен (1946 г.) заболоченный участок леса на правом берегу верхней Волги рядом с поселком Большая Волга. Образованная здесь в 1948 г. ускорительная лаборатория по соображениям конспирации и ввиду близости к Московскому морю получила название Гидротехнической лаборатории (ГТЛ) АН СССР. Фактически это был филиал Лаборатории № 2, которой заведовал в Москве И. В. Курчатов.

Директором ГТЛ и научным руководителем разработок по ускорителю был назначен Михаил Григорьевич Мещеряков, а его заместителем — Венедикт Петрович Джелепов. Проектирование магнита ускорителя и электротехнического оборудования было выполнено под руководством сотрудника специального конструкторского бюро ленинградского завода «Электросила» Д. В. Ефремова. Разработкой высокочастотной системы ускорителя и мощного высокочастотного генератора руководил член-корреспондент АН СССР А. Л. Минц.



Михаил Григорьевич Мещеряков

По настоянию И. В. Курчатова разработка синхроциклотрона была начата в Лаборатории № 2. Организованный в ней ускорительный отдел, руководителем которого был назначен М. Г. Мещеряков, был призван в кратчайший срок создать действующую модель будущего синхроциклотрона и проверить на ней принцип автофазировки. Уже в декабре 1947 г. такая модель была задействована, а к середине 1948 г. на ней были исследованы все существенные особенности синхроциклотронного способа ускорения протонов. В проведении этих работ принимали активное участие сотрудники отдела Н. П. Богачев, Е. Л. Григорьев, В. С. Катышев, А. А. Реут и А. А. Кропин. Было запланировано, что после завершения исследований модели нового ускорителя этот отдел переедет на место строительства синхроциклотрона и станет ядром будущего научного центра.

Между тем одновременно с сооружением ускорителя все более нарастающими темпами велось и строительство основных лабораторных зданий и жилых домов научного городка — будущей Дубны. Руководил этими работами один из опытных строителей крупных объектов А. П. Лепилов. В довольно сжатые сроки, при неблагоприятных условиях был возведен главный корпус синхроциклотрона — здание, высота массивных стен которого достигала 35 м, толщина бетонного потолка —

2 м, а общий вес перекрытия превышал 10 000 т. Огромная роль в решении проблем градостроительства принадлежит М. Г. Мещерякову. Он был первым, кто определил социальный облик будущей Дубны — города с особой атмосферой незримой работы человеческой мысли.

В 1948–1949 гг. в ГТЛ пришли молодые физики Н. И. Фролов, Ю. М. Казаринов, А. Г. Вахромеев, Б. И. Замолдчиков, Б. М. Головин, а также студенты-дипломники В. П. Дмитриевский, А. Е. Игнатенко, Г. И. Селиванов, Л. М. Сороко. Эта небольшая группа положила начало первому научному коллективу Дубны.

Запуск синхроциклотрона состоялся в рекордные сроки — 14 декабря 1949 г. Первый в СССР ускоритель заработал! Это было историческое событие, ознаменовавшее начало развития новой области научных исследований — физики частиц высоких энергий. На синхроциклотроне сначала были ускорены дейтроны до энергии 280 МэВ, α -частицы — до 250 МэВ, и вскоре



Здание первого ускорителя Дубны — синхроциклотрона

протоны — до 480 МэВ. До 1953 г. синхроциклотрон оставался крупнейшим ускорителем в мире.

В 1953 г. после увеличения диаметра полюсов магнита синхроциклотрона до шести метров и существенной реконструкции его высокочастотной системы был введен в действие протонный вариант ускорителя на энергию протонов 680 МэВ с интенсивностью пучка протонов примерно 0,3 мкА. Одновременно с этим В. П. Дмитриевским был осуществлен новый, регенеративный метод вывода частиц из ускорителя, что позволило увеличить интенсивность выведенного пучка в десятки раз.

Быстрое развитие экспериментальных исследований на синхроциклотроне, получение на нем первоклассных по научной значимости результатов позволили в 1953 г. преобразовать ГТЛ в Институт ядерных проблем АН СССР, который в 1956 г., войдя в состав Объединенного института ядерных исследований, стал его первой действующей лабораторией и получил название Лаборатории ядерных проблем. Директором этой лаборатории был назначен В. П. Джелепов.

Электрофизическая лаборатория

В 1949 г. под руководством В. И. Векслера при активной поддержке академика С. И. Вавилова в районе будущей Дубны началось проектирование еще одного мощного ускорителя протонов — синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ. В 1953 г. здесь была образована Электрофизическая лаборатория АН СССР (ЭФЛАН), которая в 1956 г. вошла в состав ОИЯИ и стала называться Лабораторией высоких энергий (ЛВЭ). Основателем и директором ЭФЛАН и ЛВЭ до 1966 г. был Владимир Иосифович Векслер, открывший в 1944 г. принцип автофазировки, лежащий в основе работы всех циклических ускорителей на высокие и сверхвысокие энергии.

Возглавив большой коллектив специалистов из различных институтов, В. И. Векслер, благодаря своим организаторским способностям и инженерным знаниям, направил его усилия на решение сложнейшей научно-технической проблемы — сооружение самого большого в мире протонного ускорителя. К разработке проектов уникального оборудования синхрофазотрона В. И. Векслер привлек научно-инженерные коллективы, возглавлявшиеся Д. В. Ефремовым и А. Л. Минцем.



Владимир Иосифович Векслер

Сооружение ускорителя потребовало решения многих проблем в области электромашиностроения, аппаратостроения и специальных материалов. Были разработаны и созданы гигантский кольцевой электромагнит весом 36 000 т, изготовленный из специальной марки стали, специальные схемы электрического питания и радиотехнические устройства, уникальная измерительная аппаратура. В процессе разработки радиотехнической и электронной аппаратуры родилась новая отрасль технической науки — радиотехника и электроника мощных ускорителей заряженных частиц.

Большая научно-исследовательская работа велась в Физическом институте АН СССР (ФИАН), где группа физиков-теоретиков, руководимая М. С. Рабиновичем и А. А. Коломенским, в течение длительного времени анализировала условия движения частиц в ускорителе. На территории ФИАН была сооружена действующая модель синхрофазотрона с условным названием МКМ, запущенная в 1953 г. и позволившая исследовать различные процессы, связанные с работой ускорителя. В частности, был изучен вопрос ввода частиц в ускоритель от внешнего инжектора, а также подготовлены кадры для предстоящих работ на синхрофазотроне — молодые специалисты, только что окончившие институты: К. П. Мызников, С. К. Есин, И. Б. Иссинский, Л. М. Попиненкова, Э. А. Мяз, Е. М. Кулакова, И. М. Баженова и др.

В конце 1956 г. монтаж основных узлов синхрофазотрона был закончен. До его запуска в ЛВЭ были разработаны различные детекторы частиц и созданы разного типа физические установки. Так, к началу работы синхрофазотрона на внутреннем пучке протонов готовилось оборудование для облучения ядерных фотоэмульсий, а на выведенном пучке отрицательных пионов заканчивался монтаж камеры Вильсона, пузырьковых камер: 24-литровой пропановой и полуметровой ксеноновой. Впоследствии методика пузырьковых камер, регистрирующих почти все вторичные заряженные и нейтральные частицы, стала основной при изучении процессов множественного рождения частиц на синхрофазотроне. Ускоренными темпами совершенствовались и создавались электронные методы исследований. На выведенных пучках синхрофазотрона появились простые, а затем и более сложные спектрометры, содержащие искровые камеры и черенковские счетчики.

В 1957 г. на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ был впервые получен пучок протонов, ускоренных до проектной энергии — десять миллиардов электронвольт. Успешный запуск синхрофазотрона позволил ученым стран-участниц ОИЯИ активно включиться в исследования по поиску новых элементарных частиц и неизвестных ранее закономерностей загадочного микромира в области энергий, которая до этого была недоступна ни одной лаборатории мира. Физическая программа



Главное здание синхрофазотрона

исследований на синхрофазотроне была подготовлена и осуществлялась под руководством В. И. Векслера, М. А. Маркова и И. В. Чувило.

В 1959 г. за создание этого ускорителя была присуждена Ленинская премия коллективу авторов в составе: В. И. Векслера, Ф. А. Водопьянова, Д. В. Ефремова, Л. П. Зиновьева, А. А. Коломенского, Е. Г. Комара, А. Л. Минца, Н. А. Моносзона, В. А. Петухова, М. С. Рабиновича, С. М. Рубчинского, А. М. Столова.

Группы ядерных фотоэмульсий первыми были готовы к работе на ускоренном до рекордных энергий пучке протонов. Случай рождения и распада антисигма-минус-гиперона был найден после просмотра 40 000 стереофотографий, зарегистрировавших десятки тысяч других взаимодействий отрицательно заряженных пионов с атомами водорода и углерода пропана. На Рочестерской конференции 1960 г. в Беркли (США) дубненские ученые сообщили данные, которые впервые наиболее полно отображали общую картину процессов образования странных (Λ^0 , K^0 , Σ^\pm и Ξ^-) частиц в пион-нуклонных взаимодействиях при самых высоких в то время энергиях. В частности, рассказывалось об открытии антисигма-минус-гиперона — первом зарегистрированном открытии ОИЯИ, о первом наблюдении множественного (более двух) рождения странных частиц и об обнаружении быстрого роста с энергией сечения генерации каскадных кси-минус-гиперонов. Впервые сообщалось о подтверждении ранее установленного физиками ОИЯИ общеизвестного сейчас закона сохранения барионного заряда.

Образование ОИЯИ

ГТЛ и ЭФЛАН, две крупные лаборатории с мощнейшими ускорителями, уникальными исследовательскими установками, первоклассным оборудованием и штатами опытных сотрудников, вошли в состав Объединенного института ядерных исследований — первой межправительственной научной организации социалистических государств.

Соглашение о создании Объединенного института было подписано 26 марта 1956 г. представителями правительств 11 стран-учредителей с целью объединения их научного и материального потенциала для изучения фундаментальных свойств материи. В том же году научный городок вместе



Совещание представителей правительств одиннадцати стран-учредителей Объединенного института ядерных исследований. Выступает главный ученый секретарь президиума АН СССР А. В. Топчиев. Москва, 26 марта 1956 г.

с рабочими поселками района Большой Волги был преобразован в город, получивший название Дубна.

Первым директором Института Комитет полномочных представителей одиннадцати стран единогласно избрал профессора Д. И. Блохинцева, только что завершившего создание первой в мире атомной электростанции в Обнинске. Вице-директорами международного научного центра стали профессора М. Даныш (Польша) и В. Вотруба (Чехословакия).

В дополнение к двум вошедшим в состав ОИЯИ лабораториям были созданы три новые: Лаборатория ядерных реакций, директором которой стал Г. Н. Флеров, Лаборатория нейтронной физики, которую возглавил И. М. Франк, и Лаборатория теоретической физики, возглавленная Н. Н. Боголюбовым. В Лаборатории ядерных реакций началось строительство мощного циклотрона для ускорения тяжелых ионов, в Лаборатории нейтронной физики развернулось строительство уникального импульсного реактора на быстрых нейтронах. Эти установки были успешно введены в действие в 1960 г. В 1966 г. в ОИЯИ была создана еще одна лаборатория — Лаборатория вычислительной техники и автоматизации, директором которой стал ее создатель М. Г. Мещеряков. Новые технические средства, появив-



Полномочный представитель Правительства СССР Е. П. Славский выступает на первом заседании Комитета полномочных представителей ОИЯИ. Дубна, сентябрь 1956 г.

шился благодаря этому в Институте, существенно расширили диапазон экспериментальных и теоретических исследований, способствовали развитию новых научных направлений.

Незадолго до образования Объединенного института ядерных исследований западноевропейские страны реализовали идею консолидации усилий в изучении фундаментальных свойств микромира, создав в 1954 г. близ Женевы (Швейцария) Европейскую организацию ядерных исследований (ЦЕРН), где были построены крупные экспериментальные установки для проведения ядерно-физических исследований.

В целом, и создание, и дальнейшая деятельность двух крупнейших международных научных организаций — ОИЯИ и ЦЕРН — служат неопровержимым доказательством того, что только широкое международное сотрудничество может обеспечить поступательное развитие ядерной науки, равно как и мирное использование атомной энергии.

Становление и развитие ОИЯИ

История становления Объединенного института связана с именами таких крупнейших ученых и руководителей науки, как Н. Н. Боголюбов, Л. Инфельд, И. В. Курчатов, Г. Не-

водничанский, А. М. Петросьянц, Е. П. Славский, И. Е. Тамм, А. В. Топчиев, Х. Хулубей, Л. Яноши и др.

В формировании основных научных направлений на разных этапах развития Института принимали участие выдающиеся физики: Н. С. Амаглобели, А. М. Балдин, Ван Ганчан, В. И. Векслер, В. Вотруба, М. Гмитро, Н. Н. Говорун, М. Даныш, В. П. Джелепов, И. Звара, И. Златев, В. Г. Кадышевский, Д. Киш, Я. Кожевник, Н. Кроо, К. Ланиус, Ле Ван Тхием, А. А. Логунов, М. А. Марков, В. А. Матвеев, М. Г. Мещеряков, Г. Наджаков, Нгуен Ван Хьеу, Ю. Ц. Оганесян, Л. Пал, В. Петржилка, Г. Позе, Б. М. Понтекорво, В. П. Саранцев, А. Н. Сисакян, Н. Содном, Р. Сосновски, А. Сэндулеску, А. Н. Тавхелидзе, И. Тодоров, И. Улегла, И. Урсу, Г. Н. Флеров, И. М. Франк, Х. Христов, А. Хрынкевич, Щ. Цицейка, Чжоу Гуанчжао, И. В. Чувило, Ф. Л. Шапиро, Д. В. Ширков, Д. Эберт, Е. Яник и др.

Со времени образования Института в области ядерных исследований произошли изменения, которые с полным правом можно назвать революционными. В 1961 г., когда были учреждены премии ОИЯИ, первую награду получил коллектив авторов, возглавляемый академиком В. И. Векслером и китайским



Первая дирекция ОИЯИ и директора лабораторий (слева направо): директор ЛНФ И. М. Франк, вице-директор ОИЯИ М. Даныш, директор ЛЯП В. П. Джелепов, вице-директор ОИЯИ В. Вотруба, административный директор ОИЯИ В. Н. Сергиенко, директор ОИЯИ Д. И. Блохинцев, директор ЛВЭ В. И. Векслер, помощник директора ОИЯИ А. М. Рыжов, директор ЛТФ Н. Н. Боголюбов, директор ЛЯР Г. Н. Флеров. 1957 г.

профессором Ван Ганчаном, за открытие антисигма-минус-гиперона.

Уже несколько лет спустя этой элементарной, как полагали сначала, частице было отказано в элементарности, а с ней и протону, нейтрону, π - и K -мезонам и другим так называемым адронам. Эти объекты оказались сложными частицами, состоящими из кварков и антикварков, к которым и перешло право называться элементарными.

Дубненские физики (Н. Н. Боголюбов с учениками) внесли ясность в понимание кварковой структуры адронов: была предложена концепция цветных кварков, кварковая модель адронов, получившая название «дубненский мешок», и т. д.

Сегодня Объединенный институт ядерных исследований — всемирно известный научный центр, являющий собой уникальный пример успешной интеграции фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований с разработкой и применением новейших технологий и университетским образованием. Рейтинг ОИЯИ в мировом научном сообществе очень высок.

Институт опирается на мощный фундамент: традиции научных школ, имеющих мировое признание; базовые установки с уникальными возможностями, позволяющие решать актуальные задачи во многих областях современной физики; статус международной межправительственной организации. В соответствии с Уставом Институт осуществляет свою деятельность на принципах открытости для участия всех заинтересованных государств, их равноправного взаимовыгодного сотрудничества.

Членами ОИЯИ являются 18 государств: Азербайджанская Республика, Республика Армения, Республика Беларусь, Республика Болгария, Социалистическая Республика Вьетнам, Грузия, Республика Казахстан, Корейская Народно-Демократическая Республика, Республика Куба, Республика Молдова, Монголия, Республика Польша, Российская Федерация, Румыния, Словацкая Республика, Республика Узбекистан, Украина, Чешская Республика. На правительственном уровне заключены соглашения о сотрудничестве Института с Венгрией, Германией, Египтом, Италией, Сербией и Южно-Африканской Республикой.

Высший руководящий орган Института — Комитет полномочных представителей всех 18 стран-участниц. Научную политику Института вырабатывает Ученый совет, в состав которого,



Фотовыставка «Атом — миру. 40 лет Объединенному институту ядерных исследований в Дубне». Женева, Дворец Наций Европейского отделения ООН

помимо крупных ученых, представляющих страны-участницы, входят известные физики Германии, Греции, Индии, Италии, Китая, США, Франции, Швейцарии, Европейской организации ядерных исследований и др.

Широкое международное сотрудничество — важнейший аспект деятельности ОИЯИ. Институт поддерживает связи более чем с 700 научными центрами и университетами в 64 странах мира. Только в России, крупнейшем партнере ОИЯИ, сотрудничество осуществляется более чем со 150 исследовательскими центрами, университетами, промышленными предприятиями и фирмами из 43 российских городов. Среди научных партнеров Объединенного института в России — 92 исследовательские организации в 23 городах. Непосредственными участниками реализации научной программы ОИЯИ являются 22 промышленные организации из 14 городов России, которые сначала проектируют, а затем производят у себя нестандартное оборудование.

География сотрудничества ОИЯИ с российскими вузами не ограничивается Москвой, а распространяется на всю территорию страны. Партнерские отношения у Института существуют с 40 университетами в 25 российских городах.

В Институте накоплен колоссальный опыт взаимовыгодного научно-технического сотрудничества в международном масштабе. ОИЯИ поддерживает контакты с МАГАТЭ, ЮНЕСКО, Европейским физическим обществом, Международным центром теоретической физики в Триесте. Ежегодно в Дубну приезжают более тысячи ученых из сотрудничающих с ОИЯИ организаций.

С момента образования ОИЯИ здесь выполнен широкий спектр исследований и подготовлены научные кадры высшей квалификации для стран-участниц Института. Среди них президенты национальных академий наук, руководители крупнейших ядерных институтов и университетов многих государств-членов ОИЯИ.

В составе ОИЯИ семь лабораторий, каждая из которых по масштабам проводимых исследований сопоставима с большим институтом.

В Институте работают около 4500 человек, из них более 1200 — научные сотрудники (40% — из стран-участниц, кроме РФ), в том числе действительные члены и члены-корреспонденты национальных академий наук, более 260 докторов и 560 кан-

дидатов наук, около 2000 человек — инженерно-технический персонал.

Основные направления теоретических и экспериментальных исследований в ОИЯИ: физика элементарных частиц, ядерная физика и физика конденсированных сред. Научная программа ОИЯИ ориентирована на достижение высоких результатов принципиального научного значения.

Институт располагает уникальным набором экспериментальных физических установок. Наряду с ныне действующим первым ускорителем Дубны — фазотроном на энергию 680 МэВ, который используется для лучевой терапии, к ним относятся: нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер и тяжелых ионов на энергию 6 ГэВ/нуклон для исследований в области релятивистской ядерной физики; циклотроны тяжелых ионов У-400 и У-400М, используемые в экспериментах по синтезу тяжелых и экзотических ядер для изучения их физико-химических свойств и механизмов ядерных реакций; импульсный реактор ИБР-2М (средняя мощность 2 МВт, пиковая — 1500 МВт) для проведения исследований по нейтронной ядерной физике и физике конденсированных сред.



Ускоритель протонов фазотрон
Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

150104



Сверхпроводящий ускоритель ядер нуклонов



Циклотрон У-400М



Радиобиологические исследования

Экспериментальная база ОИЯИ позволяет проводить не только передовые фундаментальные исследования, но и прикладные исследования в области физики конденсированного состояния вещества, в биологии, медицине, материаловедении, геофизике, инженерной диагностике, направленные на изучение строения и свойств наносистем и новых материалов, биологических объектов, на разработку и создание новых электронных, био- и информационных нанотехнологий.

ОИЯИ обладает мощными высокопроизводительными вычислительными средствами, которые с помощью высокоскоростных каналов связи интегрированы в мировые компьютерные сети. В 2009 г. введен в строй масштабируемый канал связи Дубна–Москва с начальной пропускной способностью 20 Гбит/с и возможностью последующего расширения пропускной способности до 720 Гбит/с. Опорная сеть ОИЯИ со скоростью передачи данных 1 Гбит/с объединяет в единую компьютерную сеть локальные сети всех лабораторий и подразделений ОИЯИ. Ядро вычислительной инфраструктуры Института — Центральный информационно-вычислительный комплекс (ЦИВК). Созданный на его базе грид-сегмент ОИЯИ является важным элементом мировой грид-инфраструктуры.

ОИЯИ всегда, даже в нелегкое постперестроечное время, работал в соответствии с конкретными планами. Относитель-



Центральный информационно-вычислительный комплекс

ная экономическая стабильность в начале нынешнего столетия позволила коллективу Института опираться на более долгосрочные планы развития — семилетние программы (2003–2009 гг., 2010–2016 гг.) и «дорожную карту» — перспективную программу стратегического развития Института на 10–12 лет. Этот документ, который раз в два-три года будет корректироваться, принят с целью концентрации кадровых и финансовых ресурсов Института для реализации перспективных и амбициозных проектов. Развитие научных направлений по отдельным разделам «дорожной карты» рассчитано на перспективу от 10 до 15 лет.

Концептуальной основой современных программ развития Института является триада: наука — образование — инновации, что соответствует также стратегии экономического развития стран-участниц ОИЯИ. Базовый элемент триады — фундаментальная наука — это так называемые каркасные проекты, т. е. проекты, связанные с крупными экспериментальными установками. Благодаря их реализации формируются новые научные направления, разрабатываются новые технологии. В Объединенный институт, располагающий мощным и уникальным парком базовых машин (ускорителей и реакторов), на протяжении десятилетий стремились ученые из стран-участниц и многих других научных центров мира. Здесь под руководством крупнейших ученых сформированы научные школы, реализуются крупные международные проекты, создаются элементы иннова-

ционного пояса вокруг Института, усиливается роль образовательной компоненты в деятельности ОИЯИ.

Любой научный или технологический центр остается конкурентоспособным и привлекательным с научной точки зрения, пока не устаревает его оснащение — приборы и установки. Поэтому «дорожная карта» предусматривает в первую очередь обновление научно-инновационной инфраструктуры ОИЯИ: модернизацию всех базовых установок Института и начало создания новых. Программа нацелена на повышение привлекательности исследований на собственных установках Института как для мирового научного сообщества, так и для научной молодежи стран-участниц.

Концепция Семилетнего плана развития ОИЯИ на 2010–2016 гг. предусматривает концентрацию ресурсов для обновления ускорительной и реакторной базы Института и интеграцию его базовых установок в единую систему европейской научной инфраструктуры.

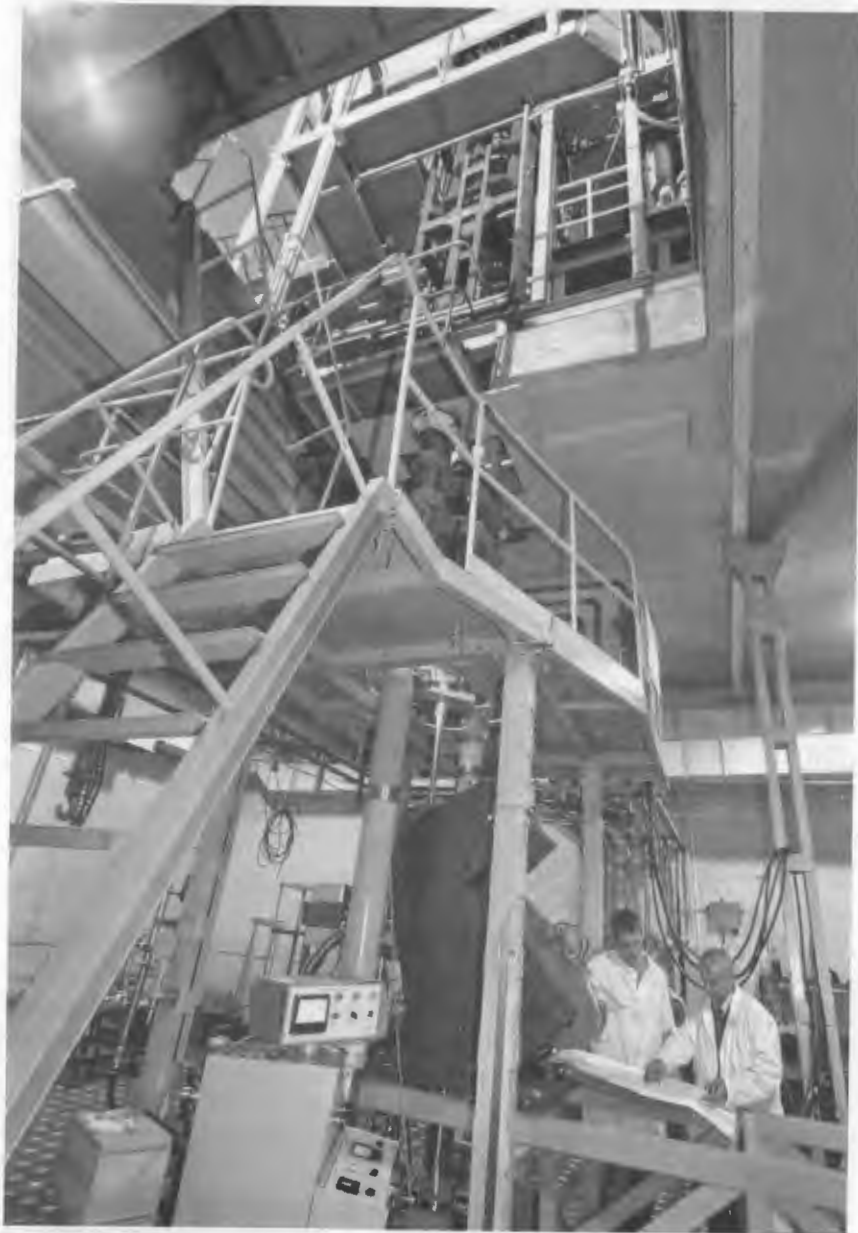
В конце 2008 г. введена в строй новая базовая установка — источник резонансных нейтронов ИРЕН-1, предназначенная для исследований в области ядерной физики с помощью время-пролетной методики в энергетическом диапазоне нейтронов до сотен кэВ.

Активно ведутся работы по проекту «Нуклотрон-М», который станет основой нового сверхпроводящего коллайдера NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) для ускорения тяжелых ионов до высоких энергий, оснащенного многоцелевым детектором MPD (MultiPurpose Detector), с целью проведения экспериментов по изучению адронной материи и ее фазовых превращений.

Широкие возможности для проведения экспериментальных исследований механизмов реакций со стабильными и радиоактивными ядрами предоставляет современный ускорительный комплекс тяжелых ионов DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams).

С успехом завершены работы по модернизации уникального импульсного быстрого реактора ИБР-2М, включенного в 20-летнюю Европейскую стратегическую программу по исследованиям в области нейтронного рассеяния.

Вся экспериментальная научная программа ОИЯИ поддерживается блестящей школой теоретической физики, хорошо развитой в Институте методикой физического эксперимента, современными информационными технологиями, включая грид-



Базовая установка нового поколения ИРЕН-1

технологии. Осуществляются проекты, направленные на развитие научной базы стран-участниц ОИЯИ, сооружение новых установок и разработку научных программ для них. За последние годы реализованы проекты создания циклотронов в Казахстане, Словакии и Болгарии.

После завершения этапа модернизации базовых установок наступит период интенсивных научно-исследовательских работ на «домашней» базе Института в рамках партнерских программ, прорабатываемых сейчас со странами-участницами и крупными исследовательскими центрами мира. Наряду с «домашними» работами ОИЯИ продолжает свое участие в крупных международных проектах (LHC, FAIR, XFEL), исследовательских программах на ускорителях RHIC и тэватрон (США).

Объединенный институт ядерных исследований входит в число участников проекта по сооружению международного линейного коллайдера ILC — мегапроекта XXI в. По итогам переговоров с руководителями глобальной проектной группы ILC (GDE) ОИЯИ наряду с FNAL (США), КЕК (Япония), ЦЕРН (Швейцария) и DESY (Германия) признан официальным кандидатом на возможное размещение ускорительного комплекса ILC.

Объединенный институт активно сотрудничает с Европейской организацией ядерных исследований в решении многих теоретических и экспериментальных задач физики высоких энергий. Сегодня физики ОИЯИ участвуют в работах 15 проектов ЦЕРН.

Весомый вклад ОИЯИ в осуществление проекта века «Большой адронный коллайдер (LHC)» получил высокую оценку мирового научного сообщества. С успехом и точно в срок были выполнены все обязательства ОИЯИ по разработке и созданию отдельных систем детекторов ATLAS, CMS, ALICE и самой машины LHC. Физики ОИЯИ задействованы в подготовке к проведению широкого спектра фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц на LHC. Центральный информационно-вычислительный комплекс Института активно используется для задач, связанных с экспериментами на LHC и другими научными проектами, требующими крупномасштабных вычислений.

В ОИЯИ созданы прекрасные условия для обучения талантливых молодых специалистов. Учебно-научный центр ОИЯИ ежегодно организует практикум на установках Института для



Научный семинар «Физика на Большом адронном коллайдере (ЛHC ЦЕРН)», посвященный медиа-презентации первых столкновений пучков ЛHC при энергии 7 ТэВ. Дом международных совещаний ОИЯИ

студентов из высших учебных заведений России и других стран. Физикам из развивающихся стран ОИЯИ предоставляет стипендии. В 1994 г. по инициативе дирекции ОИЯИ, при активном участии Российской академии естественных наук, администраций Московской области и города был создан Международный университет природы, общества и человека «Дубна». В его преподавательском составе — десятки сотрудников ОИЯИ, ученые мирового уровня. На территории ОИЯИ активно развивается учебная база университета.



Студенты университетов ЮАР на ознакомительной практике в ОИЯИ



Ознакомительная практика для студентов

Ученые Института — неперенные участники многих международных и национальных научных конференций. В свою очередь, ОИЯИ ежегодно проводит до 10 крупных конференций, более 30 международных совещаний, а также ставшие традиционными школы молодых ученых. Ежегодно в редакции многих журналов и оргкомитеты конференций Институт направляет более 1 500 научных статей и докладов, которые представляют около 3 000 авторов. Публикации ОИЯИ рассылаются более чем в пятьдесят стран мира. Издаются известные журналы «Физика элементарных частиц и атомного ядра», «Письма в ЭЧАЯ», ежегодный отчет о деятельности ОИЯИ, информационный бюллетень «Новости ОИЯИ», а также сборники трудов конференций, школ, совещаний, организованных Институтом.

На долю ОИЯИ приходится около 40 открытий в области ядерной физики. Признанием выдающегося вклада ученых Института в современную физику и химию стало решение Международного союза чистой и прикладной химии присвоить элементу 105 Периодической системы элементов Д. И. Менделеева название дубний. В числе последних достижений Института — прорыв в синтезе сверхтяжелых элементов и в понимании проблемы их стабильности. Благодаря усовершенствованию экс-



Участники международной Боголюбовской конференции «Проблемы теоретической и математической физики»



Участники проводимой в ОИЯИ Всероссийской научной школы для молодежи «Современная нейтронография: междисциплинарные исследования наносистем и материалов»

периментальных методов и достижению высокой эффективности ускорения ионов учеными Дубны впервые в мире были синтезированы новые долгоживущие сверхтяжелые элементы с порядковыми номерами 113, 114, 115, 116, 117, 118.

Более 15 лет ОИЯИ участвует в реализации программы по созданию инновационного пояса Дубны. В 2005 г. Правительством РФ было подписано постановление «О создании на



Члены Комитета полномочных представителей ОИЯИ на экскурсии в особой экономической зоне «Дубна»

территории г. Дубны особой экономической зоны технико-внедренческого типа». Специфика ОИЯИ нашла отражение в направленности особой экономической зоны. Это ядерно-физические и информационные технологии. Для реализации в особой экономической зоне Объединенным институтом подготовлено более 50 инновационных проектов, 9 компаний-резидентов ОЭЗ «Дубна» имеют свои истоки в ОИЯИ.

Заключение

История Объединенного института богата яркими событиями, открытиями мирового масштаба и неразрывно связана с историей жизни и судьбами целого поколения ученых, инженеров и рабочих. Благодаря их профессионализму, энтузиазму и преданности науке Объединенный институт ядерных исследований в Дубне приобрел мировую известность, смог выжить в нелегкое постперестроечное время, сумев в непрерывном научном поиске достичь выдающихся результатов и воспитать новое поколение талантливейшей молодежи, которая вместе с Институтом уверенно смотрит в будущее.

Дальнейшее успешное развитие Объединенного института ядерных исследований предусматривает единство фундаментальной науки, широкой инновационной деятельности и весомой образовательной программы. Создание в Дубне постановлением Правительства РФ особой экономической зоны позволяет вплотную приступить к формированию инновационного пояса вокруг Института, основу которого составят ядерно-физические и информационные технологии, их применение в энергетике, нано- и микроэлектронике, медицине, приборостроении и материаловедении.

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА

ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ОИЯИ ЗА 2003–2009 ГГ.

В предлагаемом обзоре представлен ряд основных экспериментальных результатов, полученных в области физики элементарных частиц, атомного ядра и конденсированного состояния вещества за период реализации первого семилетнего плана развития Института, принятого в 2002 г.

Наиболее важные результаты в области физики элементарных частиц были получены сотрудниками Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина и Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова. Эти результаты стали возможными благодаря экспериментам по изучению нарушения CP-симметрии, исследованию спиновой структуры нуклона, поиску новых состояний адронной материи, а также благодаря экспериментам в области нейтринной физики и исследованию редких явлений и процессов с целью прецизионной проверки современной Стандартной модели физики частиц.

В серии экспериментов под общим названием **NA48**, которые проходили в CERN, было доказано существование прямого CP-нарушения, удалось измерить ненулевые значения параметров CP-нарушения. Явление прямого CP-нарушения играет решающую роль в вопросе объяснения наблюдаемой асимметрии между материей и антиматерией. В эксперименте NA48 получены значения параметров CP-нарушения $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (14,7 \pm 2,2) \cdot 10^{-4}$. В эксперименте **NA48/2** соответственно получено $A_g^c = (-1,5 \pm 2,2) \cdot 10^{-4}$ для $K^\pm \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^\pm$ и $A_g^n = (-1,8 \pm 1,8) \cdot 10^{-4}$ для $K^\pm \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^\pm$, где $A_g = (g^+ - g^-)/(g^+ + g^-)$ — асимметрия параметров наклона g^+ и g^- на графике Далитца. Эти результаты являются самыми точными среди измеренных параметров в распадах нейтральных и заряженных каонов.

Впервые в распределении на графике Далитца для распада заряженного каона на один заряженный и два нейтральных пиона наблюдалась аномалия (так называемый cusp-эффект).

Это наблюдение позволило произвести самое точное измерение длин пион-пионного рассеяния a_0 и a_2 (рис. 1).

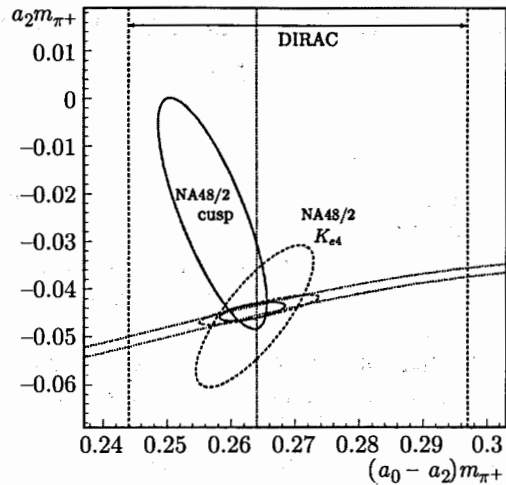


Рис. 1. Эллипсы (сплошные линии) соответствуют результатам измерений длин $\pi\pi$ -рассеяния: маленький эллипс соответствует ограничению киральной теории возмущений, большой эллипс — независимому фитированию параметров $a_0 - a_2$ и a_2 . Эллипсы (штриховые линии) — ограничения из K_{e4} -распада. Вертикальные линии: центральное значение из эксперимента DIRAC (пунктирная линия) и пределы ошибок (штриховые линии). Теоретический диапазон в 1σ , разрешенный в киральной теории, показан пунктирными кривыми

Вместе с результатами анализа распадов K_{e4} ($K^\pm \rightarrow \pi^+\pi^-e^\pm\nu$) эти данные позволяют получить самосогласованную картину значений базовых параметров низкоэнергетичной КХД. Полученные результаты хорошо согласуются с предсказаниями киральной теории возмущений. Кроме того, в экспериментах NA48, NA48/2 впервые наблюдались новые моды редких распадов каонов и гиперонов: $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$, $K_S \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$, $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+e^-\nu \rightarrow \pi^+\pi^0\mu^-\nu$ и $K^\pm \rightarrow \pi^\pm e^+e^-\gamma$. Прецизионные измерения относительных вероятностей полуплеptonных мод распада заряженных и нейтральных каонов способствовали разрешению проблемы унитарности матрицы СКМ. Эта проблема возникла в результате недостаточно точных измерений в ряде предыдущих экспериментов. Набранная в эксперименте NA48/2 статистика — 7253 кандидата в распад

$K^\pm \rightarrow \pi^+e^+e^-$ (с фоном в 1%) позволила провести наиболее точные измерения вероятности и формфактора этого распада.

Новые уникальные данные о структуре спина нуклона (в контексте решения известной проблемы «спиновой кризиса») получены в экспериментах **COMPASS** (CERN) и **HERMES** (DESY, Германия): впервые была измерена величина поляризации глюонов (рис. 2). Она оказалась достаточно небольшой: $|\Delta g/g| < 0,3$. Впервые был получен полный набор поляризованных партонных функций распределения Δu , Δd , $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{d}$ и Δs .

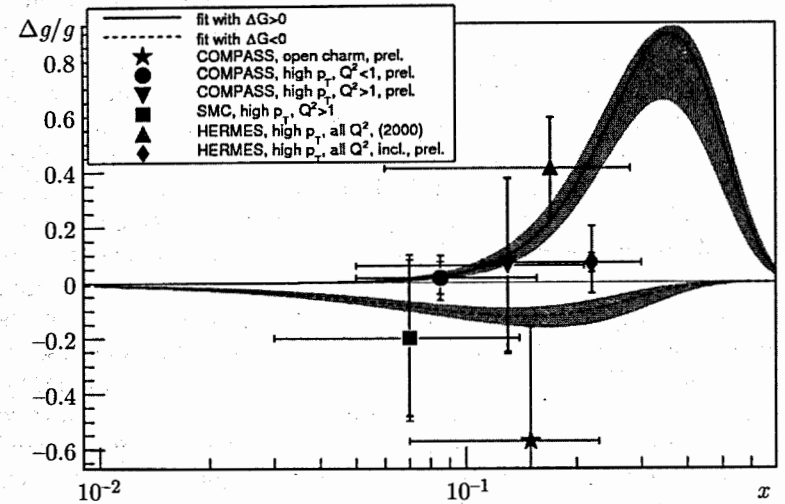


Рис. 2. Результаты измерений поляризации глюонов $\Delta g/g$ в процессах образования очарованных частиц и в процессах рождения адронных пар с большим p_T как функция x . Горизонтальными линиями отмечены области в x для каждого измерения; вертикальные линии показывают статистическую точность и общее число ошибок (если они есть). Измерения для процессов образования очарованных частиц выполнены при $13 (\text{ГэВ}/c)^2$, другие измерения — при $3 (\text{ГэВ}/c)^2$. Кривые — параметризации анализа NLO QCD в схеме $\overline{\text{MS}}$ при $3 (\text{ГэВ}/c)^2$, они соответствуют $\Delta G > 0$ (сплошная линия) и $\Delta G < 0$ (пунктирная линия)

В эксперименте COMPASS выполнены первые исследования реакций Примачока, цель которых — измерение поляризуемости пиона, что представляет несомненный интерес с точки зрения соответствия нынешним теоретическим предсказаниям.

При участии специалистов ОИЯИ в эксперименте **H1** в DESY была исследована поперечная спиновая структура нук-

лона, изучен характер эксклюзивного образования мюонов, выполнено измерение поляризации Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гиперонов, а также проведено прецизионное измерение структурной функции F_2 в широком кинематическом диапазоне $3 \cdot 10^{-5} < x < 0,8$ и Q^2 до $3 \cdot 10^4$ (ГэВ/с)².

При активном участии группы из ОИЯИ в столкновениях Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ (эксперимент STAR на RHIC (BNL, США)) наблюдался эффект заметного подавления выхода электронов (нефотонного происхождения, т.е. от распадов D - и B -мезонов), обладающих большими значениями поперечного импульса. Этот эффект пока не имеет объяснения в современной теории. Изучение фемтоскопических корреляций в эксперименте STAR показало, что радиусы π , K , p и Λ зависят только от поперечной массы (имеют m_t -скейлинг), что указывает на универсальный характер расширения кварк-глюонной материи, ожидаемый в гидродинамике. В рамках эксперимента STAR группа ОИЯИ участвовала также в изучении характеристик мягких фотонов, в разработке нового теоретического подхода к реконструкции плоскости реакции, в анализе фрактальной размерности событий и многочастичных корреляций вторичных частиц, полученных в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов. Группа провела сравнение предсказаний пертурбативной КХД и модели z -скейлинга с данными по асимптотическому поведению струй, полученными на тэватроне и RHIC.

В эксперименте NA49 (SPS, CERN) при активном участии физиков ОИЯИ наблюдалась аномальная величина отношения выхода странных частиц к выходу пионов в центральных Pb + Pb-столкновениях. Эту аномально большую величину можно интерпретировать как указание на новое состояние сильновзаимодействующей материи. Она может указывать на начало деконфайнмента на низких энергиях SPS (~ 10 ГэВ).

Систематическое изучение свойств и поведения адронов в ядерной среде посредством облучения ее частицами от пионов и протонов до тяжелых ядер ведется в эксперименте HADES (GSI, Дармштадт, Германия). Группа ОИЯИ в этом эксперименте выполнила очень важную задачу по разработке и созданию легких дрейфовых камер и электроники считывания данных. Среди основных научных результатов эксперимента HADES следует отметить наблюдение избытка электрон-позитронных пар с малой инвариантной массой. Как выяснилось, причиной этого избытка в столкновениях C + C являлись немезонные ис-

точники указанных пар, присутствующие в нуклон-нуклонных столкновениях ($p + p$ и $d + p$) и обладающие очень сильной зависимостью от изоспина. Впервые был реконструирован четкий сигнал от распада омега-мезона $\omega \rightarrow e^+e^-$ при энергиях ускорителя SIS в $p + p$ -, $p + \text{Nb}$ - и $\text{Ag} + \text{K}/\text{Cl}$ -столкновениях. Также впервые наблюдалось глубокоподпороговое образование барионов $\Xi^-(1321)$ с множественностями, значительно превышающими ожидания в статистических и транспортных моделях.

В рамках эксперимента NIS был запущен прибор для поиска нарушения правила OZI в образовании ϕ - и ω -мезонов и рождении Θ -бариона (пентакварка) в протон-протонных взаимодействиях на нуклотроне. Экспериментальный поиск гипер- и η -ядер и их исследования с помощью методики ядерных трековых эмульсий проводились в рамках проектов GIBS, «Eta-ядра» и BECQUEREL. Фазовый переход в ядерной материи изучался в серии экспериментов PHASA и продолжается в проекте PHASA-3.

В соответствии с долгосрочной программой развития ОИЯИ физика нейтрино и изучение редких явлений — ключевые направления работы Лаборатории ядерных проблем.

Основная цель эксперимента GEMMA — измерение магнитного момента антинейтрино с чувствительностью на уровне $(4 \div 7) \cdot 10^{-12} \mu_B$. Спектрометр GEMMA-I состоит из сверхчистого германиевого детектора весом 1,5 кг с комбинированной активной и пассивной защитой. Он установлен под центром реактора (3 ГВт) Калининской атомной электростанции. Проведенный в 2009 г. сбор данных и их анализ позволили улучшить предел на магнитный момент до $3,9 \cdot 10^{-11} \mu_B$. Одновременно со сбором данных и их анализом разрабатывался и строился спектрометр GEMMA-II. Ожидается, что чувствительность к величине нейтринного магнитного момента будет на уровне менее $(1,0 \div 2,0) \cdot 10^{-11} \mu_B$. В третьей фазе эксперимента (GEMMA-III) чувствительность будет доведена до значения $(0,4 \div 1,0) \cdot 10^{-11} \mu_B$.

Основная цель эксперимента NEMO-3 — это поиск процесса двойного бета-распада семи различных $\beta\beta$ -изотопов как с испусканием двух нейтрино ($2\nu\beta\beta$ -распад), так и в безнейтринной моде ($0\nu\beta\beta$ -распад). Экспериментальный поиск $0\nu\beta\beta$ -распада имеет фундаментальное значение для современной физики частиц. Если удастся наблюдать этот процесс, то это будет означать, что нейтрино имеет майорановскую природу, и появит-

ся возможность оценить абсолютное значение ненулевой массы нейтрино. Набор данных в эксперименте NEMO-3 ведется с февраля 2003 г. в подземной лаборатории в Модане, расположенной в туннеле Фрежюс между Францией и Италией на глубине 4800 м водного эквивалента. За прошедшие годы коллаборацией были получены уникальные данные по двойному бета-распаду различных изотопов (табл. 1, 2).

Таблица 1

Изотоп	Оценка периода $0\nu\beta\beta$ -полураспада $T_{1/2}$, лет (90% CL)	Эффективная масса нейтрино (m_ν), эВ
^{100}Mo	$> 5,8 \cdot 10^{23}$	$< 0,8-1,3$
^{82}Se	$> 2,1 \cdot 10^{23}$	$< 1,4-2,2$
^{48}Ca	$> 1,3 \cdot 10^{22}$	$< 29,7$
^{96}Zr	$> 8,6 \cdot 10^{21}$	$< 7,4-20,1$
^{150}Nd	$> 1,8 \cdot 10^{22}$	$< 4,8-7,6$

Таблица 2

Изотоп	Измеренный период $2\nu\beta\beta$ -полураспада $T_{1/2}$, лет
^{100}Mo	$0,711 \pm 0,002(\text{стат.}) \pm 0,054(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$
^{82}Se	$9,6 \pm 1,0(\text{стат.}) \pm 0,3(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$
^{116}Cd	$2,8 \pm 0,1(\text{стат.}) \pm 0,3(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$
^{150}Nd	$0,920^{+0,025}_{-0,022}(\text{стат.}) \pm 0,072(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$
^{96}Zr	$2,3 \pm 0,02(\text{стат.}) \pm 0,3(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$
^{48}Ca	$4,4^{+0,5}_{-0,4}(\text{стат.}) \pm 0,4(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$
^{130}Te	$76 \pm 15(\text{стат.}) \pm 8(\text{сист.}) \cdot 10^{19}$

Установка NEMO-3, по существу, уникальна и является единственной в мире «фабрикой» двухнейтринного бета-распада различных ядер.

Французско-немецко-российский эксперимент **EDELWEISS** нацелен на прямое детектирование WIMP-частиц темной материи. Этот эксперимент также проходит в подземной лаборатории в Модане. В эксперименте EDELWEISS используются высокочистые германиевые криогенные детекторы для одновременного измерения фоновых и ионизационных сигналов при температуре около 20 мК. В 2009 г. в течение 8 месяцев коллаборация EDELWEISS-II проводила прямой поиск темной

материи, используя десять 400-граммовых криогенных детекторов, снабженных специальными чередующимися электродами. Наблюдение одного события-кандидата на WIMP с энергией отдачи ядра выше 20 кэВ за 6 месяцев сбора данных интерпретировалось как новое ограничение на сечение спин-независимого взаимодействия WIMP-частиц с нуклонами. Для массы WIMP в $80 \text{ ГэВ}/c^2$ на 90%-м уровне достоверности (CL) исключаются сечения, превышающие $1,0 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2$. Впервые данный результат показал уникальные возможности такого сорта детекторов темной материи в вопросе подавления фоновых событий.

Считается, что очень редкий распад каонов $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ является идеальным процессом для понимания причин нарушения CP-симметрии, а также для проверки Стандартной модели. Теоретическая неопределенность в определении относительной вероятности этого процесса, которая в Стандартной модели составляет $(3 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$, оценивается на уровне всего 1–2%. Данный распад рассматривается как идеальный процесс в физике кварковых ароматов для проверки Стандартной модели и поиска новой физики за ее пределами. Современный экспериментальный предел составляет $5,9 \cdot 10^{-7}$. Эксперимент **E391a** (КЕК-PS, Япония) — это первый целенаправленный поиск указанного распада. В нем используются две концепции — остронаправленный пучок каонов и герметичная вето-система для фотонов. Набор данных в эксперименте начался в феврале 2004 г. с целью улучшить существующий экспериментальный предел на несколько порядков. Поскольку ожидаемого сигнала не было обнаружено, а предполагаемый уровень фона ничтожно мал, полученный верхний предел на вероятность распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ составил $6,7 \cdot 10^{-8}$ (90% CL). Это самая точная в настоящее время величина. Сотрудниками ОИЯИ разработан абсолютно новый подход к измерениям распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ для эксперимента E391. Существовавший ранее регистрационный метод не позволял различать тип частицы, распадающейся на две гамма-частицы, и масса распавшихся частиц не могла быть реконструирована из-за отсутствия возможности углового измерения. Был предложен и разработан новый метод угловой реконструкции импульсов гамма-частиц, зарегистрированных калориметром установки.

В рамках проекта **PIBETA** (PSI, Швейцария) были получены окончательные результаты анализа экспериментальных данных по радиационному распаду пионов $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$. Этот

распад изучался в трех кинематических областях с помощью детектора PIBETA и остановленного пучка пионов. Данные использовались для извлечения аксиального F_A и векторного F_V формфакторов пиона, а также для проверки Стандартной модели. Объем данных, полученных за все время эксперимента PIBETA, на порядок больше, чем объем данных, полученных во всех предыдущих исследованиях. Для гипотетического тензорного вклада в амплитуду распада был получен верхний предел $|F_T(0)| \leq 5,1 \cdot 10^{-4}$ при 90%-м уровне достоверности.

В 2009 г. в PSI был продолжен эксперимент MEG по поиску распада $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, запрещенного законом сохранения лептонного аромата. Целью эксперимента является улучшение существующего ограничения на вероятность этого распада на два порядка и достижение рекордной чувствительности на уровне 10^{-13} . Анализ экспериментальных данных 2008 г. позволил получить верхний предел $3 \cdot 10^{-11}$. После этого были улучшены характеристики детектора, и после обработки экспериментальных данных ожидается получение предела на уровне $(2 \div 4) \times 10^{-12}$.

Чрезвычайно интересное явление — осцилляции нейтрино, предсказанные академиком Бруно Понтекорво, широко изучаются сейчас в различных экспериментах. Так, в эксперименте OPERA пучок мюонных нейтрино из CERN направляется на экспериментальную установку в лаборатории Гран-Сассо (Италия), которая была построена при активном участии сотрудников ОИЯИ. В 2009 г. проводился полномасштабный сеанс и было зарегистрировано более 3500 взаимодействий мюонных нейтрино. Общее количество данных, полученных в 2008–2009 гг., позволяет считать, что первые кандидаты на рождение тау-нейтрино должны быть среди зарегистрированных событий. Группа из ОИЯИ разработала программу для проведения поиска вершины взаимодействия.

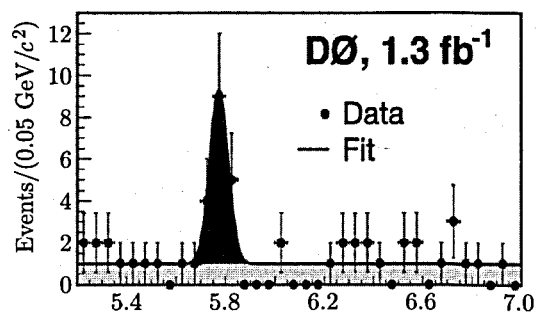
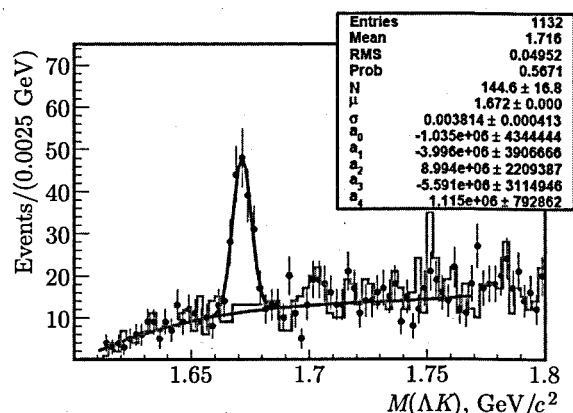
С мая 2007 г. продолжается набор данных в эксперименте BOREXINO. За последние годы основные усилия этой коллаборации были направлены на улучшение точности измерения потока солнечных нейтрино от ${}^7\text{Be}$. Для этой величины окончательно было получено значение 49 ± 3 (стат.) ± 4 (сист.) отсчетов в день на 100 т сцинтиллятора. Ожидаемый сигнал в Стандартной солнечной модели без осцилляций составляет 74 ± 4 отсчета, учет осцилляций солнечных нейтрино (сценарий MSW-LMA) снижает эти значения до 48 ± 4 отсчетов в день на

100 т. Гипотеза об отсутствии осцилляций нейтрино не согласуется с измерениями на уровне 4σ . Другой интересный результат — это новые, самые строгие ограничения на нейтринный магнитный момент. Изучение возможного отклонения спектра от формы чистого электрослабого взаимодействия для нейтрино от ${}^7\text{Be}$ дало новое ограничение на эффективный нейтринный момент: $\mu_\nu < 5,4 \cdot 10^{-11} \mu_B$ при 90%-м уровне достоверности.

Основные результаты работы группы ОИЯИ в эксперименте CDF (FNAL, США) — это измерение массы топ-кварка и эффективная работа установки CDF II. Был сделан важный вклад в прецизионное измерение массы топ-кварка M_{top} в так называемой дилептонной моде распада при интегрированной светимости $2,9 \text{ фб}^{-1}$. Получено значение $M_{\text{top}} = 165,5_{-3,3}^{+3,4}$ (стат.) $\pm 3,1$ (сист.) ГэВ/ c^2 . С учетом всех данных, проанализированных коллаборациями CDF и D0, верхние пределы на сечение образования бозонов Хиггса примерно в 2,7 и 0,94 раза выше, чем ожидается в Стандартной модели, для бозона Хиггса массой $m_H = 115$ и 165 ГэВ соответственно. Такой бозон Хиггса изучался на тэватроне в интервале масс $163 < m_H < 166$ ГэВ при 95%-м уровне достоверности. Эти результаты дают новую информацию по массе бозона Хиггса в рамках Стандартной модели после прямых исследований на LEP.

В рамках проекта D0 (FNAL) было осуществлено первое прямое наблюдение заряженного «прелестного» бариона Ξ_b , который содержит кварки всех трех поколений b , s и d . Были проанализированы 35 миллионов протон-антипротонных взаимодействий с энергией 1,96 ТэВ, в которых регистрировались мюонные пары с массой 2,5–3,6 ГэВ/ c^2 . В этих событиях были реконструированы J/ψ -частицы и заряженные Ξ -гипероны и антигипероны. Распределение инвариантных масс этих пар ($J/\psi \Xi$) имеет пик (19 событий) при 5774 МэВ/ c^2 с шириной 37 МэВ/ c^2 . Вероятность того, что такой пик возникнет из фоновых колебаний, не превышает $3,3 \cdot 10^{-8}$ (уровень фона — 3,6 событий). Пик интерпретировался как распад $\Xi_b \rightarrow J/\psi + \Xi$ (рис. 3). Измеренная масса Ξ_b согласуется с теоретическими предсказаниями.

В 2008 г. было также осуществлено первое прямое наблюдение «прелестного» бариона Ω_b (рис. 4). Это открытие было отмечено Американским физическим обществом к разряду самых

Рис. 3. Наблюдение пика в $(J/\psi\Xi)$ -распределенииРис. 4. Наблюдение Ω_b -бариона

выдающихся достижений в физике за 2008 г., которых было не так много.

Основная задача эксперимента **DIRAC** (SPS, CERN) — измерение времени жизни атомов $\pi^+\pi^-$, π^+K^- и π^-K^+ с целью проверки предсказаний КХД при низких энергиях. В 2009 г. проводилась настройка установки **DIRAC** и набор данных с Ni-мишенью для наблюдения π^+K^- - и π^-K^+ -мезоатомов, а также для измерения времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атомов с точностью не хуже 6%. Обработка и анализ данных, набранных в 2001–2003 гг., полностью закончены — время жизни атомов $\pi^+\pi^-$ было найдено с точностью 10%. Были опубликованы первые результаты по поиску атомов πK . В общей сложности 173 ± 54 πK -атомные пары наблюдались на уровне достоверности $3,2\sigma$.

Завершен анализ данных, полученных на установке **АНКЕ** в **COSY** (Юлих, Германия), по реакции распада дейтрона $pd \rightarrow \{pp\}sn$ с испусканием вперед быстрой протонной пары $\{pp\}s$ в состоянии 1S_0 при энергии протонного пучка 0,5–2,0 ГэВ. В эксперименте использовалась коллинеарная геометрия, что позволяло анализировать события с большой передачей импульса и исследовать нуклонную структуру на малых расстояниях. Были измерены дифференциальные сечения и угловые зависимости в диапазоне углов испускания протонной пары 0–12°, а также энергетическая зависимость сечения. Показано, что измеренные наблюдаемые величины очень чувствительны к части нуклон-нуклонного взаимодействия на малых расстояниях.

При активном участии физиков ОИЯИ были сконструированы, запущены и успешно начали работать экспериментальные установки **CMS**, **ATLAS** и **ALICE** на Большом адронном коллайдере **LHC**.

Повышение интенсивности ускоряемых сгустков заряженных частиц и обеспечение высокой плотности частиц в поперечном сечении пучка является одной из актуальных проблем в ускорительной физике и технике. Для решения этой задачи в синхротронах используются системы подавления когерентных поперечных колебаний, с помощью которых осуществляется коррекция поперечного импульса сгустков с учетом их состояния в предшествующие моменты времени. Специалисты ОИЯИ совместно с CERN создали систему подавления когерентных поперечных колебаний пучка в LHC. Предусмотрено участие физиков ОИЯИ в наладке и запуске системы подавления поперечных колебаний на пучке коллайдера LHC, а также в исследованиях динамики частиц в синхротроне с целью достижения предельных параметров пучка на LHC.

Результаты исследований и разработок по системе подавления поперечных колебаний пучка и по системам мощной электродинамики предполагается использовать на базовых установках в ОИЯИ, включая синхротроны в рамках проектов «Нуклотрон-М» и NICA, и в сотрудничающих с ОИЯИ институтах из других стран.

В соответствии с долгосрочным планом развития ОИЯИ наиболее важные экспериментальные результаты в области физики атомного ядра и тяжелых ионов были получены сотрудниками Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова

и Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка. Основные исследования в этой области были сосредоточены в направлениях синтеза новых ядер, изучения ядерных свойств и механизмов реакций с тяжелыми ионами, исследования процессов деления в тяжелых и сверхтяжелых ядерных системах, а также в области ядерной физики нейтронов и т. п.

Для того чтобы синтезировать сверхтяжелые ядра вблизи области повышенной ядерной стабильности, были выбраны реакции полного слияния нейтроноизбыточных изотопов актинидов, таких как ^{244}Pu , ^{243}Am , ^{248}Cm , ^{249}Bk и ^{249}Cf (они использовались в качестве мишеней), и дважды магическое ядро ^{48}Ca (налетающая частица). Ожидаемый период полураспада тяжелых ядер, полученных в этих реакциях, может варьироваться от нескольких микросекунд до десятков часов, и предполагаемые сечения образования оцениваются на уровне нескольких пикобарн. Эксперименты проводились с использованием дубненского газового сепаратора ядер отдачи. Ионы $^{48}\text{Ca}^{+5}$ ускорялись на циклотроне У-400. В экспериментах по синтезу сверхтяжелых ядер использовались мишени из окисей актинидов толщиной $\approx 0,35$ мг/см², расположенные на титановой фольге толщиной 1,5 мкм. Обогащенные изотопы $^{233,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , $^{245,248}\text{Cm}$, ^{249}Bk и ^{249}Cf применялись в качестве материала для мишеней. В исследованных реакциях были зарегистрированы 92 цепочки распадов. В основном все эти цепочки характеризуются наличием последовательных α -распадов (от одного до шести), которые завершаются спонтанным делением. В наблюдаемых цепочках было в общей сложности 253 ядерных распада. Изучены свойства распадов 34 новых нуклидов, полученных в экспериментах с налетающими ядрами ^{48}Ca .

Парциальные периоды полураспада для спонтанного деления (SF) ядер с $N \geq 163$, полученных в реакциях слияния с ^{48}Ca , а также периоды полураспада SF-нуклидов с $N \leq 160$ показаны на рис. 5, а. Диапазон изменения общей кинетической энергии фрагментов спонтанного деления всех известных четно-четных изотопов с $Z \geq 96$ показан на рис. 5, б.

Изотопы сверхтяжелых элементов с $Z = 111-116$ и 118 были синтезированы в 2001–2006 гг. в экспериментах с ускоренными ионами ^{48}Ca . Начиная с июля 2009 г. проводился эксперимент по синтезу нового элемента 117 в реакции полного слияния $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$. Эксперимент проходил в ЛЯР ОИЯИ

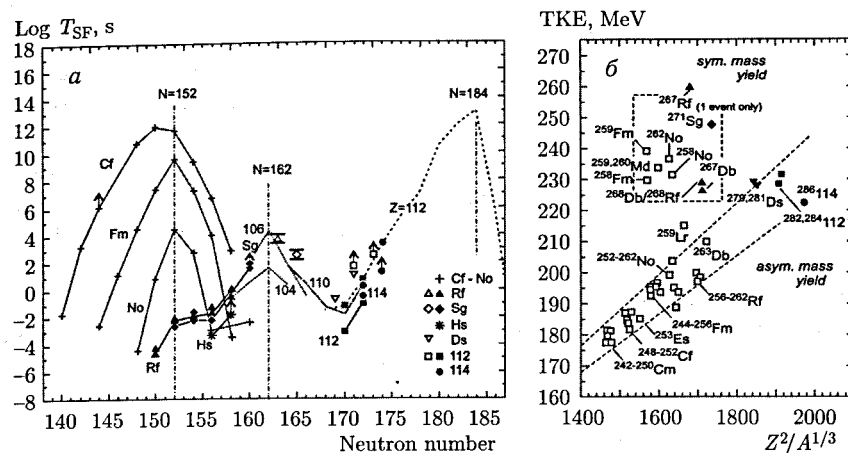


Рис. 5. а) Парциальные периоды полураспада для спонтанного деления T_{SF} как функция N для ядер с четными атомными номерами $Z = 98-114$. Темные символы и крестики обозначают четно-четные ядра, светлые символы — четно-нечетные ядра. Сплошные линии проведены по точкам $T_{SF}(\text{exp})$, соответствующим экспериментальным данным для четно-четных ядер. Пунктирные линии — рассчитанные величины $T_{SF}(\text{th})$, полученные для четно-четных изотопов с $Z = 104-112$. б) Средние значения полной кинетической энергии фрагментов деления в зависимости от $Z^2/A^{1/3}$. Светлые квадраты — экспериментальные данные для изотопов с $Z = 96-104$, черные символы — данные для SF-изотопов с $Z \geq 104$, наблюдаемых в реакциях $\text{Act.} + ^{48}\text{Ca}$. Штриховые линии разделяют масс-асимметричные и масс-симметричные зоны деления

в сотрудничестве с американскими лабораториями Ок-Риджа (ORNL), Ливермора (LLNL) и Университетом Вандербильта.

В 2009 г. был начат еще один эксперимент с более низкой энергией ^{48}Ca , которая соответствует энергии возбуждения $^{297}117$ — около 35 МэВ. Наблюдалась цепочка из шести α -распадов, также закончившаяся спонтанным делением. В начале 2010 г. элемент 117 был успешно синтезирован, он получил (предварительное) название унунсептий. Нейтроноизбыточные и долгоживущие нуклиды, образующиеся с сечениями в несколько пикобарн в реакциях $\text{Act.} + ^{48}\text{Ca}$, являются уникальными объектами, их ядерная структура, моды распада, спонтанное деление, атомные и химические свойства должны быть тщательно исследованы.

Изучение химических свойств новых нуклидов представляет отдельный интерес в связи с исследованиями структуры сверхтяжелых атомов и химических свойств тяжелых и сверхтяжелых элементов. При этом один из непосредственных методов идентификации атомного числа основывается на классических химических методах. Эти методы вполне применимы в серии экспериментов с нейтроноизбыточными и относительно долгоживущими ядрами, синтезированными в реакциях $\text{Act} + {}^{48}\text{Ca}$. Действительно, некоторые из этих ядер имеют период полураспада от нескольких секунд до почти суток, что делает их доступными для радиохимических методов анализа (рис. 6).

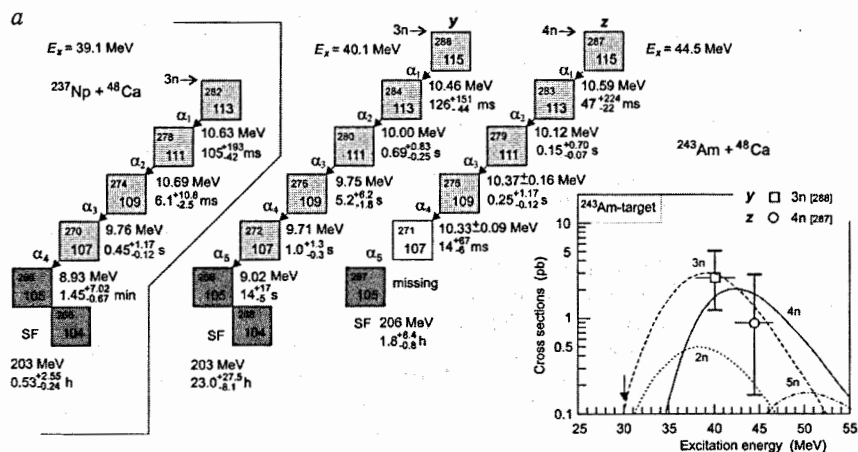


Рис. 6. а) Цепочки распадов, наблюдаемые в реакции ${}^{237}\text{Np} + {}^{48}\text{Ca}$. б) Откоррелированные цепочки распадов y и z , полученные в реакции ${}^{243}\text{Am} + {}^{48}\text{Ca}$ при двух значениях энергии возбуждения составного ядра. В правой части показаны рассчитанные функции возбуждения каналов xn -испарения реакции ${}^{243}\text{Am} + {}^{48}\text{Ca}$. Точки — экспериментальные данные

Самый тяжелый изотоп, который может быть использован для синтеза сверхтяжелых элементов в качестве мишени, — это калифорний ${}^{249}\text{Cf}$. Слияние ${}^{249}\text{Cf}$ с ионами ${}^{48}\text{Ca}$ дает ядра элемента 118, который был синтезирован в 2005 г. Дальнейшие исследования в области сверхтяжелых элементов требуют использования более тяжелых, чем ${}^{48}\text{Ca}$, пучков ионов.

Исследования с радиоактивными ионными пучками — это важное направление в ядерной физике. Изучение ядер вдали от области β -стабильности и даже за пределами линий ядерной

стабильности имеет важное значение для понимания свойств ядерной материи в экстремальных условиях. Такие исследования нужны для дальнейшего развития ядерной теории и имеют неограниченное значение для ядерной астрофизики. Прогресс в получении очень короткоживущих ядер и создание радиоактивных ядерных пучков обеспечили эти исследования необходимыми инструментами для детального изучения большинства экзотических ядер. Наличие радиоактивных пучков уже позволило получить заметные результаты по гало-структурам, инверсии оболочек, новым магическим числам и экзотическим режимам распадов, которые проявляются на границах ядерной стабильности.

В ОИЯИ был предложен, разработан и применен на практике новый подход к изучению резонансных состояний ядер вблизи и за пределами линии нейтронной стабильности. Было показано, что в экспериментах, проведенных с определенными кинематическими настройками, присущие продуктам реакции корреляции становятся богатейшим источником информации. Уникальной технической особенностью является наличие тритиевых пучков и криогенных тритиевых мишеней в ЛЯР. В настоящее время эта лаборатория — единственная в мире, где наличие тритиевой мишени и пучка сочетается с исследованиями с радиоактивными ионными пучками.

За период 2003–2009 гг. в ОИЯИ был получен ряд важных результатов. Впервые продукты реакций ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, p){}^4\text{H}$ и ${}^3\text{H}({}^3\text{H}, d){}^4\text{H}$ были выделены из фона, и были точно определены параметры основного состояния ${}^4\text{H}$. Был установлен более низкий предел для энергии распада ${}^7\text{H}$. Был достоверно установлен энергетический спектр ${}^5\text{H}$. Наблюдаемая корреляционная анизотропия позволила идентифицировать эту структуру как смесь состояний $3/2^+$ и $5/2^+$. Такая уникальная спиновая идентификация трехтельной системы на основе информации, идущей от корреляций, является новой особенностью этих исследований. В результате были разработаны и стали применяться экспериментальные методы анализа трехтельных распадов спинвыстроенных состояний. Были получены новые данные по уровням энергии ${}^7\text{--}10\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{13,14}\text{Be}$, а также информация по ряду нейтроноизбыточных ядер (включая ${}^{31}\text{F}$, ${}^{34}\text{Ne}$, ${}^{37}\text{Na}$, ${}^{43}\text{Si}$ и т. д.) в районе «острова инверсии». Как функции энергии были измерены сечения взаимодействия ${}^4,6\text{He}$, ${}^6,7\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ с ядрами Si-мишени.

В 2005 г. был пущен в работу первый блок ускорительного комплекса для радиоактивных пучков **DRIBs**. Эта установка предоставила возможность проводить на высоком уровне новые исследования в области реакций, индуцированных ${}^6\text{He}$ на энергиях вблизи кулоновского барьера. Интенсивность пучка ${}^6\text{He}$ на физической мишени достигала 10^7 с^{-1} . Полученные результаты впервые продемонстрировали, что глубокое подбарьерное слияние ядер с нейтронным гало (как, например, для ${}^6\text{He}$) возможно, и способствовали проведению в ряде научных центров таких же экспериментов и теоретических исследований подбарьерных реакций со слабосвязанными ядрами.

Интересный результат был получен для реакций передачи нейтронов и дейтронов с использованием соответственно пучков ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$. В обоих случаях максимальное сечение наблюдалось при энергиях вблизи кулоновского барьера реакции. Так, сечение реакции передачи одного нейтрона от ${}^6\text{He}$ к ядру-мишени ${}^{197}\text{Au}$ составляло более чем 1 б.

Изучение реакций слияния-деления при низких энергиях дает полезную информацию о вероятности формирования и «выживаемости» тяжелых ядерных систем и позволяет выбирать оптимальные ядерные комбинации для синтеза сверхтяжелых элементов. В ОИЯИ впервые были получены экспериментальные данные по распределению масс и энергий фрагментов реакции, множественности пред- и постнейтронной эмиссии, а также угловым и энергетическим распределениям нейтронов в совпадениях с фрагментами деления для трех наиболее интересных участков — области ядер перед актинидами, средней области и области ядер тяжелее фермия. В реакциях ${}^{204,208}\text{Pb}({}^{16}\text{O}, f)$ и ${}^{208}\text{Pb}({}^{18}\text{O}, f)$ многомерные корреляции (масса–энергия–угол) фрагментов деления, совпадающие с гамма-лучами, изучались при энергиях падающих частиц вблизи кулоновского барьера (энергии возбуждения в диапазоне 16–40 МэВ). При низких энергиях возбуждения были идентифицированы две моды деления (симметричная и асимметричная), которые хорошо согласуются с предсказаниями макромикроскопической модели.

Экспериментальные исследования вероятности деления, распределений масс и энергий фрагментов деления, испускания нейтронов до и после деления проводились для нейтронодефицитных изотопов ${}^{220,224,226}\text{Th}$, а также для ядер Ra, полученных в реакции слияния ${}^{204,208}\text{Pb} + \text{C}$ при близких к барьеру и подбарьерных энергиях.

Составное ядро, в случае если оно образовано в реакции слияния, начинает далее деление со своего изначального (возбужденного) состояния. Фрагменты деления составного ядра имеют характерные массовые и энергетические распределения, которые отличают их от фрагментов, образованных в других процессах, таких, например, как квазиупругое рассеяние, глубоконеупругие столкновения и т. д. Проблема заключается в том, чтобы выделить деление именно составного ядра. Этот процесс, названный «квазиделение» (QF), не связан с образованием составного ядра ${}^{286}112$, однако его «следы» создают фон в области деления симметричных масс $A_F \approx A_{CN}/2$. Разделение двух типов деления возможно только посредством систематических измерений при различных энергиях возбуждения, так как выходы этих двух типов деления различны при разных энергиях возбуждения. Пик тяжелых фрагментов квазиделения находится вблизи $A_F \approx 208$ (${}^{208}\text{Pb}$). Такие же измерения проводились для многих других реакций с мишенями легче или тяжелее ${}^{238}\text{U}$. Распределение масс фрагментов деления, полученное в одной из этих реакций ${}^{248}\text{Cm} + {}^{48}\text{Ca}$ при $E_x = 33 \text{ МэВ}$, представлено на рис. 7, а. Разница между двумя типами деления хорошо видна: основной канал — это квазиделение QF с соотношением масс фрагментов $A_{F1}/A_{F2} \approx 2,35$, другой, симметричный (FF) канал гораздо меньшей интенсивности: $A_{F1}/A_{F2} \approx 1,24$. На

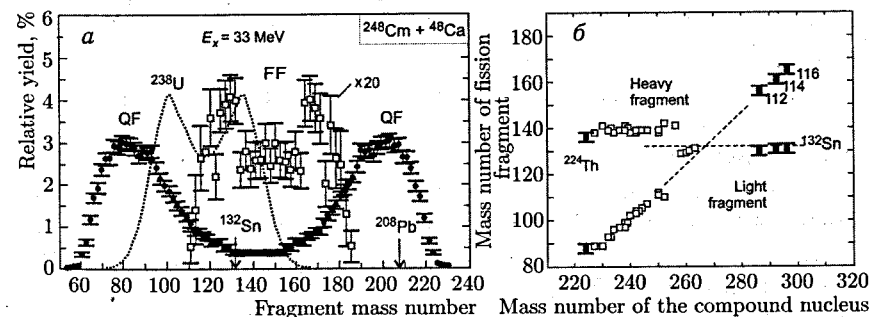


Рис. 7. а) Распределения масс фрагментов квазиделения (черные кружки) и деления в области симметричных масс (светлые квадраты) в реакции ${}^{248}\text{Cm} + {}^{48}\text{Ca}$ при $E_x = 33 \text{ МэВ}$. Пунктирная линия — распределение масс фрагментов деления ${}^{238}\text{U}$ при $E_x = 33 \text{ МэВ}$. б) Наиболее вероятная масса первоначальных фрагментов деления как функция массы делящегося ядра. Светлые квадраты показывают низкоэнергетичное деление актинидов, черные квадраты — деление возбужденных ядер с $Z = 112, 114, 116$

рисунке также показано известное распределение масс фрагментов деления ^{238}U при $E_x \approx 33$ МэВ. Его форма такая же, как форма FF-спектра масс из реакции $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$.

Перекрытие диапазона масс тяжелых фрагментов от ^{238}U и легких фрагментов от $^{296}116$ может быть признаком того, что в обоих случаях деление обусловлено эффектом закрытых оболочек $Z = 50$, $N = 82$. Однако при делении ^{238}U оболочечный эффект связан с образованием тяжелого фрагмента, в то время как в случае тяжелого ядра ($A = 296$) он проявляется в легком фрагменте. Распределения масс фрагментов из FF-канала и данные, полученные по актинидам, показывают (рис. 7, б), что режим деления всех ядер с $Z = 90-116$ один и тот же. Спектры энергий и масс фрагментов деления характеризуются малым изменением массы одного из фрагментов (оболочечный эффект $Z = 50$, $N = 82$) и большим разнообразием массы дополнительного фрагмента.

Анализ экспериментальных данных по слиянию и делению ядер $^{286}112$, $^{292}114$ и $^{296}116$, образованных в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ и $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$, а также данные о вероятностях их выживания при испарении трех и четырех нейтронов позволяют определить барьеры деления этих сверхтяжелых ядер. Эти барьеры оказались действительно высокими, что обеспечило достаточно высокую стабильность указанных ядер. Нижние пределы, полученные для высот барьеров деления для ядер $^{283-286}112$, $^{288-292}114$ и $^{292-296}116$, составляют 5,5, 6,7 и 6,4 МэВ соответственно.

Электростатический сепаратор **VASSILISSA** успешно использовался в ЛЯР для экспериментальных исследований закономерностей формирования и вероятностей выживания возбужденных составных ядер, синтезированных в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами. С помощью сепаратора **VASSILISSA** было выполнено большое количество таких исследований высоковозбужденных составных ядер с $82 \leq Z \leq 94$. Пятнадцать новых изотопов U, Np, Pu и No были синтезированы во время этих экспериментов, и были изучены характеристики их α -распадов и спонтанного деления.

Было показано, что низкоэнергетическая реакция передачи двух нейтронов с ядром ^6He (структура которого напоминает кольца Борромео) является эффективным инструментом для изучения как структуры таких ядер, так и динамики ядерных реакций с их участием. Впервые была разработана че-

тырехтельная модель для описания процессов двухнуклонного перехода в борновском приближении искаженных волн. Впервые в рамках самосогласованной теоретической модели четко показано, что каналы передачи нейтронов с положительными значениями Q действительно увеличивают сечение слияния при подбарьерных энергиях. Был предложен новый процесс «последовательного деления» с передачей промежуточного нейтрона состояниям с $Q > 0$, который играет роль «энергетического лифта» для двух взаимодействующих ядер. Было обнаружено, что этот эффект проявляется особенно сильно для слияния слабосвязанных ядер. В рамках этого механизма был предложен новый эксперимент по измерению и сравнению сечений остаточного испарения в реакциях $^6\text{He} + ^{206}\text{Pb}$ и $^4\text{He} + ^{208}\text{Pb}$, которые приводят к тем же самым составным ядрам. Было предсказано, что выход изотопов полония при энергии 5 МэВ ниже барьера будет на три порядка больше для первой реакции, чем для второй. Полученные результаты полностью подтвердили эти предсказания.

Огромное возрастание вероятности глубокого подбарьерного слияния было обнаружено для легких нейтроноизбыточных слабосвязанных ядер. Это наблюдение крайне важно для понимания нуклеосинтеза в ранней вселенной и при взрывах сверхновых звезд.

Предложен новый механизм процесса слияния-деления для тяжелой ядерной системы, который происходит в многомерном конфигурационном пространстве. Механизм описывает эволюцию коллективизации нуклонов двух взаимодействующих ядер. Эти ядра, окруженные определенным количеством обобщенных нуклонов (принадлежащих как бы сразу двум ядрам), постепенно теряют (или приобретают) свои индивидуальные черты с ростом (или снижением) числа коллективизированных нуклонов. В рамках созданной модели был успешно проведен теоретический анализ имеющихся экспериментальных данных по реакциям «холодного» и «горячего» слияния-деления. Были предсказаны сечения образования сверхтяжелых элементов с $Z = 112-118$ в каналах испарения от 1 до 5 нейтронов в реакциях слияния, индуцированных ^{48}Ca , и были предсказаны энергии максимумов функций возбуждения для последующих экспериментов. Эти предсказания были полностью подтверждены в экспериментах по синтезу сверхтяжелых элементов.

Сотрудниками ЛЯР ОИЯИ создана информационная база по ядерной физике низких энергий «Видеоматериалы по ядерным реакциям», которая расположена на веб-сайте <http://nrv.jinr.ru/nrv>. Первая задача этой базы — быстрое и наглядное получение экспериментальных данных по ядерной структуре и сечениям ядерных реакций, предоставление возможности обработки этих данных, их сравнения и систематизации. Вторая задача — интерактивный анализ экспериментальных данных и моделирование процессов ядерной динамики в рамках хорошо разработанных подходов. На данный момент эта информационная база является уникальным веб-ресурсом.

Главный результат, полученный специалистами ЛНФ ОИЯИ в рамках подготовки и проведения эксперимента по прямому измерению сечения нейтрон-нейтронного рассеяния на реакторе JAGUAR (РФЯЦ – ВНИИЭФ), это разработка и создание уникального нейтронного детектора, отвечающего всем требованиям эксперимента. Никогда ранее не создавались детекторы нейтронов, которые могли сочетать высокую скорость счета (10^6 отсчетов в секунду), почти 100%-ю эффективность регистрации нейтронов, высокое энергетическое разрешение (не хуже чем 10%) и низкую чувствительность к γ -квантам ($\sim 10^{-9}$). Детектор был помещен в экспериментальную установку и успешно протестирован в калибровочных измерениях с газами в импульсном режиме реактора JAGUAR.

Была проведена серия фундаментальных исследований в области нейтронной оптики. В частности, была осуществлена проверка принципа слабой эквивалентности для нейтрона как элементарной частицы, т.е. для отношения инертной массы нейтрона к его гравитационной массе γ была получена величина $1 - \gamma = (1,8 \pm 2,1) \cdot 10^{-3}$.

Поставлен эксперимент по изучению роли преломляющей среды в нейтронной оптике. Эффект ускоряющей среды состоит в изменении частоты волны при прохождении ее через преломляющий образец,двигающийся с ускорением. Несмотря на то, что этот эффект имеет достаточно универсальную природу, он наблюдался только для нейтронных волн. В эксперименте 2007 г. были получены новые убедительные данные, которые позволили с полной уверенностью утверждать существование этого эффекта.

Создание Большого гравитационного спектрометра позволило изучать в широком температурном диапазоне редкие процессы (с вероятностью до 10^{-8}) с малой передачей энергии за счет взаимодействия ультрахолодных нейтронов (УХН) с поверхностью. Проведенные исследования показали, что такие процессы с малой передачей энергии — это результат взаимодействия УХН с поверхностными наночастицами и что они могут приводить к дополнительным утечкам УХН из ловушек, внося систематические коррекции в результаты прецизионных экспериментов с УХН.

В ЛНФ был разработан и сконструирован корреляционный гамма-спектрометр высокого разрешения **COCOS**. Этот спектрометр был использован в ряде исследований по поиску нейтронного p -резонанса в свинце, который отвечает за вращение спина, наблюдаемое в классическом эксперименте по изучению эффектов нарушения четности.

В рамках определения среднеквадратичного радиуса заряда нейтрона в (n, e) -взаимодействии был предложен новый подход, который основывается на измерении угловой анизотропии нейтронного рассеяния с помощью благородных газов, и создана установка для измерения длины рассеяния (n, e) .

Сотрудниками ОИЯИ было продолжено изучение P -нечетной асимметрии при эмиссии вторичных частиц в реакциях поляризованных холодных нейтронов и легких ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$. Эти исследования были выполнены в ILL (Гренобль, Франция). Были измерены асимметрии испускания ядер ${}^3\text{H}$ в реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ и асимметрии испускания γ -лучей в ядерной реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow {}^7\text{Li}(\text{g.s.})$. На основе этих измерений была дана оценка эффективной константы слабого нейтрального тока, которая заметно отличалась от «лучшей» величины, измеренной в других процессах ($f_{\pi}^{\text{DDH}} = 4,6 \cdot 10^{-7}$). С целью проверки рассогласования в октябре–ноябре 2009 г. был начат новый эксперимент по измерению асимметрии испускания γ -лучей. В течение 50 дней в ILL проводились измерения на пучке поляризованных холодных нейтронов. Основная разница между этим экспериментом и предыдущими исследованиями заключается в улучшенной геометрии: ранее мишень (${}^{10}\text{B}$) находилась прямо в воздухе в нейтронном пучке перед детекторами, в новом эксперименте она была помещена в нейтронопровод, наполненный гелием. Это дало возможность уменьшить фон и улучшить точность измерений.

Специалисты ОИЯИ совместно с французскими учеными на пучке холодных нейтронов ILL измерили концентрацию атомов водорода в алмазном нанопорошке, сечение рассеяния нейтронов на водороде и его температурную зависимость. Концентрация была найдена за счет измерения относительной интенсивности потока гамма-квантов в реакции $n(p, d)\gamma$ от исследуемых образцов и полиэтиленового образца. Было выявлено, что количество водорода в нанопорошке до и после дегазации может быть выражено с помощью соотношений C_8H и $C_{15}H$ соответственно. Полное сечение рассеяния для атома водорода в дегазированном порошке составило примерно 120 б. Изменение этого сечения с падением температуры от 500 до 80 К не превышает 3%. Таким образом, рост вероятности отражения от порошка алмазных наночастиц, который интересен как отражатель очень холодных нейтронов, возможен либо путем замены/перемещения водорода, либо подавлением канала неупругих потерь из-за охлаждения порошка до температуры жидкого гелия.

Продолжалось изучение реакций (n, p) , (n, α) , вызванных быстрыми нейтронами. Эксперименты проходят на ускорителе Ван де Граафа ЭГ-5 в ОИЯИ и ЭГ-4,5 в Институте физики тяжелых ионов Пекинского университета в сотрудничестве с Университетом г. Лодзь (Польша), Национальным университетом Монголии (Улан-Батор) и Национальной лабораторией Ок-Риджа (США).

Данные по нейтронным реакциям с эмиссией заряженных частиц, вызванной быстрыми нейтронами, интересны как с точки зрения создания конструкционных материалов для ядерной энергетики, так и для определения параметров оптического нуклон-нуклонного потенциала. Анализ данных для изотопов ^{147}Sm , ^{143}Nd , ^{95}Mo показывает, что измерения в основном делались при тепловых и резонансных энергиях, а также для нейтронов с энергией 14 МэВ. В то же время почти нет экспериментальных данных в МэВ-ной области энергий нейтронов. В результате существуют заметные противоречия между величинами сечений, полученных из различных баз данных по ядерным расчетам. В рамках совместных исследований на ускорителе ЭГ-4,5 Института физики тяжелых ионов Пекинского университета были проведены измерения параметров реакций $^{143}Nd(n, \alpha)^{140}Ce$ и $^{95}Mo(n, \alpha)^{92}Zr$ при $E_n = 4,0, 5,0$ и $6,0$ МэВ

и реакции $^{147}Sm(n, \alpha)^{144}Nd$ при $E_n = 5,0$ и $6,0$ МэВ. Были получены энергетические спектры заряженных частиц.

Фундаментальные исследования в области конденсированного состояния материи проводились в ОИЯИ на комплексе спектрометров базовой установки ЛНФ — реактора ИБР-2 в рамках международного сотрудничества с научными центрами стран-участниц ОИЯИ. Были проведены исследования магнетизма и сильно коррелированных электронных систем, кристаллических структур и их возбуждения, некристаллических материалов и жидкостей, конструкционных материалов, исследования в области биологии, фармакологии, химии, физики полимеров и геофизики.

Систематические исследования нейтронной дифракции на атомных и магнитных структурах сложных оксидов марганца и кобальта проводились в широком диапазоне температур и давления. Полученные результаты имеют большое значение для понимания механизмов появления уникальных физических явлений, происходящих в этих соединениях на уровне структурной организации, таких как колоссальное магнитное сопротивление, переходы изолятор–металл, орбитальный и зарядовый порядок, магнитоэлектрический эффект, переходы состояния спина и т. д. Было обнаружено, что применением высокого давления к ионам марганца, окруженным кислородным восьмигранником, можно вполне контролируемым образом изменить характер магнитного состояния манганитов.

Исследование при низких температурах эффектов «близости» в многослойном сверхпроводнике — ферромагнитных гетероструктурах двух типов $n_x[Fe/V]Fe/V$ и $n_x[Mo/Si]Fe/Nb$ проводилось с помощью методики нейтронной рефлектометрии. Для первой структуры в переходе слоя V (40 нм) в сверхпроводящее состояние были выявлены антиферромагнитный порядок ванадиевых подслоев, а также демагнетизация кластерной железованадиевой структуры. Для второй структуры при переходе слоев Nb (40 нм) и $n_x[Mo/Si]$ в сверхпроводящее состояние наблюдалось снижение средней намагниченности слоя Fe.

Структура и свойства коллоидных магнитных потоков, базирующиеся на магнетитовых наночастицах и органических неполярных монокарбонных кислотах с короткой цепочкой, изучались с помощью малоуглового рассеяния нейтронов. Были выявлены большие различия в распределении стабилизированного магнетита, а именно обнаружено уменьшение среднего ра-

диуса частицы и индекса полидисперсии при замене олеиновой кислоты короткоцепочечными кислотами. Происхождение этого эффекта связано с разной организацией кислот на поверхности магнетита, что определяет упругие свойства стабилизирующей оболочки.

Проведена серия экспериментов по определению универсальной константы взаимодействия неустойчивых поверхностей. Был разработан новый подход к исследованию сил волнового движения и определению универсальной константы на основании изучения температурной зависимости внутримембранных взаимодействий с помощью комплементарного использования малоуглового рассеяния нейтронов и дифракции синхротронного излучения. В частности, была получена величина константы взаимодействия, которая совпадает с теоретическими предсказаниями. Впервые была определена абсолютная величина сил волнообразного движения. Выяснилось, что они действительно вносят большой вклад в равновесие межмембранных взаимодействий и становятся доминирующими при межмембранных расстояниях, превышающих 20 Å.

Проводилось изучение распределения внутренних напряжений в конструкционных материалах и промышленных продуктах. Типичный пример проделанной работы — изучение распределения внутреннего напряжения в фундаменте реактора ВВЭР-1000, а именно в покрытии из нержавеющей стали (фаза аустенита) и ферритовой стали. Много внимания уделено свойствам мартенсит-ферритовых азотных сталей, нового перспективного материала для корпусов реакторов и компонентов сердечников. Исследования показали значительный рост микронапряжений в мартенсит-ферритовой стали по сравнению с аустенитовой сталью, что может быть одной из причин снижения их радиационно-индуцированного расширения и более высокого сопротивления коррозии.

С помощью данных нейтронной дифракции была определена текстура специальных сталей, графита, ниобата циркония. Была определена функция распределения ориентации кристаллита; проведено моделирование объемных эластичных свойств этих конструкционных материалов. Было показано, что аустенитное покрытие корпуса реактора ВВЭР-1000 имеет четкую радиальную текстуру, что приводит к сложному характеру распределения остаточных деформаций в ней.

Были продолжены исследования нейтронной дифракции атомной и магнитной структур 314-кобальтитов. Для этих сложных соединений было установлено, что атомы Со, занимающие различные положения в клетке, имеют различные величины магнитного момента, соответствующие количеству кислорода вокруг атома, т.е. впервые прямая корреляция между зарядом и состояниями спина атомов Со была обнаружена для кобальтитов типа перовскитов.

Изучение влияния высокого давления на кристаллическую и магнитную структуры сложных анион-дефицитных оксидов кобальта продолжалось в широком температурном диапазоне. Структурные характеристики оптически-активных наноструктурных материалов, прокаленных при $T = 900^\circ\text{C}$, изучались с помощью малоуглового рассеяния нейтронов и дифракции рентгеновских лучей. Было обнаружено, что значительное изменение относительной интенсивности полос возбуждения люминесценции ионов ^{3+}Eu при введении серебра коррелирует с уменьшением характерных размеров полидисперсных кластеров, образующихся во время прокаливания.

С помощью малоуглового рассеяния нейтронов проводилось изучение мицеллообразования додецилбензолсульфоната натрия в нейтральных и щелочных электролитных растворах различной концентрации. Было обнаружено, что мицеллы, образованные в растворах, имеют цилиндрическую (эллиптическую) форму. Были определены характерные размеры мицелл как функции поверхностно-активных веществ (ПАВ) с дополнительными концентрациями электролита. Показана корреляция данных с геометрией трековых нанопор и динамикой их травления в растворах, содержащих ПАВ, и разработана модель влияния ПАВ на образование пор со специфической геометрией.

Были продолжены экспериментальные исследования проблемы сосуществования ферромагнетизма (F) и сверхпроводимости (S). Магнитное состояние бислоя Fe/V изучалось с использованием нейтронного волнового резонатора MgO/V/Cu. Поведение бислоя в действительности соответствовало поведению трехслойной структуры F/F-S/S, в которой средний слой F-S представлял собой смесь атомов ванадия и железа. Наблюдались прямой и обратный эффекты близости. Прямой эффект, заключающийся в установлении сверхпроводящего параметра порядка в ферромагнетике F-S, проявился при переходе ванади-

евого слоя (S) в сверхпроводящее состояние в виде уменьшения и поворота вектора намагниченности к направлению внешнего магнитного поля. Обратный эффект близости, т.е. появление ферромагнитного порядка в сверхпроводнике F-S, состоял в увеличении вектора намагниченности и его отклонении от направления магнитного поля.

Изучалась зависимость электрических характеристик SiCN-пленок на кремниевом субстрате от их химического состава. Пленки были получены с помощью методики химического осаждения пара под воздействием плазмы. Концентрация кремния, азота и углерода в пленках измерялась с помощью методики обратного рассеяния Резерфорда. Концентрация водорода в пленках и их толщина были определены по протонам отдачи на пучке ионов гелия электростатического генератора ЭГ-5. Была реализована возможность точного определения концентрации всех составляющих в трехэлементной пленке путем одновременных измерений обратного рассеяния Резерфорда и спектра протонов отдачи.

В данном обзоре представлены только некоторые из основных экспериментальных результатов, полученных сотрудниками четырех лабораторий ОИЯИ — ЛФВЭ, ЛЯП, ЛЯР и ЛНФ в области фундаментальной физики элементарных частиц, атомного ядра и конденсированного состояния вещества.

В последующих статьях настоящего сборника более подробно будут рассмотрены достижения Института, связанные с созданием и модернизацией базовых установок ОИЯИ (NICA/MPD, ИБР-2, DRIBs), сотрудничеством с CERN, научными центрами США и Германии, а также с развитием информационных технологий, теоретическими и радиобиологическими исследованиями, образовательной, инновационной и прикладной деятельностью.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС NICA/MPD

Лаборатория физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В. И. Векслера и А. М. Балдина была образована 4 мая 2008 г. на базе двух лабораторий: одной из старейших лабораторий Института — Лаборатории высоких энергий — и Лаборатории физики частиц. Новая лаборатория объединила в одном коллективе специалистов, инженеров и научных сотрудников, занятых в проведении экспериментальных исследований по физике частиц, физике высоких энергий, ускорительной физике и в создании детектирующей и электронной аппаратуры.

История экспериментальной физики высоких энергий фактически началась в ОИЯИ с созданием и запуском в ЛВЭ в 1957 г. синхрофазотрона — ускорителя протонов на энергию 10 ГэВ. В то время он являлся крупнейшим ускорителем в мире. Многолетняя программа исследований на синхрофазотроне осуществлялась под руководством таких всемирно известных ученых, как академики В. И. Векслер, М. А. Марков, И. В. Чувило, А. М. Балдин.

Целенаправленное развитие ускорительного комплекса ЛВЭ постоянно расширяло спектр доступных физикам научных задач. В 1971 г. были ускорены дейтроны, после создания нового инжекционного линейного ускорителя и источников высокозарядных ионов и поляризованных дейтронов стали доступны легкие ядра (вплоть до серы) и появилась возможность проводить исследования по спиновой физике. Дальнейшее развитие базового ускорительного комплекса привело к созданию в 1993 г. сверхпроводящего ускорителя ядер — нуклотрона, сегодня являющегося базовой машиной лаборатории.

В 1988 г. на базе Отдела новых методов ускорения и нескольких научных групп ЛВЭ и ЛЯП была создана Лаборатория физики частиц (Лаборатория сверхвысоких энергий до 1999 г.). Ее первым директором стал профессор И. А. Савин, собравший коллектив из физиков, участвовавших в наиболее

интересных проектах по физике высоких энергий, проводимых вне ОИЯИ, в крупнейших ускорительных центрах мира, в первую очередь в ЦЕРН, в DESY и в BNL. Лаборатория физики частиц была сравнительно небольшой и просуществовала лишь 20 лет, но ее сотрудники, прошедшие школу совместной работы в международных коллаборациях на передовом рубеже экспериментальной физики, сегодня составляют ядро Лаборатории физики высоких энергий.

Сегодняшняя научная программа ЛФВЭ включает исследования по трем основным направлениям физики высоких энергий. Это исследования по физике тяжелых ионов высоких энергий, спиновой физике и по наиболее актуальным проблемам физики элементарных частиц, связанным с проверкой Стандартной модели, поиском новой физики за ее пределами и CP-нарушением. Исследования проводятся как на собственной ускорительной базе, так и, традиционно, в крупнейших ускорительных центрах мира в экспериментах, где вклад сотрудников Института носит существенный или определяющий характер.

Уже многие годы программа исследований по физике тяжелых ионов является наиболее приоритетной для Института как в области низких энергий (экспериментальные исследования, проводимые в ЛЯР), так и в области интересов ученых, представляющих ЛФВЭ. Стратегические планы ОИЯИ в этом направлении связаны с созданием и запуском на базе нуклотрона базовой установки нового поколения для проведения экспериментальных исследований в области энергий $\sqrt{s} = 4\text{--}11$ ГэВ на нуклон, являющейся ускорителем встречных пучков тяжелых ядер (проект NICA/MPD). Реализация этой программы создаст условия для проведения передовых исследований по физике высоких энергий в ОИЯИ на десятилетия. Интерес к проведению исследований в данной области чрезвычайно высок. Об этом говорит и программа модернизации ускорительного комплекса BNL (США), и работы по созданию близкого по параметрам ускорительного комплекса в GSI (Германия). Прилагая максимум усилий для реализации данной программы, сотрудники ОИЯИ параллельно участвуют в действующих экспериментах по физике тяжелых ионов высоких энергий: NA62 и ALICE в ЦЕРН, STAR в BNL, тем самым создавая интеллектуальный задел для продолжения работ на новой базовой установке после ее создания.

Остановимся более подробно на структуре и возможностях создаваемого в рамках проекта NICA/MPD ускорительного комплекса и экспериментальной установки.

После запуска в 1993 г. ускорителя нуклотрон проведение исследований по физике тяжелых ионов высоких энергий стало одной из приоритетных задач Института. Однако возможности этого ускорителя, созданного в условиях минимального финансирования, сильно ограничивали спектр потенциальных задач. В 2007 г. в ОИЯИ начаты работы по сооружению на его основе нового ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Основной целью данного проекта является создание в ближайшие 5–7 лет базы для проведения экспериментов по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной кварк-глюонной материи и поиск возможного образования так называемой смешанной фазы такой материи. Для проведения исследований был выбран режим встречных пучков (коллайдера), по многим параметрам являющийся оптимальным для подобного рода исследований.

Ускорительный комплекс NICA включает в себя, во-первых, два синхротрона. Первый — это вновь создаваемый бустерный синхротрон, ускоряющий пучки тяжелых ионов до энергии 600 МэВ на нуклон, и второй — это существующий сверхпроводящий протонный синхротрон — нуклотрон, позволяющий ускорять тяжелые ионы до энергии 4,5 ГэВ на нуклон и протоны до 12,5 ГэВ. Во-вторых, этот комплекс включает в себя два вновь создаваемых сверхпроводящих кольца коллайдера, работающих в режиме накопителя (ускорение пучков в них не предполагается). Поэтому в коллайдере можно проводить эксперименты на встречных пучках ионов во всем диапазоне энергий, доступном для нуклотрона.

Основными элементами ускорительного комплекса NICA являются: инжекторы ионов (как тяжелых, так и легких) и поляризованных пучков; бустер — быстроциклирующий сверхпроводящий протонный синхротрон; каналы транспортировки пучка из бустера в нуклотрон и в экспериментальный зал.

Возможности комплекса позволяют не ограничиваться лишь этой областью исследований, на нем также планируется реализация столкновения встречных пучков легких ионов и пучков поляризованных протонов и дейтронов. Последнее чрезвычайно важно, поскольку позволит проводить эксперименты по спиновой физике, продолжающие исследовательскую программу

ОИЯИ в этой области, на качественно новом уровне. Кроме работы в коллайдерной моде, будут продолжены эксперименты на выведенных пучках нуклотрона и на внутренней мишени. На пучках ионов, ускоренных в бустере NICA, который входит в состав комплекса, предполагается выполнение обширной программы прикладных и фундаментальных исследований. Бустер будет оборудован системой медленного вывода пучка для проведения медико-биологических и технологических исследований. Обсуждается возможность проведения исследований и на пучках ионов из линейных ускорителей инжекционной цепочки комплекса.

Размещение основных элементов и систем комплекса NICA осуществляется при максимальном использовании существующих зданий и инфраструктуры площадки Лаборатории физики высоких энергий.

Поскольку проектом предусматриваются три основных режима работы коллайдера NICA — это столкновения ядер тяжелых элементов, столкновения протонов (легких ионов) с ядрами тяжелых элементов и столкновения поляризованных пучков протонов и дейтронов, для каждого из них инжекционная цепочка имеет свой специфический состав. Бустер используется для накопления ионов при инжекции и ускорении их до энергии, необходимой для их эффективной обдирки на тонкой (углеродной) мишени. Полностью «ободранные» ионы (ядра) ускоряются затем в нуклотроне в форме одиночного сгустка интенсивностью до уровня 10^9 частиц от энергии 600 МэВ на нуклон до энергии эксперимента (от 1 до 4,5 ГэВ на нуклон). Проектный уровень светимости при столкновениях тяжелых ионов достигается за счет стохастического и электронного охлаждения пучков в кольцах коллайдера.

Одной из главных задач комплекса NICA является осуществление столкновений пучков тяжелых ядер, таких как Au, Pb или U, в интервале энергий частиц 1–4,5 ГэВ на нуклон со светимостью не менее $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при энергии 3,5 ГэВ на нуклон и выше. В данном проекте в качестве «реперного» иона, для которого оптимизирована работа инжекционной цепочки комплекса, выбран ион золота Au^{32+} .

Комплекс NICA позволяет осуществлять столкновения пучков ионов разного типа, включая протон-ионные столкновения. Такие эксперименты необходимы для сравнения результатов столкновений ионов разных масс. Эксперимент будет прово-

даться на том же самом детекторе, поэтому светимость, существенно превышающая величину $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, не требуется. При столкновениях поляризованных пучков минимальная светимость, достаточная для проведения экспериментов, составляет $10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Ускоритель является необходимой, но недостаточной частью комплекса. Без экспериментальной установки, созданной с учетом всех необходимых требований, реализация программы исследований невозможна.

Целью проекта MPD является создание комплекса регистрирующей аппаратуры для проведения экспериментов по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной адронной материи, поиск возможного образования так называемой смешанной фазы такой материи — смеси кварк-глюонного и адронного состояний, а также поиск процессов нарушения P- и CP-четности в сильном взаимодействии. Область энергий сталкивающихся частиц составляет 1–4,5 ГэВ на нуклон.

Для решения этих задач детектор MPD должен нормально работать при загрузке до 10 кГц при множественности до 1500 заряженных частиц в событии и обеспечивать эффективное восстановление частиц в максимально возможном интервале по псевдобыстроте (вплоть до $|\eta| \sim 3$). Он должен обладать достаточным разрешением по импульсу и углу для частиц в диапазоне энергий от 100 МэВ до 2 ГэВ. MPD будет обеспечивать идентификацию заряженных частиц и возможность детектирования электронов, фотонов и π^0 -мезонов.

Концепция установки MPD предполагает размещение центрального комплекса регистрирующей аппаратуры в соленоидальном магнитном поле и двух форвард-спектрометров за его пределами. Создание установки предполагает 3 этапа. Сначала планируется выполнить так называемый пусковой минимум (когда баррельная часть будет содержать TPC и ECAL или (и) RPC, а также будут введены в эксплуатацию ZDC и BBC). Затем в баррель будет добавлен внутренний трекер IT и введен в действие endcap, в заключение будут введены в эксплуатацию форвард-детекторы. Концепция создания установки предполагает, что за 7 лет будут завершены 1-й и 2-й этапы, проведен запуск установки и начат набор экспериментальных данных.

ПРОЕКТ DRIBs-III

Яркие научные достижения в области традиционной ядерной физики низких энергий, полученные в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ за последние несколько лет, позволяют с оптимизмом смотреть в будущее и строить амбициозные планы на ближайшие годы. Для осуществления этих планов в Объединенном институте ядерных исследований начата реализация приоритетного проекта DRIBs-III (Dubna Radioactive Ion Beams). Помимо существенной модернизации действующих ускорителей У-400 и У-400М, в рамках этого проекта будут созданы новый ускорительный комплекс и новый экспериментальный зал. Будут существенно модернизированы действующие и созданы новые установки для проведения разносторонних исследований в двух основных направлениях:

— тяжелые и сверхтяжелые ядра: синтез сверхтяжелых элементов, изучение химических свойств новых элементов, изучение реакций слияния-деления и реакций многонуклонных передач, массовая спектрометрия и ядерная спектроскопия сверхтяжелых ядер;

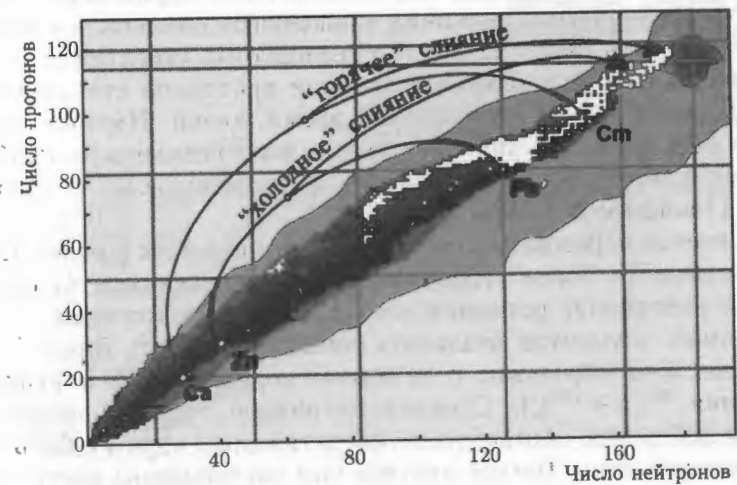
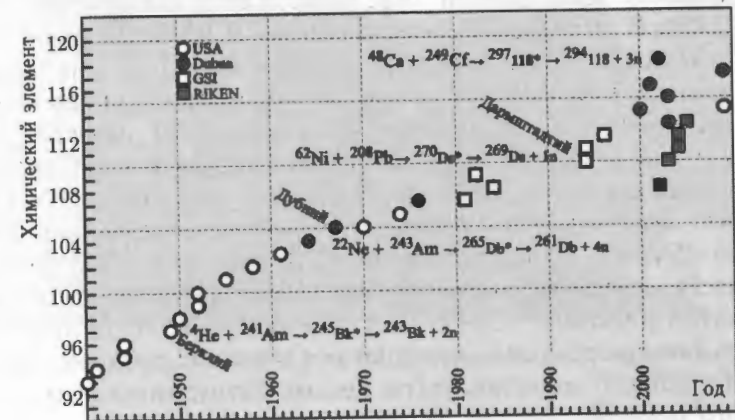
— легкие экзотические ядра: структура ядер, удаленных от линии стабильности, редкие моды распада и реакции с экзотическими ядрами.

Синтез сверхтяжелых элементов

Хорошо известно, что уран является последним (наиболее тяжелым) элементом, время жизни которого соизмеримо со временем жизни Земли и который встречается в природе в макроскопических количествах. Все остальные элементы с $Z > 92$ были созданы в лабораторных условиях. Прогресс в этой области поистине впечатляющий: 26 новых элементов были синтезированы искусственным путем. Первые трансурановые элементы (вплоть до эйнштейния) были получены в атомных реакторах в процессах захвата нейтронов с последующим бета-распадом.

Заметим, что аналогичный процесс происходит при ядерных взрывах и взрывах сверхновых (так называемый r -процесс нуклеосинтеза). Элементы с $Z \geq 100$ были синтезированы в реакциях слияния ядер с использованием ускорителей тяжелых ионов.

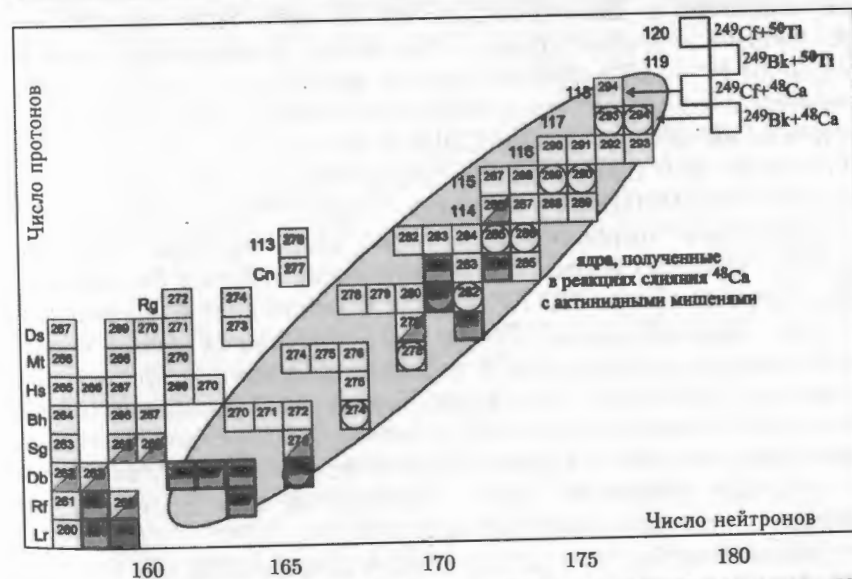
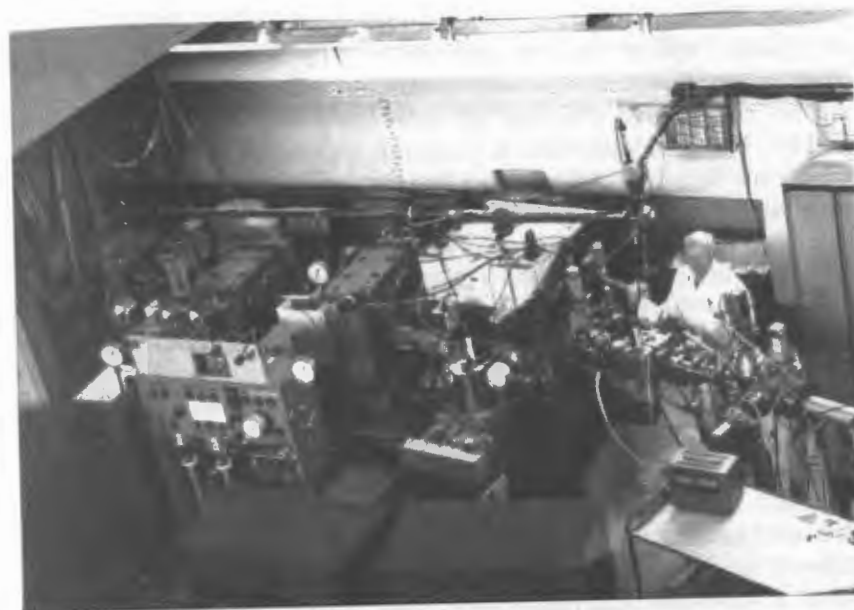
Две важные страницы в истории синтеза сверхтяжелых ядер были перевернуты в последние двадцать лет. В реакциях «холодного» слияния, основанных на использовании ядер-мишеней



История лабораторного синтеза тяжелых элементов (вверху). Сверхтяжелые ядра, производимые в реакциях «холодного» и «горячего» слияния (внизу). Предсказываемый теоретиками «остров стабильности» находится в области $Z = 114-120$ и $N = 184$

с замкнутыми оболочками, а именно свинца ($Z = 82$) и висмута ($Z = 83$), и ускоренных сравнительно тяжелых ядер-снарядов (Fe, Ni, Zn), были синтезированы сверхтяжелые элементы вплоть до $Z = 113$. Такой метод синтеза называется «холодным», поскольку образующееся составное ядро имеет меньшую энергию возбуждения и испускает лишь один нейтрон при переходе в основное состояние. Совсем недавно двум из этих элементов (синтезированным в Германии) были присвоены названия Roentgenium (Rg, $Z = 111$) и Copernicium (Cn, $Z = 112$). В исследовательском центре RIKEN (Япония) был поставлен своего рода «мировой рекорд» — 0,03 пб для сечения образования 113-го элемента при облучении мишени из висмута пучком ионов ^{70}Zn в течение 8 месяцев (это означает, что лишь в одном из 10^{14} попаданий ядра цинка в ядро висмута образуется составное ядро сверхтяжелого элемента с $Z = 113$). Следует заметить, что в Японии этот элемент был синтезирован в 2004–2005 гг., на год позже, чем в Дубне, где он был получен в качестве продукта альфа-распада 115-го элемента, синтезированного в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$ с сечением 4 пб. Дальнейшее использование реакций «холодного» слияния (с пучками галлия или германия) представляется весьма затруднительным из-за резкого падения сечения. Более того, из-за «кривизны» линии бета-стабильности в реакциях «холодного» слияния мы можем синтезировать лишь нейтронно-дефицитные сверхтяжелые ядра, расположенные близко к границе протонной стабильности и тем самым имеющие короткое время жизни. Именно поэтому в реакциях слияния стабильных ядер невозможно приблизиться к «острову стабильности», расположенному в области $Z \sim 114\text{--}120$ и $N \sim 184$.

Сечения образования сверхтяжелых элементов в более асимметричных (и более «горячих», т.е. с испусканием большего числа нейтронов) реакциях слияния ^{48}Ca с мишенями из актинидных элементов оказались намного больше. Даже 118-й элемент был образован с сечением порядка 1 пб в реакции слияния $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf}$. Слияние актинидов с ^{48}Ca приводит к более нейтронно-обогащенным сверхтяжелым ядрам с большим временем жизни. Тем не менее и они расположены достаточно далеко от центра предсказываемого «острова стабильности», образованного замкнутой нейтронной оболочкой $N = 184$. Заметим, что именно реакции слияния с ^{48}Ca впервые экспериментально подтвердили само существование «острова стабиль-



Шесть новых элементов (113–118) и сорок пять новых изотопов, лежащих вблизи «острова стабильности», синтезированы в ЛЯР ОИЯИ за последние 10 лет с использованием газонаполненного сепаратора, показанного на верхнем рисунке

ности». В этих реакциях был, наконец, достигнут «берег» этого «острова»: время жизни изотопа $^{285}_{112}$ (синтезированного в реакции «горячего» слияния) оказалось на пять порядков больше по сравнению с более легким изотопом того же элемента $^{277}_{112}$, синтезированным в реакции «холодного» слияния. Как бы то ни было, калифорний ($Z = 98$) является наиболее тяжелым актинидом, который может быть использован в качестве мишенного материала. Периоды полураспада двух долгоживущих изотопов эйнштейния ($Z = 99$) — $^{252}_{99}\text{Es}$ (470 сут) и $^{254}_{99}\text{Es}$ (276 сут) — достаточны для проведения опыта. При этом изотоп $^{254}_{99}\text{Es}$ в принципе может быть наработан в реакторе. Однако задача накопления нужного количества этого вещества (хотя бы несколько миллиграммов) является достаточно сложной и до настоящего времени не решена.

Совсем недавно в этом подходе был синтезирован 117-й элемент в реакции слияния $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{249}_{117}\text{Bk}$. Несколько десятков миллиграммов чрезвычайно редкого вещества берклия-249 (время жизни которого составляет всего 320 сут) было накоплено в ядерном реакторе Ок-Риджа. Затем это вещество было переправлено в Димитровград, где из него была приготовлена мишень, которая затем и облучалась ускоренными ионами кальция-48 в ЛЯР ОИЯИ. Данный эксперимент явился ярким примером успешного сотрудничества ОИЯИ с ведущими национальными лабораториями США в Ок-Ридже и Ливерморе, с Университетом Вандербильта. Таким образом, за последние десять лет в ЛЯР ОИЯИ в реакциях слияния $^{48}_{20}\text{Ca}$ с актинидными ядрами были синтезированы 6 новых сверхтяжелых элементов и более 40 новых изотопов. Периодическая таблица Менделеева была расширена от 112-го до 118-го элемента, т. е. полностью закрыт седьмой период. После этого начинается новый (восьмой) период с щелочными и щелочно-земельными элементами при $Z = 119$ и $Z = 120$. Последующие электронные оболочки $5g$, $6f$ и $7d$ очень близки по энергиям и будут заполняться в конкуренции друг с другом. Нельзя исключать, что элементы с $Z \geq 122$ вообще не будут походить на свои более легкие гомологи периодической таблицы.

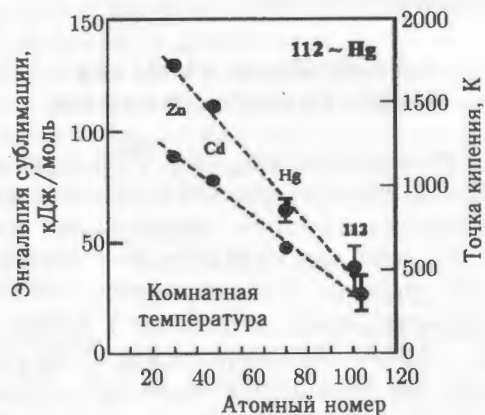
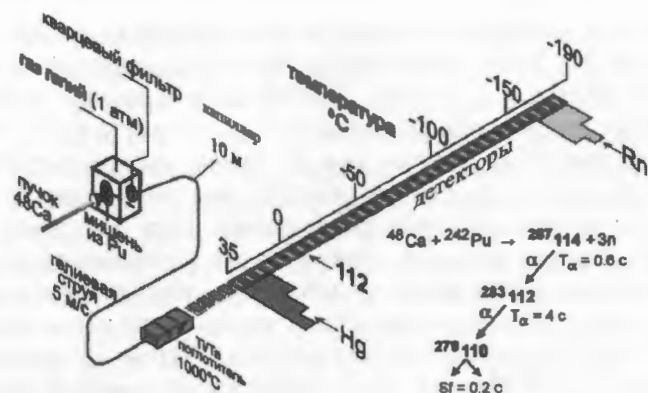
Однако чтобы идти дальше в этом направлении, мы должны использовать более тяжелые ускоренные ионы с $Z > 20$ (Ti, Cr и т. д.). Расчеты показывают, что вероятность слияния этих ионов с ядрами актинидных элементов гораздо ниже, чем для $^{48}_{20}\text{Ca}$. Это означает, что нам необходимо увеличить интенсив-

ность пучков ускоренных ионов и эффективность сепараторов и детекторов для того, чтобы иметь шанс продвинуться в область новых элементов с $Z > 118$. Другой возможностью получения долгоживущих нейтронно-обогащенных сверхтяжелых элементов, расположенных вблизи или на самом «острове стабильности», является использование реакций многонуклонных передач при столкновении тяжелых актинидных ядер (например урана и кюрия), а также реакций слияния с ускоренными радиоактивными ядрами, в том числе с нейтронно-обогащенными осколками деления. Эти реакции плохо изучены экспериментально, и их сечения практически неизвестны. Одной из важнейших задач проекта DRIBs как раз и является изучение и использование всех этих возможностей.

Химические свойства сверхтяжелых элементов

Реакции «горячего» слияния ядер $^{48}_{20}\text{Ca}$ с актинидными мишенями приводят к образованию нейтронно-обогащенных и тем самым долгоживущих изотопов сверхтяжелых элементов. Помимо прочего, это дает нам уникальную возможность исследовать химические свойства этих элементов, что является одной из фундаментальных задач современной химии. На границе периодической таблицы (большие значения Z) релятивистские эффекты играют все большую роль в электронных оболочках атомов. Для 112-го элемента, например, релятивистское сжатие приводит к более сильной связи сферической $7s$ -орбитали и в то же время к расширению $6d$ -состояния. В результате для 112-го элемента существовала полная неопределенность в предсказании его химических свойств — от металла до инертного газа.

Химические свойства сверхтяжелых элементов проявляются в их взаимодействии с охлаждаемой металлической поверхностью и образовании (или отсутствии таких образований, в случае инертного газа) соответствующих интерметаллических соединений. Высокая летучесть 112-го элемента и его способность образовывать интерметаллические соединения впервые были обнаружены в ЛЯР ОИЯИ методом термохроматографии с помощью криодетектора. Обнаруженные свойства 112-го элемента позволили однозначно отнести его к 12-й группе (аналог ртути). В аналогичных экспериментах по химии 114-го элемента впервые определена его повышенная летучесть при

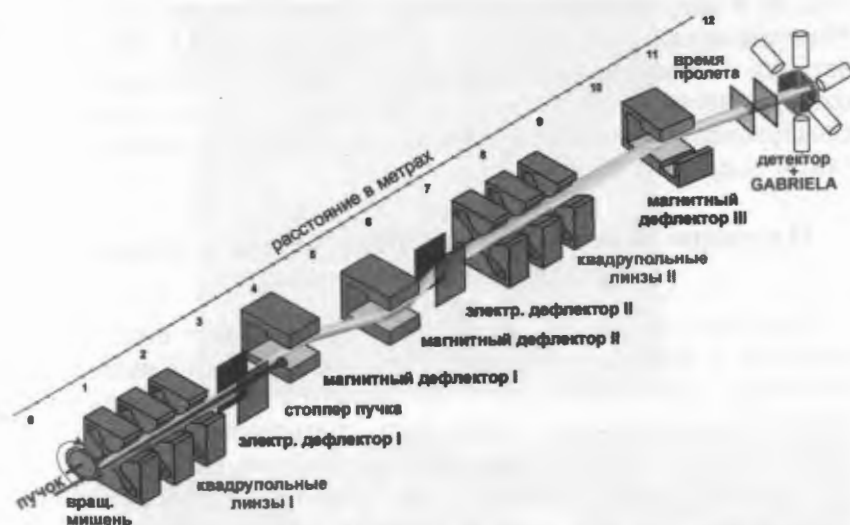


Экспериментальная установка, используемая для определения химических свойств сверхтяжелых элементов

комнатной температуре. Эксперименты проводятся в тесном сотрудничестве с радиохимиками Института им. Пауля Шеррера (Швейцария). Совместная программа дальнейшего развития этих работ нацелена на сравнительное изучение химических свойств сверхтяжелых элементов с $Z > 112$ и их легких гомологов.

Измерение массы и спектроскопия сверхтяжелых элементов

Для прямого измерения массового числа сверхтяжелых элементов в ЛЯР ОИЯИ создается масс-сепаратор MASHA (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms). Его разрешающая способность



Масс-анализатор MASHA (вверху) и модернизированный электростатический сепаратор VASSILISSA (ASSA-2000) в комбинации с детектирующей системой GABRIELA (внизу)

$\Delta A/A \sim 10^{-3}$ позволяет напрямую измерить массовые числа синтезируемых изотопов новых элементов, а также «развести» их по разным детекторам для последующего изучения их распадов и химических свойств. По эффективности сепарации и широким возможностям изучения свойств распадов сверхтя-

желых элементов MASHA должна значительно превосходить имеющиеся установки такого типа.

Известно, что элементы с $Z > 100$ существуют исключительно благодаря квантовым эффектам и оболочечной структуре ядер. И расположение самого «острова стабильности» на карте ядер обусловлено заполненными протонными и нейтронными оболочками ($Z \sim 114$, $N \sim 184$). Эти предсказания, однако, базируются исключительно на наших знаниях об оболочечной структуре уже изученных более легких ядер. Любая информация о возбужденных состояниях сверхтяжелых ядер и их характеристиках распада является чрезвычайно ценной и позволяет нам судить о деформациях этих ядер и их одночастичных состояниях, т. е. о протонных и нейтронных оболочках. Такая информация получается в спектроскопических экспериментах с использованием не только сепаратора сверхтяжелых элементов, но и сверхэффективных альфа-, бета- и гамма-детекторов. Модернизированный сепаратор VASSILISSA (ASSA-2000) в сочетании с детектирующей системой GABRIELA, развиваемой в сотрудничестве с коллегами из Франции, позволит проводить спектроскопические исследования сверхтяжелых элементов на самом высоком уровне.

Изучение процессов слияния-деления и реакций многонуклонных передач

Как уже отмечалось, ядра с $Z > 118$ не могут быть синтезированы в реакциях слияния ^{48}Ca с актинидными мишенями, поскольку калифорний ($Z = 98$) является наиболее тяжелым веществом, из которого может быть приготовлена мишень для таких экспериментов. Чтобы двигаться дальше, нам необходимо использовать более тяжелые, чем кальций, ядра-снаряды — ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{64}Ni и т. д. Однако прежде чем проводить чрезвычайно дорогостоящие опыты по поиску новых элементов, необходимо выбрать наиболее оптимальные комбинации «снаряд-мишень» и изучить свойства соответствующих реакций. Например, для синтеза 120-го элемента могут быть использованы реакции полного слияния $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$, $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$ или $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$, ведущие к образованию одного и того же изотопа $^{302}120$. Сравнение выходов продуктов деления и квазиделения в этих реакциях позволяет оценить относительную вероятность образования составного ядра и, таким образом, выбрать наибо-

лее подходящую комбинацию для последующего многодневного синтеза нового элемента. Изучение реакций слияния-деления будет проводиться в ЛЯР ОИЯИ на модернизированной установке CORSET в сочетании с мультинейтронным спектрометром DEMON.

Еще одно до сих пор не изученное «белое пятно» расположено на «северо-востоке» ядерной карты. Существующая граница верхней части ядерной карты находится очень близко к линии бета-стабильности, в то время как неисследованная область тяжелых нейтронно-избыточных нуклидов (к «востоку» от линии стабильности) чрезвычайно важна для астрофизических исследований и, в частности, для понимания r -процесса астрофизического нуклеогенезиса. В соответствии с недавним отчетом Национального исследовательского совета НАН США,

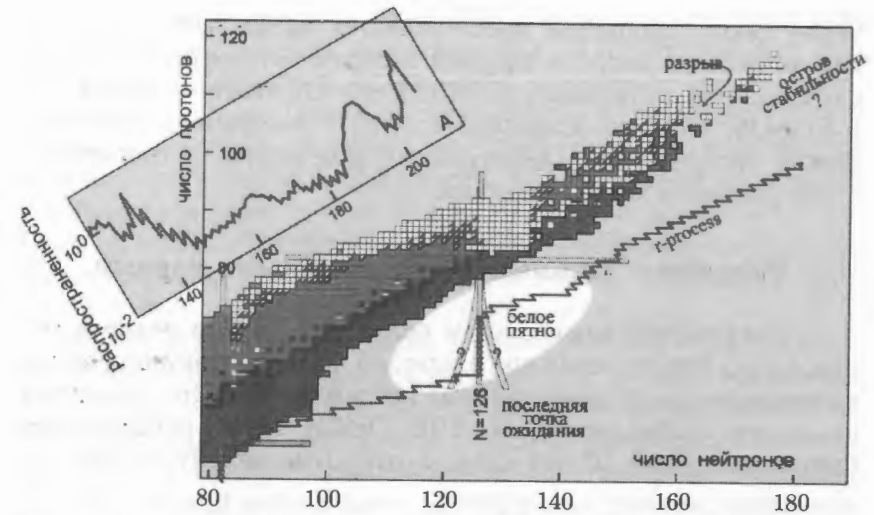


Двухплечевой времяпролетный спектрометр CORSET (вверху) и его работа в сочетании с мультинейтронным детектором DEMON (внизу)

происхождение тяжелых элементов от железа до урана остается одной из 11 наиболее важных проблем современного естествознания и, по всей видимости, будет предметом интенсивных исследований в ближайшие годы. Заметим, что r -процесс протекает (и, в конце концов, прерывается делением) именно в области еще не изученных нейтронно-избыточных ядер. Нейтронная оболочка $N = 126$ (в области $Z \sim 70$) является последней «точкой ожидания» этого процесса. Время жизни и другие характеристики этих ядер чрезвычайно важны для понимания сценария r -процесса. Изучение структуры ядер, расположенных вблизи линии $N = 126$, могло бы также прояснить интенсивно обсуждаемую проблему подавления оболочечных эффектов в ядрах с ростом нейтронного избытка.

Для синтеза тяжелых нейтронно-обогащенных ядер, расположенных вдоль замкнутой нейтронной оболочки $N = 126$, предполагается использовать процессы многонуклонных передач в низкоэнергетических столкновениях ^{136}Xe с ^{208}Pb . Основная идея состоит в стабилизирующем эффекте замкнутых нейтронных оболочек двух этих ядер, $N = 82$ в ксеноне и $N = 126$ в свинце. Передача протонов от свинца ксенону может оказаться весьма благоприятной, поскольку образующиеся при этом легкие фрагменты являются сильносвязанными (стабильными) ядрами и Q реакции остается близким к нулю. Для идентификации и изучения свойств новых ядер, образующихся в таких реакциях, будут использоваться как физические, так и химические методы сепарации, поскольку время жизни этих ядер достаточно велико. В отличие от реакций полного слияния, продукты реакций многонуклонных передач распределены в достаточно широком угловом диапазоне, и для более эффективного их захвата и последующей сепарации требуется широкоапертурный сепаратор нового типа. Этот сепаратор будет использоваться также для получения сверхтяжелых ядер, образующихся в реакциях многонуклонных передач при столкновении тяжелых актинидных ядер, например урана и кюрия (см. выше). Проектирование такого сепаратора ведется в ЛЯР ОИЯИ и в GSI (Германия).

Одним из актуальных направлений в изучении свойств тяжелых (и сверхтяжелых) ядер является поиск их кластерной структуры. Кластеризация является общим свойством многочастичных систем. В каждом случае это не что иное, как образование энергетически более выгодных компактных объектов



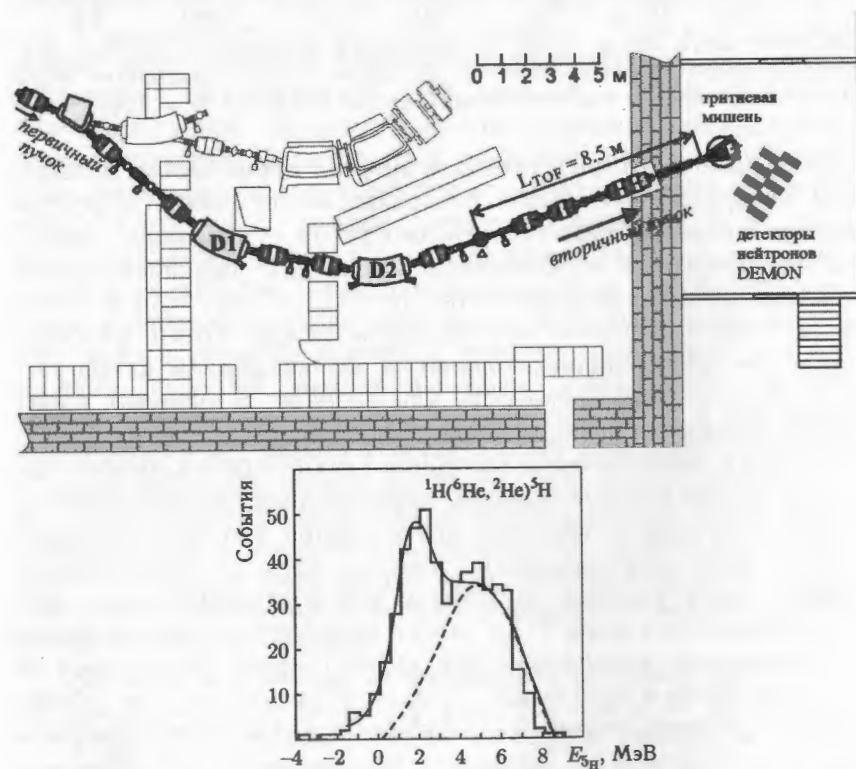
Верхняя часть карты ядер: схематически показаны r -процесс астрофизического нуклеосинтеза и последняя «точка ожидания» этого процесса в области замкнутой нейтронной оболочки $N = 126$

(кластеров), в которых удельная энергия связи частиц больше, чем в окружающей среде. Благодаря оболочечным эффектам внутри атомного ядра (в зависимости от его размера) нуклоны предпочитают образовывать компактные сильносвязанные дважды магические фрагменты ^4He , ^{16}O , ^{48}Ca , ^{132}Sn и ^{208}Pb . В некоторых случаях энергия связи между этими фрагментами становится положительной, и мы наблюдаем альфа-распад, ионную радиоактивность или деление. В тяжелых ядрах сильносвязанные дважды магические кластеры ^{132}Sn или ^{208}Pb приводят к энергетически выгодным двухцентровым конфигурациям. Асимметричное деление, тяжелоионная радиоактивность, изомеры формы и процессы квазиделения являются проявлениями такой кластеризации тяжелых ядер. В сверхтяжелых ядрах, массы которых достаточно для образования двух дважды магических ядер ^{132}Sn , могут возникать и трехцентровые конфигурации; например, 116-й элемент может распадаться на два ядра олова и ядро серы: $^{296}_{116} \rightarrow ^{132}\text{Sn} + ^{32}\text{S} + ^{132}\text{Sn}$ с большим энерговыделением. Аналогичные трехкластерные распады могут происходить и в гигантских ядерных молекулах, образующихся при столкновении тяжелых актинидных ядер, например $^{232}\text{U} + ^{232}\text{U} \rightarrow ^{464}_{184} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$. Наблюдение и изу-

чение таких процессов представляется чрезвычайно важным для понимания свойств ядерной материи. Эти процессы будут изучаться на установках CORSET (+ DEMON + HENDES) и FOBOS, которые позволяют измерять массовые и энергетические распределения делительных фрагментов в совпадении с нейтронами и гамма-квантами.

Реакции с легкими радиоактивными ядрами

С появлением возможности получения пучков радиоактивных ядер открыта новая эра в ядерной физике — инициированы интенсивные экспериментальные исследования ядер, удаленных от линии стабильности. В ЛЯР ОИЯИ такие исследования стартовали около 10 лет назад с открытия динейтронной кон-

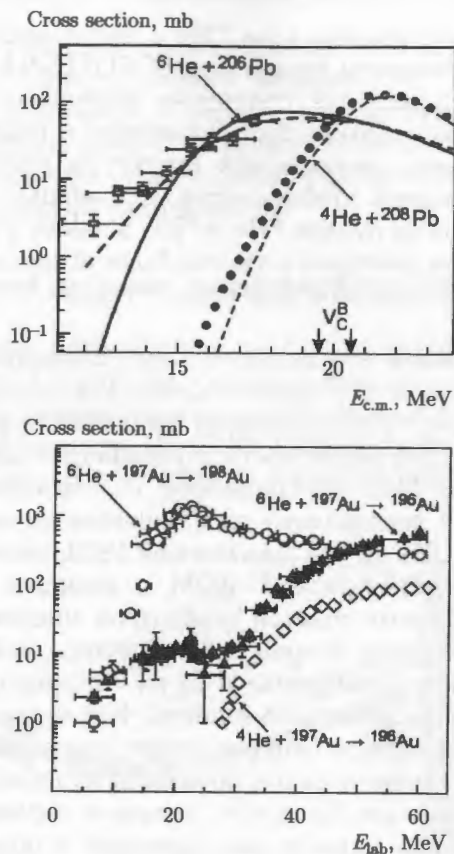


Установка ACCULINNA (вверху) и спектр ядра ${}^5\text{He}$, полученный в реакции ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^2\text{He}){}^5\text{H}$ (внизу)

фигурации экзотического ядра ${}^6\text{He}$ в эксперименте, проведенном на кинематическом сепараторе ACCULINNA, который был специально построен для получения вторичных пучков методом фрагментации. Позже был разработан и реализован новый подход к изучению резонансной структуры ядер, лежащих за границей нейтронной стабильности. С помощью этого подхода и с использованием пучков ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$, а также уникальной мишени из жидкого дейтерия и трития были исследованы свойства «сверхтяжелых» изотопов водорода и гелия: ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, ${}^7\text{H}$, ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{He}$ и ${}^{10}\text{He}$.

Новый механизм «последовательного слияния» был предсказан и подтвержден экспериментально для легких нейтронно-избыточных ядер. Этот механизм приводит к увеличению на несколько порядков вероятности глубокоподбарьерного слияния таких ядер, как ${}^6\text{He}$, по сравнению со стабильными ядрами. Это был первый эксперимент со вторичным пучком, выполненный в ЛЯР ОИЯИ по так называемой ISOL-схеме. Атомы ${}^6\text{He}$ получались на ускорителе У-400М в реакции фрагментации ядер ${}^7\text{Li}$, тормозимых толстой углеродной мишенью. Затем эти атомы ионизировались и транспортировались во второй ускоритель У-400, где и формировался пучок ускоренных ионов ${}^6\text{He}$, направляемых на свинцовую мишень. Наблюдавшийся эффект усиления подбарьерного слияния может оказаться чрезвычайно важным для астрофизических процессов нуклеосинтеза, происходящих в результате Большого взрыва и взрыва сверхновых, где большие нейтронные потоки приводят к образованию нейтронно-обогащенных ядер.

Большинство экзотических ядер, удаленных от долины стабильности, по-прежнему не изучены или изучены очень плохо. Такие эффекты, как нейтронные гало, нейтронные слои, состояния Ефимова и молекулярная структура, должны наблюдаться для нейтронно-избыточных изотопов гелия, лития, бериллия и т. д. Поиск мультинейтронных резонансов ${}^{4,6}n$, двухпротонной гало-структуры и изучение двухпротонного распада протонно-избыточных ядер и их резонансных состояний также представляют большой интерес. Особое внимание будет уделено изучению кластерной структуры легких экзотических ядер и других свойств ядерного вещества, находящегося в экстремальных условиях. Реакции с участием экзотических ядер и особенно их подбарьерное слияние с легкими стабильными ядрами также требуют дальнейшего изучения. Все эти исследования, поми-



Сечения реакций слияния и нейтронных передач ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^4\text{He}$

мо прочего, имеют важное значение для бурно развивающейся в последнее время ядерной астрофизики.

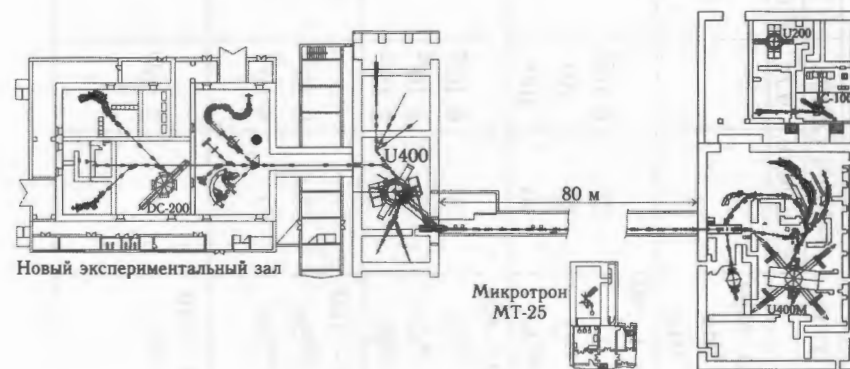
Новый ускоритель и новый экспериментальный зал

Для проведения описанных выше исследований необходимо значительно модернизировать существующие экспериментальные установки и создать несколько новых. В число этих установок входят новый, более эффективный универсальный газонаполненный сепаратор для синтеза и изучения свойств сверхтяжелых элементов, пресепаратор для радиохимических и масс-спектрометрических исследований, криогенный детек-

тор для изучения свойств сверхтяжелых элементов, газовая ловушка для остановки и последующей однократной ионизации продуктов ядерных реакций, радиохимическая лаборатория 2-го класса, новый сепаратор для получения пучков радиоактивных ядер, широкоапертурный спектрометр для продуктов реакций передач и осколков деления. Для размещения этих установок предполагается прежде всего построить новый экспериментальный зал площадью не менее 2000 m^2 .

Помимо этого, необходимо значительно увеличить интенсивность пучков ускоряемых ионов и улучшить их качество. С этой целью в 2010 г. началась модернизация ускорителя У-400, после которой станет возможной плавная перестройка энергии ускоряемых ионов в диапазоне $0,8\text{--}25 \text{ МэВ/нуклон}$ с одновременным уменьшением потребляемой мощности в $3\text{--}4$ раза. Одновременно будут разрабатываться и изготавливаться более эффективные источники многозарядных ионов, в том числе с повышенным до $50\text{--}100 \text{ кВ}$ напряжением инжекции, что поможет решить проблему объемного заряда, стоящую на пути увеличения энергии и интенсивности пучков. На следующем этапе запланировано создание нового ускорителя, производящего более интенсивные пучки ионов, необходимых для синтеза сверхтяжелых элементов.

После модернизации действующих ускорителей У-400 и У-400М и создания нового ускорителя появится возможность получения интенсивных пучков ионов практически всех элементов (от гелия до урана) в широком диапазоне энергий — от глубокоподбарьерных до энергий, при которых с большой веро-



Ускорительный комплекс и экспериментальные залы ЛЯР ОИЯИ

Пучок	У-400М (2010),		У-400R (2011),		DC 200 (2014),		Исследования
	Е/А, МэВ	ч./с	Е/А, МэВ	ч./с	Е/А, МэВ	ч./с	
Рад. ядра ${}^6\text{He}$ ${}^8\text{He}$			3÷14 2÷8	10^8 10^5			Структура легких экзотических ядер, подбарьерные реакции слияния и передач, астрофизика
$6 < A < 40$ ${}^7\text{Li}$ ${}^{18}\text{O}$ ${}^{40}\text{Ar}$	35 33 40	$6 \cdot 10^{13}$ 10^{13} 10^{12}	17 19 5	$1 \cdot 10^{14}$ $1 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{13}$	4 8 5	$1 \cdot 10^{14}$ $1 \cdot 10^{14}$ $6 \cdot 10^{13}$	Фрагментация, получение экзотических ядер, кластерная структура экзотических ядер и редкие моды распада
$A \sim 60$ ${}^{48}\text{Ca}$ ${}^{54}\text{Cr}$ ${}^{58}\text{Fe}$	5 5 5	$6 \cdot 10^{12}$ $3 \cdot 10^{12}$ $3 \cdot 10^{12}$	5 5 5	$2,5 \cdot 10^{13}$ $6 \cdot 10^{12}$ $6 \cdot 10^{12}$	5 5 5	$6 \cdot 10^{13}$ $2 \cdot 10^{13}$ $1 \cdot 10^{13}$	Синтез сверхтяжелых элементов с $Z > 118$, их спектроскопия, химические свойства, процессы слияния, деления и квазиделения
$A \sim 150$ ${}^{124}\text{Sn}$ ${}^{136}\text{Xe}$	5 5	$2 \cdot 10^{11}$ $4 \cdot 10^{11}$	5 5	$2 \cdot 10^{12}$ $3 \cdot 10^{12}$	5 5	$6 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^{12}$	Глубоконеупругие реакции, многонуклонные передачи, новые нейтронно-избыточные ядра, оболочечные эффекты, симметричное слияние
$A \sim 240$ ${}^{238}\text{U}$	7	$2 \cdot 10^{10}$	7	10^{11}	7	$5 \cdot 10^{10}$	Получение нейтронно-обогащенных сверхтяжелых элементов, изучение процессов тройного деления, сверхсильные электрические поля и спонтанное рождение позитронов

ятностью происходят процессы фрагментации с образованием экзотических протонно- и нейтронно-избыточных ядер. Энергии и интенсивности (частиц в секунду) некоторых ионов приведены в таблице.

Реализация проекта DRIBs-III на порядок увеличит эффективность экспериментов в области синтеза новых сверхтяжелых элементов, а также позволит значительно расширить спектр исследований в области тяжелых и легких экзотических ядер.

РЕАКТОР НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ И ЛНФ ИМ. И. М. ФРАНКА

С Лабораторией нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ сегодня ассоциируется передовая наука, связанная с быстрыми нейтронными импульсными реакторами, с богатейшим опытом их создания и использования.

Ровно 50 лет назад, с пуском быстрого импульсного реактора ИБР, была открыта история нейтронных исследований в ЛНФ. Процесс создания ИБР-1 развивался буквально в течение нескольких лет — от идей, озвученных Д. И. Блохинцевым в конце 1955 г., о создании реактора на быстрых нейтронах до физического пуска этой установки прошло всего четыре с половиной года. Примерно столько же времени потребовалось сегодняшним инженерам и физикам, чтобы модернизировать третий по счету реактор ЛНФ (ИБР-2) и превратить его в современную установку мирового класса. Накопившийся в лаборатории опыт по созданию и эксплуатации реакторов ИБР, ИБР-30 и ИБР-2 и развитие на их основе соответствующей научной проблематики позволили спроектировать модернизированный реактор ИБР-2 и обеспечить проведение на нем уникальных исследований в ближайшем будущем.

За счет изменения геометрии активной зоны и изменения конструкции замедлителей планируется увеличение потока тепловых нейтронов, полученных на ИБР-2 при сохранении средней мощности реактора 2 МВт. Однако просто иметь большой поток нейтронов недостаточно для изучения строения вещества и материалов. Превращение нейтрона в полезный инструмент исследователя — это поэтапный наукоемкий процесс. Практически все задачи, связанные с оптимизацией использования нейтронов на ИБР-2, решаются в лаборатории.

Для изучения строения вещества и материалов пригодны нейтроны, движущиеся с малой скоростью — сотни и тысячи метров в секунду. Такие нейтроны называют медленными в отличие от быстрых нейтронов, излучаемых реактором, которые

имеют скорости десятки тысяч километров в секунду. Медленные нейтроны получают путем замедления быстрых в устройствах, называемых замедлителями. В простейшем случае это кассета с обыкновенной водой. Быстрые нейтроны, сталкиваясь с ядрами водорода, наиболее эффективным способом теряют скорость. Замедлившиеся нейтроны вылетают за пределы замедлителя и попадают на мишени исследователей.

Однако в воде нейтроны не могут замедлиться до энергии ниже энергии теплового движения молекул воды. Чтобы получить более медленные нейтроны, надо понизить саму температуру замедлителя. Этот простой способ в действительности приводит к необходимости создания достаточно сложных криогенных устройств и поиска веществ, подходящих для замедления нейтронов. Таких веществ немного — это жидкий водород, твердый метан и некоторые ароматические углеводороды. Для создания наилучшего холодного замедлителя для реактора ИБР-2 в ЛНФ была разработана новаторская концепция комбинированных замедлителей. Этот комбинированный замедлитель представляет собой сложную систему камер (отсеков), в которых находится либо охлажденное до низких (20–100 К) температур водородсодержащее вещество, либо обычная вода при комнатной температуре, либо вакуум, либо рассеивающее и не поглощающее нейтроны вещество. Особенностью такого замедлителя является существенная зависимость спектра термализованных нейтронов от направления вылета и/или места вылета нейтронов. Такой замедлитель, установленный в реакторе ИБР-2, вместе с более компактной активной зоной реактора обеспечивает увеличение дифференциальной плотности потока холодных нейтронов не менее чем в 10 раз по сравнению с ИБР-2.

В различных экспериментах требуется направить на образец нейтроны определенной энергии. На ИБР-2 эти задачи решаются механическими системами, разработанными в ЛНФ и пропускающими на образец нейтроны строго определенное время, примерно 1–10 мс. Точность стабилизации составляет от 20 до 250 мкс. Для проводки пучков тепловых (холодных) нейтронов от активной зоны реактора до спектрометра используются сложные нейтронно-оптические системы — нейтронотводы, они обеспечивают минимальные потери пучка при длине до сотен метров и подавление (уменьшение) фона быстрых нейтронов и гамма-квантов. Совместно с ПИЯФ (Гатчина) и институтами

ФРГ специалисты Лаборатории нейтронной физики проводят расчет, оптимизацию и разработку новых зеркальных нейтронных водов на ИБР-2.

Для создания на исследуемом образце требуемых для проведения эксперимента условий, например температуры, давления, магнитного поля и т. п., в ЛНФ разрабатывается целый класс самых современных устройств — это так называемые системы окружения образца. Например, на ИБР-2 для нагрева образцов в диапазоне температур от комнатной до 100, 300 или 3000 °С используются различные печи с мощностью от 200 до 3000 Вт.

После рассеяния на образце нейтроны регистрируются детекторами нейтронов. С помощью детекторов определяют интенсивность потока нейтронов, пространственное и угловое распределение. На спектрометрах реактора ИБР-2 используются различные типы детекторов. Промышленные нейтронные счетчики, несмотря на их разнообразие, по многим параметрам не удовлетворяют требованиям, поэтому в ЛНФ с 2002 г. ведутся уникальные разработки по созданию детекторов на основе позиционно-чувствительных газовых камер сцинтилляционных экранов. Высококачественная аппаратура, созданная специалистами ЛНФ, нашла применение не только на ИБР-2, но и в ряде российских ядерных центров, таких как филиал НИИФХИ им. Л. Я. Карпова (Обнинск), РНЦ «Курчатовский институт» и ИФМ УрО РАН (Заречный).

От зарегистрированного сигнала на детекторе до привычного всем описания результатов измерений в цифрах лежит сложный путь, который успешно проделывается благодаря сотрудникам ЛНФ, специализирующимся в разработке и создании систем сбора данных (ССД) нового поколения. К их опыту по созданию типовых и специализированных ССД обращаются и физики других исследовательских центров, например Helmholtz-Zentrum (Берлин).

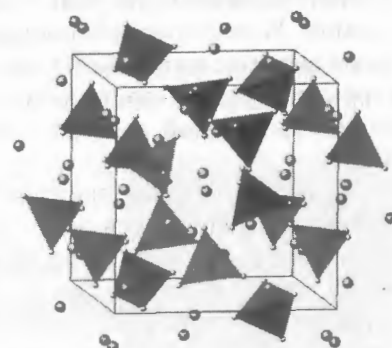
Таким образом, модернизированный реактор ИБР-2 обеспечивает ОИЯИ нейтронами — замечательным инструментом как для фундаментальных, так и важных прикладных исследований.

Оказывается, что многие окружающие нас вещества обладают необычными и полезными свойствами на наномасштабах, сильно отличающимися от их обычных, макроскопических, характеристик. Эти свойства в настоящее время активно используются при разработке современных нанотехнологий,

направленных на создание принципиально новых материалов, микромеханизмов, биокомпьютеров, интеллектуальных материалов, новых медицинских и электронных технологий. Развитие нанонауки и нанотехнологии неразрывно связано с необходимостью исследования нанообъектов. Широкие возможности для такого рода исследований предоставляют нейтронографические методы — рефлектометрия, малоугловое рассеяние, дифракция, неупругое рассеяние. Наличие у нейтрона магнитного момента позволяет изучать магнитную структуру веществ: установить наличие и тип магнитной структуры — упорядоченную ориентацию магнитных моментов атомов относительно друг друга и кристаллографических осей, величину магнитного момента атома, температуру и характер магнитных переходов. Нейтронная спектроскопия является уникальным методом для изучения характеристик колебаний атомов в кристаллической решетке. Полезные сведения можно получить о диффузии атомов, о влиянии примесей на свойства кристаллов, исследовать динамические свойства твердых аморфных веществ и даже жидкостей. Нейтронография успешно используется для решения задач современной промышленности — водородной энергетики, нанотехнологий, производства устройств хранения информации, микроэлектроники, фармацевтики.

Разработка функциональных материалов (обладающих физическими и химическими свойствами, которые изменяются в зависимости от внешних условий или параметров окружающей среды предсказываемым и управляемым образом) является основной задачей исследований XXI в. во многих областях науки и техники.

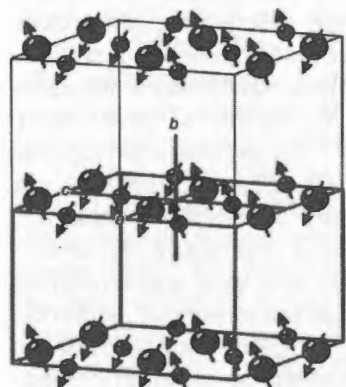
Так, переход на водородную энергетику невозможен без разработки надежных методов получения, транспортировки и хранения водорода. Перспективным направлением разработок по хранению водорода является химическое «связывание» водорода в кристаллах. Одним из таких перспективных соединений является Li_2BeD_4 , структура которого (представле-



Кристаллическая структура материала для хранения водорода Li_2BeD_4

на на рисунке) была расшифрована специалистами Лаборатории нейтронной физики.

Открытие эффекта колоссального магнитосопротивления повлекло за собой стремительный поиск и изучение обладающих



им материалов в связи с возможностью их применения в устройствах нового поколения — от создания магнитной оперативной памяти и производства устройств, снижающих шумы в коммуникационных сетях, до измерения линейных углов между предметами посредством магнитного поля и специальных сенсоров. Исследование магнитной структуры и магнитных фазовых переходов соединений с эффектом колоссального магнитосопротивления является одной из задач лаборатории.

Во многом благодаря нейтронам было достигнуто понимание структуры и динамики комплексных жидкостей. Комплексные жидкости, такие как кровь, содержащие наноразмерные частицы, играют значительную роль в процессах жизнеобеспечения организмов. Используя нейтронное рассеяние, физики лаборатории помогают биологам детально разобраться в надмолекулярной структуре таких «растворов», что способствует разработке механизмов целевой доставки лекарств в конкретные части организма.

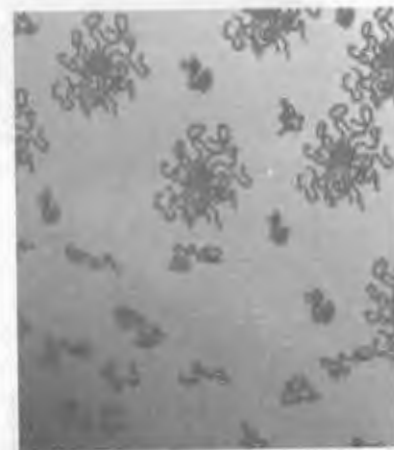
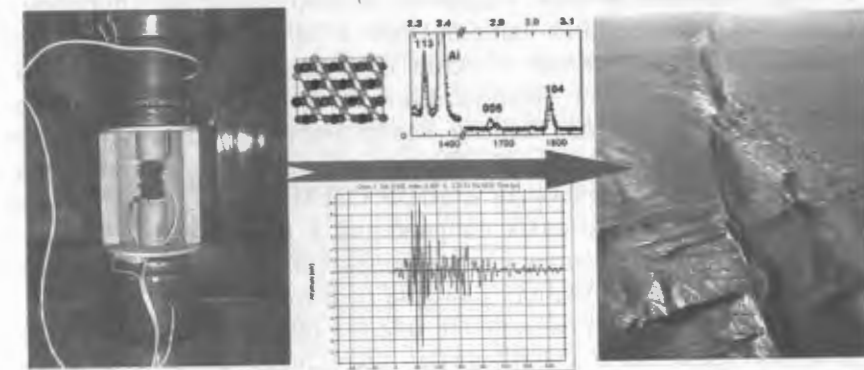
Транспортировка лекарств через кожу человека является быстроразвивающимся направлением современной фармакологии. Поиск веществ, усиливающих проникновение малых молекул через липидную матрицу кожи, является составной частью исследовательских работ в этом направлении. С помощью дифракции нейтронов можно определить с высокой точностью структуру мембраны Stratum Corneum и отслеживать проникновение в нее различных веществ.

Полимеры широко используются в наше время. Легкость, прочность и относительно низкая цена сделали их незаменимыми во многих областях науки и техники. Полимерные це-

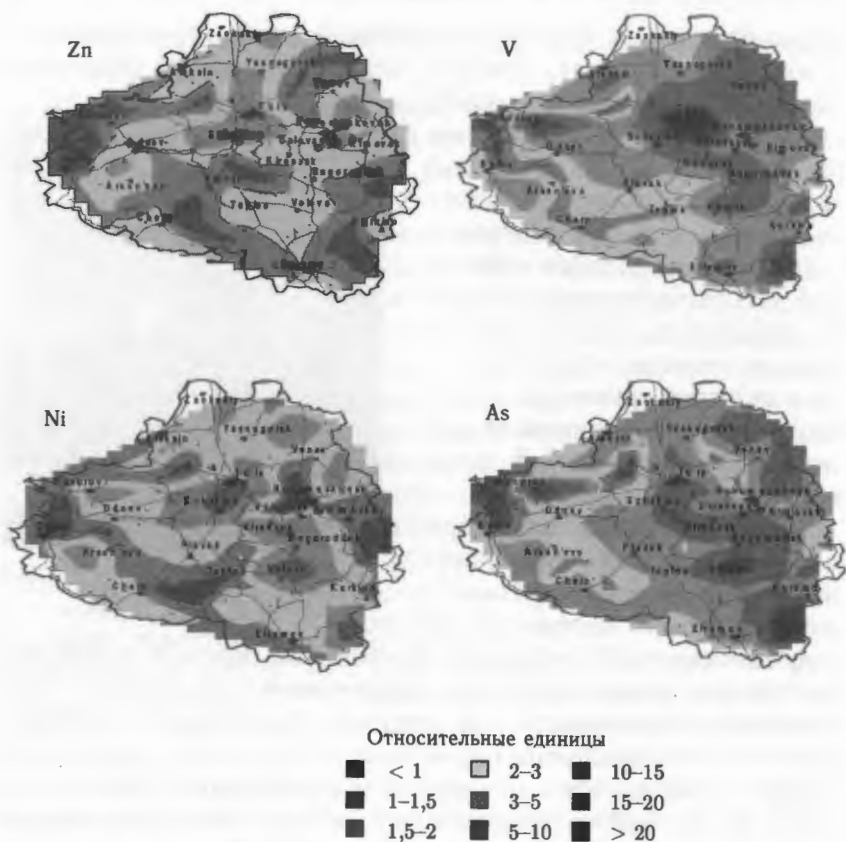
почки образованы единичными молекулами, которые состоят в основном из водорода, углерода, кислорода и фтора. Нейтроны обладают уникальными свойствами для изучения полимеров, в частности способностью «маркировать» отдельные молекулы и делать их видимыми с помощью изотопных замещений. Исследователи могут быстро определить, к примеру, насколько хорошо смешиваются те или иные полимеры, какова оптимальная температура их смешения, каков состав оптимальной смеси и т. п.

Относительно новой областью применения нейтронных методов является геофизика и наука о Земле. Использование традиционных для геофизики акустических методов в комплексе с современными нейтронографическими методиками открывает новые возможности для изучения механических и физических свойств, процессов подготовки и реализации разрушения горных пород с целью понимания и предсказания землетрясений и горных ударов, обоснованного выбора мест строительства глубинных хранилищ радиоактивных отходов.

Высокая проникающая способность нейтронов позволяет исследовать остаточные напряжения в глубине материала в раз-



Водный раствор органических полимерных цепочек



Оценка выпадения тяжелых металлов в различных регионах России и других странах

личных промышленных изделиях неразрушающим способом. Появление остаточных напряжений в процессе производства промышленных изделий — одна из причин быстрого выхода из строя и недолгой эксплуатации, поэтому их обнаружение и изучение — важная задача совершенствования и развития промышленных технологий. Одним из примеров такого рода исследований, проведенных в ЛНФ ОИЯИ, является изучение распределения остаточных напряжений в биметаллическом переходнике нержавеющей стали — сплав циркония, который используется в конструкциях каналов реакторов.

Нейтронный активационный анализ применяется для определения примесей в сверхчистых, полупроводниковых и нано-

материалах, содержания микроэлементов в экологических, биологических и медицинских исследованиях, а также в геологии, археологии и др.

Активационный анализ применяется также при поиске полезных ископаемых, для контроля технологических процессов и качества выпускаемой продукции. Установка «Регата» на ИБР-2 успешно используется во множестве международных проектов для решения разных задач научных коллективов из стран-участниц ОИЯИ.

Очень важный раздел современной ядерной физики — это нейтронная ядерная физика, изучающая взаимодействие нейтронов с ядрами. Для проведения этих исследований в 2009 г. в ЛНФ ОИЯИ была введена в строй первая очередь импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН. Определены параметры этой установки в текущей конфигурации, начаты работы по подготовке и проведению экспериментов на ИРЕН. Ведутся исследования на ускорителе ЭГ-5, который тоже находится в ЛНФ.

Нейтронная спектроскопия — раздел ядерной физики, изучающий энергетическую и другие зависимости эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами и свойства образующихся при этом возбужденных состояний ядер. Отсутствие у нейтрона электрического заряда, препятствующего сближению с ядром заряженных частиц, делает нейтрон уникальным инструментом для изучения ядерного взаимодействия при любой энергии нейтрона.

Свойства нейтрона и ядерные реакции с его участием играют определяющую роль во многих астрофизических процессах, в том числе в периоде первичного ядерного синтеза после Большого взрыва, а также в процессах нуклеосинтеза при взрывах сверхновых звезд. Теоретические сценарии развития должны объяснять химический и изотопный состав современной Вселенной. Хотя представления об основных процессах уже сложились (большинство ядер образуется в звездах в результате медленного и быстрого захвата нейтронов — так называемые s - и r -процессы), имеется еще большой ряд вопросов, требующих объяснений и уточнений.

К сожалению, имеющаяся информация по скоростям реакций (p, γ) очень бедна, причем экспериментальные данные отличаются от расчетных в 2–3 раза, а для реакций, включающих α -частицы, различные теоретические предсказания могут

отличаться в 10 раз. Именно поэтому очень важными представляются измерения реакции (n, α) с целью тестирования чувствительности α -канала к используемым в расчетах потенциалам α -частиц. Такие измерения начаты в Ок-Ридже (США), Геле (Бельгия) и планируются на установке ИРЕН в Дубне.

В Лаборатории нейтронной физики в 1968 г. были начаты первые в мире эксперименты с ультрахолодными нейтронами (УХН). Сегодня эти эксперименты развиваются в ОИЯИ благодаря сотрудничеству специалистов ЛНФ с коллегами из других научных центров, таких как Институт им. Лауэ–Ланжевена (ILL) в Гренобле.

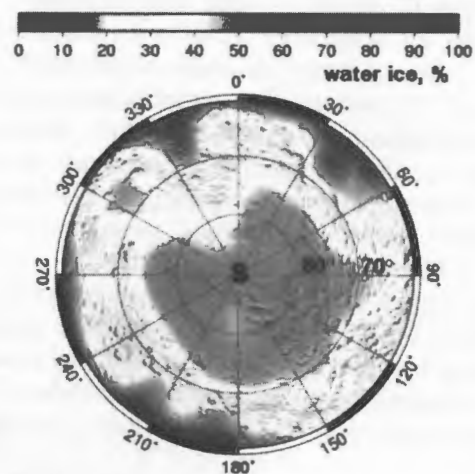
Ультрахолодные нейтроны — это очень медленные нейтроны со скоростями менее 5 м/с. Особенностью УХН является невозможность преодоления слабого отталкивания ядрами и, как следствие, полное отражение этих нейтронов от многих материалов. Полное отражение УХН от стенок позволяет хранить их в замкнутых вакуумных камерах в течение нескольких минут. На движение УХН существенным образом влияют магнитное и гравитационное поля. УХН являются чувствительным инструментом физики частиц. Они с успехом используются в экспериментах, направленных на решение вопросов фундаментальной физики, таких как определение времени жизни свободного нейтрона, эксперименты по поиску электрического дипольного момента и электрического заряда нейтрона и т. п.

На сегодняшний день опыт специалистов лаборатории по созданию экспериментальных установок для работы с УХН всемирно известен. В ЛНФ ведутся работы по изучению взаимодействия УХН с наноструктурами. Были поставлены эксперименты по проверке так называемого слабого принципа эквивалентности (СПЭ) для нейтрона. Иными словами, необходимо было проверить, падает ли он в гравитационном поле Земли с тем же ускорением, что и макроскопическое тело. Полученный результат свидетельствует о справедливости СПЭ для нейтрона на уровне точности порядка 0,1%. Ведется работа по увеличению точности этого эксперимента как минимум на порядок.

Уже самые ранние космические исследовательские аппараты несли на борту приборы для ядерно-физических измерений. Известно, что рентгеновская астрономия возникла в 1948 г., когда были обнаружены первые космические рентгеновские источники с борта орбитальной ракеты простейшим рентгеновским детектором. Первые советские автоматические станции на око-

лунной орбите имели на борту гамма-спектрометры, которые позволили выполнить первые оценки элементного состава лунного реголита и содержания в лунном веществе естественных радиоактивных изотопов K, Th и U. Сегодня экспериментальная ядерная планетология превратилась в отдельную область научных космических исследований.

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ с 1997 г. успешно сотрудничает с Институтом космических исследований РАН в области разработки и создания детекторов нейтронов, гамма-квантов и заряженных частиц для космических аппаратов. За это время в ЛНФ была предложена концепция нескольких научных приборов, три из которых в настоящее время успешно работают в космосе. Действительно, с 2002 г. на орбите Марса в составе научной программы миссии NASA «Mars Odyssey 2001» успешно работает созданный при участии ЛНФ прибор HEND, при помощи которого было обнаружено значительное количество водяного льда в поверхностном слое марсианского грунта. Модификация прибора HEND в настоящее время размещена также на российском сегменте Международной космической станции с целью изучения радиационной обстановки на ее борту. С осени 2009 г. на лунной орбите работает прибор LEND, входящий в состав аппаратуры миссии NASA. В стадии разработки и создания находятся еще несколько приборов для



Распределение водяного льда в южной области Марса (по данным российского прибора HEND)

российских, американских и европейских космических аппаратов, запуск которых намечен на 2011–2015 гг.

Для всех этих приборов в лаборатории, помимо выбора концепции и состава датчиков, проводятся работы по математическому и физическому моделированию, а также физическим калибровкам. Для проведения физических калибровок используются все возможности лаборатории — импульсные источники нейтронов (ИБР-2, ИРЕН), электростатический ускоритель ЭГ-5, радиоизотопные источники нейтронов и гамма-квантов, большие помещения, в которых удастся существенно понизить фон при проведении экспериментов.

В итоге можно сказать, что в ЛНФ развивается комплексная и амбициозная научная программа по изучению нейтрона как элементарной частицы, по его применению в области физики конденсированных сред и в ряде современных прикладных научных исследований.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОИЯИ

Лаборатория вычислительной техники и автоматизации (ЛВТА, с 2000 г. — Лаборатория информационных технологий) была образована в августе 1966 г. на базе вычислительного центра ОИЯИ, отделов и групп автоматизации и обработки экспериментальных данных Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории высоких энергий. Лабораторию возглавил и бессменно ею руководил более 20 лет член-корреспондент АН СССР Михаил Григорьевич Мещеряков (1910–1994). Первыми заместителями М. Г. Мещерякова были Г. И. Забиякин и Н. Н. Говорун. Николай Николаевич Говорун (1930–1989), член-корреспондент АН СССР, работая заместителем директора, а с 1988 г. директором ЛВТА, руководил направлением, связанным с использованием и развитием ЭВМ в научных исследованиях.

Основные направления деятельности Лаборатории информационных технологий (ЛИТ) нацелены на обеспечение теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в ОИЯИ и странах-участницах, современными телекоммуникационными, сетевыми, информационно-вычислительными средствами, а также на поддержку исследований программным обеспечением и математическими методами. Сегодня исследования и работы в лаборатории ведутся по двум темам: «Информационное, компьютерное и сетевое обеспечение деятельности ОИЯИ» и «Математическая поддержка теоретических и экспериментальных исследований, проводимых ОИЯИ» в рамках общего направления «Сети, компьютеринг, вычислительная физика». В ЛИТ работает высококвалифицированный научно-технический персонал, включающий 25 докторов и 60 кандидатов наук.

В течение 2003–2009 гг. лаборатория обеспечивала надежное функционирование и развитие сетевой информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ. Ключевыми компо-

нентами этой инфраструктуры являются телекоммуникационные каналы связи, локальная вычислительная сеть (ЛВС), центральный информационно-вычислительный комплекс (ЦИВК) и базовое программное обеспечение, объединяющее информационно-вычислительные ресурсы Института в единую среду.

Телекоммуникационные каналы связи ОИЯИ

Развитие и совершенствование внешних телекоммуникационных каналов ОИЯИ — это необходимый и естественный элемент общего развития высокоскоростной сетевой инфраструктуры в России, всестороннего совершенствования системы международных компьютерных каналов для науки и образования в России, а также каналов связи со странами-участницами ОИЯИ.

Запуск высокоскоростного масштабируемого канала связи ОИЯИ–Москва на базе технологии спектрального уплотнения DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) в 2009 г. явился итогом сложной и кропотливой работы, выполненной в тесном сотрудничестве со многими организациями и в первую очередь с ФГУП «Космическая связь» и ЦКС «Дубна». Существенные усилия в реализацию проекта внесли коллеги из компаний «Российский НИИ развития общественных сетей» (РосНИИРОС) и АНО «Центр взаимодействия компьютерных сетей «МСК-IX2». Ключевую роль в выборе сетевого оборудова-

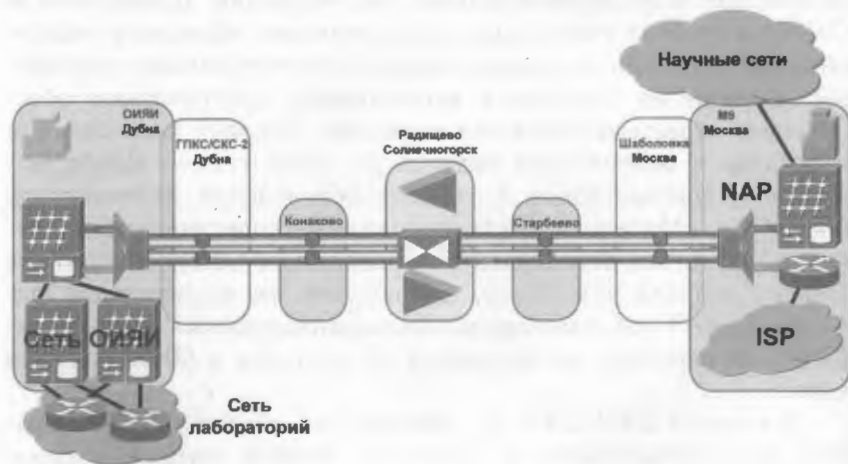


Рис. 1. Внешний канал связи ОИЯИ

ния на основе технологии DWDM и его запуске в эксплуатацию сыграла компания «JET Infosystems». Реализованная технология подразумевает спектральное разделение полосы пропускания волокна на несколько оптических каналов, что позволяет использовать много потоков в одном оптическом волокне, разделяя их по длине волны. Одной длине волны соответствует информационный поток в 10 Гбит/с. Оборудование, установленное на участке ОИЯИ–Москва (рис. 1), может поддерживать передачу данных примерно на 80 длинах волн, т. е. суммарная пропускная способность канала может составить 800 Гбит/с.

Локальная сеть ОИЯИ

В 2009 г. локальная сеть ОИЯИ объединяла 6785 компьютеров и вычислительных узлов (в 2003 г. — 4506). С ростом числа элементов сети стали проявляться трудности как в управлении, так и в обеспечении надежного ее функционирования. Чтобы разрешить возникшие проблемы, была проделана большая работа по построению надежной и защищенной высокоскоростной сети ОИЯИ; обеспечение ее бесперебойной работы стало одной из основных задач сетевой службы ЛИТ.

Магистральная сеть ЛВС ОИЯИ на основе технологии Gigabit Ethernet была введена в строй в 2004 г. В 2005 г. работа специалистов ЛИТ по созданию этой сети была отмечена первой премией ОИЯИ. В 2007 г. была проведена серьезная модернизация аппаратных средств магистральной сети ОИЯИ. На рис. 2 приведена схема локальной сети ОИЯИ (состояние на конец 2009 г.). В 2009 г. было зарегистрировано 3645 пользователей ЛВС ОИЯИ, более 1500 пользователей сервиса mail.jinp.ru и около 1300 пользователей удаленного доступа. Свыше 120 сетевых узлов мониторируется круглосуточно. Это шлюзы, сервера, опорные коммутаторы и т. п. Внедрение новых систем защиты от спама позволяет фиксировать до миллиона спам-сообщений в сутки на центральных почтовых серверах.

Одна из важных задач сетевой службы ЛИТ — это обеспечение безопасности локальной сети ОИЯИ. Для защиты вычислительных и информационных серверов, рабочих мест пользователей и активного сетевого оборудования используется подход Authentication, Authorization, Accounting (AAA). В течение 2008–2009 гг. система AAA была успешно интегрирована в разработанный в ЛИТ программный продукт IPDB — сете-

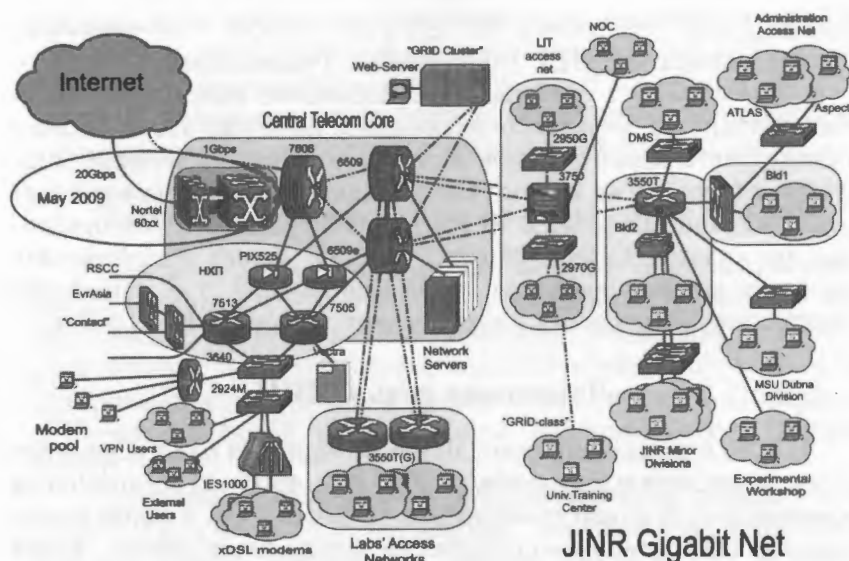


Рис. 2. Схема ЛВС ОИЯИ

вую базу данных с множественными функциями мониторинга и управления на основе IP-адресов. Программа IPDB стала основным инструментом для сетевых и системных администраторов. В ближайших планах — поэтапная модернизация локальной сети, связанная с переходом на скорость 10 Гбит/с.

Информационно-вычислительный комплекс ОИЯИ

Развитие Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ базируется на распределенной модели хранения и обработки данных. Такая модель согласуется с современной концепцией создания центров обработки информации для научных исследований, основанной на применении грид-технологий. Требования экспериментов на Большом адронном коллайдере (LHC) стимулируют развитие глобальной грид-инфраструктуры одновременно с ресурсными центрами в сотрудничающих организациях. Поскольку Россия и ОИЯИ внесли заметный интеллектуальный и материальный вклад в создание экспериментальных установок на LHC, то для обеспечения условий эффективной обработки и анализа данных необходимо было объединить усилия по развитию и сопровождению совместной грид-инфраструктуры.

С 2003 г. сотрудники ЛИТ участвуют в двух широкомаштабных международных проектах — WLCG (Worldwide LHC ComputinG project — проект по созданию, развитию и поддержке глобальной вычислительной инфраструктуры грид для экспериментов на LHC) и EGEE (Enabling Grids for E-sciencE project — проект по развертыванию грид для е-науки). В рамках участия ОИЯИ и российских институтов в проекте EGEE в 2003 г. была создана национальная федерация — российский грид для интенсивных операций с данными (Russian Data Intensive Grid — RDIG). В настоящее время инфраструктура RDIG объединяет 15 научных центров, включая ОИЯИ, с общим ресурсом в 5000 процессоров и 2000 Тбайт дискового пространства. На конец 2009 г. вычислительная среда ЦИВК ОИЯИ содержала примерно 1000 ядер, а дисковое пространство — 500 Тбайт.

В связи с приобретением в 2008–2009 гг. большого количества современных вычислительных узлов и дисковых серверов для хранения данных была проведена кардинальная перестройка структуры и организации ЦИВК ОИЯИ. Она коснулась практически всех базовых элементов ЦИВК: системы бесперебойного питания, оборудования и архитектуры локальной сети, системы хранения данных, системы вычислительных узлов и т. д. Наиболее трудной задачей была настройка всего программного комплекса, его компонентов и сервисов для того, чтобы комплекс ЦИВК работал с максимальной эффективностью. Эта сложнейшая задача была с блеском решена системными администраторами ЛИТ.

В процессе реализации проектов WLCG и EGEE в ОИЯИ была построена грид-среда, которая отвечает требованиям экспериментов на LHC. В 2009 г. сайт ОИЯИ имел лучшие показатели в RDIG, а среди всех центров инфраструктуры WLCG/EGEE занимал место в первой десятке.

Математическая и алгоритмическая поддержка исследований ОИЯИ

Развитие и применение современных методов вычислительной математики и вычислительной физики для решения специфических задач, возникающих в экспериментальных и теоретических исследованиях ОИЯИ в области физики частиц, ядерной физики и физики конденсированных сред, является

одной из главных задач ЛИТ. Эта тематика включает спектр исследований, нацеленных на разработку математического описания и алгоритмическую переформулировку физических моделей, обеспечивающих получение решения за реальное время, на создание методов и алгоритмов обработки и анализа экспериментальных данных, на моделирование физических процессов в экспериментальных установках, на развитие эффективных и надежных программных комплексов, адекватных современному аппаратному окружению. Начало исследованиям в области вычислительной математики было положено в работах проф. Е. П. Жидкова, а в области математической обработки экспериментальных данных — в работах Н. Н. Говоруна.

За годы существования лаборатории сложился уникальный коллектив физиков, математиков и программистов, способный решать сложнейшие задачи, возникающие в экспериментальных и теоретических работах, ведущихся в ОИЯИ, вычислительные проблемы которых требуют особого внимания и нестандартных подходов. Обработка и анализ данных, получаемых на современных экспериментальных установках, нуждаются в разработке новых стратегий и подходов, отвечающих таким особенностям, как дискретность изображений, сложность изучаемых структур, большой объем анализируемых данных, распознавание в условиях большой зашумленности исследуемых объектов и т. д.

В этом плане стратегически важным является направление по разработке новых математических методов для решения крупномасштабных задач в области физики частиц и релятивистской ядерной физики, создание программного обеспечения для обработки больших объемов распределенных данных и, конечно, создание промежуточного программного обеспечения для проведения эффективных высокопроизводительных вычислений. Для выполнения таких работ необходимо тесное сотрудничество с физическими группами, которые помогают корректно сформулировать математическую постановку задачи, провести ее детальную проработку вместе со специалистами в области вычислительной физики и выполнить совместный анализ получаемых результатов. Примером такого взаимодействия стали работы по созданию распределенной системы реального времени для сбора и обработки данных эксперимента ATLAS.

Другим перспективным проектом является дальнейшее развитие интерактивной системы HERWEB и ее интеграция в си-

стему распределенной обработки. В перспективных планах — развитие и использование HERWEB для задач эксперимента ATLAS, в том числе для исследования распадов хиггсов, редких распадов тау-лептона, задач SUSY и т. д.

В традиционном для ЛИТ направлении — разработке специализированного программного обеспечения для вновь создаваемых экспериментальных установок — проводились исследования по разработке эффективных методов анализа экспериментальных данных с использованием статистических методов, методов Монте-Карло, искусственных нейронных сетей, клеточных автоматов и др.

В качестве такого примера можно привести эксперимент CBM в GSI (Германия) на ускорительном комплексе FAIR, в подготовке которого участвует группа ЛИТ. В этом эксперименте большая множественность вторичных частиц и неоднородное магнитное поле значительно усложняют задачу извлечения и анализа редких процессов. Специалистами ЛИТ разработаны эффективные алгоритмы распознавания треков в детекторе переходного излучения (TRD), алгоритмы нахождения колец в детекторе черенковского излучения (RICH), развиты методы идентификации частиц с помощью детекторов TRD и RICH и т. д. Разработанные алгоритмы включены в программное обеспечение эксперимента CBM.

В 1960-е гг. в ЛВТА И. Н. Силиным был разработан метод минимизации квадратичных функционалов и создан соответствующий пакет FUMILI, который получил общественное признание и широкое применение в задачах обработки экспериментальных данных. В настоящее время в ЛИТ реализована «параллельная» версия этого пакета, с помощью которой можно проводить расчеты на фермах для параллельных вычислений.

Одним из основных подходов для численного исследования переходных и критических процессов в физических моделях сложных систем является обобщенный непрерывный аналог метода Ньютона (НАМН). Этот подход успешно развивается в лаборатории более тридцати лет. За это время НАМН превратился в мощный инструмент построения эффективных вычислительных схем для решения разнообразных нелинейных задач, возникающих в физике.

В течение последних лет в сотрудничестве с ЛЯР проводилась разработка и численное исследование моделей тепловых и термоупругих процессов во взаимодействиях тяжелых ионов

с материалами. Эти работы связаны с новым перспективным направлением — формированием наноструктур в материалах при облучении их тяжелыми ионами высоких энергий.

Проводились исследования в области компьютерной алгебры, в том числе сопровождение и развитие пакетов компьютерной алгебры Maple и Mathematica. Были разработаны новые алгоритмы для решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Дальнейшее развитие получили методы построения инволютивных базисов для приведения указанных систем к каноническому виду. Совместно с Техническим университетом г. Бреста (Белоруссия) и Университетом прикладных наук г. Вайнгартен (Германия) в рамках пакета Mathematica разработана программа для моделирования квантовых вычислений.

Особое место в проблематике лаборатории занимают вопросы, связанные с исследованиями в области нанотехнологий. Эта новая для ЛИТ область включает широкий спектр задач, которые требуют развития новых теоретических и вычислительных подходов. В частности, разработан алгоритмический подход, основанный на дискретном групповом анализе и реализованный в виде программ на языке C, к моделированию дискретных систем с нетривиальными симметриями. Этот подход применим, например, для моделирования таких наноструктур, как графены и фуллерены, а также ряда других важных угле(водо)родных молекул.

Следует отметить и работы, проводимые совместно с ЛНФ, по моделированию структуры и свойств органических и биологических материалов в рамках экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов.

Новым направлением исследований лаборатории в последние годы стали работы в области вычислительной биофизики, биоинформатики и биосенсорных (нано)технологий. Работы ведутся в сотрудничестве с Институтом белка РАН и Институтом теоретической и экспериментальной биофизики РАН (Пушино). В рамках проводимых исследований разработан новый программный продукт для расчета, построения и анализа карт рельефа и функциональной окраски поверхности спиральных молекул ДНК, РНК, белков и их комплексов на основе их пространственных структур высокого атомного разрешения. Разработан метод вычислений электростатических потенциалов биополимеров и надмолекулярных структур, основанный на решении нелинейного уравнения Пуассона–Больцмана с помощью

высокоэффективного многосеточного конечно-разностного метода, пригодного для расчетов потенциалов протяженных квазиодномерных (длинных участков двуспиральной ДНК) и квазидвумерных (биологических мембран и нанослоев) структур. В рамках задачи по проектированию биосенсоров создан существенный задел по моделированию взаимодействий ферментов с полиэлектролитами и белков в нанослоях. Разработана концепция специализированной экспертной системы, необходимой при проектировании биосенсоров с заданными свойствами.

В новом семилетнем плане ОИЯИ сформулирована задача радикального улучшения телекоммуникационных каналов связи со странами-участницами ОИЯИ и формирования единой грид-инфраструктуры стран-участниц и ассоциированных членов ОИЯИ. Эта работа потребует больших усилий не только со стороны ЛИТ, но и на «местах» — в странах-участницах. Для реализации указанной задачи разработана концепция развития совместной сети информационно-вычислительной среды, включающей три базовых уровня — сетевой, ресурсный и прикладной. Такая среда позволит всем участвующим сторонам эффективно использовать грид-инфраструктуру в решении многих фундаментальных и прикладных задач, успешная реализация которых невозможна без применения высокопроизводительных вычислений, новых подходов в проведении распределенных и параллельных расчетов и использования распределенных систем хранения данных.

ЛАБОРАТОРИЯ РАДИАЦИОННОЙ БИОЛОГИИ

В июне 2005 г. решением дирекции, Ученого совета и Комитета полномочных представителей ОИЯИ на базе Отделения радиационных и радиобиологических исследований была создана Лаборатория радиационной биологии (ЛРБ). Это событие стало закономерным результатом длинного пути формирования одного из разделов фундаментальной биологии и признанием большого вклада специалистов-радиобиологов ОИЯИ в решение важных научных задач. ОИЯИ предоставляет уникальные возможности для радиобиологических исследований, поскольку обладает широчайшим спектром самых разнообразных источников ионизирующих излучений, высококвалифицированными кадрами физиков и инженеров, необходимой аппаратурой. Фактически ни в одной стране-участнице ОИЯИ нет более удобного и физически оснащенного для проведения радиобиологических исследований научного центра. Поэтому в области изучения биологических эффектов ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками Институт с полным правом может претендовать на лидерство в данной научной области среди других научных организаций России и стран-участниц ОИЯИ.

Заряженные частицы высоких энергий являются эффективным инструментом для выяснения фундаментальных вопросов радиационной биологии. На ускорителях ОИЯИ проводятся фундаментальные исследования закономерностей и механизмов биологического действия тяжелых заряженных частиц различных энергий. Они направлены на изучение специфики повреждающего действия на ДНК клеток, выяснение механизмов летальных и мутагенных эффектов облучения. С использованием ускоренных тяжелых ионов была решена одна из центральных задач в радиационной биологии — проблема относительной биологической эффективности (ОБЭ) излучений, выяснены механизмы мутационного процесса у клеток про- и эукариот,

выявлен характер повреждений ДНК клеток и закономерности их репарации.

Первые радиобиологические эксперименты в ОИЯИ, инициированные специалистами Института гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН СССР, были начаты в далеком 1959 г. на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем. С началом космической эры и освоения околоземного космического пространства возникла острая необходимость оценки опасности биологического действия космических излучений и прежде всего протонов высоких энергий. Решить эту задачу стало возможным в наземных условиях, облучая биологические объекты на синхроциклотроне ЛЯП, генерирующем пучки протонов с энергией до 660 МэВ. Целью данных работ являлось установление величины ОБЭ протонов различных энергий, т. е. насколько более (или менее) эффективны высокоэнергетичные протоны по сравнению с рентгеновским или γ -излучением при действии на живые организмы. На этом ускорителе сотрудники созданного в 1963 г. по инициативе академиков С. П. Королева и Н. М. Сисакяна Института медико-биологических проблем МЗ СССР проводили эксперименты по облучению мелких и крупных лабораторных животных (крыс, мышей, собак и даже обезьян), растительных объектов, а также культивируемых клеток млекопитающих и человека протонами с энергиями от 25 до 645 МэВ. Помимо специалистов в области космической радиобиологии на базе Объединенного института работала группа радиобиологов — сотрудников Всесоюзного онкологического научного центра (ВОНЦ) АМН СССР. В 1966 г. по инициативе В. П. Джеллепова на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ были начаты работы по созданию первого в СССР протонного медицинского пучка для облучения онкологических больных.

Биологические исследования в ОИЯИ с конца 1978 г. начали успешно развиваться специалистами-биологами, работающими непосредственно в ОИЯИ, в созданном секторе биологических исследований Лаборатории ядерных проблем. Инициатором создания сектора биологических исследований являлся доктор физико-математических наук В. И. Данилов — руководитель отдела синхроциклотрона ЛЯП. Возглавил сектор профессор В. И. Корогодин. Основной задачей сектора являлось изучение влияния переменных магнитных полей на растения, бактерии и фаги, лимфоциты крови человека, нервные клетки (на модели нейронов моллюсков). В секторе предполагалось начать прове-

дение и радиобиологических исследований с ускоренными тяжелыми ионами. Для организации работ в этом направлении в начале 1980 г. был приглашен старший научный сотрудник Института медико-биологических проблем МЗ СССР Е. А. Красавин. Основной задачей этих работ являлось выяснение механизмов, определяющих различия в биологической эффективности ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками при действии на живые клетки. В экспериментах, выполненных на ускорителях тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций, было установлено, что биологическая эффективность ионизирующих излучений разного качества по их летальному действию на клетки про- и эукариот определяется двумя факторами различной природы: физическими характеристиками излучений и биологическими свойствами самих клеток — их способностью восстанавливаться от лучевых повреждений. Главный вывод, сделанный в результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований, на основе чего была решена важнейшая проблема радиобиологии — проблема ОБЭ, заключался в том, что способность к репарации повреждений ДНК зависит от линейной передачи энергии (ЛПЭ), так как характер летальных повреждений также изменяется и является зависимым от ЛПЭ.

Расширение спектра исследований в области радиобиологии на базовых установках ОИЯИ требовало структурной реорганизации подразделений, осуществляющих эти исследования. И в 1988 г. по инициативе профессора Е. А. Красавина сектор биологических исследований был преобразован в отдел биофизики ЛЯП. Одним из приоритетных направлений работы отдела биофизики в этот период явилось изучение мутагенного действия излучений на клетки высших эукариот, в том числе человека. Как было выяснено, ионизирующая радиация индуцирует наиболее широкий спектр мутационной изменчивости по сравнению с другими мутагенами. Она увеличивает частоту хромосомных аберраций, генных и геномных мутаций.

После успешного проведения работ по ускорению тяжелых ядер до релятивистских энергий на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий и начала физических экспериментов на нуклотроне были спланированы радиобиологические эксперименты на пучках высокоэнергетичных тяжелых ионов. Проведение таких работ требовало специальных спектрометрических и дозиметрических исследований пучков релятивистских тяже-

лых ядер. Большим опытом в данной области обладали сотрудники Отдела радиационной безопасности и радиационных исследований (ОРБиРИ) ОИЯИ. Дирекция ОИЯИ поддержала инициативу объединения отдела биофизики ЛЯП и ОРБиРИ в новое структурное подразделение Института — Отделение радиационных и радиобиологических исследований (ОРРИ), которое было создано в 1995 г.

Основной задачей ОРРИ являлось проведение радиационных и радиобиологических исследований в следующих главных направлениях: изучение взаимодействия излучений с веществом и разработка методов радиационного мониторинга; изучение генетического действия ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками; исследование радиационной обстановки в подразделениях Института; разработка и участие в создании систем радиационного контроля на вновь создаваемых и реконструируемых (модернизируемых) ядерно- и радиационно-опасных установках и участках ОИЯИ.

В области радиобиологии было продолжено изучение мутагенного действия излучений широкого диапазона ЛПЭ. В экспериментах на бактериальных клетках были начаты исследования закономерностей и механизмов индукции генных и структурных (делеционных) мутаций ускоренными тяжелыми ионами. В экспериментах на различных видах и штаммах бактерий было установлено, что биологическая эффективность ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками на клетки с различным генотипом, оцениваемая по различным критериям (летальному действию, индукции генных и делеционных мутаций, точной эксцизии транспозонов), детерминирована особенностями передачи энергии излучений, влияющими на характер индуцируемых повреждений ДНК, и эффективностью работы индуцибельных и конститутивных систем репарации клеток. В экспериментах на дрожжевых клетках были исследованы механизмы адаптивного и индуцированного мутагенеза, показана связь механизмов контроля клеточного цикла и механизма репарации повреждений ДНК, исследованы механизмы генетического контроля стабильности геномов, хромосомного и митохондриального. Широкомасштабные цитогенетические исследования были развернуты на клетках млекопитающих и человека. Основные направления исследований в этой области — продолжение изучения закономерностей индукции мутации в HPRT-гене клеток млекопитающих при действии ускоренных тяжелых

ионов, закономерностей индукции разными типами излучений нестабильных и стабильных хромосомных aberrаций в клетках человека, исследование цитогенетических эффектов малых доз облучения.

После создания в ОИЯИ Лаборатории радиационной биологии биологические исследования на базовых установках Института существенно расширились, укрепились и развились связи с научными учреждениями в странах-участницах. Главные направления работ в ЛРБ, как и ранее, были связаны с выяснением механизмов действия ускоренных многозарядных ионов на генетические структуры. Наряду с этим, под руководством академика РАН М. А. Островского, были начаты исследования, касающиеся установления закономерностей действия такого рода излучений на хрусталик и сетчатку глаза, влияния тяжелых ионов высоких энергий на биологические мембраны. Были широко развернуты работы по моделированию структуры биологически важных макромолекул методами молекулярной динамики, математическому моделированию радиационно-индуцированных эффектов на основе генетических сетей.

В настоящее время ЛРБ включает два отдела: отдел радиационной биологии и отдел радиационных исследований, а также три сектора: сектор молекулярной динамики, сектор фоторадиобиологии и сектор космической радиобиологии.

В программе исследований на период 2010–2016 гг. работы в ЛРБ будут осуществляться, во-первых, в направлении изучения механизмов генетического действия ускоренных многозарядных ионов. Они связаны с установлением закономерностей и механизмов образования и репарации повреждений ДНК в клетках человека; исследованием действия тяжелых ионов на хромосомный аппарат клеток; изучением мутагенного действия излучений широкого диапазона ЛПЭ на клетки различных организмов.

Во-вторых, будет исследоваться влияние ускоренных тяжелых частиц на структуры глаза — хрусталик и сетчатку. Основной целью предполагаемого исследования будет моделирование в условиях *in vivo* и *in vitro* молекулярных механизмов возникновения помутнений в хрусталике (катаракты) человека, подвергнутого облучению тяжелыми ионами.

В-третьих, предполагается проведение исследований закономерностей биологического действия ускоренных тяжелых ионов на центральную нервную систему. Основной задачей в этой

области будет изучение морфологических, цитологических и молекулярно-физиологических нарушений в структурах центральной нервной системы, модификация поведенческих функций у облученных животных.

Далее будет проводиться математическое моделирование биофизических систем. Планируется разработка математических моделей индуцированного мутационного процесса у клеток про- и эукариот при действии излучений с разными физическими характеристиками. Методами молекулярной динамики планируется выполнение моделирования хромофора родопсина, 11-*цис*-ретинала, и окружающих аминокислотных остатков в хромофорном участке при физиологической регенерации зрительного пигмента.

Наконец, радиационные исследования будут ориентированы главным образом на развитие методов расчета транспорта излучений в веществе применительно к решению биофизических задач. Для решения практических задач будут проводиться расчеты полей излучения внутри космических аппаратов и жилых модулей, распределений ЛПЭ первичного и вторичного излучений в органах тела человека на борту космических аппаратов, оценка дозовой нагрузки космонавтов и риска соматических и генетических последствий облучения на основе существующих методик. Другим традиционным приложением расчетов транспорта излучений в веществе будет физика защиты. Планируется продолжить разработку методов расчета защиты ускорителей в условиях сложной геометрии. Важным направлением радиационных исследований является физическая поддержка программы радиобиологических экспериментов с излучениями с различными физическими характеристиками, в первую очередь с пучками тяжелых ядер нуклотрона ЛФВЭ и циклотронов ЛЯР.

Выполненные радиобиологами ОИЯИ в предыдущие годы разработки оказались исключительно плодотворными не только при решении фундаментальных задач, они имеют весьма важную практическую направленность, поскольку последние десятилетия выдвинули ряд актуальных практических задач, решение которых требует детального изучения механизмов биологического действия тяжелых ионов высоких энергий. В первую очередь они касаются использования пучков заряженных частиц в терапии рака. Оптимальное распределение поглощенной дозы излучения в опухоли при облучении тяжелыми ионами

делает этот вид лучевого воздействия весьма перспективным в клинике лучевой терапии. Важным остается решение вопросов нормирования лучевых нагрузок на персонал, работающий в смешанных полях ионизирующих излучений.

К числу актуальных задач, связанных с изучением механизмов биологического действия тяжелых ионов высоких энергий, относятся вопросы космической радиобиологии. Увеличение дальности и длительности космических полетов выдвинули на первый план проблему оценки опасности биологического действия высокоэнергетичных тяжелых ионов и разработку мер радиационной безопасности экипажей кораблей. В ходе реализации межпланетных пилотируемых полетов экипажи будут подвергаться воздействию тяжелых ядер высоких энергий, исходящих из глубин Галактики. Энергетический и зарядовый спектры галактических ядер весьма широки, и такие частицы с высокой эффективностью могут индуцировать неблагоприятные последствия для экипажей космических кораблей: различного рода мутации генов, возникновение раковых заболеваний, нарушения структур глаза (развитие катаракты и повреждения сетчатки), повреждения центральной нервной системы и т. д. Моделирование биологического действия космических видов радиации и особенно тяжелых ядер на ускорителях тяжелых ионов высоких энергий, как можно надеяться, позволит решить проблему «радиационного барьера» при длительных космических полетах вне магнитосферы Земли.

По инициативе профессора Е. А. Красавина и дирекции ОИЯИ в 1998 г. была создана кафедра биофизики в Международном университете природы, общества и человека «Дубна». Обучение на кафедре осуществляется в рамках специальности «Радиационная безопасность человека и окружающей среды» со специализацией «Радиационная биофизика». Студенты кафедры принимают активное участие в научно-исследовательской работе по всем направлениям, проводимым в лаборатории. Результаты исследований, выполняемых студентами, докладываются ими на семинарах, конференциях и школах молодых ученых и студентов, проходящих в России, США, Германии, Чехии, Словакии, Польше и других странах.

За время работы кафедры успешно закончили обучение и получили диплом инженера-физика 50 выпускников, многие из которых нашли применение своим знаниям в Лаборатории радиационной биологии. Благодаря этому более тридцати процентов

персонала ЛРБ составляют сотрудники, возраст которых менее 30 лет. Кроме того, лучшие выпускники кафедры продолжают обучение в аспирантуре кафедры по специальности «Радиобиология», что позволит им стать высококвалифицированными специалистами.

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н. Н. БОГОЛЮБОВА — РОВЕСНИЦА ОИЯИ

Создание лаборатории, формирование научных направлений

26 марта 1956 г. на совещании, проходившем в конференц-зале Президиума АН СССР в Москве, было принято решение об организации ОИЯИ. В нем было записано, что в структуру ОИЯИ должна входить Лаборатория теоретической физики (ЛТФ) с расчетным отделом и электронно-вычислительными машинами, и предусматривалось сооружение для нее отдельного здания. Эту дату можно назвать днем рождения ЛТФ. Однако до реального возникновения лаборатории и налаженной, хорошо организованной научной работы прошло еще немало времени. 25 мая 1956 г. за подписью директора ОИЯИ Д. И. Блохинцева вышел приказ № 5, в котором говорилось: «До утверждения новой структуры института возложить на академика Н. Н. Боголюбова (начальника сектора № 3 теоретической лаборатории) выполнение обязанностей директора теоретической лаборатории Объединенного института»¹⁾. Два дня спустя приказом № 7 в ЛТФ были зачислены первые сотрудники Б. В. Медведев, М. К. Поливанов и Д. В. Ширков, составившие основу группы Н. Н. Боголюбова. Еще до 26 марта 1956 г. в Институте ядерных проблем АН СССР и Электрофизической лаборатории АН СССР, на базе которых возник ОИЯИ, существовали теоретические группы Я. А. Смородинского и М. А. Маркова. В соответствии с приказами по ОИЯИ от 05.06.1956 г. № 13 и от 14.07.1956 г. № 27 они были переведены в Лабораторию теоретической физики и, вместе с группой Н. Н. Боголюбова, составили ядро ЛТФ.

С 24 по 26 сентября 1956 г. проходила первая сессия Ученого совета ОИЯИ. Вице-директор ОИЯИ проф. В. Вотруба докла-

¹⁾ Здесь и далее тексты цитируются по архивным документам ОИЯИ.

дывал о планах развития ЛТФ (академик Н. Н. Боголюбов в дни заседаний совета находился в США на научной конференции). Предполагалось создание шести теоретических и трех расчетных секторов. Их состав и тематика не были окончательными и ставились в зависимость от научных интересов сотрудников, прибывающих в Дубну из стран-участниц Института. Касаясь направлений теоретических исследований, Вотруба заявил: «Тематика докладов теоретической секции Рочестерской конференции, состоявшейся в этом году, эквивалентна тематике ЛТФ (дисперсионные соотношения, фундаментальные основы теории поля, феноменология взаимодействий элементарных частиц, построение моделей взаимодействия, свойства гравитационного поля, варианты нелинейных и нелокальных теорий, восстановление элементов матрицы рассеяния, поляризационные эффекты при рассеянии электронов и фотонов на протонах)...» В дискуссии по докладу Вотрубы на вопрос Л. Инфельда о том, насколько теоретики будут связаны с экспериментальными лабораториями, Д. И. Блохинцев ответил, что группы М. А. Маркова и Н. Н. Боголюбова будут связаны с лабораторией В. И. Векслера, а группа Я. А. Смородинского будет связана с работами, проводимыми в ЛЯП. На этой же сессии Ученого совета ОИЯИ был утвержден состав Ученого совета ЛТФ. С 1 октября 1956 г. в ЛТФ было окончательно введено штатное расписание. Приказом от 11 октября 1956 г. № 243 утверждено 110 штатных единиц, 9 секторов. К ноябрю определилось руководство ЛТФ: директор — академик Н. Н. Боголюбов, зам. директора — кандидат физико-математических наук А. А. Логунов (ныне академик РАН), ученый секретарь — П. С. Исаев (ныне профессор, доктор физико-математических наук).

Назначение Н. Н. Боголюбова на должность первого директора ЛТФ было «...не просто удачным, а уникально удачным». К началу 1950-х гг. он уже был автором новых асимптотических методов нелинейной механики, микрофизической теории сверхтекучести, нового метода построения уравнений статистической физики. В квантовой теории поля (КТП) в первой половине 1950-х гг. он получил два крупных результата: построил первую аксиоматическую теорию матрицы рассеяния, основанную на его знаменитом дифференциальном условии причинности, и математически строго обосновал процедуру перенормировок. К середине 1950-х гг. относятся еще более яркие результаты. Он создал метод ренормализационной группы в КТП, доказал

дисперсионные соотношения, развил микроскопическую теорию сверхпроводимости.

На рубеже 1950-х – 1960-х гг. Н. Н. Боголюбов создал новый метод квазисредних для описания динамических систем со спонтанно нарушенной симметрией. Этот формализм и доказанная в его рамках теорема о дальнедействии коллективных мод нашли разнообразные применения в статистической физике, а также составили основу так называемого механизма Хиггса и теоремы Голдстоуна в физике частиц.

Все эти достижения Н. Н. Боголюбова фактически определили научные направления ЛТФ на полтора-два десятилетия вперед, вооружили теоретиков ЛТФ методами расчета физических явлений в области физики элементарных частиц, теории ядра и физики конденсированных сред и вывели лабораторию на ведущие позиции в мировой теоретической физике. Следует особенно подчеркнуть, что работы Н. Н. Боголюбова этого периода оказали огромное влияние на развитие мировой теоретической физики, произвели глубокий поворот в сторону приоритета строгих математических методов рассмотрения физических явлений. Работы Н. Н. Боголюбова вывели теоретическую физику элементарных частиц и атомного ядра на новый уровень высокой математической культуры и строгости теоретического мышления.

На пятой сессии Ученого совета, проходившей 14–16 января 1959 г., в своем отчетном докладе Н. Н. Боголюбов сказал: «За отчетный период сотрудники ЛТФ опубликовали в печати или в виде препринтов 103 научных работы, т. е. в полтора раза больше, чем в 1957 г., при одном и том же количестве научных сотрудников...» Было отмечено возросшее количество совместных работ теоретиков из СССР с теоретиками из других стран-участниц ОИЯИ. Сотрудники ЛТФ приняли активное участие в двух Женевских конференциях, а также в конференциях, проводившихся в СССР — в Москве, Ленинграде, Тбилиси, Ужгороде и Ереване. Работала машина «Урал», была заказана машина «Киев», шла речь о приобретении новых машин М-20 и БЭСМ, А. А. Логунов добивался быстрее окончания работ по строительству. В апреле 1959 г. было введено в эксплуатацию новое здание ЛТФ.

Лаборатория теоретической физики стала одной из ведущих лабораторий Института и вошла в число ведущих теоретических центров мира. Вначале исследования были ориентированы

почти исключительно на теорию элементарных частиц, а также теорию сверхпроводимости. Однако спектр направлений постепенно расширялся. Существенный импульс дала работа Боголюбова «О сверхтекучести ядерной материи» (1958). Она открыла возможность применения идеи парных корреляций, сыгравших решающую роль в создании микроскопических теорий сверхтекучести и сверхпроводимости, к изучению структуры атомного ядра. Такие исследования начались в ЛТФ в начале 1960-х гг. Их возглавил Вадим Георгиевич Соловьев. В дальнейшем тематика исследований расширялась согласно мировым тенденциям в теоретической физике и потребностям экспериментальных программ ОИЯИ и других крупных исследовательских центров в области физики элементарных частиц, ядерной физики, физики твердого тела и конденсированных состояний. Учеными ЛТФ были получены фундаментальные результаты в самых различных областях теоретической физики: теория слабых взаимодействий и физика нейтрино; физика сильных взаимодействий и спектроскопия адронов; многопетлевые вычисления в калибровочных теориях поля; построение неполиномиальных, нелокальных и некоммутативных моделей квантовой теории поля; непerturbативные методы и методы ренормгруппы; теория ядерных реакций; структура тяжелых ядер и физика тяжелых ионов; теория малотельных систем; релятивистская ядерная физика; сверхпроводимость и высокотемпературная сверхпроводимость; новые материалы, статистическая физика; кинетическая теория; динамические системы; теория гравитации; теория струн; суперсимметрия; квантовые группы и интегрируемые системы и многие другие области теоретической физики.

Переломный в истории всех стран-участниц ОИЯИ рубеж начала 1990-х гг. лаборатория прошла практически не снижая темпа работы и высокого качества исследований. ЛТФ почти не испытала кадровых потерь в течение 1990-х гг., полноценная научная работа продолжилась уже в сильно изменившемся в политическом отношении мире.

ЛТФ сегодня

Основанная выдающимися теоретиками прошлого столетия Д. И. Блохинцевым и Н. Н. Боголюбовым, сегодня ЛТФ является центром теоретических исследований в области физики частиц, ядерной физики и статистической физики, математи-

ческой физики. В лаборатории накоплен уникальный опыт исследований в этих ключевых областях фундаментальной теоретической физики, а ведущиеся исследования носят междисциплинарный характер, они непосредственно интегрированы в международные проекты с участием ученых из основных мировых исследовательских центров и тесно скоординированы с экспериментальными программами ОИЯИ. Лаборатория представляет собою большой исследовательский институт мирового класса, насчитывающий около 180 научных сотрудников, в том числе более 60 молодых ученых и аспирантов в возрасте до 35 лет. Ученые многих стран охотно приезжают в ЛТФ на сроки от одной-двух недель до нескольких лет. Их привлекают творческая обстановка и условия работы, удовлетворяющие мировым стандартам. Важную роль здесь играет высокопроизводительное компьютерное обеспечение лаборатории.

Большое внимание уделяется укреплению международных контактов. Ежегодно лаборатория проводит не менее 10 конференций, школ и рабочих совещаний; ежегодное число визитеров из стран-участниц и других стран в ЛТФ составляет около сотни ученых. У лаборатории имеются традиционные связи с ведущими теоретическими институтами и лабораториями стран-участниц ОИЯИ и многих других стран. География научных связей исключительно широка. Успешно выполняются совместные научные программы с Германией, Италией, Францией, Болгарией, Польшей, Румынией, Чехией, Словакией, ЦЕРНом, ЮАР, АРЕ, Республикой Корея. Научно-исследовательская деятельность теоретиков поддерживается национальными и международными фондами: РФФИ, INTAS, ЮНЕСКО, BMBF, DFG, CNRS и др.

Исследования, проводимые в последнее время в ЛТФ им. Н. Н. Боголюбова, охватывают широкий круг проблем квантовой теории поля и теории элементарных частиц, математической физики, теории атомного ядра и теории конденсированных сред. В области современной математической физики это — квантовые группы и интегрируемые системы, модели суперсимметрии, квантовая гравитация, космология и струны. В области «поля и частицы» это — пертурбативные вычисления и различные непертурбативные методы в калибровочных теориях, Стандартная модель и ее расширения, квантовая хромодинамика (КХД), в том числе спиновые эффекты, правила сумм и структура вакуума; спектроскопия легких адронов, тяжелые кварки

и *B*-физика; феноменология процессов при высоких энергиях. В области теории атомного ядра это — структура ядра в экстремальных условиях; динамика и структурные эффекты в ядерных и мезоскопических системах; физика малочастичных систем; релятивистская ядерная динамика. В направлении теории конденсированных сред это — сильнокоррелированные системы; динамические системы — хаос, интегрируемость, самоорганизация; неупорядоченные структуры — стекла, топологические дефекты, наноструктура и джозефсоновские контакты; мезоскопические и когерентные явления в квантовых системах.

За последние 5 лет сотрудниками ЛТФ опубликовано более 2200 работ, из которых около 1350 — монографии и статьи в ведущих международных реферируемых журналах. Каждый год публикуется 4–5 статей в одном из самых престижных журналов — «Physical Review Letters». Это само по себе является значимым результатом, показывающим, что работа ученых ЛТФ соответствует самым строгим общемировым стандартам. Большая часть работ была выполнена в сотрудничестве с учеными из стран-участниц ОИЯИ, Германии, Италии, Франции, Испании, Китайской Народной Республики, Республики Кореи и других стран.

В ЛТФ было проведено более 80 международных научных конференций, совещаний и школ для молодых ученых, в том числе две очень важные для ОИЯИ конференции, посвященные 100-летию юбилеям Н. Н. Боголюбова (2009) и Д. И. Блохинцева (2008).

Роль ЛТФ как международного образовательного центра для молодых ученых и студентов значительно усилилась; появились новые возможности привлечения молодежи к работе в ЛТФ. С 2004 г. в лаборатории работает постоянно действующая школа для молодых ученых (DIAS-TH). Были организованы две новые кафедры со специализацией в области теоретической физики (кафедра Международного университета «Дубна» и кафедра МФТИ) и кафедра нанотехнологий и новых материалов университета «Дубна».

В ЛТФ установлено восемь именных стипендий, направленных на поддержку наиболее активно работающих молодых сотрудников. В последние годы систематическая работа по привлечению в ЛТФ молодых ученых и аспирантов из стран-участниц привела к обнадеживающей тенденции увеличения числа молодых сотрудников.

Перспективы

В ближайшие несколько лет исследования по ряду направлений в указанных выше фундаментальных областях теоретической физики будут активизированы. Планируется усиление работы по ядерной астрофизике и астрофизическим аспектам физики элементарных частиц, физике плотной и горячей адронной материи (в связи с экспериментальной программой NICA/MPD, ведущимися и планируемыми экспериментами на RHIC, LHC и FAIR). Исследования в теории конденсированных сред будут координироваться с современными потребностями нанотехнологий. Сохранение высокого теоретического и математического уровня работы, фундаментальности исследований — это бесспорные условия успешного развития лаборатории. Важными составляющими благополучной реализации планов должны стать концентрация на главных направлениях работы, обеспечение теоретического сопровождения экспериментальных программ ОИЯИ, участие вместе с экспериментальными лабораториями в инновационной деятельности. Совершенствование научно-образовательной программы ЛТФ в координации с работой базовых кафедр и УИЦ, создание комфортных условий для молодежи, отбор и воспитание молодых лидеров будут принципиальными приоритетами в кадровой работе лаборатории.

Квантовая теория поля и физика элементарных частиц. Направление теоретических исследований по физике элементарных частиц, проводимых в ОИЯИ, будет определяться физическими программами международных экспериментальных коллабораций (LHC, RHIC, FAIR, K2K и т. д.) и базовых установок ОИЯИ, в первую очередь проекта NICA/MPD. В таблице проиллюстрировано соответствие между планируемыми для исследования темами теоретической физики элементарных частиц и существующими или будущими экспериментами. Все указанные в таблице темы будут затронуты в планируемых исследованиях в той или иной степени, в центре внимания будет прецизионная проверка Стандартной модели, новая физика за пределами Стандартной модели, структура адронов и спиновая физика, фазовые переходы в горячей и плотной адронной материи и смешанная кварк-адронная фаза, физика тяжелых ароматов и адронная спектроскопия, физика нейтрино, проблема темной материи и астрофизические аспекты физики элементарных частиц.

Тематика	Эксперименты
Суперсимметричные партнеры, хиггсы, сильная гравитация	CMS, ATLAS, AMS D0, CDF
Физика нейтрино	NOMAD, NA-61, OPERA, K2K, SciBooNE
КХД-феноменология и партонные распределения в широком диапазоне энергий	ATLAS, CMS, D0, CDF, JLab
Физика тяжелых кварков	CMS, ATLAS, D0, CDF, LHC-B
Высокие энергии, малые x , КХД-дифракция	CMS, ATLAS, D0, CDF
Спиновая структура адронов, новые партонные функции распределения и фрагментации, спиновые явления в КХД	COMPASS, NOMAD, STAR, HERMES, CMS, NICA/SPD, JLab, BRAHMS, PANDA-PAX
Сильносвязанная адронная материя, смешанная фаза, спиновые корреляции в среде	ALICE, STAR, HADES, NICA/MPD, NA-61, CBM
Спектроскопия, редкие процессы	NICA, BES-III, PANDA, KEK, KLOE, VASA
Многочварковые состояния и кумулятивные процессы	NICA/MPD, SPHERA, NIS-GIBS, MARUSYA

Разработка новых теоретических методов и моделей является решающей предпосылкой успешной реализации программы исследований по физике элементарных частиц. Ренормгруппа и родственные этому методу подходы (функциональная ренормгруппа, уравнения Дайсона–Швингера), многопетлевые вычисления в теории возмущений (КХД, Стандартная модель, минимальное суперсимметричное расширение Стандартной модели), решеточные вычисления в калибровочных теориях, правила сумм КХД, партонные функции распределения, киральная теория возмущений, модели конфайнмента и адронизации в КХД, термодинамика горячей и плотной адронной материи, теории в высших размерностях и методы теории струн будут в центре программы исследований по теории поля и физике элементарных частиц.

Теория ядра. Основным направлением исследований в области ядерной физики низких энергий на ближайшее десятилетие будет изучение свойств ядер, далеких от долины стабильности, т. е. ядер с аномально большой разницей чисел протонов

и нейтронов. Все начатые и только обсуждаемые проекты крупных экспериментальных установок в Европе, США и Японии нацелены на решение этой задачи. Эти исследования являются и составной частью проекта DRIBs.

Соответственно, будут развиваться и теоретические исследования в этой области науки. Будет продолжена разработка микроскопических моделей ядерной структуры с самосогласованием, использующих эффективные взаимодействия, зависящие от плотности ядра, а впоследствии — взаимодействия конечного радиуса. Кроме того, эти модели будут использовать приближения, выходящие за рамки приближений среднего поля и случайной фазы. На первом этапе будет учтено взаимодействие со сложными конфигурациями и исследованы магнитные и зарядово-обменные резонансы в средних и тяжелых ядрах. Для количественного описания спектров так называемых мягких ядер будут разрабатываться нелинейные приближения.

Важной областью исследований для указанных моделей будет структура очень тяжелых, в том числе и сверхтяжелых, атомных ядер. Эти исследования только начинают разворачиваться, они исключительно важны для получения информации о высоколежащих ядерных оболочках и, тем самым, для определения границ «сверхтяжелого» «острова стабильности». Будет продолжено изучение кластерных эффектов в структуре тяжелых ядер.

Усовершенствованные модели ядерной структуры будут использованы для предсказания скоростей слабых процессов в звездном веществе на «предвзрывной» стадии эволюции звезды, в расчетах относительной распространенности химических элементов и других астрофизических задачах. Методами теории малого числа частиц будет изучено влияние 3- и 4-частичных эффектов на скорости реакций с участием легких ядер и процессы с рождением нейтрино на Солнце.

Продолжится совершенствование полупеномонологических подходов в теории реакций, основанных на модели двойной ядерной системы или высокоэнергетическом приближении в теории ядро-ядерных столкновений, дающих наглядную интерпретацию новых экспериментальных данных и позволяющих качественно оценить результаты будущих экспериментов.

Наряду с этим будут создаваться новые строгие подходы в теории ядерных реакций в первую очередь для процессов, к которым применимы методы теории малочастичных систем.

Например, для анализа реакций с участием легких гало-ядер будет развиваться четырехтельный подход. Будут исследоваться столкновения ультрахолодных атомов и молекул в оптических и магнитных ловушках, а на более позднем этапе — реакции слияния в пересекающихся низкоэнергетических пучках легких ядер, каналированных в кристаллических структурах.

Теоретические исследования процессов взаимодействия тяжелых ионов при промежуточных и высоких энергиях в значительной мере будут ориентированы на проект NICA/MPD. Их главной целью будет изучение механизмов взаимодействия и динамики возможных фазовых переходов в ядро-ядерных столкновениях, эффектов, влияющих на возникновение смешанной кварк-адронной фазы, и сигналов ее образования. Для описания уравнения состояния ядерного вещества дальнейшее развитие получит релятивистская модель среднего поля с последовательным учетом изменения свойств адронов в горячей и плотной среде, а также гидродинамическая модель ядро-ядерных столкновений при релятивистских энергиях.

Для анализа процессов взаимодействия лептонов и адронов с легчайшими ядрами и извлечения из экспериментальных данных, полученных в ОИЯИ, GSI, JLab, J-PARC, информации о структурных функциях нуклонов и ядер будет продолжена разработка подхода Бете-Солпитера с сепарабельным взаимодействием. Кроме того, будут развиваться новые модели и методы, необходимые для анализа реакций фоторождения векторных мезонов на протоне и дейтроне, подпорогового рождения частиц, поляризационных характеристик и проч. Будут продолжены исследования реакций фото- и электророждения пионов на нуклонах, базирующиеся на дисперсионных соотношениях и динамическом описании нуклонных резонансов. В более отдаленной перспективе будет начато исследование малочастичных систем, включающих мезоны с открытым и скрытым очарованием, равно как и со скрытой странностью.

Теория конденсированных сред. В последнее время был достигнут небывалый прогресс как в приготовлении высококачественных образцов, так и в развитии высокоточной измерительной техники. Это позволило получить новые результаты в исследовании термодинамических, транспортных и спектроскопических свойств новых комплексных материалов, обнаруживающих сильные электронные и магнитные корреляции. Среди них такие материалы, как слоистые купраты в нормальном и

сверхпроводящем состоянии, оксиды переходных металлов, в частности манганиты с колоссальным магнетосопротивлением и геометрически фрустрированные антиферромагнитные соединения, а также фуллереновые кластеры и решетки. Исследование этих материалов представляет огромный интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и в связи с возможностью их использования в технике.

Основное внимание в предлагаемой перспективной программе исследований будет уделено теоретическому анализу упомянутых выше систем с сильной электронной корреляцией, что предполагает изучение новых кооперативных явлений, новых видов упорядочения, магнетизма в низкоразмерных системах и квантовых критических явлений.

Интенсивные экспериментальные исследования этих материалов с помощью рассеяния нейтронов, проводимые в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, также стимулируют развитие теоретических исследований в этой области.

Основная цель планируемых исследований в течение ближайших 7 лет состоит в проведении «реалистических» вычислений в рамках новых эффективных методов различных физических величин, измеряемых в экспериментах, что сможет пролить свет на весьма сложное взаимное влияние электронной структуры, магнитных и транспортных свойств этих комплексных систем. На основе этих вычислений можно будет указать пути к созданию новых материалов и разработке инновационных проектов.

Современные требования к созданию более сложной и тонкой электроники и производство электронных компонент размерами ниже допустимого при традиционной литографии предела привели к заметному прогрессу в развитии новой процессорной техники на наномасштабе. Примерами являются производство проводников атомного размера, устройств, использующих эффект туннелирования одного электрона, исследование спинполяризованной электроники и магнитных наноструктур. Все это имеет огромные перспективы применения в электронных устройствах нового поколения. Будущие приложения простираются от квантовых компьютеров и так называемой безопасной квантовой информации до устройств для сенсорных технологий, срабатывающих при воздействии всего одной частицы. Уникальные образцы, полученные на наномасштабных размерах, открывают новые возможности в разнообразных областях —

компьютерная память, электро- и теплоперенос, микропереключатели и высокочувствительные детекторы.

Особый интерес представляют углеродные наноструктуры. Например, углеродные нанотрубки рассматриваются в качестве возможных компонент MOSFET-транзисторов и соединений. Хорошие эмиссионные характеристики обеспечивают их применение в индикаторных панелях. Тонкие игольчатые структуры позволяют применять нанотрубки в качестве зондов в различных микроскопах. Другое важное приложение связано с хорошими поглощающими характеристиками углеродных наночастиц, в частности водорода, что может быть использовано при разработке новых топливных устройств. Однако предстоит проделать большую работу для того, чтобы четко понимать и контролировать их изготовление с учетом произвольной формы, топологии, хиральности, размеров, структуры (к примеру одностенные в сравнении с многостенными), расположения, параллельного монтажа, интеграции в нанoeлектронные системы, отвода тепла. Помимо этого необходимо понимание на молекулярном уровне организации соединений между такими материалами.

По этой причине основные направления исследований будут включать теоретическое изучение электронных, тепловых и транспортных характеристик разнообразных современных наноматериалов и наноструктур.

Современная математическая физика. Теория суперструн — наиболее серьезный кандидат на роль единой теории фундаментальных взаимодействий, включающей квантовую гравитацию. Именно по этой причине теория суперструн является основным источником задач, составляющих предмет современной математической физики. Развитие этой теории составляет основную цель исследований по теме и включает изучение исключительно широкого спектра ее возможных режимов, точных классических и квантовых решений. Кроме того, эта теория имеет многочисленные приложения, в том числе непертурбативный режим суперсимметричных калибровочных теорий, микроскопическое описание черных дыр, космологические модели ранней Вселенной. Для применения и развития новых идей, порожденных теорией струн, решающим является использование математических методов теории интегрируемых систем, квантовых групп и некоммутативной геометрии. В ближайшее десятилетие это направление будет занимать

центральное место в исследованиях по математической физике в ЛТФ ОИЯИ.

Дубненская международная школа современной теоретической физики (DIAS-TH). Уникальная черта проекта DIAS-TH состоит в глубокой его интеграции в научную жизнь ЛТФ, что обеспечивает регулярное и естественное участие ведущих ученых в учебно-образовательной работе. Основным направлением деятельности DIAS-TH будет организация регулярных школ и рабочих совещаний по тематике ОИЯИ для молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников из стран-членов ОИЯИ и других участников Института. Кроме этого, в рамках проекта DIAS-TH будет осуществляться кооперация с УНЦ ОИЯИ в вопросе подготовки студентов и аспирантов и в организации школ для студентов, будут прочтены обзорные лекции по проблемам современной физики, направленные на поддержку и формирование экспериментальных программ ОИЯИ. DIAS-TH обеспечит участие молодежи в международных научно-образовательных проектах по подготовке молодых ученых, организацию работы семинаров молодых ученых и аспирантов по теоретической и математической физике, публикацию лекций, в том числе на основе современных компьютерных технологий, компьютерную обработку видеозаписей лекций, поддержку цифрового архива видеозаписей, создание и сопровождение базы данных с обучающими программами и лекциями по актуальным проблемам современной физики. Участие сотрудников ОИЯИ в организации учебного процесса на профильных кафедрах Международного университета «Дубна» и базирующихся в г. Дубне кафедрах факультета общей и прикладной физики МФТИ и физического факультета МГУ также будет среди приоритетных задач проекта DIAS-TH.

Деятельность DIAS-TH будет сосредоточена на основных направлениях исследований ЛТФ — теории элементарных частиц, теории ядра, теории конденсированных сред и современной математической физике. Важным условием успешной работы проекта будет развитие сотрудничества с международными и российскими фондами (ЮНЕСКО, DAAD, DFG, РФФИ, «Династия» и др.) и государственными организациями (BMBF, INFN, CNRS).

ИННОВАЦИОННАЯ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Стратегия семилетнего плана развития ОИЯИ определялась триадой «наука–образование–инновации». Эта стратегия одобрена Комитетом полномочных представителей правительств государств-членов ОИЯИ и отвечает интересам перехода к инновационной экономике в этих странах. Инновационное развитие ОИЯИ опирается на творческий потенциал международного коллектива ученых и специалистов и разнообразие имеющихся в Институте базовых и экспериментальных физических установок, позволяющих не только вести научно-исследовательские работы, но и эффективно развивать перспективные прикладные, инновационные разработки широкого профиля.

Концепция инновационного развития ОИЯИ предопределила реализацию нескольких важнейших задач.

1. Дальнейшее развитие научно-исследовательского потенциала Института за счет создания новых базовых и экспериментальных физических установок с уникальными характеристиками, повышения эффективности их использования, в том числе за счет внедрения новых форм финансирования научных исследований (проектное финансирование, гранты и т. д.).

2. Содействие реализации научно-исследовательских и технологических проектов, обеспечивающих прорывные позиции в избранных перспективных направлениях развития прикладных разработок.

3. Подготовка специалистов для инновационной сферы деятельности.

4. Содействие формированию комплекса перспективных инновационных направлений исследований и разработок, развиваемых в особой экономической зоне технико-внедренческого типа в городе Дубне.

В период перехода к рыночной экономике в государствах-членах ОИЯИ широко практиковалось создание небольших предприятий, использующих разработки, выполненные

в ОИЯИ. Большинство из них не смогли выжить в силу ряда причин: неразвитости рыночных отношений, отсутствия достаточного стартового капитала, незнания основ инновационного менеджмента и др. Однако некоторые из них оказались успешными, и ярким примером такой инновационной компании в Дубне является Научно-производственный центр «Аспект», разрабатывающий и производящий аппаратуру для радиационного контроля, развивающийся в тесном сотрудничестве с ОИЯИ. В последнее время с участием ОИЯИ или на основе научно-технических разработок, выполненных в Институте, образованы еще несколько предприятий и научно-производственных комплексов, в том числе ООО «ДвиН» (разработка и изготовление детекторов для дистанционного обнаружения веществ с заданными характеристиками в скрытых объемах), ООО «Циклон» (разработка и сооружение ускорительных комплексов для радиотерапии), ЗАО «Нанокаскад» (разработка медицинской аппаратуры для глубокой очистки крови фильтрами на основе трековых мембран), ООО «ИнтерГрафика» (мультимедийные средства в образовательном процессе) и др.

Важной вехой в инновационном развитии ОИЯИ стало создание в декабре 2005 г. в городе Дубне особой экономической зоны (ОЭЗ) технико-внедренческого типа. Характер и стратегические цели деятельности ОИЯИ нашли отражение в тематической направленности исследований и технологических разработках резидентов ОЭЗ — ядерно-физических и информационных технологий. Резидентами ОЭЗ «Дубна» стали и перечисленные ранее предприятия, использующие результаты научно-исследовательских разработок, выполненных в подразделениях Объединенного института ядерных исследований.

Дирекцией ОИЯИ предпринимаются значительные усилия по созданию с участием Института соответствующей инновационной инфраструктуры, необходимой для эффективной реализации творческого потенциала сотрудников международной научно-исследовательской организации.

С 2004 г. ОИЯИ действует на основе соглашения о частно-государственном партнерстве с крупнейшей российской частной высокотехнологичной корпорацией АФК «Система». Совместно с ней в 2005 г. было создано открытое акционерное общество «Управляющая компания Дубна-Система», деятельность которого помогла решать важнейшие для инноваций задачи — ока-

зание услуг по юридическому сопровождению, бизнес-планированию и т. д. недавно созданным компаниям.

В 2005 г. ОИЯИ принял участие в совместной программе Европейского союза и Российской академии наук на основе победы в рамках проекта «Наука и коммерциализация технологий» EuropeAid/115381/C/SV/RUS. Специалисты ОИЯИ в течение года активно работали совместно с европейскими специалистами по тематике трансфера технологий, маркетинга инноваций, менеджмента и т. д., посетили лучшие центры коммерциализации в Германии и Великобритании. Результатом проекта стало создание Центра коммерциализации научных разработок в ОИЯИ, который является членом сети Medilink-Russia совместно с 13 российскими центрами коммерциализации.

ОИЯИ активно участвует в различных целевых программах для развития инфраструктуры в Российской Федерации. В 2006 г. Институт выиграл конкурс в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) России «Исследование инновационного потенциала г. Дубны с целью создания и развития центров трансфера технологий (ЦТТ)», в результате чего ОИЯИ стал участником сети ЦТТ, созданных при организационном участии государства. По заказу Федерального агентства по управлению особыми экономическими зонами РФ Институт выполнил большую работу по научно-техническому обоснованию строительства Центра коллективного пользования оборудованием в рамках ОЭЗ «Дубна» (2007 г.) В рамках ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации» совместно с РНЦ «Курчатовский институт» и ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной акустики» была выполнена работа по созданию системы мониторинга исследований и разработок в области нанотехнологий и наноматериалов.

Большое внимание уделяется в Институте подготовке кадров для инновационной деятельности. Специалисты ОИЯИ ведут специальные курсы по управлению инновационными проектами в Международном университете «Дубна». С 2009 г. ОИЯИ при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации проводит ежегодную Школу инновационного менеджмента, где молодые инноваторы со всей России получают важнейшую информацию от ведущих практиков российского инновационного бизнеса. В 2008–2010 гг. ОИЯИ совместно с РНЦ «Курчатовский институт» и при поддержке Межгосударственного фонда гуманитарного сотрудничества государств

участников СНГ ежегодно проводит Высшие курсы стран СНГ для молодых ученых и аспирантов по нанотехнологиям.

Важным является увеличение эффективности инновационного сотрудничества ОИЯИ со странами-участницами по следующим направлениям.

1. Технологии: разрабатываемые новые технологии должны иметь конкурентные преимущества, определяющие их адекватное приложение и условия доступа к ним для промышленных партнеров из стран-участниц.

2. Услуги: они должны быть в основном связаны с использованием комплекса уникального и высокотехнологичного оборудования, расположенного в ОИЯИ.

3. R&D-программы: в странах-участницах ОИЯИ должна быть полная информация о программах исследований в рамках инновационной деятельности Института, оговорены возможности партнерского участия в таких программах.

В этих целях ОИЯИ стремится постоянно развивать материальную и приборную базу, инфраструктуру, для чего привлекает внешнее финансирование. В марте 2010 г. ОИЯИ совместно с партнерами стал победителем крупного конкурса государственной корпорации «Роснано» на право создания инфраструктурного нанотехнологического центра в Дубне. Проект наноцентра реализуется на основе инвестиционного соглашения, заключенного между РОСНАНО, ОИЯИ, концерном «РТИ Системы», ЗАО «Фирма АйТи. Информационные технологии» и ОАО «Особые экономические зоны».

В соответствии с концепцией развитие наноцентра опирается на две основных составляющих. Во-первых, за счет РОСНАНО приобретается комплекс современного уникального оборудования, которое будет размещено в ОИЯИ и крупных компаниях-резидентах ОЭЗ и будет использоваться для коммерциализации научно-технических разработок. Во-вторых, участники наноцентра учредили ЗАО «Международный инновационный нанотехнологический центр» (МИНЦ), который должен координировать использование всей инфраструктуры, а также стимулировать с помощью средств РОСНАНО и других акционеров формирование проектных команд и стартап-компаний.

В бизнес-фокусе наноцентра находятся отбор и коммерциализация нанотехнологических разработок через доработку технологий (внутри МИНЦ силами специально формируемых проектных групп) и участие в капитале стартап-компаний. Пла-

нируемые ресурсы включают как собственный бюджет проектной деятельности, так и машинное время на оборудовании наноцентра «Дубна».

Целью проекта является развитие институтов коммерциализации результатов научных исследований путем создания условий для трансфера технологий и инкубирования малых инновационных компаний в процессе деятельности нанотехнологического центра в Дубне. Ключевым отличием наноцентра «Дубна» от других проектов является наличие в структуре оборудования так называемого «виртуального ЦКП», т.е. программно-аппаратного комплекса системы удаленного доступа к ресурсам наноцентра «Дубна».

Наноцентр «Дубна» обеспечит выстраивание отношений центра трансфера технологий ЗАО «Международный инновационный нанотехнологический центр» со всеми необходимыми организациями, независимо от их местоположения, осуществит отбор элементов научной и производственной инфраструктуры, наилучшим образом соответствующих целям конкретного проекта, т.е. создание сети из уже существующих НИИ, университетов, бизнес-структур как «цепочки от знаний до рынка».

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ОИЯИ

Образовательная программа ОИЯИ включает в себя научно-образовательные проекты и школы ОИЯИ, Учебно-научный центр ОИЯИ (УНЦ), университет «Дубна», МИРЭА, молодежную политику Института, проблемы передачи научной эстафеты. Она ставит своей целью разработку и функционирование системы подготовки молодых специалистов для стран-участниц и самого Института по специальностям, связанным с направлениями исследований в ОИЯИ. Эта программа реализуется в основном на базе УНЦ, вокруг которого происходит концентрация различных научно-образовательных программ ОИЯИ.

Учебно-научный центр ОИЯИ был образован более 20 лет назад. За это время стало понятно, что идея подготовки научных кадров в лабораториях под руководством сотрудников Института является очень плодотворной. УНЦ выполняет важную функцию связующего звена между университетами стран-участниц ОИЯИ и лабораториями Института. Работа УНЦ создает условия для превращения ОИЯИ в большой физический практикум для университетов стран-участниц Института.

Учебно-научный центр осуществляет общую координацию и поддержку образовательной программы ОИЯИ. В рекомендациях по научной программе на следующее десятилетие, записанных в резолюции 106-й сессии Ученого совета ОИЯИ, подчеркнуто, что «сильная поддержка образовательных программ, работы Учебно-научного центра ОИЯИ является одним из наиболее приоритетных направлений деятельности Института».

Сегодня деятельность УНЦ является весьма многогранной и включает такие основные направления, как координация усилий базовых кафедр российских университетов в ОИЯИ, создание специальных лекционных курсов для студентов-старшекурсников, организация работы аспирантуры ОИЯИ, проведение крупных международных мероприятий, включая международную летнюю студенческую практику. Традиционной в деятельности

УНЦ является работа со школьниками, в которую входят различные мероприятия, такие как проведение научно-исследовательских конференций для школьников, работа в школьном практикуме УНЦ, организация экскурсий в лаборатории Института. В последние годы УНЦ стал организовывать программы повышения квалификации школьных учителей для более широкой пропаганды достижений современной науки.

ОИЯИ является базой по подготовке физиков для многих известных вузов Российской Федерации. Эта подготовка охватывает специализацию в ядерной физике, физике элементарных частиц, физике конденсированных сред, теоретической физике, технической физике и радиобиологии.

В настоящее время на базе ОИЯИ работают две кафедры МГУ — «Физика элементарных частиц» (зав. кафедрой академик РАН В. Г. Кадышевский) и «Нейтроннография» (зав. кафедрой доктор физико-математических наук профессор В. Л. Аксенов), кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира МФТИ (зав. кафедрой доктор физико-математических наук профессор Д. В. Фурсаев), кафедра «Электроника физических установок» МИРЭА (зав. кафедрой доктор физико-математических наук профессор А. И. Малахов). В ОИЯИ базируются пять кафедр Международного университета «Дубна» — это кафедры «Ядерная физика» (зав. кафедрой академик РАН Ю. Ц. Оганесян), «Теоретическая физика» (зав. кафедрой доктор физико-математических наук профессор Д. В. Фурсаев), «Биофизика» (зав. кафедрой доктор физико-математических наук профессор Е. А. Красавин), «Распределенные вычислительные системы» (зав. кафедрой кандидат физико-математических наук В. В. Кореньков) и кафедра «Нанотехнологии и новые материалы» (зав. кафедрой доктор физико-математических наук В. А. Осипов).

В ближайшее время базовой кафедрой в ОИЯИ станет кафедра «Физика тяжелых ионов» НИЯУ МИФИ, на которой будет осуществляться подготовка студентов для Лаборатории ядерных реакций и создаваемой в Институте базовой установки NICA/MPD.

Ежегодно в УНЦ обучаются более 500 студентов базовых кафедр и других вузов РФ и стран-участниц ОИЯИ. С 2008 г. по численности стали доминировать студенты вузов Дубны (около 80%). С открытием базовых кафедр ОИЯИ в университете «Дубна» произошло важное качественное изменение в

образовательной программе Института: ОИЯИ стал готовить научные кадры своими силами, начиная с момента поступления молодых людей в университет. Это позволяет Институту в большей степени влиять на образовательный процесс, подстраивая его под свои задачи, а сотрудникам Института — совмещать научную и преподавательскую деятельность (в 2009 г. среди преподавателей базовых кафедр было более 90 сотрудников ОИЯИ). Сказанное выше не означает, что УНЦ стал уделять меньше внимания студентам других вузов стран-участниц. Справедливо обратное: увеличилась как численность студентов этих вузов (примерно в 5 раз), так и количество вузов, заключивших договоры с УНЦ (сейчас таких вузов 21 в России и 16 в других странах-участницах Института).

Учебно-научный центр имеет постоянно развивающийся современный интернет-сайт <http://uc.jinr.ru/>, на котором размещается информация по всем направлениям деятельности. Для студентов, например, доступен список тем бакалаврских и магистерских студенческих работ, разработанных научными сотрудниками Института, а также база данных учебных курсов по физике частиц и квантовой теории поля, математической и статистической физике, конденсированным средам, физике наноструктур и нейтронной физике, ядерной физике, физическим установкам, по информационным технологиям.

Ежегодно в аспирантуре ОИЯИ по 10 специальностям обучается около 70 человек. Научное руководство аспирантами осуществляют ведущие сотрудники Института.

Специальности аспирантуры ОИЯИ: вычислительная математика, приборы и методы экспериментальной физики, теоретическая физика, физика конденсированного состояния, физика атомного ядра и элементарных частиц, физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, физика высоких энергий, радиобиология, математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Специфика аспирантуры ОИЯИ заключается в совмещении обучения и научной работы по теме диссертации. Из 198 аспирантов, закончивших аспирантуру с 1998 г., 53 человека защитили кандидатские диссертации. Подготовка аспирантов по истории и философии науки ведется преподавателями кафедры философии естественных факультетов философского факульте-

та МГУ. Для аспирантов и студентов организованы занятия по английскому языку.

В УНЦ работа со студентами, аспирантами и школьниками имеет не только традиционные формы учебного процесса. Практикуется регулярное проведение летних студенческих практик, школ, специальных семинаров.

Международные студенческие практики стали организовываться с 2004 г. по инициативе УНЦ, МИФИ, МФТИ, польских вузов и Чешского технического университета. Практики предназначены для студентов старших курсов из стран-участниц ОИЯИ и стран, заключивших с ОИЯИ соглашения на правительственном уровне. В связи с большим количеством заявок на участие (в 2004 г. на практику приехали 23 человека, в 2009 г. их число составило уже 87 человек) с 2007 г. практики проводятся в несколько этапов.

Среди участников — представители Арабской Республики Египет, Белоруссии, Болгарии, Польши, Румынии, Российской Федерации, Словакии, Чехии, Южно-Африканской Республики. Программа практики включает работу над небольшими (длительностью в три недели) учебно-исследовательскими проектами в лабораториях Института, отчеты-презентации студентов о выполненной работе, лекции ведущих ученых и специалистов о деятельности лабораторий ОИЯИ, а также экскурсии и культурные мероприятия. На сайте УНЦ размещена ежегодно пополняемая база учебно-исследовательских проектов, с содержанием которых практиканты знакомятся заранее.

С 2001 г. УНЦ при поддержке Чешского технического университета и программы «Боголюбов–Инфельд» организует международные летние школы «Ядерные методы и ускорители в биологии и медицине». Первая и третья школы прошли в Дубне, вторая — в Познани (Польша), четвертая — в Праге (Чехия), пятая — в Братиславе (Словакия). Программы школ включали лекции по следующим направлениям: ядерная физика, окружающая среда, ускорители заряженных частиц, радиационная терапия, детекторы излучений, визуализация биомедицинских данных, радиационная биология, современные тенденции в биологии и физике.

Для студентов обязательным условием поездки на школу является представление устного доклада или постера. 17 студентов из Российской Федерации, 21 из Чешской Республики, 24 из Польши, 10 из Словакии, 6 из Южной Африки и 2 сту-

дента из Болгарии приняли участие в работе последней школы благодаря финансовой поддержке дирекции ОИЯИ.

УНЦ организует специальные образовательные курсы по тематике Института. В 2008 и 2009 гг. на курсы «Радиационная охрана и ядерная безопасность» приезжали польские студенты Университета им. М. Склодовской-Кюри (Люблин), выбравшие специализацию, связанную с обеспечением ядерной безопасности. Для них сотрудниками ОИЯИ проводились лекции, практические занятия и экскурсии.

Еще одно направление деятельности УНЦ — организация ознакомительных визитов для студентов, аспирантов и школьников из стран-участниц ОИЯИ, которые осуществляются благодаря финансовой поддержке грантов полномочных представителей и программе «Боголюбов–Инфельд». В 2009 г., например, гостями УНЦ были школьники Германии и Польши, студенты Польши и Швеции, а два преподавателя из Болгарии знакомились с опытом преподавания физики школьникам в УНЦ.

В ноябре 2009 г. в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) проходила Всероссийская научная школа для молодых российских учителей физики. УНЦ являлся одним из организаторов школы. Финансовая поддержка была оказана Федеральным агентством по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

В работе школы приняли участие 46 учителей физики из различных общеобразовательных учреждений Российской Федерации. Ведущие ученые-физики России, работающие в ЦЕРН (включая и представителей ОИЯИ), прочитали лекции о современных достижениях в области физики частиц, космологии, ускорительной техники, информационных и нанотехнологий. В программу школы также входили посещения экспериментальных установок в ЦЕРН, встречи с физиками в рабочей и неформальной обстановке.

В учебное время для дубненских школьников старших классов проводятся занятия по физике, которые включают лекции, помогающие подготовке к поступлению на физические факультеты российских вузов, а также занятия в школьной физической лаборатории. В 2009 г. в двух группах занимались 40 школьников. С 2003 г. в УНЦ действует школьный физический практикум.

УНЦ и университет «Дубна» являются организаторами летних конференций для школьников. Первые две конференции состоялись в 2005 и 2006 гг. В них приняли участие более 50 школьников старших классов школ России, Белоруссии и Украины. В июле 2007 и 2008 гг. УНЦ совместно с Фондом поддержки фундаментальной физики организовал на базе профилактория «Ратмино» летние школы «Современная физика». Около 70 школьников 8–10-х классов физико-математических школ Москвы и Подмоскovie, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Ставрополя, а также 15 польских школьников были участниками этих мероприятий. Спонсорами летних школ выступили благотворительный фонд АФК «Система» и Фонд Дмитрия Зимина «Династия». Программа школ включала проведение олимпиад, решение теоретических и экспериментальных задач, популярные лекции ведущих ученых по современным научным проблемам (от физики микромира и космологии до новых научных и технологических задач), экскурсии в лаборатории ОИЯИ, встречи с учеными и деятелями культуры, культурно-спортивную программу.

В 2006 г. в Учебно-научном центре появилась новая структура — учебные лаборатории УНЦ ОИЯИ. Лабораторный комплекс в данный момент включает четыре лаборатории: физической оптики, молекулярной физики и термодинамики, атомной физики и ядерной физики. Планируется, что учебный лабораторный комплекс будет развиваться, поддерживаться и использоваться совместно теми вузами, чьи студенты проходят обучение на базе ОИЯИ и нуждаются в задачах общего или специального практикума. В учебных лабораториях УНЦ ОИЯИ идут занятия студентов факультета естественных и инженерных наук университета «Дубна» и студентов кафедры электроники физических установок филиала МИРЭА в Дубне.

В настоящее время в УНЦ восемь лекционных аудиторий, три из которых оборудованы проекторами для проведения презентаций и видеоконференций, а также два компьютерных класса. Еще одна оборудованная аудитория и компьютерный класс находятся в помещениях учебных лабораторий УНЦ ОИЯИ.

Одно из направлений деятельности Учебно-научного центра — лицензированная подготовка и повышение квалификации рабочих, ИТР и служащих.

Продолжается подготовка молодых ученых и специалистов Института на курсах английского языка. В 2009 г. на них занимались 42 сотрудника Института.

УНЦ издает свои методические и учебные пособия. Их общее число — 46.

Почти в каждой лаборатории ОИЯИ существуют собственные образовательные программы или проекты. У Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова есть постоянно действующий проект «Дубненская международная школа теоретической физики» (DIAS-TH), обеспечивающий информирование и систематическую углубленную подготовку аспирантов и молодых ученых из стран-участниц ОИЯИ по новейшим направлениям теоретической физики.

Подготовка научной смены является основной задачей молодежной политики Института. Программа «Молодежь в ОИЯИ» на 2003–2009 гг., разработанная Объединением молодых ученых и специалистов (ОМУС) и поддерживаемая дирекцией и всеми подразделениями Института, предусматривает создание благоприятных условий для молодых сотрудников не только для профессиональной научно-исследовательской деятельности, но и в социально-бытовой сфере.

Стипендиатами конкурсов на получение грантов для молодых ученых и специалистов ОИЯИ, а также обладателями стипендий имен известных ученых: Н. Н. Боголюбова, Б. М. Понтекорво, Ф. Л. Шапиро, И. М. Франка, В. И. Векслера, Н. Н. Говоруна, М. Г. Мещерякова, организуемых объединением, ежегодно становятся молодые сотрудники Института, среди которых немало аспирантов УНЦ.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

ЭТАПЫ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ОИЯИ

Многоплановое международное сотрудничество — ключевая отличительная черта научной деятельности ОИЯИ. Со времени образования Института его международный статус долгие годы определялся сотрудничеством ученых 12 равноправных и независимых государств-учредителей, которые добровольно объединились с целью умножения совместного научного и материального потенциала для изучения фундаментальных свойств материи.

В начале 1990-х гг. в связи с распадом СССР и социалистического лагеря наметился процесс выхода стран-участниц из состава ОИЯИ, а с другой стороны, получившие государственную самостоятельность бывшие советские республики не потеряли интереса к фундаментальной науке. По существу произошло заметное изменение состава стран-участниц Института (их стало 18), и появились страны, получившие название ассоциированных членов, сотрудничающие с ОИЯИ на основе соглашений правительственного уровня. Такие соглашения заключены с Венгрией, Германией, Египтом, Италией, Сербией и Южно-Африканской Республикой. В последние годы также были подписаны партнерские соглашения с рядом крупных мировых исследовательских центров, среди которых ЦЕРН, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, GSI, FNAL, BNL и др.

Германская Демократическая Республика была страной-участницей ОИЯИ с 1956 г. После объединения Германии форма ее участия в ОИЯИ изменилась — по инициативе немецкой стороны в 1991 г. было заключено двустороннее Соглашение между ОИЯИ и Министерством науки и технологий (BMFT, впоследствии BMBWF) ФРГ. Двусторонний комитет ОИЯИ–BMBWF в 2010 г. собрался уже в 20-й раз, а сотрудничество с ФРГ в рамках этого соглашения стало своего рода эталоном взаимовыгодного ассоциированного членства в ОИЯИ

как по объему и многоплановости, так и по методам организации.

Венгрия, одно из государств-учредителей, прекратила свое членство в ОИЯИ в конце 1992 г. С 1993 г. по настоящее время сотрудничество осуществляется на основе двустороннего Соглашения между ОИЯИ и Венгерской академией наук в интересующих венгерскую сторону областях, прежде всего по физике конденсированных сред и физике тяжелых ионов. Эффективная работа на уровне ассоциативного членства в ОИЯИ побуждает венгерских ученых к обсуждению возможности восстановления полноправного членства в Институте. Координирующей структурой по данному вопросу с венгерской стороны является Национальное управление по исследованиям и технологиям. Катализатором в процессе реинтеграции послужили с успехом проведенные в начале декабря 2008 г. в Будапеште Дни ОИЯИ в Венгрии.

Научные контакты с итальянскими физиками поддерживались со времени образования ОИЯИ. В конце 1960-х гг. ОИЯИ подписал с Национальным институтом ядерной физики Италии Соглашение о сотрудничестве, закрепившее официально широкие научные связи и взаимные интересы дубненских и итальянских физиков. В настоящее время совместные работы ведутся практически по всем направлениям деятельности ОИЯИ, наиболее плодотворно — по физике конденсированного состояния вещества и радиобиологии. Важное направление сотрудничества занимает теоретическая физика. На территории Италии в г. Триесте расположен Международный центр теоретической физики, в работе которого принимают участие теоретики ОИЯИ.

Наиболее ярким современным примером плодотворного развития новой формы совместной научной деятельности стало сотрудничество ОИЯИ с ЮАР, первые ростки которого начали прорастать в трудные для Института 1990-е гг. Действительно, научные контакты специалистов ОИЯИ и ЮАР начались еще в 1993 г. В 1994 г. появился первый договор о сотрудничестве. В начале 2000-х гг. сотрудничество, обмен визитами уже осуществлялись по четырем темам. Главными организациями в этих направлениях являлись университеты в Претории и Кейптауне.

5 октября 2005 г. в Москве был подписан Меморандум о взаимопонимании между правительством ЮАР и ОИЯИ, в

соответствии с которым 14 февраля 2006 г. в Претории состоялось первое заседание совместного координационного комитета ЮАР и ОИЯИ. Было решено, что основная часть долевого взноса ЮАР в ОИЯИ пропорционально распределится между пятью приоритетными областями исследований: грид-технологии, исследования на пучках нейтронов, физика тяжелых ионов, адронная терапия, а также работы, связанные с модернизацией реактора ИБР-2. Во всех научных проектах была образовательная составляющая для молодых ученых, аспирантов и студентов из ЮАР.

В 2007 г. в Скукузе, «столице» Крюгер-парка (ЮАР), был проведен симпозиум под названием «Модели и методы в много- и малочастичных системах», ставший своего рода ярмаркой идей сотрудничества и смотрам состояния коллаборации. В Кейптауне прошла III Сессия совместного координационного комитета ЮАР–ОИЯИ. Из новых начинаний была одобрена идея проведения Зимней школы для южноафриканских студентов в Дубне. К настоящему времени прошло уже четыре практики, и около ста южноафриканских студентов и аспирантов приняли в них участие.

Ведущие сотрудники ОИЯИ успешно выступили в 2008 г. на ежегодной конференции Южно-Африканского института физики (SAIP) в Университете Лимпопо. SAIP — это один из возможных каналов распространения информации об ОИЯИ и поиска новых партнеров, поэтому в 2010 г. аналогичная группа ученых из ОИЯИ приняла участие в очередной конференции SAIP, прошедшей в Претории. Нашим лекторам была полностью отдана однодневная Зимняя школа для молодых ученых, которой эта конференция традиционно начинается.

В феврале 2011 г. в Претории прошел итоговый форум «ЮАР–ОИЯИ 5 лет вместе», на нем даны высокие оценки взаимовыгодному сотрудничеству, скорректирован курс, намечены новые рубежи, установлены надежные связи, есть взаимный интерес, есть позитивный опыт работы в реалиях сегодняшнего дня. Безусловно, этот опыт будет востребован в дальнейшей работе не только с ЮАР, но и с другими странами, такими как Египет и Сербия.

В начале 2009 г. было подписано Соглашение с Министерством высшего образования и научных исследований Арабской Республики Египет, которое закрепило ассоциативное участие этой страны в деятельности ОИЯИ. В рамках этого соглашения

осуществляется сотрудничество с Агентством по атомной энергии Египта, Каирским университетом, с Университетом в Минуфии и Институтом металлургических исследований. В частности, протоколы устанавливают условия обмена учеными и научно-технической информацией. В соответствии с ними ОИЯИ предоставляет стипендии египетским специалистам. Около 15 специалистов уже были стипендиатами ОИЯИ. В настоящее время египетские ученые наиболее активно поддерживают связи с Лабораторией ядерных реакций и Лабораторией теоретической физики.

Сегодня международный фундамент научного сотрудничества ОИЯИ опирается не только на страны-участницы ОИЯИ, но и на его ассоциированных членов, а также на проверенное временем сотрудничество с ведущими мировыми физическими центрами. Институт поддерживает связи с более чем 700 научными центрами и университетами в 62 странах мира. Только в России, крупнейшем партнере ОИЯИ, сотрудничество осуществляется более чем со 150 исследовательскими центрами, университетами, промышленными предприятиями и фирмами. Ежегодно в Дубну приезжают более полутора тысяч ученых из разных стран мира. ОИЯИ поддерживает контакты с такими международными организациями, как МАГАТЭ, ЮНЕСКО, Европейское физическое общество. Именно такое широкомасштабное и взаимопроникающее научное сотрудничество представляет собой определяющий путь развития фундаментальной науки в быстро меняющемся современном мире.

ЦЕРН: НАЧАЛО И СТАНОВЛЕНИЕ СОТРУДНИЧЕСТВА

И. А. Савин

ЦЕРН отметил свой 55-летний юбилей в 2009 г. За такой же срок работы в Объединенном институте мне посчастливилось участвовать во многих международных экспериментах в ОИЯИ, ЦЕРН и других лабораториях. С учетом имеющегося опыта могу утверждать, что ЦЕРН — лучшая в мире исследовательская организация.

На вопрос редактора еженедельника «Дубна: наука, сотрудничество, прогресс» Е. М. Молчанова, какой из эпизодов сотрудничества с ЦЕРН представляется наиболее значительным, я бы отметил не один, а несколько. Как всегда, наиболее яркое впечатление производит то, с чем сталкиваешься впервые.

Впервые в ЦЕРН я был в 1965–1967 гг. Меня направил в длительную командировку В. И. Векслер, бывший в то время директором ЛВЭ. Вскоре после открытия американскими физиками нарушения СР-четности (одно из крупнейших открытий прошлого века) в распадах долгоживущих K^0 -мезонов на два пиона, о котором они сообщили в 1964 г. на Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне, физики ЛВЭ Э. О. Оконов и М. И. Подгорецкий предложили способ доказательства, что этот эффект действительно существует, а не является следствием других известных фактов или их комбинации. До этого было известно, что по такой схеме распадаются только короткоживущие K -мезоны. Идея была очень проста. Если два типа K -мезонов распадаются на одни и те же вторичные частицы, то в этих распадах при сравнимой интенсивности должна наблюдаться интерференция. На основании этой идеи в ЦЕРН было предложено два эксперимента. После их утверждения В. И. Векслер получил письмо, в котором физики ЛВЭ приглашались для участия в одном из них. Выбор пал на меня. Так я оказался в группе, которую возглавлял триумвират — Клаус Винтер из Германии, Марсель Виваржан из Франции и Рон Мермо из Швейцарии. А группа, как футбольная команда, со-

стояла из 11 физиков, представлявших 9 стран, включая одного из СССР и одного из США. Интернационализм во всем: от организации управления до состава участников исследований — вот что производит огромное впечатление и является одним из достижений ЦЕРН. Представьте себе интригу: американцы что-то обнаружили, русские предложили их проверить, девять европейцев плюс один американец, плюс один русский эту проверку осуществили. Идеи Оконова и Подгорецкого блестяще подтвердились, эффект интерференции, являющийся следствием нарушения CP-инвариантности в распадах K -мезонов, был неопровержимо установлен в обоих экспериментах. Кстати, вторую группу возглавлял Карло Руббиа, сыгравший важную роль в становлении полноправного сотрудничества ОИЯИ–ЦЕРН. А прямое нарушение CP-четности в распадах K -мезонов было доказано в ЦЕРН позднее в эксперименте NA48, тоже с участием ОИЯИ.

Во время моего первого визита в ЦЕРН я познакомился с тем, что теперь называют информационной технологией. Там она бурно развивалась в 1960-х гг. на основе компьютеров и языка программирования фортран для различного рода применений — автоматизации просмотра снимков с пузырьковых и искровых камер, экспериментов on-line, создания стандартных программ обработки данных, моделирования экспериментов и т.п. Работавший в 1966 г. в отделе пузырьковых камер ЦЕРН сотрудник ОИЯИ Н.Н. Говорун наглядно убедился в преимуществах фортрана и, возвратившись домой, внедрил с помощью ЦЕРН этот алгоритмический язык в ОИЯИ и в институтах СССР. Благодаря этому мы получили доступ к мировым базам данных и программного обеспечения, а также реальные возможности для полноправного международного сотрудничества. С помощью Н.Н. Говоруна и его сотрудников было подготовлено также программное обеспечение первых в ОИЯИ on-line экспериментов.

Второй раз, но опять впервые, я приехал в ЦЕРН в 1974 г. для выполнения специального задания. Дело в том, что до этого сотрудничество ОИЯИ–ЦЕРН, установленное в 1956 г. в результате визита вице-директора ОИЯИ Мариана Даныша, осуществлялось только в форме взаимных обменов сотрудниками, участия отдельных физиков в экспериментах ЦЕРН, визитов теоретиков, участия в конференциях, семинарах, школах. А в общепринятой в ЦЕРН форме проведения исследо-

ваний коллаборациями институтов (еще одна замечательная характеристика ЦЕРН!) ни ОИЯИ, ни СССР участия не принимали. Директор ОИЯИ Н.Н. Боголюбов решил, что, если ЦЕРН согласится, мы могли бы эту форму сотрудничества осуществить. После дополнительных переговоров, когда выяснилось, что ОИЯИ не требует формального соглашения о сотрудничестве, ЦЕРН в лице генерального директора профессора В. Енчке идею поддержал, и наша группа в составе И.А. Голутвина, В.В. Кухтина и И.А. Савина была направлена в ЦЕРН с заданием подготовить предложение (Proposal) совместного эксперимента по изучению структуры нуклонов, открывавшего новое научное направление в ОИЯИ. Однако вскоре на пути реализации этой идеи появились подводные камни. Ни одна из коллабораций, кроме той, которой руководил Руббиа и направление исследований которой совпадало с нашим заданием, не соглашалась принять всю нашу группу. Оказывается, в правилах ЦЕРН было записано, что в составе коллабораций могут участвовать только группы из стран-участниц ЦЕРН. Из других стран в них могут быть только отдельные ученые. Через некоторое время Руббиа вызвал нас и сказал буквально следующее: «Меня пригласили в дирекцию и устроили промывание мозгов, объяснив, что один-два русских в моей группе — это моя проблема, а три русских в моей группе — это уже их проблема». После этого дал нам по бутылке водки и рекомендовал проделать «домашнюю работу», в результате которой Голутвин и Кухтин остались в группе Руббиа, а я перешел в группу К. Винтера с условием, что, работая в его эксперименте на ISR, факультативно совместно с другими буду заниматься подготовкой Proposal для SPS — суперпротонного синхротрона, соорудившегося в ЦЕРН.

Так в 1974 г. появилось предложение коллаборации BCDMR (начальные буквы названий городов или лабораторий, участвовавших в коллаборации, — Bologna, CERN, Dubna, Munich, Rim, обязанности последнего позднее перешли к Sacley, и коллаборация стала называться BCDMS) по изучению структуры нуклонов и ядер вплоть до максимально возможных значений кинематических переменных, доступных на SPS. Идея эксперимента и соответствующей установки принадлежала профессору К. Руббиа (впоследствии генеральному директору ЦЕРН и нобелевскому лауреату за открытие Z - и W -бозонов. Первоначально этот проект родился внутри BCDMS, и нас приглашали



1974 г. Н. Н. Боголюбов и В. Л. Карповский в тоннеле сооружаемого в ЦЕРН суперпротонного ускорителя SPS. Объяснения дает генеральный директор ЦЕРН-2 и руководитель проекта SPS сэр Дж. Адамс (справа). На заднем плане сотрудники ОИЯИ И. А. Голутвин и И. А. Савин (фото ЦЕРН)

в нем участвовать. Но тут проявилось еще одно ограничение для стран-неучастниц ЦЕРН — одновременно участвовать только в одном эксперименте). Идея предложения VCDMS была достаточно проста: с помощью светосильной установки измерить структурные функции нуклонов в глубоконеупругих мюон-нуклонных и мюон-ядерных взаимодействиях и сравнить их поведение с предсказаниями теории. Светосильность обеспечивалась тем, что установка, построенная на основе тороидального магнита диаметром около 3 м с длинной мишенью на его оси, имела практически 100%-ю эффективность для регистрации рассеянных мюонов во всей области их кинематических переменных, начиная с минимальных. Координаты рассеянных мюонов, по которым эти переменные вычислялись, регистрировались многопроволочными пропорциональными камерами (МПК), расположенными в щелях разрезанного на диски сердечника магнита. Из практических соображений установка состояла из 10 идентичных модулей длиной по 5 м каждый.

Предложение VCDMS было утверждено в ЦЕРН в 1975 г., после чего эксперимент получил номер NA4, т.е. четвертый порядковый эксперимент на SPS.

Работа в коллаборациях ЦЕРН организована в несколько этапов: группы физиков из разных стран совместно готовят Proposal, содержащий физическое обоснование эксперимента, проект установки, распределение обязанностей, график работ и оценку ресурсов. После его утверждения стороны согласовывают Меморандум понимания, гарантирующий сроки выполнения обязательств. На местах создаются узлы установки, установка монтируется на пучке в ЦЕРН, проводится эксперимент, данные записываются на магнитные ленты и затем обрабатываются, опять на местах. Для установки NA4, стоимостью более 12 млн швейцарских франков (в то время крупнейшей в ЦЕРН), в ОИЯИ необходимо было изготовить 10 модулей сердечника тороидального магнита массой около 2000 т и 80 МПК размером $3 \times 1,5$ м каждая. Материальный вклад ОИЯИ составлял более 30% стоимости установки.

Все приходилось делать впервые — согласование чертежей, материалов, ГОСТов, технологии, транспортировки, обход эмбарго и др. Здесь были свои трудности, которые чуть не сорвали планы. Вот некоторые из них. Сталь для сердечника могла быть изготовлена в г. Жданове (теперь Мариуполь). Однако для получения лимитов на ее прокат требовалось решение Совета министров СССР. Модули сердечника по мере изготовления в Опытном производстве ОИЯИ доставлялись в Женеву на железнодорожных платформах, пересекавших границы СССР, Венгрии, Австрии и Швейцарии. На австро-венгерской границе 20-тонные модули перегружались с 60-тонных советских платформ на 40-тонные западные платформы. Во избежание задержек и потерь контроль за этими операциями был налажен с помощью венгерских сотрудников ОИЯИ. Корпуса МПК необходимо было изготовить из американского материала типа пчелиных сот (honey comb), имеющего высокую прочность при практическом отсутствии вещества на пути частиц. Прямая поставка этого материала запрещалась. При его разгрузке в ЦЕРН вначале были необъяснимые задержки. Другим важным материалом для камер были высокоточные печатные платы длиной 1,5 м. Их изготавливали в Италии. Но перед отправкой в Дубну их качество контролировал сотрудник ОИЯИ В. Г. Кривохижин, забравший целую партию. Камеры прилетели в Женеву

двумя рейсами Ил-76 — советского военно-транспортного самолета, впервые осуществившего с ними коммерческий рейс на запад. Приземление их в Женевском аэропорту было сенсацией, привлекшей внимание всей швейцарской прессы.

Экспериментом была и организация работ в ОИЯИ, в которых принимали участие специалисты из ЛВЭ, ОНМУ, ЛЯП, ЛТФ и ЛВТА в рамках впервые введенной общеинститутской темы. ЛВЭ отвечала за изготовление сердечника и общую координацию работ, ОНМУ (И. А. Голутвин) — за изготовление МПК, ЛТФ (Д. В. Ширков) — за координацию работ по физическому обоснованию измерений и анализа данных, ЛВТА (Н. Н. Говорун, И. М. Иванченко) — за подготовку программ обработки, совместимых с черновскими. Объединенная команда участвовала в наборе и анализе данных. В ее составе, кроме советских, были физики из Болгарии — В. Генчев, Г. Султанов, П. Тодоров, из Венгрии — Г. Вестергомби, И. Манно, А. Кондор, из ГДР — М. Кляйн, В. Ломан, В.-Д. Новак, из Чехословакии — Я. Гладки, Я. Жачек, П. Завада, Р. Ледницки, С. Немечек, П. Раймер, И. Страхота, Я. Цвах. За ходом работ, потому что это тоже было своеобразным экспериментом, следил весь ЦЕРН, включая генеральных директоров. Установка была собрана и успешно запущена в 1978 г. Набор данных продолжался до 1985 г., а их обработка — до 1991 г.

Кроме материального, ОИЯИ внес большой интеллектуальный вклад в подготовку, проведение и интерпретацию данных NA4. В частности, по нашему предложению был осуществлен первый сеанс набора данных с углеродной мишенью, чтобы впервые обнаружить γ - Z -интерференцию в электрослабых взаимодействиях и измерить важный параметр Стандартной модели — синус угла Вайнберга. Он связан с отношением масс Z - и W -бозонов (обнаружение которых планировалось в ЦЕРН). Идеология этих измерений была основана на работах С. М. Биленького. Для главной задачи NA4 — точного измерения структурных функций — была создана программа (Д. Ю. Бардин) учета радиационных поправок, общепринятая ныне и получающая дальнейшее развитие в экспериментах на LEP. Создана альтернативная программа анализа структурных функций в рамках КХД путем их разложения в ряд по полиномам Якоби (Н. Б. Скачков и др.). Выполнен анализ, и подготовлена последняя публикация NA4 по изучению ядерных эффектов в структурных функциях нуклонов при больших значениях

переменной Бьеркена x , включая значения $x > 1$, запрещенные двухчастичной кинематикой.

В одном из номеров еженедельного «Бюллетеня ЦЕРН» (2004. № 40), выпущенных в связи с подготовкой к празднованию 50-летия ЦЕРН, под рубрикой «Фото золотого юбилея» опубликована фотография, на которой запечатлен момент сборки установки NA4, и дан приведенный ниже текст.



Общий вид установки NA4. Август 1978 г.

«Поначалу многие сомневались в результатах VCDMS — эксперимента, который проводился с 1978 по 1985 г. и играл решающую роль в первых проверках квантовой хромодинамики, или кратко КХД. Эта теория, находившаяся тогда на стадии развития, описывает сильные взаимодействия, которые отвечают за стабильность протонов и нейтронов. VCDMS использовала мюоны для изучения структуры ядер простейших атомов — водорода, имеющего в ядре один протон, и дейтерия — с протоном и нейтроном в ядре, а также углерода, азота и железа. Когда мюоны испытывали так называемые глубоконеупругие столкновения, они могли добраться до "внутренностей" протонов и нейтронов, состоящих, как предполагалось, из кварков и глюонов. Измерения VCDMS не совпадали с полученными в других экспериментах ЦЕРН, в частности, в эксперименте

Европейской мюонной коллаборации (ЕМС) и нейтринном эксперименте CDHS. Они пользовались непререкаемым авторитетом, а BCDMS была новичком. Но постепенно, включая более поздние данные эксперимента NMC, накапливалось все больше доказательств правоты BCDMS».

Эта коллаборация опубликовала наиболее точные результаты измерений структурных функций нуклонов и доказала, что их зависимость от кинематических переменных согласуется с предсказаниями КХД. BCDMS также подтвердила и уточнила эффект ЕМС, согласно которому структура свободных нуклонов (в ядрах водорода и дейтерия) отличается от структуры нуклонов, связанных в ядре. Все результаты BCDMS были подтверждены и расширены более поздними экспериментами, включая наиболее точные на коллайдере HERA-B (DESY, Германия). Но они по-прежнему остаются самыми точными измерениями глубоконеупругих рассеяний в определенной области кинематических переменных и играют ключевую роль в становлении и проверке КХД.

Следующим совместным ОИЯИ–ЦЕРН экспериментом был DELPHI на LEP. Во времена этого эксперимента уже было подписано Соглашение о сотрудничестве по проведению исследований в ЦЕРН, определившее его общие рамки и не содержащее тех ограничений, с которыми столкнулись в NA4. Наличие соглашения позволило существенно расширить список совместных экспериментов. Дирекция ОИЯИ в лице директора В. Г. Кадышевского и вице-директора А. Н. Сисакяна была активным сторонником такого расширения. За NA4 и DELPHI последовали DIRAC, NA48, NA49, SMC, NA62, OPERA, COMPASS, участие в программе LHC: DAMPER, CMS, ATLAS, ALICE. Информация о них содержится ниже.

Я бы хотел остановиться на двух — SMC и COMPASS. Они продолжили изучение структуры нуклонов, начатое в NA4, распространив его на изучение спина протонов. В 1985 г. впервые был опубликован сенсационный результат ЕМС, из которого следовало, что макроскопическое значение спина протона, равное 0,5, не может быть объяснено в рамках наивной кварковой модели. Согласно этой модели протон состоит из трех валентных кварков, каждый из которых имеет спин 0,5. Оказалось, что кварками можно объяснить не больше 30% этой величины. Возник «спиновый кризис». Попытка его разрешить была предпринята SMC — Спиновой мюонной коллаборацией.

Для протона она подтвердила результат ЕМС, получила такой же результат для нейтрона и впервые проверила выполнение фундаментального правила сумм Бьеркена для структурных функций протонов и нейтронов. Кризис не разрешился. Появились теоретические работы, в том числе и в Дубне, предполагавшие, что в спин нуклонов могут дать большой вклад спины глюонов. Эта идея была проверена в COMPASS и, к сожалению, не подтвердилась. Четырьмя независимыми способами было показано, что вклад глюонов мал. В соответствии с законом сохранения момента в спин нуклонов могут внести вклад спины кварков и глюонов, а также их орбитальные моменты. Последние могут быть оценены только в результате измерений так называемых обобщенных структурных функций нуклонов. Основы теории этих функций заложены сотрудником ОИЯИ А. В. Радюшкиным, ныне работающим в США, а первые измерения будут выполнены в ЦЕРН в рамках недавно одобренного эксперимента COMPASS-II.

Параллельно с ОИЯИ–ЦЕРН развивалось и сотрудничество СССР–ЦЕРН. Для последнего с самого начала требовалось наличие формального соглашения. Оно было заключено в 1967 г. между ЦЕРН и ГКАЭ (Государственным комитетом по мирному использованию атомной энергии) по исследованиям в ЦЕРН и расширено в 1975 г. на исследования в СССР в связи с сооружением в Протвино крупнейшего в то время в мире ускорителя У-70. История этого сотрудничества, переплетавшаяся с нашим, описана Н. Кульбергом в книге «В глубь материи», изданной Институтом истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН в 2009 г. Н. Кульберг и его предшественники О. Лок, И. Гольдшмидт-Клермон, Д. Фидекаро, Л. Монтане были координаторами сотрудничества со странами-неучастницами ЦЕРН при генеральном директоре ЦЕРН и во многом способствовали их успеху. Соглашение ОИЯИ–ЦЕРН расширено теперь и на исследования, проводимые в ОИЯИ. ЦЕРН и его страны-участницы на основе партнерских соглашений могут участвовать в исследованиях по физике частиц на нуклотроне, проектируемом коллайдере NICA и других установках ОИЯИ. В 2010 г. высший руководящий орган ЦЕРН — CERN council, учитывая большой международный вклад в проведение экспериментов на его ускорителях, принял решение, что членом ЦЕРН может теперь стать любое государство мира. Таким образом, ЦЕРН из региональной организации, о чем свидетельствует буква E —

«европейская» в его названии, превратился в мировую. В этом есть и наш вклад.

Благодаря широкому сотрудничеству с ЦЕРН и другими лабораториями мира международная общественность убедилась в высокой квалификации специалистов ОИЯИ, способных создавать самое современное оборудование и проводить исследования на передовом фронте науки. С другой стороны, та же международная общественность, понимая это, помогла нашему Институту выжить в трудные годы после развала СССР и помогает сейчас, когда место и роль фундаментальных исследований в судьбах России и других стран-участниц ОИЯИ не оценены по достоинству.

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ–ЦЕРН

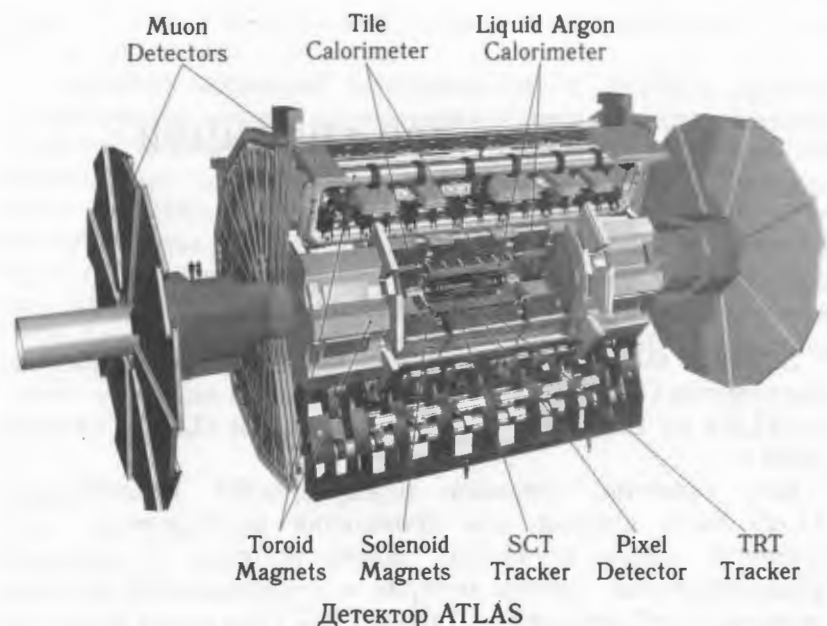
Проект ATLAS

В 2009 г. был завершен важнейший этап плодотворного сотрудничества ОИЯИ–ЦЕРН в деле создания и запуска установки ATLAS на Большом адронном коллайдере (LHC), начатый в 1994 г.

Как известно, широкая международная коллаборация ATLAS была создана для проведения многоцелевого эксперимента нового поколения, задача которого — изучение фундаментальных свойств материи в столкновениях протонов с максимальной энергией 14 ТэВ на LHC. Параметры детектора ATLAS были запланированы таким образом, чтобы исследовать широкий спектр, в том числе и новых, неожиданных физических явлений.

В полном соответствии с обязательствами ОИЯИ перед коллаборацией ATLAS и ЦЕРН дубненские ученые и инженеры принимали участие в создании (производстве, монтаже и наладке) элементов мюонной детектирующей системы, элементов жидкоаргонного и тайл-калориметра установки ATLAS. Были выполнены важные работы по созданию и наладке внутреннего (TRT) трекового детектора. С участием сотрудников ОИЯИ были проведены важные калибровочные исследования калориметров ATLAS и выполнена подготовка этих систем к набору экспериментальных данных. Кроме того, ОИЯИ занимался разработкой системы сбора и проверки качества данных (триггера TDAQ) и формированием необходимых условий для стабильной работы системы распределенных вычислений ATLAS-Грид как в ОИЯИ, так и в ЦЕРН. Важные расчеты магнитной системы установки ATLAS также были выполнены сотрудниками ОИЯИ. С 2004 г. наш Институт интенсивно включился в разработку физической программы исследований на установке ATLAS.

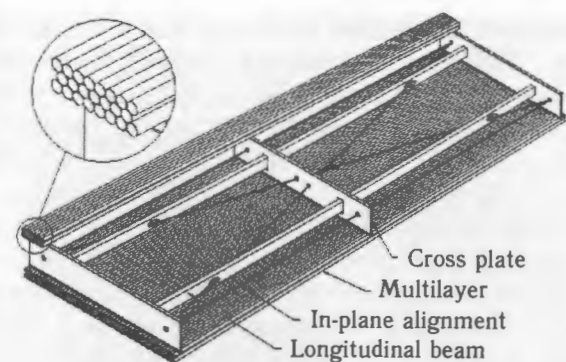
Работы **мюонной группы** коллаборации ATLAS проводились сотрудниками ОИЯИ (рук. Г. А. Шелков) в три ключевых



Детектор ATLAS

этапа. Первый этап (до 2000 г.) — это участие в разработке проекта мюонной системы установки ATLAS и создание в ЛЯП ОИЯИ участка для производства мюонных камер. Второй этап (2000–2004 гг.) включал в себя массовое производство и проверку соответствия техническим требованиям 84 мюонных камер. Третий этап (2004–2006 гг.) — это доставка (проверенных в ОИЯИ) мюонных камер в ЦЕРН и монтаж мюонной системы установки ATLAS.

Идея использования дрейфовых трубок с повышенным давлением рабочего газа в качестве основного прецизионного детектирующего элемента мюонной системы ATLAS была предложена и успешно опробована в ОИЯИ. Именно этот вариант (один из трех предложенных) был выбран в качестве основного для детекторов мюонной системы ATLAS. В сотрудничестве с Институтом им. Макса Планка (Мюнхен), ЦЕРН и специалистами из Румынии в ЛЯП был создан участок для производства мюонных детекторов. Участок был оснащен современным (в ряде случаев уникальным) оборудованием, которое позволяло производить в соответствии со стандартами ATLAS дрейфовые трубчатые координатные детекторы и собирать из них мюонные камеры. С 2000 по 2004 г. на этом участке,



Мюонные камеры установки ATLAS

в полном соответствии с технической спецификацией, было изготовлено и проверено свыше 70 тысяч дрейфовых трубок, что составило 20% от общего числа всех детекторов мюонной системы. Из этих детекторов были собраны мюонные камеры. В 2004–2005 гг. происходила транспортировка готовых мюонных камер из Дубны в Женеву. Перед установкой в шахту ATLAS все камеры прошли тщательную проверку и сборку в детектирующие блоки. 21 января 2005 г. первая камера мюонной системы ATLAS, изготовленная в ОИЯИ, была установлена на свое рабочее место. К концу 2006 г. (в соответствии с планом сборки детектора ATLAS) все камеры ОИЯИ были установлены, и началось их комплексное тестирование и подготовка к работе на пучках LHC.

Группа ОИЯИ (рук. В. В. Кухтин) участвовала в создании торцевого адронного **жидкоаргонного (LiAr) калориметра ATLAS**, в изучении радиационных свойств электроники и материалов, а также в ряде других работ. ОИЯИ внес заметный вклад в разработку концепции LiAr-калориметра, его механических характеристик и электроники считывания информации. С 1994 по 1997 г. в ОИЯИ были изготовлены полномасштабный прототип модуля адронного калориметра и нулевой модуль, которые затем были исследованы на пучках вторичных частиц ускорителя SPS ЦЕРН. Специалисты ОИЯИ принимали активное участие в проведении сеансов и анализе результатов сеансов.

В 1998 г. на территории ОИЯИ была создана «чистая комната» для сборки модулей адронного калориметра. Поглотите-

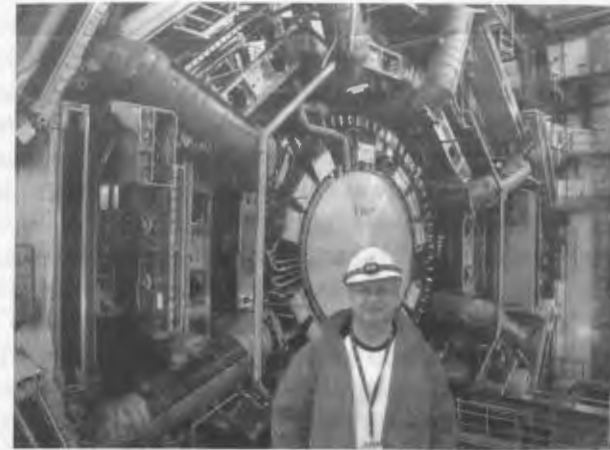
ли, выполненные из чистой меди, производились в Опытном производстве ОИЯИ и на заводе в Минске. Требования к механической точности изделий (50 мкм на расстоянии в 2 м) были выдержаны обоими производителями. В период с 2000 по 2003 г. было собрано 25 серийных модулей калориметров, что составляет 38% от общего числа всех серийных модулей адронного калориметра ATLAS. На реакторе ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики проведены исследования радиационной устойчивости элементов электроники считывания информации с калориметров, а также радиационной стойкости конструкционных материалов, которые могли быть использованы в жидкоаргоновой калориметрии детектора ATLAS.

Совместно с Институтом им. М. Планка в Мюнхене были разработаны специальные предусилители сигналов для работы при температуре жидкого аргона. Особенно жесткие требования к надежности этой электроники обусловлены высоким радиационным фоном и отсутствием свободного доступа к ней.

Исследования в данном направлении продолжались также на высокоинтенсивном пучке нейтронов, энергетический спектр которого хорошо соответствует ожидаемому спектру нейтронов от *pp*-взаимодействий на LHC.

Среди других работ этой группы следует отметить разработку и изготовление системы измерения температуры жидкого аргона в зоне расположения адронного калориметра. Для обеспечения высокоточных (до 7 мК) измерений температуры жидкого аргона на специальном стенде были прокалиброваны более 700 платиновых датчиков.

Работы над созданием **адронного тайл-калориметра ATLAS** начались в ОИЯИ (рук. Ю. А. Будагов и Д. И. Хубуа) в феврале 1994 г. Тайл-калориметр ATLAS имеет сотоподобную структуру, при которой детектирующие сцинтилляционные тайл-элементы встроены в стальные поглотители, и считывание информации с них осуществляется с помощью специальных гибких оптических фибров. Калориметр состоит из трех секций — основной бочки (барреля) в центре установки и двух дополнительных бочек (расширенных баррелей) по краям установки. Секции центрального барреля собраны из 64 клиноподобных модулей длиной 5,6 м и массой 20 т. Секции расширенного барреля в два раза короче и вдвое легче (2,8 м и 10 т). Каждый модуль состоит из субмодулей, которые



Н. Д. Топилин у собранного тайл-калориметра ATLAS

собраны на специальной общей базе (грейдере) с соблюдением необходимой линейной и угловой точности.

Необходимая, согласно физическим задачам ATLAS, структура калориметра требовала новой адекватной технологии массового производства компонентов калориметра и их сборки. Для этой цели в ОИЯИ была разработана и использована методика лазерного метрологического контроля сборки, в особенности массивных элементов детектора.

Создание элементов адронного тайл-калориметра проводилось в три этапа. Сначала было организовано высокоточное производство примерно 300 тысяч различных компонентов субмодулей (основные и дополнительные пластины). Затем была осуществлена сборка как самих субмодулей, так и прецизионная сборка уже собственно модулей тайл-калориметра из этих субмодулей. И, наконец, была разработана и применена специальная методика контроля точности сборки.

Работы по созданию адронного тайл-калориметра в ОИЯИ успешно завершились 3 июля 2002 г. в полном соответствии с требованиями коллаборации, когда последний из 65 собранных в ОИЯИ модулей был доставлен в ЦЕРН без каких-либо повреждений.

В дальнейшем «дубненские» модули центрального барреля адронного тайл-калориметра были использованы при тестовой полной сборке детектора на поверхности, а потом и при окончательной сборке детектора под землей на глубине 100 м, где

установка ATLAS начала работать с 2009 г. В обеих сборках детектора активное, если не решающее, участие принимали инженеры и техники ОИЯИ (рук. Н. Д. Топилин). В декабре 2004 г. дубненский баррель тайл-калориметра был полностью установлен на свое рабочее место. В середине 2006 г. все работы по полномасштабной сборке калориметра ATLAS были завершены.

В коллаборации с рядом российских и международных научных организаций группа ОИЯИ (рук. В. Д. Пешехонов) участвовала в разработке и создании детектора **переходного излучения — трекера (TRT) для внутреннего детектора** установки ATLAS. В Дубне были выполнены исследования и разработки тонкостенных дрейфовых трубок (так называемых строу), методов считывания информации с них. ОИЯИ участвовал в создании и тестировании прототипов детектора переходного излучения — трекера на основе строу.

Из многочисленных совместных работ можно выделить, прежде всего, исследования конструкционных материалов, элементов детекторов и прототипов на реакторах ОИЯИ; разработку технологии сборки детекторов и специализированного сборочного оборудования. Оригинальностью и сложностью отличалось исследование и выработка спецификации на метод охлаждения детектора. На стенде в ОИЯИ в течение 1996–1997 гг. проводились совместные с сотрудниками ЦЕРН исследования, результаты которых легли в основу созданной в дальнейшем системы охлаждения детектора.

В ОИЯИ было создано 17 кольцевых строу-модулей (104 448 каналов электроники считывания). Для выполнения этих работ в Дубне были подготовлены и оборудованы уникальные помещения для армирования строу.



Кольцевой строу-модуль TRT-детектора ATLAS

В основе организации работ по созданию TRT-детектора лежала, во-первых, поэтапная разработка всех сборочных процедур детектора с тестированием каждой и введением оперативной информации в базу данных, во-вторых, разработка и создание автоматизированного и вспомогательного сборочного оборудования практически для каждой сборочной процедуры и, в-третьих, тщательное тестирование модулей как после сборки, так и после их доставки в ЦЕРН. Наличие разнотипных участков с большими объемами работ: армирования строу, подготовки строу, сборки субмодулей и модулей — предполагало не только специализацию многочисленного персонала, но и наличие различных блоков основного и вспомогательного оборудования на этих участках. Результаты многочисленных оперативных тестов обеспечили высокое качество изготовленных в ОИЯИ кольцевых модулей TRT ATLAS, что подтвердило проведенное в ЦЕРН итоговое тестирование.

При **исследовании свойств калориметрического комплекса ATLAS и подготовке экспериментальных данных** с 1994 по 2008 г. группой ОИЯИ (рук. Ю. А. Кульчицкий) проведен всесторонний анализ базовых характеристик адронного тайл-калориметра и комбинированного калориметра установки ATLAS. Эти работы проводились с использованием экспериментальной информации, накопленной при облучении прототипа и реальных модулей тайл-калориметра, прототипа и реальных модулей комбинированного калориметра (жидко-аргонного электромагнитного и адронного тайл-калориметров) в пучках пионов, протонов, электронов и мюонов с энергией 10–350 ГэВ на ускорителе SPS (ЦЕРН). В частности, была проведена детальная электромагнитная калибровка 12% модулей адронного тайл-калориметра, что позволило ввести его энергетическую шкалу. Разработан и применен метод локальной адронной калибровки калориметрического комплекса ATLAS, который дает возможность определять энергию одиночных адронов с проектной точностью. С использованием результатов облучения адронного тайл-калориметра электронами решена проблема потери энергии в калориметре для адронов с энергией более 80 ГэВ, что позволило существенным образом улучшить внутреннюю цезиевую калибровку тайл-калориметра.

В последние годы интенсивно велась подготовка вычислительного центра ОИЯИ к приему и обработке данных, начата работа по подготовке к анализу данных с использованием грид-

технологий, а также практически завершено создание пункта мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ. ОИЯИ выполняет в эксперименте ATLAS роль одного из центров моделирования и анализа данных (Tier-2). С конца 2005 г. на компьютерах фермы общего пользования центрального вычислительного комплекса ОИЯИ установлено, постоянно поддерживается и обновляется программное обеспечение эксперимента ATLAS. В начале 2007 г. элемент хранения данных центрального вычислительного комплекса был интегрирован в систему управления данными ATLAS (ATLAS DDM). В августе 2007 г. ОИЯИ принял участие в проведении комплексных испытаний данной системы. Проведенные испытания показали надежную работу вычислительного центра и, в первую очередь, элемента хранения ОИЯИ в составе системы управления данными ATLAS. Была продемонстрирована готовность ОИЯИ к приему первых данных с установки.

Большой объем данных ATLAS делает невозможным применение традиционных способов анализа и требует использования специализированного программного обеспечения для обработки географически распределенных данных. Эта особенность усложняет подготовку к физическому анализу и требует соответствующей переподготовки специалистов. Начиная с 2006 г. в ОИЯИ ведутся работы по освоению программ распределенного анализа данных эксперимента ATLAS (GANGA и PANDA). Пользовательские программы физического анализа адаптируются для работы с широким использованием грид. Проводится обучение специалистов особенностям анализа данных с применением грид.

Современные информационные технологии упрощают контроль и мониторинг установки ATLAS и делают доступным получение необходимых данных о состоянии детектора практически из любой точки мира. Для реализации этой возможности было решено создать **пункт дистанционного мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ**. Его наличие позволяет любому желающему, включая экспертов подсистем, в любое время получить сведения о состоянии установки ATLAS и контролировать качество данных непосредственно из ОИЯИ. С помощью пункта мониторинга ATLAS ведется ознакомление сотрудников с организацией мониторинга и контроля качества данных установки ATLAS и обучение пользованию специализированным программным обеспечением перед участием в сеансах набора



В центре удаленного мониторинга ATLAS. На снимке внизу руководитель коллаборации ATLAS П. Йени в кругу дубненских коллег

статистики в ЦЕРН. Запуск пункта удаленного мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ состоялся в октябре 2008 г.

В 2004 г. начаты систематические работы по **программе участия ОИЯИ в физических исследованиях на установке ATLAS**. С этой целью в ОИЯИ было утверждено регулярно действующее рабочее совещание дубненской части коллаборации ATLAS, задачей которого является разработка и контроль участия ОИЯИ в физической программе этого эксперимента. В результате сотрудниками ОИЯИ выполнен ряд важных исследований в рамках коллаборации ATLAS. В частности, была показана перспективность обнаружения бозона Хиггса по его распаду на пару b -кварков при совместном рождении

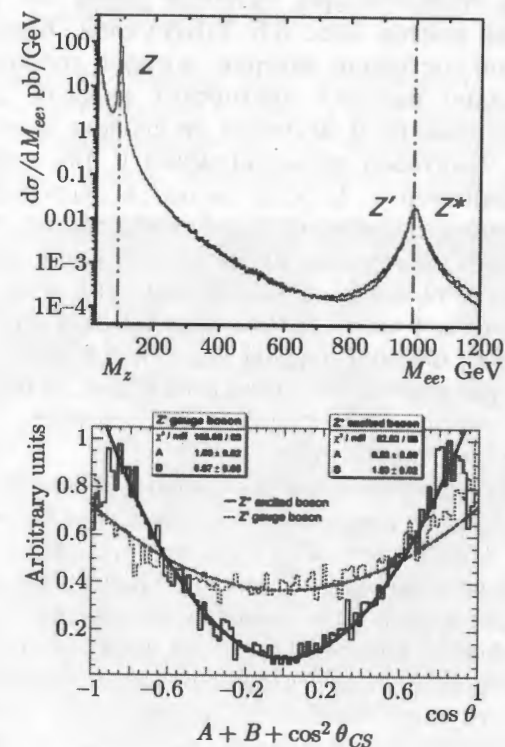
H - и W -бозонов в случае, когда отбираются события с большими поперечными импульсами этих бозонов. Совместно с коллегами из хиггсовской группы ATLAS HSG5 сотрудники ОИЯИ разработали новый подход, основанный на применении нейронных сетей, который включает дополнительные угловые переменные, определяемые спином распадающихся частиц. Поиск заряженного бозона Хиггса SUSY будет вестись сотрудниками ОИЯИ по его распадам на чарджино-нейтралينو в рамках Минимальной суперсимметричной стандартной модели (MSSM). Данный канал распада предоставляет возможность обнаружить заряженный бозон Хиггса в той области пространства параметров модели, которая недоступна распадам на частицы Стандартной модели. Рассматриваемый распад предполагает, что заряженный бозон Хиггса имеет достаточно большую массу (не менее 250 ГэВ), где доминирует канал рождения тяжелого заряженного бозона Хиггса — совместное рождение с топ-кварком. Предварительные исследования показали перспективность данного канала для обнаружения заряженного бозона Хиггса в достаточно широкой области пространства параметров ($\tan\beta - m_{H^\pm}$). Экспериментальные данные, полученные установкой ATLAS в первые годы работы на низкой светимости LHC, будут использованы для определения реальных фонов.

С участием сотрудников ОИЯИ был предложен новый метод измерения массы топ-кварка, основанный на использовании информации только лептонного характера. Применимость этого метода была изучена на основе анализа распада в детекторе ATLAS пары топ-кварков в лептон-струйном канале ($tt \rightarrow \text{lepton} + \text{jets}$) при энергии LHC 10 ТэВ. Наклон линейной зависимости среднего поперечного импульса лептона как функции массы топ-кварка и отношение сигнала к фону являются ключевыми факторами данного метода: чем больше оба эти значения, тем точнее может быть определена масса топ-кварка данным методом. Далее предполагается провести калибровку зависимости среднего поперечного импульса лептона от массы топ-кварка на основе более широкого набора моделированных данных для разных масс топ-кварка, а также более тщательно исследовать фоновые процессы.

В ОИЯИ продолжены исследования возможности обнаружения суперсимметрии по нескольким наблюдаемым в так называемой EGRET-области. Помимо доминирующих каналов образования глюино дополнительно рассмотрены так называемые

слабые каналы образования в этой точке нейтралино и чарджино, которые, распадаясь, давали бы в конечном состоянии несколько энергичных лептонов и адронных струй совместно с большой потерянной поперечной энергией.

С участием сотрудников ОИЯИ на базе сгенерированного набора данных проведен анализ возможности регистрации нового возбужденного нейтрального бозона Z^* на установке ATLAS. Этот бозон может быть образован в адронных столкновениях в канале кварк-антикварковой аннигиляции и зарегистрирован за счет последующего распада на лептонную пару. Это делает такие бозоны весьма привлекательными объектами с точки зрения раннего их поиска на первых нескольких десятках обратных фемтобарн полной статистики LHC при энергии 7 ТэВ. Более того, в отличие от других тяжелых нейтральных резонансных состояний, эти бозоны имеют уникальную сиг-



Распределения по инвариантной массе и углу разлета дилептонной пары от распада Z^* -бозона

натуру (дилептонных пар) относительно поперечного импульса, псевдобыстроты и углового распределения, что позволяет легко отличить их от других объектов, также распадающихся на лептонные пары (см. рисунок). Построен простой генератор событий для инклюзивного образования Z^0 -бозонов с распадом последнего на электрон-позитронную пару ($pp \rightarrow Z \rightarrow e^+e^-$), и получены предварительные результаты для оценки чувствительности детектора ATLAS к этому процессу на базе полного моделирования детектора.

Эксперимент ALICE

Эксперимент ALICE на Большом адронном коллайдере (LHC) предназначен для поиска и исследования кварк-глюонной плазмы в столкновениях тяжелых ионов (Pb–Pb) с энергией в системе центра масс 5,5 ТэВ/нуклон. Кварк-глюонная плазма — новое состояние материи, которое должно возникать при экстремально высоких плотностях энергии. Доказательство ее существования и изучение ее свойств имеет ключевое значение для квантовой хромодинамики и для понимания механизма конфайнмента. С этой целью в эксперименте будет проведено всеобъемлющее изучение характеристик вторичных частиц (адронов, электронов, мюонов и фотонов), рождающихся в столкновениях тяжелых ионов. Кроме того, в экспериментах будут исследоваться чисто протон-протонные и протон-ядерные взаимодействия. Физики ОИЯИ начали активно участвовать в подготовке проекта эксперимента ALICE с начала 1990-х гг. В настоящее время коллаборация ALICE состоит из 1000 физиков из 90 институтов 30 стран.

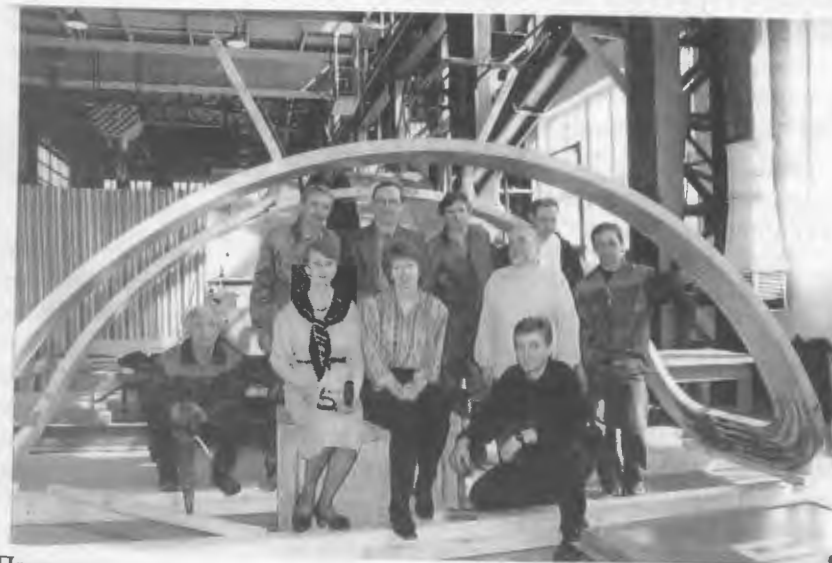
В этом проекте специалисты ОИЯИ занимались проектированием большого дипольного магнита, созданием прототипов обмотки и изготовлением ярма магнита. Были выполнены поставка и измерение характеристик кристаллов вольфрамата свинца для фотонного спектрометра, изготовлены и протестированы дрейфовые камеры детектора переходного излучения; разработаны программы для моделирования, распознавания образов, реконструкции треков и графического представления. Сотрудники ОИЯИ осуществили тестирование программных пакетов моделирования и анализа данных эксперимента на базе грид-технологий, занимаются разработкой физической про-

граммы исследований и моделированием различных процессов, а также уже приступили к физическому анализу данных.

Крупнейший дипольный магнит, спроектированный в ОИЯИ, является важной частью переднего мюонного спектрометра. Величина магнитного поля составляет 0,7 Тл, интеграл поля 3,0 Тл·м и апертура 9°. Длина магнита составляет 5 м, высота 9 м, ширина 7 м и внутренний диаметр 4,1 м. Обмотка сделана из полого алюминиевого проводника 50 × 50 мм². Масса ярма магнита около 850 т, масса обмотки около 30 т. Прототип седлообразной обмотки был изготовлен в ОИЯИ. Ярмо магнита изготавливалось на заводе СМЗ (Кимры, Россия) под контролем группы ОИЯИ–ALICE.

Дипольный магнит после изготовления был транспортирован в Женеву по железной дороге. В ЦЕРН он был сначала собран и испытан во временной позиции. Затем был разобран и собран уже в рабочей позиции, успешно испытан при полном токе в обмотке.

Для достижения главной цели эксперимента ALICE — исследования кварк-глюонной плазмы в ходе анализа данных будут изучаться определенные наборы наблюдаемых параметров событий взаимодействия тяжелых ионов. Среди них: глобаль-



Прототип одного слоя седлообразной обмотки дипольного магнита, изготовленный в ОИЯИ



Дипольный магнит собран в рабочей позиции и испытан при полном токе

ные характеристики событий (распределение потоков частиц, форма и структура распределений по быстротам); спектры поперечных импульсов (большие флуктуации от события к событию, особенности спектров); композиция ароматов (странность и увеличение выхода очарованных частиц); характеристики векторных мезонов (изменение масс, ширин легких мезонов (ρ, ω, ϕ), подавление выходов тяжелых кваркониев ($J/\psi, \psi', \Upsilon, \Upsilon', \Upsilon''$)); фемтоскопия; прямые фотоны (термальное излучение из кварк-глюонной плазмы и смешанной фазы).

Основные усилия группы ОИЯИ в работах по физическому моделированию и подготовке к анализу данных были направлены на исследование рождения векторных мезонов, корреляций частиц и рождения тяжелых кваркониев. Ожидается, что изучение рождения легких векторных мезонов даст детальную информацию о динамике ультрарелятивистских ядро-ядерных столкновений. Изменения формы резонансов ожидаются как эффект взаимодействия с плотной материей (предсказываются ширины до 450, 100 и 80 МэВ для ρ -, ω - и ϕ -мезонов соответственно) и как результат частичного восстановления киральной симметрии. Исследование рождения тяжелых кваркониев в ядро-ядерных столкновениях очень важно для изучения кварк-

глюонной плазмы. Одним из ярких предсказаний образования кварк-глюонной плазмы является подавление рождения кваркониев вследствие цветного экранирования $Q\bar{Q}$ -взаимодействия или разрушения вследствие соударения термальных глюонов. Сила эффекта зависит от энергии связи кваркония и от температуры кварк-глюонной плазмы. Отметим, что такие эффекты холодной ядерной материи, как ядерное поглощение и экранирование, также подавляют выходы кваркониев как в AA-, так и в pA-столкновениях. Интенсивное моделирование проводилось для изучения корреляций частиц (фемтоскопия). Экспериментальные данные будут использоваться для получения сведений о пространственных размерах источника вылета частиц.

Главная задача в системе компьютеринга эксперимента ALICE — обеспечение коллаборации необходимой структурой, ресурсами и программным обеспечением для извлечения физической информации из данных, накопленных в ходе эксперимента и, таким образом, реализации целей и задач, поставленных в эксперименте. Основным заданием для компьютеринга эксперимента является поддержка стабильного функционирования прикладного программного обеспечения и промежуточного слоя программ, обеспечивающих процесс набора данных и передачу данных. Группа ОИЯИ-ALICE ответственна за организацию компьютеринга во всех российских институтах и университетах, вовлеченных в проект ALICE. В течение ряда лет проводилось тестирование на базе Грид компьютерной сети эксперимента ALICE для моделирования и анализа данных на компьютерной ферме ОИЯИ и в других российских институтах.

Важнейшей частью установки ALICE является детектор переходного излучения TRD. Он разработан для идентификации электронов и регистрации треков (совместно с TPC) при большой множественности частиц, образующихся в результате столкновения тяжелых ионов. Детектор TRD ALICE имеет полную активную площадь 736 м^2 и включает в себя 540 TRD-камер с чувствительной площадью от 0,9 до $1,8 \text{ м}^2$. TRD-камера основана на многопроволочной пропорциональной камере с 7-мм промежутком газового усиления и включает в себя также дрейфовый промежуток глубиной 30 мм и радиатор толщиной 48 мм.

Для создания и тестирования TRD-камер в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ была создана современная ин-



Первый кандидат в J/Ψ -событие, обнаруженный при анализе столкновений протонов с энергией взаимодействия 7 ТэВ. На топографии события четко видны два прямых трека в мюонном спектрометре

фраструктура — подготовлены и оснащены новейшим технологическим оборудованием помещения общей площадью около 600 м², включая «чистые» комнаты площадью 120 м², оборудованные климатической системой, позволяющей поддерживать постоянную температуру около +24 °С и влажность не более 35%. Фильтры тонкой очистки воздуха обеспечивают в рабочей зоне класс чистоты лучше 10 000. Созданная инфраструктура и технология изготовления детекторов получили высокую оценку российских и зарубежных специалистов. Работы по проекту TRD ALICE в ОИЯИ координировал проф. Ю. В. Заневский.

TRD-камеры сконструированы как полностью склеенные (неразборные) модули. Была разработана соответствующая технология создания камер и методика их многократного тестирования в процессе изготовления. Особое внимание уделялось герметичности камер, так как рабочим газом является дорогостоящий ксенон. Всего в ОИЯИ за 4 года было создано 125 TRD-камер размером около 1 × 1 м. При этом точность изготовления детекторов составляла ~ 50 мк. Исследование однородности коэффициента усиления создаваемых модулей TRD, коэффициента поглощения рентгеновских квантов в радиаторах детектора выполнялось на автоматизированном стенде двухмерного сканирования с компактным источником направленного мягкого рентгеновского излучения и максимальной энергией 8 кэВ. Генераторы рентгеновского излучения были разработа-



Президент Общества им. Г. Гельмгольца (Германия) проф. Ю. Млюнек знакомится с технологией изготовления TRD-камер в лаборатории координатных детекторов ЛФВЭ ОИЯИ

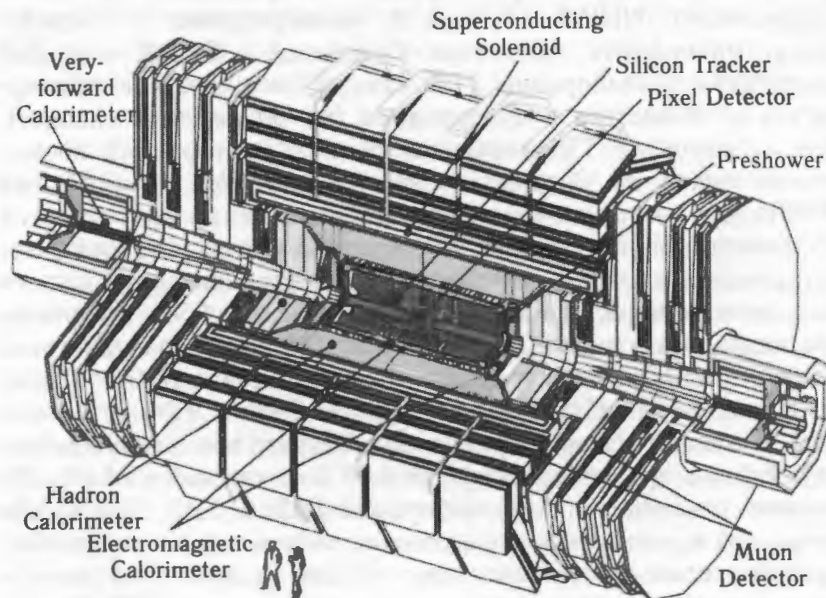
ны, исследованы и изготовлены в ОИЯИ и успешно используются в институтах, участвующих в проекте: ОИЯИ, GSI (Дармштадт), NIPNE (Бухарест), университетах г. Гейдельберга, Франкфурта, Мюнстера. Созданные в ОИЯИ и других институтах коллаборации TRD-камеры собираются в Университете г. Мюнстера в супермодули (по 30 камер в каждом). Все супермодули TRD проходят полную проверку на космических лучах на установке, спроектированной сотрудниками ОИЯИ, где в качестве ионизирующего излучения используются космические лучи. Основными элементами этой установки, изготовленной в ОИЯИ, являются сцинтилляционные плоскости большого размера, просматриваемые системой ФЭУ, и соответствующая электроника. В 2010 г. эта работа была удостоена второй премии на конкурсе научно-методических работ ОИЯИ.

В начале декабря 2009 г. детекторы TRD и TPC установки ALICE впервые зарегистрировали события при столкновении двух пучков протонов с энергией 0,45 ТэВ каждый на LHC. По мнению руководителей коллабораций TRD и TPC ALICE, оба детектора хорошо работали в течение сеанса, что подтвердилось предварительными результатами off-line анализа. Это важное достижение коллаборации, где вклад сотрудников ОИЯИ является весьма существенным.

Проект CMS

Компактный мюонный соленоид (CMS) — это крупномасштабный по своим размерам и сложности многоцелевой исследовательский комплекс, стоимость которого приближается к миллиарду швейцарских франков. Коллаборация CMS объединяет около 2300 ученых из 175 научных центров 38 государств. Руководителями группы CMS в ОИЯИ являются И. А. Голутвин и А. В. Зарубин.

Научные группы из России и стран-участниц ОИЯИ создали объединенный коллектив, получивший сокращенное название RDMS (Russia–Dubna Member States), достаточно сильный, чтобы взять на себя обязательства по созданию субдетекторов CMS. На верхнем уровне управление осуществляется советом коллаборации и исполнительным комитетом. На нижнем уровне работу по проектам отдельных подсистем, в создании которых принимает участие много организаций, координирует совет институтов. Совет коллаборации — руководящий орган RDMS и несет ответственность за принятие стратегических решений внутри коллаборации. В него входят представители институтов и стран. Руководитель проекта осуществляет управ-



Детектор CMS (Compact Muon Solenoid)

ление исполнительным комитетом, в состав которого входят технические координаторы подсистем, руководители подпроектов, а также председатель совета коллаборации. Важная часть программы RDMS — ежегодное проведение научных конференций с детальным анализом результатов работы по созданию установки и подготовке программы физических исследований, которые привлекают ученых из многих стран. После пуска коллайдера эта серия конференций продолжается обсуждением первых научных результатов. Это своеобразный «мозговой центр» сотрудничества, вырабатывающий оперативные решения по координации работы всех участников коллаборации. Наряду с этим сотрудничеством институтов России и стран-участниц в ОИЯИ организован постоянно действующий объединенный семинар «Физика на LHC», на котором ведущие ученые и специалисты ОИЯИ, ЦЕРН, других центров обсуждают самые свежие новости из ЦЕРН.

Именно организация RDMS позволила физикам России и стран-участниц ОИЯИ нести полную ответственность за торцевые области детектора CMS, как это было определено в начальном проекте RDMS, т. е. за торцевые адронные калориметры и передние мюонные станции. Основные усилия ОИЯИ в проекте CMS сконцентрированы на создании и запуске внутренних торцевых электромагнитных калориметров. Вместе с RDMS ОИЯИ отвечал за изготовление адронных торцевых калориметров епдсар (HE) и передних мюонных станций (ME1/1), а также комплекса вращающейся передней радиационной защиты. Кроме того, физики RDMS участвуют в развитии физической программы, реконструкции и отборе событий и создании базового математического обеспечения и компьютеринга.

Особый интерес для группы из ОИЯИ представляет программа исследований процессов с димюонами больших масс, которая является составной частью физической программы на CMS. Сфера ответственности ОИЯИ в физическом анализе на CMS — это исследование образования пар Дрелла–Яна и поиск дополнительных размерностей в димюонных конечных состояниях, измерения бегущей константы связи КХД, а также исследования по физике прямых фотонов.

Проект CMS потребовал создания беспрецедентно сложного оборудования, основанного на использовании последних достижений высоких технологий в рамках международного сотрудни-

чества. Огромную роль в создании CMS сыграла промышленность — как российская, так и других стран-участниц ОИЯИ. Ряд промышленных предприятий, работающих по заказам коллаборации, отмечен золотыми наградами CMS за вклад в создание компактного мюонного соленоида. В частности, Минский завод им. Октябрьской Революции (МЗОР), Богородицкий завод теххимических изделий (Тульская обл.), Санкт-Петербургский ЦНИИ «Электрон», Ижорские механические заводы, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалы — НИКИЭТ, ВНИИ технической физики (Снежинск), ОКБ им. В. М. Мясищева (Жуковский).

С участием НИКИЭТ — крупнейшей конструкторской организации России, которая разрабатывала реакторы для Атомного проекта, реакторы для подводных лодок, космических аппаратов, исследовательские реакторы, разработаны важные узлы CMS. Привлекая к этой работе свой большой опыт и связи с отечественной промышленностью, специалисты этого института нашли нетривиальный путь решения очень сложной проблемы при создании поглотителя калориметра — использовали в качестве основного материала латунь от гильз артиллерийских снарядов, которые подлежали уничтожению. Это обошлось дешевле, чем другие варианты, но самое главное, что «конверсионный» материал отвечал необходимым требованиям по прочности. Разработки НИКИЭТ реализовывались на таких крупнейших предприятиях, как завод «Красный выборжец» в Санкт-Петербурге, который занимался прокатом металла, и уже упомянутый МЗОР в Белоруссии, изготовивший необходимые узлы с чрезвычайно высоким качеством. ВНИИТФ в Снежинске (бывший Челябинск-70, до недавних пор одно из самых закрытых предприятий) разработал и изготовил поглотитель переднего калориметра на основе новейших технологий — так называемой диффузионной сварки.

Большую роль в сложившемся международном разделении труда сыграло производство очень сложных кристаллических детекторов для электромагнитного калориметра из вольфрамата свинца. И единственное предприятие в мире, на котором удалось организовать крупномасштабное производство этой уникальной продукции, — это Богородицкий завод теххимических изделий в Тульской обл.

Важный вклад в создание детектора внес Зеленоград с его современными технологиями разработки и изготовления полу-

проводниковых кремниевых детекторов. На предприятии «Электрон» разработаны и изготовлены 20 тысяч сверхчувствительных фотодетекторов, рассчитанных на работу в сильном магнитном поле. В ОКБ им. В. М. Мясищева в творческом сотрудничестве с ИЯИ РАН организованы разработки и изготовление на основе углепластика сверхпрочных и сверхтонких структур крепления кристаллов, которые выращиваются в Богородицке.

Лидерами российской промышленности изготовлен ряд сложных элементов установки CMS, например, механические структуры электромагнитного калориметра — на предприятии «Энергия» в г. Королеве Московской обл., а по соседству с Дубной, в г. Савелово Тверской обл., — масштабные устройства поворотной защиты. Часть заказов выполнялась в рамках российской программы, а часть — по заказам ЦЕРН, что стимулировало и развитие предприятий-изготовителей.

Огромный потенциал фундаментальной науки в сочетании с научно-техническим потенциалом прикладной науки и промышленности и большая материальная поддержка правительств участвующих стран позволили ученым RDMS занять достойное место в одном из крупнейших проектов XXI в. Успешное выполнение обязательств по созданию установки CMS открыло ученым RDMS возможность участия в физических исследованиях на LHC. Это особенно привлекательно для молодых ученых.

Таким образом, участие институтов России и стран-участниц Дубны в физической программе LHC действительно стало важнейшим направлением национальных программ России и некоторых других стран-участниц по физике частиц. Как сказал руководитель коллаборации CMS Гвидо Тонелли, «Россия сыграла важную роль в строительстве детектора CMS и выдающуюся роль в создании нескольких его главных компонентов, а именно мюонной и калориметрической систем, которые относятся к основным подсистемам, играющим ключевую роль в физической программе. Поэтому прежде всего я хочу сказать, что мы благодарны за поддержку, оказанную проекту CMS Россией и странами-участницами ОИЯИ в Дубне. И теперь мы надеемся, что новое поколение молодых российских физиков, студенты и аспиранты, внесут свой вклад в изучение той физики, которая станет следующим вызовом в ближайшем будущем».

Запуск LHC damper

По инициативе руководителей Лаборатории физики частиц И. А. Савина и В. П. Саранцева в 1991 г. было начато сотрудничество с ЦЕРН по ускорительной тематике в рамках проекта LHC. В том же году И. Н. Иванов (ОИЯИ) и Д. Буссар (ЦЕРН) договорились о проведении научно-исследовательских работ по системе подавления поперечных когерентных колебаний пучка в LHC. Успешный ход совместных работ специалистов ОИЯИ и сектора высокочастотных систем отдела пучков на ускорителях ЦЕРН стал основанием для участия ОИЯИ в создании системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в LHC в рамках соглашений ЦЕРН–Россия–ОИЯИ по LHC. Система подавления (СП) поперечных когерентных колебаний пучка предназначена для демпфирования остаточных колебаний сгустков после инжекции в LHC и для обеспечения устойчивости высокоинтенсивных пучков ускоряемых частиц. В короткие сроки в ОИЯИ и ЦЕРН было проведено проектирование всего оборудования. Изготовление необходимых 20 электростатических дефлекторов и 20 мощных широкополосных усилителей было осуществлено на российских предприятиях и в ОИЯИ в полном объеме в установленные сроки — в 2006 г. Окончательная сборка и наладка усилителей, подсоединенных к дефлекторам, была выполнена в ЦЕРН в 2007 г.



Дефлекторы и мощные усилители СП в тоннеле LHC

Работы по запуску всех подсистем СП были начаты в конце 2007 г.; по их завершении в намеченные сроки (до начала работ с пучком) были достигнуты параметры, соответствующие спецификациям LHC. Инжектированные в LHC протоны прошли сквозь электростатические дефлекторы 7 сентября 2008 г. на первом кольце и 10 сентября 2008 г. на втором кольце. После достижения режима длительной циркуляции сгруппированного пучка во втором кольце (11 сентября 2008 г.) мощные выходные каскады и дефлекторы системы подавления были успешно использованы в режиме возбуждения поперечных колебаний в пучке для измерения бетатронных частот. Эти же системы были протестированы в декабре 2009 г. в режиме удаления из камеры ускорителя частиц, попавших в сепаратрисы, которые приходится на фронт ударного магнита, осуществляющего вывод пучка из вакуумной камеры ускорителя.

Ближайшие планы связаны с участием специалистов ОИЯИ в работах по окончательной наладке системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка LHC и в исследованиях динамики частиц с целью получения предельных параметров пучка в коллайдере.

Исследования спиновой структуры нуклона

ОИЯИ имеет более чем 30-летнюю историю проведения экспериментальных исследований структуры нуклона, восходящую к эксперименту NA4 (сотрудничество BCDMS) по измерению структурных функций нуклонов и ядер на SPS в ЦЕРН. Эти результаты до сих пор являются наиболее точными среди экспериментов на фиксированной мишени. Когда в конце 1980-х гг. был опубликован шокирующий результат коллаборации EMC по измерению вклада валентных кварков в спин нуклона, известный как «спиновый кризис», группа сотрудников ОИЯИ, руководимая проф. И. А. Савиным, была приглашена для участия в проведении проверочного эксперимента сотрудничеством «Спиновая мюонная коллаборация» (SMC). После того как измерения SMC подтвердили предыдущий результат, заключавшийся в том, что вклад валентных кварков не описывает спин нуклона, была начата подготовка следующего этапа данных исследований — измерения вклада глюонов и выделения индивидуальных распределений легких кварков и странного моря.

Для реализации этих задач требовалось создать установку нового поколения, оснащенную протяженной секционной поляризованной мишенью, развитой трековой системой, способной регистрировать и идентифицировать не только рассеянный мюон, но и остальные частицы, возникающие в процессе глубоководного рассеяния, и развитой калориметрией. Такая установка была создана коллаборацией COMPASS в ЦЕРН при активном участии ОИЯИ. Ключевые позиции в создании установки COMPASS — поляризованной мишени, адронного калориметра и строу детектора — занимали сотрудники ОИЯИ. Набор экспериментальных данных начался в 2002 г., в настоящее время с участием физиков ОИЯИ получены уникальные результаты по измерению спиновой структуры нуклона. Среди них можно отметить прямое измерение поляризации глюонов в нуклоне. Впервые были извлечены партонные распределения Δu , Δd , $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{d}$ и Δs . Полученные на протонной и дейтронной поляризованных мишенях данные позволили извлечь несинглетную спинозависимую структурную функцию $g_1^{NS}(x, Q^2)$ и провести проверку правила сумм Бьеркена с точностью, превышающей 1σ .

Программа исследований сотрудничества COMPASS включает уникальные измерения с поперечно-поляризованной мишенью, исследования выхода странных кварков, изучение эффекта Примакова и адронную спектроскопию.

Развитие этой области исследований также связано с создаваемым ускорительным комплексом NICA и установки, ориентированной на экспериментальные исследования с поляризованными пучками. Основной акцент предполагается сделать на процессы с поперечной поляризацией.

Эксперименты NA48 и NA62

Традиционным для ОИЯИ направлением исследований по физике элементарных частиц является физика каонов. Восходя к проекту БИС на ускорителе У-70 в Протвино, эта программа постоянно развивалась и поддерживалась дирекцией Института, что позволило физикам из Дубны проявить себя в одном из наиболее успешных проектов в этой области — эксперименте NA48.

Европейский эксперимент NA48, в котором ОИЯИ принимал самое активное участие с этапа разработки детекторов, как

и его американский партнер и конкурент КTeV, можно отнести к экспериментам, изучающим каонные распады методами физики высоких энергий. В этих экспериментах каоны порождаются на фиксированной мишени протонами с энергией в несколько сотен ГэВ. Этим они отличаются от исследований распадов каонов, рожденных в протон-антипротонной аннигиляции при низкой энергии или в распадах почти покоящихся ϕ -мезонов. Итогом выполнения серии экспериментов NA48 стала совокупность результатов, внесших крупный вклад в каонную физику.

Под общим названием NA48 на ускорителе SPS в ЦЕРН была проведена серия успешных экспериментов NA48, NA48/1 и NA48/2, нацеленная на высокоточные исследования распадов каонов на пределе достижимой интенсивности событий. В рамках сложившегося сотрудничества подготовлена также программа нового эксперимента NA62, нацеленного на изучение сверхредкого распада положительно заряженного каона на пион и два нейтрино, принятая к реализации в ЦЕРН.

В эксперименте NA48 было доказано существование в Природе эффекта прямого CP-нарушения — механизма, способного повлиять на процессы бариогенезиса в ранней Вселенной. Измерение с наивысшей точностью величины параметра CP-нарушения $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (14,7 \pm 2,2) \cdot 10^{-4}$ в двухпионных распадах нейтральных каонов до регистрации первых CP-нарушающих распадов B -мезонов стало одним из наиболее важных экспериментальных результатов, когда-либо полученных в ЦЕРН. Оно находится в согласии с пока еще недостаточно точными расчетами, выполненными в рамках Стандартной модели, что инициирует развитие теоретических расчетных методов.

В указанном эксперименте были обнаружены также новые редкие каналы распадов нейтральных каонов и гиперонов, с наилучшей точностью измерены время жизни и масса короткоживущего нейтрального каона, существенно улучшены точности измерения параметров и определены новые характеристики для ряда известных распадов заряженных и нейтральных каонов, с наилучшей точностью измерена и существенно «поправлена» масса η -мезона. По совокупности полученных результатов эксперимент NA48 вошел в пятерку наиболее ярких экспериментов ЦЕРН, осуществленных за его более чем 50-летнюю историю.

В эксперименте NA48/1, проведенном без спектрометра заряженных частиц, впервые наблюдались редкие распады ней-

тральных каонов на пион и лептон-антилептонную пару, были выполнены прецизионные измерения редких распадов нейтральных барионов.

Эксперимент NA48/2, нацеленный на обнаружение прямого CP-нарушения в трехпионных распадах заряженных каонов путем сравнения их свойств у каонов противоположных знаков, улучшил на порядок существовавший предел точности измерения параметра прямого CP-нарушения — зарядовой асимметрии наклонов далитц-плота $A_{CP} = (g^+ - g^-)/(g^+ + g^-)$.

В этом же эксперименте впервые была обнаружена особенность (сиср-эффект, или эффект «острия») на диаграмме Далитца распада заряженного каона на заряженный и два нейтральных пиона. Это открытие совместно с классическим методом, основанным на анализе распадов каонов на два пиона, электрон и нейтрино, позволило беспрецедентно точно измерить базовые параметры низкоэнергетической КХД, связанные с величиной кваркового конденсата — длиной пион-пионного рассеяния. Результаты, полученные в эксперименте обоими методами, имеют точность, превышающую точность теоретических вычислений на сегодняшний день, и требуют проведения теоретических вычислений в высших порядках киральной пертурбативной теории для сопоставления.

ОИЯИ внес существенный вклад в серию экспериментов NA48 на всех этапах их осуществления. На стадии разработки детекторов сотрудники Института участвовали в создании криостата жидкокриптонного калориметра, организации на территории России производства и в поставке большого объема сверхчистого жидкого криптона для этого уникального прибора. Разработка системы мониторинга физических данных, позволявшая на основе автоматического экспресс-анализа быстро выявлять неочевидные проблемы в работе установки, была с самого начала в сфере ответственности группы сотрудников ОИЯИ. Модернизация программ моделирования, учет эффектов наложения событий, окончательный анализ данных, оценка множества вкладов в систематическую ошибку, подготовка публикаций — на всех этих этапах вклад сотрудников Института был определяющим при получении наиболее важных результатов.

Сложной и комплексной задачей, решенной сотрудниками ОИЯИ, явилось участие в разработке физической программы эксперимента NA48/2 на стадии его подготовки, а также

разработка и создание современной электроники считывания данных с детектора каонного пучка этого эксперимента. Подтверждением значимости вклада ОИЯИ в серию экспериментов NA48 следует считать избрание руководителя дубненской группы В. Д. Кекелидзе на пост лидера («споксмена») эксперимента NA48/2 уже на этапе его планирования.

За время участия в NA48 на материале экспериментов этой серии сотрудниками ОИЯИ были защищены пять кандидатских и одна докторская диссертация, подготовлено более десяти дипломных работ выпускниками ведущих вузов России.

Наследником научной культуры NA48 будет новый эксперимент NA62. Сверхредкий распад заряженного каона, на исследование которого он нацелен, с предсказанной в рамках Стандартной модели вероятностью порядка 10^{-11} несет ценную информацию о CP-нарушающих параметрах матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы, с трудом измеримых в других распадах (в том числе в *B*-мезонном секторе). Предполагается зарегистрировать порядка 100 событий таких распадов при фоне в 10%, что станет качественно новым шагом в каонной физике, снова достигаемым путем преодоления количественного предела регистрируемой установкой интенсивности распадов. В эксперименте NA62 на ОИЯИ возложена ответственность за один из ключевых детекторов — спектрометр заряженных частиц на базе детекторов на тонкостенных дрейфовых трубках, который должен работать с высоким пространственным разрешением в вакууме. Активное участие группа сотрудников ОИЯИ примет и в развитии общего программного обеспечения эксперимента; в том числе в разработке инструментов моделирования, в создании базы данных для контроля процесса изготовления и использования детекторов экспериментальной установки.

Эксперимент DIRAC

Исследования пион-пионных атомов были начаты в 1985 г. на ускорителе У-70 в Протвино на основании работы Л. Л. Неменова, в которой были получены оценки сечения образования адронных атомов в инклюзивных процессах и предложен метод их наблюдения и измерения времени жизни. Затем эксперименты были продолжены на ускорителе PS в ЦЕРН на выведенном протонном пучке с энергией 24 ГэВ международной коллаборацией DIRAC, где лидирующую роль играют физики

ОИЯИ. Экспериментальная установка была создана в 1998 г. Измерения, выполняемые на установке DIRAC, позволяют осуществить уникальную проверку точных предсказаний квантовой хромодинамики при низких энергиях. Первые результаты обработки статистического материала опубликованы, из анализа статистического материала, содержащего 6500 атомных пар, получена первая оценка времени жизни пион-пионных атомов и разность s -волновых длин пион-пионного рассеяния $|a_0 - a_2|$. К настоящему времени зарегистрировано более 16 000 атомных пар от развала пионных атомов в мишени.

В 2004 г. был подготовлен проект по модернизации установки. Цель модернизации — осуществление наблюдения пион-каонных атомов и измерение их времени жизни, улучшение точности измерения времени жизни пион-пионных атомов до 6%, что позволит определить $|a_0 - a_2|$ с точностью лучше 3%, а также наблюдение долгоживущих (метастабильных) состояний пион-пионных атомов. В 2006 г. экспериментальная установка DIRAC была модернизирована: увеличена апертура детекторов за магнитом, добавлены новые детекторы для идентификации каонов и пионов и установлена защита детекторов. В 2007 г. после модернизации установки на ней наблюдалось 173 пион-каонных атома. Набор статистических данных продолжался в 2008–2010 гг.

Проект NA49

С 1994 г. ОИЯИ принимает активное участие в эксперименте NA49 по исследованию образования адронов во взаимодействиях ядер Pb+Pb на ускорителе SPS в ЦЕРН с целью обнаружения возможного состояния деконфайнмента в сильновзаимодействующей ядерной материи на ранней стадии ядро-ядерных столкновений.

Существенным вкладом в эксперимент стало создание в ОИЯИ 900-канального времяпролетного детектора (TOF) высокого разрешения (60–70 пикосекунд), который обеспечивает надежную идентификацию заряженных частиц и легких ядер в широком интервале импульсов от 3 до 14 ГэВ/с. Это стало основной мотивацией к тому, чтобы дубненская группа была активно вовлечена также в обработку и анализ экспериментальных данных. Эта работа посвящена, главным образом, изучению образования идентифицированных заряженных

частиц, которые играют важную роль в понимании динамики релятивистских столкновений тяжелых ионов и эволюции систем, образующихся в этих столкновениях. Результаты последних 5–7 лет основаны на уникальных экспериментальных данных NA49, полученных в столкновениях Pb+Pb при энергиях пучка $(s_{NN})^{1/2} = 6,3, 7,6, 8,7, 12,3$ и $17,3$ ГэВ. Впервые в одном эксперименте для этих энергий были получены спектры по поперечному импульсу пионов, каонов, протонов и антипротонов, а также легких ядер дейтерия, антитейтерия, трития и ^3He в широкой области центральности столкновений ядер.

К числу главных результатов следует отнести исследование стоппинга (торможения) барионов — процесса формирования разогретой и плотной материи, необходимого ингредиента для формирования кварк-глюонной плазмы. Интересными для теории представляются полученные данные об энергетической зависимости выхода отношения антигиперонов к антипротонам, которое не воспроизводится в существующих моделях.

Также следует отметить проведение энергетического сканирования по рождению частиц в интервале энергий SPS с целью поиска порога возможного образования деконфайнмента (смешанной фазы) в центральных столкновениях ядер Pb + Pb. Было показано, что отношение выходов странности к энтропии демонстрирует резкий рогоподобный пик при низких значениях с последующим выходом на плато. Такое поведение не наблюдается в pp -реакции и не воспроизводится в адронных моделях, но находит объяснение в так называемой статистической модели раннего состояния (SMES), в которой обнаруженный эффект объясняется увеличением эффективных степеней свободы примерно в 3 раза, ожидаемым в случае фазового перехода от адронных к кварк-глюонным степеням свободы.

Следует отметить, что полученные результаты стимулировали многочисленные теоретические исследования, в особенности те, которые относятся к обнаруженным особенностям в рождении адронов при низких энергиях SPS и связанному с ними возможному наблюдению начала деконфайнмента. Дальнейшие исследования в этой области положены в основу проекта NA61 в ЦЕРН, в котором ОИЯИ также принимает активное участие и, тем самым, вносит вклад в развитие научной программы по физике релятивистских тяжелых ионов, предусмотренной по проекту NICA/MPD в Дубне.

Нейтринный эксперимент OPERA

Явление осцилляций нейтрино, связанное с наличием у этих частиц отличной от нуля массы и предсказанное более 50 лет назад Б. М. Понтекорво, сегодня доказано несколькими экспериментами, исследующими нейтрино от Солнца, рождаемые в атмосферных ливнях, от реакторов и на ускорителях. Ускорительные эксперименты обладают преимуществами, поскольку в них контролируются энергия и поток нейтрино.

В 2006 г. в ЦЕРН был запущен нейтринный пучок CNGS (CERN–Neutrino–Gran Sasso) в направлении подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии. В лаборатории Гран-Сассо был сооружен 1,5-килотонный нейтринный детектор OPERA. В последние годы стало принято считать, что превращение мюонных нейтрино в тау-нейтрино является механизмом, ответственным за осцилляции, происходящие в атмосфере и на ускорителях. Однако напрямую этот процесс никто пока не наблюдал. Прямая регистрация тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино на расстоянии 700 км от ЦЕРН является целью эксперимента OPERA. Гибридный детектор общей массой около 1,5 тысяч тонн сочетает в себе электронные детекторы с рекордным количеством ядерной фотоэмульсии. Фотоэмульсия служит для регистрации короткоживущих тау-лептонов, рождающихся при взаимодействиях тау-нейтрино с веществом детектора. Ввиду огромного объема фотоэмульсий в эксперименте были разработаны полностью автоматические микроскопы, обладающие высокой производительностью. ОИЯИ принимал активное участие во всех этапах эксперимента с момента создания установки. В настоящее время группа ОИЯИ занимает лидирующую роль в анализе информации от электронных детекторов для предсказания положения вершины события в эмульсионных блоках, а также ведет поиск тау-нейтрино в эмульсии с помощью созданной в ОИЯИ специальной автоматической сканирующей станции для просмотра фотоэмульсии.

Информационные технологии

Традиционно сотрудничество ОИЯИ с ЦЕРН в области информационных технологий развивалось в рамках поддержки, разработки и адаптации пакетов церновских программ (типа segnlib и GEANT), а также специализированного программного обеспечения для отдельных физических экспериментов.

В ходе создания коллайдера LHC началась активная совместная работа по созданию глобальной программно-аппаратной грид-инфраструктуры и по внедрению современных технологий программирования для развития прикладного программного обеспечения для LHC-проектов. Начиная с 2003 г. сотрудники ОИЯИ принимают активное участие в работе двух широкомасштабных международных проектов, где ЦЕРН является головной организацией: WLCG (Worldwide LHC Computing project — проект по созданию, развитию и поддержке глобальной вычислительной инфраструктуры грид для экспериментов на LHC) и EGEE (Enabling Grids for E-science project — проект по развертыванию грид для e-науки). Проекты WLCG и EGEE развивались в тесном взаимодействии, и созданная в результате глобальная грид-инфраструктура чаще всего именуется как инфраструктура WLCG/EGEE.

Участие в WLCG/EGEE включает поддержку и развитие грид-инфраструктуры в ОИЯИ в соответствии с требованиями экспериментов на LHC, участие в тестировании и экспертной оценке промежуточного программного обеспечения WLCG, разработку инструментария для мониторинга грид-среды, развитие базы данных моделированных физических событий (WLCG MCDB), обучение пользователей грид-инфраструктуры, поддержку стран-участниц ОИЯИ в их деятельности по проекту WLCG и др. В результате сотрудничества с ЦЕРН в проектах WLCG и EGEE в ОИЯИ создана грид-инфраструктура, полностью интегрированная в глобальную инфраструктуру WLCG/EGEE и обеспечивающая все необходимые аппаратные, организационные и программные ресурсы для участия специалистов ОИЯИ в экспериментах ALICE, ATLAS, CMS. Грид-сайт ОИЯИ успешно прошел тестовые испытания накануне запуска LHC, а по показателям эффективности использования и надежности грид-сайт ОИЯИ находится в первой десятке лучших сайтов всей глобальной грид-инфраструктуры WLCG/EGEE.

Большой вклад сотрудники ОИЯИ вносят в развитие системы мониторинга для виртуальных организаций LHC, разрабатываемой и поддерживаемой в отделении информационных технологий в ЦЕРН. Данные работы включают в себя как развитие таблиц базы данных и пользовательских интерфейсов, так и совершенствование подходов к сбору и представлению мониторируемых данных. Большое внимание уделялось созданию

и развитию средств мониторинга грид-сервиса FTS — сервиса передачи данных в глобальной инфраструктуре WLCG/EGEE.

В начале 2000-х гг. в ЦЕРН для обеспечения прозрачности работ по построению коллайдера LHC в составе интегрированного комплекса административно-управленческих информационных систем (AIS-комплекса — от Administrative Information Services) началась разработка специальной системы аналитического сопровождения таких больших проектов. Система, получившая название Earned Value Manager (EVM), была создана в ЦЕРН в кратчайшие сроки в сотрудничестве со специалистами из ОИЯИ и ряда университетов — Московского инженерно-физического института и др. При этом особым вкладом со стороны российских специалистов стал метод поиска нестандартных решений, который позволяет сокращать на порядок затраты времени при выполнении сложных научных разработок. Метод основан на разделении решаемой задачи на два этапа — создания в кратчайшие сроки «ядра» системы и ввода его в эксплуатацию, а затем наращивания его шаг за шагом с учетом получаемого опыта эксплуатации. Сложным здесь является выделение «ядра», в основе нахождения которого был заложен принцип: *не делать ничего, что можно не делать*.

В 2008 г. эти результаты стали основой проекта «AIS-технологии и международное сотрудничество», вошедшего от имени ОИЯИ в Программу фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». Целью проекта является организация в российских и зарубежных университетах научно-образовательного процесса по тематике AIS-технологий при ведущем участии специалистов ЦЕРН, с дальнейшим развитием опыта международного сотрудничества, в том числе при участии представителей гуманитарных наук. В 2010 г. этот проект вошел в договор между ОИЯИ и ЦЕРН по научно-техническому сотрудничеству по физике высоких энергий. При этом главная задача — передача опыта по обеспечению прозрачности работ по построению Большого адронного коллайдера для поддержки проектов ОИЯИ — строительства ускорительного комплекса NICA и др.

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ–ГЕРМАНИЯ

Германская Демократическая Республика с момента основания Института была страной-участницей ОИЯИ. Решающую поддержку идее создания Института оказали два известных физика из ГДР — Г. Позе и Г. Герц. После объединения ГДР и ФРГ статус Германии был изменен. ФРГ и ОИЯИ заключили договор о международном сотрудничестве на правительственном уровне, по которому Федеральное министерство образования и исследований Германии (BMBWF) поддерживает определенные направления исследований в ОИЯИ. Договор заключался на 3 года, но потом продлевался, и каждый раз круг задач, которые он охватывал, все расширялся. Сейчас соглашение о совместных работах охватывает 45 городов и 62 научных центра Германии. Это означает участие российских и немецких ученых в общих научных проектах, конференциях, это сотни совместных публикаций в престижных журналах. Каждый год BMBWF проводит заседание комитета в ОИЯИ, на котором всесторонне анализируется сотрудничество Германии и ОИЯИ.

В настоящее время в рамках Соглашения между Федеральным министерством образования и исследований Германии и Объединенным институтом поддерживаются несколько направлений исследований. Это исследования в области теоретической и нейтронной физики, физики высоких энергий и тяжелых ионов, подготовка проектов в GSI и DESY, а также работы по совершенствованию компьютерной инфраструктуры.

В области теоретической физики с 1993 г. по настоящее время действует специальная программа, названная в честь двух выдающихся ученых Германии и России, — программа «Гейзенберг–Ландау». Эта программа нацелена на укрепление связей между физиками-теоретиками Германии и ОИЯИ. Со стороны Германии в программе принимают участие ученые из университетов г. Бонна, Росток, Исследовательского центра г. Дрездена, DESY (Гамбург), Гиссенского университета им. Ю. Либиха

и Института гравитационной физики Общества им. М. Планка (Потсдам). Основными составляющими программы являются проведение школ, рабочих совещаний, поддержка ученых как с одной, так и с другой стороны, выделение грантов на долгосрочные поездки в научные центры Германии, а также для пребывания немецких ученых в ОИЯИ. Особое внимание уделяется воспитанию молодых кадров. В рамках этой программы уже было поддержано более 300 ученых как из Германии, так и из России.

Первый в мире импульсный реактор ИБР (ЛНФ ОИЯИ) стал центром притяжения физиков из стран-участниц сразу же после запуска в 1960 г. Школу научных исследований на установках реактора прошло не одно поколение физиков из многих стран, включая и Германию. Физики из разных стран вместе создавали новые спектрометры, вместе проводили исследования

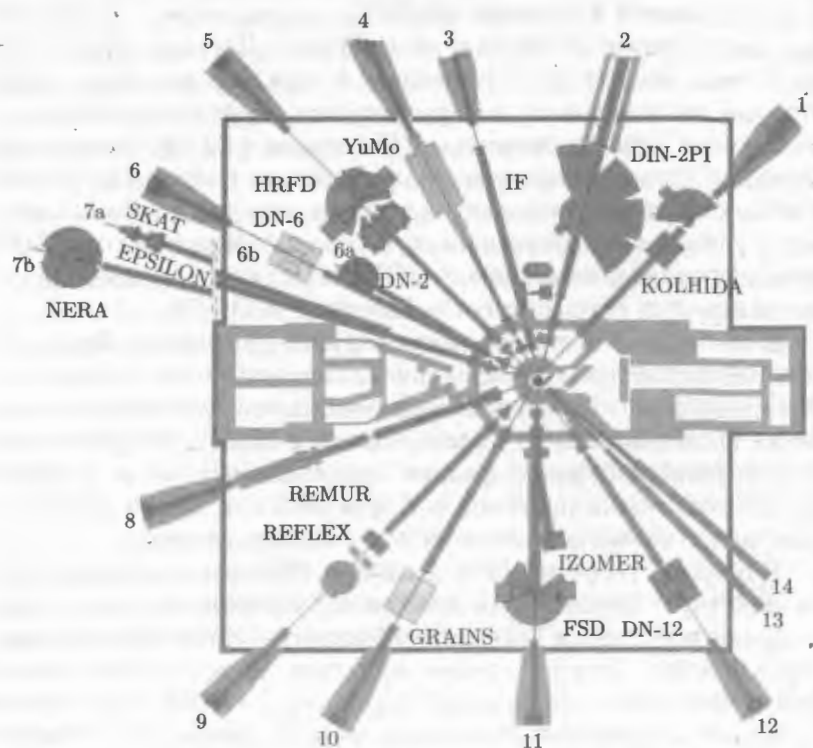


Схема расположения экспериментальных установок на реакторе ИБР-2



Нейтронный импульсный реактор ИБР-2

на них. Получила развитие новая форма сотрудничества — политика пользователей на ИБР-2. Ученый из университета или научного института любой страны мог подать предложение о проведении эксперимента на любой действующей установке реактора. После рассмотрения этого предложения комитетом экспертов и их рекомендаций автор эксперимента совместно с сотрудниками ЛНФ проводил эксперимент. Дальнейшая работа по обработке данных продолжалась с помощью средств

связи. Многие ученые из Германии и других стран прошли подобную школу исследований.

В 2007 г. ИБР-2 был закрыт на реконструкцию и модернизацию с целью повышения эффективности экспериментальных исследований в области физики ядра и конденсированных сред, улучшения основных параметров и повышения эксплуатационной надежности и безопасности реактора. Но сотрудничество с Германией не прекратилось. Пока реактор не работает, идет работа по реконструкции нейтронных каналов на канале 7 ИБР-2 и модернизация дифрактометров ЭПСИЛОН и СКАТ. Основное направление работ на этих дифрактометрах — изучение деформационных процессов, происходящих внутри коры Земли. В реконструкции принимают участие сотрудники из Потсдамского центра геофизических исследований Общества им. Г. Гельмгольца и Института морских наук г. Киля.



Дифрактометр СКАТ

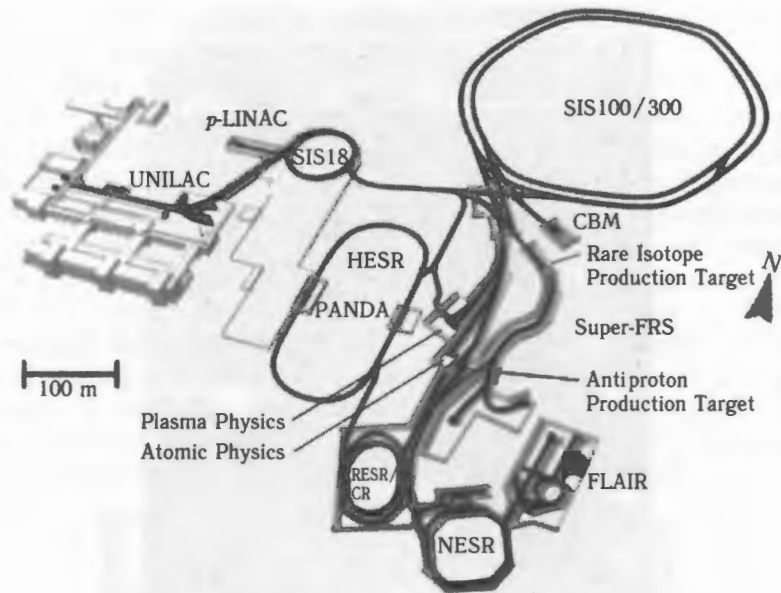
С помощью рассеяния нейтронов и с применением дополнительных методов возможно исследование наносистем и новых материалов, что имеет важное значение для развития нанотехнологий в сфере электроники, фармакологии, медицины, химии, современной физики конденсированных сред и смежных областей. На ИБР-2 для этого проходит не только модернизация старых, но и создание новых спектрометров. Один из таких проектов — нейтронный рефлектометр с вертикальной плоскостью рассеяния GRAINS — создается в сотрудничестве с учеными из Мюнхенского технического университета. Кроме того, сов-



Дифрактометр для измерения деформаций и напряжения ЭПСИЛОН-МДС вместе с устройством одноосного сжатия

местно с учеными из Университета г. Магдебурга, Берлинского центра им. Г. Гельмгольца проводятся расчеты и оптимизация пучков нейтронов на каналах реактора для спектрометров, разработки перспективных детекторов нейтронов, системы сбора данных, информационно-вычислительной инфраструктуры.

В области физики высоких энергий и тяжелых ионов особое место занимает сотрудничество с Центром по изучению тяжелых ионов (GSI). В GSI в стадии строительства находится крупнейший международный проект FAIR, участниками которого являются Россия и ОИЯИ. Реализация этого проекта позволит решить очень широкий круг задач от радиобиологии и ядерной астрофизики до исследований в области кварк-глюонной плазмы. В 2008 г. был подписан новый договор о сотрудничестве в исследованиях свойств горячей и плотной барионной материи и разработке ускорительных комплексов ОИЯИ и GSI. Оба института имеют богатый опыт проведения совместных исследований



Ускорительный комплекс FAIR

по синтезу новых элементов, радиобиологических экспериментов и изучению конденсированного состояния вещества.

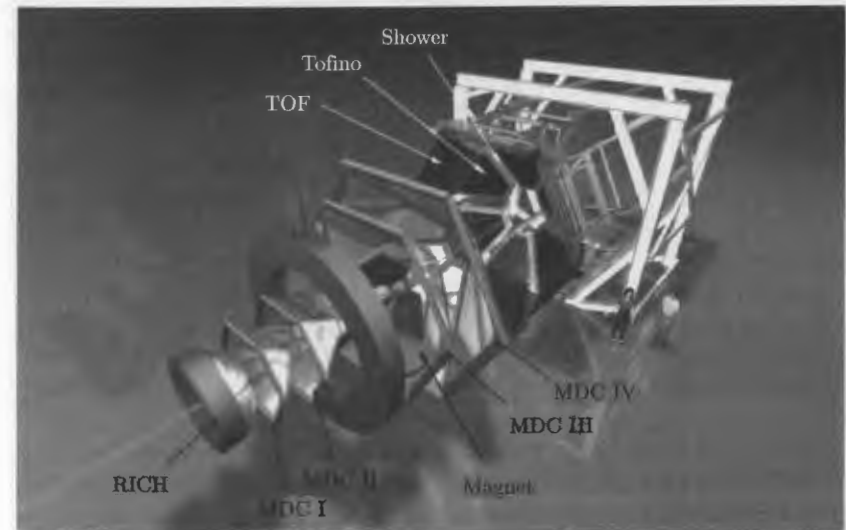
Изучение горячей и плотной барионной материи играет важную роль в современных экспериментальных и теоретических программах. Для продолжения этих исследований в GSI в рамках проекта FAIR создается ускорительный комплекс SIS100/300. Аналогичный с точки зрения физических задач комплекс NICA планируется создать в ОИЯИ. Два различных подхода к проведению экспериментов: исследования с фиксированной мишенью на SIS100/300 и коллайдерные эксперименты на комплексе NICA/MPD — являются взаимодополняющими.

Физики ОИЯИ совместно со своими коллегами из университетов г. Гейдельберга, Франкфурта, Мюнхена и Исследовательского центра г. Дрездена принимают активное участие в создании ускорительного комплекса FAIR в Дармштадте. На основе сверхпроводящих элементов, которые используются в нуклотроне, разрабатываются прототипы магнитов, которые планируется применять в этом новом международном центре. Несколько физических групп заняты проработкой экспериментальной программы исследований, которые планируется проводить на

этом комплексе, в частности по эксперименту CBM (сжатая барионная материя). Для этого эксперимента в ОИЯИ ведутся разработки дипольного сверхпроводящего магнита.

Работы по проекту PANDA включают в себя расширение физической программы, разработку методов и средств моделирования и анализа данных и конструирование детекторных систем. В частности, физики ОИЯИ принимают участие в создании сверхпроводящего соленоида, черенковского детектора и мюонной системы. В проекте задействованы физики из университетов г. Гиссена, Бохума, Тюбингена.

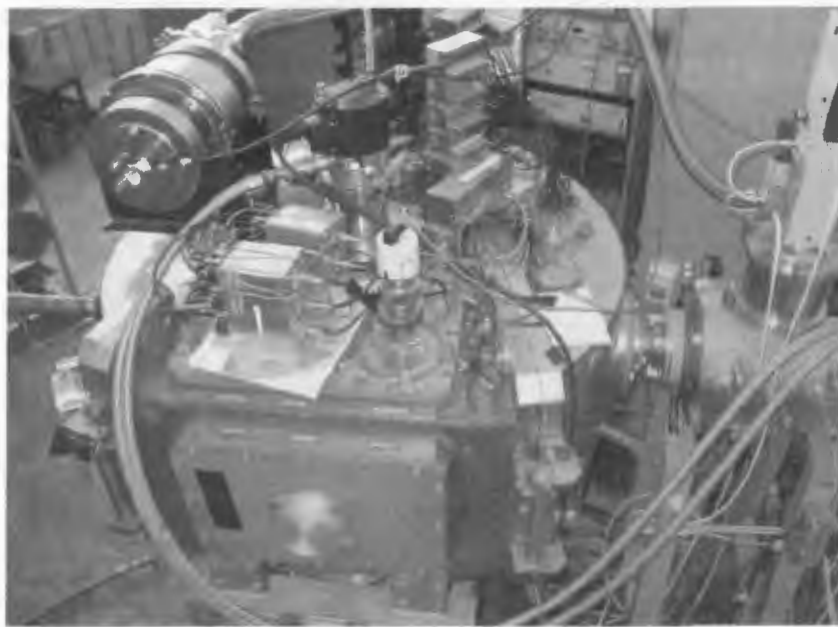
В GSI совместно с физиками из университетов г. Франкфурта, Гиссена, Технического университета г. Мюнхена и Исследовательского центра г. Дрездена ученые ОИЯИ принимают активное участие в эксперименте HADES. Эта установка, представляющая собой широкоапертурный спектрометр для изучения рождения лептонных пар в столкновениях тяжелых ядер, способна работать на очень интенсивных пучках. Сотрудники ОИЯИ принимают участие в получении и обработке экспериментальных данных, создании программ восстановления физических характеристик частиц по данным, полученным с детекторов установки. Также идет проработка физической программы для экспериментов на SIS100, разработка и создание позици-



Установка HADES

онно-чувствительных детекторов с высоким пространственным разрешением и высоким быстродействием.

Особый интерес физиков из GSI, как, впрочем, и физиков-ядерщиков всего мира, вызывает исследование структуры легких ядер вблизи и за границей стабильности. Современные теоретические расчеты описывают свойства легчайших ядер с высокой точностью, поэтому очень важна экспериментальная проверка предсказанной теории. Изучение реакций передачи нуклонов и ядерных кластеров предоставляет исключительные возможности для получения сведений о структуре ядра. Для изучения структуры легких нейтроноизбыточных ядер особенно эффективны пучки радиоактивных ядер. В 1997 г. в ЛЯР ОИЯИ был сооружен пучковый канал высокого разрешения — сепаратор АКУЛИНА. На нем проводятся исследования структуры легких ядер ^{10}He , ^6Be , ^{17}Ne с использованием радиоактивных пучков и тритиевой мишени, а также изучение особенностей взаимодействия кластерных ядер ^6He , $^{6,9}\text{Li}$ при энергиях вблизи кулоновского барьера на магнитных спектрометрах. Проводятся



Установка АКУЛИНА

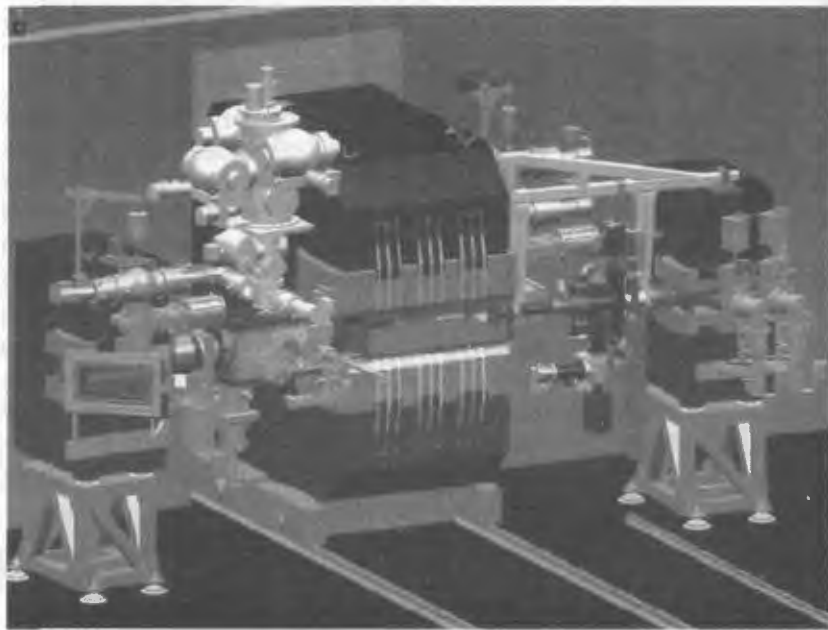
также эксперименты по изучению структуры легких ядер на границе нуклонной стабильности.

Еще один аспект сотрудничества ЛЯР–GSI — это α -, β -, γ -спектроскопия тяжелых ядер на установке ВАСИЛИСА, которая используется для изучения сечений образования и свойств радиоактивного распада ядер отдачи, образующихся в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами. С помощью установки был выполнен большой объем исследований закономерностей образования и вероятностей выживания высоковозбужденных компаунд-ядер с атомными номерами $82 \leq Z \leq 100$, изучались свойства новых нейтронодефицитных изотопов элементов U–No, исследовались сечения образования и делимость компаунд-ядер трансфермиевых нуклидов в реакциях «горячего» слияния, а также проводились эксперименты по синтезу и изучению свойств сверхтяжелых элементов в реакциях «теплого» слияния, в которых использовались ионы ^{48}Ca .



Установка ВАСИЛИСА

Еще одна часть сотрудничества Германия–ОИЯИ — это эксперименты в Исследовательском центре г. Юлиха (ANKE-COSY и PAX) и сотрудничество по эксперименту ALICE в ЦЕРН.



Установка ANKE-COSY

Одинокое рождение пионов в pp -соударениях является первоочередным процессом для проверки нашего понимания мезон-барионной динамики NN -взаимодействий. Наиболее подходящей для этого является реакция $pp \rightarrow d\pi^+$, которая была объектом интенсивных исследований в течение длительного времени. Однако очень мало известно об изоспиновом партнере этой реакции — процессе $pp \rightarrow (pp)_S\pi^0$, где $(pp)_S$ есть протонная пара в 1S_0 -состоянии. Несмотря на кинематическую близость, этот процесс включает переходы в NN -системе, отличающиеся от переходов в реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, в частности, роль Δ -изобары, доминирующей там, ожидается сильно подавленной из-за запрета S -волнового ΔN -взаимодействия в промежуточном состоянии. Активное изучение процесса началось лишь в последнем десятилетии и ограничивалось областью околопороговых энергий. С целью расширения энергетической области исследований коллаборацией ANKE на ускорителе COSY (Юлих) принята соответствующая программа экспериментов, первым из которых является измерение дифференциальных сечений процесса $pp \rightarrow (pp)_S\pi^0$ при энергии 0,8 ГэВ. Несмотря

на то, что дифференциальное сечение более чем на два порядка величины меньше, чем для $pp \rightarrow d\pi^+$, процесс хорошо идентифицируется. Совсем недавно был завершен анализ данных, полученных на установке ANKE, по реакции развала дейтрона $pd \rightarrow \{pp\}_S n$ с испусканием вперед быстрой протонной пары $\{pp\}_S$ в 1S_0 -состоянии при энергиях протонного пучка 0,5–2,0 ГэВ. В использованной коллинеарной геометрии процесс происходит с большой передачей импульса и, следовательно, чувствителен к структуре нуклонов на коротких расстояниях.

Были измерены дифференциальные сечения и угловые распределения в диапазоне углов вылета протонной пары $\theta_{pp} = 0-12^\circ$, зависимость сечения от энергии пучка при $\theta_{pp} = 0^\circ$. Получены распределения по относительной энергии E_{pp} при $E_{pp} < 3$ МэВ и по направлению протона в системе покоя pp -пары, доказывающие 1S_0 -состояние протонной пары.

В качестве предварительного этапа проекта PAX, целью которого являются исследования в области спиновой физики, были выполнены измерения сечения передачи спина от поляризованных протонов к электронам. Измеренное сечение оказалось на несколько порядков величины меньше, чем предсказывали некоторые теоретические работы, предлагавшие использовать процесс обмена спином между электронами и (анти)протонами для поляризации пучка ускорителя. Измерения показали, что метод, предложенный в проекте PAX, является единственно возможным для поляризации антипротонного пучка в накопителе. Ближайшей задачей коллаборации PAX является проведение экспериментов с целью подтверждения этого метода.

В сотрудничестве с GSI, университетами г. Гейдельберга, Мюнхена и Франкфурта сотрудники ОИЯИ успешно работают над проектом ALICE на LHC. Этот проект предназначен для изучения $Pb + Pb$ взаимодействий на LHC при энергии в системе центра масс около 5,5 ТэВ на нуклон. Целью эксперимента является изучение свойств сильно взаимодействующей материи при экстремально высоких плотностях. Основной вклад ОИЯИ в создание установки — разработка и изготовление ярма дипольного магнита мюонного плеча установки и участие в разработке и изготовлении элементов системы идентификации частиц на основе детекторов переходного излучения (TRD). Камеры TRD изготавливались в ОИЯИ, а затем отправлялись в GSI, где проводились их испытания.

В 2009 г. в окрестностях Гамбурга стартовал новый международный проект: в знаменитом немецком исследовательском центре DESY началось сооружение европейского рентгеновского лазера на свободных электронах, или сокращенно XFEL. Протяженность туннеля, в котором будет располагаться ускоритель электронов, достигнет 2,1 км, а общая длина сооружения — почти 3,4 км. В нем будет несколько подземных этажей на глубине от 6 до 38 м.

Строительство лазера предполагают завершить в 2014 г., и уже на 2016 г. запланированы первые эксперименты с пучками фотонов. Будущий лазер призван решать в первую очередь задачи материаловедения и биотехнологии. Возможности рентгеновского лазера пригодятся и фундаментальной науке: исследуя явления при экстремальных значениях внешних параметров, можно лучше понимать физику процессов, протекающих в недрах планет Солнечной системы.

Достаточно давно физикам стало ясно, что идеальным инструментом исследования сверхмалых объектов мог бы стать лазер, работающий в рентгеновском диапазоне. Он делает возможным получение дифракционной картинка высокого разре-



Один из каналов, по которому идет лазерный пучок, расположенный в зале эксперимента FLASH

шения при исследовании объектов размером в нано- и микрометры, причем тех, которые не обладают периодичностью кристаллической решетки. Детальная дифракционная картинка позволит восстановить информацию о строении таких объектов. Располагать подобными данными крайне необходимо врачам, биологам и материаловедам.

Пока идет строительство XFEL, и Россия вкладывает в него значительные средства. Руководители проекта высказали заинтересованность в изготовлении на территории РФ фрагментов линейного ускорителя электронов, системы охлаждения, систем диагностики пучка и т. д. Физики из ОИЯИ участвуют не только в разработке основных ускорительных узлов лазера, но и в разработке физической программы исследований.

Все многолетнее сотрудничество между ОИЯИ и научными центрами и университетами Германии говорит о серьезном взаимном научном интересе и перспективах дальнейшего развития этого сотрудничества. В данной статье были затронуты только некоторые аспекты сотрудничества Объединенного института ядерных исследований с немецкими научными центрами. ОИЯИ очень дорожит научными и дружескими связями с немецкими коллегами и, безусловно, будет укреплять их впредь.

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ–США

На протяжении многих десятилетий Объединенный институт ядерных исследований активно сотрудничает с крупнейшими научными лабораториями США в исследовании ключевых проблем современной физики элементарных частиц и атомного ядра, совместно создавая новые уникальные экспериментальные методики и крупные спектрометрические комплексы.

Начиная с конца 1950-х гг. на основе отдельных научных контактов физиков ОИЯИ с американскими коллегами начали развиваться тесные связи Объединенного института с национальными центрами США. Новый этап в развитии сотрудничества был открыт визитом в ОИЯИ в 1969 г. Г. Сиборга, бывшего в то время председателем Комиссии по атомной энергии США.

Первый совместный эксперимент по упругому π - e -рассеянию, в котором был измерен зарядовый радиус пиона, был выполнен на ускорителе У-70 в Протвино в 1970–1971 гг. Эксперимент был независимо предложен физиками Лаборатории высоких энергий ОИЯИ и Калифорнийского университета (Лос-Анджелес). Опыт проведения эксперимента в Протвино был использован в последующих совместных работах в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL, Батавия).

Так, еще до запуска протон-антипротонного коллайдера тэватрон FNAL в этой лаборатории были проведены опыты со струйной мишенью, каналированием в кристаллах, регистрацией протонов под углами $\sim 90^\circ$ к пучку и другие опыты с ключевым участием ученых и специалистов ОИЯИ, приведшие к получению ярких новых физических результатов. С 1972 по 1980 г. во FNAL был проведен цикл работ по исследованию процессов дифракционного рассеяния протонов на протонах и легких ядрах в широком диапазоне энергий, позволивший точно и полно проверить основные положения квантовой теории поля. Часть уникальной аппаратуры, созданной в ОИЯИ для этих работ, теперь хранится в музее Американского физического общества в Вашингтоне.

Объединенный институт был активным научным партнером SSC-Lab в Далласе при создании крупных экспериментальных установок SDC и GEM для сверхпроводящего коллайдера на 40 ТэВ, сотрудниками Института предложены в ряде случаев оригинальные решения сложнейших инженерно-технических проблем. Так, например, было с «русской идеей» (Ю. А. Будагов, В. М. Романов, Н. Д. Топилин, А. Каулин, Дж. Триллинг) изготовить ярмо 20000-тонного магнитопровода для установки SDC не из прокатной стали, а из полученных на Новолипецком металлургическом комбинате непрерывным литьем листов стали с последующей механической обработкой на Атоммаше.



Даллас, 1992 г. (слева направо): Дж. Триллинг, А. Сисакян, Ю. Будагов

В 1993 г. после остановки проекта сверхпроводящего коллайдера в Далласе хорошо сформированные и подготовленные группы ученых и специалистов ОИЯИ разделились на два потока: для участия в экспериментах по физике высоких энергий во FNAL и в ЦЕРН.

Параллельно наметилась важная роль ученых ОИЯИ в разработке научной программы, в создании аппаратуры и методик по обнаружению новых физических явлений в ядро-ядерных соударениях на релятивистском коллайдере тяжелых ионов RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL).

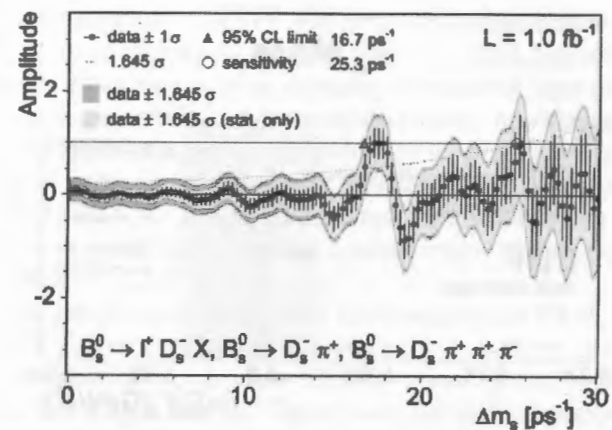
Физика элементарных частиц

На протяжении многих лет FNAL является одним из основных американских партнеров ОИЯИ. И в настоящее время на его ускорителе — тэватроне — большие международные коллективы выполняют ряд крупных научных проектов. Эксперименты по физике высоких энергий собственно на территории США во FNAL с рекордной энергией столкновения протонов и антипротонов 1,96 ТэВ были особенно привлекательны, поскольку долгое время до запуска Большого адронного коллайдера (LHC) в ЦЕРН тэватрон был единственным источником данных в ТэВ-ном диапазоне энергий, открыв новое научное направление — «физику топ-кварков» как один из наиболее ярких и увлекательных разделов современной физики микромира до создания LHC.

Участие ОИЯИ в физической программе модернизированного тэватрона осуществляется двумя группами во главе с В. В. Глаголевым в проекте CDF и с Ю. А. Будаговым и Г. Д. Алексеевым в проекте D0. Оба проекта нацелены на наиболее важные проблемы физики высоких энергий, например, на выяснение свойств кварков третьего поколения, поиски бозона Хиггса, обнаружение суперсимметричных частиц и др. Ученые и специалисты ОИЯИ не только существенно обогатили экспериментальные установки CDF и D0 новой аппаратурой, адекватной светимости (до $3,5 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) тэватрона, но и внесли значительный вклад в получение многих (в том числе впервые) данных принципиального научного значения по физике тяжелых кварков.

Одним из доминантных вкладов ОИЯИ в коллаборации CDF является измерение в дилептонных событиях с высокой точностью массы топ-кварка (m_t). Последняя является фундаментальным параметром Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц, и значимость этой массы заключается в ее большой величине: $m_t = 165,5_{-3,3}^{+3,4}$ (стат.) $\pm 3,1$ (сист.) ГэВ/ c^2 (CDF Collab. // Phys. Rev. D. 2009. V. 79. P. 072005), которая существенным образом влияет на определение массы бозона Хиггса.

Физики ОИЯИ внесли большой вклад в CDF в связи с новейшими результатами в спектроскопии частиц, например: впервые были зарегистрированы тяжелые барионы Σ_b и Σ_b^* ,



Первые наблюдения осцилляций $\bar{B}_s - B_s$

а также барионы Ξ_b , составленные из d -, s -, b -кварков; произведены первые наблюдения осцилляций $\bar{B}_s - B_s$.

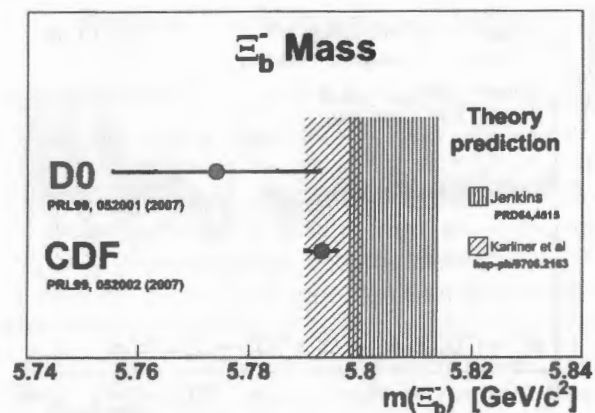
Группа ОИЯИ внесла в физическую программу CDF новые направления исследований, связанные с явлениями термализации при больших множественностях частиц (А. Н. Сисакян и И. Д. Манджavidзе) и изучением квантовых корреляций Бозе–Эйнштейна легких адронов при конечных температурах (Г. А. Козлов).

Участие физиков ОИЯИ в коллаборации D0 сконцентрировано на двух основных направлениях: поиски новых тяжелых барионов и исследование процессов при сильных взаимодействиях между частицами.

В экспериментах первого направления активно использовалась мюонная система, сконструированная специалистами в ОИЯИ. С использованием данных, накопленных детектором D0 в 2002–2006 гг., и анализом 35 млн событий в протон-антипротонных столкновениях при энергии тэватрона $\sqrt{s} = 1,96$ ТэВ в 2007 г. было объявлено о первом обнаружении заряженного бариона Ξ_b , содержащего кварки всех трех поколений: b , s и d .

Измеренная масса Ξ_b -бариона оказалась в согласии с теоретическими оценками и была независимо подтверждена в экспериментах на детекторе CDF.

Результат второго направления — впервые измеренное при протон-антипротонных столкновениях сечение рождения изолированного фотона с испусканием адронной струи, что яви-



Измеренная коллаборациями D0 и CDF масса Ξ_b^- -бариона

лось ценным материалом для уточнения модельных параметров в теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамике.

Релятивистская ядерная физика

В 1970-х гг. были начаты эксперименты с тяжелыми ионами высоких энергий в ОИЯИ, в Национальной лаборатории им. Э. Лоуренса в Беркли (LBNL) и в Брукхейвенской национальной лаборатории. Каждая из лабораторий имела свою оригинальную научную программу, но в то же время был большой взаимный интерес к результатам исследований коллег, их теоретическому анализу, разработке новых подходов к анализу экспериментальных данных в этой новой области физики. Так, например, группа физиков из LBNL под руководством Ли Шрёдера повторила эксперименты по изучению предельной фрагментации ядер и подтвердила предсказанный А. М. Балдиным и открытый в Дубне эффект кумулятивного рождения мезонов.

На новый уровень сотрудничество с США в области релятивистской ядерной физики вышло после подписания в 1993 г. договора о сотрудничестве между ОИЯИ и BNL. Обе лаборатории строили свои программы по изучению эффектов проявления кварковых и глюонных степеней свободы в ядерной материи как в опытах со столкновениями релятивистских тяжелых ионов, так и при исследовании природы сильных взаимодействий в экспериментах с поляризованными частицами и ядрами — протонами на установке AGS в BNL и поляризованными дейтронами

на синхрофазотроне ОИЯИ. По этой причине совместные эксперименты на сооружаемом в то время в BNL релятивистском коллайдере тяжелых ионов и поляризованных протонов, получившем название RHIC, казались наиболее привлекательными. Физики ОИЯИ получили приглашение участвовать в исследованиях в рамках совместных экспериментов на детекторах STAR и PHENIX на RHIC. В дальнейшем в качестве основного эксперимента для проведения совместных исследований был выбран проект STAR.

Группы специалистов ОИЯИ (руководители Ю. А. Панебратцев и И. А. Савин) активно включились в работу по созданию важных элементов установки STAR — электромагнитных калориметров End Cap и Barrel. Теоретики ОИЯИ приняли активное участие в работе Spin-коллаборации по разработке совместно с американскими коллегами программы поляризационных исследований на коллайдере RHIC.

В 2000 г. состоялся запуск коллайдера RHIC и начаты эксперименты на установке STAR. Уже первые результаты показали, что при энергиях RHIC образуется новое состояние сильно-взаимодействующей ядерной материи, которое в дальнейшем получило название «совершенная жидкость» («Perfect Liquid»).

В 2003 г. на RHIC начались эксперименты с поляризованными протонами. Опыты со столкновениями продольно- и поперечно-поляризованных протонов позволяют изучить вклад глюонной компоненты в спиновую структуру протона, исследовать



В. Г. Кадышевский и А. Н. Сисакян обсуждают вопросы сотрудничества с советником президента США по науке и технологиям Д. Марбургом

поляризацию кварк-антикваркового «моря» в протоне, изучить механизм орбитального движения кварка в протоне.

Современное и дальнейшее развитие сотрудничества находится в плоскости совместной реализации программы энергетического сканирования фазовых переходов сильновзаимодействующей материи и поиска критической точки сильных взаимодействий. В настоящее время обсуждаются варианты сценария, по которому центр тяжести сотрудничества по исследованию фазовых переходов в ядерной материи при невысоких энергиях и достаточной большой барионной плотности может переместиться в Дубну. Основой для этого является сооружаемый в ОИЯИ ускорительный комплекс NICA, на котором планируется получить интенсивные пучки ускоряемых тяжелых ядер со светимостью до $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (для ядер золота) и тем самым обеспечить новое качество для изучения столкновений тяжелых ионов в области максимальных барионных плотностей.

Ускорительная физика и техника

Сотрудничество между ОИЯИ и FNAL по ускорительной тематике приняло активную форму, когда в 1998 г. в американской лаборатории стартовал проект по высокоэнергетическому электронному охлаждению. Этот проект был инициирован группой физиков-ускорительщиков, которые развивали это направление в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН и впоследствии перенесли этот проект во FNAL. Со временем группа специалистов из Новосибирска численно выросла, и в настоящее время многие из них занимают ведущие позиции во FNAL, являются крупными экспертами по физике и технике ускорителей.

Группа ОИЯИ, возглавляемая И. Н. Мешковым, активно включилась в развитие проекта электронного охлаждения совместно со специалистами FNAL (руководитель С. Нагайцев). Это сотрудничество является взаимообогащающим, что позволяет получать новые решения применительно к коллайдеру тэватрон, и будет чрезвычайно полезным в новом проекте ОИЯИ NICA.

Совместные работы специалистов ОИЯИ и FNAL по ускорительной тематике проводятся в соответствии с Меморандумом о взаимопонимании (1995 г.) и Договором о сотрудничестве, подписанным в марте 2009 г.

С самого начала развития в ОИЯИ проекта NICA специалисты из FNAL выразили глубокую заинтересованность в его поддержке и реализации в Дубне.

Одной из важнейших задач ускорителя NICA является формирование пучка ионов с высокой интенсивностью и плотностью, что будет обеспечивать высокую светимость и эффективность работы коллайдера. Эта задача может быть решена с помощью эффективных методов охлаждения пучка — электронного и стохастического. Начиная с конца 1990-х гг. FNAL занимает лидирующие мировые позиции в развитии этих двух методов охлаждения, поэтому участие экспертов из Батавии в проекте NICA является очень важным.

Совместные работы по развитию проекта NICA включают в себя решение таких важных задач, как обеспечение стохастического и электронного охлаждения пучков, создание современной системы фокусировки пучка с соответствующим стохастическим охлаждением, разработка сверхпроводящих магнитов с целью создания компактных элементов магнитной системы коллайдера. С 2009 г. эксперты FNAL вошли в состав международного программного комитета по сооружению коллайдера NICA, где их существенная роль способствует динамичному развитию проекта в целом.

Международный линейный коллайдер

Уникальный проект XXI в. «Международный линейный коллайдер» (International Linear Collider, ILC) обеспечит столкновение электронов с позитронами при энергиях 500–1000 ГэВ. Коллайдер ILC будет следующим шагом после Большого адронного коллайдера, крупнейшего в мире ускорителя частиц — протонов, вступившего в строй в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН, Женева) в 2009 г.

Создание ускорителя нового поколения не только позволит продвинуться в исследовании фундаментальных свойств материи, но и будет способствовать развитию перспективных направлений в области ядерной энергетики и, как следствие, исследований по новым источникам энергии, новым материалам, новым технологиям и др.

Россия является одним из возможных мест расположения этого гигантского по своим масштабам и научной значимости международного проекта.



Предполагаемое месторасположения строительства коллайдера ILC на территории Московской обл.

На первой стадии коллайдер ILC с общей длиной ускоряющей части около 35 км будет способен ускорять электрон-позитронные пучки до энергии 500 ГэВ.

Одним из основных элементов ускорителя является гелиопитающая труба из титана (Ti), протянутая по всей длине коллайдера. Специалисты ОИЯИ, FNAL и INFN (Пиза, Италия) совместно исследуют вариант изготовления гелиопитающей трубы из нержавеющей стали (SS), что может повлиять на существенное удешевление проекта. Ключевая проблема такой конструкции — переход от трубы из SS к титановому сосуду, в котором располагаются сверхпроводящие резонаторы, ответственные за ускорение электронов и позитронов. В настоящее время произвести сварку элементов из SS и Ti с помощью общепринятых методов электронно-лучевой или электродуговой сварки не представляется возможным. Известные попытки проводить сварку трубок из SS и Ti двумя нетрадиционными методами — фрикционной сваркой и сваркой методом горячего изостатического давления — не привели к успеху.

Другой, более надежный метод сварки был найден в ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров). Этот уникальный метод сварки использует энергию взрыва. Образцы биметаллической SS-Ti трубки были изготовлены в Сарове из рабочего материала по спецификации криомодуля ILC. Эти трубки прошли успешные испытания в экстремальных условиях (термоциклирование



Образец биметаллической трубки Ti-SS, изготовленной сваркой взрывом

Stainless Steel + Titanium Bimetallic Tube installed into Cryomodule



Общий вид криомодуля с Ti-SS-переходником в рабочем положении

в жидком азоте и жидком гелии при температуре 1,8 К) на течь в вакууме в INFN и FNAL.

После достижения приведенных выше результатов ОИЯИ, FNAL и INFN перешли к более сложной задаче принципиальной важности: изменению дизайна криомодуля ILC, заменив титановую оболочку дьюара, в котором плавает ниобиевый резонатор в жидком гелии, на оболочку из нержавеющей стали.

Конструкция «ниобий–нержавеющая сталь» (Nb–SS) была описана в феврале 2009 г. в INFN представителями ОИЯИ, FNAL и INFN и были приняты две схемы ОИЯИ: а) с наружной плакировкой и б) с внутренней плакировкой. В ВНИИЭФ (г. Саров) с помощью уникальных методов, которые основаны на идее сварки взрывом, произведено четыре первых опытных образца биметаллических переходников Nb–SS по этим двум схемам. Следующим важным этапом сотрудничества в этом направлении является всестороннее тестирование опытных образцов при различных экстремальных условиях в FNAL и INFN.



Участники проекта «Международный линейный коллайдер» (слева направо): Ю. Будагов, Г. Ширков, Г. Трубников, Б. Сабилов

Совместные исследовательские программы ОИЯИ–FNAL–BNL отмечены достижением ярких новых результатов принципиального научного значения в области физики тяжелых кварков, обнаружении новых состояний ядерной материи, создании уникальных методик и технологий в разработке конструкций модулей ILC. Перспектива новых достижений в отмеченных выше направлениях объединяет лаборатории в Дубне и в США, привлекает новые поколения молодых сотрудников.

Синтез новых элементов

В течение многих лет укрепляются прочные и эффективные связи Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова (ЛЯР) ОИЯИ с Ливерморской национальной лабораторией им. Э. Лоуренса (LLNL) и другими научными центрами США в области синтеза и изучения свойств ядер на границах стабильности.

В 2009 г. в ОИЯИ синтезирован новый 117-й элемент Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева (Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 142502). Эксперименты (руководитель академик Ю. Ц. Оганесян) проводились на ускорителе тяжелых ионов У-400 ЛЯР в сотрудничестве с национальными лабораториями США в Ок-Ридже и Ливерморе, с Университетом Вандербильта (США), а также с Научно-исследовательским институтом атомных реакторов в Димитровграде (Россия).

Синтез нового элемента осуществлен в реакции ускоренных ионов ^{48}Ca с уникальной мишенью из изотопа искусственного 97-го элемента — ^{249}Bk , период полураспада которого составляет всего 320 сут. Его наработка была осуществлена на атомном реакторе NIFR Национальной лаборатории США в Ок-Ридже. В ходе длительного (более полугода) эксперимента были зарегистрированы шесть событий «рождения» нового элемента. Свойства распада изотопов элемента 117 и его дочерних продуктов — изотопов элементов 115, 113, 111, 109, 107 и 105 вместе с ранее синтезированными в Дубне изотопами элементов 112–116 и 118, являются прямым экспериментальным доказательством существования «островов стабильности» сверхтяжелых ядер.

Сегодня ОИЯИ имеет обширные связи с американскими лабораториями и университетами по всем направлениям своей деятельности, включая образовательную программу. Для студентов и школьников выполнена интересная совместная работа: сотрудники ОИЯИ под руководством Ю. А. Панебратцева с коллегами из Брукхейвенской национальной лаборатории создали веб-сайт, посвященный новым результатам совместных экспериментов ученых ОИЯИ и BNL.

Ученые США с коллегами из ОИЯИ сотрудничают в области ядерной безопасности. При финансовой помощи и организационной поддержке Департамента энергетики США совершенствуется физическая защита ОИЯИ, его хранилища радиоактивных материалов.

Американские ученые активно участвуют в составах Ученого совета и программно-консультативных комитетов ОИЯИ. Членом Ученого совета был профессор Дж. Триллинг, Программно-консультативный комитет по физике частиц возглавлял профессор Т. Холлман.

ОИЯИ сотрудничает с 75 научными центрами и университетами США. Действующие и постоянно обновляемые согла-



Лаборатория ядерных реакций. Эксперимент по синтезу элемента 117 (слева направо: В. К. Утенков и Ю. Ц. Оганесян)



шения о научном сотрудничестве показывают, что «притяжение» является взаимным и желание работать вместе приносит неоспоримую выгоду науке... «Наука сближает народы!» — «Science brings nations together!»

THE «FROM A TO Y» COLLABORATION

R. Sosnowski

To our JINR colleagues and friends from the Laboratory of Nuclear Spectroscopy and Radiochemistry, the Bubble Chamber groups of the Laboratory of High Energies and the Magnetic Spark Spectrometer group of the Laboratory of Nuclear Problems, who in the first decades of the Joint Institute for Nuclear Research enabled physicists working in remote Universities and Institutes to participate actively in research based on the JINR facilities

The middle of the 1950s was a very important period for the nuclear science. The Geneva conference «On the Peaceful Uses of Atomic Energy» opened the way for a wider international collaboration in this field. Two international organizations for nuclear research — CERN and JINR — have been organized. Their aim was to open for scientists from the member states the access to big nuclear facilities, at that time — to big accelerators. The most direct way to reach this aim was to invite scientists to come to do research at the organization's site. This has been done from very beginning.

The people from the JINR member state research centres coming to work in Dubna have been met with great sympathy and hospitality. I know it from my own experience being the third Polish physicist who came to work there. Nevertheless, the Dubna physicists were slightly disappointed. I was told that it was expected that people coming from abroad will speak English. In reality most of them could communicate in Russian well enough.

But the number of scientists who could be invited by JINR was rather limited for two reasons: the financial possibility of the organization and its infrastructure. Moreover, the scientists had

obligations in their universities and national research institutes and they could not be on leave too long or too frequently.

Therefore, already in early years of JINR, nuclear physicists from the member states were looking for possibilities of participating in the JINR research activities without leaving home institutions for a longer time. The first suggestion in this direction came from Jan Zylicz from the Institute of Nuclear Research in Świerk. He proposed to study in Polish nuclear spectroscopy laboratories the decay of radioactive isotopes produced in Dubna by the 660 MeV protons accelerated in the Phasotron of the Laboratory of Nuclear Problems. The proposal has been accepted. The irradiation of a target, and the first-step chemical extraction of radioactive reaction products were performed in Dubna. Then, the container with radioactive material was transported by a plane to Warsaw and immediately taken to laboratories in Świerk by a person waiting for it in the Warsaw airport. After the chemical separation of radioactive elements, their decay was studied with magnetic beta spectrometers and gamma-ray spectrometers. Some samples have been analyzed in Cracow. This collaboration lasted more than a decade. One has to recognize the key role in this work played by Yu. V. Narseev and I. A. Yutlandov — the members of the JINR Nuclear Spectroscopy and Radiochemistry Laboratory. They took care of the irradiation of targets and the extraction of radioactive chemical fractions before sending them to Poland. Without their devoted contribution the programme could not work.

Another important field of remote engagement of member state physicists in JINR scientific programmes was high-energy physics studied with accelerators. Three times in the history of science the Soviet Union was the world leader in high-energy accelerators with the Phasotron of the Laboratory of Nuclear Problems launched in 1949, the Synchrophasotron of the Laboratory of High Energies in 1957, and later, in 1967, with the Proton Synchrotron of the Institute of High-Energy Physics in Serpukhov. The leading position of the Soviet Union in accelerators was due to V. I. Veksler who discovered in 1944 the effect of the «self-focusing of phases» of accelerated particles.

It was natural that after the start in March 1957 of the Synchrophasotron — the world largest accelerator — the main scientific activity at JINR was the search for new, yet unobserved particles produced with its beams. The bubble chamber was an

ideal detector to observe such objects. The 24-liter propane bubble chamber has been built for this purpose and irradiated with the 7 GeV/c π^- beam of the Synchrophasotron. The group of physicists and technicians led by the Chinese physicist Wang Ganghang was created to scan and analyze the bubble chamber photographs. There was a general feeling that something new should be discovered. Not only in offices or laboratories but even at lunch people were talking what they saw in the scanning, discussed the apparently strange configurations of tracks which they found and what object they might represent. However, nothing new have been found until the March 9th, 1959, when after scanning of 40 thousands of photographs the decay of until now unobserved antisigma-minus hyperon was found. This was the first important discovery done with a bubble chamber.

The discovery was done at Dubna, but in the group of Wang Ganghang were already working physicists from the JINR member states. One can imagine how impressed was someone coming from a country where the energy of the largest accelerator hardly exceeded 1 MeV, when he joined the group to work with the largest accelerator in the world. Such people have gained experience to work with bubble chamber pictures and they wished to continue this work also after they return home. They realized that bubble chamber films can be sent for the analysis to the laboratories in the member states as it has been done with isotopes. With films it was even easier because contrary to isotopes they do not decay.

The first bubble chamber pictures sent from JINR abroad were those obtained with the 24-liter propane chamber exposed to the 7 GeV/c π^- beam from the JINR Synchrophasotron, and they were a small part of those which have been already scanned in the search for new particles. The films were sent to Budapest and Warsaw as the training material. However, physicists from both laboratories were tempted to do a real research. This idea was supported by M. I. Soloviev, who visited Warsaw. He was a very experienced person. He has built the 24-liter bubble chamber and knew how to work with bubble chamber pictures. His visit and his advices have speeded up the construction of the scanning and measuring devices in Warsaw. The results on the elastic scattering of 7 GeV/c π^- on protons have been published by Budapest and Warsaw in 1962.

At this time it was already known that the next high-energy accelerator is under construction in the Soviet Union. Its energy will be by one order of magnitude higher than that of the Synchrophasotron in Dubna and its location will be in Serpukhov. The JINR decided to build two bubble chambers to work with the new accelerator beams. One of them was the 2-meter propane bubble chamber built in the Laboratory of High Energies. It has been constructed under the leadership of M. I. Soloviev. Many high-energy physicists from the JINR member states have worked with him already previously with a smaller propane bubble chamber. Certainly, they had a very high opinion of his competence in physics and his work with bubble chambers. The new perspective to work with him with a much bigger bubble chamber and with particle beams from the much larger accelerator attracted many people from numerous laboratories. M. I. Soloviev paid visits to the member state research centres and presented the possibility of working with the Dubna bubble chamber exposed to the beams of the highest possible energy. He explained directly that the probability of the success of a bubble chamber experiment is statistically proportional to the square root of the number of processed pictures. Therefore the experiment needs a big collaboration which is able to process a large number of photographs. As a result, there were 30 universities and institutes from 24 cities which joined the common scientific programme — the study of high-energy collisions with the 2-meter propane bubble chamber. They formed a collaboration the name of which originated from all participating cities. The first in the list of cities in the alphabetic order was Alma Ata and the last was Yerevan. Therefore sometimes the collaboration was called «From A to Y».

The number of people who later were signing the collaboration papers exceeded 250. According to the present standards this collaboration cannot be considered to be a big one. However, in the 1970s it was one of the largest collaborations. It was the most extended geographically, since the remoteness between two the most distant collaborating cities, Cracow and Hanoi, is about 8 thousand kilometers.

The Collaboration made use of two different beams of high-energy particles: the beam of negative pions with momentum of 40 GeV/c from Serpukhov accelerator and after moving the chamber to Dubna the beam of light nuclei with energy of 4.2 GeV/nucleon from the Synchrophasotron. The momentum

4.2 GeV/c looks to be small when compared with that of π mesons but for years the beams of light nuclei from the Synchrophasotron were of the highest energy.

The working liquid of the 2-meter bubble chamber was propane. Thus, the incoming accelerated particles collided with the protons, the neutrons bound in carbon nuclei, and with the carbon nuclei. For each of the beams there was a rich variety of subjects to be studied.

One can imagine how difficult it must have been to organize the work on various physics subjects of 30 teams from 30 universities and institutes. Moreover, the teams were spread over ten countries and seven Soviet Union Republics. There was no internet, no e-mail, no possibility for video-conferences, and no mobile phones. The most advanced communication techniques were telexes and telephones with usually overloaded lines. In addition, each of the two hundred members of collaborating teams could have personal ambitions and priorities. Not all of them knew Russian or English. Valentin Grishin has agreed to be the Collaboration spokesman and the organizer of its research programme. His deep understanding of physics, organization talent and personal culture played a major role for smooth and efficient work of the Collaboration. Of course, he was not alone. There were more members of the JINR team who played a key role in the Collaboration work. One of them was E. N. Kladnitskaya whose active contacts with member states were widely appreciated. She visited many member state research centres, Warsaw included. Her remarks and advices were often very relevant and valuable.

The «from A to Y» Collaboration was a common effort of many people and institutions. The first steps for the bubble chamber experiment were done by people from the staff of the Serpukhov Institute of High-Energy Physics. They run the accelerator and were responsible for the beams of energetic π^- mesons.

The physicists, engineers and technicians from the JINR Laboratory of High Energies run the bubble chamber and took care for the quality (and quantity) of recorded pictures. They prepared necessary information on the bubble chamber photographic system necessary for the reconstruction in space of recorded tracks. They also measured the magnetic field inside the bubble chamber and prepared its map. Finally, after the bubble chamber run there were kilometers of film to be developed in Dubna. The JINR staff was also responsible for the distribution of films and had to be aware

where they are. One might ask whether it paid for JINR to do all this for outside laboratories. Certainly it was a huge amount of work but the JINR has been created for that. Moreover, it was true that outside laboratories profited from services but they also contributed to the work of the Collaboration with its human power. It was especially important for the research with bubble chambers.

Bubble chambers are very universal detectors. However, they have one important limitation. Contrary to many other detectors, they could not be triggered by a signal that something interesting happened and it is worth to be recorded. When working in synchronization with an accelerator, a picture is taken at every pulse of accelerated particles independently whether there was a collision in the chamber's liquid or all beam particles passed the chamber without any collision. The automatic selection of interesting pictures and the rejection of others never fully worked. This had to be done by looking at every picture, which was a time consuming process and needed many qualified people. This was why there was a mutual interest of JINR and of outside institutions to work together. The contribution to the common effort of the universities and outside institutes was very valuable gain for all parts.

In the 1970s, the Collaboration meetings were more important than they are today, when they can be replaced by video-conferences. The most of them were organized in Dubna but not only there. The Collaboration met few times in Warsaw, Tbilisi, Prague, Budapest or at the Bulgarian sea coast. The atmosphere of meetings was usually very friendly. Nevertheless, there was some flavor of a competition. Every collaborating laboratory was supposed to measure collisions of beam particles, which were registered on the bubble chamber films, and with computers reconstruct them in the space. The results were sent to Dubna where the database was created for the further physical analysis. There was no fixed quota for laboratories. It was taken as granted that every of them worked as much as it was possible. This attitude was more encouraging than would be critical remarks or quotas. Laboratories always watched whether they work according to the Collaboration's expectations. Other information interesting for every laboratory was the quality of their work. This was discussed openly, but not as a criticism but rather in terms how to improve the work if there is a problem.

The Collaboration started to publish its results in 1972 and continued regular publications until 1989. This was its active period. Towards the end of this period, bubble chambers have been gradually replaced by new more efficient detectors. A step in this direction was the Magnetic Spark Spectrometer built under the supervision of A. A. Tyapkin from the Laboratory of Nuclear Problems. The new detectors are faster, can be triggered, have direct link to computers which can display recorded data in many sophisticated ways. But these displays are not so close to reality as were tracks in the bubble chambers.

The bubble chambers now have gone but they are worth to be remembered, as are the people who worked with them.

ВОСПОМИНАНИЯ ОБ ЛТФ

Д. Эберт

Начну с чисто личных впечатлений, которые характеризуют мое удивительно раннее знакомство с ОИЯИ. Помню точно: лето 1958 г.; я был 16-летним учеником десятого класса гимназии языков: латинского, французского, английского и русского. Хотел изучать в университете романистику, французскую литературу. Несколько раз слушал в то время радиointервью немецких физиков, только что приехавших из ОИЯИ и рассказывавших о своей работе в области атомной и ядерной физики, о научных семинарах и первых впечатлениях. Под влиянием этих рассказов об ОИЯИ выбрал в школе тему сочинения «Атомная энергия — благо или проклятие для человечества», которая и сегодня очень актуальна. Начал читать специальную литературу по физике. Скоро мне стало ясно, что хочу изучать атомную и квантовую физику в университете и стать физиком. При этом физика как наука меня специально не привлекала с точки зрения эксперимента или математики — более важной казалась возможность осознать единую связь микромира с макромиром, понять, с одной стороны, загадки звезд и космоса на основе физики атомов и ядер, а с другой стороны, синтез тяжелых атомов дальше железа во взрывах сверхновых или на Земле — в соударениях ядер на ускорителях. Возникло сильное желание когда-нибудь позже работать в ОИЯИ, принять участие в его научной работе.

В университете первой по этой тематике мне в руки попала книга Д. И. Блохинцева «Основы квантовой механики». Позже мне пришлось читать учебники Ландау и Лифшица без перевода и действительно удалось получить единственное место дипломника на кафедре «Квантовая теория поля и частиц» у профессора Франка Кашлуна в Университете им. В. фон Гумбольдта в Берлине. Как вы знаете, Ф. Кашлун был одним из первых немецких физиков-теоретиков, работавших в Дубне в группе Н. Н. Боголюбова. В то время свое основное научное

образование в области квантовой теории поля я получил на основе превосходной книги Н. Н. Боголюбова и Д. В. Ширкова, которая обогнала свое время на много лет.

Зная русский язык, я скоро познакомился со всеми дубненскими коллегами Ф. Кашлуна, которые посещали Берлин: с Н. Н. Боголюбовым, Д. И. Блохинцевым, Б. М. Понтекорво, Д. В. Ширковым, Я. А. Смородинским, В. А. Мещеряковым. Два раза я сопровождал Н. Н. Боголюбова и Д. И. Блохинцева в их поездках по институтам и университетам ГДР. Стал почти профессиональным экскурсоводом — знатоком прусской истории при поездках с дубненскими коллегами в Потсдам.

Естественно, мне хотелось сразу после защиты кандидатской диссертации в 1968 г. осуществить свое старое желание — работать в ОИЯИ. Но в 1969 г. я не выполнил требуемые в то время «общественные поручения», чтобы получить разрешение работать в Дубне. В 1971 г. моя анкета опять была отвергнута. Поэтому я ушел в 1974 г. из Университета им. В. фон Гумбольдта в ИФВЭ в Цойтене (сегодня DESY), где профессор Карл Ланиус мне сразу пообещал, что через год я буду работать в ОИЯИ. Таким образом, в 1975 г. осуществилась все-таки моя мечта работать в ЛТФ ОИЯИ. Я вспоминаю свой первый доклад на Ученом совете о бислокальной бозонизации КХД в 1976 г., когда Д. И. Блохинцев, увидев меня, объявил: «Эберт в конце концов приехал». Позже он помог мне продлить работу в Дубне на пять лет — до 1980 г.

Свою первоочередную задачу я видел, конечно, в науке, в интересных совместных работах с дубненскими коллегами. С другой стороны, как молодой немец, видевший руины войны в Германии и Советском Союзе и знавший исторически заложенные культурные, научные и политические связи между нашими странами, я сознательно хотел вместе со своей семьей сделать конкретные личные шаги к новому сближению немецких и русских людей. Оглядываясь на 30 лет назад, могу сказать, что действительно достиг своих целей. Те первые пять лет в ЛТФ (1975–1980) были необыкновенно плодотворными и счастливыми, и наши дружеские связи со многими дубненскими семьями живы и сегодня.

Теперь несколько слов о науке.

Исключительно важное влияние на мои научные интересы в ОИЯИ имели работы Н. Н. Боголюбова о сверхпроводимости и спонтанном нарушении симметрии и их возможном применении

в релятивистской физике частиц в рамках кварковых моделей. Очень важным также оказался интерес Д. И. Блохинцева и его коллег Г. В. Ефимова, М. К. Волкова и В. Н. Первушина к неперенормируемым, нелокальным теориям поля. Хочу отметить два главных результата нашего сотрудничества. Во-первых, вместе с В. Н. Первушиным был разработан и применен метод континуального интеграла в билокальных полях, что позволило построить эффективную теорию связанных с нелокальным взаимодействием частиц из калибровочной теории. Так, в 1976 г. получили для КХД эффективное действие мезонных полей, которое в приближении стационарной точки совпадает с суммированием планарных диаграмм Фейнмана при больших N , как было предложено т'Хофтом. Во-вторых, в 1970-е гг. М. К. Волков и В. Н. Первушин вели в ЛТФ исследования киральных неперенормируемых моделей мезонов и барионов, результатом которых явилась их интересная книга «Существенно нелинейные квантовые теории, динамические симметрии и физика мезонов». М. К. Волков вскоре пригласил меня включиться в «киральную науку», в результате чего нам удалось применить метод континуального интеграла для кварковых моделей типа Намбу-Йона-Лазинио и вывести киральные лагранжианы связанных мезонов с нелокальными взаимодействиями типа Скирма. Позже в эти исследования включился Х. Райнхардт. Я думаю, это были действительно важные работы, которые стимулировали дальнейшее развитие бозонизации кварковых моделей и КХД, а также изучение фазовых переходов, включая модную цветную сверхпроводимость на основе дикварковых конденсатов.

Завершая эту часть, я хотел бы добавить еще несколько личных воспоминаний о Д. И. Блохинцеве, который молодым ученым, включая и меня, уделял особое внимание. Мне нравилось его демократичное отношение к сотрудникам и особенно его разносторонние интересы, которые затрагивали и такие вопросы, как «физика и искусство», «математика и философия». Он приглашал меня несколько раз к себе домой, показывал свои картины, дискутировал по разным вопросам физики, философии и рекомендовал мне интересные книги, например, «Мастер и Маргарита» Булгакова, «1984» Оруэлла и специфическую книгу «Красный атом» первого немецкого вице-директора ОИЯИ Г. Барвиха, при этом сказал с хитрой улыбкой: «Барвих нигде в этой книге не написал плохо обо мне и ОИЯИ».

Во второй части моих воспоминаний я хочу кое-что сказать о работе в течение трех лет в должности вице-директора ОИЯИ, с 1989 по 1992 г. В то время в ГДР искали кандидата на этот пост и предложили меня. Кажется, любят теоретиков в центральной дирекции.

Перед отъездом из Берлина я гулял с женой Гизелой недалеко от Берлинской стены и спросил: «Когда же эта стена исчезнет? Может быть, это увидят только наши внуки?» Несколько месяцев спустя, 10 ноября 1989 г., я сидел утром на заседании директоров, и директор Д. Киш мне тихо сообщил: «В эту ночь в Берлине открылась Стена». Вначале я думал, что это что-то вроде апрельской шутки, но был ноябрь, а не апрель. Это событие и его последствия имели решающее значение для работы дирекции. Никто из нас не предвидел, какое критическое и чрезвычайно сложное время ожидало нас. В числе первых это почувствовали ученые из ГДР. В конце 1989 и начале 1990 г. у нового правительства и многих немецких ученых возникли серьезные намерения выйти из состава ОИЯИ. Я сидел после Рождества дома и писал меморандум на семь страниц о необходимости для ГДР остаться в ОИЯИ. Обратился с просьбой к новому министру науки и техники срочно принять меня утром 3 января 1990 г. перед вылетом в Москву. Вручил ему этот документ и при этом высказался категорически против запланированного выхода из ОИЯИ. В результате меня исключили из делегации, вылетавшей на переговоры в Москву. Но на переговорах в Москве, слава Богу, наша делегация не объявила о выходе. Не исключено, что выход в тот момент привел бы к цепной реакции со стороны других стран-участниц, как меня предупредили представители Польши и Чехословакии. Так ГДР до конца ее существования осталась в числе государств-членов ОИЯИ, и ФРГ с момента объединения 3 октября 1990 г. взяла на себя международные обязательства ГДР. Это в то время была моя главная цель: действовать так, чтобы в тот критический момент многолетние научные и человеческие связи между ОИЯИ, Россией и Германией не прерывались, чтобы сохранялось доверие между нашими странами. В июле 1991 г. был подписан двусторонний договор между ОИЯИ и Министерством науки и технологий ФРГ, дававший немецким ученым возможность дальнейшей работы в ОИЯИ.

Я счастлив, что, несмотря на все зигзаги и неожиданные повороты, с которыми я столкнулся в период моей командировки

в ОИЯИ, я оказался в верный, решающий момент на важном посту вице-директора ОИЯИ и смог внести определенный вклад в сохранение нашего сотрудничества.

Конечно, мне также казалось необходимым предпринимать конкретные шаги для расширения научных контактов между ЛТФ и теоретиками Германии. Так возникла идея организовать в Дубне рабочие совещания (контакт-митинги) с участием ведущих немецких теоретиков в области квантовой теории поля, физики частиц, физики ядра и конденсированных сред. Для этой цели я вел переговоры в различных научных центрах Германии, в институтах им. Макса Планка и университетах. В конце концов в министерстве в Бонне было выделено 50 000 марок, чтобы финансировать проезд и пребывание 50 немецких теоретиков для участия в контакт-митингах в ЛТФ. Таким образом был дан «зеленый свет» этому проекту, и вместе с директором В. Г. Кадышевским и теоретиками ЛТФ были подготовлены научные программы этих совещаний. Как вы знаете, они прошли с большим успехом, и в результате возник общеизвестный сейчас проект «Гейзенберг–Ландау».

WHEN I THINK ABOUT DUBNA: MEMORIES OVER 40 YEARS

W. Greiner

I came first to Dubna in 1966. In Germany we had already founded the «Arbeitsgemeinschaft Hessischer Kernphysiker» in which Rudolf Bock, Peter Brix, Erwin Schopper, Wilhelm Walcher and I were proposing the construction of a Joint University Laboratory for Heavy Ion Physics. I dreamed of superheavy elements, of nuclear molecules, of spontaneous positron emission in supercritical electric fields, and all the novel and very fundamental QED-processes, of Coulomb fission, Coulomb excitation to very high angular momentum states and even of heavy ion tumour therapy. Christoph Schmelzer had proposed the UNILAC accelerator. This laboratory was approved by the German Government in 1969 and it became GSI!

I was extremely eager to come to Dubna to see and talk to Georgii Nikolaevich Flerov and his collaborators. It was fascinating to see the dedication of this great scientist, sitting at the long table in his office; Yuri Oganessian sitting beside him. Somehow I knew then — a deep feeling inside of me indicated this — that I might have many visits to Dubna and collaborations with Russian physicists in future. Indeed Yuri Oganessian, Mikhail Itkis, Valery Zagrebaev, ..., Gurgen Ter-Akopian, Sergey Dmitriev and others became colleagues with whom I worked intensively in later years.

During the very early 70-ties, I had the idea to create nuclear shock waves in high energy nucleus–nucleus collisions. My colleague Erwin Schopper wanted to proof this special collective motion of nuclear matter (later this was called nuclear flow) in such encounters. The only «heavy ions» at high energy available at this time were α particles at the Synchrophasotron at Dubna with α energies up to 2 GeV/nucleon. Erwin Schopper brought his AgCl-detectors to Dubna — Dr. Tolstov helped him — and indeed, they found the indication of flow, but in a crude way. Several years later, Hans Gutbrod and Reinhard Stock had developed under the

foresight of Rudolf Bock the Plastic Ball, which at the Berkeley Bevalac brought out clearly the flow and — thus — the predicted shock waves.

Nowadays, this field has developed into a great enterprise, because through such high compression and heating through and within the created in shock waves, one strives for the quark–gluon plasma.

My binding to Dubna became stronger and stronger. We had developed the Two-Centre-Shell-Model (TCSM) in Frankfurt. This was in the early seventieth and we calculated with the TCSM the potential energy surfaces, found the «cold valleys» due to shell effects which led us to the prediction of cold fusion and to a good understanding of fusion–fission processes. Symmetric, asymmetric and in particular superasymmetric fission was predicted. It was Mikhail Itkis who discovered this first — at that time he was still in Alma-Ata, but I met him at a meeting in Bad Aussig near Dresden.

Very recently Friedrich Günnewein (Tübingen) found the superasymmetric fission for many Actinide nuclei.

Valery Zagrebaev and his colleagues have brought the Two-Centre-Shell-Model into a most wonderful form. He became a very good friend and we are working nowadays very closely together. We are exchanging young collaborators and students and are seeing each other regularly.

Upon reflection, A. Sandulescu and D. Poenaru (both from Bucharest, but working at Dubna) enter my mind. I met them also in Dubna, where Sandulescu has been a Vice-Director for some time. By looking at cold valleys in the potential surfaces we found very narrow valleys for very large asymmetric break-ups of heavy nuclei. This led us to predict cluster radioactivity. In fact, even α decay we could describe as a fission process. Cluster radioactivity was explored in Oxford (H. Rose and G. Jones) and in particular also in Dubna and at Kurchatov Institute (A. Oglobin and S. Tretyakova), and in many laboratories world-wide. But the principal excitement came always with the superheavy elements, which are now discovered up to $Z = 118$ by the Dubna physicists under the leadership of Yuri Oganessian. He supplemented and checked with the ^{48}Ca -beam properties of the superheavies which Sigurd Hofmann discovered at GSI (elements $Z = 106$ – 112) and went far beyond (elements 113 – 118). This is great physics of world class! Also the chemistry of the new elements discovered here

and the ordering of the new elements within the Periodic System agree quite well with what my former student Burkhard Fricke and I predicted with Dirac–Hartree–Fock calculations in the early seventies. It is just fantastic to see what Sergey Dmitriev, Robert Eichler and their fellows have achieved!

We are not yet at an end: More neutrons have to be brought into the fused new elements. According to theory, such more neutron-rich nuclei should live much longer, some even thousands of years. The challenge will be to achieve this. V. Zagrebaev and I proposed various possibilities: The collision of very heavy nuclei like $\text{U} + \text{Cm}$ of high energy may lead to «nuclear rain» into very neutron-rich superheavy and, of course, also to other «ordinary» nuclei far outside the neutron dripline. Perhaps one of my most fascinating dreams is the extension of the Periodic System into the strangeness sector (hypernuclei with multiple strangeness) and the production of antinuclei. The production of antihelium, or anticarbon or even antioxygen, etc., will be a very great spectacle. I see this on the horizon. This will request that the Synchrophasotron will have to be modernized and brought into action for just such physics. Dubna should not repeat what RHIC at Brookhaven and the LHC accelerator at CERN are doing, but follow own, original ways!

КАК МЫ ИСКАЛИ МОНОПОЛЬ ДИРАКА

Я. Ружичка

Посвящается памяти соавторов эксперимента «Поиск монополя Дирака», которых уже нет с нами

В первый раз я приехал в Объединенный институт ядерных исследований в Дубне 3 октября 1969 г. сразу же после окончания высшего учебного заведения — Университета им. Я. Коменского в Братиславе, кафедры ядерной физики факультета естественных наук. Начал свою работу, сроком на два года, в группе Валентина Петровича Зрелова, с которым в то время уже работали несколько коллег с кафедры Братиславского университета (Петер Павлович, Павел Шулек, Рудольф Яник, Душан Коллар). Прошло более 40 лет, однако целый период моей активной жизни с того времени был тесно связан с работой в ОИЯИ: те первые два года вылились в 20 лет, которые я прожил в Дубне.

Эксперимент «Поиск монополя Дирака» был первым экспериментом, в котором я участвовал как специалист, который только что закончил учебное заведение. И это был самый красивый эксперимент из всех экспериментов, в которых я имел возможность принять участие как физик за все время моей работы не только в Дубне, но и в других исследовательских институтах всего мира.

Во время моего первого приезда в Объединенный институт ядерных исследований в Дубне в другом институте — Институте физики высоких энергий в Протвино — начал работать самый большой ускоритель в мире — протонный синхротрон с энергией 72 ГэВ. Реализация эксперимента «Поиск монополя Дирака» в то время была возможна только потому, что экспериментальная аппаратура была разработана таким образом, что позволяла провести этот эксперимент непосредственно в ускорительном канале синхротрона, еще в процессе ускорения, сразу же после достижения максимальной энергии без необходимости выво-

дить ускоренный пучок протонов из ускорителя в экспериментальный зал. Поэтому эксперимент «Поиск монополя Дирака» был одним из первых экспериментов, которые проводились на этом новом ускорителе.

Работа на внутреннем пучке предъявляла очень высокие требования к экспериментальной аппаратуре. Приведу только некоторые из них. Было необходимо в прямом смысле «разобрать» ускоритель — выбрать часть вакуумной трубки (приблизительно 4 м) и в кольцо ускорителя ввести нашу аппаратуру. Во время эксперимента в нашей части аппаратуры не должно было произойти нарушения вакуума, иначе последствия для ускорителя могли быть катастрофическими. При самом ускорении протоны много раз проходили и через нашу аппаратуру, и, пока они не достигли полной энергии, наша внутренняя мишень не могла находиться в вакууме ускорительной трубки, иначе процесс ускорения был бы нарушен и было бы невозможно достичь полной энергии. Для нас это означало значительные технические трудности: специальную мишень из кремниевого стекла массой приблизительно 250 г было необходимо вводить прямо в вакуум ускорительной трубки, причем синхронно с циклами ускорения и только на короткий период, во время которого протоны, после достижения своей максимальной энергии, пролетали в кольце ускорителя. Из-за высокого фона вблизи кольца ускорителя предъявлялись огромные требования к электронике.

При этом идея эксперимента, автором которой был Валентин Петрович Зрелов, была очень простая. Магнитный монополю, так называемый монополю Дирака, образующийся при столкновении протонов с мишенью, во время своего пролета в мишени должен испускать излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ). Согласно теории это излучение радикально отличается от ИВЧ обычных электрически заряженных частиц прежде всего своей интенсивностью (она более чем в 4000 раз более высокая), поляризацией (ориентация электрического вектора развернута на 90°) и временем эмиссии излучения (предполагалась возможность возникновения и нестабильных магнитных монополей). Регистрация излучения Вавилова–Черенкова производилась в специальных черенковских детекторах (их было 8), главной задачей которых было отличить ИВЧ, испускаемое магнитным монополюм, от излучения, испускаемого электрически заряженными протонами основного пучка или другими электрически заряженными частицами, которые возникали в результате

столкновения протонов с энергией 70 ГэВ с атомами мишени. В сложных условиях эксперимента, описанных выше, это было непростой задачей. Несмотря на все технические трудности, эксперимент удалось провести. Высокая энергия внутреннего



основного пучка и многократное прохождение пучка через мишень позволили получить конечный результат — границу действующего разреза, в котором при данной энергии магнитные монополи не были обнаружены на уровне 10^{-41} см². В то время это было мировым рекордом (для нестабильных монополей этот рекорд не превзойден до настоящего времени).

На фотографии, которая уже стала классической, можно видеть главную часть аппаратуры эксперимента «Поиск монополя Дирака» и участников этого эксперимента. Снизу вверх: Любича Колларова, Валентин Петрович Зрелов, Петер Павлович, Рудольф Яник, Душан Коллар, Михаил Шабашов, Виктор Петрович Лупильцев, Владимир Сошников (автор этой статьи в то время, когда была сделана фотография, был отправлен из Протвино в командировку в Дубну, против чего совсем не возражал, поскольку только он знал, что тогда в Дубну должна была приехать его будущая супруга Валентина).

Вместе с возможностью работать на самом большом ускорителе в мире, провести уникальный эксперимент «Поиск монополя Дирака» работа в ОИЯИ, связанная с долгосрочным пребыванием в Дубне, дала автору намного больше, чем только воспоминания. Доказательством может служить вторая фотография, сделанная в 1973 г., во время свадьбы в Дубне. На фотографии, кроме молодоженов, запечатлен и свидетель на свадьбе Петер Павлович.



Опыт, приобретенный во время работы автора этой статьи, а также других словацких сотрудников в ОИЯИ, в настоящее время в большой степени переносится в Словакию, прежде всего при реализации самого большого проекта, который был за всю историю страны, — проекта Циклотронного центра Словацкой Республики. Главным идеологом работ и технологий этого комплекса, предназначенного для применения ускорителей в экономике Словацкой Республики, является Объединенный институт ядерных исследований в Дубне.

Составной частью Циклотронного центра Словацкой Республики является Протонный терапевтический комплекс в Центральном военном госпитале в г. Ружомберок в Средней Словакии. Комплекс предназначен для лечения протонами онкологических заболеваний. Ускоритель — протонный синхротрон с энергией 330 МэВ — скоро будет введен в эксплуатацию (для исследовательских целей). На этом ускорителе, вероятнее всего, не будет возможности проводить эксперименты, связанные с поиском монополя Дирака, но автор глубоко верит, что эксперименты с излучением Вавилова-Черенкова, которым он посвятил всю свою жизнь и, в частности, годы работы в Дубне, будет возможно проводить уже дома, в Словакии.

Дало ли сотрудничество с ОИЯИ в Дубне для Словакии много или мало, пусть судит сам читатель.

14 февраля 2010 г.

МНОГИЕ ГОДЫ — С ОИЯИ

Н. М. Шумейко

Год 1964-й. Знакомство

О международном ядерном институте в Дубне я узнал в 1962 г., будучи студентом 2-го курса физического факультета Белорусского государственного университета в Минске и занимаясь в кружке ядерной физики при одноименной кафедре, созданной в 1961 г. Заведовал кафедрой ее основатель А. Н. Писаревский, приехавший из Ленинграда, а вел кружок И. З. Фишер, талантливый молодой профессор, ставший моим научным руководителем после моего распределения на кафедру в конце 2-го курса. Дела у меня с ним шли весьма успешно, но в начале 4-го курса И. З. Фишер сообщил, что вскоре он переедет из Минска и пообещал позаботиться о моей дальнейшей судьбе. Вскоре я был приглашен на беседу к А. Н. Писаревскому, и Александр Николаевич предложил мне продолжить учебу (после сдачи зимней сессии) в филиале НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова в Дубне, с директором которого, Ю. Н. Лобановым, он был хорошо знаком. Думал я недолго, хотя в это же время как один из лучших студентов получил предложение от декана факультета поехать для завершения учебы в ГДР, в Берлинский университет им. В. фон Гумбольдта. То, что можно будет учиться в знаменитом МГУ, да еще на базе быстро ставшего знаменитым ОИЯИ, перевесило для меня все возможные преимущества обучения за границей.

И вот 7 февраля 1964 г., сойдя утром с поезда в незнакомой Москве и преодолев за 5 рублей с «участливым» таксистом длинный, полуторачасовой путь от Белорусского вокзала до Савеловского, на последней электричке к ночи я приехал в Дубну. Мороз, пурга. К счастью, добрый попутчик, вышедший на Большой Волге, порекомендовал мне не пытаться ночью искать счастья у вахтера на незнакомой ул. Ленинградской, д. 14, а найти (по начерченной им схеме) приют до утра в новой

гостинице ОИЯИ на ул. Векслера. Выслушав мои объяснения, а скорее, из сочувствия к дрожащему от холода юному ночному гостю, дежурная в гостинице дала добро, в виде исключения без заявки, на мое поселение, предоставив мне единственно свободный, по ее словам, номер люкс за 3 рубля. Кстати, курьез, но это был мой первый и до сих пор единственный случай проживания в люксе гостиницы «Дубна». Больше, по разным причинам, не довелось: вполне устраивают предоставляемые ОИЯИ уютные одноместные номера.

Наутро 8 февраля я уже писал заявления и заполнял анкеты в филиале МГУ, а к вечеру обрел место в общежитии и зажил студенческой жизнью в понравившемся с первого взгляда родном городе ОИЯИ на берегу Волги. Не думал я тогда, что практически вся моя дальнейшая жизнь в той или иной мере будет связана с ОИЯИ, чему я, конечно, безмерно рад.

Многое можно вспомнить о том времени, но особенно незабываемы дни, когда мы, приехавшие студенты-четверокурсники, получив через два месяца необходимые документы, впервые ступили на площадки ОИЯИ и начали работать там со своими научными руководителями — сотрудниками Института. А летом того же 1964 г. некоторые из нас были привлечены к работам по обслуживанию Международной (Рочестерской) конференции по физике высоких энергий, проводившейся на базе ОИЯИ.

Год 1992-й. Выборы директора

На памятной внеочередной сессии КПП 10–13 декабря 1991 г., на которой Белоруссия, Россия и Украина были приняты в состав государств-членов ОИЯИ, была образована комиссия по выборам дирекции Института. Неожиданное, новое время срочно требовало, естественно, нового руководства. Во главе комиссии был поставлен представитель России — И. М. Бортник, зам. министра науки и технической политики. Комиссии было поручено подготовить предложения по выборам дирекции к очередной сессии КПП. Вскоре стало известно, что полномочный представитель Правительства России Б. Г. Салтыков предложил на пост директора кандидатуру А. Ю. Румянцева, одного из руководителей «Курчатовского института», и его поддержали представители Польши, Чехословакии и Венгрии. Я не был знаком с А. Ю. Румянцевым и, осведомившись у своих коллег из России и ОИЯИ, узнал, что он

никогда не работал в ОИЯИ, где его почти не знают, а область его научных интересов заметно иная, нежели у отцов-основателей Института и его первых директоров Д. И. Блохинцева и Н. Н. Боголюбова. И я понял, что нужно предложить другого кандидата, хорошо знающего ОИЯИ и хорошо известного в Институте и странах-участницах, который сможет поддержать традиции Института, сохранить и развить ОИЯИ как уникальный многоплановый международный научный центр. Мой выбор остановился на В. Г. Кадышевском, блестящем ученом и яркой личности, работавшем в то время директором ЛТФ ОИЯИ. Обсуждения со многими коллегами в Белоруссии, России и ОИЯИ укрепили мое решение как полномочного представителя Белоруссии. К тому же я хорошо знал большинство полномочных представителей правительств стран-участниц (а в то время о вступлении в ОИЯИ заявили также Азербайджан, Армения, Грузия, Казахстан и Молдова) и еще даже до обсуждения с ними мог спрогнозировать результат их тайного голосования при выборе директора.

Теперь необходимо было получить согласие самого В. Г. Кадышевского, что, как показали две мои длительные беседы с ним, оказалось делом совсем не простым. Мы разговаривали в уютном кабинете директора ЛТФ, где многое напоминало о великих предшественниках: Н. Н. Боголюбова и Д. И. Блохинцева, в разные годы работавших в нем. Первая реакция Владимира Георгиевича была: «Нет! Меня вполне устраивают моя работа и должность. Да и представитель России уже выдвинул кандидата». Тем не менее после обсуждения возможных последствий для направлений развития ОИЯИ в случае избрания кандидата, не знающего специфику Института, он согласился с тем, что, несмотря на позицию России, на выборах непременно должна быть альтернатива в лице кандидата из ОИЯИ. Далее я изложил Владимиру Георгиевичу свои соображения по прогнозу результатов голосования большинства полномочных представителей, которых, кстати, он знал (а они — его) далеко не хуже меня. В конце нашей второй беседы Владимир Георгиевич сказал, что он согласится на выдвижение своей кандидатуры, но с условием, что его программа будет поддержана и принята к реализации в случае избрания его директором. Во-первых, ОИЯИ должен стать по-настоящему международной межправительственной организацией, открытой и привлекательной для сотрудничества со всеми заинтересованными парт-

нерами (международными организациями, странами, институтами, университетами), в какой бы точке планеты они не располагались. С этой целью в качестве первого шага необходимо сформировать такой Ученый совет ОИЯИ, в который входили бы видные ученые не только стран-участниц, но и всех ведущих ядерных центров мира. Во-вторых, Институт, оставаясь уникальной многоплановой научной организацией с большой инженерно-методической и технологической составляющей, должен полномасштабно реализовать, что называется, пустить в оборот свой образовательный потенциал, накопленные знания, опыт, навыки, наработанные международные связи. Эта новая полноценная компонента, новое измерение ОИЯИ — образование — будет способствовать выживаемости Института, придаст ему устойчивость, принесет новую плавучесть. В-третьих, необходимо, руководствуясь нормами международного права, юридически оформить отношения ОИЯИ с новой страной местопребывания — Россией, подготовив и заключив соответствующее соглашение.

Мне было очевидно, что программа с такими основными положениями не может быть не поддержана как полномочными представителями, так и сотрудниками Института, и я немедленно направил в комиссию по выборам дирекции ОИЯИ письмо о выдвижении Республикой Белоруссией В. Г. Кадышевского кандидатом на должность директора. Как я уже отмечал, первоначально (в декабре 1991 г.) выборы директора было запланировано провести на очередной сессии КПП. Однако, хотя этот вопрос и был внесен в повестку дня этой сессии (17–18 марта 1992 г.), КПП перенес выборы на июнь 1992 г., поручив комиссии по выборам завершить подготовительную работу и не позже чем за две недели до июньской сессии разослать подробную информацию о кандидатах и их программах. Запомнилась мартовская сессия КПП 1992 г. тем, что четыре бывшие республики Советского Союза — Азербайджан, Армения, Грузия и Казахстан — были приняты в число государств-членов ОИЯИ. А мне — еще и длительной дискуссией тет-а-тет с И. М. Бортником, в которой Иван Михайлович убеждал в необходимости избрания А. Ю. Румянцева директором, что для меня было равносильно предложению снять кандидатуру В. Г. Кадышевского, поскольку его не поддержит Россия. Разъехались мы, оставшись при своих мнениях. При этом, перегово-

ворив во время сессии с большинством коллег по КПП, я практически не сомневался в исходе предстоящего голосования.

А в ОИЯИ тем временем бурлили предвыборные страсти. Научно-технические советы Института и его лабораторий наряду с кандидатурой В. Г. Кадышевского предложили также кандидатуры А. М. Балдина (директора ЛВЭ ОИЯИ) и А. Н. Сисакяна (вице-директора ОИЯИ). Что и говорить: все трое — достойные кандидаты. Но распыление сил было не на пользу любому из кандидатов от ОИЯИ. Я не знаю точно, какими еще мотивами руководствовались Александр Михайлович и Алексей Нораирович, но они приняли единственно верное в то время решение — отказаться от своего выдвижения в пользу Владимира Георгиевича — единственного кандидата от ОИЯИ.

Наступил июнь 1992 г., и в окончательном списке кандидатов было три фамилии: А. Ю. Румянцев (выдвинут представителем России, выдвижение поддержано представителями Венгрии, Польши и Чехословакии), В. Г. Кадышевский (выдвинут представителем Белоруссии, поддержан НТС ОИЯИ), А. Михул (выдвинут представителем Румынии). Но перед этим мне позвонил из Москвы И. М. Бортник и спросил, не передумал ли я с выдвижением кандидатуры В. Г. Кадышевского. Озвученный аргумент у него, в сущности, был один: возможное избрание кандидата, которого не поддерживает Россия, может создать большие трудности Институту. Конечно, резон в этом утверждении был. Однако я твердо знал другое: мнение руководства Министерства науки и технической политики еще не означает мнения большинства ядерного научного сообщества России, включая людей, близких к высшему руководству страны. В первую очередь я имею в виду Анатолия Алексеевича Логунова, решительная поддержка которым кандидатуры В. Г. Кадышевского сыграла весьма важную роль. Поэтому мой ответ Ивану Михайловичу был прост: выборы свободные, и пусть решает голосование полномочных представителей, результаты которого, я уверен, будут приняты в России вполне нормально при любом его исходе.

Сессия КПП была назначена на 23–24 июня. Но у меня на этот период была уже запланирована командировка на рабочее совещание в Италию совместно с коллегами из ОИЯИ под руководством И. А. Голутвина. Поэтому свои полномочия я передал на это время ответственному работнику аппарата Совета ми-

нистров Республики Белоруссии Л. П. Орлову, с которым мы в деталях «отрепетировали» линию его поведения на сессии КПП.

Будучи во Флоренции, мы с И. А. Голутвиным с нетерпением ждали итогов выборов, хотя и были уверены в избрании В. Г. Кадышевского. И вот звонок в Дубну во второй половине дня 23 июня, и мы с огромной радостью узнаем результаты голосования по выборам директора ОИЯИ: из 16 голосовавших 11 за В. Г. Кадышевского, 4 за А. Ю. Румянцева, 1 за А. Михула. Как говорится, комментарии излишни. В соответствии с заранее разработанной и принятой на этой же сессии КПП «Процедурой вступления в должность вновь избранной дирекции» Владимир Георгиевич Кадышевский вступил в должность сразу же после избрания. И очень скоро всем, включая представителей России, стало ясно, что это был единственно правильный выбор в то непредсказуемо сложное и трудное время.

Год 1997-й. Возобновление Гомельских школ

О первых Гомельских школах «Актуальные проблемы физики частиц» ярко и точно написал Л. М. Томильчик в сборнике «Объединенному институту ядерных исследований — 40 лет. Хроника. Воспоминания. Размышления» (Дубна: ОИЯИ, 1996). Здесь я хотел бы кратко вспомнить о том, как была возобновлена эта очень важная для науки в Белоруссии традиция, заложенная Н. Н. Боголюбовым, Ф. И. Федоровым и В. Г. Кадышевским.

У меня в рабочем кабинете на книжной полке всегда стоял (и стоит) коллективный снимок участников первой Гомельской школы 1971 г. Приятно-волнительно все-таки время от времени посмотреть на молодые одухотворенные лица друзей, коллег, знакомых. Вернувшись в конце марта 1996 г. с юбилейной сессии КПП ОИЯИ и просматривая привезенный с собой упомянутый выше сборник, в том числе статью Л. М. Томильчика, я взглянул на памятный снимок и впервые подумал о возможности возобновления Гомельских школ в новых условиях. При случае я выяснил у коллег из Института физики НАН Белоруссии некоторые детали организации, проведения и, главное, финансирования первых школ. Мне стало ясно, что единственный реальный источник получения средств на проведение школы — это долевой взнос Белоруссии в ОИЯИ. По телефону, а затем и в одну из поездок в Дубну я обсудил возникшие идею и

вопросы с В. Г. Кадышевским и А. Н. Сисакяном и получил от них полное понимание и поддержку.

Реальная работа по подготовке школы началась осенью 1996 г. со встречи в Минске с Н. В. Максименко, на которой мы наметили предварительный план действий на месте, в Гомеле и пансионате «Золотые пески» (месте проведения трех первых школ). В Гомеле в эту работу с энтузиазмом сразу же включились «ветераны» первых школ Ю. М. Плескачевский и С. В. Шербаков. В Минске «боевую готовность» выразили А. А. Богуш, Л. М. Томильчик, В. И. Кувшинов и другие коллеги из Института физики. Проинформировав В. И. Недилько и В. И. Прокошина в ГКНТ, В. А. Плетюхова в Национальном собрании и А. В. Кухарева в Совете министров и получив их «добро», я написал на имя директора ОИЯИ официальное письмо с предложением о совместном проведении школы летом 1997 г. К этому времени с помощью гомельских коллег были предварительно согласованы в тресте «Гомельпромстрой», которому принадлежал пансионат «Золотые пески», место и даты проведения школы.

Приведу полностью ответ, вскоре пришедший из ОИЯИ.

Полномочному представителю Правительства Республики Белоруссии в Объединенном институте ядерных исследований профессору Н. М. Шумейко.

Глубокоуважаемый Николай Максимович! Рассмотрев Ваше предложение о возобновлении Гомельских школ, дирекция Объединенного института ядерных исследований решила поддержать эту инициативу. Мы согласны с Вашими предложениями по проведению очередной школы 8–17 августа с. г., в том числе по финансированию участия ОИЯИ, приглашенных лекторов и зарубежных участников в счет долевого взноса Вашей страны в ОИЯИ. Сообщаю Вам также о поддержке с нашей стороны участия в оргкомитете школы названных Вами специалистов ОИЯИ.

*С глубоким уважением,
профессор А. Н. Сисакян,
вице-директор Объединенного института
ядерных исследований.*

31 января 1997 г.

Дальнейшее, как говорится, было делом техники. Были сформированы оргкомитеты: от ОИЯИ — председатель А. Н. Сисакян, зам. председателя и ректор Н. Б. Скачков; от Белоруссии — председатель Н. М. Шумейко, зам. председа-

теля А. А. Богуш. Создан программно-консультативный комитет — председатель В. Г. Кадышевский. Приглашены лекторы из DESY, ОИЯИ, FNAL, ЦЕРН, а также ведущих научных центров Австрии, Белоруссии, Великобритании, Италии, России, Украины, Франции. Подписан контракт с ОИЯИ на финансирование школы из средств долевого взноса Республики Белоруссии. При этом, исходя из состава участников, соотношения между лекциями и докладами, школа была переименована в школу-семинар с прежним названием «Актуальные проблемы физики частиц».

Примерно за месяц до начала школы-семинара я выехал в Гомель, чтобы на месте увидеть ход подготовки к ней. Вместе с Н. В. Максименко мы встретились с Ю. М. Плескачевским, работавшим директором Института механики металлополимерных систем, с ректором Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины Л. А. Шеметковым и ректором Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого А. С. Шагиняном. Мы также посетили «Золотые пески» и увидели разительные изменения, произошедшие за 20 лет после школы 1977 г. Пансионат стал санаторием, выстроенным фактически заново. Лишь корпус, бывший нашей единственной «базой» на школах 1970-х гг., да живописные, почти километровые подвесные мостики через болотце, ведущие к тропинке к Сожу, напоминали нам о прежней инфраструктуре.

Результат поездки даже превзошел мои ожидания. Гомельские коллеги делали все от них зависящее, чтобы обеспечить успех дела. С другой стороны, мы в Минске работали в максимально тесном взаимодействии с коллегами из ОИЯИ, особенно по учебно-научной программе, количественному и качественному составу участников. В таких условиях, да еще при внимании и поддержке государственных структур нашей страны школа-семинар была обречена на успех.

Итак, традиция возродилась. С тех пор через каждые два года проведены еще шесть школ-семинаров. Бессменным председателем оргкомитета всех этих научно-образовательных форумов от ОИЯИ являлся А. Н. Сисакян, неоднократно приезжавший в «Золотые пески» и непосредственно руководивший работой. Со школы-семинара 2001 г. зам. председателя оргкомитета, а с 2005 г. ректором, сменившим Н. Б. Скачкова, становится Н. А. Русакович. Его вклад в подготовку, организацию и проведение всех последних семи школ-семинаров просто огро-

мен. К этому добавлю еще, что на каждой школе он бывает, как говорят, от рассвета до заката, регулярно читает лекции и делает доклады. Кстати, наряду с А. Н. Сисакяном, только Н. А. Русакович и И. А. Голутвин неизменно входили в оргкомитет школ-семинаров от ОИЯИ.

Со стороны Белоруссии оргкомитет возглавляли В. А. Гайсенко (1999 г.) и А. И. Лесникович (2001 г.), бывшие в те годы председателями Государственного комитета по науке и технологиям (ГКНТ) и полномочными представителями правительства в ОИЯИ. Заместителями председателя в оргкомитете стали (и остались ими на последующих школах) Ю. М. Плескачевский и ваш покорный слуга, а бессменным проректором — Н. В. Максименко. С 2003 г. тематика школ-семинаров была расширена за счет лекций и докладов по ядерной физике, ядерным технологиям, радиационному материаловедению, а также за счет обзорных лекций по смежным научно-технологическим направлениям. Соответственно более «широким» стало наименование школы-семинара: «Актуальные проблемы физики микромира». Председателем оргкомитета от Белоруссии стал первый заместитель председателя ГКНТ В. И. Недилько, назначенный в том году полномочным представителем правительства в ОИЯИ и работающий в этих качествах все последующие годы.

В заключение отмечу ничем не заменимый вклад, который вносят Гомельские школы-семинары в образование научной молодежи Белоруссии, России и других стран-участниц ОИЯИ, в поддержание и повышение уровня фундаментальной и прикладной науки в наших странах, в оживление плодотворного международного научного общения, в воспитание новых поколений ученых.

Годы 2000-е.

Совместная работа по проектам на LHC

Ярким примером суперуспешного сотрудничества нашей страны с ОИЯИ является совместное выполнение взятых обязательств по разработке и созданию ряда подсистем детекторов CMS и ATLAS. Совместная работа по проекту CMS в составе коллаборации RDMS, созданной по инициативе И. А. Голутвина, довольно подробно описана мною в статье «В CMS — с самого начала» в сборнике «В глубь материи» (М.: РАН, Ин-

ститут истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова, 2009). Здесь хотел бы добавить, что, по моему мнению, ОИЯИ был и остается стержнем, цементирующей и движущей силой этого беспрецедентного сотрудничества институтов России, Белоруссии и других стран-участниц в проекте CMS. Во многом благодаря этому с блеском были выполнены все масштабные обязательства коллаборации RDMS, включая непосредственные обязательства Белоруссии, предусмотренные «Соглашением между ГКНТ Республики Белоруссии, ЦЕРН и ОИЯИ о координации усилий по участию в проекте создания компактного мюонного соленоида» от 24 июня 1998 г. Немалым оказался наш (Белоруссии) совместный с ОИЯИ (группой Н. А. Русаковича) вклад в проект ATLAS. В 1990-е гг. на Минском тракторном заводе была произведена сверхточная штамповка 12 типономиналов спейсерных пластин из специальной стали для поглопителя адронного калориметра, а в 2003–2005 гг. на заводе МЗОР в Минске были прецизионно изготовлены из алюминия большие серии крупногабаритных элементов тепловой структуры магнитной системы детектора ATLAS.

Завершу мои заметки словами искренней благодарности судьбе за то, что она позволяет мне и многим-многим моим коллегам из Белоруссии уже на протяжении почти полувека плодотворно работать бок о бок и тепло общаться в ОИЯИ (или при его содействии) с дубненскими и зарубежными коллегами, пользоваться уникальным достоянием ОИЯИ, внося посильный вклад в развитие передовой науки в своей стране и в нашем общем Институте на берегу Волги.

A STRONG INTERACTION WITH JINR

G. Stratan

Three short — and real — stories about three personalities, men of quite different professions and intellectual formation met by the author at JINR-Dubna are presented in order to give a picture of the local scientific, political and human atmosphere in the first half of the seventies, dominated by the outstanding personality of N. N. Bogoliubov.

Introduction. The Dubna Institute enjoys a great prestige among Romanian scientists. It must be mentioned that the father-founder of the Institute of Atomic Physics in Bucharest, Horia Hulubei (1896–1972), who was a man of Western education (he received his PhD at Sorbonne, under Jean Perrin and Marie Curie, and was elected in 1939 a corresponding member of Paris Academy of Sciences), was a devoted partisan of the cooperation between Romania and Dubna. Hulubei considered his membership of the JINR Scientific Council as one of his most important acknowledgements of his activity and also a very important duty. Other Romanian scientists who worked at JINR were respected and openly envied by the younger ones.

So, when, in early 1970, the author of this paper had the chance to go to work in Dubna, he did not miss it. Five years with the Laboratory of Theoretical Physics, led then by Academician D. I. Blokhintsev, in the sector of Professor V. G. Soloviev, were an occasion to learn from, and to work with, eminent scientists, to know many people and a new country, which altogether constituted a professional and life experience without equal.

Quite short after my arrival in Dubna, I was nominated head of Romanian National Group, numbering then only four members (including me). All other members of the group, starting with Professor Alexandru Mihul, the JINR Vice-Director, were older than their «head». A. Mihul proposed and firmly sustained my appointment to this duty which, in spite of my reluctance, I had to accept. Being somehow afraid, and not knowing exactly what I have to do, I assumed three tasks which nobody assigned to

me: to contribute to the enhancement of Romanian cooperation with JINR, to fight for the best possible conditions for Romanian scientists in Dubna and to keep them as far as possible from the political intrusion and pressure which, at least in Romania, were almost insupportable. It would be difficult — and immodest — for me to appreciate if my mission was successfully accomplished. Only one detail: when I left Dubna in 1975, the number of Romanian community in JINR was bigger than thirty. This cannot be the merit of one person only; the position of Professor Mihul in the JINR Directorate and the support from Professor Ioan Ursu home were decisive in this sense. It must be mentioned also that the JINR authorities welcomed such a trend. Back in Romania after my five years of work in Dubna, I was confronted with a hostile atmosphere coming from the tough Party members who were adversaries of international cooperation and partisans of an autarchic development of Romania. They accused me to be a pro-Soviet political fan (which, certainly, I was not) and an admirer of Russian science and culture (which, certainly, I was). The fact that I denied their first accusation and recognized the second one did not ease my situation. Soon, they took over in the Party and the international collaboration in the field of science went down, including our participation to JINR activities. When, in December 1989, the papers from the local Party bureau of my institute were thrown out through the windows, one colleague of mine found an official report in which my opinion that the politics of the scientists must be the science itself was correctly quoted and furiously criticized as undermining the Party politics. But, enough with all that. I hope this period is closed totally, and for ever. The greatest (maybe the only!) advantage of being the head of Romanian Group in JINR was to know many people from the multinational host country and from abroad, many of them otherwise difficult to meet, or quite impossible.

N. N. Bogoliubov. When entering the first floor of Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, you can see a wall full of pictures taken and arranged by Yu. Tumanov. When looking at the lower row, the third picture at left reveals a prophetic image. It is one of the best portraits of N. N. Bogoliubov, photographed most probably in the early 70s. But this is not exactly why all people knowing Dubna from that period remark immediately. Indeed, in the picture, behind Bogoliubov, there are two other persons, two young theoreticians, disciples and followers of their great master.

Both of them, dark haired and with — then, modern — hair cut a la Elvis Priestley ¹⁾, looked confidently to the future. I bet that you recognized V. G. Kadyshevsky and A. N. Sissakian, who followed Bogoliubov also in the difficult and prestigious duty of Director of JINR ²⁾.

Like in the picture, Bogoliubov was in the first row of Dubna scientists, but he was *primus inter pares*, as the beautiful Latin words define *the first one between equal ones*. He was a man of outstanding intellectual gifts and a special sense of humor. Assisting the Romanian delegation at the sessions of the Scientific Council, I was marveled by his capacity to synthesize the discussed problems, giving to the texts a lapidary formulation, so to be acceptable for all, without loosing their substantiality. Once, late in the evening, when the contradictory discussion seemed without end, he suddenly said: «La nuit porte conseil». Not many knew French to catch the meaning of the phrase («The night brings advice») and a rumor grew up when people started to ask each other what Bogoliubov said. Then, Bogoliubov stood up and closed the meeting, «because all of us are tired and it is the time to eat something and to have a good sleep». And so it was. Next morning, the decision was taken quickly, by adopting a short formulation proposed by Bogoliubov. All people could verify so that the French saying is correct.

There is another amazing fact about his knowledge of languages. When N. N. Bogoliubov went in Romania to receive the *Doctor Honoris Causa* title from the Bucharest University, he asked to see some Romanian newspapers, a requirement which was very easy to fulfill: like in many Member States, we had only three, the Party's one, the Government's and the Trade Union's. Bogoliubov took one newspaper and, to the astonishment of all accompanying persons, started to read it aloud in English. After a couple of phrases, he suddenly stopped. «I don't understand this word» he said. One official went closer and offered his help: «Nikolai Nikolaevich, but this word is like in Russian, you

¹⁾ If someone will think that it is outrageous for a scientist to be compared with a rock star, I have to mention that not being a fan of rock, I consider Elvis Priestley a real genius, maybe the only one to make this kind of music an authentic one. We must take into account also that in the years when the picture was taken, and in that place, to admire Elvis was a nonconformist attitude. The conformists admired only the patriotic songs.

²⁾ We have to ask Tumanov to make more such pictures ...

know ...» Then, Bogoliubov interrupted him. «Yes, yes! Sorry, I completely forgot that you have also some Slavic roots in your vocabulary. I used only that part of my brain, where I stored my knowledge of the Latin family of languages, to which Romanian belongs.» And Bogoliubov went on, reading fluently in English a Romanian newspaper.

When thinking about N. N. Bogoliubov, I feel also a bitterness. This comes from a well-known fact. In spite of his great achievements, he did not receive the Nobel Prize, which went to other physicists who did less than he did in science. I comfort myself by the idea that Bogoliubov is in a good company: L. N. Tolstoy, the great Russian and universal writer whose candidature to the Nobel Prize for Literature was rejected in the favor of an obscure poet of French expression¹⁾. Who doesn't know Tolstoy? But who knows his counter-candidate?

Gheorghe Marin (or **Marin Gheorghe**, I don't know exactly²⁾). He came from the workshop of one of laboratories of the Institute of Atomic Physics, in Bucharest-Magurele as the head of a group of three specialized electromechanical workers. They were received in the Laboratory of High-Energy Physics for three months (extended later at six months, at the request of LHEP) and started to work. Usually, needing something, the physicist asks an engineer how to do a device, the engineer makes the plan of it and each worker effectuates a specific operation, like cutting, drilling, welding, polishing, etc. When the engineer contacted GM (or MG) for a first operation to be done, he asked the engineer what exactly that device was necessary for. After hearing the answer, GM proposed to modify the device, so to function better. Looking at the new proposed scheme, the engineer realized that it was better than the previous one and accepted it. More than that, GM performed quickly all the operations and, in a short time, the device was ready ... Gheorghe Marin did not know a word in Russian and I was asked to help with the translation, witnessing all the things happening. People started to suspect that, from reasons of prestige, the Romanian authorities were sending as workers three disguised engineers. V. S. Shvanev,

¹⁾ The bias of Nobel Committee against the Russian candidates to the Nobel Prize is well known.

²⁾ There are cases when the distinction between the given and family names of Romanians is difficult.

the head of the JINR International Department (see below), asked me why we do such a propaganda, and I did not succeed to convince him that all three newcomers were real workers.

Then, in the LHEP, an experiment was performed in concurrence with an American laboratory and, to the great disappointment of the people involved in it, a Hewlett-Parker online device went broken. The experiment stopped, and the HP representative for Eastern Europe was called. The contract specified that he had to come from abroad in 24 hours from the announcement to fix the apparatus, but shortly after, a fax came with a bad news. The HP man was an Israel citizen and his entrance in Soviet Union was denied by USSR Ministry of Foreign Affairs: a few days before, the Israeli-Egyptian war started and then, the high politics impeded the continuation of the experiment. All the efforts to solve the problem were in vain. Then, GM contacted me by phone from LHEP asking again to help him with the translation. He wanted to convince the people from the experiment to let him fix the device. He was not sure to succeed, but the situation was so that even a desperate attempt to solve the problem was better than doing nothing. He dismantled the device and went in his house, where he started to study the object. He returned in the lab after two days, unshaved and tired. Back in its place, the device started to work and the experiment could continue. The reaction to this exploit was extraordinary. GM was congratulated¹⁾, received a sum of money and the Dubna newspaper (nicknamed The Gossip) wrote an article about him. Even the renowned Pravda gave an account of the facts. Only Gheorghe Marin was reluctant to all the manifestation of acknowledgement: he was afraid what will happen home when the news will reach the people in command home. Between Bucharest and Moscow the relations were not at their best ...

Ten years after this story, I met GM in Bucharest. He was already retired and we discussed, of course, about Dubna. To my astonishment, Gheorghe Marin started by telling me that he owes me an apology. From what he said, I understood that V. S. Shvanev was right, but not exactly in the sense that GM was a disguised engineer. He was sent in Dubna as a worker, and he was a worker home, too. Besides that, he received the mission to keep an eye

¹⁾ It seems that by N. N. Bogoliubov himself, but I couldn't verify the information.

on me, and back home, to report «them» how I was behaving in a foreign country. «Don't be afraid, Stratan» he added «you are a good man, and I told them that».

V. S. Shvanev. The spring of 1974 was a cold one. The usual parade of May 1st found me at the tribune, together with other heads of JINR National Groups. It was snowing. Not far from me, I saw Venyamin Semionovich Shvanev, the chief of the JINR International Department, wearing a red ribbon at his lapel. He did not answer to my greetings. He was furious on me, and I knew why. Several days before May 1st, he called me to discuss about the coming holyday. I thought that all other heads of National Groups were invited but, when I entered his office, we were alone, which seemed strange to me. Soon, I understood the reason, but first, I have to explain, like in the previous paragraph, some details of the international situation. At the Western end of the European continent, the Portuguese military dictatorship was overthrown and, in Pravda's words, «for the first time after a lot of time, the First of May holyday will be freely observed by the Portuguese people». It was true; even the Portuguese soldiers, retired from Angola, manifested with a carnation in the barrel of their guns. This news was displayed in the «good corner» of Pravda page consecrated to the international affairs. At the other side of the continent, something «negative» was happening, and this kind of news was published in the opposite corner of Pravda. Apparently without connection with Portuguese events, Pravda reproduced Ceausescu's decree about establishing the First of May as a working day, in order to accomplish the goals of the current five-year plan in four years and a half...

When invited by Shvanev at the International Department, I didn't know all these developments. Shvanev wanted from me to agree with a special participation of Romanians from JINR at the May 1st demonstration. His proposal was to form a separate row in the manifestation, marked by a Romanian flag. I rejected the proposal, asking why we have to change the established custom... Then, Shvanev suggested me to call the other heads of National Groups and to propose them to change the order of the demonstration, grouping the people by the nationality criterion. I refused, because he didn't furnish me a convincing argument. I could not see the reason. He, nevertheless, insisted and the discussion finished only when I asked him to go together to N. N. Bogoliubov, to settle the dispute. It was Shvanev's turn to

refuse and I left the International Department totally puzzled. Why he insisted so much? Why he surrendered when I proposed him to go to Bogoliubov? Back in laboratory, I found the articles in Pravda, and I started to shiver. I could imagine there an article under the title «While in Bucharest the Romanians went to work, in Dubna they can have a rest after the demonstration of the First of May». Useless to mention what could happen to us, if accepting Shvanev's proposal: we could be called back in Romania in a matter of days.

I understood also why Shvanev did not accept the discussion with Bogoliubov. The great Russian scientist was not the man to accept a political provocation in JINR. I called Shvanev by phone and I asked him to allow to the Romanian Group to work in the labs on First of May, in sign of solidarity with what happens home. He said that this was impossible because it will be regarded as a political provocation. My answer was that his proposal was a provocation, too, and that the most reasonable solution was to let us in peace. I have to mention that, except me (obliged by the protocol), no Romanian participated ever: we disliked both demonstrations (compulsory then in Romania) and the obligation to work during the holydays.

Closing remarks. Certainly, as it was shown also here, the scientific and social life in that period in Dubna was dominated by the personality of N. N. Bogoliubov. Science needed always such people to establish a high standard and to indicate the way to be followed. Changing a little what Isaac Newton wrote, we may say that JINR climbed on the shoulders of giants. One of them was Bogoliubov.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

«Объединенному институту ядерных исследований .— 55 лет» — издание, в котором подводятся итоги семи лет развития Института (2003–2009 гг.) и освещаются планы на ближайшее будущее, связанные с фундаментальными научными исследованиями, реализацией инновационной и образовательной программ. Значительные усилия и ресурсы ОИЯИ, направленные в последние годы на осуществление крупномасштабной программы модернизации базовых установок и создания новых, позволят Институту сохранить лидирующие позиции в актуальных направлениях фундаментальной науки.

Завершается модернизация нуклотрона, проводятся испытания магнитов для бустера и будущего коллайдера NICA, достигнут определенный прогресс в выполнении программы проекта NICA/MPD.

Проведена реконструкция реактора ИБР-2 — основной базовой установки ОИЯИ для нейтронных исследований в области физики конденсированных сред, обладающей параметрами мирового уровня и оснащенной комплексом уникальных спектрометров.

Программа ОИЯИ по исследованиям в области сверхтяжелых элементов вывела Институт на позиции признанного лидера в мировом научном сообществе, что еще раз продемонстрировал эксперимент по синтезу 117-го элемента Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева. Проект будущего ускорительного комплекса DRIBs предусматривает расширение набора ускоряемых ионов как стабильных, так и радиоактивных изотопов, существенное повышение интенсивности и качества пучков.

Продолжается работа по усовершенствованию информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ, повышению производительности грид-сервисов. Грид-сегмент Института благодаря своей эффективной работе входит в десятку лучших в мире.

Большой цикл работ выполнен учеными ОИЯИ в рамках сотрудничества с ЦЕРН и по созданию элементов LHC, и по участию в создании физических установок. В 2010 г. подписано Генеральное соглашение по сотрудничеству между ЦЕРН и ОИЯИ.

С корпорацией «РоснаноТех» заключено соглашение о создании в ОИЯИ нанотехнологического центра, в котором будет размещаться прецизионное оборудование для работ в области нанотехнологий.

Полученные учеными и специалистами Института фундаментальные научные результаты в сочетании с развитием образовательной программы, ростом инновационной составляющей, расширением международного научного сотрудничества вселяют оптимизм и являются прочной основой для успешной реализации семилетнего плана 2010–2016 гг.

СОДЕРЖАНИЕ

Объединенный институт ядерных исследований: рождение научной Дубны	3
--	---

Научная программа

Основные достижения ОИЯИ за 2003–2009 гг.	31
Ускорительный комплекс NICA/MPD	57
Проект DRIBs-III	62
Реактор на быстрых нейтронах и ЛНФ им. И. М. Франка	80
Информационные технологии в ОИЯИ	91
Лаборатория радиационной биологии	100
Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова — ровесница ОИЯИ	108

Инновационная и образовательная деятельность

Инновационная деятельность	123
Образовательная программа ОИЯИ	128

Международное сотрудничество

Этапы международного сотрудничества ОИЯИ	137
ЦЕРН: начало и становление сотрудничества. <i>И. А. Савин</i>	141
Сотрудничество ОИЯИ–ЦЕРН	151
Сотрудничество ОИЯИ–Германия	183

Сотрудничество ОИЯИ–США	196
The «from A to Y» Collaboration. <i>R. Sosnowski</i>	209
Воспоминания об ЛТФ. <i>Д. Эберт</i>	216
When I think about Dubna: Memories over 40 years. <i>W. Greiner</i>	221
Как мы искали монополь Дирака. <i>Я. Ружичка</i>	224
Многие годы — с ОИЯИ. <i>Н. М. Шумейко</i>	229
A Strong Interaction with JINR. <i>G. Stratan</i>	239
Послесловие	246

100 =

**ОБЪЕДИНЕННОМУ ИНСТИТУТУ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ — 55 ЛЕТ**

2011-23

Получено 2.02.2011. Подписано в печать 9.03.2011.
Формат 60 × 90/16. Усл. печ. л. 15,8. Уч.-изд. л. 14,9. Тираж 1000. Заказ № 57255.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/