

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Полувековой юбилей Объединенного института ядерных исследований

В.Г. Кадышевский, А.Н. Сисакян

26 марта 2006 года исполнилось 50 лет со дня основания Объединенного института ядерных исследований. Рассказывается о становлении Института, его достижениях и планах на будущее.

PACS numbers: 01.52.+r, 01.65.+g

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) — международная межправительственная научно-исследовательская организация, созданная на основе Соглашения об учреждении ОИЯИ от 26 марта 1956 г., зарегистрированная в ООН 1 февраля 1957 г. и в ЮНЕСКО — 24 сентября 1997 г.

История Института в действительности началась раньше. В 1947 г. по инициативе группы ученых во главе с академиком И.В. Курчатовым приблизительно в 120 км к северу от Москвы началось строительство крупнейшего по тем временам ускорителя элементарных частиц — синхроциклотрона, который был успешно запущен к концу 1949 г.

В это же время развернулась широкая программа фундаментальных исследований свойств ядерной материи с привлечением специалистов Академии наук СССР и атомной отрасли. На территории будущей Дубны начались, в частности, работы по созданию синхрофазотрона — нового ускорителя с рекордными по тем временам техническими параметрами. Этот ускоритель, запущенный, как и первый искусственный спутник Земли, в 1957 г., стал символом достижений отечественной науки.

В 1954 г. в Женеве была создана Европейская организация ядерных исследований (ЦЕРН), призванная консолидировать усилия западноевропейских стран в изучении фундаментальных свойств материи. Это ускорило образование нашего Института как международной научной организации, способной объединить ученых социалистического лагеря. С самого основания Объединенного института научные контакты ЦЕРНа и ОИЯИ плодотворно развиваются по восходящей линии. Большое значение имеет сотрудничество ОИЯИ и ЦЕРНа в



Административный корпус ОИЯИ.

В.Г. Кадышевский, А.Н. Сисакян. Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Российская Федерация
Тел. (496-21) 62-243, 62-268. Факс (496-21) 632-78-80
E-mail: kadyshhev@jinr.ru, sisakian@jinr.ru

*Статья поступила 2 декабря 2005 г.,
после доработки 14 декабря 2005 г.*

сооружении большого адронного коллайдера (LHC) и подготовке экспериментов на нем.

Соглашение об организации ОИЯИ было подписано в Москве представителями правительств 11 государств; в настоящее время в состав Института входят 18 стран-участниц.



Первая дирекция ОИЯИ (слева направо): И.М. Франк, М. Даныш, В.П. Джелепов, В. Вотруба, Д.И. Блохинцев, В.Н. Сергиенко, В.И. Векслер, А.М. Рыжов, Н.Н. Боголюбов, Г.Н. Флеров.

История становления Института связана с именами таких крупнейших ученых и руководителей науки СССР, как Д.И. Блохинцев, Н.Н. Боголюбов, И.Е. Тамм, В.И. Векслер, Г.Н. Флеров, И.М. Франк, В.П. Джелепов, Б.М. Понтекорво, М.Г. Мещеряков, И.В. Курчатов, А.М. Петросьянц, Е.П. Славский, равно как и выдающихся ученых из стран-участниц: Л. Инфельда и Г. Неводничанского (Польша), Г. Наджакова (Болгария), Ван Ганчана (Китай), Х. Хулубея (Румыния), Л. Яноши (Венгрия), Г. Герца и Г. Позе (ГДР).

За пять десятилетий своей деятельности ОИЯИ стал крупнейшим многоплановым научным центром, оснащенным первоклассным оборудованием для проведения фундаментальных ядерных исследований, объединяющим усилия ученых в их стремлении понять, как устроен окружающий нас мир материи.

В Институте работают около 6 тысяч человек, в том числе действительные члены и члены-корреспонденты национальных академий наук, более 260 докторов и 650 кандидатов наук, десятки лауреатов международных и государственных премий. В состав ОИЯИ входят восемь научных лабораторий, каждая из которых по своим масштабам сопоставима с большим институтом.

Естественно, что главный капитал Института — это работавшие и работающие в нем люди, профессионалы экстракласса, высококвалифицированные специалисты в области физики и смежных наук.

Академик Н.Н. Боголюбов — один из крупнейших ученых XX столетия, создатель научных школ в математике, механике и физике, без малого 25 лет стоял во главе нашего Института. ОИЯИ по праву гордится научными школами, основанными Д.И. Блохинцевым, В.И. Векслером, Б.М. Понтекорво, М.А. Марковым, Г.Н. Флеровым, И.М. Франком, А.М. Балдиным и многими другими всемирно признанными учеными-физиками.

В стенах ОИЯИ были подготовлены тысячи специалистов высшей квалификации для всех стран-участниц. Президенты многих национальных академий наук, ректоры университетов, руководители крупных научных коллективов прошли школу ОИЯИ. Среди них бывший президент Вьетнамской академии наук и технологий

Нгуен Ван Хьеу, академик Российской академии наук и Академии Грузии А.Н. Тавхелидзе, академики РАН А.А. Логунов, В.А. Матвеев, Д.В. Ширков, Ю.Ц. Оганесян и многие другие. До недавнего времени Академию наук Китая возглавлял академик Чжоу Гуанджао, а в 1990 г. ректором Карлова университета в Праге стал профессор Иван Вильгельм. Оба они — воспитанники Дубны.

Характерная черта коллектива Института — высокая инициативность в постановке оригинальных исследований, в развитии новых научных направлений и передовой методики современного эксперимента, а также высокая надежность научных результатов. В стенах Института возник ряд идей, обогативших и углубивших наши представления о физическом мире.

Среди активно развивающихся сегодня в ОИЯИ научных направлений есть ряд направлений, родоначальником которых является Объединенный институт: релятивистская ядерная физика, физика тяжелых ионов, ультрахолодные нейтроны. Полученные результаты широко известны в мире, долгие годы они были рекордными и способствовали повышению престижа нашего Института и науки в целом.

В 1957 г. на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, руководимой выдающимся советским ученым-физиком академиком Владимиром Иосифовичем Векслером, был впервые получен пучок протонов, ускоренных до проектной энергии — 10 миллиардов электронвольт. Успешный запуск синхрофазотрона позволил ученым 12 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.

Еще до запуска синхрофазотрона для этой цели в ЛВЭ уже разрабатывались различные детекторы частиц и создавались 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 пузырьковых камер:

камеры Вильсона, 24-литровой пропановой и полуметровой ксенонной. 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 разрабатывались электронные методы исследований. На выведенных пучках синхрофазотрона появились современные спектрометры, содержащие искровые камеры и черенковские счетчики.

Первыми, кто был готов к работе на ускоренном до рекордных энергий пучке протонов, были сотрудники группы ядерных фотоэмульсий. Когда сотрудник одной из этих групп принесли Владимиру Иосифовичу Векслеру еще не проехавший от проявления отпечаток фотоснимка с изображением первой "звезды", воспроизводящей результат столкновения ускоренных до 10 ГэВ протонов с ядрами фотоэмульсии, лицо основателя и первого директора Лаборатории высоких энергий осветила счастливая улыбка!

Случай рождения и распада антисигма-минус-гиперона был найден после просмотра 40 тысяч стереофотографий, на которых были зарегистрированы десятки тысяч других взаимодействий отрицательных 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 частиц (Λ^0 , K^0 , Σ^\pm и Ξ^-) в пион-нуклонных взаимодействиях при самых высоких в то время энергиях. В частности, рассказывалось об открытии антисигма-минус-гиперона, 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.

Не менее ярка и наполнена событиями история первого ускорителя Дубны — синхроциклотрона (Лаборатория ядерных проблем). Под руководством известных ученых В.П. Желепова и Б.М. Понтекорво на синхроциклотроне ОИЯИ сделано 13 научных открытий. Замечательная идея нейтринных осцилляций, высказанная Бруно Понтекорво, недавно нашла экспериментальное подтверждение.

В 1953 г. — после увеличения диаметра полюсов магнита синхроциклотрона до 6 м и существенной реконструкции его высокочастотной системы — был введен в действие протонный вариант ускорителя на энергию протонов 680 МэВ с интенсивностью пучка протонов 0,25–0,3 мкА; на протяжении ряда лет синхроциклотрон ЛЯП являлся самым мощным ускорителем протонов в мире.

Одновременно с проведенной реконструкцией магнитной и ВЧ-систем на синхроциклотроне был осуществлен новый, регенеративный метод вывода частиц из ускорителя, что позволило увеличить интенсивность выведенного пучка в десятки раз. В экспериментальный павильон, отделенный от ускорителя четырехметровой стеной из тяжелого бетона и закрытый толстым 1,5-метровым бетонно-потолочным перекрытием, с помощью отклоняющего магнита и коллиматоров были выведены 14 пучков протонов, пионов и нейтронов

различных энергий, что открыло большой простор для исследований не только физиков ЛЯП, но и ученых из Москвы, Ленинграда, Харькова и других городов. Повышение интенсивности внутреннего протонного пучка до 2,3 мкА и увеличение коэффициента его вывода, осуществление медленного вывода протонов и появление ряда новых пучков существенно расширили возможности постановки принципиально новых экспериментов и значительно улучшили условия проведения на синхроциклотроне физических и прикладных исследований.

В ЛЯП были развернуты широкие исследования нейтронодефицитных изотопов, в ходе реализации которых (1955–1979 гг.) было открыто более 100 новых радиоактивных изотопов.

После 30-летней работы синхроциклотрон был реконструирован в фазотрон со спиральной вариацией магнитного поля, который с конца 1984 г. успешно работает на физику частиц и атомного ядра, а также используется для прикладных исследований. Параметры пучков нового ускорителя и его надежность существенно превосходят характеристики бывшего синхроциклотрона. Стало возможным получение интенсивных пучков медленных пионов и мюонов, в том числе сепарированного пучка "поверхностных" мюонов. Для проведения медико-биологических и клинических исследований были сформированы широкие и узкие пучки протонов с энергией от 70 до 660 МэВ, интенсивный пучок отрицательных π -мезонов с энергией от 30 до 80 МэВ, пучок сверхбыстрых нейтронов со средней энергией 350 МэВ. Кроме того, фазотрон является наиболее интенсивным источником мезонных пучков в странах-участницах ОИЯИ.

Чрезвычайно высока научная репутация крупнейшего в мире коллектива теоретиков — Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ. В 1960 г. Н.Н. Боголюбов сформулировал концепцию квазисредних, оказавшую большое влияние на развитие квантовой теории поля. Спустя пять лет Н.Н. Боголюбов, Б.В. Струминский и А.Н. Тавхелидзе решили проблему статистики кварков путем введения нового квантового числа, названного впоследствии цветом. Кварковая модель адронов активно развивалась в Дубне. Предполагалось, что кварки — это тяжелые объекты, связанные в адронах большими силами, обуславливающими большой дефект масс кварков и их невылетание наружу. Так появилась модель "дубненского кваркового мешка" (Н.Н. Боголюбов, П.Н. Боголюбов, Нгуен Ван Хьеу, В.А. Матвеев и др.), в рамках которой был получен ряд важных результатов, в том числе дано объяснение аномальных магнитных моментов нуклонов. В конце 60-х годов В.А. Матвеев, Р.М. Мурадян и А.Н. Тавхелидзе продемонстрировали плодотворность представления об автомодельности в сильных взаимодействиях и получили правила кваркового счета¹. В 70–80-х годах был выполнен значительный цикл работ по применению принципа автомодельности и обобщению правил кваркового счета для множественных и инклюзивных процессов с использованием трехмерной формулировки

¹ Эти результаты вошли в цикл исследований "Новое квантовое число — цвет и установление динамических закономерностей в кварковой структуре элементарных частиц и атомных ядер", удостоенный Ленинской премии в 1988 году (авторы А.М. Балдин, П.Н. Боголюбов, В.А. Матвеев, Р.М. Мурадян, А.Н. Тавхелидзе).



Слева направо: научный руководитель Института, директор ОИЯИ в 1992–2005 гг. В.Г. Кадышевский, руководитель Федерального агентства по науке и инновациям РФ С.Н. Мазуренко и директор ОИЯИ А.Н. Сисакян.

КТП (С. Мавродиев, Р.М. Мурадян, А.Н. Сисакян, В.И. Саврин, Н.Б. Скачков, Л.А. Слепченко). Эти работы нашли широкое применение при обработке данных и планировании экспериментов на крупных ускорителях.

В 70-е годы В.Г. Соловьев сформулировал основные положения микроскопической квазичастично-фононной модели ядра (КФМ), которая описывает ядерные спектры на основе представлений о взаимодействующих боголюбовских квазичастицах и фононах в приближении случайной фазы. Развитие микроскопической теории ядра и сейчас является важной составной частью исследований дубненских теоретиков. Им удалось понять сложную картину низколежащих состояний деформированных атомных ядер, внести существенный вклад в теорию ядерных колебаний и вращений, теорию деления, а также заложить фундамент модели взаимодействующих бозонов (Р.В. Джолос). В последние годы интересы теоретиков-ядерщиков сместились в область ядерных состояний с экстремальными значениями углового момента, деформации, энергии возбуждения, что необходимо для совершенствования микроскопических моделей ядра, создания единой картины ядерных возбуждений.

С начала 90-х годов XX века начался качественно новый этап деятельности нашего Института. Распад социалистического лагеря и СССР, жестокий экономический кризис во многих странах-участницах — все это отразилось на жизни Института. Однако в это непростое время Объединенный институт выстоял благодаря усилиям многих видных ученых и государственных деятелей, нацеленным на его сохранение. В первую очередь, сыграли роль дальновидность и мудрость создателей ОИЯИ, традиции его научных школ, высочайший уровень проводимых в нем теоретических и экспериментальных исследований, уникальная научная база, самоотверженность и беззаветная преданность науке высококвалифицированного коллектива сотрудников института — ученых, специалистов, рабочих.

Исключительно важным событием для Института стало принятие в конце 1999 г. Федерального закона "О ратификации Соглашения между Правительством Российской Федерации и Объединенным институтом ядер-

ных исследований о местопребывании и об условиях деятельности Объединенного института ядерных исследований в Российской Федерации". Этот Федеральный закон был подписан и.о. Президента России В.В. Путиным 2 января 2000 г. Тем самым для Института были подтверждены правовые гарантии, соответствующие общепринятым международным нормам.

На новом этапе развития ОИЯИ стало ясно — сотрудничество стран-участниц в международном институте должно обрести качественно новый характер: быть взаимовыгодным, базироваться на реальных возможностях государств-членов ОИЯИ. Именно такими являются современные принципы деятельности Института, определяющие его стратегию, перспективы развития, приоритетные направления исследований.

В 1992 г. был образован международный Ученый совет ОИЯИ, в который избраны ведущие специалисты из крупнейших исследовательских центров мира. Созданы международные программно-консультативные комитеты. Впервые представители государств-членов ОИЯИ ответили на вопрос, какие научные направления в Институте для них наиболее интересны и актуальны. Целый ряд перспективных направлений ОИЯИ развивает в сотрудничестве с институтами и организациями России при действенной поддержке Российской академии наук, Министерства образования и науки, Федерального агентства по атомной энергии РФ.

Из весьма широкого спектра научных исследований в ОИЯИ можно выделить три основных направления. Это физика высоких энергий (или физика элементарных частиц), ядерная физика и физика конденсированных сред.

Исследования физики высоких энергий, связанные с рождением и взаимодействием элементарных частиц, — самый прямой путь познания структуры материи в ультрамалых пространственно-временных масштабах. Ученые ОИЯИ ведут эксперименты по этой программе не только у себя в Дубне, но и в других научных центрах: в Институте физики высоких энергий (Россия), в ЦЕРНе (Швейцария), в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США), на Германском электронном синхротроне (ФРГ) и т.д. Физиками Дубны охвачен широкий круг вопросов, нацеленных на исследование фундаментальных свойств элементарных частиц и их взаимодействий, на изучение редких процессов для проверки предсказаний Стандартной модели и поиска новых явлений и закономерностей, выходящих за ее пределы, измерения параметров прямого CP-нарушения, всесторонние исследования природы и свойств нейтрино. Новая информация о свойствах элементарных частиц в широком интервале энергий окажет воздействие на формирование единой теории фундаментальных взаимодействий.

Дубненские эксперименты по релятивистской ядерной физике — новому научному направлению, предложенному и развитому академиком Александром Михайловичем Балдиным, привлекают самое пристальное внимание физиков научных центров мира. В частности, ведутся исследования взаимодействий релятивистских ядер в энергетической области от нескольких сотен мегаэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт на нуклон с целью поиска проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, асимптотических законов для ядерной материи, а также изучается спиновая структура

легчайших ядер. Поиск и исследование свойств сильно возбужденной ядерной материи позволят осуществить проверку КХД-теории и дать возможные ответы на фундаментальные вопросы: что такое конфайнмент, каковы механизмы адронизации и нарушения киральной симметрии? Эксперименты в этих направлениях проводятся с использованием собственной ускорительной базы Института, а также ускорителей других научных центров: CERN, BNL, GSI, RIKEN и т.д.

В Лаборатории высоких энергий, носящей имена академиков В.И. Векслера и А.М. Балдина, в 2002 г. проводились уникальные научно-технические работы по совершенствованию системы медленного вывода пучка заряженных частиц из нуклотрона — нового ускорителя релятивистских ядер. Сейчас можно утверждать, что система медленного вывода нуклотрона, являясь уникальной по технологии, успешно прошла всесторонние испытания и обеспечивает все заданные параметры выводимых из ускорителя пучков. Были получены рабочие пучки широкого спектра ионов в большом диапазоне энергий с хорошими временной структурой и коэффициентом однородности пучка. Впервые в мире осуществлено комплексное решение задачи медленного резонансного вывода пучка из сверхпроводящего ускорителя. Достигнут еще один важнейший результат: ускорен и выведен из нуклотрона пучок поляризованных дейтронов, что открывает новые возможности для исследований. Изучение взаимодействий поляризованных дейтронов крайне важно для понимания природы спина.

В целом, проект системы криогенного обеспечения нуклотрона отличается необычайно большим количеством новых технических идей и решений, никогда ранее не применявшихся в мировой практике. В криогенной системе нуклотрона используются быстроциклирующие сверхпроводящие магниты, криостатирование двухфазным парожидкостным потоком гелия при экстремально коротком времени захолаживания системы, параллельное соединение по криоагенту сотен сверхпроводящих магнитов, парожидкостный гелиевый турбодетандер, винтовой гелиевый компрессор со степенью сжатия более 25 всего в двух ступенях, струйные аппараты для циркуляции жидкого гелия и многое другое. Каждая из перечисленных выше характеристик — новый важный шаг в развитии криогенной гелиевой техники.

На сегодняшний день нуклотрон — единственный ускорительный комплекс, который может в течение года предоставить для экспериментов большое разнообразие пучков (от протонов до ядер железа) и удовлетворить таким условиям, как прецизионное изменение энергии, требуемый уровень интенсивности, длительная растяжка и однородность временной структуры выводимых пучков, необходимый для экспериментов их профиль. Повышение надежности и устойчивости работы ускорительного комплекса благодаря усилиям специалистов-ускорительщиков лаборатории и их коллег из стран-участниц Института является основой для увеличения объема эксплуатации нуклотрона и выполнения программы дальнейшего продвижения к предельным параметрам ускорителя.

На базе нуклотрона создан пользовательский центр для исследований по релятивистской ядерной физике и решения прикладных задач с использованием релятивистских ионов в области энергий в несколько гигаэлектронвольт на нуклон. Дальнейшее развитие получают

технологии для создания прототипов быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов.

Второе наше направление — исследования по ядерной физике. Особенностью взаимодействия двух сложных ядер является коренная перестройка структуры взаимодействующих партнеров, приводящая к необычайному разнообразию продуктов реакций. В Дубне реализуется широкая программа по изучению свойств ядер, ядерных реакций, новых элементов, в том числе трансурановых и сверхтяжелых. ОИЯИ — один из мировых лидеров в этой области. Ярким примером признания достижений Института является присвоение в 1997 г. Международным союзом чистой и прикладной химии названия "Дубний" 105-му элементу Периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

Академик Георгий Николаевич Флеров стал первопроходцем нового направления фундаментальных научных исследований в ядерной физике — физики тяжелых ионов, исследующей ядерные превращения при столкновении двух сложных атомных ядер. Под его руководством Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ превратилась в ведущий международный центр по физике тяжелых ионов.

В 1968–1990 гг. в ЛЯР под руководством Г.Н. Флерова была выполнена серия работ по поиску сверхтяжелых элементов (СТЭ) в природе с применением, прежде всего, значительно усовершенствованных инструментальных методов детектирования актов спонтанного деления. Исследовались природные материалы, отобранные на основании ожидаемого геохимического и химического поведения СТЭ. Самая высокая в мире чувствительность обнаружения СТЭ была достигнута на детекторах, регистрирующих мгновенные нейтроны спонтанного деления на базе ^3He -счетчиков. Признаком акта спонтанного деления была одновременная регистрация двух и более нейтронов. Для защиты от "фона" ложных отсчетов, создаваемых космическими мюонами, детекторы размещали в соляной шахте на глубине 1100 м водного эквивалента.

Цикл исследований ЛЯР был уникальным по полноте и систематичности выбора изучаемых образцов и чувствительности измерений. Наиболее тщательно анализировались метеориты типа углистых хондритов, представляющие наименее дифференцированное доступное вещество Солнечной системы, т.е. по составу наиболее близкое к "среднему" по системе. Установленный верхний предел средней концентрации СТЭ составил 10^{-14} при $T_{1/2} = 10^9$ лет. Это в 100–1000 раз выше пределов, достигнутых во многих других крупных научных центрах. Данные о метеоритах были дополнены исследованиями земных образцов. Исследовались многочисленные образцы руд и минералов, обогащенные легкими гомологами сверхтяжелых элементов с атомными номерами $Z = 108–115$. Сюда можно отнести глубинные железомарганцевые конкреции Тихого океана, которые к тому же могли содержать элементы из "космической пыли".

Базовая установка лаборатории — циклотрон У-400 позволял получать пучки тяжелых ионов с энергией от 0,5 до 25 МэВ на нуклон. На нем был ускорен большой набор тяжелых ионов, включая ионы редких разделенных нуклидов. Интенсивность пучков в указанном энергетическом интервале оставалась рекордной в мире на протяжении многих лет. Дальнейшее развитие цикло-

трона У-400 было связано с созданием в 1996 г. системы аксиальной инжекции пучка из ЭЦР-источника с частотой 14,5 ГГц. Целенаправленное повышение эффективности этой системы дало возможность получать пучки ^{48}Ca с интенсивностью $(3-5) \times 10^{12} \text{ c}^{-1}$ при расходе рабочего вещества всего $0,4 \text{ мг ч}^{-1}$, что имело решающее значение для успешного синтеза СТЭ с атомными номерами от 112 до 118.

В свете последних достижений Института программа исследований СТЭ ОИЯИ заслуживает особого упоминания.

В 1989 г. директором ЛЯР был избран Ю.Ц. Оганесян, ближайший ученик Г.Н. Флерова. В настоящее время Юрий Цолакович Оганесян является научным руководителем лаборатории.

В 1989 г. в ЛЯР была создана установка — газонаполненный сепаратор (ГНС). Этот сепаратор продуктов ядерных реакций с высокими эффективностью сбора ядер и степенью очистки от фоновых продуктов открыл новые перспективы для исследования стабильности тяжелых и сверхтяжелых атомных ядер, синтеза новых нуклидов, изучения структуры и свойств ядер, а также механизмов их образования в ядерных реакциях.

С 1998 г. на ГНС в сотрудничестве с Ливерморской национальной лабораторией им. Э. Лоуренса (США) проводятся опыты по синтезу и исследованию СТЭ. Опыты по синтезу новых тяжелых ядер в реакциях ^{208}Pb и ^{209}Bi с ионами ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{64}Ni , ^{70}Zn , а также тяжелых актинидов с ионами от ^{22}Ne до ^{34}S показали, что для получения СТЭ чувствительность опытов должна быть повышена еще на несколько порядков. В ЛЯР впервые были синтезированы наиболее тяжелые изотопы ^{262}Rf ($Z = 104$), $^{265,266}\text{Sg}$ ($Z = 106$), ^{267}Hs ($Z = 108$) и $^{273}110$.

В 1998–1999 гг. на ГНС с использованием новой сборки детекторов с повышенной эффективностью регистрации ядер были проведены эксперименты по синтезу изотопов 114-го элемента в реакции слияния ^{244}Pu с ионами ^{48}Ca с чувствительностью почти на три порядка выше, чем во всех предыдущих попытках. Впервые были синтезированы два ядра нового элемента с $Z = 114$. Времена жизни новых дочерних ядер 112-го и 110-го элементов оказались на 4–5 порядков больше, чем у полученных в реакциях холодного слияния нуклидов $^{277}112$ и $^{273}110$, имеющих на 8 нейтронов меньше. Столь значительное повышение стабильности ядер с увеличением числа нейтронов могло быть обусловлено влиянием сферической нейтронной оболочки $N = 184$, что можно рассматривать как экспериментальное доказательство существования области сферических СТЭ.

Дальнейшие исследования были нацелены на синтез 116-го элемента в реакции слияния ^{48}Ca с ^{248}Cm ; последний тяжелее ранее использованного ^{244}Pu на одну α -частицу. Поэтому α -распад материнских ядер должен был приводить к нуклидам, ранее полученным при облучении ^{244}Pu . Были зарегистрированы три цепочки α -распада ядра $^{293}116$, при этом свойства дочерних ядер полностью совпали со свойствами ядер, полученных напрямую в "дочерней" реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$. Это значительно повысило достоверность результатов по синтезу 114-го элемента. Сечение образования ядра $^{293}116$ составило $0,5 \text{ пб}$, что на три порядка лучше чувствительности экспериментов 80-х годов. Авторами работ направлена заявка в IUPAC о признании приоритета в открытии 114-го и 116-го элементов.

В 2002 г. проводились опыты по синтезу 118-го элемента в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$. Получены пучки ^{48}Ca высокой интенсивности ($6 \times 10^{12} \text{ c}^{-1}$) при экономном ($0,3 \text{ мг в час}$) расходовании ^{48}Ca . Наблюдалось одно событие, состоящее из сигнала от имплантации тяжелого ядра в детектор, двух последовательных α -распадов и спонтанного деления с большим энерговыделением, коррелированных по позиции и времени. Энергии и времена α -распадов материнского и дочернего ядер оказались в согласии с ожиданием для $^{294}118$ и его дочернего ядра $^{290}116$, которые должны образоваться после испарения трех нейтронов из составного ядра $^{297}118$.

В начале 2003 г. была подтверждена обоснованность этих результатов. Мишенью теперь служил ^{245}Cm , отличающийся на одну α -частицу от ^{249}Cf . Зарегистрированы три цепочки распада изотопа 116-го элемента, свойства которого совпадают со свойствами ядра, наблюдавшегося после α -распада изотопа $^{294}118$ в реакции $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$. Таким образом, синтез изотопа $^{290}116$ подтвердил результаты опытов по элементу 118. Кроме того были зарегистрированы два события распада еще одного изотопа 116-го элемента — $^{291}116$.

В других опытах 2003 г. были измерены сечения образования изотопов 114-го элемента в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ и последующего испарения от 3 до 5 нейтронов из возбужденного составного ядра $^{292}114$ в зависимости от энергии ионов. Это имело существенное значение для продолжения исследований СТЭ благодаря тому, что в одной реакции были синтезированы сразу три изотопа 114-го элемента. Свойства одного из них, $^{289}114$, подтвердили результаты 1999–2001 гг. Кроме того были получены два других изотопа, $^{288}114$ и $^{287}114$, причем $^{287}114$ ранее наблюдался после α -распада изотопа $^{291}116$, синтезированного в реакции $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$. Были также определены энергии ионов ^{48}Ca , при которых выходы различных изотопов 114-го элемента максимальны. Оказалось, сечение может достигать пяти пикобарн, что в 10 раз превосходит значение, измеренное в 1999 г., когда энергия ^{48}Ca была ниже оптимальной. Результаты этого эксперимента существенно расширили представления о механизме реакций полного слияния.

Ранее считалось, что сверхтяжелые ядра могут выживать только при энергиях ^{48}Ca вблизи барьера слияния и что сечения таких реакций едва ли могут превысить один пикобарн. Однако при облучении более легкого изотопа ^{242}Pu ионами ^{48}Ca также образовывались ядра 114-го элемента с сечениями до 4 пб при энергиях ^{48}Ca на $10-15 \text{ МэВ}$ выше барьера слияния. В этой реакции были синтезированы изотопы $^{286}114$ и $^{287}114$. Оба они ранее наблюдались после α -распадов ядер $^{290}116$ и $^{291}116$ в реакции $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$, а $^{287}114$ был зарегистрирован и в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$.

Измеренные функции возбуждения для реакций полного слияния ядер и последующего испарения нескольких нейтронов позволили с большей определенностью выбрать энергии ионов ^{48}Ca в следующем эксперименте, имевшем целью синтез 115-го элемента в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$. При двух энергиях ^{48}Ca были получены два изотопа $^{287}115$ и $^{288}115$. Причем впервые в одном эксперименте были синтезированы сразу два новых СТЭ, поскольку изотопы 113-го элемента, $^{283}113$ и $^{284}113$, образовывались после α -распадов ядер $^{287}115$ и $^{288}115$.

Таким образом, в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ под руководством академика Ю.Ц. Оганесяна в течение последних пяти лет впервые были синтезированы пять новых сверхтяжелых элементов, изучены радиоактивные свойства 27 новых нуклидов. При этом многие ядра были получены в различных (перекрестных) реакциях, а сечения образования ядер были измерены при различных энергиях ионов ^{48}Ca (функции возбуждения). Оба этих метода чрезвычайно важны для надежной идентификации атомных чисел A и Z синтезированных нуклидов. Радиоактивные свойства новых нуклидов (энергии и времена их α -распадов) указывают на то, что α -распады сверхтяжелых ядер являются разрешенными, что характерно для сферических ядер. Для изотопов более легких элементов, дочерних продуктов α -распадов сверхтяжелых ядер, наблюдается повышение запретов на α -распад. Этот факт свидетельствует о том, что в процессе последовательных α -распадов изначально сферическое ядро постепенно принимает все более деформированную форму. Таким образом, ядра в процессе α -распадов переходят из сферической области в деформированную, что убедительно подтверждает предсказания теории о существовании области повышенной стабильности сферических сверхтяжелых ядер.

Эти важные открытия увенчали почти 40-летние усилия ученых разных стран по поиску "острова стабильности" сверхтяжелых ядер.

В последние годы все большую роль в ядерно-физических исследованиях начинают играть пучки экзотических изотопов легких элементов, обладающие большим избытком нейтронов, такие, например, как ^6He и ^8He . Эти изотопы получают исключительно в ядерных реакциях, они радиоактивные (часто очень короткоживущие), и поэтому обычно говорят о "радиоактивных пучках". В ЛЯР для этих целей используется циклотрон У-400М, на котором пучки необходимых радионуклидов получают за счет фрагментации ядер ^7Li , ^{11}Be , ^{15}N , ускоренных до энергий (35–45) МэВ на нуклон, и он-лайн магнитного разделения продуктов реакций. Интенсивность вторичных пучков ^6He и ^8He составляет соответственно 1×10^6 и $2 \times 10^4 \text{ c}^{-1}$ при энергии 25 МэВ на нуклон. Существенно большие возможности для исследований с радиоактивными пучками открывает создаваемый в ЛЯР комплекс DRIBs. В первой фазе проекта (DRIBs-I) используется комбинация циклотронов У-400М и У-400 и ионопровод длиной ~ 100 м для транспорта пучка от первого ускорителя ко второму. Циклотрон У-400М служит для генерации радиоактивных изотопов, которые с использованием он-лайн ионного источника и ускорения до низкой энергии передаются в У-400 для их ускорения до необходимой энергии. Эта комбинация циклотронов позволит получать пучки ^6He и ^8He с энергиями от 6 до 16 МэВ на нуклон при интенсивности соответственно 10^{10} и 10^7 c^{-1} .

Тяжелые ионы предоставляют ученым богатые возможности для изучения свойств конденсированных сред, создания и целенаправленной модификации свойств материалов, развития нанотехнологий.

И третье основное направление наших исследований — физика конденсированных сред. Это быстро развивающаяся область фундаментальной науки, связанная с использованием экспериментальных методов ядерной физики для изучения физических явлений в твердых телах, жидкостях, а также новых свойств материалов. Объединенный институт располагает уни-

кальным исследовательским импульсным реактором ИБР-2, позволяющим на мировом уровне проводить исследования в перечисленных выше областях науки. Благодаря модернизации реактора на ИБР-2 открываются новые возможности для исследований соединений со сложными структурами, что особенно важно для биологии, физики полимеров, материаловедения, фармакологии и т.д.

Кроме того, дальнейшая исследовательская программа ОИЯИ в этой области во многом связана с реализацией проекта ИРЕН — нового источника резонансных нейтронов для фундаментальных и прикладных исследований по нейтронной ядерной физике.

Наиболее приоритетными остаются исследования, связанные с фундаментальными симметриями, проявляющимися в реакциях с нейтронами, изучение свойств самого нейтрона и фундаментальных взаимодействий с участием нейтрона. Так, нарушение временной симметрии при взаимодействии поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами будет исследовано в рамках проекта KaTRIn с использованием оригинальной, предложенной в ЛНФ ОИЯИ методики, позволяющей снизить до минимума систематические эффекты, возникающие при поляризации нейтронов и ядерной мишени и анализе поляризации прошедшего нейтронного пучка.

Помимо трех основных направлений исследований, в которых концентрируется деятельность Института и сильные научные позиции ОИЯИ являются общепризнанными, необходимо отметить успешные работы в других, более узких, но также важных направлениях. В Институте разработана методика получения высококачественных радиоактивных изотопов, методика изготовления высокоэффективных пленочных ядерных фильтров, методы радиоизотопного и рентгенофлуоресцентного анализа, применяемые в геологии, медицине, биологии и др. Успешно решаются фундаментальные и прикладные задачи радиационной биологии.

В 2005 г. на базе Отделения радиационных и радиобиологических исследований была образована Лаборатория радиационной биологии. Экспериментальные установки Объединенного института эффективно используются в качестве источников ионизирующих излучений при проведении интереснейших радиобиологических экспериментов. Изучаются механизмы летального и мутагенного действия на живые клетки ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками.

В современной ускорительной и реакторной базе, пожалуй, наиболее ярко отражается потенциал ОИЯИ как многопрофильного физического центра. Мощная инфраструктура, собственное экспериментальное производство, наличие специалистов в самых разных отраслях и активные международные связи позволяют с минимальными затратами решать невероятные по сложности задачи. Вот один такой пример: с 1999 г. в Дубне работает клиническое онколого-радиологическое отделение. Здесь проходят курс лечения пациенты после облучения на медицинских пучках фазотрона ОИЯИ; осуществлено лечение более 300 больных. Это стало возможным благодаря энтузиазму и подвижничеству члена-корреспондента РАН Венедикта Петровича Желепова, который совместно с членом-корреспондентом РАН Михаилом Григорьевичем Мещеряковым руководил созданием первого ускорителя Дубны — синхротронного. Все работы на протонном пучке фазотрона проводятся совместно сотрудниками Института экспе-

риментальной и клинической онкологии АМН СССР (ныне Онкологический научный центр Российской АМН) и группой физиков Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Причиной неудач лучевого лечения опухолей в ряде случаев является относительная резистентность новообразования к излучениям с низкой линейной передачей энергии, невозможность подведения к опухоли необходимой дозы из-за риска повреждения нормальных окружающих тканей. Радикально улучшить геометрические параметры распределения дозы, увеличить повреждающий эффект облучения можно с помощью использования пучков адронов. Почти все такие частицы слабо рассеиваются в тканях перед мишенью, имеют четко определенный пробег, малое поперечное рассеяние пучка. Линейные передачи энергии возрастают по мере проникновения и достигают максимума на определенной глубине, образуя пик Брэгга, благодаря чему доза в мишени может превосходить дозу на поверхности в несколько раз даже при облучении с одного направления.

По предложению В.П. Желепова на фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был создан первый в России протонный пучок с необходимыми для лучевой терапии параметрами. В настоящее время в ОИЯИ функционирует многокабинный клиничко-физический комплекс, который обеспечивает возможность генерации и формирования широких и узких пучков протонов, отрицательных пи-мезонов и нейтронов высоких энергий. Комплекс оснащен всеми необходимыми системами для обеспечения и контроля качества лучевой терапии. Такой набор медицинских пучков тяжелых ядерных частиц впервые получен на одном ускорителе. Это позволяет для каждого больного индивидуально подбирать наилучший вид излучения, исходя из особенностей дозного распределения и биологических характеристик каждого вида частиц, а также размера и клинических особенностей опухоли.

Подобных примеров сегодня в Институте много...

Информационные технологии — ключевые технологии современного физического эксперимента, помогающие делать "физику на расстоянии". Институт обладает мощными и быстродействующими вычислительными средствами, интегрированными в мировые компьютерные сети. Центральный информационно-вычислительный комплекс (ЦИВК) ОИЯИ является частью создаваемой российской GRID-инфраструктуры и включает интерактивный кластер и ферму общего доступа, специализированную ферму для LHC-экспериментов, ферму для параллельных вычислений (на основе технологий Myrinet и SCI), специализированный кластер LCG-2, средства массовой памяти большой емкости на дисковых RAID-массивах и магнитных лентах. ЦИВК ОИЯИ используется для задач моделирования и анализа данных в области физики частиц, ядерной физики и физики конденсированных сред.

В 2009 г. намечен переход на технологии передачи данных со скоростью 10 Гбит с⁻¹ для локальной и внешней сетей. Созданный на базе ОИЯИ и 10 российских ядерно-физических центров распределенный Tier2-центр, реализующий GRID-технологии на основе высокоскоростных сетей нового поколения и интегрированный в европейскую и мировую GRID-структуры, будет соответствовать требованиям наиболее крупных физических экспериментов, включая эксперименты нового поколения на нуклотроне (ОИЯИ), LHC (CERN), RHIC (BNL), тэватроне (FNAL), HERA (DESY).

ОИЯИ на сегодняшний день остается единственным на территории России научным центром, осуществляющим многостороннее сотрудничество в области фундаментальных исследований. Партнерами Института в России являются 154 исследовательские и учебные организации в 45 городах, широко использующие возможности уникальной научной базы ОИЯИ. Всей своей деятельностью ОИЯИ способствует укреплению престижа России, особенно среди промышленно развитых стран мира — партнеров России по "большой восьмерке": Германии, Италии, Франции, США, Японии и др.

В выполнении научной программы Института участвуют более 200 научных центров, университетов и предприятий из 10 государств СНГ. ОИЯИ реально можно рассматривать как общий научный центр стран Содружества, успешно работающий на мировом уровне.

В Объединенном институте созданы прекрасные условия для подготовки и воспитания талантливой молодежи. Успешно работает Учебно-научный центр ОИЯИ, ежегодно обеспечивающий практикум на установках Института для 270 студентов из высших учебных заведений России и других стран. В 1995 г. в ОИЯИ была открыта аспирантура, в которой обучается 50 – 60 человек ежегодно.

Образовательную функцию Институт всегда выполнял и будет выполнять — в этом его важное предназначение как школы самой высокой квалификации для ученых стран-участниц. Сейчас, например, разворачивается очень интересная программа углубленного обучения для молодых физиков-теоретиков (DIAS-TH). Вузскому образованию Институт тоже стремится помогать. ОИЯИ развивает связи с университетом "Дубна" и с традиционными нашими партнерами — МГУ, МФТИ, МИФИ, а также с вузами Томска, Твери, Воронежа, Саратова и других городов.

В течение 50 лет своего существования ОИЯИ является своеобразным мостом между Западом и Востоком, способствуя развитию международного научного сотрудничества между десятками стран.

К своему полувековому юбилею Объединенный институт ядерных исследований подошел с новыми научными открытиями, с обновленной экспериментальной базой, в обстановке, когда общество уже адекватно оценивает роль фундаментальной науки.

The first half-century of the Joint Institute for Nuclear Research

V.G. Kadyshevsky, A.N. Sissakian

Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow Region, Russian Federation

Tel. (7-496-21) 62-243, 62-268. Fax (7-496-21) 632-78 80.

E-mail: kadyshev@jinr.ru, sissakian@jinr.ru

26 March 2006 marked 50 years since the Joint Institute for Nuclear Research began. This review examines how the Institute became what it is, and discusses its achievements and prospects for future work.

PACS numbers: 01.52.+r, 01.65.+g
Uspekhi Fizicheskikh Nauk 176 (3) 311–318 (2006)

Received 2 December 2005, revised 14 December 2005
Physics – Uspekhi 49 (3) (2006)