

реносной генератор нейтронов, также действующий на описанном выше принципе. Генератор содержит внутренний многоканальный регистратор  $\alpha$ -частиц. Испытаны два варианта  $\alpha$ -регистратора — на базе неорганических сцинтилляторов YAP(Ce) и кремниевых полупроводниковых детекторов. Для быстрой автоматической селекции  $\gamma$ -спектров по их сходству с эталонными спектрами разработано программное обеспечение, основанное на применении метода нейронных сетей.

Измерения показали, что сложные различные вещества порождают качественно различающие  $\gamma$ -спектры, что позволяет эффективно идентифицировать простые и некоторые сложные вещества, упакованные в контейнеры или находящиеся под землей. Так, образец тринитротолуола массой 1500 г, помещенный на глубине 18 см под землей, дал  $\gamma$ -спектр с четкими линиями С и О. По согласованной с представителями таможенной программе были проделаны 22 испытания прибора, из которых в 21 случае была получена правильная идентификация заданных образцов. Созданная система не имеет аналогов в России. Конечная цель проекта — получить экспериментальное доказательство применимости описанной методики в практике разминирования и таможенного контроля. Предполагается, что полученный при выполнении проекта опыт и технологические разработки приведут к созданию коммерчески значимого продукта.

#### 4. Ускорительная техника

##### *Краткая история ускорительного отделения*

Научное отделение по ускорительной тематике основано на базе Отдела новых методов ускорения, который был создан в ОИЯИ в 1968 году. Главная задача Отдела — теоретическое и экспериментальное обоснование коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами. У истоков формирования этого нового направления в физике ускорителей была замечательная плеяда молодых ученых, которыми руководил академик В.И.Векслер, — В.П.Саранцев, О.И.Ярковой, С.Б.Рубин, Н.Б.Рубин, А.Б.Кузнецов, Г.В.Долбилов, В.П.Рашевский, Э.А.Перельштейн, И.Н.Иванов. Ими был предложен принципиально новый вариант коллективного метода ускорения, основанный на создании компактного электронного кольца как источника ускоряющего электрического поля с большой напряженностью. В короткие, почти фантастические сроки была создана модель коллективного ускорителя тяжелых ионов, включавшая в себя абсолютно новые для ускорительной техники технические узлы, присущие установкам типа «токамаков» с импульсными магнитными полями. Этот этап привел к результату, признанному в мировом сообществе, — впервые в мире с помощью электронных колец были ускорены  $\alpha$ -частицы до энергии несколько МэВ на длине ускорения ~40 см. Следующим шагом было уже создание прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов. Ориентация на тяжелые ионы произошла под влиянием академика Г.Н.Флёрова, который пристально следил за всеми работами по коллективным методам ускорения и придавал им большое значение как самому перспективному направлению в физике и технике ускорения сильнозарядных ионов. Создание прототипа КУТИ потребовало сосредоточить фантастические усилия на разработку и изготовление всех основных узлов будущего ускорителя у себя в ОНМУ, причем эти узлы разрабатывались впервые в мировой ускорительной практике.

Коллективом под руководством Г.В.Долбилова был сконструирован и изготовлен сильноточный инжектор индукционного линейного ускорителя на энергию  $E_0 = 2$  МэВ, ток в импульсе  $I_e = 200$  А. Камера для формирования электронных колец с большой плотностью получила название адгезатор (адиабатический генератор заряженных тороидов).

В 1976 году были проведены сеансы успешного ускорения ионов азота на прототипе коллективного ускорителя. После этих экспериментов было принято решение о создании полномасштабного ускорителя тяжелых ионов с энергией до 10 МэВ/нуклон (КУТИ) с частотой повторения 20 Гц. Решение этой задачи также требовало создания принципиально новых узлов – ускорителей, которые должны были работать на частоте повторения 20 Гц. Были созданы новый электронный ускоритель «Силунд-20», новый вариант адгезатора, система питания магнитных полей, которая формировала импульсные магнитные поля с напряженностью до 20 кЭ. В создании всего ускорительного комплекса определяющую роль сыграли Г.В.Долбилов и другие сотрудники ОНМУ. Для ускорения ионов до энергии 10 МэВ/нуклон была предложена схема ускорения электрон-ионных колец в электрическом поле индукционного линейного ускорителя (ЛУЭК). В создании коллективных ускорителей как в ОНМУ, так и в научных центрах других стран физики столкнулись с большими проблемами, обусловленными тем, что процесс коллективного ускорения, являясь плазменным процессом, имел очень много ограничений, связанных с проявлением плазменных неустойчивостей. Прежде всего это было связано с двумя фундаментальными величинами – давлением остаточного газа в камере  $P \leq 10^{-9}$  торр и пороговым числом электронов в кольце  $N_e \geq 10^{13}$ . Все это приводит к нерегулярному ускорению ионов. Нерешенная экспериментальная проблема и резко ухудшившееся экономическое положение в стране привели к тому, что продолжение работ в этом направлении было уже невозможно. Однако, учитывая большой научный и технический потенциал ОНМУ, дирекция ОИЯИ переориентирует коллектив, поставив во главу угла задачи, связанные с созданием новых методик в области физического эксперимента и ускорительной техники. Как уже было сказано, решение основных экспериментальных проблем коллективного метода ускорения привело к созданию в ОНМУ и ОИЯИ новых научных направлений:

- физика и техника создания индукционных линейных ускорителей наносекундной длительности – СИЛУНД, СИЛУНД-20, ЛУЭК (Г.В.Долбилов и др.);
- физика и техника формирования импульсных магнитных полей заданной конфигурации в металлических камерах (Л.С.Барабаш);
- методы расчета поведения ансамбля частиц с большим пространственным зарядом, выполненные Э.А.Перельштейном и другими сотрудниками ОНМУ;
- экспериментальные методы исследования электрон-ионных колец по синхротронному и оптическому излучению (В.А.Свиридов, С.И. Тютюнников);
- создание систем автоматического управления ускорителями (АСУ) под руководством В.Д.Инкина;
- физика и техника формирования сверхпроводящих электрических и магнитных систем, физика низких температур (Н.И.Балалыкин);
- физика и техника генерации мощного когерентного излучения миллиметрового диапазона (А.К.Каминский);

- разработка систем подавления колебаний заряженных частиц в кольцевых ускорителях адронов (В.М.Жабицкий).

Исходя из накопленного в течение многих лет опыта в указанных направлениях, ускорительное отделение успешно решает задачи, о которых будет рассказано ниже. Следует отметить, что создание такого работоспособного коллектива было бы невысказимо без профессора В.П.Саранцева, который объединил людей для решения главной задачи, а своим самоотверженным трудом научил коллег работать на пределе своих возможностей.

Основные знаменательные даты ускорительного отделения:

- 1968 – создание отдела новых методов ускорения;
- 1970 – зарегистрировано ускорение  $\alpha$ -частиц коллективным методом;
- 1972 – начало разработки прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов ПКУТИ;
- 1976 – осуществление ускорения ионов азота на прототипе КУТИ до энергии 2 МэВ/нуклон; запуск первой секции ЛУЭК (линейного ускорителя тяжелых ионов, энергия ускоренных ионов доведена до 4 МэВ/нуклон);
- 1982 – запуск линейного ускорителя электронов СИЛУНД-20 с током 800 А, с частотой повторения до 50 Гц;
- 1983 – запуск комплекса СИЛУНД-20 и адгезатор-20 в режиме формирования электронных колец;
- 1989 – эксперименты по усилению в ондуляторе излучения миллиметрового диапазона;
- 1992 – эксперименты по использованию синхротронного излучения КУТИ-20 для конденсированных сред.

После создания ЛСВЭ усилия ускорительного отделения под руководством И.Н.Иванова были направлены на решение фундаментальных и прикладных проблем физики ускорителей. Первоначально это была новая тематика, связанная с созданием источников когерентного СВЧ-излучения.

В 1983 году профессор В.П.Саранцев инициировал начало исследовательских работ в ОИЯИ по созданию источников когерентного СВЧ-излучения – лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). В миллиметровом диапазоне длин волн такие источники получили название мазеров (МСЭ). Как одно из основных прикладных применений, рассматривалось использование МСЭ в работах по двухпучковому ускорению (ДПУ). В ДПУ источником СВЧ-энергии для запитки ускоряющих секций пучка основного ускорителя, в которых обеспечивается высокий (более 100 МэВ/м) темп ускорения, является пучок низкоэнергетического сильноточного ускорителя. Для получения высокого темпа набора энергии в основном ускорителе предполагалось заметное увеличение (до  $10 \div 40$  ГГц) частоты ускоряющего поля.

С начала работ по генерации когерентного излучения в ОИЯИ исследования проводились по трем основным направлениям:

- экспериментальные и теоретические исследования схем МСЭ;
- создание группирователей электронного пучка и исследование его динамики;
- создание источника СВЧ-мощности для тестирования и запитки высокоградиентных структур в диапазоне  $30 \div 40$  ГГц.



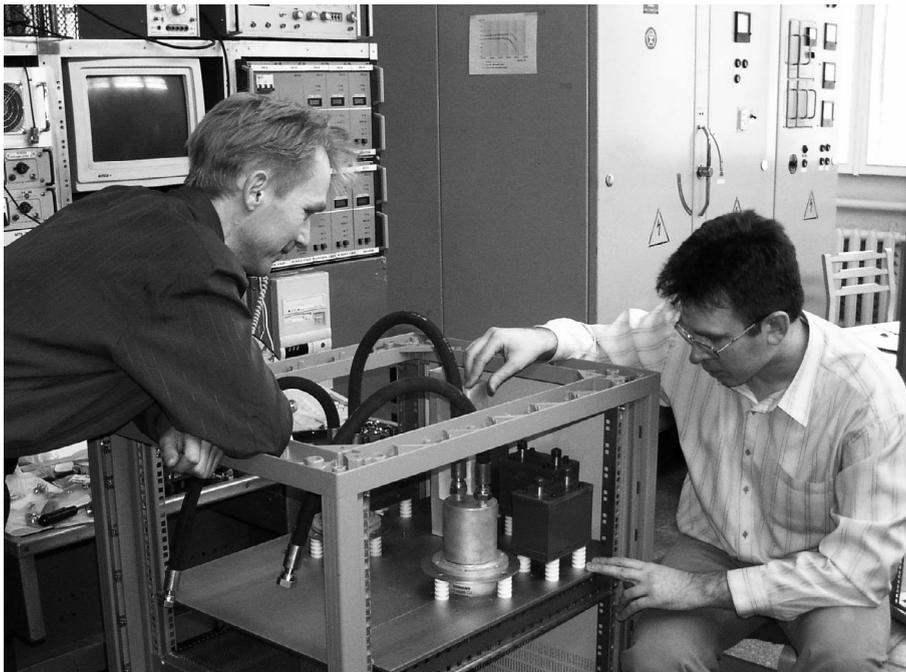
**Ускорители электронов для радиационных технологий типа D-300-10, разработанные коллективом ЛФЧ в составе: Г.В.Долбилова, А.В.Мажулина, В.А.Савельева, В.Н.Разувакина, Н.А. Зинина и др. Ускорители поставляются в Японию, Китай и другие страны**



Значительный прогресс в исследованиях по увеличению эффективности МСЭ был достигнут после того как было продемонстрировано, что эффективность и ширина спектра на выходе МСЭ с ведущим магнитным полем имеют сильную зависимость от направления этого поля. Экспериментально измеренное значение эффективности МСЭ-усилителя в режиме так называемого обратного ведущего магнитного поля достигало 27% и превышало эффективность МСЭ в режиме прямого поля в 3–9 раз.

Полученные результаты позволили использовать указанный тип МСЭ-генератора в экспериментах по тестированию ускоряющей структуры коллайдера CLIC. Значительный вклад в эти работы внес к.ф.-м.н. А.К.Каминский.

Следующий цикл работ по генерации уже жесткого коротковолнового излучения был предложен коллективом сотрудников под руководством д.ф.-м.н. М.В.Юркова.



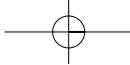
Сборка мощного широкополосного усилителя

Во второй половине XX века источники когерентного оптического излучения — лазеры — оказали заметное влияние на развитие целого ряда фундаментальных исследований и прикладных применений. Интенсивные разработки в области лазерной физики и техники привели к заметному расширению спектра в сторону инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. На протяжении последних десятилетий велись интенсивные разработки лазеров, работающих в рентгеновском диапазоне. Однако эта проблема не была решена, и трудно ожидать ее решения в обозримом будущем из-за больших сечений поглощения коротковолнового излучения в активной среде и низких коэффициентов отражения зеркал. Современное состояние дел с квантовыми генераторами таково, что область длин волн короче 100 нм (граница вакуумного ультрафиолета) практически недостижима для обычных лазеров.

В лазере на свободных электронах электромагнитное излучение усиливается электронным пучком при прохождении ондулятора — магнитного элемента со знакопеременным магнитным полем.

До недавнего времени качество электронных пучков позволяло получать сравнительно небольшой коэффициент усиления излучения за проход ондулятора, поэтому для достижения необходимой мощности излучения использовались оптические резонаторы.

Решение проблемы рентгеновского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) стало возможным после развития технологии производства и ускорения интенсивных эле-



ктронных пучков высокого качества (имеющих малые энергетический разброс и эмиттанс). В рентгеновском ЛСЭ усиление излучения происходит за один пролет электронного пучка в ондуляторе. Так как активной средой ЛСЭ является электронный пучок, движущийся в вакууме, отпадают принципиальные ограничения на усиление коротковолнового излучения. Ввод в строй рентгеновских лазеров откроет беспрецедентные перспективы для фундаментальных и прикладных применений в различных областях биологии, химии и физики.

Рентгеновский ЛСЭ обладает большим потенциалом для увеличения яркости выходного излучения по сравнению с классической однопролетной схемой, где яркость излучения ограничена неполной продольной когерентностью вследствие старта процесса усиления излучения из дробового шума электронного пучка. Была разработана схема двухкаскадного ЛСЭ-усилителя, которая в настоящий момент принята как основная для рентгеновского ЛСЭ на ТТФ. В этой схеме первый ондулятор с монохроматором играет роль задающего лазера.

Первые экспериментальные результаты на рентгеновском ЛСЭ в DESY, полученные в феврале 2000 года, продемонстрировали обоснованность научного подхода к созданию рентгеновского лазера и правильность принятых технических решений. Ускоритель работал на энергии  $180 \div 260$  МэВ, и ЛСЭ производил мощное, плавно перестраиваемое излучение в области вакуумного ультрафиолета  $80 \div 180$  нм.

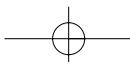
Исследования свойств электрон-ионных колец созданного коллективного ускорителя КУТИ-20 привели к пониманию того, что они являются источником синхротронного излучения в инфракрасной части спектра с очень высокой импульсной яркостью, значительно превосходящей все известные в мире.

На этой установке под руководством д.т.н. С.И. Тютюнникова впервые были проведены фундаментальные исследования оптических свойств нового класса материалов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с температурой перехода  $T \geq 90$  К.

Проведенные исследования на пучке СИ коллективного ускорителя позволили накопить опыт в этой области и сформулировать направления будущих исследований. К этому времени была завершена работа по созданию специализированного источника СИ в РНЦ «Курчатовский институт» (на базе ускорителя «Сибирь-2»), который имеет следующие параметры: энергия электронов  $E_e = 2,5$  ГэВ, ток накопленных электронов  $I_e = 100$  мА, критическая энергия квантов рентгеновского излучения  $E_e = 6,9$  кэВ. Было решено создать на пучке СИ установку для исследований ближнего порядка неупорядоченных квазикристаллических систем. Для этих целей создается энергодисперсионный спектрометр EXAFS (Extended X-ray Fine Structure). Установка обладает следующими отличительными особенностями:

- возможность измерять спектры поглощения EXAFS с временным разрешением, что позволит исследовать влияние внешних динамических воздействий на структуру образца;
- минимальный размер образца может составлять  $0,1 \div 0,2$  мм;
- отсутствие механической перестройки по длинам волн при измерении EXAFS-спектров.

В настоящее время идет завершение запуска станции EXAFS-спектроскопии в РНЦ «Курчатовский институт», использование которой дает большие возможности исследовать



дований в области физики конденсированных сред. Инициатором этой работы являлся бывший директор Лаборатории нейтронной физики д.ф.-м.н. В.Л.Аксенов.

Как было сказано выше, в процессе работ по коллективному методу ускорения был накоплен уникальный опыт в разработке различных ускорительных технологий. Это позволило включиться в одну из важнейших работ по созданию большого адронного коллайдера (LHC) в CERN.

Начиная с 1997 года в ускорительном отделении ЛФЧ осуществляются разработка и создание системы подавления поперечных колебаний пучка большого адронного коллайдера LHC, сооружаемого в CERN (проект LHC Damper). Эта работа ведется в рамках Соглашения ОИЯИ–CERN по участию нашего Института в ускорительной части создания LHC и поддерживается Министерством науки и промышленности РФ как часть общей программы участия России в создании ускорителя нового поколения.

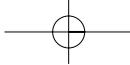
Основная задача этих систем изначально состояла в обеспечении поперечной устойчивости заряженных частиц, что позволяет существенно повысить интенсивность ускоряемых пучков.

В ЛФЧ ОИЯИ был предложен и совместно с CERN осуществлен эксперимент на пучке SPS, чтобы показать эффективность нелинейных методов и возможность их реализации. Результатом работы стало не только подтверждение старых результатов, но и открытие нового нелинейного метода подавления, названного «логическим», что позволило использовать принципиально новую схемотехнику для создания систем поперечной обратной связи.

В соответствии с Соглашением ОИЯИ–CERN коллаборация производит 20 электростатических кикеров и 40 широкополосных усилителей для системы поперечной



Монтаж электростатического дефлектора



обратной связи ЛНС. Параметры разрабатываемых устройств не имеют аналогов в мировой практике.

Разработанный прототип кикера представляет собой электростатический дефлектор, состоящий из двух медных пластин длиной 1500 мм, имеющих профиль симметричных  $90^\circ$  сегментов кольца с внутренним диаметром 52 мм.

В феврале 2000 года закончена наладка классических вариантов усилителей и сборка прототипа. Тестирование собранного комплекса проведено на специальном стенде ЛФЧ совместно с коллегами из CERN. Испытания показали полную адекватность характеристик установки проектным параметрам.

Главный результат завершенных на данный момент работ состоит в том, что схемотехника усилителей и конструкция кикера в целом соответствуют требованиям проекта и могут считаться согласованными. В настоящее время документация на прототип системы проходит в CERN процедуру согласования с ответственными экспертами проекта. Завершение этого этапа будет являться стартом для начала изготовления промышленной серии оборудования. Инициатором этой программы был начальник ускорительного отделения к.ф.-м.н. И.Н.Иванов. Благодаря его усилиям был сформирован коллектив ведущих специалистов (В.М.Жабицкий и др.), который успешно продолжает дело.

В соответствии с решениями дирекции ОИЯИ был значительно активизирован процесс изготовления комплекса ИРЕН на основе мощного линейного ускорителя на 200 МэВ для создания источника импульсных пучков нейтронов. В Лаборатории физики частиц в 2002 году был создан отдел линейного ускорителя под руководством д.ф.-м.н. Г.Д.Ширкова. За трехлетний период им проделана большая работа по изготовлению и наладке основных узлов ускорителя. В настоящее время идет работа по установке этих узлов в зале ускорителя в рабочем состоянии уже под руководством к.ф.-м.н. А.П.Сумбаева.

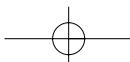
В начале 90-х годов в ускорительном отделении ЛФЧ под руководством Г.Д.Ширкова начались интенсивные исследования по физике ЭЦР-источников. Этому способствовал богатый опыт по исследованию динамики ионизации и накопления ионов в электронных кольцах, полученный в ОНМУ. В 1992 году было начато сотрудничество по физике источников многозарядных ионов между ОИЯИ и CERN.

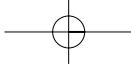
Теоретические исследования в этой области осуществлялись в рамках программы по ускорению ионов свинца на ускорительном комплексе PS и SPS в CERN в 1993–1995 годах.

С 1995 года ускорительное отделение ЛФЧ участвовало в исследовательско-конструкторских работах по проектированию линии транспортировки низкоэнергетического пучка ионов между лазерным источником ионов и ионным RFQ в CERN.

В последующие годы в рамках сотрудничества с RIKEN (Япония) и LNS INFN (Италия) проведены важные теоретические исследования по образованию и накоплению ионов в ЭЦР-источнике, в том числе по методам лазерной инжекции ионов и нейтралов твердотельных элементов.

В 1999–2001 годах совместно с RIKEN и в сотрудничестве с ВНИИЭФ (Саров) подготовлен и выполнен проект по применению модели крупных частиц в компьютерных программах и численному моделированию многокомпонентной ЭЦР-плазмы.





В последние годы теоретическая и экспериментальная деятельность связана с исследованиями на ЭЦР-источниках в RIKEN, Франкфурте и ЛЯР ОИЯИ с целью усовершенствования их работы и получения большей информации об основных характеристиках ЭЦР-плазмы. В частности, в RIKEN использование предложений сотрудников ЛФЧ позволило существенно повысить интенсивность ионных пучков, получены первые экспериментальные результаты по лазерной инжекции ионов и нейтральных атомов из металлической мишени в 18 ГГц сверхпроводящий ЭЦР-источник ионов.

Во Франкфурте проведены запуск и наладка новой, не имеющей аналогов, системы для измерения эмиттанса пучка ЭЦР-источника.

Придавая большое значение прикладным работам, в ускорительном отделении созданы оригинальные ускорители электронов для радиационно-стимулированных технологий под руководством Г.В.Долбилова.

Разрабатываемый ускоритель имеет следующие конструктивно-технологические особенности:

- использование холодных катодов с пороговыми эмиссионными характеристиками допускает применение синусоидального напряжения для формирования импульсов тока электронного пучка;
- многопучковый, многооконный вариант ускорителя позволяет конструировать систему вывода электронного пучка с очень большой суммарной площадью выводных окон посредством увеличения числа малых окон;
- использование источника высокого напряжения, основанного на коаксиальном вакуумном резонаторе, существенно улучшает добротность и эффективность преобразования энергии промышленной сети в энергию электронного пучка.

Экспериментальный опыт позволил начать в 2000 году работы по созданию полномасштабной модели ускорителя с энергией 500–700 кэВ и выходной мощностью 25–35 кВт. Параметры электронного пучка ускорителя: суммарный пиковый ток 0,5 А, длительность импульса 10–20 мкс, частота повторения 10–20 кГц.

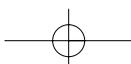
В настоящее время изготовлены по этой схеме два ускорителя: один – для Японии, другой – для Китая.

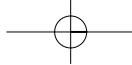
Ускорительное отделение ЛФЧ обладает уникальной экспериментальной базой, позволяющей проводить широкий спектр исследований и создавать новые экспериментальные установки. В секторе криофизических исследований (руководитель д.т.н. Ю.П.Филиппов) создано уникальное криофизическое оборудование для получения низких температур  $T \leq 1,5$  К.

За годы существования ЛФЧ на его основе проведен широкий спектр исследований двухфазных гелиевых потоков. В настоящее время сектор принимает участие в проекте XFEL-TESLA, в рамках которого создается система криодиагностики ускорителей.

Создание широкого спектра экспериментальных установок в ОНМУ было бы немислимо без помощи высококвалифицированных рабочих, руками которых сделаны основные узлы всех ускорителей. Неоценимый вклад в эти работы внес В.И.Клементьев.

Большой вклад сотрудниками ЛФЧ внесен в развитие систем управления и диагностики ускорителей. Первые работы, начатые в 1987 году под руководством

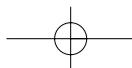


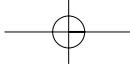


И.Н.Иванова, были посвящены разработке и созданию систем подавления когерентных поперечных колебаний (СППК) пучка УНК в Протвино (Россия). Это был один из первых в мире проектов адронных коллайдеров такого масштаба. Проведенные в сотрудничестве с экспертами различных институтов теоретические исследования проблемы показали уникальность сочетания необходимых параметров и отсутствие аналогов инженерно-технической реализации системы. Однако было найдено методическое решение задачи, которое состояло в обосновании принципиально нового режима подавления и в последствии получило название UNK-technology. Система была успешно реализована совместно со специалистами ИФВЭ (Протвино) и МРТИ (Москва). Тем самым был завоеван международный приоритет в создании СППК для ускорителей подобного типа, и положено начало серии работ по исследованию различных режимов подавления. Этот результат стал в 1997 году основой сотрудничества ЦЕРН–ОИЯИ–Россия для создания системы поперечной обратной связи для ЛНС (ЦЕРН, Швейцария). Как с теоретической, так и с технической точки зрения эта задача оказалась еще более сложной из-за необходимости комплексного обеспечения ряда противоречивых условий. Тем не менее накопленный опыт позволил к 2002–2003 годам найти необходимые методические, инженерные и технологические решения, которые были утверждены экспертным советом ЛНС. Одновременно была начата промышленная реализация системы. Все работы проводятся в тесном сотрудничестве с институтами и предприятиями России (МЭИ, АТН, «Торий»), Республики Беларусь (ИТМО, ИГГ АНБ), Болгарии (ЭЛСИЭЛ, ИЯИЯЭ БАН), Германии (DESY), Чехии («Вакуум-Прага») и т.д. Разработки, полученные в ходе выполнения проекта, успешно внедряются и используются в различных прикладных ускорительных установках.

С 1995 года ОИЯИ является членом коллаборации TESLA, в рамках которой в DESY разрабатывается новый линейный электрон-позитронный коллайдер на основе сверхпроводящих ускоряющих секций с высоким темпом ускорения. Специалисты ЛФЧ принимали активное участие на всех этапах разработки проекта TESLA, внося наиболее весомый вклад в развитие ускорительных технологий с использованием рентгеновских ЛСЭ. Результаты работ специалистов из ОИЯИ по проекту TESLA получили высокую оценку в рамках коллаборации и широкое международное признание. Они оказали заметное влияние на развитие проекта в части опции гамма-гамма коллайдера и рентгеновского лазера. В частности, основной схемой для рентгеновского лазера на тестовом ускорителе TESLA принята двухкаскадная схема, обеспечивающая полную продольную когерентность излучения. Как перспективное развитие рентгеновского ЛСЭ, для TESLA принята многокаскадная схема генерации импульсов излучения аттосекундной длительности. Работы неизменно поддерживались целевым финансированием BMBF (Министерство науки и техники Германии) и целевыми грантами Польши. Благодаря этой поддержке на тестовом ускорителе TESLA специалистами ОИЯИ был проведен эксперимент по изучению ЛСЭ нового типа – регенеративного ЛСЭ-усилителя.

В ОИЯИ развивается новое нетрадиционное направление в технике электронных ускорителей для радиационных технологий. В частности, разрабатываемые в ЛФЧ многопучковые ускорители с высокой частотой повторения обеспечивают возможность использования очень дешевых постоянных электрических полей для ускорения

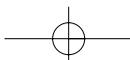


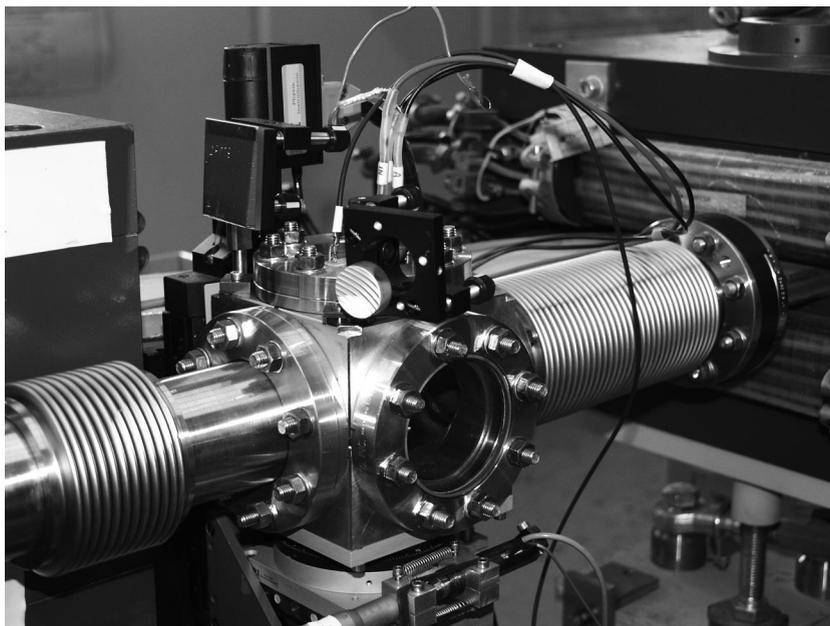


вторичных электронов. С 1995 года эти работы поддерживались Институтом ядерных исследований и ядерной энергетики (София, Болгария), а с 2001 года они получили внебюджетное финансирование в рамках соглашений о сотрудничестве между ОИЯИ и USTC (Хефэй, Китай) и фирмой MUS (Токио, Япония).

Источники ионов на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР) и электронно-лучевые источники ионов (ЭЛИИ) являются сегодня основными видами источников с последовательной ионизацией электронным ударом. Исследования в области физики источников ионов начались в ОИЯИ в начале 80-х годов в связи с идеями использования легких малозарядных ионов для охлаждения тяжелых многозарядных ионов и отбора энергии ионов из пучка ЭЛИИ (ионное охлаждение). В начале 90-х годов в ЛФЧ начались интенсивные исследования по физике ЭЦР-источников. В 1992 году было начато сотрудничество по физике многозарядных источников ионов между ОИЯИ и ЦЕРН. Программа ОИЯИ–ЦЕРН по теоретическим исследованиям в этой области осуществлялась в рамках программы по ускорению ионов свинца на ускорительном комплексе PS и SPS в CERN в 1993–1995 годах. В последующие годы в рамках сотрудничества с RIKEN (Япония) и LNS INFN (Италия) проведены наиболее важные теоретические исследования по образованию и накоплению ионов в ЭЦР-источнике. Новый сверхпроводящий ЭЦР-источник SERSE разработан и сконструирован в INFN-LNS (Катания, Италия) и CEA-DRFMC (Гренобль, Франция), испытан в Гренобле и смонтирован в Катании в середине 1998 года. С 1995 года ЛФЧ участвовала в исследовательско-конструкторских работах по проектированию линии транспортировки низкоэнергетического пучка ионов между лазерным источником ионов и ионным RFQ в CERN. В 1999 году в сотрудничестве с RIKEN подготовлен и начат новый проект по применению модели крупных частиц в компьютерных программах и численном моделировании для многокомпонентной ЭЦР-плазмы. В последние годы экспериментальная деятельность связана с исследованиями на ЭЦР-источниках в RIKEN (Франкфурт) и ЛЯР ОИЯИ с целью усовершенствования их работы и получения большей информации об основных характеристиках ЭЦР-плазмы.

В конце 2000 года приказом по ОИЯИ в ЛФЧ для завершения ускорительной части проекта ИРЕН образован научно-экспериментальный отдел ускоряющих систем. Проектом ИРЕН предусмотрено создание в ОИЯИ новой базовой установки – интенсивного источника резонансных нейтронов с параметрами нейтронных пучков, обеспечивающими возможности постановки и решения широкого спектра задач как в области фундаментальных ядерно-физических, так и в области прикладных исследований. Импульсный источник использует бустерный принцип быстрого размножения первичных нейтронов в размножающей мишени, содержащей подкритическую сборку тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) из  $^{239}\text{Pu}$ . В качестве драйвера, инициирующего появление первичных нейтронов, используется пучок электронов линейного ускорителя электронов (ЛУЭ-200). В разработке проекта и создании ускорителя принимают участие четыре лаборатории ОИЯИ, а также ряд научно-производственных организаций стран-участниц ОИЯИ и ведущих ускорительных центров других стран. Помимо Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск) существенный вклад в оснащение ускорителя внесен Стамфордским центром линейного ускорителя (SLAC, USA), Ереванским физическим институтом (Республика Ар-

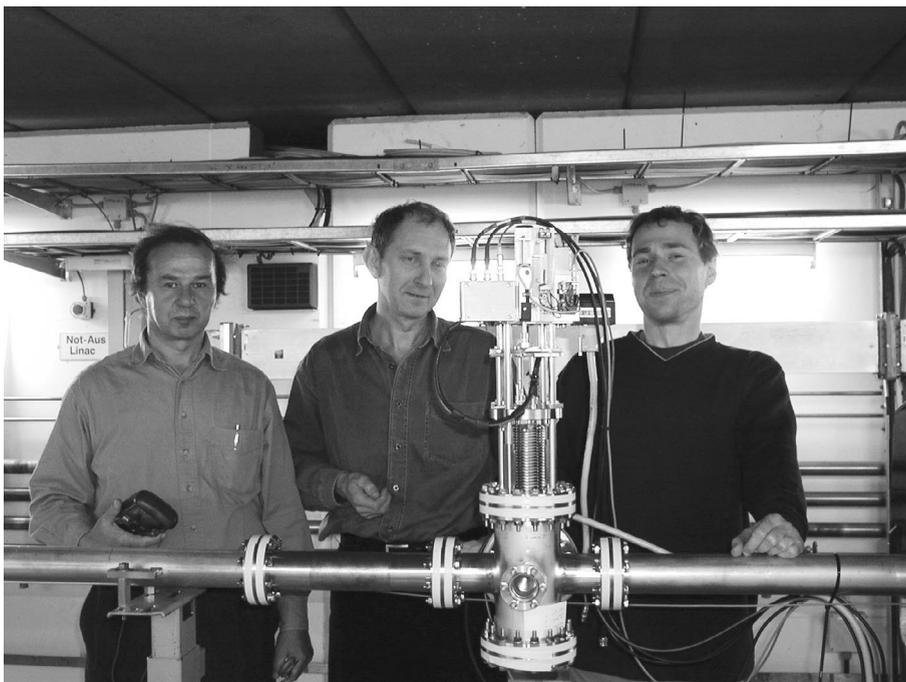




Камера с зеркальным и диагностическим оборудованием проекта «Регенеративный усилитель ЛСЭ» (RAFEL)



М.Юрков, Е.Шнайдемиллер (DESY) и А.Фатеев настраивают камеру проекта RAFEL



А.Фатеев (слева) с польскими коллегами завершают сборку камеры диагностики отраженного излучения

меня), фирмой «Вакуум-Прага» (Чехия) и Базой развития и внедрения Болгарской академии наук (София, Болгария). В совместных экспериментах с ИЯФ СО РАН при тестировании прототипов ускоряющих секций для ускорителя ЛУЭ-200 достигнуты рекордные темпы ускорения интенсивного пучка электронов для ускоряющих структур с бегущей волной S-band диапазона.

## 5. Серпуховской научно-экспериментальный отдел

### *ОИЯИ–ИФВЭ: многолетнее уникальнейшее сотрудничество*

Особое место среди национальных центров стран-участниц для ОИЯИ занимает Институт физики высоких энергий (ИФВЭ, Протвино).

В октябре 1967 года в ИФВЭ на только что построенном ускорителе У-70 впервые в мире был получен пучок ускоренных протонов с рекордной в мире энергией 76 миллиардов электрон-вольт, что позволило физикам Советского Союза и ОИЯИ проводить систематические исследования свойств микромира в той области энергий, которая ранее была недоступна.

Академик Н.Н.Боголюбов, который в это время занимал пост директора ОИЯИ и был первым научным руководителем ИФВЭ, в конце 1967 года писал: «В прошедшем году важное место в деятельности ОИЯИ занимала подготовка к экспериментам на