

нается. Здесь может оказаться решающим использование пучков релятивистских ядер среднего и большого атомного номера.

Физическая программа эксперимента НИС освещена в четырех докладах на международных и российских конференциях.

3. Методические и прикладные исследования

Разработка детекторов на основе дрейфовых трубок

В 1998–1999 годы в рамках сотрудничества с ЦЕРН группа сотрудников ЛФЧ под руководством В.Д.Пешехонова разработала методику нового трекового координатного детектора на основе тонкостенных дрейфовых трубок и совместно с Мюнхенским техническим университетом, Университетом г. Фрайбурга и Варшавским техническим университетом создала полномасштабный прототип straw-камер большого размера, испытал его на пучке SPS в ЦЕРНе. В последующие годы в ЛФЧ было создано 15 двухслойных трековых камер с общей чувствительной площадью около 420 м². Начиная с 2002 года, детекторы работают в составе трековой системы спектрометра COMPASS. Работа была поддержана грантом немецкого министерства BMBF.

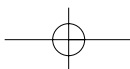
С начала 1990-х годов группа сотрудников ЛФЧ совместно с МИФИ начала разработку детектора переходного излучения TRT. На этой основе расширенное сотрудничество российских институтов приступило к созданию TRT для внутреннего детектора установки ATLAS.

Кремниевые планарные детекторы в России и ОИЯИ

В конце 80-х годов по инициативе профессоров И.А.Голутвина и В.А.Свиридова в ОНМУ ОИЯИ было создано новое методическое направление, целью которого были разработка и исследование кремниевых планарных детекторов для широкомасштабного применения в экспериментах на создаваемых ускорителях SSC, LHC и др. Это направление получило название «Дубненская силиконовая программа». Кроме ОИЯИ в ней приняли участие эксперты из разных научных центров СССР: ГИРЕД-МЕТ (Москва), ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Ленинград), НИИПФП им. А.Н.Сенченко (Минск), НПО «Элма» и НИИМВ им. А.Ю.Малинина (г. Зеленоград).

В 80-е годы были созданы экспериментальные установки, использовавшие первые координатные планарные кремниевые детекторы, и получен положительный опыт применения таких детекторов в пучках заряженных частиц. Планировавшиеся новые эксперименты на строящихся ускорителях SSC и LHC ориентировались на массовое применение кремниевых детекторов. Основными проблемами для широкого применения таких детекторов в те годы были высокая стоимость детекторного кремния, выращиваемого методом бестигельной зонной плавки (БЗП), и высокая цена изготовления детекторов, а также радиационная стойкость детекторов.

Для начала работ по созданию планарных кремниевых детекторов в СССР необходимо было изучить ситуацию с отечественным БЗП-кремнием в свете долгосрочной перспективы его изготовления. Также было важно создать технологию изготовления пластин для детекторов. Конечно, все предпосылки к этому были – в СССР в те годы был достаточно высокий уровень технологии интегральных схем на многих



предприятиях. Но большое отличие параметров детекторного кремния от кремния, применяемого для микроэлектронных изделий, потребовало тщательного изучения отечественного материала и сравнения с материалом иностранных фирм. В те годы еще существовал запрет на ввоз в СССР БЗП-кремния производства западных фирм и надо было ориентироваться на доступный материал. Особенностью изготовления координатных (полосковых или стриповых) кремниевых детекторов является то, что обычно на пластине диаметром 76 или 100 мм размещен один детектор площадью (30–40) см² и всего лишь один дефект на пластине приводит к браку всего детектора.

После поездки осенью 1991 года на ЗТМК (Запорожье), где выращивались кристаллы БЗП-кремния, и обсуждения с экспертами предприятия стало ясно, что в сложившихся к тому времени политических и экономических условиях в стране невозможно было рассчитывать на отечественный материал. По инициативе И.А.Голутвина и при поддержке ЦЕРН, INFN (Флоренция), INFN (Милан) в 1992 году было образовано сотрудничество RD-35/ЦЕРН, в рамках которого был получен в слитках БЗП-кремний. Изготовление детекторов проводилось на отечественном и зарубежном материалах. Это давало возможность сравнивать радиационную стойкость детекторов, изготовленных на кремнии от разных производителей. Материал ЗТМК был вполне пригоден для детекторов, немного уступал по однородности и времени жизни и, если бы не развал страны, этот высокотехнологичный материал достойно бы конкурировал на международном рынке.

Поиск предприятия электронной промышленности, которое смогло бы создать технологию планарных детекторов и затем производить серийные детекторы, шел в течение нескольких лет. Первые исследовательские работы были проведены в 1987–1990 годы в НИИВТ им. С.А.Векшинского (Москва) и на Заводе им. 50-летия Октября (Фрязино). В результате этих работ были изготовлены планарные детекторы, которые использовались для радиационных исследований. На создаваемом ускорителе SSC для адронного калориметра планировалось применение кремниевых детекторов. Для этого потребовалось бы 300 м² активной площади детекторов. Было ясно, что изготовление такого количества кремниевых детекторов потребует промышленного производства пластин и детекторов при относительно небольшой цене. Лучше всех справиться с этой задачей могло Научно-производственное объединение «Элма» (Зеленоград), которое было основным производителем кремниевых пластин для электронной промышленности СССР. Первые переговоры с дирекцией НПО «Элма» состоялись весной 1990 года, когда в ходе встречи И.А.Голутвина с генеральным директором НПО «Элма» Л.А.Иванютиным и профессором М.Г.Мильвидским (ГИРЕДМЕТ) была обсуждена программа по созданию детекторной технологии.

Однако в то время поставленные задачи казались невыполнимыми из-за жестких требований на параметры детекторов: большая площадь прибора; низкие обратные токи; сохранение работоспособности детектора после инверсии типа проводимости при воздействии радиации; высокое напряжение пробоя. Заниматься проблемой создания детекторной технологии было поручено начальнику физико-технологической лаборатории НИИМВ, входившей в НПО «Элма», Ю.Ф.Козлову. Результатом сотрудничества ОИЯИ с НИИМВ на протяжении 15 лет является создание в России технологии планарных кремниевых детекторов, которые известны во многих научных центрах мира и соответствуют по своим параметрам мировым стандартам. Суще-

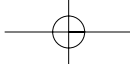


Дубненский региональный центр по созданию
и исследованию модулей кремниевых детекторов

ствующая высокотехнологическая линия производства в НИИМВ позволяет производить до 2 м^2 кремниевых детекторов в год.

В ЛФЧ ОИЯИ при сотрудничестве с Зеленоградом и НЦФЧВЭ (Минск) была создана технологическая инфраструктура, позволяющая применять кремниевые планарные детекторы в будущих физических экспериментах. Разработана технология облучения детекторов, измерения параметров облученных детекторов и их хранения. Разработан и создан технологический комплекс для сборки детекторов в микромодуль, который размещен в чистой зоне ЛФЧ в помещениях с классом чистоты 100. Работы специалистов ОИЯИ по технологии детекторов в условиях небольшой исследовательской лаборатории позволили понять в деталях технологические процессы и сложности планарной технологии, что всегда позволяло лучше решать обсуждаемые проблемы с экспертами из НИИМВ.

Первые планарные детекторы были изготовлены в НИИМВ летом 1991 года. С 1992 года все основные разработки детекторов проводились с учетом спецификации эксперимента CMS. Создаваемые экспериментальные установки на ускорителе LHC базируются на широкомасштабном применении планарных кремниевых детекторов. Наибольшего масштаба оно достигло в эксперименте CMS – более 200 м^2 чувствительной площади кремниевых детекторов только в центральной трековой системе.



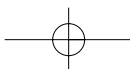
Кроме того, в данном эксперименте потребуется более 18 м^2 полосковых детекторов для плоскостей электромагнитного калориметра на основе кристаллов PbWO_4 . Для такого огромного количества кремниевых детекторов потребуется вырастить кристаллы высокоомного кремния в объеме большем, чем за все предыдущие годы. Основными особенностями применения детекторов в эксперименте CMS являются: работа в сильном магнитном поле, высокое быстродействие при частоте столкновений пучков 40 МГц, большой радиационный фон (до 2×10^{14} нейтрон/см²/10 лет). Первые два требования, естественно, реализуются с помощью кремниевых детекторов. Проблема радиационной стойкости оказалась очень серьезной и потребовала длительных исследований многими научными коллективами разных стран.

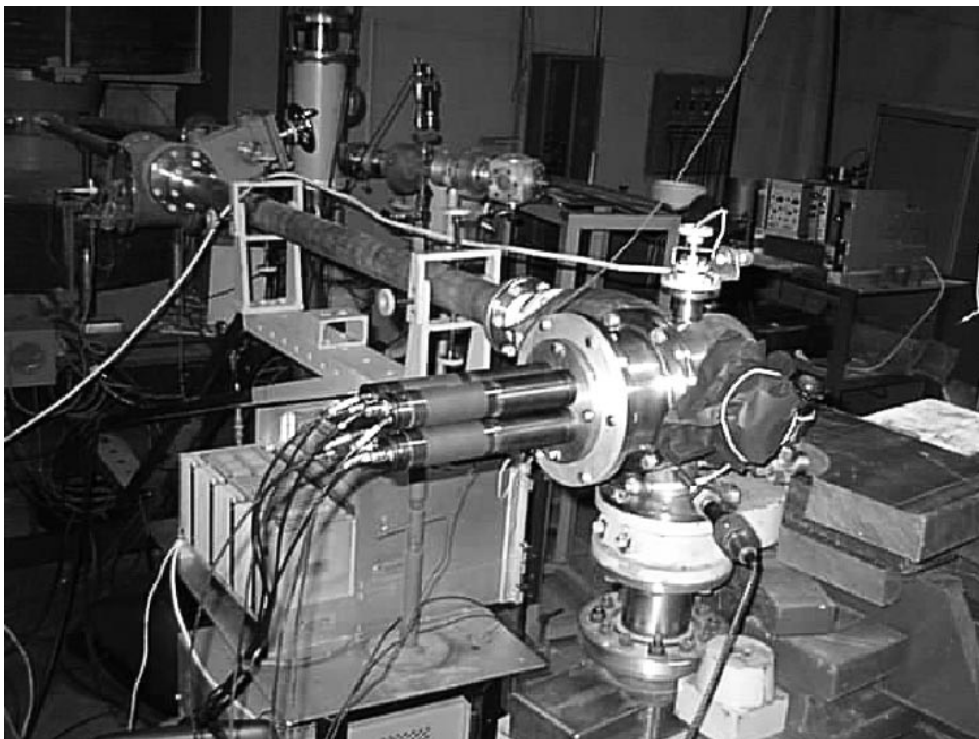
Для международного эксперимента CMS должно быть изготовлено более 8 м^2 кремниевых детекторов — это самый большой заказ такого типа приборов для промышленности России. Вкладом России и ОИЯИ по созданию предливневой части электромагнитного калориметра CMS является изготовление 1900 полосковых детекторов размера $(63 \times 63 \times 0,3) \text{ мм}^3$. Все детекторы тестируются в ОИЯИ и собираются в микромодули. После этого они будут смонтированы в составе установки CMS. Созданная в ОИЯИ научно-методическая база позволяет доводить (тестирование, сборка в корпус, сварка контактов, электроника, радиационные тесты) изготовленный в Зеленограде детектор (собственно кристалл) до готового к применению прибора для физических экспериментов. Технология позволяет выпускать планарные кремниевые детекторы для других научных и прикладных применений (рентгеновская спектрометрия, альфа-спектрометрия, фотоприемники и др.).

Применение ядерно-физических методов для идентификации сложных химических веществ

Цель данного проекта — создание прибора, проводящего анализ состава сложного химического вещества в реальном времени как в различных технологических процессах (определение качества угля, цемента и др.), так и в практике таможенного досмотра багажа и грузов с целью обнаружения нелегально транспортируемых веществ типа взрывчатки, ядерного топлива или наркотиков, для поиска мин в грунте. Применение ядерно-физической технологии для решения этих задач обеспечивает большую глубину зондирования, химическую чувствительность и высокую скорость неразрушающего анализа. Получаемые данные пригодны для быстрой обработки с помощью методов, широко применяемых в практике физического эксперимента, что позволяет создать эффективную систему автоматического принятия решения.

Работа установки основана на использовании метода меченых нейтронов (МН), позволяющего получить трехмерное изображение объекта и определить его элементный состав. Для этого используются быстрые монохроматические нейтроны с энергией 14,1 МэВ из реакции $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ при облучении мишени, содержащей тритий (обычно Tt_2), пучком дейтронов с энергией ~ 100 кэВ. В бинарной реакции α -частицы с энергией 3,5 МэВ и нейтроны вылетают в противоположных направлениях. Локализация траектории α -частицы двухкоординатным α -спектрометром определяет направление вылета «меченого» нейтрона. Меченый нейтрон взаимодействует с веществом изучаемого объекта, в результате чего образуется характеристическое гамма-излучение, несущее информацию об атомарном составе





Экспериментальная установка проекта ДВИН на ускорителе Ван-де-Граафа (электростатический генератор ЛНФ)

объекта. Монохроматические нейтроны имеют скорость 5 см/нс, поэтому, измеряя время между моментами попадания α -частицы и γ -кванта в соответствующие детекторы, можно определить положение излучателя и восстановить трехмерную картину распределения вещества в объекте и его химический состав. Отбор событий по критерию $\alpha\gamma$ -совпадений позволяет также значительно подавить фон от ускорителя и рассеянных частиц. Метод МН, в основном, основывается на идентификации элементов С, N и O и получении атомарного состава в каждой выделенной области объекта. В γ -спектрах этих элементов имеется несколько интенсивных линий в интервале энергии 2-8 МэВ. Другие элементы тоже могут быть идентифицированы, если γ -детекторы имеют достаточно высокое энергетическое разрешение. Идентификация делящегося материала (U-235, U-238) также возможна по превышению выхода нейтронов над уровнем фона, который наблюдается при отсутствии в объекте делящихся веществ.

По инициативе ЛФЧ в ЛНФ ОИЯИ создана экспериментальная установка и ведутся работы по идентификации веществ, скрытых в различных контейнерах. Часть исследований в рамках данного проекта выполнена на ускорителе Ван-де-Граафа, где получается пучок дейтронов с энергией 400 кэВ. В настоящее время в установке используется разработанный совместно с НИИ Автоматики (Москва) компактный пе-

реносной генератор нейтронов, также действующий на описанном выше принципе. Генератор содержит внутренний многоканальный регистратор α -частиц. Испытаны два варианта α -регистратора — на базе неорганических сцинтилляторов YAP(Ce) и кремниевых полупроводниковых детекторов. Для быстрой автоматической селекции γ -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 γ -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 γ -спектр с четкими линиями С и О. По согласованной с представителями таможи 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 α -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.