

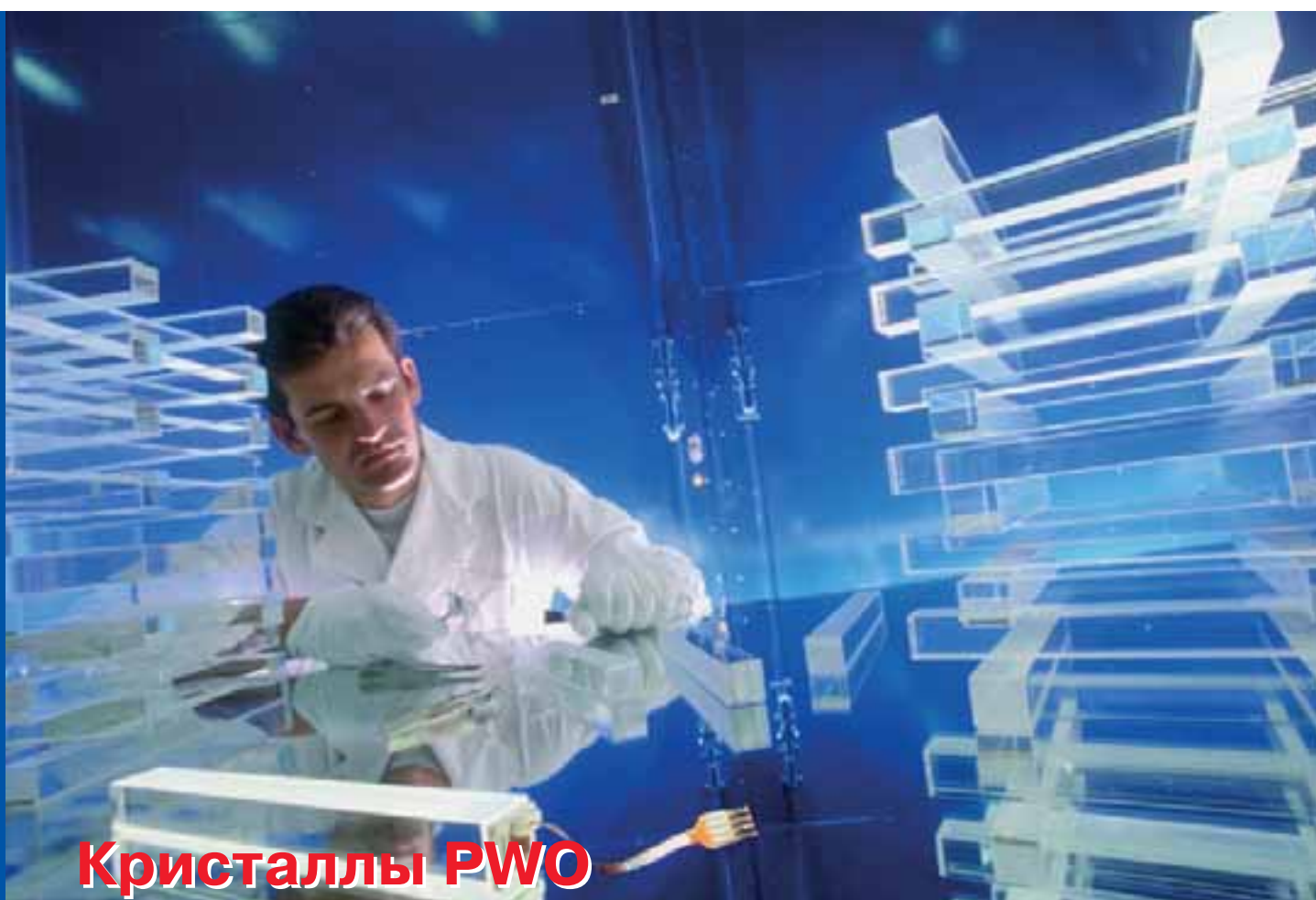


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

№ 1(1), 2008



**Кристаллы RWO
для электромагнитной калориметрии**

Новости и проблемы фундаментальной физики

Журнал Института физики высоких энергий. Журнал предназначен для освещения текущих событий в жизни научного сообщества, новейших достижений современной фундаментальной физики, новейшей экспериментальной техники и приложений, обзора наиболее принципиальных проблем.



Редакционная коллегия:

Главный редактор: Н.Е. Тюрин

Члены редколлегии: А.М. Зайцев
С.В. Иванов
В.А. Петров
Ю.Г. Рябов.

Редакторы: Л.Ф. Васильева
Н.В. Ежела

Фото: Ю.А. Туманов
Н.В. Шарыкина

Дизайн, печать: «ПРИНТ-Ателье»

Содержание

Кристаллы вольфрамата свинца – основа современной электромагнитной калориметрии <i>В.А. Качанов, М.В. Коржик</i>	1
Самый тяжелый кварк <i>Э. Боос, Л. Дудко, С. Слабоспицкий</i>	9
Технология Грид <i>В.В. Котляр</i>	18
Является ли теория суперструн наукой? <i>От редакции</i>	29
Скептики о теории суперструн	29
Единственная игра в городе: сила и слава теории струн	33
Новости из лабораторий мира	41
Новости ГНЦ ИФВЭ	43

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий

142281, Протвино Московской области,
Площадь Науки, д. 1.
Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий

<http://www.ihep.su>

Кристаллы вольфрамата свинца – основа современной электромагнитной калориметрии

В.А. Качанов, М.В. Коржик

Введение

Разработка новых экспериментов на планируемых в восьмидесятые годы XX века коллайдерах с высокой светимостью (УНК в СССР, SSC в США, LHC в ЦЕРН) потребовала создания новых технологий и материалов как для детекторов заряженных частиц, так и для электромагнитной калориметрии. Одной из наиболее очевидных проблем стало отсутствие радиационно стойкого тяжелого сцинтилляционного материала для создания электромагнитных калориметров нового поколения, способных работать в интенсивных радиационных полях.

Электромагнитная калориметрия в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино, Россия) берёт своё начало буквально с момента запуска ускорителя У-70 в 1967 году. Уже в 1968 году первый электромагнитный спектрометр, созданный на основе оптических искровых камер, участвовал в эксперименте по измерению процессов перезарядки π -мезонов на протонах. Дальнейшим развитием электромагнитной калориметрии в ИФВЭ явилось создание трёхкоординатного годоскопического сцинтилляционного спектрометра для эксперимента НИЦЕ, на котором в начале 70-х годов было получено много уникальных результатов и, прежде всего, был открыт h -мезон со спином 4. Однако годоскопический тип спектрометров имеет очевидный недостаток – перекрытие ливней в отдельных плоскостях детектора, что ограничивает количество одновременно регистрируемых гамма-квантов. Эта проблема может быть решена только в детекторах ячеистого типа, состоящих из матрицы отдельных элементов.

В середине 70-х годов в ИФВЭ под руководством академика Ю.Д. Прокошкина была начата программа ГАМС по исследованию зарядовообменных процессов с использованием электромагнитных спектрометров ячеистого типа из свинцового стекла. Впервые было показано, что при использовании ячеек с поперечными размерами, близкими к мольеровскому радиусу, можно измерять не только энергию, но и координаты гамма-квантов или электронов с высокой точностью. Принцип действия таких спектрометров, получивших название ГАМС, очень прост – развитие ливня захватывает несколько ячеек, сравнение сигналов с которых и позволяет определять координаты падающих частиц.

Программа ГАМС включала в себя создание двух электромагнитных спектрометров – один для работы в ИФВЭ и состоящий из 2000 ячеек и второй, предназначенный для экспериментов в ЦЕРН и состоящий из 4000 элементов. Первый спектрометр был запущен в ИФВЭ в 1979 году, второй был при-

везён в ЦЕРН осенью 1980 года для эксперимента NA-12. На обоих спектрометрах было получено большое количество результатов, описанных в десятках статей. Надо отметить, что спектрометр ГАМС-4000 побил в ЦЕРН все рекорды долголетия. Он и сейчас успешно работает в составе эксперимента COMPASS. Для создания этих детекторов в ИФВЭ был образован оптический участок, который мог производить до 1000 ячеек из свинцового стекла в месяц с точностями обработки, недоступными тогда для массового производства в советской промышленности.

В конце восьмидесятых годов сформировались три направления работ в решении проблемы поиска радиационно стойкого материала для электромагнитной калориметрии:

1. В рамках программы SSC проводились работы по разработке технологии производства очень быстрого сцинтиллятора BaF_2 . Были получены обнадеживающие результаты по выращиванию кристаллов этого типа, однако технология производства радиационно стойких кристаллов так и не была создана из-за закрытия проекта.
2. Для реализации проекта LHC в ЦЕРН была создана коллаборация "Crystal Clear", которая провела достаточно подробные исследования широкого круга как активированных, так и самоактивированных люминесцентных неорганических соединений. В результате этого поиска для эксперимента CMS выбор был сделан в пользу кристалла фторида церия, CeF_3 . Однако, несмотря на огромные усилия, технология производства крупногабаритных и радиационно стойких кристаллов этого типа так и не была разработана. Исследования в этом направлении были свернуты в 1995 году после принятия экспериментом CMS кристалла вольфрамата свинца.
3. При подготовке эксперимента НЕПТУН на строящемся в те годы в ИФВЭ ускорительно-накопительном комплексе УНК были начаты методические работы по поиску материалов и выработке конструктивных решений для создания электромагнитного калориметра нового поколения.

Предварительные исследования показали, что наиболее перспективным классом материалов являются вольфраматы. Среди тяжелых соединений вольфраматы уже были хорошо известны и активно использовались материалы с медленно затухающими сцинтилляциями в микросекундном диапазоне ($CaWO_4$, $CdWO_4$, $ZnWO_4$), что полностью

исключало их использование в новых проектах. Однако, в результате проведенных исследований, среди вольфрамов были установлены соединения – $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ (NBW) и PbWO_4 (PWO), – характеристики которых были наиболее близки к требованиям планируемых экспериментов по физике высоких энергий.

Результаты первых исследований данных вольфрамов были опубликованы в работе [1], открывшей дорогу вольфраматам в физику высоких энергий.

В дальнейшем из-за технологических проблем работы по разработке $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ были свернуты, а работы по созданию технологии производства кристаллов вольфрамата свинца PbWO_4 получили активное развитие. Кроме того, вскоре стало ясно, что NBW не является сцинтиллятором.

Кристалл вольфрамата свинца – первые тесты и свойства

Кристалл вольфрамата свинца, на котором были впервые измерены сцинтилляционные свойства этого материала, был выращен в НИИ «Монокристалл» (г. Харьков, Украина) в 1990 году и изучен в НИИ ядерных проблем (НИИ ЯП, г. Минск, Белоруссия). Никто не мог представить, что у этого желтоватого (рис. 1), в общем-то, невзрачного кристалла большое будущее.

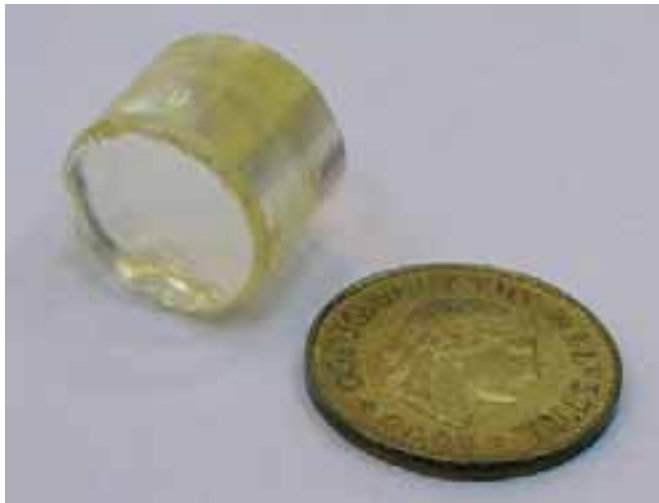


Рис. 1.

Всех, кто держал в руках кристалл PWO, прежде всего поражает его вес. Как абсолютно прозрачный материал может быть таким тяжёлым! Это очень плотное вещество ($\rho=8,28 \text{ г/см}^3$) с наименьшей среди известных синтетических кристаллов радиационной длиной ($X_0 = 0,89 \text{ см}$). Его радиус Мольера (RM) составляет около 20 мм, что обеспечивает небольшие поперечные размеры электромагнитного ливня и высокую точность измерения координат фотонов (электронов).

В начале 1992 года из кристалла, выращенного также в НИИ «Монокристалл», был изготовлен первый сцинтилляционный элемент кристалла вольфрамата свинца размером $20 \times 20 \times 120 \text{ мм}^3$, содержащий более 10 радиационных длин и пригодный для проведения тестов на ускорителе. Он был всесторонне изучен на пучках электронов ускорителя У-70 ИФВЭ.

На рис. 2 представлены первые спектры, полученные с одиночных кристаллов в 1992 году для двух наиболее перспективных вольфрамов. Очевидно, что из-за утечек значительной части электромагнитного ливня судить об энергетическом разрешении трудно. Однако по резкому правому краю спектра можно было судить о его перспективности.

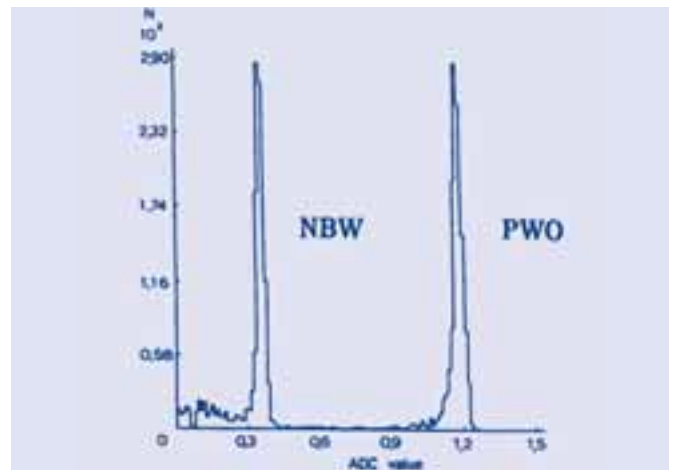


Рис. 2.

Результаты этой работы были представлены на семинаре в ЦЕРН и на Международной конференции CRYSTAL-2000 в Шамони (Франция) [2].

После анализа в ИФВЭ и НИИ ЯП всех возможностей внедрения этого кристалла в промышленность был выбран Богородицкий завод техно-химических изделий (БЗТХИ, Тульская область, Россия), прежде всего из-за наличия на нём 130 ростовых установок и опыта работы с тугоплавкими оксидными соединениями. С этим заводом в конце 1992 года ИФВЭ заключил договор на производство первых элементов электромагнитного калориметра из вольфрамата свинца. Уже в марте 1993 года им было изготовлено около 10 ячеек, тесты которых на ускорителе ИФВЭ подтвердили, что кристалл PbWO_4 обладает уникальной комбинацией свойств – высокой плотностью, быстро затухающими сцинтилляциями в удобном для фотоприемников спектральном диапазоне и удовлетворительной прозрачностью.

Что касается радиационной стойкости, то в процессе исследований выяснилась её сильная зависимость от качества кристаллов и, прежде всего, их прозрачности. Первые изготовленные на заводе элементы имели длину поглощения 30–50 см и были достаточно сильно окрашены. При облучении вплоть до 17 Мрад на реакторах их прозрачность не сильно ухудшалась. Количество так называемых центров окраски у первых кристаллов было столь велико, что дополнительные, образованные при облучении центры особой роли не играли. Однако с улучшением технологии выращивания прозрачность кристаллов значительно повысилась. Сегодня длина поглощения достигает 2–3 м. При этом центры окраски, образующиеся при облучении, играют уже весьма существенную роль.

В конце 1993 года ИФВЭ заключил контракт с БЗТХИ на разработку технологии и производство около 300 кристаллов PWO для макета калориметра

эксперимента НЕПТУН, планируемого на УНК. Этот и последующие контракты ИФВЭ спасли БЗТХИ от неминуемой остановки и перепрофилирования, так как завод, ранее бывший флагманом электронной промышленности в России и основным поставщиком кристаллов ниобата и танталата лития, в очень тяжелых экономических условиях начала девяностых годов находился на грани банкротства. Всего в течение 1993–1995 гг. ИФВЭ выплатил по контрактам БЗТХИ около 400 тысяч долларов США, что позволило заводу сохранить высокие технологии и, по существу, выжить.

В 1993–1994 гг. в ЦЕРН на канале Н8 группой экспериментаторов из ИФВЭ, НИИ ЯП и LAPP (Франция) при поддержке коллаборации ALICE были проведены тесты макета калориметра, состоящего из 60 ячеек PWO. Полученные в ходе тестов результаты оказались столь впечатляющими, что коллаборация CMS в сентябре 1994 года приняла кристалл PWO в качестве основы для создания электромагнитного калориметра [3-4].

Первый спектрометр гамма-квантов, состоящий из 150 гексагональных кристаллов PWO, был изготовлен в 1995 году и вошел в состав установки ГАМС-4л в ИФВЭ для измерения физических характеристик детектора на PWO в реальном эксперименте. На рис. 3 представлен спектр масс событий с двумя гамма-квантами, полученный на этом спектрометре [5].

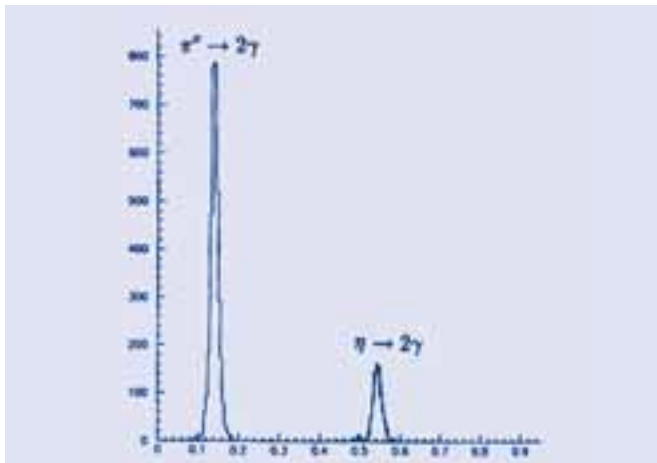


Рис. 3.

С 2001 года на ускорителе У-70 ИФВЭ проводились исследования прототипа электромагнитного калориметра для эксперимента ВTeV (США). Прототип состоял из 60 кристаллов вольфрамата свинца, изготовленных в России БЗТХИ и Компанией «Северный кристалл» (Апатиты), а также в Китае. Специально созданная система измерения импульса пучка на основе четырнадцати дрейфовых камер с разрешением 160 микрон позволила измерять импульс с точностью порядка 0,1% при энергии до 45 ГэВ.

При измерениях энергетического и координатного разрешений в области энергии электронов 1–45 ГэВ были получены рекордные для данных кристаллов результаты:

$$\sigma(E)/E = 1,8\% / \sqrt{E} \oplus 0,3\%$$

Энергетическое разрешение PWO-калориметра уже при энергии около 30 ГэВ выходит на уровень

0,5%, а при энергии 1 ГэВ оно менее 2%. Точность измерения координат электромагнитного ливня для PWO-калориметра лучше 0,5 мм. Сегодня это самая высокая точность, достигнутая в электромагнитной калориметрии при высоких энергиях [6].

В тяжелых кристаллах электромагнитные ливни в два раза уже, чем в свинцовом стекле. Из опыта разделения ливней в спектрометрах ГАМС следует, что два фотона (электрона) могут быть надёжно разделены в PWO-калориметре при расстоянии между ними около 15 мм. Эта величина критична для экспериментов ALICE и CMS из-за высокой загрузки детекторов частицами.

Были проведены систематические исследования радиационной стойкости кристаллов при их облучении электронами и адронами, а также потоком со смешанным спектром частиц, включавшим заряженные адроны, нейтроны и гамма-кванты [7]. Два кристалла были облучены до 3 Мрад с мощностью дозы около 100 крад/час. Их прозрачность ухудшилась в два-три раза, однако система мониторинга позволяет скорректировать эти изменения, хотя, конечно, энергетическое разрешение несколько ухудшается.

В этом же цикле исследований с высокой достоверностью было показано, что при радиационном облучении в кристаллах PWO меняется только их прозрачность, а сцинтилляционный механизм (или световыход) не меняется [8]. Именно это обстоятельство вселяло надежду на возможность мониторинга этих изменений при помощи простейшей системы на световых диодах или лазере, что и было подтверждено позже результатами тестов на пучках частиц.

Так как температурная зависимость световыхода кристалла имеет коэффициент $-2\%/^{\circ}\text{C}$ в относительно большом интервале температур, появляется возможность увеличения световыхода за счет понижения его температуры. На рис. 4 приведены результаты измерения энергетического разрешения при регистрации гамма-квантов с энергией от 50 до 500 МэВ для матрицы 3×3 , составленной из кристаллов с размерами $20 \times 20 \times 200 \text{ мм}^3$, при $T = -25^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее охлаждение кристалла приводит к увеличению доли медленной компоненты сцинтилляций и является нецелесообразным.

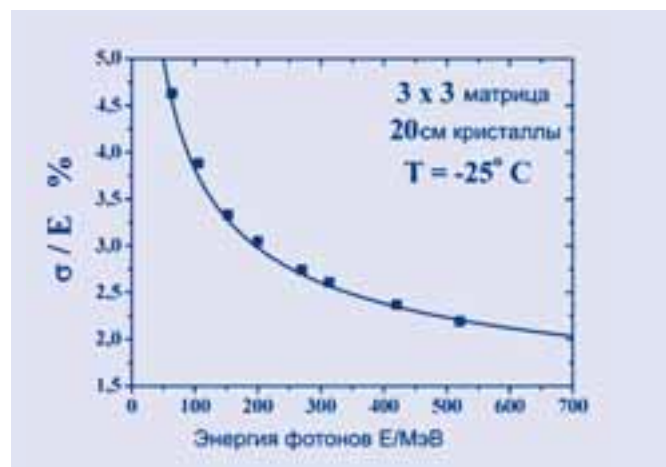


Рис. 4.

Полученные в этих тестах результаты дают основание утверждать, что детектор на основе кристаллов вольфрамата свинца при его охлаждении до низких температур имеет достаточно высокое энергетическое разрешение, что открывает широкие возможности для его применения в экспериментах по физике низких и средних энергий. Именно этот приём и собираются использовать в эксперименте PANDA (проект FAIR) в Германии.

Кроме экспериментов на LHC (CMS и ALICE), в настоящее время в ряде научных центров мира идёт подготовка новых экспериментов, в которых также планируется использование кристаллов вольфрамата свинца:

- ◆ эксперимент MECO в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (США). Он нацелен на поиск нарушения симметрии при преобразовании мюонов в электроны в поле ядра. Электромагнитный калориметр установки состоит из 2300 кристаллов PWO с размерами $30 \times 30 \times 120 \text{ мм}^3$;
- ◆ эксперимент PrimEx в Национальной Лаборатории им. Джефферсона (США). Его цель – измерение с высокой точностью времени жизни π^0 -мезона через эффект Примакова. Он использует 1200 кристаллов PWO с размерами $20.5 \times 20.5 \times 180 \text{ мм}^3$, изготовленных в Китае;
- ◆ эксперимент PANDA (проект FAIR), GSI (Германия), планирует использовать 19000 кристаллов PWO;
- ◆ рассматривается возможность применения кристаллов вольфрамата свинца на линейных ускорителях CLIC в ЦЕРН и ILC в США;
- ◆ обсуждается возможность замены кристаллов в торцевом электромагнитном калориметре CMS, при переходе к программе SLHC. Однако это потребует интенсивной научно-исследовательской работы по улучшению радиационной стойкости кристаллов PWO.

Технология производства кристаллов вольфрамата свинца

С момента появления первых кристаллов PWO начали появляться многочисленные теоретические работы, пытающиеся объяснить его основные свойства и главное – почему вольфрамат свинца сцинтиллирует? За последние 15 лет по этому вопросу была написана не одна сотня статей, однако этот вопрос остается предметом оживленной дискуссии в литературе.

Тем не менее, определённое понимание физических процессов, происходящих в кристалле, всё же имеется, что позволило объяснить такие его особенности, как окраска, люминесцентные характеристики, изменение спектральных свойств под действием ионизирующего излучения, а также оптимизировать технологию выращивания кристалла и довести его характеристики до уровня требований экспериментов на LHC.

Свойства PWO определяются технологией его выращивания и могут меняться в довольно широких

пределах. В исследованиях свойств кристаллов вольфрамата свинца, выполненных за последние 15 лет, можно выделить три проблемы, потребовавшие решений.

Первой проблемой, которая была успешно решена, являлось устранение желтого цвета кристаллов, поскольку поглощение света сцинтилляций внутренними центрами в длинном кристалле создает большую неоднородность световых выходов вдоль сцинтилляционного элемента, что ухудшает энергетическое разрешение. Второй проблемой стало устранение в кинетике сцинтилляций медленных компонент. И, наконец, третьей, наиболее важной из решенных проблем, явилось радикальное улучшение радиационной стойкости кристалла путём допирования его определёнными элементами.

Разработанная в России массовая технология производства кристаллов вольфрамата свинца основана на методе Чохральского. Исходным сырьем являются окислы PbO и WO_3 . Из этих порошков готовятся уплотненные таблетки, которые наплавляются в платиновые тигли. Непосредственным сырьём для выращивания кристаллов является продукт предварительной перекристаллизации уплотнённых таблеток на ростовых установках типа «Лазурит».

Выращивание кристаллов проводится в ростовых установках типа «Кристалл 3М». В качестве затравки используется кристалл вольфрамата свинца, закрепляемый в платиновом охлаждаемом держателе. В установках этого типа температурный градиент между расплавом и кристаллом создается путем отвода тепла от затравочного кристалла.

Растущий кристалл вытягивается из расплава, получаемого высокочастотным нагревом в комбинированном платиновом тигле в заданной газовой среде. Установка автоматически поддерживает заданные скорости вытягивания, скорость вращения затравки и температурный режим (рис. 5).



Рис. 5.

К технологическим параметрам, определяющим качество кристалла, относятся:

- 1) состав шихты;
- 2) состав газовой атмосферы;
- 3) ориентация затравки относительно кристаллографического направления роста;
- 4) температура выращивания;
- 5) скорость выращивания;
- 6) скорость вращения затравки;
- 7) скорость охлаждения.

Исследования показали [9], что параметры 4–7 не очень критичны и могут меняться в относительно широких пределах без потери качества кристаллов. Так, температура выращивания может лежать в пределах 1110–1150°C, скорость выращивания (вытягивания) – 1–12 мм/час, скорость вращения затравочного кристалла 1–50 об/мин., а скорость охлаждения – не более 150°C/час. Наиболее существенными оказались параметры 1–3.

Кристаллизационное оборудование допускает проведение нескольких последовательных выращиваний из одного тигля. Масса выращенного кристалла существенно меньше массы шихты, наплавленной в тигель. После добавления в тигель эквивалентного выращенному кристаллу количества материала можно проводить выращивание следующего кристалла. Однако, из-за увеличения концентрации примесей в оставшемся в тигле расплаве, последующая кристаллизация неизбежно приводит к изменению свойств кристалла. При массовом производстве экономически невыгодно использовать только одну кристаллизацию. Важной задачей было установление оптимального числа повторных кристаллизаций, при котором качество кристаллов соответствует спецификации заказчика. При использовании оптимизированных составов шихты удалось увеличить число кристаллизаций до 10 с возможностью использования в качестве сырья кристаллов, забракованных из-за механических повреждений, а также отходов при их обработке. Заключительным этапом в производстве кристаллов является их сертификация (контроль размеров и качества), которая производится на автоматизированном оборудовании, разработанном специалистами НИИ ЯП, LAPP и ЦЕРН. Оно позволяет измерять кинетику сцинтилляций методом задержанных совпадений с временным разрешением ~0.2 нс, световыход и его однородность по длине, а также определять прозрачность кристаллов при разных длинах волн. Если кристалл по каждому из измеренных параметров соответствует спецификации заказчика, он покидает завод. По прибытии в ЦЕРН измерения повторяются на таком же оборудовании. И только после этого кристалл попадает на участок сборки электромагнитного калориметра CMS.

Для иллюстрации работы системы контроля качества на рис. 6 представлено распределение по прозрачности на длине волны 420 нм (максимум спектра излучения PWO) для 4600 кристаллов торцевого калориметра CMS, выращенных

в 2007 году. Распределение очень узкое, что говорит о стабильности технологии и высоком качестве кристаллов. Однако мы приводим его не только для этого. На этом спектре на уровне 55% жирной линией представлена минимальная величина для этого параметра, заложенная в спецификации CMS. С чего бы такие огромные допуски? Всё просто. В начале производства кристаллов в 1999 году это распределение было гораздо шире, и для обеспечения разумного выхода годных кристаллов в спецификацию по большинству параметров были заложены весьма щадящие для завода цифры. Но уже в 2000 году технология производства вышла на современный уровень, все распределения по параметрам заметно сузились, но спецификацию менять не стали.

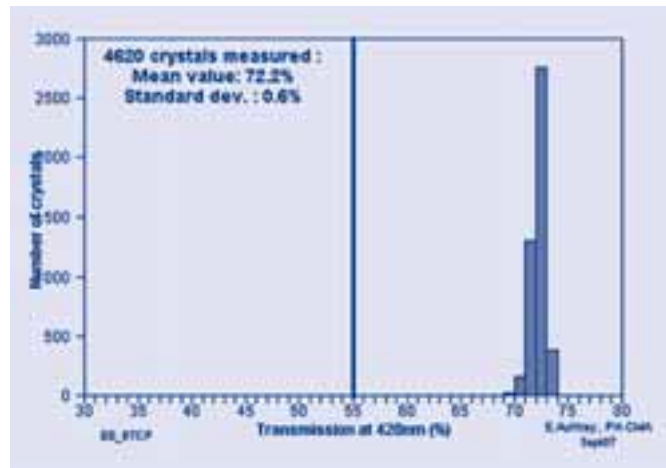


Рис. 6.

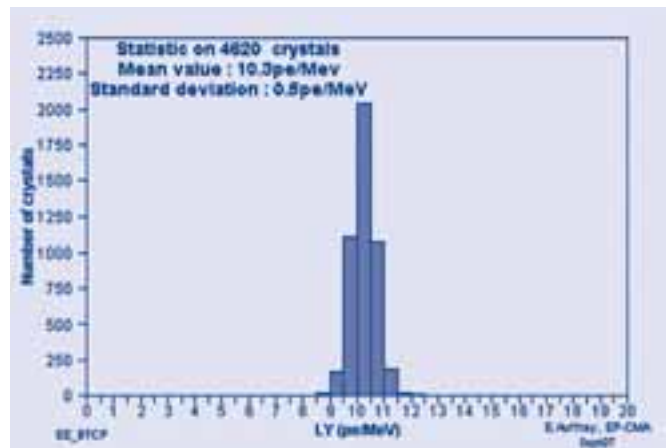


Рис. 7.

На рис. 7 представлено распределение по световыходу для этих же кристаллов. Средняя величина 10,5 фотоэлектронов/МэВ является относительной, она зависит от размеров и геометрии кристаллов, а также от используемого фотодетектора.

В настоящее время БЗТХИ является основным производителем кристаллов вольфрамата свинца в мире. Каждый месяц на этом предприятии производится не менее 1000 сертифицированных сцинтилляционных элементов для комплектования электромагнитного калориметра коллаборации CMS (рис. 8).



Рис. 8.

Электромагнитный калориметр CMS

В данной статье мы не планировали подробного описания калориметра CMS – она посвящена исключительно кристаллу вольфрамата свинца и его истории, но уйти от краткого описания самого большого из спектрометров на PWO мы не смогли. «Этот детектор, как по весу, так и по количеству каналов, превосходит все спектрометры на кристаллах, вместе взятые...» – отметил в своём докладе в декабре 2007 года руководитель эксперимента CMS проф. Джим Верди.

Электромагнитный калориметр CMS состоит из цилиндрической части и двух торцевых калориметров, перекрывающих область углов η от 1.5 до 3

(рис. 9). Интересы России, и стало быть ИФВЭ, сосредоточены в основном вокруг торцевых калориметров.

На рис.10 представлена схема торцевого электромагнитного калориметра CMS. Он состоит из двух дисков, каждый из которых для удобства монтажа разделён на две половины. Вид такого полудиска похож на латинскую букву D, отчего и получил название Dee.

Для размещения кристаллов и их изоляции друг от друга была выбрана модульная альвеоловая структура, состоящая из матрицы 5×5 кристаллов. В процессе работы по созданию электромагнитного калориметра был проведён анализ различных конструкционных материалов, пригодных для изготовления альвеоловой структуры. В результате был выбран углепластик, самый легкий и прочный материал.

Модули крепятся на переднем несущем диске. Для поддержания постоянной температуры кристаллов с точностью 0,1 градуса Dee закрывается термоэкраном, изготовленным на РКК «Энергия» с применением новейших материалов и космических технологий. На этом же предприятии была изготовлена нейтронная защита электроники торцевого калориметра. На рис. 11 представлены основные детали модуля торцевого калориметра. Стоит отметить, что практически все они были изготовлены в России.

Сборка модулей является полной ответственностью России. За 6 месяцев 2007 года было собрано и протестировано более половины всех модулей (320 штук). Вторая половина будет смонтирована до лета 2008 года. Параллельно шёл монтаж модулей на переднюю панель Dee. Уже собран один Dee и начаты его испытания на стендах. На рис. 12 показан первый собранный Dee.

Создание электромагнитного калориметра CMS близко к завершению. Его цилиндрическая часть, состоящая из 62 тысяч кристаллов, смонтирована в подземном зале LHC, производится её комплексный запуск и калибровка на космических мюонах. Что касается торцевых электромагнитных калориметров, то по плану монтажа установки CMS первый из них будет установлен в апреле, а второй – летом 2008 года.

Электромагнитный калориметр CMS

Новый тип электромагнитного калориметра на основе PWO кристаллов был предложен CMS физиками ИФВЭ в 1994 году

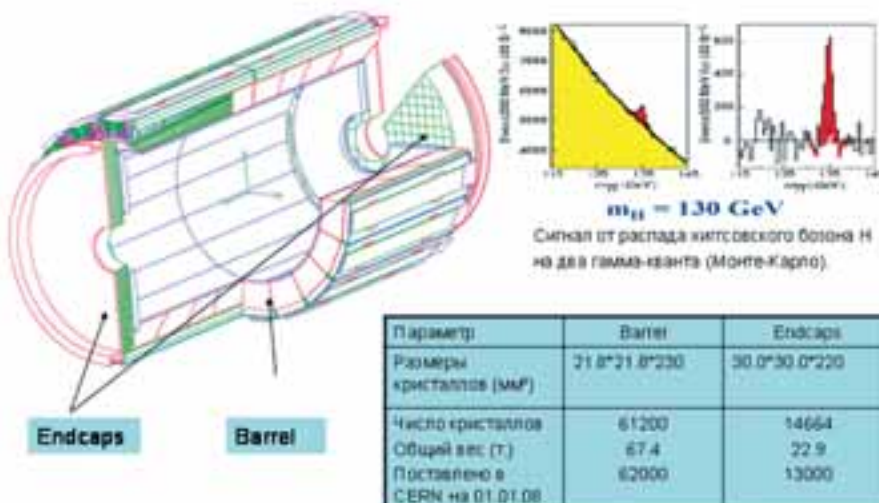


Рис. 9.

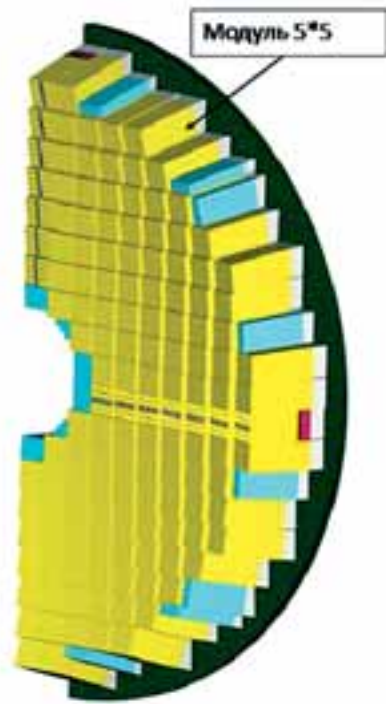


Рис. 10.

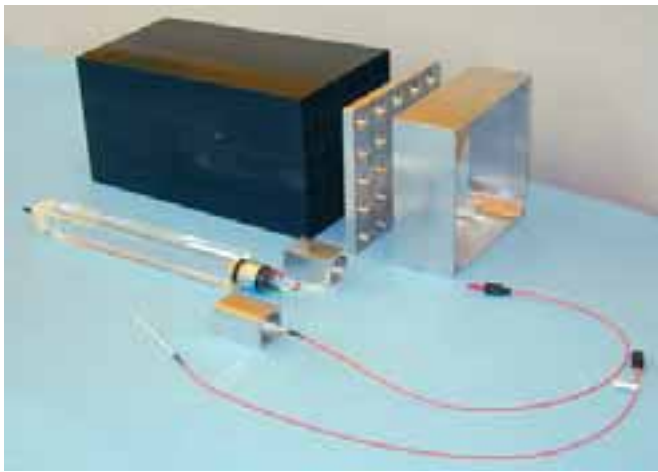


Рис. 11.



Рис. 12.

Заключение

Монокристалл вольфрамата свинца является перспективным сцинтилляционным материалом для применения в экспериментах по физике частиц высоких энергий. По совокупности параметров он является оптимальным для электромагнитной калориметрии на коллайдерах с большой светимостью. Сцинтиллятор вольфрамата свинца позволяет создавать компактные однородные быстродействующие электромагнитные калориметры с хорошим энергетическим разрешением в диапазоне энергий регистрируемых электронов и гамма-квантов от 50 МэВ.

Результаты исследований свойств PWO описаны более чем в двухстах научных статьях и сборниках, двух монографиях [10]. По результатам исследований защищены 3 докторских и 8 кандидатских диссертаций.

Достаточно дешёвый и технологичный при выращивании и обработке кристалл PWO, обладающий уникальными характеристиками (высокая плотность, малая радиационная длина, высокая прозрачность, хорошая радиационная стойкость, малые времена высвечивания сцинтилляций), занял лидирующие позиции в электромагнитной калориметрии. Мировая потребность в нём до 2010 года составляет около 120 тысяч штук общим весом более 150 тонн, основное количество которого было или будет изготовлено в России. Сегодня уже произведено более 70 тысяч элементов для эксперимента CMS и около 10 тысяч для эксперимента ALICE.

Что касается стоимости этого кристалла в России, то она менялась в соответствии с изменением стоимости жизни в нашей стране. В 1999 году она была 1.8 долларов США за куб. см, сегодня же она составляет около 6 долларов.

Прошло 15 лет с момента появления первых полноразмерных кристаллов вольфрамата свинца. Появились ли новые тяжёлые сцинтиллирующие кристаллы? Да, появились. Это, прежде всего, кристаллы на основе лютеция – силикат лютеция $\text{Lu}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ (LSO) и алюминат лютеция $\text{LuAlO}_3(\text{Ce})$ (LuAP). Допированные церием, они обладают в сотни раз большим световыходом по сравнению с PWO и удовлетворительной радиационной стойкостью. Первый уже довольно широко используется в медицине для томографии. Технология производства второго – LuAP – осваивается сегодня ведущими фирмами по производству кристаллов. Уже появились результаты исследований этих кристаллов с необходимыми для нас размерами на пучках частиц. Но они стоят очень больших денег, около 100 \$ за куб. см. Это может отпугнуть многих, но не всех. Для небольших калориметров это то, что надо, особенно в экспериментах при низких и средних энергиях. Ну а для калориметров типа CMS весом в 100 тонн? Где взять столько денег и столько лютеция?

И чем всё-таки нас не устраивает PWO? Прежде всего, малым световыходом и всё же недостаточной радиационной стойкостью. Увеличение световыхода этого кристалла путём его допирования различными элементами большого успеха не име-

ло. На БЗТХИ научились выращивать PWO с удвоенным световыходом, но этого мало. Что касается радиационной стойкости, то если посмотреть на распределение по этому параметру для кристаллов, выпущенных для CMS, можно увидеть, что есть кристаллы (порядка 10 процентов), которые практически не меняют своих свойств при их облучении до весьма больших доз. Это означает, что принципиально можно выращивать весьма радиационно стойкие кристаллы. Понятно, что всё портят неконтролируемые примеси и структурное несовершенство кристаллов.

Сегодня обсуждается возможность использования нанотехнологий при производстве PWO на стадии приготовления сырья. Если вместо порошков Pb и WO₃ использовать нанопорошки, то при их смешивании образуется более однородная масса, что может значительно уменьшить локальное нарушение стехиометрии, которое является одной из возможных причин ухудшения радиационной стойкости.

И уж совсем из области фантастики. Можно производить кристаллы PWO по технологии горячего прессования, как это сегодня делается при производстве прозрачных керамик, но это очень сложные и дорогие технологии, и их реализация возможна только в том случае, если это будет кому-то нужно. Но это уже другая история.

В заключение мы хотели бы выразить благодарность руководителям наших институтов академику А.А. Логунову и В.Г. Барышевскому за поддержку исследований на начальной стадии. Именно благодаря этой поддержке в очень тяжёлые времена начала 90-х, удалось не только внедрить кристалл вольфрамата свинца в физику высоких энергий, но и сохранить материальную базу для его производства.

Мы признательны всему коллективу завода БЗТХИ за многолетнее плодотворное сотрудничество. Хотим особо отметить огромную роль в организации производства В.Л. Костылева, А.Н. Анненкова и В.Н. Лигуна.

Литература

1. V.G.Barishevsky, M.V.Korzhih, V.A.Katchanov, V.I.Moroz et al. Single crystals of tungsten compounds as promising materials for the total absorption detectors of the e.m. calorimeters. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A322 (1992) 231.
2. V.A.Kachanov. Study of characteristics of real-size PbWO₄ crystal cells for precise EM-calorimeters to be used at LHC energies. Report to the CRYSTAL 2000 Workshop, Chamonix, 1992.
3. V.A.Kachanov. Beam studies of EM calorimeter prototype built of PbWO₄ crystals, reported to the IV Int. Conf. on Calorimetry in High Energy. Sept. 15-19, 1993, Isola Elba, Italy.
4. O.V. Buyanov, R. Chipaux, A.A. Fyodorov, V.A. Kachanov et al. A first electromagnetic calorimeter prototype made of PbWO₄ crystals. NIM, A349, 62-69, 1994; Preprint LAPP-EXP-94.06, 1-28, March 1994.
5. F.G.Binon et al. Beam studies of SAD-150 heavy crystal PWO calorimeter, small angle multiphoton detector of GAMS-4pi spectrometer. Nucl. Instrum. Meth., A428, 292-298, 1999.
6. V.A.Batarin et al. Precision measurement of energy and position resolutions of the BTeV electromagnetic calorimeter prototype. Nucl. Instrum. Meth., A510, 248-261, 2003.
7. V.A.Batarin et al. Study of radiation damage in lead tungstate crystals using intense high-energy beams. Nucl. Instrum. Meth., A512, 488-505, 2003.
8. V.A.Batarin et al. Study of possible scintillation mechanism damage in PbWO₄ crystals after pion irradiation. Nucl. Instr. and Meth., A540 (2005) 131-139.
9. В.Л.Костылев. Разработка технологии производства сцинтилляторов с улучшенными характеристиками на основе вольфрамата свинца. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Иваново, 2004.
10. М.В.Коржик. Физика сцинтилляторов на основе кислородных монокристаллов (монография). БГУ, Минск, Беларусь, 2003.

Самый тяжелый кварк

Э. Боос, Л. Дудко¹, С. Слабоспицкий²

¹НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им.М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ) 119991, г. Москва, Россия,

²Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ) 142281, г. Протвино, Россия

Введение

В 1964 г. Гелл-Манном и Цвейгом была предложена кварковая модель для объяснения накопившихся фактов в экспериментах на ускорителях и, частично, в экспериментах с космическими лучами по рождению большого количества (порядка 100) новых сильновзаимодействующих частиц, получивших название адроны. В то время для описания этих адронных состояний достаточно было ввести три новых фундаментальных объекта: кварки u (*up*), d (*down*) и s (*strange*). Например хорошо известные адроны протон и нейтрон, из которых состоят все окружающие нас атомные ядра, образуются из кварков следующих комбинаций: uud (протон), ddu (нейтрон). Для того чтобы правильно описывать спины и заряды наблюдаемых адронов, кварки должны иметь спин $1/2$ и дробный электрический заряд в единицах заряда протона (заряд u -кварка $2/3$, заряд d - и s -кварков $-1/3$). Соответственно массы u - и d -кварков ожидалось порядка $1/3$ массы протона (300 МэВ), а масса s -кварка (примерно 500 МэВ) определялась измеренными массами K -мезонов.

Введение кварковой гипотезы было очередным шагом в установлении минимальных элементарных фундаментальных составляющих («кирпичиков мироздания»). Такой шаг на пути познания материи, направленный на нахождение наименьших и неделимых ее составляющих, восходит еще к древнегреческим философам, например к Демокриту. Дальнейшие экспериментальные открытия, в частности обнаружение в 1974 г. нового адрона, так называемой частицы J/ψ с массой 3,1 ГэВ, интерпретированы как связанное состояние нового кварка, названного c (*charm*) и соответствующего ему антикварка (см. работу [1], где подробно описана история и современный статус тяжелых кварков). Ранее существование этого кварка было предсказано теоретически для интерпретации данных по распадам заряженных и нейтральных K -мезонов. К этому времени были обнаружены и новые элементарные частицы другого класса, получившие название лептонов.

Кроме хорошо известных электрона и электронного нейтрино были обнаружены мюон и мюонное нейтрино. Лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях, но подвержены электромагнитным взаимодействиям и участвуют в слабых радиоактивных распадах. Возникла замечательная симметрия существования двух поколений кварков (u, d) (c, s) и двух поколений лептонов (ν_e, e) (ν_μ, μ). Но такая симметрия оказалась нарушенной, когда в 1976 г. был обнаружен третий заряженный лептон, τ -леп-

тон, а в 1977 г. в Фермилабе был найден новый мезон Υ (Ипсилон) с массой порядка 10 ГэВ, который был интерпретирован как связанное состояние нового кварка b (*bottom*) и соответствующего ему антикварка. Дальнейшие эксперименты в DESY (Германия, Гамбург) и Cornell (США, Нью-Йорк) показали, что b -кварк обладает спином $1/2$ и зарядом $-1/3$ так же, как d - и s -кварки, при этом его масса оказалась порядка 5 ГэВ.

Если предположить, что найденные τ -лептон и b -кварк принадлежат к новому, третьему, поколению, то для сохранения симметрии по аналогии с существующими парами (u, d) (c, s) и (ν_e, e) (ν_μ, μ) нужно было допустить, что существуют еще один кварк, аналогичный u и c , и еще одно нейтрино, аналогичное мюонному и электронному нейтрино. Обе эти частицы были обнаружены в дальнейших экспериментах. τ -нейтрино было обнаружено в прямых наблюдениях в 2000 г. в распадах τ -лептонов в эксперименте DONUT в Фермилабе (США, Чикаго). Предсказанный шестой кварк, получивший название t -кварка (*top*), был также обнаружен пятью годами раньше на коллайдере Теватрон в Фермилабе. К описанию этого выдающегося открытия и описанию уникальных свойств топ-кварка мы и переходим. Забегая вперед, отметим, что найденная масса топ-кварка (примерно 175 ГэВ) оказалась во много раз больше, чем массы более легких кварков – b, c, s, d, u .

В отличие от c - и b -кварков, масса t -кварка была довольно точно предсказана за несколько лет до его обнаружения. В 1992 г. в журнале "Phys. Lett. B" появилась заметка, касающаяся способов «извлечения» Стандартной Модели, т.е. ее структуры и параметров из теории суперструн. Хотя сама теория не была построена (как, впрочем, она не построена и поныне), но имелись соображения, что на больших расстояниях (по сравнению с планковской длиной 10^{-33} см) уже общих черт теории суперструн достаточно для получения содержательных оценок, прямо связанных с экспериментально достижимыми возможностями. Так вот, в упомянутой заметке [4] было приведено значение массы t -кварка $m_t = 175 - 180 \text{ ГэВ}/c^2$.

В отличие от ситуации со всеми предыдущими кварками, не было найдено никаких новых адронов, для интерпретации которых необходимо было бы ввести новый топ-кварк. Обнаружение топ-кварка поставило перед физиками еще целый ряд проблем и загадок, таких например, как:

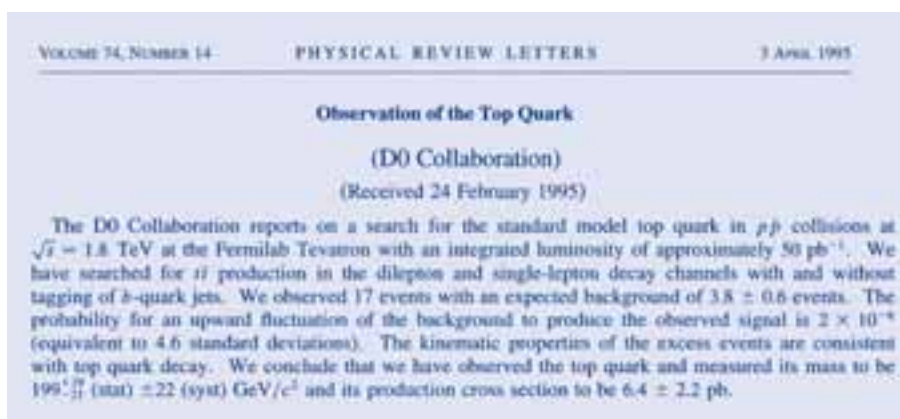
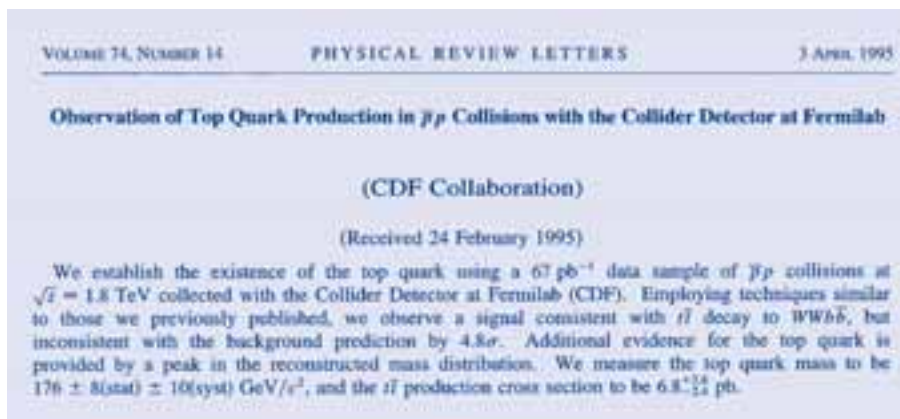
- ◆ Почему топ-кварк настолько тяжелее остальных кварков и лептонов, обнаруженных в природе?

- ◆ Какова причина того, что численное значение константы взаимодействия топ-кварка с бозоном Хиггса, которая называется юкавской константой топ-кварка, оказывается практически равным единице?
- ◆ Каким образом топ-кварк, обладая массой чуть меньше массы ядра золота или примерно в 175 раз больше массы атома водорода, тем не менее, является точечной частицей, т.е. его структура, если она и есть, не проявляется до расстояний порядка 10^{-17} см? Отметим, что «объем» t -кварка примерно в 200 миллиардов раз меньше объема ядра атома золота.

Ответы на эти и некоторые другие вопросы на сегодня достоверно неизвестны. Хотя в разных моделях, выходящих за рамки СМ, делаются попытки найти ответы и понять выделенную роль топ-кварка среди всех известных частиц.

1. Открытие топ-кварка

Топ-кварк был открыт в 1995 г. практически одновременно двумя экспериментальными сотрудничествами (коллорабациями): CDF [2] и D0 [3] на коллайдере Tevatron («оригиналы» этих «объявлений» приведены ниже).



Интересно отметить, что ни в одной из двух публикаций нет ссылки на отмеченное выше теоретическое предсказание массы топ-кварка, сделанное в 1992 г.

Открытию топ-кварка на Теватроне предшествовал более чем двадцатилетний период напряженных поисков в экспериментах на различных коллайдерах. Одной из основных проблем в поиске топ-кварка было отсутствие каких бы то ни было априорных

указаний на возможную величину его массы. На электрон-позитронных коллайдерах PEP (SLAC, США, Калифорния) и PETRA (DESY) были проведены поиски новых адронных состояний с массами порядка 30 ГэВ, которые по аналогии с J/Ψ - и Y -частицами могли бы быть поняты как связанные состояния пары топ- и антитоп-кварков. При этом предполагалось, что топ-кварк в три раза тяжелее b -кварка в соответствии с соотношением между массами c - и s -кварков. Но эти поиски не увенчались успехом, и такие новые адронные состояния не были найдены.

Дальнейшие поиски продолжились в 80-е годы на протон-антипротонном коллайдере $S\bar{p}pS$ (CERN, Швейцария, Женева). Энергия столкновения в системе центра масс коллайдера $S\bar{p}pS$ была примерно 600 ГэВ. Такие большие энергии потенциально позволяли наблюдать новые частицы со значительно большими массами. На коллайдере $S\bar{p}pS$ было сделано выдающееся открытие, отмеченное Нобелевской премией, по обнаружению W - и Z -бозонов – переносчиков слабых взаимодействий, с массами примерно 80 и 91 ГэВ соответственно. В случае, если бы масса топ-кварка была меньше половины массы Z -бозона, наблюдался бы распад Z -бозона в пару топ- и антитоп-кварков. Таких распадов обнаружено не было; также не были обнаружены распады W -бозонов в t - и b -кварки, что позволило передвинуть ограничение возможной массы топ-кварка практически до значения массы W -бозона минус масса b -кварка (примерно 75 ГэВ).

Атмосфера этих поисков была достаточно драматичной, иногда исследователям казалось, что они получали экспериментальные указания на существование топ-кварка, но впоследствии при большей экспериментальной статистике наблюдаемые указания оказывались статистически недостоверными. Дальнейшие прямые поиски были продолжены на коллайдере Tevatron, они позволили сначала существенно увеличить нижнюю границу на массу топ-кварка, а затем и обнаружить его, о чем речь пойдет ниже. Отметим, что к этому времени уже появились данные

с электрон-позитронных коллайдеров LEP (CERN) и SLD (SLAC) по точным измерениям масс W - и Z -бозонов, которые позволили определить возможный интервал масс топ-кварка с точностью порядка 20%. В дальнейшем мы объясним более подробно, как это было сделано.

Как же проводился поиск топ-кварка? Согласно представлениям Стандартной модели, топ-кварк, как W - и Z -бозоны, является очень короткоживу-

щим состоянием. Ниже мы специально остановимся на конкретных численных предсказаниях для времени жизни и ширины распада топ-кварка. Отметим, что топ-кварк распадается практически в том же месте, где и рождается, не успевая провзаимодействовать с другими кварками и образовать какие-то связные адронные состояния. На что же распадается топ-кварк? Согласно структуре взаимодействий топ-кварка, которая диктуется принципами построения СМ, топ-кварк распадается практически только на W -бозон и b -кварк. Заметим, что уже в этом месте проявляется значительное отличие топ-кварка от других кварков и лептонов, хотя сама структура его взаимодействий в СМ такая же, как и для других фермионов. Различия возникают из-за того, что топ-кварк существенно тяжелее, чем W -бозон. Поэтому его распад происходит в реальный W -бозон, который затем резонансно распадается на возможные пары легких кварков и лептонов. Все же остальные кварки и лептоны существенно легче W -бозона, поэтому их распад происходит через глубоко виртуальное состояние W -бозона. Как следствие, ширины распада других кварков и лептонов оказываются существенно меньше, а, соответственно, время жизни существенно больше времени жизни топ-кварка.

Топ-кварк распадается по следующим каналам, которые задаются всеми возможными способами (модами) распада W -бозона:

$$t \rightarrow b, W^\pm \rightarrow b, \begin{cases} e^+, \nu_e & 11\% \\ \mu^+, \nu_\mu & 11\% \\ \tau, \nu_\tau & 11\% \\ u, d & 33\% \\ c, \bar{s} & 33\% \end{cases} \quad (1)$$

Три первые моды, содержащие лептоны, называются лептонными модами распада топ-кварка, соответственно две последние – кварковыми модами распада. Легкие кварки, рождающиеся с достаточно большими энергиями и поперечными импульсами, не разлетаются сами по себе, а подхватываются из вакуума подходящие кварки, антикварки и глюоны и образуют совокупность адронов, летящих близко к исходному направлению родившегося кварка. Эти совокупности частиц, летящих в близком направлении, называются струями (*jet*) и регистрируются детектором. Электроны и мюоны регистрируются в детекторе непосредственно. Нейтрино, в силу его чрезвычайно слабого взаимодействия с веществом детектора, не регистрируется прямо, однако приводит к наличию дисбаланса импульса или, как говорят, к потерянным импульсам в продольных и поперечных направлениях.

Продольный потерянный импульс невозможно зарегистрировать в столкновениях адронов, поскольку исходный продольный импульс сталкивающихся протонов распределен между различными кварками и глюонами, их образующими и называемыми партонами. Во взаимодействии участвуют только определенные партоны, другие же просто

уносят части продольных импульсов. Эти партоны, участвующие во взаимодействии, называются «наблюдателями». Из-за невозможности измерить импульс партонов-наблюдателей невозможно установить и потерянный продольный импульс, обусловленный рожденным нейтрино. А вот поперечный импульс в исходном столкновении адронов практически равен нулю. Поэтому рождающееся нейтрино приводит к такой характерной черте выделяемых событий, как суммарный потерянный поперечный импульс.

Топ-кварк регистрируется по продуктам его распада, которые дают одну струю, происходящую от b -кварка (ее называют *b-jet*) и в зависимости от моды распада W -бозона, либо еще две струи от легких кварков (*light jets*), либо лептон и недостающий поперечный импульс от нейтрино. Для того чтобы понять, какие события необходимо искать и анализировать, чтобы выделить сигнал от топ-кварка, необходимо рассмотреть вопрос о каналах или о процессах его образования. Наглядно такие процессы представляются с помощью диаграмм Фейнмана, в которых начальным и конечным линиям соответствуют участвующие в процессе частицы. Внутренним линиям соответствуют виртуальные частицы, а вершины описывают взаимодействия этих частиц. При этом начальные частицы принято изображать в левой части, а конечные – в правой части диаграммы.

Топ-кварк в адронных столкновениях рождается либо парно, когда вместе с топ-кварком рождается соответствующая ему античастица (анти топ-кварк), либо одиночно, когда рождение топ-кварка сопровождают другие частицы. Наиболее характерные диаграммы Фейнмана для парного и одиночного рождений топ-кварков показаны на рис. 1 и 2.

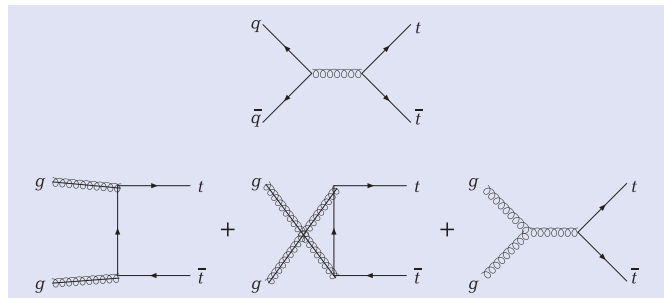


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана, описывающие рождение пары топ- и анти топ-кварков.

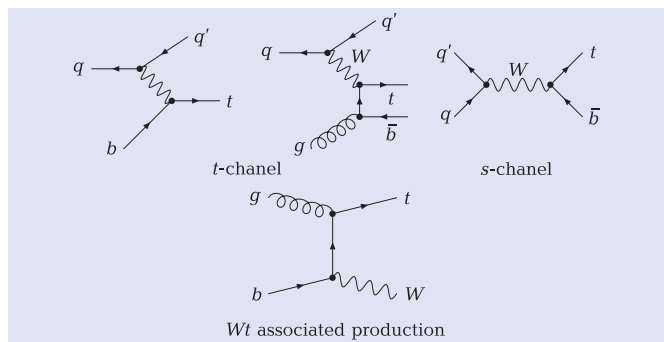


Рис. 2. Диаграммы Фейнмана, описывающие одиночное рождение топ-кварков.

Как видно из рис. 1, парное рождение происходит либо в столкновении пары легких кварка и антикварка с обменом виртуальным глюоном, либо в столкновении двух глюонов из двух сталкивающихся адронов. Таким образом, этот процесс обусловлен сильными взаимодействиями. Поэтому он является более вероятным по сравнению с процессами одиночного рождения, которые происходят за счет электрослабого взаимодействия с W -бозоном.

Именно в процессах рождения пары $t\bar{t}$ и был открыт топ-кварк в Фермилабе. Какие же характерные события отбирались для поиска топ-кварка? Это схематически показано на рис. 3.

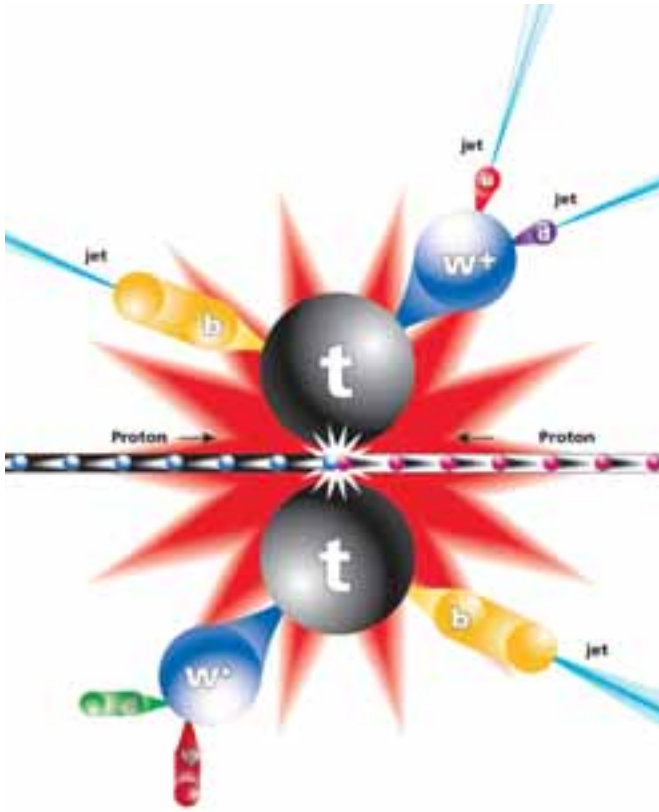


Рис. 3.

Из приведенного рисунка и обсуждения выше видны следующие характерные признаки, по которым отбирались события:

- 1) два b -кварка от распада топ-кварка t и анти-топ-кварка (\bar{t}), два легких кварка и антикварка от распада одного из W -бозонов, лептона и нейтрино от распада другого W -бозона. Этому соответствуют события, в которых регистрируются $2\ b\text{-jets}$, $2\ \text{light jets}$, заряженный лептон и потерянный поперечный импульс. Этот тип событий, или, как принято говорить, сигнатура событий, называется полулептонной сигнатурой;
- 2) два b -кварка от распада t и (\bar{t}) и четыре легких кварка от распада W образуют так называемую адронную сигнатуру событий – $2\ b\text{-jets}$ и $2\ \text{light jets}$;
- 3) два b -кварка от распада t и (\bar{t}), два заряженных лептона и два нейтрино от распада W -бозонов дают так называемую двухлептонную сигнатуру $2\ b\text{-jets}$, 2 заряженных лептона и потерянный поперечный импульс.

Первое обнаружение топ-кварка было сделано на основе наблюдения событий с полулептонной сигнатурой (сигнатура – характерное конечное состояние). Основная проблема с обнаружением топ-кварка не только в том, что вероятность такого процесса не столь велика по сравнению с другими реакциями, идущими за счет сильных взаимодействий. Главная сложность состояла в существовании большого числа так называемых фоновых процессов, которые ведут к сигнатурам событий схожих с сигнальными и, как правило, имеют значительно большие вероятности. Для обнаружения сигнала полулептонная сигнатура оказалась оптимальной, так как с одной стороны, сигнальный процесс в этой сигнатуре обладает достаточно большой вероятностью, а с другой стороны, наилучшим оказывается соотношение величины сигнала к суммарной величине фона.

За время работы коллайдера Теватрон при энергии сталкивающихся протонов и антипротонов 1,8 ТэВ (этот период работы Теватрона называется первым сеансом) было получено около 500 событий, что полностью соответствовало ожидаемым вероятностям для этого процесса. Эти вероятности образования пары топ-кварков были посчитаны в рамках Квантовой хромодинамики (КХД), которая является частью СМ, описывающей сильные взаимодействия. Вероятность полулептонной моды также вычисляется теоретически и составляет примерно 45%, что тоже подтвердилось в измерениях. Таким образом, в сеансе-I было зарегистрировано около 220 событий в полулептонной моде в каждом из двух экспериментов CDF и D0. В сеансе-II, когда коллайдер Теватрон начал работать на энергии 1,96 ТэВ с существенно увеличенным числом сталкивающихся протонов и антипротонов, парное рождение топ-кварка было надежно зарегистрировано во всех вышеупомянутых сигнатурах: полулептонной, адронной и лептонной. Увеличенное количество событий, т.е. уже статистика позволила провести существенно более точные измерения характеристик топ-кварка.

Как уже упоминалось, топ-кварк может рождаться и одиночным образом, как показано на рис. 2. Основной отличительной чертой одиночного рождения топ-кварка от его парного рождения на адронных коллайдерах Теватрон и ЛHC является то, что он образуется во взаимодействиях с переносчиком электрослабых взаимодействий W -бозоном. Поэтому такой механизм рождения называется электрослабым механизмом, а вероятность его протекания оказывается меньше, чем у процесса парного рождения. Однако эффективная энергия столкновения партонов для рождения одного топ-кварка существенно меньше, чем для рождения пары топ и анти-топ-кварков. По этой причине различие в вероятностях протекания процессов сильного рождения пары и электрослабого одиночного рождения не столь велико, как можно было бы наивно полагать. На обоих коллайдерах Теватрон и ЛHC вероятность электрослабого одиночного рождения топ-кварка составляет примерно 40% от вероят-

ности сильного рождения пары t и (\bar{t}) . В первом сеансе работы коллайдера Теватрон одиночный топ-кварк открыт не был. Основная причина этого – существенно более сложные фоновые условия по сравнению с парным рождением.

Отметим, что для выделения сигнальных событий из фоновых применялись различные методы. Все они используют предварительное численное моделирование событий и построение распределений по различным кинематическим переменным детектируемых частиц (энергия, импульс, угол вылета и т.п.). В традиционной технике предполагается, что сигнальные и фоновые события сосредоточены в разных областях переменных. И, применяя кинематические обрезания (т.е. выделяя различные области переменных), возможно существенным образом подавить относительный вклад фоновых событий. Однако практически всегда сигнал и фон имеют похожие распределения. В этом случае приходится применять более «изошренные» методы. Например, в методе «матричных элементов» для каждого события вычисляется вероятность того, что частицы из данного конечного состояния (с измеренными энергиями и углами) могли образоваться в результате сигнального или фонового процессов. В методе «нейронных сетей» для смоделированных сигнальных и фоновых событий вычисляются различные весовые функции, зависящие от кинематики конечных частиц. Каждому событию приписывается дискретный вес (например, единица для сигнала). Тем самым проводится так называемое «обучение» (или «тренировка») нейронной сети. Для двух последних методов очень важным является хорошее (т.е. правильное) знание модели (матричных элементов) для описания сигнала и фона.

Именно комбинация этих различных техник и позволила выделить сигнал от рождения одиночного топ-кварков во втором сеансе (сеансе-II), когда суммарное количество событий (набранная статистика) было увеличено в 10 раз по сравнению с сеансом-I. Коллайдер LHC открывает новые перспективы в изучении процесса одиночного рождения топ-кварка.

2. Основные измерения свойств топ-кварка

2.1. Масса топ-кварка

Как было отмечено выше, топ-кварк был открыт в процессе парного рождения на коллайдере Теватрон. Во втором сеансе было обнаружено и одиночное рождение. Существенно большая набранная статистика позволила сделать ряд измерений свойств топ-кварка. Прежде всего, это более точные измерения массы топ-кварка. Последние данные по измерению массы дают величину массы топ-кварка $171.4 \pm 1.2(stat) \pm 1.8(syst)$. Проблема столь большой величины массы топ-кварка уже отмечалась выше. Отметим, что в СМ массы всех частиц образуются за счет взаимодействия с конденсатом скалярного поля Хиггса. При этом взаи-

модействие топ-кварка, как и любого другого фермиона (f) СМ, с полем Хиггса представляет собой взаимодействие типа Юкавы вида $\Lambda_f = \bar{f}fH$ с кон-

стантой $\Lambda_f = \frac{m_f}{v/\sqrt{2}}$, где v – величина вакуумного

среднего порядка 230 ГэВ, задаваемого независимыми измерениями масс W - и Z -бозонов¹. Принимая во внимание, что масса t составляет примерно 171 ГэВ, получаем для Λ_t величину, близкую к единице. В настоящее время бозон Хиггса не открыт экспериментально. Соответственно, не понят и механизм спонтанного нарушения симметрии. Близость измеренного значения массы топ-кварка и величины вакуумного среднего $v/\sqrt{2}$ позволяет многим специалистам полагать, что именно изучение свойств и взаимодействий топ-кварка, или, как говорят, изучение сектора топ-кварка СМ, позволит пролить свет на проблему образования масс.

В дополнение, обратим внимание еще на одно обстоятельство, для которого большое значение массы топ-кварка оказалось крайне важным. Речь идет о суперсимметричных (SUSY) моделях, которые являются одними из вероятных кандидатов в реализуемую в природе модель за рамками СМ. В SUSY моделях существует не один, а несколько бозонов Хиггса. Например, в минимальном суперсимметричном расширении СМ, называемом MSSM, существуют пять бозонов Хиггса. Масса наиболее легкого нейтрального бозона Хиггса в них не должна превышать величину массы Z -бозона. Такие легкие массы бозона Хиггса уже исключены экспериментально. Эти ограничения закрывали бы многие популярные варианты SUSY моделей, в частности MSSM. Однако в СМ (как и в любой квантовой теории поля) частицы распространяются в окружении «облака» виртуальных частиц. (Некоторая аналогия существует с электромагнитным полем, порождаемым заряженной частицей.) Частица в результате взаимодействия с таким «облаком» изменяет свою наблюдаемую массу (так называемые петлевые вклады). В случае бозона Хиггса поправка в его массу за счет топ-кварка и его суперпартнера стоп-кварка пропорциональна массе топ-кварка в 4-ой степени (m_t^4). Поскольку масса топ-кварка велика, эта поправка оказывается большой и отодвигает границу допустимых масс легчайшего бозона Хиггса, которая вместо m_z становится примерно $\sim 135\text{--}140$ ГэВ. Эта область масс бозонов Хиггса не закрыта экспериментально, и, следовательно, SUSY модели также экспериментально не закрыты. Возвращаясь к измеренному значению массы топ-кварка, важно отметить небольшую величину ошибки этого измерения.

На рис. 4 показана область экспериментально допустимых значений масс топ-кварка и W -бозона с учетом точности их измерений. На рисунке показана зависимость массы W как функции массы топ-кварка при различных значениях массы Хиггса. Вид-

¹ С учетом связи массы W -бозона и хорошо известной константы Ферми (G_F) юкавская константа Λ_f может быть переписана в виде $\Lambda_f = 2^{3/4} G_F^{1/2} m_f$.

но, что кривая, соответствующая бозону Хиггса с небольшой массой порядка 100 ГэВ, ближе к области измеренных значений масс топ-кварка и W -бозона. Соответственно, существование такого бозона Хиггса более вероятно. Тяжелые же бозоны Хиггса с массой порядка 1ТэВ практически уже исключены.

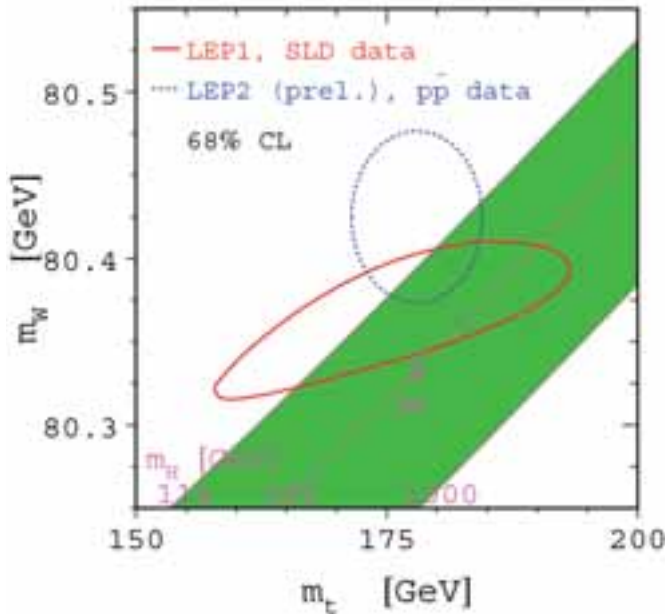


Рис. 4.

Отметим, что анализ зависимостей поправок к массам W - и Z -бозонов от массы топ-кварка позволил получить информацию о предпочтительных значениях массы топ-кварка еще до того, как он был открыт в прямых экспериментах на Теватроне. Это было сделано с использованием данных коллайдеров LEP и SLD, когда ошибка в измерении массы, например W -бозона (ΔM_W^{exp}), сравнивалась с теоретическим сдвигом массы, пропорциональным квадрату массы топ-кварка – $\Delta M_W^{thear}(M_{top})$. Требование того, чтобы теоретический сдвиг не превышал нескольких (типично трех) ошибок эксперимента $M_W^{thear}(M_{top}) < 3\Delta M_W^{exp}$, накладывало ограничения на возможные массы топ-кварка в интервале $\sim 20\%$ вокруг значения 178 ГэВ. Отметим еще раз, что этот анализ был сделан до прямого измерения массы топ-кварка и, как видно, оказался в прекрасном согласии с этими и последующими измерениями. Сам этот факт стал одним из подтверждений того, насколько серьезной квантовой теорией, а не просто эффективной моделью, является СМ.

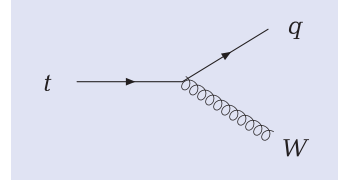
2.2 Ширина или время жизни топ-кварка

Выше отмечалось, что топ-кварк не стабилен и быстро распадается по различным модам. Топ-кварк был зарегистрирован по продуктам своего распада. Теперь мы рассмотрим подробнее нестабильность топ-кварка, которая характеризуется временем жизни или полной шириной распада².

Как и для любой другой нестабильной частицы или состояния в квантовой физике, время жизни и ширина распада обратно пропорциональны друг другу

$$\tau = \frac{1}{\Gamma} \text{ в системе единиц } \hbar=c=1, \text{ которая исполь-}$$

зуется в физике высоких энергий³. Согласно СМ, топ-кварк распадается практически только на W -бозон и b -кварк. Ширина этого распада легко рассчитывается в соответствии с диаграммой Фейнмана, соответствующей распаду на реальный b -кварк и W -бозон:



Если подставить в выражение для ширины топ-кварка измеренные значения масс t -кварка и W -бозона (171 и 80 ГэВ) и хорошо известное значение константы Ферми $G_F=10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$, то для полной ширины распада топ-кварка мы получим $\Gamma_{tot}^{top} \approx 1.6 \text{ ГэВ}$.

Что означает эта цифра, много это или мало? С одной стороны, ширина топ-кварка более чем в 100 раз меньше его массы, в этом смысле топ-кварк – узкий резонанс. Более того, он настолько узкий, что полная ширина не может быть прямо измерена в экспериментах на адронных коллайдерах. С другой стороны, ширина топ-кварка настолько велика, что его время жизни оказывается очень ма-

леньким, примерно $\tau_{top} = \frac{1}{\Gamma_{tot}} \approx 4 \times 10^{-25} \text{ сек}$. Это

время жизни топ-кварка столь мало, что даже если бы топ-кварк двигался со скоростью света $3 \times 10^{10} \text{ см/сек}$, он успел бы удалиться от точки своего рождения на расстояние $\sim 10^{-14} \text{ см}$, которое намного меньше разрешения любого детектора. Поэтому, как отмечалось выше, топ-кварк распадается практически в той же точке, где и рождается.

Очень важно сравнить время жизни топ-кварка с характерным временем образования адронов за счет сильных взаимодействий. За счет этих взаимодействий все остальные цветные кварки подхватывают из вакуума другие кварки и антикварки, образуя бесцветные связанные состояния – адроны. Только в случае с топ-кварком это не так, хотя он имеет цвет и испытывает те же сильные взаимодействия, что и другие кварки. Причина состоит в том, что типичное время образования бесцветных состояний оценивается как $\tau_{hadron} \approx 1/\Lambda_{QCD}$, где $\Lambda_{QCD} \approx 200 \text{ МэВ}$ – размерный параметр квантовой хромодинамики. Это время составляет $\tau_{hadron} \approx 3 \times 10^{-24} \text{ сек}$. Таким образом, время жизни топ-кварка τ_{top} примерно на порядок (в 10 раз)

² Обычно ширина резонанса измеряется на половине высоты распределения по инвариантной массе продуктов его распада. В случае топ-кварка неточности в измерении энергии струй и лептонов не позволяют извлечь ширину таким образом.

³ В системе единиц $\hbar=c$ полезно запомнить несколько приближенных соотношений, в частности, $1/\text{ГэВ} = 2 \times 10^{-14} \text{ см}$, где $\text{ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$. Как известно, 1 эВ – это энергия, которую приобретает частица с единичным зарядом (электрон) при прохождении разницы потенциалов в 1 Вольт.

меньше времени образования бесцветных связанных состояний. Это означает что топ-кварк успева-ет распаться задолго до того, как он смог бы обра-зовать адроны. Адроны образуют продукты распада топ-кварка, а вот адронов, содержащих топ-кварк, в природе быть не может. По этой причине изуче-ние топ-кварка позволяет более аккуратно исследо-вать структуру его взаимодействий, поскольку в них не участвуют эффекты образования адронов, или, как говорят, эффекты адронизации, которые вносили бы в рассмотрение существенную неопре-деленность. Это еще одна из причин, почему столь важно изучать сектор топ-кварка на коллайдерах, в особенности на коллайдере LHC. Здесь можно бу-дет получить наиболее чистую информацию о структуре взаимодействий и, соответственно, об-наружить какие-либо отклонения от предсказаний СМ, если таковые существуют в природе.

2.3 Электрический заряд, спин, цвет и сла-бый изотопический спин топ-кварка

В этом разделе речь пойдет о квантовых числах топ-кварка. Все эти квантовые числа задаются СМ и связаны с симметриями СМ по отношению к тем или иным преобразованиям.

1. Электрический заряд топ-кварка такой же, как и у двух других верхних кварков и у первого (u) и второго (c) поколений, и равен $+2/3$ в единицах электрического заряда протона. Пока точности совре-менных экспериментов не хватает для того, что-бы прямо измерить этот заряд. Это можно будет сделать в процессах рождения топ-кварка с излу-чением дополнительного фотона. Однако большие фоны, когда фотон излучается не непосредственно топ-кварком (это излучение пропорционально квадрату его заряда), а продуктами его распада, существенно затрудняют выделение событий нуж-ного класса. С другой стороны, если бы электри-ческий заряд топ-кварка отличался бы от $+2/3$, это привело бы к самым серьезным проблемам в струк-туре взаимодействий СМ, в частности, последова-тельное вычисление радиационных поправок в СМ с участием топ-кварка стало бы невозможным.

2. Топ-кварк – это фермион, и как и все другие фермионы (кварки и лептоны), он обладает спином $1/2$. Напомним, что спин, который очень условно можно понимать как внутренний момент импульса частицы, характеризует поведение частицы при преобразованиях Лоренца пространства и време-ни. В случае с топ-кварком не существует таких прямых способов измерения спина, как хорошо из-вестный опыт по измерению спина электрона по его поведению в магнитных полях. Однако, если бы спин топ-кварка был отличен от $1/2$, то с теорети-ческой точки зрения, это тоже привело бы к рассог-ласованию СМ, а экспериментально привело бы к другим угловым распределениям продуктов рас-пада топ-кварка и величине вероятности его обра-

зования. Тем не менее, вопрос об измерении спина топ-кварка пока остается открытым. На LHC и в дальнейшем на линейном электрон-позитронном коллайдере ILC можно будет пытаться измерить оп-ределяемый спином магнитный момент топ-кварка.

3. Как и все остальные кварки, топ-кварк участ-вует в сильных взаимодействиях за счет специфиче-ских сил, обусловленных переносчиками взаимо-действий – глюонами. Как и все остальные кварки, топ-кварк может находиться в трех различных сос-тояниях. Эти состояния принято характеризовать специальным квантовым числом – «цветом» (впер-вые понятие цвета было введено в работе [5]).

Заметим, что в отличие от кварков, имеющих три цвета, глюоны могут находиться в 8 цветовых сос-тояниях, и описывающие их волновые функции являются октетами по цвету. Цветовая структура легких кварков и глюонов хорошо установлена по многочисленным экспериментам с рождением струй на коллайдерах в (e^+, e^-) , p, \bar{p} -столкновениях. Топ-кварк, наблюдавшийся только в \bar{p} -столкнове-ниях на коллайдере Теватрон, не образует адронов и не дает непосредственно струй, как было отмече-но выше. Однако он распадается в b -кварк и W -бозон, поэтому, в силу закона сохранения цвета, он должен быть тем же цветным объектом, что и b -кварк, т.е. быть также триплетом по цвету. Кроме того, если бы цветовая структура топ-кварка была другой, например такой же, как у глюона, то вероят-ности его рождения существенно отличались бы от тех, что уже измерены на коллайдере Теватрон.

4. Слабый изотопический спин частицы харак-теризует поведение частицы при поворотах в еще одном, мысленном пространстве, или, как принято говорить, в пространстве внутренних симметрий. Это внутреннее пространство, о котором пойдет речь, называется пространством слабого изоспина. Оно было введено в СМ по аналогии с простран-ством изотопического спина, которое в свое время ввел Гейзенберг, предположив что протон и нейтрон являются двумя состояниями одной частицы с раз-ными значениями проекции нового спина-изоспина. Как известно, в природе не сохраняется лево-правая симметрия. Для описания этого в СМ для каждого кварка и лептона по-разному вводятся ле-вые и правые кварки и лептоны⁴. Левые компонен-ты кварков из одного поколения (u, d) так же, как и протон и нейтрон в теории Гейзенберга, объеди-няются в один объект из двух состояний, называе-мый дублетом. Таким образом, левые компоненты обладают слабым изотопическим спином $1/2$ с про-екцией на любую ось квантования в этом новом слабом изотопическом пространстве $\pm 1/2$, что за-писывается в виде столбцов из двух компонент, которые для кварков имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \quad (2)$$

⁴ Левые фермионы – это такие фермионы, у которых проекция спина на направление импульса их движения противоположна этому направлению, а у правых фермионов, наоборот, совпадает с этим направлением.

Правые же компоненты кварков и лептонов в SM предполагаются скалярами по слабому изотопическому спину, т.е. они не преобразуются при поворотах в этом пространстве, что обозначается соответственно

$$u_R, d_R, c_R, t_R, b_R. \quad (3)$$

Самое главное, это предположение SM, которое было сделано в соответствии с экспериментами по слабым распадам, восходящими к Энрико Ферми, что только левые фермионы взаимодействуют с заряженными W^\pm -бозонами. Именно этим в SM описывается нарушение лево-правой симметрии в природе. Такая структура слабых взаимодействий с W -бозоном, которая называется ($V-A$), блестящее подтверждается в экспериментах.

Возвращаясь к топ-кварку, поставим вопрос, каким образом можно экспериментально проверить свойства топ-кварка по отношению к слабому изотопическому спину. Для ответа на этот вопрос необходимо детально изучить структуру взаимодействий топ-кварка, т.е. то, каким образом он взаимодействует с электрослабыми W - и Z -бозонами. Изучение этих взаимодействий топ-кварка началось на коллайдере Tevatron и будет продолжено на LHC. При этом возникают много нерешенных вопросов, и LHC должен помочь найти ответ на некоторые из них. Самая главная проблема – имеет ли топ-кварк такие взаимодействия, как предсказывает SM, или существуют какие-то новые взаимодействия, приводящие к отклонению от предсказаний SM. Особую роль в поисках ответов на эти вопросы будут играть изучение на LHC деталей распада топ-кварка в парном рождении и детальное исследование процесса его одиночного рождения.

3. Матрица смешивания Кабиббо-Кобаяши-Москава и параметр V_{tb}

В любой квантовой теории состояния с одинаковыми квантовыми числами могут (должны) находиться в различных линейных комбинациях, или, другими словами, смешиваться, если нет каких-либо симметрий, запрещающих такое смешивание. При этом в природе наблюдаются такие комбинации смешанных состояний, которые являются состояниями с определенной массой. Именно так происходит и в кварковом секторе SM⁵.

Как мы уже обсуждали, левые компоненты верхних и нижних кварков образуют спиноры в пространстве слабого изотопического спина для всех трех поколений. В свое время по распадам заряженных K -мезонов Кабиббо заметил, что распады существенно лучше описываются, если d -кварк вступает во взаимодействие в линейной комбинации с s -кварком: $d_\Theta = d \cdot \cos\Theta + s \cdot \sin\Theta$, где $\cos\Theta = 0.9736 \pm 0.0010$. Смешивание Кабиббо помогло в описании распадов заряженных K -мезонов. Однако это привело к резкому противоречию с данными по распадам нейтральных K -мезонов за счет так называемых нейтральных токов. Такое взаимодействие приводит к распаду $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ с вероятностями, которые

не наблюдались экспериментально. Эта проблема была решена путем введения нового «верхнего» кварка второго поколения – c -кварка, который образует слабый дублет с s -кварком.

С открытием b -кварка – нижнего кварка третьего поколения, идеи смешивания были обобщены на случай трех поколений, что, в свою очередь, вызвало необходимость ввести шестой кварк (топ-кварк – верхний кварк третьего поколения). Коэффициенты в линейных комбинациях (смешивание) всех 6 кварков принято объединять в матрицу 3×3 . Эта матрица V содержит только элементы перехода между кварками с изменением заряда.

Элементы матрицы входят как константы во взаимодействия заряженных кварков с W -бозонами. Так, например, взаимодействие топ-кварка, b -кварка и W -бозона пропорционально матричному элементу V_{tb} . В рамках предположений SM о наличии только трех поколений кварков в природе матричный элемент V_{tb} оказывается близким к единице. Это следует из результатов измерений других элементов матрицы V и условия унитарности ($VV^\dagger = 1$, т.е. матрица переходит сама в себя при комплексном сопряжении, транспонировании и взятии обратной матрицы), которое накладывает условие связи между элементами. Полученное из этих условий значение V_{tb} примерно равно 0,999.

Однако такое значение получено в предположении справедливости SM с тремя поколениями. Если же от этого предположения отказаться, то значение V_{tb} оказывается практически неопределенным. Например, если существует четвертое поколение кварков, то условие унитарности соответствующей матрицы смешивания 4×4 практически не накладывает ограничений на величину V_{tb} . С этой точки зрения, важными являются прямые измерения параметра V_{tb} . Первое прямое измерение было сделано при наблюдении рождения одиночного топ-кварка на коллайдере Tevatron. Вероятность рождения одиночного топ-кварка прямо пропорциональна V_{tb}^2 , но в силу малой статистики первое измерение позволило получить лишь очень приблизительную информацию о значении V_{tb} ($V_{tb} > 0,68$).

На коллайдере LHC ожидается набрать примерно на три порядка больше событий с одиночным рождением топ-кварка. Это позволит прямо измерить параметр смешивания V_{tb} с точностью порядка 8–9%, что будет важнейшим результатом LHC, дающим возможность проверить экспериментально выполнение гипотезы SM о существовании только трех поколений кварков.

4. Перспективы изучения физики топ-кварка на LHC

Коллайдер LHC открывает широкие перспективы по исследованию физики топ-кварка. Задачи, связанные с топ-кварком, включают в себя:

- ◆ прецизионные измерения массы топ-кварка;
- ◆ измерение вероятностей (сечений) парного и одиночного рождений топ-кварков и сопос-

⁵ Недавние экспериментальные данные по осцилляции нейтрино показали, что смешивание существует и в лептонном секторе.

тавление результатов с теоретическими предсказаниями;

- ◆ измерение относительных вероятностей распада топ-кварка по разным модам и сравнение с предсказаниями СМ;
- ◆ измерение спиновых корреляций в парном и одиночном рождениях топ-кварка;
- ◆ измерение параметра V_{tb} и структуры взаимодействия топ-кварка с W -бозоном;
- ◆ измерение формы распределений кинематических переменных продуктов распада топ-кварка и сравнение с теоретическими расчетами;
- ◆ измерение константы связи Юкава в процессе совместного рождения бозона Хиггса и пары топ-кварков t, \bar{t}, H ;
- ◆ исследование отклонений от предсказаний СМ и поиск эффектов за рамками СМ, в частности:
 - ◇ поиск нейтральных s -канальных резонансов, распадающихся в пару $t\bar{t}$ -кварков, и поиск заряженных s -канальных резонансов, распадающихся в пару $t\bar{b}$ -кварков;
 - ◇ измерение аномальных констант связи в вершине W_{tb} в экспериментах с одиночным рождением топ-кварков;
 - ◇ поиск суперсимметричных партнеров топ- и b -кварков («стоп» и «сботтом»);
 - ◇ поиск нейтральных токов с изменением аромата кварков в процессах с участием топ-кварка.

Заключение

В короткой статье невозможно охватить все аспекты исследований на коллайдере LHC, связанные с одной из самых интересных частиц, – топ-кварком – самой тяжелой обнаруженной частицей СМ. Более подробно с физикой топ-кварка можно ознакомиться в обзорах [6], [7].

Следует отметить, что изучение топ-кварка и решение различных связанных с этим проблем требуют создания новых теоретических и экспериментальных методов. Со стороны теории, помимо выработки новых реалистичных моделей необходимо провести расчеты вероятностей сигнальных

процессов, разработать методы детального моделирования таких процессов, провести новые вычисления и моделирование сложных фоновых процессов с включением необходимых сильных и электрослабых петлевых поправок.

С точки зрения экспериментальных исследований, когда речь идет о выделении малых сигналов из многократно превосходящих их фонов, то тут нужны новые эффективные методы, такие как, например, развитые при поиске одиночного топ-кварка на коллайдере Tevatron многомерные кинематические методы типа метода оптимальных нейронных сетей, метода «деревьев решений» и других.

В заключение авторы выражают благодарность А.М. Зайцеву за предложение написать данную работу и многочисленным ее обсуждениям. Мы также выражаем благодарность В.А. Петрову за обсуждение различных аспектов данной темы и указание на теоретическое предсказание величины массы топ-кварка до его открытия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 08-02-91002-Ц).

Литература

1. А.К. Лиходед и В.А. Петров. Новости и проблемы фундаментальной физики. 1 (2007), 17.
2. F. Abe et al. [CDF Collaboration], Phys.Rev. Lett. 74 (1995) 2626 [arXiv:hep-ex/9503002].
3. S. Abachi et al. [D0 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 2632. [arXiv:hep-ex/9503003].
4. A.E. Faraggi. Phys. Lett. B274 (1992), 47.
5. N.N. Bogoliubov, B.V. Struminsky, and A.N. Tavkhelidze, Joint Institute for Nuclear Research Report, No. D-1968, 1965 (unpublished); M.Y. Han and Y. Nambu. Phys. Rev. 139 (1965), 1038; Y. Miyamoto. Prog. Theor. Phys. Suppl. Japan, Extra No, 187 (1965).
6. M. Beneke et al. arXiv:hep-ph/0003033, in "Standard model physics (and more) at the LHC" G. Altarelli and M.L. Mangano eds., Geneva, Switzerland: CERN (2000) 529 p.
7. G. Weiglein et al. [LHC/LC Study Group]. Physics interplay of the LHC and the ILC. Phys. Rept. 426 (2006), 47.

Технология Грид

В.В. Котляр
ГНЦ ИФВЭ

Введение

Технология Грид¹ в последнее время становится все более популярной и широко распространенной. Обычно термином «Грид» пользуются, определяя объединенные по какому-то признаку вычислительные ресурсы и ресурсы хранения данных. Привлекательность Грид базируется на широком распространении Internet, высокоскоростных сетевых технологиях и относительно недорогом аппаратном обеспечении. Эта технология используется для создания географически распределенной инфраструктуры, объединяющей различного рода ресурсы с организацией доступа к этим ресурсам в рамках выделенных групп – виртуальных организаций.

Концепция Грид была предложена авторами первого фундаментального труда по этой теме калифорнийскими учеными Карлом Кессельманом и Йеном Фостером [1]. В упрощенном виде первоначальная идея заключалась в том, что вычислительными ресурсами можно было бы воспользоваться так же, как обычные люди пользуются электросетью: как и бытовой прибор, вы включаете свой компьютер в розетку, запускаете свое задание, оно куда-то уходит, где-то выполняется, а вам только остается ждать ответ. Где выполняется задание, какие вычислительные ресурсы используются, вас, как пользователя вообще не должно волновать. В настоящее время различают несколько типов распределенных вычислительных систем. Во-первых, это относительно простые вычислительные системы, так называемые кластеры. Ресурсы кластера обычно используются одной рабочей группой и представляют собой несколько десятков компьютеров, объединенных с помощью локальной сети. Роль управления распределением ресурсов возлагается на управляющий компьютер, с установленным на нем специализированным программным обеспечением. Пользователь отправляет свое задание на управляющий компьютер, который ставит его в очередь на выполнение и ответ возвращает отправителю. В физике высоких энергий такие кластеры получили название «ферма». Во-вторых, это вычислительные системы корпоративного уровня, обслуживающие несколько групп, которые работают над разными проектами, например, в рамках одного института. В такой системе уже необходимо установление правил совместного использования ресурсов. Однако масштаб таких систем, как правило, небольшой, и для организации работы ресурсов и пользователей хватает обычных административных мер. Третий тип систем – это

глобальные системы, в которых участвуют отдельные организации со всего мира, которые предоставляют друг другу свои ресурсы по определенным правилам и с определенными протоколами взаимодействия. В этом случае административные методы управления не эффективны или вообще не применимы, и организационные вопросы и вопросы управления необходимо решать на уровне программного обеспечения. Вычислительные распределенные системы глобального типа и подразумеваются, когда говорят о Грид.

Появление Грид обусловлено следующими факторами:

- ◆ ростом требований к вычислительным мощностям при решении сложных научных, инженерных, производственных и бизнес-задач;
- ◆ широким распространением высокоскоростных сетей передачи данных, таких как Internet, и выделенных сетей для связи научных организаций;
- ◆ наличием локальных вычислительных ресурсов во многих организациях (кластеров персональных компьютеров или специализированных суперкомпьютеров);
- ◆ необходимостью объединения ресурсов различных организаций, работающих над одной задачей.

Таким образом, технологии Грид являются очередным шагом в развитии информационных технологий, позволяющим оптимально использовать распределенные ресурсы по всему миру с помощью современных высокоскоростных средств передачи данных (средств связи). Грид – это как бы отображение локальных вычислительных кластеров организаций во всемирную компьютерную сеть Internet.

Объединение вычислительных и информационных ресурсов является основой технологии Грид. Для этого используются сетевые технологии и специальное программное обеспечение промежуточного уровня (между базовой операционной системой и прикладным ПО), а также набор стандартизированных служб для обеспечения доступа к распределенным ресурсам – вычислительным кластерам и хранилищам данных.

В настоящее время реализуется множество проектов по созданию систем, основанных на технологии Грид. Но в основном развитие этой технологии происходит по трем направлениям: Грид вычислительные, Грид семантические – для оперирования данными из различных баз данных, и Грид для ин-

¹ Мы используем термин Грид тогда, когда речь идет о конкретной реализации, а термин грид для обозначения концептуально-технологической категории, также как это имеет место при использовании терминов Internet и internet.

тенсивной обработки данных. Задачей вычислительного направления является достижение максимальной скорости вычислений за счет глобального распределения этих вычислений между большим числом компьютеров (например, объединение суперкомпьютерных центров). Грид-системы второго направления – семантические – предоставляют инфраструктуру для выполнения вычислительных задач на основе распределенного мета-информационного окружения, позволяющего оперировать данными из разнотипных баз, различных форматов, представляя результат в форме, определяемой приложением. Целью третьего направления является обработка огромных объемов данных относительно несложными программами – одна задача на один процессор, что позволяет использовать в грид-инфраструктуре вычислительные кластеры из персональных компьютеров. Сложность последнего направления – доставка данных для обработки и пересылка результатов.

Одним из крупнейших проектов, целью которого является создание грид-системы для обработки научных данных, является проект EGEE (Enabling Grids for E-sciencE). Этот проект выполняется под патронажем Европейского Союза (www.eu-egee.org), и участниками этого проекта являются более 140 образовательных и научных организаций из 45 стран мира, включая Россию.

Проект EGEE нацелен на применение в различных отраслях научной деятельности: физике высоких энергий, биомедицине, астрофизике, науке о земле, геофизике, исследованиях в области ядерного синтеза, вычислительной химии, финансов и мультимедиа. Ведутся работы по расширению российской инфраструктуры Грид (RDIG, www.egee-rdig.ru).

Несмотря на взаимодействие и сотрудничество многих грид-проектов, конкретные их реализации все еще сильно отличаются друг от друга. И только в последнее время наметилась тенденция стандартизации большинства компонент, что означает следующий важный шаг в развитии и формировании технологии Грид. Выделяют три основных требования к Грид: он должен координировать использование ресурсов при отсутствии централизованного управления этими ресурсами; должен применять стандартные, открытые, универсальные протоколы и интерфейсы; должен обеспечивать высококачественное обслуживание пользователей. В настоящее время ни в одной из существующих грид-систем не обеспечивается выполнение всех этих требований в полной мере. Пока Грид – это еще «незавершенный», развивающийся продукт, разрабатываемый во всем мире сотнями исследователей и специалистов по программному обеспечению.

Характеристики Грид

Грид – это согласованная, открытая и стандартизованная среда, обеспечивающая гибкое, безопасное, скоординированное, раздельное использование разнообразных компьютерных ресурсов вирту-

альными организациями. Основополагающими характеристиками Грид являются следующие:

- ◆ Сотрудничество – это аспект Грид, подразумевающий справедливое разделение ресурсов методами распределенного компьютеринга.
- ◆ Объединение, когда каждый Грид больше суммы всех своих частей: Грид объединяет в одно целое много ресурсов, и поэтому дает нам объединение мощностей индивидуальных ресурсов в виртуальный ресурс с мощностями более высокого уровня, при этом возможности индивидуальных ресурсов сохраняются.
- ◆ Грид-службы представляются определенным интерфейсом, который скрывает сложность нижележащих ресурсов. По-другому это называется виртуализацией.
- ◆ Грид предоставляет службы, следуя принципам ориентированной на службы архитектуры.
- ◆ Грид состоит из «гетерогенных вычислительных ресурсов», т.е. имеется многообразие различных компонент аппаратных устройств и программного обеспечения с различными характеристиками латентности и эффективности.
- ◆ Ресурсы в Грид находятся в собственности разных владельцев, и одним из требований Грид является использование механизмов распределенного (децентрализованного) управления.
- ◆ Для создания общей распределенной инфраструктуры, обеспечивающей выполнение задач пользователя и предоставление утилит² пользовательского уровня, необходима стандартизация интерфейсов взаимодействующих друг с другом служб.
- ◆ Грид должен разрешать обращаться к вычислительной инфраструктуре и тем пользователям, которые не обладают глубокими знаниями базовой архитектуры или сетевой топологии.
- ◆ Грид должен быть «динамически реконфигурируемым» и легко масштабируемым.
- ◆ У авторизованных пользователей и приложений должен быть ограниченный набор операций, которые они могут выполнять с помощью служб. Безопасность Грид – один из первостепенных моментов, с которым реальные пользователи имеют дело.
- ◆ Приложения также должны считаться частью Грид, и вся среда (аппаратные средства, промежуточное программное обеспечение и приложения) должна управляться данными.

Хотя сама технология Грид не привязана к конкретным ресурсам, наиболее часто реализации систем Грид обеспечивают работу с ограниченными типами ресурсов: вычислительными ресурсами (отдельные компьютеры, кластеры); ресурсами хранения данных (диски и дисковые массивы, ленты, системы массового хранения данных); сетевыми ресурсами; программным обеспечением (какое-либо специализированное ПО).

² Утилиты - набор программ, которые выполняют некоторые функции.

Следует отметить разницу между технологией Грид и реализациями систем Грид. Сама технология включает в себя лишь наиболее общие и универсальные аспекты, одинаковые для любой системы. Используя эту технологию и наполняя ее конкретным содержанием, можно реализовать ту или иную грид-систему, предназначенную для определенного класса прикладных задач. Также следует понимать разницу между технологией Грид и технологией параллельных вычислений. В рамках конкретной грид-системы можно, конечно, организовать параллельные вычисления, поскольку ее можно рассматривать как мета-компьютер, имеющий множество вычислительных процессоров. Однако сама технология Грид не является технологией параллельных вычислений, и в ее задачи входит лишь координация использования ресурсов.

Структура глобального проекта Грид

Архитектура Грид определяет системные компоненты, цели и функции этих компонент и отражает способы их взаимодействия друг с другом. Эта архитектура представляет собой совокупность взаимодействующих между собой протоколов, сервисов и интерфейсов, определяющих механизмы взаимодействия пользователей с грид-системой. В целом эта архитектура задает требования для основных компонент технологии Грид, не представляя строгий набор спецификаций, оставляя возможность их развития в рамках принятой концепции.

Общая структура Грид описывается в виде набора уровней или слоев протоколов. Каждый уровень предназначен для решения узкого круга задач и используется для предоставления услуг для более высоких уровней. Самые верхние уровни ближе всего к пользователю и работают с более абстрактными объектами, в то время как самые нижние уровни сильно зависят от физической организации ресурсов Грид. Следует отметить сходство данной структуры со структурой сетевой модели OSI (Open System Interconnection Reference Model; модель взаимодействия открытых систем) – абстрактной модели для сетевых коммуникаций и разработки сетевых протоколов.

На рис. 1 представлено сравнение протоколов Грид с моделью протоколов OSI.



Рис. 1. Стек грид-протоколов.

Стек грид-протоколов³ включает в себя:

- ◆ Аппаратный уровень (Grid Fabric Layer) сос-

тавляет протоколы, по которым соответствующие службы непосредственно работают с локальными ресурсами.

- ◆ Уровень связи (Connectivity Layer) составляет протоколы, обеспечивающие обмен данными между компонентами базового уровня (коммуникационные протоколы) и протоколы аутентификации.
- ◆ Ресурсный уровень (Resource Layer) – это основа многоуровневой системы, протоколы этого уровня взаимодействуют с ресурсами, используя унифицированный интерфейс и не различая архитектурных особенностей конкретного ресурса.
- ◆ Коллективный уровень (Collective Layer) отвечает за глобальную координацию использования имеющихся ресурсов.

Прикладной уровень (Application Layer) описывает пользовательские приложения, работающие в среде виртуальной организации и на основе сервисов нижележащих уровней.

Рассмотрим каждый уровень по отдельности.

Аппаратный уровень (базовый) обеспечивает доступ к распределенным ресурсам, необходимый вышестоящим протоколам. Ресурсы могут быть разнообразными, но в основном это: вычислительные ресурсы (вычислительные кластеры или отдельные персональные компьютеры); ресурсы памяти (системы массового хранения данных или просто жесткие диски рабочих станций), характеризующиеся объемом ресурса; информационные ресурсы и каталоги, хранящие информацию о представлении метаданных⁴ и информацию о других ресурсах грид-системы; сетевые ресурсы, которые являются связующим звеном между распределенными ресурсами системы Грид и характеризуются скоростью передачи данных. Следует отметить, что ресурс может быть как логическим (распределенная файловая система), так и физическим (кластер компьютеров). Данный уровень представляет собой набор интерфейсов для управления локальными ресурсами.

Связывающий уровень определяет протоколы коммуникации и протоколы аутентификации, которые обеспечивают обмен данными между компонентами аппаратного уровня. Основные протоколы этого уровня – коммуникационные, обеспечивающие надежный транспорт и маршрутизацию сообщений, а также присвоение имен объектам сети. На них основываются протоколы аутентификации, предоставляющие криптографические механизмы для идентификации и проверки подлинности пользователей и ресурсов. Также сюда относится инфраструктура поддержки, которая включает централизованную выдачу сертификатов, управление сертификатами и ключами и т.д.

Ресурсный уровень, используя протоколы уровня связи, проводит согласование политик безопасности использования ресурса, инициализацию

³ Стек грид-протоколов (protocol stack) - это комбинация протоколов. Каждый уровень определяет различные протоколы для управления функциями грид-системы или ее подсистемами. Каждому уровню присущ свой набор правил.

⁴ Метаданные, в общем случае, - это данные, характеризующие или поясняющие другие данные.

и мониторинг ресурса, управление, учет и контроль над ресурсом. Протоколы этого уровня опираются на функции базового уровня для доступа и контроля над локальными ресурсами, для чего используется унифицированный интерфейс, не различающий архитектурные особенности конкретного ресурса. Существуют два основных класса протоколов ресурсного уровня:

- ◆ Информационные протоколы, получающие информацию о структуре и состоянии ресурса, о его конфигурации, загрузке, политике предоставления ресурсов.
- ◆ Протоколы управления, которые обеспечивают согласованный доступ к разделяемым ресурсам и определяют требования и допустимые операции по отношению к ресурсу. Протоколы управления обязаны проверять соответствие запрашиваемых операций политике разделения ресурса. Они могут поддерживать функции мониторинга статуса и функции управления операциями.

Коллективный уровень отвечает за интеграцию различных наборов ресурсов в глобальном масштабе. В этом уровне различают специфические (для отдельных приложений) и общие протоколы. Специальные протоколы создаются для отдельных приложений Грид (например, протокол архивации распределенных данных). К общим протоколам относятся протоколы авторизации сообществ⁵, протоколы обнаружения и выделения ресурсов, системы мониторинга. В протоколах коллективного уровня реализуются следующие функции и сервисы:

- ◆ Сервисы координации поддерживают обмен информацией в потенциально большом сообществе пользователей.
- ◆ Службы авторизации сообществ способствуют улучшению правил доступа к распределенным ресурсам и определяют возможности использования ресурсов грид-системы. Эти службы позволяют формировать политики доступа на основе информации о ресурсах, протоколах их управления и протоколах безопасности связывающего уровня.
- ◆ Сервисы совместного выделения, планирования и распределения ресурсов обеспечивают выделение ресурсов для определенной цели, а также планирование выполняемых на ресурсах задач.
- ◆ Службы каталогов позволяют пользователям находить свободные ресурсы, выполнять запросы по именам и различным атрибутам ресурсов (например, таким как тип ресурса и его загрузка).
- ◆ Функции мониторинга и диагностики отслеживают аварии, атаки, перегрузку.
- ◆ Сервисы управления рабочей загрузкой применяются для описания и управления многоэ-

тапными, асинхронными, многокомпонентными заданиями.

- ◆ Сервисы репликации данных координируют использование ресурсов памяти в рамках различных виртуальных организаций, обеспечивая повышение скорости доступа к данным в соответствии с выбранными метриками (время доступа, надежность, стоимость и т.п.).
- ◆ Службы учета и оплаты обеспечивают сбор информации об использовании ресурсов для контроля за обращениями пользователей.

Прикладной уровень – последний и самый близкий к пользователю уровень стека протоколов грид-системы. Он включает в себя пользовательские приложения, которые исполняются в среде объединенных ресурсов. В процессе исполнения приложения используют протоколы более низких уровней, обеспечивающие доступ к необходимым службам, а также прикладные программные интерфейсы (Application Programming Interface – API), соответствующие данным протоколам. Для облегчения работы с протоколами прикладного уровня пользователям предоставляются наборы инструментов и средств для разработки программного обеспечения (Software Development Kit – SDK⁶). Следует отметить, что приложения могут вызываться через достаточно сложные программные оболочки и библиотеки. Эти оболочки, в свою очередь, сами могут определять протоколы, сервисы и прикладные программные интерфейсы, однако подобные надстройки не относятся к фундаментальным протоколам и сервисам, которые определяют структуру грид-систем.

Виртуальная организация – основная организационная единица

Одним из центральных понятий Грид является понятие виртуальной организации. Виртуальная организация (ВО) представляет собой динамическое сообщество людей, которое использует ресурсы Грид в соответствии с правилами, согласованными между ним и собственниками ресурсных центров. Данный набор правил регулирует доступ ко всем типам ресурсов, включая компьютеры, программное обеспечение и данные. Непосредственное управление внутри виртуальной организации осуществляется ее администратором (менеджером), ответственным за ведение записей о статусе членов ВО в базе данных ВО, т.е. осуществляющим включение (или исключение) пользователей в число членов ВО, устанавливающим их полномочия и обновляющим информацию о пользователях. Технически поддержка базы данных о структуре и составе ВО осуществляется на основе сервиса управления виртуальными организациями, который обеспечивает детальную авторизацию пользователей грид-системы.

⁵ Протоколы авторизации сообществ способствуют улучшению правил доступа к разделяемым ресурсам, а также определяют возможности использования ресурсов сообщества. Подобные протоколы позволяют формировать политики на основе информации о ресурсах, протоколах управления ресурсами и протоколах безопасности связывающего уровня.

⁶ SDK обозначает комплект автоматически связываемых с приложением или вызываемых из него программ, обеспечивающих реализацию определённых функций. Обычно SDK реализует какой-нибудь прикладной программный интерфейс.

Обычно в виртуальные организации объединяются научные сотрудники из различных институтов. ВО помогает организовывать временные межинститутские и международные коллаборации исследователей для решения крупных проблем. При этом, благодаря технологиям Грид, они получают доступ к общим ресурсам и могут работать с единым программным обеспечением, что обеспечивает достоверность и сравнимость результатов, полученных разными группами исследователей.

В настоящее время существует множество ВО в различных грид-системах. Примерами виртуальных организаций, действующих в рамках проекта LCG2 (грид-система для обработки данных с ускорителя LHC, строящегося в CERN), являются ВО экспериментов, которые планируется проводить на этом ускорителе: ATLAS, CMS, Alice, LHCb.

Пользователь в Грид

Процедура входа пользователя в грид-систему довольно сложна. Это обусловлено многими факторами, но главной проблемой является решение вопросов безопасности. Путем решения этой проблемы для Грид является использование стандартных средств безопасности – аутентификации и авторизации. Для виртуальных организаций средства аутентификации должны обладать следующими свойствами:

- ◆ Системой единого входа. Пользователь аутентифицируется и регистрируется только один раз в начале работы, получая тем самым доступ ко всем разрешенным ресурсам базового уровня системы Грид.
- ◆ Делегированием прав. Пользователь должен иметь возможность запуска задач от своего имени, и таким образом получать доступ ко всем ресурсам, на которых авторизован пользователь. В свою очередь запущенные задачи могут делегировать часть своих прав другим программам.
- ◆ Системой доверительных отношений к пользователю. Пользователь должен иметь возможность работы с ресурсами нескольких поставщиков, и при конфигурации защищенной среды пользователя система безопасности не должна требовать дополнительного взаимодействия поставщиков ресурсов друг с другом.

Обычно для входа в систему Грид пользователю необходимо: быть зарегистрированным пользователем вычислительных ресурсов в своей организации; иметь персональный цифровой сертификат, подписанный региональным центром сертификации Грид; быть зарегистрированным пользователем в какой-нибудь виртуальной организации.

Наличие цифрового сертификата является обязательным шагом для получения доступа к системе

Грид. Цифровой сертификат аналогичен цифровой подписи и однозначно идентифицирует пользователя. Для его получения пользователю необходимо обратиться в региональный центр сертификации Грид. Обычно такие центры существуют в рамках организаций или в рамках федераций, участников грид-системы. Например, Российский центр сертификации для LCG/EGEE Грид в настоящий момент находится в научном центре «Курчатовский институт» (ca.grid.kiae.ru/RDIG). При получении цифрового сертификата пользователь выполняет следующие шаги:

- ◆ создает на компьютере пользователя закрытый ключ⁷ и запрос на сертификат;
- ◆ отправляет запрос на сертификат в центр сертификации;
- ◆ получает из центра сертификации подписанный открытый ключ⁸ (после процедуры проверки личности пользователя по паспорту или по иному документу).

После получения цифрового сертификата пользователь должен пройти процедуру регистрации в какой-нибудь виртуальной организации. Это может быть локальная, национальная или международная виртуальная организация, в зависимости от области работы пользователя. Возможно участие в нескольких виртуальных организациях одновременно.

Доступ к самой системе Грид может производиться из любой точки с установленного там промежуточного программного обеспечения пользовательского интерфейса грид-инфраструктуры. С него пользователь должен иметь возможность полноценно работать с грид-системой: запускать новые задания, иметь возможность управления уже запущенными заданиями, получать результаты работы завершенных заданий, должен иметь доступ к работе с ресурсами памяти (на жестких дисках или на магнитных лентах). Наиболее стандартным в настоящий момент является интерфейс работы с командной строки, позволяющий выполнять все эти действия, но сейчас возникла тенденция к появлению веб-ориентированных интерфейсов, позволяющих работать с грид-системой прямо из веб-браузера, используя сеть Internet.

Архитектура грид-систем

Рассмотрим основные функциональные подсистемы промежуточного программного обеспечения (ППО), в задачи которого входит обеспечение полноценного и безопасного функционирования грид-системы. Число подсистем зависит от сложности системы Грид, более простые системы могут иметь только часть представленных подсистем или использовать их упрощенный вариант с ограничением функциональности. За основу для описания архитектуры выберем ППО gLite, которое является базо-

⁷ Хранящийся только у владельца секретный ключ асимметричной пары, используемый для целей расшифрования и цифрового подписания информации.

⁸ Ключ асимметричной пары, используемый для зашифрования и сличения цифровых подписей. Не нуждается в защите и сохранении в тайне, может быть широко распространён. Знание открытого ключа не может помочь взломщику в вычислении закрытого.

вым ППО одной из крупнейших в настоящее время грид-инфраструктур – EGEE.

Любая система Грид включает в себя следующие базовые структурные компоненты (рис. 2): совокупность компьютеров с установленными на них пользовательскими интерфейсами; совокупность ресурсных центров, включающих в себя вычислительные ресурсы и ресурсы хранения данных; совокупность базовых грид-сервисов.

Пользовательский интерфейс (User Interface, UI) предназначен для обеспечения доступа пользователя к ресурсам Грид. Через него пользователь осуществляет следующие действия:

- ◆ осуществляет запуск задач на выполнение;
- ◆ контролирует процесс выполнения задания;
- ◆ получает результаты выполнения задания;
- ◆ пересылает данные с одного ресурса хранения данных на другой.

Ресурсный центр включает в себя два типа ресурсов:

- ◆ Вычислительные ресурсы, на которых производится само выполнение заданий; служба, представляющая вычислительный ресурс в Грид, называется «Вычислительный элемент» (Computing Element, CE).
- ◆ Ресурсы хранения данных (Storage Element, SE), которые обеспечивают хранение и транспортировку данных между аналогичными ресурсами или данным ресурсом и пользователем в среде Грид.

Базовые грид-сервисы обеспечивают работу всей грид-системы и подразделяются на следующие подсистемы:

- ◆ Подсистема управления загрузкой (Workload Management System, WMS). Она управляет заданиями, запущенными пользователями, осуществляет поиск ресурсов, запрошенных заданием, и планирует выполнение задания на подходящем вычислительном кластере. Также она следит за статусом выполнения задания и позволяет пользователю получить результат после его выполнения. Центральным элементом в этой системе является служба распределения заданий (Resource Broker, RB).
- ◆ Система управления данными (Data Management System, DMS). Обеспечивает доступ к системам хранения различных видов, существующих в ресурсных центрах. Состоит из службы файлового каталога и службы каталога метаданных.
- ◆ Подсистема информационного обслуживания и мониторинга грид-системы (Information System, IS). Решает задачу сбора и уп-

равления данными о состоянии грид-инфраструктуры.

- ◆ Подсистема безопасности и контроля прав доступа (Grid Security Infrastructure, GSI). Состоит из службы выдачи и поддержки сертификатов (Certificate Authority, CA), службы регистрации виртуальных организаций и пользователей, службы управления виртуальными организациями и выдачи прокси-сертификатов (Virtual Organization Membership Service, VOMS), службы продления прокси-сертификата (MyProxy Service, MP). В задачи этой подсистемы входит обеспечение аутентификации и авторизации между различными компонентами грид-системы.
- ◆ Подсистема протоколирования (Logging and Bookkeeping, LB), отслеживающая процесс выполнения заданий.
- ◆ Подсистема учета (Accounting Subsystem, AS), предназначенная для учета использования вычислительных ресурсов.

По причине использования одного ППО распределенное географически множество ресурсов представляется для пользователей в качестве единого ресурса. Промежуточное ПО играет базовую роль в Грид, например, как роль операционной системы на персональном компьютере.

Грид-технологии в проекте EGEE

Проект EGEE (Enabling Grid for E-sciencE – развертывание грид-систем для развития е-науки) является одной из глобальных грид-систем в настоящее время (41000 процессоров и 5 ПБ массивов данных), разрабатываемых для решения крупных научных задач. Главной целью данного проекта является создание глобальной грид-инфраструктуры, с помощью которой ученые получают доступ к большим географически распределенным ресурсам вычислительной техники вне зависимости от своего местонахождения. По аналогии с похожими бизнес-

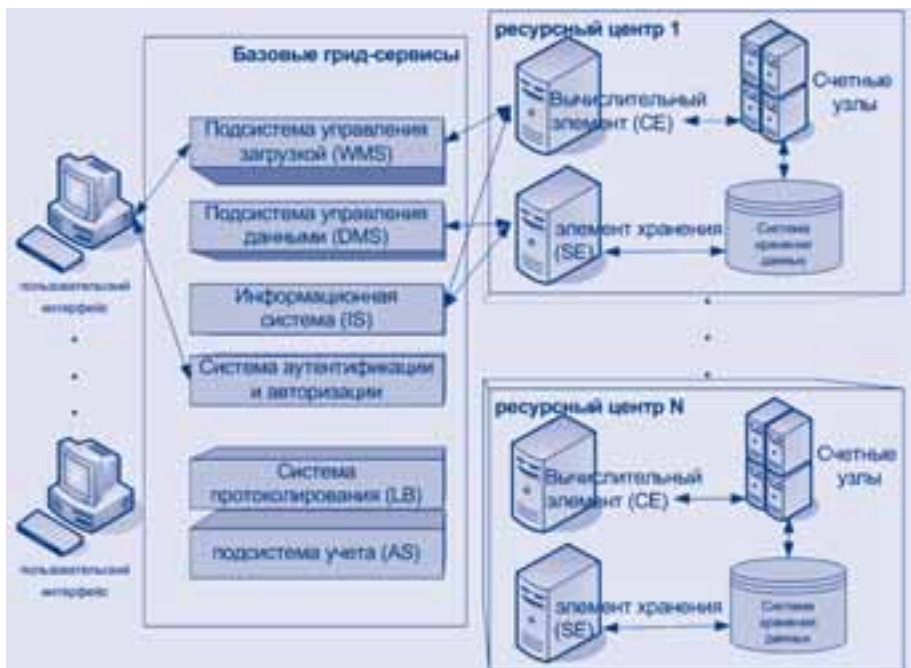


Рис. 2. Схема структуры грид-системы.

приложениями (е-бизнес в сети Internet) исследования с использованием распределенных систем назвали «е-наукой».

Задачами проекта EGEE являются:

- ◆ развертывание однородной, надежной, масштабируемой грид-системы и соответствующей инфраструктуры;
- ◆ увеличение ресурсов вычислительной техники и хранения данных, объединяемых этой грид-инфраструктурой;
- ◆ совершенствование промежуточного программного обеспечения;
- ◆ привлечение новых пользователей как из различных научных, так и из других областей;
- ◆ обеспечение высокого уровня их обучения и поддержки при использовании грид-инфраструктуры проекта.

Данный проект финансируется Европейским сообществом и странами-участницами и разбит на несколько этапов. Сейчас протекает второй двухлетний этап – EGEE II, цель которого создать полнофункциональную, постоянно работающую глобальную грид-инфраструктуру «производственного» уровня, взаимодействующую с другими грид-структурами во всем мире. В консорциум EGEE-II входят свыше 140 участников из 45 стран, которые объединены в 12 федераций и представляют большинство европейских грид-проектов, а также проекты в США и Азии. Базовой организацией для всего проекта является организация CERN (Европейский центр ядерных исследований).

В EGEE-II выделяют следующие направления работ, называемые активностями: обеспечение развития грид-сообщества (Networking Activities, NA), функционирование служб грид-инфраструктуры (Service Activities, SA), совместные исследования участников проекта (Joint Research Activities, JRA). Данные направления, в свою очередь, подразделяются на подактивности. Первое направление (NA) включает в себя: NA1 – управление проектом; NA2 – распространение знаний и опыта использования грид-технологий; NA3 – обучение и подготовка пользователей Грид; NA4 – поиск и взаимодействие с прикладными областями, в которых может с успехом использоваться Грид, и их поддержка в грид-инфраструктуре; NA5 – выработка общей политики проекта и вопросы международного сотрудничества. Для второго направления выделяют следующие виды служб: SA1 – поддержка, эксплуатация и управление грид-инфраструктурой; SA2 – обеспечение сетевыми ресурсами; SA3 – интеграция, тестирование и сертификация ППО. Для совместных исследований также выделяют подуровни: JRA1 – развитие программного обеспечения (разработка и поддержка gLite); JRA2 – обеспечение качества работы грид-инфраструктуры, в частности, общая координация мер безопасности.

Очень большое внимание в текущей фазе проекта уделяется поддержке приложений и распространению информации о проекте для быстрого увеличения числа пользователей грид-системы по сравнению с предыдущей фазой проекта. Особое

внимание уделяется привлечению приложений из производственных областей. Для этого была разработана специальная программа работы EGEE с бизнес-партнерами, а также организован Индустриальный форум – регулярные мероприятия, на которых представители индустрии могут ознакомиться с возможностями Грид и наоборот. Важным каналом взаимодействия с индустрией является взаимодействие с проектом CERN Openlab, объединяющим ЦЕРН и ведущие IT-фирмы.

Области применения EGEE

Первоначально грид-инфраструктура EGEE разрабатывалась для физики высоких энергий и биомедицинских наук. Ко второй фазе проект стал поддерживать гораздо более широкий диапазон областей исследований. Теперь в него входят, например, такие области применения, как разработка мультимедийных средств, астрофизика, археология, вычислительная химия. Рассмотрим более подробно каждую из них:

Физика высоких энергий (ФВЭ).

ФВЭ была одной из двух главных областей применения, для которых разрабатывался EGEE, и остается одним из крупнейших пользователей инфраструктуры EGEE. Отсюда получают знания и опыт, исключительно важные для обеспечения высокого уровня сервисов, ориентированных на пользователей.

В EGEE ФВЭ сформирована из основных экспериментов на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider, LHC), строящемся в CERN:

- ◆ Два универсальных детектора ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) и CMS (Compact Muon Solenoid) предназначены для исследований взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Одной из основных задач является выяснение механизма нарушения калибровочной симметрии электрослабых взаимодействий (поиск хиггсовского бозона, или другими словами, выяснение природы происхождения массы).
- ◆ LHCb (Large Hadron Collider beauty) – эксперимент по изучению нарушения комбинированной симметрии (заряда и четности). Этот эффект может являться причиной неравновесия между веществом и антивеществом при рождении Вселенной.
- ◆ ALICE (A Large Ion Collider Experiment) – эксперимент по изучению физики сильных взаимодействий при сверхвысоких плотностях, где ожидается образование нового состояния – кварк-глюонной плазмы.

Ожидается, что после запуска коллайдера в 2008 г. будет производиться около 15 петабайтов данных в год. Управление этими данными и их обработка будут вестись в инфраструктуре EGEE. Инфраструктуру EGEE используют и другие международные эксперименты в ФВЭ. Среди них эксперименты на ускорителях в США BaBar (B and B-bar); CDF (Collider Detector at Fermilab – коллайдерный детектор в Фермилаб) и DØ; эксперименты ZEUS и H1 на коллайдере HERA в лаборатории DESY в Германии.

Биомедицинские науки.

Биомедицина – одна из основных прикладных областей, которая была включена в проект EGEE с самого начала. Приложения в данной области подразделяются на три направления: визуализация медицинских данных, биоинформатика, поиск новых лекарств. В инфраструктуре EGEE развернуты или разворачиваются 23 отдельных приложения (Clinical Decision Support System, Grid Protein Sequence Analysis, Drug Discovery, Pharmacokinetics и др.). Среди биомедицинских приложений особо следует упомянуть WISDOM (Wide In Silico Docking On Malaria). Приложение основано на возможности вычислять вероятность того, что новое потенциальное лекарство войдет в прямой контакт с активной частью одного из паразитных белков малярии. В EGEE сеансе было исследовано свыше 46 миллионов кандидатов на новое лекарство и одновременно использовались 1000 вычислительных систем в 15 странах (на одном персональном компьютере для этого потребовалось бы 80 лет).

Астрофизические приложения.

Основные виртуальные организации в этой области – Planck (обработка данных со спутника Plank) и MAGIC (обработка данных с телескопа MAGIC). Они занимаются общими проблемами вычислений, отличающимися огромными масштабами поиска, сбора, хранения и моделирования данных. В 2008 г. будет запущен спутник Planck Европейского космического агентства (European Space Agency ESA), задачей которого станет картографирование неба – необычайно масштабное как геометрически, так и по ширине диапазона частот. Высочайшим также будет и уровень точности, устойчивости и чувствительности измерений. Приложение MAGIC моделирует ливни частиц в атмосфере, порожденные высокоэнергетичными космическими лучами. Это моделирование необходимо для анализа данных с телескопа MAGIC (принцип работы которого основан на использовании черенковского излучения в атмосфере), находящегося на Канарских островах, чтобы можно было изучать происхождение и свойства высокоэнергетичных гамма-лучей. Планируется ввод второго аналогичного телескопа, что существенно увеличит поток данных, обрабатываемых в грид-инфраструктуре EGEE.

Геофизика и наука о Земле.

В EGEE поддерживаются четыре специализированных приложения в области гидрологии, климатологии, наблюдений за поверхностью земли и физики твердой земли. Созданы две виртуальные организации: для академических учреждений – ESR (Earth Science Research – исследования в области наук о Земле) и EGEODE (Expanding GEOsciences on Demand – развитие наук о Земле по требованию) – первое приложение EGEE промышленного уровня. Инициатором этого приложения была частная компания CGG (Compagnie Generale de Geophysique). Эти приложения используются для анализа наблюдений за поверхностью земли (анализ характеристик озонового слоя), моделирования землетрясений в сложных трехмерных геологических моделях,

изучения проникновения морской воды в прибрежный водоносный слой в бассейне Средиземного моря, моделирование климатических условий на базе экспериментальных данных, обработка сейсмических данных и исследование состава слоев земной коры, предсказания извержений вулканов.

Ядерный синтез.

ITER (the International Thermonuclear Experimental Reactor – Международный экспериментальный термоядерный реактор) – это международный проект исследований и разработок, целью которого является доказательство научной и технической возможности использования энергии термоядерного синтеза. Реактор будет построен в г. Кадарш (Cadarche) во Франции к 2016 г. с предполагаемой мощностью порядка 500 мегаватт. Сейчас в структуре EGEE работают часть приложений для исследований ядерного синтеза: расчет траектории микроволнового пучка в плазме; расчет явления кинетического переноса посредством отслеживания орбит большого числа независимых частиц, которые претерпевают столкновения с фоновой плазмой, характеризующейся температурой, плотностью и электрическим полем; приложения для оптимизации установки постоянного режима для магнитного удержания плазмы (стелларатора), где происходит термоядерный синтез.

Вычислительная химия.

Главным пользователем грид-технологий в области вычислительной химии является молекулярный симулятор GEMS (Grid Enabled Molecular Simulator – молекулярный симулятор на основе грид-технологии). В грид-инфраструктуре успешно размещены и используются в режиме нормальной эксплуатации несколько приложений, решающих следующие задачи: расчет наблюдаемых величин в химических реакциях (ABCtraj); моделирование молекулярной динамики сложных систем (DI-Poly); расчет электронной структуры молекул, молекулярных агрегатов, жидкостей и твердых тел.

Финансы и мультимедиа.

В 2007 г. эти две области приложений в инфраструктуре EGEE были одними из самых новых. Мультимедийное приложение тестируется на системах отладки в виртуальной грид-лаборатории GILDA (Grid Infn Laboratory Dissemination Activities). Работа над финансовыми приложениями включает в себя сотрудничество с Международным центром теоретической физики им. Абдуса Салама, развивающего грид-инфраструктуру для финансово-экономических исследований в рамках проекта Egrid.

Участие России в EGEE – консорциум РДИГ

Для обеспечения полномасштабного участия России в осуществлении проектов EGEE/LCG в сентябре 2003 г. был образован Российский консорциум РДИГ (Российский Грид для интенсивных операций с данными – Russian Data Intensive Grid). Меморандум о его создании был подписан руководителями восьми крупных институтов: Института физики высоких энергий (Протвино), Института математических проблем биологии (Пушино), Объ-

диненного института ядерных исследований (Дубна), НИИ ядерной физики МГУ (Москва), Института теоретической и экспериментальной физики (Москва), Института прикладной математики им. М.В. Келдыша (Москва), Петербургского института ядерной физики (Санкт-Петербург) и РНЦ «Курчатовский институт» (Москва). Консорциум РДИГ входит в структуру EGEE в качестве региональной федерации «Россия», и целями его является создание действующей грид-инфраструктуры в России:

- ◆ наращивание вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных российского сегмента грид-среды;
- ◆ обеспечение надежной и быстрой сетевой инфраструктуры, в том числе с выходом на европейских партнеров проекта;
- ◆ обеспечение работы базовых сервисов Грид в российском сегменте;
- ◆ создание Регионального операционного центра (Regional Operations Center – ROC);
- ◆ помощь ресурсным центрам в установке ППО и поддержка его функционирования;
- ◆ поддержка пользователей Грид;
- ◆ участие в предоставлении ресурсов для исследований в важных прикладных областях;
- ◆ управление функционированием инфраструктуры: регистрация пользователей, региональных виртуальных организаций и мониторинг;
- ◆ популяризация грид-технологий и вовлечение новых пользователей из научных центров и производственной сферы.

Распределение базовых грид-служб РДИГ происходит между всеми его участниками, и, благодаря наличию полного набора этих служб, РДИГ способен работать как независимо от остальной инфраструктуры EGEE, так и в качестве одного из его сегментов.

В настоящее время в рамках РДИГ работают более 100 ученых и специалистов в области компьютерных технологий, существует 15 ресурсных центров, которые предоставляют ресурсы для грид-системы с общим числом около 1000 процессоров и общим объемом ресурсов памяти на дисках (лентах) около 300 ТБ. Также производятся установка и наладка нового оборудования, что позволит в ближайшее время увеличить число процессоров в сегменте РДИГ до 1500.

Для предоставления ресурсов российским научным проектам в рамках консорциума РДИГ были созданы региональные виртуальные организации, которые могут быть включены в будущем в глобальную инфраструктуру EGEE. В настоящий момент это ВО в области космофизики (AMS), физики высоких энергий (PHOTON), термоядерного синтеза (Fusion), геофизики (eEarth). Для тестирования локального сегмента РДИГ используются ВО RDTEAM – для мониторинга и тестирования грид-инфраструктуры и RGStest – неспециализированная ВО, служащая для целей пробного использования технологии Грид в прикладных областях. Она предназначена для тех исследователей, которые пока не приняли решение о создании своей выделенной виртуаль-

ной организации, но хотят практически ознакомиться с преимуществами и особенностями работы в грид-инфраструктуре.

ИФВЭ в инфраструктуре Грид

Работы по установке и настройке первого Грид ПО в ИФВЭ начались в конце 2003 г. в рамках проекта «Грид Минатома». Тогда были установлены и сконфигурированы первые основные сервисы грид-инфраструктуры (CE, SE, WN, UI) на вычислительном кластере в ОМБТ (16 двухпроцессорных 900-МГц Pentium III). Для этого использовалось ПО, разрабатывавшееся в рамках проектов LCG (LHC Computing Grid) и EDG (European Data Grid). Начиная с апреля 2004 г., ИФВЭ становится полноправным участником проекта EGEE наряду с другими научными центрами. В рамках этого проекта выполняются работы по активностям: NA2 – распространение информации и расширение круга пользователей; NA3 – знакомство с Грид и обучение; NA4 – привлечение к проекту новых пользователей, сообществ и ВО; SA1 – поддержка, эксплуатация и управление грид-системами. Был создан Распределенный региональный операционный центр для российского сегмента Грид, в котором ИФВЭ играл ведущую роль. В том же 2004 г. было закуплено оборудование (рис. 3), которое являлось и до сих пор является основным ядром ресурсного центра ИФВЭ в грид-инфраструктуре EGEE. Это 80 CPU 2.6 ГГц и около 5 ТБ дисковых массивов.

Следует отметить, что полноценное участие ИФВЭ в проекте EGEE стало возможным благодаря появлению в ИФВЭ высокоскоростного доступа в Internet (100 Мб/с полный дуплекс⁹) осенью 2004 г.

В 2005 г. продолжились работы, связанные с развитием грид-технологий. Была создана обновляемая база программного обеспечения для Грид. Организован центр по подготовке квалифицированных пользователей и системных администраторов для Грид. Был введен в строй центр тестирования, адаптации и распространения нового грид-ПО для российских ресурсных центров. Было проведено большое число обучающих курсов как для обычных пользователей Грид, так и для системных администраторов и программистов грид-систем.

Начиная с 2006 г. и до середины 2007 г. произошло обновление промежуточного ПО Грид на новую версию, закуплен и установлен дополнительный элемент хранения данных емкостью 2.4 ТБ для грид-инфраструктуры. Велись работы по сотрудничеству в рамках проекта EGEE/LCG с другими научными институтами в России, а также с ЦЕРН.

Специалисты ИФВЭ принимали участие в работах по написанию тестирующего программного обеспечения для грид-системы (стресс-тестов для серверов передачи данных в среде Грид), анализаторов лог-файлов для некоторых базовых грид-сервисов, анализаторов для протокольных файлов в системе тестов LCG, системы тестов для Менеджера заданий (базового сервиса грид-системы) в архитектуре LCG и gLite, в работах по разработке

⁹ Полный дуплекс (full-duplex, FDX) – одновременная двухсторонняя передача данных.



Рис. 3. Вычислительный Грид-кластер ИФВЭ 2004–2007 годов.



Рис. 4. Новые вычислительные мощности для Грид.

новой версии системы хранения больших объемов данных CASTOR2 (CERN Advanced STORage manager), принимались работы в переносе отдельных тестов LCG в новую EGEE gLite архитектуру.

С июня по сентябрь 2007 г. было закуплено новое современное оборудование, что увеличило суммарную производительность ресурсного центра ИФВЭ в среде Грид в четыре раза (с 50 KSI2K до 250 KSI2K, где SPECint2000 – единица измерения вычислительной мощности), доведя количество процессоров до ~170. Также была увеличена суммарная память на дисковых массивах до 45 TB (рис. 4).

Сейчас проводятся работы по настройке и внедрению нового оборудования в вычислительный кластер – ресурсный центр грид-инфраструктуры.

Запланировано дальнейшее участие ИФВЭ в работах по проекту EGEE, которое будет продолжаться до 2010 г. в третьей его стадии – проекте EGEE-III, стартующем весной 2008 г.

Следует отметить, что вычислительный кластер ресурсного центра ИФВЭ используется не только виртуальными организациями, участницами EGEE, но также и локальными экспериментами ИФВЭ, не имеющими возможности или необходимости регистрации в грид-системе, что позволяет использовать огромные вычислительные ресурсы параллельно с грид-системой.

Заключение

Для грид-технологий наступает пора масштабного применения в самых разнообразных областях науки, производства и экономики. Интенсивность применения грид-технологии зависит от способности новых и уже существующих приложений быть развернутыми в этой среде. По этой причине на первое место выходят тенденции в области разработки и реализации приложений для грид-структур. Также наметилось направление на изменение грид-ПО по упрощению взаимодействия конечного пользователя со сложной структурой грид-системы, скрывающее все сложности запуска задач и управления данными.

Развитие одной из самых больших грид-систем – проекта EGEE – будет происходить в направлении повышения его устойчивой и полнофункциональной работы в качестве грид-инфраструктуры, повышения качества обслуживания уже существующих и привлечения новых прикладных проектов. В будущем будет усиливаться взаимодействие с другими родственными грид-системами.

Участие России в этом проекте, несмотря на сравнительно небольшие вычислительные ресурсы, будет продолжаться, т.е. планируется дальнейшее развитие РДИГ, которая представляет собой

первую реально работающую грид-инфраструктуру в России. Это первый проект Грид всероссийского уровня, поддерживаемый на правительственном уровне. Первоочередные задачи РДИГ и региональных центров – это расширение инфраструктуры, увеличение мощностей ресурсных центров, поиск новых задач для решения с использованием технологии Грид, обучение пользователей, привлечение молодых специалистов для развития и использования этой современной технологии.

Грид-технологии обеспечили появление нового очень важного инструмента, позволяющего большому количеству ученых по всему миру намного быстрее выполнять трудоемкие расчеты и обрабатывать огромные объемы данных.

Литература

1. Ян Фостер, Карл Кессельман, Стив Тьюке. АНАТОМИЯ ГРИД. Создание масштабируемых виртуальных организаций, <http://gridclub.ru/library/publication.2004-11-29.7104738919/view>
2. Luben Boyanov, Plamena Nenkova. On the employment of LCG GRID middleware. International Conference on Computer Systems and Technologies – CompSysTech' 2005.
3. Хайнц Штокингер. Определение понятия Грид: фиксируем точку зрения экспертов. Швейцарский Институт биоинформатики (Vital-IT) CH-1015 Лозанна, Швейцария, <http://gridclub.ru/library/publication.2006-10-06.2791255951/view>
4. А.П. Демичев, В.А. Ильин, А.П. Крюков. Введение в грид-технологии. Препринт НИИЯФ МГУ – 2007 – 11/832.
5. Foster, "What is Grid? A three point check", <http://www-fp.mcs.anl.gov/~foster/Articles/WhatIsTheGrid.pdf>
6. Future for European Grids: GRIDs and Service Oriented Knowledge Utilities Vision and Research Directions 2010 and Beyond, Next Generation GRIDs Expert Group Report. <http://www.semanticgrid.org/documents/ngg3/ngg3.html>
7. Хорошей «входной точкой» для ознакомления с общей тематикой Грид и различными грид-проектами являются грид-порталы: <http://www.gridclub.ru>
<http://gridcafe.web.cern.ch>
<http://EnterTheGrid.com>
<http://www-1.ibm.com/grid>
8. Европейский проект EGEE: <http://www.eu-egee.org>.
9. Проект РДИГ: <http://egee-rdig.ru>.

Скептики о теории суперструн

От редакции

В 2006 г. вышла из печати книга П. Войта «*Даже не неправильно: крах теории струн и остающаяся проблема объединения законов физики*», вызвавшая оживленные дискуссии в физическом сообществе.

Термин «теория (супер)струн» на слуху уже скоро четверть века, включая сенсационные публикации о «новой революции в физике» в газетах. Началом «струнной революции» принято считать 1984 г., когда впервые был широко обнародован (в частности на крупнейших международных конференциях) амбициозный план «теории всего сущего» ("*Theory of Everything*") – грандиозная программа вывода всех физических законов (и даже самого существования человека), в основе которой лежит в качестве идеального элемента не материальная точка (как это имело место от ньютоновской механики до квантовой теории поля), а одномерно протяженная «струна». Из самых общих соображений следовало, что струна объединяет в себе все виды взаимодействий и все частицы, считавшиеся элементарными, – кварки, лептоны, калибровочные бозоны – и в перспективе дает все надежды на построение непротиворечивой квантовой теории гравитации. Плюс совершенно органическое свойство суперсимметрии. После недавнего успеха Стандартной модели такая перспектива казалась вполне естественной и безальтернативной. Среди теоретиков воцарился небывалый энтузиазм, и теория суперструн обрела статус «высокой моды».

С течением времени, однако, стало ясно, что ситуация не так уж проста, а перспективы не такие уж радужные. Оказалось, что теория имеет колоссальное количество вариантов и прежде, чем приступить к объяснениям и предсказаниям, предстоит проделать огромную – во многом чисто математическую – работу. Международные конференции по-прежнему украшались блестящими докладами

лидеров суперструнного направления, но «простые физики» так и не увидели ни одного результата, который можно было бы проверить экспериментально.

В конце-концов стали появляться скептические и критические мнения относительно самой возможности реализации «теории всего сущего». Одно из таких мнений и представлено в упомянутой выше книге П. Войта. Ее автор – выпускник Гарварда, написавший ряд известных работ по квантовой теории поля и математической физике. В настоящее время работает в Колумбийском университете (США).

Выбранные с разрешения автора для публикации главы из книги Войта в русском переводе В.О. Соловьёва дают, как нам кажется, не только хорошее общее представление о теории суперструн, но и знакомят со многими интересными деталями, касающимися «социологии» научной работы в США.

Справедливости ради, к этому, пожалуй, надо добавить, что в последнее время стали появляться работы, авторы которых, вероятно, хотят защитить теорию суперструн в самой ее уязвимой части – феноменологической. Насколько успешны такие попытки, заинтересованный читатель может составить себе представление, ознакомившись с недавней работой черновского теоретика И. Антониадиса по «феноменологии струн» (arXiv: 0710.4267 hep-th). Этого не надо упускать из вида тем «реальным физикам», кто, увидев, как предается анафеме теория суперструн, в душе порадовались уже хотя бы тому, что теперь ни к чему ломать голову над «многообразиями Калаби-Яо», «S- и T-дуальностями» и всякими там «Рамон-Рамон потоками». Вряд ли уже теперь можно просто «вычеркнуть» это направление из фундаментальной физики, хотя что из него получится, теперь не так ясно, как казалось четверть века назад.

Является ли теория суперструн наукой?

«40 главных качеств Единого поля, которые можно приравнять к характерным качествам 40 аспектов Вед и Ведической литературы, получены из математической формулы Единого поля, данной Теорией суперструн.»

(Махариши Махеш Йог, «Единое Поле Всех Законов Природы»)

Как ни крути, фабула теории суперструн – эпизод, не имеющий аналогов в истории современной физики. Более двадцати лет интенсивных исследований тысяч лучших ученых мира, десятки тысяч научных статей не дали ни одного экспериментально проверяемого предсказания теории. Эта беспреце-

дентная ситуация заставляет спросить, действительно ли мы можем называть исследования по теории суперструн научными исследованиями в области физики? Вопрос можно поставить двояко. Во-первых, как вопрос, который задают многие физики: следует ли считать теорию суперструн ма-

тематикой, а не физикой? Во-вторых, является ли эта теория наукой вообще?

Так как я провожу большую часть времени на математическом факультете, для меня очевидно то, как мои коллеги-математики ответили бы на вопрос, является ли теория суперструн математикой. Они единогласно сказали бы: «Конечно, нет!» Математики определяют свою дисциплину как деятельность по созданию точных утверждений, теорем об абстрактных математических объектах и построению строгих доказательств этих теорем. Тот факт, что исследования по теории суперструн относятся к спекулятивным физическим объектам, не является, на самом деле, проблемой, так как математики – мастера абстракции, и могут легко преобразовать любую точную теоретическую структуру в структуру, выраженную на языке абстрактной математики. Проблема состоит в том, что теория суперструн, в действительности, не теория, а скорее ряд надежд на то, что такая теория, в самом деле, существует. Для математика надежда, что теория существует, надежда, которая исходит просто из физических побуждений, определенно вообще математикой не является. Так же, как в физике, такой набор надежд может, в принципе, использоваться как стимул к построению точного набора гипотез о том, что является истинным, но пока концептуальная структура не дозреет до возможности это сделать, то неясно, как можно реально эти надежды использовать.

С другой стороны, многие физики, которые сами не работают над теорией суперструн, часто характеризуют ее как математику. В большинстве случаев это означает отрицательный отзыв, так как многие физики разделяют мнение, которое однажды выразил Гелл-Манн, сказав, что абстрактная математика – это разновидность мастурбации. О теории суперструн основная масса физиков думает как о математике, а большинство математиков – как о физике; каждая группа убеждена, что теория суперструн не имеет смысла в пределах их системы взглядов, но, по-видимому, имеет его в пределах чужей-то другой системы.

Любимым художественным оформлением дверей офисов теоретиков частиц в середине 80-х была очень большая и очень красочная эмблема, распространявшаяся Международным университетом Махариши. Эмблема включала основные уравнения 11-мерной супергравитации и была снабжена детальным объяснением значения каждого члена в уравнениях, согласно индийской философии, по версии Махариши. Эпиграф, помещенный в начале этой главы, взят из более нового, столь же красочного документа, теперь распространяемого онлайн Университетом менеджмента Махариши. Новый документ более современен (супергравитацию сменила теория суперструн), но тем не менее, он кажется почти тем же самым.

Главной персоной, стоящей за всем этим, является не Махариши, а физик по имени Джон Хаджелин. Хаджелин был аспирантом в области теории частиц в Гарварде в конце семидесятых; я помню, как мы вместе ходили на занятия по квантовой те-

рии поля. Так как у моего соседа по комнате был определенный интерес к трансцендентальной медитации (ТМ), и он знал Хаджелина по местному центру ТМ, то так или иначе, у нас была возможность поговорить. Интерес Хаджелина к квантовой теории поля, казалось, имел причудливую сторону, он хотел использовать КТП для объяснения того, почему знатоки ТМ могут левитировать, но в общем, он вел себя вполне так же, как все аспиранты.

Когда Хаджелин окончил Гарвард, написав несколько серьезных статей по теории частиц, он затем на несколько лет, в качестве постдока, перешел в SLAC. В это время он работал над суперсимметричными расширениями Стандартной Модели и теорий великого объединения, сотрудничая со многими ведущими учеными в этой области и написав много статей, некоторые из них до сих пор часто цитируются. В 1984 г. Хаджелин оставил SLAC, перешел в Международный университет Махариши в Фэрфилде, Айова, и начал создавать там физический факультет. Тогда теоретические отделы, занимавшиеся частицами, издавали новые статьи своих сотрудников в виде препринтов и рассылали их по почте другим отделам. Я помню, что видел несколько препринтов по теории частиц Международного университета Махариши того периода. По содержанию они были неотличимы от многих других препринтов на подобные темы, но были несколько необычны тем, что печатались на розовой бумаге, а не на белой.

В 80-х и в начале 90-х годов Хаджелин продолжал издавать научные статьи по модным в те времена темам, часто пытаясь разрабатывать приложения различных теорий великого объединения, полученных из теории струн. К 1995 г. Хаджелин написал 73 научные статьи, большинство из них опубликовано в очень престижных журналах, специализирующихся на теории частиц, многие цитировались более ста раз в последующих работах. Если Вы посмотрите на список этих статей в базе данных SLAC, то увидите, что выделяются несколько названий: «Действительно ли сознание – единое поле? (теоретико-полевая точка зрения)» и «Перестройка основ физики в свете ведической науки Махариши». Глядя на эти статьи, мы видим, что с середины 80-х Хаджелин идентифицировал «единое поле» теории суперструн с «единым полем сознания Махариши». Международный университет Махариши требовал от всех своих студентов-первокурсников изучать «Введение в концептуальные основы теорий единого поля (двадцать занятий)», в котором, по-видимому, связь между теорией суперструн и сознанием объяснялась более подробно.

В последние годы Хаджелин перестал писать статьи по физике и получил известность как кандидат в президенты от «Партии Естественных Законов». Совсем недавно он выдвинул идею борьбы с терроризмом с помощью «Новой Неукротимой Технологии Защиты», основанной на открытии единого поля.

На самом деле, каждый физик-теоретик отмахнется от всего этого, как от ерунды и бреда сумасшедшего, но случай с Хаджелином показывает, что

психически неуравновешенные люди могут иметь степень PhD от физического факультета Гарварда и много часто цитируемых работ, опубликованных в лучших рецензируемых журналах по теоретической физике. Как эта область науки защищает себя от психов? При том, что Хаджелин, несомненно, представляет свою научную деятельность единым целым, как можно отделить то, что является истинной законной наукой, от того, что, с его стороны, является иррациональным принятием желаемого за действительное?

Люди различными способами пытаются объяснить окружающий нас мир, но лишь объяснения определенного вида обычно признаются «научными». Объяснение, которое позволяет успешно и подробно предсказать, что произойдет, если мы выполним реальный эксперимент, никогда не ставившийся раньше, – вот объяснение, которое с наибольшей очевидностью можно считать «научным». Объяснения, основанные на традиционных или религиозных системах верований, которые не могут использоваться для предсказаний того, что произойдет, очевидно, не заслуживают названия «научных». Это также верно относительно объяснений, основанных на принятии желаемого за действительное или на идеологии, где источником веры в объяснение является не рациональное мышление, а нечто совсем иное.

Вопрос о том, можно ли решить, что является наукой, а что нет, и если можно, то как принять это решение, является центральной проблемой философии науки. Самым известным критерием, предложенным для решения вопроса, что можно назвать наукой, а что – нет, является критерий фальсифицируемости, обычно приписываемый философу Карлу Попперу. В соответствии с этим критерием, объяснение научно, если оно может использоваться для получения предсказаний, которые могут быть фальсифицированы, т.е. можно реально проверить, верны они или нет. Критерий фальсифицируемости при некоторых обстоятельствах может быть скользким, потому что не всегда ясно, что считать фальсификацией. Наблюдения могут быть перегружены теорией, так как теория своего рода необходима даже для описания того, что наблюдается в эксперименте, но здесь эту проблему мы не обсуждаем.

В то время как определенные модели могут быть прямо фальсифицируемыми, вопрос, можно ли фальсифицировать общую теоретическую структуру, является более тонким. За прошедшие годы сообщалось о многих предварительных экспериментальных результатах, не согласующихся с предсказаниями Стандартной Модели. В каждом из этих случаев можно было, вообще говоря, придумать расширение Стандартной Модели, которое согласовывалось бы с новыми результатами, но за счет существенного усложнения теории. Но ни один из этих экспериментальных результатов долго не продержался – при более осторожном анализе всегда оказывалось, что никакого расширения Стандартной Модели на самом деле не требовалось. Задав некоторую теоретическую структуру, часто можно найти способ обеспечить соответ-

ствие всем различным экспериментальным результатам, если позволить себе использовать в пределах этой структуры сколь угодно сложные модели. Для решения вопроса о том, является ли данная структура фальсифицируемой, существенна эстетика, так как мы должны ограничиться рассмотрением в рамках данной структуры относительно простых и естественных моделей. Если допустить чрезвычайно сложные и причудливые конструкции, то часто можно получить согласие практически с любым экспериментальным результатом.

Стандартная Модель – вот превосходный пример фальсифицируемой теории, так как это одна из самых простых моделей в своем роде. Она может использоваться для получения бесконечного набора предсказаний о результатах экспериментов в физике элементарных частиц, и все, в принципе, могут быть однозначно проверены. С другой стороны, теория суперструн в настоящее время – бесспорно пример теории, которая не может быть фальсифицирована, так как она не делает никаких предсказаний. Никто не придумал в рамках теории суперструн модели, которая согласуется с известными фактами о физике элементарных частиц. Все попытки сделать это привели к очень сложным конструкциям, у которых есть все признаки того, что бывает, когда мы пытаемся заставить несоответствующую теоретическую структуру соответствовать экспериментальным результатам. В то же время из-за отсутствия непертурбативной теории структура теории суперструн остается слишком плохо понятой для того, чтобы быть вполне уверенным в том, какие из действительно последовательных моделей в нее вписываются.

В 1998 году, выступая на конференции, где собрались главным образом физики-экспериментаторы, теоретик суперструн Джозеф Польчинский заявил [1]:

«Я уверен, что все экспериментаторы хотели бы знать: как проверить теорию струн, как заставить ее уйти и не возвращаться?»

Да, вы не можете! Пока не можете.»

Согласно критерию фальсифицируемости, теория суперструн, кажется, не является наукой, но ситуация здесь гораздо сложнее. Хитрость заключается в слове Польчинского «пока». Большая часть теоретической деятельности ученых является спекулятивной в том смысле, что она состоит из постановки вопросов типа, «что, если я приму, что X является верным, смогу ли я тогда, используя это предположение, построить реальную теорию?» Это как раз тот вид деятельности, на который ученые тратят большую часть времени, и никто, по-видимому, не хочет считать это «ненаучным». Теория суперструн является весьма спекулятивной попыткой подобного типа. Теоретики, вовлеченные в эту область, рассматривают весьма спекулятивное предположение, согласно которому нужно заменить понятие элементарной частицы понятием струны или более экзотических объектов, и попытаться посмотреть, можно ли основать на этом предположении научную теорию, способную давать фальсифицируемые предсказания.

Обобщение понятия «научный», включающее предположения этого типа, определенно сделало бы теорию суперструн наукой. Но хотим ли все мы действительно признать, что такая спекулятивная деятельность научна? Вот любимая байка космологов (эта версия идет от Стивена Хокинга, но есть и много других вариантов):

«Однажды известный ученый (некоторые говорят, что это был Бертран Рассел) читал публичную лекцию по астрономии. Он описал, как Земля вращается вокруг Солнца, и как Солнце, в свою очередь, обращается вокруг центра обширного собрания звезд, названного нашей Галактикой. В конце лекции из задних рядов встала маленькая старая леди и сказала: *«То, что Вы нам рассказали, – чушь. Мир, на самом деле, – плоская тарелка, держащаяся на спине гигантской черепахи».*

Ученый, прежде чем ответить, улыбнулся с чувством превосходства: *«На чем же стоит черепаха?»* *«Вы очень умны, молодой человек, очень умны, – сказала маленькая старая леди, – но там одни черепахи, всю дорогу вниз – черепахи».* [2]

В то время как физики наслаждаются этой историей и многими ее вариантами (Рассела часто заменяют Уильям Джеймс или Эйнштейн), антропологам известна другая версия. Она исходит от Клиффорда Гиртза и вот какова:

«Есть индийская история – по крайней мере, мне это рассказали как индийскую историю – об англичанине, который, услышав, что мир опирается на платформу, которая покоится на спине слона, который покоится, в свою очередь, на спине черепахи, спросил (возможно, он был этнографом, они так себя ведут): *«На что опиралась черепаха? – На другую черепаху. – А та черепаха? – Ах, сагиб, там дальше вниз идут одни черепахи, всю дорогу – черепахи.»* [3]

Гиртз рассказывает эту историю, чтобы сделать вывод об «антифундаментализме» и продолжает:

«...Поэтому я никогда не стремился добраться, ни в какой степени, до основания чего-либо, о чем писал, ни в этом эссе, ни в другом месте. Культурный анализ внутренне не полон. И, хуже того, чем глубже идет этот анализ, тем он менее полон.»

Теория частиц, в отличие от этнографии, в большей степени является наукой, которая должна иметь основу, и чем глубже мы подбираемся к этой основе, тем полнее должна быть теория. Стандартная Модель является теорией, которая обеспечивает основу для предсказания и понимания широкого диапазона явлений. Текущие исследования должны быть сосредоточены и на укреплении тех мест, где основа является несколько шаткой, и на поиске еще более полной теории. Что если я, выбрав чуть менее неблагоприятную форму теории черепах, решу поспекулировать на тему о том, что на достаточно малых масштабах расстояний физика должна описываться не в терминах частиц, струн и т.д., а в тер-

минах черепах? Если бы я объявил, что исследовал перспективы объединенной теории, основанной на предположении, что мир построен из чрезвычайно маленьких черепах, и что из этого предположения я надеюсь получить Стандартную Модель и вычислить ее неопределенные параметры, большинство людей сказала бы, что я занимаюсь не наукой. С другой стороны, если бы после нескольких месяцев работы я действительно сумел получить параметры Стандартной Модели из гипотезы черепах, тогда людям пришлось бы передумать и признать, что да, я все время занимался наукой.

Таким образом, вопрос о том, является ли данная спекулятивная деятельность наукой, кажется, не допускает абсолютно однозначного ответа, а зависит от общей системы верований научного сообщества и от ее развития, когда ученые делают новые теоретические и экспериментальные открытия. Спекулятивное исследование проблемы, использующее подход, характеризуемый большинством ученых, долго и напряженно обдумывавших эту проблему, как неблагоприятный и неосуществимый, вероятно, нельзя назвать научным исследованием, особенно если оно продолжается снова и снова в течение многих лет, не давая никаких признаков результата. С другой стороны, если большая часть научного сообщества думает, что спекулятивная идея весьма разумна, то о тех, кто следует этому предположению, говорят, что они занимаются наукой.

Спекуляция, известная под именем теории суперструн, продолжает, в соответствии с этим критерием, квалифицироваться как наука, так как значительная часть теоретиков считает ее разумным предположением, заслуживающим испытания. Решение называть ее наукой является в сильной степени социальным и основано на суждении, разделяемом многими (хотя и не всеми) физиками. Есть много физиков, которые полагают, что используемые в теории суперструн спекулятивные предположения, вероятно, неправильны, и еще более вероятно, таковы, что просто не стоит и надеяться превратить их в теорию, которая может быть использована для получения предсказаний. Теоретики суперструн хорошо знают, что это является проблемой для их признания сообществом физиков, и что если теория и в дальнейшем будет не в состоянии предсказывать что-либо, настанет такой момент, когда сообщество не захочет называть то, что они делают, наукой. Тревога, которую многие испытывают по поводу теории суперструн, часто проявляется в виде беспокойства, что теория рискует стать религией, а не наукой. Глэшоу – один из физиков, выразивших подобные мысли публично [4]:

«Возможно я переоцениваю заявления, сделанные струнными теоретиками в защиту своей новой версии средневекового богословия, где ангелы заменены многообразиями Калаби-Яо. Угроза, однако, ясна. Впервые мы видим, чем наши благородные поиски могут закончиться, и как Вера может однажды снова заменить собой Науку.»

Я знаком и с другими версиями этого беспокойства, выраженными некоторыми физиками в виде утверждения, что теория суперструн становится «культом», с Виттеном в роли «гуру». В качестве примера, вспомните комментарии Магуэйю (Maguëijo) об М-теории, процитированные выше. Некоторые струнные теоретики действительно выражают свою веру в теорию струн на языке религии. Например, струнный теоретик, преподающий в Гарварде, имел обыкновение заканчивать все свои e-мейлы строкой: «Суперструна/М-теория – это язык, на котором Бог написал мир».

Теоретик струн и автор книг Мичайо Каку, давая интервью для радиошоу, описал основную идею теории струн так:

«Божественный разум – это музыка, резонирующая в 11-мерном гиперпространстве.»

Некоторые физики шутили по этому поводу, что, по крайней мере, в Соединенных Штатах теория струн может выжить, обратившись к федеральному правительству за финансированием, как «инициатива на основе веры». В последние годы фонд Темплтона, ставящий своей целью пропаганду идеи восстановления отношений между наукой и религией, поддерживал конференции, посещаемые многими видными струнными теоретиками. Обеспокоенность Глэшоу возможностью того, что богословие заменит собой науку, временами кажется весьма обоснованной.

Лично я не считаю, что термины «культ» или «религия» здесь также уместны – все же они относятся

к человеческой деятельности, во многом весьма отличающейся от той, что имеет место в сообществе физиков. С другой стороны, по мере того, как идут годы, и становится ясно, что теория суперструн потерпела неудачу в качестве жизнеспособной идеи объединения, отказ признавать этот факт начинает вызывать все более тревожные мысли. Мы видели, что невозможно четко отделить вопрос о том, что является и что не является наукой, от общечеловеческих проблем, вроде той, во что хотят люди верить и почему. Наука, таким образом, не имеет никаких гарантий и иммунитета от некоторых опасностей культового поведения, жертвой которого могут стать люди. Для того чтобы наука продолжала оправдывать свое название, ей необходимо постоянно соблюдать строгие внутренние критерии рациональности.

Литература

1. Polchinski J. Talk given at the 26th SLAC Summer Institute on Particle Physics, arXiv:hep-th/9812104.
2. Hawking S. A Brief History of Time. Bantam, 1988, page 1. (Хокинг С. Краткая история времени. – Мир).
3. Geertz C. The Interpretation of Cultures. Basic Books, 1973, page 28.
4. Glashow S. Does Elementary Particle Physics Have a Future? In The Lesson of Quantum Theory, de Boer J., Dal E. and Ulfbeck O., eds. Elsevier, 1986, pages 143-53. (Глэшоу Ш. Очарование физики).
5. Kaku M. Interview on the Leonard Lopate Show. WNYC, 1/2/2004.

Единственная игра в городе: сила и слава теории струн

Парень, свихнувшийся на игре, каждую ночь проигрывает в покер последнюю рубашку. Ему говорят, что игра подстроена, чтобы отправить его в богадельню. А он отвечает измученно: да знаю я, знаю. Но это единственная игра в городе.

(Курт Воннегут, «Единственная игра в городе» [1])

Самым обычным оправданием, которое я слышал, беседуя со многими суперструнщиками о том, почему они продолжают работать над этой теорией, несмотря на стабильное отсутствие какого бы то ни было успеха в достижении ее целей, было что-то вроде: «Послушайте, это единственная игра в городе. Пока кто-нибудь не придумает чего-то более многообещающего, все будет крутиться здесь». Это оправдание было в ходу еще со времен первой «суперструнной революции» 1984 г., когда очень многие принялись работать в области теории струн. В интервью 1987 г. Дэвид Гросс* дал следующий комментарий о причинах популярности теории суперструн [2]:

«Самая важная причина – то, что нет никаких других хороших идей. Именно это привлекает

большинство людей. Когда люди начали интересоваться теорией струн, они не знали о ней ничего. На самом деле, первой реакцией большинства было мнение, что теория чрезвычайно уродлива и неприятна, по крайней мере, так было несколько лет назад, когда понимание теории струн было намного менее разработанным. Людям было трудно выучить ее и включиться в работу. Поэтому я считаю, что реальная причина, по которой струны привлекали людей, то, что нет никакой другой игры в городе. Все другие подходы к построению теорий великого объединения, которые сначала были консервативны, и только постепенно стали радикальными, терпели неудачу, а эта игра все же не потерпела неудачи.»

* Дэвид Гросс – американский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии (вместе с Д. Политцером и Ф. Вилчеком) за открытие «асимптотической свободы» – ослабления сильных взаимодействий на малых расстояниях.

Гросс был и остается большим энтузиастом теории суперструн, в отличие от многих других физиков, которые с самого начала посчитали ее не очень хорошей идеей, и стояли перед трудным выбором, стоит ли работать над ней. Научный журналист Гэри Таубз в конце своей книги «Нобелевские мечты» рассказывает о следующей беседе с другим теоретиком частиц [3]:

«4 августа 1985 г. я сидел в буфете ЦЕРНа и пил пиво с Альваро де Рухула*... Де Рухула предсказал, что 90 процентов теоретиков будут работать над суперструнами и их связью с суперсимметрией, потому что это модно. Когда он объявил, что считает это нездоровым, я спросил, над чем предпочитает работать он сам. Вместо того, чтобы ответить прямо, он сделал отступление.

«Следует помнить, – сказал мне де Рухула, – что эти два человека, благодаря которым развивается теория суперструн, Грин и Шварц, провели 10–15 лет, систематически работая над чем-то таким, что было немодным. На самом деле, люди их высмеивали за упрямую приверженность к этой науке. Так что, когда Вас пытаются убедить, что надо заниматься самой модной темой, стоит помнить, что решающие шаги всегда делаются теми, кто работает не над самым модным предметом.»

«Тогда мой вопрос, – сказал я, – состоит в том, над чем же работаете Вы вместо этого? О чем будет Ваша следующая статья?»

«Это вопрос, который задает себе каждый теоретик, – ответил он. – И это зависит от того, хотите ли Вы выжить как теоретик, или Вы имеете мужество думать, что вера в Вашу собственную работу важнее, чем мгновенное признание Вашего модного вклада. Этот вопрос каждый должен решать для себя сам, в зависимости от степени его веры своему собственному гению.»

«Итак, – повторил я, – о чем же будет Ваша следующая статья?»

«Я пытаюсь втолковать Вам, – произнес де Рухула, – что я понятия не имею об этом.»

Тот факт, что исследования по теории суперструн стали «единственной игрой в городе» в середине 1980-х в те времена, когда теория еще не была достаточно разработанной, и можно было резонно надеяться, что она приведет к великим результатам, не слишком удивителен. Намного труднее понять, почему она продолжает оставаться «единственной игрой в городе» сейчас, более чем двадцать лет спустя, перед лицом постоянно крепнущей очевидности, что она является, в сущности, программой исследований, потерпевшей неудачу.

В 2001 г., после того как я поместил в архиве препринтов по физике короткую статью, оценивающую ситуацию в теории суперструн и подчеркивающую, что теперь ясно, что идея эта была неудачной, я очень быстро получил в ответ много писем по

электронной почте. Единственные критические сообщения пришли от двух аспирантов, занимающихся теорией суперструн, которые придерживались мнения, что я – некомпетентный идиот, угрожающий задержать прогресс науки. Пришло множество поздравительных сообщений, многие содержали один аспект, удививший меня. В этих письмах отмечалась моя смелость и выражалась надежда, что я переживу ожидаемые ими жестокие личные нападки теоретиков суперструн. Я не знал, что очень многие люди в сообществе физиков не только были скептиками по отношению к теории суперструн, но более того, чувствовали, что этот предмет увековечивал себя благодаря своего рода запугиванию. Мое положение в отделе математики таково, что мне не о чем особо волноваться, с точки зрения профессионального возмездия, но многие из моих корреспондентов чувствовали себя совсем иначе, один из них даже назвал теоретиков суперструны «мафией». Это придало другой оттенок выражению «единственная игра в городе». Многие физики, казалось, чувствовали, что каждому, кто угрожает успешному ведению суперструнной игры, возможно, следует побеспокоиться о своей профессиональной безопасности.

За исключением двух чрезмерно восторженных аспирантов, отклик теоретиков суперструн на мою первую статью был вполне вежливым. Единственным давлением, которое я испытал, было интеллектуальное, так как многие из ведущих ученых в этой области являются блестящими, интенсивно работающими и очень талантливыми людьми, в послужных списках которых имеются крупнейшие достижения. Прийти к выводу, что их деятельность была серьезным заблуждением, совсем нелегко. Безусловно, самой обычной реакцией теоретиков суперструны было игнорирование моих аргументов на том основании, что я не сказал ничего такого, что не было бы известно людям, работающим в этой области. Несомненно, некоторые из моих друзей и коллег, занятых в этой области, нашли мои аргументы грубыми, но в то же время они знали, что обсуждаемые мной проблемы реальны. Многие из них очень надеются на появление новых идей и на то, что наступит день, когда теория суперструн перестанет быть «единственной игрой в городе».

Позже, когда я обнаружил, что продолжающееся господство теории суперструн в физике элементарных частиц становится все более и более тревожным, я занялся двумя различными проектами, с целью привлечь более широкое внимание к этой проблеме. Первый из них – эта книга, которую я начал писать в 2002 г. Второй – это веб-блог (weblog), запущенный в начале 2004 г., где я помещал информацию по различным темам математики и физики, которые, как мне казалось, люди могли бы счесть интересными, в том числе много критических материалов о последних событиях в теории суперструн. Эти два проекта вызвали существенно более негативную реакцию, чем моя ранняя статья, несомненно, из-за того, что их было труднее игнорировать.

* Альваро де Рухула - один из авторитетов в теоретическом отделе ЦЕРНа.

Веб-блог вызвал гораздо больший интерес, чем я мог ожидать. В настоящее время главная страница веб-блога получает более 6 000 кликов в день со всех континентов. Многие из читателей – это теоретики суперструн, одним из признаков этого является большое число соединений с компьютерами академических учреждений, которые содержат слово «струна» в своих названиях. Во время конференций в Париже и Торонто «Струны-2004» и «Струны-2005» лог-файлы веб-сервера показали несколько соединений с беспроводной точки доступа в лекционном зале конференции. По-видимому, по ходу некоторых наиболее скучных докладов не один струнный теоретик проверял, что я и другие люди пишут на веб-блоге.

Веб-блог включает раздел комментариев, и некоторые теоретики суперструн предпочли использовать его, чтобы атаковать меня лично в ответ на часть моей конкретной научной критики теории суперструн, нападая на меня как на человека неосведомленного и некомпетентного. Один из таких наиболее легко возбудимых энтузиастов суперструны, преподаватель из Гарварда, однажды использовал раздел комментариев, чтобы выразить мнение, что те, кто критикует финансирование теории суперструн, являются террористами, которые заслуживают ликвидации вооруженными силами Соединенных Штатов. Я опасаюсь, что он писал это серьезно.

Ранняя версия книги, которую Вы сейчас читаете, рассматривалась для публикации издательством Кембриджского университета (Cambridge University Press) с начала 2003 г. после того, как я встретил редактора, который проявил интерес к рукописи. Хотя Кембридж издал многие из самых известных книг по теории струн, редактор казался заинтересованным опубликовать то, что написал я, чтобы соблюсти некое равновесие по данной теме. Рукопись была отослана рецензентам, и я был настроен оптимистически относительно результата, так как был уверен, что рукопись не содержит никаких существенных ошибок, и поэтому должна легко пройти стандартный академический процесс рецензирования. Я предполагал, что рецензенты из числа неструнных теоретиков дадут положительные отзывы, а рецензенты из струнных теоретиков, даже если они и не согласятся с некоторыми моими выводами, должны будут признать, что мои факты верны.

В то время как отзывы некоторых рецензентов были вполне положительными и энергично поддерживали публикацию книги Кембриджским издательством, поведение струнных теоретиков оказалось не таким, как я ожидал. В первом раунде рецензирования некто, охарактеризованный мне редактором как «известный струнный теоретик», написал короткий отзыв, утверждая, что, хотя рукопись полна ошибок, он приведет только один пример. Он (или она) выдернул из контекста предложение, которое я написал, неверно его процитировал, превратив единственное число в множественное, и рассмотрел это неверно процитированное предложение как свидетельство того, что мне не известен ряд достижений в данной области. В том виде,

как оно было написано, и в соответствующем контексте это предложение было совершенно точным резюме о состоянии знаний по определенной проблеме в квантовой теории поля. Отзыв заканчивался так: «Я мог бы написать длинную критику рукописи, но, в действительности, это не является необходимым. Я думаю, что Вам пришлось бы сильно попотеть, чтобы найти кого-то, кто скажет хоть что-нибудь положительное об этой рукописи». Мне послали копию этого отзыва в одном и том же электронном письме с другим сообщением, энергично одобряющим публикацию. Рефери также сравнил мою критику теории струн с критикой креационистами преподавания теории эволюции.

До того, как я прочитал это сообщение, меня несколько беспокоили некоторые написанные мной вещи, я чувствовал, что они подходили слишком близко к обвинению струнных теоретиков в интеллектуальной непорядочности. После знакомства с этим отзывом я перестал чересчур волноваться по этому поводу. Ясно, что уровень непорядочности и степень, до которой многие струнные теоретики не желали признавать проблемы своего предмета, далеко превосходили все то, что я первоначально себе воображал. Кембриджский редактор согласился, что этот отзыв не внушает большого доверия и в некоторой степени подтверждает наличие проблем, к которым обращалась моя рукопись, но он видел, что не может продолжать работу над публикацией без более положительных отзывов.

Второй раунд рецензирования дал новую, весьма положительную рецензию (от физика, который работал над теорией струн), но также и другую, очень отрицательную. В этой второй (также от физика, который работал над теорией струн) не утверждалось, что какой-либо из моих фактов неверен, даже говорилось, что рефери разделяет некоторые из моих критических представлений о теории струн. Отзыв был довольно коротким, но в нем энергично утверждалось, что лидеры сообщества теории частиц могут сами позаботиться о своих проблемах, что я не имел никакого права критиковать их, и настоятельно рекомендовалось не публиковать книгу в Кембриджском издательстве. Редактор предложил испробовать третий раунд рецензирования, но к тому времени мне стало ясно, что даже будучи не в состоянии ответить на мои аргументы, струнные теоретики будут решительно выступать против публикации. Я потратил бы свое время впустую, продолжая иметь дело с Кембриджем, так как они вряд ли издали бы что-то резко отклоненное ведущими фигурами в этой области, даже когда эти возражения не подкреплялись никакими научными доводами. Тогда я отослал рукопись редакторам нескольких других университетских издательств, но результаты были отрицательными, причем два редактора прямо говорили мне, что хотя то, что я написал, было очень интересно, оно было просто слишком спорным для публикации университетским издательством.

Степень, до которой теория суперструн является «единственной игрой в городе», трудно преувели-

чить, равно как и триумфальное настроение некоторых из практикующих ее лиц. На встрече Американской академии за прогресс науки, в 2001 г. Дэвид Гросс сделал доклад, названный «Сила и слава теории струн», который дает представление о тоне многих докладов по теории суперструн [4]. В качестве другого примера укажем, что Джозеф Польчинский, в своих лекциях 1998 г. на Летней Школе SLAC, начал одну из лекций словами:

«На предварительной схеме, которую Ланс Диксон (Lance Dixon) предложил для моих лекций, одним из пунктов были «Альтернативы теории струн». Моей первой реакцией было то, что это глупо, что никаких альтернатив нет.»

Многие струнные теоретики, кажется, занимают такую позицию: невообразимо, что теория суперструн – просто неправильная идея. Они чувствуют, что, в то время как текущая версия теории суперструн, возможно, неправильна, она должна, так или иначе, быть большей частью того, что, в конечном счете, окажется правильной теорией. В статье о Виттене* и его коллегах – теоретиках суперструн в Институте высших исследований в Принстоне, один из них цитируется следующим образом [5]:

«Большинство струнных теоретиков очень высокомерно, – говорит Зайберг с улыбкой. – Если будет обнаружено нечто [вне теории струн], то мы назовем это теорией струн.»*

В статье *New York Times*, написанной в 2001 г. и названной «Даже без экспериментальных свидетельств теория струн завоевывает влияние», научный обозреватель Джеймс Гланз написал:

«...ученые все же должны разработать нечто большее, чем фрагменты того, что, как они предполагают, в конечном счете будет полной теорией.»

Однако струнные теоретики уже собирают урожай, который обычно достается победителям в экспериментальной области, включая федеральные гранты, престижные награды и постоянные позиции в штате преподавателей. Меньше десяти лет тому назад было очень трудно получить какие-либо рабочие места для струнных теоретиков.

«В настоящее время, – говорит доктор Гросс, – если Вы – отчаянный молодой струнный теоретик, считайте, что дело в шляпе.» [6]

Чтобы увидеть, насколько точна эта характеристика, можно, например, посмотреть на список стипендий МакАртура (MacArthur), предоставленных теоретикам частиц с начала программы в 1981 г. В общей сложности, было девять таких награждений, и почти все они достались струнным теоретикам (Дэниел Фридан, Дэвид Гросс, Хуан Малдацена, Джон Шварц, Натан Зайберг, Стивен Шенкер, Ева Сильверстейн и Эдвард Виттен), за исключением одной, доставшейся Фрэнку Вильчеку в 1982 г.

Влияние и власть в академической области в значительной степени находятся в руках тех, кто занимает постоянные профессорские позиции в наиболее авторитетных университетах. В Соединенных

Штатах, если верить *US News and World Report*, главная полудюжина физических факультетов – это Беркли, КалТех, Гарвард, МТИ, Принстон и Стэнфорд. Когорта постоянных профессоров в области теории частиц в этих учреждениях, которые защитили свои степени доктора философии после 1981 г., – это группа из двадцати двух человек. Двадцать из них специализируются в теории суперструн (пара человек работает над мирами на бране), один – в феноменологии суперсимметричных расширений Стандартной Модели, и один – в высокотемпературной КХД.

Успех, который теоретики суперструны имели в сборе средств и в создании институтов для своего предмета, также очень внушительен. Бывший глава фирмы «МакКинси менеджмент консалтинг» недавно дал 1 миллион долларов, чтобы учредить кафедру теоретической физики, названную в честь Фредерика Глюка в Калифорнийском Университете в Санта-Барбаре, кафедру, в настоящее время возглавляемую Дэвидом Гроссом. Пресс-релиз, объявляющий об этом, сообщает нам, что спонсора привлекла теория струн:

«То, что свело вместе Глюка и Гросса, является теорией струн... Очарованный предметом, Глюк стал прозелитом теории струн, дав, например, собственную презентацию в гольф-клубе «Бирнамский лес».»

Друг Дэниела Фридана рассказал мне следующую, возможно, преувеличенную, историю о том, как возникла группа теории суперструн в Рутжерс (*Rutgers*). В конце 1980-х Фридан работал в своем офисе в Чикагском университете, когда ему позвонил по телефону один из высокопоставленных должностных лиц Университета Рутжерс. Этот чиновник спросил Фридана, что нужно для того, чтобы перевести его и некоторых других видных теоретиков суперструн в Рутжерс. Так как у Фридана не было большого желания переезжать в Нью-Джерси, он сочинил перечень того, что он сам считал полностью возмутительными требованиями: очень высокие зарплаты, беспрецедентно малая преподавательская нагрузка, возможность нанять по желанию большое количество младших сотрудников и преподавателей-визитеров, специальное здание и т.д. Чиновник из Рутжерс поблагодарил его и повесил трубку, оставив Фридана убежденным, что он никогда больше не услышит об этом. Однако несколько часов спустя ему позвонили снова и сообщили, что Университет Рутжерс с удовольствием выполнит все его требования.

Теоретик суперструн, который ищет приятное место, чтобы провести примерно неделю за чей-либо счет, будет почти каждый год иметь выбор из приблизительно тридцати конференций, причем многие из них проводятся в весьма экзотических местах. В 2002 г., например, среди самых престижных и трудно достижимых вариантов был летний симпозиум в Аспене, но в течение года другими возможными местами для путешествия были Сан-

* В настоящее время директор Института (Питер Годдард) – струнный теоретик, как и весь постоянный штат факультета физики, за исключением Стивена Адлера, теоретика, принятого на работу в конце 1960-х и теперь близкого к пенсионному возрасту.

та-Барбара, Чили, Триест, Генуя, Черное море, Корсика, Париж, Берлин, Ванкувер, Сеул, Китай и многие другие, включая Баку (Азербайджан).

Как можно заметить из этого списка, сила и слава теории суперструн не ограничены Соединенными Штатами, а простираются на весь мир. Большая часть лидеров данной области базируется в Соединенных Штатах, но явление глобализации, которое сделало американскую культуру столь доминирующей силой на земном шаре, по некоторым причинам также работает и здесь.

Большие усилия теоретики суперструн вкладывают в пропаганду своей теории. Мой коллега по Колумбийскому университету Брайан Грин, талантливый ученый, популяризатор и лектор, написал две чрезвычайно успешные книги о суперструнах, «*Эlegantная Вселенная*» (Greene B. *The Elegant Universe*. W. W. Norton, 1999) и «*Фабрика Космоса*» (Greene B. *The Fabric of the Cosmos*. Knopf, 2004). В 2003 г. программа Nova television выпустила трехчасовой сериал, основанный на первой из этих книг, и расходы на него в размере 3,5 миллионов долларов были частично покрыты Национальным Научным Фондом. Суперструны и исследователи суперструн стали предметом множества статей в популярной прессе, и до недавнего времени фактически все эти статьи занимали не критическую позицию по отношению к утверждениям теории. "New York Times" даже зашла настолько далеко, что озаглавила одну из своих статей о мирах на бране «*Физики, наконец, находят способ проверить теорию суперструн*», хотя это утверждение далеко от действительности [7].

Летом 2002 г. Институт высших исследований в Принстоне организовал двухнедельную летнюю программу для аспирантов, чтобы подготовить из них исследователей в области теории суперструн. Она стала первой в ряду таких ежегодных программ, в 2003 г. охватив теорию суперструн и космологию, темой 2004 г. снова была теория суперструн, хотя программа на 2005 г. касалась физики на высокоэнергетических коллайдерах. Теория суперструн преподается не только на уровне аспирантов. Физический факультет МТИ предлагает лекции по теории струн для младшекурсников, и так же, как и для всех курсов МТИ, материалы курса доступны онлайн бесплатно. Теперь существует и учебник для этого курса, носящий название «*Начальный курс теории струн*» (Zwiebach B. *A First Course in String Theory*. Cambridge University Press, 2004).

В 2001 г. Институт теоретической физики в Санта-Барбаре проводил симпозиум для преподавателей средних школ по теории суперструн, очевидно, имея в виду, что это как раз то, что они должны преподавать студентам. Непохоже, что преподавателям много рассказывали о проблемах теории и, если послушать онлайн записи выступлений, можно услышать преподавателя средней школы, говорящего, что он узнал теперь, что «*нам, вероятно, придется принять новые стандарты того, что значит говорить, что мы кое-что соображаем в науке*».

Почему так случилось, что теория суперструн – «единственная игра в городе»? Какова вероятность появления новых идей, которые изменят ситуацию? Обычной реакцией физиков и математиков на подобный вопрос, с которой я сталкивался, была надежда на то, что, где-нибудь сидит некий молодой ученый и работает над новой идеей, которая все изменит. Чтобы оценить перспективы этой возможности, надо тщательно проследить, каков стандартный путь карьеры для честолюбивых и талантливых молодых физиков. Картина несколько варьируется в различных районах мира, но я сосредоточусь на ситуации в Соединенных Штатах, потому что я знаю ее лучше всего, и из-за лидирующей роли, которую в этой области играют американские ученые.

Ситуация с рабочими местами для физиков в академических учреждениях, начиная приблизительно с 1970 г., стала весьма трудной. До этого времени американская университетская система быстро расширялась, и средний возраст постоянных профессоров физики был ниже сорока лет [8]. Студенты, получившие степень PhD в области теории элементарных частиц и желавшие найти постоянную академическую позицию, могли разумно рассчитывать получить ее без особых затруднений. После спада 1970 г. ситуация с академическим наймом так никогда и не выправилась, и с того времени средний возраст преподавателей физики начал линейно расти, много лет это происходило со скоростью приблизительно восемь месяцев в год. Последние цифры показывают, что средний возраст постоянного штата преподавателей физики сейчас достиг почти шестидесяти лет [9], период прошлых тридцати лет, таким образом, характеризовался очень небольшим наймом постоянных преподавателей физики, в то время как программы подготовки аспирантов продолжали готовить большое количество PhD, что делало для молодого доктора философии в области теории частиц перспективы найти работу мрачными. Также важно помнить, что перед началом 1970-х квантовая теория поля находилась в тени, таким образом, период, в течение которого было нанято большинство существующей профессуры теории частиц, был таким, что по квантовой теории поля специализировались очень немногие. Это снова стало верным после 1984 г., поскольку в моду вошла теория суперструн. Лишь примерно в течение десятилетия 1974–1984 гг. квантовая теория поля была областью, с которой начинало свою карьеру большинство исследователей, только что получивших PhD. Это было десятилетие, в течение которого смогли получить постоянные рабочие места необычно малое число молодых теоретиков.

В течение нескольких последних лет Группа данных по частицам (Particle Data Group) в Беркли вместе с данными по частицам собирала данные относительно теоретиков и экспериментаторов физики элементарных частиц [10]. Каждый год из последних нескольких лет их данные показывают приблизительно 400–500 аспирантов по теории частиц и приблизительно 500 постоянных преподавателей теории частиц. Так как аспирантам требуется приб-

лизительно пять лет, чтобы получить степень, одной пятилетней когорты студентов почти достаточно, чтобы заменить всех постоянных преподавателей в этой области. Обзор, сделанный в 1997 г., показал, что ежегодное среднее число аспирантов, добирающихся до PhD в области теории частиц, составляет 78, из них 53 обучались в тридцати лучших университетах [11].

Фактически все получившие PhD студенты, которые продолжают вести исследовательскую работу в теории частиц, идут затем на постдокровские исследовательские позиции. Это занимает от одного до трех лет и главным образом финансируется грантами Национального научного фонда (NSF) или Министерства энергетики (DOE). Обзор 1997 г. и более свежие обзоры Группы данных по частицам показывают, что приблизительно 200 теоретиков занимают постдокровские исследовательские позиции. Весьма обычным для людей является путь через ряд постдокровских позиций часто в различных учреждениях. Эти позиции не могут поддерживаться неопределенное время, так что, рано или поздно, чтобы иметь возможность продолжать исследования, каждому требуется найти постоянную академическую работу в соответствующем учреждении, часто с обязанностью подготовки аспирантов. Ситуацию можно подробно проследить по веб-сайту, названному «Фабрика слухов о рабочих местах для теоретиков в физике элементарных частиц» [12], который следит за тем, какие рабочие места являются доступными, кто попадает в краткий список для найма, и кого, в конечном счете, нанимают. Просматривая данные за последние несколько лет, мы видим, что в среднем каждый год на эти позиции принимается приблизительно 15 теоретиков.

В принципе, того, кто занимает такую *tenure-track* позицию, будут рассматривать для найма на постоянную (*tenure*) должность приблизительно через шесть лет, хотя часто это происходит раньше у тех, кто делает свою работу очень хорошо, и есть опасность, что они будут наняты другим учреждением. У меня нет никаких данных о том, сколько из пятнадцати теоретиков, получающих рабочие места *tenure-track*, в конечном счете, занимают постоянные (*tenured*) позиции, но вероятно, около десяти.

Некоторые не получают постоянных позиций, некоторые оставляют эту область по другим причинам и переходят с одной работы на другую, и, таким образом, в среднем числе 15 есть элемент двойного подсчета.

Таким образом, окончательным результатом является то, что в течение последних лет каждый год до PhD в теории частиц добираются приблизительно восемьдесят студентов, возможно, десять из них могут ожидать, в итоге, получения постоянной позиции в области исследований теории частиц. Что случается с теми, кто терпит неудачу в этой академической игре «музыкальных» кафедр? Как правило, они сталкиваются с пугающей перспективой начинать с нуля новую карьеру, но для большинства преуспевание заканчивается. Некоторые люди находят академические рабочие места в колледжах,

где на первом месте стоит обучение, а не исследование, некоторые идут учиться на юристов или на медиков, а в последние годы многие пошли работать в компьютерные или финансовые отрасли.

Некоторые из них действительно преуспевают, включая нескольких моих соседей по комнате в аспирантуре, PhD которых относились к квантовой гравитации и теории частиц (Натан Михрвольд и Чак Витмер). После короткой паузы в качестве постдоков в теоретической физике (Натан работал в Кембридже со Стивеном Хокингом) они запустили компанию программного обеспечения под названием «Динамические системы» около Беркли и иногда звали меня присоединиться к ним. Так как мне платили разумную сумму как постдоку в Стони Брук, чтобы я работал над тем, что мне нравилось, я не считал очень привлекательной идею присоединиться к ним и проводить долгие часы за написанием компьютерных программ в обмен на акции, которые, как тогда мне казалось, ничего не будут стоить. Это оказалось большой ошибкой, о чем Натан иногда напоминает мне, прилетая в Нью-Йорк на своем личном реактивном самолете. Акции «Динамических систем» оказались весьма ценными, так как компания была вскоре куплена Майкрософтом. Натан, Чак и некоторые другие из «Динамических систем» пошли работать на Майкрософт, а Натан, в конечном счете, стал в компании главным инспектором по технологии.

В то время как теоретики частиц, не получившие ни одного из немногих постоянных академических рабочих мест, занимаются другими различными вещами, есть одна вещь, которой они занимаются редко, – это теория частиц. Те времена, когда Эйнштейн мог писать важные работы в свободное время, работая в патентном бюро, давно ушли, став жертвой и весьма возросших сложности и изоциренности теоретической физики и роста требований ко времени и энергии со стороны многих профессий. К несчастью, это факт, что новые достижения в теории частиц вряд ли придут от кого-то, кому не платят, чтобы думать о предмете, или от финансово независимого состоятельного субъекта.

Как победить в этой игре и получить постоянную академическую должность? Правила весьма просты и вполне понятны каждому заинтересованному лицу. Начиная с того года, когда Вы получите степень доктора философии, каждые два года надо преодолевать весьма специфическое препятствие, т.е. убеждать комитет по найму, состоящий из старших теоретиков некоторого учреждения, выбрать Вас из большого числа претендентов. Многие досье Ваших конкурентов будут содержать письма от видных людей и значительное число изданных статей, некоторые, возможно, даже по последней и самой горячей теме. Статьи должны быть одобрены для публикации рецензентами из лучших журналов, и должны быть по темам, которые оценщики признают в качестве значимых и важных.

Если Вы выиграете это соревнование и получите работу, то, если Вам не повезет, это будет однолетняя позиция, и Вы должны будете рассылать новые

заявления уже через несколько месяцев после своего вступления в должность. Более вероятно, что у Вас будет год или, возможно, даже два после начала новой работы, чтобы подготовиться к следующему препятствию, получив новые научные результаты и подготовив как можно больше статей, принятых к публикации. Когда Вы начинаете новую научно-исследовательскую работу, не раз Вам приходится делать трудный выбор. Следует ли работать в условиях определенности, добиваться небольшого прогресса в чем-то связанном с тем, что Вы делали прежде? Как насчет того, чтобы попробовать справиться с самой последней горячей темой в области, подумав, сможете ли Вы найти некоторый ее аспект, которого никто еще не разрешил, и выполнить эту работу прежде, чем кто-то другой? Возможно, надо попробовать разработать некоторую необычную идею, которая кажется многообещающей, но никто кроме Вас, по-видимому, не находит ее интересной? Прежде чем выбрать последнее, следует поволноваться о том, действительно ли есть серьезные основания думать, что никто больше не работает над этой идеей, удастся ли Вам добиться результата в течение приблизительно одного года, иначе Вы рискуете оказаться с пустыми руками перед началом следующего раунда работы комитетов по найму.

Изадор Зингер – видный математик, который много лет работал над задачами на границе теоретической физики и математики. Он сделал следующие комментарии в интервью, которое имело место в 2004 г. по случаю его награждения премией Абеля, которую он разделил с Майклом Атья, за их работу над теоремой Атья-Зингера об индексе [13]:

«В Соединенных Штатах я вижу тенденцию к ранней специализации, которая вызвана экономическими соображениями. Вы должны рано подать надежды, чтобы получить хорошие рекомендательные письма, чтобы получить свою первую работу в хорошем месте. Вы не можете позволить себе распыляться, пока Вы не утвердитесь и не займете безопасного положения. Реальности жизни порождают узость перспективы, которая несвойственна математике... Когда я был молод, рынок вакансий был хорош. Было важно попасть в лучший университет, но все же Вы могли процветать и в меньшем. Я обеспокоен принуждающей силой сегодняшнего рынка вакансий. Молодые математики должны иметь свободу выбора, которую имели мы, когда были молодыми.»

Замечания Зингера обращены к молодым математикам, которые хотели бы заняться новой математикой, связанной с физикой, но еще больше – к молодым теоретикам частиц, для которых конкуренция на рынке вакансий еще сильнее, чем в математике.

Что происходит с теми, кто успешно проходит через эту систему и, наконец, достигает святого Грааля постоянной (*tenured*) академической позиции? Они теперь принадлежат к небольшому числу людей, ответственных за выживание теоретической

группы на физическом факультете в их учреждении. Эта группа, вероятно, имеет грант или от DOE или от NSF. В 2001 бюджетном году DOE потратил около 20 миллионов долларов, финансируя приблизительно семьдесят таких групп, включая 222 преподавателя, 110 постдоков и 116 аспирантов. NSF тратит примерно в половину меньше, чем DOE, поддерживая приблизительно вдвое меньше людей. Типичный грант DOE или NSF в ведущем учреждении будет возобновляться каждые пять лет и обеспечивать поддержку в полмиллиона долларов или около того в год. Большой кусок этой суммы пойдет «наверх», в основном как оплата университету, который должен покрыть материальные затраты на офисы, библиотеки и т.д., используемые группой теоретиков. Этот доход в виде грантов является критическим для большинства университетских бюджетов, и гарантирует их готовность хорошо обеспечивать преподавателей, получающих грант, сохраняя, например, для них низкую преподавательскую нагрузку. Часть из оставшихся средств гранта идет на выплаты зарплат нескольким постдокам, часть идет на исследовательские стипендии для нескольких аспирантов, работающих в теоретической группе. Исследовательские стипендии включают в себя стипендию для студента и плату за обучение для университета. Без дохода за обучение от этих стипендий, университеты, вполне вероятно, сократили бы прием аспирантов по теоретической физике.

Большая часть гранта идет на прямые платежи участвующим в гранте преподавателям, называемые «летней зарплатой». Они основаны на философии, что деньги, которые университет платит профессорам, покрывают только девять месяцев их рабочего времени, таким образом, они имеют право получать зарплату в другом месте в течение трех месяцев в году. NSF и DOE платят теоретикам частиц сверх их университетской зарплаты по той формальной причине, что иначе они могли бы найти другую работу или преподавать в летней школе в течение лета, хотя практически все это весьма маловероятно. Наконец, гранты также покрывают другие траты, типа расходов на поездки на конференции, затраты на компьютеры в офисе и т.д., хотя это, как правило, намного меньше, чем выплаты зарплат ученым.

Общая сумма долларов, выделяемая DOE и NSF для финансирования теоретической физики, за последнее десятилетие существенно не изменилась. Так как зарплаты значительно увеличились, число людей, поддержанных этими грантами, значительно уменьшилось. Каждый раз, когда грант представляется для возобновления, опасность некоторого сокращения или, еще хуже, полного аннулирования является вполне реальной. Потеря гранта может означать снижение дохода, неспособность нанимать постдоков или поддерживать аспирантов, недостаток в деньгах для поездок на конференции, а также возможность того, что университет начнет увеличивать Вам преподавательскую нагрузку. Это последствия, которых большинство теоретиков хотело бы избежать любой ценой, таким

образом, преподаватели, имеющие постоянную позицию, оказываются снова в ситуации, когда требуется периодически выигрывать соревнование с группами почти такого же состава, как комитеты по найму, с которыми они имели дело прежде.

Британский суперструнный теоретик Майкл Дафф, который процветал в американской системе (хотя в 2005 г. он вернулся в Великобританию), противопоставляет это ситуации в Великобритании таким образом [14]:

«Конкуренция типа «горло перережу» имеет место даже, или лучше сказать, особенно, в академии, и британское понятие 'справедливой игры' (fair play) здесь не в ходу.

Я надеюсь, что мои американские друзья не будут оскорблены, когда я скажу, что этические стандарты вследствие этого снижаются. Давление необходимости преуспеть особенно чувствуют университетские ученые, которым традиционно платят только девять месяцев в году, и которые должны искать финансирования исследований у агентств типа Национального Научного Фонда для своих летних зарплат. Баснословное время и усилия, таким образом, тратятся на подготовку предложений для гранта.»

Сообщество теории частиц в Соединенных Штатах не слишком велико и составляет в общей сложности приблизительно тысячу человек. Это очень талантливая группа, но в течение двух десятилетий она работала в среде интеллектуальных неудач и жестокой конкуренции за недостающие ресурсы. Есть и другие причины, почему существует «только одна игра в городе», но социальные и финансовые структуры, в рамках которых работают люди, являются важной частью этой ситуации.

Литература

1. Vonnegut K. The Only Game in Town. Natural History, Winter 2001.
2. Davies P.C.W., Brown J.R. Superstrings: A Theory of Everything?. Cambridge University Press, 1988, page 148.
3. Taubes G. Nobel Dreams: Power, Deceit and the Ultimate Experiment. Random House, 1986, pages 254-5.
4. Gross D. Talk at AAAS session on 'The Coming Revolutions in Particle Physics', 16 February 2001, <http://www.aaas.org/meetings/2001/6128.00.htm>.
5. Jha Alok. String Fellows. The Guardian, 20 January 2005.
6. Glanz J. Even Without Evidence, String Theory Gains Influence, New York Times, 13 March 2001.
7. Johnson G. Physicists Finally Find a Way to Test Superstring Theory, New York Times, 4 April 2002.
8. Gruner S., Langer J., Nelson P. and Vogel V. What Future will we Choose for Physics?, Physics Today, December 1995, 25-30.
9. Henly M. and Chu R. AIP Society Membership Survey: 2000.
10. Particle Data Group. The 2002 Census of US Particle Physics.
11. Oddone P. and Vaughan D. Survey of High-Energy Physics Support at US Universities. DOE, 1997.
12. Theoretical Particle Physics Jobs Rumor Mill: <http://www.physics.wm.edu/~calvin>.
13. Raussen M. and Skau C. Interview with Michael Atiyah and Isadore Singer, Notices of the AMS 52 (2005) 228-31.
14. Duff M. and Blackburn S. Looking for a Slice of the American Pie, The Times Higher Education Supplement, 30 July 1999.

Новости из лабораторий мира

Госдума ратифицировала соглашения о создании международного термоядерного реактора

В июне 2007 г. Госдума Российской Федерации ратифицировала два соглашения о создании международной организации ИТЭР по термоядерной энергии.

Договор о строительстве термоядерного реактора в рамках проекта ИТЭР был подписан в конце ноября 2006 г. в Париже. В проекте участвуют Европейский Союз, Индия, Китай, Россия, США, Южная Корея и Япония.

Так как проект будет реализовываться на территории Евросоюза – во Франции, европейцы вносят вклад до 50% общей стоимости проекта и, кроме того, берут на себя обязательства по подготовке площадки для строительства, включая создание необходимой инфраструктуры. Вклад России в проект составит до 10% его стоимости как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации (на стадии строительства это составит около 560 млн. долларов за 10 лет, причем большая часть этой суммы – за счет поставок произведенного в России оборудования). При этом Россия, наряду с другими участниками проекта, будет обладать доступом ко всему объему научно-технической информации в рамках проекта.

Расчетная термоядерная мощность ИТЭР составляет 500 МВт. По расчетам, строительство экспериментального реактора займет порядка 10 лет. Разработка технического проекта ИТЭР была завершена в 2001 г.

<http://www.polit.ru/news/2007/06/27/iter.html>

Реактор ПИК

11 августа 2007 г. председателем Правительства РФ М.Фрадковым подписано Распоряжение о **завершении реконструкции научно-исследовательского реакторного комплекса ПИК** Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константина Российской академии наук со сроком ввода объекта в эксплуатацию в декабре 2012 г.

Государственным органам даны указания о выделении необходимых средств в соответствии с графиком работ.

Проект реактора ПИК был утвержден в 1991 г. Этот реактор по своим параметрам и экспериментальным возможностям отвечает высшим мировым стандартам и после пуска станет уникальной базой для прикладных и фундаментальных исследований:

- ◆ изучение кристаллической и магнитной структур веществ – распределения атомов и магнитных моментов в пространстве;
- ◆ исследование динамики атомных и спиновых колебаний;
- ◆ исследования в биологии, фармакологии, медицине;

- ◆ исследования новых материалов, в том числе конструкционных, а также изготовленных с использованием нанотехнологий (катализаторы, компоненты водородной энергетики, медицинские препараты, препараты для фотодинамической и нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний, магнитные материалы, сверхпроводники и т.д.);
- ◆ производство радиоизотопов в интересах медицины и промышленности;
- ◆ исследование фундаментальных свойств нейтрона (электрический дипольный момент, время жизни, корреляционные коэффициенты);
- ◆ физика деления ядер (динамика деления ядер и корреляционные явления при делении, в частности, изучение механизма формирования Т-нечетной асимметрии в делении тяжелых ядер нейтронами);
- ◆ нейтрон-протонные, нейтрон-нейтронные и нейтрон-ядерные взаимодействия (Р-, Т-нечетные асимметрии в реакциях нейтронов с легкими ядрами);
- ◆ ядерная спектроскопия;
- ◆ нейтринная физика (нейтринные источники с активностью до нескольких мегаюри).

Этот проект является самым крупным исследовательским проектом в России за последние 20 лет.

<http://www.pnpi.spb.ru/>

Открытие источника синхротронного излучения Diamond

19 октября 2007 г. в Великобритании состоялось торжественное открытие новой национальной установки – источника синхротронного излучения (*Diamond Light Source*). Это самый крупный научный проект Великобритании за последние 40 лет, призванный способствовать развитию фундаментальной науки Великобритании в ближайшие десятилетия. Спектр приложений этой установки чрезвычайно широк – от исследования структуры веществ в интересах медицины до материаловедения и археологии.

Основа проекта Diamond – электронный синхротрон на энергию 3 ГэВ, являющийся уникальным источником мягкого рентгеновского излучения в диапазоне от 100 эВ до 20 000 эВ. Первая фаза проекта включает также семь каналов, на которых располагаются экспериментальные установки. Этот этап работ завершен, его стоимость – £260 миллионов.

На втором этапе в течение трех-четырёх лет будут добавлены еще пятнадцать каналов, что потребует дополнительного финансирования в объеме £120 миллионов. Дальнейшее развитие проекта будет определяться новыми результатами исследований и новыми запросами потребителей.

<http://www.diamond.ac.uk/default.htm>

Нейтринные осцилляции в Дай Бей

13 октября 2007 г. члены сотрудничества Дай Бей (*Daya Bay*) вместе с представителями правительства Китая и департамента энергетики США провели церемонию начала строительных работ в международном эксперименте по исследованию осцилляций нейтрино на реакторах Дай Бей и Линг Ао, расположенных в южном Китае, в 55 км от Гонконга.

В горах, служащих защитой от космических лучей, будут построены три экспериментальных зала, соединенные длинными тоннелями. В каждом зале будут сооружены глубокие бассейны с водой, в которых разместятся детекторы антинейтрино.

Первый экспериментальный зал для этого эксперимента должен быть построен в 2008 г., первые детекторы будут запущены в 2009 г., а завершение создания установки запланировано на 2010 г.

В сотрудничестве Дай Бей участвуют 35 организаций из Китая, Тайваня, США, Чехии и России.

<http://www.ihep.ac.cn/>

Окончание эры ГЕРА

30 июня 2007 г. с последним оборотом частиц завершился пятнадцатилетний период научных открытий на электрон-протонном коллайдере ГЕРА. В состав этой крупнейшей установки входит сверхпроводящее протонное кольцо на энергию 800 ГэВ и электрон-позитронное кольцо на энергию до 30 ГэВ. В течение пятнадцати лет коллайдер ГЕРА использовался для экспериментов по физике элементарных частиц и атомного ядра. Теперь эта установка закрывается, чтобы дать место новым научным проектам в ДЭЗИ (*Deutsches Elektronen-Synchrotron*), Гамбург.

Два больших эксперимента H1 и ZEUS начали свою работу на коллайдере ГЕРА в 1992 г. Основной целью этих исследований являлось изучение структуры протона и исследование фундаментальных взаимодействий. Благодаря этим экспериментам удалось существенно продвинуться в понимании сильных взаимодействий и заложить надежный фундамент для исследований на следующей генерации установок, таких как Большой Адронный Коллайдер.

В исследованиях на установках H1 и ZEUS удалось подтвердить, что слабые и электромагнитные взаимодействия при высоких энергиях проявляют себя одинаково и могут быть объединены в единое электрослабое взаимодействие.

Еще один эксперимент, HERMES, был запущен на коллайдере в 1995 г. и продолжался до самого последнего дня. В этом эксперименте изучалось взаимодействие электронов с поляризованной мишенью. Основная цель экспериментов – исследование спиновой структуры протона. В исследованиях на установке HERMES удалось подтвердить, что всего около трети спина протона можно отнести к кваркам, из которых состоит протон, впервые измерить спиновую асимметрию в глубоковиртуальном комптоновском рассеянии, впервые измерить такую малоизученную характеристику, как поперечность (трансверсальность), получить огромный объем информации по эксклюзивным реакциям.

И, наконец, эксперимент HERA-B, закрывшийся несколько лет назад, предназначался для исследования свойств тяжелых кварков, образующихся при взаимодействии протонов с фиксированной мишенью.

С завершением набора данных эти четыре эксперимента не заканчиваются. Обработка данных будет продолжаться еще несколько лет и, несомненно, принесет новые важные результаты.

<http://www.physorg.com/news102592075.html>

Запущена первая очередь ВЕРСИИ

3 августа 2007 г. проведен пробный пуск первой очереди ВЕРСИИ – существенно модернизированного Пекинского электрон-позитронного коллайдера (*Beijing Electron-Positron Collider (BEPC)*) в Институте физики высоких энергий, Пекин.

ВЕРСИИ состоит из двух накопительных колец – в дополнение к уже существовавшему кольцу в конце 2006 г. сдано в эксплуатацию еще одно. С начала 2007 г. это кольцо используется в качестве источника синхротронного излучения.

Параллельно с февраля 2007 г. ведутся работы по настройке электрон-позитронного коллайдера. При энергии 1,89 ГэВ ток пучков достиг 500 мА, а светимость $L=10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, что сравнимо с уровнем, имевшимся до модернизации. После успешного пробного запуска коллайдер остановлен для монтажа сверхпроводящих квадруполов в месте встречи. В ноябре 2007 г. после остановки получен режим электрон-позитронных столкновений с проектным значением вертикальной бета-функции в точке взаимодействия 1,5 см.

Успешный запуск коллайдера свидетельствует о надлежащей работе всех его систем.

Весной 2008 г. будет завершен монтаж основного детектора BESIII – установки с прекрасной калориметрией на основе кристаллов CsI и прецизионным трековым детектором. На этой установке планируется исследование процессов в области J/ψ и ψ' с беспрецедентной статистикой $\sim 10^9$ событий.

<http://www.ihep.ac.cn/english/index.htm>

Трехлетний цикл Международных конференций по ускорителям частиц

Летом 2007 г. организационные комитеты трех основных конференций по ускорителям частиц, проводимых в Америке (US PAC), Европе (EPAC) и Азии (APAC), приняли решение о координации структуры и времени проведения этих конференций. До последнего времени конференции US PAC и EPAC проводились по очереди через год, а конференция APAC проводилась раз в три года, совпадая по времени с одной из двух других конференций. Учитывая значительный прогресс в развитии ускорительных технологий в азиатском регионе, организационные комитеты трех конференций единогласно решили перейти к трехлетнему циклу, так что конференции будут проходить ежегодно, по очереди в каждом из трех регионов. С 2010 г. эти конференции будут называться Международными конференциями по ускорителям частиц. Ближайшие конференции состоятся в Генуе (2008 г.), Ванкувере (2009 г.), Киото (2010 г.) и Валенсии (2011 г.).

<http://www-bd.fnal.gov/icfabd/Newsletter43.pdf>

Нобелевская премия по физике

Нобелевская премия 2007 г. по физике присуждена французскому Альберту Ферту и немцу Петеру Грюнбергу за открытие в области магниторезистивного эффекта.

59-летний Альберт Ферт, профессор Университета Париж-юг, занимался исследованиями в области металлофизики и магнетизма. 58-летний

Петер Грюнберг, занимавшийся исследованиями антиферромагнитных соединений, работал приглашенным профессором в университете Кельна.

Ферт и Грюнберг исследовали магниторезистивный эффект – изменение электрического сопротивления твердого проводника под действием внешнего магнитного поля. Объектом их исследований были тонкие пленки, составленные из чередующихся слоев ферромагнетиков и полупроводников. В 1988 г. Альберт Ферт и Петер Грюнберг независимо друг от друга открыли новое явление сверхсильного магниторезистивного эффекта (GMR). Ученые

обнаружили, что незначительные изменения в магнитном поле связаны с заметными изменениями сопротивления проводников, объединенных в GMR-систему. Такая система могла быть применена для считывания информации с жесткого диска и производства более чувствительных считывающих головок. Первые магниторезистивные головки были произведены в 1997 г. и вскоре стали наиболее распространенной технологией. Сегодня последние разработки в области считывания информации с «винчестеров» базируются на открытии Фертом и Грюнбергом GMR-эффекте.

Новости ГНЦ ИФВЭ

Осенний (2007 г.) сеанс ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ

Успешно проведен осенний (2007 г.) сеанс работы ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ. Начало сеанса – 8 октября. Протонный синхротрон У-70 работал с пучком с 31 октября, а собственно на программу физических исследований – с 9 ноября по 10 декабря. Энергия пучка – 50 ГэВ, что продиктовано соображениями экономии затрат на электроэнергию и достаточно для большинства заявленных потребителей пучка. Интенсивность до $6 \cdot 10^{12}$ протонов в цикле. Ускорительный комплекс отработал в соответствии с расписанием, устойчиво, с малыми простоями и пропусками пучка. Их относительное число за время работы на экспериментальные установки составило всего 14%.

Выполнение планового этапа модернизации системы подавления поперечных колебаний, цепей автоматического регулирования амплитуды ускоряющего поля и автоматической подстройки частоты резонаторов ускоряющей системы ГРАФИТ позволило заметно улучшить качество – в пять раз уменьшить продольный фазовый объем протонного пучка. Подтверждена техническая возможность сокращения длительности согласованного сгустка на выводном плато до 12–15 нс (по основанию распределения). При этом пиковая мощность, переносимая пучком, достигает тераваттного диапазона.

Введена в эксплуатацию новая станция кристаллических дефлекторов в прямолинейном промежутке № 30 магнитной структуры У-70. С ее помощью был реализован эффективный режим деления медленно выведенного пучка протонов между каналами транспортировки № 8 и 22.

Проведен комплекс исследований, направленных на использование эффектов объемного отражения в кристаллах для формирования пучков частиц высоких энергий. Продемонстрирована возможность применения предложенной в ИФВЭ мультирефлекторной конструкции для коллимации пучков и для вывода пучков из ускорителя. Исследованы характеристики излучения, сопровождающего объемное отражение позитронов от изогнутых кристаллов.

К началу сеанса 2007 г. завершены работы по монтажу канала перевода частиц из линейного ус-

корителя И-100 в бустер. Смонтировано электрофизическое оборудование в 9-м прямолинейном промежутке бустера (импульсные септум- и кикер-магниты). Пристыкован канал транспортировки частиц от И-100 к бустеру. В период автономной работы бустера в декабре 2007 г. подтверждена возможность использования линейного ускорителя И-100 в качестве резервного инжектора протонов. Пучок протонов энергии 72 МэВ проведен до бустера, инжектирован и ускорен до максимальной энергии 1.3 ГэВ. Интенсивность ускоренного пучка $3 \cdot 10^{10}$ протонов в цикле. Полученный результат является важным шагом в реализации проекта по ускорению легких ионов в ускорительном комплексе У-70.

На установке ПРОЗА-М завершено набор статистики в эксперименте по исследованию односпиновой асимметрии в реакции $p + p \rightarrow \pi^0 + X$ при 50 ГэВ и отрицательных значениях x_F ($-0.6 < x_F < -0.1$) в области фрагментации поляризованного протона мишени. Это был последний сеанс в многолетней программе исследования поляризационных явлений в инклюзивных реакциях. Установка надежно проработала в течение всего сеанса, на мишени эксперимента был получен интенсивный стабильный протонный пучок, поляризация мишени составила 85%.

На установке СВД удалось существенно продвинуться в исследовании процессов с аномально высокой множественностью. Этот эксперимент, выполняемый совместно с ОИЯИ и НИИЯФ МГУ, предъявляет исключительно высокие требования к параметрам выводимого на установку протонного пучка. Благодаря запуску новой станции кристаллических дефлекторов был получен пучок с требуемыми характеристиками и набрана статистика для первого этапа исследований.

Одна из основных задач сеанса состояла в запуске канала сепарированных каонов. Впервые удалось надежно получить значительное обогащение пучка каонами при помощи сверхпроводящего сепаратора. При импульсе пучка 12.5 ГэВ несепарированный пучок содержит 0.9% каонов, а после сепарации доля каонов повышается до 7%. С таким пучком уже можно работать, но для достижения проектных характеристик требуются дополнительные исследования и профилактические работы.

В ходе сеанса 2007 г. произведен комплексный запуск основной части детекторов и электроники новой установки ОКА, произведен комплексный запуск системы сбора данных, достигнута скорость приема данных 20 тыс. событий/ сброс, проведен пробный набор статистики, получен первый опыт работы с сепарированным пучком каонов.

Проведены методические работы, направленные на расширение возможностей ряда установок и на разработку и исследование детекторов частиц.

На установке ВЕС запущен и исследован ряд ключевых элементов – пучковый спектрометр, модернизированный многоканальный черенковский счетчик, новые усилители для трековых детекторов, аппаратура системы сбора данных и контроля установки.

На установке ФОДС запущена система мониторинга пучка, отлажена система триггерных счётчиков, запущена система выработки триггеров для исследования различных физических процессов, отлажена система приема информации и программного обеспечения установки, изучена работа дрейфовых и пропорциональных камер с новой электроникой в стандарте МИСС.

На установке СПИН удалось реализовать режим работы с паразитным использованием медленно выведенного пучка, осуществить комплексный запуск установки, исследовать фоновую обстановку, продемонстрировать возможность измерения инклюзивных спектров в широком кинематическом диапазоне.

На установке ГИПЕРОН набрано 140 миллионов событий инклюзивного образования нейтральных частиц при взаимодействиях пионов с различными ядрами при импульсе 7 ГэВ/с.

На базе установки КМН выполнены исследования характеристик жидкоаргоновых калориметров в высокоинтенсивных пучках. Эти исследования направлены на создание детекторов для коллайдера БАК со сверхвысокой светимостью (SLHC).

В сеансе наряду со специалистами ИФВЭ участвовали физики из ряда российских институтов, а также ученые из США, Канады и ФРГ.

Международные совещания

Проект FAIR и Россия



С 15 по 16 января 2008 г. в ГНЦ ИФВЭ состоялось 2-е Межинститутское совещание по международному сотрудничеству ускорительного комплекса FAIR (г. Дармштадт, Германия). Первое совещание из этой серии было проведено 1–2 октября 2007 г. в Лаборатории по исследованию тяжелых ионов GSI, г. Дармштадт. Программа работы 2-го Совещания была определена совместно представителями ГНЦ ИФВЭ и GSI (проект FAIR). Сопредседателями Совещания выступили Н.Е. Тюрин (ИФВЭ) и Г. Гутброт (GSI).

Всего в Совещании приняли участие 40 специалистов из 8 стран, включая 15 человек из России, представлявших 6 национальных институтов.

Участники заслушали приветственные обращения Федерального агентства по атомной энергии и Ассоциации им. Гельмгольца (Московское представительство). Впрочем, основное внимание было уделено собственно ускорителям и накопительным кольцам проекта FAIR. Было проведено подробное обсуждение состояния подготовки отдельных групп работ (т.н. work packages) и возможности организа-

ции поставок комплектов оборудования, изготовленного странами-участницами проекта. Заинтересованные стороны провели краткие презентации своих возможностей и планов деятельности. Были выявлены группы работ, в которых предложения потенциальных участников вступают в конфликт, равно как и группы работ, к которым пока не был проявлен достаточный интерес.

Участники Совещания были проинформированы о создании совместной организации под эгидой РОСАТОМа и Ассоциации им. Гельмгольца – Исследовательского центра FAIR-Россия (сокращенно, FRRC от FAIR-Russia Research Center). Этот центр будет размещен в Москве на территории ИТЭФ. Ожидается, что со временем FRRC станет центром координации, проведения консультаций и встреч участников деятельности по проекту FAIR в России.

В целом, Совещание было весьма активным и неформальным. Существующие проблемы обсуждались прямо и откровенно. Основные усилия были направлены на поиск разумных и реализуемых решений. Было принято предложение о скорейшем проведении серии специальных технических переговоров на уровне экспертов по отдельным системам ускорительного комплекса FAIR, чтобы как можно быстрее выработать технические спецификации систем и решить проблему стыковки оборудования комплекса. Было высказано пожелание, чтобы специалисты по физике пучков и ускорителей как можно быстрее переняли образ жизни и организации работ, принятый в существующих международных коллаборациях по физическим экспериментам, таким как PANDA или CBM. Кстати, их представители также приняли участие в Совещании на правах наблюдателей.

С материалами Совещания можно ознакомиться по web-адресу:

<http://www.ihep.su/FAIR-meeting/index.shtml>

Слёт математических физиков в Протвино

В период с 21 по 24 января 2008 г. в ГНЦ ИФВЭ прошла очередная Международная конференция «Классические и квантовые интегрируемые системы» (CQIS -08).

Тематика конференций этой серии чрезвычайно важна и интересна. Она касается и физики высоких энергий, и теории твёрдого тела, и теории конденсированных сред, космологии и т.д.

В конференции приняли участие 70 российских учёных из ИФВЭ, ИТЭФ, МИ РАН, ФИ РАН, ОИЯИ, МГУ, СПбУ, ИТФ РАН, ИПМ РАН, ИЯФ РАН, ИЯИ РАН, ОмскГУ, ТомскГУ и 7 учёных из Valenciennes University (Франция), University of Amsterdam (Нидерланды), Pierre et Marie Curie University (Франция), University of Wuppertal (Германия), Service de Physique Theorique C.E.A / Saclay (Франция), Loughborough University (Великобритания), University Paris-Sud. На конференции было представлено более 40 докладов.

В России, а точнее в Советском Союзе, в начале 70-х годов возникла группа ученых, начавших исследование интегрируемых систем с бесконечным числом степеней свободы, или интегрируемых теорий поля. Основоположником этого направления является известный российский физик и математик, академик РАН Л.Д. Фаддеев, который участвовал в работе данной конференции.

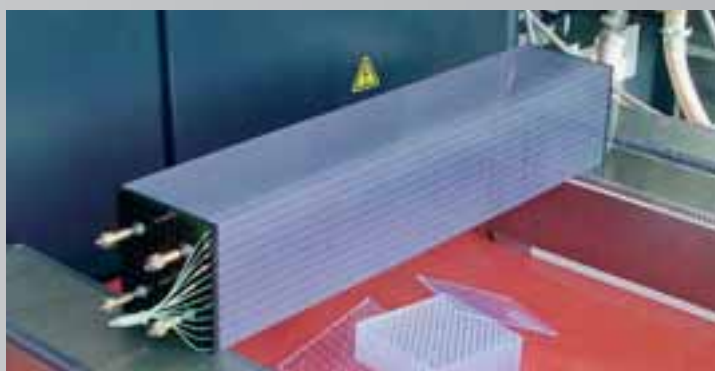
Производство пластического сцинтиллятора и детекторов частиц в ГНЦ ИФВЭ



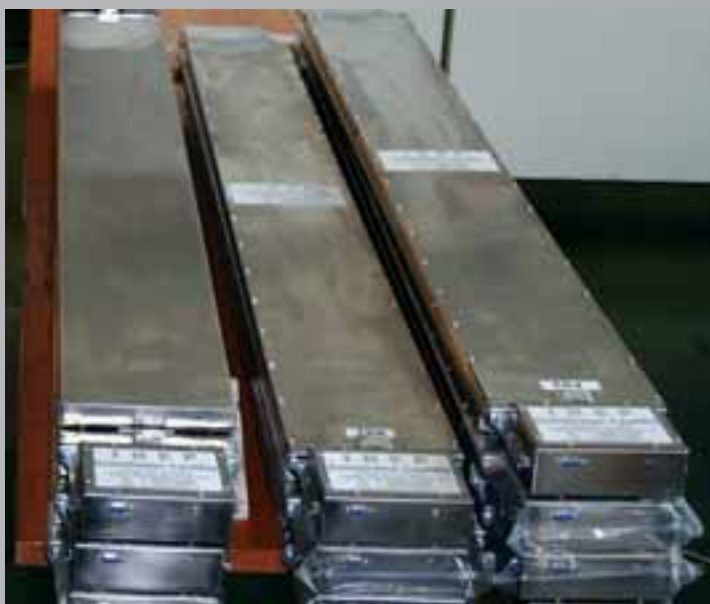
Участок по производству сцинтилляторов и изделий из пластмасс.

Оснащен современными импортными термопласт-автоматами и оборудованием для подготовки сырья. Имеется чистое помещение для производства медицинских изделий. Мощность участка – до 100 тонн сцинтиллятора в год.

Разработаны и серийно изготавливаются сцинтилляционные счетчики большой площади (1 м^2) для регистрации заряженных частиц в экспериментах на ускорителях и в космофизике. Счетчики поставляются в Россию и ряд зарубежных стран (Казахстан, Армения, Корея, Дания, Финляндия, Швейцария и др.).



Разработаны модули слоистых калориметров (типа «шашлык») для экспериментов в области физики высоких энергий на основе литьевого сцинтиллятора. Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра из таких модулей составляет примерно $3\%/\sqrt{E(\text{ГэВ})}$.



На основе литьевого полистирольного борсодержащего сцинтиллятора СЦ-331 разработан и серийно изготавливается детектор тепловых нейтронов с высокой чувствительностью ($1.0 \text{ импульс/нейтрон/см}^2$) и высоким быстродействием.



Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий

142281, г. Протвино
Московской области,
Площадь Науки, д. 1

www.ihep.su